

カーボネイト砂の力学特性とその砂中の杭の 周面摩擦力特性

田中邦博¹・安福規之²・村田秀一³・兵動正幸⁴

¹正会員 工博 九州共立大学助教授 土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

²正会員 工博 九州大学助教授 建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³正会員 工博 山口大学教授 社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

⁴正会員 工博 山口大学助教授 社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

本研究では、チイビシ砂及び Dogs Bay 砂の2種類のカーボネイト系の砂を対象に三軸圧縮試験、一面せん断試験及び滑らかで小さな模型杭の載荷実験を行い、力学特性の違いが杭の周面摩擦力の発現に及ぼす影響を実験的に検討した。主な結果をまとめると次のようになる。1) チイビシ砂は Dogs Bay 砂よりも間隙比は小さいが、間隙比の変化に対する拘束圧依存性は大きい。2) 一面せん断試験で得られた有効摩擦角は試料によって異なり、チイビシ砂が Dogs Bay 砂よりも大きい。3) 杭周面摩擦力の発現には側圧依存性がみられるが、試料によって摩擦力側圧曲線の形状に違いが見られる。この傾向は一面せん断試験から得られた結果とよい対応を示すことが明らかになった。

Key Words : pile, skin friction, carbonate sand, model test, direct shear test

1. ま え が き

近年、カーボネイト地盤に支持された杭基礎による海上プラットフォームの建設が盛んになるにつれ、その支持力に関していくつかの問題が生じてきている。即ち、高いせん断強度と大きな圧縮性を特徴とするこの種の地盤中の杭の挙動は、従来の支持力公式ではうまく表せ得ないということである。そこで、前報¹⁾では、杭先端の支持力の発現に砂質地盤材料の圧縮性が大きく関わっていることを明確にするるとともに、砂質地盤中の杭の先端支持力の評価に圧縮性の影響を積極的に取り入れたひとつの経験的な手法を提案した。しかし、地盤材料の圧縮性を考慮に入れた深い基礎の合理的な設計手法を確立するという意味からは、杭周面の摩擦力についてもその発現特性の解明が不可欠である。

杭周面の摩擦力に関しては過去に多くの研究がなされており、堅い土粒子からなる通常のシリカ系の砂を対象にした杭の周面摩擦力特性に関しては一応の方向付けがなされている²⁾。しかし、カーボネイト系の砂を対象にした杭の周面摩擦力特性に関しては、地盤材料そのものは非常に高いせん断抵抗角を有しているにもかかわらず、予想より小さい周面摩擦力しか発現し得ないことが共通の傾向として報告³⁾⁻⁶⁾されている。また、その原因について、砂の内部摩擦角が小さくなることによるのではなく、杭周面にある砂が粒子破碎により体積収縮を起

こし、その結果杭周面に作用する鉛直応力が減少し、周面摩擦力が低下するとした報告⁷⁾もある。しかし、発現に対する砂の相対密度、上載圧、応力比、杭径などの依存性に関して相反する報告⁸⁾⁻¹⁰⁾がなされ、明確な方向付けがなされていないのが現状である。さらに、最近の研究成果をまとめた Randolph や Fahey らの報告⁵⁾⁻⁶⁾にあるように、周面摩擦力を高めるための現実的な対策として、周面摩擦力の発現性を高めるために杭材の表面をモルタルで被覆し、杭材表面の粗度を高めることが施されている程度で、カーボネイト系の砂の特性を考慮に入れた実用的な設計手法はいまだ示されてはならず、さらなる包括的な研究の推進が望まれている。

本研究では、カーボネイト系の砂の力学特性を検討するとともに、この砂地盤を対象とした杭の周面摩擦力の発現特性を明確にするため、以下の事項を実験的に検討する。

(1) 本研究では、2種類の異なるカーボネイト系の砂、即ち Dogs Bay 砂¹⁾及びチイビシ砂^{11),12)}を用いた三軸圧縮試験を行い、砂の力学的な性質の違いを明確にする。

(2) 改良型一面せん断試験機を用いて試料と杭材間の摩擦力を測定し、模型杭で測定された摩擦力との比較を行う。

(3) 今回、従来の加圧砂層型の実験装置を発展させ、周面摩擦力が独立に測定可能で、任意の応力状態が再現



Photo.1 (a) Photomicrograph of Dogs Bay sand

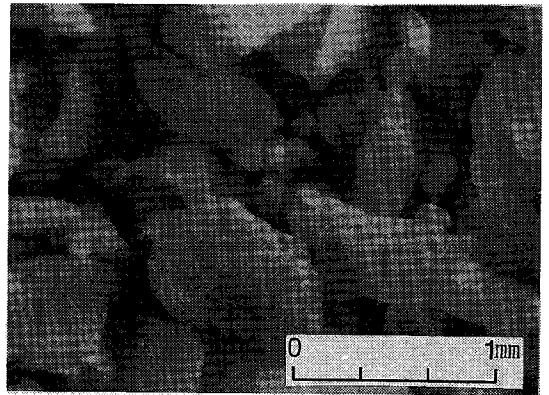


Photo.1 (b) Photomicrograph of Chiibishi sand

Table 1 Fundamental material properties

Material	G_s	D_{max}	e_{max}	e_{min}	U_c	D_{50}	CaCO ₃	$e_{max}-e_{min}$
Dogs Bay sand	2.72	2.0	2.451	1.621	1.92	0.08	94	0.830
Chiibishi sand	2.83	2.0	1.574	0.983	2.00	0.70	96	0.591
Toyoura sand	2.64	0.5	0.973	0.635	1.20	0.09	--	0.338

できる模型杭実験装置を新たに試作し¹³⁾、この実験装置を用いた滑らかで小さな模型杭の載荷実験を豊浦標準砂（シリカ系の砂）を含めた3種類の試料を対象に行い、変形強度特性の違いに着目して周面摩擦力の発現特性を検討する。

(4) 試料の基礎的な力学特性と模型杭で測定された摩擦力の相互関係から、前報¹⁾同様にカーボネイト系の砂とシリカ系の砂の力学的な性質の違いを考慮した杭の周面摩擦力評価の可能性を実験的な立場から検討する。

2. 試料の物理的・力学的特性

(1) 試料の物理的性質

本研究では、2種類の空気乾燥したカーボネイト系の砂を用いて三軸圧縮試験、摩擦試験及び模型杭載荷実験を行った。Fig.1には試料の粒度分布を、Table 1には3つの試料の主要な物理的性質をまとめている。

Photo.1は、実験に用いた2種類のカーボネイト系の砂の顕微鏡写真である。(a)にはDogs Bay砂が、(b)にはチイビシ砂が示されている。Photo.1(a)、(b)から土粒子構造の複雑さ・多孔質性及び土粒子の形状や大きさの違いが見て取れる。

(a) Dogs Bay砂：アイルランド西海岸から採取されたカーボネイト砂で、その特性は前報¹⁾に詳述している。

(b) チイビシ砂：Dogs Bay砂に類するカーボネ

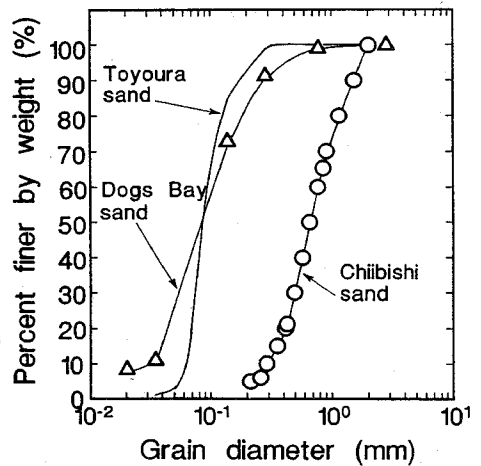


Fig.1 Grading curves for sands

ト砂で、沖縄地方に広く分布するものである。Photo.1(b)から見て取れるように、チイビシ砂は、その概観は破片状の角ばった粒子（さんご、貝、有孔虫の遺骸）や筒状の粒子（苔虫の遺骸）が多く、その粒子はDogs Bay砂よりも形状が多彩で、大きさも大きく、しかもより多孔質である。

最大と最小の間隙比は、Table 1からもわかるようにDogs Bay砂に比べると60~65%程度低めである。また、両者の均等係数はほぼ等しいが、平均粒径はチイビシ砂が9倍程度大きい。なお、チイビシ砂は、約96%

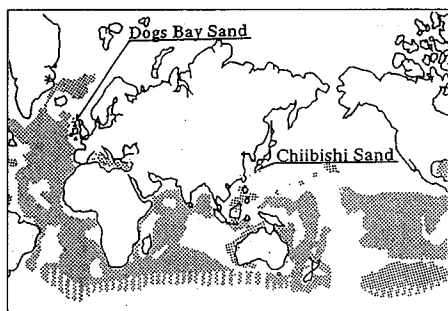


Fig.2 Location map

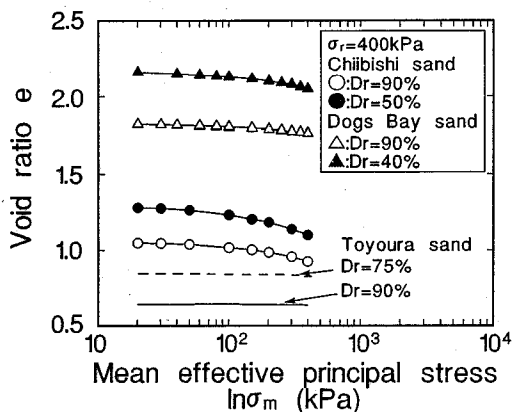


Fig.3 Comparison of void ratio

の炭酸カルシウム成分を含んでおり、Dogs Bay 砂と同様に典型的なカーボネイト砂であることがわかる。

なお、Fig.2 には Dogs Bay 砂及びチイビシ砂の採取地と共に、熱帯・亜熱帯地方の沿岸海底地盤を形成するカーボネイト砂の分布状況（ハッチで表示）を示している。このような圧縮性の卓越したカーボネイト砂が、いかに世界各地に広く分布しているかが伺える。

(2) 力学特性の比較

2種類のカーボネイト系の砂の力学的な性質の違いを明確にするために、後述の模型杭実験の試料作成方法に対応するようにタンピング法を用いて作成された気乾状態の供試体を対象とした、等方圧縮試験と三軸圧縮試験が、400 kPa までの拘束圧域において排気条件下で行われた。また、等方圧縮試験は応力制御方式で行い、側圧一定の三軸圧縮試験は、ひずみ速度 0.12%/min 一定のひずみ制御方式で行い、圧縮及びせん断中の体積変化は、三軸セル中の脱気水の変化量を二重ピュレットを介して読むことによって測定された。2種類のカーボネイト系の砂から得られた主要な結果は、Table 2 にまとめられている。なお、Fig.3, 4 においては、チイビシ砂は

Table 2 Results of triaxial compression test

Material	D_r (%)	σ_r (kPa)	C_p'	$G_{0.1}$ (MPa)	ϕ_{dp} (Deg.)	ϕ_{ch} (Deg.)
Dogs Bay sand	40	50	0.020	9.13	41.8	36.0
	40	100	0.030	14.52	42.3	36.0
	40	200	0.046	15.67	39.2	36.0
	40	400	0.076	23.00	34.1	36.0
	90	50	0.022	16.53	43.3	36.0
	90	100	0.029	20.20	43.9	36.0
	90	200	0.036	25.50	42.1	36.0
	90	400	0.046	30.73	38.3	36.0
Chiibishi sand	50	100	0.048	19.13	43.34	43.0
	50	200	0.109	26.33	43.18	43.0
	50	300	0.183	29.49	41.46	43.0
	50	400	0.250	34.94	40.18	43.0
	90	100	0.032	9.17	48.20	43.0
	90	200	0.058	14.87	46.50	43.0
	90	300	0.094	19.73	44.20	43.0
	90	400	0.120	24.00	43.90	43.0

$G_{0.1}$: Shear modulus accumulated by 0.1%.

ϕ_{dp} : Secant angle when maximum deviator stress is mobilized.

ϕ_{ch} : Secant angle from triaxial test.

丸印で、Dogs Bay 砂は三角印で表示し、比較のためにシリカ系の砂である豊浦標準砂の結果は破線・実線で表示している。

a) 等方圧縮試験結果

Fig.3 は2種類のカーボネイト系の砂の等方圧縮試験結果を、間隙比 e と対数で表示した平均主応力 $\ln \sigma_m$ ($\sigma_m = (\sigma_o + 2\sigma_r)/3$) との関係でまとめたものである。この図から、カーボネイト系の砂は、平均主応力の増加とともに間隙比が非線形的に減少し、平均主応力の大きさが大きくなる程、その傾向は顕著となり、間隙比の変化には拘束圧依存性が汲み取れる。また、2種類のカーボネイト系の砂を比較すると、初期の間隙比は Dogs Bay 砂の方が大きく、同じ平均主応力で比較すると、常に Dogs Bay 砂が2倍程度大きな間隙比を示すが、間隙比の減少傾向はチイビシ砂の方が特に顕著で、チイビシ砂の方がより大きな拘束圧依存性を示すことがわかる。カーボネイト系の砂は豊浦標準砂と比較すると間隙比が全体的に2~4倍程度大きく、拘束圧の変化に伴う間隙比の変化も著しく大きい。

ここで、等方圧縮下での圧縮性の程度をより明確に評価するために、前報¹⁾同様圧縮係数 C_p' を導入する。

$$C_p' = \frac{\Delta e}{\Delta(\ln \sigma_m)} \quad (1)$$

C_p' は $e - \ln \sigma_m$ 曲線におけるある任意の平均主応力での接線勾配を与え、この場合平均主応力は拘束圧 σ_r に一

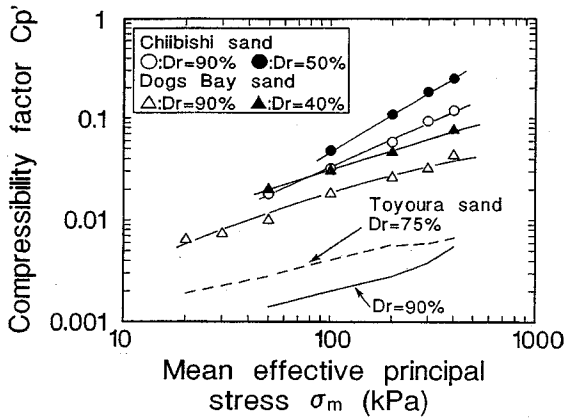


Fig.4 Comparison of isotropic compressibility

致する。

Fig.4 は、上記により求めた圧縮係数 C_p を用いて 2 種類のカーボネイト系の砂の等方圧縮過程での圧縮性を比較したものである。カーボネイト系の砂は対象とする応力域においては、いずれも C_p の値は指数関数的に増加しており、平均主応力の増加とともに圧縮性は増加するが、2 種類のカーボネイト系の砂の違いに着目すると、 C_p の値はチビシ砂の方が圧縮性が 2 倍程度大きいことがわかる。また、平均主応力が大きくなる程、2 つの試料の C_p の値の差はより大きなものとなる。このことはチビシ砂の方が粒子破碎に対する抵抗力が小さいこと、及び平均主応力の増加とともに粒子破碎が著しく進行することを示唆している。また、 C_p の値は、2 種類のカーボネイト系の砂が豊浦標準砂よりも全体的に 5~15 倍程度大きく、カーボネイト系の砂の圧縮性の大きさがわかる。

b) 三軸圧縮試験結果

Fig.5 (a), (b) は、2 種類のカーボネイト系の砂の三軸圧縮試験の結果を拘束圧 σ_r に着目してそれぞれまとめたものである。

(a) には Dogs Bay 砂の結果が、(b) にはチビシ砂の結果がそれぞれ示されている。図中には軸差応力 q ($q = \sigma_a - \sigma_r$) と軸ひずみ ϵ_1 の関係及び体積ひずみ v と軸ひずみ ϵ_1 の関係を示している。まず、 $q-\epsilon_1$ 関係について 2 種類のカーボネイト系の砂を比較すると、チビシ砂の方が初期の立上りが急であり、かつ拘束圧が同じ場合、最大となる軸差応力の値は Dogs Bay 砂よりも大きい。軸差応力が最大となる時の軸ひずみは、どちらかと言えば Dogs Bay 砂の方が大きい。次に、 $v-\epsilon_1$ 関係を見ると、カーボネイト系の砂の場合、密な状態(相対密度 90%)にあるにもかかわらず、チビシ砂は 300 kPa 以上の拘束圧で、Dogs Bay 砂は 200 kPa 以上の拘束圧で圧縮一方となっており、Dogs Bay 砂の場合、

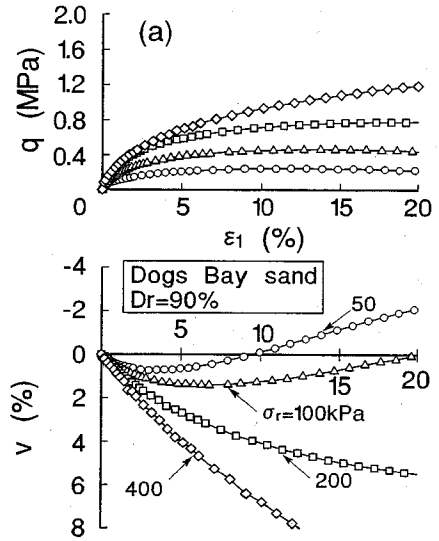


Fig.5(a) Deviator stress, volumetric strain and axial strain response (Dogs Bay sand)

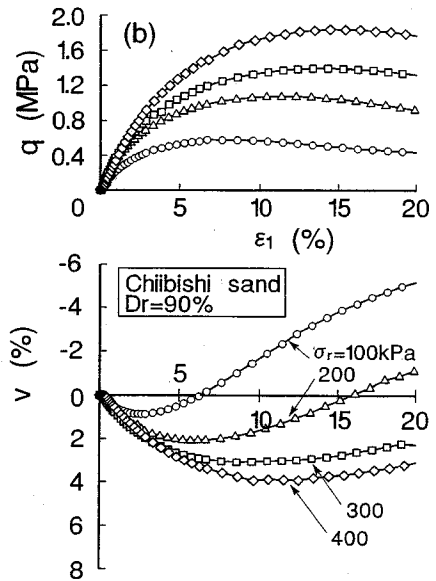


Fig.5(b) Deviator stress, volumetric strain and axial strain response (Chibishi sand)

400 kPa での最終的な体積ひずみ量は 8% 以上にも達するが、チビシ砂ではその時の体積ひずみ量は 4% 程度で明確な違いを示している。

また、Fig.6 は、2 種類のカーボネイト系の砂のせん断過程におけるせん断剛性 G とせん断ひずみ ϵ ($\epsilon = 2(\epsilon_a + \epsilon_r)/3$) の関係を 0.01~10% 程度のひずみレベルを対象にまとめたものである。せん断剛性 G は、ある任意のせん断ひずみ ϵ での軸差応力とせん断ひずみの関係における割線勾配を 3 で除した値で与えられる。0.01%

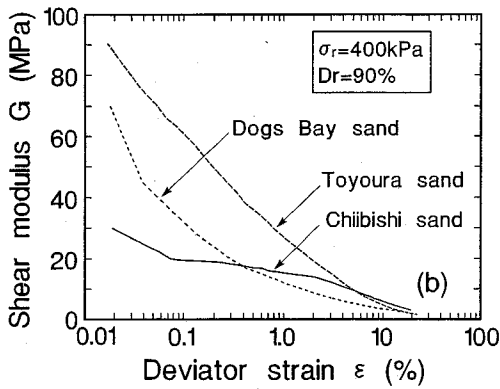


Fig. 6 Comparison of shear modulus

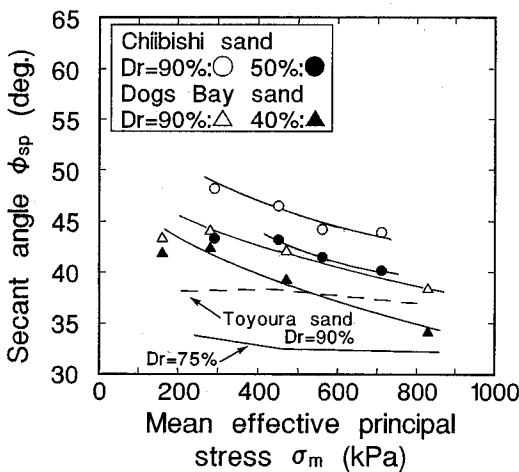


Fig. 7 Comparison of secant friction angle of each sand at peak deviatoric stress

以上のひずみレベルを対象にせん断剛性を概観すると、相対密度が90%のチイビシ砂は、せん断ひずみが0.4%程度まではDogs Bay砂よりも明らかに小さなせん断剛性を示しているが、それ以上のせん断ひずみではせん断剛性の大小関係が逆転し、チイビシ砂の方が大きなせん断剛性を示すようになる。また、試料の違いにかかわらず、せん断剛性はせん断ひずみの増加とともに指数関数的に減少しある値に収束する傾向が見られる。なお、1%以下の比較的小さなレベルにおいては豊浦標準砂のせん断剛性に比べて、カーボネイト系の砂のそれは小さいことが理解できる。

Fig. 7は、軸差応力の最大の点で求めた各試料のセカント角度 ϕ_{sp} と平均主応力の関係をまとめたものである。平均主応力の増加に伴うセカント角度の減少傾向は、カーボネイト砂の場合に著しい。また、対象としている応力域においては、チイビシ砂の平均値は、Dogs Bay砂のそれよりも3~4度高くなっている。具

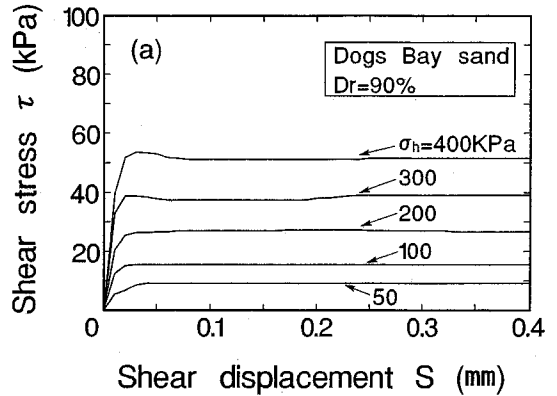


Fig. 8 (a) Behavior of friction between stainless steel plate and Dogs Bay sand

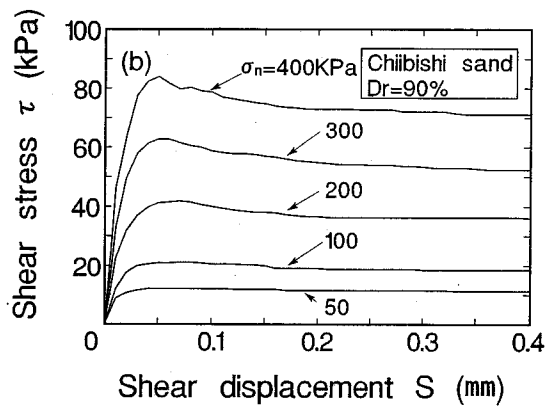


Fig. 8 (b) Behavior of friction between stainless steel plate and Chiibishi sand

体的にはチイビシ砂のセカント角度の値は40~48度の範囲に、Dogs Bay砂のそれは34~44度の範囲に、豊浦標準砂のそれは33~38度の範囲にあり、対象としている応力域においては、カーボネイト系の砂の拘束圧依存性が著しいことがわかる。

3. 試料砂と杭材間の摩擦特性

土と杭材との摩擦挙動については、これまでいくつかの包括的な研究^{14)~16)}が行われてきている。しかし、砂地盤の場合その多くはシリカ系の砂を念頭においたものであり、圧縮性の大きなカーボネイト系の砂を対象とした検討はほとんどないようである。また、摩擦試験装置としては、せん断時の試料全体の応力・ひずみ状態がかなり一様になっているので、実地盤に近い状態が再現できる単純せん断型が主流であるが、試験が煩雑になり簡便さに欠ける嫌いがある。そこで、本研究では基礎的なデータを得る意味で、簡便性を重視した張らの報告¹⁵⁾を

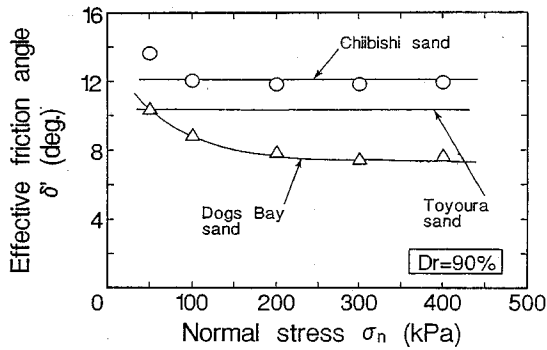


Fig.9 Comparison of angle of interface friction

基礎として改良型一面せん断試験機を用いて試料砂と杭材間の摩擦力の測定を行った。

摩擦試験は、上部せん断箱に固定した杭材（ステンレススチール）と下部せん断箱に詰めた試料砂の摩擦力の測定を、50~400 kPaの5段階の鉛直圧を多段式で载荷（定圧せん断）し、ひずみ速度 2.5×10^{-3} mm/sec一定のひずみ制御方式で行った。また、すべての供試体は、等方圧縮試験及び三軸圧縮試験の場合と同様に、模型杭実験の試料作成方法に対応するようにダンピング法を用いて作成された。なお、杭材の表面粗さは最大高さ R_{max} 13~16 μ mの範囲にあり、平均で15 μ m（基準長さが0.2 mmの時）であった。

Fig.8 (a), (b) は、砂と杭材の摩擦力（せん断応力） τ と水平変位 S の関係を鉛直圧 σ_n の違いに着目して示したものである。(a)にはDogs Bay砂の結果が、(b)にはチイビシ砂の結果がそれぞれ示されている。2種類のカーボネイト系の砂は、試料の違いによらず τ - S 曲線に示される初期の立上りは鉛直圧が同一である場合はほぼ一致し、鉛直圧の増加に伴い摩擦力も一様に増加しているが、同一の鉛直圧でのピーク時の摩擦力はチイビシ砂の方が大きいことがわかる。また、ピーク時の水平変位はチイビシ砂の場合、0.05~0.07 mm、Dogs Bay砂の場合、0.02~0.04 mmの範囲にあった。

Fig.9は、Fig.8で得られた摩擦力のピーク値を最大摩擦力 τ_{max} と定め、鉛直圧で正規化した摩擦係数 μ ($\mu = \tau_{max}/\sigma_n$)から求めた有効摩擦角 δ' ($\delta' = \tan^{-1}\mu$)と鉛直圧の関係を試料の違いに着目して示したものである。Dogs Bay砂の場合、有効摩擦角は鉛直圧の増加とともに減少し、このような応力レベルにおいても応力依存性を示すことがわかる。一方、チイビシ砂と豊浦標準砂は多少のばらつきはあるものの、鉛直圧の変化に因らずほぼ一定の値を示している。なお、有効摩擦角の大きさはチイビシ砂が最も大きく、豊浦標準砂、Dogs Bay砂の順に小さくなっている。

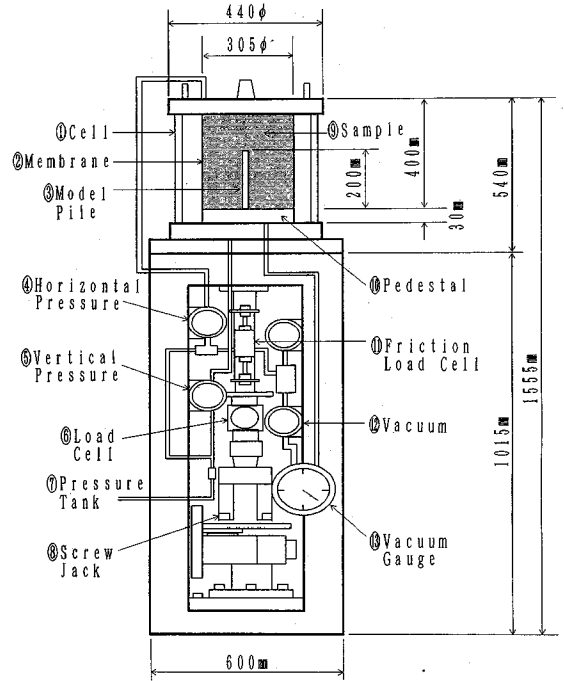


Fig.10 Model pile calibration chamber

4. 側圧制御型模型杭実験装置

(1) 実験装置の概要

著者らがこれまで用いていた加圧砂槽型の模型杭実験装置は、周面摩擦力を直接測定することができないためにその発現機構を調べるのが難しいことや、限られた初期の応力状態、即ち、 K_0 状態を模擬した支持力実験しか行えないために、支持力特性に及ぼす応力状態の影響を知ることができないといった問題があった。本研究では、このような立場から、下記に示すような特徴を有する新しい実験装置の試作を行い、載荷実験を行った。

今回の実験に用いた模型杭実験装置の模式図がFig.10に示されている¹³⁾。この実験装置の特徴を概観すると次のようである。

(a) 模型杭③を本体部と外管部の二重構造とすることにより、全体の荷重はロードセル⑥で、周面摩擦力は直接にロードセル⑪によりそれぞれ独立に測定することができる。

(b) 三軸圧縮試験機の機構を取り入れ、側方圧力④と上載圧⑤を独立に载荷することにより、応力状態の同一性を保つとともに、種々の応力状態を再現することが可能である。

(c) 模型杭の载荷は下方から上方へ行われる構造になっている。そのため、セットされた模型杭を含むセル①中に試料⑨を詰めていくことになり、模型杭の偏心や

Table 3 Results of model pile tests

	D_r (%)	σ_v (kPa)	σ_h (kPa)	k^*	ϕ_{ch} (Deg.)	k_0^{**}	σ_m (kPa)	$f_{s,max}$ (kPa)	$(S/D)_{max}$	μ_h
Dogs Bay sand	50	100	100	1.00	36.0	0.41	100	25.5	0.018	0.25
	50	200	200	1.00	36.0	0.41	200	48.1	0.024	0.24
	50	400	400	1.00	36.0	0.41	400	88.9	0.034	0.22
	90	100	50	0.50	36.0	0.41	87	18.7	0.039	0.37
	90	200	100	0.50	36.0	0.41	172	26.2	0.043	0.26
	90	400	200	0.50	36.0	0.41	267	58.1	0.576	0.29
	90	400	200	0.50	36.0	0.41	267	50.5	0.039	0.25
	90	100	100	1.00	36.0	0.41	100	29.7	0.082	0.29
	90	300	300	1.00	36.0	0.41	300	63.0	0.060	0.21
	90	400	400	1.00	36.0	0.41	400	82.8	0.113	0.20
Chiibish sand	50	200	100	0.50	43.0	0.32	133	30.4	0.020	0.30
	50	200	200	1.00	43.0	0.32	200	51.6	0.022	0.25
	90	400	200	0.50	43.0	0.32	267	49.1	0.029	0.24
	90	100	100	1.00	43.0	0.32	100	29.3	0.014	0.29
	90	200	100	0.50	43.0	0.32	133	26.4	0.071	0.26
	90	200	200	1.00	43.0	0.32	200	52.7	0.020	0.26
	90	400	400	1.00	43.0	0.32	400	102.3	0.031	0.25

* k^* : σ_h/σ_v , k_0^{**} : $1-\sin\phi_{ch}$

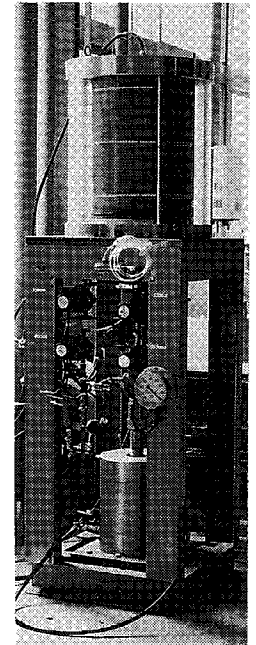


Photo.2 Setting of model pile

模型杭周囲の試料の乱れを防ぐことができ、また均質な供試体の作成が可能となる。さらに、上述のように周囲摩擦力を独立に測定するため、全体の支持力に対して周囲摩擦力が極端に小さい場合（数 kPa 程度）でも測定が可能である。

(d) 模型杭の貫入は、応力制御方式とひずみ制御方式⑧の両方での実施が可能である。

模型杭は三軸セル①の大きさ、載荷能力などを考慮して直径 3 cm の円柱型のものを用いている。この杭はステンレス製であり先端は平らで、その表面は大変滑らかなもの（表面の粗さは $R_{max}=15\mu m$ ）である。供試体⑨は直径 30.5 cm、高さ 40 cm の円柱形で側方を厚さ 1 mm のメンブレン②で拘束している。さらに、この供試体への載荷は、側方圧力④・上載圧⑤・模型杭③へ独立した 3 系統により行われる。即ち、側方圧力④はセル①上部から直接空気圧を負荷することにより制御され、上載圧⑤はピストン状になった下部ベダスタル⑩に空気圧を送ることにより行われ、500 kPa までの載荷が可能である。また模型杭③への載荷は、応力制御方式の場合、ベロフラムシリンダーを介して空気圧によって 3 t まで負荷でき、ひずみ制御の場合、0.05~2.0 mm/min までの範囲で速度を変化させた載荷が可能である。いずれの場合も杭全体にかかる荷重の測定は 3 t ロードセル⑥を使って行われ、周囲摩擦力の測定は 0.5 t ロードセル⑪を 2 個使用し、測定値は 2 個の平均値として現れる。

(2) 実験方法の概要

空気乾燥した試料（砂層）は、Table 3 に示した所定の相対密度を得るために予備実験で決定した巻き出し厚と一層当たりの突固め回数に基づいてタンピング法により準備された。即ち、試料の作成は、試料内の密度を均一にするために一層当たりの層厚を 1 cm とし $\phi 13$ cm、2.8 kg のタンパーを用いた。また、必要とされる一層分の試料を計量し、タンピングはメンブレンの内側に 1 cm 間隔に記したラインを目安に行った。なお、一回のタンピングの強さは、目標とする相対密度によって変動させているが、どの場合も土粒子が破碎しない程度とした¹⁾。

Photo.2 は、試料のセットが完了した時点の装置の様子を示したものである。載荷実験における軸荷重の載荷は、応力制御方式及びひずみ制御方式で行われた。応力制御方式の場合、載荷ステップは、最大載荷重の 1/20 を目安とした。各ステップで軸荷重は、沈下速度が 0.01%/min になるまで維持され、それ以下になった時点で沈下量 S を測定し次の荷重ステップへ進んだ。また、ひずみ制御方式の場合、応力制御方式での実験結果との整合性を確かめた予備試験の結果を基に、沈下速度は基準沈下量（杭径の 10%）となる沈下量が 3 mm までは 0.1 mm/min、それ以降は、0.2 mm/min とし、載荷は沈下量が杭径（3 cm）と同程度の値に達するまで続けた。ここで対象とした上載圧は $\sigma_v=50\sim 400$ kPa、側方圧力に対する上載圧の比 K （以下主応力比と称す）

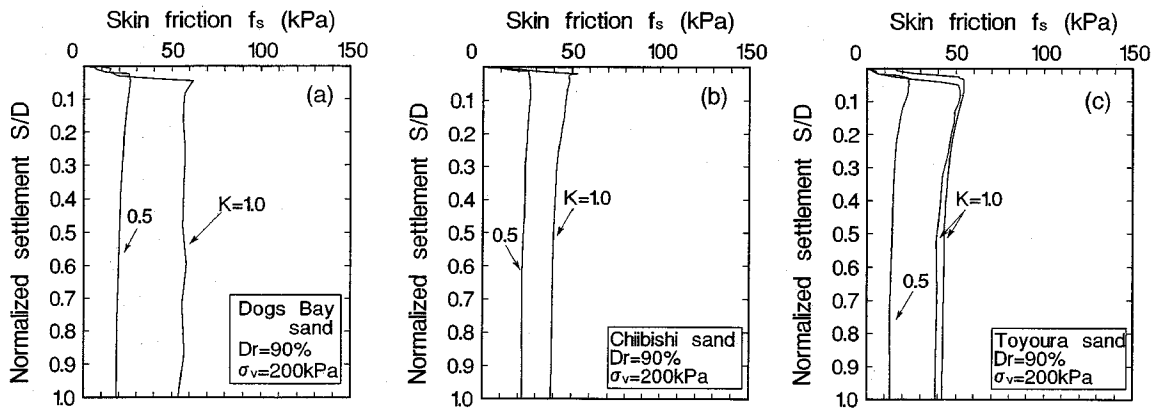


Fig.11 Relation between skin friction and settlement ratio
(a) Dogs Bay sand, (b) Chibishi sand, (c) Toyoura sand

は0.5と1.0であり、また相対密度 D_r は50%と90%である。

5. 模型杭載荷実験の結果と考察

(1) 杭周面摩擦応力と沈下量の関係

杭周面摩擦応力 f_s と杭径 D で正規化した沈下量 S/D の関係が、相対密度が90%、上載圧が200 kPaの場合について、主応力比をパラメータとしてFig.11に描かれている。(a),(b)にはそれぞれDogs Bay砂とチイビシ砂の結果が、(c)には豊浦標準砂の結果が示されている。いずれの試料も主応力比が同一である場合、発現される杭周面摩擦応力、初期の立上がりともに等しいことがわかる。また、主応力比が大きくなると、杭周面摩擦応力は大きくなる。加えて、特徴的なことは、いずれの試料も杭周面摩擦応力-沈下量曲線に明確なピークが現れ、破壊形態が全般的な滑りに起因していることを示唆していることである。ちなみにそのピーク値における正規化沈下量は、大半の試料において0.05以下であった。以上のことは相対密度が50%の場合でも言えることである。なお、杭周面摩擦応力-沈下量曲線のピーク時で規定される最大周面摩擦応力 $f_{s,max}$ 、その時の沈下量などの主要な結果は、Table 3にまとめられている。

(2) 最大周面摩擦応力と原位置実験結果の対応

Fig.12は、実験結果から求めた各試料の最大周面摩擦応力と原位置で行われた大型の模型杭実験結果⁹⁾の対応を深さ Z に対して見たものである。この原位置で行われた実験結果は、比較的圧縮性の高い珊瑚質のカーボネイト砂に設置された模型鋼杭(図中に示されたSFTは、Steel Friction Testsの略である)のもので実設計の指針値作成の基になったものである。この図から、原

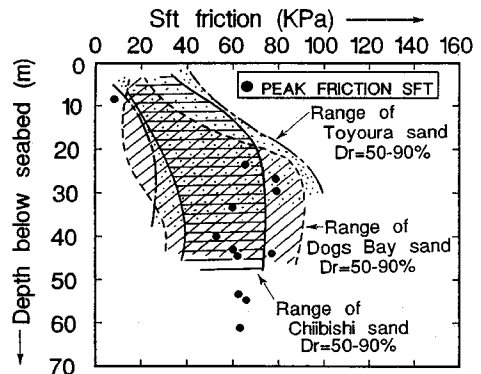


Fig.12 Comparison of experimental skin friction with field test data

位置で行われた実験結果は、本実験で得られたDogs Bay砂とチイビシ砂の結果のほぼ平均的な範囲にあり、今回の実験で得られた知見がより大型の模型杭に対しても適用可能であり、さらには、実際の問題にも適用できることを示唆している。なお、図中の深さは上載圧を単位体積重量 γ で割ることによって計算されたものである。

(3) 摩擦応力の発現特性と主応力比の関係

Fig.13は、杭周面摩擦応力-沈下量曲線のピーク時で規定される最大周面摩擦応力 $f_{s,max}$ と側方圧力の関係を、相対密度が90%の場合について、主応力比(砂地盤の一般的な K_0 値及び等方応力状態を考慮して、 $K=0.5$ 及び $K=1.0$ の場合を取り上げる)をパラメータにまとめたものである。最大周面摩擦応力の発現の仕方には明確な側方圧力依存性が見られる。しかし、その発現パターンは試料によって異なり、Dogs Bay砂は上に凸の曲線を示し、チイビシ砂及び豊浦標準砂は対象とする応力域

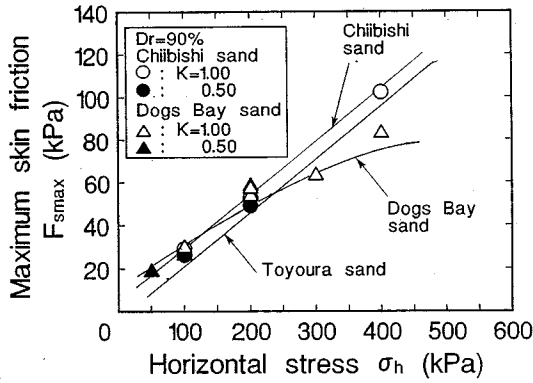


Fig. 13 Comparison of maximum skin friction against horizontal pressure

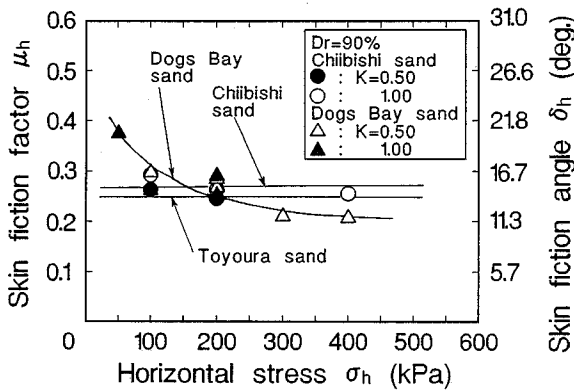


Fig. 14 Comparison of pile skin friction factor against horizontal pressure

においてはほぼ直線的である。

Fig. 14は、杭材の表面が滑らかで、すべり破壊が試料と杭材の境界面で発生したと仮定した場合の実測の摩擦係数 μ_h ($\mu_h = f_{smax}/\sigma_h$) 及び杭の摩擦係数に基づいた摩擦角 δ_h ($\delta_h = \tan^{-1}\mu_h$) と側方圧力の関係を、Fig. 13の場合と同様に、主応力比をパラメーターにまとめたものである。Dogs Bay砂の場合、摩擦係数は側方圧力の増加とともに非線形的に低下し、その値は0.2~0.4(摩擦角は11~22度)の範囲にある。また、チイビシ砂及び豊浦標準砂の場合は、対象とする応力域において側方圧力の変化によらずほぼ直線的で、その値はチイビシ砂が0.27(摩擦角は15度)程度、豊浦標準砂が0.25(摩擦角は14度)程度である。このような傾向は前述の一面せん断試験に示された結果と定性的に良い対応を示していると言える。

Fig. 15は、一面せん断試験機を用いて得られた摩擦係数 μ と模型杭載荷実験で得られた摩擦係数 μ_h の関係をまとめたものである。それぞれ求める摩擦係数を比較すると、相対的に模型杭載荷実験で得られた摩擦係数の

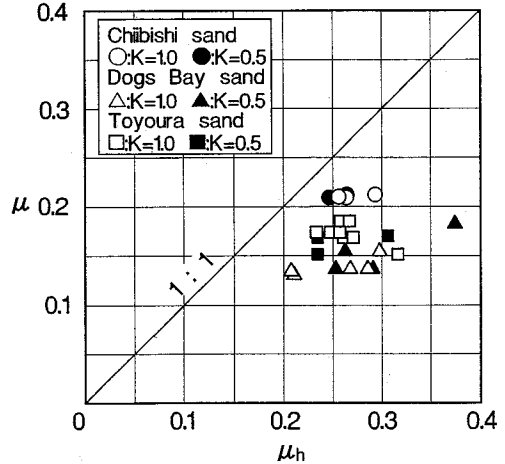


Fig. 15 Relation between interface friction factor and pile skin friction factor

方が大きく、2つの摩擦係数の比を α ($\alpha = \mu_h/\mu$) なる係数で示すと、その値はチイビシ砂の場合、1.20~1.45の範囲に、Dogs Bay砂の場合は1.61~2.22の範囲に、豊浦標準砂の場合は1.35~2.00の範囲にそれぞれあり、Dogs Bay砂の場合が最も小さく、豊浦砂、チイビシ砂の順に大きくなっている。ここで、 μ_h/μ が1より大きくなった理由としては、一つに改良型一面せん断試験機では破壊面を杭材と試料の境界部に規定しているのに対して、模型杭実験では周辺地盤内への破壊面の進行も考えられる。あるいは、拘束圧が杭の貫入に伴って局所的に変化していることも考えられる。しかし、これらのことに対する詳細な観察は今後の検討課題である。

この結果を踏まえ、杭の最大周面摩擦応力を一面せん断試験機を用いて得られた摩擦係数 μ 、それと模型杭載荷実験で得られた摩擦係数 μ_h との比 α 、三軸圧縮試験で得られたセカントアングル ϕ_{ch} 及び上載圧 σ_v により関係づけると次のようになる。

$$f_{smax} = \alpha \mu K_0 \sigma_v = \alpha \mu (1 - \sin \phi_{ch}) \sigma_v \quad (2)$$

ここで、係数 α は平均的な値を用いると、チイビシ砂で1.23、Dogs Bay砂で1.85、豊浦標準砂では1.54となる。

6. まとめ

本研究では、生産地の異なる2種類のカーボネイト系の砂の力学特性のちがいを調べるとともに、その特性の違いが $R_{max} = 15 \mu m$ 程度の滑らかな杭の周面摩擦力に及ぼす影響を実験的に検討した。主要な結果をまとめるつつぎのようになる。

(1) 2種類のカーボネイト系の砂を比較すると、初期の間隙比はDogs Bay砂の方が大きく、同じ平均主応力で比較すると、常にDogs Bay砂が2倍程度大きな間隙比を示すが、間隙比の減少傾向はチイビシ砂の方が特に顕著で、チイビシ砂の方がより大きな拘束圧依存性を示す。また、カーボネイト系の砂は豊浦標準砂と比較すると間隙比が全体的に2~4倍程度大きく、拘束圧の変化に伴う間隙比の変化も著しく大きい。

(2) チイビシ砂は、せん断ひずみが0.4%程度まではDogs Bay砂よりも明らかに小さなせん断剛性を示すが、それ以上のせん断ひずみではせん断剛性の大小関係が逆転し、チイビシ砂の方が大きなせん断剛性を示すようになる。また、1%以下の比較的小さなひずみレベルにおいては、豊浦標準砂のせん断剛性に比べてカーボネイト系の砂のそれはかなり小さい。

(3) Dogs Bay砂の場合、一面せん断試験で得られた有効摩擦角は鉛直圧の増加とともに減少し、このような圧力レベルにおいても応力依存性を示すことがわかる。一方、チイビシ砂と豊浦標準砂の多少のばらつきはあるものの、鉛直圧の変化に因らずば一定の値を示している。なお、有効摩擦角の大きさはチイビシ砂が最も大きく、豊浦標準砂、Dogs Bay砂の順に小さくなっている。

(4) 杭周面摩擦力は側方圧力の増加とともに一義的に増加するが、チイビシ砂及び豊浦標準砂では、側方圧力の増加に伴い直線的に増加するのに対して、Dogs Bay砂での増加傾向は非線形的であり、側方圧力の増加に伴う周面摩擦力の増加割合が低下していく傾向にある。この傾向は一面せん断試験から求まる鉛直圧と最大摩擦力との関係とよい対応を示すことが明らかになった。

(5) 一面せん断試験機と模型杭載荷実験で得られた摩擦係数を比較すると、相対的に模型杭載荷実験で得られた摩擦係数の方が大きいことが示された。また、2つの摩擦係数の比($\alpha = \mu_h / \mu$)は試料によって異なり、平均的な値を用いると、チイビシ砂は1.23、Dogs Bay砂は1.85、豊浦標準砂は1.54となる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、実験、データ整理及び載荷試験機の改良等において多大な協力を受けた山口大学技官の山本修三氏及び山口大学大学院の辻昭人君、桑島啓治君に深甚の謝意を表す。また、特にDogs Bay砂の入手に便宜をはかって頂いたBradford大学上級講師のA. F. L. Hyde博士及びチイビシ砂を提供して頂いた琉球大学農学部教授の新城俊也博士に深く感謝します。

参考文献

- 1) 安福規之, 田中邦博, 村田秀一, 兵動正幸: 圧縮性の卓越した砂中の杭の先端支持力とその評価, 土木学会論文報告集, 第505号, III-29, pp.191-200, 1994.12.
- 2) 土質工学会: 杭基礎の設計法とその解説, pp.277-283, pp.305-309, 1985.
- 3) McClelland, B.: Design of deep penetration piles for ocean structures, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.100 (GT7), pp.709-747, 1974.
- 4) Murff, D.J.: Pile capacity in calcareous sands: State of the Art, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.113 (5), pp.490-507, 1987.
- 5) Randolph, M.F., Finnie, I. and Joer, H.: Performance of Shallow and Deep Foundations on Calcareous Soil, *Int. Seminar in Kagoshima '93*, pp.169-220, 1993.
- 6) Fahey, M.: Selection of Parameters for Foundation Design in Calcareous Soil, *Int. Seminar in Kagoshima '93*, pp.71-134, 1993.
- 7) Nooranny, I.: Side friction of piles in calcareous sands, *Proc. 11th ICSMFE*, pp.1611-1614, 1985.
- 8) Zaki, A.B.: Model pile testing in carbonate sediments of the Red Sea, Canada, *Geotechnical Engineering*, J.28, pp.423-433, 1991.
- 9) Coyle, H.M. and Sulaiman, I.H.: Skin friction for steel pile in sand, *Proc. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.93, No.SM6, November, pp.53-60, 1967.
- 10) Poulos, H.G.: The mechanics of calcareous sediments, *Research Report No.595 of The University of Sydney, Australia*, 1989.
- 11) 新城俊也, 宮城調勝, 小宮康明: さんご石灰質砂の強度特性, 農業土木学会論文集, 第163号, pp.95-101, 1993.
- 12) 新城俊也, 宮城調勝, 小宮康明, 島袋進: さんご石灰質砂の力学特性, 農業土木学会誌, 59(10), pp.41-46, 1991.
- 13) 安福規之, 山本修三, 村田秀一, 辻昭人, 田中邦博: 周面摩擦力を独立に測定可能な模型杭実験装置の試作とその適用, 第28回土質工学研究発表会概要集, pp.1669-1670, 1993.
- 14) 山肩邦男, 伊藤淳志, 小椋仁志, 加藤史彦, 小森 崇: 砂-鋼板間の摩擦試験(その3定体積条件と定圧条件での試験結果の比較), 第26回土質工学研究発表会, pp.719-720, 1991.
- 15) 張 恵文, 白子博明, 赤石 勝, 稲田倍穂: 模型杭に作用する負の摩擦力和測定法に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol.22, No.4, pp.143-151, 1982.
- 16) Tsubakihara, Y., Kishida, H. and Nishiyama, T.: Friction between cohesive soils and steel, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.2, pp.145-146, 1993.

(1994.10.7受付)

ENGINEERING PROPERTIES OF CARBONATE SANDS AND SKIN FRICTION OF PILE IN SANDS

Kunihiro TANAKA, Noriyuki YASUFUKU, Hidekazu MURATA
and Masayuki HIYODO

The aim of this paper is to investigate the skin friction of pile in carbonate sands, as compared with that in the hard grained silica sand. A series of triaxial compression tests, direct shear tests and model pile loading test were performed in the stress range of 50–400 kPa. By considering the material compressibility, the estimating method of skin friction of pile in sands was also discussed.

The experimental results indicate that the carbonate sand shows the higher compressible and less stiff characteristics, compared with the silica sands. Then, the model pile test simulating the skin friction of piles in these sands were conducted to study the effects of the difference in compressibility of each sand on the skin friction. It is found that even if much higher internal friction angle is obtained, the low skin friction could be observed in the case of highly compressible sands. Based on the experimental results, a new determined technique for evaluating the skin friction was presented by considering the friction angle and the results of the direct shear tests.