# 高炉スラグ微粉末を高含有した<br>低炭素型のコンクリートに関する実験的検討

宮　野　和　樹[*1]　　梶　田　秀　幸[*2]
宮　澤　友　基[*2]　　合　田　尋　聡[*2]

## 要　　旨

国内における2050年カーボンニュートラルの目標達成に向けて，温室効果ガスの排出量低減のため，セメントを高炉スラグ微粉末などの混和材で置換した低炭素型のコンクリートの開発・実用化が進められている．混和材を高含有したコンクリートは，各種性状が一般のコンクリートと異なる可能性があるため，それらを適切に把握するとともに，実工事適用に向けた課題の検討が必要である．

そこで，室内実験，実機実験を通じて，普通ポルトランドセメントに混和材として高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの基本性状の確認，調合設計方法の検討および構造体コンクリートの圧縮強度等の確認を行い，一般のコンクリートとの差異を把握した．その結果，低炭素型のコンクリートは，一般のコンクリートと同様の手法でスランプ，スランプフロー，空気量の調整および結合材水比と圧縮強度の関係に基づいた調合設計が可能であること，ならびに，初期性状，収縮性状，耐久性状等の特性が明らかとなった．

キーワード　低炭素／高炉スラグ微粉末／高含有／フレッシュコンクリート／圧縮強度／初期性状／収縮性状／耐久性状

## 目　　次

1．はじめに
2．室内実験におけるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状の検討
3．室内実験におけるコンクリートの初期性状，収縮性状および耐久性状の検討
4．実機実験におけるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状の検討
5．まとめ

# EXPERIMENTAL STUDY ON LOW CARBON CONCRETE CONTAINING HIGH AMOUNT GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG

**Kazuki　MIYANO**　　**Hideyuki　KAJITA**
**Yuki　MIYAZAWA**　　**Hiroaki　GOUDA**

Synopsis:

To contribute to carbon neutrality, low-carbon concrete containing a high volume of ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) was investigated through laboratory and full-scale production tests. The results demonstrated that slump, slump flow, and air content could be appropriately controlled, and that mixture proportioning based on the relationship between the binder-to-water ratio and compressive strength was feasible using conventional design procedures. Furthermore, the characteristics of the concrete were clarified in terms of initial properties, shrinkage behavior, and durability performance.

＊１本店　ＩＣＩテクノロジーセンター　施工革新グループ
＊２本店　ＩＣＩテクノロジーセンター　建設材料グループ

## 1．はじめに

2015 年の COP21 において，今後の世界の共通目標として，産業革命以来の気温上昇を 1.5℃以内に抑える努力目標が定められた．その対応として，2050 年前後の世界全体におけるカーボンニュートラルの実現が必要とされている．国内では，それらを受けた改正地球温暖化対策推進法において，2050 年カーボンニュートラル化の目標が具体的に明記されている[1)]．

建設工事においては，コンクリートの製造工程での温室効果ガスの排出量が多いセメントの使用率を低減するため，セメントを高炉スラグ微粉末（以下，BS と略記する）などの混和材と置換した低炭素型のコンクリートの開発・実用化が進められている[例えば 2),3)]．特に，混和材を高含有したコンクリートは，各種性状が混和材を用いていない一般のコンクリートとは異なる部分があるため，それらを把握して用いる必要がある．また，混和材を高含有したコンクリートを実工事に使用するためには，実機ミキサによる製造の確認，フレッシュコンクリート性状の経時変化の確認，構造体コンクリートの圧縮強度の把握が必要である．

そこで，本検討では，普通ポルトランドセメントに，混和材として BS を高含有したコンクリートを開発・実用化することを目的に，室内実験により，フレッシュコンクリート，圧縮強度，初期性状，収縮性状および耐久性状の把握，ならびに，調合設計方法の確立を行った．また，実機実験により，実機ミキサによる製造の確認,フレッシュコンクリート性状の経時変化の確認，構造体コンクリートの圧縮強度の把握および調合設計方法の確立を行った．

## 2．室内実験におけるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状の検討

### 2.1 実験概要

#### (1) 室内実験におけるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状の実験概要

実験の要因と水準（室内_フレッシュ･圧縮）を**表-1** に示す．フレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状を把握するため，以下の目的で実験 1 および実験 2 を実施した．

実験 1 は，化学混和剤の種類によるフレッシュコンクリート性状の確認および BS を使用していない場合と BS を高含有した場合のフレッシュおよび圧縮強度性状の確認を目的とした．

実験 2 は，BS の使用率を高炉セメント C 種相当および C 種を超える範囲とした場合のフレッシュおよび圧縮強度性状の確認を目的とした．

#### (2) 使用材料，試験項目および調合

使用材料（室内_フレッシュ･圧縮）を**表-2** に，試験項目および試験方法（室内_フレッシュ･圧縮）を**表-3** に，調合（室内_フレッシュ･圧縮）を**表-4** に示す．フレッシ

**表-1**　実験の要因と水準（室内_フレッシュ･圧縮）

| 実験No. | 要因 | 水準 |
|---|---|---|
| 1 | 化学混和剤の種類 | AE減水剤，高性能AE減水剤 |
| | 水結合材比(%) | 65，55，40，30 |
| | BSの使用率(%) | 0，70 |
| 2 | 水結合材比(%) | 55，39，30 |
| | BSの使用率(%) | 70，80 |

**表-2**　使用材料（室内_フレッシュ･圧縮）

| 材料 | 記号 | 種類・特性・主成分 |
|---|---|---|
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント，密度3.16g/cm$^3$ |
| 混和材 | BS | 高炉スラグ微粉末4000，密度2.90g/cm$^3$ |
| 細骨材 | S1 | 山砂，表乾密度2.61g/cm$^3$ |
| | S2 | 砕砂，表乾密度2.68g/cm$^3$ |
| 粗骨材 | G1 | 硬質砂岩砕石，表乾密度2.66g/cm$^3$ |
| 混和剤 | Ad1 | AE減水剤，リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体 |
| | Ad2 | 高性能AE減水剤，ポリカルボン酸エーテル系化合物 |
| 水 | W1 | 地下水 |

**表-3**　試験項目および試験方法(室内_フレッシュ･圧縮)

| 試験項目 | | 試験方法 | 備考 |
|---|---|---|---|
| フレッシュコンクリート | スランプ | JIS A 1101 | — |
| | 空気量 | JIS A 1128 | — |
| | コンクリート温度 | JIS A 1156 | — |
| 硬化コンクリート | 圧縮強度 | JIS A 1108 | 標準養生材齢3または4，7，14，28日，n=3 |
| | 静弾性係数 | JIS A 1149 | |

**表-4**　調合およびフレッシュコンクリート試験結果（室内_フレッシュ･圧縮）

| 実験No. | 調合名 | 混和剤種類 | BSの使用率(%) | 水結合材比(%) | 単位量(kg/m$^3$) | | | | | | Ad1 (B×%) | Ad2 (B×%) | フレッシュコンクリート性状 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | W1 | C | BS | S1 | S2 | G1 | | | スランプ(cm) | 空気量(%) | コンクリート温度(℃) |
| 1 | Ad1-65-BS0 | Ad1 (AE減水剤) | 0 | 65 | 175 | 270 | 0 | 618 | 265 | 959 | 1.05 | — | 18.5 | 4.2 | 22.0 |
| | Ad1-55-BS0 | | | 55 | 175 | 319 | 0 | 584 | 250 | 967 | 1.00 | — | 20.0 | 4.1 | 22.0 |
| | Ad1-65-BS70 | | 70 | 65 | 170 | 79 | 183 | 623 | 267 | 959 | 0.85 | — | 19.0 | 4.6 | 21.0 |
| | Ad1-55-BS70 | | | 55 | 170 | 93 | 217 | 587 | 252 | 967 | 0.80 | — | 20.5 | 4.4 | 21.0 |
| | Ad2-55-BS0 | Ad2 (高性能AE減水剤) | 0 | 55 | 170 | 310 | 0 | 587 | 252 | 983 | — | 0.65 | 19.0 | 5.7 | 22.0 |
| | Ad2-40-BS0 | | | 40 | 170 | 425 | 0 | 520 | 223 | 983 | — | 0.75 | 20.0 | 5.8 | 22.0 |
| | Ad2-30-BS0 | | | 30 | 170 | 567 | 0 | 437 | 187 | 983 | — | 1.00 | 18.5 | 5.2 | 23.0 |
| | Ad2-55-BS70 | | 70 | 55 | 165 | 90 | 210 | 591 | 253 | 983 | — | 0.40 | 19.5 | 5.1 | 21.0 |
| | Ad2-40-BS70 | | | 40 | 165 | 124 | 289 | 521 | 223 | 983 | — | 0.45 | 18.5 | 5.6 | 21.0 |
| | Ad2-30-BS70 | | | 30 | 165 | 165 | 385 | 433 | 186 | 983 | — | 0.65 | 21.0 | 3.5 | 21.0 |
| 2 | Ad2-55-BS70 | Ad2 (高性能AE減水剤) | 70 | 55 | 160 | 87 | 204 | 603 | 258 | 983 | — | 0.55 | 18.0 | 5.5 | 20.0 |
| | Ad2-39-BS70 | | | 39 | 160 | 123 | 288 | 529 | 227 | 983 | — | 0.50 | 16.5 | 5.1 | 20.0 |
| | Ad2-30-BS70 | | | 30 | 160 | 160 | 374 | 452 | 194 | 983 | — | 0.65 | 21.5 | 3.9 | 21.0 |
| | Ad2-55-BS80 | | 80 | 55 | 163 | 59 | 238 | 592 | 254 | 983 | — | 0.40 | 18.5 | 5.4 | 21.0 |
| | Ad2-39-BS80 | | | 39 | 163 | 84 | 334 | 517 | 221 | 983 | — | 0.35 | 16.5 | 4.8 | 21.0 |
| | Ad2-30-BS80 | | | 30 | 163 | 109 | 435 | 438 | 188 | 983 | — | 0.55 | 20.5 | 3.0 | 21.0 |

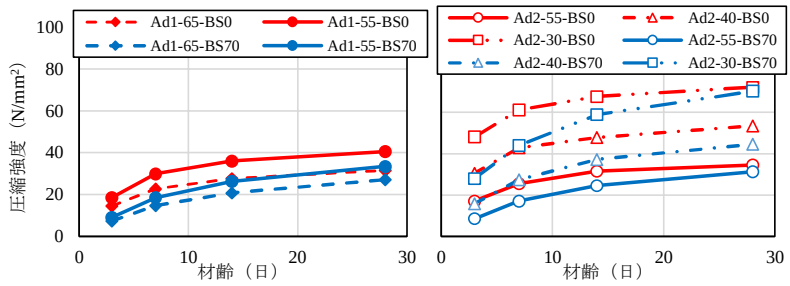



**図-1**　実験 1 の材齢と圧縮強度の関係

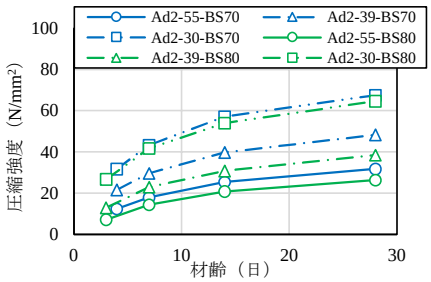



**図-2**　実験 2 の材齢と圧縮強度の関係

**表-5**　BS の使用率 0%に対する BS の使用率 70%の圧縮強度比

| 化学混和剤の種類と水結合材比(%)の組合せ | 材齢 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 3日 | 7日 | 14日 | 28日 |
| Ad1-65 | 0.506 | 0.648 | 0.751 | 0.858 |
| Ad1-55 | 0.489 | 0.619 | 0.731 | 0.825 |
| Ad2-55 | 0.503 | 0.671 | 0.781 | 0.904 |
| Ad2-40 | 0.516 | 0.640 | 0.778 | 0.833 |
| Ad2-30 | 0.582 | 0.720 | 0.871 | 0.974 |

**表-6**　BS の使用率 70%に対する BS の使用率 80%の圧縮強度比

| 化学混和剤の種類と水結合材比(%)の組合せ | 材齢 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 3日 | 7日 | 14日 | 28日 |
| Ad2-55 | 0.567 | 0.799 | 0.815 | 0.829 |
| Ad2-39 | 0.595 | 0.776 | 0.773 | 0.795 |
| Ad2-30 | 0.839 | 0.963 | 0.944 | 0.956 |

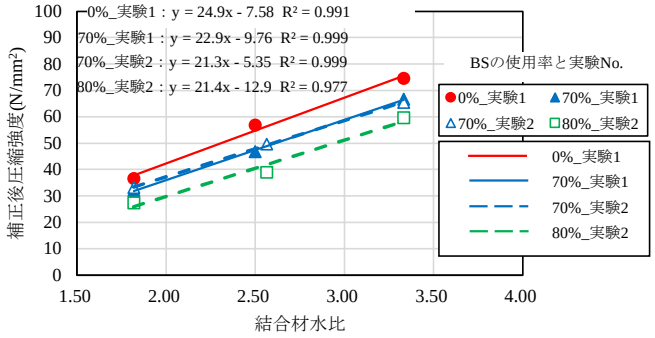



**図-3**　結合材水比と材齢 28 日の補正後圧縮強度の関係

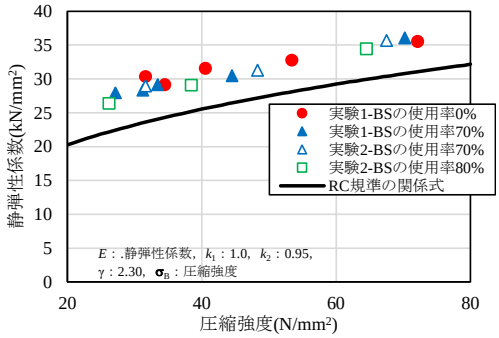



**図-4**　材齢 28 日の圧縮強度と静弾性係数の関係

ュコンクリート試験は練上がり直後に実施し，目標スランプは 18±2.5cm，目標空気量は 4.5±1.5%とした．

## 2.2 実験結果および考察

### (1) フレッシュコンクリート性状

フレッシュコンクリートの試験結果（室内_フレッシュ･圧縮）を**表-4** に示す．スランプおよび空気量は，化学混和剤の添加率の調整により，ほぼすべての調合において目標値を満足した．BS の使用率が高い場合であっても，AE 減水剤または高性能 AE 減水剤を用いて，一般のコンクリートと同様の手法でスランプ，空気量の調整が，可能であると考えられる．

### (2) 圧縮強度性状

実験 1 の材齢と圧縮強度の関係を**図-1** に，BS の使用率 0%に対する BS の使用率 70%の圧縮強度比を**表-5** に示す．BS の使用率にかかわらず，材齢の経過に伴い圧縮強度は増加し，水結合材比（以下，W/B と略記する）が小さくなるほど圧縮強度が大きくなる傾向が認められた．BS の使用率 0%に対する BS の使用率 70%の圧縮強度比は，材齢 3，7 日では 0.49～0.72 倍程度，材齢 14，28 日では 0.73～0.97 倍程度となった．材齢が経過すると，BS の使用率 0%に対する BS の使用率 70%の圧縮強度比が大きくなり，長期強度の増進が見込まれると類推できる．

実験 2 の材齢と圧縮強度の関係を**図-2** に，BS の使用率 70%に対する BS の使用率 80%の圧縮強度比を**表-6** に示す．BS の使用率 70%に対する BS の使用率 80%の圧縮強度比は，材齢 3，7 日では 0.57～0.96 倍程度，材齢 14，28 日では 0.82～0.96 倍程度となった．また，実験 1 と同様に，材齢が経過すると，BS の使用率 70%に対する BS の使用率 80%の圧縮強度比は大きくなった．

結合材水比と材齢 28 日の補正後圧縮強度の関係を**図-3** に示す．ここで，結合材水比と圧縮強度の関係を評価するにあたり，空気量が圧縮強度に影響を及ぼす可能性が考えられたため，空気量の試験結果をもとに圧縮強度の補正を行った [4]．すべての調合において，結合材水比と圧縮強度は相関性が高い直線関係にあることが確認された．よって，一般のコンクリートと同様に，結合材水比と圧縮強度の関係式による調合設計が可能と考えられる．

材齢 28 日の圧縮強度と静弾性係数の関係を**図-4** に示す．図中に日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準･同解説（以下，RC 規準と略記する）に採用されている関係式をあわせて示す．圧縮強度が大きくなると静弾性係数は RC 規準の関係式と同様の傾向で大きくなった．圧縮

強度と静弾性係数の関係は一般のコンクリートと同様と考えられる.

### 2.3 室内実験におけるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状のまとめ

室内実験におけるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状を確認した結果，以下の知見が得られた.

(1)高炉スラグ微粉末の使用率が高い場合であっても，AE 減水剤または高性能 AE 減水剤を用いて，一般のコンクリートと同様の手法でスランプ，空気量の調整が可能であった.

(2)高炉スラグ微粉末の使用率が 70，80%の低炭素型のコンクリートの結合材水比と圧縮強度は相関性が高い直線関係にあり，一般のコンクリートと同様の調合設計が可能であった.

## 3．室内実験におけるコンクリートの初期性状，収縮性状および耐久性状の検討

### 3.1 実験概要

#### (1) 室内実験におけるコンクリートの初期性状，収縮性状および耐久性状の実験概要

実験の要因と水準（室内_初期･収縮･耐久性）を**表-7** に示す．初期性状，収縮性状および耐久性状を把握するため，以下の目的で実験 3～9 を実施した．なお，実験 3，4，6～9 の実験においては BS の使用率 0，70，80%についての比較を実施した.

実験 3 は，BS の使用率の違いによるブリーディング量の確認を目的とした．W/B はブリーディング量が多い 55%のみの実施とした.

実験 4 は，BS の使用率および高炉セメント C 種を超える範囲である BS の使用率 80%における W/B の違いによる凝結時間の確認を目的とした.

実験 5 は，高炉セメント C 種を超える範囲である BS の使用率 80%および高炉セメント C 種の範囲の下限値程度となる BS の使用率 60%における断熱温度上昇量の確認を目的とした．なお，高炉セメント C 種の BS の使用率の範囲は 60%を超え 70%以下と規定されていることから，BS の使用率 60%を確認することにより，高炉セメント C 種の範囲において最大以上となる断熱温度上昇量を把握できると考えた.

実験 6 は，BS の使用率および高炉セメント C 種を超える範囲である BS の使用率 80%における W/B の違いによる自己収縮および線膨張係数の確認を目的とした.

実験 7，8，9 は，それぞれ，BS の使用率および W/B の違いによる乾燥収縮率，中性化深さ，凍結融解抵抗性の確認を目的とした.

いずれの実験も，BS の使用率および W/B を要因とし，1～3 水準どうしの組合せにより合計 42 ケースのデータを取得した.

**表-7**　実験の要因と水準（室内_初期･収縮･耐久性）

| 実験 | | | 要因 | 水準 | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|
| 初期性状 | 3 | ブリーディング | BSの使用率(%) | 0, 70, 80 | 計3ケース |
| | | | 水結合材比(%) | 55 | |
| | 4 | 凝結 | BSの使用率(%) | 0, 70, 80 | BS0, 70%は水結合材比39%のみ，BS80%は水結合材比全水準の測定で計5ケース |
| | | | 水結合材比(%) | 55, 39, 30 | |
| | 5 | 断熱温度上昇特性 | BSの使用率(%) | 60, 80 | 計2ケース |
| | | | 水結合材比(%) | 39 | |
| 収縮性状 | 6 | 自己収縮（線膨張係数） | BSの使用率(%) | 0, 70, 80 | BS0, 70%は水結合材比39%のみ，BS80%は水結合材比全水準の測定で計5ケース |
| | | | 水結合材比(%) | 55, 39, 30 | |
| | 7 | 乾燥収縮 | BSの使用率(%) | 0, 70, 80 | 計9ケース |
| | | | 水結合材比(%) | 55, 39, 30 | |
| 耐久性状 | 8 | 中性化 | BSの使用率(%) | 0, 70, 80 | 計9ケース |
| | | | 水結合材比(%) | 55, 39, 30 | |
| | 9 | 凍結融解抵抗性 | BSの使用率(%) | 0, 70, 80 | 計9ケース |
| | | | 水結合材比(%) | 55, 39, 30 | |

**表-8**　使用材料（室内_初期･収縮･耐久性）

| 材料 | 記号 | 種類・特性・主成分 |
|---|---|---|
| 水 | W1 | 地下水 |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント，密度3.16g/cm$^3$ |
| 混和材 | BS | 高炉スラグ微粉末4000，密度2.89g/cm$^3$ |
| 細骨材 | S1 | 山砂，表乾密度2.60～2.61g/cm$^3$ |
| | S2 | 石灰岩砕砂，表乾密度2.67g/cm$^3$ |
| 粗骨材 | G1 | 硬質砂岩砕石，表乾密度2.64g/cm$^3$ |
| 混和剤 | Ad2 | 高性能AE減水剤，ポリカルボン酸エーテル系化合物 |

**表-9**　試験項目および試験方法（室内_初期･収縮･耐久性）

| 試験項目 | | 試験方法 |
|---|---|---|
| フレッシュコンクリート性状 | スランプ試験 | JIS A 1101 |
| | スランプフロー試験 | JIS A 1150 |
| | 空気量試験 | JIS A 1128 |
| | コンクリート温度測定 | JIS A 1156 |
| 圧縮強度性状 | 圧縮強度試験* | JIS A 1108（供試体Φ10×20cm，標準養生材齢28日，n=3） |
| | 静弾性係数試験* | JIS A 1149（供試体Φ10×20cm，標準養生材齢28日，n=3） |
| 初期性状 | ブリーディング試験 | JIS A 1123, n=2 |
| | 凝結時間試験 | JIS A 1147, n=1 |
| | 断熱温度上昇試験 | JCI-SQA3（コンクリート中心部の上昇温度が定常状態になるまで測定）, n=1 |
| 収縮性状 | 線膨張係数の測定 | 中心部に埋込型ひずみ計を埋設した材齢56日の封かん養生供試体□10×10×40cmを用い，図1に示す温度履歴を与えて5分間隔でひずみを測定，n=1 |
| | 自己収縮試験 | JCI-SAS2（供試体□10×10×40cm, n=2） |
| | 乾燥収縮試験*（長さ変化測定） | JIS A 1129-3（供試体□10×10×40cm，材齢7日まで20℃水中養生，室温20℃･相対湿度60%の乾燥材齢1, 3, 5, 8, 13, 26週，n=3） |
| 耐久性状 | 促進中性化試験* | JIS A 1153（供試体□10×10×40cm，促進養生材齢1, 4, 8, 13, 19, 26週，n=3） |
| | 凍結融解試験* | JIS A 1148（供試体□10×10×40cm, n=3） |

*脱型：材齢3日

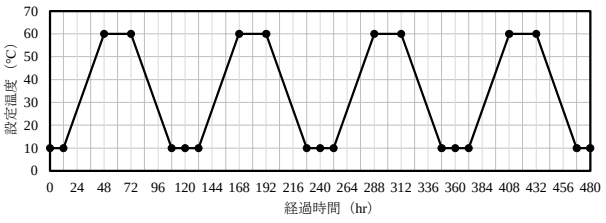



**図-5**　線膨張係数測定時に与えた温度履歴

#### (2) 使用材料，試験項目および調合

使用材料（室内_初期･収縮･耐久性）を**表-8** に，試験項目および試験方法（室内_初期･収縮･耐久性）を**表-9** に，線膨張係数測定時に与えた温度履歴を**図-5** に，調合（室内_初期･収縮･耐久性）を**表-10** に示す．フレッシュコン

表-10　使用材料およびフレッシュコンクリート試験結果･圧縮強度試験結果（室内_初期･収縮･耐久性）

| 実験 | | | 調合名 | BSの使用率 (%) | 水結合材比 (%) | 単位量(kg/m$^3$) | | | | | | 混和剤 (B×%) | フレッシュコンクリート性状 | | | 圧縮強度性状 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | W | C | BS | S1 | S2 | G | | スランプ (cm) | 空気量 (%) | コンクリート温度(℃) | 圧縮強度 (N/mm$^2$) | 静弾性係数 (kN/mm$^2$) |
| 初期性状 | 3 | ブリーディング | B-00-55 | 0 | 55 | 170 | 310 | 0 | 577 | 247 | 982 | 0.650 | 20.0 | 3.6 | 20 | 39.9 | 32.5 |
| | | | B-70-55 | 70 | 55 | 163 | 89 | 208 | 588 | 252 | 982 | 0.500 | 20.0 | 4.1 | 20 | 32.0 | 32.3 |
| | | | B-80-55 | 80 | 55 | 163 | 59 | 238 | 587 | 251 | 982 | 0.450 | 20.5 | 4.2 | 20 | 27.2 | 29.1 |
| | 4 | 凝結 | S-00-39 | 0 | 39 | 170 | 436 | 0 | 506 | 217 | 982 | 0.650 | 19.5 | 4.8 | 21 | 55.0 | 35.0 |
| | | | S-70-39 | 70 | 39 | 163 | 125 | 293 | 513 | 220 | 982 | 0.450 | 19.5 | 4.0 | 20 | 46.3 | 36.9 |
| | | | S-80-55 | 80 | 55 | 163 | 59 | 238 | 585 | 251 | 982 | 0.450 | 20.5 | 4.2 | 20 | 27.2 | 29.1 |
| | | | S-80-39 | 80 | 39 | 163 | 84 | 334 | 511 | 219 | 982 | 0.500 | 19.5 | 3.6 | 20 | 42.4 | 35.8 |
| | | | S-80-30 | 80 | 30 | 163 | 109 | 435 | 432 | 185 | 982 | 0.650 | 17.5 | 3.7 | 21 | 63.7 | 37.9 |
| | 5 | 断熱温度上昇特性 | A-60-39 | 60 | 39 | 163 | 167 | 251 | 515 | 221 | 982 | 0.650 | 20.5 | 5.4 | 21 | 47.2 | 32.5 |
| | | | A-80-39 | 80 | 39 | 163 | 84 | 334 | 511 | 219 | 982 | 0.500 | 20.5 | 5.0 | 20 | 44.3 | 33.0 |
| 収縮性状 | 6 | 自己収縮（線膨張係数） | 初期性状・凝結時間の実験と同一のコンクリートから採取した試料により測定 | | | | | | | | | | | | | | |
| | 7 | 乾燥収縮 | D-00-55 | 0 | 55 | 170 | 310 | 0 | 577 | 247 | 982 | 0.700 | 17.5 | 3.8 | 20 | 42.3 | 32.9 |
| | | | D-00-39 | 0 | 39 | 170 | 436 | 0 | 504 | 216 | 982 | 0.700 | 18.5 | 3.7 | 21 | 60.5 | 35.4 |
| | | | D-00-30 | 0 | 30 | 170 | 567 | 0 | 428 | 184 | 982 | 0.900 | 20.0 | 4.2 | 22 | 79.8 | 38.9 |
| | | | D-70-55 | 70 | 55 | 163 | 89 | 208 | 587 | 251 | 982 | 0.475 | 19.5 | 3.8 | 20 | 34.7 | 30.7 |
| | | | D-70-39 | 70 | 39 | 163 | 125 | 293 | 512 | 219 | 982 | 0.450 | 18.5 | 4.5 | 20 | 50.2 | 34.5 |
| | | | D-70-30 | 70 | 30 | 163 | 163 | 381 | 434 | 186 | 982 | 0.750 | 20.0 | 3.6 | 20 | 78.9 | 38.3 |
| | | | D-80-55 | 80 | 55 | 163 | 59 | 238 | 585 | 251 | 982 | 0.475 | 20.5 | 4.1 | 19 | 28.3 | 28.1 |
| | | | D-80-39 | 80 | 39 | 163 | 84 | 334 | 509 | 218 | 982 | 0.500 | 20.0 | 4.1 | 19 | 42.9 | 33.2 |
| | | | D-80-30 | 80 | 30 | 163 | 109 | 435 | 431 | 185 | 982 | 0.600 | 17.5 | 3.6 | 20 | 64.4 | 35.4 |
| 耐久性状 | 8 | 中性化 | C-00-55 | 0 | 55 | 170 | 310 | 0 | 577 | 247 | 982 | 0.700 | 18.0 | 5.1 | 21 | 37.9 | 30.3 |
| | | | C-00-39 | 0 | 39 | 170 | 436 | 0 | 504 | 216 | 982 | 0.800 | 20.0 | 5.2 | 22 | 55.2 | 32.7 |
| | | | C-00-30 | 0 | 30 | 170 | 567 | 0 | 428 | 184 | 982 | 1.000 | 19.0 | 3.8 | 23 | 84.9 | 38.9 |
| | | | C-70-55 | 70 | 55 | 163 | 89 | 208 | 587 | 251 | 982 | 0.500 | 20.0 | 5.1 | 21 | 32.5 | 28.6 |
| | | | C-70-39 | 70 | 39 | 163 | 125 | 293 | 512 | 219 | 982 | 0.450 | 18.5 | 5.2 | 21 | 46.5 | 33.1 |
| | | | C-70-30 | 70 | 30 | 163 | 163 | 381 | 434 | 186 | 982 | 0.750 | 16.5 | 4.5 | 21 | 73.1 | 34.6 |
| | | | C-80-55 | 80 | 55 | 163 | 59 | 238 | 585 | 251 | 982 | 0.550 | 20.0 | 4.8 | 20 | 28.3 | 28.3 |
| | | | C-80-39 | 80 | 39 | 163 | 84 | 334 | 509 | 218 | 982 | 0.500 | 19.5 | 5.1 | 20 | 41.0 | 30.1 |
| | | | C-80-30 | 80 | 30 | 163 | 109 | 435 | 431 | 185 | 982 | 0.700 | 19.5 | 5.0 | 21 | 62.9 | 33.3 |
| | 9 | 凍結融解抵抗性 | F-00-55 | 0 | 55 | 170 | 310 | 0 | 577 | 247 | 982 | 0.700 | 17.5 | 4.5 | 21 | 41.7 | 32.7 |
| | | | F-00-39 | 0 | 39 | 170 | 436 | 0 | 504 | 216 | 982 | 0.700 | 18.0 | 4.5 | 21 | 58.4 | 36.1 |
| | | | F-00-30 | 0 | 30 | 170 | 567 | 0 | 428 | 184 | 982 | 0.950 | 16.0 | 4.2 | 23 | 80.3 | 37.6 |
| | | | F-70-55 | 70 | 55 | 163 | 89 | 208 | 587 | 251 | 982 | 0.500 | 20.5 | 4.5 | 20 | 33.9 | 30.8 |
| | | | F-70-39 | 70 | 39 | 163 | 125 | 293 | 512 | 219 | 982 | 0.450 | 17.0 | 4.5 | 20 | 46.4 | 34.8 |
| | | | F-70-30 | 70 | 30 | 163 | 163 | 381 | 434 | 186 | 982 | 0.900 | 17.5 | 4.0 | 21 | 79.1 | 37.4 |
| | | | F-80-55 | 80 | 55 | 163 | 59 | 238 | 585 | 251 | 982 | 0.450 | 20.0 | 5.0 | 20 | 26.2 | 27.1 |
| | | | F-80-39 | 80 | 39 | 163 | 84 | 334 | 509 | 218 | 982 | 0.500 | 19.5 | 4.9 | 20 | 39.2 | 32.1 |
| | | | F-80-30 | 80 | 30 | 163 | 109 | 435 | 431 | 185 | 982 | 0.700 | 16.5 | 5.2 | 21 | 52.8 | 34.8 |

クリート性状の試験は練上がり直後に実施し，目標スランプは 18±2.5cm，目標空気量は 4.5±1.5%とした．

### 3.2 実験結果および考察

#### (1) 基本性状

フレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状の試験結果（室内_初期･収縮･耐久性）を**表-10** に示す．スランプおよび空気量は，化学混和剤の添加率の調整により，すべての調合において目標値を満足した．

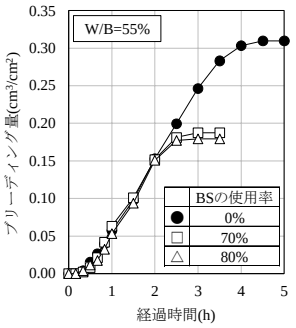



**図-6**　ブリーディング試験結果

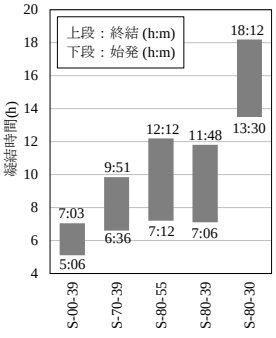



**図-7**　凝結試験結果

#### (2) ブリーディング

初期性状におけるブリーディングの試験結果を**図-6** に示す．BS の使用率にかかわらず，初期 2 時間までの発生傾向に顕著な差はみられなかった．ただし，ブリーディング量は，BS の使用率が大きくなるほど減少し，終了時間が早くなる傾向を示した．一般に，ブリーディング量は，BS の使用率が大きくなるほどポルトランドセメント量が減少し，初期の反応が遅延するため，ブリーディング量は多くなるといわれている [5]．一方で，BS 使用による比表面積の増大に伴って水との接触面積が大きくなることから，BS の粒子周囲に拘束される水量が増し，ブリ

ーディング量が少なくなると考えられている[6]．既往の研究でも前者の傾向[7]と後者の傾向[8]を示す結果がみられ，本実験では後者と同様の傾向を示した．

### (3) 凝結

初期性状における凝結の試験結果を**図-7** に示す．凝結時間は，始発および終結ともに，BS の使用率が大きくなるほど遅延する傾向を示した．BS の使用率 80%のコンクリートでは，W/B=55%と W/B=39%の調合でほぼ同程度の凝結時間を示したが，W/B=30%の調合で大幅に凝結時間が遅延する結果となった．これは，混和剤の添加量が大きくなったためと考えられる W/B=30%の高強度域の調合では，凝結遅延による影響を考慮する必要がある．

### (4) 断熱温度上昇特性

各試験ケースで実測した断熱温度上昇量と，比較のためマスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針[9]の予測式で算出した，打込み温度 20℃，呼び強度 40 のマスコンクリート対策として用いられる各セメント（M：中庸熱，L：低熱）を使用したコンクリートの断熱温度上昇量を**図-8** に示す．図中に示した M,L の終局断熱温度上昇量 $K$，断熱温度上昇速度を表す係数$\alpha$および$\beta$は指針に示されている係数を用いて算出し，試験ケースの $K$ は実測値を，$\alpha$は式[1]より回帰して求めた．

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t^{\beta}}) \qquad [1]$$

ここに，$t$：材齢(日)，$Q(t)$：断熱温度上昇量(℃)，$K$：終局断熱温度上昇量(℃)，$\alpha$，$\beta$：断熱温度上昇速度係数

断熱温度上昇速度係数$\alpha$において，各試験ケースは，M と同程度で L より大きく，材齢初期では L と比べて試験ケースの温度上昇量が上回っている箇所があった．一方で，終局断熱温度上昇量 $K$ において，試験ケースは M，L よりも小さいことが確認できた． BS の使用率を 80，60%とすることで，温度上昇量を抑えることが可能であり，温度ひび割れ対策として有効であると考えられる．

### (5) 線膨張係数

線膨張係数の測定結果を**表-11** に示す．一般的なコンクリートの線膨張係数は 7～13（×10$^{-6}$/℃）[10]と言われており，BS を高含有した本研究のコンクリートの線膨張係数は一般的な範囲にあることを確認した．また，BS の使用率 80%において W/B が小さくなるほど線膨張係数は大きくなる結果となった．

### (6) 自己収縮

材齢約 50 日までの自己収縮ひずみの測定結果を**図-9** に示す．BS の使用率 80%において，自己収縮ひずみは W/B が小さくなるほど大きくなる傾向となった．W/B39%において，自己収縮ひずみは BS の使用率 80，0，70%の順でひずみが大きくなったが，その差は最大で 37×10$^{-6}$ と小さ

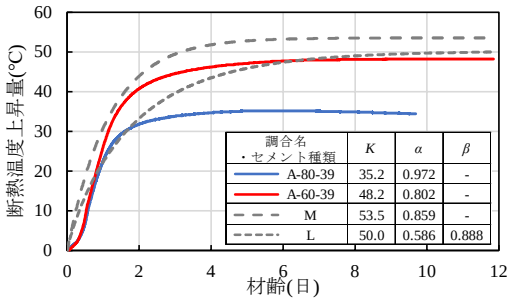



**図-8** コンクリートの断熱温度上昇量

**表-11** 線膨張係数の測定結果

| 調合名 | BSの使用率 (%) | 水結合材比 (%) | 線膨張係数 (×10$^{-6}$/℃) |
|---|---|---|---|
| S-80-55 | 80 | 55 | 10.43 |
| S-80-39 | | 39 | 11.67 |
| S-80-30 | | 30 | 12.08 |
| S-70-39 | 70 | 39 | 12.20 |
| S-00-39 | 0 | 39 | 9.16 |

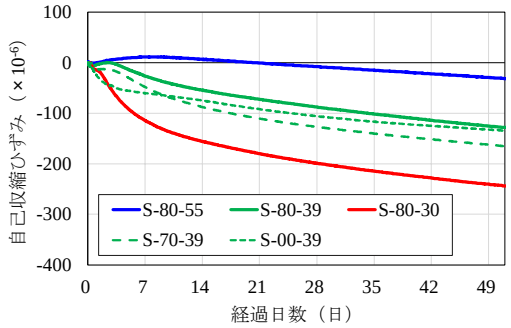



**図-9** 自己収縮ひずみの測定結果

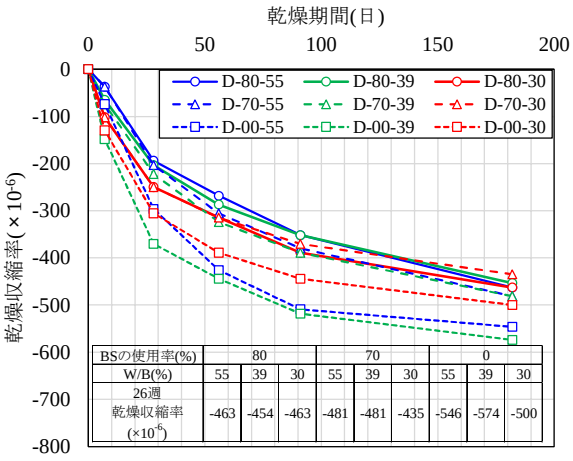



**図-10** 乾燥期間 26 週までの乾燥収縮率

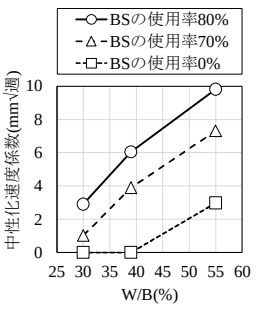



**図-11** W/B と促進期間 26 週までの中性化速度係数の関係

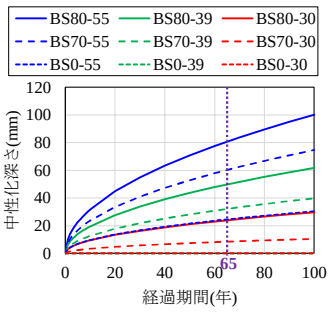



**図-12** 経過期間と推定中性化深さの関係

く，BS の使用率による大きな違いは確認できなかった．

### (7) 乾燥収縮

乾燥期間 26 週までの乾燥収縮率を**図-10** に示す．すべての試験ケースにおいて，建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5[11]（以下，JASS 5 と略記する）にて規定されている乾燥期間 26 週において $8\times10^{-4}$ 以下になることを確認した．乾燥収縮率は，BS の使用率 80%と 70%は同程度となり，BS の使用率 0%は 80%および 70%よりひずみが大きくなった．W/B の違いによる明確な差は確認できなかった．

### (8) 中性化

BS の使用率別の W/B と促進期間 26 週までの中性化速度係数の関係を**図-11** に示す．なお，中性化速度係数は，促進中性化試験結果より式[2]を用いて算出した．

$$C = A\sqrt{t} \qquad [2]$$

ここに，$C$：中性化深さ(mm)，$A$：促進中性化試験による中性化速度係数(mm√週)，$t$：材齢(週)

W/B が大きくなるほど，BS の使用率が大きくなるほど，中性化速度係数は増大する結果となった．

経過期間と推定中性化深さの関係を**図-12** に示す．推定中性化深さは，鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説 [12]より式[3]を用いて算出した．環境条件は，温度 20℃，相対湿度 60%，$CO_2$ 濃度は耐久設計上で屋内の値として用いられる 0.10%とした．

$$C = A\sqrt{CO_2/5.0}\cdot\sqrt{t} \qquad [3]$$

ここに，$C$：中性化深さ(mm)，$CO_2$：$CO_2$ 濃度(%)，$A$：促進中性化試験による中性化速度係数(mm√週)，$t$：材齢(週)

JASS 5 では，仕上げなしの場合，計画供用期間の級が標準（65 年）において，スラブを除いた構造部材の最小かぶり厚さを 40mm としている．C-80-55，C-80-39 および C-70-55 を除いた試験ケースにおいて，65 年経過後の推定中性化深さが 40mm を下回る結果となった．すなわち，BS の使用率が 80%では W/B30％以下，70%では W/B39%以下と，W/B を低減することで，BS による中性化の進行を抑え，鉄筋コンクリート構造物に適用可能と考えられる．

### (9) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験による相対動弾性係数を**図-13** に，質量減少率を**図-14** に示す．F-00-55 を除いた試験ケースにおいて，300 サイクルでの相対動弾性係数は 95%を超え，質量減少率は 1.0%以下となった．**表-10** に示す通り，各調合の空気量試験結果に大きな違いはなく，**図-13** より BS の使用率の違いによる相対動弾性係数の差が小さいことから，BS の使用率 80，70%による凍結融解抵抗性への影響は小さいと考えられる．さらに，W/B55%においては，

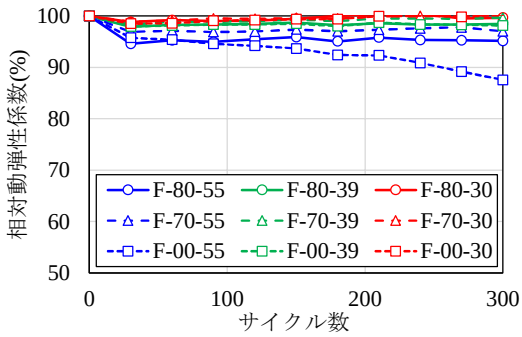



**図-13** 凍結融解試験による相対動弾性係数

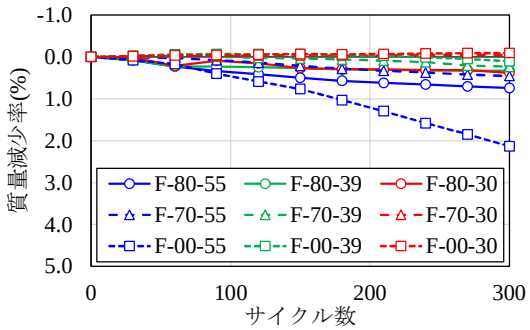



**図-14** 凍結融解試験による質量減少率

BS の使用率 0%の相対動弾性係数が最も小さい値となり，空気量や圧縮強度の差が小さいことから，BS を使用することで凍結融解試験抵抗性が向上する可能性が示唆された．

## 3.3 室内実験におけるコンクリートの初期性状，収縮性状および耐久性状のまとめ

室内実験におけるコンクリートの初期性状，収縮性状および耐久性状を確認した結果，以下の知見が得られた．

(1) 初期性状において，ブリーディング量は BS の使用率が大きくなるほど減少し終了時間が早くなり，凝結時間は始発および終結ともに BS の使用率が大きくなるほど遅延する傾向を示した．また，断熱温度上昇特性において温度上昇量を抑えることが可能であり温度ひび割れ対策の有効性を確認した．

(2) 収縮性状において，線膨張係数は一般的なコンクリートと同等の範囲にあり，自己収縮ひずみは BS の使用率の違いによる明確な差は確認されず，BS の使用率 0%と同程度となった．また，乾燥収縮率は 乾燥期間 26 週において $8\times10^{-4}$ 以下となり BS の使用率 80%と 70%が 0%よりひずみが小さくなった．

(3) 耐久性状において，BS の使用率が大きくなるほど促進中性化試験による促進期間 26 週までの中性化速度係数は増大したが，W/B を低減することで鉄筋コンクリート構造物に適用可能となる範囲を確認した．また，凍結融解抵抗性への影響は小さいことを確認した．

## 4．実機実験におけるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状の検討

### 4.1 実験概要

#### (1) 実機実験におけるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状の実験概要

実験の要因と水準（実機_フレッシュ･圧縮）を**表-12** に示す．結合材の割合は，いずれの実験も，普通ポルトランドセメントを 20%，BS を 80%とし，以下の目的で実験 10 および実験 11 を実施した．

実験 10 は，フレッシュコンクリート性状の経時変化の確認を目的とした．

実験 11 は，構造体コンクリートの圧縮強度および構造体強度補正値（以下，$_{28}S_{91}$ 値と略記する）の確認を目的とした．

#### (2) 使用材料，試験項目および調合

使用材料（実機_フレッシュ･圧縮）を**表-13** に示す．実験 10 と実験 11 は異なる場所で実施したため，骨材，水は異なる種類の材料を用いた．

試験項目および試験方法（実機_フレッシュ･圧縮）を**表-14** に，調合（実機_フレッシュ･圧縮）を**表-15** に示す．実験 10 では，フレッシュコンクリート性状の試験を，練上がり直後，練混ぜから 30，60，90，120 分後に実施した．実工事における運搬時間を想定し，練混ぜから 60 分で目標値を満足することとした．実験 11 では，フレッシュコンクリート性状の試験は練上がり直後に実施した．

### 4.2 実験結果および考察

#### (1) フレッシュコンクリート性状

フレッシュコンクリートの試験結果（実機_フレッシュ･圧縮）を**表-15** に示す．スランプ，スランプフローお

**表-12　実験の要因と水準（実機_フレッシュ･圧縮）**

| 実験No. | 要因 | 水準 |
|---|---|---|
| 10 | 水結合材比(%) | 50，39，35 |
| 11 | 水結合材比(%) | 55，39，30 |
| | 季節区分 | 夏期，標準期，冬期 |

**表-13　使用材料（実機_フレッシュ･圧縮）**

| 材料 | 記号 | 種類・特性・主成分 | |
|---|---|---|---|
| | | 実験10 | 実験11 |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント,密度3.16g/cm$^3$ | |
| 混和材 | BS | 高炉スラグ微粉末4000,密度2.89g/cm$^3$ | |
| 細骨材 | S1 | — | 山砂,表乾密度2.59-2.61g/cm$^3$ |
| | S2 | — | 砕砂,表乾密度2.67-2.68g/cm$^3$ |
| | S3 | 陸砂,表乾密度2.58g/cm$^3$ | — |
| | S4 | 砕砂,表乾密度2.62g/cm$^3$ | — |
| 粗骨材 | G1 | — | 硬質砂岩砕石，表乾密度2.64g/cm$^3$ |
| | G2 | 石灰石砕石，表乾密度2.70g/cm$^3$ | — |
| 混和剤 | Ad | 高性能AE減水剤，ポリカルボン酸エーテル系化合物 | |
| 水 | W1 | — | 地下水 |
| | W2 | 上水道水 | — |

**表-14　試験項目および試験方法（実機_フレッシュ･圧縮）**

| 試験項目 | | 試験方法 |
|---|---|---|
| フレッシュコンクリート性状 | スランプ<br>スランプフロー | JIS A 1101<br>JIS A 1150 |
| | 空気量 | JIS A 1128 |
| | コンクリート温度 | JIS A 1156 |
| 圧縮強度性状 | 圧縮強度 | JIS A 1108（標準養生：材齢7,28,56,91日，n=3，構造体コンクリート：JASS 5T-605によるコア供試体_材齢28,56,91日，n=6，JASS 5T-606による簡易断熱養生供試体_材齢28,56,91日，n=3） |

**表-15　調合およびフレッシュコンクリート試験結果（実機_フレッシュ･圧縮）**

| 実験No. | 調合名 | 製造時の季節区分 | BSの使用率(%) | 水結合材比(%) | 単位量(kg/m$^3$) W1またはW2 | C | BS | S1またはS3 | S2またはS4 | G1またはG2 | Ad(B×%) | フレッシュコンクリート性状（実験10：練混ぜから60分後，実験11：練上り直後） 目標スランプまたは目標スランプフロー(cm) | スランプ(cm) | スランプフロー(cm) | 目標空気量(%) | 空気量(%) | コンクリート温度(℃) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 10-BS80-50-冬 | 冬期 | 80 | 50 | 165 | 66 | 264 | 435 | 435 | 929 | 0.73 | 21±2.0 | 22.5 | 43.5 | 4.5±1.5 | 5.0 | 13 |
| | 10-BS80-39-冬 | | | 39 | 165 | 85 | 338 | 394 | 394 | 929 | 0.78 | | 23.0 | 46.5 | | 4.7 | 14 |
| | 10-BS80-35-冬 | | | 35 | 165 | 94 | 378 | 382 | 382 | 908 | 0.83 | 55±7.5 | — | 60.0 | | 4.6 | 14 |
| 11 | 11-BS80-55-夏 | 夏期 | 80 | 55 | 163 | 59 | 238 | 591 | 253 | 976 | 0.55 | 18±2.5 | 18.0 | 29.5 | | 5.2 | 31 |
| | 11-BS80-39-夏 | | | 39 | 163 | 84 | 334 | 515 | 221 | 976 | 0.65 | | 20.0 | 20.5 | | 3.8 | 29 |
| | 11-BS80-30-夏 | | | 30 | 163 | 109 | 435 | 436 | 187 | 976 | 0.90 | | 19.5 | 31.5 | | 6.0 | 31 |
| | 11-BS80-55-標 | 標準期 | 80 | 55 | 163 | 59 | 238 | 585 | 251 | 982 | 0.55 | | 18.5 | 31.0 | | 4.1 | 18 |
| | 11-BS80-39-標 | | | 39 | 163 | 84 | 334 | 509 | 218 | 982 | 0.63 | | 20.0 | 33.5 | | 4.7 | 18 |
| | 11-BS80-30-標 | | | 30 | 163 | 109 | 435 | 431 | 185 | 982 | 0.95 | | 19.0 | 30.0 | | 3.0 | 21 |
| | 11-BS80-55-冬 | 冬期 | 80 | 55 | 163 | 59 | 238 | 588 | 252 | 976 | 0.60 | | 19.5 | 34.0 | | 3.3 | 11 |
| | 11-BS80-39-冬 | | | 39 | 163 | 84 | 334 | 513 | 220 | 976 | 0.70 | | 20.5 | 34.0 | | 3.2 | 12 |
| | 11-BS80-30-冬 | | | 30 | 163 | 109 | 435 | 435 | 186 | 976 | 1.10 | | 18.0 | 29.0 | | 5.5 | 14 |

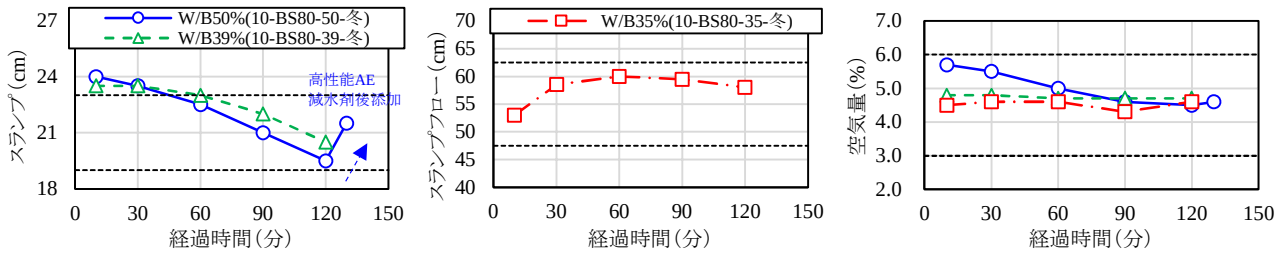



**図-15　フレッシュコンクリートの経時変化**

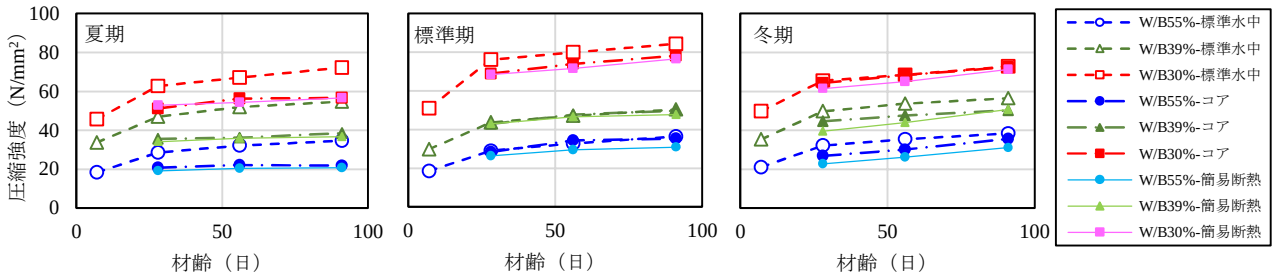



図-16　材齢と圧縮強度の関係

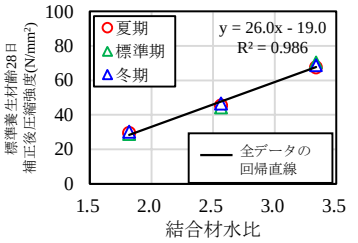



図-17　結合材水比と標準養生材齢 28 日の補正後圧縮強度の関係

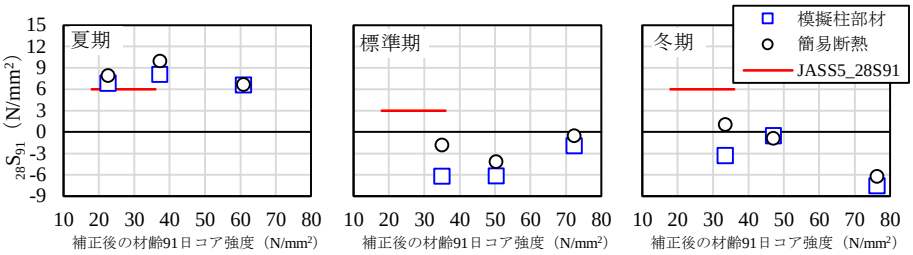



図-18　補正後の材齢 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係

よび空気量は，化学混和剤の添加率の調整により，すべての調合において目標値を満足した．

フレッシュコンクリートの経時変化を図-15 に示す．スランプ，スランプフロー，空気量は経過時間 60 分から 120 分まで目標の範囲を満足した．W/B50%において，経過時間 120 分のフレッシュコンクリート試験終了後に高性能 AE 減水剤の後添加を実施したところ，スランプが 21.5cm に回復した．これより，スランプロスが大きい場合，高性能 AE 減水剤の後添加により調整が可能と考えられる．

### (2) 圧縮強度性状

材齢と圧縮強度の関係を図-16 に示す．コアおよび簡易断熱の圧縮強度は，同一材齢の標準養生と比較し小さくなり，特に夏期において差が 10N/mm² 以上となった．コアと簡易断熱の圧縮強度の差は，3N/mm² 程度でありほぼ同程度の値となった．ここで，例えば，W/B30%の夏期と標準期の同一材齢における標準養生の圧縮強度は，差が 10N/mm² 程度である．これは，空気量が夏期は 6.0%，標準期は 3.0%であったことが影響していると考えられる．そこで，空気量の試験結果をもとに圧縮強度の補正を行い[4]，これ以降は補正後の圧縮強度で検討した．

結合材水比と標準養生材齢 28 日の補正後圧縮強度の関係を図-17 に示す．季節に関わらず同一 W/B の場合，同程度の圧縮強度となり，結合材水比と圧縮強度は相関性が高い直線関係にあることが確認された．このことから，実機による製造においても結合材水比と圧縮強度の関係式による調合設計が可能と考えられる．

補正後の材齢 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係を図-18 に示す．図中の JASS 5_$_{28}S_{91}$ は，JASS 5[13]の高炉セメント C 種の $_{28}S_{91}$ である．標準期，冬期の $_{28}S_{91}$ は JASS 5 の $_{28}S_{91}$ より小さく，夏期の $_{28}S_{91}$ は JASS 5 の $_{28}S_{91}$ よりやや大きい値となった．BS の使用率 80%の場合，標準期，冬期は JASS 5 の $_{28}S_{91}$ を採用することが可能と考えられ，夏期は工場での実験データから $_{28}S_{91}$ を設定することが必要と考えられる．

### 4.3 実機実験におけるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度性状のまとめ

高炉スラグ微粉末の使用率が 80%の低炭素型のコンクリートに関する実機実験の結果，以下の知見が得られた．

(1) スランプ，スランプフロー，空気量は化学混和剤の添加率の調整により経時 120 分まで目標の範囲を満足した．

(2) 結合材水比と圧縮強度は相関性が高い直線関係にあり，一般のコンクリートと同様の調合設計が可能であった．

(3) 標準期，冬期は JASS5 の高炉セメント C 種の $_{28}S_{91}$ を採用でき，夏期は工場での実験データによる $_{28}S_{91}$ の設定が必要と考えられた．

## 5．まとめ

普通ポルトランドセメントに混和材として高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの基本的な性能を把握することを目的に，室内実験および実機実験により検討を実施した結果，以下の知見が得られた．

(1) スランプ，スランプフロー，空気量は，一般のコンクリートと同様に，適切な化学混和剤の添加率とすることにより経時 120 分まで目標の範囲に調整可能であった．

(2) 結合材水比と圧縮強度は相関性が高い直線関係にあり，一般のコンクリートと同様の調合設計が可能であった．また，標準期，冬期は JASS 5 の高炉セメント C 種の

$_{28}S_{91}$ を採用でき，夏期は工場での実験データによる $_{28}S_{91}$ の設定が必要と考えられた．

(3) 一般のコンクリートと比較し，ブリーディング量は減少し終了時間が早くなり， 凝結時間は始発および終結ともに遅延した．また，断熱温度上昇量を抑制することが可能であり，温度ひび割れ対策に有効であった．

(4) 一般のコンクリートと比較し，線膨張係数および自己収縮によるひずみは同程度であり，乾燥収縮によるひずみは小さくなった．

(5) 一般のコンクリートと比較し，促進中性化試験による中性化速度係数は増大したが，水結合材比を低減することで中性化の進行を抑え，鉄筋コンクリート構造物に適用可能であることを確認した．また，凍結融解抵抗性への影響は小さかった．

以上の知見を得られているが，実構造物に適用する際には，高炉スラグ微粉末の供給やレディーミクストコンクリート工場の協力が課題となる．また，建築物件で使用する際は本技術に関する何らかの公的証明が必要になると考えられるが，その証明は未取得の状況である．

**謝辞**：本研究に関して，シーカ・ジャパン（当時ポゾリスソリューションズ），アサノコンクリート品川工場のご協力を得ました．ここに記して謝意を表します．

## 参考文献

1) 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 2022，p.181
2) 和地正浩他：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.485-490，2010
3) 白根勇二他：硬化促進剤を用いた低炭素型のコンクリートの施工事例，土木学会第 73 回年次学術講演会，V-217，2018
4) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'25，p.70，2025.9
5) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計･施工指針（案）･同解説，2017.9
6) 宮澤祐介他：高炉スラグ微粉末の比表面積および置換率がコンクリートの長期強度発現に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.82，No.740，pp.1517-1526，2017.10
7) 古川雄太他：高炉スラグ微粉末を高含有した環境配慮型コンクリートの基礎物性 その 2 フレッシュ性状および力学性状，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.81-82，2016.8
8) 川又篤他：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状 その 4 室内実験におけるブリーディングおよび凝結，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.541-542，2019.9
9) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計･施工指針･同解説，p.54，2019
10) 日本コンクリート工学会：コンクリート便覧（第 2 版），p.262，1996
11) 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，pp.409-414，2022
12) 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･同解説，pp.99,116，2016
13) 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 2022，pp.20,61