

飽和れき混り粘土のせん断特性

SHEAR CHARACTERISTICS OF SATURATED GRAVELLY CLAYS.

川上 浩*・阿部 広史**
By Hiroshi Kawakami and Hirofumi Abe

1. まえがき

れきと粘土が混合した地盤は崖錐台地などで見られ、また材料としてもフィルタイプダム材料として用いられている。これらの材料のせん断強さを知るためには、通常大型三軸試験機が用いられるが、混入するれきの最大寸法の増大とともに、さらに大型の供試体を必要とし多くの労力を要することになる。

そこで粘土・れき混合土のせん断特性がその混合率によりいかに変化するかを調べ、粘土がその性質を支配する範囲・れきが支配的となる範囲を明らかにするとともに、粘土・れきそれぞれの強さがその混合率に応じいかに影響しあうか、これら混合土のせん断時の性状を明らかにしたいと考えた。

この種の研究としては Holtz & Ellis¹⁾、山野²⁾ などの研究が、また砂と粘土の混合土に対しては倉田・藤下³⁾ の研究があるが、Holtz らの実験はかなり不飽和なものについて行なっているために、間げき圧の測定に問題があり過大な c' を得ていると考えられる。また倉田らによれば砂と粘土の混合土については、実用的には粘土含有量 20% 以下で砂質領域、20~40% で中間領域、40% 以上で粘土領域と考えてよいとしている。

2. 試料および方法

使用したれきの最大粒径は、三軸供試体直径 50 mm の 1/10 とし、犀川砂より 2.0~4.8 mm の粒径のものをとり出してれき分として使用した。れきは写真-1 に示すようにやや丸味をもったものである。また粘土は信大工学部構内粘土を用いたが、その粒度・土性は図-1 に示すようなものである。

これらの粘土とれきを乾燥重量比により、れき 0% よりれき 75% まで、15% ピッチに 6 種の混合比で混合

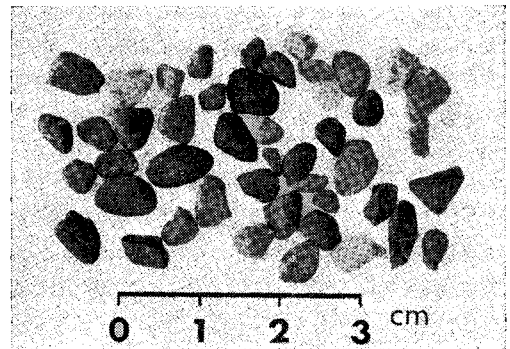


写真-1 れきの形状

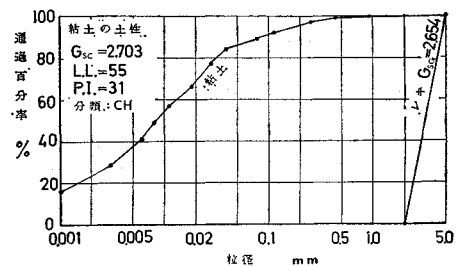


図-1 試料の粒度・土性

し圧密非排水試験を行ない、またれき混合率の高いものについては排水試験を行なっている。これにれき混合率の少ないものから順に A~F の記号を付している (図-11 参照)。

れきを混合しないもの (A系) については、液性限界程度の軟らかさで直径 100 mm、高さ 220 mm の三軸圧密装置に投入し、 $0.4 \sim 0.7 \text{ kg/cm}^2$ で等方圧密したものをトリマーを用いて直径 50 mm、高さ 100 mm に切り出して供試体とした。

またれきを混入したもの (B~F系) では、まずれきは水中で十分吸水させた後、乾いた布で過剰な水分をふきとったものを用意する (平均含水比 2.3%)。つぎに粘土は含水比 34% に調合し、一晚養生したものを用意する。これらのれきと粘土を乾燥重量比により、所定の混合率になるよう混合し、乾燥しないよう保存しておき、試験直前に直径 50 mm、高さ 100 mm に突固めて

* 正会員 工博 信州大学助教授 工学部土木工学科
** 学生会員 信州大学大学院 土木工学専攻

供試体とした。粘土含水比 34% は前述の等方圧密試料で圧密後得られる含水比と一致する含水比として選定した。

得られた供試体は成形後れきなしで $S_r=96\sim 98\%$ 、れき混入土で $S_r=95\%$ 前後であるので、水中セットを行ない、 $1.6\sim 2.5\text{ kg/cm}^2$ の back press. により飽和させるようつとめている。計算上⁴⁾ は飽和に十分な back press. が与えられているが、後の間引き水压変化に見られるように多少飽和が完全でない面も見られる。

成形された土の状態は、れき混入率の増大とともに当然その平均密度は大になる。三軸試験前の平均密度を示すと図-2 のようになる。図中○印が三軸試験前の状態である。これに粘土のみの乾燥密度 $r_{dc}=1.37\text{ g/cm}^3$ 、れきの真比重 $G_{sg}=2.65$ 、れきの吸水含水比 $w_g=2.3\%$ 、れきのみの乾燥密度 $r_{dg}=1.64\text{ g/cm}^3$ を用いて、Walker・Holtz の方法⁵⁾ による補正密度を計算してみると図-2 の実線となり、ほぼ供試体密度と近似していることがわかる。この実験の場合飽和度を高めるためとくに最適含水比での成形は配慮せず、 $w_{opt}=23\%$ より湿潤側の $w_c=34\%$ で突固めているが、一定含水比の粘土にれきが混入した場合の強さの変化として考えている。

この一連の実験は飽和土の圧密非排水試験であるが、多少とも不飽和な場合に生ずるせん断中の体積変化を測定している。体積変化は図-3 に示すごとく、三軸室への水の出入を市販のパラフィンゲージ式体積変化計を用いて測定している。測定には流動パラフィンよりもマンメーター・オイルを使用した方がガラス管との付着が少なく好都合である。三軸室への水の出入りにより体積変化を測定する場合、三軸室自身の変形が問題である。そこで三軸室の合成樹脂円筒、体積変化計の合成樹脂円筒は温度変化の影響をうけやすいので、 20°C の恒温室内で実験を行なっている。また三軸室圧力により三軸室円筒は体積変化を生ずる。その一例を図-4 に示してい

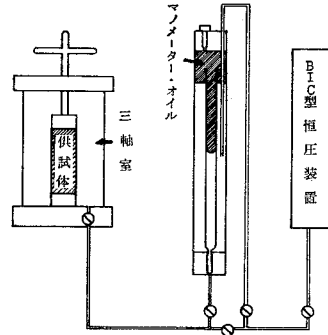


図-3 体積変化計配管略図

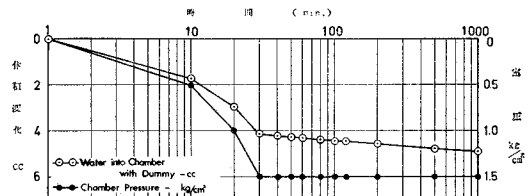


図-4 Cell の膨張に対する検定

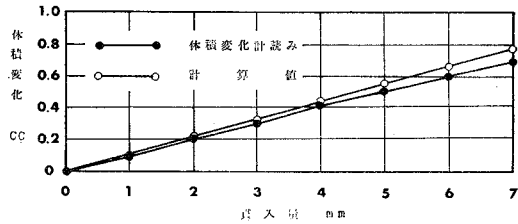


図-5 鋼棒貫入による体積変化計検定

る。圧力の変化により体積の膨張収縮があるのみならず、一定の圧力のもとでもかなりのクリープ変形が認められる。そこで back press. を1時間以上かけた後、せん断を行ない、このクリープ変形が比較的少なくなるよう心がけている。また体積変化計を三軸室への軸圧載荷用鋼棒の貫入によって検定した結果を図-5 に示しているが、体積変化計の測定の誤差は最小読取り目盛りの 0.1 cc 程度と考える。

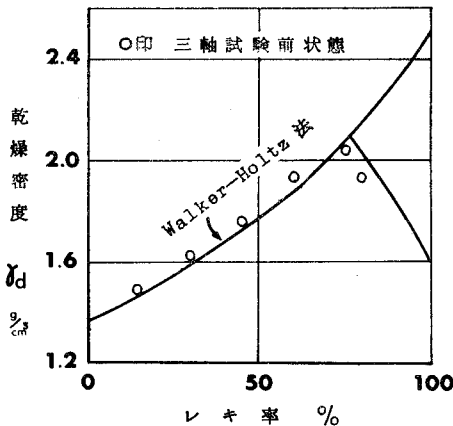


図-2 供試体の成形密度

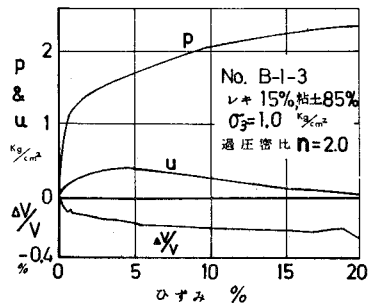


図-6 代表的応力-ひずみ曲線

3. 有効応力による強度表示

れきと粘土を各種の割合に混合した試料の正規圧密土・過圧密土について、圧密非排水試験を行なっている。代表的応力-ひずみ曲線を図-6 に示す。図-6 は粘土 85%・れき 15% (B系) の例であるが、軸差応力は載荷直後急増し、その後なだらかに増加を続け明確な破壊点は現われない。その間、間げき水圧も増大し、最大値を示すが、軸差応力との直視的な関連はない。体積変化は 全般的に $\Delta V/V=0.2\sim 0.4\%$ の体積収縮を示している。絶対量はわずかであるが多少の体積収縮が見られることは、back press. の作用にもかかわらずなお多少不飽和であったことを示すが、これらは 飽和度 95% 以上に対応し、強度的な影響は少ないものとする。

粘土 25%・れき 75% (F系) の例が図-23 にも示されている。

有効応力で整理した、最大主応力面と 60° をなす面上の応力の軌跡は、図-7、図-8、図-9 の例のごとくである。それぞれA系(れきなし)、B系(れき 15%)、E系(れき 60%) の応力軌跡を示す。図中○印は正規圧密土の場合、●印は過圧密土の場合を示すが、過圧密土は 2.0 kg/cm^2 の等方圧で圧密後 $\sigma_3=1.5, 1.0, 0.7, 0.4 \text{ kg/cm}^2$ で膨張させている。これらの応力軌跡は本質的には一つの包絡線を形成するものと見ることができ。すなわち有効応力で表示する場合、過圧密の影響は見られない。

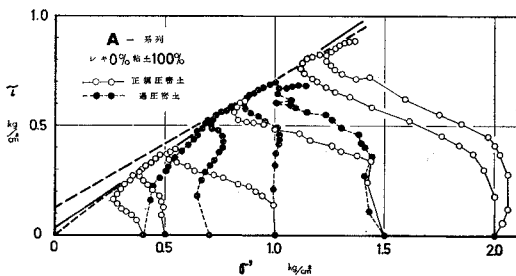


図-7 A系 応力軌跡

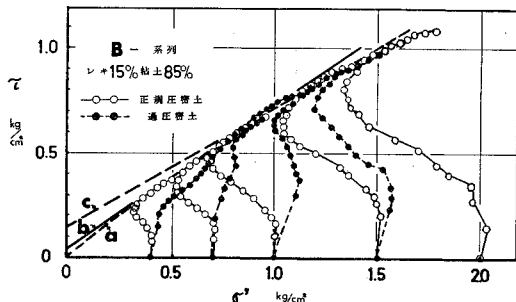


図-8 B系 応力軌跡

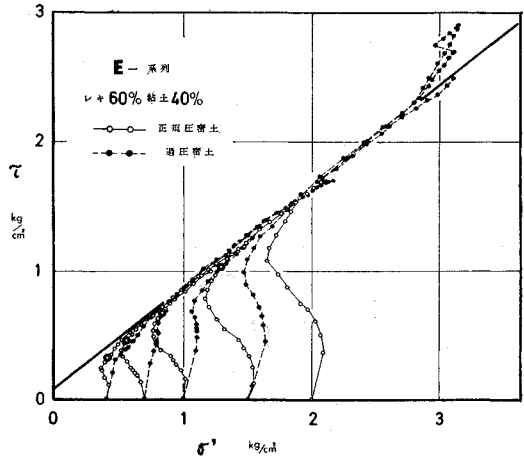


図-9 E系 応力軌跡

しかしこれらの包絡線は多少曲線をなし、直線とはなっていない。そのため一定値として強度定数は示しがたい(図-8 中の a 線)。正規圧密土の場合応力軌跡はほぼ相似な形を示し、破壊時の σ' の値は広い範囲に分布するが、過圧密土の場合応力軌跡は破壊時、 σ' の大なる方に集中する傾向がある。したがって過圧密土のみのデータから強度定数を決めれば、 σ' の値が大きい範囲での強度定数を求める結果になる(図-8 中の c 線)。

そこで σ' の値が小さい範囲での接線としても強度定数を求め(図-8 中 b 線)、2つの強度定数によりれき混入の影響を表わすことにする。

E系(れき 60%) よりれき量の多いものでは、破壊包絡線は直線となり上記のように曲線となる傾向は見られない。

しかし、れき混合率が大きくなると応力軌跡が破壊包絡線よりはずれてくる。その一例は図-9 の σ' の大なる部分の一部見られるが、図-10 における過圧密土の場合に顕著に見られる。これは非排水せん断中にれきが正のダイラテンシーを生じようとするため間げき水圧は極端に負圧となり、間げき水圧測定値が不良になった影響である。

したがって、れき混合率の高いH系(れき 90%)、I系(れき 100%)では非排水試験は行ないず排水試験を行なっている。しかしこの場合にはせん断中にダイラテンシーを生じているので、ダイラテンシーのエネルギー補正を行なったものを非排水試験の結果と比較している。

以上の応力軌跡の破壊包絡線より得られる有効応力による強度定数 c', ϕ' をれき混合率と対比してまとめると図-11 のとおりである。

応力軌跡の σ' の大なる範囲での強度定数を●、 σ' の小さい範囲での包絡線よりうる強度定数を○印で示している。

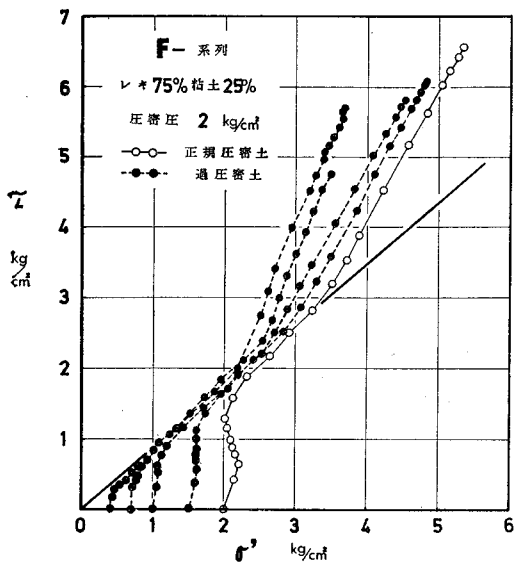


図-10 F系応力軌跡

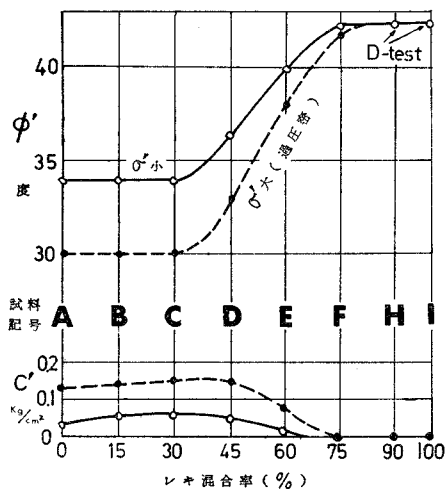


図-11 れきによる c' , ϕ' の変化

c' , ϕ' の面かられき混入の影響を見ると、れき率 30% までは変化がないが、それ以後れきの影響により ϕ' は漸増、 c' は漸減し、れき率 75% 以上でまた一定となる。

したがって c' , ϕ' に対する影響の面からは、れき率 0~35% は粘土領域、れき率 35~75% は中間領域、れき率 75% 以上はれき領域とみることができる。

かかる c' , ϕ' に対するれき混入の影響として Holtz ら¹⁾ は表-1 の結果を示しているが、 ϕ' の変化の傾向は類似している。しかしこの場合 c' の値が非常に大きいのは飽和度 55~70% という不飽和土につ

表-1 Holtz らの結果

れき率 (%)	ϕ'	c' (kg/cm ²)
0	25°15'	0.61
20	25°40'	0.49
35	25°10'	0.58
50	32°10'	0.32
65	34°10'	0.35

いて、飽和土と同じ間げき水圧測定を行なっているため正しい間げき圧が得られていない影響と考えられる。

4. 全応力表示

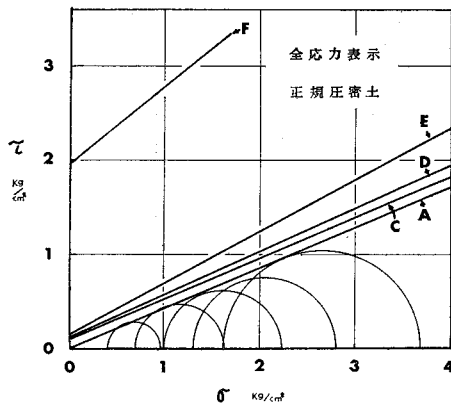


図-12 正規圧密土の全応力表示

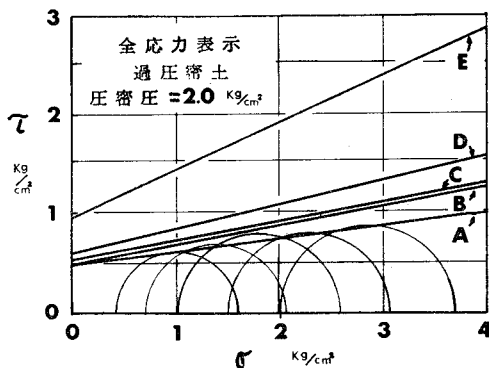


図-13 過圧密土の全応力表示

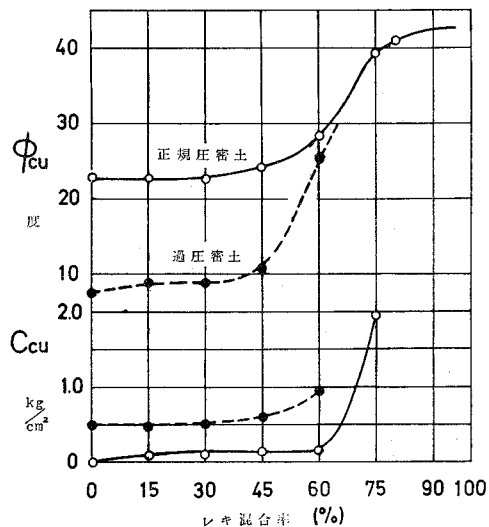


図-14 れきによる c_{cu} , ϕ_{cu} の変化

正規圧密土および過圧密土の非排水試験結果を全応力モール円で表示した場合には図-12, 図-13のごとき破壊包絡線が得られる。これらをまとめると図-14のごとくなる。

図-12の正規圧密土の場合、れき率45%まではさしたる強さの変化はないが、60%で多少増大し、75%でせん断強さは急増する。

図-13の過圧密土の場合には、れき率60%より強さが増すことがわかる。

全応力表示による強度定数 c_{cu} , ϕ_{cu} の面よりれき混入の影響をみた場合、れき率50%までは粘土領域、50~75%は中間領域、れき率75%以上はれき領域とみることができる。

5. せん断中の間げき水圧

せん断中に生ずる間げき水圧を軸差応力に対して図-15に示した。図では破壊時の軸差応力で除して無次元化して示してある。図はれき混入のない正規圧密土の場合であるが、back press. を作用させた場合には载荷初期 $du = \frac{1}{3} dp$ なる間げき水圧を発生し、ほぼ飽和していることがわかるが、back press. を作用させない場合には载荷初期の間げき水圧の発生が悪くなり、多少不飽和であると推察される。

間げき水圧に対するれき混入の代表的結果として、れき率45%(D系)の場合を図-16に示す。

図-15, 図-16より明らかなように間げき水圧を無次元化して示せば、ほぼ代表的曲線をうることができる。

かかる間げき水圧変化に対するれき混入の影響を示すと図-17のとおりで、れき混入率の増大とともに間げき水圧の発生が小さくなることがわかる。

また過圧密土の場合、図-18に、れき30%(C系)の場合を示したように、過圧密比の増大とともに発生す

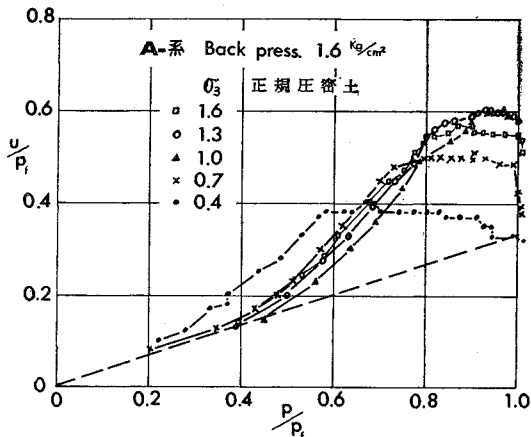


図-15 A-系 間げき水圧変化

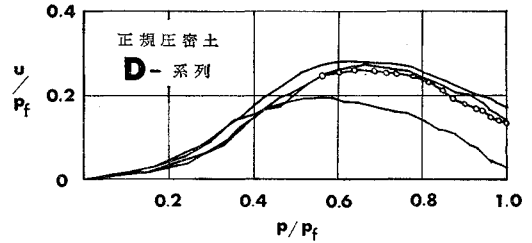


図-16 D-系 間げき水圧変化

る間げき水圧が小さくなることはよく知られている。いま過圧密比2.0の場合を例にとりてれき混入の影響を調べてみると、図-19のごとくE・F系でれきの影響が著しくなるが、図中のF系で途中から間げき水圧が一定になっているのは、水圧が負圧となり管路に気泡が析出し測定不能になったためと考えられ、測定が完璧ならば破

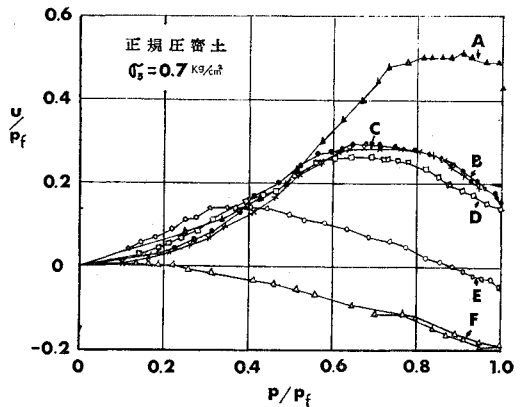


図-17 れき率による間げき水圧変化(正規)

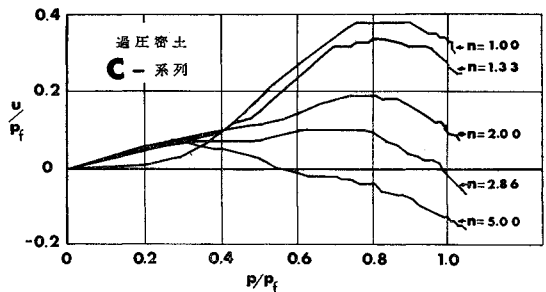


図-18 C-系 間げき水圧変化(過圧密)

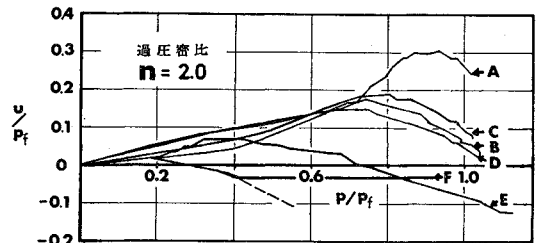


図-19 れき率による間げき水圧変化(過圧密)

線で示したとき経過をたどるものと推察される。これは前述の応力軌跡が破壊包絡線より上方にそれることの原因にもなっている。

図-17, 図-19 ともにれき混合率の増大とともに間げき水圧は小さくなるという同じような傾向にあるが、れき率 15~45% の B・C・D 系はほぼ類似した変化を示し、E・F 系で間げき水圧が小さくなりれき混入の影響が顕著に現われる。

したがって正規圧密土・過圧密土を通してれき混入の影響を間げき水圧変化の面より見た場合、れきのわずかな混入によっても間げき水圧変化には影響を与えるが、れき率 15~45% まではほぼ同じ状態で粘土のみの場合に近い。しかしれき率が 50% をこえるとれき率の増大とともに間げき水圧の発生は小さくなり、れき率 50% 以上が粘土とれきの中間領域になると考えうる。

6. せん断中の体積変化

試料は飽和度 95% 前後であり、さらに back press. を作用させているが、多少不飽和であるため非排水せん断中にもその絶対量はわずかではあるが体積収縮が測定されている(図-6 参照)。

通常飽和土に用いられる 0 点法による間げき水圧測定を不飽和土に適用した場合には、不飽和土の間げき空気圧を測定することになるといわれている。しかし飽和度 90% 以上では間げき水圧と間げき空気圧は近似的に等しいと考えて差し支えない⁹⁾。

そこで測定した間げき水圧と体積変化の関係を調べてみると、たとえば図-20, 図-21, 図-22 のごとくなる。試料が多少とも不飽和である場合には、間げき空気はその圧力の増大とともに圧縮され、かつ間げき水に溶けこんで体積が収縮する。この間げき空気圧と体積変化の関係はボイル・ヘンリーの法則から間げき率 n_0 、飽和度 S_0 、ヘンリーの溶解率 H を用いて計算できる⁴⁾。

図-20, 図-21, 図-22 には $n_0(1-S_0+S_0H)$ を仮定して計算した間げき空気圧と体積変化の関係を破線により示し、実験結果と併記している。計算に用いた n_0

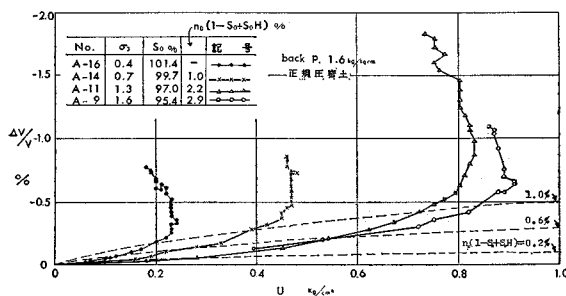


図-20 A-系体積変化

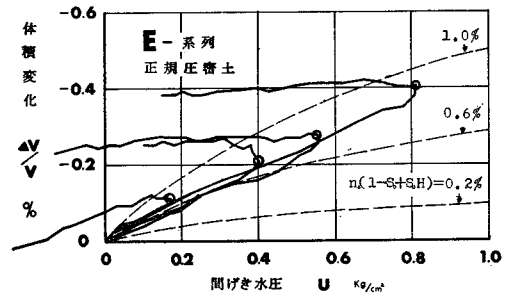


図-21 E-系体積変化

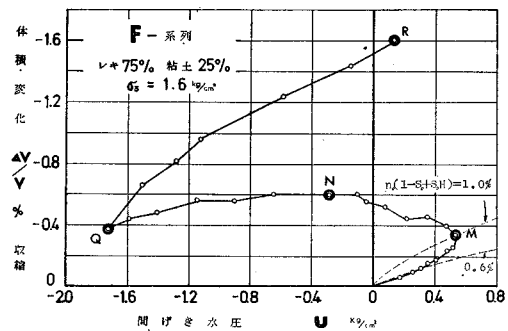


図-22 F-系体積変化

$(1-S_0+S_0H)$ の値と試験時の値とは必ずしも一致しないが、実験結果は圧縮の初期において計算による曲線に沿って上昇する傾向が認められる。

$n_0(1-S_0+S_0H)$ 値には back press. の効果が算入されていないし、また $n_0(1-S_0+S_0H)$ 値算出の誤差を考えると圧縮初期には間げき水圧の増大により間げき空気が収縮・溶解して体積が収縮すると見ることができる。

しかし間げき圧が一定値に達して以後変化しなくなるとか、最大値に達して以後減少するなどの状態に達するとその後体積変化・間げき水圧の関係は収縮・溶け込みの曲線からはずれてくる。かかる点を図-21, 図-22 に大○印で示しているが、この状態は応力軌跡ではそれぞれ図-9, 図-24 の大○印に対応し、応力軌跡が破壊包絡線に近づいた点であることがわかる。

したがって体積変化は少なくとも応力軌跡が破壊包絡線に近づくまでは、間げき圧の増大により間げき空気が圧縮・溶解して生ずるといえる。

しかし間げき圧が最大値を示し以後減少する過程においては、この曲線よりはずれることは図-21, 図-22 に見られる通りであるが、これは本質的にはやはりこの線に沿うべき性質のものであり、体積変化測定の time lag に基因するものではないかと考えられる。

これら一連の実験において間げき水圧測定には 0.1% /min の軸ひずみで十分であることをひずみ速度を変えた試験によって確かめてある。しかし体積変化の場合、

供試体外への排水という圧密は生じないが、間げき空気の圧縮・膨張による圧密という、いわば内部的圧密をとまなうものであり、とくに体積変化には時間的遅れが出るのではないかと考えられる。

体積変化性状を明確に示した一例として、図-22に対応する応力-ひずみ曲線を図-23に、応力軌跡を図-24に示す。これらはれき 75%・粘土 25% の供試体に $\text{back press.} = 2.5 \text{ kg/cm}^2$ を加えた場合の結果である。

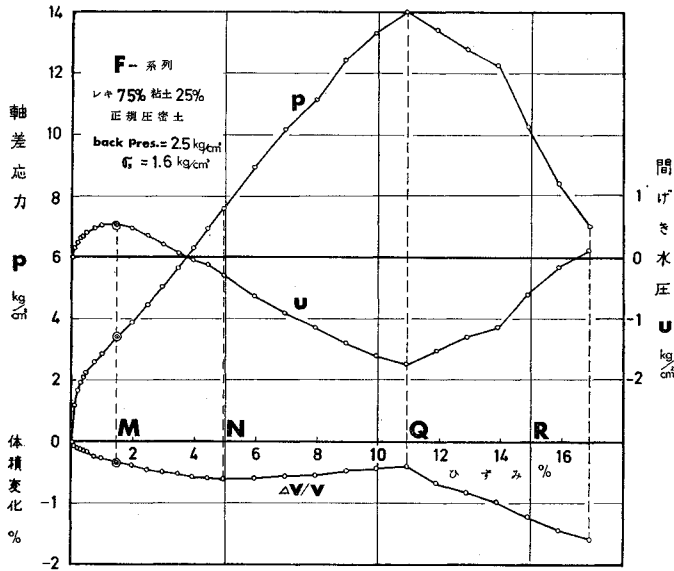


図-23 F系 応力-ひずみ曲線

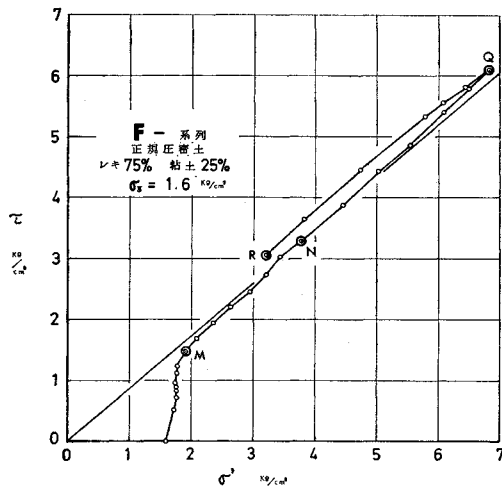


図-24 F系 応力軌跡

この No. F-2 の場合軸ひずみは 1.5% まで (Mまで) 間げき圧は増大し、体積は収縮する。このひずみMの状態は 図-24 のM点に対応し、すでに破壊包絡線に近づいている。この時 図-22 の場合にもM点に対応し、

ここまではほぼ間げき圧と体積変化に関連のあることが認められる。MよりNまではせん断によるれきのダイレイタンスにより膨張しようとする働きが加わり、間げき圧は減少するにもかかわらず体積は収縮している。Nをすぎて軸差応力が最大となるQまで間げき圧の減少に応じ体積変化も膨張するがその絶対量はわずかである。軸差応力最大を過ぎ再圧縮の段階に入り、間げき圧の増大に応じ体積は再び収縮に転ずることになる。MからNまでの体積変化が収縮であることまたNからQまでの体積膨張の量が小さいことが理解できないことであり、体積変化の時間的遅れと考えざるをえない。一見、圧密における圧縮・膨張時の体積変化率の相違に基因するものと想起されるが、排水による有効応力の変化と対比した体積変化ではなく間げき圧との対比であるので無関係である。これらのことは、不飽和土のせん断性状を明らかにする上には重要なことであると考えられる。

7. 結 論

一種類の試料についてであり、かつ最大粒径の小さいれきを使用しての結果ではあるが正規圧密・過圧密の状態についてせん断強さの面かられきと粘土の混合土の性質を明らかにし、つぎの結論をえた。

有効応力表示による c' , ϕ' については、れき率 0~35% で粘土領域、れき率 35~75% は中間領域、れき率 75% 以上はれき領域とみなしうる。

全応力表示による c_{cu} , ϕ_{cu} よりみた場合、れき率 0~50% は粘土領域、れき率 50~75% は中間領域、れき率 75% 以上はれき領域と見ることができる。

間げき水圧変化にはれきのわずかな混入が影響する。しかしれき率 50% まではほぼ同じ状態で粘土のみの場合に近い。れき率が 50% をこえるとれき率の増大とともに間げき水圧発生は小さくなり、中間領域に入るとみなしうる。

総合した結論は出し難いが強いて一つにまとめれば、れき 50% 以下が粘土領域、50~75% が中間領域、75% 以上でれき領域といえよう。

砂と粘土の混合土については、砂 60% 以下が粘土領域といわれている³⁾ のと対比すれば、れきと粘土の場合、粘土領域が多少せまくなると考えればよいといえる。

なおせん断時の体積変化については今後の問題を残しているが、多少不飽和な場合における体積変化と考えられ、本質的には間げき圧の変化により間げき空気が圧縮・溶解するものとみなしてよいと考えられる。これらの

挙動は不飽和土のせん断特性を考えるうえに示唆するものがある。

最後に本研究に協力していただいた永野，飛田，音部（当時本学学生）の諸君に感謝の意を表するとともに，文部省科学研究費の補助をうけたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Holtz, W.G. & Ellis, W.: "Triaxial Shear Characteristics of Clayey Gravel Soils." 5th Int. Conf. S.M.F.E. 1961
- 2) 山野隆康：“粗レキ交り土のせん断強さに関する研究” 土木試験所月報第135号，1964

- 山野他：“砂利交り土の三軸圧縮試験について” 土木試験所報告第33号，1965
- 3) 倉田・藤下：“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第11巻第9号，1961
 - 4) Lowe & Johnson, "Use of back pressure to increase degree of saturation of triaxial test specimens." "Proc. Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, 819-839, (ASCE), 1960
 - 5) 土質工学会：“土質試験法初版”，p. 141
 - 6) 川上・峰村：“不飽和締固め粘土の強度特性” 信大工学部紀要 No. 25, 1968

(1970. 4.15・受付)