

論文 高流動コンクリートのせん断変形条件と材料分離の関係に関する実験的考察

安本 礼持^{*1}・橋本 親典^{*2}・安重 晃^{*3}・内田美生^{*4}

要旨：連続体モデルを用いた高流動コンクリートの流動解析において材料分離の発生を予測する方法の提案を最終目的とし、その基礎資料を得るために粗骨材沈降の程度とフレッシュコンクリートのせん断変形条件との関係について実験を行った。その結果、せん断ひずみ速度が $1.0s^{-1}$ 未満の領域において、粗骨材の沈降はせん断ひずみ速度の影響を受けず、せん断ひずみの累増に伴って進行することが認められた。この他、フレッシュコンクリートの電気的特性によって粗骨材沈降の進行を連続的に測定する方法を提案した。

キーワード：高流動コンクリート、粗骨材沈降、せん断変形、せん断ひずみ速度

1. はじめに

コンクリート工事の作業性を予測するため、数値解析によってフレッシュコンクリートの挙動を表現する検討が試みられている。特に高流動コンクリートに関しては、コンピュータの演算処理速度の向上とも相まって、コンシステンシー試験時の流動を再現可能な段階に達しつつある。ここで、フレッシュコンクリートの流動解析に適用される材料モデルには、コンクリートを均一な物質とみなす連続体モデルと複数の物質の集合体とみなす非連続体モデルがある。前者を用いる解析手法として SMAC 法や粘塑性有限要素法等があげられる。これらの解析手法は、非連続体モデルを採用する方法に比べて計算に要する時間が短くなることから、部材全体など比較的大きな解析対象を取り扱うことが可能である。この反面、連続体モデルの本質上、フレッシュコンクリートの材料分離を表現することは不可能となっている。

浦野らは、打設中のフレッシュコンクリートに不具合が生じるような状況をせん断ひずみ速度によって特定する方法を提案している¹⁾。この

提案に準じ、流動中のフレッシュコンクリートに材料分離が生じる危険性を、フレッシュコンクリートの変形量やせん断ひずみ速度によって間接的に表現できれば、連続体モデルを用いた流動解析でも材料分離が生じる危険性を予測することが可能になると考えられる。

そこで本研究では、せん断条件とフレッシュコンクリートの材料分離の関係について実験を行った。なお、材料分離は粗骨材とモルタルの分離から先に生じるという既往の研究報告²⁾より、本研究では粗骨材の沈降について検討した。また、せん断変形に伴う粗骨材沈降の進行を連続的に測定するため、フレッシュコンクリートのインピーダンスの変化から粗骨材沈降の程度を評価する方法についても検討した。

以降では、粗骨材沈降の定量化方法の検討をシリーズ1、せん断変形条件と粗骨材沈降の関係についての検討をシリーズ2として報告する。

2. 配合および使用材料

配合、フレッシュコンクリートの性状および使用材料を表-1～表-3に示す。

*1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 工修 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 (株)構造計画研究所 解析技術一部 工博

*4 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 工博 (正会員)

表－１ 配合

高流動 コンクリート の種類	記号	配合条件					単位量 (kg/m ³)				混和剤添加率			
		W/C (%)	air (%)	s/a (%)	Vs/Vm	単位G体積 (m ³ /m ³)	W	C	S	G	増粘剤 (W重量%)	SP (C重量%)	AE剤 (C重量%)	消泡剤 (C重量%)
増粘剤系	WC40S52V	40.0	5.5	55.4	0.52	0.277	180	450	896	745	0.20	3.00	0.010	0.010
粉体系	WC28S49	28.0	5.5	55.4	0.49	0.277	162	579	851	745	－	2.35	0.009	0.010
	WC30S45	29.5	5.5	52.0	0.45	0.277	180	610	780	745	－	1.35	0.011	0.010
	WC30S51	29.5	5.5	55.2	0.51	0.277	160	542	886	745	－	1.85	0.007	0.012
	WC33S51	32.5	5.5	55.2	0.51	0.277	168	517	886	745	－	1.30	0.010	0.015

表－２ フレッシュコンクリートの性状

記号	空気 量 (%)	スランブ フロー (cm)	50cm フロー 時間 (s)	ボックス充填高さ	
				R1 (cm)	R2 (cm)
WC40S52V	5.9	59.5	12.4	32.5	33.5
WC28S49	4.9	70.5	9.5	33.5	33.5
WC30S45	6.0	60.5	6.5	31.5	33.0
WC30S51	4.8	62.0	13.4	22.8	32.0
WC33S51	5.9	50.5	11.0	30.0	31.0

表－３ 使用材料

	高流動コンクリートの種類	
	増粘剤系	粉体系
セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.14g/cm ³	低熱ポルトランドセメント 密度3.24g/cm ³
細骨材	野洲川産、揖斐川産の7:3混合品 表乾密度 2.60g/cm ³ 、粗粒率 2.77	
粗骨材	碎石2005（高槻産）、実積率 58.6% 表乾密度 2.69g/cm ³ 、粗粒率 6.86	
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	
	AE剤、消泡剤	
	セルローズ系増粘剤	

3. シリーズ１（骨材沈降定量化方法の検討）

3.1 粗骨材沈降の測定装置

粗骨材とモルタルの材料分離を定量的に評価する方法に洗い試験がある。この方法は、粗骨材とモルタルの材料分離を直接評価することが可能である反面、材料分離の進行を連続的に測定することができない。

辻村・橋本らは、コンクリートのポンプ圧送時における閉塞事故の感知方法として、フレッシュコンクリートの電気抵抗をモニタリングするシステムを開発している³⁾。このシステムはフレッシュコンクリートを粗骨材とモルタル相の二相系材料と考え、絶縁体である粗骨材粒子と導体となるモルタル相の比率の変化を電気抵抗の変化として捕らえることにより、圧送管内における閉塞の前兆を検知するものである。

本研究でもこの方法に準じて、電気的な方法から連続的に粗骨材の沈降を測定することを試みた。前記の方法と異なり、電源には交流電源を使用し、フレッシュコンクリートのインピーダンスの変化から粗骨材の沈降度合いを評価した。これは、圧送管内では電極と接するコンクリートが常に入れ替わるため、直流電流によるコンクリートの分極が軽微であるのに対し、容器内では試料の入れ替わりがないため、分極に



図－１ せん断ボックス試験装置

よって電気抵抗の測定値が安定しないことが確認されたためである。

せん断変形の導入には、寺田らが開発したせん断ボックス試験装置⁴⁾を用いた（図－１）。この装置は、フレッシュコンクリートのレオロジー試験装置として開発されたもので、試料容器の側壁を兼ねる前後２枚のせん断プレートをそれぞれ逆向きに平行移動させることにより、試料容器内のフレッシュコンクリート全体に純せん断変形を加えることが可能である。このせん断ボックス試験装置とインピーダンス測定用の電気回路を組み合わせ、せん断変形による粗骨材沈降の進行を測定することを試みた。

電気回路図を図－２に、電極を図－３に示す。電極には直径 10mm の銅製丸棒を８本使用し、せん断ボックス試験機の試料容器に配置した

(図-4)。このうち4本の電極は試料容器底面より10～80mmに位置する部分を除いて絶縁し、残る4本は試料容器底より100～180mmに位置する部分を除いて絶縁した。そして前者を試料下層部分の電極、後者を試料上層部分の電極として、上下層のインピーダンスの測定にそれぞれ用いた。インピーダンスは式(1)により求めた。

$$R_C = R \cdot E_C / E_R \quad (1)$$

ここで、 R_C ；フレッシュコンクリートのインピーダンス (Ω)， R ；固定抵抗 (100Ω)， E_R ；固定抵抗間の交流電圧の実効値 (V)， E_C ；試料間の交流電圧の実効値 (V)

インピーダンスの測定は、一旦せん断ボックス試験装置を停止し、試料容器の形状が直方体となる状態で行った。また、すべての電極はせん断変形に伴う粗骨材の移動を阻害しないよう、試料容器の変形に連動するようにした。

3.2 粗骨材沈降の定量化方法と検証実験

上下層間のインピーダンスの差から、粗骨材量の差を求めるためには、あらかじめ粗骨材濃度とインピーダンスの関係を把握しておく必要がある。そこで、モルタル部分の配合を同一とし粗骨材量を変化させたフレッシュコンクリートのインピーダンスをせん断変形を加えずに測定した。結果例を図-5に示す。同一の粗骨材体積におけるインピーダンスの値はモルタル部分の配合によって異なるものの、どの配合においても粗骨材体積とインピーダンスの間には良好な線形関係が認められた。

粗骨材沈降の程度は上下層間の単位粗骨材体積の差によって表現した。この単位粗骨体積の差は、図-5に示す回帰直線の傾きを用いた式(2)から求めた。

$$dV_G = \alpha \{ (R_{Ci} - R_{Lo}) - (R_{Ui} - R_{Uo}) \} \quad (2)$$

ここに、 dV_G ；上下層間における単位粗骨材体積の差 (m^3/m^3)， R_{Ui} ， R_{Li} ；せん断サイクル i 回後の試料上層および試料下層のインピーダン

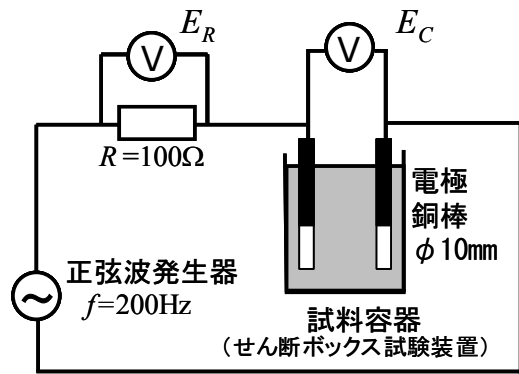


図-2 回路図

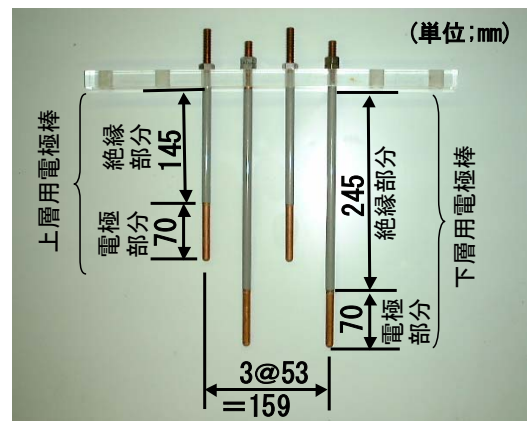


図-3 電極

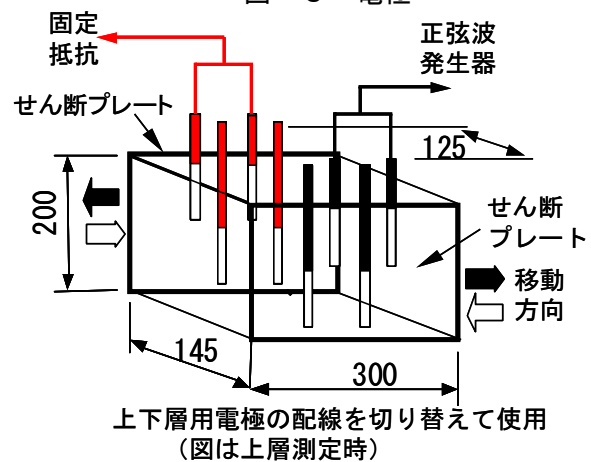


図-4 電極の配置

ス (Ω)， R_{Uo} ， R_{Lo} ；せん断変形を与える前の試料上層および試料下層のインピーダンス (Ω)， α ；インピーダンスと単位粗骨材体積の関係における回帰直線の傾き ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^3/\text{m}^3$)

配合やせん断条件が異なる5ケースにおいて、式(2)より求めた上下層の単位粗骨材体積の差と洗い試験の結果を比較した。図-6より双方の結果が概ね一致することが認められた。ここで、

洗い試験はせん断ボックス試験装置の試料容器内の試料を上下に二等分したものについて行い、ふるいには目の開き 5mm のものを用いた。

次に、セメントの水和反応の進行により、試験中にフレッシュコンクリートのインピーダンスが大幅に変化しないことを確認するため、静置状態でのインピーダンスの経時変化を測定した。結果を図-7に示す。静置状態では上下層間のインピーダンスの差が若干増加するものの、せん断変形を加えた場合に比べてその増加量が僅かであることから、時間経過によるインピーダンスの変化を無視しても差し支えないと判断した。

以上により、上下層間のインピーダンスの差から粗骨材沈降の程度を連続的に評価可能であることが確認された。

4. シリーズ 2 (せん断変形条件と粗骨材沈降の関係に関する検討)

4.1 試験方法

シリーズ1で検討した装置を用い、せん断変形条件と粗骨材沈降との関係について検討した。ここで、せん断変形に関する因子としてせん断変形量およびせん断ひずみ速度を取り上げた。

型枠内では鉄筋間を通過する際に特に大きなせん断変形がコンクリートに生じると考えられる。ここで流動方向と配筋方向が一定の場合、鉄筋間を通過する度にコンクリートには同一方向のせん断変形が累増することになる。一方、せん断ボックス試験装置では正反方向のせん断変形を繰り返す機構から、一方向のせん断変形のみを累増させることができない。このため、せん断ボックス試験装置を使用した場合、せん断変形方向の反転による影響が懸念された。そこで、変形方向の反転による影響を確認するため次の実験を行った。せん断ボックス試験装置のせん断プレートの振幅を 93mm, 46mm, 23mm の 3 水準とし、せん断ひずみ速度の最大値が同一となる条件でせん断変形を繰り返した場合の粗骨材沈降を比較した。なお、これらの振幅か

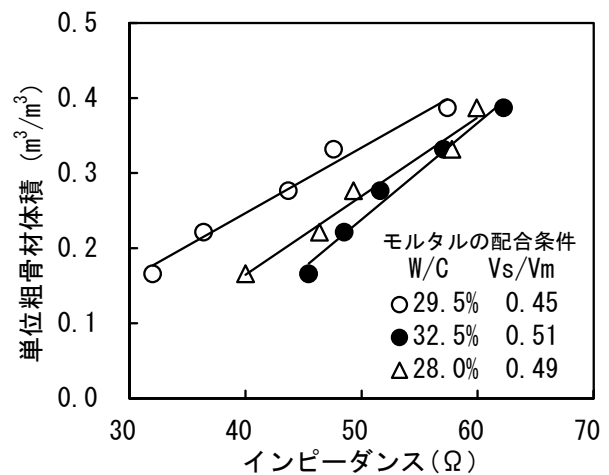


図-5 インピーダンスと粗骨材量の関係

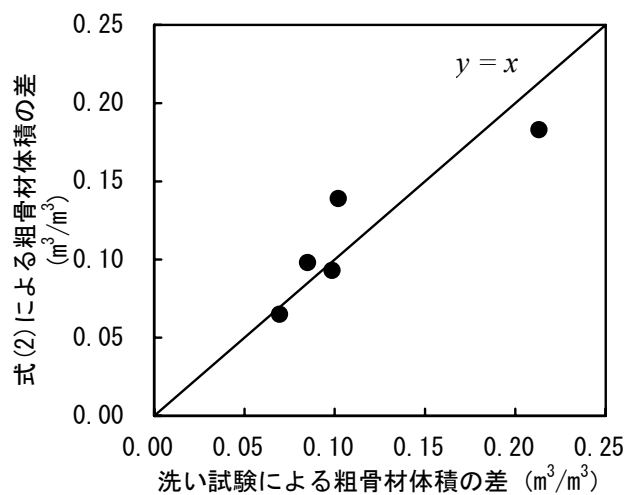


図-6 洗い試験結果との比較

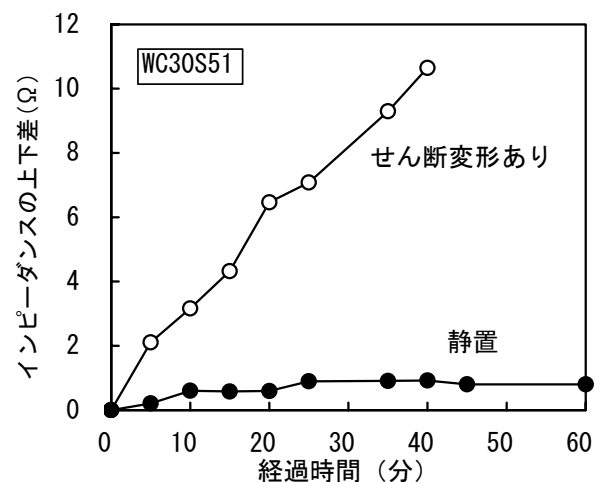
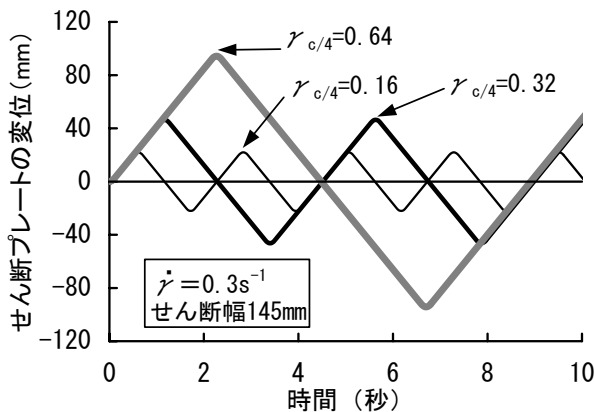


図-7 インピーダンスの経時変化

らせん断ひずみが最大となる 1/4 サイクル毎のせん断ひずみ ($\gamma_{c/4}$) を求めると、それぞれ 0.64, 0.32, 0.16 となる。振幅が異なる場合、せん断変



図－８ 振幅を変化させた場合のせん断プレートの変位パターン

形量の累計が同じであっても、変形方向の反転回数が異なる（図－８参照）。このため、正反方向への反転による影響が大きい場合、同一のせん断変形量における粗骨材沈降の程度は異なるものと考えられる。逆に反転による影響がほとんどない場合には、同一のせん断変形量における粗骨材沈降の程度はほぼ等しくなると考えられる。なお、この結果については次節「4.2 せん断変形量の影響」で報告する。

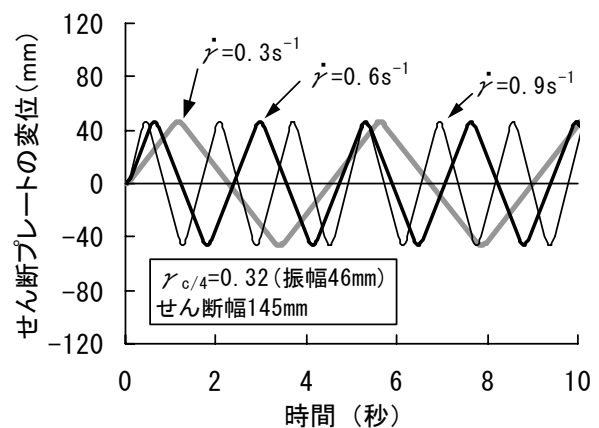
せん断ひずみ速度 ($\dot{\gamma}$) の影響の検討では、最大せん断ひずみ速度の設定値を 0.3, 0.6, 0.9 s⁻¹ の 3 水準とした。これは、スラブ状型枠内に配置された鉄筋の周囲を自重によって流動するモデルコンクリートのせん断ひずみ速度が 1.0 s⁻¹ 以下であるとする可視化実験の報告⁵⁾を基に決定した。

せん断ひずみ速度を因子とした場合のせん断プレートの変位パターンを図－９示す。

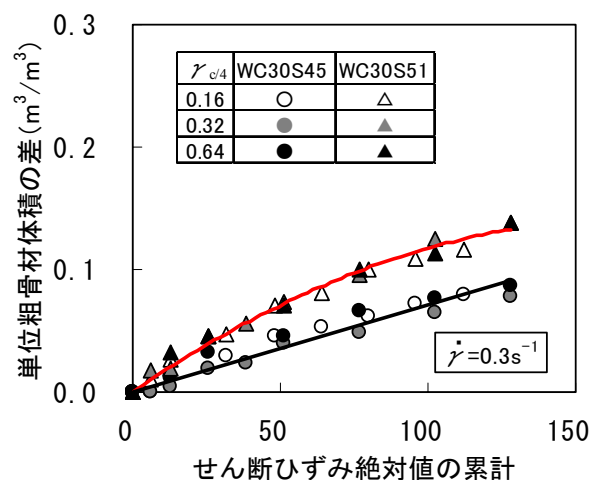
4.2 せん断変形量の影響

1/4 サイクル毎のせん断ひずみ（あるいは振幅）が異なる条件では、1 サイクルあたりのせん断変形量が異なることから、せん断サイクル数によってせん断変形量の大きさを表現することができない。このため、せん断ひずみの絶対値を累計した値により変形量の大きさを表現した。

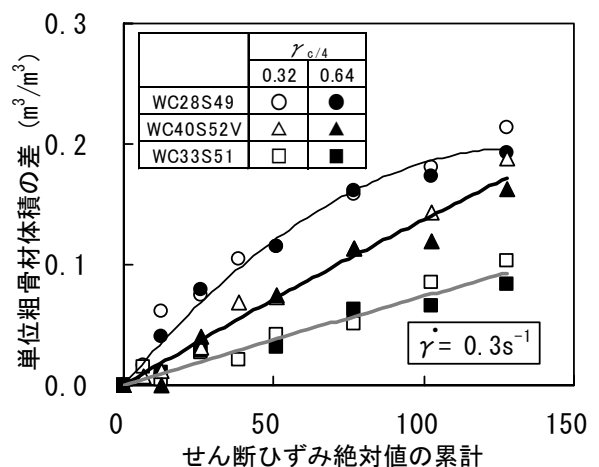
図－１０ および図－１１ に 1/4 サイクル毎のせん断ひずみ ($\gamma_{c/4}$) を変化させた場合における、せん断ひずみ（絶対値）の累計値と単位粗骨材体



図－９ せん断ひずみ速度を因子としたせん断プレートの変位パターン



図－１０ 上下層の単位粗骨材体積の差とせん断ひずみの累計値の関係



図－１１ 上下層の単位粗骨材体積の差とせん断ひずみの累計値の関係

積の上下差との関係を示す。1/4 サイクル毎のせん断ひずみ ($\gamma_{c/4}$) が異なるにも関わらず、同一配合による高流動コンクリートの単位粗骨材体積の上下差は、せん断ひずみの累計値の増加に

伴いほぼ同じように増加している。この結果より、懸念されていたせん断方向の反転による影響は僅かであり、また、粗骨材の沈降はせん断変形の累増に伴って進行することが認められた。さらに、高流動コンクリートの粗骨材沈降は、せん断変形量がある値に達した後に発生するのではなく、せん断ひずみの累計値の増加に伴い徐々に増加することが認められた。

4.3 せん断ひずみ速度の影響

せん断ひずみ速度を変化させた場合における、せん断ひずみ（絶対値）の累計値と上下層間の単位粗骨材体積の差との関係を図-12に示す。配合が同じの場合、単位粗骨材体積の上下差はせん断ひずみ速度の最大値に関わらずほぼ同様に増加した。これより、せん断ひずみ速度が 1.0s^{-1} 未満の領域における粗骨材沈降の進行はせん断ひずみ速度の影響を受けないことが確認された。

5. まとめ

粗骨材沈降の進行具合を連続的に評価する方法およびせん断変形条件と高流動コンクリートの粗骨材沈降との関係について検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) フレッシュコンクリートの上下層間におけるインピーダンスの差から、粗骨材沈降の進行を連続的に評価することが可能である。
- (2) 粗骨材の沈降は、せん断ひずみの累計値がある限界点に達した後に生じるのではなく、せん断ひずみの累増に伴って徐々に進行する。
- (3) せん断ひずみ速度が 1.0s^{-1} 未満の領域において、せん断ひずみ速度の違いによる粗骨材沈降への影響は認められなかった。

連続体モデルを用いた流動解析に適用可能な材料分離の予測方法を提案するためには、さらにせん断変形方向と重力の作用方向の相互関係による影響について明確にする必要があり、これは今後の課題である。この他、粗骨材体積差の許容範囲を提示することも必要と考えられる。これについては粗骨材体積によるコンクリートの体積変化や外部劣化因子の浸透速度への影響

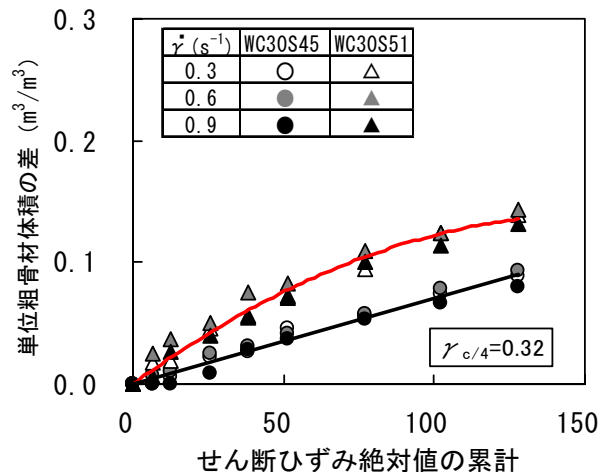


図-12 上下層の単位粗骨材体積の差とせん断ひずみの累計値との関係

等を考慮した検討が必要と考える。

参考文献

- 1) 浦野真次：可視化技術によるコンクリートの施工設計に関する基礎的実験，群馬大学学位論文，pp.130-136，1999.6
- 2) 河合徹：高流動コンクリートの配合設計手法に関する実験的研究，東京工業大学学位論文，pp.96-106，1996.8
- 3) 辻村直哉ら：管内を流れるコンクリートの閉塞感知システムの開発に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.73-78，1988
- 4) 寺田謙一：せん断ボックス試験に基づくフレッシュコンクリートのレオロジー定数の定量化に関する研究，名古屋大学学位論文，pp.45-62，1999.3
- 5) 浦野真次：可視化技術によるコンクリートの施工設計に関する基礎的実験，群馬大学学位論文，pp.45-72，1999.6

謝辞：せん断ボックス試験装置の製作にあたり、(株) 錢高組技術研究所寺田謙一博士より多大なご教授を得ました。ここに謝意を表します。