

少数主桁連続合成鉄桁の合理化に関する研究 (膨張コンクリートによるケミカルプレストレス導入の検討)

細見 雅生¹⁾ 岡田 幸児²⁾ 林 勝樹³⁾

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、中間支点負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考えて、どう扱うかが重要な課題である。今回、膨張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中心としたプレストレス導入の組合せを考え、その有効性について検討を行った。ここでは、数値的な検討と効果確認のための実験計画について報告する。

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^{1),2)}。この理由として、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、最近、橋梁の構成要素を合理的に評価し、使用するという考え方に変わりつつある。このような考え方は阪神大震災を契機にして、構造物の複合的な評価に基づく、より安全で合理的な設計法が求められていることも関連していると考えられる。

当社においても、以前からこのような要請に対する取り組みを検討してきた。今回、膨張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中心に、少数主桁連続合成鉄桁の検討を行った。ここでは、数値的な検討と効果確認のための実験計画について報告する。

現在、一般的に考えられている少数主桁連続合成鉄桁の基本形式は下記のとおりである。

- ①少数主桁（2主桁）
- ②PRC床版（橋軸直角方向にPC鋼線で緊張

し、プレストレスを導入する）

- ③橋軸方向には正曲げモーメントを受ける部分のみを合成桁とする（部分合成）。

今回は上記のほかに、下記の2つの方法により合合作用をさらに活用することを検討する。

- ④支点のジャッキ操作によりプレストレスを導入し、中間支点上の負曲げモーメントを小さくし、床版部の引張応力度を軽減する。
- ⑤中間支点部の床版に膨張コンクリートを使用して、ケミカルプレストレスを導入する。

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ものと思われる。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使用を検討した事例は少ない³⁾。今回、このケミカルプレストレスを積極的に取り入れようとするものである。ケミカルプレストレスにより、中間支点上のコンクリートの引張が完全になくならない場合についても、耐久性の高い床版となることが期待できる。

今回、モデル橋を用いた各種プレストレスの効果の検討を行い、④および⑤の方法の組合せを選定した。引き続きこれらのプレストレス導入の効果検討のための実験を実施中である。現在、膨

1) 開発室次長 2) 開発室 3) 開発室室長

張コンクリートの配合検討のための実験を終え、載荷実験を実施中である。ここでは、実験の計画までを報告する。

1. モデル橋を用いた各種プレストレスの効果の検討

(1) 概要

大支間の少数主桁連続合成鉄桁を想定し、その中間支点部に各種プレストレスを導入し、その効果を検討する。検討した各種プレストレスより、中間支点部のコンクリート床版部の引張力を打ち消すような、合理的なプレストレスの組み合わせを検討する。また、主桁としての作用だけでなく、床版としての作用も併せて検討する。

(2) 解析モデルと計算結果

大支間の少数主桁連続合成鉄桁橋として最大支間長 100m、主桁間隔 10m を想定し解析を行う。モデル橋は中間支点上で剛結とし、各種プレストレスを導入することにより、中間支点上においても床版上面に引張力が作用しない状態を目標とし、プレストレス導入の組合せを検討する。

モデル橋の諸条件は以下のとおりであり、図-1にこの一般図を示す。

- 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 : 380 mm
- 設計荷重 : B活荷重
- コンクリート設計基準強度 : 40N/mm²
(400kgf/cm²)

図-2, 表-1に設計荷重による曲げモーメントを示す。

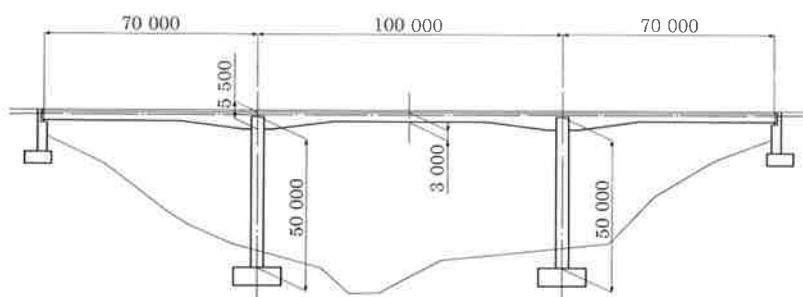


図-1 モデル橋の一般図

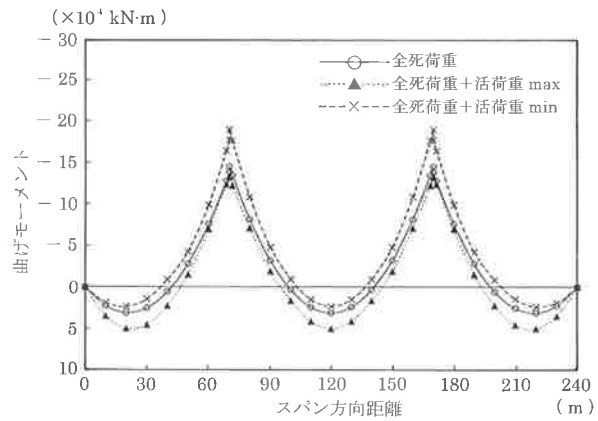


図-2 設計荷重によるモデル橋の曲げモーメント

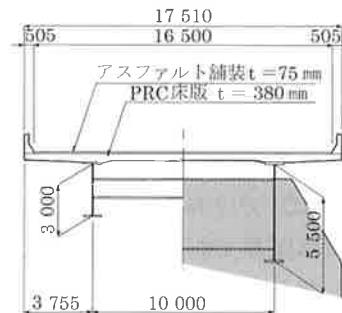
表-1 設計荷重によるモデル橋の曲げモーメント (kN-m)

	中間支点上	支間中央
合成前死荷重	-109494.4	22449.8
全死荷重+活荷重 max	-133990.5	50203.4
全死荷重+活荷重 min	-190205.3	23162.3

(3) 各種プレストレスの計算方法

これまでの計算例では、導入する各種プレストレスは、床版のひび割れを抑制するためのもので設計上は考慮されていない場合が多い。そこで本解析では、プレストレスの効果を積極的に取り入れて解析を行い設計に反映する。なお、クリープと乾燥収縮による応力度の計算方法は道路橋示方書⁴⁾ (以下、「道示」と示す)の合成断面に対する断面力を使用する方法を用いている。今回は以下の4種類のプレストレスの効果を解析により確認する。

- ① ジャッキ操作によるプレストレス
- ② カウンターウェイトによるプレストレス
- ③ 膨張コンクリートによるケミカルプレストレス
- ④ PC鋼材によるプレストレス



1) ジャッキ操作によるプレストレス

合成前に中間支点上にジャッキアップを行い、合成後にジャッキダウンを行うことでプレストレスを導入する。ジャッキ操作量は常識的な範囲のジャッキアップ可能量として1.0mとする。

2) カウンターウェイトによるプレストレス

合成前に各支間中央付近にウェイトを載荷し、合成後にウェイトを除荷することによりプレストレスを導入する。各ウェイトの重量は98kN(10tf)とする(合計294kN(30tf))。

3) 膨張コンクリートによるケミカルプレストレス

中間支点上床版に膨張コンクリートを使用することでプレストレスを導入する。膨張コンクリートによるプレストレス量は、鋼桁との合成作用により発生するプレストレスについては膨張を乾燥収縮と同様の現象と考えて、道示の手法により算出する。鉄筋の拘束によるプレストレスは、膨張コンクリート設計施工指針(案)⁵⁾より算出する。ケミカルプレストレスは上記の2つの値を足し合わせて求める。膨張率は 600×10^{-6} を想定し、膨張の計算の際には、膨張は乾燥収縮よりも早く始まるものと考えてクリープ係数 $\phi = 6$ と仮定して使用することとした。 $\phi = 6$ の妥当性については、今後実験などによって確認することを考えている。

4) PC鋼材によるプレストレス

PC鋼材により中間支点付近に橋軸方向プレストレスを導入する。ポストテンション方式を使用し、導入プレストレスとして断面全体に9810kN(1000tf)を導入する。計算の際には乾燥収縮、クリープなどの各種損失を考慮する。

(4) 計算結果

表-2, 3に計算結果を示す。まず、ジャッキ操作によるものでは、中間支点上に適度な応力が導入されているが、支間中央にも大きな圧縮力が導入されている。これにより、導入直後の応力状態により断面が決定する可能性がある。

カウンターウェイトでは、ウェイト重量各98kN(10tf)では導入量が小さく、必要な量を確保するには概算でおおの2940kN(300tf)程度のウェイトが必要となる。

膨張コンクリートでは、中間支点上に適度に導入されており、支間中央には圧縮力はほとんど働

表-2 プレストレスの比較
(中間支点上コンクリート上縁 $\sigma_{\text{上}}$) (N/mm²)

		ジャッキ操作	カウンターウェイト	膨張コンクリート	PC鋼材
合 成 前		-			
合 成 後	死荷重	2.26			
	活荷重	2.58			
ク リ ー プ		0.06			
乾 燥 収 縮		0.92			
温 度 差	桁+	0.42			
	桁-	- 0.42			
有効プレストレス		- 2.41	- 0.11	- 3.05	- 0.79

表-3 プレストレスの比較
(支間中央コンクリート上縁 $\sigma_{\text{中}}$) (N/mm²)

		ジャッキ操作	カウンターウェイト	膨張コンクリート	PC鋼材
合 成 前		-			
合 成 後	死荷重	- 1.10			
	活荷重	- 2.47			
ク リ ー プ		0.49			
乾 燥 収 縮		1.22			
温 度 差	桁+	1.14			
	桁-	- 1.14			
有効プレストレス		- 2.31	- 0.06	- 0.07	0.41

いていない。しかし、膨張により導入されるプレストレスは鉄筋の拘束により発生するので、鉄筋応力度に注意する必要がある。

最後にPC鋼材によるものでは、少数主桁であるため桁に対する床版の有効幅が広く、必要な量を確保するためにはさらに大きな導入プレストレスが必要になる。

(5) 合理的なプレストレスの組合せ

各プレストレスの検討結果より、中間支点上のジャッキ操作と、膨張コンクリートを併用してプレストレスを導入する。これにより、中間支点上における有効プレストレス量は5.5N/mm²(55kgf/cm²)となり、死活荷重に対する引張応力度は1.0N/mm²(10kgf/cm²)以下にまで低減できる。さらに、支間中央部では、ケミカルプレストレスによる圧縮は小さな値となっている(表-4)。支点部について組合せたプレストレスを導入した際のM- ϕ 曲線を図-3に示す。図中の ΔM は、死荷重状態を0とした付加モーメントを表しており、 ϕ は死荷重も含めた鋼桁下縁の応力度より計算している。ここで、コンクリートのひび割れ発生応力度は2.5N/mm²(25kgf/cm²)としている。図より、膨張コンクリートによるプレストレス導入およびジャ

表-4 プレストレスの組合せ (N/mm²)

		中間支点上		支間中央	
		コンクリート上縁	コンクリート下縁	コンクリート上縁	コンクリート下縁
合 成 前		-	-	-	-
合 成 後	死荷重	2.26	1.71	- 1.10	- 0.41
	活荷重	2.58	1.93	- 2.47	- 0.95
ク リ ー プ		0.06	0.05	0.49	- 0.15
乾 燥 収 縮		0.92	0.97	1.22	1.12
温 度 差	桁+	0.42	0.06	1.14	0.93
	桁-	- 0.42	- 0.06	- 1.14	- 0.93
ジャッキ操作 (PS(J))		- 2.41	- 1.85	- 2.31	- 1.37
膨張コンクリート (PS(C))		- 2.99	- 2.95	- 0.07	- 0.07
死 荷 重	PS無し	3.67	- 3.31	- 0.53	- 1.49
	PS (J)	1.25	- 1.46	- 2.84	0.12
	PS (C)	0.68	- 0.36	- 0.60	1.42
	PS(J+C)	- 1.73	- 1.49	- 2.91	0.05
死荷重+ 活荷重	PS無し	6.24	0.52	- 3.00	0.54
	PS (J)	3.83	3.39	- 5.31	- 0.83
	PS (C)	3.25	2.29	- 3.07	0.47
	PS(J+C)	0.84	0.44	- 5.38	- 0.90

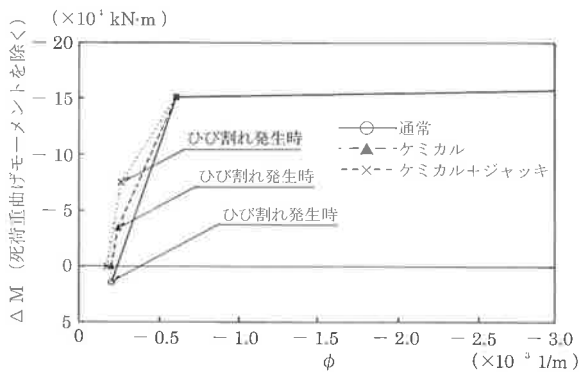


図-3 モデル橋のM-φ曲線 (ひび割れ発生応力度2.5N/mm²)

ッキアップとの併用によりひび割れ曲げ発生モーメントが、従来のものよりも増大していることがわかる。

(6) 床版としての応力の組合せ

モデル橋は主桁間隔が10mである。ここでは、主桁間隔が計算式の適用範囲を超えても、道示の計算式は大きくは変化しないと仮定して、床版としての応力度を算定した(表-5)。床版作用による応力度は床版支間中央部で発生しているが、主桁作用による応力度は床版支間中央部ではシアラグの影響で表-5の値よりも小さくなる。よって「床版+主桁」によるコンクリートの引張応力度は大きな問題ではないと考えられる。このことについての詳細な検討は今後の課題と考えている。

表-5 床版としての応力度の組合せ(コンクリート橋編) (N/mm²)

	中間支点上		支間中央	
	床版上縁	床版下縁	床版上縁	床版下縁
床版としての作用	- 5.44	5.44	- 5.85	5.85
主桁の一部としての作用	0.84	0.44	- 5.38	0.90
床版+主桁	- 4.60	5.88	- 11.23	4.95
床版+主桁(許容応力度)	- 13.72	2.45	- 13.72	2.45

2. 膨張コンクリートの配合検討試験

(1) 概要

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、硬化後に体積膨張を起こすコンクリートである⁶⁾。これ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。これに使用される膨張材は石灰系とCSA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。

連続合成桁の検討の際、中間支付近の床版の引張応力が問題となるが、これを膨張コンクリートによるプレストレスを導入すること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。また、膨張材は石灰系のエクспанとし、ケミカルプレストレスコンクリートとして検討する。

(2) 試験内容

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の基準により決定した。表-6に基本配合を示す。このコンクリートは設計基準強度として40N/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、強度および配

表-6 基本配合

スランブ (cm)	Air (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
				W	C	S	G	Ex	Pz70	Pz101	
EX-0	8±2.5	4.5±1.5	36.5	35.0	170	466	580	1106	00	1.49	3A*
EX-40	8±2.5	4.5±1.5	36.5	35.0	170	426	580	1106	40	1.49	3A
EX-50	8±2.5	4.5±1.5	36.5	35.0	170	416	580	1106	50	1.49	3A
EX-60	8±2.5	4.5±1.5	36.5	35.0	170	406	580	1106	60	1.49	3A

*) Aは空気量1%のAE剤の単位量を示す。

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膨張材添加量と膨張率の関係
- ③環境温度の膨張特性に与える影響

3) 試験項目, 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。

- ①スランプ試験 (JIS A1101)
- ②空気量の測定 (JIS A1128)
- ③圧縮強度試験 (JIS A1108)
- ④静弾性試験 (JSCE-G502)
- ⑤拘束膨張試験 (JIS A6202)

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湿布養生とし、以後脱型し水中養生を行っている。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。

(3) 試験結果

まず、膨張材量が $50\text{kg}/\text{m}^3$ の場合の膨張率を図-4に示す。温度が 10°C 、 20°C の場合が最も膨張している。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

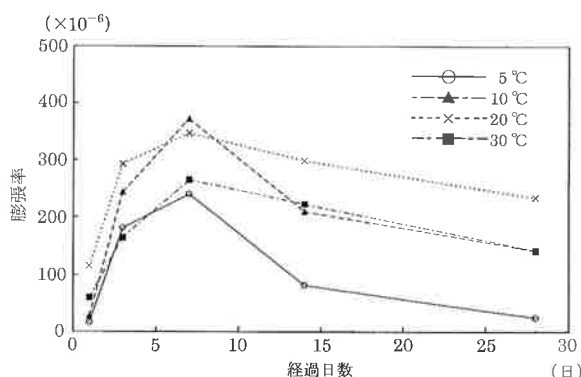


図-4 膨張材量 $50\text{kg}/\text{m}^3$ の場合の膨張率

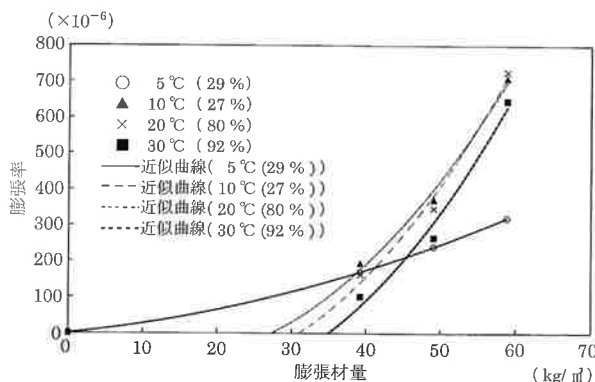


図-5 配合量と膨張率の関係 (7日目)

たために、乾燥収縮が発現しているためである。

次に、配合量と膨張率 (7日目) の関係を図-5に示す。結果として温度が 10°C 以上であれば、膨張材量の増加に従い膨張率は増加していく。 5°C の場合でも膨張率は増加していくが、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-6に示す。傾向として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、配合量を $55\text{kg}/\text{m}^3$ 、管理温度を 10°C 以上とする。

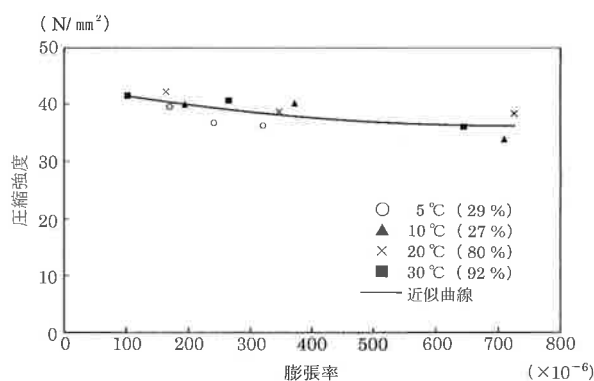


図-6 圧縮強度と膨張率の関係 (7日目)

3. 合成桁の負曲げ実験計画

(1) 概要

少数主桁連続合成鉄桁の中間支点付近をモデル化し、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アップによるプレストレスの併用の効果を確認するのが実験の主目的である。

今回予定している実験内容を以下に示す。

- ①少数主桁連続合成鉄桁の中間支点付近 (コンクリートに引張応力が発生する領域) をモデル化した実験桁を3体製作する。
- ②コンクリート打設から28日目までは、膨張、クリープおよび乾燥収縮の影響を調べるためのひずみ計測を自動計測で行う。
- ③その後、載荷試験を実施する。載荷試験では、荷重とコンクリートのひび割れの関係、耐荷力を確認する。

今回使用する実験桁および載荷桁の一般図を図-7に示す。

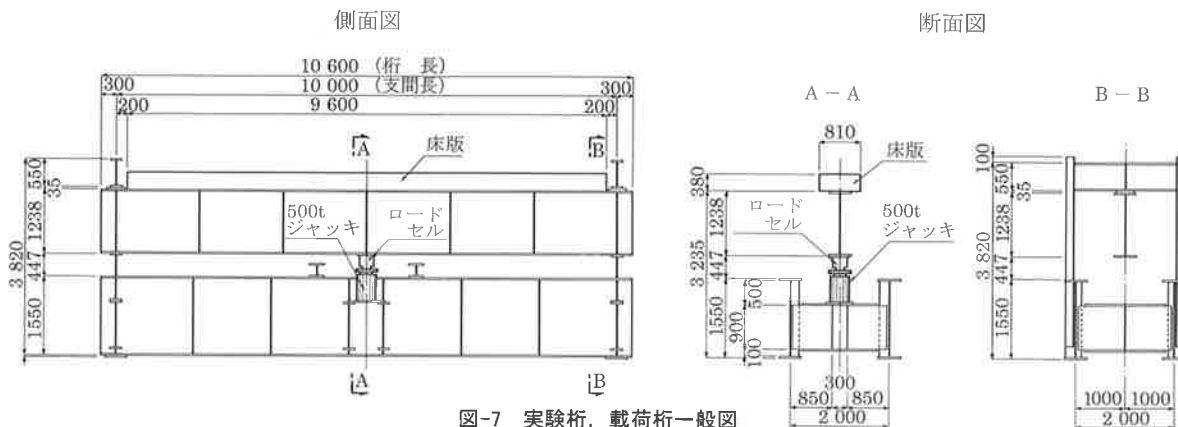


図-7 実験桁，載荷桁一般図

(2) 実験条件

1) 実験桁の諸元

実験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であるため、実験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あわせてそれぞれ380mmと2%とし、幅に関しては有効幅内に収まるようにした。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。

支持条件としては不静定力の影響のない単純支持を選定している。

実験としては、膨張コンクリートによるケミカルプレストレス、膨張コンクリートとジャッキアップによるプレストレス、普通コンクリートのみの3種類を行い比較する。

2) プレストレス量

実験桁におけるプレストレス量はモデル橋との比較を考えて、ジャッキアップ、膨張コンクリートでおのおの3.0N/mm² (30kgf/cm²)程度の圧縮力を導入する。モデル橋は連続構造であるため各種の断面力に対して2次応力が発生するが、実験桁では単純支持のため2次応力は発生しない。また、モデル橋では合成後死荷重が存在するため、中間支点上において床版に引張力が発生し、プレストレスによるクリープが緩和される傾向にある。しかし、実験桁では所定の有効プレストレスを導入するのにモデル橋に比べて、より大きな導入プレストレスが必要となる。

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-7に示す。計算方法はモデル橋と同様である。また、各実験桁のM

ーφ曲線を図-8に示す。これも、計算方法はモデル橋と同様である。モデル橋の後死荷重に相当する荷重が実験桁には作用していないという条件が両者で異なっているため、初期ひび割れモーメントが相対的に上側にシフトしている。プレストレスの効果の関係についてはモデル橋と同様であり、これにより実験桁による各プレストレスの効果を確認しようとするものである。

3) ケミカルプレストレス

実験桁に導入するケミカルプレストレスは3.0N/mm² (30kgf/cm²)、膨張率600×10⁻⁶程度を目標としている。膨張コンクリートにおいて所定の膨張率を出すためには、適切な養生が必要となり、特に温度によって同じ膨張材量でも膨張率に大きな違いが出る。これについては、

表-7 実験桁のコンクリート床版部の応力度

	コンクリート上縁		コンクリート下縁			
	ジャッキ操作	膨張コンクリート	ジャッキ+膨張	ジャッキ操作	膨張コンクリート	ジャッキ+膨張
死荷重+活荷重	0.00			0.00		
クリープ	0.00			0.00		
乾燥収縮	0.54			0.96		
温度差	桁+	0.13		1.12		
	桁-	-0.13		-1.12		
有効プレストレス	-2.75	-2.92	-5.67	-1.94	-3.11	-5.05
死荷重+PS	-2.09	-2.25	-5.01	0.14	-1.03	-2.97

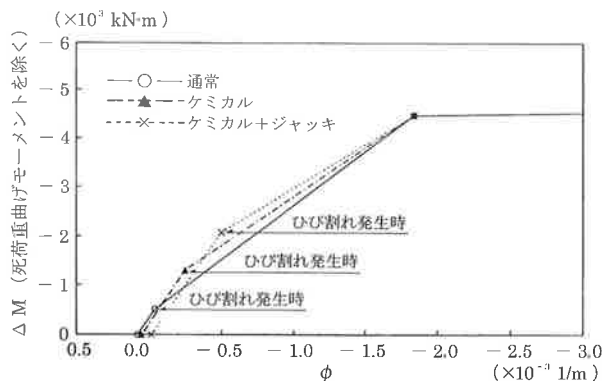


図-8 実験桁のM-φ曲線 (ひび割れ発生応力度2.5N/mm²)

膨張コンクリートの配合検討試験の結果をもとに、温度の管理値を設定し、十分に管理するとともに、計測器を用いて連続して記録しておくこととした。

(3) 実験内容

実験は、当社富津工場内の屋外に実験場を設けて実施する。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うこととする。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う。

計測内容は下記のとおりである。

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、膨張率など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う。計測はデータロガーとパソコンを接続し自動で行う。計測項目は以下のとおりである。

- ①コンクリートの歪計測
- ②鉄筋の歪計測
- ③鋼桁の歪計測
- ④桁の変形量
- ⑤コンタクトゲージによる歪計測、ひび割れ幅計測
- ⑥反力計測

2) 荷重載荷時

載荷試験時（コンクリート打設28日経過後）にコンクリート養生中と同様の計測を行う。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、桁の耐荷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う。

あとがき

少数主桁連続合成鋼桁のコンクリートを有効にする方法の1つの案として、ケミカルプレストレスとジャッキアップの併用案について解析的な検討を行った。プレストレス導入については、ケミカルプレストレスとジャッキアップの併用により、計算上スパン100mの連続桁について中間支点上においてもコンクリートをほぼ有効にできるという結果になった。

乾燥収縮と同程度の約 200×10^{-6} の膨張率をもつ膨張コンクリートは以前からよく使用されてお

り、信頼度も高いと考える。本解析は、膨張率を 600×10^{-6} とケミカルプレストレスを積極的に使用することの有効性について、数値的な検討を行ったものである。現在、実際の効果について実験により確認を行っている。

基本的な検討については、実施中の実験も含めてほぼ終えたが、実用化のため今後とも検討を行う必要があると考えている。今後の大きな課題としては、

- ①繰返し荷重などの耐久性の問題
- ②ケミカルプレストレスの経年変化
- ③架設ステップを考慮したプレストレス導入の検討
- ④詳細なクリープ、乾燥収縮の解析と設計簡便法の検討

が挙げられる。これらについて、引き続き検討を進めて行く予定である。

最後に、本研究を進めるにあたり、早稲田大学理工学部土木工学科 依田照彦教授に指導していただきました。また、コンクリートの配合の検討と膨張コンクリートの配合試験については(株)小野田に協力していただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田村陽司・川尻克利・大垣賀津雄・作川孝一：PC床版連続合成2主桁橋「千鳥の沢川橋」の設計、橋梁と基礎、Vol.32, No.9, pp.18-22, 1998.9.
- 2) 木村 宏・内田修平・塩田圭三・田中一夫・小西哲司・太田哲：PC床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の設計・工場製作・現場施工、川田技報、Vol.16, pp.38-45, 1997.1.
- 3) 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.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I 共通編・II 鋼橋編、丸善、1996.12.
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー第45号・膨張コンクリート設計施工指針（案）、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研究、土木学会論文報告集、第235号, pp.111-124, 1975.3.