

再構成した有機質土のせん断特性

株式会社 興和 正会員 田中福光
足利工業大学 正会員 西村友良
荒井建設株式会社 荒井 健
同 上 山尾芳秀

1. まえがき

我国における高有機質土地盤は、そのほとんどが北海道にあるため、北海道での数多くの工事実績が現在の高有機質土地盤に関わりをもつ工事の重要な資料となっている。最近の国土開発の急速な進展によって良好な地盤が減り、軟弱な地盤上にも道路や住宅地、工業団地などの建設が盛んに行われている。腐植した植物を多く含む高有機質土は、一般に海綿状の繊維性構造を形成しているため非常に多孔性で圧縮性に富んでいる。また、高有機質土の力学的特性は、高有機質土の独特な土構造の影響の他に、腐植植物の量や状態などによっても影響を受けるため、高有機質土地盤上では長期継続する圧密沈下や周辺地盤の変状などの工学的問題を生じている¹⁾。従って、高有機質土地盤上の工学的問題を解決するためには、高有機質土の圧密特性やせん断特性を把握することが必要である。利根川本川やその支流が集まる群馬県館林市周辺の地形は利根川の後背湿地であり、氾濫によって、腐植した植物を多く含む高含水比の「ぼっけ」とよばれる有機質土が広域に堆積している。本研究では、群馬県館林市の谷田川左岸で築堤施工時に発生したすべりの原因と考えられる「ぼっけ」の圧縮性およびせん断特性を明らかにするために、標準圧密試験と圧密非排水($\bar{C}U$)三軸圧縮試験を行なった。標準圧密試験では、圧密量や圧密曲線、圧縮指数、二次圧密係数を調べて「ぼっけ」の圧縮性を明らかにし、圧密非排水($\bar{C}U$)三軸圧縮試験では、過圧密・正規圧密状態における応力-ひずみ関係、有効応力経路を調べて「ぼっけ」のせん断特性を明らかにしている。また、自然地盤より良好な状態で試料のサンプリングが行えなかったために供試体は採取した「ぼっけ」の土塊を乱して、再構成した供試体を用いた。

2. 試料

有機質土「ぼっけ」は、群馬県館林市周辺に広域に渡り分布しており、また、腐植した植物を含み、高含水比の状態では堆積しているため道路敷設や造成工事の際に工学的問題を引き起こしている。試験に用いた試料は、有機質土「ぼっけ」が堆積している自然地盤より良好なサンプリングが行えず、また、三軸圧縮試験用の供試体寸法(直径5cm, 高さ10cm)にトリミング出来るようなまとまった土塊が得られなかった。そのため、採取した試料(自然試料)を気乾乾燥したあと粉碎し、0.85mmふるいに通過した試料をスラリー状にしたもの(攪乱試料)と、採取した試料をそのままスラリー状にしたもの(擬不攪乱試料)を直径15cmのCBRモールドに投入し、0.4, 0.6, 0.8, 1.0(kgf/cm²)の各圧密圧力で1週間予備圧密して飽和供試体を作成した。このように再構成した飽和供試体には、未分解植物の存在が確認されたが、擬不攪乱試料の方が攪乱試料より明確に見られた。表-1と表-2に自然試料、攪乱試料、擬不攪乱試料の物理的性質と初期状態を示す。ただし、表中の値は平均値である。また、表-2の初期状態より、攪乱試料の初期間隙比が予備圧密の応力に関わらずほぼ同値であるのは、攪乱試料の塑性指数が小さいこと、あるいは攪乱試料の粘着力が低いことが原因であると考えられる。

3. 試験方法

標準圧密試験は、採取した土塊および予備圧密した攪乱試料および擬不攪乱試料からカッターリングで試料を取り、直径6cm, 高さ2cmにトリミングした供試体を、圧密容器に設置した後、基準化されている「土の圧密試

Shear properties of reconstituted organic soils.

Fukumitsu TANAKA. Kowa Co., Ltd. Tomoyoshi NISHIMURA. Ashikaga Institute of Technology.

Ken ARAI. and Yoshihide YAMAOKA. Arai Construction Co., Ltd.

表-1 各試料の物理的性質

| | 自然試料 | 攪乱試料 | 擬不攪乱試料 |
|----------------------------|-------|-------|--------|
| Wn(%) | 17.5 | — | — |
| en | 3.89 | — | — |
| $\gamma_t(\text{gf/cm}^3)$ | 1.08 | 1.33 | 1.28 |
| $\rho_s(\text{gf/cm}^3)$ | 2.361 | 2.361 | 2.361 |
| WL(%) | 22.5 | 8.1 | 22.5 |
| WP(%) | 12.2 | 7.1 | 12.2 |
| IP(%) | 10.3 | 1.0 | 10.3 |
| Lig(%) | 2.2 | 2.4 | 2.2 |

表-2 各試料の試験前の初期状態

| | | 予備圧密(kgf/cm ²) | | | |
|--------|-------|----------------------------|------|------|------|
| | | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
| 自然試料 | W(%) | 17.5 | | | |
| | e | 3.89 | | | |
| | Sr(%) | 9.0 | | | |
| 攪乱試料 | W(%) | 8.5 | 8.0 | 8.3 | 8.4 |
| | e | 2.22 | 2.26 | 2.22 | 2.32 |
| | Sr(%) | 9.0 | 8.3 | 8.9 | 8.5 |
| 擬不攪乱試料 | W(%) | 18.6 | 16.8 | 14.9 | 14.6 |
| | e | 4.43 | 4.06 | 3.54 | 3.46 |
| | Sr(%) | 9.9 | 9.8 | 9.9 | 9.9 |

験方法」に従って試験を行った²⁾。また、圧密非排水(\overline{CU})三軸圧縮試験は、予備圧密した攪乱試料および擬不攪乱試料から直径5cm、高さ10cmにトリミングした供試体を二重セル構造の三軸圧縮試験機に設置した後、所定の有効拘束圧力(等方圧密時は σ_c 、せん断時は σ_c' と示す)を供試体に载荷して等方圧密試験を行った。ただし、各圧力段階は24時間である。等方圧密終了後、非排水条件にして軸ひずみ速度0.05(%/min)でせん断試験を行った。なお、供試体の飽和度を高めるため、等方圧密前に供試体の上下からバックプレッシャー $\sigma_{B.P.}=1.0(\text{kgf/cm}^2)$ を2時間与えた。表-3には三軸圧縮試験の応力条件を示し、表-4には標準圧密試験と圧密非排水(\overline{CU})三軸圧縮試験に用いた供試体のプロフィールを示す。

表-3 三軸圧縮試験の応力条件

| | | 正規圧密 | | 過圧密 | | | | | |
|-----|-----|------------|-----------------|------------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|
| | | OCR 1 | | OCR 2 | | | OCR 4 | | |
| | | σ_c | $\sigma_{B.P.}$ | σ_c | σ_c' | σ_c | | σ_c' | |
| | | | | 圧密 | 膨潤 | σ_c' | 圧密 | 膨潤 | σ_c' |
| 1.4 | 1.0 | 0.4 | 0.4 | — | — | — | — | — | — |
| 1.8 | 1.0 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.4 | 0.4 | — | — | — |
| 2.6 | 1.0 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 0.8 | 0.8 | 1.6 | 0.4 | 0.4 |
| 4.2 | 1.0 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 1.6 | 1.6 | 3.2 | 0.8 | 0.8 |
| 7.4 | 1.0 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 3.2 | 3.2 | 6.4 | 1.6 | 1.6 |

単位：(kgf/cm²)

表-4 各試験で使用した供試体の種類

| | | 自然試料 | 攪乱試料 | | | | 擬不攪乱試料 | | | |
|----------------------------|----------|------|----------------------------|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|
| | | | 予備圧密(kgf/cm ²) | | | | 予備圧密(kgf/cm ²) | | | |
| | | | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
| 標準圧密試験 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| \overline{CU} 三軸 圧縮試験 | 正規 圧密 | — | ○ | ○ | ○ | — | ○ | ○ | ○ | |
| | 過圧密 | — | — | — | ○ | — | — | — | ○ | |

○：使用

4. 試験結果

4.1 標準圧密試験

図-1は、自然試料の経過時間と圧密量の関係を示したものである。各圧密圧力における圧密量は、時間(log t)に対してほぼ直線的变化を示しているため、曲線定規法や \sqrt{t} 法の当てはめが難しく、一次圧密領域と二次圧密領域の区別が困難である。このことは、攪乱試料や擬不攪乱試料の経過時間と圧密量の関係にも同様なことが見られた。

図-2は、自然試料・攪乱試料・擬不攪乱試料のe-log P曲線を示したものである。各試料の間隙比は、圧密圧力の増加とともに減少しているが、自然試料および擬不攪乱試料の間隙比は、攪乱試料より変化が大きいので、自然試料および擬不攪乱試料は圧縮性が高いことが分かる。擬不攪乱試料中には、攪乱試料に比べて腐植植物の形状が残っているため、擬不攪乱試料のe-log P曲線は、攪乱試料より自然試料のe-log P曲線に近似している。また、各試料のe-log P曲線は、明確な急変部が見られず緩いカーブを示しているため、正規圧密領域と過圧密領域との区別が不明瞭であり、圧密降伏応力(P_c)や圧縮性の指標である圧縮指数(C_c)を求めることが困難である。特に、

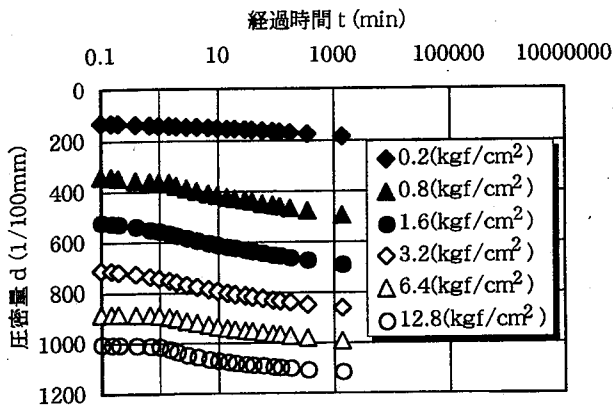


図-1 自然試料の圧密量

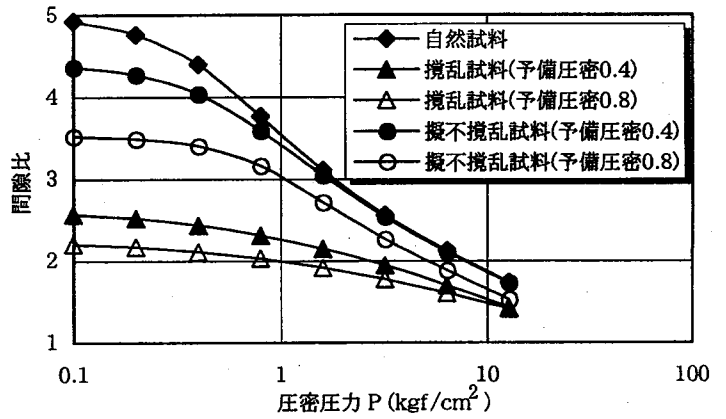


図-2 e-log(P)曲線

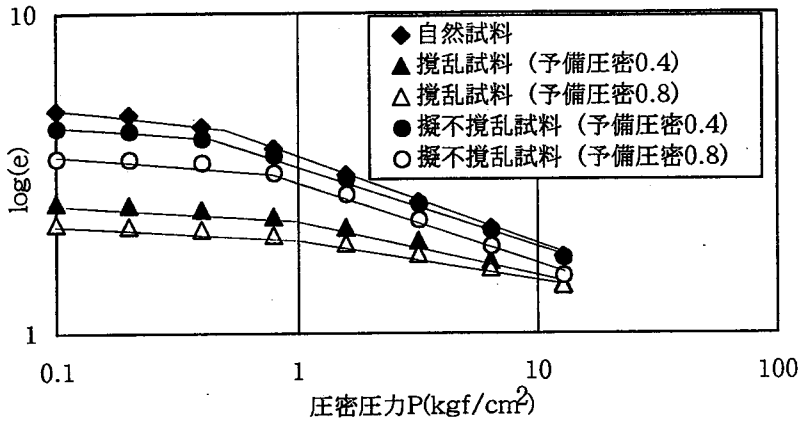


図-3 log(e)-log(P)関係

表-5 各試料の圧密降伏応力と圧縮指数

| 予備圧密 (kgf/cm ²) | 自然試料 | | 攪乱試料 | | 擬不攪乱試料 | |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | P _c | C _c | P _c | C _c | P _c | C _c |
| 0.4 | 0.52 | 1.99 | 1.02 | 0.85 | 0.54 | 1.89 |
| 0.6 | | | 1.10 | 0.93 | 0.60 | 1.93 |
| 0.8 | | | 1.20 | 0.83 | 0.74 | 1.69 |
| 1.0 | | | 1.50 | 0.90 | 1.20 | 1.73 |

P: (kgf/cm²), C_c: (cm²/kgf)

自然試料のe-logP曲線は、一般に言われている逆S字曲線に近いカーブを描いており、有機質土特有のe-logP曲線を示している。そこで、Oikawa³⁾の研究報告より、図-3に示すlog e-logP曲線で表示すると過圧密領域と正規圧密領域は2本の直線で表すことができ、圧密降伏応力と圧縮指数が求められることができる。圧密降伏応力は直線の交点として求め、圧縮指数は正規圧密領域の直線の傾きで求めている。表-5に各試料の圧密降伏応力(P_c)と圧縮指数(C_c)を示す。擬不攪乱試料の圧密降伏応力は、予備圧密の応力とほぼ一致しているが、攪乱試料は予備圧密の応力に関わらず1.0(kgf/cm²)以上である。これは、攪乱試料の塑性指数が小さいこと、あるいは攪乱試料の粘着力が低いことが原因であると考えられる。また、自然試料および擬不攪乱試料の圧縮指数は、攪乱試料の圧縮指数の約2倍であるので自然試料および擬不攪乱試料は、攪乱試料より圧縮性が高いことが明白である。さらに、自然試料と再構成した擬不攪乱試料の両者の圧縮指数の大きさが近いことは、自然状態の「ぼっけ」の圧縮性を再構成した供試体で検討できると考えられる。

図-4と図-5は、各試料の平均圧密圧力(P)と二次圧密係数(C_{αε})の関係を示したものである。ここで、二次圧密係数は、二次圧密領域の沈下速度の指標であり、時間(log t)に対する二次圧密領域の圧縮ひずみの傾きとして求めている。過圧密領域における各試料の二次圧密係数は、平均圧密圧力が高くなるとともに増大するが、自然試料の二次圧密係数は平均圧密圧力が0.6(kgf/cm²)の付近で減少し、擬不攪乱試料の二次圧密係数は、予備圧密の応力とほぼ同値の平均圧密圧力の大きさを減少している。また、攪乱試料の二次圧密係数は、予備圧密の応力が異なっても平均圧密圧力が1.0(kgf/cm²)のところで増加割合が減少している。この二次圧密係数の増加傾向が変化する平均圧密圧力を圧密降伏応力と述べた宮川⁴⁾らの考察を参考にすると、本実験では、log e-log P曲線で求めた圧密降伏応力(表-5参照)と二次圧密係数の増加傾向が変化する平均圧密圧力はほぼ一致しているので、C_{αε}-log P'関係から求められる平均圧密圧力は圧密降伏応力である。従って、「ぼっけ」の過圧密領域を拡大することで二次圧密沈下の低減ができると考えられる。また、正規圧密領域における「ぼっけ」の二次圧密係数は0.02~0.03であり、通常の泥炭の二次圧密係数に近い値を示している⁵⁾。

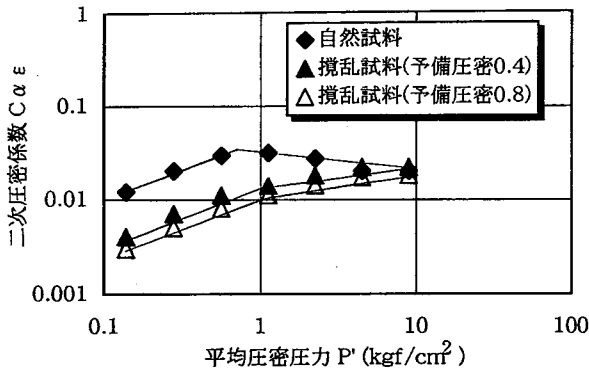


図-4 平均圧密圧力と二次圧密係数の関係
(自然試料と攪乱試料)

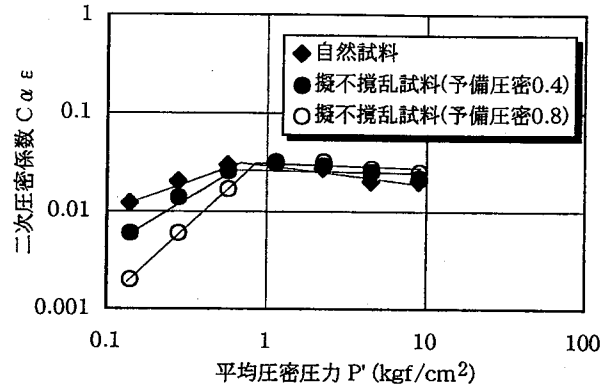


図-5 平均圧密圧力と二次圧密係数の関係
(自然試料と擬不攪乱試料)

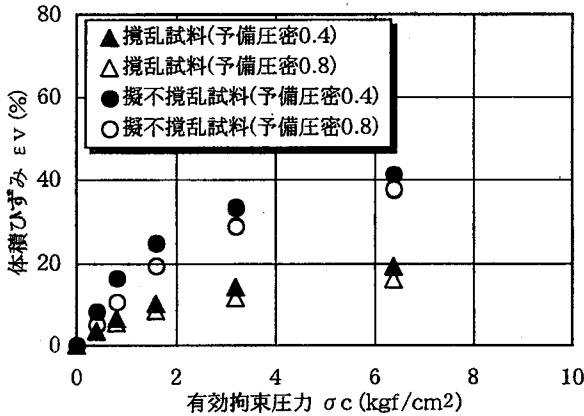


図-6 有効拘束圧力と体積ひずみの関係

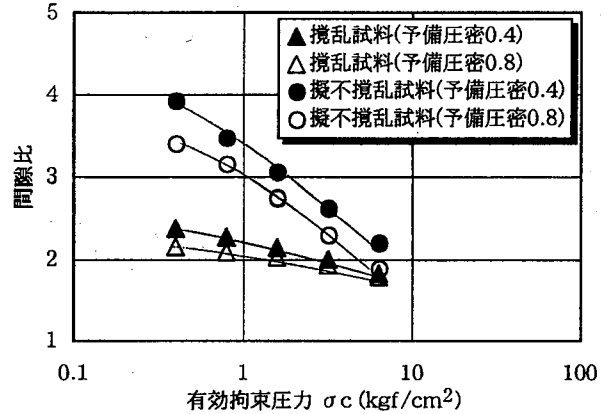


図-7 e-log(σc)関係

4.2 等方圧密試験

図-6は、攪乱試料および擬不攪乱試料の有効拘束圧力(σ_c)と体積ひずみ(ϵ_v)の関係を示したものである。両者の体積ひずみは、有効拘束圧力の増加に伴い増大している。また、有効拘束圧力を $6.4(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ まで増加したときの体積ひずみは、予備圧密の応力が異なっても攪乱試料では約20%、擬不攪乱試料では約40%であり、擬不攪乱試料の方が攪乱試料より大きな体積ひずみを示している。これは、擬不攪乱試料の初期間隙比が攪乱試料より大きいこと、あるいは擬不攪乱試料に含まれている腐植植物の形状が攪乱試料より残っていることが影響していると考えられる。

図-7は、攪乱試料および擬不攪乱試料の $e-\log \sigma_c$ 関係を示したものである。各試料の間隙比は、有効拘束圧力の増加にともない減少しているが、擬不攪乱試料の方が攪乱試料より初期間隙比が大きいため、間隙比の減少が大きいことを示している。また、各試料の $e-\log \sigma_c$ 関係は、標準圧密試験で求めた $e-\log P$ 曲線と同様に、明確な急変部が見られず緩いカーブを示しており有機質土特有の $e-\log \sigma_c$ 関係を示しているため、正規圧密領域と過圧密領域の区別が不明瞭であり、圧縮性の指標である圧縮指数(Cc)を求めることが困難である。そこで、Oikawa³⁾の研究報告をもとにして、図-8のように $\log e-\log \sigma_c$ 関係で示すと過圧密領域と正規圧密領域は2本の直線で表すことができ、圧縮指数の算定が可能となる。各試料の圧縮指数を表-6に示す。等方圧密試験で得られた擬不攪乱試料の圧縮指数は、標準圧密試験で得られた圧縮指数(表-5参照)とほぼ一致している。また、擬不攪乱試料の圧縮指数は、攪乱試料の約2~3倍を示しており、擬不攪乱試料は、攪乱試料より圧縮性が高いことが分かる。従って、有機質土「ぼっけ」の圧縮性は、応力状態が一次元圧縮あるいは等方圧縮であってもほぼ同じであることが明白である。

4.3 せん断試験(非排水条件)

図-9は、正規圧密状態における攪乱試料および擬不攪乱試料の軸ひずみ(ϵ_a)とせん断応力(q)の関係を示した

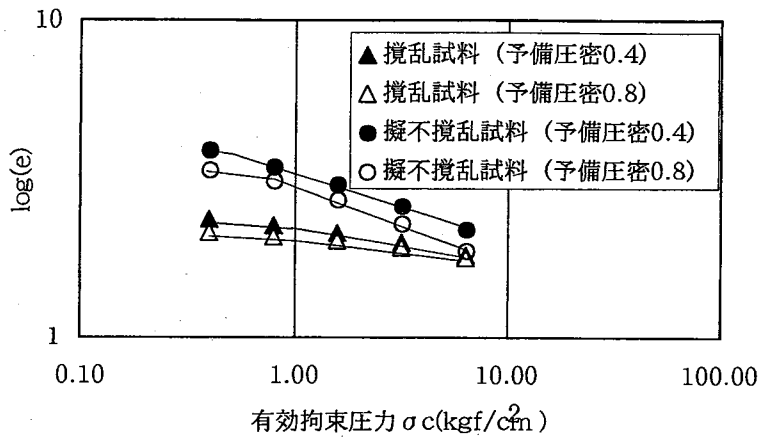


図-8 log(e)-log(σc)関係

表-6 各試料の圧縮指数

| 予備圧密 (kgf/cm ²) | 攪乱試料 | 擬不攪乱試料 |
|--------------------------------|----------------|----------------|
| | C _c | C _c |
| 0.4 | 0.70 | 1.82 |
| 0.6 | 0.63 | 1.82 |
| 0.8 | 0.66 | 1.78 |

C_c:(cm²/kgf)

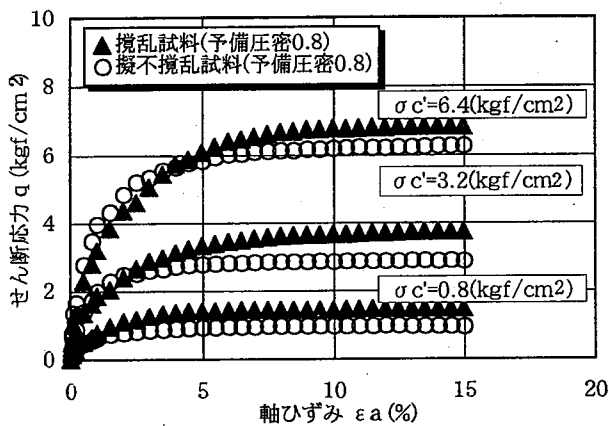


図-9 軸ひずみとせん断応力の関係
(正規圧密状態)

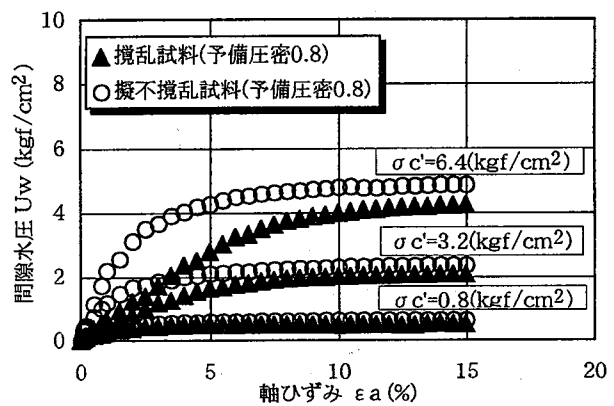


図-10 軸ひずみと間隙水圧の関係
(正規圧密状態)

ものである。各試料のせん断応力は、有効拘束圧力(σc)の増加とともに大きくなり、軸ひずみが10%付近から一定になっている。従って、各試料の最大せん断応力(qmax)は、軸ひずみが15%の時のせん断応力として求められる。攪乱試料の最大せん断応力に比べて擬不攪乱試料の最大せん断応力は低いが、大きさ差異は見られない。

また、せん断中に発生する各試料の過剰間隙水圧(Uw)は、図-10に示すように有効拘束圧力の増加とともに大きくなり、軸ひずみが15%付近で一定になっている。せん断開始直後の擬不攪乱試料の過剰間隙水圧は、攪乱試料より大きな過剰間隙水圧を発生している。これは、擬不攪乱試料の初期間隙比が攪乱試料より大きく、含水量が高いためであると考えられる。しかし、軸ひずみが15%付近になるとほぼ等しい過剰間隙水圧を示す。

一方、過圧密状態における攪乱試料および擬不攪乱試料の最大せん断応力は、図-11に示すように有効拘束圧力(σc)の増加とともに大きくなり、有効拘束圧力0.8(kgf/cm²)で見られるように過圧密比(OCR)が大きいほど最大せん断応力が増大している。勿論、過圧密状態の最大せん断応力は図-9に示した正規圧密状態の最大せん断応力に比べて高い。

過圧密状態の試料のせん断中に発生する過剰間隙水圧は、図-12に示すように有効拘束圧力の増加とともに大きくなるが、過圧密比が大きくなると過剰間隙水圧は減少する。また攪乱試料の過剰間隙水圧の大きさに比べて擬不攪乱試料の過剰間隙水圧は大きく発生している。従って、有機質土「ぼっけ」は、一般的な粘性土の応力-ひずみ関係と同様な関係を示すことが分かる。

図-13と図-14は、攪乱試料と擬不攪乱試料の有効応力経路を示したものである。各試料の有効応力経路は、過圧密状態や正規圧密状態に関わらず、同一の限界状態線CSL(Critical State Line)に漸近しており、限界状態線CSLは、Schofield⁶⁾らが述べているように $q=MP'$ の式で表現できる。また、高有機質土のCU試験から求められる内部摩擦角の値は、一般に50°~70°という報告が多く、非常に大きい値であるとされている⁷⁾。本実験結果からも同様なことがいえており、限界状態線の勾配(M)から求めた内部摩擦角(φ')は、攪乱試料では37°、擬不攪乱試料では43°であり、かなり大きな値を示し、擬不攪乱試料の内部摩擦角は、攪乱試料より大きな値である。これは、擬不攪乱試料に含まれている腐植植物の形状が攪乱試料より残っているため、擬不攪乱試料に腐植植物

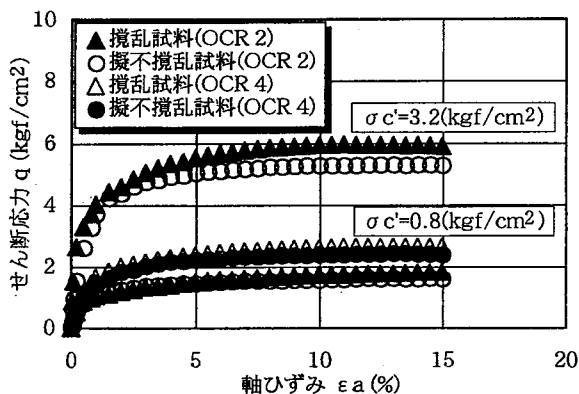


図-11 軸ひずみとせん断応力の関係 (過圧密状態)

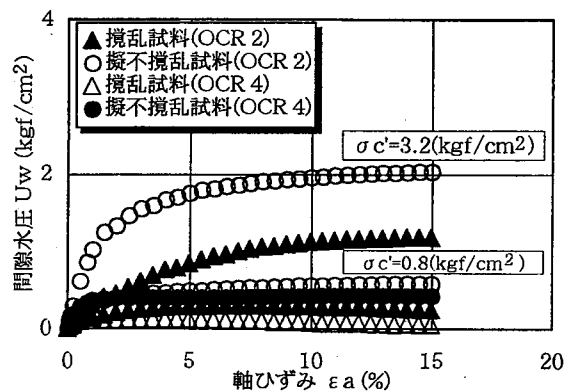


図-12 軸ひずみと間隙水圧の関係 (過圧密状態)

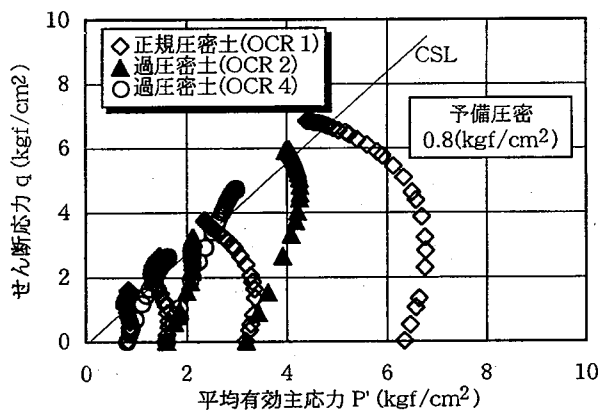


図-13 攪乱試料の有効応力経路

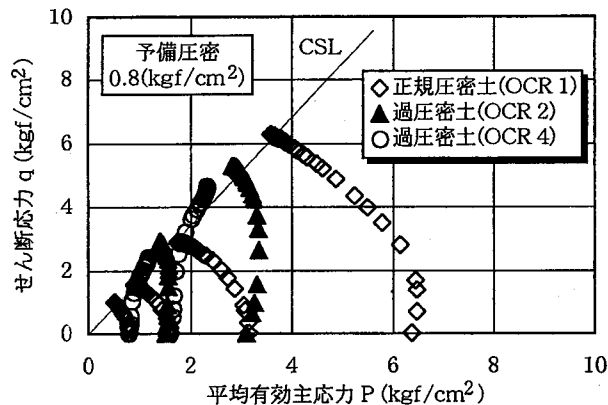


図-14 擬不攪乱試料の有効応力経路

の引張り強さが大きく生じていると考えられる。従って、腐植植物を含む有機質土は、土粒子間に作用するせん断抵抗の他に、腐植植物の引張り強さがあるので、大きな内部摩擦角を示すと考えられる。

5. 結論

本研究では、群馬県館林市周辺に分布している有機質土「ぼっけ」の圧縮性およびせん断特性を明らかにするために、標準圧密試験と圧密非排水(CU)三軸圧縮試験を行なった。ただし、「ぼっけ」の良好なサンプリングが行えなかったために、土塊を乱した後、再構成した供試体を攪乱試料、擬不攪乱試料として区別し、これらの試料を用いて実験を行い、以下のような結果が得られた。(1)再構成した擬不攪乱試料は自然試料と同様に一次圧密領域と二次圧密領域の区別が困難であり、 e - $\log P$ 曲線は有機質土特有の逆S字曲線である。(2)圧密降伏応力と圧縮指数は $\log e$ - $\log P$ 曲線で表示すると明確になり、自然試料と擬不攪乱試料の圧縮指数は近い値を示す。(3)正規圧密領域の「ぼっけ」の二次圧密係数は、通常の泥炭の二次圧密係数の大きさに近い値を示す。(4)再構成した「ぼっけ」の三軸圧縮時のせん断応力および過剰間隙水圧の発生は、一般的な粘性土の応力-ひずみ関係と同様である。また、限界状態線から求めた内部摩擦角(ϕ)は、攪乱試料で 37° 、擬不攪乱試料では 43° であり、かなり大きな値を示す。

【参考文献】1)山口晴幸・対馬雅己：せん断挙動の特徴と強度定数の評価，講座・高有機質土地盤の問題点を探る，土と基礎，Vol.42，No.8，pp.85～92，1994. 2)土質工学会編：土質試験の方法と解説，第6編，透水試験・圧密試験，第2章，土の圧密試験，pp.289～315，1990. 3)Oikawa,H.：Compression Curve of Soft Soils, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.99～104, 1987. 4)宮川 勇：泥炭地における土質工学上の2,3の問題，土木学会北海道支部講習会資料，1962. 5)Lambe T.W. and R.V. Whitman：Soil Mechanics, 27～7 Secondary Compression, pp.419～422, 1969. 6)Schofield, A.N. and Wroth, C.P.：Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, London, 1968. 7)土質工学会：高有機質土の工学，第5章，せん断特性，pp.103～207，1990.