

2019 年度修士論文

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

Measurement of friction between solid particles in mortar as
a factor of flowing performance through obstacles of fresh
concrete

主指導教員 大内 雅博

副指導教員 田島 昌樹

副審査委員 高木 方隆

高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻

社会システム工学コース

1225079 福田 翔太

2020 年 3 月

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

福田 翔太

要旨

フレッシュコンクリートは鉄筋間に代表される狭くなる間隙を通過する際、粗骨材粒子間が接近することによりモルタル相に圧縮応力が生じ、せん断変形抵抗（せん断強度）が大きくなる。これはフレッシュコンクリートの自己充填性、特に間隙通過性能を構成する最も重要な要素である。本研究では、直応力下でのフレッシュモルタルのせん断強度を、土質試験にて用いられる一面せん断試験を適用し、直接測定することにより求めた。直応力下でのフレッシュモルタルのせん断強度はモルタル単体での測定が困難なものであり、これまで間接測定にとどまっていたが、本研究では初めて直接測定を行った。

一面せん断試験には排水試験または非排水試験の 2 つの試験方法があり、両方の試験方法を検討した。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た。間隙通過時のフレッシュコンクリートには排水は見られなかったため、非排水条件であると判断し、一面せん断試験を行った。

秒速 0.03 mm の水平載荷の開始と共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。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）を差し引いた値を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。

気泡潤滑型自己充填コンクリートを想定した、細骨材容積比を 55%・水セメント比 45% の、消泡剤を添加して空気を連行しなかったフレッシュモルタルのせん断強度を、直応力 400 kPa まで上昇させて求めた。その結果、土質材料同様、直応力の増加に応じてモルタルのせん断強度が増加する傾向が見られた。一方、鉛直外力の無い場合のせん断強度はほぼゼロに近い値であった。

水セメント比を変えた場合、同じ鉛直荷重（圧縮応力下）では、最大静摩擦力（せん断強度に相当）には違いが現れたが、動摩擦力はほぼ同じであった。

モルタル相の細骨材容積比 55% に固定したフレッシュモルタルの水セメント比を 30% から 50% まで 5% 刻みで変化させ、土木学会基準によるレベル R1 でのボックス上昇高さを指標とするフレッシュコンクリートの自己充填性を求め、モルタルのせん断強度との関係を求めた。その結果、レベル R1 の間隙通過に際してモルタル中に生じる直応力は 300 kPa 程度以下であると推定した。本せん断試験における直応力設定値の妥当性を確認した。

Measurement of friction between solid particles in mortar as a factor of flowing performance through obstacles of fresh concrete

Shota Fukuda

ABSTRACT

The shear strength of mortar is the most important factor of flowing performance through obstacles of fresh concrete. It is difficult to measure it directly because it is subject to increase due to normal stress generated between approaching coarse aggregate particles when fresh concrete is to flow through obstacles. In this study, the one-sided shear testing apparatus in the field of soil mechanics was applied in order to measure the shear strength of fresh mortar in self-compacting concrete directly.

One-sided shear test has two test methods: drainage test and undrained test. Both test methods considered. In this study, it is assumed that fresh concrete passes through the gap. There was no drainage in fresh concrete when passing through the gap. Therefore, it was judged as undrainage condition

As a result of the measurement using this one-sided shear test, the frictional force suddenly increased at the start of horizontal loading at 0.03 mm / sec, and the frictional force suddenly decreased at a certain point. When the water to cement ratio was changed, the initial peak values differed, however the subsequent movements were almost the same. In this study, The value obtained by subtracting the frictional force of the container itself from the peak of the maximum static frictional force and dividing the value by the shear area was defined as the "shear strength" of the fresh mortar.

Assuming the mortar in air-enhanced self-compacting concrete, the fine aggregate content was fixed as 55% and the standard water to cement ratio was 45%. The shear strength of the mortar increased in accordance with the increase of the normal stress, similar to the soil. On the other hand, the shear strength without vertical external force was almost zero.

The shear strength reduced with the increase in water to cement ratio of 30% to 50%. A suitable normal stress for the testing for practical SCC was estimated less than 300 kPa by considering a relationship between the self-compacting performance test (Ranking R1 by JSCE standard) and the shear strength of the mortar measured.

目次

第1章	序論	1
1.1	自己充填性の主要因であるフレッシュモルタルの直応力下でのせん断強度	1
1.2	せん断強度の直接測定の必要性	2
1.3	本論文の構成	3
第2章	一面せん断試験方法の確立	4
2.1	概要	4
2.2	本研究による試験方法とせん断強度の定義	5
2.3	排水条件と非排水条件の比較	7
第3章	水セメント比がせん断強度に及ぼす影響	9
3.1	モルタル試験の配合	9
3.2	直応力によるせん断強度の増加	10
3.3	鉛直外力がない場合のせん断強度	15
第4章	コンクリートの自己充填性試験から推定する一面せん断試験における直応力の妥当性の検証範囲	16
4.1	コンクリート試験	16
4.2	間隙通過性とせん断強度の関係	17
第5章	結論	20
	参考文献	21
	謝辞	22
	付録	23
	モルタルの練混ぜ方法	23
	コンクリートのスランプフロー試験	24
	モルタルのフロー試験	24
	空気量試験	25
	コンクリートの間隙通過性(ボックス試験)	26
	粘度の測定方法	27
	今後の課題	28

目次

図-1. 1	コンクリート間隙通過イメージ	1
図-1. 2	直応力とせん断応力のイメージ	1
図-1. 3	ガラスビーズ試験イメージ	2
図-1. 4	本論文の構成	3
図-2. 1	一面せん断試験機	4
図-2. 2	一面せん断試験のイメージ	4
図-2. 3	せん断面の0リングとグリースの塗布	5
図-2. 4	水セメント比による水平方向の変位とせん断力の関係	6
図-2. 5	直応力とせん断強度の関係(200 kPaのみ3回行った, 他は1回のみ)	6
図-2. 6	排水試験イメージ	7
図-2. 7	試験機からの排水	7
図-2. 8	直応力 200 kPa での排水条件と非排水条件の比較(W/C 45%)	8
図-2. 9	一面せん断試験後のモルタルの状態	8
図-2. 10	間隙通過後のフレッシュコンクリートの状態	8
図-3. 1	W/C 30%での直応力によるせん断力の変化	10
図-3. 2	W/C 35%での直応力によるせん断力の変化	11
図-3. 3	W/C 40%による直応力によるせん断力の変化	11
図-3. 4	W/C 45%での直応力によるせん断力の変化	12
図-3. 5	W/C 50%での直応力によるせん断力の変化	12
図-3. 6	W/C 30%での直応力によるせん断強度の変化	13
図-3. 7	W/C 35%での直応力によるせん断強度の変化	13
図-3. 8	W/C 40%での直応力によるせん断強度の変化	14
図-3. 9	W/C 45%での直応力によるせん断強度の変化	14
図-3. 10	W/C 50%での直応力によるせん断強度の変化	15
図-3. 11	外力が無い場合でのせん断強度の比較	15
図-4. 1	フレッシュコンクリートの間隙通過性試験(レベル R1 ボックス試験)	18
図-4. 2	水セメント比による粘度値の比較	18
図-4. 3	直応力 300 kPa と 400 kPa のせん断強度の比較	19
図-4. 4	直応力 300 kPa と 400 kPa のせん断強度の比較	19
図-付. 1	モルタルミキサ	23
図-付. 2	コンクリートのスランプフロー試験	24
図-付. 3	モルタルのフロー試験	25
図-付. 4	コンクリートの間隙通過性試験(ボックス試験)	26
図-付. 5	粘度計	27

図-付. 6 水セメント比によるボックス上昇高さ	28
--------------------------------	----

表目次

表-3.1	使用材料.....	9
表-3.2	モルタル配合	9
表-3.3	モルタル中の空気量	10
表-4.1	使用材料.....	16
表-4.2	コンクリート配合	17
表-4.3	コンクリート試験結果.....	17

第1章 序論

1.1 自己充填性の主要因であるフレッシュモルタルの直応力下でのせん断強度

フレッシュコンクリートの自己充填性, 特に鉄筋間に代表される間隙通過性能は, 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が流動し, 間隙手前でフレッシュコンクリートが変形するにはフレッシュモルタル相の変形が必要であるが, 同時に粗骨材粒子どうしの接近を伴う。その際に, フレッシュモルタル中に発生する直応力がせん断応力を高める。これが, 液相だけではなく固体粒子が含まれているモルタル相のせん断強度を高め, 間隙手前でコンクリートが閉塞する原因となる(図-1.1)。モルタル内に含まれる使用材料や固体粒子の質と量が影響を及ぼすと分かっている(図-1.2)。

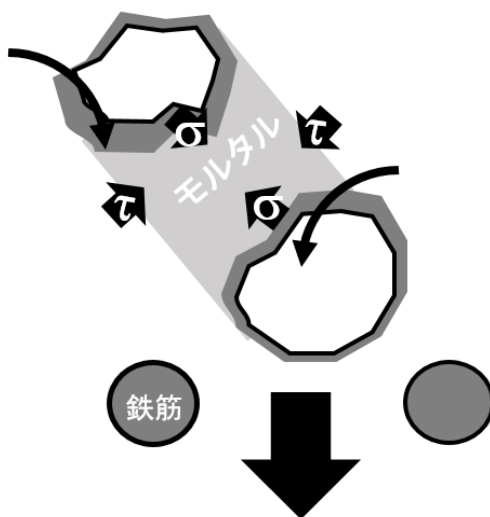


図-1. 1 コンクリート間隙通過イメージ

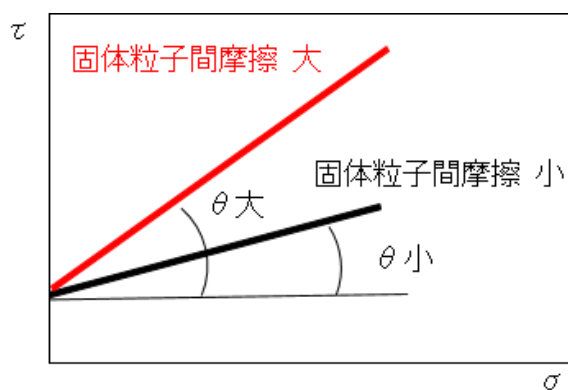


図-1. 2 直応力とせん断応力のイメージ

1.2 せん断強度の直接測定の必要性

直応力の作用によるモルタルのせん断応力の上昇は粗骨材とモルタルとの相互作用によるものであり、モルタル単体では測定不可能である。大内らは、ガラスビーズを模擬粗骨材として、混入したフレッシュモルタルの、ガラスビーズの有無によるモルタルの漏斗速度を比較する方法を考案した。模擬粗骨材の混入によるモルタルの漏斗流下速度の低下率を指標とする方法である(図-1.3)。混入した模擬粗骨材による漏斗速度の減少度合いが大きいほど、粗骨材とモルタル構成粒子間の相互作用が大きく、コンクリートが間隙通過する際のモルタルのせん断応力が大きくなる。ただし、この方法は間接測定にとどまっている。

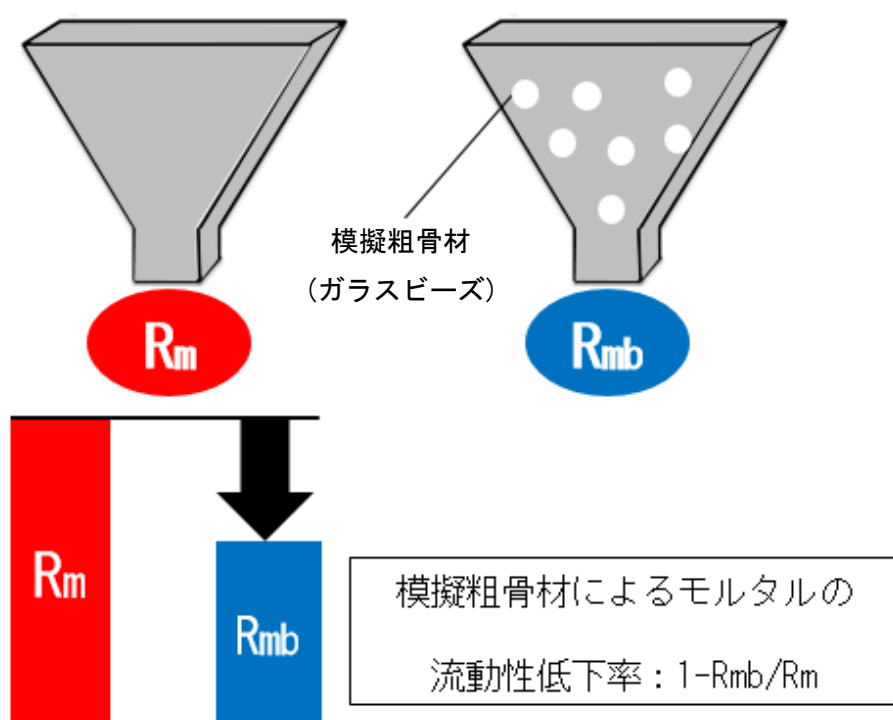


図-1.3 ガラスビーズ試験イメージ

ガラスビーズ試験では、フレッシュモルタルの粘度が高すぎるとガラスビーズ自体がつまり測定できなくなる。また、ガラスビーズは噛み合わせが毎回同じではないため、ガラスビーズによる測定結果のばらつきが生まれる。本研究では、一定の直応力によってフレッシュモルタルのせん断強度の増加の程度の直接測定する。ガラスビーズなどの影響因子を減らすことにより、正確な測定を可能とした。本研究では、土質試験に用いられる一面せん断試験を適用した。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を示す(図-1.4)に示す。

第1章は序論である。本研究の背景と既往研究，そして目的を述べる。

第2章では，フレッシュコンクリートの間隙通過性を一面せん断試験機による直接測定方法の構築について説明する。一面せん断試験における排水条件についての検討も行った。

第3章では，確立した測定方法により直応力を増加させて，水セメント比による比較を行った。

第4章では，水セメント比による一面せん断試験結果と実際のコンクリートによる自己充填性との関係から，間隙通過時を想定した適切な直応力の推定を行った。

第5章は結論である。

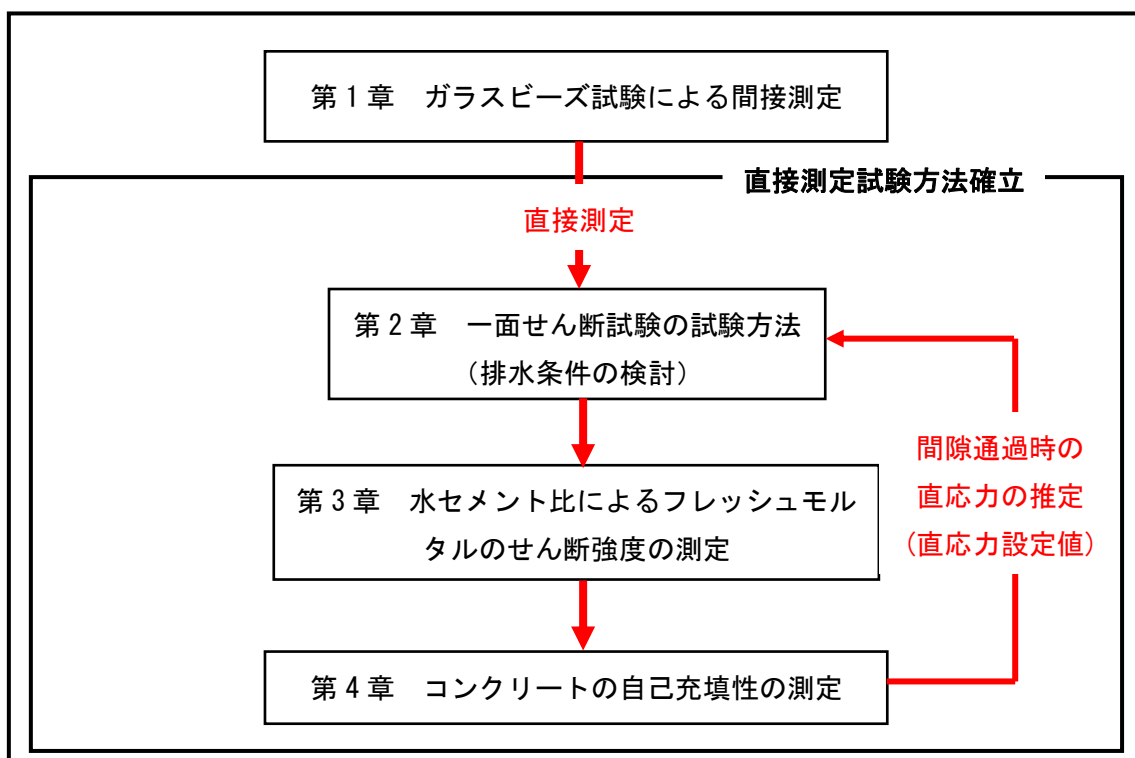


図-1.4 本論文の構成

第2章 一面せん断試験方法の確立

2.1 概要

直応力下でのフレッシュモルタルのせん断強度の定量化のため、一面せん断試験機を導入した(図-2.1)。この試験機は、鉛直荷重を試料に作用させてその内部に圧縮応力を生じさせ、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(図-2.2)。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下でのフレッシュモルタルせん断変形を模擬したものである。



図-2.1 一面せん断試験機

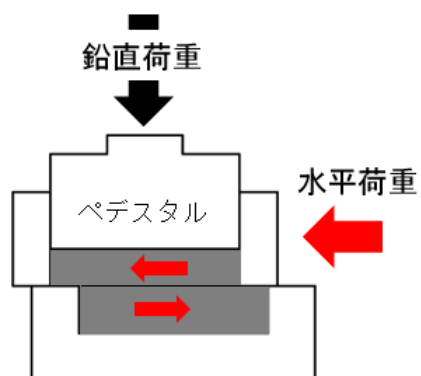


図-2.2 一面せん断試験のイメージ

2.2 本研究による試験方法とせん断強度の定義

直径 60 mm, 高さ 30 mm, 容積 158 ml の上下に分かれた, 上部をくり抜いた円筒容器内にフレッシュモルタル試料を入れる。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。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ことにより試験結果のバラツキを抑制した(図-2.3)。そして, 上部から円筒形の鉛直载荷ペダスタル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。試験は変位 8 mm に到達するまで行った。

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示す(図-2.4)。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)を差し引いた値を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。

変化させた直応力と摩擦力との関係を示す(図-2.5)。土質試験同様, 直応力の増加に伴うせん断強度が直線的に増加する結果となった。本試験方法の妥当性を確認できたといえる。

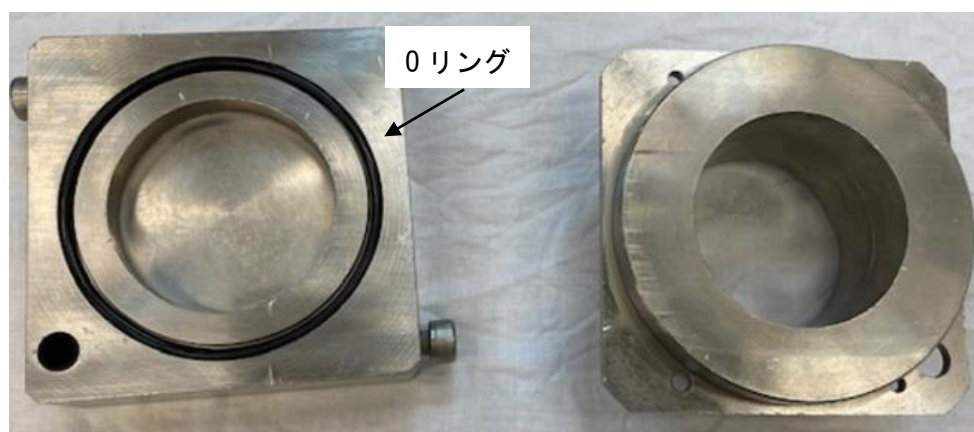


図-2.3 せん断面の O リングとグリースの塗布

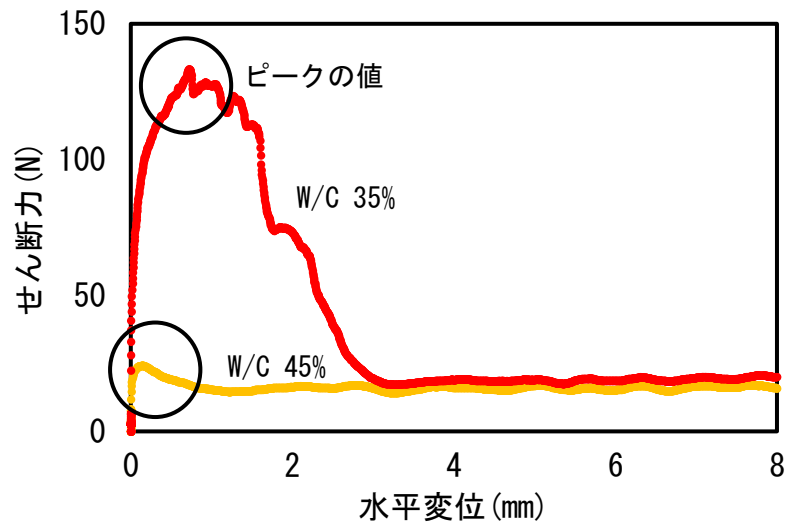


図-2. 4 水セメント比による水平方向の変位とせん断力の関係

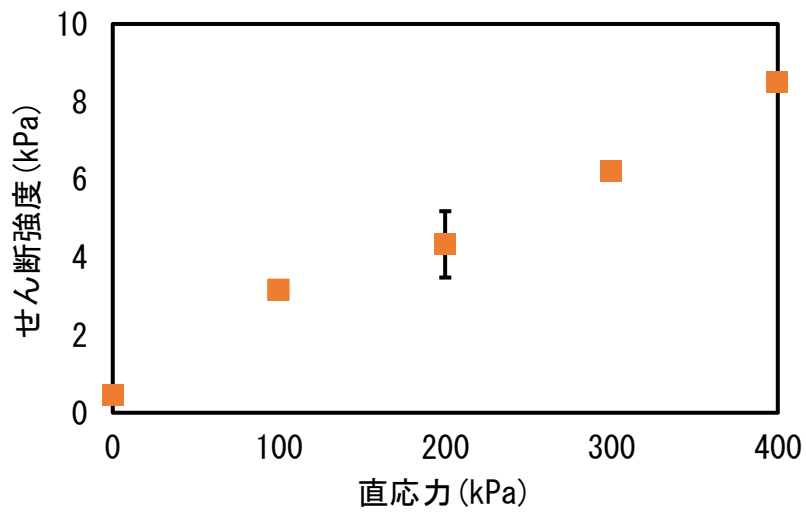


図-2. 5 直応力とせん断強度の関係(200 kPa のみ 3 回行った, 他は 1 回のみ)

2.3 排水条件と非排水条件の比較

土質試験同様、一面せん断試験においては、排水条件と非排水条件の2種類の試験条件があり得る。排水条件では、せん断開始後に試料から脱水し、試験機の上箱と下箱から排水した(図-2.6, 図-2.7)。一方、非排水条件では、容器せん断面の周囲にOリングを取り付けて排水を防止した。

排水条件と非排水条件それぞれのせん断試験を行い、せん断力の比較を行った(図-2.8)。非排水条件では、試験開始直後にせん断力のピークを迎えた後、急激にせん断力が低下し、試験終了まで一定値であった。一方、排水条件では、試験終了までせん断力が上昇し続けた。これは排水によってモルタル内の水が減少し固体粒子間の摩擦が卓越したためと考察した。

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(図-2.9)。非排水条件のモルタルは試験前と変化がなかった。排水条件のモルタルは水が抜け、硬くなっていた。フレッシュコンクリートの間隙通過時を想定した本研究では、実際のコンクリートの試験後の試料の観察から、非排水条件と判断した。本試験では非排水条件で試験を行った(図-2.10)。

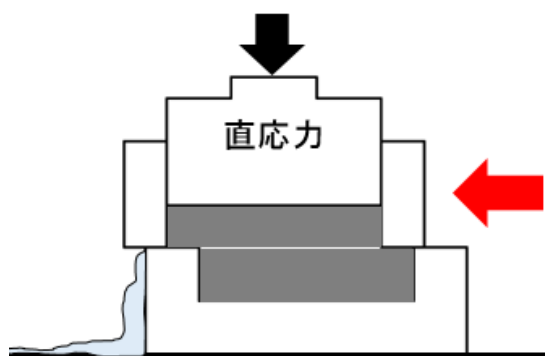


図-2.6 排水試験イメージ

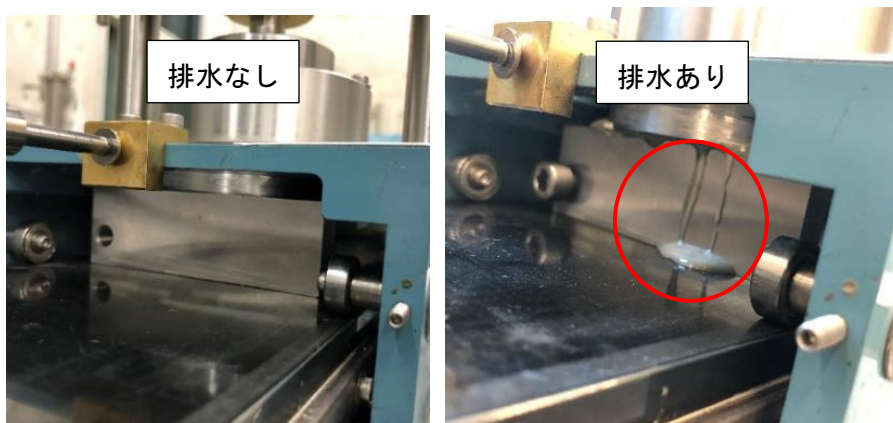


図-2.7 試験機からの排水

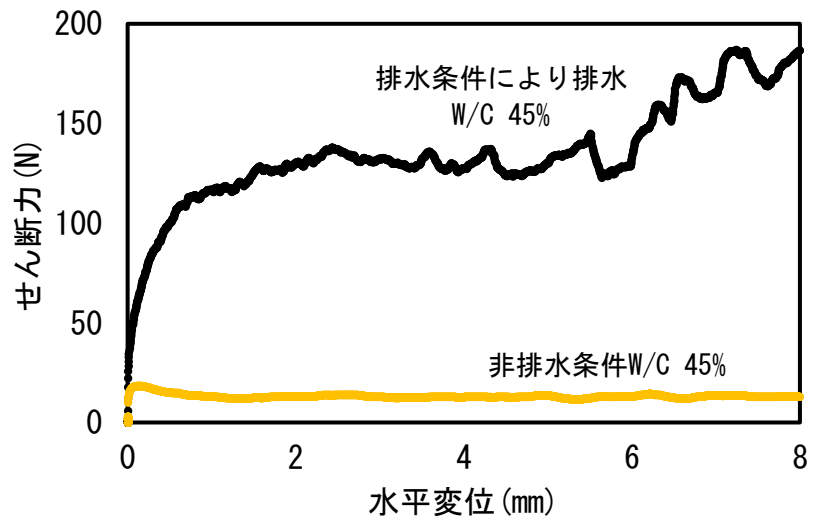


図-2. 8 直応力 200 kPa での排水条件と非排水条件の比較 (W/C 45%)



図-2. 9 一面せん断試験後のモルタルの状態



図-2. 10 間隙通過後のフレッシュコンクリートの状態

第3章 水セメント比がせん断強度に及ぼす影響

3.1 モルタル試験の配合

本研究で用いた使用材料を示す(表-3.1)。セメント(C)は普通ポルトランドセメント、細骨材(S)は石灰石砕砂、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)はポリエーテル系を使用した。

モルタル配合は細骨材容積比を 55%で一定とし、水セメント比のみを変化させた(表-3.2)。材料分離を抑制するために増粘剤を使用した。巻き込み空気の影響を無くすために、消泡剤を添加し、空気量を 2%以下とした(表-3.3)。増粘剤と消泡剤の添加量を統一した。モルタルは 120 秒間練り混ぜ、10 分静置、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。

表-3.1 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^3
細骨材	S	石灰砕砂 密度 2.68 g/cm^3 , 粗粒率 2.63, 粒径判定実積率 55.3 %
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

表-3.2 モルタル配合

W/C (%)	s/m (%)	減水剤 (Cx%)	増粘剤 (g/m ³)	消泡剤 (g/m ³)	単位量(kg/m ³)		
					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-3.3 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

3.2 直応力によるせん断強度の増加

非排水条件での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。直応力は0から100 kPa刻みで400 kPaまで増加させた。速度設定値は非排水条件で行い、土質試験での非圧密非排水試験(急速試験)に準じて0.03 mm/secで行った。水セメント比ごとに直応力を増加させて一面せん断試験を行った(図-3.1~3.5)。せん断強度での比較を行った(図-3.6~3.10)。水セメント比30%以外のものは300 kPaまで同程度のせん断強度であった。水セメント比35%は400 kPaのときにせん断強度が急増した。

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思定したが、大まかにはその通りの結果となった。本試験方法の妥当性を確認できたといえる。

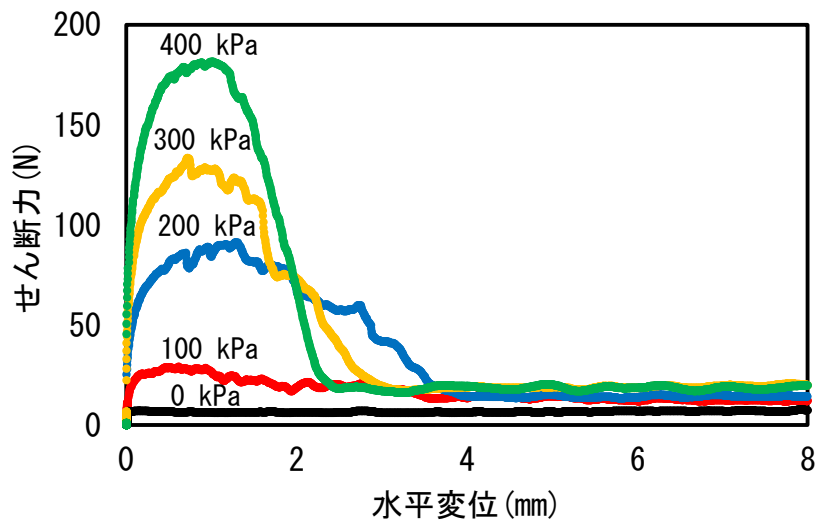


図-3.1 W/C 30%での直応力によるせん断力の変化

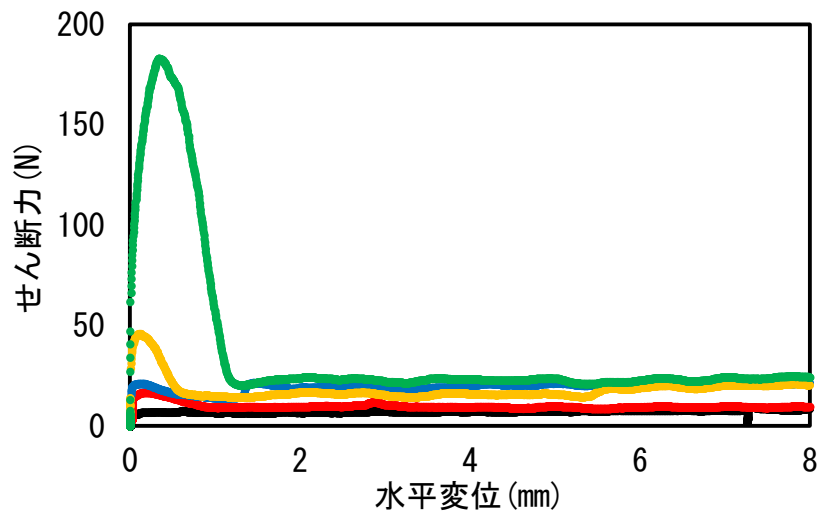


図-3. 2 W/C 35%での直応力によるせん断力の変化

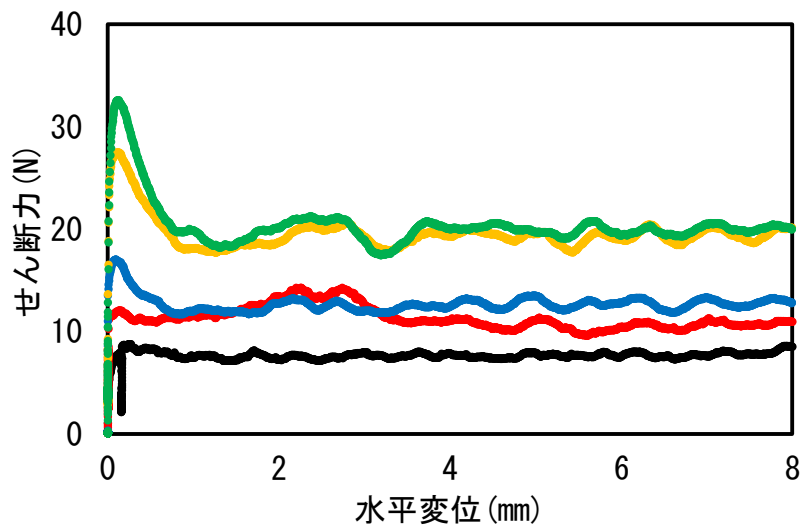


図-3. 3 W/C 40%による直応力によるせん断力の変化

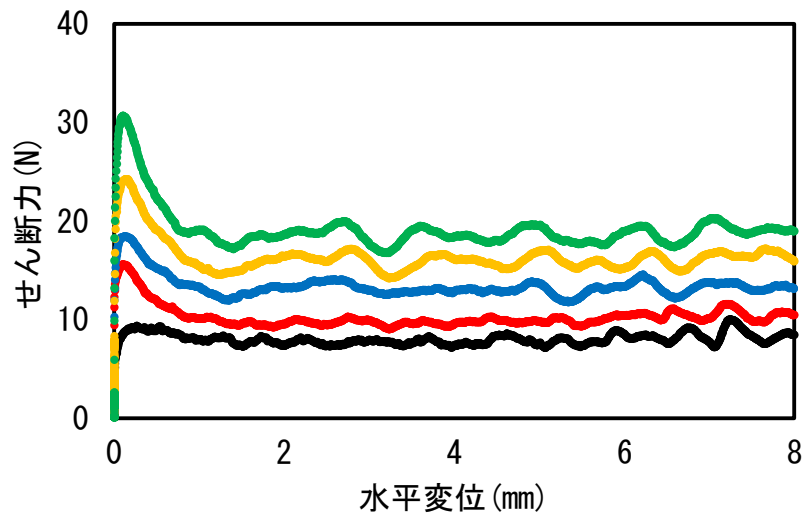


図-3. 4 W/C 45%での直応力によるせん断力の変化

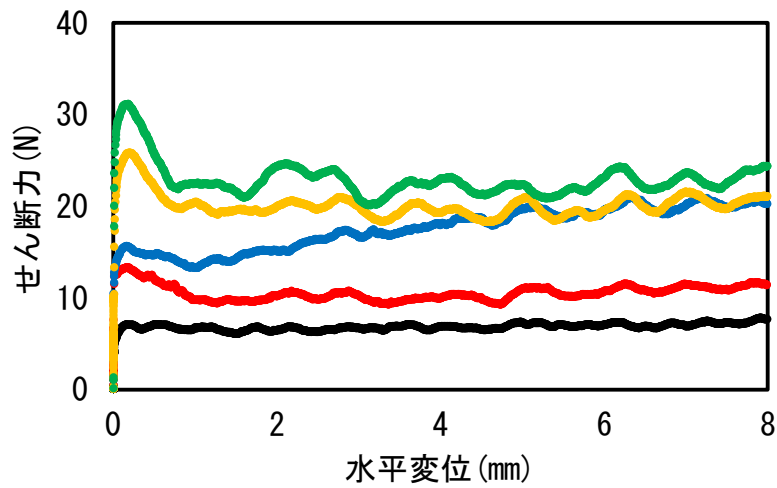


図-3. 5 W/C 50%での直応力によるせん断力の変化

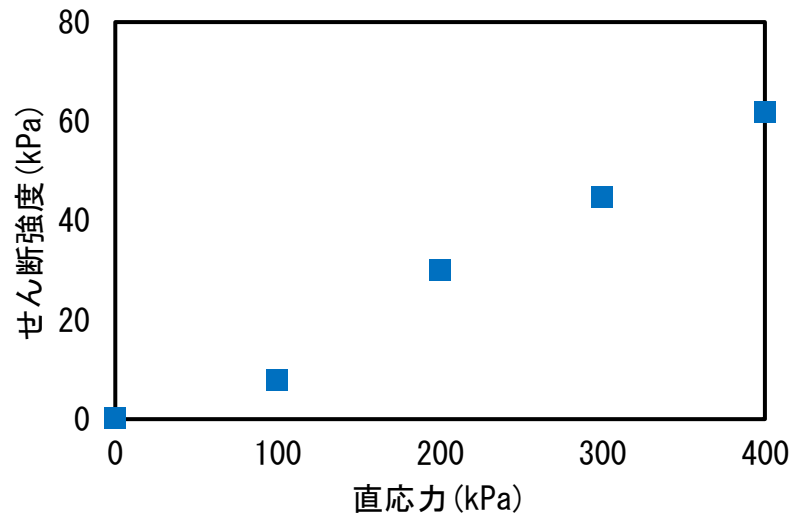


図-3. 6 W/C 30%での直応力によるせん断強度の変化

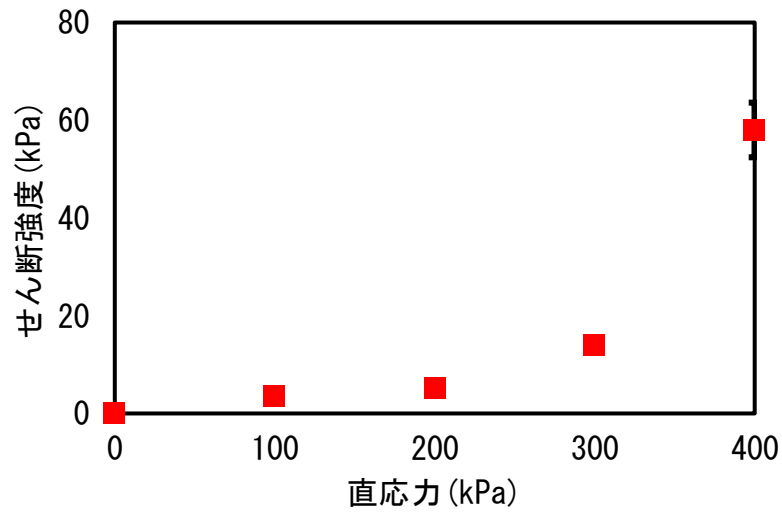


図-3. 7 W/C 35%での直応力によるせん断強度の変化

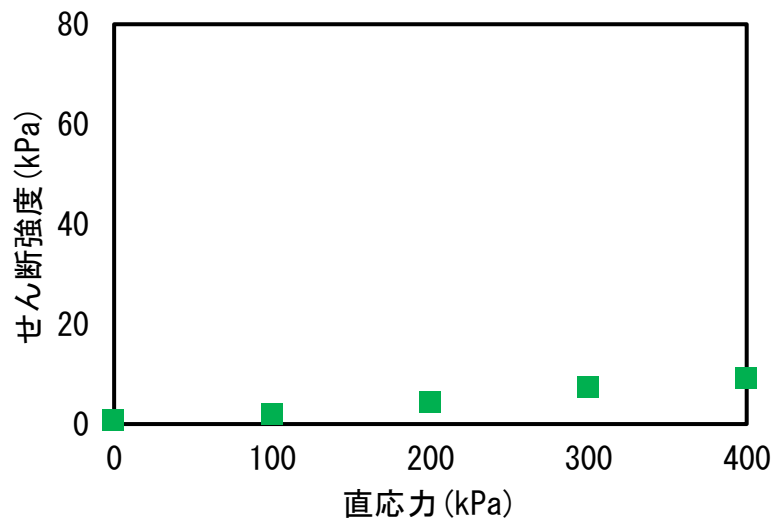


図-3. 8 W/C 40%での直応力によるせん断強度の変化

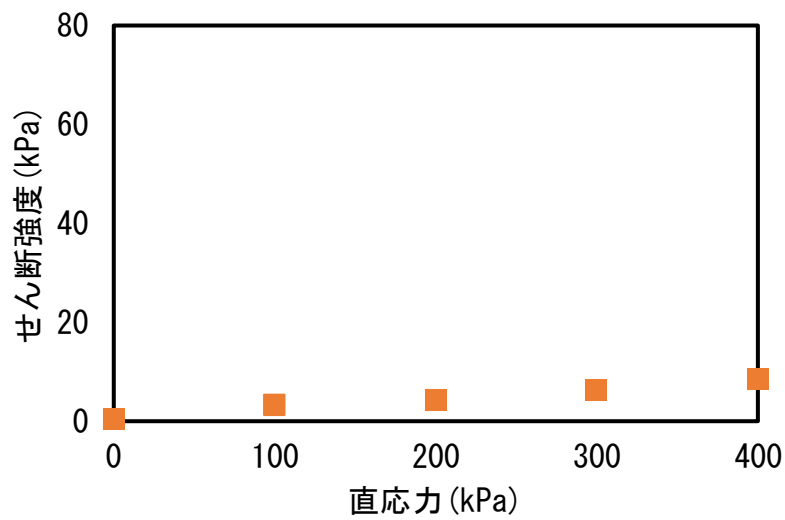


図-3. 9 W/C 45%での直応力によるせん断強度の変化

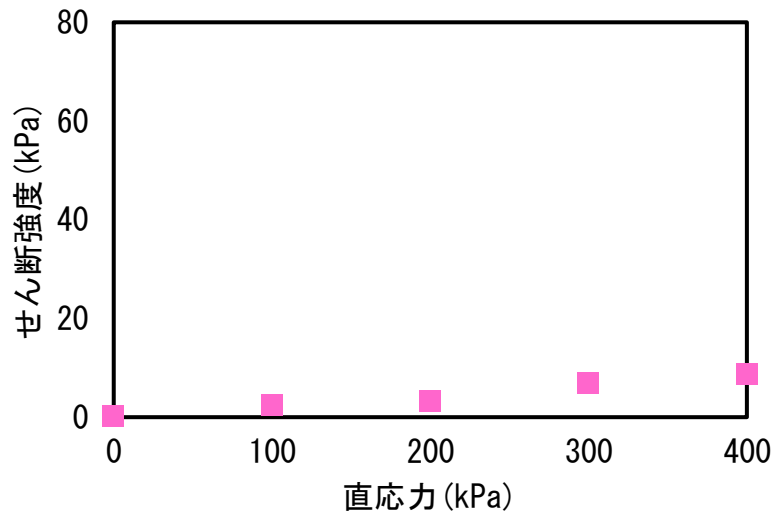


図-3. 10 W/C 50%での直応力によるせん断強度の変化

3.3 鉛直外力がない場合のせん断強度

鉛直外力がない場合(直応力 0 kPa)で一面せん断試験を行った。せん断強度は、鉛直外力が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(図-3.11)これは、土質材料とは異なる、重力のみで充填する自己充填コンクリートの性質によるものと考察した。

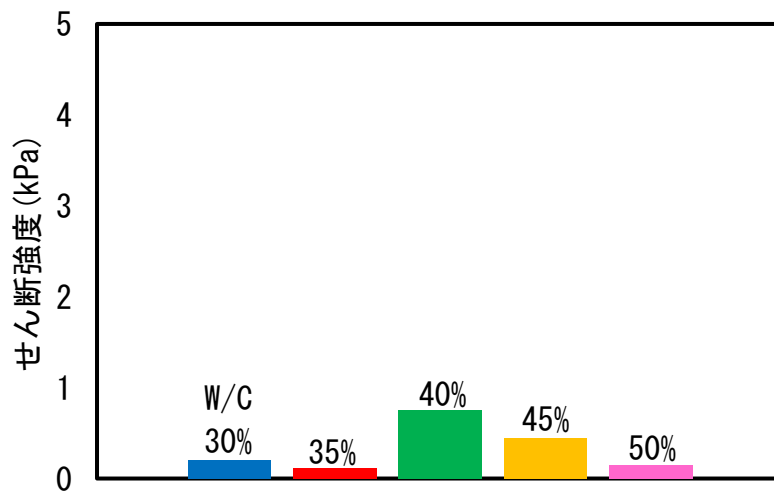


図-3. 11 外力が無い場合でのせん断強度の比較

第4章 コンクリートの自己充填性試験から推定する一面せん断試験における直応力の妥当性の検証範囲

4.1 コンクリート試験

フレッシュモルタルのせん断強度を求める際には、実際に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(接近する粗骨材粒子間に生じる直応力)とする必要がある。しかしながら、これを直接測定することは、現在の技術では不可能であると判断した。間接的に推定する必要がある。

まず、各配合の自己充填性を調べるために、コンクリート試験を行った。コンクリート試験での使用材料・配合を示す(表-4.1, 4.2)。コンクリート配合のモルタル分は本研究のモルタルと同一材料・同一配合とした。粗骨材(G)は石灰碎石を使用し、300 L/m³とした。

コンクリート試験での測定項目は、スランプフローと漏斗流下時間、レベルR1のボックス上昇高さ、エアメーターによる空気量および温度であった(表-4.3)。本研究でのフレッシュコンクリートの間隙通過性はR1のボックス試験で評価した。

表-4.1 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 ³
細骨材	S	石灰砕砂 密度 2.68 g/cm ³ , 粗粒率 2.63, 粒径判定実積率 55.3 %
粗骨材	G	石灰碎石 表乾密度 2.70 g/cm ³ , 吸水率 0.25 %, 実積率 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

表-4.2 コンクリート配合

W/C(%)	s/m(%)	減水剤 (C×%)	増粘剤 (g/m ³)	消泡剤 (g/m ³)	単位量(kg/m ³)			
					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-4.3 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)	R1 ボックス 上昇高さ(mm)	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

4.2 間隙通過性とせん断強度の関係

フレッシュコンクリートの自己充填性を、間隙通過性試験（ボックス試験）で測定した。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示す(図-4.1)。水セメント比 35%での自己充填性が最も高くなった。それ以外の配合の R1 ボックス上昇高さは 150 mm 程度と十分な自己充填性は無かった。

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(図-4.2)。粘度は粗骨材とモルタルが一体となる性質である。粘度値は水セメント比が低いほど高かった。水セメント比 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固体粒子間摩擦が高すぎたことによるものと推定した。

直応力 300 kPa と 400 kPa のせん断強度を比較した(図-4.3, 図-4.4)。水セメント比 30%と 35%に注目すると、直応力 300 kPa では大きな差がある。水セメント比 35%のモルタルを直応力 400 kPa に高めることによってモルタルのせん断強度が急増し、水セメント比 30%と同程度になったことから、実際のコンクリートの間隙通過の際に生じる直応力は、300 kPa 程度以下であると推定した。本研究で用いた一面せん断試験機の直応力設定値は最大 400 kPa 程度まで可能であり、現行の自己充填コンクリートを想定した試験法として

妥当性を確認できたといえる。直応力 300 kPa 以下では水セメント比 35%から 50%の間では同程度のせん断強度であった。

水セメント比 40%から 50%が低いせん断強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。

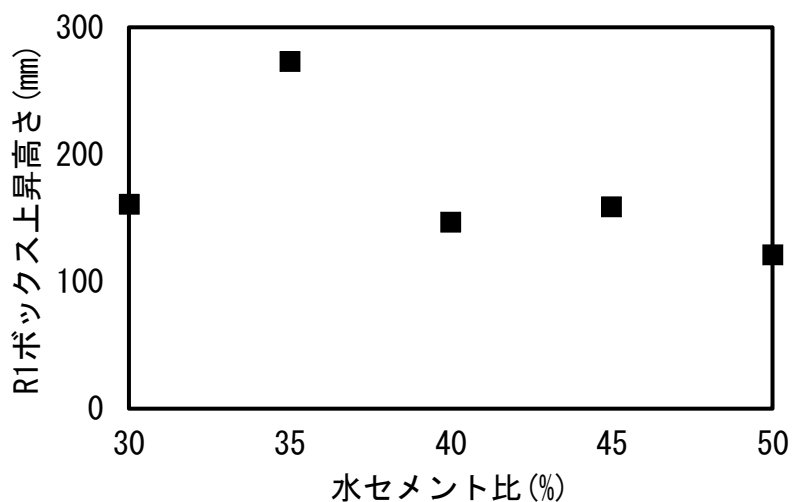


図-4. 1 フレッシュコンクリートの間隙通過性試験(レベル R1 ボックス試験)

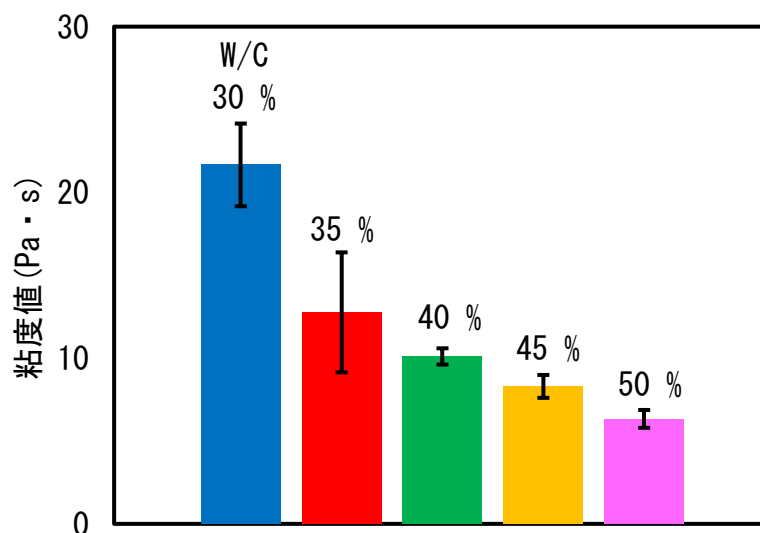


図-4. 2 水セメント比による粘度値の比較

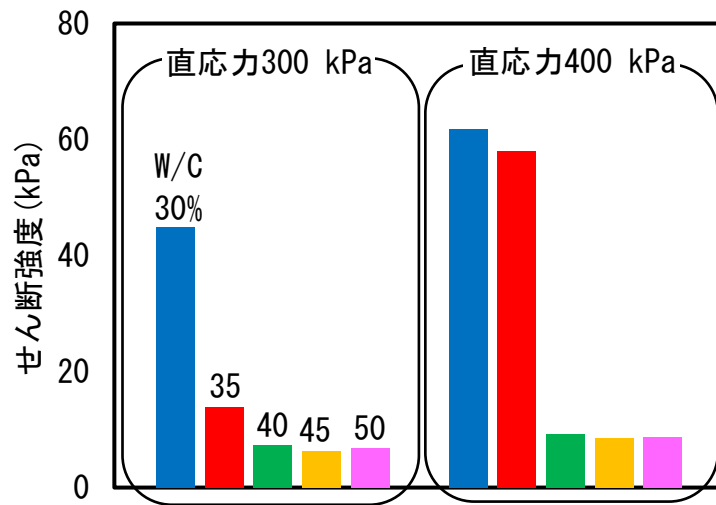


図-4. 3 直応力 300 kPa と 400 kPa のせん断強度の比較

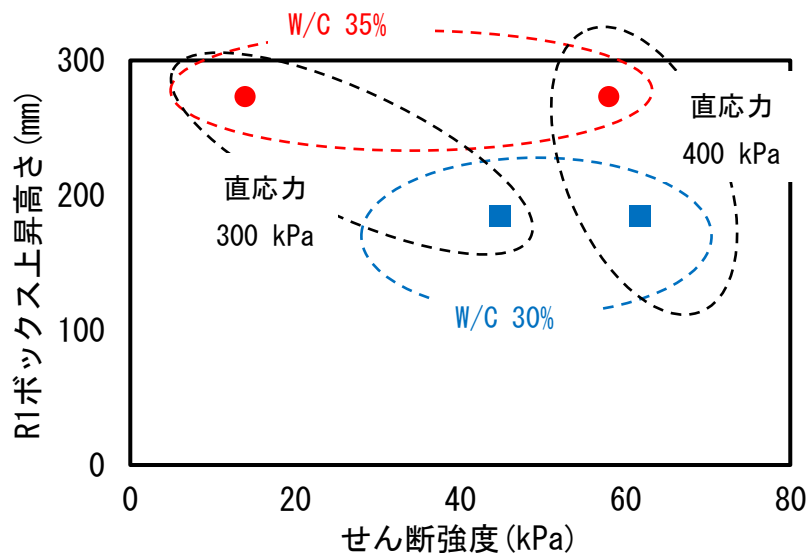


図-4. 4 直応力 300 kPa と 400 kPa のせん断強度の比較

第5章 結論

本研究では、非排水条件での一面せん断試験機により、フレッシュコンクリートが間隙通過する際の直応力を推定し、間隙通過性能を支配する固体粒子間摩擦を定量化することができた。試験機により測定される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）を差し引いた値を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。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(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。これは土質材料とは異なる、重力の作用のみで自己充填する性質によるものと考察した。
- 3) 一面せん断試験機とフレッシュコンクリートの間隙通過性試験(レベル R1 のボックス試験)との関係から、フレッシュモルタル中に生じる直応力は **300 kPa** 程度以下と推定した。
- 4) 上記の直応力の範囲内では、水セメント比 **35%**から **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。

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年
- 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，Vol.21，No.22，1999年
- 3) 毛利匡志，大内雅博：ペーストの高粘着付与による自己充填コンクリートのモルタル中の細骨材分布の均等化，コンクリート工学年次論文報集，Vol.41，No.1，2019年
- 4) 土の強さと地盤の破壊入門編集委員会編(1991)「土の強さと地盤の破壊入門」土質工学会
- 5) 山口柏樹(1984)「土質力学」技報堂
- 6) 土の試験実習書改訂編集委員会(1991)「土の試験実習書」土質工学会

謝辞

本研究を進めていくに当たり、多くの方々の多大なるご指導・ご協力を頂きました。

本論文の作成にあたり、大内雅博先生（高知工科大学教授）、田島昌樹先生（高知工科大学准教授）、曾我部敏郎先生（現高知工科大学技術指導員）宮地日出夫先生（前高知工科大学技術指導員）、山川 勉氏（現・鉄建建設㈱）、小西秀和氏（信越化学工業㈱合成技術研究所）、今井保行氏（㈱丸東製作所）、清水隆央氏（㈱丸東製作所）、駒崎清美氏（㈱丸東製作所）には、数多くの貴重な御助言、御指導を頂きました。ここに謹んで御礼申し上げます。

大内先生には、研究だけでなく進路相談や学会発表の機会を与えて頂きました。大変お世話になりました。研究においては、フレッシュモルタルせん断強度の直接測定という新たな測定方法の確立に携わることができました。大内先生のご指導により、まずは行動する重要性を学ぶことができました。心より御礼申し上げます。

田島先生には、修士論文の副指導教員と学年担任として学部生の時から広い見地からのご意見や的確なご指摘を頂きました。いつも親身に相談にのっていただきました。心より御礼申し上げます。

曾我部先生と宮地先生には、コンクリートに関するお話から実験方法の相談等、親身になって教えて頂きました。心より御礼申し上げます。

山川 勉氏と小西秀和氏には、新型増粘剤を御提供頂き、そして一面せん断試験機によるせん断強度の定量化についての御指導賜りました。心より御礼申し上げます。

今井保行氏、清水隆央氏、駒崎清美氏をはじめとする㈱丸東製作所の皆様には研究で使用する特注の一面せん断試験機の製作、数度にわたる試験機の調整についてご協力頂きました。心よりお礼申し上げます。

本研究を行うにあたって、共に研究を行ってきたコンクリート研究室のメンバーには、普段の実験の手伝いや相談にのっていただきました。心より感謝しています。

最後に、大学・大学院と 6 年間にわたり多方面で支えてくださった家族に対し心より感謝申し上げます。

以上のように、多くの方々の力添えのもと本研究を進めてくることができました。この場をお借りして皆様に感謝の意を表します。

2020 年 1 月 福田翔太

付録

① モルタルの練混ぜ方法

モルタルの材料練混ぜにはモルタルミキサ（練混ぜ速度：低速，自動速度：毎分 140 ± 5 回転，公転速度：毎分 62 ± 5 回転）を使用した（図-付. 1）。通常のもルタル試験の場合は 1.6 L とした。モルタル試験では，砂とセメント，増粘剤，消泡剤を入れた後，水と高性能 AE 減水剤を入れて 120 秒間練り混ぜた。

コンクリートの材料練混ぜには二軸強制練りミキサを使用した。練混ぜ量は 30 L とした。練混ぜ方法は粗骨材と細骨材，セメント，増粘剤，消泡剤，水，高性能 AE 減水剤を入れて 120 秒間練り混ぜた。



図-付. 1 モルタルミキサ

② コンクリートのスランプフロー試験

スランプフロー試験(図-付. 2)は, JIS A1150「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準じて試験を行った。コンクリートの自重による変形性を測定する試験である。スランプコーンにコンクリートを詰め, 鉛直方向にゆっくりと引き上げる。コンクリートの動きが止まった後に, 広がり最大のと思われる直径とその直行する方向の直径を図る。

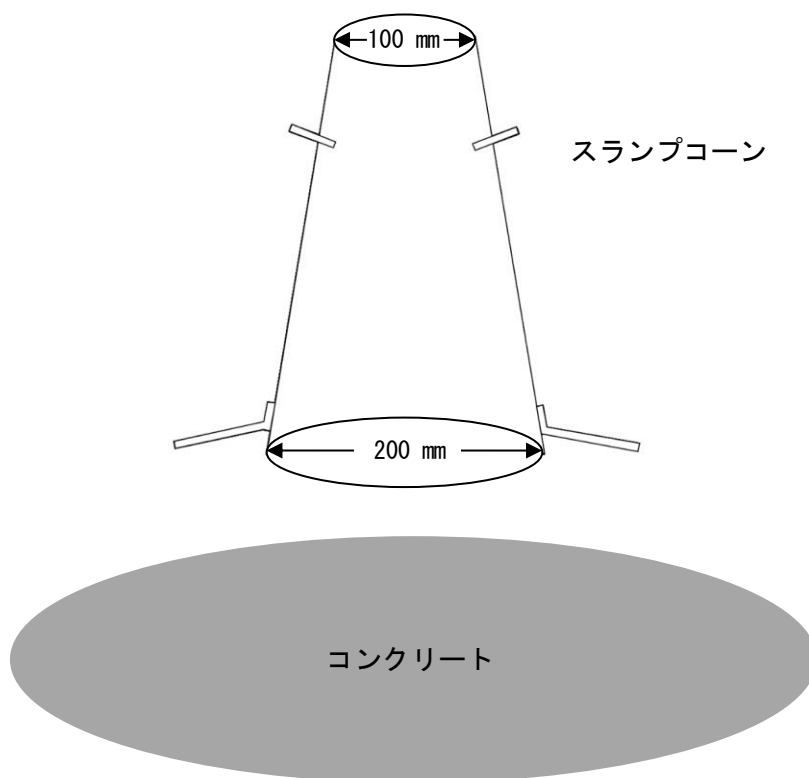


図-付. 2 コンクリートのスランプフロー試験

③ モルタルのフロー試験

モルタルフロー試験(図-付. 3)とは, モルタルの自重による変形性を測定する試験である。コンクリートのスランプフロー試験と同様に, モルタルフローコーンにモルタルを詰め, 鉛直方向にゆっくりと引き上げる。モルタルの動きが止まった後に, 広がり最大のと思われる直径とその直行する方向の直径を図る。モルタルの流動性を評価する試験で主に変形性に置き換えることとしている。

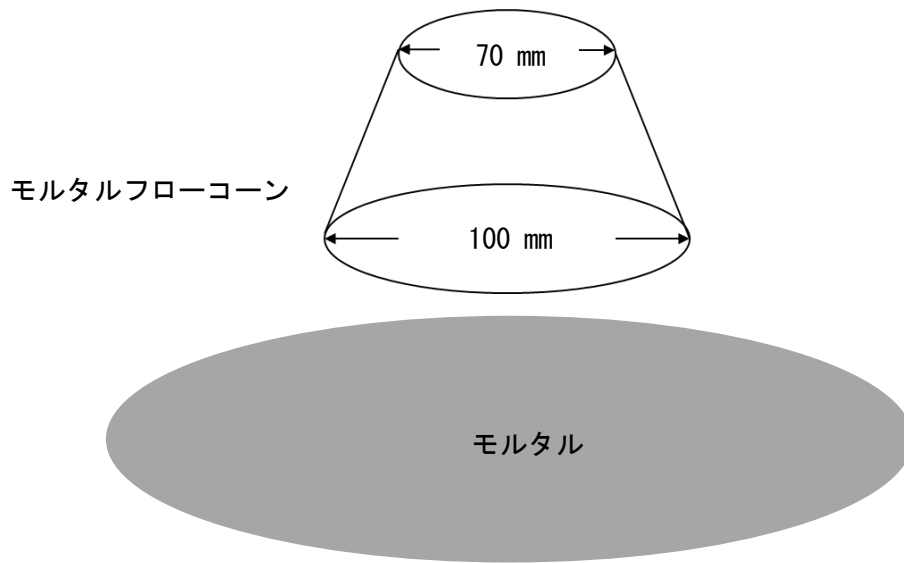


図-付. 3 モルタルのフロー試験

④ 空気量試験

空気量試験は JIS A1116 「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法（質量法）に準じて試験を行った。

$$\text{空気量(\%)} = ((T - M) / T) \times 100$$

T: 空気が全くないものとして計算したコンクリートの単位容積質量 (kg/m^3)

M: コンクリートの単位容積質量 (kg/m^3)

⑤ コンクリートの間隙通過性(ボックス試験)

コンクリートの間隙通過性試験(ボックス試験)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(図-付. 4)。コンクリートの自重による力で鉄筋の間を通過する能力を定量化するものである。片方に詰められたコンクリートがゲートを開けることで平行な鉄筋で構成された障害物を通過し、反対側に上昇した高さを計測する。鉄筋障害物の手前で粘性の不十分なコンクリートや分離気味のコンクリートは閉塞する。

この試験の流動障害は異形鉄筋 D10 を 5 本使用する厳しい方の、障害 R1 により行った。これにより 250 mm 以上コンクリートが上昇すると十分な自己充填性があると見なす。

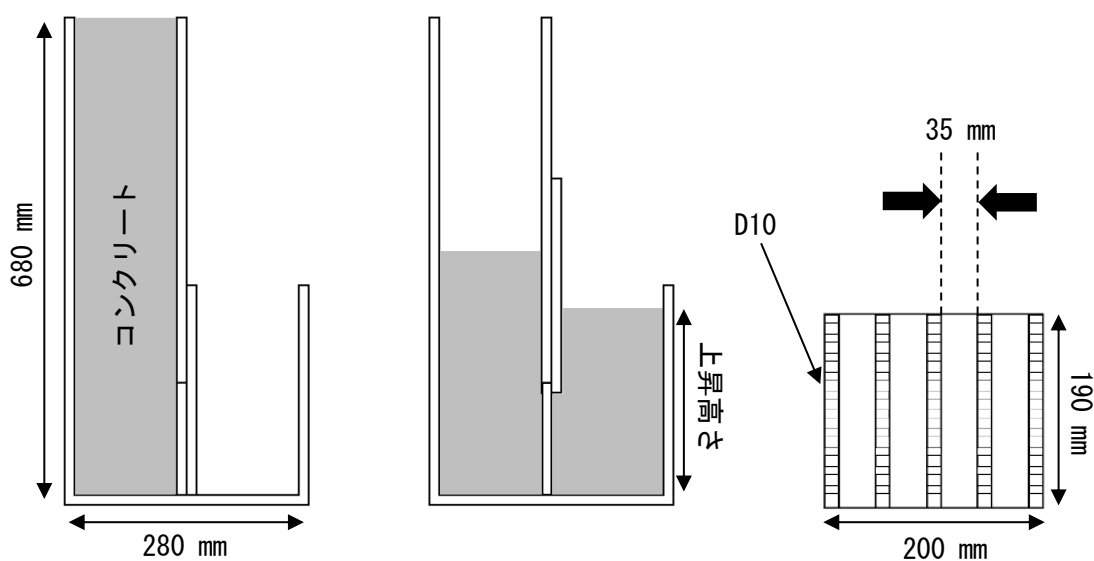


図-付. 4 コンクリートの間隙通過性試験(ボックス試験)

⑥ 粘度の測定方法

粘度値の測定に使用した試験機を示す(図-付. 5)。トルクを回転させ、試料をせん断変形させる。測定された抵抗値を粘度値へと自動変換する。トルクの回転速度を 3 rpm とし、回転開始後 90 秒後の値で比較した。



図-付. 5 粘度計

⑦今後の課題

本研究では、水セメント比を変化させてフレッシュモルタルのせん断強度の比較を行った。今後は経時変化と温度変化による固体粒子間摩擦の定量化を行うことが課題である。また、増粘剤の種類、添加量を変化させて固体粒子間摩擦の比較を行う。増粘剤の効果により高い粘度と低い固体粒子間摩擦を実現し、高い水セメント比で水セメント比 35%と同程度の自己充填性を得ることが目標である(図-付. 6)。

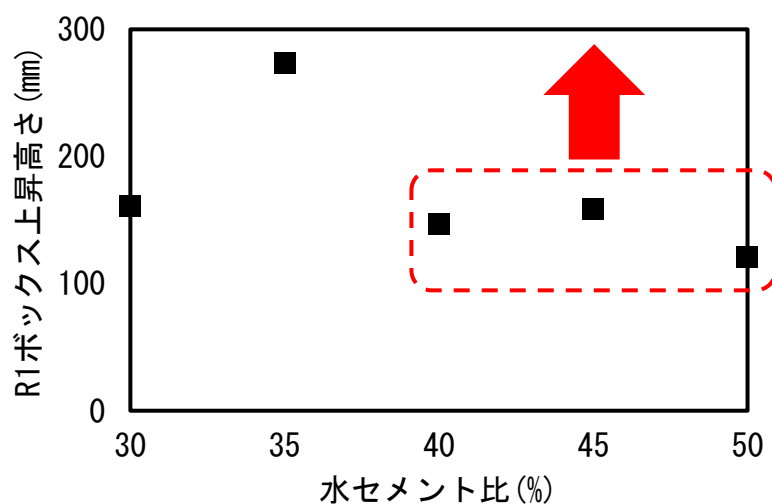


図-付. 6 水セメント比によるボックス上昇高さ