

# 琉球大学学術リポジトリ

## 苗マットの弾塑性学的研究(農業工学科)

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 上野, 正実, Ueno, Masami メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/4002">http://hdl.handle.net/20.500.12000/4002</a>

## 苗マットの弾塑性学的研究

上野正実\*

Masami UENO: Elasto-plastic Studies on  
Rice Seedling Mat

## 目次

Summary	257
第I章 緒論	262
I. 1 土付苗用田植機と苗マットの概要	262
I. 2 土付苗用田植機と苗マットの問題点	264
I. 3 従来の研究の概要	267
I. 4 本研究の目的	268
I. 5 苗マットの力学的性質のとらえ方	268
第II章 苗マットの力学的性質に関する実験的研究	271
II. 1 苗マット用床土の物理性および苗マットの性状	271
1. はじめに	271
2. 床土の基本的物理性	271
3. 床土の力学特性	272
4. 苗マットの性状に関して	273
5. 結語	274
II. 2 たわみ特性	274
1. はじめに	274
2. 自重による畑土苗マットのたわみとその経時変化	275
3. 集中荷重による畑土苗マットのたわみ特性	277
4. 集中荷重による人工床土苗マットのたわみ特性	282
5. たわみにおける苗マットの弾塑性的特性	284
6. 結語	284
II. 3 分離特性	285
1. はじめに	285
2. 5・6本の苗の分離特性	285
3. 畑土苗マットの分離特性	286
4. 人工床土苗マットの分離特性	290

\*琉球大学農学部農業工学科

5. 分離試験法に関する検討	291
6. 分離特性とたわみ特性の関係	292
7. 結語	292
II. 4 引張特性	293
1. はじめに	293
2. 引張試験法に関する検討	293
3. 畑土苗マットの引張強度	295
4. 人工床土苗マットの引張強度	297
5. 変形を考慮した苗マットの引張特性	297
6. 引張特性のモデル的考察	305
7. 結語	306
II. 5 圧縮特性	306
1. はじめに	306
2. 苗マットの圧縮特性	306
3. 圧縮における苗マットの弾塑性的特性	311
4. 苗マットの横変位	312
5. 圧縮特性と引張特性との比較	312
6. 圧縮特性のモデル的考察	312
7. 結語	313
II. 6 せん断特性	314
1. はじめに	314
2. 目的	314
3. 研究方法	314
4. 試験結果と考察	317
5. せん断特性のモデル的考察	321
6. 結語	322
II. 7 引張・圧縮・せん断特性の相互関係	323
1. はじめに	323
2. 引張・圧縮・せん断特性の相互関係	323
3. 苗マットの力学特性に関する考察	326
4. 苗マットの力学的性質の要約	335
5. 結語	335
II. 8 苗マットの簡単な力学試験法の提案	335
第III章 苗マットの弾塑性学的研究	336
III. 1 土と苗マットの弾塑性論	336
1. はじめに	336
2. 本章で用いた記号と弾塑性論の概要	336
3. 土の弾塑性論の概要	339
4. 苗マットの弾塑性論	344
IV. 2 苗マットの弾塑性構成式	351

1. はじめに	351
2. 弾塑性構成式	351
3. 計算結果	356
Ⅲ. 3 結語	358
第IV章 結論	358
第V章 本論文の概要	360
謝辞	363
参考文献	363

### Summary

Japanese-type rice transplanter have been spread so widely since 1967 putting on sale. About 1.9million machines are used in about 2.2 million hectares paddy fields, in 1981. The performance of this machine already reached enough level. But there are two problems relating to this machine. One is to develop the automatic self-feeder of rice seedling mats for advanced performance. The other is to keep and standardize the physical properties of rice seedling mats and bed soils.

Achieving this high performance or solving this problem, it may be necessary to make clear the mechanical properties of rice seedling mats.

The main purpose of this paper is to make clear the mechanical properties of rice seedling mats from the following five points of view.

- (a) The mechanical test methods are examined and settled.
- (b) The strength and deformation properties to (the deflection, dividing, extension, compression and shear are examined experimentally.
- (c) The interrelationships of those test results are investigated to grasp the mechanical properties as a whole.
- (d) The factors influenced to those properties are analyzed regarding as a composite material of roots and soil.
- (e) The elasto-plastic behaviours of rice seedling mats are discussed theoretically by assuming an elasto-plastic model like soil's one.

Deflection properties of rice seedling mats was grasped by use of a creep test under the dead load and a continuous loading test under the concentrated load at the center of 160mm span. The kinds of bed soil, the planting density and the days for raising of seedling were regarded as experimental factors and were changed to several levels to vary qualities of mats provided for tests.

- (1) The two types of deflection test, one of them was simply supported at the opposite ends of a mat with the dead load, and the other

was fixed at the opposite ends of a mat with the concentrated load at the center, were treated as easy methods to estimate the mechanical strength of rice seedling mats by the comparison with the deflection at the center of span. It seemed that the latter test gave an accurate estimation to the mechanical strength.

- (2) The deflection of mats had little change in the measuring duration (with in three minutes) either above-mentioned method.
- (3) The deflection of mats was remarkably plastic.
- (4) The deflection of mats was influenced by the conditions for raising of seedling, i.e. the kinds of bed soil, the planting density, the days for raising of seedling, the weight of roots, the water content of mat and so on.

In the present National Test for Agricultural Machinery related to the Japanese-type rice transplanter, only one estimation to the mechanical strength of mats is treated by the measurement of dividing resistance to five or six rice seedlings from a mat. It was viewed that this test was the most suitable method and how to represent the dividing properties of mats.

- (5) At first, the dividing test according to the method by pulling five or six seedlings apart from their own mat was done. The experimental results showed that this test didn't give an accurate dividing resistance of mat, with about thirty times repetitions of measurement, because the confidence interval of data with confidence coefficient 95% was so large.
- (6) After many methods and devices on the dividing test were examined, one method that a mat was divided into two parts at the parallel cross section to short edges of mat was chosen in this study. In spite of a few repetitions of measurement (only four times) to a mat, the confidence interval for the dividing resistance with confidence coefficient 95% became smaller than that of above-mentioned test. So, this test might be able to estimate more accurately the dividing resistance.
- (7) The four characteristic values to represent the dividing curves (load-displacement relationship), namely the dividing resistance, the dividing secant modulus, the initial secant modulus and the half-value width, were available to estimate the dividing properties of mats.
- (8) The kind of bed soil, the days for raising of seedling and the planting density were regarded as factors on the dividing properties. Moreover, the weight of roots and the water content of mat seemed

to be essential factors. The following trends could be observed generally to these factors. The heavier the weight of roots was, the larger the dividing resistance occurred. Mats became softened on the increase of their water content. The kinds of bed soil also affected the dividing properties, so the selection of bed soils was very important.

- (9) There were close interrelationships between deflection properties and dividing properties.

The extension and compression characteristics of mats became clear as fundamental physical properties in the sense of strength of materials. The extension test devices were designed that test piece didn't slip to the supporter for accurate measurement of displacement. Test pieces for extension and compression tests set horizontal to the direction of load. All test pieces were failed in extension test smaller than 30 KPa of extension stress, but in compression test most of them didn't so.

- (10) The tangential gradient of a typical stress-strain curve gradually decreased in the extension test, on the other hand in the compression test, gradually increased or might be regarded as constant i.e. a straight line. Those curves were approximated with following equation.

$$\sigma = a \epsilon^n \dots\dots\dots (1)$$

where  $\sigma$  (KPa) is stress,  $\epsilon$  is strain, and  $a$  (KPa) and  $n$  are material constants. The value of  $n$  is about 0.5 in extension and 1.0 in compression.

- (11) In the examination of extension characteristics using the value of a maximum extension stress, a strain, a secant modulus and a tangent modulus showed that those had interrelationships each other. The maximum extension stress could be regarded as a representative of the extension characteristics of mats. The values of maximum extension stress of tested mats ranged from 1.57 KPa to 17.3 KPa. The values of maximum extension strain ranged from 0.03 to 0.32. The values of secant modulus ranged from 19.6 KPa to 196 KPa. The apparant longitudinal extension elasticity moduli ranged from 27KPa to 900 KPa.
- (12) The apparant longitudinal compression elasticity moduli ranged from 78 KPa to 402 KPa.
- (13) Deformation rate influenced to the compression characteristics but little did to the extension characteristics.
- (14) The raising conditions for rice seedling i.e. a planting density of seed, days for raising and a weight of roots influenced to the

extension characteristics but little did to the compression characteristics.

(15) The kind of bed soils and soil properties influenced so much to the compression characteristics but a little did to the extension characteristics.

(16) Arranging the differences between extension and compression characteristics, the former was influenced mainly by conditions of roots and the later was done mainly by soil physical properties, which was tried to account qualitatively by a simple model of mats.

The shearing characteristics of mats became clear as fundamental physical properties like the extension and compression characteristics.

(17) The shearing stress-displacement curves of mats were similar to those of loose packed soils with low density. These curves might belong to the strain hardening pattern.

(18) The relationship between normal stress  $\sigma$  (KPa) and shearing strength  $\tau_f$  (KPa) of mat was approximated by the Coulomb's equation as same as soils.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \dots\dots\dots (2)$$

$\varphi$  : internal friction angle,  $c$  : cohesion

(19) In the characteristics index of shearing strength obtained from tested mats, the values of cohesion  $c$  ranged from 5 KPa to 126 KPa and those of internal friction angle  $\varphi$  ranged from 25 to 44 degree.

(20) In consequence of the analysis of effecting factors in the strength and stiffness characteristics, it might become clear main factors were the kind of bed soils i.e. physical properties of bed soil, and the planting density of seed and the weight roots influenced to the cohesion  $c$  and the volumetric deformation  $K$ . An influence of the weight of roots to the cohesion  $c$  seemed remarkable in the low compression region.

(21) Those shearing characteristics were tried to explain with behaviours of a simple model of mats.

The interrelationships between extension, compression and shearing characteristics of mats were investigated.

(22) It became clear that those had mutual relations each other as follows.

$$\sigma_{-0.2} = 1.885 \sigma_{\max} - 0.168 (r = 0.93) \dots\dots\dots (3)$$

$$E_e = 1.45 E_c - 0.13 (r = 0.97) \dots\dots\dots (4)$$

$$\varphi = 66.14 \sigma_{\max} + 27.1 (r = 0.87) \dots\dots\dots (5)$$

$$c = 0.74 \sigma_{\max} + 0.44 (r = 0.62) \dots\dots\dots (6)$$

where,  $\sigma_{-0.2}$  is compression stress with -0.2 compression strain,  $E_e$

and  $E_c$  are longitudinal apparent elasticity moduli of extension and compression, and  $\sigma_{max}$  is maximum extension stress.

Therefore, the brief trends of mechanical properties of mats may be able to grasp qualitatively by knowing one of them, for example, an extension strength. This seems to give some suggestions how to measure the mechanical properties of mats and how to use the results of them. Based on these results, some simple test methods and devices were proposed.

(23) All data of extension strength as a representative value were re-examined and mechanical properties based on above-mentioned results were arranged. The values of extension strength obtained in this study ranged from 0.98 KPa to 21.6 KPa. This range nearly overlapped to the one of actual rice seedling mats raising in the farms. It became clear by a reexamination of influence factors that not only the kind of bed soils and the weight of roots but also the strength of each root and the condition of roots distribution affected remarkably to the extension strength.

(24) Furthermore, some qualitative considerations were given to the relationship between anisotropy and inner structure of mats i.e. condition of roots, to the representation of elastic, plastic and viscostic behaviours by a mechanical model, and to the failure criteria.

Those experimental results showed that the deformation of mats might be regarded as an elasto-plastic one in the quasi-static deformation processes. The elasto-plastic behaviours of mats were similar to those loose packed soils, for example, dilatancy and failure criterion. But there were different in the low pressure and extension region. Those might caused by the difference of reaction between roots and soil to external forces.

(25) An elasto-plastic model that plastic strain occurred both of the yield conditions and the subyield conditions was assumed as follows.

$$\varphi(\sigma_{ij}) \leq f(\sigma_{ij}) = F(\epsilon_{ij}^p) \dots\dots\dots (7)$$

where,  $\varphi$  is plastic potential,  $F$  is hardening function,  $\sigma_{ij}$  is stress and  $\epsilon_{ij}^p$  is plastic strain.  $\varphi = f$  represents an yield condition and  $\varphi < f$  represents a subyield condition.

The plastic potential  $\varphi$  of mats was described an ellipse in the stress space.

$$\varphi^2 \equiv f^2 \equiv (p - p_0)^2 \left\{ 1 + \frac{1}{M^2} \left( \frac{\tau}{p - p_0} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (8)$$

where  $p$  is pressure,  $\tau$  is second-order invariant of deviatoric stress,  $M$  and  $P$  are material constants.



The hardening function  $F$  is given by a following equation as a function of volumetric plastic strain  $\epsilon_v^p$  and deviatoric plastic strain  $\epsilon_r^p$

$$F = \bar{F} + \bar{P} \dots\dots\dots (9)$$

$$\bar{F} = F_0 \exp(-\epsilon_v^p/\alpha) \dots\dots\dots (10)$$

$$P = P_e (1 - * \frac{\epsilon_r^p}{\epsilon_{ur}^p})^m (1 - \nabla \frac{\epsilon_v^p}{\epsilon_{uv}^p})^l \dots\dots\dots (11)$$

$$* = 1 (\epsilon_r^p \leq \epsilon_{ur}^p)$$

$$* = 0 (\epsilon_r^p > \epsilon_{ur}^p)$$

$$\nabla = 1 (0 < \epsilon_v^p \leq \epsilon_{uv}^p)$$

$$\nabla = 0 (\epsilon_v^p \leq 0, \epsilon_v^p > \epsilon_{uv}^p)$$

The hardening behaviours of bed soil is described by  $\bar{F}$ , and  $\bar{P}$  gives a roll on roots to the hardening and softening behaviour of mats.

The plastic stress-strain relations was derived from these equations as follows.

$$\alpha \epsilon_{ij}^p = \frac{(\varphi/F)^n}{(\partial F/\partial \epsilon_v^p)(\partial \varphi/\partial p) + (\partial F/\partial \epsilon_r^p)(\partial \varphi/\partial r)} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{kl}} \alpha \sigma_{kl} \dots\dots (12)$$

The elasto-plastic stress-strain constitutive equation was given by

$$\alpha \epsilon_{ij} = \{ E_{ijkl}^{-1} + \frac{(\varphi/F)^n}{(\partial F/\partial \epsilon_v^p)(\partial \varphi/\partial p) + (\partial F/\partial \epsilon_r^p)(\partial \varphi/\partial r)} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{kl}} \} d \sigma_{kl} \dots\dots (13)$$

where  $E_{ijkl}^{-1}$  is a elastic constiutive tensor. Especially, in the three axial loading process this equation is simplified as follows.

$$\alpha \epsilon_l = \{ \frac{\beta}{9(P_r - p)} + \frac{2}{3} ar + \frac{(\varphi/F)^n}{9((\partial F/\partial \epsilon_v^p)(\partial \varphi/\partial p) + (\partial F/\partial \epsilon_r^p)(\partial \varphi/\partial r))} (\frac{\partial \varphi}{\partial p} + 2 \frac{\partial \varphi}{\partial r}) (\frac{\partial \varphi}{\partial p} + * 2\sqrt{6} \frac{\partial \varphi}{\partial r}) \} \alpha \sigma_l \dots\dots\dots (14)$$

The qualitative and quantiative examinations fo this constitutive equation showed that this elasto-plastic model gave good approximation.

## 第 I 章 緒 論

### I. 1 土付苗用田植機と苗マットの概要

日本農業の根幹である稲作において、機械化一貫作業体系が確立したのは比較的新しいことである。この一貫作業体系を可能にしたのは移植作業における田植機と、収穫作業における自脱コンバインやバインダなど収穫機の出現であった。これらの機械はともに独自の技術で開発された点でも、我国の農業機械化史上、特に重要な意義を持つものと言える<sup>1-36)</sup>。

ところで、田植機は軟弱な苗を水田に植付ける関係上、機械の性能の良否によって稲の生育や収量に大きな影響を及ぼすと考えられ、その開発には多くの困難が伴い、かつ導入においては慎重な検討がなされた<sup>1)</sup>。

慣行の田植では、苗代から採取した苗の根を水洗し、代掻きされた水田に3～5本の苗を約15cm程度の間隔に手で軽く押し込んで植付ける。この作業を機械に代行させるポイントは所定量の苗の分離と、水田への植付けをいかに正確に行い、植残しや浮き苗を少なくするかということにある。したがって、苗の形態によって、田植機は機構そのものが規定されることになる。あるいは機構に適合する苗の形態を作り出す必要があり、開発、試作段階より苗の形態によっていくつかの田植機が考案されてきた<sup>2)</sup>。

田植機には大別して、植付け時の苗に床土が付いた状態で使用する土付苗用田植機と、水洗苗を使用する根洗苗用田植機がある。後者は慣行の田植方式をそのまま機械化したものであるが、植付け機構が複雑なことや植付け精度が十分でないなどの理由により、現在我国では使用されていない。

一方、土付苗用田植機には床土の状態によって、短冊苗式、ひも苗式、ポット苗式、マット苗式などの種類がある。これらの呼称は田植機の植付け部に供給される苗の形態を示したものである。短冊苗、ひも苗およびポット苗を使用した田植機は現在ではあまり用いられていない。マット苗は仕切りのない木製もしくはプラスチック製の苗箱に床土を充填し、一面に均等に播種して育苗する。苗箱から取り出された苗はマット状になっている。播種や育苗管理が容易なことなどから、現在使用中の田植機の大半はマット苗式の田植機となっている。

本論文ではこのマット苗の力学的性質を研究対象とするが、個々の苗の力学的性質よりもマット全体の力学的性質を扱うために、そのニュアンスを持たせる意味で今後「苗マット」という用語を一貫して使用する。

最初に苗マットを使用した土付苗用田植機が市販されたのは1967年（昭和42年）のことで、その後急速に普及し、10年経過した1977年（昭和52年）には、水田の全植付け面積約250万haのうち約80%までがこの田植機によって植付けられている。緩やかながらその後も普及率は増加し、1981年（昭和56年）

現在では全植付け面積のおよそ90%は苗マット方式の土付苗用田植機が使用されている<sup>2)</sup>。1981年現在におけるこの田植機の普及台数は約189万台<sup>3)</sup>で、1980年における出荷台数は歩行型約15.6万台、乗用型約1.2万台で合計台数約16.8万台となっている<sup>4)</sup>。過去における苗マット方式の土付苗用田植機の普及の推移は表

Table 1.1 The increase of Japanese-type rice transplanter

表 1.1 土付苗用田植機の普及の推移<sup>3,4)</sup>

年 度 (昭和)	45	50	52	54	55	56
普及台数 (千台)	33	740	1,241	1,533	1,717	1,887
普及率 (%)	0.6	14.9	—	—	—	40.9
出荷台数 (台)	—	—	292,592	185,088	168,388	—

1.1 に示す通りである。これより、最近では普及台数はほぼ横ばい状態であることがわかる。

この田植機では苗マットは苗載台とともに一定速度で左右に移動する。植付け部において植付け爪は苗マットの左右端から順に約1×2cmの角片を切り取り、それをはさんだまま土中に押込んで植付ける<sup>5-7)</sup>。植付け爪は4点リンク機構によって運動し、一定間隔に正確に植付ける。苗載台が一端から他端へ移動すると苗マットの下部は帯状に切り取られるので、残部は上方から自重で滑り落ち、再び同様の動作を繰り返す。植付け本数や植付け密度は苗マットの横送り速度と植付け爪のピッチとの相対関係によって調節する<sup>8-11)</sup>。

上述のように、苗マット方式の田植機の運動機構は単純で、他の方式の田植機に比べて高い植付け精度が保障されるのが特徴である。さらに、ばらまき方式であるために播種が簡単で機械化しやすく、マット状であるために取り扱いが容易である。これらの利点があるために、広く普及したものである。

図1.1 に示す苗マットは内のり28×58cmの苗箱に床土を詰めて、播種した後に覆土し、発芽、硬化さ

せたものである<sup>6)</sup>。播種床は約2~2.5 cmの厚さに床土を詰めて均平にしてから如雨露で十分に散水し、その上に200g (浸種1kg) 程度の種籾を均一になるようにばらまく。籾は塩水選した後に積算水温がおよそ100°Cに達するまで浸種しておいたものを用いる。籾を播いた後に再び如雨露で散水して籾を横にし、厚さ5 mm程度の覆土を行う。播床用の床土には肥料を混ぜてあるが、覆土用の土には混合しない。播種後苗箱を育苗器に入れて発芽させる。器内温度は約30°Cに保ち3~4日入れておく。発芽したらまず直接には日光の当たらない所に2日ほど置いて緑化させる。その後、屋外もしくはハウス内で移植しうる状態になるまで硬化させる。硬化期間は15日程度が目安である。なお、ここでは稚苗苗マットについて述べたが、中苗になると播種量はこれより少なくなり、全体の育苗日数は長くなる。

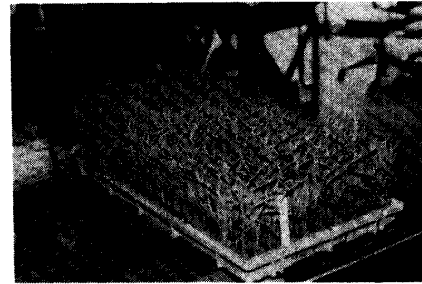


図 1.1 供試した苗マット

Fig. 1.1 A rice seedling mat for test

## 1.2 土付苗用田植機と苗マットの問題点

前述のように我国では土付苗用田植機が広範に普及し、大量の苗マットが使用されているが、この方式もいくつかの問題を含んでいる。本節では土付苗用田植機の今後の動向と問題点、および苗マットに関連する問題点をいくつか指摘し、本研究の背景について述べる。

Table 1.2 The performance of rice transplanter

図 1.2 土付苗用(マット)田植機の作業性能<sup>2)</sup>

年 度	歩 行 型					
	2 条		4 条		6 条	
	圃場 作業量 a/H	作 業 速 度 m/s	圃場 作業量 a/H	作 業 速 度 m/s	圃場 作業量 a/H	作 業 速 度 m/s
49	11.3	0.64	16.0	0.52	—	—
50	11.7	0.64	19.2	0.61	—	—
51	12.2	0.65	19.7	0.58	24.5	0.61
52	11.7	0.67	17.7	0.60	23.1	0.54
53	9.3	0.55	17.7	0.60	24.1	0.65
54	11.7	0.67	19.1	0.64	27.1	0.68
55	—	—	17.0	0.57	16.9	0.37
全年	11.6	0.64	18.2	0.59	24.4	0.60
年 度	乗 用 型					
	4 条		6 条		8 条	
	圃場 作業量 a/H	作 業 速 度 m/s	圃場 作業量 a/H	作 業 速 度 m/s	圃場 作業量 a/H	作 業 速 度 m/s
52	—	—	25.4	0.65	26.2	0.53
53	17.4	0.68	23.6	0.61	27.3	0.53
54	—	—	16.6	0.42	30.8	0.51
55	17.8	0.64	—	—	30.4	0.57
全年	17.8	0.64	22.9	0.59	28.8	0.56

まず、土付苗用田植機の性能向上に関する問題から検討する<sup>2,12-17)</sup>。

表 1.2<sup>2)</sup>に示すように、土付苗用田植機は多条化、乗用化に向かう傾向が見られる。すなわち、多条化による作業能率の向上、および乗用化による労働強度の軽減といった高性能化が進められている。同表によると、同じ植付け条数の田植機については歩行型、乗用型ともに圃場作業量や作業速度に関する変化は見られず、基本性能は安定している。これは軟弱な土壌条件下で作業を行うなどの制約が多いために、土付苗用田植機の作業速度にはある限界が存在することを意味する。すなわち作業速度を速くし過ぎると植付け精度は急激に低下する。このため、乗用化は作業速度の向上を目指したのではなく、専ら労働強度の軽減に重点をおいたものである。一方、多条化によって能率は著しく向上し、圃場作業量は歩行型2条用に対して同4条用および同6条用はそれぞれ約1.5倍および2.5倍も増えている。また、乗用型でも4条用と8条用の圃場作業量の間には

およそ2倍の差が見られる。ただし歩行型と乗用型の間には基本的な性能の差は見られない。

図1.2には国営検査における田植機の作業速度と圃場作業効率の関係を示す<sup>2)</sup>。同図より圃場作業量とは逆に、植付け条数の少ない田植機ほど圃場作業効率は高いことがわかる。これは多条化によって田植機の能力が大幅に上昇するのに引換え、苗補給に要する時間や枕地での旋回に要する時間の占める割合が増加するためである。また多条化すると植残し面積が増えるために手作業の割合も増加して効率は悪くなる。乗用型は歩行型よりさらに圃場作業効率は低下するようである。このような圃場作業効率の低下、我国の水田の規模および植付け時の水田状態などによる制限から、ある水準以上の多条化は望めない。したがって次の段階の高性能化を図るには、田植機による植付け作業の内容を詳細に分析してみる必要がある。

そこで田植機における各動作のおおよその所要時間を分析すると、直進植付け作業時間が全体の70~77%、旋回時間が5~8%、苗補給に要する時間が12~21%、その他の時間が3~5%となっている<sup>12,13)</sup>。田植機の高性能化を図るには各動作の所要時間をできるだけ短縮する必要がある。

前にも述べたように植付け精度を犠牲にせず直進植付け作業時間を短縮するのは困難である。この面では自動制御装置などによって耕盤の不正な水田における植付け位置を調節し、植残しや深植あるいは浅植を少なくすることも可能であろう。このような消極的な意味での高性能化はともかく、積極的な高性能化は植付け機構そのものを変えないことには望めそうにない。

枕地での旋回時間については、旋回におけるクラッチ操作などを簡単にしたり、スムーズにすることによってある程度の短縮は可能になるかもしれないが、作業時間全体に占める短縮時間の比率はさほど大きくない。

意外に多くの時間を要するのが苗補給の時間である。一枚の苗マットからは稚苗でおよそ600~900個の苗株ができるが、これを15cm間隔にすると植付け距離は約100mとなる。普通は枕地側の畔に苗マットを置いておき、苗が切れたらそこまで取りに行って補給する。また田植機に予備の苗マットを積載しておいて、この手間を少なくする方式もあるが、これでも苗がなくなったのを検知したら機械を停止させ、苗マットを苗載台に装填した後に作業を再開するという手順を踏まねばならない。各苗載台において苗のなくなる時期が一致しないために、植付け条数の多い田植機ほど、同じ植付け距離において苗補給の回数が増える。苗のなくなる時期が一致しないのは苗マットの物理性に起因するのでこれについては後述する。また苗載台が座席より後方にある乗用型田植機では、苗マットの装填は上半身を後向きにひねった状態で作業しなければならず、人間工学的にも好ましくないと言えよう。

したがって、苗補給を自動化し、停止することなく植付け作業を続行できるようにすれば、全作業時間の2割近くを短縮しうることになる。また田植機の高性能化だけでなく人間工学的にも改良されることになる。

最終的には苗を連続的に供給すればよいわけであるから、苗マット方式以外の田植機でもよいという考えもある<sup>19)</sup>。この場合には植付け機構そのものが変わることになって、田植機および作業方法が根本的に異なってくるために、多くの問題が発生すると考えられる。仮に満足しうる性能を持つ新たな田植機ができたとしても、現在使用中の機械をすべて更新するまでには長い時間を要したり、膨大な数の苗

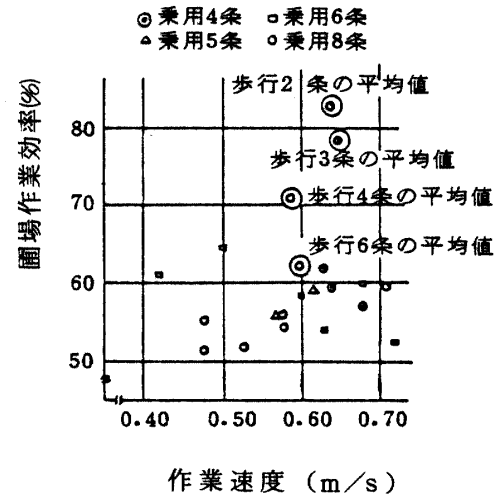


図 1.2 国営検査における作業速度と圃場作業効率<sup>2)</sup>

Fig. 1.2 Capacity and field efficiency in the National Test of rice transplanter

箱や播種機あるいはそれに関連する施設が無駄になる可能性が大きい。また育苗技術なども変わることになる。言換えれば田植の作業体系全体が影響を受けることになるので、定着するまでには数多くの問題を解決しなければならない<sup>18,19)</sup>。このために、苗マット方式の田植機は当然田植機の主流であると考える必要がある。したがって、現時点では現行の作業体系を換えることなく、苗マット方式の田植機において自動化を考える方が望ましい。

さて田植機の性能を向上させるには苗マットの自動供給装置が必要となることを示したが、これがどのような機構や構造となるにせよ、その設計を行う上で基礎資料となるのは苗マットの物理性であることは言うまでもない。周知のように苗マットは機械で取扱う材料としては非常に柔らかい材料である。このため苗マットの物理性の中でも力学的な性質を十分に把握した上で設計しないと、苗載台への装填がうまくいかなかったり、植付けができなくなることになりかねない。とりわけ、貯苗部から苗載台へ苗マットを移す過程において苗マットが破壊したり極度に変形しないような機構が必要であろう。設計の時点で苗マットの力学的性質が判っておれば、その機構が期待どおりの機能を発揮するかをチェックできる。あるいは最初からそれを考慮した設計が可能である。しかるに、後で述べるように、苗マットの力学的な性質についてはほとんど研究されていないので、田植機設計の観点からこれを十分に検討しておく必要がある。

次に、苗マットおよび床土の性質に関連する問題を検討する<sup>20-36)</sup>。

苗マットはおおよそ5 kg前後であるが、植付けには10 a当たり15~20枚(稚苗)程度の苗マットが必要であるので、全国の植付け面積約220万haに対して稚苗苗マットを使用すると仮定すれば約4億4千万枚、したがって、おおよそ200万tonの苗マットが使用されることになる。苗マットの重量は大半が床土の重量であることを考えると、いかに大量の床土が使用されているかがわかる。これらの床土としては水田土、畑土あるいは山土などを蒸気消毒した後で使用している。採土や消毒には手間を要することから、近年では消毒し肥料を混合して調製した人工的な床土が広く流通している。これは年間おおよそ24万ton消費され、その量は年々増加する傾向がある<sup>22,23)</sup>。これらに伴って、床土の種類すなわち質はますます多様化しており、なかには床土として好ましくないものも見られる。そこで床土、特に、人工床土の性状には何らかの基準を設ける必要があるが、問題となる性状は何か、またその基準はどのようなものであるべきかなど基本的な検討はなされていない。さらに、床土の性状の多様化が苗マットの物理性や生育状態にどのように影響するのかなどに関しては不明な点が多い。後者に関連して作物学的な観点よりいくらか研究されているが<sup>23-30)</sup>、物理性に関する研究はほとんど行われていない。床土の多様化は苗マットの物理性にも多少の変化を引き起こすのは避けられない。この影響が大きければ田植機が十分にその性能を発揮しえない事態も発生しよう。現に、苗マットが軟弱すぎて育苗センターから圃場へ運搬する途中や、苗箱から取り出して苗載台に装填する過程で崩壊することがある。田植機の普及当初は育苗にも十分な注意が払われていたが、普及率の向上とともに苗マットの質はむしろ低下しており、東北の冷害地帯での被害を機に見直しが要請されている<sup>25)</sup>。したがって、植付け作業に支障のない力学的性質を持ち、かつ、植付け後の生育も良好である苗マットを育苗する必要がある。このためには苗マットの物理性に関して目標とすべき基準を設定しておかねばならない。

一方、苗マットの自動供給装置の設計においても苗マットはある程度の強度や粘りを持つことが必要な条件であることは言うまでもない。言換ると、移植作業を支障なく行ったり、精度よく行うためには十分な強度を持つ苗マットを育苗しなければならない。

上述の両方の問題に対処するには、まず、苗マットの物理性を十分に把握する必要がある。しかるに、苗マットの物理性に関するデータの蓄積はおろか確固たる測定法すらないのが実状である。唯一の試験法は田植機の国営検査において5・6本の苗の分離抵抗を測定する方法だけで<sup>36)</sup>、試験法としての適否については検討されていない。

上に述べた田植機を取り巻く状況と問題点を整理すると次のように要約しうる。

(a) 現在、大幅に普及している苗マット方式の田植機は近い将来とも主流であると予測されるが、この機械の高性能化を図るには苗マットを自動的に供給する装置の開発が必要である。

(b) 多種多様な床土の使用に伴って苗マットの物理性が多様化しているため、床土の性状に何らかの基準を設定する必要がある。また、機械移植を精度よく、かつ、順調に行うには苗マットの力学的性質にも基準を設けておく必要がある。

(c) 自動供給装置の開発や基準値設定のためには、測定法も含めて苗マットの物理性を明確にする必要があるが、これらの研究は行われていない。このため、苗マットと移植作業との関わりを主として検討する場合には物理性の中でも力学的性質の解明が重要である。

### I. 3 従来の研究の概要

前述のように、苗マットの物理性に関する研究は意外に少ない。これは研究の主力を田植機の開発に注がねばならなかった事情によるところが大きい。このため苗マットに関する研究は育苗技術の確立のために作物学的な立場から行われたものが多い<sup>28-31)</sup>。本節では苗マットなどの物理性について報告された論文を要約する<sup>32-35)</sup>。

#### (1) 田原らの研究

田原らは苗マット方式の田植機が普及する前に、苗帯について動摩擦係数や引張、曲げ、せん断強さの測定を行った<sup>32,33)</sup>。

移植における植付け精度の低下を貯苗部から切断部へ苗帯を移送する際の異常にあると見なして、動摩擦係数を測定して、平均で1.23であることを示した。移送部と苗帯の諸条件に対して動摩擦係数を検討した結果、苗帯の動摩擦係数は、①苗帯の乾湿すなわち含水比の影響を受け、含水比が高いほど大きな値をとること、②床土の種類の影響を受けること、③移送部の摩擦板の材質によってかなり変化し、金属板に比べるとテフロン板が小さくなることなどを報告している。

移送部における苗帯の破断に対応するために引張、曲げ、せん断について検討し、次のような結果を得ている。

- ① 引張、曲げ、せん断強さは苗立数と直線的な関係があった。
- ② 引張、曲げ、せん断強さに対する床土の種類や含水比による明確な影響は確認できなかった。
- ③ 標準的な苗帯の引張、曲げ、せん断強さはそれぞれ、平均値で0.29 kgf/cm<sup>2</sup>、0.01 kgf/cm<sup>2</sup>、3.1 gf/cm<sup>2</sup>であった。
- ④ 引張と曲げに強い苗帯はせん断にも強いことが明らかになった。

田原らの研究は苗帯を対象としており、測定法も本研究とは異なるが、苗帯は苗マットを切断した状態に近いので、本研究を計画する段階で参考となった。

#### (2) 江崎らの研究

本研究の前段階として、江崎らは苗マットの自動供給装置の開発に重点をおいて、苗マットの種々の物理性を検討し、次の結果を示した<sup>34,35)</sup>。

- ① 苗マットの静止摩擦角は床土の材料や苗載台の傾斜や形状によって変化する。含水比が大きくなると静止摩擦角は大きくなった。
- ② 一辺を支持した苗マットの自重によるたわみは育苗日数の影響を受けた。両辺支持された苗マットの自重によるたわみには、育苗日数および含水比の影響が見られた。
- ③ 苗マットを水平もしくは傾斜台から落下させた時の衝撃による変形や、落下予定位置からの変異をみると、薄くなって横に広がるとともに、水分が一部排除された。落下高さが高くなるとこの傾向は強くなった。さらに変形量は含水比の高い苗マットほど大きくなった。傾斜台から苗マットを落下させるとかなりずれた位置で静止した。
- ④ 田植機あるいは加振機による振動に対して周波数が高いほど苗マットの変形量が著しくなった。

また、加振時間、方向および振幅などの条件によって変形は大きな影響を受けるので、自動供給装置における振動の問題には十分に留意すべきである。

⑤ 苗載台への送込み速度と衝撃によって苗マットの変形や破壊の状態を測定した。苗載台の傾斜角や形状および材質と送込み速度の関係によっては苗載台の外に飛び出したりするが、安全な範囲および苗マットの変形の状況にある程度把握した。

苗マットの物理性、特に力学的性質を直接取り扱ったのはこの研究だけである。したがって、苗マットの自動供給装置の設計だけでなく、性状に関する基準値の設定を行うには、苗マットの力学的性質を基本的な段階から分析する必要がある。

#### I. 4 本研究の目的

以上より、本研究では苗マットの力学的性質を次の5つの観点から明確にすることを主要な目的とし、実験および理論的な分析を行う。

(a) 苗マットの力学試験法に関して、現場で使用しうる簡便試験法と材料力学的に厳密な試験法の両方を検討し、従来十分に検討されていなかった苗マットの力学試験法を確立する。

(b) たわみ、分離、引張、圧縮およびせん断などの個々の力学作用に対する苗マットの応答性すなわち強度と変形性を実験によって明確にする。

(c) これらの諸特性間の相互関係を明らかにして、苗マットの力学的性質を全体的に把握する。

(d) 苗マットの力学的性質に影響する諸因子の分析を行う。特に、苗マットを根と床土で構成された複合材料と見なし、力学的性質に対するそれぞれの役割を分析する。

(e) 実験結果に基づき苗マットを弾塑性体と仮定して、土の弾塑性論を参考に苗マットの弾塑性モデルによって力学的性質を説明し、応力-ひずみ関係式を提示する。

#### I. 5 苗マットの力学的性質のとらえ方

苗マットの力学的性質を体系的に把握するために本研究で用いた考え方は次の通りである。

苗マットは厚板状の床土に苗の根が張りつめた構造を有する。苗マットの根の状態を図1.3に示す。根はまず下に伸びて底面に突き当たった後に、横に広がったり、底面の孔から苗箱の下に伸びている。このため底面と側面には根が密集する傾向がある。各々の根からは無数の側根が伸びて複雑に絡み合っ

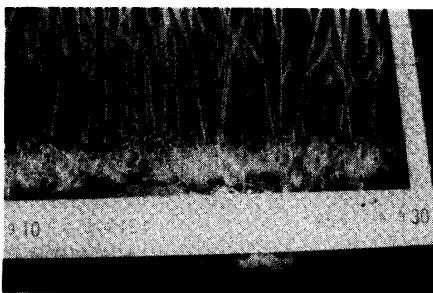


図1.3 苗マットの根の状態  
Fig.1.3 Roots condition of rice seedling mat

ている。すなわち、苗マットは土と根から構成された複合材料の一種で、その力学的性質はそれぞれの要素の力学的性質に依存する。また苗マットは間隙を通して水分や空気、熱の移動、あるいは植物体を通して物質の移動や形成などの輸送過程が存在する。このように熱力学的には解放系であり、厳密には熱力学的記述も必要であろうが、これは複雑すぎて実用的でないので純粋に力学的性質のみに限定する。

一般に材料の力学的性質を把握するには、まず種々の材料試験を行い、それぞれの特性を整理して、最後に変形と破壊もしくは強度を扱う力学理論に基づいて体系化する。

変形力学は外力に対して材料がどのように変形するかを議論するもので、応力とひずみの関係を構成式と称する数式で表現し、境界値問題として個々の特殊な問題の解析を試みるものである<sup>37)</sup>。また、破壊力学は変形の究極現象である破壊の生ずる条件を論じ、機械や構造物の安全設計の問題を扱う<sup>38, 39)</sup>。したがって、苗マットの力学的性質についても変形力学と破壊力学の両方の観点から分析する必要がある。変形と破壊を巨視的に分析する方法をここでは連続体力

学と称しておく<sup>40,41)</sup>。これは通常使用されている方法で、材料試験などで表れる力学現象を直接に数学的表現に結び付けるものである<sup>43)</sup>。そこで本研究でも苗マットの力学的性質に関する巨視的現象をこの方法によって把握することにする。

連続体力学は歴史も古く様々な発展過程を経ており<sup>42, 43)</sup>、弾性論から始まり、粘性、塑性を考慮に入れた構成関係の研究へと発展し、今日ではさらに詳細な研究が進められている。特に、工業材料の開発が進み、また使用条件が過酷になってくると、弾性論だけでは対応しえなくなり、多くの研究者によって塑性、

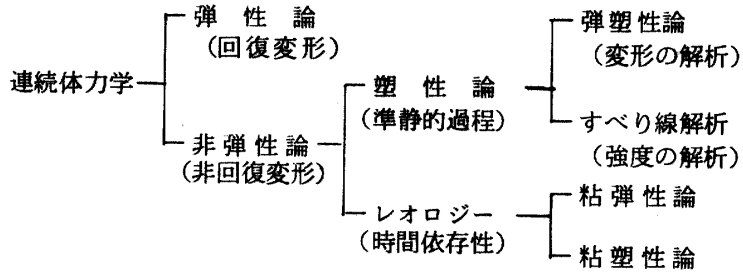


図 1.4 連続体力学の内容<sup>40,42)</sup>

Fig. 1.4 Contents of the continuum mechanics

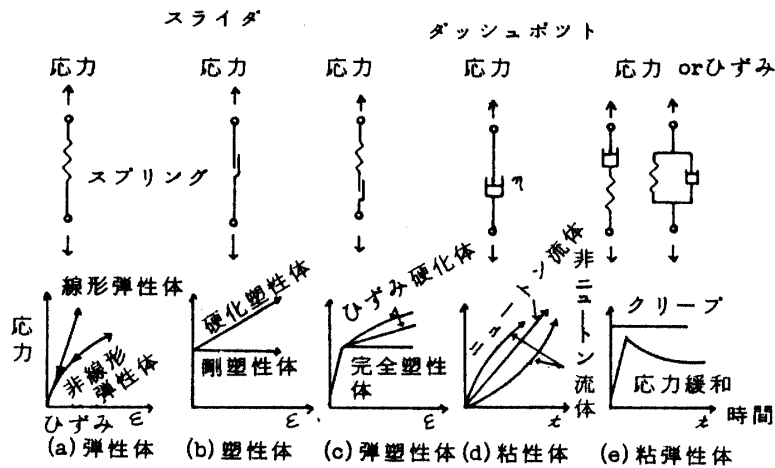


図 1.5 単純な力学モデルと構成関係<sup>37-42)</sup>

Fig. 1.5 Simple mechanical models and constitutive relations

粘性を扱う力学およびこれらを統一的に扱う力学が整備されつつある。図 1.4 および 1.5 に連続体力学の内容と構成関係を模式的に示す<sup>37, 42)</sup>。苗マットの力学的性質はこれらの中で最も適合するものに準拠して説明することになる。

苗マットの力学的性質を把握するにはどの程度の材料試験を行えば良いだろうか。材料の変形は垂直ひずみとせん断ひずみからなるので原理的にはこの2つを調べる試験が必要である。図 1.6 に各種の材料を対象に行われている試験法<sup>46)</sup>の代表的なものと同本研究で用いる試験法を示す。これらの材料試験法は金属材料を中心に発達してきたもので、苗マットに適用するにはかなりの工夫が必要であることと、すべてに渡って行うには多くの時間を要するので、いくつかの基本的な方法に限定して試験を行った。I. 3 で述べたように苗マットの力学的性質はほとんど検討されていないので、まずこれらの試験に対する特性を十分に把握する必要がある。

次の段階として、連続体力学の主要な目的の一つであるその材料特有の構成式を決定する問題が重要である。

一般に、応力とひずみはそれぞれ6個の独立な成分を持つテンソル量である<sup>40)</sup>。したがって、構成式はこれらの量の関数関係を与えるものである。最も簡単な線形弾性体では最高21個の材料定数を求める必要



がある。直交異方性の場合には独立な材料定数は8個に減り、等方性においては2個に減少するので非常に簡単になる。

苗マットの構成式を分析するには、これらのことを考慮してまず、線形弾性体で等方性であると仮定して検討始める方が妥当であろう。しかるに、後で述べるように苗マットは非線形な変形すなわち塑性あるいは粘性的な変形が顕著であるために、順次それらを取り入れた構成式に拡張していく必要がある。この場合には構成式は応力やひずみを変数として含むので線形弾性体の構成式に比べるとかなり複雑な形となる。また、粘性を無視しない材料の構成式は時間項を含む。苗マットが動的な作用を受ける問題では、粘性については十分に検討しておく必要がある。さらに準静的な作用すなわち非常にゆっくりとした作用を受ける問題、および粘性を無視できる材料については時間項は含まず、構成式は弾性と塑性について検討すればよい。特に、両方の性質を含む材料は弾塑性体と称されるが、苗マットはこの中に含まれることを後の実験結果で示す。

本研究では弾塑性性を中心として苗マットの力学的性質に関する分析を進めたい。

同時に、苗マットの力学特性に対する影響因子を明確にする問題もある。複合材料としての観点から、苗マットの力学的性質をF、床土のそれをS、根のそれをR、水のそれをWで表わすと、苗マットの力学的性質は次式で表わしうる。

$$F = F(S, R, W) \dots\dots\dots (1. 1)$$

本式を具体的に例示すると

$$F = \alpha_1 S + \alpha_2 R + \alpha_3 W + \alpha_4 SR + \alpha_5 RW + \alpha_5 WS + \alpha_6 SRW + \alpha_7 S^2R + \dots\dots\dots (1. 2)$$

のような多項式で表現しうる<sup>44)</sup>。ここに $\alpha_i$ は係数で、本式の第4項目からはそれぞれの性質の相互作用を意味する。最も単純な場合には線形加成式などと称される<sup>47)</sup>次式が用いられる。

$$F = \alpha_1 S + \alpha_2 R + \alpha_3 W \dots\dots\dots (1. 3)$$

例えば、苗マットの縦弾性係数Ef (ヤング率)は

$$Ef = \alpha_1 Es + \alpha_2 Er \dots\dots\dots (1. 4)$$

となる。ここにEsは土の、Erは根の縦弾性係数を表わすが、水のそれは無視してある。

苗マットは母材が土であるので、土の力学的性質が中心的な役割を果たすものとする。つまり式(1. 3)においてSを含む項の値が大きいことを意味する。根の力学的性質は苗マットのそれに対して決定的ではないが重要な影響を与える。例えば、苗箱に床土のみを詰め苗マットの育苗条件と同一の条件下においても苗箱から取り出せば崩壊するが、苗マットではまず崩壊することはない。これは根によって引張抵抗が発生するためであろう。

根は播種条件や育苗日数、気温その外の環境条件によって生長の程度あるいは張り具合が異なる<sup>29)</sup>の

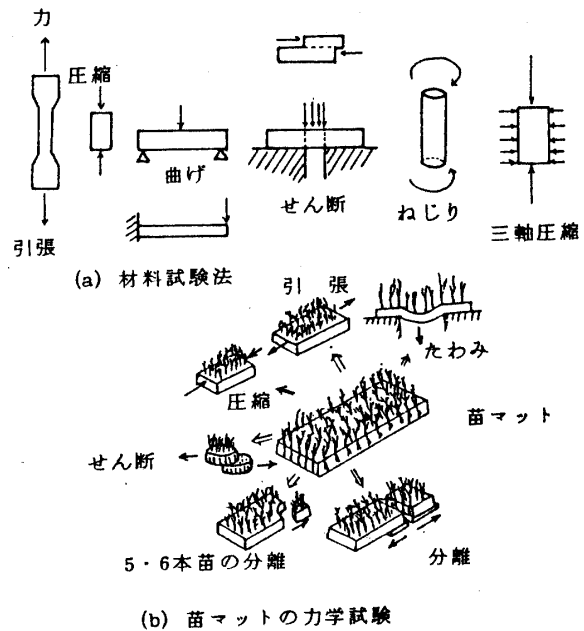


図 1.6 一般の材料試験法ならびに苗マットの試験法

Fig. 1.6 Test methods of material strength and those of mat

で、それに応じて苗マットの力学的性質はどの程度変化するのも興味ある問題である。根の状態をいかなる量で表現すれば、苗マットの力学的性質を表わすパラメータとなるかについても検討しなければならない。これらが明確になれば良質の苗マットの育苗に利用できる。

本研究では第Ⅱ章において、苗マットのたわみ、分離、引張、圧縮およびせん断に関する実験結果を分析し、それぞれの特性と各特性値の相互関係を検討した。この過程において、苗マットの变形は塑性变形が主要な要素であることが判明したので、苗マットを弾塑性体と仮定し、第Ⅲ章においてその挙動を詳細に分析した。

## 第Ⅱ章 苗マットの力学的性質に関する実験的研究

### Ⅱ.1 苗マット用床土の物理性および苗マットの性状

#### 1. はじめに

本節では、本研究で供試した畑土、水田土、人工床土9種類、計11種類の床土の物理性について研究した結果を述べる。

床土の物理性としていかなる量を把握すればよいのかについては議論の余地があるが、本研究は苗マットの力学的性質に注目した研究であることを考慮して、床土の比重、粒度などの基本的な物性値とともに、一面せん断特性を調べる。

また、苗マットの性状に関連するいくつかの量について簡単に述べる。

#### 2. 床土の基本的物理性

##### 1) 試験方法

本研究に供試した床土の銘柄（名称）を表2.1に示す。以下、床土の種類は同表の床土番号で識別する。

これらの床土に対して、①比重、②粒度、③液性限界、④塑性限界を測定してみた。これらの基本的な物理性のほかに、⑤団粒分析を行った。

測定方法は土質試験法に準拠した<sup>49)</sup>

① 比重試験：JIS A 1202による。

② 粒度試験：JIS A 1204による。

③ 液性限界試験：JIS A 1205による。

④ 塑性限界試験：JIS A.1206による。

⑤ 団粒分析試験（湿式フルイ分け法）：土壌物理試験法（東大農業工学教室編<sup>50)</sup>による。

##### 2) 試験結果

これらの測定結果を一括して表2.2に示す。比重は2.5～2.8で他の土の比重とほぼ同程度であった。粒度はどの床土も砂分（粒径0.074mm以上）が多く、粘土分（粒径0.005mm未満）は10%にも満たない分布状態のものが多かった。図2.1には粒径加積曲線を、図2.2には国際法により三角座標を用いた土性の分類を示した。同図より、供試した床土は大半が砂質壤土であることがわかった。

液性限界（LL）、塑性限界（PL）は床土によってかなり異なっており、また塑性指数（ $I_p = LL - PL$ ）にも差が見られた。したがって、水分を含んだ時の床土の性状はある程度の幅があり、これが苗マットの物理性を多様化させている要因の1つであると言える。

表2.2を見ると、見かけ上粒状の床土でも団粒百分率は小さいものがあり、必ずしも団粒構造が発達しているとは限らないことがわかった。

Table 2.1 Kinds of bed soils

表2.1 床土の種類

床土番号	名称（流通銘柄）
1	パールマット特号
人 2	くみあい日化培土1号
工 3	くみあい培土ボンソル1号
4	くみあい人工培土1号
床 5	くみあい大平粒状培土
土 6	くみあい粒状培土K
7	いなほ床土
8	いなほ粒状培土
水田土 9	桜村内の水田土
畑土 10	筑波大学農林技術センター内畑土
人工床土 11	さなえ培土

Table 2.2 Physical properties of tested bed soils

表 2.2 供試床土の性状

床土番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
比 重		2.6	2.7	2.6	2.7	2.6	2.7	2.5	2.8	2.5	2.6	2.6
粒 度 (%)	砂	88.1	79.8	79.2	71.1	71.4	72.2	50.6	65.0	70.5	70.0	—
	シルト	8.9	16.0	15.9	21.3	26.5	22.7	38.4	30.2	23.5	25.8	—
	粘土	3.0	4.2	4.9	7.6	2.1	5.1	11.0	4.8	6.0	4.2	—
均等係数		8.3	45.0	28.0	35.6	6.5	9.1	24.9	19.7	15.8	9.6	—
液性限界 (%)		—	70.2	48.3	63.4	49.5	27.0	53.3	40.6	56.7	76.4	40.8
塑性限界 (%)		—	46.9	—	38.6	34.9	—	31.2	34.5	46.2	73.1	18.2
塑性指数 (%)		—	23.3	—	24.8	14.6	—	22.1	6.1	10.4	3.3	22.8
流動指数 (%)		—	14.3	23.2	15.6	10.6	5.7	13.0	9.1	15.3	17.3	—
タフネス指数 (%)		—	1.63	—	1.59	1.37	—	1.71	0.67	0.68	0.19	—
団 粒 百 分 率 (%)	0.1~0.25	—	—	—	—	—	8.0	2.2	—	—	—	—
	0.25~0.5	—	—	—	—	—	7.0	22.8	4.1	0.6	—	—
	0.5~1.0	0.5	3.1	12.5	0.5	6.1	3.7	12.1	22.8	9.0	25.3	—
	1.0~2.0	12.3	19.6	6.9	12.3	26.5	0.2	2.5	20.9	15.3	15.0	—
	2.0~8.0 (mm)	25.7	23.3	2.5	6.5	35.5	0.1	0.2	3.2	24.8	11.9	—

3. 床土の力学特性

床土の力学特性の一つであるせん断強度を知るために、一面せん断試験を行った。

1) 試験方法

せん断試験は三笠式改良型一面せん断試験機 (マルイ製作所) を使用して行った。試料は練返した床土をせん断箱 (60φ) に充填し、排水状態で30分間の圧密を行った。圧密荷重は 24.0, 36.0, 48.0, 64.0 kgf の 4 段階とした。圧密・排水状態で 1 mm/min のひずみ制御でせん断を行った。畑土については含水比を 5 段階に変化させて試験した。

2) 試験結果

図 2.3 に示す水平変位—せん断応力曲線の例のように、曲線にピークが表れるものと、そうでないものがあった。ピークが表れる場合には一端収縮した試料は体積膨張し、ピークが表れない場合には試料は単調に収縮する傾向が見られた。これらの性質はダイレイタンス<sup>51)</sup>

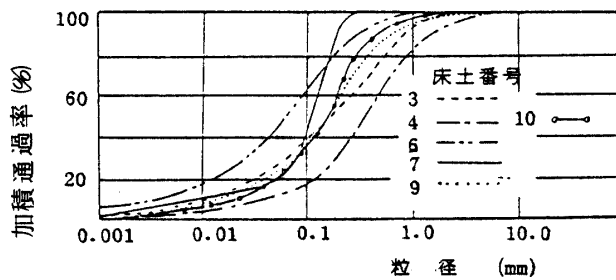
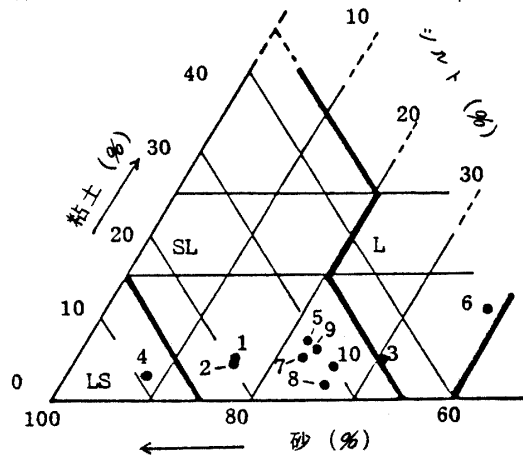


図 2.1 供試床土の粒度

Fig. 2.1 Grain size accumulation curves of bed soils



LS: 壤質砂土, SL: 砂質壤土, L 壤土

図 2.2 三角座標 (国際法) による床土の分類

Fig. 2.2 Classification of bed soils by the triangular co-ordinate (International Method)

(dilatancy) として知られており、土などの粉粒体の変形挙動に特徴的に見られる現象である。

せん断強度は、水平変位—せん断応力曲線において、ピークがある場合にはそのせん断応力値を、ピークがない場合には15%変位（ここでは水平変位 8 mm）におけるせん断応力値を以て定義した。各床土について4段階の垂直応力値によって得たせん断強度  $\tau_f$  (kgf/cm<sup>2</sup>) と垂直応力  $\sigma$  (kgf/cm<sup>2</sup>) との関係を図示すると図 2.4 のようになった。同図より両者には次の直線関係のあることがわかった。

$$\tau_f = C + \sigma \tan \phi \quad \dots\dots\dots (2. 1)$$

ここに C (kgf/cm<sup>2</sup>) は粘着力、 $\phi$  (度) は内部摩擦角を表わす。

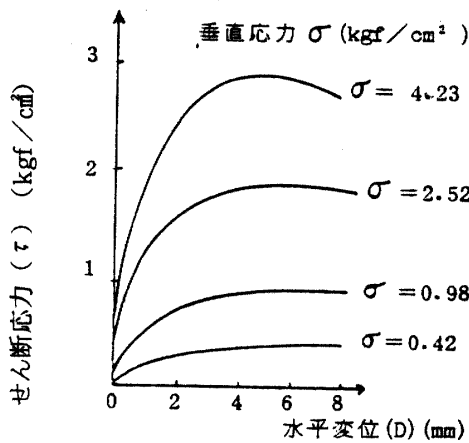


図 2.3 床土の一面せん断試験における  
応力—水平変位曲線

Fig. 2.3 Stress—displacement curves in  
the direct shear

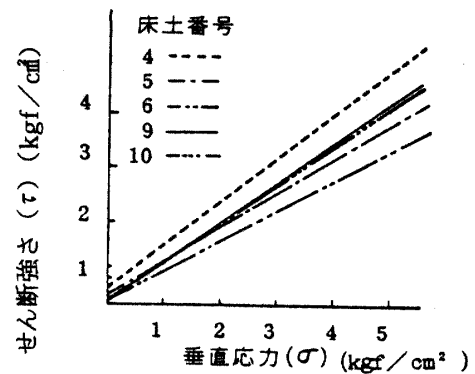


図 2.4 床土の一面せん断強度

Fig. 2.4 The shearing strength of  
bed soils

すなわち苗マット用の床土においても他の土と同様に Coulomb 式が適用でき、粘着力と内部摩擦角でせん断強度を表わしうる。各々の床土の回帰直線における相関係数は 0.99 程度であった。

表 2.3 に示す粘着力や内部摩擦角といったせん断特性値は床土の種類によってかなりの差があった。また、畑土においてこれらの特性値と含水比の関係を調べたところ、粘着力が 0.02~0.17 kgf/cm<sup>2</sup>、内部摩擦角が 30°~38°と変化した。含水比の範囲はおよそ 30~100% であったが、70% 付近において粘着力および内部摩擦角ともに大きくなる傾向が見られた。このため表 2.3 に示したせん断特性値はあくまでも 1 つの判断資料としてのみ有効であろう。

4. 苗マットの性状に関して

苗マットの力学的性質はその性状によって異なるので、実験を行うに際して苗マットの性状を把握しておく必要がある。苗マットの性状をどのように表現するかについては検討の余地はあるが、ここでは作物学的な面を中心に次のような量を用いた。

Table 2.3 Shearing characteristics of bed soils  
表 2.3 床土のせん断特性

床土番号	1	2	3	4	5	6
含水比 (%)	44.0	67.7	38.8	55.7	56.7	48.7
粘着力 C (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.32	0.19	0.09	0.28	0.22	0.07
内部摩擦角 $\phi$ (度)	37.3	34.5	36.4	39.2	31.8	29.5
床土番号	7	8	9	10	11	
含水比 (%)	29.6	47.3	66.2	32.6	31.3	
粘着力 C (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.11	0.03	0.13	0.07	0.27	
内部摩擦角 $\phi$ (度)	32.4	32.4	35.9	35.1	40.0	

- (1) 千粒重( $g$ ): 粃10~20 $g$ の粒数を数え, それを, 千粒相当の質量に換算する。
- (2) 播種量( $g$ /箱): 苗箱1箱に播種した粃の浸種重量を質量に換算する。
- (3) 肥料の量( $g$ /箱): 苗箱1箱分の床土に混合した肥料の量。
- (4) 草丈(mm): 供試苗マットの1領域から30~50本の苗を選び, 地際より最上端までの長さを草丈とする。生育むらの著しい苗マットについては数個の領域について測定する。
- (5) 苗立数(本/30 $cm^2$ ): 約30 $cm^2$ 程度の領域における苗数を数え, 30 $cm^2$ 相当の苗数に換算する。供試苗マット1枚につき1~4領域測定。
- (6) 葉齡: 草丈測定に用いた苗の不完全葉(第0葉とした)より上の葉数で表わす。
- (7) 地上部重(乾物重 $g$ /30 $cm^2$ ): 約30 $cm^2$ 程度の領域の苗を地際より切断し, 105 $^{\circ}C$ -24時間法で炉乾燥後, その重量を測定し, 30 $cm^2$ 当たりの質量に換算する。
- (8) 根重(乾物量 $g$ /30 $cm^2$ ): 約30 $cm^2$ 程度の領域の苗マットの地上部を除去し, 水洗によって床土のみを完全に除いた後に, 105 $^{\circ}C$ -24時間法で炉乾燥して, その質量で表わす。苗マット1枚につき1~4領域測定。
- (9) 含水率(% w. b): 105 $^{\circ}C$ -24時間法により, 苗の生体重に対する水分量の百分率を含水率とする。
- (10) 含水比(% d. b): 105 $^{\circ}C$ -24時間法により, 地上部を除去した試験片の乾燥重に対する水分量の百分率を含水比とする。
- (11) 試験片の寸法(mm): 苗マット試験片の幅, 長さ, 厚さ。
- (12) 試験片の重さ(kg): 供試苗マットおよび試験片の重量を質量表示する。
- (13) 試験片の初期間隙比: 試験片の体積を $V$ , その固体部分の体積を $V_s$ として, 間隙比は $e = (V / V_s) - 1$ で求める。

苗マットの性状を表わすこれらの量の測定値については各々の試験別に述べる。

## 6. 結語

本節では供試床土11種類の基本的な性状を検討し, 比重は約2.6で普通の土に等しく, 粒度は床土によって若干の差はあるものの砂質壤土であり, 液性限界および塑性限界は床土によってかなり異なっていることを示した。また, 床土のせん断強度はCoulomb式で表現でき, せん断特性値としての粘着力や内部摩擦角は床土の種類および含水比によってかなり変化した。さらに, 力学試験を行うに先立って, 苗マットの性状を表わすいくつかの量を示した。

## II. 2 たわみ特性<sup>52,53)</sup>

### 1. はじめに

前章で述べたように, 苗マットは力学的には極めて複雑な複合材料であり, その力学特性の分析はほとんどなされていない。このため, 厳密な理論解析を前提とした実験研究を行うよりも, まず, 力学的性質を十分に表示しうる特性値の選択とその測定法の確立が重要である。特に, 苗マットの特徴を考慮するならば, この特性値はできるだけ測定が容易なものが好ましい。また, 苗マットの力学的性質に寄与する主要な因子を探り, 相互の関係を定量化する必要がある。

上述の観点より, 苗マットの力学特性の1つとして「たわみ」に着目し, その特性に関する実験を行う。たわみはスケールなどがあれば測定できるので, 育苗センターなどの現場において容易に適用しうる実用性の高い物性値になると考える。

本研究では主に次の2点に関して試験を行う。最初は, 一定荷重(ここでは自重)下におけるたわみの経時変化を測定し, 苗マットの変形に時間依存性があるか否かを検討する。すなわち, 一種のクリープテストを行う。次に, 段階的に増加する集中荷重に対するたわみ量の変化を調べ, その特性を検討する。これらの実験では, たわみ特性に対する影響因子として, 特に重要と考えられる根の状態(張り具

合)を表わす根重を取り上げ、これとたわみ特性との関係を分析する。さらに、表2.1に示す人工床土8種類を用いて苗マットを作り、集中荷重に対するたわみ特性と床土の種類の関係を調べる。

## 2. 自重による苗マットのたわみとその経時変化

### 2.1 目的

両辺支持状態での自重によるたわみ試験は最も容易なたわみ試験法であるので、ここでは自重による苗マットのたわみ量とその経時変化の特徴を調べ、レオロジーの性質を検討することを目的とする。同時に、育苗日数および床土の種類を変えた多種の苗マットを供試して、影響因子を分析する。

### 2.2 研究方法

#### 1) 供試床土の種類

本実験では表2.1のNo11を除いた10種類の床土を使用した。それぞれの床土の性状は表2.2に示した通りである。

#### 2) 育苗経過と苗マットの性状

##### (1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和53年1月17日～1月25日。
- ② 播種日：昭和53年1月25日。
- ③ 播種量：200g/箱。
- ④ 品種：日本晴（昭和52年度筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：上記の10種類。
- ⑥ 催芽：育苗器（クボタ製）にて6日間催芽，器内温度は30℃で積算温度は180℃。
- ⑦ 緑化・硬化：ビニールハウス内の電熱温床で2日間緑化し，その後硬化。
- ⑧ 育苗時期：昭和53年1月25日～3月13日。
- ⑨ 灌水：1日1回，午前10時。
- ⑩ 育苗経過：時期はずれの苗にしては生育状態は良好であった。

##### (2) 苗および苗マットの性状

供試した苗および苗マットの性状を表2.4に示す。同表よりわかるように、育苗条件は同じにもかかわらず、草丈や地上部重にはかなりの差があり、床土の種類によって生育に差が見られた。また、同一の灌水条件でも苗マットの含水比は相当異なった。

Table 2.4 Physical properties of mats

表2.4 苗および苗マットの性状

床土番号	苗立数 (本/30cm <sup>2</sup> )	草丈 (mm)	葉齡	根重 (g/30cm <sup>2</sup> )	含水比 (% db)	地上部重 × 100 根重 (%)
1	96	177	1.8	2.11	15.8	72
2	105	186	1.9	2.15	42.1	88
人	3	123	1.9	2.23	19.7	84
工	4	96	2.0	2.14	37.5	76
床	5	81	1.8	2.50	43.3	87
土	6	108	1.9	2.02	35.3	73
7	108	188	1.8	2.32	23.9	68
8	78	181	1.8	2.15	30.1	112
水田土	9	78	1.9	2.15	44.0	92
畑土	10	111	1.8	2.34	49.0	91

## 3) 試験方法

## (1) 試験計画

① 試験因子：床土10種類，育苗日数6水準（24日，25日，27日，35日，41日，48日）とした。

② 試験回数：上記因子の全組合せについて試験を行った。育苗日数24日については3回繰返し，その他の育苗日数については1回，合計80回の試験回数であった。

③ 試験日：昭和53年2月17日，2月18日，2月20日，2月28日，3月13日および3月20日に測定した。

## (2) 試験方法

本試験では，160mmスパンで設置した2個の定盤上に，図2.5に示すように1枚の苗マツトを短辺に平行な線上で両辺支持の状態になるように設置して，スパン中央部のたわみ量を測定した。載荷荷重はスパン間の試験片の自重によるので，等分布荷重と見なす。

苗マツトを定位置に置き，自重による初期たわみが生じた直後（0秒とする）より開始して，10秒，30秒，70秒，150秒および310秒後のたわみ量を経時的に測定した。

## 2.3 試験結果と考察

自重による苗マツトのたわみとその経時変化の一例として，25日間育苗した苗マツトについての結果を図2.6に示す。同図によると，床土の種類によって，初期のたわみ量には3倍程度の差が見られる。たわみ量の経時変化は全く生じないものとある程度生ずるものがあった。

最大たわみ量  $U_{max}$  から初期たわみ量  $U_0$  を引いたものを測定中のたわみの全変化量  $\Delta U_t$ ，すなわち  $\Delta U_t = U_{max} - U_0$  とする。たわみの経時変化の程度は，たわみ量の時間変化率， $\Delta U / \Delta t$ ，および初期たわみ量に対する全変化量の比， $\Delta U_t / U_0$  などの特性値で把握しうるであろう。図に見られるようにたわみの変化は緩やかであるので，たわみ量の時間変化率  $\Delta U / \Delta t$  は全測定時間の平均変化率  $\Delta U_t / 310$  (mm/s) で大まかに表わしうると仮定すると， $\Delta U_t$  の大小でその傾向がわかる。表2.5に初期たわみ量  $U_0$  およびたわみの全変化量  $\Delta U$  を示す。これらの量に対して床土の種類および育苗日数を因子として分散分析を行った。同表に床土の種類を因子とした初期たわみ量に関する一元配置の分散分析表を一例として示す。初期たわみ量と育苗日数，たわみの全変化量と床土の種類および育苗日数の間には有意水準0.05で有意差はなかった。

図2.6および表2.5より

a. 自重による初期たわみは苗マツトによって差が見られた。これは床土の種類によって影響されるが，育苗日数の影響は明確でなかった。床土によって苗マツトの生育状態に差が生じ，たわみに対する

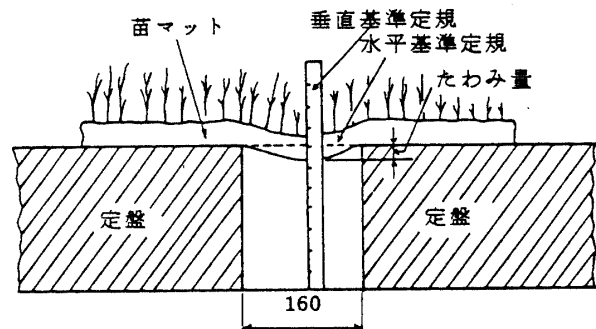


図2.5 自重によるたわみの測定法

Fig. 2.5 Measurement of deflection with dead load

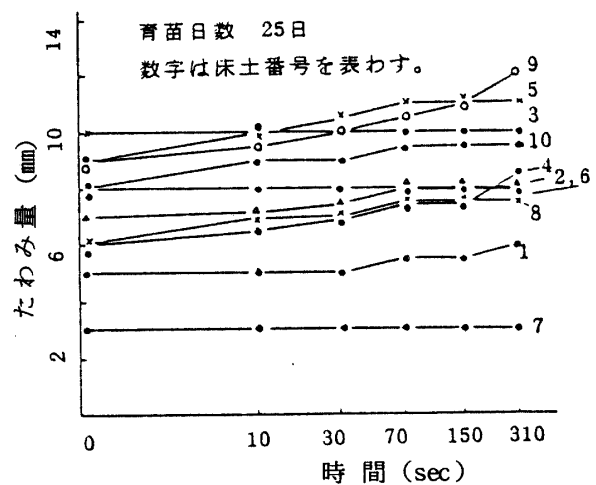


図2.6 自重による苗マツトのたわみの経時変化

Fig. 2.6 Creep characteristics in the deflection of mats with dead load

Table 2.5 The change of deflection with time under the dead load

表 2.5 自重によるたわみの経時変化

	育苗日数 (日)		24		25	27	35	41	48	
	床土番号	No								
初期 たわみ 量 U <sub>0</sub> (mm)		1	3.0	11.0	2.0	5.0	1.0	8.0	4.5	6.0
		2	11.0	4.0	5.0	8.0	5.5	8.0	7.0	8.5
		3	3.0	6.0	3.0	9.0	8.5	20.0	15.5	8.0
		4	9.0	13.0	9.0	6.0	7.0	9.5	9.0	5.5
		5	8.0	12.0	6.0	10.0	7.5	11.5	8.0	9.5
		6	4.0	2.0	5.0	7.0	10.5	6.0	6.0	4.5
		7	1.0	4.5	3.5	3.0	10.5	6.0	6.0	5.0
		8	6.0	9.0	12.0	6.0	7.5	23.5	18.0	4.5
		9	7.0	3.5	5.0	9.0	7.5	7.5	8.0	9.0
		10	5.0	4.0	8.5	8.0	5.5	4.0	8.0	10.0
たわみの 全変化 量 △U (mm)		1	0.5	2.0	1.0	1.0	0.5	0.0	0.0	0.5
		2	0.0	0.5	1.0	0.0	1.5	0.5	1.0	0.5
		3	1.0	0.0	0.5	1.0	0.5	10.5	9.5	1.0
		4	1.0	1.0	1.0	2.5	1.5	0.5	1.0	0.5
		5	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	1.5	0.0	1.0
		6	1.0	0.0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	1.0
		7	1.0	1.0	0.5	0.0	1.0	1.0	0.0	0.5
		8	2.5	1.0	7.0	1.5	1.5	1.5	6.0	0.5
		9	2.0	0.5	1.0	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		10	1.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	1.0	1.5

分散分析表 — 初期たわみ量に対する床土の種類の影響 (一元配置)

	SS	DF	MS	FO
級間	52.6	9	5.8	2.13 > F ( 9, 70, 0.05)
級内	191.8	70	2.7	= 2.01
計	244.4	79		

抵抗が異なったものであろう。一方、育苗時期が冬期であったため全般に苗の生育が悪く、育苗日数による苗の生育差つまりたわみへの影響は小さかったものと考えられる。

b. 5分間の測定時間内において、自重によるたわみ量の経時変化は無視しえないが全般に小さな値であった。

c. たわみの全変化量 $\Delta U_t$ 自体が小さいために、経時変化に対する床土の種類、育苗日数などの影響はほとんど見られなかった。

このように、苗マットによってたわみ量に差は表れるが経時変化は小さいことより、自重によるたわみ試験は苗マットの簡便な強度判定法として利用しうる。

### 3. 集中荷重による畑土苗マットのたわみ特性

#### 3. 1 目的

自重のみでなくいくつかの荷重水準でたわみ試験を行う方が、たわみ特性をさらに詳細に分析できると考え、スパン中央における段階的な集中荷重に対する苗マットのたわみ特性を調べるとともに、前回の試験では十分確認できなかった育苗日数、播種量および根重がたわみ特性に与える影響の分析を目的とする。

#### 3. 2 研究方法

##### 1) 供試床土の種類とその性状



本試験で用いた床土は畑土1種類であった。その性状に関しては表2.2に示した通りである。

## 2) 育苗経過と苗マットの性状

### (1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和53年5月11日～5月15日。
- ② 播種日：昭和53年5月15日～5月17日。
- ③ 播種量：1箱当り 150 g, 200, 250 g。
- ④ 品種：日本晴（昭和52年度筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：蒸気消毒して肥料を混合した畑土。
- ⑥ 催芽・緑化および硬化：育苗器内で3日間催芽（積算温度90°）し、露地で緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：16日, 20日, 25日間の3水準とした。
- ⑧ 育苗時期：昭和53年1月25日～3月13日。
- ⑨ 灌水：1日2回, 午前9時および午後3時に行った。
- ⑩ 育苗経過：生育状態は極めて良好であった。

### (2) 苗および苗マットの性状

前述の性状調査法に基づく供試苗マットの性状を表2.6に示す。本表の性状値は3枚の苗マットの平均値である。前回の試験に供試した苗マットと比較すると、草丈はかなり低いが、地上部重に対する根重の比率は増加している。分散分析によると根重は播種量に対して有意水準0.01で有意差があり強く影

Table 2.6 Physical properties of rice seedlings and mats

表2.6 苗および苗マットの性状

育苗 日数	播種量 (g)	苗立数 (本/30cm <sup>2</sup> )	草丈 (mm)	葉 齢	根 重 (g/30cm <sup>2</sup> )	地上部重量	含水比 (% db)	苗マット 厚さ平均 (mm)	スパン内の 苗マットの 重量 (kg)
						根 重 × 100(%)			
16	150	84	86	1.9	1.21	65	121.7	19.7	0.9
	200	105	84	1.9	1.65	52	124.9	19.9	0.8
	250	135	84	1.8	2.07	48	130.9	20.1	0.9
20	150	87	95	2.0	1.40	56	107.8	19.2	0.9
	200	108	96	2.0	1.63	59	117.2	19.5	0.9
	250	138	93	2.0	1.92	53	132.5	20.0	1.0
25	150	75	94	2.5	1.22	73	117.3	19.8	0.9
	200	117	95	2.3	1.56	81	131.1	19.5	1.0
	250	135	99	2.3	1.93	68	130.3	22.0	1.0

響されていることがわかったが、育苗日数との関連は明確でなかった。播種量 150～250 g/箱の範囲では、播種量と根重の間には直線関係があった。

### 3) 試験方法

#### (1) 試験計画

① 試験因子：播種量3水準（150 g, 200 g, 250 g），育苗日数3水準（16日, 20日, 25日）とし、全組合せの苗マットを各5枚ずつ育苗した。

② 試験回数：上記因子に対して、同一水準の試験を3回ずつ繰返した。したがって、試験回数は3 × 3 × 3 = 27回であった。

③ 試験日：昭和53年5月30日～6月1日, 6月3日～6月5日および6月8日～6月10日に行った。

#### (2) 試験方法

図 2.7 に示すように、スパン 160 mm で 1 枚の苗マッ  
 ットを両辺固定支持し、まず自重によるたわみ量を  
 読み取った後に、集中荷重をスパン中央に 0.2 kgf  
 ずつ段階的に作用させてそのたわみ量を読み取った。  
 1.2 kgf 载荷した後に荷重を 3 回に分けて除荷し、  
 再び载荷した。たわみ量はスパン中央部で読み取っ  
 た。

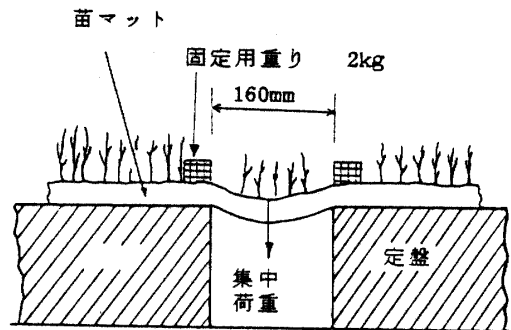


図 2.7 集中荷重によるたわみの測定法

Fig. 2.7 Measurement of deflection with concentrated load

以上の他にたわみの経時変化を再確認するための  
 試験および播種むらとたわみ特性の関係を検討する  
 ための試験を行った。

3. 3 試験結果と考察

1) たわみの経時変化

前回の自重によるたわみ試験で確認したことでは  
 あったが、念のために播種量 200g、育苗日数 20 日の苗マッ  
 ットに 2.0 kgf の集中荷重を作用させて、24  
 時間にわたってたわみ量の変化を測定した。その結果、全変化量は 2 mm 以下であり、経時変化は無視し  
 ても支障ないことがわかった。前回の試験では育苗時期が冬期であったため、今回の苗マットより生育  
 が悪く、若干の経時変化が表れたものとする。

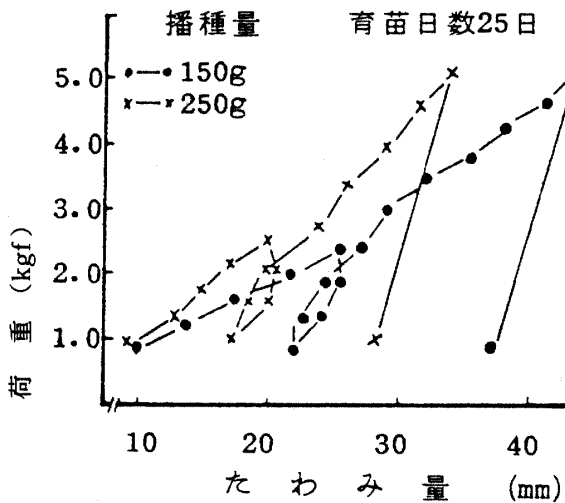


図 2.8 荷重-たわみ曲線の例

Fig. 2.8 Examples of load-deflection curves

2) 荷重-たわみ曲線

本試験で得た荷重-たわみ曲線の例を図 2.8 に  
 示す。図に見られるように、荷重の増加に伴って  
 勾配が漸増すなわち下に凸状にたわみ抵抗が増加  
 する曲線が多かった。これはたわみの増加に伴っ  
 て、微小たわみの範囲すなわち中立軸の上部で圧  
 縮、下側で引張の作用する範囲を超えて、引張成  
 分を主体としたたわみになるために、大たわみ論  
 という面内力<sup>54)</sup>の効果が生じたものと思われる  
 (図 2.9 参照)。

最大 5.0 ~ 6.0 kgf の集中荷重をかけたが、ス  
 パン中央もしくは支持部で崩壊した苗マットは 2 例  
 程度しか見られなかった。

载荷の途中で除荷するとたわみはほとんど回復  
 せず、再び载荷すると除荷曲線とは異なった経路  
 を辿る。除荷直前の荷重レベルに達すると最初の

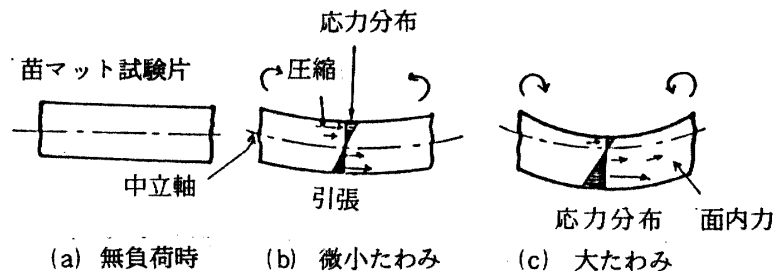


図 2.9 たわみの進展に伴う内部応力分布の変化

Fig. 2.9 Stress distribution with the magnitude of deflection

荷重-たわみ曲線を延長した曲線を描いた。これより、苗マットのたわみは著しい塑性成分を含み、またヒステリシスが表れることがわかった。最初の荷重-たわみ曲線の勾配は、再負荷曲線の勾配よりかなり小さかった。

3) たわみ特性値と要因分析

図 2.8 に示すように、苗マットによって荷重-たわみ曲線の形状にはかなりの差が見られた。そこでこの曲線より次のようなたわみ特性値を定義し、たわみに影響する因子の分析を試みた (図 2.10 参照)。

- a. 自重によるたわみ量  $\delta_0$  (mm)。
- b. 15 mm たわみ時の載荷重  $S_{15}$  (kgf)。
- c. 25 mm たわみ時の載荷重  $S_{25}$  (kgf)。
- d. 1.2 kgf 載荷時のたわみ量  $\delta_{1.2}$  (mm)。
- e. 2.0 kgf 載荷時のたわみ量  $\delta_{2.0}$  (mm)。
- f. 3.0 kgf 載荷時のたわみ量  $\delta_{3.0}$  (mm)。
- g. 除荷曲線の勾配  $G$  (kgf/s)。

表 2.7 にこれらのたわみ特性値を一括して示す。

同表の特性値は 3 枚の苗マットの平均値である。自重たわみはおよそ 5~17 mm, 3 kgf 載荷時におけるたわみ量は約 20~35 mm で苗マットによってかなりの変化が見られた。分散分析結果によると、一定荷重載荷時のたわみ量  $\delta_{1.2}$ ,  $\delta_{2.0}$ ,  $\delta_{3.0}$  に対して育苗日数および播種量は有意水準 0.01 で有意差のある大きな影響因子であり、また、育苗日数 x 播種量の交互作用も同様であった。

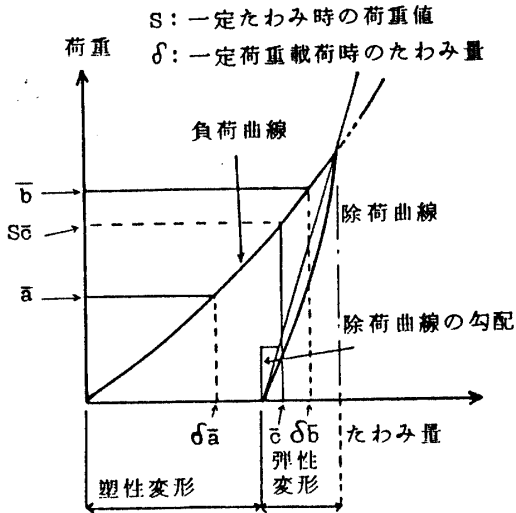


図 2.10 たわみ特性値の定義

Fig. 2.10 The definition of deflection characteristics

Table 2.7 Results of deflection tests with concentrated load

表 2.7 集中荷重によるたわみ試験結果

育苗日数 (日)	播種量 (g)	一定荷重におけるたわみ量 (mm)			一定たわみに必要な荷重(kgf)		自重 たわみ $\delta_0$ (mm)	除荷曲線 の勾配 (kgf/cm)	縦弾性 係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
		(1.2 kgf) $\delta_{1.2}$	(2.0 kgf) $\delta_{2.0}$	(3.0 kgf) $\delta_{3.0}$	(15 mm) $S_{15}$	(25 mm) $S_{25}$			
16	150	18.7	26.1	36.4	1.31	2.02	9.0	4.4	0.5
	200	24.6	34.2	42.8	0.77	1.31	5.1	7.1	0.3
	250	15.5	22.7	28.9	1.34	2.44	8.5	8.0	0.5
20	150	8.0	13.6	21.7	2.14	3.68	16.3	5.8	1.1
	200	14.3	20.7	27.9	1.66	2.58	11.9	4.4	0.6
	250	11.6	18.4	23.5	1.61	3.20	10.2	12.4	0.6
25	150	13.5	21.5	29.2	1.33	2.50	8.7	4.4	0.5
	200	12.5	19.9	27.9	1.43	2.55	10.0	5.8	0.6
	250	10.6	17.2	24.1	1.90	3.36	11.8	5.8	0.5

そこで、育苗日数や播種量と上記のたわみ特性値との定量的な関係を見い出そうと様々な分析を行ってみたが、ばらつきがあり明確な関係は見い出せなかった。しかるに全般に播種量が多いほどたわみに対する抵抗は大きくなる傾向があった。図 2.11 にその例として、播種量と除荷曲線の勾配  $G$  すなわち弾性的な性質との関係を示す。また、育苗日数に関しては明確な傾向は見られなかった。

4) 自重たわみより算定した縦弾性係数

前述のように苗マットのたわみは大きな塑性成分を含み、かつ、根は底面に集中する傾向がある。このため、たわみ量から縦弾性係数E (kgf/cm<sup>2</sup>) を求めるのは問題もあるが、一応の目安として、微小たわみ論に基づいて次式より算定してみた<sup>54)</sup>。

$$E = p \ell^4 / (384 \delta_0) \dots\dots (2. 2)$$

ここに、pは苗マットの自重(kgf),  $\ell$ はスパン長(mm),  $\delta_0$ (mm)は初期たわみである。本式で算定した苗マットの縦弾性係数は約0.27~1.80 kgf/cm<sup>2</sup>で、表2.7にそれぞれの実験条件における平均値を示しておいた。

5) 苗マットの内部構造とたわみ特性

苗マットのたわみ特性に影響する試験因子の一部を明らかにしたが、直接的な影響は苗マットの内部構造、すなわち、根の分布状態や床土の力学状態に左右される。根の分布状態の影響を知るには、まず、この定量的な表現と測定に関する簡単な方法が必要である。そこで、根の重さの大小で根の張り状態および力学状態を表現しようと考えて根重を求めた。全般に根重の大きい苗マットは、根の量が多く、張りも密であるので、根1本当たりの強度を一定と仮定すれば、苗マットの変形抵抗や強度は大きいと仮定しよう。

図2.12に根重とたわみ特性値との関係の一例として、根重と15mmたわみ時の荷重S<sub>15</sub>の関係について示す。同図のように、同じ播種量の苗マットではほぼ直線的な関係があり、根重が大きいほどたわみは生じにくくなることがわかった。しかるに、全体的にみるとばらつきが大きく根重とたわみ特性値と

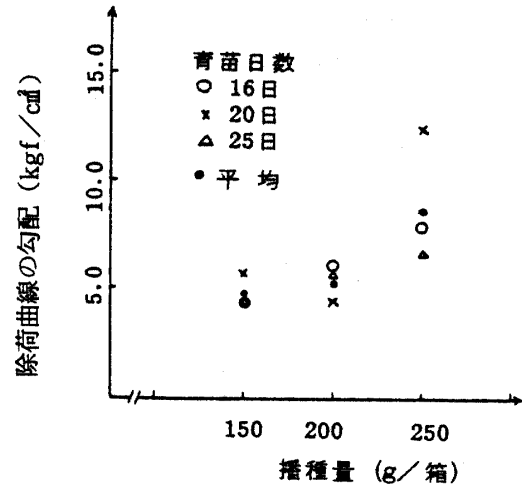


図 2.11 播種量と除荷曲線の勾配との関係  
Fig. 2.11 Relationships between the planting density and the gradient of unloading curve

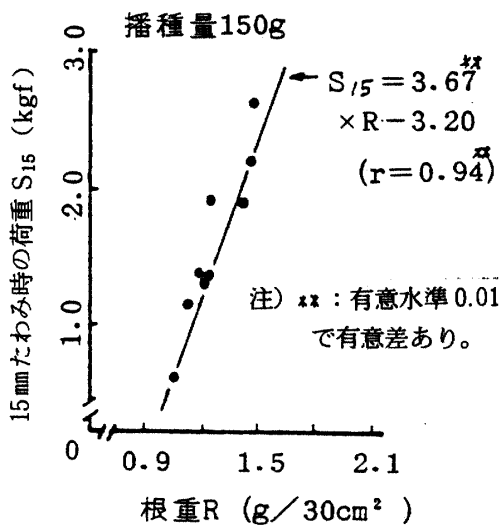


図 2.12 根重と荷重の関係

Fig. 2.12 Relationships between the root weight and the load

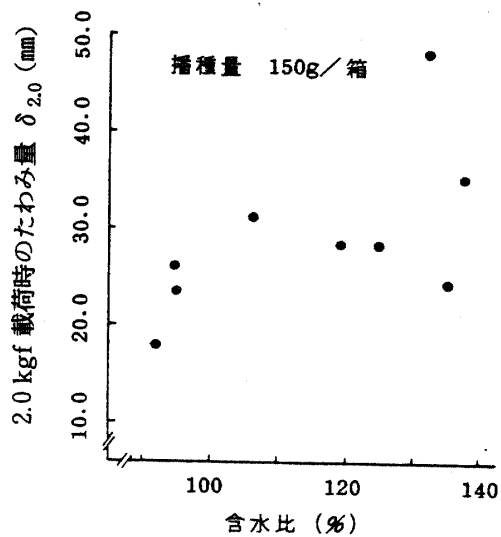


図 2.13 含水比とたわみの関係

Fig. 2.13 Relationships between the water content and the deflection

の明確な関数関係は得られなかった。したがって、苗マットのたわみ特性は根重だけでは表わしえず、根の分布の特徴あるいは1本1本の強度にも影響されると考える。

苗マットの内部構造に関連する因子として含水比も重要であることが知られているので、苗マットの含水比を因子としてたわみ特性との関係を分析してみた。図2.13に含水比と2.0 kgf 載荷時のたわみ $\delta_{2.0}$ との関係を示す。同図より、含水比が増加すると苗マットはたわみやすくなる傾向があることがわかった。ただし、たわみ特性値と含水比の明確な関数関係は得られなかった。

#### 6) 苗マットの根の分布とたわみ特性

根の状態とたわみ特性の関係として、播種むらすなわち根の分布密度とたわみ特性の関係を検討してみた。ここでは簡単に根の分布むらをつくるために、苗マットの中央部に直径5 cmの無播種部を設けて育苗した。播種量は150 g, 200 g, 250 g/箱, 育苗日数は24日間で、育苗条件は前述の通りとした。

荷重が4.0 kgf を超えると、たわみが急激に増加し、播種むらのない苗マットは5.0 kgf では切断しなかったのに対し、この場合にはすべてが切断した。前述の各々のたわみ特性値を比較すると、たわみ強度以外は表2.7の値との大きな差は得られなかった。これより、根の密度にむらがあると苗マットのたわみ強度すなわち破壊時の荷重はかなり小さくなるものと予想される。

以上の分析において、畑土苗マットのたわみ特性を一部明らかにし、これに関する影響因子をいくつか示したが、たわみ特性と因子間の定量的関係は十分には解明しえなかった。なお、苗マットの力学的強度の判定法としては、両辺単純支持の自重載荷でも十分判定可能であるが、様々な荷重水準においてたわみ特性を検討するので、両辺固定した苗マットのスパン中央に集中荷重を載荷する方法による判定がより明確であろう。

### 4. 集中荷重による人工床土苗マットのたわみ特性

#### 4.1 目的

本試験では、人工床土を使用した苗マットの集中荷重によるたわみ特性を調べ、床土の種類がたわみ特性に及ぼす影響を分析することを目的とする。特に、畑土苗マットのたわみ特性との相違などについて検討する。

#### 4.2 研究方法

##### 1) 供試床土の種類とその性状

本試験で供した床土は、表2.1に示した床土のうち、外見的に、粒状の床土2種類と粉状の床土2種類の計4種類を用いた。なお、比較用として畑土を用いた苗マットを作成した。供試床土の性状は表2.2の通りである。

##### 2) 育苗経過と苗マットの性状

###### (1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和53年6月23日～6月26日
- ② 播種日：昭和53年6月26日～6月28日
- ③ 播種量：1箱当たり200 g。それぞれの床土につき4枚播種し、1枚は性状調査用とした。
- ④ 品種：日本晴（昭和52年度筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：5種類、表2.1の床土番号2, 4, 6, 8 および10の床土を用いた。
- ⑥ 催芽・緑化および硬化：播種終了後、育苗器内で2・3日間催芽し、露地に敷いたベニア板上で緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：15日間。
- ⑧ 灌水：1日2回、午前9時および午後3時に行い、蒸散の著しい時は追加した。
- ⑨ 育苗経過：気温の高い日が続いたため、やや高温障害の表れた苗マットも見られたが、全般に順調であった。

(2) 苗および苗マットの性状

供試苗マットの性状の平均値を表2.8に示す。草丈、葉齢は前の試験で供試した5月育苗の苗マットより大きくなっている。草丈は畑土苗マットより人工床土苗マットの方が全般に高かったが、根重については床土間に大きな差は見られなかった。なお、同一条件で灌水したにもかかわらず、含水比は全般に人工床土の方が低く床土間で大きく異なった。

Table 2.8 Physical properties of rice seedlings and mats  
表2.8 苗および苗マットの性状

床土番号	苗立数 (本/30cm <sup>2</sup> )	草丈 (mm)	葉 齢	根 重 (g/30cm <sup>2</sup> )	含水比 (% db)	地上部重 根重 × 100 (%)
人 2	102	142	2.4	1.63	92.6	62
工 4	108	132	2.3	1.73	73.7	56
床 6	96	144	2.3	1.80	51.2	52
土 8	108	150	2.3	1.53	41.7	72
畑土 10	102	120	2.2	1.63	123.4	52

3) 試験方法

(1) 試験計画

- ① 試験因子：床土5種類。
- ② 試験回数：各水準に対して試験の繰返し回数は3回、計15回とした。
- ③ 試験日：昭和53年7月10～7月12日。

(2) 試験方法

集中荷重の載荷法やたわみの測定法は前節で述べた方法(図2.7参照)で行った。試験は各床土の苗マットを1枚ずつ(計5枚)、3日間に分けて行った。

4.3 試験結果と考察

図2.14に本試験で得た荷重-たわみ曲線の例を示す。同図より、曲線形状は畑土苗マットのそれとはほぼ同形で、また床土の種類による明確な差はないことがわかる。ヒステリシスも同様に顕著であった。

本試験で得たたわみ特性値の平均値を表2.9に示す。分散分析結果より、これらのたわみ特性値は床土の種類と有意水準0.01で有意差があり、大きな影響を受けることが明らかとなった。たわみ特性値に対する根重と含水比の影響を分析したところ、根重が増加するとたわみに対する抵抗は大きくなり、含水比が増加

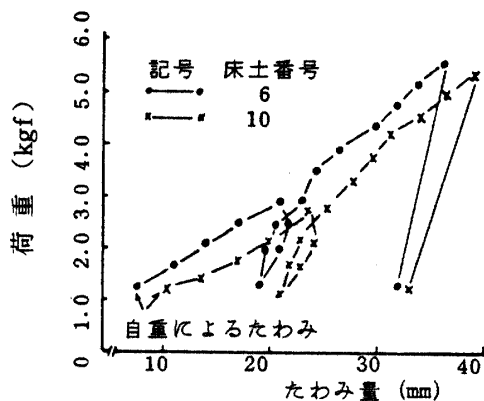


図2.14 床土別の荷重-たわみ曲線の例  
Fig. 2.14 Examples of load-deflection curve with each bed soil

Table 2.9 Results of deflection tests with concentrated load

表2.9 集中荷重によるたわみ試験結果

床 土	一定荷重によるたわみ量 (mm)		一定たわみの所要荷重 (kgf)		自 重 たわみ $\delta_0$ (mm)	除荷曲線 の勾配G (kgf/cm)
	(2kgf) $\delta_{2.0}$	(4kgf) $\delta_{4.0}$	S <sub>15</sub> (15mm)	S <sub>25</sub> (25mm)		
人 2	24.3	36.4	1.24	2.05	8.2	7.2
工 4	19.3	34.6	1.58	2.58	10.3	7.4
床 6	15.4	29.2	1.95	3.27	13.7	8.0
土 8	20.2	38.3	1.52	2.37	10.3	19.6
畑土 10	22.3	35.2	1.32	2.36	8.9	7.5

するとたわみやすくなかったが、定量的な関係は得られなかった。また、表2.2に示した床土の性状値、例えば液性限界や塑性限界などとたわみ特性の関係の分析においても同様で、苗マットのたわみ特性に寄与する床土の物理性は不明のまま残った。

## 5. たわみにおける苗マットの弾塑性的特性

### 5.1 たわみにおける弾性成分と塑性成分

前述のように、たわみにおいて苗マットは容易に塑性変形を生じた。ここでは弾性成分と塑性成分の大きさを比較して、たわみにおける弾塑性変形の特徴を調べ、第Ⅲ章における弾塑性解析の参考とした。

たわみにおける弾性成分は除荷によって回復するたわみ量で、塑性成分はそうでないたわみ量と定義する。ここでは図2.14に示した自重によるたわみ状態を基準(たわみ0)として考える。1.2 kgfまで载荷の後、除荷して回復変形と非回復変形の量を調べた。全変形量は約8~23mmで平均15mm、そのうち弾性成分は約1~6mmで平均3mm、全変形量に対する弾性成分の比率は約20%であった。したがって、残りのおよそ80%は塑性変形であり、非常に顕著であることがわかった。

### 5.2 たわみにおける塑性変形の発達

上述のような塑性的な変形を苗マットのたわみの特徴と考え、その発達の過程を簡単に分析してみる。図2.15に示すように、微小たわみでは通常弾性変形だけが生じ、長さを変化しない中立軸を中心に、上部では圧縮、下部では引張が作用する。たわみが大きくなると前述のように中立軸は上方にずれ、これに平行に引張力としての面内力が作用し、たわみに対する抵抗が大きくなるとされている。

一方、苗マットの場合には根が下方に集まり、上部は大半が床土より構成されているために、たわみの状態も大分異なるを考える。図2.15の(A)に示すように、たわみが小さい範囲では根の多い下部で引張力、その上部で圧縮力が作用する。しかるに、床土は間隙が大きいために容易に塑性変形を生ずる。たわみが大きくなり(B)を経て(C)の状態になると、前述の大たわみの場合とも異なり、苗マット全体が引張られる状態に近づいて、圧縮の作用は消滅する。さらに、たわみが大きくなると、苗マットには引張力のみが作用する。この引張力は根の部分で発生するが、この部分の引張強度に達すると破壊する。

(B)の状態になると床土の多い部分では塑性変形だけとなり、根部の方は弾性と塑性が混在した状態であろう。(A)から(C)に至るたわみ過程において除荷すると復元力を発生しうるのは根部だけと考えられ、その力は上部の床土の多い部分の変形回復と、根部の変形回復に消費される。したがって、根部で発生した復元エネルギーのうち、床土部分の変形回復に使用されたエネルギーは完全に消散することになり、荷重-たわみ曲線にヒステリシス・ループが表れたものとする。

## 6. 結語

苗マットの力学的性質を表わす測度の一つとして「たわみ」を取り上げて、自重によるたわみとそのクリープ特性、および、集中荷重によるたわみを調べ、苗マットの力学的性質の一面を把握することができた。供試苗マットの性状を変えるために、床土、播種量、育苗日数などを変化させて試験を行い、

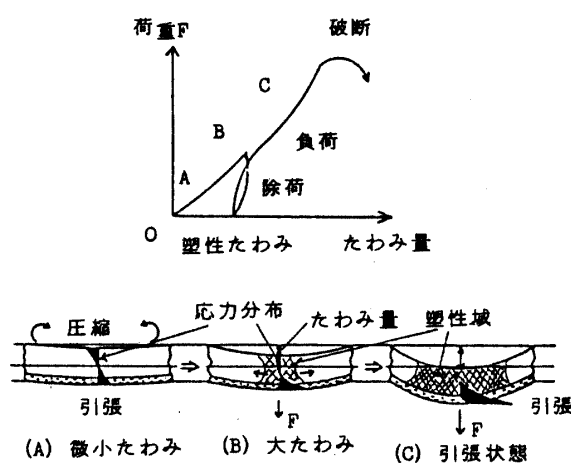


図2.15 たわみにおける塑性変形の発達過程  
Fig. 5.15 The process of plastic deformation in the deflection

たわみ特性の要因を分析した。

a) 苗マットの力学的強度を判定する簡便法としては、苗マットを一定スパンで両辺単純支持し、その時の苗マット中央の自重によるたわみ量で比較する方法でも十分であるが、苗マットを両辺固定支持し、スパン中央に集中荷重を載荷して中央のたわみ量を測定する方法により、さらに明確に苗マットの力学的強度を判定することができる。

b) 苗マットのたわみ量の経時変化、すなわちクリープ変形は自重のみの場合でも、集中荷重を載荷した場合でもかなり小さく、実用的には無視しても差し支えない。

c) 繰返し負荷における苗マットのたわみは全たわみ量の約80%が塑性的な変形であり、本試験に供試した全材料が同様の傾向を示した。わずかに弾性的な回復変形も生じ、荷重-たわみ曲線には顕著なヒステリシス・ループが見られた。簡単な力学的分析によって苗マットのたわみの特徴を明らかにし、ヒステリシス・ループの発生原因は床土部分の回復変形に消費されるエネルギーに起因することを示した。

d) 苗マットのたわみ量に対する影響因子は床土の種類、播種量、育苗日数、根重あるいは含水比などで、播種量、育苗日数および根重が多いほどたわみ抵抗は大きくなり、含水比が高いと逆に小さくなった。

## II.3 分離特性<sup>55,56)</sup>

### 1. はじめに

本節では、破壊試験法の一つとして苗マットの分離に関する実験と考察を行い、その特性について調べる。

現在、田植機の国営検査などで苗条件を記述するのに、一つの指標として分離抵抗を示している<sup>36)</sup>。しかるに、この試験法の妥当性に関しては十分な検討はなされておらず、苗マットの力学的性質の分析法、あるいは、現場試験法としての有効性については若干の疑問が残っている。

そこで、分離抵抗の測定法の検討および改良を行うために、まず現行の試験法による実験を行い、次に新しい試験法を確立するための検討を行う。

さらに、いくつかの分離特性値を導入し、分離特性を分析する。たわみ特性の分析と同様に、供試する苗マットの性状を変えるために、床土の種類、育苗日数、播種量などの条件を変えて種々の苗マットを育苗し、分離特性に影響する因子を検討する。

### 2. 5・6本の苗の分離特性

#### 2.1 目的

本試験では、従来より分離試験法として知られている測定法に基づいて実験を行い、その適用性について検討することを目的とする。

#### 2.2 研究方法

##### 1) 供試床土の種類とその性状

本試験では人工床土8種類および畑土と水田土の計10種類を床土として供試苗マットを作った。これらの床土の銘柄および性状は表2.1および表2.2に示してある。

##### 2) 育苗経過と苗マットの性状

本試験で供試した苗マットは、前節で述べたたわみの経時変化の測定と同時期に育苗した苗マットを用いた。育苗経過はII.2節で述べた通りである。苗および苗マットの性状は表2.3に示してある。

##### 3) 試験方法

###### (1) 試験計画

- ① 試験因子：特になし。
- ② 試験回数：10種類の床土の苗マットに対して各30回。
- ③ 試験日：昭和53年3月13日。



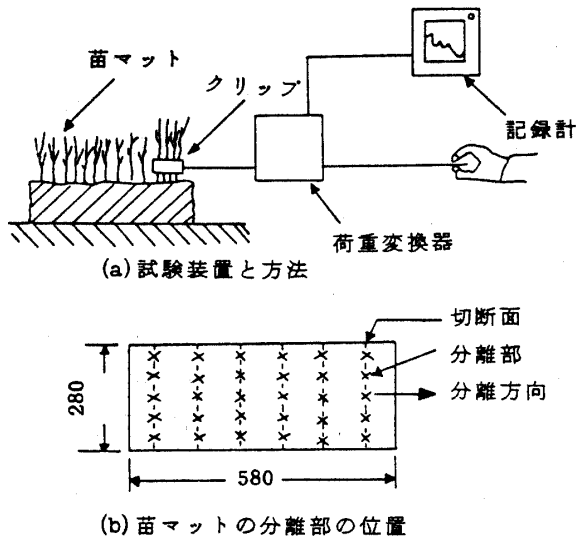


図2.16 5・6本苗の分離試験の装置と方法  
 Fig. 2.16 The dividing test device and method for 5.6 rice seedlings

(2) 試験装置および測定法

本試験では、図2.16に示すようにクリップで5・6本の苗の根元をつかみ、これを手で苗立方向に対して直角方向にゆっくり引張って分離した。苗の分離に要した力は荷重変換器で検出され、電磁オシログラフで記録した。同図に示すように、1枚の苗マットにおいて短辺方向に平行な6つの分離面を選び、各面よりそれぞれ5カ所、計30回の分離試験を行った。

2.3 試験結果と考察

本試験では分離する苗数が4～6本であったので、苗5本相当の分離抵抗に換算し、それぞれの苗マット1枚当たり30個のデータの平均分離抵抗を求めた。

表2.10に示すように、平均分離抵抗は約200～480gf/5本で、床土の種類によって相当の差が見られた。すなわち苗マットの分離抵抗は床土の種類に影響されるが、個々の苗マットにおけ

る30個の分離抵抗にはかなりのばらつきがあった。

これは同一の苗マット内における苗立数や生育状態あるいは含水比などの局所的な不均一な分布状態に起因すると考える。このため、その苗マットを代表しうる分離抵抗値を得るには、かなり多数の試験回数が必要となる。したがって、今回採用した試験法は、苗マット間の分離抵抗の差を知る方法としては妥当であるとは言い難く、試験方法の改良の必要性を痛感した。

3. 畑土苗マットの分離特性

3.1 目的

前述の分離試験法の検討に基づき、本試験では苗マットの分離特性を的確に測定しうる分離試験機として、短辺に平行な面全体で分離する装置を作製し、畑土苗マットの分離特性を検討することを目的とする。

さらに、育苗日数と播種量を試験因子として各3水準の組合せにより試験を行い、苗マットの分離特性を規定すると考えられる力学的な内部構造、特に根の状態(張り具合)の影響を調べる。

3.2 研究方法

1) 供試床土と苗マットの性状

本試験で供試した苗マットは、II.2節で述べた集中荷重によるたわみ試験に供試したものである。育苗経過はII.2節参照。苗および苗マットの性状は表2.5に示しておいた。

2) 試験方法

Table 2.10 Mean dividing resistance to five rice seedlings

表2.10 苗5本あたりの平均分離抵抗

床土番号	苗5本当たりの平均分離抵抗 (gf)	95%信頼区間(gf)	含水比 (% db)
1	346.7	± 51.2	18.2
人 2	477.8	± 97.6	28.5
工 3	375.0	± 100.7	10.2
4	375.1	± 60.6	21.5
床 5	330.3	± 41.7	32.8
土 6	381.5	± 46.5	14.7
7	314.4	± 67.0	15.3
8	251.0	± 31.2	17.3
水田土 9	205.4	± 48.4	37.9
畑土 10	206.8	± 27.2	32.2

## (1) 試験計画

- ① 試験因子：播種量（3水準，1箱当り 150g, 200, 250g），育苗日数（3水準，16日，20日，25日）。
- ② 試験回数：上記2因子に対する3水準すべての組合せによる試験を行った。同一条件の試験は3回繰返したので，試験回数は $3 \times 3 \times 3 = 27$ 回であった。なお，苗マット1枚についてそれぞれ4回の分離を行ったので，全測定数は108回となった。
- ③ 試験期日：昭和53年5月30日～6月1日，6月3日～6月5日，6月8日～6月10日の3回に分けて行った。

## (2) 試験装置および測定法

本試験で開発した分離試験装置を図2.17に示す。くし歯の付いた2個の分離器具を，両方のくし歯が直線上に並ぶように設置した後に，苗マットの短辺に平行な面をこのくし歯で突き通し，分離器具を相対的に反対方向に移動させて引張って分離する。この試験は苗マットを面積の広い特定面で分離する方法である。なお，くし歯には径4mmの鋼線を各7本ずつ（間隔40mm），計14本を使用した。この分離器具は一面せん断試験機を改装して装着し，一方(A)を一定速度で移動させ，他方(B)は固定した。

本試験では分離（移動）速度は $1.06\text{mm/s}$ とした。分離に要する力はリングにひずみゲージを貼付けた荷重変換機で検出し，ローパスフィルタを通して電磁オシログラフで記録した。

図2.17に1枚の苗マットの4つの分離面の位置を示す。前述のたわみ試験と同じ苗マットを使用したので，たわみ部を避けて分離を行った。

## 3.3 試験結果と考察

## 1) 分離荷重-変位曲線

分離中の苗マットは，分離開始時より分離面において伸びが生じ，根の絡みが次第にはぐれ，もしくは，引きちぎられて分離面にすき間が発生し，やがて完全に分離した。

図2.18に本試験で得た分離荷重-変位曲線の一例を示す。分離が進行すると所要荷重は急激に増加し，ピークが表れた後も苗マットが完全に分離するまでは抵抗を示すことがわかる。

同図において，A曲線はB，C曲線に比べて初期の勾配が急であり最高値も高いが，下降勾配は急である。B曲線とC曲線は上昇勾配および最高値は似ているが，下降勾配は異なった傾向を示している。このように各々の苗マットで分離荷重-

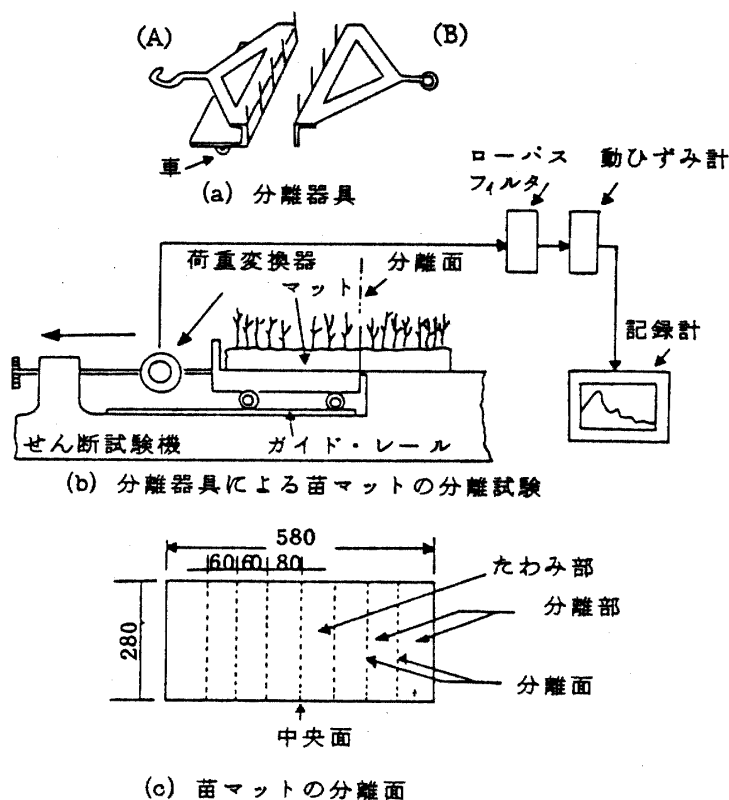


図2.17 苗マットの分離試験装置

Fig. 2.17 The dividing test device for mat

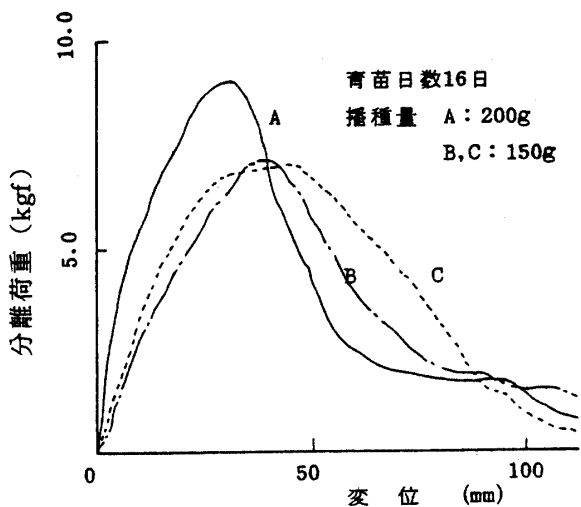


図 2.18 苗マットの分離荷重—変位曲線  
Fig. 2.18 The dividing load—displacement curves of mats

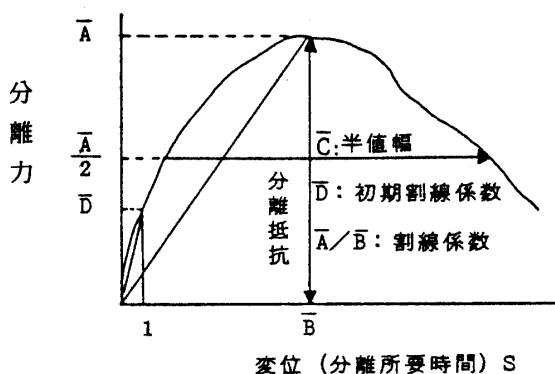


図 2.19 分離荷重—変位曲線の特性値  
Fig. 2.19 The definition of characteristics of dividing load—displacement curve

3) 平均分離抵抗

表 2.11には平均分離抵抗値とその信頼係数95%に対する信頼区間を示したが、これを表 2.10の5・6本の苗の分離における信頼区間と比較してみると、本試験の方がはるかに小さくなっている。このため本試験法を用いれば、苗マットの分離抵抗をよりの確に把握しうると考える。

変位曲線にかなりの差が見られるので、苗マットの分離特性を示すには最高値のみでは不十分と考えた。

2) 分離特性値

そこで、分離荷重—変位曲線より図 2.19に示す分離特性値を定義して、その特徴を分析してみた。

a. 分離抵抗  $\bar{A}$  (kgf) : 苗マットの分離に要する最大力。

b. 分離割線係数  $\bar{A}/\bar{B}$  (kgf/s) : 原点から分離抵抗までの勾配。分母は分離を開始してから最大力が生ずるまでの時間であるが、変位量と同等である。

c. 初期割線係数  $\bar{D}$  (kgf/s) : 分離開始時から単位時間経過後の分離力。

d. 半値幅  $\bar{C}$  (s) : 分離抵抗の半分以上の力を持続する時間。

これらの特性値は苗マットの強度と変形性を表わしており、分離抵抗の大きな苗マットは強度が大きいことを意味し、また、分離割線係数、初期割線係数は変形の難易を表わし、半値幅は苗マットの粘りを表わす。

本試験で得たこれらの分離特性値の平均値を表 2.11に示す。分離抵抗はおよそ 7.20~10.24 kgf であるが、苗マットの断面積を約 70 cm<sup>2</sup> とすると単位面積当たり約 0.10~0.14kgf/cm<sup>2</sup> である。半値幅はおよそ 1 分間程度であるが、分離速度は 1.06mm/s であったので約 6 cm である。

Table 2.11 Dividing resistance of mats by a field soil  
表 2.11 畑土苗マットの分離抵抗

育苗日数 (日)	播種量 (g)	分離抵抗 (kgf)		分離割線係数 (kgf/s)	初期割線係数 (kgf/s)	半値幅 (s)
		平均分離抵抗	95%信頼区間			
16	150	7.2	± 0.4	1.9	3.4	65.6
	200	8.1	± 0.5	2.0	3.9	61.7
	250	8.5	± 0.9	2.3	4.0	72.2
20	150	9.4	± 1.2	2.7	4.9	52.5
	200	9.1	± 0.7	2.7	4.6	57.7
	250	9.9	± 0.3	2.7	4.8	56.7
25	150	8.9	± 0.9	2.4	4.4	55.3
	200	8.2	± 0.7	2.3	4.0	57.1
	250	10.3	± 0.6	2.6	4.8	60.1

4) 試験因子と分離特性

播種量や育苗日数といった試験因子と上述の諸分離特性値との関係を分析するために、分散分析を行ったところ、分離抵抗に対して育苗日数および播種量は有意水準 0.01 で有意差があった。分離割線係数および初期割線係数に対して、それぞれ育苗日数は有意水準 0.01 および播種量は有意水準 0.05 で有意差があり、半値幅以外はこれらの因子の影響が大きいことが明らかになった。全般的に播種量より育苗日数の影響が表れているが、その原因は分析しえなかった。

5) 根重と分離特性

たわみ試験の場合と同様に、根重が苗マットの内部構造を代表する測度であると考えて、各分離特性値との関係を検討した。

その例として、図 2.20 および 2.21 にそれぞれ根重と分離抵抗および根重と初期割線係数との関係を示す。これより、根重が増加すればこれらの特性値は大きくなる、すなわち、強度が増すと同時に分離初期の抵抗が大きくなることがわかる。しかしながら、データのばらつきが大きく、また、播種量によって別々の相関関係が得られたので、根重をパラメータとしてこれらの特性値を一意的に表現する事はできなかった (図 2.21 参照)。

なお、半値幅と根重との関係は見当らなかった。

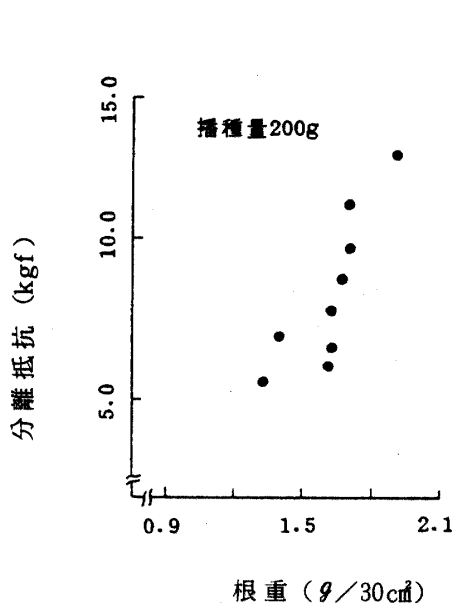


図 2.20 分離抵抗と根重の関係

Fig. 2.20 Relationships between the diving resistance and the root weight

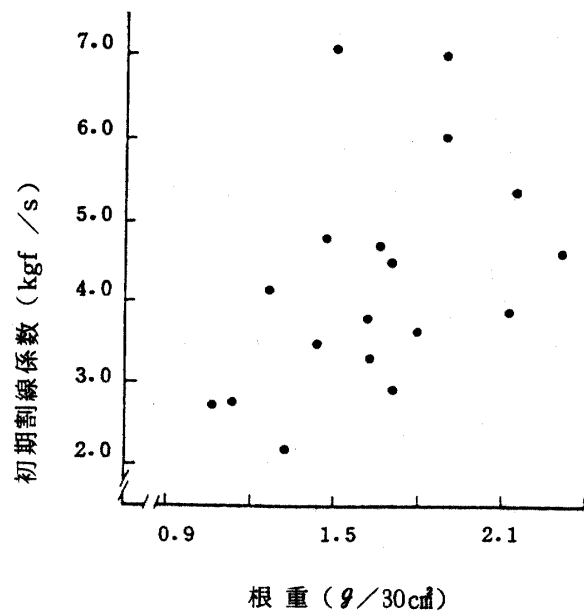


図 2.21 初期割線係数との根重の関係

Fig. 2.21 Relationships between the initial secant modulus and the root weight

6) 含水比と分離特性

苗マットの分離特性には根重のみが影響するのではなく、含水比もかなりの影響を与えると考え、苗マットの含水比をパラメータにとって分離特性値との関連を調べた。図 2.22 に含水比と、分離抵抗、初期割線係数および半値幅との関係を示す。含水比が増加すると分離抵抗と初期割線係数は減少しており、分離初期の抵抗が小さく、かつ強度も小さくなる、すなわち、軟弱になる傾向を示している。また、含水比が増加すると半値幅は増加しており、苗マットに粘りが出ること示している。これは含水比によって分離に対する脆性が変化することを表わす。

以上のように、苗マットの分離特性は根重や含水比などのパラメータの大小を比較することによって、大まかな傾向を把握できる。

4. 人工床土苗マットの分離特性

4.1 目的

ここでは苗マットを広い面で分離する試験法を用いて、床土の種類による分離特性値を検討することを目的とする。合わせて、分離試験法の妥当性を検討する。

4.2 研究方法

1) 供試床土と苗マットの性状

本試験ではⅡ.2における人工床土苗マットのたわみ試験に用いた苗マットを供試して、分離を行った。したがって、床土の種類、性状は表2.1および表2.2に示してある。

育苗経過はⅡ.2の通りである。苗マットの性状は表2.5に示してある。

2) 試験方法

(1) 試験計画

- ① 試験因子：床土5種類。
- ② 試験回数：各床土につき12回、計60回の試験を行った。
- ③ 試験期日：昭和53年7月10日～7月12日。

(2) 試験方法

分離試験は前節で述べた面全体で分離する方法を用いた。

4.3 試験結果と考察

本試験で得た各床土に対する分離荷重-変位曲線の一例を図2.23に示す。すべての床土に対して、畑土苗マットのそれと同様のパターンが表れた。ただし床土によって、これらの曲線形状は相当異なるので、前節で述べた4つの分離特性値によって整理した結果を表2.12に示す。

平均分離抵抗は約6.0～12.0kgfすなわち、0.08～0.17kgf/cm<sup>2</sup>で床土によって2倍程度の差があった。分散分析の結果によると、平均分離抵抗は床土の種類に有意水準0.05で有意差があり、影響を受けることがわかった。分離割線係数と初期割線係数は前回の試験結果よりいくぶん小さくなっている。なお、半値幅は前回とほぼ同じく1分間であった。分離抵抗以外は床土の種類には影響を受けないような分散分析結果が得られた。

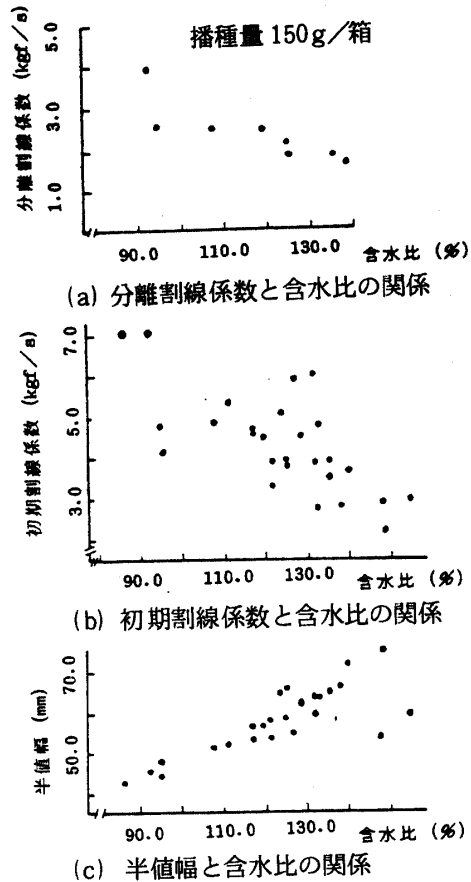


図2.22 分離特性値と含水比の関係

Fig. 2.22 Relationships between the dividing characteristics and the water content

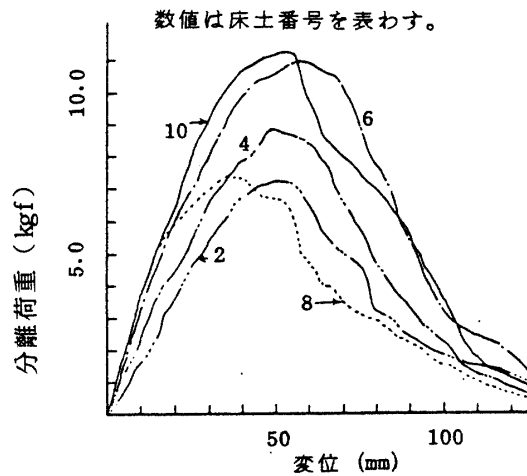


図2.23 人工床土苗マットの分離荷重-変位曲線

Fig. 2.23 Dividing load - displacement curves of artificial bed soils

床土の種類によってなぜ分離抵抗に差が生じるのかについては、床土別に苗の生育が異なり根重に差があるためか、含水比が異なるためか、もしくは、床土の物理性そのものに起因するのか、様々の角度から分析したが、明確な原因は求めえなかった。

5. 分離試験法に関する検討

5.1 分離試験の意味

本試験で行った分離試験の意味する所を一般の引張試験法の概念と比較して若干述べる。

前述のように、分離試験は5・6本の苗を苗マット本体より引き離す時の抵抗を知る目的で、土付苗用田植機の試験法の一部として導入された。イメージとしては植付け爪で苗を掻取る状態を想像したものと思われる。この方法で求まる分離抵抗は分離する苗と隣接する苗マットの小面積部における引張強度を意味する。一方、広い特定の面で苗マットを分離する方法で得られた分離抵抗は、その面における引張強度を意味する。

面積の大小はあってもこの2種類の試験法は指定された面での引張強度を求める引張試験の一種と見なしうる。通常の引張試験は、引張を加える面が互いに離れているために、伸びと破断はこの中間部分で生ずる。これに対して、分離試験では破断面が限定されており、変位は一般的な意味での伸びとはやや異なっている。これらの様子を図2.24に示しておく。すなわち、くし歯を刺した部分より根の分断

が始まり、変位が増加するに伴って分離された領域が直線状に進展する過程をたどって分離が行われる。

したがって、破壊する面をあらかじめ指定する点で分離試験はせん断における一面せん断試験と同類であると見なせる。これと図2.24の関係を考慮すると、分離抵抗は引張強度に相当し、初期割線係数は縦弾性係数に類似した物理量であるが同等ではないと言える。このため変形力学に則った分析を行うためには、分離試験は適切とは言難い。しかるに、苗マットの引張強度の目安を簡単に知るには非常に有効な方法である。

5.2 分離試験法の適用性に関する検討

苗マットを微少部分で分離する国営検査の方法と、本研究で開発した広い面で分離する方法の適用性について検討した。

表2.10, 2.11, 2.12に示した平均分離抵抗と95%の信頼区間の幅を比較すると、後者の方がばらつきが小さく、安定したデータを得られることがわかった。1枚の苗マットに対する試験回数

Table 2.12 Dividing characteristics of mats by artificial bed soils

表 2.12 人工床土苗マットの分離特性

床土の番号	分離抵抗 (kgf)		分離割線係数 (kgf/s)	初期割線係数 (kgf/s)	半値幅 (s)
	平均分離抵抗	95%の信頼区間			
2	6.9	± 0.3	1.4	1.7	64.2
4	9.8	± 0.3	2.0	2.6	62.4
6	10.0	± 0.7	1.9	3.1	66.2
8	6.3	± 0.2	1.4	2.3	64.7
10	11.6	± 1.2	2.2	3.2	65.5

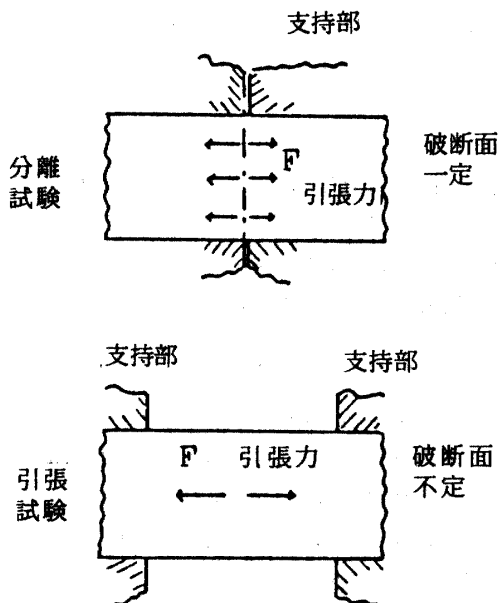


図 2.24 分離試験と引張試験の比較  
Fig. 2.24 Comparison with the dividing test and the extension test

は前者が30回で、後者が4回であることを考えると、後者の有効性を強調する。すなわち、広い面で分離する試験法は少ない試験回数でその苗マットを代表する容定した分離抵抗値を与える。これは分離面の大小によって、根の分布状態が平均化される度合に起因すると解釈できる。

そこで、従来の試験法に代わる新しい苗マットの分離試験法として、本論文では広い面積で分離する方法を提案したい。これに基づく簡単な試験装置としては、例えば図2.25に示すようなものが考えられる。これは現場での使用を前提にしており、フレームと滑動板およびバネ秤(20kgfもあれば十分)で分離力を測定する簡単な器具である。分離抵抗はバネ秤の示す最大分離力として測定でき、また、初期割線係数は単位長さの変位もしくは単位の力を作用させることによって知りうる。苗マットの分離特性を詳細に検討するためには、分離抵抗だけでなく初期割線係数などの分離特性値を知る必要があるが、現場試験では単純に分離抵抗だけに限定して測定する方が有効である。

#### 6. 分離特性とたわみ特性の関係

本研究で行った分離試験とたわみ試験において、集中荷重によるたわみ試験および広い面での分離試験に供試した苗マットは、前述のように同一のものを使用した。たわみ特性や分離特性は苗マットの強度や変形性を示す指標であるので、両者には何らかの関係があるものと考えられる。そこでこれらの分離特性とたわみ特性を比較して相互の関係を検討した。

一例として、図2.26に分離抵抗値と2.0 kgfの集中荷重を載荷した時のたわみ量との関係を示す。同図より、分離抵抗が大きくなるとたわみ量は小さくなる傾向があり、分離に強い苗マットはたわみに対しても強い抵抗を示すと言える。したがって、苗マットの力学的な性質を簡単に知るにはたわみ試験か分離試験の一方を行えば十分である。

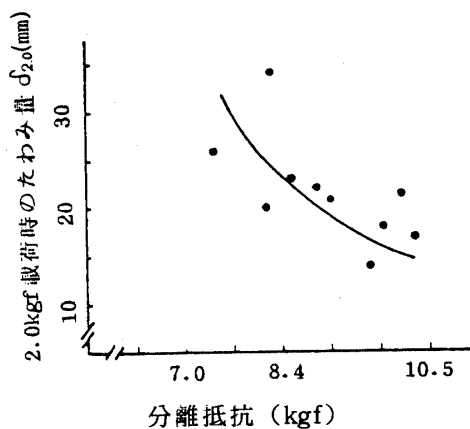


図2.26 たわみ特性と分離特性の関係

Fig. 2.26 Relationships between the deflection and dividing characteristics

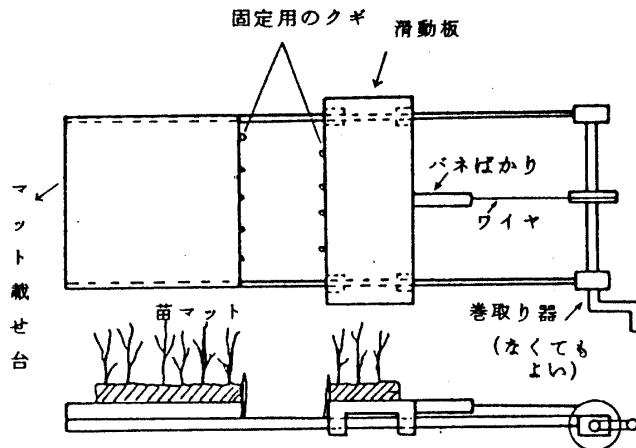


図2.25 分離試験装置の例

Fig. 2.25 An example of dividing test device

#### 7. 結語

現在、国営検査などで苗マットの力学的強度を表示する手法の唯一のものとして、5・6本の苗の分離抵抗の測定が行われている。この方法が苗マットの分離特性を表現するのに最適な方法であるか否かを検討するとともに、苗マットの分離特性についての検討を行った。

a) 5・6本の苗の分離試験の結果、1枚の苗マットから30回以上の試験を行ったにもかかわらず、95%の信頼係数に対する信頼区間が非常に広く、これ位の試験回数では、もしくは本試験法では、苗マットの分離抵抗を的確に表現することは無理であるとの結論を得た。

b) 試験方法に関する検討の結果、図2.20に示したような試験器具を用いて苗マットの短辺に平行な面全体で2つに分離する試験法によれば、試験

回数が4回と非常に少なくとも現在行われている方法に比べて、信頼係数95%の信頼区間が狭くなりうる事が判明した。そこで苗マットの分離抵抗を表示するには面全体で分離する試験方法に改善することを提案したい。なお、現場などで使用する簡単な試験器具を図2.25に示した。

c) 分離試験によって苗マットの分離特性を十分に表現するには、分離抵抗のみではなく分離割線係数、初期割線係数、半値幅の4つの分離特性値によって比較すれば、さらに明確になることを示した。ただし、現場試験においては分離抵抗を知るだけでも十分であろう。

d) 苗マットの分離特性を支配する主なパラメータとしては、床土の種類、育苗日数および播種量があるが、これらより直接的なパラメータとして根重や含水比を取り上げることができる。一般に根の量が多いと分離抵抗は大きくなり、含水比が高いと軟弱化する傾向があった。また、床土の違いによっても苗マットの分離特性は異なるので、良好な分離特性を持った苗マットを得るためには床土の選択をなおざりにはできない。

e) 分離特性と前節のたわみ特性を比較したところ、分離に強い苗マットはたわみにも強いことが明らかとなり、苗マットの力学的性質を知るための現場試験としてはいずれか一方を行えば十分であることを示した。

## II. 4 引張特性<sup>57-59)</sup>

### 1. はじめに

これまでに苗マットの力学的性質として、たわみや分離といったいわば現場試験的な特性を明らかにしてきた。しかしながら、弾性論、塑性論などの連続体力学的な観点から一步突込んだ議論を行うにはこれらの特性値では不十分で、基本的な引張、圧縮、せん断に関する基礎資料を得る必要がある。そこでまず引張試験を行い、その特性を検討する。

苗マットは土と根で構成された複合材料であり、その根によって他の繊維強化材料<sup>44)</sup>と同様に母材である床土の力学的強度に比べるとかなり強化されていると考える。特に、床土そのものは引張強度はほとんどもないが、苗マットは引張強度を有している。これは、相当の変形が生じても苗マットが崩壊しないための要因となっている。すなわち引張に対する苗マットの性質は、大きな力学的特徴の1つと言えよう。

そこで、ここでは工業材料に適用されている単軸の引張試験に準じて、苗マットに合った試験法を開発し、引張特性の分析を行う。また単純な複合材料モデルの導入によって引張における床土と根の作用を定性的に考察する。

### 2. 引張試験法に関する検討

苗マットの引張試験を行うに当たって、(a) 試験片の形状をどのようにするか、(b) 試験片の支持方式はどうするか、(c) 伸び量をいかに測定するか、など試験法に関連した多くの問題を解決する必要があった。

苗マットは軟弱で母材が土で

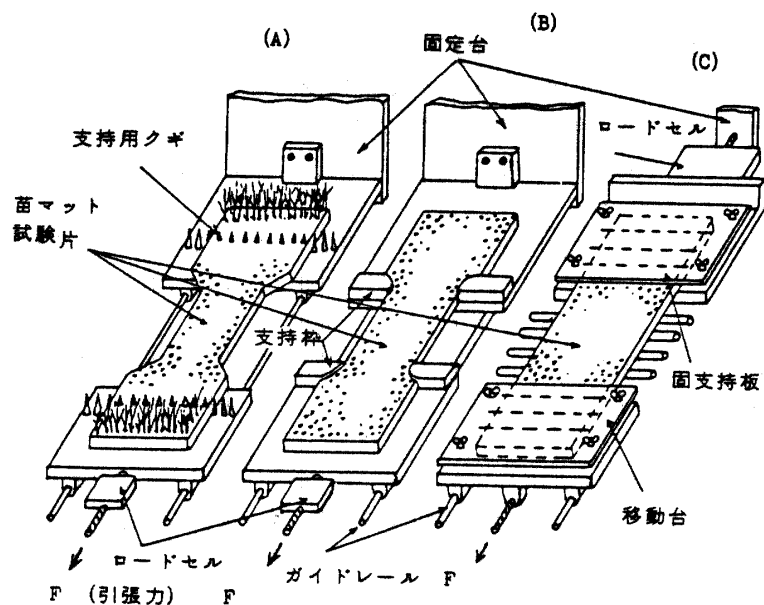


図 2.27 苗マットの引張試験装置

Fig. 2.27 Extension test devices for mat



あるために支持方式が適切でないと支持部と試験片の間に滑りを生じたり、支持された部分で破壊が生じて十分に試験ができない。試験片が小さいと、5・6本の苗の分離の場合と同様に、根の分布などの不均一さが表れてデータにばらつきが生ずる恐れもある。したがって、試験片の寸法はある程度の大きさが必要であるが、あまり大きいと試験の効率が悪かったり、装置が大型になる欠点がある。

以上を考慮に入れて、本研究では図2.27に示す3通りの引張試験装置(A, B, C)を試作して、試験法の検討を行った。

いずれの装置でも、水平に置いた2個の支持台に試験片を設置し、水平方向に引張る方式をとった。これは試験片を吊す方式では、自重によって引張る前に破壊する恐れがあるためである。

### 2.1 装置A

装置A(昭和53年試作)では、支持台に取付けた釘に、台形状のくびれ部を持った試験片を刺して固定した。試験片の寸法は標点距離180mm(全体の長さは280mm)、幅70mmである。この形状は苗箱に木枠で形をつくり、播種時より整形したものである(図2.28参照)。伸び量の測定は試験片に埋込んだ2個の金属片の相対移動量を、差動トランス型変位計で検出して求めた。

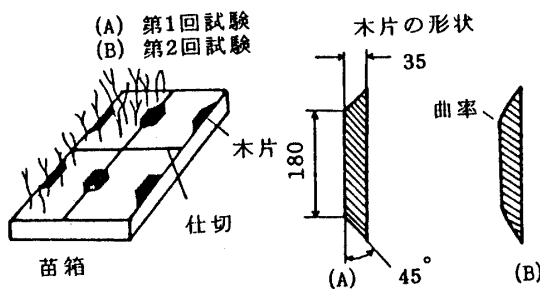


図2.28 苗マット試験片の整形

Fig. 2.28 Formation of test pieces

支持台の一方は固定されており、他方を定速で移動させることによって引張った。変位速度は1mm/sであった。試験機の本体は分離試験装置に用いた一面せん断試験機を改装したものを利用した。

本試験装置を用いて引張試験を行った結果、次のような欠点のあることが明らかになった。

- a. 支持台間の引張部分にたわみが生じ、正確な引張の開始点がわかりにくい。
- b. 試験片を釘に刺して固定する時に、試験片が損傷しやすい。
- c. 伸び量を検出するために試験片に埋めこんだ金属片が十分に安定せずに、変位計の触

針の移動が実際の伸び量と対応しない。

- d. 試験片の引張部における隅部で破断が生じやすい。
- e. 試験片の整形に大きな手間がかかる。

これらの欠点の一部を改良した試験装置として、図2.27の装置Bを作製した。

### 2.2 装置B

装置B(昭和53年)では、支持用の釘をやめて図2.27に示す木枠を支持台に取り付けて試験片を固定した。また、試験片の隅に曲率を持たせ応力の集中を防止した(図2.28参照)。

装置Bは装置Aと本質的には同じで、前述のa, c, eの欠点は是正されずに残された。したがって、適切な引張試験を行うには装置の大幅な改良が必要であることがわかった。

以上の反省をふまえて、図2.27に示す装置Cを作製した。

### 2.3 装置C

装置C(昭和54~55年)では長方形の試験片とし、その両端部を2個の支持台に置いて上下から押え板ではさんで支持し、一方の支持台を固定して、他方を移動させて引張った。押え板には数本のアクリル製の三角棒を引張方向に直角に取り付けて、苗マット試験片と押え板との滑りを防ぐようにした。実測した結果、試験精度を左右する程の滑りは生じなかつたので、伸びは支持台の移動量に等しいと見なした。これより、支持台を等速で移動させれば伸び量は容易に知りうる。また、移動支持台と固定支持台の中間に3本の回転丸棒を置いて、これで試験片を支持して自重たわみを防止した。

試験片は地上部を除去した苗マットを所定の寸法に切断して整形したので、装置AおよびBに用いる試験片の整形に比べると非常に手間が省けた。

引張力は支持台の移動に伴う摩擦力を含まないように、固定支持台側にロードセルを設置して検出した。

装置Cの大きな問題点の一つとして、支持部において試験片が圧縮力を受けるために、破断しやすくなって、実際の引張強度が得られないのではないかと思われたが、後述するようにこの部分で破断した試験片はほとんどなく、問題にならないことが判明した。

このため、引張部の幅を支持部より小さくするなどの特別な対策は必要なかった。このように、装置Cによれば適切に引張試験が行えることがわかった。

### 3. 畑土苗マットの引張強度

前述のように、装置Aおよび装置Bによる試験結果では、変形を考慮した引張特性の検討は行えなかったが、引張強度を求めることができたので簡単に述べる。

#### 3.1 目的

苗マットのたわみ特性や分離特性の主要な因子であった播種量と引張強度との関係の検討を目的とする。

#### 3.2 研究方法

##### 1) 供試床土の種類とその性状

床土は表2.1に示した畑土を用いた。その性状は表2.2に示してある。

##### 2) 育苗経過と苗マットの性状

###### (1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和53年9月24日～9月30日。
- ② 播種日：昭和53年9月28日～9月30日。
- ③ 播種量：5水準，1箱当り50g，100g，150g，200g，250g。
- ④ 品種：日本晴（昭和53年度筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：畑土。
- ⑥ 催芽：緑化および硬化：育苗器内で3～4日間催芽した後，ガラス温室内で緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：27日間。
- ⑧ 灌水：1日1回，午前10時に行った。
- ⑨ 育苗経過：10月に入って気温が下がったせいか生長に時間がかかった。

###### (2) 苗および苗マットの性状

表2.13に苗および苗マットの性状を示す。葉齢が大きいわりに草丈が低く，生育状態は良好でなかった。

##### 3) 試験方法

###### (1) 試験計画

① 試験因子：上記のように播種量を5水準とした。なお含水比を5段階に変える予定で灌水条件を変化させたが，うまく調整できなかった（苗マットの含水比については表2.13参照）。

② 試験回数：播種量5水準に対して15回繰返しとした，すなわち合計75回の試験を行った。

③ 試験日：昭和53年10月24日～10月27日。

###### (2) 試験方法

前述の引張試験装置Aを用いて行った。

### 3. 試験結果と考察

本試験で得た引張強度はおおよそ0.02～0.08kgf/cm<sup>2</sup>であった。これを苗マットの長辺方向全体の引張

力に換算するとおよそ 1.39 ~ 4.89 kgf とかなり小さな値であった。これは播種量が50g/箱, 100g/箱と非常に疎な状態を含んでいることと, 育苗時期が秋期であったので根の生育が良くなったためと考える。播種量50g/箱, 100g/箱の試験片では試験器に装着する過程で崩壊したものもいくつかあった。

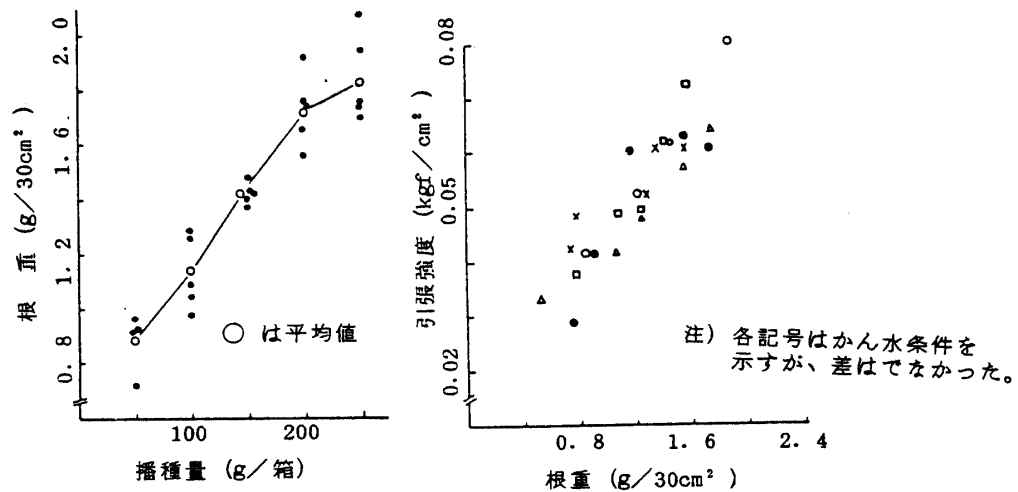
試験片の破断はいろいろな場所で発生したが, 前述のように, くびれ

Table 2.13 Physical properties of rice seedlings and mats

表 2.13 苗および苗マットの性状

播種量 (g)	50	100	150	200	250
草丈 (mm)	95	96	96	95	95
苗立数 (本/30cm <sup>2</sup> )	27	52	75	102	127
葉 齢	3.2	2.9	2.9	2.9	2.7
含水比 (% db)	76.3	76.8	84.1	73.9	72.9
根重 (g/30cm <sup>2</sup> )	0.48	0.93	1.19	1.45	1.68

注) 数値は15個の試験片の平均値を表わす。



(a) 播種量と根重の関係

(b) 根重と引張抵抗の関係

図 2.29 播種量と根重, 根重と引張抵抗の関係

Fig. 2.29 Relationships between the planting density and the root weight, between the root weight and the extension strength

Table 2.14 Physical properties of rice seedlings and mats

表 2.14 苗および苗マットの性状

床土番号	播種量	育苗日数	含水比 (% db)	根 重 (g/30cm <sup>2</sup> )	
人 工 床 土	200g	27日	1	40.3	0.62
			2	77.9	0.57
			3	37.6	0.66
			4	55.0	0.62
			5	—	—
			6	37.3	0.55
			7	30.5	0.69
			8	67.7	0.70
水田土	9		101.1	0.59	
畑土	10		120.6	0.72	

注) No 5は試験不能であった。

部の隅の部分から発生する場合が多く、そこに応力が集中していることがわかった。

図2.29には播種量と根重および根重と引張強度の関係を示す。同図に見られるように、これらは密接な関係があることが明らかになった。また、含水比と引張強度の関係を求めたが、明確な傾向はなかった。

#### 4. 人工床土苗マットの引張強度

##### 4.1 目的

ここでは人工床土を用いた苗マットを供試し、床土の種類と引張強度の関係を分析を目的とする。

##### 4.2 研究方法

###### 1) 供試床土の種類とその性状

表2.1のNo 11を除く10種類の床土を用いて苗マットを育苗した。それらの性状は表2.2に示してある。

###### 2) 育苗経過と苗マットの性状

###### (1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和53年10月25日～11月1日。
- ② 播種日：昭和53年11月1日～11月3日。
- ③ 播種量：1箱当たり200g。
- ④ 品種：日本晴（昭和53年度筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：人工床土8種類，水田土，畑土。
- ⑥ 催芽・緑化および硬化：育苗器内で5日間催芽した後，ガラス温室内で緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：27日間。
- ⑧ 灌水：1日1回，午前10時に行った。
- ⑨ 育苗経過：全般に生育は良くなかった。
- ⑩ 苗マットの性状：表2.14に苗マットの性状を示した。

###### 3) 試験計画

###### (1) 試験計画

- ① 試験因子：床土10種類を試験因子とした（床土番号No 1～10）。
- ② 試験回数：上記因子のそれぞれを4回繰返した。
- ③ 試験日：昭和53年11月27日～11月30日。

###### (2) 試験方法

前述の引張試験装置Bを用いて行った。

##### 4.3 試験結果と考察

冬期に育苗したために苗の生育があまり良くなかったことと、伸びをうまく測定できなかつたので、引張強度だけを知りえたにとどまった。

本試験で得た引張強度は約0.01～0.22 kgf/cm<sup>2</sup>で、床土の種類によって大きな差が見られた。これは苗マットの長辺方向の引張を考えると、0.7～15.4 kgf 程度の引張強度に相当する。床土によっては極端に弱く、全く試験できないものもあった。一方、11月に育苗したにもかかわらず、かなり大きい引張強度を示す苗マットもあった。

#### 5. 変形を考慮した苗マットの引張特性

##### 5.1 目的

図2.27に示した装置Cを用いて、強度だけでなく変形を含めて苗マットの引張特性の分析を行うことを目的とする。

##### 5.2 研究方法

昭和54から55年に3回の引張試験を実施した。昭和54年7月，同10月および55年5月に試験を行った

ので、それぞれを第1回、第2回、および第3回引張試験と区別して述べる。

1) 第1回試験における育苗経過、苗マットの性状および試験方法

(1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和54年5月18日。
- ② 播種日：昭和54年5月22日。
- ③ 播種量：3水準，1箱当り150g，200g，250g。
- ④ 品種：日本晴（昭和53年筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：畑土。
- ⑥ 催芽・緑化および硬化：育苗器内で2～3日間催芽した後，露地にて緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：17日間。
- ⑧ 灌水：1日2回，午前10時と午後2時に行った。
- ⑨ 育苗経過：全般に生育は順調であった。

(2) 苗および苗マットの性状

本試験で供試した苗および苗マットの性状を表2.15に示す。

Table 2.15 Physical properties of rice seedlings and mats

表 2.15 苗 および 苗 マ ッ ト の 性 状

	床土の種類	播種量 (g)	育苗日数 (日)	苗立数 (本/30cm <sup>2</sup> )	葉齢	根重 (g/30cm <sup>2</sup> )	含水比 (% db)	草丈 (mm)
第1回試験	畑土	150	17	51	2.7	—	88.6	166
		200	17	78	2.7	—	90.7	172
		250	17	108	2.6	—	90.4	161
第2回試験	畑土	150	31	66	2.8	1.10	91.3	170
		200	21	77	2.0	1.38	116.1	147
		200	26	91	2.4	1.34	105.1	163
		200	31	78	2.7	1.36	78.6	160
		250	31	96	2.5	1.68	109.0	147
第3回試験	畑土	150	20	71	2.7	1.33	99.3	100
		200	20	83	2.3	1.44	100.5	110
		250	20	96	2.8	1.82	110.9	88
	人工床土	150	20	62	2.7	1.22	34.3	127
		200	20	65	2.8	1.61	38.3	121
		250	20	100	2.8	1.73	46.9	104

(3) 試験方法

① 試験因子

本試験では、試験因子として播種量と引張速度を選び、各々3水準とした。播種量は1箱当り150g，200g，250gである。また、引張速度は50mm/min，100mm/min および200mm/minとした。

② 試験回数

上記各因子の全組合せに対して、3回の繰返し、計27回の試験を行った。

③ 試験日

昭和55年7月9日。

④ 試験方法

一枚の苗マットから、短辺70mm、長辺280mm、標点距離180mmの試験片を採取した。

試験装置は図2.30に示すように引張圧縮試験機に取り付け、クロスヘッドの移動がワイヤを介して引張を与えるようにした。引張力はロードセルで、伸びはクロスヘッドの移動量で検出した。

2) 第2回試験における育苗経過、苗マットの性状および試験方法

(1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和54年10月6日。
- ② 播種日：昭和54年10月11日～10月18日。
- ③ 播種量：3水準，1箱当り150g，250g。
- ④ 品種：日本晴（昭和53年度筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：畑土。
- ⑥ 催芽・緑化および硬化：育苗器内で4～5日開催芽した後，ガラス温室内で緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：3水準（21日，26日，31日）。
- ⑧ 灌水：1日1回，午前10時に行った。
- ⑨ 育苗経過：生育むらが見られ，あまり順調ではなかった。

(2) 苗および苗マットの性状

表2.15に苗および苗マットの性状を示す。

(3) 試験方法

① 試験因子

本試験では育苗日数と播種量を3水準とし，そのうち200g/箱に対しては育苗日数3水準を割り当て150gおよび250g/箱に対しては育苗日数31日を割り当てた。

② 試験回数

上記因子の組合せに対して，各2回の繰返し，計6回の試験を行った。

③ 試験日

昭和54年10月30日～11月10日。

④ 試験方法

試験方法は第1回試験と同様である。引張速度は10mm/minである。

3) 第3回試験における育苗経過、苗マットの性状および試験方法

(1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和55年5月4日
- ② 播種日：昭和55年5月6日～5月8日。
- ③ 播種量：3水準，1箱当り150g，200g，250g。
- ④ 品種：日本晴（昭和54年度筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：畑土および人工床土No11。
- ⑥ 催芽・緑化および硬化：育苗器内で2日間催芽した後，露地において緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：21日間。

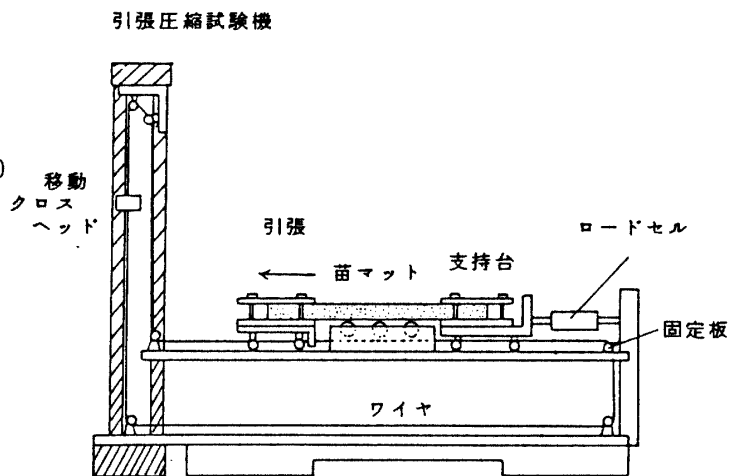


図2.30 引張試験装置と試験法

Fig. 2.30 Extension test device and test method

⑧ 灌水：1日2回，午前10時および午後3時に行った。

⑨ 育苗経過：生育は全般に良好であったが，畑土より人工床土の方が生育がよかった。

(2) 苗および苗マットの性状

表2.15に示すように，人工床土苗マットは畑土苗マットより約20~30mm草丈が高かった。

(3) 試験方法

① 試験因子

本試験では播種量3水準，床土2種類を試験因子とした。

② 試験回数：上記因子の組合せに対して，各3回の繰返し試験（計18回）を行った。

③ 試験日：昭和55年5月29日~5月31日。

④ 試験方法

試験方法は第1回試験と同様で，引張速度は10mm/minとした。

5.3 試験結果

変形を考慮に入れた3回の引張試験の結果をまとめて示す。

1) 引張破断の状態

試験片を引張ると，伸びに伴って引張力は増加するが，ある値に達すると試験片は破壊し始めて減少した。破壊は一気には生じず，徐々に進行する場合が多かった。また，破壊は1カ所で発生したり，数カ所で同時に発生したり，試験片によって各種各様であった。

塑性破壊のように，引張方向に対してある角度を持った面で破断する例もあったが，多くは波状の破断面が生じた（図2.31参照）。これは苗マットでは試験片における強度の分布にむらがあり，この部分から破断が進展するためと考える。破断は試験片の中央部付近で生ずる場合が多かった。

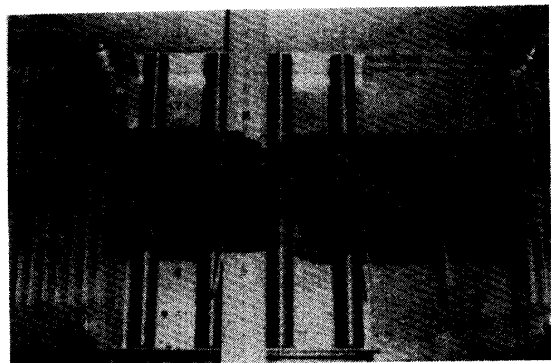


図2.31 苗マットの引張破断の状態  
Fig. 2.31 Failure state by extension of mat

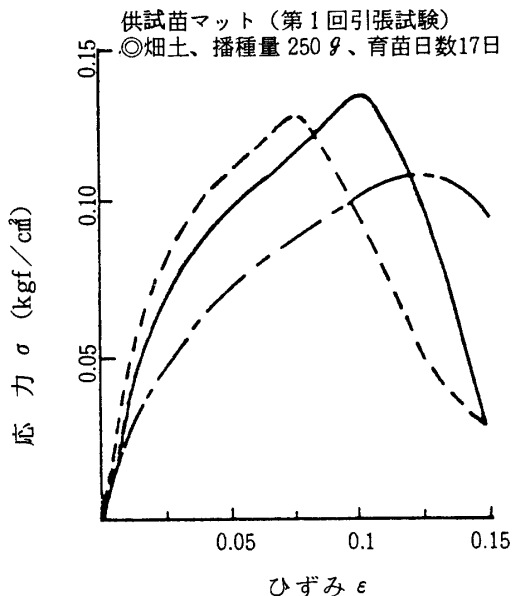


図2.32 引張における応力-ひずみ曲線  
Fig. 2.32 Stress-strain curves with extension

2) 応力-ひずみ曲線の特徴

本試験によって得た応力-ひずみ曲線の例を図2.32に示した。応力  $\sigma$  (kgf/cm<sup>2</sup>) およびひずみ  $\epsilon$  は次式で定義した。

$$\sigma = F / A_0 \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\epsilon = \Delta l / l_0 \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで，F (kgf) は引張力，A<sub>0</sub> (cm<sup>2</sup>) は試験片の初期断面積（約17.5cm<sup>2</sup>），l<sub>0</sub> (mm) および  $\Delta l$  (mm) はそれぞれ試験片の初期長さ（180mm）および伸び量を表わす。ここで定義したひずみは工学ひずみである。

図2.32に見られるように，応力-ひずみ曲線は引張開始時には比較的急に立上っているが，ひずみが増加すると勾配は徐々に減少し，応力の最大値が表れた後に下降する。最大応力値が生ずるのは巨視的破壊の発生時とほぼ一致していると見なす。応力-ひずみ曲線の下降部は試験片の破断が進行してい

る状態を表わす。

応力-ひずみ曲線の形状はどの試験片でも同様であったが、立上りの状態やピーク付近の形状に若干の差が見られた。例えば、立上り部に比較的明瞭な屈曲部があるものとなないものがあった。曲線形状の差異は播種量や床土の種類に影響されるようである。

応力-ひずみ曲線を簡単な関数で表現しておけば、苗マットの自動供給装置の設計などの応用上便利である。そこで、次の指数式でピークまでの応力-ひずみ曲線の関数表示を試みた。図2.33に示すように、応力-ひずみ曲線を両対数面に表示すると、ほぼ直線になり、本式は良好な近似曲線を与えることが明らかとなった。

$$\sigma = a \epsilon^n \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで  $a$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) および  $n$  は曲線の形状を決定する材料定数である。

3回の引張試験の結果より、最小自乗法によってこれらの材料定数を決定したところ、 $a$  の値は約  $0.1 \sim 0.4 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  の範囲にあり、 $n$  の値は約  $0.3 \sim 0.6$  の範囲であった。 $n$  の値は  $0.5$  付近のものが多く見られたので、引張における応力-ひずみ曲線は次式で表わしても支障ないものとする。

$$\sigma = a\sqrt{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

前述のたわみなどでも見たように、苗マットの变形は顕著な塑性成分を有するので、大きな变形を受けると係数  $a$  の値は変化することも考えうる。したがって、ここに示した  $a$  の値は苗箱から取出して大きな塑性变形を受けていない苗マットの引張に対して適用しうる値である。

3) 引張特性値

引張に対する苗マットの強度と変形性を検討するために、前述の応力-ひずみ曲線より下記の特性値を定義した(図2.34参照)。

- (a) 最大引張応力  $\sigma_{\max}$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) : 応力の最高値。
- (b) 最大ひずみ量  $\epsilon_{\max}$  : 最大引張応力発生時におけるひずみ量。
- (c) 割線係数  $E_{\max}$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) : 最大引張応力と最大ひずみ量の比。
- (d) 縦弾性係数  $E_e$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) : 変形初期(ここではひずみ  $\epsilon = 5.6 \times 10^{-3}$ )における応力値をこのひずみ量で除した値で、見かけ上の縦弾性係数と仮定した。

これらの特性値の内、最大引張応力は強度を表わし、他の特性値は変形性を表わす。表2.16に示すように、3回の引張試験における最大引張応力  $\sigma_{\max}$  はおよそ  $0.02 \sim 0.18 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  と10倍近い差があった。苗マットの長辺方向の引張を考えると、断面積がおよそ  $70 \text{ cm}^2$  であるので、 $1.39 \sim 12.60 \text{ kgf}$  程度の引張力で破断することになる。最大ひずみ量  $\epsilon_{\max}$

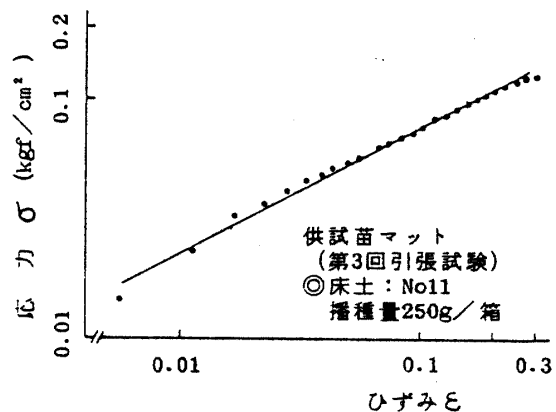


図2.33 両対数面に表示した応力-ひずみ曲線  
Fig. 2.33 A stress-strain curve described in log-log plane

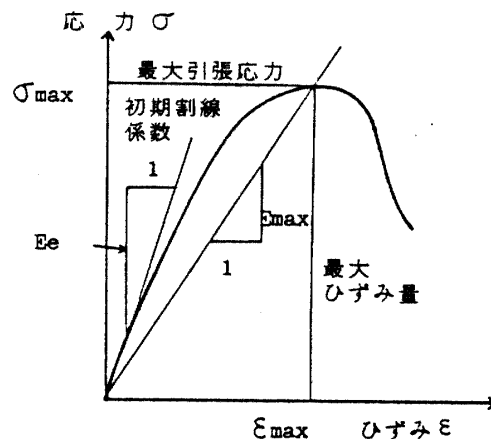


図2.34 引張特性値の定義  
Fig. 2.34 The definition of extension characteristics



は約 0.082 ~ 0.252 で、およそ 3 倍程度の差があった。50 cm の引張部分に対して苗マットは約 4.0 ~ 12.5 cm 伸びてから破壊を開始することを示しており、破断するまでにはかなり伸びることがわかった。

4) 引張特性値間の関係

上に定義した 4 個の引張特性値間の比較を行って、相互の関係を検討してみた。その検討結果の一例を図 2.35 に示す。同図より、最大ひずみ量  $\epsilon_{max}$ 、割線係数  $E_{max}$  および縦弾性係数  $E_e$  は最大引張応力  $\sigma_{max}$  の増加に伴って、それぞれ大きくなる傾向があることがわかった。特に、割線係数  $E_{max}$  以外は次式のように相関関係が見られた。

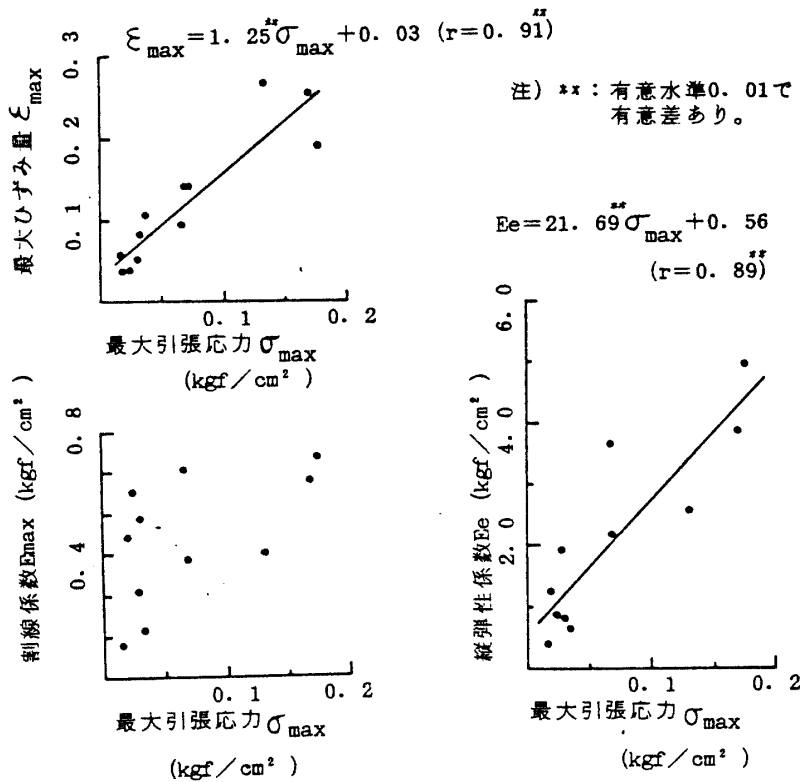


図 2.35 引張特性値間の相互関係

Fig. 2.35 Interrelationships of some extension characteristics

$$\epsilon_{max} = 1.25 \sigma_{max} + 0.03 \quad (r = 0.91) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$E_e = 21.69 \sigma_{max} + 0.56 \quad (r = 0.87) \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ここに  $r$  は相関係数を表わす。これらの関係より、引張において大きな強度を持つ苗マットは変形抵抗が大きく、かつ、大きな変形性を示すといえる。

また図 2.36 に示すように、割線係数  $E_{max}$  と縦弾性係数  $E_e$  の間にも直線関係が見られる。

以上より、苗マットの最大引張応力  $\sigma_{max}$  すなわち、引張強度を知れば、その苗マットの引張特性値の傾向はだいたい把握しうるのではないかと期待される。

5) 引張特性値と試験因子との関係

前述のように、苗マットによってその引張特性値には大きな差がある。そこで引張特性値に影響する因子を明らかにするために、3 回の引張試験における因子すなわち引張速度、播種量、育苗日数、床土の種類および育苗時期と引張特性値の関係を分析した。

その結果は次の通りである。

Table 2. 16 Extnsion characteristics

表 2.16 引張特性値

	試験条件		最大引張応力 $\sigma_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大ひずみ量 $\epsilon_{max}$	縦弾性係数 $E_e$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	割線係数 $E_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
	播種量 (g/箱)	引張速度 (mm/min)				
第一回引張試験	150	50	0.077	0.048	6.223	1.701
		100	0.090	0.070	7.913	1.320
		200	0.074	0.056	6.487	1.320
	200	50	0.110	0.080	5.990	1.374
		100	0.104	0.086	5.860	1.214
		200	0.099	0.066	4.110	1.505
	250	50	0.135	0.102	6.807	1.397
		100	0.130	0.097	6.513	1.386
		200	0.119	0.093	5.123	1.317
第二回引張試験	150	30	0.016	0.056	0.397	0.279
		20	0.020	0.037	1.278	0.545
	200	25	0.031	0.052	0.814	0.595
		30	0.025	0.016	0.871	0.649
	250	30	0.034	0.108	0.645	0.318
第三回引張試験	畑土	播種量				
		150	0.031	0.082	1.929	0.410
		200	0.066	0.097	3.684	0.695
	人工床土 No 11	250	0.070	0.144	2.179	0.479
		150	0.170	0.252	3.851	0.675
		200	0.139	0.193	4.875	0.744
		250	0.132	0.269	2.566	0.500

(1) 引張速度

第1回試験における引張速度50~200 mm/minの範囲内では、引張特性値に対する明確な影響は見られなかった。

(2) 播種量

図2.37に3回の引張試験の畑土における引張特性値と播種量の関係を示す。同図によれば、播種量が150~250 g/箱の範囲で増加すれば、最大引張応力  $\sigma_{max}$  および最大ひずみ量  $\epsilon_{max}$  は直線的に増加する傾向が見られる。すなわち、播種量が増えると苗マットが強くなるとともに、破壊までのひずみ量も大きくなることを示している。一方、割線係数  $E_{max}$  あるいは縦弾性係数  $E_e$  と播種量の間には明確な関係は見られなかった。

(3) 育苗日数

第2回引張試験結果の分散分析によると、育苗日数は引張特性値に影響するが、相関関係は把握できなかった。

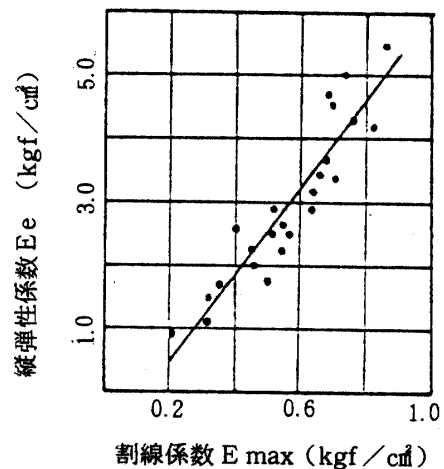


図 2.36 割線係数と縦弾性係数との関係  
Fig. 2.36 Relationships between the secant modulus and the longitudinal elastic modulus

(4) 床土の種類

第3回試験において供試した2種類の床土による苗マットの引張特性値には顕著な差があった。例えば、引張強度  $\sigma_{max}$  について見ると、畑土では約0.02~0.07 kgf/cm<sup>2</sup>であるのに対して、人工床土では約0.10~0.17 kgf/cm<sup>2</sup>となった。床土の種類によって苗マットの力学特性に差ができる傾向は、前述のようにたわみ特性や分離特性にも見られた。この原因としては床土の力学的性質の違いによることも考えうるが、苗作りにその土壌が適しているか否か、また、一定期限内での根の伸長状態などが異なることによるものとも考えうる。

(5) 根重

たわみ特性や分離特性で分析したように、引張特性値に対する根の状態の影響を、根重を測度として検討した。図2.38に畑土における根重と最大引張応力  $\sigma_{max}$  との関係を示す。同図に示すように、根重が増加すると最大引張応力は増加しており、分離やたわみと同様の結果を得た。この関係を直線回帰したら次式が得られた。

$$\sigma_{max} = 0.066 R - 0.056 \quad (r = 0.68) \quad (2.9)$$

ここにR (g/30cm<sup>2</sup>)は根重を表わし、1.1 < R < 1.9である。

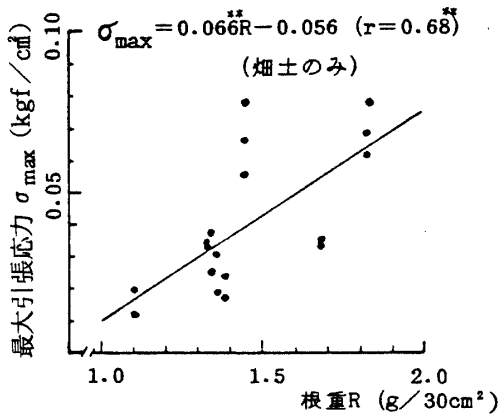


図2.38 根重と最大引張応力の関係

注) \*\*: 有意水準0.01で有意差あり。

Fig. 2.38 Relationships between the root weight and the maximum extension stress

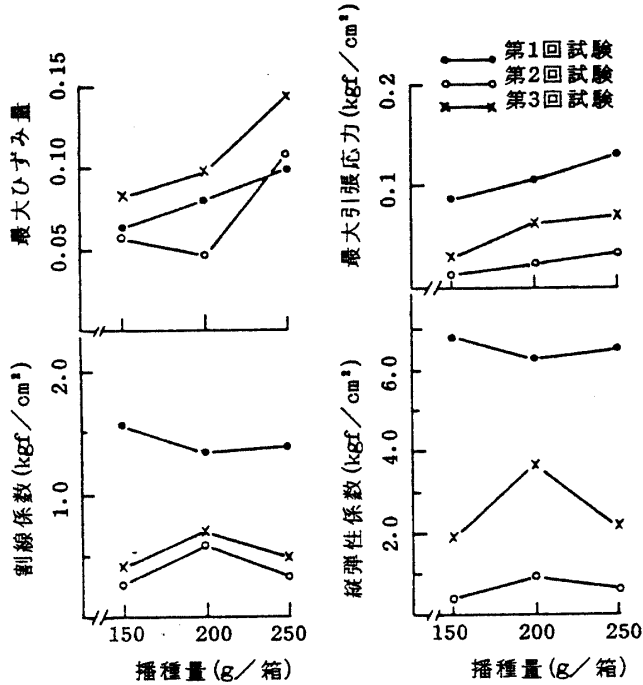


図2.37 播種量と引張特性値との関係

Fig. 2.37 Relationships between the planting density and the extension characteristics

同図に示すように、根重が増加すると最大引張応力は増加しており、分離やたわみと同様の結果を得た。この関係を直線回帰したら次式が得られた。

最大引張応力  $\sigma_{max}$  と根重の関係におけるばらつきは育苗条件が異なることに起因していると考えうる。すなわち、苗マットの内部構造は根重だけでは十分に表われないために、根重で整理すると、最大引張応力にばらつきが生じたものと解釈できる。

(6) 育苗時期

畑土苗マットを例にとると、育苗時期の差すなわち第3回試験の5月育苗と第2回試験の10月育苗の苗マットでは、最大引張応力  $\sigma_{max}$  には2倍程度の差があった。一方、根重には育苗時期による大差は見られないので、これは気象条件などを含めた育苗条件によって、根の状態に大きな差が生じたためであろう。

以上、苗マットの引張特性値は育苗条件に大きく依存することと、根の成長に適した床土を選択すべきことが明らかとなった。

6. 引張特性のモデル的考察

上述のような苗マットの引張特性を大まかに把握するために、単純な複合材料モデルを用いて分析を行う。

苗マットは種子扱から種子根と冠根が伸びて、付近の種子扱から伸びた同様の根と複雑に絡まっている。また各々の根からは無数の側根が発生している<sup>29)</sup>。

苗マットの中から小さな要素を取り出してそれに引張力が作用する場合を考える。引張方向と一致している根については、引張力の大半は根に直接作用し、残りが側根による抵抗および床土との摩擦力として周囲の床土に作用している。引張方向と一致していない根については、引張力は根の方向の分力、直角方向に根が床土を圧する力および摩擦力、さらに側根による抵抗力とに分解できる。引張方向と根の方向のずれが大きくなると、根が発揮しうる引張力は小さくなる(図2.39参照)。

このように引張では根の効果が大きいので、引張特性を詳細に議論するには根の分布状態と強度分布、根と床土の摩擦力などを仮定して統計的に扱う方法が考えうる。しかるに、この方法は十分に発達していないので、本研究では根の状態を単純化して引張方向と平行な2組の根部と床土部分からなるモデル要素を考えた。引張力がある限度内に達するまでは、根と床土は接着しているが、限界に達するとすべりが生ずるものと仮定する。

図2.40において、モデル要素を引張って(A)の状態から(B)の状態に変化させる場合を考える。要素の中央部にくびれが生じない場合には、引張力はほとんど根に直接作用する。一方、くびれが生ずる場合には、根と床土の接着を剥離する引張方向に直角な力Pが作用し、この力が大きくなると根と床土は離れて、引張力は根のみに作用する。引張力がさらに大きくなり、根の引張強度に達すると、根が切れ始めて伸びが増大する。この過程において引張力は最大値を示す。切断した根は床土との摩擦抵抗しか発揮しえず、また床土の引張抵抗はほとんどないので、要素が伸びると引張力は急減して、(C)の状態に示すように要素は破壊する。

したがって、このモデル要素の挙動より苗マットの引張特性は根の量とその強

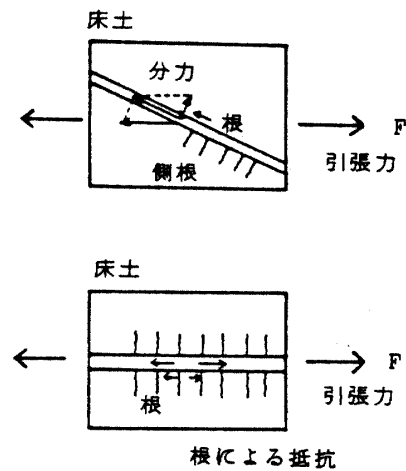


図2.39 引張における根の効果  
Fig. 2.39 The effect of root in extension

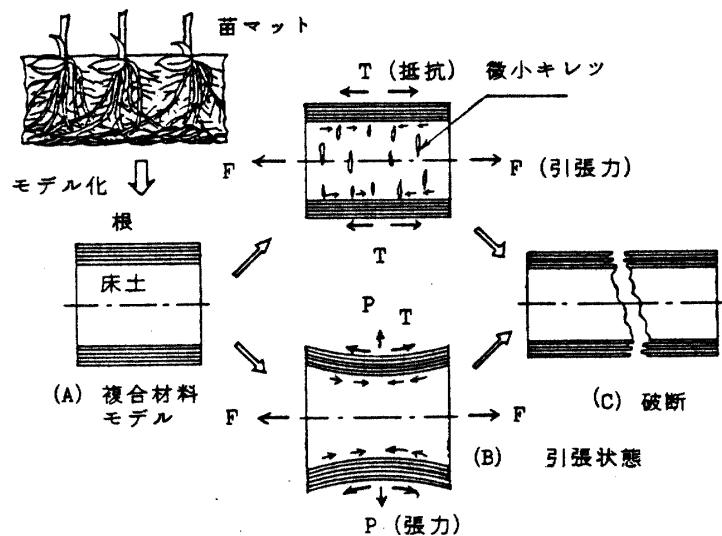


図2.40 苗マットモデルの引張挙動  
Fig. 2.40 Extension behaviours of a model of mat

度の大小に大きく依存することがわかる。さらに、モデルの根部に一箇所でも弱い部分があると、そこから破壊が生ずることが推察される。

## 7. 結語

本節では、苗マットの変形挙動の中でも特有な挙動を示す引張を取り上げて、実験的な検討を行った。

a) 引張試験法について多方面から検討し、試験法の改良を行った結果、一応満足しうるデータの得られる装置と方法を開発できた。

b) 10月に育苗した畑土苗マットの引張強度は約0.02~0.08 kgf/cm<sup>2</sup>であった。この引張強度は根重が増加すると直線的に大きくなる傾向が見られた。

c) 数種類の人工床土苗マットの引張強度は約0.01~0.22 kgf/cm<sup>2</sup>と床土の種類によって大きな差があった。

d) 引張における苗マットの応力-ひずみ曲線は、接線勾配が漸減する山形の曲線で、生育状態により若干の差はあるが、そのパターンはどの苗マットでも同様であった。

e) ピークまでの応力-ひずみ曲線を次式で関数近似しうることを示した。

$$\sigma = a \varepsilon^n \quad (\sigma: \text{応力}, \varepsilon: \text{ひずみ}, a, n: \text{材料定数})$$

また、大まかな近似には

$$\sigma = a\sqrt{\varepsilon}$$

で十分であることが明らかとなった。

f) 応力-ひずみ曲線より、最大引張応力、最大ひずみ量、割線係数および縦弾性係数の4個の引張特性値を定義して苗マットの引張特性の分析を行った。これらの特性値の比較を行ったところ、相互関係があり、最大引張応力すなわち引張強度を代表特性値と見なしうることを示した。供試苗マットの最大引張応力はおおよそ0.02~0.18 kgf/cm<sup>2</sup>で、これが大きいほど最大ひずみ量および縦弾性係数は大きくなった。

g) 引張特性値に対する引張速度、播種量、育苗日数、床土の種類、根重および育苗時期の影響を検討し、床土の種類、根重および育苗時期の影響が大きいことを明らかにした。特に、同じ床土の苗マットでは引張特性は根の状態によって規定されるが、これらの関係は根重だけでは表現できなかった。

h) 単純なモデルを導入して苗マットの引張挙動の分析を行った。この分析によって根の状態が引張に与える影響を示し、実験結果の説明を行った。

## II. 5 圧縮特性<sup>57-59)</sup>

### 1. はじめに

本節では苗マットの圧縮特性を取り上げて分析を行う。

通常観察されるように、床土は引張と圧縮に対して異なった挙動を示す。すなわち、引張に対する抵抗はほとんどないが、圧縮に対してはかなりの抵抗を発生する。このような床土の力学的性質の非対称性は苗マットの力学的性質にどのように反映するであろうか。また、圧縮に対する苗マットの強度はどの程度か。さらに、苗マットの圧縮特性にはいかなる因子が影響するか。

これらを検討するために、圧縮試験を実施し、圧縮における応力-ひずみ曲線の関数近似を行うとともに圧縮特性値を定義して分析を行う。また繰返し負荷試験を行い、圧縮に対する苗マットの弾塑性的な性質を調べる。さらに、圧縮特性と引張特性を比較し、その相違点を整理する。最後に単純な複合材料モデルを導入して、その力学挙動を分析することによって、圧縮特性の説明を試みる。

### 2. 苗マットの圧縮特性

#### 2.1 目的

ここでは圧縮における応力-ひずみ曲線の分析と影響因子の分析によって、圧縮特性を明確にすることを目的とする。

2.2 研究方法

本研究では、昭和54年7月、同54年10月および昭和55年5月の3回、圧縮試験を行った。そこで、試験法に関してはそれぞれ第1回、第2回および第3回試験と区別して述べる。

1) 第1回試験

(1) 床土の種類と性状

床土としては表2.1の畑土を用い、その性状は表2.2に示してある。

(2) 育苗経過

- ① 浸種：昭和54年6月22日。
- ② 播種日：昭和54年6月26日。
- ③ 播種量：3水準、1箱当り150g、200g、250g。
- ④ 品種：日本晴（昭和53年度筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：畑土。
- ⑥ 催芽・緑化および硬化：育苗器内で2～3日間催芽した後、露地において緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：17日間。
- ⑧ 灌水1日2回、午後10時と午後2時に行い、蒸散が著しい時は追加した。
- ⑨ 育苗経過：生育は全般に順調であったが、やや高温障害を受けた苗も見られた。

(3) 苗および苗マットの性状

供試した苗および苗マットの性状を表2.17に示す。

(4) 試験方法

① 試験因子

本試験では、播種量を上記の3水準、圧縮速度を10mm/min、20mm/min および50mm/minの3水準変化させた。

② 試験回数

上記各因子の全組合せに対して、3回の繰返し、計27回の圧縮試験を行った。

③ 試験日

昭和54年7月12日

④ 試験方法

図2.29で述べた引張試験装置の引張部を図2.41に示す圧縮器具に交換して、引張圧縮試験機に装着した。圧縮器具は固定平板と、レール上の台車より構成されている。台車は試験機のクロスヘッドに結ばれたワイヤによって定速で移動し、試験片を圧縮する。圧縮力は固定平板に取り付けてあるロードセルで検出した。圧縮変位はクロスヘッドの移動量に等しいと考えた。ひずみ-0.2になる部分まで圧縮した。

試験片は70×70mmの寸法とした。

各播種量の苗マットから9個ずつ採取し、3水準の圧縮速度に対して3個ずつ供試した。

Table 2.17 Physical properties of mats

表 2.17 第1回圧縮試験における苗マットの性状

播種量 (g)	苗立数 (本/30cm <sup>2</sup> )	葉齢	草丈 (mm)	含水比 (% db)
150	59	3.0	130	101.0
200	84	2.8	135	105.8
250	109	2.7	131	105.4

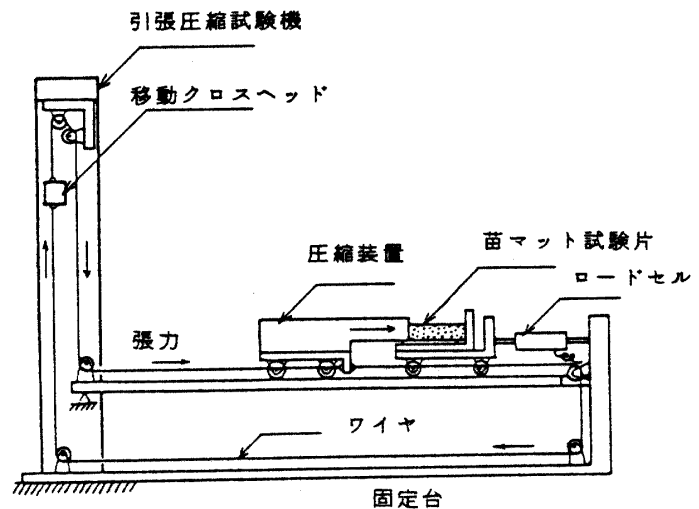


図 2.41 圧縮試験装置

Fig. 2.41 Compression test device

## 2) 第2回試験

## (1) 育苗経過, 苗マットの性状

本試験は, 昭和54年10月~11月において, II. 4における第2回引張試験と同じ苗マットを供試して行った。育苗経過や苗マットの性状はII. 4節で述べた通りである。

## (2) 試験方法

## ① 試験因子

本試験では, 播種量と育苗日数を試験因子とした。播種量は1箱当り150g, 200g, 250gの3水準とし, 育苗日数は21日, 26日, 31日の3水準である。育苗日数が長いのは育苗時期が秋期のため, 苗の生育が良くなかったことによる。

## ② 試験回数

上記因子のうち, 播種量200gの苗マットについては3水準の育苗日数をそれぞれ割付け, 播種量150gおよび250gの苗マットは育苗日数31日の組合せとした。これらの組合せに対して2回ずつ繰返したので, 計10回圧縮試験を行ったことになる。

## ③ 試験日

昭和54年10月30日~11月10日。

## ④ 試験方法

試験方法は第1回試験に準じて行った。試験片の寸法は70×70mmで, 各播種量の苗マットに対してそれぞれ2個採取した。圧縮速度は10mm/minとした。

## 3) 第3回試験

## (1) 育苗経過, 苗マットの性状

本試験は昭和55年5月において, II. 4で述べた第3回引張試験と同じ苗マットを供試して行った。育苗経過, 苗および苗マットの性状は前述の通りである。

## (2) 試験方法

## ① 試験因子

本試験では播種量と床土の種類を試験因子とした。播種量は1箱当り150g, 200g, 250gの3水準とした。また, 床土としては表2.1の畑土と床土番号No.11の人工床土を用いた。

## ② 試験回数

上記の播種量と床土の全組合せに対してそれぞれ3回ずつ, 計18回の圧縮試験を行なった。

## ③ 試験日

昭和55年5月29日~5月31日。

## ④ 試験方法

試験は前回と同様の方法で行った。今回は試験片の寸法を70×30mmとし, 圧縮における破壊状態の観察を試みた。試験片は1枚の苗マットから3個ずつ採取した。

## 2.3 試験結果と考察

第1回~第3回圧縮試験で得た結果を一括して示し, 若干の考察を行う。

## 1) 苗マットの圧縮状態

苗マットは小さな圧縮でも比較的容易に変形し, 圧縮ひずみが大きくなると苗立方向(苗マットの表面方向)にたわみ始め, やがて座屈する傾向が見られた。これは苗マットの底面と表面とでは根の分布が異なっているために, 表面の方が圧縮に対して弱いことに起因すると考える。

座屈が生じない場合でも, 圧縮ひずみが0.2程度になっても破壊が生じた例は全試験において2例にすぎなかった。試験片の圧縮状態および破壊の状態を図2.42に示す。また横方向の変位は左右対称に生じない場合が多く見られた。

## 2) 応力-ひずみ曲線

上述のように苗マットは圧縮変形しやすいが、破壊し難い性質がある。そこで応力-ひずみ曲線について詳しい分析を行ってみた。

応力とひずみは引張特性において定義した式(2.6)および(2.7)を使用した。なお、圧縮力および圧縮変位を負の値としたので、応力とひずみはいずれも負の値である。

図2.43に本研究で得た応力-ひずみ曲線の1例を示す。同図のようにひずみ量-0.2程度までは、応力-ひずみ曲線はほぼ直線もしくは横軸に対して凸の形状であり、引張とは非常に異なった曲線パターンを得た。なお、応力-ひずみ曲線の勾配が逆に減少したのは、破壊が生じた2例にとどまった。

圧縮における応力-ひずみ曲線を引張の場合と同様に次式で近似した。

$$\sigma = a \epsilon^n \dots\dots\dots (2.9)$$

ここに、 $a$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) および  $n$  は材料定数である。 $a$  の値は約  $0.8 \sim 4.1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 、指数  $n$  の値は約  $0.8 \sim 1.3$  で  $1.0$  付近のものが多かった。したがって次の直線の式で概ね近似しうる。

$$\sigma = a_c \epsilon \dots\dots\dots (2.10)$$

本式の適用範囲は  $-0.3 < \epsilon < 0.0$  である。

このように、苗マットの圧縮における応力-ひずみ曲線は、見かけ上 Hooke の法則を満足しているが、後述するように圧縮ひずみは塑性成分が大きいので、以前に受けた荷重によって大きな塑性変化を生じている場合には上式は使えなくなることもありうる。ただし、苗箱から取り出した直後の苗マットの圧縮に対しては、十分に適用しうる式である。本式によると1枚の苗マットを長辺方向にひずみ-0.1 すなわち  $6 \text{ cm}$  圧縮する場合にはおよそ  $5.6 \sim 28.1 \text{ kgf}$  の圧縮力が必要である。

3) 圧縮特性値

本圧縮試験では破壊状態に達しなかったので、圧縮強度は得られなかった。そこで応力-ひずみ曲線より、式(2.10)の係数  $a_c$  および、ひずみ-0.2、-0.4における圧縮応力  $\sigma_{-0.2}$ 、 $\sigma_{-0.4}$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) を特性値として、圧縮における変形性を検討した。なお、直線勾配  $a_c$  は見かけ上の縦弾性係数  $E_c$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) と考えることにする。

3回の圧縮試験で得た圧縮特性値を表2.18に示す。これらの特性値のうち縦弾性係数  $E_c$  はおよそ  $0.8 \sim 4.1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  であった。表2.15に示したように、引張における縦弾性係数  $E_e$  は約  $0.4 \sim 8.9 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  で、引張の値が圧縮の値より全般に大きかった。

圧縮特性値における応力-ひずみ曲線はほぼ直線であったので、上述の圧縮特性値間には密接な関係がある。

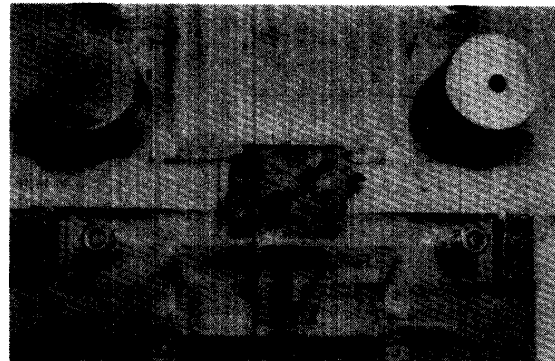


図2.42 苗マットの圧縮状態  
Fig. 2.42 Compression state of mat

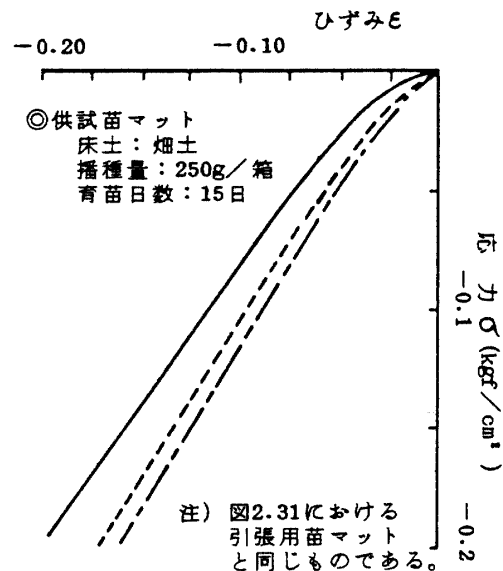


図2.43 圧縮における応力-ひずみ曲線  
Fig. 2.43 Stress-strain curves in compression



Table 2.18 Compression characteristics

表2.18 圧縮特性値

	播種量 (g)	ひずみ-0.2における 圧縮応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )		ひずみ-0.4における 圧縮応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )		縦弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
		最小値	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値
第1回 試験 (畑土)	150	0.18	0.25	-	-	0.90	1.16
	200	0.17	0.23	-	-	0.95	1.18
	250	0.20	0.28	-	-	1.11	1.56
第2回 試験 (畑土)	150	0.19	0.22	-	-	0.93	1.11
	200	0.17	0.33	-	-	0.78	1.70
	250	0.21	0.24	-	-	1.04	1.22
第3回 試験	畑土						
	150	0.17	0.24	0.35	0.66	1.35	1.68
	200	0.23	0.37	0.28	0.74	2.29	3.41
	250	0.28	0.36	0.51	1.16	1.41	1.92
	人工床土No 11						
	150	0.34	0.51	0.90	1.35	1.62	2.77
200	0.50	0.66	1.41	1.71	3.23	4.07	
250	0.35	0.42	1.11	1.40	1.25	1.63	

※ 圧縮応力値は負号を抜いてある。

#### 4) 圧縮特性値と試験因子との関係

表2.18に示すように、育苗条件によって苗マットの圧縮特性にはかなりの差がある。そこで、本研究で設定した試験因子すなわち圧縮速度、播種量、育苗日数、床土の種類、およびその他の因子として育苗時期、根重などと圧縮特性値との関係を検討した。

##### ① 圧縮速度

第1回試験において10~50mm/minの範囲で圧縮速度を変化させたが、10mm/minの圧縮速度においてひずみ-0.2の圧縮応力  $\sigma_{-0.2}$  の平均値は約-0.19 kgf/cm<sup>2</sup>、圧縮速度50mm/minでは約-0.23 kgf/cm<sup>2</sup>で1.2倍程度の差が見られた。また育苗条件は同じでも、圧縮速度が大きくなれば縦弾性係数  $E_c$  はやや大きくなる傾向があった。

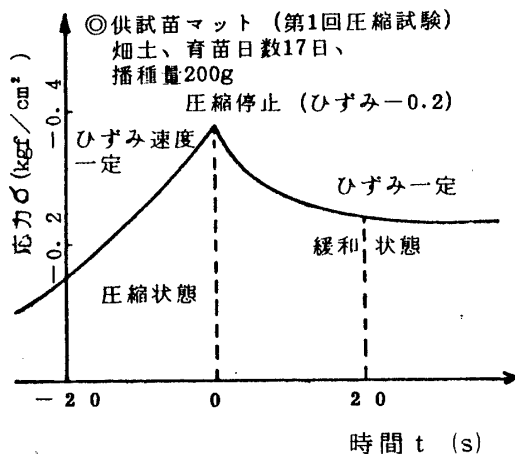


図2.44 応力緩和現象

Fig. 2.44 Phenomenon of stress relaxation

このように苗マットは圧縮速度が大きくなると変形抵抗が増加するが、これは苗マットは圧縮に対して粘性的な応答を示すことを意味する。これに関連してあるひずみ量で圧縮を停止すると応力の緩和現象が生ずることを確認した(図2.44参照)。圧縮ひずみ-0.2で圧縮を停止すると応力は急速に低下した後安定し、5・6分間ではほぼ平衡に達して、圧縮停止直前の応力値に対して25%程度の応力降下が見られた。

##### ② 播種量

分散分析によると圧縮特性値は播種量にいく分影響されることが明らかになった。縦弾性係数  $E_c$  は播種量が増えると直線的に増加する傾向が見られた。一方、圧縮ひずみ0.2における

応力値  $\sigma_{-0.2}$  については播種量との明確な関係はなかった。

③ 育苗日数

育苗日数と圧縮特性値との間には相関関係は認められなかった。

④ 床土の種類

本試験で用いた畑土および人工床土苗マットでは圧縮特性値に大きな差があった。例えば、縦弾性係数  $E_c$  は畑土苗マットでは平均  $1.9 \text{ kgf/cm}^2$ 、人工床土苗マットで平均  $2.5 \text{ kgf/cm}^2$  であった。この差は後述するように床土の力学的特性に依存するものと考えられる。

⑤ 根重

引張、分離あるいはたわみ特性に対して、根重は重要なパラメータの1つであった。ところが、圧縮では根重が増加しても縦弾性係数  $E_c$  は若干大きくなる傾向はあったが、全般に明確な相関関係は得られなかった。

⑥ 育苗時期

畑土苗マットについて、3回の圧縮試験における5月、7月および10月育苗のものとの圧縮特性値を比較したが、明確な差は見られず、ほぼ近い値であった。これを上記の根重の影響などとも合わせて考えると、苗マットが圧縮に対して示す抵抗は、根の状態よりもむしろ床土の力学的性質に依存する割合が大きいことを意味している。

3. 圧縮における苗マットの弾塑性的性質

苗マットを圧縮した後、力を抜いてもその変形はほとんど元に戻らないことは経験的に知られている。すなわち、苗マットは非常に塑性に富む材料である。そこで圧縮変形において塑性成分がどの程度含まれているかを検討した。

前述の第3回試験において、ひずみ量  $-0.3$  すなわち  $70\text{mm}$  の試験片を  $21\text{mm}$  圧縮してから除荷したら、回復量は全変形量のおよそ  $1/10 \sim 1/6$  であった。これより塑性成分は弾性成分の  $5 \sim 10$  倍程度大きいことが明らかになった。このことは田植機による移植作業において十分に注意しておかないと、大きな圧縮を受けた状態で苗マットが苗載台に置かれた場合には必要以上に多くの苗が植付けられ、大量の苗マットを必要とすることも考えられる。

塑性変形の状態をさらに詳しく見るために、繰返し圧縮試験を行った。  $30 \times 70\text{mm}$  の畑土苗マットの試験片を  $10\text{mm/min}$  の速度で圧縮し、ひずみ量  $-0.1$  の状態より除荷した。除荷速度は  $10\text{mm/min}$  である。圧縮力が零の状態になったら再び圧縮を開始し、ひずみ量  $-0.13$  より除荷し、さらに負荷を行った。

本試験で得られた応力-ひずみ曲線を図 2.45 に示す。負荷曲線  $OA$  は勾配が漸増する直線に近い形状で、他の苗マットと同様の傾向が得られた。除荷開始時の曲線は勾配が急であるが、除々に勾配は小さくなっている。再負荷曲線は  $BC$  および  $EF$  に見られるように、直線に近く、 $C$  点において急激に曲がり、初期の負荷曲線  $OA$  を延長した線に一致する。

繰返し負荷によって得られる除荷・再角

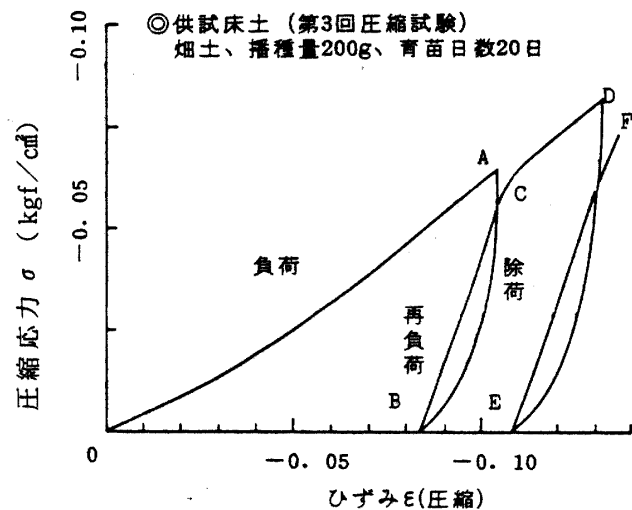


図 2.45 繰返し圧縮試験における応力-ひずみ曲線  
Fig. 2.45 Stress-strain curve in cyclic compression test

荷曲線は同様のパタンを示した。再負荷曲線の勾配はほぼ等しいので、再負荷曲線の立上り部分は弾性変形が主体である。したがって、最初の負荷曲線の見かけは直線でも、多くの塑性成分を含んでおり、連続体力学的な考察を行う際には注意する必要があることがわかる。

さらに、繰返し過程における応力-ひずみ曲線には顕著なヒステリシス・ループが見られた。同様なヒステリシス・ループは前述のようにたわみにおいても表れた(Ⅱ.2参照)。ループ内の面積は除荷・再負荷過程において消費されたエネルギーを示す<sup>40)</sup>。

#### 4. 苗マットの横変位

これまでは主に圧縮方向の変形特性について検討してきたが、横方向の変形特性に関する検討は行わなかった。これは図2.42に見られるように横変位が一定せず、測定が困難なことも一因であった。

そこで第3回圧縮試験において、試験片の真上にテレビカメラを置き、圧縮状態をモニターテレビに写しながら横変位の測定を試みた。多くの試験片は左右の変位量が異なったり、不均一であった。

図2.46に横変位の測定例を示す。図のように、苗マットの横変位はかなり大きく、見かけのポアソン比は0.5程度もしくはそれ以上であった。なお、大半のデータは左右の変位量が異なっていたので横変位に関する十分な検討はなし得なかった。

#### 5. 圧縮特性と引張特性との比較

Ⅱ.4で述べた引張に対する苗マットの応答と、圧縮に対するそれとではいくつかの相違点があったが、その主なものについて整理すると次のようになる。

(a) 苗マットが破壊する時の応力やひずみは引張の方が小さい。圧縮ではかなり大きなひずみが生じて大半は破壊しなかった。

図2.46 圧縮における横ひずみの測定例

Fig. 2.46 Examples of lateral strain in compression

(b) 応力-ひずみ曲線は引張、圧縮ともに指数式で近似できたが、引張では勾配が漸減する山形の形状であるのに対して、圧縮では直線もしくは横軸に対して凸の曲線であった。

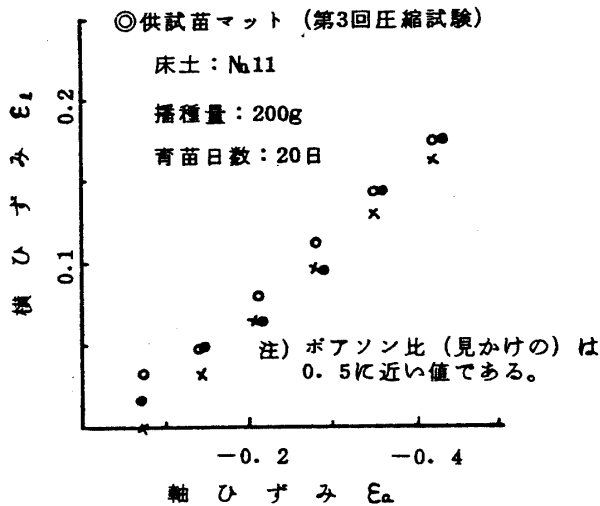
(c) 見かけの縦弾性係数を比較すると、圧縮より引張の方が全般に大であった。なお、両者には高い相関関係があった。

(d) 引張特性値は播種量や根重といった苗マットの根の状態を表わす因子に大きな影響を受けたのに対して、圧縮ではこれらの影響はそれほど小さくなく、むしろ床土の力学的な性質に大きな影響を受けた。

#### 6. 圧縮特性に関する力学的分析

本節で得た圧縮特性に対して、庄土と根より構成された単純なモデルを導入して、簡単な分析を行った。

図2.47および2.48にモデル要素とその圧縮挙動を示す。図2.47のように苗マットの圧縮では根と圧縮力の方向に関係なく、根の影響はほとんどないものとする。そこで、図2.48(A)に示すような根部と床土よりなるモデルを導入した。これは引張で導入したモデルと同じものである。同図において(A)の状態から圧縮すると、根は圧縮に対する抵抗を持たないので、圧縮力は床土のみに作用する。圧縮ひずみが増加して床土が側方に押し出され、(B)の状態になった場合を考える。床土の側方変位が大



きくなると根に引張力が発生し、床土の側方変位を阻止する力となるために、要素の圧縮抵抗は増加する。この引張力が根の引張強度に達すると根は切断され、さらに床土の圧縮強度に達すると(C)に示すように、要素は破壊する。

したがって、変形が大きくなった状態で、根は圧縮強度をいくらか増加させるが、引張に比べると床土の力学的性質への依存度が高いといえる。前述のように引張に対しては、床土の力学的性質よりも根の影響が大きいと仮定して、苗マットの力学特性を分析した。このような引張と圧縮における根と床土の効果に関する定性的な仮説に基づいて、苗マットの引張特性と圧縮特性の相違点を次のように説明する。

まず、根の引張強度はそれほど大きくないので苗マットは低い引張応力で破壊する。根の縦弾性係数は床土の見かけの縦弾性係数より大きいため、苗マットの縦弾性係数は圧縮より引張の値が大きくなる。また、根の力学的性質は育苗条件によって変化すると仮定すれば、育苗条件の影響は圧縮特性より引張特性に顕著に表れる。

7. 結語

ここでは苗マットの圧縮特性について検討を行い、次の結果を得た。

a) 圧縮における応力-ひずみ曲線はゆるやかな横軸に対して凸の曲線か、もしくは直線であり次式で表現しえた。

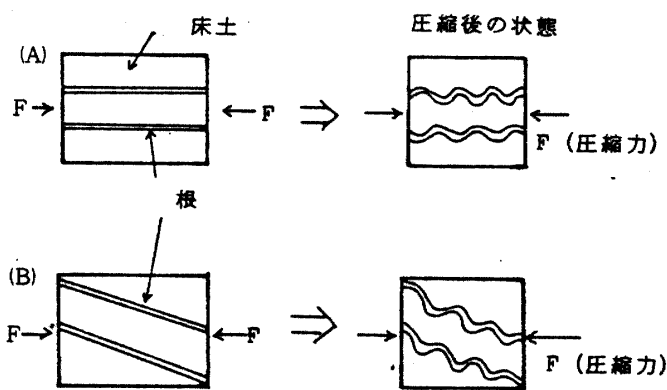
$$\sigma = a_c \epsilon \quad (\sigma: \text{応力}, \quad \epsilon: \text{ひずみ}, \quad a_c: \text{材料定数})$$

b) 圧縮における見かけの縦弾性係数は約 0.8 ~ 4.1 kgf/cm<sup>2</sup>であった。

c) 圧縮特性値は圧縮速度、床土の種類に大きな影響を受けるが、根重などの育苗条件にはあまり影響を受けなかった。

d) 苗マットは圧縮において大きな塑性変形を含み、ひずみ-0.3 では塑性成分が弾性成分の5~10倍程度大きいことを明らかにした。

e) 繰返し圧縮試験における応力-ひずみ曲線の分析によって、苗マットの弾塑性変形の特徴を明



(A) では根の方向と力の方向が一致している。

(B) では根と力の方向は一致していない。

図 2.47 圧縮における根の役割

Fig. 2.47 Roll on roots in compression

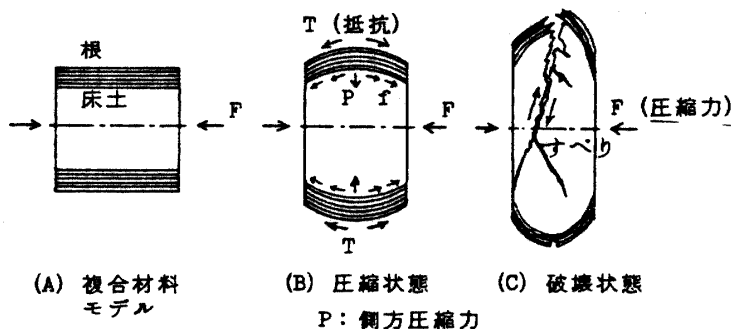


図 2.48 苗マットモデルの圧縮挙動

Fig. 2.48 Compression behaviour of the model of mat

らかにした。

f) 圧縮における横変位に関しては十分なデータは得られなかったが、見かけのポアソン比は0.5程度ありかなり大きい。

g) 引張特性と圧縮特性の相違点を整理すると、前者は主に根の状態に、後者は同じく床土の力学的性質に影響を受けることがわかるが、これに関しては単純な苗マットのモデルを仮定して定性的に説明した。

## II. 6 せん断特性<sup>57, 59)</sup>

### 1. はじめに

せん断は材料が力を受ける際には必然的に発生する基本的な作用の一種である。材料の破壊論において最大せん断応力説<sup>38, 39)</sup>などがあるように、破壊や強度などと密接な関係があるので、引張や圧縮と並んで解明すべき力学挙動であろう。特に、苗マットでは移植作業において植付爪による掻取り工程のように、せん断が主な作用となる場合もある。

土の力学において、また金属材料の塑性挙動を考える上でせん断は最も重要な現象であり、せん断特性に関する無数の研究が報告されている<sup>61)</sup>。したがって、苗マットの塑性挙動の分析を行うに際してはそのせん断特性を十分に把握しておかねばならない。

苗マットは床土と根から構成された複合材料であるが、引張・圧縮特性で述べたように力の作用の仕方によって、根と床土の影響の表れ方が異なった。そこで、せん断に対しては根と床土の影響はどのように表れるのか、また、土のせん断特性と苗マットのそれとはどのように違うのか、などを検討するために、苗マットの一面せん断試験を行ってその特性を分析する。

### 2. 目的

苗マットのせん断特性に関して、次を明確にすることを目的とする。一面せん断試験を行い、せん断応力-変位曲線の特徴およびせん断に伴う体積変化の特徴を調べ、せん断強度に対するCoulomb式適用の可否を明らかにする。苗マットと床土のせん断特性との比較を行いその違いを知る。また苗マットのせん断特性に関する影響因子とその効果を分析する。さらに単純化された複合材料モデルによって、苗マットのせん断挙動の考察を行う。

### 3. 研究方法

苗マットの一面せん断試験は4回行ったので、それぞれ第1回、第2回、第3回および第4回せん断試験として区別する。

#### 3.1 第1回試験

##### 1) 育苗経過と苗マットの性状

##### (1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和54年3月1日。
- ② 播種日：昭和54年3月5日～3月7日
- ③ 播種量：3水準，1箱当り150g，200g，250g。
- ④ 品種：日本晴（昭和53年度筑波大学農林技術センター産）。
- ⑤ 床土：畑土。
- ⑥ 催芽・緑化および硬化：育苗器内で4～5日間催芽した後，ガラス温室において緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：22日間
- ⑧ 灌水：1日2回，午前10時と午後3時に行った。
- ⑨ 育苗経過：3月に育苗した割には順調な生育状態であった。

##### (2) 苗および苗マットの性状

本試験で供試した苗マットの性状を表 2.19 に示す。

2) 試験方法

(1) 試験因子

本試験では播種量 3 水準を試験因子とした。

(2) 試験回数

3 水準の播種量に対してそれぞれ 3 回ずつ繰返し、計 9 回の試験を行った。

(3) 試験日

昭和54年 3 月 27 日～ 3 月 29 日。

(4) 試験方法

一面せん断試験は土質試験法に準じて行った。図 2.49 に示すように、苗マットの地上部を除去して、採土円筒で直径 60mm (厚さ約 25～30mm) の円形状にくり抜いて、試験片を得た。一枚の苗マットより 4 個の試験片を採取した。試験片は一面せん断試験機 (三笠式改良型) のせん断箱に地上部側を下向にセットし、せん断面は苗立方向に直角な面となるようにした。

圧密・排水条件下でせん断したが、せん断前に 30 分間初期圧密を行った。30 分間の圧密で垂直変位はほとんど生じなくなった。せん断速度 1 mm/min のひずみ制御試験とした。せん断変位が 8 mm になったら試験を終了した。

一枚の苗マットから採取した 4 個の試験片に対して垂直 (圧密) 荷重はそれぞれ 16.0 kgf, 32.0 kgf, 48.0 kgf および 64.0 kgf を与えた。

3.2 第 2 回試験

1) 育苗経過と苗マットの性状

(1) 育苗経過

- ① 浸種：昭和54年 5 月 20 日
- ② 播種日：昭和54年 5 月 24 日～ 5 月 27 日
- ③ 播種量：3 水準，1 箱当り 150 g, 200 g, 250 g。
- ④ 品種：日本晴 (昭和53年度筑波大学農林技術センター産)。
- ⑤ 床土：人工床土 5 種類と畑土。
- ⑥ 催芽・緑化および硬化：育苗器内で 2 日間催芽した後，露地において緑化および硬化を行った。
- ⑦ 育苗日数：3 水準，14 日，19 日，24 日間。
- ⑧ 灌水：1 日 2 回，午前 10 時と午後 3 時に行った。

Table 2.19 Physical properties of mats

表 2.19 第 1 回試験における苗マットの性状

播種量 (g)	葉齡	含水比 (%db)	草丈 (mm)	厚さ (mm)	間隙比 (圧密前)
150	2.9	118.9	155	27.5	4.83
150	2.7	110.7	149	27.0	4.33
150	2.8	95.1	146	26.5	4.06
200	2.7	104.2	141	29.0	4.68
200	2.8	109.5	143	30.0	5.02
200	2.9	94.2	154	30.5	5.02
250	2.6	73.1	144	29.5	4.42
250	2.9	87.3	164	29.0	4.80
250	2.9	89.9	136	31.5	4.48

注) 間隙比は床土の真比重を苗マットのそれとみなして求めた。

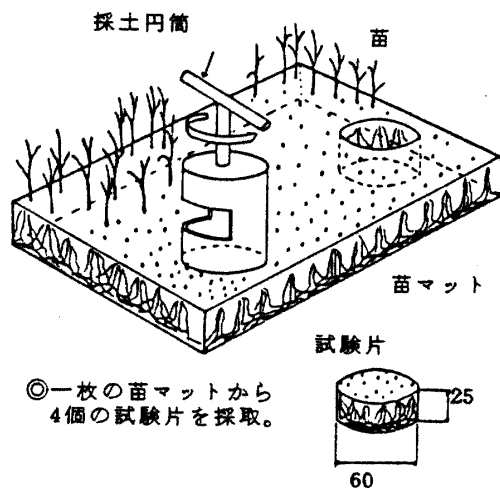


図 2.49 せん断試験用試験片の採取

Fig. 2.49 Sampling of test piece for shear test

⑨育苗経過：生育は良好であった。

(2) 苗および苗マットの性状

表2.20に本試験で供試した苗マットの性状を示す。

2) 試験方法

(1) 試験因子

本試験では、播種量、育苗日数、床土の種類を試験因子として選び、播種量、育苗日数をそれぞれ3水準、床土の種類を6種類とした。

(2) 試験回数

上記因子において、畑土苗マットでは、播種量150および250g/箱に対して育苗日数14日、播種量200g/箱に対しては育苗日数3水準の組合せを作り、それぞれ1回ずつ試験を行った。なお、一面せ

Table 2. 20 Physical properties of mats

表 2.20 第2回試験における苗マットの性状

播種量 (g)	育苗日数 (日)	葉 齢	草 丈 (mm)	含水比 (% db)	苗 立 数 (本/30cm <sup>2</sup> )	地上部重 (g/30cm <sup>2</sup> )	根 重 (g/30cm <sup>2</sup> )		
畑	150	14	2.9	101	98.5	—	—	1.39	
	200	14	2.8	91	104.4	78	—	1.72	
	200	19	3.4	96	110.0	71	0.52	1.65	
	200	24	3.9	109	116.5	86	0.58	2.57	
土	200	24	3.9	102	112.4	114	0.71	2.92	
	200	24	3.9	99	82.7	110	0.50	2.02	
	250	14	2.9	98	114.0	—	—	1.71	
パールマット 特 号		3.3	140	50.2	115	0.51	—	1.28	
人 工 床 土	くみあい日化 培土1号		3.2	129	93.1	90	0.49	—	1.08
	くみあい人工 培土1号		2.9	120	44.4	—	—	—	1.53
	くみあい粒状 培土K		3.2	130	53.3	102	0.66	—	1.26
	いなほ粒状 培 土		2.5	157	59.0	92	0.37	—	1.22

注) 人工床土は播種量 200g, 育苗日数14日である。

ん断試験の場合には4個の試験片のせん断を一試験と見なす。また、人工床土苗マットに対しては育苗日数14日、播種量200g/箱の一条件で試験を行った。合計10回の試験回数であった。

(3) 試験日

昭和54年6月6日～6月16日。

(4) 試験方法

試験方法は前述の通りである。

### 3.3 第3回試験

1) 育苗経過と苗マットの性状

本試験は昭和53年10月～11月にかけて、II.4で述べた第2回引張試験に供試した苗マットと同じものを用いて行った。したがって、育苗経過、苗および苗マットの性状は前述の通りである(表2.15)

参照)。

2) 試験方法

(1) 試験因子

本試験では育苗日数と播種量を試験因子とした。育苗日数は3水準(21日, 26日, 31日), 播種量は3水準(1箱当り, 150g, 200g, 250g)であった。

(2) 試験回数

上記因子の各水準のうち, 播種量200g/箱に対しては育苗日数3水準, 播種量150g/箱, 250g/箱に対しては育苗日数31日を割り当てた。これらの組合せに対して, それぞれ1回, 計5回の試験を行った。

(3) 試験日

昭和54年11月6日~11月10日。

(4) 試験方法

せん断試験法は第1回せん断試験で述べた通りである。本試験は引張, 圧縮試験と同じ苗マットを用い, これらの試験と並行して行った。

3.4 第4回試験

1) 育苗経過と苗マット

本試験は第3回せん断試験と同様に, II.4節で述べた第3回引張試験(昭和55年5月)に供試した苗マットを用いて行った。育苗経過などは前述の通りであり, 苗マットの性状は表2.15に示してある。

2) 試験方法

(1) 試験因子

本試験では播種量, 床土の種類を試験因子とした。播種量は1箱当り150g, 200g, 250gの3水準で, 床土は畑土と人工床土(No.11)の2種類とした。

(2) 試験回数

上記因子の全組合せに対して各1回計6回の試験を行った。

(3) 試験日

昭和55年5月29日~5月31日。

(4) 試験方法

試験方法は前述の通りである。

4. 試験結果と考察

1) せん断応力-変位曲線の特徴

図2.50には本試験で得られた床土と苗マットに対するせん断応力 $\tau$

( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )とせん断(水平)変位 $u$

( $\text{mm}$ ), および, せん断(水平)変位 $u$ ( $\text{mm}$ )と垂直変位 $\Delta H$ ( $\text{mm}$ ) (体積ひずみ $\epsilon_v$ ) の関係を示す。

体積ひずみ $\epsilon_v$ は次式で与えられる。

$$\epsilon_v = \Delta H / H_0 \dots\dots\dots (2.11)$$

ここに,  $H_0$  ( $\text{mm}$ ) は初期圧密終了後の試験片の厚さ(約25 $\text{mm}$ ),  $\Delta H$  ( $\text{mm}$ ) はせん断過程における鉛直変位を表す。

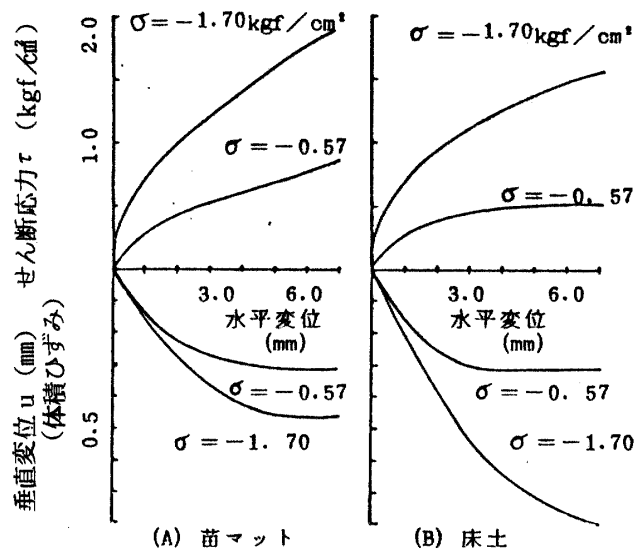


図 2.50 水平変位-せん断応力、水平変位-垂直変位 (体積ひずみ) の関係

Fig 2.50 Displacement-shearing stress relations, Displacement-volumetric strain relations



同図において、床土と苗マットはいずれもせん断変位  $u$  の増加に伴って、せん断応力  $\tau$  が増加した後にある値に漸近する傾向が見られる。せん断応力-変位曲線は勾配が漸減する上に凸の形状である。

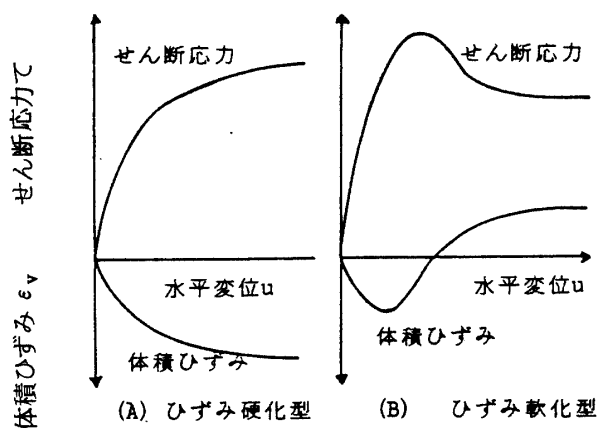


図 2.51 典型的な土のせん断変形パターン  
Fig. 2.51 Typical patterns of shearing deformation of soil

体積ひずみ  $\epsilon_v$  はせん断変位の増加に伴って減少、すなわち体積は縮小した。せん断変位-体積ひずみ曲線は勾配の絶対値が漸減する形状となっている。したがって、変形の進展に伴って、体積の変化は小さくなった。また、体積ひずみ  $\epsilon_v$  が一定値に近づくとせん断応力  $\tau$  の変化もなくなった。このようなせん断による体積変化は土や粉粒体の力学ではダイレイタンスと呼ばれる現象であることは前述の通りである。

なお、一部の苗マットでは変形初期において、せん断応力  $\tau$  の増加が単調ではなく、波状の曲線も見られた。

一般に土のせん断応力-変位曲線には図 2.51 に示すひずみ硬化とひずみ軟化の2つのパターンが典型的である<sup>51, 61)</sup>。前者ではせん断変位  $u$  の増加に伴ってせん断応力  $\tau$  は単調に増加し、体積ひずみ  $\epsilon_v$  は単調に減少していずれも一定値に漸近する。後者ではせん断変位  $u$  の増加に伴って、せん断応力  $\tau$  は増加し最高値に達した後減少した。この過程において体積ひずみ  $\epsilon_v$  は一度減少した後に増加に転じ、同様に一定値に漸近する。このような2つのパターンは主として初期間隙比の大小および垂直応力の大きさによって決まり、前者は間隙比の大きなゆる詰め

の土に、後者は密詰めの土に表れやすいせん断パターンである。間隙が大きいと、せん断によって土の粒子は互いにその間隙を埋めるように移動するために、体積は減少し、硬化現象が生ずる。他方、土粒子が密に充填されている場合には、相対移動によって、粒子間の乗り上げが生じ体積は増加する。このため初期の状態に比べると、粒子間の結合が疎になり、せん断抵抗は低下する、すなわち軟化現象が生じると考えられている<sup>61)</sup>。

図 2.50 と図 2.51 を比較すると、苗マットのせん断変形は非常に大きな垂直応力を作用させない限り、ゆる詰め土と同様にひずみ硬化のパターンを示すといえる。これは主として苗マットの間隙比が大きいことに起因しているものであろう。例えば、表 2.19 に示した畑土苗マットの間隙比は約 3.0 ~ 5.0 と非常に間隙の大きい充填状態であった。苗マットは播種時より床土を緩く充填することと、生育過程において大きな圧密を受けることはない上に、根が発達すると網目構造が形成されて、逆に間隙を押し広げるためと考える。畑土苗マットでは、せん断開始前の圧密過程による間隙比の変化は約 1.50 ~ 2.30、せん断過程における間隙比の変化は約 0.07 ~ 0.17 で、せん断終了後も比較的大きな間隙を保持していた。

上述のように、床土と苗マットのせん断変形パターンは類似しており、根の影響はこのパターンを変える程には大きくないことが判明した。なお一部の苗マットにおいて、せん断応力-変形曲線の立上り部に波状の変化が見られたのは、根が局所的に破断し、一時的にせん断応力が低下したためであろう。

2) Coulomb式による苗マットのせん断強度の表示

床土の力学特性でも述べたように、土や岩石あるいは粉粒体などのせん断強度  $\tau_f$  (kgf/cm<sup>2</sup>) は垂直応力  $\sigma$  (kgf/cm<sup>2</sup>) との線形関係

$$\tau_f = C + \sigma \tan \phi \dots\dots\dots (2.12)$$

で大まかに近似される。ここに、 $C$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) は粘着力、 $\phi$  (度) は内部摩擦角である。

本式は Coulomb 式と称されるが、この式は 2 個のパラメータでせん断強度を表示できる利点がある。そこで、苗マットのせん断強度についてもこれを適用しうるか否かについて検討を行った。

苗マットでは、せん断応力 $\tau$ のピークは表れなかった。土質試験法に準じてせん断ひずみ 15% (8mm変位) におけるせん断応力値をせん断強度 $\tau_f$ とした。せん断強度 $\tau_f$ とその時の垂直応力 $\sigma$ の値を応力空間 ( $\sigma, \tau$ ) にプロットすると、図 2.52 のようにほぼ直線に近い線が得られた。相関係数は低いものでも 0.95 程度あり、苗マットのせん断強度は Coulomb 式で十分近似できる。

3) せん断特性値

苗マットは床土と同様のせん断パターンを示すが、育苗条件などによって定量的にはかなりの差があった。そこで、次に示すせん断特性値を定義して、影響因子の分析を行った。

苗マットのせん断強度は Coulomb 式で表わしうるので、強度を示す特性値としては粘着力 $C$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) と内部摩擦角 $\phi$  (度) を採用できる。一方、変形性を表わす特性値として、次式で定義したせん断変形係数 $G$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) および体積変形係数 $K$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) を用いた。

$$G = \tau_{0.14} / 0.0014 \dots \dots \dots (2.13)$$

$$K = \sigma / \epsilon_{v0} \dots \dots \dots (2.14)$$

ここに、 $\tau_{0.14}$  はせん断ひずみ 0.14% ( $8.3 \times 10^{-3}$  mm 変位) におけるせん断応力、 $\epsilon_{v0}$  はせん断前の圧密による体積ひずみ、すなわち圧密前の体積 $V_0$  ( $\text{cm}^3$ ) と圧密による体積変化量 $\Delta V$  ( $\text{cm}^3$ ) の比

$$\epsilon_{v0} = \Delta V / V_0 \dots \dots \dots (2.15)$$

である。せん断変形係数 $G$ お

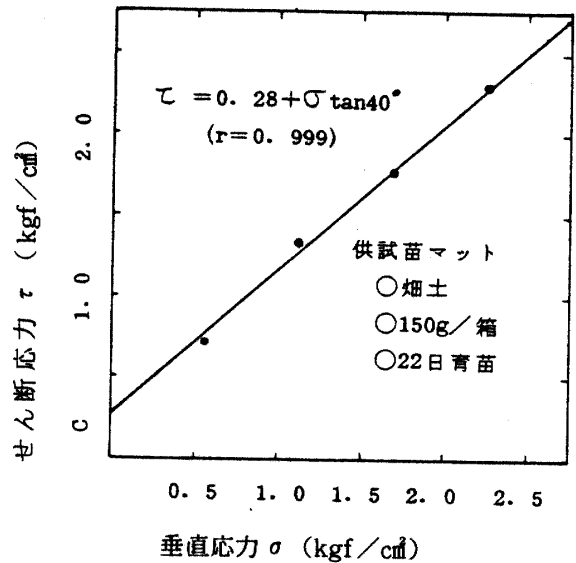


図 2.52 垂直応力とせん断強度の関係  
Fig. 2.52 Relationships between the normal stress and shearing strength

Table 2.21 Shearing strength of mats

表 2.21 苗マットのせん断強度

	床土	播種量 (g)	育苗日数 (日)	粘着力C ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	内部摩擦角 $\phi$ (度)
第 1 回 試験	畑土	150	22	0.28	40
				0.12	39
				0.44	32
		200	0.64	33	
			0.43	36	
			0.49	34	
	250	0.62	27		
0.46	32				
0.49	34				
第 2 回 試験	畑土	150	14	0.16	39
				0.14	44
		200	19	0.05	41
				0.45	38
		250	14	0.58	39
				0.38	43
	人工床土	パーユマット特号	くみあい日化培土 1号	0.76	27
				1.29	26
				0.20	40
				1.05	30
第 3 回 試験	畑土	150	31	0.38	30
				0.26	32
		200	21	0.46	25
				0.51	27
				0.47	30
		250	27	0.40	29
				0.47	28

注) 人工床土は播種量 200g、育苗日数 14日である。

よび体積弾性変形係数Kはそれぞれ材料力学における横弾性係数および体積弾性係数に類似する量である。

4) せん断特性値に対する影響因子の分析

(1) せん断強度

表2.21に示すように、本研究で得た苗マットの粘着力Cは約0.05~1.29 kgf/cm<sup>2</sup>、内部摩擦角φは約25°~44°でかなりの変化幅があった。以下にこれらの強度特性値に対する影響因子を分析してみる。

① 育苗日数

育苗日数を試験因子とした第2回および第3回せん断試験の結果を検討したところ、第2回試験では育苗日数が長くなると粘着力Cは大きくなったが、第3回試験では逆の傾向が見られ、その影響ははっきりしなかった。内部摩擦角φに関してはいずれの試験でも明確な傾向はなかった。

② 播種量

播種量の多い苗マットほど粘着力Cが増加する傾向があった(図2.53参照)。一方、内部摩擦角φと播種量の間にははっきりした傾向は見られなかった。

③ 床土の種類

6種類の床土による苗マットの粘着力Cを比較すると約0.05~1.28 kgf/cm<sup>2</sup>と最小値と最大値では25倍程度の差があり、粘着力Cは床土の種類によって大きな影響を受けることが判明した。また、内部摩擦角φも同様に約26°~44°と変化しており、床土の種類による差が見られた。

粘着力Cや内部摩擦角φの大きい床土を用いた苗マットほどこれらの値は大きく、逆にこれらの値の小さい床土を用いた苗マットでは小さくなった。すなわち、苗マットのせん断強度は床土のそれに大きな影響を受けるので、育苗には床土の選択に十分注意する必要がある。

④ 含水比

第1回試験では、図2.54に示すように、苗マットの含水比の増加に伴って、粘着力Cは直線的に減少し、内部摩擦角φは直線的に増加する傾向があった。しかし、その他の試験では明確な傾向は見られず、含水比との相関関係は確認しえなかった。

⑤ 根重

根の発達に応じて苗マットの内部構造は変化し、それが分離や引張と同様に、粘着力Cや内部摩擦角φなどのせん断特性値にも反映すると考えうる。そこで、根の状態を表わす測度として根重を用いて検討を行った(図2.55参照)。その結果、根重R(g/30cm<sup>2</sup>)と粘着力C(kgf/cm<sup>2</sup>)の間には次の直線関係が見られた。

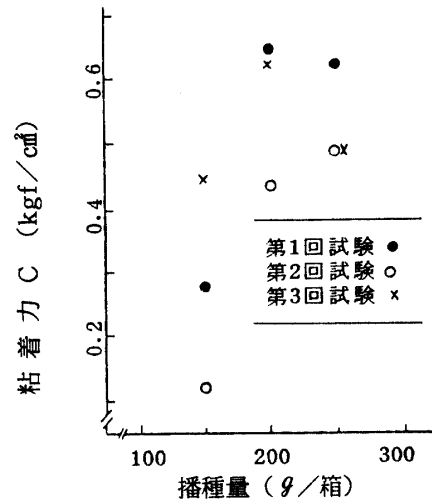


図2.53 播種量と粘着力の関係  
Fig. 2.53 Relationships between the planting density and cohesion

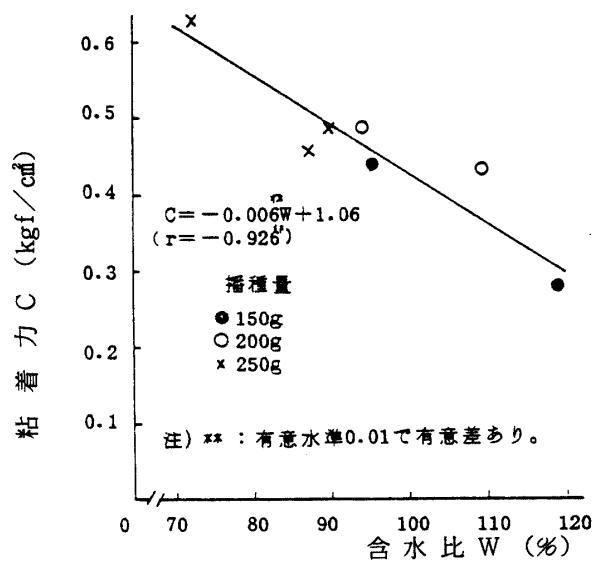


図2.54 せん断特性値と含水比の関係  
Fig. 2.54 Relationships between the shearing characteristics and the water content

$$C = 0.32R - 0.37 \quad (r = 0.93) \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\text{ただし, } 1.39 < R < 2.92 \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

したがって、粘着力すなわち単純せん断に対する苗マットの強度は根の状態にも依存するといえる。

一方、内部摩擦角 $\phi$ は根重の増加に対してほぼ一定、もしくは、やや減少する傾向が見られた。

まとめると、図2.56に模式的に示すように、苗マットのせん断強度は根重の増減に応じて切片の値が変化する平行線、もしくは勾配が変化する直線群で表現できる。

⑥ 育苗時期

II. 4で述べたように、苗マットの引張強度は育苗時期に大きな影響を受けたが、せん断強度に関しては3月、5月および10月に育苗した苗マットでも明確な差はなかった。これは育苗時期には影響されない圧縮特性に近い傾向と言える。

以上より、苗マットのせん断強度は床土の種類に大きな影響を受け、根重や播種量など苗の性状は粘

注) \*\*: 有意水準 0.01 で有意差あり。

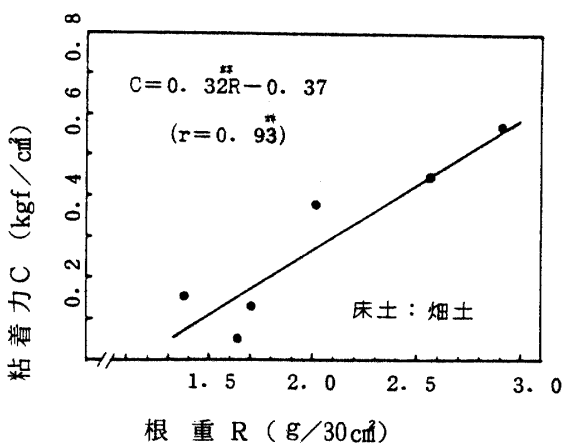


図 2.55 根重と粘着力の関係

Fig. 2.55 Relationships between the root weight and the cohesion

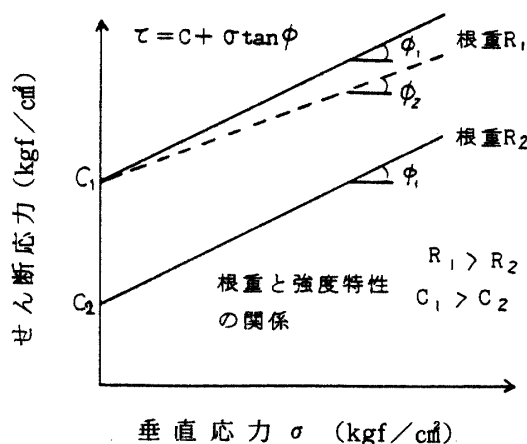


図 2.56 根重によるせん断強度の変化

Fig. 2.56 The difference of shearing strength with the root weight

着力Cのように垂直応力の小さな領域における苗マットのせん断強度に影響を与えることが判明した。この原因については後述する。

(2) 変形性

せん断変形係数Gの値はおよそ 12.7 ~ 22.0 kgf/cm<sup>2</sup>、体積変形係数のKの値は約 3.6 ~ 104.0 kgf/cm<sup>2</sup>であった。畑土苗マットに限ると、前者は約 14.8 ~ 22.0 kgf/cm<sup>2</sup> 後者は約 3.6 ~ 15.2 kgf/cm<sup>2</sup> である。これより体積変形係数Kは床土の種類に大きな影響を受けるが、せん断変形係数Gはほとんど影響されないことがわかる。

せん断変形係数Gに対する根重の影響は不明であったが、体積変形係数Kは根重が増加すると幾分小さくなる傾向が見られた。これは根が発達すると、苗マットのかさ密度は小さくなり、収縮しやすくなるためだと考える。変形性に対するその他の因子の影響は明確にしえなかった。

5) 苗マットと床土のせん断特性の比較

床土と苗マットのせん断強度を比較すると一部の例外はあったが、苗マットの方が粘着力Cは大きくなり、内部摩擦角 $\phi$ はいくぶん小さくなる傾向が見られた。

5. せん断特性のモデル的考察

土のせん断特性は土粒子間の滑りによって規定されるが、苗マットは根があるために、前述のように

床土よりもいくぶん大きなせん断強度を発揮するなどの影響を受ける。すなわち、根はせん断面付近において、せん断や引張などの作用を受ける。そこで、図2.57に示すように、苗マツトを床土と根部が層状に組合されたモデルとして単純化し、根の影響を分析した。

このモデルでは根部は数本の繊維群より構成されており、繊維間での接着はなく、滑りは可能であると仮定する。繊維は引張抵抗だけをもち、曲げに対する抵抗は無視するものとする。床土は通常の土と同様の性質をもち、床土と繊維はせん断力がある限界内にあれば接着しており、限界値に達すると滑りが生ずると仮定した。

繊維方向に直角な面でせん断を開始すると、床土の土粒子間の滑りに対する抵抗と繊維の引張抵抗が発生し、これらの合力がモデルのせん断力となる。せん断変形が進むと、床土部分では体積が収縮して抵抗が増加する。同時に繊維の引張抵抗も増加するが、徐々に繊維間あるいは繊維と床土の間に滑りが発生するようになり、部分的に繊維が破断し始める(図2.57)。最終的には繊維の大半が破断して抵抗を失い、モデルのせん断抵抗は床土の滑り抵抗に漸近してゆくと考える。

したがって、苗マツトのせん断抵抗は、根による抵抗成分だけ床土のせん断抵抗より大きくなる。ただし、根の強度はそれほど大きくなく、また根の量は床土の量に比べると少ないために、苗マツトのせん断では床土のせん断特性が主要な要素である。床土のせん断特性の影響は垂直応力が大きいほど顕著である。せん断強度の大きな苗マツトは床土のせん断強度が大きい上に、根の量が多く、張りが均一で、かつ各々の根が強い場合に得られる。

これより前述の苗マツトのせん断特性に関する影響因子の分析結果は簡単に説明しうる。まず、垂直応力が増加すると、苗マツトのせん断強度は大きくなるために根の抵抗はほとんど寄与しなくなり、逆に垂直応力が小さいほど根の影響が大きくなる。これは図2.55に示した根重とせん断強度の関係において、根重が増加すると粘着力Cが増加したことと同義である。さらに、根重が増加すると内部摩擦角 $\phi$ がやや小さくなる傾向も説明できる。

以上より、苗マツトのせん断特性に対する根の効果は、垂直応力の低いせん断過程において顕著であることがわかった。II. 4, II. 5で述べたように、引張特性と圧縮特性に対する根の影響は、引張において顕著であったのと同様の傾向が得られたと言える。

## 6. 結語

引張特性や圧縮特性と同様に材料力学的な基本物性である苗マツトのせん断特性に関して、せん断強度の表示法についての検討、強度と変形性を表わすせん断特性値の傾向とそれらに対する影響因子の分析、さらに、苗マツトモデルによる簡単な考察などを行い、以下に示す結果を得た。

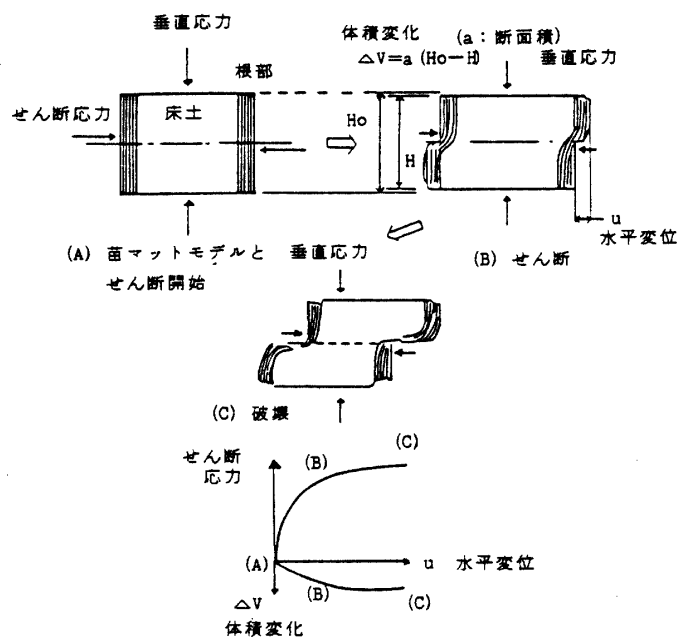


図2.57 苗マツトの複合材料モデルとせん断挙動  
Fig. 2.57 A composite material model for mat and its shearing behaviours

- a) 苗マットはせん断に対してゆる詰めのと同様な変形パターン，すなわち，ひずみ硬化型のパターンを示した。
- b) 苗マットのせん断強度は土などと同様にCoulomb式で十分近似しえた。
- c) せん断強度を表わす特性値のうち，粘着力Cは約0.05～1.28 kgf/cm<sup>2</sup>，内部摩擦角φは約25°～44°であった。
- d) 苗マットのせん断における変形性および強度を表わす特性値に影響する因子を分析したところ床土の種類すなわち力学的性質が最も大きな影響を与え，また播種量や根重などの因子は粘着力Cと体積変形係数Kに影響することを明らかにした。特に，圧密荷重の小さなせん断領域において，根重の影響は大きくなる傾向があった。
- e) このような苗マットのせん断特性は床土と根によって構成された単純なモデルのせん断挙動の分析によって定性的に説明しえた。

II. 7 引張・圧縮・せん断特性の相互関係<sup>(62, 63)</sup>

1. はじめに

II. 4～6において，苗マットの引張，圧縮およびせん断について，個々にその特性を明らかにした。また，それぞれの作用に対して，苗マットの内部構造を構成する根と床土の挙動の差もある程度把握しえた。本節では次の段階として苗マットの力学的性質の全体的な検討を試みる。

材料の力学的特性を全体的に把握するには，引張，圧縮およびせん断の個々の特性を知るとともに，各特性の相互関係を明確にしておく必要がある。しかるに，苗マットは1枚毎に性状が多様であるために，別々の苗マットから得た特性値では相互関係の分析はできない。そこで，同じ苗マットからそれぞれ引張，圧縮，せん断用の試験片を採取して試験を行った結果より，各々の特性値間の相互関係を検討する。

この分析結果に基づいて，昭和53年から55年にかけて行った苗マットの物性試験の中から，データ数の最も多い引張強度（最大引張応力）を代表値として取り上げて，その傾向と影響因子について再検討する。

さらに，苗マットの力学的性質を整理し，異方性の問題や破壊基準に関する考察とともに，簡単な力学モデルを仮定して定性的な検討を行う。

2. 引張・圧縮・せん断特性の相互関係

1) 研究目的

苗マットの引張，圧縮およびせん断に関するいくつかの特性値を用いて，それぞれ引張と圧縮，圧縮とせん断，せん断と引張の特性値間の相互関係をそれぞれ明らかにすることを目的とする。

2) 研究方法

(1) 試験方法

同じ苗マットから採取した試験片を供試して，引張試験，圧縮試験，一面せん断試験を並行して行った。各々の

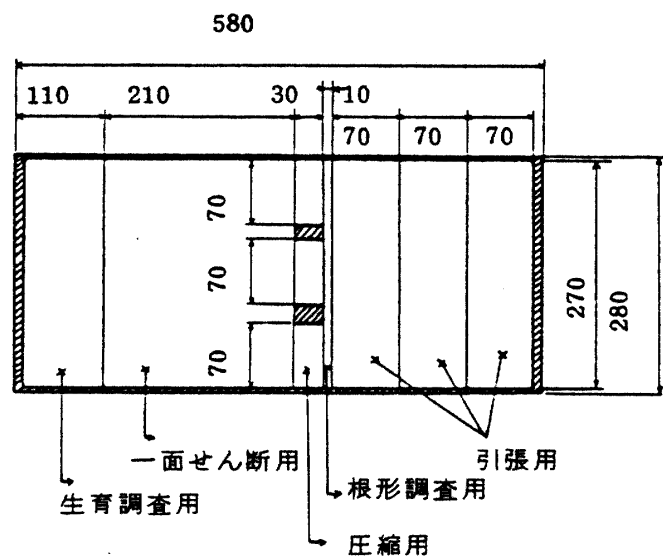


図 2.58 引張・圧縮・せん断試験用の試験片の採取  
Fig. 2.58 Sampling of test pieces for extension, compression and shear

試験方法は前述の通りである。

図2.58に示すように、1枚の苗マットから引張用の試験片(70×270mm)を3個、圧縮用の試験片(30×70mm)を3個、一面せん断用の試験片(60φ)を4個採取し、残りの部分で苗の生育状態を調査した。

## (2) 試験の概要と併試苗マットの性状

昭和54年10・11月と55年5月の2回にわたって試験を行った。ここではこれらを第1回試験、第2回試験として区別する。これらの試験についてはそれぞれⅡ.4～6の関連する項目で個別に述べたが、第1回試験は第2回引張試験、第2回圧縮試験および第3回せん断試験に相当し、第2回試験は第3回引張試験、第3回圧縮試験および第4回せん断試験に相当する。

第1回試験の育苗経過および苗マットの性状については引張の第2回試験で、第2回試験については同じく引張の第3回試験で述べた通りである。

試験の概要を次に述べる。

### ① 第1回試験

#### (a) 試験因子

本試験では、播種量3水準(1箱当たり150g, 200g, 250g)と育苗日数3水準(21日, 26日, 31日)を試験因子とした。

#### (b) 試験回数

上記因子において、播種量150g/箱と250g/箱に対しては育苗日数31日、200g/箱に対しては育苗日数3水準をそれぞれ割り当てた。

#### (c) 試験日

昭和54年10月11日～11月10日。

### ② 第2回試験

#### (a) 試験因子

本試験では播種量と床土の種類を試験因子とした。播種量は1箱当たり150g, 200g, 250gの3水準で、床土は畑土と人工床土(No 11)の2種類とした。

#### (b) 試験回数

上記因子の全組合せに対して各3回、計18回の試験を行った。

#### (c) 試験日

昭和55年5月29日～5月31日

## 3) 試験結果と考察

### (1) 引張, 圧縮, せん断特性値

1枚の苗マットから得た引張, 圧縮, せん断試験の結果より、次の特性値を用いて相互の比較を行った。各特性値を表2.22に示す。

#### ① 引張特性値

- a. 最大引張応力(引張強度)  $\sigma_{\max}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)。
- b. 最大ひずみ量  $\epsilon_{\max}$ 。
- c. 割線係数  $E_{\max}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)。
- d. 縦弾性係数  $E_e$  (kgf/cm<sup>2</sup>)。

#### ② 圧縮特性値

- a. 一定ひずみ(-0.2)での圧縮応力  $\sigma_{-0.2}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)。
- b. 縦弾性係数  $E_c$  (kgf/cm<sup>2</sup>)。

#### ③ せん断特性値

- a. 粘着力  $C$  (kgf/cm<sup>2</sup>)。

Table 2.22 Extension, compression and shearing characteristics

表 2.22 引張・圧縮・せん断特性値

育苗時期	第1回試験			第2回試験					
	1979.10			1980.5			1980.5		
床土	畑土	"	"	"	"	"	人工床土	"	"
播種量 (g)	150	200	250	150	200	250	150	200	250
最大引張応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.016	0.025	0.034	0.031	0.066	0.070	0.170	0.176	0.132
最大ひずみ量	0.056	0.043	0.108	0.082	0.097	0.144	0.252	0.193	0.269
割線係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.28	0.59	0.32	0.41	0.70	0.48	0.68	0.74	0.50
縦弾性係数 (引張) (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.40	0.99	0.65	1.93	3.68	2.18	3.85	4.88	2.57
ひずみ (-0.2) における圧縮応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	-0.20	-0.22	-0.22	-0.22	-0.29	-0.32	-0.44	-0.57	-0.38
縦弾性係数 (圧縮) (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.02	1.09	1.14	1.50	2.68	6.69	2.32	3.74	1.65
粘着力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.46	0.46	0.47	0.39	0.46	0.57	0.51	0.60	0.54
内部摩擦角 (度)	25	29	28	35	32	33	39	39	36

b. 内部摩擦角  $\phi$  (度)。

(2) 各特性値間の相互関係

① 引張特性と圧縮特性の関係

図 2.59 に最大引張応力  $\sigma_{max}$  と一定ひずみ (-0.2) での圧縮応力  $\sigma_{-0.2}$  の関係を示す。両者には次の直線関係が見られ、引張に対して大きな強度をもつ苗マットは、圧縮に対しても大きな変形抵抗を示すことが明らかとなった。

$$\sigma_{-0.2} = -1.885 \sigma_{max} - 0.168 \quad (r = -0.93) \quad (2.18)$$

$$\text{ただし, } 0.02 < \sigma_{max} < 0.18 \quad (2.19)$$

図 2.60 には、引張および圧縮における縦弾性係数  $E_e$  および  $E_c$  の関係を示す。これらの縦弾性係数値の間にも相関の高い直線関係

$$E_e = 1.45 E_c - 0.13 \quad (r = 0.97) \quad (2.20)$$

$$\text{ただし, } 1.2 < E_c < 4.1 \quad (2.21)$$

が成立しており、変形初期において引張に対して大きな変形抵抗を示す苗マットは、圧縮に対しても同様な傾向のあることを表わしている。しかし、図 2.60 に見られるように両方の縦弾性係数値は等しくなく、圧縮の値が一部大きくなっているものの、全般的には引張の縦弾性係数値が大きい。

式 (2.18) および (2.20) に示したような直線関係は引張と圧縮のほかの特性値間にも見られ、全体的に引張に強い苗マットは圧縮にも強くなる傾向がある。例えば、次のように最大ひずみ量と圧縮ひずみ 0.2 における応力値との直線関係もあり、引張において粘り強い苗マットは圧縮抵抗も大きいことがわかる。

$$\sigma_{-0.2} = -1.14 \epsilon_{max} - 0.168 \quad (r = -0.77) \quad (2.22)$$

$$\text{ただし, } 0.04 < \epsilon_{max} < 0.32 \quad (2.23)$$



最大引張応力  $\sigma_{\max}$  や縦弾性係数  $E_e$  などは根の状態に影響され、根張りが良く引張に大きな抵抗を示す苗マットは、圧縮に対する抵抗性も大きくなると言える。

### ② 引張特性とせん断特性の関係

図 2.61 および図 2.62 にそれぞれ最大引張応力  $\sigma_{\max}$  と粘着力  $C$  および内部摩擦角  $\phi$  との関係を示す。最大引張応力  $\sigma_{\max}$  と粘着力  $C$  の関係では相関係数は小さかったが、引張に強い苗マットは粘着力  $C$  が大きくなる傾向があった。一方、最大引張応力  $\sigma_{\max}$  と内部摩擦角  $\phi$  には次のような直線関係が見られた。

$$\phi = 66.14 \sigma_{\max} + 27.31 \quad (r = -0.87) \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

粘着力  $C$  と最大引張応力  $\sigma_{\max}$  の関係は

$$\sigma_{\max} = 1.36 C - 0.59 \quad (r = 0.69) \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

粘着力  $C$  と最大ひずみ量  $\epsilon_{\max}$  の関係は

$$C = 0.48 \epsilon_{\max} + 0.43 \quad (r = 0.62) \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

苗マットのせん断強度  $\tau_f$  (kgf/cm<sup>2</sup>) は Coulomb 式で近似しうるので (II.5 参照)、粘着力  $C$  と内部摩擦角  $\phi$  が大きいほどせん断強度は大きくなる。このため、引張に強い苗マットはせん断に対しても強くなる傾向があると言える。

### ③ 圧縮特性とせん断特性の関係

図 2.63 および図 2.64 には、一定ひずみ (-0.2) における圧縮応力  $\sigma_{-0.2}$  と粘着力  $C$  および内部摩擦角  $\phi$  との関係を示す。これらの図のように、各特性値間には次式に示すおおよかな直線関係が見られた。

$$C = -0.326 \sigma_{-0.2} + 0.391 \quad (r = -0.62) \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

$$\phi = -30.27 \sigma_{-0.2} + 22.85 \quad (r = -0.81) \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

$$\text{ただし, } -0.17 > \sigma_{-0.2} > -0.66 \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

したがって、引張と同様に、せん断に強い苗マットは圧縮にも強いことがわかる。

### (3) 苗マットの力学特性の相互関係

上述の比較によって引張特性、圧縮特性およびせん断特性の間には密接な相互関係があることを明らかにした。式 (2.18) ~ (2.29) における各特性値間の関係式に関して、相関係数については  $t$  検定を、回帰直線の傾きについては  $F$  検定を行ったが、相関係数は有意水準 0.01 で、傾きは有意水準 0.05 でいずれの関係式でも有意であった。なお傾きについては式 (2.25), (2.26) および (2.27) 以外は有意水準 0.01 でも有意であった。

供試苗マットは強度に対する主要な影響因子である播種量、育苗時期および床土の種類などを変化させて育苗したので、農家で育苗している多様な苗マットと類似したものであろうと考える。したがって、上に示した相関関係にはある程度の一般性があると期待され、引張に強い苗マットは圧縮にもせん断にも強く、引張に弱い苗マットはすべてに弱く見なしてよいだろう。すなわち、一つの特性値、例えば引張強度  $\sigma_{\max}$  を知ることによって、苗マット全体の力学特性を定性的に把握しうると考える。

## 3. 苗マットの力学特性に関する考察

### 1) 引張強度 (最大引張応力) から見た力学特性

前述の結果に基づいて、苗マットの引張強度すなわち最大引張応力  $\sigma_{\max}$  を代表値として、力学特性を再整理してみた。

引張強度のデータは II.4 節で述べた 5 回の引張試験の他に、II.3 節で述べた分離試験の結果を用いた。分離試験は苗マットを一定の面で強制的に引離すもので、前述のように引張試験の一種と見なす。表 2.12 で述べた分離抵抗値を苗マットの短辺の断面積 (約 70 cm<sup>2</sup>) で除して、これを引張強度とした。

これらの試験結果を含めた苗マットの引張強度の範囲は約 0.01 ~ 0.22 kgf/cm<sup>2</sup> であった。平均値は

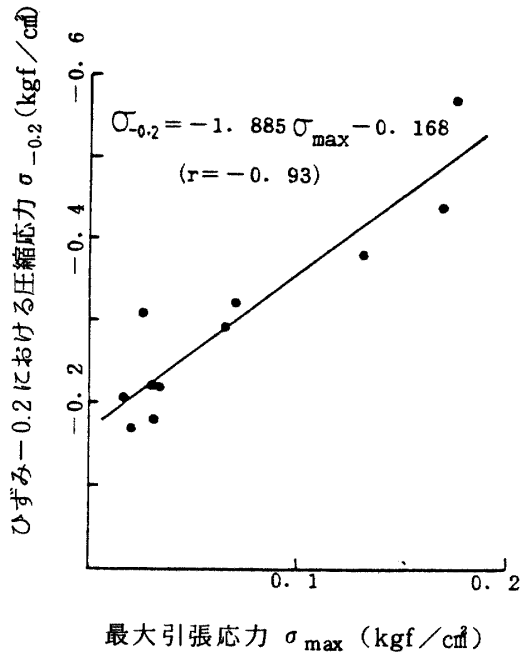


図 2.59 最大引張応力と圧縮応力 (ひずみ - 0.2) の関係  
 Fig. 2.59 Relationships between the maximum extension stress and the compression stress

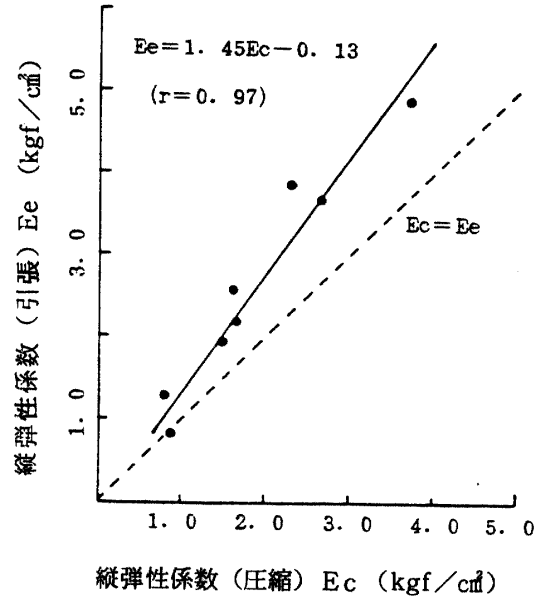


図 2.60 引張と圧縮における縦弾性係数の関係  
 Fig. 2.60 Comparison of longitudinal moduli with extension and compression

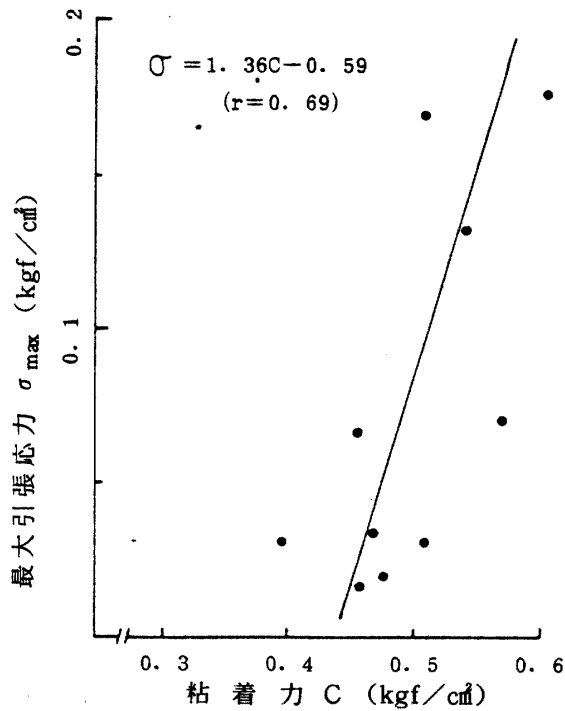


図 2.61 粘着力と最大引張応力の関係  
 Fig. 2.61 Relationships between the cohesion and the maximum extension stress

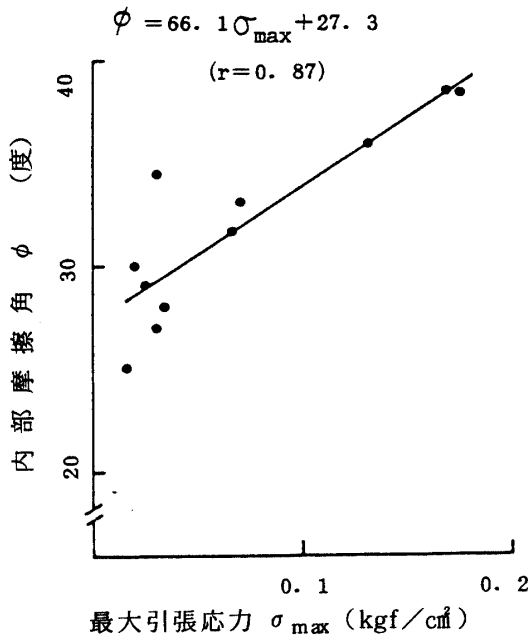


図 2.62 最大引張応力と内部摩擦角の関係  
Fig. 2.62 Relationships between the maximum extension stress and the internal friction angle

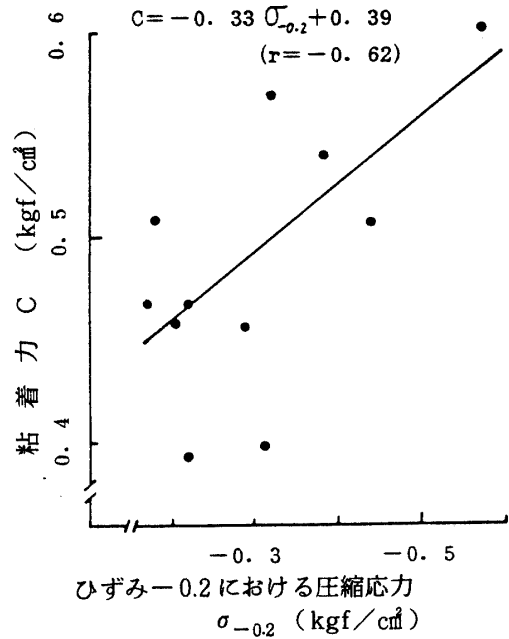


図 2.63 圧縮応力と粘着力の関係  
Fig. 2.63 Relationships between the compression stress and the cohesion

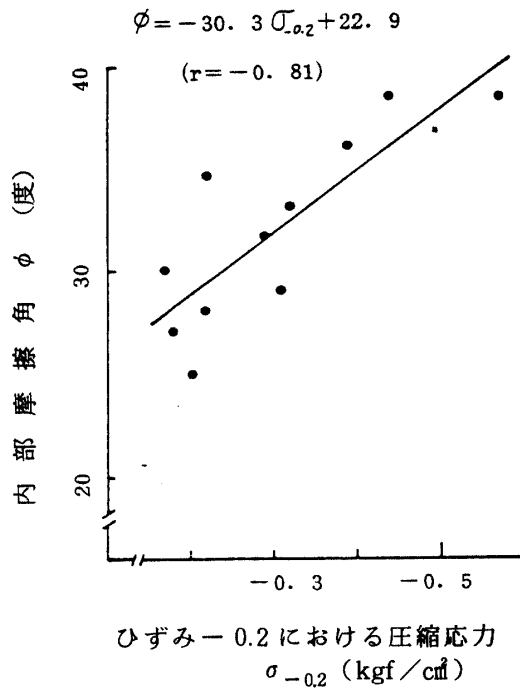


図 2.64 圧縮応力と内部摩擦角の関係  
Fig. 2.64 Relationships between compression stress and internal friction angle

およそ  $0.07 \text{ kgf/cm}^2$  で変動係数は  $0.72$  である。これは例えば苗マットを長辺方向に引張ると、およそ  $0.70 \sim 15.39 \text{ kgf}$ 、平均  $4.9 \text{ kgf}$  程度の引張力で破断することになる。最小値付近の引張強度  $\sigma_{\max}$  は、秋期に育苗した播種量  $50 \text{ g}$  および  $100 \text{ g/箱}$  の苗マットから得られたものである。これはかろうじて引張試験が行えるほどの軟弱な苗マットであり、弱い方の限界値を示すものと言える。

供試苗マットの育苗条件は、播種量  $50 \sim 250 \text{ g/箱}$ 、育苗日数  $15 \sim 30$  日、床土の種類  $11$  種類、育苗時期は年間を通した。このように、育苗条件はかなり多様であったので、農家や育苗センターで育苗される稚苗苗マットの引張強度は上記の範囲ではぼカバーされるものと思われる。したがって、苗マットの自動供給装置の設計などにおいては、この引張強度の範囲を十分考慮に入れておく必要がある。

本研究で得た引張強度には約  $20$  倍の差があるが、これは何に起因するのであろうか。II. 4 で述べた引張特性の分析では、播種量、根重、床土の種類、育苗時期あるいは含水比などが、主要な影響因子であることを示した。そこで、これらの影響因子の効果を引張強度  $\sigma_{\max}$  の全データについて再検討した結果、総合的には床土の種類や育苗時期の効果が強く表れることがわかった。播種量、根重、含水比についてはデータのばらつきが大きく、その影響は必ずしも明確ではなかった。その一例として根重と引張強度の関係を見ると、根重はおよそ  $0.37 \sim 2.92 \text{ (g/30cm}^2)$  で平均  $1.27 \text{ (g/30cm}^2)$  とかなり変化していたが、引張強度のばらつきは非常に大きかった。しかしながら、図 2.65 に示すように同一条件で育苗した苗マットの引張強度は根重と多少の相関があったので、育苗時期の影響が大きいことがわかった。

すなわち、II. 4 で述べたように引張強度は、苗マットの内部構造を表わす一測度としての根重だけではなく、育苗時期によって変化する根の強度や根の分布状態に影響されると言える。本研究ではこれらの因子をパラメータとして苗マットの引張強度を定量的に表現するまでには至らなかった。

## 2) 苗マットの力学特性

そこで、苗マットの内部構造に着目して、その力学特性の定性的な分析を試みる。

### (1) 内部構造と力学的方向性 (異方性)

苗マットは床土中に根が混入して交錯した内部構造を持つ土と根の複合材料で、「繊維強化」された材料の一種として、その力学特性は内部構造に大きく依存することは前述のとおりである。まず、この内部構造の特徴と力学特性の方向性について検討する。

根が床土中にランダムに分散しているならば、苗マットは力学的に方向性を持たない状態、すなわち等方性であると考えうる。根は種子根  $1$  本と最高  $5$  本 (稚苗において) の冠根が、まず下方に伸び (図 2.66)、苗箱底面に到達したら横に広がるか、そこで絡み合っている<sup>29)</sup>。各々の根からは無数の側根が発生している。育苗条件によっては冠根の数が少ないものや、側根の発達状態の悪い苗マットがある。このように、根は苗箱内においてある程度方向性をもって発達するので、苗マットは異方性を持つことも十分考えうる。本研究では確認しえなかったが、もし異方性が表れるほど根の方向性が顕著ならば、

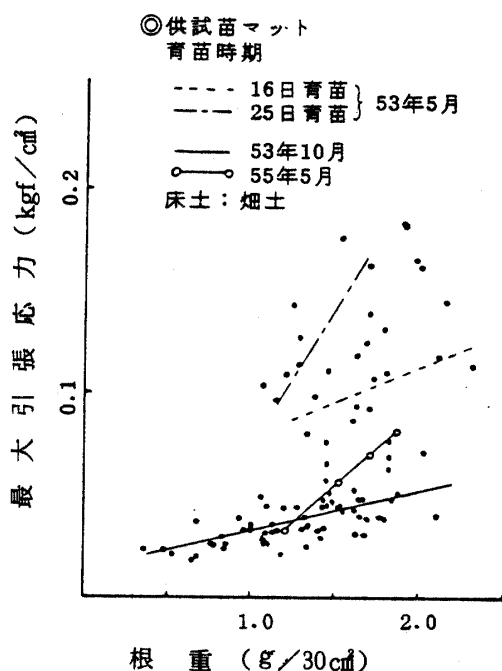


図 2.65 根重と最大引張応力との関係

Fig. 2.65 Relationships between the root weight and maximum extension stress

上記より力学特性は苗立方向に変化し、それに直角な面内では一様の性質を持つ直交異方性材料に近いものであろう。この場合には第I章で述べたように、苗マットを線形弾性体と見なしても4個の独立な弾性定数が必要となり、それらの測定や取扱いは著しく煩雑になる<sup>44)</sup>。

しかるに、異方性の程度は根の張り具合で決定されるが、苗マットの厚さは広さに比べて小さいために、実際問題において必要となるのは主に苗立て方向に直角な面、すなわち、広さ方向における強度や変形性である。この面内では根はランダムに広がるので、等方性材料と見なしても十分有効である。

(2) 繊維強化理論から見た苗マットの力学特性  
 複合材料の分野における簡単な繊維強化理論<sup>44-47)</sup>を援用して苗マットの力学特性を分析してみる。

図2.67に示すように、連続な繊維が平行に並び、一方向に強化された要素を考える。同図(b)のように、この材料の変形には弾性域Aと塑性域Bがあるとす。要素の平均引張応力を $\sigma_c$ 、 $\sigma_f$ および $\sigma_m$ をそれぞれ繊維およびマトリックス(母材)の引張応力、 $E_f$ および $E_m$ をそれぞれ繊維およびマトリックスの縦弾性係数、 $V_f$ および $V_m$ をそれぞれ繊維およびマトリックスの体積含有率すなわち要素の体積に対するそれぞれの体積の比率( $V_f + V_m = 1$ )とする。この時、要素の力学特性は次の線形式で表わされる<sup>44)</sup>

① 弾性域A:

(a) 縦弾性係数:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \dots\dots\dots (2.30)$$

② 弾塑性領域B

(a) 応力:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \dots\dots\dots (2.31)$$

(b) 接線係数:

$$E_c = E_f V_f + \left[ \frac{d\sigma_m}{d\varepsilon} \right] V_m \dots\dots\dots (2.32)$$

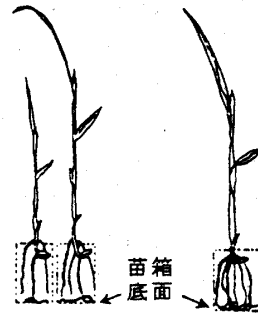
(c) 引張強度:

$$\sigma_{c \max} = \sigma_{f \max} V_f + \sigma_{m \max} V_m \dots\dots\dots (2.33)$$

$\sigma_{f \max}$ 、 $\sigma_{m \max}$  はそれぞれ繊維とマトリックスの引張強度である。

上記の繊維強化材料の各特性値は、繊維とマトリックスのそれぞれの体積に一次的に依存することを表わしている。一般に引張強度はマトリックスより繊維の方が大きい。このため、繊維強化材料の引張に対する各特性値は繊維の体積含有率  $V_f$  の大きさによって決定されることになる。

普通、床土の引張強度は非常に小さいので無視しうるものと仮定すると、苗マットの引張特性値は根の引張特性と根の体積含有率だけで決定される。根の体積と根重は相関関係があると考え、苗マットの引張特性は根重に強く支配されることになり、前述の実験結果をある程度説明しうる。実際には引張強度あるいはそのほかの特性値は、必ずしも根重との相関は大きくなかった。これは個々の根の引張強度が異なっていることを意味し、この相違が各特性値に非常に大きな影響を与えているものと推察できる。すなわち、育苗時期や床土の種類などの育苗条件によって根の引張強度に差が生じたり、根の分布状態が異なると、それが苗マットの力学的性質に直接反映する。



(a) 発育の悪い根 (b) 発育の良好な根

図2.66 苗マットにおける根の伸長状態 (星川<sup>29)</sup>)

Fig. 2.66 Roots conditions of mat

このように、単純な繊維強化理論によっても、苗マットの力学的性質は定性的に説明しうることがわかった。

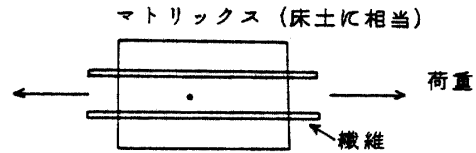
(3) 弾性、塑性、粘性

現象論的に見ると苗マットは変形しやすく、弾性、塑性、粘性のすべての性質を含んでいる。弾性や塑性に関しては、経験的にもわかるが、著しい塑性変形と、比較的小さな弾性変形を生じる。これらについては、II. 2およびII. 5のたわみ試験および圧縮試験において、除荷・再負荷（繰返し）試験によって確認している。また、粘性については圧縮試験において応力緩和挙動を、たわみ試験においてクリープ挙動を観察した。生育の良好な苗マットでは、応力緩和は比較的顕著であり、一方、クリープは小さかった。また、応力-ひずみ曲線の形状など、引張特性と圧縮特性にはいくつかの相違点があった。

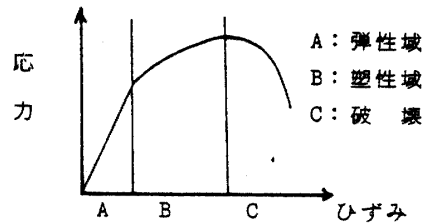
以上の特徴を考慮に入れた苗マットの単純な力学モデルの一例を図2.68に示す。このモデルは3つの要素A、BおよびCからなり、

要素AおよびBは弾性を示すスプリング、粘性を示すダッシュポットおよび塑性を表わすスライダより構成されている。要素AおよびBは粘弾性論における標準線形固体<sup>40)</sup> (standard linear solid) にスライダを直列に結合したものである。また、要素Cは引張と圧縮において、要素AおよびBへの力の伝達を切り替える接点である。これは引張と圧縮における力学特性の差を表現するために導入した「フック」要素と言え

る。モデルを引張ると、フックCの機能によって、引張力は要素Bのみに作用する。圧縮すると、逆に圧縮力は要素Aのみに作用し、要素Bは離れる。そこで、ばね定数（縦弾性係数）は要素Bの方が大きく、全体の強度、もしくはスライダが滑り始める時の力は要



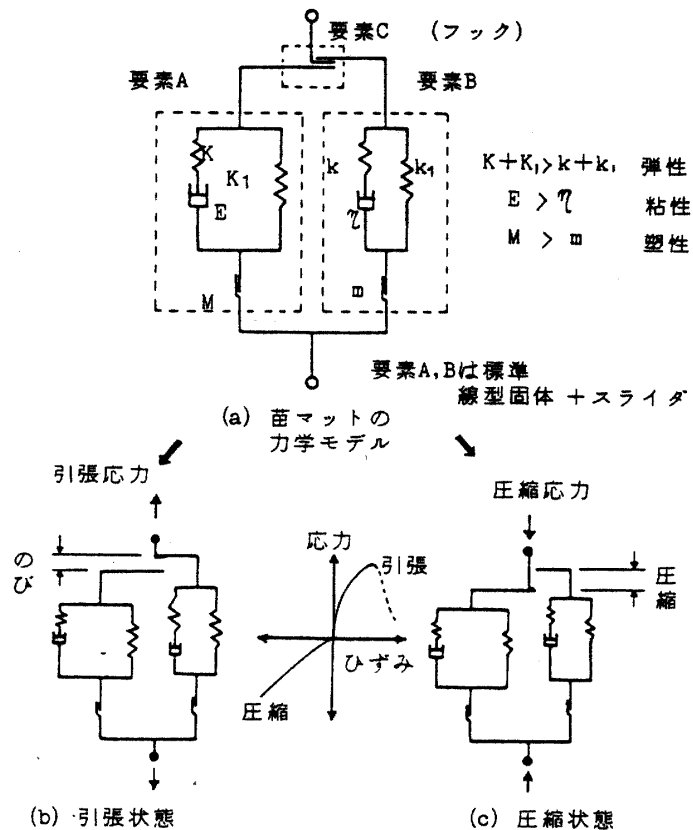
(a) 繊維強化モデル



(b) 応力-ひずみ曲線

図 2.67 繊維強化モデルと応力-ひずみ曲線

Fig. 2.67 A fiber reinforced model and its stress-strain curve



(a) 苗マットの力学モデル

(b) 引張状態

(c) 圧縮状態

図 2.68 苗マットの力学モデルと引張・圧縮挙動

Fig. 2.68 Mechanical model of mat and its extension and compression behaviours

素Aの方が大きいとすると、引張と圧縮の応力-ひずみ曲線の違いを表現できる。

標準線形固体の応力-ひずみ曲線<sup>40)</sup>は図2.69に示す形状であるので、この力学モデルによる苗マットの応力-ひずみ関係は図2.70で表現しうる。各要素に与えた制限により、応力-ひずみ曲線の立上り勾配は引張の方が大きく、強度は圧縮の方が大きくなる。

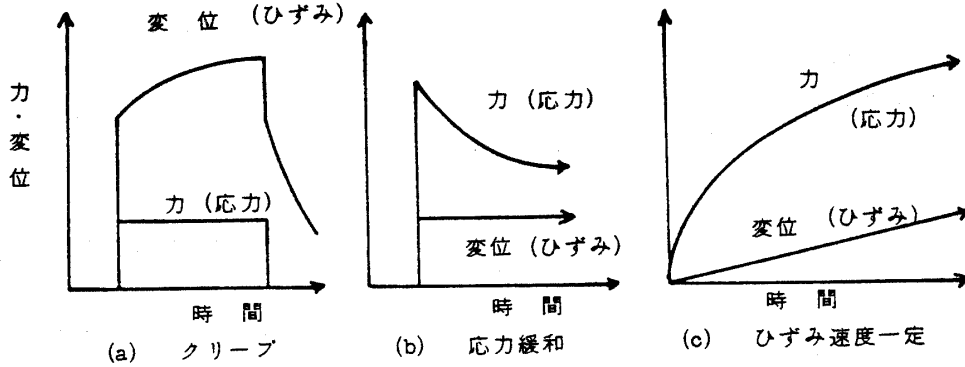
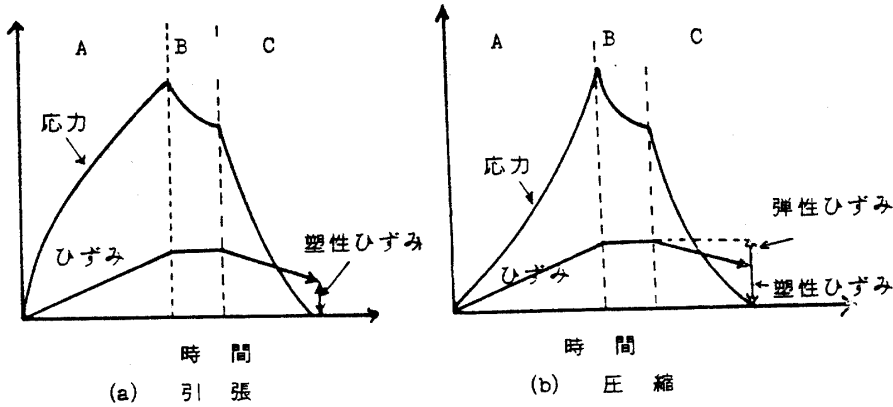


図 2.69 標準線形固体の応力とひずみの関係 (Y. C. ファン 40)  
 Fig. 2.69 Stress-strain relations of the standard linear solid (by Y. C. Fan)



- A : 負荷過程 (ひずみ速度一定)
- B : 応力緩和過程
- C : 除荷過程

図 2.70 苗マットの力学モデルの応力-ひずみ曲線  
 Fig. 2.70 Stress-strain curves of mechanical model for mat

ところで、標準線形固体の応力-ひずみ関係は次式で与えられている<sup>39)</sup>。

$$\dot{\epsilon}^{ve} = \frac{K K_1}{\eta (K + K_1)} \cdot \left\{ \frac{1}{K} \left( \sigma + \frac{\eta}{K} \dot{\sigma} \right) - \epsilon^{ve} \right\} \dots \dots \dots (2.34)$$

ここに、 $\epsilon^{ve}$  および  $\dot{\epsilon}^{ve}$  はそれぞれ標準線形固体におけるひずみ、および、ひずみ速度を表わし、 $\sigma$  および  $\dot{\sigma}$  はそれぞれ応力および応力速度を意味する。また、 $\eta$  は粘性係数、 $k$  および  $k_1$  は縦弾性係数である。

苗マットを完全塑性体すなわち応力が降伏点に達すると硬化を伴わない変形を生ずると仮定すると、上式の適用範囲はスライダの滑り開始の応力までである。すなわち、降伏応力値を  $f$  とすると

$$\sigma \leq f \dots\dots\dots (2.35)$$

である<sup>64)</sup>。

苗マットをひずみ硬化体と仮定すると、降伏応力値  $f$  は応力履歴もしくはひずみ履歴によってその大きさが変化し、塑性ひずみ速度  $\dot{\epsilon}^p$  は次式で与えられると仮定されている<sup>64,65)</sup> (塑性変形に関しては第三章で詳述する)。

$$\dot{\epsilon}^p = G \partial f / \partial \sigma \dots\dots\dots (2.36)$$

ここに、 $G$  は非負の比例係数である。時間依存性のない塑性変形だけを考える場合には式 (2.36) は増分形式

$$d \epsilon^p = G \partial f / \partial \sigma \dots\dots\dots (2.37)$$

$$d \epsilon^p = \dot{\epsilon}^p dt \dots\dots\dots (2.38)$$

で表わされる。ここに  $d \epsilon^p$  は塑性ひずみ増分、 $dt$  は時間の増分である。

図 2.68 で表わす力学モデルのひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  は、標準線形固体のひずみ速度  $\dot{\epsilon}^{ve}$  と塑性ひずみ速度  $\dot{\epsilon}^p$  との和で与えられる。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^{ve} + \dot{\epsilon}^p \dots\dots\dots (2.39)$$

式 (2.34) および (2.36) を本式に代入すると力学モデルの応力-ひずみ関係は次式で表わされる。

$$\dot{\epsilon} = \frac{KK_1}{\eta(K+K_1)} \cdot \left\{ \frac{1}{K} (\sigma + \frac{\eta}{K} \dot{\sigma}) - \epsilon^{ve} \right\} + G \frac{\partial f}{\partial \sigma} \dots\dots\dots (2.40)$$

式 (2.40) を苗マットの引張、圧縮に対して実際に使用するには、材料定数の決定などに解決されていない問題も残されている。苗マットを弾塑性体と仮定した場合の挙動については第三章において詳細に検討する。

以上のように単純な力学モデルの一方向の応力-ひずみ曲線でもかなり複雑な形となるので、塑性などに特別に関心を払わなくてもよい場合には簡単な構成式が望ましい。特に、繰返し負荷過程を含まない苗マットの引張や圧縮に対する応力-ひずみ関係式としては、II.4 および II.5 で述べた指数式が有用である。

$$\sigma = a \epsilon^n \quad (a, n : \text{材料定数}) \quad (\text{再記})$$

(4) 破壊基準

II.6 のせん断特性において、苗マットのせん断強度  $\tau_f$  (kgf/cm<sup>2</sup>) は Coulomb 式 (2.4) で近似しうることを示した。せん断強度を拡張した概念で、土などの破壊応力を表示する「破壊基準 (式)」としてこの式が使用されることが多い<sup>61)</sup>。

そこで、Coulomb 式は苗マットに対しても破壊基準と見なしうると仮定すると、引張強度 (最大引張応力)  $\sigma_{max}$  と圧縮強度  $\sigma_c$  は次式で表現できる<sup>61)</sup> (図 2.71 参照)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{max} \\ \sigma_c \end{array} \right\} = - \frac{2C(1 \pm \sin \phi)}{\cos \phi} \dots\dots\dots (2.41)$$

一面せん断試験 (II.6) で得た粘着力  $C$  と内部摩擦角  $\phi$  を本式に代入して算定した引張強度  $\sigma_{max}$  と圧縮強度  $\sigma_c$  を比較すると、計算値の方が 4~15 倍ほど大きな値となった。例えば、播種量 150g/箱の畑土苗マットでは、粘着力  $C = 0.38$  kgf/cm<sup>2</sup>、内部摩擦角  $\phi = 34.6^\circ$  で、引張強度  $\sigma_{max}$  の計算値は 0.42 kgf/cm<sup>2</sup>、実測値は 0.03 kgf/cm<sup>2</sup> であった。

このような大きな差が生ずる原因の 1 つとして、引張試験とせん断試験における滑り方向の違いから前述の苗マットの異方性の効果が表れたことも考えうる。すなわち図 2.72 に示すように、本研究におけるせん断面は苗立方向に直角な面 I であったが、この他にも苗立方向に平行な面内で 2 方向 II および III が主なせん断方向である。本研究の引張や圧縮では、図 2.72 の II に示す破壊面が生ずる。根の張り



に関連する異方性があると仮定すると、Iの破壊面に比べてせん断強度はやや小さくなることも考えられる。塑性論によると、引張や圧縮方向に対して破壊の方向は $\pi/4 \pm \phi/2$ の傾きを持つとされている。これより考えると、苗立方向に直角な面Iで破壊が生ずるためには、引張方向は苗立方向に対して傾斜した方向でなければならない。

しかるに、引張強度に4倍以上の差が生じた原因としては、上述のせん断面による異方性の影響よりは、むしろ苗マットの引張に対する破壊基準にCoulomb式を用いたことに無理があったと考える方が自然である。このため、苗マットの引張・圧縮・せん断強度を表示する破壊基準は、Coulomb式を若干修正したものになる。

その一例として、図2.71に示すような引張強度 $\sigma_{max}$ 、および、あるせん断強度 $\bar{\tau}_f$  (垂直応力 $\bar{\sigma}$ )を通る次の放物線を考えた。

$$\bar{\tau}_f = \frac{\bar{\tau}_f}{\sqrt{-\bar{\sigma} + \sigma_{max}}} \sqrt{-\sigma + \sigma_{max}} \dots\dots\dots (2.42)$$

本式を決定するには、引張試験とせん断試験を各1回ずつ行えばよいことになる。本式では、粘着力Cに相当するせん断応力 $\tau$ 軸との切片C'は次式で与えられる。(図2.71参照)。

$$C' = \frac{\bar{\tau}_f}{\sqrt{-\bar{\sigma} + \sigma_{max}}} \sqrt{-\sigma_{max}} \dots\dots\dots (2.43)$$

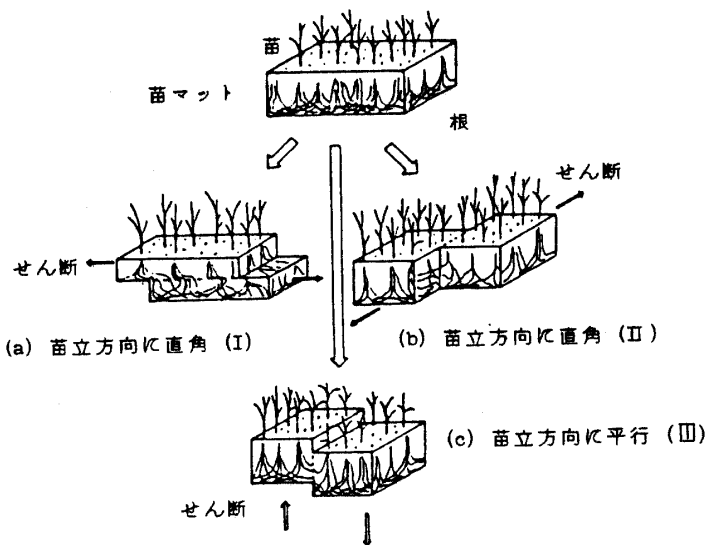


図2.72 苗マットのせん断方向  
Fig. 2.72 Shearing directions of rice seedling mat

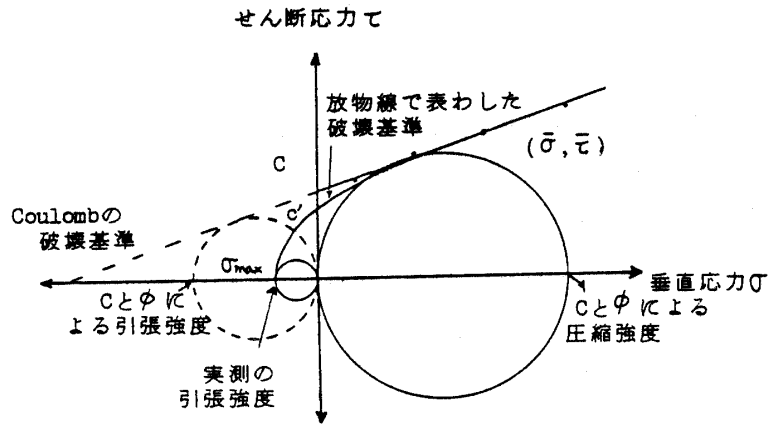


図2.71 Coulombの破壊基準と苗マットの破壊基準  
Fig. 2.71 The Coulomb's failure criteria and its of mat

例えば、前述の播種量150g/箱の畑土苗マットでは、 $\sigma_{max} = 0.03 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\bar{\tau} = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ に対して $\bar{\sigma} = 1.77 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $C = 0.38 \text{ kgf/cm}^2$ であったが、式(3.42)および式(3.43)で表わした破壊基準および粘着力C'はそれぞれ次のようになる。

$$\bar{\tau}_f = 1.24 \sqrt{-\sigma + 0.031} \dots\dots\dots (2.44)$$

$$C' = 0.22 (\approx 0.56 C) \dots\dots\dots (2.45)$$

このように、破壊基準として式(3.42)を採用すれば、粘着力Cに相当するC'はCに比べてかなり小さくなっており、実際の値に近くなった。

#### 4. 苗マットの力学的性質の要約

本章における実験的研究で明らかになった苗マットの力学的性質を簡単に要約すると次のようになる。

① せん断特性や圧縮特性の傾向はゆる詰め土の変形特性に近い。

② 苗マットでは床土にはほとんど見られない引張抵抗が生ずる。

③ 苗マットの力学的性質は、床土の性状、根重、播種量、育苗時期、含水比などに影響をうける。この内、床土の性状や含水比は根の性質には直接関係しない要因であるが、その他の因子は根の力学特性に関連して苗マットの力学特性を特徴付けるものである。

④ 床土と根は力学作用の様式によって異なる応答を示す。引張に対しては根が、圧縮に対しては床土が主要な役割をはたす。

⑤ 苗マットは弾性、塑性、粘性的な性質のいずれをも有する。特に、塑性変形は顕著で、小さな変形でも塑性変形が含まれる。

⑥ 引張と圧縮の単純負荷に対する応力曲線は指数式で簡単に表示しうる。

圧縮やたわみにおける繰返し負荷過程では著しいヒステリシス・ループが表れる。

⑦ 苗マットのせん断強度は Coulomb 式で簡単に表わしうる。しかるに引張領域にも適用しうる破壊基準はこの式では表現できない。

#### 5. 結語

本節では苗マットの引張、圧縮およびせん断特性の相互関係を検討し、力学特性を総合的に分析した。

a) これらの特性値間には密接な相互関係があり、引張に強い苗マットは圧縮にもせん断にも強いことを示した。したがって、苗マットの力学特性は1つの特性値、例えば引張強度を知れば全体の傾向を定性的に把握しうることになる。これは苗マットの物性試験を考える上で参考となる。

b) 上記の分析結果に基づいて引張強度を代表値として全データを再整理し、苗マットの力学特性を検討した。本研究で得た引張強度は約  $0.01 \sim 0.22 \text{ kgf/cm}^2$ 、平均はおよそ  $0.07 \text{ kgf/cm}^2$  で、この範囲は現場で育苗される苗マットの引張強度をほぼ含んでいるものと考えられる。引張強度に関する影響因子を再検討した結果、床土の種類や根重だけでなく、根の強度や根の分布状態などの影響も大きいことが推察された。

c) 苗マットの内部構造すなわち根の状態と異方性の関係の検討、繊維強化理論による力学特性の考察、および、単純な力学モデルによる弾性、塑性、粘性を含む苗マットの挙動の表現、さらに、破壊基準に関する若干の定性的な考察を行い、苗マットの力学的性質の特徴を示した。

#### II. 8 苗マットの簡単な力学試験法の提案

第I章で述べたように、土付苗用田植機の性能を保障したり、高性能化を図る上で、苗マットが有すべき力学的性質の基準値を設定する事は重要な問題である。この点については作物学的な観点あるいは育苗されている苗マットの実態などと照し合せて慎重に検討すべきである。これらの判定資料を得るには大量のデータが必要であるために、現場で簡単に測定しうる試験法が求められる。また基準値が設定された後は使用する苗マットがそれに適合しているか否かをチェックする試験も必要となる。そこで、本章で、検討した苗マットの力学的性質に基づいて簡単な試験法の提案を行う。

II. 7において述べたように、苗マットの力学的性質は一種類の試験によって大まかな特徴を把握できる。圧縮試験では座屈が生じやすいためにその強度を得難く、またせん断試験は多くの時間を要するので、引張試験か分離試験が妥当である。変形に関する検討も行える点で引張試験の方が一般性がある。

単純な引張試験法としては、図2.73に示すように苗マット全体もしくは短冊状に切断した試験片の一片を支持して吊るし、自重による引張破断が生ずるか否かで強度を判断する方法を考えた。例えば、自重5 kg前後の苗マットを短片で支持して吊るす試験では、破断が生じない場合には引張強度はおよそ0.07

kgf/cm<sup>2</sup>以上であると判断しうる。

支持方式としては図 2.73 (a) および (b) のように、2 枚の板ではさむ方法と、丸棒を支点として苗マツを吊る方法が簡単である。後者は簡易で、苗を傷めず、また支持点の変更が容易であるため用途の広い試験法となろう。

あるいは同図 (c) に示すように、図 2.25 で提示した分離試験装置を引張試験に転用する方法も考えうる。

以上の 3 通りの引張試験法を現場用の苗マツの力学試験法として提案したい。

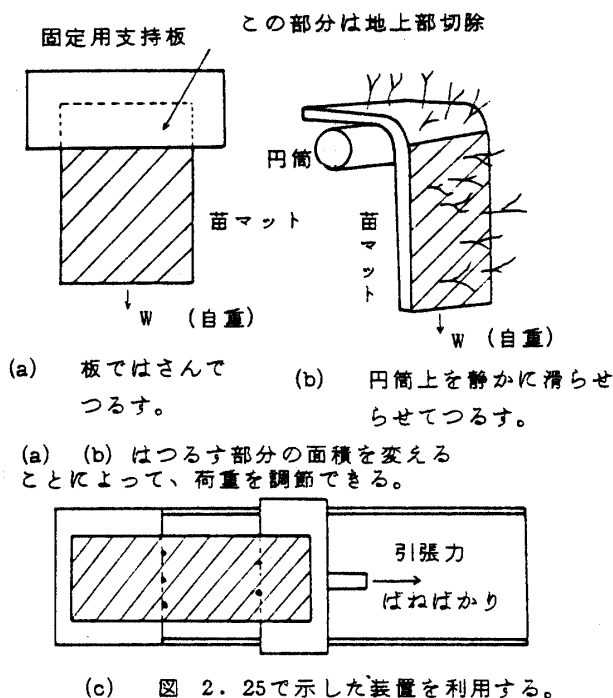


図 2.73 簡易引張試験法および器具

Fig. 2.73 Simple extension test method and device

### 第三章 苗マツの弾塑性学的研究

第二章における実験的研究とその考察を通じて、苗マツの力学的性質は連続体力学的には弾塑性論を用いて検討するのが妥当であろうとの結論に達した。特に、苗マツは床土と根より構成されているので、土の弾塑性論が参考になるものと期待しうる。そこで、本章では苗マツを弾塑性体と見なして、一つの弾塑性モデルを導入し、その変形挙動を定性的に分析する。さらに、そのモデルに基づいて苗マツの弾塑性構成式を具体的に展開し、それより求めた応力-ひずみ曲線を示す。

#### III. 1 土と苗マツの弾塑性論

##### 1. はじめに

本節では、土の塑性論に若干の修正を加えて苗マツの塑性挙動の説明を試みる。しかるに土の塑性論で扱うのは構造物周囲の固い地盤の変形挙動を主な対象としているが、苗マツで問題となるのは引張および低応力域の変形挙動である。苗マツは小さな応力でも大きな変形を生ずるために、この点を考慮に入れた検討が必要となる。

そこでここではまず苗マツの弾塑性論の参考とした一般および土の弾塑性論の概要を述べる<sup>66-83)</sup>。次に、苗マツの弾塑性挙動を分析し、それに適用しうる弾塑性論を展開する。

##### 2. 本章で用いた記号と弾塑性論の概要<sup>64,65)</sup>

###### (1) 応力とひずみの表記法

応力とひずみは一般にそれぞれ 9 個の成分により構成され、テンソル量としての性質を持つ。表記法としては 2 重添字付きの記号または大文字が用いられるが、ここでは前者を採用する。すなわち、

$$\text{応力} : \sigma_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\text{ひずみ} : \epsilon_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots (3.2)$$

これらの量は対称性を持つことが知られている<sup>37)</sup>。

弾塑性変形は非線型現象であるため、増分型式の表示法が使用されることが多い。応力増分を  $d\sigma_{ij}$ 、ひずみ増分を  $d\epsilon_{ij}$  で表わす。ひずみ増分は弾性成分  $d\epsilon_{ij}^e$  と塑性成分  $d\epsilon_{ij}^p$  の和であると仮定する。

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

なお、ひずみ増分は次式で与えられるものとする<sup>83)</sup>。

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Delta u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \Delta u_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに  $\Delta u_i$  は微小変位増分を表わす。

応力  $\sigma_{ij}$  やひずみ  $\epsilon_{ij}$  の数学的操作にはテンソル代数を用いる。したがって、ここで扱うテンソル方程式の一边に同一指標が繰返し表れる場合には、アインシュタインの総和規約<sup>#</sup>を適用してある<sup>37 40)</sup>。

本論文で頻繁に使用する応力やひずみなどを次に一括して示す<sup>37 64 83)</sup>。

\* 平均応力：  $P = \sigma_{ij} \delta_{ij} / 3 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3 \quad \dots\dots\dots (3.5)$

\* 偏差応力：  $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P \delta_{ij} \quad \dots\dots\dots (3.6)$

\* 偏差応力の2次不変量：  $r = (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3.7)$

\* 偏差応力の3次不変量：  $s = (\sigma'_{ij} \sigma'_{jk} \sigma'_{ki})^{1/3} \quad \dots\dots\dots (3.8)$

\* 体積ひずみ：  $\epsilon_v = \epsilon_{ij} \delta_{ij} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \quad \dots\dots\dots (3.9)$

\* 弾体体積ひずみ：  $\epsilon_v^e = \epsilon_{ij}^e \delta_{ij} \quad \dots\dots\dots (3.10)$

\* 偏差ひずみ：  $\epsilon'_{ij} = \epsilon_{ij} - \epsilon_v \delta_{ij} / 3 \quad \dots\dots\dots (3.11)$

\* 塑性体積ひずみ：  $\epsilon_v^p = \epsilon_{ij}^p \delta_{ij} \quad \dots\dots\dots (3.12)$

\* 弾性偏差ひずみ：  $\epsilon_{ij}^{e'} = \epsilon_{ij}^e - \epsilon_v^e \delta_{ij} / 3 \quad \dots\dots\dots (3.13)$

\* 塑性偏差ひずみ：  $\epsilon_{ij}^{p'} = \epsilon_{ij}^p - \epsilon_v^p \delta_{ij} / 3 \quad \dots\dots\dots (3.14)$

\* 偏差ひずみの2次不変量：  $\epsilon_r = (\epsilon'_{ij} \epsilon'_{ij})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3.15)$

\* 弾性偏差ひずみの2次不変量：  $\epsilon_r^e = (\epsilon_{ij}^{e'} \epsilon_{ij}^{e'})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3.16)$

\* 塑性偏差ひずみの2次不変量：  $\epsilon_r^p = (\epsilon_{ij}^{p'} \epsilon_{ij}^{p'})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3.17)$

\* クロネッカのデルタ：  $\delta_{ij} \begin{cases} = 1 & (i = j) \\ = 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.18)$

(2) 降伏面、破壊基準

金属材料のように、弾性変形域と非弾性変形域が比較的明確に別れる材料の応力-ひずみ曲線では、図3.1に示すような明瞭な屈曲部が表れる<sup>64 65)</sup>。この屈曲部は降伏点と称され、塑性変形開始時の応力状態を表わす。応力空間における降伏点の集合が降伏面を形成する。また、材料の破壊時の応力状態は破壊面を形成する。降伏面と破壊面は明確に区別せずに使用されることが多い。本論文では両者を区別し破壊面は降伏面の極限状態として定義する。

# アインシュタインの総和規約

$$\begin{aligned} a_i b_i &= a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 \\ a_{ij} b_j &= a_{i1} b_1 + a_{i2} b_2 + a_{i3} b_3 \end{aligned}$$

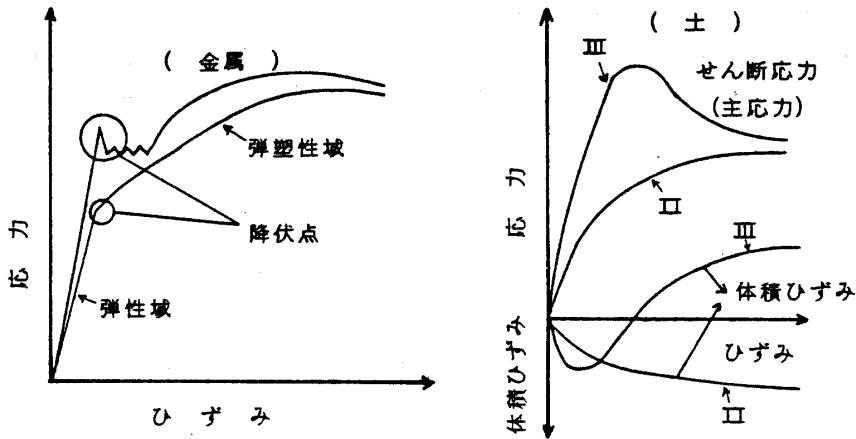


図 3.1 金属材料と土の応力-ひずみ曲線  
Fig. 3.1 Stress-strain curves of metal and soil

一般に、降伏面  $f$  は応力  $\sigma_{ij}$  と塑性ひずみ  $\epsilon_{ij}^p$  の関数である<sup>65,66)</sup>

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = 0 \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

あるいは

$$\bar{f}(\sigma_{ij}) - F(\epsilon_{ij}^p) = 0 \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

ここに、 $F$  は塑性ひずみ  $\epsilon_{ij}^p$  による硬化の様式を示す硬化関数で、 $\bar{f}$  は負荷関数と称する。

(3) 関連流れ則と塑性ひずみ増分

弾性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^e$  は応力増分  $d\sigma_{ij}$  と同方向に生じ、両者には一対一の対応が存在する。他方、塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  は応力増分との一対一の関係は存在しない。すなわち、 $K$  を比例係数として

$$d\epsilon_{ij}^p \neq K d\sigma_{ij} \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

となる。

数理塑性論によると塑性ひずみ増分の発生する方向は応力  $\sigma_{ij}$  の方向に規定され、具体的に次式で決定しようと仮定されている<sup>66,67)</sup>。

$$d\epsilon_{ij}^p = G \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

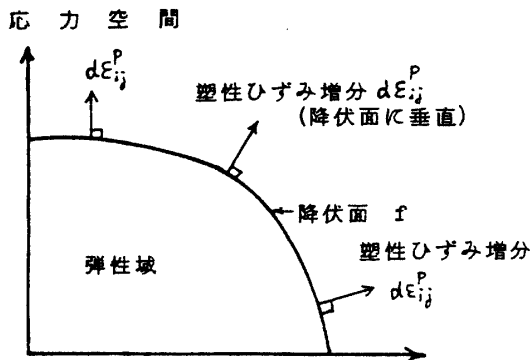


図 3.2 降伏面と塑性ひずみ増分  
Fig. 3.2 Yield surface and plastic strain increment

ここに  $G$  は非負の比例係数で、塑性ひずみ増分の大きさを定める。

本式は塑性ひずみ増分が降伏面の外向法線方向に生じることを意味しており (図 3.2 参照)、垂直条件式と称される。これは降伏面を塑性ポテンシャル面と見なす (関連流れ則) ことに相当する<sup>67)</sup>。

降伏面  $f$  の関数形を具体的に決め、また、比例係数  $G$  が決まれば、塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  を決定しうる。降伏面  $f$  は前述のように応力  $\sigma_{ij}$  と塑性ひずみ  $\epsilon_{ij}^p$  の関数であるが、比例係数  $G$  は後述するように硬化の様式によって定まる。したがって、苗マットの塑性変形を議論するにはまず降伏面の形状や硬化の様式を具体的に指定しておく必要がある。

例えば、金属材料では、降伏面の具体形としてMisesの提案した

$$r^2 - F^2(\epsilon_{ij}^P) = 0 \dots\dots\dots (3.23)$$

などが使用されている<sup>65)</sup>。これは応力空間において平均応力P軸方向の円筒形を呈する<sup>64)</sup>(図3.3)。

(4) 降伏面の凸面性

式(3.22)に示した垂直条件式と塑性仕事増分  $dW^P$  が非負となる条件

$$dW^P = \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^P \geq 0 \dots\dots\dots (3.24)$$

より、降伏面はいたるところで凸面であることが要請される<sup>67)</sup>。

(5) 弾性変形

一般に弾性変形における応力増分  $d\sigma_{ij}$  とひずみ増分  $d\epsilon_{ij}$  の構成関係式は次式で与えられる<sup>37)</sup>。

$$d\sigma_{ij} = E_{ijk_1} d\epsilon_{k_1} \dots\dots\dots (3.25)$$

ここに、 $E_{ijk_1}$  は弾性構成テンソルと称する4階のテンソルである。

等方性材料に対しては

$$E_{ijk_1} = \lambda \delta_{ij} \delta_{k_1} + \mu (\delta_{ik} \delta_{j_1} + \delta_{il} \delta_{j_k}) \dots\dots\dots (3.26)$$

が成立する<sup>37)</sup>。ここに、 $\lambda$  と  $\mu$  は弾性係数でLameの定数と呼ばれる。

(6) 負荷状態、除荷状態

塑性状態にあった材料が後続の応力増分  $d\sigma_{ij}$  の方向と大きさによっては除荷状態、すなわち、応力値が降伏面の内側に移動する場合がある。この状態では塑性変形は生じず、弾性変形だけが発生すると仮定されることが多い。塑性変形が発生する応力状態を負荷状態、降伏後、塑性変形が発生しなくなる応力状態を除荷状態と称し、これらは次式によって判別される<sup>64)</sup>。

$$\text{負荷状態} : dW^P \geq 0 \dots\dots\dots (3.27)$$

$$\text{除荷状態} : dW^P < 0 \dots\dots\dots (3.28)$$

3. 土の弾塑性論の概要

土の塑性変形挙動は近年活発に研究されている。このため、十分な理論体系の確立には至っていないが、土の塑性変形をある程度数学的に表現しうるようになった。そこで、これらの中でも比較的単純な塑性モデルを苗マットに準用しうるか否かの検討を行った。

3.1 土の変形挙動<sup>61,70-79)</sup>

土の変形挙動は粒度、組成鉱物、粒子の形状、間隙比、含水比などによって著しい影響を受ける。粒度や粒子の形状によって、土は砂から粘土まで分類され、含水比や間隙比によって固状から液状まで多様に変化する。このように土の変形挙動は非常に複雑ではあるが、多くの研究の結果その特性はある程度まで明らかにされつつある。

従来の研究によって明らかにされた土の変形挙動を弾塑性学的観点から簡単に整理すると次のようになる。

(1) 硬・軟化挙動(硬化様式)<sup>68-77,82-86)</sup>

第II章でも述べたが、土は過去に受けた変形もしくは応力によって、降伏応力値が増減する(図3.1参照)。降伏応力値が大きくなる現象を(ひずみ)硬化現象、逆に、応力値が減少する現象を(ひずみ)軟化現象と称している。平均応力すなわち静水圧のみによる圧縮変形では硬化挙動だけが生ずるが、せん断を含む変形では応力状態によって硬・軟化両現象が見られることが知られている<sup>51)</sup>。

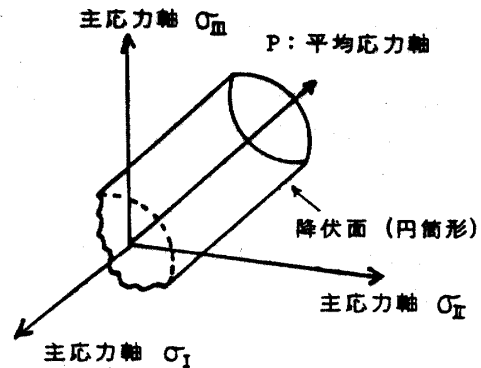


図3.3 Misesの降伏面 Fig.3.3 The yield surface by Mises

上記の硬・軟化挙動は土の体積変化と密接な関係がある。土の場合には、塑性的な体積変形が比較的容易に生ずる。図3.1に示すように、硬化においては体積は減少する。言い換えると、体積の減少は間隙比の低下を意味し、粒子間の接点数が増加するため滑りによる変形抵抗は大きくなる。一方、軟化挙動においては体積は増加する。この場合には、間隙比が大きくなって粒子間の接点数が減少するために滑りによる変形抵抗は小さくなる。せん断変形においては硬化あるいは軟化現象のいずれかが生じた後に、体積変化は発生せずに変形が進む状態すなわち限界間隙状態<sup>77)</sup>に達する。限界間隙状態はcritical void stateの訳語であるが、後述するように土の塑性論では降伏面の決定において極めて重要な概念となっている。

(2) 非線型性

土の変形では応力とひずみの関係に著しい非線型性が見られる。非線型性は塑性変形だけでなく弾性変形にも表れる。このような非線型性を表現した実例として、平均応力による圧縮過程において、体積Vと圧力Pの関係はβを係数として次式で表わされることがある<sup>61)</sup>。

$$V = -\beta \ln | P | \dots\dots\dots (3.29)$$

(3) 弾塑性遷移

金属材料と異なり、土の変形では応力-ひずみ曲線の勾配の変化が緩やかで、明確な降伏点は見つけ難い。間隙比の大小によってかなりの差はあるが、小さな変形でも除荷すると塑性変形が残る。したがって、土の変形はその大小にかかわらず弾性変形と塑性変形とを含み、変形が大きくなるにつれて、塑性変形の比率が徐々に増加するものと考えうる。このように弾性変形から塑性変形に移る過程を弾塑性遷移過程と呼ぶ<sup>86)</sup>。

(4) ヒステリシス

繰返し圧縮試験を行うと応力-ひずみ曲線に著しいヒステリシスが見られる。

(5) 等方圧縮特性

平均応力による圧縮過程においては、間隙比および平均応力の対数 ln(e) および ln|P| の間には線形関係がある<sup>61)</sup> (図3.4参照)。

3.2 土の塑性論

土の塑性変形を始めに本格的に取扱った理論は critical state 理論として知られている。この理論は限界間隙状態に基づいて土の塑性構成式を分析するもので、せん断変形中の土の状態は平均応力P、偏差応力の2次不変量rおよび間隙比eで決定されると仮定している<sup>77)</sup>。すなわち、せん断変形が進行して限界間隙状態(以下、csと略記する)となる応力値(P, r)は間隙比eに応じて変化する。図3.4に示すように<sup>61)</sup>、限界間隙状態は等方圧密線

$$e = e_0 - \alpha \ln | P | \dots\dots\dots (3.30)$$

によって規定される。ここにe<sub>0</sub>は初期降伏時の間隙比、αは両対数面における平均応力と間隙比の勾配を与える係数である。限界間隙状態は(P, r, e)空間において曲面を形成する。これを(P, r)平面に投影すると原点を通る直線を得る。

$$r = -MP \dots\dots\dots (3.31)$$

ここにMは限界間隙状態におけるrと-Pの比を表わす材料定数である。

本式は土の最終的な強度すなわち破壊応力状態を表わし、cs線と呼ばれる。これはCoulomb式によって示されていた破壊基準をより厳密に定義付けしたものと解釈しうる<sup>77)</sup>。

飽和土の非圧密・非排水試験(Uテスト)すなわち体積一定試験を行う時に、csに達した後の径路

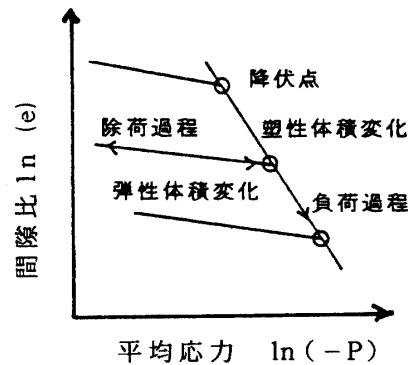


図3.4 等方圧縮特性<sup>61)</sup>  
Fig. 3.4 Compression characteristics by the pressure

の形成する曲線は (P, r, e) 空間において1つの曲面を形成する。応力がこの内部にあれば、土の変形は弾性的であると考えられている。この曲面を (P, r) 面に投影してできる閉曲面 (図3.5参照) が降伏面に相当する。

以上が critical state 理論の概要であるが<sup>51)</sup>、以下、これを拡張して作られた土の塑性論について簡単に述べ、苗マットへの準用を試みる。

土の降伏面としては、図3.6に示すように (P, r) 面においてP軸と2点で交わり、外側になめらかに凸状に膨んだ降伏面が仮定されている。これに加えて等方的な硬・軟化モデルを考えると、次のような挙動を表現しうる。

まず、図3.7においてP軸上の点Aから等方圧密(経路I)を行うと、圧力が $-P_0$ に達するまでは弾性的な体積ひずみ  $\epsilon_v^e$  が発生する。弾性および塑性体積ひずみは次の線型式で与えられる<sup>83)</sup>。

$$\epsilon_v^e = \epsilon_{v_0}^e - \beta \ln |P| \dots\dots\dots (3.32)$$

$$\epsilon_v^p = \epsilon_{v_0}^p - \alpha \ln |P| \dots\dots\dots (3.33)$$

ここに  $\beta$  および  $\alpha$  はそれぞれ弾性状態および塑性状態における図3.4の等方圧密線の勾配を意味する。

塑性体積ひずみ増分  $d\epsilon_v^p$  は平均応力軸Pの負の向きに発生する。塑性体積ひずみの増加に伴って、降伏面は大きくなり、応力値はこの面上にとどまった状態が増加する。その後、点Pより点Aまで徐荷すると弾性的に体積膨張し、 $\epsilon_v^e - \ln |P|$  関係は式(3.32)に従う。降伏面はPの大きさのままで、再負荷するとPより塑性変形が生ずる。

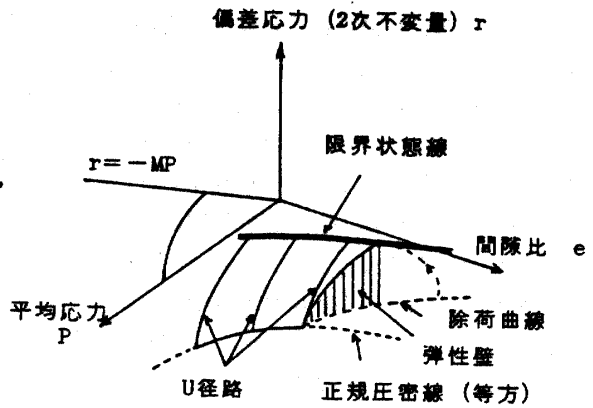


図3.5 限界間隙状態<sup>51)</sup>  
Fig. 3.5 The critical void state

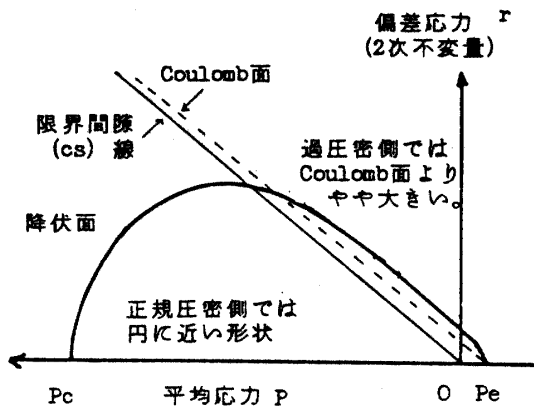


図3.6 (P, r) 面における降伏面の形状  
Fig. 3.6 Shape of yield surface in (P, r) plane

次に点Aより側圧一定の圧縮試験(経路II)では、応力経路はP軸に対して $\sqrt{6}$ の勾配をもつ。降伏面上の点Sに達するまでは弾性的な変形だけであるが、それ以降は塑性変形が生ずる。塑性ひずみ増分の平均応力軸方向の成分が塑性体積ひずみ増分、偏差応力軸方向の成分が塑性偏差ひずみ増分である。変形の進展に伴って、降伏面は応力とともに増加し、同時に塑性ひずみ増分も変化する。応力値がcs面に達すると、降伏面の外向き法線は上向きであるので、体積成分は  $d\epsilon_v^p = 0$  となり、偏差成分のみを含む。応力値がcsに達する前に除荷すると弾性状態

になるが、降伏面は除荷直前の状態にとどまった大きさを保つ。このため再負荷過程では降伏点が最初の点Sより大きくなる。すなわち硬化現象が表れる。これらの様子は図3.7に示す。なお、この過程において塑性ひずみ増分の体積成分は負の値を持っており、塑性的に体積が収縮することがわかる。すなわち、硬化を伴うせん断変形過程では体積減少が生ずることになり、実測結果と傾向が一致する。

さらに、P軸上の点Bから側圧一定で圧縮する(経路III)と経路IIの場合と同様に降伏面に達して塑



性ひずみが生ずる。しかるに塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^P$  の方向は降伏面の外向法線方向であるため、その体積成分  $d\epsilon_V^P$  は正の値を持つ。すなわち塑性的な体積膨張が生ずることを意味する。このため土は柔らかくなり、降伏面は応力値を下げる方向に変化する。体積は弾性域では縮小し、塑性状態に入ってから膨張に転ずる (図 3.1, 3.7 参照)。塑性変形の進展とともに降伏面は小さくなり、やがて応力は  $cs$  に達する。このモデルの挙動によって実測される軟化現象を説明できる<sup>82,83)</sup>。

このように塑性変形の進行時の応力状態やその径路によって、降伏面は多様に变化する。したがって、塑性変形を分析するには降伏面の形状と、降伏後の変化の様式 (硬化様式) を定めておく必要がある。

土の降伏面形状は次の条件を満足することが要請される<sup>71-81)</sup>。

- a. なめらかな凸面を呈する。特に、 $cs$  では降伏面の外向法線は上向き ( $r$  軸に平行) である。
- b.  $cs$  から等方状態までの領域 (正規圧密側) すなわち  $cs$  より下側では、円もしくは楕円に近い形状を呈する。
- c.  $cs$  面 (線) より上側の領域 (過圧密側) では  $cs$  面よりわずかに膨らんでいる。

$cs$  面は Coulomb 面に近いが、実測される過圧密状態での降伏値、すなわち応力-ひずみ曲線のピーク値は、応力状態によってはこれよりやや大きくなることはよく観察される現象である (図 3.6 参照)。

降伏面の変化の様式としては、大きく、等方硬 (軟) 化、移動硬 (軟) 化、回転硬 (軟) 化およびそれらの複合形が考えられている<sup>37, 69, 86)</sup>。等方硬化は応力原点を中心に、後続の降伏面が相似形を保った状態で膨張あるいは縮小するもので、次式で表わされる。

$$f(\sigma_{ij}, F(\epsilon_{ij}^P)) = 0 \quad \dots\dots\dots (3.34)$$

移動硬化は応力値に応じて降伏面が平行移動するもので、次式で表わされる。

$$f(\sigma_{ij}, K_{ij}(\epsilon_{ij}^P)) = 0 \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

回転硬化は応力値に応じて降伏面が回転するもので次式で表わされる。

$$f(\pi_{ijkl}(\epsilon_{ij}^P) \sigma_{kl}) = 0 \quad \dots\dots\dots (3.36)$$

ここに、 $F(\epsilon_{ij}^P)$  は硬化関係数、 $K_{ij}(\epsilon_{ij}^P)$  は平行移動量を表わす 2 階のテンソル、 $\pi_{ijkl}(\epsilon_{ij}^P)$  は応力軸の回転を与える 4 階のテンソルである。いずれも塑性ひずみの関数である。等方硬化以外はひずみに伴う異方性の発達 (応力-ひずみ曲線のヒステリシス)、バウシニング効果などを表現するために導入されたものである<sup>86)</sup>。これらの硬化様式では降伏面は相似形を保つが、降伏面の形状自体が変形する様式も考えられる。

土の降伏面の関数形としては例えば次のような関数が提案されている<sup>83)</sup>。

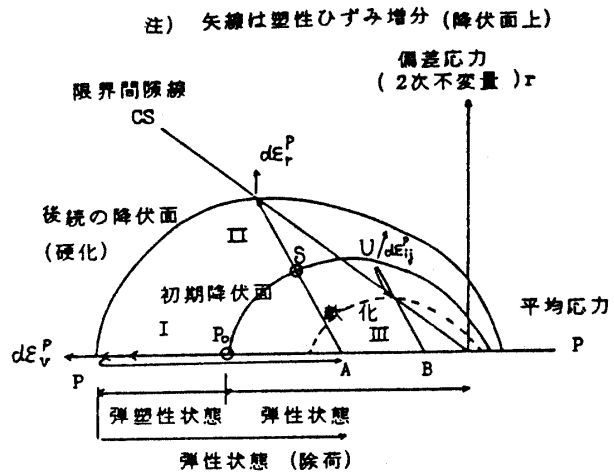


図 3.7 等方硬軟化モデル<sup>83)</sup>  
 応力-ひずみ曲線 I → 図 3.4  
 II → 図 3.1 (II)  
 III → 図 3.1 (III)

① Coulomb・Mohr

$$f = \frac{1}{\sin \phi} \left( \frac{\sigma_I - \sigma_{II}}{2} + \frac{\sigma_I + \sigma_{II}}{2} \sin \phi \right) - C \cot \phi \quad (3.37)$$

② Burland

$$\bar{f}^2 = (-P)^2 \{ 1 + (\eta/M)^2 \} \quad (3.38)$$

③ Roscoe

$$\bar{f} = -P (\eta/M) \quad (3.39)$$

④ Rowe

$$\bar{f} = \sigma_{II} \frac{1}{R^{k-1}} \quad (3.40)$$

⑤ 橋口

$$\bar{f} = (K^2 - 1) \sigma_I \sigma_{II} / (\sigma_I - K^2 \sigma_{II}) \quad (3.41)$$

ここに $\sigma_I$ および $\sigma_{II}$ はそれぞれ最大および最小主応力である。また

$$\eta = -r/P \quad (3.42)$$

$$R = \sigma_{II} / \sigma_I \quad (3.43)$$

さらにKは材料定数でcsにおけるR値を意味する。

硬化様式としては等方硬化を想定して理論を組み立てるのが最も単純である。硬化の程度を表わす測度としてはDruckerによって塑性体積ひずみ $\epsilon_v^p$ が主要な役割を果たすことが示唆された<sup>66-68)</sup>。すなわち、間隙の疎密の程度によって降伏面の大小が決まる。

したがって、土の塑性条件式は次式で与えうる。

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_v^p) = 0 \quad (3.44)$$

あるいは

$$\bar{f}(\sigma_{ij}) - F(\epsilon_v^p) = 0 \quad (3.45)$$

この場合、硬化関数の具体形は等方圧密線、式(3.33)によって決定される。同式において $F_0 = -P_0$ とすると

$$F = F_0 \cdot \exp(-\epsilon_v^p / \alpha) \quad (3.46)$$

を得る<sup>82)</sup>。 $F_0$ は硬化関数の初期値である。

以上より式(3.37)～(3.41)と式(3.46)を組み合わせると等方硬化における土の塑性構成式を具体的に決定できる。

### 3.3 土の弾塑性構成式

等方硬化を表わす降伏条件式(3.44)、(3.45)に対して式(3.22)の垂直条件式を適用すると

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{df}{dF} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot d\epsilon_v^p \quad (3.47)$$

あるいは

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{d\bar{f}}{dF} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot d\epsilon_v^p \quad (3.48)$$

を得る<sup>83)</sup>。これらに式(3.37)～(3.46)を用いると塑性ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p$ が具体的に決まる。

一方、土の弾性変形は非常に小さいため、専ら塑性変形に研究の重点が置かれており、十分な研究がなされているとは言い難い。弾性構成式としては等方圧密状態における体積変形(図3.4参照)より、

式 (3.32) が提案されている。また、有限要素法などによる変形解析<sup>84,85)</sup>のために便宜上、式 (3.25), (3.26) で示す Hooke の法則が使用されている。橋口は式 (3.32) に加えて弾性せん断ひずみをべき関数で表わし、弾性構成式として次式を提案している<sup>83)</sup>。

$$d\epsilon_{ij}^e = \frac{\beta}{3(P_r - P)} \cdot dP \delta_{ij} + aNr^{N-1} d\sigma'_{ij} \dots\dots\dots (3.49)$$

ここに a および N は弾性せん断ひずみを規定する材料定数である。

弾性ひずみ増分に対して式 (3.25), 塑性ひずみ増分に対して式 (3.48) を用いると、ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}$  はこれらの和で与えられる。

$$d\epsilon_{ij} = \left( E_{ijkl}^{-1} + \frac{1}{\frac{dF}{d\epsilon_v} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial P}} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{kl}} \right) d\sigma_{kl} \dots\dots\dots (3.50)$$

ここに  $E_{ijkl}^{-1}$  は弾性構成テンソルの逆形式で式 (3.49) より求められる。

または、応力増分  $d\sigma_{ij}$  は

$$d\sigma_{ij} = \left( E_{ijkl} - \frac{E_{ijmn} \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{mn}} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{pq}} E_{pqkl}}{\frac{1}{G} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{rs}} \cdot E_{rstu} \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{tu}}} \right) d\epsilon_{kl} \dots\dots\dots (3.51)$$

で表わされる。

4. 苗マットの弾塑性論

第II章で示した苗マットの力学的性質に基づいていくつかの基本仮定をおき、上述の土の塑性論を参考にして、苗マットの塑性変形挙動を説明しうる塑性論を展開する。

4.1 塑性挙動

まず、第II章で述べた実験結果を弾塑性論的な観点より整理すると次のようになる。

(a) 全変形量のうち、塑性変形の占める割合が大きい。圧縮ひずみ 0.3 のうちおよそ 0.24 は塑性ひずみであった。

(b) 微小な圧縮応力値に対しても容易に塑性変形が生ずる。これは初期の負荷曲線の立上り勾配が再負荷曲線のそれよりはかなり小さいことなどから確認した。したがって、弾塑性遷移過程を考慮することが必要となる。

(c) せん断応力によって体積変化が発生する。圧縮試験および一面せん断試験では体積は収縮し、硬化現象が生じた。

(d) 引張では応力が苗マットの引張強度に達したら破断し、その強度を完全に失う。一方、圧縮では引張よりかなり大きな応力でも破壊しなかった。すなわち、引張と圧縮における破壊応力は圧縮の方が大きい。

(e) せん断における変形パターンはゆるぎの土に近いパターンを示す。また、せん断強度は Coulomb 式で概ね近似できる。粘着力 C は床土より苗マットの方が大きく、内部摩擦角  $\phi$  は等しいか苗マットの方がやや小さい。本式を破壊基準として採用すると引張強度を過大に見積もるので、修正が必要である。

(f) 苗マットでは根の量、根の強さおよび含水比が強度や変形性に影響を与える。

(g) 根による強度の増加は引張側になるほど顕著で、圧縮側ではそれほど大きくない。すなわち、床土の強度に比べると苗マットでは引張側の強度の増加が著しい。

(h) 除荷・再負荷過程では応力-ひずみ曲線に著しいヒステリシス・ループが見られる。

4.2 苗マットの塑性変形に関する基本仮定

上述のように、苗マットの塑性挙動は全般に床土のそれに比較的近く、引張側および低応力域におい

て異なった挙動を示すことが明らかとなった。これより苗マットに対しても土の塑性論をそのまま、もしくは修正を施して用いることが期待される。そこで苗マットの塑性挙動を表現するモデルを導入するために、次に示すいくつかの基本仮定をおく。

(1) 降伏面が存在する。これは応力  $\sigma_{ij}$  と塑性ひずみ  $\epsilon_{ij}^P$  の関数

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^P) = 0 \dots\dots\dots (3.52)$$

$$\bar{f}(\sigma_{ij}) - F(\epsilon_{ij}^P) = 0 \dots\dots\dots (3.53)$$

である。

(2) 応力空間における苗マットの降伏面形状は土のそれと同形であり、なめらかな凸状の閉曲面を呈する(図3.8参照)。

(3) 初期降伏面の大きさは苗マットの初期間隙比  $e_0$ 、および、根の量とその強さによって定まる。

(4) 塑性変形の進展に伴って硬・軟化挙動が生じ、後続の降伏面は塑性体積ひずみ  $\epsilon_V^P$  だけでなく塑性偏差ひずみの2次不変量  $\epsilon_r^P$  によって規定される。これらの役割については後述する。

(5) 塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^P$  は降伏面の法線方向に生ずる。すなわち、垂直条件式(3.22)が成り立つ。

(6) 塑性変形は未降伏状態すなわち、応力値が降伏面上に到達していない状態でも発生する。この場合、塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^P$  は降伏面と相似な塑性ポテンシャル面  $\phi$  によって規定される。

これらの基本仮定のうち、(3)、(4)以外は土のような粒状体一般に適用される仮定であるが、(3)および(4)は苗マットの塑性変形における根の影響とその特徴を表現するために導入したものである。

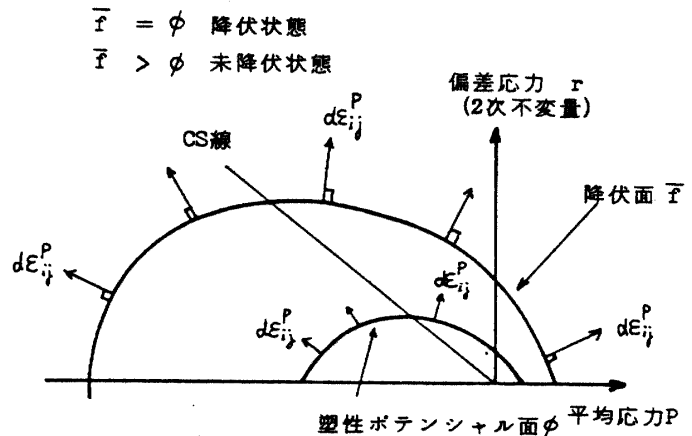
4.3 塑性モデルの定性的挙動

上述の仮定に基づいて、具体的な塑性モデルを導入して、苗マットの塑性変形挙動を定性的に分析してみる。

1) 初期降伏面

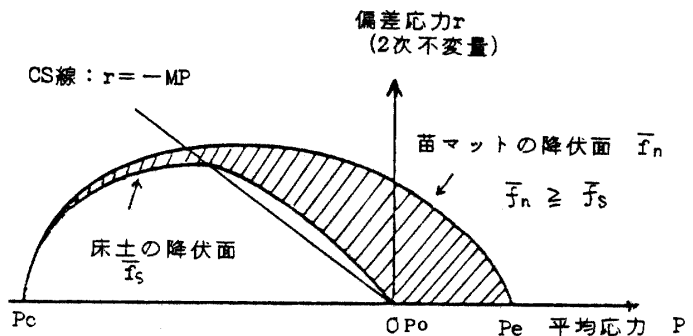
図3.9に応力空間における苗マットと床土の初期降伏面の模式図を示す。同図のように両曲面は平均応力P軸とそれぞれ2つの交点  $P_e$ ,  $P_c$  および  $P_o$ ,  $P_c$  をもつが、負側  $P_c$  で一致している。他

方、平均応力値が大きくなる、すなわち正側になるほど両曲面は離れ、苗マットの降伏面と平均応力軸の正側の交点  $P_e$  は相対的に大きな値を持つのに対して、床土のそれは極めて小さく、原点よりやや大



注) 矢線は塑性ひずみ増分を表わす。これは降伏状態では降伏面より、未降伏状態では塑性ポテンシャル面より生ずる。

図3.8 苗マットの降伏面形状の模式図  
Fig. 3.8 An assumed yield surface of mats



注) 斜線部は床土と苗マットの降伏面の差を表わす。平均応力の正側で差が大きい。

図3.9 苗マットと床土の初期降伏面  
Fig. 3.9 Initial yield surfaces of mat and bed soil

きいか、もしくは原点に一致する。

この降伏面は苗マットの塑性変形に関する基本仮定 (1)~(4)、特に (3) および (4) によって導いたもので、苗マットが引張あるいは負圧にもある程度の抵抗を示す特徴を表現しうる。さらに、圧縮側では苗マットの塑性変形は床土の塑性変形に漸近することも表現できる。降伏面と平均応力軸との交点  $P_e$ 、 $P_c$  のうち、負側の  $P_c$  は主に苗マットの空隙比によって定まり、正側の交点  $P_e$  は根の力学状態によって定まる。したがって、根の生育のよい苗マットほど初期降伏面は大きく、引張側の強度が強くなることを表わしうる。なお、II, 7 で苗マットの破壊基準として Coulomb 式を修正した放物線を考えたが、これは引張側だけに注目したもので、圧縮側まで含めて考慮すると 3.9 に示す形状が適切である。

2) 塑性条件式

未降伏状態における塑性変形を規定する塑性ポテンシャル面を  $\phi$  とすると、

$$\phi < \bar{f} \text{ (未降伏状態)} \dots\dots\dots (3.54)$$

$$\phi = \bar{f} \text{ (降伏状態)} \dots\dots\dots (3.55)$$

となる。未降伏状態における塑性ポテンシャル面は、図 3.8 に示すように降伏面と相似形 ( $\phi \propto \bar{f}$ ) になると仮定する。

3) 塑性ひずみ増分

基本仮定 (5) および (6) より、苗マットの塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  は次式で与えうると仮定する。

$$\begin{aligned} d\epsilon_{ij}^p &= H \left( \frac{\phi}{\bar{f}} \right)^n \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} d\phi \\ &= H \left( \frac{\phi}{\bar{f}} \right)^n \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{kl}} d\phi_{kl} \dots\dots\dots (3.56) \end{aligned}$$

$$\left( \phi / \bar{f} \right)^n \begin{cases} < 1 & \text{(未降伏状態)} \dots\dots\dots (3.67) \\ = 1 & \text{(降伏状態)} \end{cases}$$

ここに  $H d\phi$  は式 (4.22) における非負の係数  $G$  に相当する。また  $(\phi / \bar{f})^n$  は未降伏状態における塑性ひずみ増分の大きさを制御する係数である (図 3.8 参照)。すなわち、これらの係数によって未降伏状態において降伏状態以上の塑性ひずみ増分が発生するのを防止する。

なお、応力値が降伏面に到達した後の負荷状態では常に、

$$\bar{f} = \phi \dots\dots\dots (3.58)$$

となり、塑性ひずみ増分は式 (3.48) で記述される。

4) 硬・軟化挙動およびダイレイタンス

土の硬・軟化挙動は前述のように、主に塑性体積ひずみ  $\epsilon_v^p$  の変化によって生ずるが、苗マットでは根があるためにこれに加えて塑性偏差ひずみの 2 次不変量  $\epsilon_p^p$  によって生ずると考える。

塑性偏差ひずみすなわち塑性せん断変形が増加すると、まず苗の側根が切断されて根と床土の結合が疎になり、また根と根の絡みが次第に解れ、最後に根そのものが切断するために苗マットは弱くなる (図 3.10 参照)。根が完全に破断するまで偏差ひずみが進行すると、それ以降の変形では根は苗マットの強度に寄与しないことになる。この限界における塑性偏差ひずみの 2 次不変量を  $\epsilon_{ur}^p$  で表わすことにする。これは苗マットの根の分布状態とその強度によって定まる。

$$\epsilon_{ur}^p = \epsilon_{ur}^p (s, \rho) \dots\dots\dots (3.59)$$

ここに  $s$  は根の引張強度、 $\rho$  は分布状態を表わす関数である。この軟化挙動には体積変化は関与せず、また、塑性偏差ひずみによる硬化も生じないと仮定する。

さらに、正の塑性体積ひずみ  $\epsilon_v^p$  が生ずる、すなわち、体積が膨張すると床土の強度は小さくなるか、もしくは消滅する。同時に根が次第に解れたり、切断するので、苗マットの強度は全体的に小さくなる

(図 3.10 参照)。体積膨張による引張作用で根が完全に切断する時の塑性体積ひずみを  $\epsilon_{uv}^p$  とする。これも苗マットの根の分布や強度などの力学状態によって定まる。

$$\epsilon_{uv}^p = \epsilon_{uv}^p(s, \rho) \dots \dots \dots (3.60)$$

正の塑性体積ひずみが  $\epsilon_{uv}^p$  を超えると、根は強度を失い、その後の変形では苗マットの力学的性質は床土のそれに一致する。

一方、負の塑性体積ひずみに対しては、床土の硬化によって苗マットの強度は大きくなる。等方的な体積の収縮によって根が破壊することはないと考えるので、根の役割は体積膨張の場合に比べると著しい非対称性を示す。

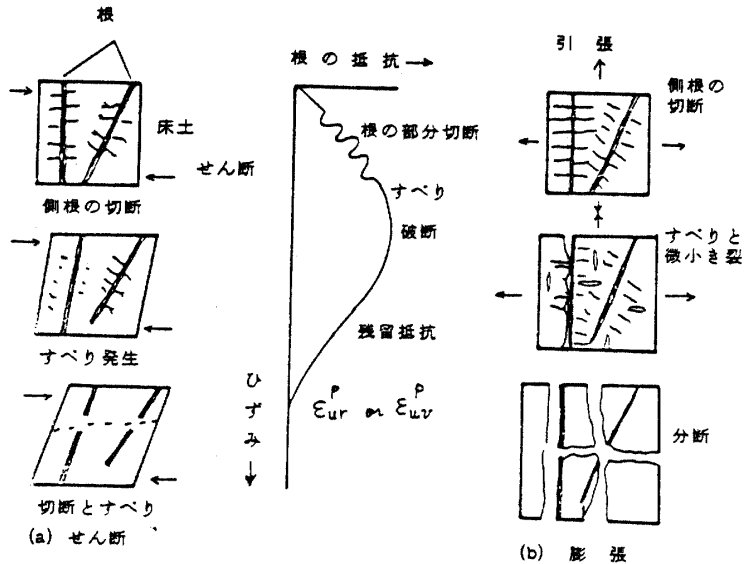


図 3.10 せん断と膨張における根の状態と抵抗の変化

Fig. 3.10 Variations of roots condition and resistance by shear and expansion

以上に述べた苗マットの塑性モデルに基づいて膨張過程、引張過程、圧縮過程における降伏面の挙動と応力-ひずみ曲線の定性的な検討を行う (図 3.11 参照)。なお、簡単のために降伏面は円で表わす。

(A) 膨張過程

図 3.11(A) に示す膨張過程では応力は原点  $P_0$  から平均応力  $P$  軸上を  $P_1, P_2, \dots$  と増加する。すなわち負圧が作用する。初期降伏面  $f_0$  に相似な塑性ポテンシャル面  $\phi$  によって、膨張開始時より、正の塑性体積ひずみが生ずる。塑性ポテンシャル面は応力の増加に伴って  $\phi_1, \phi_2, \dots$  と大きくなり、比  $\phi / \bar{f}$  が 1 に近くなるほど、塑性体積ひずみは増大する。一方、正の塑性体積ひずみの増加による間隙比の増加および根の切断によって苗マットが軟化するために、降伏面は  $\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots$  と次第に小さくなる。この段階では応力-ひずみ曲線は単調に増加する。塑性ポテンシャル面と降伏面が一致した時点で苗マットは破断し、2つの曲面は応力原点  $P_0$  に収束する。

(B) 単純引張過程

図 3.11(B) に示す単純引張過程において、応力値の増加に対応する塑性ポテンシャル面によって生ずる塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  は正の体積成分  $d\epsilon_v^p$  と偏差成分  $d\epsilon_r^p$  を持つ。このため前述のように降伏面は縮小する。体積ひずみの増加によって等方軟化、すなわち降伏面は同心的に縮小すると考える。一方、偏差ひずみの増加による降伏面の縮小は、図 3.11(B) に示すように平均応力軸との正側の交点  $P_e (> 0)$  だけが原点側へ移動することによって生ずると仮定する。すなわち、移動硬(軟)化の一種である。降伏面と塑性ポテンシャル面が接近すると塑性ひずみ増分は大きくなるので、応力の増加率に比べてひずみ増分の増加率が大きくなる。このため、応力-ひずみ曲線の勾配は徐々に減少し、次第に平行線に近くなった後にピーク値を示し、上に凸の形状となる。この時点、もしくはやや進んだ時点で降伏面と塑性ポテンシャル面が一致し、苗マットは破断する。

(C) 等方圧縮過程

図 3.11(C) に示す等方圧縮過程では応力値が初期塑性ポテンシャル面  $\phi_0$  に到達するまでは弾性変

形だけが生ずる。塑性ポテンシャル面到達後は負の塑性体積ひずみ増分  $d\epsilon_v^p$  が発生し、塑性ポテンシャル面  $\phi$  とともに降伏面  $\bar{f}$  は大きくなる。この過程では根の影響は見られないことは前述の通りである。また、圧縮によって引張側の強度が増加することはないと仮定すると、降伏面と平均応力軸との正側の交点  $P_e$  は固定されたままで、負側の  $P_c$  がさらに負側へ移動することによって降伏面は大きくなる。すなわち、降伏面の増加はその中心が平均応力軸の負側へ移動することによって生ずる硬化様式が表れる。応力-ひずみ曲線は土の等方圧縮と同じく両対数面で直線となる。

(D) 単純圧縮過程

図3.11(D)に示す単純圧縮過程では、等方圧縮過程の場合と同様に、応力値が初期ポテンシャル面  $\phi_0$  に到達した後に塑性変形が生ずる。塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  は体積成分  $d\epsilon_v^p$  と偏差成分  $d\epsilon_p^p$  から構成される。初期降伏面  $\bar{f}_0$  の状態によって塑性体積成分は正もしくは負の値をとる。負の塑性体積ひずみが発生する場合には降伏面は大きくなり、逆に正の塑性体積ひずみが発生する場合には降伏面は小さくなる。一方、塑性偏差ひずみの増加によって根の切断が発生するために、降伏面と平均応力軸との正側の交点  $P_e$  は原点側に移動し、苗マットは軟化する。このため、硬化は  $P_e$  が原点側に移動しながら、同時に降伏面は大きくなる形式をとる。この過程において塑性偏差ひずみが  $\epsilon_{ur}^p$  より大きくなると  $P_e$  は原点に達して、それ以降は変化しなくなる。これに対して、正の塑性体積ひずみが発生する場合には平均応力軸との負側の交点  $P_c$  は原点側に移動し、さらに塑性偏差ひずみによって正側の交点  $P_e$  も原点側へ移動しながら降伏面が縮小する。

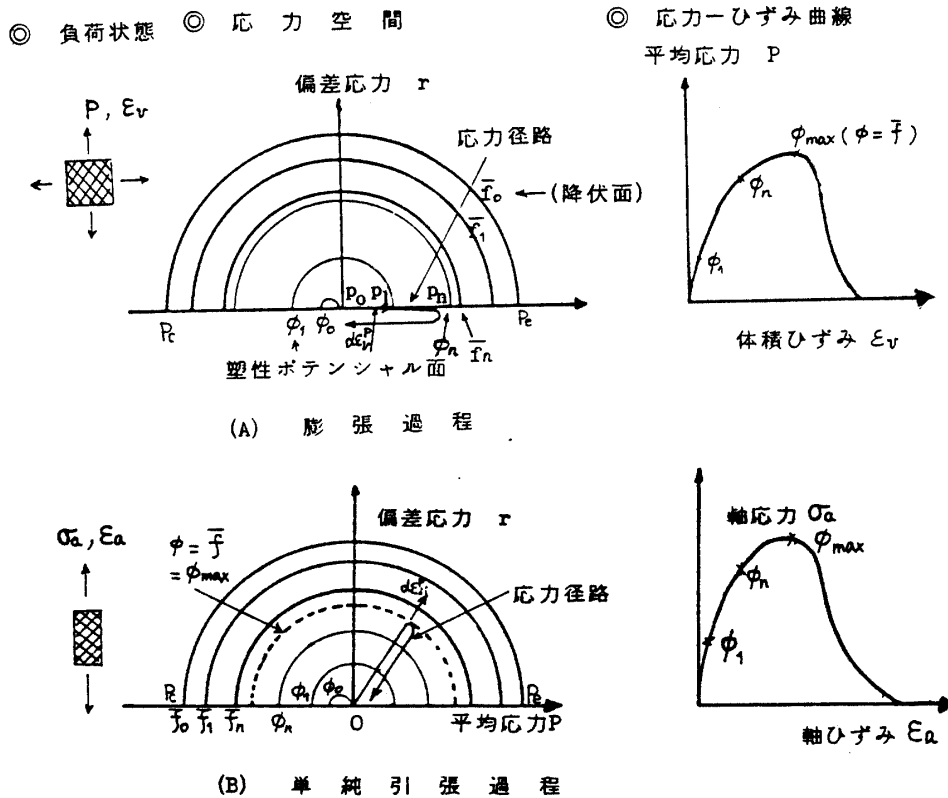


図 3.11 苗マットの硬・軟化挙動  
Fig. 3.11 Hardening and softening behaviours of mat

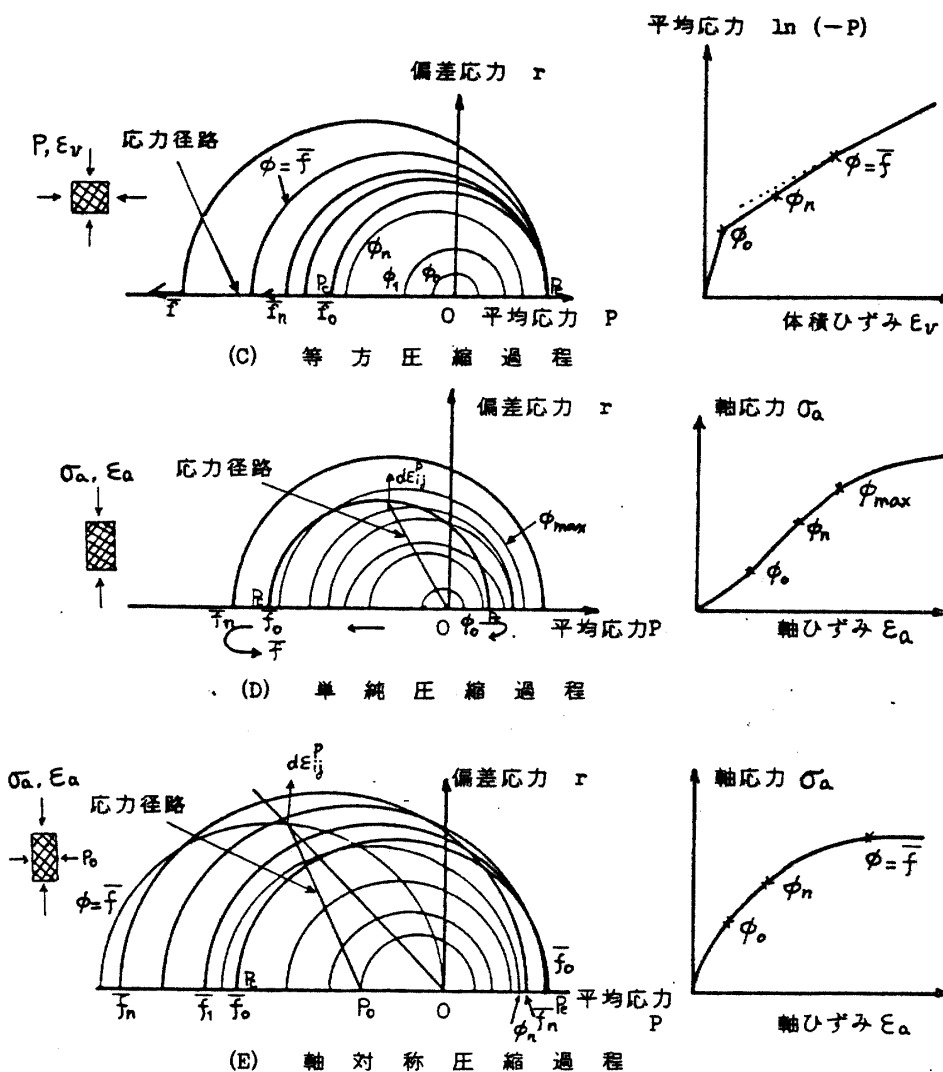


図3.11 苗マットの硬・軟化挙動  
Fig. 3.11 (Part 2)

塑性ポテンシャル面と降伏面が一致した後の挙動は次の塑性体積ひずみ増分の正負によって2通りのパターンが生じる。

(I) 塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  が負の体積成分を持つ場合には応力状態は次第に  $cs$  に近づき塑性体積ひずみ増分が減少するので、硬化の割合は次第に減少し、やがて、塑性体積ひずみ増分  $d\epsilon_v^p = 0$  の状態すなわち  $cs$  に達して応力は一定のまま変形が進む。この過程において応力-ひずみ曲線は勾配が減少し、最終的に水平状態となる。

(II) 圧縮過程において、塑性体積ひずみ増分  $d\epsilon_v^p$  が正の場合には、降伏面は次第に縮小を続け、応力値は一旦  $cs$  線を通り過ぎるが、降伏面の縮小によって塑性ひずみ増分は増大する。このためある時点より応力増分は減少し始め、やがて  $cs$  に到達する。

これらの2つの過程において、体積ひずみは、(I)では単調に減少し、(II)では一旦減少した後再び増加する。すなわち前者はひずみ硬化型、後者はひずみ軟化型である。

(E) 側圧一定圧縮過程 (三軸圧縮)

図3.12(E)に示す側圧一定の圧縮過程では、概ね単純圧縮過程で述べたのと同様の傾向が表れる。



II. 6で述べたように、苗マットは初期間隙比が大きいので降伏面のサイズは一般に小さい。応力水準によっては初期の等方圧密の過程において容易に降伏することも考えうる。このため、圧縮段階ではほとんどが負の体積ひずみを生ずる変形すなわち硬化挙動を示す。これは苗マットの一面せん断において硬化挙動が表れたことに対応する。

5) 降伏面のサイズ

苗マットの塑性条件式は応力  $\sigma_{ij}$ 、塑性体積ひずみ  $\epsilon_v^p$ 、塑性偏差ひずみの2次不変量  $\epsilon_p^p$  の関数であるが、上述の硬・軟化挙動で示したように降伏面および塑性ポテンシャル面のサイズは変化する。硬化の様式を表わし、降伏面のサイズを規定する関数を硬化関数  $F$  とする。前述の基本仮定 (4) より苗マットの硬化関数は一般に

$$F = F(\epsilon_v^p, \epsilon_p^p) \dots\dots\dots (3.61)$$

で表わしうる。

(4)で述べた苗マットの硬化および軟化挙動を表現しうる硬化関数  $F$  の例として次式を仮定する。

$$F = \bar{F} + \bar{P} \dots\dots\dots (3.62)$$

$$\bar{F} = F_0 \cdot \exp(-\epsilon_v^p / \alpha) \dots\dots\dots (3.63)$$

$$\bar{P} = Pe \left(1 - * \frac{\epsilon_p^p}{\epsilon_{ur}^p}\right)^m \left(1 - \nabla \frac{\epsilon_v^p}{\epsilon_{uv}^p}\right)^1 \dots\dots\dots (3.64)$$

本式において、右辺第1項  $\bar{F}$  は橋口によって土の硬化関数として提案された関数で、塑性体積ひずみの大きさによって床土の硬化および軟化挙動を記述する(式(3.46)参照)。第2項  $\bar{P}$  は塑性偏差ひずみおよび塑性体積ひずみと根の相互関係による降伏面のサイズの変化を表わすために新しく導入した関数である。ここに  $Pe$  は応力の作用していない自然状態における  $P$  の値を意味する。また  $*$  および  $\nabla$  はそれぞれ塑性体積ひずみと塑性偏差ひずみに関連して降伏面に対する根の影響の限界を表わすために次の値をもつ。

$$* \begin{cases} = 1 & (\epsilon_p^p \leq \epsilon_{ur}^p) \dots\dots\dots (3.65) \\ = 0 & (\epsilon_p^p > \epsilon_{ur}^p) \end{cases}$$

$$\nabla \begin{cases} = 1 & (0 < \epsilon_v^p \leq \epsilon_{uv}^p) \dots\dots\dots (3.66) \\ = 0 & (\epsilon_v^p \leq 0, \epsilon_v^p > \epsilon_{uv}^p) \end{cases}$$

すなわち  $*$  の機能によって、塑性偏差ひずみが根の発揮しうる限界値に達した後は、硬化関数に対するこの影響は消失する。同様に  $\nabla$  は根に関連した塑性体積ひずみの硬化関数に対する影響の範囲を規定する。なお、 $\bar{P}$  は軟化して一旦原点に達した後はその状態を保つ。

6) 降伏面および塑性ポテンシャル面の形状

苗マットの降伏面がいかなる形状を持つかに関しては様々な検討を要するが、第II章の実験結果より床土のそれに近いと推察できる。そこで基本仮定(2)および(6)で述べたように、土と同形の降伏面および塑性ポテンシャル面を使用する。

土の降伏面に関する研究自体が十分に確立されているわけではないが、比較的単純な降伏面形状として、本研究では前述の Burland の提案した楕円面を採用する(図2.12参照)。苗マットは引張にも抵抗を持つのでその関数は次式で表わされる。

$$\bar{f}^2 - F^2 = (P - P_0)^2 \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{M^2} \left( \frac{r}{P - P_0} \right)^2 \right\} - F^2 = 0 \dots\dots\dots (3.67)$$

ここに、 $P_0$  は楕円中心の  $P$  座標であるが塑性体積ひずみ  $\epsilon_v^p$  および塑性偏差ひずみの2次不変量  $\epsilon_p^p$  の変化によって、上述の様式で移動する。同様に塑性ポテンシャル面  $\phi$  も楕円形でその中心は常に降伏面

の中心 (Po, 0) と一致していると仮定する。塑性ポテンシャル面と降伏面の中心座標 Po は次式で定まる。

$$P_o = \bar{P} - F/2 \dots\dots (3.68)$$

上述の降伏面形状, 式 (3.67) および, 降伏面のサイズ, 式 (3.62) を式 (3.56) に適用すれば塑性ひずみ増分の具体的な関数形が定まる。これについては次節で述べる。

4.4 弾性について

苗マットの弾性に関する検討は, II.5 における繰返し圧縮過程などにおいて若干行ったにすぎない。このため, 苗マットの弾性構成式として用いるモデルを明確に示したとは言い難いが, 実験結果では, 苗マットの弾性変形も相当の非線型性を含んでいるので, 基本的にはそれを表現できる構成式が必要となる。その例として, 前述の橋口によって提案された平均応力 P および

偏差応力 r に関する指数関数で表示された構成式 (3.49) を採用する。この式を書き換えると

$$d\sigma_{ij} = \left\{ \frac{3(P_r - P) - \beta}{3\beta a N r^{N-1}} \delta_{ij} \delta_{kl} + \frac{1}{2a N r^{N-1}} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right\} d\epsilon_{kl} \dots\dots (3.69)$$

となる。中括弧内は弾性構成テンソル E<sub>ijkl</sub> を具体的に示したものである。

本式において, 係数 Pr は正の平均応力 P による体積弾性変形の限界応力を表わし, 根重 W (g/cm<sup>2</sup>) の関数であると仮定する。根重が大きいほどこの限界応力は高くなるので, 具体的な関数として次式を考えた。

$$P_r = P_{r0} + t\sqrt{W} \dots\dots (3.70)$$

また係数 a はせん断変形を制御し, 根重が大きいほど小さい値となってせん断に対する抵抗を増加させる。

$$a = a_0 - u\sqrt{W} \dots\dots (3.71)$$

ここに, Pro および a<sub>0</sub> は床土の値であり, t および u は係数である。

IV.2 苗マットの弾塑性構成式

1. はじめに

前節で展開した苗マットの塑性論に基づいて, 本節では具体的な弾塑性構成式を導く。その後で, 本構成式による数値計算例を述べ, ここで導入したモデルで苗マットの变形挙動を概ね記述し示す。

2. 弾塑性構成式

2.1 降伏状態における塑性構成式

降伏状態  $\bar{f} = \phi$  における苗マットの塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  は式 (3.56) より

$$d\epsilon_{ij}^p = H \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} \dots\dots (3.72)$$

で与えられる。

$$\bar{f}^2 = (P - P_o)^2 \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{M^2} \left( \frac{r}{P - P_o} \right)^2 \right\}$$

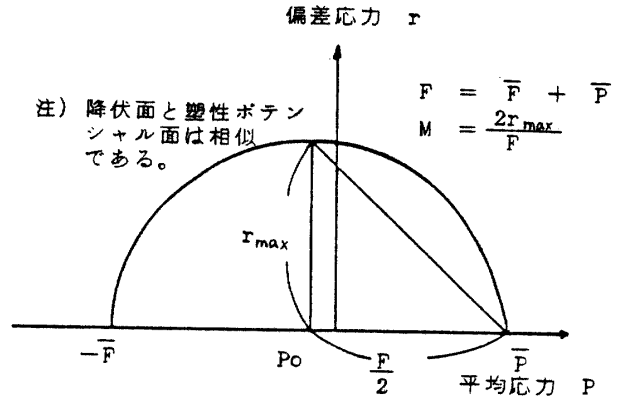


図 3.12 応力空間における苗マットの塑性ポテンシャル面と降伏面

Fig. 3.12 An example of plastic potential surface and yield surface of mat in stress space

塑性条件式は

$$f = \bar{f}(P, r) - F(\epsilon_v^p, \epsilon_r^p) = 0 \dots\dots\dots (3.73)$$

である。上記2式より、係数Hを求め、次式を得た。

$$\frac{1}{H} = \frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \dots\dots\dots (3.74)$$

したがって、塑性構成式は次式で表わしうる。

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial r}} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} \dots\dots\dots (3.75)$$

もしくは

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial r}} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{ij}} \left( \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} dP + \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} dr \right) \dots\dots\dots (3.76)$$

となる。

あるいは

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} \cdot \frac{\delta_{ij}}{3} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \sigma'_{ij} \dots\dots\dots (3.77)$$

より

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial r}} \left( \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} \cdot \frac{\delta_{ij}}{3} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \sigma'_{ij} \right) \left( \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} dP + \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} dr \right) \dots\dots\dots (3.78)$$

を得る。

以上の式を具体化するには式(3.62)～(3.67)に対して、まず $\partial \bar{f} / \partial P$ 、 $\partial \bar{f} / \partial r$ 、 $\partial F / \partial \epsilon_v^p$  および  $\partial F / \partial \epsilon_r^p$  を決定する必要がある。多少の演算を行い、次の関係式を得た。

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial P} = \left\{ 1 + \frac{1}{M^2} \left( \frac{r}{P - P_0} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - \frac{r^2}{fM^2(P - P_0)} \dots\dots\dots (3.79)$$

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial r} = \frac{1}{f} \cdot \frac{r}{M^2} \dots\dots\dots (3.80)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} = -\frac{1}{\alpha} \bar{F} - \frac{\nabla \ell}{\epsilon_{uv}^p (1 - \nabla \frac{\epsilon_{uv}^p}{\epsilon_{uv}^p})} \bar{P} \dots\dots\dots (3.81)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} = -\frac{*m}{\epsilon_{ur}^p (1 - * \frac{\epsilon_r^p}{\epsilon_{ur}^p})} \cdot \bar{P} \dots\dots\dots (3.82)$$

これらの関係式(3.79)～(3.82)を式(3.75)～(3.78)のいずれかに代入すれば苗マットの塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  が具体的に定まる。

特殊な例として引張や圧縮などの応力径路の定まった変形過程においては次の関係式が成立する。

a 膨張過程、等方圧縮過程：

$$dr = d\epsilon_r^p = 0 \dots\dots\dots (3.83)$$

$$d\epsilon_v^p = \frac{1}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial r}} \cdot \left(\frac{\partial \bar{f}}{\partial P}\right)^2 dP \dots\dots\dots (3.84)$$

d 単純引張過程, 単純圧縮過程, 軸対称圧縮過程:

これらの過程では  $\sigma_{II} = \sigma_{III}$  で, 軸応力だけが変化する。すなわち,

$$d\sigma_{II} = d\sigma_{III} = 0 \dots\dots\dots (3.85)$$

$$dP = d\sigma_I / 3 \dots\dots\dots (3.86)$$

$$dr = * \sqrt{2/3} d\sigma_I \dots\dots\dots (3.87)$$

これより, 軸ひずみ増分  $d\epsilon_I^p$  は

$$d\epsilon_I^p = \frac{1}{9 \left( \frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \right)} \cdot \left( \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + 2 \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \right) \cdot \left( \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + * \sqrt{6} \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \right) \cdot d\sigma_I \dots (3.88)$$

また, 体積ひずみ増分  $d\epsilon_v^p$  および側方ひずみ増分  $d\epsilon_{II}^p$  はそれぞれ

$$d\epsilon_v^p = \frac{1}{3 \left( \frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \right)} \cdot \left( \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} + * \sqrt{6} \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \right) \cdot \frac{\partial \bar{f}}{\partial P} d\sigma_I \dots\dots\dots (3.89)$$

および

$$d\epsilon_{II}^p = d\epsilon_{III}^p = (d\epsilon_v^p - d\epsilon_I^p) / 2 \dots\dots\dots (3.90)$$

となる。

2) 未降伏状態における塑性構成式

未降伏状態における塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  は, 前述のように, 塑性ポテンシャルによって規定されると仮定した。式(3.56)より, 塑性ひずみ増分の一般式は次式で与えられる。

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{(\phi/F)^n}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} \dots\dots\dots (3.91)$$

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{(\phi/F)^n}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} dP + \frac{\partial \phi}{\partial r} dr \right) \dots\dots\dots (3.92)$$

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{(\phi/F)^n}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r}} \cdot \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} \cdot \frac{\delta_{ij}}{3} + \frac{\partial \phi}{\partial r} \sigma'_{ij} \right) \cdot \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} dP + \frac{\partial \phi}{\partial r} dr \right) \dots\dots\dots (3.93)$$

次に特殊な応力径路の塑性変形に関しては次の関係式が成立する。

a 膨張過程, 等方圧縮過程:

$$d\epsilon_v^p = \frac{(\phi/F)^n}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P}} \cdot \left(\frac{\partial \phi}{\partial P}\right)^2 dP \dots\dots\dots (3.94)$$

b 単純引張過程, 単純圧縮過程, 軸対称圧縮過程:

$$d\epsilon_I^p = \frac{(\phi/F)^n}{9 \left( \frac{\partial F}{\partial \epsilon_V^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)} \cdot \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} + 2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \cdot \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} + * \sqrt{6} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \cdot d\sigma_I \quad \dots\dots (3.95)$$

$$d\epsilon_V^p = \frac{(\phi/F)^n}{3 \left( \frac{\partial F}{\partial \epsilon_V^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)} \cdot \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} + * \sqrt{6} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} d\sigma_I \quad \dots\dots (3.96)$$

3) 弾塑性構成式

以上に, 苗マットの塑性構成式を具体的に導いた。本研究では未降伏状態においても塑性変形が発生すると仮定したので, 全変形過程を通して, 弾塑性変形が発生する過程と弾性変形だけが発生する過程とに分類しうる。すなわち, 前者が弾塑性負荷過程で, 後者が弾性負荷過程および除荷過程である。これらの力学状態の判別法は式(3.27)および(3.28)に示した通りである。

負荷状態ではひずみ増分は弾性ひずみ増分と塑性ひずみ増分の和であるとする, 苗マットの弾塑性構成式は次式で表わされる。

$$d\epsilon_{ij} = \left\{ E_{ijkl}^{-1} + \frac{(\phi/F)^n}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_V^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{kl}} \right\} d\sigma_{kl} \quad \dots\dots (3.97)$$

この逆形式の一般形は式(3.51)と同形である。これらの弾塑性構成式に式(3.67), (3.69), (3.79)~(3.82)を用いると苗マットの弾塑性構成式が具体的に定まる。表3.1にこれらの関係式および記号を再記し, また材料定数などについての説明を一括して示す。本式は応力とひずみそれぞれ9個ずつの成分間の関係式であり, 平面ひずみ問題や平面応力問題だけでなく3次元変形問題にも適用しうる。ただし相当複雑な形であるので実際の解析には計算機が必要となる。

特殊な応力径路の場合には式(3.97)は次のように比較的簡単になる。

a 膨張過程, 等方圧縮過程:

$$d\epsilon_V = \left\{ \frac{\beta}{P_r - P} + \frac{(\phi/F)^2}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_V^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P}} \cdot \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} \right)^2 \right\} dP \quad \dots\dots (3.98)$$

b 単純引張過程, 単純圧縮過程, 軸対称圧縮過程:

$$d\epsilon_I = \left\{ \frac{\beta}{9(P_r - P)} + \frac{2}{3} ar + \frac{(\phi/F)^n}{9 \left( \frac{\partial F}{\partial \epsilon_V^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)} \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} + 2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \cdot \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} + * \sqrt{6} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right\} d\sigma_I \quad \dots\dots (3.99)$$

$$d\epsilon_V = \left\{ \frac{\beta}{9(P_r - P)} + \frac{(\phi/F)^n}{3 \left( \frac{\partial F}{\partial \epsilon_V^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)} \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} + * \sqrt{6} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} \right\} d\sigma_I \quad \dots\dots (3.100)$$

$$d\epsilon_{II} = d\epsilon_{III} = (d\epsilon_V - d\epsilon_I) / 2 \quad \dots\dots (3.101)$$

Table 3.1 Symbols and coefficients of elasto-plastic constitutive equation for mat  
表 3.1 苗マットの弾塑性構成式の記号と係数について (その1)

---

A) 応力とひずみ

$\sigma_{ij}$  : 応力  
 $\sigma'_{ij}$  : 偏差応力  
 $P$  : 平均応力  
 $r$  : 偏差応力の2次不変量

$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$  : 最大主応力, 中間主応力, 最小主応力  
 $\epsilon_{ij}, \epsilon^e_{ij}, \epsilon^p_{ij}$  : ひずみ, 弾性ひずみ, 塑性ひずみ  
 $\epsilon_v, \epsilon^e_v, \epsilon^p_v$  : 体積ひずみ, 弾性体積ひずみ, 塑性体積ひずみ  
 $\epsilon_r, \epsilon^e_r, \epsilon^p_r$  : 偏差ひずみ (2次不変量), 弾性偏差ひずみ, 塑性偏差ひずみ

---

B) 弾性構成式

1) 構成式

$$d \epsilon^e_{ij} = \frac{\beta}{3 (Pr - P)} dP \delta_{ij} + aNr^{N-1} \cdot d \sigma'_{ij}$$

2) 記号および係数

$\beta$  : 弾性体積ひずみを規定する係数で, 間隙比  $e$  と平均応力  $P$  の両対数面に表示された等方圧縮線の勾配を表わす。  
 $Pr$  : 膨張に対する弾性変形の限界平均応力  $P$  を表わす。  
 $a$  : 弾性せん断変形を表示する指数関数の係数で, せん断ひずみの大きさを規定する。  
 $N$  : 弾性せん断変形を表示する指数関数の指数で, せん断ひずみの大きさを規定する。  
 $E_{ijkl}, E^{-1}_{ijkl}$  : 弾性構成テンソルで, 上式をテンソル表示したもの。

---

C) 塑性構成式

1) 構成式

$$d \epsilon^p_{ij} = H \left( \frac{\phi}{f} \right)^n \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} d \phi$$

◎ 降伏状態 :  $\bar{f} = F = \phi$   
 ◎ 未降伏状態 :  $\bar{f} = F < \phi$

$$\phi^2 \equiv \bar{f}^2 \equiv (P - P_0)^2 \left\{ 1 + \frac{1}{M^2} \left( \frac{r}{P - P_0} \right)^2 \right\}$$

$$F = \bar{F} + \bar{P} = F_0 \exp(-\epsilon^p_v / \alpha) + P_e \left( 1 - * \frac{\epsilon^p_r}{\epsilon^p_{ur}} \right)^m \left( 1 - \nabla \frac{\epsilon^p_v}{\epsilon^p_{uv}} \right)^l$$

2) 記号および係数

$\bar{f}$  : 降伏面, 苗マットの降伏応力 (組み合わせ応力) を表わす。  
 $\phi$  : 塑性ポテンシャル面, 降伏面と相似形で未降伏状態における塑性変形を規定する。  
 $F, \bar{F}, \bar{P}$  : 降伏面のサイズ, 床土の降伏面のサイズ, 降伏面に対する根の影響の大きさを表わす関数。  $F_0$  および  $P_e$  はそれぞれの初期値。  
 $M$  : 限界間隙状態における偏差応力の2次不変量と平均応力の比,  $cs$  (限界間隙状態) 線の

Table 3.1 (Part 2)

表 3.1 苗マットの弾塑性構成式の記号と係数について (その2)

---

勾配を意味する。この線上では塑性体積ひずみは発生しない。

$P_0$  : 降伏面あるいは塑性ポテンシャル面の中心の平均応力値。

$\alpha$  : 塑性体積ひずみを規定する係数で、間隙比  $e$  と平均応力  $P$  の両対数面に表示された等方圧縮線の勾配を表わす。

$\epsilon_{uv}^p$  : 塑性的な体積変形に対する限界体積ひずみを表わす。

$\epsilon_{ur}^p$  : 塑性的なせん断変形に対する限界せん断ひずみを表わす。

$\nabla, *$  : 限界体積ひずみおよび限界せん断ひずみが降伏面のサイズにおよぼす影響を制御する、すなわち硬化様式を規定する。

$m, l$  : 硬化関数における指数。

$n$  : 未降伏状態における塑性ひずみ増分の大きさを規定する係数  $\phi / \bar{f}$  の指数。

---

## D) 弾塑性構成式

$$d\epsilon_{ij} = \left\{ E_{ijkl}^{-1} + \frac{(\phi / F)^n}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_v^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial \epsilon_r^p} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{kl}} \right\} d\sigma_{kl}$$


---

## 3. 計算結果

前述の苗マットの具体的な弾塑性構成式に基づいて、単純負荷過程に対する応力-ひずみ曲線を算定してその適合度を検討する。

式 (3.99) および (3.100) を積分形にするのは難しいので数値積分によった。まず、式 (3.99) において軸方向の塑性ひずみ増分  $d\epsilon_I^p$  を与えて軸方向の応力増分  $d\sigma_I$  を求めた。応力増分  $d\sigma_I$  から弾性ひずみ増分  $d\epsilon_I^e$  を計算し、これと塑性ひずみ増分  $d\epsilon_I^p$  を加えて、軸ひずみ増分  $d\epsilon_I$  を算定した。式 (3.99) より直接計算できないのは、軟化状態において応力増分に対してひずみ増分が唯一に定まらないためである。次に、ここで得た応力増分  $d\sigma_I$  を式 (3.100) に代入して体積ひずみ増分  $d\epsilon_v$  を計算した。側方ひずみ増分  $d\epsilon_{II}$  は式 (3.101) で求めた。これらの増分値をそれぞれ加算しながら、順次、繰返し計算を行った。

この計算によって得た応力-ひずみ曲線の例を図 3.13 に示す。計算に用いた材料定数および比較のために用いた実験データについては表 3.2 に示す。材料定数値は土のそれを参考にしながら実験値によく適合するものを選んだ。例えば、等方圧縮に対しては  $P = -0.2 \text{ kgf/cm}^2$  付近の圧力で降伏し、膨張に対しては  $P = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$  以下の圧力で破断することを意味する。同図に見られるように、計算によって得た応力-ひずみ曲線は、実験結果と若干の差はあるもののその傾向は十分に表現している。したがって、本研究で展開した苗マットの弾塑性論によれば、時間項を含まない準静的な変形過程は十分に説明しうると期待できる。特に、ここで述べた単純な負荷過程だけでなく、式 (3.97) の一般表示形の構成式を用いれば、組み合わせ応力を受ける場合についても応力-ひずみ曲線を計算できるので適用性はかなり高いと考える。複雑な問題には一般表示形に基づく有限要素法の利用が必要となる。

本節では苗マットの具体的な弾塑性構成式の一例を提示したにとどまったが、今後、降伏面の関数形や諸係数に関する研究を続けることによって、さらに高い精度で苗マットの变形挙動を表現しうようになると考える。

▼ 計算条件

単軸圧縮, 軸ひずみ増分 - 0.0002

▼ 各材料定数

$M = 0.5$        $Fo = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$   
 $\alpha = 0.03$       $Po = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$   
 $\epsilon_{ur}^p = 0.2$       $\epsilon_{uv}^p = 0.1$   
 $l = m = 1.0$     $n = 0.01$   
 $\beta = 0.01$       $Pr = 0.5, a = 0.01$   
 $\sigma_{II} = \sigma_{III} = 0.0$

○ 実験条件 (昭和55年 5月)

{ 床土: 畑土  
   播種量: 250g, 育苗日数21日  
   圧縮速度 10mm/min

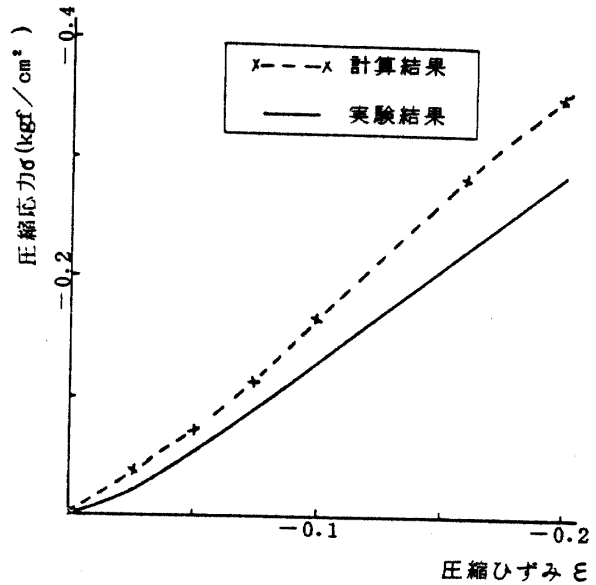


図 3.13 弾塑性構成式による計算結果と実験結果の比較例

Fig. 3.13 Comparison with analytical and experimental results

Table 3.2 Experimental data compared with analytical result

表 3.2 計算結果の検討に用いた実験データ

1) 実験条件 (第3回圧縮試験参照)

- 1 実験日 昭和55年5月29日
- 2 播種日 昭和55年5月9日
- 3 育苗日数 21日
- 4 床土 畑土 No 10 (表 2.1参照)
- 5 圧縮速度 10mm/min (ひずみ制御試験)
- 6 試験片寸法 30×70 mm
- 7 圧縮条件 30 mm (ひずみ約 - 0.4) まで圧縮

---

2) データ

ひずみ	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
応力	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13
ひずみ	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40				
応力	0.19	0.27	0.34	0.44	0.55	0.65				

注) 応力およびひずみは負号を抜いてある。これらのデータは引張圧縮試験機の記録用紙から読み取った。

3) 材料定数

- 1 弾性  $\beta = 0.01, Pr = 0.5 \text{ kgf/cm}^2,$   
 $a = 0.01 \text{ cm}^2/\text{kgf}, N = 1.0$
- 2 塑性  $M = 0.5, Fo = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$   
 $Po = 0.2 \text{ kgf/cm}^2, \alpha = 0.03, m = 1 = 1.0$   
 $n = 0.01, \epsilon_{ur}^p = 0.2, \epsilon_{uv}^p = 0.1$



### Ⅲ. 結 語

本章では苗マットの力学的性質を弾塑性学的観点から分析し、その挙動を以下のように説明した。

a) 苗マットの塑性変形は降伏状態だけでなく未降伏状態でも発生する。このため、降伏面だけでなく、これに相似な塑性ポテンシャル面を仮定した。塑性ひずみ増分  $d \epsilon_{ij}^p$  は降伏面  $\bar{f}$  および塑性ポテンシャル面  $\phi$  に関連して

$$d \epsilon_{ij}^p = H \left( \frac{\phi}{f} \right)^n \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} d \phi$$

$$\bar{f} < \phi \quad (\text{未降伏状態})$$

$$\bar{f} = \phi \quad (\text{降伏状態})$$

で与えられると仮定した。

b) 苗マットの塑性ポテンシャル面と降伏面は土のそれに近い形状を考え、これらを表わす具体的な関数形としては楕円面

$$\phi^2 \equiv \bar{f}^2 \equiv (P - P_0)^2 \left\{ 1 + \frac{1}{M^2} \left( \frac{r}{P - P_0} \right)^2 \right\}$$

を採用した。

c) 苗マットの硬・軟化挙動は塑性体積ひずみ  $\epsilon_v^p$  および塑性偏差ひずみの2次不変量  $\epsilon_p^p$  によって規定されると仮定した。具体的には、硬化関数

$$F = F_0 \cdot \exp \left( -\epsilon_v^p / \alpha \right) + P e \left( 1 - * \frac{\epsilon_r^p}{\epsilon_{ur}^p} \right)^m \left( 1 - \nabla \frac{\epsilon_v^p}{\epsilon_{uv}^p} \right)^l$$

で硬化および軟化挙動を記述した。本式の右辺の第1項は床土による硬・軟化挙動、第2項は根による硬・軟化挙動を表わす。

d) 上述のモデルの挙動の分析により、苗マットの塑性変形挙動を定性的に説明した。このモデルによれば引張および低応力域において、土と異なる苗マットの挙動を十分に記述しえた。

e) 苗マットの弾塑性構成式を具体的に決定し、それぞれ9個の応力とひずみに関する一般形と、膨脹過程、等方圧縮過程、単純圧縮および引張過程、軸対称圧縮過程などの特殊な応力径路に対する構成式を示した。

f) 単純負荷過程について、苗マットの弾塑性構成式による応力-ひずみ曲線を示し、本構成式の適用性を確認した。

### 第IV章 結 論

たわみ、分離、引張、圧縮、せん断試験による実験的研究と弾塑性学的な分析を中心として、土付苗用田植機の高性能化および植付け性能の安定化を図る上で必要となる苗マットの力学的性質に関連するいくつかの知見を得た。主要な結果は以下の通りである。

(a) 軟弱で多様な性状を持つ苗マットの力学的性質を測定しうる試験法を示した。特に、現場で使用する簡便試験法として、現在の国営検査法に代わる新しい分離試験法、および、引張試験法を提案した。苗マットの強度だけでなく、変形性を的確に知りうる点で引張試験法が適用性は高い。

(b) たわみ、引張(分離を含む)、圧縮、せん断に対する苗マットの代表的な特性値として表4.1を得た。実際に使用されている稚苗苗マットの特性値は同表の範囲内にあるものと考えられる。

引張や圧縮における応力-ひずみ曲線は指数式

$$\sigma = a \epsilon^n \quad (\sigma : \text{応力}, \quad \epsilon : \text{ひずみ}, \quad a, n : \text{材料定数})$$

で表わされ、 $n$ の値は引張で約0.5、圧縮で約1.0である。一方、せん断強度はCoulomb式で近似

しえた。

苗マットは小さな応力でも容易に塑性変形を生じ、全ひずみの中で塑性ひずみは大半を占めることを明らかにした。繰返し負荷に対しては著しいヒステリシス・ループが見られた。

(c) 実験で得た諸特性値を互いに比較し、これらの間には密接な相互関係があり、強度の大きい苗マットは変形しにくいことなどを明らかにした。これより、(a)で述べた試験法とも関連するが、例えば引張特性を知れば苗マットの力学的性質を定性的に把握しうる。

(d) 苗マットの力学的性質は播種量、育苗日数、育苗時期、根重、床土の種類および含水比に影響されることを示した。これらの影響因子を苗マットの内部構造に対応させると、それぞれ根の分布状態と強度および床土の力学的性質に分類できるが、その影響は作用によって異なり、引張側および低応力域では前者が、圧縮側では後者の影響が強く表れた。すなわち苗マットの力学的特徴は引張側および低応力域で顕著である。

簡単な苗マットの複合材料モデルの分析によって、苗マットの力学的性質と影響因子との関係を示した。

Table 4.1 Total results of mechanical properties of mat

表 4.1 苗マットの力学的性質の総合結果

項 目		最小値	最大値	平均値	標準偏差
苗マットの性状 品種：日本晴 床土：11種類 試験期間： S 53～55	播種量 (g/箱)	50	250	180	54
	育苗日数 (日)	14	31	24	5.2
	重 量 (kg)	2.2	6.5	4.1	0.88
	草 丈 (mm)	71	175	109	24.9
	苗立数 (本/30cm <sup>2</sup> )	23	154	88	32
	葉 齢	1.4	5.0	3.1	0.8
	含水比 (% db)	30.0	235.0	85.3	33.2
	根 重 (g/30cm <sup>2</sup> )	0.37	2.92	1.27	0.49
	含水率 (% wb)	80.0	86.0	82.4	1.5
	千粒重 (g)	34.0	34.9	34.5	0.40
引 張	最大引張応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.010	0.219	0.076	0.055
	最大ひずみ量	0.0278	0.322	0.105	0.066
	割線係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.22	2.01	0.96	0.48
	縦弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.31	8.90	4.00	2.45
圧 縮	縦弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.78	4.07	1.54	0.76
	ひずみ-0.2における 圧縮応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	-0.12	-0.66	-0.27	0.11
	ひずみ-0.4における 圧縮応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	-0.35	-1.71	-0.93	0.42
	縦弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )				
せん断	粘着力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.054	1.293	0.470	0.250
	内部摩擦角 (度)	25.0	44.0	34.0	5.30
たわみ	自重たわみ (cm)	0.3	2.5	1.2	0.42
	自重たわみから求めた 縦弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.24	1.83	0.53	0.26
	縦弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )				

注) 分離抵抗は最大引張応力に含めた。

(e) 実験結果を整理して、異方性や破壊基準に関する検討を行い、弾性、塑性、粘性を含む力学モデルを提示した。さらに、準静的な変形過程に対して苗マットを弾塑性体と見なし、土の理論を参考にして弾塑性モデルを導入した。そのモデルの挙動を定性的に分析するとともに、降伏面形状および硬化関数を示し応力-ひずみ関係式を具体的に導いた。これらの分析により、ここで用いた弾塑性モデルは低応力域および引張側における土と苗マットの挙動の差を明確に表わしうることを示した。

苗マットの力学的性質は非常に複雑であるため、本研究ではその一部を明らかにしたにとどまった。特に弾塑性学的な分析では多くの未解決の問題も残っている。しかし、時間依存性の問題を別にすると苗マットの弾塑性的特徴は十分に表現できると考える。

以上の実験および理論的研究の結果は、苗マットの自動供給装置に対する苗マットの変形および安全荷重の予測、あるいは、現行の植付け機構に対する苗マットの許容強度の判定などに活用できるものと期待する。

分析をさらに進め、苗マットだけでなく、圃場や草地における走行性などの変形抵抗の問題を扱う際に必要な土-植物2相体の力学体系への拡張・一般化を行いたい。

## 第V章 本論文の概要

我国独自の技術で開発された土付苗用田植機は1967年の市販開始後、急速に普及し、現在では普及台数約189万台、水稻全作付け面積の90%およそ220万haの植付け作業に使用されている。土付苗用田植機は今後とも田植機の主流であると考えられるが、機械の性能はすでに一定水準に達しており、現在ではさらに進んだ高性能化を活発に進める段階に入っている。

土付苗用田植機において作業能率および植付け精度に関する高性能化を図るためには、多条化に加えて、苗補給の円滑化が必要である。これにはその基礎資料となる苗マットの力学的性質を明らかにしておかねばならない。また、機械移植に適した力学的性質を持つ苗マットの確保が重要である。一方、土付苗用田植機の普及によって年間約200万ton(推定)以上の大量の苗マットが使用されており、これに伴って苗マット用床土の消費量は急激に増加し、近年では「人工床土」と称する床土も流通している。中には粘着力や付着力が強すぎたり逆に弱すぎて、移植作業に支障をきたす床土も見受けられる。このような床土の質の多様化および量の増加が苗マットの物理的性質にいかなる影響を与えるかを機械移植の観点から明確にする必要がある。

ところで、苗マットは床土中に互いに絡み合った根群が混在した構造を持ち、一種の複合材料と見なしうる。すなわち、母材である床土の力学的性質が根によって強化された材料である。従来からの数多くの研究にもかかわらず、未解決の問題が少なくない土の力学的性質に比べて、苗マットのそれは根の影響があるために土よりさらに複雑である。苗マットの物理性に関連する従来の研究は少なく、特に変形性および強度に関する基本的な力学的分析はほとんど行われていなかった。

そこで、本研究では苗マットの力学的性質をまず実験的に解明し、次に、その結果を整理して弾塑性学的な観点より分析を試み、最終的に具体的な弾塑性構成式を導いた。

第II章では、実験結果より苗マットのたわみ特性、分離特性、引張特性、圧縮特性およびせん断特性について検討を行い、各々の特性だけでなくこれらの相互関係を明らかにした。これらの試験に供試した苗マットは育苗条件や床土などを多様に変えて育苗したので、以下に述べる諸特性値は実際に使用されている稚苗苗マットの力学的性質を十分に表現するものと考えられる。さらに苗マットの力学的性質に対する土と根の影響を分析した。

たわみ試験では苗マットを短辺に平行な線上において160mmスパンで両辺支持し、自重および集中荷重の段階的な載荷によるたわみ量の変化を測定した。たわみの経時変化は非常に小さく、実用上は無視しても差し支えないことがわかった。2.0kgf 載荷時の中央部のたわみ量は8~23mmで、一旦除荷す

ると回復変形量は1～6 mmしかなく、苗マットのたわみは塑性変形が顕著であることを明らかにした。荷重—たわみ曲線は勾配が漸増する形状で、除荷・再負荷過程におけるそれは顕著なヒステリシス・ループを描いた後に単純載荷過程における曲線に収束した。5.0 kgf 程度の集中荷重では大半の苗マットは破壊しなかった。苗マットのたわみ特性に関しては床土の種類、播種量などが主要な因子であり、また根の分布状態を表わす測度の1つとして根重を考えると、根重が大きい苗マットほどたわみに対する抵抗は大きくなる傾向が見られた。

土付苗用田植機の国営検査において苗条件を調査する方法として定められている5・6本苗の分離試験法では苗マットの力学的性質を適切に測定しえないことが判明した。そこで広い断面で苗マットを分離する方法を用いたところ、精度の良いデータが得られたので、これを苗マットの改良分離試験法として提案した。新しい試験法によって得られた分離力—変位曲線より分離抵抗などのいくつかの特性値を導入して分離特性の分析を行った。分離抵抗すなわち破断抵抗は0.10～0.14 kgf/cm<sup>2</sup>であった。分離特性は播種量、根重、含水比あるいは床土の種類などに大きな影響を受けることを明らかにした。

引張試験は苗マット試験片の支持方式などに問題が多く、試験法を確立するまでには多くの検討を要した。最終的に70×280 mmの矩形試験片を水平に置き、両端を各々2枚の板ではさんで支持する試験装置を用いた。

引張における応力—ひずみ曲線はおおまかに

$$\sigma = a \sqrt{\epsilon} \quad (\sigma: \text{応力 (kgf/cm}^2\text{)}, \epsilon: \text{ひずみ})$$

で近似した。係数aの値は0.1～0.4 kgf/cm<sup>2</sup>であった。最大引張応力すなわち引張強度は0.02～0.17 kgf/cm<sup>2</sup>、この時のひずみ量は0.03～0.32であった。応力—ひずみ曲線の初期勾配を見かけの縦弾性係数とすると0.31～8.90 kgf/cm<sup>2</sup>であった。これらの引張特性値を比較すると互いに相関関係が見られ、変形抵抗の大きい苗マットは大きな強度を示した。引張特性値は播種量、根重などの根の分布状態に関連する因子に著しい影響を受け、床土の力学的性質に関連する因子の影響は相対的に小さいことを明らかにした。

圧縮試験は30×70 mmの矩形試験片を用いて行った。苗マットは小さな応力値でも容易に変形するが、引張では0.2 kgf/cm<sup>2</sup>以下の応力で破壊したのに比べて、圧縮では応力0.3～0.6 kgf/cm<sup>2</sup>、ひずみ0.3～0.4に達しても破壊した試験片はほとんどなかった。圧縮における応力—ひずみ曲線は直線もしくは勾配が漸増する曲線で次式で近似した。

$$\sigma = a_c \epsilon$$

係数 $a_c$ を圧縮における見かけの縦弾性係数とすると0.8～4.1 kgf/cm<sup>2</sup>であり、全般に引張におけるそれより小さな値であった。圧縮特性値は床土の力学状態に大きな影響を受け、引張特性とは対照的に、根の影響は小さいことを明らかにした。圧縮における繰返し負荷試験により、圧縮ひずみ0.3のうち8～9割は塑性ひずみであることを示した。また初期載荷時の曲線勾配は再負荷時のそれより小さいことより、圧縮開始時から塑性変形が発生していることが明らかとなった。すなわち、苗マットの準静的な圧縮変形では塑性変形が主要な要素である。

せん断試験は一面せん断試験法を採用して、圧密・排水条件において、ひずみ制御で苗立方向に直角な面をせん断した。苗マットのせん断応力—変位曲線はゆる詰め土と同様に勾配が漸減する単調増加型で、体積が収縮するせん断パターンになることを示した。また苗マットのせん断強度は普通の土と同様に次のCoulomb式で近似した。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (\sigma: \text{垂直応力}, \tau_f: \text{せん断応力 (kgf/cm}^2\text{)})$$

苗マットの粘着力cは0.02～1.28 kgf/cm<sup>2</sup>、内部摩擦角 $\phi$ は25～44(度)で、これらのせん断特性値は床土のそれに大きな影響を受けることを明らかにした。床土のせん断特性と苗マットのそれとを比較すると、粘着力は苗マットの方が大きく、内部摩擦角は同程度もしくは苗マットの方がやや小さくなる傾向が見られた。播種量や根重が増加するとこの傾向はさらに顕著となった。

引張, 圧縮, せん断に関する諸特性値を互いに比較し, これらの間には密接な相互関係があり, 引張に強い苗マットは圧縮にもせん断にも大きな抵抗を示すことを明らかにした。したがって, 苗マットの力学的性質は1つの特性値を知ることによって定性的に把握しうることになる。この結果に基づいて, 苗マット間の特性差が明確に表れる引張に関する簡便試験法を提案した。

以上の実験結果を整理すると, 苗マットの力学的性質は, (a) 全般に床土のそれに近い, しかし, (b) 低応力領域および引張領域では主に根の力学状態の影響を受けて床土とはかなり異なるが, (c) 圧縮領域では床土の力学的性質の影響が大きく, さらに, (d) 著しい塑性変形が発生すると言える。一つの特徴として引張や圧縮など作用の種類に応じて, 苗マットの力学的性質に対する床土と根の役割は相違に異なる。そこで, 床土と根より構成された単純な複合材料モデルを導入し, その挙動を分析することによって, これらの特性を定性的に説明した。また, 苗マットの力学的性質を記述するために粘一塑性モデルを示した。さらに異方性や破壊基準に関する若干の検討を行った。

第Ⅲ章では, 上述の実験結果の分析に基づいて, 苗マットは準静的な変形過程においては弾塑性体と見なしうると仮定し, 土の弾塑性論を参考に苗マットの力学的性質を弾塑性学的観点より分析した。特に, 低応力領域および引張領域において土と異なる苗マットの変形挙動を十分に表わしうる弾塑性モデルについて検討を行った。

苗マットの塑性変形は変形初期より生じ, 塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  は降伏状態では降伏面  $f$  に, 未降伏状態では塑性ポテンシャル面  $\phi$  によって規定されると仮定した。

$$\begin{aligned} \bar{f}(\sigma_{ij}) - F(\epsilon_v^p) &= 0 \\ \phi(\sigma_{ij}) - F(\epsilon_v^p) &< 0 \\ d\epsilon_{ij}^p &= H(\phi/\bar{f})^n \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} d\phi \\ \bar{f} &< \phi \quad (\text{未降伏状態}) \\ \bar{f} &= \phi \quad (\text{降伏状態}) \end{aligned}$$

ここに,  $\sigma_{ij}$  は応力,  $H$  はひずみ増分の大きさを制御する係数,  $F$  は降伏面のサイズを規定する硬化関数である。

塑性変形の進行に伴う硬・軟化挙動すなわち降伏面の挙動を表現するために, 土の塑性モデルで用いられる塑性体積ひずみ  $\epsilon_v^p$  だけでなく, 塑性偏差ひずみ  $\epsilon_r^p$  を硬化パラメータとして, 根の影響を考慮した塑性モデルを仮定した。その挙動を引張, 圧縮, 三軸圧縮などいくつかの変形パターンにおいて分析し, 苗マットの変形挙動を定性的に記述できることを示した。このモデルに基づいて, 次に示す具体的な塑性ポテンシャルや硬化関数を導入し, 上式より苗マットの応力-塑性ひずみ関係を展開した。

$$\begin{aligned} \phi^2 &\equiv \bar{f}^2 \equiv (P - P_0)^2 \left\{ 1 + \frac{1}{M^2} \left( \frac{r}{P - P_0} \right)^2 \right\} \\ F &= P_0 \cdot \exp(-\epsilon_v^p/\alpha) + P_e \left( 1 - * \frac{\epsilon_r^p}{\epsilon_{ur}^p} \right)^m \left( 1 - \nabla \frac{\epsilon_v^p}{\epsilon_{uv}^p} \right)^l \end{aligned}$$

これと弾性構成式を用いて弾塑性構成式を得て, 苗マットの弾塑性変形に関する計算を行い, 応力-ひずみ曲線を求めた。この計算結果と実験結果との比較によって, 本研究で導入した弾塑性モデルが苗マットの変形挙動を定量的にも表現しうることを示した。

## 謝 辞

本研究は筑波大学農林工学系教授・江崎春雄先生の御指導をいただいて同大学において行ったものである。本文中でも少し述べておいたように、東京教育大学において江崎先生のもとで進められていた「苗マットの物性に関する研究」を、筑波大学への移転を機会に、苗マットの力学的性質の解明に焦点を絞って継続した。江崎先生には、準研究員として筑波大学に着任した昭和53年当時、本研究を勧めていただき、以来実験から論文の取りまとめに至るまで一方ならぬ御指導、御鞭撻および公私にわたる御厚情をいただいた。江崎先生に深甚の謝意を表します。

次に、本論文を取りまとめるに際して、多忙にもかかわらず詳細な御検討と懇切丁寧な御指導をいただいた筑波大学教授・小中俊雄先生、同・相原良安先生および同・花田毅一先生に心より感謝申し上げます。

また、実験を行うに際しては、筑波大学農林工学系講師・湯沢昭太郎先生、同・黒石巖先生、同学農林技術センター余田章教務員を始めとして、農業機械学の分野に関連する大学院生および専攻生の諸氏を含めて多くの方々に協力をいただいた。さらに、琉球大学への転勤により、同学農学部・泉裕巳教授同・國府田佳弘教授には何かと御面倒をおかけした。これらの皆様の御協力と御厚意に深く感謝致します。

最後に、九州大学大学院農学研究科に在学中、塑性論を御教示いただいた同農学部・橋口公一助教授に御礼申し上げます。

なお、本論文の編集には琉球大学計算センターの大型計算機M-180 II D (富士通)の日本語情報処理システムを利用したことを付記しておく。

## 参 考 文 献

- 1) 星野盛二：田植機 特集 新型機の技術的動向と今後の開発方向，機械化農業，1975 (4)，23-25，新農林社
- 2) 星野盛二：水田における移植作業の機械化，農業機械学会誌43 (2)，277-281，1981
- 3) 農林水産省農蚕園芸局肥料機械課：農業機械化広報，No 138，P2，1981，日本農業機械化協会
- 4) 農林水産省農蚕園芸局肥料機械課：農業機械化広報，No 136，P3，1981，日本農業機械化協会
- 5) 梅田重夫共著：農作業機械学・VII播種機，移植機，114-117，1980，文永堂
- 6) 日本農業機械化協会編：'76田植機便覧，1976，日本農業機械化協会
- 7) 全国農業共同組合連合会編：'82農業機械の仕様と特徴，350-353，1982，全国農業共同組合連合会
- 8) 並河清：リンク式田植機植付機構の解析，農業機械学会誌 37 (3)，295-299，1975
- 9) 並河清：リンク式田植機植付機構の総合，農業機械学会誌 37 (4)，533-537，1976
- 10) 梅田重夫・穂波信雄・チャウ・ピン・ダック：田植機の植付機構の動物性 (第1報)，農業機械学会誌 42 (1)，51-55，1980
- 11) 梅田重夫・穂波信雄・チャウ・ピン・ダック：田植機の植付機構の動物性 (第2報)，農業機械学会誌 42 (2)，229-235，1980
- 12) 藤田昭三：多条・乗用田植機の構造と特徴 特集 育苗と田植の技術・作業改善，機械化農業，1978 (3)，5-9，新農林社
- 13) 金井啓吉：最近の田植機改良とその利用 特集 育苗と田植の技術・作業改善，機械化農業，1978 (3)，10-12，新農林社
- 14) 藤田昭三：乗用田植機を使いこなすために 特集 乗用田植機のすべて，機械化農業，1980 (3)，

- 5-8, 新農林社
- 15) 新農林社編：特集 乗用田植機のすべて，機械化農業，1980(3)，9-22，新農林社
  - 16) 日本農業機械化協会編：乗用田植機の利用実態調査結果から，機械化農業，1981(7)，36-39，新農林社
  - 17) 新農林社編：'81年型田植機の新傾向を見る，機械化農業，1981(4)，43-46，新農林社
  - 18) 芳村多一郎：田植機の研究I，農業機械学会九州支部，1957
  - 19) 中村喜彰：新しい水稻の直播栽培と機械化，農業機械学会誌 43(2)，273-276，1981
  - 20) 山影征男：将来の田植機 特集 稲育苗と移植の合理化，機械化農業 1975(3)，13-15，新農林社
  - 21) 篠崎浩之：中成苗育苗と田植の検討—機械利用から 特集 田植機稲作技術の再確認と新展開，機械化農業，1977(3)，14-16，新農林社
  - 22) 藤沢博信：水稻育苗用床土採集機の開発 特集 稲育苗と移植の合理化，機械化農業，1975(3)，5-6，新農林社
  - 23) 遠藤太郎：農業と冷害そして農民 特集 田植機稲作技術の再確認と新展開，機械化農業，1977(3)，5-6，新農林社
  - 24) 姫田正美：中成苗育苗と田植の検討—栽培技術から 特集 田植機稲作技術の再確認と新展開，機械化農業，1977(3)，11-13，新農林社
  - 25) 寺中吉造：寒冷地機械移植稲作技術の再確認 特集 田植機稲作技術の再確認と新展開，機械化農業，1977(3)，7-10，新農林社
  - 26) 伊藤俊一：田植機と育苗技術 特集 今，農業機械に何を求めるか，機械化農業，1978(4)，24-25，新農林社
  - 27) 及川俊昭：水稻育苗用うすまき技術の検討 特集 育苗と田植の技術，機械化農業，1978(4)，13-15，新農林社
  - 28) 中橋勇作：水稻土付中・成苗の育苗法と機械移植に関する実験的研究(学位論文)，1980，兵庫県農業総合センター特別研究報告
  - 29) 星川清親：田植機イナ作 稚苗の生理と育苗技術，1971，農山漁村文化協会
  - 30) 星川清親：水稻の生理から見た直播・移植，農業機械学会誌 43(2)，289-293，1981
  - 31) 西尾敏彦：機械移植栽培のための水稻苗の物理的性質に関する研究，農事試験場研究報告 29，131-202，1979
  - 32) 須藤充・藍房和・田原虎次：苗帯の引張，曲げ，せん断強さについて，農業機械学会誌 30(2)，83-87，1968
  - 33) 田原虎次・藍房和・須藤充：苗帯の動摩擦係数について，農業機械学会誌 30(4)，201-205，1968
  - 34) 江崎春雄・湯沢昭太郎・小中俊雄：苗マットの物性に関する研究(第1報)，農業機械学会誌 41(1)，51-60，1979
  - 35) 江崎春雄・湯沢昭太郎・小中俊雄：苗マットの物性に関する研究(第2報)，農業機械学会誌 41(2)，229-242，1979
  - 36) 農林水産省：田植機(土付き苗用)の型式検査の主要な実施方法及び基準，昭和52年4月7日官報公示
  - 37) Y. C. ファン著 大橋義夫他訳：固体の力学/理論，126-153，1970，培風館
  - 38) 横掘武夫：材料強度学 第2版，117-217，1974，岩波書店
  - 39) J. C. ジェーガー著 飯田汲事訳：弾性・破壊・流動論—工学および地球科学への応用—，53-106，1968，共立出版

## 上野：苗マットの弾塑性学的研究

- 40) Y. C. ファン著 大橋義夫他訳：連続体力学入門，1-15・113-172，1973，培風館
- 41) D. C. リー著 村上澄男訳：非線形連続体力学，1-14・173-197，1975，共立出版
- 42) 富田幸雄著：レオロジー 機械工学大系12，1-31，1975，コロナ社
- 43) Truesdell, C. and R. Toupin: The Classical Field Theories, in S. Flugge (ed), "Encyclopedia of Physics," Vol. III pt1, Springer-Verlag OHG, Berlin, 1960
- 44) 林毅編：複合材料工学 複合の理論，27-58，1971，日科技連
- 45) A. ケーリ著 村上陽太郎訳：複合材料 強靱化の理論と応用，136-192，1976，丸善
- 46) L. E. ニールセン著 小野木重治訳：高分子と複合材料の力学的性質，1-24・277-311，1976，化学同人
- 47) 藤井太一・座古勝：複合材料の破壊と力学，1-34，1978，実教出版
- 48) 江崎春雄・上野正実：苗マットの物理的性質について，農業機械学会誌 43 (2)，283-288，1981
- 49) 土質工学会編：土質試験法，326-329，1974，土質工学会
- 50) 東京大学農業工学教室編：土壌物理実験，58-60，1966，東京大学出版会
- 51) 山口伯樹：土の力学 エンジニアリング・サイエンス講座，57-92，1976，共立出版
- 52) 江崎春雄・上野正実・湯沢昭太郎・余田章・市川道和：土付苗用田植機の苗マットのたわみ特性に関する研究，農業機械学会誌 42 (1)，43-49，1980
- 53) 江崎春雄・上野正実・湯沢昭太郎・余田章・市川道和：苗マットの物性に関する研究（第4報）—苗マットのたわみ特性について—，農業機械学会第38回総会講演要旨，P42，1979
- 54) 日本機械学会編：改訂第6版 材料力学，1975，日本機械学会
- 55) 江崎春雄・上野正実・湯沢昭太郎・余田章・市川道和：土付苗用田植機の苗マットの分離特性に関する研究，農業機械学会誌 42 (2)，221-227，1980
- 56) 江崎春雄・上野正実・湯沢昭太郎・黒石巖・余田章・市川道和：苗マットの物性に関する研究（第5報），農業機械学会第38回総会講演要旨，P43，1979
- 57) 江崎春雄・上野正実・湯沢昭太郎・余田章・市川道和：苗マットの物性に関する研究（第6報），農業機械学会第39回総会講演要旨，P99，1980
- 58) 上野正実・江崎春雄・湯沢昭太郎・余田章：苗マットの引張・圧縮・せん断特性に関する研究（第1報）—引張・圧縮特性について—，農業機械学会誌 44 (1)，23-30，1982
- 59) 上野正実・江崎春雄・余田章・屋代幹雄：苗マットの物性に関する研究（第7報）—苗マットの引張性，圧縮特性およびせん断特性—，農業機械学会第40回総会講演要旨，P68，1981
- 60) 上野正実・江崎春雄・菊池亮之介：苗マットの引張・圧縮・せん断特性に関する研究（第2報）—せん断特性について—，農業機械学会誌 44 (2)，317-323，1982
- 61) 最上武雄編：土質力学，1969，技報堂
- 62) 上野正実・江崎春雄：苗マットの物性に関する研究（第8報）—苗マットの引張・圧縮・せん断の相関特性—，農業機械学会第40回総会講演要旨，P69，1981
- 63) 上野正実・江崎春雄・菊池亮之介・屋代幹雄：苗マットの引張・圧縮・せん断特性に関する研究（第3報）—引張・圧縮・せん断特性の相互関係—，農業機械学会誌 44 (3)，439-446，1982
- 64) 北川浩：塑性力学の基礎，37-92，1979，日刊工業新聞社
- 65) R. ヒル著 鷺津他訳：塑性学，1954，培風館
- 66) Drucker, D. C.: Some implications of work hardening and ideal plasticity, Quart. Appl. Math., Vol. 7 No 4, 411-458, 1950
- 67) Drucker, D. C.: A more fundamental approach to stress-strain relations, Proc. 9st National Congress for Appl. Mech., ASME, 487-491, 1951



- 68) Drucker, D.C., R. E. Gibson and D. J. Henkel: Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity, Trans. of ASCE, Vol. 122, 338 - 346, 1957
- 69) Prager, W.: Strain-hardening under combined stress, J. Appl. phys., Vol. 116, 837 - 840, 1954
- 70) Parry, R. H. G.: Triaxial compression and extension tests on remoulded saturated clay, Geotech., Vol. 10 No 4, 166 - 180, 1969
- 71) Matsuoka, H. and T. Nakai: Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stress, Proc. JSCE, No 232, 59-70, 1974
- 72) Tatsuoka, F. and K. Ishihara: Yielding of sand in triaxial compression, Soils and Foundations, Vol. 14 No 2, 63 - 76, 1974
- 73) Roscoe, K. H., A. N. Schofield and C. P. Wroth: On the yielding of soils, Geotech., Vol. 13 No 1, 12-38, 1963
- 74) Roscoe, K. H. and H. B. Poorooshasb: A theoretical and experimental study of strains in triaxial compression tests on normally consolidated clays, Geotech., Vol. 13 No 1, 12-38, 1963
- 75) Roscoe, K. H., A. N. Schofield T. Thurairajah: Yielding of clays in states wetter than critical, Geotech., Vol. 13, No 3, 211 - 240, 1963
- 76) Roscoe, K. H. and J. B. Burland: On the generalized stress-strain behaviour of "wet" clay, Engineering Plasticity (ed. J. Heyman and F. A. Leckie), Cambridge Univ., 535 - 609, 1968
- 77) Schofield, A. N. and C. P. Wroth: Critical State Soil Mechanics, 1968, Mcgraw - Hill
- 78) Rowe, P. W.: The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact, Proc. Royal Soc., London, Sr. A, Vol. 269, 500 - 527, 1962
- 79) Burland, J. B.: The yielding and dilation of clay, Correspondance., Geotech., Vol 13 No 3, 211 - 214, 1965
- 80) 佐武正雄: 粒状体の降伏条件に関する一試案とその考察, 土木学会論文報告集 189号, 79-88, 1971
- 81) 佐武正雄: 粒状体の降伏条件に関する一提案, 土木学会第28回学術講演集Ⅲ, 91-92, 1973
- 82) 橋口公一: 粒状体に関する等方硬化理論, 土木学会論文報告集 229号, 45-58, 1974
- 83) 橋口公一: 粒状体に関する弾塑性構成方程式, 1975, 東京工業大学学位論文
- 84) Zienkiewicz, O. C. and D. J. Naylor: The adoption of critical state soil mechanics theory for use in finite elements, Roscoe Memorial Symp., 537 - 547, 1971, Cambridge
- 85) Zienkiewicz, O. C. and D. J. Naylor: Finite element studies of soils and porous media, Lectures on Finite Element Methods in Continuum Mechanics (ed. J. T. Oden & E. R. A. Oliveira) UAH Press, 459 - 493, 1973
- 86) Philips, A. and H. Moon: An Experimental Investigation Concerning Yield Surfaces and Loading Surfaces, Acta Mechanica 27, 91 - 107, 1977