

# 論文 フレッシュコンクリートの間隙通過性を支配するモルタルの固体粒子間摩擦の定量化

福田 翔太\*1・大内 雅博\*2

要旨：フレッシュコンクリートの自己充填性を支配する間隙通過性を構成する，直応力下でのフレッシュモルタルのせん断強度の非排水一面せん断試験による直接測定法を確立した。直応力の増加に応じてフレッシュモルタルのせん断強度が増加する傾向が見られた。水セメント比を 30% から 50% まで変化させたフレッシュモルタルのせん断強度と粘度との関係を用いて，フレッシュコンクリートの自己充填性試験結果から，土木学会基準レベル  $R_1$  の間隙通過時にモルタル内に生じる直応力を 300 kPa 程度以下と推定した。本一面せん断試験における直応力設定値の妥当性を確認した。

キーワード：自己充填コンクリート，フレッシュモルタル，一面せん断試験，せん断強度，固体粒子間摩擦

## 1. 序論

フレッシュコンクリートの自己充填性，特に鉄筋間に表示される間隙通過性は，直応力下でのモルタル相のせん断強度（せん断変形の際の抵抗力）が支配している。フレッシュコンクリートの間隙通過時の流動の様子を図-1 に示す<sup>1) 2)</sup>。フレッシュコンクリートが下矢印方向に流動し，間隙手前で粗骨材粒子どうしが接近する際にモルタルに直応力( $\sigma$ )が生じる。これが，液相だけではなく固体粒子が含まれているフレッシュモルタル相のせん断強度( $\tau$ )を高める。直応力とせん断強度のイメージグラフを図-2 に示す<sup>1) 2)</sup>。これが間隙手前でコンクリートが閉塞する原因となる。

著者の一部らは，ガラスビーズを模擬粗骨材として，その混入による漏斗流下速度の低下率を指標として定量化する方法を考案した<sup>2)</sup>。この方法は，相対距離が小さくなるガラスビーズに挟まれたモルタルのせん断変形抵抗を直接測定しているわけではなく，低下する漏斗流下速度を測定する間接測定にとどまっている。ガラスビーズ試験を図-3 に示す<sup>2)</sup>。

本研究では，重力によるフレッシュコンクリートの間隙通過を模擬した一面せん断試験により，直応力下でのフレッシュモルタルの摩擦の直接測定法を確立する。

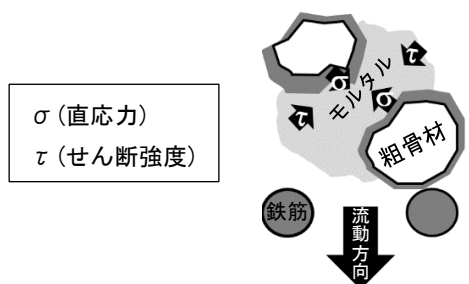


図-1 フレッシュコンクリートの間隙通過イメージ

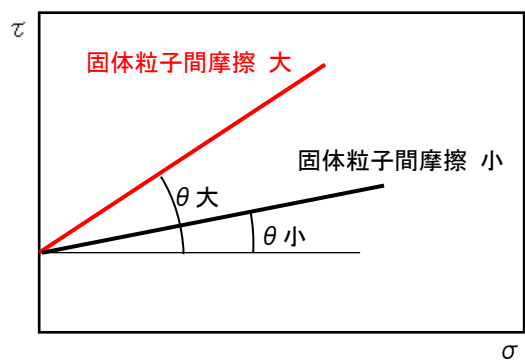


図-2 直応力とせん断強度のイメージグラフ

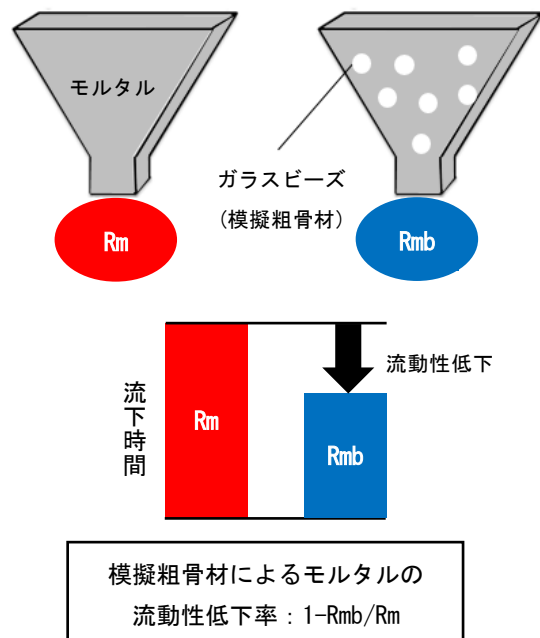


図-3 ガラスビーズ試験

\*1 高知工科大学大学院修士課程 工学研究科基盤工学専攻 社会システム工学コース (学生会員)

\*2 高知工科大学 システム工学群 教授 (正会員)

## 2. 一面せん断試験方法の概要

直応力下でのフレッシュモルタルのせん断強度測定のため、一面せん断試験機を導入した。一面せん断試験を図-4に示す。この試験機は、鉛直荷重を試料に作用させてその内部に直応力を生じさせ、上層と下層の二層に分かれた容器内のフレッシュモルタルを一定速度でせん断変形させることにより、その上下面の間に生じる摩擦力をロードセルにより測定するものである。一面せん断試験によるせん断のイメージを図-5に示す。直応力が、フレッシュコンクリートの間隙通過時に接近する粗骨材粒子間に生じる直応力を模擬したものである。

試験機は直径 60 mm、高さ 30 mm、容積 158 ml の上下に分かれ、上部をくり抜いた円筒容器である。フレッシュモルタル試料はくり抜いた円筒容器上部から投入した。本研究では、円筒容器内の上下の境界面（せん断面）にO(オー)リングを装着して脱水を防止した。せん断面を図-6に示す。また、測定ごとにせん断面にグリースを塗布し、容器自体の摩擦を極力低減すると共に試験結果のバラツキを抑制した。そして、上部から円筒形の鉛直载荷ペDESTALを挿入し鉛直荷重を作用させ、試料内に直応力を生じさせた。土質力学での一面せん断試験では、せん断力のピークが現れない場合水平変位 8 mm まで試験を行う<sup>3)</sup>。本試験機は土質材料用の試験機を流用したため、その基準と同じ水平変位 8 mm まで载荷した。その範囲内の全ての非排水試験において、最大せん断力を得たことを確認した。

本研究で用いたモルタル配合とコンクリート配合、使用材料を表-1、表-2、表-3に示す。セメント(C)は普通ポルトランドセメント、細骨材(S)は石灰砕砂、粗骨材(G)は石灰砕石を使用した。高性能 AE 減水剤(SP)は主成分がポリカルボン酸エーテル系化合物のものを使用した。増粘剤(VMA)は低分子量セルロースエーテル系のものを使用した。消泡剤(D)はポリエーテル系のものを使用した。

材料分離を抑制するために増粘剤を使用した。空気の影響を小さくするために、消泡剤を添加し、空気量 2% 以下とした。モルタル中の空気量を表-4に示す。増粘剤と消泡剤の添加量を統一した。細骨材容積比は 55% で一定とし、水セメント比のみを変化させた。コンクリート配合での粗骨材(G)は石灰砕石を使用し、300 L/m<sup>3</sup>とした。モルタルは 120 秒間練り混ぜ、10 分間静置後、5 秒間練り混ぜをしてから測定を行った。モルタルフローは 250±15 mm となるように減水剤の添加量を調整した。全ての配合のモルタルとコンクリートについて、骨材沈降等の材料分離は見られなかったことを確認した。

本試験により測定した水平方向の変位と摩擦力との関係の一例を図-7に示す。秒速 0.03 mm の水平载荷の開始

と同時に急激に摩擦力が大きくなり、そしてある点をピークとして摩擦力が急激に低下した。同じ鉛直荷重を载荷し、水セメント比を変えた場合、最初のピーク値(最大静止摩擦力)に違いが現れたが、その後の動き(動摩擦力)は同じであった。本研究では、この最大静止摩擦力のピークから容器自体の摩擦力(試料無しでの測定値)を差し引き、せん断面積で除した値をフレッシュモルタルの「せん断強度」と定義した。

図-8に変化させた直応力と摩擦力との関係を示す。土質試験では直応力の増加に伴いせん断強度の増加は直線関係である<sup>3)</sup>。本試験でも同様に直線関係が確認できた。

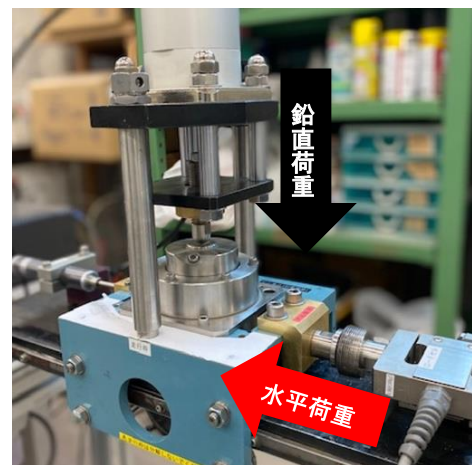


図-4 一面せん断試験機

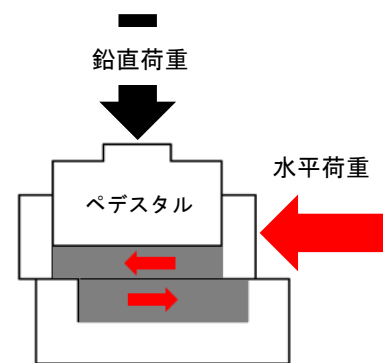


図-5 一面せん断試験のイメージ

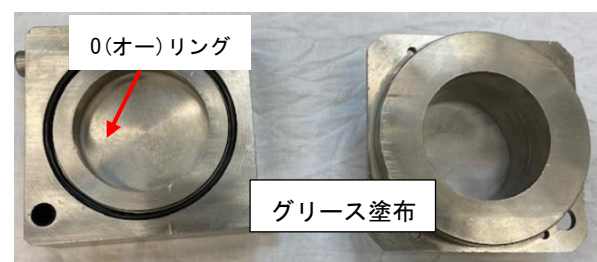


図-6 一面せん断試験機のせん断面

表-1 モルタル配合

W/C (%)	s/m (%)	減水剤 (C×%)	増粘剤 (g/m <sup>3</sup> )	消泡剤 (g/m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		
					W	C	S
30	55	5.50	286	71	219	729	1474
35	55	2.75	286	71	236	674	1474
40	55	1.65	286	71	251	627	1474
45	55	1.25	286	71	264	586	1474
50	55	1.00	286	71	275	550	1474

表-2 コンクリート配合

W/C(%)	s/m(%)	減水剤 (C×%)	増粘剤 (g/m <sup>3</sup> )	消泡剤 (g/m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
30	55	5.50	200	50	153	510	1032	810
35	55	2.75	200	50	165	472	1032	810
40	55	1.65	200	50	176	439	1032	810
45	55	1.25	200	50	185	410	1032	810
50	55	1.00	200	50	193	385	1032	810

表-3 使用材料

種類	記号	銘柄, 物理的特性
水	W	上水道
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.15 g/m <sup>3</sup>
細骨材	S	石灰砕砂 密度 2.68 g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 2.63, 粒径判定実績率 55.3 %
粗骨材	G	石灰砕石 表乾密度 2.70 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.25 %, 実績率 60.1 %
減水剤	SP	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)
増粘剤	VMA	低分子量セルロースエーテル系増粘剤
消泡剤	D	ポリエーテル系

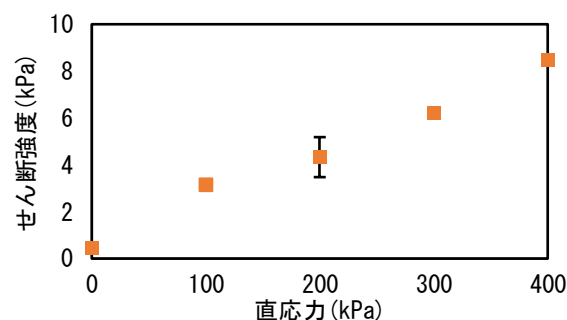


図-8 直応力とせん断力の関係

表-4 モルタル中の空気量

W/C (%)	30	35	40	45	50
空気量 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5

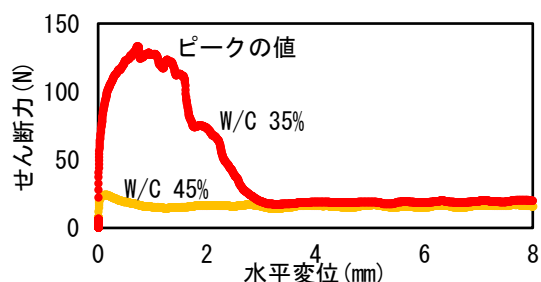


図-7 水セメント比(W/C)の違いによる水平変位とせん断力の関係

### 3. 排水条件の選定

一面せん断試験においては「排水」と「非排水」の2種類の条件がある。排水試験は試験中の排水を許容するもの、一方、非排水試験はせん断面に O(オー)リング(図-6)を取り付けて排水させないものである。

排水試験では、せん断開始後に試料から脱水し、試験機の上箱と下箱の間から排水した。排水試験のイメージを図-9に示す。一方、非排水条件では、容器せん断面の周囲に O(オー)リングを取り付けて排水を防止した。O(オー)リングの効果により、排水は見られなかった。

図-10 に排水条件と非排水条件の試験後のモルタルの状態を比較した写真を示す。排水試験のモルタルは水が抜け、硬くなっていた。一方、非排水試験のモルタルは試験前と変化がなかった。本研究では、フレッシュコンクリートの間隙通過時を想定している。コンクリート試験後の試料を図-11 に示す。間隙通過後のコンクリートに

は排水は観察されなかったため、本研究では一面せん断試験の排水条件を非排水と決定して以下の検討を行った。

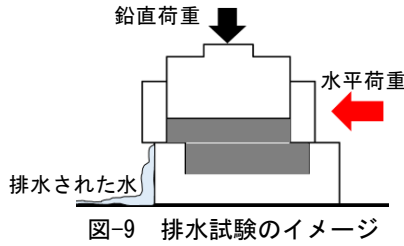


図-9 排水試験のイメージ

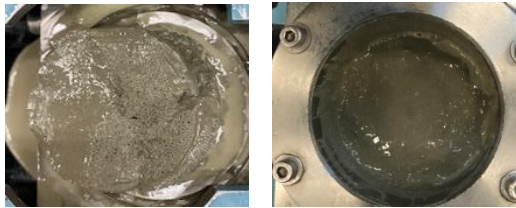


図-10 一面せん断試験後のモルタルの状態  
(左：排水, 右：非排水)



図-11 間隙通過後のフレッシュコンクリートの状態

#### 4. 水セメント比とせん断強度の関係

一面せん断試験によりフレッシュモルタルのせん断強度を求めた。水セメント比(W/C)30%と35%の直応力とせん断強度との関係を図-12に示す。水セメント比(W/C)40%と45%、50%の直応力とせん断強度との関係を図-13に示す。直応力は0から100 kPa刻みで400 kPaまで増加させた。この値の範囲の妥当性は本論文の5章で確認した。

直応力によるせん断強度の増加は、固体粒子の占める容積比が高くなるほど大きくなると想定したが、水セメント比(W/C)40%~50%の範囲内では、ほぼ同程度のせん断強度であった。ただし、水セメント比(W/C)35%では、400 kPaでせん断強度が大きくなった。水セメント比(W/C)30%では、ゼロ以外の全ての直応力で他の水セメント比よりもせん断強度が明らかに大きかった。

鉛直外力がない場合(直応力 0 kPa)でのせん断強度を図-14に示す。外力のある場合と比較すると、全配合でほぼゼロに近い値であった。土質材料は自立する必要があるため、直応力が生じていない場合でもせん断強度の値がある<sup>3)</sup>。一方、自己充填コンクリートはせん断強度が

ゼロに近い値であった。自己充填コンクリートは重力の作用のみで流動する必要があるため、直応力がない場合のせん断強度はほぼゼロであったと考察した。

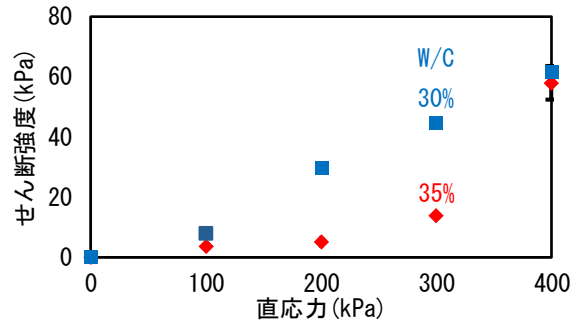


図-12 直応力とせん断強度の関係  
(水セメント比(W/C)30%と35%)

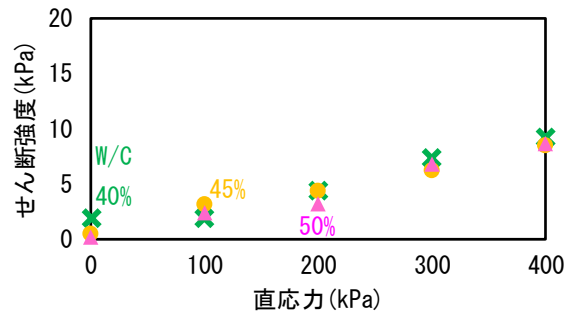


図-13 直応力とせん断強度の関係  
(水セメント比(W/C)40%と45%、50%)

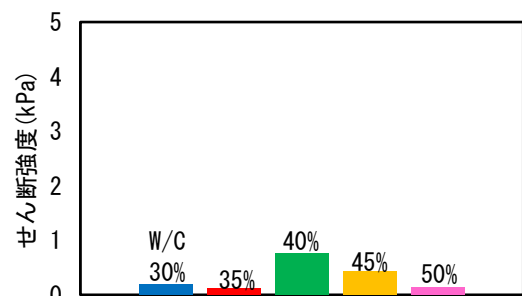


図-14 鉛直外力がない(直応力 0 kPa)場合の水セメント比によるせん断強度の比較

#### 5. コンクリート間隙通過時に生じる直応力の妥当性の検証

ここで、これまでフレッシュモルタルのせん断強度を求める際の直応力が適切な値であるかを検証した。フレッシュモルタルのせん断強度は直応力に左右されるが、一面せん断試験に際してはその値を実際のコンクリートの間隙通過の際にモルタル中に生じる直応力とする必要がある。しかし、鉄筋の間に接近する粗骨材に挟まれたモ

ルタル中の圧縮応力を直接測定することは不可能であるため、コンクリートの自己充填性試験結果から妥当性を推定して検証した。

コンクリートの試験結果を表-5に示す。フレッシュコンクリートの間隙通過性は間隙通過性試験(R<sub>1</sub>のボックス試験)で評価した。コンクリートの間隙通過性試験はJSCE F 511「高流動コンクリートの充填試験方法」に準じて試験を行った<sup>4)</sup>。この試験はコンクリートの自重により鉄筋の間を通過する能力を定量化するものである。コンクリートの上昇高さが高いものほど、自己充填性が高いが、本研究では、上昇高さが260 mm以上を十分な自己充填性があるとみなした。水セメント比とフレッシュコンクリートの自己充填性試験結果との関係を図-15に示す。自己充填性は水セメント比(W/C)35%が最も高かった。それ以外の配合のR<sub>1</sub>ボックス上昇高さは150 mm程度と十分な自己充填性は得られなかった。

フレッシュモルタルとせん断強度とともにフレッシュコンクリートの自己充填性を構成するもう一つの要素であるフレッシュモルタルの粘度を測定した。粘度は粗骨材とモルタルが一体となり変形・流動するために必要な性質である。粘度値の測定結果を図-16に示す。粘度は水セメント比が低いほど高かった。水セメント比(W/C)30%は最も粘度が高いにもかかわらず十分な自己充填性が得られなかったのは、せん断強度が他の配合と比較して著しく高かったことによるものと推定した。

各水セメント比のフレッシュモルタルにおけるせん断強度と粘度との関係を用いて、フレッシュコンクリート

の自己充填性試験結果から各直応力の妥当性を検証した。図-17に粘度値と直応力400 kPaのせん断強度の関係を示した。図から読み取れる通り、この時の水セメント比(W/C)30%と35%の間には粘度値に大きな差があるが、せん断強度は同程度であった。図-18には、粘度値と直応力を300 kPaに下げた時のせん断強度の関係を示した。直応力を300 kPaに下げることにより水セメント比(W/C)30%と35%のせん断強度に大きな差が生じた。図-19に示すように、直応力の200 kPaの場合も直応力300 kPaの場合と同様の差が生じた。図-20に示す直応力100 kPaの場合は、水セメント比(W/C)35%以上のせん断強度は前二者の場合と同程度であった。一方、水セメント比(W/C)30%のせん断強度は、前二者の場合と比較すると、他の配合より高めではあるが同程度に近づいた。

図-15には各配合の間隙通過性試験結果を示している。自己充填性が最も高い水セメント比(W/C)35%のもの以上に高い粘度を持ちながら十分な自己充填性が得られなかった水セメント比(W/C)30%の間隙通過時のせん断強度が同程度であることはあり得ない。そこで、一面せん断試験にて、せん断強度に大きな差が現れた直応力300 kPa程度以下が、実際のコンクリートの間隙通過時に生じる直応力の範囲と推定し、本一面せん断試験において設定した直応力の範囲が適切であったと考察した。

一方、水セメント比(W/C)40%から50%は直応力300 kPa以下のせん断強度が水セメント比(W/C)35%と同程度であるにもかかわらず十分な自己充填性が得られなかったのは、低粘度が原因であると推定した。

表-5 コンクリート試験結果

W/C(%)	スランプフロー (mm)	漏斗流下 時間(s) <sup>4)</sup>	R <sub>1</sub> ボックス 上昇高さ(mm) <sup>4)</sup>	空気量 (%)	温度(°C)
30	615	85.97	161	0.9	18.4
35	660	22.15	273	1.7	21.0
40	665	11.25	147	1.7	21.6
45	640	8.75	159	1.8	21.7
50	655	6.39	121	1.5	21.9

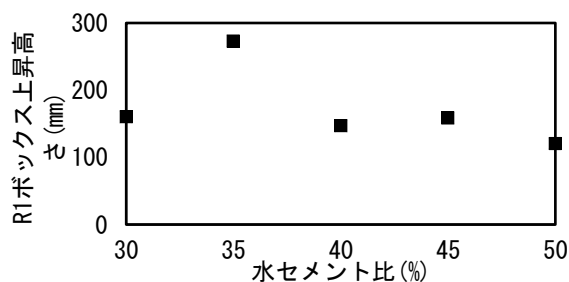


図-15 水セメント比とR<sub>1</sub>ボックス上昇高さの関係

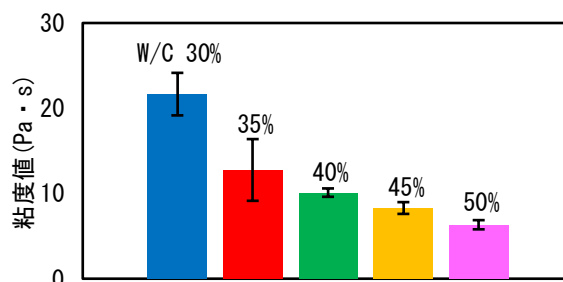


図-16 水セメント比による粘度値の比較

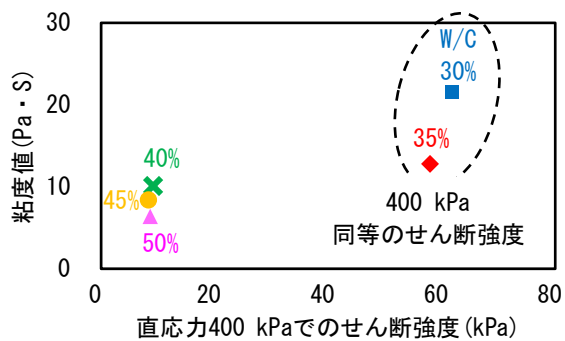


図-17 粘度値と直応力 400 kPa でのせん断強度

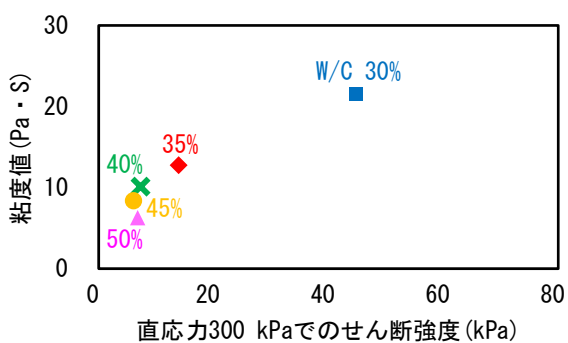


図-18 粘度値と直応力 300 kPa でのせん断強度

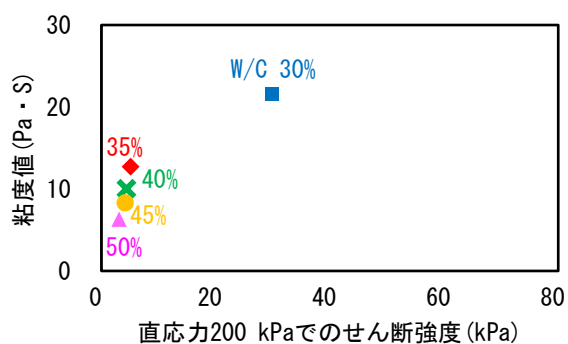


図-19 粘度値と直応力 200 kPa でのせん断強度

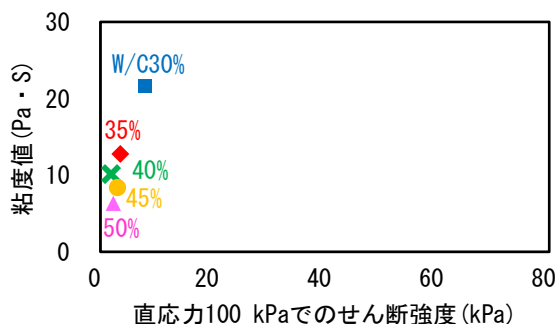


図-20 粘度値と直応力 100 kPa でのせん断強度

## 6. 結論

フレッシュコンクリートの間隙通過を模擬し、直応力下での非排水条件でのフレッシュモルタルの一面せん断試験の結果から定義したせん断強度を求め、間隙通過性を支配する固体粒子間摩擦を定量化した。得られた知見を以下に示す。

- 1) フレッシュモルタル中の直応力の増加に応じてせん断強度が増加した。
- 2) 鉛直外力による直応力がない場合のせん断強度は、水セメント比を変化させた全ての配合において比較的ゼロに近い値であった。
- 3) 水セメント比を 30% から 50% まで 5% 刻みで変化させたフレッシュモルタルのせん断強度と粘度との関係と、フレッシュコンクリートの自己充填性試験結果を用いて、土木学会基準レベル  $R_1$  の間隙通過時にモルタル内に生じる直応力を 300 kPa 程度以下と推定した。本一面せん断試験における直応力設定値の妥当性を確認した。
- 4) 上記の直応力の範囲内では、水セメント比(W/C)35%～50%の間のフレッシュモルタルのせん断強度は同程度であった。同程度のせん断強度であるにもかかわらず、水セメント比(W/C)35%の自己充填性が最も高かったのは粘度値が高かったためであると考察した。

## 謝辞

本研究に際して、高知工科大学技術指導員の曾我部敏郎氏(株CDR コンサルタント専務取締役)には実験全般について御指導御協力を頂きました。心より御礼申し上げます。本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究(B)(課題番号 19H02217) および JST 研究成果展開事業 A-STEP 機能検証フェーズ(課題番号 VP3041808881)によるものである。

## 参考文献

- 1) 岡村 甫編：自己充填ハイパフォーマンスコンクリート-黎明期から実用化に向けた挑戦の記録, 社会システム研究所, 1999
- 2) 大内雅博, 枝松良展, 小澤一雅, 岡村 甫：自己充填コンクリート中の粗骨材・モルタル粒子間相互作用の簡易評価法, コンクリート工学年次論文報集, Vo 1.21, No.22, 1999 年
- 3) 土の試験実習書改訂編集委員会：土の試験実習書, 土質工学会, 1991
- 4) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書[基準編]土木学会基準および関連基準, 2018