

アウトケーブルを用いた PRC 桁の設計・施工（その2）

——福塩線芦田川橋梁——

小林明夫*
 渡辺忠朋**
 山住克巳***
 池田英昭†
 小松道生††

1. はじめに

旧国鉄では、設計理論の検討・模型実験等を経て現在までに十数橋の PRC 桁の設計・施工を行ってきた。

PRC 桁は、設計荷重時にひびわれを許容した設計をしており、従来の PC 桁に比べ PC 鋼材の減少がはかられ非常に経済的な構造である。

今回、JR 西日本福塩線（河佐・備後三川間）にアウトケーブルを用いた PRC 桁の設計・施工を行った¹⁾。アウトケーブルを用いた PRC 桁の施工実績は少なく、実橋の挙動を調査した例も少ないのが現状である。

そこで、アウトケーブルを用いた PRC 桁の挙動を把握することを目的として、次に示す項目について測定および調査検討を行ったので、本稿はその結果について報告するものである。

○測定・調査項目

- 1) 荷重試験によるたわみ測定
- 2) PC 鋼より線の張力測定
- 3) ひびわれ調査
- 4) 施工時からの桁の変形、鉄筋およびコンクリート応力の測定

2. 実橋荷重試験

2.1 荷重試験の方法

本橋の完成後、約4か月および1年後において、それぞれ軌道作業車ならびに試運転列車を利用して実橋の荷重試験を行った（写真—1）。荷重はいずれも作業車ならびに列車を橋梁上に停止させて静的に測定した。

* Akio KOBAYASHI：日本国土開発（株）（前…（財）鉄道総合技術研究所線路構造研究室）

** Tadatomo WATANABE：（財）鉄道総合技術研究所線路構造研究室

*** Katsumi YAMAZUMI：（財）鉄道総合技術研究所線路構造研究室

† Hideaki IKEDA：JR 西日本コンサルタンツ（株）（前…JR 西日本広島工事事務所）

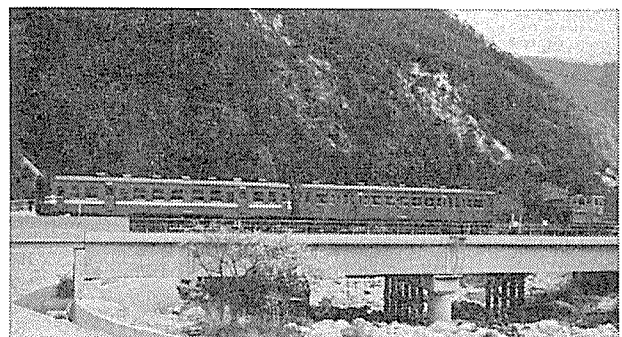
†† Michio KOMATSU：興和コンクリート（株）大阪支店

（1）軌道作業車の荷重

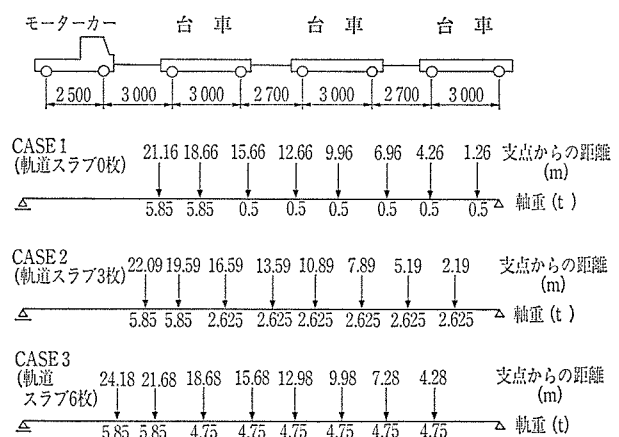
荷重は、当時隣接トンネル内へ軌道スラブを運搬していたモーターカーおよび台車3両を橋梁上の所定の位置に停止させることにより行った。

また、荷重の調整は、台車に積載する軌道スラブの枚数を変化させることにより行った。測定は、軌道スラブ積載無し（Case 1）、軌道スラブ各台車1枚ずつ積載（Case 2）および各台車2枚ずつ積載（Case 3）の3ケースとした。なお、軌道スラブの重さは1枚当たり2125kgである。

モーターカーおよび台車の軸配置ならびに荷重位置と



写真—1 試運転列車荷重状況



図—1 モーターカーの停車位置および軸重

軸重の関係を図-1に示す。なお、この時点ではバラスト止め、パイプ高欄は施工済みであったがバラストはまだ施工しておらず、上床版の上に仮軌道(約100kg/m)を敷設した状態であった。この試験においては桁のたわみを測定した。

(2) 試運転列車の载荷

载荷試験に用いた列車は、線路付替区間の開業に備えて試運転を行っていたもので、開業後実際に同線を走行する車両である。測定に使用した試運転列車は2両編成で、各車両の諸元は表-1に示したとおりである。また、橋梁上での载荷位置を図-2に示す。

測定項目は、たわみ、鉄筋およびコンクリートのひずみならびにPC鋼材の張力であり、桁下面のひびわれも同時に調査した。

表-1 载荷車両の主要諸元

		キハ20	キハ23
主要寸法	最大長(mm)	20000	21300
	最大幅(mm)	2928	2928
	最大高(mm)	3925	3925
	台車中心間距離(mm)	13800	14400
台車	形式	DT22C, TR51B	DT22C, TR51A
	軸距	2100	2100
自重(t)		32.1	34.5
換算両数	積車	4.0	4.0
	空車	3.0	3.5

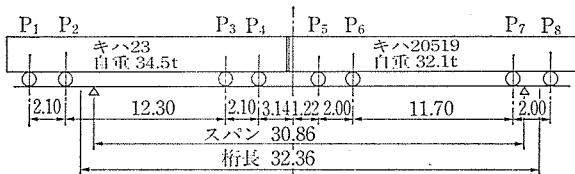


図-2 試運転列車の载荷位置

2.2 桁のたわみ測定

(1) 測定方法

たわみの測定位置を図-3に示す。測定はスパン中央部のほかに、支点沈下の影響を補正するために両支点部においても測定し、それぞれ上流方および下流側合計6点とした。

測定方法は、図-4に示したように、スパン中央部はリング式変位計、両支点部はカンチレバー式変位計を使用して、スイッチボックスを介して静ひずみ測定器に記録した。使用機器類を表-2に示す。

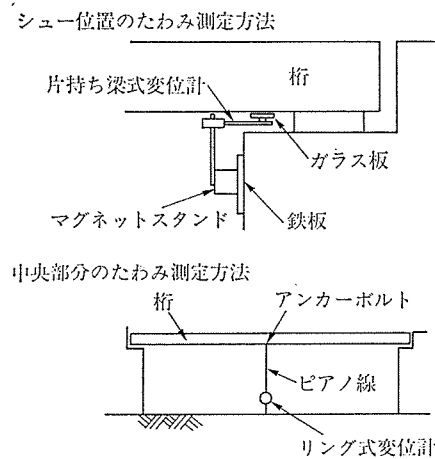


図-4 たわみ測定方法

表-2 たわみ測定用機器類

機器品	形式	数量	記事
リング式変位計	東京測器 OU-10 TC	2	スパン中央たわみ
片持ち梁式変位計	東京測器 CE-5	4	支点部たわみ
スイッチボックス	東京測器 ASW 324 B	1	
静ひずみ測定器	東京測器 TDS 256 DC	1	

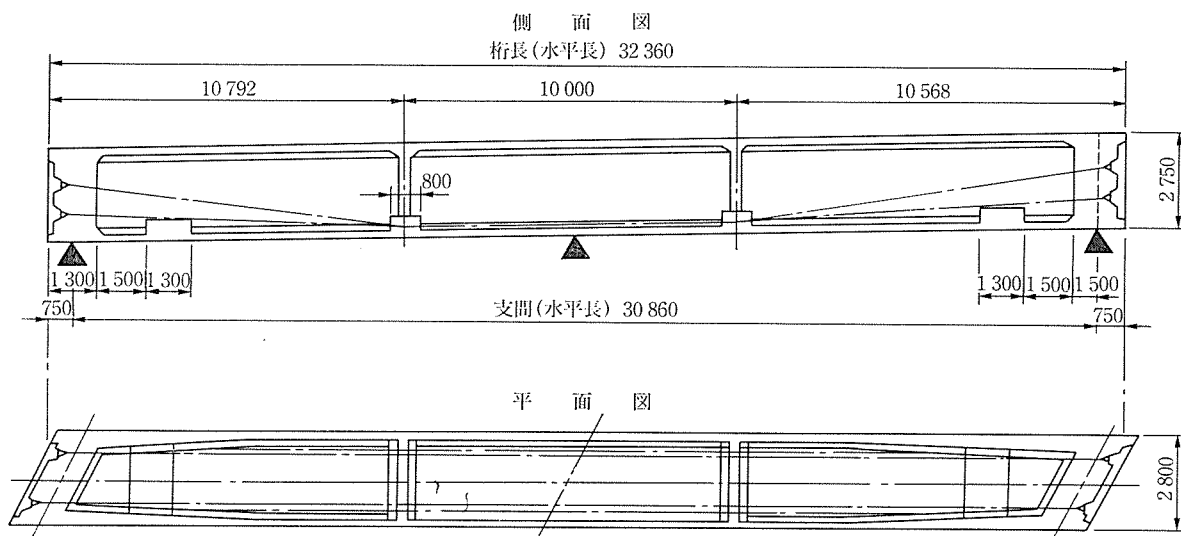


図-3 たわみ測定位置

◇工事報告◇

表-3 桁のたわみの計算値と測定値 (単位: mm)

	載荷ケース	計算法1	計算法2	測定値	記 事
軌道作業車 載 荷 時	Case 1	0.750	0.733	0.526	全断面有効
	Case 2	1.268	1.248	1.150	
	Case 3	1.894	1.850	1.350	
試運転列車 載 荷 時	Case 4	1.996	1.867	1.942	全断面有効 有効断面二次 モーメント
		3.977	3.748		

注) 測定値は、支点変位の影響をキャンセルした左右の平均値

(2) 測定結果

たわみの実測値と計算値を表-3に示す。計算値はそれぞれ次の計算方法による場合の値である。

(計算法1) 載荷荷重を等分布荷重とし、断面二次モーメントはスパン中央の値を用いてスパン内で一定として求めた値

(計算法2) 載荷荷重を集中荷重列とし、断面二次モーメントは各断面変化点での値を用いて求めた値

なお、計算に用いた断面二次モーメントは、軌道作業車載荷時には桁にひびわれが発生していなかったことから、全断面有効として計算した値を用いた。また、試運転列車載荷時は、全断面有効とした値および有効断面二次モーメント (I_e) を用いて計算した。ここで、有効断面二次モーメント (I_e) は参考文献 2) による次式を用い、計算法 1, 2 ともスパン内一定として計算した。

$$I_e = \left(\frac{\sigma_{scr}}{\sigma_s} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{\sigma_{scr}}{\sigma_s} \right)^3 \right] I_{cr} \dots\dots(1)$$

ここに、 I_e : 有効断面二次モーメント

I_g : 全断面有効として計算した断面二次モーメント

I_{cr} : コンクリートの引張域を無視して計算した断面二次モーメント

σ_{scr} : ひびわれ発生時の引張鉄筋の応力度

σ_s : 試運転列車載荷時の引張鉄筋の応力度

ただし、 I_g , I_{cr} の計算は、引張鉄筋と圧縮鉄筋をコンクリート断面に換算して考慮したが、本橋はアウトケーブルであるので PC 鋼材は考慮していない。また、 σ_{scr} , σ_s は、それぞれの作用モーメントからデコンプレッションモーメントを差し引いたモーメントに対して計算した応力度を用いた³⁾。

全断面有効の断面二次モーメントには、バラスト止め、地覆および引張鉄筋を考慮した。

コンクリートのヤング係数は材令 28 日における試験値 ($2.413 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$) を用いた。

軌道作業車載荷時には、測定値はいずれの場合も全断面有効として計算した値よりも小さめであったが、試運転列車載荷時にはほぼ等しい結果となった。

2.3 試運転列車載荷時のひずみ測定

スパン中央断面の断面形状ならびにひずみ測定位置を

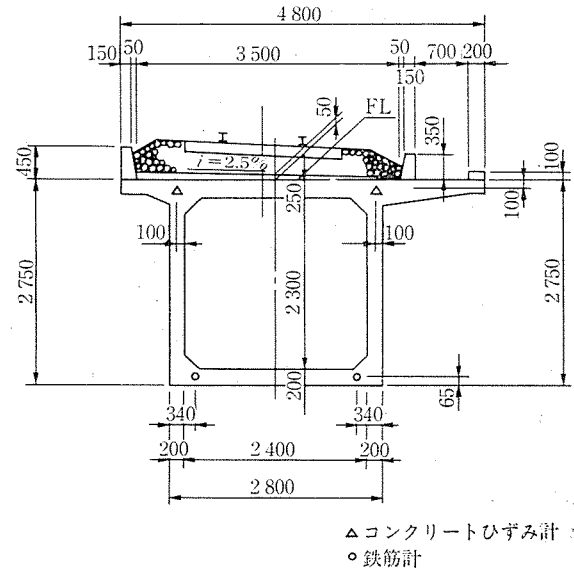
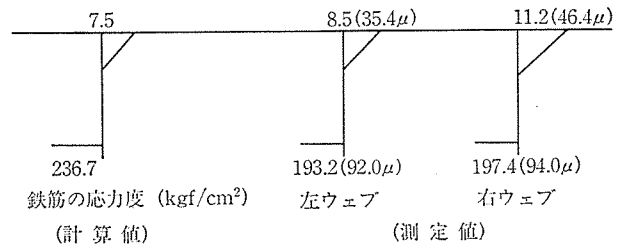


図-5 桁の断面形状およびひずみ測定位置 (スパン中央)

コンクリートの応力度 (kgf/cm^2)



* () 内の値は実測ひずみを示す。

図-6 列車載荷による応力度の変動量 (中央断面)

図-5 に示す。

列車載荷によるコンクリートおよび鉄筋のひずみの増分の測定値と計算値を図-6に示す。なお、計算値は、コンクリートの引張域を無視して偏心軸力が作用する RC 断面として計算したものである。また、コンクリートの応力度は、材令 28 日のテストピースにより測定したヤング係数 $E_c = 2.413 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ を用いて計算した値である。

測定値は、引張鉄筋の応力度が計算値よりも小さく、コンクリートの応力度は計算値よりも大きくなる結果となった。

3. PC 鋼より線の張力測定

実橋に配置されている PC 鋼より線に設計時の緊張力が導入されているかを確認するために、PC 鋼より線の張力測定を行った。

3.1 予備試験

実橋に配置されている PC 鋼より線の張力測定を行う際の、張力測定方法の適用性を把握するために予備試験を行った。

(1) 試験方法

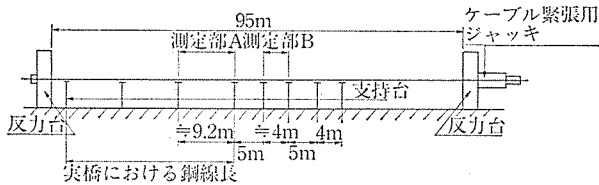


図-7 試験装置

試験装置を図-7に示す。PC 鋼より線には、油圧ジャッキを用いて緊張力を導入した。PC 鋼より線に導入される緊張力は、ロードセルで管理した。

測定は、測定部 A、B の中央に加速度計を取り付け、ハンマーで付近をたたくことにより PC 鋼より線に強制振動を与え、その振動の波形をデータレコーダおよび電磁オシログラフに記録することにより行った。

測定区間の長さは、実橋のケーブル長（中間支持部間距離および中間支持部と定着具間距離）を考慮した長さ（916.9 cm～921 cm）を中心とし、また参考のために実橋の PC 鋼より線長の約 1/2 の長さについて行った。

また、予備試験は支持点が完全固定状態になるように PC 鋼より線を鋼板ではさみボルトで固定することを前提としたので、実橋における中間支持部での支持状態も考慮し、固定用ボルトを緩めてその影響についても調査することとした。さらに実橋で用いた PC 鋼より線は、防食のためにグリースとポリエチレンパイプで被覆されているので、被覆の有無の影響についても調査した。

(2) 周波数および測定された張力

電磁オシログラフに記録された振動の波形の自由振動

部分の波形から周波数を読み取った。

読み取られた周波数と、計算で求められた周波数の比較を行った。周波数は(2)式で求めた。

$$f = \frac{1}{2 \cdot l} \sqrt{\frac{T \cdot g}{r}} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 f ：周波数

T ：張力 (kg)

g ：重力加速度 (980 cm/sec²)

l ：スパン (cm)

r ：線密度 (kg/cm) 0.00854

ただし、被覆を除去した場合 0.00774

張力の計算値および実測値を表-4に示す。

これによると、PC 鋼より線の支持点の固定の度合や被覆状態による影響は、本試験の範囲では小さいと考えられる。

(3) 測定結果の考察および実橋測定への適用性

本予備試験においては、ケーブルの周波数を未知数とし試験を行い、周波数の計算値と実測値を比較した。しかし、実橋測定においては、ケーブルの張力が未知数となり、計算式の上では周波数を既知としてケーブルの張力を求める場合と測定の誤差が異なることになる。

そこで、実橋測定への適用性を検討するために、読み取った周波数を用いてケーブル張力の計算式は(2)式を変形した(3)式を用いた。

$$T = \frac{4 \cdot l^2 \cdot f^2 \cdot r}{g} \dots\dots\dots(3)$$

表-4 張力測定結果

番号	T (t)	l (cm)	g (g/sec ²)	r (g/cm)	f_{cal} (Hz)	f_{test} (Hz)	$\frac{f_{test}}{f_{cal}}$	T_{tcal} (t)	$\frac{T_{tcal}}{T}$
Y 1	9.07	921	980	8.54	17.51	17.0	0.971	8.545	0.942
2	8.99	921			17.44	17.5	1.003	9.055	1.007
3	10.10	919			18.52	18.5	0.999	10.075	0.998
4	11.13	919			19.44	19.2	0.987	10.852	0.975
5	11.12	919			19.44	19.5	1.003	11.194	1.007
6	12.07	918.9			20.25	20.0	0.988	11.773	0.975
Y 7	12.05	918.9			20.23	20.0	0.989	11.773	0.977
Y 8	12.02	396.2			46.85	44.7	0.954	10.933	0.910
Y 9	12.01	396.2			46.85	45.0	0.961	11.080	0.923
Y10	12.01	396.2			46.85	45.0	0.961	11.080	0.923
11	12.00	396.2			46.83	45.2	0.965	11.179	0.932
Y12	10.93	396.1			44.71	43.0	0.962	10.112	0.925
13	9.07	396.1			40.72	39.5	0.970	8.533	0.941
14	9.07	396.1			40.72				
15	7.12	395.6			36.13	35.5	0.983	6.875	0.966
16	7.13	395.6			36.15	35.5	0.982	6.875	0.964
17	7.07	395.8		7.74	37.80	37.0	0.979	6.775	0.958
18	7.07	395.8			37.80	37.0	0.979	6.775	0.958
19	7.06	395.8			37.77	37.0	0.980	6.775	0.960
20	9.05	395.5			42.75	41.5	0.970	8.511	0.940
21	12.00	395.4			49.29	47.5	0.964	11.144	0.929

注) 記号は(2)式参照。ただし、 f_{cal} 、 f_{test} は周波数の計算値、実測値、 T_{tcal} は f_{test} を用いた計算値である。なお、番号の前のYは支持台への締付けを緩くしたものである。

(参考) f_{test}/f_{cal} について 番号 1~21 $\bar{x}=0.927$, $v=22.9\%$, $n=20$
番号 1~7 $\bar{x}=0.991$, $v=1.1\%$, $n=7$

◇工事報告◇

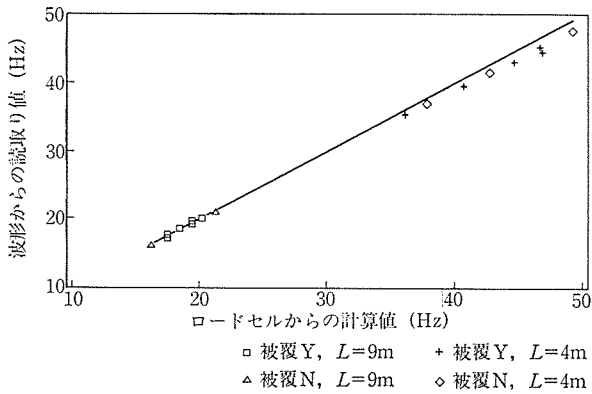


図-8 周波数の相関

計算結果を表-4 および図-8 に示した。

上記の計算結果によると、スパン 9 m で最大 500 kg/cm² 程度、スパン 4 m で最大 1 000 kg/cm² 程度の測定誤差が生じていることがわかる。

実橋において設計列車荷重作用時における PC 鋼線の張力の増加量は、コンクリートと PC 鋼材には付着がないので、支間全長にわたり平均してひずみが生じると考えた場合、設計計算上は 695 kg/mm² となる。また、実際に測定時に載荷する列車の荷重は、一般には設計荷重に比べて小さいので PC 鋼材に生じる張力の増加量は小さくなることが考えられる。

したがって、上記の測定誤差および実橋における張力増加量のレベルを比較すると実橋測定時には、周波数の測定回数をできるだけ多くすることが必要である。

3.2 実橋における張力測定

(1) 測定概要

PC 鋼より線の張力は、予備試験の結果をふまえて、PC 鋼より線の固有振動数を測定して (3) 式によって計

算して求めるものとした。

PC 鋼より線の固有振動数は、測定対象のケーブルに振動加速度計を取り付けて強制振動を与え、振動が減衰状態となった後の自由振動部分の波形から求めた。

測定位置は、定着部から曲げ上げ部分 (第 3 スパン)、中央曲げ上げ部間 (第 2 スパン) の各スパン中央において、各ケーブル群のうちの最上方のケーブルについて行った (図-9 (a), (b) 参照)。また予備試験の結果ではケーブルの被覆状態による差異は特に認められなかったため、ケーブルは被覆された状態のまま測定した。

(2) 測定結果および考察

PC 鋼より線の固有振動数の測定結果を表-5 に示す。PC 鋼より線の固有振動数は、第 2 スパンは全死荷重作用時で 19.63 Hz、列車荷重作用時で 19.74 Hz、第 3 スパンは全死荷重作用時で 19.53 Hz、列車荷重作用時で 19.53 Hz であった。

固有振動数の測定値から (3) 式を用いて求めた張力を表-5 に示す。これによると、全死荷重作用時および列車荷重作用時ともに、中央径間の方が側径間部よりも大きい張力を示す結果となった。これは、中央径間部の PC 鋼より線の張力の計算に用いたスパンは、中間横桁のケーブル曲げ上げ部の誘導管間の距離を用いたのに対し、側径間部は、中間横桁のケーブル曲げ上げ部の誘導管間先端と、PC 鋼より線の腐食防止用のレジンボックス前面までの距離を用いている。したがって、側径間部の PC 鋼材定着部側は腐食に対する配慮からレジンボックスを設置しており、そのレジンボックス部がコンクリート面から出ていることのスパンへの影響によるものと考えられる。

また、列車荷重作用による PC 鋼より線の張力増加は

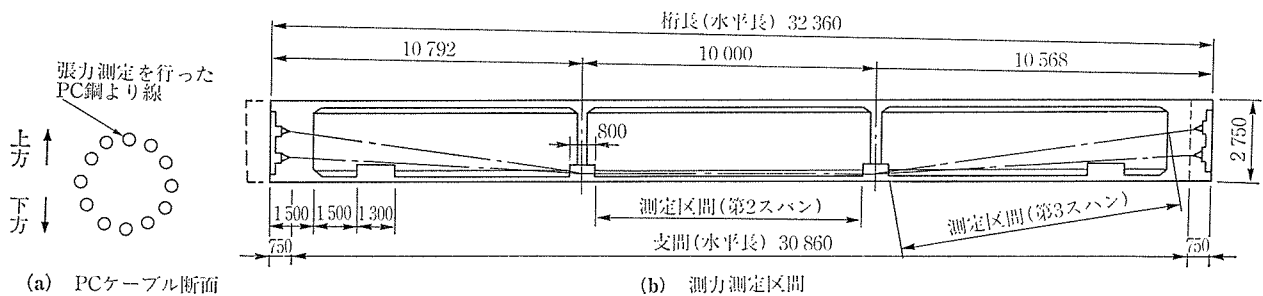


図-9 張力測定箇所

表-5 張力測定結果

測定箇所	スパン (cm)	全死荷重作用時			列車荷重作用時		
		<i>n</i>	<i>f</i> (Hz)	<i>T</i> (kg/mm ²)	<i>n</i>	<i>f</i> (Hz)	<i>T</i> (kg/mm ²)
中央径間	900.7	10	19.63 (19.5, 19.8)	110.4	5	19.53 (19.6, 19.8)	111.6
側径間	862.3	11	19.74 (19.5, 19.8)	100.1	6	19.53 (19.5, 19.7)	100.1

注) ここに、*n*: 測定回数、*f*: 測定された周波数の平均値、*T*: 測定された周波数から求めた張力 () 内は、周波数の最小値と最大値を示す。

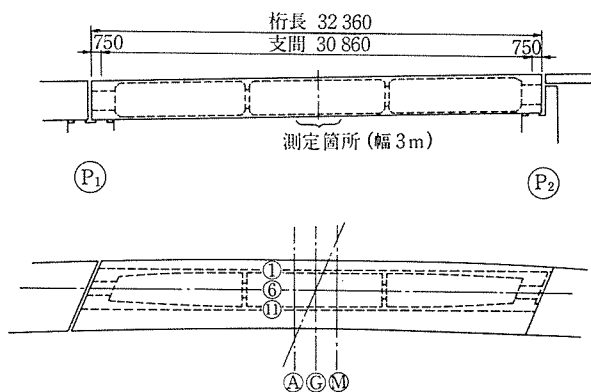
中央径間においては若干認められるが、側径間部においては認められなかった。これは、3.1 予備試験の結果から考えると測定の見誤差内にあり、本測定方法では十分にその影響を測定することができなかつたと考えられる。

なお、計算上の全死荷重時の PC 鋼より線の張力は、 100.2 kg/mm^2 であるので、固有振動数の測定値から求められた PC 鋼より線の張力（中央径間部 110.4 kg/mm^2 、側径間部 100.1 kg/mm^2 ）は、ほぼ等しい結果となった。

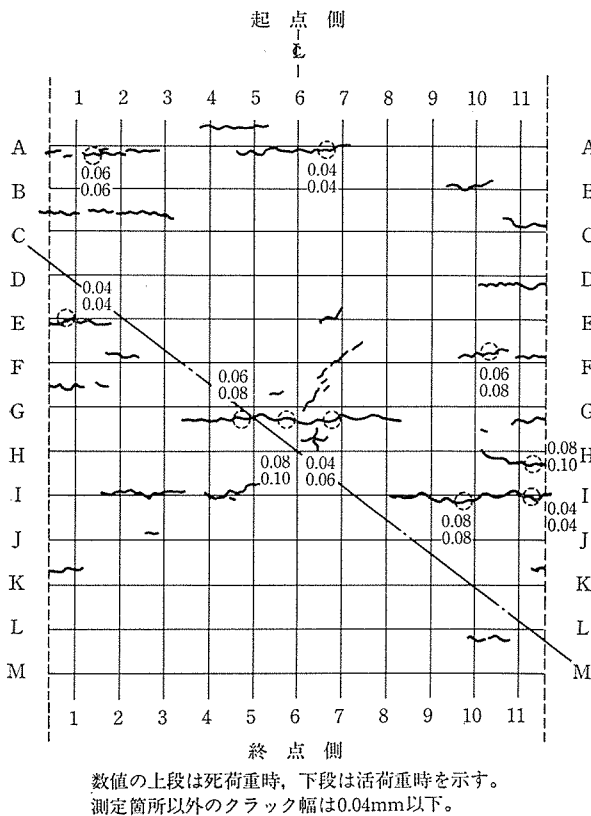
4. ひびわれ状況

4.1 ひびわれ調査

桁下面のひびわれ発生状況の調査を行った。調査は、



図—10 ひびわれ調査箇所



図—11 ひびわれ状況

表—6 ひびわれ発生状況

	全死荷重作用時	列車荷重作用時
ひびわれ度数	33	33
平均ひびわれ幅 (mm)	0.048	0.053
最大ひびわれ幅 (実測値) (mm)	0.08	0.10
最大ひびわれ幅 (計算値) (mm)	0.074(0.064)	0.103(0.096)

桁自重作用時、全死荷重作用時および列車荷重作用時の各状態について行った。

ひびわれは、桁スパン中央から、起点側・終点側へそれぞれ 1.5 m の範囲、すなわち 3 m の範囲について調査を行った。また、桁下面には橋軸方向および橋軸直角方向に 25 cm 間隔に測定線を描き、調査を行った（図—10）。

桁自重作用時には、ひびわれの発生は認められなかった。全死荷重作用時および列車荷重作用時のひびわれ発生状況を 図—11 に示す。

図中に示す数値は、ひびわれ幅である。上段の数値は全死荷重時、下段の数値は列車荷重時の値をそれぞれ示す。数値を示していない箇所のひびわれ幅は 0.04 mm 以下である。

また、ひびわれ幅、ひびわれ間隔を集計したものを表—6 に示す。

設計上の応力度の状態とひびわれ状況を比較すると、桁自重作用時には、設計では桁下縁に引張応力度が発生しないので、ひびわれの発生が認められないことと適合している。

しかし、全死荷重作用時には、設計では桁下縁の引張応力度が約 19 kg/cm^2 となるように設計されている。これは、コンクリートの引張強度 (24 kg/cm^2) 以下であるので、ひびわれが発生しない状態である。しかし、ひびわれは、図—10 に示すように発生している。これは、本橋は、近接しているトンネルへの軌道スラブ等の軌道用材料の搬路として使用され、載荷試験前にモーターカーが走行しており、桁の全断面有効として桁下縁の応力度で 30 kg/cm^2 程度の引張応力度を受けており、その時期に発生したひびわれが、完全に閉合しない状態にあるものと考えられる。

4.2 曲げひびわれの検討

本橋は、使用限界状態にひびわれの発生を許容する、いわゆる PRC 構造である。したがって、使用状態において曲げひびわれ幅を精度良く算定することが必要である。本橋の設計においては、土木学会コンクリート標準示方書（昭和 61 年制定）⁴⁾ で示される曲げひびわれ幅の算定式を用いた。ここでは、実測された曲げひびわれ幅について検討を行うので、土木学会コンクリート標準示方書で示されている曲げひびわれ幅の算定式の基本となっている角田式⁵⁾を用いることとした。

◇工事報告◇

角田式を以下に示す。

$$\omega_{\max} = \left(\frac{\Delta\sigma_s}{E_s} - \varepsilon_\varphi \right) \cdot l_{\max} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 ω_{\max} : コンクリート表面最大ひびわれ幅 (cm)

l_{\max} : 最大ひびわれ間隔 (cm)

$$e_s/t \leq 2.5 \quad l_{\max} = K_4 \cdot t$$

$$e_s/t \geq 2.5 \quad l_{\max} = \frac{K_4 \cdot t}{1.45} \left(1 + 0.18 \frac{e_s}{t} \right)$$

$$K_4 = 5.4$$

t : 鉄筋のかぶり (cm)

e_s : 鉄筋純間隔 (cm)

$\Delta\sigma_s$: ひびわれ断面における引張鉄筋の引張応力度増加量 (kg/cm²)

ε_φ : クリープ、収縮等によって生じた鉄筋とコンクリートとの間の弾性ひずみの差

なお、角田式において σ_{cm} (ひびわれ間の付着による鉄筋応力の減少量をコンクリート有効断面の平均引張応力に換算したものは、全死荷重状態においては0、また列車荷重載荷時においても試験列車を約1時間静止させた状態でひびわれ幅を測定したこと、および変動荷重の影響はほとんど受けていないことを考慮して0とした。

$\Delta\sigma_s$ については、鉄筋と同じ位置のコンクリートの応力が0となるときからの応力増加を用いた。

ε_φ については、 150×10^{-6} として計算した。

なお、着目する鉄筋は、下スラブに配置されている軸方向引張鉄筋 (D22) とした。

最大ひびわれ幅の実測値と計算値を表—6に示す。表中、最大ひびわれ幅の計算値において () 内の値は鉄筋位置における計算値を示し、() 外の値は桁下面に換算した値を示している。

最大ひびわれ幅の実測値と計算値を比較すると、全死荷重作用時、列車荷重作用時ともに、ほぼ等しい結果となった。

5. あとがき

以上本稿では1. に示した測定調査項目のうち1)~3)に示す実橋載荷試験についての測定調査および検討の結果を報告したが、その内容をとりまとめて示せば次のようである。

- 1) 桁のたわみの実測値は、桁の全断面を有効として計算した値よりも小さい。
- 2) 鉄筋およびコンクリートのひずみの載荷による増分の測定値は、引張鉄筋の応力度は計算値よりも小さく、コンクリートの応力度は計算値よりも大きくなる結果であった。
- 3) PC 鋼材に振動加速度計を取り付けて測定した固有振動数から PC 鋼材の張力を求める方法は、今回の試験の範囲では、載荷による張力の増加量は、荷重の大きさや測定誤差等の問題もあり十分に測定できなかった。しかし、全死荷重時については計算値と測定値がほぼ等しい結果となった。
- 4) 最大ひびわれ幅の実測値は、角田式を用いて算出した計算値とほぼ等しい結果となった。

上記の結果を踏まえ、今後さらにより合理的なアウトケーブルを用いた PRC 桁の設計・施工を行っていきたいと考えている。なお、1. に示した測定項目のうち4)については現在結果をとりまとめているので機会を改めて報告したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 小林, 渡辺, 山住, 池田, 小松 : アウトケーブルを用いた PRC 桁の設計・施工 (その1), プレストレストコンクリート, Vol. 31, No. 2, Mar. 1989
- 2) 角田 : 曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状, 土木学会論文集, 第384号/V-7, 1987年8月
- 3) コンクリート構造の限界状態設計法指針 (案), 土木学会, 1983
- 4) コンクリート標準示方書 (昭和61年制定), 土木学会, 1986
- 5) 角田 : 鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅, コンクリートジャーナル, 1970.9

【1989年10月17日受付】