

論文 高強度コンクリート配合の空練りによる流動性向上に関するモルタルのレオロジー的考察

坂本 恭裕*1・川崎 佑磨*2・平野 修也*3・三島 剛*4

要旨：高強度コンクリートの製造技術として、空練り（練混ぜ初期における細骨材とセメントの練混ぜ）による流動性向上について考察してきた。本報では、実務への適応を想定した施工性確認のため、空練りによる流動性向上効果をモルタルのレオロジーに基づき検証した。その結果、一定の空練り時間を確保することで、目標スランプフローを得るための混和剤添加量が低減可能であり、回転粘度計を用いたレオロジー試験によりモルタルの粘性が低下することを確認した。一方で、コンクリート中のモルタルは、同一スランプフローに関わらず、空練り時間によって粘性が変化することを確認した。

キーワード：高強度コンクリート，2 軸強制練りミキサ，空練り，レオロジー，回転粘度計，混和剤

1. はじめに

我が国では、自然災害の激甚化、頻発化から、防災・減災やインフラ老朽化対策が進められている。また、人口減少などの社会問題からも、建設業界における労働力確保や生産性向上などの対応が急務となっている¹⁾。

そのような背景から、国土強靱化や品質向上、工期削減などに伴い、高強度コンクリートでの施工や、高強度コンクリートを使用したプレキャストコンクリート製品の利用がますます促進されると予測される。2019 年の JIS A 5308 改正における趣旨にも、高強度コンクリートの利用を推進するためと明記されている。

高強度コンクリートの利用が増加することからも、施工技術だけでなく、バッチャープラントでの製造においても、最適な製造技術が求められる。

その製造技術において、練混ぜ条件がコンクリートの流動性に影響を与えることが確認されているが、高強度コンクリートの配合において、影響の程度やメカニズムの解明を試みた事例は少ない。製造時の品質確保の観点から、練混ぜ条件に伴う流動性の相違の解明は急務であり、メカニズムの解明が今後の高強度コンクリートの安定的な供給に寄与できると考える。

そこで既報²⁾として、練混ぜ初期における細骨材とセメントの練混ぜ（以下、空練り）の有無や練混ぜ時間に着目して、空練りが高強度コンクリートの流動性に与える影響を考察した。2 軸強制練りテストミキサを用いた

実務により近い形での実験を実施することで、空練りの影響およびメカニズムについて報告した。

本報では、2 軸強制練りテストミキサにて、空練りによる流動性向上を確認するとともに、実務への適応を想定して混和剤添加量により流動性を制御した場合への影響を確認した。さらに施工性の判断材料を得るため、レオロジーによる考察を試みた。空練り条件や混和剤添加量をパラメータに、モルタル、コンクリートおよびコンクリートからウェットスクリーニングにより採取したモルタルのコンシステンシーを測定するとともに、モルタルを対象に回転粘度計による測定を実施することで、空練りによる流動性向上をレオロジー的に考察した。

また、先行研究でも必要不可欠であった混和剤に着目し、超高強度コンクリート用高性能減水剤だけでなく、高強度コンクリート用高性能 AE 減水剤についても試験を行い、混和剤種類が空練りによる高強度コンクリートの流動性向上に与える影響についても検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

先行研究同様に、実験対象とした設計基準強度 80N/mm² の高強度コンクリートの配合を表-1 に示す。本研究では、2 軸強制練りテストミキサ（公称容量 60L）での練混ぜ可能量である 36L を基準とし、モルタル試験のための採取分も考慮した必要材料値を計算して、後述

表-1 高強度コンクリートの配合（呼び方：80-60-20L）

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)				
			水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤 (SP)
21.4	44.3	0.521	175	818	620	817	変動値

*1 日工株式会社 技術本部 開発部 博士(工学) (正会員)

*2 立命館大学 理工学部 環境都市工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 株式会社フローリック 技術本部 コンクリート研究所 主席研究員 博士(工学) (正会員)

*4 株式会社フローリック 関西支店 技術課長 博士(工学) (正会員)

する各試験を行った。試験環境は温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 60%RH 以上の室内とした。表-2 に使用材料を示す。混和剤は、セメント分散性能を高めた高性能減水剤 SPU と、保持性能を有する高性能 AE 減水剤 SPH を用いた。なお、細骨材の表面水率は 2.39% に調整した。先行研究での最適表面水率が 2~3% の範囲であったことによる。

2.2 練混ぜ方法

図-1 に練混ぜ方法を示す。本研究ではミキサの動力負荷の観点から、粗骨材投入までのモルタル練混ぜ段階で十分に動力の低減が確認できた時間を最適練混ぜ時間と考え、その予備実験結果から、空練り時間を含むモルタル練混ぜを 7 分、粗骨材を投入してからのコンクリート練混ぜを 3 分として、合計 10 分の練混ぜを行った。

また、空練り時間による影響を確認するため、モルタル練混ぜ時間を 7 分に固定したまま、空練り時間を 10, 30, 90 秒の 3 パターンで設定した。これに対応するように注水後のモルタル練混ぜ時間を変更した。練上り直後のモルタルから試料を 3L 採取し、速やかに粗骨材を投入してフレッシュコンクリートを製造した。

2.3 試験項目

本研究では、空練り時間 10 秒で目標スランブフロー 650mm となる混和剤添加率を基準に空練り時間のみを変化させた場合と、空練り時間ごとに目標スランブフロー 650mm となるように混和剤添加率を調整した場合について検討した。練上り直後のモルタル、コンクリートおよびコンクリートからウェットスクリーニングにより採取したモルタル（以下、WS モルタル）を対象に、コンシステンシー試験およびレオロジー試験を実施した。

コンシステンシー試験はモルタルおよび WS モルタルではフロー試験（JIS R 5201）、コンクリートではスランブフロー試験（JIS A 1150）を行った。フロー試験を動画撮影し、フロー150mm 到達時間を求めた。レオロジー試験はモルタルおよび WS モルタルを対象に回転粘度計による測定を実施した。その詳細は 3. で後述する。

回転粘度計は十字羽根（板厚 1mm、高さ 30mm×幅 15mm）を装着した。φ15×10cm の容器に試料を約 1L 充填後、速やかに測定に供した。

3. レオロジー特性の評価方法

回転粘度計による測定では、50rpm に到達するまで十字羽根の回転速度を徐々に増加させる履歴（上昇曲線）と、その後 0rpm に到達するまで回転速度を徐々に低下させる履歴（下降曲線）で構成されるせん断速度とせん断応力の関係曲線（ヒステリシスループ）を測定した。ヒステリシスループで囲まれた面積 s_{tx} によって、凝集構造の破壊と回復の時間的なズレの度合い、すなわちクソトロピー性を簡易評価できると報告されている³⁾。

また、フロー試験からモルタルのレオロジー定数を推定するため、東舟道ら⁴⁾が提案した式(1)および式(2)の推定式を用いて、降伏値 τ_y および塑性粘度 η を求めた。

$$\tau_y = 2292e^{-0.01833MF} \quad (1)$$

$$\eta = 15.53T_{150} + 155.5\rho - 342.7 \quad (2)$$

ここで、 MF はフロー値(mm)、 T_{150} はフロー150mm 到達時間(s)、 ρ はモルタル密度(g/cm^3)を表す。

4. 実験結果および考察

各試験項目における結果を、表-3 にまとめて示す。表中の試料名は「混和剤種類-空練り時間(s)-目標スランブフロー(mm)」の違いを示す。なお、「over」は空練り時間のみを増加することでスランブフロー値が 650mm を超えることを表す。

4.1 練上り直後のモルタルの性状

(1) 同一混和剤添加量時の空練り効果

図-2 に混和剤種類ごとの空練り時間とモルタルフローおよびスランブフローの関係を示す。SPU および SPH ともに、空練り時間が長くなるほどモルタルフローおよびスランブフローは大きくなる傾向を示した。特に 90 秒では空練りの影響が顕著となり、30 秒と比べ SPH では 47mm、SPU では 89.5mm ものスランブフロー差となる。

一方で、フローの増加度合いは SPU に比べて SPH が低いことから、空練り時間増加によるフローの増加は、混和剤種類の違いによって変化することが示唆された。

また、モルタルフローに比べてスランブフローの方が空練り時間増加による増加傾向は大きいことが確認された。この要因の一つとして、モルタルフロー試験は高さ 60mm のフローコーンを用いるのに対してスランブフロー試験では高さ 300mm のスランブコーンを用いることと、前者の試料は約 344ml であるのに対して後者では約

表-2 使用材料

材料	種類および品質
セメント C	低熱ポルトランドセメント、密度：3.23g/cm ³
細骨材 S	砕砂（岩種：安山岩）、表乾密度：2.54g/cm ³ 、吸水率：1.65
粗骨材 G	碎石（岩種：安山岩）、表乾密度：2.67g/cm ³ 、吸水率：0.96
混和剤 SP	高性能減水剤 SPU、高性能 AE 減水剤 SPH 主成分：ポリカルボン酸系化合物

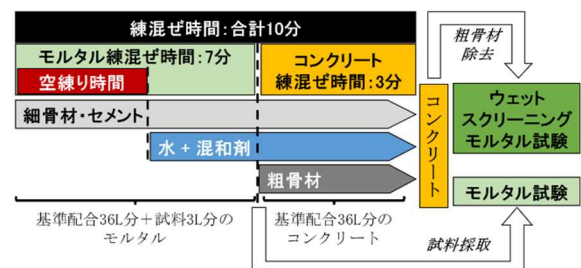


図-1 練混ぜ方法

表-3 各試験項目における結果

Sample Name	Admixture Type	Dry Mixing Time [s]	Admixture Addition Rate [C×%]	Concrete SF [mm]	Mortar Sample Name	Mortar					
						MF [mm]	T_{150} [s]	ρ [g/cm ³]	τ_y [Pa]	η [Pa·s]	S_{tx} [Pa/s]
U-10-650	SPU	10	0.800	664.5	Mortar	344.5	1.14	2.42	4.15	51.42	179.6
					WS Mortar	257.0	1.67	2.41	20.62	57.62	850.1
U-30-over		30	0.800	677.0	Mortar	354.5	1.10	2.42	3.45	50.75	139.6
					WS Mortar	254.5	1.61	2.42	21.59	58.64	838.6
U-90-over		90	0.800	766.5	Mortar	367.5	1.01	2.42	2.72	49.13	73.9
					WS Mortar	293.5	1.60	2.41	10.56	57.19	639.0
U-30-650	SPH	30	0.780	634.5	Mortar	336.0	1.46	2.41	4.85	55.24	162.7
					WS Mortar	237.0	2.31	2.40	29.75	66.30	1192.1
U-90-650		90	0.770	640.5	Mortar	353.0	1.17	2.42	3.55	51.12	131.9
					WS Mortar	212.0	2.86	2.41	47.05	76.23	1411.8
H-10-650	SPH	10	0.870	674.5	Mortar	342.5	1.37	2.42	4.30	54.35	231.1
					WS Mortar	256.5	2.19	2.41	20.81	65.83	986.7
H-30-over		30	0.870	676.5	Mortar	349.5	1.27	2.42	3.78	52.86	207.0
					WS Mortar	245.5	2.56	2.41	25.46	71.85	1198.4
H-90-over		90	0.870	723.5	Mortar	359.0	1.22	2.42	3.18	52.57	176.6
					WS Mortar	261.0	2.04	2.42	19.16	65.19	896.0
H-30-650	SPH	30	0.865	653.5	Mortar	343.5	1.50	2.41	4.22	55.43	266.4
					WS Mortar	239.5	2.63	2.42	28.42	74.71	1348.1
H-90-650	SPH	90	0.855	680.5	Mortar	346.5	1.25	2.42	4.00	52.41	209.9
					WS Mortar	245.5	2.14	2.43	25.46	68.07	901.8

5495ml であるため、スランブフロー試験の方が試料の位置エネルギーが大きいことも影響したと推察される。

(2) 同一目標スランブフロー時の空練り効果

前項にて既報同様に空練りによる流動性向上が確認できたことから、次に、同一目標スランブフロー(650mm)とした際の混和剤添加量差を確認した。その結果について、図-3 にて示す。データラベルはコンクリートのスランブフロー(mm)を表す。図-2 の傾向からも推察されるように、空練り時間が長くなるほど必要混和剤添加量は減少可能であることが確認された。

また、SPH に比べて SPU の混和剤低減率が大きいことから、空練り時間増加による流動性向上は SPU においてより効果的に作用することが示唆された。

(3) 空練りによるチクソトロピーへの影響

回転粘度計で測定したヒステリシスループについて、図-4 に同一混和剤添加量、図-5 に同一目標スランブフローの結果をそれぞれ示す。

図-4 では、空練り時間が長くなるにつれて所定のせん断速度 $\dot{\gamma}$ におけるせん断応力 τ は低下する傾向を示した。この傾向は SPH に比べて SPU の方が顕著であり、空練りによる分散性向上効果は SPU の方が高いことが示された。一方、SPH は SPU に比べてセメント分散性を低く設計しており、これが影響したものと考えられる。

図-5 においても図-4 と同様に、SPU における空練り時間増加に伴う分散性向上が確認されるが、その傾向は図-4 に比べて低いことが空練り時間 90 秒の点線の履歴から分かる。SPH においても同様の傾向が確認された。

上記の結果から、SPU および SPH における空練り時間とチクソトロピー指数 S_{tx} の関係を図-6 に示す。データラベルは混和剤添加率(C×%)を表す。どの水準において

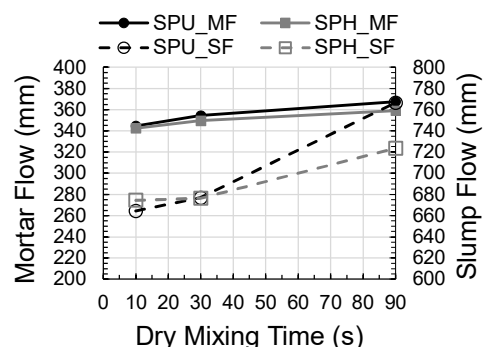


図-2 空練り時間とモルタルフローおよびスランブフローの関係（同一混和剤添加量）

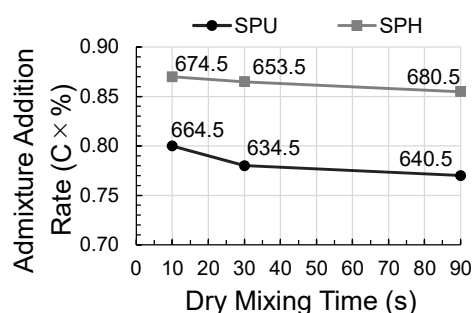


図-3 空練り時間と混和剤添加率の関係（同一目標スランブフロー）

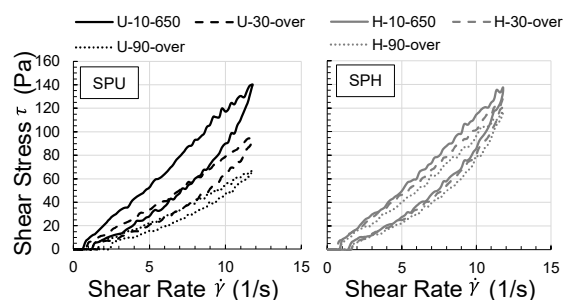


図-4 ヒステリシスループ（同一混和剤添加量）

も空練り時間増加に伴う s_{tx} 低減効果が確認された。破線のTSF650は同一目標スランプフローのデータを表すが、実線に比べて混和剤使用量が減少したことでセメント分散性が低下し、凝集性を表す s_{tx} は高くなったと推察される。実務ではコンクリートの流動性を混和剤使用量で最終調整することが多く、空練り時間増加によるモルタルのチクソトロピー低減効果は、混和剤種類、混和剤添加率にも左右されることが示唆された。

(4) 空練りによるレオロジー定数への影響

モルタルのフロー試験から求めた降伏値 τ_y および塑性粘度 η を図-7 および図-8 に示す。

図-7 では、実線で示した SPU および SPH に関しては空練り時間の増加による τ_y の減少傾向が確認され、SPU の τ_y はより低い値を示した。一方、破線の同一目標スランプフローのデータにおいて、SPH では空練り時間の増加に伴う τ_y の減少傾向は認められなかった。

図-8 では、実線の SPU および SPH とともに空練り時間の増加による η の減少傾向を示し、SPU が η はより低い値を示した。一方、破線の同一目標スランプフローのデータにおいて、 η は空練り時間 10 秒に対して 30 秒で増加し、90 秒で減少した。表-3 によると U-30-650 および H-30-650 のスランプフローは 634.5mm および 653.5mm であり、他の同一目標スランプフローのデータに比べて流動性が低いことが影響していると推察される。但し、SPH に比べて SPU の方が空練りの効果は大きくなった。

練上り直後のモルタルのレオロジー評価として、総じて空練りによる流動性向上の有効性が確認された。加えて、セメント分散性の高い SPU が、SPH に比べて空練りによる粘性低減効果は高いことが示された。

4.2 ウェットスクリーニングモルタルの性状

本節では、コンクリートから採取した WS モルタルを対象に空練りによる流動性向上について検証した。

(1) 同一混和剤添加量時の空練り効果

図-9 に混和剤種類ごとの空練り時間と WS モルタルフローおよびモルタルフローの関係を示す。SPU の WS モルタルフローは空練り時間 90 秒で大幅に増加する傾向を示し、SPH に比べて空練り時間増加による流動性向上は顕著であった。一方で、SPH においては空練りによる WS モルタルフローへの影響は少なく、明確な傾向は認められなかった。

WS モルタルフローがモルタルフローに比べて低い値を示した理由は、WS モルタルはコンクリートから粗骨材を除去したものであるが、粗骨材表面でモルタルの固着化が経時的に促進され、流動性が低下するためである。

(2) 同一目標スランプフロー時の空練り効果

次に、同一目標スランプフローとした際の空練り時間と WS モルタルフローおよびモルタルフローの関係を図

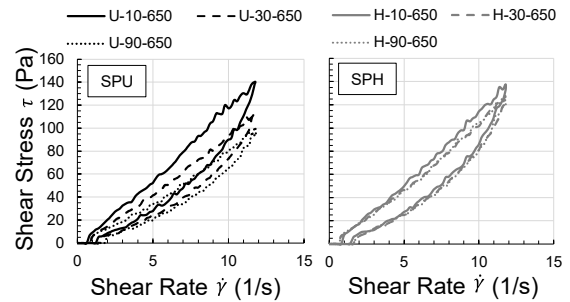


図-5 ヒステリシスループ（同一目標スランプフロー）

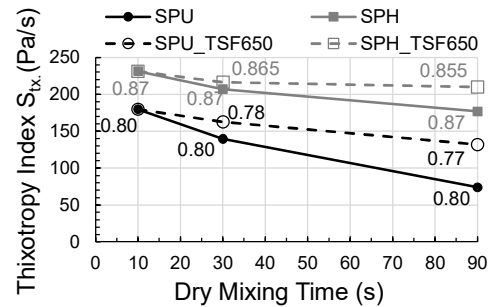


図-6 空練り時間とチクソトロピー指数 s_{tx} の関係

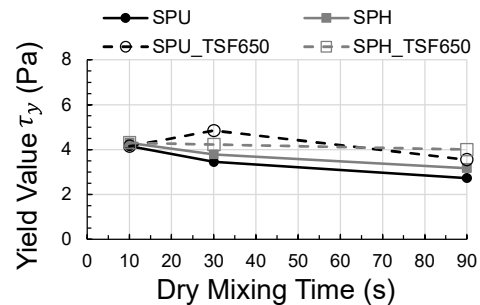


図-7 空練り時間と降伏値の関係

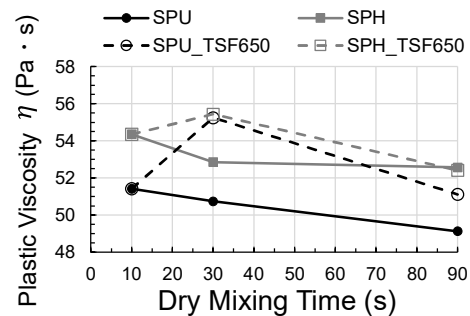


図-8 空練り時間と塑性粘度の関係

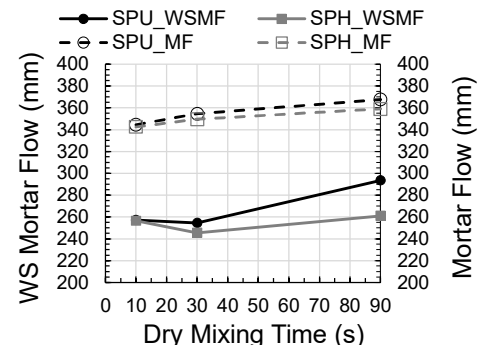


図-9 空練り時間と WS モルタルフローおよびモルタルフローの関係（同一混和剤添加量）

図-10 に示す。データラベルは混和剤添加率(C×%)を表す。なお、スランプフローは 634.5mm から 680.5mm の範囲となり、目標値に到達したものと判断した。

SPU の WS モルタルフローは空練り時間増加に伴って減少する傾向を示し、空練り時間 10 秒に対して 90 秒で約 17.3%減少した。これは空練り時間が長いものほど混和剤添加率が低減したため、WS モルタルの採取時間も影響してセメント分散効果が経時的に減少した可能性が考えられる。なお、WS モルタルフローは練上り直後のモルタルフロー試験から約 7 分後に測定した。

一方で、SPH の WS モルタルフローは空練り時間 10 秒に対して 90 秒で約 4.3%の減少に留まった。SPH は SPU に比べて混和剤添加量が多くなったため、流動性の経時変化が小さくなったと考察できる。

(3) 空練りによるチクソトロピーへの影響

回転粘度計で測定したヒステリシスループについて図-11 に同一混和剤添加量、図-12 に同一目標スランプフローの結果をそれぞれ示す。両図ともに上昇曲線の τ は低 $\dot{\gamma}$ 域で大きく増加した後、緩やかに増加する傾向を示した。WS モルタルを容器に充填後、凝集性が増加したことに起因すると考えられ、この傾向は図-4 および図-5 の練上り直後のモルタルでは認められなかった。

図-11 において、SPU では空練り時間 10 秒に対して、90 秒の所定の $\dot{\gamma}$ における τ は減少する傾向を示した。一方、SPH では空練り時間 10 秒に対する 90 秒における τ の減少傾向は僅かであり、30 秒においては τ が増加する傾向を示した。SPU に対して SPH はセメント分散性能を低く設計していることが影響したものと考える。

図-12 において、SPU では空練り時間増加に伴って所定の $\dot{\gamma}$ における τ は増加する傾向を示した。また、空練り時間 90 秒では上昇曲線の低 $\dot{\gamma}$ 域において τ が極大値を示すようになり、30 秒の履歴においても同様の兆候が認められた。同図ではスランプフローが 650mm になるように空練り時間の増加に併せて混和剤添加率を減少させたため、WS モルタル採取時にはセメント分散効果が経時的に減少し、凝集性が向上して低 $\dot{\gamma}$ 域において粒子の噛み合いが生じたものと推察される。すなわち、スランプフローは同等であっても、コンクリートを構成するモルタルの流動特性に差異が生じていたことが確認された。

一方で SPH の履歴では、低 $\dot{\gamma}$ 域における凝集性は SPU に比べて緩和する傾向を示し、SPH が SPU に比べて分散保持性を高く設計されていることによるものとする。

上記の結果から、図-13 に SPU および SPH における空練り時間とチクソトロピー指数 s_{tx} の関係を示す。データラベルは混和剤使用率(C×%)を表す。実線の SPU において空練り時間増加に伴う s_{tx} の減少傾向が確認されたものの、SPH では空練り時間 30 秒で s_{tx} は一旦増加し、

90 秒で減少した。一方、破線の同一目標スランプフローのデータでは、SPU における空練り時間増加に伴う s_{tx} の増加傾向が顕著となった。

図-13 の傾向は図-6 の練上り直後のモルタルにおける傾向とは異なり、両図の SPU_TSF650 の空練り時間 90 秒の結果を比較すると、WS モルタルの s_{tx} は練上り直後のモルタルに対して約 10.7 倍増加した。SPU は超高強度コンクリート用高性能減水剤として高いセメント分散性

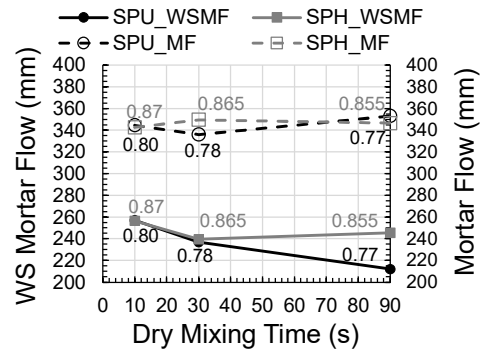


図-10 空練り時間と WS モルタルフローおよびモルタルフローの関係（同一目標スランプフロー）

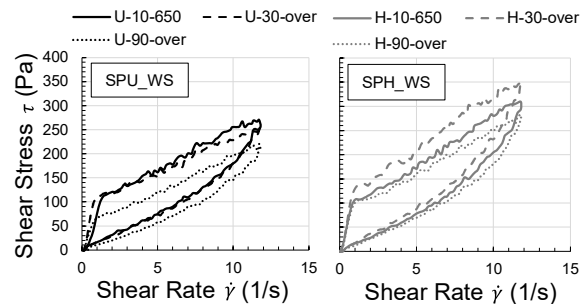


図-11 ヒステリシスループ（同一混和剤添加量）

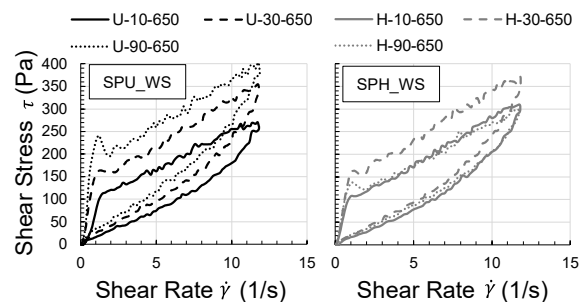


図-12 ヒステリシスループ（同一目標スランプフロー）

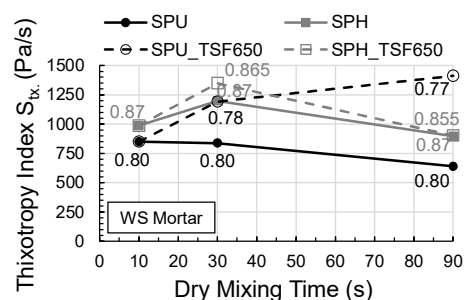


図-13 空練り時間とチクソトロピー指数 s_{tx} の関係

能を有するため、練上り直後のモルタルの s_{tx} は低くなったが、WS モルタルを採取するまでの時間経過により、粗骨材表面におけるモルタル固着化が促進されるとともに、セメント分散性が低減した可能性が示唆された。

(4) 空練りによるレオロジー定数への影響

WS モルタルのフロー試験から求めた降伏値 τ_y および塑性粘度 η を図-14 および図-15 に示す。練上り直後を対象とした図-7 および図-8 に比べて、WS モルタルの τ_y および η の値が大きくなった理由は、表-3 に示す通りモルタルフローが低く、 T_{150} が長いことに起因する。

図-14 の SPU に関して、実線の同一混和剤添加量においては、空練り時間の増加により τ_y は減少する傾向を示した。一方、破線の同一目標スランブフローにおいては、空練り時間の増加とともに混和剤添加量を低減させたため τ_y は増加する傾向を示した。特に、空練り時間 90 秒における τ_y の増加が顕著であった。

図-15 の η においても同様の傾向が認められた。

本実験では、SPU を用いて空練り時間 90 秒で製造した目標スランブフロー650mm のコンクリートにおけるこわばり性状が確認され、上述のように WS モルタルの s_{tx} 、 τ_y および η は著しく増加した。よって、空練りによる流動性向上技術を実務展開する上で、セメントの分散性能に限らず、分散保持性やレオロジー制御の観点から混和剤を最適化する必要があると言える。

4.3 空練りによる流動性向上に関して

空練り時間を長くすることで高強度コンクリートの流動性が向上することは既報²⁾の通りであり、モルタルの性状として、チクソトロピー、降伏値および塑性粘度が低減する結果を示した。さらに、同一目標スランブフローを得るための混和剤添加量を低減することができた。

一方で混和剤添加量を低減した場合、流動性の保持時間が短くなり、コンクリートに若干のこわばりが生じた。

すなわち、空練りを利用して高強度コンクリートの流動性を高める場合、コンクリートの使用時間で所要の流動性が得られるように混和剤の添加量および成分構成を調整することが重要である。

5. まとめ

本研究で得られた知見について、以下にまとめる。

- (1) 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリート配合では、適正な空練り時間を設けることで流動性が向上し、その効果は超高強度コンクリート用高性能減水剤の方が、高強度コンクリート用高性能 AE 減水剤に比べて高いことが明らかとなった。
- (2) 空練りによる高強度コンクリートの流動性向上技術を利用することで、目標スランブフローを得るために必要な混和剤添加量が低減可能となった。

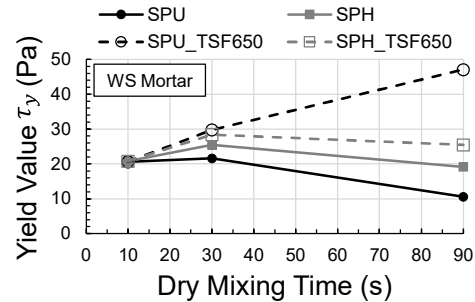


図-14 空練り時間と降伏値の関係

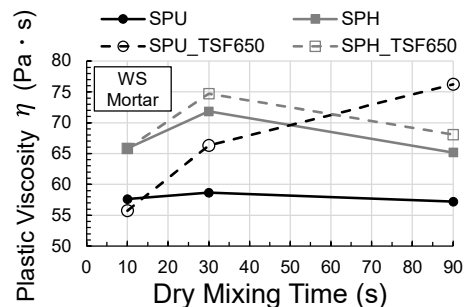


図-15 空練り時間と塑性粘度の関係

- (3) 空練りによる高強度コンクリートの流動性向上において、コンクリートのスランブフロー試験では表現できない性状の差が生じ、ウェットスクリーングモルタルのレオロジー試験により数値化できる可能性が示された。

謝辞

本研究に当たり、立命館大学の小林様よりご協力を頂いたことを深謝致します。また、株式会社フローリックの秋山様、清水様並びにコンクリート研究所の皆様にもご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通白書 2021, 第2章第2節「災害リスクの増大や老朽化インフラの増加」, pp.45-53
- 2) 坂本恭裕, 川崎佑磨, 福山智子, 金侖美: 空練りによるブロック形成が高強度コンクリートのスランブフローに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.826-831, 2023
- 3) 秋山五郎, 平野修也, 西祐宜, 友寄篤: コンクリート用火山ガラス微粉末を用いたフレッシュモルタルのレオロジー特性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.166-171, 2022
- 4) 東舟道裕亮, 山田義智, 平野修也: フロー試験によるセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数推定法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.88, No.803, pp.1-11, 2023.1