

液状化した砂試料の粘性係数に関する一考察

国松 直¹・神宮司元治¹・今泉博之²

¹正会員 工博 資源環境技術総合研究所 安全工学部(〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-3)

²資源環境技術総合研究所 安全工学部(〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-3)

本研究は液状化した砂地盤の流動特性について、従来のひずみ速度優先の計測方法とは異なる、応力優先制御方式の音叉型振動式粘度計を用いて、上向き浸透流によって液状化状態を保持した砂試料のレオロジー特性について計測した結果を報告する。計測結果から液状化した砂試料の流動特性は上向き浸透流の流速によって挙動が変化するが、その流動特性は擬塑性流体的挙動を示すことが判明した。さらに、既往の研究成果と比較し、液状化した砂試料の流動特性にべき乗則モデルを適用して、流速とせん断ひずみ速度に依存する粘性係数算出式を示した。

Key Words : liquefaction, liquefied sand, coefficient of viscosity, viscometer by tuning-fork vibration mechanism

1. はじめに

地震時における砂地盤の液状化や液状化した地盤が流動する側方流動現象によって、護岸や各種構造物基礎、ライフラインの埋設管路に甚大な被害を生じることが過去の被害調査から数多く報告されている¹⁾。これらの現象の解明や対策を目的として、従来液状化した砂地盤を剛性の低下した固体あるいは流体とみなした数値解析および重力場や遠心力場での模型実験が行われてきた^{2),3),4)}。

一方で、液状化した砂地盤を流体と見なし、その特性から地中構造物に及ぼす外力や傾斜地盤における水平変位量の予測が試みられている^{5),6),7),8)}。これらの評価および予測に対して、液状化地盤の流動特性や粘性係数が必要であるにも関わらず、現状では液状化した砂地盤のレオロジー特性について一致した見解が得られているとは言い難い。

そこで、本研究では液状化した砂試料の流動特性について、従来のひずみ速度優先の計測方法とは異なる、応力優先制御方式の音叉型振動式粘度計を用いて、飽和砂試料に上向き浸透流を与える方法により液状化状態を保持した砂試料のレオロジー特性を検討した結果について述べる。

2. 液状化した砂試料の粘性係数の過去の報告

液状化した砂地盤の粘性係数の過去の測定結果については、大友⁹⁾により表-1のようにまとめられている。測定方法としては、鋼球落下、鋼球・鉛の引き上げ、鋼管の

表-1 既往の研究による液状化した砂地盤の粘性係数⁶⁾

研究者	測定方法	粘性係数	
		(gf·s/cm ²)	(Pa·s)
高田, 永井	鋼球落下	5.8	568.4
佐藤, 濱田, 土居	鋼球引き上げ	2.9~48.6	284.2~4762.8
	鋼管側方牽引	1.6~83.5	156.8~8183.0
湯浅, 佐藤, 土居, 川上, 濱田	回転粘度計	0.003~0.4	0.3~39.2
	鋼球引き上げ	0.02~0.1	2.0~9.8
	振動台	1.5~12	147.0~1176.0
宮島, 長谷川, 北浦, 小池, 北野	鉛球引き上げ	1.7	166.6
大友	鋼球引き上げ	10	980.0

側方牽引、回転粘度計、振動台試験などが用いられている。

まず、粘性係数の大きさについて見れば、0.3~8183 Pa·sの間に大きくばらついている。次に、流体特性についてもニュートン流体⁶⁾、擬塑性流体⁵⁾としての報告がある。

例えば、大友⁹⁾による鋼球引き上げ試験では、液状化地盤の流体特性をニュートン流体と仮定し、その粘性係数は10gf·s/cm²(980Pa·s)と報告されている。また、濱田・若松⁵⁾による結果(表-1では湯浅ほかの結果)では、鋼球引き上げ試験および回転円筒粘度計においても粘性係数にせん断ひずみ速度依存性があり、非ニュートン流体(擬塑性流体)的挙動を示すという報告がなされている。

これらの結果による粘性係数について、同様の測定方法である鋼球の引き上げ試験結果と比較しても、大友による10gf·s/cm²(980Pa·s)と湯浅らによる0.02~0.1gf·s/cm²(2.0~9.8Pa·s)とはオーダーが異なっている。

このような大きな差異が見られることについて、測定方法の原理から再検討する必要があると考えられる。

3. 試料のレオロジー特性の測定法

現在、液体試料のレオロジー特性の測定には主な種類として、a)落球または落針粘度計、b)毛管粘度計、c)回転型レオメータ、d)その他の粘度計、のようなものが用いられている⁹⁾。このような種類の測定器を使用して液状化した砂試料のレオロジー的性質を測定するためには、液状化地盤を再現した状態で測定を行う必要があることを考慮する必要がある。そのため、砂試料の液状化状態の再現方法として、上向き浸透流を与える方法が多く用いられ、球引き上げ型粘度計による計測⁵⁾、⁶⁾や回転円筒粘度計による計測⁵⁾などが使用されてきた。

しかし、球引き上げ型粘度計による計測法¹⁰⁾において、流体のレオロジー方程式としてニュートン流体およびビンガム流体については、レオロジー定数を求める方法が理論的に検討されているが、それ以外の流体特性のレオロジー定数を求めることは難しい。またこの測定法で重要な点は、球の引き上げ速度をレイノルズ数 Re が $Re < 1$ の範囲内で設定しなければならないため、引き上げ速度を任意に大きく設定することができないという制約があることである。

濱田・若松⁵⁾が行った回転円筒粘度計による測定においても流体特性としてニュートン流体を仮定し、Couette の式を用いて粘性係数を求めている。本測定法において、非ニュートン流体の流動特性を測定するためには半径比が 1 に近い共軸回転円筒を用いた試験を行わなければならない。液状化した砂試料の流動特性の測定に適用することは難しい。

4. 音叉型振動式粘度計による測定

以上記述した方法で試料の流動特性を求める場合、試料の流体特性があらかじめ判明している場合には有効に使用することが可能である。しかし、現在まで前述したように、液状化地盤の流体特性が明らかになっているとは言い難い。そのため、流体特性が不明のものとして、流体特性を検討する測定法が好ましい。

音叉型振動式粘度計(株)エー・アンド・デイ製 CJR120) はニュートン流体、非ニュートン流体を意識することなく流体の粘度および流動特性を計測することが可能で、操作も簡便である。以下にその測定原理を記述する。

(1) 音叉型振動式粘度計の測定原理¹¹⁾

粘度検出器の機構を図-1に示す。先端に感応板(直径 20mm, 厚さ 0.2mm)を取り付けた一対の板バネ(振動可動部)を、フェライト磁石と電磁コイルとから成る電磁駆動部により一定の共振振動数(30Hz)で逆位相に一定振幅で

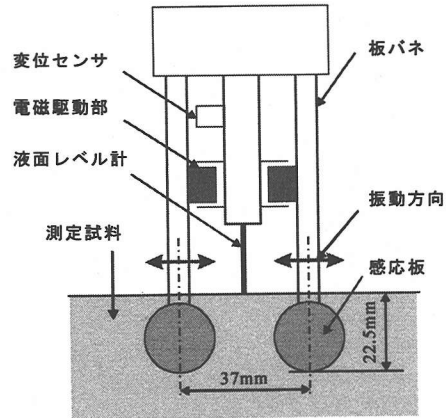


図-1 音叉型振動式粘度計の検出部

振動させる。振幅値は変位センサで検出する。測定試料中に挿入した感応板と試料との間に生じる粘性抵抗の相違を、加振力である駆動電流 (I) の変化として検出し、駆動電流値と粘性抵抗との間の比例関係から測定試料の粘度を求めるというものである。すなわち、未知の試料の粘度は振動子を一定振幅に駆動するために必要な電流を検出することで、粘度校正用標準液を用いて $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ から $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ までの粘度と駆動電流との間に作成された基本検量線から求められる。当然のことながら、感応板の大きさや板バネの深さが変化すれば粘性抵抗が変化するので、上記の関係が成立しなくなり、正確な粘度を求めることはできなくなる。そのため、図中の液面レベル計で常に感応板の挿入深さを一定にして計測は行われる。

以上の原理から、音叉型振動式粘度計は以下の特徴を有している。

- (1) 回転式と異なり、共振振動を利用しているため、可動部に慣性が無く、感応板に作用する加振力(応力)がすべて試料に作用する。
- (2) 従来の回転式に多いひずみ速度制御方式と異なり、駆動電流を設定する応力優先制御方式のため、微小な力の影響を測定することができる。反面、低せん断ひずみ速度領域については有効な測定法とは言えない。せん断ひずみ速度が 10 以下では滑らかな流動曲線を得ることが難しいと言われている。
- (3) 試料に挿入された感応板周りの微小部分の測定であることから、大きな構造破壊を起こしにくい測定方法である。

流動特性については、駆動電流を変化させながら粘度を測定し、測定された粘度を既知として、せん断応力からせん断ひずみ速度を算出する方法で求めている。ここで、せん断応力 (τ) は電磁駆動部のコイル長、磁束密度、感応板の両側面積から $\tau = 1588 \cdot I$ の関係から求められる。すなわち、せん断ひずみ速度は測定された粘度を割線粘性係数

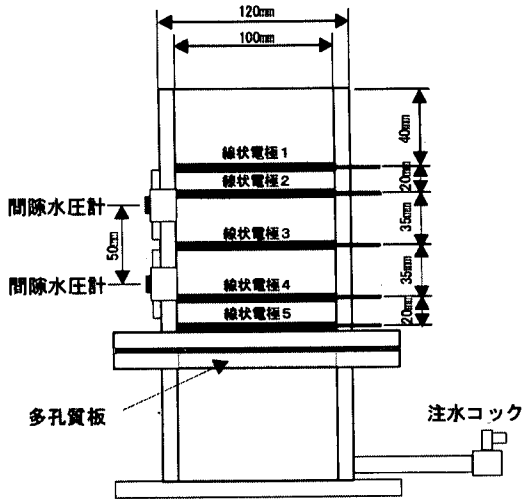


図-2 実験容器

表-2 実験条件

Case No	流速 (cm/s)	比抵抗 ($\Omega \cdot m$)	平均間隙率 (%)	相対密度 (%)
1	0.0160	170.1	44.4	74
2	0.0252	169.4	44.5	73
3	0.0322	156.8	47.0	52
4	0.0378	152.2	48.0	43
5	0.0402	148.4	48.9	34
6	0.0528	141.5	50.6	18
7	0.0643	136.8	51.8	5
8	0.0885	120.4	56.8	-55
9	0.1023	119.4	57.2	-60
10	0.0080	129.2	54.0	-20

と見なすことにより、駆動電流から計算されたせん断応力を用いて算出される。

(2) 実験概要

音叉型振動式粘度計を用いて液状化地盤のレオロジー特性を測定するために、簡便に定常的な砂試料の液状化状態を再現できる図-2の容器を製作し、上向き浸透流を飽和砂試料に与えた状態で計測を行った。

初期の砂試料として十分に締固められた密な試料(相対密度約75%)を作成し、砂試料の底部から供給する流量を制御することにより、単位面積当たりの流速を制御し、各流量毎に音叉型振動式粘度計による計測を行った。図-1の感応板は図-2のような10cm正方の断面を持つ実験容器の上部から試料内に挿入している。砂試料としては豊浦標準砂を使用した。

各実験条件を表-2に示す。参考のために、流速が一定で保持されている間の砂試料の電極2と3の間の比抵抗から求めた平均間隙率¹²⁾および豊浦砂の最大間隙比と最小間隙比を使用して算出した相対密度を示す。相対密度の算出方法の妥当性については参考文献12)に記載している。ただし、平均間隙率を求めた位置と実際に粘度を測定している感応板の位置とは異なっている。

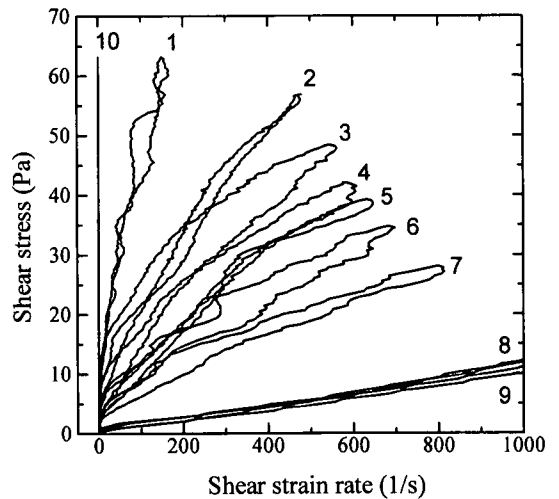


図-3 流速の変化に伴う砂試料の流動特性

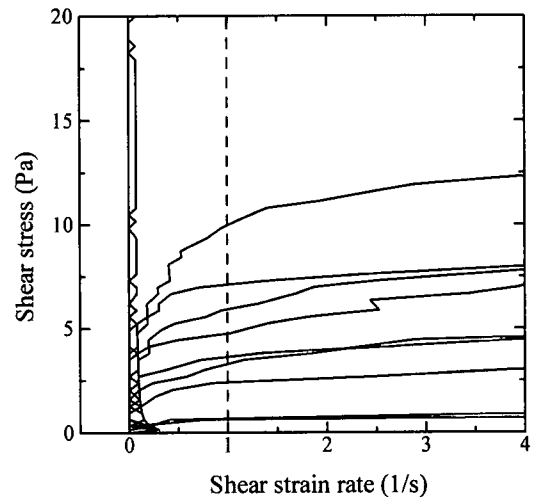


図-4 低せん断ひずみ速度領域での流速の変化に伴う砂試料の流動特性

音叉型振動式粘度計による計測では、駆動電流最大40mAを3分間で直線的に増加させ、その後同様に減少させた。

(3) 実験結果および考察

図-3に流量の増加に伴う流動特性の変化を示す。図中の番号は実験番号を表し、Case 1から順に流量は増加している。Case 10は最後に流量を絞った時の結果である。高せん断ひずみ速度領域まで測定された流動特性から、液状化した砂試料の特性を大略把握することができる。すなわち、流量が極端に小さいCase 10では微小なせん断ひずみ速度に対してせん断応力の立ち上がり急峻である。流量の増加に伴い流動曲線が上に凸の形状を示し、擬塑性流体的挙動(Case 1~7)を示している。さらに流量を増加する

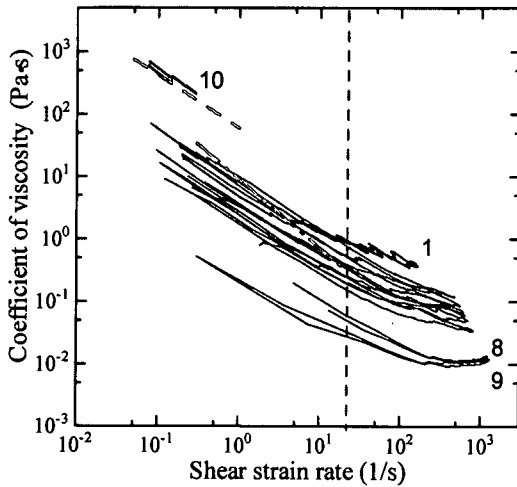


図-5 粘性係数とせん断ひずみ速度との関係
 (破線 : $\mu = 60\dot{\gamma}^{-0.84}$)
 (一点鎖線 : $\mu = 9.1\dot{\gamma}^{-1.1}$)

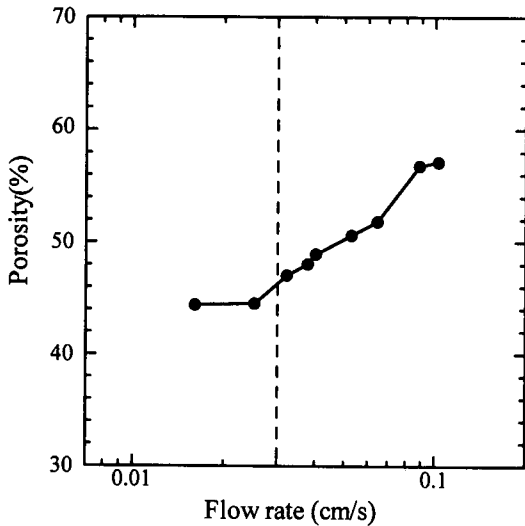


図-6 流速の増加に伴う間隙率の変化

と流動曲線はせん断ひずみ速度に対して直線的に変化し、ニュートン流体的挙動(Case 8, 9)を示している。また、載荷と除荷において若干ヒステリシスが見られる。ここで、流動特性が滑らか曲線となっていないが、この原因として、微小な砂試料の構造変化を反映したものと考えられる。次に、図-3の流動特性におけるせん断ひずみ速度は、濱田・若松⁵⁾の土槽実験の結果(せん断ひずみ速度1(1/s)以下)を参考とすれば、実際の液状化した砂地盤のせん断ひずみ速度に比べてはるかに大きい領域まで求められているので、図-4に図-3の低せん断ひずみ速度領域を拡大した図を示す。明らかに、せん断ひずみ速度が1(1/s)(図中の破線)以下での勾配が急であることがわかる。しかし、この図から、流動特性が降伏値を有するかどうかを明言することは難しいように思われる。この図の解釈として、せん

断ひずみ速度を0.2(1/s)の領域に限定すれば、降伏値の有無によりニュートン流体またはビンガム流体的挙動を示していることが可能である。また、多少領域を広く、せん断ひずみ速度1.0(1/s)程度の領域まで見れば擬塑性流体や非ビンガム流体的挙動を示しているように見こともできる。このことは、対象とする、または測定を行ったせん断ひずみ速度の範囲によって、液状化した砂試料の挙動の見え方が異なってくることを示唆しているといえる。

図-5は求められた粘性係数(μ)をせん断ひずみ速度($\dot{\gamma}$)に対してプロットした結果である。明らかに粘性係数はせん断ひずみ速度に依存し、実験により求められた流動特性は擬塑性流体の性質を示していることがわかる。

既往の研究において、液状化した砂試料を擬塑性流体として整理した研究は濱田・若松⁵⁾の結果しか見当たらない。そこで、濱田・若松⁵⁾の結果を図中の斜めの破線および一点鎖線で示す。ここで、破線は土槽実験結果、一点鎖線は回転式粘度計等(一点鎖線)から求められた回帰式である。この比較によれば、一点鎖線は勾配は異なるけれどもCase 1~7の結果に近いことがわかる。

さて、砂試料に上向き浸透流を加えた場合、固体状態から砂粒子が浮遊し液状化状態となる限界の流速(最小流動化速度)が存在することが知られている¹³⁾。そこで、液状化状態にある砂試料の流動特性を議論するために、最小流動化速度について検討を行う。最小流動化速度は流速に対する試料内の差圧の変化から定義されるが、ここでは図-6のように流速と間隙率との関係から検討を行った。明らかに流速が0.03cm/s付近で変曲点が見られることから、実験に用いた砂試料に対する最小流動化速度は0.03cm/sと見なすことができる。また、吉見¹⁴⁾による上向き浸透試験結果でも同様の値が示されている。以上のことから、表-2においてCase 3からCase 9では完全液状化状態に至っていると判断される。

Case 1とCase 2では最小流動化速度より小さい上向き浸透流が作用していることになり、完全液状化状態に至っていないと判断されるが、図-3に見られるように流動特性の挙動において、最小流動化速度前後で著しい変化は認められない。

そこで、液状化した砂試料の見かけの粘性係数を推定する式として、濱田・若松⁵⁾と同様に次式のようなべき乗則モデル¹⁵⁾を用いて検討を行う。

$$\mu = A \cdot \dot{\gamma}^{-B} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (1)$$

上式を実験結果に適用し、図-5においてせん断ひずみ速度と粘性係数との関係が線形な20(1/s)(図中の破線)以下の範囲を対象として回帰式を求めた。求められた回帰式の係数Aを流速に対して両対数軸上にプロットした結果が図-7である。また、同様に回帰式の係数Bを片対数軸上にプロットした結果が図-8である。図中には表-2の実験

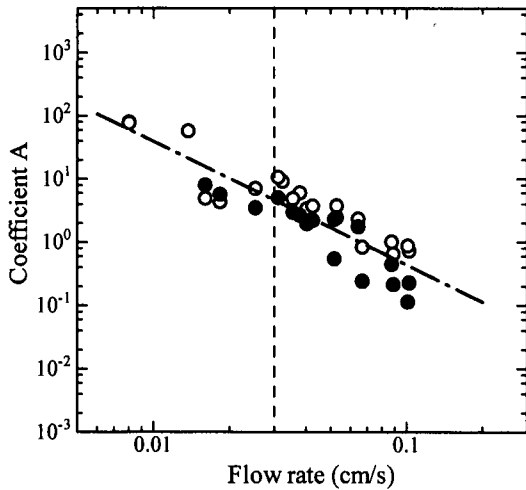


図-7 上向き浸透流の流速と係数Aとの関係

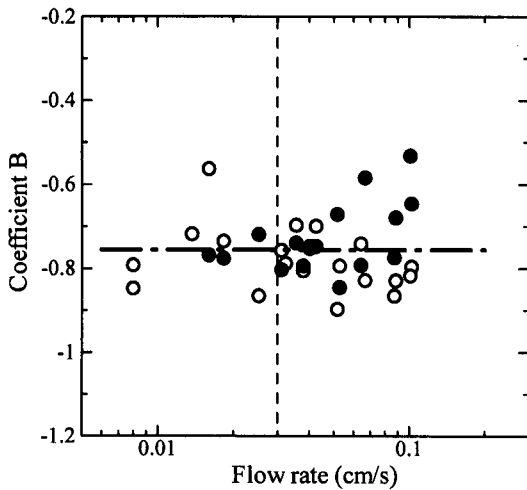


図-8 上向き浸透流の流速と係数Bとの関係

結果以外に追加した実験結果もデータとして加えている。図中の○印は載荷時、●印は除荷時の結果を表している。図-7の結果から、係数Aは流速に敏感に影響され、その増加に伴い減少する傾向にあることがわかる。また、係数Bは-0.6から-0.9の間で変動するものの、流速に対してほぼ一定値を示していると判断される。

上記の関係について、載荷時と除荷時の係数Aを使用し、平均的な係数Aと流速(v)を式(1)と同様の形で回帰した結果、次式が得られた。

$$A = 0.0050 \cdot v^{-2.0} \quad (2)$$

回帰された係数Bについては、平均値として-0.76が得られた。

以上のことをまとめると、粘性係数は次式で表現することができる。

$$\mu = (0.0050 \cdot v^{-2.0}) \cdot \dot{\gamma}^{-0.76} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (3)$$

ここで、完全液状化状態での粘性係数については、流速として0.03cm/sを代入することで、次式が得られる。

$$\mu = 5.0 \cdot \dot{\gamma}^{-0.76} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (4)$$

式(3)における上向き浸透流による流速は完全液状化状態に至るまで動水勾配と比例関係にあり、動水勾配は過剰間隙水圧勾配に関連させられる¹⁴⁾。

上記の議論は高せん断ひずみ速度領域からの議論であり、低せん断ひずみ速度領域での特性、特に降伏値を有するかどうかという点については今回の実験から明らかではない。また、べき乗則モデルは降伏値を考慮したものではなく、せん断ひずみ速度が小さくなれば粘性係数が非常に大きくなるという特性を有するため、今後の検討によっては降伏値を有する非ビンガム流体挙動をモデル化したHerschel-Bulkleyモデル¹⁵⁾の適用等も考えられる。

5. まとめ

本研究は液状化した砂試料の流動特性について、既往のひずみ速度優先の計測方法とは異なる、応力優先制御方式の音叉型振動式粘度計を用いて、液状化した砂試料のレオロジー特性を測定した結果を報告した。

測定結果から液状化した砂地盤の流動特性は上向き浸透流の流速によって挙動が大きく異なり、流速が速くなるにつれて、擬塑性流体の挙動から、ニュートン流体の挙動を示すことが判明した。

一方で、せん断ひずみ速度を0.2(1/s)の領域に限定すれば、降伏値の有無によりニュートン流体またはビンガム流体の挙動を示し、また多少領域を広く、せん断ひずみ速度1.0(1/s)程度の領域まで見れば擬塑性流体や非ビンガム流体の挙動を示しているように見ることできる。このことは、対象とする、または測定を行ったせん断ひずみ速度の範囲によって、液状化した砂試料の挙動の見え方が異なってくることを示唆しているといえる。

これらの結果について、せん断ひずみ速度に対して粘性係数をプロットした結果、粘性係数に明らかにひずみ速度依存性が認められ、擬塑性流体と見なせることが判明した。そこで、粘性特性として、べき乗則モデルを用いて検討を行い、べき乗則モデルに含まれる係数Aが上向き浸透流の流速に依存する関係が得られた。この結果をもとに、せん断ひずみ速度と上向き浸透流の流速に依存した粘性係数を求める式を示した。提案した式(3)の使用法としては、砂試料が完全液状化状態となる最小流動化速度を代入して使用するべきであろう。

また、今回は擬塑性流体の粘性特性をべき乗則モデルで表現したが、その他のモデルも多く提案されており、液状化した砂地盤の特性を合理的に、十分表現できるモデルについては今後さらなる検討が必要と考えられる。特に、擬塑性流体として流体解析を行う場合、初期の粘性係数の与え方などが問題点として挙げられる。

さらに、今回提案した粘性係数の推定式は無拘束下での結果であり、上載圧などの拘束条件の影響は考慮されていない。この点についての検討も今後の検討課題としたい。

最後に、液状化した砂地盤を流体と見なして取り扱うことにより、液状化した砂地盤の側方流動挙動や水平変位量の予測、地中構造物に及ぼす抗力評価などの解明に繋がることを期待している。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、工業技術院計量研究所物性計測研究室小林比呂志博士、山口大学工学部応用化学工学科佐伯 隆博士に有益なご助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) Hamada, M. and O'Rourke, T.D. (Eds.): *Case study of liquefaction and lifeline performance during past earthquake, Vol.1 Japanese case studies*, Technical Report NCEER-92-002, 1992.
 2) 吉田 望, 永瀬英生, 三浦均也: 液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響, 3. 地盤の流動の発生メカニズムと解析法(その1), 土と基礎, Vol.47, No.8, pp.47-52, 1999.
 3) 吉田 望, 永瀬英生, 三浦均也: 液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響, 3. 地盤の流動の発生メカニズムと解析法(その2), 土と基礎, Vol.47, No.9, pp.49-54, 1999.

4) 佐藤正義: 遠心力場におけるケーソン岸壁および杭基礎の液状化被害に関する再現実験, 土木学会論文集, 第582号/III-41, pp.295-304, 1997.
 5) 濱田政則, 若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, 第596号/III-43, pp.189-208, 1998.
 6) 大友敬三: 地中構造物に及ぼす地盤側方流動の荷重特性評価, 土木学会論文集, 第591号/I-43, pp.283-297, 1998.
 7) 大友敬三: 地中洞道・杭基礎系に作用する側方流動の外力に関する一考察, 土木学会論文集, 第605号/I-45, pp.187-202, 1998.
 8) 濱田政則, 飯田康史, 志摩美裕貴, 山田隆一: 側方流動地盤が杭に及ぼす外力に関する模型実験と数値解析, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.373-376, 1999.
 9) 梶内俊夫, 薄井洋基: 分散系レオロジーと分散化技術, 信山社サイテック, pp.23-41, 1991.
 10) 水口裕之, 安永正三: フレッシュモルタルのレオロジー定数の測定法, セメント技術年報, Vol.27, pp.186-191, 1973.
 11) 石渡章介, 林 充郎, 大島秀明, 鈴木 脩: 音叉型振動による粘度測定方法, 日本レオロジー学会誌, 第19巻, 第2号, pp.83-88, 1991.
 12) 神宮司元治, 国松 直: 比抵抗による液状化現象の計測とその評価, 物理探査学会, Vol.52, No.5, pp.439-445, 1999.
 13) 白井 隆: 流動屈, 科学技術社, pp.68-81, 1977.
 14) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 技報堂出版, pp.6-8, 1991.
 15) 中村喜代次: 非ニュートン流体力学, コロナ社, pp.81-85, 1997.

(1999. 11. 22 受付)

A STUDY ON RHEOLOGY CHARACTERISTICS OF SATURATED SAND LIQUEFIED BY UPWARD INFILTRATION FLOW

Sunao KUNIMATSU, Motoharu JINGUJII and Hiroyuki IMAIZUMI

This study deals with described the experimental results concerning rheology characteristics of the liquefied sand specimen which was measured by a viscometer using tuning-fork vibration mechanism. The specimen was kept in the liquefied sand condition by upward infiltration flow during measurements, and the behaviors of flow curves measured were changed by flow rate from pseudo-plastic fluid like to Newton fluid like as the flow rate increased. Furthermore, the behaviors which could be considered Newton fluid or Bingham fluid were shown as we focused on the shear strain rate area less than 0.2(1/s). As a conclusion, it became clear that the coefficients of viscosity in these results depended on the shear strain rate, namely the flow curves had the characteristics of pseudo-plastic fluid. From these results, the equation to obtain the coefficient of viscosity which was dependent on shear strain rate and flow rate as pseudo-plastic fluid was derived.