

# 琉球大学学術リポジトリ

## さんご礁石灰質堆積物の透水係数(生産環境学科)

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): 石灰質堆積物, 透水試験, 透水係数, 砂, 礫 キーワード (En): Calcareous sediments, Permeability test, Coefficient of permeability, sand, gravel 作成者: 新城, 俊也, Shinjo, Toshiya メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/3730">http://hdl.handle.net/20.500.12000/3730</a>

## さんご礁石灰質堆積物の透水係数

新城 俊也\*

Toshiya SHINJO : The coefficient of permeability of calcareous sediments in coral reefs

キーワード：石灰質堆積物、透水試験、透水係数、砂、礫

Key words : Calcareous sediments, Permeability test, Coefficient of permeability, sand, gravel

### Summary

Calcareous sediments consist of such bioclastic as coral, shell and foraminifera, which have calcareous skeleton. A series of permeability tests has been performed on reconstituted calcareous sands with various grading curves to clarify the effects of grain size, content of gravelly component and fine fraction smaller than  $75\mu\text{m}$  on the coefficient of permeability. Major conclusions obtained in this study are as follows. (1) There exists a linear relation in the relationship between the logarithm of the coefficient of permeability and void ratio for individual grading curves. (2) The equivalent coefficient of permeability in a give void ratio increases as the content of gravelly component increases. (3) On the other hand the coefficient of permeability decreases with the increasing in the fine fraction smaller than  $75\mu\text{m}$ . (4) Based on characteristics of gradation the coefficient of permeability of calcareous sediments can be estimated to be within the range of  $10^{-3}\text{cm/s}$ . (5) The coefficient of permeability of calcareous sands can be evaluated by using the effective size  $D_{10}$ .

### 緒言

沖縄を含む南西諸島の島々の周りにはさんご礁が発達し浅い海域を形成している。近年この浅い海を利用して離島架橋や漁港施設等の整備が進められており、このようなさんご礁海域における橋梁基礎や漁区施設の海中工事においては水深が浅いことから仮締切りにより基礎の施工を実施することが多い<sup>1)</sup>。さんご礁の堆積物は主にそこに棲息する生物の遺骸および礁の碎屑物等であり、それらが石灰質の砂や礫となり、海底の基岩や基盤上に砂礫層として堆積している。このようなさんご礁の砂礫層を対象とした基礎工事においては、さんご礁砂礫層の透水係数を把握することが仮締切りの設計および仮締切りによる施工計画に対して重要である。

\* 琉球大学農学部生産環境学科

さんご礁堆積物の透水係数は乱さない状態の値を把握することが望ましいが、これらの堆積物はシルト以下の細粒分から数10cm大の礫まで広範な粒径の粒子を含むため、不攪乱試料のサンプリングが困難であり、また実粒度を用いた透水試験では装置が大型化し試験の実施が容易ではない。仮締切りの実施においては、砂礫層は透水性であることを前提として、仮締切り本体と砂礫層のグラウトの併用により止水効果を期待するのが現状である。

本研究ではさんご砂とさんご礫からなる堆積物の透水性を粒度特性から評価することを目的として、海底から掘削したさんご砂礫試料の再粒度調整試料を用いてさんご砂の透水係数とそれに及ぼす礫含有量、礫の最大粒径、細粒分の影響等を検討した。

## 試料及び実験方法

### 1 試料

試料は、さんご礁海域における架橋地点において橋脚基礎工事のための仮締切り内から掘削した砂礫である。この砂礫はさんご礁の堆積物であり、さんご破片、貝、有孔虫等石灰質の殻を有する生物の遺骸で構成されている。この堆積物の粒度はFig. 1に示すように粒径100mm以下の礫からシルト以下の細粒まで広範に分布しているが、粒径2mm以下の含有量が60%以上もあり、砂分が卓越している。これは、砂や礫が堆積過程で波浪や潮流の影響を受け、砂層の中に礫を取り込みながら堆積したことによると考えられる。

物理的性質は掘削試料の4.75mmふるい通過分について調べた。4.75mmふるい通過試料の粒度分布はFig. 1に、それらの物理試験結果はTable 1にそれぞれ示してある。なお、石灰質の殻は骨格内に空隙を有するが、ここでは間隙比は粒子内間隙を含む値で示してある。また、比較のため豊浦標準砂の結果もFig. 1とTable 1にそれぞれ示してある。

### 2 試験方法

試験は内径10cm、高さ12.5cmモールドを用いて定水位透水試験を行った。

透水試験では試験結果が、粒度や間隙比などの試料の状態の他に、供試体の飽和度、フィルターの透水性など試験条件によって異なる。さんご礁堆積物は、海水面下に堆積し飽和しており、また粒径75 $\mu$ m以下の細粒分を含有することを考慮すると、透水試験では飽和供試体と透水性のフィルターを用いることが必要である。これらの透水試験の試験条件を検討するため、供試体の飽和の程度とフィルターの透水性の影響を標準砂を用いて調べた。供試体の飽和度の影響は乾燥砂をモールドに詰めた後水浸する方法（水浸供試体）とあらかじめ砂を水浸脱気しその後水中でモールドに詰

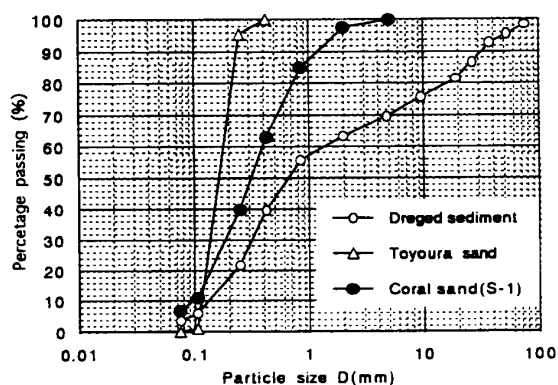


Fig.1 Grading curves of carcaleous sediments

Table 1 Physical properties of sand used in the tests

Sands	$\rho_s$	$D_{10}$ (mm)	$U_c$	$e_{min}$	$e_{max}$
Coral sand	2.79	0.095	4.26	0.819	1.372
Toyouira sand	2.64	0.115	1.58	0.604	0.982

$\rho_s$ : Specific gravity,  $D_{10}$ : Effective size,  $U_c$ : Uniformity,  $e_{min}$ : Minimum void ratio,  $e_{max}$ : Maximum void ratio

める方法（水浸脱気供試体）について調べた。フィルターにはポーラスストーンと細粒分を含まない粗粒砂を用いた。供試体の飽和度の影響はフィルターにポーラスストーンを使用した場合に調べ、一方フィルターの影響は水浸脱気供試体についてポーラスストーンと粗粒砂を用いた場合に比較した。供試体は、間隙比の影響をも併せて検討するため、それぞれの試験条件に対してモールドへの試料の充填層数と層当たり転圧回数を変えて作成し、一連の間隙比に対して透水試験を実施した。透水係数はそれぞれの供試体について5回以上測定しその平均で求めた。Fig. 2に試験結果を透水係数（ $K$ ）と初期間隙比（ $e$ ）の関係で示した。いずれの試験においても間隙比の増加に伴って透水係数は増大しており、 $\ln(K)$ と $e$ には直線関係が認められる。飽和の度合いの影響と比較すると、水浸脱気供試体の透水係数の方が水浸供試体よりも大きな値を示している。このことは、供試体を水浸しただけでは未だ粒子間隙に気泡が残存していることを示唆しており、気泡の影響を取り除くには脱気が必要である。特に、細粒分を含みアンギュラーな粒子形状のさんご礁堆積物では水浸脱気による供試体が不可欠である。一方、フィルターとしてポーラスストーンと粗粒砂を比較すると、粗粒砂を用いた方が透水係数は大きくなる傾向にある。さんご礁堆積物は粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分を含むため、その透水係数は標準砂より小さく、フィルターにポーラスストーンの使用が可能と判断できるが、緩詰め試料や礫混じり試料についても透水試験を実施することから、フィルターに粗粒砂を用いた。

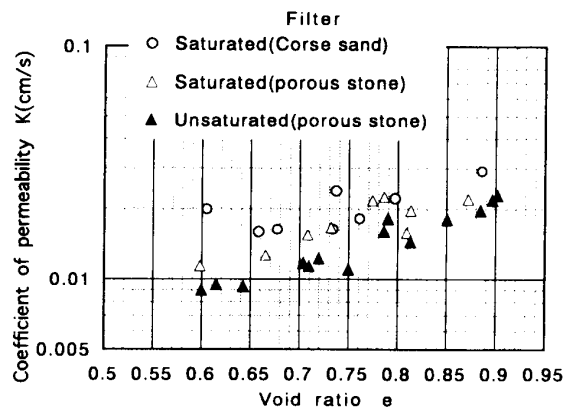


Fig. 2 Effects of saturation and filter on coefficient of permeability (Toyouura sand)

### 3 実験

透水係数に及ぼす間隙比、礫含有量、礫の最大粒径および細粒分の影響を調べることを目的として以下の粒度調整試料について一連の透水試験を実施した。供試体はあらかじめ必要量を水浸脱気し、空気が混入しないよう6層に分けて水中でモールドに充填した。

#### (1) 実験1 (S-1)

間隙比の影響を調べるためFig. 1に示した4.75mmふるい通過試料（S-1，せん頭粒度試料）を用いて透水試験を行った。緩詰めから密詰めにまたがる供試体を層当たりの転圧回数を変えて作成した。

#### (2) 実験2 (S-2)

礫分の影響を調べるために2mmふるい通過分と粒径2mm~10mm（9.52mmふるい通過、2mmふるい残留）の礫を質量比で0、10、20、30、40、50%に粒度調整した試料について透水試験を行った。粒度調整した試料の粒度分布をFig. 3(a)に示す。なお、粒径2mm以上の礫は4.75mmふるい通過分を残留分の質量が等しくなるように調整してある。

#### (3) 実験3 (S-3)

実験2（S-2）のような礫混じりの試料において礫の粒径の大きさの影響を調べるために、礫含有率20%の礫混じり試料に含まれる礫の最大粒径を5、10、15、20mmに変化させ透水試験を行った。それらの粒度調整試料の粒度分布をFig. 3(b)に示す。

#### (4) 実験4 (S-4)

粒径2mm以下の試料の透水係数に及ぼす粒径の大きさ及びそれらに含まれる細粒分の影響を調べるため、2mm、1mm、0.85mm、425 $\mu\text{m}$ 、250 $\mu\text{m}$ のそれぞれのふるいでふるった5種類のせん頭粒度試料について透水試験を行った。これらのせん頭粒度試料の粒度分布をFig. 3(c)に示す。

以上の実験2から4までの透水試験では粒度ごとに密詰め、中詰め、緩詰めを目標に供試体を作成し、

間隙比を3段階に変化させた。また、実験2と3では礫の分離や粒度の偏りを防ぐため、必要量を均質に6等分しそれらを水浸脱気し水中で一層ずつモールドに充填した。

また、実験に用いた試料の粒度特性をTable 2に示す。

Table 2 Particle size characteristics and parameter  $\alpha$

Test sample	$D_{10}$ (cm)	$D_{50}$ (cm)	$D_{60}$ (cm)	F(%)	$\alpha$
S-1	0.0095	0.032	0.041	7.0	0.0137
S-2 p=0%	0.0093	0.031	0.039	7.1	0.0146
p=10%	0.0108	0.034	0.045	6.4	0.0089
p=20%	0.0110	0.042	0.058	5.7	0.0111
p=30%	0.0117	0.055	0.081	5.0	0.0168
p=40%	0.0125	0.115	0.200	4.3	0.0267
p=50%	0.0140	0.152	0.275	3.5	0.0434
S-3	0.0110	0.042	0.058	5.7	0.0200
S-4 <0.25mm	0.005	0.014	0.016	17.2	0.0089
<0.425mm	0.0066	0.018	0.024	10.9	0.0146
<0.85mm	0.0088	0.026	0.034	8.1	0.0146
<1mm	0.0094	0.027	0.035	7.9	0.0146

F(%): Fraction finer than  $75 \mu\text{m}$

### 実験結果

Fig. 4に実験1 (S-1)の結果を透水係数(K)と間隙比(e)の関係で示す。間隙比の増加に伴って透水係数は増大しており、Fig. 2に示した標準砂の場合と同様に $\ln(K)$ とeの間に線形性が認められる。Kとeの関係は最小自乗法を適用して次式で与えられる。

$$K(\text{cm/s}) = \exp(3.61e - 8.59) \quad (1)$$

Fig. 5は実験2 (S-2)の結果を礫含有量別に透水係数と間隙比の関係で示したものである。なお、比較のため図中には実験1 (S-1)の結果と礫含有率 $P=53.3\%$ の場合の結果も示してある。 $P=53.3\%$ 供試体は、礫が堆積物の骨格を構成し、その空隙を砂が埋めると仮定したものであって、その作成は粒径 $5\text{mm}-10\text{mm}$ の礫を6層に分けて敷き詰めそれぞれ層ごとにその空隙に $2\text{mm}$ ふるい通過分を充填する方法で行った。この礫含有率は砂層中に礫を含有できる上限とみなせる。それぞれの礫含有率の結果にはバラツキがみられるが、 $P=0\%$ すなわち $2\text{mm}$ ふるい通過試料の $\ln(K)$ とeの関係の傾きが実験1 (S-1)の結果とほぼ同じであることから、 $P=10\%$ 以上の礫混じり砂における $\ln(K)$ とeの傾きは同じと仮定する。図中には、このような仮定に基づいてそれぞれの礫含有率に対し $\ln$

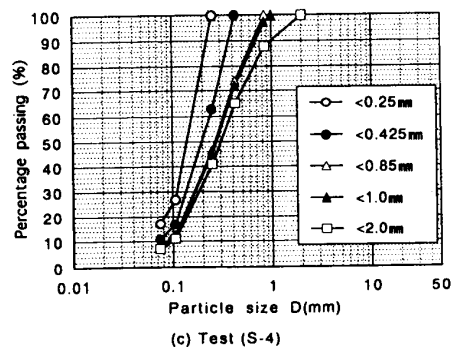
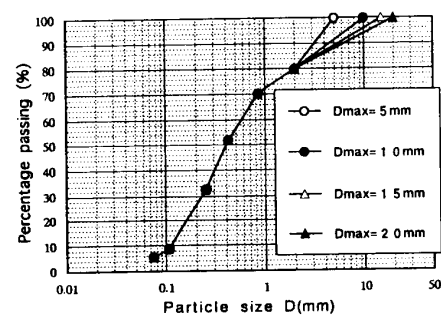
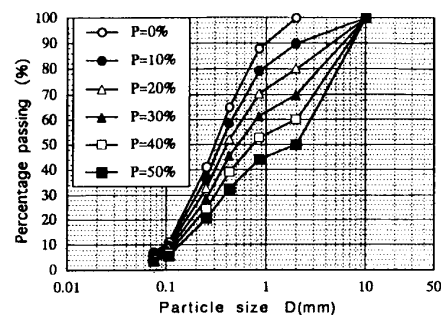


Fig. 3 Grading curves of sample used in tests

( $K$ )と $e$ の関係を実線で示してある。礫混じり砂では、礫含有率の増加に伴って透水係数は増大する傾向にある。また、礫含有率が増えるにつれ間隙比はわずかに減少する傾向にあるが、これは礫の粒子内間隙が砂粒子による粒子間隙に比べて小さいことによると考えられる。そこで、礫混じり砂の間隙比は多くが0.7-0.9の間にあるので、それぞれの礫含有率の透水係数はそれぞれの礫含有率数に対する値の平均で求め、それらの透水係数とそれぞれの礫含有率の関係を示したのがFig. 6である。なお、 $P = 0\%$ に対する値は $K$ と $e$ の関係を外挿して $e = 0.8$ の値として求めてある。2 mm以下の砂に礫が混じると、間隙比が減少し透水係数も低下するが、礫混じり砂では透水係数は礫含有量の増加に伴って増大することがわかる。

Fig. 7は実験3 (S-3)における礫含有率  $p = 20\%$ の礫混じり試料の試験結果を礫の最大粒径ごとに $K$ と $e$ と関係を示したものである。Fig. 5に示した実験2 (S-2)における $P = 20\%$ の結果に比べて間隙比が大きい(  $\ln(K) - e$ 関係はほぼ同一線上にある)、最大粒径の影響はほとんどみられない。礫含有率 $P = 20\%$ のような礫混じり砂では、礫が砂の中に点在して含まれていることを示唆しており、透水係数は礫の粒径より砂粒子の間隙比に支配されるといえる。

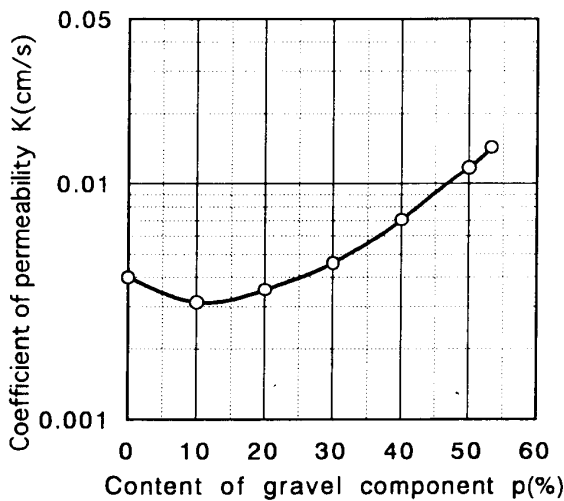


Fig. 6 Effect of contents of gravel component on permeability

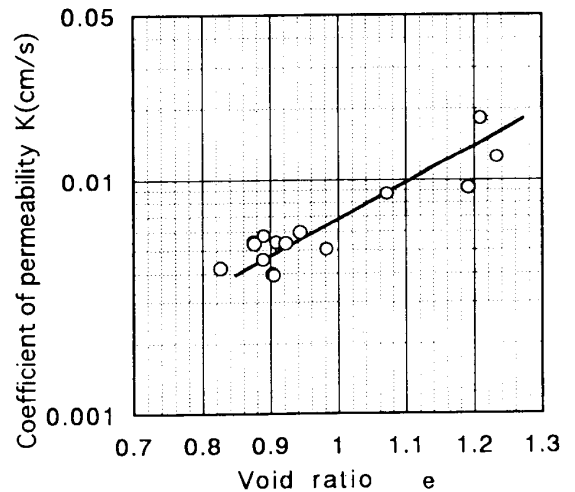


Fig. 4 Permeability test results(S-1)

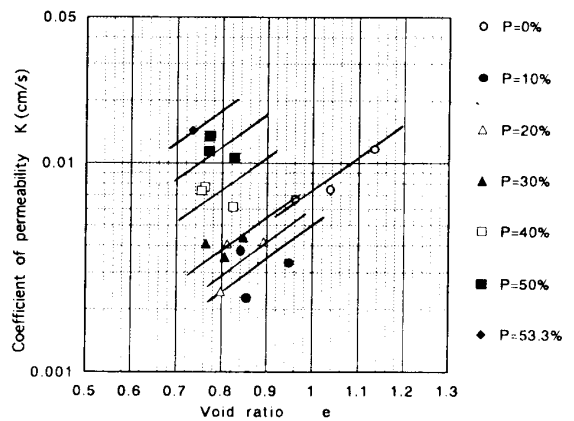


Fig. 5 Permeability test results(S-2)

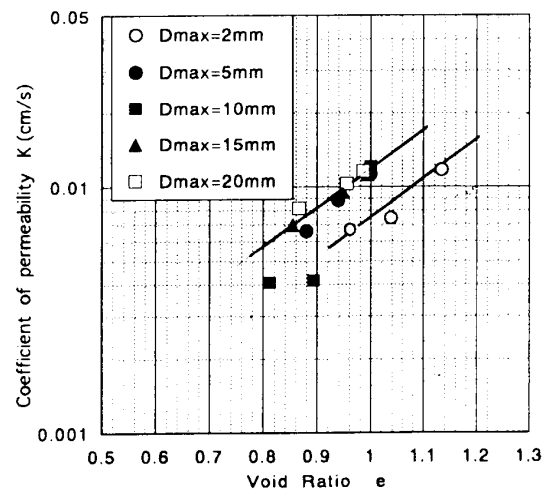


Fig. 7 Permeability test results(S-3)

Fig. 8は実験4 (S-4)における各せん頭粒度試料のKとeの関係を示したものである。ln (K)とeの関係は線形性を示し、その傾きは、実験(S-1)の結果にはほぼ一致している。透水係数は最大粒径0.425mm以上のせん頭粒度では最大粒径の影響がみられないが、最大粒径0.25mmのせん頭粒度ではそれらに比べて低い値にある。最大粒径0.25mm以下では粒径が小さくなるとともにシルト以下の細粒分の含有量が増加しており、透水係数は細粒分の含有量に支配されることを示唆している。

考 察

Fig. 9は透水係数と間隙比の関係ですべての実験結果について再度まとめて示したものである。これらの透水係数と間隙比の関係は、先に実験結果のみたように、粒度ごとにln (K) - eの線形関係で示される。しかしながら、一方実験結果を全体的にみると、礫含有率50%の場合や間隙比が大きい場合を除けば、透水係数は $10^{-3}$ cm/sのオーダーの範囲にあることがわかる。

砂の透水係数は間隙比eと土粒子の粒径Dsに関係し、間隙比に関しては $e^3/(1+e)$ と、また粒径に関しては $(D_s)^2$ と比例関係にあることが認められている<sup>2)</sup>。粒径との関係に関しては次のHazenの近似式がよく知られている。

$$K = 100(D_{10})^2 \quad (2)$$

ここに、 $D_{10}$ :有効径(cm)。

Fig. 10は透水係数と間隙比の関係をKと $e^3/(1+e)$ の関係で整理したものである。さんご礫礫に対しても次式で示す同様な比例関係が個々の粒度に対して認められる。

$$K = \alpha e^3 / (1 + e) \quad (3)$$

ここに、 $\alpha$ は粒径に関係するパラメタであり、各粒度に対する値をTable 2に示す。

一方、透水係数は同じ粒度においても間隙比の影響を受けるので、粒径との関係は例えば間隙比 $e = 0.9$ の場合について検討する。

$e = 0.9$ における透水係数はFig. 9から個々の粒度に対するln (K) - e関係の勾配が実験1 (S-1)の結果と同じと仮定して内挿(外挿)により求まる。あるいは、式(3)により間隙比から同じ透水係数の値が求まる。

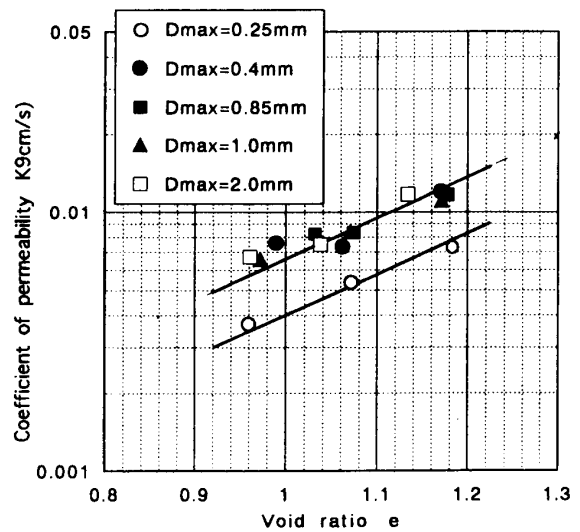


Fig.8 Permeability test results(S-4)

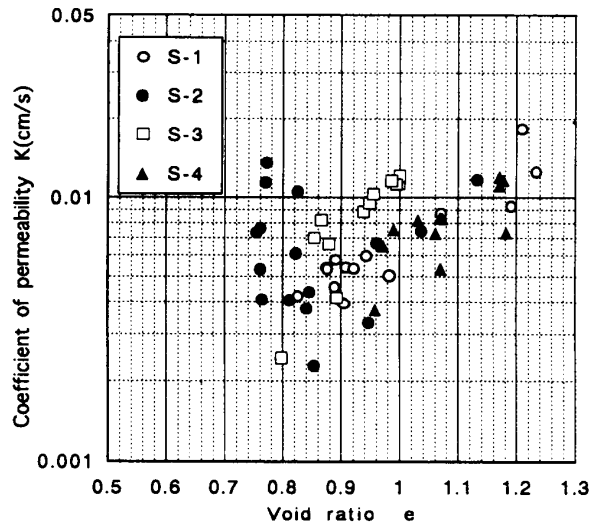


Fig. 9 Comparison of permeability test results

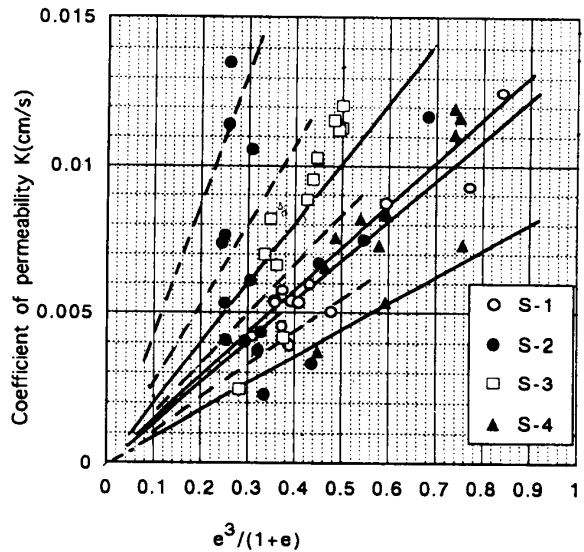


Fig.10 Coefficient of permeability as a function of  $e^3/(1+e)$

このように決定した透水係数 (K) とそれぞれの粒度の有効径の二乗、(D<sub>10</sub>)<sup>2</sup> の関係を示したのが Fig.11 である。いくらかばらつきがあるが、透水係数と有効径の関係は次の関係にある。

$$K(\text{cm/s}) = \beta (D_{10})^2 \quad (4)$$

ここに、D<sub>10</sub>:有効径(cm)、β:間隙比に関するパラメタであり、e=0.9のとき、β=70である。パラメタβは、他の間隙比に対してもFig.9、あるいは式(3)を利用しその間隙比におけるKを求め、(D<sub>10</sub>)<sup>2</sup>との関係から決定できる。このようにして求めた、e=0.7-1.2におけるβの値をFig.12に示す。また、これらの関係は次式で与えられる。

$$\beta = 92e^{2.54} \quad (5)$$

ここに、e:間隙比。さんご砂礫に対しても有効径との関係が認められ、透水係数は有効径から推定できる。

また、透水係数が有効径に関係することから明らかのように、同時にまた細粒分含有率に関係することが推察できる。Fig.13は透水係数と粒度ごとの粒径75μm以下の含有量との関係を示したものである。e=0.9の場合の透水係数であるが、粒径75μm以下の細粒分含有量6%を境に透水係数はそれ以下では急激に増大し、それ以上では6×10<sup>-3</sup>cm/sより小さい値を示している。このことから透水係数は粒径75μm以下の含有量に支配されることが分かる。さんご砂礫においては、間隙比の影響を考慮しても、粒径75μm以下の含有量が5%以上であれば、透水係数は10<sup>-3</sup>cm/sのオーダーを越えることはないと言える。

### 摘 要

さんご礫におけるさんご砂やさんご礫からなる堆積物の透水係数とそれに及ぼす間隙比、粒度、礫含有量、粒径、75μm以下粒径含有量等の影響を検討した。主な結論は次のようである。

- 1) 透水係数 (K) は間隙比 (e) に支配され、ln (K) と e の間に線形関係が認められる。
- 2) さんご砂では礫含有量の増加に伴って透水係数が増大し、礫混じりさんご砂の透水係数は礫含有量の影響が大きい。
- 3) 一方、同じ礫含有量のさんご砂においては透水係数に及ぼす礫の粒径の大きさの影響は小さい。

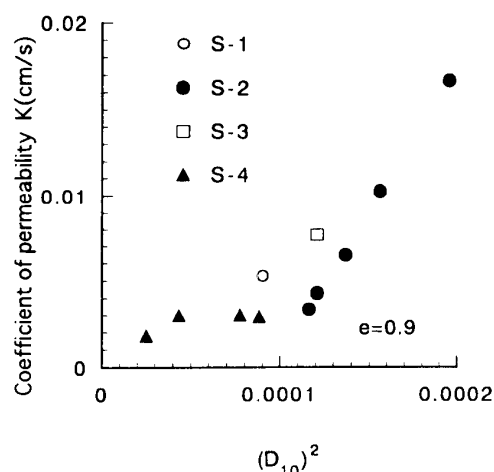


Fig.11 Effects of particle size on coefficient of permeability  
D<sub>10</sub>(cm):effective size

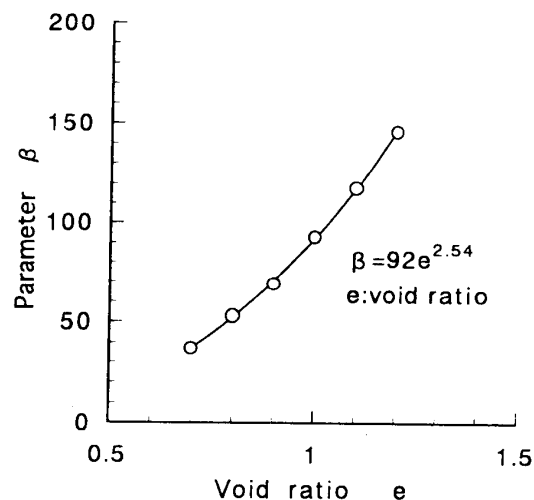


Fig.12 Parameter β as a function of void ratio

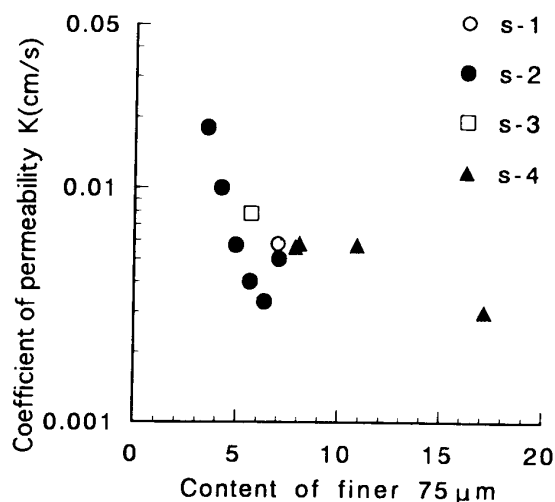


Fig.13 Relationship between permeability and content of finer 75μm



- 4) さんご砂の透水係数はシルト以下の細粒分の含有量による影響が大きい。
- 5) さんご砂礫層の透水係数は堆積物を構成する粒子の有効径から推定できる。
- 6) さんご砂礫層の透水係数は、粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の含有量が5%以上であれば $10^{-3}\text{cm/s}$ のオーダーの範囲にある。

本研究の一部は、文部省科学研究費の補助を受けた。また、実際には玉城直路氏（沖縄県農林水産部）の協力を得た。ここに付記して謝意を表す。

#### 参考文献

1. 池間好一、福島英次、島袋進：来間大橋の締切工法について、第74回農業土木学会九州支部講演集、107-110、1993
2. Taylor, D.W.: Fundamentals of soil mechanics, John Wiley & Sons, 111-115, 1959