

2023 年度修士論文

炭酸水練混ぜと微細気泡の連行による
増粘剤添加型フレッシュコンクリートの
自己充填性能の向上

Improvement of Self-Compacting Performance of Fresh Concrete
with Viscosity Modifying Agent by Mixing with Carbonated
Water and Entrainment of Microbubbles

主指導教員 大内 雅博

副指導教員 佐藤 慎司

副査審査員 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

1265053 曾我部 蓮太

2024 年 1 月

炭酸水練混ぜと微細気泡の連行による 増粘剤添加型フレッシュコンクリートの自己充填性能の向上

曾我部 蓮太

要旨

型枠内への充填に際して振動締固め作業を必要としない自己充填コンクリート(Self-Compacting Concrete : SCC)が1988年に開発されたが、30年以上が経過しても自己充填コンクリートが普及しているとは言い難い。フレッシュコンクリートに自己充填性能を付与するためにセメント量を増やして粘性を高めて間隙通過性能を高めるとともに、高性能AE減水剤を添加し、セメントを分散させて軟度高める必要がある。そのため、粉体(セメント等)の使用量が普通コンクリートの約2倍となり、高コストになっている。この状況から自己充填コンクリートを汎用化して普及させるには、自己充填性能を維持しつつセメント量を減らすことが有効な手段の1つである。

本研究の目的は、これまで効果が検証されてきた増粘剤(VMA)添加と微細気泡連行の組み合わせに、新技術である炭酸水練混ぜを組み合わせ、それぞれが支障なくその効果を発揮してフレッシュコンクリートの自己充填性能を向上させることである。

連行した空気が炭酸水練混ぜのフレッシュモルタルの粘性と内部摩擦に与える影響を調べた。次に炭酸水練混ぜが連行する空気の質と量に与える影響を調べた。モルタルの練混ぜには、予備実験より判明した、コンクリート中のモルタルを再現するのに適している分割練りを採用した。粘度、面内付着力および面外付着力を総称して定義した粘性は、炭酸水練混ぜによる向上効果を確認するとともに、気泡連行が粘性を低下させないことを確認した。また、炭酸水練混ぜはAE剤を用いなくても適量の空気連行を可能にするが、高い自己充填性能付与の観点から、従来通りAE剤添加による空気連行方法が適していることが分かった。気泡径分布測定より、炭酸水練混ぜは、連行気泡の微細化、すなわち自己充填性能にとって有利となる可能性を得た。さらに炭酸水練混ぜのモルタルに気泡を連行することにより、内部摩擦の増加を抑制しつつ粘性を向上させることができた。

最後に、コンクリート練混ぜによる検証実験により自己充填性能向上効果を確認した。フレッシュコンクリートでは、水道水練混ぜよりも少ない空気量で高い充填高さを示した。炭酸水練混ぜと微細気泡の連行の併用による、自己充填性能の向上効果の可能性を得た。このことを、コンクリートから採取したモルタル試験による、粘性向上及び内部摩擦抑制を確認して裏付けた。

以上、既存の増粘剤添加および気泡連行に加えて、炭酸水練混ぜによりフレッシュコンクリートの自己充填性能レベルを向上させることができた。空気量の調整技術が確立されれば、当初目標の汎用型自己充填コンクリートの完成の見通しを得たとと言える。

Improvement of Self-Compacting Performance of Fresh Concrete with Viscosity Modifying Agent by Mixing with Carbonated Water and Entrainment of Microbubbles

Renta Sokabe

ABSTRACT

Self-Compacting Concrete (SCC), which does not require vibratory compaction when placed in the formwork, was developed in 1988, but even after more than 30 years, self-compacting concrete is still not widely used. To give self-compacting performance to fresh concrete, it is necessary to increase the amount of cement to increase its viscosity and pore-passing performance, and to add a high-performance AE water reducer to disperse the cement and increase its softness. This requires the use of about twice the amount of powder (cement, etc.) as ordinary concrete, resulting in high costs. In this situation, one of the effective ways to make self-compacting concrete more widely used is to reduce the amount of cement while maintaining its self-compacting performance.

The objective of this study is to improve the self-compacting performance of fresh concrete by combining the combination of thickener (VMA) addition and microbubbles, both of which have been verified to be effective, with a new technology of carbonated water mixing, where the effects of each are demonstrated without any problems.

The effects of air entrained with carbonated water on the viscosity and internal friction of the fresh mortar were investigated. Next, the effect of carbonated water kneading on the quality and quantity of the continuous air was investigated. For the mortar mixing, a split mixing method was employed, which was found from preliminary experiments to be suitable for reproducing the mortar in concrete. Viscosity, defined collectively as viscosity, in-plane adhesion, and out-of-plane adhesion, was improved by mixing with carbonated water, and it was confirmed that air bubble coupling did not reduce the viscosity. Although carbonated water mixing enables an appropriate amount of air entrainment without the use of AE agent, it was found that the conventional air entrainment method with the addition of AE agent is suitable from the viewpoint of providing high self-compacting performance. From the measurement of bubble size distribution, it was found that the carbonated water mixing may be advantageous for the miniaturization of air bubbles, i.e., for the self-compacting performance. Furthermore, the addition of the continuous bubbles to the carbonated water-mixed mortar improved the viscosity of the mortar while suppressing the increase in internal friction.

Finally, the effect of improved self-compacting performance was confirmed through verification experiments using concrete mixing. Fresh concrete exhibited higher self-compacting height with less air than tap water mixing. We obtained the possibility of improving the self-compacting performance by the combination of carbonated water mixing and the continuous flow of microbubbles. This was supported by the viscosity improvement and internal friction suppression confirmed by mortar tests taken from concrete.

As described above, the self-compacting performance level of fresh concrete could be improved by mixing with carbonated water in addition to the existing thickener addition and air bubble circulation. Once the technology for adjusting the air volume is established, the prospect of completing the initial goal of general-purpose self-compacting concrete can be said to have been achieved.

目次

第1章 序章	1
1.1 自己充填コンクリートの背景と課題	1
1.2 低セメント量で高い自己充填性能を付与する技術の現状	4
(1) 自己充填性能向上に有効な気泡径	4
(2) 増粘剤による粘性の付与	5
(3) 増粘剤添加による微細気泡の連行と経時安定性向上	6
(4) 微細気泡連行による自己充填性能の向上	7
(5) 炭酸水練混ぜによる粘性の向上	8
1.3 現行技術に炭酸水練混ぜを組み合わせる必要性	9
1.4 本研究の目的	11
1.5 本研究の位置付け	11
1.6 本研究で対象とするフレッシュモルタルの粘性と内部摩擦	13
第2章 材料・配合および試験方法	14
2.1 使用材料	14
2.2 配合	15
2.3 練混ぜ手順	16
2.4 フレッシュモルタルの試験方法	19
(1) モルタルフロー試験	19
(2) モルタルロート試験	19
(3) 空気量試験	20
(4) 粘度の測定	20
(5) 面内付着力の測定	23
(6) 面外付着力の測定	25
(7) せん断強度の測定	28
第3章 炭酸水練混ぜによる粘性の向上と気泡の連行	31
第4章 炭酸水練混ぜによる連行気泡の微細化	35
4.1 空気連行剤(AE剤)の有無による違い	35
4.2 炭酸水による連行空気の質向上	39
第5章 連行気泡が炭酸水練混ぜによる内部摩擦増加を緩和する効果	41
5.1 VMA添加量による粘性と内部摩擦の関係	41
5.2 連行気泡が炭酸水練混ぜの内部摩擦に与える影響	43
第6章 コンクリート練混ぜによる検証実験	46
6.1 炭酸水練混ぜによる自己充填性能の向上と課題	46
6.2 消泡剤添加による空気量調整とその悪影響	50
第7章 結論	53
付録	54
付録1 せん断強度測定におけるピーク値について	54
付録2 フレッシュモルタルの粘性の各指標間の比較	57
参考文献	61

図目次

図-1.1	フレッシュコンクリートに間隙通過性能を付与する従来の技術.....	2		
図-1.2	開発中の汎用型自己充填コンクリートの位置づけ.....	2		
図-1.3	普通コンクリートに近い、開発中の自己充填コンクリートの配合.....	3		
図-1.4	模擬粗骨材（ガラスビーズ）によるロート流下速度低下率を指標としたフレッシュモルタルの固体粒子間摩擦の定量化方法.....	4		
図-1.5	フレッシュモルタル中の気泡径 $450\mu\text{m}$ 以下（左）または $450\mu\text{m}$ 以上（右）の空気量と模擬粗骨材添加によるロート流下速度低下率の関係.....	4		
図-1.6	増粘剤によるモルタルと粗骨材の一体流動性の付与.....	5		
図-1.7	VMA の有無による練り上がり 10 分後の気泡径分布の違い.....	6		
図-1.8	練り上がり 10 分後と 1 時間後の空気量.....	6		
図-1.9	フレッシュモルタル中の気泡径 $500\mu\text{m}$ 未満の空気量とせん断強度の関係....	7		
図-1.10	微細気泡によるフレッシュコンクリートの変形の際の内部摩擦緩和効果....	7		
図-1.11	せん断強度と面外付着力の関係.....	8		
図-1.12	目標達成に必要な性能とそのための各手段.....	9		
図-1.13	現行 SCC の自己充填性能とその課題.....	10		
図-1.14	本研究のフロー.....	11		
図-1.15	本研究の国際的な位置付け.....	11		
図-1.16	フレッシュコンクリートの間隙通過性能を支配する粘性の役割.....	13		
図-1.17	フレッシュモルタルの 2 種類の付着力.....	13		
図-2.1	モルタルミキサ	図-2.2	コンクリートミキサ.....	16
図-2.3	ロート流下時間と付着力の関係.....		17	
図-2.4	練混ぜ手順.....	18		
図-2.5	モルタルフロー試験.....	19		
図-2.6	モルタル用ロート試験.....	19		
図-2.7	回転粘度計による粘度測定.....	20		
図-2.8	TVB25 形粘度計（東機産業製）.....	21		
図-2.9	W/C 35%の粘度の測定結果.....	21		
図-2.10	回転速度と粘度の関係.....	22		
図-2.11	W/C 35%の面内付着力の測定結果.....	24		
図-2.12	回転速度と面内付着力の関係.....	24		
図-2.13	TA.XT plus C テクスチャーアナライザー（英弘精機製）.....	25		
図-2.14	試料に付着・剥離させる治具.....	26		
図-2.15	テクスチャーアナライザーによる面外付着力測定.....	26		
図-2.16	測定中のモルタルの様子.....	26		
図-2.17	W/C 35%の面外付着力の測定結果.....	27		

図-2.18	引上げ速度と面外付着力の関係	27
図-2.19	フレッシュコンクリートの間隙通過イメージ	28
図-2.20	一面せん断試験機	29
図-2.21	一面せん断試験機の測定イメージ	30
図-2.22	水平方向の変位とせん断力の関係	30
図-3.1	ロート流下時間の比較	33
図-3.2	粘度の比較 (回転速度 100 rpm)	33
図-3.3	面内付着力の比較 (回転速度 100 rpm)	34
図-3.4	面外付着力の比較 (引上げ速度 40 mm/s)	34
図-4.1	ロート流下時間の比較	37
図-4.2	粘度の比較 (回転速度 100 rpm)	37
図-4.3	面内付着力の比較 (回転速度 100 rpm)	38
図-4.4	面外付着力の比較 (引上げ速度 40 mm/s)	38
図-4.5	自動気泡解析装置 (Air Void Analyzer : AVA)	39
図-4.6	各気泡径の比率 (炭酸水による効果)	40
図-5.1	一面せん断試験機	42
図-5.2	一面せん断試験機の測定イメージ	
図-5.3	せん断強度と面外付着力の関係 (VMA 添加量による違い)	42
図-5.4	せん断強度の比較	45
図-5.5	せん断強度と面外付着力の関係	45
図-6.1	ボックス 5 本上昇高さ と 空気量の関係	48
図-6.2	せん断強度と粘度の関係	48
図-6.3	せん断強度と面内付着力の関係	49
図-6.4	せん断強度と面外付着力の関係	49
図-6.5	ボックス上昇高さ と 空気量の関係	51
図-6.6	せん断強度と粘度の関係	51
図-6.7	せん断強度と面内付着力の関係	52
図-6.8	せん断強度と面外付着力の関係	52
図-付録 1.1	一面せん断試験機	54
図-付録 1.2	一面せん断試験機の測定イメージ	
図-付録 1.3	せん断力測定結果の例	55
図-付録 1.4	測定値のピーク有無の比較	55
図-付録 1.5	Gm と Rm の関係とそのピーク値	56
図-付録 1.6	せん断強度と Gm の関係とそのピーク値	56
図-付録 2.1	面内付着力と粘度の関係	57
図-付録 2.2	面外付着力と粘度の関係	58
図-付録 2.3	面外付着力と面内付着力の関係	58
図-付録 2.4	粘度とロート流下時間の関係	59
図-付録 2.5	面内付着力とロート流下時間の関係	59
図-付録 2.6	面外付着力とロート流下時間の関係	60

表目次

表-2.1 使用材料	14
表-2.2 モルタル配合(空気を除いたもの).....	15
表-2.3 コンクリート配合(空気を除いたもの).....	15
表-3.1 混和剤添加量(VMA 添加量はモルタル中に換算した値)	31
表-3.2 各配合における測定結果	32
表-4.1 混和剤添加量(VMA 添加量はモルタル中に換算した値)	35
表-4.2 各配合における測定結果	36
表-4.3 混和剤添加量と空気量	39
表-5.1 混和剤添加量(VMA 添加量はモルタル中に換算した値)	41
表-5.2 各配合における測定結果	41
表-5.3 混和剤添加量(VMA 添加量はモルタル中に換算した値)	43
表-5.4 各配合における測定結果	44
表-6.1 混和剤添加量(VMA 添加量はコンクリート中に換算した値)	46
表-6.2 コンクリート試験結果	46
表-6.3 コンクリートから採取したモルタルの測定結果	47
表-6.4 混和剤添加量(VMA 添加量はコンクリート中に換算した値)	50
表-6.5 コンクリート試験結果	50
表-6.6 コンクリートから採取したモルタルの測定結果	50

第1章 序章

1.1 自己充填コンクリートの背景と課題

主要な建設材料のひとつであるコンクリートは安価で供給しやすいため最も一般的な建設材料として幅広く使用されている。しかし、コンクリート材料の信頼性や耐久性は施工過程における締固め作業等、人的要因に大きく影響を受けており、適切に施工されない場合ジャンカやコールドジョイント等ができ、構造や安全上の問題が生じてしまう。この課題を解決するため、施工時に振動締固め作業を必要としない自己充填コンクリート (Self-Compacting Concrete : SCC)が 1988 年に開発された¹⁾。

しかしながら、30 年以上が経過した現在においても、自己充填コンクリートが普及しているとは言い難い。原因として、普通コンクリートよりも高単価であることが挙げられる。従来の自己充填コンクリートは材料分離抑制のために骨材量を小さくし、セメント量を増やして粘性を高めて、十分な間隙通過性能を確保させるとともに、セメント分散効果を有する高性能 AE 減水剤を添加し、軟度高めることにより高い自己充填性を得ている。そのため、粉体(セメント等)の使用量が普通コンクリートの約 2 倍となり、高価格なコンクリートとなっている(図-1.1)。これより自己充填コンクリートを一般的に普及させるには、自己充填性能を維持しつつ、単位セメント量を抑制して価格を抑えることが有効な手段の 1 つである。

高知工科大学では、コンクリート中のセメントの一部を微細な気泡に置き換えてセメント量の低減を図った「気泡潤滑型自己充填コンクリート (air-enhanced Self-Compacting Concrete : air-SCC)」を開発し²⁾、実用化に向けた技術開発を行ってきた(図-1.2, 1.3)。このコンクリートは、微細な気泡がフレッシュコンクリート中の固体粒子間摩擦を緩和し、骨材量を増加させ、単位セメント量を削減して普通コンクリート並みの単価にするものである。さらに、単位セメント量の削減に伴う材料分離抵抗性の低下を補うために増粘剤 (VMA: Viscosity Modifying Agent) を添加し、粘性を維持させることを可能とした。これにより、自己充填性能に有利な、そして合泡しにくく時間経過に対して安定した気泡連行も可能になった。以上から、自己充填コンクリートの実用化を達成するための、安定した微細気泡の連行と適度な粘性を付与することが可能になった。

自己充填コンクリートの汎用化・一般化に残された課題は、時間経過に対する自己充填性能の一層の安定化である。特に、スランプフロー値に代表されるフレッシュコンクリートの軟度の維持・安定化が課題となっている。現行の J I S では、生コンクリートは製造工場出荷から 90 分以内に打ち込みを完了する必要がある。人力作業によってフレッシュ性状の低下を補うことが不可能な自己充填コンクリートの場合、少なくとも 90 分間、出来れば 180 分間、スランプフロー値が安定していることが、その普及のためには望ましいと言える。次節以降、上記の技術開発の経緯を述べる。

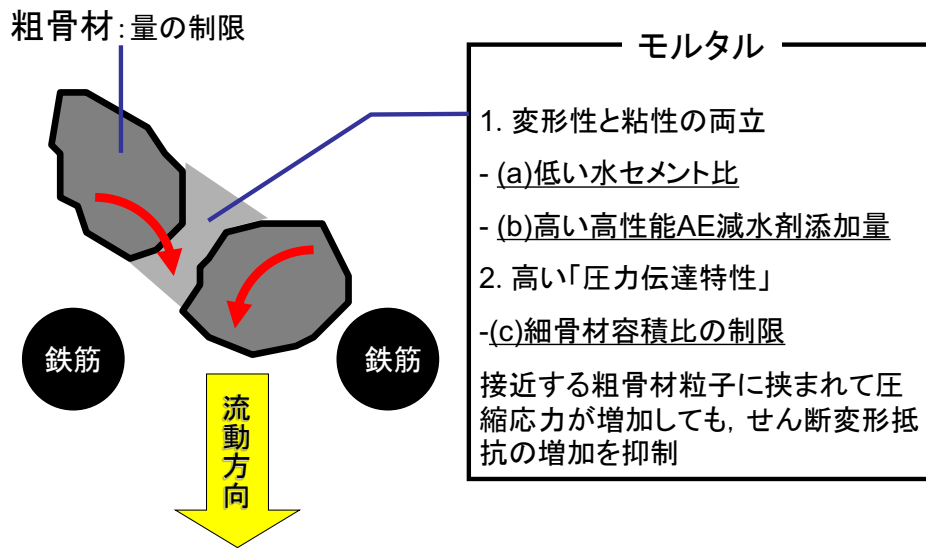


図-1.1 フレッシュコンクリートに間隙通過性能を付与する従来の技術

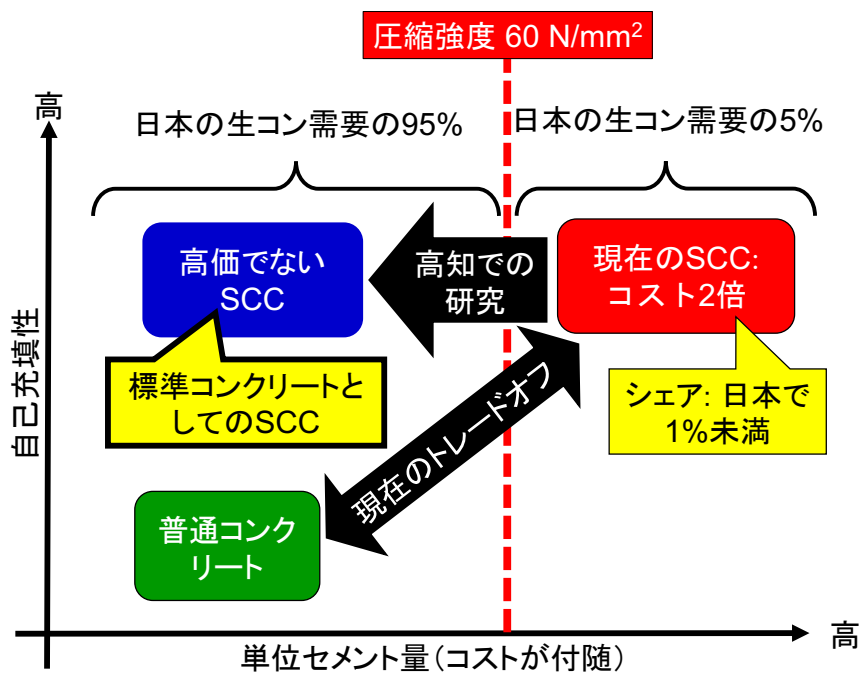


図-1.2 開発中の汎用型自己充填コンクリートの位置づけ

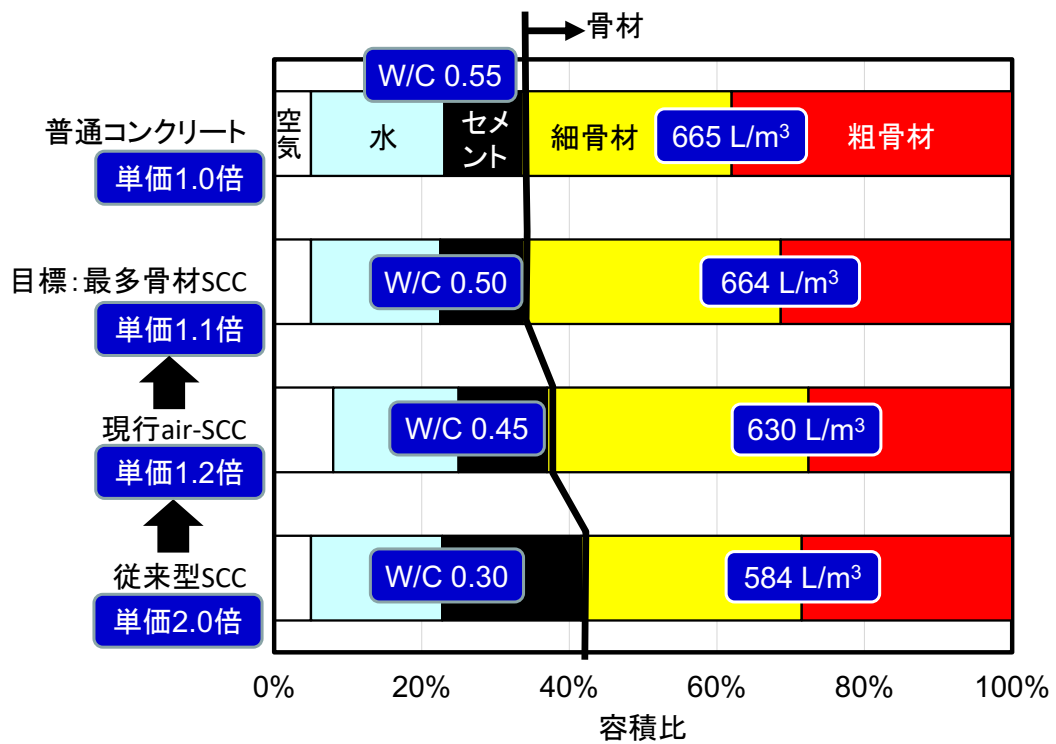


図-1.3 普通コンクリートに近い、開発中の自己充填コンクリートの配合

1.2 低セメント量で高い自己充填性能を付与する技術の現状

(1) 自己充填性能向上に有効な気泡径

大内らは、模擬粗骨材（ガラスビーズ）を混入させたモルタルの漏斗流下試験により、模擬粗骨材としてのガラスビーズの混入による流下速度低下率を指標としてモルタル中の固体粒子間摩擦を間接的に定量化する方法を開発した。(図-1.4)

Puthipasら³⁾の研究では、この指標を用いることにより、フライアッシュを混入したモルタルでは 450 μm 未満の連行空気が自己充填性を向上させることを示した(図-1.5)。

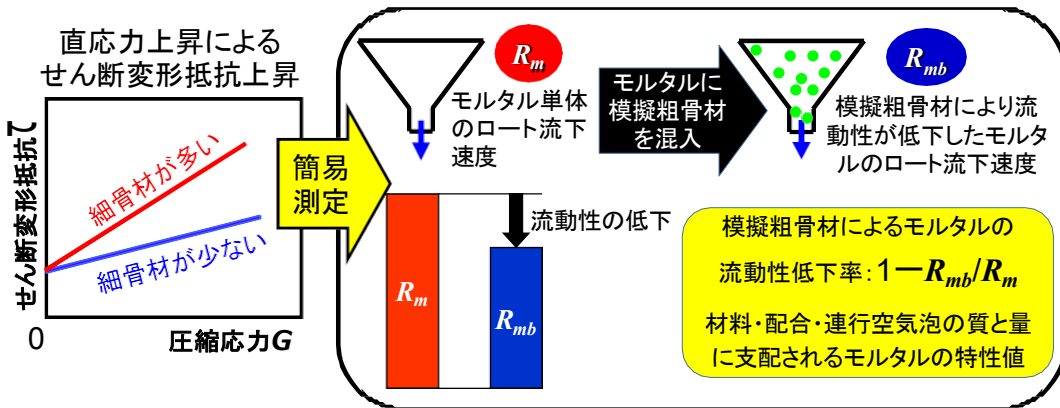


図-1.4 模擬粗骨材（ガラスビーズ）によるロート流下速度低下率を指標としたフレッシュモルタルの固体粒子間摩擦の定量化方法

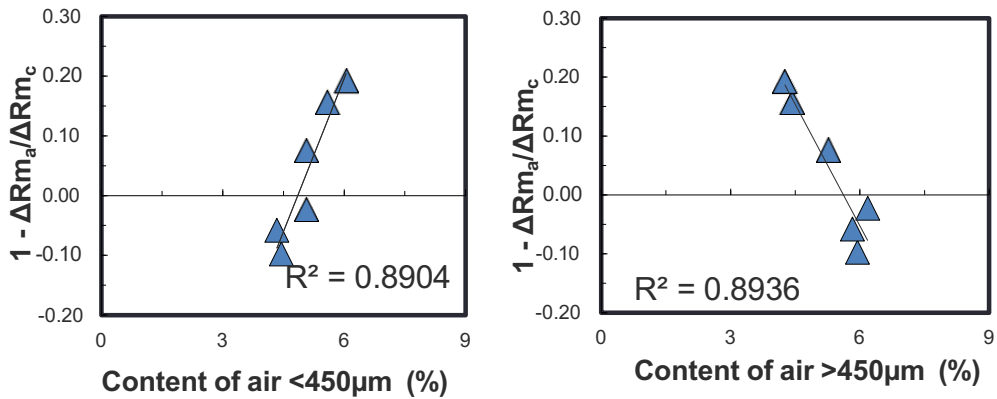


図-1.5 フレッシュモルタル中の気泡径 450 μm 以下（左）または 450 μm 以上（右）の空気量と模擬粗骨材添加によるロート流下速度低下率の関係

(2) 増粘剤による粘性の付与

単位セメント量を削減した自己充填コンクリートの材料分離抵抗性を向上させるため、セルロースを原料とした低分子量の新型増粘剤（以下、VMAと称する）が開発された。このVMAはフレッシュコンクリートの粘性を向上させ、材料分離抵抗性を高める効果があると確認されている⁴⁾。実際にVMAの有無を比較すると、モルタルと骨材の一体性が増加し、水っぽさも減少したことから、粘性付与による材料分離抵抗性の向上が確認できる（図-1.6）。

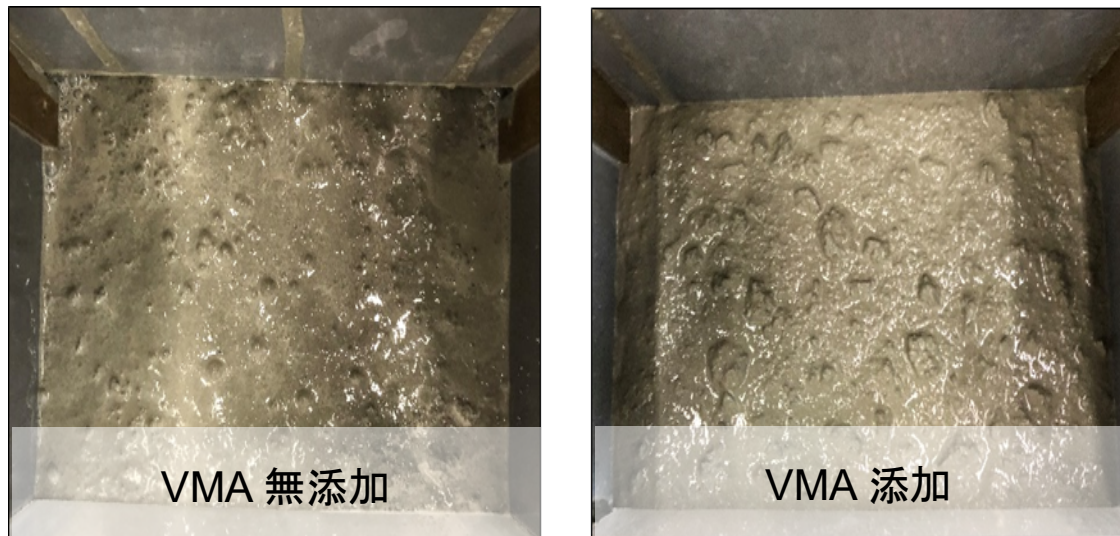


図-1.6 増粘剤によるモルタルと粗骨材の一体流動性の付与

(3) 増粘剤添加による微細気泡の連行と経時安定性向上

北中・大内らの研究⁵⁾では、VMA を添加したモルタルを無添加のモルタルと比較すると、練り上がりの空気量が同等であっても気泡径分布が異なっていた。VMA を添加したモルタルは小径気泡が多く、大径気泡が少なくなった(図-1.7)。また、VMA を添加したモルタルでは練り上がりから 1 時間後までの空気減少量が小さく、安定して微細な気泡を維持できることが分かった(図-1.8)。増粘剤の添加により、安定した微細気泡の連行が可能になったといえる。

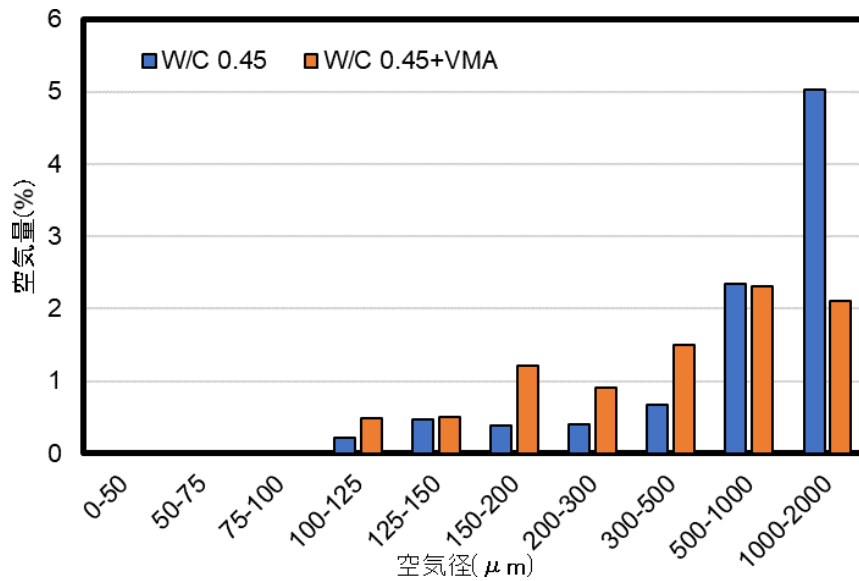


図-1.7 VMA の有無による練り上がり 10 分後の気泡径分布の違い

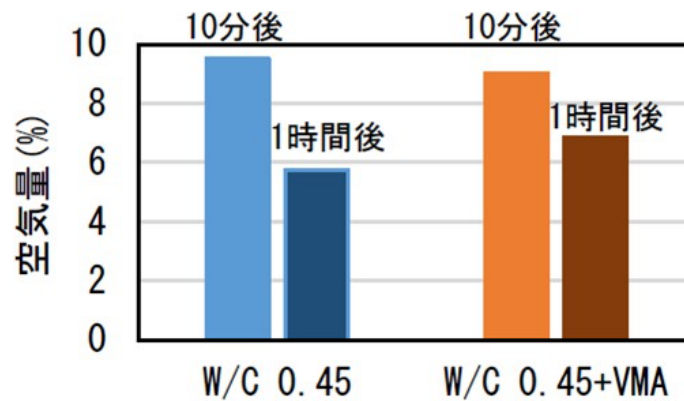


図-1.8 練り上がり 10 分後と 1 時間後の空気量

(4) 微細気泡連行による自己充填性能の向上

大西・大内の研究⁶⁾では、フレッシュモルタルの圧縮試験により変形量を求め、そして一面せん断試験により摩擦力を直接求めることで微細気泡によるベアリング効果の直接検証を行った。フレッシュコンクリートの鉄筋間隙通過の際にモルタル相に生じる圧縮応力（直応力）として推定した 0.20 MPa 下での気泡径 500 μm 以下の空気量が大きくなるほど、せん断変形抵抗性の指標であるせん断強度との間に高い相関が得られた(図-1.9)。この結果より、微細気泡によるベアリング効果を検証したと言える(図-10)。

以上から、500μm 以下の微細気泡をフレッシュコンクリート中に連行することが自己充填性向上に有効であることを示したと言える。

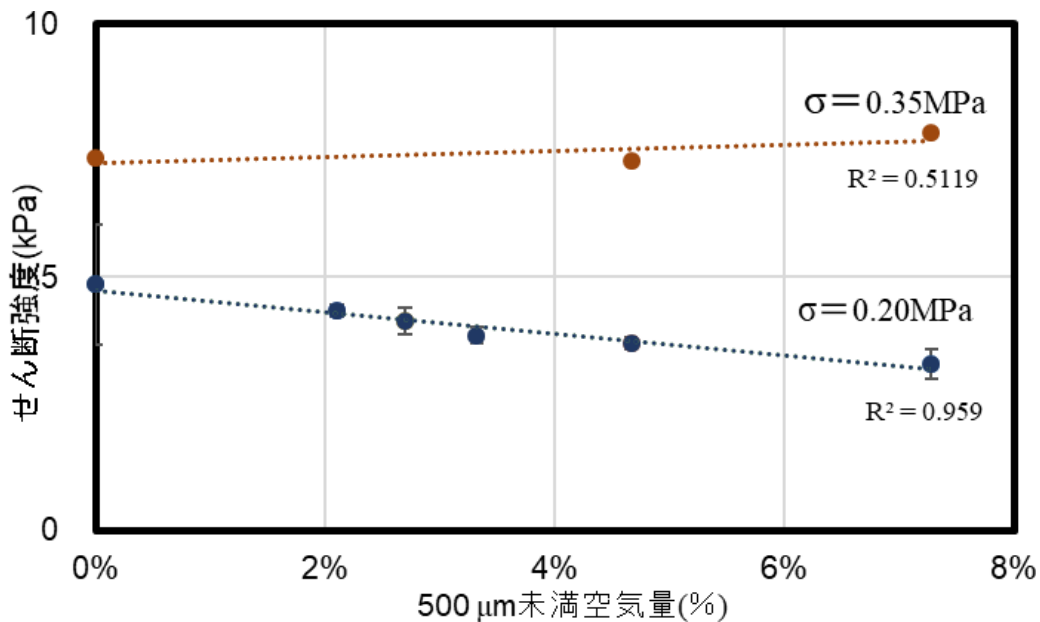


図-1.9 フレッシュモルタル中の気泡径 500μm 未満の空気量とせん断強度の関係

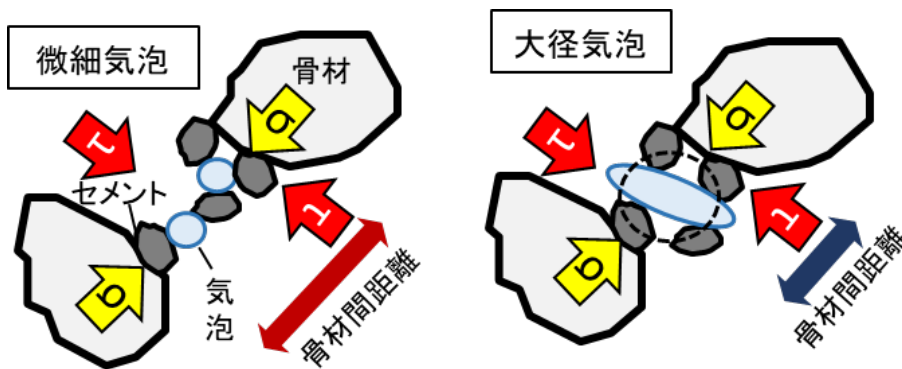


図-1.10 微細気泡によるフレッシュコンクリートの変形の際の内部摩擦緩和効果

(5) 炭酸水練混ぜによる粘性の向上

向井・大内らの研究⁷⁾では、粘性向上のための新たな技術として炭酸水での練混ぜ(一括練り)を行った。その結果、炭酸水での練混ぜにより W/C45%のフレッシュモルタルの粘性が向上し、さらにVMA添加の併用により、従来型自己充填コンクリートであるW/C35%のモルタル相と同等の粘性を得た。一方で炭酸水練混ぜとVMA添加を併用すると、付着力の向上に比べ、内部摩擦の指標であるせん断強度が大きく増加してしまうことが課題として残った(図-1.11)。

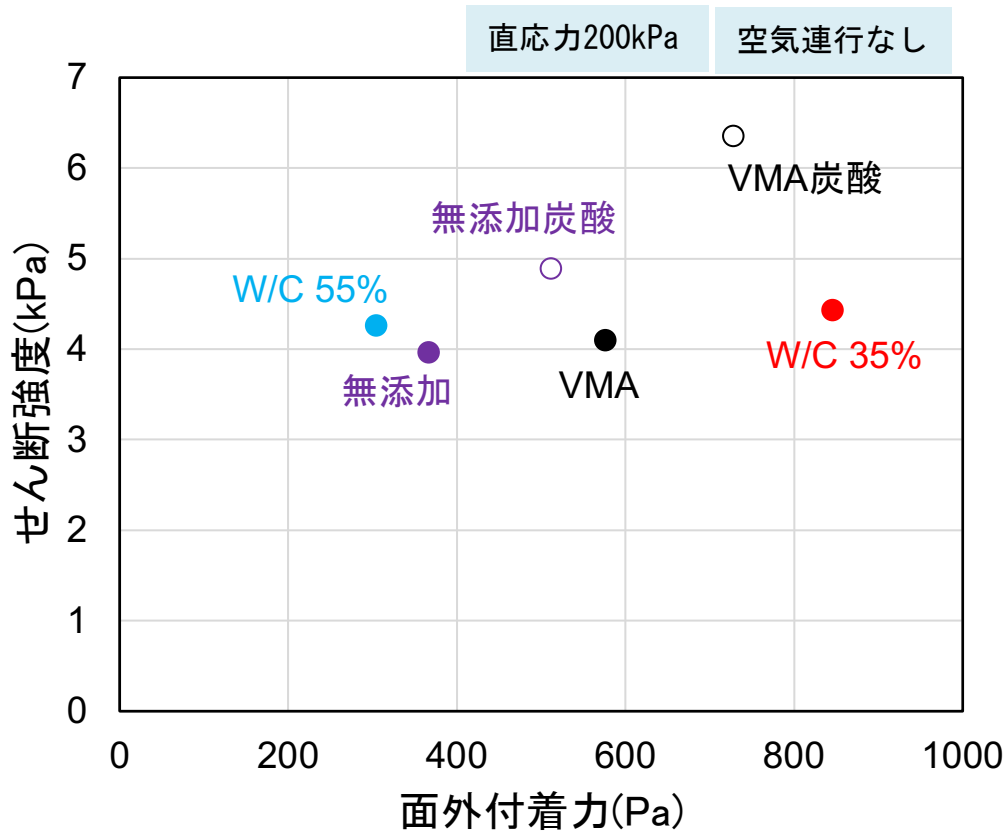


図-1.11 せん断強度と面外付着力の関係
(特記以外 W/C 45%)

1.3 現行技術に炭酸水練混ぜを組み合わせる必要性

高知工科大学では自己充填コンクリートの実用化のために、低セメント量のフレッシュコンクリートの性状として、間隙通過性試験（鉄筋5本=R1障害のボックス試験）でのボックス充填高さ300mm以上の高い自己充填性と、それを練り上がり3時間後まで維持することを最終的な目標としている。これらの目標を達成するためには、それぞれモルタルレベルにおいて低い内部摩擦と高い粘性の両立、そして軟度と空気量を3時間維持することが必要になる。以上の性能を達成するための手段として、1.2で述べた数々の研究が現在まで行われ、各手段による効果が報告されている（図-1.12）。

次に、2022年度に始まった炭酸水練混ぜを除いた現状の技術で練ったコンクリートの間隙通過性試験結果を示す（図-1.13）。結果として、目標とするボックス充填高さ300mmに達しなかったことから、現状の技術ではまだ所定の自己充填性能を得られないことが分かった。また、必要以上に空気を連行してしまうことも課題としてあげられる。これにより硬化後強度の大きな低下を招く。

このことから、自己充填性能の向上には新たな手段が必要であると言える。そこで本研究では、現行技術である増粘剤添加⁴⁾と微細気泡の連行⁶⁾に、粘性向上と練混ぜ後3時間までの軟度変化を抑制する可能性のある炭酸水練混ぜ⁸⁾を併用して、水セメント比45%および細骨材容積比55%のフレッシュコンクリートの自己充填性能の向上効果を調べた。

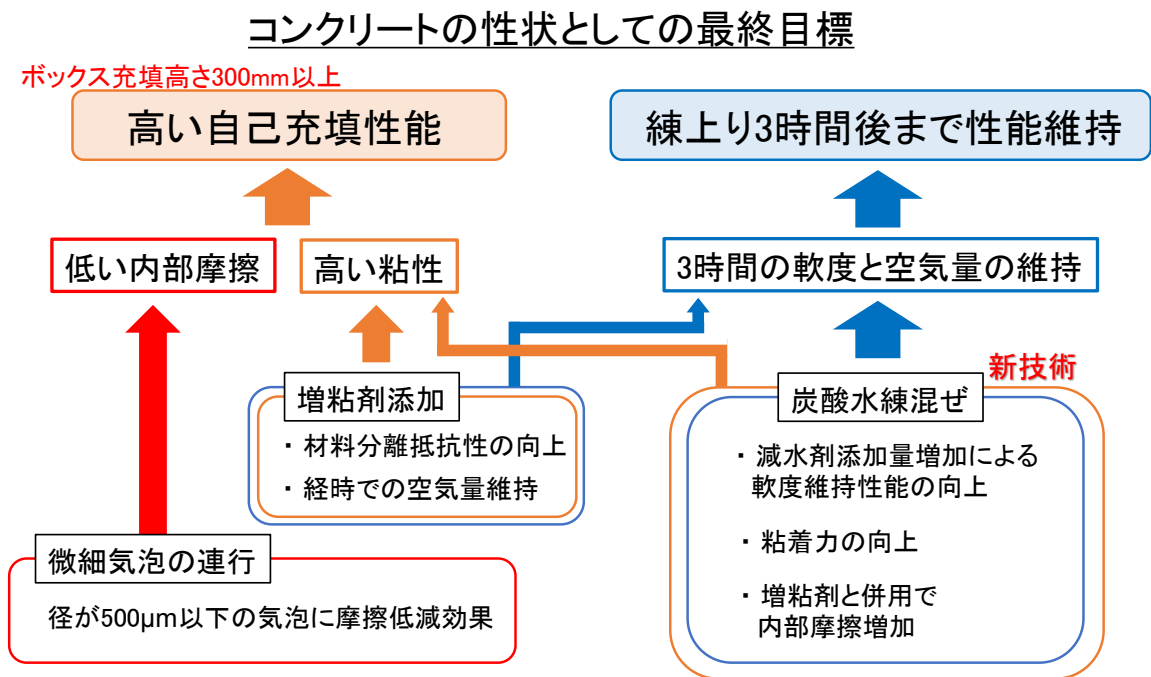
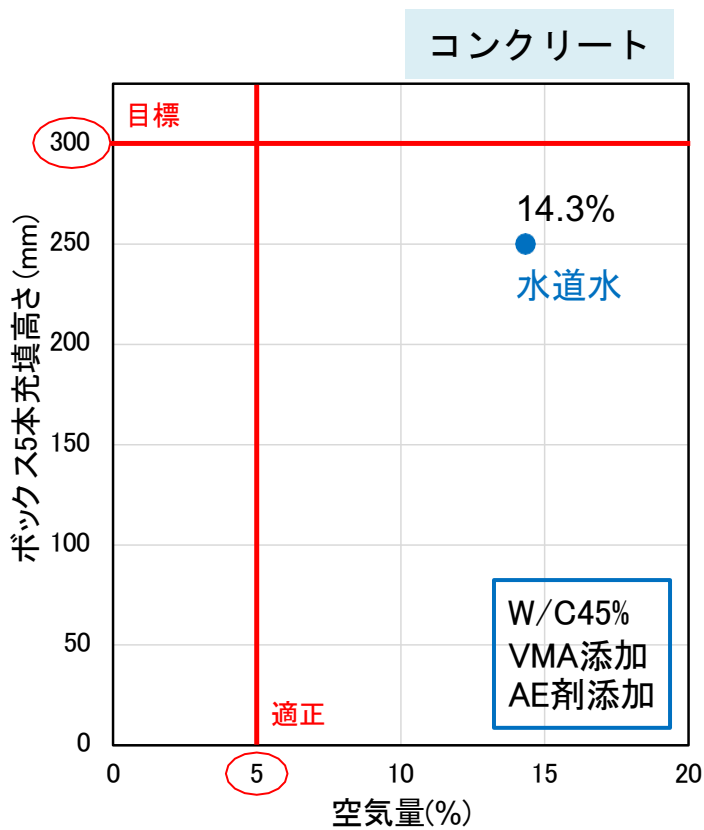


図-1.12 目標達成に必要な性能とそのための各手段



現状の課題

- ・ 自己充填性能の不足
- ・ 過大な空気量



- ・ 炭酸水練混ぜでの自己充填性の向上
- ・ 空気量の調節

図-1.13 現行 SCC の自己充填性能とその課題

1.4 本研究の目的

現行の技術である VMA 添加と微細気泡の連行のみでは、十分な自己充填性能が得られないことや、必要以上に空気を連行してしまう事が分かった。そこで本研究では、これまで相乗効果を検証してきた VMA 添加および微細気泡連行に、新技術である炭酸水練混ぜを組み合わせることで自己充填性能の向上を目指す。これまで、炭酸水練混ぜと空気連行に関する研究は行われていないからである。

まず、連行した空気が炭酸水練混ぜのフレッシュモルタルの粘性と内部摩擦に与える影響を調べる。次に、炭酸水練混ぜが連行する空気の質と量に与える影響を調べる。そして、コンクリート練混ぜによる検証実験において、自己充填性能向上効果を確認する(図-1.14)。これらの手段が実際の自己充填性能に及ぼす効果が明らかになれば、さらなる自己充填性能向上につながると想定している。

コンクリート(W/C45%)の性状としての最終目標

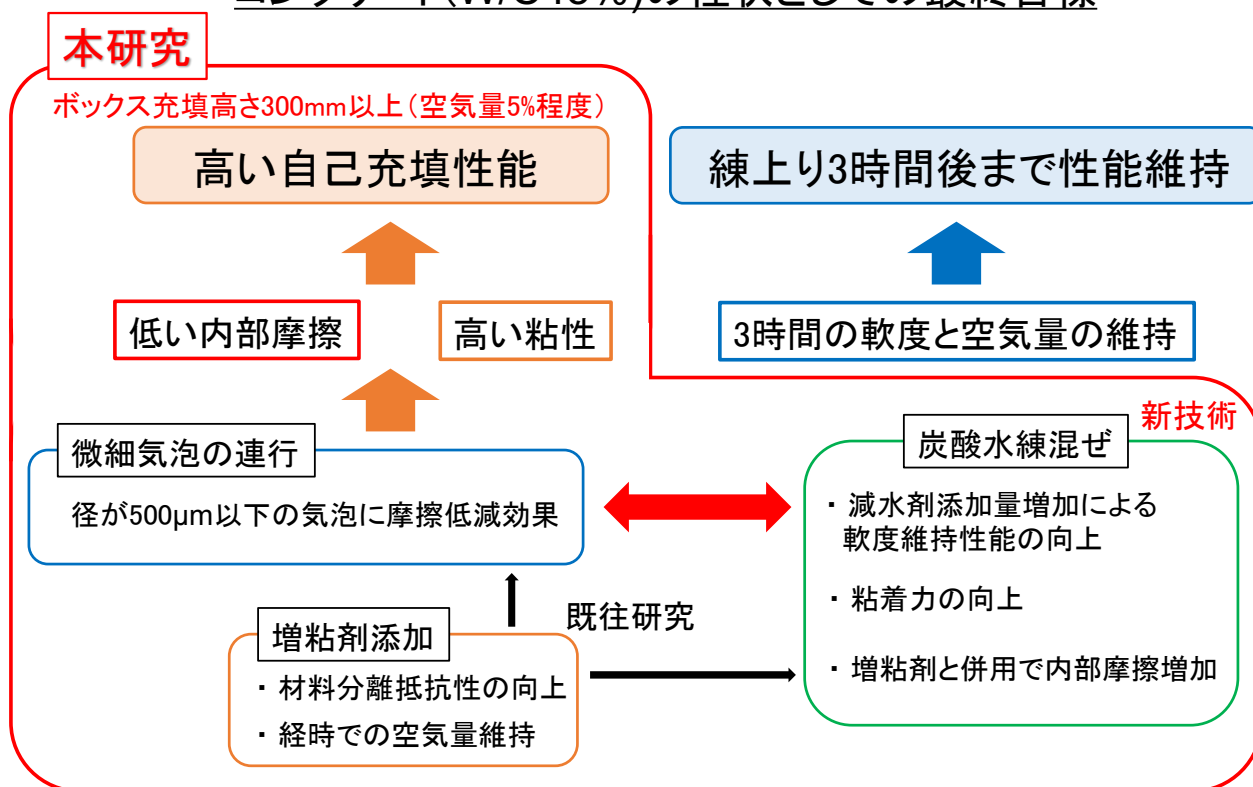


図-1.14 本研究のフロー

1.5 本研究の位置付け

ここで本研究の国際的な位置付けを示す(図-1.15)。従来の自己充填コンクリートは単位セメント量が多く高単価のため、実用化が妨げられている。そこで海外や日本の中流動コンクリートの研究は、セメント量、自己充填性能共に低くし、締め固めが必要なものとしている。特に海外は日本に比べ地震の発生が少ないため、従来の自己充填コンクリートの自己充填性能の維持を必要としていない。

一方で本研究は、自己充填性能を維持しつつセメント量の削減を目指し、従来通り締め固め不要としている。また本研究は唯一、粗骨材間の直応力下で発生するせん断応力を測定、考慮している。つまり自己充填性能の維持とモルタルと粗骨材間の相互作用を考慮することが本研究の特徴であり、国際的立ち位置におけるオリジナリティである。

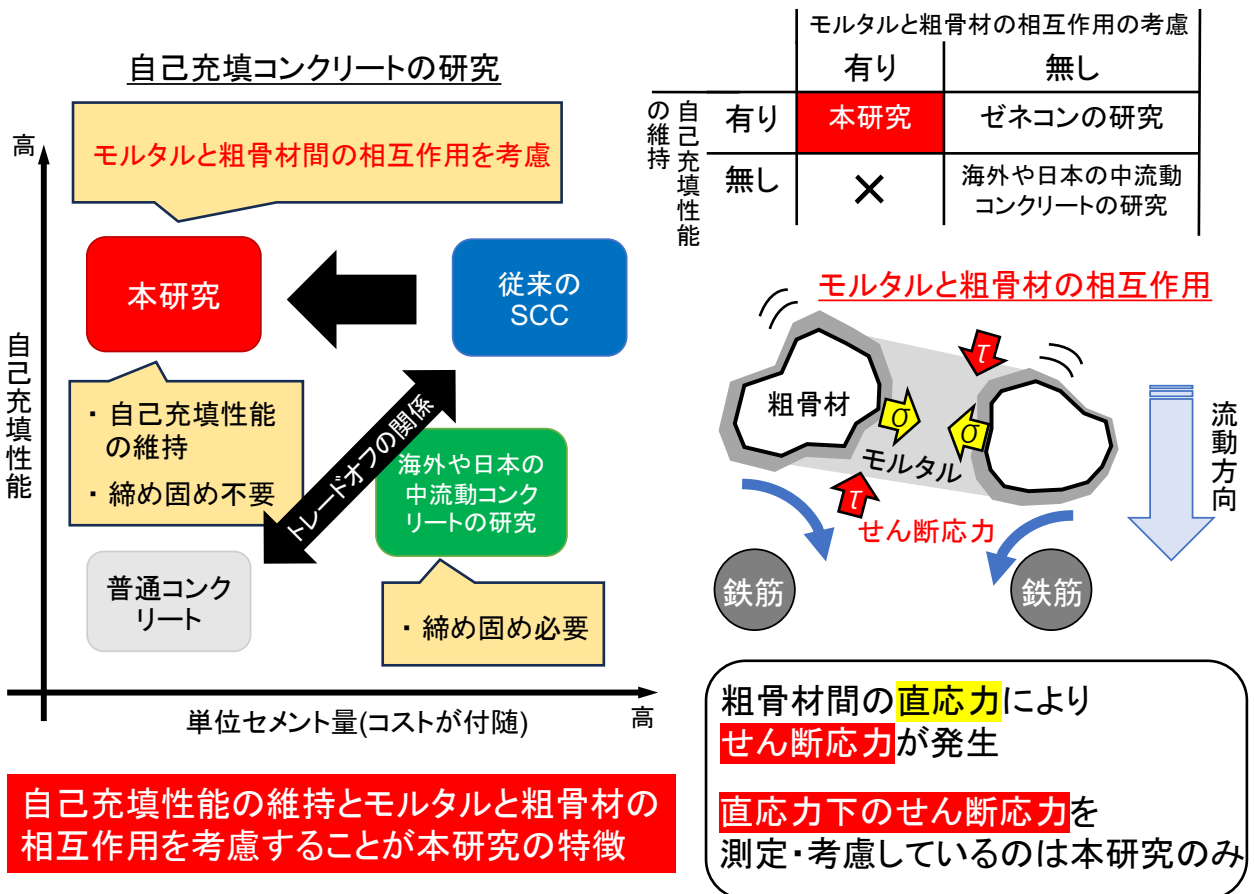


図-1.15 本研究の国際的な位置付け

1.6 本研究で対象とするフレッシュモルタルの粘性と内部摩擦

重力の作用のみによるフレッシュコンクリートの自己充填性能，特に間隙通過性能付与のメカニズムを示す（図-1.16）。モルタル相の軟度が十分かつ粗骨材量が制限されている場合，自己充填性能は主にモルタル相の粘性と内部摩擦が支配する。

粘性には，間隙手前での粗骨材粒子どうしの接触摩擦を緩和する粘度と，粗骨材表面からのモルタルの剥離を抑制する付着力の2種類を設定した。本研究では，付着力について，モルタルから粗骨材が剥離する際の水平方向の抵抗力となる面内付着力，一方，垂直方向の抵抗力となる面外付着力の2種類を定義した（図-1.17）。以下，本研究ではこれら3者を「粘性」と総称する。

内部摩擦は，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）である。ここでの直応力とは，フレッシュコンクリートが間隙手前にて粗骨材粒子間距離が小さくなる際にフレッシュモルタルに生じる圧縮応力のことである。これが高くなると，間隙手前で接近する粗骨材粒子に挟まれたモルタルのせん断変形抵抗が増し，間隙手前でコンクリートが閉塞する原因となる。

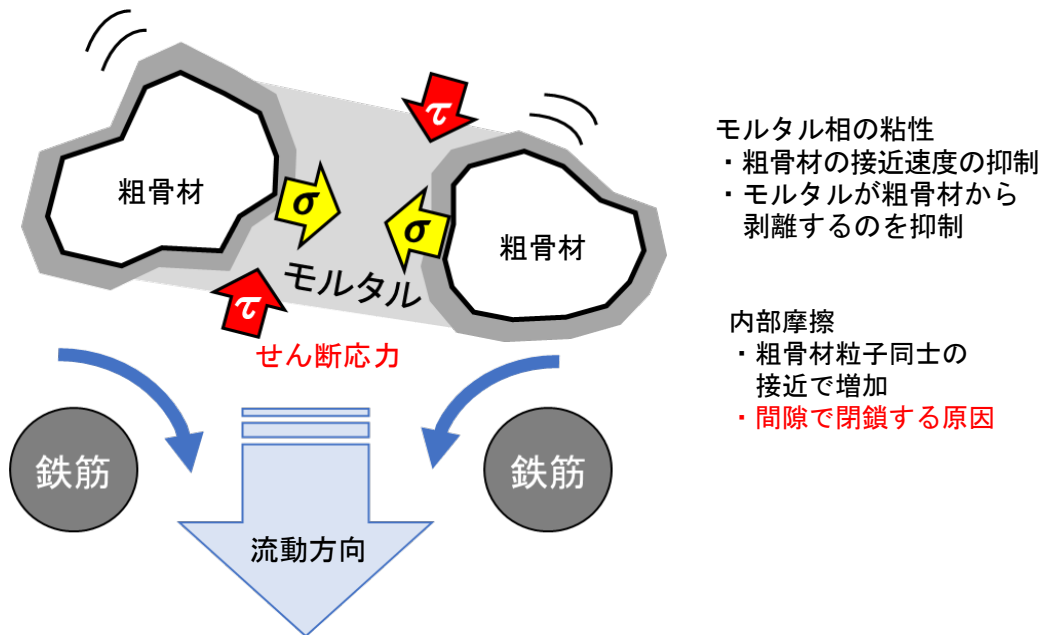


図-1.16 フレッシュコンクリートの間隙通過性能を支配する粘性の役割

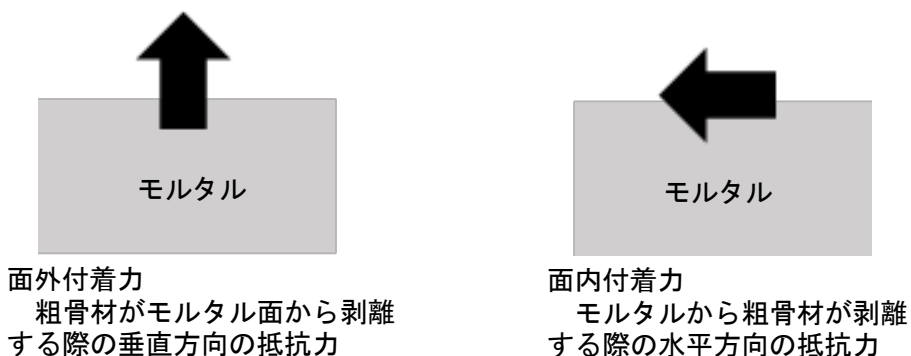


図-1.17 フレッシュモルタルの2種類の付着力

第2章 材料・配合および試験方法

2.1 使用材料

本研究で用いた使用材料を示す(表-2.1)。セメント(C)は普通ポルトランドセメント、細骨材(S)は石灰岩砕砂、粗骨材(G)は石灰砕石を使用した。高性能AE減水剤(SP)はポリカルボン酸エーテル系化合物が主成分のものを使用した。減水剤の添加量は、練上がり10分後のフロー値が250mm±10mmとなるように調整した。増粘剤は水溶性セルロースエーテル系のもを使用し、粗骨材容積比 0.3 のコンクリート中に 100g/m³(モルタル中では0.7で除した143 g/m³)となるように添加した。つまり、第5章までのモルタル試験では143 g/m³添加、第6章のコンクリート試験では100g/m³添加する。空気連行剤は変形ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を使用した。添加量はセメントの質量に対して 0.005%を基本として添加した。消泡剤は空気を連行しないもののみ添加した。炭酸水(Wca)は市販の飲料用炭酸水(炭酸濃度約9 g/L)を用いた。

表-2.1 使用材料

材料	概要	記号
水	上水道水	W
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.15g/m ³	C
細骨材	石灰岩砕砂 密度 2.68g/m ³ , 粗粒率 2.63 粒径判定実積率 55.3%	S
粗骨材	石灰砕石 表乾密度2.70 g/cm ³ , 吸水率0.25 %, 実積率60.1 %	G
減水剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)	SP
空気連行剤	変形ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	AE
増粘剤	水溶性セルロースエーテル系増粘剤	VMA
消泡剤	ポリエーテル系	D
炭酸水	「ウィルキンソンタンサン」 (アサヒ飲料)	Wca

2.2 配合

空気を除いたモルタル中の細骨材容積比(s/m)は 55%，水セメント比(W/C)は 45%を基本にし，後述のモルタルフロー試験に応じて高性能 AE 減水剤(SP)の添加量を変えて実験を行った。増粘剤の添加量をコンクリート中で 100g/m^3 (モルタル中では0.7で除した 143 g/m^3)とした理由は、後述する第5章で述べる。モルタルの示方配合を示す(表-2.2)。またコンクリートの示方配合も示す(表-2.3)。

表-2.2 モルタル配合 (空気を除いたもの)

単位量(kg/m^3)		
W	C	S
264	586	1474

※各ケースにおける減水剤をはじめとする混和剤添加量は各章に記載

表-2.3 コンクリート配合 (空気を除いたもの)

単位量(kg/m^3)			
W	C	S	G
185	410	1032	810

※各ケースにおける減水剤をはじめとする混和剤添加量は各章に記載

2.3 練混ぜ手順

モルタルの練混ぜには、JIS R5201 に規定されたモルタルミキサを用いた（図-2.1）。練混ぜ速度は低速（自転：毎分 140 ± 5 回転，公転：毎分 62 ± 5 回転）で，1 バッチあたりの練混ぜ量は 1.8L（空気を除く）とした。コンクリートの練り混ぜには二軸強制練りミキサを使用した（図-2.2）。1 バッチあたりの練混ぜ量は 40L（空気を除く）とした。



図-2.1 モルタルミキサ



図-2.2 コンクリートミキサ

次に練り混ぜ手順選定のための予備実験として、練ったコンクリートから直接採取したモルタルの性状と、モルタル試験で得た各練り混ぜ方法のモルタルの性状を同一配合のもので比較を行った（図-2.3）。その結果コンクリートから採取したモルタルは、水を一度に投入する一括練りのモルタルよりも、二度に分けて投入する分割練りのモルタルの性状に近かった。これより、コンクリート中のモルタルを再現するには分割練りが適切と分かった。以上から、本研究のモルタル試験においては分割練りを採用する。各配合に対する練り混ぜ手順を示す（図-2.4）。練混ぜ時間は、1次練り60秒，2次練り180秒としたが，空気を連行する炭酸水練混ぜの配合に限り、1次練り時間を180秒，2次練り時間を60秒とした。これは元々気体を含む炭酸水では必要以上に空気が入ってしまうため、既往研究⁹⁾より空気量の調節が可能と報告されている1次練りの時間を増やした。練混ぜは，粉体材料の偏りを無くすために30秒間空練りをしてから行った。練り混ぜ終了後は10分間静置し，時間経過後に再度5秒間練混ぜをしてから各試験を行った。

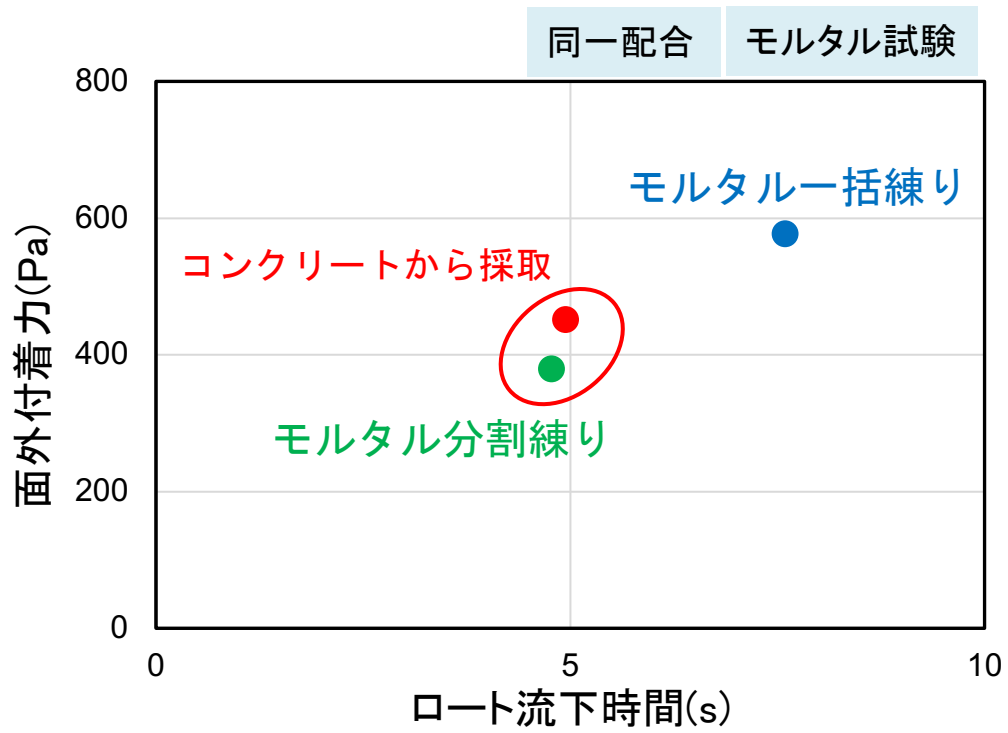


図-2.3 ロート流下時間と付着力の関係

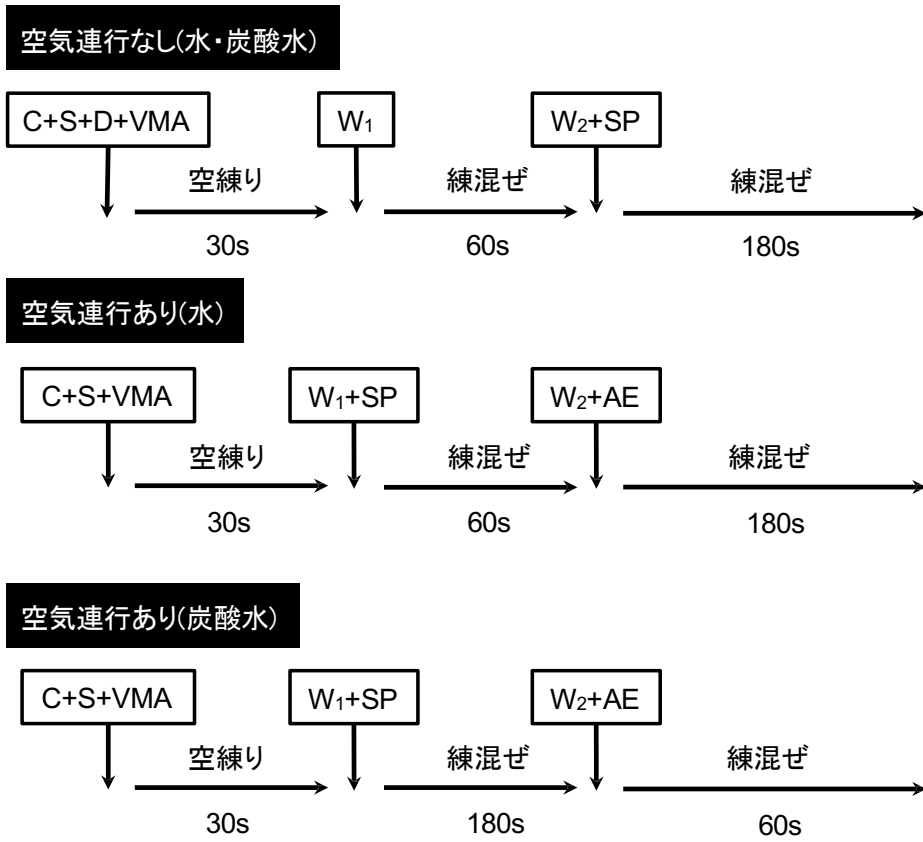


図-2.4 練混ぜ手順

2.4 フレッシュモルタルの試験方法

(1) モルタルフロー試験

モルタルの軟度の測定は、JIS R 5201 に基づきモルタルフロー試験により無振動で行った（図-2.5）。この試験結果はフレッシュコンクリートのスランプフロー値と高い相関がある。そのため、自己充填コンクリートの性能を簡易に予測する方法として用いられている。

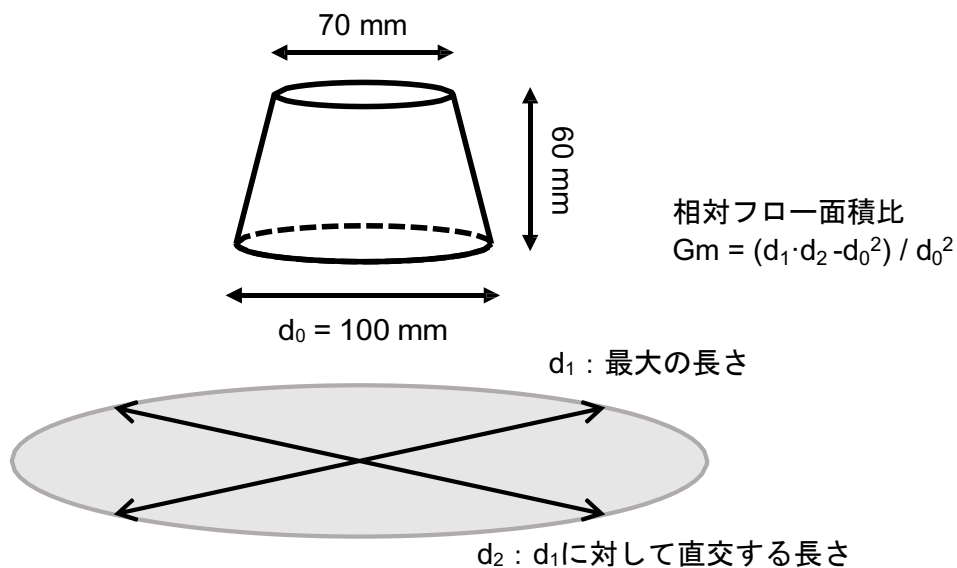


図-2.5 モルタルフロー試験

(2) モルタルロート試験

モルタルロート試験は、粉体や細骨材粒子どうしの接触摩擦の程度や壁面との摩擦の程度により影響を受けるモルタルの流動性(粘性)を定量化する試験である。モルタルの粘性の指標として、モルタルロート試験の流下時間から算出される相対ロート速度比 Rm が用いられる（図-2.6）。

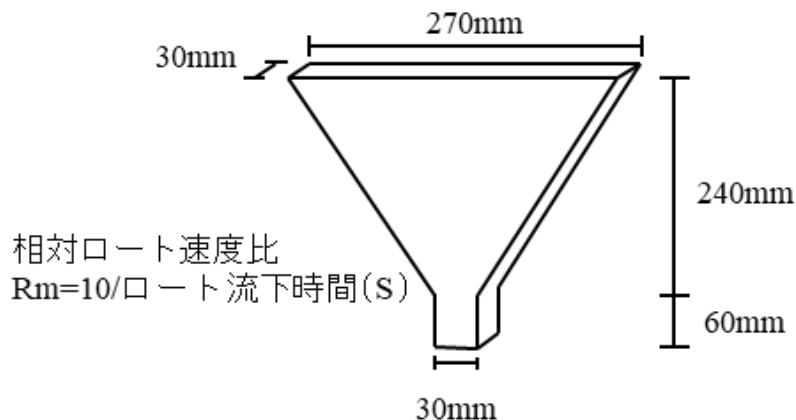


図-2.6 モルタル用ロート試験

(3) 空気量試験

フレッシュモルタル中の空気量は 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）」に準じて測定した。

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

ただし、

T：空気を全く含まない場合のコンクリートまたはモルタルの単位容積質量(kg/m³)

M：コンクリートの単位容積質量(kg/m³)

(4) 粘度の測定

フレッシュモルタルの粘度の測定には回転粘度計を使用した。回転粘度計は、回転するローターに対する試料のせん断変形抵抗性を測定することで、液体の粘性を簡易的に評価することができる（図-2.7）。本研究では、TVB25 形粘度計（東機産業製）を使用した（図-2.8）。低回転速度でローターとモルタルを十分に密着させてから、高回転速度に上昇させ、安定した 100 秒後の粘度値を粘度とした（図-2.9）。本研究ではローターは H4 を使用し、測定レンジは U とし、マニュアルモードで測定を行った。回転粘度計を用いて、低回転速度 1.0 rpm で 300 秒間ローターにモルタルを付着した後、高回転速度 20 rpm, 50 rpm または 100 rpm（最高速度）に上昇させ、100 秒間測定したときの回転速度と粘度との関係を示す（図-2.10）。本研究では回転速度を、(5)と同様の 100 rpm（138.6 mm/s）に統一した。測定誤差を減らすため、容量 500 mL のガラスビーカーを用いて測定試料のモルタル投入量を 450 mL に固定した。

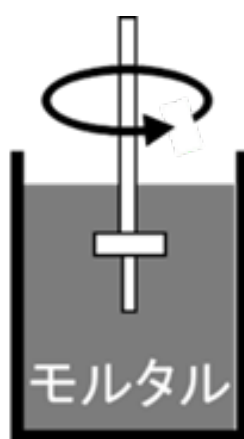


図-2.7 回転粘度計による粘度測定



図-2.8 TVB25 形粘度計 (東機産業製)

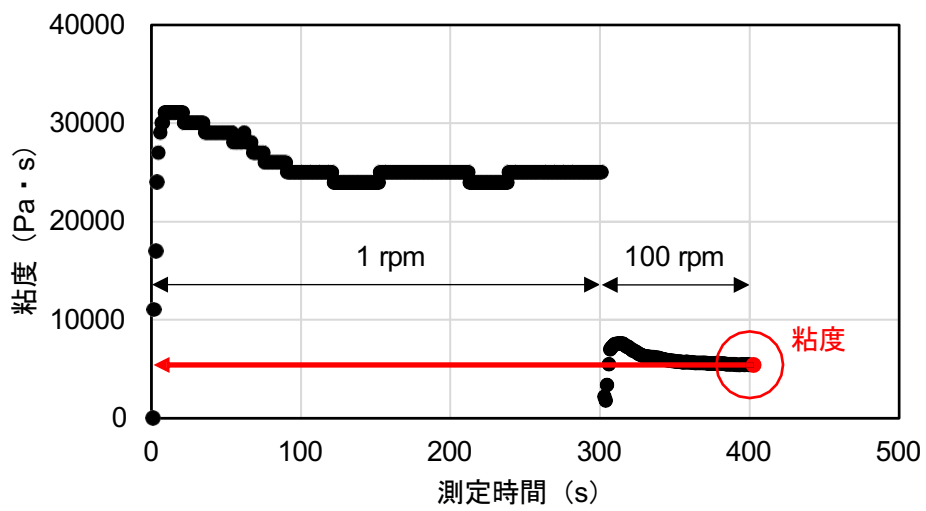


図-2.9 W/C 35%の粘度の測定結果

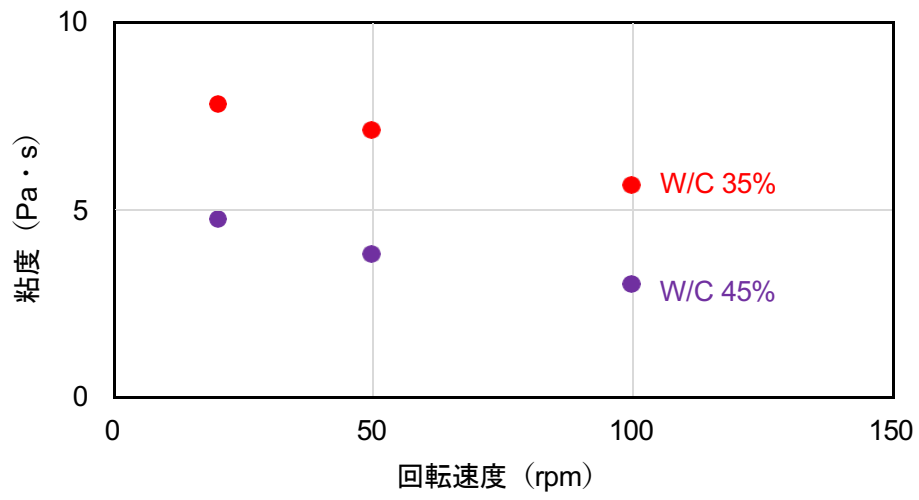


図-2.10 回転速度と粘度の関係

(5) 面内付着力の測定

フレッシュモルタルの面内付着力の測定には、粘度の測定に用いたのと同じ回転粘度計を使用した。回転粘度計は、粘度値にずり速度を乗ずることですり応力を算出する。佐藤はこの仕組みを利用し、粘度の測定と同様に、低回転速度でローターとモルタルを十分に密着させたうえで、高回転速度に上昇させることで、モルタルとローターを剥離させる剥離試験法を構築した⁴⁾。このときの最大のずり応力を面内付着力とした(図-2.11)。粘度の測定と同様に、測定試料の量は 450 mL とし、ローターは H4 を使用し、測定レンジは U とし、マニュアルモードで測定を行った。回転粘度計を用いて、低回転速度 1.0 rpm で 300 秒間ローターにモルタルを付着した後、高回転速度 20 rpm, 50 rpm または 100 rpm (最高速度) に上昇させ、100 秒間測定したときの回転速度と面内付着力の関係を示す(図-2.12)。回転速度による、面内付着力の逆転は無いものと判断した。本研究では、回転速度を、付着力の差が顕著に表れる 100 rpm (138.6 mm/s) に統一した。

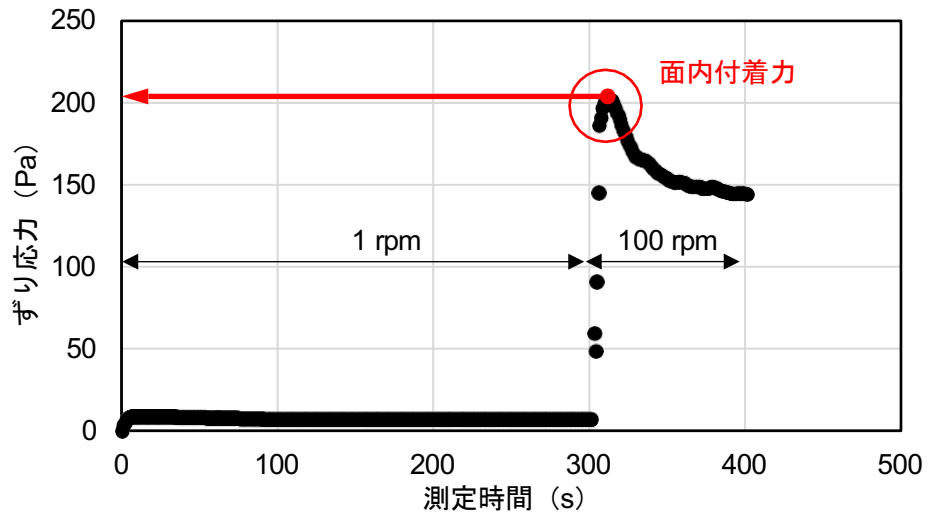


図-2.11 W/C 35%の面内付着力の測定結果

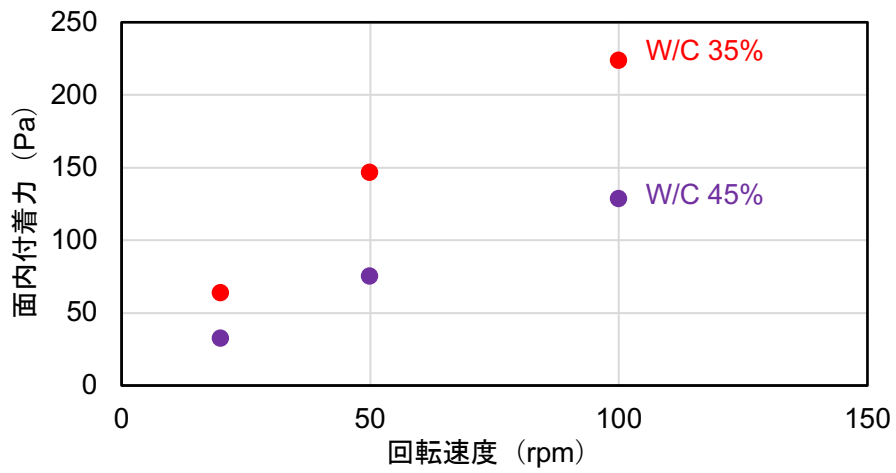


図-2.12 回転速度と面内付着力の関係

(6) 面外付着力の測定

面外付着力の測定には、TA.XT plus C テクスチャーアナライザー（英弘精機製）を使用した（図-2.13）。テクスチャーアナライザーは、荷重を測定するセンサー（ロードセル）に治具（図-2.14）を取り付け、その治具が試料に押し込まれたり、試料から引き抜かれたりする際の荷重を測定することにより、その物性を定量化するものである（図-2.15）。

本研究では、治具をフレッシュモルタルに押し付けることで治具とモルタルを付着させたうえで、治具を引き上げることでモルタルと治具の間を剥離させ（図-2.16）、面外方向の剥離強度を測定し、最大の剥離強度を面外付着力とした（図-2.17）。粘度、面内付着力の測定と同様に、測定試料の量は 450 mL とした。また、キャリブレーション（分銅 2 kg を乗せ、荷重のチェックを行った後、測定位置のキャリブレーションを行う）を行い、測定にうつった。測定前には念入りに治具の水分を十分に拭き取った。テクスチャーアナライザーを用いて引上げ速度 5 mm/s、10 mm/s、20 mm/s または 40 mm/s（最高速度）における水セメント比 35% または 45% のフレッシュモルタルの面外付着力を測定した（図-2.18）。引上げ速度が速いほど剥離強度は増加することを確認した。引上げ速度による面外付着力の逆転は無いものと判断した。本研究では、引上げ速度を、付着力の差が顕著に表れる 40 mm/s に統一した。



図-2.13 TA.XT plus C テクスチャーアナライザー（英弘精機製）



図-2.14 試料に付着・剥離させる治具

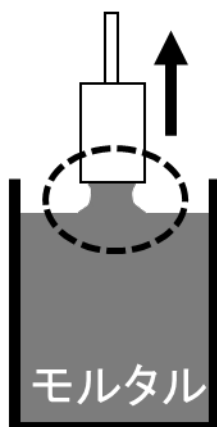


図-2.15 テクスチャーアナライザーによる面外付着力測定



図-2.16 測定中のモルタルの様子
(モルタル試料から抜け出た治具とモルタルが剥離する瞬間)

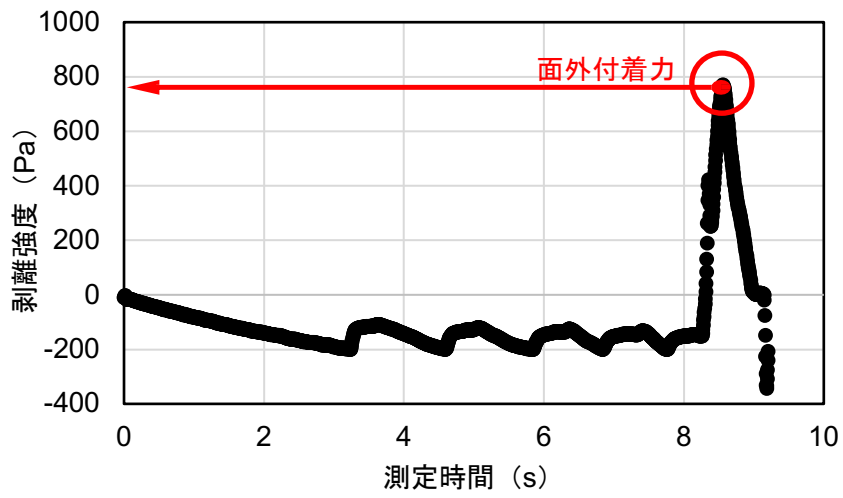


図-2.17 W/C 35%の面外付着力の測定結果

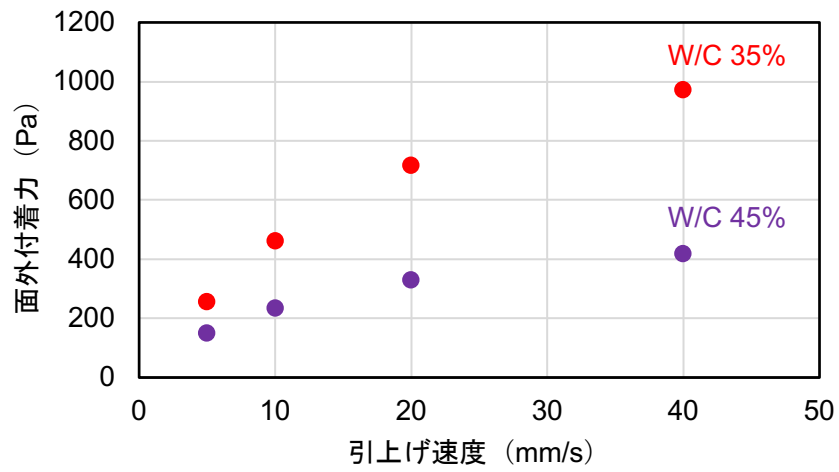


図-2.18 引上げ速度と面外付着力の関係

(7) せん断強度の測定

フレッシュコンクリートの自己充填性能，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（図-2.19）。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、つまり内部摩擦を高め，間隙手前でコンクリートが閉塞する原因となる。

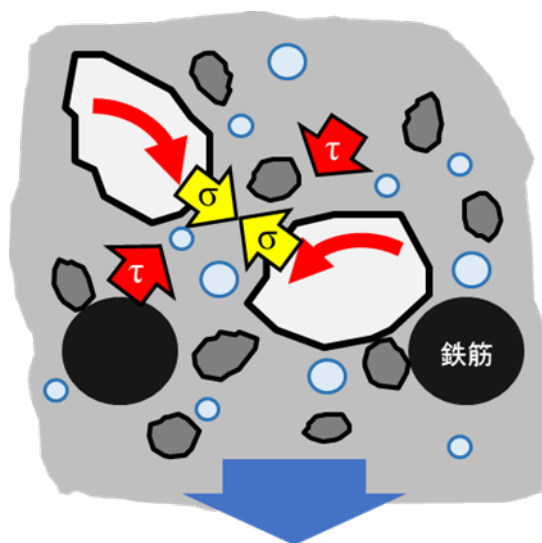


図-2.19 フレッシュコンクリートの間隙通過イメージ

せん断応力の測定のため、一面せん断試験機を使用した(図-2.20)。直径 60 mm, 高さ 30 mm, 容積約 158 mL の上下に分かれ, 上面をくり抜いた円筒容器内にフレッシュモルタル試料を投入した(投入量: 約 85 mL)。鉛直荷重を載荷した状態で上部のみを水平荷重速度 0.30 mm/sec で水平移動させることで, 試料内部に生じたせん断応力を測定する(図-2.21)。土質力学における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。本試験機は土質材料用の試験機を応用したものであるため, その基準と同様に水平変位 8 mm まで載荷した。本研究では, 非排水条件で試験を行った。既往研究より, 鉛直外力が無い場合(直応力 0 kPa)ではせん断強度がほとんどゼロに近い値であったこと¹⁾, フレッシュモルタル中に生じる直応力は 300 kPa程度以下と推定されること⁶⁾, そして200 kPaは微細気泡が合泡しない程度の上限の直応力であった²⁾ことから, 本研究での直応力(鉛直荷重)を200 kPaに設定した。

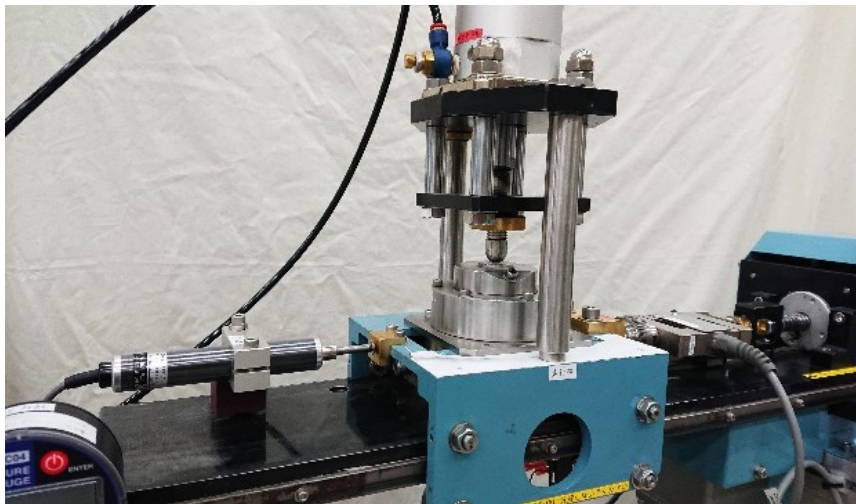


図-2.20 一面せん断試験機

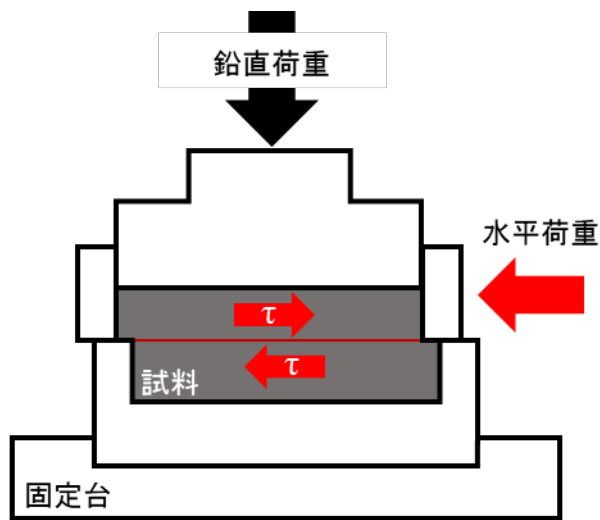


図-2.21 一面せん断試験機の測定イメージ

一面せん断試験機を用いて測定した水平方向の変位とモルタル中のせん断力との関係の一例を示す(図-2.22)。本研究では、一面せん断試験での測定データにおいて、動き始めて最初に得られたせん断力のピーク値(最大静止摩擦力)から容器自体の摩擦力(試料無しでの測定値)を引き、試料のせん断面積で除した値を「せん断強度」と定義し、内部摩擦の指標とした。

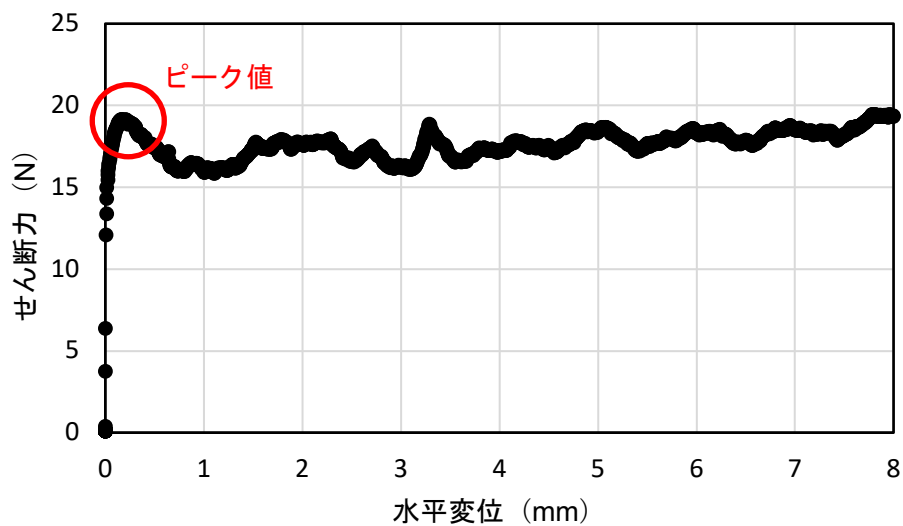


図-2.22 水平方向の変位とせん断力の関係

第3章 炭酸水練混ぜによる粘性の向上と気泡の連行

これまで、炭酸水練混ぜによるフレッシュコンクリートやモルタルの分割練りや空気の連行は行われていなかった。本研究では、炭酸水による分割練混ぜと、そこに微細気泡を連行することによる、練混ぜ直後のフレッシュモルタルの粘性（粘度、面内および面外付着力）に与える影響を調べた（表-3.1, 3.2、図-3.1~3.4）。各測定とも3回行い、平均値と誤差棒を記した。練混ぜ水の種類（水道水か、または炭酸水か）と空気連行の有無（AE剤添加か、または消泡剤添加か）の、合計4パターン間での比較を行った。なお、自己充填コンクリートの簡易配合設計のための道具として使用されているモルタル用ロータ試験の結果が粘性の指標として用いられてきたが、内部摩擦が変化し得る本研究では、ロータ試験の結果が大きく影響を受けるため、あくまでも参考として測定結果を示すにとどめ、粘性の指標とはしない。

まず、練混ぜ水の種類による比較を行った。各グラフにおける同色の棒の高さの比較である。炭酸水練混ぜにより粘性3指標（粘度、面内および面外付着力）の全てが向上した。炭酸水の分割練りによる粘性向上効果を確認できた。

次に、空気連行の有無による比較を行った。各グラフにおける、隣接する棒の高さの比較である。水道水練混ぜでは空気連行により全ての粘性指標が同程度を維持または向上した。一方、炭酸水練混ぜでは、空気連行により粘性の平均値は若干低下したが、標準偏差 $\pm 1\sigma$ の誤差棒の範囲には収まっていた。

以上、炭酸水練混ぜは、モルタルの分割練りにおいても粘性向上効果があるとともに、気泡を連行しても粘性に対して悪影響がないことと確認した。

表-3.1 混和剤添加量 (VMA添加量はモルタル中に換算した値)

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g/m ³)	AE 剤添加量 (C×%)	高性能AE 減水剤 添加量(C×%)
1	水道水	143	71	-	1.50
2	水道水	143	-	0.005	1.60
3	炭酸水	143	71	-	1.85
4	炭酸水	143	-	0.005	2.12

表-3.2 各配合における測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	粘度 (Pa・s)	面内付着力 (Pa)	面外付着力 (Pa)	空気量(%)
1	246.0	4.77	2.87	114.4	379.5	-
	240.0	4.66	2.74	108.8	356.8	-
	244.0	4.5	2.56	105.9	354.7	-
2	254.0	3.6	2.93	115.2	430.3	9.06
	256.0	4.5	2.87	115.0	414.5	8.95
	257.5	3.62	2.69	103.0	380.8	8.77
3	245.0	6.12	3.14	128.4	391.0	-
	253.0	6.28	3.20	133.2	496.9	-
	254.0	6.21	3.04	126.1	443.2	-
4	258.0	4.52	2.97	117.1	438.6	7.89
	245.0	4.87	3.29	128.4	426.0	7.82
	248.0	4.56	3.10	124.3	443.1	8.17

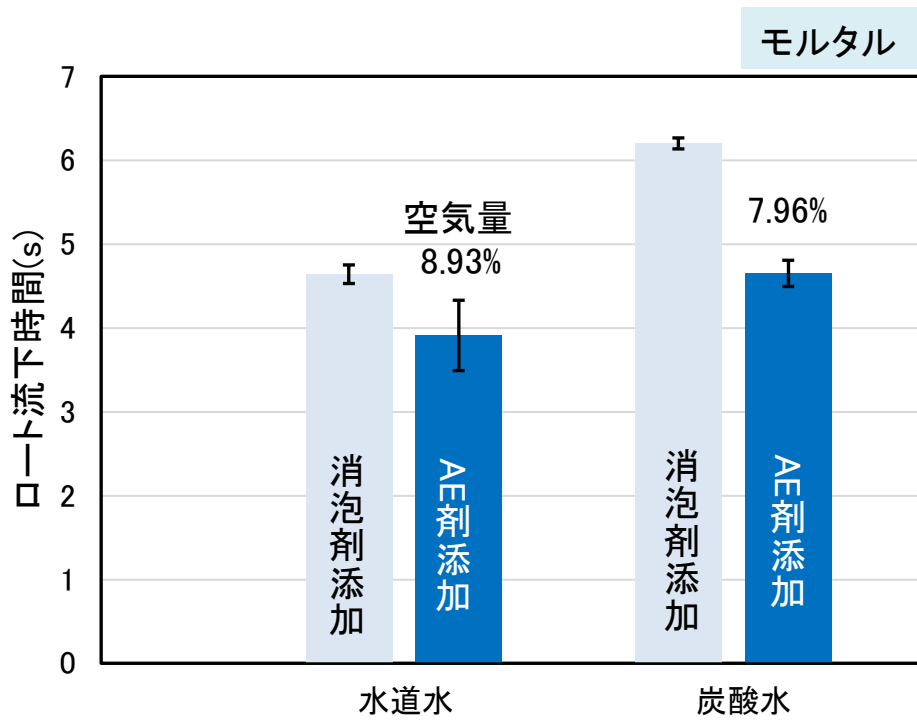


図-3.1 ロート流下時間の比較

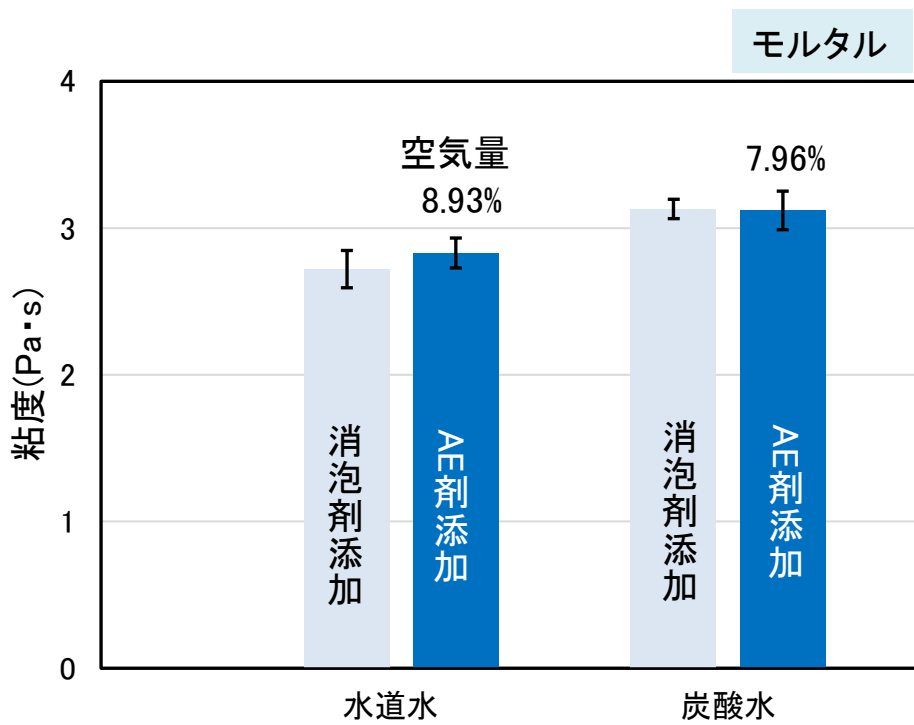


図-3.2 粘度の比較 (回転速度 100 rpm)

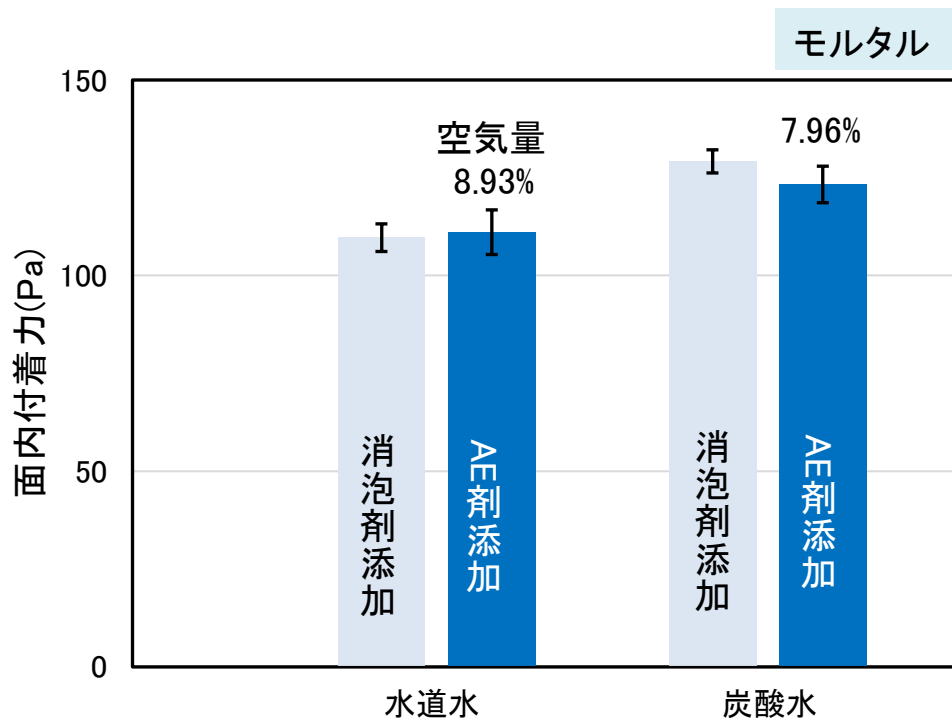


図-3.3 面内付着力の比較 (回転速度 100 rpm)

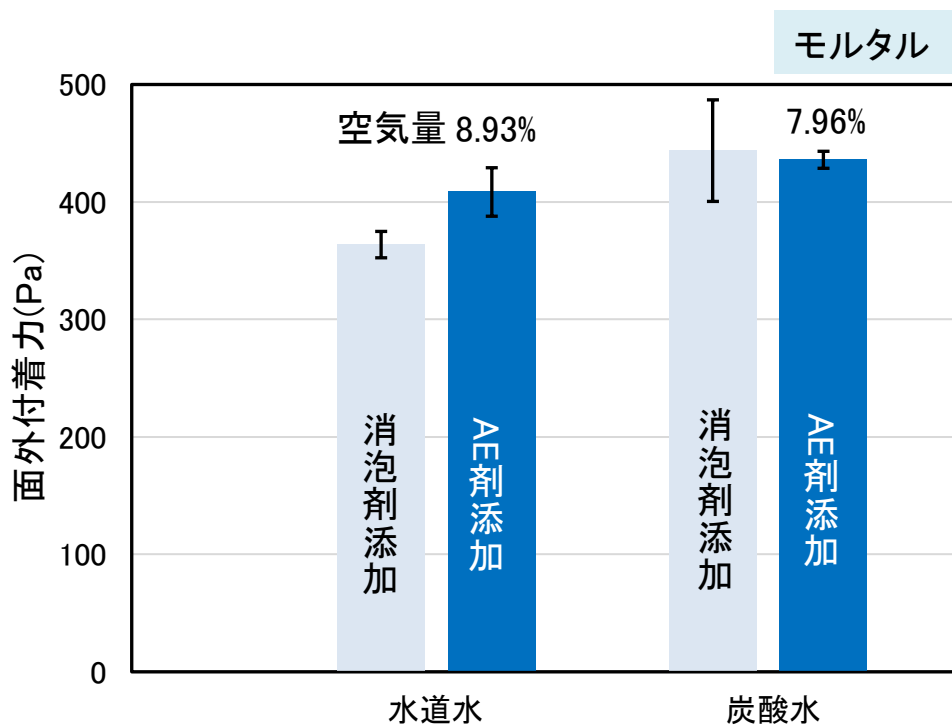


図-3.4 面外付着力の比較 (引上げ速度 40 mm/s)

第4章 炭酸水練混ぜによる連行気泡の微細化

4.1 空気連行剤(AE剤)の有無による違い

まず気泡の連行手段である空気連行剤（以下AE剤と称す）が炭酸水に与える影響を調べるために、AE剤無添加で空気を連行したものと粘性の比較を行った（表-4.1, 4.2、図-4.1~4.4）。炭酸水練混ぜにより、AE剤無添加でもある程度の量の空気を連行することが可能である一方、AE剤添加のものと比較して粘性が全体的に低下してしまった。原因として、AE剤無添加のため連行した空気の微細気泡割合が低下したことが考えられる。以上から、炭酸水練混ぜはAE剤を用いなくても空気連行自体は可能であるが、高い自己充填性能付与の観点から、従来通りAE剤添加による空気連行方法が適していると言える。

表-4.1 混和剤添加量 (VMA添加量はモルタル中に換算した値)

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g/m ³)	AE 剤添加量 (C×%)	高性能AE 減水剤 添加量(C×%)
1	水道水	143	71	-	1.50
2	水道水	143	-	0.005	1.60
3	炭酸水	143	71	-	1.85
4	炭酸水	143	-	0.005	2.12
5	水道水	143	-	-	1.85
6	炭酸水	143	-	-	2.00

表-4.2 各配合における測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	粘度 (Pa・s)	面内付着力 (Pa)	面外付着力 (Pa)	空気量(%)
1	246.0	4.77	2.87	114.4	379.5	-
	240.0	4.66	2.74	108.8	356.8	-
	244.0	4.50	2.56	105.9	354.7	-
2	254.0	3.60	2.93	115.2	430.3	9.06
	256.0	4.50	2.87	115.0	414.5	8.95
	257.5	3.62	2.69	103.0	380.8	8.77
3	245.0	6.12	3.14	128.4	391.0	-
	253.0	6.28	3.20	133.2	496.9	-
	254.0	6.21	3.04	126.1	443.2	-
4	258.0	4.52	2.97	117.1	438.6	7.89
	245.0	4.87	3.29	128.4	426.0	7.82
	248.0	4.56	3.10	124.3	443.1	8.17
5	249.0	3.98	2.71	106.9	395.3	5.59
	242.0	3.87	2.70	106.7	380.7	4.81
	246.0	3.69	2.72	109.6	360.6	6.27
6	243.0	3.94	3.00	112.6	377.8	6.24
	253.0	4.09	2.54	95.94	373.6	6.91
	257.0	4.12	2.47	95.68	374.2	6.92

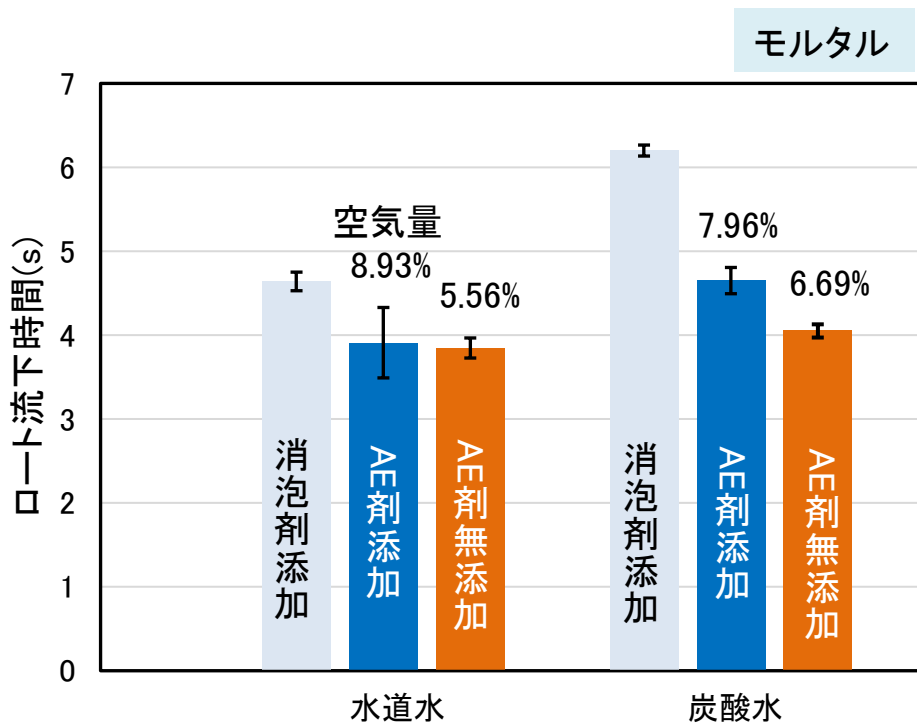


図-4.1 ロート流下時間の比較

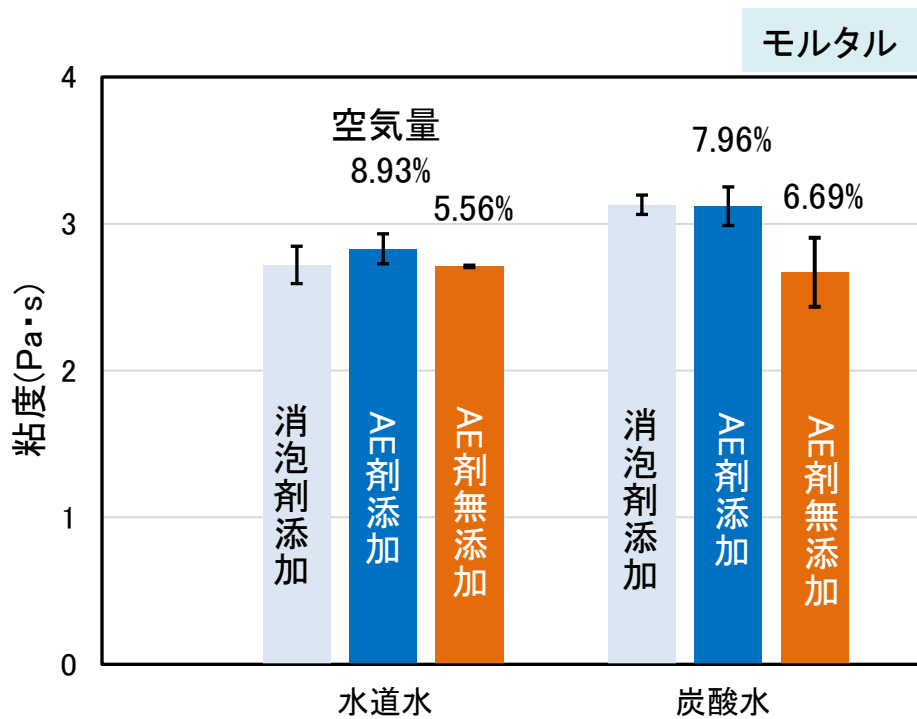


図-4.2 粘度の比較 (回転速度 100 rpm)

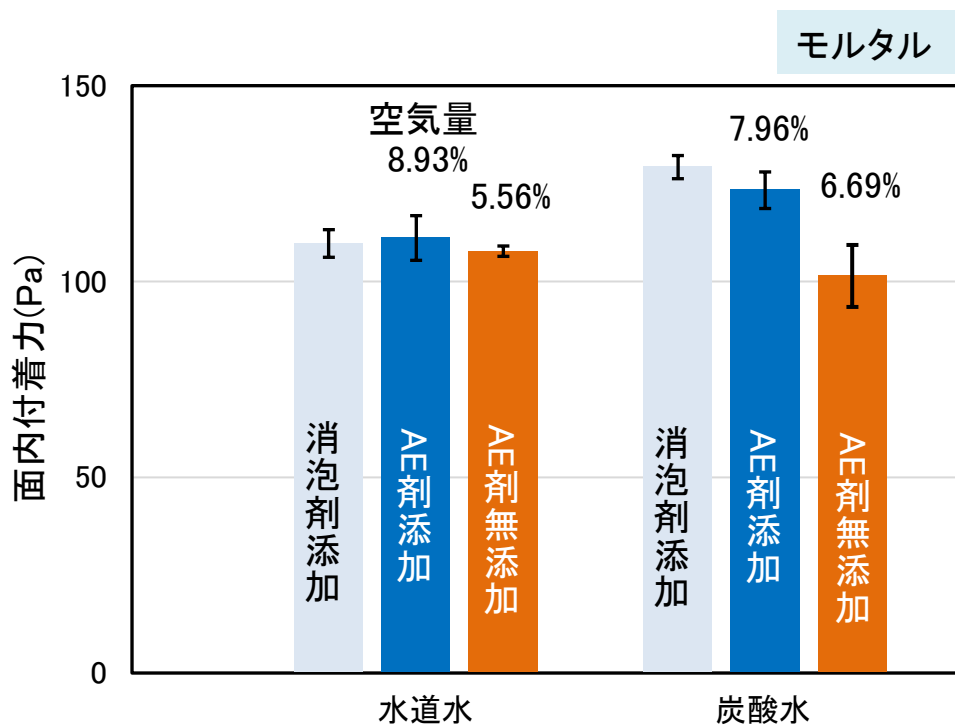


図-4.3 面内付着力の比較 (回転速度 100 rpm)

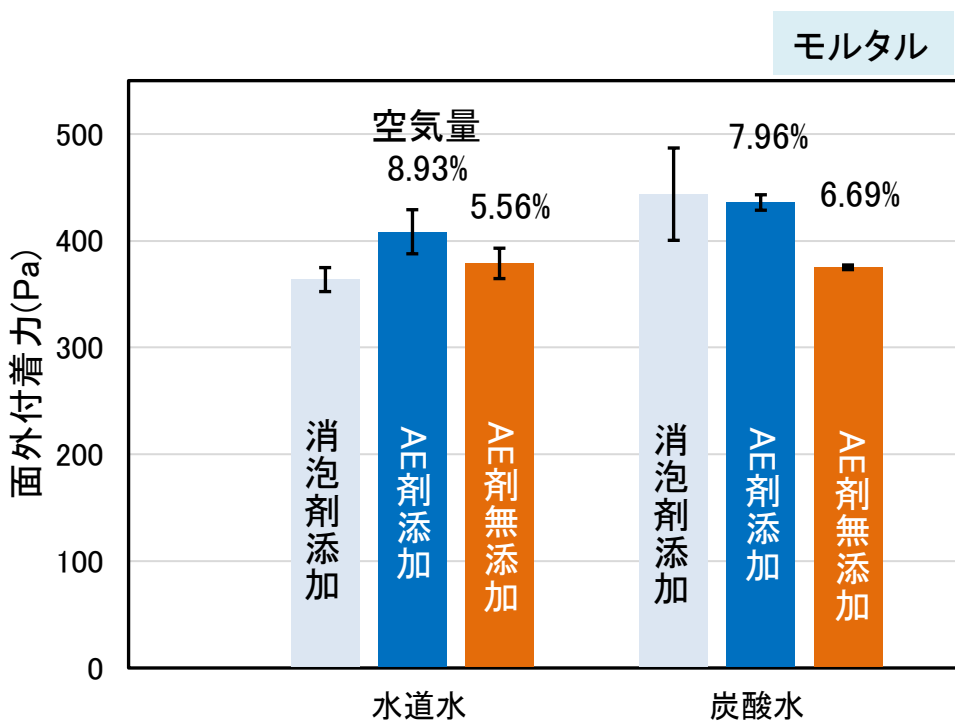


図-4.4 面外付着力の比較 (引上げ速度 40 mm/s)

4.2 炭酸水による連行空気の質向上

次に炭酸水練混ぜが連行する空気の質に及ぼす影響を調べるため、自動空気泡解析装置 (Air Void Analyzer : AVA) により、気泡径分布を測定した (表-4.3) (図-4.5)。この測定器は高粘度溶液中でフレッシュモルタル試料を攪拌し連行気泡を浮上させ、その浮上速度の差を利用してモルタル中に連行された気泡径の分布を測定するものである。フレッシュモルタルでの測定が可能のため、施工性に影響する空気泡を直接測定することが可能な試験方法である。

その結果、水道水と比較して、炭酸水練混ぜは径が500 μm 以下の微細気泡の比率を約10%高めた (図-4.6)。炭酸水による連行空気の質向上の可能性を得たと言える。

表-4.3 混和剤添加量と空気量

No.	VMA 添加量 (g/m^3)	消泡剤添加量 (g/m^3)	AE 剤添加量 ($\text{C}\times\%$)	高性能AE 減水剤添加量 ($\text{C}\times\%$)	空気量($\%$)	微細気泡比率 ($\%$)
2	143	-	0.005	1.60	8.93	76.8
4	143	-	0.005	2.12	7.96	87.8



図-4.5 自動空気泡解析装置 (Air Void Analyzer : AVA)

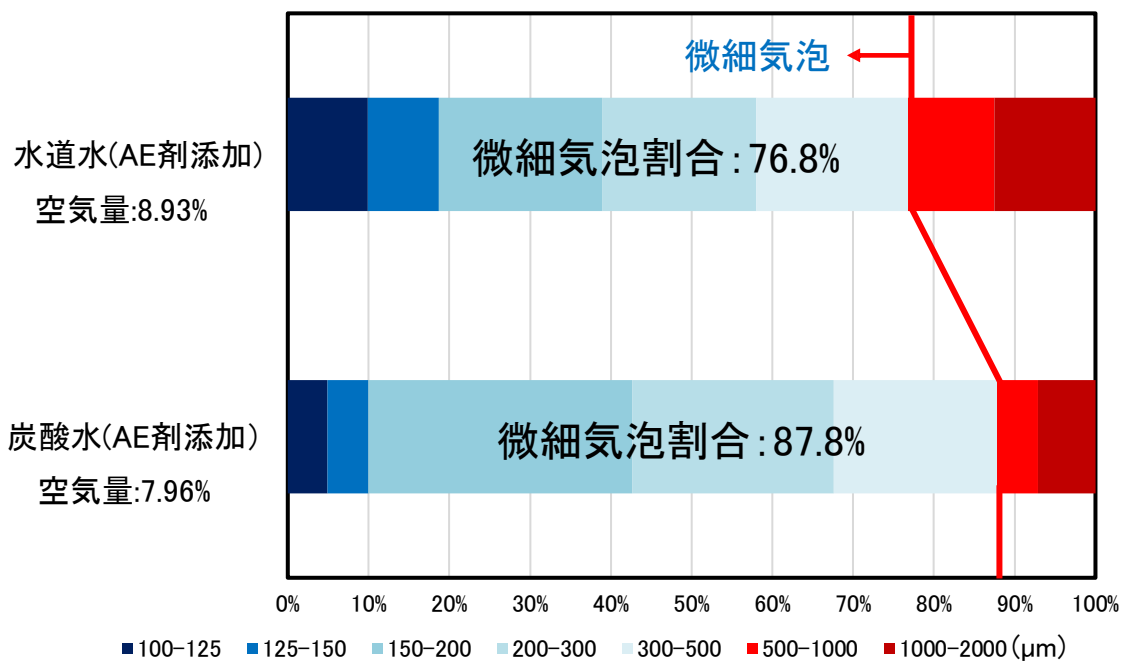


図-4.6 各気泡径の比率(炭酸水による効果)

第5章 連行気泡が炭酸水練混ぜによる内部摩擦増加を緩和する効果

5.1 VMA添加量による粘性と内部摩擦の関係

増粘剤（VMA）は粘性を向上させる効果があるが、それに伴い流体のせん断変形の際の抵抗力も向上させる可能性がある。よって、VMAの添加量には最適な値が存在すると予想した。そこで、添加量選定のために、粘性と内部摩擦の関係を VMA の添加量で比較した（表-5.1, 5.2）。内部摩擦の指標であるせん断強度の測定は、一面せん断試験機で行った（図-5.1, 5.2）。0~200 g/m³ の添加量でそれぞれ比較を行った結果、粗骨材容積比0.3のコンクリート中に100 g/m³ に相当する量（モルタル中では0.7で除した143 g/m³）を添加したものはせん断強度を増加させずに付着力のみを向上させた（図-5.3）。一方で、その2倍となる200 g/m³（モルタル中では0.7で除した286 g/m³）を添加したものは、付着力は向上せず内部摩擦が増加した。これより、VMAには、一定の添加量を上回ると粘性は上がらず、内部摩擦のみ増加させる性質を有している可能性を得た。以上の結果から、本研究におけるVMA添加量は100 g/m³とした。

表-5.1 混和剤添加量(VMA添加量はモルタル中に換算した値)

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g/m ³)	AE 剤添加量 (C×%)	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
7	水道水	0	71	-	1.20
8	水道水	143	71	-	1.60
9	水道水	286	71	-	2.00

表-5.2 各配合における測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	粘度 (Pa・s)	面内付着力 (Pa)	面外付着力 (Pa)	せん断強度 (kPa)
7	246.0	5.20	2.99	101.8	387.4	3.95
8	248.0	7.59	4.62	185.0	576.5	4.09
9	251.0	10.01	5.07	241.3	606.2	6.35

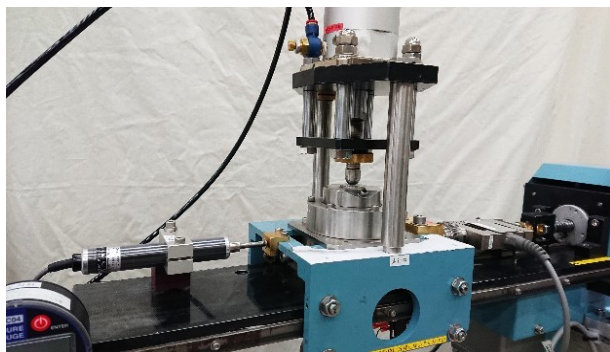


図-5.1 一面せん断試験機

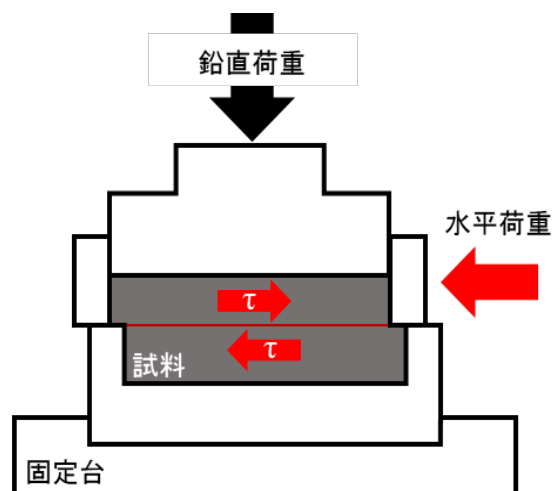


図-5.2 一面せん断試験機の測定イメージ

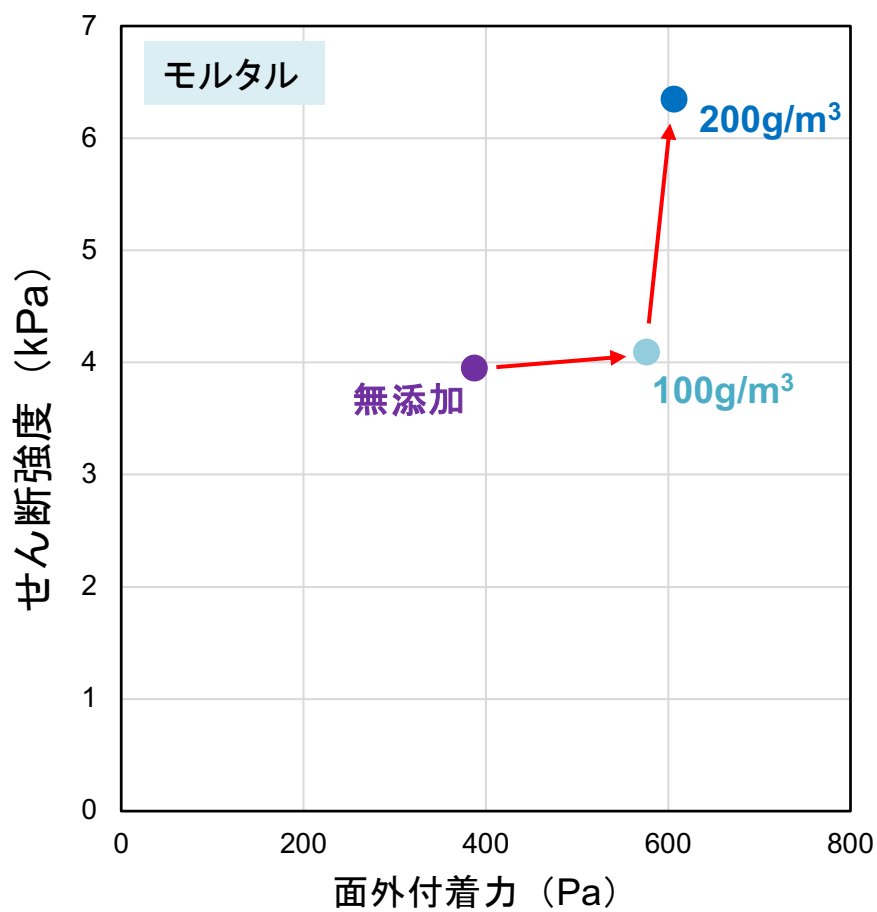


図-5.3 せん断強度と面外付着力の関係 (VMA添加量による違い)

5.2 連行気泡が炭酸水練混ぜの内部摩擦に与える影響

連行気泡が炭酸水練混ぜのフレッシュモルタルの内部摩擦に与える影響を調べた（表-5.3, 5.4、図-5.4）。炭酸水練混ぜのフレッシュモルタルの内部摩擦には空気連行の有無による差が生じなかったが、水道水練混ぜ（消泡剤添加）の値とは同程度であった。既往研究では、気泡連行しない場合にはVMA添加と炭酸水練混ぜの併用では内部摩擦が増加したが、本研究では、気泡の連行により炭酸水練混ぜによる内部摩擦の増加を抑制できたといえる。また、水道水練混ぜと比較すると、せん断強度を増加させずに粘性のみを向上させたと言える。

粘性の指標の一つとして面外付着力を取り上げたものを示す（図-5.5）。この要因として、5.2で述べた炭酸水による連行空気の質向上（微細化）が考えられる。気泡の表面積が大きくなったことにより自由水が拘束され、粘性が向上したものと予想した。

表-5.3 混和剤添加量(VMA添加量はモルタル中に換算した値)

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g/m ³)	AE 剤添加量 (C×%)	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
1	水道水	143	71	-	1.50
2	水道水	143	-	0.005	1.60
3	炭酸水	143	71	-	1.85
4	炭酸水	143	-	0.005	2.12

表-5.4 各配合における測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	粘度 (Pa・s)	面内付着力 (Pa)	面外付着力 (Pa)	せん断強度 (kPa)	空気量(%)
1	246.0	4.77	2.87	114.4	379.5	5.30	-
	240.0	4.66	2.74	108.8	356.8	5.00	-
	244.0	4.50	2.56	105.9	354.7	4.51	-
2	254.0	3.60	2.93	115.2	430.3	4.47	9.06
	256.0	4.50	2.87	115.0	414.5	4.59	8.95
	257.5	3.62	2.69	103.0	380.8	4.31	8.77
3	245.0	6.12	3.14	128.4	391.0	4.83	-
	253.0	6.28	3.20	133.2	496.9	4.60	-
	254.0	6.21	3.04	126.1	443.2	5.35	-
4	258.0	4.52	2.97	117.1	438.6	4.79	7.89
	245.0	4.87	3.29	128.4	426.0	4.53	7.82
	248.0	4.56	3.10	124.3	443.1	5.44	8.17

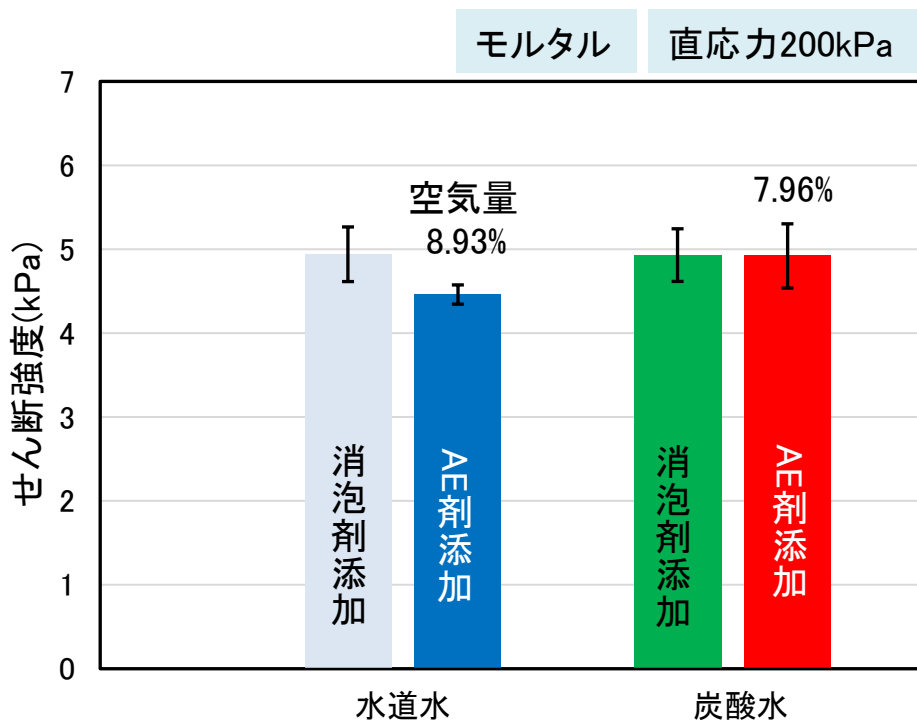


図-5.4 せん断強度の比較

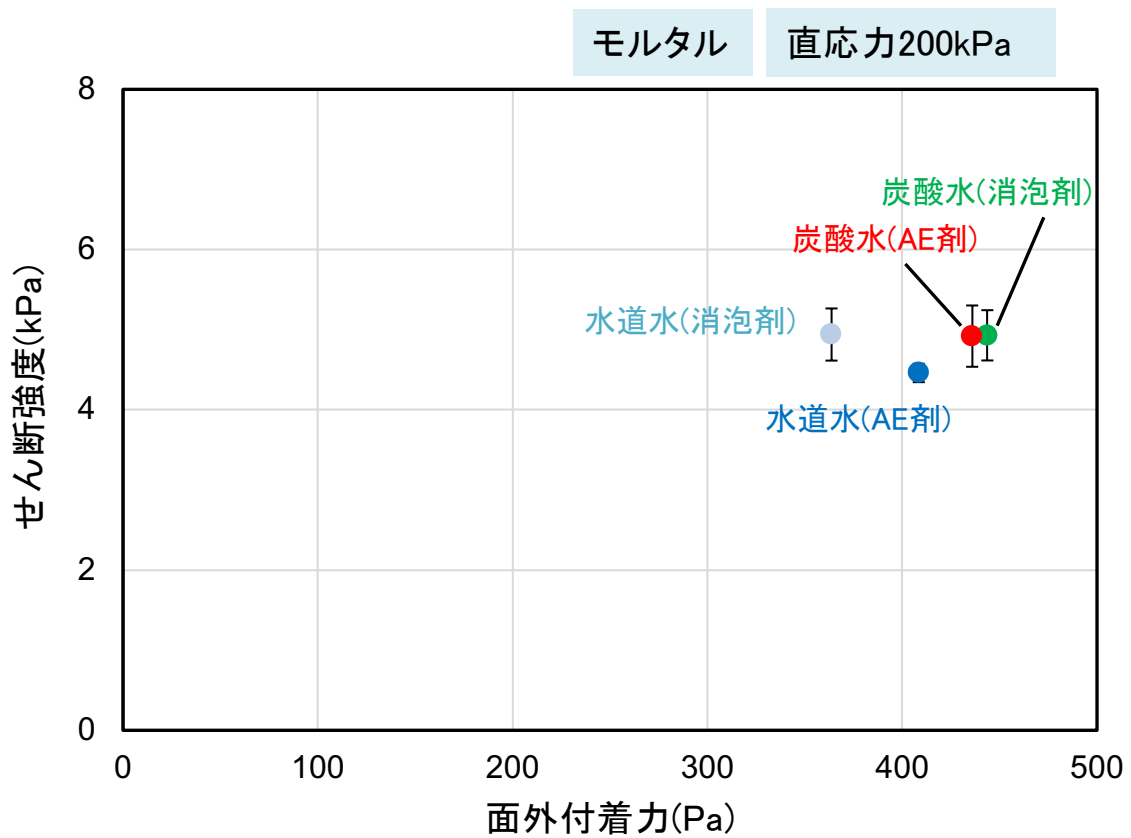


図-5.5 せん断強度と面外付着力の関係

第6章 コンクリート練混ぜによる検証実験

6.1 炭酸水練混ぜによる自己充填性能の向上と課題

ここまでのモルタル試験の結果から、炭酸水による練混ぜとそれによる微細気泡連行の併用は、フレッシュコンクリートにより高い自己充填性能を付与できる可能性を得た。そこで、コンクリートでの検証実験を行った。コンクリート配合のモルタル相は本研究のモルタルと同一材料・同一配合とした(表-6.1)。粗骨材(G)は石灰砕石を使用し、空気を含まない場合で300 L/m³とした。フレッシュコンクリートの自己充填性能は、JSCE F 511「高流動コンクリートの充填試験法」に準じて間隙通過性試験(鉄筋5本=障害物R₁のボックス試験)を行った(表-6.2, 6.3)。

その結果、炭酸水練混ぜにより、より少ない空気量で、それをを用いない場合よりも高い自己充填性能レベルを達成できた(図-6.1)。それらのコンクリートから採取したモルタルに、前章でのモルタルの各粘性とせん断強度の関係を併せて示した(図-6.2~6.4)。コンクリートから採取したモルタルにおいても、全ての粘性が向上した一方で、炭酸水練混ぜによるせん断強度の増加量が大きくなったが、それよりも面外付着力の増加率はもっと高かった。空気量が大きくなったことから、モルタルよりも高い効率のコンクリートの練混ぜにより、炭酸水の作用が一層発揮されたことが要因であると考察したが、特に粘性増加の方が大きかったことにより、せん断強度の増加分を補ってさらにコンクリートの自己充填性能が高くなった可能性がある。

以上より、炭酸水練混ぜによる自己充填性能の向上効果の可能性を得た。しかし、この結果では、必要以上の空気が連行されてしまっている。本技術の実用化に向けて、空気量を適正な値に調整する方法を構築することが課題である。

表-6.1 混和剤添加量(VMA添加量はコンクリート中に換算した値)

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g/m ³)	AE 剤添加量 (C×%)	高性能AE 減水剤 添加量(C×%)
10	水道水	100	-	0.005	1.60
11	炭酸水	100	-	0.005	2.10

表-6.2 コンクリート試験結果

No.	練混ぜ水	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)
10	水道水	670.0	7.37	250	14.3	21.6
11	炭酸水	680.0	9.78	335	11.1	21.2

表-6.3 コンクリートから採取したモルタルの測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	粘度 (Pa・s)	面内付着力 (Pa)	面外付着力 (Pa)	せん断強度 (kPa)
10	238.0	10.29	4.39	141.0	485.4	3.99
11	267.0	11.33	4.67	157.3	692.8	5.57

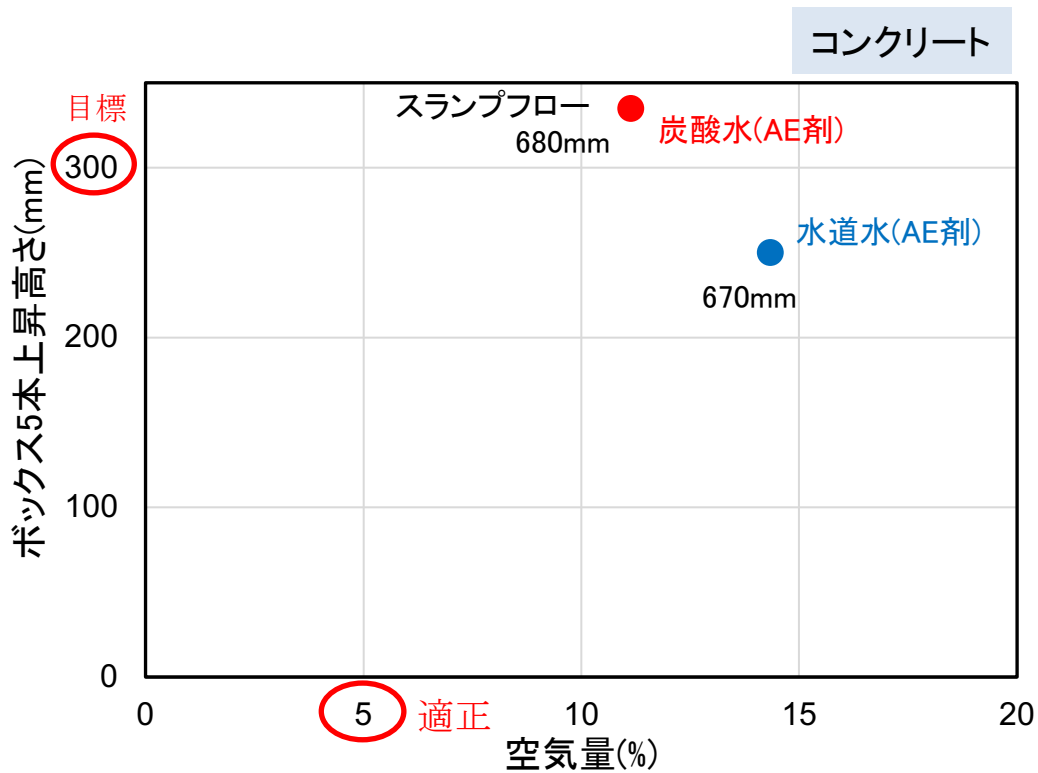


図-6.1 ボックス5本上昇高さ空気量の関係

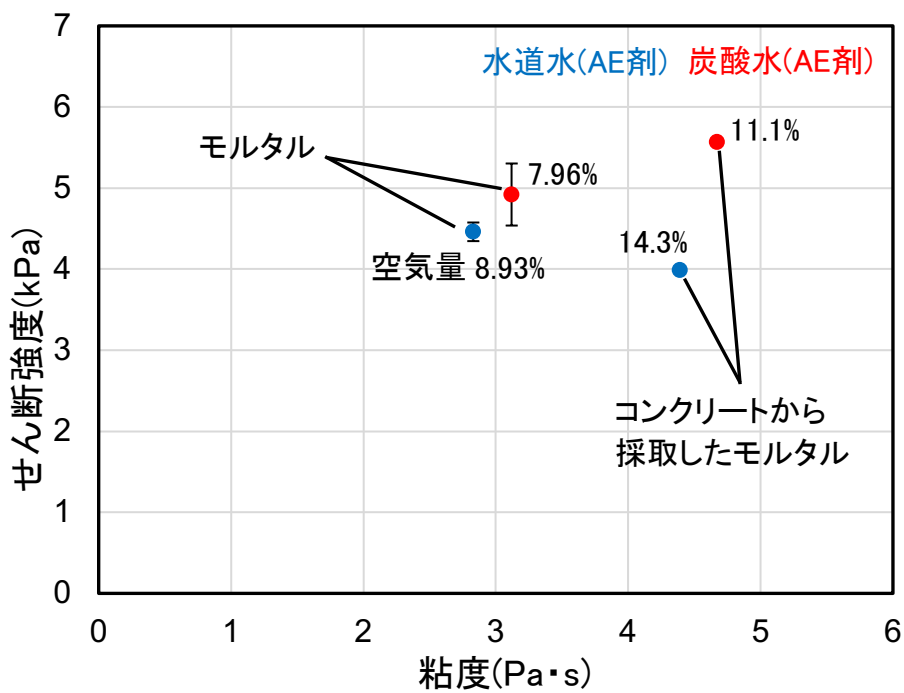


図-6.2 せん断強度と粘度の関係

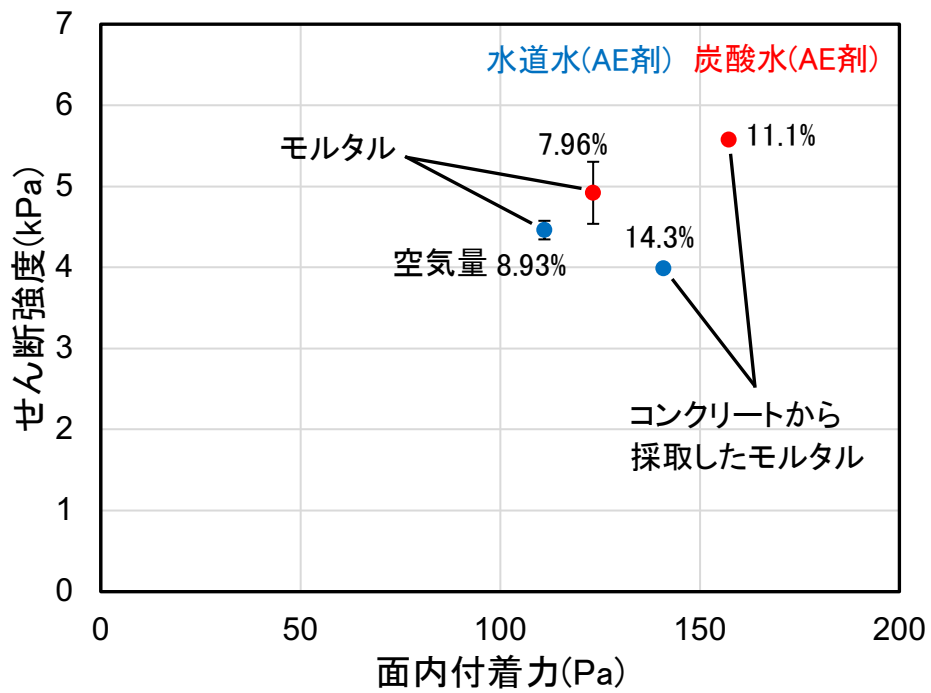


図-6.3 せん断強度と面内付着力の関係

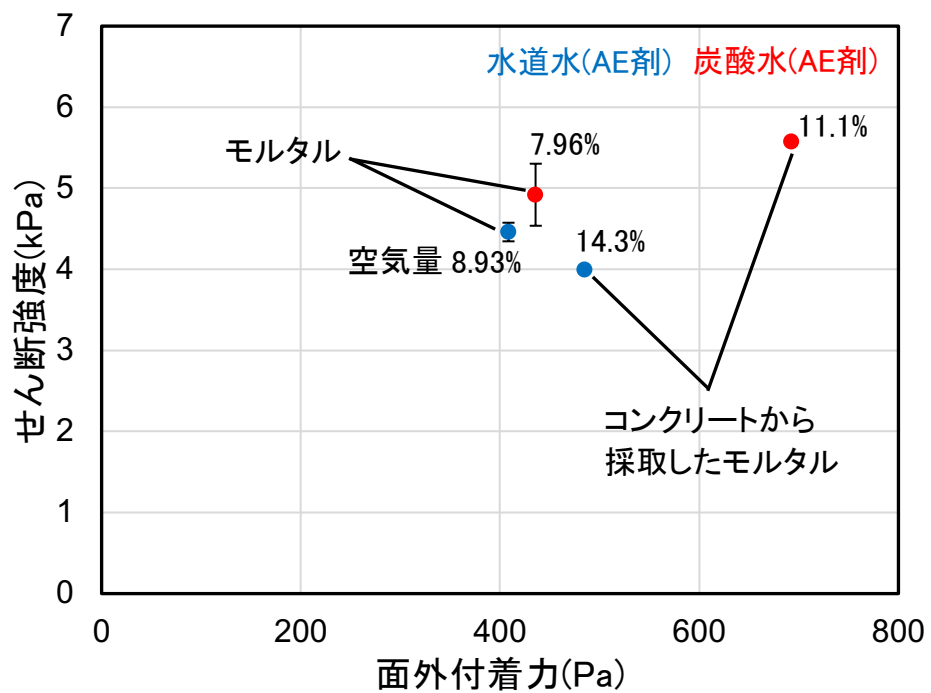


図-6.4 せん断強度と面外付着力の関係

6.2 消泡剤添加による空気量調整とその悪影響

コンクリート中に必要以上に空気を連行してしまった問題点が明らかになったことから、空気量を適切な値に調整することを目的に、空気量調整手段の一つである消泡剤を炭酸水練混ぜのコンクリートに添加して自己充填性能の比較を行った（表-6.4~6.6、図-6.5）。その結果、目標である空気量の調整は達成できたが、同時に自己充填性能も低下してしまった。

これらのコンクリートから採取したモルタルで試験をし、粘性の比較を行った結果、消泡剤を添加すると全ての粘性が低下すると同時に、せん断強度も増加した（図-6.6~6.8）。特に面外付着力が著しく低下していることから、自己充填性能は面外付着力に左右される可能性があると言える。これより、消泡剤の添加は、必要以上の空気量を調整する効果以上に、自己充填性能に対して悪影響を与えている可能性があると言える。

表-6.4 混和剤添加量 (VMA添加量はコンクリート中に換算した値)

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g/m ³)	AE 剤添加量 (C×%)	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
10	水道水	100	-	0.005	1.60
11	炭酸水	100	-	0.005	2.10
12	炭酸水	100	5	0.005	2.10

表-6.5 コンクリート試験結果

No.	練り混ぜ水	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)
10	水道水	670.0	7.37	250	14.3	21.6
11	炭酸水	680.0	9.78	335	11.1	21.2
12	炭酸水 (消泡剤)	673.0	8.54	220	6.44	20.4

表-6.6 コンクリートから採取したモルタルの測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	粘度 (Pa・s)	面内付着力 (Pa)	面外付着力 (Pa)	せん断強度 (kPa)
10	238.0	10.29	4.39	141.0	485.4	3.99
11	267.0	11.33	4.67	157.3	692.8	5.57
12	278.0	8.54	4.18	152.76	446.6	5.88

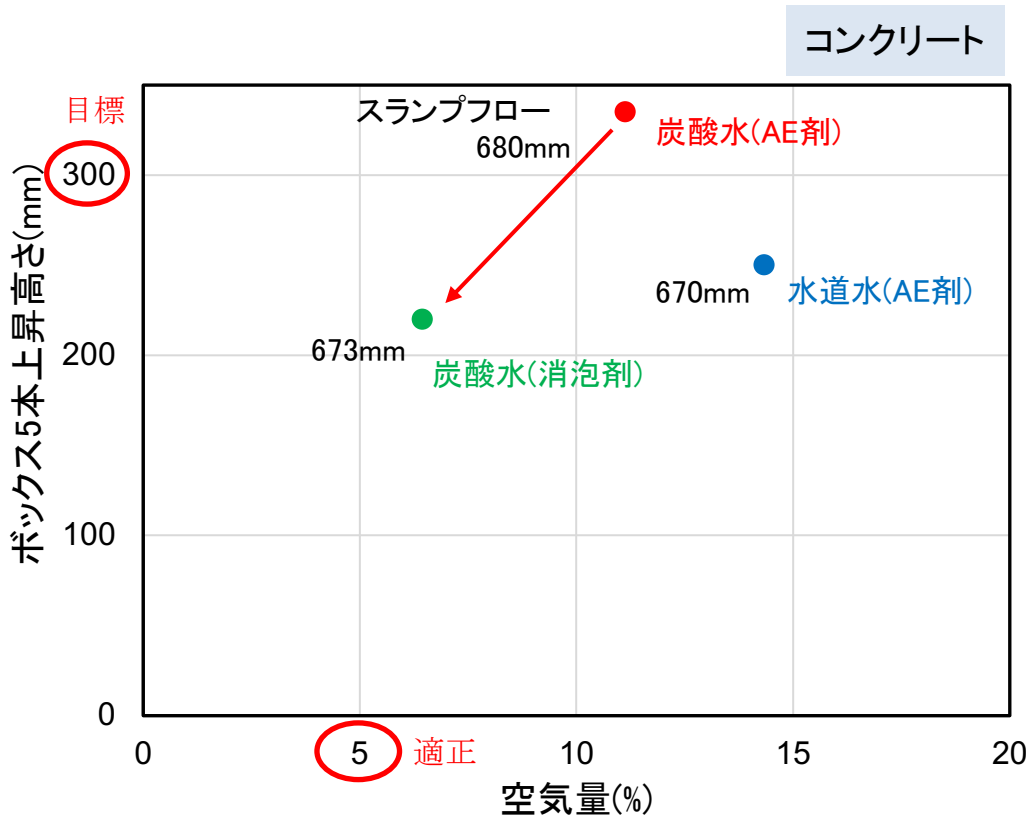


図-6.5 ボックス上昇高さと空気量の関係

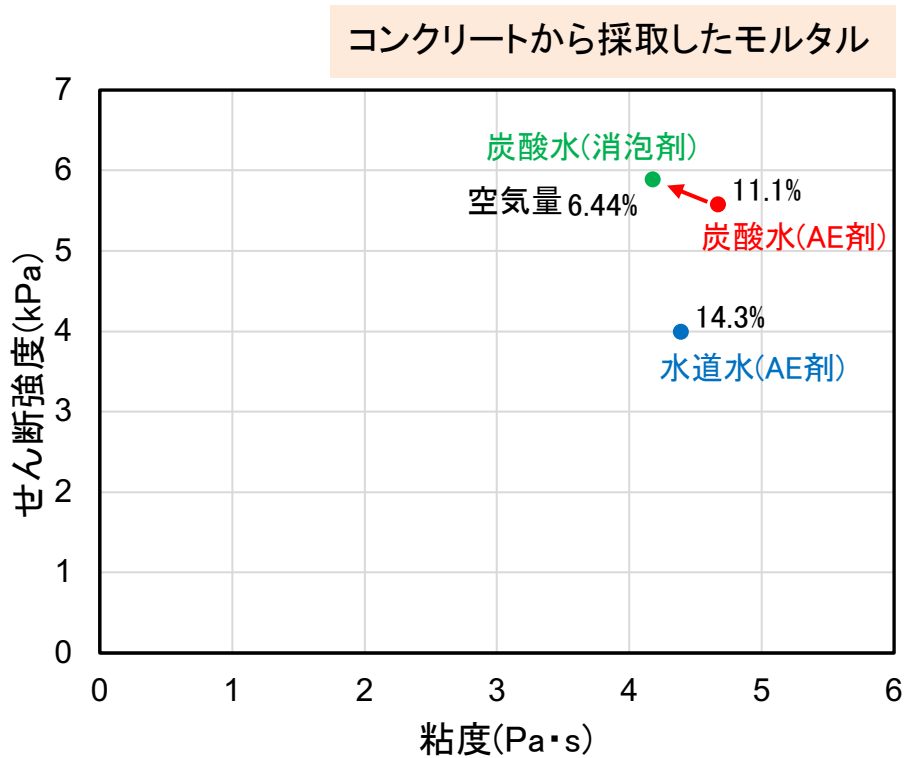


図-6.6 せん断強度と粘度の関係

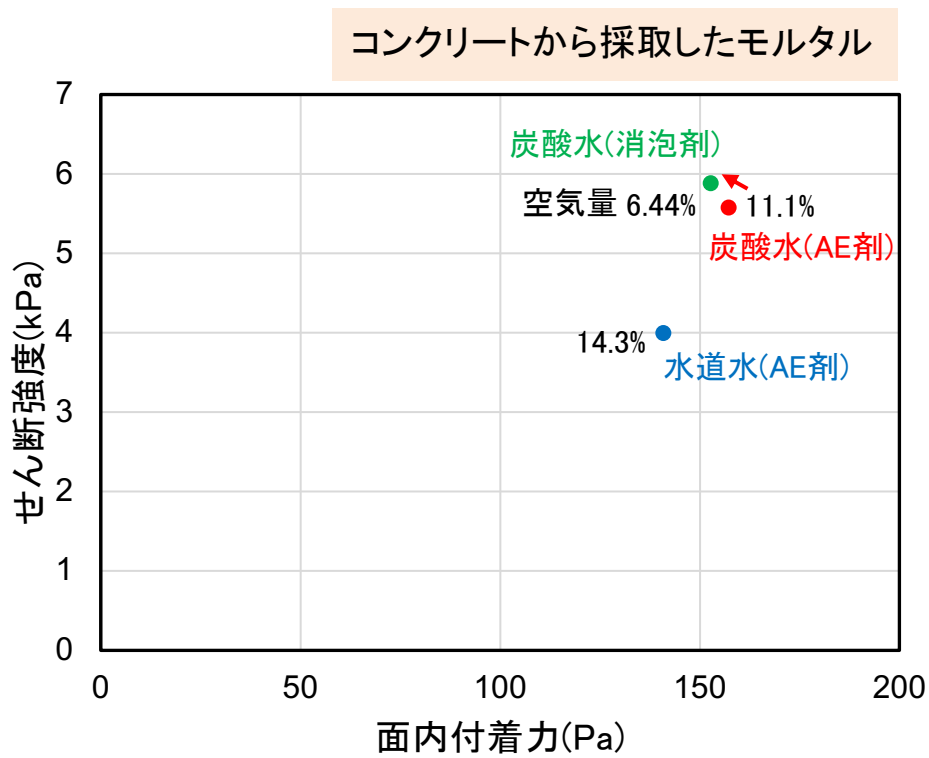


図-6.7 せん断強度と面内付着力の関係

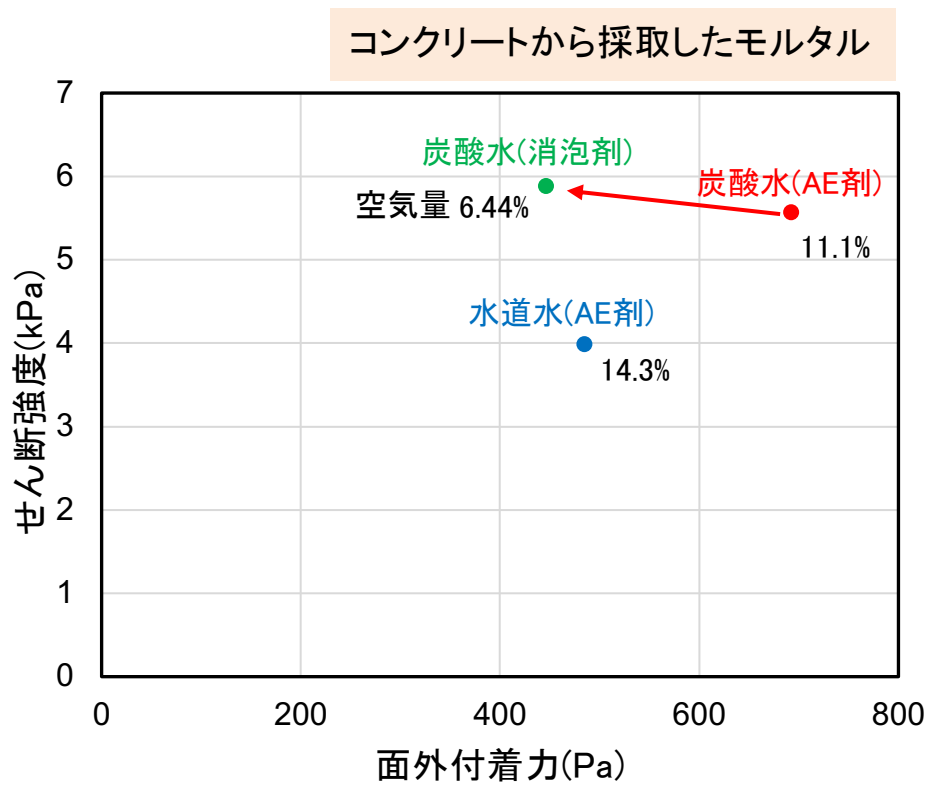


図-6.8 せん断強度と面外付着力の関係

第7章 結論

本研究では、フレッシュモルタルを対象に炭酸水練混ぜと微細気泡が自己充填性能を構成する要因である粘性と内部摩擦に与える影響を調べ、最後にコンクリートの自己充填性能試験によりその効果を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) フレッシュコンクリート中のモルタル相の状態をより近く再現することを可能にする分割練りをしたフレッシュモルタルにおいても、炭酸水練混ぜによる粘性の向上効果を確認した。
- 2) 空気連行は炭酸水練混ぜのフレッシュモルタルの粘性に対して悪影響の無いことを確認した。また、炭酸水練混ぜはAE剤を用いなくても空気連行自体は可能であったが、高い自己充填性能付与の観点から、従来通りAE剤添加による空気連行方法が適していると確認した。
- 3) 炭酸水練混ぜは、連行気泡の微細化、すなわち自己充填性能にとって有利となる可能性を得た。
- 4) 既往研究では、気泡連行しない場合にはVMA添加と炭酸水練混ぜの併用で内部摩擦が増加する問題があったが、炭酸水練混ぜのモルタルに気泡を連行することにより、内部摩擦の増加を抑制しつつ粘性を向上させることができた。この要因として、炭酸水による連行空気の質向上が考えられる。
- 5) フレッシュコンクリートでは、水道水練混ぜよりも少ない空気量で高い充填高さを示したことから、炭酸水練混ぜと微細気泡の連行の併用による、自己充填性能の向上効果の可能性を得たと言える。しかし、現時点では必要以上の空気量が連行されてしまっているため、本技術の実用化のためには空気量の調整が必要である。

今後の課題として、空気量を適正な値に調整する方法を構築することがあげられる。その手段の一つとして用いた消泡剤は、自己充填性能に対して悪影響を及ぼす可能性があることが分かったことより、今後は他の手段で検討する必要がある。自己充填性能を維持しつつ空気量の調整が実現すれば、自己充填コンクリートの汎用化が達成されると確信する。

付録

付録1 せん断強度測定におけるピーク値について

本研究では、フレッシュモルタル中の内部摩擦(せん断抵抗)の測定のために、一面せん断試験機を使用した(図-付録1.1, 1.2)。測定結果の一例を示す(図-付録1.3)。本研究では、一面せん断試験での測定データにおいて、動き始めて最初に得られたせん断力のピーク値(最大静止摩擦力)から容器自体の摩擦力(試料無しでの測定値)を引き、試料のせん断面積で除した値を「せん断強度」と定義し、内部摩擦の指標としている。しかし、これまでピーク値については明確な定義定量が無く、明確なピーク値がないものも混在していた(図-付録1.4)。

そこで、せん断強度試験結果の妥当性確保のため、予備実験として様々なモルタル性状で測定を行い、ピーク値の有無を記録した(図-付録1.5, 1.6)。ピーク値の定義は、測定初期の最大のせん断応力で上に凸となり、それ以降そのせん断応力を超えないものとした。モルタル性状は、Gm(軟度の指標)とRm(粘性の指標)をそれぞれ変化させて比較した。結果として、せん断試験におけるピーク値は、Rm(粘性の指標)によらず、Gm(軟度の指標)に支配されていることが分かった。これは水道水と炭酸水で同様である。具体的には、Gmがおよそ2.4(=モルタルフロー184mm)を下回るとピーク値が現れなくなった。また、Gmが2.4を下回るとせん断強度も大幅に増加すると確認できた。これより、モルタルフローがおよそ184mm以上ならば、正確な測定値が保証できると言える。

本研究で用いたモルタルは全てこの条件を満たすため、せん断強度の妥当性を確保できたとと言える。

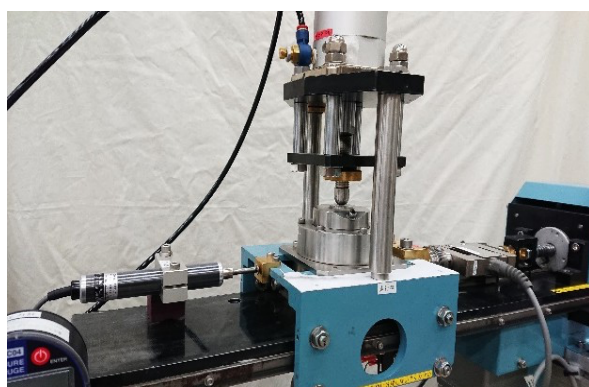


図-付録1.1 一面せん断試験機

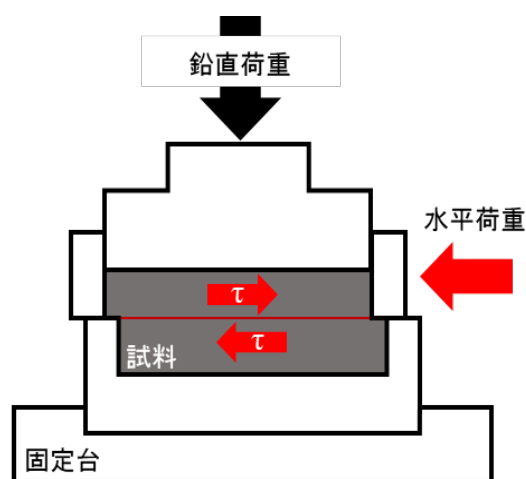


図-付録1.2 一面せん断試験機の測定イメージ

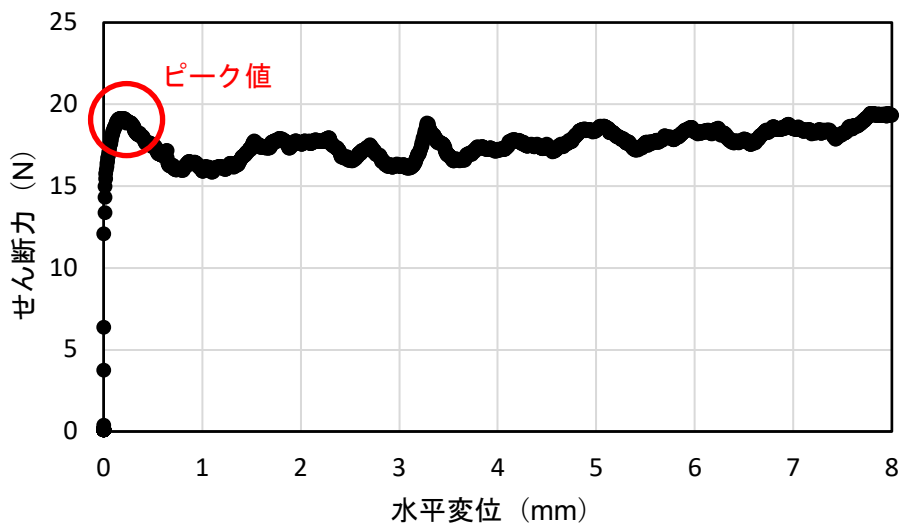


図-付録1.3 せん断力測定結果の例

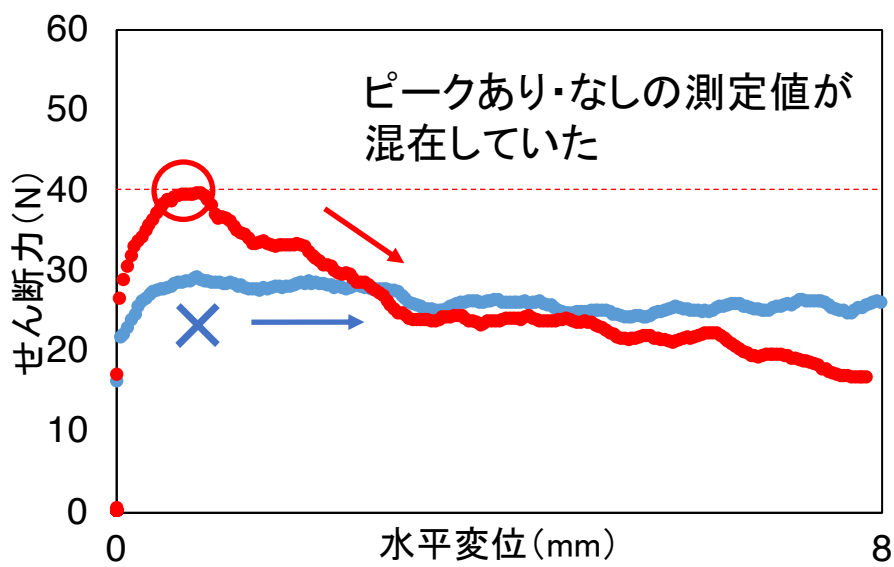


図-付録1.4 測定値のピーク有無の比較

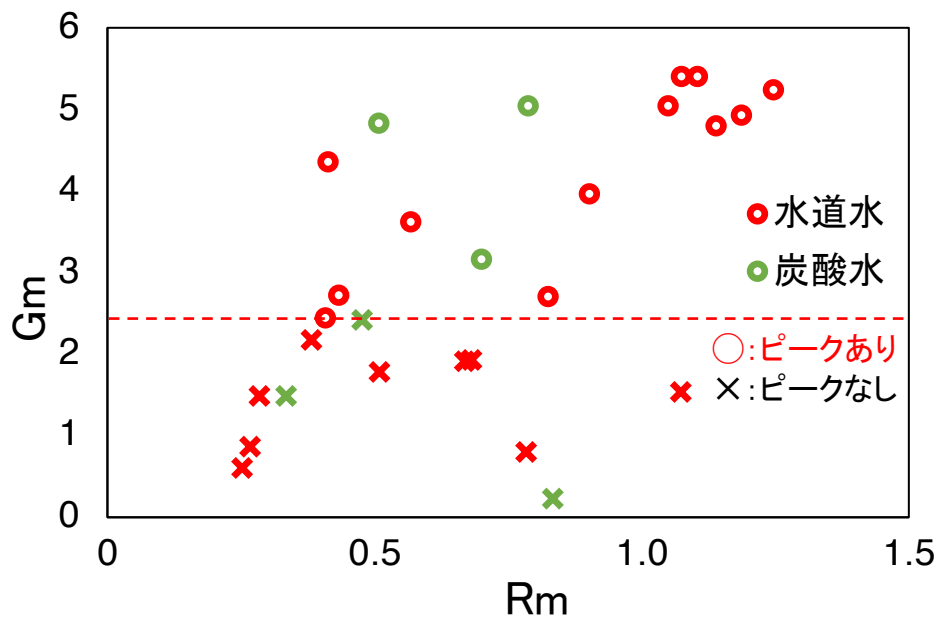


図-付録1.5 G_m と R_m の関係とそのピーク値

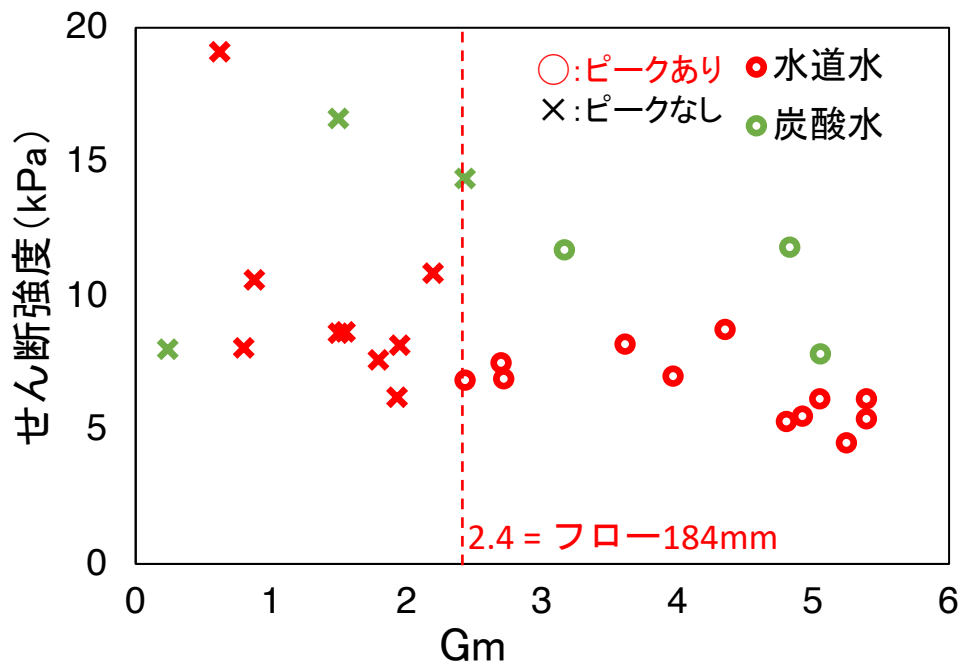


図-付録1.6 せん断強度と G_m の関係とそのピーク値

付録2 フレッシュモルタルの粘性の各指標間の比較

本研究で測定した粘性の指標をそれぞれ比較した。粘度と面外付着力や面内付着力との関係、さらに面内付着力と面外付着力との関係を示す(図-付録 2.1~2.3)。粘度と面内付着力、粘度と面外付着力はどちらも相関が高く、粗骨材の接近速度を抑制する粘度は、せん断変形する際の抵抗力や鉛直面に剥離する際の抵抗力の総合的な指標である可能性があると言える。

一方、面内付着力と面外付着力との関係は、粘度と面内付着力、面外付着力との関係と比較すると相関が低かった。面内付着力と面外付着力は、モルタルが粗骨材から剥離する際の方向が違うことや、材料分離の影響の度合いも違うため、相関が低くなったと言える。これらの結果は、向井・大内の既往研究⁷⁾の結果と同様であったため、妥当性を確認できたと言える。

次に、各粘性とロート流下時間の関係も示す(図-付録 2.4~2.6)。各粘性とロート流下速度の相関はどれも低かった。これは空気連行の有無による、内部摩擦の違いによるものと言える。流れを絞るロート試験は、内部摩擦の影響が卓越するからである。

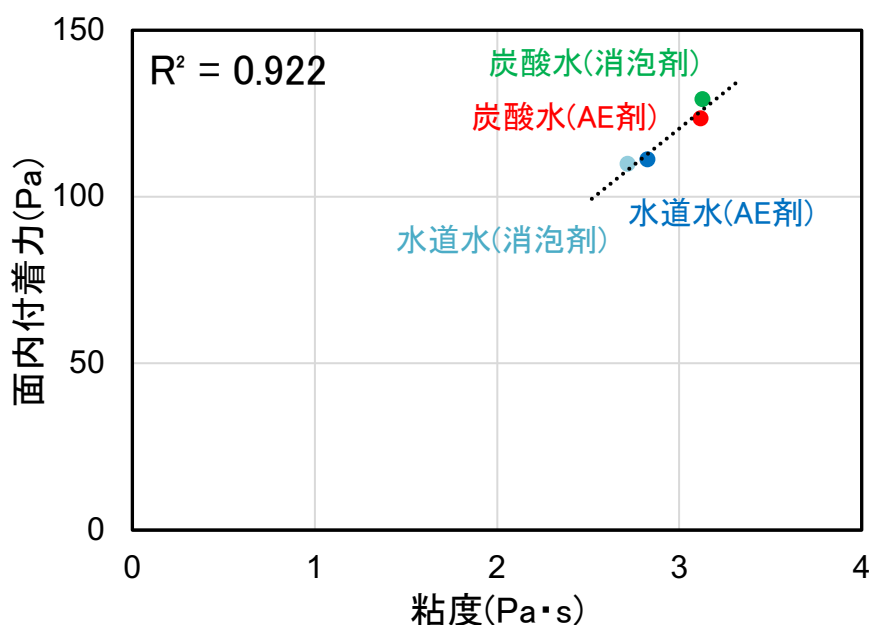


図-付録2.1 面内付着力と粘度の関係

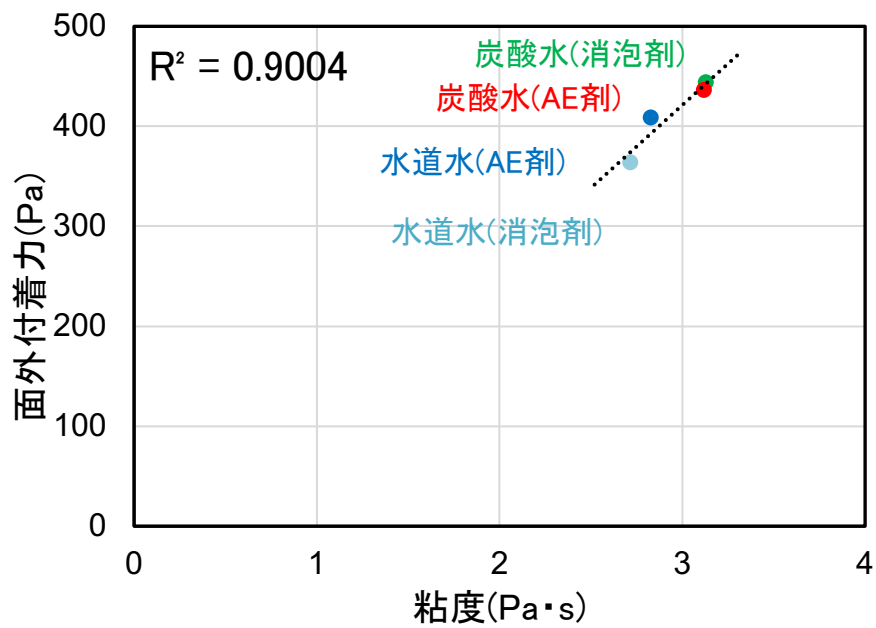


図-付録2.2 面外付着力と粘度の関係

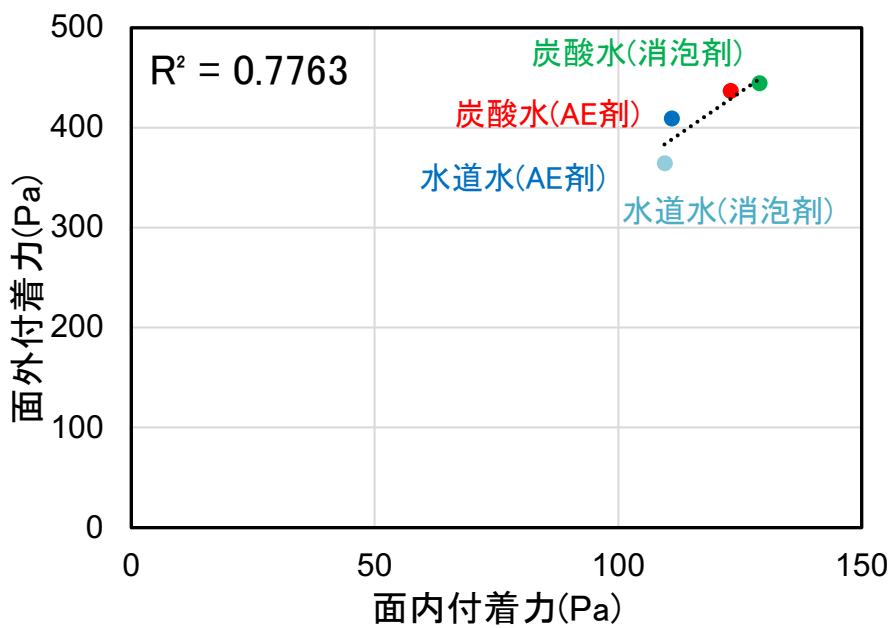


図-付録2.3 面外付着力と面内付着力の関係

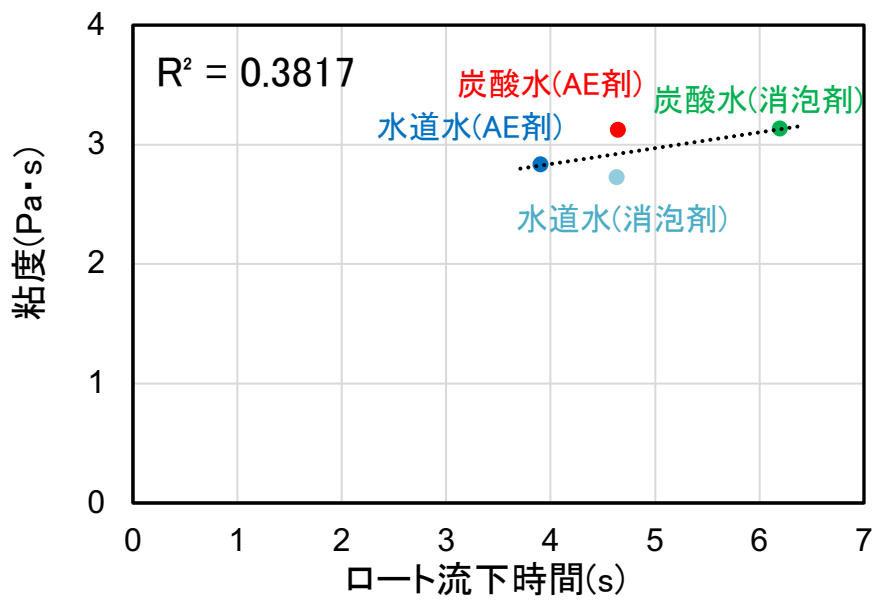


図-付録2.4 粘度とロート流下時間の関係

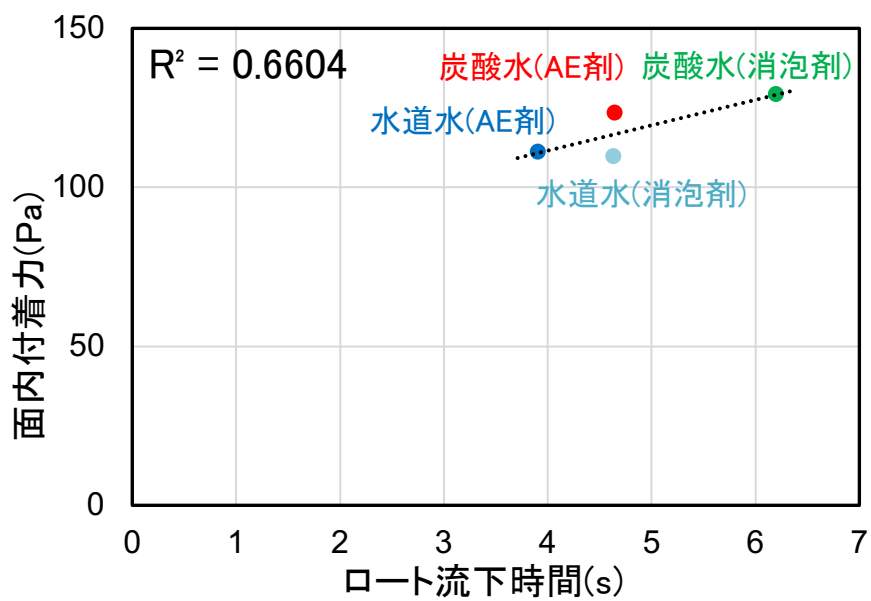


図-付録2.5 面内付着力とロート流下時間の関係

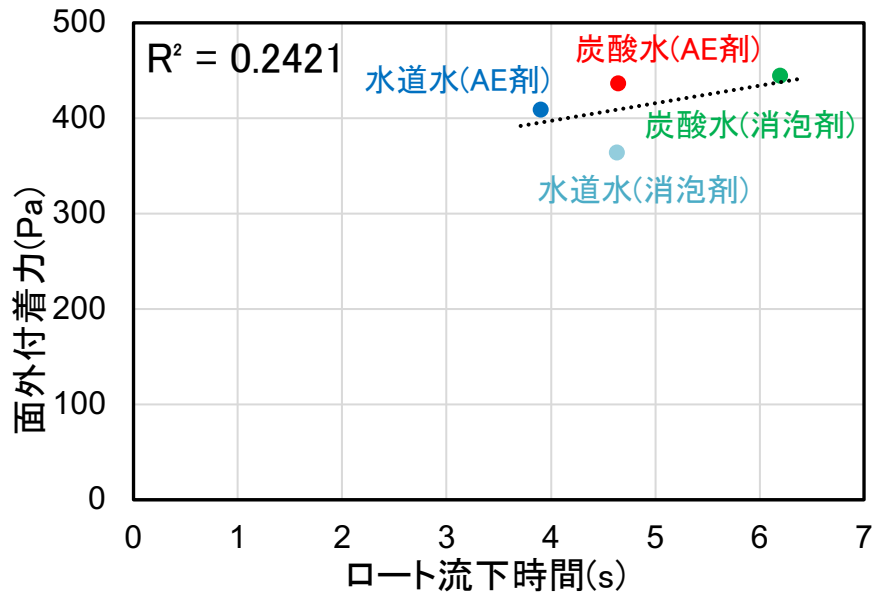


図-付録2.6 面外付着力とロート流下時間の関係

参考文献

- 1) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993年9月
- 2) A nuwat Attachaiyawuth, Sovannsathya Rath, Kazunori Tanaka, Masahiro Ouchi: Improvement of self-compactability of air-enhanced self-compacting concrete with fine entrained air, Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, Vol. 14, No. 3, pp.55-69, March, 2016.
- 3) Puthipad, N., Ouchi, M., Rath, S., Attachaiyawuth, A.: Enhanced entrainment of fine air bubbles in self-compacting concrete with high volume of fly ash using defoaming agent for improved entrained air stability and higher aggregate content, Construction and Building Materials, Vol. 144, pp. 1-12, July, 2017.
- 4) 大西 悠, 大内雅博: 粗骨材・モルタル間の付着力向上によるフレッシュコンクリートへの自己充填性付与, 第73回土木学会年次学術講演会, 第V部門, 2018.
- 5) 大内 雅博, 北中 康太, Attachaiyawuth, A.: 増粘剤添加によるフレッシュモルタルへの連行空気泡の安定化, 令和元年度土木学会全国大会第74回学術講演会講演概要集, V-3.9, 2019.
- 6) 大西 悠, 大内 雅博: フレッシュコンクリートに連行した空気泡による自己充填性のためのベアリング効果の解明, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, Vol. 42, No. 2, pp.1043-1048, July, 2020.
- 7) 向井仁哉, 大内雅博: 炭酸水練混ぜによるフレッシュモルタルの粘性向上, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp.808-813, 2023.
- 8) 福田龍大, 大内雅博: 炭酸水練混ぜによるフレッシュモルタルの時間経過に対する軟度と粘性の維持性能の向上, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 802-807, 2023.
- 9) 森崎弘汰朗, 大内雅博: 増粘剤を添加した自己充填コンクリート用モルタルに微細気泡を連行する練混ぜ手順の確立, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp.814-819, 2023.
- 10) 佐藤 奨, 大内雅博: 自己充填性を支配するフレッシュモルタルの付着力の回転粘度計による定量化, 土木学会全国大会第76回年次学術講演会, 2021.
- 11) 福田翔太, 大内雅博: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp.1025-1030, 2020.

謝辞

本研究に際して、多くの方々の多大なるご協力を頂きましたことを心より感謝申し上げます。

大内 雅博先生（高知工科大学教授）、佐藤 慎司先生（高知工科大学教授）、曾我部 敏郎先生（(株)CDR コンサルタンツ専務取締役）には、数多くの貴重なご助言、ご指導を賜りました。ここに謹んで御礼申し上げます。

大内先生には、研究活動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。締め切り直前まで徹底的な御指導を賜り、最後まで物事をやり遂げることの大切さを御教示くださいました。また、社会人としての心得や人として大事なことを教えていただき、より成長する事ができました。心より御礼申し上げます。

佐藤先生には、修士論文の副指導教員として広い知見からのご意見や的確なご指導を頂きました。心より御礼申し上げます。

曾我部先生には、コンクリートに関する基礎的な知識から実験の相談等、多くのことをご教授頂きました。また、実験中には何度も差し入れをいただき、大変元気付けられました。心より御礼申し上げます。

本研究を行うにあたって、今まで試行錯誤をして研究の形を作ってくださった先輩方、ともに研究を行い、時には実験に協力してくれたコンクリート研究室のメンバーには、心より感謝申し上げます。

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

以上のように、多くの方々のお力添えのもと本研究を進め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。

2024年1月 曾我部 蓮太