

論文

鋼床版連続箱桁橋 U リブ・横リブ交差部の応力性状

Luiza H. Ichinose*, 水嶋晋作**, 坂野昌弘***

*修士, 一般社団法人 日本非破壊検査工業会 (〒553-0002 大阪市福島区鷺洲 2 丁目)

** 学士, 国土交通省, 和歌山河川国道事務所 (〒640-8227 和歌山市西汀丁 16 番)

*** 工博, 関西大学教授, 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3 丁目)

鋼床版は, 死荷重低減と工期短縮の観点から有利であるが, 疲労耐久性が課題となっている。特に, 鋼床版の縦リブ・横リブ交差部では多くの疲労損傷が報告されていることから, 本稿では, 縦リブ・横リブ交差部に着目した。「鋼床版の疲労耐久性向上に関する研究 PJ」の一環として, U リブ鋼床版の縦リブ・横リブ交差部の応力性状を把握するために, 補強工事が予定されている鋼床版連続箱桁橋に対して, 動的載荷試験および応力頻度測定を行った。その結果, 横リブウェブで面外曲げが発生することや U リブが左右に変形することなどが確認され, U リブ下側スリット部の廻し溶接止端付近の横リブウェブ母材が最短の疲労寿命となった。

キーワード: 鋼床版, U リブ・横リブ交差部, 疲労, 応力測定

1. はじめに

鋼床版は, 死荷重低減と工期短縮の観点から有利であるが, 疲労耐久性が課題となっている。特に, 鋼床版の縦リブ・横リブ交差部では多くの疲労損傷が報告されていることから, 本稿では, 縦リブ・横リブ交差部に着目した。

縦リブ・横リブ交差部の挙動について, 三木ら²⁾は, 静的載荷試験および FEM 解析を用いて横リブの面外曲げに着目し検討している。その結果, 縦リブ・横リブ交差部のデッキ側のスカラップを省略することにより, 局所的な面外曲げ応力が低減し, 疲労強度が高くなることを明らかにしたが, 実際の移動荷重下においてはさらに大きな面外曲げ応力が生じることが考えられ, さらに検討が必要であるとしている。その後, 山本ら³⁾と服部ら⁴⁾は U リブ内の密閉ダイヤフラムに着目し, 供用前の橋梁での載荷試験, FEM 解析および静的載荷試験を行った。その結果, 横リブスリット部の U リブ廻し溶接部の応力集中が確認され, 疲労対策として L 型部材を U リブ下面に設置する改良構造を提案した。

供用荷重下でのバルブリブ鋼床版の縦リブ・横リブ交差部の挙動については夏秋ら⁵⁾が動的載荷試験および応力頻度測定を行って, スリット上下部の溶接部近傍のコバ面で大きな圧縮応力が発生し, スリット下部の母材部では大きな引張応力が発生することを確認した。その後,

疲労対策を提案し, 実際の橋梁でその効果を検証している⁶⁾。

本稿では, 「鋼床版の疲労耐久性向上に関する研究 PJ」⁷⁾の一環として, U リブ鋼床版の縦リブ・横リブ交差部の応力性状を現地計測より把握した。

2. 応力計測方法

2.1 対象橋梁

対象橋梁は, 2003 年に竣工し, 鋼床版の補強工事が予定されている橋長 689m, 標準部幅員 25.3m (4 車線) の 8 径間連続鋼床版箱桁橋である。図-1 に対象橋梁の一般図を示す。疲労対策前の U リブ・横リブ交差部の応力状態を把握するために, 試験車走行による動的載荷試験および供用荷重下の 72 時間連続の応力頻度測定を行った。足場などの条件から, 応力測定は第 8 径間で行った。

2.2 測定位置

測定位置を含む第 8 径間の平面図を図-2, 断面図を図-3 に示す。試験車走行による動的載荷試験および 72 時間連続の応力頻度測定の測定位置は, 図-2 に示すとおり, A2 から 2 番目の横リブで, 大型車両の走行が多いと思われる下り線の走行車線で, 図-3 に示すように走行車両の右側輪荷重直下の U リブを選定した。

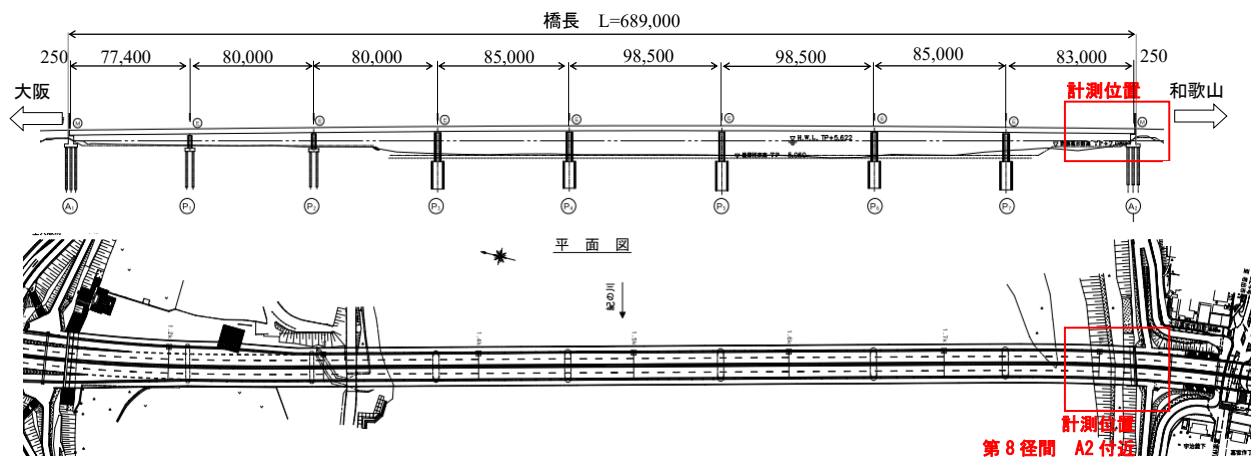


図-1 対象橋梁

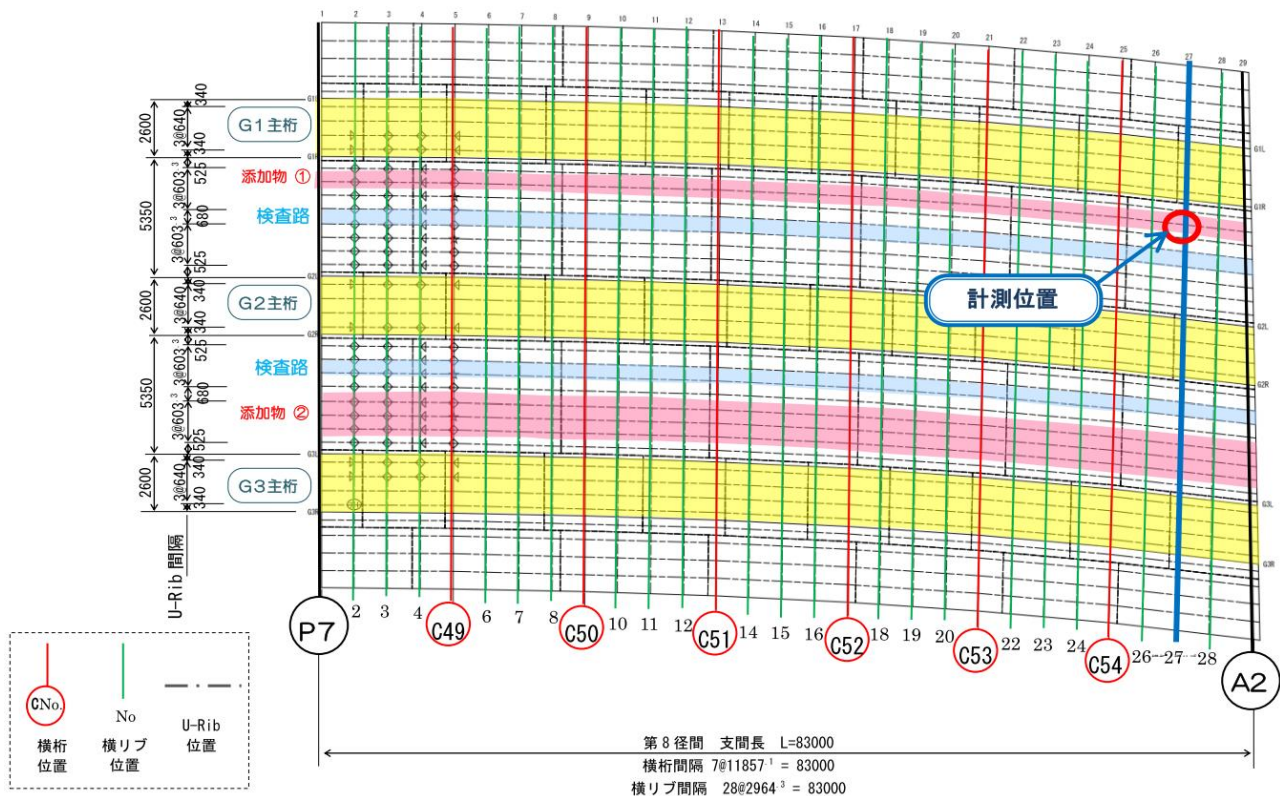


図-2 測定位置 第8径間 (平面図)

計測機器の都合により、測定点数を8チャンネル以下に絞り込んだ。計測対象候補として2つのUリブ、R12-2およびR12-3(図-3参照)を選定し、一般車両走行下で予備計測を行って、応力が大きい方のUリブを測定対象とした。予備計測の測定点と着目ゲージを図-4に示す。

予備計測と動的載荷試験および応力頻度測定のためのゲージ位置は図-5に示すとおりである。横リブウェブの

溶接止端とスリット縁から5mmずつ離れた位置の両面に三軸ゲージを貼り付け、Uリブ側は廻し溶接止端から5mmの位置に一軸ゲージを貼り付けた。なお、予備計測後、②と④のゲージはz方向が溶接線に向かうように貼り替えた。また、Uリブ直下の横リブ下フランジ下面には、走行車両の軸重を推定するために一軸ゲージを貼り付けた。

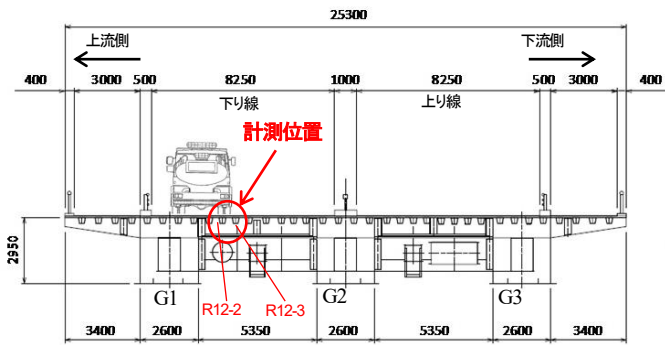


図-3 測定位置 (断面図)

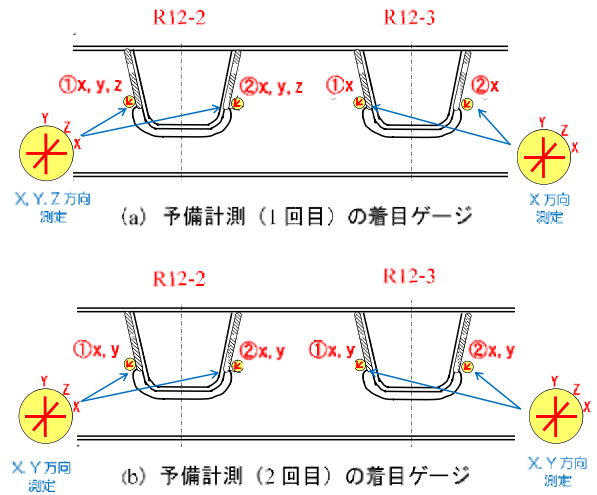


図-4 予備計測 (一般車両下) の測定点と着目ゲージ

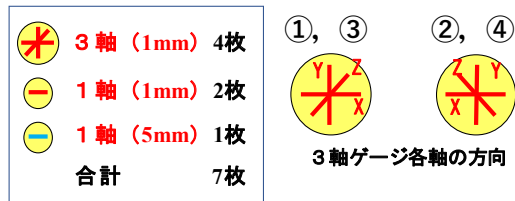
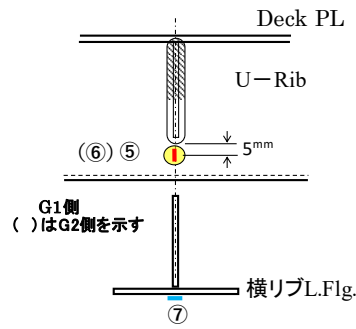
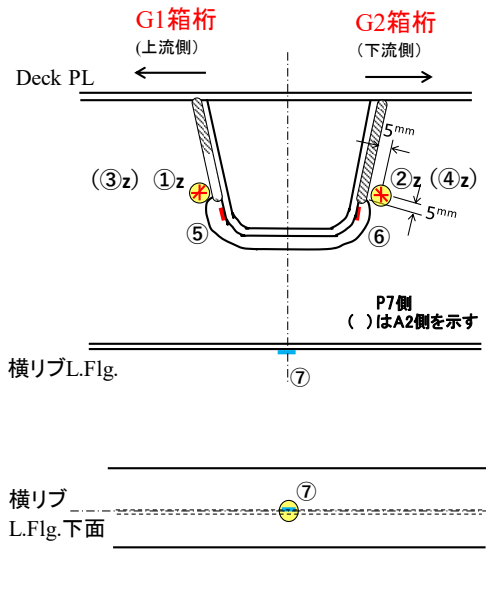


図-5 ゲージ位置図

2.3 動的載荷試験

動的載荷試験には、図-6 に示す散水車 (総質量=12.9t, 前軸質量=4.2t, 後軸質量=8.5t) を用いた。図-3 に示すとおり、下り走行車線を約 60km/h の速度で走行させ、追越し車線寄り (右側) の車輪直下に位置する Uリブ・横リブ交差部に着目して応力測定を行った。

2.4 応力頻度測定

応力頻度測定は、応力頻度測定要領 (案)⁸⁾に基づいて行った。一般車両通行時の 72 時間の計測データの応力頻度分析にはピークバレー法およびレインフロー法を用いた。



図-6 散水車

3. 応力測定結果および考察

3.1 予備計測結果

計測対象のUリブを選定するために、一般車両走行下で測定対象候補のUリブ(図-3のR12-2およびR12-3)を対象に、予備計測を行った。

(1) 予備計測 (1回目)

ひずみが比較的大きな3ケースを表-1に示す。UリブR12-2のゲージ①では、z方向、②ではy方向のひずみが大きく、x方向のひずみはR12-2、R12-3ともに小さい。y方向か、z方向いずれかの方向に決めるためにR12-3側もyとzのひずみに着目し、2回目の予備計測を行った。

(2) 予備計測 (2回目)

比較的大きなひずみが生じた5ケースを表-2に示す。R12-2とR12-3を比較するとR12-2の値が大きいため、R12-2を測定対象に選定した。yとzを比較すると、R12-2、R12-3ともに①ではzの値が大きく、②はyの方が大きい。それは、図-4に示すように①と②のz方向が溶接に対して直角と平行で異なっているためと考えられる。溶接と直角方向の応力が大きいため、②と④のゲージを図-5のように貼り直した。

3.2 動的載荷試験結果

動的載荷試験で散水車が横リブ上を通過した際に各測定点で観測された応力の最大・最小値を表-3に、発生応力が最も大きかった1回目の応力波形を図-7に示す。

横リブでは圧縮応力が卓越しており、その最小値-31MPaはP7側の測定点②zで観測された。また、全体的にG2側(②z、④z)がG1側(①z、③z)より大きい。Uリブについては、G1側の測定点⑤が圧縮(最小-12MPa)、G2側の測定点⑥が引張(最大21MPa)であった。したがって、車輪はG2側を走行し、UリブがG1側に変形したと考えられる。なお、横リブの下フランジでは引張応力のみが発生しており、3回とも6MPaであった。

図-7に示す横リブ表裏の測定点①zと③z、および測定点②zと④zを比較すると、横リブウェブに面外曲げが発生していることが分かる。それは、輪荷重の移動により、先に手前側のUリブがたわみ、次に向こう側のUリブがたわむため、横リブに面外曲げが発生すると考えられる。なお、⑥は引張、⑤は圧縮であるが、何れも輪荷重が横リブ直上に載った時に、Uリブのたわみが生じなくなるので、応力がゼロに近づいている。

表-1 予備計測 (1回目) ひずみ一覧表

測定点	R12-2						R12-3	
	①			②			①x	②x
	x	y	z	x	y	z		
case1	-9	-55	-78	-13	-118	8	-6	-3
case2	-21	33	11	16	-71	-2	-18	13
case3	-4	-52	-63	-2	-22	1	5	0

単位: $\times 10^{-6}$

表-2 予備計測 (2回目) ひずみ一覧表

測定点	R12-2				R12-3			
	①		②		①		②	
	y	z	y	z	y	z	y	z
case 1	41	19	-68	-3	48	39	-36	2
case 2	-98	-126	-86	7	-12	-15	12	-8
case 3	6	-4	-86	2	-77	-103	-13	7
case 4	-97	-123	-34	7	7	9	9	-2
case 5	-4	-21	-119	4	-93	-125	-28	10

単位: $\times 10^{-6}$

表-3 動的載荷試験結果

ゲージ位置	No.	1回目		2回目		3回目	
		σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}
		横リブ Web	P7側 ①z	1	-10	1	-12
②z	1		-31	1	-30	1	-26
A2側 ③z	3		-4	1	-7	6	-3
④z	0		-11	0	-13	2	-7
Uリブ側面	⑤	4	-9	6	-7	1	-12
	⑥	20	0	19	0	21	0
横リブ L.Flg. 下面	⑦	6	0	6	0	6	0

(単位: MPa)

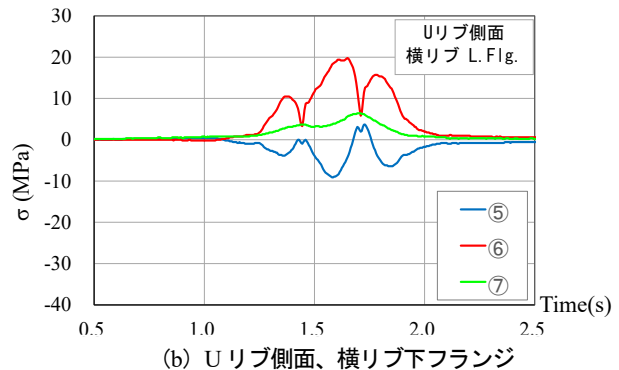
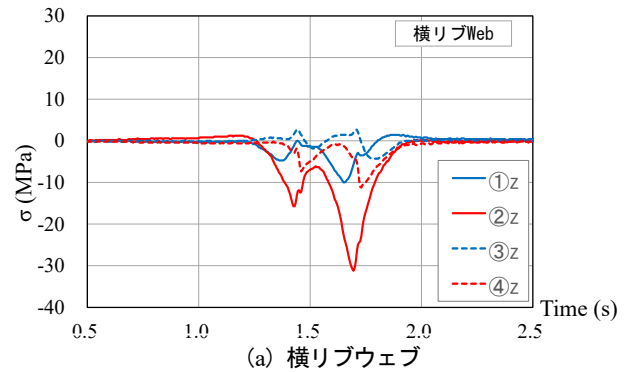


図-7 動的載荷試験時の応力波形 (1回目)

3.3 応力頻度測定結果

供用荷重下の72時間の応力測定データによって、ピークバレー法およびレインフロー法から求めた応力頻度分布を図-8と図-9に、またそれぞれの最大、最小値を表-4に示す。

横リブの最大応力範囲62MPaと最小応力-58MPaは測定点②zで計測され、③zと④zでは、引張と圧縮が交番する傾向が見られた。Uリブの測定点⑤、⑥の応力範囲56MPa、54MPaには大きな差は認められなかったが、測定点⑤では圧縮と引張が交番、測定点⑥では引張が卓越していた。したがって、実際の交通荷重では、車輪はG2側だけではなくG1側も走行しており、Uリブが左右に変形していることが推定される。

横リブ下フランジ（測定点⑦）については、応力頻度測定期間中に発生した最大引張応力が、16MPaであり、動的載荷試験時の6MPaの約2.7倍であった。したがって、試験車両の後軸質重（8.5t）と比較すると約23tの軸重が応力頻度測定中に通過したと推定される。

応力頻度分布から算出した疲労寿命を表-5に示す。最も短い疲労寿命は横リブの測定点②zの約400年（F

等級⁹⁾）、その次がUリブ側面の測定点⑥の約600年（G等級⁷⁾）であった。また、修正マイナー則に近いH'等級⁹⁾で評価した場合には、それぞれ、約30年および約90年となった。なお、計測した応力が公称応力ではないため、疲労寿命の絶対値そのものにはあまり意味はないが、補強後の値と比較することにより、補強効果が検証できる。

表-4 応力頻度測定結果

ゲージ位置	No.	レインフロー法	ピークバレー法		
		最大応力範囲 $\Delta\sigma_{max}$	最大・最小応力 σ_{max} σ_{min}		
横リブ	P7側	①z	46	8	-40
		②z	62	4	-58
	A2側	③z	46	18	-28
		④z	40	16	-26
Uリブ側面	⑤	56	24	-32	
	⑥	54	46	-8	
横リブ L.Fl.g. 下面	⑦	16	16	-2	

単位: (MPa)

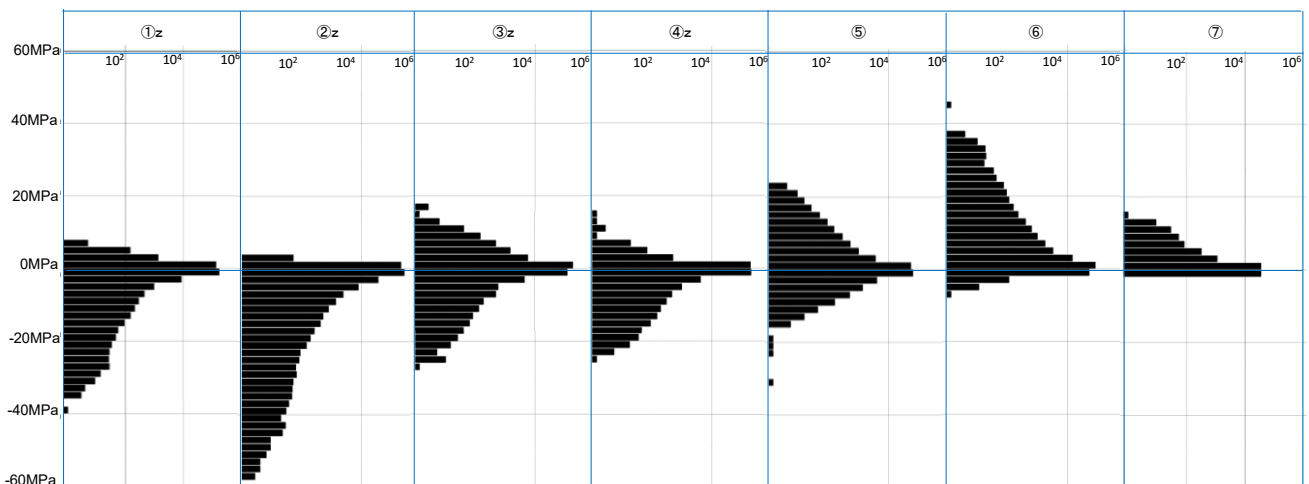


図-8 応力頻度分布（ピークバレー法）

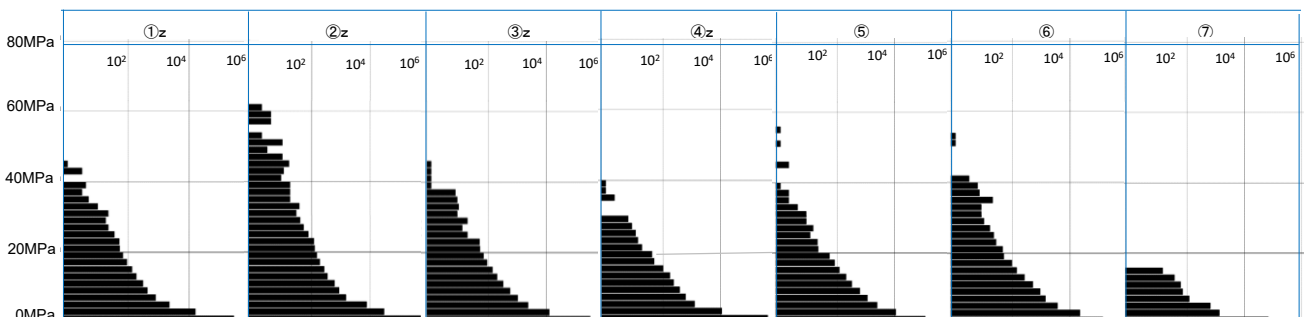


図-9 応力頻度分布（レインフロー法）

表一5 疲労寿命一覧表

ゲージ位置	No.	強度等級	許容応力範囲 (MPa)	応力打切限界 (MPa)	最大応力範囲 (MPa)	等価応力範囲 (MPa)	寿命 (年)	
横リブ Web	P7側	①z	F	65	21	46	28	1819
		②z	F	65	21	62	32	439
	A2側	③z	F	65	21	46	28	2283
		④z	F	65	21	40	26	8101
Uリブ側面	⑤	G	50	15	56	22	1085	
	⑥	G	50	15	54	24	666	
横リブL.Flг. 下面	⑦	D	100	39	16	---	∞	
横リブ Web	P7側	①z	H'	30	7	46	16	104
		②z	H'	30	7	62	18	32
	A2側	③z	H'	30	7	46	14	114
		④z	H'	30	7	40	13	243
Uリブ側面	⑤	H'	30	7	56	13	145	
	⑥	H'	30	7	54	14	94	
横リブL.Flг. 下面	⑦	H'	30	7	16	11	2269	

4. まとめ

鋼床版連続箱桁橋において、動的載荷試験および応力頻度測定を行った結果、Uリブ・横リブ交差部の応力状態を把握することができた。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 動的載荷試験結果から、横リブウェブでは圧縮応力が卓越し、G2側の測定点がG1側より大きい値を示した。また、UリブではG1側の測定点で圧縮、G2側で引張が発生したことから、車輪はG2側を走行し、UリブがG1側に変形したことが推定される。
- (2) 応力頻度測定結果から、横リブP7側では圧縮が卓越し、A2側では応力の符号が交番した。また、UリブG1側では応力の符号が交番し、G2側では引張が卓越した。したがって、実際の交通下では、車輪はG1側を走行しており、Uリブが左右に変形していることが推定される。
- (3) 横リブ下フランジの最大ひずみを動的載荷試験時に発生したひずみと比較すると、測定期間中に最大軸重23tの車両が走行したと推定される。
- (4) 補強前の疲労寿命を推定した。これらを補強後の値と比較すると、疲労対策効果の検証を行うことができる。

参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策（三訂版），2012。

- 2) 三木千壽，館石和雄，奥川淳志，藤井裕司：鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力と疲労強度，土木学会論文集，No.519，I-32，pp. 127-137，1995。
- 3) 山本泰幹，御嶽議，木村真二，林暢彦，栗原康行：Uリブ鋼床版の横リブ交差部の疲労耐久性向上に関する検討，鋼構造年次論文報告集，第15巻，pp. 301-308，2007。
- 4) 服部雅史，大西弘志，高田佳彦，青木康素，松井繁之：鋼床版のUリブと横リブ交差部の疲労損傷対策と輪荷重走行試験，鋼構造年次論文報告集，第15巻，pp. 431-438，2007。
- 5) 夏秋義広，讃岐康博，中村香澄，宮崎幸雄，坂野昌弘：鋼床版バルブリブと横リブ交差部の実働応力計測，鋼構造年次論文報告集，第16巻，pp. 479-486，2008。
- 6) 夏秋義広，讃岐康博，中村香澄，水野洋幸，坂野昌弘：鋼床版バルブリブと横リブ交差部の補強効果の確認，鋼構造年次論文報告集，第17巻，pp. 307-314，2009。
- 7) 坂野昌弘：鋼床版の疲労耐久性向上に関する研究プロジェクト，土木学会第73回年次学術講演会講演概要集，CS3，2018。（発表予定）
- 8) （財）道路保全技術センター：応力頻度測定要領（案），1996。
- 9) （社）日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002。

（2018年7月20日受付）