

(8) PC三径間連続ラーメン橋の  
クリープに関する研究

三井建設(株)	PC技術部	○米倉 宏行
同上	同上	森 理太郎
同上	同上	竹内 光
同上	同上	加島 清一郎

1. はじめに

近年、道路及び鉄道の整備事業の進展とともに、コンクリート橋の設計及び施工方法の技術の発展はめざましいものがある。現在国内では、コンクリート道路橋の最大支間は斜張橋で250m(呼子大橋)連続ラーメン橋で148m(岡谷高架橋)にも達し、コンクリート橋は今後も長大化傾向にあり、施工実績も年々増加するものと思われる。

このような背景から本研究はPC橋梁技術の向上を目的に実橋梁の長期計測を行い、三径間連続ラーメン橋のクリープの進行について計測データを基に解析を行い考察し、今後のPC橋梁の設計、施工及び維持管理を行う場合の一助とするものである。

2. 研究の目的

PC多径間連続ラーメン橋等の不静定構造物は、施工時と完成時に構造系が変化するとともに大きな特徴をもっている。施工時は片持ち梁であり、完成時は連続ラーメンとなり主桁の自重によるクリープの進行とともに応力の再配分が行われる。また気温の変化によっても不静定力が生じる。このように時間や温度に依存する構造物を設計する場合、仮定条件(クリープ係数、乾燥収縮度等)の設定、温度応力の大きさ等を適切に判断することが重要となる。しかしながら現状において、各団体の示方書はあるものの、実橋梁における長期計測データを基にクリープ係数や温度応力について示したものはみあたらない。

本研究は、PC三径間連続ラーメン橋(橋長:109m)の躯体内に埋設したひずみ計、鉄筋計及び熱電対による各種の計測を行い、さらに橋台の支承反力についても完成後約2年間の測定を行い、計測データから本橋梁のクリープの進行過程すなわちクリープ係数及び温度変化による不静定力(温度応力)について明らかにしたものである。

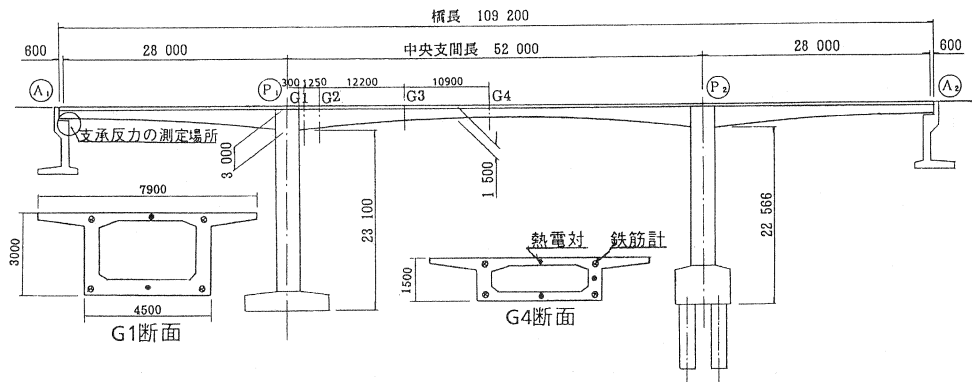


図-1 一般形状図とセンサーの取付位置

### 3. 計測の概要

本橋梁の一般形状図及びセンサー（鉄筋計など）の取付位置を図-1に示す。計測断面は図-1に示すように主桁部の4断面である。またコンクリートのクリープ及び乾燥収縮ひずみを得る目的でダミーブロックを製作した。ダミーブロックの断面形状寸法は（社）日本道路協会設計便覧に示されている“部材の仮想厚さ”に従って決定した。ダミーブロックの種類、形状及びプレストレスの導入量等について表-1に示す。

表-1 ダミーブロックの諸性状

ダミーブロック名	目的	断面形状	断面位置	プレストレス量
DP-1	クリープ	0.80×0.80 *2.00m	G1, 2	38.9kgf/cm <sup>2</sup>
DS-1	乾燥収縮			0
DP-2	クリープ	0.60×0.60 *2.00m	G3	56.7kgf/cm <sup>2</sup>
DS-2	乾燥収縮			0
DP-3	クリープ	0.55×0.55 *2.00m	G4	47.6kgf/cm <sup>2</sup>
DS-3	乾燥収縮			0

次に支承反力の測定方法を図-2に示す。支承反力は橋台と主桁の間に油圧ジャッキを4台据え付け、主桁をジャッキアップする直接的な方法で行った。測定方法は電動ポンプによりジャッキの圧力を徐々に上げ、荷重と変位をデータロガーによりモニターしながら測定する。主桁の変位が約1mmに達したらジャッキの圧力を止め徐々に下げる。図-3は荷重と変位の関係を概念的に示したものである。図-3に示した最初の傾きは沓のパネ強さを表し、次の変曲点はジャッキが沓の荷重をすべて受け替えたときの支承反力を示す。その後の傾きは主桁の曲げ剛性(EI)を表している。

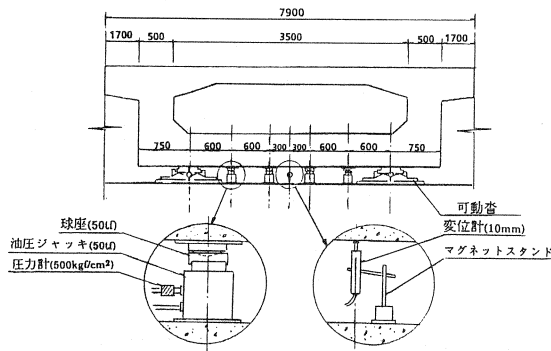


図-2 支承反力の測定方法

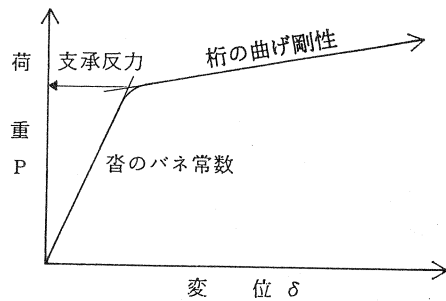


図-3 荷重と変位の概念図

### 4. 設計及び施工の概要

本橋梁の設計及び施工は、（社）日本道路協会道路橋示方書・同解説（昭和53年制定）、（社）日本道路協会設計便覧（昭和60年10月）及び施工便覧（昭和59年2月）に準拠し行った。次に設計条件を表-2に示す。

表-2 設計条件

施工手順は柱頭部から左右対称に施工を行う張り出し架設工法を採用した。側径間端ブロックは吊支保工により施工し、最後に中央径間ブロックを施工し閉合した。

橋種	プレストレストコンクリート道路橋
型式	三径間連続ラーメン橋
施工法	張り出し架設工法(PAC)
橋格	一等橋
橋長	109.200m
支間	28.000+52.000+28.000m
有効幅員	7.000m
活荷重	TL-20
温度変化	±15.0℃
温度差	5℃
水平震度	KH=0.18 (橋軸方向) 0.20 (橋軸直角方向)
雪荷重	1.00kgf/m <sup>2</sup>

### 5. PC鋼材及びコンクリート

本橋梁に使用したPC鋼材は、橋軸方向についてはPC鋼より線(SWPR7B, 9T12.7)を、床版横締めはPC鋼棒(SBPR80/95, φ32)である。

コンクリートの設計基準強度は上部工と下部工で400, 240kgf/cm<sup>2</sup>である。表-3にコンクリートの配合を、表-4にコンクリートの力学的性質について示す。

表-3 コンクリートの配合

工種	Gmax (mm)	セメントの 種類	呼び強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	スラン (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位重量(kg/m <sup>3</sup> )				
								C	W	S	G	Ad
上部工	25	早強	400	8	4.0	37.5	39.8	427	160	705	1081	1.068
下部工	25	普通	240	12	4.0	54.0	45.5	307	166	827	1018	1.535

6. 計測結果と考察

6.1 ダミーブロックのクリープ及び乾燥収縮

3種類のダミーブロックで1回のプレストレス導入で終了しているダミーブロックはDP-3である。このクリープ及びDS-3の乾燥収縮ひずみを基本クリープ曲線及び基本乾燥収縮曲線とし、解析に用いた。この経時変化を図-4に示す。計測結果よりクリープ係数は1.29(材令750日)となり、道路橋示方書の設計値(以下、設計値と略称)の1.08とほぼ同じ結果が得られた。なお設計値に用いた湿度は実測値の80%とした。また乾燥収縮ひずみについても実測値と設計値を比較すれば、実測値がやや大きいものの100μ以下であり、実測値の妥当性が裏付けられた。ダミーブロックの材令とクリープ係数及び乾燥収縮度との関係を図-5及び図-6に示すような片対数グラフで表すことができた。そこで基本クリープ曲線を式(1)に、また基本乾燥収縮曲線を式(2)で表すことにした。

表-4 コンクリートの力学的性質

工種	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
上部工	2	340			2.31*10 <sup>5</sup>	0.247
	7	436	36.3	48.1	2.63	0.191
	28	525	38.8	50.5	3.30	0.233
	103	533	36.8	80.9	3.53	0.267
下部工	7	206			1.52	0.185
	28	315	26.2		2.07	0.192
	189	344			3.05	0.248

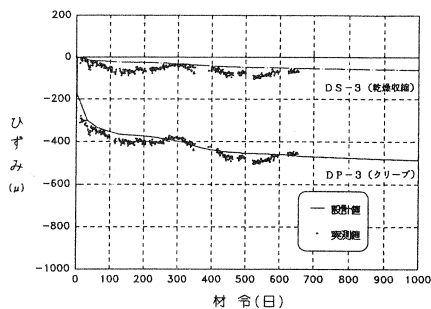


図-4 ダミーブロックの経時変化

$$\phi t = 0.413 \log t + 0.106 \quad (1)$$

$$\epsilon_{st} = 58 \log t - 74 \quad (x10^{-6}) \quad (2)$$

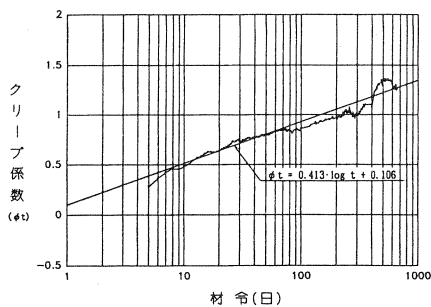


図-5 ダミーブロックのクリープ係数

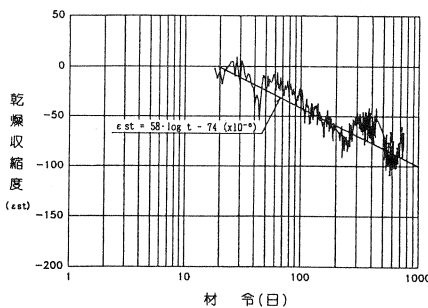
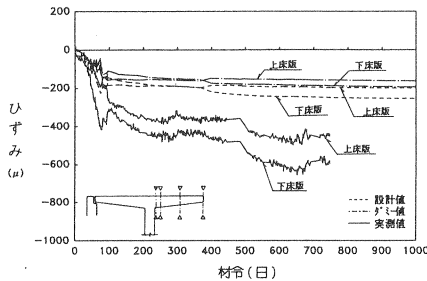


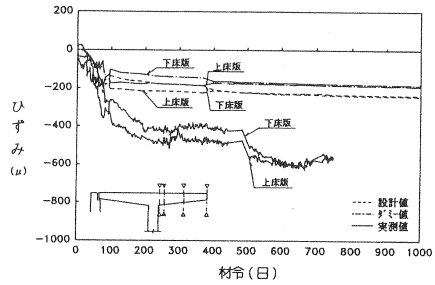
図-6 ダミーブロックの乾燥収縮度

### 6.2 主桁内に埋設したセンサーのひずみ

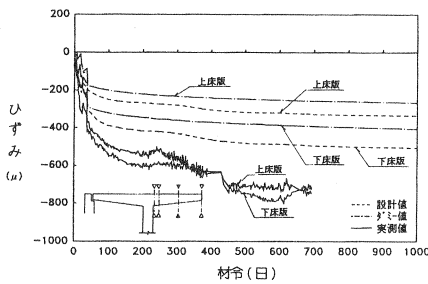
主桁内部に埋め込んだセンサー(鉄筋計)からコンクリートひずみ(温度補正)を算出した。実測値と設計値及びダミーブロックより得られたクリープ係数(以下、ダミー値と略称)の結果を図-7示す。主桁が張り出している静定構造期間(0~93日)と中央部閉合(完成後)の不静定構造期間(93日~)に大きく分けると、静定構造期間のコンクリートひずみの実測値は設計値及びダミー値の約2倍であり、不静定構造期間のひずみの伸びも大きい。この理由として、地上に置かれているダミーブロック周辺の湿度に比べ実橋周辺の湿度が低いことによりクリープの進行がダミーブロックより大きかったものと考えられる。またセンサーの取付位置がPC鋼材と非常に近いためシースの影響によりプレストレス量が設計値より大きく導入されたものと思われる。



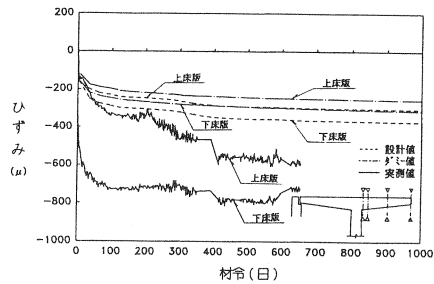
(a) G1断面



(b) G2断面



(c) G3断面



(d) G4断面

図-7 主桁内センサーのひずみと設計値の比較

### 6.3 支承反力の測定結果

連続ラーメン橋など構造系が変化する場合は不静定力すなわち支承反力はF. Dischingerの式(3)によって求めることができる。

$$\Delta R_{\phi} = (R_0 - R_1) (1 - e^{-\phi}) \quad (3)$$

側径間の支承反力( $\Delta R_{\phi}$ )は主に主桁の自重によるクリープとプレストレスにより発生する2次応力のクリープなどによって増加する。すなわち支承反力を測定することにより本橋梁のクリープの進行( $\phi$ :クリープ係数)を明らかにすることができる。

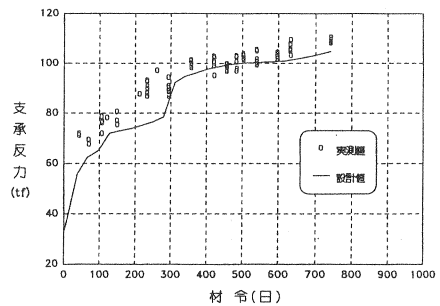


図-8 支承反力の経時変化

支承反力の測定は側径間の最終ブロック打設から4日後に開始し、約2年間に及ぶ測定を行い、現在も測定を継続している。支承反力の測定結果を示したグラフが図-8である。支承反力は上床版とその他の部材の温度差により大きく変化することから支承反力の測定は4時間毎に24時間実施し、温度補正を行った。温度補正は中央閉合時期の平均温度差(+4.6℃)を温度差ゼロとした。

測定結果より、初期の実測値は設計値より約10~15tf程度大きな値を示し、2年後は約5tf程度の差となっている。以上の結果より、クリープの進行は設計値より初期に速く徐々に緩慢となる。図-8の設計値の支承反力の急激な伸びは地覆、高欄及び舗装などによる橋面荷重の影響である。

#### 6.4 温度差による支承反力の変化

前項でも述べたように、上床版とその他の部材の温度差により周期的に支承反力(不静定力)は変化する。図-9はその測定結果で、24時間の支承反力の変化を示したグラフである。また図-10は温度差と支承反力の変化量との関係を示したものである。道路橋示方書によれば温度差を+5℃で設計するよううたわれているが、計測結果によれば温度差は約10℃と設計値(5℃)の2倍の値を示した。また温度差1℃当りの支承反力の変化量は設計値の4.0tf/℃に比べ実測値は3.4tf/℃とほぼ同じ結果が得られた。

今回の測定結果から、上床版の温度は輻射熱により予想以上に高いものであり、今後このような不静定構造物の設計を行う場合の貴重な資料となるものと思われる。また温度差による支承反力変化量の算定方法は実測値とよく合致し妥当であることが明らかとなった。

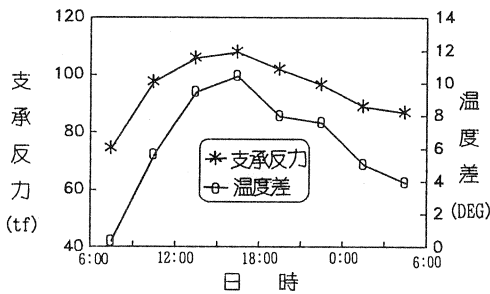


図-9 1日の支承反力の変化

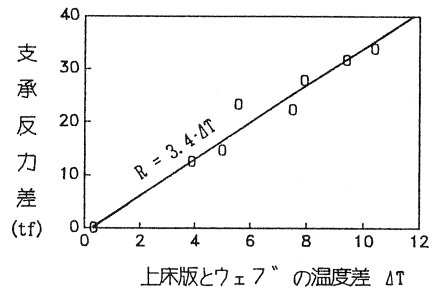


図-10 温度差と支承反力の関係

#### 6.5 埋設センサーと支承反力の比較

実橋梁のクリープについて埋設センサーの測定と支承反力の測定の両面からアプローチしてきた。表-5は埋設センサーから求めたクリープ係数、支承反力から求めたクリープ係数及び設計値のクリープ係数の値を示したものである。埋設センサーと設計値のクリープ係数を比較すると埋設センサーのクリープ係数は設計値の約3~4倍の値となっているのに対し、支承反力のクリープ係数は設計値のクリープ係数の約1.1倍程度でありそれほど差はなく、過去の事例から推測すれば支承反力によって得られたクリープ係数が妥当な値と考えられる。

表-5 埋設センサーと支承反力のクリープ係数の比較

測定方法	測定断面	測定位置	閉合時		1年後		2年後	
			実測値	設計値	実測値	設計値	実測値	設計値
埋設センサーによるφt	G1	上床版	0.72	(1.26)	2.85	(3.28)	3.57	(3.43)
		下床版	2.83	(0.57)	2.66	(3.06)	3.72	(3.58)
	G2	上床版	1.15	(2.02)	3.29	(3.78)	3.99	(3.84)
		下床版	2.45	(0.57)	2.39	(2.75)	3.64	(3.50)
	G3	上床版	1.26	(2.47)	2.89	(0.88)	3.50	(3.13)
		下床版	0.61	(1.20)	1.36	(1.53)	1.83	(1.63)
	G4	上床版			3.25	(3.22)	4.37	(3.38)
		下床版			1.59	(1.57)	1.59	(1.23)
支承反力によるφt					1.66	(1.53)	1.84	(1.82)

( ) \*1:実測値/設計値

以上の結果からクリープの進行過程を明らかにする手段として支承反力の測定方法は信頼性が高く、直接的にクリープを求めることができる。反対に埋設センサーによる方法は仮定条件が多く信頼性に乏しい方法と考えられる。

#### 7. おわりに

PC橋梁等の不静定構造物を設計する場合、施工時と完成後とでは構造系が異なることに留意する必要がある。特に主桁自重によるクリープの進行状況や、温度変化等による不静定力などを、適切に判断することが重要となる。

今回の計測データを基に解析した結果をまとめると次のことがいえる。

- 1) 本橋梁のクリープ係数及び乾燥収縮ひずみをダミーブロックにより計測した結果、設計値と同じ値を示し、また材令との関係を log関数で表すことができた。
- 2) 埋設センサーによる実測ひずみは設計値及びダミー値と比較し約2倍の値を示し、クリープ係数では設計値の5倍近い値を示している場所もあった。
- 3) 2年間にわたる橋台沓座部での支承反力の測定結果から不静定力が時間の経過とともに増加していることが明らかとなった。この不静定力より実橋梁のクリープ係数を算出した結果、設計値とよくあっていた。ただし初期では設計値より大きい傾向にあり、徐々に設計値に近づいていることが判った。
- 4) 上床版とその他の部材の温度差は計測結果では約10℃の値を示し、設計値の2倍であった。また、この温度差1℃当りの支承反力の変化量は、設計値と同じ結果が得られた。

不静定構造物である連続ラーメン橋のクリープの測定は、温度や湿度などの環境に大きく影響される為に従来の埋設センサーによる測定方法では、純粋なクリープを正確に得ることが非常に困難であった。今回行った支承反力の測定はクリープの進行を明らかにする直接的な方法であり、設計値と比較しても精度よくクリープを求めることができた。さらに今後も支承反力の測定を続けていくとともに、埋設センサーによる測定値との相違も検討していく予定である。

最後に本試験の実施に際しご協力をいただいた㈱三井の森、三井不動産㈱及びフォレストJV作業所の関係各位に対し感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 森, 加島, 他:  $\pi$ 形ラーメン橋の設計における一考察(その1), 土木学会第45回年次学術講演会
- 2) 米倉, 平田, 他:  $\pi$ 形ラーメン橋の設計における一考察(その2), 土木学会第45回年次学術講演会
- 3) (社)土木学会: コンクリート標準示方書(設計及び施工編)
- 4) (社)日本道路協会: コンクリート道路橋設計便覧
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説
- 6) H. リュッシュ, D. ユンクビルト: コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮
- 7) 榎波, 大神, 佐藤: コンクリート橋の施工
- 8) 村田, 岡田: フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ