

90余年供用したリベット鉄道桁の静的載荷実験および疲労実験

STATICAL LOADING TESTS AND FATIGUE TESTS FOR RIVET RAILWAY GIRDERS USED MORE THAN 90 YEARS

大塚 久哲*・彦坂 熙**・宮武 洋之***・中村 聖三****

By H. OTSUKA, H. HIKOSAKA, H. MIYATAKE and S. NAKAMURA

This paper investigates the corroded conditions, reduction of bending stiffness and fatigue properties in riveted girder railway bridges used for more than 90 years. Furthermore, mechanical properties and chemical composition of the steel are reported.

The results of statical loading tests show that the stiffness of the girder, considering reduction of the cross section area, predicts the actual behaviour of the girders.

The results of fatigue tests show that, if reduction of the cross section area is properly evaluated, corroded girders have almost equivalent fatigue strength to the B-line in the S-N chart in the specifications for steel railway bridges.

1. ま え が き

九州で始めて鉄道が営業を開始したのは1889年(明治22年)のことであり、このとき客車6両を連結した機関車が博多―千歳川(現、筑後川)仮停車場間を一日3往復したことが記録に残されている。その後、路線を順調に伸ばし、1909年には門司―鹿児島間が全線開通している。新線建設に伴い架設された鉄道橋のうち、今も現役としてその使命を果たしている老朽橋もあるが、JRとしては独自の取り替え規準を整備し、順次老朽橋の架け替えを実施している状況にある。

ところで、長年月自然環境にさらされ続け、しかも供用中に応力変動を繰り返し受けた橋梁が、どの程度腐食し耐疲労強度があるかを調査することは、今後この種の老朽橋の残存寿命判定基準を整備していく上で極めて重要なことである。このような観点から行われた老朽橋梁の疲労実験に関する主な報告には、文献1), 2), 3)などがあるが、供用期間や腐食状況、構造部位、通過荷重などによって疲労損傷の程度が異なり、これからのデータの蓄積が望まれている。著者らは、90余年供用された2主桁リベット橋の現況調査と、材料試験、静的載荷実験、疲労実験等を行ったので、その結果を報告する。

* 工博 九州大学助教授 工学部土木工学科 (〒160 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 工博 九州大学教授 工学部土木工学科 (〒160 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** 九州旅客鉄道(株) 施設部工事課 (〒801 北九州市門司区清滝2-3-19)

**** 工修 川崎製鉄(株) 研究開発センター (〒281 千葉市長沼町351)

2. 試験桁

試験桁は供用期間92年の後、3年間の放置期間をもつ経年95年の桁であり、上下対称 I 桁断面の2主桁で、フランジは2つのアングルと1つのカバープレートで構成され、全てリベットで組み立てられている。実験は九州大学および川崎製鉄(株)の2カ所で行った。九州大学では試験機的能力から2主桁のままでは実験できないので、写真1に示すように現地で対傾構・横構を切断し、単桁2本に分離して大学内に搬入した。搬入後、単桁の静的載荷実験を行ってから、さらに単桁を水平に切断し、圧縮フランジを溶接して2体の疲労試験桁(以後A, B桁と呼ぶ)と、中立軸付近の腐食のない腹板から引張試験片を作成した。

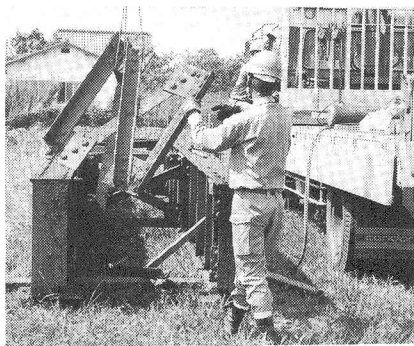


写真1 2主桁橋の解体

一方、川崎製鉄では2主桁のまま静的載荷実験を行い、実験終了後、単桁に分離し曲げ疲労試験を行った(以後、C, D桁と呼ぶ)。このときD桁には等曲げ区間のフランジリベットを高力ボルトに置き換え、疲労強度に対する効果を検討した。図1, 2に九大で行った静的曲げ載荷試験桁と曲げ疲労試験桁を示す。

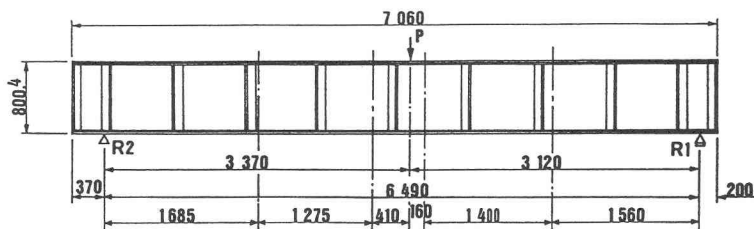


図1 静的曲げ載荷試験桁 (単位: mm)

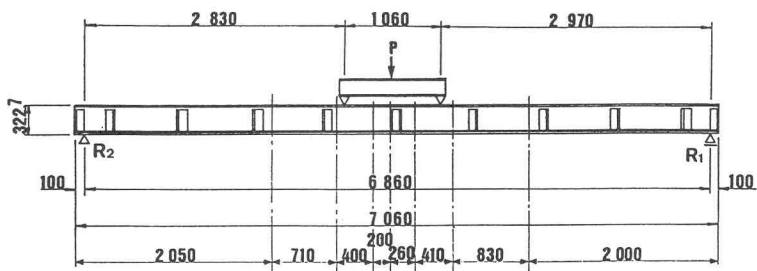
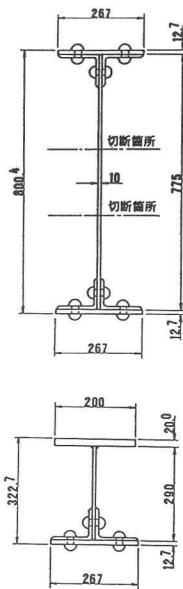


図2 疲労試験桁 (単位: mm)



3. 腐食状況

試験桁の腐食は上フランジと下フランジとで異なる。上フランジでは枕木直下で腐食が激しく、頭部が欠損しているリベットも見受けられる。下フランジでは内側の水分が溜まりやすいところで腐食損傷が大きい。写真2, 3にショットブラストにより塗料と錆を取り除いたあとの桁表面の腐食状況を示す。

板厚の減少率を具体的に算出するため、フランジを1-2 cm間隔のメッシュに区切り各点の板厚をキャリパーで測定した(測定点数約5000)。測定点の板厚がその測定点のあるメッシュ面積を代表するものとして重みつき平均(測定点間距離が異なるところがあるため)により断面減少率を算出したところ、上フランジ

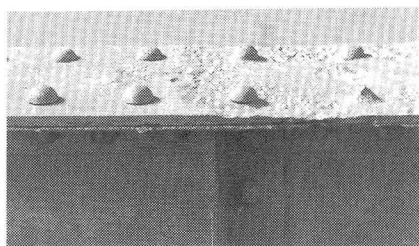


写真2 上フランジの腐食状況

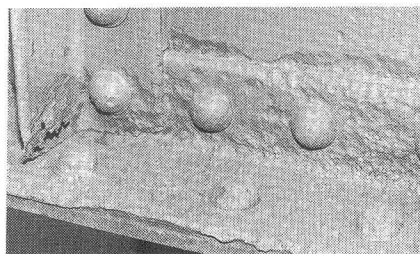


写真3 下フランジ上面側の腐食状況

は枕木直下で21.8%，その他で2.7%と枕木直下での腐食損傷が格段に激しいことがわかった。外側と内側（対傾構のある側）で比較すると、それぞれ12.3%，12.8%でありほとんど差がない。一方、下フランジは外側で11.7%，内側で18.6%の板厚減少率であり、下フランジは内側が腐食環境にあることがわかった。これらの測定値より桁全体としての平均板厚を求め、断面2次モーメントの減少率を計算すると、9.2%であった。ウェブの腐食は下フランジ側アングル材直上に局部的に生じており、中には貫通孔が開いているところもあったが、それ以外のところではほぼ健全であった。リベット接合部の緩みは全く存在しない。

4. 化学組成と機械的性質

使用鋼材の化学組成分析を行ったところ、表1に示すような結果を得た。また引張試験により降伏点応力と引張強度の平均値はそれぞれ29.5kgf/cm²、44.1kgf/cm²、伸びの平均値は24.1%であり、ヤング率の平均

表1 化学組成分析結果（単位：%）

採取部位／項目	C	Si	Mn	P	S	Al
ウエブ	0.14	0.017	0.57	0.057	0.066	0.001
スティッフナー	0.12	0.018	0.61	0.055	0.043	0.005

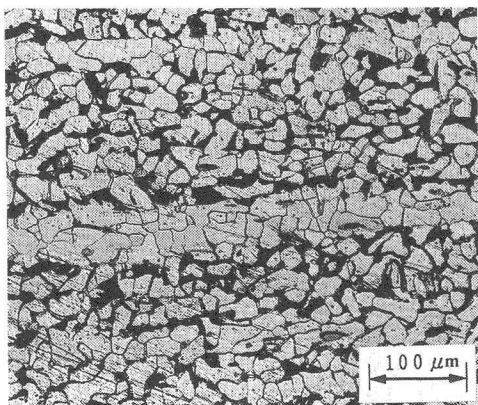


写真5 圧延方向に直角な面の顕微鏡写真

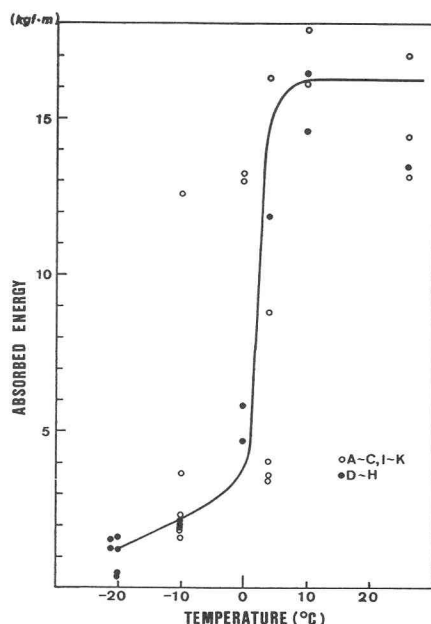


図3 シャルピー試験結果

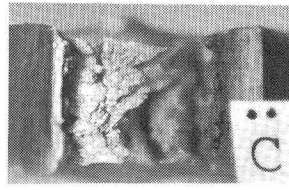
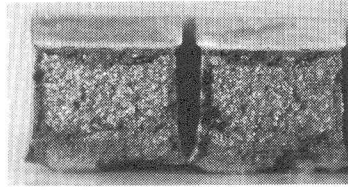
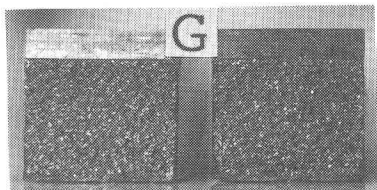


写真4 シャルピー試験片の破面（試験温度 G:-20℃，E:0℃，C:26℃）

値は $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ であることが判った。これらの結果から、組成的には現在の鋼に比しリン、イオウが若干多く、また伸びも低めであるが、試験桁鋼材はSS41と同等であると判断できる。

シャルピー試験結果を図3に示す。本鋼材は摂氏0度付近に明瞭な延性-脆性遷移温度をもっており、エネルギー吸収値は靱性側で $16 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 、脆性側で $1.5 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ であった。シャルピー試験片の破面は写真4に示すようであり、常温領域では層状に破断している特徴を有している。現在生産されている鋼材ではこのような破壊性状を呈することはほとんどなく、本試験桁は製作年度が古いためリン・イオウなどの不純物が多く、これらの偏析に起因してこのような層状組織が形成されたものである（フェライトバンド）。そこで圧延方向に直角な面（研磨の後、ナイル3%溶液にて腐食）の顕微鏡写真を撮り組織を観察したところ、パーライト（黒い部分）とフェライト（白い部分）が板の厚さ方向に層状をなしていることが判明した（写真5）。

5. 最大履歴応力

試験桁が供用中に受けた最大履歴応力を2通りの方法によって推定した。1つはA E試験による方法、他の1つは最大入線機からの推定である⁵⁾。

九州大学で行った静的曲げ载荷試験桁と曲げ疲労試験桁の両桁に対し、漸増载荷および漸減除荷試験（2回繰返し）を行い、A E信号の測定を行った。A Eセンサーはスパン中央に近い引張側フランジ上面に、リベット（スパン中央点より約0.93mの位置）を中央にして2個設置した。ひずみゲージはリベット断面のフランジ縁端側に貼り、A E信号発生時のひずみを同時に記録した。横軸にひずみゲージの読みを縦軸に累積カウント数をとって計測結果をまとめると、曲線勾配の急変部が生じ、その点のひずみを読みとると 210μ （2つの桁の平均値）をえ、従って応力は 440 kgf/cm^2 となる。一方、本桁の最大入線機D50、D51（KS相当値=14.5 tf）によるA E測定点における計算最大応力は 480 kgf/cm^2 （衝撃率を含む）程度と推定された。

以上より、本桁の最大履歴応力は 500 kgf/cm^2 以下と推定され、後に示すようにこれは疲労限以下の応力と考えられるから、疲労に対する累積損傷は無視できるといえる。

6. 曲げ挙動

静的曲げ载荷試験については、図1に示す試験桁による結果のみを示す。桁には集中荷重を、0tf から45tfまで7.5tf刻みの6段階で载荷した。各荷重段階ごとの増加量の平均値をたわみと応力について示せば図4を得る。ここで各荷重段階ごとの増加量はほぼ一定であり、線形挙動をしていることが確かめられた。図

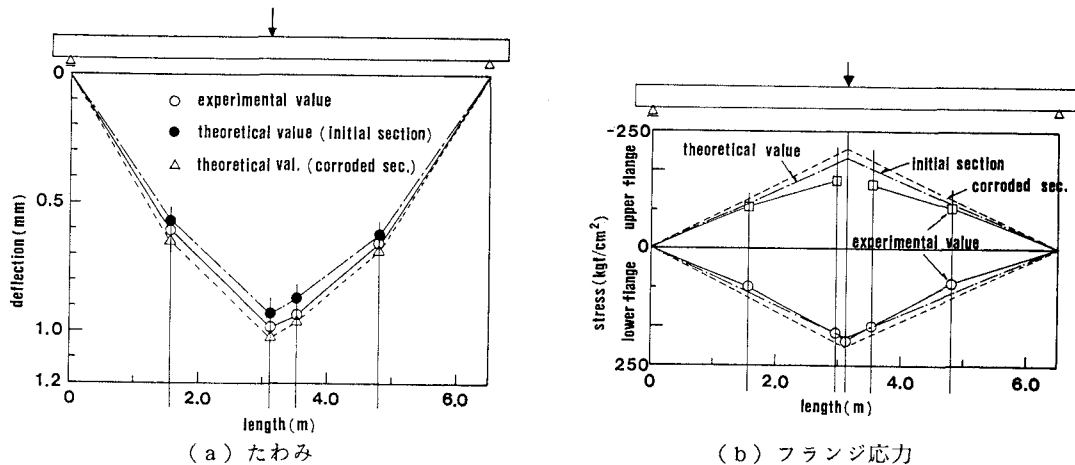


図4 静的曲げ载荷試験結果

中、理論値は設計図面による原断面と、腐食による断面減少率を考慮した実断面の2種類に対して求めている。実断面の断面係数は平均板厚から算出した。実験値はたわみが両理論値の中間（実断面に近い）にあり、応力も载荷点下フランジは両理論値の中間にある（载荷点近傍の上フランジの圧縮応力が小さいのは局部的な板曲げ応力の影響によるものであろう）。これらから、原断面による値は、危険側になり好ましくないこと、実断面による値は実験値に近く、しかも安全側の評価となることが知られる。また、腐食による断面減少以外に、リベットのゆるみなどによる曲げ剛性の低下はないといえよう。

7. 疲労亀裂の発生状況

曲げ疲労試験は図2に示す2点曲げ载荷により行い、繰返し载荷は正弦波の片振荷重とした。荷重条件を表2に示す。表中U、Lはそれぞれもとの桁の上、下フランジから製作したことを示す。

疲労亀裂の発生箇所は、腐食窪み（貫通孔も含む）とリベット孔に大別できる。A桁、B-U、Dの各桁は最初の亀裂がアングル水平脚腐食窪みあるいは腐食により生じた貫通孔から発生し、アングル水平脚が破断した後、破断断面に最も近いカバープレートのリベット孔に亀裂が生じた。B-L桁は応力範囲が小さくアングル水平脚の腐食ビットから発生した亀裂も鉛直脚側には進展せず、カバープレートも980万回まで、亀裂は生じなかった。C、D桁は他の桁に比べてアングルの腐食が少なく、亀裂は全てカバープレートのリベット孔から発生した。

写真6はA-U桁のアングル水平脚の亀裂、写真7はA-L桁のカバープレートの破断状況を示す。A-L桁のリベット孔からの最初の亀裂はフランジ縁端側から生じた。ここには開孔時に生じたと思われるノッチの存在が確認される（写真8）。この亀裂が縁端到達後、フランジ中央側から新たに生じた亀裂がもう一方のリベ

表2 各試験桁の荷重条件

試験桁	最小荷重 (tf)	最大荷重 (tf)	荷重範囲 (tf)	繰返し速度 (Hz)
A-U	1.8	19.8	18.0	1.0 ~ 1.5
A-L				
B-U	1.2	13.2	12.0	1.8
B-L	1.2	8.4	7.2	2.0 ~ 2.3
	1.2	10.8	9.6	
C・D	5.0	55.0	50.0	2.0

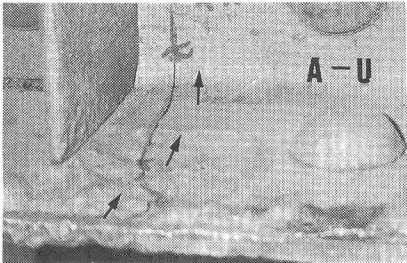


写真6 アングル水平脚の亀裂 (A-U)

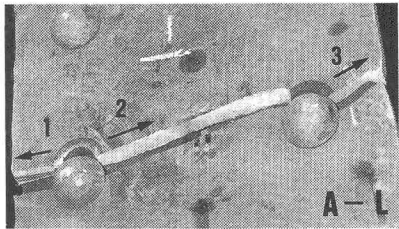


写真7 カバープレートの破断状況 (A-L)

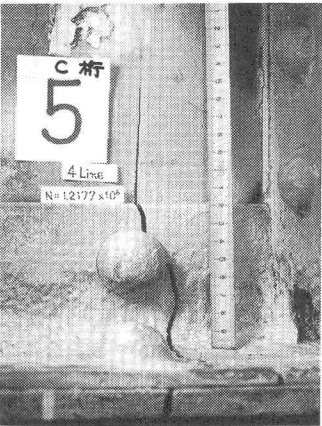


写真9 C桁の最終破断状況

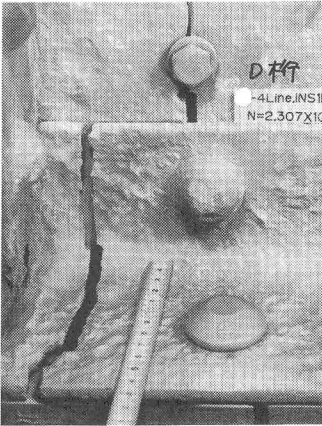


写真10 D桁の最終破断状況

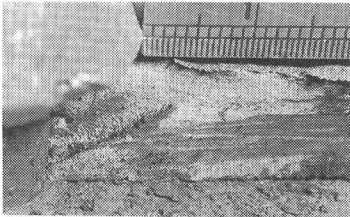


写真8 リベット孔横のノッチ

ト孔に向かって進展していった。この亀裂は、フランジ中央を過ぎた辺りから脆性破壊と思われるような破面を呈している。写真9、10はC、D桁の最終破断状況を示す。写真10のウェブにあるボルトはストップホールに挿入した亀裂進展用のボルトであるが、最終的に亀裂はこれを越えている。フランジにある高力ボルトは実験に先だってリベットと交換されたものであり、これの効果については後で述べる。

8. 疲労強度

表3に上記の疲労亀裂の発見時繰返し回数と計算応力範囲を示す。リベット孔の亀裂発生には、アングル水平脚破断による応力上昇が影響していることも考えられるが、その影響を具体的に考慮することは難しいのでここでは無視している。実断面に基づく応力は、フランジの原厚と亀裂発生断面における腐食窪みを考慮したフランジ最小厚との比を、原断面に対して算出した応力（純断面ではリベット孔を控除して算出し、総断面では隣接リベット孔の影響を考慮した式⁴⁾により求めている）に乗じて求めている。

図5、6は表3をもとに、アングル水平脚の腐食窪み（または貫通孔）からの亀裂とカバープレートリベット孔からの亀裂に対して、応力範囲と繰返し回数との関係を示したものである。直線A、Bは国鉄の非溶接継手に対する疲労設計曲線であり、Aが高力ボルト摩擦接合継手の母材、Bがリベット継手の母材に適用されている曲線である。これらの図表から、以下のことが知られる。

表3 曲げ疲労試験結果

試験桁	荷重範囲 (KN)	最終応力繰返し数 (10 ⁵ 回)	き裂位置	き裂発見時の応力繰返し数 (10 ⁵ 回)	原断面に基づく応力範囲 (Mpa)	フランジの最小板厚 (mm)	実断面に基づく応力範囲 (Mpa)
A-U	176	4.60	a	2.0	120	16.5	166
			b	2.0	121	14.0	196
			c	3.4	120	10.5	260
			d	4.3	163	19.5	190
A-L	176	7.46	a	6.5	115	13.5	194
			b	2.1	120	11.0	248
			c	2.9	121	13.5	203
			d	7.1	163	18.5	200
B-U	118	6.89	a	1.6	80	10.5	173
			b	0.1	79	7.0	256
			c	1.9	80	10.5	174
			d	1.5	60	7.5	256
			e	4.5	108	15.0	163
B-L	78	80.00	a	49.0	47	12.0	89
		98.24	a	16.2	62	13.0	109
			a'	35.0	62	11.0	128
			b	31.0	59	13.0	103
				未破断	85	22.0	88
C	490	12.18	a	12.1	134	17.5	166
			b	12.1	134	17.5	166
			c	12.1	139	17.5	172
			d	12.1	137	16.0	185
			e	11.5	141	17.0	180
			f	11.5	141	20.0	153
			g	12.1	141	18.0	170
			h	12.1	141	18.0	170
			i	12.1	141	18.0	170
			j	12.1	139	21.0	144
			a	23.0	137	18.0	165
D	490	23.07	b	23.0	114	—	—
			c	19.4	137	18.0	165
			d	22.9	141	17.5	175
			e	22.1	137	18.5	160
			f	23.0	114	—	—

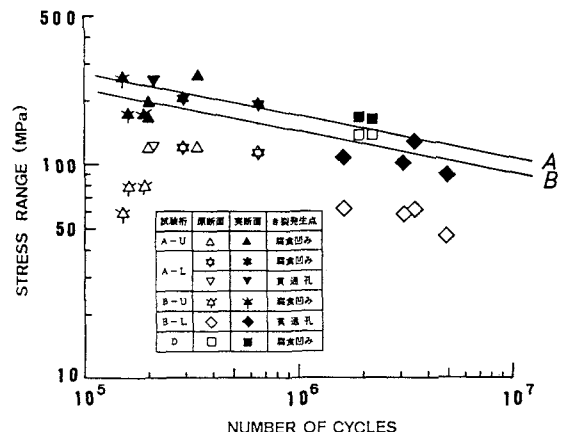


図5 疲労試験結果（腐食凹みの亀裂）

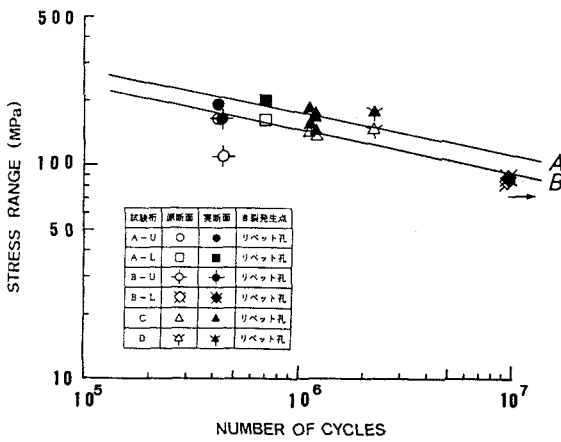


図6 疲労試験結果（リベット孔の亀裂）

- (1) 原断面に基づく応力では全てB等級以下であり腐食を考慮することが必要である。
- (2) リベット孔からの亀裂は実断面に基づく応力によればほぼB等級とみなせる。
- (3) 腐食凹みからの亀裂は断面減少を考慮にいれてもB等級より疲労強度が低く、応力集中の度合いが高い。
- (4) したがって、本桁のように腐食の程度が著しい場合は腐食ピットから亀裂が先に発生し疲労強度もリベット孔からの場合よりも低いといえよう。
- (5) 最大履歴応力の推定値が前述のように、約 500kgf/cm^2 であり、最大曲げ応力 870kgf/cm^2 に対して約1000万回まで無破断であること、またU,L桁の疲労強度に有為な差はないことから、この桁は疲労限以下の荷重しか受けておらず、累積疲労損傷を考慮する必要はないと思われる。
- (6) 下フランジ水平脚の腐食凹みから亀裂が発生しても、桁全体の剛性の低下は少なく、カバープレートとリベットが健全であれば十分な補修補強の期間がある。
- (7) C桁とD桁とで、疲労寿命を比較すると、D桁の方が2倍程度の寿命となっている。したがって、曲げ応力が支配的である区間のリベットを高力ボルトに置き換える方法は疲労強度の向上に効果があるといえる。

9. あとがき

95年を経過した(供用92年)2主桁鉄道橋の腐食状況を調査し、断面減少率を測定した。鉄道桁の腐食は枕木下と桁内側に多いこと、実断面による曲げ剛性の評価は静的曲げ載荷試験とよく合うこと、実断面で評価した応力範囲によれば疲労設計曲線Bで疲労強度を推定できること、高力ボルトによる置き換えは疲労寿命を2倍程度伸ばし得ることなどが知られた。

謝辞：本研究のシャルピー試験、顕微鏡写真撮影は本学材料工学科の高木節雄助教授のご協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1)三木他：70年間使用された鋼鉄道縦桁の疲れ強さ，東工大土木工学科研究報告，No. 37, 1987.
- 2)竹名他：経年劣化リベットプレートガーダーの疲労強度，鉄道技術研究報告，No. 1339, 1987. 2
- 3)山田他：50年供用したリベット継手の疲労試験，構造工学論文集，Vol. 36A, 1990. 3
- 4)土木学会：国鉄建造物設計標準解説，鋼鉄道橋 1983.
- 5)大塚他：老朽橋梁の最大履歴応力推定へのA E試験の適用，構造工学論文集，Vol. 37A, 1991. 3.
- 6)JSSC：疲労設計指針(案)，JSSCレポートNo. 14, 1989. 11

(1990年10月12日受付)