せん断ボックス試験による高濃度サスペンションの
レオロジー性質に関する実験的研究EXPERIMENTAL STUDY ON RHEOLOGICAL PROPERTIES
OF DENSE SUSPENSION BY SHEAR BOX TEST三島直生^{*1}, 谷川恭雄^{*2}, 森 博嗣^{*3}, 黒川善幸^{*4}
寺田謙一^{*5}, 服部俊範^{*6}Naoki MISHIMA, Yasuo TANIGAWA, Hiroshi MORI, Yoshiyuki KUROKAWA,
Ken-ichi TERADA and Toshinori HATTORI

In this study, the shear box test was carried out by using saturated sand and fresh mortar in order to grasp the rheological properties of them. As the results, it was concluded that shear stress in dense suspension increases with increasing of shear strain, because of the disappearance of excess pore water pressure with liquefaction and the decrease of pore water pressure by dilatancy. From the experimental results obtained by using saturated sand, the coefficient of dynamic internal friction was obtained, which is needed to express the flow behavior of saturated sand. From the experimental results obtained by using fresh mortar, it was clarified that only a part of high-fluidity mortar can be expressed by Bingham's model.

Keywords : coefficient of dynamic internal friction, dilatancy, fresh mortar, rheology, saturated sand, shear box test,
動的内部摩擦係数、ダイラタンシー、フレッシュモルタル、レオロジー、飽和砂、せん断ボックス試験、

1. はじめに

フレッシュコンクリートのレオロジーに関する多くの研究では、降伏値および塑性粘度の2つのBingham定数による特性の定量化が試みられている。しかし、均質粘塑性体を仮定したBinghamモデルの適用範囲は極めて狭く、高流動モルタルのような極めて軟らかい試料に限られている。

通常のコンシステンシーより硬練りの範囲のフレッシュコンクリートのレオロジー的な性質は、まだ正確には把握されていない。粉粒体の破壊条件を表すMohr・Coulombモデルによる定量化を試みた研究^{1)~3)}においても、スランプ値などの静的な降伏条件の評価にとどまっている。また、筆者らは、既にBingham定数の応力依存性を考慮した複合モデル⁴⁾を提案しているが、フレッシュコンクリートの流動挙動を十分に表現するには至っていない。

一方、地盤工学の分野においては、従来、液状化現象による被害が数多く報告されており、近年の調査・研究によれば、地盤の液状化に起因する側方流動により建築構造物の杭基礎に多くの被害が発生していることが明らかとなった⁵⁾。このため、液状化に伴う流動のメカニズムを把握するとともに、その挙動の予測が重要課題とな

っている。

砂地盤が液状化に至るまでの研究は現在までに数多く行われており、そのメカニズムも把握されつつある。これに対し、液状化後の飽和砂の力学的性質には不明な点が多く、また、ひずみが数十%にも及ぶせん断変形を再現できる試験方法がないなどの理由から、飽和砂の流動現象に関する研究は極めて少なく、Newton流体⁶⁾やBingham流体⁷⁾、限界せん断ひずみを持つ擬塑性流体⁸⁾などを適用した研究においても飽和砂の流動挙動を十分に表現するには至っていない。

そこで、本研究では、試料をマトリックスと固体粒子からなる2相材料とみなして、飽和砂を試料とした大ひずみ領域までの定ひずみ式単純せん断試験を行い、有効応力と内部摩擦係数をパラメータとするモデルを想定したうえで、飽和砂の流動性状の把握およびそのパラメータの定量化を試みる。

さらに、フレッシュモルタルおよびセメントペーストを試料とした実験を行い、飽和砂の実験結果から得られた高濃度サスペンションの流動のメカニズムを適用し、フレッシュモルタルのより正確なレオロジー性質の把握および影響因子の検討を行う。

*1 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生・工修

*2 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

*3 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授・工博

*4 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻 助手・工修

*5 錢高組技術研究所 主席研究員・工博

*6 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生

Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Nagoya Univ., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Nagoya Univ., M. Eng.

Senior Research Engineer, Technical Research Institute, Zenitaka Corporation, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Nagoya Univ.

図-1 測定装置の概要

図-2 粒径加積曲線

種類	密度 (g/cm ³)	実積率 (%)	粗粒率 F.M.	洗い試験による 損失量(%)
豊浦標準砂	2.64	62.3	2.09	0.00
香取産山砂	2.40	65.3	1.74	2.24
信濃川産川砂	2.54	71.4	2.76	3.05
青梅産砕砂	2.51	72.5	3.07	5.12

2. 飽和砂を試料とした実験

2.1 実験装置と測定方法

実験には図-1に示すような鉛直型せん断ボックス試験装置^{9),10)}を用い、一定ひずみ速度のもとで試料に対して繰返しせん断変形を与えた。本装置は最大で±0.64のせん断ひずみを与えることができるが、強制変形の反転に要する加・減速領域を考慮して、±0.60の範囲の測定値を考察に用いた。せん断応力 τ は試料容器側面の引張抵抗力から算出し、また、試料底部に埋設した小型の間隙水圧計により、変形時の間隙水圧 u を測定した。

せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.9/sの5水準に変化させ、各速度ごとに3~4往復ずつ繰返しせん断変形を与えた。測定は、試料充填後、まず $\dot{\gamma}=0.1/s$ で行い、その後、試料の状態をえることなく、上記の5水準の測定を任意の順番で行った。

試験時の境界条件は、試料上面のみが自由表面であり、この面における試料の体積変化および吸排水は自由とした。

2.2 試料

試料として用いた砂は、豊浦標準砂、香取産山砂、信濃川産川砂、青梅産砕砂の、粒度分布の異なる4種類である。また、上記の4種類に加えて、3節のモルタルに用いた山砂と砕砂を3:7の質量比で混合した試料についても測定した。図-2に粒径加積曲線を、表-1に砂の物理特性を示す。なお、試験器内では飽和砂が作成できないため、事前に飽和させた砂を試験に用いた。

(a) 試料充填直後

(b) 限界間隙比に達した後

図-3 せん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係の一例

(a) 試料充填直後

(b) 限界間隙比に達した後

図-4 せん断応力 τ および間隙水圧 u の時刻歴の一例

2.3 実験結果とその考察

図-3に、実験で測定されたせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係を、図-4に、せん断応力 τ と間隙水圧 u の時刻歴の一例を示す。図-3に示すように、試料が負の方向に変形する時はせん断応力 τ も負となるが、図-4以降では、せん断応力 τ はその絶対値で示す。

これらの図から明らかなように、せん断応力 τ と間隙水圧 u の変化は非常によく対応している。装置が最大に変形した直後、せん断変形が反転する瞬間に飽和砂は液状化し、間隙水圧が上昇して、せん断抵抗が消失する。その後、過剰間隙水圧が消散するとともに、せん断応力 τ が回復する。また、過剰間隙水圧の消散後も、せん断ひずみ γ の増大に伴って間隙水圧 u は減少し、せん断応力 τ が増加する。これは、正のダイラタンシーによって間隙水圧 u の低下が生じるためと考えられる。過剰間隙水圧は、最大でも静置時に働く有効応力分しか上昇しないが、正のダイラタンシーによる間隙水圧 u の低下は、間隙の体積の膨張による減圧であるため、下限値は決まらず、試料の充填状態や透水性、せん断ひずみ速度、排水などの条件によっては非常に小さい値を取る可能性もある。この時、間隙水圧 u の低下した分だけ有効応力 p は増大し、せん断抵抗が増すと考えられる。

(a) 繰返しせん断回数N

図-3および4の(a)は、試料充填直後に $\dot{\gamma}=0.1/s$ で測定された結果である。図-3に示したように、繰返しせん断回数Nが増加するにしたがってループは小さくなり、ある範囲に漸近していく。これは、流動状態において試料が収束する間隙比である限界間隙比 e_{cr} が、初期の充填状態よりも緩く、せん断変形の繰返しにより間隙比が増大していくためと考えられる。図-3および4の(b)に示すように、試料が限界間隙比 e_{cr} に達した後の測定では、充填状態が安定していないN=1および2を除けば、その水準ごとに一定の軌跡が観測された。

図-5 せん断ひずみ γ の影響(b) せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$

図-5に、各測定値とせん断ひずみ γ の関係を示す。各測定値は試料が限界間隙比 e_{cr} に達した後の測定値のみを示す。

豊浦標準砂、香取産山砂および信濃川産川砂の結果では、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が小さいほど、関係曲線の変曲点が顕著に現れている。この変曲点は、液状化後に起こる過剰間隙水圧の消散とその後の正のダイラタンシーによる間隙水圧 u の低下という異なる2つのメカニズムの境界を示していると考えられる。一方、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が大きい場合、正のダイラタンシーの影響が大きく、液状化した試料の過剰間隙水圧が消散しきらないうちに、正のダイラタンシーが発生するために変曲点が現れなくなるものと考えられる。

青梅産砕砂および山砂と砕砂の混合砂では、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の影響は比較的小さい。

これは、青梅産砕砂の微粒分混入量が多いことが原因と考えられる。間隙水に微粒分が混入することにより、間隙水の粘性の増加に起因する透水性の低下や、マトリックスと砂粒子の間の密度差が小さくなることによる砂粒子の沈下速度の低下などの影響により、過剰間隙水圧の消散速度が遅くなり、正のダイラタンシーの影響が顕著となるものと考えられる。すなわち、透水性が低い状態では、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の大きい状態と類似の現象が起こっているといえる。

図-5の(a)には、比較のために乾燥砂で同様の測定を行った結果を破線で示したが、乾燥砂では、同一種類の砂において、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ による測定値の差が全く見られなかった。このことか

ら、本実験の測定条件下においては、飽和砂のせん断ひずみ速度依存性は、砂の透水性および間隙水の粘性によっては決まるものと判断できる。

(c) コンシステンシー曲線

図-6に、飽和砂のせん断ひずみ領域ごとのコンシステンシー曲線を示す。ただし、今回測定されたコンシステンシー曲線は、初期状態を液状化した状態と仮定している。いずれの試料も、せん断ひずみ γ の小さい液状化している領域では、せん断応力 τ が小さく、せん断ひずみ $\dot{\gamma}$ を増大させていくと、まず、せん断ひずみ速度の小さい領域のせん断応力が増大し、その後、コンシステンシー曲線が図の右方向にシフトしながら、コンシステンシー曲線の傾きが、せん断

図-7 セン断応力 τ と有効応力 p の関係 図-8 各砂のせん断応力 τ と有効応力 p の関係

図-9 セン断変形履歴の影響

ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の小さい領域から順に逆転し、最終的にはBinghamモデルに近似できるコンシステンシー曲線に近づく。

せん断ひずみの小さい段階でコンシステンシー曲線が逆勾配となるのは、過剰間隙水圧の消散が時間に依存した現象であるためと考えられる。同一せん断ひずみの場合では、せん断ひずみ速度が大きいほど変形反転からの経過時間は短く、過剰間隙水圧の消散度合いが小さくなるため、せん断応力が小さくなる。その後、変形の進行とともに、せん断ひずみ速度の小さい領域から順に過剰間隙水圧の消散が終了するために、コンシステンシー曲線の勾配は、せん断ひずみ速度の小さい方から順に逆転していく。

また、コンシステンシー曲線からも、前述したような、透水性の低い試料ほどせん断ひずみ速度の大きい状態へシフトする傾向が見られ、これらの曲線の比較から、砂の透水性が、粒度分布および微粒分含有量の影響で、信濃川産川砂・豊浦標準砂・香取産山砂・青梅産砕砂の順で低くなっていると判断できる。

(d) 動的内部摩擦係数 $\tan\phi'$

図-6に示すコンシステンシー曲線は、厳密に言えば近似的なものであり、過剰間隙水圧の消散現象が時間に依存する現象であることから、誤差が生じることが予想される。本来せん断応力 τ がせん断ひずみ γ ではなく、有効応力 p をパラメータとしていることを考えると、複雑な流動挙動を正確に表現するためには、有効応力 p と内部摩擦係数 $\tan\phi'$ からせん断応力 τ を求める必要がある。そこで、全応力が有効応力 p と間隙水圧 u の和であるという関係から、完全な液状化状態でせん断応力が0のときの有効応力 p を0と仮定し、その状態からの間隙水圧 u の減少分を有効応力 p とみなして算出した。

図-7に、豊浦標準砂のせん断応力 τ と有効応力 p の関係を示す。図には有効応力 p の上昇域のみを示している。本実験の範囲では、2値の関係は、せん断ひずみ速度および充填状態によらず、 $p=0.8\text{kPa}$ 付近で交わる2本の直線で近似できる。図-5(b)に示した間隙水圧 u の挙動と比較すると、 $p<0.8\text{kPa}$ では試料は液状化状態にあり、 $p>0.8\text{kPa}$ では、正のダイラタンシーが発生していると考えられる。このことから、 $p<0.8\text{kPa}$ の範囲では、液状化により砂粒子間の接触状態が変化して、近似直線の勾配が減少しているものと考えられる。

また、 $p=1.0\text{kPa}$ の付近でせん断応力 τ が上方にシフトする傾向が見られる。これは、 $\dot{\gamma}$ が小さい場合にのみ現れ、試料内部では、粒子の接触状態が、有効応力 p が一定のまま、液状化状態から通常の状態に移行しているものと考えられる。 $\dot{\gamma}$ が大きい場合にはこのような現象は観察されず、有効応力 p の増加にしたがって徐々に状態が移行していく。

図-7には、近似直線から求まる応力円の包絡線も併示した。この包絡線は動動的Coulomb線であり、動的内部摩擦係数 $\tan\phi'$ として、 $p<0.8\text{kPa}$ で0.220、 $p>0.8\text{kPa}$ で1.966の値が得られた。動摩擦が動的状态にあることを条件とすることから、流動時の応力状態は、常にこの包絡線に接する応力円上にある。

(e) セン断層厚さ h

試料の寸法効果を検討するために、せん断層厚さ h が214mmの試験装置を用いた実験も行った。その結果、コンシステンシー曲線およびせん断応力 τ と有効応力 p の関係のいずれにおいても、前掲の $h=139\text{mm}$ の結果との大きな差異は見られなかった。図-8に、せん断応力 τ と有効応力 p の関係に関して、せん断層厚さ h が139mmおよび214mmの結果を重ねた結果を示す。

(f) 砂の種類

図-8中の破線は、豊浦標準砂で測定された2本の回帰曲線を示すが、この図から、砂の種類による違いは、微粒分の多い試料で相関の悪いものがあった以外は、ほぼ同じ直線上に重なった。これは、本実験における有効応力 p の範囲が極めて小さかったため、砂粒子の表面性状の違いは現れず、また、限界間隙比 e_{lim} に達した状態のみを評価したために、砂粒子間の距離が遠くなり、砂粒子形状の影響も現れなかったものと考えられる。

(g) セン断変形履歴

図-9に、せん断応力 τ および間隙水圧 u とせん断ひずみ γ の关系到及ぼす、変形開始以前のせん断変形履歴の影響の一例を示す。図は、 $N=1$ の変形開始時の測定結果であり、せん断ひずみ $\gamma=0$ から変形を開始している。変形開始以前に受けた変形の方向と同じ方向に変形させた場合を順方向、逆方向に変形させた場合を逆方向として結果を示す。また、比較のために限界間隙比 e_{lim} に達した後の測定結果も併

せて示す。図から明らかなように、せん断変形履歴によってその性状は全く異なり、順方向に変形させた場合には、せん断応力 τ が変形開始とともに急激に増加するのに対し、逆方向の場合には、変形開始と同時に液状化して、せん断応力 τ が消失する。この結果から、側方流動後の飽和砂地盤は、流動方向と逆方向の変形を受けた場合に、容易に液状化することが予測される。

2.4 飽和砂を試料とした実験のまとめ

飽和砂のような高濃度サスペンションの流動挙動には、液状化による過剰間隙水圧だけでなく、正のダイラタンシーによる間隙水圧の低下が大きく影響を及ぼしていることが実験により明らかとなった。また、そのコンシステンシー曲線は、せん断ひずみに依存している。間隙水圧の測定結果からは、飽和砂の流動挙動を予測するために必要となる動的内部摩擦係数を求めることができた。

3. モルタルおよびセメントペーストを試料とした実験

3.1 実験装置と測定方法

実験には、飽和砂の場合と同様に、せん断層厚 $h=139\text{mm}$ の鉛直型せん断ボックス試験装置を用いた。ただし、セメントを混入した場合には、間隙水圧計による測定が困難であるため、間隙水圧の測定は行っていない。

モルタルには、山砂：砕砂を3：7の比率で混合した砂を用いた。表-2に今回の実験に用いた試料の調合およびモルタルフロー試験結果を示す。

砂粒子の混入量の違いの影響を検証するために、容積比 s/m を50, 55, 57.5 (%)の3水準に変化させた。この時、砂の混入量の違いのみを評価するために、マトリックスとなるセメントペーストの調合は一定とした。また、セメントペーストの性質の違いの影響を見るために、 $s/m=50\%$ の時の0回落下時のモルタルフロー値 Fl_0 を100mm程度および200mm以上の2水準に変化させ、また、 $s/m=57.5\%$ の時の0回落下時のモルタルフロー値 Fl_0 を200mm程度となるように流動化

表-2 モルタルおよびペーストの調合およびモルタルフロー試験結果

No.	W/C (%)	s/m (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	HAE/C (%)	Fl ₀ (mm)	Fl ₁ (mm)
1		50.0	243	811	1,300		273	-
2		55.0	219	730	1,430	2.2	205	243
3	30	57.5	207	689	1,495		137	190
4		50.0	243	811	1,300	1.2	124	201
5		57.5	207	689	1,495	3.2	201	240
6		50.0	279	698	1,300		202	258
7		55.0	251	628	1,430	0.8	103	204
8	40	57.5	237	593	1,495		91	170
9		50.0	279	698	1,300	0.2	95	202
10		57.5	237	593	1,495	1.5	229	272
p-1	30		487	1,622			-	-
p-2	40	0.0	558	1,396		0.2	-	-
p-3	29		478	1,649		0.0	-	-

[Notes] W/C: Water-cement ratio, s/m: Volumetric sand-mortar ratio, W: Water, C: Cement, S: Fine aggregate, HAE: High-range water reducing AE agent, Fl₀: Mortar flow value before drop, Fl₁: Mortar flow value after 15times drop.

させた試料の試験も行った。水セメント比W/Cは全ての試料で30%および40%の2水準とした。0回落下時のモルタルフロー値 Fl_0 は、高性能AE減水剤添加量HAE/Cで調節した。

マトリックスとなるセメントペーストのみの試験も行ったが、高性能AE減水剤の添加率HAE/Cをモルタルの場合と同一にすると、セメント粒子の分離が著しくなるため、添加量を減らした試料を用いた。また、高性能AE減水剤を添加しない、硬練りのセメントペーストの試験も行った。

3.2 実験結果とその考察

図-10にせん断ボックス試験で測定されたモルタルのせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係を示す。図中に示す曲線は、それぞれせん

図-10 せん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係

断ひずみ速度を $\dot{\gamma}=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.9/s$ で変形させた場合の結果である。図からわかるように、モルタルのせん断ひずみ依存性は割合によって全く異なる。

せん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係曲線の勾配は、ダイラタンシーに起因するものであり、この勾配が大きいほどサスペンション特有の性質が顕著に現れていることを示す。逆に、完全なBingham流体ではこのような勾配は現れず、せん断応力 τ は一定となるはずである。

(a) 細骨材容積率 s/m

細骨材容積率 s/m を変化させた試料No.1～No.3およびNo.6～No.8を比較すると、 s/m の増加に伴ってせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係曲線の勾配が大きくなっている。これは、マトリックスの性質が一定ならば、固体粒子の混入量が多いほど、せん断応力 τ のせん断ひずみ依存性が顕著に現れることを示している。

なお、 $W/C=40\%$ の試料の方が $W/C=30\%$ の試料に比べて勾配が急であるが、これは0回落下時のモルタルフロー値 Fl_0 の違いによるものと考えられる。

(b) セメントペーストの流動性

試料No.1, 6から、混和剤添加量 HAE/C を減らして、セメントペーストの流動性を下げた試料No.4, 9では、曲線の勾配が大きくなり、せん断ひずみ依存性が顕著に現れている。

一方、試料No.3, 8から、混和剤添加量 HAE/C を増やして、セメントペーストの流動性を上げた試料No.5, 10では、細骨材容積率 s/m が大きいにもかかわらず、曲線の勾配は小さい。このことから、高性能AE減水剤を多量に添加し、セメントペーストの流動性を上げれば、曲線の勾配は小さくなり、Bingham流体に近い挙動を示すことがわかる。

(c) コンシステンシー曲線

図-11に、せん断ひずみ領域ごとのコンシステンシー曲線を示す。フレッシュモルタルの場合には、飽和砂で見られたような、せん断ひずみ $\dot{\gamma}$ の増大に伴うコンシステンシー曲線の勾配の逆転現象は観察されなかったが、せん断ひずみ $\dot{\gamma}$ の増大とともにせん断応力 τ が増大し、コンシステンシー曲線が右方向にシフトしていく傾向は、程度の差はあるものの、すべての試料で確認された。

$W/C=30\%$ の試料では、試料No.4を除いて、右上がりのコンシステンシー曲線が測定されているのに対し、 $W/C=40\%$ の試料では、試料No.10を除いて、右下がりのコンシステンシー曲線が測定されている。

この結果から、コンシステンシー曲線の傾きの正・負は、単にセメントペーストの軟らかさによって決まるのではなく、混和剤添加量 HAE/C が直接影響していることがわかる。すなわち、高性能

図-11 コンシステンシー曲線

AE減水剤は、セメント粒子を分散させてセメントペーストを流動化させる作用があるが、その他にも、固体粒子間の摩擦を低減する潤滑作用を持つ可能性が考えられる。この場合、サスペンションの内部摩擦係数が小さくなるため、間隙水圧 u が変化しても、せん断応力 τ はほとんど変化しないことが予想される。仮に、動的な内部摩擦係数 $\tan\phi$ が0になった場合には、せん断応力 τ は間隙水圧 u によらず、セメントペーストの性質とその変形領域のみによって決まるため、Bingham流体と仮定することができる。 $W/C=30\%$ のモルタルでは、 $HAE/C=2.2\sim 3.2\%$ と混和剤添加量が大きいためにコンシステンシー曲線が右上がりになり、また、 $W/C=40\%$ の中で唯一右上がりとなる試料No.10についても、 $HAE/C=1.5\%$ と他の試料に比べて大きいことから、これが説明できる。

一方、混和剤添加量が小さい試料のコンシステンシー曲線が逆勾配となるのは、前述の飽和砂の場合と同様で、過剰間隙水圧の影響と考えられる。ただし、モルタルの場合にはセメントの混入によりマトリックスの粘性が高くなり、過剰間隙水圧の消散速度が遅いた

めに、全ひずみ領域において過剰間隙水圧の影響が現れたものと考えられる。

(d) セメントペーストの測定結果

図-12に、セメントペーストのせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係曲線を示す。試料No.p-1,2では、せん断ひずみ γ の増加に伴うせん断応力 τ の増加は測定されず、ほぼBingham流体とみなすことができる。一方、混和剤を添加していない試料No.p-3では、同関係曲線に明らかに勾配が現れ、割合によってはセメントペーストでも、ダイラタンシーに起因するせん断応力のせん断ひずみ依存性をしめすことが明らかとなった。

図-12 セン断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係 (セメントペースト)

3.3 モルタルおよびセメントペーストを試料とした実験のまとめ

飽和砂と同様に、フレッシュモルタルおよびペーストのせん断応力はダイラタンシーによる間隙水圧の低下に大きく影響を受けており、そのコンシステンシー曲線は、せん断ひずみに依存していることが明らかとなった。また、高性能AE減水剤はセメントペーストの流動性だけでなく、骨材粒子間の動的内部摩擦係数に大きく影響を及ぼしており、高性能AE減水剤の添加量が多く、かつ、流動性の良いもののみがBingham流体としてモデル化できることがわかった。

4. おわりに

本研究では、高濃度サスペンションのレオロジー的な性質を把握するために、飽和砂、フレッシュモルタルおよびペーストを試料としたせん断ボックス試験を行った。その結果、液状化後の高濃度サスペンションの流動挙動は、せん断ひずみの進行とともに液体的な性質から固体的な性質へと変化することが明らかとなった。今回測定されたような、せん断ひずみに依存したコンシステンシー曲線は、他の物質では観察されず、飽和砂やフレッシュモルタルなどの高濃度サスペンションに特有なものである。また、固体粒子とマトリックスの間の密度差が、その性状をさらに複雑なものとしている。

本実験で得られた飽和砂の実験結果は、限界間隙比に達した後の、自由排水条件下における、完全な液状化の後のレオロジー性質であり、充填状態や排水条件、液状化の度合いなどを变化させた場合の流動挙動に関しては、今後の研究課題といえる。

フレッシュモルタルに関しては、マトリックスのセメントペーストが降伏値を持つことなどの理由から、現在のところ、せん断変形時の間隙水圧を正確に測定する方法がなく、その試験手法の検討が重要課題である。また、高性能AE減水剤の動的内部摩擦係数に及ぼす影響については、まだ十分に検証されていない。

本研究で得られたせん断ひずみ依存型のレオロジーモデルを用いることにより、型枠内流動時の鉄筋間通過性や閉塞、振動前後の性状変化などをより正確に評価することができると考えられ、今後研究を進めていく予定である。

フレッシュモルタルの流動性に影響を及ぼす細骨材の材料性質の定量化手法に関しては、粒度分布や骨材の個々の形状からの把握は困難であり、本実験で測定した飽和砂のコンシステンシー曲線などによるレオロジー的な把握手法が有効であると考えられる。

謝辞

本研究に際して、鳴滝康宏君、名口芳和君（いずれも名古屋大学大学院生）の協力を得た。本研究費の一部は、平成10・11年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(B)ならびに1999年度セメント協会研究奨励金によった。付記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 村田二郎：フレッシュコンクリートの流動と変形，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集，pp.272-273，1976.
- 2) 下山善秀：静的外力による硬練りコンクリートの変形に関する研究，土木学会論文集，No.390/V-8，pp.141-149，1988.2
- 3) 越川茂雄：フレッシュコンクリートの間隙水圧挙動に関する考察，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，pp.465-466，1986.11
- 4) 森博嗣・田中政史・谷川恭雄：フレッシュコンクリートのせん断変形性質に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.421，pp.1-10，1991.3
- 5) 時松孝次：地盤の液状化・側方流動による被害事例および設計への展開，地盤の液状化および流動講習会講演資料，地盤工学会，1998.
- 6) 中村孝明・佐藤博・土居賢彦：BEM・FEM結合モデルによる液状化側方流動解析，境界要素法論文集，No.10，pp.53-58，1993.
- 7) 渦岡良介・八嶋厚・川上哲太郎：Binghamモデルを用いた液状化地盤の側方流動解析，第32回地盤工学研究発表会（熊本），pp.893-894，1997.7
- 8) 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，No.596/III-43，pp.189-208，1998.6
- 9) 寺田謙一・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・三島直生・若林信太郎：せん断ボックス試験に基づくモデル材料を用いたフレッシュコンクリートのレオロジー性質に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.511，pp.17-24，1998.9
- 10) 寺田謙一・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・三島直生：フレッシュコンクリートのレオロジー性質に及ぼすせん断層厚および粗骨材要因の影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.513，pp.15-22，1998.11

(1999年7月7日原稿受理，1999年9月10日採用決定)