

平成 26 年度  
環境研究総合推進費補助金 研究事業  
総合研究報告書

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  
(3K123015)

平成 27 年 3 月

鹿島建設株式会社 閑田 徹志

補助事業名 環境研究総合推進費補助金研究事業（平成 24 年度～平成 26 年度）

所管 環境省

国庫補助金 26,019,000 円（複数年度の総計）

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

研究期間 平成 24 年 6 月 8 日～平成 27 年 3 月 31 日

研究代表者名 閑田 徹志（鹿島建設）

研究分担者 笠井 哲郎（東海大学工学部）  
百瀬 晴基（鹿島建設）  
親本 俊憲（鹿島建設）  
全 振煥（鹿島建設）  
青木 真一（三和石産）  
大川 憲（三和石産）

## 目次

総合研究報告書概要	1
本文	
1. 研究背景と目的	11
1.1 研究背景	11
1.2 研究目的	11
2. 研究方法	12
2.1 コンクリート用スラッジ再生セメント(SRセメント)の開発研究	12
2.2 R-CF コンクリートの配(調)合方法の確立に関する研究	16
2.3 R-CF コンクリートの耐久性確保に関する研究	19
2.4 R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法 確立に関する研究	26
3. 結果と考察	37
3.1 コンクリート用スラッジ再生セメント(SRセメント)の開発研究	37
3.2 R-CF コンクリートの配(調)合方法の確立に関する研究	44
3.3 R-CF コンクリートの耐久性確保に関する研究	51
3.4 R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法 確立に関する研究	62
4. 結論	78
5. 研究発表	80
6. 知的財産権の取得状況	80
研究概要図	81
英文概要	82

## 環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要

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

研究番号：3K123015

国庫補助金清算所要額：26,019,000 円（複数年度の総計）

研究期間：平成 24 年 6 月 8 日～平成 27 年 3 月 31 日

研究代表者名： 閑田 徹志（鹿島建設）

研究分担者： 笠井 哲郎（東海大学工学部）、百瀬 晴基（鹿島建設）、親本 俊憲（鹿島建設）、全 振煥（鹿島建設）、青木 真一（三和石産）、大川 憲（三和石産）

### 研究目的

本研究は、循環型社会形成推進及び廃棄物に関わる問題解決に加え、CO<sub>2</sub> 排出量とエネルギー消費量の抑制に貢献するため、以下の 3 つの課題の克服を目指して、建設副産物である戻りコンクリートを原料とするスラッジ再生セメント（SR セメント）を主たる結合材とし、フライアッシュ等の副産物混和材を大量添加した超低炭素型のクリンカーフリーコンクリート（以下、R-CF コンクリート）を開発し、プレキャスト製造による鉄筋コンクリート(RC)部材として建設構造物へ汎用的に適用する技術を開発することを目的とする。

- 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.建設産業による CO<sub>2</sub>排出量及びエネルギー消費量の抑制
- III.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

### 研究方法

#### 1 コンクリート用スラッジ再生セメント(SR セメント)の開発研究

- 1)達成目標：普通ポルトランドセメント(以下、普通 PC)に対する強度比が 40%以上
- 2)達成目標の妥当性：SR セメント製造のコストは、バージンセメントの 40%以下にはならないことがこれまでの経験からわかっており、開発技術の経済性確保の観点から前記目標を設定した。
- 3)研究内容・手法

SR セメントの開発基盤となる再生結合材は、概要図 1 に従い三和石産社で戻りコンクリートより製造され、地盤改良材の増量材として実績がある。再生結合材は、戻りコンクリートのセメント初期水和進展が再生処理までの時間、気温などに影響されて品質が変動し、さらに初期水和で未水和のセメント鉱物成分の一部が消失してコンクリート性能に影響を与える。この課題に対し、本研究では SR セメント製造実験による製造条件確立、戻りコンクリート初期水和による逸散成分の同定と練混ぜ実験による補助

材の検討を行った。前者では、戻りコンクリート初期水和の抑制のため、注水から再生処理開始までの限界時間に与える外気温の影響把握，ミキサー車への遅延剤投入の影響検討を行った。後者では，SRセメントを対象に，粒度分布測定，SEM 画像(概要写真 1)による観察，成分分析を行うと共に，石膏等の逸散鉱物を加えフレッシュ・硬化性能の改善を検討した。



概要写真 1 SEM 反射電子像

## 2 R-CF コンクリートの配(調)合方法の確立に関する研究

1)達成目標：設計基準強度  $24\text{N/mm}^2$  以上，プレキャスト RC 部材製造が可能な施工性

2)達成目標の妥当性：開発技術の展開先は汎用コンクリート製品であり，同製品の一般的な強度レベルが  $24\text{N/mm}^2$  であること，および同製品の製造がプレキャストにて行われることから達成目標を設定した。

3)研究内容・手法

本検討では，広範なモルタルおよびコンクリートを対象とした練混ぜ実験(概要写真 2)により，水結合材比，フラッシュ・高炉スラグ微粉末の混合率，養生条件を実験要因とし，概要写真 3 に示すフレッシュ性状(空気量，スランプ等，およびそれら経時変化)，概要写真 4 に示す硬化後の材料力学性能(圧縮強度，弾性係数，引張強度)を確認し，その結果として，圧縮強度と施工性の標記目標を達成可能とする材料・配(調)合を選定した。本研究では，モルタル練混ぜ実験による事前検討により材料・配(調)合を絞り込み，コンクリート練混ぜ実験により配(調)合方法の検討を行った。



概要写真 2 練混ぜ用ミキサ

概要写真 3 スランプ試験例

概要写真 4 圧縮強度試験例

## 3 R-CF コンクリートの耐久性確保に関する研究

1)達成目標：①高炉セメント B 種コンクリートに対して同等以上の中性化抵抗性

②コンクリートの収縮率が  $-10 \times 10^{-4}$  以下

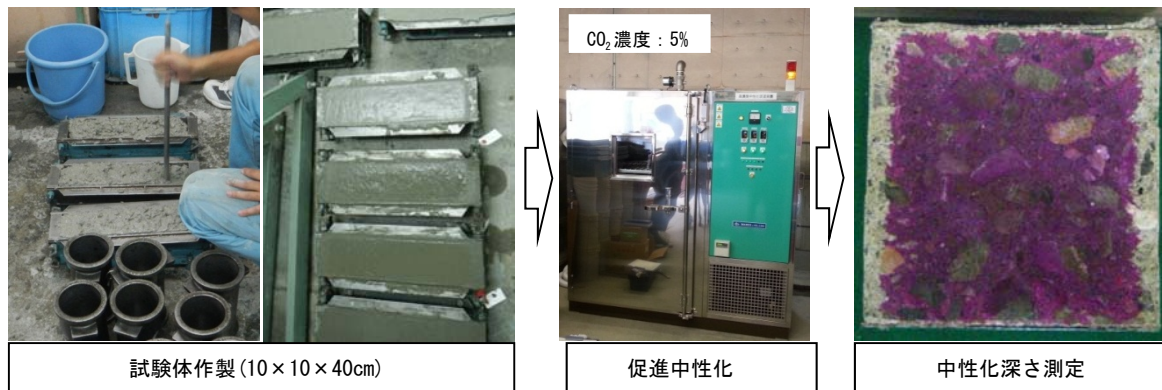
③プレキャスト RC 部材ひび割れ制御方法の確立

2)達成目標の妥当性：汎用的なプレキャスト鉄筋コンクリート部材と同等の耐久性を確保する観点から、前記達成目標を設定した。

### 3)研究内容・手法

本研究では、R-CF コンクリートの耐久性確保を目指し、前記目標を達成すべく、①中性化促進試験に基づく中性化抵抗性予測方法の検討および長期暴露実験による耐久性確認、②収縮特性の把握および収縮低減方法の検討、③プレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験によるひび割れ抵抗性の検討を行った。

①では、コンクリートの耐久性を短時間で評価する試験として一般的な促進中性化試験(概要図 2)を行うことにより、材料と配(調)合の影響を把握すると共に、これらを考慮した中性化深さの予測に関する実験式を検討した。更には、供用環境条件での中性化抵抗性を把握するため、実大の壁部材およびφ100×200mm 円柱供試体を作製し、10年間に及ぶ長期暴露実験を開始した。②では、100×100×400mmの試験体を用いて、コンクリートの収縮率を評価する乾燥収縮試験に準じた試験を行うことにより、R-CF コンクリートの収縮特性を把握すると共に、石膏添加などの経済的な収縮低減方法の効果を検討した。③では、プレキャスト部材への適用を念頭に、蒸気養生を行うプレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験を行った。プレキャスト部材の製造では、初期強度を早期に発現させるため、硬化初期に60℃程度の蒸気養生を行うことが一般的であり、本実験においても同様の蒸気養生を実施した。また、試験体の拘束程度は、一般的なプレキャスト部材の中で、拘束が大きくひび割れが生じやすいと予想される梁部材を模擬し、R-CF コンクリートのプレキャスト部材における収縮ひび割れ抵抗性を検討した。



概要図 2 促進中性化試験の作業手順

## 4 R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法確立に関する研究

1)達成目標：R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の耐久性・構造性能の確保と製造方法確立

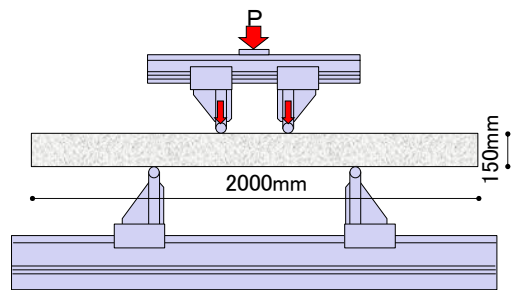
- ①一般プレキャスト工場で製造が可能
- ②計画供用期間 65 年を満足する耐久性
- ③一般 RC 部材と同等の曲げ構造性能

2)達成目標の妥当性：一般的なプレキャスト RC 部材と同等の耐久性・構造性能を確保する観点から、前記達成目標を設定した。

### 3)研究内容・手法

本研究では、R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法確立を目指し、前記目標を達成すべく、①プレキャスト工場での製造検討、②鉄筋腐食抵抗性の検討、③曲げ構造性能の検討を行った。

①では、実際のプレキャスト工場にて、室内試験による混和剤検討実験および調合検討実験、実大規模の部材製作実験を実施し、R-CF コンクリートの施工性、脱型時強度、コア強度の検討を行った。本検討により、一般プレキャスト工場において、R-CF コンクリートによるプレキャスト部材の製造が可能であることを確認した(概要写真 5, 概要写真 6)。②では、電気化学に基づく鉄筋腐食メカニズムを仮定し、模擬 RC 試験体の自然電位、分極抵抗を測定することで、R-CF コンクリートの腐食抵抗性の評価を普通 PC コンクリートと比較した。③では、前記部材製作実験と併せて実大の板状試験体を製作し構造実験を行った(概要図 3)。実験では、床スラブ等の曲げ部材を想定して曲げ载荷を行い、その結果から R-CF コンクリートによる RC 部材の曲げ耐力や剛性が、普通 PC コンクリートによる RC 部材と同等であり、既存式で設計可能であることを確認した。



概要写真 5 部材製造の例

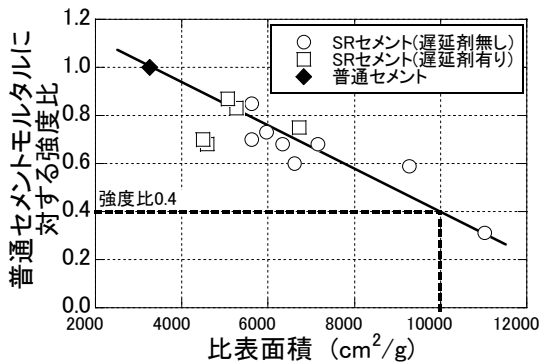
概要写真 6 製造する部材の例

概要図 3 実大部材曲げ実験例

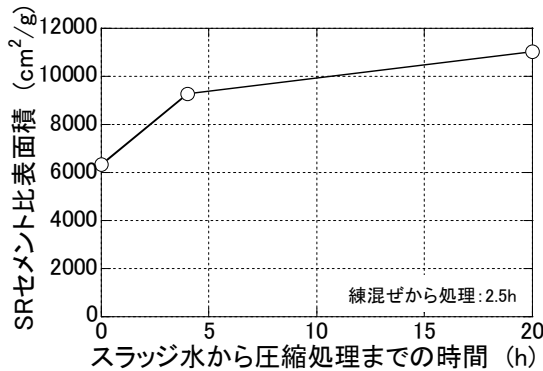
## 結果と考察

### 1. コンクリート用スラッジ再生セメント(SR セメント)の開発研究

普通 PC モルタルに対する SR セメントモルタルの圧縮強度の比を概要図 4 に示す。概要図 4 から、SR セメントの比表面積が増大するに従い、同強度比は低下し、品質変動を考慮すると SR セメントの比表面積を  $8000\text{cm}^2/\text{g}$  以下にすることで、普通 PC に対する強度比 40%以上を満足できることが確認された。また、SR セメントの比表面積に大きな影響を及ぼす製造工程として、スラッジ水から処理開始までの時間が重要であることが確認され、概要図 5 から、この処理過程の時間を 2.5 時間以内に管理することで、夏期においても比表面積  $8000\text{cm}^2/\text{g}$  以下の SR セメントが製造可能であることが確認された。

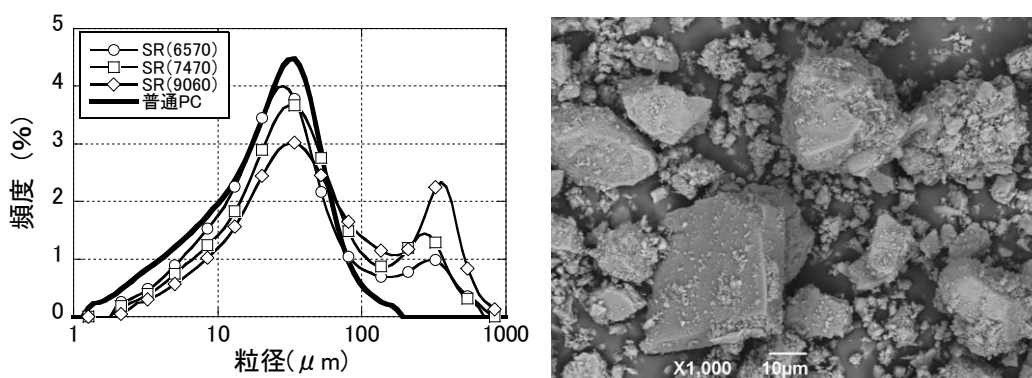


概要図 4 普通 PC に対する SR セメントの強度比



概要図 5 スラッジ水から処理までの時間の影響

モルタル練混ぜ実験から、無水石膏の添加により、練混ぜ直後のこわばりおよび流動性の低下が軽減され、圧縮強度も若干増大する傾向が認められたことから、補助材として無水石膏の可能性が確認された。また、各種分析結果から、SRセメント中には未水和セメント以外に、砂や水和生成物などの凝集が認められ、未水和セメントの残存率は65%程度であることが明らかとなった。概要図6から、SRセメントの比表面積が増大した際に、細かい粒子が凝集し300 $\mu\text{m}$ 程度の見掛け上粒径の大きな粒子が増大しているが、この300 $\mu\text{m}$ 程度の粒子を分級などにより除去することで、普通PCと同様の粒度分布となるSRセメントを製造できる可能性が示唆された。

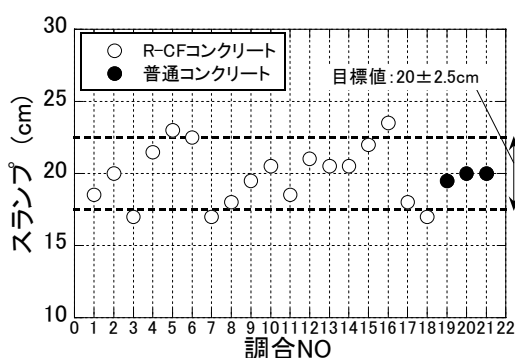


概要図6 SRセメントの粒度分布測定結果およびSEM画像

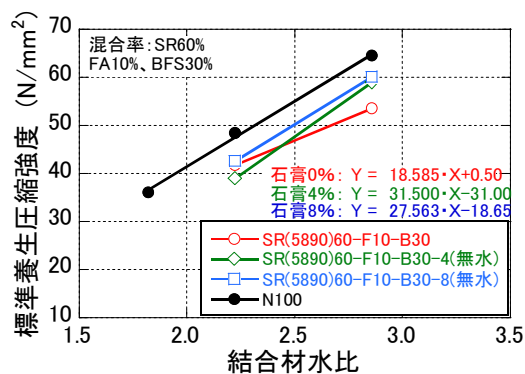
## 2. R-CF コンクリートの配(調)合方法の確立に関する研究

R-CF コンクリートのフレッシュ性状は、SRセメントおよび併用する混和材の比表面積が大きいため、普通コンクリートに比べて粘性が増大する傾向となる。しかし、普通強度のレベルであれば大きな施工上の問題はなく、概要図7に示す様に所要のスランプも得られる結果となった。以上のことから、プレキャストRC部材の製造に対して、十分施工可能なフレッシュ性状を有していると考えられる。

概要図8から、R-CF コンクリートは普通コンクリートと同様に、結合材水比が増大するに従い圧縮強度が大きくなることから、結合材水比と圧縮強度の関係式を用いて配(調)合設計が可能になると考えられる。また、R-CF コンクリートの圧縮強度は最大60N/mm<sup>2</sup>程度であることから、設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を十分満足できることが確認された。



概要図7 スランプ試験結果

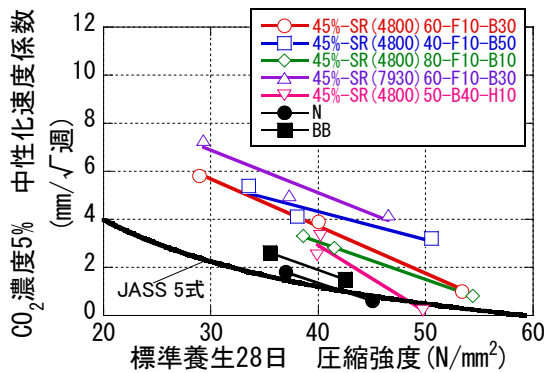


概要図8 結合材水比と圧縮強度の関係



### 3 R-CF コンクリートの耐久性確保に関する研究

概要図 9 の促進中性化試験の結果から、R-CF コンクリートの配合を最適化し強度を高めることで、高炉セメント B 種コンクリートに対して同等以上の中性化抵抗性を付与できることが確認された。同実験結果から、中性化速度係数の実験式を提案し、本実験式を活用して耐久性設計を行うことで、概要表 1 の計画供用期間の級に応じた設計かぶり厚さと所要の圧縮強度を算定した。さらに、供用環境条件での中性化抵抗性を把握するため、概要写真 7 の実大の壁部材および  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  円柱供試体を作製し、10 年間に及ぶ長期暴露実験を開始した。コンクリートの自由収縮試験結果から、R-CF コンクリートの収縮率は普通コンクリートよりも  $2 \times 10^{-4}$  程度大きくなること、石膏の添加により普通コンクリートよりも収縮率を低減できることが明らかとなり、これらの知見から収縮率  $10 \times 10^{-4}$  以下の R-CF コンクリートを実現する方法を見出した。概要図 10 のプレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験結果から、R-CF コンクリートにおいてもひび割れが生じておらず、R-CF コンクリートによりプレキャスト部材を製造した際に、収縮ひび割れが過大となる可能性は低いことが分かった。



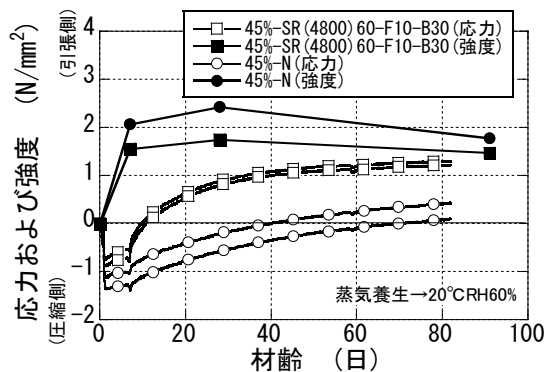
概要図 9 促進中性化試験の結果

概要表 1 耐久性を満足するために必要な設計かぶり厚さ毎の標準養生 28 日圧縮強度

配合	設計かぶり厚さ(mm)					
	屋内			屋外		
	20	30mm	40mm	30mm	40mm	50mm
SR(4800)60-F10-B30	45.8	41.3	36.8	40.4	31.3	22.3
SR(4800)40-F10-B50	49.1	44.6	40.1	43.7	34.6	25.6
SR(4800)80-F10-B10	42.6	38.1	33.6	37.2	28.1	19.1
SR(7930)60-F10-B30	53.0	48.4	44.0	47.6	38.5	29.4
SR(4800)50-B40-H10	40.0	35.4	30.9	34.6	25.5	16.4



概要写真 7 長期暴露実験の外観

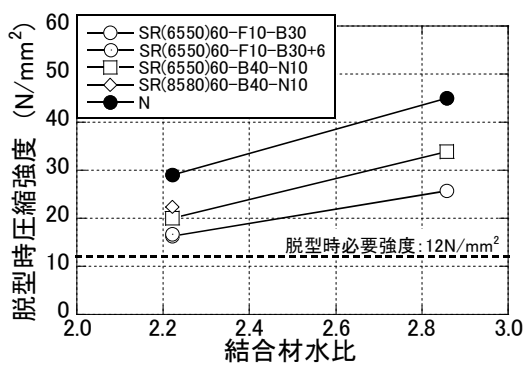


概要図 10 結合材水比と圧縮強度の関係

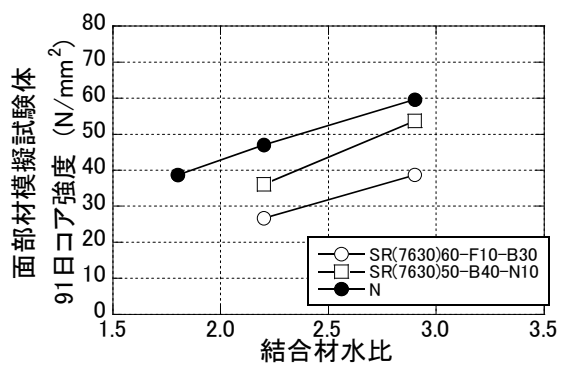
### 4 R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法確立に関する研究

実際のプレキャスト工場にて、室内試験による混和剤検討実験および調合検討実験、実大規模の部材製作実験を実施した結果、プレキャスト部材製造に必要な脱型時強度(概要図 11)、および構造性能確保のためのコア強度(概要図 12)などを満足する結果が得られ、一般プレキャスト工場において、R-CF コンクリートによるプレキャスト部材の製造が可能であることが確認された。模擬 RC 試験体の自然電位、

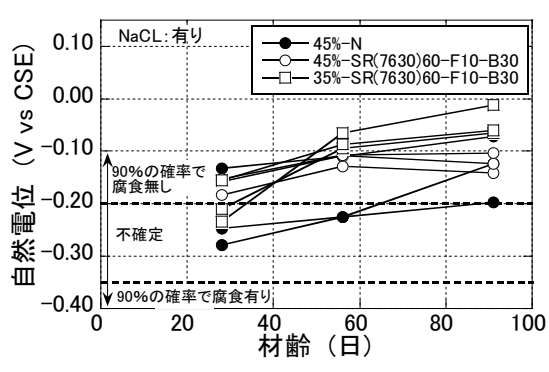
分極抵抗を測定することで、R-CF コンクリートの腐食抵抗性の評価を普通 PC コンクリートと比較した。概要図 13 は、自然電位の測定結果であり、R-CF コンクリートの腐食抵抗性は普通コンクリートと同程度であることが確認された。中性化抵抗性については、上述の中性化抵抗性予測方法を用いた性能設計により、計画供用期間 65 年の耐久性を有した R-CF コンクリートのプレキャスト RC 部材を実現できるものと考えられる。前記部材製作実験と併せて実大の板状試験体を製作し構造実験を行った。概要図 14 の構造実験の結果から、R-CF コンクリートによる RC 部材の曲げ構造性能が、普通 PC コンクリートによる RC 部材と同等であり、既存式で設計可能であることが確認された。



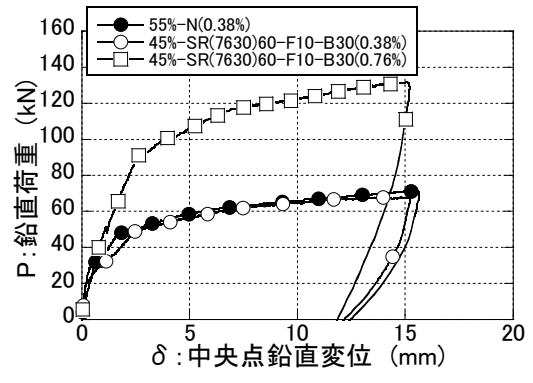
概要図 11 脱型時圧縮強度の結果



概要図 12 面部材コア強度の結果



概要図 13 自然電位測定結果



概要図 14 実大曲げ実験結果

## 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

日本全体の年間産業廃棄物量 4.2 億 t のうち、建設産業に起因するものは 20%程度(7700 万 t)を占め、そのうち最終処分される建設廃棄物は全体の 25%程度の 600 万 t に達し、環境行政にとってその縮減は重要である。建設廃棄物の種類別では、解体コンクリート塊が最も多く 3200 万 t に及ぶ。解体コンクリートは、2000 年のグリーン購入法制定などの施策により再資源化率が 95%以上と著しく高まり、最終処分量は 100 万 t 程度に抑制されているが、再資源化の用途は路盤材を主とし、近年の道路建設需要の低下から、最終処分量は再び増加傾向にある。仮に再資源化率が 1%低下すれば 30 万 t の最終処分量の増加が見込まれることから、再資源化率を保持するため路盤材以外の再利用用途の確保が非常に重要となる。

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。戻りコンクリートは、生コン出荷量全体の約 1.6%とされ、年間 200 万 m<sup>3</sup>に達するそれらのほとんどは産業廃棄物として

処理されており、骨材分を除いて縮減されることで、100 万 t 程度が廃棄物として排出されていると推測される。

本研究によれば、この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量 100 万 t 全量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 CO<sub>2</sub> 排出量及びエネルギー消費量の抑制

日本全国の CO<sub>2</sub> 排出量は年間約 12 億 t であるが、そのうち建設産業で使用するセメントの製造に起因するものは、およそ 4%の 42,500 千 t に達する。また、セメント製造起源のエネルギー消費量は年間 20,000×10<sup>7</sup>MJ を超え、全国消費量の 1%を上回る膨大な量となる(概要表 2)。また、同表にあるように、本技術が普及すれば、特に CO<sub>2</sub> 排出抑制に対して効果が大きく、全国の CO<sub>2</sub> 総排出量の 0.7%に相当する 850 千 t の削減、さらにエネルギー消費削減効果はセメント製造起源の 1%程度である 230×10<sup>7</sup>MJ となる。

概要表 2 セメント製造起源の CO<sub>2</sub> 排出量およびエネルギー消費量と本技術による削減可能量

	CO <sub>2</sub> 排出量 (千t/年)	エネルギー消費 (10 <sup>7</sup> MJ/年)	備考
一般セメント製造起源	42,500	20,204	全国のCO <sub>2</sub> 総排出量に対し4%、エネルギー消費総量に対し1%を占める
本技術により削減可能な量	848	230	・全国のCO <sub>2</sub> 総排出量12億tの0.7%の削減に相当 ・セメント製造起源のエネルギー消費の1%削減

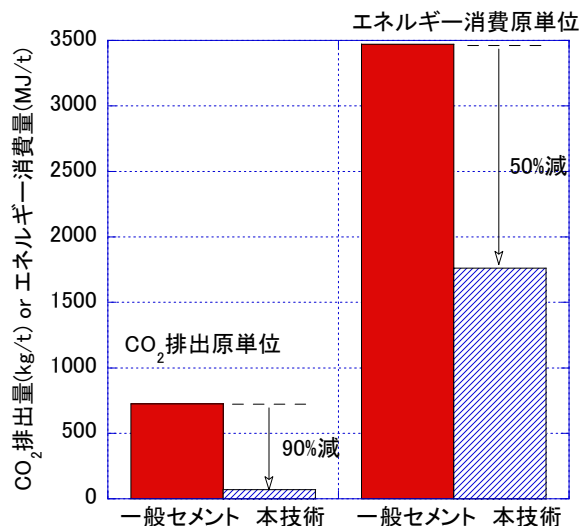
本技術によれば CO<sub>2</sub> 排出とエネルギー消費を大きく削減することができる。一般に、セメント製造による CO<sub>2</sub> 排出原単位は 725kg/t と大きいですが、本技術では一般セメントを代替し、SR セメントに加え産業副産物の高炉スラグ、フライアッシュを組み合わせることで、概要図 15 のように CO<sub>2</sub> 排出原単位を 90%低減して 130kg/t とでき、削減効果が非常に大きい (SR セメント : 高炉スラグ : フライアッシュ = 6 : 2 : 2 の組合せの場合)。また、エネルギー消費原単位に関しても、約 50%の削減が達成できる。

## 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

2009 年度の石炭灰の排出量は 11,000 千 t と膨大であるが、有効利用率 (再利用率) が 97%以上と高く埋立処理分量は 300 千 t 程度に止まるとされる。しかし、石炭使用量全体に対し電力事業が占める割合が 70%を超える現状において、東日本大震災以降の原子力発電所の稼働制限により、石炭火力発電の稼働が活発化することで石炭使用量の増加が見込まれ、石炭灰の排出量は 13,000 千 t へ近づくことが予想される。また、再利用の用途別では、セメント原料としての使用が全体の 70%

程度を占めるが、セメント生産量の漸減傾向が続いていることから、再利用先に石炭灰増加分の処理能力の余力は乏しく、埋立処分量が増加することが懸念される。

本技術成果によれば、貢献2で述べたように、結合材のうちSRセメントに加え20%のフライアッシュが利用できるため、その普及に伴い260千tに及ぶ石炭灰の再利用先が生まれることになる。この量は、現状の石炭灰の埋立処分量に相当し、前述した今後予想される埋立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。



概要図 15 本技術による CO<sub>2</sub> 排出原単位およびエネルギー消費原単位の削減

### 研究成果の実現可能性

本技術の実用化は、研究目標が全て達成された場合には比較的容易と考えられる。さらに、本技術の広範な普及を目指すために最も重要な点は経済性で、本技術にて結合材として使用するSRセメント、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末は、競合する一般セメントと比較し製造単価が半分以下と推定され高い潜在競争力を有している。一方、普及にあたっての経済性確保における大きな課題は流通コストである。しかし、戻りコンクリートの処理費削減にニーズを有するレディミクストコンクリートの共同販売組合の協力を得て、SRセメント製造の拠点整備を進め、さらに地産地消の原則を守ることで流通コスト低減に向けた課題解決が図れると考えられる。

### 結論

本研究の目標は、i) 地盤改良材の増量材に利用されるスラッジ再生結合材をベースとしたコンクリート用SRセメントの開発、ii) 構造用R-CFコンクリートの材料組合せ及び配(調)合方法の確立、iii) 同コンクリートの耐久性確保、iv) 同コンクリートによるプレキャストRC部材の耐久性・構造性能の確保と製造方法確立の4項目とし、研究を実施した。

コンクリート用スラッジ再生セメント(SRセメント)の開発研究では、SRセメントの実規模製造実験を実施し、目標品質を確保するため製造プロセス改良を行った。その結果、SRセメントの未水和成分が減少することで品質が低下する夏期の製造においても、スラッジの脱水処理までの時間を

一定以下に制御することで普通 PC に対する強度比が 40%以上の品質を実現できることが明らかとなった。

R-CF コンクリートの配(調)合方法の確立に関する研究では、モルタルおよびコンクリートの練混ぜ実験を実施し、設計基準強度  $24\text{N/mm}^2$  以上、および良好な施工性を達成できる見通しが得られ、さらには材料構成や結合材水比により圧縮強度を推定する調合方法に目途をつけた。施工性については、フレッシュ時における時間経過に伴う流動性の保持に課題があったが、SR セメントの製造までの過程で逸散していると考えられる石膏を添加することで改善できることがわかった。

R-CF コンクリートの耐久性確保に関する研究では、①中性化促進試験に基づく中性化抵抗性予測方法の検討および長期暴露実験による耐久性確認、②収縮特性の把握および収縮低減方法の検討、③プレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験によるひび割れ抵抗性の検討を行った。①では、促進中性化試験の結果から、R-CF コンクリートの配合を最適化し強度を高めることで、高炉セメント B 種コンクリートに対して同等以上の中性化抵抗性を付与できることを確認し、耐久性設計により、計画供用期間の級に応じた設計かぶり厚さと所要の圧縮強度を算定した。②では、コンクリートの自由収縮試験結果から、R-CF コンクリートの収縮率は普通コンクリートよりも  $2 \times 10^{-4}$  程度大きくなること、石膏の添加により普通コンクリートよりも収縮率を低減できることが明らかとなり、これらの知見から収縮率  $-10 \times 10^{-4}$  以下の R-CF コンクリートを実現する方法を見出した。③では、プレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験結果から、R-CF コンクリートにおいてもひび割れが生じておらず、R-CF コンクリートによりプレキャスト部材を製造した際に、収縮ひび割れが過大となる可能性は低いことが分かった。

R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法確立に関する研究では、①プレキャスト工場での製造検討、②鉄筋腐食抵抗性の検討、③曲げ構造性能の検討を行った。①では、実際のプレキャスト工場にて、室内試験による混和剤検討実験および調合検討実験、実大規模の部材製作実験を実施した結果、R-CF コンクリートの施工性、脱型時強度、コア強度などの実製造に必要なデータが得られ、一般プレキャスト工場において、R-CF コンクリートによるプレキャスト部材の製造が可能であることが確認された。②では、模擬 RC 試験体の自然電位測定結果から、R-CF コンクリートの腐食抵抗性は普通コンクリートと同程度であること、計画供用期間 65 年の耐久性を有していることを確認した。③では、実大の板状試験体による構造実験の結果から、R-CF コンクリートによる RC 部材の曲げ構造性能が、普通 PC コンクリートによる RC 部材と同等であり、既存式で設計可能であることを確認した。

上記研究結果から、本技術によれば i) 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、ii) 建設産業による  $\text{CO}_2$  排出量及びエネルギー消費量の抑制、iii) 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の 3 つの環境政策への貢献が期待され、その実現性も高いと考えられる。

## 1. 研究背景と目的

本研究は、循環型社会形成推進及び廃棄物に関わる問題解決に加え、CO<sub>2</sub> 排出量とエネルギー消費量の抑制に貢献するため、以下の 3 つの課題の克服を目指して、建設副産物である戻りコンクリートを原料とするスラッジ再生セメント (SR セメント) を主たる結合材とし、フライアッシュ等の副産物混和材を大量添加した超低炭素型のクリンカーフリーコンクリート (以下、R-CF コンクリート) を開発し、プレキャスト製造による鉄筋コンクリート(RC)部材として建設構造物へ汎用的に適用する技術を開発することを目的とする。

- 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.建設産業による CO<sub>2</sub> 排出量及びエネルギー消費量の抑制
- III.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

上記課題の解決に寄与する既存技術には様々な問題が残されている。課題 I.については、回収水および回収骨材の利用については進展が見られるが、スラッジの利用については有望な技術は見当たらない。また、課題 II.と III.に関連するクリンカーフリーコンクリートは多くの提案があるが、補強鉄筋の腐食抵抗性に劣り、一般的な RC 部材として適用することが難しく、原材料が高コストで経済性に乏しい例が多い。これら問題に対し、SR セメントは戻りコンクリートの有力な再利用対策で、強いアルカリ性を硬化体にて保持可能なため鉄筋腐食抵抗性に優れ、比較的簡易な設備・工程での製造により低コストとなるなど解決が可能であり、一般的な建設市場を対象に展開可能である見通しを得ている点に大きな特色がある。

本研究の研究目標は、i) 地盤改良材の増量材に利用されるスラッジ再生結合材をベースとしたコンクリート用 SR セメントの開発、ii) 構造用 R-CF コンクリートの材料組合せ及び配(調)合方法の確立、iii) 同コンクリートの耐久性確保、iv) 同コンクリートによるプレキャスト RC 部材の耐久性・構造性能の確保と製造方法確立の 4 項目とする。これら目標の達成により、超低炭素型のリサイクルコンクリートを用いながら、既存技術と同等以上の性能を有するに加え、一般構造物へ汎用的に適用可能な経済性を併せ持つ独創的な RC 部材を実現し、上記課題の解決への多面的な貢献により、廃棄物と CO<sub>2</sub> の排出量削減を目指す環境政策の実現に資することが可能となる。

## 2. 研究方法

### 2. 1 コンクリート用スラッジ再生セメント(SR セメント)の開発研究

#### 2. 1. 1 研究概要

1)達成目標：普通 PC に対する強度比が 40%以上

2)達成目標の妥当性：SR セメント製造のコストは、バージンセメントの 40%以下にはならないことがこれまでの経験からわかっており、開発技術の経済性確保の観点から前記目標を設定した。

3)研究内容・手法

SR セメントの開発基盤となる再生結合材は、三和石産社で戻りコンクリートより製造され、地盤改良材の増量材として実績がある。再生結合材は、戻りコンクリートのセメント初期水和進展が再生処理までの時間、気温などに影響されて品質が変動し、さらに初期水和で未水和のセメント鉱物成分の一部が消失してコンクリート性能に影響を与える。この課題に対し、本研究では SR セメント製造実験による製造条件確立、戻りコンクリート初期水和による逸散成分の同定と練混ぜ実験による補助材の検討を行った。前者では、戻りコンクリート初期水和の抑制のため、注水から再生処理開始までの限界時間に与える外気温の影響把握、ミキサー車への遅延剤投入の影響検討を行った。後者では、SR セメントを対象に、粒度分布測定、SEM 画像による観察、成分分析を行うと共に、石膏等の逸散鉱物を加えフレッシュ・硬化性能の改善を検討した。

#### 2. 1. 2 SR セメント製造実験による製造条件の確立

SR セメントの比表面積の年間変動を図 2.1.1 に示す。これまでの検討結果から、SR セメントの比表面積が大きいほど、結合材として用いた場合の強度は低下すること、SR セメントの比表面積は、外気温が高い夏期は  $10000\text{cm}^2/\text{g}$  程度、外気温が低い冬期は  $6000\text{cm}^2/\text{g}$  程度であり、外気温の影響により大きく変動することが確認されている。夏期に比表面積が低い SR セメントを製造することは現状難しく、これを克服することが製造条件確立に向けた大きな課題となる。課題解決に向け、実際の製造プラントを用い、SR セメントの製造実験を実施した。

SR セメント製造実験の実験要因と水準を表 2.1.1 に、SR セメント製造過程にて検討すべき工程を図 2.1.2 に示す。SR セメント製造実験は、特に夏期での製造条件の確立のため、7 月および 9 月の 2 回実施した。実験要因は、①練混ぜから処理開始までの時間、②スラッジ水になってから処理開始までの時間、③コンクリートの混和剤種類、④アジテータ車への遅延剤投入量、⑤遅延剤種類の 5 つとした。特に大きな影響を及ぼす要因は①と②の 2 つと予想され、これらを検討とした。また、様々な種類のコンクリートが原料となるため複数の混和剤種類を対象とし、さらには SR セメントの品質向上を期待し、アジテータ車への遅延剤添加を検討した。遅延剤の添加は、コンクリート練混ぜから 1.5h 経過した時点でアジテータ車に投入した。コンクリートの使用材料一覧を表 2.1.2 に、コンクリートの調合一覧を表 2.1.3 に示す。

SR セメント製造実験の流れを図 2.1.3 に示す。室内試験では実プラントの各影響要因を検討することは困難であることから、レディーミクストコンクリート工場においてコンクリートを  $5\text{m}^3$  練り混ぜ、アジテータ車に積んで出荷し、SR セメント製造プラントにて実験を行った。各水準により製造した SR セメントは、屯パックに保管し、後日、SR セメントの密度および比表面積試験を行った。また、同 SR セ

メント用いてモルタルを練り混ぜ試験体を作製し材齢 28 日において圧縮強度試験に供した。更に、比較対象として普通 PC を用いてモルタルの圧縮強度試験を行い、同 SR セメントの普通 PC に対する強度比を求めた。

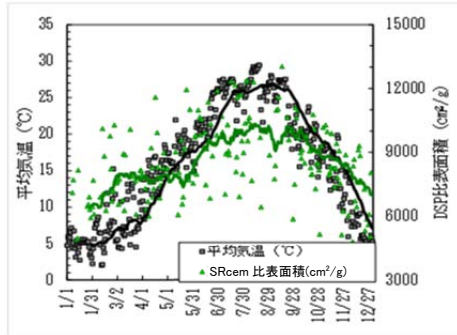


図 2.1.1 SR セメントの比表面積の年間変動

表 2.1.1 SR セメント製造実験の実験要因と水準

実験要因	水準			
	1	2	3	4
1 練混ぜから処理開始までの時間	2.5時間	3.5時間	-	-
2 スラッジ水になってから処理開始までの時間	直ちに	2時間	4時間	翌朝まで
3 コンクリートの混和剤種類	AE減水剤	高性能AE減水剤	-	-
4 アジテータ車へ遅延剤投入量	遅延剤 C×0.1%	遅延剤 C×0.2%	-	-
5 遅延剤種類	G グルコン酸	S ショ糖	-	-

表 2.1.2 コンクリートの使用材料一覧

項目	記号	材料	密度
セメント	N	普通ポルトランドセメント	3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67g/cm <sup>3</sup>
	S2	山砂	2.57g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	石灰砕石	2.70g/cm <sup>3</sup>
混和剤	SP1	AE減水剤	-
	SP2	高性能AE減水剤	-

表 2.1.3 コンクリートの調合一覧

調合	W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
			W	N	S1	S2	G	SP1	SP2
普通30-18-20N (AE減水剤)	50%	44.4%	185	370	418	342	980	4.81	-
普通30-18-20N (高性能AE)	50%	47.9%	170	340	467	382	953	-	3.57

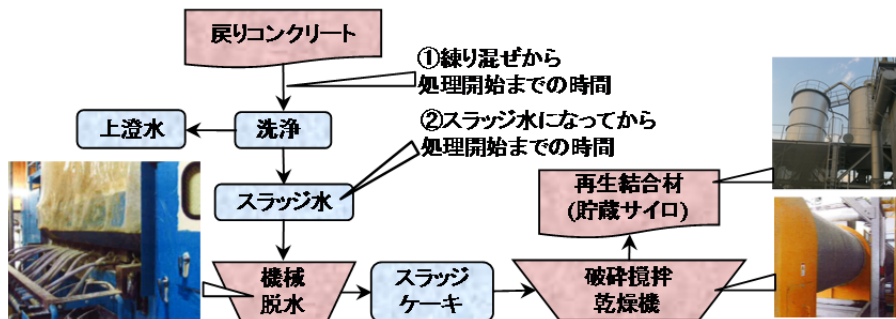


図 2.1.2 SR セメント製造工程の検討



図 2.1.3 SR セメント製造実験の流れ



### 2. 1. 3 SRセメントの初期水和による逸散成分等の分析と補助材の検討

写真 2.1.1 のレーザー回折式粒度測定機を用いて SR セメントの粒度分布測定を行うと共に、写真 2.1.2 の走査型電子顕微鏡(SEM)およびエネルギー分散型 X 線分析(EDX)により、SR セメントの粉体観察、成分分析を行った。SEM-EDX の分析作業の流れを表 2.1.4 に示す。SR セメントの外観観察を行った他、エポキシ樹脂と粉体を練り混ぜ SR セメントの断面観察を行った。

SR セメントは、レディーミクストコンクリートの状態で数時間程度の水和反応過程を経て乾燥処理されるため、初期水和が一定程度進んだ状態となっている。ポルトランドセメントにおいては、注水から数時間程度の初期水和において特に石膏が消費されることから、SR セメントで逸散成分と想定される石膏を補助材として添加することにより、R-CF モルタルのフレッシュ性状および硬化性状の改善を検討した。

SR セメント補助材検討実験の概要を表 2.1.5 に、使用材料の一覧を表 2.1.6 に、調合表の一覧を表 2.1.7 に示す。SR セメントの補助材として石膏を検討することとし、本検討では無水石膏と二水石膏の 2 種類の石膏を対象に検討を行った。R-CF モルタルの基本調合となる結合材は、SR セメントを B×60%、フライアッシュを B×20%、高炉スラグ微粉末を B×20%の構成とした。これに対し、無水石膏および二水石膏を結合材の 3%若しくは 6%で内割り添加したモルタルについて実験を行った。また、比較対象として普通 PC を用いた普通モルタルについても実験も実施した。SR セメントは比表面積が  $6400\text{cm}^2/\text{g}$  の比較的高品質のものを使用した。フライアッシュは JIS A 6201 の II 種相当、高炉スラグ微粉末は比表面積  $4000\text{cm}^2/\text{g}$  程度のものとした。

本実験では 8L のモルタルミキサーを用いて練混ぜを行った。フレッシュ試験項目は、一般的なモルタルで実施されるフレッシュ試験とし、モルタルフロー(JIS R 5201)、空気量 (JIS A 1171, JIS A 1128)、単位容積質量(JIS A 1171)、モルタル温度(JIS A 1156)の各試験を実施した。なお、モルタルフロー経時変化では、練直、10、30、60、90 分について試験を行った。圧縮強度試験用供試体として、1 調合につき  $\phi 50 \times 100\text{mm}$  の円柱供試体を 9 体作製し、標準養生に供し、材齢 3、28、91 日で圧縮強度試験 (JIS A 1108) を行った。



写真 2.1.1 レーザー回折式粒度分布測定機



写真 2.1.2 SEM-EDX

表 2.1.4 SEM-EDX 分析作業の流れ


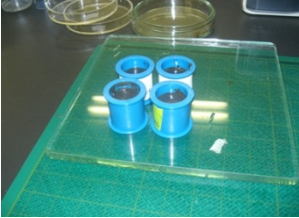

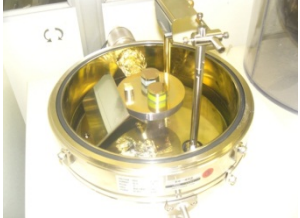


1.エポキシ樹脂と粉体練混ぜ	2. 埋込モールドに試料を流し込み	3.観察面を研磨
		
4.観察面を金蒸着	5. 専用ステージに設置	6.SEM-EDX により分析
		

表 2.1.5 SR セメント補助材検討実験概要

NO	配合	W/B	結合材						試験項目		
			SR(6400): 6400cm <sup>2</sup> /g	F: フライ アッシュ	B: 高炉スラグ 微粉末	N: 普通 PC	無水 石膏	二水 石膏	フレッシュ 試験		圧縮強度 試験
									練直	経時	φ50×100mm
1	40%-SR(6400)60-F20-B20	40%	B×60%	B×20%	B×20%	—	—	—	○	○	○
2	40%-SR(6400)60-F20-B20-3(無水)	40%	B×58.2%	B×19.4%	B×19.4%	—	B×3%	—	○	○	○
3	40%-SR(6400)60-F20-B20-6(無水)		B×56.4%	B×18.8%	B×18.8%	—	B×6%	—	○	○	○
4	40%-SR(6400)60-F20-B20-3(二水)		B×58.2%	B×19.4%	B×19.4%	—	—	B×3%	○	○	○
5	40%-SR(6400)60-F20-B20-6(二水)		B×56.4%	B×18.8%	B×18.8%	—	—	B×6%	○	○	○
6	40%-N100	40%	—	—	—	B×100%	—	—	○	○	○

表 2.1.6 使用材料の一覧

項目	記号	材料	密度	ブレン値
結合材	SR(6400)	SRセメント	2.82g/cm <sup>3</sup>	6400cm <sup>2</sup> /g
	F	フライアッシュ	2.31g/cm <sup>3</sup>	3880cm <sup>2</sup> /g
	B	高炉スラグ微粉末	2.91g/cm <sup>3</sup>	4310cm <sup>2</sup> /g
	N	普通ポルトランドセメント	3.16g/cm <sup>3</sup>	3250cm <sup>2</sup> /g
	—	無水石膏(CaSO <sub>4</sub> )	2.91g/cm <sup>3</sup>	3670cm <sup>2</sup> /g
—	二水石膏(CaSO <sub>4</sub> ・2H <sub>2</sub> O)	2.23g/cm <sup>3</sup>	—	
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67g/cm <sup>3</sup>	—
	S2	山砂	2.58g/cm <sup>3</sup>	—
混和剤	SP	高性能減水剤	—	—

表 2.1.7 調合表の一覧

NO	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									SP (B×%)
	SR (6400)	F	B	N	無水 石膏	二水 石膏	W	S1	S2	
1	360	120	120	—	—	—	240	714	585	1.30%
2	349	116	116	—	18	—	240	716	586	1.30%
3	338	113	113	—	36	—	240	716	586	1.30%
4	349	116	116	—	—	18	240	713	583	1.30%
5	338	113	113	—	—	36	240	710	581	1.30%
6	—	—	—	600	—	—	240	759	621	0.30%

## 2. 2 R-CF コンクリートの配(調)合方法の確立に関する研究

### 2. 2. 1 研究概要

- 1)達成目標：設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>以上、プレキャスト RC 部材製造が可能な施工性
- 2)達成目標の妥当性：開発技術の展開先は汎用コンクリート製品であり、同製品の一般的な強度レベルが 24N/mm<sup>2</sup>であること、および同製品の製造がプレキャストにて行われることから達成目標を設定した。
- 3)研究内容・手法

本検討では、モルタルおよびコンクリートを対象とした広範な練混ぜ実験により、水結合材比、フライアッシュ・高炉スラグ微粉末の混合率、養生条件を実験要因とし、フレッシュ性状(空気量、スランプ等、およびそれら経時変化)、硬化後の材料力学性能(圧縮強度、弾性係数、引張強度)を確認し、その結果として、圧縮強度と施工性の標記目標を達成可能とする材料・配(調)合を選定した。本研究では、モルタル練混ぜ実験による事前検討により材料・配(調)合を絞り込み、コンクリート練混ぜ実験により配(調)合方法の検討を行った。

### 2. 2. 2 モルタル練混ぜ実験による事前検討

R-CF コンクリートの材料・配(調)合の絞り込みを目的に、モルタル練混ぜ実験による事前検討を実施した。実験要因は、SR セメントの比表面積および混合率、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の混合率とし、表 2.2.1 に示す計 18 調合について実験を行った。調合の一覧を表 2.2.2 に示す。SR セメント以外の使用材料は、表 2.1.4 の材料を使用した。SR セメントは比表面積が A : 6400, B : 7200, C : 8580, D : 10740, E : 11640, F : 13290cm<sup>2</sup>/g の 6 種類とし、SR セメントの比表面積の影響を検討した。SR セメントと併用する副産物混和材は、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末とし、これらの構成割合の影響についても検討を行った。

本実験では 8L のモルタルミキサーを用いて練混ぜを行った。フレッシュ試験項目は、モルタルフロー(JIS R 5201)、空気量(JIS A 1171, JIS A 1128)、単位容積質量(JIS A 1171)、モルタル温度(JIS A 1156)の各試験を実施した。圧縮強度試験用供試体として、1 調合につき φ50×100mm の円柱供試体を 9 体作製し、標準養生に供し、材齢 3, 28, 91 日で圧縮強度試験(JIS A 1108)を行った

表 2.2.1 モルタル練混ぜ実験による事前検討概要

NO	記号	W/B	SRセメント 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	結合材の構成比(結合材×%)				試験項目	
				SR: SRセメント	F: フライ アッシュ	B: 高炉スラグ 微粉末	N: 普通 PC	フレッシュ 試験	圧縮強度 試験 φ50×100mm
1	30%-SR(7200)60-F40	30%	7200 (B)	B×60%	B×40%	—	—	○	○
2	30%-SR(7200)80-F20			B×80%	B×20%	—	—	○	○
3	40%-SR(6400)60-F40	40%	6400 (A)	B×60%	B×40%	—	—	○	○
4	40%-SR(6400)60-F20-B20			B×60%	B×20%	B×20%	—	○	○
5	40%-SR(6400)60-B40		B×60%	—	B×40%	—	○	○	
6	40%-SR(7200)60-F40		7200 (B)	B×60%	B×40%	—	—	○	○
7	40%-SR(7200)80-F20			B×80%	B×20%	—	—	○	○
8	40%-SR(8580)60-F40		8580 (C)	B×60%	B×40%	—	—	○	○
9	40%-SR(8580)60-B40			B×60%	—	B×40%	—	○	○
10	40%-SR(10740)60-F40		10740 (D)	B×60%	B×40%	—	—	○	○
11	40%-SR(10740)60-F20-B20			B×60%	B×20%	B×20%	—	○	○
12	40%-SR(10740)60-B40			B×60%	—	B×40%	—	○	○
13	40%-SR(11640)60-F40	11640(E)	B×60%	B×40%	—	—	○	○	
14	40%-SR(13290)60-F40		B×60%	B×40%	—	—	○	○	
15	40%-SR(13290)60-B40	13290 (F)	B×60%	—	B×40%	—	○	○	
16	40%-N100	40%	—	—	—	B×100%	○	○	
17	50%-N100	50%	—	—	—	B×100%	○	○	
18	60%-N100	60%	—	—	—	B×100%	○	○	

表 2.2.2 調合の一覧

NO	記号	SRセメント 比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )							SP ( $\text{B} \times \%$ )
			SR	F	B	N	W	S1	S2	
1	30%-SR(7200)60-F40	7200 (B)	510	340	-	-	255	532	436	1.45%
2	30%-SR(7200)80-F20		680	170	-	-	255	548	449	2.40%
3	40%-SR(6400)60-F40	6400 (A)	360	240	-	-	240	699	572	1.10%
4	40%-SR(6400)60-F20-B20		360	120	120	-	240	714	585	1.30%
5	40%-SR(6400)60-B40		360	-	240	-	240	730	598	1.45%
6	40%-SR(7200)60-F40	7200 (B)	360	240	-	-	240	694	568	1.20%
7	40%-SR(7200)80-F20		480	120	-	-	240	706	577	1.70%
8	40%-SR(8580)60-F40	8580 (C)	360	240	-	-	240	671	549	2.50%
9	40%-SR(8580)60-B40		360	-	240	-	240	703	575	3.00%
10	40%-SR(10740)60-F40	10740 (D)	360	240	-	-	240	678	555	3.50%
11	40%-SR(10740)60-F20-B20		360	120	120	-	240	694	568	3.70%
12	40%-SR(10740)60-B40		360	-	240	-	240	710	581	3.70%
13	40%-SR(11640)60-F40	11640(E)	360	240	-	-	240	662	542	6.00%
14	40%-SR(13290)60-F40	13290 (F)	360	240	-	-	240	634	518	8.50%
15	40%-SR(13290)60-B40		360	-	240	-	240	666	545	10.00%
16	40%-N100	-	-	-	-	600	240	759	621	0.30%
17	50%-N100	-	-	-	-	450	225	850	696	0.35%
18	60%-N100	-	-	-	-	375	225	884	723	0.30%

### 2. 2. 3 コンクリート練混ぜ実験による配(調)合方法の検討

上記のモルタル練混ぜ実験結果を受け、R-CF コンクリートの配(調)合方法を確立することを目的に、コンクリートを対象とした練混ぜ実験を行った。実験要因は、水結合材比(W/B)、SR セメント、フライアッシュおよび高炉スラグの混合率、無水石膏の添加率の4要因とし、表 2.2.3 に示す計 21 調合のコンクリートを練混ぜ、フレッシュ試験および強度特性試験を行った。

使用材料の一覧を表 2.2.4 に、調合の一覧を表 2.2.5 に示す。W/B は 45%および 35%の 2 水準とし、比較対象である普通モルタルについては 55%、45%および 35%の 3 水準とした。SR セメントの混合率は、 $\text{B} \times 40\%$ 、60%および 80%の 3 水準、フライアッシュは  $\text{B} \times 10\%$ 一定とした。高炉スラグ微粉末の混合率は、前記 2 材料に高炉スラグ微粉末を足して計  $\text{B} \times 100\%$ となる様に混合率を定めた。無水石膏の添加率は、 $\text{B} \times 4\%$ および 8%とし、結合材の内割とした。細骨材はモルタル練混ぜ実験で用いたものと同じものを使用し、粗骨材は石灰岩砕石を用いた。単位水量は  $170\text{kg}/\text{m}^3$ 一定とした。

本実験では、練り量を 40L とし、公称容量 60L の強制二軸ミキサーを用いて練混ぜを行った。練混ぜ時間は W/B55%および 45%では 150 秒、W/B35%では 180 秒とした。練混ぜ後、スランプ(JIS A 1101)、スランプフロー(JIS A 1150)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)を測定した。練混ぜ直後のスランプの目標値は、2cm のロスを見込んで 20cm とし、許容値は $\pm 2.5\text{cm}$ とした。また、練混ぜ直後の空気量の目標値は 4.5%とし、許容値は $\pm 1.5\%$ とした。

強度試験の一覧を表 2.2.6 に示す。1 調合につき、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の試験体を 18 本作製し、9 本は標準養生、9 本は 20°C封かん養生に供した。標準養生とした 9 本の内、6 本は材齢 28 日、91 日において圧縮強度試験(JIS A 1108)および静弾性係数試験(JIS A 1149)を行い、残りの 3 本は、材齢 28 日において割裂引張強度試験(JIS A 1113)を行った。20°C封かん養生とした 9 本は、材齢 2 日、28 日、91 日において、3 本ずつ圧縮強度試験(JIS A 1108)および静弾性係数試験(JIS A 1149)を行った。

表 2.2.3 コンクリート練混ぜ実験の概要

NO	配合	W/B	SR セメント 混合率	結合材					試験項目	
				SR(5890): 5890cm <sup>2</sup> /g	F: フライ	B: 高炉スラグ	N: 普通	無水 石膏	フレッシュ 試験	強度特性試験 φ100×200mm
1	45%-SR(5890)40-F10-B50	45%	B×40%	B×40%	B×10%	B×50%	-	-	○	○
2	35%-SR(5890)40-F10-B50	35%		B×40%	B×10%	B×50%	-	-	○	○
3	45%-SR(5890)40-F10-B50-4(無水)	45%		B×38.4%	B×9.6%	B×48%	-	B×4%	○	○
4	35%-SR(5890)40-F10-B50-4(無水)	35%		B×38.4%	B×9.6%	B×48%	-	B×4%	○	○
5	45%-SR(5890)40-F10-B50-8(無水)	45%		B×36.8%	B×9.2%	B×46%	-	B×8%	○	○
6	35%-SR(5890)40-F10-B50-8(無水)	35%		B×36.8%	B×9.2%	B×46%	-	B×8%	○	○
7	45%-SR(5890)60-F10-B30	45%	B×60%	B×60%	B×10%	B×30%	-	-	○	○
8	35%-SR(5890)60-F10-B30	35%		B×60%	B×10%	B×30%	-	-	○	○
9	45%-SR(5890)60-F10-B30-4(無水)	45%		B×57.6%	B×9.6%	B×28.8%	-	B×4%	○	○
10	35%-SR(5890)60-F10-B30-4(無水)	35%		B×57.6%	B×9.6%	B×28.8%	-	B×4%	○	○
11	45%-SR(5890)60-F10-B30-8(無水)	45%		B×55.2%	B×9.2%	B×27.6%	-	B×8%	○	○
12	35%-SR(5890)60-F10-B30-8(無水)	35%		B×55.2%	B×9.2%	B×27.6%	-	B×8%	○	○
13	45%-SR(5890)80-F10-B10	45%	B×80%	B×80%	B×10%	B×10%	-	-	○	○
14	35%-SR(5890)80-F10-B10	35%		B×80%	B×10%	B×10%	-	-	○	○
15	45%-SR(5890)80-F10-B10-4(無水)	45%		B×76.8%	B×9.6%	B×9.6%	-	B×4%	○	○
16	35%-SR(5890)80-F10-B10-4(無水)	35%		B×76.8%	B×9.6%	B×9.6%	-	B×4%	○	○
17	45%-SR(5890)80-F10-B10-8(無水)	45%		B×73.6%	B×9.2%	B×9.2%	-	B×8%	○	○
18	35%-SR(5890)80-F10-B10-8(無水)	35%		B×73.6%	B×9.2%	B×9.2%	-	B×8%	○	○
19	55%-N100	55%	-	-	-	B×100%	-	○	○	
20	45%-N100	45%	-	-	-	B×100%	-	○	○	
21	35%-N100	35%	-	-	-	B×100%	-	○	○	

表 2.2.4 使用材料の一覧

項目	記号	材料	密度	ブレン値
結合材	SR(5890)	SRセメント	2.76g/cm <sup>3</sup>	5890cm <sup>2</sup> /g
	F	フライアッシュ	2.30g/cm <sup>3</sup>	4170cm <sup>2</sup> /g
	B	高炉スラグ微粉末	2.90g/cm <sup>3</sup>	4310cm <sup>2</sup> /g
	N	普通ポルトランドセメント	3.16g/cm <sup>3</sup>	3250cm <sup>2</sup> /g
	-	無水石膏(CaSO <sub>4</sub> )	2.90g/cm <sup>3</sup>	4710cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67g/cm <sup>3</sup>	-
	S2	山砂	2.58g/cm <sup>3</sup>	-
粗骨材	G	石灰砕石2005	2.69g/cm <sup>3</sup>	-
混和剤	SP	高性能AE減水剤	-	-

表 2.2.5 調合の一覧

NO	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )										SP (B×%)
		SR (5890)	F	B	N	無水 石膏	W	S1	S2	G		
1	42.7%	151	38	189	-	-	170	549	183	1001	1.00%	
2	39.0%	194	49	243	-	-	170	473	158	1001	1.75%	
3	42.7%	145	36	181	-	15	170	551	184	1001	1.10%	
4	39.0%	187	47	233	-	19	170	473	158	1001	1.40%	
5	42.8%	139	35	174	-	30	170	553	184	1001	1.20%	
6	39.0%	179	45	223	-	39	170	473	158	1001	1.40%	
7	45%	227	38	113	-	-	170	547	182	1001	1.50%	
8	38.9%	291	49	146	-	-	170	471	157	1001	1.90%	
9	42.6%	218	36	109	-	15	170	547	182	1001	1.34%	
10	38.9%	280	47	140	-	19	170	471	157	1001	2.59%	
11	42.7%	209	35	104	-	30	170	549	183	1001	2.12%	
12	38.9%	268	45	134	-	39	170	471	157	1001	2.48%	
13	42.5%	302	38	38	-	-	170	545	182	1001	2.20%	
14	38.6%	389	49	49	-	-	170	465	155	1001	4.00%	
15	42.6%	290	36	36	-	15	170	547	182	1001	2.30%	
16	38.7%	373	47	47	-	19	170	467	156	1001	4.00%	
17	42.6%	278	35	35	-	30	170	547	182	1001	2.50%	
18	38.7%	357	45	45	-	39	170	467	156	1001	4.00%	
19	49.5%	-	-	-	309	-	170	492	402	933	0.70%	
20	47.8%	-	-	-	378	-	170	460	376	933	0.65%	
21	45.0%	-	-	-	486	-	170	411	336	933	0.70%	

表 2.2.6 強度試験の一覧

養生条件	強度特性	試験材齢	
		2日	28日
標準養生	圧縮強度	-	○
	ヤング係数	-	○
	割裂引張強度	-	○
20℃ 封かん養生	圧縮強度	○	○
	ヤング係数	○	○

## 2. 3 R-CF コンクリートの耐久性確保に関する研究

### 2. 3. 1 研究概要

1)達成目標：①高炉セメント B 種コンクリートに対して同等以上の中性化抵抗性

②コンクリートの収縮率が $-10 \times 10^{-4}$ 以下

③プレキャスト RC 部材ひび割れ制御方法の確立

2)達成目標の妥当性：汎用的なプレキャスト鉄筋コンクリート部材と同等の耐久性を確保する観点から、前記達成目標を設定した。

3)研究内容・手法

本研究では、R-CF コンクリートの耐久性確保を目指し、前記目標を達成すべく、①中性化促進試験に基づく中性化抵抗性予測方法の検討および長期暴露実験による耐久性確認、②収縮特性の把握および収縮低減方法の検討、③プレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験によるひび割れ抵抗性の検討を行った。

①では、コンクリートの耐久性を短期間で評価する試験として一般的な促進中性化試験(JIS A 1153)を行うことにより、材料と配(調)合の影響を把握すると共に、これらを考慮した中性化深さの予測に関する実験式を検討した。更には、供用環境条件での中性化抵抗性を把握するため、実大の壁部材および $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  円柱供試体を作製し、10年間に及ぶ長期暴露実験を開始した。②では、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の試験体を用いて、コンクリートの収縮率を評価する乾燥収縮試験(JIS A 1129)に準じた試験を行うことにより、R-CF コンクリートの収縮特性を把握すると共に、石膏添加などの経済的な収縮低減方法の効果を検討した。③では、プレキャスト部材への適用を念頭に、蒸気養生を行うプレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験を行った。プレキャスト部材の製造では、初期強度を早期に発現させるため、硬化初期に $60^\circ\text{C}$ 程度の蒸気養生を行うことが一般的であり、本実験においても同様の蒸気養生を実施した。また、試験体の拘束程度は、一般的なプレキャスト部材の中で、拘束が大きくひび割れが生じやすいと予想される梁部材を模擬し、R-CF コンクリートのプレキャスト部材における収縮ひび割れ抵抗性を検討した。

### 2. 3. 2 中性化促進試験に基づく中性化抵抗性予測方法の検討および長期暴露実験による耐久性確認

R-CF コンクリートの耐久性を実験的に明らかにすることを目的に、コンクリートの耐久性を短期間で評価する試験として一般的な促進中性化試験(JIS A 1153)を行うと共に、実大の壁部材および $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  円柱供試体を作製し、10年間に及ぶ長期暴露実験を開始した。

促進中性化試験および長期暴露試験の概要を表 2.3.1 に、使用材料の一覧を表 2.3.2 に、調合表の一覧を表 2.3.3 に示す。W/B は 55%、45%および 35%の 3 水準とし、SR セメントの混合率は、B $\times$ 40%、60%および 80%の 3 水準、フライアッシュは B $\times$ 10%一定とした。高炉スラグ微粉末の混合率は、前記 2 材料に高炉スラグ微粉末を足して計 B $\times$ 100%となる様に混合率を定めた。無水石膏の添加率は、B $\times$ 6%とした。SR セメントは比表面積は、 $4800 \text{cm}^2/\text{g}$  および  $7930 \text{cm}^2/\text{g}$  の 2 種類とし、SR セメントの比表面積の影響を検討した。また、強度増進や中性化抵抗性の向上を期待し、早強ポルトランドセメントを結合材質量に対し 10%混合した影響を NO18~NO20 で確認した。単位水量は  $170 \text{kg}/\text{m}^3$ 、粗骨材かさ容積は  $0.56 \text{m}^3/\text{m}^3$ 、空気量は 4.5%、スランプは 18cm として調合を設定した。

全水準を対象に、圧縮強度試験用供試体として、1水準につきφ100×200mmの円柱供試体を6体作製した。打設直後から20℃封かん養生とし、材齢3日で脱型後、標準養生とした。材齢28、91日で圧縮強度試験（JIS A 1108）を行った。

促進中性化試験の作業手順を図2.3.1に示す。全水準を対象に、1水準につき100×100×400mmの促進中性化試験体を2体作製した。促進中性化試験は、JIS A1153コンクリートの促進中性化試験方法に準拠した。材齢3日で脱型し、材齢28日まで標準養生、材齢56日まで20℃RH60%気乾養生、材齢56日から20℃RH60%、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度5%の促進養生とした。促進材齢2W、8W、26Wにおいて、中性化深さを測定した。

長期暴露中性化試験体を図2.3.2に示す。表2.3.1に示す13水準を対象に、長期暴露中性化試験体として、1調合につきφ100×200mmの円柱供試体を8体作製した。試料は2層詰め、打設直後から材齢7日まで20℃封かん養生とし、材齢7日以降は4本を屋内暴露、4本を屋外暴露とした。それぞれの暴露条件で、材齢1、2、5、10、X年において中性化試験を行うこととした。

長期暴露実大壁試験体を図2.3.3に示す。表2.3.1に示す3水準を対象に、梁付きの壁を模擬した1500×1430mmの模擬試験体を作製して、屋外暴露試験を行った。壁部の鉄筋はD10@200mm(ダブル)とした。梁部は、主筋をD32-8本、せん断補強筋をD10@150mmとした。養生条件は、打設直後から蒸気養生、材齢10日まで湿潤養生とし、その後屋外暴露を開始した。

表 2.3.1 促進中性化試験および長期暴露試験の概要

NO	記号	水 結合材 比 (%)	結合材の構成比 (結合材×%)							試験項目			
			SR (4800)	SR (7930)	F	B	N	H	SO <sub>3</sub>	強度試験 φ100× 200mm	促進中性化 試験 φ100× 200mm	長期暴露試験	
												中性化 試験 φ100 ×200mm	実大 壁部材
1	55%-N	55	-	-	-	-	100	-	-	○	○	○	-
2	45%-N	45	-	-	-	-	100	-	-	○	○	○	-
3	55%-BB	55	-	-	-	42	58	-	-	○	○	○	-
4	45%-BB	45	-	-	-	42	58	-	-	○	○	○	○
5	55%-SR(4800)60-F10-B30	55	60	-	10	30	-	-	-	○	○	○	-
6	45%-SR(4800)60-F10-B30	45	60	-	10	30	-	-	-	○	○	○	○
7	35%-SR(4800)60-F10-B30	35	60	-	10	30	-	-	-	○	○	○	-
8	45%-SR(4800)60-F10-B30+6	45	56.4	-	9.4	28.2	-	-	6.0	○	○	○	-
9	45%-SR(4800)40-F10-B50	45	40	-	10	50	-	-	-	○	○	○	-
10	35%-SR(4800)40-F10-B50	35	40	-	10	50	-	-	-	○	○	-	-
11	45%-SR(4800)40-F10-B50+6	45	37.6	-	9.4	47.0	-	-	6.0	○	○	-	-
12	45%-SR(4800)80-F10-B10	45	80	-	10	10	-	-	-	○	○	○	-
13	35%-SR(4800)80-F10-B10	35	80	-	10	10	-	-	-	○	○	-	-
14	45%-SR(4800)80-F10-B10+6	45	75.2	-	9.4	9.4	-	-	6.0	○	○	-	-
15	45%-SR(7930)60-F10-B30	45	-	60	10	30	-	-	-	○	○	○	-
16	35%-SR(7930)60-F10-B30	35	-	60	10	30	-	-	-	○	○	-	-
17	45%-SR(7930)60-F10-B30+6	45	-	56.4	9.4	28.2	-	-	6.0	○	○	-	-
18	45%-SR(4800)50-B40-H10	45	50	-	-	40	-	10	-	○	○	○	○
19	35%-SR(4800)50-B40-H10	35	50	-	-	40	-	10	-	○	○	○	-
20	45%-SR(4800)50-B40-H10+6	45	47.0	-	-	37.6	-	9.4	6.0	○	○	-	-

表 2.3.2 使用材料の一覧

記号	材料	密度	ブレン
SR (4800)	SRセメント	3.05g/cm <sup>3</sup>	4800 cm <sup>2</sup> /g
SR (7930)		2.63g/cm <sup>3</sup>	7930 cm <sup>2</sup> /g
F	フライアッシュ	2.28g/cm <sup>3</sup>	4420 cm <sup>2</sup> /g
B	高炉スラグ微粉末	2.90g/cm <sup>3</sup>	4450 cm <sup>2</sup> /g
SO <sub>3</sub>	無水石膏 (CaSO <sub>4</sub> )	2.90g/cm <sup>3</sup>	4150 cm <sup>2</sup> /g
N	普通ポルトランドセメント	3.16g/cm <sup>3</sup>	3250 cm <sup>2</sup> /g
H	早強ポルトランドセメント	3.14g/cm <sup>3</sup>	4450 cm <sup>2</sup> /g
S1	石灰砕砂	2.67g/cm <sup>3</sup>	-
S2	山砂	2.58g/cm <sup>3</sup>	-
G	石灰碎石	2.69g/cm <sup>3</sup>	-
SP	高性能AE減水剤	-	-

表 2.3.3 調合の一覧

NO	s/a	単分量 (kg/m <sup>3</sup> )											SP (B×%)
		SR (4800)	SR (7930)	F	B	N	H	SO <sub>3</sub>	W	S1	S2	G	
1	42.7%	-	-	-	-	309	-	-	170	492	402	933	0.70%
2	39.0%	-	-	-	-	378	-	-	170	460	376	933	0.55%
3	42.7%	-	-	-	130	179	-	-	170	486	398	933	0.55%
4	39.0%	-	-	-	159	219	-	-	170	454	372	933	0.55%
5	42.8%	185	-	31	93	-	-	-	170	479	392	933	0.80%
6	39.0%	227	-	38	113	-	-	-	170	446	365	933	0.80%
7	45%	291	-	49	146	-	-	-	170	393	322	933	1.00%
8	38.9%	213	-	36	107	-	-	23	170	444	363	933	0.75%
9	42.6%	151	-	38	189	-	-	-	170	444	363	933	0.70%
10	38.9%	194	-	49	243	-	-	-	170	389	318	933	0.95%
11	42.7%	142	-	36	178	-	-	23	170	443	362	933	0.60%
12	38.9%	302	-	38	38	-	-	-	170	447	366	933	0.90%
13	42.5%	389	-	49	49	-	-	-	170	395	323	933	1.20%
14	38.6%	284	-	36	36	-	-	23	170	447	366	933	0.90%
15	42.6%	-	227	38	113	-	-	-	170	428	350	933	1.50%
16	38.7%	-	291	49	146	-	-	-	170	370	303	933	2.90%
17	42.6%	-	213	36	107	-	-	23	170	428	350	933	2.00%
18	38.7%	189	-	-	151	-	38	-	170	451	369	933	0.70%
19	49.5%	243	-	-	194	-	49	-	170	398	325	933	0.95%
20	47.8%	178	-	-	142	-	36	23	170	451	369	933	0.70%

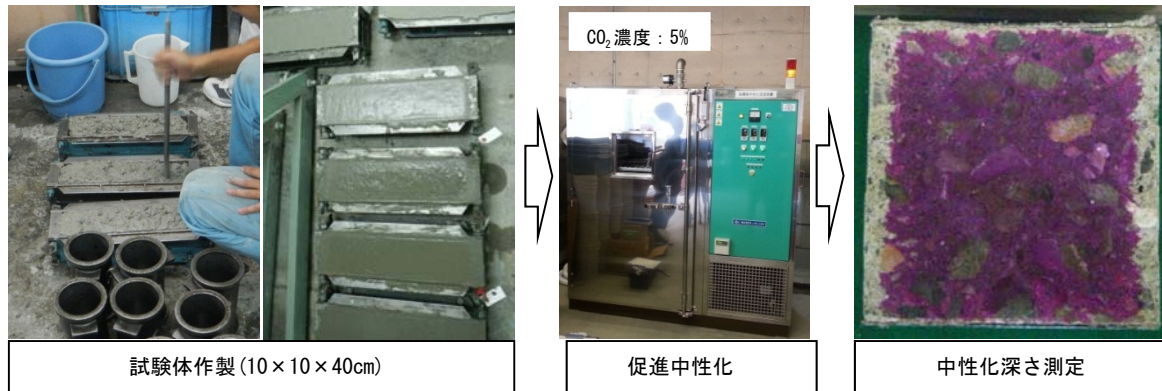


図 2.3.1 促進中性化試験の作業手順

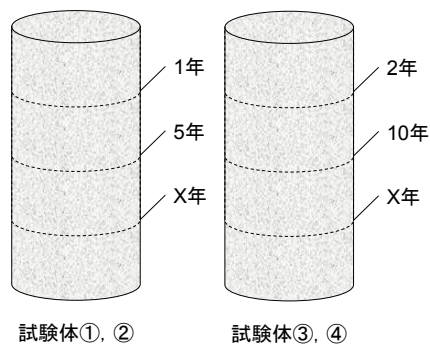


図 2.3.2 長期暴露中性化試験体



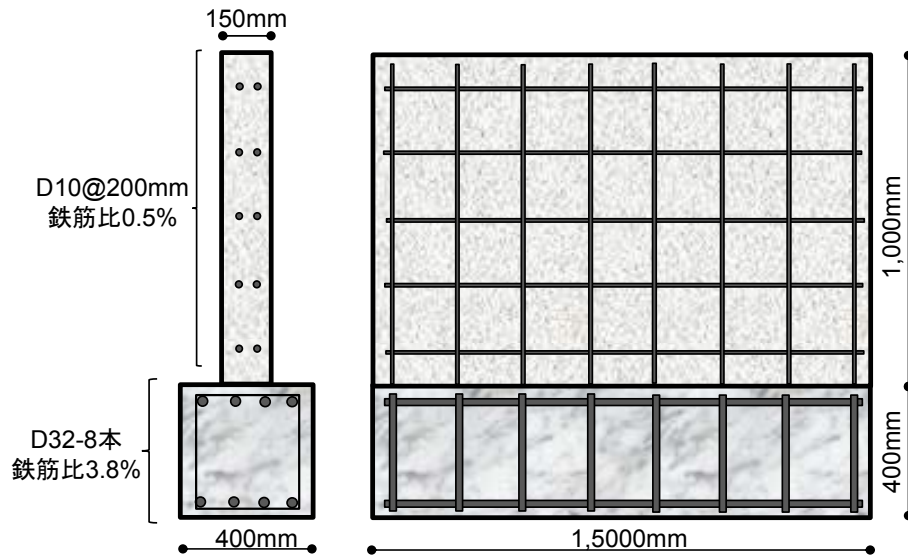


図 2.3.3 長期暴露実大壁試験体

### 2. 3. 3 収縮特性の把握および収縮低減方法の検討

R-CF コンクリートの収縮特性を把握すると共に、経済的な収縮低減方法の効果を検討することを目的に、図 2.3.4 に示す 100×100×400mm の試験体を用いて、コンクリートの収縮率を評価する乾燥収縮試験(JIS A 1129)に準じた自由収縮試験を行った。

実験水準の一覧を表 2.3.4 に、調査表の一覧を表 2.3.5 に示す。使用材料は、表 2.3.2 に示す材料を使用した。SR セメントは比表面積 4800cm<sup>2</sup>/g および 7930cm<sup>2</sup>/g の 2 種類とし、SR セメントの混合率は、B×40%、60%および 80%の 3 水準、フライアッシュは B×10%一定とした。高炉スラグ微粉末の混合率は、前記 2 材料に高炉スラグ微粉末を足して計 B×100%となる様に混合率を定めた。無水石膏の添加率は、B×6%とした。また、強度増進や中性化抵抗性の向上を期待し、早強ポルトランドセメントを結合材質量に対し 10%混合した影響を NO10 で確認した。W/B は 45%、単位水量は 170kg/m<sup>3</sup>、粗骨材かさ容積は 0.56m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>、空気量は 4.5%として調合を設定した

全水準を対象に、圧縮強度試験用供試体として、1 水準につき φ100×200mm の円柱供試体を 6 体作製した。打設直後から 20℃封かん養生とし、材齢 3 日で脱型後、標準養生とした。材齢 28、91 日で圧縮強度試験 (JIS A 1108) を行った。

全水準について、20℃の環境温度における自由収縮試験を行った。1 水準につき、図 2.3.4 に示す 100×100×400mm の自由収縮試験体を 2 体作製し、材齢 7 日まで 20℃封かん養生、材齢 7 日以降は 20℃RH60% の気乾養生に供した。打設前からひずみの計測を行い、乾燥材齢 182 日まで計測を行った。自由ひずみの原点は、凝結時間試験より得られた始発時間とした。試験体の底面は型枠との付着を除去するため、厚さ 1mm のテフロンシートを敷き、その上に厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを敷くこととした。長手方向の側面および上面は、厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムのみとした。試験体の端部は、コンクリートの膨張収縮挙動に対する拘束を無くすため、厚さ 3mm のポリスチレンボードの上に、厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを施すものとした。

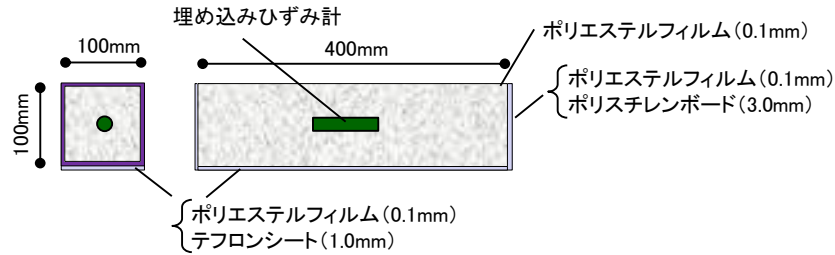


図 2.3.4 自由収縮試験体

表 2.3.4 実験水準の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	結合材の構成比 (結合材×%)							
			SR (4800)	SR (7930)	F	B	N	H	SO <sub>3</sub>	
1	45%-N	45	-	-	-	-	100	-	-	-
2	45%-SR(4800)60-F10-B30	45	60	-	10	30	-	-	-	-
3	45%-SR(4800)60-F10-B30+6	45	56.4	-	9.4	28.2	-	-	-	6
4	45%-SR(4800)40-F10-B50	45	40	-	10	50	-	-	-	-
5	45%-SR(4800)40-F10-B50+6	45	37.6	-	9.4	47.0	-	-	-	6
6	45%-SR(4800)80-F10-B10	45	80	-	10	10	-	-	-	-
7	45%-SR(4800)80-F10-B10+6	45	75.2	-	9.4	9.4	-	-	-	6
8	45%-SR(7930)60-F10-B30	45	-	60	10	30	-	-	-	-
9	45%-SR(7930)60-F10-B30+6	45	-	56.4	9.4	28.2	-	-	-	6
10	45%-SR(4800)50-B40-H10+6	45	47.0	-	-	37.6	-	9.4	-	6

表 2.3.5 調合表の一覧

NO	記号	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )											SP (B×%)	
			SR (4800)	SR (7930)	F	B	N	H	SO <sub>3</sub>	W	S1	S2	G		
1	45%-N	47.8%	-	-	-	-	378	-	-	-	170	460	376	933	0.50%
2	45%-SR(4800)60-F10-B30	47.0%	227	-	38	113	-	-	-	170	446	365	933	0.70%	
3	45%-SR(4800)60-F10-B30+6	46.9%	213	-	36	107	-	-	23	170	444	363	933	0.70%	
4	45%-SR(4800)40-F10-B50	46.9%	151	-	38	189	-	-	-	170	444	363	933	0.65%	
5	45%-SR(4800)40-F10-B50+6	46.9%	142	-	36	178	-	-	23	170	443	362	933	0.60%	
6	45%-SR(4800)80-F10-B10	47.1%	302	-	38	38	-	-	-	170	447	366	933	0.90%	
7	45%-SR(4800)80-F10-B10+6	47%	284	-	36	36	-	-	23	170	447	366	933	0.80%	
8	45%-SR(7930)60-F10-B30	46.0%	-	227	38	113	-	-	-	170	428	350	933	2.00%	
9	45%-SR(7930)60-F10-B30+6	46.0%	-	213	36	107	-	-	23	170	428	350	933	2.00%	
10	45%-SR(4800)50-B40-H10+6	47.3%	178	-	-	142	-	36	23	170	451	369	933	0.60%	

### 2. 3. 4 プレキャスト RC 部材ひび割れ制御方法の確立

R-CF コンクリートのプレキャスト部材における収縮ひび割れ抵抗性を検討することを目的に、図 2.3.5 の示すプレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験を行った。

実験概要を表 2.3.6 に、調合表の一覧を表 2.3.7 に示す。使用材料は、表 2.3.2 に示す材料を使用した。本実験では、実験要因をコンクリート種類として、代表的な配合の R-CF コンクリートと普通コンクリートの 2 種類のコンクリートについて実験を行った。R-CF コンクリートは、比表面積 4800cm<sup>2</sup>/g の SR セメントを用い、SR セメントの混合率は B×60%とした。フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の混合率は、それぞれ B×10% および B×30%とした。表 2.3.7 の 2 水準について、初期蒸気養生、材齢 7 日まで 20℃封かん養生、材齢 7 日以降 20℃RH60%気乾養生の条件で、拘束ひび割れ実験を行った。

プレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ試験体として、図 2.3.5 の示す 100×100×750mm の拘束ひび割れ試験体を 1 調合につき 2 体作製した。試験体は JCI 拘束ひび割れ試験体を参考に 100×100×750mm とし、定着区間は 250mm とした。本実験はプレキャスト部材で比較的内部鉄筋量の多い梁部材を想定して鉄筋比を 3.8% とし、拘束体である鉄筋は丸鋼  $\phi 22$  を使用した。鉄筋は、定着部の付着を高めるため、M22 相当のネジきりに加工した。本実験では、プレキャスト部材の製造工程を想定し、硬化初期に蒸気養生を行うことを前提とした。蒸気養生は、打設から 2 時間～6 時間を目途に蒸気養生を開始することとし、20°C/h の勾配で昇温、65°C で 2.5 時間保持した後に、1 日程度かけて緩やかな勾配で降温した。温度降下後は、材齢 7 日まで 20°C 封かん養生、材齢 7 日以降は 20°C RH60% の気乾養生とした。

試験体の底面は型枠との付着を除去するため、厚さ 1mm のテフロンシートを敷き、その上に厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを敷くこととした。長手方向の側面および上面は、厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムのみとした。試験体の端部は、コンクリートの膨張収縮挙動に対する拘束を無くすため、厚さ 3mm のポリスチレンボードの上に、厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを施すものとした。

鋼材に貼付けるひずみゲージは、試験区間の中央に対称に 2 枚貼り付けた。気乾養生時は、2 面乾燥とするため、試験体の底面および打設面はアルミテープを貼付し封かん養生とした。ひずみ計測はコンクリート打設前から開始した。コンクリート打設後、直ちにコンクリート打設面上にポリエステルフィルムを載せ、乾燥を防ぐため、更に濡れウエスを被せた。

拘束ひび割れ試験に合わせて、蒸気養生条件における自由収縮試験を行った。1 調合につき、図 2.3.4 に示す 100×100×400mm の自由収縮試験体を 2 体作製し、蒸気養生後は拘束ひび割れ試験と同一の養生条件とした。打設前からひずみの計測を行い、乾燥材齢 182 日まで計測を行った。自由ひずみの原点は、凝結時間試験より得られた始発時間とした。試験体の底面は型枠との付着を除去するため、厚さ 1mm のテフロンシートを敷き、その上に厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを敷くこととした。長手方向の側面および上面は、厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムのみとした。試験体の端部は、コンクリートの膨張収縮挙動に対する拘束を無くすため、厚さ 3mm のポリスチレンボードの上に、厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを施すものとした。

拘束ひび割れ試験に合わせて、蒸気養生条件における圧縮強度試験(JIS A 1108)、静弾性係数試験(JIS A 1149) および割裂引張強度試験(JIS A 1113)を行った。1 調合につき、 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱試験体を 21 体作製し、蒸気養生後は材齢 7 日まで 20°C 封かん養生、材齢 7 日以降は 20°C、RH60% の気乾養生に供した。12 体は材齢 3, 7, 28, 91 日にて、3 体ずつ圧縮強度・静弾性係数試験に、残り 9 体は、材齢 7, 28, 91 日にて、3 体ずつ割裂引張強度試験に供した。

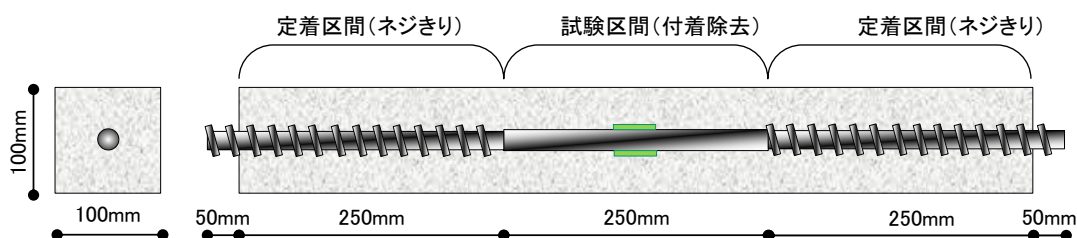


図 2.3.5 拘束ひび割れ試験体

表 2.3.6 拘束ひび割れ実験の実験概要

NO	記号	水結合材比 (%)	結合材の構成比 (結合材 × %)				試験項目(蒸気養生)		
			SR(4800)	F	B	N	拘束ひび割れ試験 100 × 100 × 750mm	自由収縮試験 100 × 100 × 200mm	強度試験 φ 100 × 200mm
1	45%-N	45	-	-	-	100	○	○	○
2	45%-SR(4800)60-F10-B30	45	60	10	30	-	○	○	○

表 2.3.7 調合表の一覧

NO	記号	s/a	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )								SP (B × %)
			SR (4800)	F	B	N	W	S1	S2	G	
1	45%-N	47.8%	-	-	-	378	170	460	376	933	0.50%
2	45%-SR(4800)60-F10-B30	47.0%	227	38	113	-	170	446	365	933	0.70%

## 2. 4 R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法確立に関する研究

### 2. 4. 1 研究概要

1)達成目標：R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の耐久性・構造性能の確保と製造方法確立

- ①一般プレキャスト工場で製造が可能
- ②計画供用期間 65 年を満足する耐久性
- ③一般 RC 部材と同等の曲げ構造性能

2)達成目標の妥当性：一般的なプレキャスト RC 部材と同等の耐久性・構造性能を確保する観点から、前記達成目標を設定した。

3)研究内容・手法

本研究では、R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法確立を目指し、前記目標を達成すべく、①プレキャスト工場での製造検討、②鉄筋腐食抵抗性の検討、③曲げ構造性能の検討を行った。

①では、実際のプレキャスト工場にて、室内試験による混和剤検討実験および調合検討実験、実大規模の部材製作実験を実施し、R-CF コンクリートの施工性、脱型時強度、コア強度の検討を行った。本検討により、一般プレキャスト工場において、R-CF コンクリートによるプレキャスト部材の製造が可能であることを確認した。②では、電気化学に基づく鉄筋腐食メカニズムを仮定し、模擬 RC 試験体の自然電位、分極抵抗を測定することで、R-CF コンクリートの腐食抵抗性の評価を普通 PC コンクリートと比較した。③では、前記部材製作実験と併せて実大の板状試験体を製作し構造実験を行った。実験では、床スラブ等の曲げ部材を想定して曲げ荷重を行い、その結果から R-CF コンクリートによる RC 部材の曲げ耐力や剛性が、普通 PC コンクリートによる RC 部材と同等であり、既存式で設計可能であることを確認した。

### 2. 4. 2 プレキャスト工場での製造検討

R-CF コンクリートの製造方法確立を目指し、実際のプレキャスト工場にて、室内試験による混和剤検討実験および調合検討実験、実大規模の部材製作実験を実施した。

室内試験による混和剤検討実験では、スランプ保持性および脱型時強度に大きな影響を及ぼす混和剤の検討実験を行い、R-CF コンクリートに適した混和剤を選定した。混和剤検討実験の調合表の一覧を表 2.4.1 に、混和剤検討実験の使用材料一覧を表 2.4.2 に示す。実験要因を混和剤種類として、表 2.4.2 の 3 種類の混和剤を検討した。混和剤 A は実機試験を予定しているプレキャスト工場で使用している高性能減水剤、混和剤 B はレディーミクストコンクリートで汎用的に用いられる高性能 AE 減水剤、混和剤 C は低粘性型の高性能 AE 減水剤の計 3 水準とした。SR セメントは比表面積  $6550\text{cm}^2/\text{g}$  とし、SR セメントの混合率は B $\times$ 50%、高炉スラグ微粉末は B $\times$ 40%、普通 PC は B $\times$ 10%とした。その他の材料は、実機試験を予定しているプレキャスト工場で使用している材料を使用し、調合は同工場の保有している調合を基に、W/B を 45%、単位水量を  $165\text{kg}/\text{m}^3$ 、細骨材材率を 44.0%、空気量を 4.5%として調合を設定した。

フレッシュ試験項目は、一般的なコンクリートのフレッシュ試験項目とし、スランプ(JIS A 1101)、スランプフロー(JIS A 1150)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)、凝結時間試験 (JIS A 1147) の各試験を実施した。フレッシュ試験は、コンクリート練上り直後および練上りから 30 分後の 2 回実施した。また、フレッシュ試験の目標値は、45%-N ではスランプ 10±2.5cm、空気量 4.5±1.5%とし、45%-SR(6550)50- B40-N10 ではロスを考慮してスランプ 15±2.5cm、空気量 4.5±1.5%とした。

圧縮強度試験用供試体として、1 調合につき φ100×200mm の円柱供試体を 15 体作製した。試料は 2 層詰め、打設直後から 20℃封かん養生とした。12 体は打設から 3 時間の時点で 40℃の蒸気養生槽内に移動し、打設から 4 時間の時点で 60℃の蒸気養生槽内に移動し静置した。打設から 16 時間の時点で 40℃の蒸気養生槽内に移動し、打設から 17 時間の時点で 20℃の恒温槽に静置した。材齢 18h、7 日、14 日、28 日の時点で圧縮強度試験に供した。また、残りの 3 体の圧縮強度試験体は材齢 3 日より標準養生とし、材齢 28 日の時点で圧縮強度試験に供した。図 2.4.1 に蒸気養生の温度条件を示す。

表 2.4.1 混和剤検討実験の調合表の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	混和剤種類	結合材の構成比 (結合材×%)			s/a	単位数 (kg/m <sup>3</sup> )						SP (B×%)
				SR (6550)	B	N		SR (6550)	B	N	W	S	G	
1	45%-N(A)	45	混和剤A	-	-	100	44.0%	-	-	367	165	778	995	0.70%
2	45%-SR(6550)50-B40-N10(A)	45	混和剤A	50	40	10	44.0%	183	147	37	165	765	977	1.70%
3	45%-SR(6550)50-B40-N10(B)		混和剤B											1.75%
4	45%-SR(6550)50-B40-N10(C)		混和剤C											1.60%

表 2.4.2 混和剤検討実験の使用材料の一覧

項目	記号	材料	密度	ブレン値
結合材	SR(6550)	SRセメント	2.77g/cm <sup>3</sup>	6550cm <sup>2</sup> /g
	B	高炉スラグ微粉末	2.90g/cm <sup>3</sup>	4310cm <sup>2</sup> /g
	N	普通ポルトランドセメント	3.15g/cm <sup>3</sup>	3250cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	石灰砕砂	2.63g/cm <sup>3</sup>	-
粗骨材	G	石灰砕石	2.64g/cm <sup>3</sup>	-
混和剤	SP(A)	プレキャスト工場用高性能減水剤	-	-
	SP(B)	レミコン工場用高性能AE減水剤	-	-
	SP(C)	低粘性型高性能AE減水剤	-	-

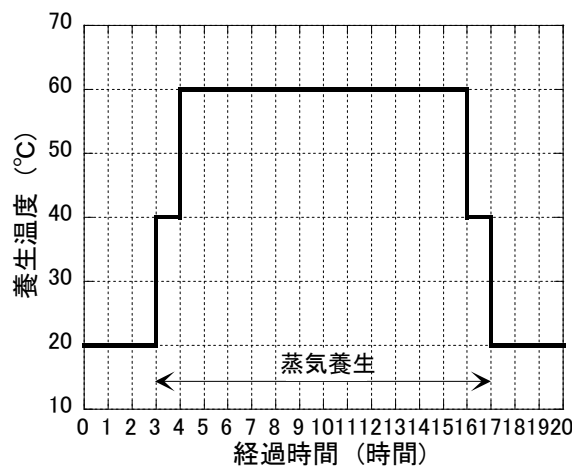


図 2.4.1 蒸気養生条件

混和剤検討実験で選定した混和剤を用いて、室内試験による調合検討実験を実施した。調合検討実験の水準の一覧を表 2.4.3 に、調合検討実験の調合表の一覧を表 2.4.4 に、調合検討実験の使用材料の一覧を表 2.4.5 に示す。W/B は 45% および 35% の 2 水準とし、SR セメントの混合率は B×60%、フライアッシュの混合率は B×10%、高炉スラグ微粉末の混合率は B×40% とした。無水石膏の添加率は、B×6% とした。SR セメントの比表面積は、6550cm<sup>2</sup>/g および 8580cm<sup>2</sup>/g の 2 種類とし、SR セメントの比表面積の影響を検討した。また、強度増進や中性化抵抗性の向上を期待し、普通 PC を結合材質量に対し 10% 混合した影響を NO6~NO8 で確認することとし、表 2.4.3 に示す計 8 調合のコンクリートを対象に実験を実施した。単位水量を 165kg/m<sup>3</sup>、空気量を 4.5% として調合を設定した。

フレッシュ試験項目は、一般的なコンクリートのフレッシュ試験項目とし、スランプ(JIS A 1101)、スランプフロー(JIS A 1150)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)、凝結時間試験 (JIS A 1147) の各試験を実施した。また、フレッシュ試験の目標値は、普通コンクリートではスランプ 10±2.5cm、空気量 4.5±1.5% とし、R-CF コンクリートではロスを考慮してスランプ 15±2.5cm、空気量 4.5±1.5% とした。

圧縮強度試験用供試体として、1 調合につき φ100×200mm の円柱供試体を 21 体作製した。試料は 2 層詰め、打設直後から 20℃ 封かん養生とした。18 体は、図 2.4.1 の蒸気養生を実施し、材齢 18h、3 日、7 日、14 日、28 日、91 日の時点で圧縮強度試験に供した。また、残りの 3 体の圧縮強度試験体は材齢 3 日の時点で標準養生とし、材齢 28 日の時点で圧縮強度試験に供した。

表 2.4.3 調合検討実験の水準の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	結合材の構成比 (結合材 × %)					
			SR (6550)	SR (8580)	F	B	N	SO <sub>3</sub>
1	45%-N	45	-	-	-	-	100	-
2	35%-N	35	-	-	-	-	100	-
3	45%-SR(6550)60-F10-B30	45	60	-	10	30	-	-
4	35%-SR(6550)60-F10-B30	35	60	-	10	30	-	-
5	45%-SR(6550)60-F10-B30+6	45	56.4	-	9.4	28.2	-	6
6	45%-SR(6550)60-B40-N10	45	50	-	-	40	-	-
7	35%-SR(6550)60-B40-N10	35	50	-	-	40	-	-
8	45%-SR(8580)60-B40-N10	45	-	50	-	40	-	-

表 2.4.4 調合検討実験の調合表の一覧

NO	記号	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									SP(A) (B × %)	SP(B) (B × %)
			SR (6550)	SR (8580)	F	B	N	SO <sub>3</sub>	W	S	G		
1	45%-N	44.0%	-	-	-	-	367	-	165	778	995	0.70%	-
2	35%-N	42.0%	-	-	-	-	471	-	165	707	979	0.75%	-
3	45%-SR(6550)60-F10-B30	44.0%	220	-	37	110	-	-	165	760	972	-	1.95%
4	35%-SR(6550)60-F10-B30	42.0%	283	-	47	141	-	-	165	684	945	-	2.35%
5	45%-SR(6550)60-F10-B30+6	44.0%	207	-	34	103	-	22	165	760	969	-	1.85%
6	45%-SR(6550)60-B40-N10	44.0%	183	-	-	147	37	-	165	765	977	-	1.75%
7	35%-SR(6550)60-B40-N10	42.0%	236	-	-	189	47	-	165	692	958	-	1.95%
8	45%-SR(8580)60-B40-N10	44.0%	-	183	-	147	37	-	165	757	969	-	3.00%

表 2.4.5 調合検討実験の使用材料の一覧

項目	記号	材料	密度	ブレン値
結合材	SR(6550)	SRセメント	2.77g/cm <sup>3</sup>	6550cm <sup>2</sup> /g
	SR(8580)		2.53g/cm <sup>3</sup>	8580cm <sup>2</sup> /g
	F	フライアッシュ	2.28g/cm <sup>3</sup>	4170cm <sup>2</sup> /g
	B	高炉スラグ微粉末	2.90g/cm <sup>3</sup>	4310cm <sup>2</sup> /g
	N	普通ポルトランドセメント	3.15g/cm <sup>3</sup>	3250cm <sup>2</sup> /g
	SO <sub>3</sub>	無水石膏(CaSO <sub>4</sub> )	2.90g/cm <sup>3</sup>	4150cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	石灰砕砂	2.63g/cm <sup>3</sup>	-
粗骨材	G	石灰碎石	2.64g/cm <sup>3</sup>	-
混和剤	SP(A)	高性能減水剤 (NIに使用)	-	-
	SP(B)	高性能AE減水剤 (R-CFに使用)	-	-

室内試験による調合検討実験の結果を踏まえ、実際のプレキャスト工場にて、実大規模の部材製作実験を実施した。実機製造実験の実験概要を表 2.4.6 に、実機製造実験の調合表の一覧を表 2.4.7 に、実機製造実験の使用材料の一覧を表 2.4.8 に示す。W/B は 55%、45%および 35%の 3 水準とし、SR セメントの混合率は B×60%、フライアッシュの混合率は B×10%、高炉スラグ微粉末の混合率は B×30%、SR セメントの比表面積は 7630cm<sup>2</sup>/g のとした。また、強度増進や中性化抵抗性の向上を期待し、普通 PC を結合材質量に対し 10%混合した影響を NO6~NO7 で確認することとし、表 2.4.6 に示す計 7 調合のコンクリートを対象に実験を実施した。単位水量を 165kg/m<sup>3</sup>、空気量を 4.5%として調合を設定した。

実機製造実験の練り量は 1.0~0.5m<sup>3</sup>とし、実際のプレキャスト工場のみキサにて、1 調合につき 1 バッチずつ練混ぜを行った。フレッシュの経時変化試験は、経過時間 0, 30 にて、スランプ(JIS A 1101)、スランプフロー(JIS A 1150)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)の各試験を行った。フレッシュ試験の目標値は、普通コンクリートではスランプ 10±2.5cm、空気量 4.5±1.5%とし、R-CF コンクリートではロスを考慮してスランプ 15±2.5cm、空気量 4.5±1.5%とした。強度試験用の供試体として、1 水準につき φ100×200mm の円柱供試体を 6 本作製した。試験体は材齢 3 日の時点で標準養生とし、材齢 28 日、91 日で圧縮強度試験を行った。全水準にて、図 2.4.2 に示す面部材用の模擬試験体 70×70×22cm の試験体を 1 体ずつ作製し、蒸気養生後、現場封かん養生とした。材齢 28 日、91 日にて図 2.4.2 の位置でコア抜きを行い、コア強度試験を行った。NO2, 4, 6 の 3 水準にて、図 2.4.3 に示す梁部材用の模擬試験体 70×70×70cm の試験体を 1 体ずつ作製し、蒸気養生後、現場封かん養生とした。材齢 28 日、91 日にて図 2.4.3 の位置でコア抜きを行い、コア強度試験を行った。蒸気養生は、打設から 3h 時間の時点で外気温+20℃まで上昇させ、打設から 4h の時点で 65℃まで上昇させ、その後は蒸気を出さず翌日まで養生槽の中で静置した。

表 2.4.6 実機製造実験の実験概要

NO	記号	水結合材比 (%)	結合材の構成比 (結合材 × %)				試験項目		
			SR (7630)	F	B	N	強度試験 φ100×200mm	コア強度試験	
								面部材用 模擬試験体 70×70×22cm	梁部材用 模擬試験体 70×70×70cm
1	55%-N	55	-	-	-	100	○	○	-
2	45%-N	45	-	-	-	100	○	○	○
3	35%-N	35	-	-	-	100	○	○	-
4	45%-SR(7630)60-F10-B30	45	60	10	30	-	○	○	○
5	35%-SR(7630)60-F10-B30	35	60	10	30	-	○	○	-
6	45%-SR(7630)50-B40-N10	45	50	-	40	10	○	○	○
7	35%-SR(7630)50-B40-N10	35	50	-	40	10	○	○	-



表 2.4.7 実機製造実験の調合表の一覧

NO	記号	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							SP(A) (B×%)	SP(B) (B×%)
			SR (7630)	F	B	N	W	S	G		
1	55%-N	44.0%	-	-	-	300	165	799	1031	0.60%	-
2	45%-N	44.0%	-	-	-	367	165	773	999	0.70%	-
3	35%-N	42.0%	-	-	-	471	165	702	983	0.75%	-
4	45%-SR(7630)60-F10-B30	44.0%	220	37	110	-	165	752	970	-	2.60%
5	35%-SR(7630)60-F10-B30	42.0%	283	47	141	-	165	673	946	-	3.00%
6	45%-SR(7630)50-B40-N10	44.0%	183	-	147	37	165	757	978	-	2.40%
7	35%-SR(7630)50-B40-N10	42.0%	236	-	189	47	165	681	957	-	2.60%

表 2.4.8 実機製造実験の使用材料の一覧

項目	記号	材料	密度	ブレン値
結合材	SR(7630)	SRセメント	2.61g/cm <sup>3</sup>	7630cm <sup>2</sup> /g
	F	フライアッシュ	2.28g/cm <sup>3</sup>	4170cm <sup>2</sup> /g
	B	高炉スラグ微粉末	2.90g/cm <sup>3</sup>	4310cm <sup>2</sup> /g
	N	普通ポルトランドセメント	3.15g/cm <sup>3</sup>	3250cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	石灰砕砂	2.63g/cm <sup>3</sup>	-
粗骨材	G	石灰砕石	2.64g/cm <sup>3</sup>	-
混和剤	SP(A)	高性能減水剤 (NIに使用)	-	-
	SP(B)	高性能AE減水剤 (R-CFに使用)	-	-

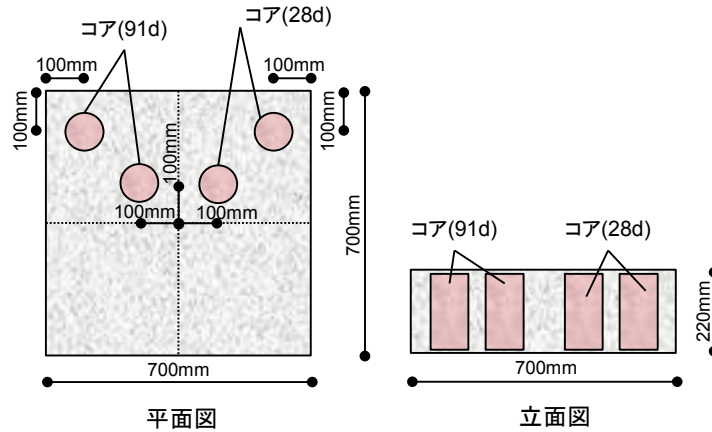


図 2.4.2 面部材用模擬試験体の詳細

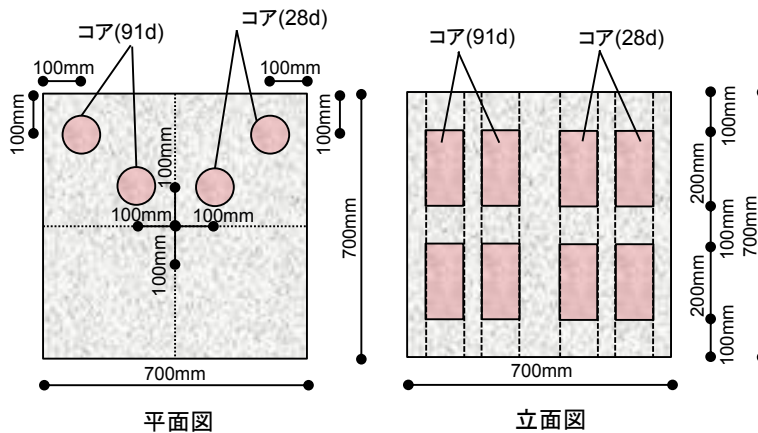


図 2.4.3 梁部材用模擬試験体の詳細

### 2. 4. 3 鉄筋腐食抵抗性の検討

R-CF コンクリートが一般的なプレキャスト RC 部材と同等の耐久性を有し、計画供用期間 65 年以上の耐久性を満足することを確認することを目的に、鉄筋腐食抵抗性の検討を実施した。

鉄筋腐食抵抗性実験の概要を表 2.4.9 に、調合表の一覧を表 2.4.10 に示す。使用材料は、表 2.4.8 の材料を使用した。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、図 2.4.1 の蒸気養生後に 40°C RH90%とした。また、鉄筋の腐食を促進するため、塩化ナトリウム(NaCl)を混和する水準でも試験を行った。表 2.4.11 を参考に、過酷な状況を想定して、Cl-量 2.5kg/m<sup>3</sup>と設定し、実験では 4.0kg/m<sup>3</sup>の NaCl を添加することとした。塩化ナトリウム(NaCl)を混和した試験体を採取するために必要なコンクリート数量は 1 調合につき 12L である。エアメータの容器(約 7L)2 杯分を、フネに移し、少量のお湯に溶かした NaCl 水溶液をフネで切り返すことにより、NaCl を混和したコンクリートを作製した。

腐食試験体の詳細を図 2.4.4 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。鉄筋はスペーサによって支持し、材齢 7 日までに脱型およびキャッピングを行った。キャッピングの際、鉄筋に測定用のリード線を接続した。キャッピング後、材齢 7 日まで 20°C 封かん養生とし、材齢 7 日以降は 40°C RH90%の気乾養生とした。試験体の打設面、底面および端面は脱型後にアルミテープを貼付し、側面 2 面乾燥とした。

模擬 RC 試験体の自然電位(腐食の有無)、分極抵抗(腐食速度)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 PC コンクリートと比較した。更に、測定した分極抵抗から、R-CF コンクリートの腐食速度を算定し、プレキャスト RC 部材を想定した腐食速度の推定値に基づく耐久性評価を行った。自然電位および分極抵抗は、図 2.4.5 および図 2.4.6 の測定方法に従い、材齢 28、56、91 日にて測定を行った。自然電位および分極抵抗の測定箇所は図 2.4.4 に示す通り、試験体 1 体当たり 6 箇所とした。

表 2.4.9 鉄筋腐食抵抗性実験の概要

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

表 2.4.10 調合表の一覧

NO	記号	s/a	単分量 (kg/m <sup>3</sup> )							SP(A) (B×%)	SP(B) (B×%)
			SR (7630)	F	B	N	W	S	G		
1	45%-N	44.0%	-	-	-	367	165	773	999	0.70%	-
2	45%-SR(7630)60-F10-B30	44.0%	220	37	110	-	165	752	970	-	2.60%
3	35%-SR(7630)60-F10-B30	42.0%	283	47	141	-	165	673	946	-	3.00%

表 2.4.11 塩化物イオン量に関する基準等 2.1)

出典	塩化物イオン含有量基準等
建設省総合技術開発プロジェクト 「コンクリートの耐久性向上技術の開発」報告書（平成元年5月）	発錆限界塩化物イオン量として、 <b>1.2~2.5 kg/m<sup>3</sup></b> を示している。
JIS A 5308 「レディーミクストコンクリート」, (2009)	レディーミクストコンクリートの塩化物含有量は、荷降し地点で、塩化物イオン (Cl <sup>-</sup> ) 量として、0.30 kg/m <sup>3</sup> 以下とする。ただし、この上限値については、必要に応じて協議することと指定することができる。また購入者の承認を受けた場合には0.60 kg/m <sup>3</sup> 以下とすることができる。
土木学会 「コンクリート標準示方書〔施工編〕」	練混ぜ時にコンクリート中に含まれる塩化物イオンの総量は原則として0.30kg/m <sup>3</sup> 以下とする
日本建築学会 「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5鉄筋コンクリート工事」, 2009	コンクリートに含まれる塩化物量は、塩化物イオンとして0.30 kg/m <sup>3</sup> 以下とする。 やむを得ずこれを超える場合は、鉄筋防錆上有効な対策を講じるものとし、その方法は特記による。この場合においても、塩化物量は塩化物イオンとして0.60 kg/m <sup>3</sup> を超えないものとする。

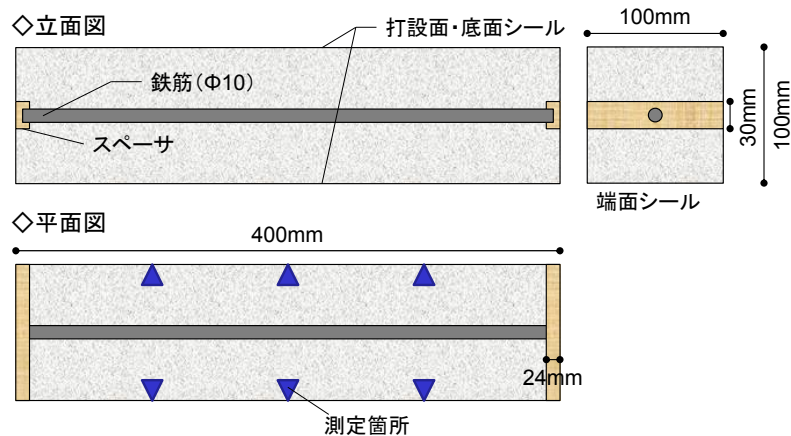


図 2.4.4 腐食試験体の詳細

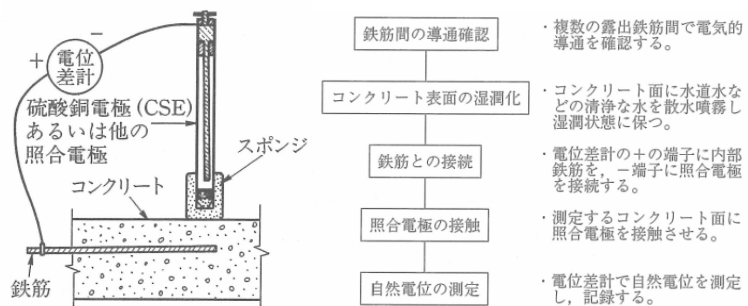
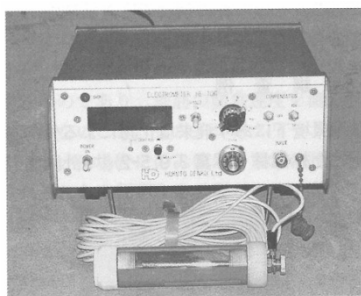


図 2.4.5 自然電位の測定方法 2.1)

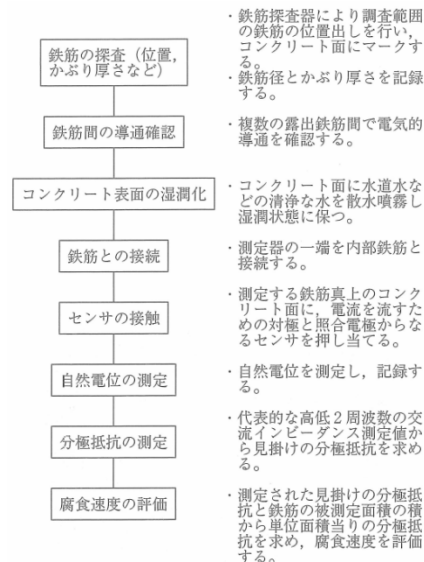
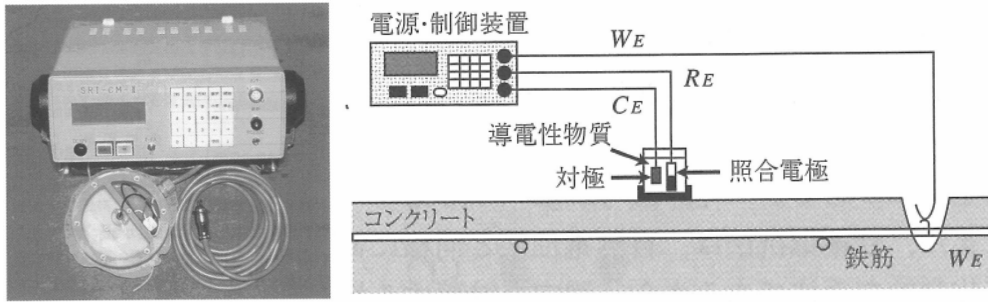


図 2.4.6 分極抵抗の測定方法 2.1)

#### 2. 4. 4 曲げ構造性能

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。

実大スラブ曲げ試験の概要および調査表を表 2.4.12 に示す。使用材料は、表 2.4.8 の材料を使用した。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 2.4.7 に示す。加力装置は、100T(980kN)オートグラフ、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。

実大スラブ曲げ試験体の詳細を図 2.4.8 および図 2.4.9 に示す。試験体形状は、長さ 2000mm×幅 500mm×高さ 200mm とした。短辺方向の配筋は、せん断破壊を防止するため D6 のフープ筋とし、長辺方向の配筋は鉄筋比 0.76% では D10×8 本、鉄筋比 0.38% では D10×4 本とした。長辺方向の側面には、曲率測定用インサートを設置した。

計測位置および名称を図 2.4.10 に示す。荷重 P, 鉛直変形 Da①, Db①, Dc①, Dd①, De①, Da②, Db②, Dc②, Dd②, De② の 10 点, 純曲げ区間の曲率変形 DT①, DB①, DT②, DB② の 4 点について計測した。

実験から得られた荷重および変位の結果から、曲げ性能を表す  $M-\phi$ 、 $P-\delta$  を算定し、R-CF コンクリートの  $M-\phi$ 、 $P-\delta$  について、普通コンクリートと比較した。

・鉛直荷重  $P(\text{kN})$

100T オートグラフに設置したロードセルから得られる。

・鉛直変形  $\delta(\text{mm})$

鉛直変形  $\delta$  は、鉛直変形を測定する  $Da$ 、 $Db$ 、 $Dc$ 、 $Dd$ 、 $De$  から(1)式で得られる。

$$\delta = Dc - \frac{Da + De}{2} \text{-----(2.1)}$$

・曲げモーメント  $M(\text{kN} \cdot \text{mm})$

ロードセルから得られる鉛直荷重  $P(\text{kN})$  から(2)式で得られる。

$$M = Q \cdot l = \frac{P}{2} \cdot 300 \text{-----(2.2)}$$

・曲率  $\phi$

曲率  $\phi$  は、水平変形  $DT$ 、 $DB$  から、図 2.4.11 に示す方法で算定する。

表 2.4.12 実大スラブ曲げ試験の概要

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

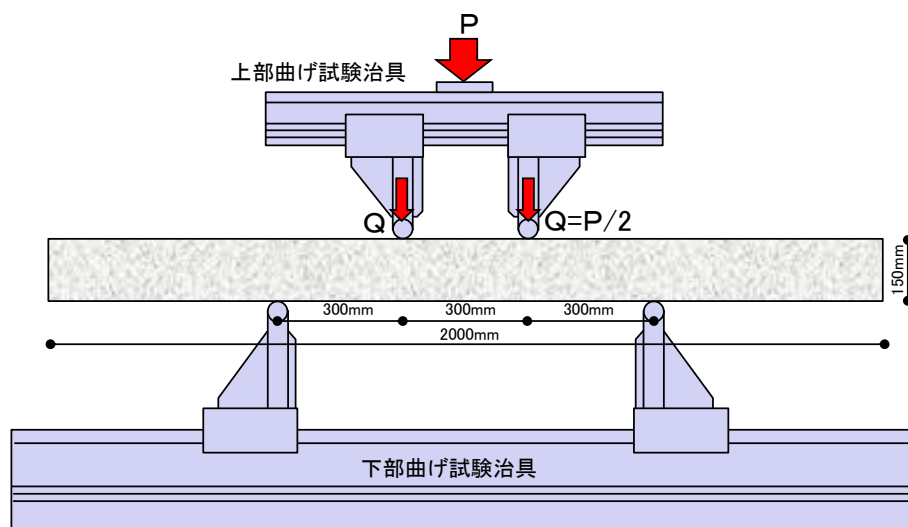


図 2.4.7 加力装置の詳細

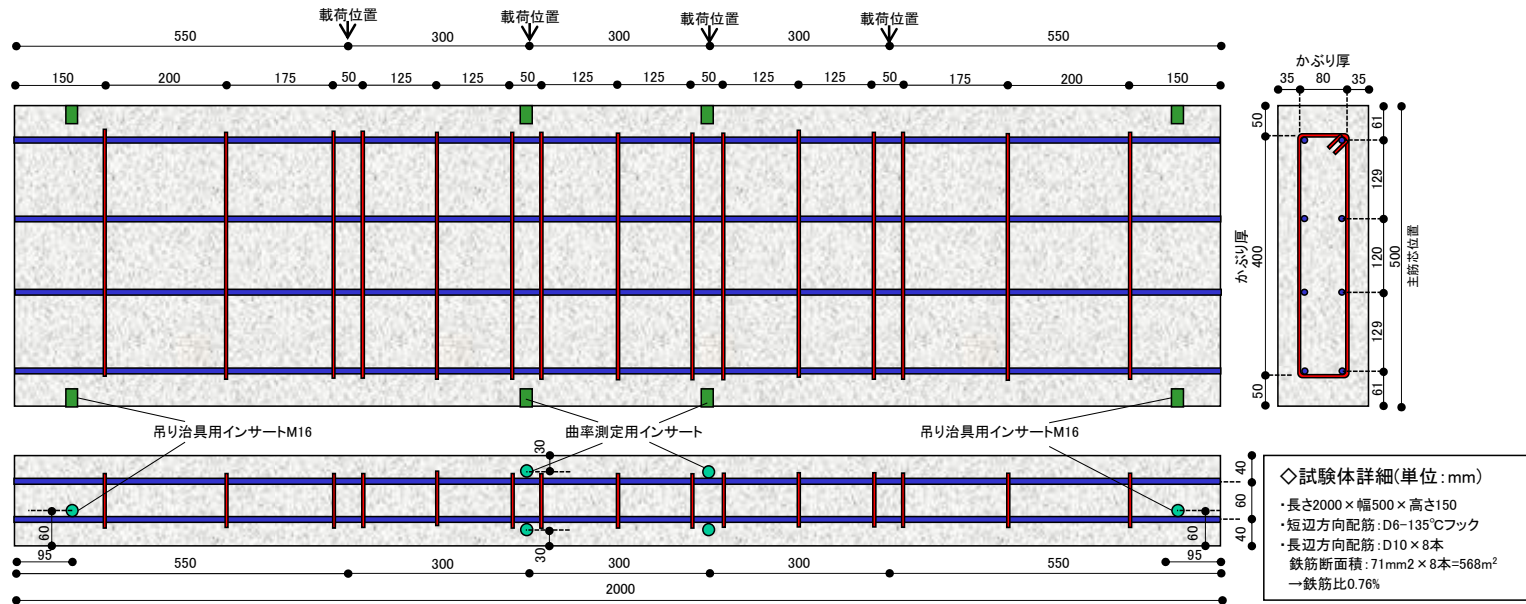


図 2.4.8 実大スラブ試験体詳細(鉄筋比 0.76%)

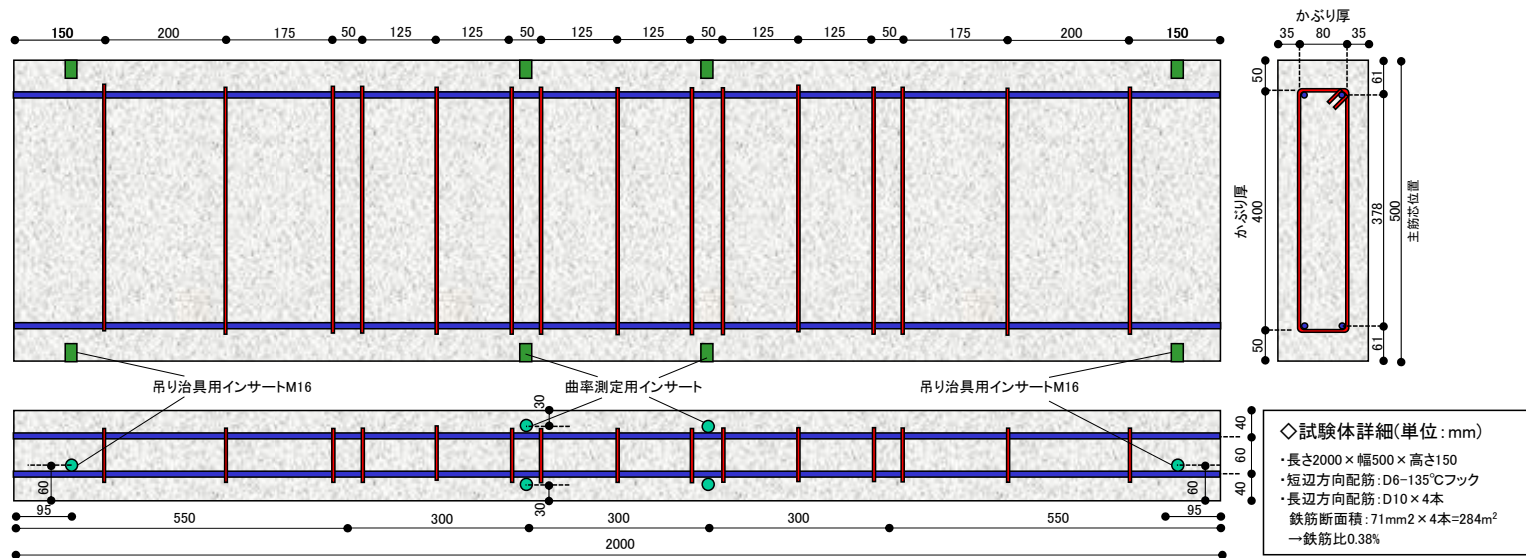


図 2.4.9 実大スラブ試験体詳細(鉄筋比 0.38%)

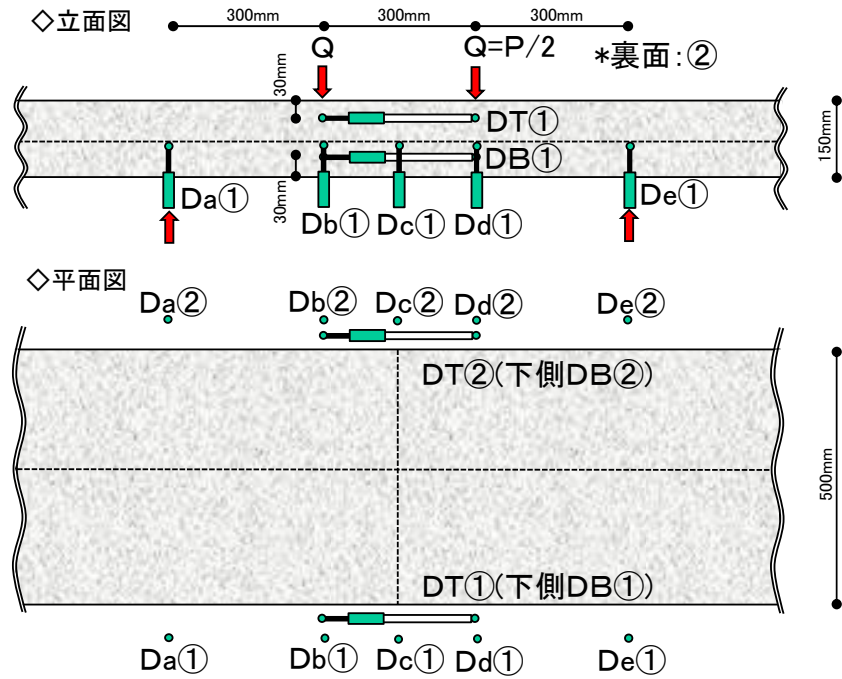


図 2.4.10 計測位置および名称

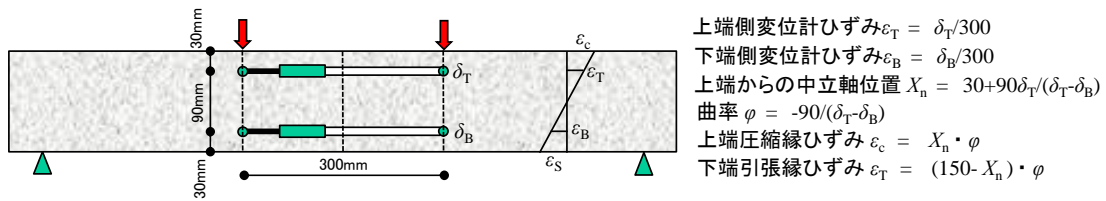


図 2.4.11 曲率  $\phi$  の算定方法

参考文献

2.1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術【基礎編】

### 3. 結果と考察

#### 3. 1 コンクリート用スラッジ再生セメント(SR セメント)の開発研究

##### 3. 1. 1 SR セメント製造実験による製造条件の確立

実機製造実験により製造した SR セメント物性試験結果の一覧を表 3.1.1 に、コンクリートの混和剤種類が SR セメントの比表面積に与える影響を図 3.1.1 に示す。一般的に高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートは、AE 減水剤を用いたコンクリートに比べて遅延効果が高く水和の進行も遅いことから、SR セメントの比表面積が低くなることが予想された。しかしながら、図 3.1.1 の結果から、混和剤種類が SR セメントの比表面積に与える影響は軽微であることが確認された。

練混ぜから処理開始までの時間が SR セメントの比表面積に与える影響を図 3.1.2 に、スラッジ水にしてから処理開始までの時間が SR セメントの比表面積に与える影響を図 3.1.3 に示す。図 3.1.2 および図 3.1.3 から、処理過程における時間が長いほど、SR セメントの比表面積が大きく、特にスラッジ水から処理開始までの時間の影響が極めて大きいことが確認された。これらの結果から、処理過程の時間を管理することにより、SR セメントの品質を確保することができるものと考えられる。

遅延剤が SR セメントの比表面積に与える影響を図 3.1.4 に示す。レディーミクストコンクリートの水和進行を遅延させることが SR セメントの品質向上に繋がると考え、コンクリートを積んだアジテータ車に遅延剤を添加することにより、SR セメントの品質向上は図った。図 3.1.4 の結果から、遅延剤の添加量が増大するに従い SR セメントの比表面積が低下しており、遅延剤の添加により SR セメントの品質向上の可能性が確認された。また、今回検討した遅延剤の中では、グルコン酸ナトリウムの G が若干比表面積の低減効果が高い結果となった。

実機製造実験により製造した SR セメントのモルタル練混ぜ実験の結果を表 3.1.2 に、普通ポルトランドセメントモルタルに対する SR セメントモルタルの圧縮強度の比を図 3.1.5 に示す。図 3.1.5 から、遅延剤の添加により SR セメントの比表面積が小さくなり、それに応じて圧縮強度が増大していることから、遅延剤による SR セメントの品質向上の見通しが得られた。また、SR セメントの比表面積が増大するに従い、同強度比は低下する傾向にあり、普通 PC に対する強度比 40%は、SR セメントの比表面積  $10000\text{cm}^2/\text{g}$  に相当することが確認できた。普通 PC に対する強度比 40%以上を満足するための SR セメントの比表面積の管理値は、SR セメントの品質変動などを勘案し  $8000\text{cm}^2/\text{g}$  以下とすることが望ましいと考えられる。図 3.1.3 から、SR セメントの比表面積に大きな影響を及ぼす製造工程として、スラッジ水から処理開始までの時間が重要であることが確認され、図 3.1.3 から、この処理過程の時間を 2.5 時間以内に管理することで、夏期においても比表面積  $8000\text{cm}^2/\text{g}$  以下の SR セメントが製造可能であることが確認された。



表 3.1.1 実機製造実験により製造した SR セメント物性試験結果の一覧

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	遅延剤		コンクリートの 混和剤種類	SRセメント物性試験結果	
				遅延剤	添加量		密度(g/cm <sup>3</sup> )	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)
1	2.5-0-N	2.5h	直ちに	無し	-	AE減水剤	2.91	5960
2	3.5-0-N	3.5h				高性能AE	2.82	7150
3	2.5-0-N(高)	2.5h				AE減水剤	2.87	5620
4	2.5-0-G0.1%(1.5)			G	C×0.1%	2.95	5260	
5	2.5-0-G0.2%(1.5)			G	C×0.2%	2.97	4590	
6	2.5-2-N			2時間	無し	2.84	6620	
7	2.5-2-G0.1%(1.5)	G			C×0.1%	2.83	6720	
8	2.5-0-N	2.5h	直ちに	無し	-	AE減水剤	2.89	6340
9	2.5-4-N		4時間			G	C×0.2%	2.69
10	2.5-4-G0.2%(1.5)		翌日(約20時間)	無し	2.94	4490		
11	2.5-20-N			無し	2.45	11030		
12	2.5-0-N	2.5h	直ちに	無し	-	AE減水剤	2.95	5630
13	2.5-0-N-S(0.2%)					S	C×0.2%	3.03

\* G: グルコン酸ナトリウム、S: ショ糖

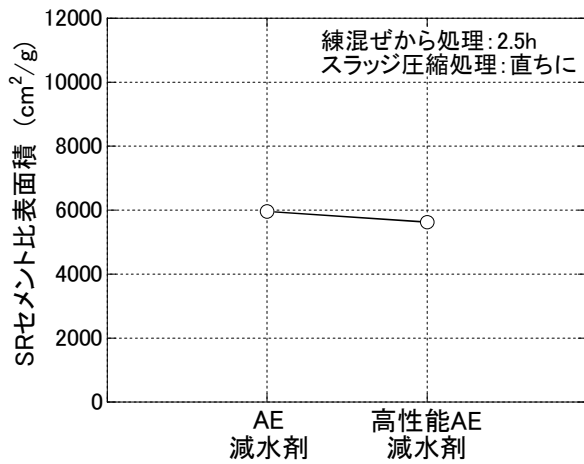


図 3.1.1 コンクリートの混和剤種類が SR セメントの比表面積に与える影響

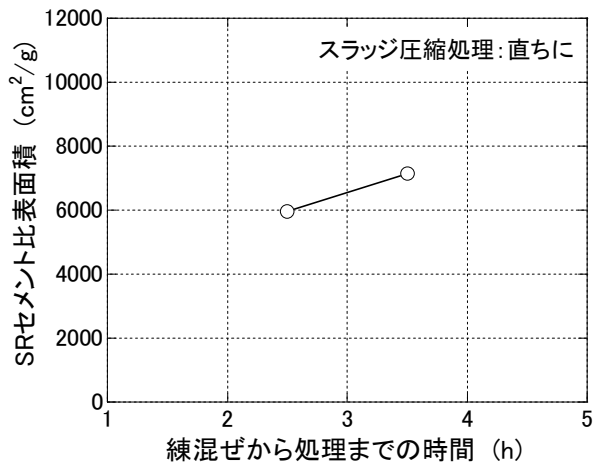


図 3.1.2 練混ぜから処理開始までの時間が SR セメントの比表面積に与える影響

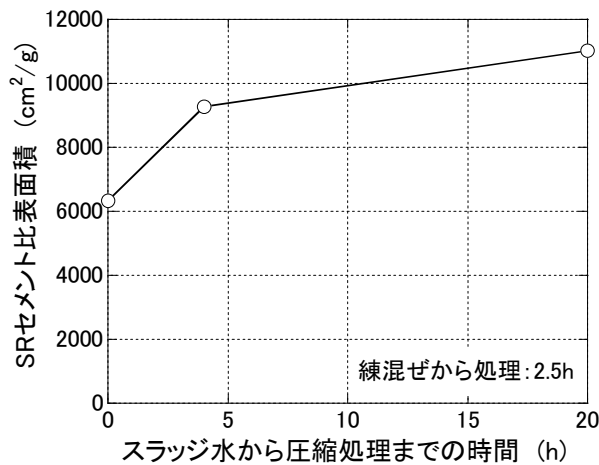


図 3.1.3 スラッジ水にしてから処理開始までの時間が SR セメントの比表面積に与える影響

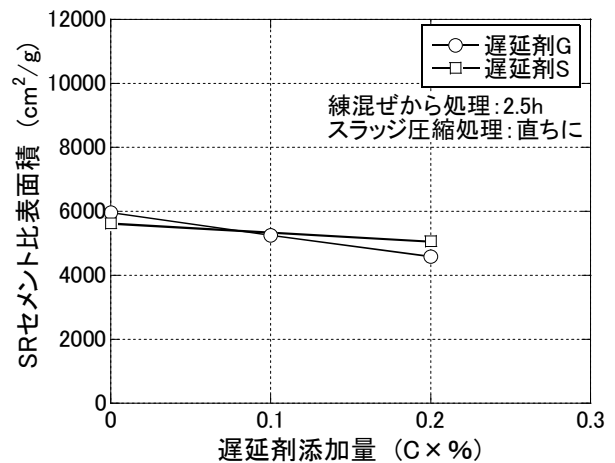


図 3.1.4 遅延剤が SR セメントの比表面積に与える影響

表 3.1.2 実機製造実験により製造した SR セメントのモルタル練混ぜ実験の結果

NO	記号	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤	フレッシュ試験結果			圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
			N	SR	W	S		SP	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	7日
1	2.5-0-N	50	-	900	450	2700	0.80%	172	6.8	18.0	37.1	46.5
2	3.5-0-N	50	-	900	450	2700	1.00%	177	6.3	18.0	34.1	43.1
3	2.5-0-N(高)	50	-	900	450	2700	0.90%	166	6.9	19.0	34.6	44.3
4	2.5-0-G0.1%(1.5)	50	-	900	450	2700	0.90%	197	4.5	20.0	42.2	52.6
5	2.5-0-G0.2%(1.5)	50	-	900	450	2700	0.40%	164	7.2	20.0	35.6	43.2
6	2.5-2-N	50	-	900	450	2700	0.90%	180	6.9	19.5	25.3	37.8
7	2.5-2-G0.1%(1.5)	50	-	900	450	2700	1.00%	164	6.9	19.0	36.5	47.4
8	2.5-0-N	50	-	900	450	2700	0.90%	163	8.5	20.5	32.2	43.4
9	2.5-4-N	50	-	900	450	2700	2.70%	196	5.2	19.0	25.8	37.4
10	2.5-4-G0.2%(1.5)	50	-	900	450	2700	0.70%	164	5.1	20.0	32.4	44.3
11	2.5-20-N	50	-	900	450	2700	4.50%	244	7.6	18.5	10.7	19.7
12	2.5-0-N	50	-	900	450	2700	1.00%	140	8.3	21.0	46.0	54.1
13	2.5-0-N-S(0.2%)	50	-	900	450	2700	0.56%	153	6.8	21.0	49.0	55.1
—	N	50	900	-	450	2700	-	154	6.8	20.0	49.2	63.5

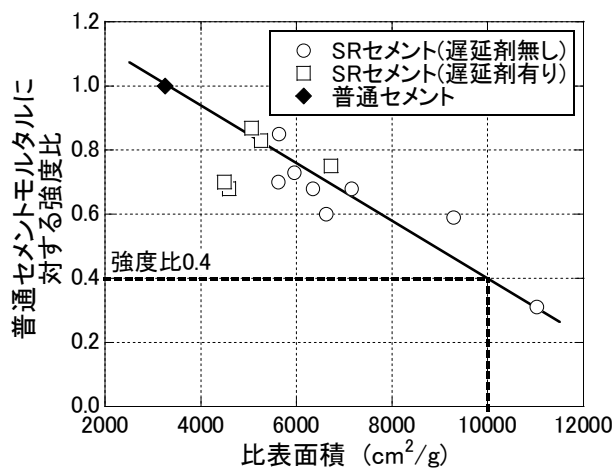


図 3.1.5 普通 PC モルタルに対する SR セメントモルタルの圧縮強度の比

### 3. 1. 2 SR セメントの初期水和による逸散成分等の分析と補助材の検討

#### ・ SR セメントの微細構造観察および成分分析

レーザー回折式粒度測定機を用いて SR セメントの粒度分布測定を行うと共に、走査型電子顕微鏡 (SEM) およびエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) により、SR セメントの粉体観察、成分分析を行った。

SR セメントの粒度分布測定結果を図 3.1.6 に示す。図 3.1.6 から、普通 PC の粒度分布は 30 μm 程度を中心に山状の粒度分布であるのに対し、SR セメントは同粒形の他に 300 μm 程度の頻度も高く 2 山状の粒度分布であることが確認された。通常、比表面積が高いということは、粉体の粒子が細かいことを意味するが、SR セメントの比表面積が高くなるに従い、30 μm 程度を頻度は低下し、300 μm 程度を頻度は増大する結果となった。

SR セメントと普通 PC の比較を写真 3.1.1 に、SR セメントの SEM 画像を写真 3.1.2～写真 3.1.4 に示す。写真 3.1.1 から、普通 PC は未水和セメント粒子が独立して存在しているのに対し、SR セメント中には未水和セメント以外に、砂や水和生成物などの凝集物が確認された。写真 3.1.2～写真 3.1.4 から、

SR セメントでは  $100\mu\text{m}$  以上の凝集した粒子が確認されており，SR セメントの比表面積が増大するに従い，その凝集物が増大する傾向があり，上述の粒度分布測定結果と合致する傾向にあった。

SR セメントおよび普通 PC のエポキシ樹脂混合試料による SEM 画像を写真 3.1.5 に示す。この SEM 画像を二値化することにより，図 3.1.7 の様に SR セメントの未水和セメント量を定量化した。SR セメントの比表面積と未水和セメント量の関係を図 3.1.7 に示す。図 3.1.7 から，SR セメントの比表面積が大きくなるに従い未水和セメント量が減少する傾向にあり，比表面積  $8000\text{cm}^2/\text{g}$  以下の SR セメントであれば，未水和セメントの残存率は 65%以上確保されることが確認された。一方で，35%は砂や水和生成物などであり，強度に寄与しない成分が一定程度存在することも確認された。

各種分析結果から，SR セメント中には未水和セメント以外に，砂や水和生成物などの凝集が認められ，未水和セメントの残存率は 65%程度であることが明らかとなった。SR セメントの比表面積が増大した際に，細かい粒子が凝集し  $300\mu\text{m}$  程度の見掛け上粒径の大きな粒子が増大しているが，この  $300\mu\text{m}$  程度の粒子を分級などにより除去することで，普通 PC と同様の粒度分布となる SR セメントを製造できる可能性を見出した。

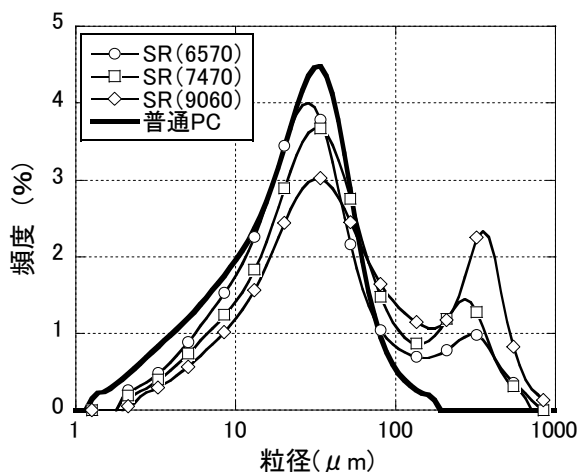
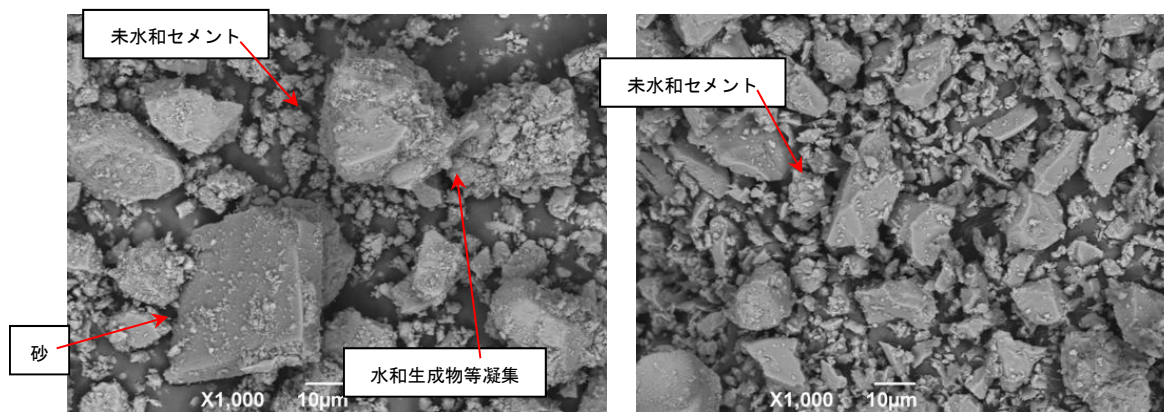


図 3.1.6 SR セメントの粒度分布測定結果



SR セメント( $5960\text{cm}^2/\text{g}$ )

普通 PC( $3300\text{cm}^2/\text{g}$ )

写真 3.1.1 SR セメントと普通 PC の比較

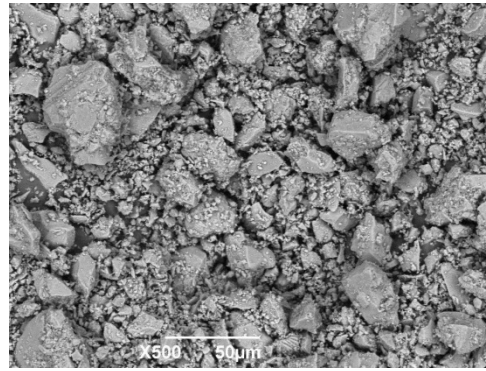
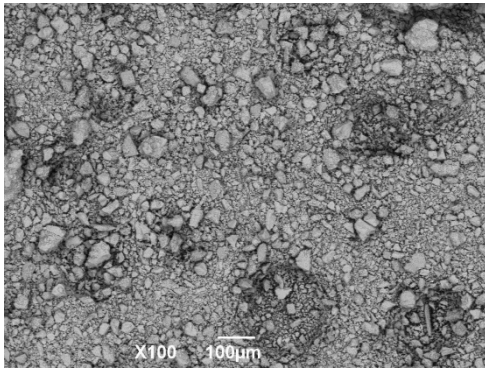


写真 3.1.2 SRセメントの SEM 画像(比表面積 4800cm<sup>2</sup>/g)

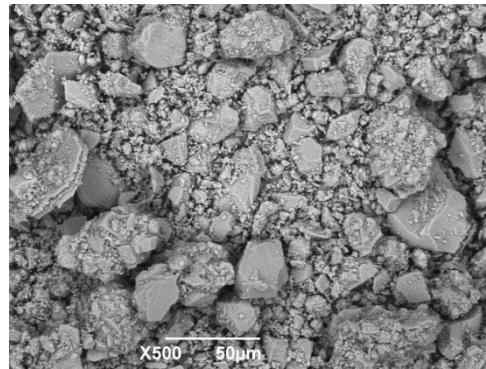
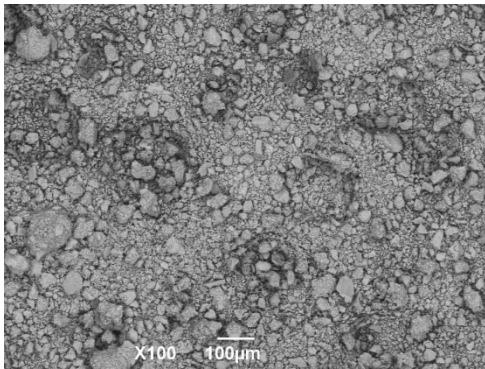


写真 3.1.3 SRセメントの SEM 画像(比表面積 7930cm<sup>2</sup>/g)

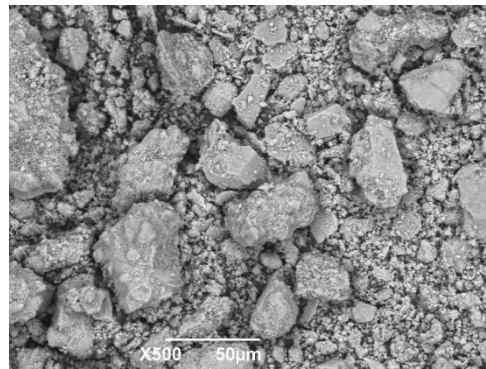
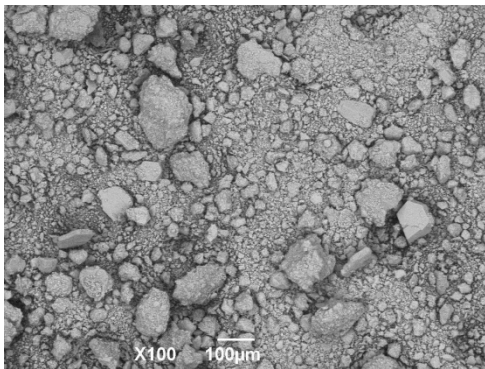
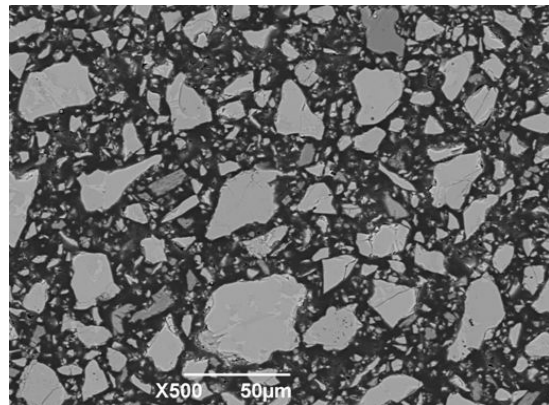
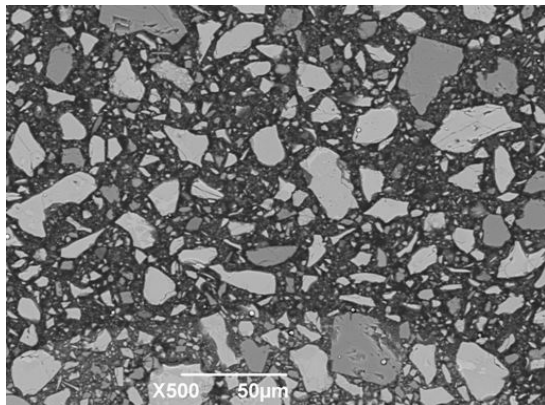


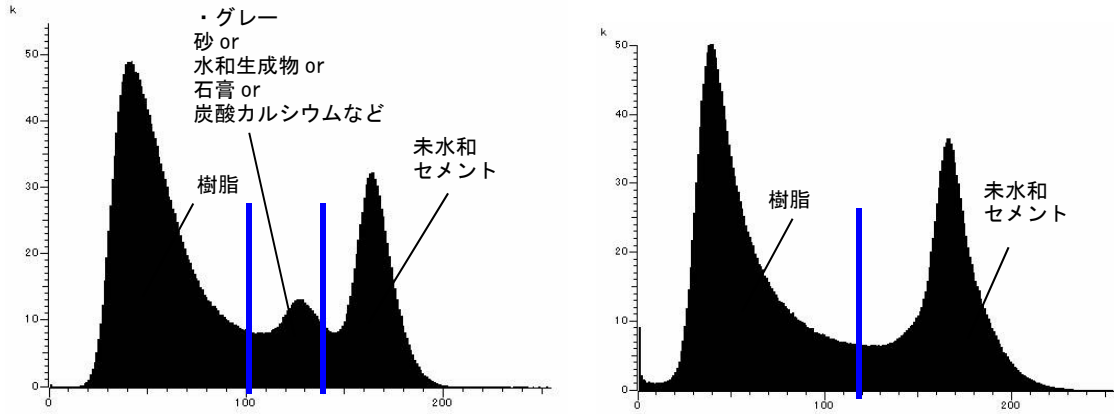
写真 3.1.4 SRセメントの SEM 画像(比表面積 9880cm<sup>2</sup>/g)



SRセメント(5960cm<sup>2</sup>/g)

普通 PC(3300cm<sup>2</sup>/g)

写真 3.1.4 SRセメントおよび普通 PC のエポキシ樹脂混合試料による SEM 画像



対象	樹脂	グレー	未水和
SRセメント (5960cm <sup>2</sup> /g)	59.0%	14.1%	26.9%
	-	34.4%	65.6%

対象	樹脂	未水和
普通PC (3300cm <sup>2</sup> /g)	60.1%	39.9%
	-	-

SRセメント(5960cm<sup>2</sup>/g)

普通PC(3300cm<sup>2</sup>/g)

図 3.1.7 SEM 画像の二値化による未水和セメント量の定量化

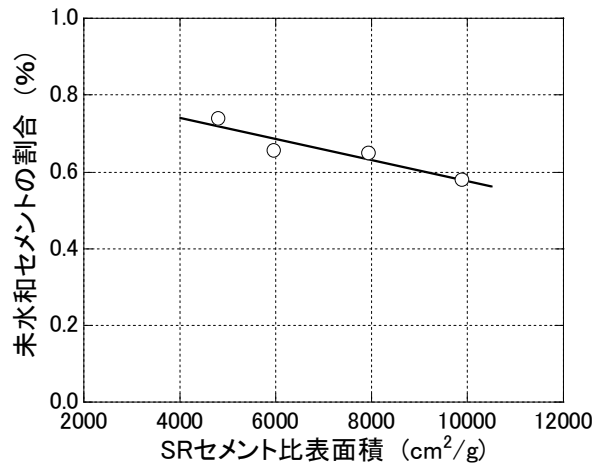


図 3.1.8 SRセメントの比表面積と未水和セメント量の関係

#### ・SRセメント補助材検討実験

SRセメント補助材検討実験の結果一覧を表 3.1.3 に、フロー経時変化に与える石膏の影響を図 3.1.9 および図 3.1.10 に示す。普通モルタルである 40%-N100 は 60 分経過時点の 15 打フローの差(以下、フローロスと称する)は 40mm 程度であるのに対し、R-CF モルタルである 40%-SR(6000)-F20-B20 は練混ぜ直後から急激にこぼれ、60 分経過時点の 15 打フローロスは 70mm 程度と大きい結果となった。これに対し、石膏を添加した水準では 15 打フローロスが軽減され、その効果は石膏添加率 B×6%で顕著であった。石膏添加率が圧縮強度に与える影響を図 3.1.11 に示す。図 3.1.11 から、二水石膏を用いた水準は、石膏添加率の増加に従い強度が微減しているのに対し、無水石膏を用いた水準は、石膏添加率の増加に従い強度が若干増大している結果となった。以上の検討結果から、無水石膏の添加により、練混ぜ

直後のこわばりおよび流動性の低下が軽減され、圧縮強度も若干増大する傾向が認められたことから、補助材として無水石膏の可能性が確認された。

表 3.1.3 SR セメント補助材検討実験の結果一覧

NO	記号	W/C (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤	フレッシュ試験結果			圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
			N	SR	W	S		SP	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	7日
1	2.5-0-N	50	-	900	450	2700	0.80%	172	6.8	18.0	37.1	46.5
2	3.5-0-N	50	-	900	450	2700	1.00%	177	6.3	18.0	34.1	43.1
3	2.5-0-N(高)	50	-	900	450	2700	0.90%	166	6.9	19.0	34.6	44.3
4	2.5-0-G0.1(1.5)	50	-	900	450	2700	0.90%	197	4.5	20.0	42.2	52.6
5	2.5-0-G0.2(1.5)	50	-	900	450	2700	0.40%	164	7.2	20.0	35.6	43.2
6	2.5-2-N	50	-	900	450	2700	0.90%	180	6.9	19.5	25.3	37.8
7	2.5-2-G0.1(1.5)	50	-	900	450	2700	1.00%	164	6.9	19.0	36.5	47.4
8	2.5-0-N	50	-	900	450	2700	0.90%	163	8.5	20.5	32.2	43.4
9	2.5-4-N	50	-	900	450	2700	2.70%	196	5.2	19.0	25.8	37.4
10	2.5-4-G0.2(1.5)	50	-	900	450	2700	0.70%	164	5.1	20.0	32.4	44.3
11	2.5-20-N	50	-	900	450	2700	4.50%	244	7.6	18.5	10.7	19.7
12	2.5-0-N	50	-	900	450	2700	1.00%	140	8.3	21.0	46.0	54.1
13	2.5-0-N-S(0.2%)	50	-	900	450	2700	0.56%	153	6.8	21.0	49.0	55.1
—	N	50	900	-	450	2700	-	154	6.8	20.0	49.2	63.5

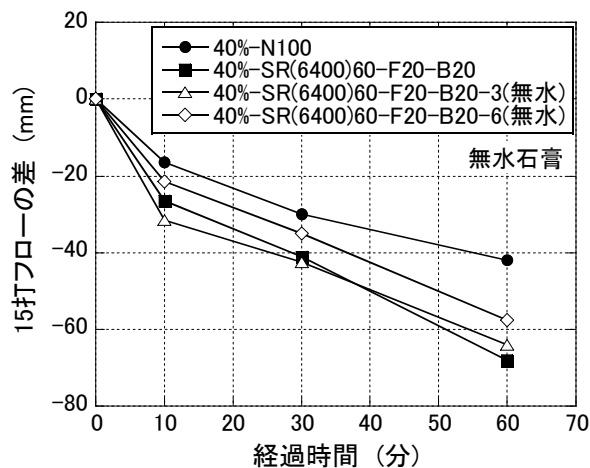


図 3.1.9 無水石膏がフロー経時変化に与える影響

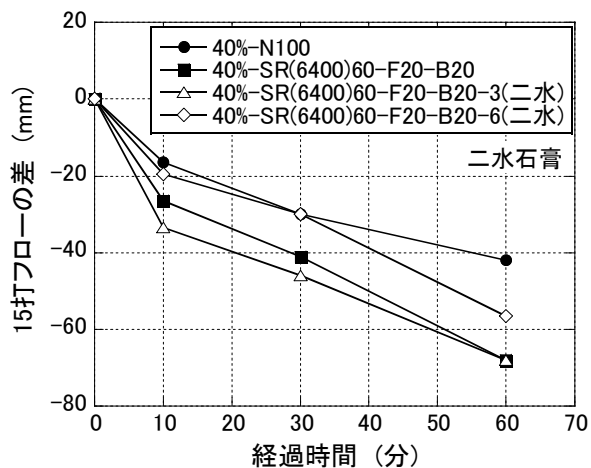


図 3.1.10 二水石膏がフロー経時変化に与える影響

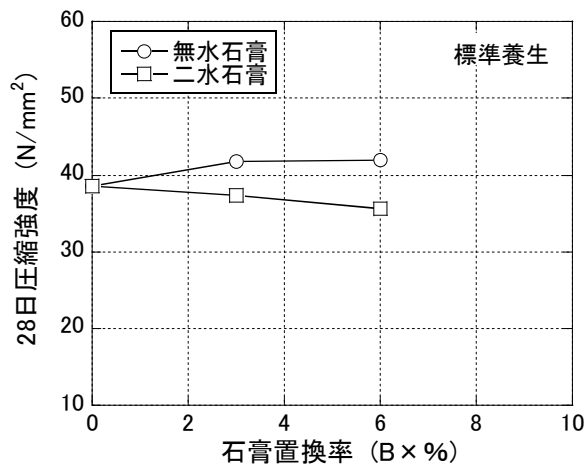


図 3.1.3 石膏添加率が圧縮強度に与える影響

### 3. 2 R-CF コンクリートの配(調)合方法の確立に関する研究

#### 3. 2. 1 モルタル練混ぜ実験による事前検討

R-CF コンクリートの材料・配(調)合の絞り込みを目的に、モルタル練混ぜ実験による事前検討を実施した。モルタル練混ぜ実験の結果一覧を表 3.2.1 に、SR セメントの比表面積が練混ぜ時間に与える影響を図 3.2.1 に、SR セメントの比表面積が高性能減水剤の添加量に与える影響を図 3.2.2 に示す。図 3.2.1 および図 3.2.2 から、SR セメントの比表面積が大きくなるに従い、練混ぜに必要とする高性能減水剤添加量および練混ぜ時間は増大しており、特に比表面積 10000cm<sup>2</sup>/g 以上でその傾向は顕著であった。また、図 3.2.2 から、SR セメントと高炉スラグ微粉末を併用した 40%-SR(\*\*\*\*)60-B40 に比べて、SR セメントとフライアッシュを併用した 40%-SR(\*\*\*\*)60-F40 の方が、必要とする高性能減水剤の添加量は低減できており、練混ぜ性能の観点では SR セメントと併用する混和材はフライアッシュの方が適していることが確認された(\*\*\*\*は比表面積を示す)。また、一般的な高性能減水剤の添加量である B×3%程度以下とするためには、比表面積 8000cm<sup>2</sup>/g 程度以下の SR セメントを使用する必要がある。

SR セメントの比表面積が圧縮強度に与える影響を図 3.2.3 に、結合材水比が圧縮強度に与える影響を図 3.2.4 に示す。図 3.2.3 から、SR セメントの比表面積が大きくなるに従い、圧縮強度が低下する水準が認められた。SR セメントとフライアッシュを併用した 40%-SR(\*\*\*\*)60-F40 に比べて、SR セメントと高炉スラグ微粉末を併用した 40%-SR(\*\*\*\*)60-B40 の方が、高い圧縮強度が得られていることから、強度確保の観点では SR セメントと併用する混和材のうち高炉スラグ微粉末の混合率を増やした方が良いと考えられる。図 3.2.4 から、R-CF モルタルは普通モルタルの同様に、結合材水比が増大するに従い圧縮強度が大きくなることが確認された。このことから、R-CF モルタルにおいても、結合材水比と圧縮強度の関係式を用いて配(調)合設計が可能になると考えられる。

フライアッシュの混合率が圧縮強度に与える影響を図 3.2.4 に示す。図 3.2.4 から、フライアッシュ混合率が增大するに従い圧縮強度が低下するものの、混合率 B×20%以下であれば、その低下量は軽微であった。以上の検討結果から、コンクリートによる練混ぜ実験では、比表面積 6000cm<sup>2</sup>/g 程度の SR セメントを使用することとし、フライアッシュ混合率は B×10%一定として実験を行うこととした。

表 3.2.1 モルタル練混ぜ実験の結果一覧

NO	記号	SRセメント 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	SP (B×%)	練混ぜ 時間 (分)	フレッシュ試験				圧縮強度試験(N/mm <sup>2</sup> )		
					モルタル フロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容 積質量 (kg/L)	3日	28日	91日
1	30%-SR(7200)60-F40	7200	1.45%	2.5	160	5.1	21.5	2.117	11.8	38.9	57.4
2	30%-SR(7200)80-F20	(B)	2.40%	4.0	127	4.7	24.0	2.140	18.1	46.7	61.1
3	40%-SR(6400)60-F40	6400 (A)	1.10%	2.0	162	4.3	23.0	2.162	5.9	23.9	30.4
4	40%-SR(6400)60-F20-B20		1.30%	2.0	160	4.3	23.0	2.191	11.9	38.6	47.7
5	40%-SR(6400)60-B40		1.45%	2.0	165	4.5	23.0	2.219	19.6	46.9	49.5
6	40%-SR(7200)60-F40	7200	1.20%	2.0	177	4.6	20.0	2.155	4.5	21.8	32.9
7	40%-SR(7200)80-F20	(B)	1.70%	2.0	133	5.2	21.0	2.167	8.8	29.8	40.7
8	40%-SR(8580)60-F40	8580	2.50%	2.0	125	4.0	22.0	2.157	4.0	22.7	33.0
9	40%-SR(8580)60-B40	(C)	3.00%	2.5	117	4.4	22.0	2.197	19.9	42.7	51.0
10	40%-SR(10740)60-F40	10740 (D)	3.50%	3.0	127	5.1	25.0	2.123	4.6	21.2	35.9
11	40%-SR(10740)60-F20-B20		3.70%	3.0	148	4.7	25.0	2.165	13.4	37.1	44.7
12	40%-SR(10740)60-B40		3.70%	3.0	124	4.2	25.0	2.202	22.9	43.4	51.8
13	40%-SR(11640)60-F40	11640(E)	6.00%	8.5	153	4.8	24.0	2.116	2.8	13.1	23.4
14	40%-SR(13290)60-F40	13290	8.50%	13.0	128	4.4	25.5	2.119	1.3	5.3	15.0
15	40%-SR(13290)60-B40	(F)	10.00%	11.5	136	4.2	25.0	2.184	18.3	47.5	56.7
16	40%-N100	-	0.30%	2.0	171	4.8	23.0	2.241	32.4	58.9	65.7
17	50%-N100	-	0.35%	2.0	149	5.5	22.5	2.229	23.0	41.8	48.7
18	60%-N100	-	0.30%	2.0	147	4.8	19.0	2.245	17.5	32.1	39.9

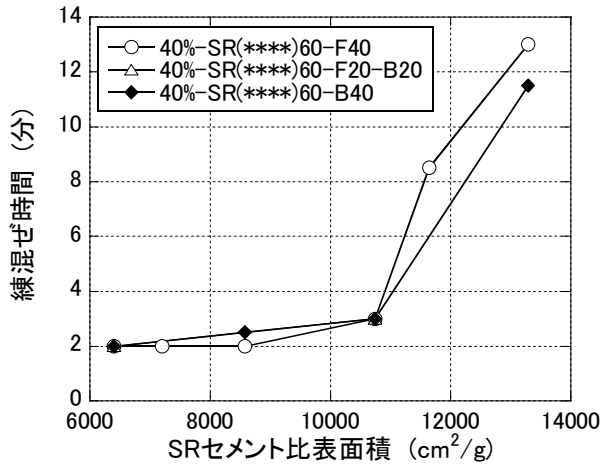


図 3.2.1 SR セメントの比表面積が練混ぜ時間に与える影響

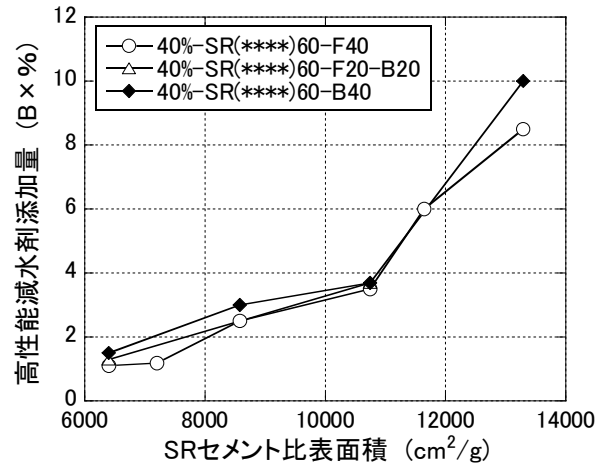


図 3.2.2 SR セメントの比表面積が高性能減水剤の添加量に与える影響

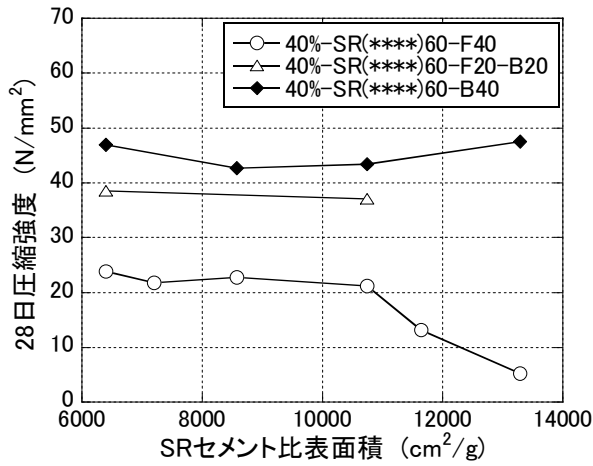


図 3.2.3 SR セメントの比表面積が圧縮強度に与える影響

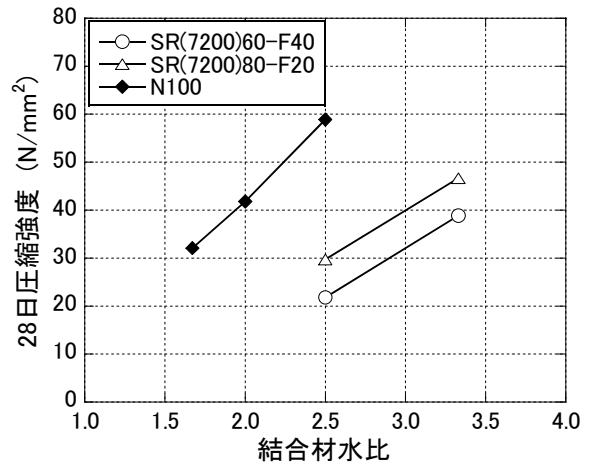


図 3.2.4 結合材水比が圧縮強度に与える影響

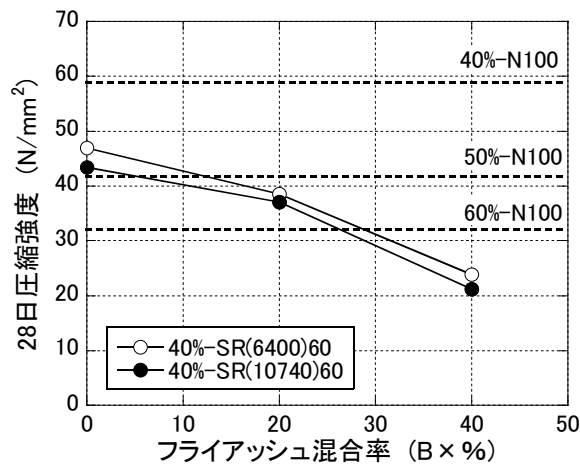


図 3.2.5 フライアッシュの混合率が圧縮強度に与える影響



### 3. 2. 2 コンクリート練混ぜ実験による配(調)合方法の検討

上記のモルタル練混ぜ実験結果を受け、R-CF コンクリートの配(調)合方法を確立することを目的に、コンクリートを対象とした練混ぜ実験を行った。フレッシュ試験結果の一覧を表 3.2.2 に、R-CF コンクリートのスランプ試験結果を図 3.2.6 に、R-CF コンクリートの空気量試験結果を図 3.2.7 に、高性能 AE 減水剤の添加量を図 3.2.8 に示す。練混ぜ直後のスランプの目標値は、2cm のロスを見込んで 20cm とし、許容値は $\pm 2.5\text{cm}$  とした。また、練混ぜ直後の空気量の目標値は 4.5% とし、許容値は $\pm 1.5\%$  とした。図 3.2.6 および図 3.2.7 から、R-CF コンクリートのスランプ結果および空気量は概ね許容値を満足しており、普通コンクリートと同様に、高性能 AE 減水剤および空気連行整剤など化学混和剤の調整により、目標値のスランプおよび空気量が得られることが確認され、プレキャスト RC 部材の製造に対して、十分施工可能なフレッシュ性状を有していると考えられる。しかしながら、R-CF コンクリートでは、SR セメントの混合率が高く、W/B が低い場合、普通コンクリートに比べて粘性が増大する傾向が認められ、図 3.2.8 の様に、高性能 AE 減水剤の添加量も増大することから、普通強度域では問題がないが、W/B35% 以下の高強度域では粘性が高くなることにより施工性に問題が生じる可能性が考えられる。

強度特性試験結果の一覧を表 3.2.3 に、標準養生における圧縮強度試験結果を図 3.2.9～図 3.2.10 に示す。図 3.2.9～図 3.2.10 から、SR セメントの混合率の影響として、 $B \times 40 \sim 80\%$  の範囲であれば、 $B \times 60\%$  とした場合が最も高い強度が得られることが確認された。SR セメントの混合率  $B \times 80\%$  の場合に、高い強度が得られない原因として、上述のフレッシュ性状で示した様に、粘性が高いことによる空隙の発生が一因として考えられる。図 3.2.11 は、R-CF コンクリートを、SR セメント、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末の 3 成分に整理した 3 成分相図であり、標準養生 28 日圧縮強度の結果から、最適な 3 成分の構成割合が明らかとなった。

無水石膏の混合率が圧縮強度に与える影響を図 3.2.12～図 3.2.13 に示す。図 3.2.12～図 3.2.13 から、無水石膏の影響として、無水石膏の添加率を  $B \times 8\%$  とした水準は、無水石膏を添加しない水準に対して、圧縮強度が高くなる結果が得られ、無水石膏による強度増進の効果がコンクリートにおいても確認された。

R-CF コンクリートのヤング係数試験結果を図 3.2.14 に、R-CF コンクリートの割裂引張強度結果を図 3.2.15 に示す。図 3.2.14 には JASS 5 に示されるヤング係数予測式により算定した結果も合わせて示し<sup>3.1)</sup>、図 3.2.15 には既存の割裂引張強度予測式による算定結果も合わせて示した<sup>3.2)</sup>。図 3.2.14～図 3.2.15 から、R-CF コンクリートの圧縮強度に対するヤング係数、圧縮強度に対する割裂引張強度は、普通コンクリートと同程度であり、既存の予測式とも大きな差がないことが確認された。このことから、R-CF コンクリートの力学特性として圧縮強度に着目することで、他の力学特性は普通コンクリートと同様に圧縮強度から推測することができると考えられる。

結合材水比と圧縮強度の関係式を図 3.2.16～図 3.2.18 に示す。図 3.2.16～図 3.2.18 から、SR セメントの混合率によらず、結合材水比が増大するに従い圧縮強度が大きくなることが確認された。このことから、R-CF コンクリートにおいても、普通コンクリートの調合設計と同様に、水結合材比により圧縮強度を制御できることが確認された。また、図 3.2.16～図 3.2.18 から、RCCF コンクリートの圧縮強度は最大  $60\text{N/mm}^2$  程度であることから、設計基準強度  $24\text{N/mm}^2$  以上の圧縮強度を十分満足できることが確認された。

図 3.2.16～図 3.2.18 から、R-CF コンクリートは普通コンクリートと同様に、結合材水比が増大するに従い圧縮強度が大きくなることから、結合材水比と圧縮強度の関係式を用いて配(調)合設計が可能になると考えられる。図 3.2.16～図 3.2.18 の結合材水比と圧縮強度の関係式から、R-CF コンクリートの配(調)合方法に供することができる調合設計式として、SR セメントの混合率および無水石膏の添加率の関数となる(3.1)式を求めた。図 3.2.19 は、R-CF コンクリートの調合設計式により推定した圧縮強度の推定値と圧縮強度の実験結果を比較しており、(3.1)式により圧縮強度の実験結果を精度良く再現できることが確認された。

$$f_c(28) = \alpha \cdot B/W + \beta$$

$$\alpha = -0.00637 \cdot SR^2 + 0.663 \cdot SR + 9.03 \text{-----}(3.1)$$

$$\beta = 0.3097 \cdot SO_3 + A$$

$$A = 0.0034 \cdot SR^2 - 0.123 \cdot SR - 22.521$$

ここに、 $f_c(28)$  : 標準養生における材齢 28 日の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

SR : SR セメントの混合率(B×%)

SO<sub>3</sub> : 無水石膏の添加率(B×%)

表 3.2.2 フレッシュ試験結果の一覧

NO	記号	W/B	SP (B×%)	フレッシュ試験				
				スランブ (cm)	フロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積 質量 (kg/L)
1	45%-SR(5890)40-F10-B50	45%	1.00%	18.5	279	4.6	17.7	2.291
2	35%-SR(5890)40-F10-B50	35%	1.75%	20.0	298	5.6	18.6	2.276
3	45%-SR(5890)40-F10-B50-4(無水)	45%	1.10%	17.0	289	4.4	18.6	2.301
4	35%-SR(5890)40-F10-B50-4(無水)	35%	1.40%	21.5	346	4.8	18.4	2.295
5	45%-SR(5890)40-F10-B50-8(無水)	45%	1.20%	23.0	457	5.1	18.4	2.288
6	35%-SR(5890)40-F10-B50-8(無水)	35%	1.40%	22.5	208	5.0	18.3	2.288
7	45%-SR(5890)60-F10-B30	45%	1.50%	17.0	266	4.9	19.2	2.294
8	35%-SR(5890)60-F10-B30	35%	1.90%	18.0	259	4.0	20.3	2.312
9	45%-SR(5890)60-F10-B30-4(無水)	45%	1.34%	19.5	298	4.4	17.9	2.298
10	35%-SR(5890)60-F10-B30-4(無水)	35%	2.59%	20.5	308	4.5	19.0	2.312
11	45%-SR(5890)60-F10-B30-8(無水)	45%	2.12%	18.5	273	5.2	15.0	2.276
12	35%-SR(5890)60-F10-B30-8(無水)	35%	2.48%	21.0	365	3.7	18.1	2.325
13	45%-SR(5890)80-F10-B10	45%	2.20%	20.5	317	5.7	18.2	2.276
14	35%-SR(5890)80-F10-B10	35%	4.00%	20.5	310	4.2	20.1	2.316
15	45%-SR(5890)80-F10-B10-4(無水)	45%	2.30%	22.0	379	5.5	18.2	2.275
16	35%-SR(5890)80-F10-B10-4(無水)	35%	4.00%	23.5	473	4.1	18.7	2.309
17	45%-SR(5890)80-F10-B10-8(無水)	45%	2.50%	18.0	292	5.6	19.1	2.278
18	35%-SR(5890)80-F10-B10-8(無水)	35%	4.00%	17.0	253	5.6	20.4	2.276
19	55%-N100	55%	0.70%	19.5	336	4.4	16.0	2.314
20	45%-N100	45%	0.65%	20.0	363	4.7	18.0	2.321
21	35%-N100	35%	0.70%	20.0	335	3.8	19.0	2.359

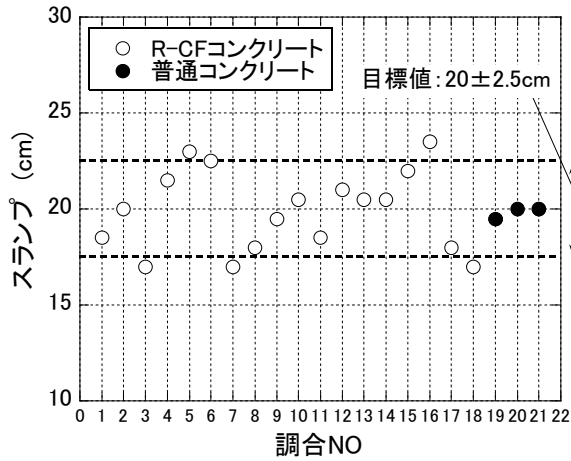


図 3.2.6 スランプ試験結果

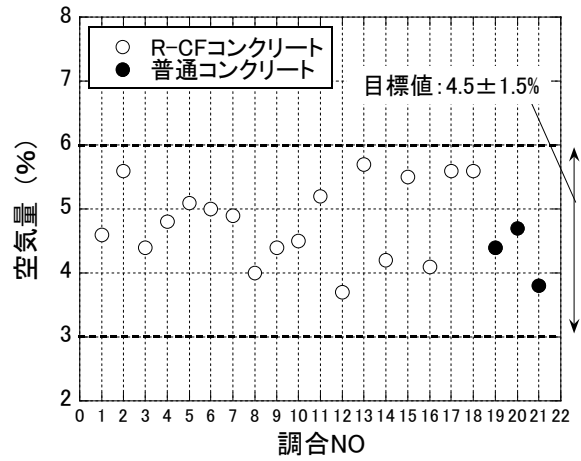


図 3.2.7 空気量試験結果

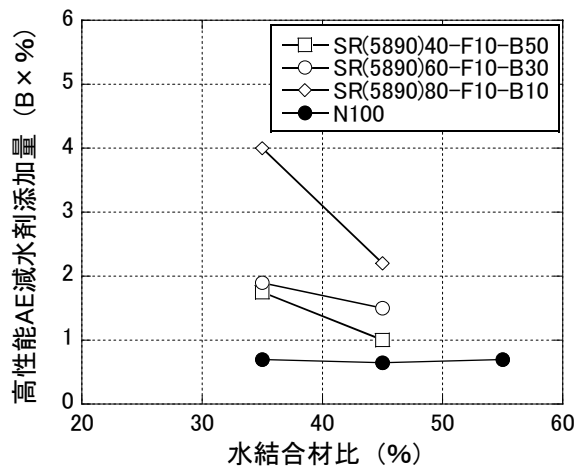


図 3.2.8 高性能 AE 減水剤の添加量

表 3.2.3 強度特性試験結果の一覧

NO	記号	W/B	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )						ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )						割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
			標準養生		20°C封かん				標準養生		20°C封かん				標準養生
			28日	91日	2日	28日	91日	28日	91日	2日	28日	91日	28日		
1	45%-SR(5890)40-F10-B50	45%	35.1	40.5	9.4	31.6	37.8	32.3	36.7	20.9	31.8	36.2	3.29		
2	35%-SR(5890)40-F10-B50	35%	50.3	57.5	17.2	47.5	54.6	33.0	36.8	21.5	31.1	37.8	3.97		
3	45%-SR(5890)40-F10-B50-4(無水)	45%	34.4	39.2	9.5	32.2	36.6	32.6	36.0	19.0	30.8	34.6	3.09		
4	35%-SR(5890)40-F10-B50-4(無水)	35%	52.2	58.3	21.0	51.1	57.3	33.4	36.3	28.4	34.1	34.2	4.15		
5	45%-SR(5890)40-F10-B50-8(無水)	45%	37.3	44.6	11.6	36.3	42.2	32.1	33.4	22.6	31.1	34.5	2.56		
6	35%-SR(5890)40-F10-B50-8(無水)	35%	52.6	59.6	18.0	49.6	55.8	33.9	36.8	23.2	34.0	35.7	3.32		
7	45%-SR(5890)60-F10-B30	45%	41.8	50.3	10.5	39.1	46.7	33.5	35.7	20.0	33.1	36.3	3.47		
8	35%-SR(5890)60-F10-B30	35%	53.6	60.4	-	-	-	34.7	35.3	-	-	-	-		
9	45%-SR(5890)60-F10-B30-4(無水)	45%	39.0	46.4	11.0	37.5	44.1	35.2	34.5	19.7	31.4	39.5	3.39		
10	35%-SR(5890)60-F10-B30-4(無水)	35%	59.0	65.9	20.5	46.5	61.4	34.6	37.5	23.1	34.2	36.8	3.79		
11	45%-SR(5890)60-F10-B30-8(無水)	45%	42.6	49.4	10.9	40.7	46.8	32.0	34.6	19.6	31.4	34.9	3.67		
12	35%-SR(5890)60-F10-B30-8(無水)	35%	60.1	66.5	19.0	57.1	63.1	35.5	37.5	22.4	35.0	42.2	3.89		
13	45%-SR(5890)80-F10-B10	45%	36.9	45.6	12.2	35.8	42.9	29.2	31.3	17.9	29.4	30.4	2.80		
14	35%-SR(5890)80-F10-B10	35%	52.2	61.6	20.1	50.9	59.7	32.7	34.3	23.3	30.9	31.1	3.25		
15	45%-SR(5890)80-F10-B10-4(無水)	45%	37.3	46.7	11.8	34.6	43.3	29.7	31.3	22.3	29.9	32.7	2.73		
16	35%-SR(5890)80-F10-B10-4(無水)	35%	50.3	61.0	19.1	48.4	57.7	32.6	35.7	21.4	33.3	29.6	3.53		
17	45%-SR(5890)80-F10-B10-8(無水)	45%	39.9	48.1	11.7	37.3	45.1	28.9	31.8	17.9	28.2	29.8	3.22		
18	35%-SR(5890)80-F10-B10-8(無水)	35%	52.2	60.9	18.4	49.3	58.2	32.2	34.5	22.2	30.7	31.0	3.67		
19	55%-N100	55%	36.1	43.3	17.5	37.7	40.9	32.2	34.5	25.0	31.7	33.8	3.19		
20	45%-N100	45%	48.5	55.4	26.4	46.2	52.9	34.5	36.4	27.5	33.4	35.7	3.58		
21	35%-N100	35%	64.6	70.5	39.6	58.9	62.9	37.6	40.7	30.6	37.2	39.4	4.12		

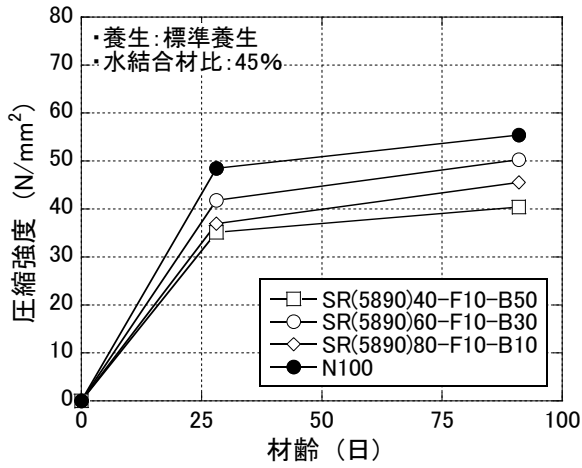


図 3.2.9 標準養生における圧縮強度試験結果  
(水結合材比 45%)

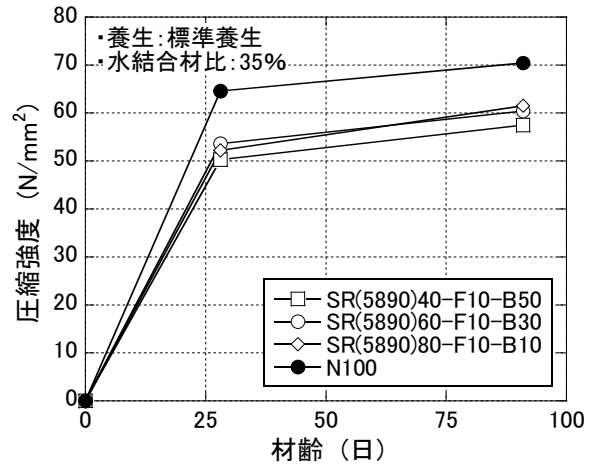


図 3.2.10 標準養生における圧縮強度試験結果  
(水結合材比 35%)

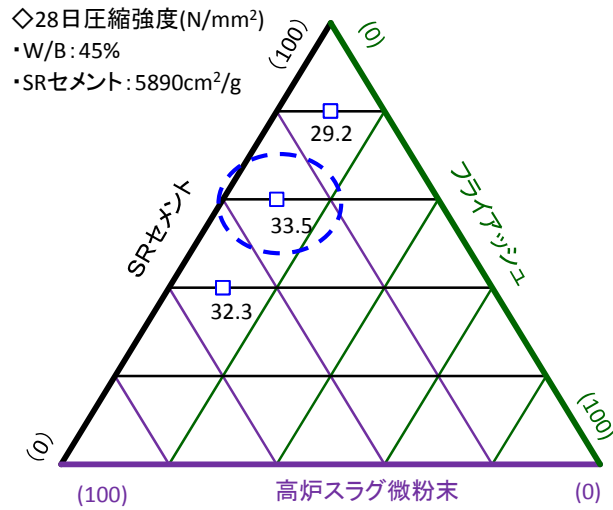


図 3.2.11 R-CF コンクリートの3成分相図

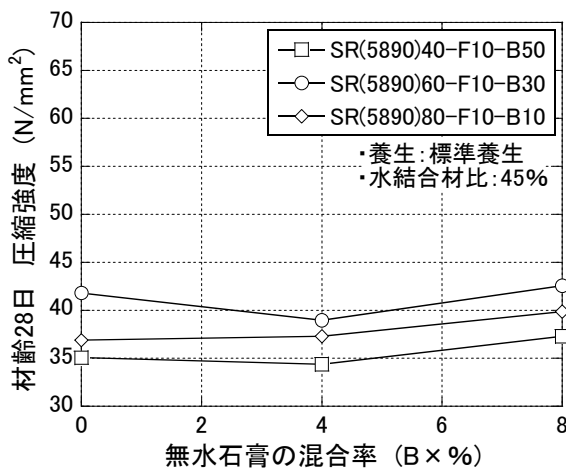


図 3.2.12 無水石膏の混合率が圧縮強度  
に与える影響(水結合材比 45%)

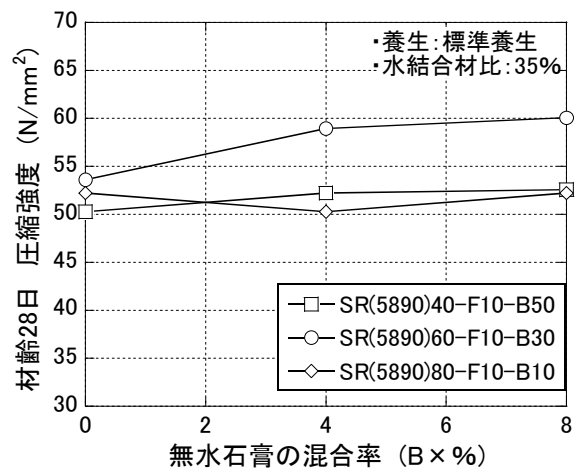


図 3.2.13 無水石膏の混合率が圧縮強度  
に与える影響 (水結合材比 35%)

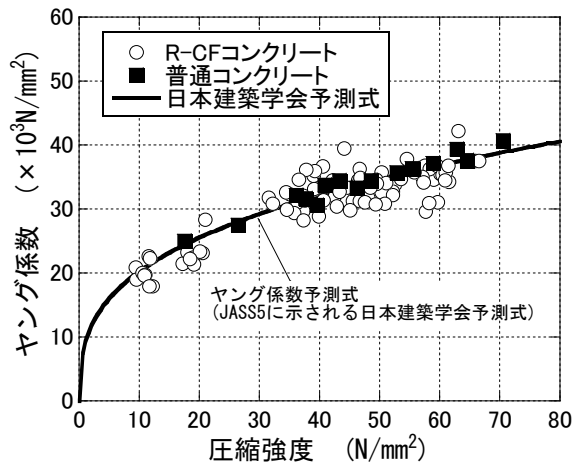


図 3.2.14 ヤング係数試験結果

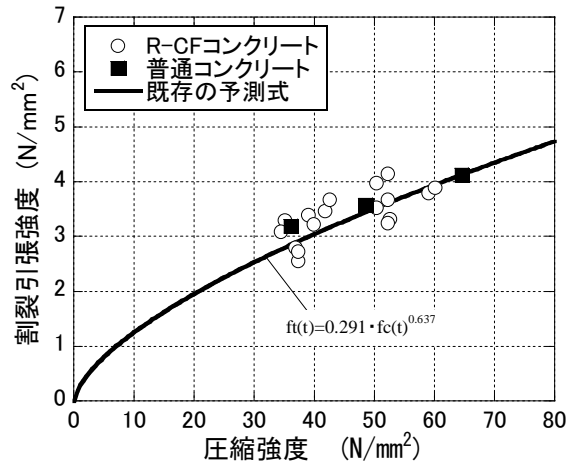


図 3.2.15 割裂引張強度試験結果

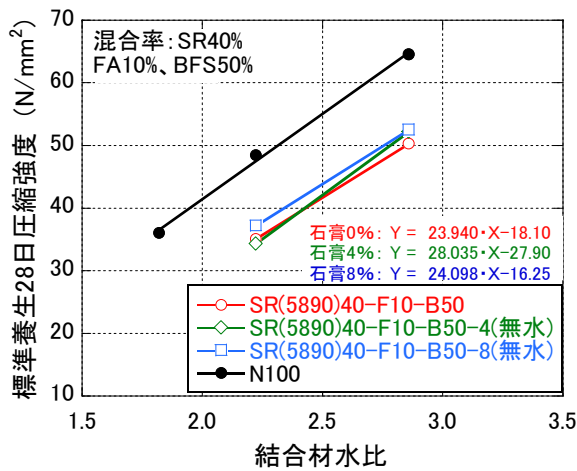


図 3.2.16 結合材水比と圧縮強度の関係 (SRセメント: B×40%)

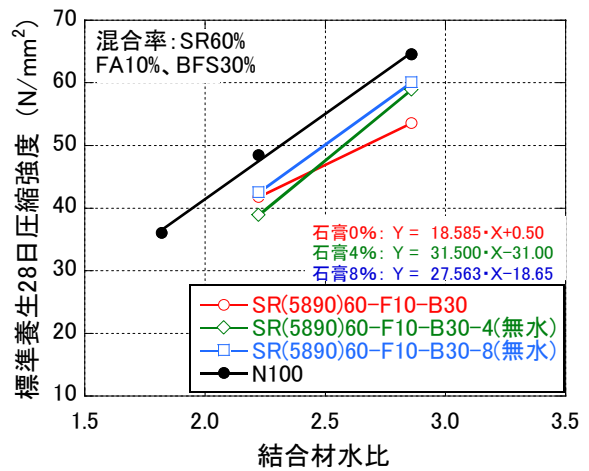


図 3.2.17 結合材水比と圧縮強度の関係 (SRセメント: B×60%)

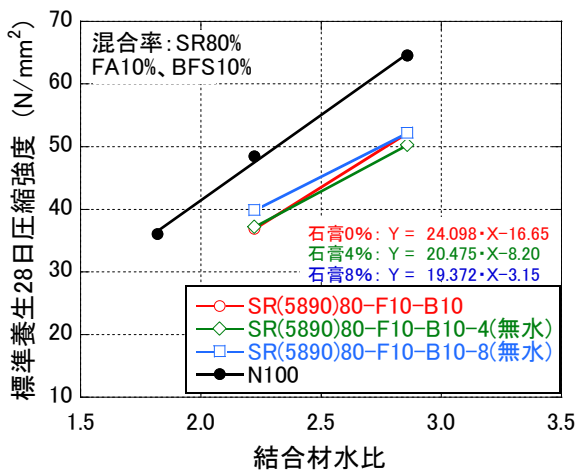


図 3.2.18 結合材水比と圧縮強度の関係 (SRセメント: B×80%)

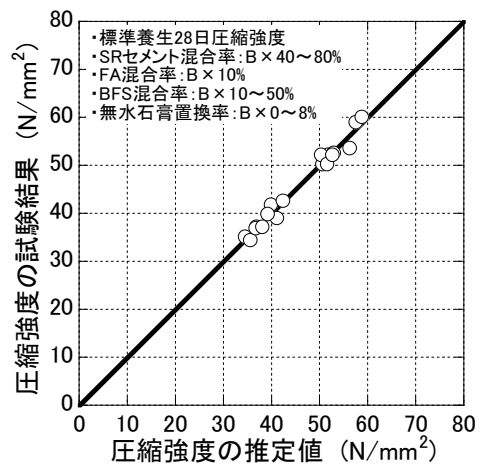


図 3.2.19 調合設計式により推定した圧縮強度の精度

### 3. 3 R-CF コンクリートの耐久性確保に関する研究

#### 3. 3. 1 中性化促進試験に基づく中性化抵抗性予測方法の検討および長期暴露実験による耐久性確認

- ・中性化促進試験に基づく中性化抵抗性予測方法の検討

R-CF コンクリートの耐久性を実験的に明らかにすることを目的に、コンクリートの耐久性を短期間で評価する試験として一般的な促進中性化試験(JIS A 1153)を行うと共に、促進試験に基づく中性化抵抗性予測方法の検討を行った。

フレッシュ試験結果の一覧を表 3.3.1 に、R-CF コンクリートのスランプ試験結果を図 3.3.1 に、R-CF コンクリートの空気量試験結果を図 3.3.2 に示す。練混ぜ直後のスランプの目標値は 18cm とし、許容値は $\pm 2.5\text{cm}$  とした。また、練混ぜ直後の空気量の目標値は 4.5% とし、許容値は $\pm 1.0\%$  とした。表 3.3.1 および図 3.3.1 から、NO16 以外の水準では、スランプ  $18\pm 2.5\text{cm}$  を概ね満足する結果となった。NO16 の 35%-SR(7930)60-F10-B30 は、混和剤の添加率が結合材質量の 2.9% と非常に大きいですが、スランプは 12.5cm と小さい。この要因として、SR セメントの比表面積が大きく、水結合材比が低い条件において、粘性が増大したことが挙げられる。図 3.3.2 から、全水準において、空気量は  $4.5\pm 1.0\%$  の範囲にあることが確認できた。

圧縮強度試験および促進中性化試験結果の一覧を表 3.3.2 に、結合材水比と圧縮強度の関係を図 3.3.3 に、SR セメントの混合率が圧縮強度に与える影響を図 3.3.4 に、SR セメントの比表面積が圧縮強度に与える影響を図 3.3.5 に、無水石膏の混合率が圧縮強度に与える影響を図 3.3.6 に示す。図 3.3.3 から、R-CF コンクリートの内、最も強度が高い SR(4800)60-F10-B30 の圧縮強度は、同水結合材比の条件において、N に対し  $5\text{N/mm}^2$  低下する程度であり、適当な結合材の構成における R-CF コンクリートの圧縮強度は、N に対して大きな強度低下が生じないことが確認された。図 3.3.4 から、SR セメントの混合率は結合材質量に対し 60~80% の範囲で圧縮強度が高くなる傾向となり、配(調)合方法の検討で得られた知見が再現された。図 3.3.5 から、SR セメントの比表面積が大きいほど圧縮強度が低下しており、その差は  $10\text{N/mm}^2$  程度であった。このことから、SR セメントの品質を確保するためには、比表面積の管理が重要であることが示唆された。図 3.3.6 から、無水石膏の添加により、圧縮強度が向上する水準が多く確認され、その効果は最大で  $8\text{N/mm}^2$  程度であった。

促進中性化試験における中性化深さの結果を図 3.3.7 に、SR セメントの混合率が中性化深さに与える影響を図 3.3.8 に、SR セメントの比表面積が中性化深さに与える影響を図 3.3.9 に、無水石膏の混合率が中性化深さに与える影響を図 3.3.10 に示す。図 3.3.7 および図 3.3.8 から、圧縮強度と同様に、SR セメントの混合率が結合材質量に対し 60~80% の範囲で中性化深さが小さくなる結果となった。早強 PC を使用した SR(4800)50-B40-H10 は、SR セメントの混合率が 50% であるが、SR セメントの混合率が 80% である SR(4800)80-F10-B10 と同程度の中性化深さであり、中性化抵抗性の向上が確認された。また、同水結合材比の条件では、最も中性化深さが小さい SR(4800)80-F10-B10 においても、BB の 2 倍程度の中性化深さであった。図 3.3.9 および図 3.3.10 から、SR セメントの比表面積が大きいほど中性化深さが増大する結果となり、無水石膏を添加した水準で中性化深さが低減できる結果となった。

R-CF コンクリートの RC 造構造物への適用に向け、上記の促進中性化試験結果から、R-CF コンクリートの耐久性設計を実施した。標準養生 28 日の圧縮強度と  $\text{CO}_2$  濃度 5% 促進環境下での中性化速度係数

の関係を図 3.3.11 に示す。図 3.3.11 から、R-CF コンクリートの圧縮強度に対する中性化速度係数は、調査により異なり、比較対象である BB や N に比べて大きい傾向であった。一方で、圧縮強度の増加に伴い中性化速度係数は低減していることから、R-CF コンクリートにおいても調査を最適化し強度を高めることで、BB や N に対して同等以上の中性化抵抗性を付与できると言える。

図 3.3.11 の圧縮強度と中性化速度係数の関係から、R-CF コンクリートの中性化速度係数実験式として、結合材の混合率の関数となる(3.2)式を得た。図 3.3.12 は、R-CF コンクリートの中性化速度係数の実験結果と、(3.2)式により算定した中性化速度係数を比較しており、(3.2)式により中性化速度係数の実験結果を精度良く再現できることが確認された。

$$A(5.0) = -0.185 \cdot f_c(28) + \beta$$

$$\beta = -0.027 \cdot SR(6000) - 0.004 \cdot SR(8000) + 0.109 \cdot F + 0.0034 \cdot B - 0.03 \cdot H + 11.49 \quad (3.2)$$

ここに、A(5.0) : CO<sub>2</sub> 濃度 5% 中性化速度係数(mm/√週)

f<sub>c</sub>(28) : 標準養生材齢 28 日の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

SR(6000), SR(8000), B, F, H : 結合材の混合率(結合材×%)

2009 年度版建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 では<sup>3.1)</sup>、要求される供用期間の級毎に、耐久設計基準強度とかぶり厚さを定めることで、RC 造建築物の耐久性を確保している。本検討では、(3.2)式の中性化速度係数予測式を用いて、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説」に示される手法に従い<sup>3.3)</sup>、R-CF コンクリートを用いた場合に必要とされる設計かぶり厚さと圧縮強度を算定した。文献 3.3)では、中性化に対する設計限界状態を最外側鉄筋の 20%が腐食した状態とし、腐食確率の計算条件として鉄筋のかぶり厚さのばらつき標準偏差 10mm、中性化深さの変動係数 10%、発錆限界における中性化残りは屋内・20mm・屋外 0mm、炭酸ガス濃度は屋内 0.20%・屋外 0.05%を標準としており、これらに従って算定を行った。

上記の条件により算定した耐久性を満足するために必要な設計かぶり厚さと標準養生 28 日圧縮強度を表 3.3.3 に示す。表 3.3.2 は、設計かぶり厚さ毎に、所要の耐久性を満足するための圧縮強度を示している。これらの手法および結果を用いることにより、計画供用期間の級に応じて、かぶり厚さと所要の圧縮強度を満足することにより、R-CF コンクリートにおいても所要の耐久性を満足する RC 造構造物を実現できるものと考えられる。

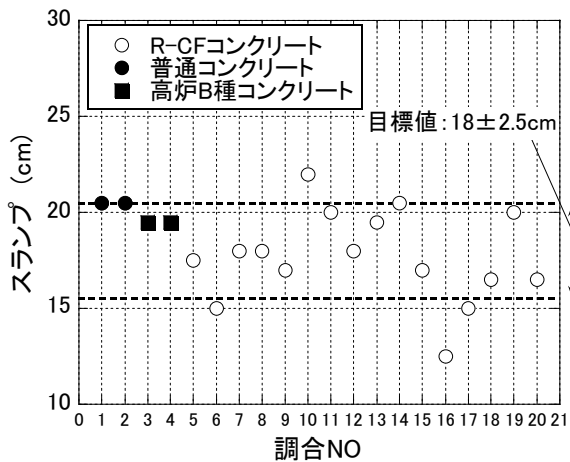


図 3.3.1 スランプ試験結果

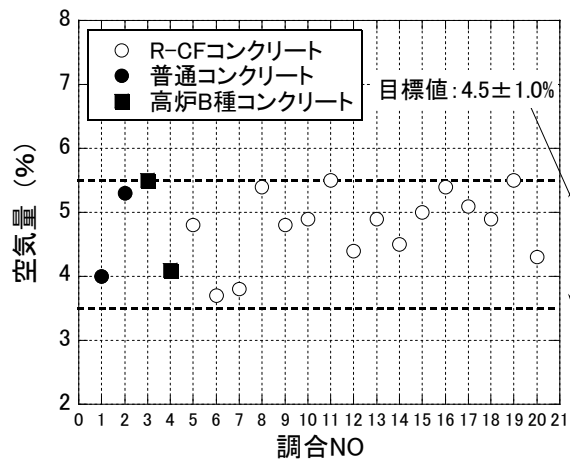


図 3.3.2 空気量試験結果

表 3.3.1 フレッシュ試験結果の一覧

NO	記号	水 結合材 比 (%)	SP (B×%)	フレッシュ試験				
				スランブ (cm)	フロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積 質量 (kg/L)
1	55%-N	55	0.70%	20.5	385	4.0	18.8	2.334
2	45%-N	45	0.55%	20.5	365	5.3	19.8	2.317
3	55%-BB	55	0.55%	19.5	324	5.5	18.7	2.294
4	45%-BB	45	0.55%	19.5	315	4.1	18.7	2.334
5	55%-SR(4800)60-F10-B30	55	0.80%	17.5	310	4.8	19.5	2.294
6	45%-SR(4800)60-F10-B30	45	0.80%	15.0	259	3.7	19.4	2.325
7	35%-SR(4800)60-F10-B30	35	1.00%	18.0	303	3.8	20.4	2.339
8	45%-SR(4800)60-F10-B30+6	45	0.75%	18.0	287	5.4	19.4	2.287
9	45%-SR(4800)40-F10-B50	45	0.70%	17.0	281	4.8	19.2	2.302
10	35%-SR(4800)40-F10-B50	35	0.95%	22.0	387	4.9	19.6	2.308
11	45%-SR(4800)40-F10-B50+6	45	0.60%	20.0	332	5.5	19.8	2.275
12	45%-SR(4800)80-F10-B10	45	0.90%	18.0	292	4.4	20.1	2.314
13	35%-SR(4800)80-F10-B10	35	1.20%	19.5	314	4.9	20.6	2.314
14	45%-SR(4800)80-F10-B10+6	45	0.90%	20.5	332	4.5	20.2	2.318
15	45%-SR(7930)60-F10-B30	45	1.50%	17.0	272	5.0	21.0	2.281
16	35%-SR(7930)60-F10-B30	35	2.90%	12.5	222	5.4	22.2	2.275
17	45%-SR(7930)60-F10-B30+6	45	2.00%	15.0	251	5.1	20.0	2.280
18	45%-SR(4800)50-B40-H10	45	0.70%	16.5	274	4.9	19.8	2.308
19	35%-SR(4800)50-B40-H10	35	0.95%	20.0	324	5.5	20.0	2.302
20	45%-SR(4800)50-B40-H10+6	45	0.70%	16.5	282	4.3	18.8	2.324

表 3.3.2 圧縮強度試験および促進中性化試験結果の一覧

NO	記号	水 結合材 比 (%)	標準養生 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		促進中性化試験 中性化深さ(mm)			CO <sub>2</sub> 濃度5%中性化 速度係数(mm/√週)		
			28日	91日	2週	8週	26週	2週	8週	26週
1	55%-N	55	37.0	43.7	4.0	5.9	9.3	2.8	2.1	1.8
2	45%-N	45	45.0	56.4	1.4	1.4	2.9	1.0	0.5	0.6
3	55%-BB	55	35.5	45.5	4.9	8.1	13.4	3.4	2.9	2.6
4	45%-BB	45	42.5	54.1	3.0	4.2	7.6	2.1	1.5	1.5
5	55%-SR(4800)60-F10-B30	55	28.9	35.8	9.7	16.3	29.3	6.9	5.8	5.8
6	45%-SR(4800)60-F10-B30	45	40.0	48.4	6.6	11.5	20.0	4.6	4.0	3.9
7	35%-SR(4800)60-F10-B30	35	53.4	67.2	2.3	4.1	5.3	1.6	1.4	1.0
8	45%-SR(4800)60-F10-B30+6	45	39.4	50.1	6.5	10.6	16.9	4.6	3.8	3.3
9	45%-SR(4800)40-F10-B50	45	33.5	42.9	9.0	16.9	27.5	6.4	6.0	5.4
10	35%-SR(4800)40-F10-B50	35	50.5	62.0	5.2	10.3	16.2	3.6	3.6	3.2
11	45%-SR(4800)40-F10-B50+6	45	38.0	47.0	7.3	13.3	21.1	5.2	4.7	4.1
12	45%-SR(4800)80-F10-B10	45	38.6	50.4	5.5	10.2	16.6	3.9	3.6	3.3
13	35%-SR(4800)80-F10-B10	35	54.4	69.8	1.5	1.7	3.9	1.1	0.6	0.8
14	45%-SR(4800)80-F10-B10+6	45	41.5	55.0	5.4	8.8	14.2	3.8	3.1	2.8
15	45%-SR(7930)60-F10-B30	45	29.3	37.3	11.7	20.7	37.1	8.3	7.3	7.3
16	35%-SR(7930)60-F10-B30	35	46.5	60.0	5.8	12.7	21.2	4.1	4.5	4.2
17	45%-SR(7930)60-F10-B30+6	45	37.3	47.3	7.5	13.9	25.4	5.3	4.9	5.0
18	45%-SR(4800)50-B40-H10	45	40.2	50.3	5.0	9.9	17.0	3.6	3.5	3.3
19	35%-SR(4800)50-B40-H10	35	49.7	69.3	0.7	1.4	1.2	0.5	0.5	0.2
20	45%-SR(4800)50-B40-H10+6	45	39.9	57.2	4.1	8.4	12.7	2.9	3.0	2.5



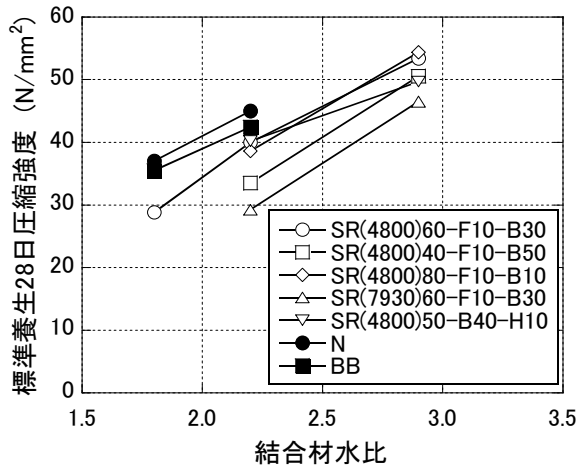


図 3.3.3 結合材水比と圧縮強度の関係

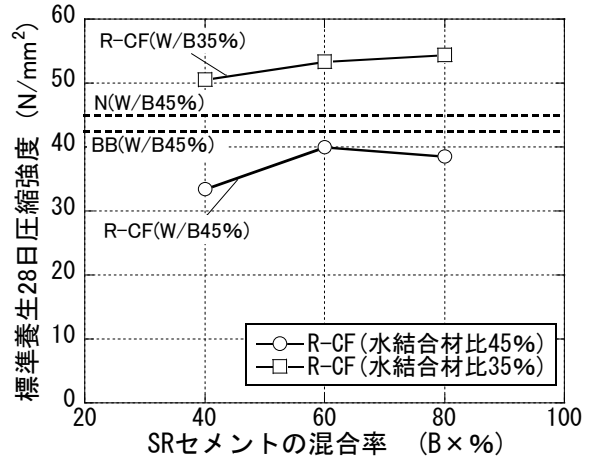


図 3.3.4 SRセメントの混合率が圧縮強度に与える影響

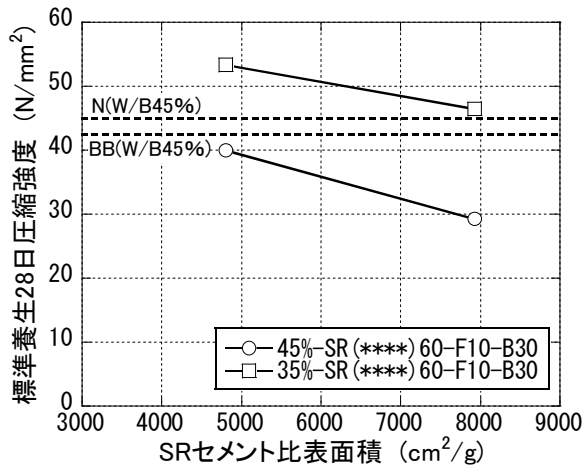


図 3.3.5 SRセメントの比表面積が圧縮強度に与える影響

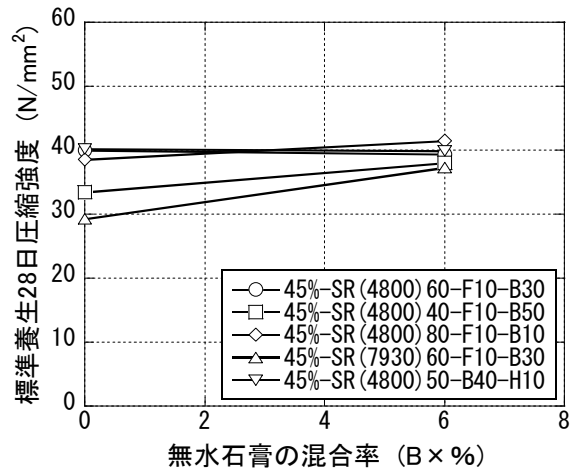


図 3.3.6 無水石膏の混合率が圧縮強度に与える影響

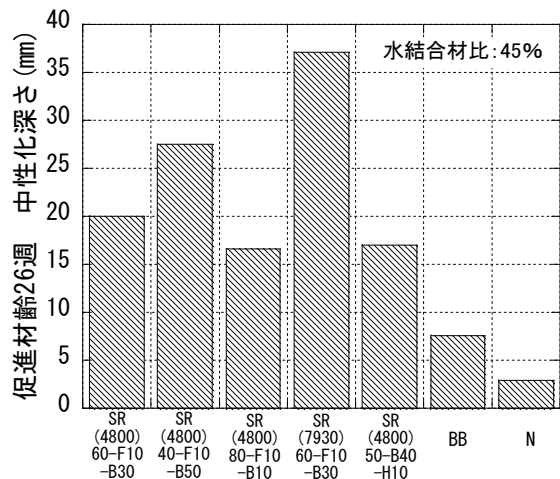


図 3.3.7 促進中性化試験結果の中性化深さ結果

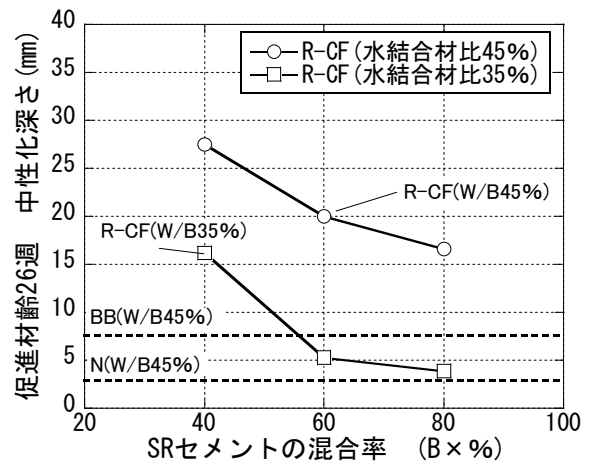


図 3.3.8 SRセメントの混合率が中性化深さに与える影響

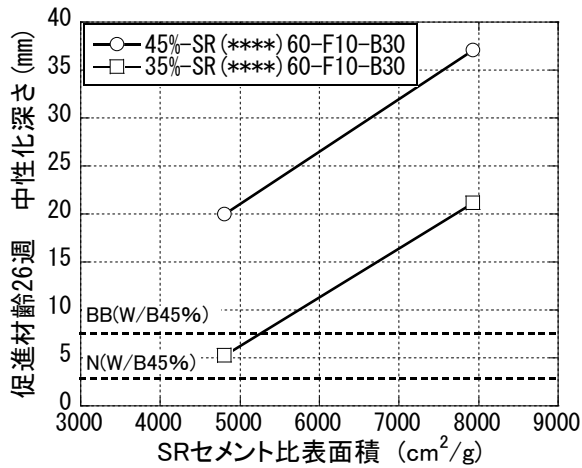


図 3.3.9 SRセメントの比表面積が中性化深さに与える影響

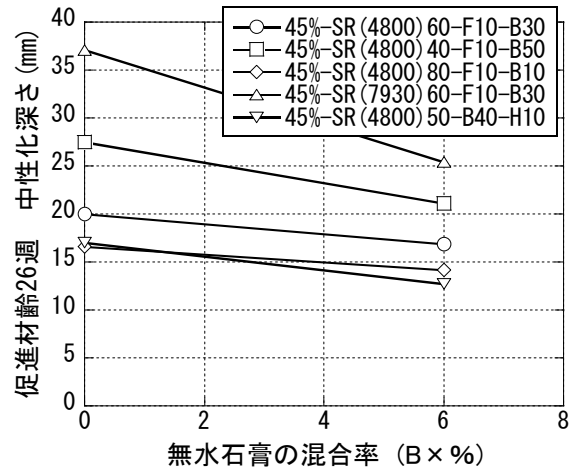


図 3.3.10 無水石膏の混合率が中性化深さに与える影響

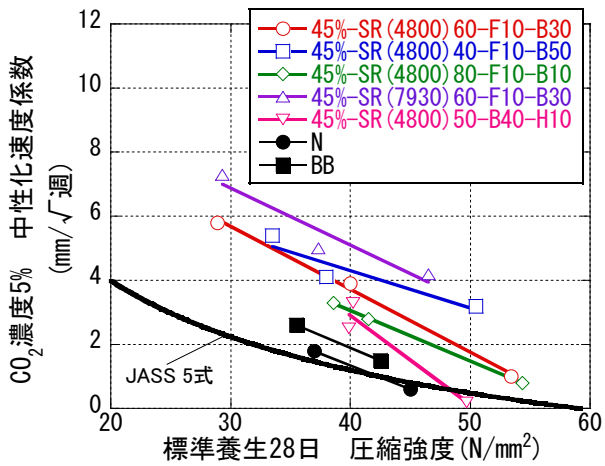


図 3.3.11 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (CO<sub>2</sub>濃度 5%促進環境下)

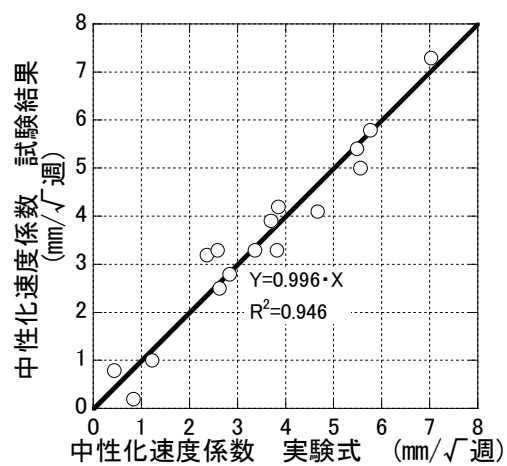


図 3.3.12 中性化速度係数式の精度

表 3.3.3 耐久性を満足するために必要な設計かぶり厚さ毎の標準養生 28 日圧縮強度

計画共用期間の級	配合	設計かぶり厚さ(mm)					
		屋内			屋外		
		20mm	30mm	40mm	30mm	40mm	50mm
短期(30年)	SR(4800)60-F10-B30	39.0	32.3	25.7	31.1	17.7	4.4
	SR(4800)40-F10-B50	42.2	35.6	29.0	34.3	20.9	7.6
	SR(4800)80-F10-B10	35.7	29.1	22.5	27.8	14.4	1.1
	SR(7930)60-F10-B30	46.1	39.5	32.9	38.2	24.8	11.5
	SR(4800)50-B40-H10	33.1	26.5	19.9	25.2	11.8	-1.5
標準(65年)	SR(4800)60-F10-B30	45.8	41.3	36.8	40.4	31.3	22.3
	SR(4800)40-F10-B50	49.1	44.6	40.1	43.7	34.6	25.6
	SR(4800)80-F10-B10	42.6	38.1	33.6	37.2	28.1	19.1
	SR(7930)60-F10-B30	53.0	48.4	44.0	47.6	38.5	29.4
	SR(4800)50-B40-H10	40.0	35.4	30.9	34.6	25.5	16.4
長期(100年)	SR(4800)60-F10-B30	48.6	45.0	41.4	44.3	37.0	29.7
	SR(4800)40-F10-B50	51.9	48.3	44.6	47.5	40.2	32.9
	SR(4800)80-F10-B10	45.4	41.8	38.1	41.0	33.7	26.4
	SR(7930)60-F10-B30	55.8	52.1	48.5	51.4	44.1	36.8
	SR(4800)50-B40-H10	42.8	39.1	35.5	38.4	31.1	23.8

・円柱供試体および実大壁部材による長期暴露実験

R-CF コンクリートの耐久性を実験的に明らかにすることを目的に、実大の壁部材およびφ100×200 mm 円柱供試体を作製し、10 年間に及ぶ長期暴露実験を開始した。長期暴露中性化試験体の暴露状況を写真 3.3.1 に、長期暴露実大壁試験体の暴露状況を写真 3.3.2 に示す。長期暴露中性化試験体は、写真 3.3.1 に示す様に、屋内および屋外にて長期暴露中であり、暴露条件下における中性化深さ試験を今後 10 年に亘り実施する予定である。長期暴露実大壁試験体は、材齢 1 年の時点のひび割れ観察の結果、目視で確認できるひび割れは生じていない。



写真 3.3.1 長期暴露中性化試験体の暴露状況



写真 3.3.2 長期暴露実大壁試験体の暴露状況

### 3. 3. 2 収縮特性の把握および収縮低減方法の検討

R-CF コンクリートの収縮特性を把握すると共に、収縮低減方法として無水石膏の効果を検討することを目的に、コンクリートの収縮率を評価する乾燥収縮試験(JIS A 1129)に準じた自由収縮試験を行った。フレッシュ試験および強度試験結果の一覧を表 3.3.5 に、R-CF コンクリートのスランプ試験結果を図 3.3.13 に、R-CF コンクリートの空気量試験結果を図 3.3.14 に示す。練混ぜ直後のスランプの目標値は 19cm とし、許容値は±2.5cm とした。また、練混ぜ直後の空気量の目標値は 4.5% とし、許容値は±1.5% とした。表 3.3.5 および図 3.3.13 から、これまでの結果と同様に、比表面積の高い SR(7930)を使用した水準において、混和剤の添加率が高い結果となった。また、無水石膏の添加により、R-CF コンクリートの偽凝結が改善される傾向が認められた。図 3.3.14 から、全水準において、空気量は 4.5±1.5% の範囲にあることを確認した。始発時間試験結果を図 3.3.15 に示す。図 3.3.15 から、比表面積の高い 45%-SR(7930)60-F10-B30 の始発時間は 3 時間程度と早く、無水石膏を添加しないそれ以外の R-CF コンクリートおよび N は 5.5 時間程度であった。また、無水石膏の添加により、始発時間が遅くなる傾向が認められた。圧縮強度試験結果を図 3.3.16 に示す。図 3.3.16 から、これまでの強度試験結果と同様に、結合材に対する SR セメントの混合率が B×60~80% と大きくなるほど高く、比表面積が低い SR セメントを使用した水準で強度が高い結果となった。

自由収縮試験結果の一覧を表 3.3.6 に、自由ひずみの経時変化を図 3.3.17～図 3.3.18 に、材齢 189 日の自由ひずみを図 3.3.19 に、乾燥開始時の自由ひずみを図 3.3.20 に、乾燥材齢 182 日の乾燥収縮ひずみを図 3.3.21 に示す。図 3.3.19 から、R-CF コンクリートの自由ひずみは B に比べて 100～200 $\mu$  程度大きい結果となった。また、SR セメントの混合率が最も低い 40%で自由ひずみが最も小さく、比表面積が高い SR セメントを使用した水準で収縮が大きい傾向にあった。図 3.3.20 から、R-CF コンクリートの乾燥開始時点の自由ひずみは、N に比べて 100～300 $\mu$  程度大きく、特に比表面積の高い SR セメントを用いた水準が著しく大きい結果となった。図 3.3.21 から、R-CF コンクリートの乾燥材齢 182 日時点の乾燥収縮ひずみは、N と同程度の結果であった。以上のことから、R-CF コンクリートの自由ひずみは N に対して 100～200 $\mu$  程度大きく、乾燥収縮ひずみは同等であった。また、自由ひずみの増大は、乾燥開始前の自己収縮ひずみに起因すると想定されることが明らかとなった。図 3.3.19～図 3.3.20 から、無水石膏を添加した R-CF コンクリートは、硬化直後に大きな膨張ひずみが得られ、長期的に普通コンクリートよりも自由ひずみが小さいことが確認された。以上のことから、R-CF コンクリートの収縮低減方法として、無水石膏の添加が有効であり、普通コンクリートよりも収縮率を低減できることが確認された。

図 3.3.22 は日本全国の生コン製品を対象として実施した収縮試験の結果を示している<sup>3.5)</sup>。一般的なコンクリートは、平均-800 $\mu$  程度であり、主に使用骨材の影響により広く分布していることが報告されている。図 3.3.19 の結果から、R-CF コンクリートの収縮率は普通コンクリートよりも 200 $\mu$  程度が大きくなることから、ベースとなるコンクリートの収縮率が-800 $\mu$  以下となる骨材を使用するか、それを超える場合には無水石膏を添加することにより、収縮率-800 $\mu$  以下(-10 $\times 10^{-4}$ 以下)の R-CF コンクリートが実現できるものと考えられる。

表 3.3.5 フレッシュ試験および強度試験結果の一覧

NO	記号	水 結合材 比 (%)	SP (B $\times$ %)	フレッシュ試験					凝結時間試験		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
				スランブ (cm)	フロー (mm)	空気量 (%)	温度 ( $^{\circ}$ C)	単位容積 質量 (kg/L)	始発		標準養生		標準養生	
									(時間)	(日)	28日	91日	28日	91日
1	45%-N	45	0.50%	18.0	308	3.4	19.6	2.361	5.44	0.23	48.7	56.2	34.7	35.9
2	45%-SR(4800)60-F10-B30	45	0.70%	18.5	331	4.8	20.0	2.301	5.47	0.23	39.8	48.0	33.6	35.8
3	45%-SR(4800)60-F10-B30+6	45	0.70%	20.0	336	4.8	20.6	2.301	6.25	0.26	41.1	49.6	32.5	38.2
4	45%-SR(4800)40-F10-B50	45	0.65%	18.5	305	5.2	16.0	2.294	5.45	0.23	34.0	40.0	30.4	40.7
5	45%-SR(4800)40-F10-B50+6	45	0.60%	20.0	351	3.2	18.0	2.340	6.86	0.29	40.9	47.5	36.8	40.8
6	45%-SR(4800)80-F10-B10	45	0.90%	18.5	313	3.9	19.8	2.324	5.37	0.22	41.6	51.3	32.7	37.3
7	45%-SR(4800)80-F10-B10+6	45	0.80%	16.5	284	4.3	19.5	2.317	5.40	0.22	41.6	51.2	30.9	34.9
8	45%-SR(7930)60-F10-B30	45	2.00%	20.5	318	4.9	20.9	2.285	3.07	0.13	34.4	40.6	29.6	35.7
9	45%-SR(7930)60-F10-B30+6	45	2.00%	20.0	313	4.1	17.8	2.308	8.00	0.33	42.8	49.6	33.2	37.1
10	45%-SR(4800)50-B40-H10+6	45	0.60%	18.0	307	3.7	21.2	2.337	6.12	0.25	46.9	55.6	35.7	38.2

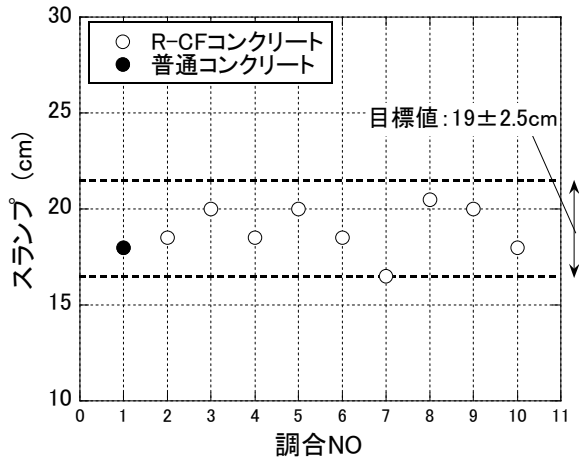


図 3.3.13 スランプ試験結果

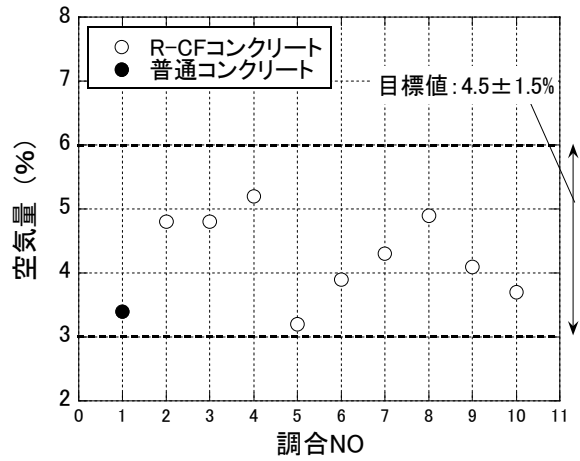


図 3.3.14 空気量試験結果

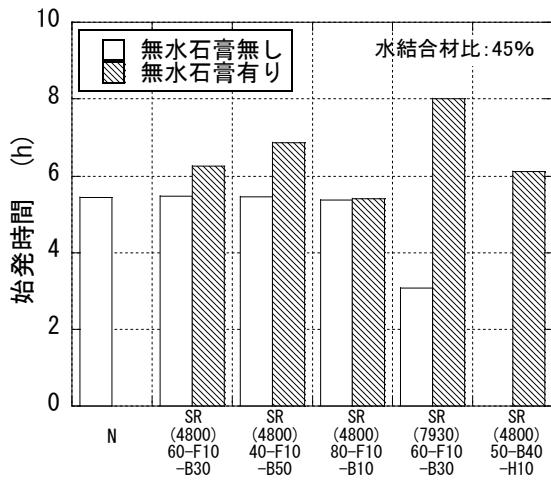


図 3.3.15 始発時間試験結果

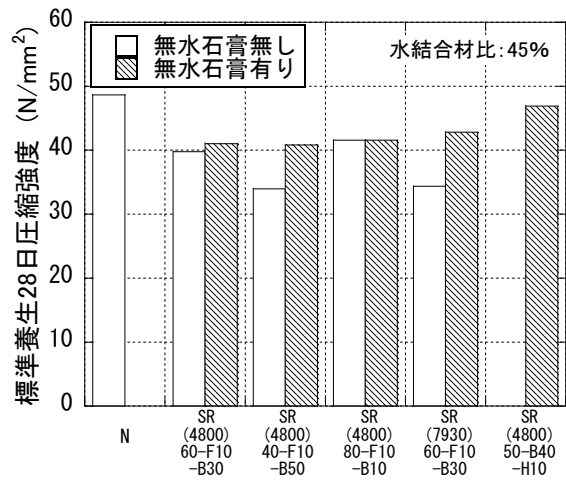


図 3.3.16 圧縮強度試験結果

表 3.3.6 自由収縮試験結果の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	自由収縮試験		
			材齢189日 自由ひずみ (μ)	乾燥開始時点の 自由ひずみ (μ)	乾燥材齢182日 乾燥収縮ひずみ(μ)
1	45%-N	45	-491	-15	-476
2	45%-SR(4800)60-F10-B30	45	-690	-174	-516
3	45%-SR(4800)60-F10-B30+6	45	-333	150	-483
4	45%-SR(4800)40-F10-B50	45	-611	-135	-476
5	45%-SR(4800)40-F10-B50+6	45	-282	143	-425
6	45%-SR(4800)80-F10-B10	45	-668	-136	-532
7	45%-SR(4800)80-F10-B10+6	45	-355	154	-508
8	45%-SR(7930)60-F10-B30	45	-724	-307	-417
9	45%-SR(7930)60-F10-B30+6	45	-619	-201	-418
10	45%-SR(4800)50-B40-H10+6	45	-335	96	-431

\*+側: 膨張ひずみ、-側: 収縮ひずみ

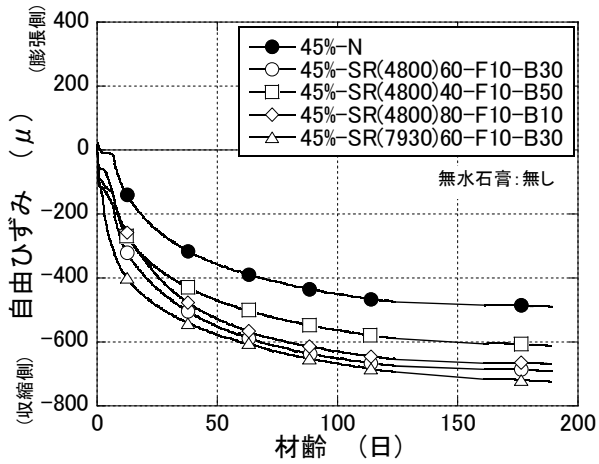


図 3.3.17 自由ひずみの結果(無水石膏無し)

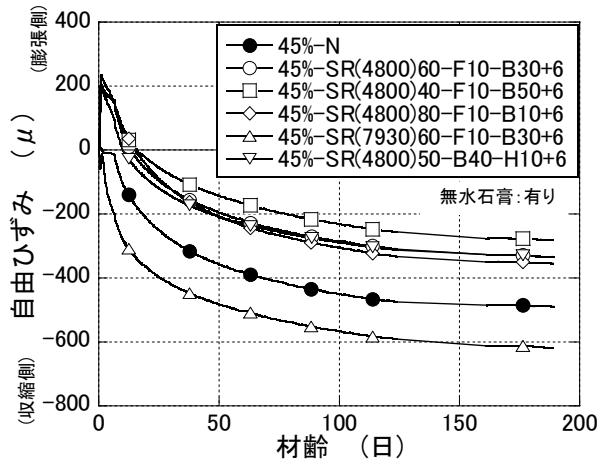


図 3.3.18 自由ひずみの結果(無水石膏有り)

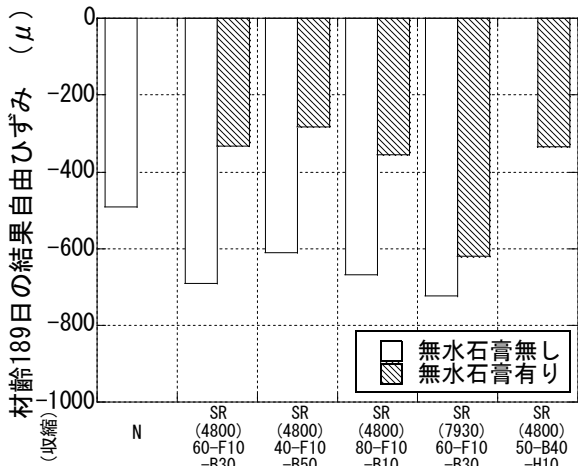


図 3.3.19 材齢 189 日の自由ひずみ結果

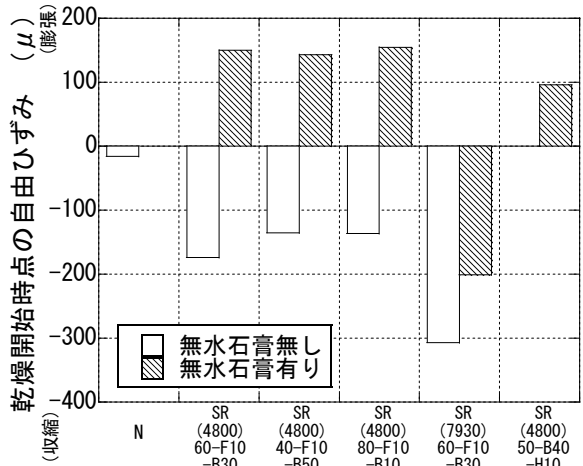


図 3.3.20 乾燥開始時の自由ひずみ結果

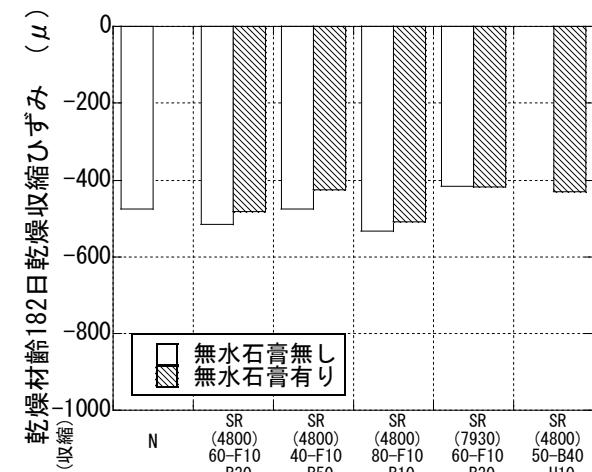


図 3.3.21 乾燥材齢 182 日の乾燥収縮ひずみ

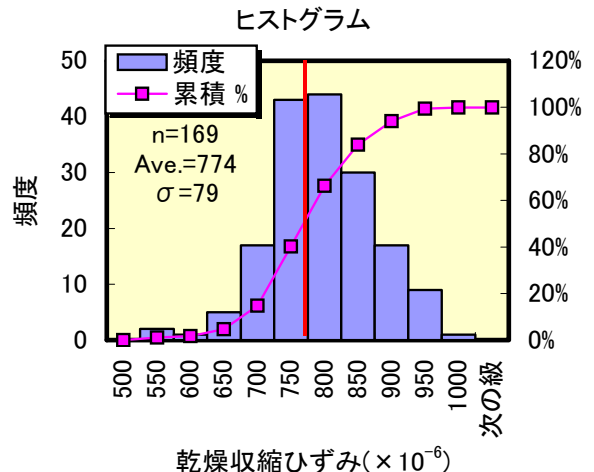


図 3.3.22 日本全国の生コン製品を対象として実施した収縮試験の結果 3.5)

### 3. 3. 3 プレキャスト RC 部材ひび割れ制御方法の確立

R-CF コンクリートのプレキャスト部材における収縮ひび割れ抵抗性を検討することを目的に、プレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験を行った。強度特性実験結果の一覧を表 3.3.6 に、圧縮強度試験の結果を図 3.3.23 に示す。図 3.3.23 から、R-CF コンクリートの標準養生 28 日圧縮強度は、N に対して  $8\text{N/mm}^2$  程度低い結果であったが、R-CF コンクリートの蒸気養生 28 日圧縮強度は N に対して  $12\text{N/mm}^2$  程度低い結果となった。

拘束ひび割れ実験結果の一覧を表 3.3.7 に、蒸気養生条件における自由ひずみ結果を図 3.3.24 に示す。図 3.3.24 の自由ひずみは蒸気養生の温度変化に伴い生じる温度ひずみを除去した値であるが、コンクリートの種類によらず、いずれも大きな膨張ひずみが得られる結果となった。この原因としては、コンクリートの線膨張係数は、加水直後では大きく、その後急激に小さくなることが知られており、温度ひずみが温度上昇時には大きく、温度降下時では小さくなり、温度上昇時の膨張ひずみが残ったことが可能性として考えられる。材齢 7 日以降は、気乾養生であり乾燥に伴い収縮している。材齢 80 日時点の自由ひずみは、普通コンクリートが  $0\mu$  程度であるのに対し、R-CF コンクリートは収縮側にて  $300\mu$  程度であり、蒸気養生条件下において R-CF コンクリートの方が自由ひずみが大きい結果となった。

蒸気養生条件における拘束ひび割れ試験体の実ひずみを図 3.3.25 に示す。図 3.3.25 から、拘束ひび割れ試験体の実ひずみにおいても、自由ひずみと同様に、初期に膨張ひずみが残存しており、乾燥開始後収縮が進行する挙動を示した。実ひずみは自由ひずみに対して、初期の膨張ひずみ、乾燥開始後の収縮ひずみが小さいが、これは内部鉄筋に拘束されたためと考えられる。

蒸気養生条件における応力およびひび割れ強度結果を図 3.3.26 に示す。拘束ひび割れ試験の実ひずみ測定結果から、鉄筋とコンクリートの力の釣り合いによりコンクリートに生じている応力を算定した。ひび割れ強度は、割裂引張強度試験結果に 0.7 を乗じて算定した。図 3.3.26 から、硬化初期には圧縮応力が導入されており、自由収縮試験において膨張ひずみが得られた挙動と合致する傾向が認められた。その後、乾燥収縮の進展に伴って引張応力が大きくなっているが、N で  $0.2\text{N/mm}^2$  程度、R-CF コンクリートにおいても  $1.0\text{N/mm}^2$  程度の引張応力であり、コンクリートのひび割れ強度に対して小さく、今後もしび割れが生じない可能性が高いと考えられる。

本実験はプレキャスト部材で比較的内部的鉄筋量の多い梁部材を想定して、鉄筋比 3.8% で実験を行っており、この条件においてもひび割れが生じていないことから、R-CF コンクリートでプレキャスト部材を製造した際に、収縮ひび割れが過大となる可能性は低いと予想される。また、拘束ひび割れ試験における引張応力は、自由収縮試験の収縮率と高い相関があることから、前記収縮率の把握と石膏添加による収縮率の低減により、プレキャスト部材におけるひび割れを制御できるものと考えられる。

表 3.3.6 強度特性実験の一覧

NO	記号	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )						ヤング係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )						割裂引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )		
		標準養生		蒸気養生				標準養生		蒸気養生				標準養生		
		28日	91日	3日	7日	28日	91日	28日	91日	3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
1	45%-N	48.7	56.2	20.3	24.4	31.7	34.5	34.7	35.9	22.4	26.0	22.7	25.1	2.22	2.50	2.11
2	45%-SR(4800)60 -F10-B30	39.8	48.0	30.7	35.5	43.8	44.9	33.6	35.8	28.0	29.7	30.7	29.0	2.96	3.48	2.55

表 3.3.7 拘束ひび割れ実験結果の一覧

NO	記号	自由収縮試験 材齢80日 自由ひずみ ( $\mu$ )	拘束ひび割れ試験					
			材齢80日 実ひずみ( $\mu$ )			材齢80日 引張応力(N/mm <sup>2</sup> )		
			①	②	平均	①	②	平均
1	45%-N	-20	-55	-13	-34	0.43	0.10	0.27
2	45%-SR(4800)60-F10-B30	-323	-169	-157	-163	1.31	1.22	1.27

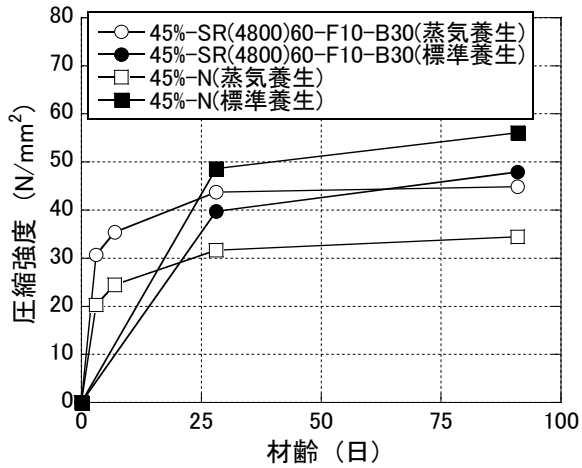


図 3.3.23 圧縮強度試験の結果

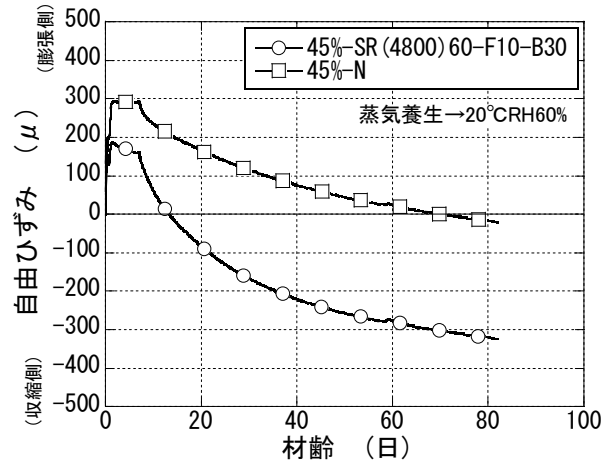


図 3.3.24 蒸気養生における自由ひずみ結果

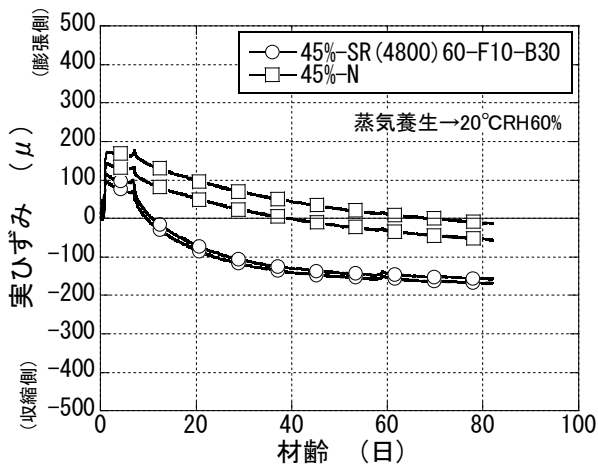


図 3.3.25 蒸気養生条件における実ひずみ結果

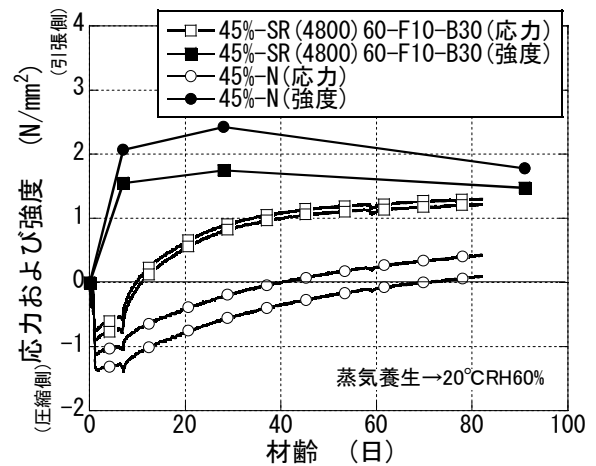


図 3.3.26 蒸気養生条件における  
応力およびひび割れ強度結果



### 3. 4 R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法確立に関する研究

#### 3. 4. 1 プレキャスト工場での製造検討

##### ・ 混和剤検討実験

R-CF コンクリートの製造方法確立を目指し、実際のプレキャスト工場にて実大規模の部材製作実験を行うことを念頭に、スランプ保持性および脱型時強度に大きな影響を及ぼす混和剤の検討実験を行った。混和剤の検討実験結果の一覧を表 3.4.1 に、R-CF コンクリートのスランプ試験結果を図 3.4.1 に、R-CF コンクリートの空気量試験結果を図 3.4.2 に示す。練混ぜ直後のフレッシュ試験の目標値は、45%-N ではスランプ  $10\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量  $4.5\pm 1.5\%$  とし、45%-SR(6550)50- B40-N10 ではロスを考慮してスランプ  $15\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量  $4.5\pm 1.5\%$  とした。図 3.4.1 および図 3.4.2 から、練直のスランプおよび空気量は、許容値を満足するコンクリートであることを確認した。

スランプの経時変化を図 3.4.3 に、スランプロス試験結果を図 3.4.4 に、スランプの経時変化の状況を写真 3.4.1～写真 3.4.3 に示す。45%-N(A)は、練直のスランプは 10cm であるが、30 分後のスランプは 5cm であり、スランプロスも小さく、プレキャスト部材を施工するのに適したフレッシュ性状を有していた。プレキャスト工場で通常使用している混和剤 A を用いた 45%-SR(6550)50- B40-N10(A)では、練直のスランプは 15cm 程度であるが、30 分後のスランプは 0cm であり、スランプロスが大きく、プレキャスト部材を施工は困難であると判断された。レディーミクストコンクリートで汎用的に用いられる混和剤 B、低粘性型の混和剤 C は、混和剤 A に対しスランプロスが軽減された。特に、混和剤 B を用いた R-CF コンクリートは、N に対してスランプロスが大きいものの、30 分経過時点で 5cm 程度のスランプを有しており、プレキャスト部材の製造が可能な施工性を有していると判断された。

凝結試験結果を図 3.4. に示す。表 3.4.1 および図 3.4.5 から、混和剤 A を用いた N の始発時間は 4.4 時間であるのに対し、混和剤 A を用いた R-CF コンクリートの始発時間は 2.9 時間、混和剤 B および混和剤 C を用いた R-CF コンクリートの始発時間は 5.5 時間であった。このことから、R-CF コンクリートは N に対して始発時間が早くなること、R-CF コンクリートにおいても混和剤を選定することで N と同程度の始発時間にすることが可能であることが確認された。

蒸気養生における圧縮強度試験結果を図 3.4.6 に示す。図 3.4.6 から、R-CF コンクリートの 18 時間強度は N に対して低く、R-CF コンクリートの長期強度は N と同等以上の結果が得られた。プレキャスト部材の製造では、蒸気養生を行い材齢 18 時間程度で脱型を行うことから、初期強度の確保が必須であり、調合検討において R-CF コンクリートの初期強度発現を確認する必要がある。

以上の検討結果から、プレキャスト工場で通常使用している混和剤を用いた R-CF コンクリートは、スランプロスが大きく施工性が低下しプレキャスト部材の製造は困難であること、今回検討した 3 種の中では混和剤 B を用いた R-CF コンクリートが最もスランプロスが小さく、プレキャスト部材の製造が可能な施工性を有していることが確認されたことから、室内試験による調合検討で使用する混和剤として、混和剤 B を選定し検討を行うこととした。

表 3.4.1 混和剤の検討実験結果の一覧

NO	記号	混和剤種類	SP (B×%)	フレッシュ試験						凝結時間試験		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				
				経時 (分)	スランプ (cm)	フロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積質量 (kg/L)	始発 (時間)	終結 (時間)	蒸気養生				標準養生
												18時間	7日	14日	28日	28日
1	45%-N(A)	混和剤A	0.70%	練直	12.5	218	3.9	21.5	2.334	4.40	6.07	27.3	32.5	35.5	38.9	47.5
				30分	7.0	211	3.5	21.8	2.347							
2	45%-SR(6550)50-B40-N10(A)	混和剤A	1.70%	練直	16.5	244	5.0	20.5	2.275	2.93	11.33	20.1	31.7	35.8	40.3	49.7
				30分	0.5	198	1.8	20.9	2.354							
3	45%-SR(6550)50-B40-N10(B)	混和剤B	1.75%	練直	14.0	227	5.7	20.9	2.260	5.86	11.75	19.1	30.1	34.3	39.2	47.8
				30分	4.0	203	3.1	20.9	2.330							
4	45%-SR(6550)50-B40-N10(C)	混和剤C	1.60%	練直	14.5	241	3.3	20.4	2.315	5.29	13.62	19.6	32.1	39.8	44.5	55.1
				30分	1.5	201	2.1	-	2.345							

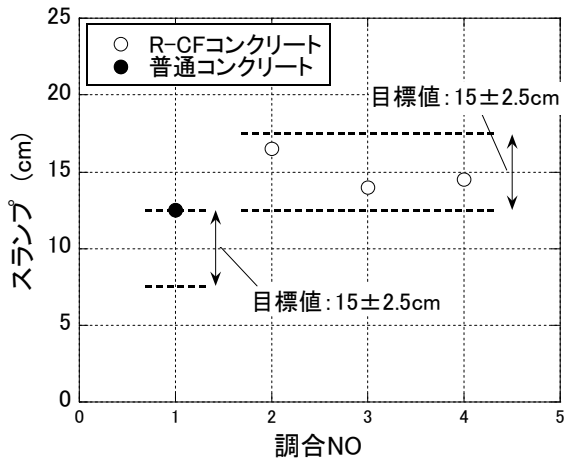


図 3.4.1 スランプ試験結果

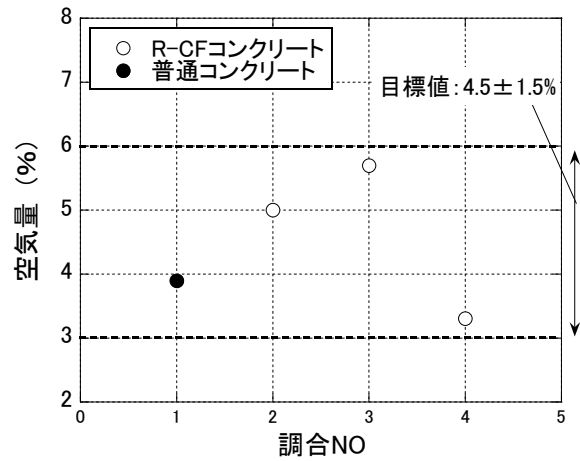


図 3.4.2 空気量試験結果

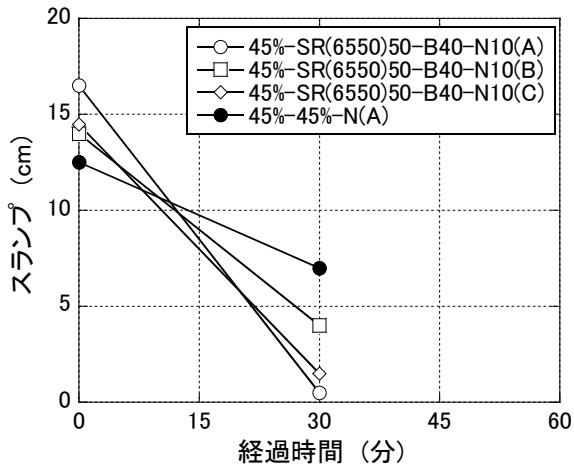


図 3.4.3 スランプの経時変化

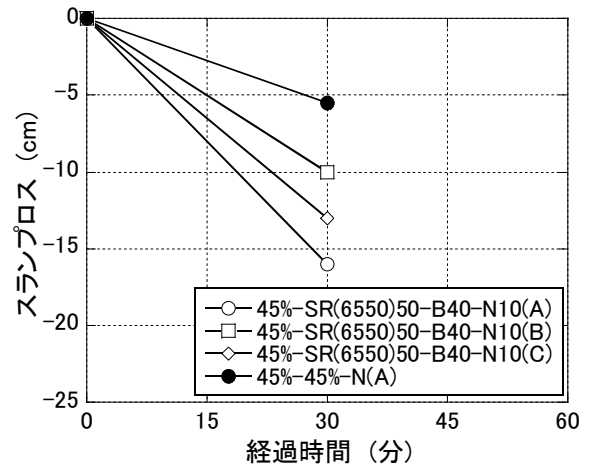


図 3.4.4 スランプロス試験結果



写真 3.4.1 スランプの経時変化(45%-N(A), 左：練直, 右：30分経過)



写真 3.4.2 スランプの経時変化(45%-SR(6550)50-B40-N10(A), 左：練直, 右：30分経過)



写真 3.4.3 スランプの経時変化(45%-SR(6550)50-B40-N10(B), 左：練直, 右：30分経過)

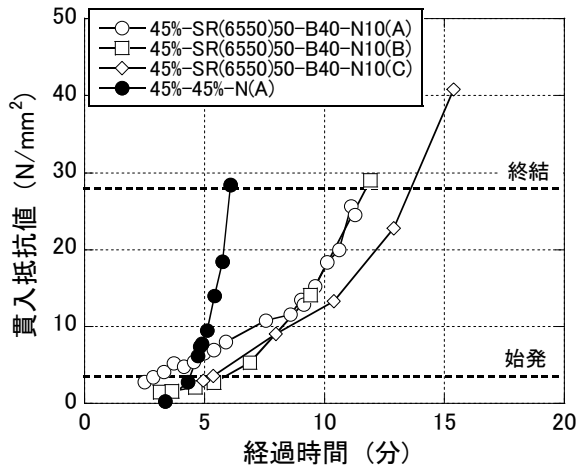


図 3.4.5 凝結時間試験の結果

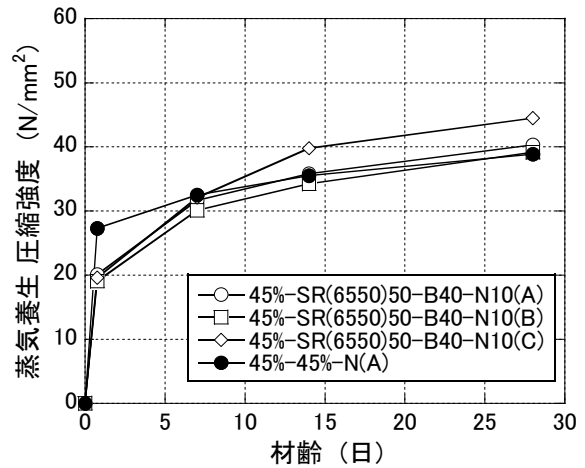


図 3.4.6 蒸気養生における圧縮強度試験結果

・室内試験による調合検討実験

混和剤検討実験で選定した混和剤 B を用いて、室内試験による調合検討実験を実施した。フレッシュ試験および凝結時間試験結果の一覧を表 3.4.2 に、R-CF コンクリートのスランプ試験結果を図 3.4.7 に、R-CF コンクリートの空気量試験結果を図 3.4.8 に、混和剤添加量の結果を図 3.4.9 に示す。練混ぜ直後のフレッシュ試験の目標値は、N ではスランプ  $10 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量  $4.5 \pm 1.5\%$  とし、R-CF コンクリートではロスを考慮してスランプ  $15 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量  $4.5 \pm 1.5\%$  とした。図 3.4.7 および図 3.4.8 から、練直のスランプおよび空気量は、許容値を満足するコンクリートであることを確認した。図 3.4.9 から、R-CF コンクリートは N に対して粘性が増大する傾向があり、スランプロスを考慮し練直のスランプを大きくする必要があることから混和剤添加量が増大する結果となった。また、比表面積の大きい SR セメントを使用した水準においてその傾向は顕著であった。

凝結時間試験の結果を図 3.4.10～図 3.4.12 に示す。図 3.4.10～図 3.4.12 から、混和剤 B を使用した R-CF コンクリートは、混和剤 A を使用した N に対して、始発時間および終結時間が遅れる傾向が認められた。これは混和剤種類が異なることに加えて、R-CF コンクリートは粘性が高く、混和剤添加量が多くなったことも一因であると考えられる。

圧縮強度試験結果の一覧の一覧を表 3.4.3 に、標準養生における結合材水比と圧縮強度の関係を図 3.4.13 に示す。図 3.4.13 から、本実験では、少量の普通 PC を添加した R-CF コンクリートである SR60(6550)-B40-N10 および SR60(8580)-B40-N10 についても検討しており、これらの標準養生 28 日圧縮強度は、N と同程度か若干低い結果となった。

蒸気養生 18 時間圧縮強度の結果を図 3.4.14 に示す。プレキャスト部材の製造では、蒸気養生を行い材齢 18 時間程度で脱型を行うことから、脱型時に  $12\text{N/mm}^2$  以上の圧縮強度が必要となる。図 3.4.14 から、R-CF コンクリートの蒸気養生 18 時間圧縮強度は、N に対して劣るものの、脱型時に必要とされる  $12\text{N/mm}^2$  以上を満足していることから、R-CF コンクリートにおいても、プレキャスト製造における脱型時強度を確保できるものと考えられる。

長期材齢にわたる蒸気養生圧縮強度の結果を図 3.4.15～図 3.4.16 に示す。プレキャスト部材は、出荷時に必要強度を満足する必要があるが、近年では富調合とし材齢 7 日で所要の圧縮強度を発現させる調合設計を採用するケースが多い。この手法は長期強度の伸びを考慮していないため安全率が高く、セメント量が増大するため、経済性および環境負荷の観点から不利益が生じると言える。図 3.4.15～図 3.4.16 から、R-CF コンクリートの 7 日圧縮強度は、N に対して劣るものの、その後の長期強度は増加している。N の 7 日圧縮強度が出荷時に必要な強度であると考えられ、R-CF コンクリートの 28 日圧縮強度は、調合により差はあるものの、N の 7 日圧縮強度と概ね同等となる。即ち、R-CF コンクリートの出荷時材齢を 28 日として管理することにより、N と同じ水結合材比とすることができ、経済的な調合設計が実現する可能性があると考えられる。

表 3.4.2 フレッシュ試験および凝結時間試験結果の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	SP(A) (B×%)	SP(B) (B×%)	フレッシュ試験					凝結時間試験	
					スランプ (cm)	フロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積質量 (kg/L)	始発 (時間)	終結 (時間)
1	45%-N	45	0.70%	-	10.5	223	5.7	20.7	2.283	3.85	5.26
2	35%-N	35	0.75%	-	8.5	212	3.5	21.9	2.358	3.11	4.40
3	45%-SR(6550)60-F10-B30	45	-	1.95%	17.0	254	5.2	19.8	2.265	4.47	8.47
4	35%-SR(6550)60-F10-B30	35	-	2.35%	14.0	229	5.7	20.6	2.258	3.37	7.61
5	45%-SR(6550)60-F10-B30+6	45	-	1.85%	12.5	221	5.6	19.9	2.253	7.60	12.11
6	45%-SR(6550)60-B40-N10	45	-	1.75%	14.5	241	6.2	20.8	2.249	5.53	9.31
7	35%-SR(6550)60-B40-N10	35	-	1.95%	13.5	227	4.9	20.4	2.288	3.63	7.34
8	45%-SR(8580)60-B40-N10	45	-	3.00%	14.5	238	3.8	20.5	2.302	4.13	9.47

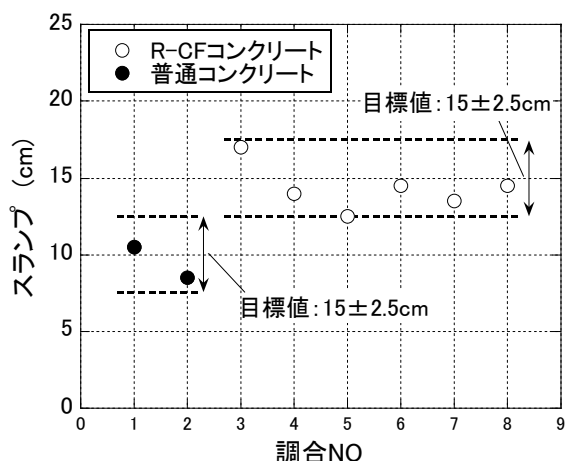


図 3.4.7 スランプ試験結果

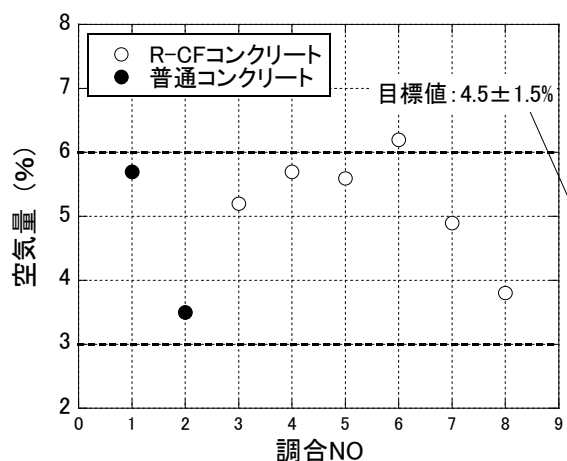


図 3.4.8 空気量試験結果

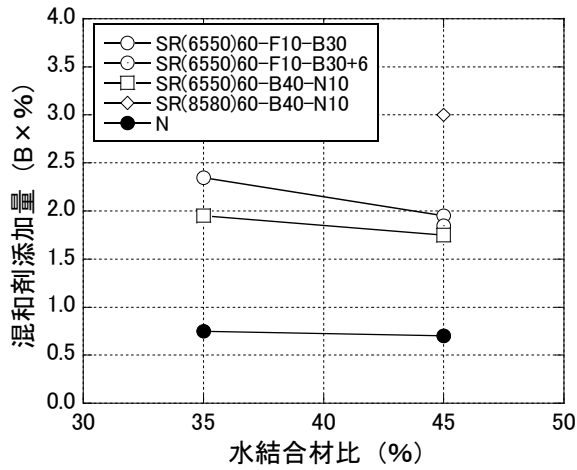


図 3.4.9 混和剤添加量の結果

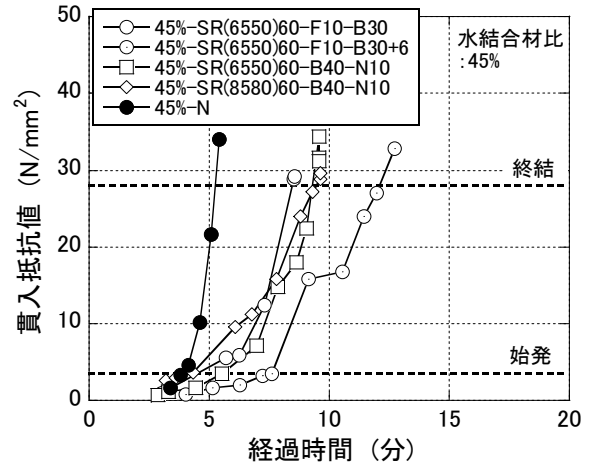


図 3.4.10 凝結時間試験の結果

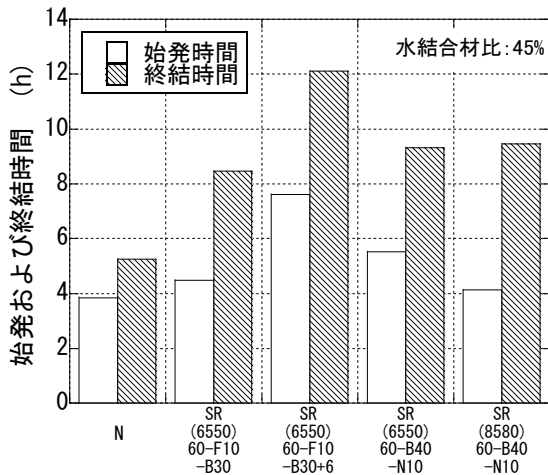


図 3.4.11 凝結時間試験の結果(W/B45%)

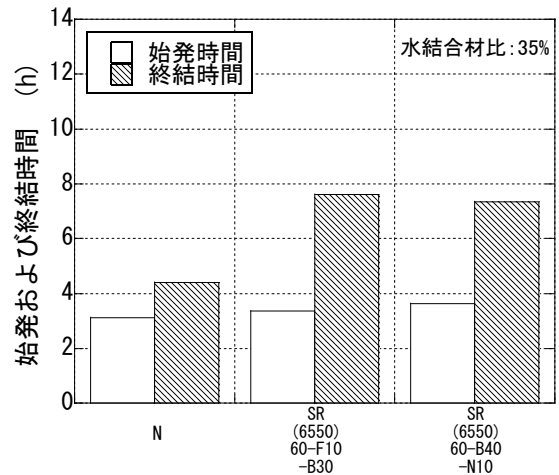


図 3.4.12 凝結時間試験の結果(W/B35%)

表 3.4.3 圧縮強度試験結果の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )						
			蒸気養生						標準養生
			18時間	3日	7日	14日	28日	91日	28日
1	45%-N	45	29.0	33.9	36.3	40.0	43.0	50.0	45.3
2	35%-N	35	45.0	46.9	48.6	53.4	56.5	64.4	63.3
3	45%-SR(6550)60-F10-B30	45	16.3	20.3	25.6	30.9	34.8	42.1	38.7
4	35%-SR(6550)60-F10-B30	35	25.8	31.5	36.9	41.4	45.4	54.6	47.1
5	45%-SR(6550)60-F10-B30+6	45	16.7	20.4	25.0	28.4	33.4	37.4	45.3
6	45%-SR(6550)60-B40-N10	45	20.0	23.9	28.1	32.2	35.2	40.0	46.0
7	35%-SR(6550)60-B40-N10	35	33.9	41.6	47.2	50.4	54.5	62.6	60.6
8	45%-SR(8580)60-B40-N10	45	22.4	28.6	34.2	37.7	41.9	47.7	49.0

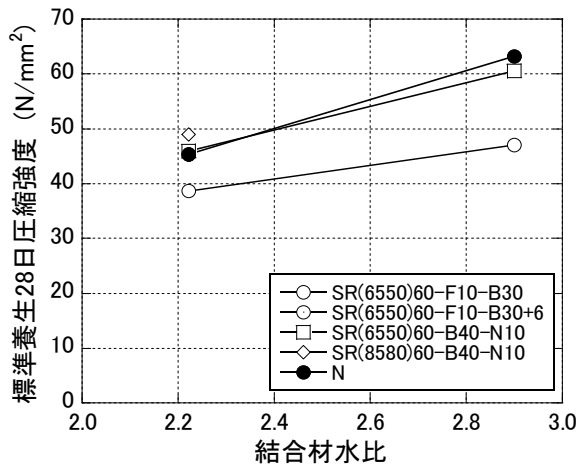


図 3.4.13 結合材水比と圧縮強度の関係

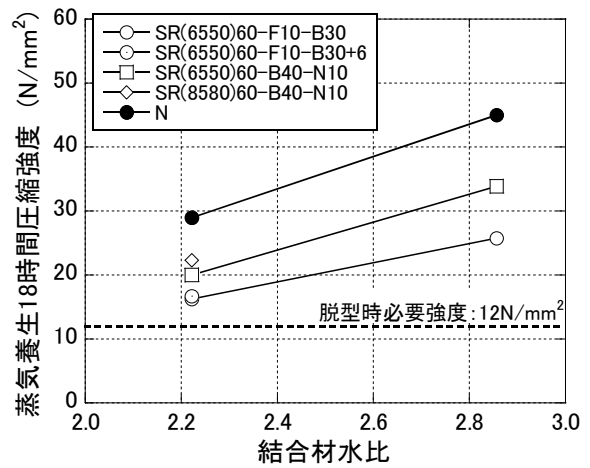


図 3.4.14 蒸気養生 18 時間圧縮強度の結果

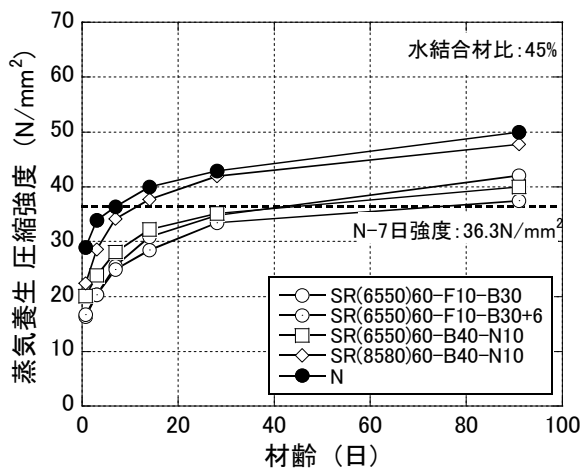


図 3.4.15 蒸気養生圧縮強度の結果(W/B45%)

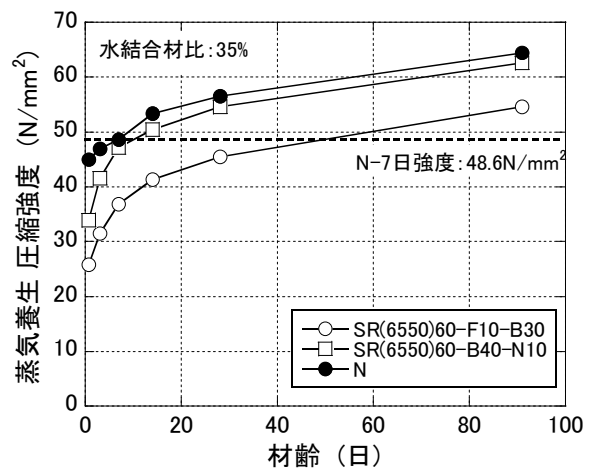


図 3.4.16 蒸気養生圧縮強度の結果(W/B35%)

・実大規模の部材製作実験

室内試験による調査検討の結果を踏まえ、実際のプレキャスト工場にて、R-CF コンクリートによる実大規模の部材製作実験を実施した。これまでの検討結果から、SR セメントの比表面積が低いほど、R-CF コンクリートの施工性・強度特性・耐久性が向上することが確認できている。本実験では、安全側の検討として、7630cm<sup>2</sup>/g の比表面積が比較的高い SR セメントを使用することとした。

フレッシュ試験結果の一覧を表 3.4.4 に、スランプ試験結果を図 3.4.17 に、スランプロスの結果を図 3.4.18 に、混和剤添加量の結果を図 3.4.19 に、空気量結果を図 3.4.20 に示す。図 3.4.17～図 3.4.18 から、N のスランプロスは 5cm 程度であるのに対し、R-CF コンクリートのスランプロスは、W/B45% で 8cm 程度、W/B35% で 15cm 程度であった。本実験では、比表面積の高い SR(7630)を使用していることも粘着性が高く、スランプロスも大きい結果となった。特に W/B35% で、その傾向が顕著であった。図 3.4.19 から、N の混和剤添加量は B×0.7% であるのに対し、R-CF コンクリートの混和剤添加量は、B×2.5～3.0% 程度であった。図 3.4.20 から、練混ぜ直後の空気量は、概ね目標値を満足する結果となった。

部材製作実験の打設状況を写真 3.4.4 に、部材製作実験により製作した部材および試験体の外観を写真 3.4.5 に示す。上述の様に、比表面積の高い SR(7630)を使用したことにより、R-CF コンクリートの粘性が高くなり若干施工性は低下したものの、本検討で計画した面部材用の模擬試験体、梁部材用の模擬試験体および各種試験用の試験体を製造することができた。R-CF コンクリートにより製造した模擬試験体の外観は、大きな空隙などの施工不良は無く良好な仕上がりであった。

圧縮強度試験結果の一覧を表 3.4.5 に、結合材水比と標準養生強度の関係を図 3.4.21 に、結合材水比とコア強度の関係を図 3.4.22 に示す。図 3.4.21～図 3.4.22 から、標準養生強度およびコア強度共に、45%-SR(7630)50-B40-H10 は N に対し 10N/mm<sup>2</sup> 程度低く、45%-SR(7630)60-F10-B30 は N に対し 20N/mm<sup>2</sup> 程度低い結果となった。本実験では、比表面積の高い SR(7630)を使用したため、N に対する強度の低下量が大きい結果となったが、比表面積の低い SR セメントを使用することで、標準養生強度およびコア強度の改善が期待できると考えられる。また、図 3.4.22 から、R-CF コンクリートのコア強度は最大 55N/mm<sup>2</sup> 程度を満足しており、本研究の目標の一つである設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup> 以上を達成できることが、模擬試験体のコア強度により確認できた。

圧縮強度試験の結果を図 3.4.23～図 3.4.25 に、面部材模擬試験体の構造体強度補正值の結果を図 3.4.26 に示す。図 3.4.23～図 3.4.25 から、コンクリート種類によらず、標準養生圧縮強度は長期的に増加するのに対し、硬化初期に蒸気養生を実施した模擬試験体のコア強度は、材齢 28 日以降の顕著な強度増進は認められなかった。図 3.4.26 は、コンクリートの調合設計に必要な構造体強度補正值(標準養生 28 日強度と 91 日コア強度の差)であり、N の構造体強度補正值は 2～10N/mm<sup>2</sup> 程度であるのに対し、R-CF コンクリートの構造体強度補正值は 2～9N/mm<sup>2</sup> 程度の範囲にあり、両者に大きな差がない結果となった。以上の部材製作実験結果から、R-CF コンクリートの施工性、脱型時強度、コア強度などの実製造に必要なデータが得られ、一般プレキャスト工場において、R-CF コンクリートによるプレキャスト部材の製造が可能であることが確認された。

表 3.4.4 フレッシュ試験結果の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	SP(A) (B×%)	SP(B) (B×%)	フレッシュ試験					
					経時 (分)	スランプ (cm)	フロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積質量 (kg/L)
1	55%-N	55	0.60%	-	練直	11.0	206	5.5	17.7	2.266
					30分	8.0	209	5.0	17.8	2.278
2	45%-N	45	0.70%	-	練直	10.0	219	5.5	17.8	2.286
					30分	4.0	203	3.6	17.9	2.340
3	35%-N	35	0.75%	-	練直	12.5	232	3.2	18.2	2.366
					30分	9.0	213	2.6	18.1	2.383
4	45%-SR(7630)60-F10-B30	45	-	2.60%	練直	11.5	222	3.7	18.9	2.288
					30分	2.5	200	2.8	19.3	2.313
5	35%-SR(7630)60-F10-B30	35	-	3.00%	練直	17.0	220	3.0	20.7	2.317
					30分	0.0	197	1.6	20.4	2.303
6	45%-SR(7630)50-B40-N10	45	-	2.40%	練直	11.5	210	5.4	19.4	2.258
					30分	6.0	207	3.5	20.1	2.306
7	35%-SR(7630)50-B40-N10	35	-	2.60%	練直	18.5	255	2.9	20.4	2.332
					30分	4.5	200	2.1	20.4	2.346



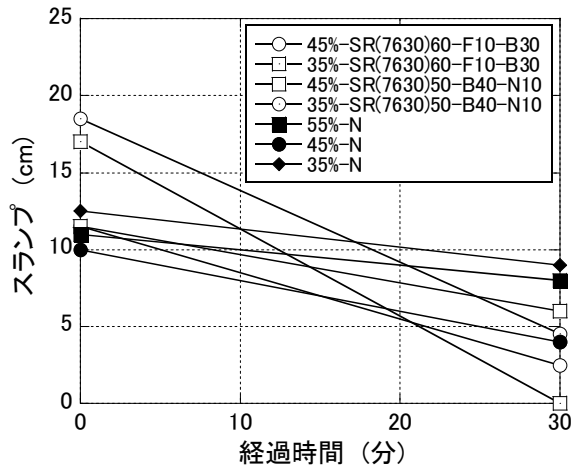


図 3.4.17 スランプ試験結果

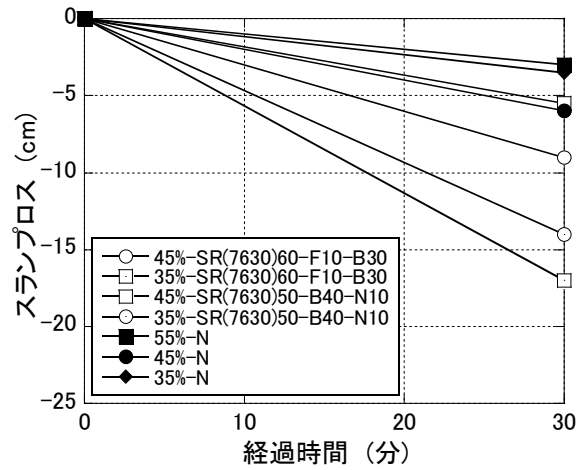


図 3.4.18 スランプロスの結果

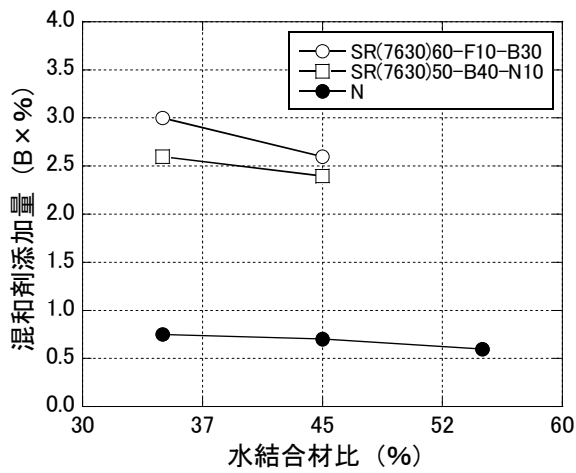


図 3.4.19 混和剤添加量の結果

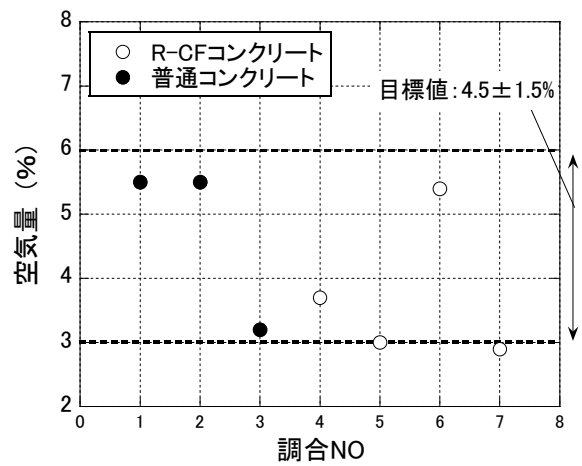


図 3.4.20 空気量試験結果



写真 3.4.4 部材製作実験の打設状況



写真 3.4.5 部材製作実験により製作した部材および試験体の外観

表 3.4.5 圧縮強度試験結果の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	標準養生 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		コア強度(N/mm <sup>2</sup> )				構造体強度補正值 (N/mm <sup>2</sup> )	
			28日	91日	面部材 模擬試験体		梁部材 模擬試験体		面部材 模擬試験体	梁部材 模擬試験体
					28日	91日	28日	91日		
1	55%-N	55	34.2	37.1	37.6	38.7	-	-	-4.5	-
2	45%-N	45	49.7	56.7	45.3	47.0	43.3	45.3	2.7	4.4
3	35%-N	35	69.9	79.2	52.8	59.6	-	-	10.3	-
4	45%-SR(7630)60-F10-B30	45	35.3	43.5	21.3	26.7	27.1	28.8	8.7	6.5
5	35%-SR(7630)60-F10-B30	35	48.2	56.7	36.1	38.8	-	-	9.4	-
6	45%-SR(7630)50-B40-N10	45	38.4	43.7	30.8	36.2	37.1	38.8	2.2	-0.3
7	35%-SR(7630)50-B40-N10	35	58.8	67.3	48.5	53.7	-	-	5.2	-

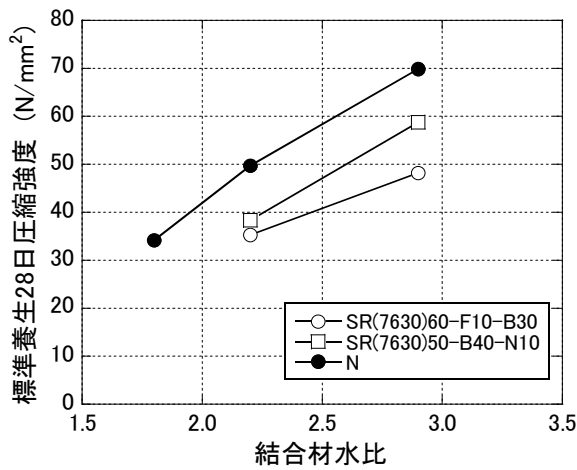


図 3.4.21 結合材水比と標準養生強度の関係

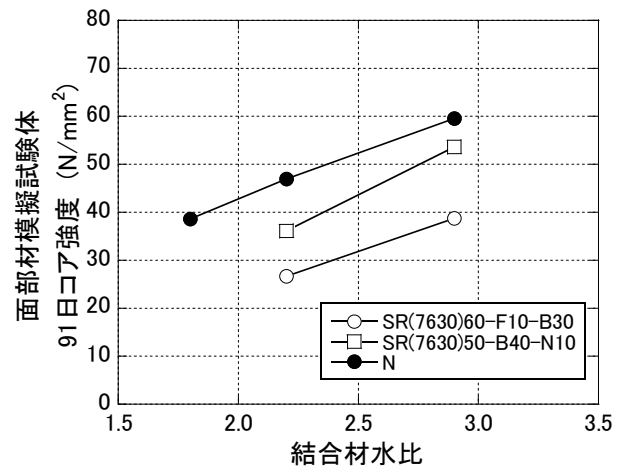


図 3.4.22 結合材水比とコア強度の関係

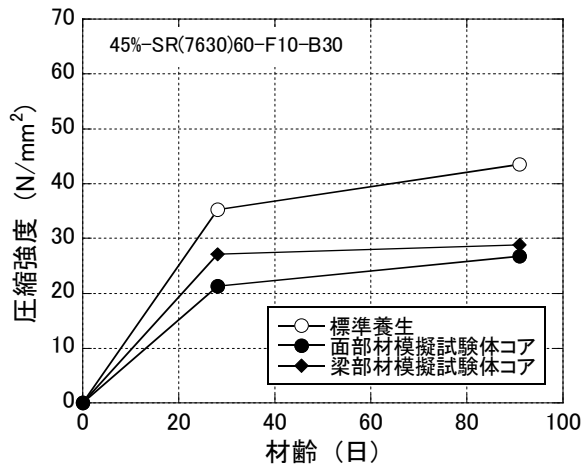


図 3.4.23 圧縮強度試験の結果  
(45%-SR(7630)60-F10-B30)

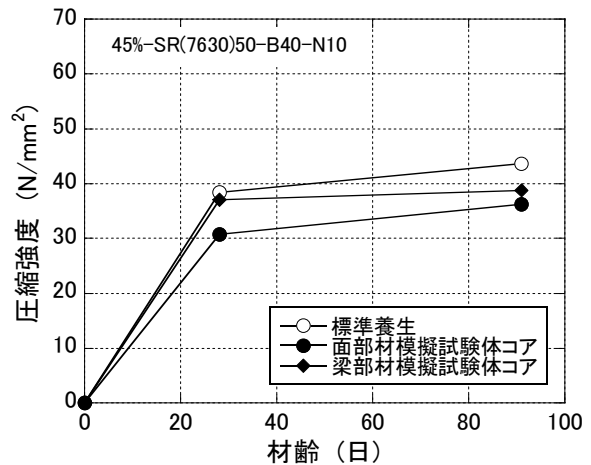


図 3.4.24 圧縮強度試験の結果  
(45%-SR(7630)50-B40-N10)

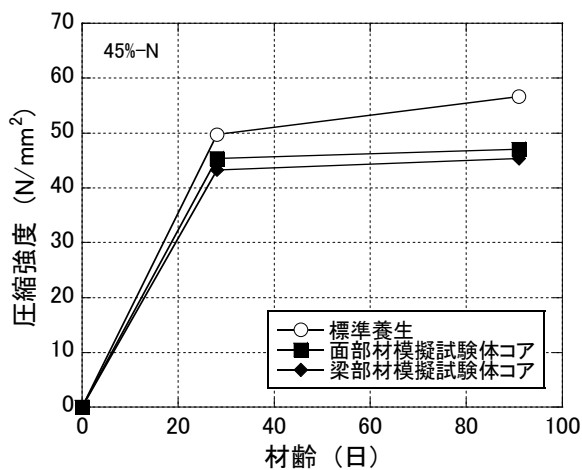


図 3.4.25 圧縮強度試験の結果(45%-N)

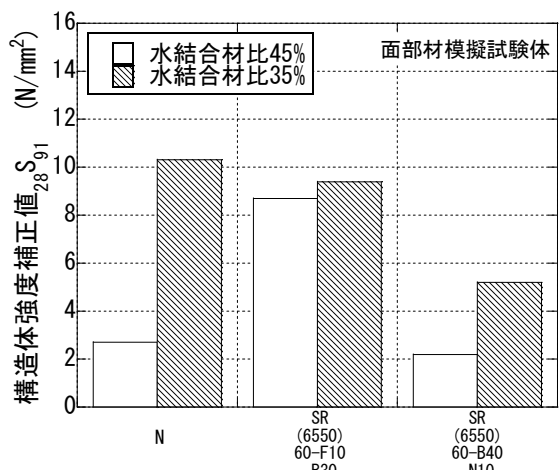


図 3.4.26 面部材模擬試験体の  
構造体強度補正值の結果

### 3. 4. 2 鉄筋腐食抵抗性の検討

R-CF コンクリートが一般的なプレキャスト RC 部材と同等で、計画供用期間 65 年以上の耐久性を満足することを確認することを目的に、鉄筋腐食抵抗性の検討を実施した。

自然電位の測定結果の一覧を表 3.4.6 に、ASTM C 876 による鉄筋腐食性評価を表 3.4.7 に、自然電位の測定結果を図 3.4.27～図 3.4.28 に示す。表 3.4.7 は、ASTM C 876 による鉄筋腐食性評価の関係から、自然電位の測定結果により、鉄筋腐食の可能性を評価した結果である<sup>3.6)</sup>。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 3.4.27～図 3.4.28 には各試験体の測定結果を図示した。図 3.4.27～図 3.4.28 から、NaCl の有無によらず、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る。また、3 体の試験体のばらつきは一定程度であり、R-CF コンクリートの自然電位は、N と大きな差が無い結果となった。

分極抵抗の測定結果の一覧を表 3.4.7 に、CEB による腐食速度の判定基準を表 3.4.8 に、分極抵抗の測定結果を図 3.4.29～図 3.4.30 に示す。表 3.4.8 は、ASTM C 876 による鉄筋腐食性評価の関係により、分極抵抗の測定結果により、腐食速度を評価した結果である<sup>3.6)</sup>。図 3.4.29～図 3.4.30 から、R-CF コンクリートの分極抵抗は、N に対して同程度か高い値を示しており、R-CF コンクリートの腐食速度は、N と同等か若干遅い程度と判断される。

模擬 RC 試験体の自然電位、分極抵抗を測定した結果、R-CF コンクリートの腐食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。中性化抵抗性については、上述の中性化抵抗性予測方法を用いた性能設計により所要の耐用年数を満足することができることから、計画供用期間 65 年の耐久性を有した R-CF コンクリートのプレキャスト RC 部材を実現できるものと考えられる。

表 3.4.6 自然電位の測定結果の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	NaCl	自然電位 (V vs CSE)		
				28日	56日	91日
1	45%-N	45	有り	-0.247	-0.226	-0.197
				-0.279	-0.226	-0.124
				-0.133	-0.109	-0.072
			無し	-0.097	-0.065	-0.036
				-0.104	-0.070	-0.006
				-0.168	-0.068	0.012
2	45%-SR(7630)60-F10-B30	45	有り	-0.183	-0.129	-0.142
				-0.158	-0.108	-0.123
				-0.153	-0.107	-0.103
			無し	-0.102	-0.037	-0.001
				-0.075	-0.024	0.046
				-0.137	-0.049	0.010
3	35%-SR(7630)60-F10-B30	35	有り	-0.210	-0.094	-0.065
				-0.235	-0.065	-0.012
				-0.155	-0.087	-0.060
			無し	-0.005	-0.009	0.099
				-0.026	-0.005	0.077
				-0.027	-0.018	0.053

表 3.4.7 ASTM C 876 による鉄筋腐食性評価<sup>3.6)</sup>

自然電位 (V vs CSE)	鉄筋腐食の可能性
$-0.2 < E$	90%以上の確率で腐食無し
$-0.35 < E \leq -0.2$	不確定
$E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食有り

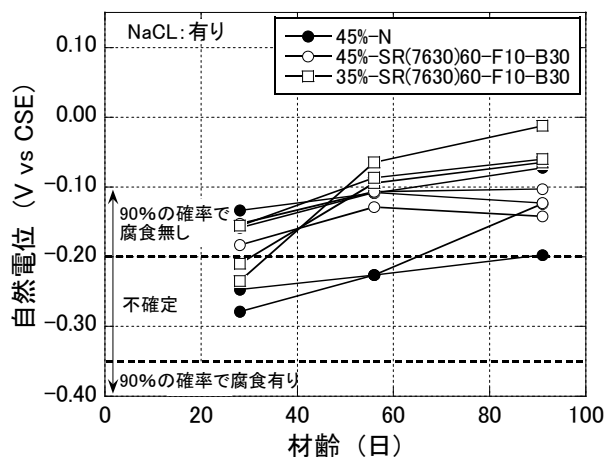


図 3.4.27 自然電位の測定結果(NaCl 有り)

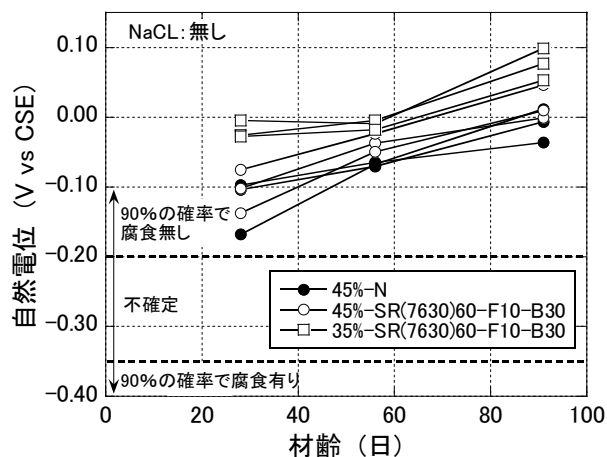


図 3.4.28 自然電位の測定結果(NaCl 無し)

表 3.4.8 分極抵抗の測定結果の一覧

NO	記号	水結合材比 (%)	NaCl	分極抵抗( $k\Omega \cdot cm^2$ )		
				28日	56日	91日
1	45%-N	45	有り	126	88	260
				40	53	197
				-	933	659
			無し	207	1620	672
				186	440	560
				227	536	-
2	45%-SR(7630)60-F10-B30	45	有り	487	801	1280
				373	825	1080
				483	885	940
			無し	768	1220	3190
				468	1380	2840
				-	1250	2530
3	35%-SR(7630)60-F10-B30	35	有り	-	683	742
				-	833	713
				156	683	662
			無し	-	809	4300
				-	853	4680
				-	935	2230

表 3.4.9 CEB による腐食速度の判定基準<sup>3.6)</sup>

分極抵抗 ( $k\Omega \cdot cm^2$ )	腐食速度の判定
130~260より大	不動状態(腐食無し)
52以上130以下	低~中程度の腐食速度
26以上52以下	中~高程度の腐食速度
26未満	激しい, 高い腐食速度

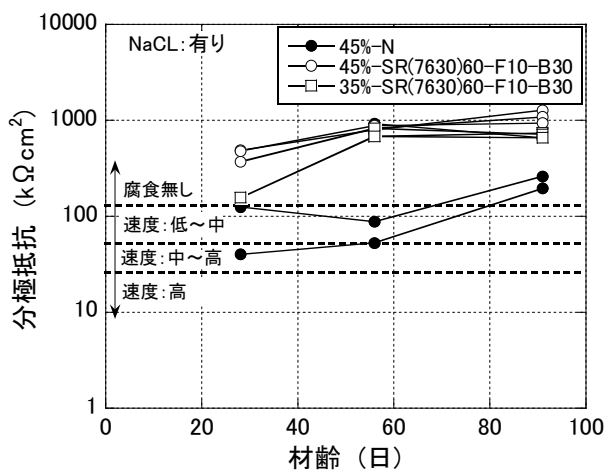


図 3.4.29 分極抵抗の測定結果(NaCl 有り)

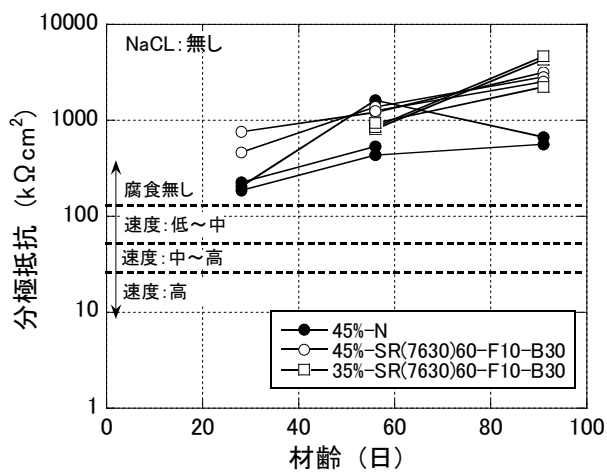


図 3.4.30 分極抵抗の測定結果(NaCl 無し)

### 3. 4. 3 曲げ構造性能

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。実大板状曲げ実験の状況を写真 3.4.5 に、実大板状曲げ実験による P-δ 関係を図 3.4.31 に、実大板状曲げ実験による M-φ 関係を図 3.4.32 に示す。

鉄筋比 0.38% の試験体の結果を比較すると、図 3.4.31 から、R-CF コンクリートの P-δ 図は N と同等であることが確認できる。一方で、図 3.4.32 の M-φ 図では、R-CF コンクリートの曲率が N の曲率よりも 30mm・1 程度小さい結果となっている。写真 3.4.6 は、実大板状曲げ実験後の試験体外観であり、N のひび割れは荷点間に 2 本、その他に 1 本、R-CF コンクリートのひび割れは荷点間に 3 本発生していることが分かる。曲率は荷点間の横方向の上下の変位測定結果から算定しており、N の 1 部の曲げひび割れが曲率測定区間の外で発生したことにより、ひび割れ後の曲率に差が生じたと考えられる。

一般 RC 部材で用いられる(3.3)式の既存式により<sup>3.7)</sup>、降伏曲げモーメント  $BMy$  を算定した。降伏曲げモーメントの算定結果を表 3.4.10 に示す。R-CF コンクリートの鉄筋比 0.76% の水準では、降伏曲げモーメントの実験値が算定値よりも大きいものの、N および RCCF コンクリートの鉄筋比 0.38% の水準では実験値と算定値が同等の結果となった。実大の板状試験体による構造実験結果および上述の検討結果から、R-CF コンクリートによる RC 部材の曲げ構造性能が、普通 PC コンクリートによる RC 部材と同等であり、既存式で設計可能であることが確認された。

$${}_B M_y = 0.9a_t \sigma_y d \text{ .....(3.3)}$$

ここに、 $BMy$  : 梁の降伏曲げモーメント

$a_t$  : 引張鉄筋断面積

$\sigma_y$  : 引張鉄筋の降伏点

$d$  : 梁の有効せい



写真 3.4.5 実大板状曲げ実験の状況

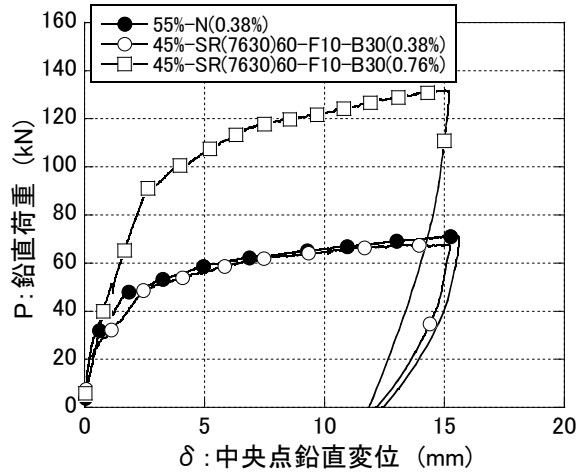


図 3.4.31 実大板状曲げ実験による P-δ 関係

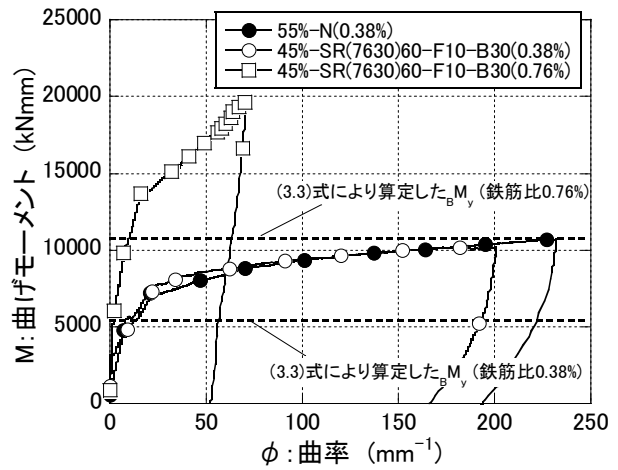


図 3.4.32 実大板状曲げ実験による M-φ 関係

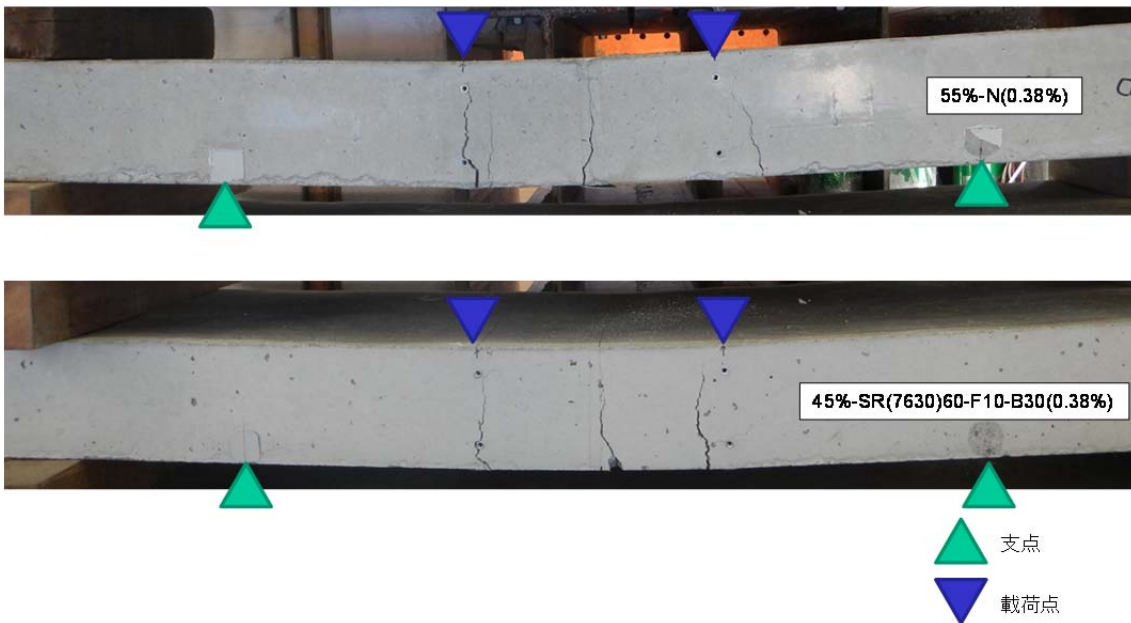


写真 3.4.6 実大板状曲げ実験後の試験体外観

表 3.4.10 降伏曲げモーメントの算定結果

NO	記号	実大 曲げ試験 200×50×15cm	水 結合材 比 (%)	$a_t$ (mm)	$\sigma_y$ (N/mm)	$d$ (mm)	${}_B M_y$ (kNmm)
		鉄筋比					
1	55%-N(0.38%)	0.38%	55	143	382	110	5408.0
2	45%-SR(7630)60-F10-B30(0.38%)	0.38%	45	143	382	110	5408.0
3	45%-SR(7630)60-F10-B30(0.76%)	0.76%		285	382	110	10778.1

---

参考文献

- 3.1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5, 2009.2
- 3.2) 野口貴文, 友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, No.472, pp.11-16, 1995.6
- 3.3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説, 2004.3
- 3.4) 松田芳範, 上田洋, 石田哲也, 岸利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.629-634, No.1, 2010
- 3.5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
- 3.6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術【基礎編】
- 3.7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 2010



## 4. 結論

本研究の目標として、i) 地盤改良材の増量材に利用されるスラッジ再生結合材をベースとしたコンクリート用 SR セメントの開発、ii) 構造用 R-CF コンクリートの材料組合せ及び配(調)合方法の確立、iii) 同コンクリートの耐久性確保、iv) 同コンクリートによるプレキャスト RC 部材の耐久性・構造性能の確保と製造方法確立の 4 項目とし、研究を実施した。

コンクリート用スラッジ再生セメント(SR セメント)の開発研究では、SR セメントの実規模製造実験を実施し、目標品質を確保するため製造プロセス改良を行った。その結果、SR セメントの未水和成分が減少することで品質が低下する夏期の製造においても、スラッジの脱水処理までの時間を一定以下に制御することで普通 PC に対する強度比が 40%以上の品質を実現できることが明らかとなった。

R-CF コンクリートの配(調)合方法の確立に関する研究では、モルタルおよびコンクリートの練混ぜ実験を実施し、設計基準強度  $24\text{N/mm}^2$  以上、および良好な施工性を達成できる見通しが得られ、さらには材料構成や結合材水比により圧縮強度を推定する調合方法に目途をつけた。施工性については、フレッシュ時における時間経過に伴う流動性の保持に課題があったが、SR セメントの製造までの過程で逸散していると考えられる石膏を添加することで改善できることがわかった。

R-CF コンクリートの耐久性確保に関する研究では、①中性化促進試験に基づく中性化抵抗性予測方法の検討および長期暴露実験による耐久性確認、②収縮特性の把握および収縮低減方法の検討、③プレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験によるひび割れ抵抗性の検討を行った。①では、促進中性化試験の結果から、R-CF コンクリートの配合を最適化し強度を高めることで、高炉セメント B 種コンクリートに対して同等以上の中性化抵抗性を付与できることが確認された。同実験結果から、中性化速度係数の実験式を提案し、本実験式を活用して耐久性設計を行うことで、計画供用期間の級に応じた設計かぶり厚さと所要の圧縮強度を算定した。さらに、供用環境条件での中性化抵抗性を把握するため、実大の壁部材および  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  円柱供試体を作製し、10 年間に及ぶ長期暴露実験を開始した。②では、コンクリートの自由収縮試験結果から、R-CF コンクリートの収縮率は普通コンクリートよりも  $2 \times 10^{-4}$  程度大きくなること、石膏の添加により普通コンクリートよりも収縮率を低減できることが明らかとなり、これらの知見から収縮率  $-10 \times 10^{-4}$  以下の R-CF コンクリートを実現する方法を見出した。③では、プレキャスト部材を模擬した拘束ひび割れ実験結果から、R-CF コンクリートにおいてもひび割れが生じておらず、R-CF コンクリートによりプレキャスト部材を製造した際に、収縮ひび割れが過大となる可能性は低いことが分かった。

R-CF コンクリートによるプレキャスト RC 部材の実用化に向けた耐久性・構造性能の確保と製造方法確立に関する研究では、①プレキャスト工場での製造検討、②鉄筋腐食抵抗性の検討、③曲げ構造性能の検討を行った。①では、実際のプレキャスト工場にて、室内試験による混和剤検討実験および調合検討実験、実大規模の部材製作実験を実施した結果、R-CF コンクリートの施工性、脱型時強度、コア強度などの実製造に必要なデータが得られ、一般プレキャスト工場において、R-CF コンクリートによるプレキャスト部材の製造が可能であることが確認された。②では、電気化学に基づく鉄筋腐食メカニズムを仮定し、模擬 RC 試験体の自然電位、分極抵抗を測定することで、R-CF コンクリートの腐食抵抗性の評価を普通 PC コンクリートと比較した。自然電位、分極抵抗を測定した結果、R-CF コンクリートの腐食抵抗性は普通コンクリートと同程度であることが確認され、中性化抵抗性については、上述の中性化抵抗性予測方法を用いた性能設計により、計画供用期間 65 年の耐久性を有した R-CF コンクリートのプレキャ

スト RC 部材を実現できるものと考えられる。③では、前記部材製作実験と併せて実大の板状試験体を製作し構造実験を行った。実大の板状試験体による構造実験の結果から、R-CF コンクリートによる RC 部材の曲げ構造性能が、普通 PC コンクリートによる RC 部材と同等であり、既存式で設計可能であることが確認された。

上記研究結果から、本技術によれば i) 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、ii) 建設産業による CO<sub>2</sub> 排出量及びエネルギー消費量の抑制、iii) 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の 3 つの環境政策への貢献が期待され、その実現性も高いと考えられる。

## 5. 研究発表

### 学会発表リスト

- 1) 大川憲, 青木真一, 百瀬晴基, 閑田徹志, 笠井哲郎: 戻りコンクリートを全量再生利用する方法に関する研究, 第17回生コン技術大会, pp.169-174, 2013.4
- 2) 陳良愷, 笠井哲郎, 大川憲, 閑田徹志, 百瀬晴基: 乾燥スラッジ微粉末と副産物混和材を結合材としたモルタルの諸物性, 第40回土木学会関東支部技術研究発表会, 2013
- 3) 百瀬晴基, 閑田徹志, 石関浩輔, 大川憲, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末と副産物混和材を用いたクリンカーフリーコンクリートに関する基礎検討, 日本建築学会大会梗概集, pp.187-188, 2013.9
- 4) 大川憲, 青木真一, 百瀬晴基, 閑田徹志, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末の製造方法に関する研究, 日本建築学会大会梗概集, pp.357-358, 2014.9
- 5) 石関浩輔, 百瀬晴基, 閑田徹志, 大川憲, 笠井哲郎: 戻りコンクリート起源のサイクルセメントによるクリンカーフリーコンクリートの基礎物性, 日本建築学会大会梗概集, pp.359-360, 2014.9
- 6) Tetsushi Kanda, Haruki Momose, Ken Okawa, Shinichi Aok and Tetsurou Kasai: CLINKER-FREE CONCRETE UTILIZING RECYCLE CEMENT PRODUCED FROM WASTED FRESH READY-MIXED CONCRETE, The 6th International Conference of Asian Concrete Federation (Seoul, Korea), pp.21-24, 2014.9
- 7) 百瀬晴基, 閑田徹志, 石関浩輔, 大川憲, 青木真一, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を使用したクリンカーフリーコンクリートの耐久性確保に関する研究(その1: 促進中性化試験結果), 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.149-152, 2015.3
- 8) 閑田徹志, 百瀬晴基, 石関浩輔, 大川憲, 青木真一, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を使用したクリンカーフリーコンクリートの耐久性確保に関する研究(その2: 拘束ひび割れ実験結果), 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.153-156, 2015.3

### 論文リスト

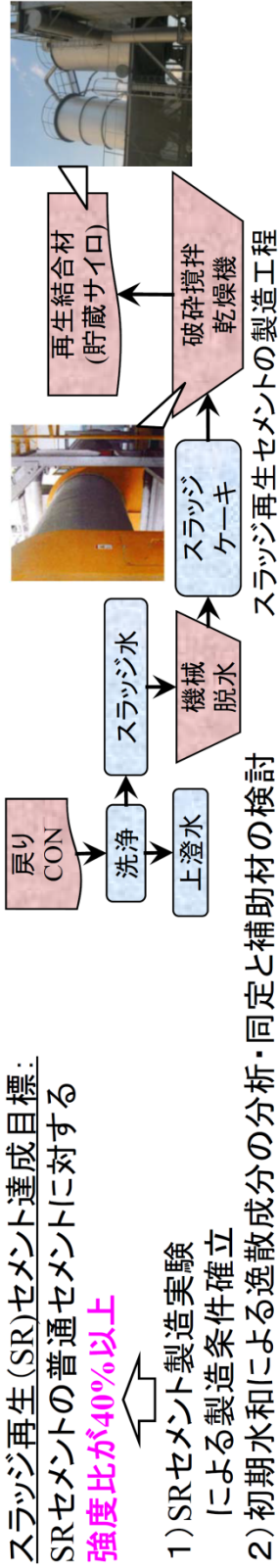
- 9) 大川憲, 百瀬晴基, 閑田徹志, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末と混和材を併用したクリンカーフリーコンクリートに関する研究, コンクリート工学会年次論文報告集, Vol.35, No.1, pp.1591-1596, 2013
- 10) 大川憲, 青木真一, 百瀬晴基, 閑田徹志, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を併用したクリンカーフリーコンクリートに関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集(投稿中)

## 6. 知的財産権の取得状況

- 1) 水硬化性硬化体, 【出願番号】2012238612
- 2) 水硬化性硬化体, 【出願番号】2012238607

【K123015】 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

①建設産業の主要な建設副産物**戻りコンクリート**の廃棄量縮減、**再生セメント**による**スラッジ再生利用**



②東日本大震災後に重要性を増した石炭灰の廃棄量縮減、**フライアッシュ(FA)有効利用**  
③建設産業によるCO<sub>2</sub>排出量・エネルギー消費量の抑制、**クリンカーフリーコンクリートの実現**

SRセメントとFAによるクリンカーフリーコンクリート達成目標:  
コンクリートの設計基準強度**24N/mm<sup>2</sup>以上**  
RC部材製造が可能な**施工性**、従来材料同等以上の**耐久性**

1) コンクリートの練混ぜ実験  
2) 耐久性実験(中性化, 乾燥収縮, 拘束ひび割れ, 暴露)

④適用拡大のためのクリンカーフリーコンクリート**鉄筋補強(RC)部材の実用化**

クリンカーフリーコンクリートRC部材の達成目標:  
プレキャストRC部材**ひび割れ制御方法の確立**  
**計画供用期間60年**を満足するRC部材**耐久性**  
一般プレキャスト工場で製造が可能  
一般RCと同等の**曲げ構造性能**

1) 鉄筋腐食抵抗性実験  
2) プレキャスト工場製造実験 3) 曲げ構造実験

鉄筋腐食診断機  
鉄筋腐食抵抗性実験

曲げ構造実験

## 8. 英文概要

Title: A Development Study on Reinforced Concrete Elements with Clinker-Free Concrete Consisting of Waste-concrete-slug Recycle Cement and By-product admixture

Project number: 3K123015

Principal investigator: Tetsushi KANDA

Responsible organization: Kajima Corporation

For the reduction of carbon dioxide emission and energy consumption, in addition to the formation of recycle-based society and waste management, following three technical development strategies I, II and III are targeted in this project. These include development of sludge-recycled cement (SR cement) originated from returned concrete as a typical construction by-product, and versatile application of clinker-free concrete (R-CF concrete) to precast building constructions using high volume industrial by-products such as fly ash and the SR cement.

- I. Recycling and reduction of the amount of disposal of returned concrete that is a major construction by-product in the construction industry.
- II. Control of carbon dioxide emission and energy consumption in the construction industry.
- III. Effective use and reduction of the amount of disposal of coal ash, which became important after the East Japan Great Earthquake.

Towards the goal, the following four studies have been performed. i) Development of SR cement originated from sludge-recycled binder often used as a soil improvement filler, ii) Examination of materials and mix proportion for structural R-CF concrete, iii) Durability evaluation of the R-CF concrete, and iv) Ensuring structural - durability performance and manufacturing method for precast R-CF concrete elements.

Development of SR cement was executed using full-scale model plant and manufacturing processes were improved according to the targeted quality. It was confirmed that strength more than 40 percent of the strength of ordinary portland cement was obtained by controlling the period for sludge dehydration even under production in summer where the quality may degrade due to the reduction in unhydrated component.

Method of mix design for R-CF concrete was studied through mixing experiments of mortar and concrete and a prospect of achieving a design strength more than 24N/mm<sup>2</sup> and favorable construction performance was obtained. Furthermore, a method estimating compressive strength from materials combination and water-binder ratio was established. Control of changes in fluidity with time was an issue of fresh state while addition of gypsum, which may be lost before SR cement production, was found to be effective for the improvement.

Durability evaluation of the R-CF concrete was studied in terms of (1) carbonation resistance estimation through accelerate carbonation test and durability estimation through long-term outdoor exposure test, (2) shrinkage characteristics and its control, and (3) cracking resistance evaluation through restrained cracking test using imitated precast members. In the study (1), the accelerated carbonation test results allowed mix design of R-CF concrete to be optimized for strength resulting in the carbonation resistance equivalent to that of blast furnace slag cement type B concrete. The test results were further led to an empirical formula of carbonation rate coefficient, which was then applied to a durability design capable of providing design values of cover depth and necessary compressive strength according the design service life classes. Further, to confirm the carbonation resistance under working conditions, full-scale wall elements and cylinder specimens of  $\phi$  100x200mm were subjected to long-term outdoor exposure test for 10 years. In the study (2), it was found that shrinkage strain of R-CF concrete was approx.  $2 \times 10^{-4}$  larger than that of normal concrete while it became smaller than that of normal concrete when gypsum was added. These findings allowed us to produce R-CF concrete with a shrinkage strain less than  $10 \times 10^{-4}$ . In the study (3), it was observed that no cracking was found for imitated precast R-CF concrete specimen during the restrained cracking test, implying that excessive shrinkage cracking of precast R-CF concrete members was unlikely.

Ensuring structural-durability performance and manufacturing method for precast R-CF concrete

elements was studied in terms of (1) manufacturing at precast concrete plant, (2) corrosion resistance of steel reinforcement and (3) structural performance under flexural loading. In the study (1), practical data necessary for full-scale R-CF concrete manufacturing such as construction performance, strength at unmolding and core strength were obtained through the laboratory tests of admixture screening, mix design and trial production of full-scale precast members. It was confirmed that precast R-CF concrete elements could be manufactured at ordinary PC plants. In the study (2), corrosion resistance of R-CF concrete was compared with that of normal concrete through the measurement of natural potential and polarization resistance of imitated precast concrete specimens with an assumption of electrochemical steel corrosion mechanism. Results of the measurement confirmed that the corrosion resistance of R-CF concrete was equivalent to that of normal concrete and the performance design with the carbonation resistance estimation method might allow manufacture of precast R-CF concrete members with a design service life as long as 65 years. In the study (3), structural performance test, together with the manufacturing test, was executed with plate-shaped specimens. It was confirmed that structural performance of R-CF concrete members under flexural loading was equivalent to that of normal concrete members and can be designed with standard design formulas.

With the results of studies as shown above, it is very likely that the proposed technologies can contribute to and realize the following three environmental agendas: (I) recycling and reduction of the amount of disposal of demolished concrete debris that is a major construction by-product in the construction industry, (II) control of carbon dioxide emission and energy consumption in the construction industry and (III) effective use and reduction of the amount of disposal of coal ash, which became important after the East Japan Great Earthquake.