

## 腐食鋼材の疲労強度ならびに 古材に設けた高力ボルト継手に関する文献調査

佐々木 秀弥<sup>1)</sup>

老朽化した橋梁を適正に評価することは、安全性と経済性から重要な問題である。経年で腐食した既存橋梁の耐用性や寿命を推定すること、また、損傷した橋梁の補修補強の設計施工方法を確立するためには、腐食した鋼材の機械的な試験性状を把握しておく必要がある。

老朽した橋梁の疲労強度の評価や、腐食した古い鋼材に設けた高力ボルト継手の研究開発は、大きな課題となっている。

本報告では、これらの事項についての問題点を解明する目的により、腐食した鋼材の既往の試験に関する文献を収集し、調査した結果をまとめ、既存橋梁の維持補修の参考となるデータを紹介したものである。

### ま え が き

鋼橋は自然環境の中に設置され、条件が不変であれば半永久的に使用できることが特徴である。

また、作用する外力は桁自重などの死荷重を除けば、自動車や列車などの経時変動する活荷重が主要のものである。したがって、繰り返し荷重による疲労損傷は、腐食を除けば唯一の損傷形態でもある。

近年の交通量ならびに重量車の増加により、道路橋にも疲労損傷の発生が報告されている。その発生箇所は鉄道橋と類似しており、桁支点部付近や横構取付補剛材付近などである。

橋梁の供用開始後に想定される損傷には、疲労亀裂発生、腐食、欠食、衝突による過度な変形などがある。

このような損傷を受けた既存橋梁の耐用性・寿命を推定することや、老朽化した橋梁を適正に評価すること、また補修、補強の設計方法を確立することは、安全性と経済性から重要な問題となっている。

実際の橋梁では疲労が問題となる頃には、普通少くとも部分的に腐食が相当進行している可能性がある。表面や材端縁の滑らかな鋼板や、溶接継手でも

余盛を除き平滑にグラインダー仕上げしたものは疲労強度は高いが、これが錆びて腐食すると疲労強度は相当に低下する可能性がある。これに対し、初めから切欠き効果のある継手、例えば応力と直角方向にガセットプレートをすみ肉溶接で取付けたディテールでは、もともと疲労強度は低いので、これが錆びて腐食し、表面が少し粗になってもあまり疲労強度に影響を与えないものもある。

腐食した鋼材に対する疲労試験の実験例は少ないようであるが、鉄道橋で行った試験を主体とし、建設省土木研究所の計画で行われた調査結果も紹介して、腐食鋼材による疲労強度について述べるものである。

また、損傷した橋梁の補修、補強、あるいは古桁の改造設計を行う場合に問題となるのが、腐食した鋼材に設ける高力ボルト継手の接触面の摩擦係数である。接触面の表面処理をどのような方法で処理し、安定した摩擦係数を確保できるかが問題であり、腐食した鋼材に設けたボルト継手の問題点を解明するために行った既往のすべり試験結果をまとめ、報告するものである。

1) 技術士 東京橋梁技術部長

1. 腐食した鋼材と疲労強度

鋼橋が長年の使用に耐えても、塗膜の劣化によって錆が発生し腐食が進行した場合、強度的には次のようなことが考えられる。

- ① 腐食による部材断面の減量が大きければ、当然単位断面積当りの応力が高くなるのでそれだけ安全度が低下する。

古い鉄桁の健全度判定に関して、従来の方法では、断面積の影響を静的な許容応力度に基づいて計算しているが、疲労強度の上からも、断面が減少して応力度が高まることは寿命を縮める原因となるものである。

- ② 鋼材表面が粗になることにより、局部的に応力集中が起り、そこから疲労亀裂が発生し易くなる。

- ③ その他、鋼材の腐食疲労の現象が生じてくる。腐食疲労とは、腐食環境下において繰返し応力が作用する場合、腐食作用と疲労作用との相乗効果により疲労強度が低下する現象であり、大気も腐食性環境の一種である。

橋梁など活荷重を繰返し受ける鋼構造物の疲労強度は、ほとんど各種試験体の空気中での疲労実験結果をもとに評価されているが、湿潤な腐食環境下においては、鋼材表面に生ずる腐食孔や水素脆化などの影響により、その疲労強度は大幅に低下することが知られている。

腐食性の強い気体や液体の中で繰返し荷重を加えると、空気中の場合より疲労強度が著しく低下することが西村、坂野、石田の実験<sup>9)</sup>によって明らかにされている。

表-1 天竜川橋梁についての試験要領と疲労強度

記号	腐食状態	採取位置	本数	疲労強度※)
(プレート試験)				
P-A	腐食が特に甚だしい板	縦桁下フランジ	7	17(167)
P-B	〃	トラス下横構	6	14(137)
P-C	幾分腐食している板	縦桁上横構	7	17(167)
P-D	幾分腐食した銕つき板	トラス下横構	5	18(167)
P-E	ほとんど腐食のない板	縦桁腹板	5	21(206)
(桁試験)				
B	腐食が特に甚だしい桁	縦桁下フランジ	7	10(98)

※) 残存断面に基づいた200万回疲労強度で重力単位(kgf/mm<sup>2</sup>)とSI単位(MPa)で示す。

鋼橋は、自然環境の中で野外に雨ざらしであり、防錆塗装を施しているものの、多湿な我が国では構造物の各部で常時乾湿状態を繰返し、塗膜の老化とともに厳しい腐食作用を受けていることになる。現在我が国の鋼橋の設計に適用される疲労条項には、腐食疲労に対する配慮がほとんどなされていない。防錆対策との関連で考える必要があるが、腐食環境下における鋼橋の耐久性については、腐食による断面減少に基づく応力増もさることながら、疲労強度の低下についても十分な認識をもって対処する必要があると考えられる。

2. 既往の腐食鋼材の疲労試験

2.1 天竜川橋梁(鉄道橋)の試験

(1) 試験材

東海道本線・天竜川橋梁(1913年架設のトラス橋、経年66年)の改造により発生した縦桁の部材から試験片を採取し、疲労試験を行った<sup>2), 3)</sup>。

試験材を採った位置や腐食の程度、本数などを表-1、試験体の形状を図-1(a)、(b)、(c)に示す。

腐食の特に甚だしい試験片は縦桁下フランジ(PA)とトラス下横構(PB)からとし、腐食程度の少ない試験片は縦桁上横構(PC)と縦桁腹板(PE)からそれぞれ採取し、腐食程度の差が疲労強度に及ぼす影響を調べるものとした。

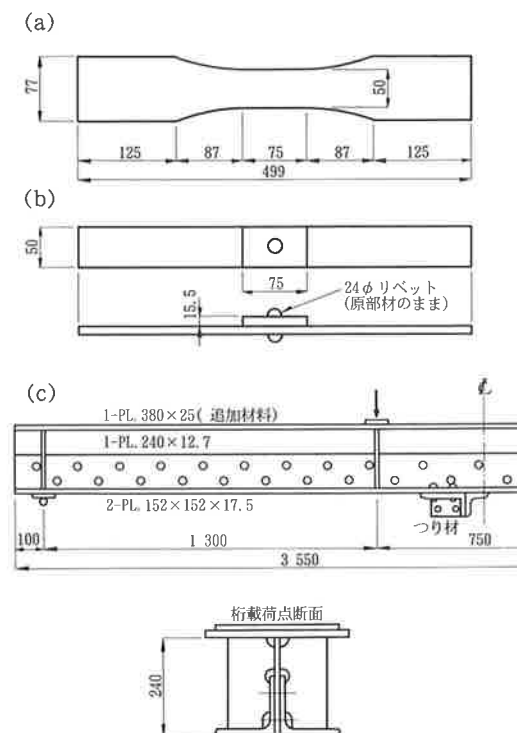


図-1 天竜川橋梁から採取した各種試験体

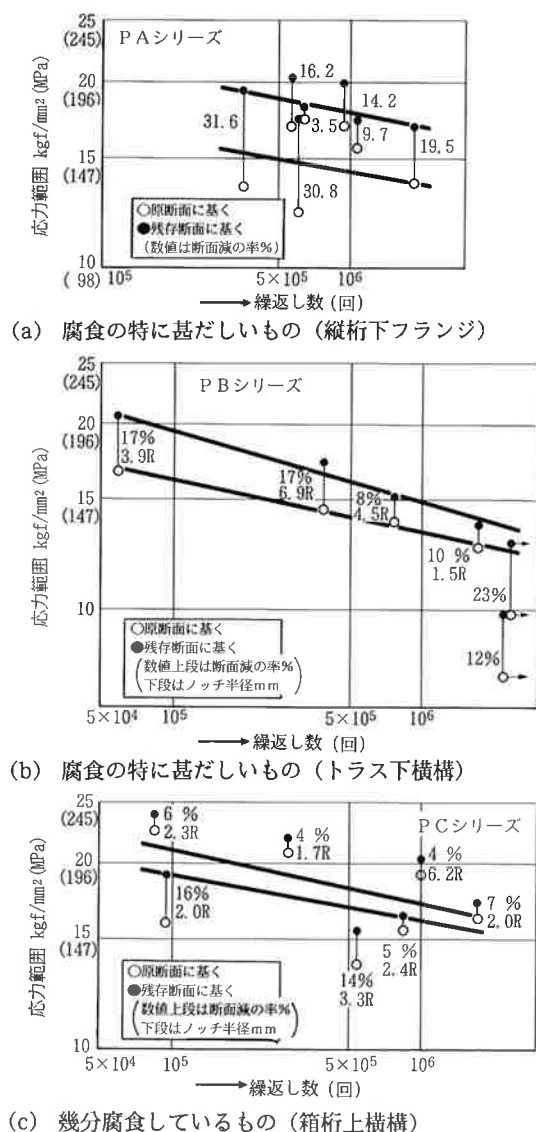
桁試験の試験材については縦桁の下フランジ部を切り出し、これに新材で上フランジをつけて高さの低い桁とし、比較的小さい荷重で破壊するようにした。

疲労試験に先立ち、比較のために静的な強度試験を行ったが、腐食のままであると断面積の測定が困難なので、表面を仕上げてJISZ2201により試験した。結果は表-2のとおりで、現行のSS41材より低いものもある。

表-2 表面仕上げ材の機械的性質

部 材 名	降 伏 点	引 張 強 度	伸 び (%)
トラス下横構	24.2 (237.2)	37.6 (368.5)	21
縦桁上横構	32.8 (321.4)	43.3 (424.3)	16

注) 上段は重力単位(kgf/mm<sup>2</sup>)  
下段はSI単位(MPa)



(2) 疲労試験結果および考察

疲労試験は、アムスラー型50t万能疲労試験機およびローゼンハウゼン60/40t疲労試験機により、下限応力1.2kgf/mm<sup>2</sup>(1.8MPa)の片振りで行った。

試験で得られた結果を図-2(a)~(f)に示す。腐食により断面減少の甚しいものは、応力度をどのように表現するかに問題があった。PDシリーズおよびPEシリーズのように断面減少のほとんどないものについては、原断面の面積で除して表わした。またPBシリーズおよびPCシリーズでは断面減少が目立つので、腐食する前の公称面積で表わす以外に、腐食後の板厚の最大と最小の平均値に基づく断面積で表わし、更に疲労亀裂始点の腐食による凹みの半径を併記した。PAシリーズでは破断面の実測面積で除して表わした。

Bシリーズの桁試験では、腐食する前の断面に基づいて計算した下フランジ断面の応力で表わしたも

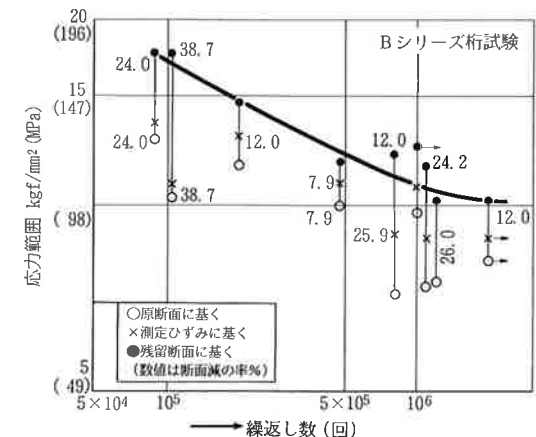
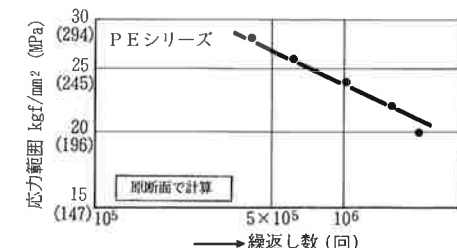
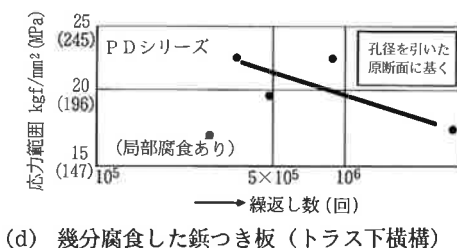


図-2 実橋による腐食材のS-N線図

のと、ストレインゲージによって実測した応力度と、さらに破断部における下フランジの腐食による断面減少率に基づいて計算応力を増加したものを示した。

疲労による亀裂の発生点は、いずれも腐食による大きな凹部であった(写真-1、2参照)。孔あき材試験体[図-1(b)リベット締め部材]は、リベット孔から亀裂が発生した。桁試験体の場合は、写真-3に示すように下フランジ縁から亀裂が発生している。



写真-1 試験片PCシリーズ  
疲労破壊状況の一例

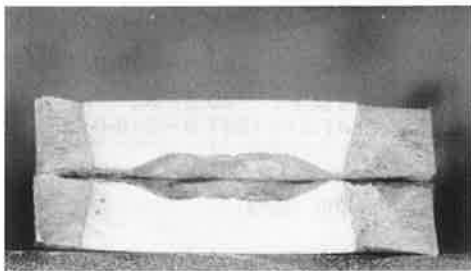


写真-2 試験片PBシリーズ  
疲労破面の一例



写真-3 試験体Bシリーズ  
下フランジの疲労破壊状況の例

以上の結果を見ると、データに相当のバラツキがあるが、この原因として

- ① 腐食による表面状態は、目視のみでは判定できない微妙な差がある。
- ② 応力度を表すために基本となる断面積の考え方の適否(破断した断面積とするのが適当か)。

などであると思われる。

また、特に桁試験体の疲労強度の値は低いが、亀裂の発生した位置から見て、下フランジの横構吊材連結山形鋼による応力集中が大きかった可能性があるためのもと思われる。

## 2. 2 鉄道橋定規桁の試験

### (1) 試験材

本試験に用いた古桁は、東北本線本宮～杉田間の上路プレートガーダー(1931年架設、経年54年、支間40ft [12.9m]、E-33荷重 [KS-15相当])で、図-3に試験片採取位置を、図-4に試験片の形状を示す。これらの試験片で、列車による繰返し荷重を受けた古桁の疲労試験を行った<sup>9)</sup>。その試験シリーズを表-3に示す。

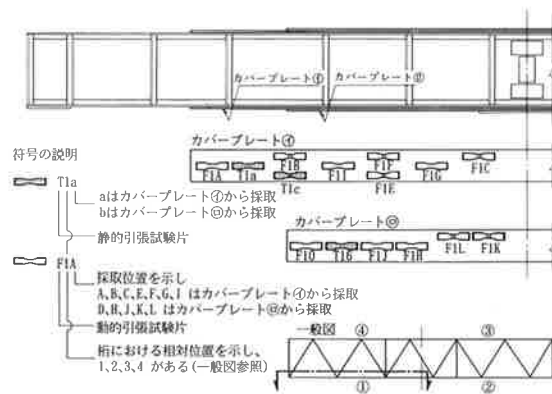


図-3 試験片採取位置

表-3 試験シリーズと疲労強度

試験片 No.	試験の種類	表面状態	形状	疲労強度	
				屈服応力	200万回応力 %
1	静的引張試験	平滑材 表面研磨せず	—	—	—
2		孔あき材 表面研磨	古いリベット孔そのまま 孔形状良	—	—
3	疲労試験	平滑材 表面研磨せず	—	—	19.9 (195.0) 74
4			—	—	27.0 (264.6) 100
5		孔あき	表面研磨せず	古いリベット孔そのまま 孔形状良、不良混合	小 13.0 (127.4) 48
6			表面研磨	古いリベット孔そのまま 孔形状良	大 14.8 (145.0) 55
7				古いリベット孔そのまま 孔形状不良	大 10.4 (101.9) 38
7		表面研磨せず	古いリベット孔リレーンギ 孔形状良	小 19.3 (189.1) 71	
7				大 11.9 (116.6) 44	
8		平滑材 表面研磨	平滑材に新孔をあける 孔形状良	小 12.5 (122.5) 46	
9			古いリベット孔そのまま 孔形状良	小 17.4 (170.5) 64	

注) 応力の上段は重力単位 (kgf/mm<sup>2</sup>)、下段はSI単位 (MPa)、%は試験No.4の疲労強度を100%として比較した。

表-4 静的引張試験結果

No	上 降 伏 点		引 張 強 さ		伸 び		破断位置	ヤング係数 × 10 <sup>4</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> ) (MPa)
	荷重 (t) (kN)	$\alpha_v$ (kgf/mm <sup>2</sup> ) (MPa)	荷重 (t) (kN)	$\sigma_r$ (kgf/mm <sup>2</sup> ) (MPa)	$\Delta \ell$ (mm)	%		
T1a	10.40 (101.9)	27 (265)	17.25 (169.1)	45 (441)	46.6	23	A	2.00 (196)
T2a	10.50 (102.9)	27 (265)	17.95 (175.9)	47 (461)	53.5	27	A	1.98 (194)
T3a	9.65 (94.6)	26 (255)	16.75 (164.2)	44 (431)	48.5	24	A	2.00 (196)
T4a	9.70 (95.1)	26 (255)	16.75 (164.2)	45 (441)	43.5	22	A	2.00 (196)
T1b	10.90 (106.8)	29 (284)	18.05 (176.9)	47 (461)	50.9	25	A	1.99 (195)
T2b	10.25 (100.5)	28 (274)	16.45 (161.2)	44 (431)	58.8	29	A	2.01 (197)
T3b	10.55 (103.4)	27 (265)	17.05 (167.1)	44 (431)	52.0	26	A	2.00 (196)
T4b	10.85 (106.3)	29 (284)	17.85 (174.9)	48 (470)	49.8	25	A	1.98 (194)
平均値	-	27.37 (268.2)	-	45.5 (445.9)	-	25.1	-	1.995 (196)

注) 上段は重力単位、下断はSI単位

表-5 鋼材の機械的性質の比較

記 号	降 伏 点	引 張 強 さ	伸 び (%)
本試験の平均	27.37 (268.2)	45.5 (445.9)	25.1
SS41	25 以上 (245.0)	41~52 (401.8~509.6)	17 以上
A-36	25.2 以上 (247.0)	40.6~56 (397.9~548.8)	

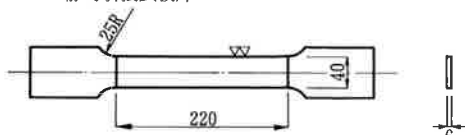
注) 上段は重力単位(kgf/mm<sup>2</sup>)  
下段はSI単位(MPa)

る試験結果は、各試験シリーズ (No.5~No.9) 毎に分類して、図-5 (a)~(e) に示す。

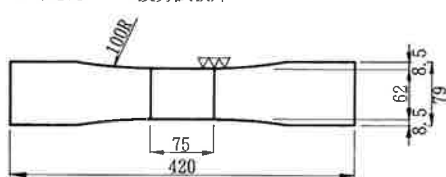
この結果から孔あき材では、表面の状態や履歴応力の大小の差異による疲労強度の差は明確につかめなかった。この理由は、古孔をそのままにして用いた試験片の試験シリーズの結果が、孔の状態の差異によってバラツキが大きかったためであると思われる。なお、表-3 に古材による試験の200万回強度を示す。

腐食による疲労強度の低下は、古桁の疲労を考える場合、その表面の腐食の程度によって大きく左右されることは、2.1の項で述べたとおりである。本試験でも図-6に示すように、平滑材で表面仕上げのあるNo.4シリーズ、同種の既報告の値<sup>9)</sup> および仕上げのないNo.3シリーズで比較した結果、No.3シリーズに2割程度の低下がみられた。しかし、孔あき材のNo.7シリーズ (表面仕上げなし、リーマ通し孔) とNo.8シリーズ (表面研磨、ドリルで新孔あけ) との比較では、No.7シリーズでパンチ孔の傷が残っているものは低い値がでて、結果的にバラツキが大きくなり、明確な有意差は認められなかった。

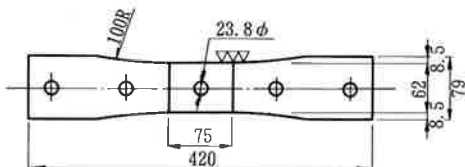
NO.1 静的引張試験片



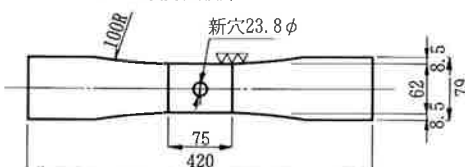
NO.3およびNO.4 疲労試験片



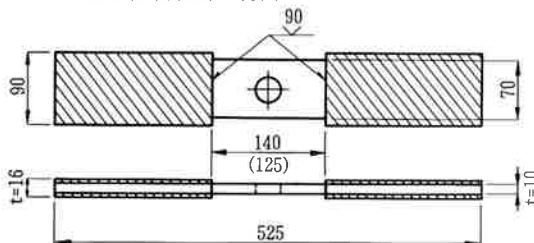
NO.5,6および7 疲労試験片



NO.8およびNO.9 疲労試験片



NO.9 試験片の加工方法



溶接後斜線部をシェーバで削る  
( ) 内の数字は試験片F~C'の場合

図-4 試験片の形状

疲労試験については、疲労強度の低下に対する腐食の影響を知るため、平滑材で表面仕上げをしたもの (No.4 試験片) と、しないもの (No.3 試験片) について比較する。また、試験片母材の表面仕上げは湿式ベルト研磨機 (240 # 研磨布使用) で研磨し、表面あらさは18S (18 μ相当) 程度になるようにした。

試験材の機械的性質を知るため、孔のないNo.1試験片によって静的引張試験を行い、その結果を表-4に示す。また、表-5に他規格との比較のため、本試験の平均値および米国ASTM規格A-36とJIS規格SS41材の値を示す。

(2) 疲労試験結果および考察

疲労試験はローゼンハウゼン型試験機 (動的最大能力40t) を使用し、下限応力1.2kgf/mm<sup>2</sup> (1.8MPa) の片振りで行なった。孔あき試験片に対す

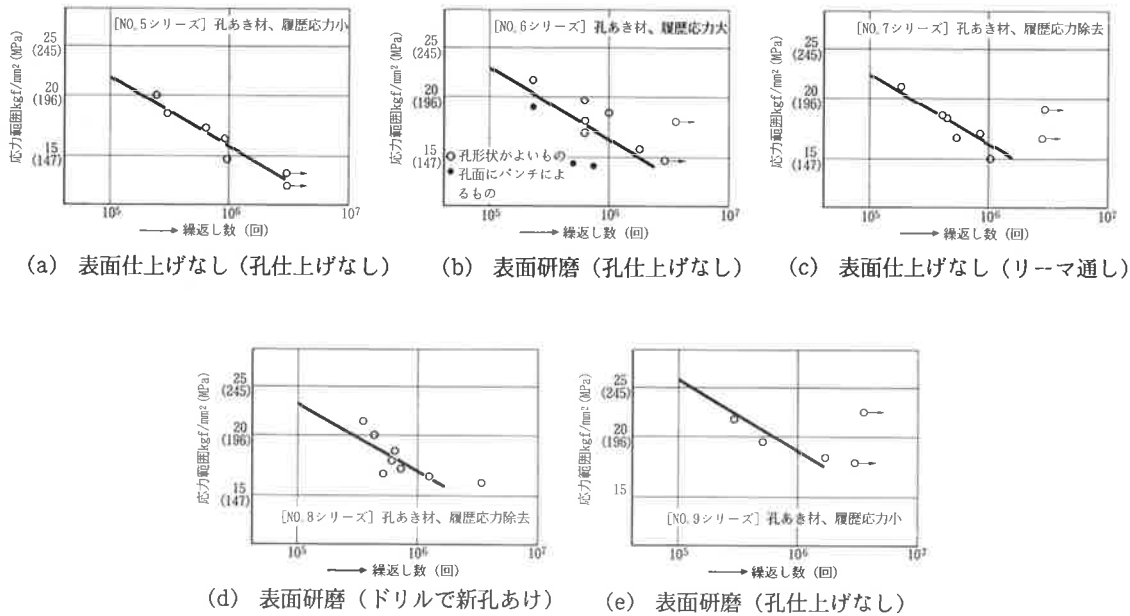


図-5 腐食材の孔あき試験片のS-N線図

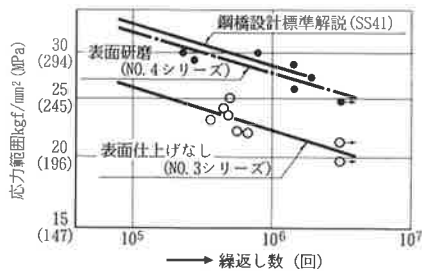


図-6 表面仕上げの有無による差

(2) 疲労試験結果

前記のような状態までに腐食した古桁の疲労試験結果を図-8に示す。このデータは「建造物の保守並びに健全度診断法に関する研究報告書（施設局、昭和36年3月）」から抜粋し、再録したものであるが、2.1でのべた天竜川橋梁の場合よりもさらに低い値を示している。

日野川橋梁の試験片は、腐食による断面減少がD型試験片より少なかったため、疲労強度はE型とD型の中間にあり、100万回強度は15kgf/mm<sup>2</sup> (147MPa)程度と考えられる。

2. 3 日野川橋梁（鉄道橋）他の試験

(1) 試験材

山陰線日野川橋梁（1902年架設）の上路プレートガーダー（ポータル型）から試験材を採取して、腐食材の疲労試験を行った<sup>6)</sup>。

図-7に示す試験片は、上カバープレートから採取したものである。これは枕木下面の影響で相当に腐食しており、原部材厚1/2in (12.7mm) に対し6~8mm程度に腐食したものである。他の橋梁では、さらに上フランジの腐食が甚しく、残存厚さは2~4mm程度のものもあった。

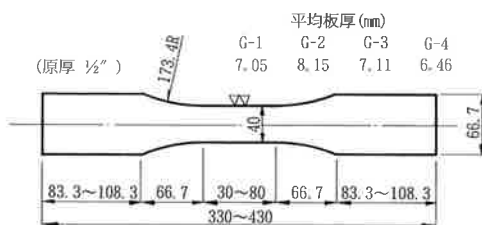


図-7 日野川橋梁試験片の形状

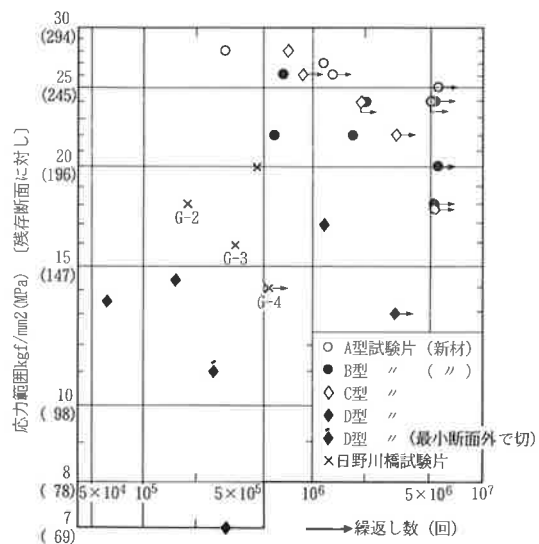


図-8 実橋腐食材の疲労強度

## 2. 4 建設省土木研究所・耐候性鋼材の試験

### (1) 試験条件

この調査は、本州四国連絡橋の調査等の一環として、耐候性鋼材を長期にわたり大気曝露し、その腐食量、引張強度および疲労強度を試験し、普通鋼材の機械的性質と比較することを目的として行なわれた調査<sup>7)</sup>であり、試験の条件は次のとおりである。

- ① 鋼種：SM50, SMA50, SM58 および SMA58 の4種類 (JIS規格相当品で各々7社で製造)
- ② 種類：母材および突合せ溶接で余盛を削成して仕上げたものの2種類 (厚さ19mm、無塗装)
- ③ 腐食環境：神戸、下関および千葉の3地点で大気中の自然曝露
- ④ 試験期間：0年、2年、および4年
- ⑤ 荷重条件：下限応力2kgf/mm<sup>2</sup> (20MPa) の片振り

### (2) 調査結果

曝露した試験片の腐食状態は、耐候性鋼材と普通鋼材とでは2年経過ではほとんど差は無いが、4年目では差が見受けられた。最も腐食の顕著なものは、下関で暴露したSM50材であり、その錆発生量などは次のとおりである。

	錆発生量	厚さ換算
1年後	平均50mg/cm <sup>2</sup> 程度	平均0.06mm
2年後	70 " "	0.09 "
4年後	120 " "	0.15 "

これらの数値を鉄道橋の枕木と接する上フランジ上面と比較すると、腐食の程度ははるかに小さい。この程度の腐食では、静的な機械的性質への影響は認められなかった。

### (3) 疲労試験結果

疲労試験に用いた試験体の数量は、総計1,000本に近い膨大な数になるが、200万回繰返し疲労強度については次のように考察している。

「200万回疲労強度は曝露前後で明らかに差がある。SM50 (母材、溶接)、SMA50 (溶接)、SM58 (母材、溶接)、SMA58 (母材、溶接) の34~38kgf/mm<sup>2</sup> (333~372MPa) に対して約70%、またSMA50 (母材) で80%となった。曝露期間2年と4年との差異による差は見受けられない。

いずれにしても曝露期間があまり長くないため、この結果からは、曝露を開始して表面が錆び始めると、すぐに切欠きが形成され疲労強度は低下するが、そ

の後の曝露による錆の発生はあまり切欠きを増やさないと考えられる」と報告されている。

しかし、既往の試験結果などから、さらに腐食し錆の発生量が増大すれば、その傾向は異なるものと思われる。

## 3. 古材に設けた高力ボルト継手のすべり試験

既存橋梁の中には腐食によって老朽化したものもあり、維持保守の対策として補修、補強あるいは改造を行うことがある。その際に問題となるのが、古い鋼材に設けた高力ボルト継手の表面処理である。また、腐食した鋼材にボルト継手を設けたり、リベットを高力ボルトに取換えるときの課題は摩擦係数の確保である。

リベット桁の部材接触面には錆、塗料、黒皮などの残存があり、接触面をそのままの状態でもボルト継手を設けることは、ボルト軸力が低下し、継手耐力が減少することになる。

接触面をプラストなどで処理するのがよいが、現場での施工は経済的に難しく、一般的で簡便な方法ではない。

このような理由により、現場施工に可能な方法を開発するために行なった既往のすべり試験の実験例を紹介し、その結果を報告する。

### 3. 1 古桁のリベットをボルトに置き換えたすべり試験

#### (1) 試験材

東海道本線旧酒匂川橋梁 (1909年架設、達第680号、経年66年) の主桁添接部と補剛材から図-9に示す位置より試験材を採取し、すべり試験を行なった<sup>8)</sup>。

試験材の採取にはガス切断を用いたが、試験片切出しには十分な余裕代をとって、接触面の塗料が燃焼しないよう配慮した。

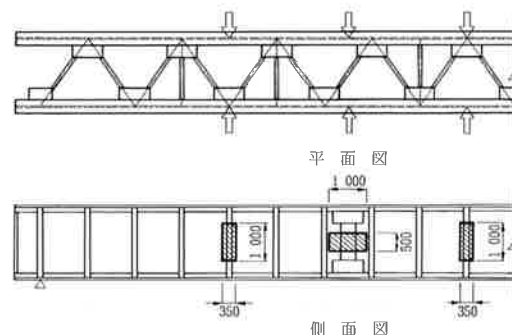


図-9 古桁からの試験体採取位置

切出し後、工場でリベット頭をプレーナーで削除し、プレスでリベットを抜き取り解体した。腹板シャーププレートは比較的孔精度が良く、リベット抜きは容易であった。しかし、補剛材には孔精度の悪いものがあり、写真-4に示すようにプレスで抜き取る際に孔周りにはらみ出しが生じたものもあった。また、孔周りにかえりが認められるものもあったが、これは孔明けの時に生じたものと考えられる。なお、解体後の接触面の状態は写真-5のとおりである。

試験片の種類は表-6、試験片の形状寸法は図-10とした。なお、ボルト締付け前の試験体の状態は写真-6のとおりである。

表-6 古材継手の試験要領と摩擦係数

記号	ボルト配置	測定位置	すべり耐力 (t)	摩擦係数	1個ボルト導入軸力 (t)	添接面処理状態 <sup>注)</sup>
腹板シャーププレート部試験片	千鳥ボルト数3本配置	上	24.9	0.26	16	無処理
		下	—	—		
		上	14.0	0.18	13	無処理
		下	20.0	0.26		
		上	23.9	0.25	16	フレームクリーニング
		下	36.2	0.38		
		上	26.1	0.33	13	(1)
		下	28.0	0.36		
上	28.5	0.30	16	フレームクリーニング		
下	36.8	0.38				
上	18.0	0.23	13	(2)		
下	32.0	0.41				
上	28.2	0.29	16	フレームクリーニング		
下	43.8	0.46				
上	27.2	0.35	13	(3)		
下	14.6	0.19				
中間補剛材部試験片	ボルト数2本配置	上	15.8	0.19	20.5	無処理
		下	16.8	0.20		
		上	10.9	0.17	16	無処理
		下	13.2	0.21		
		上	24.8	0.30	20.5	フレームクリーニング
		下	26.8	0.33		
		上	16.0	0.25	16	(1)
		下	19.25	0.30		
		上	26.9	0.33	20.5	フレームクリーニング
		下	29.2	0.36		
		上	22.0	0.34	16	(2)
		下	19.6	0.31		
		上	20.0	0.24	20.5	フレームクリーニング
		下	23.5	0.29		
		上	16.3	0.25	16	(3)
		下	17.7	0.28		
上	6.5	0.08	20.5	(完全処理)		
下	6.5	0.08				
上	5.5	0.09	16	鉛丹さび止めペイント1種1回塗り(膜厚28μ)		
下	4.2	0.07				

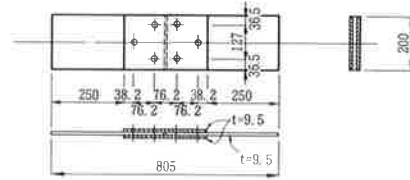
注) (1) 孔周りをグラインダー処理したもの  
すべり耐力

(2) 摩擦係 $\mu = \frac{\text{すべり耐力}}{\text{ボルト数} \times \text{摩擦係数} \times \text{軸力}}$

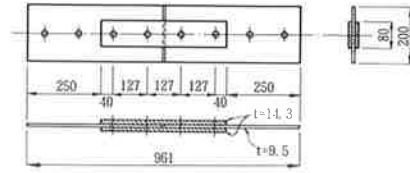
(3) フレームクリーニングは表-3.1.2に示す火炎処理を行ったもの



写真-4 リベット孔周りにパンチ傷が残存する例



(a) シャーププレート部試験片 (H.T.B、M22、F10T)

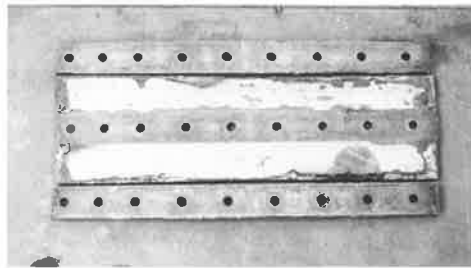


(b) 中間補剛材部試験片 (H.T.B、M22、F10T)

図-10 継手試験片の形状

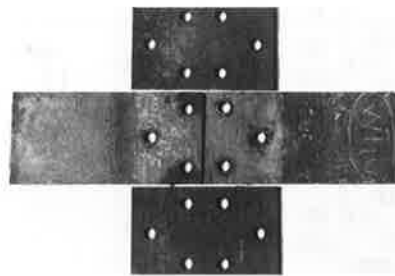


(a) 腹板シャーププレート部

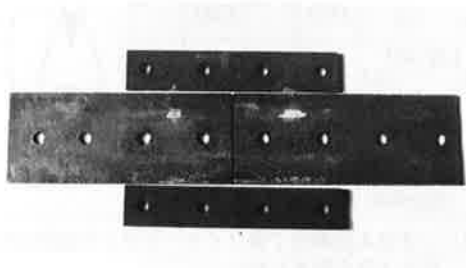


(b) 中間補剛材部

写真-5 古材解体後の接触面の状況



(a) 腹板シャーププレート部



(b) 中間補剛材部

写真-6 締付け前 接触面の状況例



(2) ボルトの締付け

ボルト軸力の導入は、摩擦係数  $\mu = 0.4$  として母材が降伏しないよう注意した。また、締付け軸力の摩擦係数に及ぼす影響を見るために、所定軸力より約 20% 低い軸力についても試験を行った。

(3) 接触面の表面処理

試験片の表面処理は、ガスバーナーで加熱した後、ワイヤブラシで清掃するフレームクリーニングを採用した。そして、比較のため、火炎処理の条件を変えたものと無処理のものとを加えた。その接触面の処理条件を表-7に示す。また、新規に塗装した試験片(表-6 S-7'、S-8' 参照)を作成した。これにはS-7とS-8試験片を再使用したもので、塗装は鉛丹さび止めペイント1種1回塗り(膜厚28  $\mu$  程度)とした。塗装後、48時間室内放置した後ボルト締めし、ただちに試験を行った。

(4) すべり試験結果および考察

すべり試験は電子管式油圧200t万能試験機を使用し、すべり量の測定はクリップゲージ(1000  $\mu$ /mm)を用いて計測した。

試験の結果を接触面の表面処理ごとに摩擦係数を整理すると図-11になる。

これによると、表面処理を施せば摩擦係数は向上するが、処理の程度による差は少ない。また、新規に塗装したものは  $\mu = 0.08$  となり、極めて低い値を示した。総体的に平均摩擦係数は、「ボルト接合基準」で採用している  $\mu = 0.4$  に対して、いずれも低い値であった。

この理由は、試験片の表面処理を行った後、ただちにすべり試験をしたためであり、接触面に薄く赤錆ができる状態で試験すれば、基準摩擦係数は確保できると考えられる。

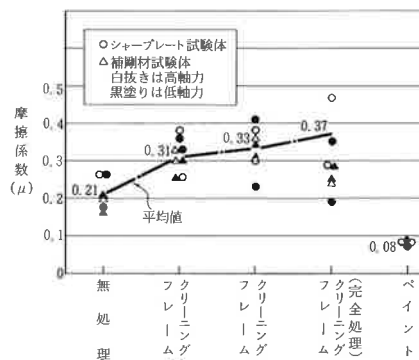


図-11 表面処理と摩擦係数

表-7 継手接触面の処理条件

項目	主桁(片面当り)	添接板(1枚当り)		摘要		
		加熱時間 秒	トーチ 距離 cm		加熱時間 秒	トーチ 距離 cm
腹板試験シャーププレート部	フレームクリーニング(1)	30 (10)	8~10	60 (10)	8~10	
	フレームクリーニング(2)	60 (20)	8~10	120 (20)	8~10	
	フレームクリーニング(3) (完全処理)	60 (20)	2~3	120 (20)	2~3	
中間試験補剛材片部	フレームクリーニング(1)	30 (15)	8~10	45 (23)	8~10	
	フレームクリーニング(2)	60 (30)	8~10	90 (46)	8~10	
	フレームクリーニング(3) (完全処理)	75 (38)	2~3	120 (60)	2~3	

注 1) いずれも加熱完了後ワイヤブラシで表面に浮き出たススを除去した。  
2) 表中の加熱時間で( )内の数値は、単位面積(100cm<sup>2</sup>)に換算した値である。

3. 2 古材に設けたボルト継手のすべり試験

(1) 試験材と表面処理

鉄道総研の杉館、市川、阿部らの行った試験では、鉄道橋で60年間使用した古桁から試験材を採取し、ボルト継手接触面の表面処理方法を変えた継手のすべり試験を行い、接触面の処理方法によるボルト継手に及ぼす影響について報告している<sup>9)</sup>。

表面処理にはショットブラスト、動力工具によるグラインダーおよびアセチレンガスによる火炎処理をしたものなどがあり、表面処理方法の施工条件は表-8に示すとおりである。

表-8 試験片の表面処理方法

処理方法	施行条件	
ショットブラスト	グリッド材質	鋳鉄
	グリッド粒度	#50(70%)# 30(30%)
	空気圧	6~7kg/cm <sup>2</sup>
	ノズル径	9φmm
火炎処理	噴射距離	約30cm
	ガス	アセチレン(1kg/cm <sup>2</sup> ) 酸素(7~8kg/cm <sup>2</sup> )
	火炎噴射距離	約20cm
	処理状況	上塗完全焼却(鉛丹さび止めが若干残る)
処理後の表面	焼却された膜がはがれているものは払いのけた	

また、試験片の継手接触面の条件となる表面粗さ測定および残存塗膜の膜厚測定を行った。その結果、古材接触面の表面粗さの平均値は、腐食面で61 $\mu$ m、1種ケレンで55 $\mu$ m、火炎処理で46 $\mu$ mであった(表-9参照)。なお、本試験に用いた継手試験体の形状寸法は、図-12のとおりである。

表-9 古材の継手接触面条件

表面処理	試験片記号	表面粗さ平均値( $\mu$ m)	塗膜厚平均値( $\mu$ m)	記事
無処理	H-1	61.5	54.6	重ね合わせ面使用
1種ケレン*	H-2	55.6	—	ショットプラス
2種ケレン*	H-3	9.5	—	グラインダー+手工具
3種ケレン*	H-4	14.1	152.2	同上
1種ケレン後ジンク処理	H-5	15.9	48.6	
火炎処理	H-6	46.2	39.1	アセチレン+酸素

\*ケレンの程度は「塗膜劣化および素地調整程度見本」日本道路協会(54年2月)を参考にした。

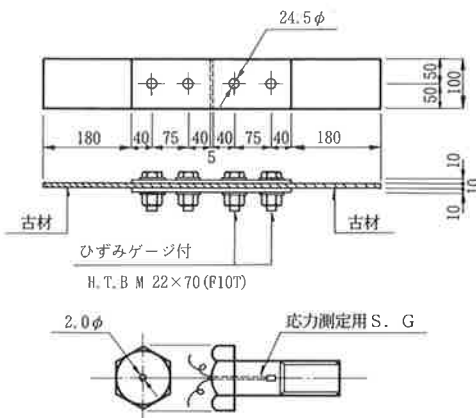


図-12 継手試験体

(2) すべり試験結果

ボルト締付け軸力の低減試験結果は、軸力導入後2週間目の軸力減少率は腐食面で7.3%、1種ケレンで4.9%、3種ケレンで7.9%、1種ケレン後ジンクリッチペイント処理で6.3%、火炎処理で6.1%となっている(表-10参照)。これらの値は、いずれも設計で考慮している軸力減少率10%の許容範囲内にある。継手の引張試験では、設計時に考慮しているすべり係数 $\mu = 0.4$ 以上を示したのが、1種ケレンで $\mu = 0.50$ 、1種ケレン後ジンクリッチペイント処理で $\mu = 0.41$ 、火炎処理で $\mu = 0.40$ である。

また古い残存塗膜がある場合には、膜厚が厚くなるほどすべり係数は減少し、塗膜のない場合は、表面粗さが粗くなるほどすべり係数は増大する傾向があった。表面粗さとすべり係数との関係の試験結果を図-13に示す。

表-10 古材の継手すべり試験結果(平均値)

試験片記号	締付合計軸力(t)	試験時軸力(t)	すべり荷重(t)	すべり係数	実すべり係数
H-1	25.234	23.371	19.167	0.38	0.41
H-2	25.283	24.011	25.450	0.50	0.53
H-3	25.393	23.979	15.883	0.31	0.33
H-4	23.976	22.068	18.950	0.39	0.42
H-5	25.227	23.615	21.033	0.41	0.44
H-6	25.303	23.735	20.150	0.40	0.42

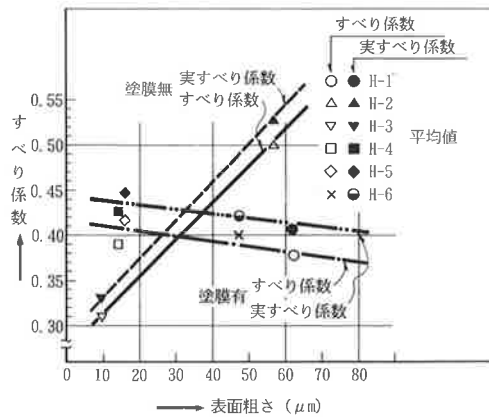


図-13 表面粗さ-すべり係数関係図

あとがき

本文において、腐食鋼材に対する疲労試験、および古材に設けたボルト継手のすべり試験に関する文献を調査し、その概要を紹介した。

建設省土木研究所の調査では、曝露した鋼材の疲労強度は、比較的短期間の実験で母材の70%程度であるが、鉄道橋で行った経年50年以上の腐食材ではもっと低下している。そして、黒皮つき鋼板あるいは表面粗さ50S程度でガス切断した鋼板の50%程度になり得ると考えておくのが安全であると思われる。しかも、これは残存断面に対するものであり、腐食による断面減少の影響も当然考慮すべきであり、部材としての耐力はさらに低下することになる。

腐食材の強度は主に断面減少と形状変化に影響されるが、腐食の程度を疲労に関連してどのように表現するかは難しい問題であり、今後の研究を要する

ものである。

実橋で疲労損傷を生ずるのは、不適当な設計ディテールや製作ミスの部分、腐食の局部的に著しい箇所や、鉄道橋ではレール継目の直下近傍で振動が著しい部分などである。しかし、このような部分は得てして、計算などにより疲労を予測することが困難な部分であるので、むしろそのような箇所を経験的な配慮によって排除することが大切である。また、実橋では変動する実応力度が比較的低いことや、腐食は架設後徐々に進行することなどの理由で、主要部材の破断した例はほとんど報告されていないが、製作時に表面を平滑にするという条件で疲労許容応力度をあまり高くとって、経済的設計をするということは危険である。

ボルト継手のすべり試験の結果、腐食した鋼材接触面をブラスト処理や、動力工具によるグラインダー処理を行なうことが望ましいが、現場での施工状況を考えると経済的に困難である。

火災処理によって不純物を除去清掃する表面処理方法は好ましいが、この方法ではすべり係数のバラツキが大きいことが報告されている。

このようなことから腐食した鋼材の表面粗さがボルト継手に及ぼす影響とともに、鋼板接触面の処理方法の開発が難しい問題であり、今後の研究が必要であると考えられる。

おわりに、本報告書のまとめに際してご指導を賜った阿部英彦氏（宇都宮大教授）、稲葉紀昭氏（日

本鉄道建設公団）、阪本謙二氏（鉄道総合技術研究所）、阿部充氏（同）、杉館政雄氏（同）に対し、深く感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 西村俊夫、坂野昌弘、石田教雄：腐食環境下における鋼材部材の疲労寿命、群馬大、1986.3.
- 2) 阿部英彦、稲葉紀昭、江口保平：腐食鋼材の疲労強度、構造物設計資料、1973.6.
- 3) 稲葉紀昭、佐々木秀弥：経年リベット桁疲労試験要領、構造物設計事務所、1965.12.
- 4) 阿部英彦、阿部允：列車荷重の繰返しを受けた鉄道橋の疲労試験、構造物設計資料、1979.3.
- 5) 土木学会：鉄道橋設計標準・解説、1983.4.
- 6) 日本保線協会：建造物の保守並びに健全度診断法に関する研究報告書、1960.3.
- 7) 国広哲夫、井上啓一、福田孝夫：耐候性鋼材の大気暴露調査、建設省土木研究所資料No.729、1972.2.
- 8) 佐々木秀弥、大槻正幸：古桁のリベットを高力ボルトに置き換えた場合の摩擦係数試験、構造物設計事務所、1976.10.
- 9) 杉館政雄、市川篤司、阿部允：古材に設ける現場継手に関する研究（その1）、土木学会第43回年次学術講演会、1988.10.