

連続合成桁へのケミカルプレストレスの適用

An attempt to use chemical pre-stressing in continuous composite bridges

岡田幸児*, 細見雅生**, 依田照彦***, 佐久間隆司****

Koji Okada, Masao Hosomi, Teruhiko Yoda, Takashi Sakuma

*工修 駒井鉄工(株) 技術本部開発室(〒270-2287 千葉県松戸市松飛台 405)

**工博 駒井鉄工(株) 技術本部開発室(〒270-2287 千葉県松戸市松飛台 405)

***工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

****(株)小野田 営業本部技術部(〒135-0016 東京都江東区東陽 4-1-13 東陽セントラルビル 5F)

Recently, with the need of rational design methods and cost-performance for bridge construction, a continuous composite bridge with a few I section girder draws much attention. In this study, an attempt is made to use a combination of two methods to introduce prestressing.

① Chemical pre-stressing in concrete decks at the negative moment of the girder.

② Prestressing by jacking supports.

The chemical pre-stressing in a composite girder at a construction site isn't necessarily available because it is difficult to control the part of quality of concrete at a construction site. In this experiment study, potential capacity of chemical prestressing is fully examined. Concrete slabs of test girder of which their ages are 4~5 weeks wear used.

Key Words : Chemical Pre-stressing, Continuous Composite Bridge, Expansive Concrete

キーワード：ケミカルプレストレス，連続合成桁，膨張コンクリート

1. まえがき

合理化，省力化を実現するための橋梁形式として，少数主桁連続合成鉄桁が現在注目されている。その理由として，少数主桁を用いた鉄桁が経済的であることと，連続合成桁に対する考え方が変わりつつあることが挙げられる。従来から非合成桁も合成桁として挙動することが知られていたが，連続合成桁を非合成として扱うことが，安全側の設計とされていた。しかしながら最近では，設計の際に橋梁の構成要素を合理的に評価すべきであるという考え方が変わりつつある。既往の研究によれば，連続合成桁の利点としては以下の事が挙げられる。

- ① 伸縮継手や支承の数が少ないため走行性に優れ，騒音，振動が少なく維持管理が容易である。
- ② 桁が橋脚上で連結されているため，耐震性に優れている。
- ③ 単純鉄桁に比較して，桁の断面力が小さくなるこ

と，伸縮装置，支承の数が少なく済むことから，経済性に優れている。

一方，従来のPC鋼材を用いない場合の連続合成桁は，ジャッキ操作等によりプレストレスを導入するが，その効果はひび割れ抑制等の予防効果として，積極的に設計上の数値としては評価していない場合が多い。また，プレストレス導入の方法として最近注目されているものに，膨張コンクリートによるケミカルプレストレスがある。しかし，現場施工の膨張コンクリートの使用によるケミカルプレストレスの導入は，施工管理と強度の評価が難しいとして，あまり使用されていない。橋梁の床版コンクリートとして乾燥収縮の影響を小さくするための膨張コンクリート（収縮補償）が使用された例は多いが，プレストレス導入のための積極的な数値評価を検討した事例は少ない¹⁾。

そこで本研究では，連続合成桁の中間支点付近にプレストレス導入を目的として，ケミカルプレストレスを積

極的に使用する事の検討を行うものである。今回、中間支点付近をモデル化した桁を製作し、養生、載荷実験を行いケミカルプレストレスの適用について実験的検討を行った。なお、載荷実験は材齢4～5週目のコンクリート床版の桁を使用している。

2. 膨張コンクリートの配合試験

膨張コンクリートは、コンクリートに膨張材を混入することで、硬化後に体積膨張が生じるコンクリートである。膨張コンクリートは収縮補償コンクリートとケミカルプレストレスコンクリートに分けられ、後者の方がより大きな圧縮応力を発生する。使用される膨張材は、石灰系とC S A系に分けられ、石灰系の方がより大きな膨張を必要とする場合に適している²⁾。

連続合成桁の検討の際、中間支点付近の床版の引張応力が問題となるが、膨張コンクリートを用いてプレストレスを導入する事で緩和することができる。この膨張コンクリートの配合は、必要とされるプレストレス量、現場の環境条件、材料特性を勘案し決定する必要がある。ここではその関係を明らかにし、膨張コンクリートの配合を決定するため、配合試験を行った³⁾。

また、膨張材は石灰系の材料を使用した。

(1) 基本配合

膨張コンクリートの基本配合は日本道路公団(JH)の基準により決定した。表－1に基本配合を示す。ここで表中の Ex は膨張材を示している。このコンクリートは設計基準強度として 39.2N/mm² (400kgf/cm²)を想定している。

(2) 試験目的

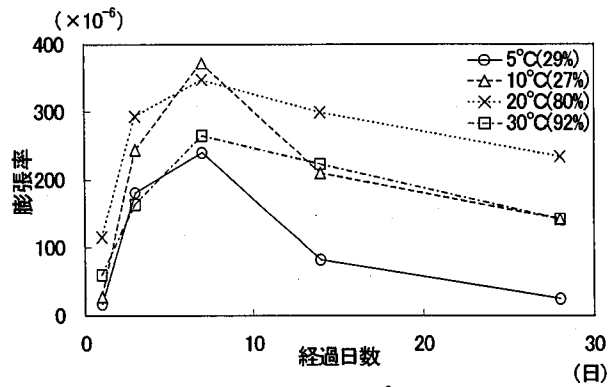
膨張コンクリートの環境温度、強度、膨張材配合量の関係を明らかにし、膨張コンクリートの配合ならびに養生管理温度を決定することを目的とする。よって、以下の関係を明らかにする。

- ①強度発現と膨張率の関係
- ②膨張材配合量と膨張率の関係
- ③環境温度の膨張特性に与える影響

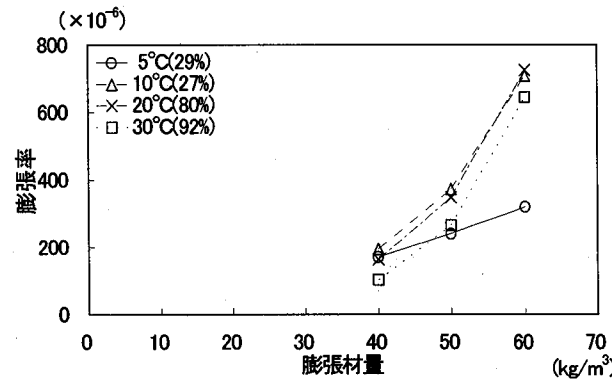
(3) 試験項目および方法

膨張コンクリートの特性を明らかにするために、以下の試験を行った。

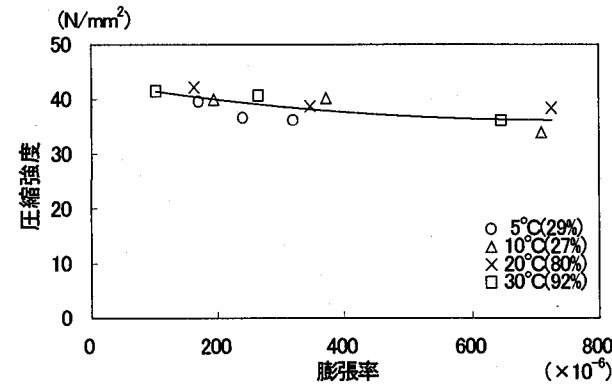
スランプ試験 JIS A1101, 空気量の測定 JIS A1128,



図－1 膨張材量50kgf/m³の場合の膨張率



図－2 膨張材配合量と膨張率の関係(7日目)



図－3 圧縮強度と膨張率の関係(7日目)

圧縮強度試験 JIS A1108, 静弾性試験 JSCE-G502, 拘束膨張試験 JIS A6202(鉄筋比 0.95%)

圧縮強度試験については7日目までは型枠をつけたままの湿布養生とし、以後脱型し水中養生を行った。また、拘束膨張試験においては7日目まで水中養生とし、以後は気中養生とした。

表－1 コンクリート配合

	種 別	スランp (cm)	Air (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						W	C	S	G	Ex	P z 70	Pz 101
1	Ex-0	8±2.5	4.5±1.5	36.5	35.0	170	466	580	1106	0	1.49	3A
2	Ex-40	8±2.5	4.5±1.5	36.5	35.0	170	426	580	1106	40	1.49	3A
3	Ex-50	8±2.5	4.5±1.5	36.5	35.0	170	416	580	1106	50	1.49	3A
4	Ex-60	8±2.5	4.5±1.5	36.5	35.0	170	406	580	1106	60	1.49	3A

(4) 試験結果

膨張材量が 50kg/m^3 の場合の膨張率を図-1に示す。ここで、図中の%のついた数値は湿度を示している。温度が 10°C 、 20°C の場合がもっとも膨張している。7日目以降に膨張率が減少しているのは、養生方法を水中養生から気中養生に切り替えたために、乾燥収縮が発現しているためである。

膨張材配合量と膨張率(7日目)の関係を図-2に示す。結果として温度が $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ であれば、膨張材量の増加に従い、膨張率は増加する。 5°C の場合でも膨張率は増加するが、他の温度に比べて増加量は少ない。

圧縮強度と膨張率(7日目)の関係を図-3に示す。膨張率が増加するにつれて圧縮強度が若干減少する傾向があるが、配合設計時にこのことを考慮すれば強度上の問題はない。

以上の結果より、膨張率を 600×10^{-6} 程度確保し、圧縮強度の低下を考慮して、膨張材配合量を 55kg/m^3 、管理温度を $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ と決定した。

3. ケミカルプレストレスの計算

今回の実験桁の設計計算と実験値を比較するための計算値の算出には、基本的に道路橋示方書の合成桁の計算式を使用した⁴⁾。膨張コンクリートに関しては、膨張コンクリート設計施工指針に鉄筋の拘束によるケミカルプレストレスの計算法が示されており、これを使用する⁵⁾、⁶⁾。また、桁との合成効果によるプレストレスの処理は、「膨張現象は乾燥収縮と正負逆な現象」と考え、道路橋示方書の乾燥収縮の計算方法を拡張してケミカルプレストレス量を算出した。以下に計算方法を示す。

(1) 鉄筋比に関わらず、単位体積あたりの膨張エネルギーが変わらないとして、拘束膨張試験で規定されている鉄筋比 0.95% 時の膨張率の条件から膨張エネルギー U を計算する。

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{CP} \epsilon$$

$$= \frac{1}{2} P_r E_s \epsilon^2 \quad \dots (1)$$

ここに、

σ_{CP} : コンクリートのケミカルプレストレス量
 P_r : 拘束鉄筋比 (A_{st}/A_c)
 E_s : 鉄筋のヤング係数
 ϵ : 鉄筋の膨張ひずみ
 A_{st} : 鉄筋断面積
 A_c : コンクリート断面積

式(1)より、任意の鉄筋比における拘束鉄筋のケミカルプレストレイン ϵ_{SP} は、

$$\epsilon_{SP} = \sqrt{2U/E_s P_r} \quad \dots (2)$$

式(1)、(2)より、コンクリートのケミカルプレストレス σ_{CP} は、

$$\sigma_{CP} = \sqrt{2UE_s P_r} \quad \dots (3)$$

(2) 計算されたケミカルプレストレス量は、コンクリートと鉄筋の間で発生するものであるから、桁との合成効果を考えて乾燥収縮と同様の式(4)を適用する。

$$\sigma_c = \frac{1}{n'} \left(\frac{P'}{A_v'} + \frac{M_v' y_v'}{I_v'} \right) + E_c' \epsilon + \frac{\Delta M_v' y_v'}{n' I_v'} \quad \dots (4)$$

ここに、

σ_c : 膨張コンクリートによるクリープ応力度
 n' : 膨張による応力度算出用ヤング係数比
 P' : 膨張による仮想軸力
 M_v' : 膨張による仮想モーメント
 A_v' : n' を用いた換算合成断面積
 I_v' : n' を用いた換算合成断面 2 次モーメント
 y_v' : n' を用いた中立軸からの距離
 E_c' : n' を用いたコンクリートヤング係数
 ϵ : 膨張率

クリープ係数 ϕ は乾燥収縮より膨張が早く始まるため、道路橋示方書の乾燥収縮の計算で用いる ϕ より大きな値になる事が考えられるが、測定例がないため乾燥収縮の場合と同じ値 $\phi=4$ を使用することとした。

(3) ケミカルプレストレスによるクリープも考慮する。ここで、クリープ係数は $\phi=2$ として計算する。プレストレスとしては、桁の拘束によるプレストレスを除いた値である式(3)による計算値を用いる。桁の拘束による影響は乾燥収縮の場合と同様に考えて式(4)の膨張計算時に考慮されているものとする。

(4) 連続桁の場合には上記により生じた応力度から、弾性荷重を計算し、それぞれに対する不静定力を計算する。

4. 載荷実験

4. 1 実験概要

本実験では大支間の少数主桁連続合成桁の中間支点付近をモデル化し、膨張コンクリートによるケミカルプレストレスの効果および、ケミカルプレストレスとジャッキ操作の併用効果を確認する。ここでジャッキ操作とは、コンクリート打設前に中間支点でジャッキアップを行い、打設後にジャッキダウンを行うことである(以後、ジャッキ操作と略す)。また、膨張コンクリートとの比較のため、普通コンクリート床版の実験桁についても載荷実験を実施する。以後、普通コンクリートをA桁、膨張コンクリートのみをB桁、膨張コンクリートとジャッキ操作の併用をC桁とする。

今回モデル化を行う際に想定した橋の規模は、最大支間が 100m、主桁間隔が 10m の連続合成桁である。

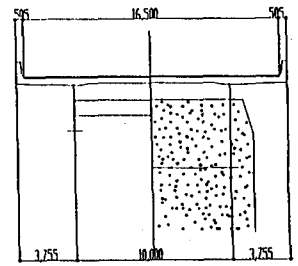
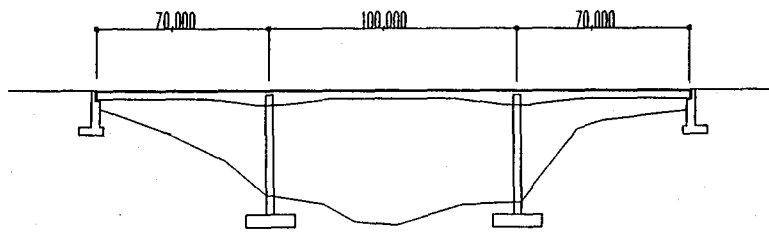


図-4 モデル橋一般図

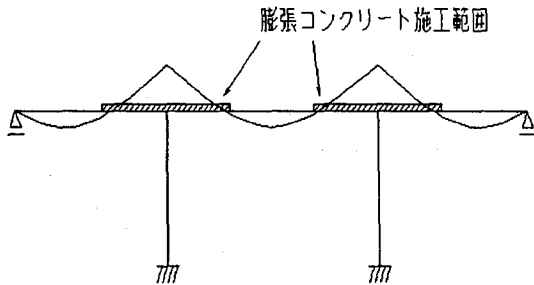


図-5 膨張コンクリート施工範囲

図-4に一般図を示す。また、図-5に膨張コンクリートの施工範囲を示す。膨張コンクリートは床版に圧縮のプレストレスを与えるものであるから、荷重によりコンクリートに圧縮の生じる支間中央に膨張コンクリートを使用することは床版にとって不利となる。したがって、桁に負の曲げモーメントが作用し、床版に引張が生じる範囲に膨張コンクリートを施工することを想定する。

モデル橋の諸条件を以下に示す。

橋長 : 240m , 有効幅員 : 16.5m
 最大支間長 : 100m , 主桁間隔 : 10.0m
 横桁間隔 : 6m , 床版厚 : 380mm
 主桁高さ : 3.0~5.5m
 設計荷重 : B活荷重
 コンクリート設計基準強度 : 39.2N/mm²
 (400kgf/cm²)

4. 2 実験桁の諸元

実験桁は中間支点上の床版の挙動やプレストレスを確認するのが目的のため、合成桁の諸元はモデル橋との比較を考えて定めている。床版に関しては、床版厚と鉄筋比はモデル橋に合わせてそれぞれ 380mm、2%とし、床版の幅に関しては有効幅内に収まるように設定した。桁断面に関しては、床版と鋼桁の断面 2 次モーメント比がモデル橋と実験桁で同じ程度になるようにしている。図-7に実験桁・載荷梁の一般図を示す。

実験桁におけるプレストレス量の目標値はモデル橋との比較を考えて、ジャッキ操作、膨張コンクリートでのおおの 2.9N/mm² (30kgf/cm²) とする。これは、モデル橋中間支点上において、合成後死荷重ならびに活荷重による引張応力度を打ち消す値である。なお、ジャッキアップ力は 50tf に相当する。

上記の条件を用いて、コンクリート床版部の応力度を計算した結果を表-2に示す。ここで表中の有効プレストレスは、クリープによる減少量を加味したプレストレスである。また、各実験桁の M-φ 曲線を図-8に示す。ここで、M-φ 曲線の計算ではコンクリートのひび割れ発生応力を 2.5N/mm² (25kgf/cm²) とし、無載荷時において、乾燥収縮、クリープによる変形を見込んだ計算を行っている。計算では、B 桁において A 桁と比較してひび割れ発生モーメントが倍程度まで増加する。

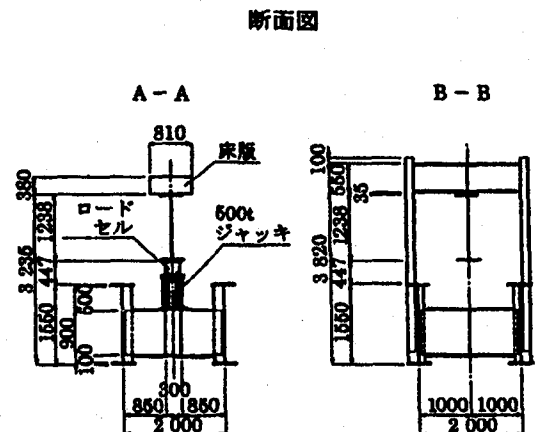
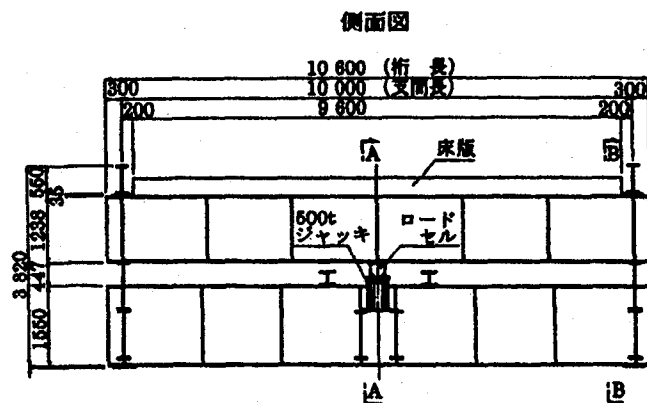


図-7 実験桁および載荷梁の一般図

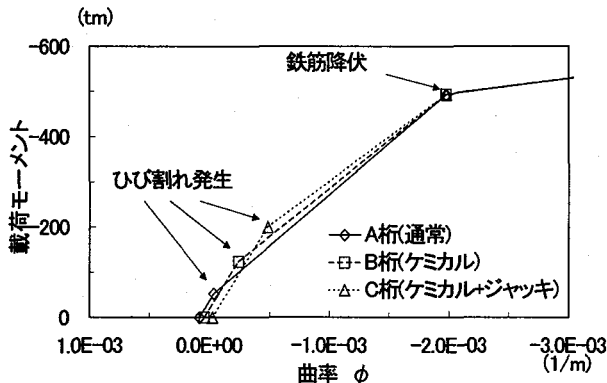


図-8 実験桁M- ϕ 曲線

表-2 実験桁の床版応力度 (N/mm²)

コンクリート		A 桁	B 桁	C 桁
上縁	プレストレス	0.00	-2.83	-7.95
	クリープ	0.00	0.47	2.83
	乾燥収縮	0.54	0.54	0.54
	温度差 (+)	0.13	0.13	0.13
	(-)	-0.13	-0.13	-0.13
	有効プレストレス	0.00	-2.36	-5.12
下縁	プレストレス	0.00	-3.69	-5.24
	クリープ	0.00	0.94	0.55
	乾燥収縮	0.96	0.96	0.96
	温度差 (+)	1.12	1.12	1.12
	(-)	-1.12	-1.12	-1.12
	有効プレストレス	0.00	-2.75	-4.69

4. 3 実験内容

実験は屋外に実験場を設けて実施した。実験実施にあたっては、橋梁架設現場での施工を念頭に置いて、コンクリート床版部の施工を行った。すなわち、型枠、配筋、コンクリート打設および養生を現場の施工に沿った方法で行った。特に、コンクリートの養生は、コンクリートの打設が冬季である2月上旬であったため、十分注意して行った。脱型まではコンクリート付近の温度を出来るだけ10℃～20℃になるようにし、継続して散水を行った。主な計測内容は下記の通りである。

(1) コンクリート養生中

コンクリート養生中のクリープ、乾燥収縮、膨張率等の把握を目的として、コンクリート打設後1ヶ月間の連続計測を行った。計測はデータロガーとパソコンを接続し自動で行った。計測項目は以下の通りである。

コンクリートの歪計測、鉄筋の歪計測、
鋼桁の歪計測、桁の変形量、反力計測、
コンタクトゲージによる歪・ひび割れ幅計測

(2) 荷重載荷時

載荷試験時(コンクリート打設28日経過後)に(1)と同様の計測を行った。荷重の載荷は、コンクリートのひび割れ発生を確認しながら載荷し、桁の耐力が限界に達するか、コンクリートのひび割れが限界に達するまで行った。

(3) 現場供試体試験

実際に現場で施工されたコンクリートの品質確認を行うため、野外実験場(以後、現場と略す。)での供試体試験を行った。また現場では実験室と違って管理をおこなっても温度が変動するため、この影響についても確認する。主な試験内容を以下に示す。

スランブ試験、空気量測定試験、コンクリート温度、拘束膨張試験、静弾性係数試験、圧縮強度試験、引張強度試験、曲げ試験(拘束膨張試験体使用) 拘束圧縮試験:鉄筋比2%で拘束した試験体(20×20×22cm)を6本作製する。材齢7日、28日で脱型して $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ でコアを抜き、両面研磨後圧縮強度試験を実施する。

4. 4 実験結果

(1) 供試体の試験結果

実験結果を図-9～11に示す。ここでは、現場養生による結果に加え、恒温室による結果も示している。

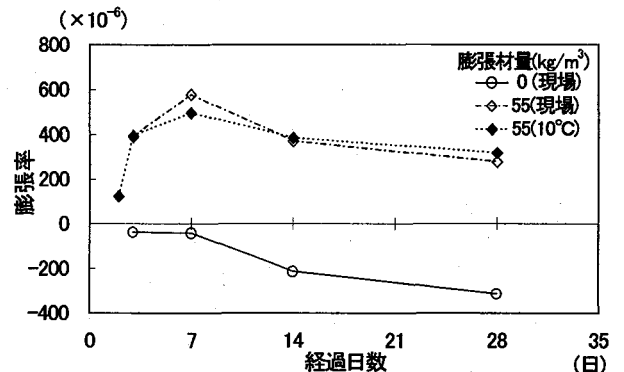


図-9 現場養生における膨張率

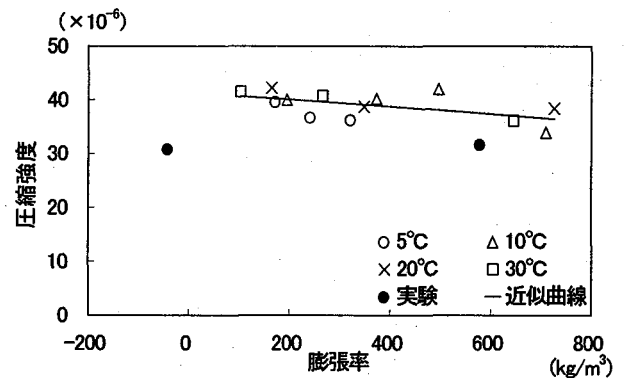


図-10 圧縮強度と膨張率の関係(7日目)

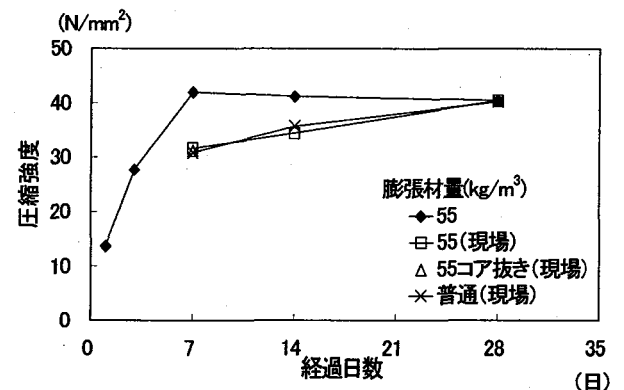


図-11 現場養生における圧縮強度

図-9は膨張率を示したものである。現場で養生したものも、恒温室の結果とほぼ同程度の値が計測されている。現場では10℃程度の変化が生じているが、このような条件に対しても膨張率は期待した値になっていることが確認できる。図-10は7日目での圧縮強度を示しているが、恒温室の結果と比べ低い値が出ている。これは、普通コンクリートも同様である。しかしながら、図-11を見ると28日強度では恒温室とほとんど差は認められない。また、通常の圧縮供試体では型枠の拘束効果が大きく、床版のような鉄筋による拘束効果が不明であったため、2%の鉄筋比を考慮した供試体を作成しコア抜き試験を行ったが、強度に差は認められなかった。

以上の結果より、今回想定した膨張材配合量55kg/m³では極端な強度低下は起こさないこと、多少の温度変動があっても膨張率は確保されることが確認できた。また、現場での養生においても強度発現が若干遅れるものの、28日強度では特に問題がないこと、床版のような型枠拘束のない場合においても強度が確保できることが確認できた。

(2) 養生中の計測結果

今回の実験において実験桁を28日間養生したが、その結果の代表として、床版上側のひずみの推移を図-12に示す。また、床版上縁の膨張率計算結果を表-3に示す。図-12より計測値では各桁とも初期に膨張を示し、その後、乾燥収縮、クリープにより、コンクリートのひずみが増加しているのが確認できる。B、C桁は膨張コンクリートを使用しているため、300×10⁻⁶以上のひずみが計測されている。また、C桁が途中でひずみが大きく変化しているのは、ジャッキダウンを行った所である。これによりケミカルプレストレスに加えジャッキダウンによるプレストレスが発生し、クリープひずみが増大し、膨張ひずみの減少量がB桁に比べ大きくなっている。

①膨張率の比較ならびに計算結果の検証

今回使用した計算方法と、実際の膨張率にどの程度の差があるかを確認するため、7日目における膨張率を計算による値と比較した。図-13a～cにその結果を示す。

図-13aは、A桁の結果であるが普通コンクリートを打設し養生を行った桁でも、若干の膨張が確認で

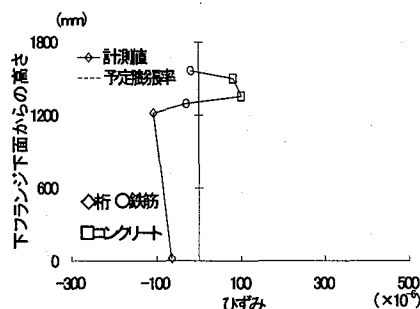


図-13a A桁中央断面ひずみ分布(7日目)

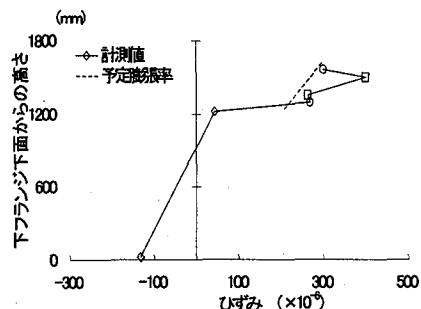


図-13b B桁中央断面ひずみ分布(7日目)

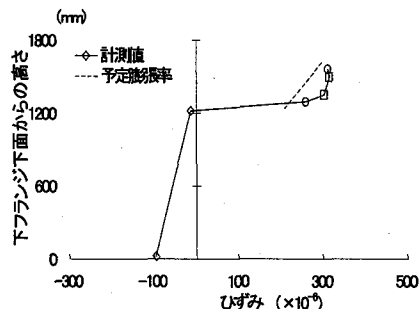


図-13c C桁中央断面ひずみ分布(7日目)

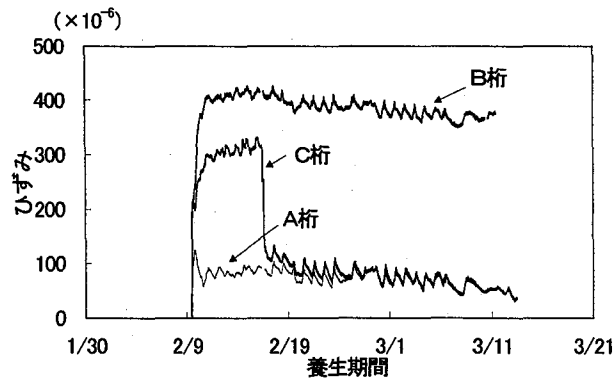


図-12 養生時の床版上側のひずみ

表-3 床版上縁の予定膨張率

計算条件	予定膨張率(×10 ⁻⁶)
鉄筋比2%*	412
桁による拘束	-115
合計	297

*鉄筋比0.95%時、600×10⁻⁶

きる。これはコンクリートを水中で養生すれば初期に100×10⁻⁶程度膨張する為であり、7日目までは湿潤養生に近い状態であるため、それほど収縮量として出なかったと考えられる。

図-13bは、膨張コンクリートを打設し養生を行ったB桁であるが、膨張率は予定した量が出ており養生が良好であったと考えられる。全体では、初期膨張の分が加味されているため大きめの膨張率が測定されていると考えられる。

図-13cはC桁の結果である。C桁は、B桁よりも膨張率が若干少ない。C桁はジャッキ操作のためにB桁よりも高い位置で養生されており、平均で2～3℃程度B桁よりも低い温度であった。膨張コンクリートの養生では約10℃以上は確保されることが望ましく、今回は10℃を下回る時期もあったため、C桁の膨張率が若干抑えられていたと考えられる。

以上より、今回の養生は個々で若干の差はあるものの良好であったと考えられる。また、膨張率に対する計算方法の仮定に問題がないことが確認できた。

②ジャッキ反力の推定

実験では、コンクリート打設より1週間でジャッキダウンを行った。実際にジャッキ力が予定通り入ったかどうかを計測ひずみより逆算し、確認を行った。ジ

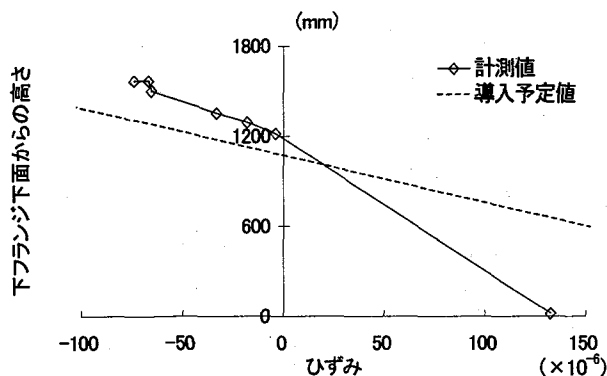


図-14 ジャッキダウン時のひずみ変化量

表-4 反力変化量の推定

測定位置	計算値(tf)	予定導入量(tf)
桁平均	28.2	56.6
床版平均	33.3	
鉄筋平均	26.6	

ジャッキ操作時の断面ひずみの変化量を図-14に示す。また、ひずみから求めた中間支点反力の変化量を表-4に示す。

ジャッキ操作による反力変化量の目標値は 56tf 程度の予定であった。しかしその測定結果から推定される導入量は平均で 30tf 程度であった。ジャッキ操作によるプレストレスが少なかった原因として、ジャッキ操作量の測定値の誤差、モデル化による誤差などが考えられる。

(3) 載荷実験の結果

① P- δ 曲線

図-15a~cに載荷実験より得られた P- δ 曲線と計算による予測値を示す。計算による予測値は、コンクリートがひび割れ荷重に達した断面は剛度を「桁+鉄筋」にするなど、各断面状態を考慮し剛度を変更し計算を行った値である。また、ここでの計測結果の変位は上向きを+としている。

図-15aは、普通コンクリートであるA桁の結果である。ひび割れ発生荷重は 30t であった。また、全体的に予測値よりも変形しているが、これは剪断変形の影響のためと考えられる。図-15bは、ケミカルプレストレスのみのB桁、図-15cはジャッキ操作を併用したC桁である。図よりそれぞれ導入したプレストレスに応じてひび割れ発生荷重が増加していることが認められる。また、載荷、除荷を繰り返した結果、鋼桁が降伏していない場合でも除荷時の変位に差が出ている。これは、後述する内部応力の開放が原因であると考えられる。各桁を比較すると相対的にC桁の残留変位が一番小さい。B、C桁の違う原因は膨張コンクリートの使用とジャッキ操作による効果と考えられる。

② P- ϵ 曲線

図-16a~cに載荷実験時の、桁中央上縁鉄筋ひずみの状態を示す。また、同時に計算による予測値も示す。計算は以下の手順で行った。

- ひび割れ発生までは「合成断面（桁+コンクリート）」として抵抗する。
- ひび割れが発生した時には、ひび割れ発生断面に着目して、コンクリートは外力を分担しないが、鉄筋は外力を分担すると仮定し、「合成断面における鉄筋ひずみ」から、「非合成断面（桁+鉄筋）」における鉄筋ひずみの計算を行う。
- ひび割れ発生後は、コンクリートと鉄筋の付着が切れていくことにより、内力（乾燥収縮、クリープ等）が開放されていく。この時、ひび割れ発生後はコンクリートはないものとし、鉄筋、桁は内力を保持しないとする（開放される内力

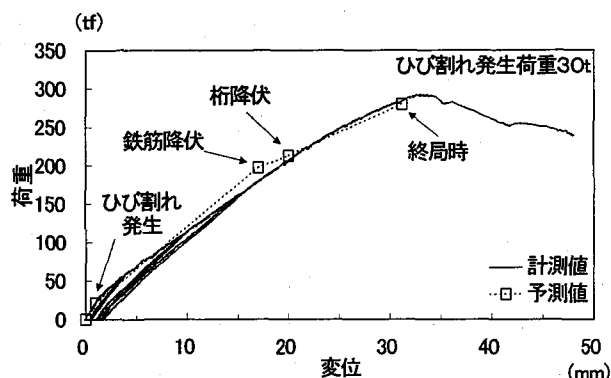


図-15a A桁荷重変位曲線

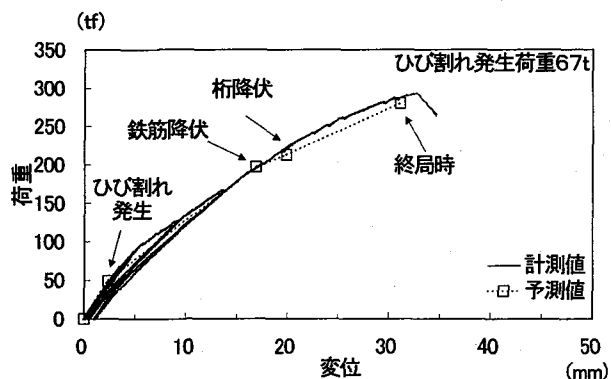


図-15b B桁荷重変位曲線

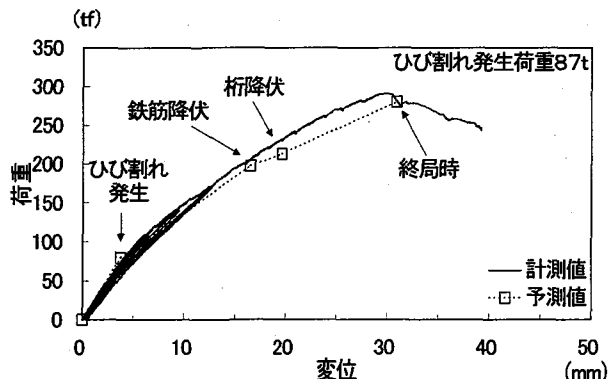


図-15c C桁荷重変位曲線

はプレストレスも含んだ全てである)。ただし、ジャッキ操作による内力は、鉄筋とコンクリートの間でおきているものではないことから、開放されないものとする。図では比較のため内力が開放されないケースも計算を行っている。

- (d) 荷重を除荷して行き、コンクリートが再度接するようになると、合成断面に近い挙動を示す。計算では、合成状態においてコンクリートの応力が0になるポイントを割り出し、その時点での鉄筋ひずみと除荷時の鉄筋ひずみが一致したら、再合成として計算する。

図-16aはA桁上縁鉄筋のP- ϵ 曲線である。ひび割れが発生するまでは、傾きは合成断面としての計算結果と一致している。そして荷重を増加させ、ひび割れが発生した時に鉄筋のひずみが大きく増加するがこの原因として以下の2つが考えられる。

- (a) コンクリートの負担していた分が、コンクリートがひび割れたことにより鉄筋に移行する。
- (b) 内部応力である乾燥収縮による鉄筋の収縮が部分的に開放された為に、鉄筋のひずみが引張側にシフトする。

上記の理由により、ひび割れ発生時に引張方向にひずみがシフトすると考えられるため、荷重を完全に除荷しても、引張方向のひずみが残ることになる。また、ひび割れ発生時には発生したひび割れ部分にひずみが集中することになるため、桁全体を非合成断面とした場合よりも、大きなひずみが発生する。このひずみは荷重が増加し、ひび割れ本数が増えるに従って分散され、非合成断面の計算結果に近づいていく。

図-16bはB桁の結果である。桁に載荷して、しばらくは合成断面よりも緩い傾きを示し、その後に合成断面の計算結果とほぼ同じ傾きになり、ひび割れが発生している。この初期の傾きは荷重を除荷した後も同様の傾向である。ケミカルプレストレス導入時において、荷重レベルが低い時には不完全な合成桁断面となっているものと推察される。荷重が載荷されるに従い、ひずみは圧縮側にずれたのちにひび割れが発生し、引張側へ大きくシフトする。この圧縮側へのずれはケミカルプレストレスにより与えられていた鉄筋の引張ひずみがマイクロクラックの発生により開放されたためではないかと推察される。

ひび割れ発生時には、A桁と同様に各内力（乾燥収縮、クリープ、膨張）の開放、コンクリート負担分の鉄筋への移行、ひずみの集中により引張側へ大きくシフトする。その後、集中したひずみが分散されつつ、内力が開放されていくが、B桁はケミカルプレストレスを導入した桁であるため、計測される鉄筋の残留する引張ひずみが減少する傾向にある。これは、乾燥収縮、クリープのよる圧縮方向ひずみの開放量よりも、

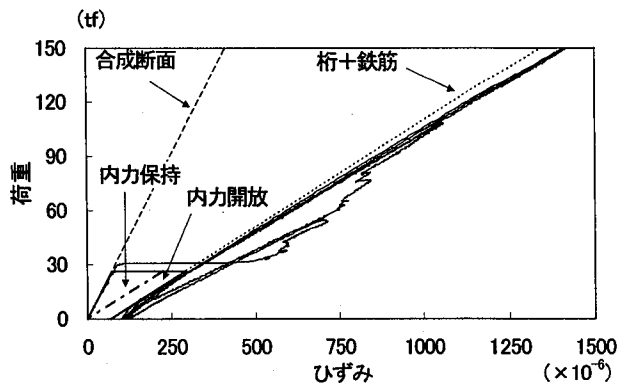


図-16a 上縁鉄筋ひずみA桁

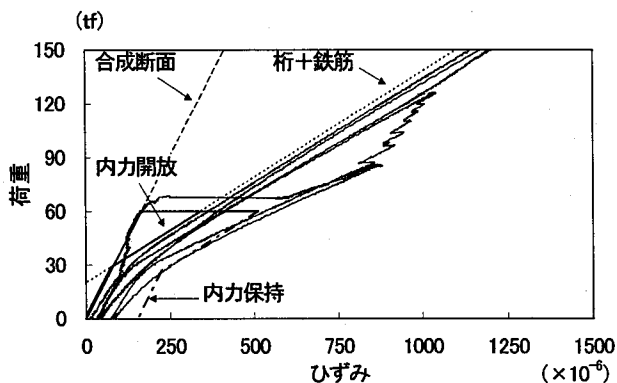


図-16b 上縁鉄筋ひずみB桁

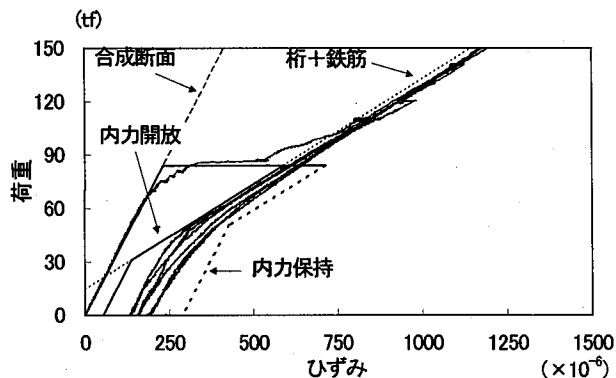


図-16c 上縁鉄筋ひずみC桁

ケミカルプレストレスによる引張方向ひずみの開放量が大きいためと考えられる。このため、残留するひずみはA桁（普通コンクリート）に比べ小さくなる。また、内部応力の開放によるひずみが圧縮方向に働いたため、コンクリートのひび割れ幅は小さくなる傾向がある。このため、ひび割れ発生後に荷重を除荷していく際、A桁よりも早い段階で非合成断面が再び合成断面として挙動するという傾向がグラフに現れている。

図-16cのC桁は、今回実験した中でもっともプレストレスを導入した桁である。このため、ひび割れ発生荷重は他の桁よりも大きくなり、ひび割れ発生後の応力再配分によるひずみや、クリープの開放によるひずみが大きくなっている。また、ジャッキ操作によるプレストレスは、コンクリートがひび割れても内部応力の開放の点では、ケミカルプレストレスと違い、ひび割れ幅制御には有利に働かないと考えられる。

ケミカルプレストレスでは鉄筋に引張力、コンクリ

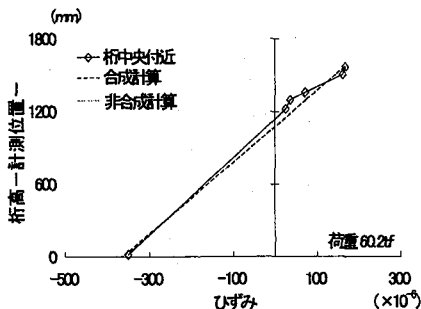


図-17a 初期合成時のひずみ分布

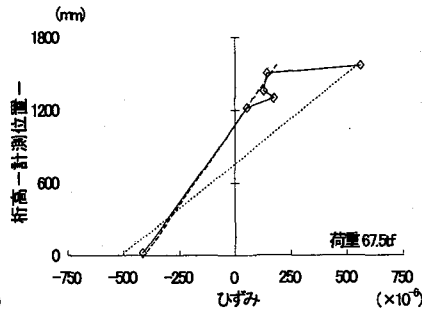


図-17b ひび割れ発生時のひずみ分布

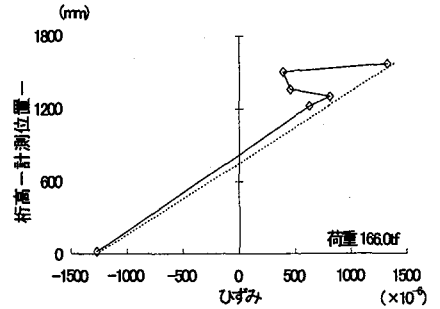


図-17c ひび割れ進展時のひずみ分布

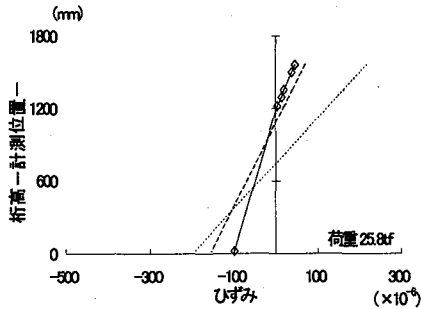


図-17d 再合成時のひずみ分布

ートに圧縮力が作用して釣り合っている状態であり、コンクリートの内部応力開放の影響が鉄筋に圧縮方向のひずみとして生じる。しかし、ジャッキダウンを行ったC桁ではコンクリートと鉄筋間には特に打ち消すような力の釣り合いは無く、同方向の圧縮方向のひずみが生じている。これより、ジャッキ操作ではコンクリートがひび割れて内部応力が開放されても、鉄筋には圧縮方向のひずみは作用しないと考えられる。しかし、C桁にもケミカルプレストレスは使用されており、除荷していく際に早い段階で再び合成化していく傾向がグラフに現れており、桁に生じたひび割れがこの段階で再び閉じていると推察される。

③断面内のひずみの状態

図-17a～dはB桁の荷重時における桁中央断面内のひずみ状態を示したものである。まず、ひび割れ発生前までの状態(a)では、合成断面の計算結果とほぼ一致している。そして、ひび割れが発生した時点(b)では、鉄筋が大きく非合成断面状態にシフトしているのがわかる。この時、鋼桁におけるコンクリートのひび割れの影響は、桁全体に分散されるため合成断面と一致したものと推察される。荷重、除荷を繰り返しひび割れが進展してくると(c)、全体的に非合成断面にシフトしてくる。一部一致していない点は、コンクリートひずみ計であり、コンクリートのひび割れが進展し、応力を分担していない事が確認できる。B桁ではコンクリートがひび割れを発生し、応力を分担しなくなっても、荷重の初期段階で勾配が合成断面の勾配になっている(図-16b, c)。これは、ひび割れが閉じて再度コンクリートが応力を分担するようになっていると考えられる。これを断面状態で確認したのが(d)である。計測値は合成断面の計算値と若干違った勾配を示すが、ほぼ一直線上であり、再合成し

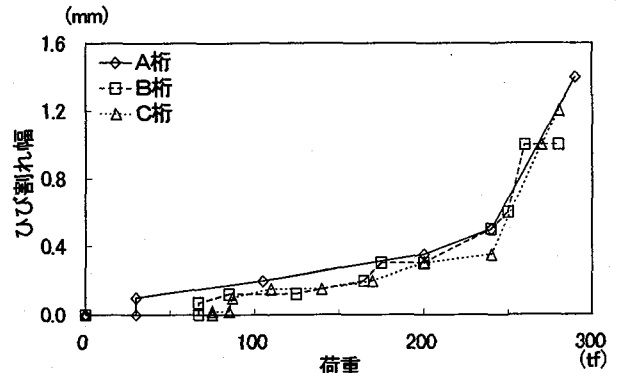


図-18 ひび割れ幅進展状況

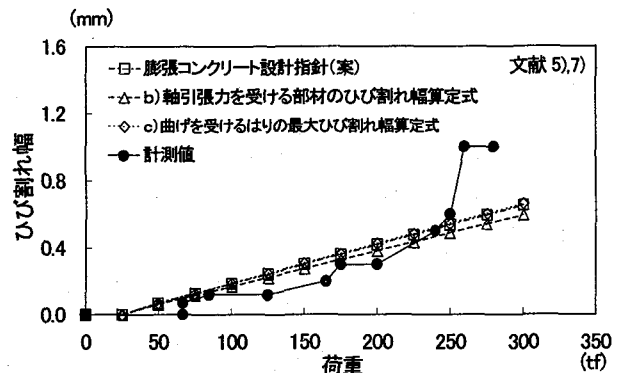


図-19 ひび割れ幅(B桁)

ていると考えられる。

④ひび割れ進展状況

図-18に各桁の桁中央のひび割れ幅進展状況を示す。プレストレスの導入に従ってひび割れ発生荷重が増加しているのが確認できるが、ひび割れ発生後はどの桁もほぼ同様の勾配を示している。また、C桁はケミカルプレストレスに加えジャッキ操作を行っているが、B桁とラインがほとんど一致している。つまり、膨張コンクリートによるケミカルプレストレスは、ひび割れ幅の抑制に効果が認められるが、ジャッキ操作によるプレストレスは初期のひび割れ発生荷重は増加させるが、ひび割れ幅の抑制の点ではあまり効果が無いと考えられる。

図-19はB桁のひび割れ幅と計算値を比較したものである。計算値は膨張コンクリート設計指針と日野らの式⁷⁾により計算を行った。また、ここでのひび割れ幅の計算には、最大ひび割れ間隔として計測値を適用し、乾燥収縮、クリープ等によるひずみに対しては文献⁸⁾をもとに、1ヶ月間分を見込むとして合成桁の

計算から得られる値の50%を適用した。計算結果では、計測値は全ての計算式を下回るものの、軸引張を受ける部材の計算式に近い挙動を示している。これは中立軸から床版までの距離があるため、床版断面だけに注目した場合、引張軸力が作用した場合と同じ様な力が作用していると考えられる。

なお、今回のひび割れ発生間隔は、最大で 250mm 程度であり、この間隔はジベルピッチとほぼ一致するものであった。

5. まとめ

本研究では連続合成桁の中間支点部を想定した実験桁を製作し、膨張コンクリートによるケミカルプレストレスの適用性について検討し以下の結論を得た。

(1) ケミカルプレストレスとジャッキ操作によるプレストレスでひび割れ荷重を活荷重合成時の荷重レベルまで上げられることが確認できた。また、計測値と計算による予測値は比較的良好に一致し、計算方法は妥当であったと言える。使用した計算方法は道路橋示方書の乾燥収縮の計算式を拡張したものであり、比較的容易に計算、設計が行えると考えられる。

(2) ジャッキ操作とケミカルプレストレスの組み合わせは鉄筋に生ずるひずみを打ち消し合い、プレストレスの効果を向上させる。

(3) ケミカルプレストレスを使用した桁では、ひび割れ発生後に荷重を除荷する過程で、再度合成する傾向が見られた。このことによりひび割れが発生した後も、再度合成断面として働くことが期待できる。

(4) ケミカルプレストレスを導入した桁には、ひび割れ幅を小さくする効果がある。また、床版のひび割れ幅は引張軸力に対するひび割れ算定式がより近い値を示す。

連続合成桁へのケミカルプレストレスの適用について、基本的な特性を確認し、良好な結果を得ることが

出来た。しかし、実用化に当たっては下記に示すような課題を残している。

- ・長時間経過に伴うプレストレスの抜けの問題
- ・疲労強度の実験的確認
- ・架設上の制約を考慮したケミカルプレストレス量の設定
- ・コンクリート打設時期、養生を考慮したケミカルプレストレス量の設定

これらの点について今後も継続して検討を進めることを考えている。

参考文献

- 1) 増田隆, 岡米男, 木曾茂: 鋼橋における膨張コンクリート床版の特性, 日本道路公団試験所報告 Vol.27, pp.45-59, 1990
- 2) 長瀧重義: コンクリートの高性能化, 技報堂出版, pp.39-46, 1997.11
- 3) 戸川一夫, 中本純次: 膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響, 土木学会論文報告集 第 321 号, pp.177-187, 1982.5
- 4) 社団法人 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, 丸善, 1996.12
- 5) 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 号一, 1993.7
- 6) 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, pp.111-124, 1975.3
- 7) 日野伸一, 山田岳史, 太田俊昭, 太田貞次: 鋼・コンクリート連続合成床版橋の中間支点部でのひび割れ特性, 土木学会論文集 No.612/I-46, pp.153-163, 1999.1
- 8) 村田二郎: 改訂新版・コンクリート技術 100 構, 山海堂, pp.194-197, 1993.5

(1999年9月17日受付)