

50年供用したリベット継手の疲労試験

Fatigue Test of Riveted Connections Cut Out
from About 50 Years Old Highway Bridge

山田健太郎¹⁾、宇都宮紳三²⁾、神谷 保³⁾、都築正治⁴⁾

By Kentaro YAMADA, Sinzo UTSUNOMIYA, Tamotsu KAMIYA, Masaharu TSUZUKI

This paper describes fatigue tests of riveted connections cut out from a highway bridge, which had been in service for about 50 years. The specimens consist of four tensile specimens with four rivets cut out from joints of main girder and ten bending specimens cut out from lower part of cross beams. Fatigue cracks were observed at the edge of outside rivet holes in the case of tensile specimens, and at the top of rivet holes in the case of bending specimens, respectively. The present test data show that the stress category of ECCS 71 can be used for the allowable fatigue strength.

1. はじめに

昭和40年代後半以降、鋼橋の組立にリベットが使用されることはほとんどないが、それ以前は、鋼橋の組立及び現場架設の接合部にリベットが用いられてきた。近年、高度経済成長に合わせて交通量及びその重量が著しく増加し、リベット橋を含めた鋼橋全体の耐久性評価の必要が生じてきた。そのために、リベット継手の基本的な疲労強度(S-N線図)が必要になる。

しかし、現在の設計基準は、一般に新しく接合されたリベット継手に関する疲労試験データを基準に求められており、長年使用された古いリベット継手から求められたものではない。本研究では、架設後約50年経過した鋼橋のリベット継手の一部を用いて疲労試験を行い、

- (1)長期間使用されたリベット継手の疲労基準作成のためのデータ収集、
- (2)き裂発生進展状況などリベット継手の疲労特性の把握、
- (3)各国の疲労設計基準と本実験データとの比較、

を行った。

1) Ph. D. 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

2) 工修 川崎製鉄(株) (〒281 千葉市長沼町)

3) 名古屋大学大学院工学研究科地盤工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

4) 愛知県庁

2. 疲労試験

本研究で用いた引張、曲げ両疲労試験体は、約50年使用した後、老朽化による架け替えのため撤去されたT橋から切り出したものである。Table 1にT橋の諸元を示した。また、試験体に用いた材

Table 1 T橋上部工の諸元

橋種	タイドアーチ + 非合成プレートガーダー
橋長	アーチ部 3径間 プレートガーダー部 8径間
幅員	304.7m
完成年月日	昭和 9年 3月 26日
重量制限	昭和 56年 5月 1日より 9ton 昭和 58年 4月 1日より 4ton
交通量	昭和 55年 自動車 7,452台/12h (うち重量車両 1,298台) 昭和 58年 " 7,674台/12h (" 1,062台)
新橋に架替え 材質	昭和 61年 10月 24日 SS41 相当

料の引張強度、衝撃試験結果、化学成分分析結果をAppendixに示した。この橋の設計荷重は不明であるが、大正15年に道路橋示方書が改訂されており、当時の2等橋の標準であるT-8荷重で設計されたと思われる。同橋は、アーチ橋と単純非合成プレートガーダー橋からなるが、試験体はすべてプレートガーダー橋から切り出した。

2.1 引張疲労試験体

引張疲労試験体は、Fig.1に示す主桁中央添接部より、主桁一本につき2体ずつ計4体(RT-1~RT-4)ガス切断して切り出した後、ショットブラストで塗装を除去し、試験部の両側はグラインダー仕上げして作製した。継手は二面せん断型で、Fig.2に試験体の切り出し位置、Fig.3に作製した試験体を示す。

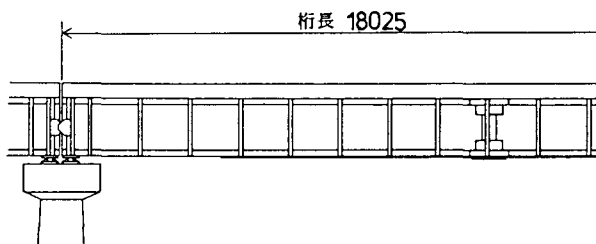


Fig.1 プレートガーダー部側面図

試験体は、プレートガーダーの中立軸付近より切り出したので、供用中の応力履歴による疲労強度への影響は小さいと考えられる。表面の状態は非常に良好で、疲労強度を低下させるほどの腐食による断面減少は認められない。リベット孔はパンチで明けられている。

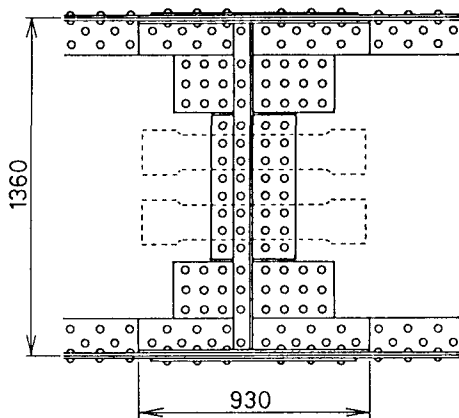


Fig.2 引張疲労試験体切り出し状況

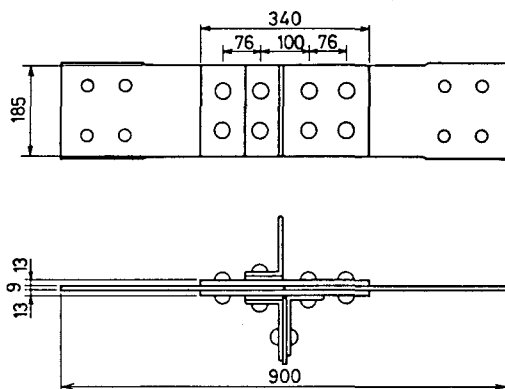


Fig.3 引張疲労試験体

2.2 曲げ疲労試験体

曲げ疲労試験体は、Fig. 4に示すように横桁下部より、下フランジ(引張り側フランジ)を含むように、2種類の試験体を計10体(RBA-1～RBA-5、RBB-1～RBB-5)切り出した。スティフナーが中央にあるものをRBAタイプ、両側にあるものをRBBタイプとしたが、実験上は特に区別していない。

作製した2種類の試験体をFig. 5に示す。試験体は横桁から切り出した後、ショットブラストで塗装を除去し、圧縮側フランジ(材質SM41)を溶接し、さらに支点部分と荷重載荷部分にはスティフナーを溶接した。試験体の表面状態は良好で、腐食による断面減少は認められない。リベット孔付近の状況は、工場リベット継手のため大変良好である。また、リベット孔はパンチで明けられ、腹板はシャワーで切断されている。

2.3 試験方法

試験機は、アムスラー型万能疲労試験機(容量:980kN、繰返し速度:4Hz、載荷波形:正弦波)を

使用した。最小荷重は、すべて29kNとした。載荷荷重をTable 2,3に示す。曲げ疲労試験の載荷方法は3点曲げで、載荷位置は支間中央である。また、一定回数毎に荷重範囲を半減し、破面にビーチマークを残すようにした。

リベット継手では、添接板やアングルの内側のリベット孔のきれつは外から見えないため、疲労試験後試験体を解体し、外から見えないきれつを探し、そのきれつの破面を露呈した後、破面観察を行った。

3. 疲労試験結果

3.1 試験体のきれつ発生進展挙動

1) 引張疲労試験体

引張疲労試験体4体のきれつは、母材の4本あるリベット列のうち、外側(荷重載荷側)2本のリベット孔辺から発生し、純断面線上に沿って側方、あるいは反対側のリベット孔に向かって進展した。これは、引張試験体内の応力の流れから考えて、外側第1列目のリベット孔付近で母材の断面の応力が最も大きくなるためと考えられる。添接板を取り除いた後の試験体RT-4の母材ときれつの状況をFig. 6に示した。

2) 曲げ疲労試験体

曲げ疲労試験体では、引張側の腹板とアングルをつなぐリベット孔辺から疲労きれつが発生した。Fig 7に、試験体RBA-1の疲労きれつ発生位置と、フランジアングルを取り除いた腹板を示した。破面を見る

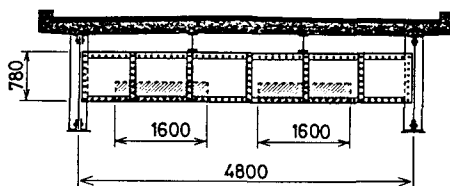


Fig. 4 曲げ疲労試験体切り出し状況

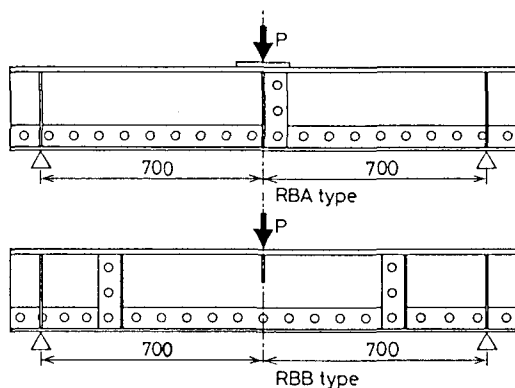


Fig. 5 曲げ疲労試験体

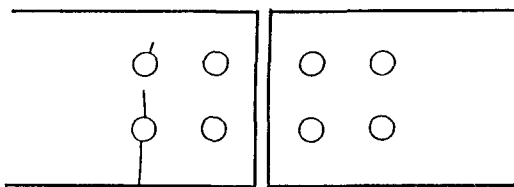


Fig. 6 RT-4のきれつ発生状況

と、フランジアングルのリベット孔から上下に発生したき裂のうち、引張縁に向かうき裂の破面は疲労破面であったが、その反対側の大半は、延性破面を示した。これは、フランジアングルのリベット孔で、曲げ応力が大きい引張縁側のリベット孔辺にき裂が発生進展し、アングルの片側が破断したところで断面減による塑性を伴った破断を生じたためと思われる。

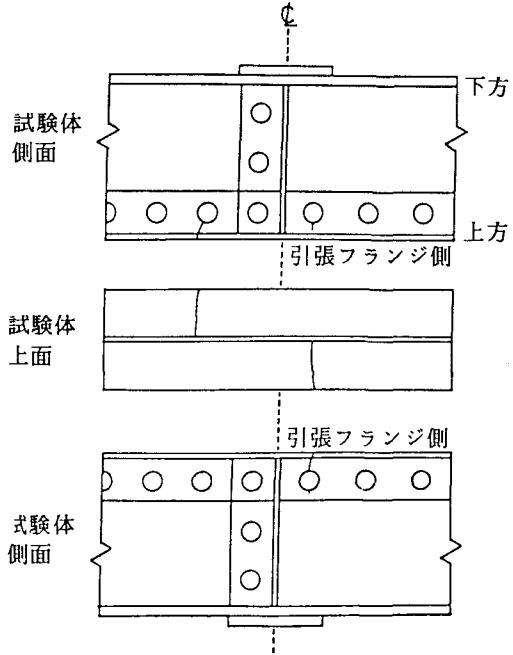
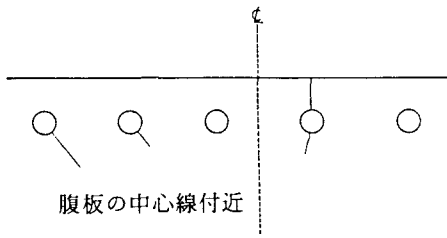


Fig. 7 RBA-1のき裂発生状況

3.2 引張疲労試験体の疲労強度

引張疲労試験の結果をTable 2に示す。応力範囲は、各試験体の断面や孔径を実測し、母材断面よりリベット孔を差し引いた純断面積により計算した。

0. R. E.¹⁾の報告書に集計されている2面せん断型のリベット継手の疲労実験結果のうち、本実験と同じくリベットが4本の場合のデータは3個ある。このデータを、本実験結果と併せてS-N線図にプロットしたものをFig. 8に示した。図中の直線は、今回の実験結果について求めた回帰直線である。この3個のデータは、70年経過した橋梁より切り出した試験体による実験から得られており、今回の実験で用いた試験体と状況がよく一致している。今回の実験結果は、200万回疲労強度が79MPa、傾き $-1/2.9$ であり、これは0. R. E. のデータとは非常によく一致している。ただし、 2×10^6 回以上のデータが不足しており、今回の回帰直線で長寿命側の疲労強度を評価できるとは言えない。

Table 2 引張疲労試験結果

供試体	断面積 (cm ²)		載荷荷重 (kN)			応力範囲 (MPa)		繰り返し数 (10 ³)
	A_a	A_n	Pmax	Pmin	ΔP	$\Delta \sigma_a$	$\Delta \sigma_n$	
RT-1	16.9	12.5	203.0	29.4	173.6	102.7	138.9	418
RT-2	16.3	12.1	207.9	29.4	178.5	109.6	147.6	289
RT-3	16.7	12.4	161.8	29.4	132.4	79.3	106.8	965
RT-4	17.6	13.0	152.0	29.4	122.6	69.7	94.4	1043

注 A_a : 母材総断面積 A_n : A_a からリベット孔分の面積を引いたもの
 $\Delta \sigma_a = \Delta P / A_a$ $\Delta \sigma_n = \Delta P / A_n$

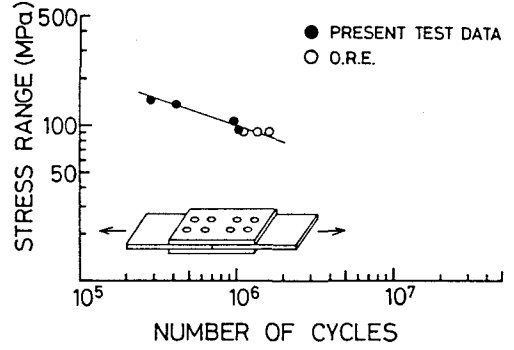


Fig. 8 引張疲労試験結果

3.3 曲げ疲労試験体の疲労強度

曲げ疲労試験の結果を、Table 3に示した。また、S-N線図にプロットしたものを、Fig. 9に示す。応力範囲は、試験体断面の曲げ応力分布(三角形分布)を求め、リベット孔中心位置に発生する応力範囲である。このとき、断面の諸定数は、引張疲労試験体と同様、試験体を実測して求めた値をもとにリベット孔を差し引いた純断面について計算した。実験結果の回帰直線を求めると、200万回疲労強度は97.2MPa、傾きは $-1/4.2$ である。

Table 3で、リベット孔から発生したきれつが、リベットの頭を越えて進展して、肉眼で見つかったときの繰返し数 N_i を初期きれつとして示す。これは9ケースあるが、いずれも N_i と破断時の繰返し数 N の差は小さい。

今回の実験結果を、他のリベットプレートガーダーの疲労試験結果と共にS-N線図にプロットしたものを、Fig. 10に示す。三木ら²⁾は、70年間使用され腐食したトラス橋の縦桁の一部を用いて、曲げ疲労実験を行った。腐食の程度はかなり激しく、部分的には板厚が1/2程度になっている箇所もある。この実験結果は、腐食前の原断面で求めた応力と、腐食後の実断面で求めた応力の両方のデータが記載されている。原断面応力でプロットしたものと比較すると、疲労強度は今回の実験の方がかなり高いが、実断面応力で

Table 3 曲げ疲労試験結果

供試体	きれつ 番号	位置 (cm)	破断 状況	最大荷重 (kN)	最小荷重 (kN)	荷重範囲 (kN)	応力範囲 (MPa)	初期きれつ $N_i (10^3)$	繰返し数 $N (10^3)$
RBA-1	F①	12.1	F	281.5	29.4	252.0	82.1	不明	2996
	F②	5.0	N				92.2	不明	未破断
	F③	5.0	F				92.2	不明	2996
RBA-2	F①	14.0	F	331.5	29.4	302.1	95.2	不明	降伏
	F②	14.0	F				95.2	1285	1420
RBA-3	F①	5.0	F	382.5	29.4	353.1	129.1	681	706
	F②	5.0	N				129.1	不明	降伏
RBA-4	F①	12.1	F	284.4	29.4	255.0	83.1	3245	3331
	F②	12.1	F				83.1	不明	3331
RBA-5	-	-	N	245.2	29.4	215.8	83.8	-	>16824
RBB-1	F①	8.0	N	331.5	29.4	302.1	105.3	不明	降伏
	F②	8.0	F				105.3	1354	1406
RBB-2	F①	8.0	F	382.5	29.4	353.1	123.0	603	633
	F②	0.0	N				138.9	不明	未破断
	F③	8.0	N				123.0	不明	未破断
	F④	8.0	N				123.0	不明	降伏
RBB-3	F①	8.0	N	382.5	29.4	353.1	123.0	不明	未破断
	F②	16.0	N				107.2	不明	降伏
	F③	8.0	F				123.0	694	708
RBB-4	F①	8.0	N	284.4	29.4	255.0	88.9	不明	未破断
	F②	0.0	F				100.3	2530	2744
	F③	0.0	N				100.3	不明	未破断
RBB-5	F①	8.0	F	245.2	29.4	215.8	75.2	6885	6890
	F②	8.0	F				75.2	6669	6889

注 “位置”は、支間中央からの距離を示す

“F”は、フランジアングルのリベット孔より上方が完全に破断

“N”は、フランジアングルのリベット孔より上方が未破断

“降伏”は、フランジ端まで疲労きれつが進展せず、途中で降伏したもの

プロットしたものと比較すると、ほぼ同じである。Fisher³⁾は、やはり腐食したリベットプレートガーダーを用いて疲労試験を行ったが、この実験値は、応力範囲が60MPa前後、繰返し数は1000万回以上で、いわゆる長寿命域の実験である。この実験結果と本実験値のS-N線図を延長して比較すると、Fisherらの実験結果の方が強度が高い。Brühwiler⁴⁾は、リベットで取り付けられたカバープレートを持つ軟鋼製の圧延桁と、鋅鉄製のリベットプレートガーダー、鋅鉄製のひし形トラスを用いて疲労実験を行った。試験体形状から考えて、鋅鉄製のリベットプレートガーダーの実験結果と比較すると、疲労強度はほぼ同じである。竹名⁵⁾の行った経年70年の鉄道プレートガーダー橋の実験結果も疲労強度はほぼ同じである。

図中にはRUN-OUTを除く全てのデータに対する50%および95%破壊確率線を実線で示した。実験データの回帰直線の傾きは $-1/3.57$ 、95%破壊確率線の200万回疲労強度は75.5MPaであった。また、ECCS疲労設計指針⁶⁾は、溶接継手の疲労設計基準であるが、参考として、ECCS疲労設計指針の継手分類(71)を破線で示した。実験データの下限値は、ECCSの継手分類(71)とよく似た疲労強度となっており、この種の継手では、ECCSの継手分類(71)が許容応力度として使えるものと思われる。なお、実際の橋梁の主桁で一般に発生する応力範囲は50MPa以下の場合が多く、Fig. 10のS-N線図に示されるようにこの領域では破断しないデータもあり、疲労寿命評価に対しては若干安全側に評価することになるものと思われる。

3.4 設計S-N線図との比較

さらに、各国で用いられている代表的な設計基準のうち、BS5400⁷⁾、AASHTO⁸⁾の各設計基準の中で示されている設計S-N線図と、今回の引張、曲げの両疲労試験結果とを、Fig. 11に示して比較した。これらより、以下のことがいえる。

引張疲労試験結果は、BS5400の継手分類(D)よりも強度が低いが、AASHTOの継手分類(D)よりは高いことがわかる。また、実験値によるS-N曲線の傾きは、 $-1/2.9$ であり、2本のS-N線図とはほぼ平行である。AASHTO(D)の200万回疲労強度は69MPa、傾きは $-1/3$ であり、他の実験を含めた実験値のばらつきの下限值と一致している。

曲げ疲労試験で得られた疲労強度は、BS54

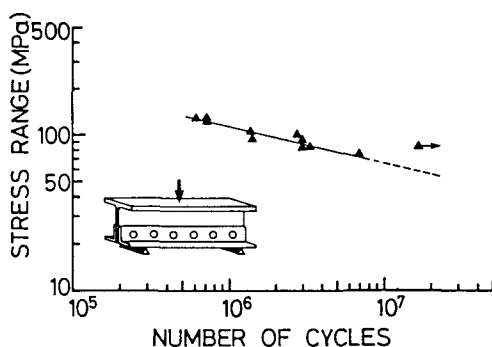


Fig. 9 曲げ疲労試験結果

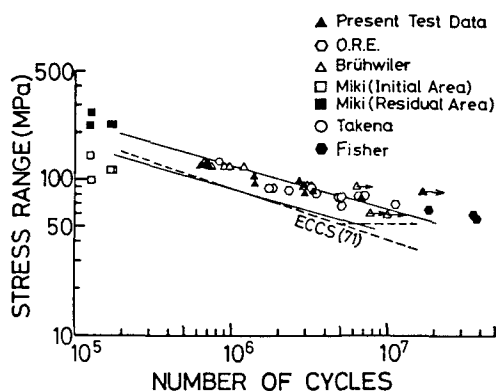


Fig. 10 他の実験結果との比較

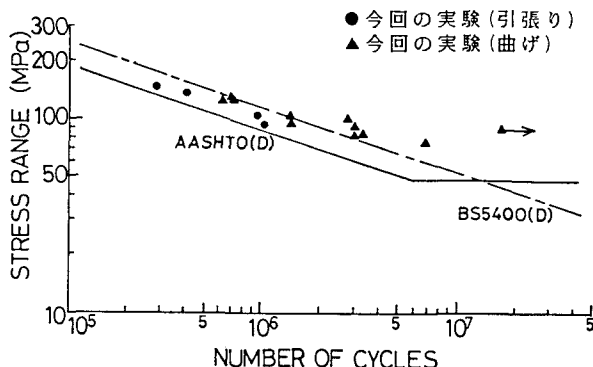


Fig. 11 各国の設計S-N線図との比較

00(D)及びAASHTO(D)より高いことがわかる。一方、実験値によるS-N曲線の傾きは、 $-1/4.2$ であり、どの設計指針とも適合しない。

したがってこれらを考慮すると、リベットプレートガーダーの疲労強度設計に関しては、AASHTOの継手分類(D)が比較的安全側の設計S-N線図を与えていることがわかる。

4. 結論

本研究では、50年供用した道路橋から切り出したリベット継手について疲労試験を行い、疲労基準作成のためのデータ収集、疲労特性の把握、各国の疲労設計基準との比較を行った。

本研究の結果をまとめると、以下のようになる。

①引張疲労試験体4体による疲労試験結果は、平均S-N線図の傾きが $-1/2.9$ 、200万回疲労強度が79MPaであった。また、10体の曲げ疲労試験を行った結果では、平均S-N線図の傾きが $-1/4.2$ 、200万回疲労強度が97.2MPaであった。

②引張疲労試験体のきれつは、純断面応力の最も高い断面のリベット孔辺で発生し、純断面線上に沿って側方、または反対側のリベット孔に向かって進展した。また、曲げ疲労試験体では、試験体中央部に近い引張縁側のリベット孔辺で発生し、試験体中心線に向かって進展した。

③今回や過去に行われたリベットプレートガーダーの疲労実験データをまとめた結果、その95%破壊確率線は、傾き $-1/3.57$ 、200万回疲労強度は75.5MPaとなり、既存の設計S-N線図の中では、ECCSの継手分類(71)に近くなった。長寿命側で行われた実験データに破壊しないデータのあること、実際の橋梁の主桁で発生する応力範囲が、ほとんど50MPa以下であることを考えると、この設計S-N線図は安全側の設計を与えると考えられる。

④現在用いられている設計基準の中では、AASHTOの継手分類(D)がリベットの疲労に対して比較的安全側の設計S-N線図を与えている。

今回の実験の目的の一つに、老朽化を示すパラメータとして腐食の要因を取り上げることがあったが、用いた供試体の腐食はほとんどなかった。竹名らが行った実験結果では、フランジアングルが腐食によって半分程度に減少してもプレートガーダー全体の疲労強度には影響ないとされている。しかし、短寿命側のデータではあるが、腐食による断面減少により疲労強度が低下した三木らの実験結果もあり、腐食の影響についてはさらに検討を続ける必要があると思われる。また、今回の実験では、リベット孔はパンチ孔、腹板の端面はシャーのため平滑ではなかったが、これも疲労強度を低下させる要因とはならなかった。これは、Fisherらが示した、リベット孔の削孔方法が疲労強度にあまり影響しないことと一致している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、供試体の提供、製作などでは愛知県土木部、トビー工業豊橋製作所、中日本コンサルタント設計部の方々の協力を得た。また、実験を進める際には名城大学土木工学科の近藤明雅助教授、および長谷川晃、水船一馬両氏の協力を得た。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Office for Research and Experiments of the International Union of Railways:Statistical Analysis of Fatigue on Steel Riveted Connections,Utrecht, 1986.

- 2) 三木千寿ほか：70年間使用された鋼鉄道橋縦桁の疲れ強さ、東工大土木工学科研究室報告No. 37、1987.
- 3) Out, J. M. M. , Fisher, J. W. and Yen, B. T. : Fatigue Strength of Weathered and Deteriorated Riveted Members, Technical Report 483(84)、Fritz Engineering Laboratory, 1984. 10.
- 4) Brühwiler, E. and Hirt, M. A. (三ツ木ほか訳)：リベット橋部材の疲れ挙動、橋梁と基礎88-10、pp. 32-38、1988.
- 5) 竹名興英ほか：経年劣化リベットプレートガーダーの疲労強度、鉄道技術研究所報告、No. 1339(施設編588号)、1987.
- 6) ECCS-第6技術委員会「疲労」：No. 43、Recommendations For the Fatigue Design of Steel Structures, 1985.
- 7) British Standards Institution : BS5400 ,Steel concrete and composite bridges, Part 10. Code of Practice for Fatigue, 1980.
- 8) The American Association of State Highway and Transportation Officials: Standard Specification for Highway Bridges, 1977.
- 9) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説(鋼鉄道橋、鋼とコンクリートの合成鉄道橋)、1983.
- 10) 土木学会：鋼鉄道橋設計標準解説、1970.

Appendix

リベット継手の引張疲労試験体と曲げ疲労試験体より切り出した試験片について静的引張試験、衝撃試験と化学成分分析を行った。

1. 静的引張試験

静的引張試験は、試験片を横桁の腹板とフランジアングルからそれぞれ3体ずつ計6体切り出して行った。試験片の種類はJIS1A試験片とした。結果をTable A1に示す。試験片強度は、SS41材に相当する。

Table A1 静的引張試験結果

	横桁腹板			横桁フランジアングル		
降伏点 (MPa)	336.4	275.6	368.7	284.4	291.3	360.9
引張強さ (MPa)	464.9	425.6	491.3	380.5	474.7	582.5

2. 衝撃試験

主桁の腹板と、横桁の腹板とフランジアングルから切り出した試験片について、シャルピー試験を行った。いずれの試験片についても、試験片温度を+15℃、0℃、-20℃で3体ずつ、計9体試験を行った。試験片形状は、JISで定める4号試験片(Vノッチ)に準じたものとした。本試験の部材は、いずれも板厚が10mm未満であり、試験片断面は7.5×10mmとした。Fig. A1に試験結果を示す。

3. 化学成分分析

主桁腹板、横桁腹板、横桁フランジアングルの材料の化学成分分析を行った。その結果をTable A2に示す。

Table A2 鋼材の化学成分分析結果

試 験 片	化 学 成 分 (wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Ni	Cr	Al	Mo
主 桁 腹 板	0.17	0.02	0.42	0.017	0.013	0.04	t r	0.03	0.03	0.007	t r
横 桁 腹 板	0.17	0.02	0.53	0.023	0.035	0.15	0.01	0.04	0.03	0.007	t r
横 桁 フランジアングル	0.16	0.02	0.32	0.011	0.017	0.10	t r	0.03	0.03	0.005	t r

注 tr:分析器の分解能(0.005%)未満の量

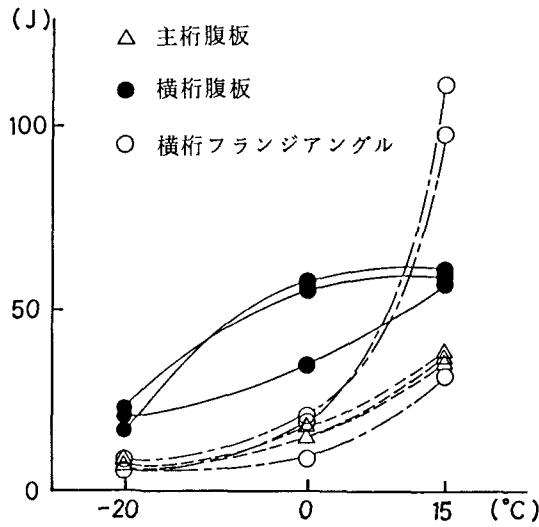


Fig. A1 シャルピー試験結果

(1989年10月2日受付)