

琉球大学学術リポジトリ

さんご砂礫のせん断特性

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): さんご片, 礫, 三軸圧縮試験, せん断強度, ダイレイタンスー キーワード (En): Finger coral, Gravel, Triaxial compression test, Shear strength, Dilatancy 作成者: 新城, 俊也, Shinjo, Toshiya メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/3646

さんご砂礫のせん断特性

新城 俊也*

Toshiya SHINJO : Shear strength characteristics of gravelly coral sediments

キーワード：さんご片，礫，三軸圧縮試験，せん断強度，ダイレイタンスー

Key Words : Finger coral, Gravel, Triaxial compression test, Shear strength, Dilatancy

Summary

Carbonate soils composed of the skeletal remains such as coral, shell and foraminifera have particles ranged widely from gravel to silt size. In this paper, in order to estimate the in situ strength of carbonate soils based on the grading of sediments, the effect of a content of gravelly component on the shear strength of carbonate sand was investigated in laboratory. A series of triaxial compression tests was carried out on the reconstituted sand with various content of gravelly component. The effect of the content of gravelly component on shear strength is significant more than that of the size of gravel. The internal friction angle at failure increases with the increase in content of gravelly component and remains to be constant over the content of gravelly component of 40%. On the other hand, the critical state friction angle shows the value of 41 degree independent of the particle size of gravel and the content of gravelly component.

緒 言

さんご礁海域では石灰質生物を起源とする砂礫が堆積し海底地盤を形成している。これらの堆積物にはシルトや砂だけでなく粒径 100mm 以上のさんご破片のような粗粒な礫を含んでいる。このような地盤の強度評価には不攪乱試料や乱した試料の再構成供試体が用いられるが、不攪乱試料のサンプリングは困難であり、また乱した試料でも実粒度試料より試験では装置が大型化するなど、原位置の強度を評価するには試験の実施に難点がある。

一方、さんご礁堆積物は粒度組成として礫分を主体としているのではなく、細粒分や砂分を主体とする礁堆積物も多く分布することが知られている¹⁾。さんご礫等の粗粒分を含む堆積物では、シルトや砂が卓越する場合その力学挙動はそれら卓越した粒径に支配されると考えられる。したがって、シルトや砂分を含む堆積物の力学挙動およびこれに及ぼす礫分の影響を室内試験で明らかにすることにより、実際の地盤の粒度分布を調べることにより卓越する粒度の強度特性からさんご礁地盤の強度特性を把握することが可能と考えられる。

このような観点に基づいて粒度特性からせん断特性を把握することを目的として、粒度調整したさんご砂礫について三軸圧縮試験を行い、さんご砂のせん断強度とそれに及ぼす礫粒径および礫含有量の影響を調べた。また、粒径の異なる相似粒度試料についてもせん断特性を調べ粒径の影響を検討した。

* 琉球大学農学部生産環境学科

琉球大学農学部学術報告 48 : 83~93 (2001)

実験試料及び実験方法

1 実験試料

試料はさんご礁海域において、架橋工事に伴う仮締切内で海底地盤を掘削し採取した。掘削試料の粒径加積曲線を Fig.1 に示す。この試料は 100mm から 0.075mm までの広範な粒径を含んでいる。2mm 以下の砂分含有率は 60% 以上であり、均等係数は 10.15、曲率係数は 0.56 であり、砂及び砂質土に分類される。砂の土粒子密度は 2.79g/cm^3 であり、炭酸カルシウム含有量は 93% である。

2 実験方法

試験は三軸圧縮試験を実施した。

供試体の寸法は直径 10cm、高さ 20cm である。供試体の作成は二つ割りモールドを組立て、その内壁にメンブレンを密着させ、5層に分けて試料を充填した。試料の充填方法は、層ごとに平均落下高さが約 40cm になるように落下高さを調整し、試料の最大粒径の約 2 倍のふるい目を通して空中落下させた。充填後、供試体をメンブレンとキャップで包み、供試体下部より供試体内部に水を注入し脱気した後、供試体上部から負圧を作用させ供試体を自立させた。モールドを脱型し、供試体の直径と高さを測定し、三軸セルを組み立てた。その後所定の側圧を作用させ、供試体内部の負圧を解消した後、排水せん断を行った。なお、端面摩擦低減のためにラバー皮膜（三軸供試体用メンブレンを使用）とテフロンシートを重ねその間にシリコングリースを塗布した摩擦除去シートを供試体上下端面に挿入した。

排水せん断試験は有効圧力を 49, 98, 149, 196, 245kPa の 5 段階に変化させ、バックプレッシャー 98kPa 作用のもとで 0.5%/min の軸ひずみ速さで行った。

軸荷重は容量 9.8kN のロードセル、軸変位は最大変位 30mm のダイヤルゲージタイプ変位変換器、体積変化は最小目盛り 1ml の二重管ビュレットに連結した差圧計を用いてそれぞれ測定し、結果はデータロガーに収録した。

3 試験供試体

試験は以下の 4 シリーズの粒度調整試料について実施した。

(1) せん頭粒度試料 (S-1)

掘削試料のせん断特性を把握するため、最大粒径 2mm, 5mm, 10mm, 15mm の 4 種類のせん頭粒度試料を準備した。

(2) 礫混じり試料 (S-2)

砂のせん断特性に及ぼす礫含有率の影響を調べるため、粒径 2mm のせん頭粒度を基準に、粒径 2~20mm の礫含有率を 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% に変化させ、6 種類の礫混合試料を準備した。粒径 2~20mm の礫分は粒径加積曲線上で直線分布するように粒度調整してある。

(3) 最大粒径の異なる礫混じり試料 (S-3)

礫混じり試料のせん断強度におよぼす礫の最大粒径の影響を調べるため、(2) の礫含有率 40% の礫混じり試料に 2~5mm, 2~10mm, 2~15mm, 2~20mm の 4 種類の礫分を混合した試料を準備した。以上の 3 シリーズの粒度調整試料に対して同一のストックヤードの掘削試料を繰り返し使用した。

(4) 相似粒度試料 (S-4)

せん断強度に及ぼす粒径の影響を調べるために、2mm せん頭粒度試料およびそれに相似な最大粒径 5mm, 10mm, 15mm の相似粒度試料を準備した。相似粒度試料の作成には実験シリーズ (1), (2), (3)

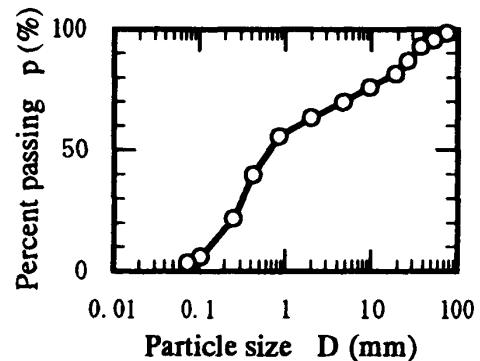


Fig.1 Particle distribution of sediment

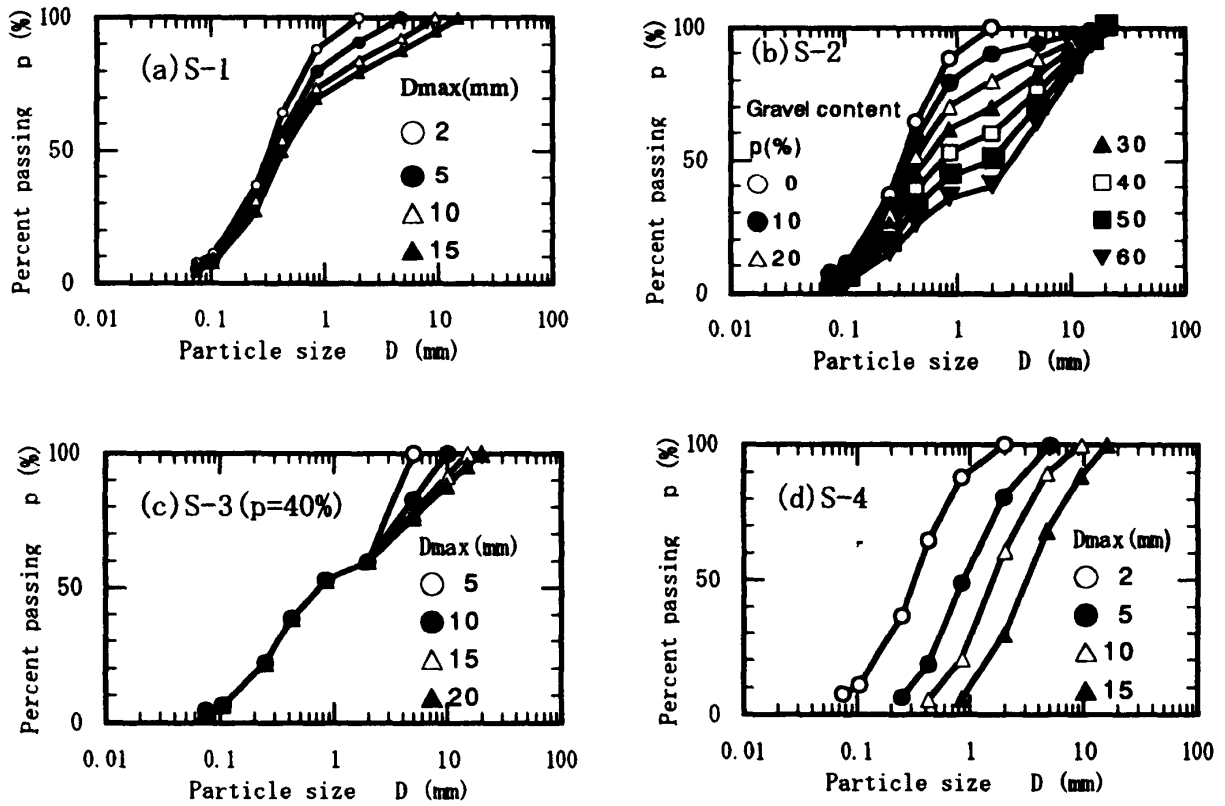


Fig.2 Grading curves of samples

とは別のストックヤードの掘削試料を供試体ごとに別々に調整し使用した。

以上の実験シリーズの各試料の粒度分布と供試体の状態量を Fig.2 および Table 1 に示してある。

実験結果

1 応力-ひずみ関係

(1) せん頭粒度試料

Fig.3 はせん頭粒度ごとに主応力差-軸ひずみ関係, 体積ひずみ-軸ひずみ関係で示したものである。主応力差-体積ひずみ-軸ひずみ関係から以下の特性がみられる。

- 1) 側圧の増加に伴いピーク強度は増加し, ピーク強度時の軸ひずみも増大している。
- 2) 最大粒径 2mm 試料では, 側圧に関係なく軸ひずみ 15% まで主応力差は増加を示している。一方,

Table 1 Physical properties of sample

Sample	D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	U_c	p (%)	γ_d (g/cm ³)	ϕ_d (°)	ϕ_{cv} (°)
S-1							
2mm	2	0.32	4.0	0	1.33	40.8	40.4
5mm	5	0.36	4.3	9	1.36	42.6	41.6
10mm	10	0.38	4.5	17	1.39	43.1	41.4
15mm	15	0.42	5.84	21	1.44	43.9	41.8
S-2							
p=10%	20	0.36	4.17	10	1.40	43.0	40.1
p=20%	20	0.42	5.27	20	1.48	46.2	42.7
p=30%	20	0.53	6.58	30	1.48	45.8	40.7
p=40%	20	0.75	15.63	40	1.54	47.4	40.5
p=50%	20	2.00	22.14	50	1.54	47.2	41.5
p=60%	20	2.95	25.29	60	1.53	46.0	41.3
S-3							
5mm	5	0.75	15.6	40	1.54	47.3	40.4
10mm	10	0.75	15.6	40	1.54	48.0	42.7
15mm	15	0.75	15.6	40	1.54	47.5	39.5
20mm	20	0.75	15.6	40	1.54	47.4	40.4
S-4							
2mm	2	0.32	4	0	1.38	46.8	41.3
5mm	5	0.93	4	19	1.39	47.1	42.0
10mm	10	1.61	4	39	1.34	45.1	42.5
15mm	15	3.05	4	70	1.30	45.9	44.4

D_{max} : maximum particle diameter, D_{50} : average diameter, U_c : uniformity coefficient, γ_d : dry density, ϕ_d : friction angle at failure, ϕ_{cv} : friction angle at critical state

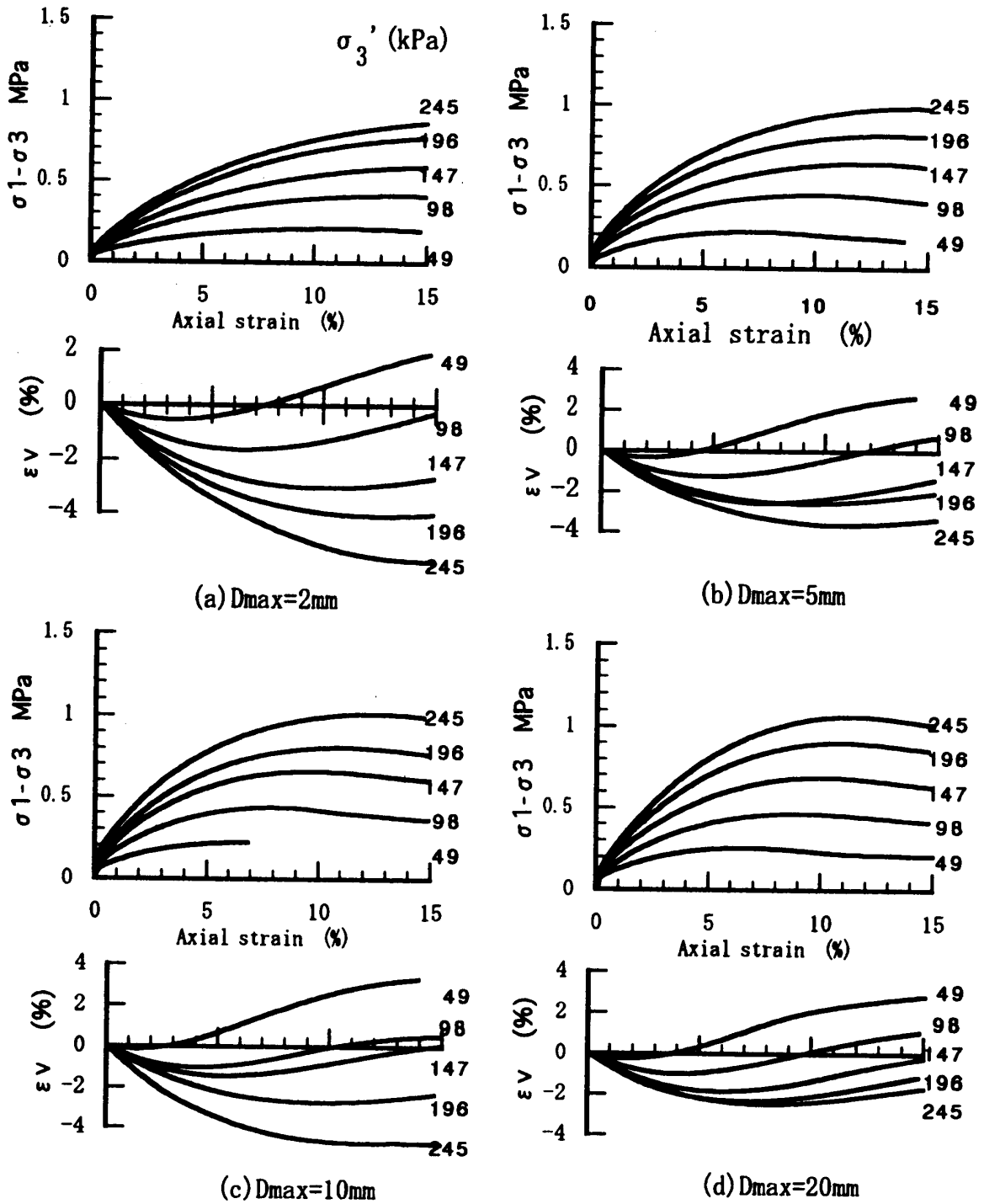


Fig.3 Test results (S - 1)

最大粒径 5mm 以上の試料では主応力差にピークがみられる。

- 3) ピーク強度はせん頭粒度の最大粒径が大きくなるほど増大する傾向にある。
- 4) 体積ひずみ—軸ひずみ関係ではせん断開始の初期段階で収縮を示し、その後膨張に転じている。
- 5) その膨張傾向は側圧 49kPa で顕著であるが、側圧の増加とともに膨張傾向は抑制されている。
- 6) 最大粒径 2mm の試料では側圧の増加に伴って体積ひずみは膨張傾向から収縮傾向に転じるが、最大粒径 5mm では側圧が増大しても体積ひずみは収縮からの膨張傾向を維持し、膨張傾向は粒径の増加に伴って著しくなる。

(2) 礫混合試料

Fig.4 は礫混合試料の主応力差—体積ひずみ—軸ひずみ関係を礫含有率ごとに示してある。主応力差—体積ひずみ—軸ひずみ関係に及ぼす側圧の影響はせん頭粒度試料と同様である。また、側圧一定の場合の応力—ひずみ関係に及ぼす礫含有率の影響は礫含有率の増加に伴って軸差応力は増大し軸差応力にピークが現れるが、軸差応力は礫含有率 40% まで増加し、それ以上の礫含有率では強度増加はみられない。体積ひずみ—軸ひずみ関係では体積収縮後の膨張傾向は礫含有率の増大に伴って著しくなるが、礫含有率 40% 以上では同じ傾向を示している。

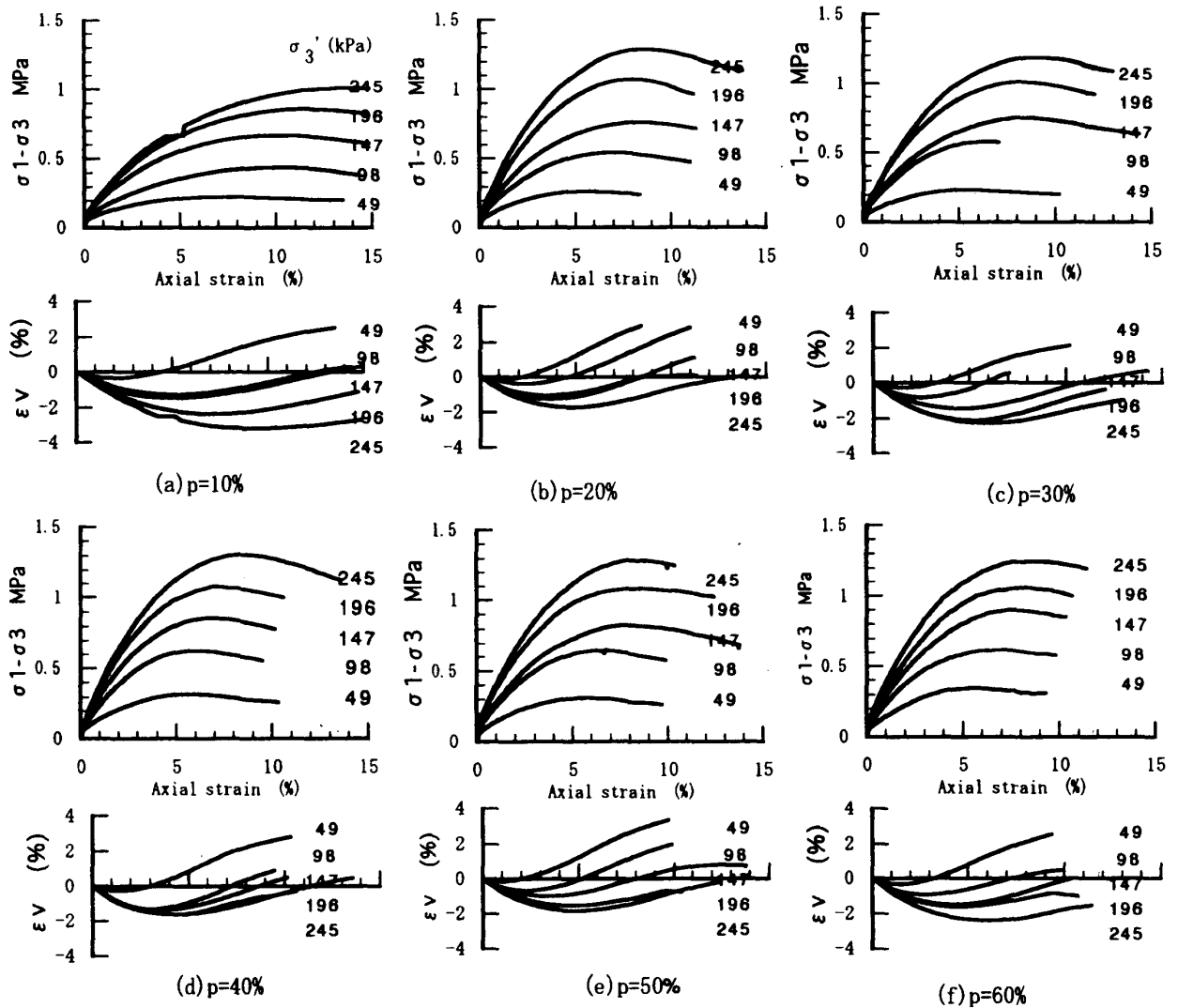
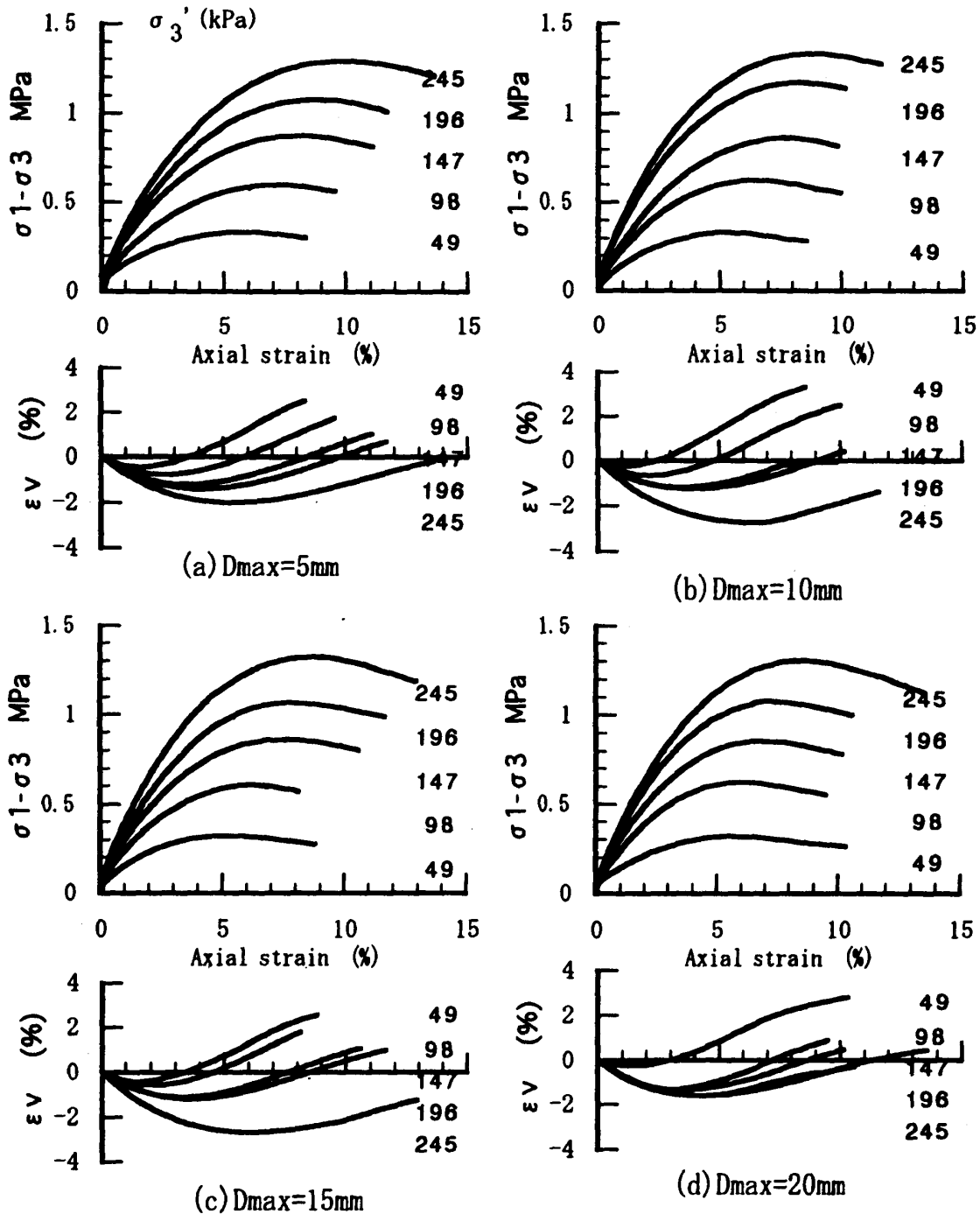


Fig.4 Test results (S - 2)

(3) 最大粒径の異なる礫混合試料

Fig.5 は礫含有率 40% のもとで礫分の最大粒径を異にする場合の主応力差—体積ひずみ—軸ひずみ関係を示したものである。主応力差—体積ひずみ—軸ひずみ関係に及ぼす側圧の影響はせん頭粒度試料と同様である。また、礫分の最大粒径の影響は礫混合試料と同様な挙動を示しており、軸差応力—軸ひずみ関係および体積ひずみ—軸ひずみ関係に礫分の最大粒径による差はみられない。

Fig.5 Test results (S - 3) (Gravel content $p=40\%$)

(4) 相似粒度試料

Fig.6 に相似粒度試料の主応力差—体積ひずみ—軸ひずみ関係を最大粒径ごとに示した。側圧の影響はせん頭粒度試料および礫混合試料の場合と同じである。また、主応力差—軸ひずみ関係は最大粒径 2mm, 5mm および 10mm までの試料ではそれらの関係はほぼ一致し、いずれもピーク強度がみられる。一方、最大粒径 15mm の試料ではピークが現れず軸ひずみの増加にともない軸差応力は増大している。体積ひずみ—軸ひずみ関係は最大粒径が小さい試料ほどせん断に伴う体積膨張傾向が著しく、最大粒径の増加に伴って体積膨張傾向は抑制されている。

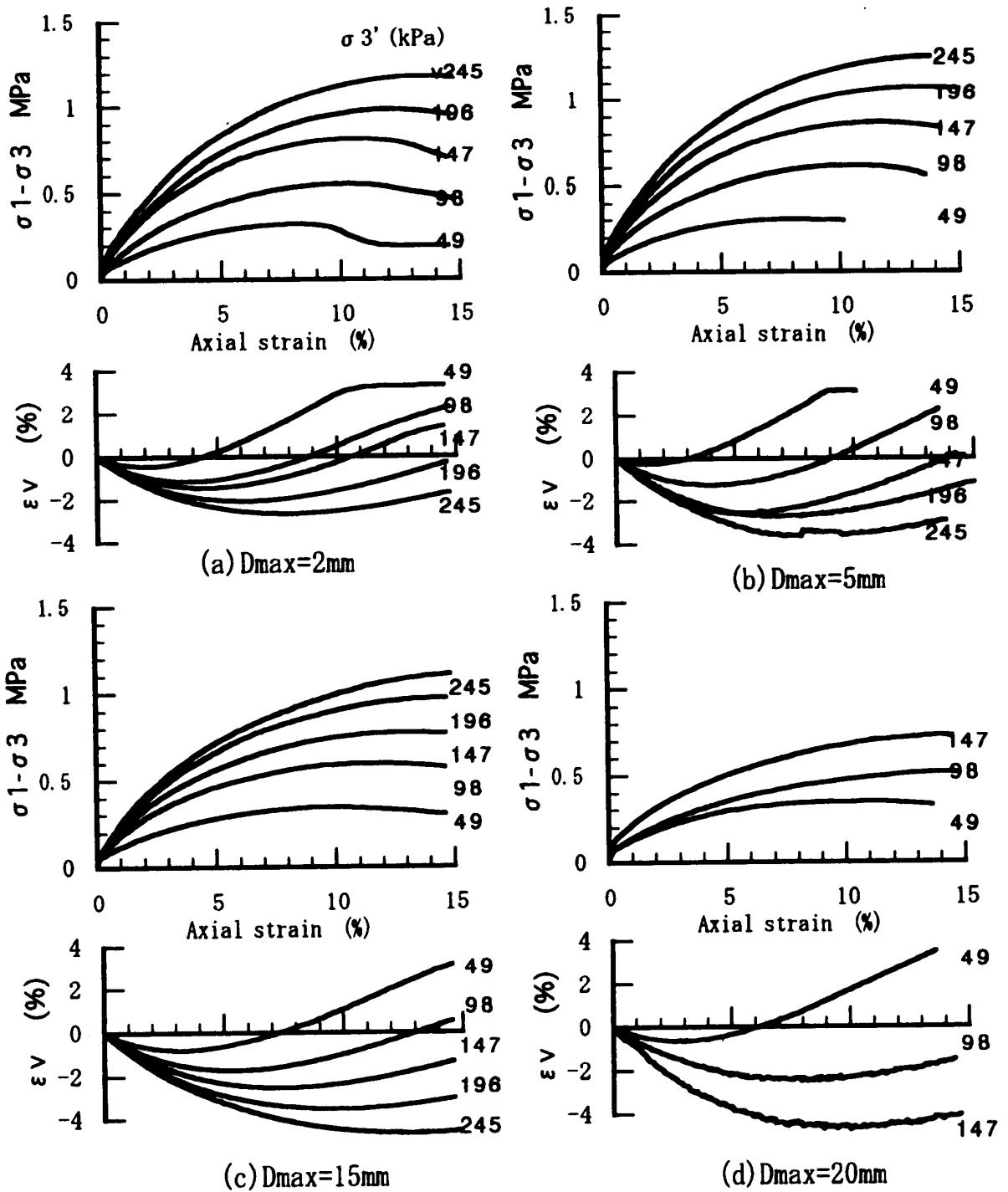


Fig.6 Test results (S - 4)

2 強度およびダイレイタンス特性

せん頭粒度試料，礫混合試料および相似粒度試料についてピーク強度およびピーク強度時のダイレイタンスに及ぼす側圧の影響を示したのが Fig.7 である。ピーク強度時の内部摩擦角は，各側圧に対して次の関係から決定した。

$$\sin \phi_d = (\sigma_1' - \sigma_3') / (\sigma_1' + \sigma_3') \quad (1)$$

また，ダイレイタンスはピーク強度時の体積ひずみの増分と軸ひずみの増分の比すなわちダイレイタンス係数 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)$ で評価した。

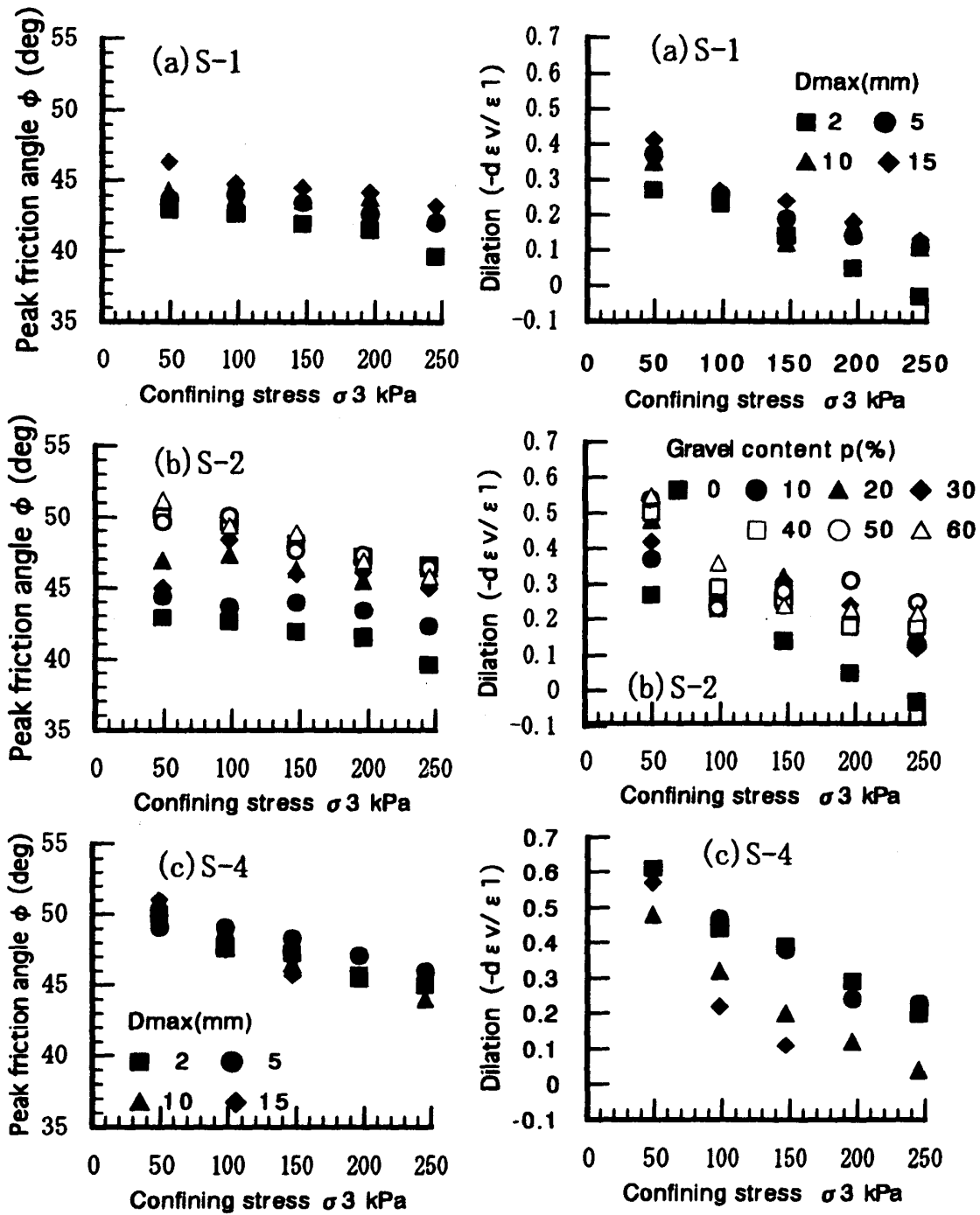


Fig.7 Effects of confining stress on friction angle and dilation

いずれの粒度調整試料においても、内部摩擦角は側圧の増加に伴って減少している。それらの内部摩擦角は、せん頭粒度と相似粒度試料では粒径により、また礫混合試料では礫含有率により、それぞれ異なるが、側圧増加による内部摩擦角の減少傾向はそれぞれの実験シリーズではほぼ一定である。49kPa から 245kPa の側圧増加に対して内部摩擦角の減少はせん頭粒度試料と礫混合試料ではほぼ 3° を、相似粒度試料では約 5° を示している。

同様に、ダイレイタンスー係数も側圧増加に伴って減少しており、ダイレイタンスーは側圧の影響を受けている。ダイレイタンスー係数はそれぞれの実験シリーズで、粒径あるいは礫含有率によって異なる。

るが、側圧増加によるダイレイタンスー係数の減少傾向はいずれの実験シリーズにおいても類似している。

以上の側圧の増加に伴う内部摩擦角とダイレイタンスー係数の対応関係から推察されるように、さんご砂礫のせん断強度はダイレイタンスーの影響を受けており、ダイレイタンスーが大きいほど内部摩擦角が大きいことがわかる。

せん断強度特性

側圧の増加に伴って内部摩擦角が減少することは破壊包絡線が非線形になることを意味している。Fig.8はせん頭粒度試料の最大粒径2mmと15mm試料の破壊線を例示したものである。側圧245kPaの範囲では破壊線は直線関係で近似することが可能であり、破壊包絡線に及ぼす拘側圧の影響は小さい。それぞれの実験シリーズで粒度調整試料ごとに最大強度時の内部摩擦角 ϕ_d を粘着力成分を無視し直線近似により決定した。

最大強度時の内部摩擦角 ϕ_d は、ダイレイタンスー成分とそれ以外の摩擦による成分の和で表せると仮定し²⁾、ここではダイレイタンスー成分以外の摩擦成分をダイレイタンスーの生じない状態での摩擦角 ϕ_{cv} に等しいとした。Fig.9は例としてせん頭粒度試料の最大粒径2mmと15mmの試料についてそれぞれの側圧の最大強度時の主応力比 $(\sigma_1'/\sigma_3')_f$ とダイレイタンスー係数 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$ の関係をプロットしたものである。それぞれの粒度に対して主応力比 $(\sigma_1'/\sigma_3')_f$ とダイレイタンスー係数 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$ の関係には線形関係が認められる。 ϕ_{cv} はこの線形性を利用して $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)=0$ のときの主応力比 (σ_1'/σ_3') の値から決定した³⁾。これらの結果はTable 1にまとめて示してある。

Fig.10はそれぞれの実験シリーズについて、粒度調整試料ごとに最大粒径あるいは礫含有率との関係で ϕ_d および ϕ_{cv} を示したものである。それぞれの実験シリーズにおける ϕ_d および ϕ_{cv} に及ぼす粒径、礫含有率および粒度の影響は次のようである。

- (1) せん頭粒度試料では ϕ_d は最大粒径の増加とともに増大している。最大粒径が増大するにつれて礫分が増加しており、礫分の増加が ϕ_d の増加に関与している。一方、 ϕ_{cv} は最大粒径に関係なく一定であり、その値はほぼ 41° である。
- (2) 礫混合試料では ϕ_d は礫含有率の増加とともに増大し礫分の影響を受け、 41° から 47° まで増大し、礫含有率 $p=40\%$ 以上では一定のままである。一方、 ϕ_{cv} はおよそ 41° を示している。
- (3) 礫含有率 $p=40\%$ 試料では、 ϕ_d および ϕ_{cv} はそれぞれ 47° と 41° を示し、礫分の最大粒径が変化してもその影響は小さい。
- (4) 相似粒度試料では ϕ_d は粒径に関係なく一定であり、一方 ϕ_{cv} は粒径の増加に伴い増大している。相似粒度のように比較的同じ粒径の粒子が揃った粒度では ϕ_d におよぼす粒径の影響は少なく、 ϕ_d はおおよそ 46° を示している。一方、 ϕ_{cv} はせん頭粒度試料および礫混合試料の場合とは異なり、粒径の影響を

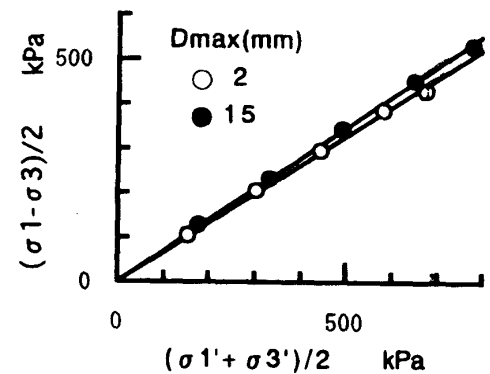


Fig.8 Failure envelopment

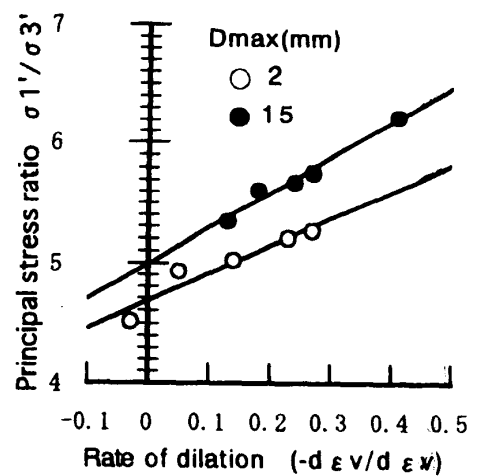


Fig.9 Relationship between stress ratio and rate of dilation

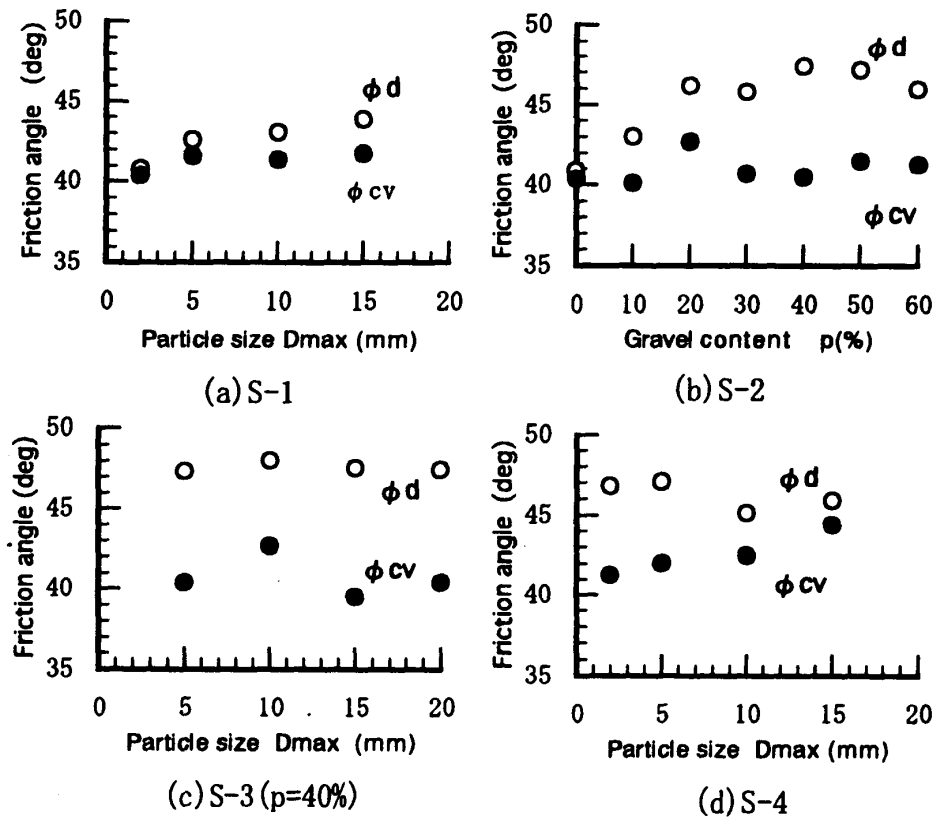


Fig.10 Effects of grading on ϕ_d and ϕ_{cv}

受けるようである。

ϕ_d の影響について以上のようにそれぞれの実験シリーズの粒度調整試料別に検討したが、これらをまとめて礫含有率および乾燥密度との関係で Fig.11 と Fig.12 に示した。Fig.11 では実験シリーズの粒度調整試料ごとに乾燥密度と礫含有率の関係を示してある。せん頭粒度試料および礫混合試料では礫含有率の増加に伴い礫含有率 40% まで乾燥密度が増加している。一方、相似粒度試料では礫含有率の増加に伴って逆に乾燥密度は減少を示している。Fig.12 では内部摩擦角と礫含有率の関係を示してあるが、せん頭粒度試料および礫混合試料では ϕ_d は礫含有率 40% までは乾燥密度の増加に対応して増大しており、 ϕ_d の増加は礫含有率の増加に伴う乾燥密度の増加を媒介としている。なお、礫分だけで構成された骨格の間隙を砂分で埋めた場合の礫含有率は実験的に 53% であった。このことは、それ以上の礫含有率では礫分だけで構成された骨格は類似し、礫含有率の増加は礫分だけで構成される骨格の間隙を部分的に充填し、乾燥密度の増加は期待できないことを意味している。したがって、礫含有率 40% 以上では礫含有率が増加しても、 ϕ_d は礫分だけで構成される骨格に支配され一定となる。

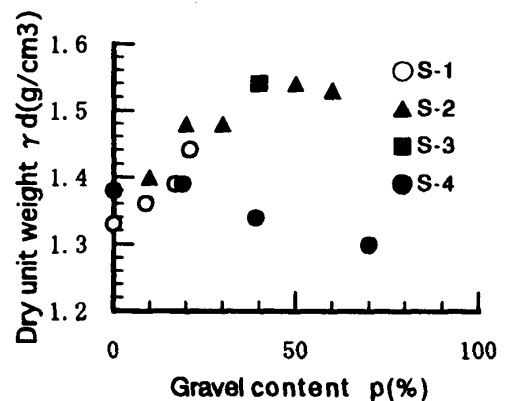


Fig.11 Relationship between dry density and gravel content

相似粒度試料では礫含有率の増加に伴って乾燥密度は減少しているにもかかわらず ϕ_d は一定のままである。相似粒度試料では粒径が大きくなるほど細粒分が少なく大きな間隙を形成し、乾燥密度は減少

するが、反面粗粒分の粒径の増加はかみ合わせ効果が大きくなる。 ϕ_d が一定のままであることは、乾燥密度の減少による内部摩擦角の減少とかみ合わせ効果による部摩擦角の増加とが相殺した結果と考えられる。

さんご礁の砂礫層は、さんご片等の礫のみが堆積し大きな間隙を形成することは少なく、多くはその間隙を砂や細粒分が埋めているか、あるいは礫が砂や細粒分の堆積層に点在している。このような砂礫層では礫を含有することにより地盤強度は増大するとみなせる。一方、さんご砂礫は粒子破碎を生じやすく、粒子破碎に伴って正のダイレイタンスーが著しく抑制される⁴⁾。このような破碎性地盤の内部摩擦角 ϕ_d は粒子破碎に伴って低下する不安定な値であるので、設計値としては限界状態における内部摩擦角 $\phi_{cv}(=41^\circ)$ を用いることが妥当である。

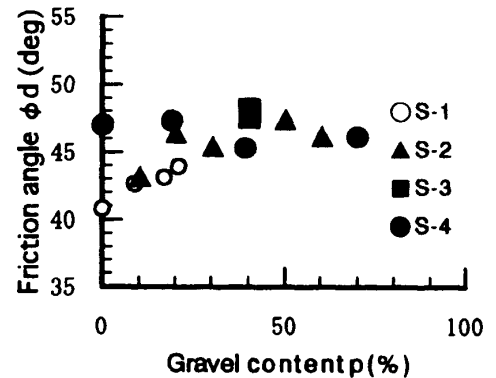


Fig.12 Effect of gravel content on friction angle ϕ_d

摘 要

さんご礁に堆積する石灰質砂礫について三軸圧縮試験を実施しせん断特性を検討した。主な結論は以下のようである。

- 1) さんご礁海域における海底堆積物は砂およびシルト分を主体としている。
- 2) さんご砂のせん断挙動は一般的な砂と類似しているが、内部摩擦角およびダイレイタンスーに及ぼす側圧の影響が大きい。
- 3) 礫混じり試料では礫粒径の大きさよりも礫含有量の方がせん断強度におよぼす影響が著しい。
- 4) ピーク強度時の内部摩擦角 ϕ_d は礫含有率の増加に伴って増大するが、礫含有率40%以上では一定となる。
- 5) 限界状態の内部摩擦角 ϕ_{cv} は礫の粒径および礫含有率に関係なくほぼ一定であり、その値は 41° である。

参考文献

- 1) Tsuchida. T. et al, 1988, Engineering properties of coral soils in Japanese south western islands, Engineering for Calcareous Sediments, Vol.1, pp.137-144.
- 2) 足立紀尚・龍岡文夫, 1981, 土の力学 (Ⅲ), p.78, 技報堂.
- 3) Bishop, A.W., 1972, Shear strength parameters for undisturbed and remolded soil specimens, Proc. of the Roscoe Memorial Symposium, pp.3-58.
- 4) 新城俊也他, 1993, さんご石灰質砂の強度変形特性, 農業土木学会論文集, 163号, pp.95-101.