

ステンレスクラッド鋼を用いた箱桁の曲げ疲労実験

BENDING FATIGUE TEST ON
A BOX PLATE GIRDER OF STAINLESS CLAD STEEL

藤井堅*, 三木千寿**, 木村秀途***, 中川茂****, 安波博道*****

Katashi FUJII, Chitoshi MIKI, Hideto KIMURA, Shigeru NAKAGAWA and Hiromichi YASUNAMI

* 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

*** 日本鋼管 (株) 総合材料技術研究所 (〒721 福山市鋼管町 1)

**** 日本鋼管 (株) 建材技術開発部 (〒100 東京都千代田区丸の内 1-1-2)

***** 工修 新日本製鐵 (株) 鉄鋼研究所 (〒299-12 富津市新富 20-1)

In order to use stainless-clad steel in bridge members for corrosion protection, it is necessary to clarify the fatigue property of bridges made of stainless-clad steel. Therefore, a fatigue test on box girder was carried out by applying two concentrated loads on the simply supported girder to produce cyclic bending moment. The webs and lower flange of the specimen were made of stainless-clad steel. And butt welded joint was used in connecting flange and web. Webs on either side of the lower flange were rounded by cold-forming. The field butt joint was prepared in the pure bending region of the specimen. Three types of fatigue cracks were observed from the test. All of them were initiated from welding locations between the steel portion of stainless-clad steel and steel members such as diaphragms or ribs. The tensile flange was broken by the crack propagating from the toe of boxing weld at the rib-scallop made for field butt joint. However, cracks were not found to be initiated from stainless steel side of clad steel. Test results suggest that the fatigue design of steel bridges can be applied to the bridges of stainless-clad steel also.

Key Words : stainless-clad steel, box girder bridge, fatigue test

1. まえがき

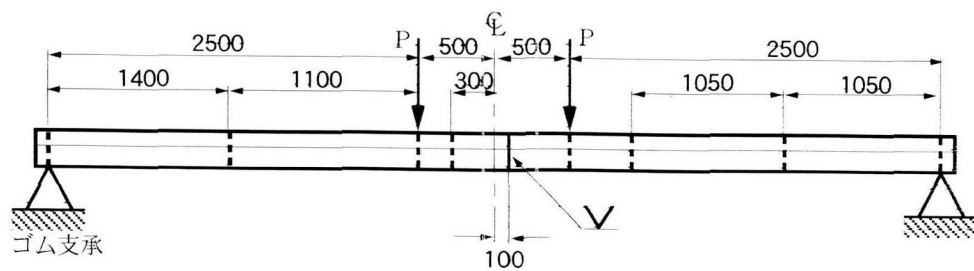
鋼橋は錆びるという弱点を持っているため、コンクリート橋に比べ維持管理面で劣るとされてきた。鋼橋の防食対策は専ら塗装に頼っているのが現状であるが、供用期間中に実施される塗装塗り替え費用は決して少なくない。したがって、塗装塗り替え作業を低減あるいはなくすといったメンテナンスフリー指向は、将来予想される社会状況をも踏まえて、鋼橋の今後進むべき一つの方向といえる。

塗装に頼らない防食性向上策の一つとしてステンレスクラッド鋼の適用が考えられる。ステンレスクラッド鋼は、鋼とステンレスを金属組織的に接合させたもので、耐食性に優れたステンレスと強度面において優れた炭素鋼のそれぞれの長所を持っており、従来、压力容器、ダム・水門施設やケミカルタンカーなどの適用実績がある¹⁻³⁾。このような新しい材料を橋梁に適用する場合、初期材料費や製作費は割高となるが、メンテナンス費用を大幅に削減あるいは削除できるので、トータルライフタイムコストの観点から、その橋梁への適用は十分可能といえる。また、最近注目されている景観面においても、クラッド鋼の適用により

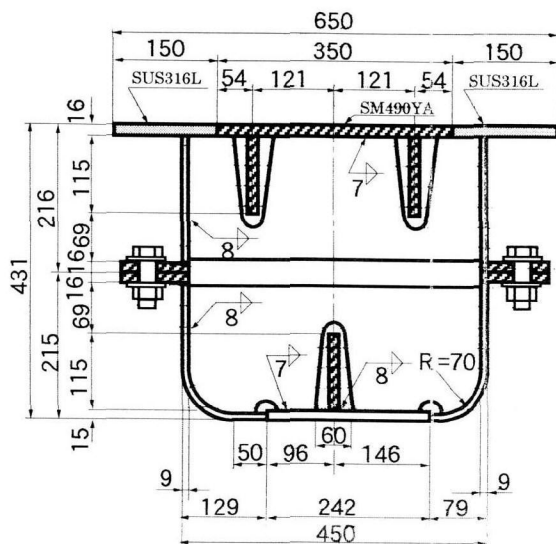
ステンレス表面そのものの金属色を活かした橋梁デザインが可能となる。このときステンレス表面の仕上げ方法により、柔らかな乳白色から鏡面的色調まで様々な雰囲気を出し出すことができるのは特筆しておくべきであろう。

しかしながら、ステンレスクラッド鋼を橋梁部材として使用するためには、橋梁特有の解決しておくべき問題がいくつかある。それは、異種金属複合材料を用いることに起因する橋梁の製作、施工上の制約条件や両材料特性の違いに起因する強度上の諸問題の解明、疲労特性や腐食進展速度の把握、そしてこれらを踏まえた設計法の確立、であろう。

筆者らは、すでに、ステンレスクラッド鋼の橋梁への適用を目指して、製作・施工上の問題に対して実物大モデルを対象に、適用できる構造詳細、溶接性や表面仕上げ方法などについて検討し、防食上は箱桁構造が適すること、溶接加工上の問題はなく、ステンレスクラッド鋼を橋梁部材に適用することは十分可能であることを確認した^{4, 5)}。しかし、鋼橋のメンテナンスフリーといった面からは、防食のほかに疲労強度の解明が最重要課題の一つと考えられ



a) 試験桁据付



: クラッド鋼
 : SUS316L単一材
 : SM490YA単一材

b) 試験桁断面

図-1 疲労試験桁

る。そこで本研究では、ステンレスクラッド鋼箱桁の曲げ疲労試験を実施し、疲労特性および亀裂発生位置、亀裂破面を調べた。

従来、ステンレスクラッド鋼の疲労に関する研究は、異種金属接合にともなう界面の特性に主眼がおかれ、いくつかの成果が掲げられている⁶⁻¹³⁾。また、压力容器や船舶を対象にそれぞれの構造物特有の応力状態に対し疲労実験が行われている¹⁴⁾。しかし、橋梁への適用を目的に疲労特性を扱った研究はないようである。

2. 疲労試験桁

ステンレスクラッド鋼の優れた防食性を活かすためには、外側をステンレスで覆い、内部を外気と遮断するような箱桁構造が望ましい。また、従来の鋼箱桁のフランジ-ウェブ接合部に多用されているような角溶接では、角部においてクラッド鋼の鋼部分が外気に曝されてしまい、防食上好ましくない。そこで、疲労試

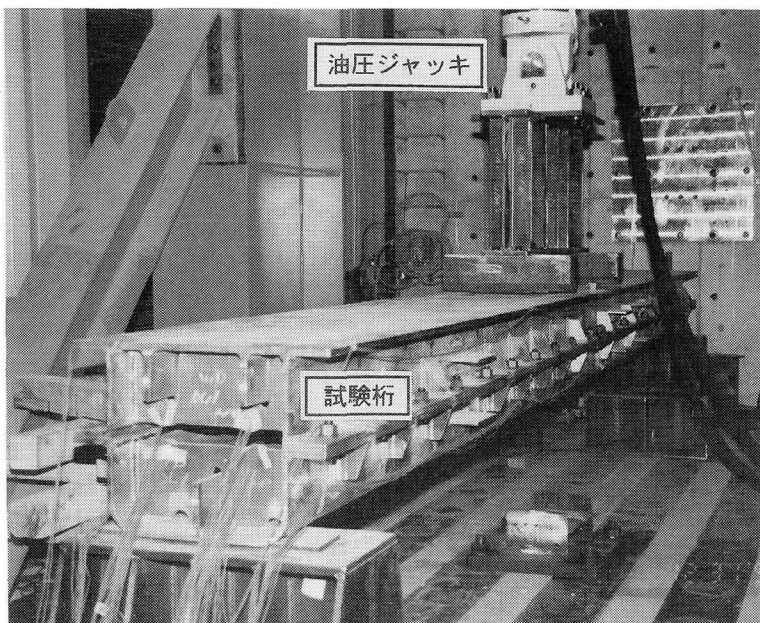


写真-1 実験状況

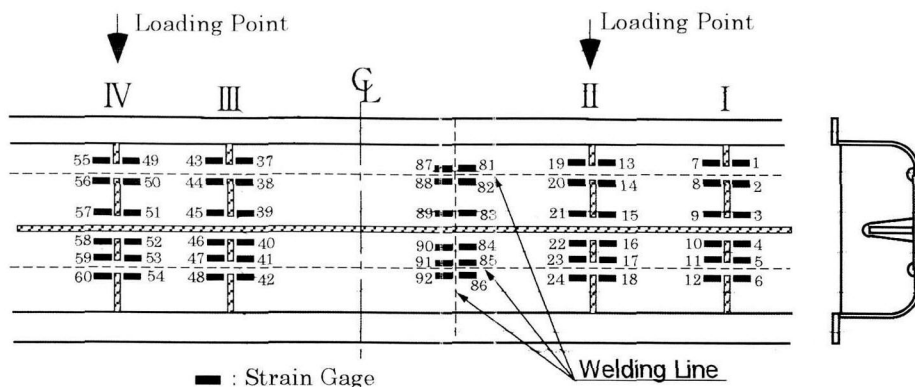


図-2 ひずみゲージ貼付位置

験桁は、図-1b)に示すように、箱桁下側の角部はウェブを冷間加工により丸みをつけ、下フランジとウェブは突き合わせ溶接とした。道路橋示方書では、冷間曲げ加工における内側半径 R は板厚 t の15倍以上を原則としている。本試験桁では、これを満足していない($R=70\text{mm}$, $R/t=7.8$)けれども、板厚の薄いウェブを折り曲げることにより、冷間曲げ加工による影響をできるだけ小さく押さえた。しかし、実橋梁の場合には、フランジを折り曲げてウェブ側に溶接するのがよいと考えられる。

本試験桁では、ステンレスクラッド鋼をウェブ部と下フランジに使用した。ステンレスクラッド鋼は、母材：SS400、合わせ材：SUS316Lで、合わせ材板厚：2mmで一定とし、ウェブ板厚：9mm（鋼7mm+ステンレス2mm）、フランジ板厚：16mm（鋼14mm+ステンレス2mm）である。上フランジについては、十分な防食対策を施せば普通鋼で十分と考え、ウェブ-フランジ接合部を含むフランジ部分をステンレス（SUS316L）、中間部を溶接構造用圧延鋼材（SM490YA）の単一材とした。また、箱桁内部のダイアフラムやリブは、ステンレスクラッドの鋼側と溶接されるので、溶接構造用圧延鋼材（SM490YA）単一材を使用している（図-1b）参照）。

疲労試験桁の断面は、幅450mm×高さ431mmと実断面に比べて小さく、桁内における溶接作業が困難であるため、中立軸付近で断面を2つに分解して作成した後、高力ボルト接合により組み立てた。

ステンレスクラッド鋼を橋梁へ適用する場合、架設現場における継手構造にも配慮が必要である。すなわちボルト継手などでは、漏水や隙間腐食、異種金属間接触腐食などの危険性があるため、現場溶接継手が望ましいと考えられる。本研究ではこれを考慮し、図-1a)に示すように、桁の純曲げ区間において現場溶接を想定した継手を設けた。このとき、開先はV開先とし、実際の箱桁内部からのみの一面溶接とした。一般には、X開先とし、両面からそれぞれの材料に対応した溶接棒を用いて溶接することが多いが、現場での省力化を目的として一面溶接とした。

また、横構等取付のためのガセットプレートを想定し、

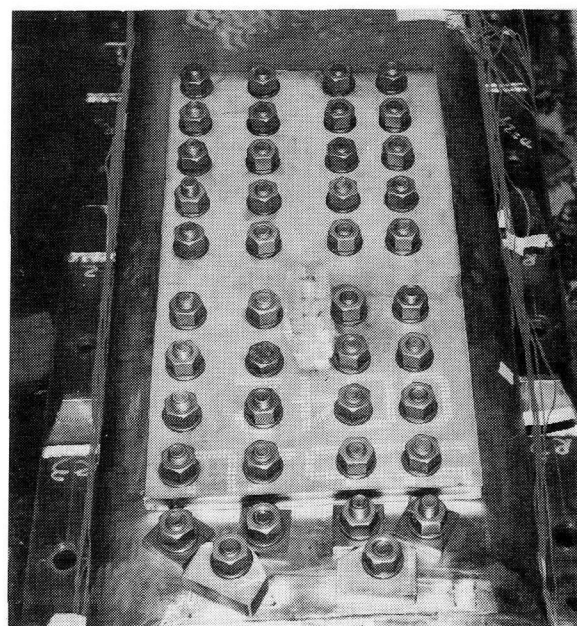


写真-2 スプライスプレート補強およびストップボルト

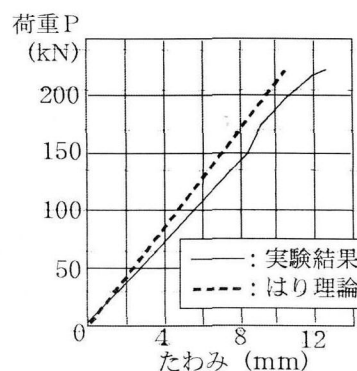


図-3 荷重-たわみ曲線

曲げ区間および曲げせん断区間にガセットプレート(SUS316L)を溶接した。しかし、取付位置が中立軸に近く、発生する曲げ応力が小さかったこともあって、亀裂などの変状は現れなかった。

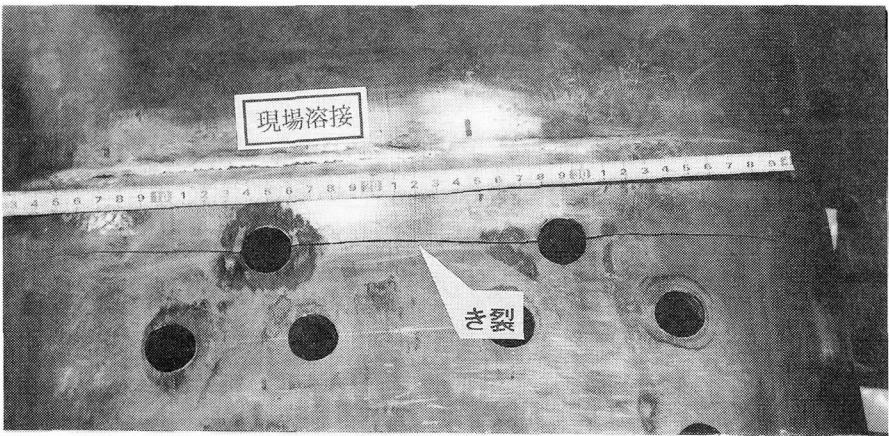
溶接については、箱桁内部のダイヤフラムおよびリブの溶接(クラッド鋼の鋼側と鋼材との溶接)は、一般の鋼橋の溶接条件と同等とした。一方、ウェブと下フランジの突合せ溶接と現場溶接(ステンレスクラッド鋼

同士の溶接)には、ステンレス溶接棒を使用した。なお、溶接は、全て炭酸ガスアーク溶接を用いた。

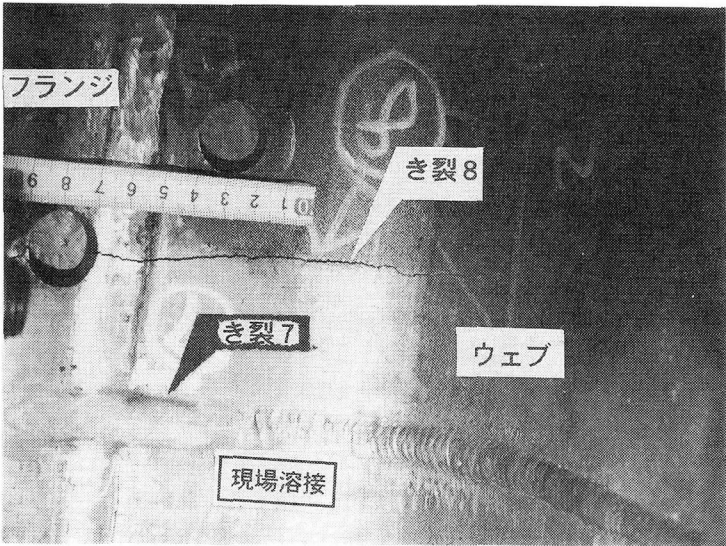
疲労試験に先立ち、ステンレスクラッド鋼から、クラッド鋼引張試験片および合わせ材を削り取った母材のみの試験片、母材を削り取った合わせ材のみの3種類の試験片を作成し、材料特性試験を行った。

ステンレスクラッド鋼の化学成分および材料特性を表-1に、溶接条件を表-2に示す。表-1の材料特性で、見かけ値は、クラッド鋼試験片の引張試験により得られたものを示す。降伏応力は、降伏棚が明確でない場合、0.2%オフセット法により求めた。

一般に、ステンレス単一材は固溶化熱処理が施されるため、再結晶による内部ひずみの緩和にとまって軟化が起こり、降伏強度は普通鋼よりも



a) き裂8の進展(下フランジステンレス側)



b) き裂7および8(下フランジ鋼側)

写真-3 現場溶接部付近のき裂

表-1 試験体の化学成分と材料特性

部位	板厚 (mm)	鋼 種		化学成分 (%)							
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
ウェブ	9	クラッド鋼	SUS316L	0.019	0.57	1.01	0.027	0.001	12.15	17.54	2.09
			SS400	0.143	0.18	0.76	0.012	0.004	-	-	-
下フランジ	16	クラッド鋼	SUS316L	0.019	0.57	1.01	0.027	0.001	12.15	17.54	2.09
			SS400	0.152	0.18	0.79	0.012	0.003	-	-	-
上フランジ	16	SUS316Lむく		0.017	0.56	0.96	0.026	0.002	12.10	17.35	2.08
		SM490YAむく		0.160	0.35	1.47	0.07	0.002	-	-	-

部位	板厚 (mm)	鋼 種		弾性係数	降伏応力	引張強度	ポアソン比	伸び
				(GPa)	(MPa)	(MPa)		(%)
ウェブ	9	クラッド鋼	SUS316L	172	335	714	0.3	29.7
			SS400	238	308	460	0.28	16.6
			見かけ値	218	305	520	0.27	21.8
下フランジ	16	クラッド鋼	SUS316L	199	309	655	0.3	30.7
			SS400	203	218	405	0.27	17.8
			見かけ値	208	263	453	0.27	19.2
上フランジ	16	SUS316Lむく		-	*240	*558	-	*64
上フランジ	16	SM490YAむく		-	*367	*533	-	*26

Note : *付は検査表より転記, その他は実測値

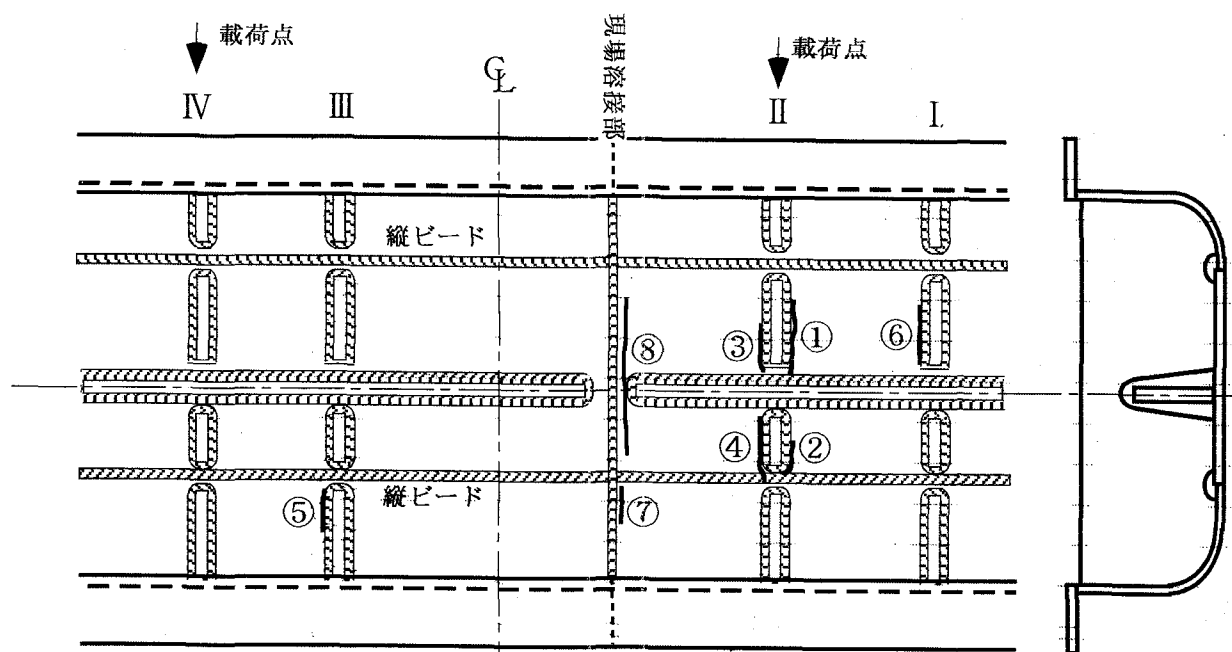


図-4 亀裂発生位置

表-2 溶接条件

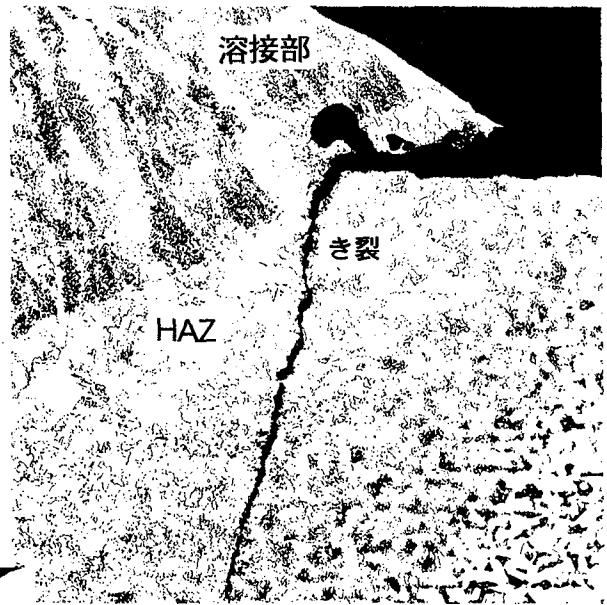
種 類	部位・形態	溶接材料	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (KJ/cm)
現場突合せ 溶接部	クラッド-クラッド SUS側 鋼側	ステンレス FCW309MOLT	190	31	25	14.1
			240	30	35	12.3
隅肉溶接部	クラッド-リブ	鋼 SF1	260	31	35	13.8
	クラッド-ダイアフラム		260	30	35	12.8

表-3 疲労試験経過

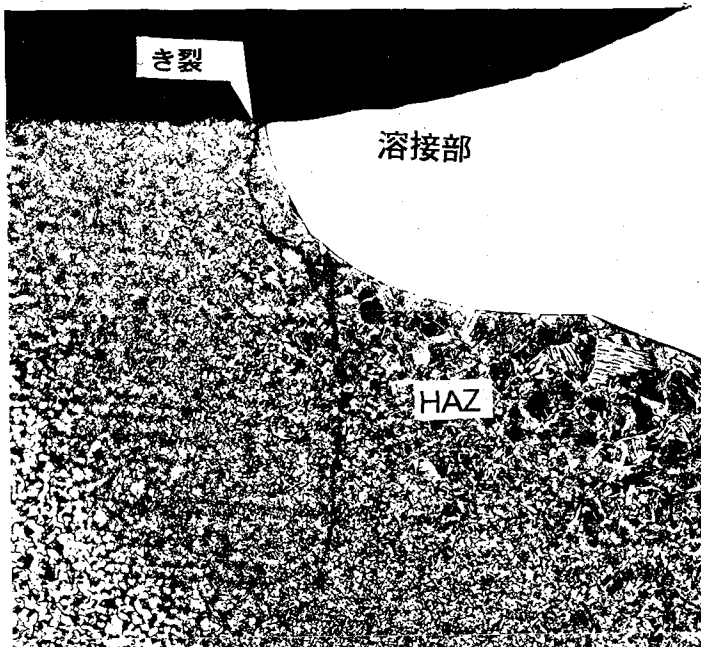
回 数	荷重P(kN)	き裂1	き裂2	き裂3	き裂4	き裂5	き裂6	き裂7	き裂8
0 ~200万	9.8~157	A: 小荷重領域							
0 ~26万	9.8~221	B: 大荷重領域							
26万 ~40万	9.8~221	発見	発見	発見	発見				
40万 ~45万	9.8~221	貫通							
45万 ~50万	9.8~221				貫通	発見			
50万 ~55万	98~221	C: 第1回ビーチマークテスト 補強, ストップホール穿							
55万 ~72.5万	9.8~221	D: 大荷重領域					発見		
72.5万 ~75万	9.8~221							発見	発見
75万 ~78.5万 終了	113~221	E: 第2回ビーチマークテスト ストップボルト設置						貫通	
	9.8~221								



a) き裂1付近の断面組成



b) き裂6付近の断面組成



c) き裂7付近の断面組成

写真-4 溶接部き裂付近の断面組成

小さくなる。ところが、ステンレスクラッド鋼では、普通鋼の材質特性を損なう危険性があるため、固溶化熱処理を行わず、熱間圧延のまま出荷されるのが多い。このため、表-1に示すように、ステンレスの降伏強度はJIS規準(175MPa)に比べかなり大きく、普通鋼SS400のそれよりも大きな値になっている。したがって、クラッド鋼としての見かけの降伏応力も普通鋼よりも大きくなっている。

載荷は、図-1a)に示すように、2点支持2点載荷である。写真-1に実験の状況を示す。

3. 静的載荷実験

疲労試験に先立ち、静載荷実験を行った。荷重範囲は弾性域とし、荷重 $P=221\text{kN}$ (22.5tf)まで漸増した。ひずみは、疲労試験における亀裂推定の目的をも含めて、単軸ひずみゲージにより測定した。

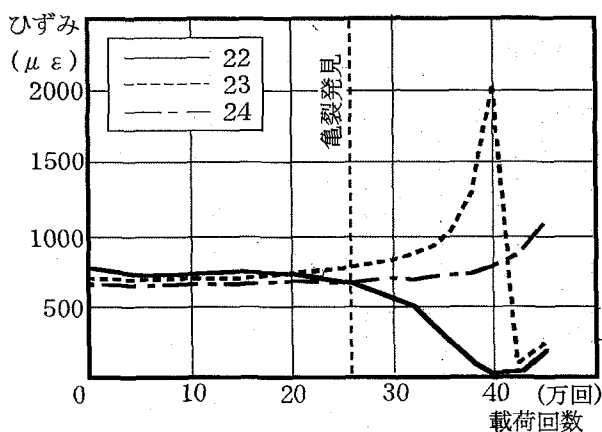


図-5 亀裂4付近のひずみ変化

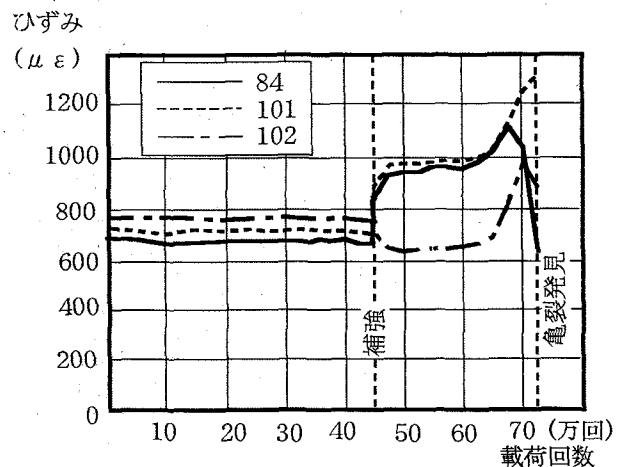


図-6 亀裂7付近のひずみ変化

図 2 にひずみ測定位置の一部を示す。はり理論から得られるひずみの検証のために、スパン中央下フランジ内側（箱桁内部側）に 2 箇所、その他は溶接し端の局所応力測定用である。

静荷重実験の荷重たわみ曲線を図-3 に示す。実験結果はほぼ直線的であるが、はり理論値よりも若干たわみが大きい。これは、ゴム支承を用いたため、その変形が付加されたためと思われる。また、荷重 $P=221\text{kN}$ (22.5tf) の曲げモーメントによる橋軸方向のひずみは、下フランジで、理論値：766 μ 、実測値：796 μ 、上フランジでは、理論値：-532 μ 、実測値：-527 μ で、ほぼ理論値を満足している。

4. 疲労荷重実験

4. 1 荷重方法

疲労試験は、最初 $P=9.8\sim 157\text{kN}$ (1 $\sim$ 16tf) の片振り荷重振幅で 200 万回行った。試験後、目視および湿式磁粉探傷により亀裂を探したが亀裂は発見されず、また、10 万回おきに行った静荷重においても各部のひずみの変化はなく、健全に思われた。これは、疲労試験に先立って行った静的荷重実験で、疲労試験における所定荷重よりも大きな荷重を荷重した影響と考えられる。そこで、初期の 200 万回は無視することとし、荷重範囲 P を $9.8\sim 221\text{kN}$ (1 $\sim$ 22.5tf) に変更して疲労試験を行った。このとき曲げモーメント振幅は、527kNm となる。また、上下フランジの応力範囲は、それぞれ $\sigma_{\text{上}}=-105\text{MPa}$ 、 $\sigma_{\text{下}}=151\text{MPa}$ である。

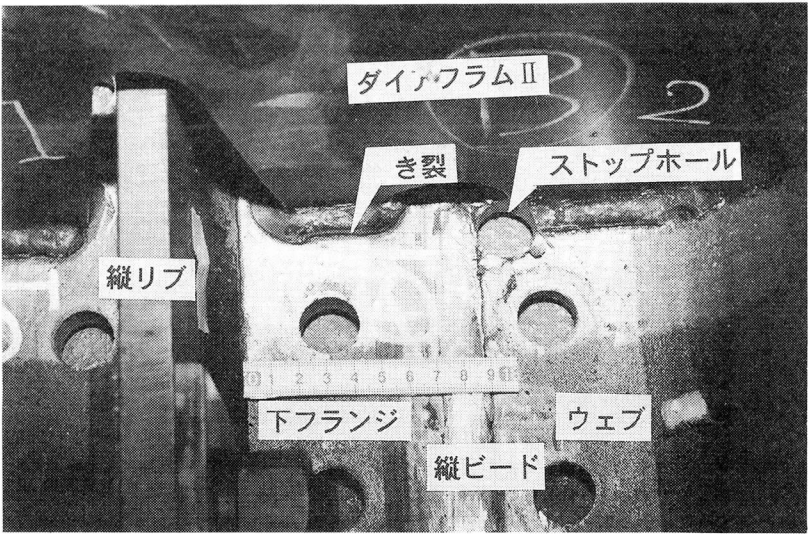
4. 2 亀裂測定

ひずみは、約 10 万回おきに 0 $\sim$ 221kN (0 $\sim$ 22.5tf) までの静荷重を行って測定した。局所応力測定用のひずみに変化が現れると、その近傍に亀裂が発生した可能性がある。これによりある程度亀裂発生箇所が推定できる。亀裂探傷は主に目視によった。とくにステンレス側の亀裂は、磁粉探傷を適用できないため、浸透探傷と目視により亀裂を探した。

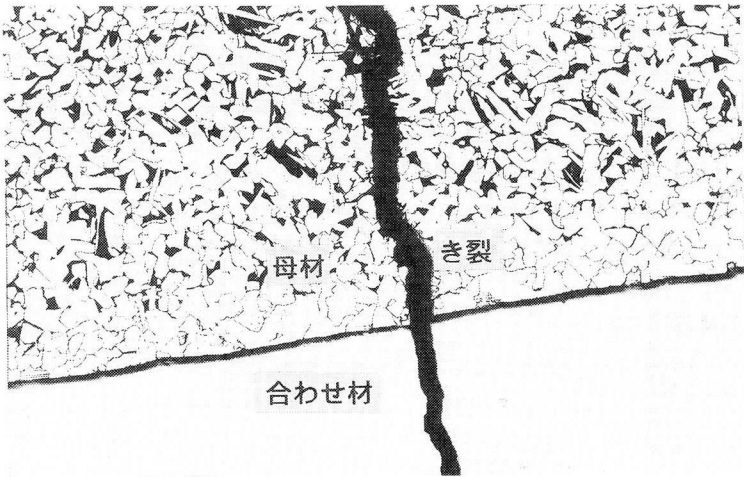
箱桁内部の亀裂は、ひずみ測定結果に変化が現れる毎にボルトをはずして桁を分解し、磁粉探傷と目視の両方により亀裂を探した。亀裂発生後はおよそ 5 $\sim$ 20 万回ごとに桁を分解し亀裂長さを測定した。

4. 3 試験の経過

疲労試験の経過観察結果を表-3 にまと



a) き裂外観



b) 鋼-ステンレス境界付近のき裂状態

写真-5 き裂 4

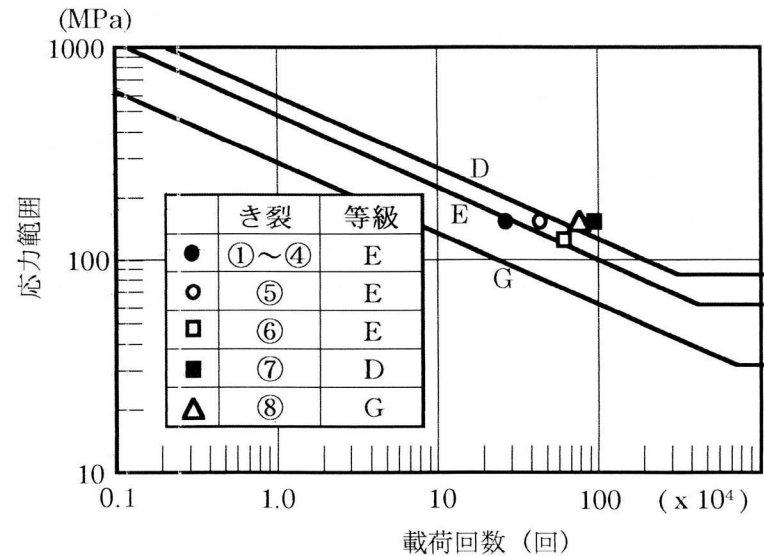
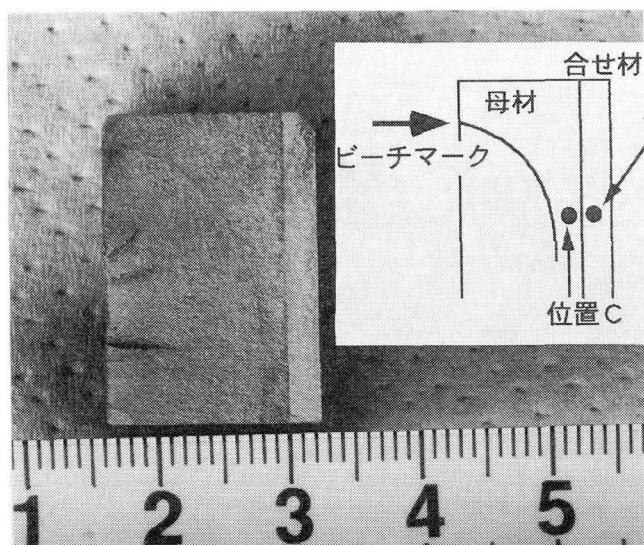
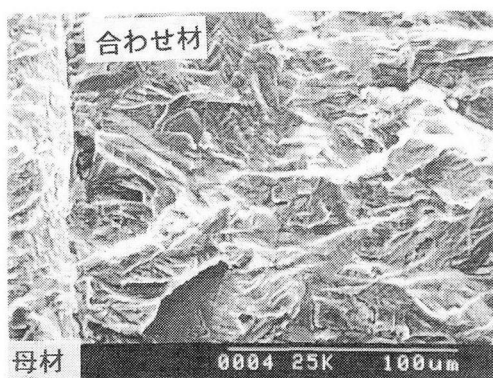


図-7 疲労設計曲線と実験結果との比較



a) き裂外観



b) 測定点B (薄材-合せ材境界付近)

写真-6 き裂1境界面付近の破面

めて示す。また、図-4に亀裂箇所を示す。

試験開始後15万回で、現場溶接部付近および載荷点下のダイアフラム溶接し端部のひずみが 100μ 程度減少した。しかし、分解して磁粉探傷を行った結果亀裂は発見できなかった。26万回後桁を分解し、磁粉探傷の結果、亀裂1~4(図-4参照)が発見された。これらの亀裂は溶接線に沿って、橋軸直角方向に進展した。このとき、全ての亀裂は箱桁内部の鋼側から発生している。亀裂1は40万回、亀裂4では45万回の後ステンレス側にまで亀裂が貫通した。また、45万回でダイアフラムⅢ(図-2参照)とウェブ溶接し端に亀裂5が発見された。

45万回載荷後、ピーチマークテストとして載荷荷重を $P=98\sim 221\text{kN}$ ($10\sim 22.5\text{tf}$)とし、5万回載荷した。ピーチマークテストの間も亀裂1および4は進展したため、これを覆うように板厚20mmのスプライスプレートを取り付けて補強した。補強後は亀裂1~4の進展は一応止まったが、55万回後亀裂6を、また、72.5万回では亀裂7および8を発見した。亀裂8は、現場溶接部縦リブに設けたスカラップ部回し溶接し端から発生したと思われるが、発見時にはすでに外側まで貫通していた。72.5万回後、2回目のピーチマークテスト(載荷振幅 $P=113\sim 221\text{kN}$)を行った。その後、亀裂8の進展を防ぐためにストップボルト(F10TM22)を設置し、疲労試験を再開した。補強の状態およびストップボルトを写真-2に示す。しかし亀裂8の進展は止まらず、78.5万回で脆性的に進展したため試験を終了した。終了後の亀裂7およびき裂8を写真-3に示す。

4.4 亀裂発生位置

き裂1, 6, および7の断面組成を、それぞれ写真-4a)~c)に示す。写真-4a)およびb)は、ダイアフラムと下フランジ鋼部とのすみ肉溶接のし端から発生したき裂である。一方、写真-4c)は、現場溶接継手を想定した突き合わせ溶接部であるが、き裂は熱影響部から発生しているよ

うにみえる。両者には、溶接法や種類の違いがあるが、加えて溶接棒が異なっており、前者は鋼、後者はステンレスである。これらの結果だけでは十分とはいえないものの、ステンレス溶接棒を用いた場合には、熱影響部からき裂が発生することもあり得ることが予想される。

4.5 亀裂付近のひずみ履歴

図-5および6に、亀裂4付近および亀裂7付近のひずみ履歴を示す。図-5に示すように、亀裂4では26万回から例えば23番のひずみ(図-2参照)は増加し始め、逆に22番のひずみは急激に減少していることから、22番ゲージ位置付近で亀裂が発生し、23番ゲージ方向へ進展したことがわかる。このように、ひずみゲージを比較的密に貼付することにより亀裂挙動が推定できる。図-6からは、スプライスプレート補強にともなって亀裂7付近に応力集中が起こり、亀裂の発生が早まったことが予想される。

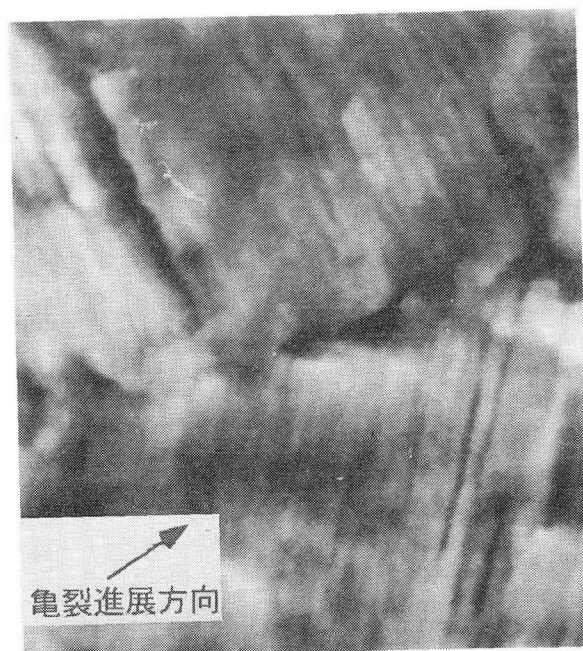
4.6 JSSC指針の強度等級¹⁶⁾との比較

実験結果をJSSC疲労設計指針¹⁶⁾の強度等級に基づいて整理すると、図-7のようになる。亀裂8については、発見時の亀裂長さが大きく、もっと前に発生したと考えられる。そこでこれについては、き裂付近のひずみ測定結果(図-6の84など)の変化から判断し、60万回とした。また、載荷回数45万回以降に発見した亀裂については、図-6に示すように、補強の影響によりひずみ値が変化している。したがって、図-7では、補強後の載荷回数については、マイナー則を適用して補正した。

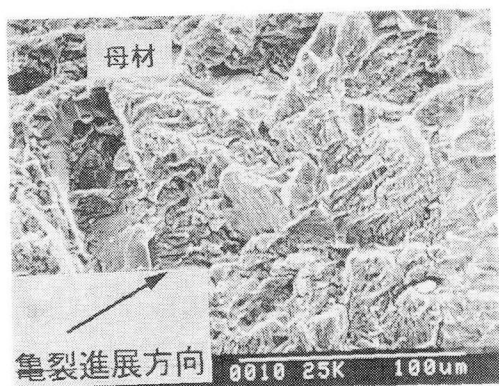
図-7からわかるように、亀裂1~4(E等級)は、若干強度等級よりも下回っているが、ほぼ同等といえる。また亀裂5および6(E等級)、亀裂7(G等級)、亀裂8(D等級)では、JSSC疲労設計指針の強度等級を上回っているのがわかる。したがって、ステンレスクラッド鋼の疲労強度は、JSSC疲労設計指針の強度等級が適用でき、また、鋼と同程度の疲労強度を有していると判断できる。



a) 測定点Bのストライエーション



b) 測定点Bのストライエーション (拡大)



c) 測定点Cのストライエーション

d) 測定点Cのストライエーション (拡大)



写真-7 き裂1のストライエーション

4. 7 亀裂破面観察

写真-5 a) ~b) に亀裂4の外観および断面組織を示す。写真-5 b) は、母材と合わせ材界面付近の亀裂の様子を示す。写真-5 b) に示すように、母材/合わせ材界面において、界面のはく離や伝播経路の分岐等を生じることなく、異常進展はみられなかった。また、走査形電子顕微鏡観察結果でも、母材と合わせ材の破面外観は異なるものの、界面部分で段差や割れを生じることなく連続性が保たれていた。

写真-6 に亀裂1の破面外観および母材-合せ材境界付近の走査型電子顕微鏡写真を示す。写真-7 a) ~d) は写真-6 a) に示す位置BおよびCの破面におけるストライエーションである。写真-6 a) ではピーチマークテストによる破面が現れており、また写真-7からは、亀裂進展方向と直角にストライエーションが観察できる。母材/合わせ材界面付近のストライエーション間隔は、母材で $0.25\mu\text{m}$ 、合わせ材で $0.3\mu\text{m}$ であった。このことから、界面で伝播速度の急激な加減速はなく、全体に連続的な扱いが可能であると考えられる。

5. 結 論

高い防食効果が期待できるステンレスクラッド鋼の橋梁への適用を目指して、疲労強度解明の観点からステンレスクラッド箱桁を作成し、曲げ疲労実験を行った。今回の実験および発見した亀裂の破面観察結果をまとめれば、以下のようになる。

- (1) 箱桁構造物を対象とした疲労強度は、鋼橋のそれと同等であり、JSSC鋼構造物の疲労設計指針の強度等級曲線が使用できる。
- (2) 今回の亀裂は、亀裂7および8以外は内ダイアフラムの溶接し端部鋼側から亀裂が発生し、フランジ外面(ステンレス合わせ材側)へ進展・貫通した。また、断面組織観察結果から、溶接棒にステンレスを使用した突き合わせ継手部では、熱影響部から亀裂が発生しているように思われた。
- (3) クラッド鋼の母材/合わせ材界面では、段差、割れ、はく離などはみられず、亀裂は連続性が保たれていた。さらに界面での亀裂伝播速度の急激な加減速もなかったことから、全体として連続的扱いが可能と考えられる。
- (4) 溶接し端部のひずみ変化を測定することにより、箱桁内部のような目視しにくい箇所の亀裂発生を推定できる。

謝 辞

本研究は、土木学会鋼構造委員会新技術小委員会耐久性WGの一活動として行ったものである。耐久性WGの各委員および関連会社の方々には、惜しまぬご協力を賜りました。心より感謝致します。

参考文献

- 1) 稲垣, 恩澤, 原, 金子, 菅野, 久保田, 近藤: 圧力技術の現状と将来 16. クラッド鋼, 日本高圧力技術協会, pp.241-264, 1989.
- 2) 土木研究所: ダム放流設備へのステンレス材料適用マニュアル(案), 土木研究所資料, 1993.
- 3) 座間, 斉藤, 矢島, 梶田, 関, 須賀, 本田, 永元: TMCP型ステンレスクラッド鋼板のケミカルタンカーへの適用, 日本造船学会論文集, No.163, pp.433-440, 1988.
- 4) 土木学会鋼構造委員会: 鋼構造の新技術に関する調査研究報告書(中間報告), 土木学会, pp.105-132, 1993.
- 5) 後藤, 関口, 松田, 藤田, 安波, 藤井, 三木: ステンレスクラッド鋼を用いた実寸断面橋梁部材の試作について, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.965-974, 1996.3.
- 6) 恩澤, 福田, 大尾, 原, 亀山: ステンレスクラッド鋼の接合強度評価法について, 圧力技術, Vol.29, No.5, pp.287-304, 1991.
- 7) 大路, 中井, 橋本: ステンレスクラッド鋼における接合界面の強度, 材料, Vol.39, No.439, pp.39-45, 1990.
- 8) 大路, 中井: 異種接合材の接合界面に沿う疲労亀裂伝ば, 材料力学講演会講演論文, 1989.
- 9) 菅田, 外山: ステンレスクラッド鋼接合界面の疲労強度に及ぼす圧下比の影響, 本機学会通常総会講演会講演論文集, Vol.67, pp.96-98, 1990.
- 10) 福田, 岩館: 圧延ステンレスクラッド鋼の接合強度特性とその評価法, 鉄と鋼, No.76, pp.191-98, 1990.
- 11) 福田, 鈴木, 岩館: 圧延ステンレスクラッド鋼の界面性状と接合強度特性, 材料とプロセス, Vol.2, No.5, pp.2-5, 1989.
- 12) Konda, N. & Toyama, K.: Fatigue strength of welded joints in stainless steel clad plates, Vol.4, Int. Conf. on Mechanical behaviour of materials 6th (Kyoto), pp.859-864, 1992.
- 13) Poyet, P., Granger, G. and Maillard-Salin C.: Fatigue behaviour of welded joints in stainless steel clad plate, Int. Conf. Fatigue welded construction (, pp.45-58, 1988.
- 14) 矢島, 座間, 平田, 斉藤, 末岡, 森, 梶田: 船舶に使用されるステンレス鋼・ステンレスクラッド鋼の疲労強度に関する考察, 西部造船会会報, No.75, pp.224-230, 1988.
- 15) 日本規格協会: JISハンドブック 鉄鋼, 1993.
- 16) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂 1993.4.
- 17) 日本道路協会: 道路橋示方書(I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, 1994.2.

(1996年9月6日受付)