

超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究

西田 浩和 片寄 哲務
横須賀 誠一*1 塩田 博之*2

概 要

近年、超高層 RC 住宅建築物の更なる超高層化に伴い、設計基準強度(F_c) $150\text{N}/\text{mm}^2$ 級の超高強度コンクリートの研究開発が多方面で行われている。一方、超高強度コンクリートは、セメント量が多いため水和反応の進行に伴って発生する自己収縮が大きいことも知られている。しかし、自己収縮に及ぼす使用材料の影響については未解決な部分が多いため、今後もデータの蓄積が必要である。

本報は、 $F_c100\sim150\text{N}/\text{mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを対象に、市販の収縮対策用材料や水結合材比をパラメータとして行った室内試験および実機試験などの製造技術に関する研究結果を報告するものである。

本実験によって以下のことが明らかとなった。①圧縮強度は、膨張材および収縮低減剤を併用することで、 $10\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の強度低下がある、②所要のワーカビリティを得るために必要な混和剤量は、セメントの種類により $0.70\sim1.20\%$ の差がある、③自己収縮ひずみは、膨張材および収縮低減剤を併用することで $52\sim84\%$ 低減することができる。

Experimental Study on Autogenous Shrinkage of Ultra-High-Strength Concrete

Abstract

Recently, demand for construction of RC ultra-highrise condominiums has risen significantly and the number of stories of these condominiums is increasing accordingly, which leads to increased R&D in the field of ultra-high-strength concretes ($F_c 150\text{N}/\text{mm}^2$). It is well known that the autogenous shrinkage, caused from hydration reaction of cements, increases in ultra-high-strength concrete at an early stage because a large volume of cement is used. However, the influence of materials used on the autogenous shrinkage has not been clarified.

In this research, targeted at concretes with the strength of $F_c100\sim150\text{N}/\text{mm}^2$ class, we investigate the manufacturing process through laboratory tests and batching plant tests. In these tests, several types of commercially available materials were used to prevent autogenous shrinkage and several water bound-material ratios were adopted.

The following findings were obtained:

- (1) Simultaneous use of expansive additives and shrinkage-reducing admixtures caused a decrease of compressive strength of approximately $10\text{N}/\text{mm}^2$.
- (2) The amount of the admixture required necessary to obtain the same workability (determined by the cement type used) varied between $0.70\sim1.20\%$.
- (3) The autogenous shrinkage strain can be decreased by $52\sim84\%$ by simultaneous use of the expansive additives and the shrinkage-reducing admixtures.

キーワード： 超高強度コンクリート フレッシュコンクリート 膨張材
収縮低減剤 圧縮強度 自己収縮

*1 建築本部 建築技術統括部
*2 東京支店 建築技術部

§1. はじめに

近年、超高層 RC 住宅建築物の更なる高層化に伴い、 $F_c=150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートに関する研究開発が多方面で行われている。

一方、超高強度コンクリートはセメント量が多いため水和反応の進行に伴って発生する自己収縮が大きいことも知られている。しかし、自己収縮に及ぼす使用材料の影響については未解決な部分が多いため、今後もデータの蓄積が必要である。

本報は、 $F_c=100\sim 150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを対象に、市販材料(セメント、膨張材、収縮低減剤、化学混和剤)や水結合材比(13~22%)をパラメータとして行った室内試験および実機試験などの研究結果を報告するものである。

§2. 室内試験

室内試験は 20°C の恒温室内で実施した。表 1 に実験要因・水準、表 2 に試験項目・方法を示す。練混ぜには公称容量 100ℓ の二軸強制練りミキサーを使用した。粗骨材かさ容積は $0.52\text{m}^3/\text{m}^3$ 、目標スランプフローは 70cm ($\pm 7.5\text{cm}$)、目標空気量は 2% ($\pm 1\%$) とした。

練混ぜ方法はモルタル先練り方式とした。

2.1 結合材の影響(シリーズ I)

シリーズ I は、市販されている2種類のシリカフューム混入セメント(低熱ポルトランドセメントにシリカフュームをプレミックスしたもの(LPC+SF)、中庸熱ポルトランドセメントにシリカフュームをプレミックスしたもの(MPC+SF))を用いた超高強度コンクリートのフレッシュ性状、強度発現性状および自己収縮ひずみの定量的把握を目的として行った。

2.1.1 使用材料および調合

表 3 に使用材料、表 4 にコンクリートの調合を示す。水結合材比(W/B)はセメント種類ごとに 13%、15%、18% の3水準とした。

2.1.2 コンクリートの製造

コンクリートの練混ぜは、細骨材、セメントおよび混和剤を混入した水をミキサーに投入して 180~300 秒間練り上げ、その後、粗骨材を投入して 120 秒間練り混ぜた。

2.1.3 フレッシュコンクリートの試験結果

表 5 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。いずれの調合とも粘性が多少異なるものの、良好なフレッシュ性状を有するコンクリートを製造できた。

図1にはセメントの種類による混和剤使用量を示す。同一の水結合材比で比較すると、所要のワーカビリティを得るのに LSF に比べて MSF の方が 0.70~1.20% 混和剤量を少なくできた。つまり、MSF を用いることで混和剤量を

表 1 実験要因・水準

実験要因	水準	
結合材	シリカフューム混入セメント (LPC+SF、MPC+SF)	2
膨張材	石灰系膨張材 (2 銘柄)	2
収縮低減剤	高性能収縮低減剤、乾燥収縮低減剤	2
化学混和剤	収縮低減型混和剤 (A 社、B 社)	2

表 2 試験項目・方法

試験項目	試験方法
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	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108
自己収縮	10×10×40cm、埋込み型ひずみ計

表 3 使用材料(シリーズ I)

水(W)	上水道水(厚木市) ※収縮低減剤含む
セメント(LSF)	シリカフューム混入セメント (LPC+SF)、密度 3.08g/cm^3
セメント(MSF)	シリカフューム混入セメント (MPC+SF)、密度 3.07g/cm^3
細骨材(S)	君津産山砂、表乾密度 2.62g/cm^3 、吸水率 1.83%
粗骨材(G)	桜川産砕石、表乾密度 2.65g/cm^3 、吸水率 0.66%
化学混和剤(SPI)	高性能減水剤(ポリカルボン酸系)

表 4 コンクリートの調合(シリーズ I)

調合 No.	W/B (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 使用量 (B×%)
		W	LSF	MSF	S	G	
LSF13	13	155	1192	—	320	837	2.90
LSF15	15	155	1033	—	456	837	1.95
LSF18	18	155	861	—	600	837	1.70
MSF13	13	155	—	1192	317	837	1.70
MSF15	15	155	—	1033	453	837	1.15
MSF18	18	155	—	861	600	837	1.00

[スランプフロー]70±7.5cm、[空気量]2.0%以下

表 5 フレッシュコンクリートの試験結果(シリーズ I)

調合 No.	スランプ フロー (cm)	50cm フロー 時間(s)	空気 量(%)	コンクリート 温度(°C)	凝結時間(h-m)	
					始発	終結
LSF13	70.0	16.7	1.9	25	25-57	27-55
LSF15	71.5	9.9	1.4	25	15-38	17-07
LSF18	70.0	6.5	1.6	23	13-23	14-25
MSF13	69.5	20.4	1.5	26	16-49	18-55
MSF15	68.5	9.0	1.5	24	9-26	11-05
MSF18	74.5	7.3	1.3	23	9-53	11-33

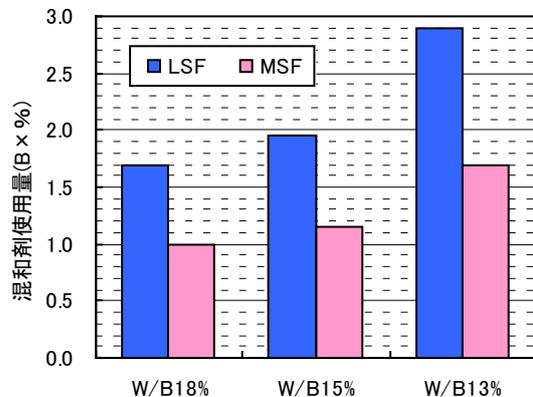


図 1 セメントの種類による混和剤使用量

概ね 6 割程度に低減できる。

凝結時間は、混和剤量が多い LSF の方が、3～9 時間程度遅延することが確認された。

2.1.4 硬化コンクリートの試験結果

図 2 に標準養生供試体の圧縮強度試験結果を示す。MSF の強度発現は、材齢 7 日においては LSF より 10% 以上高いものの、材齢 28 日以降の強度増進が LSF よりも緩慢になる傾向があった。

図 3 には自己収縮ひずみの経時変化を示す。自己収縮ひずみは、LSF、MSF とともに同一の水結合材比で概ね同様の挙動を示した。また、LSF、MSF とともに自己収縮ひずみは、水結合材比が小さいほど大きく、水結合材比 1% 低下について約 35 μ 増加する傾向にあった。

2.2 膨張材・収縮低減剤の影響(シリーズⅡ)

シリーズⅡは、膨張材、収縮低減剤の銘柄および混入量による差異を確認するため、水結合材比15%としてフレッシュ性状、強度発現性状および自己収縮ひずみの比較検討を行った。

2.2.1 使用材料および割合

表 6 に使用材料、表 7 にコンクリートの調合を示す。セメントは、低熱ポルトランドセメントにシリカフェームをプレミックスしたシリカフェーム混入セメントを用いた。収縮低減剤は、通常、乾燥収縮用として市販されているもの 2 銘柄、膨張材は石灰系膨張材 2 銘柄を用いた。膨張材はセメントの内割、収縮低減剤は単位水量の一部として用いた。膨張材 H の混入量はメーカー標準量である 20kg/m³(一定)とし、収縮低減剤 t、h は 5～9kg/m³ の範囲で使用した。

2.2.2 コンクリートの製造

コンクリートの練混ぜは、細骨材、セメント、膨張材および混和剤・収縮低減剤を混入した水をミキサに投入して 240 秒間練り上げ、その後、粗骨材を投入して 150 秒間練り混ぜた。

2.2.3 フレッシュコンクリートの試験結果

表 8 にフレッシュコンクリートの実験結果を示す。膨張材・収縮低減剤の銘柄および混入量の大小により、混和剤使用量や粘性に若干の差異が確認されたが、いずれも概ね良好な流動性を有し、所要品質を満足するものであった。しかし、膨張材・収縮低減剤を併用した時の混和剤使用量は、15Base と比較すると、全ての調合で 0.25～0.50%の増量が必要となった。

50cm フロー時間で比較すると、収縮低減剤 h を用いた場合の方がやや早いことから、粘性は収縮低減剤 h より t の方がやや高いと考えられる。

凝結時間は、15Base と比較すると、H20t5 以外は測

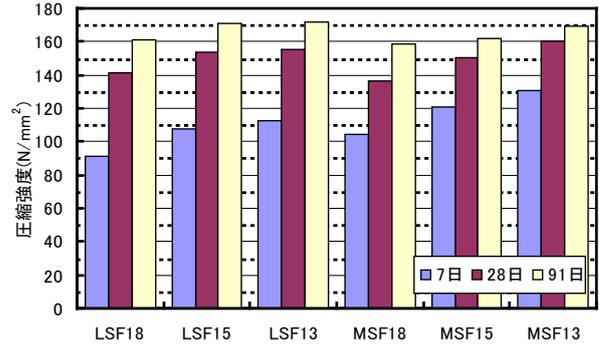


図 2 圧縮強度試験結果(シリーズⅠ)

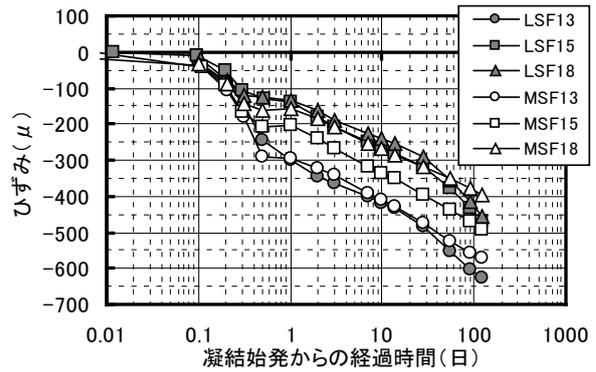


図 3 自己収縮ひずみの経時変化(シリーズⅠ)

表 6 使用材料(シリーズⅡ)

水(W)	上水道水(厚木市) ※収縮低減剤含む
セメント(LSF)	シリカフェーム混入セメント、密度 3.08g/cm ³
細骨材(S)	君津産山砂、表乾密度 2.62g/cm ³ 、吸水率 1.83%
粗骨材(G)	桜川産砕石、表乾密度 2.65g/cm ³ 、吸水率 0.66%
膨張材(H)	石灰系膨張材 ※セメントの内割として使用
膨張材(N)	石灰系膨張材 ※セメントの内割として使用
収縮低減剤(t)	高性能収縮低減剤、低級アルコールキレート付加物
収縮低減剤(h)	乾燥収縮低減剤、ボリエル誘導体
化学混和剤(SP1)	高性能減水剤(ポリカルボン酸系)

表 7 コンクリートの調合(シリーズⅡ)

調合 No.	単位量(kg/m ³)								混和剤使用量(B×%)
	W	LSF	S	G	H	N	t	h	
15Base	155	1033	456	837	—	—	—	—	1.75
H20t5	155	1033	456	837	20	—	5	—	2.00
H20t7	155	1033	456	837	20	—	7	—	2.10
H20t9	155	1033	456	837	20	—	9	—	2.10
H20h5	155	1033	456	837	20	—	—	5	2.00
H20h9	155	1033	456	837	20	—	—	9	2.20
N25h5	155	1033	456	837	—	25	—	5	2.25

[水結合材比]15%(一定)

表 8 フレッシュコンクリートの試験結果(シリーズⅡ)

調合 No.	スランブフロー(cm)	50cm フロー時間(s)	空気量(%)	コンクリート温度(°C)	凝結時間(h-m)	
					始発	終結
15Base	66.5	17.8	1.6	25	10-02	11-17
H20t5	74.0	15.2	1.2	26	9-48	11-38
H20t7	74.0	15.3	1.4	25	—	—
H20t9	73.0	14.3	1.2	27	12-02	14-28
H20h5	65.5	15.3	1.6	25	14-53	16-49
H20h9	73.0	11.1	1.6	25	20-31	22-49
N25h5	73.5	11.1	1.6	25	17-48	20-23

定した全ての調合で始発、終結の遅延が確認された。

2.2.4 硬化コンクリートの試験結果

図 4 にシリーズⅡの標準養生供試体圧縮強度を示す。15Base と比較すると、膨張材・収縮低減剤を混入することで、材齢 7 日圧縮強度は 5~17%、材齢 28 日圧縮強度は 3~14%、材齢 91 日圧縮強度は 1~9%低い結果となった。つまり、初期材齢においては強度低下の割合は比較的顕著であるのに対し、経時に伴ってその差が少なくなる傾向にあると考えられる。

図 5 に自己収縮ひずみの経時変化を示す。自己収縮ひずみは、膨張材・収縮低減剤混入量の増加に伴って減少傾向にあった。凝結始発から 100 日で比較すると、N25h5 の自己収縮ひずみは、15Base の 50%程度くらいの留まったものの、それ以外の調合においては概ね 80%程度の低減が確認された。また、収縮低減剤混入量の増大に伴う自己収縮ひずみの顕著な低減は見られなかった。

2.3 混和剤の影響(シリーズⅢ)

シリーズⅢは、収縮低減剤をプレミックスした高性能減水剤(2銘柄)の違いによる差異を確認するため、水結合材比 15%としてフレッシュ性状、強度発現性状および自己収縮ひずみの比較検討を行った。

2.3.1 使用材料および調合

表 9 に使用材料、表 10 にコンクリートの調合を示す。セメントは、低熱ポルトランドセメントにシリカフュームをプレミックスしたシリカフューム混入セメントを用いた。

2.3.2 コンクリートの製造

コンクリートの練混ぜは、細骨材、セメントおよび混和剤を混入した水をミキサに投入して、調合 No.15A は 240 秒間、15B は 180 秒間練り上げ、その後、粗骨材を投入して 120 秒間練り混ぜた。

2.3.3 フレッシュコンクリートの試験結果

表 11 にフレッシュコンクリートの実験結果を示す。両調合とも混和剤使用量が 2.35%で所要のワーカビリティを得ることができた。50cmフロー時間も大差ないことから、混和剤の違いによる粘性の差はほとんどなかったと考えられる。ただし、混和剤 B は空気量をやや巻き込みやすい傾向にあり、空気量調整剤を用いても低減させるのが困難であった。

凝結時間は、15Base に比べて両調合とも始発で 6 時間以上、終結で 6 時間半以上遅延することが確認された。

2.3.4 硬化コンクリートの試験結果

図 6 にシリーズⅢの標準養生供試体圧縮強度を示す。圧縮強度は、15Base に比べて、材齢 28 日において 5~

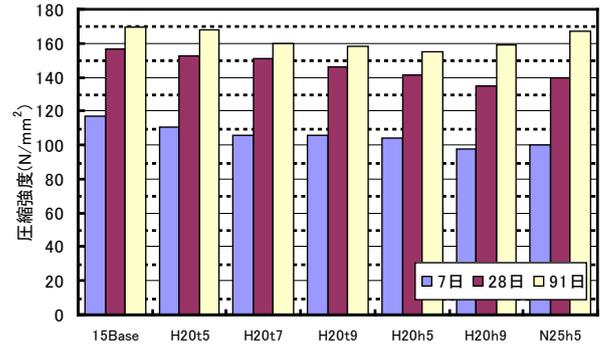


図 4 圧縮強度試験結果(シリーズⅡ)

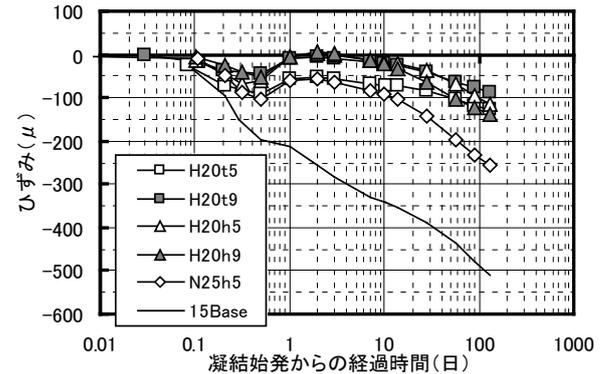


図 5 自己収縮ひずみの経時変化(シリーズⅡ)

表 9 使用材料(シリーズⅢ)

水(W)	上水道水(厚木市)
セメント(LSF)	シリカフューム混入セメント、密度 3.08g/cm³
細骨材(S)	君津産山砂、表乾密度 2.62g/cm³、吸水率 1.83%
粗骨材(G)	桜川産砕石、表乾密度 2.65g/cm³、吸水率 0.66%
化学混和剤(A)	収縮低減型高性能減水剤(ポリカルボン酸系)
化学混和剤(B)	収縮低減型高性能減水剤(ポリカルボン酸系)

表 10 コンクリートの調合(シリーズⅢ)

調合 No.	単位量(kg/m³)				混和剤使用量 (B×%)	
	W	LSF	S	G	A	B
15A	155	1033	456	837	2.35	—
15B	155	1033	456	837	—	2.35

表 11 フレッシュコンクリートの試験結果(シリーズⅢ)

調合 No.	スラブフロー (cm)	50cmフロー時間(s)	空気量(%)	コンクリート温度(°C)	凝結時間(h-m)	
					始発	終結
15A	68.5	11.4	1.5	22	17-26	19-06
15B	70.5	12.4	2.3	23	16-02	17-47
15Base	—	—	—	—	10-02	11-17

10%低いものの、材齢 91 日ではむしろ 2%高くなった。初期材齢での強度発現は鈍いものの、長期材齢では基準調合(15Base)以上の強度増進が確認できた。

図 7 に自己収縮ひずみの経時変化を示す。自己収縮ひずみは、凝結始発から 100 日で約 350 μ のひずみが生じ、15Base と比較すると低減率は 30%程度であった。

別途行った収縮低減剤を単独でメーカー標準量 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 程度混入した場合に比べると、収縮低減効果は若干低い傾向であった。

§3. 実機試験

3.1 試験概要

3.1.1 使用材料および割合

表 12 に実機試験に用いた使用材料、表 13 にコンクリートの割合をそれぞれ示す。目標スランブフローは、W/B22%、18%は $65\text{cm}(\pm 7.5\text{cm})$ 、W/B13%は $70\text{cm}(\pm 7.5\text{cm})$ とし、目標空気量は全て2% ($\pm 1\%$) とした。粗骨材かさ容積は全て $0.52\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。膨張材はセメントの内割、収縮低減剤は単位水量の一部として用いた。

3.1.2 試験体

図 8 に実機試験に用いた試験体形状を示す。試験体は断面寸法 1000×1000 、高さ 1000mm の柱模擬部材とした。試験体は、上下をそれぞれビーズ法ポリスチレンフォーム板4号 (@ 200mm) を用いて断熱し、無筋とした。コア供試体は、図中に示すように鉛直方向に内部および端部で採取し、コア 1 本から 3 個の供試体を作製した。

3.1.3 コンクリートの製造

コンクリートの製造は、レディーミクストコンクリート工場(東京都江東区)で行った。コンクリートは 2 軸強制練りミキサ(公称容量 3m^3) を用い、1 割合の練混ぜ量は $2.0 \sim 3.0\text{m}^3$ とした。練混ぜは、モルタルの練上がりモニターおよび負荷値で確認後、粗骨材を投入し、コンクリートとして練り混ぜた。コンクリートの練上がり後 45 分で工場内にて試験体に打ち込んだ。

3.1.4 試験項目

フレッシュコンクリートの試験として、スランブフロー、空気量、練り上がり温度を測定した。

硬化コンクリートの試験として、圧縮強度を標準養生(1、4、8、13 週)、コア(4、8、13 週)に関して測定した。

3.2 試験結果

3.2.1 フレッシュコンクリート

表 14 に練り上がり後 45 分のフレッシュコンクリートの試験結果を示す。いずれの割合とも良好な流動性を有し、所要品質を満足するものであった。

図 9 に混和剤使用量を示す。使用量は水結合材比が小さくなるほど増大し、とくにコンクリート温度の高い夏期の水結合材比 13% で顕著であった。

3.2.2 硬化コンクリート

図 10 に材齢 28 日における標準養生供試体圧縮強度と結合材水比の関係を示す。膨張材・収縮低減剤を混入した割合の季節による差がやや大きかった。

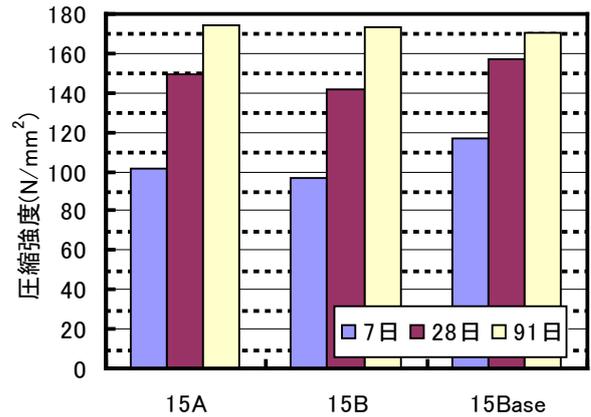


図 6 圧縮強度試験結果(シリーズⅢ)

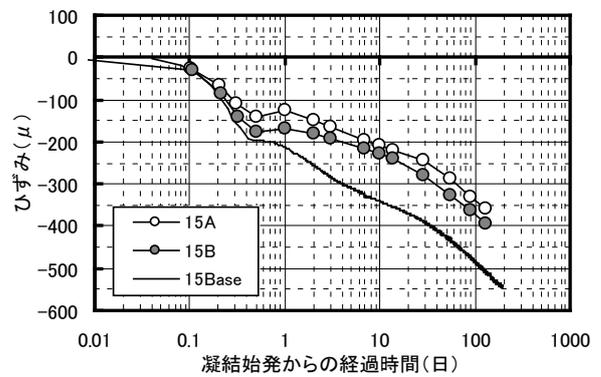


図 7 自己収縮ひずみの経時変化(シリーズⅢ)

表 12 使用材料(実機試験)

水(W)	上水道水(江東区) ※収縮低減剤含む
セメント(C)	シリカフューム混入セメント、密度 $3.08\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材(S)	富津産山砂、表乾密度 $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ 、FM2.64
粗骨材(G)	桜川産砕石、表乾密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$ 、実積率 60%
膨張材(H)	石灰系膨張材 ※セメントの内割として使用
収縮低減剤(t)	高性能収縮低減剤、低級アルコールアクリレート付加物
化学混和剤(SP1)	高性能減水剤(ポリカルボキシル系)

表 13 コンクリートの割合(実機試験)

割合 No.	単位量(kg/m^3)					
	W	C	S	G	H	t
13LSF	155	1192	330	824	—	—
18LSF	155	861	610	824	—	—
22LSF	155	705	744	824	—	—
13Ht	155	1192	330	824	20	5
18Ht	155	861	610	824	20	5
22Ht	155	705	744	824	20	5

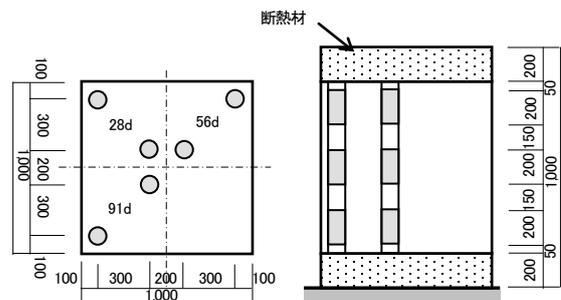


図 8 試験体形状

表 14 フレッシュコンクリートの試験結果(実機試験)

季節	調合 No.	混和剤混入量 (B×%)	スンプ [®] フロー (cm)	50cm フロー 時間(s)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
夏期	13LSF	2.40	66.0	19.8	1.0	34
	18LSF	1.70	67.0	7.6	1.4	31
	22LSF	1.50	64.5	7.2	1.3	32
	13Ht	2.60	64.0	18.2	1.4	35
	18Ht	1.775	68.0	8.1	1.0	33
	22Ht	1.65	63.0	5.7	1.1	32
標準期	13LSF	2.10	76.0	7.7	1.4	27
	18LSF	1.60	65.5	10.8	1.4	26
	22LSF	1.475	69.5	6.3	1.5	24
	13Ht	2.20	69.5	13.2	1.6	28
	18Ht	1.50	63.0	9.0	1.4	26
	22Ht	1.55	65.5	7.0	1.4	26
冬期	13LSF	1.975	72.5	13.9	1.9	20
	18LSF	1.30	62.0	14.1	1.8	16
	22LSF	1.20	67.5	7.0	1.8	15
	13Ht	1.975	69.5	20.7	1.6	20
	18Ht	1.35	68.5	7.6	1.1	18
	22Ht	1.30	67.5	5.3	1.4	18

図 11 に材齢 91 日におけるコア強度と強度補正值 ($_{28}S_{91}$) の関係を示す。本実験結果では、コア強度が増大するほど強度補正值が小さくなる傾向があった。また、夏期における膨張材と収縮低減剤を併用した調合の強度補正值はマイナス側で大きな値となり、バラツキも大きかった。

§4. まとめ

超高強度コンクリートの自己収縮に関する室内試験および実機試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 圧縮強度は、膨張材および収縮低減剤を併用することで、10N/mm²程度の強度低下がある。
- (2) 所要のワーカビリティを得るのに必要な混和剤量は、LSF に比べて MSF の方が 0.70~1.20% 少なくすることができる。
- (3) 市販の収縮低減型混和剤は、B よりも A の方が強度発現性状、収縮性状とも若干良好な結果となった。
- (4) 自己収縮ひずみは、膨張材および収縮低減剤を併用した材齢 91 日で 52~84% 低減することができる。
- (5) 自己収縮対策として膨張材および収縮低減剤を併用した超高強度コンクリートは、市中の生コンプラントの実機ミキサにおいても製造が可能である。

謝辞 本実験を行うにあたり、竹本油脂(株)、(株)フローリック、BASFポゾリス(株)、関東宇部コンクリート工業(株)豊洲工場より多大な御協力を頂きました。ここに記して深謝致します。

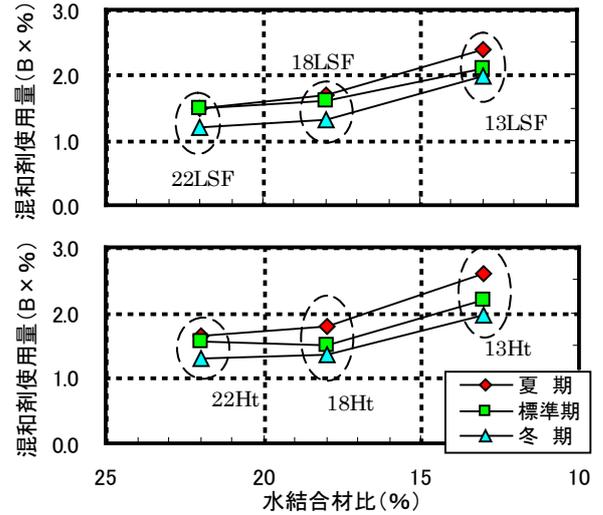


図 9 混和剤使用量

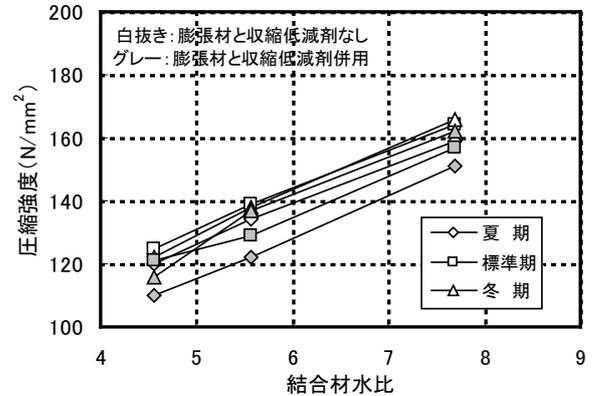


図 10 標準養生供試体圧縮強度と結合材水比の関係

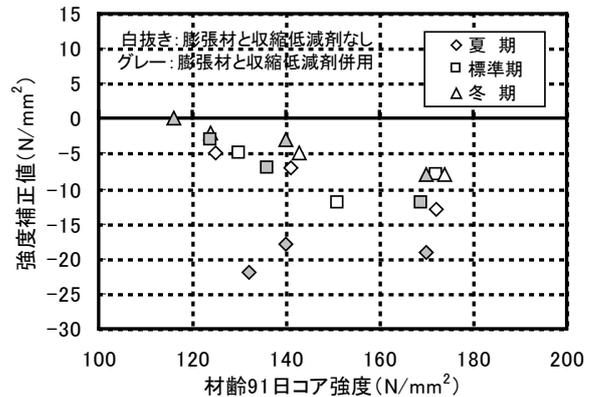


図 11 材齢 91 日コア強度と強度補正值 ($_{28}S_{91}$) の関係

ひとこと

超高強度コンクリートの適用に関してはまだまだ課題が多いですが、より高品質な躯体が施工できるように今後も引き続き検討を進めていきます。



西田 浩和