

有機質土のダイレイタンスー性状に及ぼす ヒズミ速度の影響について

対馬 雅己

Effect of Strain-Rate upon Properties
of Dilatancy of Peat

Masaki Tsushima
(昭和53年10月31日受理)

1 ま え が き

特殊土といわれる高有機質土は粘性土と比べて、その骨格の構成内容が複雑であり、しかも自然含水比、間ゲキ比などが大きいことから、作用する荷重の速度によってその応力～ヒズミ挙動がそれぞれ異なった特性を呈すると考えられる。そこで今回の報告は、室内試験（軸対称三軸圧縮試験）によって、有機質土について種々のセン断速度によるダイレイタンスー挙動とその強度特性への影響について検討を加えたものである。

2 試料および実験方法

泥炭性土では多くの場合、乱さない試料は含水比、密度、繊維構造などにかかりの変異が認められる。そこでそのバラツキを避けるために、本実験では乱した後再成形した供試体を用いた。試験に用いた試料は、秋田県雄物川流域から採取したものである。採取した試料は、日本統一分類法による黒泥(M_k)にほぼ近いものである。またその物性は表-1に示すとおりである。試料は液性限界以上の高含水比で十分練り返したものを、気泡が混入しないように十分注意しながら圧密容器に入れ、所定の圧力よりもやや低い圧力で予圧密した後、直径3.5cm、高さ8.75cmの円柱形の供試体に成形した。試験は等方圧密非排水三軸圧縮試験を行ない、圧密の終了は有効応力で規定し、残留間ゲキ水圧が作用圧密圧力の3%以下という条件によった。圧密圧力σは0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5kg/cm²の5段階で行ない、ヒズミ速度はそれぞれ約1.0, 0.1, 0.01, 0.001%/minの4種類とした。非排水試験における発生間ゲキ水圧Δuの測定は、供試体の底端部において行なった。なお破

比 重G _s	1.84~1.86
強熱減量I _d (%)	57~ 59
液性限界L.L (%)	409~ 420
塑性限界P.L (%)	183~ 197
圧縮指数 C _c	2.50
膨張指数 C _{cs}	0.25

表-1 試 料 の 物 性

壊規準としては有効主応力比 (σ'_1/σ'_3)_{max}とした。

3 試験結果および考察

図-1は、等方圧密された有機質土のセン断抵抗角φ'を各々のヒズミ速度εについて示したものである。φ'は約1.0%/minのデータを除いて、ヒズミ速度の増加とともにやや減少するか、あるいはほとんど変化しない傾向を示すようである。粘性土の非排水クリープ試験において、定常、加速クリープの

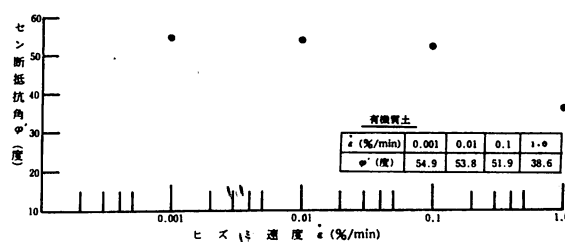


図-1 φ'～ε

開始時および破壊時の有効内部摩擦角は、ほぼ一定であるという報告¹⁾、またヒズミ制御試験による破壊時の有効内部摩擦角は、ヒズミ速度が変化してもほとんど変わらない²⁾という実験結果と同じ傾向を示すものである。

非排水強度増加率 (Cu/p) のヒズミ速度による変化を図-2 に示す。ヒズミ速度の増大にともなって

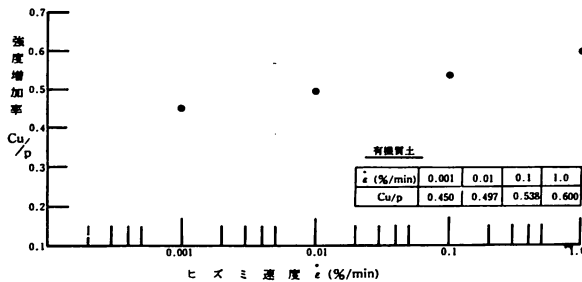


図-2 $Cu/p \sim \dot{\epsilon}$

(Cu/p) は増加する傾向を示した。粘性土については、通常ヒズミ制御試験や荷重制御試験において、ヒズミ速度すなわちせん断速度が大きいほど破壊時間が短く (Cu/p) が大きいという現象は、一般的事実として認められている。粘性土については、Richardson and Whitman²⁾はヒズミ制御試験において、ヒズミ速度が強度に及ぼす影響を検討し、栗原¹⁾はクリープ過程では、ヒズミ速度を定常クリープで代表させ、そのヒズミ速度と破壊時間との関係を調べている。これらの実験結果は、試験方法 (ヒズミ制御、荷重制御) にかかわらず、ヒズミ速度が大きくなれば強度は増加すると報告している。これは著者が行った有機質土の実験結果と一致している。

次に破壊時の発生間ゲキ水圧 U_r および間ゲキ圧係数 A_r のヒズミ速度による変化を図-3, 4 に示す。 U_r は約 1.0%/min のデータについては、ヒズミ速度の影響が現われているが、これは本質的なものではなく測定精度によるものと考えられる。ヒズミ速度約 1.0%/min を除くその他の U_r はヒズミ速度の影響がほとんど認められないようである。一方、破壊時の間ゲキ圧係数 A_r は、ヒズミ速度が大きくなるほど減少する傾向を示すようである。等方圧密土の非排水強度増加率 (Cu/p) は、せん断抵抗角 ϕ' 、破壊時の間ゲキ圧係数 A_r によって

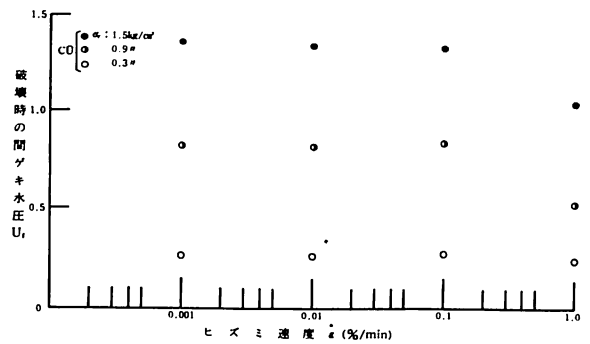


図-3 $U_r \sim \dot{\epsilon}$

$$Cu/p = \frac{\sin \phi'}{1 + (2A_r - 1) \sin \phi'} \dots \dots (1)$$

の関係で表わされる。前述した図-2 からヒズミ速度をパラメーターとした (Cu/p) は、図-1, 4 の現象からわかるように、せん断抵抗角 ϕ' の影響によらず、むしろ間ゲキ圧係数 A_r に大きく依存するようである。

次にヒズミ速度と破壊時間について吟味してみよう。粘性土のクリープ破壊試験において、定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ はクリープ破壊過程で最小値をとり、この値がクリープの破壊特性を知るうえで有力な因子となりうる。これが、斉藤・上沢³⁾によって実験的に示されている。その後、斉藤は内外の文献のクリープ破壊試験の結果をも合せて検討を加えた結果、破壊時間と定常クリープ速度の間に次の関係が見いだせることを示した。⁴⁾

$$\log_{10} t_r = 2.23 - 0.916 \log_{10} \dot{\epsilon}_s \pm 0.59 \dots \dots (2)$$

ここに t_r : 破壊時間 (min), $\dot{\epsilon}_s$: 定常クリープ速度

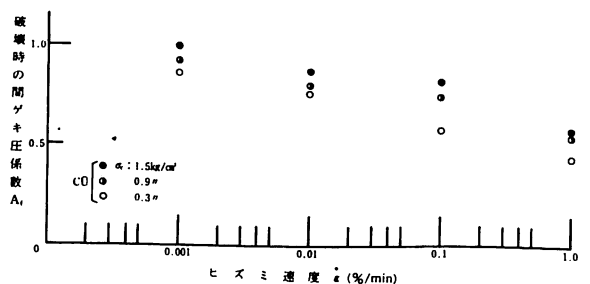


図-4 $A_r \sim \dot{\epsilon}$

有機質土のダイレイタンスー性状に及ぼすヒズミ速度の影響について

($10^{-4}/\text{min}$)。 (2)式の関係は、破壊時間は定常クリープ速度にほぼ逆比例するというものであり、定常クリープ速度が大きいほど破壊時間が短いことを示している。そしてこの関係が斜面の崩壊時間の予知に対して、有力な手段となることを示した。栗原¹⁾は通常のヒズミ制御あるいは荷重制御試験において、セン断速度が大きいほど破壊時間が短く強度が大きいという現象から、 $\dot{\epsilon}_s \cdot t_r$ の関係が通常のヒズミ制御試験における $\dot{\epsilon} \cdot t_r$ の関係と等価であることを示し

$$\dot{\epsilon}_s^m \cdot t_r = \dot{\epsilon}^m \cdot t_r = \text{const} \dots \dots (3)$$

という関係を与えた。ここに

$\dot{\epsilon}_s$: 非排水クリープ試験における定常クリープ速度 ($10^{-4}/\text{min}$)

$\dot{\epsilon}$: ヒズミ制御試験におけるヒズミ速度 ($10^{-4}/\text{min}$)

m : 定数、通常 $m \approx 1$ としてよい。

これらの関係は、主として斜面の崩壊時期の予知法として現場において大きな威力を発揮した。そこでこれまで著者が行ってきた泥炭の定ヒズミセン断試験、宮川ら⁵⁾のクリープ破壊試験結果とカナダの Muskeg について Adams⁶⁾が行なった定ヒズミセン断試験の結果をプロットすると図-5 のようになる。図には斉藤⁴⁾の与えた(2)式も比較として併示して

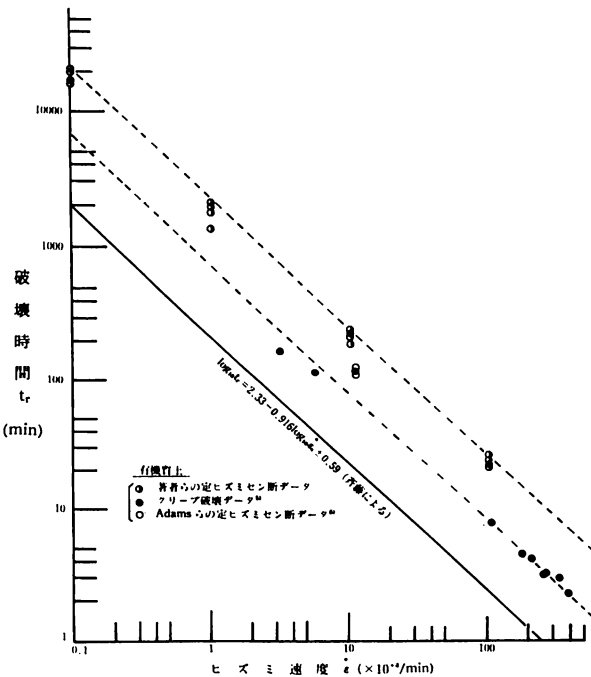


図-5 $t_r \sim \dot{\epsilon}$

昭和 54 年 2 月

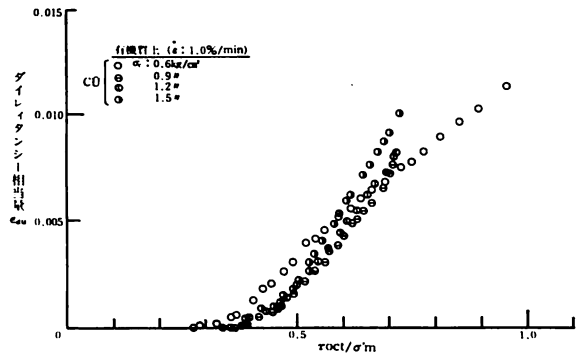


図-6 $\epsilon_{du} \sim \tau_{oct}/\sigma'_m$

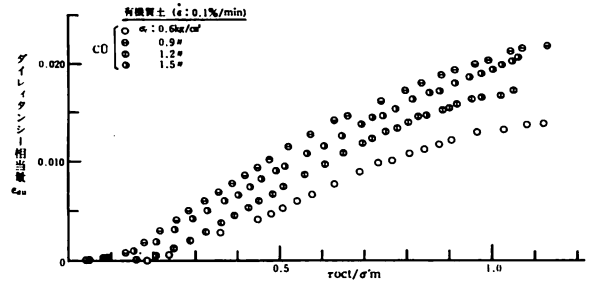


図-7 $\epsilon_{du} \sim \tau_{oct}/\sigma'_m$

ある。図から一般的に知られるように、斉藤⁴⁾の与えた95%のデータを含む ± 0.59 の幅を考慮したとしても泥炭性有機質土の破壊に至るヒズミ量が、一般の粘性土と比べて大きいことを示すものである。またクリープ破壊試験から得られた $\dot{\epsilon}_s \cdot t_r$ と定ヒズミセン断試験の $\dot{\epsilon} \cdot t_r$ の関係は、試験方法によらず定性的に同様であることが本実験から得られた。これは前述した栗原¹⁾の報告と同じ傾向を示すようである。

さて有機質土の非排水セン断過程において発生する間ゲキ水圧の挙動を通じて、ヒズミ速度の変化によるダイレイタンスー特性について検討してみる。応力が作用した場合の土粒子骨格要素に生じる体積ヒズミは次式で表わされるとする。

$$\epsilon_v = \epsilon_c + \epsilon_d \dots \dots (4)$$

ここに ϵ_v : 応力変化による全体積ヒズミ

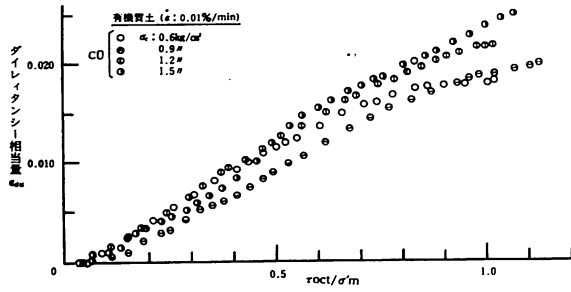


図-8 $\epsilon_{du} \sim \tau_{oct}/\sigma'_m$

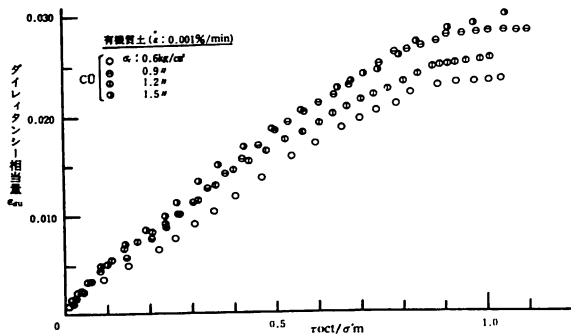


図-9 $\epsilon_{du} \sim \tau_{oct}/\sigma'_m$

ϵ_c : 等方応力成分の増分による体積ヒズミ
 ϵ_d : 偏差応力成分の増分による体積ヒズミ
 さらに ϵ_c は次式で表わされ

$$\epsilon_c = 3 C_s \Delta \sigma'_m \dots \dots (5)$$

ここで $3 C_s$ は等応力 (平均有効主応力) の増分 $\Delta \sigma'_m$ の変化による土粒子骨格の圧縮率または膨張率であり次式のように求められる。

$$3 C_s = C \log \{ (\sigma'_m + \Delta \sigma'_m) / \sigma'_m \} / (1 + e) \Delta \sigma'_m \dots \dots (6)$$

ここで e : 間ゲキ比, C : 圧縮指数または膨張指数。
 (5)式における応力を全応力の増分 $\Delta \sigma_m$ と発生間ゲキ水圧の増分 Δu によって示せば

$$\epsilon_c = 3 C_s (\Delta \sigma_m - \Delta u) \dots \dots (7)$$

となり, (7)式を(4)式に代入すれば

$$\epsilon_v = 3 C_s (\Delta \sigma_m - \Delta u) + \epsilon_d \dots \dots (8)$$

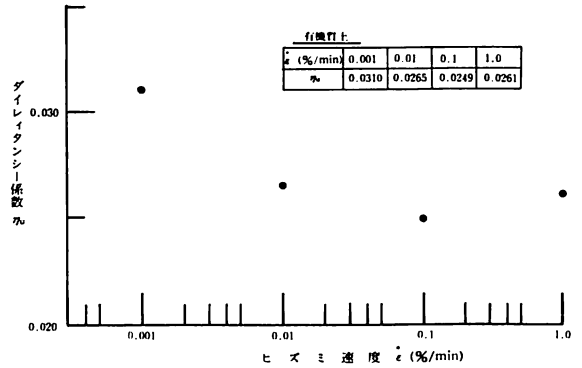


図-10 $\eta_u \sim \dot{\epsilon}$

となる。したがって非排水状態において $\epsilon_v = 0$ として, 間ゲキ水圧について解けば,

$$\Delta u = \Delta \sigma_m + \epsilon_d / 3 C_s \dots \dots (9)$$

となり, 偏差応力成分によるダイレイタンスー相当量 ϵ_{du} ($= \epsilon_d$) は(9)式より

$$\epsilon_{du} = 3 C_s (\Delta u - \Delta \sigma_m) \dots \dots (10)$$

となる。ここで(6)式の係数 C として, 非排水せん断過程における応力径路の状態から考えて膨張指数を用いる。

そこで(10)式から求められたダイレイタンスー相当量 ϵ_{du} とその発生因子の一つと考えられる正八面体面上の応力比 τ_{oct}/σ'_m との関係を, 各ヒズミ速度 $\dot{\epsilon}$ 1.0, 0.1, 0.01, 0.001%/min について示せば図-6~図-9となる。これらの図から $\epsilon_{du} \sim \tau_{oct}/\sigma'_m$ は, ヒズミ速度の変化に関係なく, 非排水せん断過程においてほぼ線形関係が認められる。これより, 偏差応力成分によって発生するダイレイタンスー相当量 ϵ_{du} と応力比 τ_{oct}/σ'_m との間に線形関係が成り立つとすれば, そのダイレイタンスー式として

$$\epsilon_{du} = \eta_u (\tau_{oct}/\sigma'_m - v) \dots \dots (11)$$

の基本式が近似的に用いられる。ここで η_u は ϵ_{du} が τ_{oct}/σ'_m に比例する領域におけるダイレイタンスー係数である。 v は, 応力比 τ_{oct}/σ'_m がある大きさに達するまでは, ϵ_{du} (圧縮) がほとんど生じないという限界の応力比である。図-6~図-9に示される応力比の限界 v は, ヒズミ速度 $\dot{\epsilon}$ が小さくなるにつれて, 零(原点)に近づいていき, $\dot{\epsilon}$ が約0.001%/minでは原点から応力比の増分に対応して, ほぼ比例的に増大する傾向を示すようである。この点については, 応力と間ゲキ水圧の発生機構に関してさらに検

有機質土のダイレイタンスー性状に及ぼすヒズミ速度の影響について

討を進め今後の課題としたい。

(II)式で示される非排水セン断過程中に発生するダイレイタンスー相当量と応力比 τ_{oct}/σ'_m のコウ配、すなわちダイレイタンスー係数 η_u とヒズミ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係を示せば図-10となる。ヒズミ速度 $\dot{\epsilon}$ 1.0%/min のデータを除いて(測定精度上の問題)、 η_u はヒズミ速度が大きくなれば、やや減少する傾向を示すようである。このような現象は、セン断速度の変化と定性的に得られたダイレイタンスー効果とは深くかかわりあっているものと推論される。

4 結 論

本報告は、泥炭性有機質土のヒズミ速度効果について、その力学のおよびダイレイタンスー特性の一端を示したものである。それらを要約するとつぎのようになる。

- 1) 有効応力解析によるセン断抵抗角は、ヒズミ速度1.0%/min を除いて、ヒズミ速度が変化してもほとんど変わらないようであった。また非排水強度増加率は、ヒズミ速度が大きくなるにつれて増加する傾向を示した。
- 2) 破壊時の発生間ゲキ水圧は、測定精度の点から考慮して、ヒズミ速度の増大にともなうほとんど変化しないようである。一方破壊時の間ゲキ圧係数は、ヒズミ速度の増加とともに減少した。またその傾向は非排水強度増加率の変化に対応しているようであった。
- 3) クリープ破壊試験および定ヒズミセン断試験による有機質土のヒズミ速度と破壊時間の間には、試験方法にかかわらずほぼ逆比例関係が成立し、その比例定数は一般の粘性土と比べて大きい値をもつ。
- 4) ダイレイタンスー相当量は、ヒズミ速度の変化にかかわらず、応力比の一次関数として表わ

される。またダイレイタンスーの発生をともなう応力比の限界値の存在が定性的に認められ、その限界値はヒズミ速度に大きく依存するようであった。

5) ダイレイタンスー係数は、ヒズミ速度の増加にともなうやや減少する傾向を示すようであり、この現象からヒズミ速度の変化とダイレイタンスー効果とは深くかかわりあっているものと推測される。

最後に、本研究を行なうにあたり終始御指導いただいた秋田大学鉱山学部宮川勇教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 栗原則夫：粘土のクリープ破壊に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第202号，pp. 59～71，1971。
- 2) A. V. Richardson・R. V. Whitman：Effect of Strain-Rate upon Undrained Shear Resistance of a Saturated Remoulded Fat clay, Geotech., Vol.13, No. 4, pp. 310～324, 1963.
- 3) 齊藤・上沢：土のクリープ破壊に関する実験的研究，鉄道技術研究報告，128号，pp. 1～9，1960。
- 4) 齊藤迪考：斜面崩壊時期の予知方法，第3回土質工学研究発表会講演集，pp. 381～384，1968。
- 5) 宮川・五十嵐・須貝：高有機質土のクリープ破壊に関する一考察，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 53～55，1974。
- 6) J. I. Adams：Laboratory Compression Test on Peat, Proc. Seventh Muskeg Res. Conf., Tech. Memo 71, pp. 36～54, 1961.