論文　混和材を高含有したコンクリートの高強度化に関する一考察

小林 利充[*1]・齋藤　賢[*2]・一瀬賢一[*3]・溝渕麻子[*4]

要旨：本研究は，混和材を高含有したコンクリートの高強度化を目的として，調合条件（水結合材比および結合材の混合割合）および材料条件（結合材および骨材の種類）を要因として，フレッシュ性状および硬化性状に関する基礎的性状について検討している。その結果，結合材中の混和材の混合割合を 70%と高含有した場合でも，最適なセメントや骨材を選定し，調合を考慮することで，一般的なコンクリートと同様に，高強度コンクリートの製造が可能であることを確認した。

キーワード：環境配慮，高強度，混和材，フレッシュ性状，圧縮強度

1. はじめに

近年，環境問題への意識が高まり，コンクリート分野においても，環境負荷を低減する取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産業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産業副産物を混和材として置換する研究が行われており [1),2)]，筆者らも結合材に対する混和材の混合割合を 70%以上高含有したコンクリートに関して，各種の検討を行っている [3)]。ここで，混和材を高含有したコンクリートは，結合材にセメントのみを使用したコンクリートに比べて，材料起源によるコンクリートの低炭素化は可能になるものの，中性化の進行が速いことに留意する必要がある。そのため，結合材に対するセメントの混合割合が少なくても，高強度化することは中性化抑制に対して有効な手段であると考える。しかしながら，混和材を高含有したコンクリートの高強度化について検討した事例は少なく，構造体への適用を考える上でも，基礎的なデータを蓄積する必要がある。なお，本論での高強度とは，28 日標準養生強度で 50N/mm^2 以上の領域を目標とした。

本研究では，混和材を高含有したコンクリートの高強度化を目的に，フェーズ 1 としての調合検討（水結合材比および結合材の混合割合の影響）とフェーズ 2 としての材料検討（結合材および骨材種類の影響）の 2 側面から検討を行い，フレッシュ性状，温度性状および強度性状に関する基礎的性状について検討している。

2. 実験概要

2.1 フェーズ 1(調合検討)

(1) 使用材料

コンクリートの使用材料を**表－1** に示す。セメントとしては普通ポルトランドセメントを使用し，混和材としては一般的に使用され，汎用的に流通可能な高炉スラグ微粉末およびシリコン起源のシリカフュームを使用した。また，細骨材および粗骨材は，茨城県桜川産硬質砂岩砕砂および砕石を，化学混和剤は，調合により高性能減水剤または高性能 AE 減水剤を選定した。

(2) 調合計画

設定条件を**表－2** に，調合計画を**表－3** に示す。スランプフロー，スランプおよび空気量の設定は，水結合材比ごとに設定した。調合計画としては，広範囲な強度性状を把握するために，水結合材比(W/B)を 15.0 から 44.0%とし，粗骨材かさ容積は水結合材比 44.0％以外は 0.54m^3/m^3 と一定とした（水結合材比 44%：0.58m^3/m^3）。単位水量は，2 水準設定し，W/B25%以下を 150kg/m^3，30%以上を 165kg/m^3 にすることを基本とした。次に，結合材の混合割合として，混和材を高含有させるためセメントは 30%一定とし，高炉スラグ微粉末およびシリカフュームの混合割合を要因に検討を行った。

(3) 実験方法

コンクリートは，20℃の恒温室内において，強制練りミキサーにより練混ぜ，所定のフレッシュ性状であることを確認し，標準養生および簡易断熱養生における供試体を作製した。その後，所定の材齢まで養生し，圧縮強度試験に供した。また，簡易断熱養生槽内の中心温度も併せて測定した。なお，簡易断熱養生槽は，発泡スチロール製の断熱材で成形し，供試体と外気の間は，いずれの方向も 20cm の断熱材を設置した。

2.2 フェーズ 2(材料検討)

(1) 使用材料

結合材は，セメント，高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを組合せた 3 成分系またはセメントおよび高炉

*1　(株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)
*2　日本シーカ(株) 技術研究所 基盤技術グループ マネジャー 博士(工学)（正会員）
*3　(株)大林組 技術研究所 生産技術研究部長 博士(工学)（正会員）
*4　(株)大林組 技術研究所　生産技術研究部 主任（正会員）

表－1　使用材料

分類		種類
結合材(B)	ｾﾒﾝﾄ	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ(N)　(3.16g/cm^3)
	混和材	①高炉ｽﾗｸﾞ微粉末(BS)　(2.89g/cm^3)
		②ｼﾘｶﾌｭｰﾑ(SF)　(2.20g/cm^3)
		比表面積：BS4300cm^2/g，SF223,000cm^2/g
水(W)		上水道水(東京都清瀬市)
細骨材		茨城県桜川産硬質砂岩砕砂(S1)(2.64g/cm^3)
粗骨材		茨城県桜川産硬質砂岩砕石(G1)(2.64g/cm^3)
混和剤(Ad)		①高性能減水剤(SP1)(No.1-16，24-31)
		②高性能 AE 減水剤(SP2)(No.17-23，32-35)

表－2　設定条件

項目	設定条件
スランプフロー スランプ	W/B25%以下：65±10cm W/B30%：60±10cm W/B37%：55±10cm W/B44%：21±2cm
空気量	2%以下(No.1-19,24-31) 3±1.5%(No.20-23,32-35)

表－3　調合計画

項目	No.	W/B (%)	W (kg/m^3)	混合割合（%）				
				C			BS	SF
				N	M	H		
1	1	15.0	150	30	—	—	65	5
	2		150	30	—	—	60	10
	3		150	30	—	—	55	15
	4		150	30	—	—	50	20
	5	18.0	150	30	—	—	70	0
	6		150	30	—	—	65	5
	7		150	30	—	—	60	10
	8		150	30	—	—	55	15
	9	21.0	150	30	—	—	70	0
	10		150	30	—	—	65	5
	11		150	30	—	—	60	10
	12		150	30	—	—	55	15
	13	25.0	150	30	—	—	70	0
	14		150	30	—	—	65	5
	15		150	30	—	—	60	10
	16		150	30	—	—	55	15
	17	30.0	150	30	—	—	70	0
	18		150	30	—	—	65	5
	19		150	30	—	—	60	10
	20	25.0	165	30	—	—	70	0
	21	30.0	165	30	—	—	70	0
	22	37.0	165	30	—	—	70	0
	23	44.0	165	30	—	—	70	0
2	24	15.0	150	—	30	—	60	10
	25	18.0	150	—	30	—	60	10
	26	21.0	150	—	30	—	60	10
	27	25.0	150	—	30	—	60	10
	28	15.0	150	—	—	30	60	10
	29	18.0	150	—	—	30	60	10
	30	21.0	150	—	—	30	60	10
	31	25.0	150	—	—	30	60	10
	32	25.0	165	30	—	—	70	0
	33	30.0	165	30	—	—	70	0
	34	37.0	165	30	—	—	70	0
	35	44.0	165	30	—	—	70	0

[注]　1:フェーズ 1, 2:フェーズ 2, C:セメント, No.24-31 はセメント種類，No.32-35 は骨材種類の検討。

スラグ微粉末の 2 種類を組合せた 2 成分系とし，セメントの種類としては，フェーズ 1 で検討した普通ポルトランドセメント（N）の他に，中庸熱ポルトランドセメント（M）(3.21g/cm^3) および早強ポルトランドセメント（H）(3.14g/cm^3) を使用した。また，細骨材および粗骨材は，フェーズ 1 で使用した茨城県桜川産硬質砂岩砕砂（S1）と砕石（G1）の組合せの他に，千葉県木更津産陸砂（S2）(2.63kg/m^3) と東京都青梅産硬質砂岩砕石（G2）(2.64g/cm^3) の組合せ(No.32-35)について検討を行った。

(2) 調合計画

設定条件を**表－2** に，調合計画を**表－3** に示す。スランプフロー，スランプおよび空気量の設定は，フェーズ 1 と同様に水結合材比ごとに設定した。調合計画としては，セメント種類の検討の場合は水結合材比を 15.0 から 25.0%，骨材種類の検討の場合は水結合材比を 25.0 から 44.0%とした。また，粗骨材かさ容積および単位水量は，フェーズ 1 と同様の設定とした。

(3) 実験方法

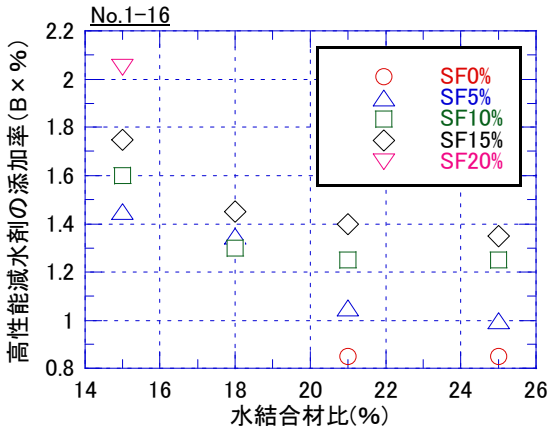
フェーズ 1 と同様に行った。

3. 実験結果

3.1 フェーズ 1(調合検討)

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状としては，概ね所定の設定条件を満足することができた。ここで，水結合材比と高性能減水剤の添加率の関係を**図－1** に，水結合材比と 50cm フロー到達時間の関係を**図－2** に示す。高性能減水剤の添加率の影響として，水結合材比が 15.0 から 25.0%の領域について述べると，水結合材比が小さいほど，SF の混合割合が大きいほど高性能減水剤の添加率が多くなり，水結合材比や SF の混合割合による調合条件で添加率が大きく異なる傾向が見られた（**図－1**）。一方，粘性の評価を 50cm フロー到達時間で見ると，水結合材比 15.0 および 18.0%の 50cm フロー到達時間は SF の混合割合によって異なるが，概ね 14 から 18 秒程度である。一方，水結合材比 21.0%



図－1　W/B と高性能減水剤の添加率の関係

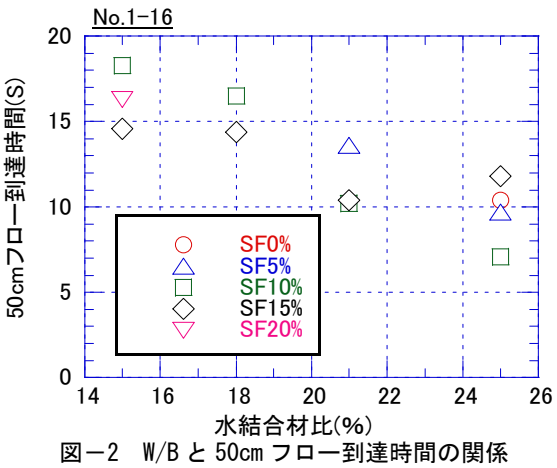
では 10 から 14 秒程度であり，水結合材比 25.0%では 7 から 12 秒程度であった。この結果から，水結合材比の増加に伴って 50cm フロー到達時間は速くなり，粘性が低減される傾向にある（**図－2**）。なお，SF の混合割合が粘性に及ぼす影響については，今回の実験からは明確な差異が確認できなかった。

(2) 温度性状

簡易断熱養生による温度性状を**表－4** に示す。水結合材比 15%を除けば，水結合材比の減少に伴って最高温度および温度上昇量は増大する傾向にある。また，同一の水結合材比でも，N.21 は No.19 に比べて，最高温度で 5.2℃，温度上昇量で 5.0℃大きくなっている。これは，同一の水結合材比でもセメントおよび高炉スラグ微粉末の単位量が多いことに起因して反応が促進され，No.21 の温度が高くなったものと推察される。

(3) 強度性状

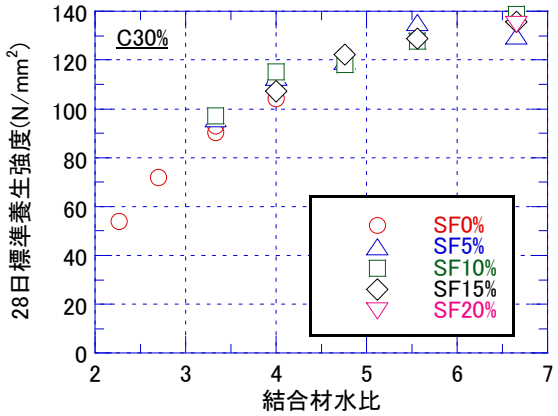
結合材水比(B/W)と 28 日標準養生強度の関係を**図－3** に，SF の混合割合と 28 日標準養生強度の関係を**図－4** に，結合材水比と 91 日簡易断熱養生強度の関係を**図－5** に示す。28 日標準養生強度は，SF の混合割合にかかわらず，結合材水比の増加に伴って増大し，結合材水比 6.67（水結合材比 15.0%）においては，130 から 140N/mm^2 に達する。ただし，結合材水比が大きい領域（水結合材比が小さい領域）においては，強度発現性が緩慢になり，結合材水比が強度に及ぼす影響が低下する傾向が見られた（**図－3**）。また，SF の影響として，水結合材比 15.0，25.0 および 30.0%では，SF の混合割合が 10%で最大値を示すが，水結合材比 18.0 および 21.0%では SF の混合割合が 10%で最小値を示し，明確な傾向は不明である（**図－4**）。次に，3 成分系(N+BS+SF)と 2 成分系(N+BS)について，91 日簡易断熱養生強度を検討しているが，標準養生強度と同様に結合材水比の増加に伴って増大する傾向にあるが，結合材水比が大きい領域においては，強度発現性が緩慢になる傾向が見られた（**図－5**）。



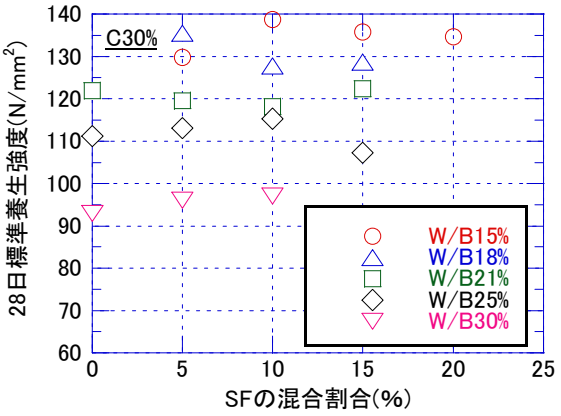
図－2　W/B と 50cm フロー到達時間の関係

表－4　温度履歴

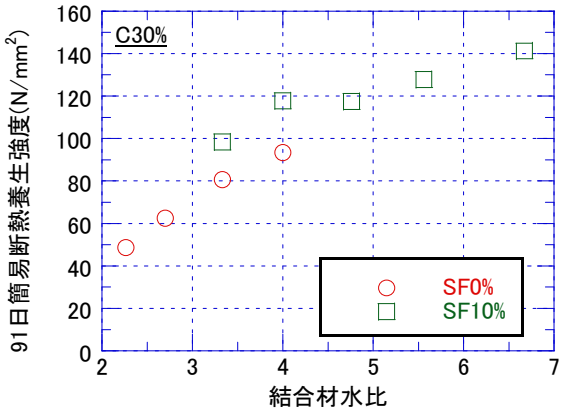
項目	No.	W/B (%)	温度性状（℃）		
			初期温度	最高温度	温度上昇量
N+BS +SF	2	15	20.7	50.7	30.0
	7	18	20.7	51.7	31.0
	11	21	20.3	50.2	29.9
	15	25	19.8	46.9	27.1
	19	30	20.2	44.2	24.0
N+BS	20	25	20.7	54.6	33.9
	21	30	20.4	49.4	29.0
	22	37	20.3	44.3	24.0
	23	44	20.0	40.8	20.8



図－3　B/W と 28 日標準養生強度の関係



図－4　SF の混合割合と 28 日標準養生強度の関係



図－5　B/W と 91 日簡易断熱養生強度の関係

次に，構造体強度補正値($_{28}S_{91}$)に関して，28 日標準養生強度と 91 日簡易断熱養生強度の関係から構造体強度補正値を求め，91 日簡易断熱養生強度との関係に整理した結果を**図－6** に示す。2 成分系の $_{28}S_{91}$ は，簡易断熱養生強度の増加に伴って大きくなる傾向にあり，簡易断熱養生強度が 90N/mm^2 程度の場合，$_{28}S_{91}$ は 11N/mm^2 程度であった。一方，3 成分系の $_{28}S_{91}$ は非常に小さく，簡易断熱養生強度が 90N/mm^2 以上でも $_{28}S_{91}$ は 1N/mm^2 以下であった。また，簡易断熱養生強度レベルを同程度にした場合の 2 成分系と 3 成分系の $_{28}S_{91}$ を比較すると（簡易断熱養生強度が 90N/mm^2 で比較），その差異（$_{28}S_{91}$）は 10N/mm^2 程度になり，3 成分系の $_{28}S_{91}$ の方が非常に小さい結果となった。

最高温度が $_{28}S_{91}$ に及ぼす影響をみると（**図－7**），2 成分系は，最高温度が高くなるにつれて $_{28}S_{91}$ は高くなる傾向にあるが，3 成分系では，温度が $_{28}S_{91}$ に及ぼす明確な影響は見られなかった。したがって，SF の有無が 20℃の環境の標準養生強度に及ぼす影響はあまり見られないが，温度が加わる簡易断熱養生強度では，SF の混入により強度が増進され，結果として $_{28}S_{91}$ が小さくなったものと推察される。

3.2 フェーズ 2（材料検討）

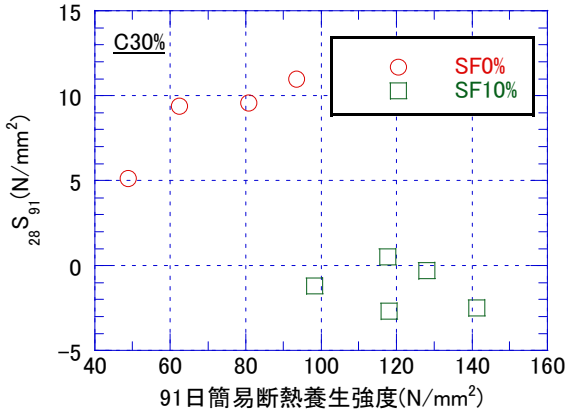
(1) フレッシュ性状

① セメント種類の影響

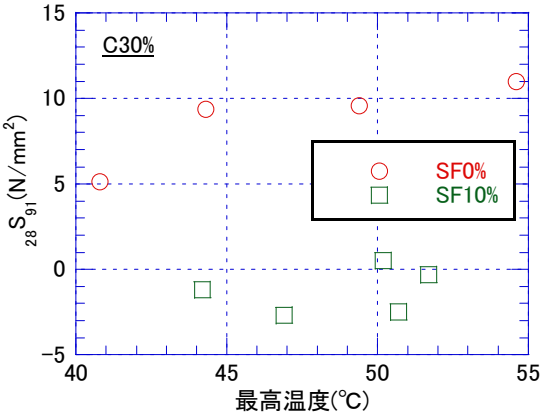
フレッシュ性状としては，概ね所定の設定条件を満足することができた。ここで，水結合材比と高性能減水剤の添加率の関係を**図－8** に，水結合材比と 50cm フロー到達時間の関係を**図－9** に示す。高性能減水剤の添加率に関して，中庸熱ポルトランドセメントを使用した場合は，水結合材比および SF の混合割合にかかわらず，普通および早強ポルトランドセメントを使用した場合に比べて，高性能減水剤の添加率が 0.5 から 3.0%程度低減することができた。普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントを比較すると，調合によって多少の差異はあるもののほぼ同程度の結果であった。また，中庸熱ポルトランドセメントを使用した場合の 50cm フロー到達時間を見ると，SF の混合割合が 10%の場合において概ね 10 秒以下であり，水結合材比が 18%以下の低い領域でも，粘性が低減される傾向にあった。

② 骨材種類の影響

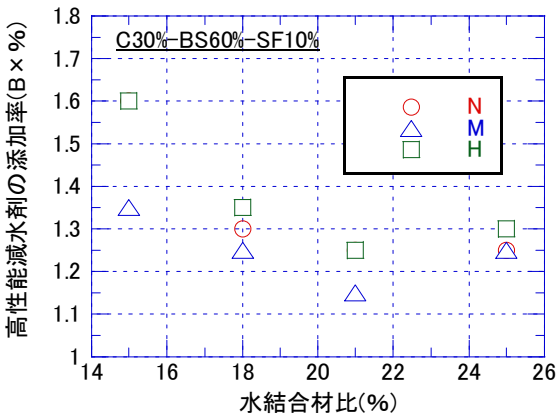
フレッシュ性状としては，所定の設定条件を満足することができた。また，骨材の影響を W/B30%で比較すると，S1+G1 のスランプフローが 63cm に対して，O 漏斗流下時間が 23.2 秒である。一方，S2+G2 のスランプフローが 61cm に対して，O 漏斗流下時間は 12.9 秒となり，同一のスランプフローでの比較ではないが，S2+G2 の方が，粘性が低減される傾向にあった。



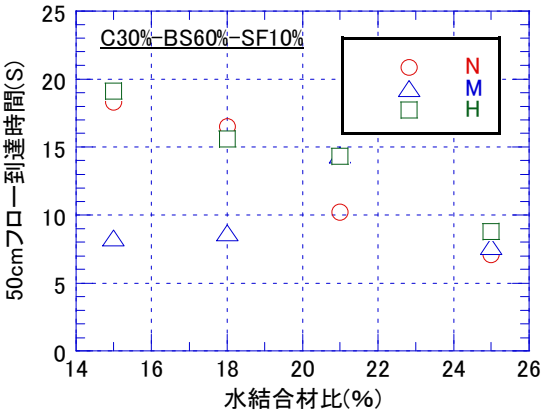
図－6　91 日簡易断熱養生強度と $_{28}S_{91}$ の関係



図－7　最高温度と $_{28}S_{91}$ の関係



図－8　W/B と高性能減水剤の添加率の関係



図－9　W/B と 50cm フロー到達時間の関係

(2) 温度性状

水結合材比と最高温度の関係を図－10 に示す。セメントの種類別に見ると，一部を除いて，中庸熱ポルトランドセメント＜普通ポルトランドセメント＜早強ポルトランドセメントの順に最高温度は高くなる傾向にある。

(3) 強度性状

① セメント種類の影響

結合材水比と 28 日標準養生強度の関係を図－11 に示す。28 日標準養生強度に及ぼすセメント種類の影響としては，結合材水比にかかわらず，中庸熱ポルトランドセメント＜普通ポルトランドセメント＜早強ポルトランドセメントの順に高くなる傾向にあり，早強ポルトランドセメントを使用した結合材水比 6.67 は，材齢 28 日において約 145N/mm^2 程度に達する。また，早強ポルトランドセメントを使用した場合の 28 日標準養生強度は，普通ポルトランドセメントを使用した場合の 5 から 9%程度増大する傾向にある。

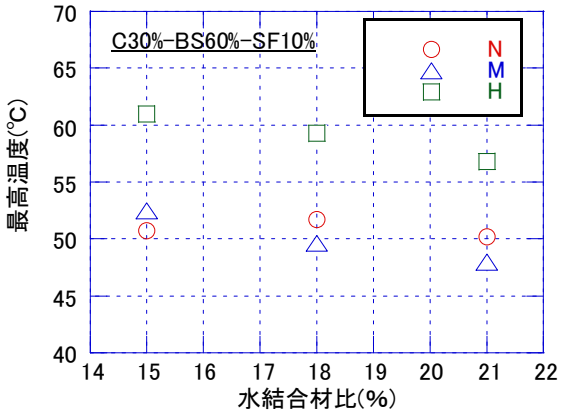
結合材水比と 91 日簡易断熱養生強度の関係を図－12 に示す。簡易断熱養生強度に及ぼすセメント種類の影響としては，結合材水比にかかわらず，標準養生強度と同様に，早強ポルトランドセメントが最も高くなる傾向にあり，結合材水比 6.67 における材齢 91 日簡易断熱養生強度は 156N/mm^2 に達する。

次に，91 日簡易断熱養生強度と $_{28}S_{91}$ の関係を図－13 に示す。$_{28}S_{91}$ に及ぼすセメント種類による影響としては，普通ポルトランドセメント＞中庸熱ポルトランドセメント＞早強ポルトランドセメントの順に小さくなり，普通ポルトランドセメント以外はすべて負の値となった。なお，91 日簡易断熱養生強度と $_{28}S_{91}$ の関係は，セメント種類で傾向が異なり，普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントは 91 日簡易断熱養生強度の増加に伴って $_{28}S_{91}$ は低減する傾向にあるが，中庸熱ポルトランドセメントを使用した場合は，91 日簡易断熱養生強度の増加に伴って $_{28}S_{91}$ は増加し，背反する結果となった。

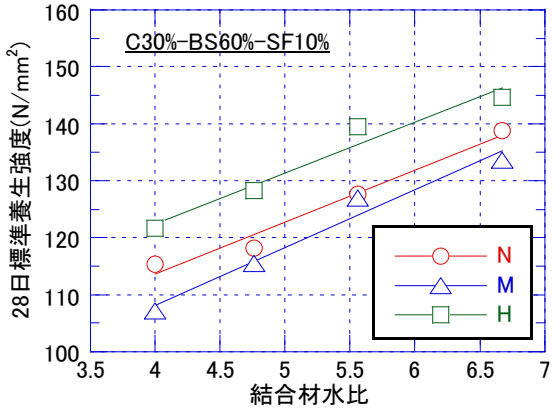
また，最高温度と $_{28}S_{91}$ の関係を図－14 に示す。この結果から，セメント種類によって傾向は異なり，普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた場合は，最高温度の増加に伴って $_{28}S_{91}$ は概ね減少する傾向にあるが，中庸熱ポルトランドセメントを使用した場合は，最高温度の増加に伴って $_{28}S_{91}$ は増大する傾向にあり，その要因については現時点では不明である。

② 骨材種類の影響

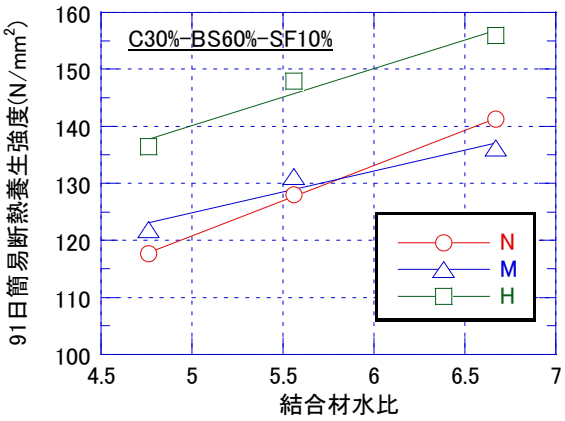
骨材種類の影響として，結合材水比と 28 日標準養生強度の関係を図－15 に示す。実験結果から，S1+G1 を使用した方が，S2+G2 を使用した場合よりも 18 から 29%程度高くなる傾向にある。本実験では，セメントと高炉スラグ微粉末を組合せた 2 成分系のみで行っているが，



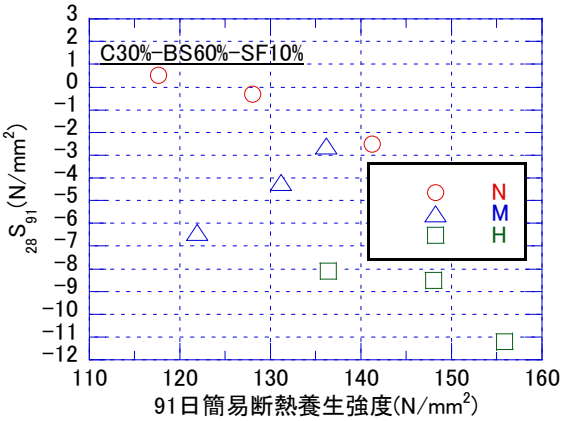
図－10　W/B と最高温度の関係



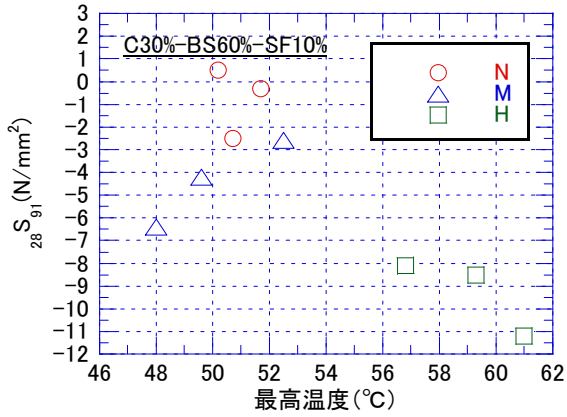
図－11　B/W と 28 日標準養生強度の関係



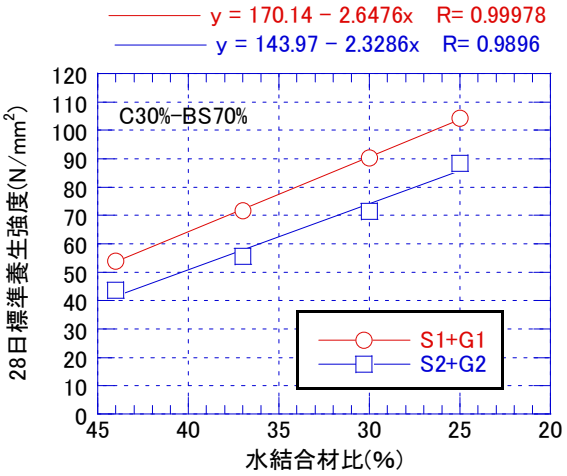
図－12　B/W と 91 日簡易断熱養生強度の関係



図－13　91 日簡易断熱養生強度と $_{28}S_{91}$ の関係



図－14　最高温度と $_{28}S_{91}$ の関係



図－15　W/B と 28 日標準養生強度の関係

骨材の種類・産地によって，同一の強度を得るための水結合材比が異なるため，環境配慮を考慮したコンクリートの場合，可能な限りセメントの使用量を低減させる必要があるため，骨材の選定は非常に重要であると考える。

4. まとめ

本実験では，混和材を高含有したコンクリートの高強度化とし，結合材に対する混和材の混合割合を 70%まで増加させた条件でも，最適なセメントや骨材を選定し，調合を考慮することで，一般的なコンクリートと同様に，高強度コンクリートの製造が可能であることを確認した。本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

［フェーズ 1：調合検討］

（1）高性能減水剤の添加率の影響としては，水結合材比が小さいほど，シリカフュームの混合割合が大きいほど高性能減水剤の添加率が多くなり，調合条件によって添加率は異なる傾向を示す。

（2）標準養生強度および簡易断熱養生強度は，シリカフュームの混合割合にかかわらず，結合材水比の増加に伴って増大する傾向にある。ただし，結合材水比が大きい領域（水結合材比が小さい領域）においては，強度発現性が緩慢になり，結合材水比が強度に及ぼす影響が低下する傾向が見られる。

（3）2 成分系(N+BS)の構造体強度補正値（$_{28}S_{91}$）は，簡易断熱養生強度の増加に伴って大きくなる傾向にあり，簡易断熱養生強度が 90N/mm^2 程度の場合，$_{28}S_{91}$ は 11N/mm^2 程度であった。一方，3 成分系(N+BS+SF)の $_{28}S_{91}$ は非常に小さく，簡易断熱養生強度が 90N/mm^2 以上でも $_{28}S_{91}$ は 1N/mm^2 以下であり，シリカフュームの影響により $_{28}S_{91}$ が小さくなったものと推察される。

［フェーズ 2：材料検討］

（4）高性能減水剤の添加率に及ぼすセメント種類の影響としては，中庸熱ポルトランドセメントを使用する場合は，普通および早強ポルトランドセメントを使用した場合に比べて，高性能減水剤の添加率を低減できる傾向にある。

（5）標準養生強度に及ぼすセメント種類の影響としては，結合材水比にかかわらず，中庸熱ポルトランドセメント＜普通ポルトランドセメント＜早強ポルトランドセメントの順に高くなる傾向にある。

（6）構造体強度補正値に及ぼすセメント種類の影響としては，結合材の混合割合を C30％－BS60％－SF10％，W/B15 から 25％の範囲（91 日簡易断熱養生強度で 118 から 156N/mm^2 の範囲）において，概ね負の値となった。

参考文献

1）日本コンクリート工学会：混和材を積極的に使用するシンポジウム，184p，2011.12

2）日本コンクリート工学会：産業廃棄物起源のコンクリート用混和材の有効利用－課題と展望－，コンクリート工学，Vol.52，No.5，pp.367-491，2014.5

3）溝渕麻子ほか：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状（その 1 からその 12），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.185-190，pp.865-874，pp.214-220，pp.325-328，2011-2014