

連続合成桁へのケミカルプレストレスの 適用に関する研究（第3報）

中本 啓介¹⁾ 石川 敏之²⁾ 細見 雅生³⁾

連続合成桁の中間支点負曲げ部にプレストレスの導入方法として膨張コンクリートを用いたケミカルプレストレスについて継続して研究を行っている。今回の報告では、設計にケミカルプレストレスを効果的に適用するために行った2主桁連続合成桁を対象とした比較計算と、長期材令時におけるケミカルプレストレスの持続性を確認するために行っている長期計測実験の計測値と解析値の比較結果について報告する。

キーワード：連続合成桁，膨張コンクリート，クリープ，乾燥収縮，長期計測

はじめに

近年，少数主桁連続合成桁が注目され，日本道路公団を中心に設計・施工が行われている。その理由として，少数主桁を用いた鈑桁が経済的であること，さらに合成桁形式を用いる事により床版を主構部材の一部として取扱うため，上フランジを小さくでき経済的であることが挙げられる。しかし，連続合成桁の設計法は主に橋軸方向にプレストレスしない設計であり，合成断面として設計するが，中間支点付近のみ鋼桁と鉄筋とで外力に抵抗する部分合成桁として設計されている。これに対し，さらに経済的な設計法として，全区間床版を有効とする設計法が考えられる。全区間の床版を有効にするためには橋軸方向にプレストレスを導入する必要がある。

このプレストレスの導入方法としては，支点のジャッキダウン，PC 軸力導入などがある。著者らは膨張コンクリートを用いたケミカルプレストレスに着目し検討を行ってきた^{1)~3)}。この方法により，ひび割れ荷重が増加する事を確認している。

本文では，ケミカルプレストレスを効果的に活

用するために行った検討内容について示す。はじめに，ケミカルプレストレスを設計計算に効果的に導入するための検討として2主桁連続合成桁橋を対象とした比較計算について示す。ここでは，プレストレス導入量，範囲を変化させた場合の試験設計を行うことによりケミカルプレストレスの効果について基礎データを示す。

次に，ケミカルプレストレスの経時変化に着目した膨張コンクリートの各種基本性能を調べるために実施している長期計測実験について示す。単純桁形式の実験桁を対象とした計測データよりクリープ，乾燥収縮ひずみの進行について予測式を用いて計測結果を定量的に評価することを試みた。さらに，小型コンクリート試験片を対象とした各種試験により膨張コンクリートの基本性能について確認した内容について報告する。

1. 比較計算によるケミカルプレストレスの特性

(1) 検討概要

著者らは，以前から連続合成桁の負曲げが作用する中間支点部に高膨張（膨張率：600 μ 程度）の膨張コンクリートを用いてケミカルプレストレ

1) 技術研究室 2) 技術研究室 3) 技術研究室次長

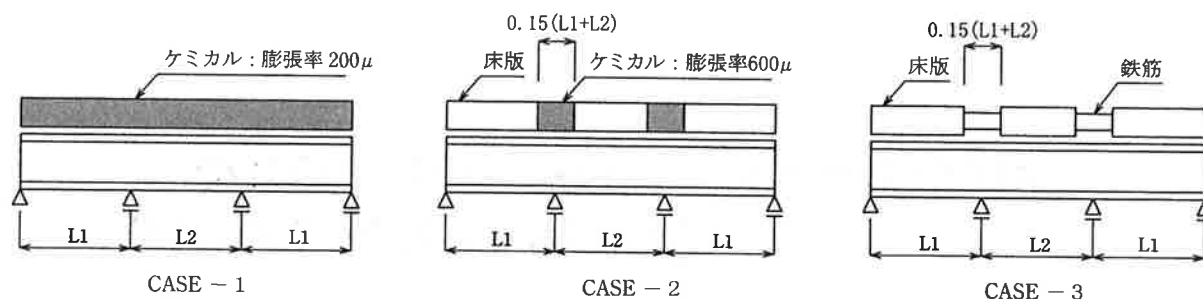


図-2 比較計算ケース

スを導入することを提案している。今回の比較計算では、乾燥収縮補償として用いられている膨張コンクリートを設計上の数値として評価した場合の計算を行い、ケミカルプレストレスの効果を定量的に示す。図-1に比較対象として想定した橋梁の一般図を示す。

(2) 比較条件

プレストレス量、導入範囲を変えた3ケースについて計算を行い、床版、鋼桁の応力度比較を行う。図-2に比較するケースを示す。ただし、条件として与える膨張率はJIS A 6202「コンクリート膨張材」膨張コンクリートの拘束膨張試験に準じた値である。

< CASE-1 >

膨張率 200μ を桁全域に導入。

< CASE-2 >

膨張率 600μ を中間支点上の $0.15L$ (L : 支間長)の部分に導入。

< CASE-3 >

膨張コンクリートなし (プレストレスしない連続合成桁, 基本ケース)

ケミカルプレストレスは、膨張コンクリート設計施工指針⁴⁾を基に鉄筋の拘束によるケミカルプレストレスの計算式と、道路橋示方書・同解説⁵⁾

(以下、道示)の合成桁断面の計算式を重ね合わせて算出することができる。概略の計算フローを図-3に示す。なお、詳細な計算式については文献2)に示している。

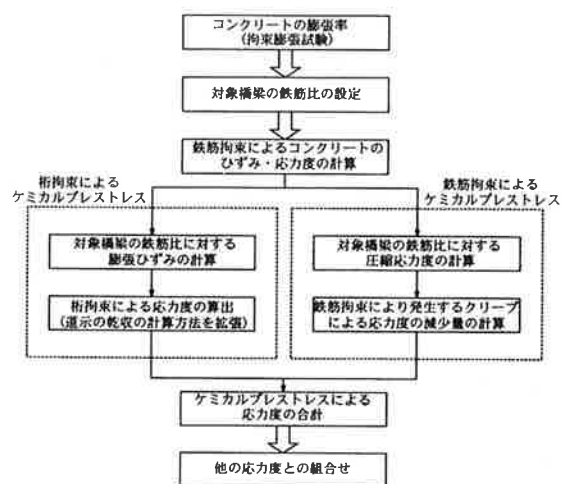


図-3 ケミカルプレストレスの計算フロー

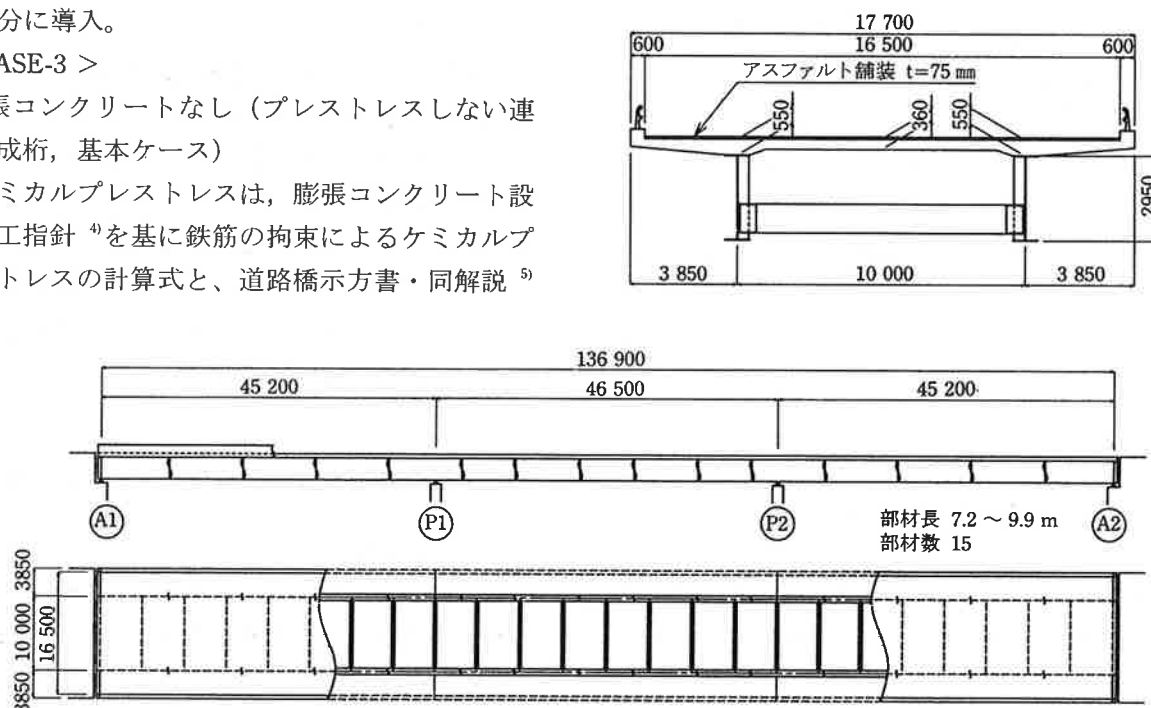


図-1 計算対象構造図

(3) 比較計算

図-1に示す3径間連続合成2主桁橋について比較計算を行った。CASE-1,2はCASE-3の基本ケースで構成した断面を用いた。ケミカルプレストレスの計算で必要となる鉄筋比は支間中央で1.3%, 中央径間で1.6%, そして端径間で1.8%である。ここで示す応力度の組合は主荷重+温度差(床版高温時)としてある。

床版上縁の応力度比較を図-4に示す。CASE-2(600 μ)は、基本ケースに対して中間支点部で約1.6N/mm²の引張応力度が低減できる。CASE-1(200 μ)では、基本ケースに対して中間支点部で約1.0N/mm²の引張応力度の低減となっている。支間中央において、CASE-1(200 μ)では、基本ケースに対し約1.0N/mm²の圧縮応力度が増加し、CASE-2(600 μ)より大きな圧縮応力度の増加となる。

次に、鋼桁の下フランジ下縁の応力度比較を図-5に示す。鋼桁の下フランジ下縁に対しては、CASE-1, 2ともに支間中央で30N/mm²程度の応力度の増加になる。したがって、ケミカルプレストレス導入時には若干の断面アップが必要となる。

比較計算の結果、合理的で経済性を考えた設計を行うためにはCASE-2(600 μ)の中間支点付近に膨張コンクリートを施工する案が有効であるといえる。

2. 実験桁を用いた長期計測によるケミカルプレストレスの持続性

ここでは、単純桁形式の実験桁を用いてケミカルプレストレスの経時変化に着目し、膨張コンクリートの長期材令時の各種基本性質およびクリー

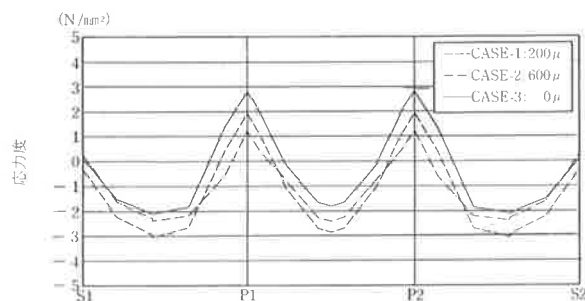


図-4 床版上縁の応力度

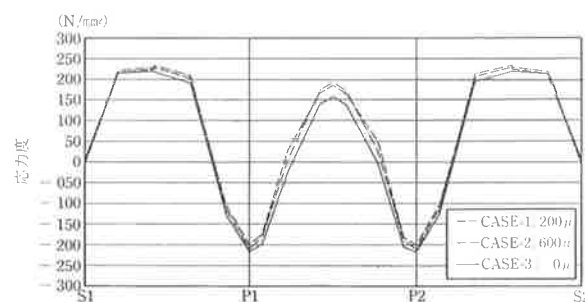


図-5 鋼桁下フランジ下縁の応力度

プ、乾燥収縮にともなう経時変化の予測についての検討を示す。

(1) 実験概要

ケミカルプレストレスの持続性の確認を目的として単純桁形式の実験桁について1999年10月から3年間の予定で長期計測実験を行っている。そのデータを基に、ケミカルプレストレスの経時変化について検討する。図-6に計測中の実験供試体図を示す。実験桁は合計3体とし膨張コンクリートのみでプレストレスを導入する桁1体(名称: CO 桁)と、ジャッキ操作と膨張コンクリートを併用して導入する桁の2体(名称: CJ1 桁, CJ2

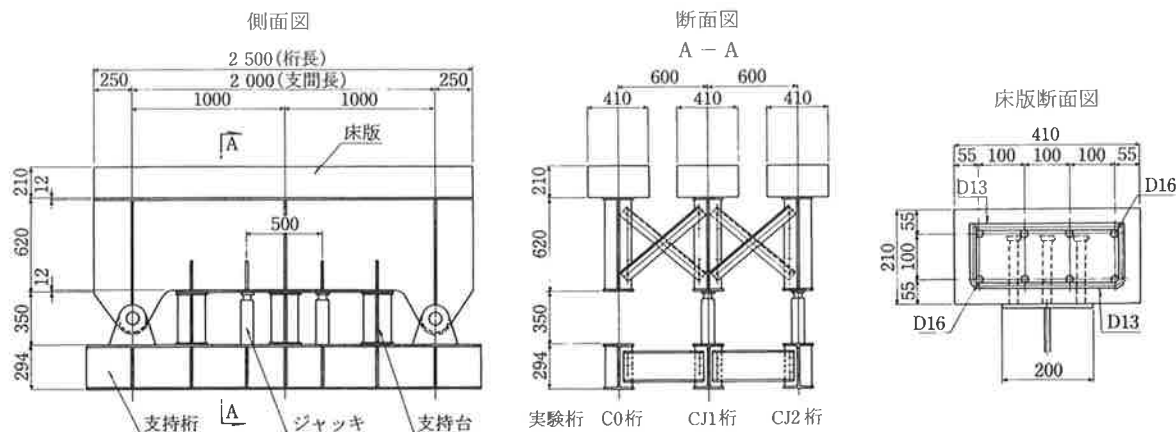


図-6 実験供試体一般図

桁)を用意した。CJ1 桁は計測開始 1 年後に載荷試験を行い (2001 年 1 月実施), 3 年後に残り 2 体 (CO, CJ1 桁) の載荷試験を行う予定である。

使用材料は設計基準強度 40N/mm^2 (圧縮強度試験結果 66.9N/mm^2) のコンクリート, 鋼材 SM400A, 鉄筋 SD295 である。床版の鉄筋比は 1.85%としている。スタッドは D19×H150 の頭付きスタッドを用い, 間隔は 1 列 3 本とし橋軸方向に 100 mm 間隔で配置している。各実験桁のプレストレスとして用いる膨張コンクリートは JIS A 6202 に示された拘束膨張試験において膨張率が 600×10^{-6} に設定している。なお, コンクリートの養生 10 日とし, 鋼製の型枠を用いて水張り養生とした。

(2) 計測方法

図-7に示す箇所の埋込ひずみゲージおよび温度センサーを用いて, コンクリート内部のひずみと温度を計測している。計測はデータロガーとパソコンを接続し, 実験開始から 3 ヶ月間は 10 分間隔, それ以降は 30 分間隔で自動計測している。

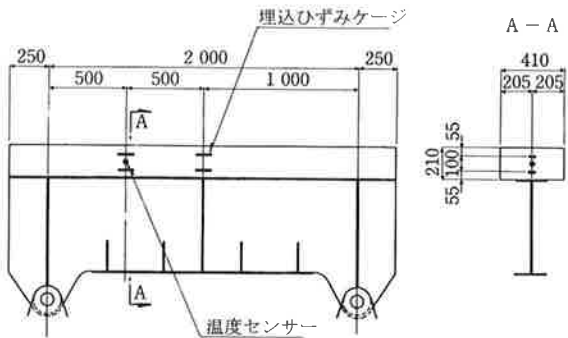


図-7 コンクリート床版ひずみ計測位置

(3) 導入プレストレス

実験桁は床版と鋼桁の断面性能の中立軸が実橋と同程度となるように断面を決定している。

ジャッキ操作でのプレストレスは, 膨張コンクリートによるプレストレスとを併用することで中間支点上に発生する引張応力度を打ち消す程度を目標値として導入した。

ジャッキ操作, 膨張コンクリートにより実際に導されたプレストレスを表-1に示す。ジャッキ操

表-1 導入プレストレス量

実験桁	C0 桁 N/mm ²	CJ1 桁 N/mm ²	CJ2 桁 N/mm ²
ジャッキ	—	— 1.14	— 0.98
ケミカル	— 2.31	— 2.13	— 2.73

作によるプレストレスは支間中央の床版における埋め込みゲージの平均値から求めた。また, 膨張コンクリートによるプレストレスは, 床版打設と同時にに行った拘束膨張試験結果をもとに求めた。

(4) 各種基準によるクリープと乾燥収縮の比較

まず, ケミカルプレストレスの経時変動を定量的に評価するための基本予測式を選定する。クリープと乾燥収縮ひずみの代表的な基準の予測式⁶⁾として ACI 式⁷⁾, CEB/FIP-90 式⁸⁾, 阪田式⁹⁾を用いた。

一例として, 図-6に示す CJ1 桁の諸元を用いた各予測式によりひずみの進行の比較を示す。図-8は, クリープ, 乾燥収縮ひずみの合計値の経時変化を, 表-2には各ひずみ成分毎の経時変化を示す。阪田式では計算条件における形状パラメータの制限により適用外となるが参考値として示している。各予測式によるクリープ, 乾燥収縮ひずみは使用目的, 計算条件が異なるなどの理由により, ばらつく結果となった。

各種予測式を用いたクリープ, 乾燥収縮ひずみの比較結果よりケミカルプレストレスの経時変化の予測には CEB/FIP-90 式を基本とする式を用いる。

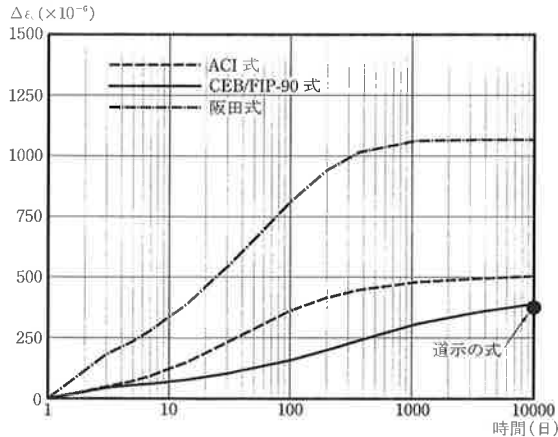


図-8 基準の予測値の比較 (CJ1 桁)

表-2 基準の予測値の比較 (CJ1 桁)

日数	$\Delta \epsilon$ ($\times 10^{-6}$)	ACI 式	CEB/FIP - 90 式	阪田式	道示
200 日	クリープ	72	101	539	—
	乾燥収縮	343	99	401	—
	合計	415	199	941	—
3 年	クリープ	89	134	608	—
	乾燥収縮	391	173	455	—
	合計	479	308	1063	—
30 年*)	クリープ	101	153	609	174
	乾燥収縮	403	237	457	200
	合計	504	390	1067	374

*) 道示によるひずみは最終値を示している

(5) 履歴積分によるクリープ・乾燥収縮の計算
鋼桁がコンクリートを拘束することにより生じる応力度の変化を考慮した精度の良い予測値を求めるため、履歴積分¹⁰⁾を用いて計算を行う。クリープおよび乾燥収縮の計算には、前節の検討結果より、CEB/FIP-90式を使用する。

任意の時刻 $t, (t>t')$ におけるクリープひずみ $\varepsilon_c(t)$ は、クリープコンプライアンス $J_c(t)$ を用いて、次式で表すことができる。

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_0 J_c(t) + \int_0^t J_c(t-t') \Delta \sigma_t dt' \quad (1)$$

ここに、

σ_0 : 時刻 $t=0$ でコンクリートに持続载荷される応力

$J_c(t)$: クリープコンプライアンス $J_c(t) = \frac{1+\phi_c(t)}{E_c}$

t' : コンクリートに持続荷重が载荷された材令 (日)

$\Delta \sigma_t$: 時刻 $t-t'$ における変化応力度 $\Delta \sigma_t = \frac{d\sigma'}{dt'}$

$\phi_c(t)$: CEB/FIP90 式で定義されるクリープ係数

E_c : コンクリートのヤング係数

式(1)の第2項は、時間間隔 $t-t'$ における微少な応力増分 $\Delta \sigma_t$ によるクリープひずみの合計とすれば式(2)の形に変形できる。

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_0 J_c(t) + \sum_{i=0}^t (\Delta \sigma_i J_c(t-i)) \quad (2)$$

合成断面の応力再分配は下式で計算する。

$$\Delta \sigma_i = \frac{1}{n} \left(\frac{P_i}{A_v} + \frac{M_i}{I_v} d_c \right) - E_c \Delta \varepsilon_t \quad (3)$$

ここに、

$$P_i = E_c \Delta \varepsilon_t A_c \quad (4)$$

$$M_i = P_i d_c \quad (5)$$

n : ヤング係数比 $n=7$

A_v : n を用いて合成後の断面を鋼換算した断面積

I_v : n を用いて合成後の断面を鋼換算した断面二次モーメント

A_c : コンクリートの断面積

d_c : 合成断面の図心軸から床版中心までの距離

式(3)に示す変化応力度 $\Delta \sigma_i$ は、時間間隔 $t-t'$ において1つ前のステップで作用した変化ひずみ $\Delta \varepsilon_t (= \varepsilon_c(t) - \varepsilon_c(t-1))$ により合成断面に生じる床

版の応力度である。ここで用いる変化ひずみは床版上縁、中心、下縁のひずみを用いて精度良く評価している。式(3)を用いた合成断面の応力再分配により、鋼桁による拘束効果を考慮できる。

一方、乾燥収縮についてもクリープひずみと同様に履歴積分と CEB/FIP-90 式における乾燥収縮のクリープ関数を用いる。

任意の時刻 $\tau (\tau=t+t')$ は、乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_s(\tau)$ と、クリープコンプライアンス $J_s(\tau)$ を用いて

$$\varepsilon_s(\tau) = \varepsilon_{sh}(\tau) + \sum_{i=0}^t (\Delta \sigma_i J_s(\tau-i)) \quad (6)$$

$$J_s(\tau) = \frac{1+\phi_s(\tau)}{E_c} \quad (7)$$

ここに、

$\varepsilon_{sh}(\tau)$: CEB/FIP-90 式における乾燥収縮の係数

$\phi_s(\tau)$: 乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_s(\tau) = \phi_0 \beta_s(\tau)$

$\phi_0, \beta_s(\tau)$: CEB/FIP-90 式で定義される基準クリープ係数、補正係数

一例として、クリープによるひずみの計算フローを図-9に示す。

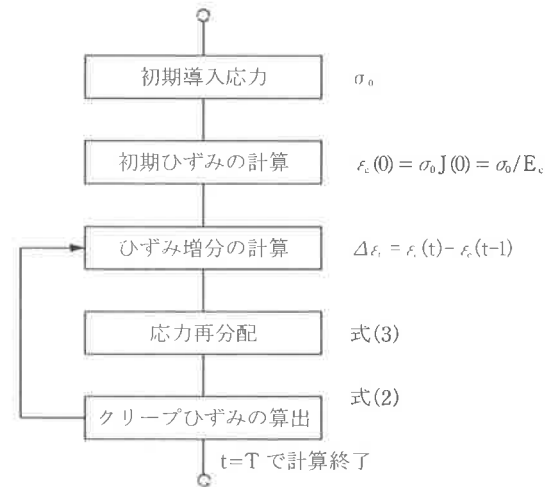


図-9 クリープひずみの計算フロー

(6) 実験結果と計算値の比較

実験桁のひずみの経時変化を図-10に示す。ここでは、一例として CJ1 桁を示す。実測値は、温度(図-11)による影響を補正した値を示す。図に示しているひずみは、支間中央におけるコンクリート床版の上下の埋め込みひずみゲージの平均値、すなわちコンクリート床版中心のひずみの値を示している。この図より、実測値は多少ばらつきが見られる。これは、実測値は温度補正を行っ

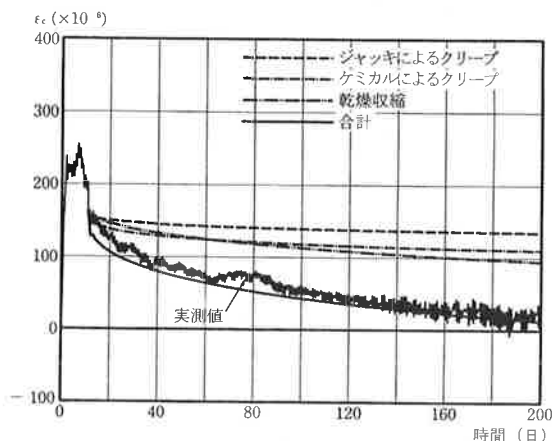


図-10 ひずみの経時変化 (CJ1桁)

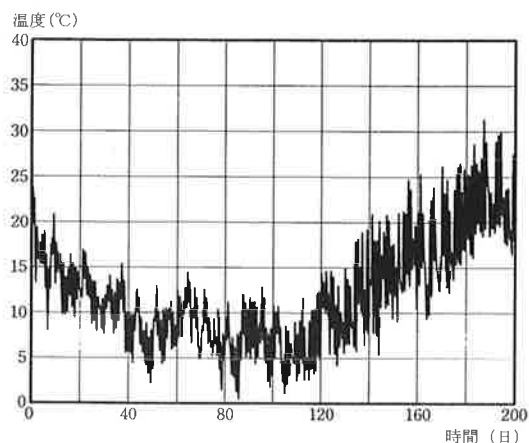


図-11 計測期間の温度変化

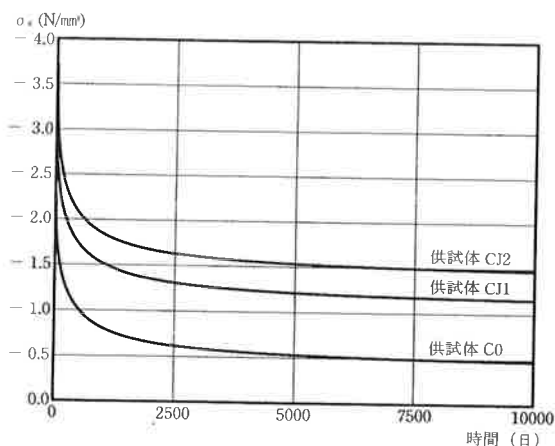


図-12 実験桁の応力度の予測

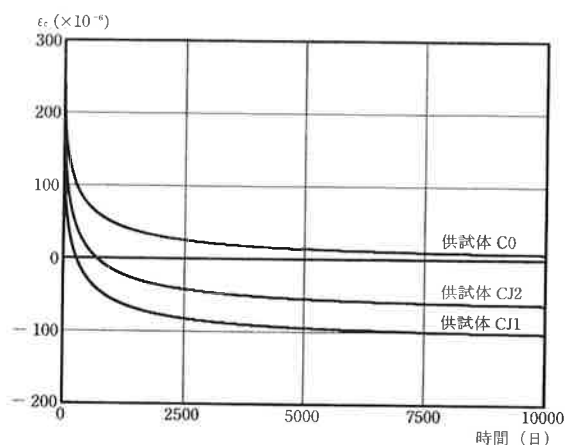


図-13 実験桁のひずみの予測

ているが、温度の影響を完全に除去できなかったことによるものと考え。同図には、履歴積分を用いて算出したジャッキダウン、ケミカルプレストレスおよび、乾燥収縮によるひずみを併せて示す。これらの図より初期における値のずれが見られるが、実測値と計算値の合計による変化の傾向はよく一致している。本文ではCJ1 桁1 体の結果を示したが、残り2 体についても同様な結果が得られている。

次に上記のひずみの比較よりひずみの計算値が妥当なものと考え、0～30 年の長期的なひずみと応力度を予測した。

計算結果を図-12、13および表-3に示す。図-13より、ひずみの状態は、C0 桁を除いてクリープ、乾燥収縮ひずみの進行により膨張域から収縮域に移行する。C0 桁についても収縮域に近づく。応力度については図-12より明らかなように、各桁すべてにおいて圧縮応力度が残存していることが確認できる。このことについて、著者らは下記に

示す考え方で説明できると考える。

図-14に示すように、初期導入された圧縮応力は、自由膨張を拘束することによって発生する。計測された膨張ひずみは、鉄筋および鋼桁によって拘束された後のひずみである。コンクリートには、初期導入された圧縮応力により、クリープが

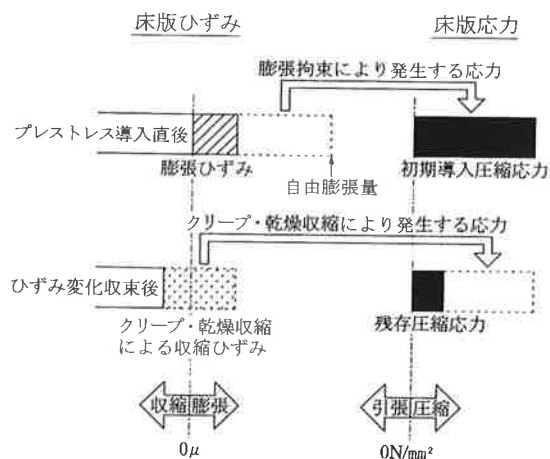


図-14 経時変化に伴う床版ひずみと応力

表-3 ひずみおよび残存応力の推定

実験桁	200 日			3 年		30 年	
	実測値 ϵ_s	計算値 ϵ_s	残存応力 σ_s	計算値 ϵ_s	残存応力 σ_s	計算値 ϵ_s	残存応力 σ_s
	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	N/mm ²	$\times 10^{-6}$	N/mm ²	$\times 10^{-6}$	N/mm ²
C0 桁	146	109	- 1.3	43	- 0.8	3	- 0.5
CJ1 桁	16	9	- 2.1	- 63	- 1.6	- 108	- 1.2
CJ2 桁	69	53	- 2.5	- 23	- 1.9	- 69	- 1.6

表-4 コンクリートの配合表

種別	スランブ (cm)	Air (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ex
Ex0	12±2.5	4.5±2.5	41	42	158	385	736	1036	0
Ex57	12±2.5	4.5±2.5	41	42	158	328	736	1036	57

進行し、さらに乾燥収縮の影響によりひずみが膨張域から収縮域に移行するが、初期導入された圧縮応力の値が、クリープ、乾燥収縮により発生する引張応力よりも大きいため、圧縮応力が残存する結果となる。

3. 供試体を用いた長期材令における各種性質の確認

3.1 実験目的

現在、小型コンクリート試験片を用いて高温高湿度条件、長期暴露条件および促進乾燥条件での膨張コンクリートの各種材料強度試験を実施している。ここでは、設計上で主要な諸量となる圧縮強度、曲げ強度試験結果について示す。

3.2 実験内容

(1) 試験項目と試験条件

試験項目を下記に示す。
スランブ試験(JIS A1101)、空気量の測定(JIS A1128)、圧縮強度試験(JIS A1108)、曲げ強度試験(JIS A1108)、拘束膨張試験(JIS A6202)
コンクリートに要求される物性は以下の通りとした。
スランブ：8±2.5cm (練上り直後 12±2.5cm)
空気量：4.5±1.5 % R.H.
圧縮強度：設計基準強度 40N /mm²
目標強度：48N /mm²
コンクリートの配合表を表-4に示す。Ex0 は普通コンクリートを表し、Ex57 は膨張コンクリートを示す。

(2) 試験体の養生条件

材令 7 日は 20℃水中養生後 20℃ 80 % R.H.で材令 28 日まで養生して養生条件は下記の 3 種類とした。
恒温恒湿条件での長期試験 (20℃ 60 % R.H.)
長期暴露条件 (屋外)
65℃での促進乾燥状態 (約 3 ヶ月)―「JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事」¹⁾、T-601 コンクリートの乾燥単位容積重量試験方法に準じる。

(3) 試験方法

コンクリートの曲げ強度試験は、図-15に示すようにコンクリート試験片に鉄筋を挿入した形式で行った。この場合の鉄筋比は 0.95 %である。圧縮強度試験については鋼管 (155×220 mm) 中に打設して、コア抜きにより測定する供試体を作製した。試験材令は、28 日、6 ヶ月、1 年、3 年としてある。

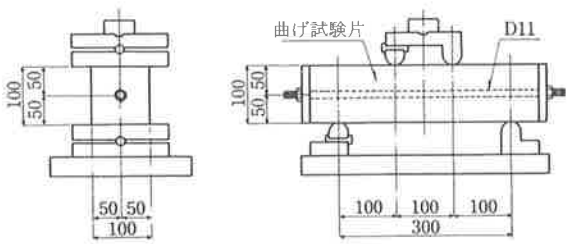


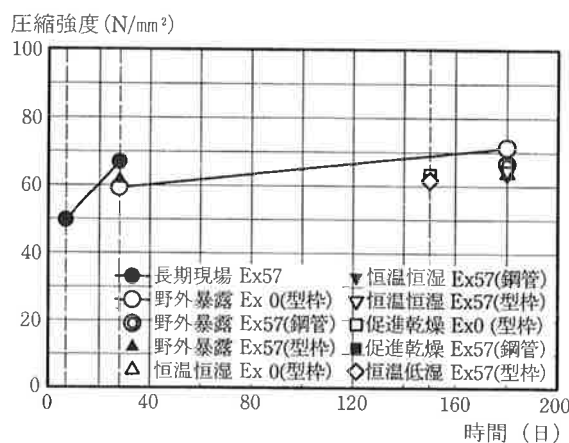
図-15 コンクリートの曲げ試験

3.3 実験結果

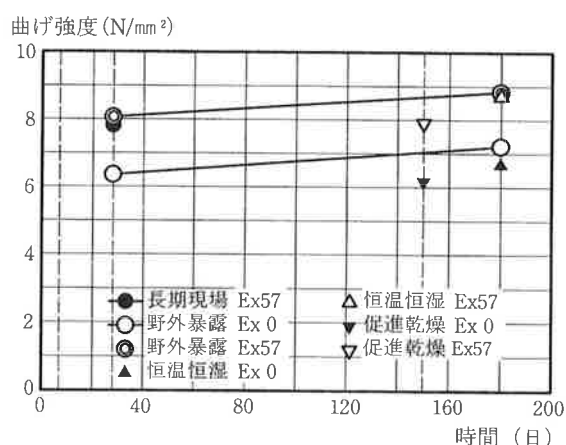
試験結果を図-16に示す。以下に試験結果を示す。

(1) 圧縮強度試験

図-16(a)より、材令 28 日以後、各条件下にお



(a) 圧縮強度試験結果



(b) 曲げ強度試験結果

図-16 コンクリート試験片を用いた試験結果

いて強度が上昇している。一般的に、28 日以後もコンクリートの強度は増加すると考えられ、本試験での 180 日強度は 28 日強度の 1.1 倍となった。

(2) 曲げ強度試験

図-16(b)より、曲げ強度についても、強度発現の影響で大きな値が計測されている。また、28 日以降も強度は増加している。ケミカルプレストレスの効果については、普通コンクリートと膨脹材を混入したコンクリートの間に明らかな強度の違いが現れているのが確認できる。この効果は、180 日でも大きな変化はない。促進乾燥において曲げ強度が他と比べ若干低下しているのは乾燥収縮による影響であると考えられる。ほぼ絶乾と考えられる促進乾燥状態の試験体においても曲げ強度の低下が少なく膨張の効果は保持されているものと評価できる。

4. まとめ

本文では、連続合成桁へのケミカルプレストレス適用の検討として行っている試設計を用いた比較計算例と長期計測実験について示した。

比較計算および継続中の長期実験結果より下記を明らかにした。

- ① 2 主桁連続合成桁橋を対象とした膨張率、導入範囲に着目した比較計算から、膨張率の違いによるケミカルプレストレスの効果の差と膨張率600 μ を支点付近に導入する案がより有効であることを確認した。
- ② 実験桁による計測において、CEB/FIP-90 と履歴積分を用いたクリープ・乾燥収縮の計算値は実測値とよく一致した。
- ③ 上記計算方法を用いて、10000 日経過時のひずみと応力度の予測値を計算した。その結果、3 体の実験桁全てにおいて、圧縮応力度が残存しているという結果が得られた。
- ④ 小型コンクリート試験片を用いた試験においては、時間経過とともに、圧縮強度、曲げ強度とも若干増加している結果となった。ほぼ絶乾と考えられる促進乾燥状態の試験体においても曲げ強度の低下が少なく膨張の効果は保持されている結果が得られた。

今後は、長期計測を継続して行い、ケミカルプレストレスの基本性能についてデータを収集すると共に実用化に向けて具体的な設計要領の提案などの諸検討に取り組む予定である。

あとがき

本研究を行うにあたり、埼玉大学工学部建設工学科 奥井義昭助教授に貴重な資料ならびにご意見を頂きました。また、早稲田大学理工学部土木工学科 依田照彦教授に貴重なご意見を頂きました。膨張コンクリートの配合、材料試験については株式会社 小野田に協力して頂きました。そして、本研究の一部の計算については長岡技術科学大学実務訓練生の新保剛貴君に行ってもらいました。ここに、記して感謝の意を表します。

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，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，CS176，pp.352-353，1999.9.
- 2) 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.
- 3) 谷口 望・依田照彦・岡田幸児・細見雅生：
ケミカルプレストレスを用いた合成桁に関する基礎的研究，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，CS-31，2000.9.
- 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ーコンクリートライブラリー第 75 号ー，1993.7.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説，1996.12.
- 6) 日本鋼構造協会 次世代土木鋼構造研究特別委員会：合理化桁の設計法小委員会報告書 合理化桁に関するデザインマニュアル，pp.44-64，2000.10.
- 7) ACI Committee 209：Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects on Concrete Structure, ACI-SP76，1982.
- 8) CEB-FIP：Model Code 1990, Comité Euro-Internationa du Béton-Fédération International de la Précontrainte，1990.
- 9) 阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮及びクリープの予測，コンクリート工学，Vol.31，No2，pp.5-15，1993.
- 10) 中本啓介・石川敏之・岡田幸司・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.1501-1508，2001.3.
- 11) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事，1991.9.