論文　超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する研究

高田　和法*1・柳井　修司*2・渡部　貴裕*3・一宮　利通*1

要旨：圧縮強度 150 N/mm^2 以上の超高強度コンクリートの自己収縮低減方法について検討した。膨張材，収縮低減剤および人工軽量骨材のセルフキュアリング効果が自己収縮低減や圧縮強度に及ぼす影響を実験的に調べた。実験の結果，圧縮強度の低下に対する収縮低減効果は，膨張材，収縮低減剤が大きく，特に両者を併用した場合に大きかった。一方，人工軽量骨材は圧縮強度の低下がやや大きいものの，自己収縮の低減効果は大きく，超高強度コンクリートの自己収縮低減対策として有効となる可能性が見出せた。

キーワード：超高強度コンクリート，自己収縮，膨張材，収縮低減剤，人工軽量骨材

1.　はじめに

最近，都心部の超高層集合住宅など，特に建築分野で設計基準強度 100N/mm^2 の超高強度コンクリートの適用例が増加している。また土木分野においても，プレキャスト部材を使用した橋梁構造物で圧縮強度 200 N/mm^2 を有する繊維補強モルタルが実用化されるなど [1]，超高強度コンクリートへのニーズは高まりを見せており，今後さまざまな形式の構造物に対して，設計基準強度が 100 N/mm^2 を超えるコンクリートの需要が顕在化してくるものと予想される。著者らは，材齢 28～91 日で圧縮強度 150 N/mm^2 以上（設計基準強度 120 N/mm^2 以上）の超高強度コンクリートの開発を進めてきた。その際，圧縮強度の他に特に以下の３点を開発の目標とした。

(1)　相当量の粗骨材を有した配合であること
(2)　施工性に優れること
(3)　自己収縮が小さいこと

一般に，コンクリートは水セメント（結合材）比が小さくなるほど自己収縮が大きくなり，混和材としてシリカフュームを使用するとさらに増大すると言われている [2]。超高強度コンクリートでは，シリカフュームの使用や水結合材比の低減が基本技術であるため，これによって生じる大きな自己収縮が RC 部材のせん断耐力を低下させることも指摘されている [3]。このほか，PC 部材とした場合の有効プレストレスの減少や，打設後のひび割れの原因となることが懸念され，なるべくこれを小さくするための対策が必要であると考えられる。

高強度コンクリートの自己収縮低減方法については，これまでにも様々な検討が行われてきた。セメント種類では低熱ポルトランドセメント，混和材料では膨張材や収縮低減剤を使用することで自己収縮を低減できることが知られており [4)5)6]，これらを併用した場合の相乗効果も報告されている [7]。また，吸水した人工軽量骨材が自己収縮を低減するというデータも示されている [8)9]。しかし，これらの検討はいずれも圧縮強度が 100 N/mm^2 程度以下のコンクリートに対して行われており，150 N/mm^2 という高い強度レベルでは十分な検討がなされていない。そこで本論文では，150 N/mm^2 以上の圧縮強度と上記(1)，(2)の開発目標を満足した上で，自己収縮を有効に低減できる方法について検討した。

2.　検討した自己収縮低減方法

メカニズムの異なる以下の３つの方法につい

*1 鹿島建設(株)　技術研究所　土木構造グループ 主任研究員 工修（正会員）
*2 鹿島建設(株)　名古屋支店 ＪＨ矢作川橋西ＪＶ 工事課長代理 工修（正会員）
*3 鹿島建設(株)　九州支店 小丸川発電所上部ダムＪＶ 工修（正会員）

て，それぞれ単独もしくは併用した場合の自己収縮低減効果を実験的に検証した。

(1)　膨張材の適用

膨張材が水和によってセメントよりも疎な硬化体組織を形成し，これにより見かけの体積が増加して収縮を補償する方法。

(2)　収縮低減剤の適用

収縮低減剤がセメント硬化体の細孔溶液の表面張力を低下させ，収縮の原因とされる毛細管張力を低減させる方法。

(3)　人工軽量骨材の適用

人工軽量骨材内部の保有水がセメントの水和に伴う硬化体の自己乾燥を補償し，細孔空隙中の湿度低下を防止する（セルフキュアリング効果）方法。

3.　実験の概要

3.1　使用材料

人工軽量骨材以外はすべて市販の材料を使用した。セメントには低熱ポルトランドセメントベースのシリカフュームプレミックスセメント（記号 C, 密度 3.08g/cm^3, 比表面積 4050cm^2/g, シリカフューム混入率 10~15%），細骨材は段戸産石英片岩砕砂（記号 S，表乾密度 2.62 g/cm^3，吸水率 0.72%，粗粒率 3.10），粗骨材は段戸産石英片岩砕石（記号 G，最大寸法 20mm，表乾密度 2.62 g/cm^3，吸水率 0.57%，実積率 63.1%），を使用し，混和剤にはポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤（記号 SP）および空気量調整にアルコール系消泡剤を使用した。また，膨張材には石灰-エトリンガイト系（記号 EX，密度 3.20g/cm^3，比表面積 3500cm^2/g），収縮低減剤には低級アルコールアルキレンオキシド付加物（記号 RA），人工軽量骨材には比較的高い強度と吸水率を有する石炭灰人工骨材（記号 JL，5～10mm，表乾密度 1.72 g/cm^3，吸水率 12.2%，ただし表乾密度・吸水率は 7 日間吸水後の値）を 7 日間以上プレウェッティングした後に表乾状態として使用した。

3.2　実験の水準とコンクリートの配合

表－１に実験の水準とコンクリートの配合条件を示す。空気量，水結合材比，単位水量，単位粗骨材絶対容積，高性能減水剤添加率を一定とした 7 つの配合ケースについて，以下の試験を行った。**表－２**に自己収縮を低減しない基本配合を示す。

3.3　実験方法

コンクリートは強制二軸式ミキサ（容量 100 リットル, 回転数 60rpm）を用いて練り混ぜた。粗骨材（人工骨材含む）以外の材料をミキサに

表－１　実験の水準とコンクリートの配合条件

配合名	空気量 (%)	W/(C+EX) (%)	W (kg/m^3)	G＋JL 容積 (l/m^3)	SP/(C+EX) (%)	EX (kg/m^3)	RA/(C+EX) (%)	JL/(G+JL) 容積率 (%)
基本配合	1.5	17	155	300	1.5	-	-	-
E20						20	-	-
E25						25	-	-
E30						30	-	-
R2						-	2.0	-
E25R2						25	2.0	-
JL30						-	-	30

（W は SP・RA 容積分を含む）

表－２　基本配合

W／C (%)	空気量 (%)	粗骨材容積 (l/m^3)	SP／C (%)	単位量(kg/m^3)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP
17	1.5	300	1.5	155	912	613	798	(13.7)

投入後 120 秒練り混ぜ，一旦ミキサを停止して内壁や羽根に付着したセメントを掻き落とした後に再びミキサを作動して 180 秒練り混ぜた。さらに粗骨材（人工骨材含む）投入後 180 秒練り混ぜ，ミキサから排出した。

コンクリート練上がり後，直ちにスランプフローと空気量，コンクリート温度を測定し，圧縮強度，凝結時間および自己収縮を測定するための供試体を作製した。圧縮強度は JIS A 1108-1999 に準じ, 標準養生における材齢 7, 28, 56, 91 日の 4 材齢で試験した。凝結時間は JIS A 1147-2001 に準じて測定したが，自己収縮の測定開始時間を知るために始発時間までの計測とした。自己収縮の測定は JCI・自己収縮研究委員会の方法 [2)]に準じたが，ひずみの測定は低剛性タイプの埋込み変位計によって行った。

4. 実験結果と考察

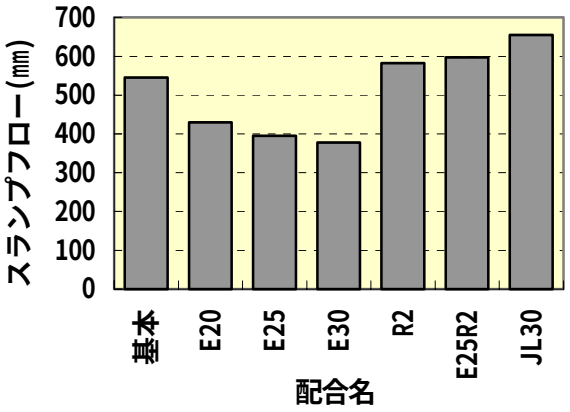
4.1 スランプフローおよび凝結時間

図－１に各配合のスランプフローを示す。膨張材の添加によってスランプフローは低下し，基本配合と比較して流動性が損なわれる傾向にあることがわかる。逆に収縮低減剤はスランプフローを若干増大させる効果が見られた。また，人工軽量骨材もスランプフローを増大させる傾向を示し，流動性は向上した。なお，基本配合を含むスランプフロー550mm 以上の配合については，良好な自己充てん性を有しているものと判断された。空気量はすべてのケースにおいて 1.3～2.5%の範囲に調整された。

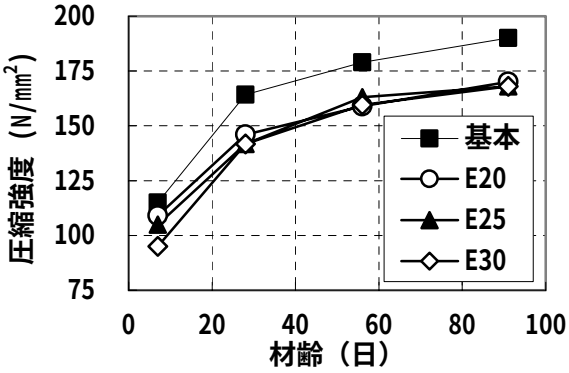
また，収縮低減剤を用いていない各配合の凝結始発時間はそれぞれ，基本：9.0 時間，E20：9.0 時間，E25：10.3 時間，E30：10.1 時間，JL30：9.2 時間とあまり大きな差は見られなかったが，収縮低減剤は明らかに凝結の開始を遅延させる傾向が見られ，R2：13.7 時間，E25R2：13.2 時間であった。

4.2 圧縮強度

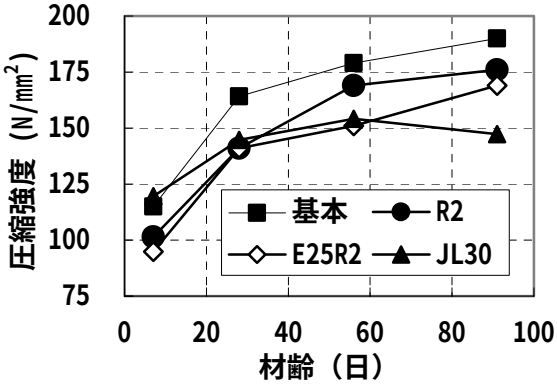
図－２，３に圧縮強度の試験結果を示す。基本配合は材齢 28 日で 164N/mm^2，91 日で 190N/mm^2 の高い圧縮強度を示した。自己収縮の低減を図った場合には，全てのケースにおいて基本配合の圧縮強度を下回る結果となり，いずれの方法においても強度の低下は避けられないことが分かった。しかし，材齢 56 日では全ての配合で目標とする 150N/mm^2 以上の圧縮強度



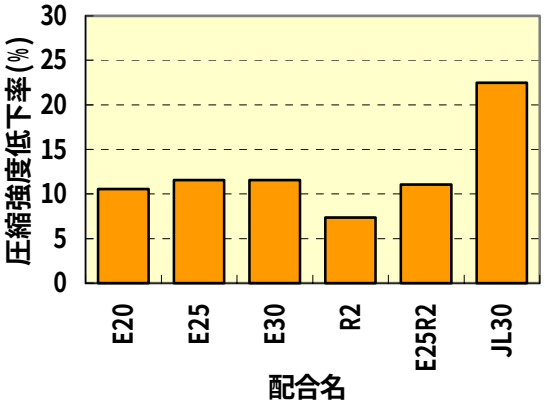
図－1　スランプフローの結果



図－２　圧縮強度（１）



図－３　圧縮強度（２）



図－４　圧縮強度の低下率（材齢 91 日）

が確認された。

膨張材を単独で使用した場合（E20,E25,E30）では，材齢 7 日で添加量が多いほど低い強度を示しているが，28 日以降はほぼ同じ強度となり，91 日では 170N/mm^2 程度に達した。収縮低減剤を添加率 2%で使用した場合（R2）は，長期強度が膨張材を使用した場合よりもやや大きくなり，材齢 91 日で 176N/mm^2 であった。膨張材と収縮低減剤を併用したケース（E25R2）では，材齢 91 日で膨張材のみの各ケースと同程度の強度となった。

粗骨材容積の 30%を人工軽量骨材で置換したケース（JL30）では，材齢 7 日は基本配合とほぼ同じ強度，材齢 28 日では膨張材や収縮低減剤を使用した場合とほぼ同等の強度が確認されたが，材齢 28 日以降ほぼ頭打ちの状況が見られ，150N/mm^2 前後で横ばいとなった。

図－４は自己収縮の低減を図った各配合における材齢 91 日での圧縮強度低下率(基本配合の圧縮強度を基準に算定）を示したものである。収縮低減剤を添加率 2%で使用した場合が，最も圧縮強度の低下率は小さく，7%であった。

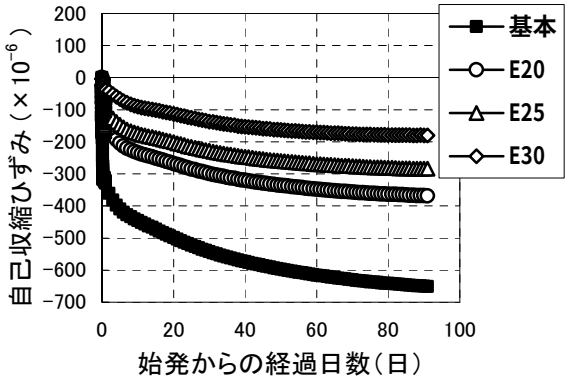
膨張材を単独で使用したケースおよび膨張材と収縮低減剤を併用したケースにおいては，強度低下率はほぼ一定であり，11～12%であった。

一方，人工軽量骨材を置換率 30%で使用した場合の強度低下率は 22%を示し，他の配合の 2～3 倍程度となった。

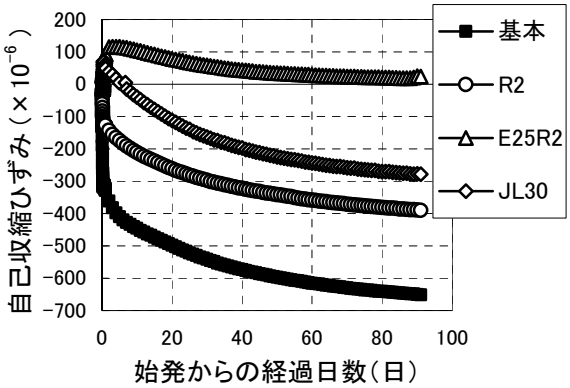
4.3　自己収縮

図－５，６に自己収縮の測定結果を示す。各配合ケースとも，凝結始発時のひずみを 0 とし，それ以降の 20℃非乾燥状態における自由収縮（膨張）ひずみを計測している。自己収縮低減対策を講じない基本配合においては，材齢 91 日で 650μという大きな自己収縮が計測された。

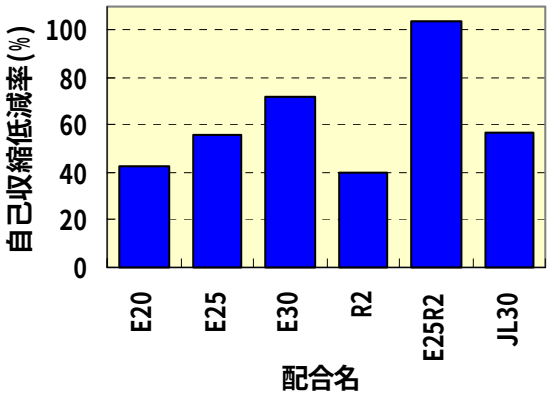
自己収縮の低減を目指した各配合においては，いずれも基本配合に比較して自己収縮は小さくなり，予測された効果が発揮された。**図－７**には，基本配合における材齢 91 日の自己収縮量を基準とした各配合の自己収縮低減率を示す。膨張材を 20kg/m^3 使用すると材齢 91 日で 370μ（E20）となり，基本配合よりも 40%以上自己収縮を低減することができた。さらに添加量を増すごとに低減効果は大きくなり，30kg/m^3（E30）で 180μ（材齢 91 日）となり，70%以上の低減効果を示した。同種の膨張材を使用した既往の研究[10]では，低熱ポルトランドセメント



図－５　自己収縮（１）



図－６　自己収縮（２）



図－7　自己収縮低減率（材齢 91 日）

を使用した水セメント比35%の高流動モルタル（材齢 91 日の自己収縮：200μ）に膨張材をセメントの内割で 3%添加した場合，自己収縮は解消され，材齢 91 日で 100μ程度の自己膨張が観察されている。本研究では，E30 における添加率が結合材内割で 3.3%であるが，自己収縮を解消するまでには至らなかった。

また，収縮低減剤は添加率 2%（R2）で膨張材 20　kg/m^3 のケース（E20）とほぼ同じ程度の収縮低減効果（40%）を示した。

一方，膨張材 25 kg/m^3 と収縮低減剤 2%を併用したケース（E25R2）では，既往の研究 [7]にも見られるように両者単独使用の場合の効果を足し合わせた以上の効果が確認され，材齢初期に 110μの膨張が確認された後，材齢 91 日に至るまでその膨張量は漸減するものの，収縮側への移行は見られなかった。

人工軽量骨材を置換率 30%で使用した場合（JL30）は，材齢 91 日での低減率は 57%となり，自己収縮の低減効果は E25 と同等程度に大きいことが分かった。既往の研究 [8]にも見られるように材齢初期には膨張も確認された。

なお，各収縮低減方法が自己収縮の測定値に及ぼす影響の特徴としては，以下の点が観察された。

① 膨張材を使用した場合は，材齢初期の収縮低減が大きいとともに，91 日までの硬化過程における収縮の増加量も基本配合に比較して小さい。

② 収縮低減剤を使用した場合も，膨張材と同様の傾向が見られる。

③ 人工軽量骨材を使用した場合は，特に材齢初期の収縮低減が大きく，材齢数日以降の自己収縮の増加量は，基本配合とあまり変わらない。

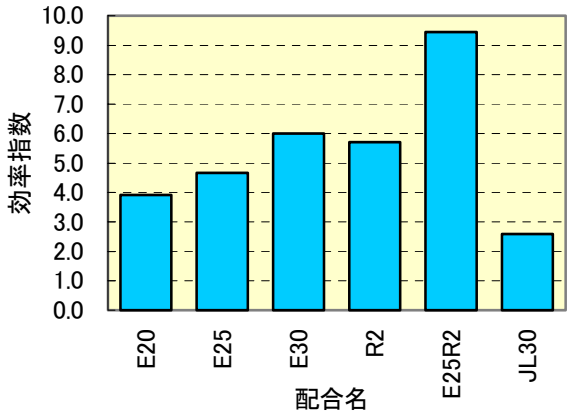
4.4　自己収縮低減効率の評価

本研究では 150 N/mm^2 以上の圧縮強度を満足することを目標としており，収縮低減方法の評価には，収縮低減効果と強度の低下程度を総合的に評価できる指標が必要である。そこで，以下のような「自己収縮低減効率指数（効率指数）」を定義し，評価することを試みた。

$$\text{効率指数} = \frac{\text{収縮低減率(\%)}}{\text{強度低下率(\%)}} \qquad (1)$$

収縮低減率(%)および強度低下率(%)は，それぞれ材齢 91 日における基本配合の自己収縮，圧縮強度を基準とした場合の，それぞれの配合における減少率を表している。効率指数値が大きいほど強度低下当たりの収縮低減効果が大きく（収縮低減効果当たりの強度低下が小さく），より高い強度で効率的に収縮低減できる方法であると評価することができる。

図－8 に各配合の効率指数の比較を示す。膨張材と収縮低減剤を併用した E25R2 の効率指数が飛び抜けて高い。次に効率が良いのは膨張材もしくは収縮低減剤を単独で使用した各ケー



図－8　収縮低減効率の比較

スであり，膨張材については，添加量が多いほど収縮低減効率が高いことを示している。

一方，人工軽量骨材を粗骨材容積の30%使用したケース（JL30）は，他の各ケースと比較して相対的に効率指数は小さく，強度低下による影響が大きいことが分かる。しかし，目標強度の150 N/mm^{2}はおおむね確保されていることから，自己収縮低減率（**図－7**参照）でその効果を評価しようとする場合には，膨張材25 kg/m^3（E25）とほぼ同等，収縮低減剤2%（R2）よりも高い収縮低減効果をもっていると評価できる。すなわち，自己収縮の低減に主眼を置くと，150 N/mm^{2}以上の超高強度コンクリートに対しても，その使用量等を調整することによって，人工軽量骨材も有効な自己収縮低減方法となり得ることが確認された。

5．まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

(1) 基本配合（低熱ポルトランドセメントベースのシリカフュームプレミックスセメント使用, 水セメント比17%, 単位水量155 kg/m^3, 単位粗骨材絶対容積 300 l/m^3）では，材齢91日で190N/mm^{2}の高い圧縮強度と650μの自己収縮が確認された。

(2) 膨張材20～30kg/m^{3}では, 収縮低減効率は大きいが，流動性が低下する。

(3) 収縮低減剤2%（×結合材重量）では，収縮低減効率が大きく，流動性も低下しない。

(4) 膨張材25kg/m^{3}と収縮低減剤2%を併用すると，自己収縮を解消することができる。

(5) 人工軽量骨材は自己収縮を低減することができるが，強度低下も比較的大きくなる。ただし，150N/mm^{2}程度の目標強度であれば，有効な自己収縮低減対策となる可能性がある。

参考文献

1) 武者浩透，大竹明朗，関　文夫，大熊　光，児玉明彦，小林忠司：無機系複合材料(RPC)を用いた酒田みらい橋の設計と施工，橋梁と基礎，2002-11，pp.2-11

2) (社)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996.11

3) 崔　益暢，田澤栄一，林　少容：鉄筋コンクリートはりにおける自己収縮による自己応力がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.1021-1026，1998.6

4) 田澤栄一，宮沢伸吾，佐藤　剛：自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響，セメントコンクリート論文集, No.47, pp.528-533, 1993

5) 近松竜一，竹田宣典，三浦律彦，十河茂幸：高強度・高流動コンクリートの低収縮化に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.169-174, 1997.6

6) 兵藤彦次，谷村充，中村秀三，石森正樹：収縮低減剤を添加したコンクリートの諸特性，太平洋セメント研究報告，No.141，pp.21-27，2001

7) 谷村充，兵藤彦次，佐藤達三，佐藤良一：高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.991-996，2000.6

8) Takada, K., Breugel, K. van, Koenders, E.A.B and Kaptijn, N.: Experimental Evaluation of Autogenous Shrinkage of Lightweight Aggregate Concrete, Proc. Int. Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, pp.221-230, Hiroshima, 1998.6

9) 笠井　浩，和美廣喜，新井一彦，森田　哲：石炭灰人工骨材を用いたコンクリートのセルフキュアリング効果に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1273-1278，2000.6

10) 保利彰宏，盛岡実，坂井悦郎，大門正機：膨張材を混和した各種高流動モルタルの自己収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.163-168，1998.6