

連続合成桁のひび割れと ケミカルプレストレスの適用に関する研究

木村 充* 細見 雅生**

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注目されている。連続合成桁では中間支点曲げ部のコンクリート床版を橋梁の合理化と耐久性から、膨脹コンクリートを使用したケミカルプレストレスの適用を考えられる。ケミカルプレストレスの効果について普通コンクリート床版と比較検討と長期材齢時におけるケミカルプレストレスの持続性の確認した過去の成果^{1),2),3),4),5)}も含めてまとめた。

キーワード：連続合成桁、ケミカルプレストレス、膨脹コンクリート、長期持続性

に述べる。

1. はじめに

近年、経済的な橋梁形式として連続合成桁の採用が再び増加する傾向にある。連続合成桁の設計にあたっては、中間支点部で発生する負曲げモーメントによるコンクリート床版のひび割れ対策が重要な検討課題となる。このひび割れ対策として、①コンクリートにプレストレスを導入する方法、②ひび割れの発生を許容するが、幅を許容値以内とする方法が挙げられる。前者の方法は建設コストアップの要因となることから、後者の方法を採用する動向にある。

ここでは後者の方法の一つとして現場施工の膨脹コンクリートを使用したケミカルプレストレスを適用した場合について報告する。このケミカルプレストレスを積極的に導入することで、中間支点上のコンクリート耐久性の高い床版になることを期待したものである。適用の際の検討項目として以下の2点が挙げられる。

- ① ひび割れ幅の検討
- ② 長期持続性の検討

これらについて理論式を構築し、実験を行うことで妥当性を証明し、膨脹コンクリートを用いたケミカルプレストレスによる効果を検討する必要がある。そのため、上記2点について詳細を以下

(1) ひび割れ幅の検討

コンクリートのひび割れ幅の算定を行うことにより、膨脹コンクリートが普通コンクリートと比較して小さくなっており有用なものであるかを検討する必要がある。そのためには、コンクリートのひび割れ幅を適切に評価することが重要な課題となる。ひび割れ幅の算定法として、我が国では、3通りの方法^{6)~8)}が提案されている。文献6)、7)はともにコンクリート標準示方書⁹⁾に規定される桁の曲げひび割れ幅算定法をベースとしているが、鉄筋応力(ひずみ)の扱いに差異がある。すなわち、文献6)は中間支点位置を「鋼桁+鉄筋」断面の状態とみなして応力を求める。この場合、最大ひずみ、平均ひずみに関係なく唯一のひずみが求まる。一方、文献7)は、コンクリートの引張剛性すなわち”tension stiffening”効果を考慮している。つまり、コンクリートはひび割れても伸び剛性に寄与しており、そのため、負担する軸力、あるいは導入される軸力が「鋼桁+鉄筋」断面とした場合に比べて大きくなることを考慮し、平均応力(ひずみ)を用いる。文献8)は、文献6)、7)が実際のひび割れ状態と関係なく常に安定ひび割れ状態を仮定している点に矛盾があるとの立場から、ひび割れ状態を初期ひび割れ時、移行時ひび割れ状態、安

定ひび割れ状態に区別したひび割れ幅の算定式を提案している。ここで、安定ひび割れ状態とは、新たなひび割れが発生しない程度にひび割れが発生し、ひび割れ幅が広がっていく状態を示し、移行時ひび割れ状態とは、ひび割れが次々と発生する状態のことを示す。

上記に示した算定式と実験結果を比較し、ひび割れ幅とひび割れ荷重に関する理論式の妥当性を証明する。

(2) 長期持続性の検討

コンクリートが経年変化によるクリープ乾燥収縮の影響が大きくなり、膨脹コンクリートのケミカルプレストレスが小さくなる。普通コンクリートの場合と比較して効果の長期持続性が発揮されているかの検討を行う必要がある。ケミカルプレストレスの長期持続性については、打設後5年経過した試験桁を用いた載荷実験を実施している。また、膨脹コンクリートによるケミカルプレストレスの効果を乾燥収縮とは逆の作用として計算し、これをプレストレス導入量として扱い、これに加えて5年経過時の乾燥収縮とクリープによるプレストレス低減値を計算している。この計算値と実験結果を比較し、計算方法の妥当性とケミカルプレストレスの長期持続性について確認した結果を報告する。

2. 理論的検討

(1) ケミカルプレストレス量の計算

プレストレス量の計算値はひび割れ発生荷重を求めるため床版上面を算出した。

拘束膨張試験で規定されている基準鉄筋比0.95%における膨脹率の条件から拘束鉄筋比に換算した単位体積あたりの膨脹エネルギー U を(1)式より計算し、(2)式よりコンクリートのケミカルプレストレス σ_{cp} を求める。

$$U' = \frac{1}{2} P_r' E_s \varepsilon'^2 \quad (1.1)$$

ここに、 $\varepsilon' = \varepsilon \sqrt{0.95/P_r'}$

$$\sigma_{cp} = \sqrt{2U'E_s P_r'} \quad (1.2)$$

ここで、 σ_{cp} はコンクリートのケミカルプレスト

レス量、 ε' は任意の鉄筋比の膨脹率、 ε は膨脹ひずみで実測値(C0 桁は 614, CJ1 桁は 518 μ)を使用した。 P_r' は拘束鉄筋比(A_s/A_c)で 1.85%、 E_s は鉄筋のヤング係数、 A_s は鉄筋断面積、 A_c はコンクリート断面積である。

(2) 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。

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_0 J_c(t) + \int_0^t J_c(t-t') \Delta \sigma_t dt' \quad (2.1)$$

ここに、

σ_0 : 時刻 $t=0$ でコンクリートに持続載荷される応力

$J_c(t)$: 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載荷された材齢 (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 $\Delta \sigma_i$ 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。

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_0 J_c(t) + \sum_{i=0}^t (\Delta \sigma_i J_c(t-i)) \quad (2.2)$$

合成断面の応力再分配は下式で計算する。

$$\Delta \sigma_i = \frac{1}{n} \left(\frac{P_i}{A_v} + \frac{M_i}{I_v} d_c \right) - E_c \Delta \varepsilon_t \quad (2.3)$$

ここに、

$$P_i = E_c \Delta \varepsilon_t A_c \quad (2.4)$$

$$M_i = P_i d_c \quad (2.5)$$

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 τ ($\tau=t+t'$) 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

$$\varepsilon_s(\tau) = \varepsilon_{sh}(\tau) + \sum_{i=0}^t (\Delta\sigma_i J_s(\tau-i)) \quad (2.6)$$

$$J_s(\tau) = \frac{1 + \varphi_s(\tau)}{E_c} \quad (2.7)$$

ここに、

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

$\varphi_s(\tau)$: 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

(3) 作用モーメントと床版分担軸力の関係

M (作用モーメント)– N_c (床版分担軸力)関係は、初期ひび割れ時の床版軸力 (N_{CR} , 以下初期ひび割れ軸力) の算出が必要となる。乾燥収縮による影響がないと仮定した場合の初期ひび割れ軸力は、

$$N_{CR} = k_{co} \times f_{ct} A_c (1 + n \rho_s) \quad (3.1)$$

と与えられる。

ここで、 k_{co} は応力勾配を考慮する係数、 f_{ct} はコンクリートの引張強度、 A_c はコンクリートの断面積、 n は鋼とコンクリートのヤング係数比、 ρ_s は鉄筋断面積 A_s とコンクリート断面積 A_c の比で鉄筋比である。

この論文で扱う供試体では、 k_{co} の値は床版高さの中央で、0.64程度となる。一方、文献9)では、乾燥収縮によって生じる応力勾配の影響を考慮して k_{co} に代わって、

$$k_c = k_{co} + k_{cc} \doteq k_{co} + 0.3 < 1.0 \quad (3.2)$$

を定義している。式(2)に k_{co} を代入すると、 $k_c=0.94$ になって、初期ひび割れ軸力において計算値と実際の値に差異が生じることになる。したがって、初期ひび割れ状態から安定ひび割れ状態への移行時のモーメントも大きく異なることになる。

さて、文献9)では実橋の初期ひび割れ軸力を評価するために、まず、床版厚内で乾燥収縮の度合いが一定でないことに起因する一種の応力集中が生じることを考慮するために係数 0.8、さらに鋼桁への力の移行を考慮する係数 0.9 を考える。この合計で、式(2)を使用した場合に比べ 72% ($0.8 \times 0.9=0.72$) に低減されると示している。これは本研究の共同筆者の経験に基づく評価方法である。この考えを数式表示すると以下の式となる。

$$N_{CR} = 0.72(k_{co} + 0.3)f_{ct}A_c(1 + n\rho_s) \quad (3.3)$$

なお、文献9)では、式(3)の右辺の鉄筋比の影響を考慮していないが、これも経験に基づくものと考えられる。何れの評価方法を用いるかは、我が国では、この種のデータも少なく明確ではない。

(4) ひび割れ間隔

最初に主桁作用によるひび割れ幅算定法について説明する。初期ひび割れ状態および安定ひび割れ状態で区別した設計式、即ち、異なるひび割れ間隔を明記しているのは文献7), 10), 11)である。このうち、初期ひび割れ時のひび割れ間隔について、比較的簡潔に記述されているのが文献9)の CEB/FIP-90 であり、その内容を式(4)に示す。また、安定ひび割れ時のひび割れ間隔は、コンクリート示方書¹²⁾に示されており、その内容を式(5)に示す。

a) 初期ひび割れ時

$$L = \frac{\sigma_{sr2}\phi}{2.7f_{ctm}(1 + n\rho_s)} \quad (3.4)$$

ここに、 $\sigma_{sr2} = N_{CR}/A_s$, f_{ctm} : コンクリート引張応力、 ϕ : 鉄筋径、 n : ヤング率比、 ρ_s : 鉄筋比

b) 安定ひび割れ状態

$$L = 4C + 0.7(C_s - \phi) \quad (3.5)$$

C : 鉄筋のかぶり、 C_s : 鉄筋ピッチ、 ϕ : 鉄筋径

(5) ひび割れ幅

ひび割れ幅は、ひび割れ間隔と(平均ひずみ+コンクリートの乾燥収縮度)の積で与えられる。

以上のひび割れ間隔を用いて、ひび割れ幅 w_M は、

a) 初期ひび割れ時

$$w_M = L \left(\frac{N_{CR}}{E_s A_s} - \frac{\beta_m N_{CR}}{E_s A_s} - \varepsilon_{csd} \right) (\beta_m = 0.60) \quad (4.1)$$

L : ひび割れ間隔, β_m : 初期ひび割れ時の平均ひずみ考慮するための係数, E_s : 鉄筋ヤング係数, A_s : 鉄筋面積, ε_{csd} : 乾燥収縮ひずみ

b) 安定ひび割れ時

$$w_M = L \left(\frac{M_d}{E_s I_{st}} y_{sr} + \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \alpha_{st} \rho_s} - \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \rho_s} - \varepsilon_{csd} \right) (\beta = 0.4) \quad (4.2)$$

L : ひび割れ間隔, M_d : 安定ひび割れ時の作用モーメント, β : 安定ひび割れ時の平均ひずみ考慮するための係数, E_s : 鉄筋のヤング係数, $\alpha_{st} = A_{st} \cdot I_{st} / A_g \cdot I_g$, I_{st}, A_{st} : 「鋼桁+鉄筋」断面の断面2次モーメント, 断面積, I_g, A_g : 鋼桁の断面2次モーメント, 断面積, y_{sr} : 「鋼桁+鉄筋」断面の図心から上鉄筋までの距離, ρ_s は鉄筋比, f_{ctm} : コンクリートの平均引張強度, ε_{csd} : 乾燥収縮ひずみ
ここで, N_{CR} は式(3.3)で定義される初期ひび割れ軸力である. また, コンクリートの平均ひずみによる変位量の影響は安全側の立場から無視している. この点は CEB/FIP-90 の考えと異なるものの, コンクリートのひずみが小さいことから, その影響は小さいと考えられる. 文献 6), 13) では繰り返し荷重を行っている場合は $\beta = 0.2$ となっているが, 本実験の場合は繰り返し回数も少ないため $\beta = 0.4$ とする.

3. ひび割れ制御実験

3. 1 実験概要

(1) 試験体

実験桁は合計 2 体とする. Case-1 が鉄筋比 1.9% で, Case-2 は Case-1 と同様に鉄筋比 1.9% で, 床版に膨張コンクリートを使用しケミカルプレスト

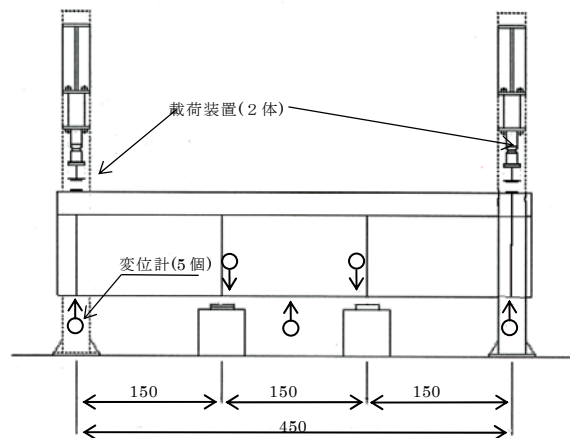


図-1 载荷装置

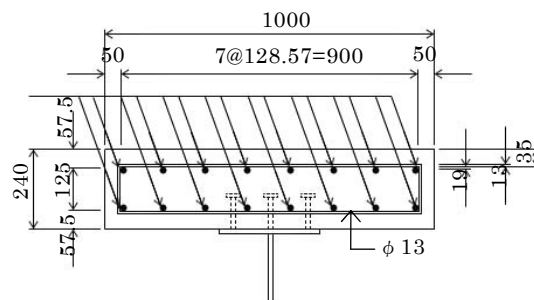


図-2 床版断面図

レスを導入している. 表-1 に各供試体のパラメータを示す. 実験に用いた桁は図-1 に示す全長 4.5m の合成桁で, 鋼桁は上, 下フランジ 300x16mm, ウェブ 800x16mm の I 型断面とし床版は幅 1000mm, 厚さ 240mm とした. 使用したスタッドは $\phi 19 \times 120$ mm で, その本数は道路橋示方書を基に鋼桁と鉄筋のみの断面性能で必要本数を計算している. 図-2 に鉄筋配置を示す. 主鉄筋は $\phi 13$ mm, 150mm ピッチ, 配力筋は $\phi 19$ mm, 128.57mm ピッチのものを使用している.

(2) 使用材料

供試体に使用したコンクリートは普通コンクリートと膨張材コンクリートの 2 種類とする. 膨張コンクリートについては著者らの研究¹¹⁾をもとに

表-1 供試体の着目パラメータ

供試体	コンクリート種類	配力筋ピッチ (mm)	主鉄筋ピッチ (mm)	スタッドピッチ (mm)	鉄筋比 (%)
Case-1	普通	128.57	150	150	1.9
Case-2	膨張				

表-2 コンクリート配合表

供試体	G-Max (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	配合量 (kg/cm ³)					
						W	C	S	G	Ex	AE減水
Case-1	25	12	35	4.5	36.5	142	406	650	1171	0	0.3A
Case-2							371			35	1.0A

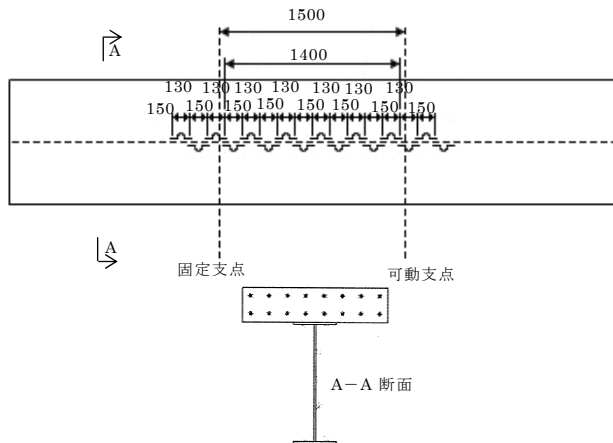


図-3 π型ゲージ配置図

拘束膨張試験 (JISA6202) での膨張率が、 600×10^{-6} になる膨張材 (Ex) の量を 35 kg/m^3 に設定した。コンクリート配合を表-2 に示す。

(3) 荷重載荷

図-1 に示す試験桁中央 1.5m の位置に支点を設置し、支点から 1.5m 離れた桁先端部において鉛直荷重を作用させ、1.5m 区間を等負曲げ区間とした。荷重・支点間は 1.5m であり、等曲げ区間の曲げモーメントは載荷荷重を 1.5 倍した値になる。荷重は両端の門型フレームに取り付けた油圧ジャッキにより最大荷重 800kN まで載荷した。荷重載荷方法は、予備載荷を含め静的に繰返し荷重を載荷する漸増載荷とした。繰返し載荷の要領を以下に説明する。予備載荷を行った後、床版コンクリートにひび割れが生じ始める初期ひび割れ状態まで載荷し、一旦除荷する。その後、計算上想定する安定ひび割れ状態に移行する荷重レベルまで載荷してから除荷する。安定ひび割れ状態までの載荷を 3 回繰り返して行う。繰返し載荷後は最大荷重レベルまで載荷する。

(4) 計測項目

実験では、変位、コンクリートと鋼桁および鉄筋のひずみとひび割れ幅を計測している。変位の計測位置は図-1 に示す 5 箇所である。ひび割れ幅は、π型変位計にて計測し、その設置位置は、等曲げ区間に連続してひび割れを検出した。設置位置を図-3 に示す。鋼桁および鉄筋の等曲げ区間のひずみを平均して中立軸を算出している。

3. 2 実験結果と考察

(1) 作用モーメントと床版分担軸力

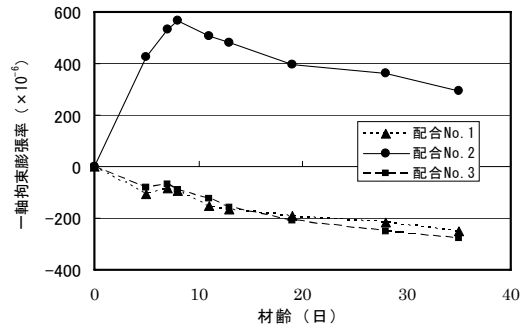


図-4 一軸拘束膨張率試験結果

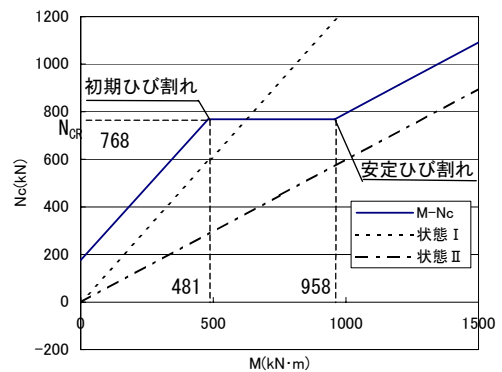


図-5 M-Nc 関係 (Case-1)

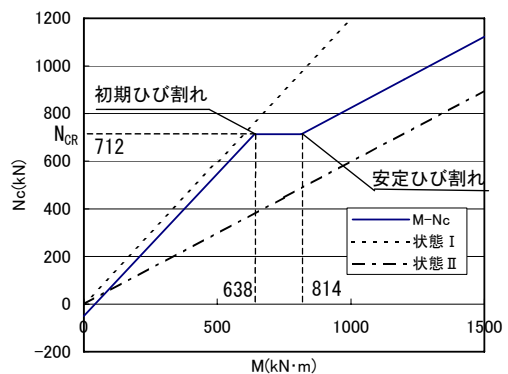


図-6 M-Nc 関係 (Case-2)

本研究では、床版分担軸力に関する乾燥収縮は別途実施した一軸拘束膨張率試験結果を基にして評価を行うこととした。鉄筋比 1.8% の試験体を用いた拘束膨張試験の結果を図-4 に示す。載荷試験を行った材齢が 35~40 日のため、図中の 35 日の値を用いる。普通コンクリートで乾燥収縮分 -250×10^{-6} 、膨張コンクリートではケミカルプレストレスで 339×10^{-6} 、乾燥収縮分 -213×10^{-6} とし、床版分担軸力を計算する。

図-5, 6 にこれらの数値を用いて計算した M-Nc 関係を示す。図中、状態 I が合成断面、状態 II が「鋼桁+鉄筋」断面である。式(3.3)の床版軸力と実験から求めた床版軸力のを比較した。 Case-1

の初期ひび割れ曲げモーメントは $480\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度、安定ひび割れ移行時の曲げモーメントは $960\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度となる。膨張コンクリートの場合は初期ひび割れ曲げモーメントが $605\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度で、安定ひび割れ移行時の曲げモーメントが $815\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度となる。ひび割れ時の床版軸力は Case-1 で 768kN 、Case-2 で計算値は 712kN となり、普通コン

クリートの方が大きくなった。これは、床版の応力勾配の差に起因するもので Case-2 の方が引張応力度は小さいためである。

(2) ひび割れ荷重とたわみ

図-7 に固定支点側載荷点位置における荷重-変位関係を示す。各ケースともほぼ同様の傾向が見られるが、普通コンクリートを用いた Case-1 に比べ、膨張コンクリートを用いた Case-2 の変位量が小さくなっているのが分かる。これは、ひび割れが発生した後の変位が小さくなっていることを示していると考えられる。Case-2 では Case-1 と比較してケミカルプレストレスの効果により、初期ひび割れ荷重が大きくなり、ひび割れ発生後も変形が小さくケミカルプレストレスの効果が見られる。

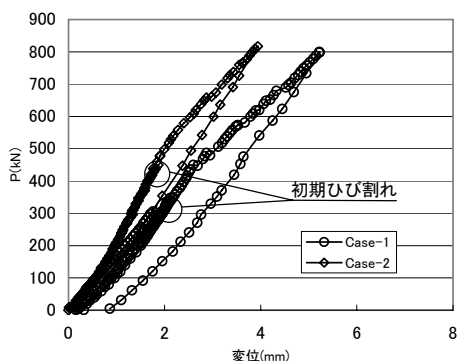
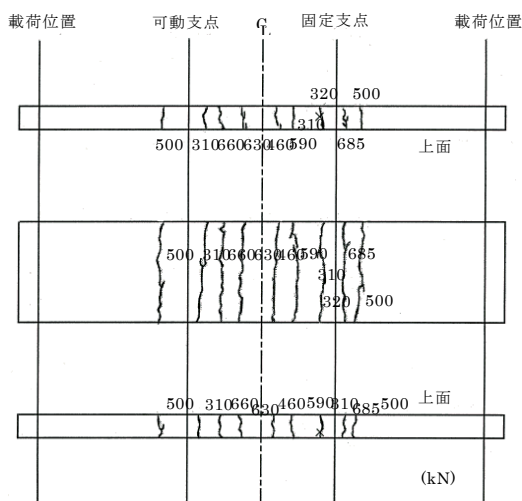


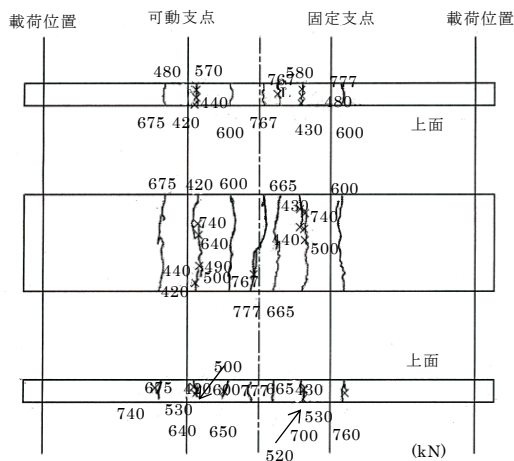
図-7 荷重変位関係

(3) ひび割れ間隔

ひび割れ間隔の代表例として図-8 に最終荷重状態での各ケースのひび割れ図を示す。図中の数値はひび割れ時載荷荷重を示す。普通コンクリートを用いた Case-1 では断面が一度にひび割れる貫通ひび割れがみられた。膨張コンクリートを用いた Case-2 では膨張材による影響で、ひび割れは貫通しておらず、徐々に進展していく傾向である。



Case-1(普通)



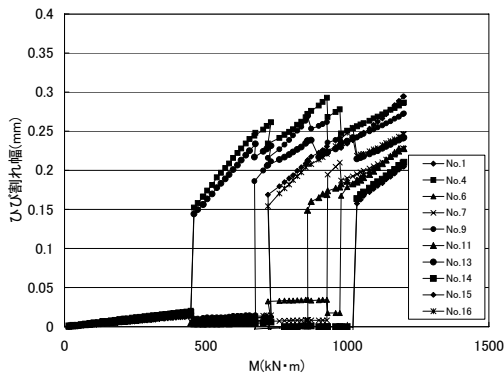
Case-2(膨張材)

図-8 ひび割れ図

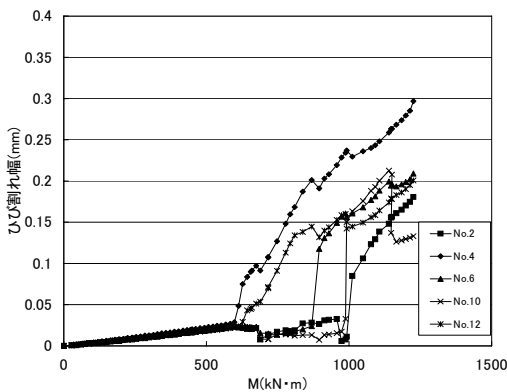
載荷荷重とひび割れ本数で見ると、Case-2 の発生本数は Case-1 に比べて少ない。初期ひび割れ発生荷重も大きな値となり、ケミカルプレストレスを導入した床版の剛性の低下が少なく、結果として分担軸力が相対的に大きくなることが予想できる。等曲げ区間を対象として、Case-1 では、図-5 から示される安定ひび割れ移行時の作用曲げモーメントは $958\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、ひび割れ載荷時の荷重は 639kN となる。実験では 685kN で新たにひび割れが発生しているが、計算値との誤差が 7%程度であり計算値が妥当であることが分かる。Case-2 では、安定ひび割れ荷重が 543kN を超えて、 600 、 665 、 675kN で新たなひび割れが発生している。このことから、実際には微細なひび割れが発生しているが、目視で検出しているため、確認が遅れていることも考えられるが、ケミカルプレストレスによるひび割れ抑制効果も期待できると考えられる。

(4) ひび割れ幅

図-9 にひび割れ幅の比較結果を示す. Case-1, Case-2 のいずれについてもひび割れ幅については

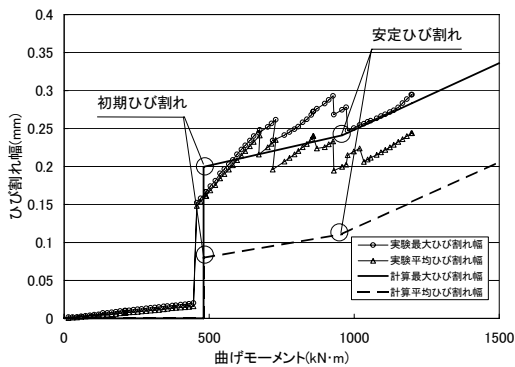


Case-1 (普通)

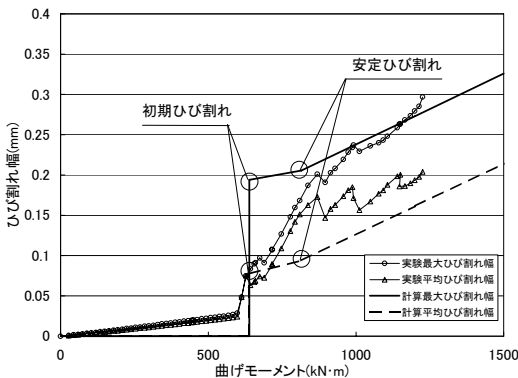


Case-2 (膨脹材)

図-9 ひび割れ幅



Case-1 (普通)



Case-2 (膨脹材)

図-10 ひび割れ幅(本実験)

バラツキが見られる. Case-1(普通コンクリート)では, 新たなひび割れが入る毎にひび割れ幅の傾きが大きく変化している. 初期ひび割れ状態から安定ひび割れ状態に移行する途中では, ひび割れ発生によりひび割れ幅の大きく変化が3回発生している. これは新たなひび割れが発生することで, 先にひび割れた箇所についても力の再分配が行われ, ひび割れ幅が小さくなっているものと考えられる. 図-10にはπゲージで有効に計測できたひび割れ幅から最大ひび割れ幅を抽出し, 式(4.1), (4.2)から算出されたひび割れ幅と比較を行った. ここに, 最大ひび割れ幅とは除荷時におけるひび割れ幅の減少を除いている. その結果, ひび割れ幅算定には最大ひずみを用いた方が最大ひび割れ幅の計測値に近くなっている. また, 平均ひび割れ幅の計測値についても計算最大ひび割れ幅より小さいが, 平均ひび割れ幅より大きな値になっている. Case-2は, Case-1と比較してひび割れ幅の急激な変化は少なく, かつひび割れ発生に伴うひび割れ幅変化も Case-1と比較して緩やかである. いずれのケースについても安定ひび割れより大きな荷重の場合について, ひび割れ幅の増加傾向があるが, 式(4.2)とほぼ対応していると考えられる.

4. ケミカルプレストレスの長期持続性実験

4. 1 実験概要

実験桁の一般図と載荷時の概要を図-11に示す. 膨脹コンクリートを使用してケミカルプレストレスとジャッキ操作によりプレストレスを併用して導入した T-1 桁と T-5 桁の2体の実験桁である. T-1 桁はコンクリート打設後1年(420日)に載荷実験を実施し, T-5 桁は打設後5年で載荷実験を実施した. 実験桁の両端をピンで支持し支間中央にジャッキを設置して負曲げモーメントを作用させた. 載荷ステップを表-3に示す. T-1 桁は 585kN, T-5 桁は 422kN で初期ひび割れ状態, また 800kN, 650kN で安定ひび割れ状態となった. クリープ・乾燥収縮については T-1 桁では履歴積分による計算により算出したが, T-5 桁では完全にクリープ・乾燥収縮が完了したものとし, 道路橋示方書¹⁴⁾の式(II 鋼橋編: 11.2.6「床版コンクリートのクリープ」, 11.2.8「床版のコンクリートの乾燥収縮」)を使って予測した.

表-3 載荷ステップ

段階	繰り返し回数	載荷STEP (kN)	除荷STEP (kN)	ピッチ (kN)	目標状態
1	2	0-200	200-0	20	
2	1	0-400,600	400,600-0	20,40	初期ひび割れ
3	4	0-800	800-0	20-200	安定ひび割れ
4	1	0-1600	1600-0	20-200	桁降伏状態

但し、第4段階ではウェブが座屈した時点で載荷終了

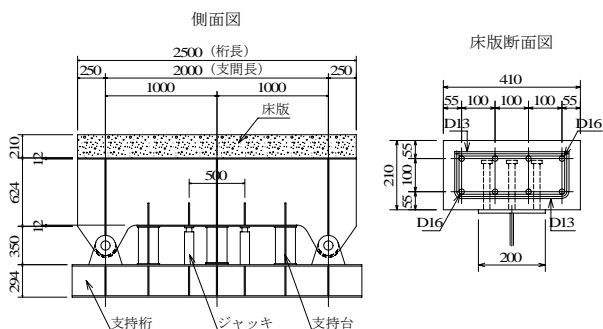


図-11 実験桁概要図

4. 2 実験結果

(1) 変位と荷重の関係

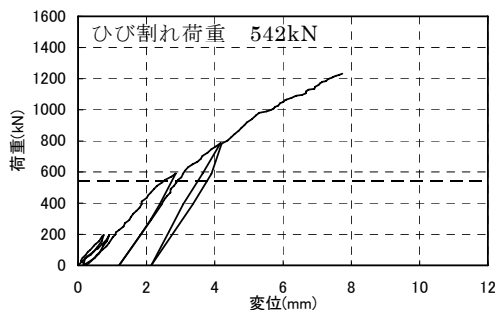
各桁の荷重変位関係を図-12に示す。コンクリートの引張強度を 2.8N/mm^2 とした場合の初期ひび割れ発生荷重の予測値は T-1 桁で 585kN 、T-5 桁で 422kN となる。またプレストレスをしない場合のひび割れの予測値は $386, 223\text{kN}$ である。載荷実験の結果、初期ひび割れは T-1 桁で 542kN 、T-5 桁は 371kN で発生した。各桁とも実験値は予測値より低くなったが、1割未満の誤差でありほぼ対応した値になった。T-5 桁は経年変化により T-1 桁からプレストレスの減少は見られるが打設後5年においてもプレストレスの効果は確認できる。実験より得られた初期ひび割れ荷重から支間中央および床版断面中心のプレストレス量を算出した結果を表-4に示す。初期導入プレストレス量は文献7)で報告している値である。初期導入プレストレス量は実際に測定した膨張量から算出した値であること、またジャッキの性能が低いことにより各桁で異なった。表-4より、T-1桁では1年で40%弱の減少が見られる。T-5桁では5年で70%弱減少が見られる。また全桁で予測よりも1割程度減少している。

(2) ひび割れ幅

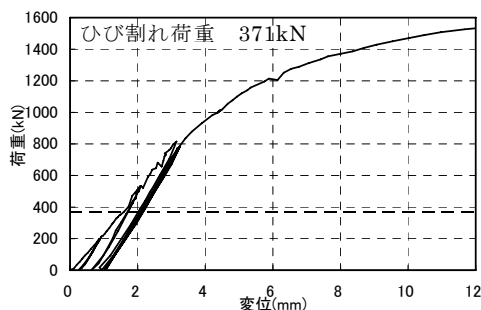
π 型変位計で支間中央付近に発生したひび割れ幅を計測した結果を図-13に示す。実験値の荷重除荷時は省略して図示した。計算値は「2. 理論的検討」で示したひび割れ幅式で算出した。ひび

表-4 プレストレス量の減少

	プレストレス量(N/mm^2)			減少率(%)	
	初期	実験	予測	実験	予測
T-1	-3.71	-2.3	-2.81	38.0	24.3
T-5	-3.27	-1.09	-1.54	66.7	53.0

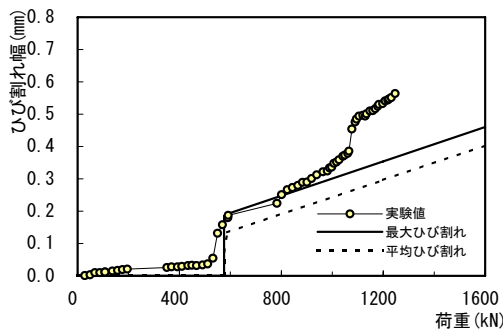


T-1

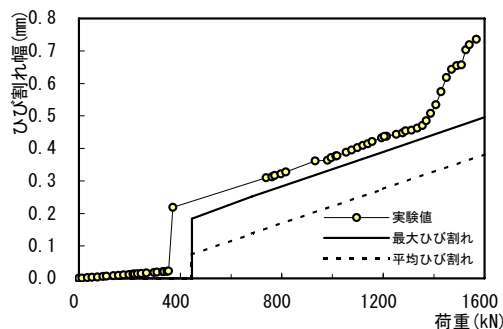


T-5

図-12 荷重-変位関係



T-1



T-5

図-13 ひび割れ幅図

割れ発生時のひび割れ幅は計算値と T-5 では 1 割程度の違いがあるが、ケミカルプレストレスの残存量の差がひび割れ幅にも影響しているものと考えられる。また、初期ひび割れと安定ひび割れの間の区間については T-1 桁, T-5 桁のいずれについても、荷重に対するひび割れ幅の傾きが計算値と計測値とほぼ同様になっているため、ひび割れ幅の計算方法の妥当性が確認できる。

4. まとめ

連続合成桁の負曲げ部を想定した静的載荷実験を行い、新たに提案するひび割れ制御設計法の妥当性と、ケミカルプレストレスのひび割れ幅に対する効果について検討を行った。また、ケミカルプレストレスの長期持続性についての検討も行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) コンクリートに対して式(3.3)に示される初期ひび割れ時の設計法を適用してその妥当性を確認した結果、良い相関性が得られた。
- (2) 図-10 に示すように最大ひずみを用いて計算する計算最大ひび割れ幅とほぼ一致する傾向がある。
- (3) 普通コンクリートではひび割れ発生と同時にひび割れ幅が急激に進行するが、膨張コンクリートではひび割れ幅が徐々に進行して行く。膨張コンクリートの使用により初期ひび割れ発生荷重は大きくなり、初期ひび割れ発生直後ではひび割れ幅についても大幅な低減効果を見せた。
- (4) 長期持続性の確認実験により、時間が経過することによりケミカルプレストレスによる影響が小さくなるが、その効果は確認できる。

あとがき

連続合成桁のケミカルプレストレスについては計算値と実験結果との対応し、ある程度良好な結果が得られた。実用化に向けては経年変化した時の乾燥収縮・クリープの影響が問題となることがわかった。今回でこの研究については終了するが、7年間の月日の中で膨張コンクリートの特性を確認できたものと思われる。

参考文献

- 1) 細見雅生, 岡田幸児, 林勝樹: 少数主桁連続合成桁の合理化に関する研究, 駒井技報 Vol.18, pp.12-18, 1999.4
- 2) 岡田幸児, 細見雅生: 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2報), 駒井技報, Vol.19, pp.1-9, 2000.4
- 3) 中本啓介, 石川敏之, 細見雅生: 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), 駒井技報, Vol.20, pp.7-15, 2001.4
- 4) 中本啓介, 石川敏之, 細見雅生: 連続合成桁に対するケミカルプレストレス導入効果の実験的検討, 駒井技報, Vol.21, pp.1-7, 2002.4
- 5) 中花洋介, 木村充, 細見雅生: ケミカルプレストレスの長期持続性の検討, 駒井技報, Vol.24, pp.7-12, 2005.4
- 6) (社) 日本橋梁建設協会: PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁の設計例と解説, 2001
- 7) (財) 高速道路技術センター: PC床版連続合成2主桁橋の設計, 施工マニュアル, 2002
- 8) 長井正嗣, 奥井義昭, 岩崎英治: 連続合成桁の初期ひび割れ状態を考慮したひび割れ幅, 鉄筋応力算定法の一提案, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.283-292, 2004
- 9) G.Hanswille: Cracking of concrete, mechanical model of the design rules in Eurocode 4, Conf. Report, Composite Construction in Steel and Concrete III (ed. By C.D.Bucker and B.M.Shahrooz), pp.420~433, ASCE, 1997
- 10) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP Model Code 1990, Tomas Telford, 1993
- 11) Hanswille. G. Zur Rissbereitenbeschaenkung bei verbundtraegern, Techsch -weissenschaftliche Mitteilungen, Institut for Konstruktiven Ingenieurbau Rhuhe-Uniberstate Bochum, Mittelitung, Nr .86-1, 1986
- 12) 土木学会: コンクリート標準示方書, 2002
- 13) SETRA: Points Mixtes (Recommendations pour maitriser la fissuration des dalles), 1995
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 2002