

連続合成桁のひび割れとケミカルプレストレスに関する実験的検討

Experimental study on cracking and chemical pre-stress of continuous composite girder bridge

木村 充*, 長井正嗣**, 細見雅生***, 奥井義昭****

Mitsuru KIMURA, Masatsugu NAGAI, Masao HOSOMI, Yoshiaki OKUI

*工修, 駒井鉄工株式会社, 技術研究室 (〒293-0011 千葉県富津市新富 33-10)

**工博, 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡 1603-1)

***工博, 駒井鉄工株式会社, 技術研究室 (〒293-0011 千葉県富津市新富 33-10)

****工博, 埼玉大学助教授 工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

The composite girder bridge is one of well-known bridge type as a rational bridge type. Because this type use the combination of the light and high strength steel girder and the slab of high durability composed by reinforced concrete. But, there are still some open issues. The most important design issues on the continuous composite girder are hogging bending moment and cracking on concrete slab caused by hogging moment. For these issues, we are studying on the width of cracking which is controlled by the degree of reinforcement and proposed the introduction of a chemical pre-stress to the concrete slab. And, we had carried out some additional experiments to investigate these above mentioned subjects. As for the width of concrete cracking, we confirm that the width could be calculated from the maximum stress of reinforced bar and the interval of the cracking using the formula of the Japan concrete standard specification. As for the long time duration of the chemical pre-stress, we could confirm the long time duration by the result of the experiment.

Key Words: Crack Width, Composite Girder, Chemical Pre-stress, Long Time Duration

キーワード: ひび割れ幅, 合成桁, ケミカルプレストレス, 長期持続性

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。その採用状況について前者の方法は建設コストアップの要因となることから, 後者の方法が採用される傾向にある。この場合, 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^{1)~3)}が提案されている。文献 1), 2)はともにコンクリート標準示方書⁴⁾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 1)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 2)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 3)は, 文献 1), 2)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。例えば, スパンが 30m 前後またそれ以下の連続桁を例にした場合, 文献 1), 2)では, ひび割れ発生の可能性が少ないにも関わらず, 十分にひび割れが発生しているとしてひび割れ幅を求めることになる。また, 文献 1)の計算例(スパン 50m)では, 中間支点位置での鉄筋比が 1.9%にも関わらず, 許容ひび割れ幅を満足できておらず, 更なる鉄筋比のアップを示唆している。これは, ヨーロッパにおける鉄筋比の実績(1.5%程度)を考えると, 違和感を抱く。文献 3)はそのような問題への対処法を示している。

さて, 以上の設計式³⁾のひび割れ幅と鉄筋応力算定法の妥当性を検討するため, 著者らは実験的検討を行った。なお, その時点では, 文献 3)を提案しておらず, 文献 2)と

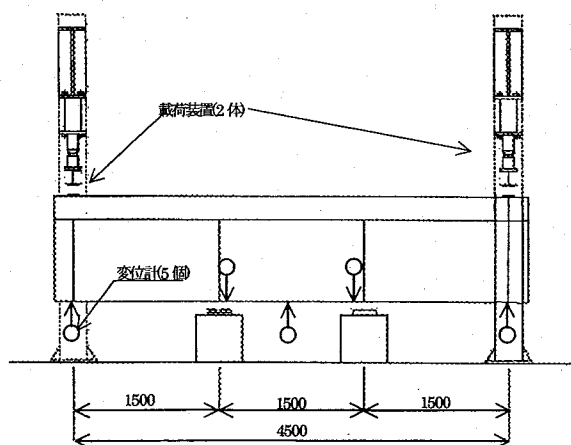


図-1 荷重装置概要

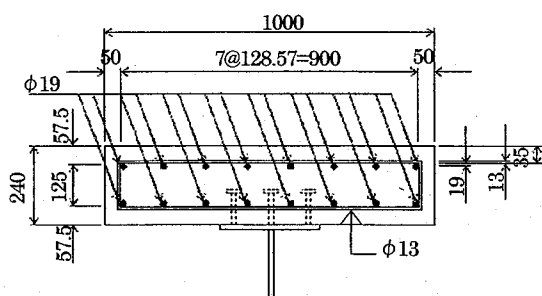


図-2 床版断面図

の比較を行った。その結果、最大ひび割れ幅は、平均ひずみではなく、最大ひずみを用いる場合と比較的良好一致を示す結果が得られた。一般に、ひび割れ幅の算定に当たり、ひずみとしては平均ひずみを用いられるが、平均ひずみでは、実験での最大ひび割れ幅を評価できない結果となった。そこで、著者らは再度の実験を行うこととした。また、著者らは、これまでケミカルプレストレスの効果についての検討も行ってきた。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荷重実験を実施している。また、著者ら⁹⁾の提案している膨張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

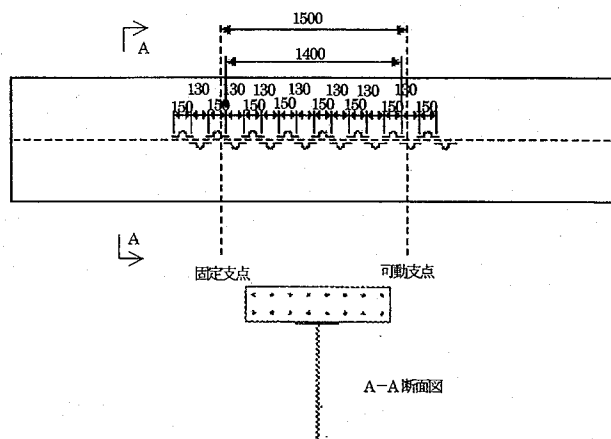


図-3 π型ゲージ配置図

スの長期持続性について確認した結果を報告する。

2. ひび割れ制御実験

2.1 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に示す支間長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φ19x120mm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φ13mm、150mmピッチ、配筋筋はφ19mm、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⁹⁾をもとに拘束膨張試験(JISA6202)での膨張率が、 600×10^{-6} になる膨張材(Ex)の量を35kg/m³に設定した。コンクリート配合を表-2に示す。

表-1 供試体の着目パラメータ

供試体	コンクリート種類	配筋筋ピッチ (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)	スランプ (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

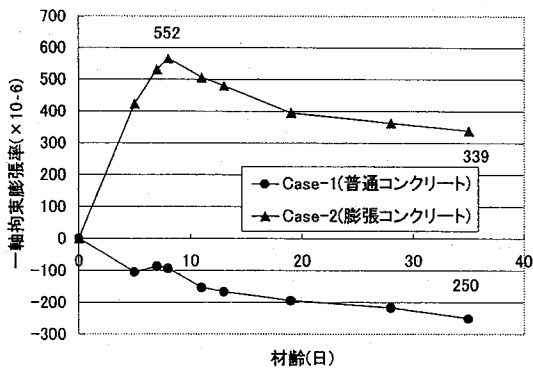


図-4 一軸拘束膨張率試験結果

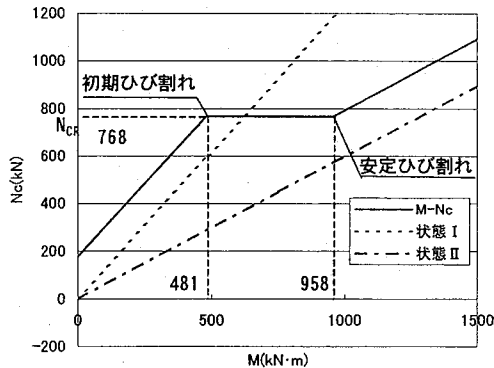


図-5 M-Nc 関係(Case-1)

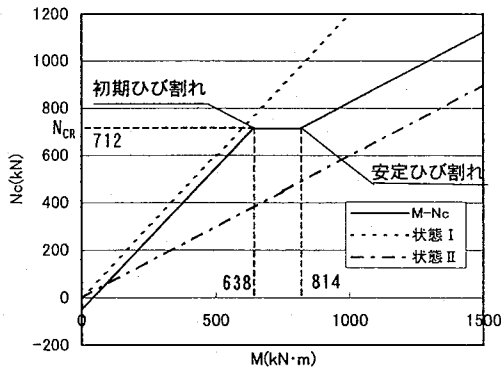


図-6 M-Nc 関係(Case-2)

(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。

2.2 理論的検討

実験結果の整理に当たりひび割れ制御の理論的背景を示す。

(1) 作用モーメント(M)と床版分担軸力(Nc)の関係

M-Nc 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³⁾は、

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

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³⁾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、

$$k_c = k_{co} + k_{ce} \approx k_{co} + 0.3 < 1.0 \quad (2)$$

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、同じ文献³⁾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。

$$N_{CR} = 0.72(k_{co} + 0.3)f_{ct} A_c (1 + n \rho_s) \quad (3)$$

なお、式(3)の右辺は鉄筋比の影響を考慮しているが、初期ひび割れ軸力 N_{CR} の他研究⁸⁾においては鉄筋比の考慮のないものである。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。

本研究では、床版分担軸力に關係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残留したケミ

カルプレストレスが 339×10^6 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-N_c 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)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 480kN・m 程度、安定ひび割れ移行時の曲げモーメントは 960kN・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 640kN・m 程度で、安定ひび割れ移行時の曲げモーメントが 815kN・m 程度となる。ひび割れ時の床版軸力は Case-1 で 768 kN, Case-2 で計算値は 712 kN 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 2), 9), 10) 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⁹⁾ 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

$$L = \frac{\sigma_{sr2} \phi}{2.7 f_{ctm} (1 + n \rho_s)} \quad (4)$$

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

$$L = 4C + 0.7(C_s - \phi) \quad (5)$$

C : 鉄筋のかぶり, C_s : 鉄筋ピッチ, ϕ : 鉄筋径

(3) 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、平均ひび割れ幅 w_M 、

a) 初期ひび割れ時

$$\text{平均 } w_M = L \left(\frac{N_{CR}}{E_s A_s} - \frac{\beta_m N_{CR}}{E_s A_s} - \varepsilon_{csd} \right) (\beta_m = 0.60) \quad (6)$$

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

$$w_M = L \left(\frac{M_d}{E_s I_{st}} y_{sr} + \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \alpha_{st} \rho_s} - \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \rho_s} - \varepsilon_{csd} \right) (\beta = 0.40) \quad (7)$$

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, $\alpha_{st} = A_{st} / A_g \cdot I_g / I_{st}$, $I_{st} A_{st}$: 「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 : 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

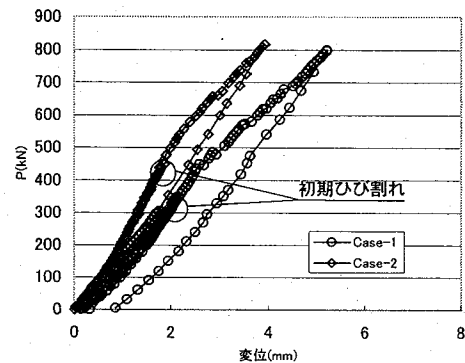
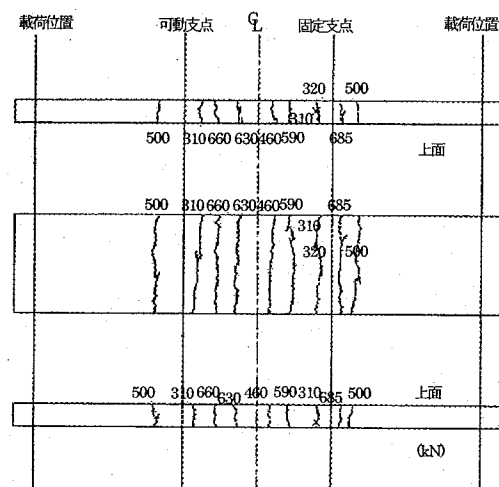
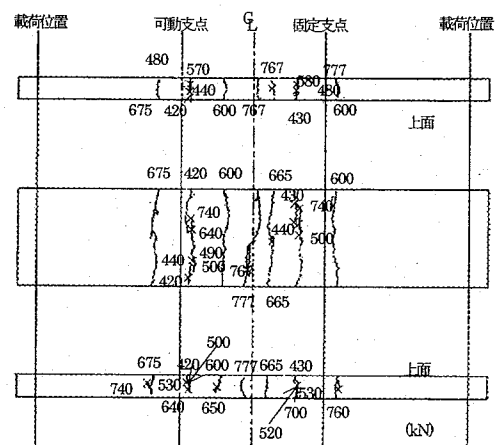


図-7 荷重変位関係



Case-1(普通)



Case-2(膨張材)
図-8 ひび割れ図

ここで、 N_{CR} は式(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 2), 11) 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。

(4) 中立軸の移動

中立軸の移動についての関係式を(8)に示す。

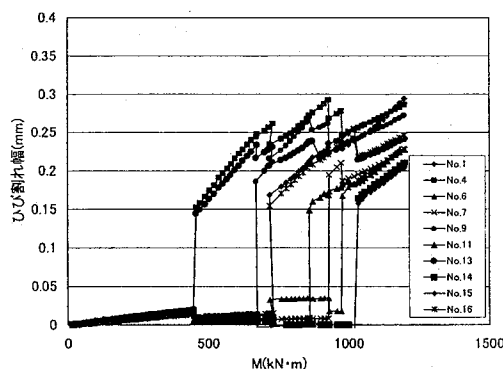
$$\frac{M_g}{I_g} \cdot e = \frac{N_e}{A_g} \quad (8)$$

ここで、 N_e : コンクリートの分担軸力 (= 鋼桁の圧縮軸力)、
 e : 中立軸の移動、 M_g : 鋼桁の分担モーメントである。 A_g 、
 I_g : 断面積、断面 2 次モーメント

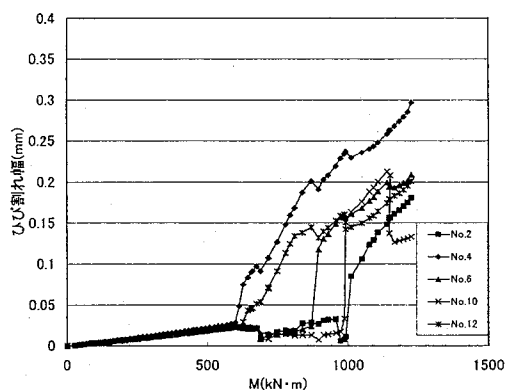
2.3 実験結果と考察

(1) 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。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、ケミカルプレストレスの効果が見られる。

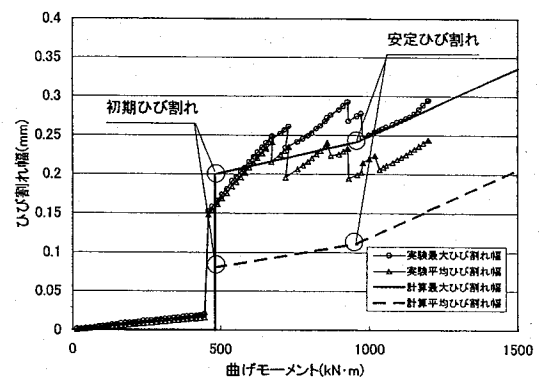


Case-1 (普通)

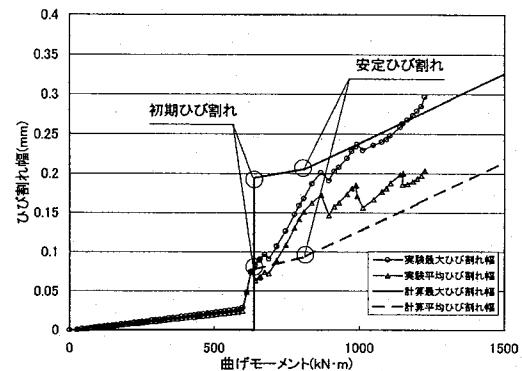


Case-2 (膨張材)

図-9 ひび割れ幅

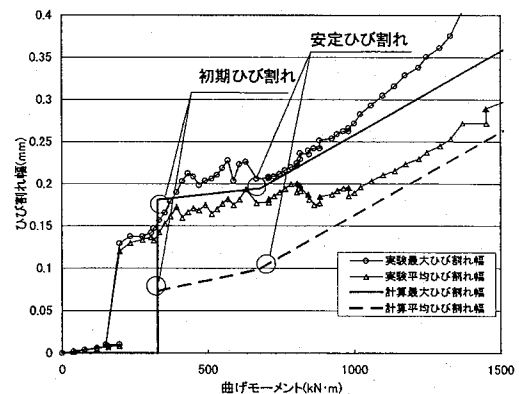


Case-1 (普通)

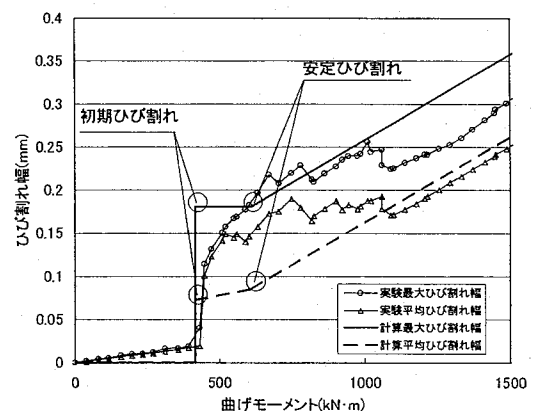


Case-2 (膨張材)

図-10 ひび割れ幅(本実験)



Case-1 (普通)



Case-2 (膨張材)

図-11 ひび割れ幅(前回実験)⁹⁾

(2) 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 では断面が一度に上面、下面、側面の各辺がつながってひび割れる貫通ひび割れの傾向がみられた。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。

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、載荷荷重は 639kN となる。載荷時の荷重は以下の式で図-5, 6 より算出している。

$$P = \frac{M}{L} \quad (9)$$

P : 載荷荷重, M : 曲げモーメント, L : 片持長さ

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、安定ひび割れ荷重は、Case-1 と同様の算出により、 543kN となっている。安定ひび割れ荷重を超えて、 $600, 665, 675\text{kN}$ 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。

(3) 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徐々に変化するとともにひび割れ幅が減少する現象が発生している。これは、初期のひび割れ発生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、ひび割れ幅の大きな変化が本実験では3回発生している。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(6), (7)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繰り返し荷重時におけるひび割れ幅の変化は式から除いている。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。前回の実験⁹⁾の結果を図-10と同様の方法で再整理した結果を図-11に示す。その結果、本実験と同様に最大ひび割れ幅の計測値が最大ひずみの

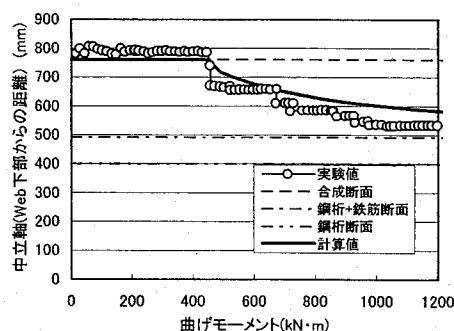


図-12 中立軸変化の比較 (Case-1)

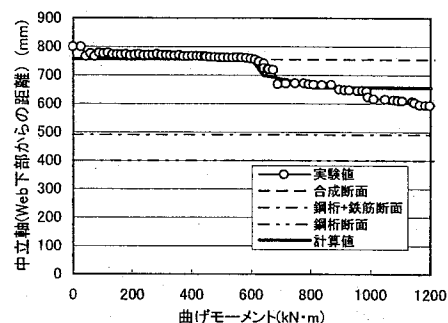


図-13 中立軸変化の比較 (Case-2)

計算値の近くになっている。また、平均ひび割れ幅についても今回とほぼ同様の傾向である。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(7)とほぼ対応しているものと考えられる。

(4) 中立軸の移動

図-12, 13 に中立軸の移動を示す。計算式は式(8)によって計算、実験値はひずみゲージの計測線から計算を行った。ゲージ位置は支間中央の図-1の鋼桁断面に5枚設置し、計測を行った。

a) Case-1 の結果

図-12 に結果を示す。Case-1 では $481\text{kN}\cdot\text{m}$ でひび割れが発生し、その荷重レベルで中立軸が急激に Web 下端に移動する。その後も新規ひび割れの発生に伴う急激な変化を繰り返し、 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$ あたりで「鋼桁+鉄筋」断面に近い値に達し、その後は横這いとなる。安定ひび割れ状態では「鋼桁+鉄筋」断面で鋼桁の応力評価を行ってよいことが分かる。

b) Case-2 (膨張材) の結果

図-13 に結果を示す。中立軸は初期ひび割れ発生荷重である $627\text{kN}\cdot\text{m}$ で大きな変化を見せるものの、その後は徐々に位置が下がって約 $1200\text{kN}\cdot\text{m}$ で計算値に近づいている。「鋼桁+鉄筋」断面での中立軸位置までは 100mm 近い差が見られ、ケミカルプレストレスが床版の曲げ剛性に対する寄与していることが分かる。膨張材を用いることの有効性が認められる。

3. ケミカルプレストレスの長期持続性実験

3.1 実験概要

実験桁の一般図と載荷時の概要を図-14に示す。膨張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 体が実験桁である。ケミカルプレストレス量およびジャッキ操作によるプレストレス量を表-3に示す。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-4に示す。予測値が T-1 桁では 585kN、T-5 桁では 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。ケミカルプレストレスについてはクリープ・乾燥収縮については T-1 桁では履歴積分による計算⁷⁾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¹²⁾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。

3.2 実験結果

(1) 変位と荷重の関係

各桁の荷重変位関係を図-15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、223kN 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-5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って各桁で異なった。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-16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「2.2 理論的検討」で示したひび割れ幅式で算出した。ひび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)に示される初期ひび割れ時の荷重の計算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に示すように本実験では最大ひずみを用いて計算する計算最大ひび割れ幅と実験結果がほぼ一致する傾向がある。これは文献⁶⁾に示す著者らの以前の実験結果を用いても同様の傾向が確認できた。

表-4 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段階ではウェブが屈服した時点で載荷終了

側面図

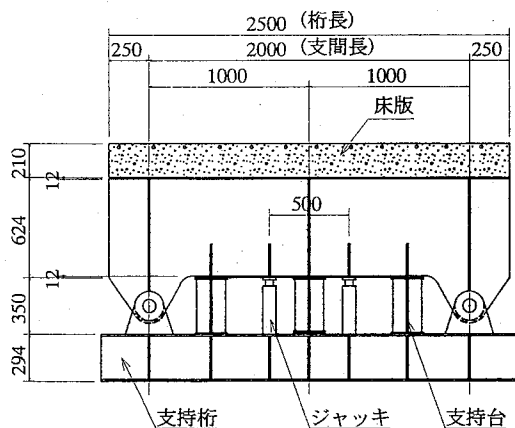


図-14 実験桁概要図

床版断面図

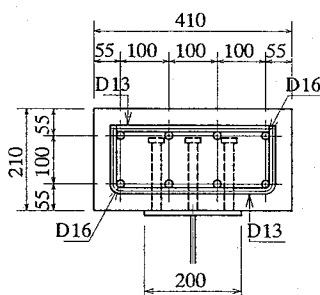
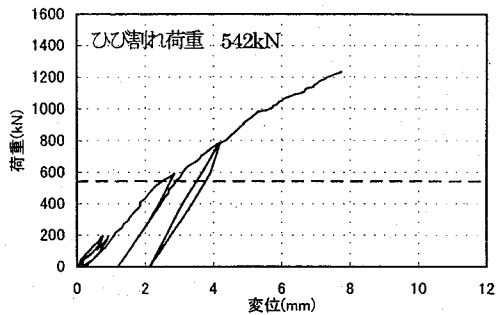


表-3 導入プレストレス量

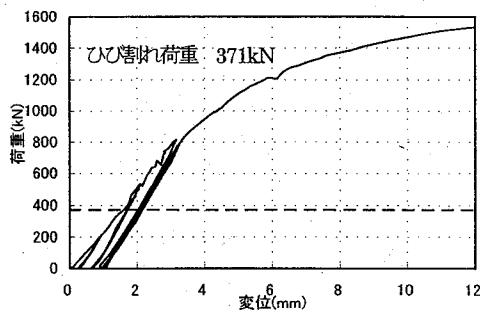
実験桁	T-1桁 N/mm ²	T-5桁 N/mm ²
ジャッキ	-1.14	-0.98
ケミカル	-2.13	-2.73

表-5 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

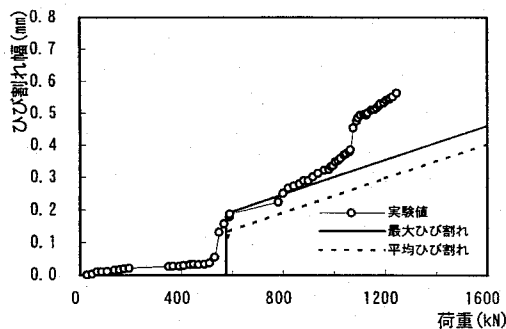


T-1

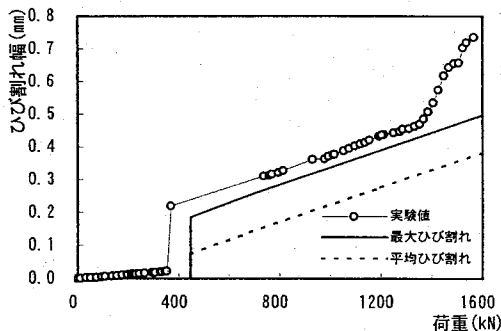


T-5

図-15 荷重-変位関係



T-1



T-5

図-16 ひび割れ幅図

(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みられた。

(4) 安定ひび割れ状態での鋼筋応力は、「鋼桁+鉄筋」断面による評価が可能である。

(5) 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。

以上の結果よりひび割れ幅の計算法、鉄筋応力の算定法の妥当性確認、およびケミカルプレストレスが有効であることの確認が行えたと考えている。しかし、実験実施上の制約があるため、まだ確実な方法として確認できていないと考えている。今後は本研究で得られた知見を元に、合成桁設計に対する適用を行い、従来の方法との比較からその有効性を検討したい。

参考文献

- (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
- (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
- 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
- 土木学会：コンクリート標準示方書, 2002
- 岡田幸児, 細見雅生, 依田照彦, 佐久間隆司：連続合成桁のケミカルプレストレスの適用, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.46A, pp.1675-1684, 2000
- 中本啓介, 長井正嗣, 奥井義昭, 岩崎英治, 細見雅生：負曲げを受ける合成桁のひび割れ挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1143-1152, 2003
- 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, 2001
- 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
- Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990, Tomas Telford, 1993
- Hanswille. G. : Zur Rissbereitenbeschraenkung bei verbundtraegern, Techsch -weissenschaftliche Mitteilungen, Institut for Konstruktiven Ingenieurbau Ruhr-Uniberstate Bochum, Mittlitung, Nr. 86-1, 1986
- SETRA : Points Mixtes (Recommendations pour maitriser la fissuration des dalles), 1995
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 2002 (2005 年 9 月 10 日受付)