

自己収縮を低減した超高強度コンクリート（150N/mm²級）の開発

Development of Ultra High Strength Concrete to Controlling Autogenous Shrinkage

高田 和法¹⁾
一宮 利通

日紫喜 剛啓
渡部 貴裕²⁾

大野 俊夫
盛田 行彦

要 約

圧縮強度 150 N/mm²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、膨張材、収縮低減剤およびセルフキュアリング効果を有する人工軽量骨材が、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、自己収縮の低減を図ることによって圧縮強度は低下するものの、強度低下当たりの収縮低減効果は、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、使用量や他の混和材料との組合せを調整することで、超高強度コンクリートの自己収縮低減に有効であることが示唆された。また、収縮を低減した配合について物性評価を試み、人工軽量骨材によって養生中の湿度条件によらずに安定した強度発現性を示すことが分かった。またクリープひずみが小さく、凍結融解抵抗性も高いことが確認された。

目 次

- I. はじめに
- II. 自己収縮を低減しない基本配合の検討（シリーズ1）
- III. 自己収縮低減方法の検討（シリーズ2）
- IV. 自己収縮を低減した配合の各種物性（シリーズ3）
- V. おわりに

I. 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/mm²以上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/mm²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、今後様々な形式の構造物に対して、設計基準強度が 100 N/mm²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/mm²以上（設計基準強度 120 N/mm²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、圧縮強度のほかに、特に以下の3点を開発の目標とした。

- a. 自己収縮が小さいこと
- b. 粗骨材を相当量含有した配合であること
- c. 施工性に優れること

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/mm²程度以下のコンクリートに対して行われており、150 N/mm²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/mm²以上の圧縮強度と上記 b, c 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。さらに、今後プレストレストコンクリート構造をはじめとする土木構造物へ適用可能な超高強度コンクリートの配合を例示し、その物性評価を試みた。

II. 自己収縮を低減しない基本配合の検討（シリーズ1）

1. 使用材料

超高強度コンクリートを構成する基本材料は、既往の研究や適用実績を考慮し、市場で入手可能な材料を選定した。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/cm³、比表面積 6060cm²/g、シリカフュー

1) 企画本部
2) 九州支店

ム混入率 10~15%), 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。

セメントおよび混和剤はそれぞれ 1 種類に限定した。骨材は、高強度コンクリートに適すると思われる 4 種類の国内産砕砂(記号 S)・碎石(記号 G)を比較した。Table 1 に骨材の種類と物性を示す。

Table 1 検討した骨材の種類と物性 (シリーズ 1)
(Characteristics of the Aggregate Tested in Series 1)

岩種	記号	摘要	物性
石英片岩	D	砕砂	表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 0.72%, 粗粒率 3.10
		碎石	最大寸法 20mm, 表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 0.57%, 実積率 63.1%
安山岩(1)	T	砕砂	表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.36%, 粗粒率 2.78
		碎石	最大寸法 20mm, 表乾密度 2.66 g/cm ³ , 吸水率 1.37%, 実積率 61.3%
安山岩(2)	H	砕砂	表乾密度 2.63 g/cm ³ , 吸水率 1.91%, 粗粒率 2.64
		碎石	最大寸法 20mm, 表乾密度 2.63 g/cm ³ , 吸水率 1.75%, 実積率 60.2%
硬質砂岩	O	砕砂	表乾密度 2.61 g/cm ³ , 吸水率 0.97%, 粗粒率 2.74
		碎石	最大寸法 20mm, 表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 0.51%, 実積率 60.2%

2. 検討の概要

圧縮強度 150N/mm² 以上のコンクリート配合を得るために、骨材種類をパラメータとした配合試験を行った。フレッシュコンクリートの性状としては自己充てん性を有することを前提とし、石英片岩骨材を使用した予備試験の結果から、単位水量 (W), 水セメント比 (W/C), 単位粗骨材絶対容積 (G_{vol}) および高性能減水剤添加率 (SP) を選定した。W/C については, 14, 17, 20%のうち, 圧縮強度が最大となった 17%を選定した。Table 2 に石英片岩骨材を使用した場合の配合を示す。以下, 細骨材および粗骨材の容積を固定し, 骨材種類のみ変化させた 4 種類の配合について, フレッシュ性状と圧縮強度の違いを調べた。

Table 2 検討配合 (シリーズ 1)

(Mixture Proportion of Concrete in Series 1)

配合 No.	W/C (%)	Air (%)	G _{vol} (l/m ³)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)
				W	C	S	G	
D-0	17	1.5	300	155	912	613	786	1.5

D-0: 石英片岩

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) を用いて練混ぜた。粗骨材以外の材料をミキサに投入後 120 秒練混ぜ, 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 秒練混ぜた。さらに粗骨材投入後 180 秒練混ぜ, 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, 圧縮強度試験用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。

4. 実験結果

Table 3 にフレッシュコンクリートの試験結果, Fig.1 に圧縮強度の試験結果を示す。空気量は, D-0 が 2.2%とやや高いものの, そのほかはおおむね 1.5%前後であった。高性能減水剤の添加率を一定としたため, スランプフローは 545~743mm の範囲で変動しているが, いずれも良好な自己充てん性を有していると判断された。圧縮強度は, いずれの骨材を使用した場合も材齢 91 日で 150N/mm² を超える結果が得られたが, 特に石英片岩骨材および安山岩(1)骨材を使用した場合に 190 N/mm² 程度の高い圧縮強度が得られることが分かった。したがって, 以下の本研究で用いる超高強度コンクリートの基本配合には, 石英片岩骨材または安山岩(1)骨材を使用することとした。

Table 3 フレッシュコンクリートの試験結果 (シリーズ 1)
(Properties of Fresh Concrete in Series 1)

配合 No.	温度 (°C)	空気量 (%)	スランプフロー (mm)	500mm フロー時間 (sec.)
D-0	23.8	2.2	545	13.7
T-0	21.9	1.7	663	10.3
H-0	22.4	1.3	743	10.8
O-0	21.8	1.4	615	14.3

D-0: 石英片岩, T-0: 安山岩(1), H-0: 安山岩(2), O-0: 硬質砂岩

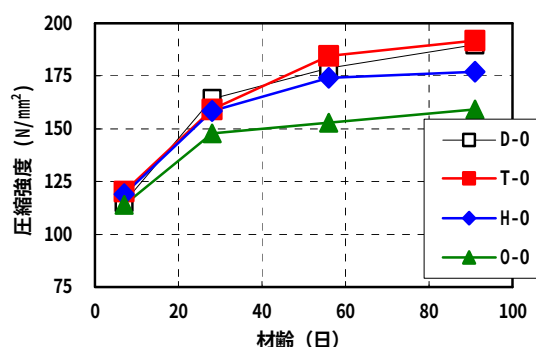


Fig.1 圧縮強度の試験結果 (シリーズ 1)
(Results of Compressive Strength in Series 1)

III. 自己収縮低減方法の検討 (シリーズ 2)

1. 検討した自己収縮低減方法

前章で得られた超高強度コンクリート基本配合は, 大きな自己収縮を示すことが予想される。そこで, 自己収縮を効率的に低減する方法を選定するため, メカニズムの異なる以下の 3 つの方法について, 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。

2. 実験の概要

セメントおよび混和剤はシリーズ1と同じもの、骨材には石英片岩砕砂および砕石を使用し、Table 2に示す配合を基本配合とした。また、膨張材には石灰-エトリンガイト系（記号 EX、密度 3.20g/cm³、比表面積 3500cm²/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、絶乾密度 1.53g/cm³、表乾密度 1.72 g/cm³、吸水率 12.2%、ただし表乾密度・吸水率は出荷時にプレソーキング処理したものを入荷後7日間以上水中保管した後の値）を表乾状態に調整して使用した。

Table 4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12の配合ケースについて、シリーズ1と同様の手順で練混ぜた後、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。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型ひずみ計によって行った。

3. 実験結果と考察

(1) スランプフローおよび凝結時間

Fig.2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分かる。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、良好な自己充填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。

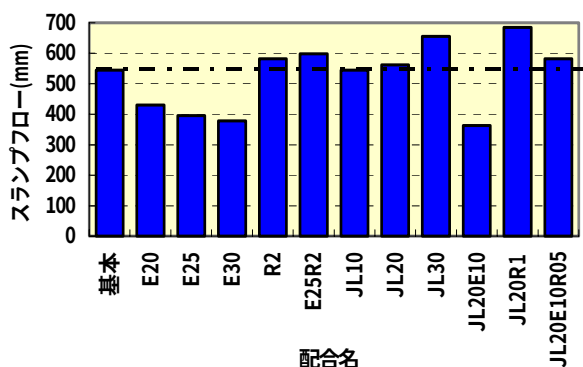


Fig.2 スランプフローの結果（シリーズ2）
(Results of Slump Flow in Series 2)

Table 4 実験の水準と配合条件（シリーズ2）

(Mix Condition of Concretes in Series 2)

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	-
JL10						-	-	10
JL20						-	-	20
JL30						-	-	30
JL20E10						10	-	20
JL20R1						-	1.0	20
JL20E10R05						10	0.5	20

(WはSP・RAの容積相当分水量を含む)

Fig.3に凝結始発時間の結果を示す。膨張材および人工軽量骨材を単独で使用した場合には、基本配合と比較して凝結始発時間に大きな差は見られない。しかし、これらを併用したケース（JL20E10）では凝結始発時間は早くなる結果が得られた。これには、スランプフローが小さかったことも影響しているものと思われる。また、収縮低減剤は明らかに凝結を遅延させる影響のあることが確認された。

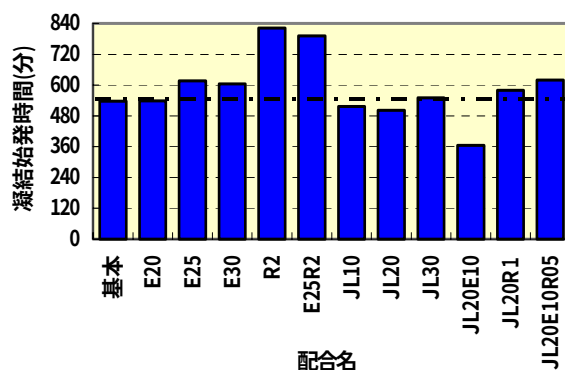


Fig.3 凝結始発時間の結果（シリーズ2）
(Results of Initial Setting Time in Series 2)

(2) 圧縮強度

Fig.4～6に圧縮強度の試験結果を示す。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/mm²以上の圧縮強度が確認された。

Fig.4は膨張材および収縮低減剤を単独使用もしくは併用した場合における強度発現履歴を比較したものである。膨張材のみを使用した場合（E20、E25、E30）は、材齢7日では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/mm²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/mm²であった。膨張材と収縮低減剤を併用した

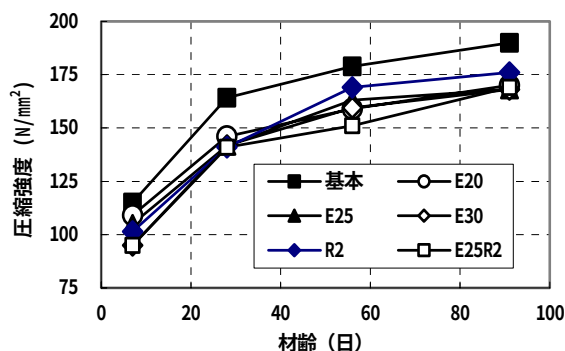


Fig.4 圧縮強度（膨張材・収縮低減剤使用）
(Results of Compressive Strength in Series 2: Applying Expansive Agent and / or Shrinkage Reducing Agent)

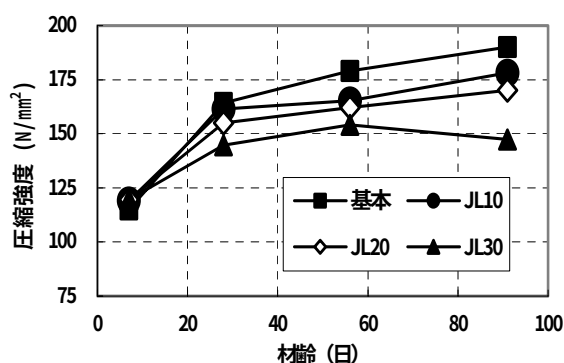


Fig.5 圧縮強度（人工軽量骨材使用）
(Results of Compressive Strength in Series 2: Applying Light Weight Aggregate)

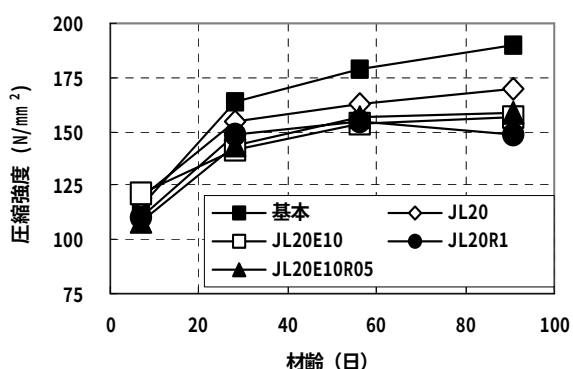


Fig.6 圧縮強度（人工軽量骨材併用）
(Results of Compressive Strength in Series 2: Combining Light Weight Aggregate and Chemical Agent)

E25R2 では、材齢 56 日の試験結果がやや小さいものの、それ以外の材齢ではほぼ E30 と同様の強度履歴となった。

Fig.5 は、人工軽量骨材の置換率別に圧縮強度の発現履歴を示している。全ての材齢において、置換率が大きいほど圧縮強度は小さくなった。特に置換率 30% (JL30) では材齢 28 日以降ほぼ頭打ちの状況が見られ、150N/mm² 前後で横ばいとなった。一方、置換率 20%までは材齢 91 日に至るまで圧縮強度の増進が認められ、置換率 20% (JL20) で 170N/mm² に達した。

Fig.6 は、人工軽量骨材の置換率を 20%で一定とし、膨張材と収縮低減剤のどちらかおよび両方を併用した場合について、圧縮強度

の発現履歴を示したものである。いずれの配合においても、JL20 より圧縮強度は低減される結果となったが、JL20E10, JL20R1, JL20E10R05 間の差異は小さく、3 ケースとも材齢 56 日以降ほぼ頭打ちの状況となった。これらでは、材齢 91 日で 149~155N/mm² 程度の圧縮強度が得られた。

Fig.7 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。人工軽量骨材を使用しないケースでは、収縮低減剤を添加率 2% で使用した場合の低下率が 7% と最も小さく、それ以外は 11~12% でほぼ一定であった。

一方、人工軽量骨材を使用した場合は置換率の増加に伴って強度低下率も大きくなり、置換率 30% で使用した場合の強度低下率は 22% を示した。ただし、置換率 20% 程度であれば、膨張材を使用したケースの強度低下率とあまり変わらない結果であった。また、人工軽量骨材と膨張材、収縮低減剤を併用した場合には、単独で使用するよりもさらに強度低下率は大きくなる傾向を示した。

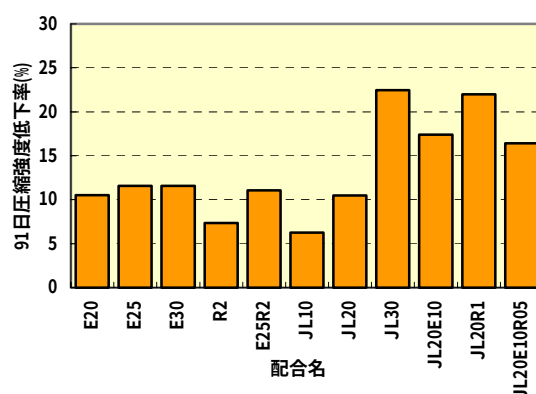


Fig.7 圧縮強度の低下率（材齢 91 日）
(Strength Reduction Rate at 91 days)

(3) 自己収縮

Fig.8~10 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 650×10^{-6} 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。Fig.11 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/m³ 使用すると材齢 91 日で 370×10^{-6} (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/m³ (E30) で 180×10^{-6} (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： 200×10^{-6} ）に膨張材をセメントの内割で 3%添加した場合、自己収縮は相殺され、材齢 91 日で 100×10^{-6} 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、水セメント比が異なるためか、自己収縮を解消するまでには至らなかった。

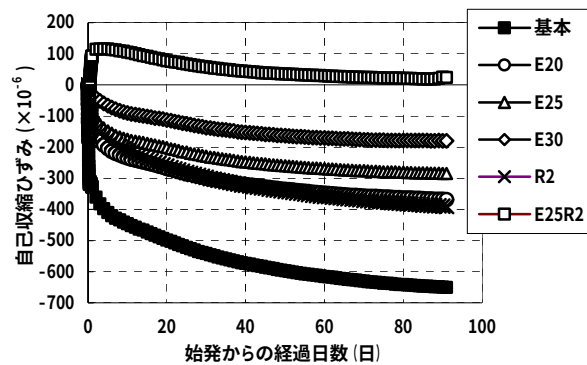


Fig.8 自己収縮（膨張材・収縮低減剤使用）
(Results of Autogenous Shrinkage in Series 2: Applying Expansive Agent and/or Shrinkage Reducing Agent)

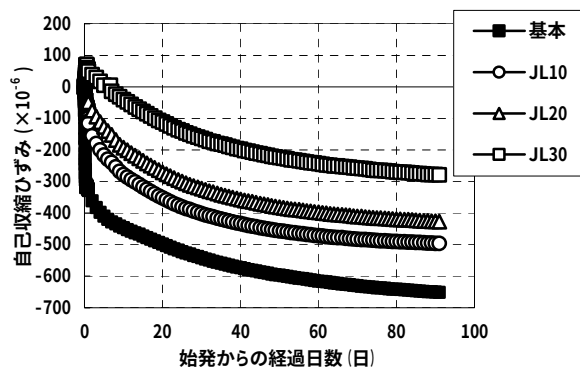


Fig.9 自己収縮（人工軽量骨材使用）
(Results of Autogenous Shrinkage in Series 2: Applying Light Weight Aggregate)

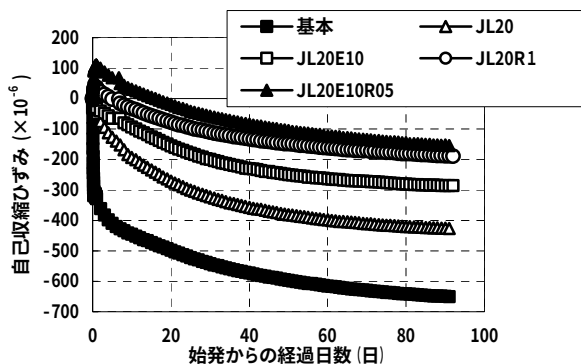


Fig.10 自己収縮（人工軽量骨材併用）
(Results of Autogenous Shrinkage in Series 2: Combining Light Weight Aggregate and Chemical Agent)

また、収縮低減剤は添加率 2% (R2) で膨張材 20kg/m³ 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 25kg/m³ 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足を足し合わせた以上の効果が確認され、材齢初期に 110×10⁻⁶ 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。

人工軽量骨材の置換率別では、材齢 91 日での低減率はそれぞれ 24% (JL10), 34% (JL20), 57% (JL30) となり、置換率が高いほど自己収縮の低減効果は大きいことが分かった。特に置換率が 30%

と高い場合には、既往の研究⁸⁾にも見られるように材齢初期に収縮ではなく膨張が確認された。強度低下はあるものの、目標強度の 150 N/mm² はおおむね確保されていることから、自己収縮低減率のみでその効果を評価すれば、人工軽量骨材置換率 30% (JL30) は膨張材 25 kg/m³ (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していると評価できる。

一方、人工軽量骨材の置換率を 20% 一定とし、膨張材および収縮低減剤を比較的少量併用した場合では、いずれも JL20 よりさらに高い収縮低減効果を示し、JL20R1 (収縮低減剤 1% 併用), JL20E10R05 (膨張材 10kg/m³ と収縮低減剤 0.5% を併用) では基本配合と比較して 70% 以上の高い収縮低減率が確認された。これは E30 とほぼ同程度の収縮低減効果である。

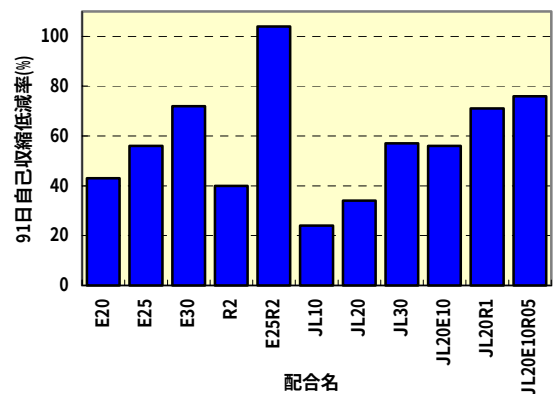


Fig.11 自己収縮の低減率（材齢 91 日）
(Shrinkage Reduction Rate at 91 days)

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。

- 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、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。
- 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。
- 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) 自己収縮低減効率の評価

本研究では 150 N/mm² 以上の圧縮強度を満足することを目標としているため、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、評価を試みた。

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

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各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。

Fig.12 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。

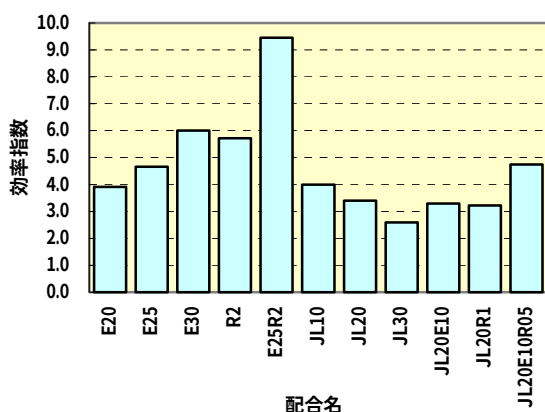


Fig.12 収縮低減効率の比較
(Comparison of Shrinkage Reduction Efficiency)

一方、人工軽量骨材を使用した場合、使用していない各ケースと比較して相対的に効率指数は小さく、置換率が高いほど低下する傾向が見られる。これは、強度低下が大きいことに起因している。しかし、少量の膨張材や収縮低減剤を併用することで、収縮低減効率をより高めることが可能であることも確認され、人工軽量骨材置換率 20% に膨張材と収縮低減剤を併用したケース (JL20E10R05) では、膨張材 25 kg/m³ (E25) と同等の効率指数となった。すなわち、150 N/mm² 以上の超高強度コンクリートに対しても、その使用量や他の混和材料との組合せ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。

IV. 自己収縮を低減した配合の各種物性 (シリーズ 3)

1. 使用材料およびコンクリートの配合

セメント、高性能減水剤、消泡剤、収縮低減剤については、シリーズ 2 と同じものを使用した。骨材はシリーズ 2 と異なり、安山岩 (1) 砕砂 (記号 S, 表乾密度 2.66 g/cm³, 吸水率 1.30%, 粗粒率 2.61) および碎石 (記号 G, 最大寸法 20mm, 表乾密度 2.66 g/cm³, 吸水率 1.25%, 実積率 63.1%) を使用した。人工軽量骨材には、製造ロットは異なるがシリーズ 2 と同じ種類のもの (記号 JL, 5~10mm, 絶乾密度 1.53g/cm³, 表乾密度 1.80 g/cm³, 吸水率 17.8%, ただし表乾密度・吸水率は、出荷時にプレソッキング処理したものを入荷後 7 日間以上水中保管した後の値) を使用した。

Table 5 には試験に供したコンクリートの配合を示す。配合 B は自己収縮を低減しない基本配合を、配合 JLR は人工軽量骨材 (置換率 20%) と収縮低減剤 (添加率 C×0.5%) を併用して自己収縮の低減を図った配合を示している。この 2 配合について、以下に示す試験を実施し、結果を比較した。

2. 試験項目

Table 5 試験配合 (シリーズ 3)

(Mixture Proportions of Concrete in Series 3)

配合	W/C (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)					添加率 (C×%)	
			W	C	S	G	JL	SP	RA
B	17	1.5	155	912	608	798	-	1.5	-
JLR						638	108		0.5

(1) 自己収縮

シリーズ 2 と同様の方法で自己収縮を測定し、収縮低減効果を確認した。

(2) 圧縮強度およびヤング係数

異なる三つの温湿度条件、20℃水中 (標準)、20℃封緘 (封緘)、20℃60% 気中 (気中) において養生した供試体を材齢 7, 28, 56, 91 日の 4 材齢で試験し、強度およびヤング係数の違いを比較した。

(3) クリープ

材齢 28 日まで 20℃水中養生した φ100×200mm 円柱供試体を、20℃60% の温湿度環境において、28 日圧縮強度の 3 分の 1 の応力度で継続載荷した場合のひずみの変化を測定し、クリープ特性を評価した。

(4) 凍結融解抵抗性

人工軽量骨材を使用した配合 JLR は、配合 B に比較して凍結融解抵抗性に劣る可能性が懸念されたため、JIS A 1148 の B 法 (気中凍結水中融解法) に準じた凍結融解試験を 300 サイクルまで実施し、相対動弾性係数によって凍結融解抵抗性を評価した。

3. 試験結果

(1) 自己収縮

Fig.13 に配合 B および JLR の自己収縮の測定結果を示す。人工軽量骨材と収縮低減剤を併用して自己収縮の低減を図ることにより、材齢 180 日の自己収縮ひずみは 200×10⁻⁶ 程度となり、基本配合の約 3 分の 1 に低減された。

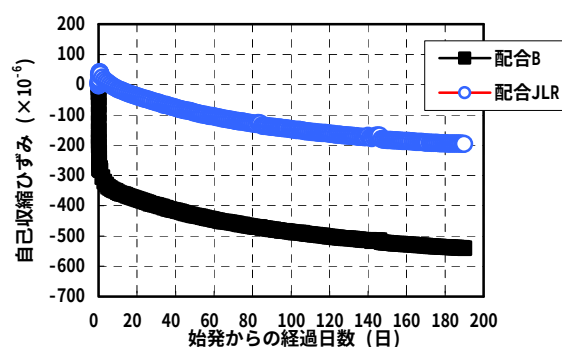
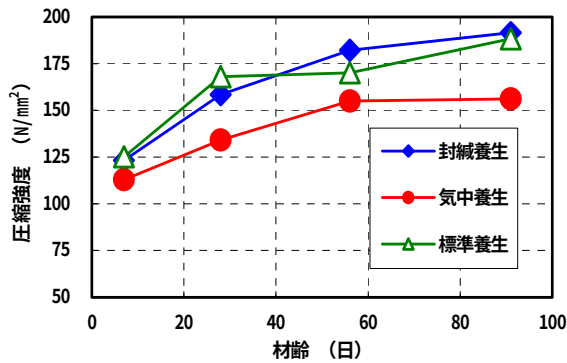


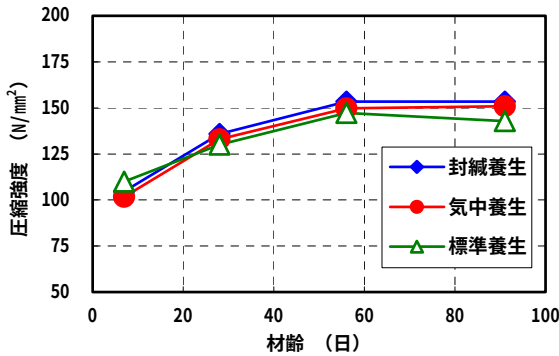
Fig.13 自己収縮 (シリーズ 3)
(Results of Autogenous Shrinkage in Series 3)

(2) 圧縮強度およびヤング係数

Fig.14(a) に基本配合 B, (b) に自己収縮低減配合 JLR の各養生条件下での圧縮強度の発現履歴を示す。配合 B では、標準養生と封緘養生にあまり大きな差は認められず、いずれも材齢 91 日で 190 N/mm² 程度の高い圧縮強度が得られたが、気中養生では強度低下し、155 N/mm² 程度となった。一方、配合 JLR は標準養生、封緘養生共に配合 B よりも低い強度となったが、目標とする 150 N/mm² はほぼ



(a) 配合 B



(b) 配合 JLR

Fig.14 異なる養生条件における圧縮強度 (シリーズ 3)
(Results of Compressive Strength under various curing conditions)

達成された。さらに気中養生でも標準養生や封緘養生と同じ強度発現となり、養生中の湿度条件の影響を受けにくい配合であることが確認された。これは、吸水した人工軽量骨材のもつセルフキュアリング効果が発揮されたことによる結果と推察され、十分な湿潤養生が行えない施工条件下でも、安定した強度発現が得られるコンクリートであることが示唆された。

Fig.15 は、配合 B および JLR の材齢 91 日におけるヤング係数の試験結果を養生条件ごとに示している。自己収縮低減の有無および養生条件の違いによるヤング係数の変化は小さく、全てのケースでほぼ 45 kN/mm² であった。

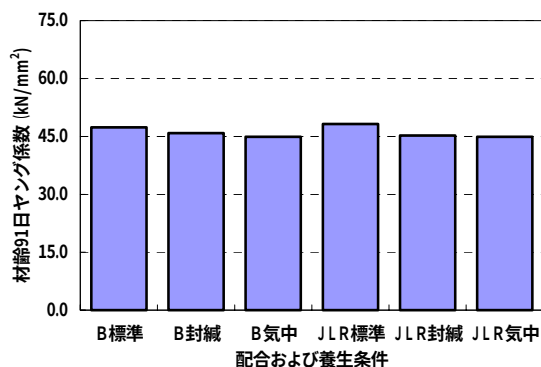


Fig.15 ヤング係数 (シリーズ 3)
(Results of Young's modulus in series 3)

(3) クリープ

Fig.16 に配合 B および JLR のクリープ特性を示す。単位応力当たりのクリープひずみ (全ひずみから荷重時弾性ひずみと自己収縮を含む乾燥収縮ひずみを差し引いたひずみ) で評価した。両配合ともほぼ同じクリープ特性を示しており、人工軽量骨材を用いた影響などは特に見られない。またこれらの結果は、土木学会標準式方書の予測式に圧縮強度 150 N/mm² を当てはめた推定値よりもやや小さく、普通コンクリート (圧縮強度 40 N/mm²) の推定値の 5 分の 1 程度の水準であった。

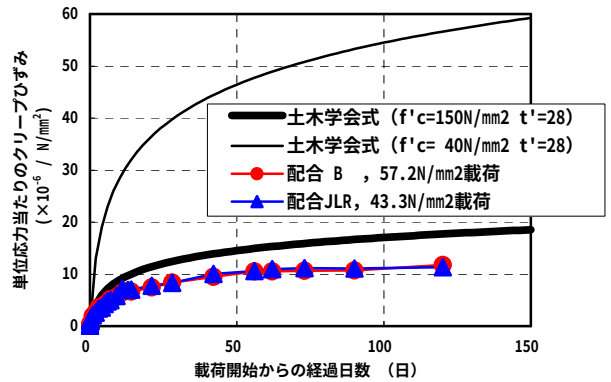


Fig.16 クリープ特性 (シリーズ 3)
(Creep Characteristics in Series 3)

(4) 凍結融解抵抗性

Fig.17 に配合 JLR の相対動弾性係数の履歴を示す。凍結融解 300 サイクルまで相対動弾性係数の低下はほとんど見られず、人工軽量骨材を使った場合でも、気中凍結水中融解の条件下において高い凍結融解抵抗性を有していることが確認された。

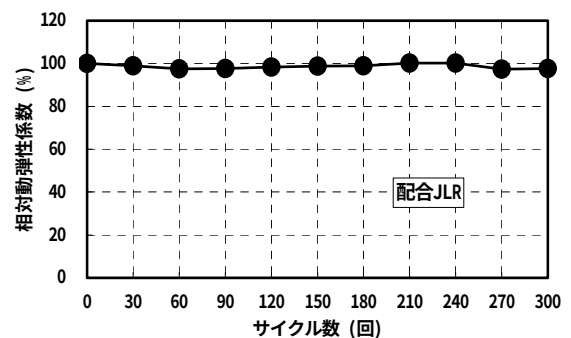


Fig.17 相対動弾性係数の履歴 (シリーズ 3)
(History of Relative Dynamic Modulus of Elasticity in Series 3)

V. おわりに

プレストレストコンクリート橋などの土木構造物への適用を目指し、自己収縮の少ない超高度コンクリートの開発を行ってきた。以下に、実験シリーズごとに得られた知見をまとめる。

(シリーズ 1)

- 低熱ポルトランドセメントベースのシリカフェウムプレミックスセメントと超高度用高性能減水剤を使用し、水セメント

比 17%で良好な施工性を示すコンクリートが製造可能である。
b. 産地の異なる数種類の砕砂・碎石を比較したところ、石英片岩若しくは安山岩(1)を用いることで、材齢 91 日の圧縮強度が 190 N/mm²程度を示す超高強度コンクリートの基本配合(水セメント比 17%, 単位水量 155 kg/m³, 単位粗骨材絶対容積 300 l/m³) が得られた。

(シリーズ 2)

- c. 基本配合では、材齢 91 日で 650×10^{-6} の自己収縮が確認された。
d. 膨張材 20~30kg/m³では、収縮低減効率は大きい、流動性が低下する。
e. 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。
f. 膨張材 25kg/m³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。
g. 本研究で使用した人工軽量骨材は自己収縮の低減に有効であるが、使用量の増加に応じて強度低下も大きくなる。粗骨材置換率 20%程度であれば、強度低下率は膨張材を使用したケースとあまり変わらない。
h. 人工軽量骨材と少量の膨張材, 収縮低減剤を併用することで、フレッシュコンクリートの流動性を損なわずに効率の高い自己収縮の低減を実現することが可能である。

(シリーズ 3)

- i. 置換率 20%の人工軽量骨材と、添加率 0.5%の収縮低減剤を併用することで、材齢 91 日圧縮強度が 150 N/mm²を満足し、材齢 180 日の自己収縮が基本配合の 3 分の 1 の 200×10^{-6} 程度に低減された超高強度コンクリートが実現できた。
j. 自己収縮を低減した配合は、吸水した人工軽量骨材のセルフキュアリング効果によって、養生中の湿度条件の影響をほとんど受けずに安定した強度発現を示すことが確認された。
k. ヤング係数は、自己収縮改善の有無および養生条件の違いにかかわらず、材齢 91 日で 45 kN/mm²程度であった。
l. 自己収縮改善の有無にかかわらず、単位応力当たりのクリープひずみはほぼ同様の履歴を示し、その水準は普通コンクリートの 5 分の 1 程度と小さかった。
m. 人工軽量骨材を使用した配合においても、300 サイクルまでの凍結融解試験で劣化はほとんど見られなかった。

以上の結果から、自己収縮を従来の高強度コンクリート程度以下

に抑制した圧縮強度 150 N/mm²級の超高強度コンクリートが実現可能であることが確認された。今後は、耐久性に関する各種物性を把握するとともに、コンクリートプラントにおける製造性や施工性などを確認し、新しい構造形式の開発と併せて、土木分野での実用化を目指していく。

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, vol.36, No.11, (2002), 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, (1998), pp.1021-1026.
- 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, (1993), pp.528-533.
- 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, (1997), pp.169-174.
- 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, (2001), pp.21-27.
- 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, (2000), pp.991-996.
- 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, (1998), pp.221-230.
- 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, (2000), pp.1273-1278.
- 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, (1998), pp.163-168.