論文　硬化促進剤を使用したスリップフォーム工法用高強度コンクリートの性状

神代泰道[*1]・坂井利光[*2]・矢島雄一[*2]・一瀬賢一[*3]

要旨：超高層の搭状構造物向けのスリップフォーム工法に高強度コンクリートを適用するにあたり，①練混ぜ後２時間まではスランプフロー55cmを確保し，②10℃の低温下においても練混ぜから6.5時間後には脱型に必要な強度0.1N/mm²を満足できる性能を付与することを目的として，硬化促進剤を使用した高強度コンクリートについて検討を行った。その結果，高性能ＡＥ減水剤と硬化促進剤を適切に組み合わせることで目標性能を満足することを確認した。また，若材齢の圧縮強度の発現性状は仮想養生温度で整理でき，温度条件に応じた硬化促進剤の添加率の目安を得ることができた。

キーワード：スリップフォーム，高強度コンクリート，若材齢，圧縮強度，スランプフロー

1．はじめに

スリップフォーム工法が適用される塔状構造物においては，高層化と耐震性向上の点から過密配筋化，高強度化が進み，使用するコンクリートにも高強度化，高流動化が求められる。これまでも筆者らは設計基準強度36N/mm²に対応するスランプフロー60cmのフライアッシュを混入した高流動コンクリートをスリップフォーム工法に適用した[1)]。今回，超高層の搭状構造物向けのスリップフォーム工法にスランプフロー60cmの高強度コンクリート適用するにあたり，①練混ぜ後２時間まではスランプフロー55cmを確保し，②10℃の低温下においても練混ぜから6.5時間後には脱型に必要な強度0.1N/mm²を満足できる性能を付与することを目的として，硬化促進剤を使用した高強度コンクリートについて検討を行った結果について述べる。

2．既往の研究

スリップフォーム工法では冬期の低温時においても早期の強度発現が求められる。これまで10℃の環境下で加水後6時間で0.07N/mm²を確保するため，早強セメントを用いたスランプ15cmのコンクリートが検討されている[2)]。しかし，早強セメントを用いると水和熱の増大が懸念される。一方，硬化促進剤の利用が考えられるが，高性能AE減水剤と硬化促進剤を併用するとスランプの保持が困難になることが指摘されている[3)]。所定の時間内までは流動性を保持しつつ，低温下においても早期に脱型強度を確保するには，使用する高性能AE減水剤と硬化促進剤の組み合わせが重要になると考えられる。

3．実験概要

実験概要を**表－１**に示す。超高層の搭状構造物向けのスリップフォーム工法用の高強度コンクリートを検討するにあたり，流動性の保持と早期の脱型強度の確保の点から目標性能を設定し，硬化促進剤の使用を検討した。目標性能を満足するには既往の研究において課題とされるように使用する高性能AE減水剤と硬化促進剤の組み合わせが重要となる。そこで実験はⅠとⅡについて実施し，まず，実験Ⅰでは硬化促進剤と高性能AE減水剤の組み合わせを検討するため，それぞれ３銘柄の組み合わせをパラメータとして低温下におけるフレッシュコンクリートおよび若材齢の強度発現について比較を行い，目標性能を満足できるものを選定した。次に実験Ⅱでは，実験Ⅰで選定した硬化促進剤と高性能AE減水剤の組み合わせについて，10℃，15℃および20℃環境下におけるフレッシュ性状，若材齢における強度発現性状および硬化コンクリートの各種性状についてデータを収集した。なお，本実験においては硬化促進剤は練混ぜ時ではなく，現場添加を想定して，練混ぜから30分後に後添加した。これは実際の打設日の外気温および脱型時間を考慮して，現場で硬化促進剤の添加率を調整して添加する方が合理的と考えたためである。

表－１　実験概要

項目	概　要
目標性能	①練混ぜ後２時間までスランプフロー55cm を確保すること ②10℃の低温下においても 6.5 時間後には脱型に必要な強度 0.1N/mm² を確保すること
実験Ⅰ	10℃の低温下において高性能ＡＥ減水剤と硬化促進剤の３種類の組み合わせを比較し，目標性能を満足するものを選定する
実験Ⅱ	実験Ⅰで選定した高性能ＡＥ減水剤と硬化促進剤を用いて 10℃，15℃，20℃におけるフレッシュ，強度発現性状等の各種データを収集する

*1　（株）大林組　技術研究所　生産技術研究部　主任研究員　博（工）（正会員）
*2　同　建築本部　特殊工法部
*3　同　技術研究所　生産技術研究部　部長　博（工）（正会員）

4．実験Ⅰ（混和剤の組み合わせの比較）

4.1　コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料を**表－２**に示す。セメントは高強度化に伴う水和熱の増大を低減するため，中庸熱ポルトランドセメントとした。高性能AE減水剤と硬化促進剤はいずれもJIS A 6204に適合するものとし，それぞれ銘柄の異なる３種類（A，B，Cと略記）の組み合わせとした。なお，高性能AE減水剤はポリカルボン酸系のもの，硬化促進剤は亜硝酸塩あるいは硝酸塩を主成分とするものを用いた。

コンクリートの調合を**表－３**に示す。水セメント比は32%，単位水量は170kg/m^{3}とした。目標スランプフローは60cm，目標空気量は2.5%とした。各種混和剤の添加率を**表－４**に示す。硬化促進剤の添加率は各シリーズに高性能AE減水剤のみの場合(0%）を含めて３ケースとした。低温下における性状を比較するため，コンクリートの練り混ぜ，フレッシュ試験および若材齢圧縮強度の試験は雰囲気温度10℃で実施した。練混ぜは２軸強制練りミキサ（55L)を用い，モルタル先練り120秒，粗骨材投入後120秒間練混ぜ，5分間静置して排出した。硬化促進剤の添加は，練混ぜから30分後に試料を一旦ミキサへ戻してから行い，30秒間練り混ぜて排出した。

4.2　試験項目

試験項目を**表－５**に示す。フレッシュコンクリートの試験方法は，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，表示0.1℃単位)とした。経時変化は静置した試料を用いて，練混ぜから120分後まで確認した。若材齢の圧縮強度試験は，硬化促進剤を無添加とした場合，練混ぜから6.5，7.5，8.5時間後に行い，添加した場合は，練混ぜから5.5，6.5，7.5時間後に実施した。供試体は載荷の0.5～1時間前を目処にキャッピングを行い，試験はプルービングリング試験機を使用した。温度測定用の供試体を設け，内部温度を記録した。圧縮強度用供試体は120分までの経時変化試験後に採取した。その後，20℃で保管し，翌日脱型

表－２　コンクリートの使用材料

分類	記号	概　要
セメント	C	中庸熱ポルトランドセメント 密度 3.21g/cm^3
細骨材	S1	山砂（千葉県君津産） 表乾密度 2.61g/cm^3
	S2	砕砂（栃木県佐野産） 表乾密度 2.61g/cm^3
粗骨材	G	砕石 2005（大分県津久見産） 表乾密度 2.71g/cm^3
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤３銘柄 SP-A，SP-B，SP-C
	AF	硬化促進剤３銘柄 AF-A，AF-B，AF-C

表－３　コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	S1 (kg/m^3)	S2 (kg/m^3)	G (kg/m^3)
32.0	47.7	170	532	598	200	905

表－４　各種混和剤の添加率

シリーズ	記号	SP(C×%)	AF(C×%)
A (SP-A と AF-A)	A-0	1.6	0
	A-1	1.5	0.1
	A-2	1.5	0.2
B (SP-B と AF-B)	B-0	1.2	0
	B-1	1.1	0.3
	B-2	1.1	0.5
C (SP-C と AF-C)	C-0	1.2	0
	C-1	1.2	0.8
	C-2	1.2	1.2

表－５　試験項目

分類	試験項目
フレッシュ	スランプフロー 空気量，コンクリート温度
	上記の 120 分間の経時変化
若材齢	圧縮強度（封かん）
硬化	圧縮強度（標準水中）

表－６　フレッシュ試験結果

記号	経過時間	スランプフロー (cm)	50cm フロー到達時間 (秒)	空気量 (%)	CT (℃)
A-2	5	58.5 x 58.5	7.3	2.0	11.4
	25	65.0 x 63.0	7.6	1.6	11.2
	後添加	70.5 x 70.5	7.7	1.6	10.6
	60	73.5 x 72.5	6.4	—	10.7
	90	71.0 x 70.5	8.6	—	10.7
	120	70.5 x 70.0	9.7	1.6	10.6
B-2	5	58.0 x 57.5	4.3	1.9	10.8
	25	61.5 x 61.0	4.3	1.7	10.4
	後添加	62.5 x 62.5	3.8	1.5	10.2
	60	62.5 x 61.0	4.2	—	10.3
	90	60.0 x 60.0	4.1	—	10.4
	120	55.5 x 54.5	5.5	2.1	10.4
C-2	5	55.0 x 54.0	5.8	2.4	11.4
	25	55.5 x 56.0	5.7	2.0	11.1
	後添加	62.0 x 62.5	4.8	1.9	10.4
	60	62.0 x 64.0	4.4	—	10.4
	90	61.5 x 63.0	4.9	—	10.4
	120	60.0 x 60.5	5.4	2.1	10.7

—：実施せず

後，標準水中養生とし，材齢7，28日で試験を行った。

4.3　フレッシュコンクリートの試験結果

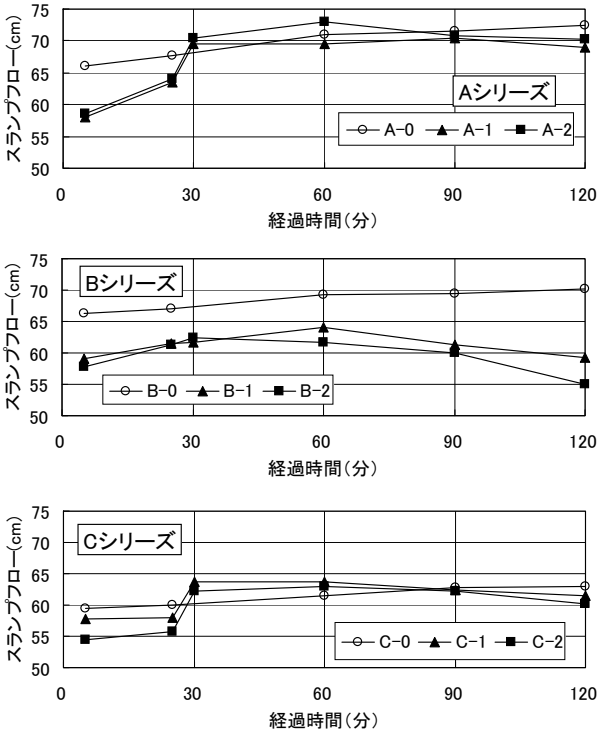
フレッシュコンクリートの試験結果を**表－6**に示す。なお,試験結果はそれぞれのシリーズにおいて硬化促進剤の添加率が最も多い調合について示した。スランプフローの時間に伴う変化を**図－1**に示す。硬化促進剤を無添加とした場合は，高性能AE減水剤を用いたコンクリートにおいて一般的に言われるように低温下におけるスランプフローののびが認められた。硬化促進剤の後添加により，AとCシリーズは5cm程度スランプローが増大し，Bは変わらなかった。後添加後は，AとCシリーズでは経時によるスランプフローの変化がほとんどなかったものの，Bでは低下した。このようにスランプフローの挙動については各シリーズで若干の差異はあるものの，全てのシリーズについて練混ぜ後2時間までスランプフロー55cmを確保できることを確認した。なお，Aシリーズは他のシリーズよりスランプフローが大きい一方で50cmフロー到達時間が長く（**表－6**），粘性が高かった。また，製造後からのスランプフローののびが大きいため,実際の工場における製造管理が難しくなることが予想された。

4.4　若材齢強度の試験結果

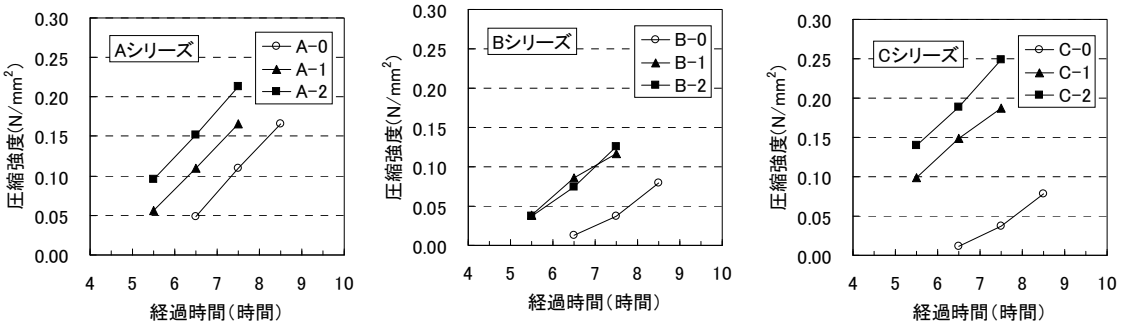
若材齢強度試験の結果を**図－2**に示す。硬化促進剤を無添加とした場合は，BとCシリーズはほぼ同様の強度発現性状であり，Aシリーズは他のシリーズより強度発現が早かった。このように使用する高性能AE減水剤によっても若材齢の強度発現性状は異なることが分かった。硬化促進剤を添加する場合については，Aシリーズ，Cシリーズとも添加することで強度は増進し，練混ぜから6.5時間後で0.1N/mm^{2}を確保できた。一方，Bシリーズについては目標性能を満足できず，また，添加率を増大したとしても達成することは難しいと考えられた。これについては，Bシリーズの高性能AE減水剤の保持成分と硬化促進剤の相性によるものと思われた。

4.5　圧縮強度の試験結果

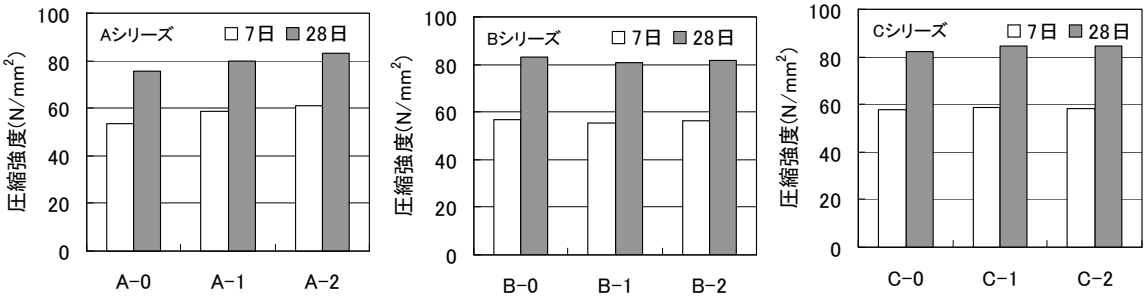
図－3に材齢7日と28日の圧縮強度の試験結果を示す。AシリーズとCシリーズについては硬化促進剤を添



図－1　スランプフローの経時変化



図－2　若材齢強度試験結果



図－3　圧縮強度の試験結果

加した方が無添加より若干圧縮強度が高くなった。Bシリーズではほとんど差はなかった。今回，硬化促進剤を後添加しているため，単位水量は実質増えるが，いずれの場合も圧縮強度への影響は認められなかった。

4.6　まとめ

高性能AE減水剤と硬化促進剤の組み合わせとしてA,B,Cの3銘柄について10℃の低温下における高強度コンクリートの性状を比較した。その結果，いずれ場合も練混ぜ後2時間までスランプフロー55cmを確保できた。また，Aシリーズ，Cシリーズでは硬化促進剤を添加することで若材齢の圧縮強度は増進し，練混ぜから6.5時間後で0.1N/mm^{2}を確保するという目標性能を満足した。以上，今回の目標性能を満足するのはAとCシリーズであった。このうちフレッシュ時の扱い易さという点を考慮するとCシリーズが最もよいと判断された。

5．実験Ⅱ（Cシリーズを用いた場合の各種性状）

5.1　コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料を**表－7**に示す。実験Ⅰにおける検討結果を受けて，高性能AE減水剤と硬化促進剤はCシリーズのもの（SP-CとAF-C）を使用した。なお，硬化促進剤は，実験Ⅰで使用したものより添加率が小さくなるタイプを使用した。

コンクリートの調合を**表－8**に示す。目標スランプフローは60cm，目標空気量は2.5%とした。試験練り時の雰囲気温度は10℃，15℃および20℃とし，各温度におけるフレッシュ性状の経時変化，若材齢における強度発現性状を比較した。各混和剤の添加率を**表－9**に示す。高性能AE減水剤の添加率は温度に関わらず同じとし，硬化促進剤の添加率を10℃ではC×0.6～1.0%，15℃ではC×0.4～0.8%，20℃では0.2～0.4%の範囲とした。練混ぜ方法は，実験Ⅰと同じとした。

5.2　試験項目

試験項目を**表－10**に示す。各温度条件下においてスランプフロー（JIS A 1150），空気量（JIS A 1128），コンクリート温度（JIS A 1156，表示0.1℃単位）を測定した。経時変化は静置した試料を用いて，練混ぜから120分後まで確認した。若材齢の圧縮強度試験は，練混ぜから5.5，6.5，7.5時間後にオートグラフで行った。載荷の0.5～1時間前を目処にキャッピングを行った。材齢7，28日において標準水中養生供試体の圧縮強度試験を実施した。スリップフォーム工法では壁状構造物への適用が想定されることから乾燥収縮率を確認することとし，JIS A 1129-2のコンタクトゲージ法で材齢7日まで水中養生してから長さ変化を測定した。圧縮強度および長さ変化試験用の供試体は，脱型までは各温度条件下で養生し，翌日脱型後，20℃の水中養生を開始した。

表－7　コンクリートの使用材料

分類	記号	概　要
セメント	C	中庸熱ポルトランドセメント 密度 3.21g/cm^3
細骨材	S1	陸砂（千葉県万田野産） 表乾密度 2.59g/cm^3
	S2	砕砂（大分県戸高産） 表乾密度 2.67g/cm^3
粗骨材	G	砕石 2005（北海道峩朗産） 表乾密度 2.70g/cm^3
混和剤	SP	高性能AE減水剤 （ポリカルボン酸系）
	AF	硬化促進剤（硝酸塩系）

表－8　コンクリートの調合

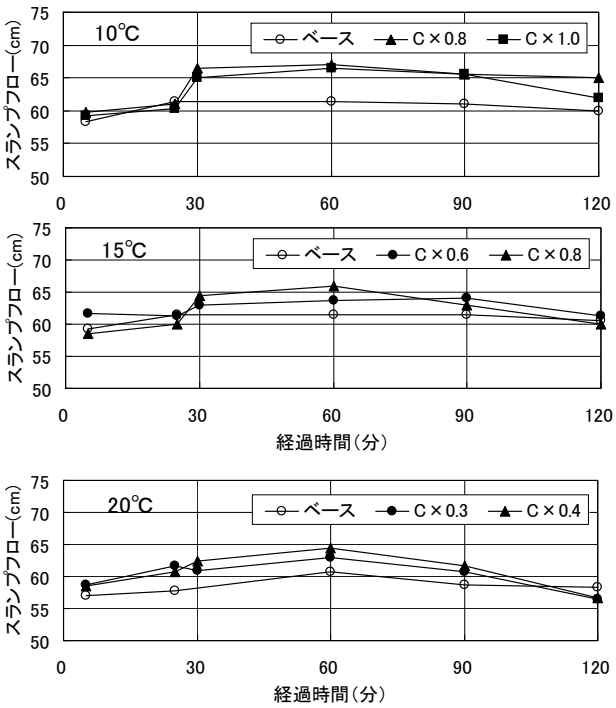
W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	S1 (kg/m^3)	S2 (kg/m^3)	G (kg/m^3)
34.5	49.0	170	493	332	498	878

表－9　各混和剤の添加率

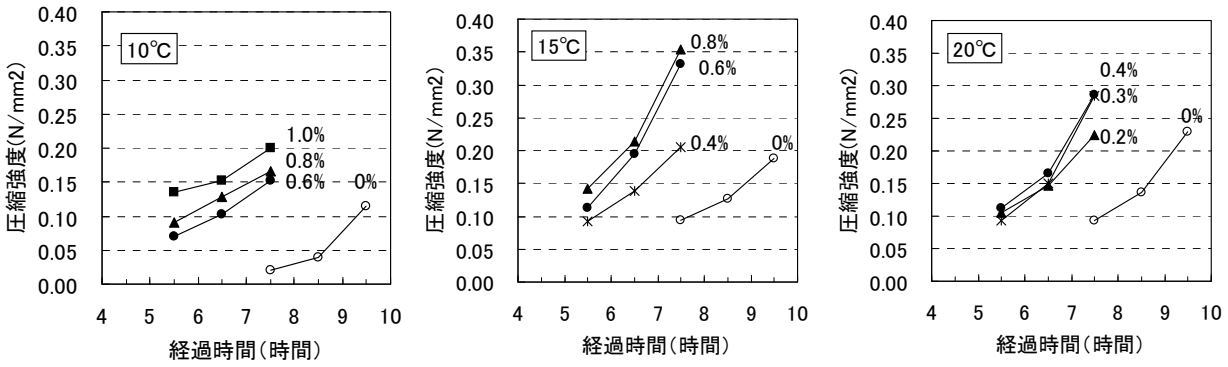
雰囲気温度	SP(C×%)	AF(C×%)
10℃	1.35	0，0.6，0.8，1.0
15℃	1.35	0，0.4，0.6，0.8
20℃	1.35	0，0.2，0.3，0.4

表－10　試験項目

分類	試験項目
フレッシュ	スランプフロー 空気量，コンクリート温度
	上記の 120 分間の経時変化
若材齢	圧縮強度（封かん）
硬化	圧縮強度（標準水中） 乾燥収縮



図－4　スランプフローの経時変化



図－５　若材齢強度試験結果

5.3　フレッシュコンクリートの試験結果

スランプフローの時間に伴う変化を**図－４**に示す。実験Ｉと同様に硬化促進剤の添加により，スランプフローは5cm程度大きくなるが，その後の低下量は，ベースコンクリートとほぼ同程度であり，120分後でもスランプフロー55cm以上を確保できた。雰囲気温度を20℃とした場合は，他の場合と比べて後添加後のスランプフローの増加量は小さく，また，スランプフローの経時的な低下が大きくなる傾向であった。

5.4　若材齢強度の試験結果

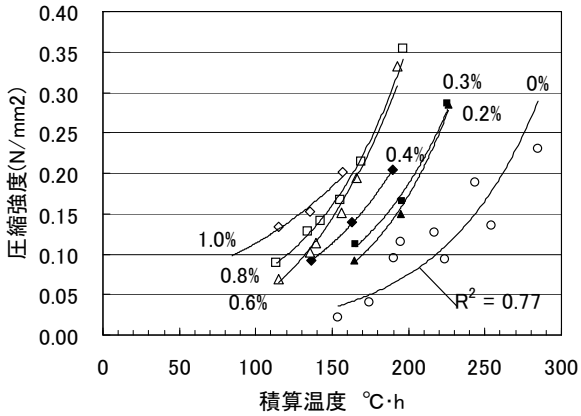
若材齢強度試験の結果を**図－５**に示す。硬化促進剤を添加せずに0.1N/mm^{2}を確保するには，10℃では9時間，15℃と20℃では7.5～8時間を要した。これに対して硬化促進剤の添加により強度発現が早まり，10℃の場合でも6.5時間で0.1N/mm^{2}を確保できることを確認した。**図－６**に積算温度（M=Σ（θ+10）×h，θ：供試体の温度，h：時間）と圧縮強度の関係を示す。若材齢強度は，硬化促進剤の添加率ごとに概ね積算温度によって整理できた。**図－７**に笠井による仮想積算温度[4)]と圧縮強度の関係を示す。仮想積算温度はh×(θ+|θ-20|/m)，（θ：供試体の温度，h：時間，m：定数）である。それぞれのケースごとに適切な定数m（m=1～5）を設定することにより，積算温度による場合より回帰式の相関係数が大きくなり，精度が高まることを確認した。この図を用いることで，例えば10℃の場合に6.5時間後に0.1N/mm^{2}を確保するためには，硬化促進剤の添加率を0.4%，同様に15℃では添加率を0.3%にすればよいという目安が得られる。また，硬化促進剤が不要となる養生温度を逆算すると23℃であることが分かった。

5.5　圧縮強度の試験結果

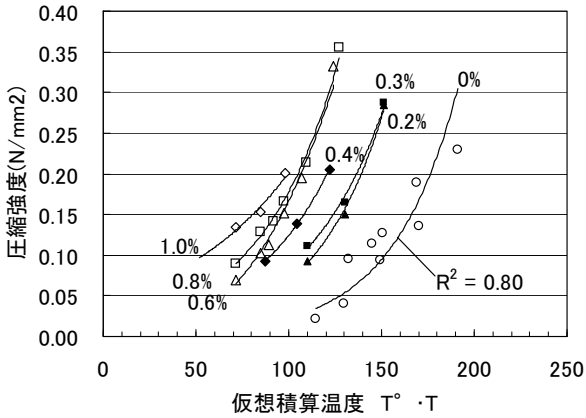
図－８に材齢7日および28日における圧縮強度試験結果を示す。いずれの温度においても硬化促進剤の添加による圧縮強度への影響は認められなかった。なお，脱型まで雰囲気温度を10℃とした場合が最も高くなった。

5.6　乾燥収縮の試験結果

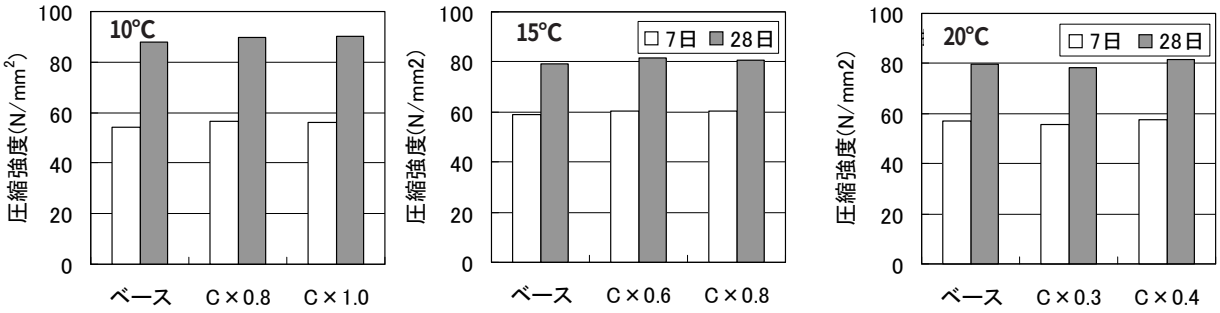
図－９に乾燥材齢182日までの長さ変化率を示す。乾燥収縮率はいずれも8×10^{-4}以下であった。また，硬化促進剤による乾燥収縮率の増加は最大でも0.5×10^{-4}程度であった。なお，脱型まで雰囲気温度10℃とした場合が最も乾燥収縮率が小さくなるという結果となった。これについては圧縮強度についても10℃の場合が最も増大していることから，標準水中養生を開始するまで低温下で養生していたことにより，セメント硬化体がより緻密化したためと考えられる。



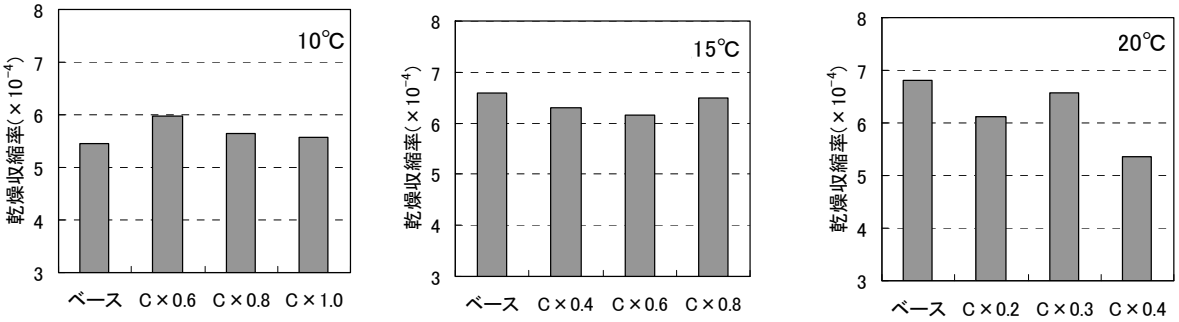
図－６　若材齢強度試験結果（積算温度）



図－７　若材齢強度試験結果（仮想養生温度）



図－８　圧縮強度の比較



図－９　乾燥収縮率（乾燥材齢 182 日）の比較

６．まとめ

超高層の搭状構造物向けのスリップフォーム工法に高強度コンクリートを適用するにあたり，①練混ぜ後２時間まではスランプフロー55cmを確保し，②10℃の低温下においても練混ぜから6.5時間後には脱型に必要な強度0.1N/mm²を満足できる性能を付与することを目的として，硬化促進剤を使用した高強度コンクリートについて検討を行った。その結果，以下のことが分かった。

(1)高性能AE減水剤と硬化促進剤の組み合わせとして3銘柄について10℃の低温下における高強度コンクリートの性状を比較した結果，いずれ場合も練混ぜ後2時間までスランプフロー55cmを確保できた。

(2)このうちの２銘柄が練混ぜから６.５時間後で０.１N/mm²を確保するという目標性能を満足し，フレッシュ性状の観点から１銘柄を選定した。

(3)選定した１銘柄について10，15，20℃の環境下で各種試験を実施し，いずれの場合も練混ぜ後2時間までスランプフロー55cmを確保できた。

(4)若材齢強度を仮想養生温度で整理することにより，温度毎の硬化促進剤の添加率の目安を得ることができた。

(5)硬化促進剤の添加による圧縮強度および乾燥収縮率の影響はないことを確認した。なお，10℃の低温下で脱型まで養生を行った場合，圧縮強度は大きくなり，乾燥収縮率は小さくなる傾向であった。

謝辞

本実験の実施にあたり，日本シーカ株式会社殿をはじめ関係者の皆様には多大なご協力を頂きました。末尾ながら謝意を示します。

参考文献

1)河合勝実，加藤靖彦，一瀬賢一，原田恒則：スリップアップ工法による大規模石炭サイロの施工，コンクリート工学，Vol.41，No.2，pp.32-38，2003

2)伊成哲雄・小川安良・秋山文生・皿海康行：スリップフォーム工法による塔体施工，コンクリート工学，Vol.43，No.12，pp.40-44,2005

3)槙島修，名倉政雄，津崎淳一ほか： 高性能AE減水剤と促進剤を併用したコンクリートのスランプ保持と初期強度発現，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.7-8,1997

4)笠井芳夫：コンクリートの初期圧縮強度推定方法，日本建築学会論文報告集，No.141，pp.1-10,1967