

# 琉球大学学術リポジトリ

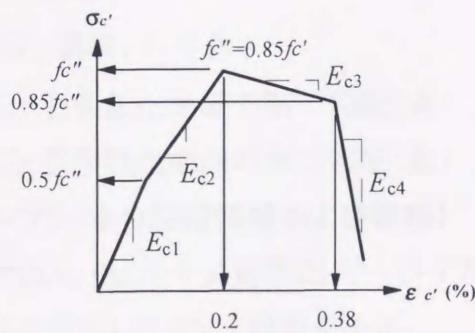
## コンクリートの引張破壊挙動に関する解析的研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 富山潤 公開日: 2021-12-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 富山, 潤, Tomiyama, Jun メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/25354">http://hdl.handle.net/20.500.12000/25354</a>

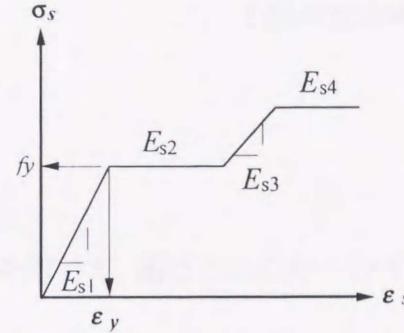
## 付録. 5 解析アルゴリズム

解析アルゴリズムは、第2.4節、第3.4節で示したニューマーク $\beta$ 法による増分法で、 $\beta=1/6$ とした（線形加速度法）。

また、本解析においては、コンクリートの圧縮側での非線形応力－ひずみ関係を付図.8のように、また鉄筋の降伏やひずみ硬化を付図.9のように仮定した<sup>[53]</sup>。



付図.8 コンクリートの応力－ひずみ曲線



付図.9 鉄筋の応力－ひずみ曲線

次に解析に、用いたプログラムの流れを簡単に示す。

### 解析手順

#### <第一段階>

- (1) 構造系および断面の形状、断面特性のデータ入力。
- (2) 拘束状態の設定。
- (3) 外力の設定入力。
- (4) 強制変位の設定入力。

第二段階へ

#### <第二段階>

- (1) 1要素ごとに質量マトリックス $[M_i]$ を算出。
- (2) 全体の質量マトリックス $[M_i]$ を算出。
- (3) 1要素ごとに減衰係数マトリックス $[C_i]$ を算出。
- (4) 全体の減衰係数マトリックス $[C_i]$ を算出（ここでは、減衰係数マトリックスとして、 $\alpha \times [K]$ （初期剛性マトリックス）を用いる。）。

第三段階へ

<第三段階>

(1) 1要素の層ごとの引張軟化曲線に対応したヤング係数を決定。

(コンクリートの引張領域)

$$\text{弾性状態} \quad E_j = E$$

$$\text{引張軟化状態} \quad \begin{cases} E_j = \frac{E \cdot C_1 \cdot EL_i}{(C_1 \cdot EL_i + E)} \\ E_j = \frac{E \cdot C_2 \cdot EL_i}{(C_2 \cdot EL_i + E)} \end{cases}$$

$E_j$ :  $j$  層のヤング係数

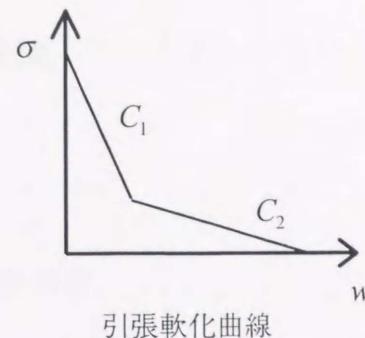
$EL_i$ : 要素  $i$  の長さ

$C_1$ : 引張軟化曲線の第一勾配(負)

$C_2$ : 引張軟化曲線の第二勾配(負)

(コンクリートの圧縮領域および鉄筋)

付図.8, 9に示す非線形応力ーひずみ関係を用いて、層ごとに応力ーひずみ関係に対応したヤング係数を決定。



(2) 1で求めたヤング係数を用いて、1要素ごとの剛性マトリックスを算出。

(3) 全体の剛性マトリックスを算出。

第四段階へ

<第四段階>

(1) 剛性マトリックス  $[K]$  と減衰マトリックス  $[C]$  と質量マトリックス  $[M]$  とをたしあわせ、

有効剛性マトリックスを作成。

$$[TK] = [K] + \frac{3}{\Delta t} [C] + \frac{6}{(\Delta t)^2} [M] \quad (\text{有効動的剛性マトリックス})$$

(2) マトリックスの荷重項の外力と速度と加速度の関係を計算。

$$\begin{aligned} & \left[ [K_n] + \frac{3}{\Delta t} [C_n] + \frac{6}{(\Delta t)^2} [M] \right] \{ \Delta U \} \\ &= \{ \Delta P \} + 3[M] \left\{ \frac{2}{\Delta t} \dot{U}_n + \ddot{U}_n \right\} + [C_n] \left\{ 3\dot{U}_n + \frac{\Delta t}{2} \ddot{U}_n \right\} \end{aligned}$$

(3) 拘束条件により、マトリックスを補正。

(4) 強制変位があるかを判定し、強制変位があれば補正。

(5) ガウスの消去法により、変位を算出。

第五段階へ

<第五段階>

- (1) 各要素の節点力を算出。
- (2) 各要素の層ごとの応力を算出。
- (3) 変位, 速度, 加速度, 荷重, 応力の増分をそれぞれ合成。

第六段階へ

<第六段階>

- (1) 各層ごとの応力状態から, 軟化, 塑性, 鉄筋降伏などを判定。
- (2) 繰り返し計算の終了判定。
  - ・まだ繰り返し計算が必要なら, 第三段階へ。
  - ・必要ないなら, 終了。

## 付録. 6 数値解析例

### (1) 無筋コンクリートはりの三等分点曲げ試験でのひび割れの局所化

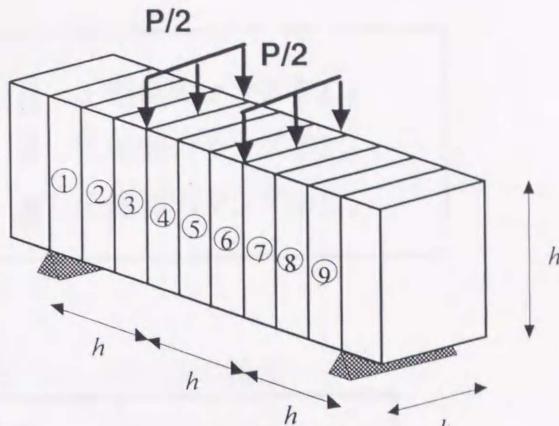
ここでは、JCI(日本コンクリート工学協会)より提案された『コンクリート構造物の破壊に関する共通解析および実験』<sup>[4]</sup>の内から、無筋コンクリートはりの曲げ破壊の解析を行う。解析に用いた要素分割は付図.10に示すとおりで、各要素をはり高方向に50層分割している。なお、各要素幅は参考文献[56]を参考にしはり高の1/3に設定した。

#### 試験体の寸法およびコンクリートの種類

とコンクリートの材料定数は付表.3、付表.4に示す通りである。解析にあたり、普通コンクリートはりの引張軟化曲線にはJCIが指定した二直線モデル(1/4model)を使用し、鋼纖維補強コンクリートはり(纖維混入率2%)の場合は、予備解析で実験値との良好な一致を示した1/5modelを使用して解析した。この解析の時間増分 $\Delta t$ は、普通コンクリートに対しては曲げ振動の一次の固有周期Tの1/5倍である。鋼纖維補強コンクリートに対しては曲げ振動の固有周期Tの1倍である。強制変位の増分 $\Delta u$ は0.001mmである。減衰影響係数 $\alpha$ は $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-7}$ の間で解析を行った。固有周期Tおよび減衰影響係数 $\alpha$ を付表.5に示す。

実際のコンクリートはりは引張強度にばらつきがあり、多数のひび割れが生じる。このため、本節の解析ではモーメントスパン内に強度が弱い部分があると仮定して、ひとつの要素をはり高方向の1%の切欠きを要素下面に入れた2種類のケースで解析を行った。

- 1)要素番号⑤に切欠き(シリーズ1)
- 2)要素番号④に切欠き(シリーズ2)



付図.10 要素分割

各試験体の荷重-変位曲線を付図.11(a)～付図.22(a)に示し、内田らの解析結果、実験結果との比較を行った。また、Peak荷重近傍、破壊近傍のひび割れ図、破壊に

いたるまでに生じたひび割れ図(付図.11(b)～付図.22(b))およびその時の要素番号④, ⑤の応力分布曲線を付図.11(c)～付図.22(c)に示した。なお、ひび割れ図におけるひび割れ幅および圧縮側のヤング係数は、次のようになっている。なお、解析では、引張軟化曲線の第二勾配以降のヤング係数を零として解析を行った(第三勾配)。

- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| □ : 引張軟化曲線の第一勾配 | ▨ : 圧縮側のヤング率 $E_{c2}$ |
| ▨ : 引張軟化曲線の第二勾配 | ■ : 圧縮側のヤング率 $E_{c3}$ |
| ■ : 引張軟化曲線の第三勾配 | ■ : 圧縮側のヤング率 $E_{c4}$ |

付表.3 試験体の寸法とコンクリートの種類

試験体名	コンクリートの種類	はりの高さ $h(mm)$
No1(#1)		100
No2(#2)	普通コンクリート	200
No3(#3)	はり	400
No4(#4)	鋼纖維補強	100
No5(#5)	コンクリート	200
No6(#6)	はり	400

付表.4 コンクリートはりの材料定数

	普通コンクリート	鋼纖維補強コンクリート
破壊エネルギー $G_f(Nm/m^2)$	100	8290
引張強度 $f_t(MPa)$	2.9	3.9
弾性係数 $E_c(GPa)$	27.5	29.4
ポアソン比	0.2	0.2
圧縮強度 $f'_c(MPa)$	34.3	44.1
粗骨材の最大寸法( $mm$ )	15	15
鋼纖維( $0.6 \times 30mm$ ) の体積混入率%	--	2

付表.5 一次の固有周期Tおよび減衰影響係数 $\alpha$ 

供試体番号	一次の固有周期T(sec)	減衰影響係数 $\alpha$
#1	$1.031 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-6}$
#2	$2.062 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-5}$
#3	$4.123 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4}$
#4	$9.969 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-7}$
#5	$1.994 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-7}$
#6	$3.988 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-7}$

付図.11(a)(b)(c)～付図.22(a)(b)(c)および付図.23, 付図.24に示した解析結果をまとめると、次のようになる。

### [荷重一変位曲線]

- (1) 普通コンクリート・鋼纖維補強コンクリートの両コンクリートはりの荷重一変位曲線は、付図.11(a)～付図.22(a)から明らかなように、シリーズ1とシリーズ2とで、ほぼ等しい結果となった。従って、局所化したひび割れがモーメントスパン中央から少しずれても、荷重一変位曲線にはあまり差がない。
- (2) 普通コンクリートの荷重一変位曲線(付図.11(a)～付図.16(a))について、本解析結果と内田らの実験結果および解析結果とを比較すると、各供試体とも Peak 荷重が 15%程度高めとなっているが、その後の軌跡は、供試体 #2, #3とも、実験値と良好な一致をみている。
- (3) 鋼纖維補強コンクリートの荷重一変位曲線(付図.17(a)～付図.22(a))について、実験結果と良好な一致を得ている内田らの解析結果との比較を行った。その結果、各供試体とも Peak 荷重が 4%～8%程度の範囲で高めとなっているが、その後の軌跡は内田らの解析値との一致が良好である。
- (4) #3の供試体を除き、両コンクリートはりとも、最大荷重における本解析結果と内田らの解析結果の差が、供試体寸法が大きくなるにつれてその割合も顕著になる傾向にある(付図.11(a)～付図.22(a))。その原因として考えられるることは、供試体寸法が変わってもすべて同じ要素分割および層分割にしたことにあると考えられる。

### [ひび割れ進展状況]

(1) ひび割れ進展状況を示した付図.11(b)～付図.22(b)より、いずれのケースでも最大荷重付近までのひび割れは、モーメントスパン内に分布しているが、わずかな荷重の変動で切欠き部のひび割れ一本のみ進展し、それ以外の部分は除荷が起こっている。なお、内田らの実験値によれば、普通コンクリートはり全ての供試体および鋼纖維補強コンクリートはりの供試体#4、#5に観察されたひび割れは、一本だけである。供試体#6については、実験を行った6体のうち5体に複数の目視ひび割れが観察されているが、巨視的なひび割れは1本である。

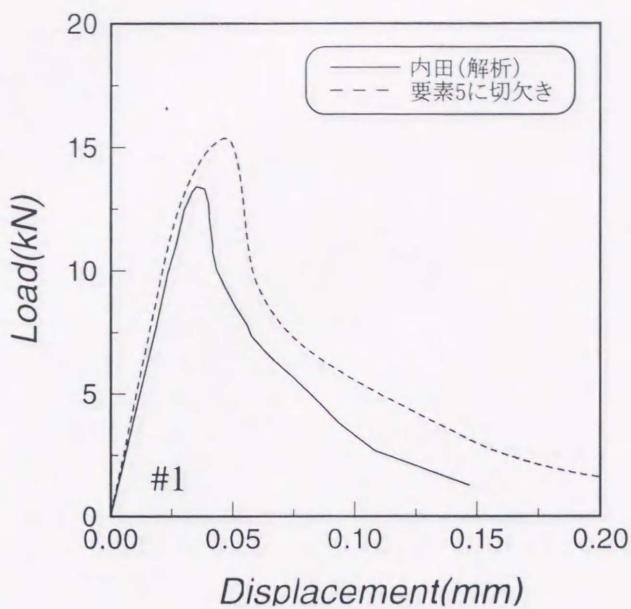
### [応力分布]

- (1) 実験において普通コンクリートは、巨視的に1本のひび割れの成長によって破壊にいたる。したがって、破壊時にはエネルギーがそのひび割れ成長要素に集中し、その隣の要素はエネルギーが解放される。解析は、Peak荷重、破壊荷重時およびひび割れの発生・進展に伴う、ひび割れの成長要素またはその隣の要素の応力分布の変化を良くとらえていると言える(付図.11(c)～付図.16(c))。
- (2) 鋼纖維補強コンクリートについては、付図.17(c)～付図.22(c)に示すように、その特色である、ひび割れが進行した状態の引張応力の変化を良くとらえていると言える。鋼纖維補強コンクリートは、普通コンクリートとは異なり、微細ひび割れが進行しても、鋼纖維のために引張応力は低下せずにひび割れが成長していく。破壊時には、ひび割れ成長要素の隣の要素は完全に応力の解放ではなく、普通コンクリートとの違いがでている。

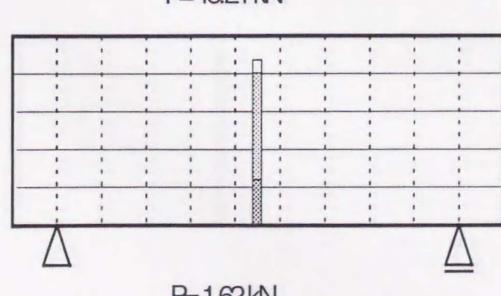
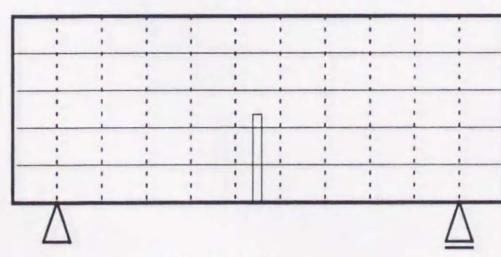
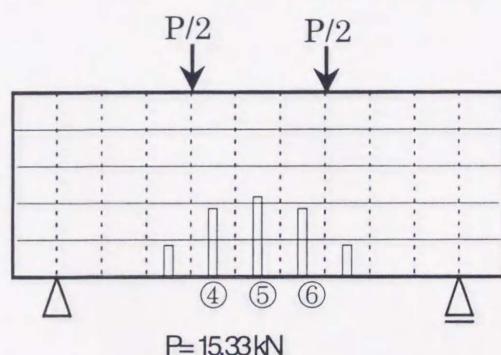
### [曲げ強度の寸法依存性]

- (1) 普通コンクリートはりの曲げ強度の寸法依存性について、シリーズ1で比較を行った結果を、付図.23に示してある。実験結果に比較して、高めの結果となっているが、明確な曲げ強度の寸法依存性が見られた。
- (2) 鋼纖維補強コンクリートはりの曲げ強度の寸法依存性についても、普通コンクリートはりと同様にシリーズ1で比較を行った(付図.24)。実験では、非常にばらつきの大きい結果となり、明確な曲げ強度の寸法依存性は見られないが、解析では、わずかではあるが曲げ強度の寸法依存性が見られた。

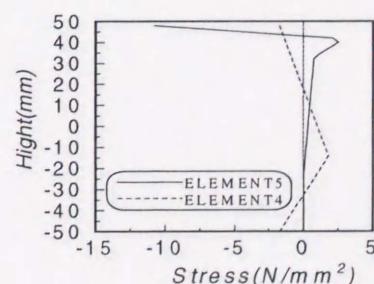
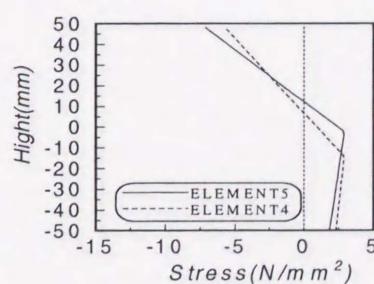
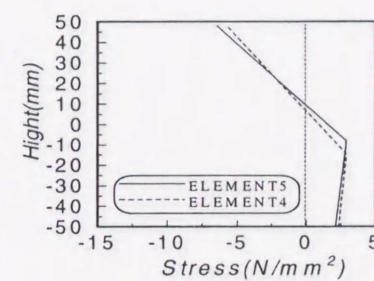
内田らの解析は、対称性を用いて供試体半分を要素数 151 個の平面三角形要素で解析しているのに対し、本解析で用いたはり-柱要素の要素分割は、供試体全体をわずか9要素分割であるため、入力データや計算コストの軽減の面で有利であるといえる。また、内田らの解析では、ひび割れは、はり中央に1本生じるとしているが、本解析の9要素分割の解析では、モーメントスパン内におけるひび割れの発生・進展・消滅のシミュレーションが可能である。



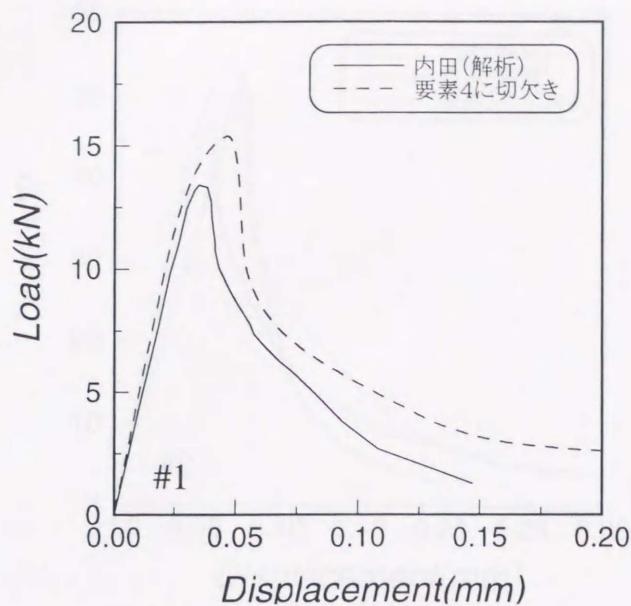
付図.11(a)荷重－変位曲線



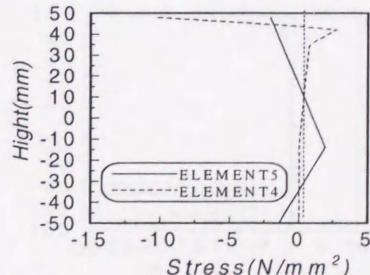
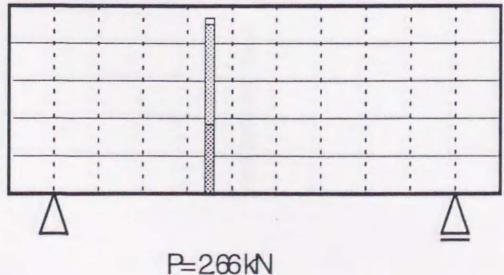
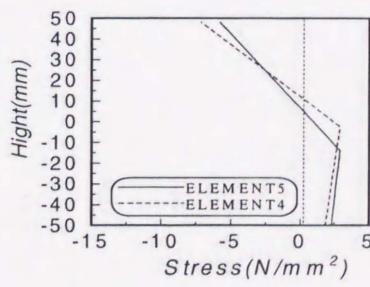
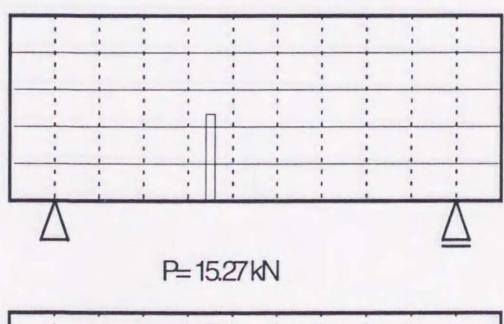
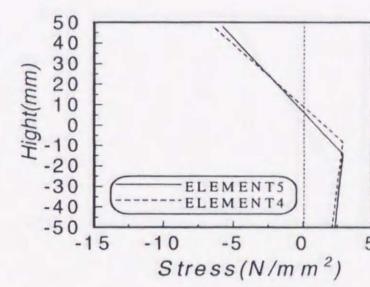
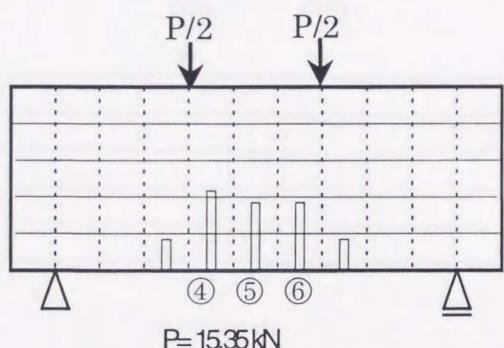
付図.11 (b)ひび割れ図



付図.11 (c)応力分布図

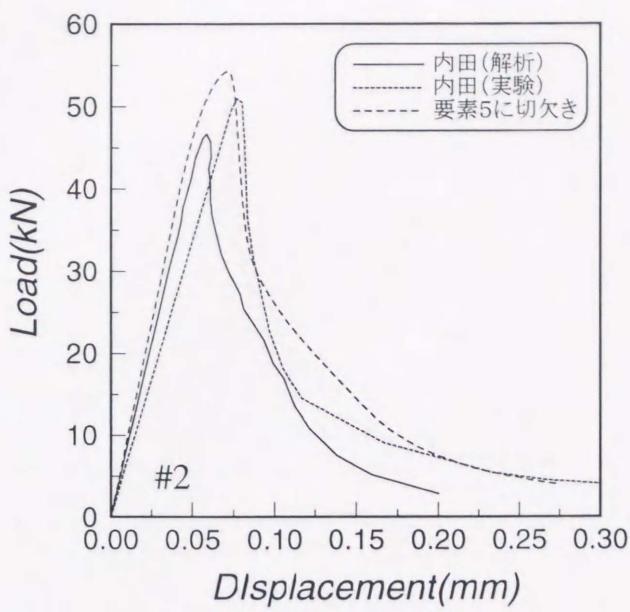


付図.12(a)荷重－変位曲線

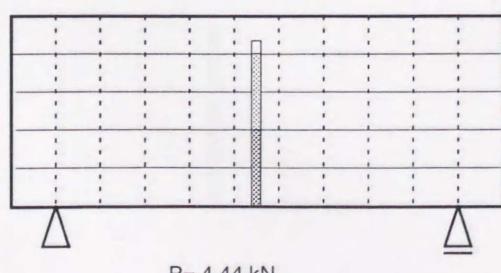
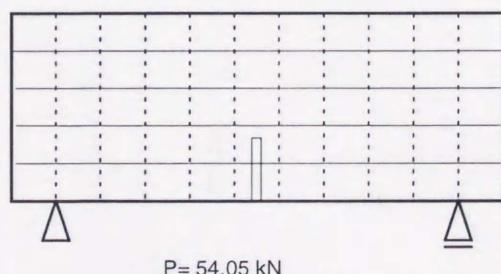
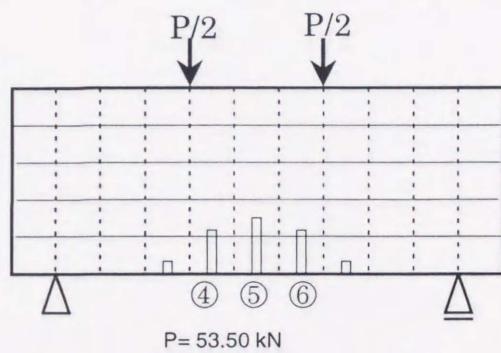


付図.12 (b)ひび割れ図

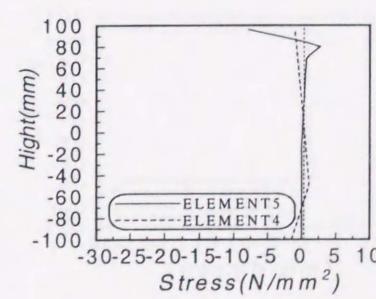
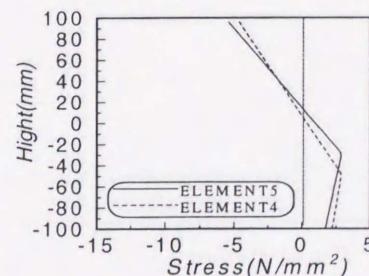
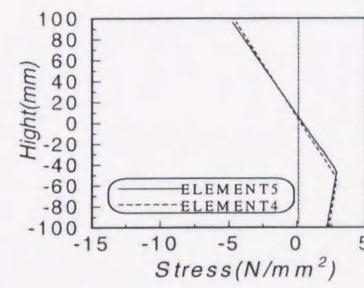
付図.12 (c)応力分布図



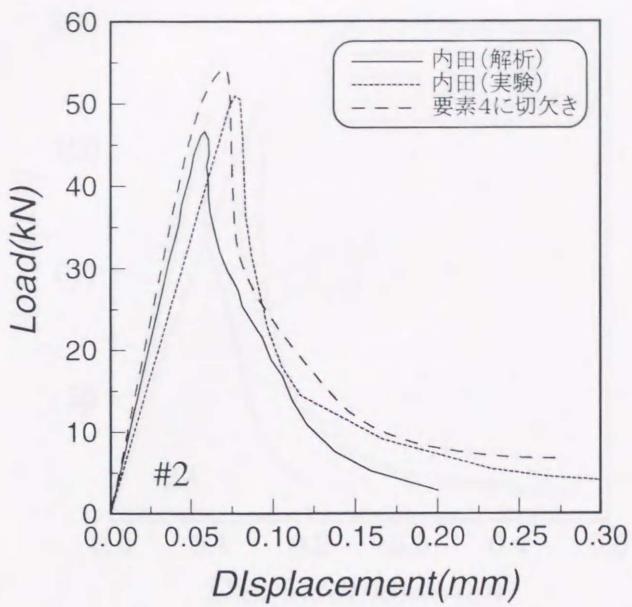
付図.13 (a)荷重一変位曲線



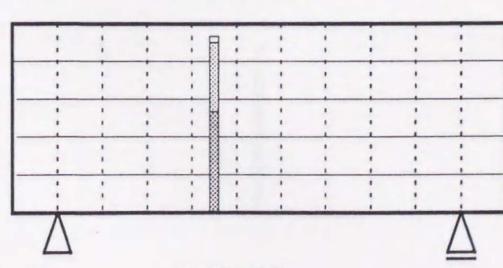
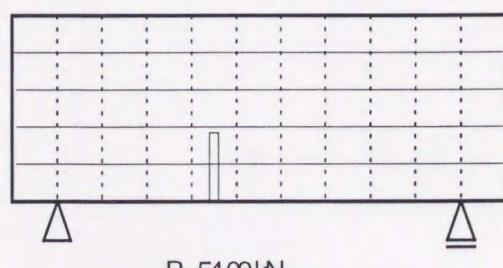
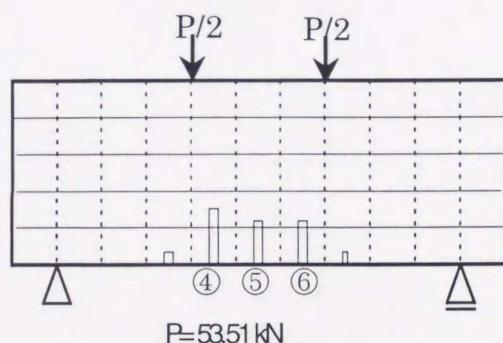
付図.13(b)ひび割れ図



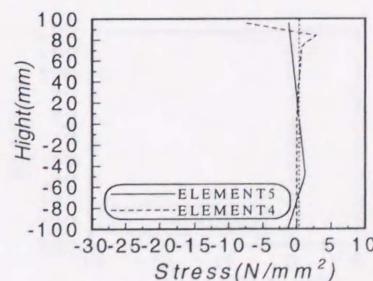
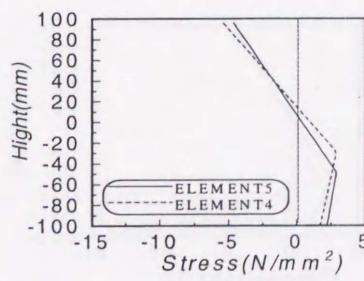
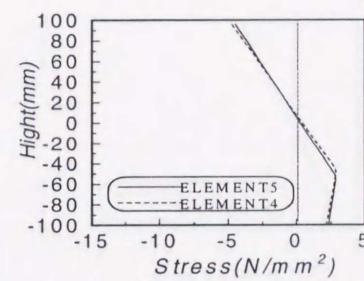
付図.13(c) 応力分布図



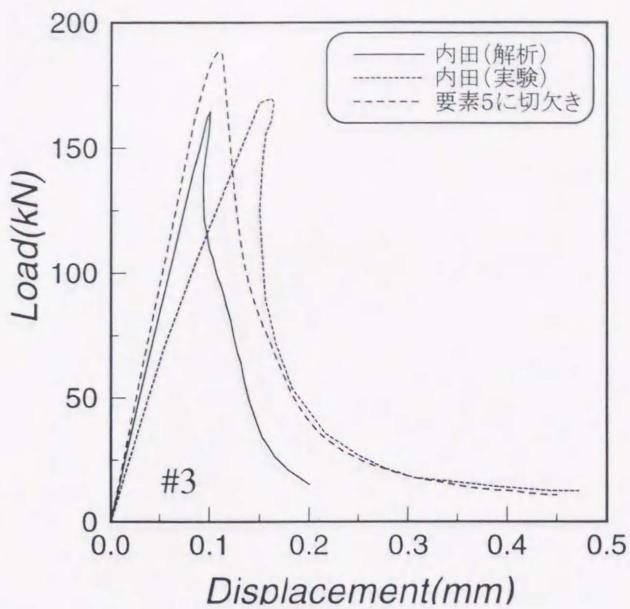
付図.14(a)荷重－変位曲線



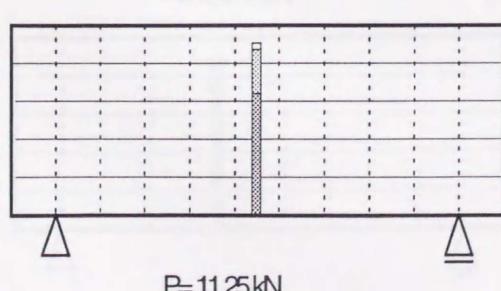
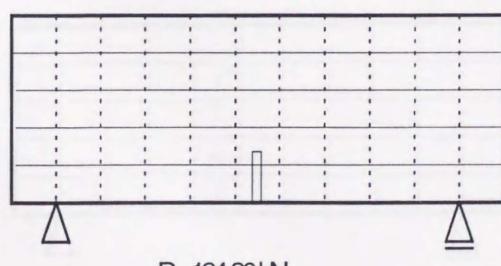
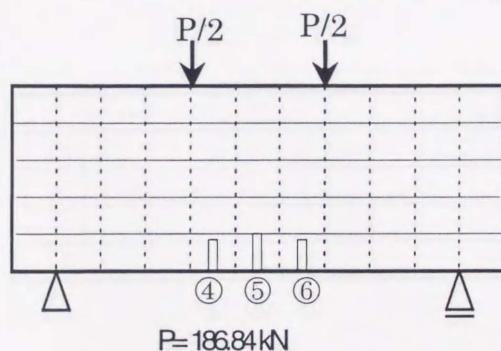
付図.14 (b)ひび割れ図



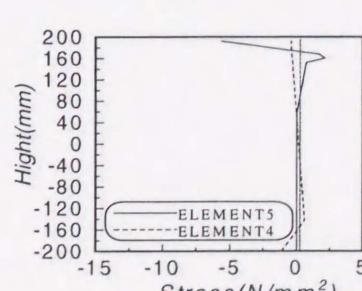
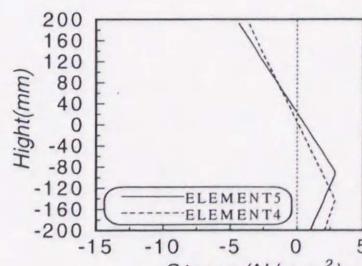
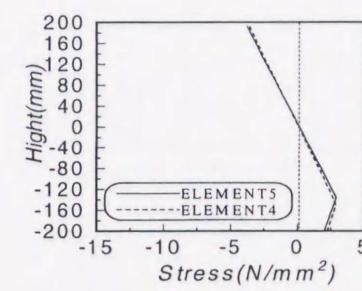
付図.14 (c) 応力分布図



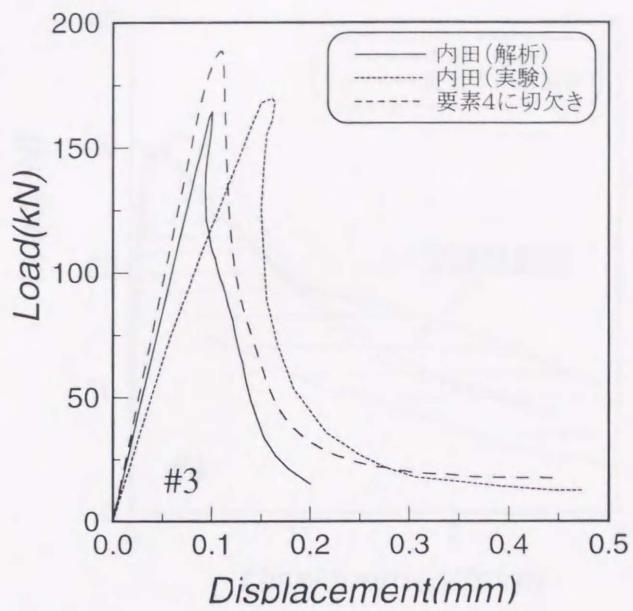
付図.15(a)荷重－変位曲線



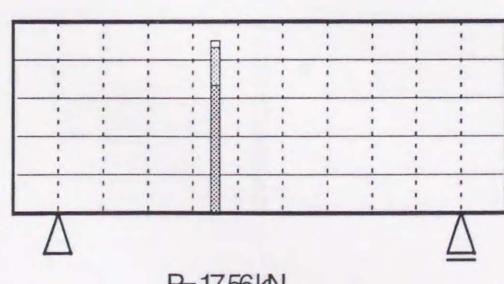
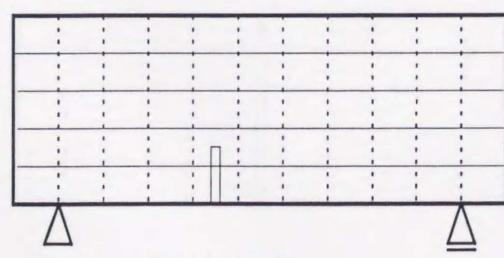
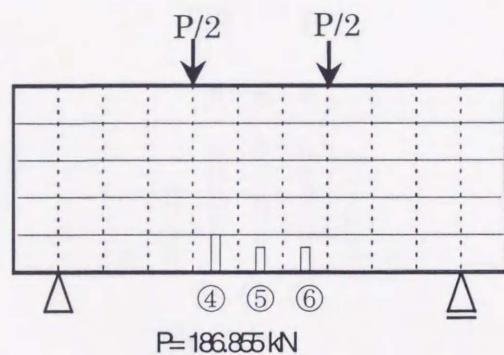
付図.15 (b)ひび割れ図



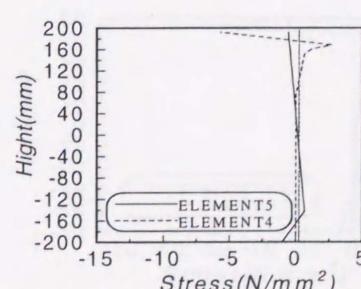
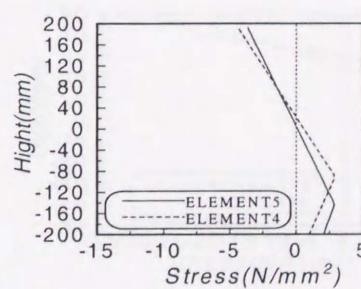
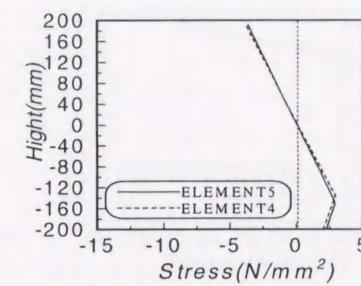
付図.15 (c) 応力分布図



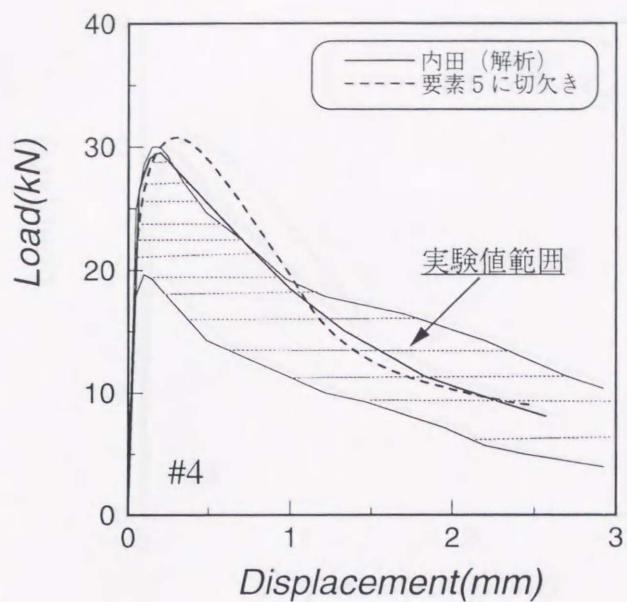
付図.16(a)荷重－変位曲線



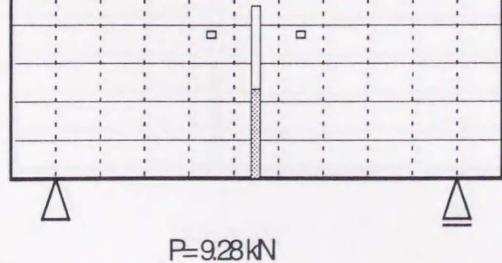
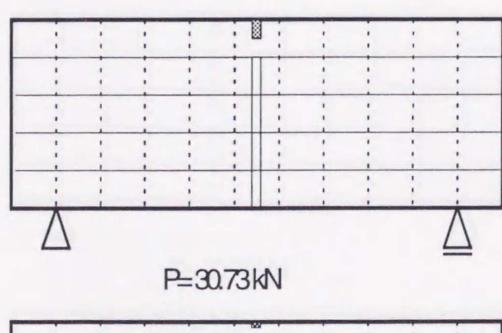
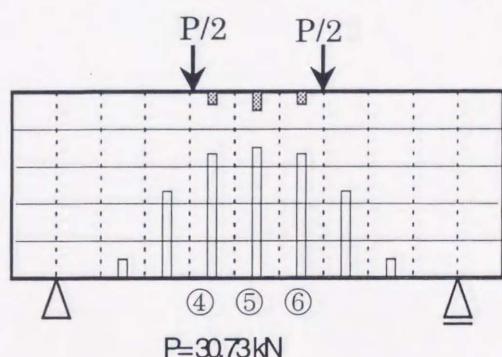
付図.16(b)ひび割れ図



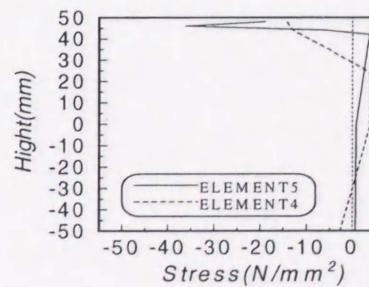
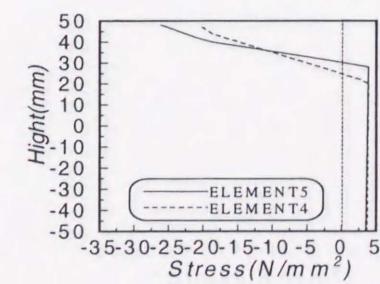
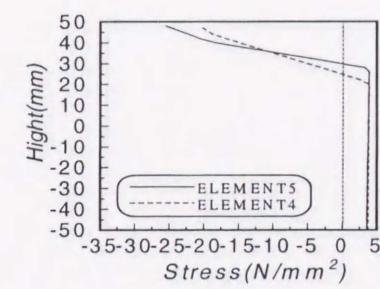
付図.16(c)応力分布図



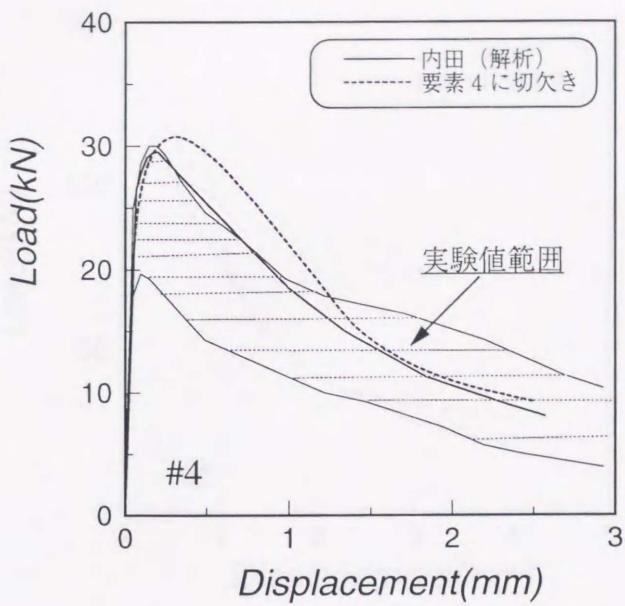
付図.17(a)荷重－変位曲線



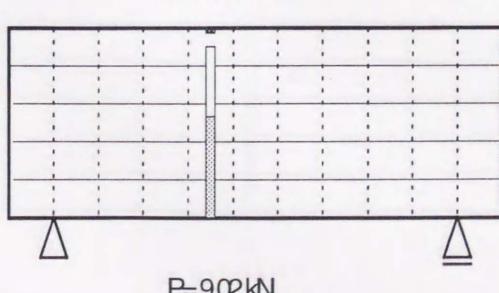
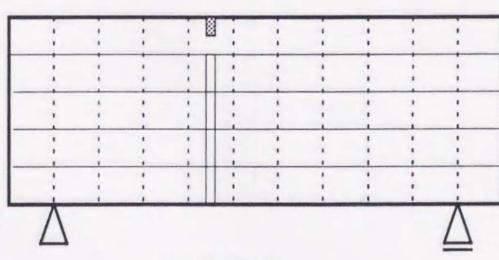
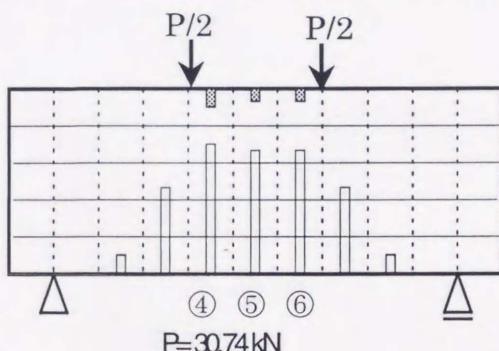
付図.17(b)ひび割れ図



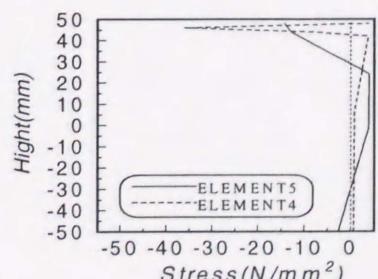
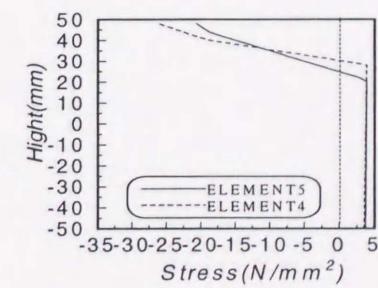
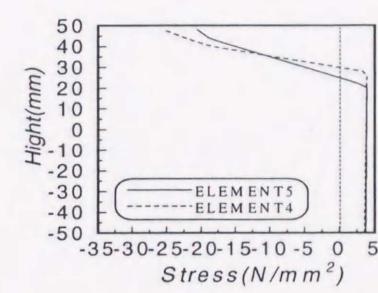
付図.17(c)応力分布図



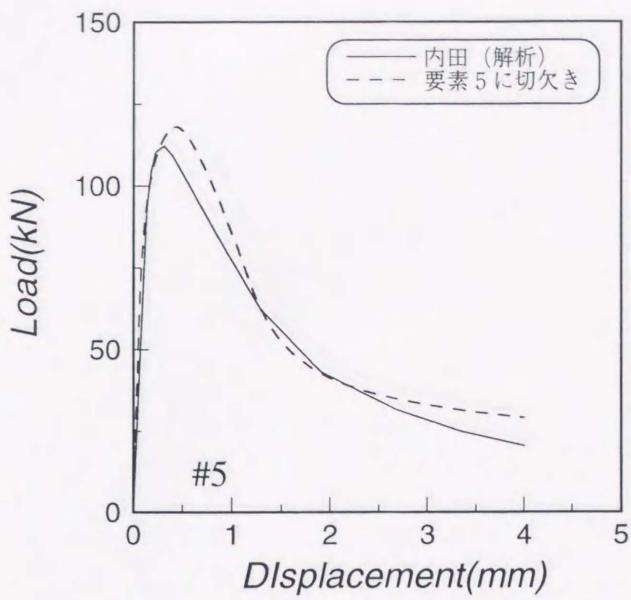
付図.18(a)荷重－変位曲線



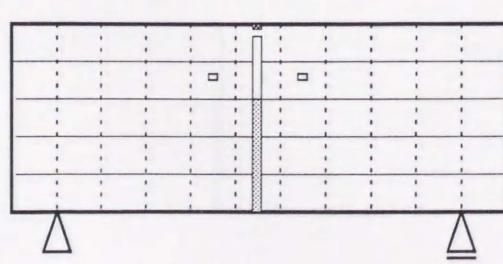
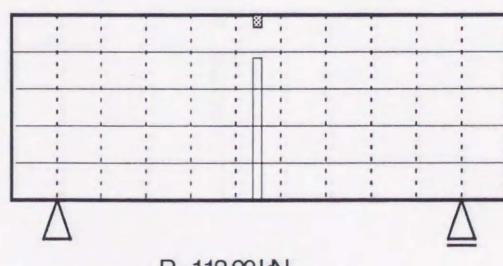
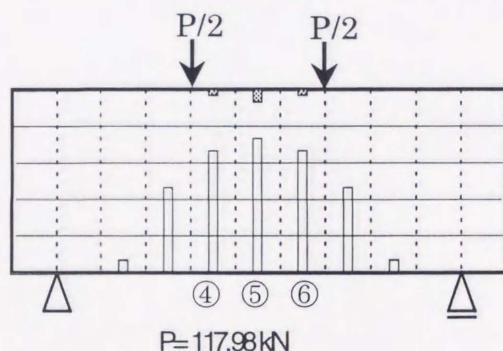
付図.18(b)ひび割れ図



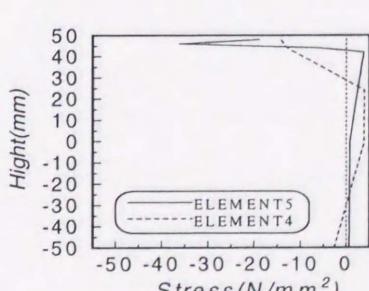
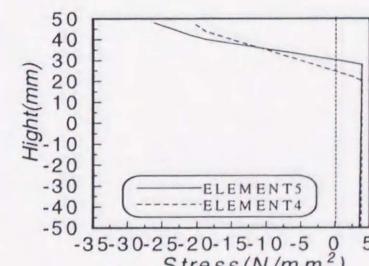
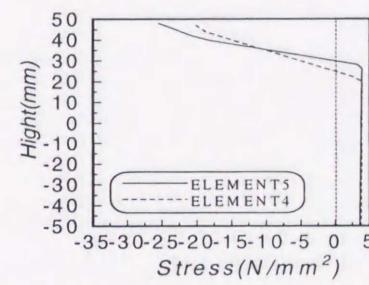
付図.18(c)応力分布図



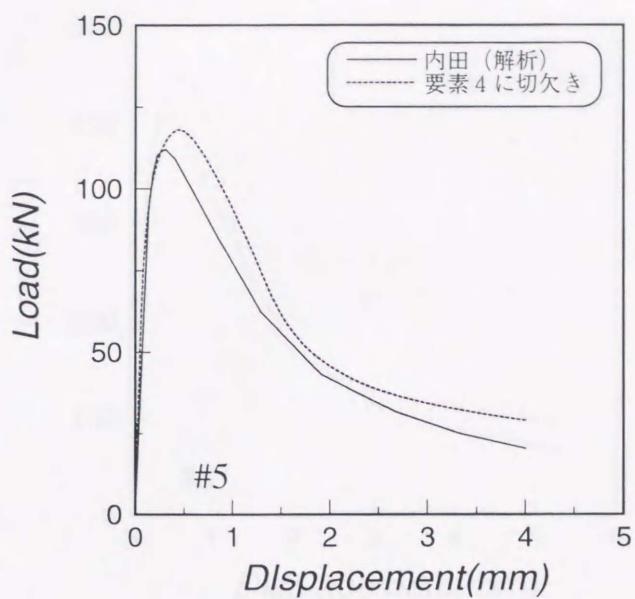
付図.19(a)荷重-変位曲線



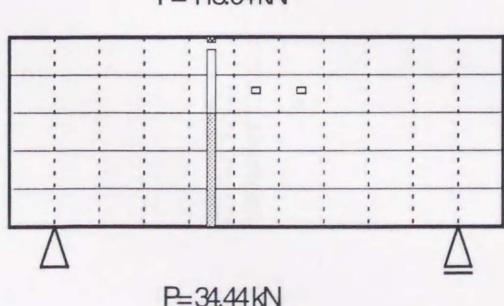
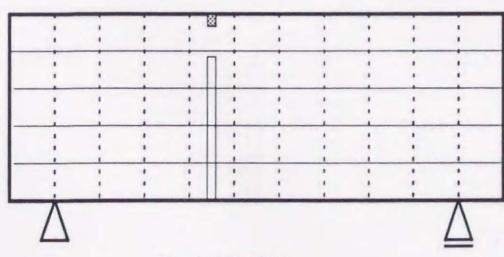
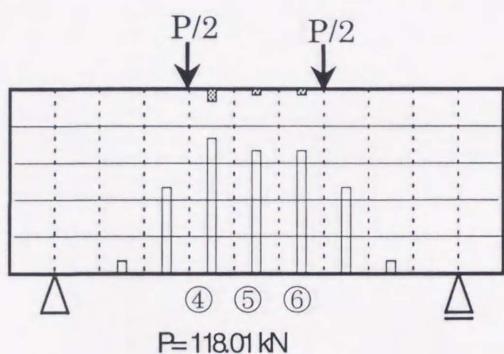
付図.19(b)ひび割れ図



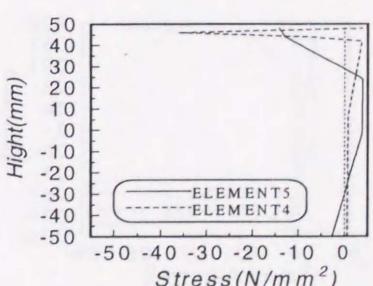
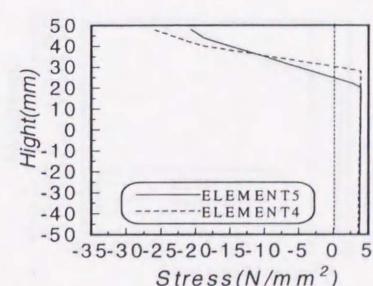
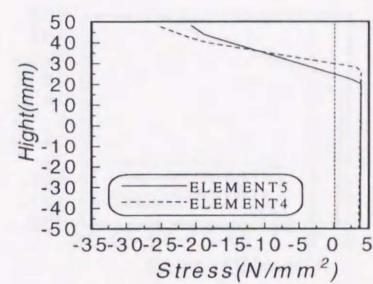
付図.19(c)応力分布図



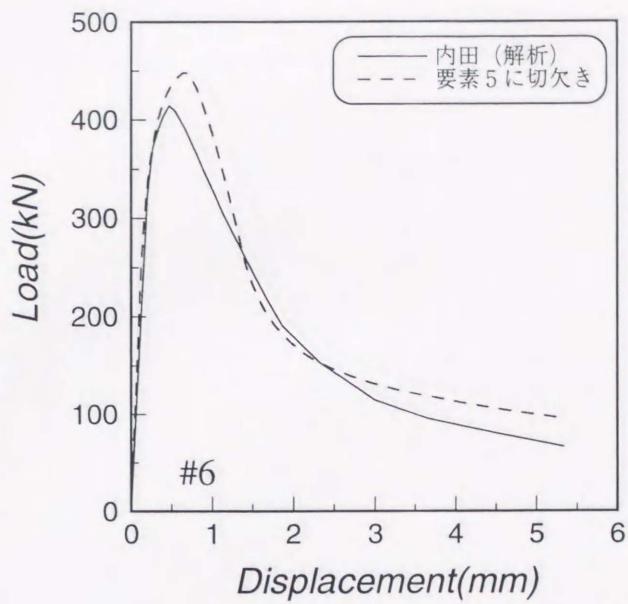
付図.20(a)荷重一変位曲線



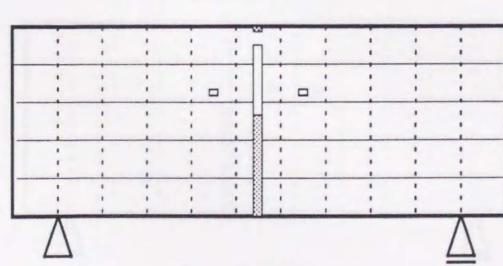
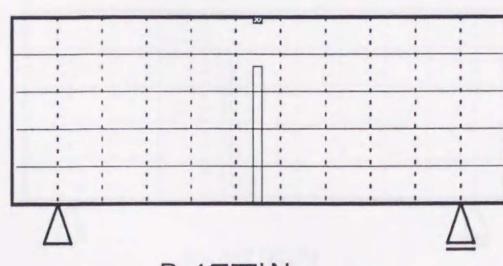
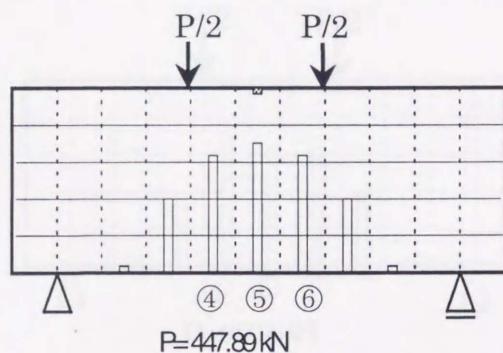
付図.20(b)ひび割れ図



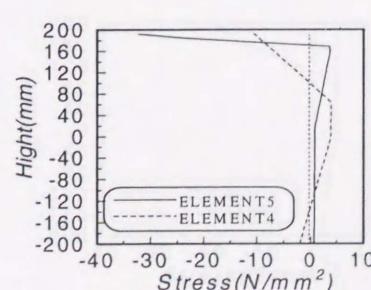
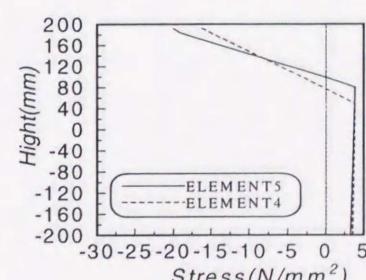
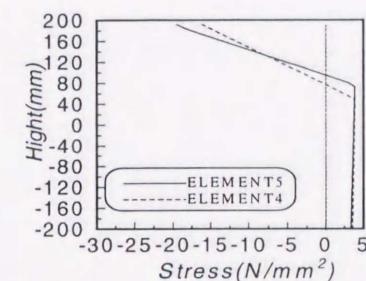
付図.20(c)応力分布図



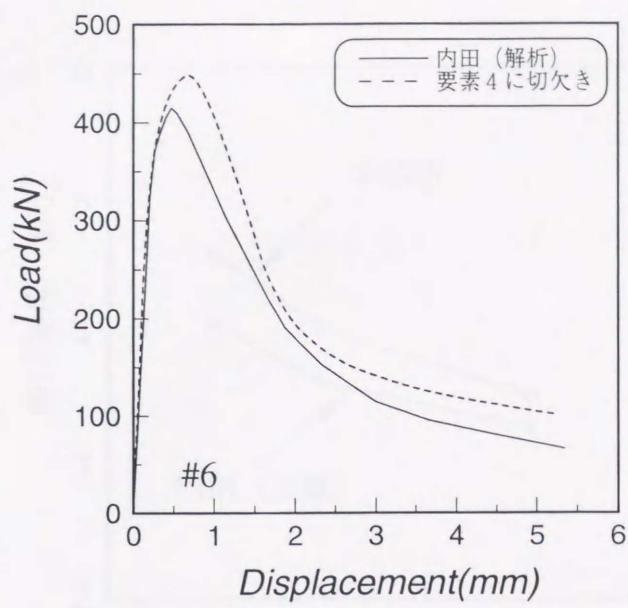
付図.21(a)荷重-変位曲線



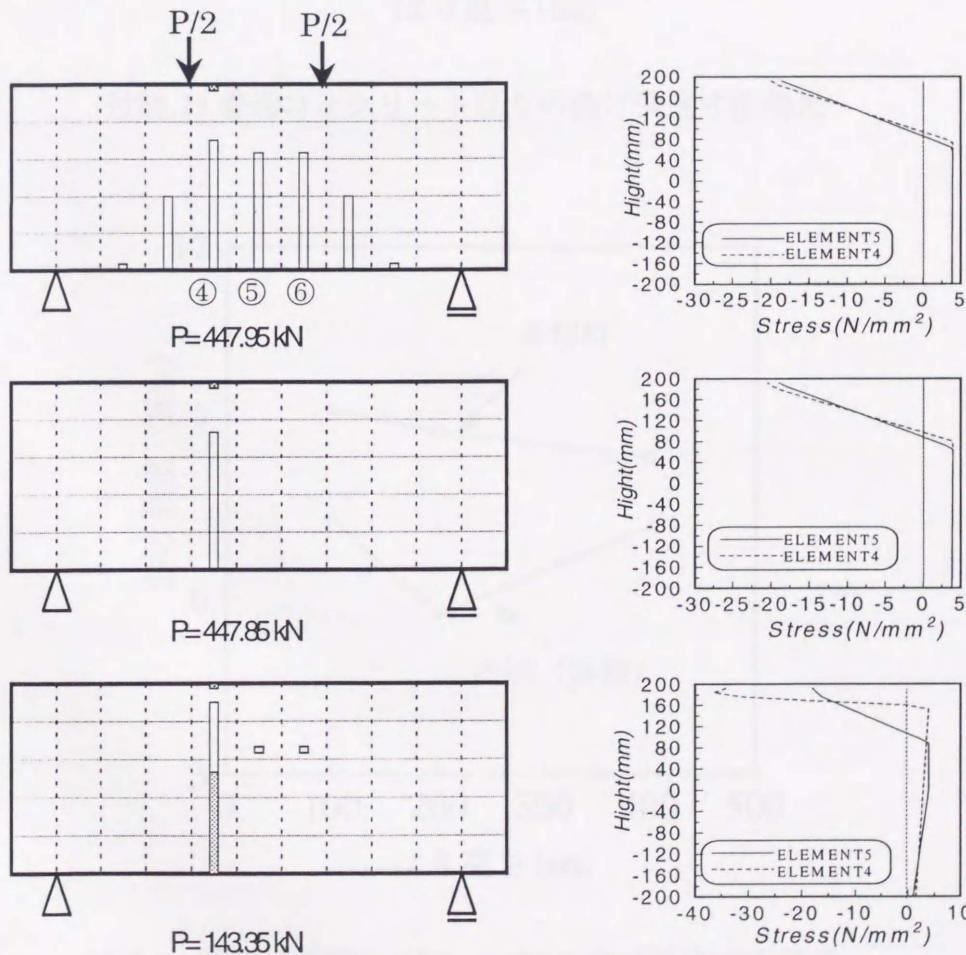
付図.21(b)ひび割れ図



付図.21(c)応力分布図



付図.22(a)荷重-変位曲線



付図.22(b)ひび割れ図

付図.22(c)応力分布図