大阪湾泉州沖地盤の力学特性

運輸省港湾技術研究所　正会員　○土田　孝
同　正会員　石井　一郎
同　正会員　菊池　喜昭
同　正会員　中島　謙二郎
同　正会員　小林　正樹

1．はじめに

世界で初の本格的な海上空港となる関西空港は、大阪湾の泉州沖合約５kmの地点に埋立人工島として建設されることになり、本年度中にも工事が開始される予定である。空港の建設される海底の地盤には、表層に層厚約25mの軟弱な沖積粘土があり、その下部には層厚数百mの洪積粘土が薄い砂レキ層をはさんで堆積している。従来、港湾の建設など沿岸域で実施された建設工事では深度20～30mまでの沖積粘土層が設計の対象とされてきたが、関西空港の場合は埋立の規模が大きくかつ深層の地盤の圧縮性が大きいため最大で深度 200mまでの地盤を設計上考慮することが必要になっている。特に深層の地盤の場合は表層にある場合と異なり人為的にこれを改良するのが不可能であり、あらかじめその力学的な挙動を十分な精度で予測しなければならない。これらを調査する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地点において海上ボーリングをおこなった。図-1はボーリング孔の配置図であるが、図中でNo.56-9 とNo.57-30は掘進深度 400m、その他のボーリング孔は 100～ 200mである。海底地盤についてこれほどの規模で本格的な調査が実施されたのは例をみないものであり、本報告はこれらの一連の土質調査の結果にもとづき主に洪積粘土の力学特性についてまとめたものである。

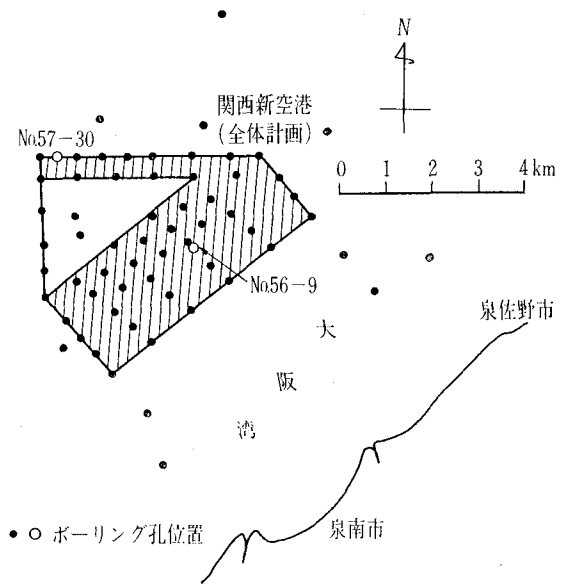

図-1　ボーリング配置図

2．土質柱状図と物理特性

図-2に一例としてNo.56-9 における土質柱状図と物理試験結果を示した。なお、今回の調査では乱れの少ない土試料を採取するように特に注意をはらい、固定ピストン式シンウォールサンプラーまたはデニソンサンプラーを用いている。

物理試験結果をまとめると、全体として今回調査した洪積粘土の試験結果は従来から近畿・

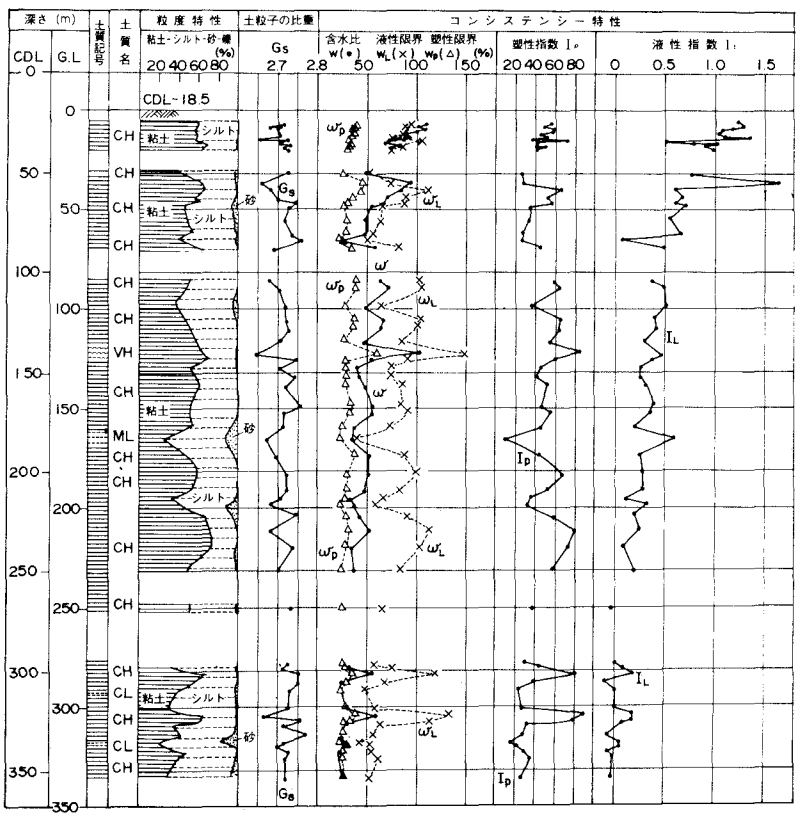

図-2　土質柱状図と物理試験結果

中国・四国地方の沿岸域でみられる沖積粘土の物理特性とほぼ同様であった。このことは深度や堆積時間によってコンシステンシー特性など物理的性質はあまり変化しないことを示している。

3．圧密特性

空港島の建設によって海底地盤がどのように沈下するかは埋立土量や建設工法さらには工事費などに直接影響をおよぼす重要な問題であり、これを精度よく予測することが今回の調査の最大の技術的課題となった。空港島の面積は500 haにおよぶので沈下は一次元圧密として生じるものが主となる。このため各ボーリング孔について圧密試験を実施した。

1） 通常の圧密試験の問題点

図-3は沖積粘土、洪積粘土および練り返した洪積粘土のe－log p曲線を示している。図のように、堆積年代の若い沖積粘土や練り返した洪積粘土に比べると、乱さない洪積粘土はある圧力を境に急激に圧縮性が大きくなる、すなわち圧密降伏応力がきわめて明瞭に現われる特徴がある。これは洪積粘土の年代効果によるものと考えられるが、このような粘土に通常行なわれる荷重増加率1の圧密試験を実施すると圧密降伏応力を正しく求められない場合がある。図-4は圧密試験結果からe－log p曲線を求めた一例である。試料は深度104.2mより採取したもので荷重増加率1で24時間ごとに載荷している。図中ではA点とB点とを結ぶ曲線がいろいろに存在し、この間のe－log p関係を確定するのが困難である。図中の①は洪積粘土の特性を重視し大きめの p_c が求められるように意識して描いたものであり、④はA点とB点をほぼ直線で結んだもの、また②，③は圧密試験に熟練した技術者2人が個別に描いたものである。このようにe－log p曲線の描き方によって圧密降伏応力 p_c は大きく影響され図-4の場合 p_c ＝ 6.4～ 10.9kgf/cm²といった差異が生じることになる。そこで今回はe－log p曲線の形状をより正確に求めるため荷重増加率 $\Delta p/p$ を0.25,0.5と小さくした圧密試験を実施した。図-6は $\Delta p/p$ ＝ 1.0、 0.5, 0.25における p_c を深度方向にプロットしたもので、 $\Delta p/p$ ＝1.0 のときは圧密圧力のある段階に集中してしまうのに対し $\Delta p/p$ が小さいときはほぼ深度に比例した p_c が得られる。この図をみても洪積粘土のe－log p曲線が実際には①，②に近いにもかかわらず $\Delta p/p$ ＝1.0 の場合には③，④として p_c を求めてしまう傾向のあることがわかる。以上のことより今回の洪積粘土のように年代効果によって p_c が明瞭に現われるような場合は、荷重載荷の段階を小さくして圧密試験を行なうのがより適切であると考えられる。

2） 圧密降伏応力と土かぶり圧の関係

図-6は今回調査した65地点のすべてについて p_c と土かぶり圧 p_o の関係を示したものである。図中には深度 0～ 400mのデータが含まれているが、全体として深度による過圧密比 p_c/p_o の顕著な変化は認められずほぼ1.0 ～2.0 の範囲にあって平均は約1.3 である。

今回のボーリングでは地質学的な調査も実施され地盤の各層の堆積年代が概略推定されている。これによると空港島のほぼ中心となるNo.56-9 の地盤では深度 100mの地層で約20万年前に堆積したと考えられる。また、この間に大規摸な隆

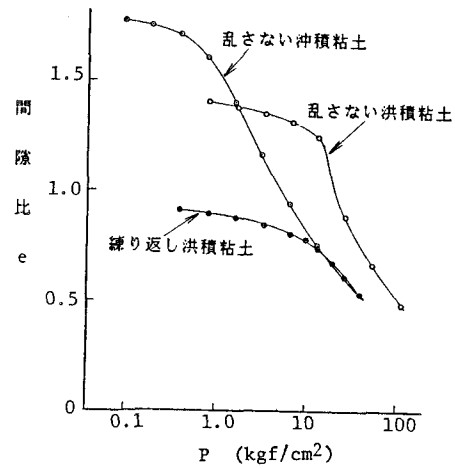

図-3 e－log p曲線

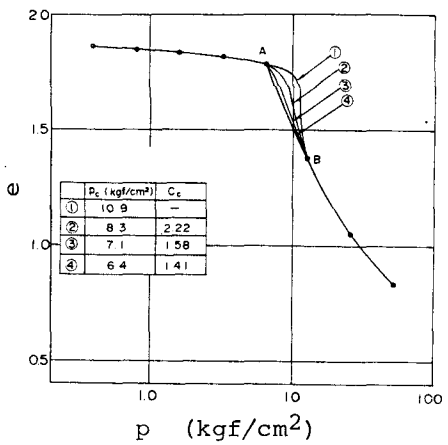

図-4 洪積粘土のe－log p曲線

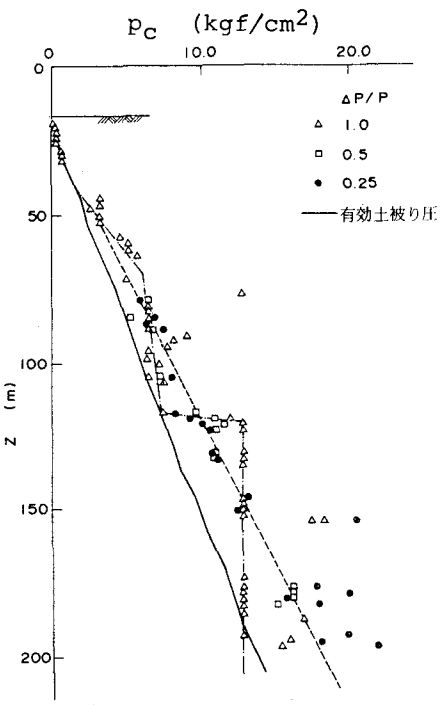

図-5 圧密降伏応力 p_c と深度の関係

起や沈降などの地殻変動が無く、また２万年前に海水面が現在よりも約150 m低下するなど何回かの海面の変動があったと推定されることから、泉州沖の地盤の過圧密の原因は主として長時間の堆積による年代効果と海水面の変動による応力履歴であると考えられる。しかし、これらを個々の地層について定量的に説明することは困難であった。

3) 圧縮指数と圧密係数

図-7、図-8はNo.56-9 、No.57-30の洪積粘土の圧縮指数と圧密係数について塑性指数 I_P との相関を調べたものである。小川・松本[2)]は全国各地の港湾地域の海成粘土について同様の相関を調べており図中にその結果をあわせて示した。図のように今回の洪積粘土の C_c および c_v と I_P の関係は小川らの結果とよく類似しており深度や堆積年代によらず従来経験されている粘土の圧縮特性・圧密特性と大きな違いのないことがわかった。

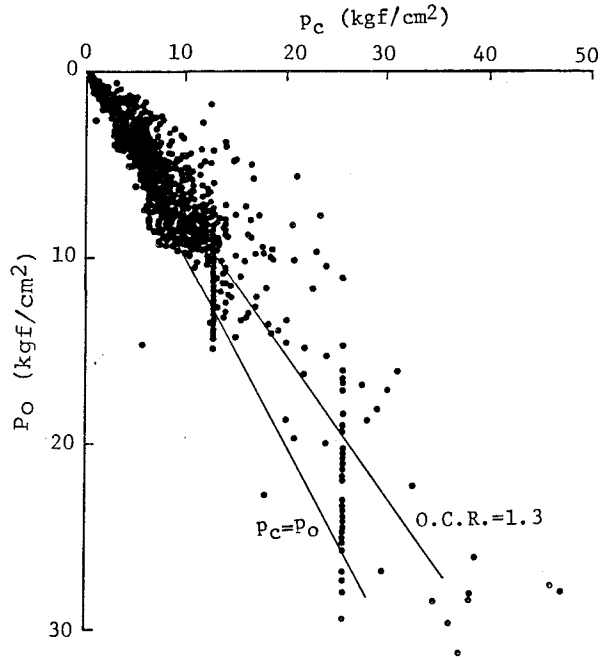

図-6 土かぶり圧 p_o と圧密降伏応力 p_c の関係

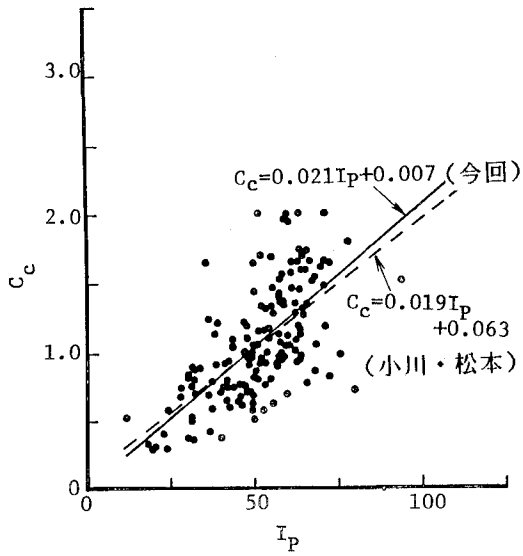

図-7 圧縮指数 C_c と塑性指数の関係

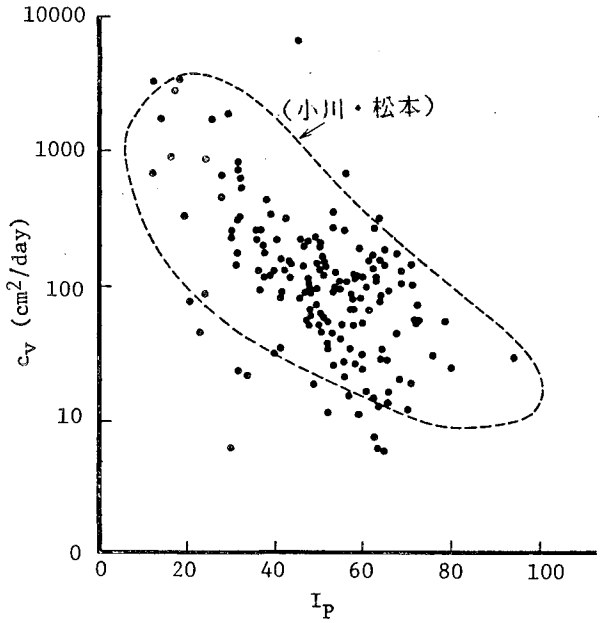

図-8 圧密係数 c_v と塑性指数の関係

4) 二次圧密特性

長期にわたる圧密沈下を精度よく予測するためには二次圧密特性を十分考慮する必要がある。このため洪積粘土と沖積粘土を用いて長期圧密試験を行ない二次圧密特性を調べた。

標準圧密試験と同様に載荷し、ある段階で長期間放置して間隙比と時間の関係を求めた一例を図-9 (a)～(c) に示す。試料は深度53mの洪積粘土で圧密降伏応力 p_c は3.2kgf/cm²である。なお図中に示した t_p は一次圧密が終了した時間であり、Taylorの $\sqrt{t}$ 法によって求めた一次圧密量 d_{100} に対応する時間である。図のように載荷圧力が p_c よりも小さい過圧密領域では二次圧密時の e－log t 曲線の勾配が時間とともに一定ないしは急になる傾向がある。一方正規圧密領域では二次圧密時の e－log t 曲線の勾配は徐々に緩やかになっている。

図-10 は二次圧縮指数 C_α と圧縮指数 C_c との相関性をみたものである。なお C_α は二次圧密時における e－log t 曲線の勾配であり次式で定義される。

$$C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t \qquad (e\text{は間隙比、}t\text{は時間})$$

C_α は時間によって変化するのでここでは $t/t_p = 10$ における C_α を用いた。また圧密圧力の大きさにより正規圧密領域、圧密降伏応力付近、有効土かぶり応力付近に分けて示してある。 Mesri らによると $C_\alpha/C_c = 0.05 \pm 0.02$ とされているが今回の結果もほぼ同様であった。

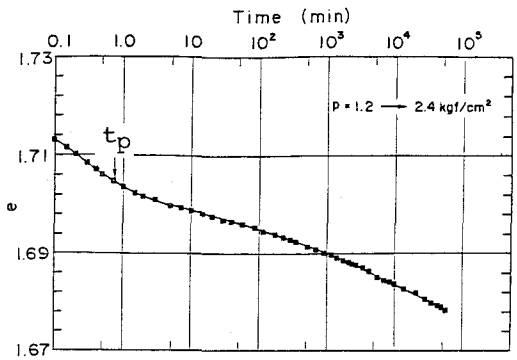

図-9(a) 時間沈下曲線（過圧密領域）

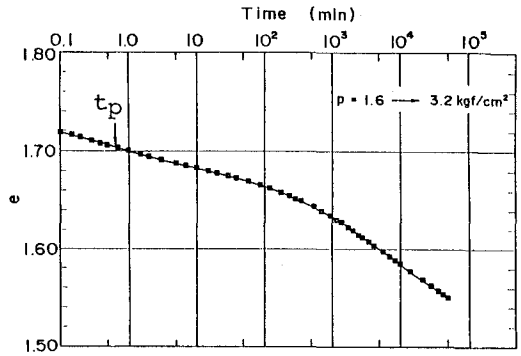

図-9(b) 時間沈下曲線（過圧密領域）

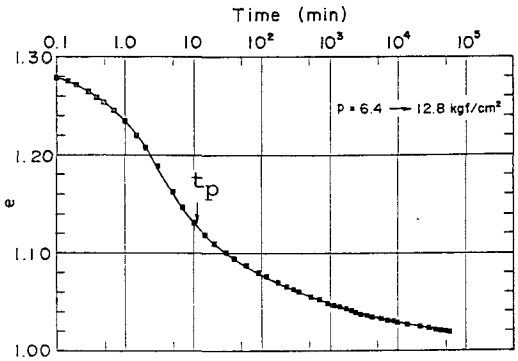

図-9(c) 時間沈下曲線（正規圧密領域）

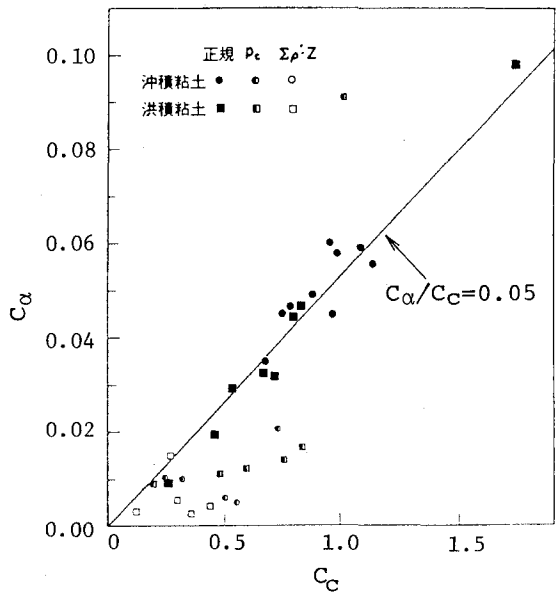

図-10 圧縮指数 C_c と二次圧縮指数 C_α の関係

4．せん断特性

1） 乱さない洪積粘土の三軸圧縮特性

洪積粘土のせん断特性を調べるため、一連の等方圧密非排水三軸圧縮試験（ＣＩＵ試験）を行なった。試験は乱さない試料から17本のサンプラーを選んでそれぞれの試料について圧密圧力を４～６種類変化させて過圧密領域および正規圧密領域の範囲で圧密し、圧密終了後ひずみ速度0.03%/min で圧縮した。

図-11 は、最大軸差応力の1/2 として求めた非排水強度と有効圧密圧力 σ_c' との比 c_u/σ_c' （強度増加率）を、圧密降伏応力 p_cで正規化した圧密圧力 σ_c'/p_c に対してプロットしたものである。σ_c'/p_c が１以上の場合は試料を三軸セル内で p_c 以上すなわち正規圧密領域まで圧密した後圧縮したことを意味し、σ_c'/p_c が１以下のときは過圧密状態で圧縮している。図-11 は今回の結果を沖積粘土（深度 4.5～14.3 m）と洪積粘土（深度33.0～ 325.0m）とに大別してまとめている。 図をみると洪積粘土の c_u/σ_c' と σ_c'/p_c の関係は粘土の種類によらずほぼ一様の傾向を示していることがわかる。また、沖積粘土と比較した場合は、各圧密圧力において洪積粘土の c_u/σ_c' の方が小さくなっている。図-12 は各試料を正規圧密領域まで圧密した後に圧縮したときの強度増加率と塑性指数 I_p との関係を示したものである。今回試験した洪積粘土の I_p は20～70の範囲でばらついているが、図のように c_u/σ_c' は I_p と関連が無くほぼ一様である。また洪積粘土と沖積粘土を比べると洪積粘土の c_u/σ_c' は約10～20%小さい。図-13 は各試料の正規圧密状態での ϕ' を$c=0$ として求め I_p に対してプロットしたものである。図のように洪積粘土の ϕ' は24°～35°の範囲でばらつき強度増加率と同様に塑性指数との関連がみられない。また、洪積粘土は沖積粘土に比べ 0°～10°小さくなっている。図-14 は正規圧密状態まで圧密したときの強度増加率 c_u/σ_c' および ϕ' について深度ごとの変化をみたものである。図をみると c_u/σ_c' 、ϕ' とも深度20m以内の沖積粘土の値が大きく洪積粘土に関しては深度による変化があまりみられない。

以上、図-11 ～14をみると洪積粘土の基本的なせん断特性は、深度や塑性の違いによらずほぼ一様であり、沖積粘土に比べ小さくなっていることがわかった。

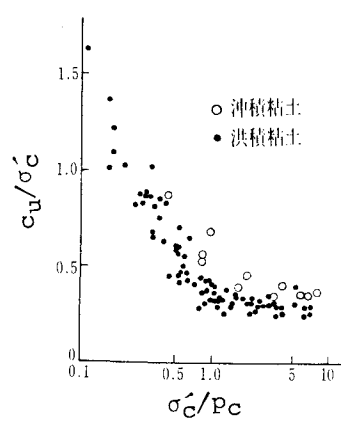

図-11 強度と圧密圧力の関係

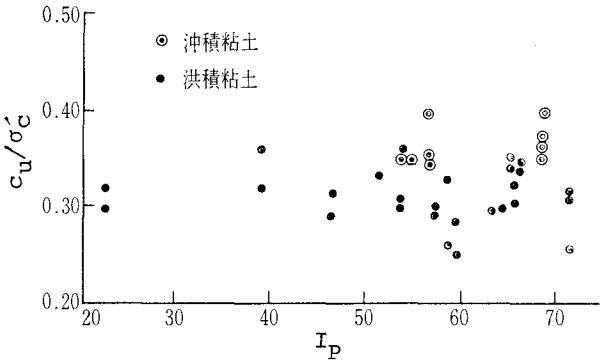

図-12 塑性指数と強度増加率の関係

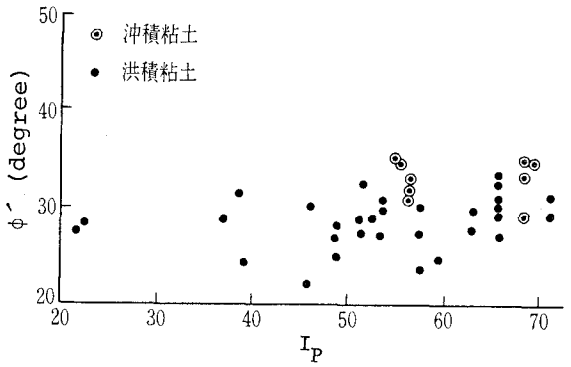

図-13 塑性指数と ϕ' の関係

2) 練り返した洪積粘土と乱さない洪積粘土の比較

洪積粘土の特徴は堆積年代が長くいわゆる年代効果を有することである。この年代効果の影響を調べるため洪積粘土を練り返して再圧密した試料の三軸試験を行ない、乱さない場合との比較を行なった。

表-1は三軸ＣＩＵ試験に用いた洪積粘土の主な物理特性を示している。練り返した試料は大きな塊がなくなるように液性限界以上の含水比で６時間以上練り返し、乱さない試料について標準圧密試験から求めた圧密降伏応力と等しい鉛直荷重で再圧密した。再圧密した試料の含水比は、それぞれNo.56-9 D-86 で20%、No.57-30D-106で34%であり、乱さない試料に比べ15～10%低く、せん断開始時の含水比をみても15～5 %低かった。

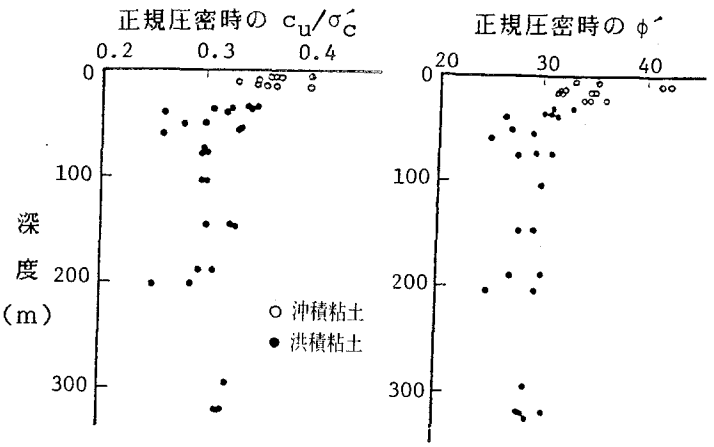

図-14 強度増加率と ϕ' の深度方向の変化

図-15 に応力ひずみ曲線を示す。乱さない試料と再圧密した試料の応力ひずみ関係はともに過圧密領域では正規化した圧密圧力 σ_c'/p_c に依存しているが、それぞれの σ_c'/p_c での応力ひずみ関係は両者で似た傾向を示している。ただし軸差応力最大時以後の挙動をみると、乱さない試料では軸差応力が低下するが再圧密試料の場合は一定になる。

図-16 は非排水圧縮強度と圧密圧力の関係である。乱さない試料と再圧密試料とも正規圧密領域で c_u/σ_c' の値は一定となるが、全体的に再圧密した試料の c_u/σ_c' が大きくなる傾向が見られた。しかし含水比が15～5 %も違うことを考えると両者の強度差は大きくないといえる。

図-17 に軸差応力最大時の間隙水圧係数 A_f と圧密降伏応力と圧密圧力の比 p_c/σ_c' との関係を示す。ここで、p_c/σ_c' は過圧密比に相当する。p_c/σ_c' が大きいところでは乱さない試料と練り返し試料とのA_fの差は小さいが、正規圧密領域では再圧密試料の A_f の方がやや小さな値を示す傾向にある。また、正規圧密領域での再圧密試料の A_f の値はこの地域の沖積粘土の A_f の値とかなりよく一致している。図-18 は軸差応力最大時の Mohr の応力円の頂点を示したものである。この図から、

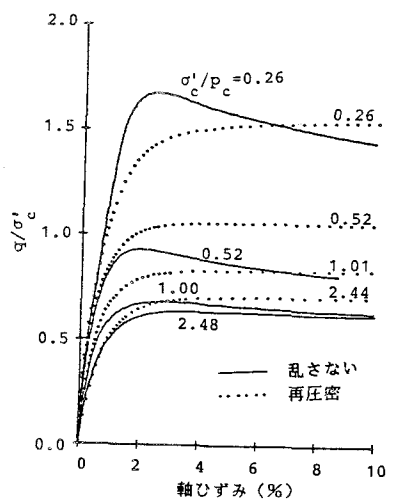

図-15 応力とひずみの関係

試料名	深度 (m)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数 (%)	自然含水比 (%)	砂分含有率 (%)	土かぶり圧 (kgf/cm)	圧密降伏応力 (kgf/cm)
57-30 D-106	190.6-191.5	89.7	32.4	57.3	50.8	0.8	14.1	18.1
56-9 D-86	318.9-319.8	54.8	32.4	22.4	31.1	0.7	26.2	38.5

表-1 実験に用いた洪積粘土の主な物理特性

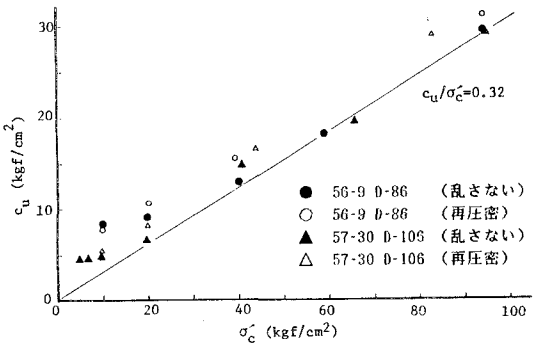

図-16 非排水強度と圧密圧力の関係

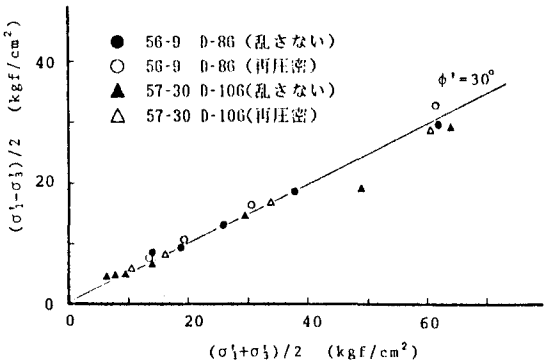

図-17 軸差応力最大時の応力状態

再圧密しても内部摩擦角 ϕ' はあまり変化しないことがわかる。

以上の結果をまとめると、年代効果を有すると考えられる乱さない試料と練り返し後再圧密した試料では、内部摩擦角にはあまり顕著な差は見られないが正規圧密領域での間隙圧係数に差があり、そのため正規圧密時の非排水強度は再圧密試料の方が大きくなる。しかし含水比の差から予想されるほどの強度差はなかった。

今回の再圧密試料の含水比は乱さない試料にくらべてかなり小さくなったが、この点について検討してみる。図-19 は、P_C の異なる4種類の乱さない試料について、標準圧密試験の結果から正規圧密領域での液性指数 I_L と圧密圧力の関係を求めたものである。図中には他の約 200本の試料について自然含水比から求めた I_L と圧密降伏応力との関係の範囲も示している。なお、ここで I_L を用いたのはそれぞれの粘土の含水比の違いを正規化して比較するためである。この地盤では深度が大きくなるにつれて P_C が増加し推積年代も古くなっているが、図をみると、P_C が大きく推積年代が古いと考えられる粘土ほど正規圧密領域での I_L～log p 関係が右方向へ移動していることがわかる。これは、年代効果を受けた土が同じ圧密圧力のもとでより大きな含水比になる傾向があることを示している。したがって、練り返した試料の含水比が乱さない試料の含水比に比べて小さくなった原因のひとつは、練り返しによって年代効果が消えることによると考えられる。

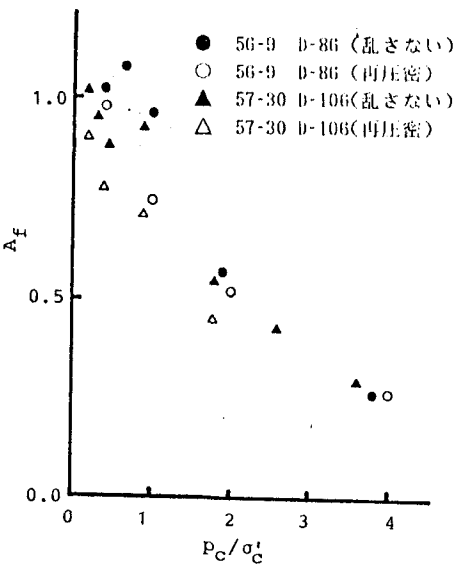

図-18 間隙水圧係数 A_f

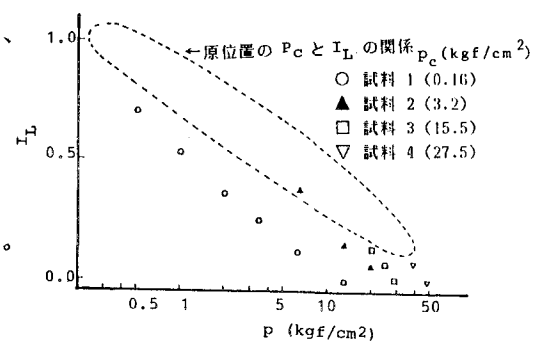

図-19 液性指数と圧密圧力の関係

5. まとめ

関西国際空港建設のために実施された土質調査の結果にもとづき大阪湾泉州沖地盤の力学特性について述べてきた。この土質調査の特徴は海洋において最大 400mにおよぶ大深度のボーリングを行ない乱さない試料の採取したことである。これらの試料、特にその大部分である洪積粘土を用いて行なった一連の土質試験結果をまとめると、e－log p 曲線において圧密降伏応力が明瞭に現われること、強度が沖積粘土に比べ10～20%小さいことなどの特徴があるが、全体に深度による力学特性の変化は大きくなくまた従来経験された海成粘土の力学特性との大きな違いはみられなかったといえる。

新空港の建設は埋立事業としては前例のない大規模なものとなるが、工事の進捗にともない今後沈下測定などのデータが得られ室内試験結果やそれにもとづく解析結果との対比が行なわれることを期待したい。

最後に試験結果を提供していただいた運輸省第３港湾建設局に感謝の意を表す。また、物理試験結果は港湾技術研究所小川富美子技官によって行なわれたものであることを付記する。

参考文献

１）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，昭和59年 9月
２）小川富美子・松本一明：港湾地域における土の工学的諸係数の相関性，港湾技術研究所報告，第17巻，第３号，昭和53年 9月