

海底地盤としてのカーボネイト砂の力学特性

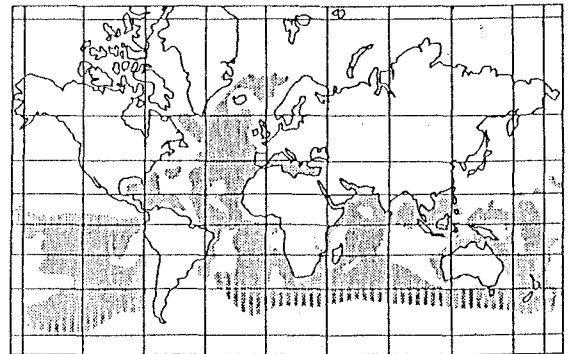
Mechanical Characteristics of Carbonate Sand in Ocean Ground

小浪岳治^{**}・兵動正幸^{*}・安福規之^{*}・村田秀一^{*}・中田幸男^{*}・Adrian F.L.Hyde^{***}
 Takeharu Konami^{**}, Masayuki Hyodo^{*}, Noriyuki Yasufuku^{*}
 Hidekazu Murata^{*}, Yukio Nakata^{*} and Adrian F.L.Hyde^{***}

The purpose of the present study is to investigate and clarify the undrained shear behaviour of carbonate sand under monotonic and cyclic loading. First, drained monotonic triaxial tests were performed under various confining pressure. Next, undrained monotonic and cyclic triaxial tests were performed with various magnitudes of initial static shear stress and confining pressure. The test results of carbonate sand were compared with those of Toyoura sand. In monotonic drained triaxial tests, a large negative dilatancy was observed during shear. In undrained triaxial tests, it was found that the strength in compression side of carbonate sand was larger than that of Toyoura sand, while in the extension side, it was smaller. Performing cyclic triaxial tests, the cyclic shear stress ratio required to develop given amplitude of axial strain in carbonate sand was almost as same as that in dense Toyoura sand. Further, it was found that the dynamic strength monotonically increased with the increase of initial static shear stress. On the other hand, it was recognized that the dynamic strength of an isotropically consolidation specimen decreased with increase of confining pressure.

1. はじめに

近年、石油採取のためのプラットフォームをはじめ、海底の大規模に多くの海洋構造物の建設が盛んに行われるようになり、海洋構造物基礎の建造においてカーボネイト砂から成る厚い海底砂地盤に遭遇する場面が増加してきていることが報告されている。カーボネイト砂は炭酸カルシウムを主成分としており、図-1に示すように熱帯、亜熱帯地域を中心に全世界に広く分布している¹⁾。カーボネイト砂は、海洋生物の死骸を多く含み、粒子自体に間隙があり不安定であることが問題となっており、設計において不確定要因が多いことが指摘されている。また、海洋構造物下の地盤内要素には、構造物の自重による拘束圧や初期せん断応力が作用しており、その状態で波浪及び地震などの動的外力が作用することが考えられる²⁾。本研究は、このように脆弱な粒子で構成された海底地盤としてのカーボネイト砂のせん断特性と動的強度を三軸圧縮試験機を使って評価し、初期拘束圧及び初期せん断応力の影響を調べて豊浦標準砂と比較することにより、その特徴を明らかにするものである。

図-1 カーボネイト砂の分布 (After Golightly¹⁾)

2. カーボネイト砂の物理特性

カーボネイト砂は、珊瑚礁など海洋生物の死骸を含む残積土であり、炭酸カルシウム(CaCO_3)分を多く含み、その粒子形状は角ばりをもった特異な形となっている。本研究対象のカーボネイト砂は、アイルランドの西海岸 Dogs Bayで採取されたものであり、 CaCO_3 の含有率は94%であった。図-2はカーボネイト砂と豊浦標準砂の粒度曲線を各々実線と破線で示している。両者を比較すると、カーボネイト砂の方が豊浦標準砂より均等係数が若干大きい分布形状を示している。表-1はそれぞれの物性値を示しており、カーボネイト砂は豊浦標準砂に比べて比重が大きく、また粒子自体に間隙があるため最大、最小間隙比もかなり大きいことなどが特徴である。図-3

* 正会員 山口大学工学部社会建設工学科 (755 山口県宇部市常盤台 2557)

** 正会員 岡三興業株式会社

*** University of Bradford U. K.

はカーボネイト砂の三軸等方圧縮、除荷試験の結果を豊浦標準砂及びまさ土と比較したものである。豊浦標準砂の圧密降伏応力 p_y が 10MPa 程度であるのに対して、カーボネイト砂の p_y は 300kPa 程度となりはるかに小さい応力で降伏点に至り、その後の体積変化は脆弱な粒子のまさ土より大きいことが特徴として観察できる。

表-1 試料の物理特性

	G_s	e_{max}	e_{min}	U_c
Carbonate sand	2.723	2.451	1.621	1.92
Toyoura sand	2.643	0.973	0.635	1.20

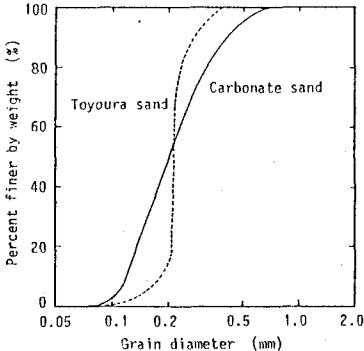


図-2 試料の粒度分布

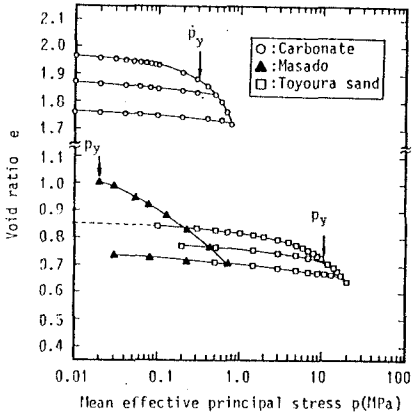


図-3 圧密曲線

3. 実験方法

カーボネイト砂のせん断特性を調べるため、三軸圧縮試験と繰返し三軸圧縮試験は初期平均有効主応力 p_0 ($= (\sigma_{1c} + \sigma_{3c})/3$) を種々変えて、等方及び異方圧密応力下で、以下の手順により行った。まず、三軸装置の配管とポーラスストーンを飽和させる。次いで、脱気した試料を脱気水で満たされたモールド中にスプーンで所定の寸法に至るまで流し込む。供試体寸法は、高さ 110mm、直径 50mm である。供試体の寸法は 10kPa の負圧で自立させた後測定される。寸法の測定後、三軸セルをセットして供試体内の 10kPa の負圧を正の側圧に置き換えて、脱気水を供試体下部から通水する。背圧 200kPa を与えて B 値を測定し、B 値が 0.96 以上のもののみに対して実験を継続する。

初期圧密においては等方及び異方圧密時の平均有効主応力 p_0 が所定の値 (100, 300, 500kPa) になるように、ある大きさまで等方圧密した後排水状態でそれぞれの初期せん断応力 q_s ($= \sigma_{1c} - \sigma_{3c}$) に至るまで軸圧を増加させて異方応力状態にする。この方法で作成した供試体は平均有効主応力 10kPa に圧密した時、相対密度はおおよそ $D_r = 60\%$ であった。静的排水試験は、初期拘束圧 $p_c = 50, 100, 300, 500$ kPa として圧縮せん断応力を 0.1mm/min. の速度で載荷した。静的非排水三軸圧縮試験は、等方圧密応力 p_0 を 100, 300, 500kPa の下で、各々の点から圧縮及び伸張せん断応力を 0.1mm/min. で載荷した。繰返し三軸圧縮試験の繰返し応力としては、側圧一定下で 0.1Hz の正弦波の軸荷重を非排水状態で載荷した。繰返しせん断中の軸荷重、軸変位、間隙水圧のそれぞれについて測定を行い、データはコンピュータに取り込んだ。

4. 静的せん断特性

カーボネイト砂の静的せん断挙動を排水及び非排水状態において調べた。まず、図-4 は初期有効拘束圧 $p_c = 50, 100, 300, 500$ kPa として、側圧 σ_{3c} 一定で排水せん断した結果である。図中の矢印は軸差応力のピークを表しており、拘束圧の増加に伴い大きくなり、軸差応力のピークまでに生じるせん断ひずみも拘束圧の増加に伴い大きくなっていることがわかる。また、 $p_c = 50$ kPa の場合の体積ひずみは、一旦収縮した後膨張して最終的には初期状態より膨張していることが観察される。 $p_c = 100$ kPa より大きい拘束圧で排水せん断した場合の体積変化は、収縮一方の挙動を示して、 $p_c = 500$ kPa においては 30% 程度の大きな体積収縮を生じていることが確認できる。このような大きな体積収縮を生じるのは、カーボネイト砂の粒子が脆弱でありせん断中に粒子破壊を生じているためと考えられる³⁾。

ここで、内部摩擦角 ϕ が粒子間摩擦の成分 ϕ_r とダイレイタンスーの成分 ϕ_d ($= \phi' - \phi_r$) の和で表されると仮定すると、

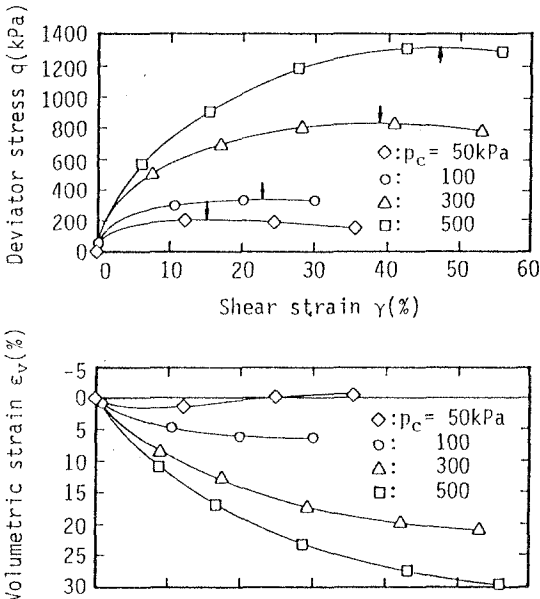


図-4 カーボネイト砂の排水せん断挙動

ϕ_r は次式によって求められる⁴⁾。

$$\tan^2 (45^\circ + \phi_r) = \frac{\sigma_1}{\sigma_3 (1 + dv/d\epsilon_1)} \quad (1)$$

dv は体積ひずみ増分であり、 $d\epsilon_1$ は軸ひずみ増分である。図-5は、カーボネイト砂の排水せん断強度である内部摩擦角 ϕ' と、式(1)を用いてダイレイタンシー補正して求めた粒子間摩擦角 ϕ_r をピーク時の平均有効主応力 p ($=(\sigma_1 + \sigma_3)/3$)に対してプロットしたものである。ダイレイタンシーの影響を取り除いた粒子間摩擦角 ϕ_r は拘束圧の影響を受けずほぼ一定($39 \sim 40^\circ$)であるが、実験によって得られる内部摩擦角 ϕ' は拘束圧の増加と共に減少する。また、平均有効主応力の小さい領域で ϕ_r の方が ϕ' より大きい、ピーク時の平均有効主応力の増加により ϕ_r と ϕ' の逆転がみられる。 ϕ_r が ϕ' より大きくなることは、ピーク有効応力比を生じるまで収縮挙動であることを意味する。カーボネイト砂の側圧一定せん断試験で、この逆転を生じる平均有効応力比は $p=190\text{kPa}$ 程度と小さく、これより大きい平均有効主応力でピークを生じるならば、体積変化は収縮一方の挙動であると推察できる。

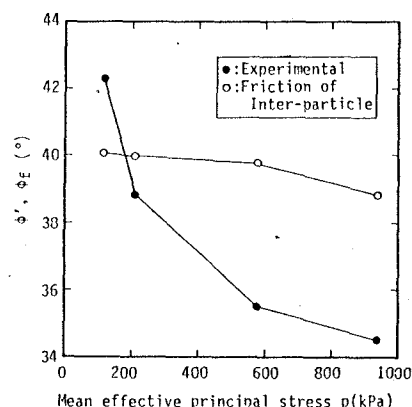


図-5 ピーク軸差応力時の ϕ' 、 ϕ_r と有効応力の関係

図-6は、非排水状態で圧縮及び伸張せん断した時の有効応力経路を示したものである。有効応力 p が減少から増加に転じる変相点での有効応力比は、圧縮側で1.61、伸張側で0.72であり、拘束圧の影響を受けないことがわかる。また、図中には豊浦標準砂の $p_c=100\text{kPa}$ における変相線も同時に示しており、豊浦標準砂の変相点の有効応力比は圧縮側で1.12、伸張側で0.83となっている。つまり、カーボネイト砂の変相線の傾きは豊浦標準砂より圧縮側で大きく、伸張側で小さいことが認められる。このことから、カーボネイト砂は異方性の強い材料であるといえる。この有効応力経路を初期の有効拘束圧 p_c で正規化した結果が図-7に示されている。 $p_c=100\text{kPa}$ における正規化した有効応力 p/p_c は、最終的に1を越え初期値より大きくなり、膨張状態に至っていることが観察される。また、伸張せん断での変相点までの有効応力経路は拘束圧の影響を受けていないことがわかる。しかし、圧縮側の有効応力経路は拘束圧の増加に伴い、変相点での正規化有効応力が減少して、収縮傾向が顕著になっていることが明らかである。

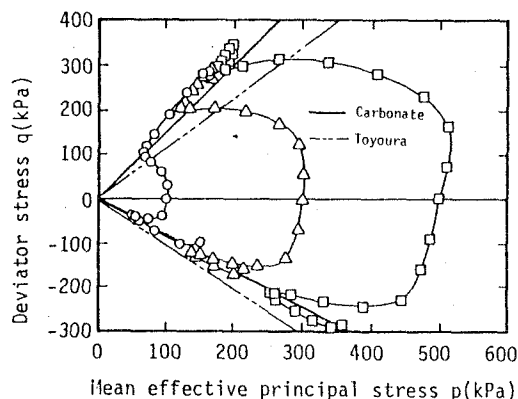


図-6 非排水せん断時の有効応力経路

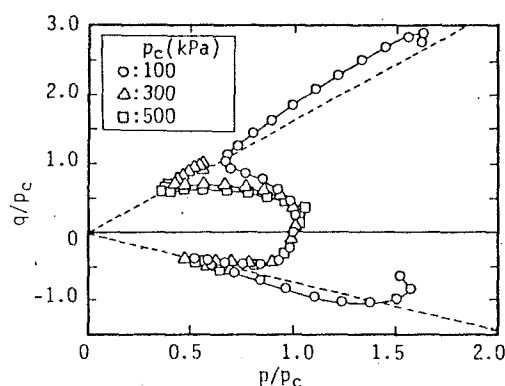


図-7 非排水せん断時の正規化した有効応力経路

5. 動的破壊形態に及ぼす初期せん断応力の影響

筆者らは豊浦標準砂を使って異方圧密下の繰返し三軸圧縮試験を行い、砂の動的破壊は初期せん断応力と繰返し応力の組合せにより圧縮せん断破壊または伸張せん断破壊を生じることを明らかにした^{5), 6)}。カーボネイト砂の伸張せん断破壊を生じる液状化挙動の例として、等方圧密後の繰返しせん断挙動を図-8(a), (b)に示した。軸ひずみ、繰返し応力、間隙水圧の時刻歴より、繰返し回数の増加と共に間隙水圧が上昇して初期拘束圧 σ_{3c} と等しくなると同時にひずみ振幅 DA が急増していることがわかる。有効応力経路からは、繰返し回数の増加と共に有効応力が減少し、伸張側の破壊線に至った後、初期液状化を生じていることが確認できる。また、初期せん断がある場合でも繰返し応力が初期せん断応力より大きい場合は、間隙水圧が初期拘束圧(σ_{3c})と等しくなり液状化を生じる。次に、図-9(a), (b)は初期せん断応力が繰返し応力より大きく応力反転のない場合の繰返し

せん断挙動を示している。まず時刻歴より、間隙水圧は徐々に上昇するが初期拘束圧とは等しくならず、また軸ひずみは圧縮側に徐々に残留していることが観察される。有効応力経路を見ると、繰返し载荷により有効応力が減少して圧縮側の破壊線に至り、定常状態となっていることが認められ、このような破壊は、間隙水圧が初期拘束圧まで上昇しないので液状化とは認められず繰返し圧縮せん断破壊と定義される。

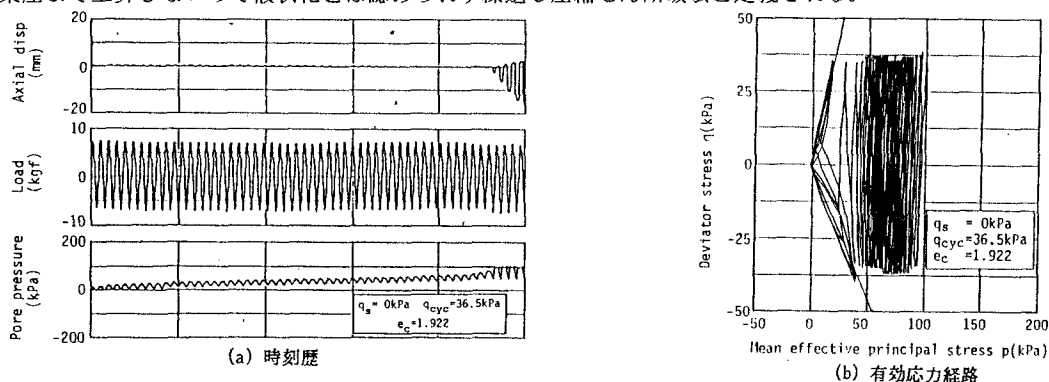


図-8 カーボネイト砂の液状化破壊

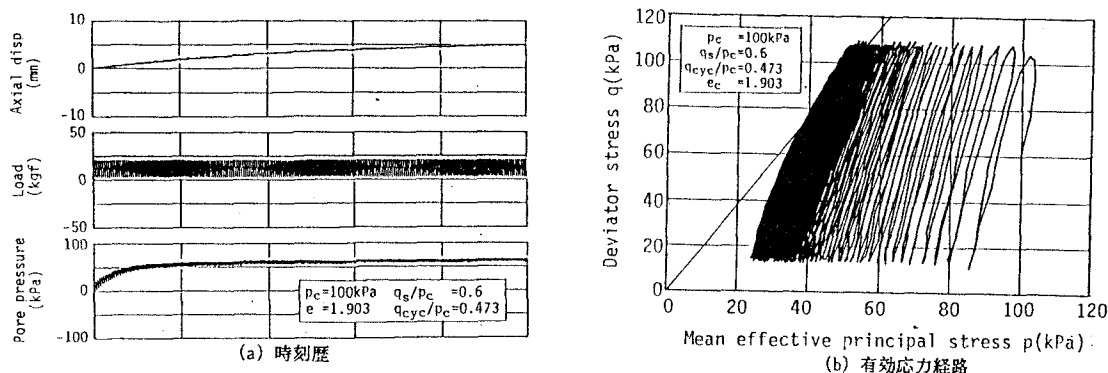


図-9 カーボネイト砂の繰返し圧縮せん断破壊

6. カーボネイト砂の動的強度

まず、等方圧密後のカーボネイト砂の液状化強度を異なる拘束圧の下で調べた。ここで、圧密前の初期相対密度 D_{r1} は等しく、圧密後の相対密度 D_r は拘束圧の増加と共に大きくなっている。また、初期液状化はひずみ両振幅の急激な増加とほぼ同時に生じるので、ひずみ両振幅 DA が 5% に至るまでの繰返し回数と繰返し応力比 q_{cyc}/p_c の関係により評価した。図-10 はカーボネイト砂の等方圧密状態における液状化強度を示したものであり、種々の相対密度の豊浦砂及びまき土の結果と比較したものである。圧密後の間隙比が異なるにも関わらず、初期間隙比の等しいカーボネイト砂の液状化強度は、拘束圧によらずハッチで示された範囲内に存在し、ほぼ等しいことが認められる。ここで用いた初期間隙比 1.901~2.001 ($D_r = 60\%$) のカーボネイト砂の液状化強度は、相対密度 70~90% の豊浦砂の液状化強度と同程度であり、比較的大きいものとなっている。このような非排水せん断においては有効応力は減少する方向に向かうことから、排水せん断で起こる粒子破碎に起因した強度低下は生じず、むしろカーボネイト砂粒子の表面効果やインターロッキング等により液状化強度は大きく現れる結果となったものと考えられる。次に、初期拘束圧 $p_c = 100 \text{ kPa}$ の下でカーボネイト砂の液状化強度に及ぼす初期せん断応力の影響について調べた結果を示す。図-11 には、 $DA = 5\%$ に至るまでの繰返し応力比と繰返し回数の関係を示している。カーボネイト砂の液状化強度

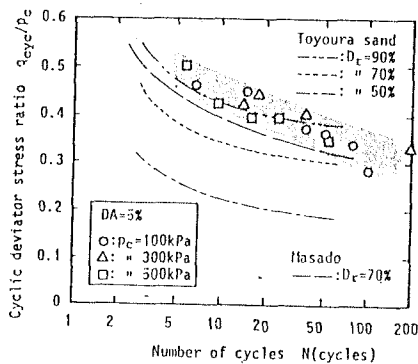


図-10 ひずみ振幅 $DA = 5\%$ に至るまでの繰返し応力比と繰返し回数の関係 ($q_s = 0$)

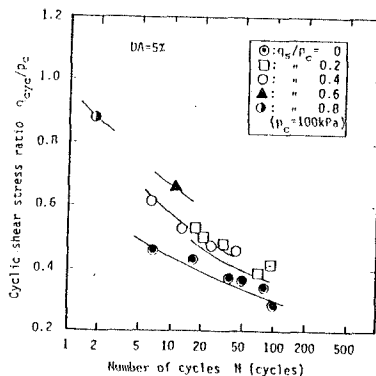


図-11 ひずみ振幅 $DA = 5\%$ に至るまでの繰返し応力比と繰返し回数の関係

は初期せん断応力の増加と共に大きくなっていることが確認できる。また、全ての初期せん断応力において、液状化を生じるには応力反転が必要であるといえる。図-12は、繰返し回数 10 回における液状化強度 R_{f10} についてカーボネイト砂と豊浦砂の結果を比較したものである。両者の液状化強度は、初期せん断応力の増加と共に増加しているが、その割合はカーボネイト砂の方が小さいことが確認できる。

繰返し応力が初期せん断応力より小さい場合、液状化破壊を生じないが軸ひずみは徐々に残留して圧縮せん断破壊を生じることを先に述べた。次に、ピーク軸ひずみ $PS=5\%$ を破壊ひずみと規定し、 $PS=5\%$ に至るまでの繰返し応力比と繰返し回数の関係を図-13に示した。初期有効拘束圧 $p_c=100\text{kPa}$

において、 $PS=5\%$ に対する動的強度は、初期せん断応力の増加に伴い大きくなっていることがわかる。この関係から繰返し回数 10 回についての繰返し応力比と初期せん断応力の関係を図-14に示した。この図には、動的破壊を規定するひずみを $PS=2, 10\%$ とした場合の関係も同時に示されている。ひずみ両振幅は応力反転がある場合のみ生じるのに対して、ピーク軸ひずみは応力反転がない場合でも生じている。また、動的破壊を規定するピーク軸ひずみの増加と共に R_{f10} が増加している。同一初期せん断応力について見ると、動的破壊を規定するピーク軸ひずみの相違による R_{f10} の差は、初期せん断応力の小さい領域において大きな違いは認められないが、初期せん断応力の増加に伴いその違いが明かとなる。このことから、初期せん断応力の大きい領域で応力反転しない場合、軸ひずみが徐々に残留することが確認できる。 $PS=2\%$ に対する R_{f10} について見ると、応力反転のある領域において初期せん断応力の増加に伴い R_{f10} は増加しているのに対して、応力反転のない領域において R_{f10} は初期せん断によらずほぼ一定である。 $PS=5, 10\%$ に対する R_{f10} は、初期せん断応力と共に増加している。動的破壊を規定するピーク軸ひずみが大きくなるほど、初期せん断応力の増加に伴う R_{f10} の増加は顕著になっている。

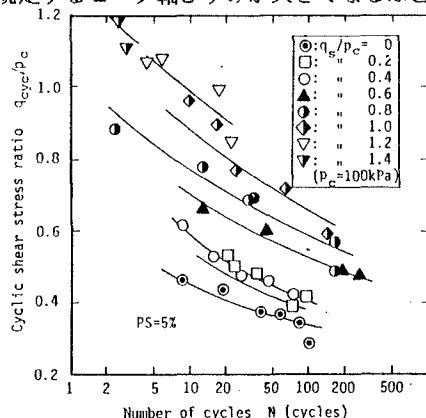


図-13 ピーク軸ひずみ $PS=5\%$ に至るまでの繰返し応力比と繰返し回数の関係

次に、カーボネイト砂の圧縮せん断挙動は拘束圧の影響を受けることが静的試験により確認されたので、初期有効応力比 $\eta_s (= q_s/p_c)$ を 0.6 で一定として、繰返し応力が初期せん断応力より小さく、圧縮側のみで繰返しせん断する場合のカーボネイト砂の動的強度に及ぼす初期有効拘束圧 p_c の影響を調べた。まず、図-15は繰返し回数 10 回における繰返し応力比 q_{cyc}/p_c と軸ひずみの関係を示したものである。繰返し回数 10 回で同一レベルの軸ひずみを生じるために必要な繰返し応力比は初期拘束圧の増加にともない小さくなっていることが認められる。各繰返しサイクルのピーク軸ひずみ PS が 5% に至るまでの繰返し応力と繰返し回数の関係を示したものが図-16である。 $\eta_s=0.6$ の $PS=5\%$ に対する動的強度は、初期拘束圧 p_c の増加に伴い大幅に低下していくこと

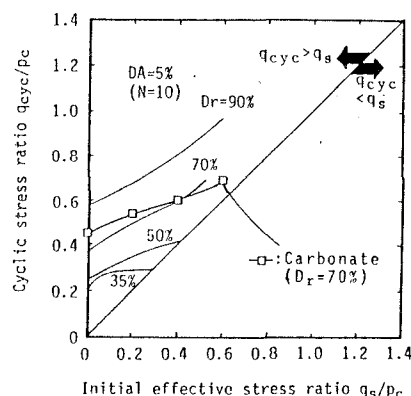


図-12 繰返し回数 10 回で $DA=5\%$ に至るのに必要な繰返し応力比と初期せん断応力の関係

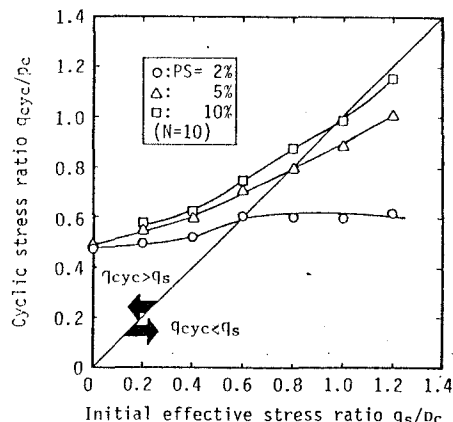


図-14 繰返し回数 10 回で $PS=2, 5, 10\%$ に至るのに必要な繰返し応力比と初期せん断応力の関係

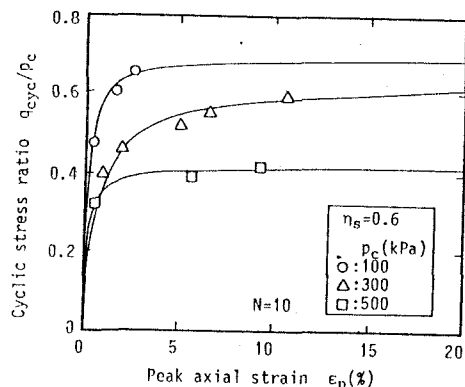


図-15 繰返し回数 10 回における繰返し応力比と軸ひずみの関係 ($q_s/p_c=0.6$)

が認められる。また、図-17は繰返し回数10回でピーク軸ひずみ2, 5, 10%に至るのに必要な繰返し応力比 q_{cyc}/p_c ($=R_{110}$) と初期有効拘束圧 p_c の関係を示している。初期有効拘束圧の増加と共に、それぞれのピーク軸ひずみに対する動的強度 R_{110} の大きな低下が確認できる。つまり、圧縮側に依存する繰返しせん断破壊に対する動的強度は、拘束圧の増加に伴い低下することが確認された。このことも、先の圧縮側の静的せん断挙動と一致するものである。

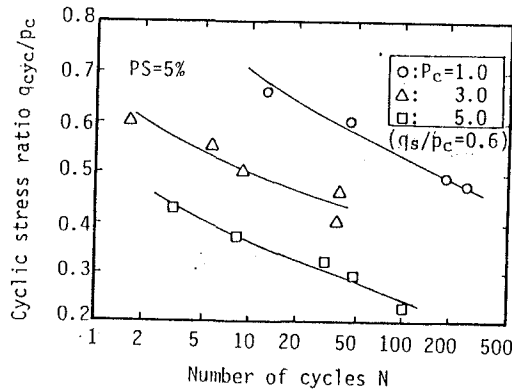


図-16 ピーク軸ひずみPS=5%に至るまでの繰返し応力比と繰返し回数の関係 ($q_s/p_c=0.6$)

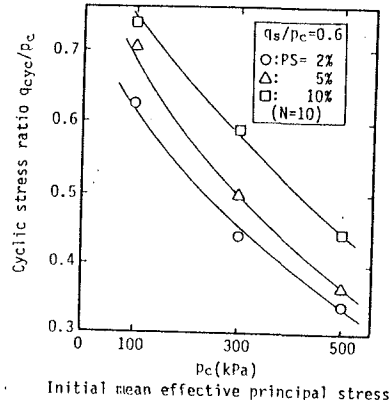


図-17 繰返し回数10回でPS=2, 5, 10%に至るのに必要な繰返し応力比と初期有効拘束圧の関係 ($q_s/p_c=0.6$)

7. まとめ

海洋構造物の基礎地盤となる脆弱な粒子で構成されたカーボネイト砂の動的強度を繰返し三軸圧縮試験機を用いて調べた結果、以下の所見が得られた。

- (1) カーボネイト砂の圧密降伏応力は豊浦標準砂より小さく、その後の体積変化はまさ土より大きい。
- (2) カーボネイト砂の排水せん断による負のダイレイタンスは大きく、それは拘束圧の増加に伴い大きくなる。
- (3) カーボネイト砂の変相線の有効応力比は豊浦標準砂と比べると、圧縮側で大きく伸張側で小さくなる。このことから、カーボネイト砂は異方性の強い材料であるといえる。
- (4) カーボネイト砂の非排水伸張せん断挙動に及ぼす拘束圧の影響は小さいが、圧縮せん断挙動は拘束圧の増加に伴い収縮傾向が顕著になり、強度は弱くなる。
- (5) カーボネイト砂の液状化強度に及ぼす拘束圧の影響は小さい。また、カーボネイト砂の液状化強度は、初期せん断応力と共に増加するが、増加の割合は豊浦砂より小さい。
- (6) 初期せん断応力比 η_s を一定として繰返しせん断を行った場合の圧縮せん断破壊に対する初期有効拘束圧 p_c の影響を調べた結果、繰返し応力比 q_{cyc}/p_c により評価した動的強度は p_c の増加に伴い小さくなる。

《参考文献》

- 1) Golightly, C. R. : Engineering Properties of Carbonate Sands, Ph.D Thesis, University of Bradford U. K., 1989.
- 2) Kaggwa, W. S. and Poulos, H.G. : Response of Carbonate Sediments under Cyclic Triaxial Test Conditions, Proc. Int. Conf. Calcareous Sediments, Perth, Vol.1, 1988, pp.97-108.
- 3) 三浦哲彦・山内豊聡 : 高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について, 土木学会論文報告集, 第193号, 1971, pp.69-73.
- 4) Rowe, P. W. : The Stress Dilatancy Relations for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc., Royal Society, London, Series A, Vol. 269, 1962, pp.500-527.
- 5) 兵動・小浪他 : 緩い飽和砂の非排水繰返しせん断強度に及ぼす初期せん断応力の影響, 第45回土木学会年次学術講演会講演集, 1990, pp.766-767.
- 6) 兵動・小浪他 : 異方圧密砂の非排水繰返しせん断強度に及ぼす密度の影響, 第25回土質工学研究発表会講演概要集, 1990, pp.747-750.