

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費補助金 総合研究報告書

課題名スラッジ再生セメントと産業副産物混和材を併用した

クリンカーフリーコンクリートによる

鉄筋コンクリート部材の開発研究

(3J153001)

平成 27 年度～平成 29 年度

A study for reinforced clinker-free concrete elements comprising by-product additives and recycled cement produced from wasted fresh ready-mixed concrete

鹿島建設株式会社 閑田 徹志

平成 30 年 5 月

目 次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	1
2. 研究開発の目的	2
3. 研究方法	3
4. 結果及び考察	8
5. 本研究により得られた主な成果	13
6. 研究成果の主な発表状況	13
7. 研究者略歴	14
II. 成果の詳細 要旨	15
1. はじめに	15
2. 研究開発の目的	16
3. 研究方法	17
4. 結果及び考察	29
5. 本研究により得られた成果	45
6. 国際共同研究等の状況	45
7. 研究成果の発表状況	46
8. 引用文献	47
III. 英文 Abstract	48

I. 成果の概要

補助事業名 環境研究総合推進費補助金 次世代循環型社会形成推進技術基盤整備事業
(平成 27 年度～平成 29 年度)

所管 環境省 及び 独立行政法人 環境再生保全機構

研究課題名 スラッジ再生セメントと産業副産物混和材を併用したクリンカーフリーコンクリートによる鉄筋コンクリート部材の開発研究

課題番号 3J153001

研究代表者名 閑田 徹志 (鹿島建設株式会社)

国庫補助金 35,384,775 円 (うち平成 29 年度 : 2,977,775 円)

研究期間 平成 27 年 4 月 1 日～平成 30 年 3 月 31 日

本研究のキーワード スラッジ再生セメント、混和材、クリンカーフリーコンクリート、鉄筋コンクリート部材、フライアッシュ

研究分担者 巴 史郎 (鹿島建設株式会社)
石関 浩輔 (鹿島建設株式会社)

1. はじめに (研究背景等)

建築産業では、全国の 20%以上の廃棄物を排出しており(図 1)、項目種別では特に解体コンクリート塊が最も多く 3,200 万 t/年に及ぶ。解体コンクリート塊の有力な排出起源のひとつが戻りコンクリートである。戻りコンクリートとは、生コンプラントから出荷されても使用されずに再び工場に戻ってくるコンクリートのことで、生コン出荷量全体の 1.6%程と言われている。戻りコンクリートは、年間 200 万 m³に達し、それらのほとんどが産業廃棄物として処理されている。一方、東日本大震災以降、原子力発電所の稼働制限により、石炭火力発電所の稼働が活発化し、使用石炭量の増加が見込まれ、石炭灰の排出量は 13,000 千 t/年へ近づくことが予想されるが、再利用先の石炭灰の処理能力の余力は乏しく、埋立て処理せざるを得ず、埋立て処分量の増加も懸念される。CO₂の排出量・エネルギー消費量に着目すれば、セメント製造起源の CO₂排出量は日本全体の約 4%、エネルギー消費量は日本全体の 1%にものぼり膨大な量となっている。本技術により、戻りコンクリート及び石炭灰の廃棄量縮減、建設産業による CO₂排出量およびエネルギー消費量の抑制を実現する。

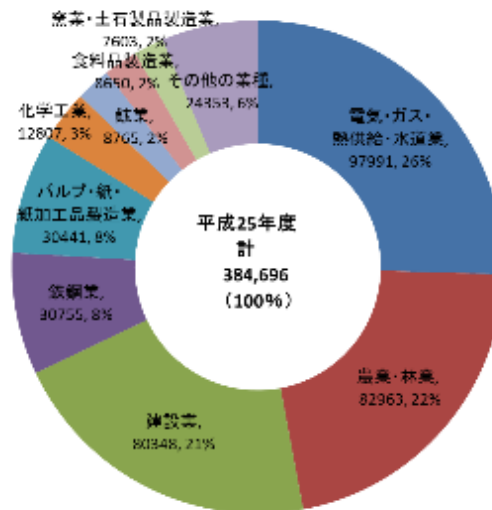


図 1 産業別の産業廃棄物量「平成 25 年度産業廃棄物の排出・処理状況 環境省」

2. 研究開発の目的

本研究は、以下Ⅰ～Ⅲの循環型社会形成推進及び廃棄物に関わる問題解決、CO₂ 排出量とエネルギー消費量の抑制に貢献することを目指す。H24～26 環境省研究総合推進費(補助金)研究事業(3K123015)において、これら 3 課題に多面的かつ効果的に貢献できる新規性に富む技術として、戻りコンクリートスラッジによる SR セメントを用いた R-CF コンクリートを開発しており、本事業では、本技術の製造方法の確立および製品化と事業化を目的とする。

- Ⅰ.建設産業に関わる主要な建設副産物である戻りコンクリートの廃棄量縮減と再生利用
- Ⅱ.東日本大震災後に重要性を増した石炭灰の廃棄量縮減と有効利用
- Ⅲ.建設産業による CO₂ 排出量及びエネルギー消費量の抑制

戻りコンクリートを集積して、スラッジ再生セメント（以下、SR セメントと称す）製造により再利用を図る循環型のシステムの構築を念頭に、SR セメントの製造ラインの改良及び大量製造方法の確立を目指す。更に、SR セメントを主たる結合材とし、フライアッシュや高炉スラグなどの産業副産物の結合材を大量に混和したリサイクル・クリンカーフリーコンクリート（以下、R-CF コンクリートと称す）によるプレキャスト（以下、PCa と称す）鉄筋コンクリート（以下、RC と称す）製品の開発・事業化を行うことで、戻りコンクリートの廃棄量縮減、石炭灰・高炉スラグの有効利用、大幅な CO₂ 排出量の削減、エネルギー消費量の削減を実現する。また、SR セメントを結合材として普通ポルトランドセメントの 20%程度と置き換えた SR セメントコンクリートについても、製品化と事業化を図り、本技術の普及促進を目指す。本事業により年間 1 万 m³以上の戻りコンクリートを受け入れられる SR セメント製造拠点を構築し、年間 1 万 m³以上の R-CF コンクリートの製造を可能とする。

3. 研究方法

3. 1 SR セメントの製造ラインの改良および製造方法の確立

3. 1. 1 製造ラインの改良による SR セメントの品質向上

SR セメントの品質および品質安定性の向上を目指し、三和石産(株)藤沢工場において、専用の洗浄・脱水設備および乾燥設備等の新規製造ラインを新設した(図 3.1.1 参照)。新規製造ラインの導入により、既存製造ラインに対し約 2.5 倍の SR セメントの生産が可能となる。

a) 新規製造ラインを用いた SR セメント実機製造実験

100 μ m 以上の凝集物が少なく普通ポルトランドセメント（以下、N と称す）に対する強度比 60%以上の高品質の SR セメントを製造できることを確認するため、新規製造ラインにて製造した SR セメントの基礎物性、モルタルのフレッシュおよび圧縮強度試験を実施した。

b) 運用時における新規製造ラインで製造した SR セメントの基礎物性試験

運用時における新規製造ラインで製造した SR セメントの品質および品質安定性を確認するため、新規製造ラインと既存製造ラインで製造した SR セメントの基礎物性について比較検討を行った。

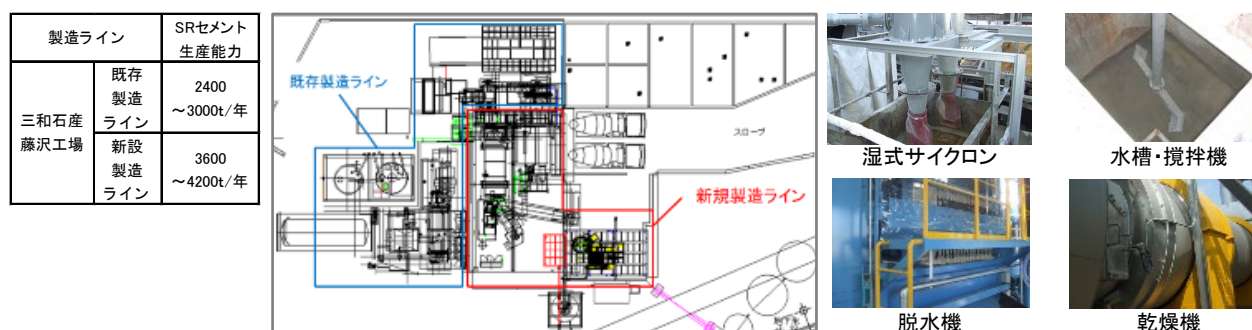


図 3.1.1 新規製造ラインの概要(三和石産：神奈川県藤沢市)

3. 1. 2 新規 SR セメント製造プラントの整備と品質確認

SR セメントを安定して大量に製造するためには、複数の生コン工場から発生した戻りコンを集積し SR セメントを製造するスキームが不可欠であり、これを実現するため、川崎市内に SR セメントの製造拠点を新たに構築し、SR セメントの生産量拡大を図った(図 3.1.2 参照)。

a) 新規製造プラントによる SR セメント実機製造実験

新規製造プラントにて製造した SR セメントの品質を確認するため、SR セメントの基礎物性、これを用いたモルタルのフレッシュおよび圧縮強度試験を実施した。

b) 運用時における新規製造プラントで製造した SR セメントの基礎物性試験

運用時における新規製造プラントで製造した SR セメントの品質および品質安定性を確認するため、同時に製造した新規製造プラントおよび既存製造プラントの 6 ヶ月分の品質試験データを比較検討した。



図 3.1.2 複数生コン工場の戻りコンを集積する新規製造プラント(リコーン：神奈川県川崎市)

3. 2 R-CF コンクリートおよびSRセメントコンクリートによるプレキャストRC製品・レディーミクストコンクリート製品の開発と事業化

3. 2. 1 R-CF コンクリートによるプレキャストRC部材の開発

R-CF コンクリートによる PCa 部材の開発を目指し、製品化に向けた調合決定のための試験練りおよび PCa 工場におけるモックアップ部材の製造実験を行った。

a) PCa 工場での試験練りによる調合検討

PCa 部材製造に適した R-CF コンクリートの調合検討を目的に、PCa 工場である岡村建興(株)本庄工場(埼玉県本庄市)にて試験練りを行い、圧縮強度試験、促進中性化試験を行った。混和材の混合比率は、SRセメント 50%、高炉スラグ 30%、フライアッシュ 10%、普通セメント 10%の汎用性の高い一般的な混合比率のもの(以下、一般調合と称す)と、より環境性能を高めた SRセメント 35%、高炉スラグ 50%、フライアッシュ 10%、普通セメント 5% (以下、環境重視調合と称す) の2水準とした(表 3.2.1 参照)。

b) PCa 部材モックアップ製造実験

R-CF コンクリートの PCa 部材製造に向け、製造上の問題点を確認することを目的に、同工場にて、モックアップ製造実験を行い、フレッシュ性状、圧縮強度および外観状況を確認した。モックアップ部材として、PCa 部材で主要構造部(建築基準法2条)以外の部材で需要があり躯体の一部に該当するバルコニー部材を選定した。モックアップ部材を作製するコンクリートは、R-CF コンクリートの一般調合および環境重視調合の2水準とした(表 3.2.2 参照)。圧縮強度はバルコニーとして最低限必要と考えられる 30N/mm^2 以上を目標とした。モックアップは集合住宅のバルコニーを想定し、図 3.2.1 に示す形状とした。製造時および屋外暴露期間において外観の異常の有無を確認することで実製造に向けた問題点を把握した。

c) 屋上設備機械基礎のモックアップ製作

R-CF コンクリートを適用する際の大きな課題として、コストおよび強度発現が挙げられる。多数の同形状の製品を製造する部材に適用することで、コスト減が狙え、バルコニーなどの躯体でなければ強度発現の遅延も問題となり難いことから屋上の設備機械基礎に着目した。R-CF コンクリートにより設備機械基礎のモックアップを製作し、強度発現と製造状況および製品の状況を確認した。コンクリートは、一般調合と環境重視調合の2水準とした。圧縮強度は設備機械基礎として最低限必要と考えられる 18N/mm^2 以上を目標とした。モックアップは、事務所ビルの屋上に設置される空調や電気等の設備を載せる基礎を想定し、図 3.2.2 に示す形状とした。製作後に仕上がり状況を確認し、屋外暴露に供し外観の異常の有無を観察した。

表 3.2.1 調合検討実験の水準

調合		W/B (%)	結合材(B×%)			
			SRセメント (6780)	高炉 スラグ	フライ アッシュ	普通 セメント
一般調合	SR(6780)50-B30-F10-N10-35%	35	50	30	10	10
	SR(6780)50-B30-F10-N10-45%	45				
	SR(6780)50-B30-F10-N10-55%	55				
環境重視調合	SR(6780)35-B50-F10-N5-35%	35	35	50	10	5

表 3.2.2 モックアップ製造実験の水準

調合		W/B (%)	結合材(B×%)			
			SRセメント (6780)	高炉 スラグ	フライ アッシュ	普通 セメント
一般調合	SR(6780)50-B30-F10-N10-35%	35	50	30	10	10
環境重視調合	SR(6780)35-B50-F10-N5-35%	35	35	50	10	5

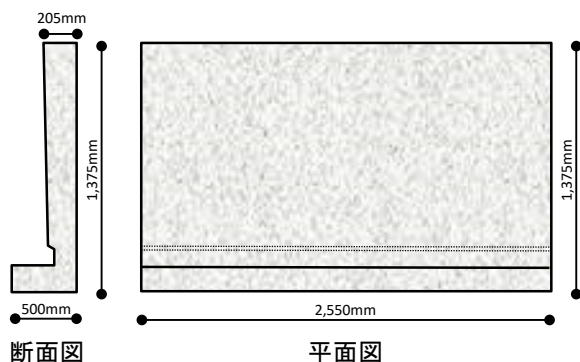


図 3.2.1 バルコニーモックアップの概要

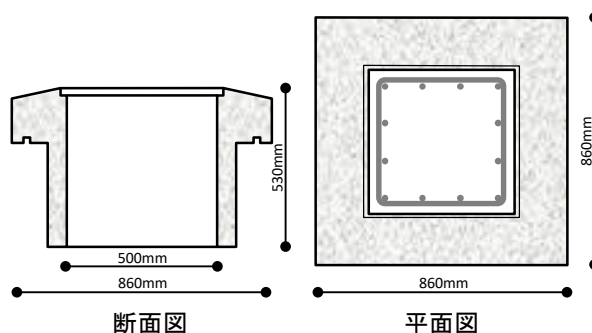


図 3.2.2 設備機械基礎モックアップの概要

3. 2. 2 SR セメントコンクリートによるプレキャスト製品の開発

SR セメントを結合材として N の 20%程度に置き換えた SR セメントコンクリートは、品質への影響が小さく経済性も高いことから、本技術を広く普及できる製品開発が期待できる。SR セメントコンクリートの普及展開を図るため、これを用いた PCa 製品の開発を目指し、製品化に向けた基礎物性試験および製造実験を実施し JIS 適合認定取得の可能性を検討した。神奈川での地産地消サイクルの構築を見据え、神奈川県内で製造されている PCa 製品として、擁壁等に用いられる積みブロック（他称：間知ブロック、写真 3.2.1 および図 3.2.3）を選定した。

a) 即時脱型成型による積みブロックの試作製

積みブロック試作製実験の概要を表 3.2.3 に示す。神奈川での地産地消の循環システムの構築を見据え、神奈川県内において即時脱型工法により積みブロックを製造している神奈川積みブロック協同組合に所属する 3 工場において、積みブロックの試作製を行い、表 3.2.4 に示す「JIS A 5371 積みブロック」の製品規格値を満たす製品製造の可能性を検討した。

b) 即時脱型成型による積みブロック製品の調合検討

即時脱型工法で積みブロック製品を製造している 1 工場（ピーシーコンクリート工業三ヶ木工場）において、実施調合を決定するための試験練りを実施した。即時脱型調合の設計指標として Bv/ Vv を採用し、Bv/ Vv と強度の関係式を求めることで調合を設定した(表 3.2.5 参照)。

c) 積みブロックの繰り返し製造実験

SR セメントコンクリートの積みブロック製品の JIS 認証取得に向け、製品の品質安定性を確認するため、複数回の積みブロック製造実験を実施した。2017 年 10 月~11 月までの期間のうち 5 日間で製造実験を行い、出荷材齢（強度保証材齢）である材齢 7 日において製品検査を行い、JIS A 5371 の品質試験を実施した。(表 3.2.6 参照)。



写真 3.2.1 積みブロック施工例

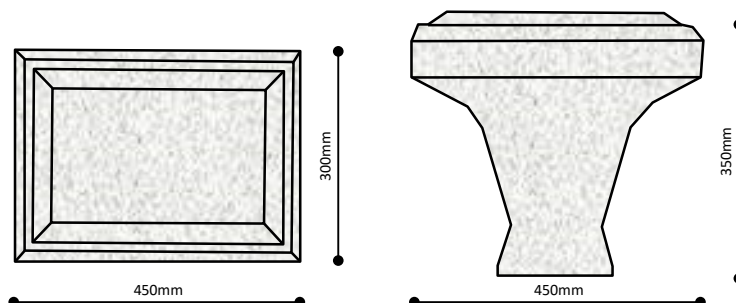


図 3.2.3 積みブロックの概要

表 3.2.3 積みブロック試作製実験の概要

工場	記号	W/B (%)	SRセメント 混合率	製品 質量	製品 寸法	強度試験	
						7日	14日
ピーシーコンクリート工業三ヶ木工場 (神奈川県相模原市)	P-SR(8430)20-32.2%	32.2	B×20%	○	○	○	○
	P-N-32.2%	32.2	—	○	○	○	○
タカコン 本社工場 (神奈川県相模原市)	T-SR(7780)20-32.9%	32.9	B×20%	○	○	○	○
	T-N-32.9%	32.9	—	○	○	○	○
湘南コンクリート工業本社工場 (神奈川県平塚市)	S-SR(8820)20-39.3%	39.3	B×20%	○	○	○	○
	S-N-39.3%	39.3	—	○	○	○	○

* 強度試験：65℃3時間蒸気養生後、現場静置とし、積みブロックから採取したコアにより試験

表 3.2.4 製品規格値

試験項目	JIS A 5371 製品規格値
圧縮強度	18N/mm ² 以上
製品重量	47.3kg以上
寸法許容差	長さ、高さ±3mm 厚さ±5mm

* 管理材齢：ピーシー・タカコン・材齢7日
湘南コンクリート材齢14日

表 3.2.5 調合検討実験の概要

記号	W/B (%)	Bv/Vv	SRセメント 混合率	製品 質量	製品 寸法	強度試験
						7日
SR(7100)20-32.4%	32.4	0.59	B×20%	○	○	○
SR(7100)20-35.5%	35.5	0.54	B×20%	○	○	○
SR(7100)20-39.0%	39.0	0.49	B×20%	○	○	○

* 強度試験：65℃3時間蒸気養生後、現場静置とし、コア強度試験

表 3.2.6 繰り返し製造実験の概要

製造日	記号		W/B (%)	SRセメント 混合率	製品 質量	製品 寸法	強度試験
							7日
17年10月11日	A①	A②	36.9	B×20%	○	○	○
17年10月19日	B①	B②			○	○	○
17年11月1日	C①	C②			○	○	○
17年11月11日	D①	D②			○	○	○
17年11月30日	E①	E②			○	○	○

* 強度試験：65℃3時間蒸気養生後、現場静置とし、コア強度試験

3. 2. 3 SR セメントコンクリートによるレディーミクストコンクリートの開発

本技術の更なる普及展開を図るため、SR セメントコンクリートによるレディーミクストコンクリートの開発を目指し、製品化に向けた基礎物性実験および生コン工場における実機製造実験を行い、供給体制を整備した。更に、本コンクリートを大規模物流施設に適用し、実工事での品質安定性や施工性、施工後の外観調査を行った。

a) 基礎物性実験の検討概要

基礎物性実験の概要を表 3.2.7 に示す。SR セメントを混和材として用いたコンクリートの基礎物性を把握することを目的に、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、促進中性化試験を行った。実験要因は、SR セメントの混合率と水結合材比の 2 要因とし、SR セメントの混合率は 0, 20, 30% の 3 水準、水結合材比は 35, 45, 60% の 3 水準とした。

b) 実機製造実験の検討概要

本コンクリートの実構造物への適用に向け、実機により製造したレディーミクストコンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値を確認することを目的に、三和石産(株)藤沢工場(神奈川県藤沢市)において、夏期・標準期・冬期の 3 シーズンの実機製造実験を行った。

実験概要の一覧を表 3.2.8 に示す。比較的広い強度域のコンクリートのフレッシュ性状、強度特性を確認するため、水結合材比 40%, 50%, 60% の 3 調合のコンクリートを対象に検討を行った。また、比較対象として、水結合材比 50% の普通コンクリートについても実験を実施した。SR20-50% については、全ての季節で、図 3.2.4 のマスコン部材用の模擬試験体および板状部材用の模擬試験体を作製し、コア強度試験を行うことで、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値を評価した。

c) 実構造物への適用概要

本コンクリートを大規模物流施設の仮設材となる事務所棟のレベルコンクリートと、付属舎棟の本設躯体に、SR セメントを結合材の 20% 混合した SR セメントコンクリートを適用した。

表 3.2.7 基礎物性実験の概要

SRセメントの 混合率	水結合材比		
	35%	45%	60%
0%	○	○△□	○
20%	○	○□	○
30%	○	○△□	○

* ○: 圧縮強度試験、△: 乾燥収縮試験、□: 促進中性化試験

表 3.2.8 実機製造実験の概要

記号	W/B	標準養生 圧縮強度試験			模擬試験体 コア強度試験		
		夏期	標準期	冬期	夏期	標準期	冬期
SR20-40%	40%	○	○	○	—	—	—
SR20-50%	50%	○	○	○	○	○	○
SR20-60%	60%	○	○	○	—	—	—
N-50%	50%	○	—	—	○	—	—

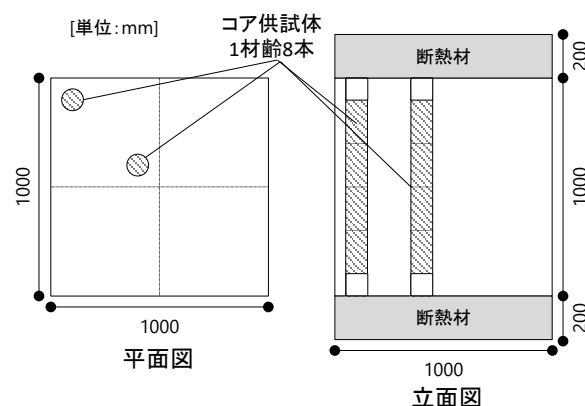


図 3.2.4 マスコン部材用の模擬試験体の詳細図

3. 2. 4 建築技術性能証明の取得と地産地消による循環型システムの構築

a) 建築技術性能証明の取得

建築構造物への適用に向け、許認可適合を証明する第三者機関での建築技術性能証明の取得が重要となる。

(一財) 日本建築総合試験所における建築技術性能証明制度により、SR セメントが JIS A 5308 及び JIS A 5464 に記載されている混和材の規定に適合していることの証明を取得することとした。JIS 適合となる混和材の規定を満足することを証明するため、鉄筋に対して悪影響を及ぼさないことを確認すると共に、R-CF コンクリートによる部材の構造性能について普通コンクリートとの比較検討を行った。

鉄筋腐食試験の水準を表 3.2.9 に示す。コンクリート種類は普通コンクリートと R-CF コンクリートの 2 水準とした。鉄筋の腐食を促進するため、実験では 4.0kg/m^3 の NaCl を添加した。鉄筋腐食試験体は図 3.2.5 に示す $100\times 100\times 400\text{mm}$ 角柱試験体とし、内部に $\phi 10$ 鉄筋(丸鋼)を埋設した。模擬 RC 試験体の自然電位(腐食の有無)を測定することで、R-CF コンクリートの腐食抵抗性の評価を普通コンクリートと比較した。

実大スラブ曲げ試験の概要を表 3.2.10 に示す。R-CF コンクリートが一般的なプレキャスト RC 部材と同等の構造性能を有していることを確認することを目的に、図 3.2.6 に示す実大の板状試験体による構造実験を行った。また、図 3.2.7 に示す梁付きの壁模擬試験体を作製し、屋外暴露に供し外観調査を行った。

b) 資源循環型システムの構築

神奈川県を先行モデルとして、地産地消を原則とした資源循環システムを構築する。建設現場に出荷された生コンのうち使われなかった戻りコンを回収して、SR セメントを製造し、SR セメントを用いたコンクリート製品として出荷し建設現場で使用していく。このような循環システムを構築する上で、①戻りコン集積スキーム、②SR セメント製造拠点の増強、③行政の資材指定化による優先利用を実現することが必要であり、これらを実現するための検討を行った。

c) 建築技術性能証明の改定

16 年 6 月に建築技術性能証明を取得後、本技術の適用案件が増加傾向にあることを受け、SR セメントを用いた製品の一般化が進むと、開発者である鹿島建設(株)および三和石産(株)が関与しない製品が実用化される可能性が懸念されたことから、認証機関である(一財)日本建築総合試験所より品質確保体制の整備を求められた。これを受け、品質確保体制の検討および建築技術性能証明の改定を行った。

表 3.2.9 鉄筋腐食試験の水準

NO	記号	W/B (%)	結合材の構成比 (B × %)			
			SR (7630)	B	F	N
1	N-45%	45	-	-	-	100
2	SR(7630)60 -F10-B30-45%	45	60	30	10	-
3	SR(7630)60 -F10-B30-35%	35	60	30	10	-

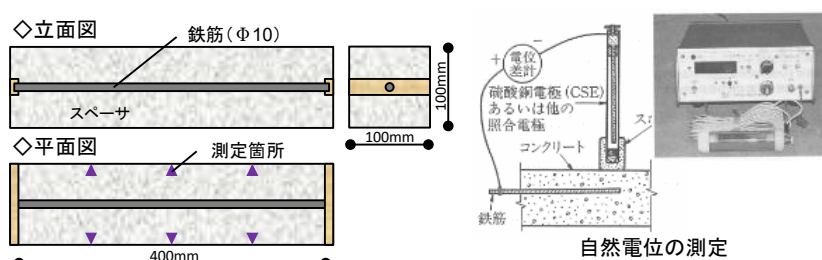


図 3.2.5 鉄筋腐食試験体および自然電位測定の概要

表 3.2.10 実大スラブ曲げ試験の水準

NO	記号	鉄筋比 (%)	W/B (%)	結合材の構成比 (B × %)			
				SR (7630)	B	F	N
1	N-55% (0.38%)	0.38	55	-	-	-	100
2	SR(7630)60-F10 -B30-45% (0.38%)	0.38	45	60	30	10	-
3	SR(7630)60-F10 -B30-45% (0.76%)	0.76					

* 実大曲げ試験: $200\times 50\times 15\text{cm}$

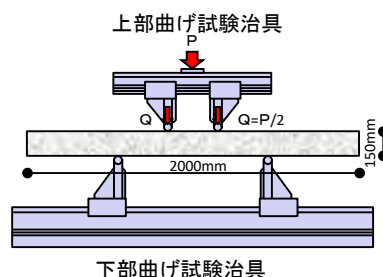


図 3.2.6 実大スラブ曲げ試験の詳細と加力装置

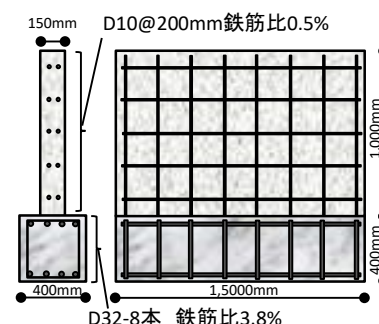


図 3.2.7 屋外暴露用梁付き壁模擬試験体の詳細

4. 結果及び考察

4. 1 SR セメントの製造ラインの改良および製造方法の確立

4. 1. 1 製造ラインの改良による SR セメントの品質向上

a) 新規製造ラインを用いた SR セメント実機製造実験結果

新規製造ラインで製造した SR セメントにおいても、比表面積が $8,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以下であれば、普通セメントに対する強度比 60%以上の SR セメントを製造できることが確認できた(図 4.1.1 参照)。既存製造ラインでは SR セメントは $30\mu\text{m}$ 程度のピークの他に $300\mu\text{m}$ 程度の頻度も高く 2 山状の粒度分布であるのに対し、新規製造ラインでは $300\mu\text{m}$ 程度のピークが小さくなっていることが確認され、新規製造ラインの導入により、 $100\mu\text{m}$ 以上の凝集物が少ない高品質の SR セメントが製造できることを確認した(図 4.1.2 参照)。

b) 運用時における新規製造ラインで製造した SR セメントの基礎物性試験結果

運用時に新規製造ラインで製造した SR セメントは、比表面積 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 以下、且つ、普通セメントに対する強度比 60%以上を満足する高品質な SR セメントを安定して製造できることを確認した(図 4.1.3 参照)。

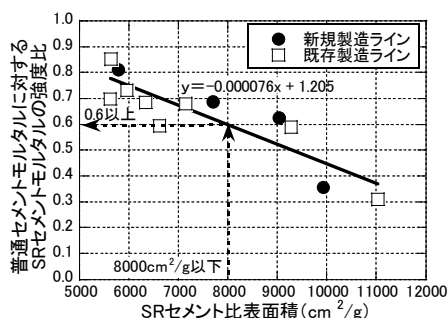


図 4.1.1 SR セメント比表面積と普通セメントとの圧縮強度比の関係

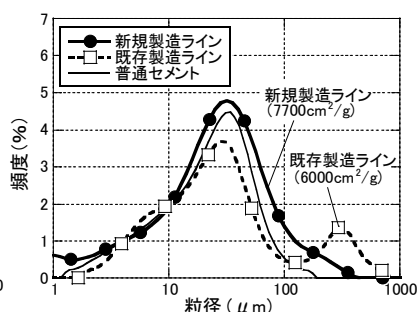


図 4.1.2 SR セメントの粒度分布測定結果

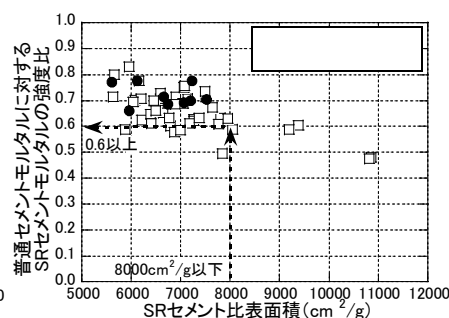


図 4.1.3 運用時の比表面積と普通セメントとの圧縮強度比の関係

4. 1. 2 新規 SR セメント製造プラントの整備と品質確認

a) 新規製造プラントによる SR セメント実機製造実験結果

新規製造プラントにおいても、遅延剤を用いることにより SR セメントの比表面積を低減し品質を向上できること、比表面積を $8,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以下で管理することにより普通セメントに対する強度比 60%以上となる SR セメントを製造できることが確認できた(図 4.1.4 および図 4.1.5 参照)。

b) 運用時における新規製造プラントで製造した SR セメントの基礎物性試験結果

新規製造プラントの SR セメント比表面積は、平均 $6,140\text{cm}^2/\text{g}$ 、変動係数 14.5%であり、既存製造プラントでは平均 $6,835\text{cm}^2/\text{g}$ 、変動係数 12.1%であった(図 4.1.6 参照)。新規製造プラントと既存製造プラントの違いが SR セメントの基礎物性に与える影響は小さく、複数の生コン工場から戻りコンを集積し SR セメントを製造するスキーム構築に際し、品質および品質安定性の問題はないことが明らかとなった。

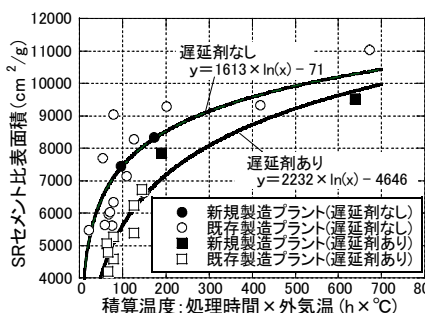


図 4.1.4 積算温度と SR セメントの比表面積の関係

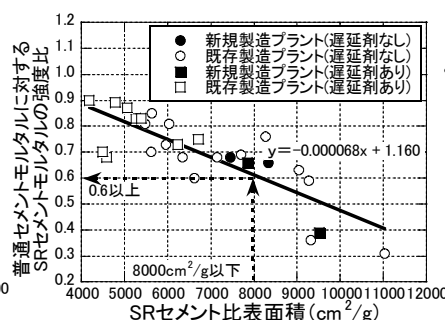


図 4.1.5 SR セメント比表面積と普通セメントとの圧縮強度比の関係

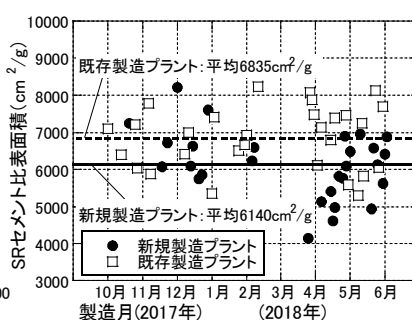


図 4.1.6 新規製造プラントの運用時の SR セメント比表面積

4. 2 R-CF コンクリートおよびSR セメントコンクリートによるプレキャスト RC 製品・レディーミクストコンクリート製品の開発と事業化

4. 2. 1 R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の開発

a) PCa 工場での試験練りによる調合検討結果

W/B45%以下の調合を採用することで、PCa 部材を製造する上で必要と考えられる 30N/mm^2 以上を確保できることが確認できた(図 4.2.1 参照)。図 4.2.2 は、促進中性化試験結果を基に、屋外の CO_2 濃度を 0.05% と仮定して屋外条件での中性化深さの進展を予測したものである。W/B35%の 2 調合は 65 年経過時点で中性化深さは 15mm 以下の結果であり、最小かぶり厚さは 30mm と想定されることから、W/B35%の R-CF コンクリートは、JASS 5 における計画供用期間の標準である 65 年の耐久性を有していると判断できる。

b) PCa 部材モックアップ製造実験結果

本製造実験は最も外気温が低い 2 月の製造であったが、一般調合において目標とした 30N/mm^2 を材齢 28 日で確保できる結果となった(図 4.2.3 参照)。バルコニー部材脱型時に、写真 4.2.1 に示す最大幅 0.5 mm 程度の表層ひび割れが認められた。この原因として、冬期の製造であったため、蒸気養生後、表層部のみ温度低下による急激な収縮が生じひび割れが発生したと考えられる。実製造では、温度降下勾配を緩やかにするなど内外温度差を小さくする対策で、表層ひび割れの発生は抑制できると考えられる。打設工程で大きな問題はなく、屋外暴露試験も良好な結果が得られていることから、R-CF コンクリートによる PCa 部材は、通常の作業工程により製造が可能であり、耐久性上も大きな問題がないと考えられる(写真 4.2.2 参照)。

c) 屋上設備機械基礎のモックアップ製作

本実験の調合は、バルコニー部材製造時と同じ調合としたが、材齢 28 日の時点で 20N/mm^2 程度であり、バルコニー部材製造時と比較し低い強度結果であった。この原因として、蒸気養生中の蒸気が試験体に上手く回らなかったことや、養生期間中の外気温が低かったことなどが挙げられる。しかしながら、設備機械基礎の目標強度は 18N/mm^2 であり、必要強度を満足する結果となった。製造工程において、コンクリート打設および脱型などの作業に大きな問題はなく、仕上がりもひび割れはなく良好であることが確認できた。今後、屋外暴露試験を継続し外観の異常の有無を確認していく予定であり、実構造物への適用検討も積極的に進めていく計画である(写真 4.2.3 参照)。

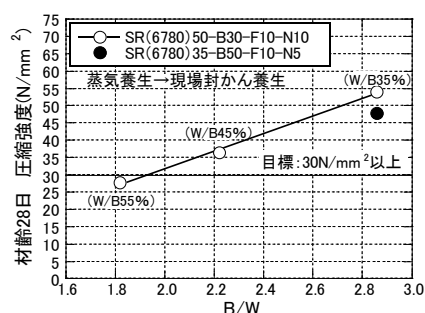


図 4.2.1 結合材水比と
材齢 28 日圧縮強度の関係

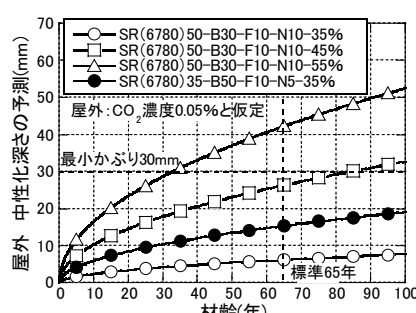


図 4.2.2 屋外条件での
中性化深さの予測結果

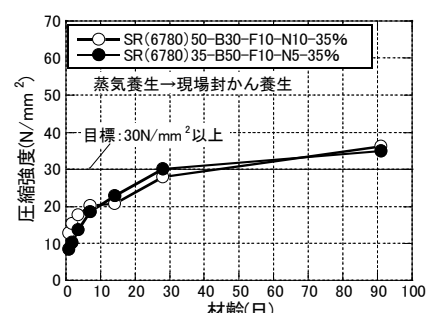


図 4.2.3 PCa 部材と同一養生の
圧縮強度試験結果



写真 4.2.1 ひび割れ発生状況



写真 4.2.2 バルコニー外観



写真 4.2.3 設備機械基礎外観

4. 2. 2 SR セメントコンクリートによるプレキャスト製品の開発

a) 即時脱型成型による積みブロックの試作製

試作製した SR セメントコンクリートによる積みブロックは、3 工場全てのロットにおいて、JIS A 5371 に定められた製品質量および製品寸法の規格値を満足し、圧縮強度も規格値である 18N/mm^2 以上を満足する結果となった(図 4.2.4 参照)。以上のことから、SR セメントコンクリートによる JIS A 5371 の規格を満足する積みブロックを製造できる見通しが得られた。

b) 即時脱型成型による積みブロック製品の調合検討結果

積みブロックの設計基準強度は 18N/mm^2 であり、工場実績から標準偏差を 3N/mm^2 と仮定すると、調合強度は $18+3\times3=27\text{N/mm}^2$ となる。調合強度 27N/mm^2 を満足する B_v/V_v を、実験により得られた図 4.2.5 の関係式で求めると $B_v/V_v=0.52$ となることから、これを基に SR セメントコンクリートの実施調合を表 4.2.1 の調合に設定した。

c) 積みブロックの繰り返し製造実験結果

SR セメントコンクリートの積みブロック製品の JIS 認証取得に向け、製品の品質安定性を確認するため、1 日 2 ロットの積みブロック製造実験を、延べ 5 日間実施した。計 20 個の積みブロック製品を対象に試験を行った結果、製品質量、製品寸法、圧縮強度の試験値は、全てのロットにおいて、JIS 規格を満足する結果が得られ、実製造に耐えうる品質安定性を有していることが確認できた(表 4.2.2 参照)。以上のデータを基に、ピーシーコンクリート工業三木木工場で製造する SR セメントコンクリートの積みブロック製品について、建材試験センターより JIS A 5371 の JIS 認証を取得するに至った。JIS 認証取得を受け、同工場では本積みブロック製品の実製造を開始している(写真 4.2.4 参照)。

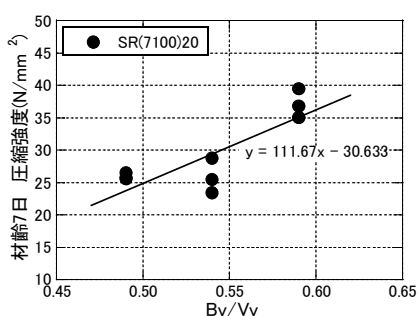
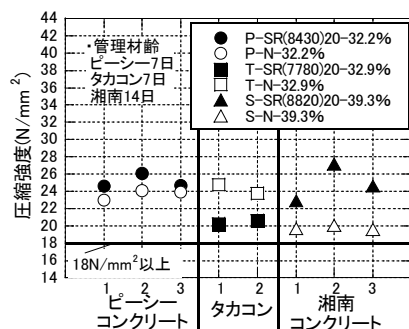


表 4.2.1 設定した実施調合

W/B (%)	B_v/V_v	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					空隙 (%)
			水	普通 セメント	SR セメント	砕砂	砕石	
36.9	0.52	60.7	110	237	61	1155	753	7.5

* V_v : 水と空隙の容積の和, B_v : 結合材の容積の和

図 4.2.4 管理材齢における圧縮強度 図 4.2.5 B_v/V_v と圧縮強度の関係

表 4.2.2 積みブロック繰り返し製造実験の品質検査結果

製造日	記号	製品質量(47.3kg以上)				製品寸法												強度試験(18N/mm^2 以上)			
		1		2		長さ(450 $\pm$ 3mm)				高さ(300 $\pm$ 3mm)				厚さ(350 $\pm$ 5mm)				1		2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
17年10月11日	A①	50.7	合格	50.3	合格	452	合格	452	合格	302	合格	301	合格	347	合格	347	合格	26.5	合格	28.0	合格
	A②	50.2	合格	50.3	合格	451	合格	451	合格	300	合格	300	合格	348	合格	348	合格	25.6	合格	25.8	合格
17年10月19日	B①	50.6	合格	50.8	合格	451	合格	450	合格	299	合格	299	合格	349	合格	348	合格	26.9	合格	29.3	合格
	B②	50.7	合格	50.6	合格	450	合格	450	合格	299	合格	298	合格	349	合格	348	合格	24.3	合格	26.0	合格
17年11月1日	C①	50.3	合格	50.2	合格	450	合格	450	合格	299	合格	300	合格	350	合格	350	合格	24.3	合格	26.6	合格
	C②	50.9	合格	50.6	合格	451	合格	450	合格	299	合格	299	合格	349	合格	349	合格	30.6	合格	28.1	合格
17年11月11日	D①	50.7	合格	50.6	合格	450	合格	450	合格	299	合格	298	合格	348	合格	348	合格	30.3	合格	27.1	合格
	D②	50.5	合格	50.5	合格	450	合格	450	合格	299	合格	299	合格	348	合格	349	合格	24.8	合格	26.4	合格
17年11月30日	E①	50.1	合格	50.9	合格	451	合格	451	合格	299	合格	299	合格	347	合格	350	合格	26.6	合格	30.0	合格
	E②	51.0	合格	51.2	合格	450	合格	450	合格	299	合格	299	合格	350	合格	351	合格	28.3	合格	25.7	合格



写真 4.2.4 SR セメントコンクリートによる積みブロックの実製造状況

4. 2. 3 SR セメントコンクリートによるレディーミクストコンクリートの開発

a) 基礎物性実験の検討結果

基礎物性検討結果により、SR セメントコンクリートの圧縮強度、乾燥収縮、中性化抵抗性は、普通コンクリートと比較し顕著な差がなく、強度および耐久性の観点から、普通コンクリートと同様に実構造物に適用できることが確認できた。

b) 実機製造実験の検討結果

図 4.2.6 の実機製造実験にて得られた結合材水比と強度の関係は概ね線形の関係であり、普通コンクリートと同様の調合設計が可能であることが確認でき、同図中の調合設計式を採用するに至った。図 4.2.7 の SR セメントコンクリートの構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値は、普通コンクリートと同程度の結果であり、JASS 5 で定められた普通コンクリートの $_{28}S_{91}$ 値の値以下であることから、安全側として、JASS 5 に示される普通コンクリートの $_{28}S_{91}$ 値を採用することとした。以上の実機製造実験により、SR セメントコンクリートの調合設計が可能となり、同実験を行った三和石産(株)藤沢工場において、本実験データなどに基づいた技術資料を整備し標準化することで、JIS A 5308 の JIS 認証が付与されるに至った。

c) 実構造物への適用結果

写真 4.2.5 に示す事務所棟のレベルコンクリートの打設は、約 $173\text{m} \times 72\text{m}$ の範囲であり、この内の約 1/3 となる計 141m^3 について、SR セメントコンクリートを打設した。施工性は普通コンクリートと大きな差が無く、施工後の状況はレベルコンクリートとして良好な出来形であった。

付属舎棟の打設範囲は、図 3.2.5 に示す付属舎棟の基準コンクリート、付属舎棟躯体の基礎耐圧盤および壁であり、計 117m^3 のコンクリートを打設した(写真 4.2.6 参照)。フレッシュ試験および強度試験結果は、全てのロットで許容値内の結果が得られた(図 4.2.8 参照)。脱型後の躯体の状況は、ひび割れ等も見られず、良好な充填状況であることが確認できた。付属舎棟完成後の外観状況は、色合いなども普通コンクリートと変わらず、優れた外観を確保する結果となった(写真 4.2.7 参照)。

良好な本適用結果を受け、神奈川県内の公共工事に SR セメントコンクリートの適用を提案した。本適用による CO_2 削減などの様々なメリットを説明することで、計 $5,000\text{m}^3$ の SR セメントコンクリートの本格適用が採用される見込みとなった。

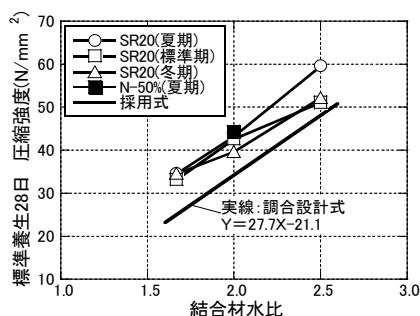


図 4.2.6 結合材水比と圧縮強度の関係式

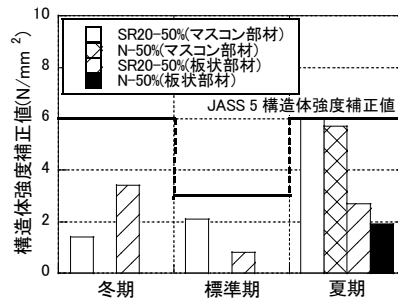


図 4.2.7 構造体強度補正值の実験結果

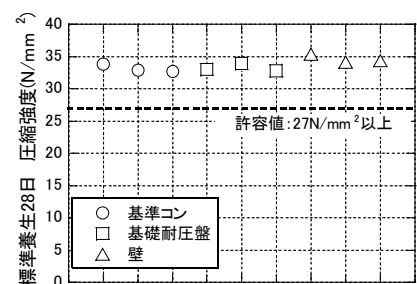


図 4.2.8 実適用における圧縮強度品質検査結果



写真 4.2.5 レベルコン打設状況



写真 4.2.6 壁部施工状況



写真 4.2.7 壁部施工後の状況

4. 2. 4 建築技術性能証明の取得と地産地消による循環型システムの構築

a) 建築技術性能証明の取得

材齢 91 日時点で全てのコンクリートの自然電位は $-0.20(\text{V vs CSE})$ 以上の値を示し、90%以上の確率で腐食していないと判断されたことから、SR コンクリートは普通コンクリートを比較しても同程度以上であり、SR セメントを混和材としてコンクリートに混合しても鉄筋に悪影響を及ぼさないことが実験的に確認できた(図 4.2.9 参照)。R-CF コンクリートの P- δ 図は、鉄筋比が同じ条件において、N と大きな差はない結果であることから、R-CF コンクリートによる RC 部材の曲げ構造性能は N と同等であると判断できる(図 4.2.10 参照)。また、写真 4.2.8 に示す 4 年間の長期に渡り屋外暴露に供した梁付きの壁模擬試験体は、普通コンクリートと比較して異常は認められなかった。これらの結果を基に、(一財)日本建築総合試験所の建築技術評価制度を利用し、JIS 適合の混和材であることを認めて貰い、GBRC-性能証明第 16・10 号を取得した。

b) 資源循環型システムの構築

資源循環システムの構築に向け、①戻りコン集積スキーム、②SR セメント製造拠点の増強、③行政の資材指定化による優先利用が重要であり、①②については、4.1 において神奈川県を中心にスキーム構築と製造拠点の増強を実現した。③について、神奈川県に積極的に働きかけ、県土整備局の建設リサイクル認定資材の登録を完了した。以上の取り組みにより、神奈川県を先行モデルとして、図 4.2.11 に示す地産地消を原則とした資源循環システムを構築し、本技術の社会実装を実現した。

c) 建築技術性能証明の改定

開発者である鹿島建設(株)および三和石産(株)が関与しない SR セメントを用いた製品の普及を見据え、これらの品質確保を目指す組織として「SR コンクリート研究会」を発足した。本組織の発足により、品質確保体制が整備されたことから、現在、(一財)日本建築総合試験所において建築技術性能証明を改定中であり、2018 年度中には認証が得られる見込みである。

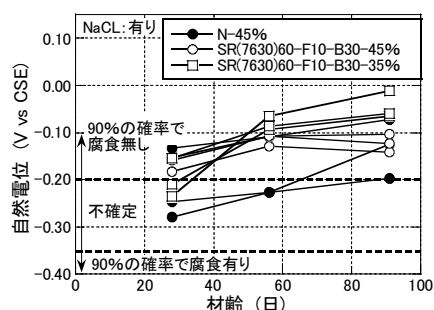


図 4.2.9 鉄筋腐食試験結果

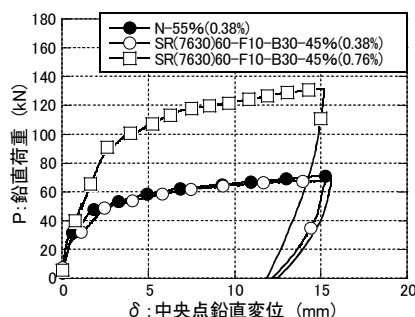


図 4.2.10 実大板状曲げ試験結果



写真 4.2.8 暴露試験状況

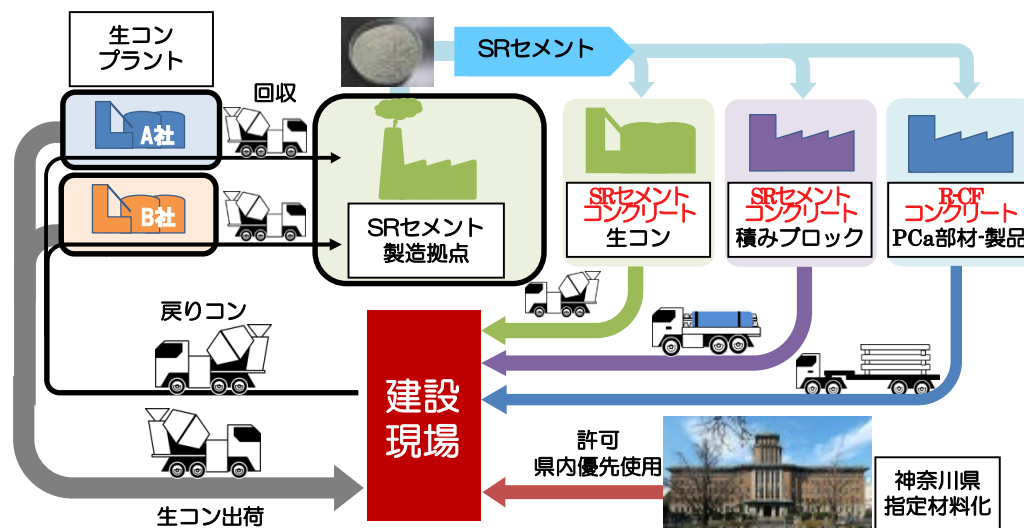


図 4.2.11 神奈川県における資源循環システムの概要

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

第一に、本事業の核心である戻りコンクリートからセメントを再生する技術は、過去に例がなく新規性に富む。また、その品質を向上させ安定させることで事業化に足る水準に高めることは技術的に価値が高い。第二の特徴であるフライアッシュ等の産業廃棄物の利用に関しては、再生セメントとの組み合わせでの使用は例がなく、フライアッシュや高炉スラグ等の利用の新しい領域を拓くものである。第三に国内外で研究開発が活発に進んでいる超低炭素コンクリートに関して、既存成果の代表格であるジオポリマーが経済性、耐久性、実用性の点で実用化にほど遠く、本事業の SR セメントを使用する現実的な方法でこれらの課題も解決可能な点が画期的である。

これらの課題の解決に対して同時に寄与できること、また再生セメントが汎用セメントと同程度のコストで製造可能であることなどもあり、R-CF コンクリートとそのプレキャスト製品は、経済性に優れることに大きな特徴があり、この製品の普及、商品化により、環境政策への高い貢献も期待される。

(2) 環境政策への貢献

貢献1. 建設産業に関わる主要な建設副産物である解体コンクリート塊の廃棄量縮減と再生利用

本研究によれば、戻りコンクリートを処理してリサイクルセメントを製造し、さらにはプレキャスト部材として有効に利用することが可能となる。本研究の成果に基づき、戻りコンクリート起源の廃棄物の再資源化が実現すれば、解体コンクリート塊に対する前記再資源化率の低下 3%分に相当する量を回復できることになる。このように、戻りコンクリート再生利用の有効手段を実現する本研究の成果は、今後予測される建設廃棄物の排出増加を回避するため効果的に貢献できるものと考えられる。

貢献2. 建設産業による CO₂ 排出量及びエネルギー消費量の抑制

本技術によれば CO₂ 排出とエネルギー消費を大きく削減することができる。一般に、セメント製造による CO₂ 排出原単位は 725kg/t と大きい。本技術では一般セメントを代替し、SR セメントに加え産業副産物の高炉スラグ、フライアッシュを組み合わせることで、CO₂ 削減効果が非常に大きい。また、エネルギー消費原単位に関しても、約 50%の削減が達成できる。

貢献3. 東日本大震災後に重要性を増した石炭灰の廃棄量縮減と有効利用

本技術成果によれば、結合材のうち SR セメントに加えフライアッシュが利用できるため、その普及に伴い石炭灰の再利用先が生まれることになる。今後予想される埋立て処分量の増加傾向の緩和へ効果的に貢献できると考えられる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付論文>

- 1) 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 百瀬晴基, 笠井哲郎: 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, 建築学会, 乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を併用したクリンカーフリーコンクリートに関する実験研究 (2015)
- 2) 大川憲, 閑田徹志, 百瀬晴基, 笠井哲郎: コンクリート工学年次論文集, Vol.38, 日本コンクリート工学会, 乾燥スラッジ微粉末の分級・粉砕による品質向上に関する研究(2016)

- 3) 大川憲, 青木真一, 百瀬晴基, 閑田徹志, 笠井哲郎: 第 19 回生コン技術大会, pp.87-92, 全国生コンクリート工業組合連合会, 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末を用いた低環境負荷コンクリートの適用検討 (2017)
- 4) 大川憲, 閑田徹志, 巴史郎, 笠井哲郎: コンクリート年次論文集, Vol.39, 日本コンクリート工学会, 乾燥スラッジ微粉末を用いたプレキャストコンクリート製品積みブロックへの適用(2017)
- 5) 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 百瀬晴基, 笠井哲郎: 土木学会論文集, E2-272, 土木学会, 乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を併用した養生方法の異なるクリンカーフリーコンクリートの耐久性に関する研究(2017)
- 6) 大川憲, 百瀬晴基, 閑田徹志, 笠井哲郎: コンクリート工学年次論文集, Vol.40, 日本コンクリート工学会, 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末の品質向上に関する研究(2018) (投稿予定)
- 7) 百瀬晴基, 大川憲, 津嶋武志, 城戸隆宏: コンクリート工学年次論文集, Vol.40, 日本コンクリート工学会, 乾燥スラッジ微粉末を混和材として用いたレディーミクストコンクリートの適用事例(2018) (投稿予定)

<査読付論文に準ずる成果発表>

「特に記載すべき事項はない。」

(2) 主な口頭発表 (学会等)

「特に記載すべき事項はない。」

7. 研究者略歴

研究代表者: 閑田 徹志

ミシガン大学工学部卒業, Ph.D, 現在鹿島建設株式会社技術研究所 主席研究員

研究分担者

※研究分担者とは研究計画書に記載された研究者を指す。

1) 巴 史郎

早稲田大学理工学部卒業, 現在鹿島建設株式会社技術研究所 主任研究員

2) 石関 浩輔

名古屋大学工学部卒業, 現在鹿島建設株式会社技術研究所 研究員

Ⅱ．成果の詳細

[要旨]

本事業では、H24～26 環境省研究総合推進費(補助金)研究事業において開発した戻りコンクリートスラッジによる再生 (SR)セメントおよびこれを主たる結合材として利用したリサイクル・クリンカーフリー(R-CF)コンクリートの基盤技術をさらに発展させ、これら技術の実用化・事業化へ向けた開発検討を実施した。

SR セメントの品質向上を目指し、専用の洗浄脱水設備を新設した。新設製造ラインの SR セメントは品質が向上し、 $100\mu\text{m}$ 以上の凝集物が少なく普通セメントに対する強度比 60%以上の SR セメントを安定して製造できることを確認した。本技術の普及展開に向け、SR セメントの大量製造を目指し複数の生コン工場から発生した戻りコンを集積し SR セメントを製造するスキームを構築し、川崎に新たな製造拠点を新設した。

R-CF コンクリートについて、プレキャスト (PCa) 部材の屋外暴露実験等により、商品化に重要な耐久性を確保し普及への重要課題を解決、さらに標準化が可能な PCa 製品の商品化および実工事への適用の検討を開始した。また、汎用化のため、SR セメントを普通セメントの一部に置き換えた SR セメントコンクリートについて、PCa 製品と生コン製品への適用を検討した。これら製品については、各種の実験を経て品質を確保した上、JIS 適合認定を取得して実用化への重要な準備を整えた。さらに、生コン製品を実工事に初めて 300m^3 適用し、品質と経済性について実用化レベルでの競争力を確認した。現在、他工事案件においても、 $5,000\text{m}^3$ の本格適用を開始している。以上により、環境性能、高い品質、優れた経済性を兼ね備えた競争力に富む製品の 2 品目以上の事業化を行い、本事業者である三和石産(株)が拠点としている神奈川県での地産地消を原則としたリサイクルシステムの先行モデルを確立し、本技術の社会実装を実現した。社会実装に際しては、本技術の特徴である環境性能、高い品質、優れた経済性に加え、地産地消による地域経済への貢献も大きな推進力となり、行政が発注する公共工事への本技術の適用も実現する見込みとなった。

本技術の普及展開により、主要な建設副産物である解体コンクリート塊の廃棄量縮減、CO₂ 排出量及びエネルギー消費量抑制、大震災以降重要性を増した石炭灰の廃棄量縮減の 3 つの環境政策への貢献が期待される。また、これらの環境行政への貢献に加え、本技術を用いたリサイクルシステムは十分な経済的競争力を有し地域産業の活性化への寄与が見込まれる。

1. はじめに

建築産業では、全国の 20%以上の廃棄物を排出しており(図 1.1)、項目種別では特に解体コンクリート塊が最も多く 3,200 万 t/年に及ぶ。解体コンクリート塊の有力な排出起源のひとつが戻りコンクリートである。戻りコンクリートとは、生コンプラントから出荷されても使用されずに再び工場に戻ってくるコンクリートのことで、生コン出荷量全体の 1.6%程とされている。戻りコンクリートは、年間 200 万 m^3 に達し、それらのほとんどが産業廃棄物として処理されている。一方、東日本大震災以降、原子力発電所の稼働制限により、石炭火力発電所の稼働が活発化し、使用石炭量の増加が見込まれ、石炭灰の排出量は 13,000 千 t/年へ近づくことが予想されるが、再利用先の石炭灰の処理能力の余力は乏しく、埋立て処理せざるを得ず、埋立て処分量の増加も懸念される。CO₂ の排出量・エネルギー消費量に着目すれば、セメント製造起源の CO₂ 排出量は日本全体の約 4%、エネルギー消費量は日本全体の 1%にものぼり膨大な量となっている。本技術により、戻りコンクリート及び石炭灰の廃棄量縮減、建設産業による CO₂ 排出量およびエネルギー消費量の抑制を実現する。

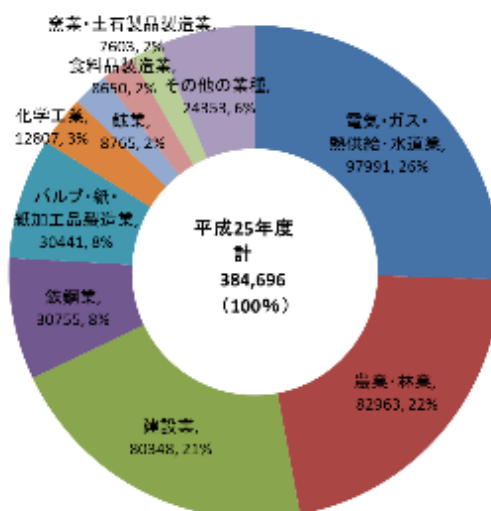


図 1.1 産業別の産業廃棄物量「平成 25 年度産業廃棄物の排出・処理状況 環境省」

2. 研究開発の目的

本研究は、以下Ⅰ～Ⅲの循環型社会形成推進及び廃棄物に関わる問題解決、CO₂ 排出量とエネルギー消費量の抑制に貢献することを目指す。H24～26 環境省研究総合推進費(補助金)研究事業において、これら 3 課題に多面的かつ効果的に貢献できる新規性に富む技術として、戻りコンクリートスラッジによる SR セメントを用いた R-CF コンクリートを開発しており、本事業では、本技術の製造方法の確立および製品化と事業化を目的とする。

- Ⅰ.建設産業に関わる主要な建設副産物である戻りコンクリートの廃棄量縮減と再生利用
- Ⅱ.東日本大震災後に重要性を増した石炭灰の廃棄量縮減と有効利用
- Ⅲ.建設産業による CO₂ 排出量及びエネルギー消費量の抑制

戻りコンクリートを集積して、スラッジ再生セメント（以下、SR セメントと称す）製造により再利用を図る循環型のシステムの構築を念頭に、SR セメントの製造ラインの改良及び大量製造方法の確立を目指す。更に、SR セメントを主たる結合材とし、フライアッシュや高炉スラグなどの産業副産物の結合材を大量に混和したリサイクル・クリンカーフリーコンクリート（以下、R-CF コンクリートと称す）によるプレキャスト（以下、PCa と称す）鉄筋コンクリート（以下、RC と称す）製品の開発・事業化を行うことで、戻りコンクリートの廃棄量縮減、石炭灰・高炉スラグの有効利用、大幅な CO₂ 排出量の削減、エネルギー消費量の削減を実現する。また、SR セメントを結合材として普通ポルトランドセメントの 20%程度と置き換えた SR セメントコンクリートについても、製品化と事業化を図り、本技術の普及促進を目指す。本事業により年間 1 万 m³以上の戻りコンクリートを受け入れられる SR セメント製造拠点を構築し、年間 1 万 m³以上の R-CF コンクリートの製造を可能とする。

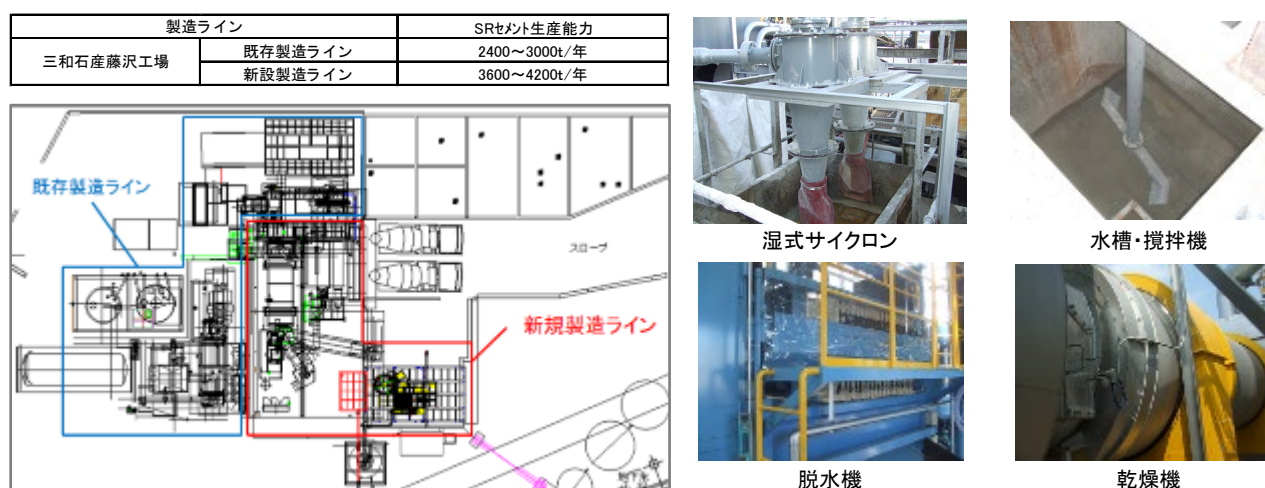
3. 研究方法

3. 1 SR セメントの製造ラインの改良および製造方法の確立

3. 1. 1 製造ラインの改良による SR セメントの品質向上

SR セメントの品質および品質安定性の向上を目指し、専用の洗浄・脱水設備および乾燥設備等の新規製造ラインを新設した。100 μ m 以上の凝集物が少なく普通ポルトランドセメント（以下、N と称す）に対する強度比 60%以上の高品質の SR セメントを製造できることを確認するため、新規製造ラインにて製造した SR セメントの基礎物性、これを用いたモルタルのフレッシュおよび圧縮強度試験を実施した。

三和石産(株)藤沢工場における既存製造ラインと新規製造ラインの概要を図 3.1.1 に示す。これまでの基礎研究において、SR セメントの品質は原料となる戻りコンクリート(以下、戻りコンと称す)の生コン練混ぜ時からの積算温度の影響が大きいこと、積算温度が小さい戻りコンの方が初期水和の進展が小さく高品質の SR セメントを製造することができること、積算温度の高い戻りコンが原料に混ざることによって SR セメントの品質が大きく低下することなどが明らかとなっている。新規製造ラインの導入により、高品質の SR セメントの製造が期待できる戻りコンのみを選別することが可能となり、SR セメントの品質および品質安定性の向上が期待できる。新規製造ラインに導入した機器について、湿式サイクロンおよび脱水機は既存製造ラインと同一メーカー同一機種を選定し、乾燥機は新規製造ラインにおいて高品質な SR セメントを大量製造する必要があるため、既存製造ラインの乾燥機と同一メーカーで生産能力が 1.5 倍のものを選定した。これにより SR セメントの最大生産能力は、既存製造ラインに対し約 2.5 倍の生産が可能となる。



a) 新規製造ラインを用いた SR セメント実機製造実験

新規製造ラインで製造した SR セメントの品質を確認するため、実機製造実験を実施した。実機製造実験は生コンプラントで生コン 5 m^3 を製造し、戻りコンが発生するまでの経過時間を 2.5 時間と設定した。2.5 時間経過後、骨材を分級し残ったスラッジ水を水槽で貯留する時間（0h, 4h, 7h, 48h）を変化させ、SR セメントを製造した。製造した SR セメントの物性試験（密度・比表面積・強熱減量）とモルタルによるフレッシュおよび圧縮強度試験を行った。また、100 μ m 以上の凝集物の割合を確認するため、レーザー回折による粒度分布測定を行った。使用材料を表 3.1.1 に、実機試験で使用した生コンの調査表を表 3.1.2 に、実機プラントによる実験水準を表 3.1.3 に示す。

表 3.1.1 使用材料一覧

項目	記号	材料	密度(g/cm ³)
セメント	N	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67
	S2	陸砂	2.57
粗骨材	G	石灰砕石	2.70
混和剤	AE	AE減水剤	—

表 3.1.2 調合表一覧

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	N	S1	S2	G	AE
N-50%(AE)	50	44.4	185	370	418	342	980	4.81

表 3.1.3 実機製造実験の水準一覧

NO	記号	練り混ぜから 処理までの時間	スラッジ水から 圧縮処理まで時間	想定積算温度 外気温7℃と仮定
1	2.5-0-N	2.5h	直ちに	17.5
2	2.5-4.0-N	2.5h	スラッジ水で4h攪拌後	45.5
3	2.5-7.0-N	2.5h	スラッジ水で7h攪拌後	66.5
4	2.5-48.0-N	2.5h	スラッジ水で48h攪拌後	353.5

* 配合: 呼び30-SL18(AE減水剤)

b) 運用時における新規製造ラインで製造した SR セメントの基礎物性試験

運用時における新規製造ラインで製造した SR セメントの品質および品質安定性を確認するため、既存製造ラインで製造した SR セメントと、新規製造ラインで製造した SR セメントの基礎物性について比較検討を行った。基礎物性は、SR セメントの品質管理を比表面積で行うため、その値を既存製造ラインのものと比較した。なお、試験方法は、比表面積(JIS R 5201)に準拠して行った。また N に対する強度比 60%以上が確保できることを確認するため、モルタルによる圧縮強度試験(JIS R 5201)を行った。

3. 1. 2 新規 SR セメント製造プラントの整備と品質確認

SR セメントを安定して大量に製造するためには、複数の生コン工場から発生した戻りコンを集積し SR セメントを製造するスキームが不可欠である。これを実現するため、川崎市内に SR セメントの製造拠点を新たに構築し、SR セメントの生産量拡大を図った。この新規 SR セメント製造拠点で製造した SR セメントの品質および安定性を確認することを目的とし、その基礎物性を確認すると共に、これを用いたモルタルのフレッシュおよび圧縮強度について検討した。

新規 SR セメント製造プラントを川崎市内に設置し、近隣 4 工場からの戻りコンを集積する(図 3.1.2 参照)。これらの戻りコンから製造した SR セメントを安定的に製造することで生産量の拡大を図る。また今後労働人口の減少や戻りコン由来の廃棄物削減および生コン工場におけるコスト縮減の観点から、生コン業界で発生する戻りコン処理において集約化し、効率的に処理することが不可欠である。この複数生コン工場の戻りコンを集積する新規 SR セメント製造プラントは、そのパイロットプラントとして位置付けており、将来他地域での拠点拡大を見据えたものである。



図 3.1.2 複数生コン工場の戻りコンを集積する新規 SR セメント製造プラント

製造工程は、図 3.1.2 に示す通りであり、三和石産(株)藤沢工場と同様の工程で、乾燥機に関しては、同一メーカー同一機種の機器を採用した。新規 SR セメント製造プラントの最大生産能力は、新設製造ラインを増設した藤沢工場と同等であり、両工場の稼働により生産能力の大幅な向上が実現できる。

a) 新規製造プラントによる SR セメント実機製造実験

新規製造プラントにて製造した SR セメントの品質を確認するため、実機製造実験を実施した。実験水準を表 3.1.4 に示す。ここでは、スラッジ水を水槽で貯留する時間 (0h, 2h) を変化させ、SR セメントを製造した。また夏季における SR セメントの品質低下が懸念されることから、品質向上を目的に遅延剤を用いた検討も実施した。遅延剤の添加量は表 3.1.5 に示す普通セメント 370kg/m³ に対し、N×0.1(wt×%)とした。それ以外の使用材料については 3.1.1 と同じ表 3.1.6 の材料を用いた。製造した SR セメントの物性試験(密度・比表面積・強熱減量)、レーザー回折による粒度分布測定、モルタルによるフレッシュおよび圧縮強度試験を実施した。

表 3.1.4 実機製造実験の水準一覧

NO	記号	練り混ぜから 処理までの時間	スラッジ水から 圧縮処理まで時間	想定積算温度 外気温27℃と仮定
1	2.5-0-N	2.5h	直ちに	68.5
2	2.5-2.0-N	2.5h	スラッジ水で2h攪拌後	123.3
3	2.5-2.0-N-G+0.1	2.5h	スラッジ水で2h攪拌後	123.3

* 配合: 呼び30-SL18(AE減水剤)

表 3.1.5 調合表一覧

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	N	S1	S2	G	AE
N-50%(AE)	50	44.4	185	370	418	342	980	4.81

表 3.1.6 使用材料一覧

項目	記号	材料	密度(g/cm ³)
セメント	N	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67
	S2	陸砂	2.57
粗骨材	G	石灰砕石	2.70
混和剤	AE	AE減水剤	-

b) 運用時における新規製造プラントで製造した SR セメントの基礎物性試験

運用時における新規製造プラントで製造した SR セメントの品質および品質安定性を確認するため、同時に製造した 6 ヶ月分のデータを用い、三和石産(株)藤沢工場で製造した SR セメントの基礎物性と比較検討した。対象とする基礎物性は密度、比表面積およびモルタルによる圧縮強度とし、JIS R 5201 および JIS R 5202 に準拠した。

3. 2 R-CF コンクリートおよび SR セメントコンクリートによるプレキャスト RC 製品・レディーミクスト コンクリート製品の開発と事業化

3. 2. 1 R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の開発

R-CF コンクリートによる PCa 部材の開発を目指し、製品化に向けた調査決定のための試験練りおよび PCa 工場におけるモックアップ部材の製造実験を行った。

a) PCa 工場での試験練りによる調査検討

PCa 部材製造に適した R-CF コンクリートの調査検討を目的に、PCa 工場である岡村建興(株)本庄工場(埼玉県本庄市)にて試験練りを行い、圧縮強度試験、促進中性化試験を行った。

実験概要の一覧を表 3.2.1 に、使用材料の一覧を表 3.2.2 に、調査表の一覧を表 3.2.3 に示す。実験要因は、混和材の混合比率と水結合材比の 2 要因とし、混和材の混合比率は、SR セメント 50%、高炉スラグ 30%、フライアッシュ 10%、普通セメント 10%の汎用性の高い一般的な混合比率のもの（以下、一般調査と称す）と、より環境性能を高めた SR セメント 35%、高炉スラグ 50%、フライアッシュ 10%、普通セメント 5%（以下、環境重視調査と称す）の 2 水準、水結合材比は 35、45、60%の 3 水準とし環境重視調査は 35%の 1 水準とした。圧縮強度試験は、60℃12 時間の蒸気養生を行った上で、現場封かん養生とした。

表 3.2.1 PCa 工場試験練りの実験概要

調査		W/B (%)	結合材(B×%)				フレッシュ 試験	強度試験			促進 中性化
			SRセメント (6780)	高炉 スラグ	フライ アッシュ	普通 セメント		脱型時	28日	91日	
一般調査	SR(6780)50-B30-F10-N10-35%	35	50	30	10	10	○	○	○	○	○
	SR(6780)50-B30-F10-N10-45%	45					○	○	○	○	○
	SR(6780)50-B30-F10-N10-55%	55					○	○	○	○	○
環境重視調査	SR(6780)35-B50-F10-N5-35%	35	35	50	10	5	○	○	○	○	○

* 強度試験：60℃12時間蒸気養生⇒現場封かん養生

表 3.2.2 使用材料の一覧

項目	記号	材料	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)
結合材	SR(6780)	SRセメント	2.73	6780
	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3270
	B	高炉スラグ微粉末	2.89	4300
	F	フライアッシュ	2.33	3770
細骨材	S	砂	2.69	—
粗骨材	G	砕石2005	2.71	—
混和剤	HP	高性能AE減水剤	—	—
	AE	AE剤	—	—

表 3.2.3 調査表の一覧

調査		W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
				W	N	SR	B	F	S	G	
一般調査	SR(6780)50-B30-F10-N10-35%	35	45	170	48	240	149	48	738	908	
	SR(6780)50-B30-F10-N10-45%	45	45	170	38	187	116	38	785	967	
	SR(6780)50-B30-F10-N10-55%	55	45	170	31	153	95	31	815	1004	
環境重視調査	SR(6780)35-B50-F10-N5-35%	35	40	170	24	167	247	48	656	991	

b) PCa 部材モックアップ製造実験

R-CF コンクリートの PCa 部材製造に向け、製造上の問題点を確認することを目的に、岡村建興(株)本庄工場にて、モックアップ製造実験を行い、フレッシュ性状、圧縮強度および外観状況を確認した。モックアップ部材として、PCa 部材で主要構造部（建築基準法 2 条）以外の部材で需要があり躯体の一部に該当するバルコニー部材を選定した。

実験概要の一覧を表 3.2.4 に示す。モックアップ部材を作製するコンクリートは、R-CF コンクリートの一般調査および環境重視調査の 2 水準とした。圧縮強度はバルコニーとして最低限必要と考えられる 30N/mm²以上を目標とした。

使用材料の一覧を表 3.2.5 に、モックアップ製造に採用した調査表の一覧を表 3.2.6 に、モックアップ部材の概要を図 3.2.1 に示す。モックアップの大きさは集合住宅のバルコニーを想定し、1,375×2,550mm の形状とした。製造後のモックアップは屋外暴露に供し、随時外観検査を行った。製造時および屋外暴露期間において外観の異常の有無を確認することで実製造に向けた問題点を把握した。

表 3.2.4 PCa 部材モックアップ製造実験の実験概要

調合		W/B (%)	結合材(B×%)				フレッシュ 試験	強度 試験
			SRセメント (6780)	高炉 スラグ	フライ アッシュ	普通 セメント		
一般調合	SR(6780)50-B30 -F10-N10-35%	35	50	30	10	10	○	○
環境重視調合	SR(6780)35-B50 -F10-N5-35%	35	35	50	10	5	○	○

* 強度試験: 60℃12時間蒸気養生⇒現場封かん養生、試験材齢16h、41h、81h、7日、14日、28日、91日

表 3.2.6 調合表の一覧

調合		W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
				W	N	SR	B	F	S	G
一般調合	SR(6780)50-B30 -F10-N10-35%	35	40	170	48	240	149	48	661	998
環境重視調合	SR(6780)35-B50 -F10-N5-35%	35	45	170	24	167	247	48	743	914

表 3.2.5 使用材料の一覧

項目	記号	材料	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)
結合材	SR(6780)	SRセメント	2.73	6780
	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3270
	B	高炉スラグ微粉末	2.89	4300
	F	フライアッシュ	2.33	3770
細骨材	S	砂	2.69	—
粗骨材	G	砕石2005	2.71	—
混和剤	HP	高性能AE減水剤	—	—

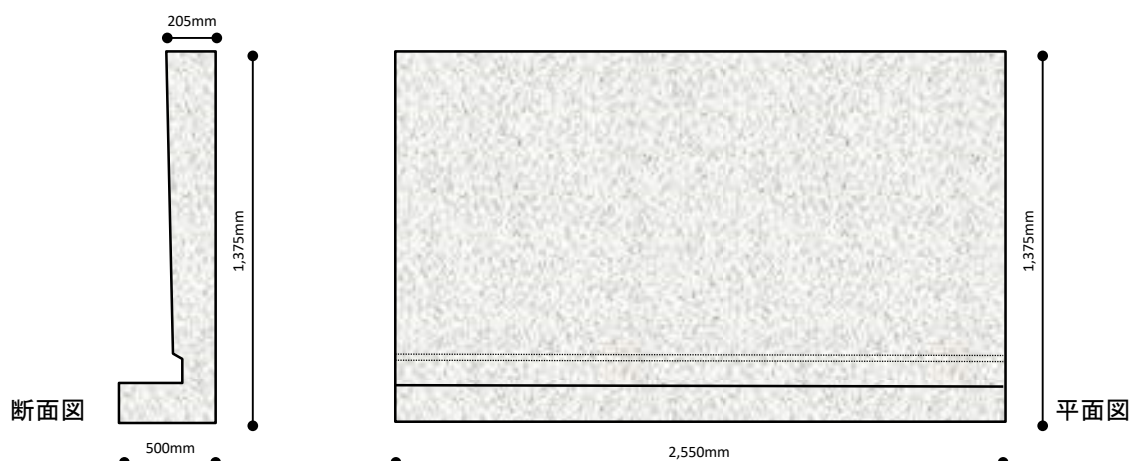


図 3.2.1 バルコニーモックアップの概要

c) 屋上設備機械基礎のモックアップ製作

R-CF コンクリートを適用する際の大きな課題として、コストおよび強度発現が挙げられる。環境性能が優れるものの使用する混和材の種類が多いため、投入手間や設備などのコスト増が伴うこと、副産物結合材が大部分を占めるため強度発現が遅いことなどが課題となる。多数の同形状の製品を製造する部材に適用することで、コスト減が狙え、バルコニーなどの躯体でなければ強度発現の遅延も問題となり難いことから屋上の設備機械基礎に着目した。

実験概要の一覧を表 3.2.7 に、使用材料の一覧を表 3.2.8 に、調合表の一覧を表 3.2.9 に示す。R-CF コンクリートにより設備機械基礎のモックアップを製作し、強度発現と製造状況および製品の外観状況を確認した。コンクリートは、一般調合と環境重視調合の 2 種類とした。圧縮強度は設備機械基礎として最低限必要

表 3.2.7 設備機械基礎モックアップ製造実験の実験概要

調合		W/B (%)	結合材(B×%)				フレッシュ 試験	強度 試験
			SRセメント (6780)	高炉 スラグ	フライ アッシュ	普通 セメント		
一般調合	SR(7320)50-B30 -F10-N10-35%	35	50	30	10	10	○	○
環境重視調合	SR(7320)35-B50 -F10-N5-35%	35	35	50	10	5	○	○

* 強度試験: 60℃12時間蒸気養生⇒現場封かん養生、試験材齢16h、41h、65h、7日、14日、28日

表 3.2.9 調合表の一覧

調合		W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
				W	N	SR	B	F	S	G
一般調合	SR(7320)50-B30 -F10-N10-35%	35	40	170	48	240	149	48	656	991
環境重視調合	SR(7320)35-B50 -F10-N5-35%	35	45	170	24	167	247	48	739	910

表 3.2.8 使用材料の一覧

項目	記号	材料	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)
結合材	SR(7320)	SRセメント	2.72	7320
	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3270
	B	高炉スラグ微粉末	2.89	4360
	F	フライアッシュ	2.37	3700
細骨材	S	砂	2.69	—
粗骨材	G	砕石2005	2.71	—
混和剤	HP	高性能AE減水剤	—	—

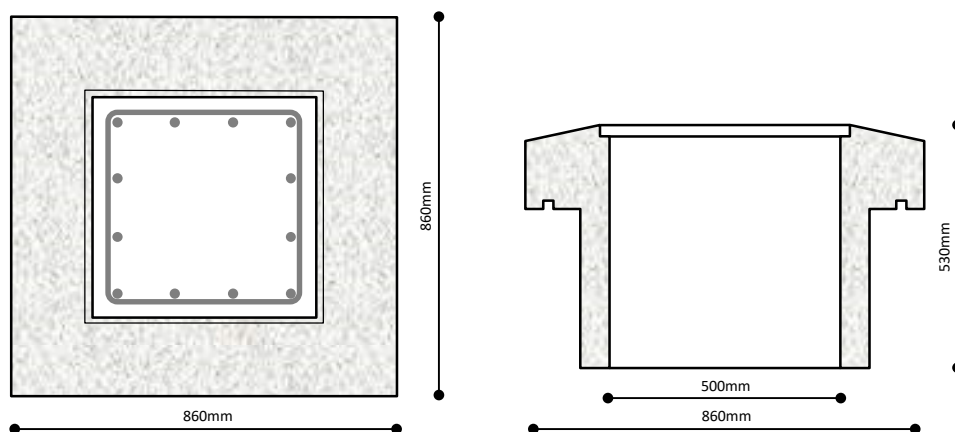


図 3.2.2 設備機械基礎モックアップの概要

と考えられる 18N/mm^2 以上を目標とした。モックアップの概要を図 3.2.2 に示す。モックアップは、事務所ビルの屋上に設置される空調や電気等の設備を載せる基礎を想定し、内径 $500 \times 500\text{mm}$ 、高さ 530mm の形状とした。製作後に仕上がり状況を確認し、屋外暴露を実施して外観の異常の有無を観察した。

3. 2. 2 SR セメントコンクリートによるプレキャスト製品の開発

SR セメントを結合材として N の 20% 程度に置き換えた SR セメントコンクリートは、品質への影響が小さく経済性も高いことから、本技術を広く普及できる製品開発が期待できる。SR セメントコンクリートの普及展開を図るため、これを用いた PCa 製品の開発を目指し、製品化に向けた基礎物性試験および製造実験を実施し JIS 適合認定取得の可能性を検討した。神奈川での地産地消サイクルの構築を見据え、神奈川県内で製造されている PCa 製品として、擁壁等に用いられる積みブロック（他称：間知ブロック、写真 3.2.1 および図 3.2.3）を選定した。選定理由として積みブロックの製造工場は県内に 3 か所あり、普及展開の促進が期待できることも挙げられる。積みブロックは、固練りのコンクリートを打込み、振動を与え型枠に詰め直ちに脱型する即時脱型方式、または、通常の流し込みによって製造される。神奈川県内では全ての工場において即時脱型工法が採用されており、今回は即時脱型工法で製造するブロックを対象とした。また、1 工場については、複数回の製造実験を行い、品質の安定性を確認した。



写真 3.2.1 積みブロック施工例

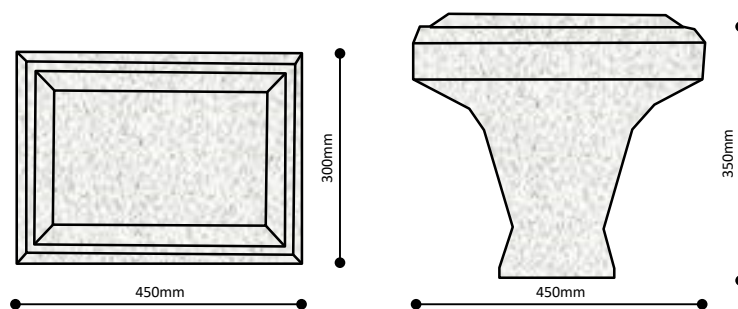


図 3.2.3 積みブロックの概要

a) 即時脱型成型による積みブロックの試作製

積みブロック試作製実験の実験概要を表 3.2.10 に示す。神奈川での地産地消の循環システムの構築を見据え、神奈川県内において即時脱型工法により積みブロックを製造している神奈川積みブロック協同組合に所属する 3 工場において、積みブロックの試作製を行い、表 3.2.11 に示す「JIS A 5371 積みブロック」の製品規格値を満たす製品製造の可能性を検討した。

各工場の使用材料の一覧表を表 3.2.12 に、各工場の調合表の一覧表を表 3.2.13 に示す。SR コンクリートによる積みブロックの試製造を行うと共に、比較対象として、通常工場で製作している調合についても積みブロックを製造した。湘南コンクリートでは、出荷材齢（強度保証材齢）を 14 日で設定しており、他の 2 工場は 7 日で設定している。また、タカコン本社工場の社内規格では、製品検査ロットを 2 個として定めており、本実験のロット数も各工場の社内規格に準拠した。

表 3.2.10 積みブロック試作製実験の実験概要

工場	記号	W/B (%)	SRセメント 混合率	製品 質量	製品 寸法	強度試験	
						7日	14日
ピーシーコンクリート工業三木工場 (神奈川県相模原市)	P-SR(8430)20-32.2%	32.2	B×20%	○	○	○	○
	P-N-32.2%	32.2	—	○	○	○	○
タカコン本社工場 (神奈川県相模原市)	T-SR(7780)20-32.9%	32.9	B×20%	○	○	○	○
	T-N-32.9%	32.9	—	○	○	○	○
湘南コンクリート工業本社工場 (神奈川県平塚市)	S-SR(8820)20-39.3%	39.3	B×20%	○	○	○	○
	S-N-39.3%	39.3	—	○	○	○	○

* 強度試験: 65℃3時間蒸気養生後、現場静置とし、積みブロックから採取したコアにより試験

表 3.2.11 製品規格値

試験項目	JIS A 5371 製品規格値
圧縮強度	18N/mm ² 以上
製品重量	47.3kg以上
寸法許容差	長さ、高さ±3mm 厚さ±5mm

* 管理材齢: ピーシー・タカコン材齢7日
湘南コンクリート材齢14日

表 3.2.12 使用材料の一覧

工場	種類	記号	品種	密度(g/cm ³)
ピーシー コンクリート	結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16
		SR(8430)	SRセメント	2.60
	細骨材	S1	砕砂	2.64
	粗骨材	G	砕石	2.65
タカコン	結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16
		SR(8430)	SRセメント	2.61
	細骨材	S1	砕砂	2.63
	粗骨材	G	砕石	2.66
湘南 コンクリート	結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16
		SR(8430)	SRセメント	2.79
	細骨材	S1	砕砂	2.62
	粗骨材	G	砕石	2.61

表 3.2.13 調合表の一覧

工場	調合	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						空隙 (%)
				W	N	SR	S1	S2	G	
ピーシー コンクリート	P-SR(8430)20-32.2%	32.2	60.5	105	262	65	1145	—	750	7
	P-N-32.2%	32.2	60.5	101	316	—	1163	—	762	7
タカコン	T-SR(7780)20-32.9%	32.9	63.7	110	266	67	1225	—	705	5
	T-N-32.9%	32.9	64.5	104	315	—	1267	—	705	5
湘南 コンクリート	S-SR(8820)20-39.3%	39.3	59.5	108	220	55	718	450	795	5
	S-N-39.3%	39.3	60.2	102	260	—	739	463	795	5

b) 即時脱型成型による積みブロック製品の調合検討

即時脱型工法で積みブロック製品を製造している 1 工場（ピーシーコンクリート工業三木工場）において、実施調合を決定するための試験練りを実施した。即時脱型調合の設計指標として Bv/ Vv を採用し、Bv/ Vv と強度の関係式を求めることで調合を設定した。

実験概要の一覧を表 3.2.14 に、使用材料の一覧表を表 3.2.15 に、調合表の一覧表を表 3.2.16 に示す。ここで Vv は水と計画空隙量の容積の和を示し、Bv は N と SR セメントの容積の和を示す。今回の調合では単位水量は 110kg=110L、計画空隙量は 75L とし、Vv は 110+75=185L とした。N の密度は 3.16 g/m³、SR セメントの密度は 2.86g/m³ として、計画調合の 1m³ あたりの各材料の重量を密度で除すことで、結合材の容積 Bv を求めた。Bv/ Vv と強度の関係から近似式を求め、調合を決定した。

表 3.2.14 積みブロック製品の調合検討実験概要

工場	記号	W/B (%)	SRセメント 混合率	製品 質量	製品 寸法	強度試験
						7日
ピーシー コンクリート	SR(7100)20-32.4%	32.4	B×20%	○	○	○
	SR(7100)20-35.5%	35.5	B×20%	○	○	○
	SR(7100)20-39.0%	39.0	B×20%	○	○	○

* 強度試験: 65℃3時間蒸気養生後、現場静置とし、積みブロックから採取したコアにより試験

表 3.2.15 使用材料の一覧

工場	種類	記号	品種	密度(g/cm ³)
ピーシー コンクリート	結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16
		SR(7100)	SRセメント	2.86
	細骨材	S	砕砂	2.65
	粗骨材	G	砕石	2.66

表 3.2.16 調合表の一覧

工場	調合	W/B (%)	Vv (L)	Bv (L)	Bv/Vv	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					空隙 (%)
							W	N	SR	S	G	
ピーシー コンクリート	SR(7100)20-32.4%	32.4	185	110	0.59	59.9	110	271	68	1120	753	7.5
	SR(7100)20-35.5%	35.5	185	100	0.54	60.4	110	248	62	1145	753	7.5
	SR(7100)20-39.0%	39.0	185	91	0.49	60.9	110	225	57	1169	753	7.5

* Vv: 単位水量と空隙の容積の和、Bv: 普通セメントとSRセメントの容積の和

c) 積みブロックの繰り返し製造実験

SR セメントコンクリートの積みブロック製品の JIS 認証取得に向け、製品の品質安定性を確認するため、複数回の積みブロック製造実験を実施した。2017 年 10 月～11 月までの期間のうち 5 日間で製造実験を行い、出荷材齢（強度保証材齢）である材齢 7 日において製品検査を行い、JIS A 5371 の品質試験を実施した。

実験概要の一覧を表 3.2.17 に、使用材料の一覧表を表 3.2.18 に、調合表の一覧表を表 3.2.19 に示す。実製造の品質検査と同様に、1 日当たり 2 ロットから 2 個ずつの計 4 個の積みブロックを抜き出し、製品質量の測定、寸法検査および圧縮強度試験を実施した。

表 3.2.17 積みブロックの繰り返し製造実験概要

工場	製造日	記号	W/B (%)	SRセメント 混合率	製品 質量	製品 寸法	強度試験 7日
ピーシー コンクリート	17年10月11日	A① A②	36.9	B×20%	○ ○	○ ○	○ ○
	17年10月19日	B① B②			○ ○	○ ○	○ ○
	17年11月1日	C① C②			○ ○	○ ○	○ ○
	17年11月11日	D① D②			○ ○	○ ○	○ ○
	17年11月30日	E① E②			○ ○	○ ○	○ ○

* 強度試験：65℃3時間蒸気養生後、現場静置とし、積みブロックから採取したコアにより試験

表 3.2.18 使用材料の一覧

工場	種類	記号	品種	密度 (g/cm ³)
ピーシー コンクリート	結合材	N	普通ポルトランド セメント	3.16
		SR(7100)	SRセメント	2.86
	細骨材	S	砕砂	2.65
	粗骨材	G	砕石	2.66

表 3.2.19 調合表の一覧

工場	調合	W/B (%)	Vv (L)	Bv (L)	Bv/Vv	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					空隙 (%)
							W	N	SR	S	G	
ピーシー コンクリート	SR(7100)20-36.9%	36.9	185	96	0.52	60.7	110	237	61	1155	753	7.5

* Vv: 単位水量と空隙の容積の和、Bv: 普通セメントとSRセメントの容積の和

3. 2. 3 SR セメントコンクリートによるレディーミクストコンクリートの開発

本技術の更なる普及展開を図るため、SR セメントコンクリートによるレディーミクストコンクリートの開発を目指し、製品化に向けた基礎物性実験および生コン工場における実機製造実験を行い、供給体制を整備した。更に、本コンクリートを大規模物流施設に適用し、実工事での品質安定性や施工性、施工後の外観調査を行った。

a) 基礎物性実験の検討概要

基礎物性実験の概要を表 3.2.20 に示す。SR セメントを混和材として用いたコンクリートの基礎物性を把握することを目的に、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、促進中性化試験を行った。実験要因は、SR セメントの混合率と水結合材比の 2 要因とし、SR セメントの混合率は 0、20、30%の 3 水準、水結合材比は 35、45、60%の 3 水準とした。

使用材料の一覧を表 3.2.21 に、調合表を表 3.2.22 に示す。セメントは N を用い、セメントの内割として、比表面積 6,780cm²/g、密度 2.86g/cm³ の SR セメントを使用した。目標とするスランプは 15cm、空気量は 4.5%とし、単位水量は 170kg/m³、粗骨材かさ容積は 0.56m³/m³とした。

表 3.2.20 基礎物性実験の概要

SRセメントの 混合率	水結合材比		
	35%	45%	60%
0%	○	○△□	○
20%	○	○□	○
30%	○	○△□	○

* ○: 圧縮強度試験、△: 乾燥収縮試験、□: 促進中性化試験

表 3.2.21 使用材料の一覧

項目	記号	材料	産地	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)
セメント	N	普通 ポルトランドセメント	-	-	3.15
混和材	SR	スラッジ再生セメント	-	6780	2.86
細骨材	S1	砂	千葉県富津産	-	2.58
	S2	砕砂(石灰石)	岩手県大船渡市産	-	2.67
粗骨材	G	砕石2005(石灰石)	岩手県大船渡市産	-	2.69
混和剤	SP	高性能AE減水剤	-	-	-

表 3.2.22 調合表の一覧

記号	SRの 混合率 (B×%)	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)						SP (B×%)
				W	N	SR	S1	S2	G	
N-35%	0%	35%	44.4%	170	486	—	336	410	934	0.65
N-45%	0%	45%	47.2%	170	378	—	376	460	934	0.60
N-60%	0%	60%	49.5%	170	283	—	412	503	934	0.55
SR20-35%	20%	35%	44.1%	170	389	97	332	406	934	1.05
SR20-45%	20%	45%	47.0%	170	302	76	373	456	934	0.80
SR20-60%	20%	60%	49.3%	170	227	57	409	500	934	0.85
SR30-35%	30%	35%	44.0%	170	340	146	330	403	934	1.10
SR30-45%	30%	45%	46.9%	170	264	113	372	454	934	0.90
SR30-60%	30%	60%	49.3%	170	198	85	408	499	934	1.00

b) 実機製造実験の検討概要

本コンクリートの実構造物への適用に向け、実機により製造したレディーミクストコンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値を確認することを目的に、三和石産(株)藤沢工場(神奈川県藤沢市)において、夏期・標準期・冬期の3シーズンの実機製造実験を行った。

実験概要の一覧を表 3.2.23 に示す。比較的広い強度域のコンクリートのフレッシュ性状、強度特性を確認するため、水結合材比 40%, 50%, 60% の3調合のコンクリートを対象に検討を行った。また、比較対象として、水結合材比 50% の普通コンクリートについても実験を実施した。SR20-50%については、全ての季節で、図 3.2.4 のマスコン部材用の模擬試験体および図 3.2.5 の板状部材用の模擬試験体を作製し、コア強度試験を行うことで、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値を評価した。マスコン部材用コア強度は1材齢につき8本のコア供試体の試験を行い、板状部材用コア強度は1材齢につき4本のコア供試体の試験を行った。

使用材料の一覧を表 3.2.24 に、調合表を表 3.2.25 に示す。SRセメントの混合率は結合材の20%とし、セメントの内割とした。単位水量は 170kg/m^3 とし、粗骨材かさ容積は工場の実績から、水結合材比と季節により調整した。

表 3.2.23 実機製造実験の概要

記号	W/B	標準養生 圧縮強度試験			模擬試験体 コア強度試験		
		夏期	標準期	冬期	夏期	標準期	冬期
SR20-40%	40%	○	○	○	—	—	—
SR20-50%	50%	○	○	○	○	○	○
SR20-60%	60%	○	○	○	—	—	—
N-50%	50%	○	—	—	○	—	—

表 3.2.24 使用材料の一覧

項目	記号	材料	産地	比表面積 (cm^2/g)	密度 (g/cm^3)
セメント	N	普通 ポルトランドセメント	—	—	3.15
混和材	SR	スラッジ再生セメント	—	6000	2.87
細骨材	S1	砂	千葉県富津産	—	2.58
	S2	砕砂(石灰石)	岩手県大船渡市産	—	2.67
粗骨材	G	砕石2005(石灰石)	岩手県大船渡市産	—	2.69
混和剤	SP	高性能AE減水剤	—	—	—

表 3.2.25 調合表の一覧

記号	W/B	s/a	単位量(kg/m^3)						SP ($\text{B}\times\%$)
			W	N	SR	S1	S2	G	
SR20-40%(夏期)	40%	42.2%	170	340	85	393	322	1001	1.50
SR20-40%(標準期)		43.2%	170	340	85	402	329	985	1.20
SR20-40%(冬期)		43.3%	170	340	85	405	331	985	0.95
SR20-50%(夏期)	50%	46.5%	170	272	68	453	370	968	1.40
SR20-50%(標準期)		47.5%	170	272	68	463	378	950	1.20
SR20-50%(冬期)		47.6%	170	272	68	464	380	950	0.95
SR20-60%(夏期)	60%	48.9%	170	226	57	489	400	950	1.35
SR20-60%(標準期)		49.8%	170	226	57	498	407	933	1.20
SR20-60%(冬期)		49.8%	170	226	57	498	408	933	1.00
N-50%(夏期)	50%	48.7%	170	340	—	477	391	933	1.05

* SRの混合率は $\text{B}\times 20\%$

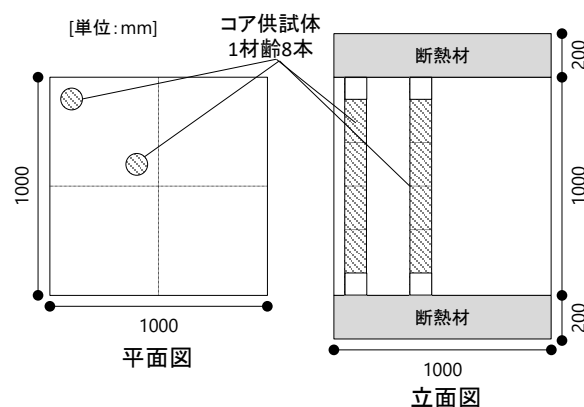


図 3.2.4 マスコン部材用の模擬試験体の詳細図

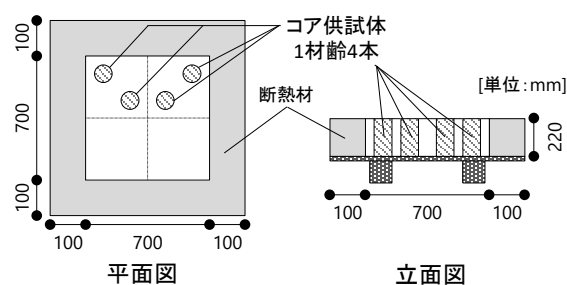


図 3.2.5 板状部材用の模擬試験体の詳細図

c) 実構造物への適用概要

本コンクリートを大規模物流施設の仮設材となる事務所棟のレベルコンクリートと、付属舎棟の本設躯体に、SRセメントを結合材の20%混合したSRセメントコンクリートを適用した。調合は、表 3.2.26 に示す調合を採用した。

表 3.2.26 調合表の一覧

呼び方 (適用部位)	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)					
			W	N	SR	S1	S2	G
普通18-15-20N (事務所棟レベルコン)	60.0%	48.9%	165	220	55	494	405	960
普通27-15-20N (付属倉庫本設躯体)	51.5%	48.3%	165	256	64	479	392	955

* SRの混合率はB×20%

3. 2. 4 建築技術性能証明の取得と地産地消による循環型システムの構築

a) 建築技術性能証明の取得

建築構造物への適用に向け、許認可適合を証明する第三者機関での建築技術性能証明の取得が重要となる。

(一財)日本建築総合試験所における建築技術性能証明制度により、SRセメントがレディーミクストコンクリート及びプレキャストコンクリートのJISに記載されている混和材の規定に適合していることの証明を取得することとした。これらのJISに記載されている混和材の規格は、「JIS A 5308 レディーミクストコンクリート」の7.4 混和材料のb)項には「a)以外(注：a項に記載されているフライアッシュ、膨張材、化学混和剤、防せい剤、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームの各JISのある混和材料)の混和材料を使用する場合は、コンクリート及び鋼材に有害な影響を及ぼさず、所定の品質およびその安定性が確かめられたもののうち、購入者が生産者と協議の上指定するものを用いなければならない。」との記載がある。一方、「JIS A 5464 プレキャストコンクリート」には「混和材料を用いる場合は、PCa製品の品質に有害な影響を及ぼさないものでなければならない。フライアッシュ、膨張材、化学混和剤、防せい剤、高炉スラグ微粉末シリカフュームおよびコンクリート用砕石粉を使用する場合はそれぞれの規格に適合するもの、または品質がこれらと同等以上のものを用いる。」とある。これらの規定を満足することを証明するため、鉄筋に対して悪影響を及ぼさないことを確認すると共に、R-CFコンクリートによる部材の構造性能について普通コンクリートとの比較検討を行った。

鉄筋腐食試験の概要を表3.2.27に、調合表の一覧を表3.2.28に示す。コンクリート種類は普通コンクリートとR-CFコンクリートの2水準とした。W/BはR-CFコンクリートでは45、35%の2水準とし、普通コンクリートでは45%の1水準とした。養生方法は、蒸気養生後に40℃CRH90%とした。また、鉄筋の腐食を促進するため、過酷な状況を想定しCl-量2.5kg/m³と設定し、実験では4.0kg/m³のNaClを添加した。

鉄筋腐食試験体および自然電位測定の概要を図3.2.6に示す。試験体は100×100×400mm角柱試験体とし、内部にφ10鉄筋(丸鋼)を埋設した。材齢7日まで20℃封かん養生とし、材齢7日以降は40℃CRH90%の気乾養生とした。模擬RC試験体の自然電位(腐食の有無)を測定することで、R-CFコンクリートの腐食抵抗性の評価を普通コンクリートと比較した。

表 3.2.27 鉄筋腐食試験の概要

NO	記号	W/B (%)	結合材の構成比				腐食試験 10×10×40cm (NaCl:4.12kg/m ³)
			SR (7630)	B	F	N	
1	N-45%	45	-	-	-	100	○
2	SR(7630)60 -F10-B30-45%	45	60	30	10	-	○
3	SR(7630)60 -F10-B30-35%	35	60	30	10	-	○

表 3.2.28 調合表の一覧

NO	記号	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						SP (B×%)
			SR (7630)	B	F	N	W	S	
1	N-45%	44.0	-	-	-	367	165	773	0.70%
2	SR(7630)60 -F10-B30-45%	44.0	220	110	37	-	165	752	2.60%
3	SR(7630)60 -F10-B30-35%	42.0	283	141	47	-	165	673	3.00%

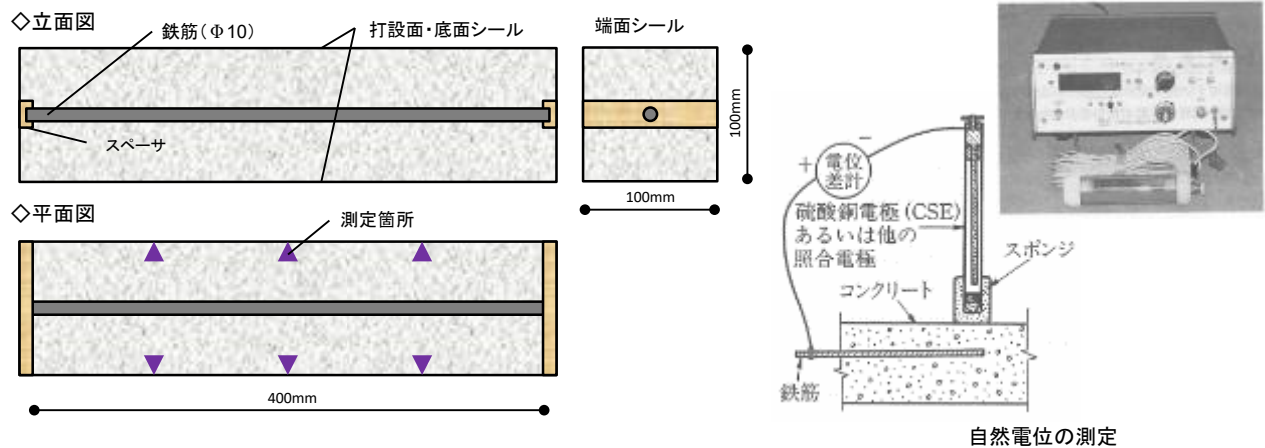


図 3.2.6 鉄筋腐食試験体および自然電位測定の概要

実大スラブ曲げ試験の概要および調合表を表 3.2.29 に示す。R-CF コンクリートが一般的なプレキャスト RC 部材と同等の構造性能を有していることを確認することを目的に、実大の板状試験体による構造実験を行った。コンクリートは R-CF コンクリートと普通コンクリートの 2 水準とし、実大スラブ曲げ試験体の鉄筋比は 0.76%および 0.38%の 2 水準とした。加力装置の詳細を図 3.2.7 に示す。加力装置は、100T(980kN) オートグラフを用い、当該試験機備え付けの曲げ試験用治具にセットして行った。試験体を下部曲げ試験治具に設置後、上部曲げ試験治具を介して、単調载荷による曲げ試験を行った。また、合わせて、図 3.2.8 に示す梁付きの壁を模擬した 1,500×1,430mm の模擬試験体を作製し、屋外暴露に供し外観調査を行った。

表 3.2.29 実大スラブ曲げ試験の概要および調合表

NO	記号	実大曲げ試験 200×50×15cm 鉄筋比	W/B (%)	結合材の構成比				単位量 (kg/m ²)							SP (B×%)
				SR (7630)	B	F	N	SR (7630)	B	F	N	W	S	G	
1	N-55%(0.38%)	0.38%	55	-	-	-	100	-	-	-	300	165	799	1031	0.60%
2	SR(7630)60-F10-B30-45%(0.38%)	0.38%	45	60	30	10	-	220	110	37	-	165	752	970	2.60%
3	SR(7630)60-F10-B30-45%(0.76%)	0.76%													

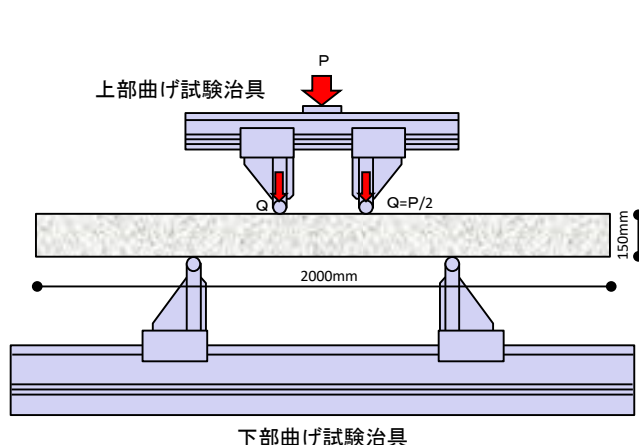


図 3.2.7 実大スラブ曲げ試験の詳細

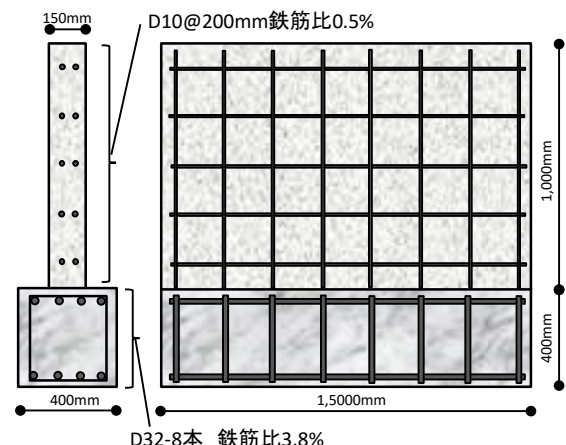


図 3.2.8 屋外暴露用模擬試験体の詳細

b) 資源循環型システムの構築

神奈川県を先行モデルとして、地産地消を原則とした資源循環システムを構築する。建設現場に出荷された生コンのうち使われなかった戻りコンを回収して、SR セメントを製造し、SR セメントを用いたコンクリート製品として出荷し建設現場で使用していく。このような循環システムを構築する上で、①戻りコン集積

スキーム, ②SR セメント製造拠点の増強, ③行政の資材指定化による優先利用を実現することが必要である。これらを実現するための検討を行った。

3.1 「SR セメントの製造ラインの改良および製造方法の確立」において, ①戻りコン集積スキーム, ②SR セメント製造拠点の増強を検討することとし, ③行政による資材指定化による優先利用について, 特に JIS 製品として出荷可能である積みブロックなどの二次製品について指定材料化を検討した。

c) 建築技術性能証明の改定

16 年 6 月に建築技術性能証明を取得後, 本技術の適用案件が増加傾向にあることを受け, SR セメントを用いた製品の一般化が進むと, 開発者である鹿島建設(株)および三和石産(株)が関与しない製品が実用化される可能性が懸念されたことから, 認証機関である(一財)日本建築総合試験所より品質確保体制の整備を求められた。下記事項を明記・追記することで, プレキャスト製品やレディーミクストコンクリートの品質を確保し, さらに開発者が直接関与しない場合の品質確保体制を構築するための改定を行った。

- 1) SR コンクリート研究会の明記
- 2) 現行の SR セメントの含有率が 20%以上であるため供給量の不足時対応のため 10%まで追加する
- 3) SR セメントの製造拠点(川崎)の明記と SR セメントの品質の確認方法

4. 結果及び考察

4. 1 SR セメントの製造ラインの改良および製造方法の確立

4. 1. 1 製造ラインの改良による SR セメントの品質向上

a) 新規製造ラインを用いた SR セメント実機製造実験結果

新規製造ラインにおける SR セメント実機製造実験結果の一覧を表 4.1.1 に、練混ぜから処理開始までの時間と SR セメントの密度および比表面積の関係を図 4.1.1 に示す。表中の赤枠部分が今回実施した新規製造ラインの結果である。図 4.1.1 から、処理までの経過時間が大きくなるほど、密度は小さく、比表面積は大きくなり、既存製造ラインと同様な傾向が認められた。

積算温度と SR セメントの比表面積の関係を図 4.1.2 に、SR セメントの比表面積と普通モルタルとの圧縮強度比の関係を図 4.1.3 に示す。図 4.1.2 から、新規製造ラインと既存製造ラインでは実験を行った季節が夏季と冬季で異なるものの、概ね同様な傾向を示し、積算温度が大きくなるほど、比表面積は大きい結果となった。図 4.1.3 から、新規製造ラインで製造した SR セメントにおいても、比表面積が $8,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以下であれば、普通セメントに対する強度比 60%以上の SR セメントを製造できることが確認できた。

SR セメントの粒度分布測定結果を図 4.1.4 に示す。図 4.1.4 から、既存製造ラインでは SR セメントは $30\mu\text{m}$ 程度のピークの他に $300\mu\text{m}$ 程度の頻度も高く 2 山状の粒度分布であるのに対し、新規製造ラインでは $300\mu\text{m}$ 程度のピークが小さくなっていることが確認され、新規製造ラインの導入により、 $100\mu\text{m}$ 以上の凝集物が少ない高品質の SR セメントが製造できることを確認した。

表 4.1.1 新規製造ラインにおける SR セメント実機製造実験結果の一覧

区分	No	季節	配合 (記号)	練混ぜから 戻りコン 処理まで の時間①	スラッジ水から 脱水処理 までの時間 ②	練混ぜからSRセメント製造までの経過時間(①+②)																遅延剤 添加量 (C×wt%)	外気温 ℃ ③	積算温度 (①+②) ×③	SRセメント物性試験結果				
						1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	21h	51h	密度 (g/cm³)	比表面積 (cm²/g)	強熱 減量 (%)	28日 強度 (N/mm²)				普通セメントとの 強度比				
既存製造 ライン	1	夏季	N-50%(AE)	2.5h	直ちに													無し	27.0	67.5	2.91	5960	12.3	46.5	0.73				
	2		N-50%(AE)	3.5h	直ちに														無し	31.0	108.5	2.82	7150	14.5	43.1	0.68			
	3		N-50%(SP)	2.5h	直ちに														無し	30.0	75.0	2.87	5620	13.5	44.3	0.70			
	4		N-50%(AE)	2.5h	直ちに														0.10%	31.0	77.5	2.95	5260	11.2	52.6	0.83			
	5		N-50%(AE)	2.5h	直ちに														0.20%	31.0	77.5	2.97	4590	11.2	43.2	0.68			
	6		N-50%(AE)	2.5h	2h														無し	33.0	148.5	2.84	6620	13.7	37.8	0.60			
	7		N-50%(AE)	2.5h	2h														0.10%	32.0	144.0	2.83	6720	12.6	47.4	0.75			
	8		N-50%(AE)	2.5h	直ちに														無し	31.0	77.5	2.89	6340	12.1	43.4	0.68			
	9		N-50%(AE)	2.5h	4h														無し	31.0	201.5	2.69	9280	15.8	37.4	0.59			
	10		N-50%(AE)	2.5h	4h														0.20%	31.0	201.5	2.94	4490	11.6	44.3	0.70			
	11		N-50%(AE)	2.5h	18.5h														無し	32.0	672.0	2.45	11030	21.7	19.7	0.31			
	12		N-50%(AE)	2.5h	直ちに														無し	23.0	57.5	2.95	5630	8.9	54.1	0.85			
	13		N-50%(AE)	2.5h	直ちに														0.20%	25.0	62.5	3.03	5060	8.0	55.1	0.87			
	14		N-50%(AE)	2.5h	直ちに														0.50%	26.0	65.0	3.04	4190	7.7	57.3	0.90			
	15		N-50%(AE)	2.5h	直ちに														0.50%	26.0	65.0	3.07	4790	7.6	56.6	0.89			
	16		N-50%(AE)	2.5h	直ちに														無し	28.0	70.0	2.91	6030	10.4	51.6	0.81			
	17		N-50%(AE)	2.5h	2h														無し	28.0	126.0	2.87	8270	12.2	48.3	0.76			
	18		N-50%(AE)	2.5h	2h														0.10%	28.0	126.0	2.93	6230	11.0	46.6	0.73			
	19		N-50%(AE)	2.5h	2h														0.40%	28.0	126.0	2.98	5390	9.6	52.6	0.83			
新規製造 ライン	20	冬季	N-50%(AE)	2.5h	直ちに													無し	8.3	20.8	3.00	5480	9.6	51.6	0.81				
	21		N-50%(AE)	2.5h	4h													無し	8.3	54.0	2.92	7700	11.7	43.7	0.69				
	22		N-50%(AE)	2.5h	7h													無し	8.3	78.9	2.83	9040	13.0	39.7	0.63				
	23		N-50%(AE)	2.5h	48h													無し	8.3	419.2	2.44	9320	18.4	22.7	0.36				

練混ぜから戻りコン処理までの時間 スラッジ水から脱水処理までの時間 遅延剤添加(練混ぜから1.5h後)

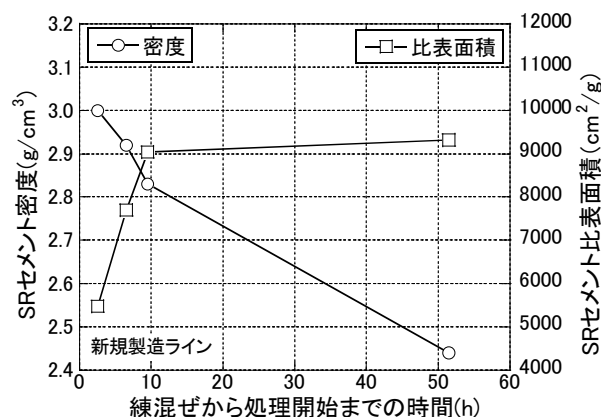


図 4.1.1 新規製造ラインにおける処理時間と密度および比表面積の関係

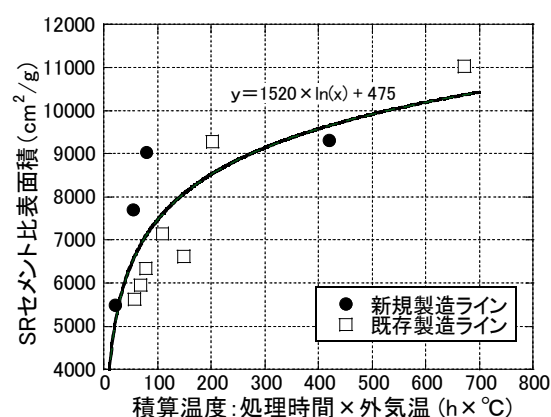


図 4.1.2 積算温度と SR セメントの比表面積の関係

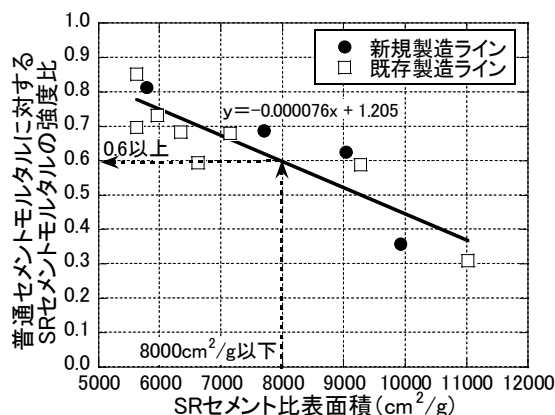


図 4.1.3 SR セメント比表面積と普通セメントとの圧縮強度比の関係

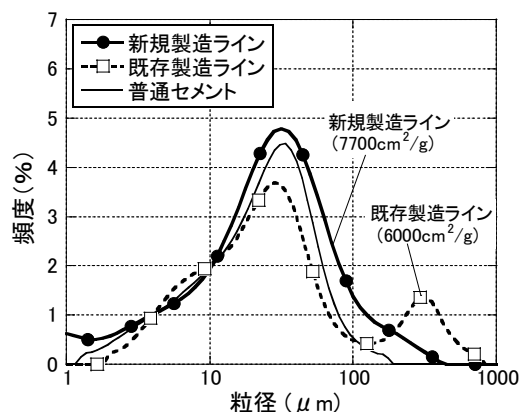


図 4.1.4 SR セメントの粒度分布測定結果

b) 運用時における新規製造ラインで製造した SR セメントの基礎物性試験結果

運用時における SR セメントの比表面積を図 4.1.5 に、SR セメントの比表面積と普通モルタルとの圧縮強度比の関係を図 4.1.6 に示す。図 4.1.5 および図 4.1.6 から、運用時における新規製造ラインで製造した SR セメントは、比表面積が $8,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以下、且つ、普通セメントモルタルに対する強度比 60%以上を満足する高品質な SR セメントを安定して製造できることが確認できた。

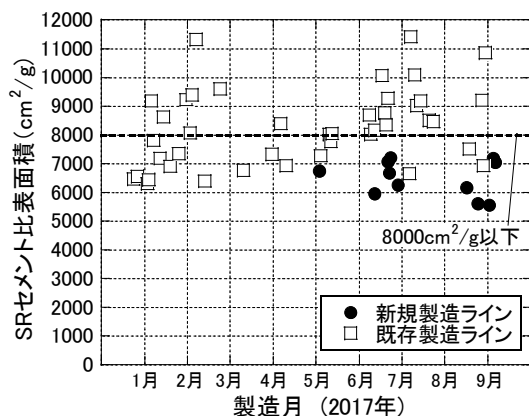


図 4.1.5 運用時の SR セメント比表面積結果

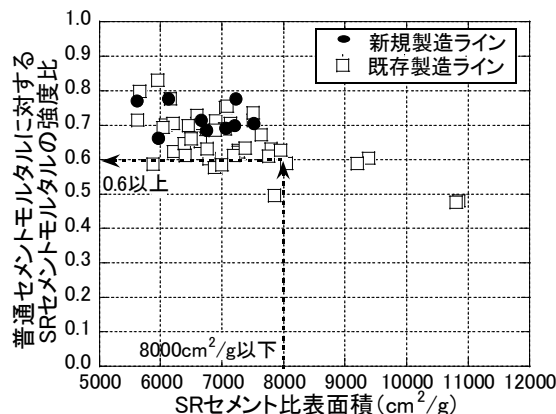


図 4.1.6 運用時の SR セメント比表面積と普通セメントとの圧縮強度比の関係

4. 1. 2 新規 SR セメント製造プラントの整備と品質確認結果

a) 新規製造プラントによる SR セメント実機製造実験結果

新規製造プラントにおける SR セメント実機製造実験結果の一覧を表 4.1.2 に、練混ぜから処理開始までの時間と SR セメントの密度および比表面積の関係を図 4.1.7 に示す。図 4.1.7 から、既存製造プラントと同様に、処理までの経過時間が大きくなるほど、密度は小さく、比表面積は大きくなる傾向が確認できた。

積算温度と SR セメントの比表面積の関係を図 4.1.8 に、SR セメントの比表面積と普通モルタルとの圧縮強度比の関係を図 4.1.9 に示す。図 4.1.8 および図 4.1.9 から、新規製造プラントにおいても、遅延剤を用いることにより SR セメントの比表面積を低減し品質を向上できること、比表面積を $8,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以下で管理することにより普通セメントに対する強度比 60%以上となる SR セメントを製造できることが確認できた。

SR セメントの粒度分布測定結果を図 4.1.10 に示す。図 4.1.10 から、新規製造プラントの SR セメントも、既存製造プラントと異なり、 $300\mu\text{m}$ 程度のピークが無いことから、 $100\mu\text{m}$ 以上の凝集物が少なく、高品質な SR セメントが製造できることが確認できた。

表 4.1.2 新規製造プラントにおける SR セメント実機製造実験結果の一覧

区分	No	季節	配合 (記号)	練混ぜから 戻りコン 処理までの 時間①	スラッジ水から 脱水処理 までの時間 ②	練混ぜからSRセメント製造までの経過時間(①+②)																遅延剤 添加量 (C×wt%)	外気温 ℃ ③	積算温度 (①+②) ×③	SRセメント物性試験結果												
						1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	強熱 減量 (%)	28日 強度 (N/mm ²)				普通セメントとの 強度比												
新規製造 プラント	24	夏季	N-50%(AE)	3.0h	直ちに													無し	31.7	95.1	2.74	7450	12.1	43.0	0.68												
	25		N-50%(AE)	3.0h	2.5h													無し	31.4	172.7	2.78	8340	12.0	41.7	0.66												
	26		N-50%(AE)	3.0h	2.5h													0.10%	34.5	189.8	2.77	7860	12.1	42.0	0.67												
	27		N-50%(AE)	3.0h	19h													0.10%	29.0	638.0	2.45	9520	19.2	24.9	0.40												
練混ぜから戻りコン処理までの時間						スラッジ水から脱水処理までの時間																遅延剤添加(練混ぜから1.5h後)															

□ 練混ぜから戻りコン処理までの時間 ■ スラッジ水から脱水処理までの時間 ⊗ 遅延剤添加(練混ぜから1.5h後)

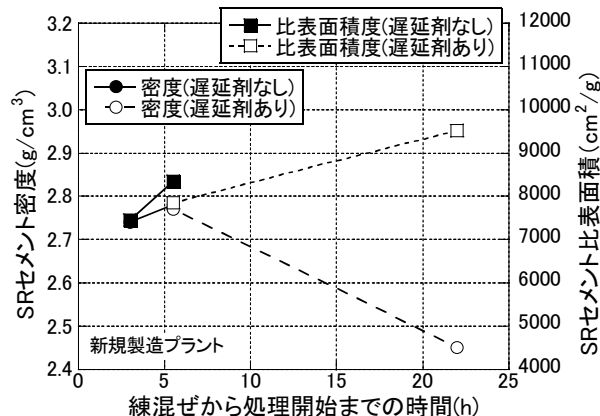


図 4.1.7 新規製造プラントにおける処理時間と密度および比表面積の関係

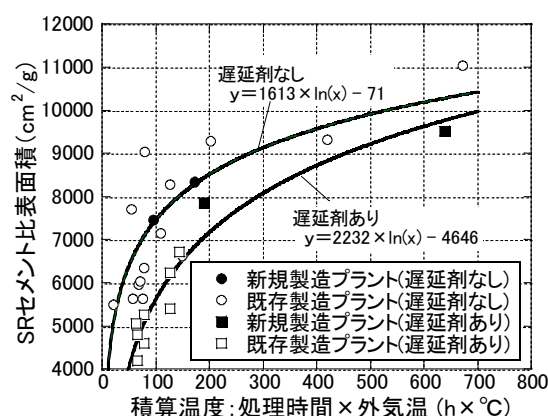


図 4.1.8 積算温度と SR セメントの比表面積の関係

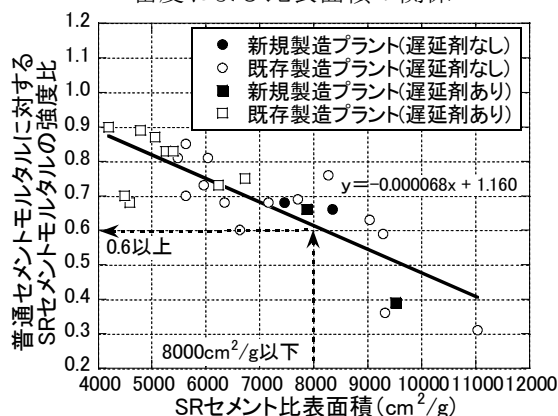


図 4.1.9 SR セメント比表面積と普通セメントとの圧縮強度比の関係

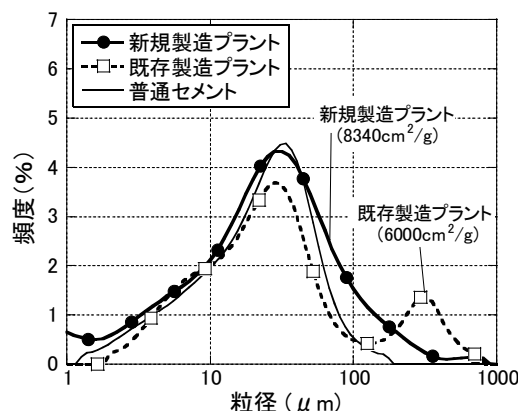


図 4.1.10 SR セメントの粒度分布測定結果

b) 運用時における新規製造プラントで製造した SR セメントの基礎物性試験結果

複数の生コン工場から戻りコンを集積し SR セメントを製造する新規製造プラントの運用時の品質試験結果を図 4.1.11 および図 4.1.12 に示す。図 4.1.11 から、SR セメントの密度は、新規製造プラント平均 2.82 g/cm³、変動係数 3.5%であり、既存製造プラント平均 2.73g/cm³、変動係数 2.9%であった。図 4.1.12 から、SR セメントの比表面積は、新規製造プラント平均 6,140cm²/g、変動係数 14.5%であり、既存製造プラント平均 6,835cm²/g、変動係数 12.1%であった。これらから、両者の SR セメントの密度および比表面積は同程度の値であり、変動係数も同程度の結果であることが確認できた。

SR セメントの比表面積と混和剤添加率 (SR セメント×wt%) の関係を図 4.1.13 に、SR セメントの比表面積とモルタルの圧縮強度の関係を図 4.1.14 に示す。図 4.1.13 から、SR セメントの比表面積が大きくなるほど、混和剤添加率は大きくなり、新規製造プラントと既存製造プラントで同様な傾向であった。図 4.1.14 から、SR セメントモルタルの圧縮強度は、新規製造プラント平均 40.0 N/mm²、変動係数 16.5%、既存製造プラント平均 41.4 N/mm²、変動係数 16.1%であった。これらの結果から、新規製造プラントと既存製造プラ

ントのもので、両者の違いがフレッシュ性状および圧縮強度に与える影響はほとんどなく、複数の生コン工場から戻りコンを集積しSRセメントを製造するスキーム構築に際し、品質および品質安定性の問題はないことが明らかとなった。

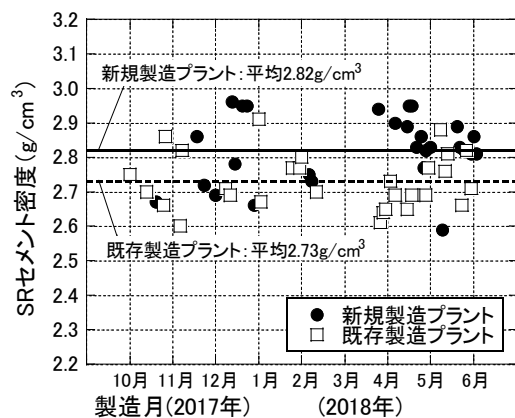


図 4.1.11 新規製造プラントにおける運用時のSRセメントの密度

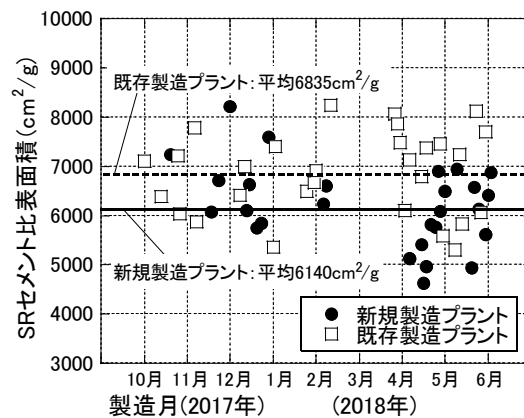


図 4.1.12 新規製造プラントにおける運用時のSRセメントの比表面積

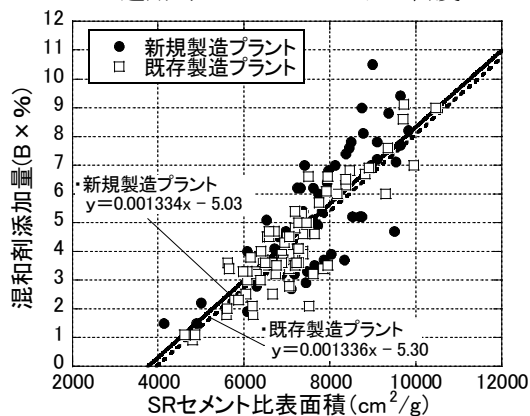


図 4.1.13 SRセメント比表面積と混和剤添加量の関係

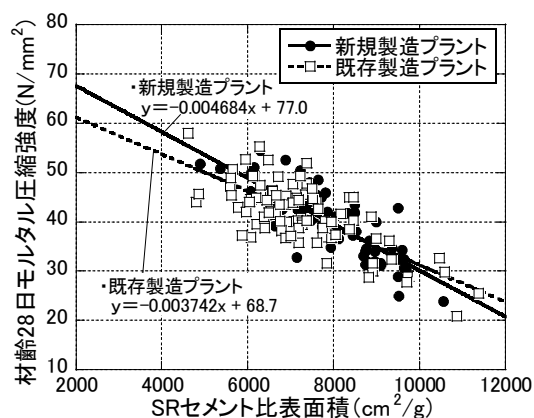


図 4.1.14 SRセメント比表面積と材齢28日モルタル圧縮強度の関係

4. 2 R-CF コンクリートおよびSR セメントコンクリートによるプレキャスト RC 製品・レディーミクスト コンクリート製品の開発と事業化

4. 2. 1 R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の開発

a) PCa 工場での試験練りによる調査検討結果

R-CF コンクリートの調査検討実験結果を表 4.2.1 に、スランプの経時変化結果を図 4.2.1 に、結合材水比と圧縮強度の関係を図 4.2.2 に示す。図 4.2.1 から、R-CF コンクリートの経時 30 分時点のスランプロスが最大 16cm 程度と大きい傾向であったが、PCa 工場において製品を製造することが可能なレベルのフレッシュ性状であると判断した。図 4.2.2 から、W/B45%以下の調合を採用することで、PCa 部材を製造する上で必要と考えられる 30N/mm²以上を確保できることが確認できた。

促進中性化試験結果から算定した中性化速度係数を図 4.2.3 に示す。図 4.2.3 から、W/B が低い調合の方が中性化速度係数は小さく、一般調合の R-CF コンクリートの方が環境重視調合よりも中性化速度係数が小さい結果となった。図 4.2.4 は、この実験結果を基に、屋外の CO₂ 濃度を 0.05%と仮定して屋外条件での中性化速度係수에換算し中性化深さの進展を予測したものである。W/B35%の 2 調合は 65 年経過時点で中性化深さは 15mm 以下の結果であり、最小かぶり厚さは 30mm と想定されることから、W/B35%の R-CF コンクリートは、JASS 5 における計画供用期間の標準である 65 年の耐久性を有していると判断できる¹⁾。

表 4.2.1 PCa 工場での試験練りにおける調査検討実験結果の一覧

調合		フレッシュ試験						蒸気養生→現場封かん養生 圧縮強度(N/mm ²)			促進中性化試験 中性化深さ(mm)				
		スランプ(cm)		空気量(%)		温度(°C)		脱型時	28日	91日	1週	4週	8週	13週	26週
		練直	30分	練直	30分	練直	30分								
一般調合	SR(6780)50-B30-F10-N10-35%	19.5	3.6	3.4	2.6	17	17	8.4	54	66.2	1.6	3.6	2.7	4.4	4.5
	SR(6780)50-B30-F10-N10-45%	14.5	2.8	5.5	5.5	17	17	3.2	36.4	42.4	5.1	9.8	14.0	17.7	21.2
	SR(6780)50-B30-F10-N10-55%	16.8	8.0	5.5	3.0	17	17	0.8	27.8	31.1	8.7	15.3	21.1	30.5	33.4
環境重視調合	SR(6780)35-B50-F10-N5-35%	20.7	6.3	6.0	4.0	19	19	5.4	47.8	56.9	2.8	5.9	6.1	11.4	12.8

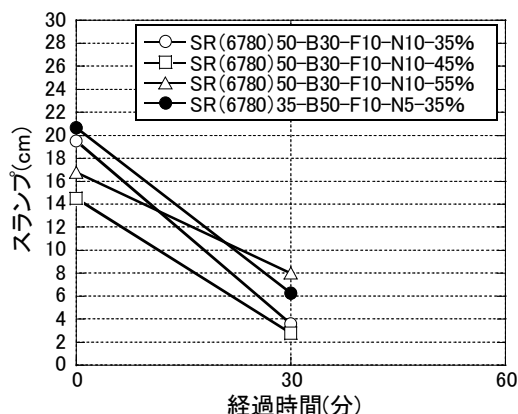


図 4.2.1 R-CF コンクリートのスランプの経時変化

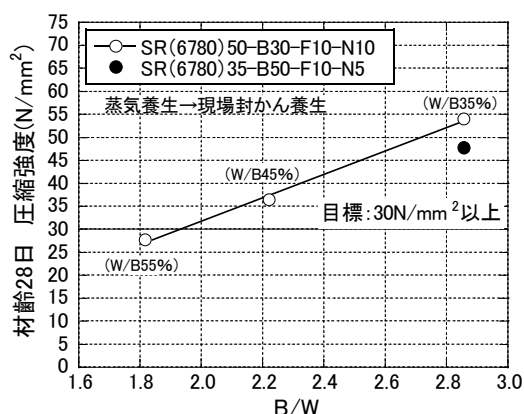


図 4.2.2 結合材水比と圧縮強度の関係

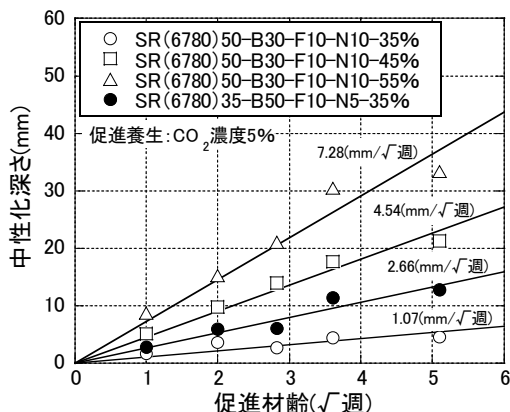


図 4.2.3 促進中性化試験における中性化速度係数

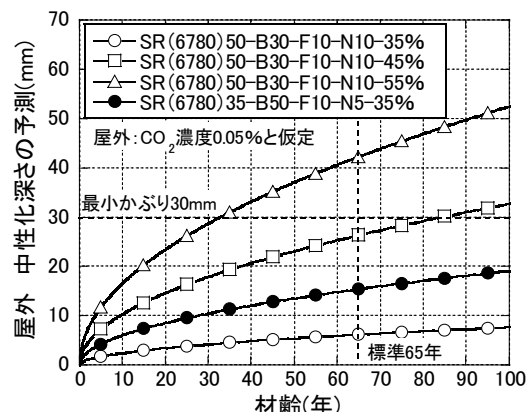


図 4.2.4 屋外条件での中性化深さの予測結果

b) PCa 部材モックアップ製造実験結果

PCa 部材としてバルコニー部材を選定し、R-CF コンクリートによる製造実験を実施した。PCa 部材製造実験結果の一覧を表 4.2.2 に、PCa 部材と同一養生とした試験体による圧縮強度試験結果を図 4.2.5 に示す。図 4.2.5 から、本製造実験は最も外気温が低い 2 月の製造であったが、一般調合において目標とした 30N/mm^2 を材齢 28 日で確保できる結果となった。環境重視調合は、材齢 28 日では 28N/mm^2 だが、材齢 91 日では 35N/mm^2 の強度が発現していることから、環境重視調合においても養生期間の延長により目標とする 30N/mm^2 を満足できるものと考えられる。

PCa 工場の外観、バルコニー部材の型枠と配筋状況、コンクリートの打設状況を写真 4.2.1～写真 4.2.3 に示す。PCa 工場では、日中は普通コンクリートにより部材を製造しているため、通常業務終了後の夜間にバルコニー部材の製造実験を実施した。製造実験により、結合材の種類が多く、一般的な PCa 工場ではサイロなどの設備が対応できないこと、混和材の投入手間等によるコスト増に繋がることなどが製造上の課題として抽出できた。これらの課題に対し、混和材のプレミックス化などを検討していくこととした。

バルコニー部材脱型時に、写真 4.2.4 に示す最大幅 0.5mm 程度のひび割れが認められた。ひび割れ深さを確認するため、ひび割れ部の表面を一部削ったところ、ひび割れは深部に至っておらず、深さ数 mm 程度の表層ひび割れであることが確認できた（写真 4.2.5 参照）。表層ひび割れの原因として、冬期の製造であったため、蒸気養生後、表層部のみ温度低下による急激な収縮が生じひび割れが発生したと考えられる。実製造では、温度降下勾配を緩やかにするなど内外温度差を小さくする対策で、表層ひび割れの発生は抑制できると考えられる。

貫通ひび割れでなく構造上の問題がないと判断し、表面の補修を行って屋外暴露に供した。現在、東京都調布市で暴露試験を実施しており、現時点で異常は認められていない（写真 4.2.6 参照）。表層ひび割れは生じたものの、打設工程で大きな問題はなく、屋外暴露試験も良好な結果が得られていることから、R-CF コンクリートによる PCa 部材は、通常の PCa 部材と同様の作業工程により製造が可能であり、耐久性上も大きな問題がないと考えられる。

表 4.2.2 PCa 部材製造実験結果の一覧

調合		フレッシュ試験				蒸気養生→現場封かん養生 圧縮強度(N/mm ²)							
		経過 時間	スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	温度 (℃)	16h	41h	81h	7日	14日	28日	91日	
一般調合	SR(6780)50-B30 -F10-N10-35%	練直	22.5	4.4	13	12.8	16	18	20.2	20.8	28.0	36.4	
		30分	22.0	3.8	12								
環境重視 調合	SR(6780)35-B50 -F10-N5-35%	練直	21.5	4.0	13	8.6	10	14	18.7	22.9	30.2	35.1	
		30分	21.0	3.8	12								

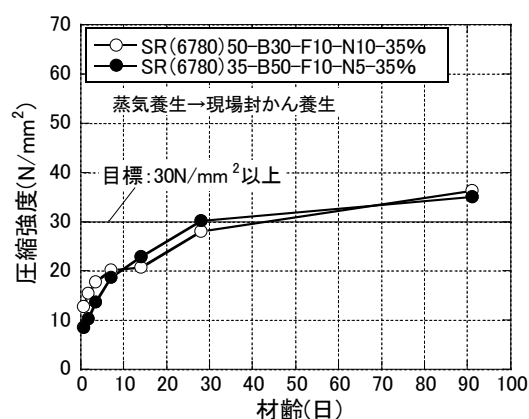


図 4.2.5 PCa 部材と同一養生の圧縮強度



写真 4.2.1 PCa 工場の外観



写真 4.2.2 型枠・配筋状況



写真 4.2.3 製造状況



写真 4.2.4 ひび割れ発生状況



写真 4.2.5 ひび割れ深さ確認



写真 4.2.6 モックアップ暴露状況

c) 屋上設備機械基礎のモックアップ製作

課題であるコスト削減を念頭に、屋上の設備機械基礎に着目し、モックアップ製造実験を実施した。設備機械基礎モックアップ製造実験結果の一覧を表 4.2.3 に、設備機械基礎と同一養生とした試験体による圧縮強度試験結果を図 4.2.6 に示す。図 4.2.6 から、本実験の調合は、バルコニー部材製造時と同じ調合としたが、材齢 28 日の時点で 20N/mm^2 程度であり、図 4.2.5 のバルコニー部材製造時と比較し低い強度結果であった。この原因として、蒸気養生中の蒸気が試験体に上手く回らなかったことや、養生期間中の外気温が低かったことなどが挙げられる。しかしながら、設備機械基礎の目標強度は 18N/mm^2 であり、材齢 28 日において必要強度を満足する結果となった。

設備機械基礎のモックアップ外観を写真 4.2.7 に示す。製造工程において、コンクリート打設および脱型などの作業に大きな問題はなく、仕上がりもひび割れはなく良好であることが確認できた。今後、屋外暴露試験を継続し外観の異常の有無を確認していく予定であり、実構造物への適用検討も積極的に進めていく計画である。

表 4.2.3 設備機械基礎モックアップ製造実験結果の一覧

調合		フレッシュ試験			蒸気養生→現場封かん養生 圧縮強度(N/mm^2)					
		スランプ(cm)	空気量(%)	温度($^{\circ}\text{C}$)	16h	41h	65h	7日	14日	28日
一般調合	SR(7320)50-B30-F10-N10-35%	18.5	3.7	22	0.6	3.35	4.37	9.9	14.7	18.6
環境重視調合	SR(7320)35-B50-F10-N5-35%	18.0	6.0	20	2.2	4.77	7.09	13.2	15.6	20.2

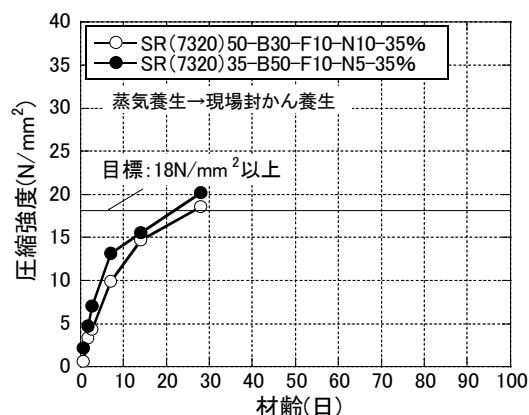


図 4.2.6 設備機械基礎と同一養生の圧縮強度



写真 4.2.7 設備機械基礎のモックアップ外観

4. 2. 2 SR セメントコンクリートによるプレキャスト製品の開発

a) 即時脱型成型による積みブロックの試作製

SR セメントを結合材として N の 20%程度に置き換えた SR セメントコンクリートによる積みブロックの試作製を行い、「JIS A 5371 積みブロック」の規格を満たす製品製造の可能性を検討した。積みブロック試

作製実験結果の一覧を表 4.2.4 に、積みブロックの製造状況を写真 4.2.8 に、製品質量試験結果を図 4.2.7 に、製品寸法試験結果を図 4.2.8 に示す。写真 4.2.8 から、試作製した SR セメントコンクリートによる積みブロックの製造作業性は普通コンクリートと大きな差がなく、良好な仕上がりとなった。図 4.2.7 および図 4.2.8 から、試作製した SR セメントコンクリートによる積みブロックは、3 工場全てのロットにおいて、JIS A 5371 に定められた製品質量および製品寸法の規格値を満足する結果となった。

管理材齢における圧縮強度試験を図 4.2.9 に示す。図 4.2.9 から、3 工場の出荷材齢は 7 日もしくは 14 日で設定されており、それぞれの出荷材齢(管理材齢)における圧縮強度は、規格値である 18N/mm^2 以上を満足する結果となった。以上のことから、SR セメントコンクリートによる JIS A 5371 の規格を満足する積みブロックを製造できる見通しが得られた。

表 4.2.4 積みブロック試作製実験結果の一覧

工場	記号	ロット NO	製品質量 (47.3kg 以上)		製品寸法						強度試験(18N/mm^2 以上)			
					長さ(450 $\pm$ 3mm)		高さ(300 $\pm$ 3mm)		厚さ(350 $\pm$ 5mm)		7日		14日	
ピーシー コンクリート	P-SR(8430)20-32.2%	1	48.8	合格	451	合格	299	合格	351	合格	24.6	合格	28.0	-
		2	48.1	合格	450	合格	299	合格	347	合格	26.1	合格	24.3	-
		3	48.7	合格	450	合格	299	合格	349	合格	24.7	合格	27.2	-
	P-N-32.2%	1	49.2	合格	450	合格	298	合格	348	合格	23.0	合格	22.0	-
		2	49.0	合格	449	合格	298	合格	349	合格	24.1	合格	24.2	-
		3	49.5	合格	451	合格	299	合格	351	合格	23.9	合格	24.7	-
タカコン	T-SR(7780)20-32.9%	1	48.2	合格	449	合格	298	合格	350	合格	20.2	合格	21.0	-
		2	48.2	合格	450	合格	299	合格	355	合格	20.6	合格	21.6	-
	T-N-32.9%	1	49.4	合格	450	合格	300	合格	352	合格	24.8	合格	24.6	-
		2	48.2	合格	449	合格	300	合格	348	合格	23.8	合格	25.7	-
湘南 コンクリート	S-SR(8820)20-39.3%	1	47.3	合格	449	合格	300	合格	347	合格	21.8	-	22.9	合格
		2	48.0	合格	450	合格	299	合格	348	合格	18.7	-	27.2	合格
		3	47.5	合格	449	合格	300	合格	349	合格	21.9	-	24.6	合格
	S-N-39.3%	1	47.9	合格	449	合格	300	合格	351	合格	18.2	-	19.7	合格
		2	47.9	合格	449	合格	300	合格	351	合格	17.8	-	20.1	合格
		3	48.1	合格	449	合格	300	合格	352	合格	18.7	-	19.6	合格



写真 4.2.8 積みブロックの製造状況

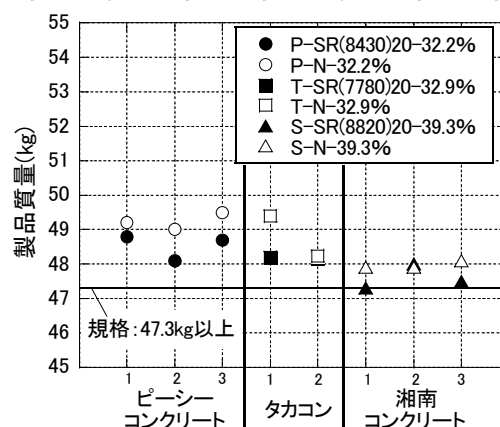


図 4.2.7 製品質量試験結果

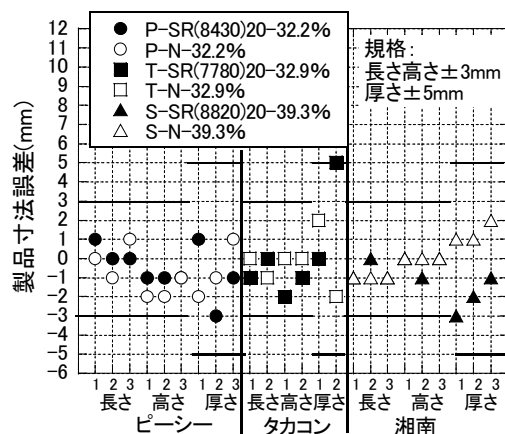


図 4.2.8 製品寸法試験結果

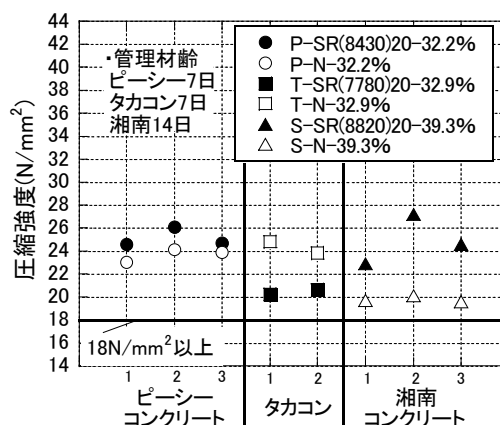


図 4.2.9 管理材齢における圧縮強度試験結果

b) 即時脱型成型による積みブロック製品の調合検討結果

ピーシーコンクリートにおいて、積みブロック製品の実製造を念頭に、実施調合を決定するための試験練りを実施した。調合検討実験結果の一覧を表 4.2.5 に、製品質量試験結果を図 4.2.10 に、製品寸法試験結果を図 4.2.11 に示す。図 4.2.10 および図 4.2.11 から、3 水準の Bv/Vv を設定し積みブロックを試製造した結果、全ての調合において JIS に定められた製品質量および製品寸法の規格値を満足する結果となった。

Bv/Vv と圧縮強度の関係を図 4.2.12 に示す。積みブロックの設計基準強度は 18N/mm^2 であり、工場実績から標準偏差を 3N/mm^2 と仮定すると、調合強度は $18+3\times 3=27\text{N/mm}^2$ となる。調合強度 27N/mm^2 を満足する Bv/Vv を、図 4.2.12 の関係式で求めると $\text{Bv/Vv}=0.52$ となることから、これを基に SR セメントコンクリートの実施調合を表 4.2.6 の調合に設定した。

表 4.2.5 積みブロック製品の調合検討実験結果の一覧

工場	記号	W/B (%)	Bv/Vv	ロット NO	製品質量 (47.3kg以上)		製品寸法						強度試験(18N/mm ² 以上)	
							長さ(450±3mm)		高さ(300±3mm)		厚さ(350±5mm)		7日	
ピーシー コンクリート	SR(7100)20-32.4%	32.4	0.59	1	49.9	合格	452	合格	299	合格	349	合格	36.8	合格
				2	50.0	合格	452	合格	299	合格	350	合格	39.5	合格
				3	50.1	合格	451	合格	300	合格	350	合格	35.1	合格
	SR(7100)20-35.5%	35.5	0.54	1	49.5	合格	451	合格	298	合格	353	合格	28.8	合格
				2	48.7	合格	450	合格	298	合格	352	合格	23.4	合格
				3	49.5	合格	449	合格	298	合格	352	合格	25.5	合格
	SR(7100)20-39.0%	39.0	0.49	1	50.3	合格	452	合格	301	合格	352	合格	25.8	合格
				2	50.6	合格	452	合格	302	合格	353	合格	26.5	合格
				3	49.0	合格	452	合格	300	合格	350	合格	25.6	合格

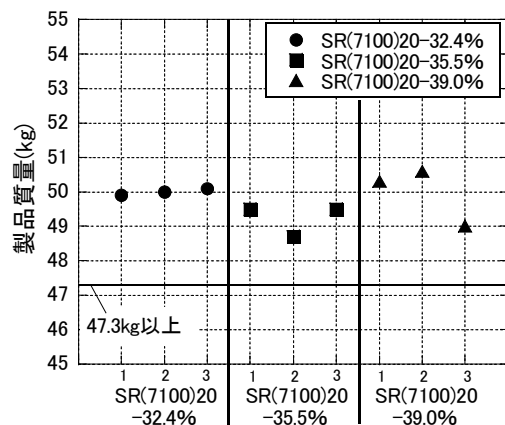


写真 4.2.10 製品質量試験結果

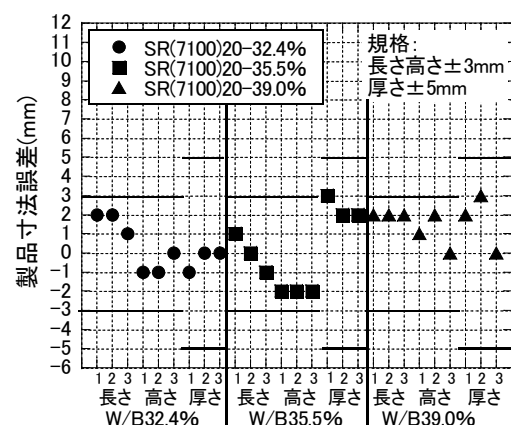


図 4.2.11 製品寸法試験結果

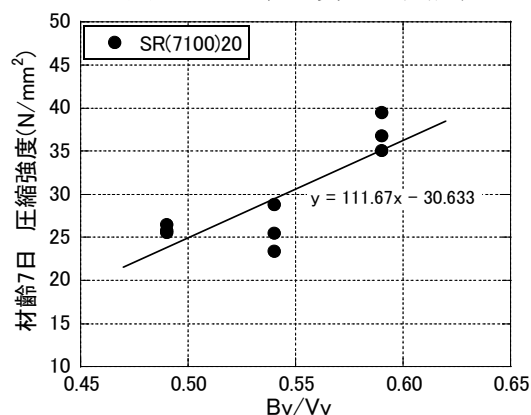


図 4.2.12 Bv/Vv と圧縮強度の関係

表 4.2.6 設定した基本調合

W/B (%)	Vv (L)	Bv (L)	Bv/Vv	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					空隙 (%)
					水	普通 ポルドランド セメント	SR セメント	砕砂	砕石	
36.9	185	96	0.52	60.7	110	237	61	1155	753	7.5

* Vv: 単位水量と空隙の容積の和、Bv: 普通セメントとSRセメントの容積の和

c) 積みブロックの繰り返し製造実験結果

SR セメントコンクリートの積みブロック製品の JIS 認証取得に向け、製品の品質安定性を確認するため、1 日 2 ロットの積みブロック製造実験を、延べ 5 日間実施した。繰り返し製造実験結果の一覧を表 4.2.7 に、製品質量試験結果を図 4.2.13 に、製品寸法試験結果を図 4.2.14 に、管理材齢における圧縮強度試験結果を図 4.2.15 に示す。計 20 個の積みブロック製品を対象に試験を行った結果、製品質量、製品寸法、圧縮強度の試験値は、全てのロットにおいて、JIS 規格を満足する結果が得られ、実製造に耐えうる品質安定性を有していることが確認できた。以上のデータを基に、ピーシーコンクリート工業三カ木工場で製造する SR セメントコンクリートの積みブロック製品について、建材試験センターより JIS A 5371 の JIS 認証を取得するに至った。JIS 認証取得を受け、同工場では本積みブロック製品の実製造を開始している(写真 4.2.9 参照)。

表 4.2.7 繰り返し製造実験結果の一覧

記号	ロット NO	製品質量 (47.3kg以上)		製品寸法						強度試験 (18N/mm ² 以上)	
				長さ		高さ		厚さ		7日	
				(450±3mm)		(300±3mm)		(350±5mm)			
A①	1	50.7	合格	452	合格	302	合格	347	合格	26.5	合格
	2	50.3	合格	452	合格	301	合格	347	合格	28.0	合格
A②	1	50.2	合格	451	合格	300	合格	348	合格	25.6	合格
	2	50.3	合格	451	合格	300	合格	348	合格	25.8	合格
B①	1	50.6	合格	451	合格	299	合格	349	合格	26.9	合格
	2	50.8	合格	450	合格	299	合格	348	合格	29.3	合格
B②	1	50.7	合格	450	合格	299	合格	349	合格	24.3	合格
	2	50.6	合格	450	合格	298	合格	348	合格	26.0	合格
C①	1	50.3	合格	450	合格	299	合格	350	合格	24.3	合格
	2	50.2	合格	450	合格	300	合格	350	合格	26.6	合格
C②	1	50.9	合格	451	合格	299	合格	349	合格	30.6	合格
	2	50.6	合格	450	合格	299	合格	349	合格	28.1	合格
D①	1	50.7	合格	450	合格	299	合格	348	合格	30.3	合格
	2	50.6	合格	450	合格	298	合格	348	合格	27.1	合格
D②	1	50.5	合格	450	合格	299	合格	348	合格	24.8	合格
	2	50.5	合格	450	合格	299	合格	349	合格	26.4	合格
E①	1	50.1	合格	451	合格	299	合格	347	合格	26.6	合格
	2	50.9	合格	451	合格	299	合格	350	合格	30.0	合格
E②	1	51.0	合格	450	合格	299	合格	350	合格	28.3	合格
	2	51.2	合格	450	合格	299	合格	351	合格	25.7	合格

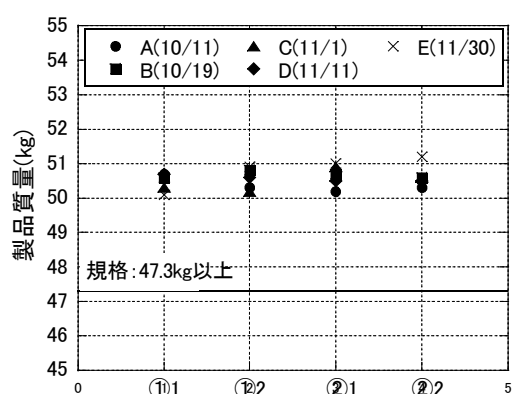


図 4.2.13 製品質量試験結果

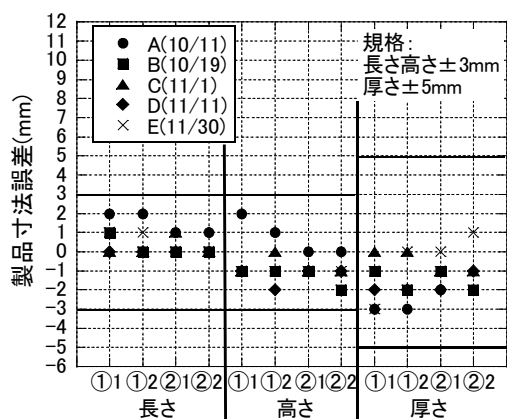


図 4.2.14 製品寸法試験結果

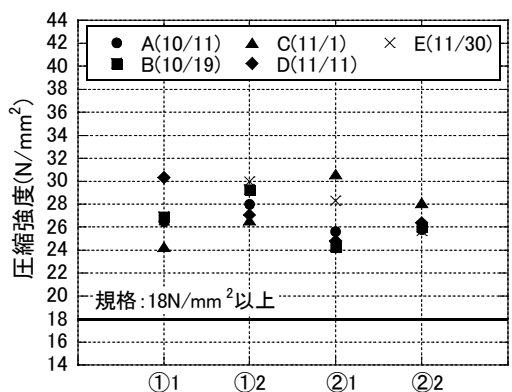


図 4.2.15 管理材齢における圧縮強度結果



写真 4.2.9 SR セメントコンクリートによる積みブロックの実製造状況

4. 2. 3 SR セメントコンクリートによるレディーミクストコンクリートの開発

a) 基礎物性実験の検討結果

圧縮強度試験結果を図 4.2.16 に、SR セメント混合率が圧縮強度に与える影響を図 4.2.17 に示す。水結合材比 35% の水準では、SR セメントの混合により最大 5% 程度の強度低下となったが、水結合材比 45% および 60% の水準では SR セメントを混合した方が強度は若干高くなる結果であり、SR セメントが圧縮強度に与える顕著な影響は本実験では認められなかった。

SR セメントが乾燥収縮に与える影響を図 4.2.18 に示す。本実験では、20℃RH60% の環境下において、文献 2) に示す省力化乾燥収縮試験を行い、得られた試験結果から、JIS A 1129 による長さ変化試験の結果を推定した。省力化乾燥収縮試験とは、i) $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の試験体を用い、ii) 試験体内部に埋設したひずみ計により自動計測を行う試験法である。JIS 法とは試験体形状と測定方法が異なるが、これらの影響程度は多くの実験データから把握できており、JIS 法による試験結果の推定が可能である²⁾。図 4.2.18 から、乾燥材齢 182 日の乾燥収縮率は、普通コンクリートである N-45% が 623μ であるのに対し、SR セメントを混合した SR30-45% は 694μ であり、いずれも比較的小さな値で、大きな差は無い結果となった。

SR セメント混合率が中性化深さに与える影響を図 4.2.19 に示す。促進中性化試験は、JIS A 1153 に準拠し、 $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$ の試験体を用い、材齢 28 日まで標準養生に供し、材齢 56 日まで 20℃RH60% の気乾養生とした。気乾養生後、20℃RH60%、 CO_2 濃度 5% の促進中性化槽に入れ、促進材齢にて試験体を切断し、断面の中性化深さを測定した。図 4.2.19 から、SR セメント混合率が中性化深さに与える影響は認められず、SR セメントコンクリートの中性化抵抗性は、普通コンクリートと同程度であることを確認した。

以上の基礎物性検討結果により、SR セメントコンクリートの圧縮強度、乾燥収縮、中性化抵抗性は、普通コンクリートと比較し顕著な差がなく、強度および耐久性の観点から、普通コンクリートと同様に実構造物に適用できることが確認できた。

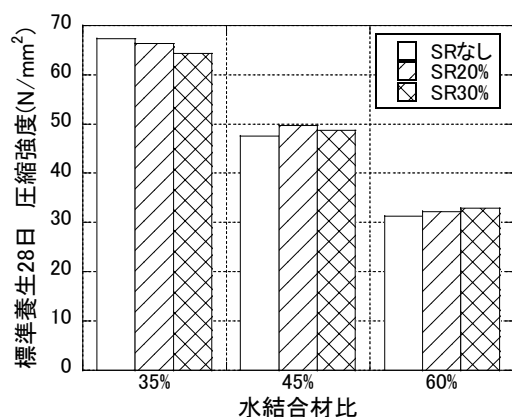


図 4.2.16 標準養生 28 日の圧縮強度試験結果

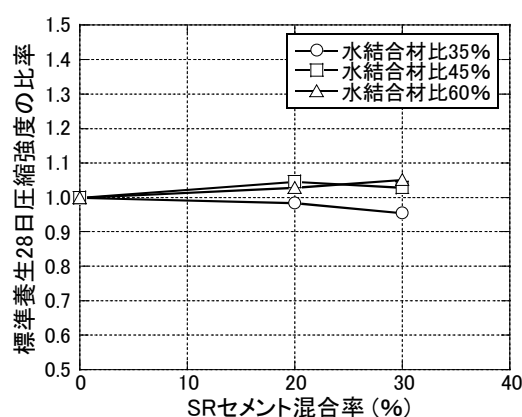


図 4.2.17 SR セメントが圧縮強度に与える影響

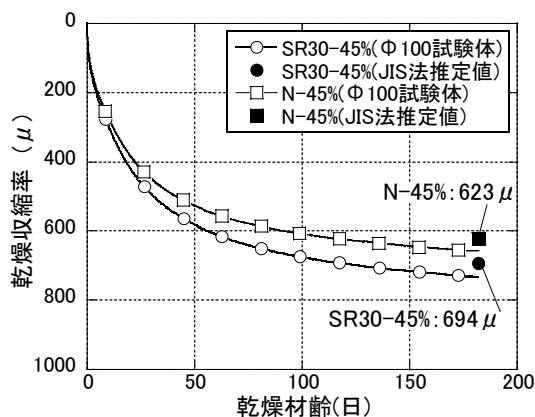


図 4.2.18 SR セメントが乾燥収縮に与える影響

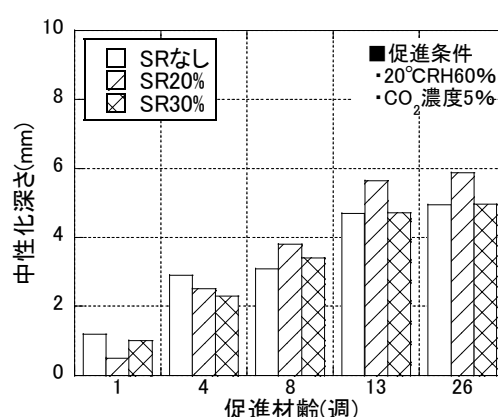


図 4.2.19 SR セメントが中性化深さに与える影響

b) 実機製造実験の検討結果

打設時期と混和剤添加量の関係を図 4.2.20 に示す。図 4.2.20 から、SR セメントコンクリートは普通コンクリートに比べ、所要のスランプを得るための混和剤添加量が多くなる傾向が認められた。この要因として、SR セメントは戻りコンクリートの時点で極初期の水和が進んでいるため初期水和の速度を調整するための石膏が減少していることなどが考えられる。

夏期の実機試験におけるスランプの経時変化を図 4.2.21 に示す。図 4.2.21 から、N-50%は練混ぜ直後から 1cm 程度スランプロスしているのに対し、SR セメントコンクリートは 30 分時点でスランプが 1cm 程度大きくなり、60 分経過時点で練混ぜ直後から 1cm 程度スランプが小さくなっている。この原因として、混和剤添加量が多いことが挙げられる。SR セメントコンクリートのフレッシュ性状は、普通コンクリートと若干傾向が異なるものの、混和剤添加量の微調整など、生コン工場において通常の出荷時に行っている管理により対応が可能と考えられる。

結合材水比と強度の関係式を図 4.2.22 に示す。コンクリートの結合材水比と圧縮強度の関係は線形であることが広く知られており、一般にこの関係式から調合設計を行う。図 4.2.22 から、実機製造実験にて得られた SR セメントコンクリートの結合材水比と強度の関係も概ね線形の関係であり、普通コンクリートと同様の調合設計が可能であることが確認でき、同図中の調合設計式を採用するに至った。

構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値の実験結果を図 4.2.23 に示す。建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(2015)では、普通コンクリートの構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値は、冬期 6N/mm²、標準期 3 N/mm²、夏期 6 N/mm²と定められている¹⁾。図 4.2.23 から、SR セメントコンクリートの $_{28}S_{91}$ 値は、普通コンクリートと同程度の結果であり、JASS 5 で定められた普通コンクリートの $_{28}S_{91}$ 値の値以下であることから、安全側として、JASS 5 に示される普通コンクリートの $_{28}S_{91}$ 値を採用することとした。

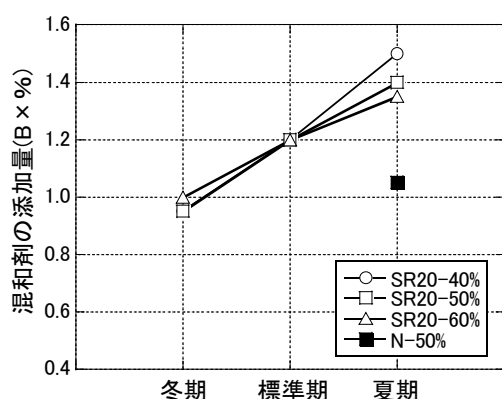


図 4.2.20 打設時期と混和剤添加量の関係

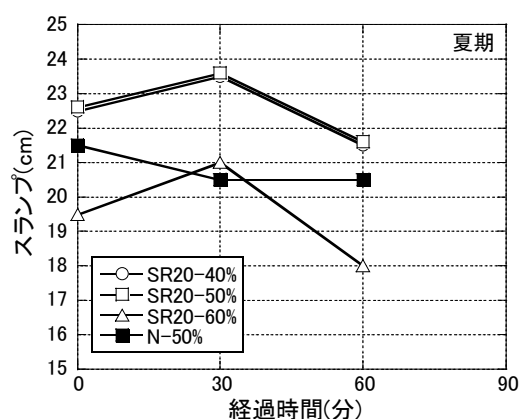


図 4.2.21 夏期実機試験のスランプ経時変化

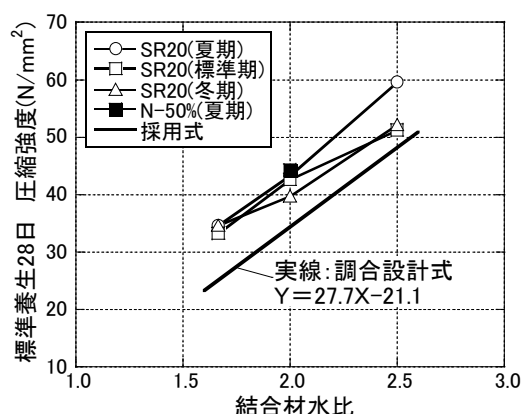
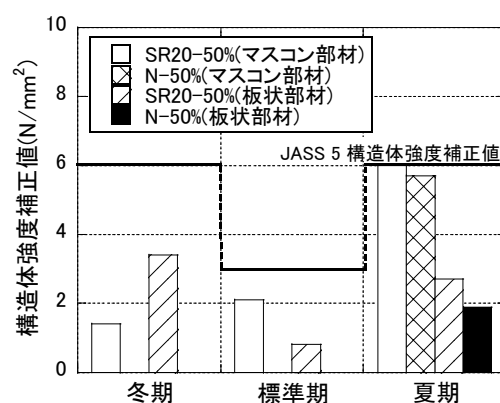


図 4.2.22 結合材水比と強度の関係式

図 4.2.23 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値の実験結果

以上の実機製造実験により、SR セメントコンクリートの調合設計が可能となった。また、実験を行った三和石産(株)藤沢工場において、本実験データなどに基づいた技術資料を整備し標準化することで、JIS A 5308 の JIS 認証が付与されるに至った。

c) 実構造物への適用結果

・事務所棟のレベルコンクリートへの適用

レベルコンクリートの打設は、約 173m×72m の範囲であり、この内の約 1/3 となる計 141m³について、2016 年 10 月～12 月の延べ 3 日間で、SR セメントコンクリートを打設した。使用材料は表 3.2.24 の材料を用い、調合は呼び強度 18、スランプ 15cm とし、表 3.2.26 に示す調合とした。

レベルコンクリートの打設状況を写真 4.2.10 に示す。レベルコンクリートは無筋の仮設材であり、施工しやすい条件であった。SR セメントコンクリートの施工性は、普通コンクリートと大きな差が無く、施工後の状況はレベルコンクリートとして良好な出来形であった。

・付属舎棟の本設躯体への適用

付属舎棟の打設範囲は、図 3.2.6 に示す付属舎棟の基準コンクリート、付属舎棟躯体の基礎耐圧盤および壁であり、2017 年 4 月～5 月の延べ 3 日間で、計 117m³のコンクリートを打設した。使用材料は表 3.2.24 の材料を用い、調合は呼び強度 27、スランプ 15cm として、表 3.2.26 に示す調合とした。

打設状況の写真を写真 4.2.11～写真 4.2.13 に示す。基準コン、基礎耐圧盤は、レベルコンクリートの打設と同様に、打設直後のひび割れなどなく、良好な施工を行うことができた。壁部は、密実なコンクリートを施工するため、薄い壁部材の締固めに適した長さ 2m の細径棒状バイブレータを用い、確実な施工を行った。

スランプ試験結果を図 4.2.24 に、空気量試験結果を図 4.2.25 に示す。荷受け時のフレッシュコンクリートの試験は、生コン車 2 台につき 1 回の高い頻度で実施した。図 4.2.24 および図 4.2.25 から、スランプおよび空気量共に、試験を行った全てのロットで許容値内の結果が得られた。

標準養生 28 日圧縮強度試験結果を図 4.2.26 に示す。図 4.2.26 から、呼び強度 27 に対して、標準養生 28 日の圧縮強度は 30N/mm² 以上であり、全てのロットで所要の圧縮強度が得られた。



写真 4.2.10 レベルコン打設状況 写真 4.2.11 基礎耐圧盤打設状況 写真 4.2.12 壁部施工状況①



写真 4.2.13 壁部施工状況②



写真 4.2.14 壁部施工後の状況

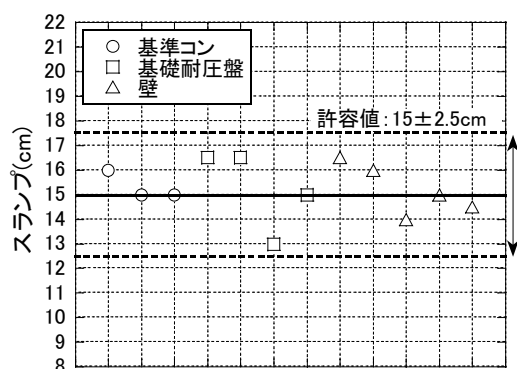


図 4.2.24 スランプ試験結果

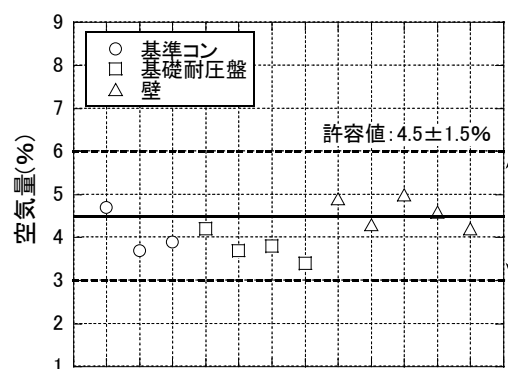


図 4.2.25 空気量試験結果

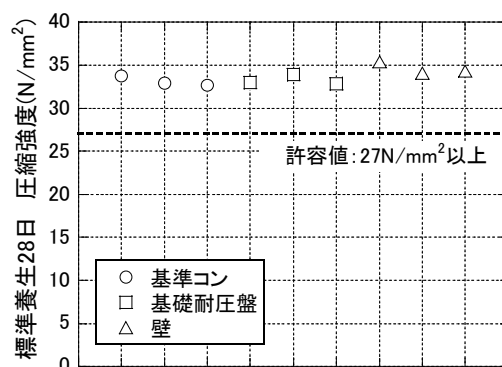


図 4.2.26 標準養生 28 日圧縮強度試験結果

壁部施工後の状況を写真 4.2.14 に示す。脱型後の躯体の状況は、ひび割れ等も見られず、良好な充填状況であることが確認できた。付属舎棟完成後の外観状況は、色合いなども普通コンクリートと変わらず、優れた外観を確保する結果となった。

良好な本適用結果を受け、神奈川県内の公共工事に SR セメントコンクリートの適用を提案した。提案時には、1)神奈川県内で発生する戻りコンを原料とすることで廃棄量を削減できること、2)本技術の適用により建設時の CO₂ を削減できること、3)神奈川県内の企業である三和石産㈱が開発した技術の普及促進により地域企業の活性に繋がること、4)適用に際しコスト増は伴わないことなど、本適用による様々なメリットを説明することで、計 5,000m³ の SR セメントコンクリートの本格適用が実施される見込みとなった。

4. 2. 4 建築技術性能証明の取得と地産地消による循環型システムの構築

a) 建築技術性能証明の取得

鉄筋腐食試験において自然電位を測定した結果を図 4.2.27 に示す。本実験では、1 水準につき、3 体の試験体で測定を行っており、図中に各試験体の測定結果を図示した。図 4.2.27 から、材齢 91 日時点で全てのコンクリートの自然電位は -0.20(V vs CSE)以上の値を示し、90%以上の確率で腐食していないと判断されたことから、SR コンクリートは普通コンクリートと比較しても同程度以上であり、SR セメントを混和材としてコンクリートに混合しても鉄筋に悪影響を及ぼさないことが実験的に確認できた。

実大板状曲げ実験による P-δ 関係を図 4.2.28 に、曲げ試験状況を写真 4.2.15 に示す。図 4.2.28 から、R-CF コンクリートの P-δ 図は、鉄筋比が同じ条件において、N と大きな差はない結果であることから、R-CF コンクリートによる RC 部材の曲げ構造性能は N と同等であると判断できる。また、写真 4.2.16 に示す 4 年間の長期に渡り屋外暴露に供した梁付きの壁模擬試験体は、普通コンクリートと比較して異常は認められなかった。

これらの結果を基に、(一財)日本建築総合試験所の建築技術評価制度を利用し、JIS 適合の混和材であることを認めて貰い、図 4.2.29 の GBRC-性能証明 第 16-10 号「スラッジ再生セメントを含有する結合材を用いた低環境負荷コンクリート工法」を取得するに至った。

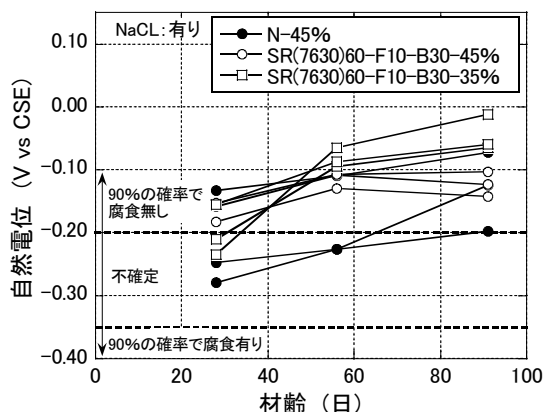


図 4.2.27 自然電位の測定結果(NaCl 有り)

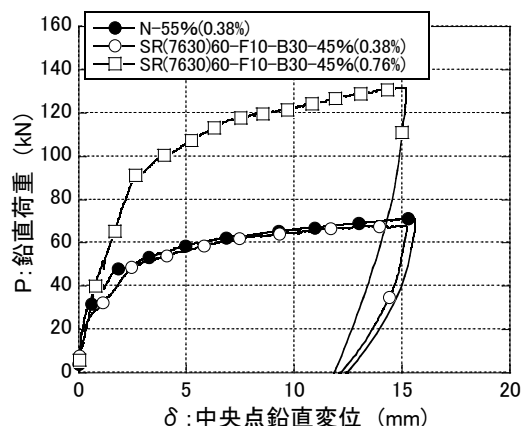


図 4.2.28 実大板状曲げ実験による P-δ 関係



写真 4.2.15 曲げ試験状況



写真 4.2.16 暴露試験体暴露状況



図 4.2.29 建築技術性能証明

b) 資源型システムの構築

資源循環システムの構築に向け、①戻りコン集積スキーム、②SR セメント製造拠点の増強、③行政の資材指定化による優先利用が重要であり、①②については、4.1 において神奈川県を中心にスキーム構築と製造拠点の増強を実現した。③について、神奈川県に積極的に働きかけ、神奈川県の県土整備局の建設リサイクル認定資材の登録を完了した(図 4.2.30 および図 4.2.31 参照)。以上の取り組みにより、神奈川県を先行モデルとして、図 4.2.32 に示す地産地消を原則とした資源循環システムを構築し、本技術の社会実装を実現した。

骨材	1 コンクリート用スラグ骨材 (高炉スラグ骨材) 2 コンクリート用スラグ骨材 (フェロニッケルスラグ骨材) 3 コンクリート用スラグ骨材 (銅スラグ骨材) 4 コンクリート用スラグ骨材 (電気炉酸化スラグ骨材) 5 コンクリート用再生骨材H 6 コンクリート用再生骨材M 7 コンクリート用再生骨材L 8 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材
混和材	1 コンクリート用フライアッシュ 2 コンクリート用高炉スラグ微粉末 3 乾燥スラッジ微粉末
セメント	1 高炉セメント 2 フライアッシュセメント 3 エコセメント

図 4.2.30 神奈川県県土整備局公共工事グリーン調達基準の抜粋

神奈川県県土整備局建設リサイクル認定資材一覧表						
品目名: 再生コンクリート二次製品						
平成29年12月22日現在						
用途・規格等	認定年月日	認定番号	申請資材名	申請者	再生資源の割合	製造工場
コンクリート用骨材 ブロック (標準)フラット 300 × 450 × 350mm	2017.04.01	3-113-1	積みブロック	相模原市緑区新屋4-25-25 ビーシーコンクリート工業㈱ 042-782-2331	乾燥スラッジ コンクリート工業㈱ 042-394-1520	相模原市緑区三ヶ木1716-2 ビーシーコンクリート工業㈱ 042-782-2331

図 4.2.31 神奈川県県土整備局建設リサイクル認定資材リストの抜粋

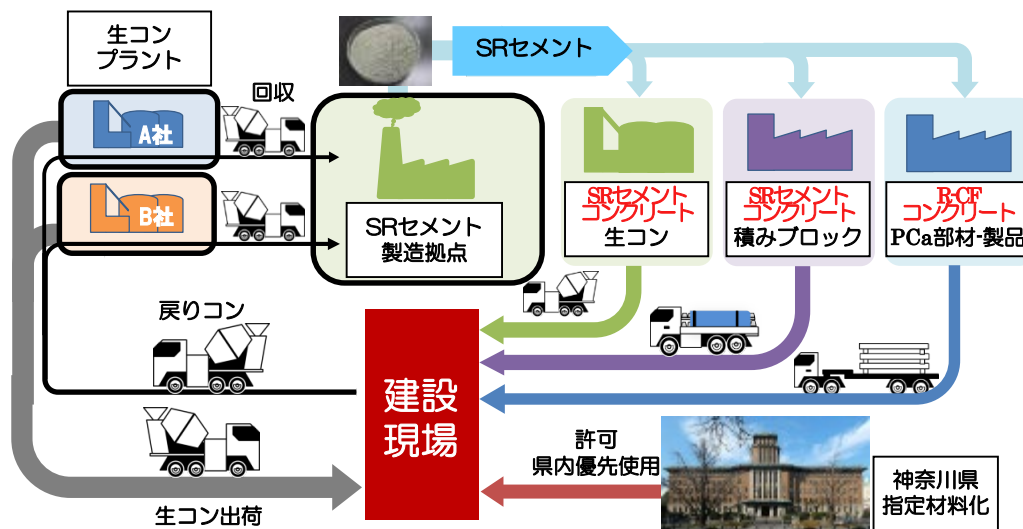


図 4.2.32 神奈川県における資源循環システムの概要

c) 建築技術性能証明の改定

開発者である鹿島建設(株)および三和石産(株)が関与しない SR セメントを用いた製品の普及を見据え、これらの品質確保を目指す組織として「SR コンクリート研究会」を発足した。SR セメントを用いた製品を製造可能なポテンシャルを有すると判断される工場から申請があった場合に工場に対し製造認定を与え、認定された工場のみ SR セメントを販売・供給することで品質を確保する体制構築を図ることとした(図 4.2.33 参照)。本組織の発足により、品質確保体制が整備されたことから、現在、(一財)日本建築総合試験所において建築技術性能証明を改定中であり、2018 年度中には認証が得られる見込みである。

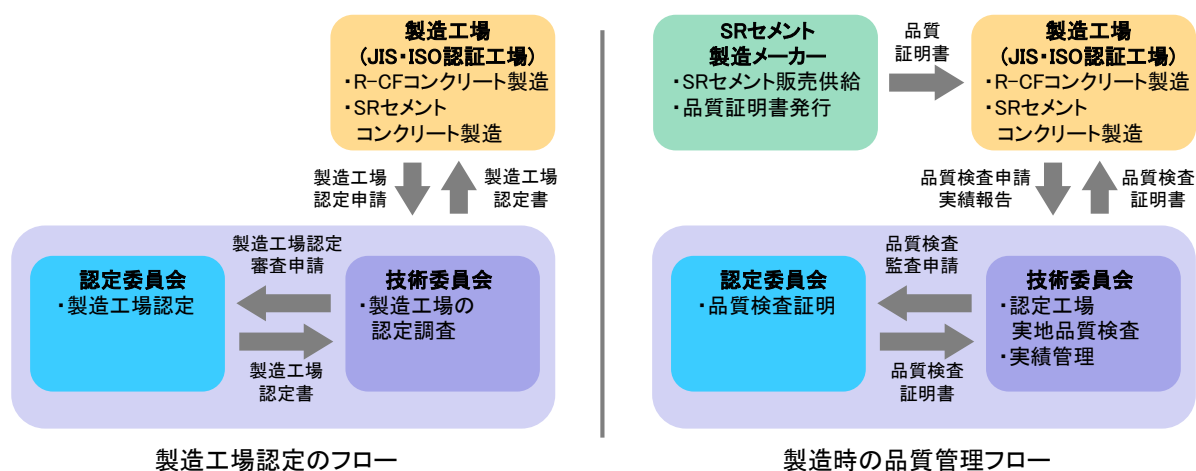


図 4.2.33 SR コンクリート研究会による品質管理体制の概要

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

第一に、本事業の核心である戻りコンクリートからセメントを再生する技術は、過去に例がなく新規性に富む。また、その品質を向上させ安定させることで事業化に足る水準に高めることは技術的に価値が高い。第二の特徴であるフライアッシュ等の産業廃棄物の利用に関しては、再生セメントとの組み合わせでの使用は例がなく、フライアッシュや高炉スラグ等の利用の新しい領域を拓くものである。第三に国内外で研究開発が活発に進んでいる超低炭素コンクリートに関して、既存成果の代表格であるジオポリマーが経済性、耐久性、実用性の点で実用化にほど遠く、本事業の SR セメントを使用する現実的な方法でこれらの課題も解決可能な点が画期的である。

これらの課題の解決に対して同時に寄与できること、また再生セメントが汎用セメントと同程度のコストで製造可能であることなどもあり、R-CF コンクリートとそのプレキャスト製品は、経済性に優れることに大きな特徴があり、この製品の普及、商品化により、環境政策への高い貢献も期待される。

(2) 環境政策への貢献

貢献1. 建設産業に関わる主要な建設副産物である解体コンクリート塊の廃棄量縮減と再生利用

本研究によれば、戻りコンクリートを処理してリサイクルセメントを製造し、さらにはプレキャスト部材として有効に利用することが可能となる。本研究の成果に基づき、戻りコンクリート起源の廃棄物の再資源化が実現すれば、解体コンクリート塊に対する前記再資源化率の低下 3%分に相当する量を回復できることになる。このように、戻りコンクリート再生利用の有効手段を実現する本研究の成果は、今後予測される建設廃棄物の排出増加を回避するため効果的に貢献できるものと考えられる。

貢献2. 建設産業による CO₂ 排出量及びエネルギー消費量の抑制

本技術によれば CO₂ 排出とエネルギー消費を大きく削減することができる。一般に、セメント製造による CO₂ 排出原単位は 725kg/t と大きいですが、本技術では一般セメントを代替し、SR セメントに加え産業副産物の高炉スラグ、フライアッシュを組み合わせることで、CO₂ 削減効果が非常に大きい。また、エネルギー消費原単位に関しても、約 50%の削減が達成できる。

貢献3. 東日本大震災後に重要性を増した石炭灰の廃棄量縮減と有効利用

本技術成果によれば、結合材のうち SR セメントに加えフライアッシュが利用できるため、その普及に伴い石炭灰の再利用先が生まれることになる。今後予想される埋立て処分量の増加傾向の緩和へ効果的に貢献できると考えられる。

<行政が既に活用した成果>

SR セメントコンクリート(二次製品)について、神奈川県 の 県土整備局 の リサイクル認定資材 に登録され指定材料化が実現した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

神奈川県内の公共工事において、計 5,000m³ の SR セメントコンクリート(生コン)の適用が承認され、実施される見込みとなった。本適用により、戻りコンの廃棄量縮減、建設時の CO₂ 削減、同県内の企業が開発した技術の採用による地域産業の活性化に貢献している。

6. 国際共同研究等の状況

「特に記載すべき事項はない。」

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 百瀬晴基, 笠井哲郎: 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, 建築学会, 乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を併用したクリンカーフリーコンクリートに関する実験研究(2015)
- 2) 大川憲, 閑田徹志, 百瀬晴基, 笠井哲郎: コンクリート工学年次論文集, Vol.38, 日本コンクリート工学会, 乾燥スラッジ微粉末の分級・粉砕による品質向上に関する研究(2016)
- 3) 大川憲, 青木真一, 百瀬晴基, 閑田徹志, 笠井哲郎: 第19回生コン技術大会, pp.87-92, 全国生コンクリート工業組合連合会, 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末を用いた低環境負荷コンクリートの適用検討(2017)
- 4) 大川憲, 閑田徹志, 巴史郎, 笠井哲郎: コンクリート年次論文集, Vol.39, 日本コンクリート工学会, 乾燥スラッジ微粉末を用いたプレキャストコンクリート製品積みブロックへの適用(2017)
- 5) 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 百瀬晴基, 笠井哲郎: 土木学会論文集, E2-272, 土木学会, 乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を併用した養生方法の異なるクリンカーフリーコンクリートの耐久性に関する研究(2017)
- 6) 大川憲, 百瀬晴基, 閑田徹志, 笠井哲郎: コンクリート工学年次論文集, Vol.40, 日本コンクリート工学会, 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末の品質向上に関する研究(2018) (投稿予定)
- 7) 百瀬晴基, 大川憲, 津嶋武志, 城戸隆宏: コンクリート工学年次論文集, Vol.40, 日本コンクリート工学会, 乾燥スラッジ微粉末を混和材として用いたレディーミクストコンクリートの適用事例(2018) (投稿予定)

<査読付論文に準ずる成果発表>

「特に記載すべき事項はない。」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 八巻真規, 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 百瀬晴基, 石関浩輔, 笠井哲郎: 土木学会関東支部技術研究発表会, V-65, 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末の基礎物性(2015)
- 2) 八巻真規, 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 百瀬晴基, 石関浩輔, 笠井哲郎: 土木学会関東支部技術研究発表会, V-14, 乾燥スラッジ微粉末と高炉スラグ微粉末を結合材としたモルタルの基礎物性(2016)
- 3) 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 巴史郎, 石関浩輔, 笠井哲郎: 土木学会年次学術講演会, 乾燥スラッジ微粉末の製造方法に関する研究(2016)
- 4) 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 石関浩輔, 笠井哲郎: 第19回生コン技術大会, 全国生コンクリート工業組合連合会, 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末を用いた低環境負荷コンクリートの適用検討(2017)
- 5) 大川憲, 青木真一, 川名正嗣, 閑田徹志, 百瀬晴基, 石関浩輔, 笠井哲郎: 土木学会年次学術講演会, 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末を用いた低環境負荷コンクリートの現場実打設(2017)
- 6) 巴史郎: セメント・コンクリート, No.849, 戻りコンクリートを再利用したコンクリート[エコクリートR³]の開発(2017)

- 7) 大川憲, 青木真一, 宮本勇馬, 閑田徹志, 百瀬晴基, 巴史郎, 石関浩輔, 笠井哲郎: コンクリートテクノロジー, Vol.36, No.1, スラッジ再生セメント(SRy セメント)の実用化と低環境負荷コンクリート(SR コンクリート)の開発(2017)
- 8) 大川憲, 宮本勇馬, 青木真一, 閑田徹志, 百瀬晴基, 巴史郎, 笠井哲郎: 土木学会年次学術講演会, 複数工場の戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末の基礎特性 (2018) (投稿予定)
- 9) 百瀬晴基, 閑田徹志, 石関浩輔, 巴史郎, 大川憲, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末を混和材として用いたコンクリートの基礎検討 (2018) (投稿予定)

(2) 口頭発表 (学会等)

「特に記載すべき事項はない。」

(3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

「特に記載すべき事項はない。」

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表 2016年11月24日 於鹿島建設本社 「戻りコンを再びコンクリートに, 究極の資源循環を実現・戻りコン再生セメントを使用したコンクリート「エコクリート R³」-」
- 2) 成果の記者発表 2017年12月7日 於鹿島建設本社 「超低炭素コンクリート「エコクリート R³」が平成29年度地球温暖化防止活動環境大臣表彰を受賞」

(6) その他

- 1) 第14回産学官連携功労者表彰(環境大臣賞)受賞 (2016)
- 2) 平成29年度地球温暖化防止活動環境大臣表彰受賞 (2017)

8. 引用文献

- 1) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015.7
- 2) 百瀬晴基, 閑田徹志, 今本啓一, 三橋博三: 乾燥収縮迅速評価システムの開発, コンクリート工学, Vol. 47, No. 10, pp. 22-29, 2009.10

Ⅲ. 英文 Abstract

A study for reinforced clinker-free concrete elements comprising by-product additives and recycled cement produced from wasted fresh ready-mixed concrete

Principal Investigator: Tetsushi KANDA

Institution: Technical Research Institute, Kajima Cooperation
2-19-1 Tobitakyu, Chofu-City, Tokyo, 182-0036, JAPAN
Tel: +81-42-489-8491 / Fax: +81-42-489-8440
E-mail: kandat@kajima.com

Cooperated by: SANWASEKISAN CO., LTD.

[Abstract]

Key Words: Recycled cement using concrete sludge, Admixtures, Clinker-free concrete, Reinforced concrete elements, Fly ash

The basic technology of recycled (SR) cement using waste fresh ready-mixed concrete sludge and recycled clinker-free (R-CF) concrete using it as main binder, was developed in 2012-2014 on the basis of research grant of the Environment Research and Technology Development Fund (3K123015). In this project, we further developed these technologies and carried out research and development for the practical application and commercialization.

We established dedicated washing and dewatering facilities to improve the quality of SR cement. As a result, quality of SR cement of this production line was improved, reducing the solid residue with a diameter more than 100 μm , and SR cement with a strength ratio more than 60% to the ordinary cement can be stably produced. For a further dissemination of this technology, mass-production of the SR cement was aimed and, after establishing the manufacture scheme of SR cement, a new manufacturing base accumulating returned concrete from multiple ready-mixed concrete plants was built in Kawasaki, Kanagawa.

An outdoor exposure test was conducted with precast elements (PCa) and solved important issues for commercialization such as durability of R-CF concrete. Commercialization of a PCa product that can be standardized and executive plans for application to actual construction were started. Also, application of SR cement concrete where the ordinary cement is partially replaced with SR cement, to PCa products and ready-mixed concrete products was examined for a general use. As a preparation of the practical application of these products, secured quality was confirmed through various experiments and obtained the JIS conformity certification. In addition, fresh ready-mixed concrete was applied for the first time to actual construction, confirming the practical level competitiveness in terms of quality and cost. As mentioned above, the social implementation of this technology has been realized by commercializing more than two competitive products that combine environmental performance, high quality and superior economic efficiency, and established an advanced “local production for local consumption” model of the recycling system in Kanagawa.

Through the spread of this technology, contribution to the three important environmental policies could be expected: reduction of the amount of demolished concrete debris which is the major construction byproduct, suppression of CO₂ emission and energy consumption, and reduction of amount of fly ash that increased after the large seismic damages. In addition to contributing to these environmental administrations, recycling systems using this technology are expected to have sufficient economic competitiveness and contribute to the revitalization of regional industries.