

粘性土の残留有効応力と圧密特性に及ぼす砂分含有率の影響

Effect of Sand Contents on Residual Effective Stress and Consolidation Characteristics of Cohesive Soils

田中政典 Masanori TANAKA (港湾空港技術研究所地盤・構造部)
亀井健史 Takeshi KAMEI (島根大学総合理工学部)

砂分を多く含む地盤の残留有効応力(σ'_r)と圧密特性を明らかにするため、砂分含有率を変化させた再構成試料を作製し、物理試験、残留有効応力測定試験および圧密試験を行った。本論文では、粒径加積曲線の通過質量百分率 60%に相当する粒径(D_{60})、 σ'_r 、圧密係数(c_v)、圧縮指数(C_c)および体積圧縮係数(m_v)の相互関係について考察している。この結果、 σ'_r 値と圧密特性との間には強い相関が認められ、 c_v 値が $100\text{cm}^2/\text{d}$ 以下の粘性土においては、 σ'_r 値と c_v 値の相関性が非常に高いことが明らかとなった。また、 c_v 値が大きな粘性土ほど σ'_r 値を得るまでの時間は短くなるとともに σ'_r 値が小さくなること、さらに D_{60} 値から σ'_r 値や c_v 値がある程度予測可能なことが示唆された。

キーワード：残留有効応力、圧密特性、砂分含有率、粒度試験 (IGC : D02, D05)

1. はじめに

港湾における構造物の設計は、対象地盤を粘性土地盤あるいは砂質地盤に分類し、粘性土地盤は非排水せん断強さ、砂質地盤は排水条件におけるせん断強さによって検討がなされる。ここでいう粘性土地盤とは砂分含有率が 50%未満のものであり、砂質地盤とは砂分含有率が 80%以上のものを指しており、塑性指数等によるさらなる分類はなされていない。砂分含有率が 50~80%のものは中間土と呼ばれ、そのせん断強さは慎重に検討を行うことになっている。一方、圧密特性については圧密現象が当然粘性土地盤を前提としていることもあって、砂分を含む地盤の圧密特性に関しての記述はなされていない。しかしながら、港湾域には中間土地盤も多く存在し、砂分含有率が圧密特性に及ぼす影響を把握しておくことは実務上重要な問題となる。

砂分含有率が圧密特性に及ぼす影響について、倉田・藤下¹⁾は砂分含有率の異なる砂・粘土混合土を作製し、体積圧縮係数(m_v)、圧縮指数(C_c)や圧密係数(c_v)などのデータから、圧密特性は粘土分含有率が 20~40%の間で大きく変化することを示した。その後、小川・松本²⁾は港湾地域で採取された膨大な不攪乱試料の実験データを整理し、物理特性と C_c 値、 m_v 値および c_v 値との関係を明らかにした。また、中瀬³⁾は砂分含有率の異なる再構成試料を作製して、標準圧密試験の適用限界について検討し、砂分含有率が 60%を越えると c_v 値や透水係数(k)が大きく変化することを指摘した。倉田・藤下¹⁾、小川・

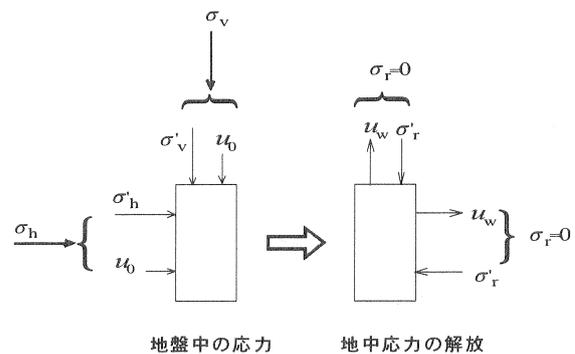


図-1 採取試料の応力変化

松本²⁾や中瀬³⁾が実験的な研究であったのに対して、大嶺⁴⁾は、混合土の圧縮挙動をモデル化することを試み、混合土中の粗粒子同士が接触するのかどうかによって圧密特性は影響を受け、細粒分が約 18%以下になると C_c 値や m_v 値が一定になることを示した。また、亀井⁵⁾は砂分含有率が 80%以上で塑性指数(I_p)が 5 以下の土は非圧密層、砂分含有率が 50%以上で I_p 値が 25 以上は圧密層として扱えることを示した。砂分含有率が圧密特性に与える影響の研究については、あまり多くの文献は見られないが、これらの研究から、 C_c 値と I_p 値の間には直線的な関係があること、 c_v 値が $1,400\text{cm}^2/\text{d}$ 程度以上の場合、 c_v 値の信頼性を再検討する必要のあることなどの結論が見出されている。

一方、砂分含有率が増加すると圧密特性のみならずせん断特性にも当然影響を及ぼすことは Nakase & Kamei⁶⁾の研究からも明らかである。また、せん断特性については、残留有効応力(σ'_r)の影響を強く受けることを奥村⁷⁾、

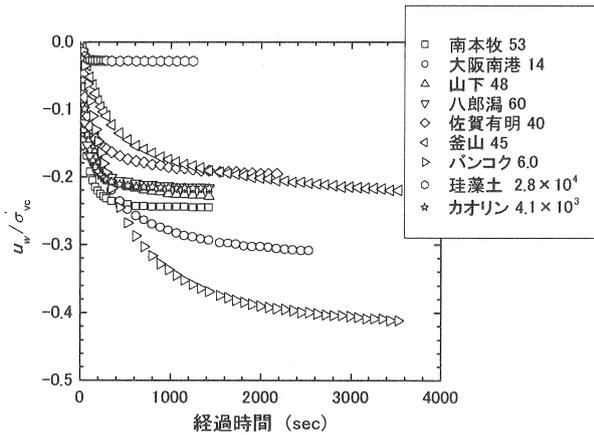


図-2 間隙水圧の測定

三田地・工藤⁸⁾や田中⁹⁾などが指摘している。そこで、本研究では砂分含有率が圧密特性に与える影響について σ'_r 値との関係に着目して検討することとした。

地中の土には鉛直応力(σ_v)と水平応力(σ_h)が働いており、間隙水圧(u_w)は静水圧を示している。この土がサンプリングによって地上に回収されると、応力は解放され $\sigma_v=0$ および $\sigma_h=0$ になる。この時の土の応力変化を図-1に示す⁷⁾。サンプリングされた試料は地中応力が解放されるので、試料に働いている応力は、 σ'_r と残留間隙水圧($-u_w$)のみであり、これらは釣り合っている。すなわち、 $\sigma'_r = -u_w$ となり、 $-u_w$ を測定することにより σ'_r 値を知ることができる。田中¹⁰⁾は国内外の地盤において σ'_r 値を測定し、 σ'_r 値に影響を与える因子について検討を行った。図-2に再構成した7種類の自然粘土と2種類の人工試料から得られた間隙水圧(u_w)と経過時間との関係を示す。凡例中の数字は c_v (cm^2/d)を示す。図から、 σ'_r 値は土の種類によって大きく異なることや c_v 値が大きな土ほど σ'_r 値が一定となる時間が短いことがわかる。以上のような既往の研究結果から、粘性土の砂分含有量は c_v 値や σ'_r 値に大きな影響を与え、それらの間には何らかの関係が存在するものと推察される。

そこで本論文では、シンガポール粘土に豊浦砂を混合した砂分含有率の異なった再構成試料を作製し、物理試験、残留有効応力測定試験および圧密試験を行うことによって、砂分含有率が c_v 値や σ'_r 値に及ぼす影響について検討している。また、これまで σ'_r 値は試料の乱れの指標や判定に主に使われてきたが、圧密特性との関連についても考察した。

2. 試験方法

2.1 残留有効応力測定試験

σ'_r 値の測定方法は、JGS 0527「不飽和土の三軸圧縮試

表-1 使用した試料の物理試験結果

試料名	ρ_s (g/cm^3)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p
シンガポール粘土	2.692	1	29	70	85	31	54
豊浦砂	2.641	99	1	0	NP	NP	NP

表-2 混合土の物理試験結果

シンガポール:豊浦砂	土粒子密度 (g/cm^3)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)
S:T=100:0	2.692	1	29	70	85	31
S:T=75:25	2.670	26	18	56	63	20
S:T=50:50	2.666	50	12	38	43	17
S:T=25:75	2.651	74	8	18	28	NP
S:T=0:100	2.641	99	1	0	NP	NP

験方法」に示されているマトリックスサクシヨンの測定方法を準用した。 σ'_r 値の測定方法は、飽和したセラミックディスクを大気圧状態にして、その時の間隙水圧(u_w)を初期値(ゼロ)とする。次に、供試体をセラミックディスクの上に静置し、 u_w が一定となった値をもって σ'_r 値とした。 σ'_r 値の計測に用いた装置と試験方法の詳細は、田中¹⁰⁾を参照されたい。

2.2 圧密試験

圧密試験はJIS A 1227「土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法」に従って実施した。ひずみ速度は0.02%/min、背圧は98kPaで実施した。

3. 用いた試料と試料の作製方法

3.1 試料

用いた試料はシンガポール粘土と豊浦砂である。それらの物理試験結果を表-1に示す。シンガポール粘土は、カオリナイトを主体とする粘性土である。我が国の粘性土には工学的特性に影響を及ぼすと言われる珪藻遺骸¹⁾が含まれており、実験結果にこの影響が出るものと考え、珪藻遺骸のほとんど含まれていないシンガポール粘土を使用した。シンガポール粘土の土粒子密度(ρ_s)は $2.692\text{g}/\text{cm}^3$ であり、我が国の港湾域に存在する海成粘性土の ρ_s とほぼ同じ値である²⁾。また、シンガポール粘土のコンシステンシー特性も我が国の海成粘性土のそれと類似しており、塑性図では(CH)に分類される。豊浦砂の ρ_s は $2.641\text{g}/\text{cm}^3$ 、液性限界(w_L)と塑性限界(w_p)はともにNPである。

3.2 混合試料

混合試料はシンガポール粘土に豊浦砂を加え、砂分含有率を調整した人工試料を作製した。シンガポール粘土に豊浦砂を混合した試料のコンシステンシー特性を表-2に示す⁹⁾。混合率はそれぞれ乾燥質量比で100:0、75:25、50:50、25:75、0:100である。表中の記号Sはシンガポール

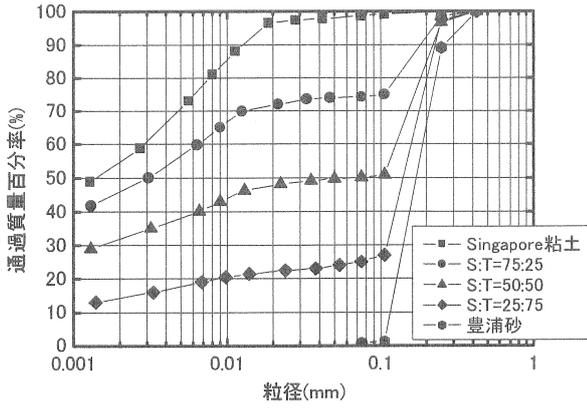


図-3 混合土の粒径加積曲線

粘土，Tは豊浦砂を示しており，この混合土をST混合土と呼ぶこととする．ST混合土の ρ_s は砂分含有率が高くなるのに従って，2.692から2.641に減少していく．コンシステンシー特性は砂分含有率の増加に伴って， w_L および w_p ともに減少し，砂分含有率が75%を越すとNPとなる．

ST混合土の粒径加積曲線を図-3に示す．砂分含有率が高くなるのに従って，粒径加積曲線は右側へ移動していく．すなわち，全体質量に占める大きな粒径の砂分が多くなっていくことを意味している．また，砂含有率が高くなると，0.25mmふるいから0.106ふるいの間で不連続現象が見られるようになってくる．これはST混合土を作製するにあたって，シンガポール粘土と豊浦砂とを単に混合しているだけであり，粒径の不連続性を調整していないためである．

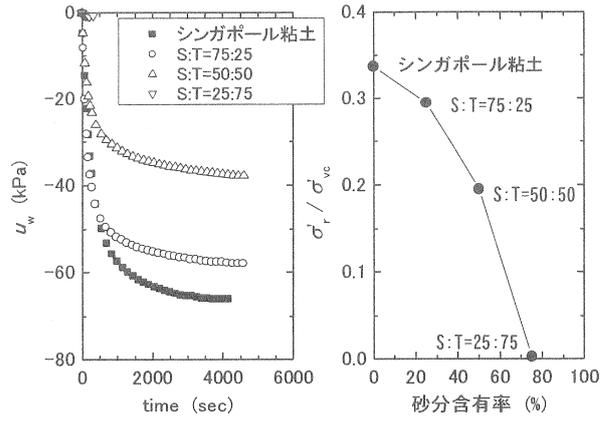
3.3 試料の作製方法

本実験に用いた再構成試料は，内径80mm，高さ500mmのアクリル円筒の圧密容器を用いて，所定の圧力を一定時間載荷して作製した．なお，本論文では特に断らない限り，予圧密圧力(σ'_{vc})は196kPa，載荷時間は $3 \cdot t_{90}$ である．ここに， t_{90} は \sqrt{t} 法における圧密度90%に対する時間である．再構成試料の作製方法の詳細は田中ら¹⁰⁾を参照されたい．

4. 実験結果

4.1 残留有効応力

砂分含有率と σ'_r 値との関係を図-4に示す．図-4(a)にST混合土の u_w 値と経過時間の測定例を示す．S:T=25:75のST混合土を除き，計測の初期段階では， u_w 値は時間の経過と共に急激に減少し，1,000秒を越す頃から時間の増加に対する u_w 値の減少傾向は小さくなっていく．これらの混合土の u_w は70~80分で一定の値となった．S:T=25:75のST混合土では， u_w 値は0.8kPaと非常に小さく測定され，約5分で一定となった．砂分含有率の増



(a) 間隙水圧の測定例 (b) σ'_r 値と砂分含有率

図-4 砂分含有率と残留有効応力

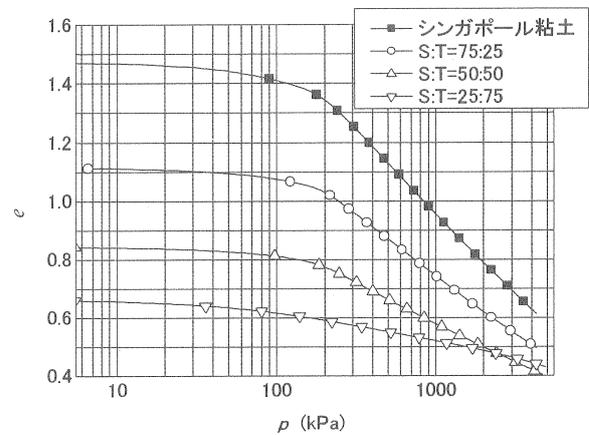


図-5 砂分含有率と e - $\log p$ 曲線

加に伴って u_w 値が一定となる時間は短くなる傾向が認められる．また， u_w 値は砂分含有率の増加に伴って大きく減少していることがわかる．これは，砂分含有率の増加に伴って試料が σ'_r を保持できなくなってくるためと考えられる．図-4(b)は σ'_r 値と砂分含有率との関係を示す．縦軸は σ'_{vc} で正規化した σ'_r 値は u_w が一定となった時の値である．すべての混合土で砂分含有率の増加に伴って σ'_r 値は小さくなっていることがわかる．また，これらの混合土の σ'_r 値の減少傾向はほぼ直線的であり， σ'_r 値は砂分含有率の影響を強く受けていることがわかる．

4.2 圧密特性

図-5に砂分含有率の変化に対する e - $\log p$ 曲線を示す．シンガポール粘土の間隙比(e)は初期間隙比(e_0)を示す1.47程度から p 値の増加に伴って緩やかに減少していき，圧密降伏応力(p_c)の226kPaを越すと p 値の増加に伴って大きく減少する．この時の C_c 値は0.59であった．砂分含有率が高くなるのに従って， e_0 値は減少し， C_c 値も小さくなり，圧縮しにくくなる． p_c 値はシンガポール粘土，S:T=75:25およびS:T=50:50混合土ではほとんど変化が見

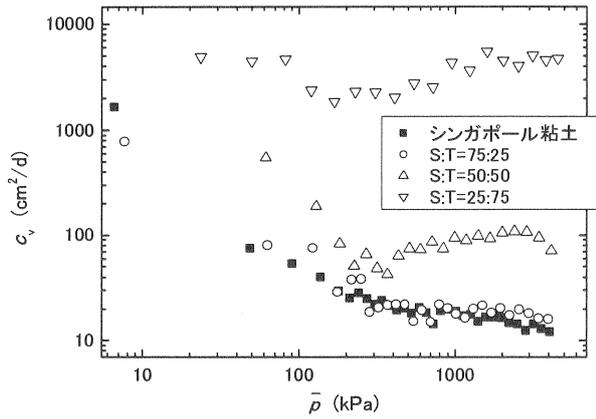


図-6 砂分含有率と $c_v\text{-log}\bar{p}$

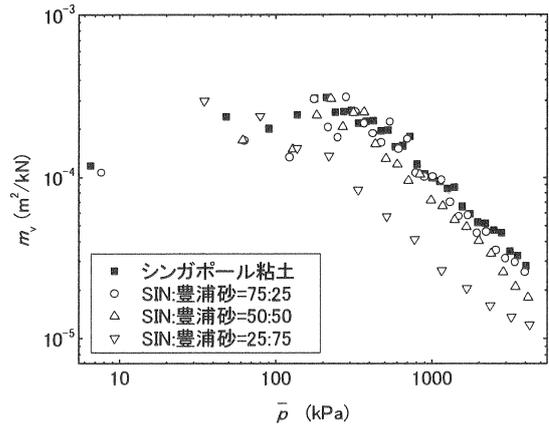


図-7 砂分含有率と $m_v\text{-log}\bar{p}$

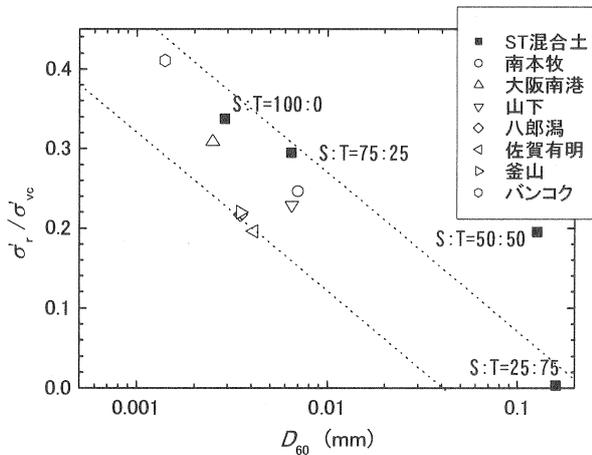


図-8 残留有効応力と 60%粒径

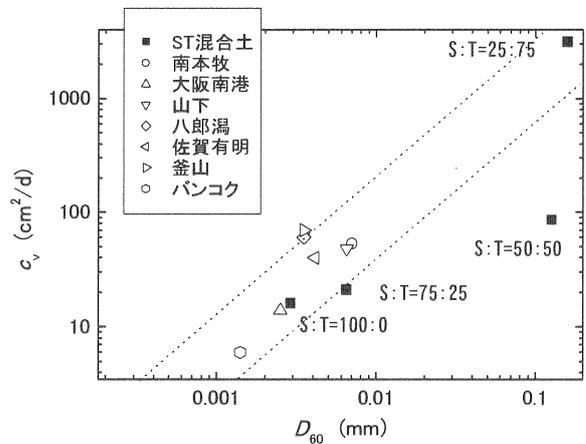


図-9 圧密係数と 60%粒径

られない。これは試料作製時の σ'_{vc} 値が同じであるためと考えられる。なお、S:T=25:75 混合土では p_c 値の算出が困難であった。

図-6 に $c_v\text{-log}\bar{p}$ 曲線を示す。 c_v 値は正規圧密領域における平均値として求めた。シンガポール粘土、S:T=75:25、S:T=50:50、S:T=25:75 混合土の c_v 値は、それぞれ 16、21、86 および $3,143\text{cm}^2/\text{d}$ であった。砂分含有率の増加に伴って c_v 値は大きくなる。また、シンガポール粘土と S:T=75:25 混合土の c_v 値はそれぞれ 16 および $21\text{cm}^2/\text{d}$ を示しており、大きな変化は認められなかった。

図-7 に $m_v\text{-log}\bar{p}$ 曲線を示す。シンガポール粘土、S:T=75:25 および S:T=50:50 混合土の m_v 値は、 p_c 値を越えると急激に減少し、砂分含有率の増加に伴ってその値は小さくなる。荷重の増加に対する m_v 値の傾きはいずれの試料とも大きな変化は認められなかった。 $1,000\text{kPa}$ における m_v 値は、シンガポール粘土、S:T=75:25、S:T=50:50 および S:T=25:75 混合土でそれぞれ 1.02×10^{-4} 、 8.58×10^{-5} 、 6.84×10^{-5} および $3.19 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{kN}$ であり、砂分含有率の増加に伴って小さくなっていくことがわかる。

5. 考察

5.1 粒度と残留有効応力および圧密係数

砂分含有率が変化することによって図-3 に示したように粒度分布は変化する。ここでは粒径加積曲線の通過質量百分率 60%に相当する粒径(D_{60})と σ'_r 値および c_v 値について検討を行う。 D_{60} 値は多くの粘性土で粒径加積曲線から読み取ることのできる値であり、ここでは、 D_{60} 値を指標とした。図-8 に ST 混合土の σ'_r 値と D_{60} 値の関係を図-2 に示した南本牧、大阪南港、山下、八郎潟、佐賀有明、釜山およびバンコク粘土のデータとともに表す。なお、縦軸は σ'_{vc} で正規化した。ST 混合土では S:T=50:50 混合土試料を除き、 σ'_r/σ'_{vc} 値は D_{60} 値の増加に伴いほぼ直線的に減少する。S:T=50:50 混合土試料の値がばらついた原因として、図-3 に示したように粒径加積曲線が不連続であり、この試料の D_{60} 値が他の試料のそれよりも著しく不連続の影響を受けたものと考えられる。南本牧粘土を始めとするその他の粘土においても、 D_{60} 値の増加に対して σ'_r/σ'_{vc} 値は減少しており、 D_{60} 値から σ'_r/σ'_{vc} 値

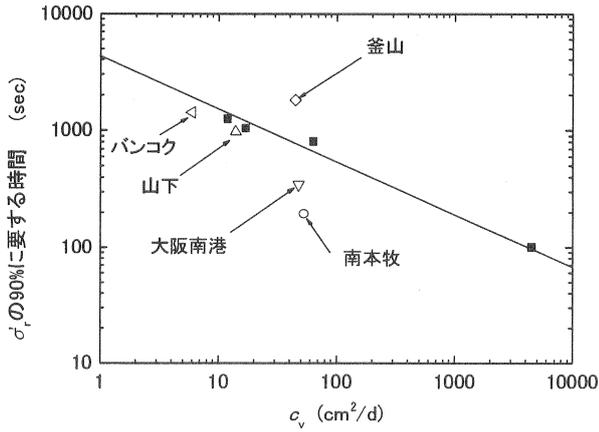


図-10 σ_r の90%に要する時間と c_v の関係

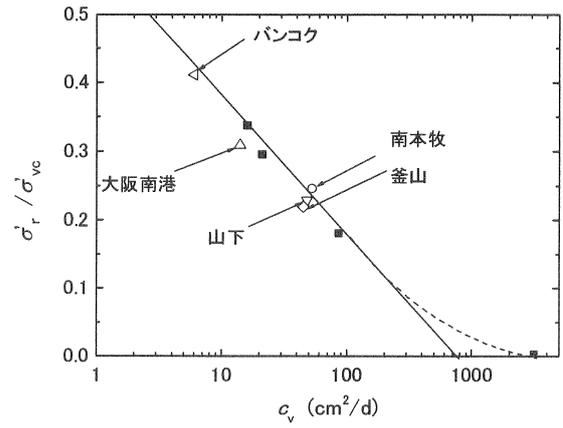


図-11 残留有効応力と圧密係数

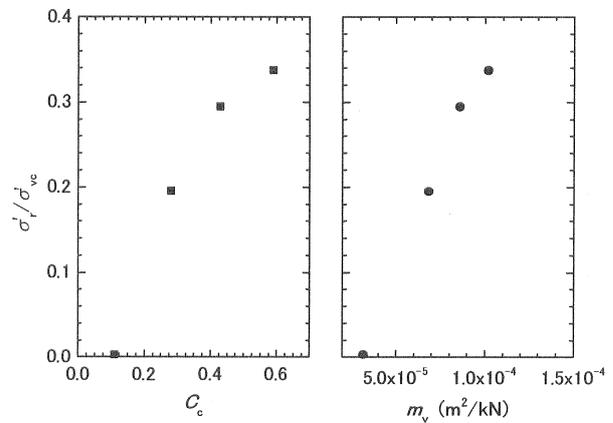
を予測できる可能性を示唆している。

図-9 に c_v 値と D_{60} 値との関係を示す。 σ_r/σ'_{vc} 値と D_{60} 値の関係で述べた理由から S:T=50:50 混合土試料のデータを除くと、ばらつきは認められるものの D_{60} 値が大きくなるのに伴って c_v 値はほぼ直線的に大きくなる傾向にある。ここに示した結果から、若干のばらつきはあるものの D_{60} 値と σ_r 値や c_v 値間にはほぼ直線関係が認められることから、 σ_r 値と c_v 値についても相関関係があるものと容易に推定できる。このため、次に σ_r 値および c_v 値の関係について検討を行うこととする。

5.2 残留有効応力と圧密係数

残留有効応力測定試験においては u_w が一定となった値をもって σ_r 値としているので、経過時間は重要な要素となる。一方、 c_v 値は圧密時間を支配する係数であり、 σ_r 値や c_v 値には時間的な要素が深く関連しているものと考えられる。図-10 に u_w の値が σ_r 値の90%に要する経過時間と c_v 値との関係を示す。図-10にはST混合土の他、図-2に示した南本牧、大阪南港、山下、釜山およびバンコク粘土の σ_r が90%に要した経過時間と c_v 値との関係についても併せて示してある。この図から、 c_v 値が大きくなるのに伴って σ_r 値に達するまでの時間は短くなることが認められる。5種類の自然粘性土についてもほぼこのライン付近にあり、同様の傾向を示している。南本牧および大阪南港粘土については示したラインのやや下側に位置しており、大きな c_v 値の土にしては σ_r 値に達するまでの時間が短いことを示している。

図-11 に σ_r と c_v との関係を示す。縦軸は σ'_vc で正規化した。図-10と同様5種類の自然粘性土の σ_r も併せて示す。ST混合土の σ_r/σ'_{vc} 値は c_v 値が $100\text{cm}^2/\text{d}$ 程度までは c_v 値の増加に対して直線的に小さくなるが、 c_v 値がこれを越えると減少傾向は緩やかになる。その他の自然粘性土の σ_r/σ'_{vc} 値は c_v 値の増加に対して直線的に減少している。なお、自然粘性土の c_v 値は $100\text{cm}^2/\text{d}$ 以下である。本実験からでは σ_r 値が c_v 値に対して単調減少するのかわりに凸の減少傾向を示すのかは不明であるが、大きな c_v



(a) σ_r と圧縮指数 (b) σ_r と体積圧縮係数

図-12 残留有効応力と圧縮指数、体積圧縮係数

値を持つ土では σ_r 値がゼロとなることもありうるので、破線のような下に凸の曲線になることが予想される。本実験結果から、 c_v 値が $100\text{cm}^2/\text{d}$ 以下であれば、 σ_r 値と c_v 値との間には強い相関が認められる。一般に、 c_v 値が $100\text{cm}^2/\text{d}$ 以下の地盤は、取り扱いにくい軟弱地盤であることが多い。

5.3 残留有効応力とその他の圧密特性

ここでは σ_r 値とその他の圧密特性である C_c 値および m_v 値との関係について検討することとする。図-12 (a) に σ_r 値と C_c 値との関係を示す。縦軸は σ'_vc で正規化した。砂分含有率が増加する、すなわち、 C_c 値が減少することによって、 σ_r/σ'_{vc} 値も減少する傾向を示す。図から σ_r 値と C_c 値には強い相関がありそうである。図-12 (b) に σ_r 値と m_v 値の関係を示す。 m_v 値が小さくなるのに従って、 σ_r/σ'_{vc} 値もほぼ直線的に減少している。

これらの実験結果から、 σ_r 値からも圧密特性を予測できそうである。特に σ_r 値と c_v 値の関係は特定の条件の下では精度の高い予測が期待できる。 σ_r 値を求める残留有効応力測定試験は、圧密試験に先だって実施され、また、測定時間が短いので、いち早く σ_r 値を求めることによ

て圧密特性をある程度予測し、設計等に反映させることが可能となる。しかしながら、本研究では主に再構成試験の実験データによって考察を行っており、今後不攪乱試験を始めとした多くのデータの積重ねが必要であろう。

6. まとめ

砂分を多く含む地盤の残留有効応力(σ'_r)と圧密特性を明らかにするため、砂含有率の異なる混合土を作製して、残留有効応力測定試験および定ひずみ速度圧密試験を実施した。 σ'_r 値は圧密特性と強い相関が見られ、データを積み重ねることによって、 σ'_r による圧密特性の予測が示唆された。本研究から得られた知見を以下に列記する。

- 1) σ'_r 値と圧密特性との間には強い相関が認められた。特に、 c_v 値が $100\text{cm}^2/\text{d}$ 以下の粘性土において、 σ'_r 値と c_v 値の相関性が高い。
- 2) c_v 値が大きな粘性土ほど σ'_r 値を得る時間は短くなり、 σ'_r 値は小さくなる。
- 3) 粒径加積曲線の通過質量百分率 60%に相当する粒径 (D_{60})から σ'_r 値や c_v 値がある程度予測できることが示唆された。

参考文献

- 1) 倉田進, 藤下利男: 砂と粘土の混合土の工学的性質に関する研究, 運輸技術研究所報告, Vol.11, No.9, pp.389-424, 1961.

- 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, Vol.17, No.3, pp.30-43, 1978.
- 3) 中瀬明男, 中ノ堂裕文, 日下部治, 野村浩: 混合土の圧密特性について, 第13回土質工学研究発表会, pp.213-216, 1978.
- 4) 大嶺聖, 落合英俊, 林重徳, 梅崎健夫: 砂と粘土の混合土の圧縮特性, 第26回土質工学研究発表会, pp.403-404, 1991.
- 5) 亀井健史: 中間土の力学的特性, 土質工学会, ジオテクノート2, 中間土—砂か粘土か—第2章, pp.7-54, 1992.
- 6) Nakase, A. and Kamei, T.; Undrained shear strength of remoulded marine clays, Soils and Foundations, Vol., 28, No. 1, pp.29-40, 1988.
- 7) 奥村樹郎: 粘土のかく乱とサンプリング方法の改善に関する研究, 港湾技研資料, No.193, 145p., 1974.
- 8) 三田地利之, 工藤豊: サクシオンと一軸圧縮強度に基づく粘土の非排水強度推定法, 土木学会論文集, No. 541/III-35, pp.147-157, 1996.
- 9) 田中政典, 亀井健史, 林照悟: 砂含有量が粘性土のせん断特性に与える影響とその評価, 第48回地盤工学シンポジウム, pp.61-68, 2003.
- 10) 田中政典, 田中洋行, 三島理: 飽和粘性土の残留有効応力を支配する要因, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.219-229, 2002.
- 11) 田中政典, 田中洋行, 亀井健史, 林照悟: 珪藻含有量が土の工学的性質に与える影響, 第47回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 121-126, 2002.

(2005年7月29日 受付)