

2024 年度修士論文

自己充填性能の経時変化抑制のため
フレッシュコンクリートの
炭酸水練混ぜ手順

A mixing procedure for mitigating the change
in self-compacting performance
over time of fresh concrete with carbonated water

主指導教員 大内 雅博
副指導教員 佐藤 慎司
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
1275061 佐藤京香

2025 年 3 月

自己充填性能の経時変化抑制のための フレッシュコンクリートの炭酸水練混ぜ手順

佐藤 京香

要旨

自己充填コンクリート (SCC) は、密な鉄筋を有する型枠内の隅々にまで重力の作用により充填されるため、型枠内での流動性を活かして施工効率の向上や作業負担の軽減に役立つ。フレッシュコンクリートはセメントの水和反応の進行により、練上がり時点から徐々に軟度が低下し、施工の妨げとなる可能性がある。コンクリートは通常、建設現場から離れた生コンクリート工場にて製造されるため、その運搬時間や現場での打ち込み時間を考慮し、振動締固めによる自己充填性能を補うことの不可能な自己充填コンクリートの場合、製造から 2 時間、出来れば 3 時間は自己充填性能を維持するのが望ましい。セメントの水和反応の進行に伴う軟度の低下を防止する技術として、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤が開発され、自己充填コンクリート用として一般的に使用されている。

高知工科大学では、ショ糖の添加によるセメントの水和反応を抑制作用に着目し、時間経過によるフレッシュコンクリートの自己充填性能の低下を抑制する効果を確認した。しかし、ショ糖の添加により、材齢一日の強度が発現しない問題点が明らかとなった。一方、高知工科大学では、練混ぜ水として市販高濃度炭酸水を用いることにより、時間経過による自己充填性能の低下の抑制効果の一方で、初期強度発現に影響しないことを確認した。

本研究では、ショ糖の代替として練混ぜ水に炭酸水を使用することで、初期強度発現に影響を与えずに自己充填性能の時間経過による低下を抑制する新たな方法を探索した。自己充填性能を構成するフレッシュモルタルの軟度の指標である相対フロー面積比と、粘性の指標である漏斗流下速度比に対して、時間経過に対して自己充填性能の変化を最小にする炭酸水練混ぜの手順を探索した。

炭酸水練混ぜによりフレッシュモルタルの軟度の経時低下が抑制されるのは、練上がり直後の所要の軟度を得るための高性能 AE 減水剤添加量が 2 倍程度に大きくなることによるものであることを確認した。所要の添加量が大きくなることで練上がり直後にセメントに吸着されずに残る量も大きくなり、それが時間経過と共に徐々に吸着することで軟度が維持されたと推察した。

練混ぜ時間を長くすることによりセメント粒子間の分散が進み、セメント粒子の合計の表面積が大きくなると、所要の高性能 AE 減水剤添加量が大きくなり、軟度の経時低下量を小さくすることが可能になった。季節や増粘剤添加量の違い、炭酸水使用の有無にかかわらず、練上がり時に所定の軟度を得るための高性能 AE 減水剤添加量と、練上がり 3 時間後までの軟度の低下量との関係がほぼ一定になることを見出した。この関係を用いることにより、実製造において、練上がり時に所定の軟度を得るための高性能 AE 減水剤添加量を指標として、効率的な配合決定法を構築した。

A mixing procedure for mitigating the change in self-compacting performance over time of fresh concrete with carbonated water

Kyoka SATO

ABSTRACT

Self-Compacting Concrete (SCC) is useful for improving construction efficiency and reducing workload by taking advantage of its fluidity in the formwork, since it is filled by the action of gravity to every corner of the formwork with dense reinforcing bars. Fresh concrete gradually loses softness from the time of kneading due to the progress of cement hydration reaction, which may hinder construction. Concrete should normally maintain its self-compacting performance for 2 hours after production, preferably 3 hours in the case of self-compacting concrete, which cannot compensate for self-compacting performance by vibratory compaction, considering transportation time and time for placing on site. As a technique to prevent the softening of cement as the hydration reaction progresses, Poly carboxylic acid-based high-performance AE water reducers have been developed and are commonly used for self-compacting concrete.

Kochi University of Technology has focused on the effect of sucrose addition to inhibit the hydration reaction of cement and has confirmed the effectiveness of sucrose addition to inhibit the decline in self-compacting performance of fresh concrete with the passage of time. However, it was found that the addition of sucrose did not result in the development of strength at the age of one day. On the other hand, it was confirmed that the use of commercially available carbonated water as mixing water had no effect on the initial strength development, while it suppressed the decline in self-compacting performance over time.

In this study, we explored a new method to suppress the decline of self-filling performance over time without affecting the initial strength development by using carbonated water as mixing water instead of sucrose. The procedure of mixing with carbonated water to minimize the change of self-compacting performance over time was explored for the relative flow area ratio, which is an index of softness of fresh mortar that constitutes self-compacting performance, and the funnel flow velocity ratio, which is an index of viscosity.

It was confirmed that the decrease in softness of fresh mortar over time is suppressed by carbonated water mixing because the amount of high-performance AE reducer added to obtain the required softness immediately after mixing is about twice as large as the required amount. The increase in the required amount of additive may increase the amount remaining in the cement immediately after kneading, which is gradually adsorbed over time to maintain the softness.

As the kneading time increases, dispersion between cement particles increases and the total surface area of the cement particles increases, the required amount of high-performance AE thickener added becomes larger and the amount of softness decrease over time can be reduced. We found that the relationship between the amount of high-performance AE reducer added to obtain the specified softness at the time of kneading and the amount of decrease in softness up to 3 hours after kneading is almost constant, regardless of the season, the amount of thickener added, or whether or not soda water is used. By using this relationship, it is possible to establish an efficient formula determination method in actual production using the amount of high-performance AE water reducer added to obtain the specified softness at kneading as an indicator.

目次

第1章 序章	7
1.1 自己充填コンクリートの背景と課題	7
1.2 本研究の背景	10
1.2.1 練混ぜ時における高性能 AE 減水剤の粒子分散効果への影響	10
1.2.2 ショ糖添加による水和反応の抑制効果の一方で強度発現への悪影響	13
1.2.3 炭酸水練混ぜによる自己充填性能の経時変化の抑制	14
1.3 本研究の目的	15
1.4 本論文の構成	16
参考文献	17
第2章 材料・配合および試験方法	18
2.1 使用材料	18
2.2 モルタルの配合	19
2.3 練混ぜ方法と基本の手順	20
2.4 高性能 AE 剤の添加タイミング	23
2.5 練混ぜ水の温度	25
2.6 練混ぜ時間	27
2.7 自己充填性評価に関する適切な指標	31
2.7.1 モルタルの軟度の指標と経時変化の指標	31
2.7.2 モルタルの粘性の指標	33
参考文献	35
第3章 炭酸水練混ぜによる経時安定性の向上	36
3.1 炭酸水練混ぜとショ糖添加の併用による経時安定性の向上の検証	36
3.2 炭酸水練混ぜによる軟度維持性能を水道水練りと比較	39
第4章 練混ぜ時間の調整による経時変化の抑制	44
4.1 時期による所要 SP 添加量の違い	44
4.2 練混ぜ時間が SP 所要添加量に与える影響の再検討	47
第5章 経時変化を最小にする練混ぜ手順の提案	50
5.1 基本となる現象	50
5.2 練混ぜ・配合決定手順の基本	52
第6章 結論	54
参考文献	56
付録1 VMA 添加量による自己充填性能への影響	57
付録2 各章の実験データ	58
謝辞	67

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	8
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	9
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	9
図-1.4	一括練りと分割練りの粒子分散効果の違い	11
図-1.5	経過時間と SP 吸着量の関係	11
図-1.6	高性能 AE 減水剤残存量と粒子分散効果の関係	11
図-1.7	練混ぜ時間と単位表面積当たりの吸着量の関係	12
図-1.8	糖類添加による Rm Gm 経時変化	13
図-1.9	減水剤の所要添加量と Gm 低下量の関係	14
図-1.10	減水剤所要添加量と Rm 低下量の関係	14
図-1.11	本論文の構成	16
図-2.1	使用したモルタルミキサ	20
図-2.2	練混ぜ手順	21
図-2.3	ロート流下時間と付着力の関係	22
図-2.4	炭酸水練混ぜによる軟度と粘性の経時変化を減水剤の 1 次練り添加と 2 次練り添加とで比較	24
図-2.5	低温の練混ぜ水による経時安定性の向上	26
図-2.6	練混ぜ時間の調整による Gm および Rm の練上がりから 3 時間後までの低下量の変化	29
図-2.7	所要 SP 添加量と Gm 低下量の関係	29
図-2.8	所要 SP 添加量と Rm 低下量の関係	30
図-2.9	モルタルフロー試験	31
図-2.10	フロー値 (Gm) 低下量の算出方法	32
図-2.11	モルタルロート試験	33
図-2.12	モルタルの粘性評価指標としての Rm の変動	34
図-3.1	5 種類の配合における Gm および Rm の練上がり 3 時間の低下量の比較	36
図-3.2	7 種類の配合の圧縮強度発現速度	37
図-3.3	分割練りによる経時変化抑制効果	38
図-3.4	漏斗流下時間の変化量とフロー最大値低下量の関係 (11 月)	40
図-3.5	漏斗流下時間の変化量とフロー最大値低下量の関係 (12 月)	40
図-3.6	炭酸水練混ぜによるフレッシュモルタルの軟度の経時低下抑制の要因	41
図-3.7	水練混ぜと炭酸水練混ぜのメカニズムの比較	42
図-3.8	炭酸水練混ぜによるフロー最大値低下量の時期を変えての安定性	43
図-3.9	炭酸水練混ぜによる 180 分後漏斗流下時間の時期を変えての安定性	43
図-4.1	練混ぜ時間による所要 SP 添加量の変化	44
図-4.2	時期による所要 SP 添加量の違いと自己充填性能の比較	45
図-4.3	所要 SP 添加量の違いによるフロー最大値低下量の比較	45
図-4.4	所要 SP 添加量の違いによる漏斗流下時間変化量の比較	46
図-4.5	1 次練り 180 秒の場合において、	47
図-4.6	炭酸水練混ぜにより増加する所要 SP 添加量のため、練混ぜ時間を長くして SP の分散効果を発揮させる必要性	48
図-4.7	練混ぜ時間延長による、SP 添加量とフロー最大値低下量の関係	49
図-5.1	所要 SP 添加量が増加するにつれてフロー最大値低下量が減少する傾向	51
図-5.2	練混ぜ手順のフローチャート	53
付録		
図-1	増粘剤添加量の影響による所要 SP 添加量とフロー最大値低下量の関係	57

表目次

表 2.1	使用材料	18
表 2.2	モルタル配合(空気を除いたもの)	19
表 2.3	混和剤添加量	23
表 2.4	練混ぜ時間	23
表 2.5	配合における測定結果	23
表 2.6	混和剤添加量	25
表 2.7	練混ぜ時間	25
表 2.8	各配合における測定結果	25
表 2.9	混和剤添加量	27
表 2.10	練混ぜ時間	27
表 2.11	各配合における測定結果	28
表 3.1	7種類の配合による混和剤添加量	37
付録		
表 1	混和剤添加量	58
表 2	練混ぜ時間	59
表 3	各配合における測定結果	59
表 4	混和剤添加量(VMA 添加量の違い)	63
表 5	練混ぜ時間(VMA 添加量の違い)	63
表 6	各配合における測定結果(VMA 添加量の違い)	63
表 7	混和剤添加量(練混ぜ時間の延長)	65
表 8	練混ぜ時間(練混ぜ時間の延長)	65
表 9	各配合における測定結果(練混ぜ時間の延長)	65

第 1 章 序章

1.1 自己充填コンクリートの背景と課題

コンクリートは安価で供給しやすいという特性から、最も幅広く使用されている建設材料の一つである。しかし、鉄筋コンクリート構造の信頼性や耐久性は施工プロセスにおける締固め作業に代表される人的要因に大きく依存する。型枠内への締め方が不適切・不十分である場合、ジャンカやコールドジョイントといった欠陥が発生し、耐荷断面の不足や鉄筋の腐食を生じさせ、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、振動締固め作業を不要とする「自己充填コンクリート」(Self-Compacting Concrete : SCC)が 1988 年に開発された。しかしながら、開発から 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は未だ広範に普及しているとは言い難い。その要因として、普通コンクリートと比較して材料コストが高い点が挙げられる。従来の自己充填コンクリートでは、材料分離抑制のために骨材量を減らし、セメント量を増加させ粘性を高めて、十分な間隙通過性能を確保させるとともに、高性能 AE 減水剤を添加し、セメント粒子を分散させ、軟度高めることにより高い自己充填性能を得ている。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)。したがって、自己充填性能を維持しつつ、単位セメント量の増加を抑えてコスト削減を図ることが、普及のために重要な課題である。

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で置き換えることで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、さらに実用化に向けた技術開発を行ってきた(図-1.2, 1.3)。この新しいコンクリートは、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軽減し、骨材量を増やすことで、セメントの単位使用量を削減しつつ、普通コンクリートと同程度の単価にするものである。また、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。この工夫により、自己充填性能に優れ、かつ気泡が合泡しにくく時間経過に対して安定した気泡連行が可能になった。これにより、自己充填コンクリートの実用化に向けて、安定した微細気泡の連行技術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一般化を実現する上で残された課題は、時間経過に対する自己充填性能の安定性の向上である。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を長時間にわたって維持・安定化させることが課題である。現行の JIS 規格では、

生コンクリートは製造工場から出荷後 90 分以内に打設を完了させる必要がある。しかし、自己充填コンクリートは施工性の低下を振動締め作業により補うことができないため、打設現場での自己充填性能の管理、そして、混和剤添加による自己充填性能の回復が必要になる場合がある。そのためには最低 2 名の人員を必要とする。

本研究では、コンクリート施工の大幅な合理化を目指し、工場での練り上がりから現行規定の 90 分間よりも大幅に長い 180 分間、スランプフロー値を指標とする自己充填性能が変化しない技術を開発することとした。このことは、生コンクリート工場の集約による設備の高度化と、交通渋滞による運搬遅延への対策となり、練上がりからの時間超過による生コンクリートの廃棄量を削減することにも貢献する。

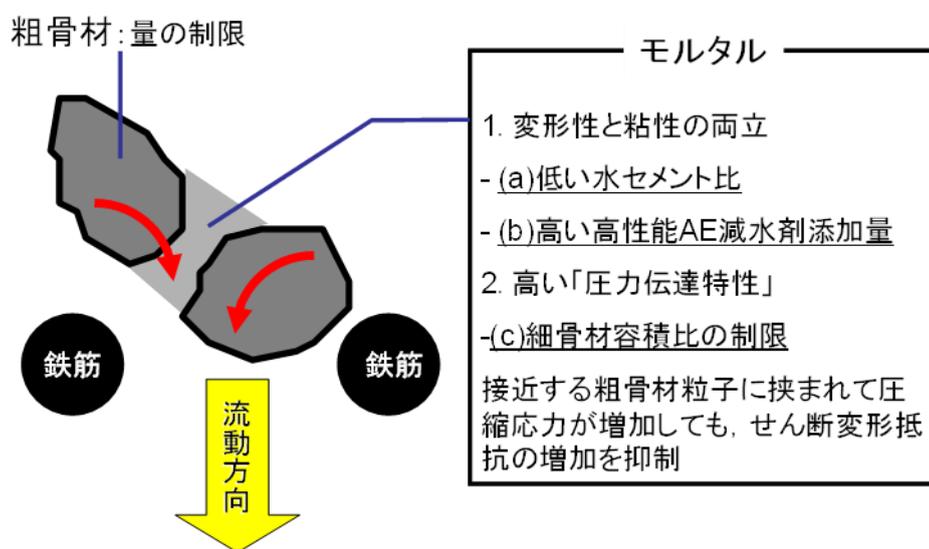


図-1.1 フレッシュコンクリートに間隙通過性能を付与する従来の技術

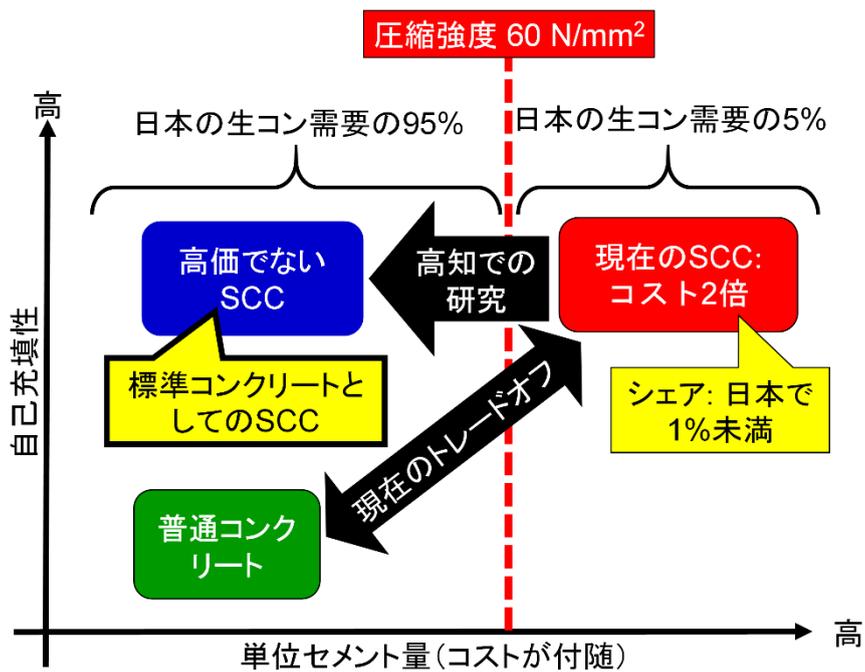


図-1.2 開発中の汎用型自己充填コンクリートの位置づけ

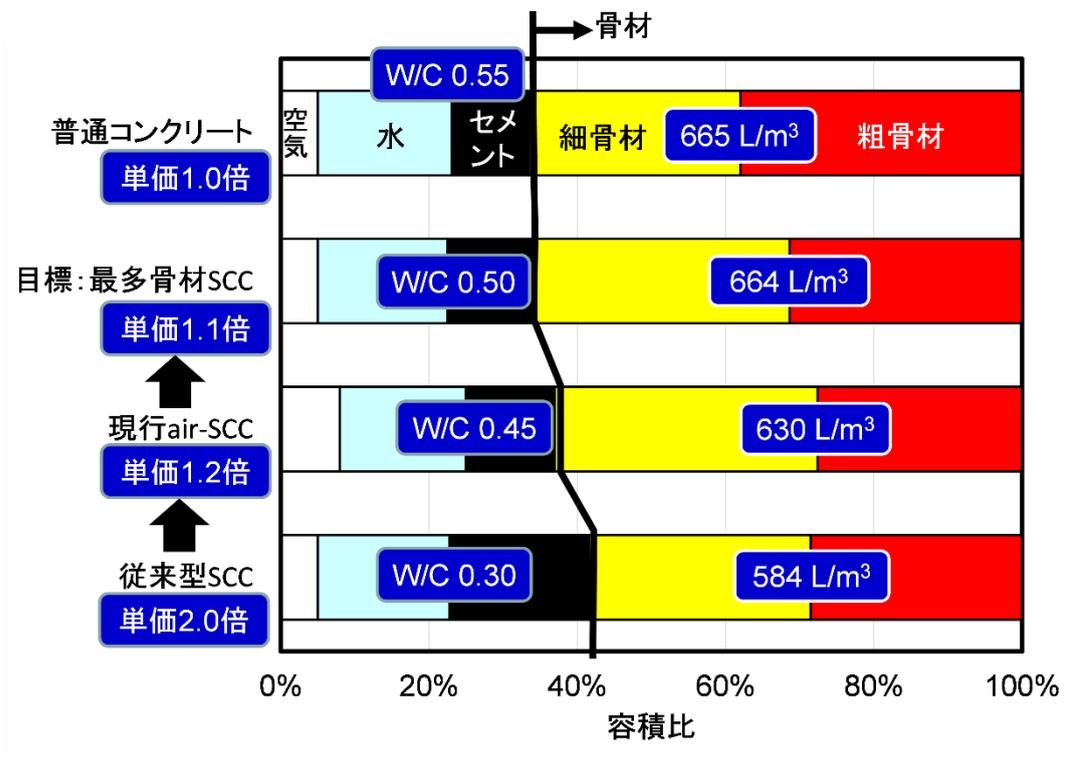


図-1.3 普通コンクリートに近い、開発中の自己充填コンクリートの配合

1.2 本研究の背景

本研究で構築する、経時に対する自己充填性能の安定化技術の背景となる既往研究について述べる。

1.2.1 練混ぜ時における高性能 AE 減水剤の粒子分散効果への影響

自己充填コンクリートのフレッシュ時の要求性能である高流動性と高材料分離抵抗性を確保するには、高性能 AE 減水剤の使用が不可欠である。

菅保¹⁾は、高性能 AE 減水剤を使用して、セメント粒子の分散作用（減水剤分子がセメント粒子表面に吸着し、静電的・空間的反発力を付与することで凝集を防止すること）により、コンクリートの流動性を確保した。

減水剤の添加量が増加するほど、未吸着量も増加、セメント粒子の分散性が向上し、流動性が大きく改善することが分かっている。粒子の分散度（ほぐれ方）を高め、合名表面積を大きくすることで所要 SP 添加量が大きくなり、未吸着量も大きくなる。

適切な減水剤量を設定することで、作業性を安定的に確保でき、さらに長時間の流動性維持には、練混ぜ条件（練混ぜ時間や順序）と減水剤の適切な組み合わせが重要であることがわかった。

一括練りの場合、セメント粒子が凝集したままであり、分散効果が不十分であるため、比表面積が小さい状態が維持される。このため、減水剤の効果を十分に発揮できない(図-1.4)。

分割練りの効果としては、1次練り時の段階で粒子間の凝集をある程度ほぐし、比表面積を増加させる効果がある。しかし、1次練りでは、比表面積の増加に対して吸着量の増加率が小さく、吸着しているものの粒子分散効果が基準練りの時よりも劣っているため、残存量の減少以上に粒子分散効果が低下することになる。一方で、2次練りでは比表面積の増加に伴い吸着量が増加し、分散効果がより顕著となる。この結果、セメント粒子のほぐれ方(分散度)が高まり、未吸着の減水剤量も増加することでさらなる流動性の向上が得られる(図-1.5, 1.6)。

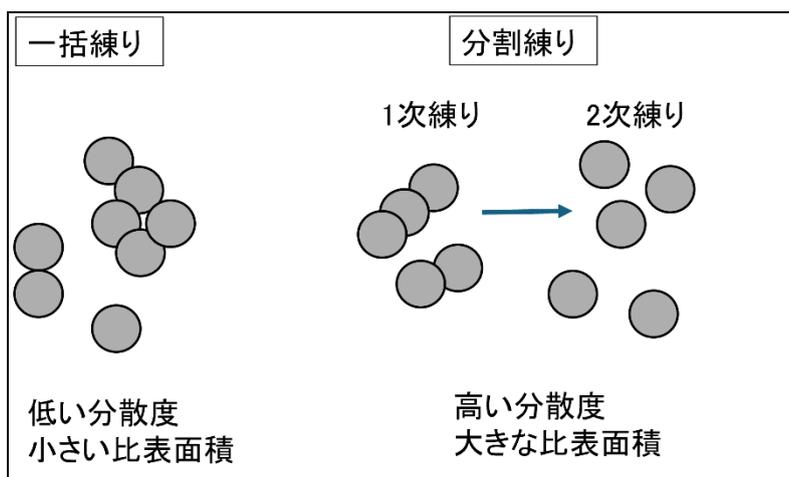


図-1.4 一括練りと分割練りの粒子分散効果の違い

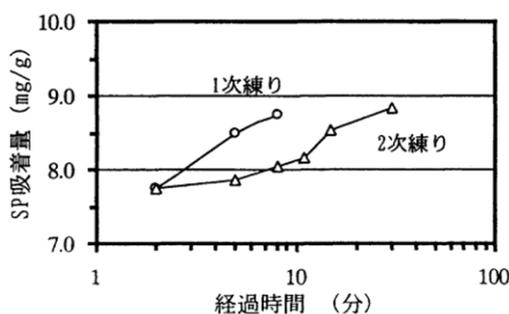


図-1.5 経過時間と SP 吸着量の関係

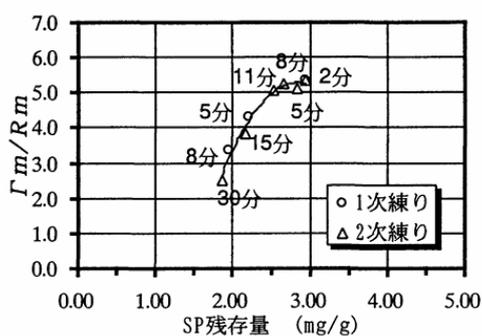


図-1.6 高性能 AE 減水剤残存量と粒子分散効果の関係

[練混ぜ方法が変わっても SP 残存量の関数で表せる]

練混ぜ時間中および経時的な高性能 AE 減水剤の粒子分散作用は、セメント粒子の比表面積増加速度と AE 減水剤の粒子分散効果の速度の相関によって決定されることが明らかになった (図-1.7)。

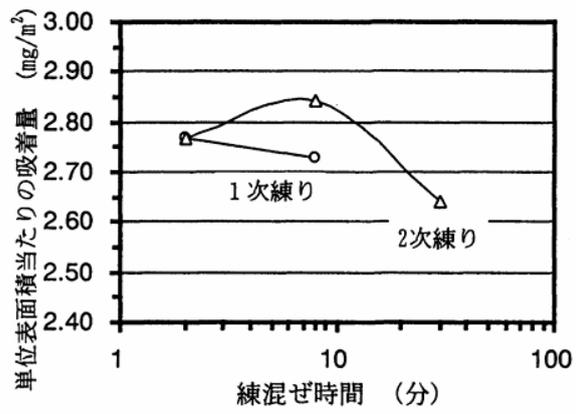


図-1.7 練混ぜ時間と単位表面積当たりの吸着量の関係

1.2.2 ショ糖添加による水和反応の抑制効果の一方で強度発現への悪影響

糖類にはセメントの水和反応の開始を抑制する効果があることがすでに明らかになっている。和田らは、ショ糖の添加により自己充填コンクリートの水和反応を抑制し、フレッシュ時の自己充填性能の経時変化を抑制することを可能にした(図-1.8)²⁾。ショ糖をセメント質量に対して0.1%添加することで、自己充填性の指標である相対フロー面積比 G_m の経時変化を抑制できることを明らかにした。添加量0.1%で最も漏斗流下速度の経時変化が最も小さくなった。それ以上の添加量ではむしろ水和反応速度を高める結果となった。

糖類の添加により、セメント粒子表面に物質が吸着し、あるいは水和反応によって生成物が粒子表面に付着し、粒子間の摩擦力を増加させるが、それだけではなく、フロック形成が抑制されることにより、セメント粒子同士が凝集できなくなった。その結果、粒度の増大が抑制され、水和反応が進行するために必要な粒子間の結合が不十分になり、水和反応が遅延してフレッシュモルタルの凝固が遅くなるというメカニズムが作用することが考えられる。摩擦力の増加だけでなく、粒子同士の凝集が抑制されることが凝固遅延の一因と考えられる。

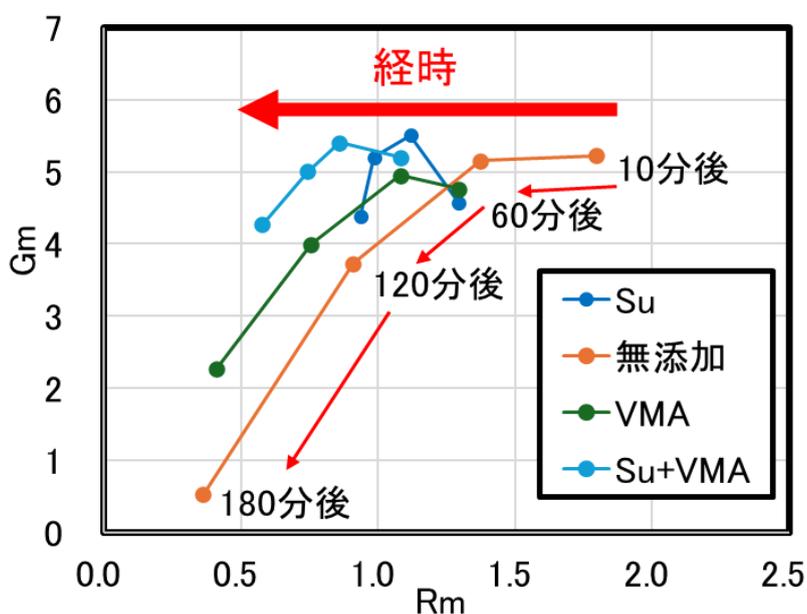


図-1.8 糖類添加による R_m G_m 経時変化

1.2.3 炭酸水練混ぜによる自己充填性能の経時変化の抑制

福田らは、練混ぜ水を水から炭酸水に変えることで、フレッシュコンクリートの自己充填性能を支配する G_m や R_m の3時間後低下量を抑制することを可能にした³⁾。

練混ぜ水中の二酸化炭素の有無や増粘剤添加の有無により生じる、練上がり時に一定のフロー値を得るための減水剤添加量の大小が軟度や粘性の経時変化量を支配していることを確認した(図-1.9)。

高性能 AE 減水剤添加量と、練上がり10分後から180分後までの相対ロート速度比 R_m の低下量を示す(図-1.10)。VMA 添加の有無や炭酸水練混ぜの有無を含め、減水剤の所要添加量が大きくなるにしたがって、 G_m 同様に R_m 低下量も小さくなった。

すなわち、炭酸水練混ぜにより、軟度と粘性の両方の時間経過に対する維持性能が高くなったが、その直接の原因は減水剤の所要添加量の増加によるものである。

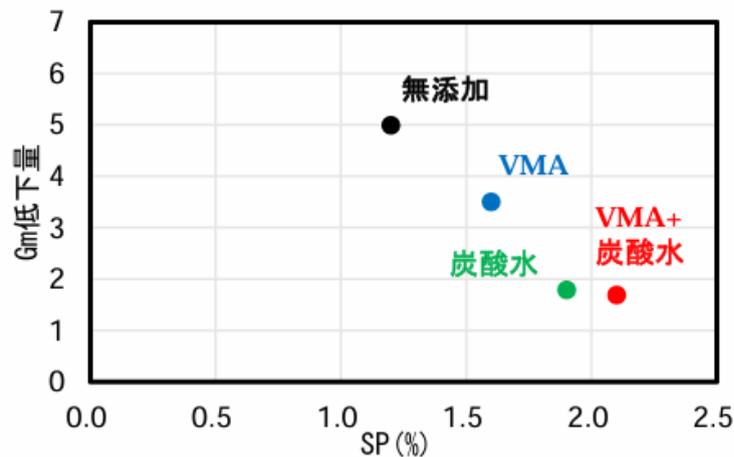


図-1.9 減水剤の所要添加量と G_m 低下量の関係

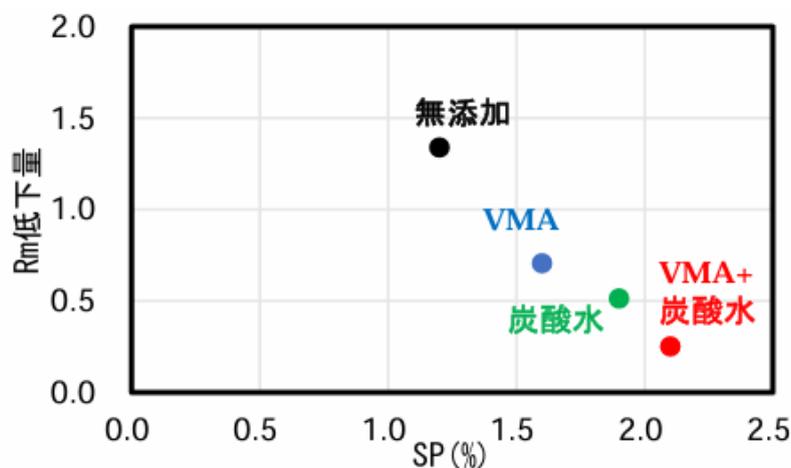


図-1.10 減水剤所要添加量と R_m 低下量の関係

1.3 本研究の目的

自己充填コンクリート(SCC)の普及にはいくつかの課題が残されている。その中でも、フレッシュ性状の経時変化による施工性の低下は重要な問題の一つである。特に、自己充填性能を支配するフレッシュモルタルの経時変化による粘性の低下(R_m)や相対フロー面積比(G_m)の変化は、長時間の打設作業において影響を与えることが考えられる。

既往研究では、ショ糖の添加によるセメントの水和反応抑制が、自己充填コンクリートの経時変化抑制に有効であることが明らかになったが、材齢1日強度が発現しないという課題があった。

そこで本研究では、ショ糖の代替として練混ぜ水に炭酸水を使用することで経時変化を抑制できる可能性に着目した。炭酸水を用いた自己充填コンクリートの練混ぜ手順として、経時変化を効果的に抑制するための練混ぜ方法を確立することを目的とした。

1.4 本論文の構成

第1章では、本研究の目的、自己充填コンクリートが開発された背景と現在の課題について述べた。

本研究の構成を以下に示す（図-1.11）。

第2章では、材料と配合と練混ぜ手順について述べ、本研究の自己充填性評価における指標を定める。

第3章では、炭酸水練混ぜによる経時安定性の向上について、炭酸水が経時変化抑制にどのような影響を与えているのかを調べる。

第4章では、炭酸水練混ぜにおける練混ぜ時間の調整を行い、SP添加量と練混ぜ時間によどのような関係があるのかを調べる

第5章では、以上の成果を用いて炭酸水練混ぜにおける経時変化抑制のための練混ぜ手順を提案する。

第6章は結論であり、各章において得られたまとめを述べて結論とする。

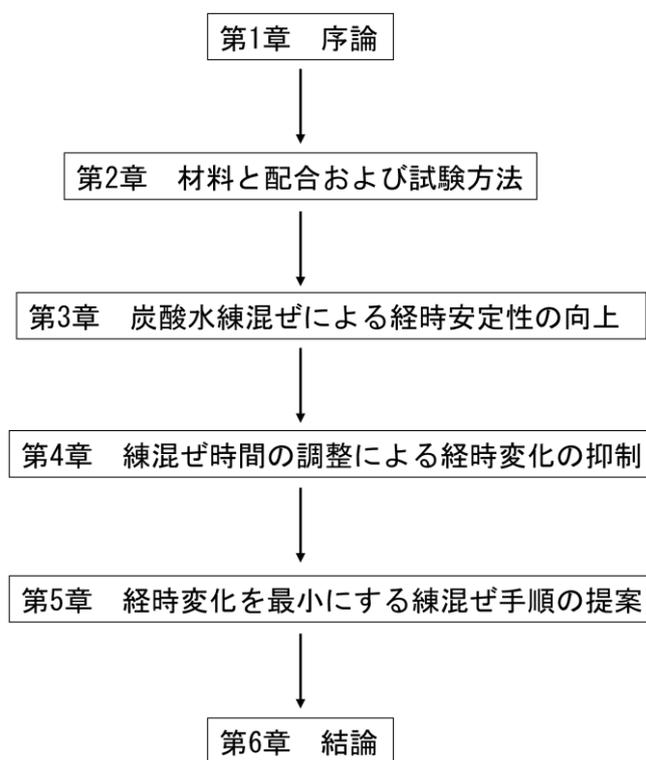


図-1.11 本論文の構成

参考文献

- 1) 菅俣 匠, 日比野 誠, 大内 雅博, 岡村 甫: 練混ぜ時における高性能 AE 減水剤の粒子分散効果に関する定量的評価, 土木学会論文集 No. 634/ V-45, 255-267, 1999 年 11 月
- 2) 和田 晃宜, 浅野 弘裕, 大内雅博: 砂糖添加による水和反応進行の抑制が自己充填性能安定化のためのフレッシュモルタルの性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol143, No. 1, 2021 年
- 3) 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, Vol145, No. 1, 2023 年

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)。自己充填性能を確保しつつ高強度ではない汎用の自己充填コンクリートを目指した、水セメント比45%の配合である。空気の影響をなくすことを目的に消泡剤を添加した。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、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のを使用した。炭酸水(Wca)は市販の飲料用炭酸水(炭酸濃度約9g/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
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
シヨ糖	スクロース	Su
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 モルタルの配合

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 基本45%に固定し，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。モルタルの示方配合を示す(表-2. 2)。

SP添加量は，練上がり10分後のモルタルフロー値が250±10mmとなるように調整した。本論文ではこの添加量を「所要(SP)添加量」と呼ぶ。

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

2.3 練混ぜ方法と基本の手順

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。モルタルの練混ぜ手順は，粉体材料の偏りを無くすために30秒間空練りをした後，水または炭酸水（SP含む）を加え練混ぜた。そして，練混ぜから10分間静置後，5秒間練混ぜをしてから各試験を行った。

各配合に対する練混ぜ手順を示す（図-2.2）。



図-2.1 使用したモルタルミキサ

練混ぜ手順は、水を一度に投入する一括練りと、二度に分けて投入する分割練りに大別される。分割練りは、材料分離を抑制し、コンクリートのブリーディングを低減するなど、コンクリートの硬化後の品質を改良するために考案された練混ぜ手順である。自己充填コンクリートについては、水量が少ない1次練りによる強力な練混ぜ負荷がセメント粒子の分散度を高めることができる。それにより、練上がり直後のフレッシュ性状も影響されることが分かっている。

曾我部は、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。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(図-2.3)⁴⁾。

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が、比較対象として一括練りも行った。

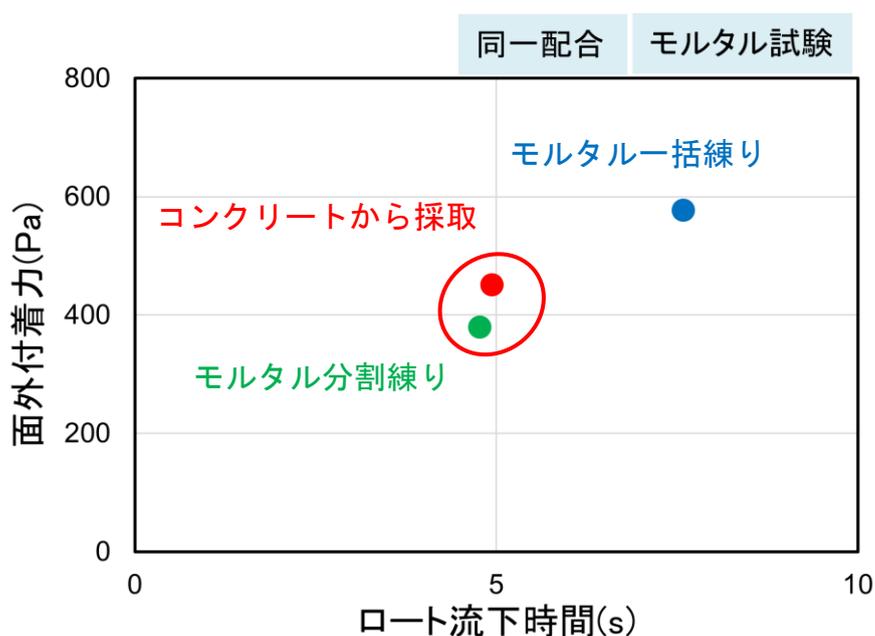


図-2.3 ロート流下時間と付着力の関係

2.4 高性能 AE 剤の添加タイミング

高性能AE減水剤(SP)添加タイミングを調整し、自己充填性能の維持を試みた(図-2.4)。セメント粒子分散途中で高性能AE減水剤(SP)を添加することによって、セメント粒子表面積が大きくなったと考察した。高性能AE減水剤(SP)の添加タイミングを早くすることで、軟度の指標であるGmの経時変化は抑制され流動性は保持されるのではないかと考えた。

コンクリートの練混ぜを想定すると、高性能AE減水剤(SP)は練混ぜ開始と同時に添加したほうが良い。所定の流動性を付与するための所要添加量が大きくなる点でも経時変化抑制に有利であることから、本研究では高性能AE減水剤を1次練り時に添加することとした。

表-2.3 混和剤添加量

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g)	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
1	炭酸水	200	0.13	1.80
2	炭酸水	200	0.13	2.10

表-2.4 練混ぜ時間

No.	1次練り時間 (s)	2次練り時間 (s)
1	90	30
2	90	30

表-2.5 配合における測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)
1	248	7.13
	243	9.47
	219	11.49

	204	15.00
2	250	6.50
	250	7.03
	243	8.71
	231	11.05

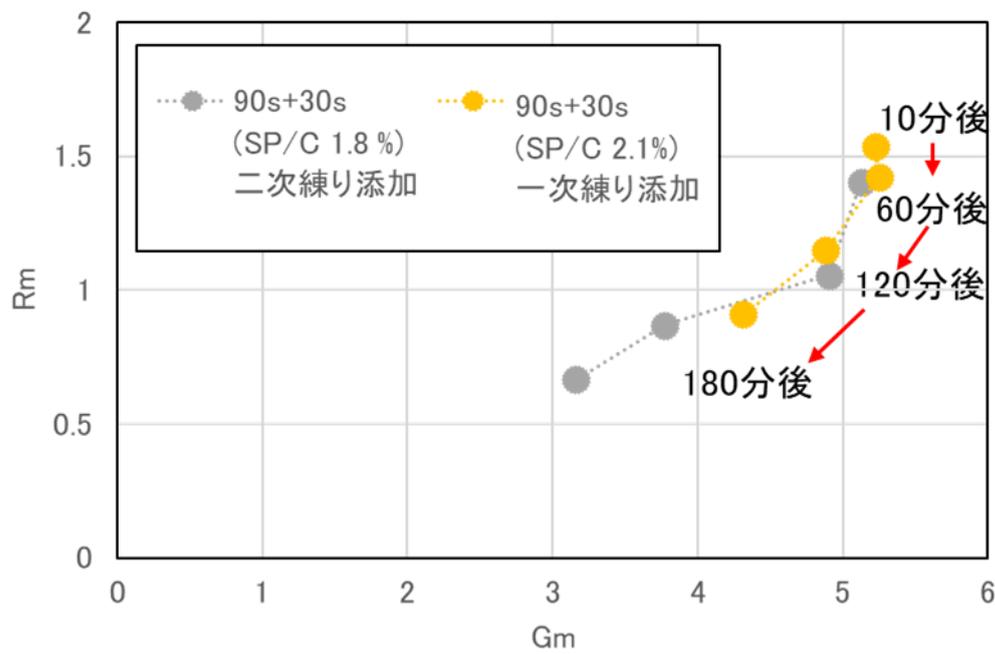


図-2.4 炭酸水練混ぜによる軟度と粘性の経時変化を減水剤の1次練り添加と2次練り添加とで比較

2.5 練混ぜ水の温度

これまで練混ぜ水として使用されていた水は、恒温室内に保管された水道水(恒温室温20°C)であった。炭酸水を使用する際は、冷蔵庫で保管したものを使用しており、実験条件を統一させることを目的に、練混ぜ水の温度と経時変化抑制との関係を調べた(図-2.5)。練混ぜ時に使用する炭酸水の温度を温度計で計測したところ、恒温室で保管した炭酸水の温度は21.6°C、冷蔵庫で保管した炭酸水は7.8°Cだった。

恒温室で保管した炭酸水練混ぜのモルタル温度は練上がり温度は、25.0°C→22.4°C(10分後→180分後)、冷蔵庫で保管した炭酸水練混ぜのモルタル温度は、22.6°C→22.4°C(10分後→180分後)であった。温度が低いと炭酸水の炭酸濃度が高くなり、高性能AE減水剤の所要添加量が大きくなるため、本研究では冷蔵庫で保管したものの方が経時変化抑制に効果的であるものと推察した。

以後、使用する水は冷蔵庫に保存したものをを使用することとした。

表-2.6 混和剤添加量

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g)	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
2	炭酸水(冷蔵)	200	0.13	2.10
3	炭酸水(常温)	200	0.13	1.90

表-2.7 練混ぜ時間

No.	1次練り時間 (s)	2次練り時間 (s)
2	90	30
3	90	30

表-2.8 各配合における測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	温度 (°C)
	250	6.50	22.6

2	250	7.03	22.8
	243	8.71	22.5
	231	11.05	22.4
3	251	6.88	25.0
	240	7.93	23.8
	231	9.66	22.4
	205	12.88	22.4

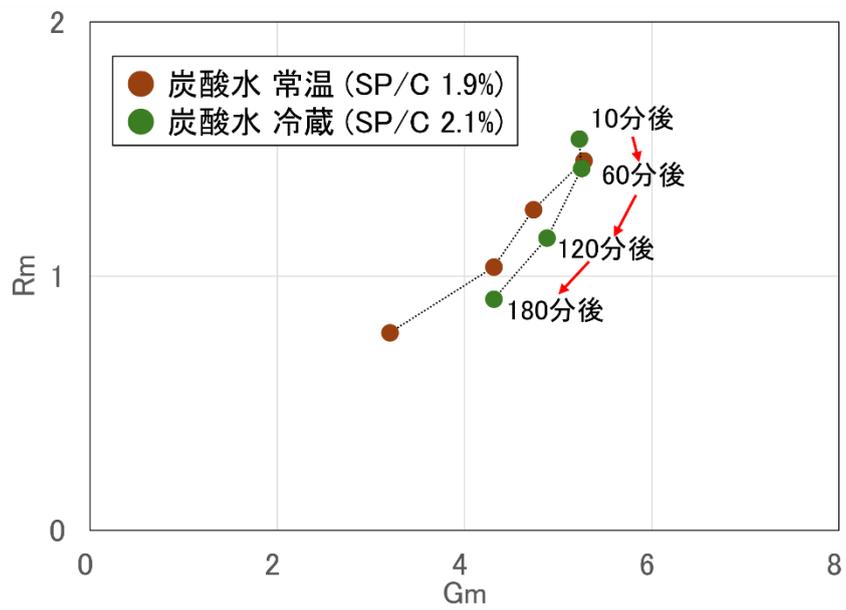


図-2.5 低温の練混ぜ水による経時安定性の向上

2.6 練混ぜ時間

炭酸水練混ぜにおける、Rmの経時変化抑制のための練混ぜ方法を検討した。

これまで1次練り90秒，2次練り30秒間で行っていた分割練りの練混ぜ時間を，まず2次練り180秒で固定し，特に2次練り時間の影響の検討を行った。極端な練混ぜ条件(2次練り時間短時間の30秒または長時間180秒)を設定し比較することで，分割練りにおける練混ぜ時間の影響を明確に把握するためである。

2次練り時間を180秒にすると，Rmの3時間後低下量抑制には効果的ではなかった。一方，2次練りで30秒間練混ぜたモルタルは，Gm，Rmともに低下量が小さく，一括練り時のようにRmの低下量を抑制できたため，2次練り時間を30秒に固定し，1次練り時間を調整することとした。

表-2.9 混和剤添加量

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g)	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
4	炭酸水	200	0.13	2.1
5	炭酸水	200	0.13	2.3
6	炭酸水	200	0.13	3.0
7	炭酸水	200	0.13	2.9
8	炭酸水	200	0.13	2.0

表-2.10 練混ぜ時間

No.	1次練り時間 (s)	2次練り時間 (s)
4	180	180
5	120	180
6	90	30
7	60	30
8	120	-

表-2.11 各配合における測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	温度 (°C)
4	248	6.25	23.5
	245	8.00	22.8
	233	8.78	22.2
	216	13.06	22.3
5	254	8.28	22.6
	248	9.09	22.6
	246	10.22	22.3
	219	13.71	21.2
6	251	6.97	20.8
	277	7.76	21.8
	276	8.04	21.6
	273	9.41	21.6
7	246	9.25	20.6
	271	10.84	21.6
	269	11.38	22.0
	268	11.94	22.0
8	255	13.81	19.5
	270	17.09	21.6
	270	17.58	21.5
	260	18.47	21.8

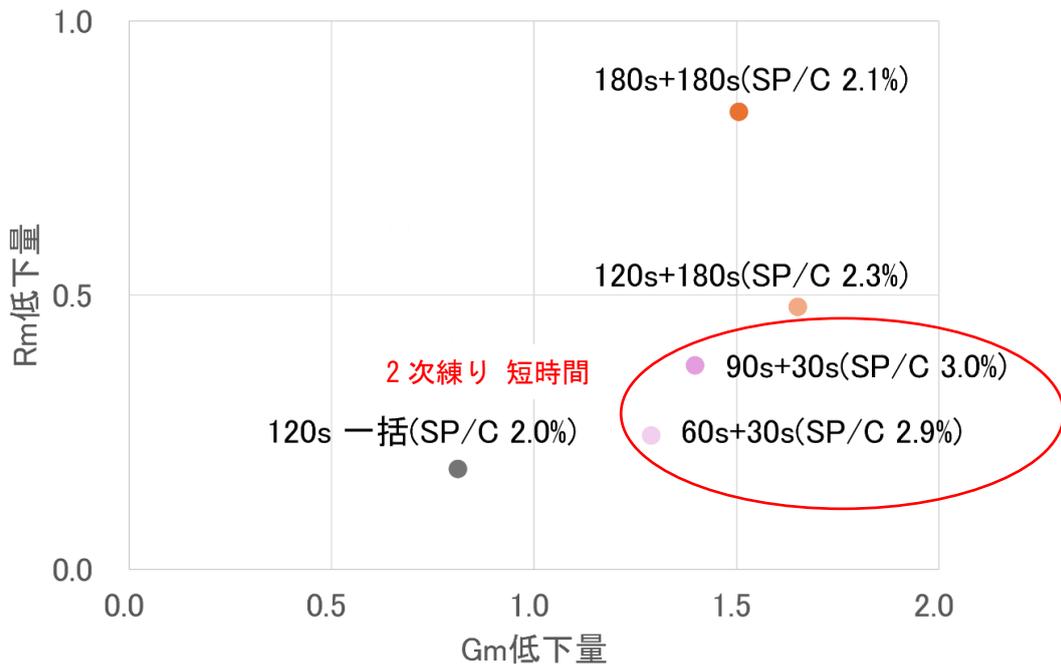


図-2.6 練混ぜ時間の調整による Gm および Rm の練上がりから 3 時間後までの低下量の変化

【短い2次練り時間はGm, Rmともに低下量が小さい】

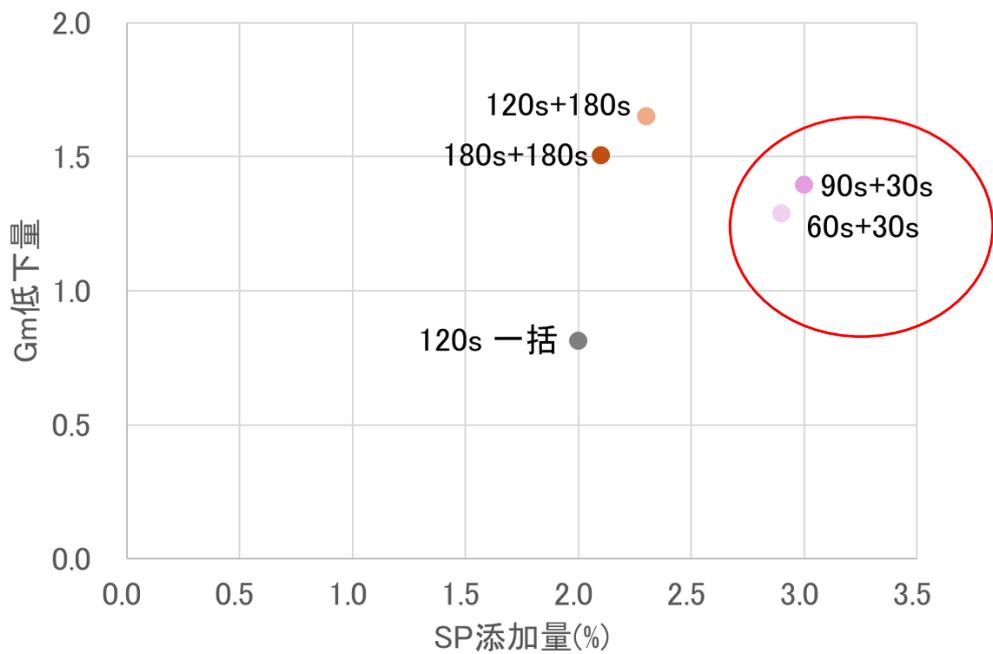


図-2.7 所要 SP 添加量と Gm 低下量の関係

【短い2次練り時間はGmの低下量が小さい】

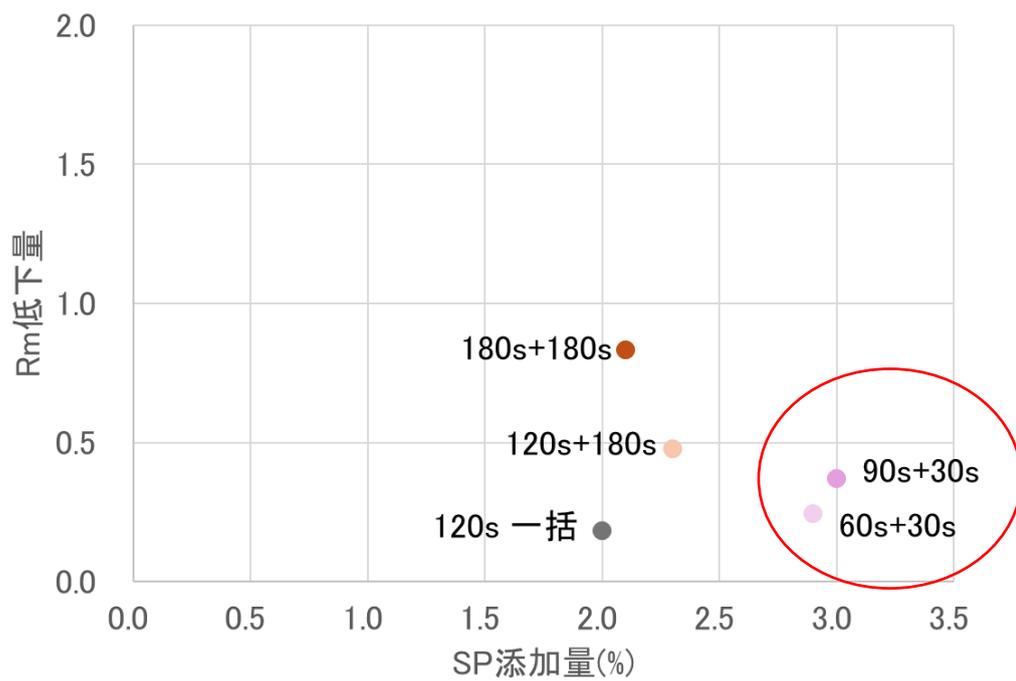


図-2.8 所要 SP 添加量と Rm 低下量の関係

【短い 2 次練り時間は Rm の低下量が小さい】

2.7 自己充填性評価に関する適切な指標

2.7.1 モルタルの軟度の指標と経時変化の指標

モルタルフロー試験は、モルタルの軟度を定量化する試験である。この試験結果はフレッシュコンクリートの軟度を定量化するスランプフロー試験の結果と高い相関がある。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。モルタルの軟度は、モルタル用フロー試験で得られたモルタルフロー値を用いて算出される相対フロー面積比Gmの指標により表される(図-2.9)。

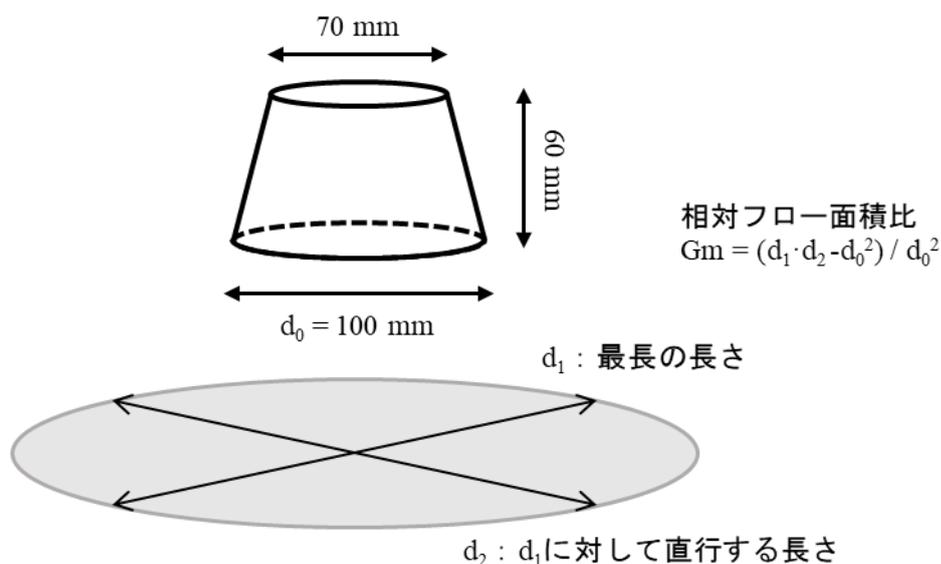


図-2.9 モルタルフロー試験

モルタルフロー試験は、モルタルの軟度を定量化する試験であり、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。モルタルの軟度は、モルタル用フロー試験で得られたモルタルフロー値を用いて算出される相対フロー面積比Gmの指標により表される。

通常、時間経過(練混ぜ後10分、60分、120分、180分)に伴い、モルタルの軟度が低下するため、Gmの値も減少するのが一般的だった。このため、10分後のGm値と180分後のGm値の単純な差を「Gmの低下量(フロー値の低下量)」として評価してきた。しかし、練混ぜ水を通常の水から炭酸水に変更し、高性能AE減水剤の添加量を増加させた場合、従来のモルタルフロー試験では見られなかった現象が発生した。具体的には、60分後のフロー値が最大値を示したり、時間経過に伴いフロー値が増加したりする場合があった。このような場合、10分後と180分後のGm値を単純に引き算して低下量を評価する方法は適切ではない。

以上のことより、Gmの算出方法は従来通り維持しつつ、時間経過におけるGmの変化をより適切に評価する新しい計算方法を考案した。

フロー値が時間経過に伴い一時的に増加する場合、その最大値を基準点として設定し、最小値と比較を行い、「フロー最大値低下量」として定義した(図-2.10)。

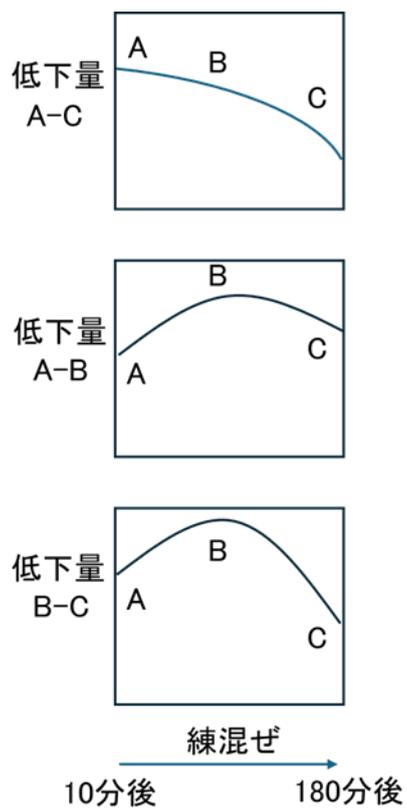


図-2.10 フロー値(Gm)低下量の算出方法

2.7.2 モルタルの粘性の指標

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 R_m が用いられる(図-2.11)。

実用性の高い漏斗試験器としては、P漏斗やJ漏斗等の円形断面を有するものであり、この場合、モルタルは3次元的に変形する。しかし、自己充填コンクリートは型枠内で鉄筋等の障害物を通過する際、主として2次元的に変形することから、本研究では強制的に2次元の変形を与えることができる図の様なV型の漏斗試験器を用いて、自己充填コンクリート用モルタルの粘性を定量化することとした。

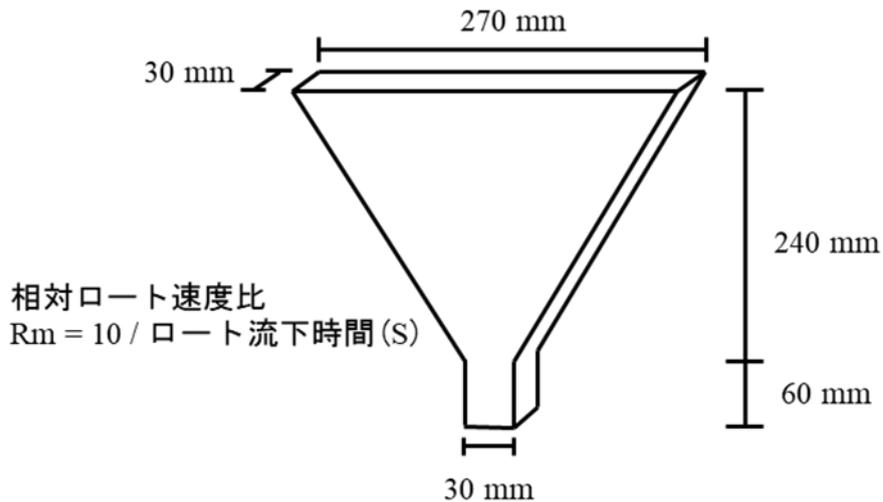


図-2.11 モルタルロート試験

第2章で述べた通り、モルタルの粘性を評価する指標として、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。相対ロート速度比Rmは

$$Rm = 10 / \text{漏斗流下時間 (s)}$$

で求められる。この定義により、漏斗流下時間が短くなるほど、Rmの値が大きくなるが、漏斗流下時間の直接比較が難しいことと過大評価のリスクがあることが課題である(図-2.12)。Rmは、漏斗流下時間の逆数を基にしているため、数値が非線形的に変化する。

例えば、漏斗流下時間が10秒から5秒に短縮されると、Rmは1から2に増加するが、10秒から9秒への短縮では、Rmの変化は0.11の増加に留まる。このため、Rmの変化量だけでは流下時間の変化幅を直感的に把握することが困難である。さらに、流下時間が非常に短い場合、Rmの値の変化が極端に大きくなる。例えば、流下時間が1秒であればRm=10、0.5秒であればRm=20となり、数値が急激に増加する。短い流下時間(1秒以下)ではRmが急激に増加する一方、長い流下時間(10秒以上)ではRmの変化が緩やかになるため粘性を評価する際に一貫性のある評価が難しくなる。

これらの課題を踏まえ、モルタルの粘性評価においてはRmの値だけでなく、流下時間そのものを指標として併用することとした。

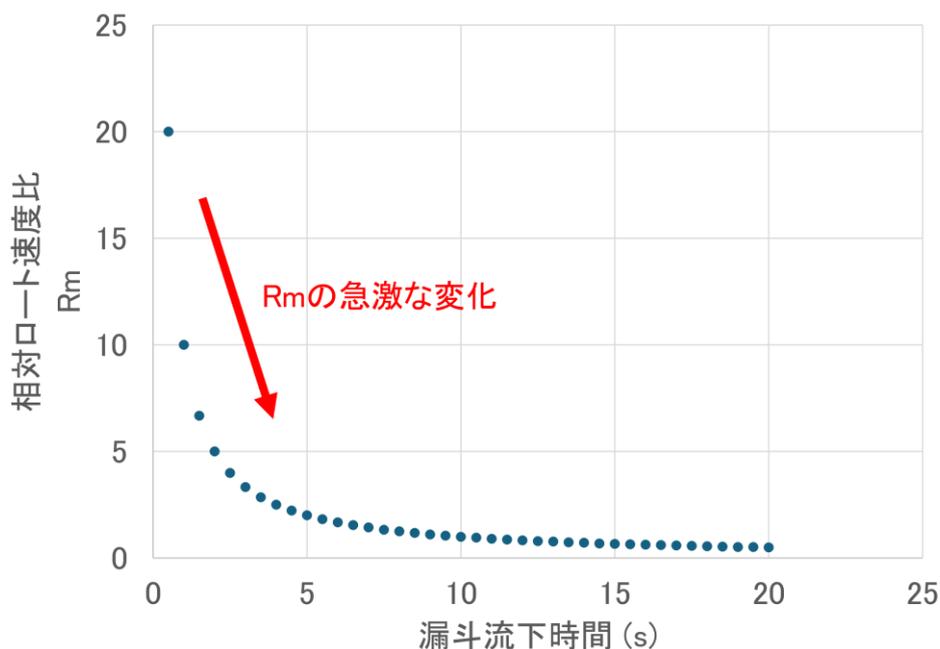


図-2.12 モルタルの粘性評価指標としてのRmの変動

参考文献

- 4) 曾我部 蓮太, 大内 雅博: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol46, No.1, pp. 937-942, 2024年

第3章 炭酸水練混ぜによる経時安定性の向上

3.1 炭酸水練混ぜとショ糖添加の併用による経時安定性の向上の検証

炭酸水練混ぜとショ糖添加を併用し、炭酸水練混ぜ経時安定性の向上を試みた。練混ぜ10分後から180分後までのGmとRmの低下量のグラフを示す(図-3.1)。ショ糖の添加と炭酸水練混ぜの併用はRmの低下量には影響していないことが分かった。さらに、ショ糖を添加することで材齢1日強度が発現しない問題点が明らかになった(図-3.2)。これは、実際の打設現場において所要施工日数の増加ひいてはコスト増加、安全性の低下などに影響を及ぼす可能性がある。

一方、炭酸水のみ練混ぜにおいては、練混ぜ方法を一括練り(プロット黄)から分割練り(プロット紫)へ変えることで、課題であったRmの初期値を、ショ糖を添加しなくても、ショ糖添加時(プロット黄緑)のように高くすることができた(図-3.3)。なお、Rmの値が小さいほど粘性が良いことを示している。分割練りによって、Rmの初期値を高く維持できたことは、粘性が向上したということである。

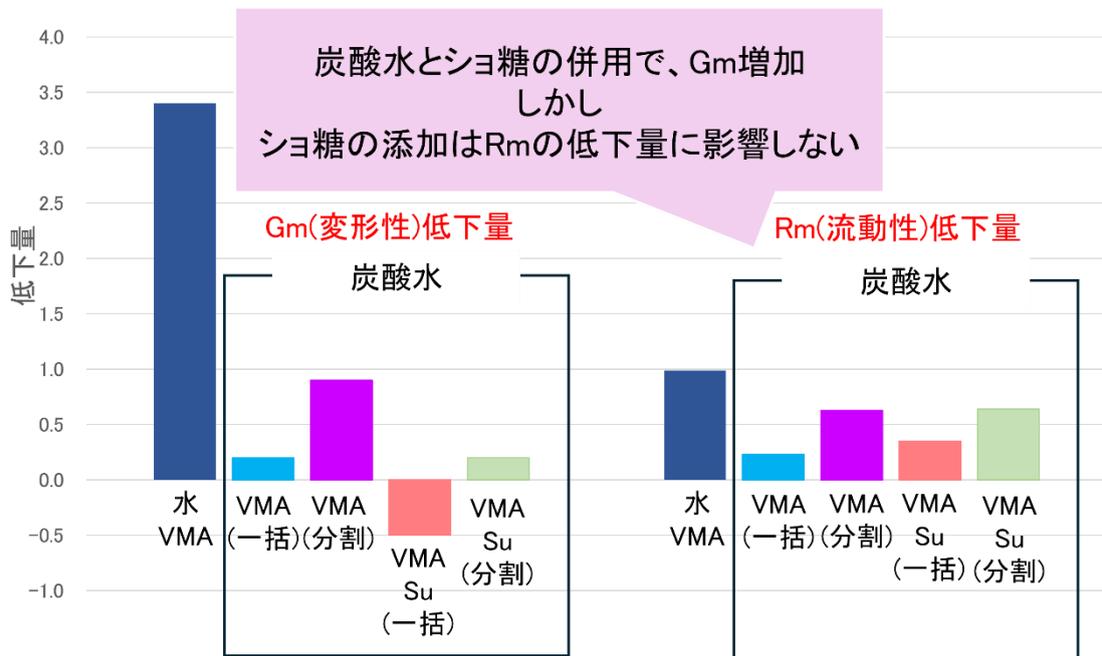


図-3.1 5種類の配合におけるGmおよびRmの練上がり3時間の低下量の比較

表-3.1 7種類の配合による混和剤添加量

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g)	シヨ糖添加量 (C×%)	高性能 AE 減水剤 添加量 (C×%)
9	水道水	-	-	-	1.20
10	水道水	200	0.13	-	2.10
11	水道水	-	-	0.10	1.20
12	炭酸水	-	-	-	1.90
13	炭酸水	200	0.13	-	2.10
14	炭酸水	--	-	0.10	0.90
15	炭酸水	200	0.13	0.10	1.00

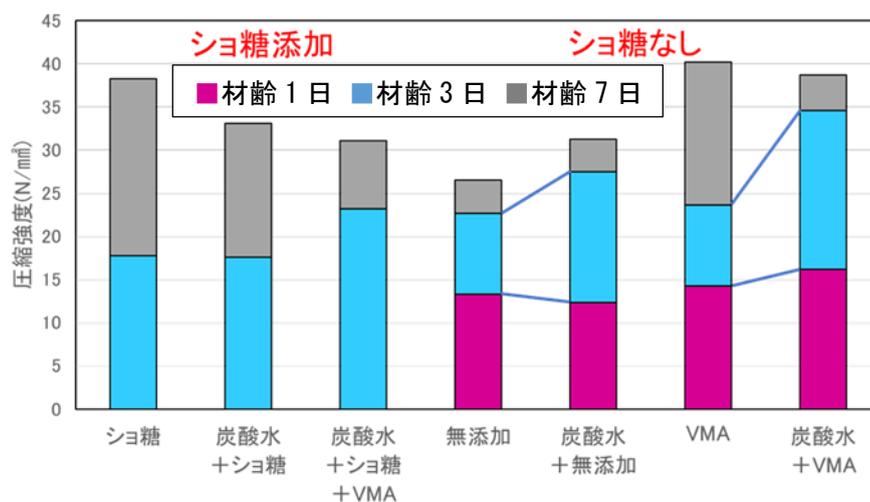


図-3.2 7種類の配合の圧縮強度発現速度

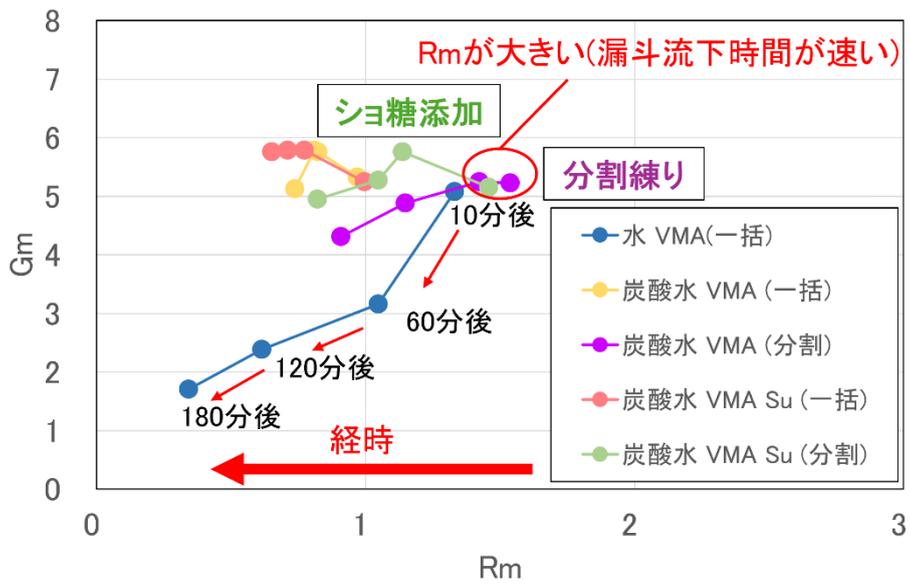


図-3.3 分割練りによる経時変化抑制効果

【すべての系列において時間経過とともにプロットは右から左に進んだ】

3.2 炭酸水練混ぜによる軟度維持性能を水道水練りと比較

炭酸水による分割練混ぜと、水(水道水)による分割練混ぜの練上がり 10 分後、60 分後、120 分後、180 分後までのフレッシュモルタルの性状に与える影響を調べた。水練混ぜは 11 月、12 月と時期を変えて 2 回、炭酸水練混ぜは、8 月、11 月、12 月に試験を行ったものをプロットとし比較を行った。

まず、練混ぜ水の種類による比較を行った。炭酸水練混ぜは水練混ぜと比較すると、どの時期、どの練混ぜ時間においてもフロー値最大値低下量が抑制され、当初目標としているフロー低下量ゼロを示していると思なせた。

11 月の結果(図-3.4)では、炭酸水練混ぜ(緑プロット)は、水練混ぜ(青プロット)と比較して、フロー最大値低下量が小さく、漏斗流下時間変化量も抑制された。特に、炭酸水練混ぜの所要 SP 添加量が 2.5~2.8%の範囲では、流動性の安定性が比較的高く、フロー最大値低下量が 20 mm 以下に収まった。一方、水練混ぜの場合、所要 SP 添加量が小さく(1.2~1.7%)、フロー最大値低下量が顕著に大きく、約 100~140 mm に達した。

12 月の結果(図-3.5)においても、炭酸水練混ぜでは、所要 SP 添加量が 2.3~3.0%の場合に漏斗流下時間変化量が最大でも 20 秒台に留まり、フロー最大値低下量も 20 mm 以下となった。一方で、水練混ぜでは、所要 SP 添加量が 1.2~1.5%の場合に漏斗流下時間変化量が 30 秒以上となり、フロー最大値低下量が 80~140 mm に達する結果が得られた。

炭酸水練混ぜにより、11 月、12 月の時期を問わず、水練混ぜを上回る流動性の経時安定性を示した。炭酸水練混ぜによりフレッシュモルタルの軟度の経時低下が抑制されるのは、練上がり直後の所要の軟度を得るための所要 SP 添加量が 2 倍程度に大きくなることによるものであることを確認した(図-3.6)。所要 SP 添加量を増加させることによる未吸着量の増加により、経時安定性を向上させた【1.2.1】のものと推察した(図-3.7)。

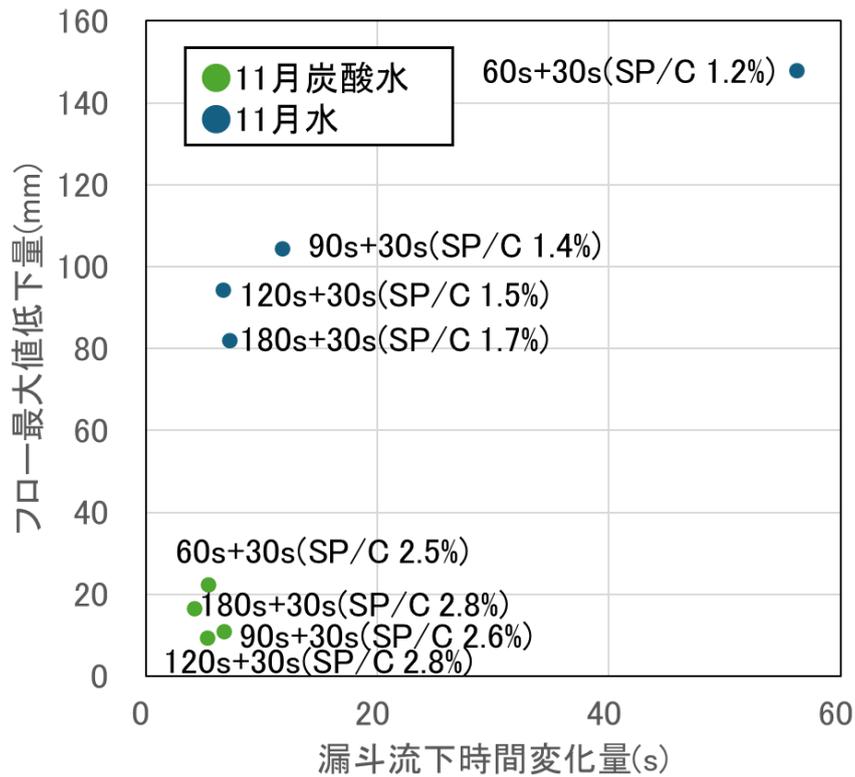


図-3.4 漏斗流下時間の変化量とフロー最大値低下量の関係(11月)

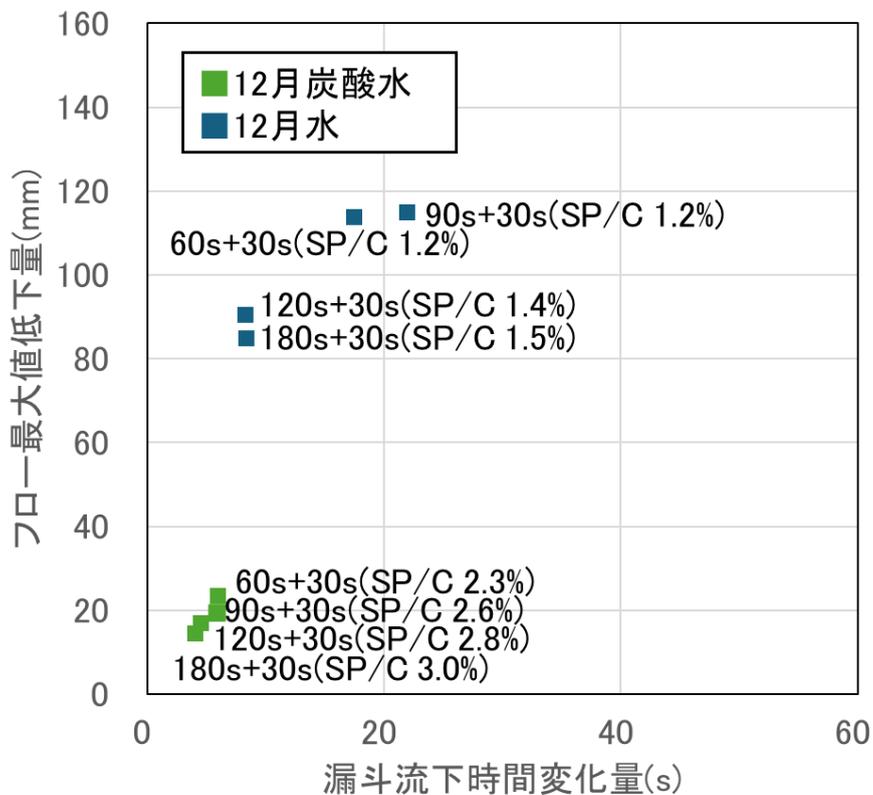


図-3.5 漏斗流下時間の変化量とフロー最大値低下量の関係(12月)

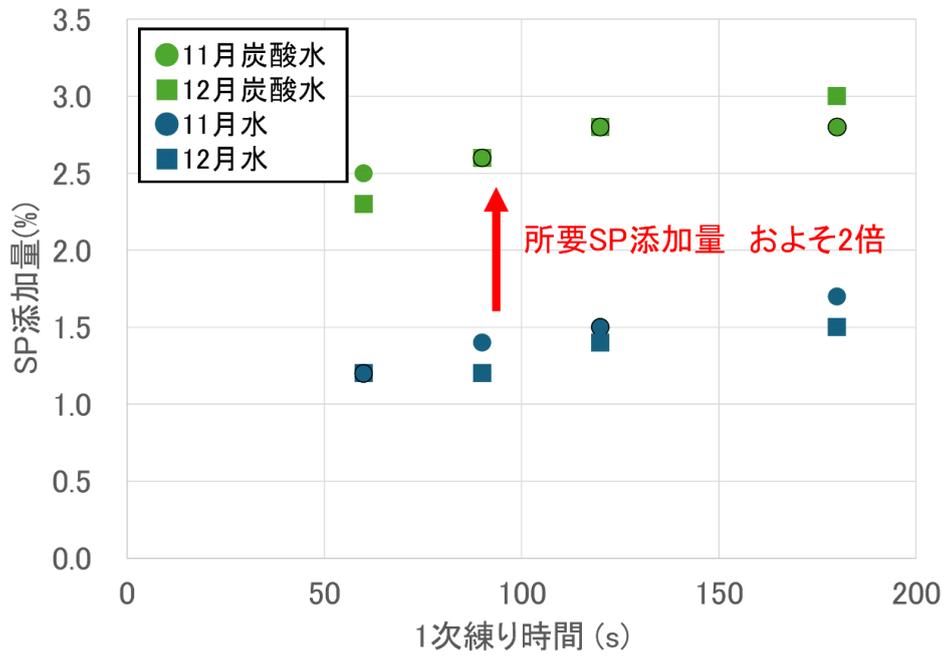


図-3.6 炭酸水練混ぜによるフレッシュモルタルの軟度の経時低下抑制の要因

【練上がり直後の所要の軟度を得るための高性能AE減水剤添加量が2倍程度に大きくなった】

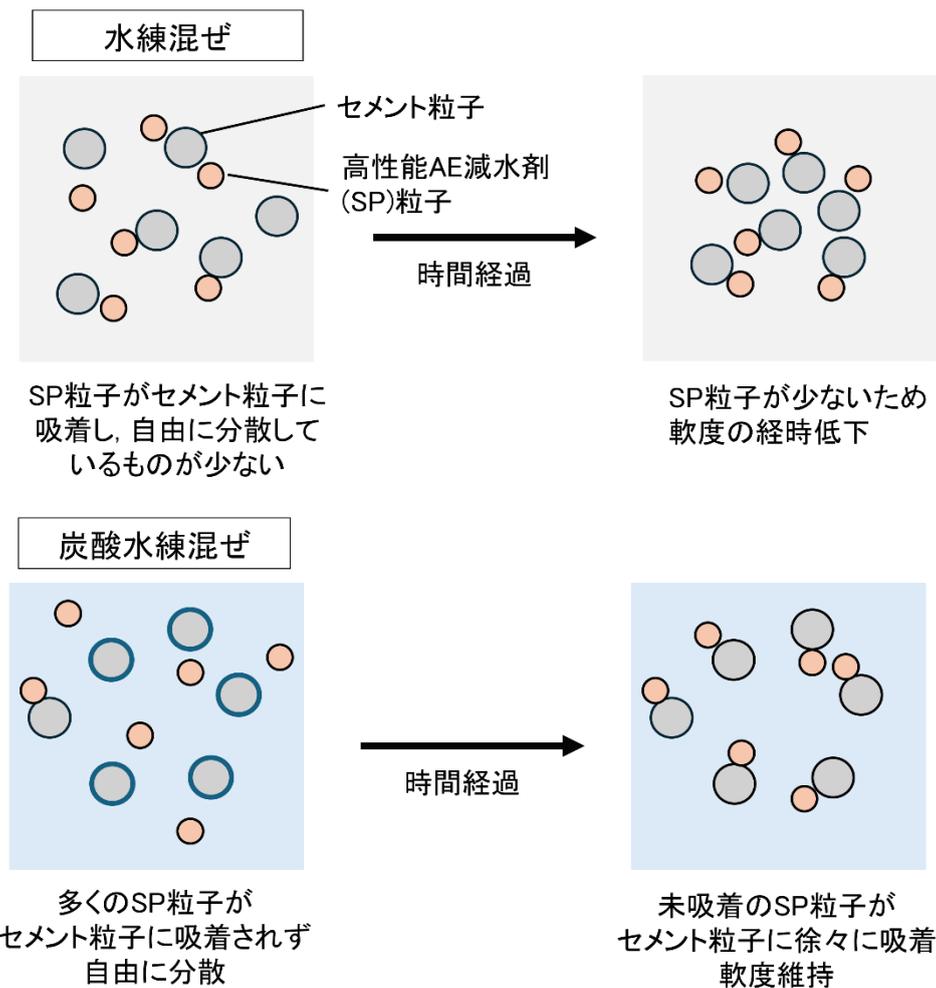


図-3.7 水練混ぜと炭酸水練混ぜのメカニズムの比較

夏季に行った炭酸水練混ぜを含めた、練上がり 180 分後の漏斗流下時間の比較を行った。炭酸水練混ぜは水練混ぜに必要とする所要 SP 添加量の 2 倍を必要とするが、水練混ぜにおける 1 次練混ぜ時間 120 秒や 180 秒といった長時間の練混ぜ時間の 180 分後漏斗流下時間は、水練混ぜと同程度の値になった(図-3.8, 3.9)。炭酸水による練混ぜが、練上がり 180 分後までの流動性の調整手段として有効であると言える。これは、軟度（フロー値）が SP 吸着量の影響を大きく受けるのに対し、粘性（漏斗流下速度）は専ら水セメント比（自由水量）に影響を受けるからであると言える。

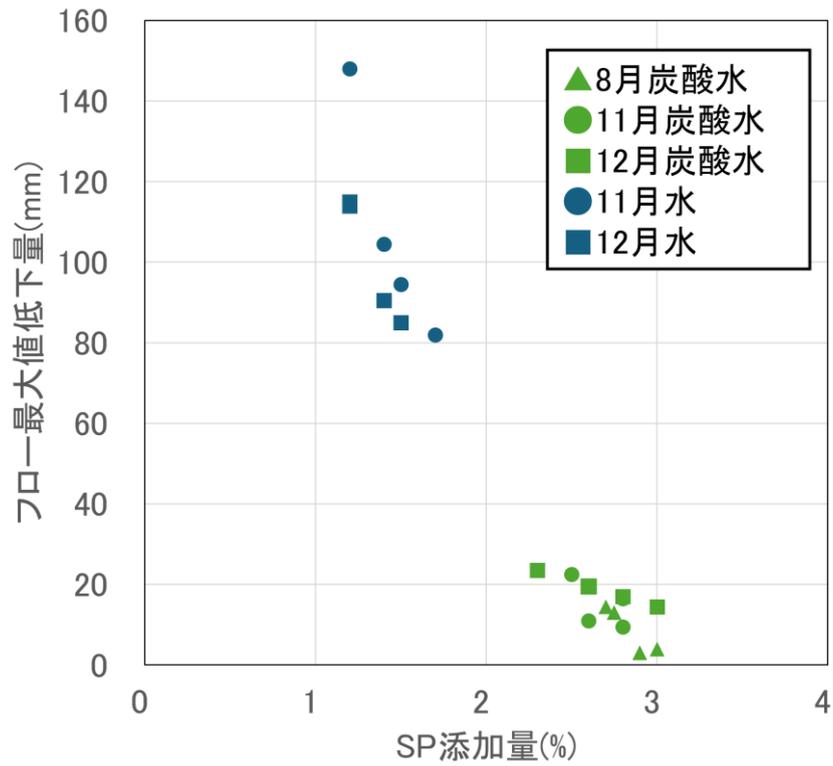


図-3.8 炭酸水練混ぜによるフロー最大値低下量の時期を変えての安定性

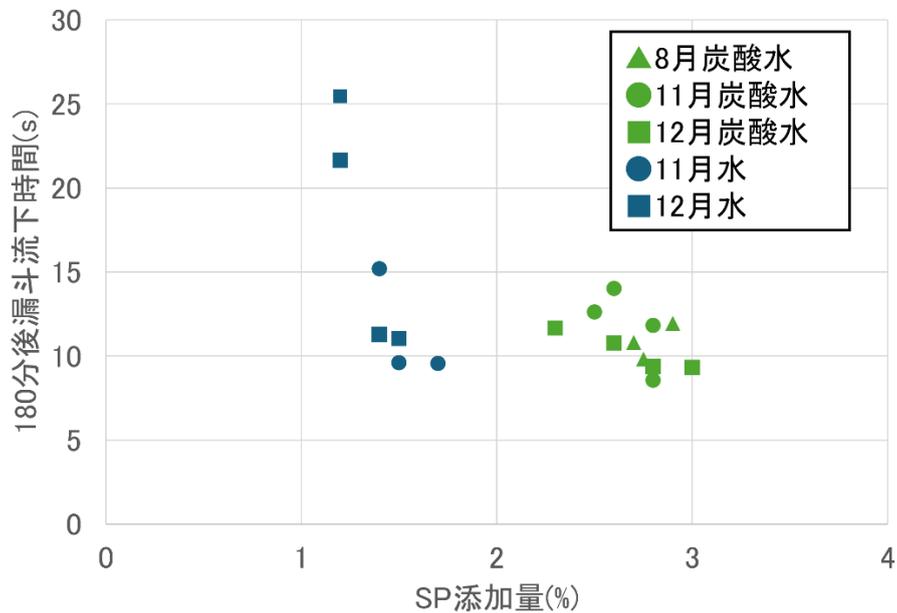


図-3.9 炭酸水練混ぜによる180分後漏斗流下時間の時期を変えての安定性

第4章 練混ぜ時間の調整による経時変化の抑制

4.1 時期による所要 SP 添加量の違い

炭酸水を用いた練混ぜにおける高性能 AE 減水剤 (SP) 添加量がフレッシュコンクリートの流動性安定性に与える影響を、時期を変えて (8月, 11月, 12月) 比較検討した。練混ぜ時間による所要 SP 添加量の変化を示した (図-4.1)。

練上がり～3 時間後までのフロー最大値低下量と漏斗流下時間変化量の関係を求め、プロット脇に練混ぜ時間および所要 SP 添加量を記した。8月では漏斗流下時間変化量とフロー最大値低下量が最も小さかった, すなわち安定していた (図-4.2)。

一方, 11月および12月では, 漏斗流下時間変化量およびフロー最大値低下量が増加し, 特に12月では流動性の低下が顕著であった。

所要 SP 添加量への影響は, 8月では 2.7~2.75%の添加量と1次練り 180 秒間+2次練り 30 秒間の練混ぜ時間が最適であった。一方, 11月および12月では SP 添加量を 2.8%以上に増加させても流動性の低下が抑制されない傾向があり, 練混ぜ条件のさらなる検討が必要であった。

これらの結果から, 炭酸水を用いた練混ぜでは, 特に所要 SP 添加量がフロー最大値低下量および漏斗流下時間変化量の経時安定化に重要であることが分かった (図-4.3, 4.4)。

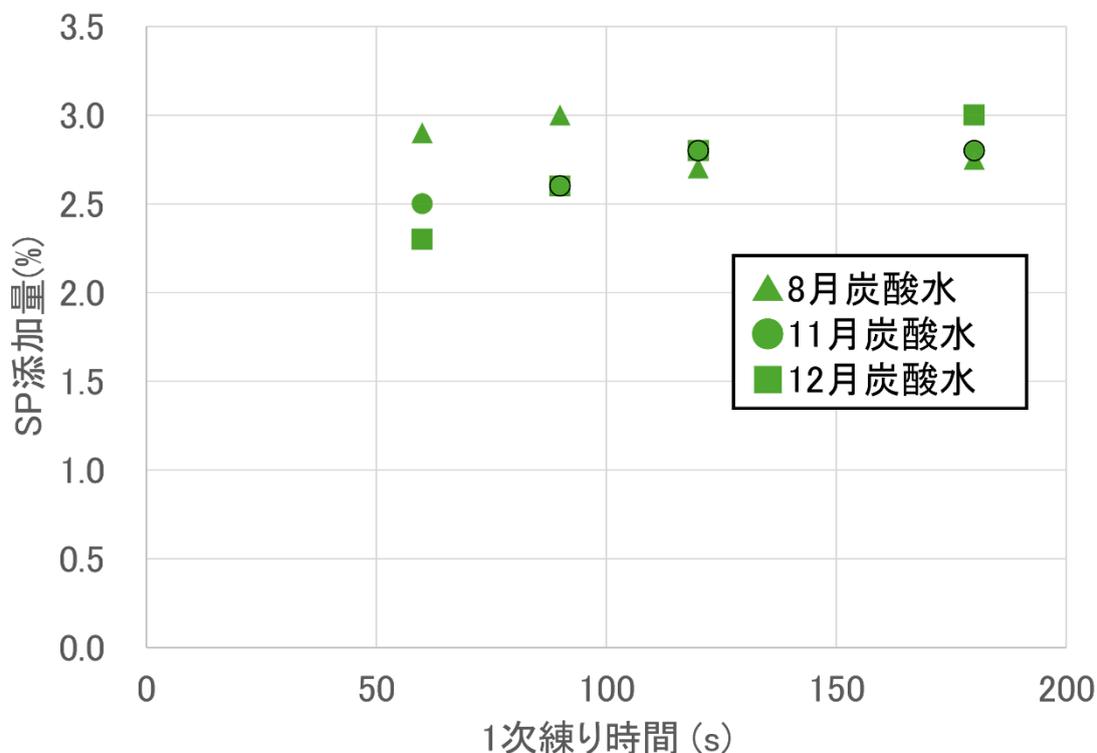


図-4.1 練混ぜ時間による所要 SP 添加量の変化

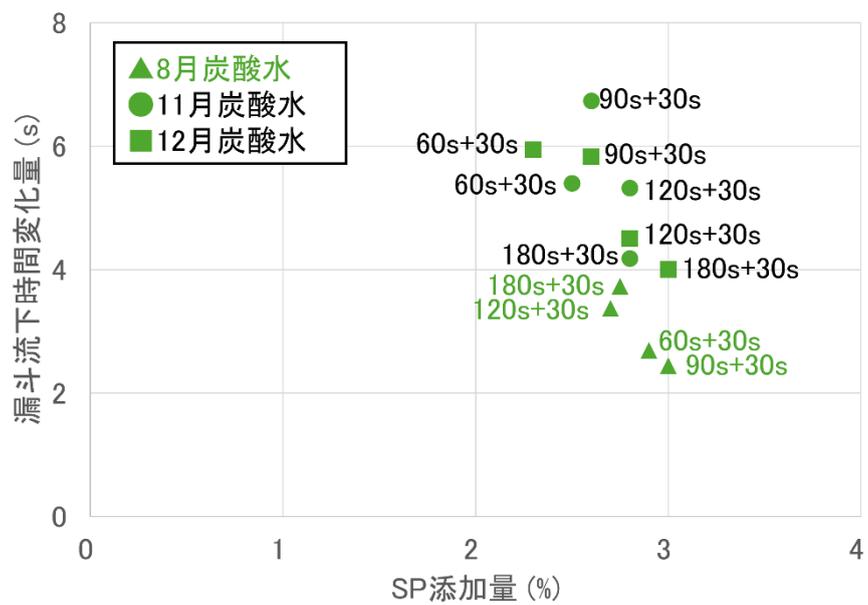


図-4.4 所要 SP 添加量の違いによる漏斗流下時間変化量の比較

4.2 練混ぜ時間が SP 所要添加量に与える影響の再検討

ここまで、練混ぜ時間を1次練り 60 秒+2次練り 30 秒、1次練り 90 秒+2次練り 30 秒、1次練り 120 秒+2次練り 30 秒、または1次練り 180 秒+2次練り 30 秒の4種類を設定した。練混ぜ時間を増加させることでセメント粒子がより分散し、その結果として高性能 AE 減水剤の所要添加量が増加するという仮定を立てていた。しかし、練混ぜ時間の増加に伴う所要 SP 添加量の変化の明確な傾向は確認されなかった。また、時期を問わず、練混ぜ時間が1次練り 180 秒の場合において、結果が他の練混ぜ時間と比較してプロット位置が外れる傾向がみられた(図-4.5)。所要 SP 添加量に関する仮定を見直す必要が生じたと言える。

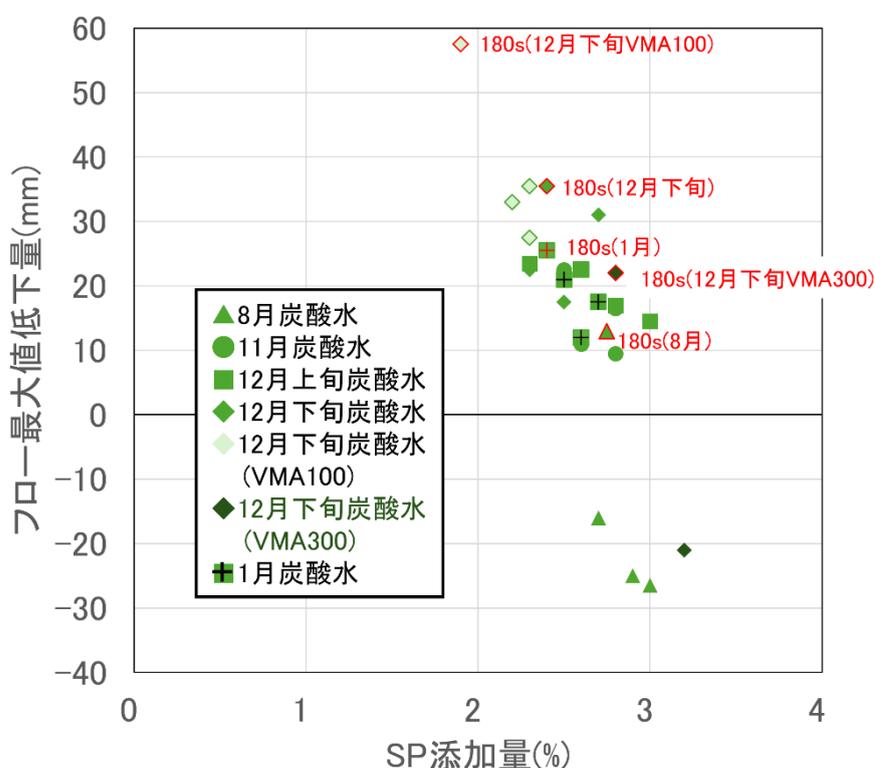


図-4.5 1次練り 180 秒の場合において、
他の練混ぜ時間と比較してプロット位置が外れる傾向(赤字)

現在の練混ぜ時間の設定(1次練りが最大 180 秒間)では、定性的な観察により、セメント粒子の十分な分散が行われておらず、SP がセメント粒子に吸着されにくく効果を発揮しにくい状況を生じさせ、所要 SP 添加量をむしろ大きくした(図-4.6)。そこで、1次練混ぜ時間をそれでの最長の 180 秒よりもさらに延長し、新たに4種類の練混ぜ時間(1次練り

120 秒 + 2 次練り 30 秒，1 次練り 180 秒 + 2 次練り 30 秒，1 次練り 240 秒 + 2 次練り 30 秒，または 1 次練り 300 秒 + 2 次練り 30 秒) で実験を行った。

所要 SP 添加量とフロー最大値低下量の関係は，1 次練りの練混ぜ時間が 180 秒以上の場合，練混ぜ時間が長くなるほど所要 SP 添加量がわずかに増加し，フロー低下量が減少した(図-4.7)。これは，練混ぜ時間が長くなることで，セメント粒子の分散が進み，SP の効果がより発揮されたのではないかと見える。さらに，時間経過によるフロー値の変化も，1 次練りの時間 120 秒以外の 3 種類では，練混ぜ時間が長くなるほどフロー値が安定して維持されていたことが分かった。つまり，1 次練混ぜ時間 180 秒以上の場合，時間経過による軟度の低下が抑制された。

以上の結果から，本実験の範囲においては，練混ぜ時間として 1 次練り 180 秒以上が望ましかつたといえる。炭酸水練混ぜにより所要 SP 添加量が，その材料設計に際して想定した添加量よりも大きくなったため，その分散効果を発揮するためのセメント粒子分散の程度に，より大きなものが求められたからだと考察した。

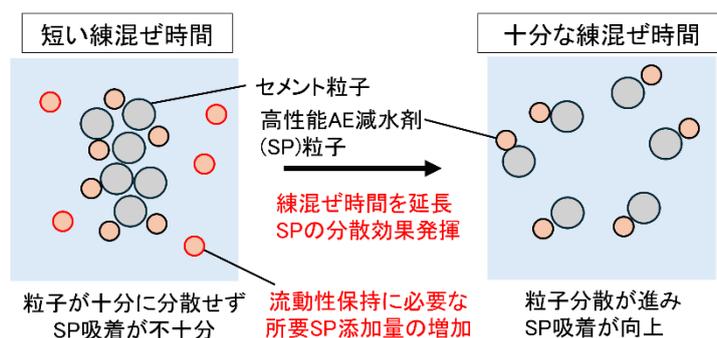


図-4.6 炭酸水練混ぜにより増加する所要 SP 添加量のため，練混ぜ時間を長くして SP の分散効果を発揮させる必要性

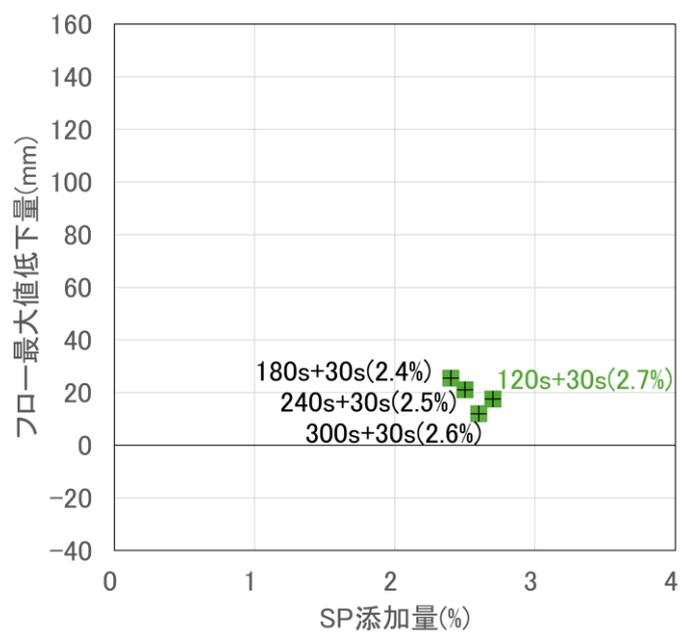


図-4.7 練混ぜ時間延長による，SP 添加量とフロー最大値低下量の関係

第5章 経時変化を最小にする練混ぜ手順の提案

5.1 基本となる現象

本章では、本研究でここまで明らかにした、練混ぜ時間、所要SP添加量と流動性の経時変化量との関係から、経時変化を最小化する練混ぜ手順を構築する。以下、基本となる法則を列挙する。

・炭酸水練混ぜによるSP残存量の増加

炭酸水練混ぜにより、所要SP添加量が増加し、SPの未吸着量が大きくなることで、軟度や粘性の経時変化が緩和される。

・練混ぜ時間にかかわらず所要SP添加量が経時変化を支配する

所要SP添加量とフロー最大値低下量の間には、非常に強い負の相関があった（本研究では相関係数 $r = -0.952$ ）。これは、所要SP添加量が増加するにつれてフロー最大値低下量が減少する傾向を示している（図-5.1）。本研究の範囲であるが、所要SP添加量が2.5%を超えるとフロー最大値低下量が急激に減少した。この負の相関は、所要SP添加量の増加による混和材の分散性が向上し、フロー現象を抑制するメカニズム【1.2.3】のものと推察した。

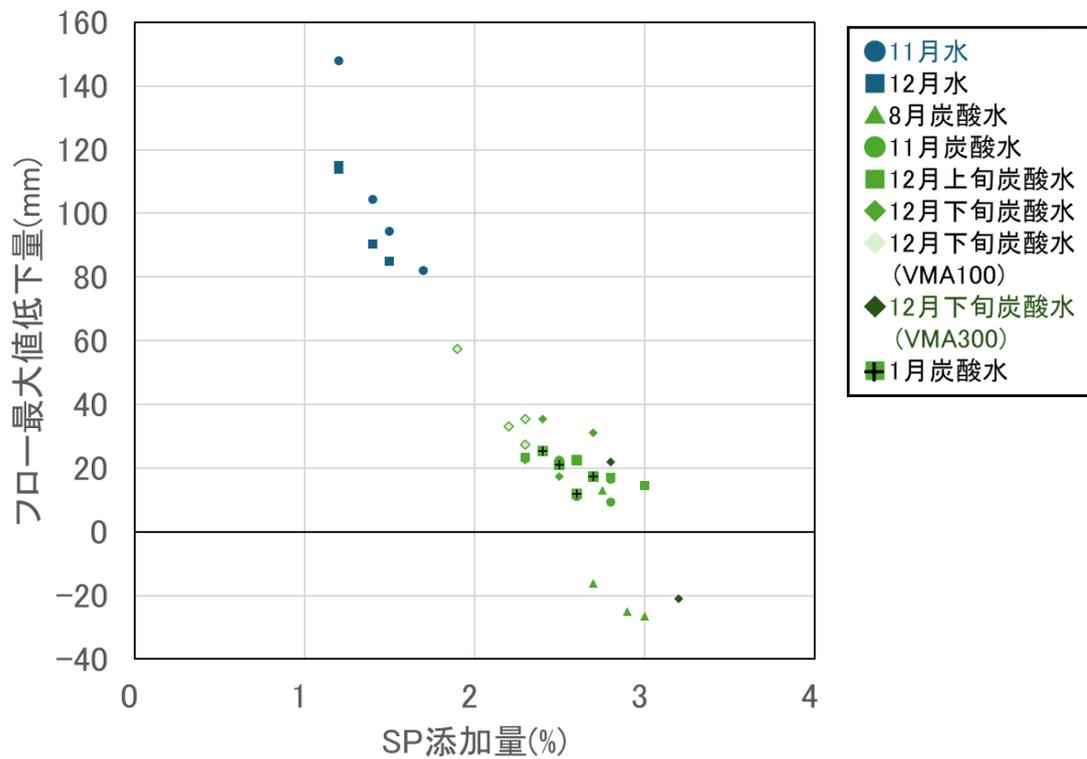


図-5.1 所要 SP 添加量が増加するにつれてフロー最大値低下量が減少する傾向

・ 1 次練混ぜ時間の延長が所要 SP 添加量を増加させる

1 次練混ぜ時間を延長することで、セメント粒子の分散が進み、SP 効果が発揮したと考えられる。所要 SP 添加量の微調整(1 次練り時間の調整)を行うことで、炭酸水練混ぜによるフレッシュモルタルの自己充填性をさらに向上させることが可能である。

5.2 練混ぜ・配合決定手順の基本

5.1 で述べた基本現象に基づき、炭酸水を用いた自己充填コンクリートの練混ぜおよび配合決定手順を以下の通りに示す。

1) 炭酸水の使用条件

炭酸水は高性能AE減水剤と同時に投入する。これにより、初期段階でセメント粒子表面へのSP吸着が促進され、長時間の流動性が保持される。

2) 所要SP添加量の調整

所要SP添加量は、練上がり10分後の目標フロー値(250mm±10mm)を満たすように決定する。調整のポイントとして、最初の実験で設定した所要SP添加量が適切でない場合、練混ぜ時間を延長し、セメント粒子の分散性を向上させる。練混ぜ時間を長くしたのに所要SP添加量が小さくなった場合は、練混ぜ時間を大幅に長くする必要がある。

3) 練混ぜ条件の設定

2次練混ぜ時間は30秒に固定する。この時間は短くても、高性能AE減水剤の効果を維持しながらフレッシュモルタルの軟度低下を抑制できることが確認できた。

以上、提案する練混ぜ手順を示した(図-5.2)。練上がり10分後の目標フロー値(250mm±10mm)を満たす所要SP添加量を決定する。この値は、本研究の結果からセメント質量に対して2.5%にすることで、調整しやすいことが分かっている。決定した所要SP添加量を1次練り時に炭酸水に混ぜ、任意の練混ぜ時間で分割練混ぜを行う。練混ぜ後は10分間、恒温室内で静置し、5秒間切り返しを行った後に、フロー試験を行う。このフロー試験で、モルタルフロー値が250mm±10mmに達しなかった場合、条件によってプロセスを選択する必要がある。「練混ぜ時間を変えない場合」と「所要SP添加量を変えない場合」の2通りの異なる処理を行い、プロセスを繰り返していく。練混ぜ所要時間の制限を守りつつ、流動性維持時間を調整したいときは「練混ぜ時間を変えない場合」として、所要SP添加量を調整し、目標フロー値に近づける。材料コストの制約があり配合を変えたくないときは「所要SP添加量を変えない場合」として、練混ぜ時間の延長または短縮し、セメント粒子の分散度を調整することで目標フロー値を目指す。

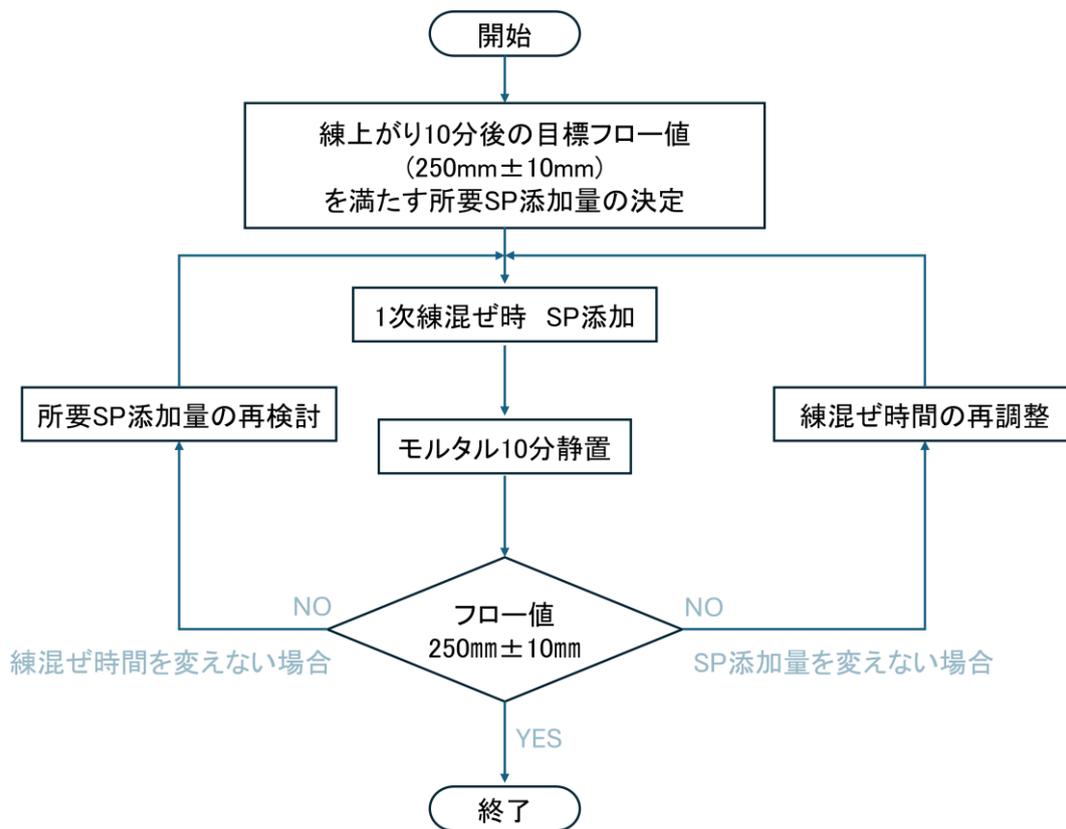


図-5.2 練混ぜ手順のフローチャート

第6章 結論

本研究では、ショ糖の代替として練混ぜ水に炭酸水を使用することで経時変化を抑制できる可能性に着目し、炭酸水を用いた自己充填コンクリートの練混ぜ手順として、経時変化を効果的に抑制するための練混ぜ方法の確立することを目的とした。結果として、炭酸水練混ぜにより **Gm** および **Rm** の経時変化が抑制されることを確認したが、短時間の練混ぜ時間では十分な効果が得られない場合もあった。この点については、さらなる検討が必要である。

本試験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 炭酸水による分割練混ぜは、水を使用した場合と比較して、フロー最大値の低下が抑制された。どの季節および練混ぜ時間においても、フローの低下量が最小限に抑えられており、当初目標としていたフロー低下がゼロとなる範囲に収めることができた。
- 2) 炭酸水を用いた分割練混ぜでは、所要 **SP** 添加量が流動性の安定化に重要であり、練混ぜ時間を調整することで所要 **SP** 添加量を調整できることができた。
- 3) 炭酸水練混ぜによりフレッシュモルタルの軟度の経時低下が抑制されるのは、練上がり直後の所要の軟度を得るための高性能 **AE** 減水剤添加量が2倍程度に大きくなることによるものであることを確認した。
- 4) 本研究の範囲では、練混ぜ時間を1次練混ぜ時間180秒以上に設定することで、セメント粒子の分散が進み、**SP** の効果が最大限発揮された。また、練混ぜ時間を増やしていくにつれて、所要 **SP** 添加量が微小に増加し、フロー最大値低下量が減少した。
- 5) 練混ぜ時間が不十分な場合は、練混ぜ時間を長くしても添加量が小さくなる場合がある。その場合は、練混ぜ時間を大幅に長くする必要があることが分かった。
- 6) 季節や増粘剤添加量の違い、炭酸水使用の有無にかかわらず、練上がり時に所定の軟度を得るための高性能 **AE** 減水剤添加量と、練上がり3時間後までの軟度の低下量との関係がほぼ一定になることを見出した。この関係を用いることにより、練上がり時に所定の軟度を得るための高性能 **AE** 減水剤添加量を指標として、効率的な配合決定法を構築した。

今後の課題として、練混ぜ時間の延長、炭酸水の濃度や SP の添加タイミングを見直し、これらの条件の影響をより詳細に研究していく必要がある。具体的には、フロー値の3時間後変化ゼロを目指すために、練混ぜ時間を長くして試験を行う(1次練混ぜ時間 300 秒, 360 秒, 420 秒)。長時間の打設作業において、フレッシュコンクリートの流動性が安定していると、効率的で高品質な施工を実現することが可能になる。

本論文では、練混ぜ時間が長くなることでセメント粒子の分散が進み、所要 SP 添加量が増加しながらも、フレッシュコンクリートの流動性が安定する傾向が分かっているが、1次練混ぜ時間 300 秒以上の長時間の場合の影響は未検証であり、フロー値変化ゼロに近づけるためには、これを明らかにする必要がある。さらに、練混ぜ時間を長くする以外の方法として、SP を入れずに1次練りを行い、1次練混ぜ時にかかる負荷を高めた実験も行う必要がある。SP を後から添加することで、初期練混ぜでの負荷が高まるため、セメント粒子の分散性や未吸着 SP の影響を明らかにし、より効率的な SP の使用法を確立することが可能になる。

参考文献

- 1) 菅俣 匠, 日比野 誠, 大内 雅博, 岡村 甫: 練混ぜ時における高性能 AE 減水剤の粒子分散効果に関する定量的評価, 土木学会論文集 No. 634/ V-45, 255-267, 1999 年 11 月
- 2) 和田 晃宜, 浅野 弘裕, 大内雅弘: 砂糖添加による水和反応進行の抑制が自己充填性能安定化のためのフレッシュモルタルの性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol143, No. 1, 2021 年
- 3) 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, Vol145, No. 1, 2023 年
- 4) 曾我部 蓮太, 大内 雅博: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol146, No. 1, pp. 937-942, 2024 年
- 5) 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
- 6) Tong Zhang, Jiase Cui, Meng Chen, Xiaowei Ouyang, Zhiguo Yan: Effect of carbonated recycled concrete fines on early-age engineering properties, hydration and microstructure of cement paste under high substitution level and low water-to-binder ratio, Journal of Building Engineering Volume 96, 1 November 2024

付録1 VMA 添加量による自己充填性能への影響

増粘剤は水溶性セルロースエーテル系のものを使用し、粗骨材容積比 0.3 のコンクリート中に 200g/m³となるよう添加している。新たに 100g/m³添加したものと 300g/m³添加したものを比較した。どの試験体も同時期の同条件下で行った。

VMA 添加量を従来の 200g/m³から増加させた 300g/m³のモルタルでは、練混ぜ時間に関係なく、所要 SP 添加量は増加した。VMA 添加量を従来の 200g/m³から減少させた 100g/m³のモルタルでは、練混ぜ時間 1 次練り 180 秒、2 次練り 30 秒のものは所要 SP 添加量が減少した。VMA 添加量が多いほど、フロー最大値低下量が小さくなることが分かった(付録図-1)。

時間経過によるフロー値の変化をみると、VMA 添加量に関係なく、短い練混ぜ時間(1 次練り 60 秒)で練ったモルタルのフロー値は、長い練混ぜ時間(1 次練り 180 秒)で練ったモルタルよりも変化量が少ないことが分かった。

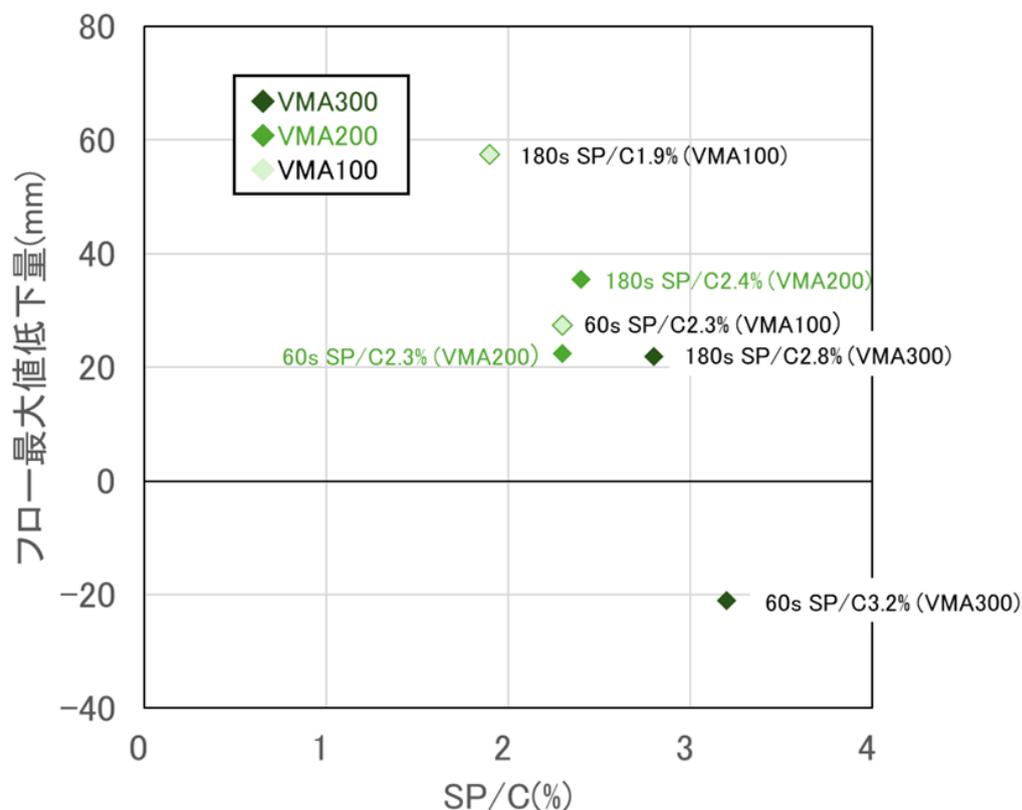


図-1 増粘剤添加量の影響による所要 SP 添加量とフロー最大値低下量の関係

付録2 各章の実験データ

【第4章 練混ぜ時間の調整による経時変化の抑制】で使用した実験データを示す(付録表-1, 2, 3)。

表-1 混和剤添加量

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g)	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
16	炭酸水(8月)	200	0.13	2.90
17	炭酸水(8月)	200	0.13	3.00
18	炭酸水(8月)	200	0.13	2.70
19	炭酸水(8月)	200	0.13	2.75
20	炭酸水(8月)	200	0.13	2.00
21	炭酸水(11月)	200	0.13	2.50
22	炭酸水(11月)	200	0.13	2.60
23	炭酸水(11月)	200	0.13	2.80
24	炭酸水(11月)	200	0.13	2.80
25	炭酸水(11月)	200	0.13	2.00
26	水(11月)	200	0.13	1.20
27	水(11月)	200	0.13	1.40
28	水(11月)	200	0.13	1.50
29	水(11月)	200	0.13	1.70
30	水(11月)	200	0.13	0.90
31	炭酸水(12月)	200	0.13	2.30
32	炭酸水(12月)	200	0.13	2.60
33	炭酸水(12月)	200	0.13	2.80
34	炭酸水(12月)	200	0.13	3.00
35	水(12月)	200	0.13	1.20
36	水(12月)	200	0.13	1.20
37	水(12月)	200	0.13	1.40
38	水(12月)	200	0.13	1.50

表-2 練混ぜ時間

No.	1次練り時間 (s)	2次練り時間 (s)
16	60	30
17	90	30
18	120	30
19	180	30
20	120	-
21	60	30
22	90	30
23	120	30
24	180	30
25	120	-
26	60	30
27	90	30
28	120	30
29	180	30
30	120	-
31	60	30
32	90	30
33	120	30
34	180	30
35	60	30
36	90	30
37	120	30
38	180	30

表-3 各配合における測定結果

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	温度 (°C)
16	246	9.25	20.6

	271	10.84	21.7
	269	11.38	21.3
	268	11.94	21.0
17	251	6.97	20.8
	277	7.76	21.8
	276	8.04	21.6
	273	9.41	21.6
18	249	7.44	22.1
	258	8.00	22.0
	265	8.97	22.2
	250	10.81	22.1
19	256	6.10	23.4
	264	7.09	23.2
	261	7.67	22.2
	251	9.83	22.2
20	249	13.81	19.5
	251	17.09	21.6
	247	17.58	21.5
	239	18.47	21.8
21	250	7.22	19.9
	260	9.37	21.7
	250	10.51	21.8
	238	12.62	21.8
22	252	7.28	20.4
	255	8.57	21.6
	246	10.46	21.8
	244	14.01	21.6
23	250	6.49	20.8

	250	7.45	22.1
	248	9.28	21.8
	241	11.81	21.7
24	253	4.38	22.3
	243	5.63	22.3
	247	6.52	23.8
	236	8.56	21.1
25	255	8.00	19.5
	271	9.43	20.7
	270	10.45	20.7
	260	11.15	19.2
26	250	3.82	19.9
	198	6.35	20.9
	166	10.56	21.0
	102	60.01	21.2
27	253	3.40	20.5
	218	5.00	21.2
	192	7.87	21.2
	149	15.19	20.8
28	255	2.89	20.7
	233	3.69	21.4
	208	5.71	21.4
	261	9.59	21.2
29	255	2.30	21.9
	236	3.28	21.9
	207	5.17	21.6
	173	9.56	21.5
30	250	6.46	18.9

	191	10.75	20.5
	150	19.06	20.7
	120	-	20.7
31	248	5.72	19.7
	245	8.05	20.7
	239	8.96	20.6
	225	11.66	20.1
32	255	4.95	19.7
	252	7.10	20.6
	250	8.53	20.1
	233	10.78	19.9
33	248	4.87	20.1
	251	6.85	20.5
	241	7.56	20.1
	234	9.37	20.1
34	248	5.30	21.9
	250	6.60	21.8
	240	8.96	20.6
	236	9.30	20.1
35	255	4.22	20.1
	206	6.72	20.1
	175	11.53	19.7
	141	21.65	19.7
36	250	3.56	20.1
	203	6.03	20.3
	173	10.44	20.1
	135	25.47	19.7
37	255	3.06	20.7

	223	4.44	20.7
	200	7.03	19.8
	265	11.28	20.0
38	250	2.66	22.0
	220	4.28	21.2
	195	6.81	20.7
	165	11.03	20.2

【付録1 VMA添加量による自己充填性能への影響】で使用した実験データを示す(付録表-4, 5, 6)。

表-4 混和剤添加量(VMA添加量の違い)

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g)	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
39	炭酸水	100	0.06	2.30
40	炭酸水	100	0.06	1.90
41	炭酸水	200	0.13	2.30
42	炭酸水	200	0.13	2.40
43	炭酸水	300	0.19	3.20
44	炭酸水	300	0.19	2.80

表-5 練混ぜ時間(VMA添加量の違い)

No.	1次練り時間 (s)	2次練り時間 (s)
39	60	30
40	180	30
41	60	30
42	180	30
43	60	30
44	180	30

表-6 各配合における測定結果(VMA添加量の違い)

No.	フロー (mm)	ルート流下時間 (s)	温度 (°C)
39	255	3.52	18.1
	267	4.65	18.8
	255	5.62	18.5
	240	7.42	18.1
40	248	3.01	20.4
	225	3.64	20.3
	201	5.56	20.3
	191	6.27	18.9
41	250	4.56	18.0
	254	5.77	18.3
	248	6.43	18.0
	232	7.45	17.8
42	255	3.50	20.5
	246	4.37	20.3
	234	6.08	20.3
	220	7.12	19.3
43	248	4.68	17.8
	269	6.28	19.1
	261	7.32	19.1
	257	7.68	19.2
44	249	4.65	19.2
	245	5.53	20.1
	242	6.80	19.0
	227	8.50	19.0

【4.2 練混ぜ時間がSP所要添加量に与える影響の再検討】で使用した実験データを示す
(付録表-7, 8, 9)。

表-7 混和剤添加量(練混ぜ時間の延長)

No.	練混ぜ水	VMA 添加量 (g/m ³)	消泡剤添加量 (g)	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
45	炭酸水	200	0.13	2.70
46	炭酸水	200	0.13	2.40
47	炭酸水	200	0.13	2.50
48	炭酸水	200	0.13	2.60

表-8 練混ぜ時間(練混ぜ時間の延長)

No.	1次練り時間 (s)	2次練り時間 (s)
45	120	30
46	180	30
47	240	30
48	300	30

表-9 各配合における測定結果(練混ぜ時間の延長)

No.	フロー (mm)	ロート流下時間 (s)	温度 (°C)
45	247	4.84	19.3
	265	5.46	18.9
	260	6.08	18.0
	251	6.94	18.0
46	250	3.71	19.7
	256	4.58	19.5
	241	5.37	18.7
	230	6.50	17.9
47	255	3.20	20.8
	256	3.99	20.1

	245	4.71	19.7
	235	6.20	19.3
48	256	2.89	21.1
	257	3.61	20.3
	251	4.19	19.8
	245	5.44	19.3

謝辞

本研究に際して、多くの方々の多大なるご協力をいただ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いただきました。締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。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。心より御礼申し上げます。

本研究を行うにあたって、研究の形を作ってくださった先輩方、とも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、実験の手伝いや相談に乗っていただきました。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。

2025年1月 佐藤 京香