

論文 振動付与 2 軸強制練りミキサを用いた高強度コンクリートのフレッシュ性状に関する基礎的研究

小野寺 誠司^{*1}・吉田 元昭^{*2}・橋本 親典^{*3}・渡辺 健^{*4}

要旨：練混ぜ性能の向上を目的とし実用的に改良した振動付与 2 軸強制練りミキサを用い、振動部位、練混ぜ時間、セメントの種類、水セメント比を変化させ高強度コンクリートのフレッシュ性状および硬化特性への影響について実験的に検討した。その結果、振動部位の違いが高強度コンクリートの硬化特性に及ぼす影響はほとんどない。練混ぜ時間の過剰な短縮は高強度コンクリートの硬化特性に悪影響を及ぼす。普通ポルトランドセメントの場合、低水セメント比ほど振動付与によりフレッシュ性状が改善される傾向にあり、シリカフェームセメントの場合、低水セメント比ほど振動付与により圧縮強度が向上する可能性がある。

キーワード：振動付与 2 軸強制練りミキサ，負荷電力量，スランプ，水セメント比

1. はじめに

近年、耐震設計の見直しによりせん断補強筋の高密度化に適用した高流動コンクリートや高強度コンクリートの需要が高まっている。しかし、高流動コンクリートや高強度コンクリート等の粉体を多く使用する特殊コンクリートを製造する場合、高性能 AE 減水剤の使用量増加や練混ぜ時間延長による供給能力の低下によりコストアップが懸念されている。そのような特殊コンクリートの製造には従来の練混ぜ性能よりも高い練混ぜ性能を有したミキサの開発が必要となっている。

本研究では、練混ぜ性能を向上させる目的と

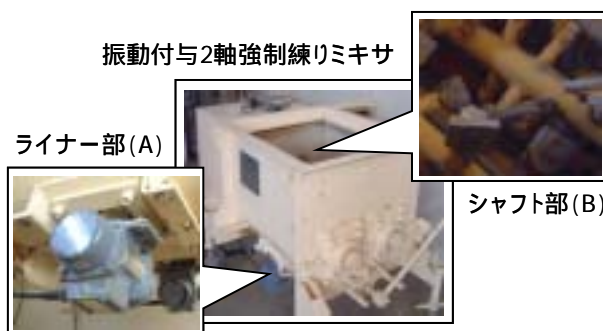


写真 - 1 振動付与 2 軸強制練りミキサ

して 2 箇所に振動機を取り付けた振動付与 2 軸強制練りミキサ¹⁾を用い、振動部位や練混ぜ時間、セメントの種類、水セメント比を変化させ、高強度コンクリートのフレッシュ性状および硬化特性への影響について実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 振動付与 2 軸強制練りミキサ¹⁾

振動付与 2 軸強制練りミキサは、2 軸強制練りミキサに振動機を取り付け、練混ぜ中に振動付与することにより練混ぜ性能を向上させることを目的として改良されている。振動機はライナー部とシャフト部の 2 箇所に取り付けられており、シャフト部については軸内に振動機が組み込まれている。本研究で使用した振動付与 2 軸強制練りミキサを写真 - 1 に示す。

2.2 使用材料

本研究で使用した材料を表 - 1、骨材の物理特性を表 - 2 に示す。材料選定については、一般的に生コンプラントで使用されている普通骨材とした。

*1 三井共同建設コンサルタント株式会社 修(工) (正会員)

*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 博士後期課程 2 年 (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソフトウェア研究部システムデザイン工学専攻教授 工博 (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソフトウェア研究部システムデザイン工学専攻助手 博(工) (正会員)

2.3 コンクリートの配合と練混ぜ方法

本研究は、シリーズ1 - 振動部位、シリーズ2 - 練混ぜ時間、シリーズ3 - セメントの種類、シリーズ4 - 水セメント比の4シリーズについて検討した。全配合とも単位水量は 165kg/m^3 と一定とし、目標スランプ $18\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5\pm 1.0\%$ とした。実際の構造物では比較的高密度の配筋下で高強度コンクリートの使用が多いこと、またスランプの大きいコンクリートほど振動付与によるフレッシュ性状の改善効果や違いが明確に現れる可能性が高いことから目標スランプを $18\pm 2.5\text{cm}$ に設定した。空気量については、実際に使用される高強度コンクリートは一般的なコンクリートに比べて空気量は小さいが、本研究では実験室レベルでの検討として一般的なコンクリートの空気量 $4.5\pm 1.0\%$ を目標設定した。本研究の実験シリーズの概要一覧を表 - 3 に示す。なお、シリーズ3, 4 では練混ぜ時間が異なっている。その理由については、粉体量が多くなるに従い、練混ぜ時間の延長が必要となったためである。練混ぜ時間については、ミキサの負荷電力の経時変化を練混ぜ中に確認し負荷電力が収束した段階で排出として練混ぜ時間を選定した。

本研究で使用したコンクリートの配合を表 - 4 に示す。配合名は、C は普通ポルトランドセメント使用、SFC はシリカフェウムセメント使用、数字は水セメント比を意味する。配合名は、

V は振動付与 (シリーズ2~4 については、ライナー部 + シャフト部振動を示す)、A はライナー部振動、B はシャフト部振動、A+B はライナー部 + シャフト部振動を示す。シリーズ2 の配合名の後ろの数字は練混ぜ時間 (分:秒) を示す。

コンクリートの練混ぜは、写真 - 1 のミキサを用い、練混ぜ量を 50 リットルと一定とした。全シリーズの練混ぜ方法を図 - 1 にまとめて示す。

表 - 1 使用材料

材 料	種 類	備 考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm^3 比表面積: $3280\text{cm}^2/\text{g}$
	シリカフェウムセメント	密度: 3.08g/cm^3 比表面積: $5960\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	普通細骨材	徳島県阿南市下大野町産 (川砂)
粗骨材	普通粗骨材	$G_{\text{max}}=20\text{mm}$, (碎石) 徳島県鳴門市撫養町産
		$G_{\text{max}}=15\text{mm}$, (碎石) 徳島県鳴門市撫養町産
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物

表 - 2 骨材の物理特性

粒径 (mm)	0~5	5~15	15~20
粗粒率	3.11	6.49	7.00
表乾密度 (g/cm^3)	2.62	2.56	2.56
絶乾密度 (g/cm^3)	2.54	2.50	2.50
吸水率 (%)	1.30	2.34	2.23
実積率 (%)	58.8	61.7	61.3

表 - 3 実験シリーズの概要一覧

シリーズ	基本条件				パラメータ			
シリーズ1 振動部位	W/C	35%			1	振動なし		
	練混ぜ時間	3分			2	ライナー部振動		
	使用セメント	普通ポルトランドセメント			3	シャフト部振動		
					4	ライナー部 + シャフト部振動		
シリーズ2 練混ぜ時間	W/C	35%			1	練混ぜ時間3分	振動なし	
	使用セメント	普通ポルトランドセメント			2		振動あり	
	振動部位	ライナー部 + シャフト部振動			3	練混ぜ時間1分30秒	振動なし	
					4		振動あり	
シリーズ3 セメントの種類	W/C	25%			1	普通ポルトランドセメント		
	振動部位	ライナー部 + シャフト部振動			2	振動あり		
	練混ぜ時間	5分30秒	普通ポルトランドセメント		3	シリカフェウムセメント	振動なし	
		2分	シリカフェウムセメント		4		振動あり	
シリーズ4 水セメント比	振動部位	ライナー部 + シャフト部振動			1	普通ポルトランドセメント	W/C=35%	振動なし
		3分	普通ポルトランドセメント		2			振動あり
		5分30秒	普通ポルトランドセメント		3		W/C=25%	振動なし
		2分	シリカフェウムセメント		4		W/C=25%	振動あり
	練混ぜ時間	3分	普通ポルトランドセメント		5	シリカフェウムセメント	W/C=25%	振動なし
			シリカフェウムセメント		6			振動あり
		2分	シリカフェウムセメント		7		W/C=18%	振動なし
			シリカフェウムセメント		8			振動あり

表 - 4 コンクリートの配合

使用セメント	粗骨材最大寸法 (mm)	目標スランプ (C m)	目標空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		高性能AE減水剤 (原液)
									5~15	15~20	
C	20	18 ± 2.5	4.5 ± 1.0	35	50.1	165	471	841	410	410	C×1 (%)
	20	18 ± 2.5	4.5 ± 1.0	25	44.9	165	660	684	410	410	C×1.25 (%)
SFC	20	18 ± 2.5	4.5 ± 1.0	25	44.4	165	660	670	410	410	C×1.1 (%)
	20	18 ± 2.5	4.5 ± 1.0	18	35	165	917	451	410	410	C×1.3 (%)

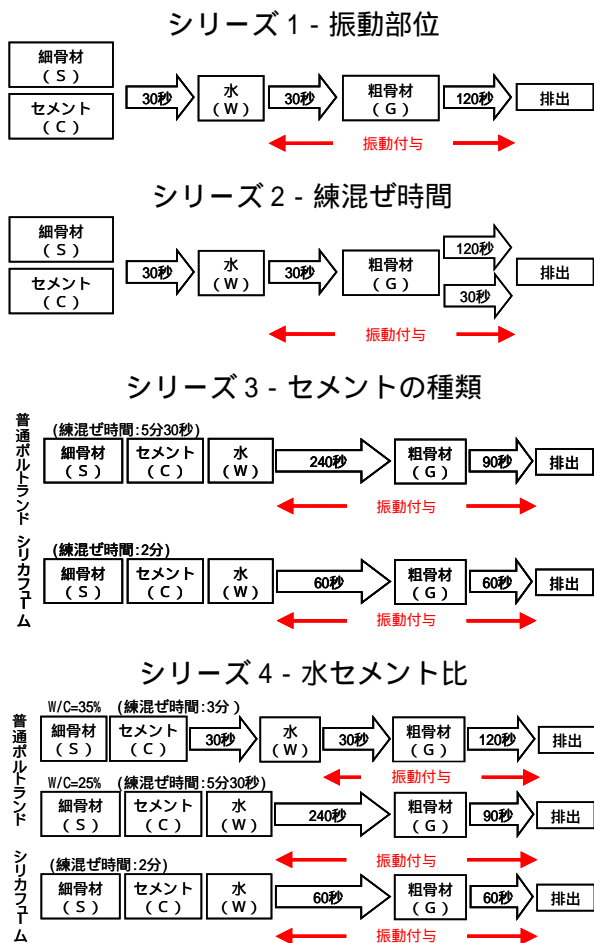


図 - 1 練混ぜ方法

表 - 5 試験項目および試験方法一覧

試験項目	試験方法
クランプ電力計による ミキサの負荷電力量測定	三相3線3電流<3電力計法>による負荷電力量測定
フレッシュ性状	スランブ JIS A 1101 コンクリートのスランブ試験方法
	空気量 JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）
硬化特性	圧縮強度 JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法
	凍結融解 液体窒素ガスを用いた簡易急速凍結融解試験方法 ²⁾

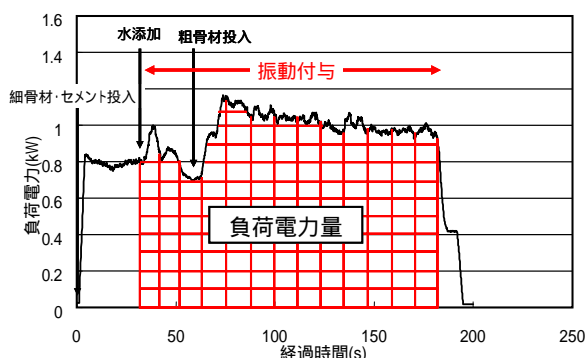


図 - 2 ミキサの負荷電力量の算定方法

2.4 試験項目および試験方法

本研究における試験項目および試験方法一覧を表 - 5 に示す。なお、ミキサの負荷電力量の算定方法については 2.4.1 で後述する。

2.4.1 ミキサの負荷電力量の算定方法

図 - 2 にミキサの負荷電力量の算定方法を示す。本研究では、振動付与の有無による比較検討が目的であることから、振動付与時間帯の負荷電力を合計した後、負荷電力量(kW・h)として算出した値を用い、比較検討した。負荷電力量(kW・h)を使用した理由については、異なる練混ぜ時間で作製したコンクリートについて同一の条件で比較検討を可能にするためである。

3. 実験結果および考察

3.1 ミキサの負荷電力量とスランブ及び空気量

図 - 3 にミキサの負荷電力量とスランブとの関係を示し、表 - 6 にコンクリートのフレッシュ性状の結果を示す。本研究で作製したコンクリートはスランブまたは空気量が目標値から外れているが、いずれの配合もスランブ 16cm 以上とスランブの大きいコンクリートであること、全配合とも同配合の振動付与の有無の 2 配合のコンクリートを作製することにより振動付与がコンクリートに与える影響を十分把握することが可能であると判断し、それらのデータを用いた。なお、図 - 3 のシリーズ 1 のグラフでは配合 (C-35) が重なり隠れて見えないため、グラフ中に矢印で指し示している。最初にミキサの負荷電力量とスランブの関係について説明する。

シリーズ 1 の結果より、W/C=35% の条件下では振動部位の違いにほとんど差異はない。シリーズ 2 の結果より、W/C=35% の条件下で練混ぜ時間 3 分と 1 分 30 秒で比較した場合、練混ぜ時間 1 分 30 秒のほうが振動付与によるミキサの負荷電力量の低下率は大きく、スランブも大きくなっている。ミキサの負荷電力量とスランブとの関係からは練混ぜ時間 1 分 30 秒のほうが振動付与効果は大きくなっているが、後述の硬化特性の結果に影響を及ぼしているため、練混ぜ時間の短縮については十分な検討と注意が必要である。シリーズ 3 の結果より、W/C = 25% の条件下において、普通ポルトランドセメントを使用した場合、振動付与によりミキサの負荷電力量

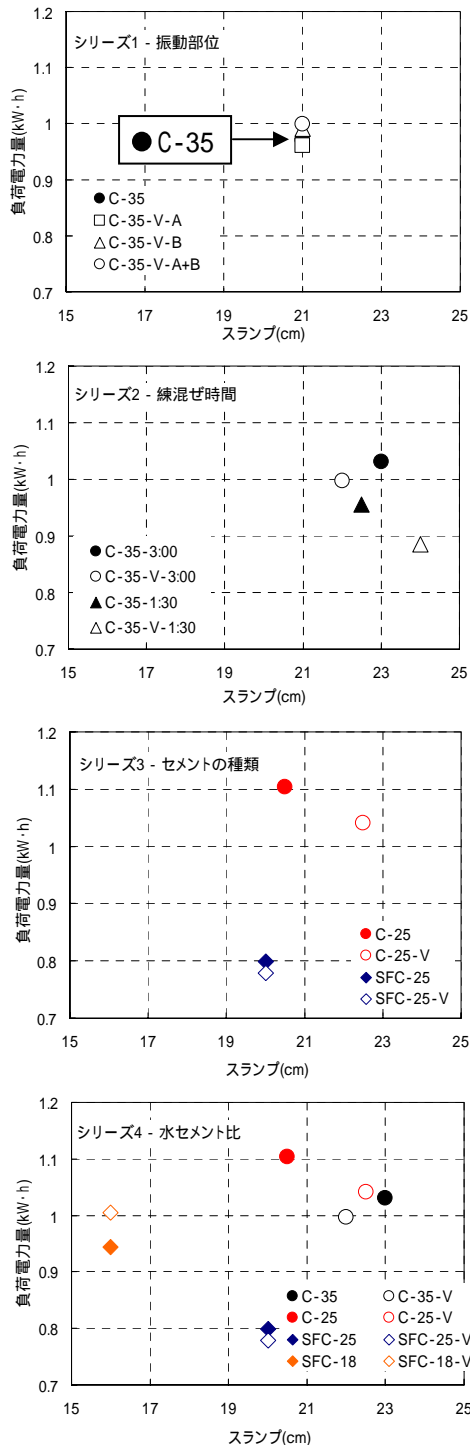


図 - 3 ミキサの負荷電力量とスランプは小さく、スランプが 2cm 程度大きくなっており、振動付与効果が見られる。シリカフェームセメントを使用した場合、振動付与によるミキサの負荷電力量とスランプには差異はない。普通ポルトランドセメントを使用した場合は練混ぜ完了が 5 分 30 秒要したのに対し、シリカフェームセメントを使用した場合は練混ぜが 2 分で完了していることから、シリカフェームが混入

表 - 6 コンクリートのフレッシュ性状

シリーズ1 - 振動部位	スランプ(cm)	空気量(%)
C-35	21	3.5
C-35-V-A	21	4.0
C-35-V-B	21	4.0
C-35-V-A+B	21	4.0
シリーズ2 - 練混ぜ時間	スランプ(cm)	空気量(%)
C-35-3:00	23	2.0
C-35-V-3:00	22	4.0
C-35-1:30	22.5	4.0
C-35-V-1:30	24	4.0
シリーズ3 - セメントの種類	スランプ(cm)	空気量(%)
C-25	20.5	2.3
C-25-V	22.5	2.6
SFC-25	20	5.2
SFC-25-V	20	5.3
シリーズ4 - 水セメント比	スランプ(cm)	空気量(%)
C-35	23	2.0
C-35-V	22	4.0
C-25	20.5	2.3
C-25-V	22.5	2.6
SFC-25	20	5.2
SFC-25-V	20	5.3
SFC-18	16	4.2
SFC-18-V	16	4.1

されているコンクリートは十分な流動性があり、従来の 2 軸強制練りミキサの性能で十分練混ぜが可能であると判断できる。シリーズ 4 の結果より、シリカフェームセメントを使用した場合、水セメント比の違いにかかわらず、振動付与による効果は見られない。普通ポルトランドセメントを使用した場合、W/C が小さくなるに従い負荷電力量の低下率は大きくなっている。このことから、普通ポルトランドセメント使用の場合、粉体量が多くなるに従い振動付与によるフレッシュ性状の改善が期待できると考えられる。

表 - 6 のコンクリートのフレッシュ性状の結果より、振動付与によって 0.1 ~ 2% ほど空気量が多くなっている。振動付与により空気量が増加する傾向にあるが、一部の配合を除いて 0.5% 以下の増加であり、振動付与による空気量の増加が硬化特性に与える影響はないと考えられる。シリーズ 2 の C-35-3:00 と C-35-V-3:00 は 2% 空気量が異なる。この配合は条件が振動付与有無だけの違いであることから、振動付与によって空気量が増加したものと考えられる。

3.2 圧縮強度

図 - 4 に圧縮強度試験結果を示す。シリーズ 1 の結果より、振動部位の違いが圧縮強度に与える影響は見られない。また、シリーズ 2 の結果より、練混ぜ時間 3 分の条件下で振動付与の有

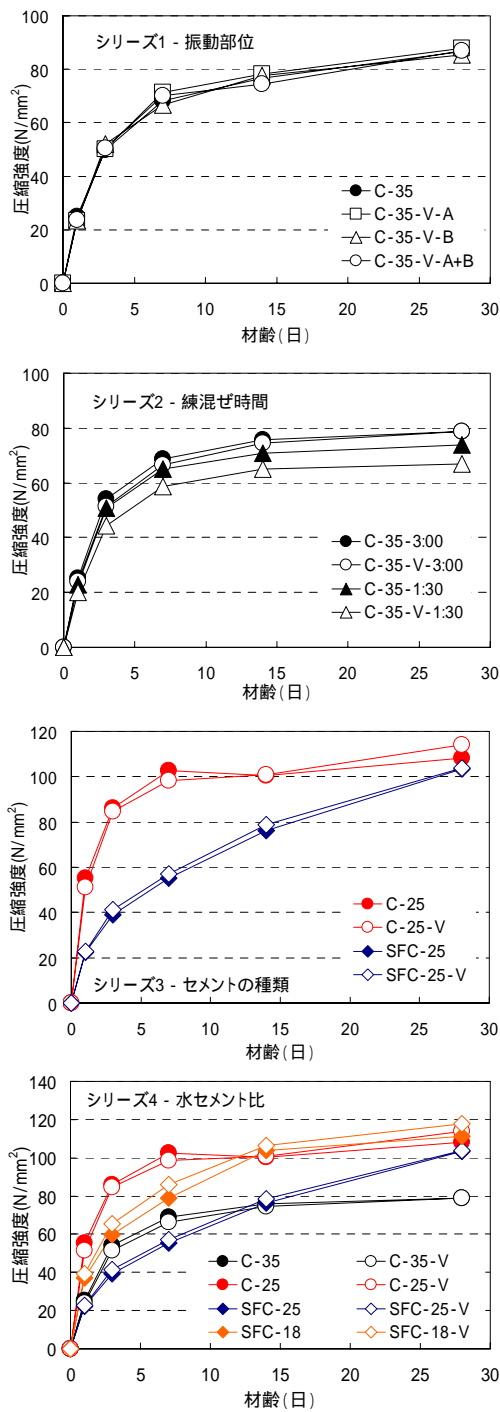


図 - 4 圧縮強度

無で比較すると、C-35-3:00 は空気量 2% であるが C-35-V-3:00 は空気量 4% と振動付与することにより増加しているが、圧縮強度にほとんど差はないことから増加した空気は空気連行性のあるエントレインドエアが多く含まれ、圧縮強度の低下を抑制したと考えられる。練混ぜ時間 1 分 30 秒の配合は練混ぜ時間 3 分の配合と比較して、圧縮強度が低下する傾向を示している。練混ぜ時間 1 分 30 秒と 3 分の練混ぜ手順の違いは、

粗骨材投入後からの練混ぜ時間が異なる。練混ぜ時間 3 分の場合よりも 1 分 30 秒の場合のほうがスランプは多少大きいものの粗骨材投入後 30 秒で排出しているため材料分離気味となり、それが圧縮強度に悪影響を及ぼしたと考えられる。C-35-V-1:30 については、特に圧縮強度低下が著しいが、振動付与による影響ではなく、練混ぜ時間の過剰な短縮が大きな要因であると考えられる。しかし、振動付与と練混ぜ時間の短縮という条件が圧縮強度に影響を及ぼした可能性も考えられ、今後より詳細な検討が必要である。シリーズ 3 の結果より、普通ポルトランドセメント使用、シリカフュームセメント使用した配合とも W/C=25% の条件下では振動付与が圧縮強度に与える影響はほとんど見られない。シリーズ 4 の結果より、普通ポルトランドセメント使用の場合、異なる水セメント比においても振動付与有無による違いは見られなかったが、シリカフュームセメント使用の場合、W/C が小さくなるに従い振動付与により圧縮強度が増加し、材齢 7 日では約 10% 向上している。材齢 14 日以降は振動付与有無によらず同等の圧縮強度となっているが、材齢 28 日による圧縮強度は W/C=25% と 18% は同等の圧縮強度であることからセメント強度が骨材強度よりも大きくなり、その結果、振動付与効果および水セメント比の違いが現れなかったと考えられる。

3.3 凍結融解抵抗性

図 - 5 に液体窒素を用いた簡易急速凍結融解抵抗性を示す。シリーズ 1, 2 の結果より、圧縮強度試験結果と同様の傾向を示し、圧縮に影響を及ぼした条件では凍結融解抵抗性も低下している。シリーズ 3, 4 の結果より、普通ポルトランドセメント使用の配合ほうがシリカフュームセメント使用の配合よりも凍結融解抵抗性が若干大きい結果となり、同水セメント比ではシリカフュームセメントは普通ポルトランドセメントよりも若干低下している。しかし、シリーズ 1 ~ 4 の全配合とも 5 サイクル終了時に相対動弾性係数が 90% 程度あり、十分な凍結融解抵抗性が

あると判断できる。このことから、条件の違いおよび振動付与が高強度コンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響はないと考えられる。

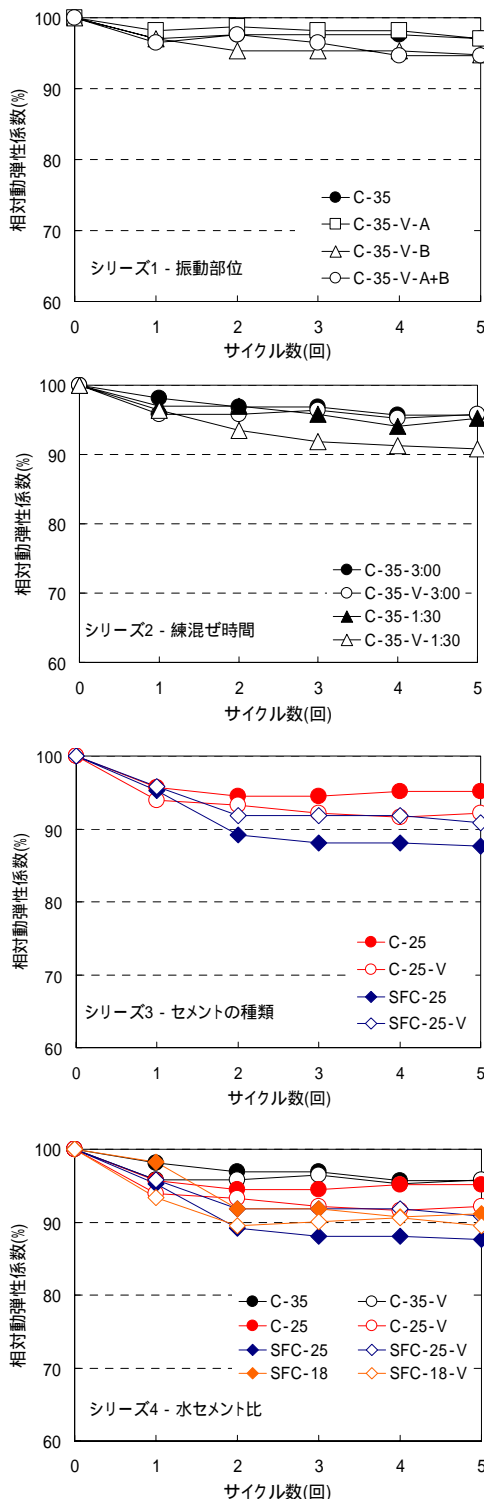


図 - 5 液体窒素を用いた急速凍結融解抵抗性

4. 結論

本研究では、振動付与 2 軸強制練りミキサを用い、振動部位や練混ぜ時間、セメントの種類、

水セメント比の条件の違いが高強度コンクリートのフレッシュ性状および硬化特性へ与える影響について検討した。以下に本研究で得られた結論を示す。

- (1) 振動付与により、高強度コンクリートの空気量は若干増加する傾向にある。
- (2) 振動部位の違いが高強度コンクリートの硬化特性に与える影響はほとんどないが、過剰な練混ぜ時間の短縮は悪影響を及ぼす。
- (3) W/C=25%の条件下では、シリカフュームセメントを使用した場合、普通ポルトランドセメントを使用した場合の約半分ほどの時間で練混ぜが可能である。
- (4) 普通ポルトランドセメントを使用した場合、W/C が小さくなるに従い、振動付与によりコンシステンシーが向上するが、圧縮強度の改善効果は見られない。
- (5) シリカフュームセメントを使用した場合、W/C が小さくなるに従い振動付与により圧縮強度の改善効果が期待できるが、フレッシュ性状の改善効果はあまり期待できない。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会平成 18 年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2) (課題番号 17360205, 研究代表: 橋本親典) に基づき実施されたものであることを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小野寺誠司, 牛尾仁, 吉田元昭, 橋本親典: 振動付与 2 軸強制練りミキサを用いた低度処理再生骨材コンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1481-1486, 2006
- 2) 湯北記代彦, 橋本紳一郎, 加地貴, 橋本親典: 液体窒素を用いた急速凍結融解試験によるコンクリート表面劣化の定量化, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.887-892, 2006