

論文 混和材を高含有したコンクリートの強度性状に関する一考察

小林 利充*1・並木 憲司*2・溝渕 麻子*3

要旨: 本論文は、高炉スラグ微粉末の混合割合を70%超とした混和材を高含有したコンクリートを対象に、複数のレディーミクストコンクリート工場において実機試験を実施し、強度性状の検討を行った。その結果、標準養生強度およびコア強度は結合材水比に比例して増加し、従来のコンクリートと同様に線形関係で表される。また、28日標準養生強度または28日コア強度に対する各材齢における強度増進割合を明らかにした。さらに、構造体強度補正值(28S91)は部材の最高温度が高いほど、91日コア強度が高いほど大きくなる傾向にあり、普通強度領域では、JASS 5に規定される標準値と同等以下であることが明らかとなった。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 実機試験, 強度, 構造体強度補正值, 最高温度

1. はじめに

近年、コンクリート分野においても、環境負荷を低減する取り組みが積極的に行われている。なかでも、コンクリートの低炭素化や副産物の有効利用を目的に、セメントの一部を高炉スラグ微粉末などの副産物系混和材に置換する研究が多数検討されており、実工事への適用も報告されている^{1),2)}。しかしながら、筆者らの研究成果を除くと、多くの研究では高炉スラグ微粉末の混合割合がJISに規定されている高炉セメントの範囲(高炉スラグ微粉末の混合割合:5~70%)で検討されている。一方、JISの範囲を超えた混合割合(高炉スラグ微粉末の混合割合:70%超)での検討は、土木学会による「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」³⁾や既往の文献^{4),5)}で報告されているが、前述したJISの範囲での検討内容に比べると非常に少なく、1工場におけるデータや同一材料によるデータがほとんどである。

本論文では、結合材に対する高炉スラグ微粉末の混合割合を70%超とした混和材を高含有したコンクリート(混和材高含有コンクリート)の強度性状を把握することを目的に、材料の製造者の組合せが異なる複数のレディーミクストコンクリート工場(生コン工場)で実機試験を実施し、各種性状について検討した。

2. 実験データの概要

実験データは、筆者らが2013~2016年までに関東地区の生コン工場において実施した実機プラントによる試験練り結果である。実験データの概要、使用材料、調査計画、製造概要および試験項目を表-1~表-5に示す。

表-1 実験データの概要

工場	地域	材料製造者			骨材 岩種	実施 期間
		Ce	BS	Ad		
1	東京	A	a	α	S:山灰 G:灰灰	標
2		A	a	β	S:山灰 G:灰	夏標冬
3		A	a	α	S:山灰 G:灰灰	標
4		B	b	β	S:山灰 G:灰	標冬
5		B	b	β	S:山灰 G:灰灰	標冬
6		A	a	β	S:山硬 G:灰	標
7		A	a	β	S:灰陸 G:灰	夏標冬
8		A	a	γ	S:山灰 G:灰	冬
9		C	a	β	S:山 G:灰灰	標
10		C	c	α	S:山灰 G:灰	冬
11		D	c	α	S:山山灰 G:灰灰	標
12	埼玉	A	a	α	S:硬硬灰 G:硬灰	冬
13		C	a	β	S:陸灰 G:灰	冬
14	神奈川	B	b	β	S:山灰 G:硬灰	夏標冬
15		A	a	β	S:山硬 G:灰硬	夏標冬
16		B	b	γ	S:山灰 G:灰	夏標冬
17		A	a	β	S:山硬 G:灰	夏
18		A	a	α	S:山硬 G:灰硬	標

[注] Ce: 普通ポルトランドセメント, BS: 高炉スラグ微粉末, Ad: 化学混和剤, S: 細骨材, G: 粗骨材, 山: 山砂, 陸: 陸砂, 灰: 石灰砕砂(碎石), 硬: 硬質砂岩砕砂(碎石), 表中の「灰灰」のような表記は、産地の異なる2種類の石灰砕砂(碎石)を用いる場合を示す。標: 標準期, 夏: 夏期, 冬: 冬期

*1 (株)大林組技術研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組東京本店 副課長 (正会員)

*3 (株)大林組技術研究所 副主任研究員 (正会員)

実施した生コン工場は、東京都、埼玉県および神奈川県
の 18 工場を対象とした。使用材料として、セメントは
普通ポルトランドセメント、混和材は JIS A 6206 に適合
する高炉スラグ微粉末 4000 を使用した。骨材は生コン工
場で常時使用しているものを用いた。また、化学混和剤
は JIS A 6204 に適合する AE 減水剤(AE)または高性能 AE
減水剤(SP)を使用した。なお、各材料の製造者は、普通
ポルトランドセメントが 4 種類、高炉スラグ微粉末が 3
種類、化学混和剤は 3 種類であった。調査計画として、
スランプの目標値は 18 または 21cm とし、水結合材比
(W/B)30%についてのみ施工性を考慮してスランプフロ
ー60cm とし、空気量の目標値は一律 4.5%とした。水結
合材比の設定は化学混和剤の種類によって異なり、AE
仕様の場合は 40、47 および 55%、SP 仕様の場合は 30、
37 および 44%とした。また、単位水量は 164~185kg/m³
の範囲で生コン工場ごとに設定した。

コンクリートの製造は、二軸強制練りミキサを使用し、
1 調査当たり 3m³を基本とし、練混ぜ方法は生コン工場
ごとに設定した。実施期間は、夏期(8、9月)、標準期
(4、5、10、11月)および冬期(1、2月)の各期間にお
いて 1 回以上実施した。

試験項目は、フレッシュ性状としてスランプまたはス
ランプフロー、空気量およびコンクリート温度を測定し
た。強度性状として標準養生強度、コア強度および簡易

断熱養生強度、温度性状として温度履歴を測定した。コ
ア強度用柱型試験体および簡易断熱養生槽の概要を図
1 および図 2 に示す。フレッシュ性状は、目標値を満足
する結果であり、本論文では強度性状のみを記載する。

表-4 コンクリートの製造概要

項目	概要
ミキサ	二軸強制練り
練混ぜ量	原則 3m ³ (1.5m ³ ×2回)
練混ぜ方法	生コン工場ごとに設定 (W/B30%の練混ぜ方法の一例として、 モルタルを 60 秒間練混ぜ後、粗骨材を 投入して 60 秒間練混ぜて製造した)

表-5 試験項目

項目	試験方法	備考	
フレッシュ 性状	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	—
強度 性状	標準養生	JIS A 1108	材齢 3,7,28,56 日
	コア	JIS A 1107	材齢 28,56,91 日
	簡易断熱養生	JIS A 1108	材齢 28,56,91 日
温度 性状	温度履歴	熱電対	打込み直後より 28 日間

表-2 コンクリートの使用材料

分類	種類	備考
セメント(Ce)	普通ポルトランドセメント	—
混和材(BS)	高炉スラグ微粉末 4000	—
水(W)	①上水道水、②工業用水、 ③地下水	生コン工 場による
細骨材(S)	①山砂(山) ②陸砂(陸) ③石灰砕砂(灰) ④硬質砂岩砕砂(硬)	組合せは 生コン工 場により 異なる(表 -1 参照)
粗骨材(G)	①石灰砕石(灰) ②硬質砂岩砕石(硬)	
化学混和剤 (Ad)	①AE 減水剤(AE) ②高性能 AE 減水剤(SP)	—

表-3 調査計画

分類	概要
スランプ(cm)	18~21
スランプフロー(cm)	60(W/B30%のみ)
空気量(%)	4.5
水結合材比(%)	AE 仕様 : 40, 47, 55 SP 仕様 : 30, 37, 44
単位水量(kg/m ³)左側 細骨材率(%)右側	W/B30% : 165~170, 42.8~47.8 W/B37% : 164~175, 43.2~46.8 W/B40% : 175~185, 40.1~44.7 W/B44% : 165~170, 43.1~48.7 W/B47% : 174~182, 43.9~47.7 W/B55% : 165~179, 45.5~50.0
高炉スラグ微粉末の 混合割合(%)	75

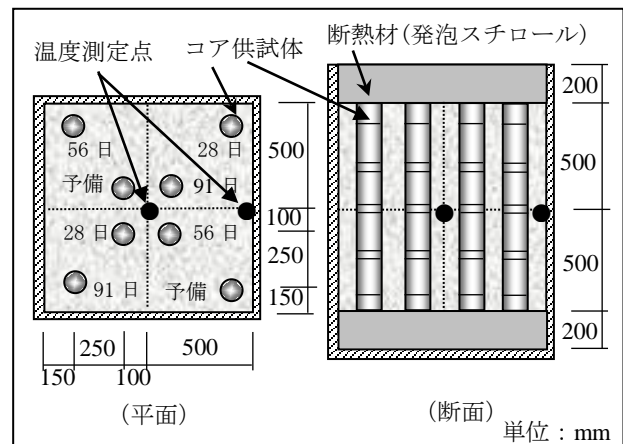


図-1 コア強度用柱型試験体の概要

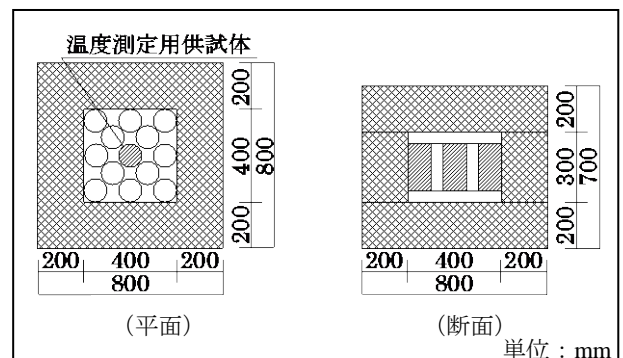


図-2 簡易断熱養生槽の概要

3. 検討結果

3.1 強度

(1) 28日標準養生強度

結合材水比と28日標準養生強度の関係として、高炉スラグ微粉末の製造者ごとに整理した結果を図-3に示す。全体的な傾向として、28日標準養生強度は結合材水比に比例して増加する傾向にあり、従来のコンクリートと同様に線形関係で表される。また、水結合材比30%（結合材水比3.33）では、最大で80N/mm²が得られている。したがって、混和材高含有コンクリートでも、水結合材比を調整することで、高強度化が可能である。

(2) 28日コア強度

結合材水比と28日コア強度の関係として、高炉スラグ微粉末の製造者および実施期間ごとに整理した結果を図-4に示す。前述した28日標準養生強度と同様に、28日コア強度は結合材水比に比例して増加する傾向にあり、本実験では30~70N/mm²の範囲に分布している。また、実施期間の影響としては、すべての生コン工場が3シーズンに渡って実機試験を行っていないため、直接的な強度の比較はできないが、28日コア強度は夏期より冬期の方が概ね高くなる傾向にある。なお、中央部コアと端部コアの強度差は平均で1.94N/mm²であり、最高温度が低い場合は中央部のコア強度が高く、最高温度が高い場合は端部のコア強度が高くなる傾向にある。

3.2 強度増進割合

(1) 標準養生強度

結合材水比と28日標準養生強度に対する材齢ごとの割合として整理した結果を図-5に示す。結合材水比1.82~3.33の範囲において、28日標準養生強度に対する3日の割合は平均で0.32~0.54、7日の割合で0.65~0.78となり、3~7日までの範囲では、結合材水比が大きいくほど、28日標準養生強度に対する各材齢の割合は高くなる傾向にある。一方、28日標準養生強度に対する56日の割合は平均で1.07~1.13となり、前述した傾向とは逆に、結合材水比が小さいほど28日標準養生強度に対する割合は高くなる傾向にある。つまり、3~7日までの若材齢においては、水結合材比が小さいほど強度発現性は高いが、56日での長期材齢では、水結合材比が大きいくほど強度発現性が高くなる傾向にある。

(2) コア強度

最高温度と28日コア強度に対する91日コア強度の割合を図-6に示す。それぞれの図には、高炉スラグ微粉末の製造者ごとに整理した結果を示す。なお、最高温度とは、コア強度用柱型試験体の中央部と端部の最高温度の平均値を示す。いずれの水結合材比においても、28日コア強度に対する91日コア強度の割合は、最高温度が低

いほど高くなる傾向にある。また、水結合材比ごとの回帰線を比較すると、水結合材比30%は37および44%に比べて、最高温度が低い場合に若干低い傾向が見られる。ただし、本論文では水結合材比30%における20~30℃の温度領域でのデータが少ないため、回帰線の傾きが低温領域で緩慢になっている可能性がある。したがって、今後データを蓄積し検討する必要がある。

3.3 簡易断熱養生強度とコア強度の相関性

91日簡易断熱養生強度と91日コア強度の関係を図-7に示す。この結果から、簡易断熱養生強度とコア強度の間には高い相関性が見られる。回帰式を以下に示す。

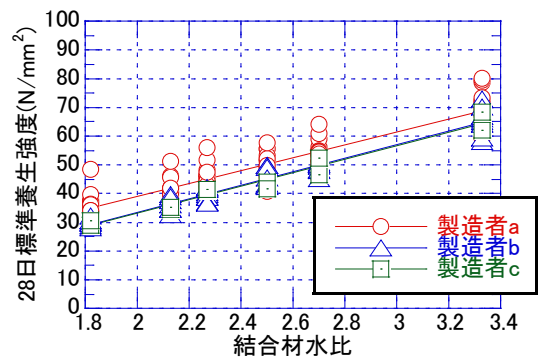


図-3 結合材水比と28日標準養生強度の関係

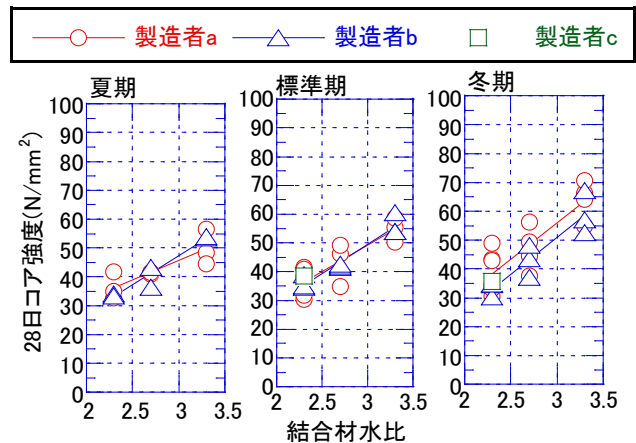


図-4 結合材水比と28日コア強度の関係

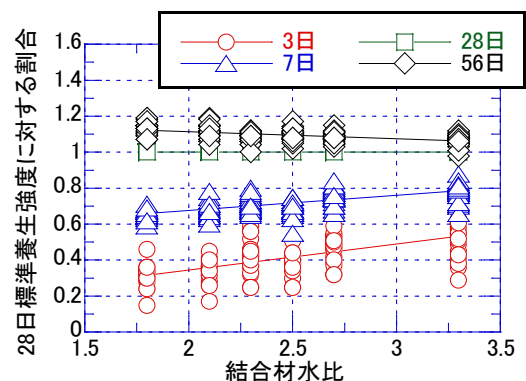


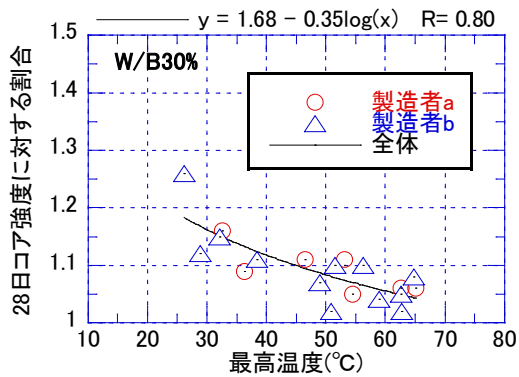
図-5 結合材水比と28日標準養生強度に対する割合

$$f_c F = k F \times 0.89 + 7.61 \quad (R=0.97) \quad (1)$$

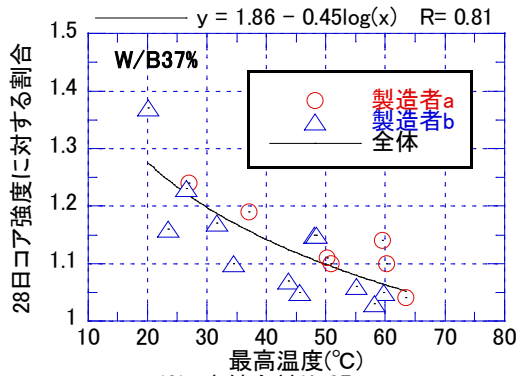
ここに、 $f_c F$: 91日コア強度 (N/mm²)

$k F$: 91日簡易断熱養生強度 (N/mm²)

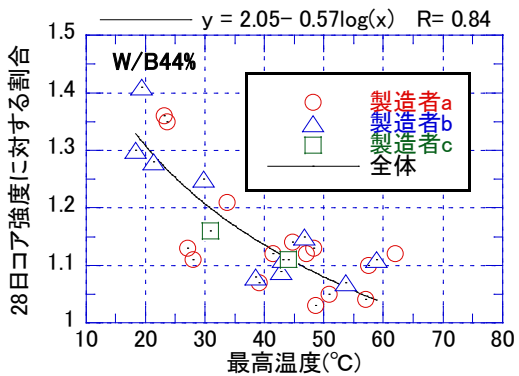
また、簡易断熱養生強度とコア強度の回帰線は、1対1の等線(図中の黒線)に比べてその傾きが緩やかになる。特に、強度が低い領域においては、91日簡易断熱養生よりも91日コア強度の方が高くなる傾向にあり、既往の結果と同様の傾向を示している⁹⁾。この結果を参考にすれば、mSn値を把握する場合、コア強度に代えて簡易断熱養生強度を用いることで、少ない労力で評価できる可能性があると言える。



(1) 水結合材比 30%



(2) 水結合材比 37%



(3) 水結合材比 44%

図-6 最高温度と28日コア強度に対する91日コア強度の割合

3.4 構造体強度補正值

(1) コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係

91日コア強度と構造体強度補正值($_{28}S_{91}$)の関係として、期間ごとに整理した結果を図-8に示す。

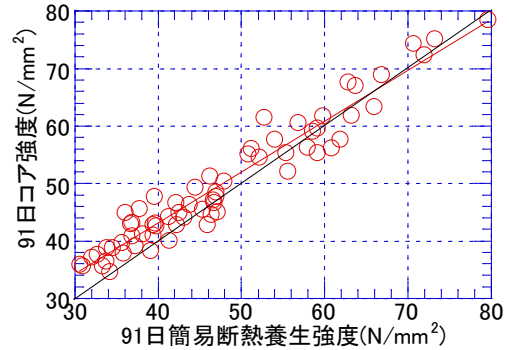
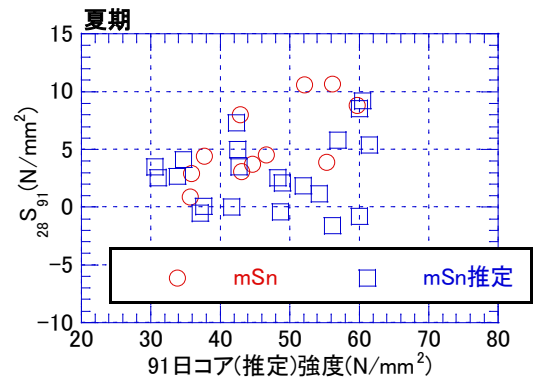
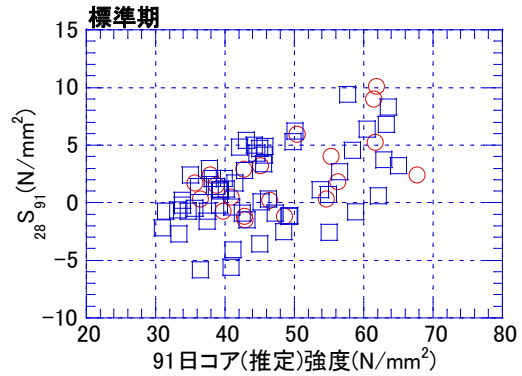


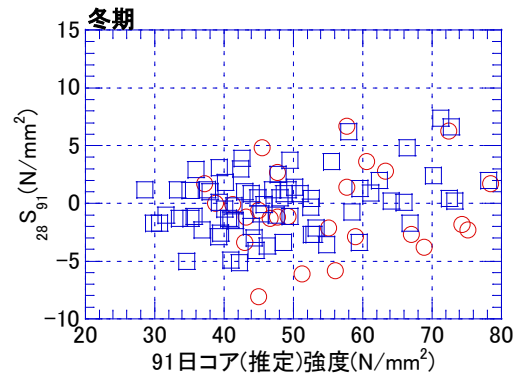
図-7 91日簡易断熱養生強度と91日コア強度の関係



(1) 夏期



(2) 標準期



(3) 冬期

図-8 91日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係

$_{28}S_{91}$ の算出は、28 日標準養生強度と 91 日コア強度の差から求めている（図中の○）。ただし、生コン工場によっては全調合でコア強度を採取していない場合がある。その際には 91 日簡易断熱養生強度を前述した式（1）に代入して 91 日コア強度を推定し、28 日標準養生強度との差から $_{28}S_{91}$ を求めた（図中の□）。いずれの期間においてもコア強度の増進に伴って $_{28}S_{91}$ は概ね増大する傾向を示している。また、季節的な影響を、コア強度 30～60N/mm² の範囲で比較すると、夏期の $_{28}S_{91}$ は-2～11N/mm² の範囲に分布しているのに対して、冬期のそれは-8～7N/mm² の範囲に分布しており、夏期の $_{28}S_{91}$ よりも冬期の方が小さくなる傾向が見られる。

(2) 生コン工場ごとの $_{28}S_{91}$

図-8 には、混和材高含有コンクリートの $_{28}S_{91}$ を期間ごとに示したが、前述したデータから 3 シーズン（夏期・標準期・冬期）にわたりデータを採取した生コン工場（表-1 の No.2 および No.16 の 2 工場）に着目し、91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係を図-9 に示す。限られたデータではあるが、同一のコア強度で比較すると、いずれも $_{28}S_{91}$ は夏期に比べて冬期の方が小さくなるのがわかる。なお、No.2 の高炉スラグ微粉末は製造者 a、No.16 は製造者 b である。したがって、高炉スラグ微粉末の製造者によって、 $_{28}S_{91}$ の値は異なるものの、期間による $_{28}S_{91}$ の傾向は同様であると考ええる。

(3) 材齢 28 日までの平均気温と $_{28}S_{91}$ の関係

28 日までの平均気温と $_{28}S_{91}$ の関係として、コア強度ごとに整理した結果を図-10 に示す。図中には JASS 5 による高炉セメント B 種を用いたコンクリートの $_{28}S_{91}$ の標準値（普通コンクリートの領域）も併せて示す。この結果でも、平均気温が高くなるほど $_{28}S_{91}$ は大きくなる傾向にある。また、コア強度が 40N/mm² 以下の強度領域であれば、 $_{28}S_{91}$ は概ね 3N/mm² 以下となる。また、コア強度が 40～50N/mm² の強度領域では、 $_{28}S_{91}$ は概ね 6N/mm² 以下となる。一方、コア強度が 50～60N/mm² の高強度領域では、全体的に $_{28}S_{91}$ は高くなり、特に夏期の $_{28}S_{91}$ が大きくなる。したがって、普通強度領域では JASS 5 による高炉セメント B 種の $_{28}S_{91}$ を採用すれば問題ないと考えられるが、40N/mm² 以下については冬期の $_{28}S_{91}$ に若干余裕がある。

(4) 最高温度と $_{28}R_{91}$ の関係

本論では、18 工場でのデータを取扱っており、生コン工場ごとに、材料の製造者の要因も含まれている。そこで、 $_{28}S_{91}$ の傾向を整理するに当たり、各データの使用材料の影響を可能な限り取り除くため、式（2）のように、 $_{28}S_{91}$ を 28 日標準養生強度（ sF ）で除し、無次元化した値（ $_{28}R_{91}$ ）を用いた。図-11 には、最高温度と無次元化した $_{28}R_{91}$ の関係を示す。この結果から、いずれの水結合材比

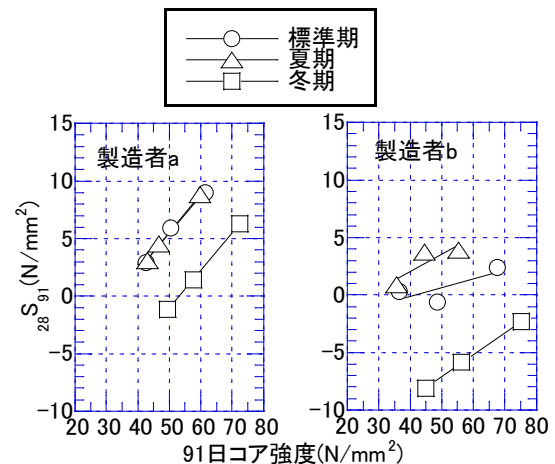
においても、 $_{28}R_{91}$ は最高温度の上昇に伴って増加する傾向にあり、最高温度を指標に整理できることがわかる。ここで言う最高温度とは、3.2（2）と同じ定義とした。

$$_{28}R_{91} = _{28}S_{91} / sF \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $_{28}R_{91}$ ： $_{28}S_{91}$ を無次元化した値（無単位）

$_{28}S_{91}$ ：構造体強度補正值（N/mm²）

sF ：28 日標準養生強度（N/mm²）



(1) No. 2 の生コン工場 (2) No. 16 の生コン工場

図-9 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係

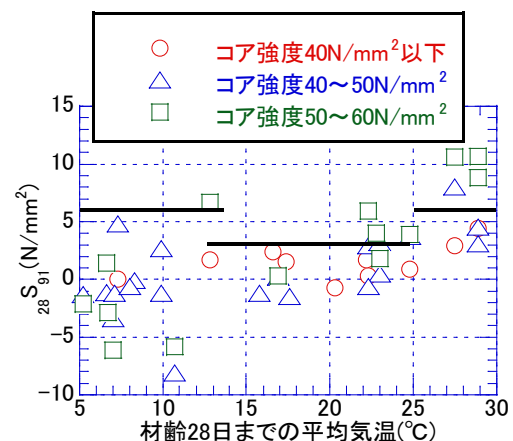


図-10 材齢 28 日までの平均値と $_{28}S_{91}$ の関係

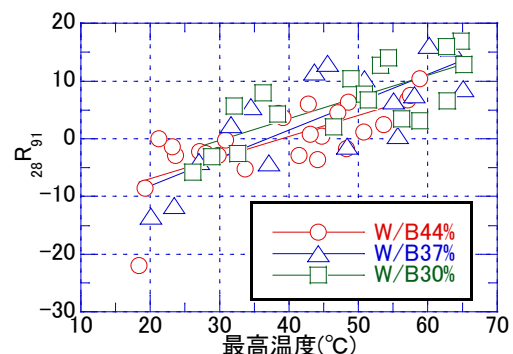


図-11 最高温度と $_{28}R_{91}$ の関係

3.5 高炉スラグ微粉末の寄与度

高炉スラグ微粉末が強度に及ぼす寄与度を確認するため、混和材高含有コンクリート (A) とセメントを 100% 使用した普通コンクリート (N) の 28 日標準養生強度を比較した結果を図-12 に示す。比較する手法は、あらかじめ生コン工場ごとに N の結合材水比と 28 日標準養生強度の実験回帰式を求め、本実験で実施した結合材水比を前述した式に代入し、N の 28 日標準養生強度を求めた。その結果、A の 28 日標準養生強度は、N に比べて平均で 10N/mm² 程度低いことが分かった。これは全体の平均値であり、高炉スラグ微粉末の製造者によっては N との差異が小さくなる傾向も見られる。したがって、この結果を参考に、生コン工場の既往データから混和材高含有コンクリートの強度データをある程度推定することが可能になると考える。

4. まとめ

本論文では、混和材高含有コンクリートの実機試験にもとづく強度性状について検討し、以下の知見が得られた。

- (1) 標準養生強度およびコア強度は結合材水比に比例して増加する傾向にあり、従来のコンクリートと同様に線形関係で表される。
- (2) 結合材水比 1.82~3.33 の範囲において、28 日標準養生強度に対する 3 日の強度増進割合は平均で 0.32~0.54、7 日で 0.65~0.78、56 日で 1.07~1.13 となる。また、3~7 日の若材齢では水結合材比が小さいほど強度発現性は高いが、56 日の長期材齢では水結合材比が大きいほど強度発現性が高い。
- (3) いずれの水結合材比においても、28 日コア強度に対する 91 日コア強度の強度増進割合は、最高温度が低いほど高い。
- (4) 91 日簡易断熱養生強度と 91 日コア強度の間には高い相関性が見られる。
- (5) 構造体強度補正值(₂₈S₉₁)は、部材の最高温度が高いほど、91 日コア強度が高いほど大きくなる傾向にある。また、普通強度領域では JASS 5 による高炉セメント B 種の ₂₈S₉₁ を採用すれば問題ないと考えられるが、40N/mm² 以下では冬期の ₂₈S₉₁ に余裕がある。

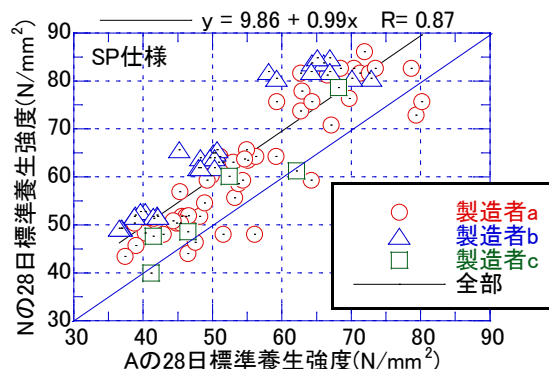


図-12 A と N の 28 日標準養生強度の関係

- (6) 混和材高含有コンクリートの 28 日標準養生強度は、セメントを 100% 使用した普通コンクリートに比べて、平均で 10N/mm² 程度低い傾向にある。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：混和材を大量使用したコンクリートのアジア地域における有効利用に関する研究委員会報告書，2015.10
- 2) 小林利充：環境に配慮した低炭素型のコンクリート，コンクリート工学，Vol.54，No.5，pp.578-581，2016.5
- 3) 土木学会：混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案），2018.9
- 4) 金沢克義ほか：大型橋りょうマスコンクリートに適した超低発熱型セメント，コンクリート工学，Vol.29，No.4，pp.27-36，1991.4
- 5) 十河茂幸ほか：低発熱水中不分離性コンクリートの開発，大林組技術研究所報，No.41，pp.80-85，1990
- 6) 小林利充ほか：混和材を高含有したコンクリートの高強度化に関する検討（その 3 実機試験），日本建築学会大会講演梗概集（九州），pp.385-386，2016.8
- 7) 小林利充ほか：超高強度コンクリート領域における強度性状に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1229-1234，2010

謝辞

本論を作成するに当たり、ご協力頂いた関係各位に紙面を借りて感謝の意を表します。