

高性能軽量コンクリートのPC橋梁上部工への 適用に関する研究

笹 倉 伸 晃 佐 藤 文 則
舟 橋 政 司 秋 山 博^{*1}
濱 田 譲^{*2}

要 旨

軽量で高強度のコンクリートを製造できるという特長を活かし、高性能軽量コンクリートを橋梁上部工などのプレストレストコンクリート部材へ適用することは有効であると考えられる。このとき、高性能軽量コンクリートのクリープや収縮などが有効プレストレス量に影響を及ぼすため、構造物を設計する上でクリープ特性などを把握しておくことが重要となる。そこで、高性能軽量コンクリートのクリープ試験を行い、P C 橋梁上部工への適用性を検討した。

また、高性能軽量骨材などの特殊材料を用いて市中生コンプラントでコンクリートを製造する場合、骨材ピンの確保の必要性などから、プラントによっては対応できない場合や製造コストが大幅増となる場合がある。そこで、特殊材料を使用する場合のコンクリートの現地製造システムを考案し、コンクリートの練混ぜ試験を行って通常のバッチャープラントで製造したコンクリートと比較したところ、同等の品質を有しているとの結果が得られた。

キーワード 高性能軽量骨材 / クリープ / 収縮 / 特殊コンクリート / 現地製造

目 次

- | | |
|------------------------|--------------------|
| 1 . はじめに | 3 . 現地製造システムに関する試験 |
| 2 . 高性能軽量コンクリートのクリープ試験 | 4 . まとめ |

A STUDY ON APPLYING SUPER LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE TO THE SUPERSTRUCTURE OF PRESTRESSED CONCRETE BRIDGE

Nobuaki SASAKURA Fuminori SATO
Masashi FUNAHASHI Hiroshi AKIYAMA
Yuzuru HAMADA

Synopsis:

Taking advantage of the feature that lightweight and high strength concrete can be manufactured, it is effective to apply super lightweight aggregate (SLA) concrete to prestressed concrete members, such as the superstructure of bridge. In this case, it is important to investigate the creep characteristic etc. for designing a structure. Then, the creep test of SLA concrete was carried out, and the applicability to the superstructure of PC bridges was discussed.

Moreover, when manufacturing concrete in the usual batching plant using special material, such as super lightweight aggregate, it may be faced to some problems which are storage of aggregate and cost rise of concrete. Then, the quality of concrete manufactured by the in-situ manufacturing system of concrete, which was proposed to prevent above-mentioned problems, was compared with that of concrete manufactured in the usual batching plant. It was concluded that the qualities of both concrete were equivalent.

* 1 株式会社銭高組 * 2 ドービー建設工業(株)

1. はじめに

近年，従来の軽量骨材に比べて，高強度で独立空隙型低吸水性の高性能軽量骨材が開発され，凍結融解抵抗性に優れた高性能軽量コンクリートの製造が可能となってきた¹⁾．このような高性能軽量コンクリートの長所を活かし，土木構造物への適用が期待されている．特にプレストレストコンクリート橋梁上部工への適用は，自重軽減によるコスト的メリットが得られるため有望な対象と考えられる．橋梁上部工のプレストレストコンクリート部材に適用する場合，コンクリートのクリープおよび収縮は，非常に重要な基本物性の一つであり，コンクリート構造物が長大化，高強度化，高性能化する傾向にある昨今，設計におけるクリープおよび収縮特性を正しく把握する必要性はきわめて高いと考えられる．一般に，普通コンクリートと比較し，軽量コンクリートは，クリープや収縮の影響が大きく表れるため，正確なクリープ挙動を把握する必要があるが，軽量骨材コンクリートのクリープ特性は，使用骨材の種類や配合条件等の要因により，かなり相違することが知られており，吸水率の少ない高性能軽量骨材を用いた高性能軽量コンクリートのクリープ試験の結果報告は十分でない．

また，高性能軽量骨材など，市中生コンクリートプラントが常備していない材料を使用する場合，製造において骨材ピンへの入れ替え作業を行う必要が生じるため，一般に対応が困難である場合が少なくない．このような場合，高性能軽量骨材をプラント外で加えることができれば，高性能軽量コンクリートの製造が容易となる．

そこで本研究では，高性能軽量コンクリートの材料特性値を明らかにすることを目的として，中国の黄河堆積粘土から製造された高性能軽量骨材(ネオライト Ch)を使用した高性能軽量コンクリートのクリープ試験を実施し，普通コンクリートの物性値と比較した．また，高性能軽量コンクリートの現地製造システムの確立を目的として，システムの基本構成を考案し，考案したシステムにより練り混ぜられた軽量コンクリートの品質に関して検討した．

2. 高性能軽量コンクリートのクリープ試験

2.1 使用材料および配合

高性能軽量コンクリートのクリープ試験において使用した材料および配合を表-2.1 および表-2.2 に示す．高性能軽量コンクリートは粗骨材のみに高性能軽量骨材を用いるものとし，中国黄河堆積粘土を主原料とする高性能軽量骨材(ネオライト Ch)を使用した．ネオライト Ch の基本的性質および外観を表-2.3 および写真-2.1 に示す．

高性能軽量コンクリートの配合は，プレストレストコンクリート上部工への適用を念頭において，セメントに

表-2.1 コンクリートの使用材料

項目	仕様
セメント	早強ポルトランドセメント 密度 3.14g/cm ³
細骨材 1	茨城県波崎産陸砂(細目)
細骨材 2	栃木県葛生産砕砂(粗目)
粗骨材	高性能軽量骨材ネオライト ch 24h 吸水率 1.13%
混和剤	高性能 AE 減水剤

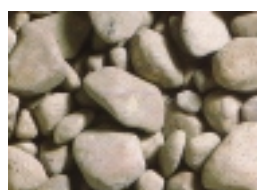
表-2.2 高性能軽量コンクリートの配合

単位量 (kg/m ³)					
W	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤
C	C	S1	S2	G	Sp
165	440	567	254	416	3.52

表-2.3 高性能軽量骨材の基本的性質

物性項目			JIS 規格	試験結果
化学成分	強熱減量	%	1%以下	0.04
	酸化カルシウム (CaO)	%	-	-
	三酸化硫黄 (SO ₃)	%	0.5 以下	0.00
	塩化物量 (NaCl)	%	0.04 以下	0.005
	有機不純物	%	標準色より淡い	標準色より淡い
粘土塊量			1.0 以下	0.02
粒度・粗粒率			FM	6.36
絶乾密度			2.5 以上	1.15
粗骨材の実績率			-	60.5

試験方法はすべて JIS に定める方法によった．



(a) 外観



(b) 骨材粒

写真-2.1 高性能軽量骨材(ネオライト ch)

は早強ポルトランドセメントを用いた．また，呼び強度は，40N/mm²，スランブ 15cm，空気量 4.5%，粗骨材の最大寸法を 15mm と設定した．配合上の単位容積質量は，1846kg/m³である．

2.2 試験方法

クリープ試験方法は，JIS 原案に基づいてクリープ試験を実施した．試験条件を表-2.4 に示す．

クリープ試験は，写真-2.2(a)に示すように 2 本の供試体を重ねてクリープ試験機に設置し，載荷を行った．載荷開始材齢は，早強セメントを用いたことを考慮し，7 日および 28 日の 2 ケースとした．載荷荷重は，同一の養生を行った試験体の圧縮強度の 1/3 となるように調整し，載荷持続期間は 1 年間とした．また，除荷後の挙動を調べるために載荷荷重の除荷後に回復ひずみの測定を行った．載荷応力除荷後については，載荷開始材齢 7 日のものに関しては 42 日間，載荷開始材齢 28 日のものに関しては 21 日間除荷後のひずみを測定した．

表-2.4 試験条件

項 目	試 験 条 件
供試体形状	円形 (φ 150 × 300)
供試体本数	クリープ試験用 2 体 × 2 種類 乾燥収縮用 2 体 圧縮強度試験用 6 体 静弾性試験は圧縮強度試験時に同時に測定するものとする。
養生方法	打設後 24 時間型枠内蔵置， 材齢 7 日まで水中養生 温度 20 ± 1 ・ R.H.65 ± 5% の気中
載荷装置	載荷荷重の保持精度は 3% 以内
載荷応力	圧縮強度の 1/3 程度
載荷開始材齢	7 日，28 日
ひずみの計測長さ	250mm
ひずみ計測位置	供試体外側面の相対する 2 点
ひずみ測定精度	20 × 10 ⁻⁶ 以上
載荷期間	1 年間 (03 年 2 月 ~ 04 年 3 月)
計測器の種類	圧力式載荷法試験機



(a) 試験状況

(b) 供試体概観

写真 2-2 クリープ試験状況

2.3 試験結果

(1) 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度および静弾性試験結果を表-2.5 ~ 表-2.8 に示す。静弾性係数を土木学会コンクリート標準示方書²⁾の普通コンクリートの値と比較すると、材齢 7 日でのヤング係数は普通コンクリートの 69.6%，材齢 28 日でのヤング係数は普通コンクリートの 71.9% と、ほぼ 70% の値を示している。これは、コンクリート標準示方書に示されている軽量骨材コンクリートの静弾性係数の値が普通コンクリートの約 60% であるのに比べてやや高いものとなっている。また、除荷後の圧縮強度および静弾性係数も試験により確認した。圧縮強度に関しては、表-2.5 ~ 表-2.8 に示すように、1 年間の載荷後除荷した供試体は、載荷開始材齢 7 日、28 日の供試体ともに 61.9N/mm² と強度の増進が確認され、強度保証材齢である材齢 7 日の値と比較すると 1.25 倍の強度増進が見られた。一方、静弾性係数は除荷後の静弾性係数は圧縮強度が増進しているのに対して、載荷開始材齢 7 日、28 日の供試体ともに材齢 7 日の値の 88% 程度に低下している結果が得られたが、この原因は不明である。

(2) クリープ

クリープひずみの算出は、全ひずみより、弾性ひずみおよび乾燥収縮ひずみを差し引いて求めた。図-2.1 および図-2.2 に載荷開始材齢 7 日および 28 日のひずみ経時変化および載荷時間 365 日時点での試験結果を示す。

表-2.5 静弾性試験結果 (載荷開始材齢 7 日)

試験体 No.	最大 応力	縦ひずみ 50 × 10 ⁻⁶ 時 応力	1/3 応力時 縦ひずみ	静弾性 係数
	N/mm ²	N/mm ²	× 10 ⁻⁶	N/mm ²
No.1	50.2	1.2	716	2.34 × 10 ⁴
No.2	48.5	1.3	670	2.39 × 10 ⁴
No.3	49.5	1.6	752	2.13 × 10 ⁴
平均	49.4	1.37	712.7	2.29 × 10 ⁴

表-2.6 静弾性試験結果 (載荷開始材齢 28 日)

試験体 No.	最大 応力	縦ひずみ 50 × 10 ⁻⁶ 時 応力	1/3 応力時 縦ひずみ	静弾性 係数
	N/mm ²	N/mm ²	× 10 ⁻⁶	N/mm ²
No.1	57.6	1.2	788	2.45 × 10 ⁴
No.2	58.3	1.3	752	2.54 × 10 ⁴
No.3	58.9	1.6	787	2.49 × 10 ⁴
平均	58.3	1.37	775.7	2.49 × 10 ⁴

表-2.7 静弾性試験結果 (載荷開始材齢 7 日: 除荷後)

試験体 No.	最大 応力	縦ひずみ 50 × 10 ⁻⁶ 時 応力	1/3 応力時 縦ひずみ	静弾性 係数
	N/mm ²	N/mm ²	× 10 ⁻⁶	N/mm ²
No.1	61.9	1.1	1029	2.00 × 10 ⁴
No.2	61.8	1.1	1000	2.06 × 10 ⁴
平均	61.9	1.1	1014.5	2.03 × 10 ⁴

表-2.8 静弾性試験結果 (載荷開始材齢 28 日: 除荷後)

試験体 No.	最大 応力	縦ひずみ 50 × 10 ⁻⁶ 時 応力	1/3 応力時 縦ひずみ	静弾性 係数
	N/mm ²	N/mm ²	× 10 ⁻⁶	N/mm ²
No.1	62.5	1.0	1024	2.04 × 10 ⁴
No.2	61.3	1.0	1030	1.98 × 10 ⁴
平均	61.9	1.0	1027	2.01 × 10 ³

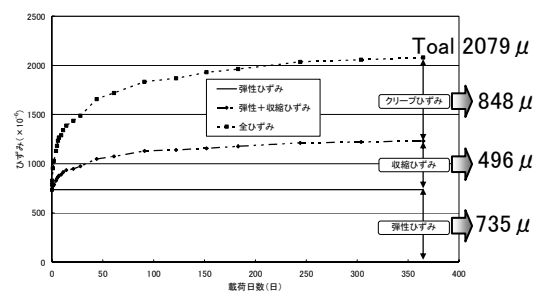


図-2.1 ひずみの経時変化 (載荷開始材齢 7 日)

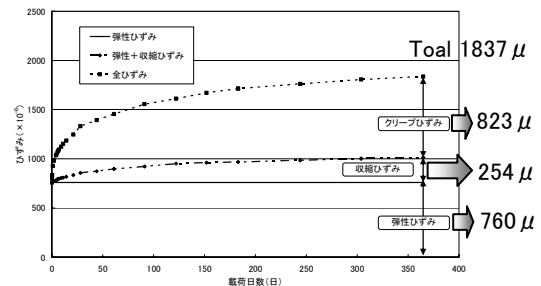


図-2.2 ひずみの経時変化 (載荷開始材齢 28 日)

2.4 試験結果の考察

(1) クリープ予測式との比較

本実験では、クリープ試験結果を、セメント種類による影響を考慮できる CEB-FIP モデルコード 1990 の予測式（以下、MC90 予測式）³⁾と比較した。クリープ試験結果より、一年の載荷期間に進行したクリープひずみをクリープ係数として表現し、MC90 予測式により得られたクリープ係数とを比較すると表-2.10 のようになる。

既往の報告より、軽量コンクリートのクリープ係数は普通コンクリートのクリープ係数の 60～85%の範囲にあることが認められており、高性能軽量コンクリートに関しても、その範囲内にあることが確認できた。したがって、土木学会コンクリート標準示方書における軽量骨材コンクリートのクリープ係数は普通コンクリートの 75%と仮定してよいとの記述に対しては、今回の実験結果はプレストレストコンクリートにおけるプレストレスの減少に対して安全側の値を与えることとなる。また、今回検討した高性能軽量骨材コンクリートは弾性係数も軽量骨材としては高く、かつクリープも少ないことから、プレストレストコンクリートに適している材料であると考えられる。

表-2.10 実験結果と MC90 予測式によるクリープ係数の比較

載荷開始材齢	実験結果	MC90 予測式	実験 / MC90
7 日	1.154	1.813	63.7%
28 日	1.083	1.555	69.6%

(2) 乾燥収縮予測式との比較

クリープ試験と同時に実施した乾燥収縮試験における測定ひずみは、乾燥収縮ひずみおよび自己収縮ひずみを含んだものとなっている。したがって、乾燥収縮ひずみを既往の予測式と比較するには乾燥収縮と自己収縮を明確に定義しているデザインコードと比較する必要があるため、本実験では、Eurocode2⁴⁾を比較対象として比較をおこなった。表-2.11 乾燥収縮試験結果と予測式の比較を示す。ひずみの合計値は予測式と実験結果とで良く整合しており、高性能軽量コンクリートの乾燥収縮ひずみは、Eurocode2 によって概ね予測できると考えられる。

表-2.11 乾燥収縮試験結果と Eurocode2 との比較

載荷開始材齢	実験結果	予測式		
		乾燥収縮	自己収縮	合計
7 日	496×10^{-6}	375×10^{-6}	118×10^{-6}	493×10^{-6}
28 日	493×10^{-6}	378×10^{-6}	119×10^{-6}	497×10^{-6}

(3) 除荷後の特性

今回検討した高性能軽量コンクリートの除荷後の変形特性を調べるため、365 日の載荷期間を経た後、除荷してその後の特性挙動を計測した。

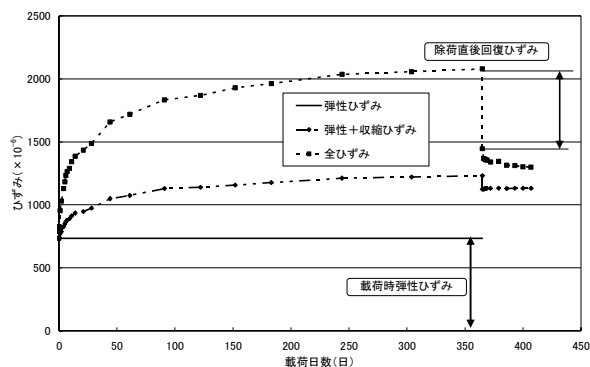


図-2.3 除荷前後のひずみの経時変化図（載荷開始材齢 7 日）

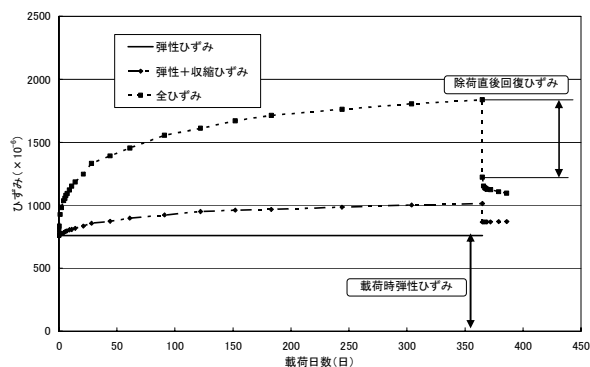


図-2.4 除荷前後のひずみの経時変化図（載荷開始材齢 28 日）

なお、回復クリープひずみの算出については、除荷直後の回復ひずみの値を用いた。載荷開始材齢 7 日および 28 日の供試体における載荷前後のひずみの経時変化を図-2.3 および図-2.4 に示す。

(a) 除荷直後の回復ひずみ

除荷直後の回復ひずみは載荷開始材齢 7 日の供試体で 634×10^{-6} (載荷直後ひずみ 735×10^{-6})、載荷開始材齢 28 日の供試体で 613×10^{-6} (載荷直後ひずみ 760×10^{-6}) となり、それぞれ除荷直後では載荷時の弾性ひずみに対して 86%、81%の回復ひずみとなっている。これは厳密には、時間依存性ひずみだけでなく瞬間ひずみに対しても完全弾性体としては挙動を表現できないためと考えられる。

(b) 遅れ弾性ひずみ

遅れ弾性ひずみは載荷開始材齢 7 日の供試体について除荷後 42 日までの観測を、載荷開始材齢 28 日の供試体について除荷後 21 日までの観測をおこなった。

実験結果と既往の研究の比較を表-2.12 に示す。実験結果と CEB-FIP Model Code 1978 に関する資料として文献⁵⁾に示されている遅れ弾性変形の進行度は、ほぼ一致する結果が得られた。

表-2.12 遅れ弾性ひずみの文献⁵⁾との比較

載荷開始材齢	除荷後測定期間	実験結果	文献	実験 / 文献
7 日	42 日	153×10^{-6}	165×10^{-6}	92.7%
28 日	21 日	131×10^{-6}	141×10^{-6}	92.9%

3. 現地製造システムに関する試験

3.1 現地製造システムの概要

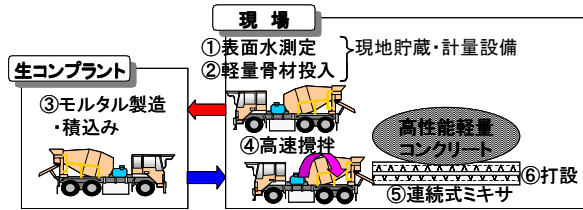


図-3.1 現地製造システムの概要

高性能軽量コンクリートを現地（現場）において製造するシステム（以下、現地製造システム）の概要を図-3.1に示す。現地製造システムは以下の～の手順でコンクリートを製造するものがある。



写真-3.1 連続式ミキサ

現場貯蔵・計量設備において粗骨材の表面水を測定。アジテータ車内に所定量の粗骨材を積み込む。市中生コンクリートプラントにおいて表面水を調整した所定の品質のモルタルをアジテータ車へ積み込む。アジテータ車により高速攪拌し粗骨材を分散させる。打設直前に連続式ミキサ(写真-3.1 参照)により練り混ぜる。

3.2 実験方法

本実験では、現地製造システムの妥当性を確認するため本システムによる軽量コンクリートとの品質確認試験を実施した。

本実験で使用した軽量コンクリートの使用材料および配合を表-3.1および表-3.2に示す。実験では、特殊材料の代替品として、生コンクリートプラントが常備している軽量骨材（メサライト）を使用した。コンクリートの配合は、PC 上部工を対象とした配合(以後、PC 用)と一般構造物を対象とした中流動コンクリート用配合(以後、中流動用)の2種類とした。品質比較試験では、図-3.2に示すように、既存の市中生コンクリートプラントの骨材貯蔵・計量装置を用いて現地製造システムを模擬した試験を実施した。試験水準および試験項目を表-3.3に示す。実験では、コンクリートの練混ぜ量を 2m^3 とした。アジテータ車ドラム内の品質変動を把握するため、通常方法は、アジテータ車の前部、中部、後部に相当するコンクリート試料を採取し、スランプフロー、空気量、単位容積質量を測定した。また同時に前部、中部、後部に相当する圧縮強度用供試体($\phi 100 \times 200\text{mm}$)を採取した。一方、現地製造システムは、軽量粗骨材およびモルタルをアジテータ車内で、5分間高速攪拌した後、連続式ミキサに投入し、排出されるコンクリートの前部、中部、後部に相当するコンクリート試料を採取し、同様の試験を実施した。検討項目は、圧縮強度と単位容積質量に対するコンクリートの均一性とした。

品質比較試験概要

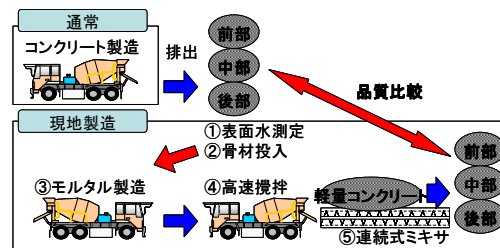


図-3.2 品質確認試験概要

表-3.1 コンクリートの使用材料

使用材料	記号	適 用
セメント	NP	普通ポルトランドセメント 密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積： $3300\text{cm}^2/\text{g}$
	HP	早強ポルトランドセメント 密度： $3.14\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積： $4510\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材 S1:S2=5:5	S1	熊谷市大麻生砂 表乾密度： $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率：1.88%、粗粒率：2.92
	S2	秩父郡皆野町砕砂 表乾密度： $2.63\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率：1.23%、粗粒率：2.78
粗骨材	GL	人工軽量骨材 表乾密度： $1.67\text{g}/\text{cm}^3$ 、24hr吸水率：7.2%、最大寸法：15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
	AE	空気量調整剤 ポリアルキレングリコール誘導体

表-3.2 コンクリートの配合

種類	粗骨材 最大寸法 Gmax (mm)	粗骨材 絶対容積 Vg (m^3/m^3)	スランプ フロー SF (mm)	空気量 air (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					
							水 W	セメント C	普通 細骨材 S	軽量 粗骨材 GL	SP C×%	AE C×%
中流動用	15	336	450	5.5	45	49.4	165	367 ¹	857	561	0.9	0.004
PC用	15	300	550	5.5	30	49.1	170	567 ²	770	501	1.3	0.006

1) 普通ポルトランドセメント、2) 早強ポルトランドセメント

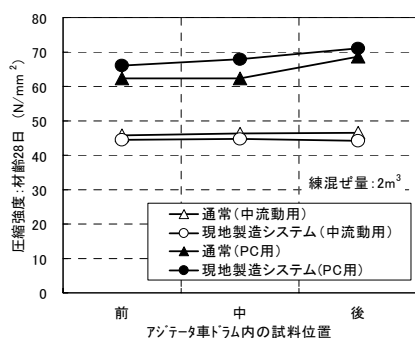


図-3.3 圧縮強度の比較

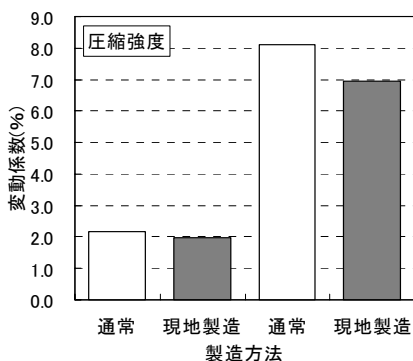


図-3.4 圧縮強度の変動係数の比較

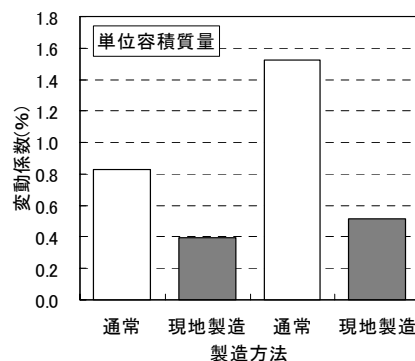


図-3.5 単位容積質量の比較

表-3.3 試験水準および試験項目

CASE	配合	製造方法	アジテータ車高速攪拌時間(秒)	試験項目
1	中流動用	通常	30	スランブフロー 空気量 単位容積質量 圧縮強度
2		現地製造	300	
3	PC用	通常	30	
4		現地製造	300	

4.3 実験結果および考察

図-3.3 にドラム内の試料位置に対する材齢 28 日の圧縮強度の平均値を示す。PC 用配合において、アジテータ車内でのばらつきが若干あるものの、ドラム内の試料位置の違いによる圧縮強度の差はほとんど認められない。

中流動用コンクリートおよび PC 用コンクリートのバッチ内変動を把握するため、通常方法と現地製造システムの圧縮強度と単位容積質量の平均値、標準偏差、変動係数を算出した結果を表-3.4 および図-3.5、図-3.6 に示す。いずれのコンクリートの場合においても、通常方法に比べて現地製造システムの方が、圧縮強度および単位容積質量の変動係数が小さくなっており、アジテータ車により、粗骨材を分散させた効果により、現地製造システムにより製造されたコンクリートの均一性が向上していることが確認できる。また、圧縮強度および単位容積質量の平均値も通常方法と現地製造方法は同等であり、現地製造システムにより製造された軽量コンクリートの品質は、通常のバッチャープラントにより製造されたものと同等であると考えられ、本システムの適用性を確認することができた。

表-3.4 圧縮強度および単位容積質量の統計量

項目	配合方法	n	中流動用		PC用	
			通常	現地製造	通常	現地製造
圧縮強度	平均値(N/mm ²)	n=9	46.3	44.5	64.5	68.3
	標準偏差(N/mm ²)	n=9	1.0	0.9	5.2	4.7
	変動係数(%)	n=9	2.2	2.0	8.1	6.9
単位容積質量	平均値(g/cm ³)	n=27	2.05	2.00	2.04	2.06
	標準偏差(g/cm ³)	n=27	0.02	0.01	0.03	0.01
	変動係数(%)	n=27	0.8	0.4	1.5	0.5

4. まとめ

今回の試験結果より得られた知見を以下に示す。

- (1) 今回用いた高性能軽量骨材(ネオライト Ch)は、弾性係数が比較的高く、クリープ係数も小さいことが

らプレストレストコンクリートに適した材料であることが確認できた。

- (2) クリープ係数を、コンクリート標準示方書に示されている普通コンクリートの 75%とすれば、プレストレストの減少量の推定に対して安全側の値であることが確認できた。
- (3) 乾燥収縮試験において測定された収縮ひずみの合計値は、Eurocode2 に基づく計算値と良く整合する結果が得られた。また、遅れ弾性の進行度に関しても、文献³⁾の CEB-FIP Model Code 1978 の資料に示されているものと良く整合する結果を得た。
- (4) 以上の結果より、従来通りの設計により、高性能軽量コンクリートをプレストレストコンクリート橋梁上部工へ適用可能であると考えられる。
- (5) 現地製造システムにより製造された軽量コンクリートの品質は、通常のバッチャープラントにより製造されたものと同等である。また、高性能軽量コンクリートのようなプラントが常備していない特殊骨材を用いるコンクリートを現地製造することが可能であると考えられる。

謝辞

本研究は、共同研究として実施したものであり、実験および論文作成にあたりご協力頂いた株式会社銭高組、ドービー建設工業株式会社に対し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡本享久, 石川雄康, 棚木隆, 笹島昌夫: 高性能軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol. 37, No4, pp12-18, 1999.4
- 2) (社)土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造的照査編], pp.28-37, 2002
- 3) CEB-FIP: CEB-FIP MODEL CODE 1990, pp.51-58, 1990
- 4) European Standard EN 1992, Eurocode2: Design of Concrete Structures (Final Draft), 2001.10.
- 5) H.リッシュ, D.ユングビルト(百島祐信(訳)): コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, pp.113-117, 1976.11, 鹿島出版会