

(16) 松の木7号橋(波形鋼板ウェブPC箱桁橋)の実橋試験について

秋田県土木部	道路建設課		石黒 互
ドーピー建設工業	東北支店	正会員	佐々木 徹
ドーピー建設工業	東北支店	正会員	○村田 嘉宏
ドーピー建設工業	技術センター	正会員	立神 久雄

1. はじめに

本橋は、ウェブに波形鋼板を用いたコンクリートと鋼の合成断面を有する5径間連続PC箱桁橋で、橋長は210mである(図-1)。上床版と下床版はコンクリート製とし、ウェブ部材に波形鋼板を用いた合成構造である(図-2)。波形鋼板にはPCケーブルを通すことができないため、ケーブルを箱桁内に配置する外ケーブル方式を採用している。本橋梁形式は、海外で数橋、国内ではまだ2橋目であり、特に、本橋は本格的な連続桁としての道路橋では国内で初めてとなる。

一般図

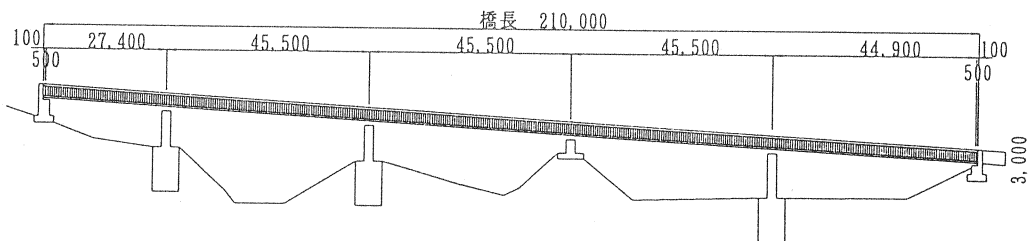


図-1

2. 試験目的

本橋は、波形鋼板を用いた合成構造として、本格的な道路橋に採用された初めてのPC橋梁であり、本橋の力学的合理性を実証し、今後、波形鋼板ウェブPC橋採用に向けての資料整備を目的に以下の試験を実施した。

(1) 静的試験

本橋では、設計に先だって模型試験を実施し、本構造の力学的特性と合理性を確認し、設計・施工に反映させている。静的試験では、実橋載荷試験を行うことで実橋レベルにおいても模型試験で確認した力学的特性および合理性が再現されるかどうかを検証し、実用レベルでの設計手法の妥当性を確認するために各種の計測をおこなった。

(2) 動的振動試験

本形式橋梁の動的挙動については、本田ら<sup>2)</sup>の波形鋼腹板桁の基礎研究、加藤ら<sup>3)</sup>の振動測定以外に殆ど研究されていないのが現状である。そこで、本橋では、以下の項目を検証することを目的とし、各種現地振動試験を実施した。

- ① 波形鋼板構造特有の振動特性の検証。
- ② 車両走行時の外ケーブルの振動特性の検証。
- ③ 車両走行時の外ケーブルの共振性の検証。
- ④ 動的増幅率(衝撃係数)の検証。

標準断面 支点断面

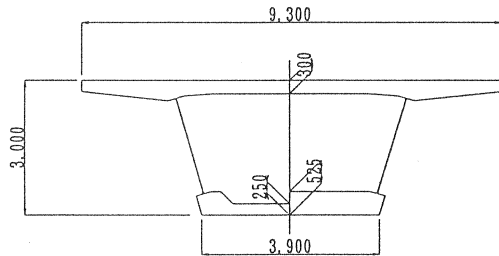


図-2

2. 静的載荷試験

(1) 実験概要

今回の試験では、模型試験で確認した本合成構造の特性が実橋レベルにおいて再現されているかどうかを確かめると同時に、実橋を設計する上で用いた実用レベルの設計手法の妥当性を再確認することを目的に以下に示す静載荷試験を実施した。

1) 載荷方法

予め計量した20tトラック4台を試験車両として用い、設計計算上応力が最も厳しくなる44断面に着目し、P4~A2径間中央に発生断面力が最大となるよう載荷した。図-3に20tトラックの載荷位置を示す。

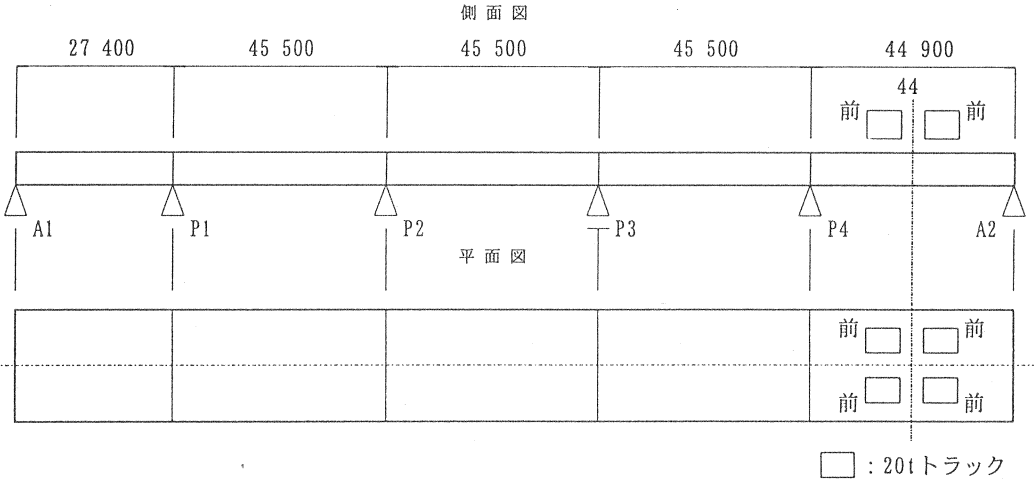


図-3 荷重載荷位置図

2) 計測方法

①コンクリート有効応力度計

主桁の曲げ応力度は、コンクリート上・下床版内に設置したコンクリート有効応力度計を用いて計測し、その配置は図-4に示す。

②直角型三軸ひずみゲージ

波形鋼板ウェブに作用するせん断応力度は、波形鋼板ウェブに直接貼り付けた直角型三軸ひずみゲージにて計測し、その配置は図-5に示す。

有効応力度計および三軸ひずみゲージによる計測値は、データロガーを用いて一斉に読みとり、記録装置に記録した。

(2) 断面力の解析

本橋の設計は、波形鋼板ウェブは曲げには抵抗せず、せん断力は伝達するという特性をふまえ、ウェブを無視したコンクリート上・下床版のみ考慮した断面諸定数を用いて棒理論にて行っている。

このことより、載荷試験による断面力の解析は、設計計算に用いた断面諸定数と解析モデルを使用して実際に載荷したトラック荷重について行なった。

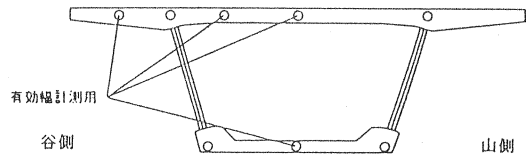


図-4 コンクリート有効応力度計の配置

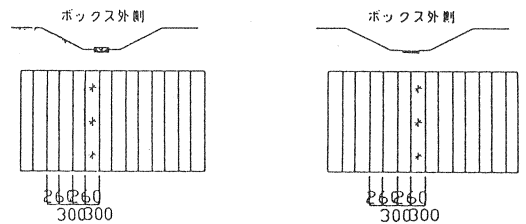
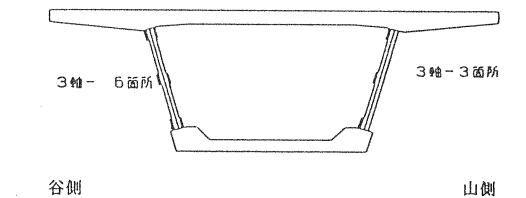


図-5 直角型三軸ひずみゲージの配置

なお、図-6に棒理論計算の概要を示す。

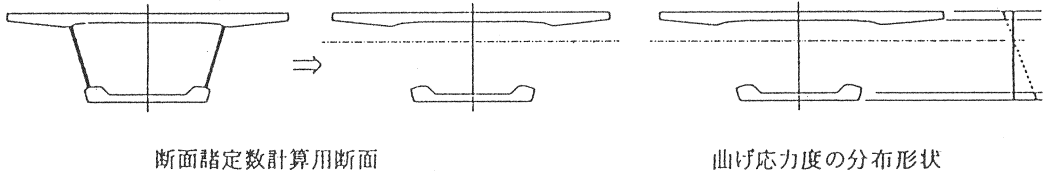


図-6 棒理論計算の概要

(3) 静載荷試験結果および考察

静載荷試験の実施状況を写真-1に示す。

1) 曲げ応力度

44断面における上・下コンクリート床版の曲げ応力度の計測結果と解析結果との比較を図-7に示す。

図からわかるとおり計測値は、上・下床版とも解析値よりやや小さな値を示しているものの、桁高方向の応力分布は解析値と一致している。

また横断方向については、均一な計測結果とはならず、ウェブの直上・直下において他の計測点より計測値が小さくなっている。

以上の結果と同様の特性は、模型試験にて確認された事項であり、実橋においてその特性が再現されていたといえる。

2) せん断応力度

44断面における波形鋼板ウェブのせん断応力度の計測結果と解析結果との比較を図-8に示す。

計測したせん断応力度の値は、解析値より若干小さな値ではあるが、ウェブの上縁から下縁にかけてほぼ均一に分布していることがわかる。また、ウェブの内・外両面においてもほぼ同じ値を計測した。

これらの結果についても曲げ応力度の場合と同じく、模型試験で確認された特性が実橋でも確認できたことを示している。

3) まとめ

以上の結果より、模型試験で確かめられた力学的特性を実橋レベルにおいても確認することができたといえる。また、実橋における実務レベルの設計手法の妥当性を試験レベルの荷重状態において検証できたといえる。



写真-1 静載荷試験状況

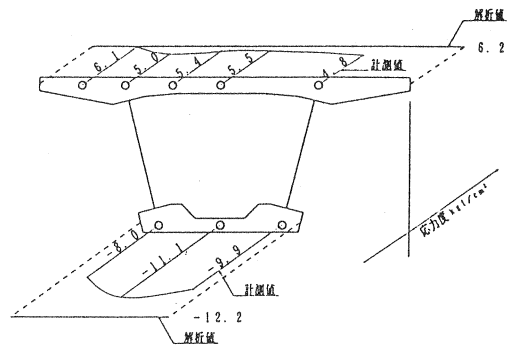


図-7 曲げ応力度の計測値と解析値

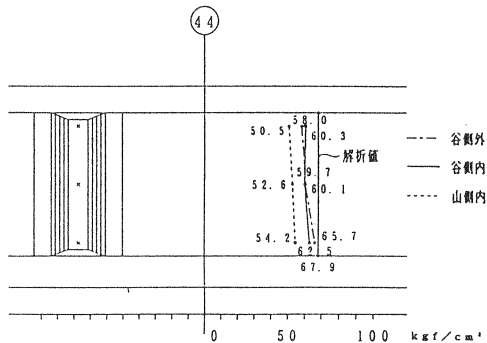


図-8 せん断応力度の計測値と解析値

#### 4. 動的振動試験

##### (1) 実験概要

##### 1) 加振方法

今回の試験では、松の木7号橋の橋体固有振動特性と外ケーブル固有振動特性、車両走行時の外ケーブルの振動特性、外ケーブルの共振性および、動的増幅率（衝撃係数）の検証を行うことを目的としたことから、以下に示す振動試験を実施した。

表-1 車両走行試験内容

	車両重量	台数	走行状態	速度(km/h)	備考
TYPE 1	10 t	1	単独	20	鉛直加振走行
TYPE 2	"	"	"	40	"
TYPE 3	20 t	"	"	20	"
TYPE 4	"	"	"	40	"
TYPE 5	10 t	"	"	20	ねじり加振走行
TYPE 6	"	"	"	40	"
TYPE 7	20 t	"	"	20	"
TYPE 8	"	"	"	40	"

※走行方向は、A1~A2

##### ①車両走行試験

予め計量した大型ダンプを試験車両として用い、速度、重量および走行状態を変化させて振動性状を計測した（表-1）。鉛直加振は主桁断面の中央を走行させ、ねじり加振は主桁断面の端部を走行させた。

##### ②車両踏台落下試験

上記の試験車両の前輪を、踏台から落下させることにより減衰自由振動を起こし、その振動波形を計測した（表-2）。鉛直加振は主桁断面の中央に車輪を落下させ、ねじり加振は主桁断面の端部に車輪を落下させた。

表-2 車両踏台落下試験内容

	車両重量	台数	加振径間	加振位置	備考
TYPE 1	20 t	1	A1~P1	スパン1/2	鉛直加振走行
TYPE 2	"	"	P1~P2	"	"
TYPE 3	"	"	P2~P3	"	"
TYPE 4	"	"	P3~P4	"	"
TYPE 5	"	"	P4~A2	"	"
TYPE 6	"	"	A1~P1	"	ねじり加振走行
TYPE 7	"	"	P1~P2	"	"
TYPE 8	"	"	P2~P3	"	"
TYPE 9	"	"	P3~P4	"	"
TYPE 10	"	"	P4~A2	"	"

##### ③人力加振試験

外ケーブルを人力により加振して、減衰自由振動を起こし、その振動波形を計測した。

##### 2) 計測方法

##### ①サーボ型加速度計

主桁の振動特性用の計測器は、サーボ型加速度計を用い、図-8に示す位置に配置した。

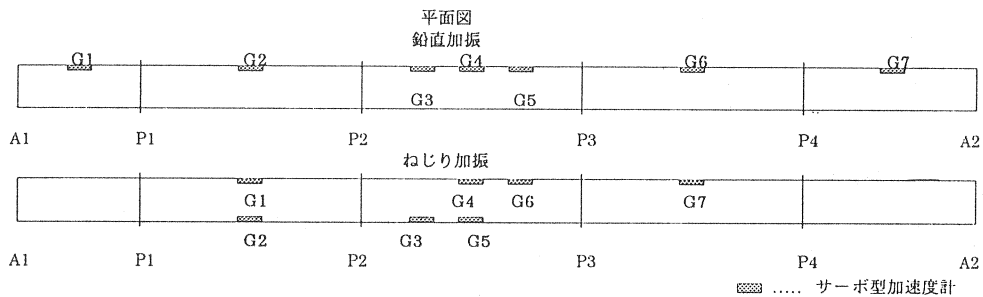


図-8 サーボ型加速度計の設置位置

##### ②圧電式加速度計

外ケーブルの振動特性用の計測器は、圧電式加速度計を用い、図-9に示す位置に配置した。

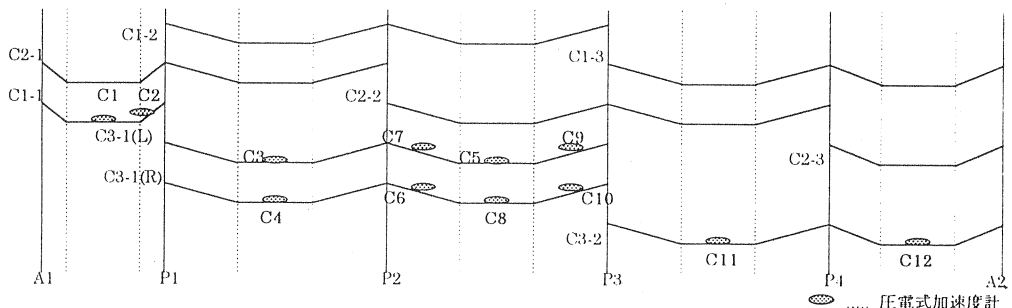


図-9 圧電式加速度計の設置位置

(2) 固有値解析

固有値解析を行うための構造物の力学的モデルは、図-10に示すように主桁と外ケーブルを考慮した3次元骨組みモデルとした。そのモデルは、次のような仮定に基づいている。

- ①モデルは、質点モデルとする。
- ②縦断線形の影響を考慮する。
- ③主桁の剛性は、上下コンクリート床版のみとする。
- ④外ケーブルをモデル化し、その張力を考慮する。

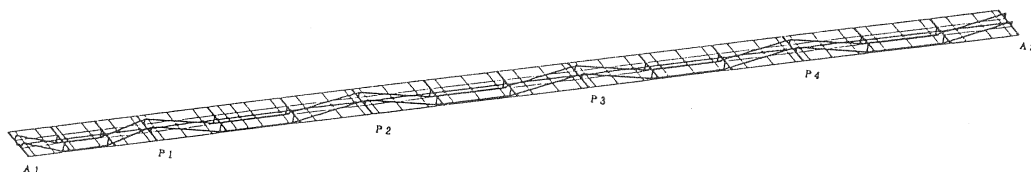


図-10 解析モデル図

(3) 振動試験結果および考察

1) 主桁の振動特性

本橋の振動特性の計測結果と固有値解析結果の比較を表-3に、固有振動モードを図-11に示す。計測による本橋の卓越振動数は、2.861Hz、3.203Hz、3.772Hz、4.330Hzであり、減衰定数 $h$ は、0.01~0.02であった。通常、鋼橋における鋼材自身の構造対数減衰率 $\delta$ は、構造物に生じている応力の範囲では $\delta = 0.002 \sim 0.005$ 程度であり、プレストレストコンクリートでは、 $\delta = 0.05$ 程度の値が妥当と考えられているので、本橋(波形鋼板ウェブPC箱橋)は、鋼橋とプレストレストコンクリート橋の間の振動特性であると考えられる。

ねじり振動特性は、解析結果と測定結果に違いが生じた。これは、波形鋼板のせん断変形の影響による、ねじり剛性およびねじりせん断応力度の評価方法に問題があると考えられる。この評価方法については、現在研究中であり、その結果に基づいてねじり振動特性の検討を行いたい。

2) 外ケーブルの振動特性

外ケーブルの減衰自由振動試験による固有振動数と解析値の比較を表-4に示す。

外ケーブルの卓越振動数は、主桁の卓越振動数、2.861Hz、3.203Hz、3.772Hz、4.330Hzに比べ大きい値を示しており、橋梁と外ケーブルは共振しない事が確認された。

外ケーブル振動による定着部およびデビエータ部付近のケーブルの局部曲げ応力については、Wyattの2次曲げ応力算定式により算定した。表-5に、外ケーブルの局部応力を示す。車両走行による振動により発生する定着部およびデビエータ部付近の局部応力は、斜張橋やエクストラドーズドPC橋の活荷重による応力変動と比較しても、はるかに小さい値であることから、疲労が問題となる応力変動ではないと考えられる。

表-3 主桁固有振動数

	固有振動数 (Hz)			減衰定数
	実験値 (A)	解析値 (B)	(A) / (B)	
鉛直1次モード	2.861	2.882	0.993	0.0174
鉛直2次モード	3.203	3.221	0.994	0.0211
鉛直3次モード	3.772	3.798	0.993	0.0116
鉛直4次モード	4.330	4.294	1.008	0.0128

鉛直1次モード



鉛直2次モード



鉛直3次モード



鉛直4次モード



図-11 固有振動モード図

3) 動的増幅率 (衝撃係数)

動的増幅率は、次式(4)により評価する。

$$i_y = \frac{|y_{d,max} - y_{s,max}|}{y_{s,max}} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $i_y$  : たわみ応答に基づく動的増幅率

$y_{d,max}$  : 最大動的たわみ

$y_{s,max}$  : 最大静的たわみ

図-12に、動的増幅率を示す。限られた試験ケースの結果からの動的増幅率を評価するため、多少問題があると考えられる。しかし、動的増幅率の分散図から判断すると、本橋の衝撃係数は、0.15~0.50に分布している。この衝撃係数と設計衝撃係数とを比較・検討することは本質的に異なる論議であるが、動的増幅率の目安として、本橋の衝撃係数は、道路橋示方書におけるプレストレストコンクリート橋の衝撃係数より大きめの値を示している。

5. おわりに

静的載荷試験においては、モデル試験と同様な結果が得られ、モデル試験の妥当性が確認された。動的振動試験においては、ねじり剛性およびねじりせん断応力度の評価方法については、現在研究中であり、その結果に基づいてねじり振動特性の検討を行いたい。また、本報告が今後の波形鋼板ウェブPC橋の発展に役立てば幸いである。最後に、松の木7号橋の設計照査、施工および計測に際し、秋田県土木部ならびに技術検討委員会の方々の多大なるご指導を賜り、貴重なデータを得ることができました。ここに、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 波形鋼板ウェブPC連続箱桁「松の木7号橋」の模型実験、第5回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp345~350、1993年10月
- 2) 本田・秋葉・水木：振動実験に基づく波型鋼腹板桁の動的特性に関する基礎研究、鋼構造年次論文報告集、第1巻、pp337~344、1993年7月
- 3) 加藤・佐藤・吉田・久保：波形鋼板ウェブ橋梁（新開橋）の振動測定、土木学会年次論文報告集、第1巻、pp1160~1161、1994年9月
- 4) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版、1993年
- 5) T.A.Wyatt：Secondary Stress in Parallel Wire Suspension Cable、ASCE、ST7、pp37~59、1960年
- 6) 小野寺・今泉・春日・岡本：エクストラードPC橋の計画と設計、プレストレストコンクリート、pp49~58、Vol.35、No.3、May.1993
- 7) 小野寺・木水・春日・山村：小田原ブルーウェイブリッジの斜材システムに関する曲げ疲労試験、第5回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp89~94、1993年10月

表-4 外ケーブル固有振動数

	ヒックアップ	卓越振動数(Hz)			減衰定数	
		試験値	解析値			
			剛性無視	剛性考慮		
C1-1	中央	C1	12.908	14.552	15.689	0.00071
	端部	C2	14.187	15.152	16.454	0.00098
C3-1(L)	中央	C3	12.446	8.381	8.773	—
	端部	C5	8.537	8.607	9.307	0.00135
	中央	C7	8.771	8.396	8.788	0.00172
	端部	C9	8.751	8.664	9.097	0.00085
C3-1(L)	中央	C4	8.519	8.381	8.773	—
	端部	C6	8.566	8.607	9.307	0.00129
	中央	C8	8.976	8.396	8.788	0.00060
	端部	C10	9.011	8.664	9.097	0.00108
C3-2	中央	C11	8.421	8.392	8.785	—
	中央	C12	8.702	8.519	8.911	0.00120

表-5 外ケーブルの局部応力

	ヒックアップ	最大振幅 (mm)	局部応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	備考
C1-1	中央	C1	0.59	0.00873
	端部	C2	0.35	0.00032
C3-1(L)	中央	C3	1.29	0.00269
	端部	C5	1.12	0.00186
	中央	C7	1.45	0.00304
C3-1(L)	端部	C9	1.21	0.00218
	中央	C4	1.23	0.00244
	端部	C6	1.08	0.00173
	中央	C8	1.41	0.00287
C3-2	端部	C10	1.04	0.00161
	中央	C11	1.43	0.00296
	中央	C12	1.73	0.00439

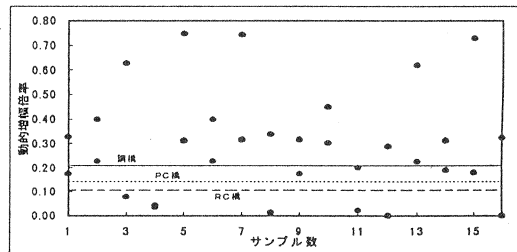


図-12 動的増幅率