

大阪湾泉州沖海底地盤のせん断特性

Shearing characteristics of diluvial clays at sea off Sensyu in Osaka Bay

つち だ たかし こ ばやし まさ き
土 田 孝* 小 林 正 樹**
お の でら しゅん いち
小 野 寺 駿 ***

1. はじめに

世界で初めての本格的な海上空港である関西新国際空港は、大阪府泉佐野市および泉南市の海岸から約5km、水深約20mの海上に人工島を造成することによって建設される。空港の規模は全体計画で約1200haであり、海上の埋立てとしては世界でもまれにみる大きなスケールである。

空港島が建設される地点には、厚さ約25mの非常に軟弱な沖積粘土層があり、その下には沈下性を有する洪積地盤が、粘性土と砂質土の互層を形成して数百mにわたり堆積している。新空港建設によって大規模な埋立てが実施されると、かなりの深度の洪積地盤に至るまで大きな盛土荷重が伝ばする。特に表層の沖積粘土層と異なり、深層の洪積地盤については地盤改良が技術的に困難であるので、新空港を確実にかつ経済的に建設するためには、大深度における洪積層の土質特性を把握することが極めて重要である。

このため、運輸省では昭和52年度から57年度にかけて泉州沖の65地点において掘進深さ100m～400mの海上ボーリングを実施した。図-1にこれらの調査におけるボーリング孔の配置を示すが、図中のNo.56-9およびNo.57-30が最大掘進深度400mのものであり、港湾技術研究所で開発した港研ワイヤーライン工法によって乱さない試料を連続的に採取している¹⁾。

本稿は、これらの調査によって採取した乱さない試料を用いて行った一連の三軸試験の結果に基づき、洪積地盤、特に粘土層のせん断特性を検討したものである。

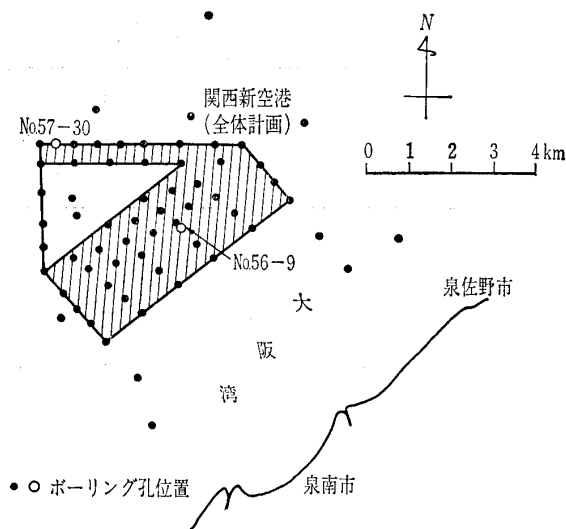


図-1 ボーリング孔の配置

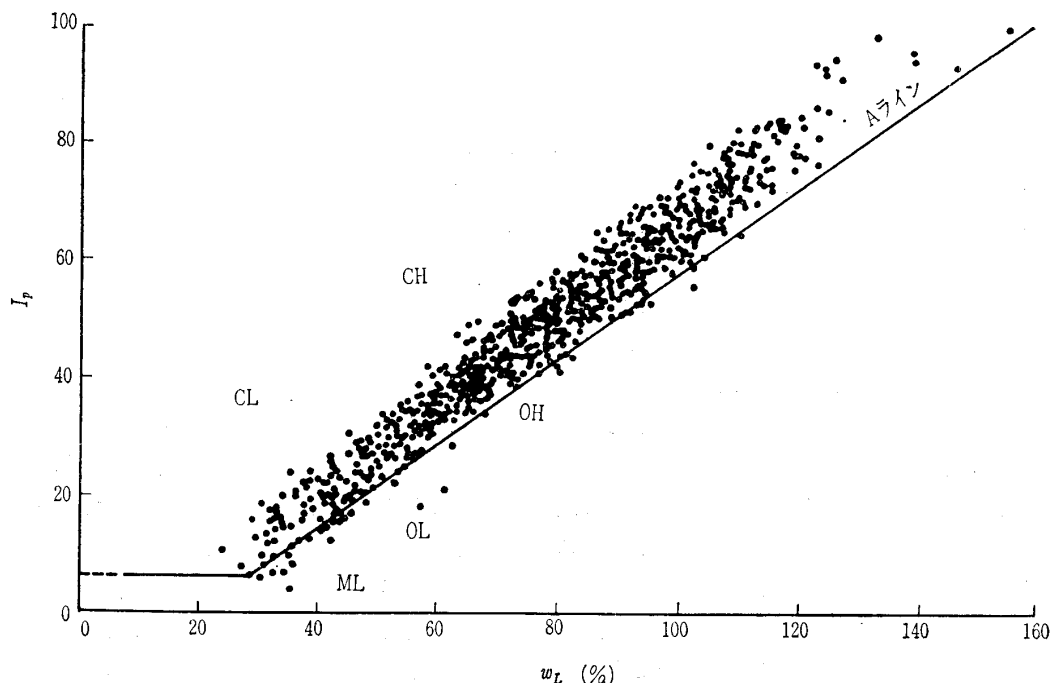


図-2 泉州沖積粘土の塑性図

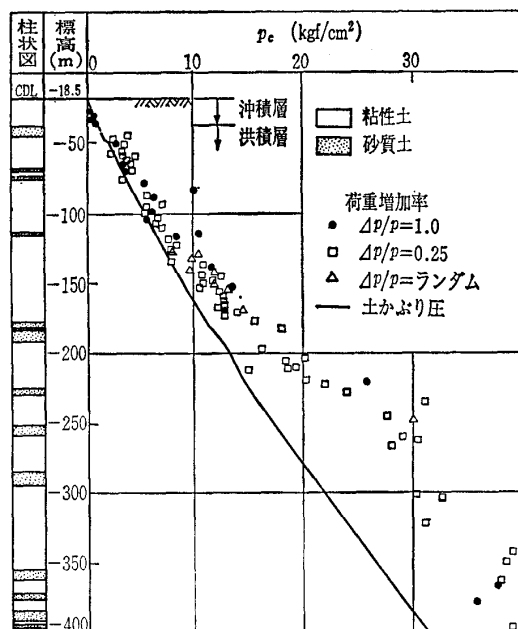
2. 洪積地盤の物理特性および圧密降伏応力と有効土かぶり圧力の関係

試料はいずれも固定ピストン式シンウォールサンプラー

*運輸省港湾技術研究所 土質部 主任研究官

**運輸省港湾技術研究所 土性研究室長

***前運輸省港湾局長

図—3 p_e の深度方向分布

またはデニソンサンプラーによって採取されている。試料の物理特性について、ここでは図—2 に塑性図を示すだけにとどめるが、比重や粒度組成、塑性図、コンシステンシー特性などからは全体として近畿、中国、四国地方の港湾において従来経験されている粘土の物理特性とほぼ同様であった²⁾。

図—3 はボーリング孔56-9における圧密降伏応力と有効土かぶり圧力との関係を示したものである。この図よりわかるように、沖積層では圧密降伏応力と有効土かぶり圧力がほぼ等しく、地盤が正規圧密状態にある。一方、洪積地盤においては、ばらつきはあるが圧密降伏応力は有効土かぶり圧力よりも大きく過圧密状態にあることが分かる。なお、図中には圧密降伏応力が有効土かぶり圧力よりも小さくなっているデータも含まれているが、これは試料採取時の機械的なく乱の影響によると考えられる。図より洪積地盤の過圧密比はいずれの深度においてもほぼ1.3~1.5になっている。このように深度30~400mという広い範囲で過圧密比がほぼ一様になっていることが、泉州沖地盤の大きな特徴である。

土質調査に伴って行われた地質学的な調査の結果によると、泉州沖地盤の堆積年代は深度100mの地層で約7~40万年前と推定されている。泉州沖地盤の圧密履歴は堆積年代が古いことによる時間効果や、その間の侵食、海面変動による荷重の除去などによるものと考えられている(詳細は文献3), 4)を参照されたい)。

3. 三軸試験結果に及ぼすバックプレッシャーの影響

今回行った三軸試験は、試料を等方的に圧密した後一定のひずみ速度で圧縮するもので、圧縮中に試料内に発生す

る過剰間隙水圧を測定している。

せん断中に間隙水圧を測定する場合は、試料内の飽和度を十分高めるためにバックプレッシャーを用いるのが望ましいとされている。特に、水深や深度の大きい海底地盤から試料を採取すると、原位置において試料内に作用していた大きな静水圧がサンプリングや試料成形の過程で解放されるため、試料は不飽和になりやすい。今回試験した試料の原位置での水深は20~350mなので、土中には約2.0~35.0 kgf/cm²の静水圧が働いていたことになる。通常の三軸試験では1~2 kgf/cm²のバックプレッシャーが用いられているが、今回のように大深度からサンプリングした場合はより大きなバックプレッシャーが必要になると予想された。

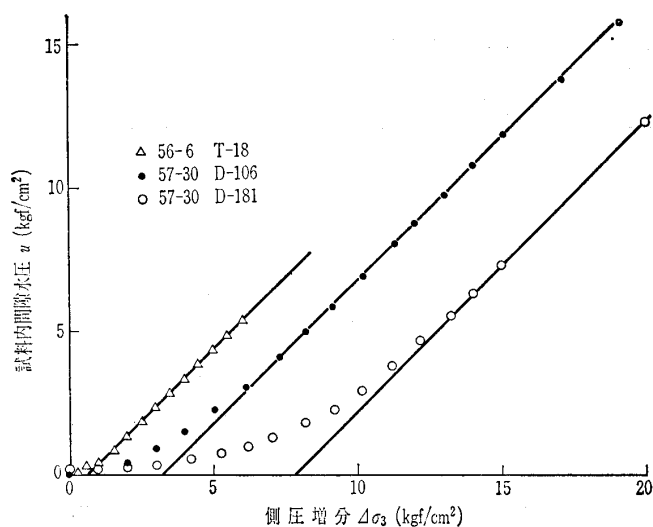
奥村⁵⁾は、試料の応力解放による飽和度の低下とそれに伴って生じる残留有効応力の低下を回復するには、原位置の静水圧と同程度の大きさのバックプレッシャーを加えることが望ましいとしている。一方、大きいバックプレッシャーを用いると、大容量の三軸試験機や、荷重計、圧力計が必要になるため、試験の能率が低下したり計測の精度が下がるなどの問題がある。そこで、三軸試験で用いるバックプレッシャーの大きさを検討するための予備実験をまず行った。

予備実験 1: まず試料をバックプレッシャーを用いず圧力 σ'_c で等方圧密し、圧密終了後排水コックを閉じたまま側圧を段階的に増加して、このときの試料内の間隙水圧の増加傾向を測定した。ここで間隙水圧係数 B を次のように定義する。

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_3 \quad (\Delta u: \text{供試体内の間隙水圧増分} \quad \Delta u = u - u_0, \Delta \sigma_3: \text{前段階からの側圧の増分})$$

図—4 は各段階において圧力増加後10分間経過した後の間隙水圧と側圧との関係である。試料が十分飽和した場合は側圧の増分 $\Delta \sigma_3$ と間隙水圧の増分 Δu とが等しく $B=1$ となり、図中の直線はこのときの関係を示している。図より沖積粘土の56-6・T-18では供試体内の u_0 が0.3 kgf/cm²以上になると以後 B はほぼ1.0(完全飽和)となり、深度191mの57-30・D-106では $u_0=5.0$ kgf/cm²、深度294mの57-30・D-181では $u_0=7.0$ kgf/cm²以上において10分経過後の B が1.0になっている。このように、試料の原位置での深度が大きいほど飽和度を十分上げるために大きな初期間隙水圧を必要とすることがわかった。これらの試料の原位置での静水圧はそれぞれ4.5 kgf/cm²、20.1 kgf/cm²、31.4 kgf/cm²であるので、この実験の結果からほぼ原位置の静水圧の $\frac{1}{4}$ 程度の間隙水圧が供試体内にあれば十分な飽和度が期待できるといえる。

予備実験 2: 2種類の粘土について、有効圧密圧力は一定でバックプレッシャーを変化させて圧密し、0.03%/minのひずみ速度で圧縮試験を行った。図—5は、このときの軸差応力・間隙水圧~ひずみ曲線である。図をみると沖積



図—4 間隙水圧と側圧の関係

粘土56-6・T-18については間隙水圧～ひずみ関係がほぼ一致しており、1.0, 3.0, 6.0 kgf/cm²のバックプレッシャーによる差はほとんどない。一方、深度76mの56-6・D-21の場合は、バックプレッシャーが大きいほど間隙水圧が大きくなる傾向が認められる。しかし、バックプレッシャーが5.0 kgf/cm²と9.0 kgf/cm²のときの試験結果とはそれほど顕著な差はみられない。

以上の予備実験の結果から、大水深の海底地盤から採取した試料を用いて間隙水圧を測定する三軸試験を行う場合、バックプレッシャーは原位置の静水圧の $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 程度かければ十分であるという結論を得た。したがって以下の実験は、各試料について原位置の静水圧の $\frac{1}{3}$ 以上のバックプレッシャーを負荷して行っている。

4. 試料および試験方法

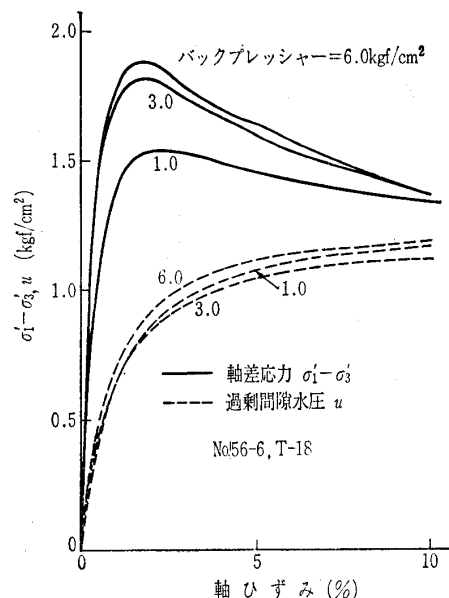
表—1に試験を行った試料の深度、主な物理特性をまとめて示した。表中で56-8・T-4, 56-8・T-10が沖積粘土であり、その他は洪積粘土である。

今回の試験では圧密圧力、バックプレッシャーが通常の三軸試験に比べかなり大きくなるので普通の三軸試験機のほかに中圧三軸試験機、高圧三軸試験機を用いて一連の試験を行っている。中圧三軸試験機はセル圧10～30 kgf/cm²、高圧三軸試験機はセル圧30～100 kgf/cm²の試験に用いた。また、各試料とも24～48時間等方圧密した後、ひずみ速度0.03%/minで圧縮した。

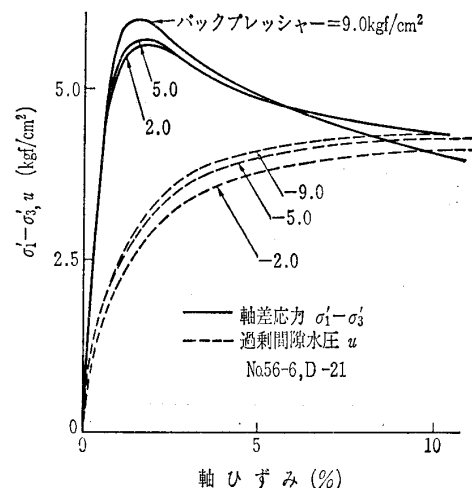
5. 三軸試験結果

5.1 非排水せん断強度 c_u

図—6は最大軸差応力の2分の1として求めた非排水せん断強度 c_u と有効圧密圧力 σ'_c との比 c_u/σ'_c と、圧密降伏応力 p_c で無次元化した圧密圧力 σ'_c/p_c との関係である。 σ'_c/p_c は過圧密比 p_c/σ'_c の逆数であり、 σ'_c/p_c が1以上のとき試料は三軸室内で正規圧密領域まで圧密されており、



図—5(a) 軸差応力・過剰間隙水圧と軸ひずみの関係



図—5(b) 軸差応力・過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

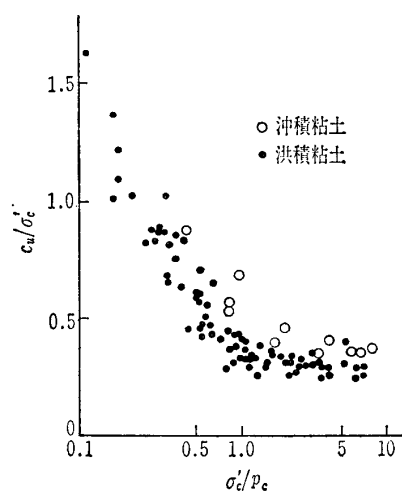
σ'_c/p_c が1未満のときは過圧密状態であることを意味する。なお、ここで p_c は標準圧密試験によって求めている。

図をみると、 c_u/σ'_c は σ'_c/p_c が大きくなるとともに低下し、 σ'_c/p_c が1以上の場合、すなわち正規圧密領域ではほぼ一定ないし σ'_c/p_c とともに若干低下する傾向を示している。また、洪積粘土の $c_u/\sigma'_c \sim \sigma'_c/p_c$ 関係は、ボーリング孔や深度、試料の塑性などの違いによらずほぼ一様の傾向を示し、沖積粘土に比べて全体に c_u/σ'_c は小さい。

図—7には各試料の正規圧密領域における c_u/σ'_c と塑性指数 I_p との関係を示した。正規圧密領域では c_u/σ'_c は圧密による強度増加率を意味するが、図のように今回用いた試料に関しては、 c_u/σ'_c は I_p との間に明らかな相関を示さず、ほぼ一様にばらついている。我が国の港湾におけるいくつかの沖積粘土について正規圧密時の c_u/σ'_c を調べた結果によると、 c_u/σ'_c は I_p とあまり関連を示さずほぼ0.34～0.42の範囲にあるとされている⁹⁾。図—8をみると泉州沖の沖積粘土の c_u/σ'_c は従来の結果と同様となり、洪積粘土はそれらよりも小さく0.30を中心として0.26～

表一 三軸試験に用いた試料の深度と土層区分、および物理特性

試料名	海底面からの深度 (m)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p (%)	自然含水比 w_n (%)	砂分含有率 (%)	推定土かぶり圧 P_0 (kgf/cm ²)	圧密降伏応力 P_c (kgf/cm ²)
56-8 T-4	4.50~ 5.30	103.0	34.5	68.5	108.5	1.0	0.23	0.30
56-8 T-10	13.50~ 14.30	83.9	27.3	56.6	78.6	2.0	0.70	0.70
56-1 D-2	16.00~ 16.88	60.4	21.5	38.9	57.2	18.0	1.40	3.30
56-8 D-4	38.00~ 38.80	103.0	37.5	65.5	80.2	0	2.9	3.3
57-1 D-6	33.50~ 34.30	97.8	31.7	66.1	85.6	1.0	2.3	3.1
57-1 D-16	59.50~ 60.30	89.3	30.6	58.7	58.0	0.3	4.3	6.9
57-16 D-4	39.50~ 40.30	109.9	38.9	71.0	89.0	1.0	2.8	3.2
57-16 D-10	51.50~ 52.30	79.1	27.6	51.5	49.1	27.0	3.6	5.6
57-30 T-41	56.20~ 57.10	77.5	26.2	51.3	53.9	1.0	3.9	4.5
57-30 D-26	76.00~ 76.90	84.2	30.5	53.7	55.1	0.6	5.1	6.0
57-30 D-42	104.20~105.10	77.0	30.6	46.4	50.4	1.1	7.3	8.3
57-30 T-79	147.10~148.10	92.0	28.7	63.3	48.7	0.8	10.9	13.3
57-30 D-106	190.60~191.50	89.7	32.4	57.3	50.8	0.8	14.1	18.1
56-9 T-182	203.60~204.60	91.0	31.7	59.3	39.5	2.8	14.9	21.8
56-9 D-53	294.20~295.10	69.1	29.5	39.6	28.1	1.2	22.3	32.5
56-9 D-86	318.90~319.80	54.8	32.4	22.4	31.1	0.7	26.2	38.5
56-9 D-92	324.40~325.30	61.6	24.3	37.3	21.5	2.9	26.2	38.5

図-6 c_u/σ'_c と p_c で無次元化した圧密圧力との関係

0.34の範囲でばらついている。

5.2 ϕ' と A_f

次に有効応力に関する諸係数について調べてみる。図-8は正規圧密時における有効応力に関する内部摩擦角 ϕ' と I_p との関係を示したものである。 ϕ' は c_u/σ'_c と同様に I_p と関連がなく、沖積粘土で $30^\circ \sim 35^\circ$ 、洪積粘土では $28^\circ \sim 32^\circ$ の範囲でばらついている。

図-9は破壊時の間隙水圧係数 A_f と p_c で無次元化した圧密圧力 σ'_c/p_c との関係である。なお、間隙水圧係数 A_f は次式で定義される。

$$A_f = \Delta u_f / \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$$

Δu_f : 軸差応力最大のときの過剰間隙水圧

$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 軸差応力の最大値

図から分かるように、洪積粘土の A_f は全体に沖積粘土よりも大きい。また、正規圧密時の A_f に注目すると、従来港湾地域の粘土の正規圧密時の A_f は $0.8 \sim 1.2$ の範囲にあるとされているが⁶⁾、今回の結果もこの範囲にあてはまる。一方過圧密時の A_f をみると、 A_f は過圧密比の増加 (σ'_c/p_c の減少) とともに低下する傾向を示す。図中の直

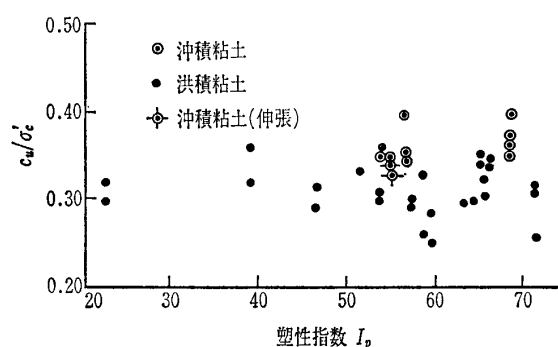
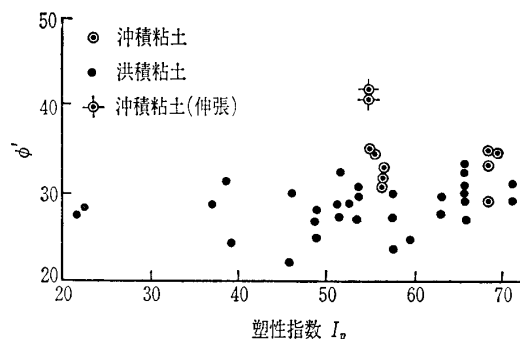


図-7 塑性指数と強度増加率との関係

図-8 塑性指数と ϕ' との関係

線は、中瀬ら⁷⁾が名古屋港、千葉港の沖積粘土を等方的に圧密および膨張させて過圧密状態とし、過圧密比と A_f の関係を調べた結果を引用したものである。今回の試験は原位置から採取する過程でいったん膨張した粘土試料を再度等方圧密したものであり、中瀬らの実験条件と少し異なっているが、 σ'_c/p_c が 0.5 以上でほぼ一致し、 σ'_c/p_c が小さいすなわち過圧密比が大きい場合で洪積粘土の A_f がより大きくなる傾向が示されている。これは、今回の試験では、試料の過圧密比が $5 \sim 20$ になっても A_f が 0.2 以下にはあまり低下しないことによるものである。

5.3 E_{50} と ϵ_f

次に、圧縮試験における応力～ひずみ曲線の初期傾度を

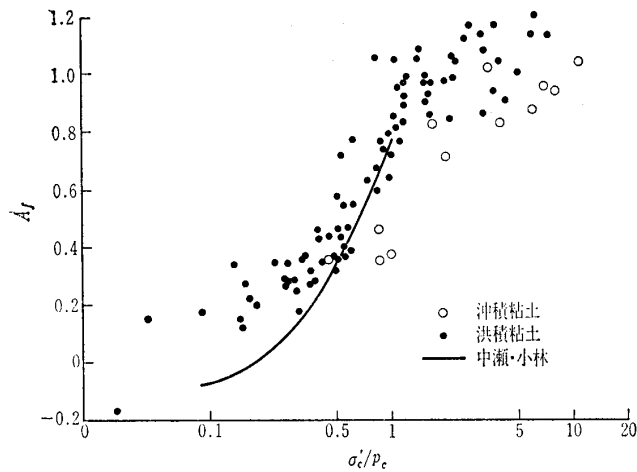


図-9 破壊時の間隙水圧係数と p_c で無次元化した有効圧密圧力との関係

示す指標として正割係数 E_{50} について調べてみる。

図-10は圧密圧力で無次元化した正割係数 E_{50}/σ'_c と σ'_c/p_c との関係である。図をみると σ'_c/p_c が1以下の範囲でばらつきが大きい、 σ'_c/p_c が増加するにつれて E_{50}/σ'_c が減少する傾向にあり、また沖積粘土と洪積粘土で $E_{50}/\sigma'_c \sim \sigma'_c/p_c$ 関係には有意な差がないといえる。

E_{50} と非排水強度 c_u との比 E_{50}/c_u は土の変形特性を示す指標としてよく用いられる。図-11は E_{50}/c_u と σ'_c/p_c の関係を示したものであり、洪積粘土の E_{50}/c_u は80~500の範囲にばらついている。また、図をみると E_{50}/c_u は σ'_c/p_c が0.5~1.0のときすなわち過圧密比1~2のときに最も大きく、 $\sigma'_c/p_c > 1$ の正規圧密領域では圧密圧力とともに減少する。図中の実線は前述の中瀬らによる結果を引用したものであるが、 $\sigma'_c/p_c = 0.3 \sim 1.0$ の範囲では今回の試験結果とほぼ同様の傾向を示している。

図-12は、軸差応力最大時で定義した破壊ひずみ ϵ_f と σ'_c/p_c の関係である。図のように ϵ_f と σ'_c/p_c の関係は全体にかなり一様であり、 σ'_c/p_c が0.2~0.9 (過圧密比1.1~5) の場合ほとんど1.0~3.5%の間に集中する。一方正規圧密領域では ϵ_f は圧密圧力とともに増加する傾向がある。

5.4 応力~ひずみ曲線、応力径路

ここまで三軸試験によって求められる諸係数を塑性指数、圧密降伏応力で無次元化した圧密圧力などにより整理してみた。これらの結果をみると、今回試験した粘土は、 p_c で諸係数を無次元化して整理すれば、ばらつきはあるもののほぼ同様の力学特性を示しているようである。そこで、次に応力~ひずみ曲線、非排水圧縮時の有効応力径路についても同様の比較を行ってみる。

図-13は、沖積粘土と洪積粘土の応力~ひずみ曲線を比較したものである。ここで軸差応力は圧密圧力 σ'_c で無次元化した値を用いている。図をみると応力~ひずみ関係は σ'_c/p_c によって大きく変化するが、沖積粘土と洪積粘土の間には明確な相違は認められない。図-14は同様に間隙水

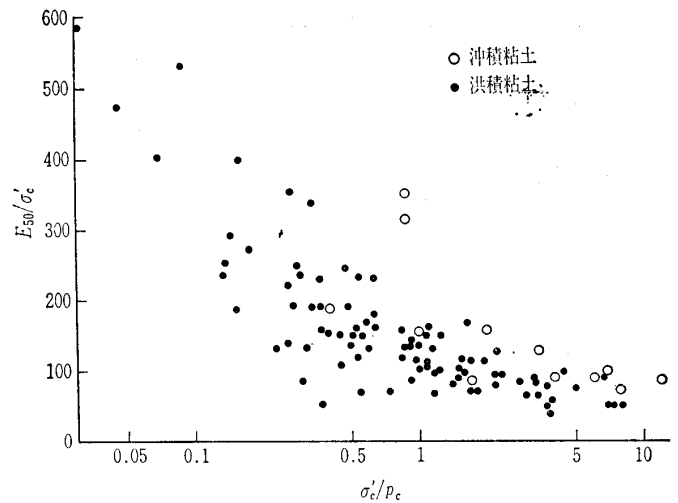


図-10 E_{50}/σ'_c と p_c で無次元化した有効圧密圧力との関係

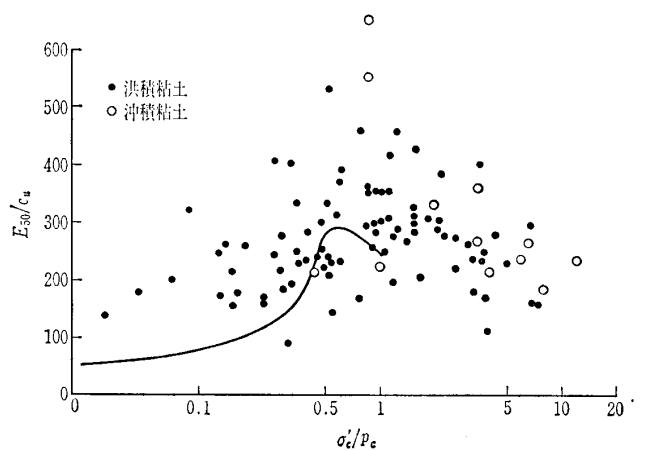


図-11 E_{50}/c_u と p_c で無次元化した圧密圧力との関係

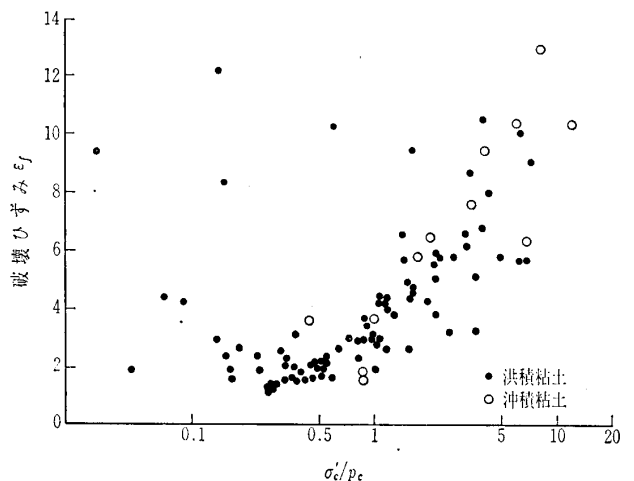


図-12 軸差応力最大時の破壊ひずみと p_c で無次元化した有効圧密圧力との関係

圧 u とひずみの関係を示したものである。図-14においても図-13と同様に σ'_c/p_c の値によって間隙水圧と軸ひずみの関係は変化するが、沖積粘土と洪積粘土には大きな差がみられないことが分かる。

図-15は、非排水圧縮中の有効応力径路に対して同様の比較を行ったものである。縦軸には軸差応力 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma'_c}$ をとり横軸に平均主応力 p'/σ'_c をとっている ($p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$)。

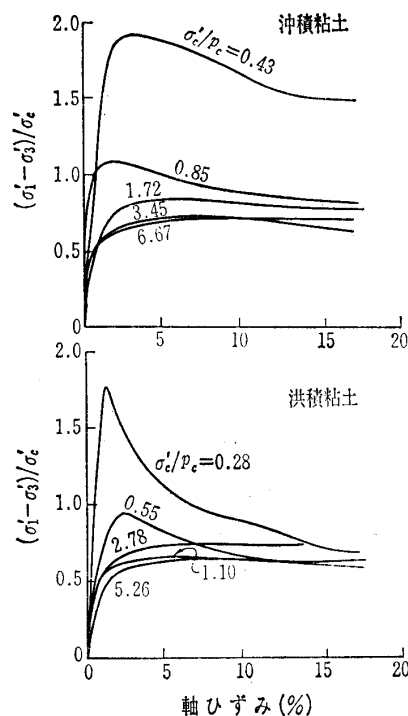


図-13 応力～ひずみ関係の比較

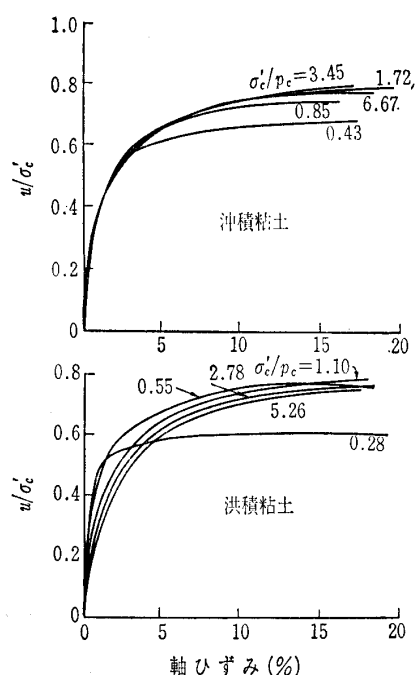


図-14 過剰間隙水圧～ひずみ関係

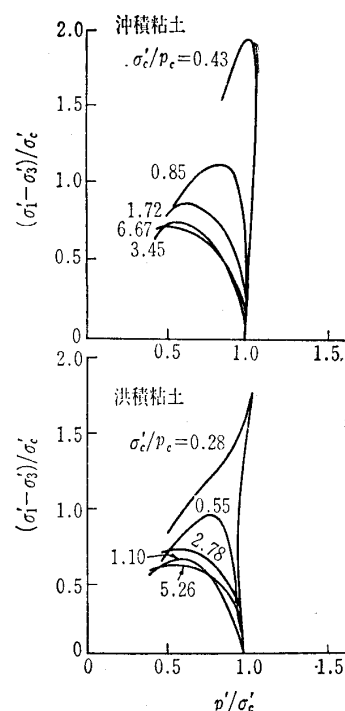


図-15 有効応力径路の比較

この図をみると、有効応力径路に関しても、沖積粘土と洪積粘土の間には大きな差がみられず、 σ_c'/p_c の影響が大きい。また、沖積粘土、洪積粘土ともに σ_c'/p_c が小さい場合つまり過圧密比が大きい場合には有効応力径路の初期部分が鉛直になるが、これは粘土が弾性体に近い挙動を示していることを意味する。

以上の結果をまとめると沖積粘土、洪積粘土とも応力～ひずみの関係はおもに過圧密比の逆数である σ_c'/p_c によって変化し、 σ_c'/p_c がほぼ等しい場合には、せん断特性に顕著な差がみられないといえる。

6. ま と め

大阪湾泉州沖の深度 25～400m から採取した乱さない試料を用いた一連の三軸試験の結果から、この地域の粘土のせん断特性について次のことが明らかになった。

- 1) 洪積粘土の正規圧密領域における強度増加率 c_u/σ_c' は塑性指数 I_p と関連がなく、0.26～0.34 の範囲にある。また ϕ' も I_p との関連がなく $28^\circ \sim 32^\circ$ の範囲にある。これらは沖積粘土に比べ約10～15%小さい。
- 2) 洪積粘土の圧密圧力で正規化した非排水強度 c_u/σ_c' および破壊時の間隙水圧係数 A_f 、破壊ひずみ ϵ_f などと圧密降伏応力 p_c で正規化した圧密圧力 σ_c'/p_c との関係は粘土の種類や塑性の違いによらずほぼ一樣になる。また、洪積粘土の A_f は沖積粘土に比べ大きい。
- 3) 正割係数 E_{50} と c_u の比 E_{50}/c_u は、80～500 の範囲にある。また E_{50}/c_u は過圧密比 1～2 で最も大きく正規圧密領域では圧密圧力とともに低下する。

- 4) 三軸試験によって得られる応力～ひずみ関係、有効応力径路は、 σ_c'/p_c によって主に変化し、 σ_c'/p_c が等しいときには沖積粘土と洪積粘土の間に顕著な差がみられない。

今回試験した泉州沖の粘土は深度が 25m から 400m に及び、その堆積年代は最も古いもので 45 年以上前と推定されている。しかしながら、その土質力学的性質に関しては、かなりの一様性が認められるのが特徴的であり、このことは地質学的にも興味深いことといえるのではないだろうか。

おわりに、本実験の実施に当たって多大な協力をいただいた運輸省第三港湾建設局の各位に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 瀬川宗亮：関西国際空港の計画と調査(土質調査)，土木学会誌，Vol. 63，No. 3，pp. 27～30，1984。
- 2) 運輸省港湾技術研究所：大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質，港湾技研資料，No. 498，1984。
- 3) 小野寺駿一・小林正樹・平尾寿雄：大阪湾泉州沖地盤の地質特性と土質特性，港湾，1984。
- 4) 小野寺駿一・小林正樹・平尾寿雄：大阪湾泉州沖地盤の特性，埋立と浚渫，1985。
- 5) 奥村樹郎：粘土試料の攪乱に関する研究(第2報)―不飽和土のサンプリングに伴う応力変化について，港湾技術研究所報告，Vol. 8，No. 3，pp. 77～98，1969。
- 6) 土田 孝・佐藤正春・小林正樹：乱さない海成粘土の正規圧密状態におけるせん断特性について，港湾技研資料，No. 444，1983。
- 7) 中瀬明男・小林正樹・勝野 克：圧密および膨張による飽和粘土のせん断強度の変化，港湾技術研究所報告，Vol. 8，No. 4，pp. 103～142，1968。

(原稿受理 1984.11.30)