

飽和粘性土の強度特性におけるヒズミ速度の影響に関する一考察

秋田大学 正 員 宮川 勇
 学生員 ○鈴木立実
 秋田工専 正 員 三浦雅己

1. はじめに

ヒズミ速度を大きくすると強度が増加するといういわゆる“ヒズミ速度効果”の研究は従来から行なわれている。しかしそれらは極めて大きいヒズミ速度と小さいヒズミ速度を作用させて比較したものが大部分であり、三軸試験で間ゲキ水圧を十分に測定できるようなヒズミ速度範囲での研究は少ない。また普通土質試験¹⁾では粘性土に対して間ゲキ水圧を測定する圧密非排水試験のヒズミ速度は $0.2 \sim 0.05\%/\text{min}$ となっているが、実際には土構造物は大きさまじりのヒズミ速度を受けているものと思われる。そこで今回の実験は乱さない飽和粘性土に対しヒズミ速度を変えた場合、有効応力解析での強度特性と破壊に至るまでのその挙動はどのような影響を受けるかということ調べたものである。

2. 試料及び実験方法

今回用いた試料は秋田県横手市郊外の用水路辺から採取した乱さない飽和粘性土である。この試料の特性は表1に示す通りであり、また約7.4%の有機分を含む比較的軟弱な土である。実験は直径5cm、高さ12.5cmに成形した供試体と0.4、0.6、0.8、1.0、 $1.2\%/\text{cm}^2$ の5段階の圧力で等方圧密し、それぞれに対し表1に掲げるようなヒズミ速度を作用させ、セル圧と圧密圧の大きさに保ち非排水三軸せん断（ヒズミ制御）したものである。なお供試体をセッティングしてから及び圧密終了時に等方圧力40%を与えたところ、発生した間ゲキ水圧 $4U_0$ はほとんど $4U_0 \approx 40\%$ であった。

表1 試料の特性

比重	L.L.	P.L.	I_p	粘土分	シルト分
2.65	64.2%	34.4%	29.8	67.4%	32.6%

表2 ヒズミ速度段階

	A	B	C	D	E	F	G
ヒズミ速度 $\%/\text{min}$	0.0012	0.0039	0.0098	0.0195	0.029	0.049	0.098

3. 実験結果及び考察

今回の実験ではほとんどが主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ にピークが見られない、いわゆる塑性状態になった。そこで有効主応力比 σ_1/σ_3 のピークを破壊とし、解析した結果は以下の通りである。

a) 有効主応力比 σ_1/σ_3 、主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、間ゲキ水圧

軸ヒズミに対する有効主応力比は図1に示すように初期の段階では、圧密圧力が小さいためほとんど同じような経路をたどるが、軸ヒズミが2%付近に達した所からヒズミ速度の大きい方が上に出て、8%の付近からヒズミ速度の小さい方が上に出て破壊に至る傾向にある。この傾向は、Richardson²⁾の行った実験結果とほぼ同様である。しかしこれはヒズミ速度が $0.0012\%/\text{min}$ と $0.098\%/\text{min}$ で実験したものについて比較した場合言えるものであり、中間のヒズミ速度ではこの傾向はやや不規則であった。

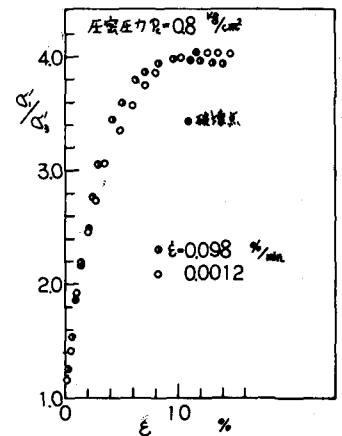


図-1 ヒズミ ϵ ~ 有効主応力比 σ_1/σ_3

有効主応力比がピークに達した時すなわち破壊に達した時の主応力差は圧密圧力が小さい程ヒズミ速度が大きくなるにつれて増大する傾向にあり、圧密圧力が大きく(1.2 g/cm³)なるとほとんどその影響は見られないようになる。(図2) またその時発生した間ギキ水圧はこの実験のヒズミ速度の範囲ではその効果は見られなかった。以上のような現象が生ずると強度増加率や強度定数に影響を与え、また破壊に達するまでの途中経過が問題になってくるように思われる。

b) 応力 ヒズミ関係

ここでは Kondner²³による粘土の圧密非排水三軸試験における応力 ヒズミ関係が近似的に双曲線で表わされるという方法に適用してみた。その双曲線は

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{a - b\varepsilon}$$

と表わされ、ここに a と b は土の種類、ヒズミ速度などによって決まる定数である。この式から応力 ヒズミ曲線は初期傾度 $1/a$ を持ち、 $\varepsilon \rightarrow \infty$ で $(\sigma_1 - \sigma_3) = 1/b$ に漸近する。そこで初期傾度 $1/a$ を変形係数 E_m に対して初期変形係数 E_0 とし、この E_0 を実験から得られたデータを用いて求め、ヒズミ速度に対してプロットすると図3のようになる。この図からヒズミ速度が増加するにつれて初期変形係数は大きくなり、しかも圧密圧力が大きい程その増加する割合が大きくなる傾向にある。

c) 非排水強度増加率 $\Delta\sigma_u/\sigma'_e$ 、強度定数 ψ'

強度増加率は圧密圧力の増加 $\Delta\sigma'_e$ に対する非排水せん断強度の増加 $\Delta\sigma_u$ の割合である。これを横軸に有効圧密圧力 σ'_e 、縦軸に非排水強度 σ_u を各ヒズミ速度ごとにとり、その傾きによって求めたものが図4である。図のようにヒズミ速度が増加するにつれて強度増加率は減少していく傾向にある。これは小さい圧密圧力ではヒズミ速度が大きくなるにつれて非排水強度が増加し、大きい圧密圧力ではほとんどそれによる影響はないという結果によるものと思われる。ヒズミ速度に対する内部摩擦角を図5に示す。これからわかるようにヒズミ速度が大きくなるにつれて内部摩擦角は小さくなる傾向にある。これは強度増加率の場合と同様に圧密圧力の大小によるヒズミ速度効果の相異によるものと思われる。なおこの解析中に若干の粘着力が生じた。

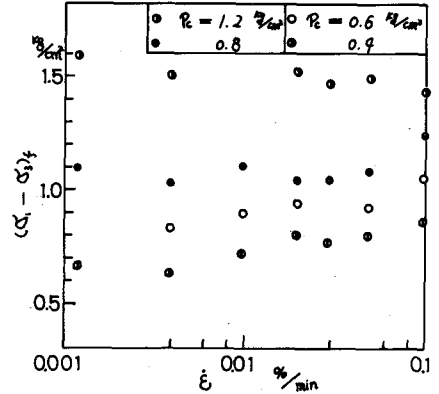


図-2 ヒズミ速度も～破壊時の主応力差

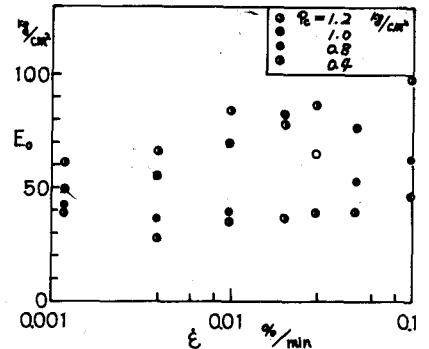


図-3 ヒズミ速度も～初期変形係数 E_0

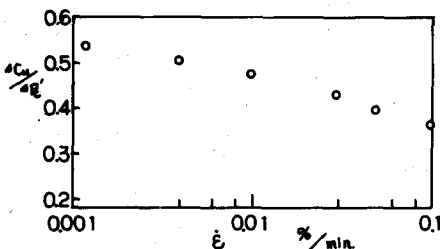


図-4 ヒズミ速度も～強度増加率 $\Delta\sigma_u/\sigma'_e$

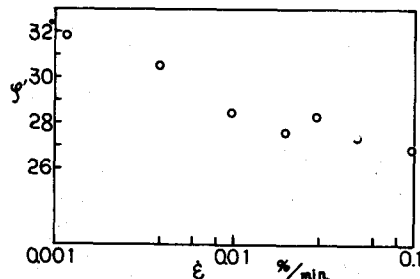


図-5 ヒズミ速度も～内部摩擦角 ϕ

d) 応力経路

上で求めた内部摩擦角を用いて破壊面上の応力状態を応力経路で描くと図6のようになる。この図はヒズミ速度 $0.0012\%/\text{min}$ と $0.098\%/\text{min}$ で実験した結果と破壊点までプロットしたものである。これによると小さいヒズミ速度の方がより大きく過圧密の領域をたどってから破壊に達している。すなわちヒズミ速度の違いがせん断過程に大きな影響を与えていることが明らかである。

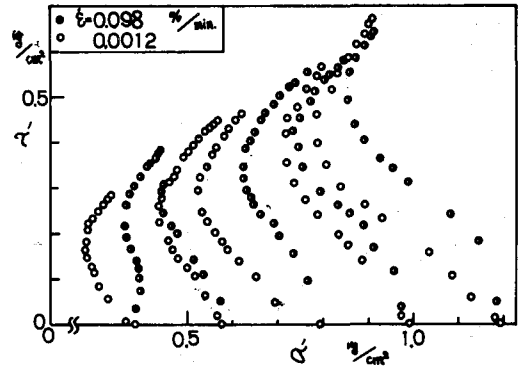


図-6 破壊面上の応力経路

e) ダイレイタンシー

今回の実験では体積変化を測定しなかったが Scott²⁴ による提案方式にデータを用いて検討してみた。それによると土骨格の体積変化 E_s と非排水の場合でせん断中に発生する間ガキ水圧 Δu は次のように考えられる。

$$E_s = 3C_s (\Delta \sigma_{oct} - \Delta u) + D \Delta \tau_{oct}$$

ここに $3C_s$: 土骨格の圧縮率、 $\Delta \sigma_{oct}$: 正八面体面直応力の増分

D : $\Delta \tau_{oct}$ による体積変化の比例係数、 $\Delta \tau_{oct}$: 正八面体面せん断応力の増分

$$\Delta u = B \left[\Delta \sigma_{oct} + \frac{D}{3C_s} \Delta \tau_{oct} \right]$$

これは三軸試験では $\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3$ であるから

$$\Delta u = B \left[\frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 + 2\Delta \sigma_3) + \frac{D}{3C_s} \frac{\sqrt{3}}{3} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \right]$$

となる。これを Skempton の間ガキ圧表示

$$\Delta u = B \left[\Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \right]$$

と対応すれば、 $\frac{D}{3C_s} = \frac{3}{\sqrt{2}} (A - \frac{1}{3})$

となる。

図7はダイレイタンシーの目安となる上式の $\frac{D}{3C_s}$ を実験から

得られた破壊時の間ガキ水圧係数 A を用いて求めたものである。図からわかるようにヒズミ速度が大きくなるにつれて $\frac{D}{3C_s}$ の値は広がっており、体積変化の受ける割合が大きくなる傾向にあると思われる。

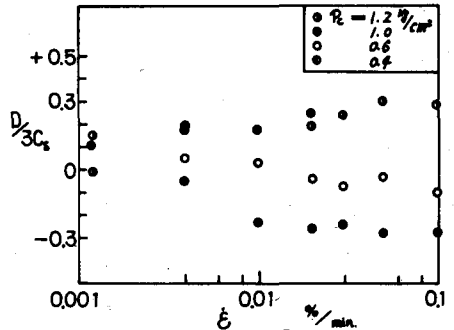


図-7 ヒズミ速度と $\frac{D}{3C_s}$

4. まとめ

乱さない飽和粘性土に対してヒズミ速度を約 0.001 から $0.1\%/\text{min}$ に変化させて実験した結果次のような傾向が生じた。1) 破壊時の主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は圧密圧力が小さい程ヒズミ速度が大きくなるにつれて増大し、またたカーヒズミ曲線の初期変形係数 E_0 は圧密圧力が大きい程ヒズミ速度が大きくなるにつれて増大する。2) 非排水せん断強度増加率と内部摩擦角はヒズミ速度が大きくなるにつれて減少する。3) せん断過程中ヒズミ速度が小さい経過圧密領域をより多くたどる。4) せん断によるダイレイタンシーはヒズミ速度の大きい程その影響を大きく受ける。

[注] 1. 土質試験法、3. 土質力学 — 土質工学会、

2. Effect of Strain-Rate upon Undrained Shear Resistance of a Saturated Remoulded Fat Clay

4. Principles of Soil Mechanics — Ronald F. Scott, — A.M. Richardson, R.V. Whitman,