

## 論文 高膨張コンクリートの配合設計・基礎物性について

佐竹 紳也\*1・佐久間 隆司\*1・細見 雅生\*2・中本 啓介\*3

**要旨**：鋼コンクリート合成構造である鋼橋の少数主桁連続合成桁は中間支点上のコンクリート床版に負曲げモーメントにより引張応力が生じる。本報告では、少数連続桁中間支点上への適用性確認のために実験桁で用いた高膨張コンクリートについて、配合試験と基礎物性確認として実施したクリープ試験結果について示す。この結果、一軸拘束膨張試験により単位膨張材量を検討してコンクリート配合を決定することができた。さらに高膨張コンクリートのクリープは普通コンクリートと比較して大きく、変形性能に優れることが確認された。

**キーワード**：連続合成桁，膨張コンクリート，ケミカルプレストレス，クリープ

### 1. はじめに

近年、鋼コンクリート合成構造である鋼橋における少数主桁連続合成桁が注目されている。その理由としては、少数桁が経済的であることや連続合成桁が耐震性、走行性、振動が少ない、維持管理の容易性等が挙げられる。この連続合成桁の床版コンクリートにプレストレスを合理的に導入方法として、膨張コンクリートを用いることが考えられる。従来、拘束が不十分であると膨張が過大になり強度低下が生じる場合があるため、膨張が大きいコンクリートは型枠で拘束し、蒸気養生を実施するコンクリート製品に多く使用されている。このため、現場打設床版コンクリートで一軸拘束膨張率が  $250 \times 10^{-6}$  を超える高い膨張性能を有するコンクリートの研究はあまり多くない。

筆者らは少数主桁連続合成桁に用いられるコンクリート床版の拘束鉄筋比が 1.4~2.0%と大きいことに着目した。すなわち、現場打設コンクリートに高い膨張性能を有するコンクリートを使用して、ケミカルプレストレスを導入し設計上の数値として評価することの検討<sup>1), 2)</sup>を行っている。ここでは、コンクリートに引張応力が生じる中間支点コンクリート床版にケミ

カルプレストレスを導入するために必要な高膨張コンクリートの配合設計、クリープを中心とする基礎的な物性試験結果について報告するものである。

### 2. 高膨張コンクリートの配合設計

高膨張コンクリートを配合設計する場合、拘束鉄筋比 0.95%の一軸拘束膨張試験における膨張率を設定する。これをもとに部材のケミカルプレストレスを計算して膨張率の設定値を調整する。ケミカルプレストレスは 0.67%~4.22%の拘束鉄筋比であれば、式(1)により膨張コンクリートがなす仕事量  $U$  は一定<sup>3)</sup>であることが知られている。

$$U = 1/2 \cdot \sigma_{cp} \varepsilon = 1/2 \cdot PE_s \varepsilon^2 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cp} = \sqrt{2U/E_s P} \quad (2)$$

$$\sigma_{cp} = PE_s \varepsilon_{cp} \quad (3)$$

ここに  $\sigma_{cp}$ ：ケミカルプレストレス量， $\varepsilon$ ：鉄筋の膨張ひずみ， $P$ ：拘束鉄筋比， $E_s$ ：鉄筋の静弾性係数， $\varepsilon_{cp}$ ：ケミカルプレストレイン

従って一軸拘束膨張試験（拘束鉄筋比 0.95%）により得られる拘束膨張率から式(1)により仕事量  $U$  を求める。次に部材における拘束鉄筋比の鉄筋のひずみを求めて、式(3)によりケミカル

\*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 (正会員)

\*2 駒井鉄工(株) 技術研究室室長 工博

\*3 駒井鉄工(株) 技術研究室 工修

プレストレスを求めるという手法により，部材のケミカルプレストレスを推定する。

図-1に高膨張コンクリートの配合設計フローを示す。ここでは現場打設される膨張コンクリートの強度・膨張性能の安定性を考慮し，既往の研究成果<sup>1),2)</sup>より一軸拘束膨張率で $600 \times 10^{-6}$ になるケミカルプレストレス量を設定した。次に生コンクリート工場における設計基準強度を $40\text{N/mm}^2$ とし配合を選定する。なお，移動式型枠による施工は，早期にプレストレス導入のために早強セメントを使用するが，この場合，膨張率が普通セメントと比較するとやや大きめ<sup>4)</sup>になる傾向にある。次に目標の一軸拘束膨張率を求めるために単位膨張材量を $40,50,60\text{kg/m}^3$ とした試験配合を決定する。圧縮強度の低下がなくケミカルプレストレスの計算上で静弾性係数も問題がないことを確認し，単位膨張材量と一軸拘束膨張率の関係より高膨張コンクリートの単位膨張材量を回帰線より決定する。

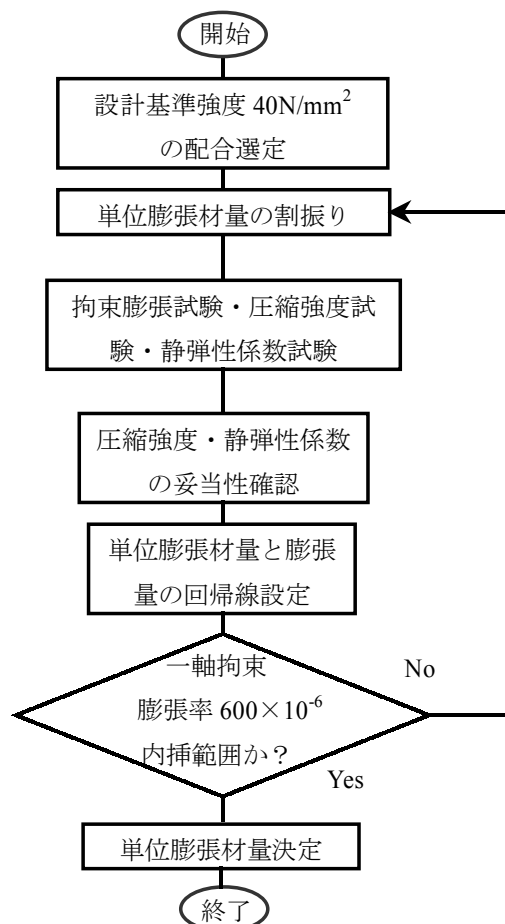


図-1. 高膨張コンクリートの配合設計フロー

### 3. 高膨張コンクリート配合設計例

#### 3.1 使用材料と試験配合

支間を約6m(床版断面 $260 \times 725\text{mm}$ )とする単純合成桁形式の実大試験体に供する膨張コンクリートの配合設計を行った。使用材料を表-1，試験配合とフレッシュコンクリートの性状を表-2に示す。

#### 3.2 試験項目と試験方法

試験項目と試験方法は表-3に示す。

練混ぜ方法は100Lパン型ミキサを用いて，材料全量投入後2分間練り混ぜた。

表-1. 使用材料

材料名	記号	品 質
セメント	C	早強ポルトランドセメント，密度 $3.14\text{g/cm}^3$
細骨材	S	信濃川産川砂 表乾密度 $2.60\text{g/cm}^3$
粗骨材	G	信濃川産川砂利 表乾密度 $2.71\text{g/cm}^3$
混和材	E	石灰系膨張材 密度 $3.15\text{g/cm}^3$
混和剤	Ad	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表-2. 試験配合とフレッシュコンクリートの性状

G-max (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )						スランブ (cm)	空気量 (%)
					W	C	S	G	E	Ad		
25	12	35	4.5	33	146	417	580	1228	0	3.54	13.5	5.0
					146	377	580	1228	40	3.13	14.0	4.8
					146	367	580	1228	50	2.92	13.5	4.2
					146	357	580	1228	60	2.92	14.0	4.0

表－3. 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JISA1101 コンクリートのスランプ試験方法
空気量	JISA1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法
一軸拘束膨張試験	JISA6202 コンクリート用膨張材 参考 1 膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法の B 法に準じ、1 ヶ月まで試験した。
圧縮強度	JISA1108 コンクリートの圧縮強度試験方法に準じた。なお、供試体は型枠に拘束させたまま上部を塗れウエスで7日間養生した後、材齢7日の圧縮強度試験を実施した。さらに供試体は型枠拘束したまま20℃養生室内で養生して材齢28日で圧縮強度試験を行った。

### 3.3 試験配合結果

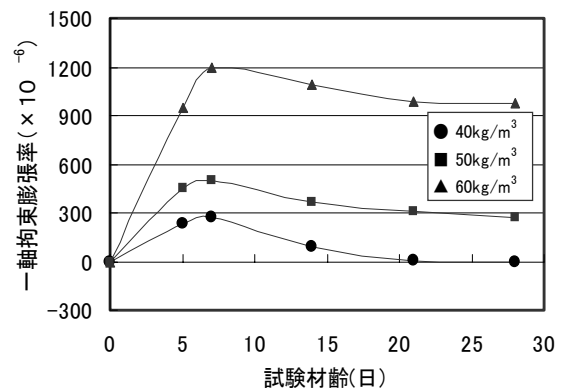
一軸拘束膨張試験結果を図－2、圧縮強度試験結果を図－3に示す。なお、材齢7日までは20℃水中養生を実施しているが、以降は20℃60RH%の条件で養生を行っているため、拘束膨張率は小さくなっている。

圧縮強度試験結果から、型枠拘束による試験にもかかわらず、単位膨張材量が60kg/m<sup>3</sup>では材齢7日において膨張材を使用しないコンクリートと比較して強度が低い値であった。この原因としては拘束膨張率が材齢7日時点で1000×10<sup>-6</sup>を超える値となっていることから、過大な膨張によりコンクリートの組織が粗くなったものと推察する。

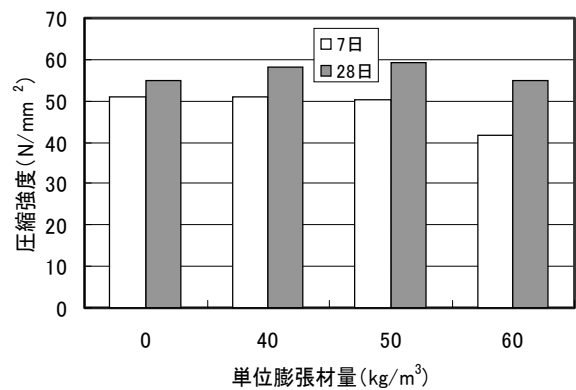
拘束膨張試験の最大膨張率と単位膨張材量の関係を図－4に示す。拘束膨張率は単位量50kg/m<sup>3</sup>を超えると急激に増大する傾向が見られる。この指数回帰させた回帰曲線から、実物大合成桁の拘束膨張率600×10<sup>-6</sup>の設定値に対しての単位膨張材量を導くと52kg/m<sup>3</sup>となる。

### 3.4 実機配合と荷下ろし地点の物性試験

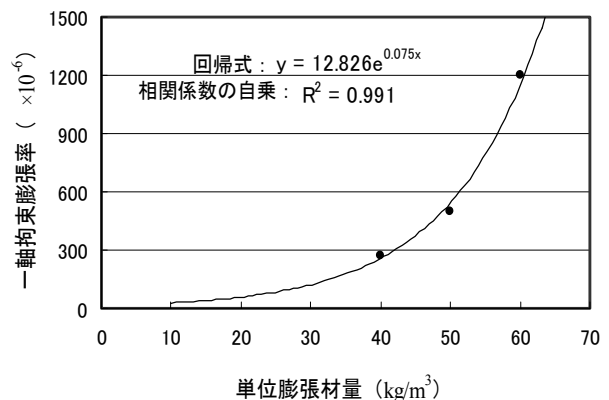
設計された表－4の配合にて実機生コンクリート工場にて練混ぜられたものを表－5に示す試験項目と試験方法にて試験を行った。フレッシュコンクリートの試験結果を表－6に、圧縮強度・静弾性係数・引張強度を表－7に示す。拘束膨張試験結果は図－5に示す。圧縮強度については、試験練りと比較すると実機練混ぜでは20%程度低い圧縮強度となった。これは試験練り時と空気量が異なることと高温時打設により強度があまり増



図－2. 一軸拘束膨張試験結果



図－3. 圧縮強度試験結果



図－4. 単位膨張材量と拘束膨張試験率の関係

表－４．示方配合表

G-max (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	配合量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	S	G	E	Ad
25	12	35	4.5	33	146	417	580	1228	0	3.55
					146	365	580	1228	52	2.92

表－５．試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JISA1101 コンクリートのスランブ試験方法
空気量	JISA1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法
コンクリート温度	棒状温度計にて測定した。
拘束膨張試験	JISA6202 コンクリート用膨張材 参考1 膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法のB法に準じた。試験材齢は成形後材齢7日間まで標準養生として、以降は20℃80%で養生した。尚、鉄筋比1.8%になるような拘束棒を使用して同様な試験を実施した。
圧縮強度試験	JISA1108 コンクリートの圧縮強度試験方法に準じた。なお、供試体は型枠に拘束させたまま上部を塗れウエスで7日間養生した後、材齢7日の圧縮強度試験を実施した。さらに供試体は型枠拘束したまま20℃養生室内で養生して材齢28日で圧縮強度試験を行なった。
静弾性係数試験	JISA1149 コンクリートの静弾性係数試験方法に準じた。なお、試験材齢は7日、28日とした。
引張強度試験	JISA1113 コンクリートの引張強度試験方法に準じた。試験材齢は7日、28日とした。

進していないことが要因であると考え。なお、型枠拘束による養生であるために膨張材の有無による強度差はほとんど認められなかった。

また、図－５に一軸拘束膨張試験結果を示す。一軸拘束膨張試験では拘束鉄筋比を変化させて乾燥収縮まで測定した。拘束鉄筋比を大きくした場合は拘束膨張率、乾燥収縮率ともに小さくなる。拘束鉄筋比0.95%の一軸拘束膨張率の最大値より算出される仕事量Uは式(1)より $2.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であった。仕事量U一定則から推定した拘束鉄筋比1.8%の場合の拘束膨張率は $333 \times 10^{-6}$ となる。本試験の実測値は $330 \times 10^{-6}$ であり推定値とほぼ一致した結果であり、仕事量一定則の妥当性が確認された。今回実機練混ぜの場合、最大一軸拘束膨張率が $460 \times 10^{-6}$ と小さくなった。これは打設時期が9月中旬で気温が高くコンクリート温度が上昇し、初期強度発現性が早くなり膨張発現が抑制され、膨張量が小さくなったもの<sup>5)</sup>と推察する。低温時に支間長10m単純合成桁形式の試験体を用いた同様な実験では養生温度を確保して、膨張量を確保

表－６．フレッシュ性状試験結果

種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
膨張材無	13.5	5.7	27.0
膨張材有	14.0	5.7	28.0

表－７．強度試験結果 (単位：N/mm<sup>2</sup>)

試験項目	膨張材 有無	材齢(日)	
		7	28
圧縮強度	無	37.1	43.7
	有	36.3	43.5
静弾性 係数	無	$3.13 \times 10^4$	$3.20 \times 10^4$
	有	$3.05 \times 10^4$	$3.40 \times 10^4$
引張強度	無	2.65	3.18
	有	2.74	3.19

することができた<sup>1)</sup>が、高温時には試験室と実機との差を補完する検討が必要と考える。

#### 4. 高膨張コンクリートのクリープ特性

##### 4.1 試験装置概要

図-6のように断面中央部に外径5cm塩ビ管を埋設し、中央にPC鋼棒を配置した。PC鋼棒は鋼製端板を介してナットにより固定した。PC鋼棒およびコンクリートの長手方向中央部それぞれ相対する面にひずみゲージを貼り付けて経時変化を測定した。

##### 4.2 試験方法

JIS 原案「コンクリートの圧縮クリープ試験方法」に準じて試験を行った。試験の配合は表-4と同様に単位膨張材量 0, 52kg/m<sup>3</sup>とし、100L 強制練りミキサで練混ぜて、供試体を作製した。20℃恒温試験室にて封緘養生し、材齢 7 日で脱型後コンクリート表面にひずみゲージを添付した。さらに材齢 10 日まで封緘養生した後、PC 鋼棒を油圧ジャッキにより緊張することにより圧縮強度の 1/3 の応力を加えた。(写真-1) 載荷後のコンクリート表面およびPC鋼棒のひずみをひずみゲージを用いて JIS 原案に準じて測定材齢にて測定した。なお、乾燥収縮成分を測定するためにクリープ試験と同一寸法・形状の供試体を作製して、同様な環境に静置した。

##### 4.3 試験結果

材齢 10 日での圧縮強度および静弾性係数試験結果を表-8に、載荷直後までの試験結果を表-9に示す。乾燥収縮ひずみの試験結果を図-7に示す。全ひずみから乾燥収縮ひずみを差引いたクリープひずみより算出した単位クリープ、クリープ係数の結果を図-8, 9に示す。

##### 4.4 クリープ試験結果のまとめ

高膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみは初期から膨張材を配合しない場合に比較して大きいですが、材齢 56 日から小さくなる傾向にある。

一方、高膨張コンクリートは単位クリープでは  $10 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{N}$  大きくなり、クリープ係数では約 0.2 大きくなった。これは膨張材が空隙を

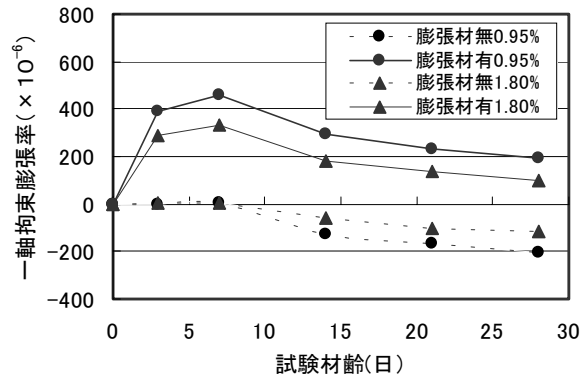


図-5. 一軸拘束膨張試験結果(実機練混ぜ)

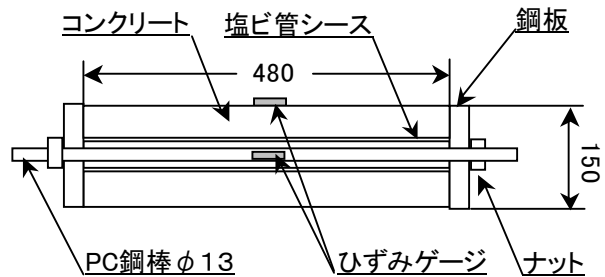


図-6. クリープ試験装置

表-8. 圧縮強度および静弾性係数試験結果

配合	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
膨張材無	48.7	$3.53 \times 10^4$
膨張材有	39.8	$3.32 \times 10^4$

表-9. 載荷直後の試験結果

項目	膨張材無		膨張材有	
	No.1	No.2	No.1	No.2
PC 鋼棒 断面積 (mm <sup>2</sup> )	530.92			
PC 鋼棒弾性 係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$2.082 \times 10^5$			
載荷直後の 荷重 (kN)	328.4	327.5	288.4	267.7
載荷直後の 応力 (N/mm <sup>2</sup> )	15.5	15.4	13.8	12.9
静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	3.50	3.34	2.87	2.92
ケミカルプ レストレス (N/mm <sup>2</sup> ) *	—	—	1.0	1.3

\*は載荷直前の PC 鋼棒のひずみから算出

造りながら膨張するために、クリープが大きくなるものと推察する。このため高膨張コンクリートは変形能力が大きくなることが予測され、引張り応力、曲げ引張り応力下でひび割れ抵抗性が大きくなるという既存の研究<sup>6)</sup>と一致した結果となった。

## 5. 結論

連続合成桁の中間支点部分に高膨張コンクリートを用いるために基礎検討として実施した配合設計およびクリープ試験結果より次のようなことが考えられる。

- (1) 高膨張コンクリートにおける単位膨張材配合量は一軸拘束膨張試験と膨張材量の関係に着目して回帰線を用いることにより導くことができた。
- (2) 現場施工における膨張率を確保するために、試験室レベルと実機との差を補完する検討が必要である。
- (3) 高膨張コンクリートのクリープは通常のコンクリートに比較してクリープ係数で約0.2大きくなり、変形能力が高いことが確認できた。

## 参考文献

- 1) 岡田幸児, 細見雅生, 依田照彦, 佐久間隆司: 連続合成桁へのケミカルプレストレスの適用, 構造工学論文集 Vol.46A, pp.1675-1684, 2000.3
- 2) 中本啓介, 石川敏之, 岡田幸児, 細見雅生, 佐久間隆司: 長期計測による連続合成桁へのケミカルプレストレス適用に関する研究, 構造工学論文集 Vol.47A, pp.1501-1508, 2000.3
- 3) 辻幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集第235号, pp111-124, 1975.3
- 4) 土木学会コンクリート委員会: 膨張コンクリート設計施工指針-コンクリートライブラリー 第75号, pp93-94, 1993.7
- 5) 戸川一夫, 中本純次, 中野錦一: 膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響,



写真-1. 油圧ジャッキによる加圧

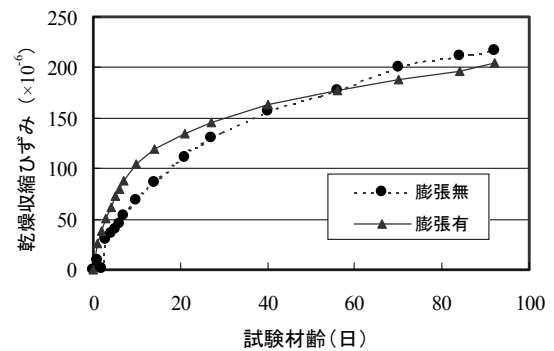


図-7. 試験材齢と乾燥収縮ひずみの関係

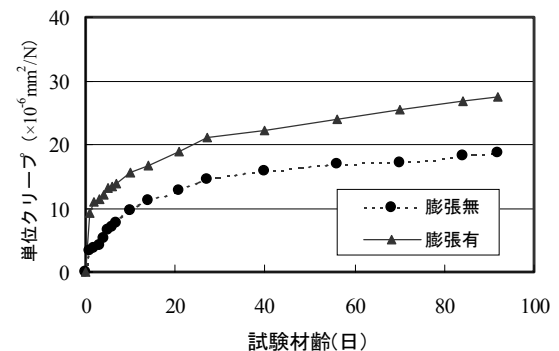


図-8. 試験材齢と単位クリープの関係

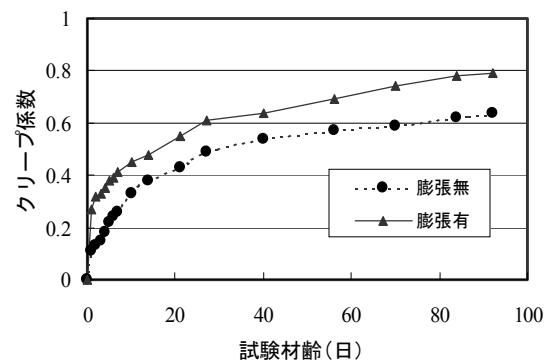


図-9. 試験材齢とクリープ係数の関係

セメント技術年報 35, pp277-281, 1981

- 6) 例えば, 岡村甫, 辻幸和: ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性, 土木学会論文集第225号, pp101-108, 1974.5