

浸透水圧を受ける砂のせん断強度について*

ON THE STUDY OF SHEAR STRENGTH OF SAND
UNDER SEEPAGE PRESSURE

内田 一郎**・村田 重之***

By Ichiro UCHIDA and Shigeyuki MURATA

1. ま え が き

土の問題は土と水との関係の問題であるといわれるほど土中の水の存在は重要な問題であるが、土中の水がそれが静止しているか流動しているかによって取り扱いが違ってくる。つまり地盤内の水が静止状態にある場合には土粒子に作用するのは間隙水圧のみであるが、流動状態にある場合には地盤の骨格を構成する土粒子には水と粒子壁面間で粘性抵抗が働くため、土粒子は流線の方に力を受けることになる。この力は浸透水圧とよばれ、水が間隙を流れることによって失われるエネルギーである。この浸透水圧はパイピングやボイリングあるいはヒービングなどを引き起こすことでよく知られているが、これらの現象がさらに進行すればアースダムやロックフィルダム、河川堤防など遮水を目的とする盛土構造物の破壊、あるいは建物の基礎や地中構造物施工時の根切り底面の不安定などにつながる。特に近年の土木工事の機械化・大型化はその危険性をますます増大させてきている。すなわち水資源開発の進展に伴い次第に良好なダムサイトが少なくなり、厚い砂礫基盤上にもアースダムやロックフィルダムを築造する必要性が増大し²⁾、また、河川流域の大規模な開発と都市化は降雨時の河川流量を急激に増大させ、さらに市街地における建築物の大型化・高層化、地下街や地下鉄の建設などによる一30mを超えるような大規模な掘削などがその典型的な例である³⁾。

ところで、これらの破壊現象は、破壊が連鎖反応的に進むいわゆる進行性破壊の1つとみなされるが、破壊に至る過程においては浸透水圧の作用による土の強度低下

が重要な問題となってくると思われる。パイピングやボイリングに関する研究はこれまでも模型実験などによる数多くの研究があり^{4),5)}、定性的にはかなりの成果が納められているようである。しかしながら浸透水圧を土粒子が流線の方向に受ける物体力としてとらえ、それが土の強度にどのような影響を及ぼしているのかを定量的に明らかにした例は極めて少ないようである。

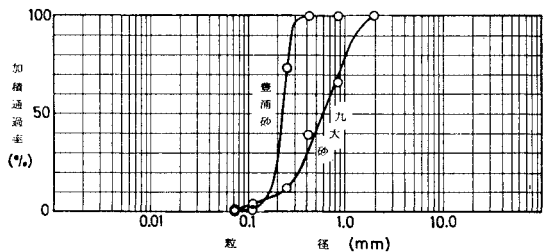
本研究はこれらの点に着目し、浸透水圧を受けることによって土のせん断強度がどのように変化するか、また浸透水圧と間隙水圧との間にどのような関係があるのかを明らかにし、実際の安定解析に対して基礎的な資料を提供することを目的に行っている。本論文は、三軸圧縮条件下の砂供試体中に浸透水を供試体の底部から上部へ向けて流し、その状態でせん断破壊を起こさせる一連の実験結果を取りまとめたものである。

2. 試料および試験方法

(1) 試料と供試体作成

試料には豊浦砂 ($G_s=2.64$, $D_{10}=0.17$ mm, 均等係数 1.4) と、一般的な砂の粒径分布を示すものとして九大砂 ($G_s=2.64$, $D_{10}=0.22$ mm, 均等係数 3.1) の2種類を使用した。図一1にその粒径加積曲線を示す。

供試体は、内部にゴムスリーブをセットした2つ割り



図一1 試料の粒径加積曲線

* 本研究の一部は、参考文献1)で発表したが、この論文はその後の研究成果を加えて取りまとめたものである。

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 九州大学助手 工学部土木工学科

にできる砂供試体作成用モールド内に、空気乾燥した試験料を5層に分け各層を同一回数突き棒で締め固め作成した。供試体は直径約5.0cm、高さ約12.6cmの円筒型で、初期間隙比(e_0)は豊浦砂約0.65、九大砂約0.59であった。

(2) 試験装置・計測および試験方法

試験装置は一般に使用されている三軸圧縮試験機を図-2のように改良したもので、通常の操作および計測は一般のそれと同様である。この改良した試験機の特徴は浸透水の供給と間隙水圧の測定法にある。つまりコンプレッサーからの圧力は、エアレギュレーターによって所定の圧力に調整され、この圧力の作用で浸透水供給タンクの水は供試体の中を底部から上部へ向かって流れ三軸室外へ排水される構造となっている。間隙水圧の測定は図-3のように供試体の軸方向に約2.4cm間隔(九大砂では上中下の3か所)で医学用の注射針(豊浦砂では外径0.8mm、九大砂では外径1.2mm)を差し込み行った。注射針のゴムスリーブへの差し込み口は、瞬間接着剤を使用して完全に密着し水漏れを防いだ。間

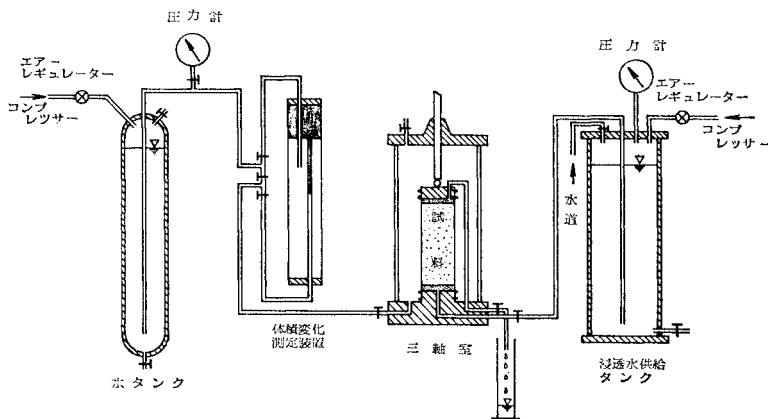


図-2 試験装置の概略図

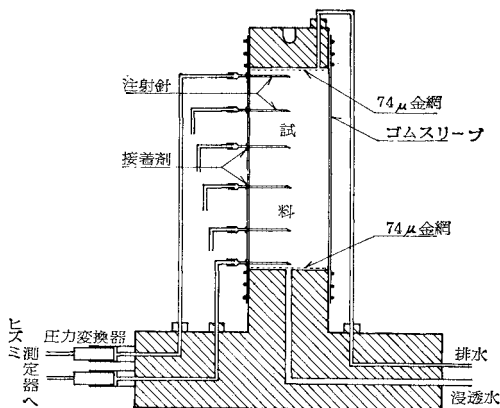


図-3 間隙水圧の計測図

隙水圧の測定には小型圧力変換器を使用した。

試験は次のような手順で行った。まず2つ割れモールド内に突き固めた供試体に載荷キャップを取り付け、ゴムスリーブを輪ゴムで固定する。次にモールドの片側だけをはずし残りのモールドを支えにして所定の位置に注射針を差し込み挿入口を接着剤で密着する。30~60分後接着剤が固まったら残りのモールドをはずし、供試体の底部から約 0.03 kg/cm^2 の圧力で水を浸透させ、供試体内に空気が残らないように徐々に飽和させる。同時に注射針から圧力変換器までの管内の空気も追い出す。これらが完了したら浸透水の供給を中断し三軸室を組み立てる。三軸室に水を満たし側圧をかけたのち、供試体の底部から所定の圧力の浸透水を送り上部からパイプを通じて三軸室外へ排水する。この状態で約1時間圧密したのち約 $0.7\%/\text{min}$ の軸ひずみ速度で圧縮し破壊に至らしめる。圧密・圧縮の両過程を通じて間隙水圧と流出水量を、圧縮中はさらに圧縮力と体積変化量を測定した。

本論文では上記のように浸透水を上部から排水させるタイプを「透水型」、排水をさせないタイプを「不透水型」とよぶことにする。「不透水型」はいわゆるバックプレッシャーをかけた状態に相当するもので、前者との比較のために行ったものである。

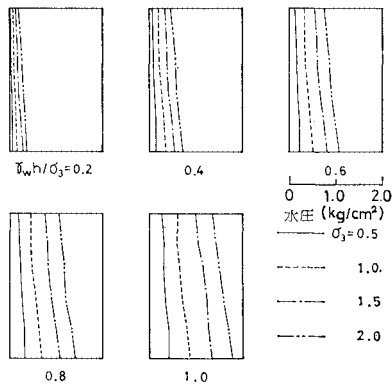
採用した側圧(σ_3)は0.5, 1.0, 1.5 および 2.0 kg/cm^2 の4段階、浸透水供給タンクの圧力($r_w h$)は側圧との比をとって $r_w h/\sigma_3 = 0, 0.1, \dots, 1.0$ の11段階である。

3. 結果と考察

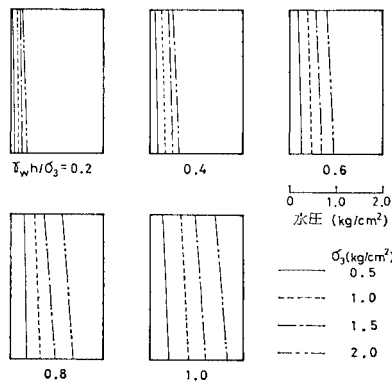
(1) 間隙水圧分布

間隙水圧は供試体内に差し込んだ注射針によって圧密・圧縮の両過程を通じて測定を行ったが、その間、間隙水圧の値にほとんど変化はなかった。図-4(a), (b)に豊浦砂と九大砂の軸方向の間隙水圧分布を、5種類の $r_w h/\sigma_3$ に対しそれぞれ4種類の側圧について示す。間隙水圧は両者とも底部から上部へ向かってほぼ直線的に減少して台形状の分布をなしている。しかし、 $r_w h/\sigma_3$ が大きくなると底部と上部との水圧に差が現われ、間隙水圧の分布形状にわずかず違いが生じている。また豊浦砂と九大砂では前者の方でその差が大きく現われている。

さらに注射針の長さを変えて同一平面内の間隙水圧分布も調べたが、供試体の中心部と周辺部との間に水圧の差は認められず、したがって同一平面内での透水性のむ



(a) 豊浦砂



(b) 九大砂

図-4 間隙水圧分布

らや、試料とゴムスリーブとの境界での特異な流れなどはなかったといえる。

(2) 透水性

図-5 は試験中に測定した流出水量から計算した平均流速 (v) と動水勾配 (i) との関係を示したもので、図中の○印は豊浦砂、□印は九大砂の結果を表わしている。これより本実験での両供試体内の間隙水の流れはダルシーの法則の成立する範囲内であったといえる。また、このグラフの傾き、すなわち透水係数 (k) は豊浦砂より九大砂の方がわずかに大きくなっているが、これと同様な結果が定水位透水試験からも得られている。したがって間隙水圧分布のところでも述べた分布形状の違いもこれから納得される。

(3) 軸差応力-体積変化-軸ひずみ関係

図-6 (a), (b) に豊浦砂、図-7 (a), (b) に九大砂のそれぞれ透水型と不透水型の軸

差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$)-体積変化 ($\Delta V/V$)-軸ひずみ (ϵ) 関係を側圧 2.0 kg/cm^2 , $r_w h = 0, 0.2, 1.0, 1.8 \text{ kg/cm}^2$ の場合について示す。図中の数字は $r_w h$ の値を示し、曲線上の矢印は破壊点を示す。これらの図において $r_w h = 0$ の曲線は三軸圧縮試験での飽和砂の排水試験と同一のものを表わすことになる。

まず透水型について考察すると、豊浦砂、九大砂とも軸差応力は $r_w h$ の増加に従って次第に低下してくる。また破壊時の軸ひずみも $r_w h$ の増加に従って小さくなっている。一方、体積変化は豊浦砂では $r_w h$ の増加に従って少しずつ大きくなっているが、九大砂ではこの傾

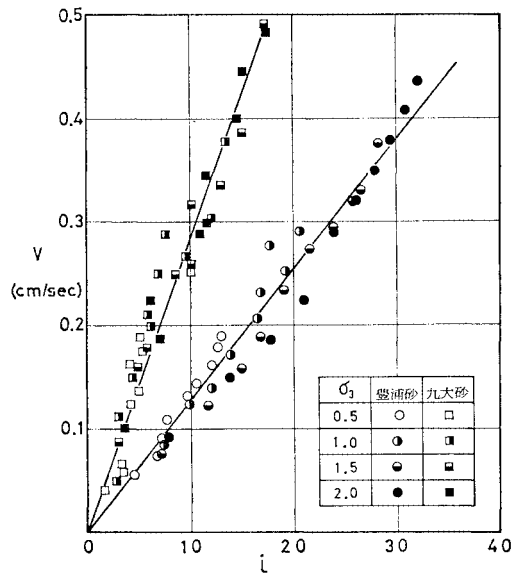
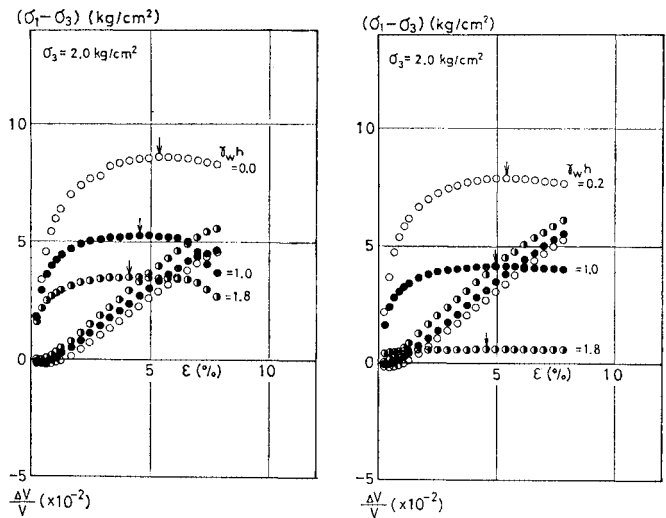


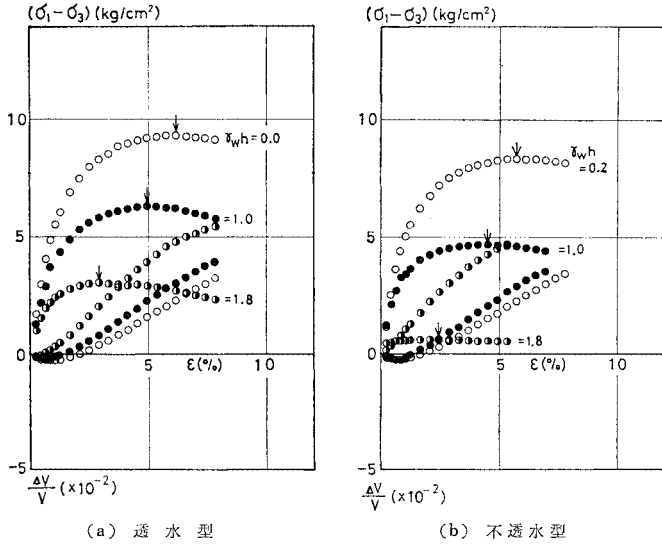
図-5 平均流速と動水勾配の関係



(a) 透水型

(b) 不透水型

図-6 豊浦砂の軸差応力-体積変化-軸ひずみ関係



図一七 九大砂の軸差応力-体積変化-軸ひずみ関係

向がよりはっきりと現われ大きな体積変化が起こっている。

不透水型では、 r_{wh} は三軸圧縮試験でのバックプレッシャーに相当するので、供試体全体にわたって r_{wh} が間隙水圧として作用することになる。したがって同一の r_{wh} であってもその影響は不透水型の方に顕著に現われ、 r_{wh} の増加に対する軸差応力の低下は透水型に比べて不透水型の方に顕著に現われることになり、その結果が図一六、七にもはっきりとでている。しかし破壊時の軸ひずみや体積変化は透水型とほぼ同様な傾向を示している。

同一試料で透水型と不透水型を比較してみると、両者の間ではっきりと違いが認められるのは軸差応力についてであり、破壊時の軸ひずみや体積変化にははっきりとした相違は認められない。

(4) 軸差応力と主応力比

破壊時の軸差応力 $[(\sigma_1 - \sigma_3)_f]$ と r_{wh}/σ_3 の関係について、豊浦砂の透水型と不透水型を図一八(a), (b)に示す。両者とも r_{wh}/σ_3 の増加に従って $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は直線的に減少しているが、減少の程度は側圧によって異なり、側圧が大きくなるほど $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の減少が著しくなっている。一方、透水型と不透水型とでは前節でも明らかなように不透水型の方が $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の減少が著しくなっている。ちなみに $r_{wh}/\sigma_3 = 0.9$ では r_{wh} の作用により砂の骨格構造が破壊されて供試体が自立しなくなる現象が観察された。

図一八(a), (b)はこれらの関係を破壊時の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ と r_{wh}/σ_3 の関係で整理したもので、それぞれ透水型と不透水型を示している。このような整理をすると図一八におけるすべての値は、

$$(\sigma_1/\sigma_3)_f = A' - \alpha(r_{wh}/\sigma_3)$$

ただし、

A' : $r_{wh}/\sigma_3 = 0$ のときの $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ の値

α : 係数

なる1本の直線上にほぼ集まってくる。上式から σ_3 を消去すると、

$$(\sigma_1)_f = A - \alpha r_{wh}$$

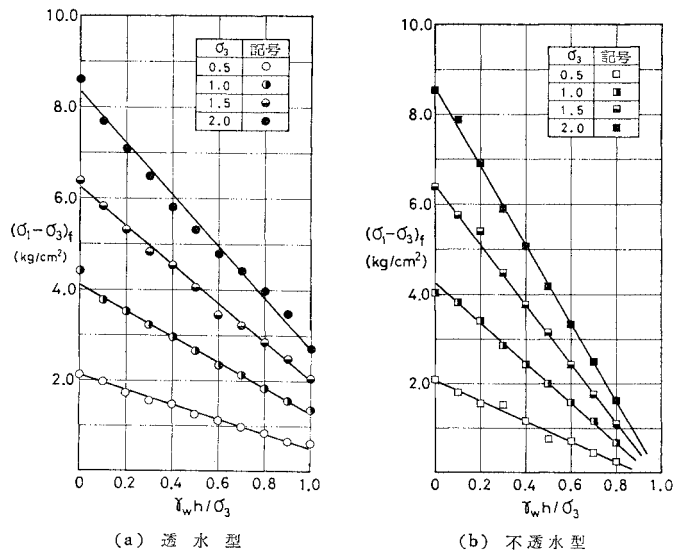
ただし、 $A = A'\sigma_3$

となり、破壊時の最大主応力は r_{wh} の1次関数で表わされることになる。この関係は透水・不透水型の両者についていえる

が、直線の傾き(α)は不透水型の方が大きくなっている。

図一十は透水型の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を間隙水の平均流速(v)との関係で整理したものである。流速の増加に従って $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ はほぼ直線的に減少している。直線の傾きは側圧によってわずかに異なっているがほぼ平行とみなせる。したがって側圧の小さい場合には、間隙水の流速がわずかに大きくなっただけで $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は零に近づき強度が失われることになる。ポリング現象が拘束圧の小さい地表面付近から進行してゆくこともこれから推測される。

豊浦砂についての以上のような関係が九大砂の場合にもほぼ同様な結果として得られており、したがって、一



図一八 豊浦砂の砂壊時の軸差応力と r_{wh}/σ_3 の関係

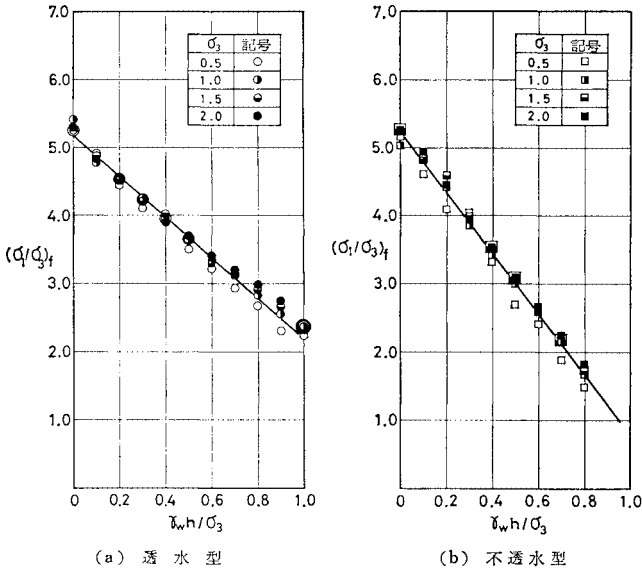


図-9 豊浦砂の主応力比と $r_w h / \sigma_3$ の関係

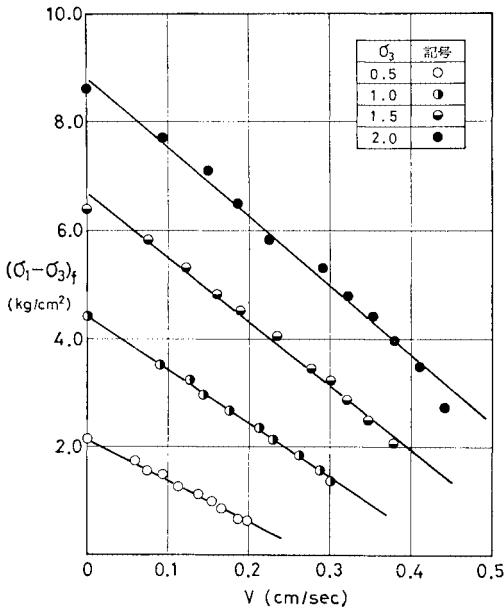
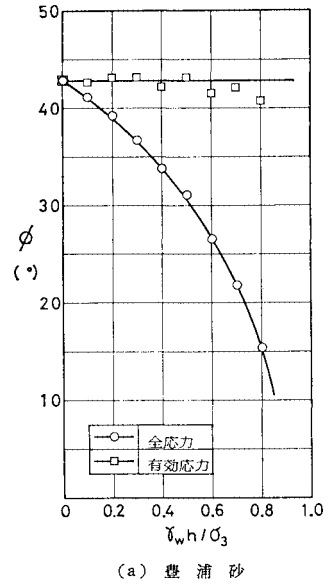


図-10 豊浦砂の破壊時の軸差応力と平均流速の関係

一般の粒径分布の砂についても上記の関係がいえるであろう。

(5) 強度定数

強度定数は全応力法と有効応力法を用いて求め、そのときのせん断抵抗角をそれぞれ ϕ , ϕ' と表示する。

ところで、有効応力に関してせん断抵抗角を求めるには、すべり面上の空隙水圧の値が必要である。不透水型では $r_w h$ = 空隙水圧となるので、これによって ϕ' を求めた。この ϕ' と全応力法による ϕ を $r_w h / \sigma_3$ との関係

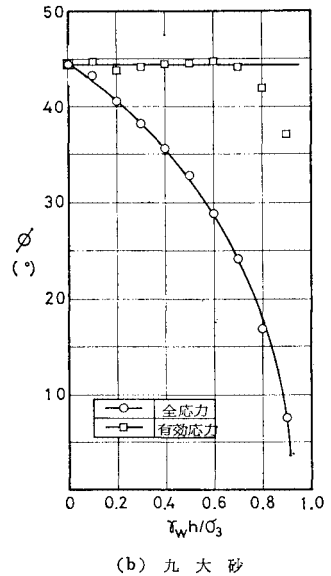
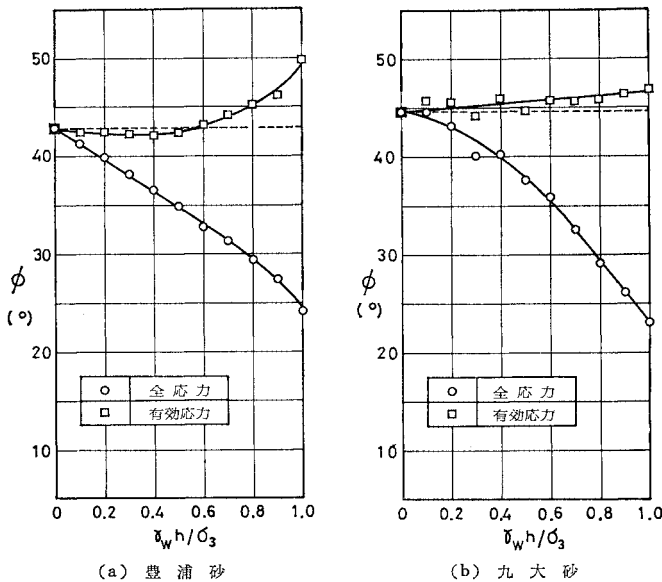


図-11 不透水型のせん断抵抗角と $r_w h / \sigma_3$ の関係

で示したのが 図-11 (a), (b) で、それぞれ豊浦砂と九大砂についての結果である。 ϕ は両者とも $r_w h / \sigma_3$ の増加に従って急激に小さくなって強度が減少してゆく様子がはっきりと現われている。一方、 ϕ' は九大砂の $r_w h / \sigma_3$ が 0.9 の値を除けばすべての値がほぼ ϕ_d の値に等しくなっている。したがって、 $r_w h / \sigma_3$ の増加による ϕ の減少はすべて $r_w h$ つまり空隙水圧の増大によるものであるといえる。結局、ここでは有効応力の概念によって強度の低下が十分に説明されたことになる。

さて、透水型では空隙水圧が 図-4 のような台形分布をなすので、ここでは供試体中央の値をすべり面上の平

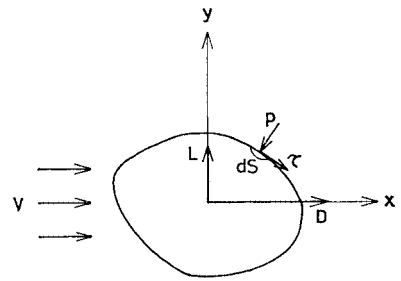


図一12 透水型のせん断抵抗角と $\tau_w h / \sigma_3$ の関係

均的な間隙水圧とみなして ϕ' を求めている。

このようにして求めた透水型の ϕ , ϕ' を示したのが図一12 (a), (b) で、それぞれ豊浦砂と九大砂の結果を示している。 ϕ は不透水型と同様 $\tau_w h / \sigma_3$ の増加に従って急激に小さくなっている。 ϕ に関するこのような傾向は軸差応力と $\tau_w h / \sigma_3$ の関係からも一応予想されることであるが、この強度低下が不透水型と同様にすべて間隙水圧の増大によるものであるのか、あるいは物体力としての浸透水圧の影響が何らかの形で入っているのかは興味あるところである。図を見ると豊浦砂では $\tau_w h / \sigma_3$ が 0.7 あたりから ϕ' は ϕ_d の値より大きくなり、1.0 では今回の実験での供試体の ϕ' としては現実に存在し得ない大きな値を示している。一方、九大砂では ϕ' は 0.7 あたりからわずかに ϕ_d の値からはずれてくるが、値としては誤差の範囲内であるように思われる。豊浦砂と九大砂でのこのような相違は透水係数の違いによるものと考えられる。つまり図一5で豊浦砂の流速は九大砂に比べて約2倍大きな値となっており、その分だけ浸透水圧の影響が大きく現われたのではないかと考えられる。

ところで水理学では流れの中の静止物体に作用する流体力は、図一13 に示すように流れに垂直な揚力 (L) と流れの方向の抵抗力 (D) に分けられる。抵抗力は摩擦による表面抵抗 (D_f) と圧力による形状抵抗 (D_p) とに分けられ、前者は摩擦抵抗ともよばれ物体表面の接線方向に、後者は圧力抵抗ともよばれ物体表面の垂直方向に作用する力である。以上3つの力のうち、土質力学の浸透問題においては揚力は考える必要はなく、摩擦抵抗と圧力抵抗のみを考えればよい。摩擦抵抗は流体が土の間



図一13 物体に作用する流体力

隙中を流れるときに失われるエネルギーで摩擦損失となって表われるものである。圧力抵抗は土質力学で考えられる流速程度だと、摩擦抵抗に比べて非常に小さく通常は無視されるものである。しかし、ボイリングやパイピングを起こすような土中水の流れでは、圧力抵抗も何らかの形でそれらに影響を及ぼしているのではないかということが考えられる。そこでこの圧力抵抗を実際に計算してみたが、本実験での流速の範囲内では無視し得るほど小さいものであった。したがって豊浦砂の場合に $\tau_w h / \sigma_3$ が 0.7 以上で ϕ' の値が ϕ_d の値より大きくなったことは、その差自体がわずかに数度のものであり実験的なばらつきと考えるのが妥当である。

以上のことから、三軸圧縮状態で砂供試体中を水が流れている場合のせん断試験においても、間隙水圧を計測することによって有効応力の概念の適用が十分に可能であるといえる。

4. まとめ

本論文は、三軸圧縮状態にある砂供試体の底部から上部へ向けて浸透水を流し、そのときの砂のせん断強度がどのように変化するかを実験的に明らかにしたものである。

以下に本論文の結論を簡単に列記する。

- (1) 本実験における砂供試体内の間隙水の流れは Darcy の法則に従い、間隙水圧は供試体の底部から上部へ向かって直線的に変化し、台形的な分布をする。
- (2) 本実験では破壊時の軸差応力は流速の増加に従って側圧にはあまり関係なく、ほぼ同一の勾配で直線的に減少する。したがって、小さな側圧に対してはわずかな流速の増加で破壊時の軸差応力が零に近づくことになる。これはボイリング現象が拘束圧の小さい地表面付近から内部に進行してゆくことを示唆している。
- (3) 浸透水圧の作用、つまり、 $\tau_w h / \sigma_3$ の増大に従って有効応力に関するせん断抵抗角 ϕ' は排水試験によ

るせん断抵抗角 ϕ_d より少し大きな値を示すようになるが、その差はわずかであり、本実験のような三軸圧縮状態では浸透水圧と間隙水圧を同一のものとみなして有効応力の概念を適用することが十分に可能である。

しかし実験の性質上、供試体内の間隙水圧は各所で異ならざるを得ず、厳密な意味での要素試験とはなりえない。したがって、実験から得られた種々の結果は供試体全体の平均的な値を求めたことになっている。したがって、今後はこの種の実験と平行して、精度の高い模型実験を行うことによって浸透水圧が土の強度にどのような影響を及ぼしているかを明らかにしてゆきたい。

終わりに、本研究は文部省科学研究費（昭和 53 年度奨励研究（A））の補助を得て行われたものである。ここに記して謝意を表す。また、本研究を進めるにあたり適切なご助言をいただいた宮崎大学工学部 藤本廣教授、同 横田漢助教授、佐賀大学理工学部 鬼塚克忠助教授、九州大学工学部 平田登基男助手の諸氏に感謝の意を表します。あわせて実験に協力いただいた九州大学工学部土木工学科道路研究室の卒業生に感謝いたします。

【記 号】

$A : = A'\sigma_3$

$A' : r_{wh}/\sigma_3 = 0$ のときの $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ の値

D : 流れの方向の抵抗力

D_f : 表面抵抗（摩擦抵抗）

D_p : 形状抵抗（圧力抵抗）

dS : 物体表面の微小面積

D_{10} : 均等係数

e_0 : 初期間隙比

G_s : 土粒子の比重

i : 動水勾配

k : 透水係数

L : 流れに垂直な揚力

p : 微小面積 dS に作用する圧力

$\Delta V/V$: 体積変化

v : 間隙水の平均流速

α : 係数

r_w : 水の単位体積重量

r_{wh} : 浸透水供給タンクの水圧

ε : 軸ひずみ

σ_1, σ_3 : 主応力

σ'_1, σ'_3 : 有効主応力

$\sigma_1 - \sigma_3$: 軸差応力

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 破壊時の軸差応力

$(\sigma_1/\sigma_3)_f$: 破壊時の主応力比

τ : せん断応力

ϕ : 全応力に関する砂のせん断抵抗角

ϕ' : 有効応力に関する砂のせん断抵抗角

ϕ_d : 排水試験による砂のせん断抵抗角

参 考 文 献

- 1) 内田一郎・村田重之：浸透水圧を受ける砂の三軸圧縮試験，第 24 回土質工学シンポジウム論文集，pp. 131～136，1979.
- 2) 電力土木技術協会編：最新フィルダム工学，電力土木技術協会，pp. 67～78，1972.
- 3) 土質工学会関西支部編：二十周年記念誌，3. 掘削，土質工学会関西支部，pp. 44～64，1978.
- 4) たとえば，鈴木音彦：透水性地盤における鋼矢板の下を回る浸透水流に関する模型実験，土と基礎，Vol. 13，No. 14，pp. 9～17，1965.
- 5) たとえば，赤井浩一：浸透水流による盛土裏法面の局部破壊について，土木学会論文報告集，第 36 号，pp. 44～49，1956.

(1979.12.26・受付)