

液状化した砂の物性に関する研究

柴田 徹* 西原 晃*

Physical Characteristics of Liquefied Sand

Toru SHIBATA* Akira NISHIHARA*

ABSTRACT

The objective of this paper is to determine experimentally the expansion- and viscosity- characteristics of liquefied sand. Several kinds of sand and glassbead specimens were used, and the liquefaction of specimens was caused by upward seepage flow. Main results obtained are as follows:

- (1) The expansion ratio, the ratio of post-liquefied volume to pre-liquefied volume, was found to be proportional to the flow rate of upward seepage.
- (2) The coefficients of viscosity of liquefied sand obtained by a rotational viscometer decreased with increasing shear strain.
- (3) Comparison of the melting behaviour of solid with the completely liquefied sand, seepage flow rate is considered to correspond to the absolute temperature.

Key words: Liquefaction, Expansion, Viscosity, Upward seepage, Melting point.

キーワード: 液状化、膨張、粘性、浸透水流、融点。

1. まえがき

水を含んだ緩い砂地盤は地震時に液状化して、各種の地盤災害を引き起こす。この液状化のメカニズムに関しては、新潟地震を契機に内外で始められた研究の進展により、その成果が実務設計にも取り入れられるようになってきた。

しかし砂地盤が液状化して側方流動を生じ、やがてそれが停止するまでの一連の過程については、未解明の課題を残している。たとえば液状化した固・液の二相混合体は、粘(弾)性固体とみるか粘性流体とみるかで解析上の扱い方が分かれる。このような現状を踏まえて、本研究では前報[1]の続報として、液状化後の流動体の物性変化を解明することを試みている。

前報[1]では、3種類の砂に対する体積変化を対象としたが、今回は実験材料としてそれに数種類のガラスビーズを加え、さらにこれら材料の粘性特性をも取

り扱った点で進展がみられる。

砂を液状化させる外作用としては、地震のほかに波浪あるいは浸透水流などがある。これらのうちで、ここでは浸透水流による方法を採用した。すなわち土槽に緩め飽和状態で粉体材料(砂やガラスビーズ)を満たし、底部から上向き浸透水を流してクイックサンド状態を出現させる。そのとき液化材料の体積変化と粘性特性を調べている。

このように上向き浸透水流の実験であるから、その成果は地盤の掘削時に発生するボイリング問題の解決にも寄与できると考えている。

さて砂のような粉粒体の液状化は、固体を加熱したときの融解現象にたとえられる。その際に「温度」の働きをするのは浸透水の「流速」であることが明らかになった。つまり浸透水流速が増えて液状化に至る過程での体積膨張や粘性挙動が、「流速」を「温度」に置き換えることによって解釈できると結論づけた。

2. 体積膨張特性

2.1 実験の方法

図1の装置を用いて、浸透水によるクイックサンド実験を行なった。

土槽は補強したアクリル製円筒で、タンクAとB間に水位差を与えることで、底部から上向き浸透流を生じさせる。図示の位置に3個の間隙水圧計を設置し、それらの差から動水勾配を求める。また土層の厚さ変化量をその表面で測定するために、土槽外側面にスケールが張り付けてある。

浸透水流速は、タンクBからの越流水を経時的に計量して求めた。

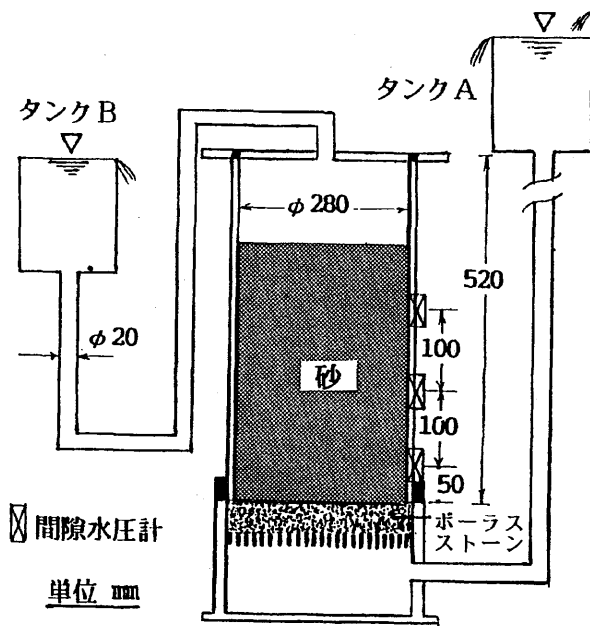


図1クイックサンドの実験装置

粒状材料としては、表1に諸物性を示す3種類の砂と、粒径の異なる3種類のガラスビーズを使用した。

粒度分布は図2のとおりであり、粒径が1.0~1.4mmのガラスビーズを除く他は、ほとんどが実用指針[2]で「特に液状化の可能性あり」の範囲に入る材料である。

表1(a) 砂試料の物理的性質

砂の種類	豊浦砂	硅砂	川砂
土粒子比重 G_s	2.65	2.62	2.59
最大密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.64	1.62	1.67
最少密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.34	1.33	1.38
最大間隙比 e_{max}	0.97	0.97	0.87
最少間隙比 e_{min}	0.61	0.61	0.55
有効径 D_{10} (mm)	0.12	0.28	0.32
均等係数	1.58	1.93	2.33

表1(b) ガラスビーズの性質

粒径 ϕ (mm)	0.15	0.35	0.50	1.0
	-0.25	-0.50	-0.71	-1.4
G_s	2.49	-	-	-
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.59	1.57	1.59	1.55
ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.47	1.44	1.46	1.47
e_{max}	0.70	0.73	0.71	0.69
e_{min}	0.56	0.59	0.57	0.60

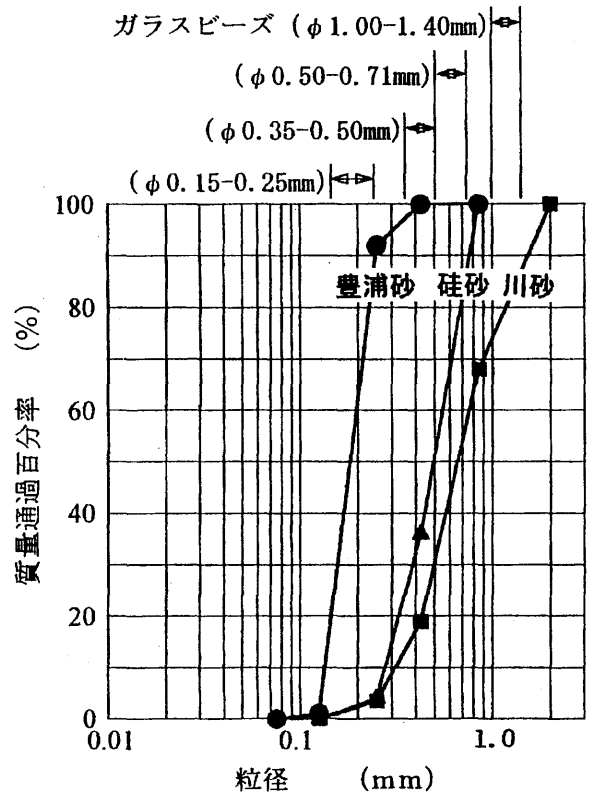


図2 実験材料の粒径分布

2.2 実験結果の概要

代表例として、豊浦砂に対する浸透実験結果を図3に示す。他の砂とガラスビーズの場合もこれと同様の傾向が見られている(図は省略)。

図3より、以下のような特徴が指摘できる。

①流速 v が限界値 v_c 以下では、 v と動水勾配 i とが比例関係にあり、Darcy 則が成立する。

v_c は限界動水勾配 i_{CR} に到達時点の v に対応しており、この $v \leq v_c$ 間では間隙比 e の変化はみられない。

②限界動水勾配 i_{CR} は粒子比重を G_s として、

$$i_{CR} = (G_s - 1) / (1 + e) \quad (1)$$

で与えられ、 $v > v_c$ の範囲では、間隙水圧計から求めた i が、式(1)の値とほぼ一致している。

③ $v > v_c$ の範囲では、間隙比 e が流速 v にほぼ比例して増加する。

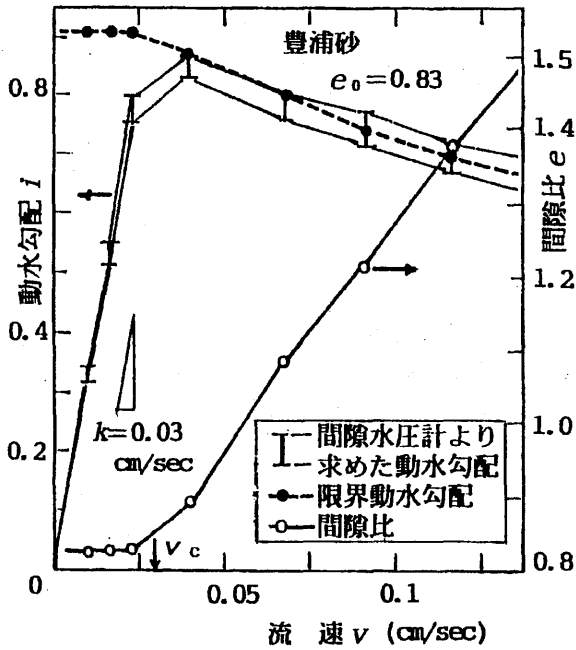


図3 浸透水流に対する動水勾配、間隙比の変化 (代表例)

2.3 膨張率と流速の関係

体積膨張率は

$$V_L/V_0 = (1+e)/(1+e_0) \quad (2)$$

で定義される。ここに e_0 は液状化する前の初期間隙比である。

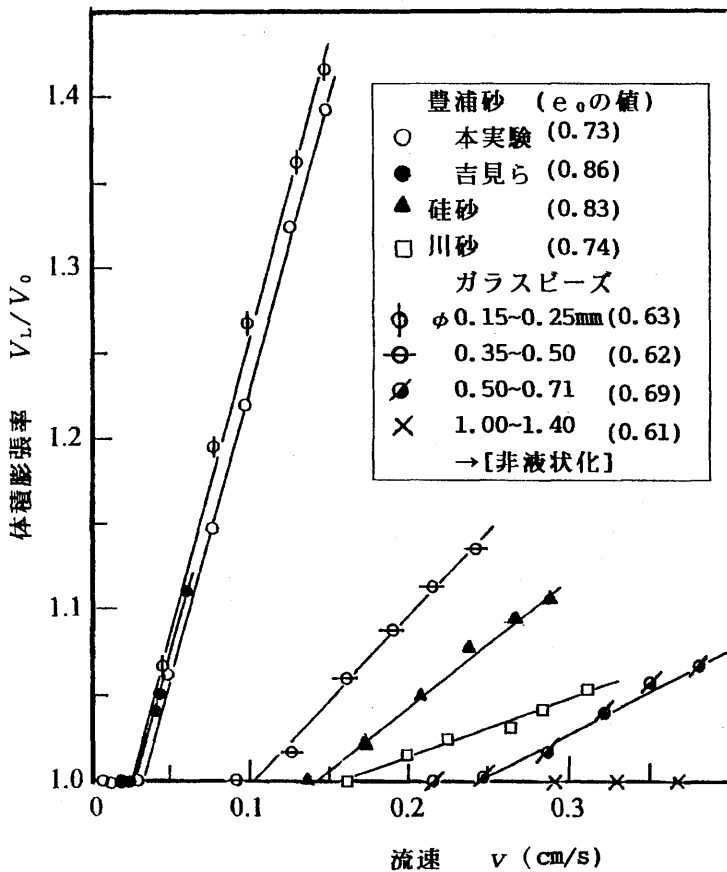


図4 浸透流速と膨張率の関係(代表例)

図4は砂およびガラスビーズに対する実験結果の中から、代表的な膨張率 $V_L/V_0 \sim$ 透水流速 v 関係をプロットしたものである。この図には、比較のために吉見らの実験結果[3]も併記してある。

図4より $v > v_c$ の範囲で $V_L/V_0 \sim v$ 関係はほぼ直線になること、砂とガラスの各グループ別にみて、粒径が大になるほど直線の勾配(膨張係数)は小さく、限界流速 v_c は大きくなるのが分かる。

これらの関係を式示すと

$$v > v_c;$$

$$V_L/V_0 = 1 + \delta_w (v - v_c) \quad (3)$$

となり、 δ_w は膨張係数である。

ここで物質を加熱したときの膨張に関して、

$$V_L/V_0 \approx 1 + \delta (T - T_m) \quad (4)$$

が成り立つことを、古川・大前[4]が紹介している。ただし T_m は物質の融点(絶対温度)、 δ は加熱による膨張係数である。

上記の式(3)と(4)を比較すれば、粉粒体を液化させるときの浸透水流速 v は、加熱による融解時の温度 T に対応し、限界流速は融点に相当するといえる。

2.4 限界流速と粒径の関係

限界流速 v_c は、限界動水勾配 i_{cr} とDarcy 則を用いて、

$$v_c = k \cdot i_{cr} \quad (5)$$

と書ける。

i_{cr} は式(1)で与えたように、土粒子比重 G_s と間隙比 e の関数である。

また透水係数は Poiseuille の式を基本にして

$$k \approx C \tau_w e^3 D^2 / (50(1+e)\eta) \quad (6)$$

と表わされる[5]。

ここに C ; 粒子構造係数、 τ_w ; 水の単位体積重量、 D ; 粒子径、 η ; 水の粘性係数である。

したがって v_c と D の関係としては、近似的に

$$v_c \propto D^2 \quad (7)$$

が成立することになる。

また宇野ら[6]は液状化を発生させる限界流速について考察し、式(7)が実際に適用可能であると報告している。

図5(次ページに示す)は、 v_c と粒径(平均粒径 D_{50}) の関係をプロットした結果である。ただしこの図は均一粒径の材料のみとし、均等係数が他よりも大きい2.33をもつ川砂のデータは省いている。

さらにこの図には、参考のために間隙比 e を 0.7 ~ 0.9 とし、宇野ら[6]の提案式から求まる関係を網目の範囲で併記した。

データはばらついているが、今回の実験でも式(7)の成立が認められる。

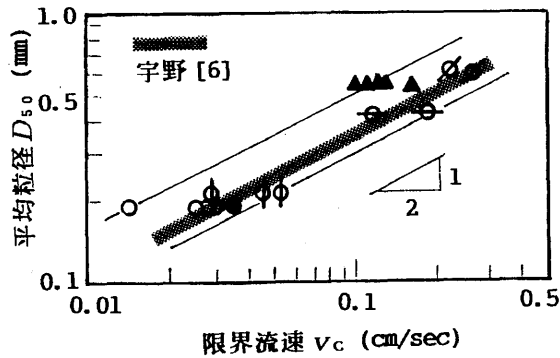


図5 限界流速と粒径の関係

(図5～図7中の記号は図4の凡例に同じ)

2.5 膨張係数と限界流速の関係

粉体工学の分野における研究例として、古川・大前の論文[4]がある。彼らはガラス管内に粉粒体を詰め、底部から空気を吹き上げることによって液状化させ、その時の体積変化や粘性特性などを明らかにした。そして空気流速が比較的低速の場合には、次式が成立することを実証した。

$$\delta_A U_c \approx 1/6 \quad (8)$$

ここに δ_A ：空気流による膨張係数、 U_c ：液化する時の限界流速である。

上記の式(8)は U_c が大きいほど δ_A が小さいことを表わしており、これは加熱による融解現象において、融点 T_m が高い物質ほど膨張率 δ が低いという特性に対応すると考えられる。

上記のように、粉粒体に対する浸透空気流の実験では、式(8)のように δ_A と U_c の積が一定となることが示された。この関係が砂やガラスビーズを用いた浸透水流の場合にも当てはまるかどうかを次に検討する。

図6は均等粒径材料の場合に、 D_{50} に対する膨張係数 δ_w をプロットしたものである。粒径が細粒になるほど膨張係数は大になる傾向を示しており、おおむね

$$\delta_w \propto (D_{50})^{-2} \quad (9)$$

と表わすことができる。

先に導かれた式(7)で $D=D_{50}$ とし、式(9)と組み合わせると、 v_c と δ_w の積は一定となる。

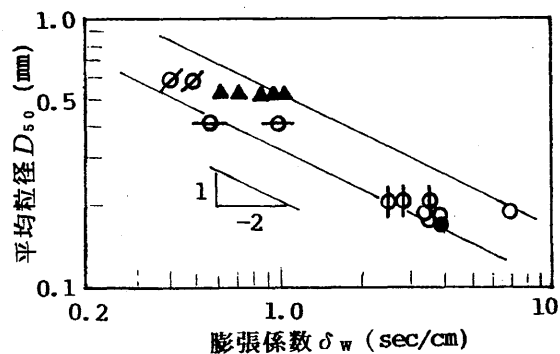


図6 膨張係数と粒径の関係

図7は各実験データに基づき、液状化後の体積膨張係数 δ_w と、液状化発生時の限界流速 v_c を求めて、両対数表示したものである。図7より、以下のような考察ができる。

①図中には $(\delta_w \cdot v_c)$ の値を記入しているが、それによると古川・大前の送気実験で得られた $(\delta_A \cdot U_c) = 1/6$ を上限とし、川砂の $1/16$ 程度を下限とする範囲内に収まっている。

②古川・大前の送気実験用材料、および今回の豊浦砂・珪砂・ガラスビーズはいずれも均等粒径である。それに対して $(\delta_w \cdot v_c) = 1/16$ の川砂は均等係数=2.33であった。このように、粒径の均等程度の違いが $(\delta_w \cdot v_c)$ の値に影響する可能性が考えられる。

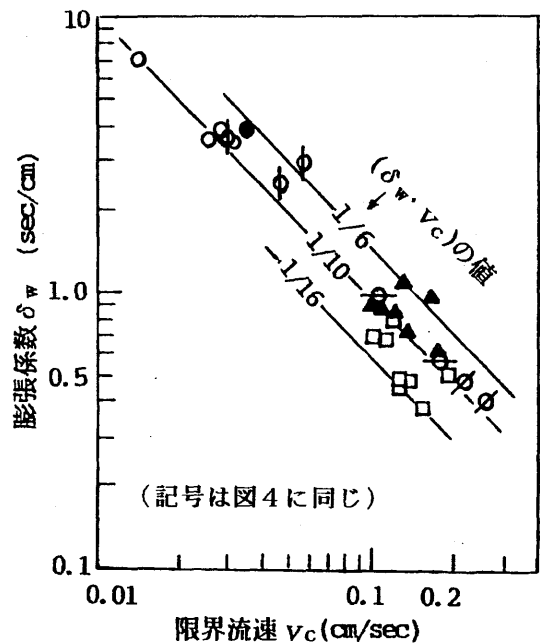


図7 限界流速と膨張係数の関係

3. 粘性特性

3.1 実験方法と結果

実験方法としては、まず前章で説明した「上向き浸透流によるクイックサンド装置(図1)」を用いて、液状状態を生じさせる。試料は、これも前章の豊浦砂と4種類のガラスビーズである。

粘性の測定には図1の円筒容器の上蓋を取り外して、液体表面より市販の回転粘度計(図8)を挿入した。この回転粘度計ではロータの回転速度を変えることにより、任意のせん断ひずみ速度を与えることができる。

図9は、豊浦砂とガラスビーズに対して、浸透流速をそれぞれ一定にしたときの粘性係数 η ～ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ 関係である。ただし粘性係数は、せん断応力 τ と $\dot{\gamma}$ の比として $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ と定義した見かけの等価(割線)係数である。なお図9では、ロータを3種類(No. 25, 26, 27)に変えて、データの再現性を確認している。

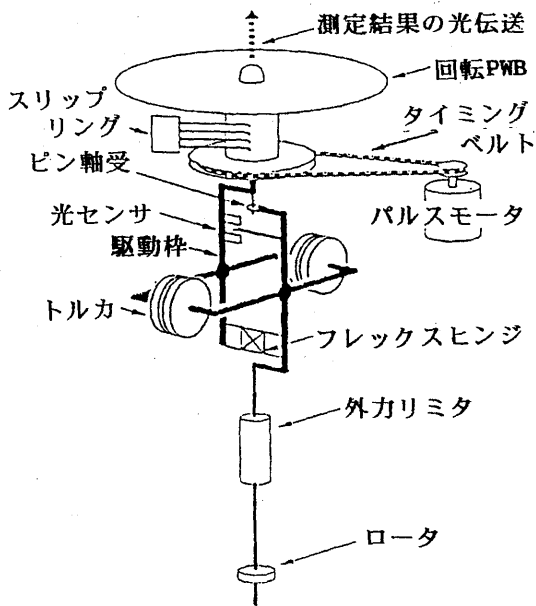


図8 回転粘度計

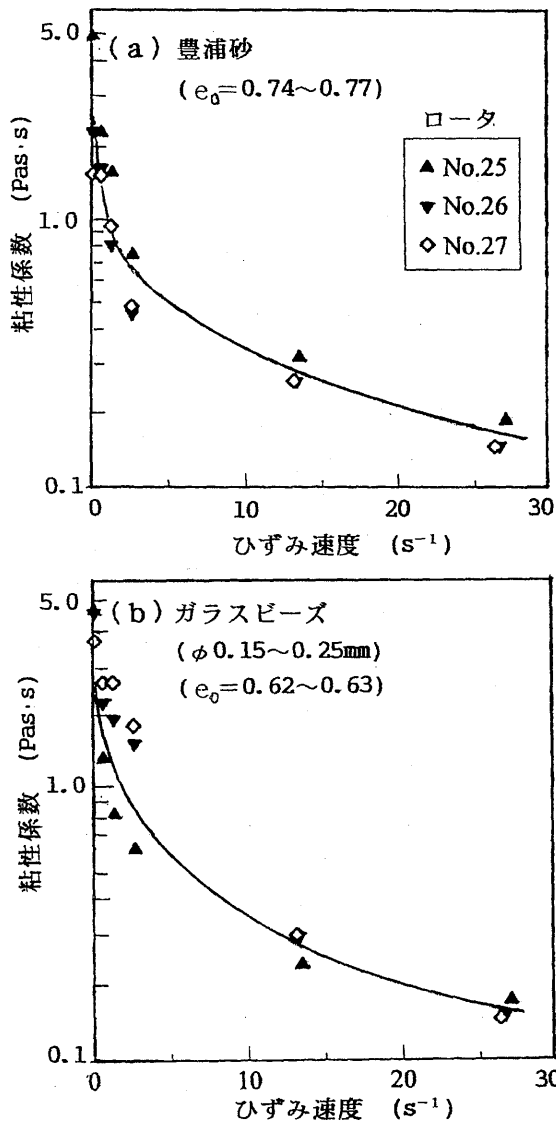


図9 粘性係数とひずみ速度の関係

図9より、 η は $\dot{\gamma}$ の増加とともに急激に減少することが明らかである。そこでせん断応力 τ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係をみると図10に示すようになり、これは次式のビンガム塑性体を表わすことになる。

$$\tau = \tau_y + \eta' \dot{\gamma} \quad (10)$$

$$\therefore \eta = (\tau_y / \dot{\gamma}) + \eta' \quad (11)$$

ここに τ_y ; 降伏値、 η' ; ビンガムの接線粘性係数である。

液化化砂の粘性測定については、1994年頃からいくつかの試みがなされており、粘度計を用いた実験結果をみると、やはりビンガムモデルで代表できるようなのである[7]。また液化流動体の変形予測を行なう数値解析において、このような降伏値をもつビンガムモデルを用いた例[8]も注目される。

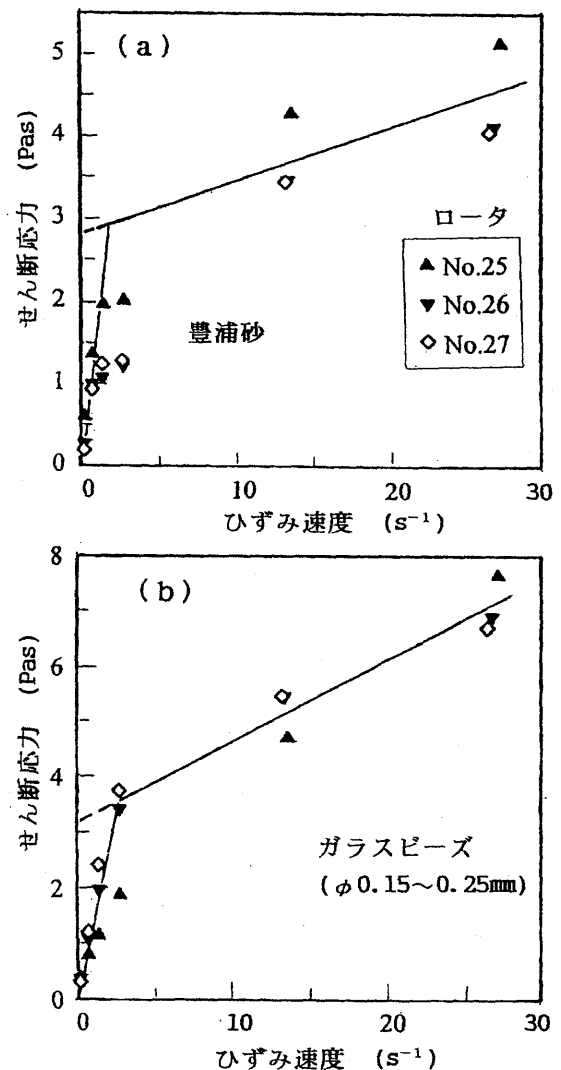


図10 せん断応力とひずみ速度の関係

3.2 粘性係数と浸透流速

前述したように、液体表面より回転粘度計を挿入して粘性実験を行なうわけであるが、ここでは上向き浸透流の流速(v)を増加させる過程における粘性係数 η の変化を調べた。

図11は、ロータ回転速度100rpmにおける η と $(1/v)$ の関係を、片対数紙上にプロットした例である。点はばらついているが、これらを直線とみなすならば、

$$\eta = A \exp(B/v) \quad (12)$$

で表現できる。ここに A 、 B はそれぞれ定数であり、豊浦砂とガラスビーズでは共通に $A \approx 10^{-2} \text{Pas} \cdot \text{s}$ が得られている。

ここで粘性の温度依存性を表わすAndradeの式

$$\eta \propto \exp(B'/T) \quad (13)$$

と式(12)とを比較してみる(B' は定数)。

すると、式(13)の絶対温度 T を v に置き換えれば式(12)の形となることに気づく。つまり液体の粘性は温度の上昇につれて急激に低下するが、その際の温度に対応して、浸透水流の流速が相当するといえる。

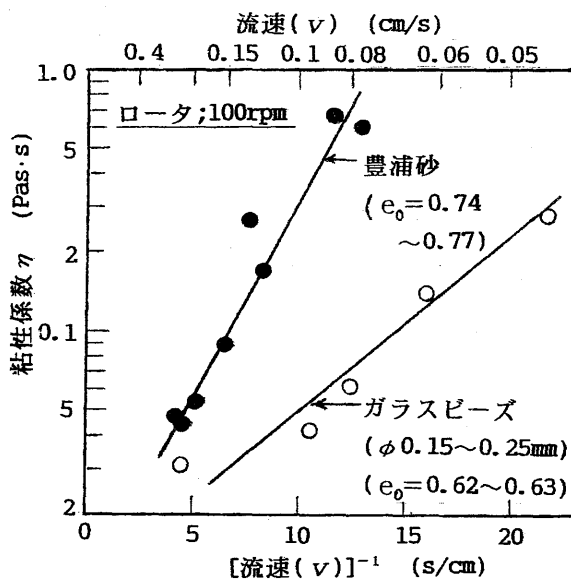


図11 粘性係数 η と v^{-1} の関係

4. 結び

本研究は地震などで液状化した後の地盤の力学挙動を解明するために、液状化砂の物性(体積変化率と粘性率)を実験的に調べることを目的とした。

物性研究に使用した実験試料は、粒径の異なる3種類の砂、および4種類のガラスビーズである。円筒容器内に充填した飽和材料に対して、下方から上方に向かって浸透水流を発生させ、流速を種々に変えたときの体積変化と間隙水圧を測定した。また同じ条件下で、回転粘度計により粘性係数を測定した。

得られた主な結論を要約すると、次のようである。

1) 浸透水流速を徐々に増加すると、ダルシー則の成立範囲を越えた点(すなわち限界動水勾配)から体積膨張がはじまり、その際に体積膨張率と浸透流速の間には比例関係が成立することをみだした。

その比例定数を δ_w とし、限界動水勾配に到達した

ときの浸透流速を v_c とすれば、 δ_w と v_c の積は同一材料では密度が違っていても一定で $1/6 \sim 1/16$ の範囲の値をとる。また粒径の均等係数が大きいと $[\delta_w \cdot v_c]$ は小さくなる傾向がみられた。

2) 液状化材料の体積膨張と浸透流速の比例関係は、固体の融解現象にみられる体積膨張と絶対温度の関数に類似しており、「流速」は「温度」の役割をし、限界流速は固体の融点に相当すると解釈できる。

3) 液状化材料の見かけの粘性係数 η は、ひずみ速度の増加とともに減少する特徴を示し、ビンガム塑性流動の範ちゅうに分類できる。

上向き浸透流速 v を与えたときの η は、 A と B を定数として

$$\eta = A \exp(B/v)$$

の関係が得られた。この式は v を絶対温度に置き換えるとアンドレイドの粘度式と同形であるから、この場合も浸透流速は温度の役目を果たしていると解釈できることとなった。

謝辞

平成13年度の卒業研究として、山岡浩一朗・渡邊誠也の両君に実験の協力を得たので、謝意を表す。

また平成12・13年度文部省科学研究費(代表:柴田徹)の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- [1]柴田徹、西原晃:クイックサンド状態にある砂の体積変化特性、福山大学工学部紀要、第25巻、pp. 13-16, (2001).
- [2](財)沿岸開発技術研究センター:埋立て地の液状化対策ハンドブック(改定版)、p. 348, (1997).
- [3]Y. Yoshimi, et al.: One-Dimensional Volume Change Characteristics of Sands under Very Low Confining Stresses, S & F, Vol. 15, No. 3, pp. 51-60, (1975).
- [4]J. Furukawa, T. Ohmae: Liquidlike Properties of Fluidized Systems, Industrial & Eng. Chemistry, Vol. 50, No. 5, pp. 821-828, (1958).
- [5]山口柏樹:土質力学(全改定)、技報堂出版、p. 56, (1994).
- [6]宇野尚雄:土の浸透破壊の発生・拡大機構に関する研究、文部省科研費補助金研究成果報告書、pp. 4-8, (1990).
- [7]T. Kawakami, et al.: Experimental study on mechanical properties of liquefied sand, Technical Report NCEER-94-0026, pp. 285-299, (1994).
- [8]S. Hadush, et al.: Liquefaction induced lateral spread analysis using the CIP method, Computers & Geotech., Vol. 28, No. 8, pp. 549-574, (2001).