

鋼床版縦リブ・横リブ交差部の応力実測とその分析

FIELD STRESS MEASUREMENTS AT THE CONNECTION BETWEEN LONGITUDINAL AND TRANSVERSE RIBS OF STEEL DECK PLATES

三木 千寿* 館石 和雄** 高木 千太郎***

By Chitoshi MIKI, Kazuo TATEISHI and Sentaro TAKAGI

In order to investigate the behavior at the longitudinal and transverse ribs connections of steel deck plates, stress measurements were carried out on two bridges in Tokyo. From the measured stresses, the influence lines of the longitudinal and the transverse ribs were calculated by using inversed problem concepts. F.E.M. analysis was applied to make clear the relationship between various distortion modes and fluctuations of local stress.

1. はじめに

鋼床版は活荷重応力の占める割合が大きな部材であり、また輪荷重を直接受けることから応力の繰り返し数が多く、疲労に対して厳しい条件下にある。そこで道路橋示方書では、鋼床版についてのみは疲労設計の考え方をとりいれた設計を行うよう規定されている。しかし、それにより照査しているのは縦リブの応力のみであり、実際の橋では縦リブ、横リブの交差部の隅肉溶接部に疲労損傷事例が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。ほとんどの疲労損傷の原因は、設計で照査している縦リブの応力によるものではなく、横リブやデッキプレート
の面外曲げによる局部応力であると考えられているが、その詳細は明らかではない。疲労損傷の原因を明確にし、その適切な補修方法を判断するためには、損傷位置において発生している応力のモードや大きさを把握することが必要である。

鋼床版は縦リブ、横リブがきわめて短い間隔で配置された複雑な3次元構造であり、その解析にはかなりの労力と費用を要する。また、輪荷重の取り扱い方など、解析の前提条件において多くの仮定を必要とするため、適切な解析手法はまだ確立しているとはいえない。

そこで、ここでは実在の鋼床版橋において応力実測を行い、その実測応力値をもとに縦リブ、横リブの応力影響線を逆算した。また求められた影響線をもとに、横リブ、縦リブの交差部周辺の応力を発生させる変形モードを明らかにした。

* 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

** 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

*** 東京都港湾局

2. 応力実測手法および結果

2-1. 応力実測手法

応力の実測は東京都内の一般道にある橋梁で行った。橋梁の一般図を図-1に示す。A橋はバルブプレートにより補剛された鋼床版板桁橋、B橋はUリブにより補剛された鋼床版箱桁橋である。ひずみゲージは支間中央の主桁下フランジ、横リブ下フランジ、横リブウェブ、縦リブに貼付した。測定は横リブの面外曲げ応力が大きいと思われる横リブ支間中央付近で行った。横リブウェブでのゲージ貼付位置の詳細を図-2に示す。応力測定は、橋梁上に図-3に示すような試験車を走行させることにより行った。試験車の走行速度を表-1に示す。試験車走行にともなう生じるひずみをサンプリング間隔0.001秒でA/D変換の後、フロッピーディスクに保存した。車線内での走行位置は厳密には測定していないが、それぞれ車線の中心を走るように注意した。車線の中央を走行したとしたときの載荷位置は図-1中に示したとおりであり、B橋では第二車線走行時に車輪が着目点のほぼ真上を通過する。

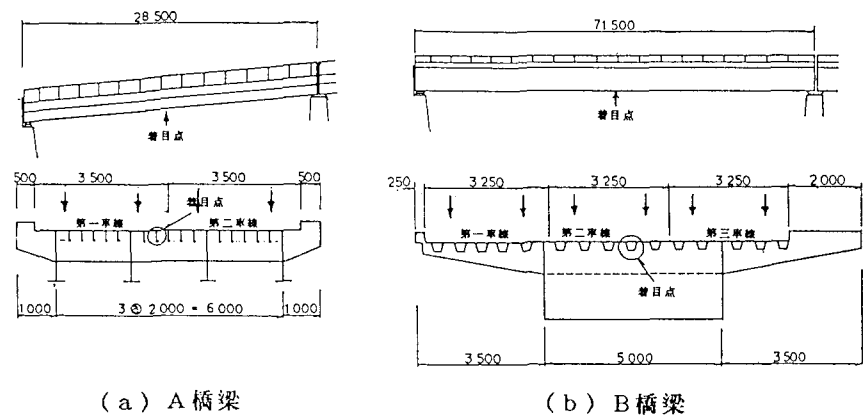


図-1. 橋梁一般図

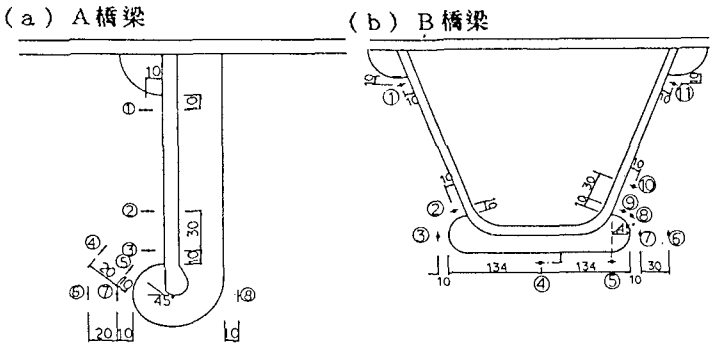


図-2. ひずみゲージ貼付位置

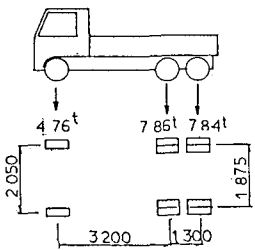


図-3. 試験トラック

表-1. 試験車の走行速度 (km/hr)

A 橋 梁		B 橋 梁	
第一車線	34.6	第一車線	34.9
第二車線	34.5	第二車線	44.2
		第三車線	46.4

2-2. 応力実測結果

図-4 (a) ~ (c) にA橋での、図-5 (a) ~ (c) にB橋での応力実測波形の例を示す。横軸は試験車第一軸の位置を示しており、「0」は、着目点（支間中央）の直上に試験車第一軸が載荷された状態を示す。ただし、車両が橋上に載った瞬間の時間の計測はあまり精度よく行っていないため、「0」の点は多少のずれを含んでいるおそれがある。

主桁の応力波形は支間全長にわたって増減しており、荷重が直上に載ったことによる局所的な応力変動は少ない。それに対して横リブでは荷重が直上に載ったときに生じる変動波形が大きく、支間全長としての応力増減はほとんどない。縦リブでは、支間全長にわたって応力が増加していく桁としての挙動と、荷重が着目点近傍に載った短時間に応力変動を生じる床版としての挙動とが混在しているが、桁作用による応力は床版作用による応力と比べて小さい。

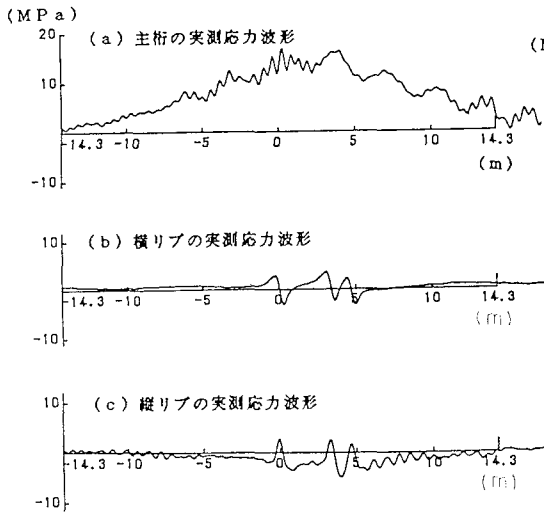


図-4. A橋梁での応力測定結果

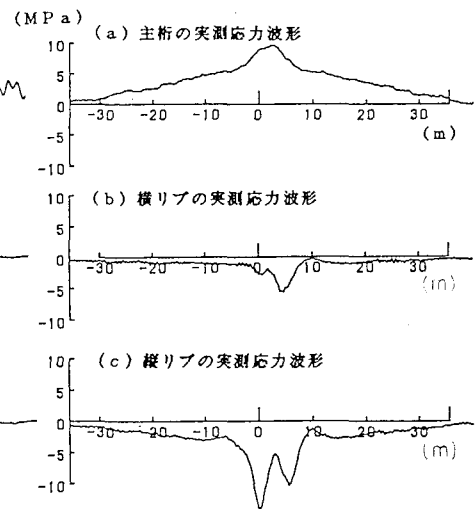


図-5. B橋梁での応力測定結果

3. 影響線の計算

3-1. 計算手法

実測によって得られた応力変動波形から、逆解析を行うことにより影響線を求めた。計算は文献4)で報告した手法を基に行った。まず、応力の影響線を次の関数式で示すことができるものと仮定する。

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m \quad \dots (1)$$

ここに、 a_n : 係数, x : 荷重の位置

いま、図-3に示した3軸トラックを考え、第一車軸と第二車軸の間隔を x_1 、第一車軸と第三車軸の間隔を x_2 とし、それぞれの軸重を P_1 、 P_2 、 P_3 とする。このとき3つの車軸によって生じる応力は、

$$\begin{aligned} \sigma = & P_1 \cdot \{ a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m \} \\ & + P_2 \cdot \{ a_0 + a_1 \cdot (x - x_1) + a_2 \cdot (x - x_1)^2 + \dots + a_m \cdot (x - x_1)^m \} \\ & + P_3 \cdot \{ a_0 + a_1 \cdot (x - x_2) + a_2 \cdot (x - x_2)^2 + \dots + a_m \cdot (x - x_2)^m \} \quad \dots (2) \end{aligned}$$

となる。 σ として実測応力を用い、最小自乗法によって係数 a_m を決定することにより、影響線が(1)式により計算できる。ここでは m を12とした。

今回実測された応力波形の中には、図-4 (c)、図-5 (c)に示した縦リブのように、スパン全体にわたって応力が増加していく桁全体としての挙動と、荷重が着目点の近傍に載荷された短時間に応力がピークを持つ床版作用としての挙動が混在しているものがある。このような鋭いピークを持つ波形を対象とした

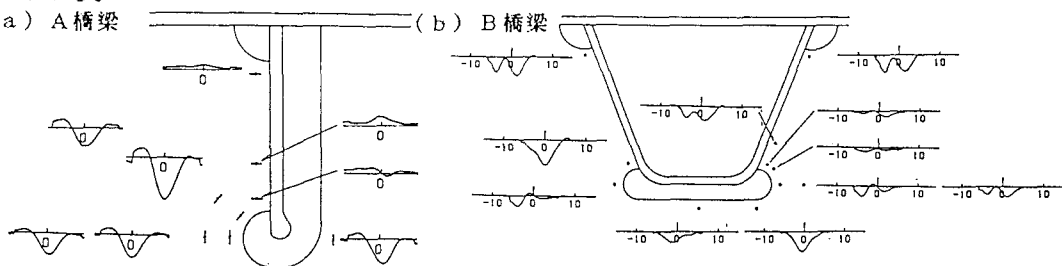
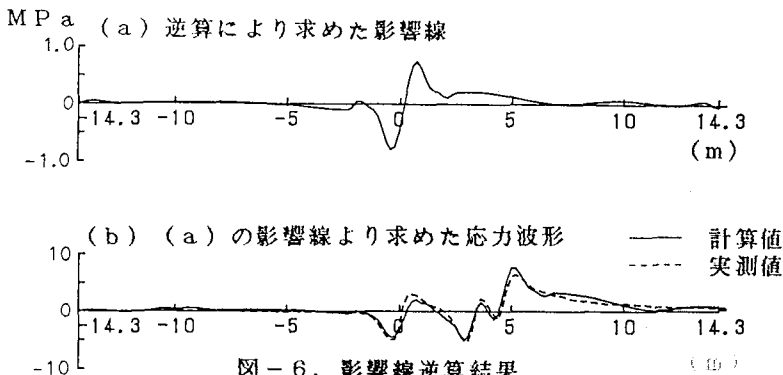
場合、回帰計算を全支間長として上記の手法により計算した影響線計算結果は必ずしもよい結果とならない。そこでまず全支間長を回帰計算の対象区間として計算し、その結果と実測波形との差をとることによって新たな波形を生成し、回帰計算対象区間を適当な長さに短くしてもう一度回帰計算を行った。最終的な影響線は、全支間長について行った回帰計算結果と、短い区間についての結果との和で表される。ただし、主桁の応力実測波形など、桁作用による応力が支配的で局部的なピークが小さい形状の応力波形については回帰計算対象区間を全支間長とした計算結果をそのまま影響線とした。また、横リブの応力波形のように、局部的な応力変動のみで、支間全長にわたる応力変動が少ないものについては、何度かの繰返しの結果最も適切であると思われる短い区間について計算した結果をそのまま影響線とした。

図-6 (a) に上記の様に求めた影響線の例を示す。また図-6 (b) の実線は、この影響線を用いて車両の通過に伴って生じる応力波形を再現したものであり、同図中の点線は応力実測値である。実測値と計算値はよく一致しており、この計算手法が妥当であることがわかる。

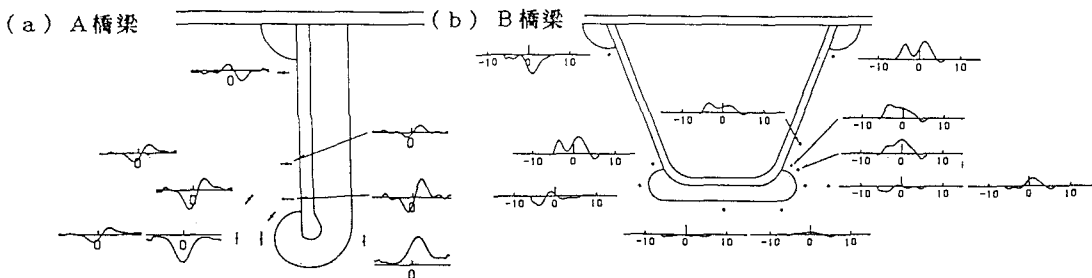
3-2. 横リブウェブの影響線

図-7は横リブウェブでの面内応力の影響線形状を示したものである。載荷車線はA橋については第一車線、B橋については第二車線である。橋軸方向の影響線長はA橋で5m、B橋で10mほどである。

図-8は横リブウェブの面外曲げ応力の影響線形状を示したものである。設計上は考慮されない面外曲げ応力は、面内応力と同等あるいはそれ以上に大きいことがわかる。



横軸: m



4. 縦リブ・横リブ交差部の面外変形モードの推定

縦リブ・横リブ交差溶接部には面内応力とほぼ同じレベルの面外曲げ応力が発生していることがわかった。そこでパソコン用汎用構造解析プログラムCOSMOS/Mを用いた簡単なF. E. M. 解析によって面外曲げ応力の発生となる変形モードを推定した。

図-9に解析に用いた要素分割図を示す。境界条件としては、横リブ下端のフランジがある位置で全自由度を拘束している。面外曲げ応力を引き起こす荷重モードとして図-10に示す4つを考えた。各変位は図中に示す方向を正とした。

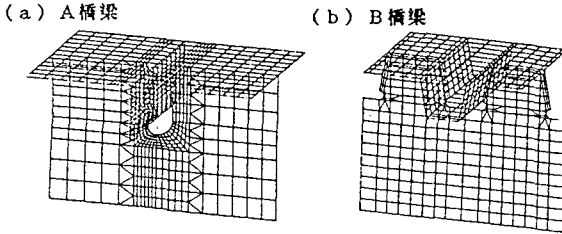


図-9. 要素分割図

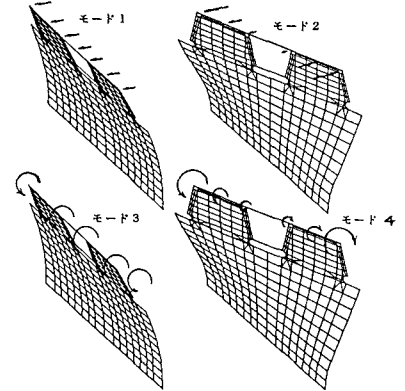


図-10. 変形モード

実測応力は次式のように各モードによる応力の線形和で表すことができるものと仮定し、最小自乗法によって係数 $a_1 \sim a_4$ を決定した。

$$\varepsilon = a_1 \cdot S_1 + a_2 \cdot S_2 + a_3 \cdot S_3 + a_4 \cdot S_4 \quad \dots (3)$$

ε ; 実測応力, $S_1 \sim S_4$; モード(1)~(4)による応力, $a_1 \sim a_4$; 係数

A橋については第一車線走行時の変形に、またB橋については第二車線走行時の変形に着目した。回帰計算の結果の例を表-2に、回帰値と実測値の相関係数を図-11に示す。A橋については測定された全データを用いて回帰計算を行ったが、B橋については横リブ上部のデッキプレートに近い測点(図-2(b)のNo.1, 11)でのデータを含めて回帰計算を行うと結果が著しく悪くなるため計算から除外した。このようにデッキプレートの直下で他の箇所と異なる挙動を示すのは、B橋では車輪が着目点のほぼ真上を通過することから、初期不整の影響等が強く現れたためと思われる。この2点でのデータを除けば、載荷位置によらず比較的よい回帰結果となっていることがわかる。

表-2. 回帰計算結果の例：載荷位置-3.0m (kg/mm²)

	測点No.	測定値	回帰値
A橋	1	-0.0839	-0.0846
	2	0.0269	0.0035
	3	-0.0114	-0.0126
	4	-0.0202	-0.0365
	5	-0.0714	-0.0560
	6	-0.0401	-0.0527
	7	-0.1344	-0.1280
	8	0.0809	0.0859
B橋	2	0.1848	0.1876
	3	-0.1014	-0.1070
	4	-0.0311	-0.0454
	5	0.0283	0.0283
	6	-0.0415	-0.0372
	7	-0.0835	-0.0772
	9	0.2703	0.2660

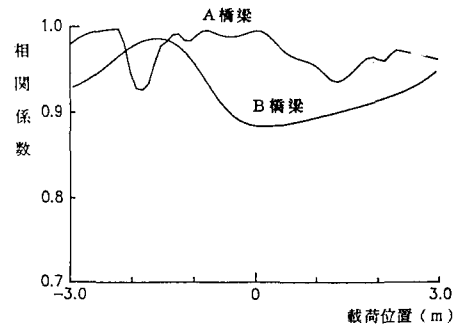


図-11. 回帰値と実測値の相関係数

図-12は両橋梁の測点3における応力を、各変形モードによって生じる応力ごとに分けて示したものである。また図-13は荷重の通過前から通過後の横リブの変形の様子を示したものである。A橋とB橋を比較した場合、A橋では横リブに鉛直軸回りの回転変形を与えるモード2、4による応力がB橋と比べて大きい。これは、A橋の縦リブがバルブプレートであり鉛直軸回りの曲げ剛性が低いことによるものと思われる。B橋ではモード1、3による応力が卓越しており、両者は符号が反対でほぼ同じ形状となっている。これはデッキプレートの水平方向変位の動きによって生じる回転変位を縦リブが拘束しているためと考えられる。

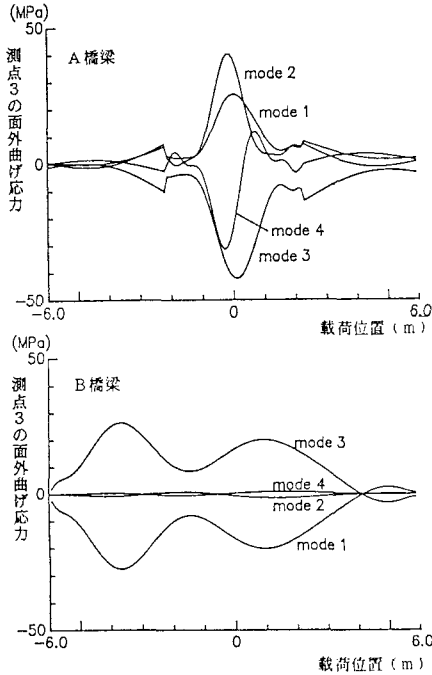


図-12. 各変形モードによる測点3の面外曲げ応力

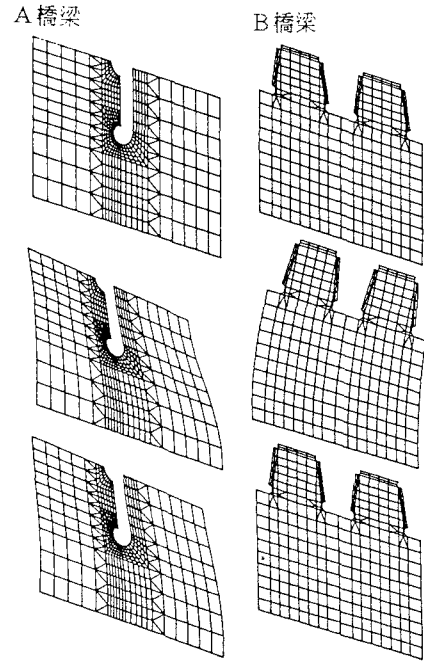


図-13. 横リブの変形挙動

5. 結 論

- ・横リブ応力はほとんどが床版作用によるものであり、桁作用によるものはほとんどない。縦リブの応力は桁作用によるものと床版作用によるものとが混在しているが、前者は後者に比べて小さい。
- ・応力実測波形から影響線を逆算した。横リブの影響線長は短く、今回対象とした橋梁では10m程度であった。
- ・縦リブと交差する近傍の横リブウェブには面内方向と同程度の面外曲げ応力が生じている。
- ・バルブプレートの縦リブの場合、横リブとの交差部に生じる面外曲げ応力はデッキプレートの鉛直軸回りの回転によるものが比較的大きい。
- ・今回対象としたUリブの縦リブの場合、縦リブ横リブ交差部の面外曲げ応力はデッキプレートの水平変位と、それとともなって生じる回転変形を縦リブが拘束することにより生じている。

参考文献

- 1) 三木千寿、坂野昌弘、館石和雄、福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析、土木学会論文集、No.392, I-9, pp.403-410, 1988.
- 2) 土木学会鋼構造委員会 鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労、土木学会論文集、I-12、1989-10
- 3) 三木千寿、米田利博、村越 潤、吉村洋司：走行車両の重量測定、橋梁と基礎、1987-4
- 4) Moses, F.: Instrumentation for Weighing Trucks-In-Motion for Highway Bridge Loads, FHWA/OH-83-001 (1990年10月12日受付)