

堺泉北有料道路PCプレテンション連結桁の実橋試験

小林 和夫*¹・中田 智*²・松永 完*³

1. まえがき

堺泉北有料道路は、大阪府道泉大津美原線（標準幅員 40 m）の中央部に併設された延長 4.7 km の連続高架橋（総幅員 17.5 m）である。

上部工は、長径間となる跨道部を除く標準部では PC 橋が採用されており、その形式はすべてプレテンション T 桁で、その 90 % 以上が 2～3 径間連結桁構造となっている。主桁の数は、ランプ部を含めて、約 2 250 本にも及んでおり、これを PC 業者 12 社がほぼ同時期に製作架設した。

同種類の桁を同時期に大量に製作するこの機会に、PC 桁の製作・性能に関する試験および連結桁としての性能に関する試験として以下のものを実施した。

- 1) PC 鋼材の緊張力試験
- 2) PC 桁の曲げ耐力試験
- 3) 連結桁の実橋載荷試験
- 4) 連結桁の長期追跡試験

このうち、PC 鋼材の緊張力試験、PC 桁の曲げ耐力試験についてはすでに報告¹⁾されているので、本報告では、連結桁の実橋載荷試験、連結桁の長期追跡試験とその解析結果について述べる。

2. 試験概要

堺泉北有料道路の PC 上部工には、維持管理の改善および走行性の向上という利点から、PC プレテンション 3 径間連結桁が多用されている。これらの設計にあたっては、主桁は連結後のすべての荷重に対して通常の連続桁と同等の耐力と性状を保證できることを目標としている。しかし、連結桁は単純桁と連続桁の中間的な構造であることや、PC 構造と RC 構造の複合構造物であることなどの理由により、その挙動に不明確なところがあり、統一された設計手法が確立されていないのが現状である。また、連結桁についての実験研究は、高速道路調査会²⁾、阪神高速道路公団³⁾において、連結部を部分的に

取り出した試験体によって、その耐力等の確認がなされているが、実際の構造物における試験例は少ない。

このような背景を踏まえて、本試験では次の項目の確認を目的として、実橋載荷試験、長期追跡試験を行った。

- 1) 連結桁が後荷重に対して連続桁としての挙動を示すかどうかの確認
- 2) 連結部の応力状態の確認
- 3) クリープ・乾燥収縮の影響の確認

3. 測定対象橋梁

実橋載荷試験、長期追跡試験の測定は、堺泉北有料道路第一工区 OFF ランプ RA₁～RP₃ 径間（図-1、写真-1 参照）を対象として行った。

4. 連結桁の実橋載荷試験

橋体工が完成した後（地覆・壁高欄は未施工）、試験車を用いて静的載荷試験を行った（写真-2、3 参照）。

4.1 試験車の載荷方法

総重量を約 26 t に調整したダンプトラックを用いて載荷試験を行った。試験は、ダンプトラック 2 台もしくは 4 台を連結部、側径間、中央径間に着目して配置した



写真-1 測定対象橋梁 (OFF ランプ)

*¹ Kazuo KOBAYASHI : 大阪工業大学工学部土木工学科教授

*² Satoshi NAKADA : 大阪府都市整備局交通政策課主幹

*³ Kan MATSUNAGA : プレストレスト・コンクリート建設業協会

◇研究報告◇

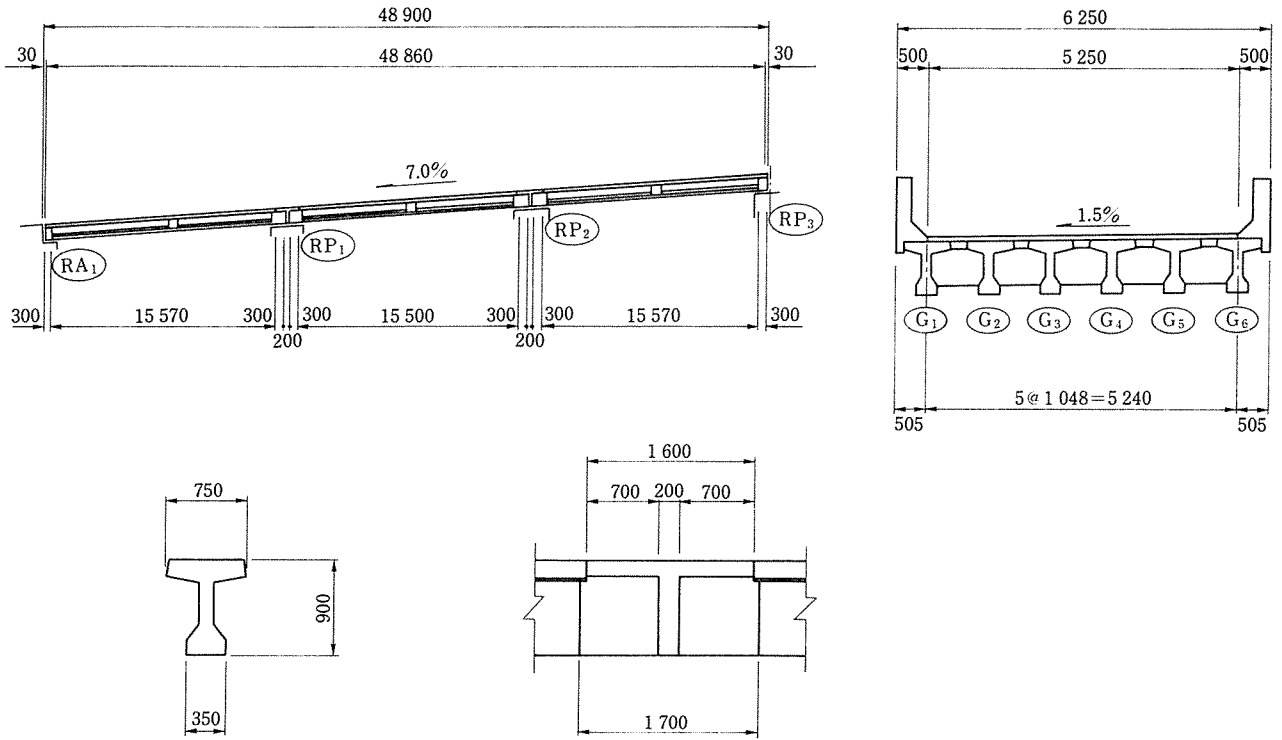
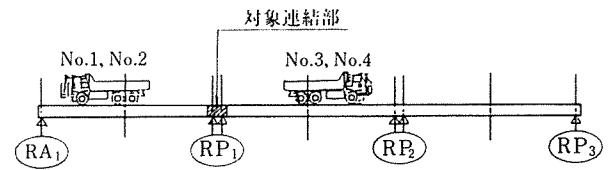


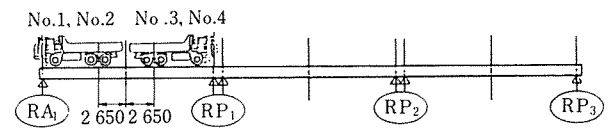
図-1 RA₁～RP₃ (OFF ランプ) 上部構造一般図



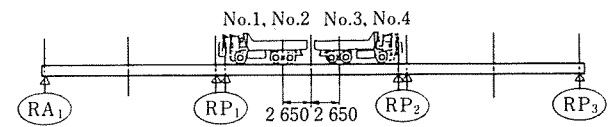
写真-2 試験車の载荷 (中央径間)



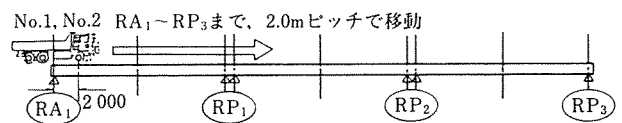
a) ケース 1 連結部に着目した場合
ケース 2



b) ケース 3 側径間に着目した場合
ケース 4



c) ケース 5 中央径間に着目した場合
ケース 6



d) ケース 7 载荷位置移動に着目した場合

図-2 橋軸方向の载荷位置

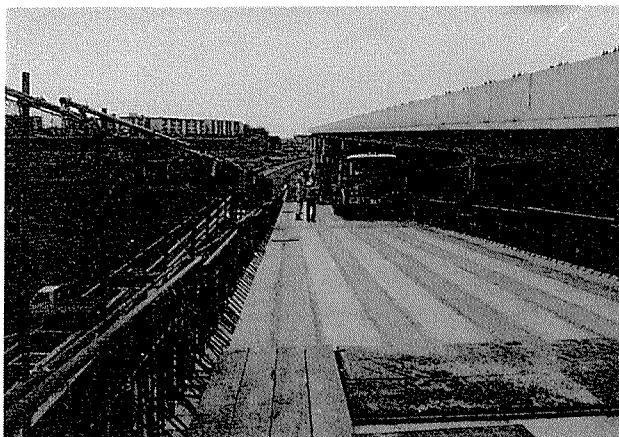


写真-3 試験車の载荷 (偏载荷)

場合と、ダンプトラックを2台並行状態で、順次2 mごとに静的移動载荷させた場合で合計7ケースについて実施した。図-2、図-3に各载荷ケースと試験車の配置状態を示す。

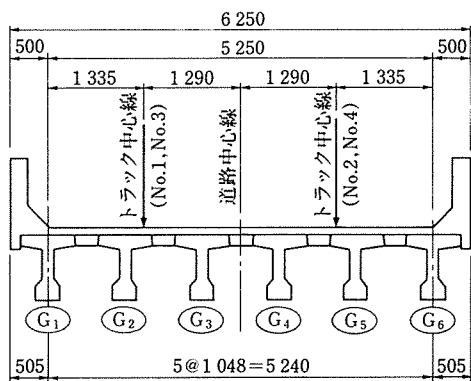
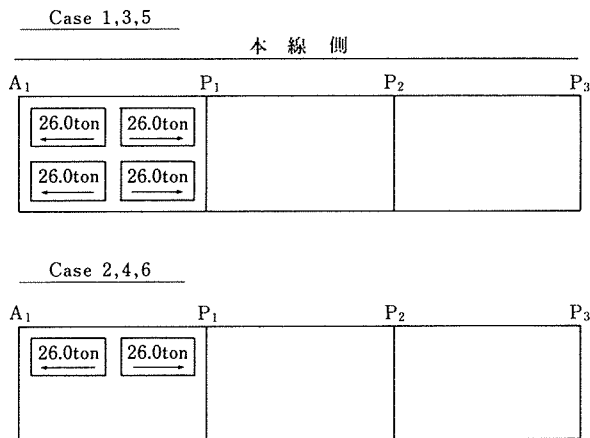
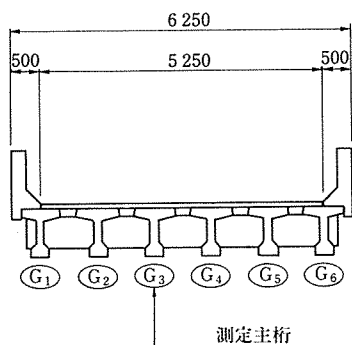
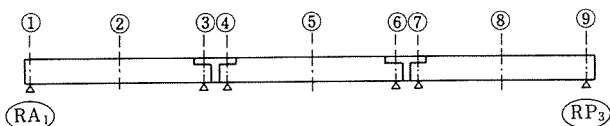


図-3 橋軸直角方向の载荷位置

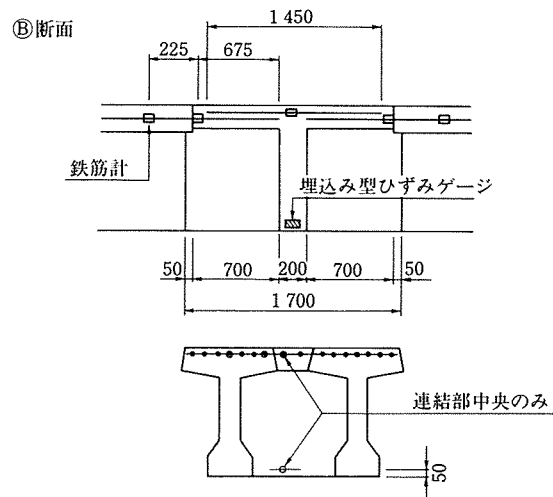
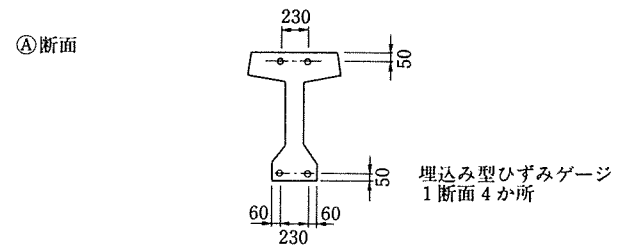
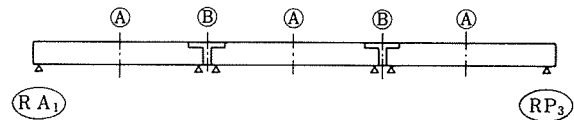


	測定位置	個数
①~⑥	全主桁	36
⑦~⑨	測定主桁	3
合計		39

図-4 たわみ測定位置

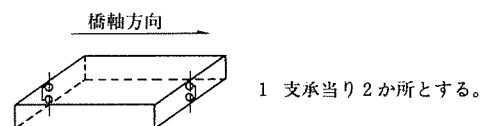
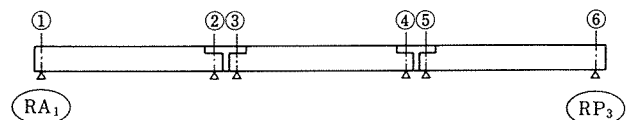
4.2 測定項目

- 1) 主桁のたわみ (図-4 参照)
- 2) 主桁コンクリートの内部ひずみ (図-5 参照)
- 3) 連結鉄筋のひずみ (図-5 参照)
- 4) ゴム支承の反力 (図-6 参照)



	A断面	B断面	計
埋込み型ひずみゲージ	12	2	14
鉄筋計	-	22	22

図-5 埋込み型ひずみゲージ・鉄筋計測定位置



	測定位置	個数
①③④⑤⑥	G ₁ ・G ₃ (測定主桁)	20
②	全主桁	12
合計		32

図-6 π型ゲージ取付け位置

◇研究報告◇

4.3 測定結果および考察

(1) 荷重位置移動に着目した場合

図-7は、G₃桁の各スパンにおけるたわみの影響線の計算値と実測値を示したものである。計算値は、ゴム支承のばね定数を考慮した5径間連続桁として算出し、荷重分配は直交異方性版理論により算定した。実測値は、計算値よりやや小さいものの、連結桁が後荷重に対して

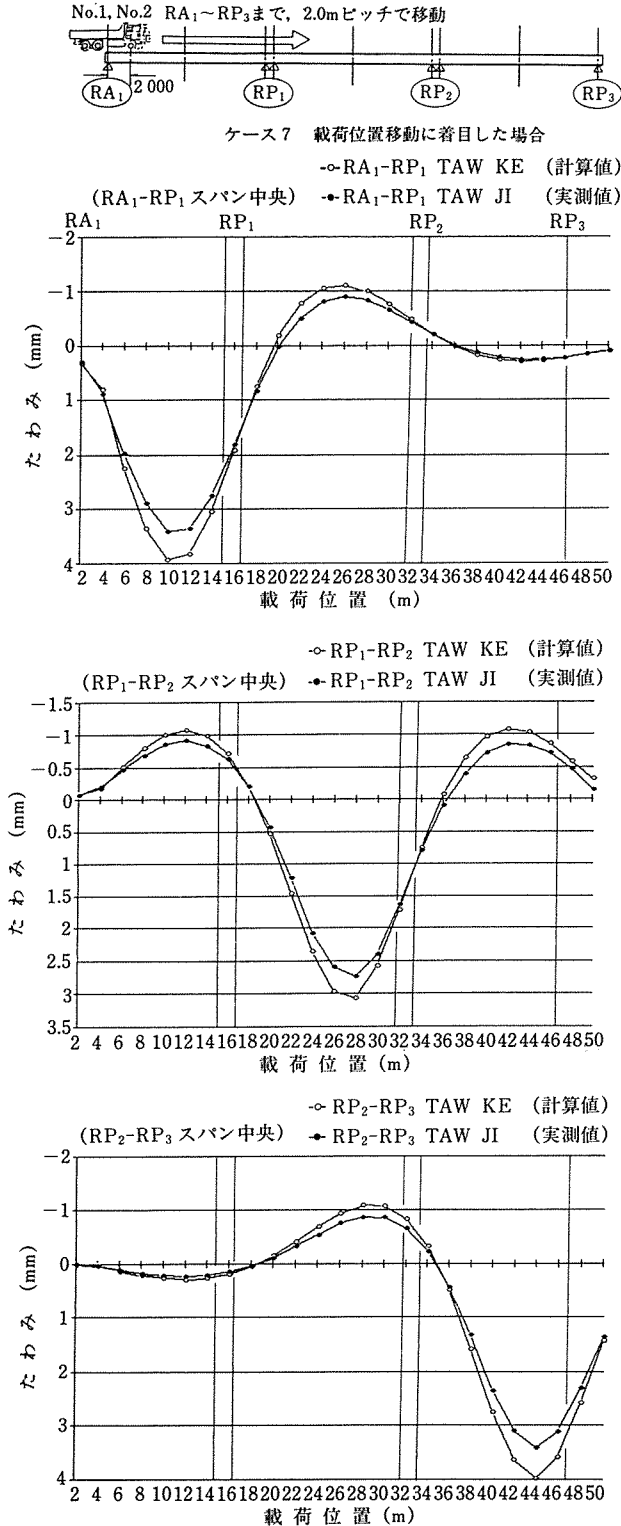


図-7 G₃桁スパン中央におけるたわみの影響線

連続桁としての挙動を示すのが確認できる。

図-8は、G₃桁の各スパン中央に埋設した埋込み型ひず

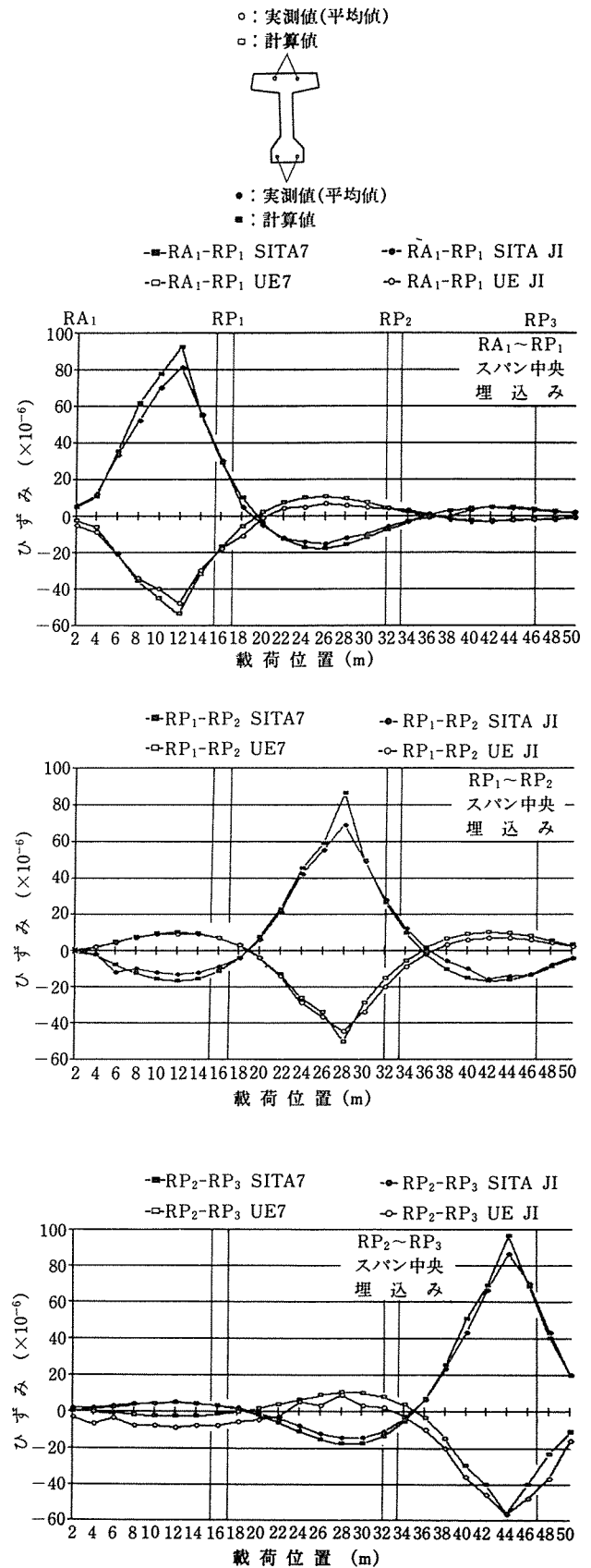


図-8 埋込みゲージによるスパン中央におけるひずみの影響線(ケース7)

ずみゲージによるひずみの影響線の計算値と実測値を示したものである。たわみの測定結果と同様に、後荷重に対して連続桁としての挙動を示すのが確認できる。

図-9は、 RP_1 および RP_2 上の横桁中央における連続鉄筋のひずみおよび下縁近傍コンクリートのひずみの影響線の計算値と実測値を示したものである。連続鉄筋の測定結果を見ると、支間中央と同様に連続桁としての挙動を示すのが確認できるが、その実測値は計算値の15%程度と非常に小さい。計算値は連続横桁の剛度を考慮していないが、実際には連続横桁の影響が非常に大きいと考えられる。下縁近傍のコンクリートひずみの実測値は、 $b=35\text{ cm}$ (主桁下縁幅) としたときの計算値に対しては40%程度であり、 $b=104.8\text{ cm}$ (主桁間隔) としたときの計算値に比較的一致する傾向が見うけられた。

(2) 連結部に着目した場合

連結部に着目した場合の支間中央のたわみとひずみの測定結果を見ると、荷重位置移動に着目した場合と同様に実測値は計算値よりやや小さいものの、連続桁としての挙動を示すのが確認できる。連続鉄筋の実測ひずみは、連続鉄筋に最も不利な応力が発生する荷重状態であるにもかかわらず計算値の約40%である 90×10^{-6} であった。

図-10は、支間中央における主桁たわみの横断方向分布の計算値と実測値を示したものである。計算値は直交異方性版理論により求めたものである。側径間における実測値は、計算値より傾きがゆるく荷重分配がやや悪い結果を示しているが、中央径間においては、実測値と計算値は良く一致している。また、反力の発生性状はたわみの発生性状に一致する傾向が見られる。

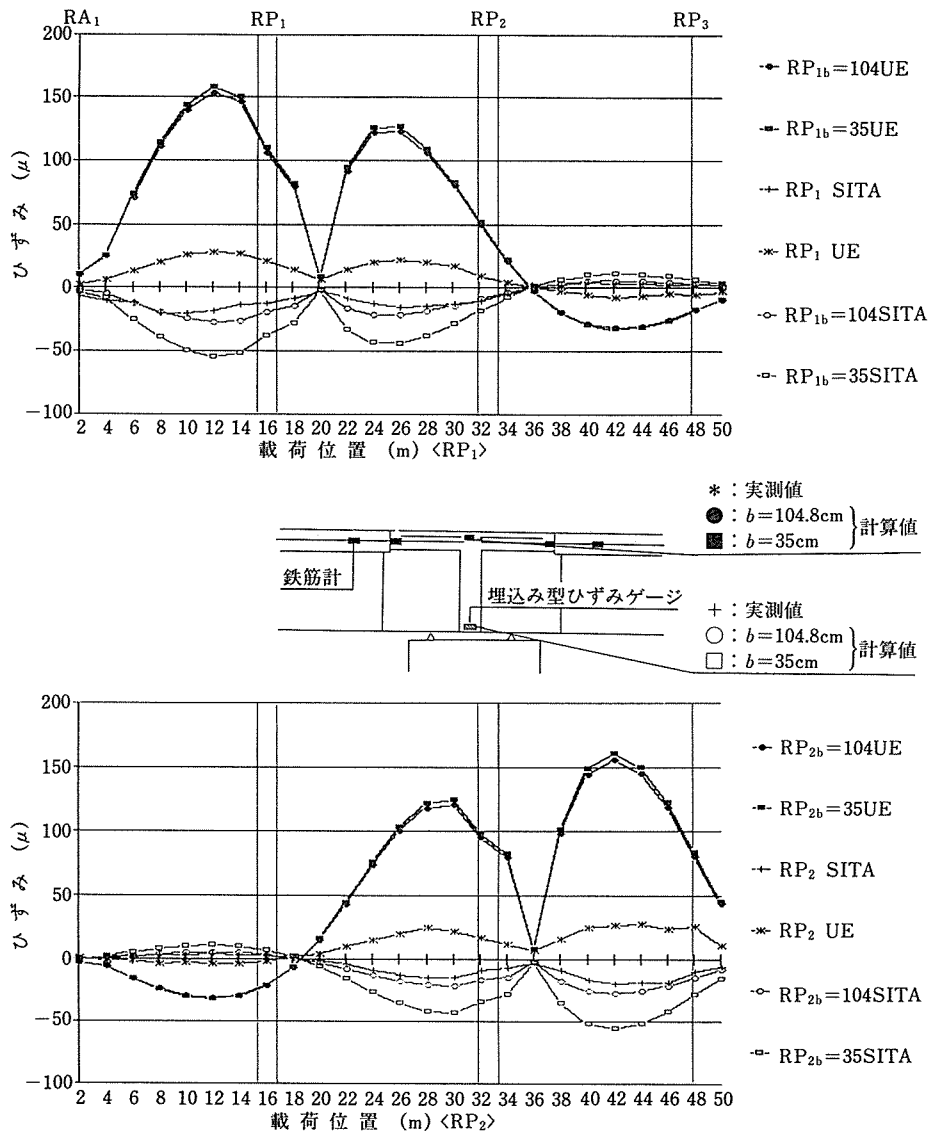


図-9 荷重位置移動に着目した場合の実測ひずみの影響線と計算値(ケース7)

◇研究報告◇

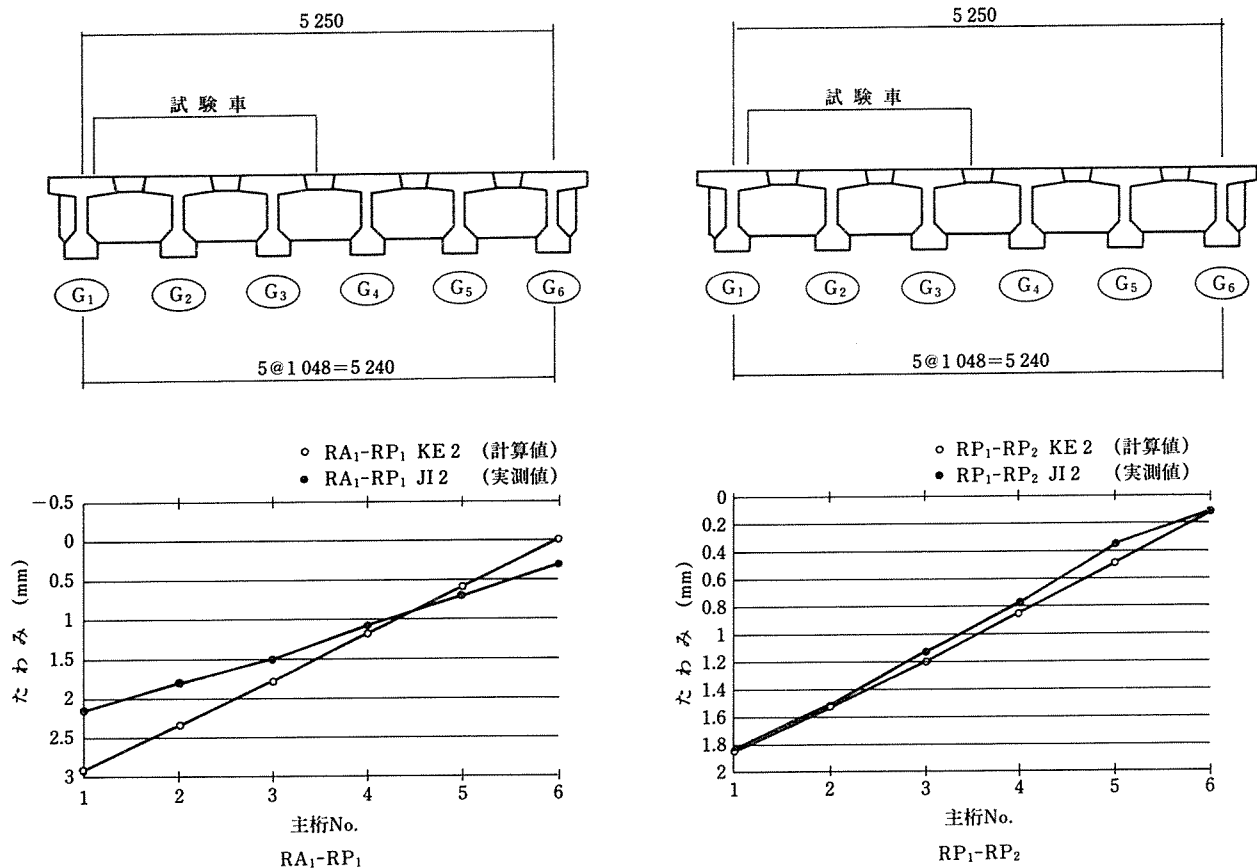


図-10 スパン中央における主桁たわみ量測定結果(ケース2)(橋軸直角方向分布)

(3) 側径間および中央径間に着目した場合

支間中央のたわみ・ひずみ, 連結鉄筋ひずみ, および反力ともに, 連結部に着目した場合と同様の傾向にある。

4.4 測定結果のまとめ

本試験は, 連結桁が後荷重に対して連続桁としての挙動を示すかどうかを確認し, 連結部の応力状態を調べることを主目的を行ったもので, 以下の事項が明確となった。

- 1) 移動載荷による支間中央のたわみおよび埋込みゲージによるひずみの影響線の測定結果を見ると, 実測値は計算値よりやや小さいものの, 連結桁が後荷重に対して連続桁としての挙動を示すのが確認できる。
- 2) 連結部における連結鉄筋のひずみの影響線の測定結果を見ると, 支間中央のひずみと同様に連続桁としての挙動を示すのが確認できるが, その実測値は計算値の15%程度と非常に小さい。計算値は連結横桁の剛度を考慮してないが, 実際には連結横桁の影響が非常に大きいと考えられる。
- 3) 連結部下縁近傍に埋設した埋込みゲージの測定結果も計算値よりかなり小さい。
- 4) 偏載荷による支間中央の横方向たわみ分布は, 側

径間において計算値とやや異なっているが, 中央径間においては計算値と良く一致している。本橋レベルの連結桁についての荷重分配は直交異方性版理論が十分適用できる。

- 5) 支点反力の分布状態は, 支間中央における横方向たわみ分布形状に一致している。

5. 連結桁の長期追跡試験

5.1 測定方法

(1) 測定日

本橋梁は, 主桁コンクリート打設後, 126日目で連結部コンクリートを打設した。測定は連結後2年間とし,

表-1 試験材令と試験年月日

主桁コンクリート打設 時からの材令 (日)	連結時からの 材令 (日)	年 月 日
0	-	平成元年 7月 6日
126	0	11月 9日
129	3	11月12日
135	9	11月18日
153	27	12月 6日
207	81	平成2年 1月29日
372	246	7月11日
868	742	平成3年11月19日

測定日は表-1に示す。

(2) 測定方法

連結桁の実橋荷試験での測定箇所と同様に、支間中央部の埋込み型ひずみゲージ、連結部における鉄筋計、埋込み型ひずみゲージ(図-5参照)のひずみを測定した。

5.2 測定結果および考察

(1) 支間中央部

今回の測定は、屋外の測定であり、測定期間も2年間と長く、測定日の気象条件も大幅に異なっている。

各々の測定ひずみは、温度・湿度・乾燥収縮・クリープ二次モーメント等を包括したものと表示される。解析にあたっては、温度・湿度の影響を取り除くために断面回転角(θ)を算出し、計算値と比較した。

$$\text{断面回転角 } \theta = \frac{\text{上縁部ひずみ} + \text{下縁部ひずみ}}{\text{主桁断面高さ}}$$

表-2に、埋込みゲージによる支間中央部のひずみ測定結果と測定ひずみから求めた断面回転角の値を示す。また、表-3に、各径間中央部のたわみおよび断面回転角の計算手順と各々の計算結果を示す。

計算にあたっては、各測定日ごとのクリープ係数を計算して(道示I, 解, 2.1.9による, 早強セメント, 相対湿度70%)クリープ進行度を算出し、二次モーメントによるたわみ(δ_{MII})・断面回転角(θ_{MII})およびクリープによるたわみ($\delta_{\phi'}$)・断面回転角($\theta_{\phi'}$)を求

め、連結後のたわみ($\delta_{MII} + \delta_{\phi'}$)・断面回転角($\theta_{MII} + \theta_{\phi'}$)を算出した。

図-11に断面回転角の測定値(表-2の θ)と計算値(表-3の $\theta_{MII} - \theta_{\phi'}$)の経時変化を比較して示す。

本橋のような3径間連結桁は、構造系が変化することにより、クリープによる二次モーメントが発生し、二次モーメントによる応力は上縁部が圧縮、下縁部が引張となる。ただし、今回の測定は、ひずみ量として抽出しているため、主桁のプレストレスモーメントによるクリープ変形たわみのひずみ(上縁部が引張)の影響が大きく、全ひずみとしては、上縁部が引張、下縁部が圧縮となる。断面回転角の材令730日における測定値は、側径

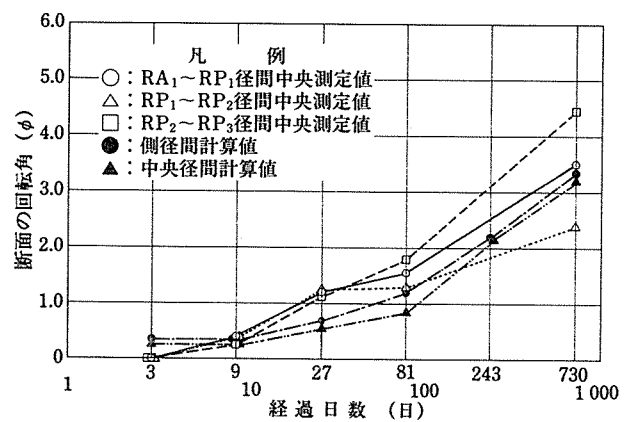


図-11 断面回転角の経時変化図

表-2 埋込みゲージによる主桁コンクリートのひずみ測定結果(伸縮ひずみ含む)と測定ひずみから求めた断面回転角

連結時からの材令		+引張ひずみ(10 ⁻⁶), ⊖圧縮ひずみ(10 ⁻⁶)					備考	
		3日	9日	27日	81日	243日	730日	
RP ₁ ~RP ₁ 径間中央	主桁上縁部ひずみ	0	45	395	235	(⊖218) ⊕245	(⊖17) ⊕10	2測点の平均値
	主桁下縁部ひずみ	0	15	300	110	(⊖268) ⊕225	(⊖263) ⊕220	同上
	断面回転角 θ	0	-0.38	-1.19	-1.56	-	-3.50	
RP ₁ ~RP ₂ 径間中央	主桁上縁部ひずみ	0	60	230	230	(⊖258) ⊕270	(⊖3) ⊕15	同上
	主桁下縁部ひずみ	0	30	130	125	(⊖213) ⊕195	(⊖193) ⊕175	同上
	断面回転角 θ	0	-0.38	-1.25	-1.31	-	-2.38	
RP ₂ ~RP ₃ 径間中央	主桁上縁部ひずみ	0	60	230	250	(⊖178) ⊕205	(⊖97) ⊕70	同上
	主桁下縁部ひずみ	0	40	140	105	(⊖263) ⊕220	(⊖258) ⊕215	同上
	断面回転角 θ	0	-0.25	-1.13	-1.81	-	-4.43	
RP ₁ 連結部下縁		0	10	165	190	⊖85	75	
RP ₂ 連結部下縁		0	0	-240	200	⊖100	125	
主桁温度		17.0℃	14.5℃	4.0℃	5.0℃	29.5℃	13.5℃	桁表面温度 3点の平均値

注) ・ひずみ測定結果欄の()内値は、後施工荷重が作用したため、これを計算ひずみにより除外したものである。

・断面回転角(θ)は次式により計算した。

$$\tan \theta = \frac{\text{上縁部ひずみ} + \text{下縁部ひずみ}}{\text{主桁断面の高さ}(h)} \quad \text{ここに、} h=80 \text{ cm (埋込みゲージ間隔)}$$

◇研究報告◇

表-3 主桁連結後の各径間中央部のたわみ (δ) と断面回転角 (θ) の計算

連結後材令		日	0	3	9	27	81	243	730	備考	
クリープ係数	プレストレスからの材令によるクリープ係数	ϕ	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2.3	2.6		
	連結後のクリープ係数進行度	ϕ'	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7	1.0		
二次モーメントによるもの	二次モーメント M_{II}	主桁自重クリープによるもの	t·m	0	-1.58	-1.58	-3.00	-4.29	-8.33	-10.46	
		プレストレスクリープによるもの	t·m	0	3.94	3.94	7.50	10.72	20.02	26.15	
		小計	t·m	0	2.36	2.36	4.50	6.43	12.49	15.69	
	M_{II} によるたわみ $\delta_{M_{II}}$	側径間中央	cm	0	0.03	0.03	0.06	0.08	0.15	0.19	
		中央径間中央	cm	0	0.06	0.06	0.11	0.16	0.31	0.39	
	M_{II} による回転角 $\theta_{M_{II}}$	側径間中央	$10^{-6}/\text{cm}$	0	0.10	0.10	0.20	0.26	0.49	0.63	
中央径間中央		$10^{-6}/\text{cm}$	0	0.20	0.20	0.36	0.53	1.02	1.29		
プレストレス・クリープによるもの	プレ導入直後の応力度 P_t		kgf/mm ²	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	
	レラクによる損失量 $\Delta\sigma_r$		kgf/mm ²	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	
	コンクリートクリープと乾燥収縮による損失量 $\sigma_{P\phi}$		kgf/mm ²	12.1	12.6	12.6	13.2	13.7	14.5	15.9	
	有効応力度 P_e		kgf/mm ²	91.9	91.4	91.4	90.8	90.3	89.5	88.1	
	有効係数 η			0.839	0.835	0.835	0.829	0.825	0.817	0.805	
	プレストレスによる導入直後のたわみ δ_{Pt}		cm	-2.46	-2.46	-2.46	-2.46	-2.46	-2.46	-2.46	
	プレストレスによる導入直後の回転角 θ_{Pt}		$10^{-6}/\text{cm}$	-8.12	-8.12	-8.12	-8.12	-8.12	-8.12	-8.12	
	有効プレストレスによるたわみ δ_{Pe}		cm	-2.06	-2.05	-2.05	-2.04	-2.03	-2.01	-1.98	
	有効プレストレスによる回転角 θ_{Pe}		$10^{-6}/\text{cm}$	-6.80	-6.77	-6.77	-6.73	-6.70	-6.63	-6.53	
	クリープ変形によるたわみ δ_{ϕ}		cm	-2.38	-2.52	-2.52	-2.66	-2.80	-3.19	-3.59	側径間
									-3.34	-3.34	中央径間
	クリープ変形による回転角 θ_{ϕ}		$10^{-6}/\text{cm}$	-7.85	-8.32	-8.32	-8.78	-9.24	-10.53	-11.85	側径間
									-11.02	-11.02	中央径間
	連結後のクリープたわみ進行量 δ_{ϕ}'		cm	0	-0.14	-0.14	-0.28	-0.42	-0.81	-1.21	側径間
-0.96									-1.36	中央径間	
連結後のクリープ回転角進行量 θ_{ϕ}'		$10^{-6}/\text{cm}$	0	-0.46	-0.46	-0.92	-1.39	-2.67	-3.99	側径間	
								-3.17	-4.49	中央径間	
連結後のたわみ $\delta_{M_{II}} + \delta_{\phi}'$	側径間中央	cm	0	-0.11	-0.11	-0.22	-0.34	-0.66	-1.02		
	中央径間中央	cm	0	-0.08	-0.08	-0.17	-0.26	-0.65	-0.97		
連結後の回転角 $\phi_{M_{II}} + \theta_{\phi}'$	側径間中央	$10^{-6}/\text{cm}$	0	-0.36	-0.36	-0.72	-1.18	-2.18	-3.36		
	中央径間中央	$10^{-6}/\text{cm}$	0	-0.26	-0.26	-0.56	-0.86	-2.15	-3.20		

間においては計算値に近い値を示しており、中央径間においてはやや小さい値となっている。図-11のグラフによれば、測定値と計算値は同様の傾向を示しており、連結後は連続桁としての挙動を示していると考えてよく、クリープ・乾燥収縮による二次力も計算値に近い値が発生していると考えられる。

(2) 連結部

図-12に連結鉄筋ひずみの測定値の経時変化を示す。

連結部も支間中央部と同様、測定ひずみは多くの要素を包括したものとして表示される。ただし、連結部は支間中央部と異なり、主桁のプレストレスモーメントによるクリープ変形たわみの影響がほとんどないので、時間の経過とともに二次モーメントが増加し、上縁部は圧縮ひずみが増加する。図-12より見ると、時間の経過に伴い、圧縮ひずみが増加しているのが確認でき、連結後は連続桁としての挙動を示しているものと考えられる。

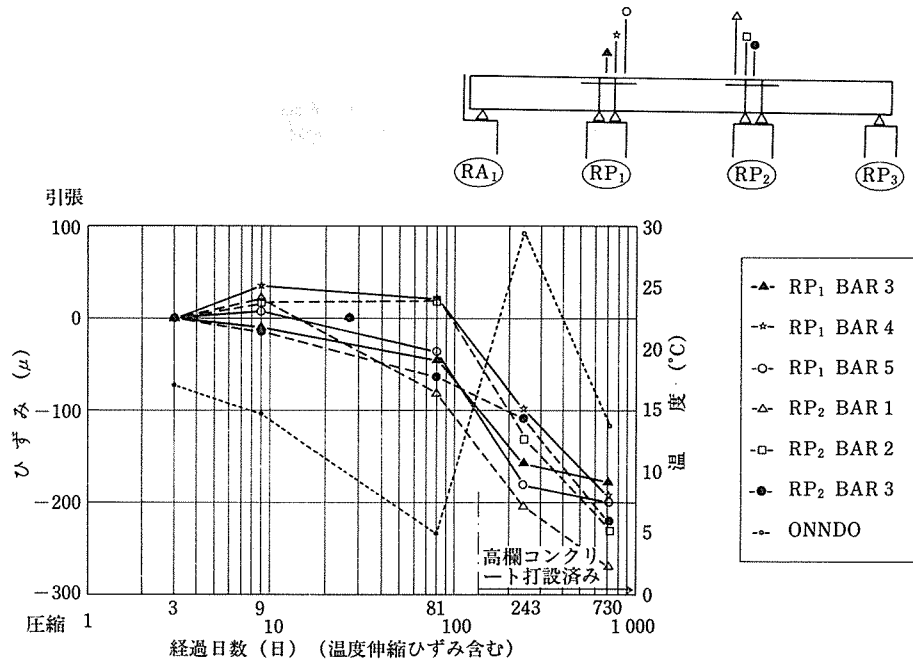


図-12 連結鉄筋ひずみの経時変化(温度伸縮ひずみ含む)

5.3 測定結果のまとめ

本試験は、クリープ・乾燥収縮の影響の確認を主目的に連結後2か年の測定を行ったもので、以下の事項が明確となった。

- 1) 支間中央部の上下縁のひずみより求めた断面回転角の測定値と計算値の経時変化をみると、屋外での実橋による長期測定であるにもかかわらず、計算値に近い値を示しており、連続桁としてのクリープ・乾燥収縮による二次力も計算値に近い値が発生しているものと考えられる。
- 2) 連結部の鉄筋ひずみの測定値より見ると、連結後は連続桁としての挙動を示しているのが確認できる。

6. あとがき

プレテンション連結桁は、現在600橋をこえる実績があるにもかかわらず、連結桁の性能に関する実構造物における試験例は少ない。今回実施した、実橋による載荷試験、長期追跡結果によれば、連結桁は、連続桁としての挙動を示すのが確認でき、クリープ・乾燥収縮による影響も連続桁として解析してよいものと考えられる。

今回の試験結果が、今後の連結桁の設計に対して多少でも参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 中田：堺泉北有料道路事業の概要，技術講習会テキスト（PC技術協会，平成2年1月）
- 2) 高速道路調査会：PCプレテンション桁橋の連結構造に関する研究報告書（昭和47年1月）
- 3) 阪神高速道路公団：プレテンション連結方式桁橋の連結部耐力試験報告書（昭和50年3月）

【1992年5月25日受付】