

九州大学工学部 正員 山内豊聡

同 大学院生 学生員 ○豊田奉節

1. まえがき 本文は、砂のせん断強さに及ぼす粒子の大きさ、形、表面の状態およびせん断速度効果の影響について研究するために行なった動的および静的の三軸圧縮試験結果を述べたものである。試料は九州大学構内砂およびけい砂の粗いものから細かいものまでの、それぞれ3種類の粒径およびスチールボールのメッキしたものと表面腐食を施したものとの2種類、合計8種類で、各々の試料は粒子の形と表面状態はほぼ一様である。三軸圧縮試験は変形速度 0.125 cm/min ($1\%/\text{min}$) の静的な圧密排水試験 (cd試験)、圧密非排水試験 (cu試験) および変形速度 $600 \text{ cm/min} \sim 1800 \text{ cm/min}$ の高速圧密非排水試験 (tcu) を行なった。

2. 試験装置 本実験では、高速試験も行なえるように製作された三軸圧縮試験装置⁽¹⁾を用いた。静的な試験では通常の三軸試験装置と同様に試験することができ、高速試験においては軸荷重は空気圧により高速載荷することができ、載荷ピストンの三軸室内への貫入による拘束圧力の増大に対しては、三軸室上部の空気層によりその増大は無視できる。変形量、軸差応力、向けき水圧はオシログラフにより自記させることができる。

3. 試料および試験方法 試料は九州大学構内の砂、けい砂およびスチールボールの3種類である。九大砂は海岸付近にみられる砂で鈍い稜角を有する普通の砂であり、けい砂はけい石を粉砕して作った人工砂で、個々の粒子は角張っているがその表面が滑らかな砂である。スチールボールはメッキした表面の滑らかなものと、表面腐食を施したもののである。九大砂、けい砂とも試験前に洗浄し、各々粗いものから細かいものへと3種類にふるい分け均等な粒度として試料とした。その粒径と記号を表-1に示す。供試体の大きさは直径 5.0 cm 、高さ 12.5 cm であり、各々の試料に対し初期向けき比 e_0 が非常に密なものとは非常に緩いものとの2種の試験を行なった。静的な圧密排水試験は、圧密圧力 $0.5, 1.0, 1.5 \text{ kg/cm}^2$ で圧密したのちその拘束圧を一定にしたまま、 $1\%/\text{min}$ の一定せん断速度で軸差応力を0から破壊に至るまで増大させた。圧密非排水試験の場合には、 $0.5, 1.0, 1.5 \text{ kg/cm}^2$ でそれぞれ圧密させたのち、せん断によって生ずる負圧による向けき水の cavitation を少なくするため、 0.5 kg/cm^2 の back pressure をかけたのち、軸差応力を増大させてせん断試験を行なった。高速試験における変形速度は密な試料と緩い試料に対して、それぞれ 600 cm/min および 1800 cm/min である。

4. 試験結果およびその考察 静的排水試験結果を図-1, 2に示す。粘着力 c およびせん断抵抗角 ϕ は応力-せん断変形曲線の主応力差が最大となるときのモール・クーロンの破壊包絡線より求めたものである (最大値が現れない場合は軸せん断比 14% に達したときの応力による)。また c , ϕ は Rowe⁽²⁾ によるダイレイタンシー補正とした強度定数である。静的圧密非排水試験および高速圧密非排水試験結果を図-3, 4に示す。C, ϕ は主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) が最大になるときの全応力によるモール・クーロンの破壊包絡線より求めたものであり、また C', ϕ' は有効応力によるものである。

表-1 試料と記号		
粒径 (mm)	九大砂	けい砂
$0.84 \sim 2.00$	K-1	Q-1
$0.42 \sim 0.84$	K-2	Q-2
$0.075 \sim 0.42$	K-3	Q-3
1.46	SB-a (表面メッキ)	
	SB-b (表面腐食)	

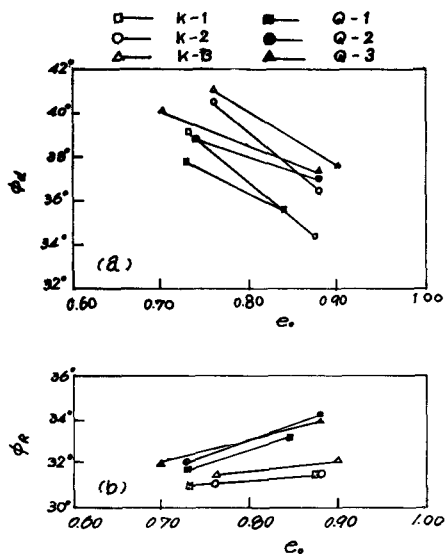


図-1. 排水試験におけるせん断抵抗角と
肉けき比の関係

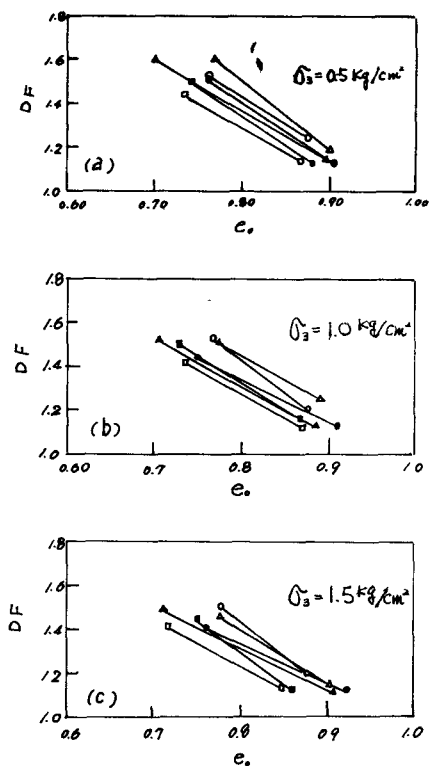


図-2. 排水試験におけるDFと肉けき比の関係

(a) 粒子の大きさの影響 ϕ_d への粒子の大きさの影響については粒径による一定の傾向は認められない。 ϕ_d は九大砂、けい砂とも粒径が小さくなるほど大きくなり、 ϕ_d は粒子の大きさによる差異はほとんど

なくなりこれは Kinkpatrick⁽³⁾ が述べていることとよく一致している。しかし肉けき比に対しては、 ϕ_d とは逆に細かい砂の方が ϕ_d は大きくなっており、とくにけい砂においてその傾向が著しい。これは Rowe⁽²⁾ によるダイレイタンス・ファクター (DF) が粒径による一定の傾向を示さないことと密接な関係があるものと考えられる。DF は次式から計算されるものである。DF = $1 + \frac{dv/v}{de}$ 。ここに dv/v は単位体積変化の増分、 de は最大主ひずみの増分である。 ϕ_d あるいは ϕ_{cu} に対しては粒径による一定の傾向を示さないが、 ϕ_{cu} あるいは ϕ_{cu} は ϕ_d と同様に粒径の減少に伴って増大するようである。

(b) 粒子表面の状態 ステールボールの結果によれば粒子の表面状態が ϕ_d に及ぼす影響は表面の粗い SB-b のほうが大きな肉けき比にもかかわらず、表面の滑らかな SB-a より ϕ_d ははるかに大きい。またダイレイタンス・ファクターについても SB-b が大きく表面状態がせん断抵抗に大きな影響を及ぼすことがわかる⁽⁴⁾。表面状態の異なる九大砂とけい砂においてダイレイタンス・補正をした ϕ_d が表面のなめらかなけい砂のほうが粗い九大砂よりも大きいことは、 ϕ_d が表面状態のみならず粒子の形にも影響されることを示すものである。粒子の形と表面状態のせん断抵抗への影響の度合は図-1 の ϕ_d より知ることができる。肉けき比の小さい密な砂の場合には、その差は小さく、肉けき比が増大するとその差も大きくなる。これは肉けき比の小さい密な状態では粒子の形による影響は小さいが大きな肉

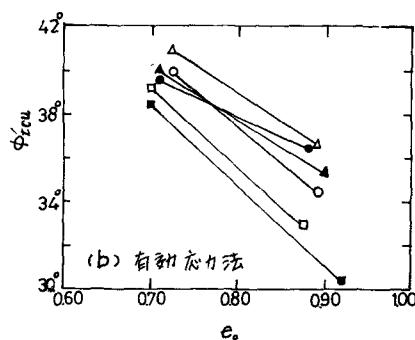
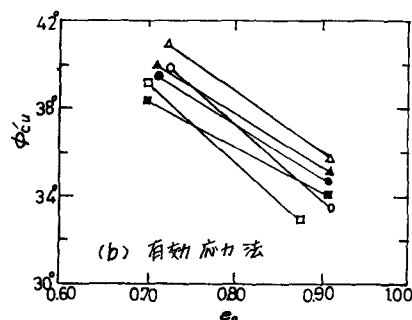
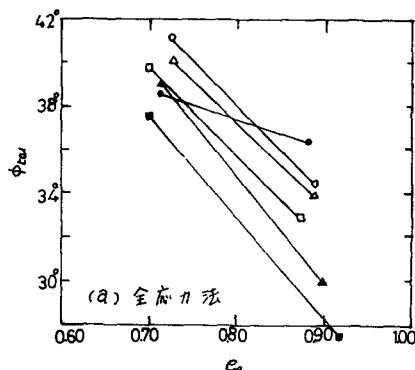
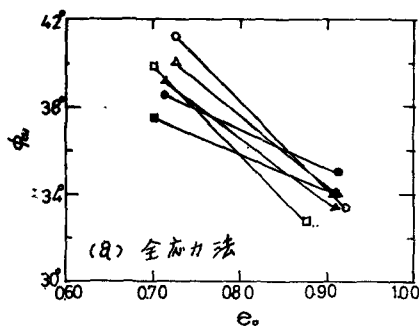


図-3. 静的非排水試験結果

図-4. 高速ひずみ試験結果

げき比の低い状態では表面の状態よりも粒子の形がせん断抵抗に大きく影響すること示すものである。

ある。(c) 高速圧密排水試験。まず軸差応力・ひずみ曲線は、密な場合九大砂、けい砂とも、静的試験との差異はほとんどなく、ひずみ速さの影響はみられない。非常に緩い場合にも、九大砂、けい砂の一部はその影響はみられないが、けい砂の場合に著しくその強さが減少することがある。つぎに間げき水圧の挙動については、密な場合軸ひずみが2%以内で最大値（正の間げき水圧）を示したのち急激に減少し -0.65 kg/cm^2 に漸近する。間げき水圧と軸ひずみの関係は静的試験と比べて、密な場合、緩い場合のいずれもその最大値に達するまでのひずみは大きく、その後の減少のしかたが緩やかである。またその最大値の増分は密な場合ではわずかであるが緩い場合には大きい。負の間げき水圧は静的荷重、高速荷重の場合のいずれの場合も -0.65 kg/cm^2 付近で落着く。これはこの付近で間げき水のcavitationが生ずるものと考えられる。粒径が小さい密な砂の場合は、高速試験における負の間げき水圧がやや遅れてから落着く原因の一部は、供試体下端における間げき水圧測定time lagにもよるものと考えられる。(d) ひずみ速さの影響。土の強さに対するモール・クーロンの仮定を有効応力を用いて、三軸圧縮試験に適用するとつぎのようになる。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{c' \cos \phi' + (\sigma_3 - u) \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (1)$$

ここに、 σ_1 , σ_3 は最大および最小主応力、 c' は粘着力、 ϕ' はせん断抵抗角、 u は間げき水圧である。(1)式に基づいて、

c' , ϕ' を求めると静的試験、高速試験ともすべて $c' = 0$ となり、したがって(1)式はつぎのように

書換えられる。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = (\sigma_1 - u) \frac{\sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

σ_1 は一定であるから、砂のせん断強さがいずみ速さとともに変化するには、 u または ϕ' 、あるいはその両方がいずみ速さに関係することになる。

密な砂の場合には $(\sigma_1 - \sigma_3)$ はいずみ速さの影響はなく、したがって $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max.}$ による ϕ' はいずみ速さによる影響はない。緩い砂の場合で高速試験において $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ が著しく減少するのは、大きな過剰間げき水圧とその緩やかな減少によるものであり、 ϕ' には関係しないものと考えられる。以上のことから砂の強さに対するいずみ速さの影響はその間げき水圧はいずみ速さとの関係によるものと考えられる。つぎにこの間げき水圧の発生傾向およびその消散と粒子の大きさについては、大きな粒径では最大応力時の間げき水圧はいずみ速さに関係しない。粒径が小さくなると高速試験における間げき水圧は大きくなり、強度減少の原因となる。密な砂の場合の内げき水圧の遅れはおそらく小さな透水係数による測定の時差 (time lag) であろう。粒子の形および表面の状態による影響は密な砂の場合にはみられない。しかし緩い砂の場合には角張っているが表面の滑らかなけい砂において大きな強度減少を示すのは、表面の滑らかな緩い砂においては、急速な荷重に対する抵抗は小さく、容易により密な状態になる傾向を有すると考えられる。

5. 結論 この実験により得られた結論はつぎのようなものである。1. 600 cm ~ 1800 cm/min の範囲の高速いずみ速さでは 1%/min の静的いずみ速さの場合と比べて、密な砂の場合せん断抵抗に対するいずみ速さによる影響はない。しかし非常に緩い砂では、高速いずみ速さを受ける場合、大きな過剰間げき水圧を発生し、その強さは著しく減少する場合がある。砂の強さに対するいずみ速さの効果は ϕ' には関係せず、間げき水圧の発生およびその消散によるものであると考えられる。2. 粒子の表面と形状が等しい場合、排水試験による ϕ_c 、非排水試験についての ϕ'_h はともに粒径が減少するほど増大するが、 ϕ_c はほぼ一定となる。3. 粒子の表面状態と形は、すでに知られているように砂のせん断抵抗角に大きく影響するが、非常に緩い砂では ϕ_c に対する粒子形状による影響が大きいようである。

引用文献 (1) 山内豊隆他：繰返し荷重を受けるシラスのような砂の間げき水圧について、第22回土木学会年次学術講演会講演概要、Ⅲ-43

(2) Rowe, P. W.: The Stress-dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Roy. Soc., London A269, pp. 500 ~ 527

(3) Kirkpatrick, W. M.: Effects of Grain Size and Grading on the Shearing Behavior of Granular Materials, Proc. 6th Int. Conf. S. M. & F. E. Vol. 1, pp. 273 ~ 277

(4) 山内豊隆, 春山元寿：砂のせん断強さに対する粒子形状の影響について、九大工学集報, Vol. 40, No. 4, 昭. 42, 6, pp. 542 ~ 552

記号 e_0 : 初期間げき比 C_d : 静的圧密排水試験による粘着力 ϕ_d : 静的圧密排水試験によるせん断抵抗角 C_R : C_d に Rowe によるダイラタンシー補正を施したもの ϕ_R : ϕ_d に Rowe によるダイラタンシー補正を施したもの C_{cu} : 静的圧密非排水試験による粘着力で全応力によるもの ϕ_{cu} : 静的圧密非排水試験によるせん断抵抗角で全応力によるもの ϕ'_{cu} : 高速いずみ試験による ϕ'_{cu} : 静的圧密非排水試験による粘着力で有効応力によるもの ϕ'_{cu} : 高速いずみ試験による ϕ'