

# 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

中本 啓介<sup>1)</sup> 石川 敏之<sup>2)</sup> 細見 雅生<sup>3)</sup>

著者らは連続合成桁のプレストレス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、部分合成桁の観点からひび割れ幅やひび割れ間隔などに対するケミカルプレストレスの効果について実験による検討を行った。ここではその実験の内容と検討結果を報告する。また、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の長期計測実験について、1年経過した実験桁の載荷試験を実施した。この実験結果についても報告する。

**キーワード** ケミカルプレストレス、部分合成、ひび割れ、長期計測実験

## まえがき

床版にコンクリートを使用する連続合成桁形式では、中間支点付近のコンクリート床版は引張応力が作用して、ひび割れ発生の原因になる。連続合成桁の設計では、このひび割れを発生させないためにプレストレスを導入し、橋梁全区間を合成桁とするプレストレスする連続合成桁と、プレストレスを導入せずコンクリートのひび割れを許し、鋼桁と鉄筋で外力に抵抗させる部分合成桁の2種類の方法がある。現在、設計・施工の簡易さや信頼性を考慮して部分合成桁が多く採用されている。著者らは連続合成桁のプレストレス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。

本誌前号までの報告<sup>1), 2), 3)</sup>では、プレストレスする連続合成桁として、ケミカルプレストレスの導入量とひび割れ荷重に着目した検討を行ってきた。その後、これまでの検討と並行して、部分合成桁の観点からひび割れ幅やひび割れ間隔などに対するケミカルプレストレスの効果について実験による検討を実施した。ここではその実験の内容と検討結果を報告する。また、文献<sup>3)</sup>でも報告し

た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の長期計測実験について、3体の実験桁の内、1体（1年経過した実験桁）の載荷試験を実施した。あとの2体については現在も計測を続けている。これらの実験・計測結果についても報告する。

## 1. ケミカルプレストレスを導入した合成桁のひび割れ特性

### (1) 概要

連続合成桁の中間支点上の負曲げ部を想定した鋼桁とコンクリート床版からなる実験桁を使用して静的負曲げ載荷試験を行い、荷重、変形、ひび割れ幅、ひび割れ間隔について計測する。これらの実験結果と Hanswille の理論で計算される初期ひび割れ荷重、ひび割れ幅との比較を行う。ひび割れ間隔については各種設計法（CEB/FIP-90, ACI, コンクリート標準示方書）と比較する。ここでは膨張材を使用してケミカルプレストレスを導入したコンクリート床版と通常の普通コンクリートを使用した床版との差異に着目し、実験的検討について示す。

1) 技術研究室 2) 技術研究室 3) 技術研究室室長

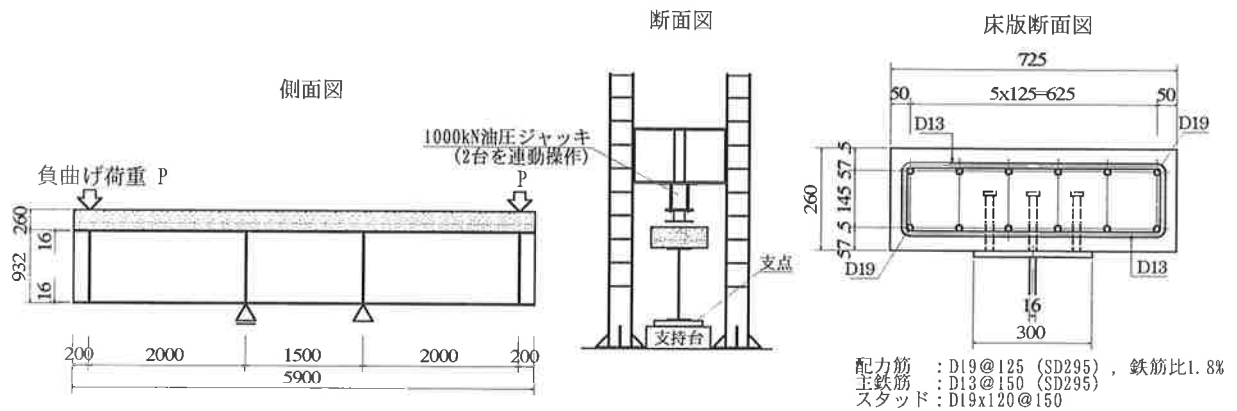


図-1 供試体と載荷方法

表-1 示方配合 (設計基準強度  $\sigma_{ck}=40.0\text{N/mm}^2$ )

G・Max (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	配合量 (kg / m <sup>3</sup> )							備 考
					W	C	S	G	E	A <sub>d</sub>	混和剤	
25	12	35	4.5	33	146	417	580	1228	0	0.85%	2A	普通
					146	365	580	1228	52	0.70%	2.5A	ケミカル

セメント：早強ポルトランドセメント (太平洋セメント社製密度 3.14kg/L)  
 細骨材：信濃川産川砂 (表乾密度 2.60kg/L, 粗粒率 2.63)  
 粗骨材：信濃川産川砂利 (表乾密度 2.71kg/L, 粗粒率 6.99)  
 膨張材：太平洋マテリアル, エキスパン (密度 3.15kg/L)  
 混和剤：高性能 AE 減水材剤ポゾリス SP - 8S

(2) 実験内容

図-1に供試体と載荷方法を示す。鉄筋比 1.8%でケミカルプレストレスを導入した床版をもつ実験桁と、普通コンクリートを使用した床版をもつ実験桁との2体について載荷実験を実施した。表-1に今回使用したコンクリートの示方配合表を示す。ケミカルプレストレスを導入するための膨張材使用量を  $52\text{kg/m}^3$  としている。コンクリートの拘束膨張試験による膨張ひずみは  $459\mu$  である。コンクリートの材令が 28日に達した時点で載荷実験を実施した。以後、普通コンクリート床版のケースを「普通」、ケミカルプレストレスを導入した床版のケースを「ケミカル」と略す。

載荷は安定ひび割れ状態になるまでは、ひび割れを観測しながら荷重を段階的に載荷する。続いて、除荷載荷を繰返し、その後に最大荷重(1000kN)まで載荷する。除荷載荷の繰返し回数は「普通」5回、「ケミカル」14回である。「ケミカル」ではひび割れ後の効果の低下を確認するため繰返し回数を多くしている。計測は荷重および変位の他に、 $\pi$ ゲージを床版表面に連続的に配置してひび割れ幅を計測している。

(3) 実験結果と考察

荷重と変位の関係を図-2に示す。ひび割れが発生するまでは「普通」と「ケミカル」はほぼ同じであるが、ひび割れ後は同じ荷重に対して、「ケミカル」の方が若干変形が小さくなる傾向である。

表-2および表-3にそれぞれひび割れ間隔(300kN)、ひび割れ間隔(500kN)の実験結果を示す。ひび割れ間隔は計測値との比較のため CEB/FIP-90<sup>4)</sup>, ACI<sup>5)</sup>, コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>による計算値を併せて示している。

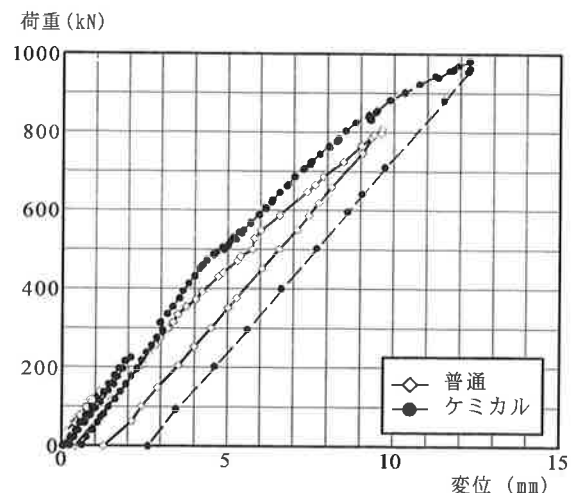


図-2 荷重と変位の関係

表-2 ひび割れ間隔 (載荷荷重 300kN) (mm)

	計測値		CEB/FIP	ACI	コンクリート 標準示方書
	最大 間隔	平均 間隔			
普通	380	286	293	262	266
ケミカル	470	380	293	262	266

表-3 ひび割れ間隔 (載荷荷重 500kN) (mm)

	計測値		CEB/FIP	ACI	コンクリート 標準示方書
	最大 間隔	平均 間隔			
普通	275	185	293	262	266
ケミカル	300	200	293	262	266

ひび割れ間隔を「普通」と「ケミカル」で比べると、荷重 300kN 時は最大間隔で 90 mm、平均間隔で 94 mmの差がある。荷重 500kN 時では、最大間隔および平均間隔は 25 mm程度の差がある。各種基準と比較してみると多少の違いが見られるものの、「普通」はコンクリート標準示方書に、「ケミカル」は CEB/FIP-90 に近い値となっている。荷重レベルの低い領域においては、「ケミカル」の方が間隔は大きく、コンクリートにプレストレスが入ることで、コンクリート内に働く引張力を受け持っていると考えられる。これにより、ひび割れが発生しにくくなり、最大間隔および平均間隔ともに大きくなったと考えられる。荷重レベルが上がってもその影響は確認できるが、差は小さくなっている。

表-4にひび割れ幅とひび割れ荷重の関係を、図-3にひび割れ幅と作用モーメントの関係を示す。図中の初期、最大、平均とも実験によって得られた結果であり、支点間で発生したひび割れを対象としている。ひび割れ発生荷重とひび割れ幅の計算値は Hanswille の理論<sup>7,8)</sup>に基づき、材令 28 日における材料試験結果から計算している。

表-4および図-3において、ひび割れ幅は最大と平均のひび割れ幅とも「普通」の方が 2 割程度大きくなっている。ひび割れ発生荷重では、「普通」では計算値より低い結果、「ケミカル」では計算値より高い結果となっている。このような違いの原因として、「ケミカル」ではコンクリート自体が引張力をより多く受け持つので、ひび割れが発生し難くなり、ひび割れ幅が小さな値となっていると考えられる。ひび割れ発生荷重についても同様の

表-4 ひび割れ幅

	ひび割れ発生荷重 (kN)		ひび割れ幅実験値 (mm)		
	計算値	実験値	初期	最大	平均
普通	182.0	138.1	0.120	0.228	0.186
ケミカル	178.0	224.0	0.115	0.178	0.153

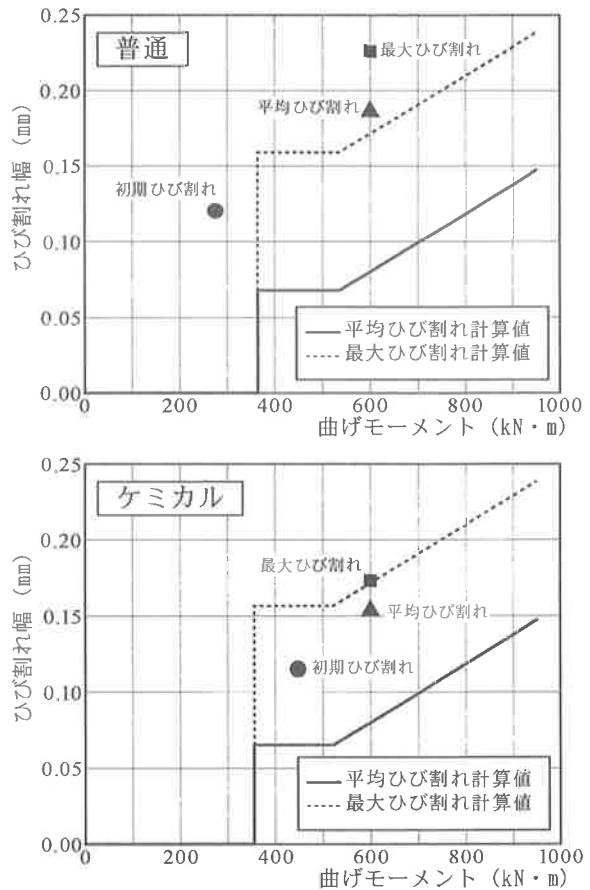


図-3 曲げモーメントとひび割れ幅の関係

理由により、「ケミカル」の方が大きくなると考えることができる。ひび割れ発生時のひび割れ幅に関しては、ほとんど差はないと判断する。ケミカルプレストレスは、ひび割れ発生時のひび割れ幅に対する効果は小さいことを示している。

図-4に「普通」および「ケミカル」の安定ひび割れ状態のひび割れ図を示す。図より「普通」に比べ「ケミカル」はひび割れ本数が大幅に少なくなっている(支点間で 10 本→7 本に減少)。安定ひび割れ状態においても、プレストレスの効果が期待できると考えられる。よって、安定ひび割れ状態までの荷重レベルの低い状態では、ケミカルプレストレスの効果により、ひび割れを低減させることができると考えられる。一方、安定ひび割れ状態に発生するひび割れの本数に大きな差はない。荷重レベルが上がるにつれプレストレスの影響

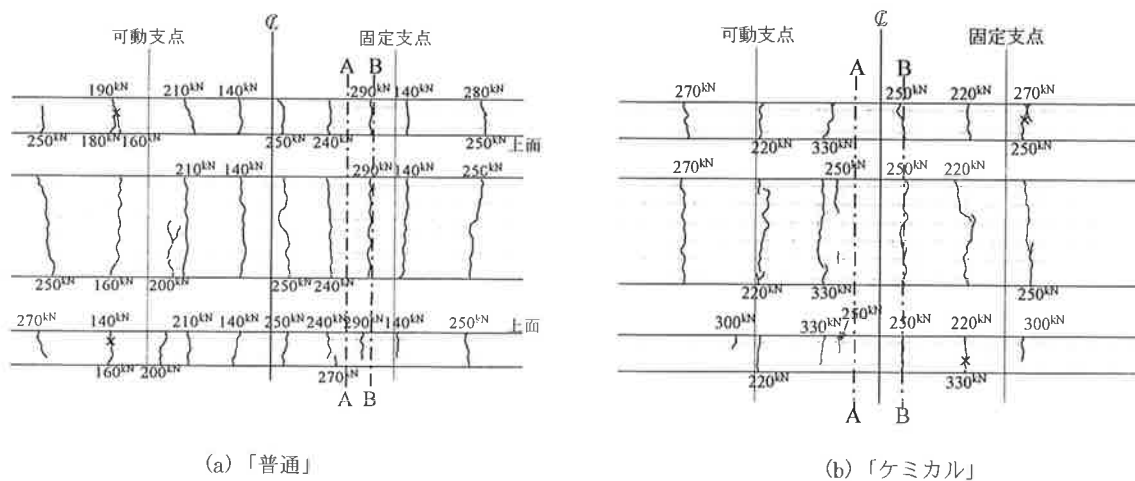
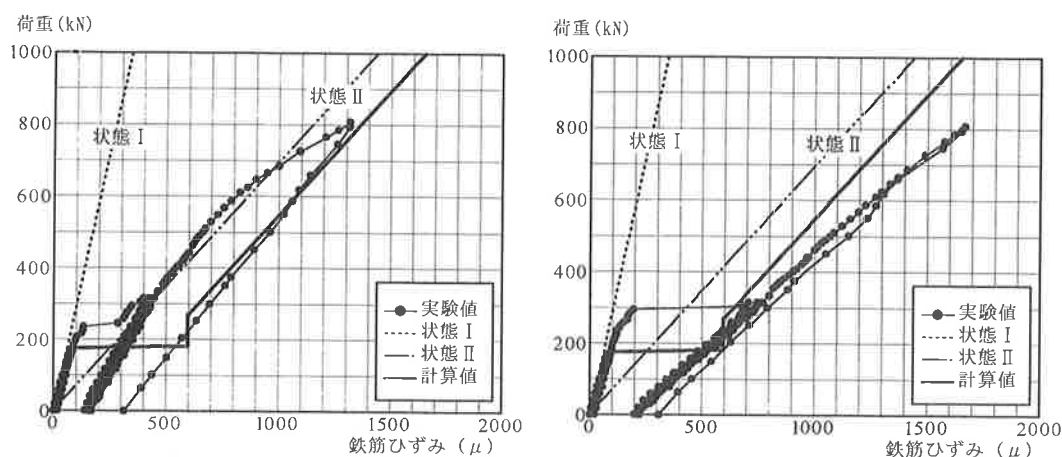
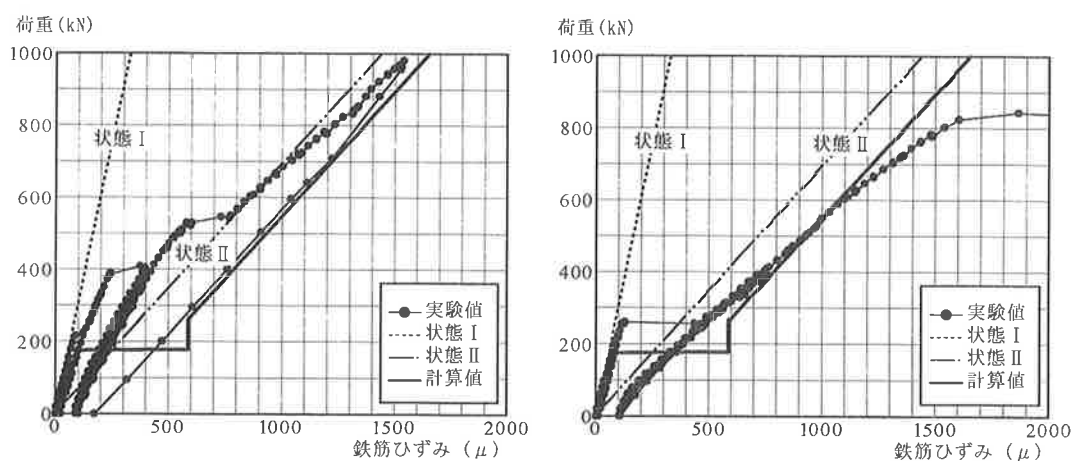


図-4 安定ひび割れ状態でのひび割れ図



(a) ひび割れから遠い断面 (図-4(a)のA断面) (b) ひび割れに近い断面 (図-4(a)のB断面)  
図-5 荷重-鉄筋ひずみ関係 (「普通」)



(a) ひび割れから遠い断面 (図-4(b)のA断面) (b) ひび割れに近い断面 (図-4(b)のB断面)  
図-6 荷重-鉄筋ひずみ関係 (「ケミカル」)

響がなくなるため、ひび割れは普通コンクリートの場合と大きな差はなくなると考えている。

図-5および図-6にそれぞれ「普通」、「ケミカル」の荷重-鉄筋ひずみ関係を示す。各図において (a) に支点間断面に発生したひび割れの位置から鉄筋のゲージ位置が遠い断面、(b) に支点間断面に発

生したひび割れの位置から鉄筋のゲージ位置に近い断面を示している。図中、状態 I はコンクリートに割れが生じていない状態、状態 II はコンクリートがない状態を示す。ひずみは、「ケミカル」の方が小さな値となっている。繰返し載荷時における残留ひずみに着目すると、「普通」に比べ「ケミ

カル」の方が小さくなっている。これは、コンクリートが引張力を多く受け持つことができ、鉄筋が受け持つ量が少なくなっているためであると考えられる。繰返し載荷時における残留ひずみについても、「普通」に比べ「ケミカル」の方が小さくなっている。

図-7は両者の分担軸力を示すものである。ケミカルプレストレスを導入した場合、床版の分担軸力が大きいことがわかる（6～7割増）。結果のまとめについては、次章2.の結果と併せて3.のまとめで示す。

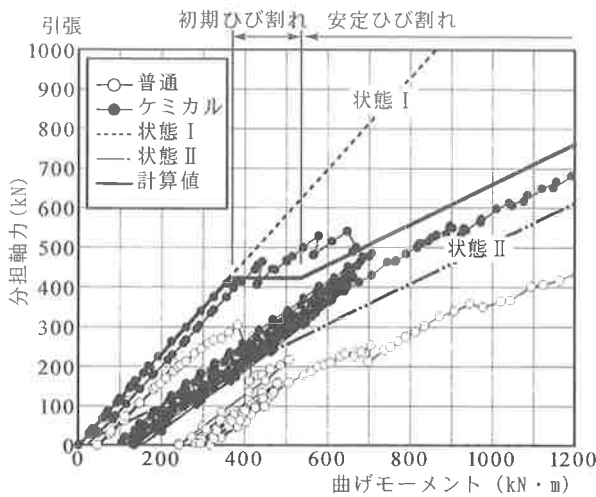


図-7 床版の分担断面軸力（支間中央位置）

を確認した。

(1) 実験概要

実験桁は1999年10月にコンクリートを打設している。載荷実験は打設後420日に実施した。実験桁と載荷時の概要を図-8および図-9に示す。載荷実験は図-8に示す実験桁のCJ2桁を使用した。実

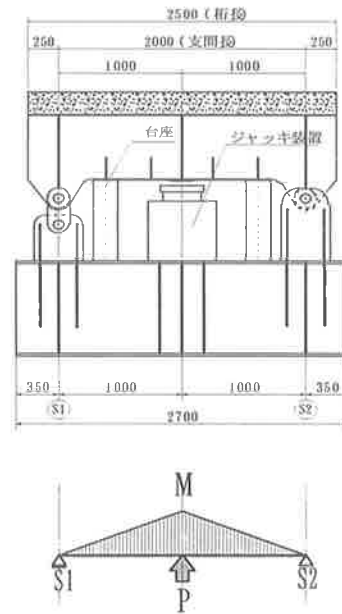


図-9 載荷実験概要図

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の検討

文献 3)で報告している長期計測実施中の実験桁（合計 3 体）のうちの 1 体について載荷実験を実施した。ケミカルプレストレスの効果の持続性をみるため、載荷実験により初期ひび割れ荷重など

表-5 載荷ステップ

	繰返し回数	載荷STEP (tf)	除荷STEP (tf)	ピッチ (tf)	目標状態
第1段階	2	0-20	20-0	2	—
第2段階	1	0-60	60-0	40,20,0	初期ひび割れ
第3段階	4	0-80	80-0	2~20	安定ひび割れ
第4段階	1	0-130	130-0	1~20	桁降伏状態

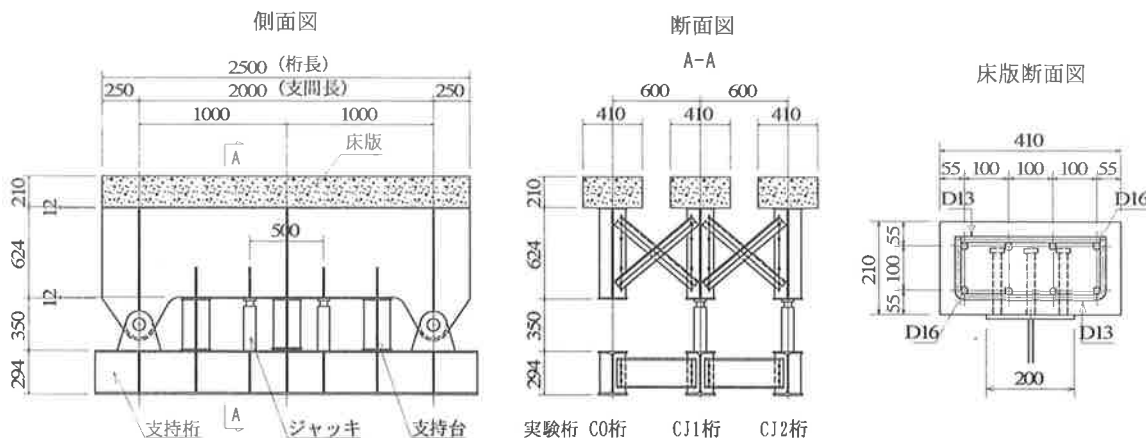


図-8 実験桁一般図

験桁の両端をピンで支持し、梁中央にジャッキを設置し荷重する。荷重ステップを表-5に示す。荷重荷重 600kN で初期ひび割れ状態、800kN で安定ひび割れ状態になる予測である。

(2) 実験結果

図-10に荷重－変位図を示す。荷重実験で初期ひび割れは 542kN で発生した。コンクリートの引張強度を 2.8N/mm<sup>2</sup> と仮定した時の初期ひび割れ荷重の予測値は 600kN である。実験値は予測値より若干小さい値であるが、ほぼ対応した値になっている。コンクリート部のひび割れの状態を図-11に示す。多くのひび割れは 800 ～ 1000kN の間で発生しており、安定ひび割れ状態は予測値の 800kN 以上になっていると予測される。これらの結果より、ケミカルプレストレスの効果はコンクリート施工後1年以上(420日)経過した桁においても持続していると判断できる。現在、残り2

体の実験桁の長期計測を継続して行っているが、3年経過後に荷重実験を実施する予定である。これを実施することにより、さらにケミカルプレストレスの持続性を確認し、効果の信頼性を高められると考えている。

3. まとめ

前記の2種類の実験結果をまとめて以下に示す。

- ・ケミカルプレストレスを導入した合成桁のひび割れ特性について
  - ①ケミカルプレストレスによってひび割れ発生荷重が大きくなる(25%増)。
  - ②理論上の安定ひび割れ状態でのひび割れ本数は、ケミカルプレストレスの方が少ない(支間で10本→7本に減少)。
  - ③安定ひび割れ状態でのひび割れ幅は、ケミカルプレストレスの場合2割程度小さい。ひび割れ発生時のひび割れ幅に関してはほとんど差がない。
  - ④安定ひび割れ状態において、ケミカルプレストレス床版の分担している軸力は、通常の床版に比べて大きな差が出ている(6~7割増)。
- ・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について
  - ①ケミカルプレストレスの効果は、コンクリート施工後1年以上(420日)経過した桁においても持続していると判断できる。

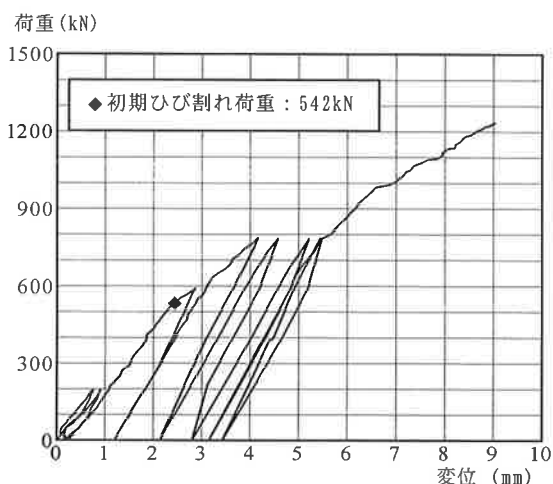


図-10 荷重－変位図

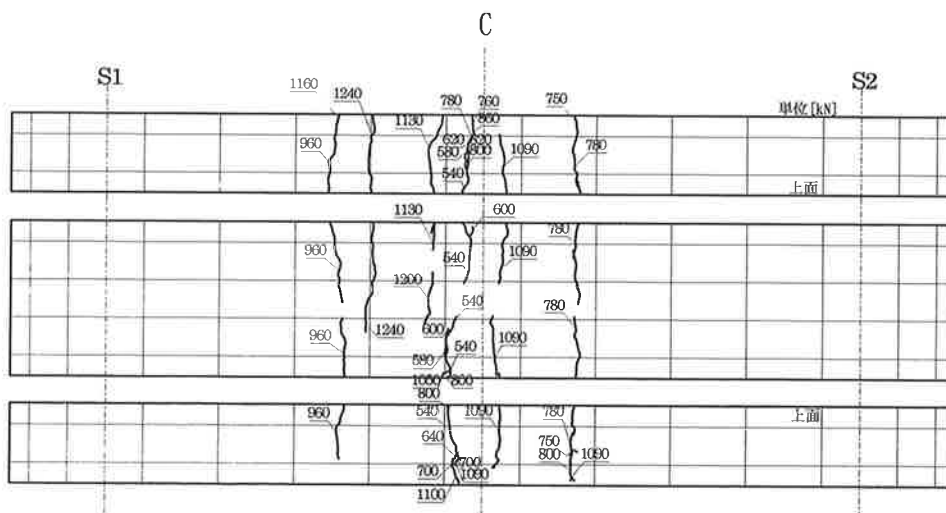


図-11 ひび割れの状況

## あとがき

本報告のうち、「ひび割れ幅とひび割れ間隔などに対するケミカルプレストレスの効果に関する実験」は長岡技術科学大学との共同研究<sup>9),10)</sup>として実施したものである。

本報告をまとめるに当たり、長岡技術科学大学長井正嗣教授、岩崎英治助教授の御指導を頂きました。また、実験は当時長岡技術科学大学院生の永尾豊明氏が中心になって実施したものです。膨張コンクリート配合設計と施工にあたっては株式会社太平洋マテリアルの御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 細見雅生・岡田幸児・林 勝樹：少数主桁連続合成鉄桁の合理化に関する研究，駒井技報，Vol.18，pp.12-18，1994.4.
- 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) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON：CEB-FIP MODEL CODE 1990，Thomas Telford.
- 5) A.Ghali and R.Favre (川上洵他訳)：コンクリート構造物の応力と変形，技報堂出版(株)，1995.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書，1996.
- 7) G.Hanswille：Cracking of concrete mechanical models 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.
- 8) K.Roik, G.Hanswille (伊藤鉦一，平城弘一共訳)：合成桁におけるひび割れ幅の制限，橋梁と基礎，Vol.27，No.2，pp.33-40，1993.
- 9) 永尾豊明・長井正嗣・岩崎英治・細見雅生・奥井義昭：ケミカルプレストレスを導入した合成桁の負曲げ挙動，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，I-B301，2001.10.
- 10) 本田卓士・奥井義昭・長井正嗣・永尾豊明・笠原竜介・細見雅生：FEMによる連続合成桁のひび割れ解析とひび割れ幅の算定に関する研究，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，I-B292，2001.10.