

論文 サスペンション要素法によるフレッシュコンクリートのせん断変形解析

比嘉 盛嗣^{*1}・谷川 恭雄^{*2}・森 博嗣^{*3}・黒川 善幸^{*4}

要旨：本研究では，粘塑性サスペンション要素法を用いて小型せん断ボックス試験のシミュレーションを行い，その計算結果に基づいて，このせん断ひずみ依存型粘塑性モデルについて検討するとともに，入力データがフレッシュコンクリートのレオロジー性質に与える影響について検討した。その結果，粒状体のレオロジー性質にせん断ひずみ依存性が確認され，その傾向は，粒子間の摩擦力，粒子形状、および固体密度によって大きく変化することが明らかとなった。

キーワード：フレッシュコンクリート，せん断ひずみ依存型モデル，サスペンション要素法

1. まえがき

コンクリート工事の合理化や機械化の実現には、高精度なフレッシュコンクリートのレオロジーモデルの構築とその定量化が不可欠である。しかし、現在フレッシュコンクリートのレオロジーモデルとして一般的に用いられているビンガムモデルでは、試料の硬さによる適用限界があるだけでなく、経時変化や加振時の性状の変化を表現することができない。そこで、筆者らは、強制変形により、せん断応力とせん断ひずみの関係を求めることができるせん断ボックス試験を行ってフレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定を行い、せん断ひずみの増加とともに降伏値と塑性粘度が増加するという条件を、ビンガムモデルに付加した、せん断ひずみ依存粘塑性モデルを提案した¹⁾。しかしながら、このせん断ボックスの内部の試料は、非常に複雑な動きをすることが実験により観察されている¹⁾。

本研究では、せん断ボックス試験中の試料の変形メカニズムを明らかとすることを目的として、フレッシュコンクリートを粗骨材とビンガム流体の性質を持つマトリクスからなる2相材料

として捉え、非連続体の動的解析手法である粘塑性サスペンション要素法(VSEM)²⁾を用いて、シミュレーションを行った。モルタルをビンガム流体と仮定したときのせん断変形を受けるフレッシュコンクリートのレオロジー性状について、解析的に検討した。

2. 解析の概要

2.1 サスペンション要素の設定

サスペンション要素と節点を図-1に示す。本解析手法では、ある程度接近した2つの固体粒子間にサスペンション要素を発生させ、その要素で力が伝達されると仮定して計算を行う。各粗骨材節点の周囲には、モルタル膜が存在すると

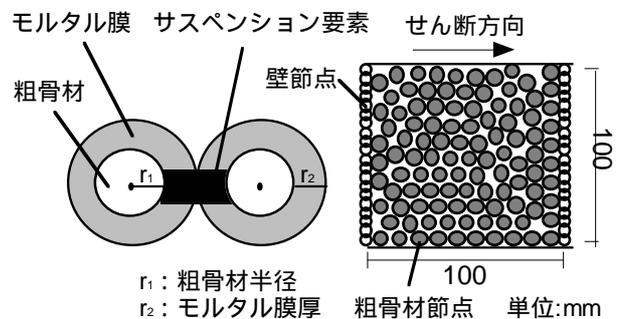


図-1 サスペンション要素と節点 図-2 解析モデル

*1 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 大学院生 (正会員)
 *2 名城大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 助教授 工博 (正会員)
 *4 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 助手 工修 (正会員)

仮定し、モルタル膜を持った粗骨材粒子の挙動を想定する。解析の入力値として、モルタルの降伏値 τ_y と塑性粘度 η を与え、また、モルタル膜の2倍の距離を要素が構成される条件として設定した。

2.2 移動境界の設定

図-2は、せん断ボックス試験の解析モデルである。せん断ボックス試験では、両側2つの壁が回転運動するが、本解析では、直径6mmの壁節点がせん断方向に定速で平行移動し、ボックス内部の試料にせん断変形を与える。壁節点の速度は、せん断ボックスの底からの距離に比例し、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を、0.5, 1.0, 2.0 (/s)の3水準に設定した。

3. せん断ひずみ依存性

3.1 解析の入力値

粗骨材節点の直径は6mm、モルタル部の降伏値 τ_y は100Pa、塑性粘度 η は100Pa・sとした。また、粗骨材節点の面積をせん断ボックス内部の面積で除した値を粗骨材体積比 V_g とし、これを0.5に設定した。

実験に用いたせん断ボックス¹⁾では、鉛直方向に回転運動を行うことから、本解析では、重力を考慮していない。

3.2 解析結果および考察

せん断ひずみ γ とせん断応力 τ の関係を図-3に示す。いずれのせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ においても、せん断ひずみ γ の増加とともに、せん断応力 τ が増加する。

コンシステンシー曲線を図-4に示す。せん断ひずみ γ の増加とともに、せん断抵抗が増加する

ため、コンシステンシー曲線は右側にシフトし、また、曲線の逆勾配で表される粘性も増加する傾向を示す。

図-5は、図-4の曲線におけるレオロジー定数とせん断ひずみ γ の関係を示したものである。各曲線で1次回帰を行い、降伏値 τ_y 、塑性粘度 η とせん断ひずみ γ の関係を式(1)および(2)に示す。降伏値 τ_y 、塑性粘度 η は、ともにせん断ひずみ γ の1次式で表すことができ、これは過去に報告した実験結果¹⁾と一致している。しかし、式(1)に示した関係式では、せん断ひずみ γ が小さい範囲で降伏値 τ_y が負となる。同関係式をモデル化するためには、多くのデータを収集して、1次回帰を行い、せん断ひずみ γ の適用範囲を定めるか、あるいは指数関数で回帰を行うかの選択となり、今後詳細に検討する必要がある。

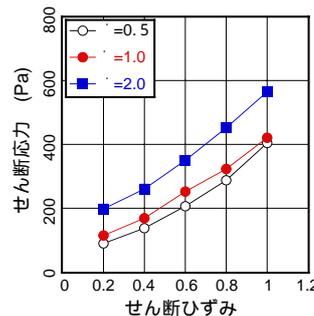


図-3 せん断ひずみ γ とせん断応力 τ の関係

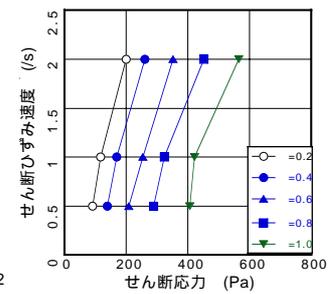
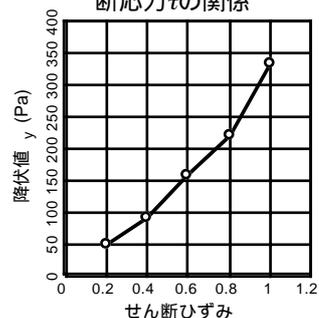
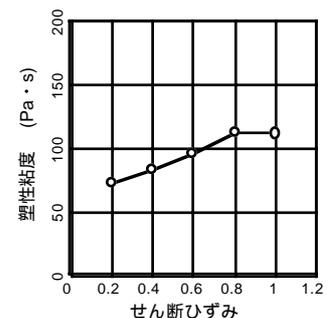


図-4 コンシステンシー曲線



(a) 降伏値 τ_y との関係



(b) 塑性粘度 η との関係

図-5 レオロジー定数とせん断ひずみ γ の関係



図-6 せん断ボックス試験の解析結果

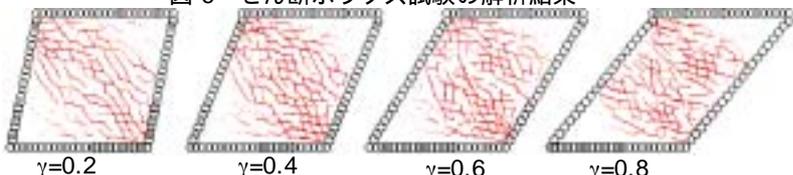


図-7 粗骨材間に働く垂直応力

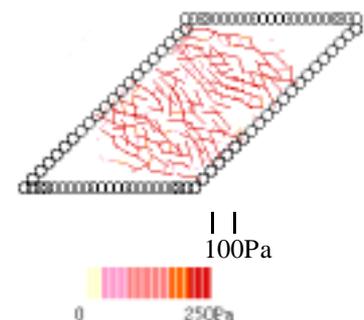


図-8 垂直応力の表示例

$$\tau_y = -37.8 + 348.7\gamma \quad (1)$$

$$\eta = 63.6 + 52.95\gamma \quad (2)$$

ここに、 τ_y ：降伏値 (Pa) ，

η ：塑性粘度 (Pa・s) ，

γ ：せん断ひずみ

図-6は、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が1.0の時の解析結果をせん断ひずみ $\gamma = 0.2$ ごとに示したものである。せん断変形の進行とともに、せん断ボックスの左上から右下部にかけて内部試料が密になり、逆に、左下と右上部の試料が疎となる。骨材粒子間に働く垂直応力を、せん断ひずみ $\gamma = 0.2$ ごとに図-7に示し、せん断ひずみ $\gamma = 1.0$ のときの垂直応力の表示例を図-8に示す。サスペンション要素を形成した粗骨材間を線分で結び、垂直応力の絶対値の大きさに比例して長く、色の濃度を濃く描いた。せん断変形の開始とともにせん断ボックスの左上から右下部にかけて圧縮応力が発生し、せん断変形の進行とともに粒子どうしが接近するものと考えられる。せん断ひずみ γ の増加に伴うせん断ボックス全体のせん断抵抗の増加は、これら固体粒子の接近に起因するものと予想される。

4. モルタル部のレオロジー性質がフレッシュコンクリートのレオロジー性質に及ぼす影響

4.1 モルタル部の降伏値による影響

モルタル部の降伏値 τ_{ym} がコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響について検討を行った。

(1) 解析の入力値

粗骨材節点の直径を6mm，粗骨材体積比 V_g を

0.5，モルタル部の塑性粘度 η_m を100Pa・sに設定した。また，モルタル部の降伏値 τ_{ym} を1, 50, 100, 150, 200Paの5段階に変化させた。

(2) 解析結果と考察

図-9は、モルタル部の降伏値 τ_{ym} を変化させた場合のフレッシュコンクリートのレオロジー定数とせん断ひずみ γ の関係を示したものである。図(a)に示すように、モルタル部の降伏値 τ_{ym} が増加すると、コンクリートの降伏値は増加する。一方、図(b)に示すように、塑性粘度 η は降伏値 τ_{ym} の増加による影響は小さい。また、せん断ひずみの増加に伴ってモルタル部の降伏値 τ_{ym} の変化による曲線間の差は増加し、せん断ひずみ γ が大きい範囲ほど、モルタル部の降伏値 τ_{ym} が降伏値に及ぼす影響が大きくなる。

4.2 モルタル部の塑性粘度による影響

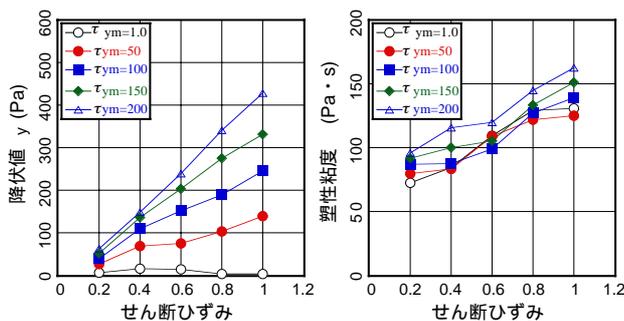
モルタル部の塑性粘度 η_m がコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響について検討を行った。

(1) 解析の入力値

4.1と同条件の設定で、モルタル部の降伏値 τ_{ym} を100Paとした。また、モルタル部の塑性粘度 η_m を1, 50, 100, 150, 200Pa・sの5段階に変化させた。

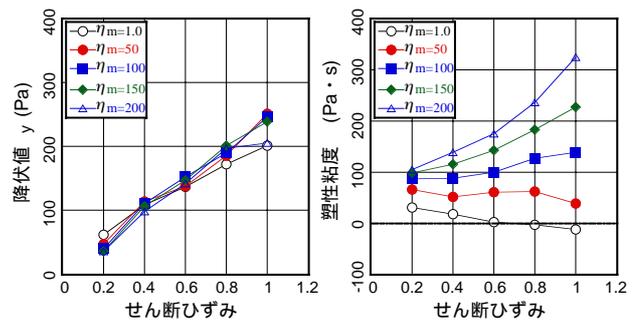
(2) 解析結果と考察

図-10は、モルタル部の塑性粘度 η_m を変化させた場合のコンクリートのレオロジー定数とせん断ひずみ γ の関係を示したものである。図(a)に示すように、塑性粘度 η_m を変化させても、降伏値 τ_{ym} が一定の場合、フレッシュコンクリートの降伏値 τ_y もほぼ一定となる。一方、図(b)に示すように、フレッシュコンクリートの塑性粘度 η は、モ



(a) 降伏値 τ_y との関係 (b) 塑性粘度 η との関係

図-9 レオロジー定数とせん断ひずみ γ の関係



(a) 降伏値 τ_y との関係 (b) 塑性粘度 η との関係

図-10 レオロジー定数とせん断ひずみ γ の関係

ルタルの塑性粘度 η_m の増加とともに増加する。また、せん断ひずみ γ が大きいほど、曲線の勾配は大きくなり、せん断ひずみ γ が大きくなるほど、モルタルの塑性粘度 η_m の影響を強く受ける。

図-10の(b)において、モルタルの塑性粘度 η_m が $1\text{Pa}\cdot\text{s}$ の場合、フレッシュコンクリートの塑性粘度 η が負になっている。フレッシュコンクリートを固体粒子とビンガム流体で構成される2相材料と想定したとき、流体部分の粘性が小さければ、フレッシュコンクリートに粘性が表れず、また、せん断ボックス試験においては、塑性粘度が負の値となって測定される場合がある¹⁾ことが解析的に示された。

5. 摩擦抵抗の考慮

図-7に示したように、せん断変形の進行時には、せん断ボックス内部で対角線方向に圧縮応力が働き、内部試料は密実になることによって、粗骨材間の摩擦抵抗が増加するものと考えられる。しかし、従来のVSEMにおいては、粗骨材節点間に働く摩擦抵抗は考慮されていない。そこで、土に関する一般式を参考にして、解析に摩擦抵抗を導入した。

5.1 摩擦係数の導入

一般に、土のせん断強度は、式(3)に示すクーロンの式で表される³⁾。同式で、土粒子の摩擦抵抗は、垂直応力 σ に内部摩擦係数 \tan を乗じたものとして定義されているが、フレッシュコンクリートの粗骨材粒子間でも同傾向の摩擦抵抗が作用すると考えられる。

式(4)に示すように、摩擦係数 k をサスペンション要素に作用する軸圧縮応力 σ_c に乗じ、その値をモルタル部の降伏値 τ_y に加算して得られた降伏値 τ_y' をVSEMに用いた。ただし、この加算は、軸応力が圧縮の場合にのみ適用される。

$$\tau = c + \sigma \tan \quad (3)$$

$$\tau_y' = \tau_y + \sigma_c k \quad (4)$$

ここに、 τ : せん断強度 (Pa),
 c : 粘着力 (Pa),

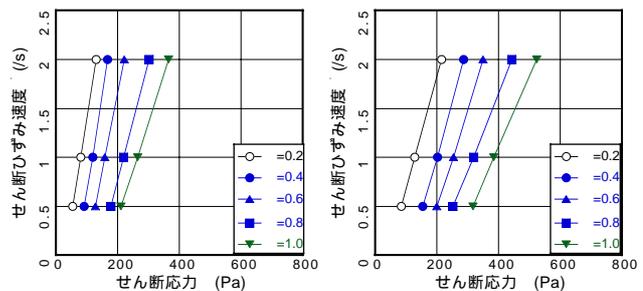
σ : せん断面に垂直に作用する有効応力 (Pa),
 \tan : 内部摩擦係数,
 τ_y : モルタルの降伏値 (Pa),
 τ_y' : 軸応力が圧縮時に用いる降伏値 (Pa),
 σ_c : サスペンション要素の軸応力 (Pa),
 k : 摩擦係数

5.2 解析の入力値

粗骨材節点の直径を6mm、粗骨材体積比 V_g を0.5、モルタル部の降伏値 τ_y 100Pa、塑性粘度 η を $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ に設定した。また、摩擦係数 k を0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 の6段階に変化させた。

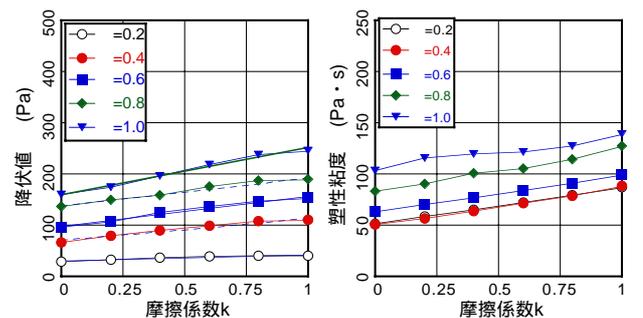
5.3 解析結果と考察

摩擦係数 k が0の場合と1.0の場合のコンシステンシー曲線を図-11に示す。摩擦係数 k を導入することで、せん断抵抗が増加するため、コンシステンシー曲線は右側にシフトし、その逆勾配(粘性)も増加する。また、せん断ひずみごとのシフト幅と曲線の勾配の変化も大きくなる。



(a) 摩擦係数 $k = 0$ (b) 摩擦係数 $k = 1.0$

図-11 コンシステンシー曲線



(a) 降伏値 τ_y' との関係 (b) 塑性粘度 η との関係

図-12 レオロジー定数と摩擦係数 k の関係

レオロジー定数と摩擦係数 k の関係を図-12に示す。摩擦係数 k が増加すると、降伏値 τ_y 、塑性粘度 η はともに増加する。また、降伏値 τ_y は、せん断ひずみ γ が大きい場合ほど増加幅は大きくなり、せん断ひずみ γ が大きくなるほど、摩擦抵抗の影響を強く受ける。以上の結果より、粗骨材粒子間の摩擦抵抗が増加すると、フレッシュコンクリートのレオロジー定数は増加し、コンシステンシー曲線全体が右側にシフトする。また、摩擦抵抗が大きいほど、降伏値、塑性粘度の増加幅は大きく、粗骨材間の摩擦抵抗が、せん断ひずみ依存性をより顕著にすることが明らかになった。

なお、摩擦係数 k の具体的な数値については、解析と同条件の実験を行って、今後検討する予定である。

6. 粗骨材がフレッシュコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響

フレッシュコンクリートの流動においては、粗骨材の形状や量などが影響要因となる。

6.1 粗骨材形状の影響

粗骨材の形状がレオロジー定数に及ぼす影響について検討を行うため、円形、三角形、および

四角形を用いたコンクリートに関する解析を行った。三角形と四角形の粗骨材に関しては、複数の円形粗骨材節点を比較的高いレオロジー定数を持つサスペンション要素で連結することで多角形粗骨材とし、一体となって運動させることで考慮した⁴⁾。

(1) 解析の入力値

円形の粗骨材節点の直径を3.05mmに、三角形粗骨材および四角形粗骨材はそれぞれその円に内接する、3つの直径1.64mmの円、4つの直径1.39mmの円とした。モルタル部の降伏値 τ_y を100Pa、塑性粘度 η を100Pa・sとし、摩擦係数 k を1.0、粗骨材体積比 V_g を0.4として解析を行った。

(2) 解析結果と考察

せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}=1.0$ の時の解析結果を、せん断ひずみ $\gamma=0.2$ ごとに図-13に示す。ただし、三角形粗骨材および四角形粗骨材では、形状を判別するため、濃度別に示した。

図-14は、各骨材を用いたコンクリートのレオロジー定数とせん断ひずみ γ の関係を示したものである。降伏値 τ_y 、塑性粘度 η ともに、四角形粗骨材を用いた試料の場合が最大となり、ついで三角形粗骨材、円形粗骨材の順となる。多角形粗骨材では、粗骨材が移動する時に、他の粗

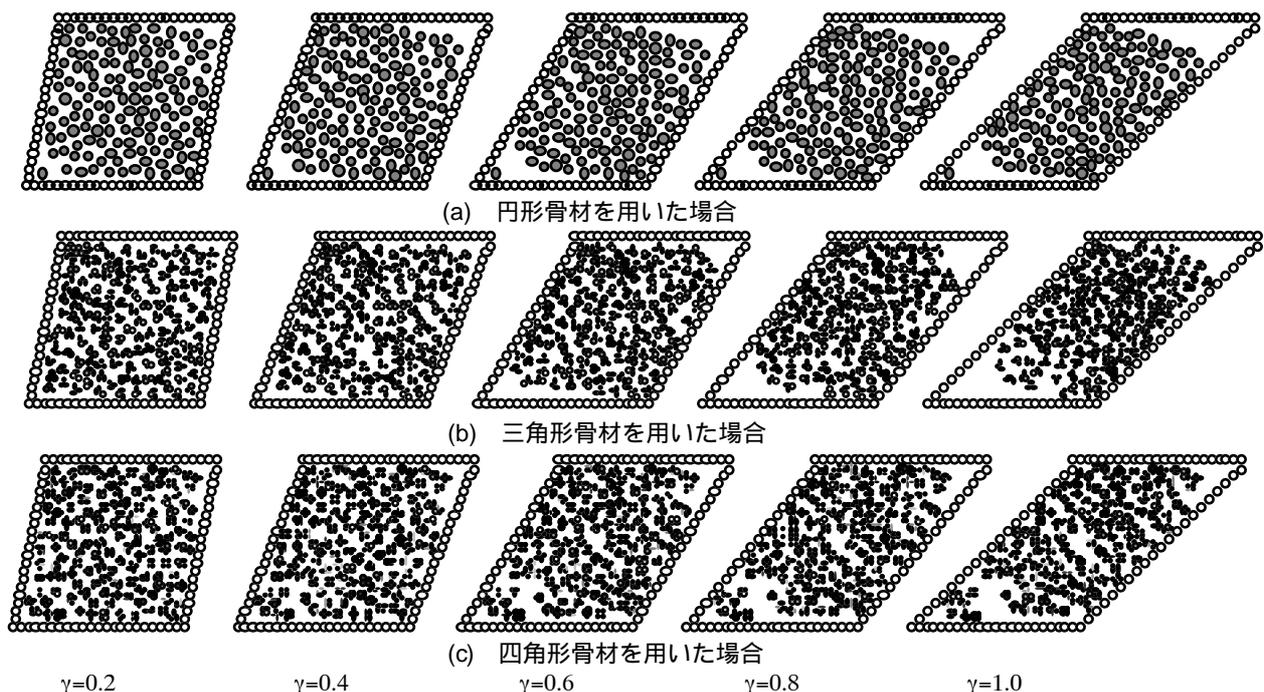
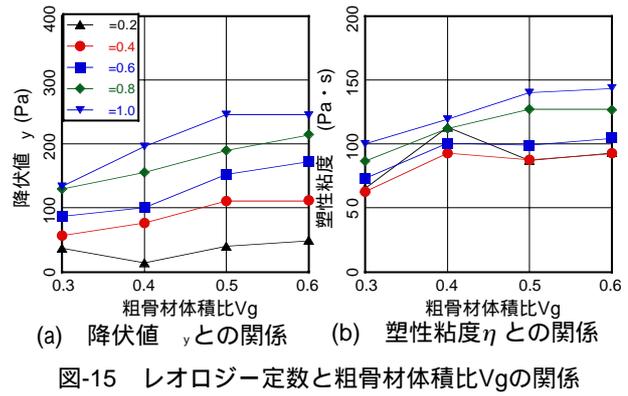
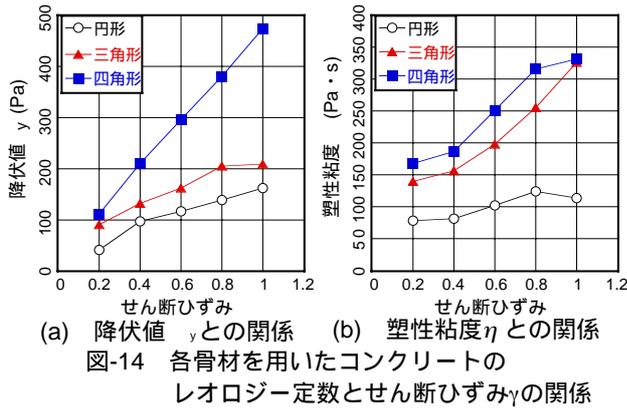


図-13 形状の異なる3種類の骨材を用いた場合の解析結果



骨材とのかみ合いが発生しているためと考えられる。また、せん断ひずみの増加に伴って多角形粗骨材と円形粗骨材の曲線間の差は増加し、せん断ひずみ γ が大きい範囲ほど、粗骨材の形状が降伏値 τ_y に及ぼす影響が大きい。

6.2 粗骨材体積比 V_g の影響

粗骨材体積比 V_g がレオロジー定数に及ぼす影響について検討を行った。

(1) 解析の入力値

粗骨材節点の直径を16mm，モルタル部の降伏値 τ_y を150Pa，塑性粘度 η を50Pa・s，摩擦係数 k を1.0とした。また，粗骨材体積比 V_g を0.3，0.4，0.5，0.6の4段階に変化させた。

(2) 解析結果と考察

図-15は，レオロジー定数と粗骨材体積比 V_g の関係を示したものである。粗骨材体積比 V_g が増加すると，降伏値 τ_y ，塑性粘度 η は増加する。これは、モルタルを粗骨材と置換することで、固体間の摩擦や，せん断ボックス内に発生する圧縮応力が増加するためと考えられる。

7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- せん断ボックス試験器内のフレッシュコンクリートの挙動を解析によって表現することができる。
- 解析によって，フレッシュコンクリートのせん断ひずみ依存モデルを再現することができる。
- モルタル部のレオロジー性質は，フレッシュコンクリートのレオロジー性質に大きく影響

するのが確認できた。

- 粗骨材粒子間の摩擦抵抗は，フレッシュコンクリートのレオロジー定数を増加させ，せん断ひずみ依存性を顕著にする。
- 粗骨材の形状および量がフレッシュコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響を解析的に検討することが可能である。

【謝辞】本研究費の一部は，平成15年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)によった。付記して謝意を表する。

【引用文献】

- 三島直生・森博嗣・黒川善幸・李建哲：小型せん断ボックス試験によるサスペンションのレオロジー定数の定量化に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.134-141，2001.12.
- 森博嗣・渡辺健治・梅本宗宏・谷川恭雄：二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動解析手法，日本建築学会構造系論文報告集，No.427，pp.11-21，1991.9.
- 杉本光隆・河邑眞・佐藤勝久・土居正信・豊田浩史・吉村優治：土の力学，朝倉書店，pp.91-116，2000.5.
- 黒川善幸他：粗骨材形状の影響を考慮したフレッシュコンクリートの粘塑性サスペンション要素法解析，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），A-1，pp.457-468，2002.9.