

鋼桁ディテールの 道路橋シミュレーション荷重疲労

FATIGUE OF LARGE-SCALE WELDED GIRDERS UNDER SIMULATED HIGHWAY LOADING

三木千寿*、豊田幸宏**、森猛***、榎土尚宏****

by Chitoshi MIKI, Yukihiro TOYODA, Takeshi MORI and Naohiro ENOKIDO

In order to examine the fatigue strength of welded bridge details subjected to traffic loading, three large-scale girders were tested with various gusset details, transverse stiffeners and welded coverplates. The results were compared with the fatigue strengths of joint specimens and the allowable stresses. Furthermore, the applicability of drilling holes as a retrofit technique was investigated.

1. はじめに

近年、鋼橋において溶接継手部の疲労損傷が多数報告されている¹⁾。最近の鋼橋の設計・製作が溶接構造を主流とする傾向にあること、またその上を通過する車両の重量化、交通量の増加を考えると、溶接継手部の疲労損傷はますます増加するものと考えられる。したがって、疲労損傷の予知を目的とした維持・管理や補修・補強の技術を確立する必要がある。そのためには、まず、溶接継手部の疲労強度を実験的、解析的に把握しておく必要がある。

溶接継手部の疲労強度を実験的に明らかにする場合、継手部をモデル化した小型試験体の疲労試験を実施することが多い。しかし、モデル化した試験体の疲労強度と実橋梁における溶接継手部の疲労強度は、以下の条件により場合によっては異なることが予想される。

- ・部材寸法、溶接欠陥の発生状況、残留応力のレベルの違い。

- ・従来の溶接継手の疲労試験は、一定振幅荷重を用いているが、実際の継手部は変動荷重（実働荷重）を受けているという荷重範囲の頻度分布性状の違い。

以上のことを考えると、部材の溶接方法、寸法等が実橋とほぼ同じ試験体を用いて変動荷重試験を行い、

*	工博	東京工業大学助教授	土木工学科	(〒152東京都目黒区大岡山2-12-1)
**	工修	(財)電力中央研究所		(〒270-11千葉県我孫子市我孫子1642)
***	工博	東京工業大学助手	土木工学科	(〒152東京都目黒区大岡山2-12-1)
****		川崎重工業株式会社		(〒675-01兵庫県加古郡播磨町新島8)

行い、溶接継手部の疲労強度を明らかにしておくことは、鋼橋部材の疲労設計を行う上で重要である。

現在までに、我国において大型の溶接プレートガーダを用いた変動荷重試験を行った例はない。アメリカでは、Fisherら²⁾が、レイリー分布に従った変動波形（実働波形）を用いて大型溶接プレートガーダの疲労試験を行っている。その中で、Fisherら²⁾は、レイリー分布は、鋼橋部材に生じている応力範囲の頻度分布によくあうと述べている。

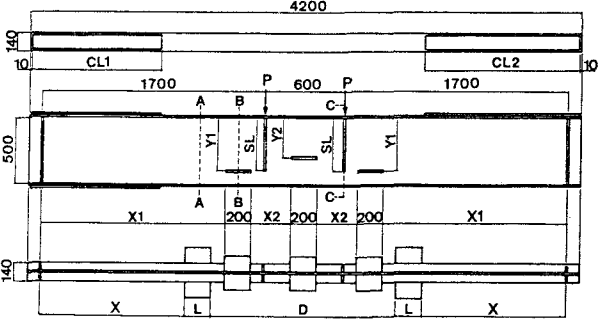
しかし、最近、我国で行われた実橋の応力測定結果³⁾によると、応力範囲の頻度が極端に低応力側に偏っており、このような頻度分布を既存の確率分布に置き換えてしまうのは無理がある。したがって、試験に用いる変動波形（実働波形）の作成には何らかの工夫を要する。

以上のことから、本研究では、大型の溶接プレートガーダを用いて、変動荷重下における溶接継手部の疲労強度を明らかにすることを目的とする。そのため、本実験で得られた結果と最近の国内外の疲労試験結果を比較し、以下の事項に着目して本実験結果を評価した。

- ・大型の試験体を用いた場合と小型の試験体を用いた場合の疲労強度の違い
- ・実働荷重下と一定振幅下における疲労強度

なお、試験に用いた変動波形は車両と重量を確率変数としたコンピュータシミュレーション⁴⁾から作成した。

試験体 1、2



試験体 3

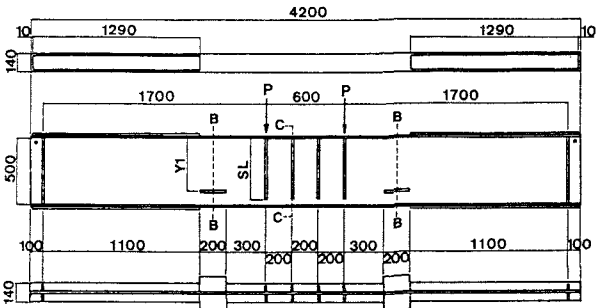


図 1 (a) 桁試験体の形状・寸法

表 1 継手の取り付け位置・寸法

試験体番号	フランジガセット			ウェブ・ガセット				スティフナー	カバープレート	
	X	L	D	X 1	X 2	Y 1	Y 2	S L	CL1	CL2
1	1520	180	600	1300	400	450	398	457	610	—
2	1100	200	1400	1400	300	400	400	465	990	1190
3	—	—	—	1290	—	400	—	460	1290	1290

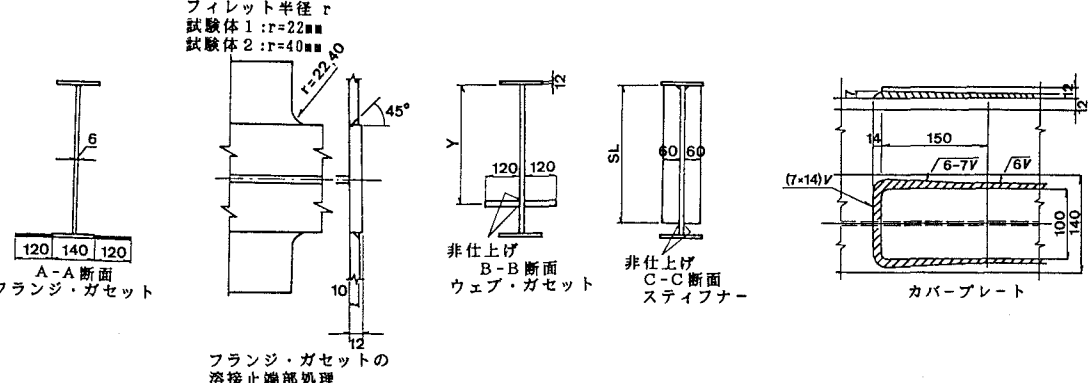


図 1 (b) 継手部の形状・寸法

表 2 供試鋼材の機械的性質、化学成分

Steel	yield strength (kg/mm ²)	tensile strength (kg/mm ²)	elongation (%)	Type	Chemical composition(X)												
					C	Si x100	Mn	P	S x1000	Cu	Ni	Cr x100	Mo	V	Nb	T.Al 1000	Ceq x100
SM50A	41	57	27	SM50A	16	38	141	23	4	—	—	—	4	—	—	—	41
SM50YA	39	54	25	SM50YA	16	34	131	15	10	2	—	—	—	—	—	—	39

また、本研究では、簡便な補修方法として疲労き裂先端に円孔（スト
ップホール）をあける方法を取りあげ、その補修効果について実験的に
検討することをもうひとつの目的としている。

2. 実験方法

(1) 試験体

図 1 (a)、(b)に溶接プレートガーダ（以下、桁試験体と
呼ぶことにする。）および継手部の形状・寸法を示す。試
験体は 3 体製作し、それぞれの試験体によって、フランジ
ガセット、ウェブ・ガセット、垂直スティフナー、カバ
プレートが取り付け位置を変えて溶接されている（表 1）。

図 1 (b)に示すごとくフランジ・ガセットの端部には、
フィレットが付いている。フィレット半径は試験体 1, 2に
おいてそれぞれ 22mm、40mmとした。なお、フランジとガセ
ットの突き合わせ溶接止端部は、グラインダーにより滑らかに仕上げている。その他のディテールにおける
溶接止端部は溶接のまま（非仕上げ）である。

なお、試験体のウェブとフランジの供試鋼材は、それぞれ SM50YA、SM50A であり、それらの機械的性質お
よび化学成分を表 2 に示す。

(2) 変動荷重データ

本研究では、実働荷重下における溶接継手部の疲労強度を明らかにするために、あらかじめ試験に用いる
変動波形データを作成した。波形データは、以下に示す方法で作成している。

i) 車両と重量を確率変数としたモンテカルロシミュレーションにより自動車荷重列を発生させる。シミュ
レーション交通モデルの車種構成を表 3 に示す。

ii) 発生した荷重列がスパン 20m の単純桁上を通過するときに、スパン中央に生じる曲げモーメントの値を
算出し、波形データとして用いる。

なお、表 3 に示した車種構成は東名高速道路等で深夜に生じるような車両列のほとんどが大型車で構成さ
れる厳しい交通条件に相当するものである。

図 2 に、このシミュレーションから作成した荷重データをモーメント範囲の頻度分布として整理したもの
を示す。変動荷重の頻度解析には、レインフロー法を用いた。

なお、このシミュレーションによる変動荷重波形が道路橋に生じる応力波形を十分に模擬するものである
ことは確認されている⁵⁾。

(3) 変動荷重試験

疲労試験は動的載荷能力 ±30tonf の電気油圧式サーボ疲労試験機により行っている。載荷方法は、4 点曲
げ載荷である。写真 1 に疲労試験の状況を示す。

表 3 交通モデルの車種構成

車種	構成率(%)
乗用車	10
小型トラック	5
2 軸大型トラック	25
3 軸大型トラック	50
トレーラー	10

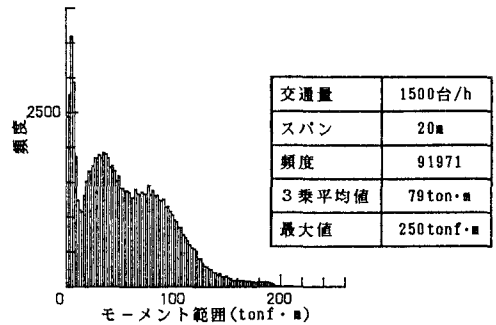


図 2 モーメント範囲の頻度分布

変動荷重試験は、試験体により異なる手法を用いて実施した。試験体No.1, No.2の疲労試験については、図2に示した頻度分布を近似した多段変動荷重(プログラム変動荷重⁶⁾)を用いている。図3にプログラム変動荷重の载荷パターンを示す。試験体No.3の試験については、シミュレーションにより作成した荷重データをDA変換し、そのまま試験機の制御信号として用いている。図4に試験体No.3の試験に用いた変動波形を示す。

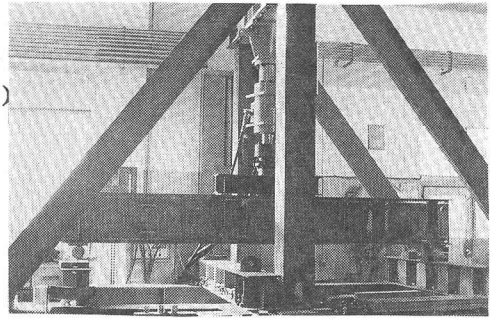


写真1 疲労試験の状況

なお、試験体No.1～3の試験実施時には、試験時間節約のため先に示した図2において、モーメント範囲の最大値に対して40%以下のモーメント範囲を削除した荷重データを用いている。この応力範囲の削除が溶接継手部の疲労損傷に対してほとんど影響を及ぼさないということは確認されている⁵⁾。

疲労試験の荷重範囲レベルの設定については、試験機の载荷能力と現行の国鉄建造物設計標準⁷⁾に定めるD等級の設計線を参考にし、各ディテールの破断寿命が1000万回以下となるように応力範囲を設定した。等曲げモーメント区間の引張り側フランジ下縁での等価応力範囲は、試験体No.1, No.2については101MPa、試験体No.3については102MPaである。いずれの疲労試験も応力比Rはほぼ0に設定している。

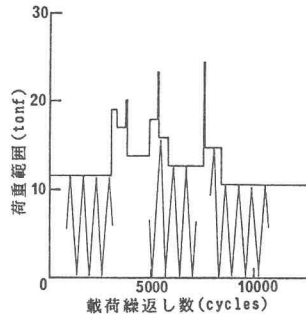


図3 プログラム変動荷重の载荷パターン

荷重プログラム ックNO.	荷重範囲 (tonf)	繰返し数 (cycles)
1	11.6	3050
2	19.1	260
3	17.0	416
4	20.2	65
5	13.8	1085
6	18.0	429
7	23.4	18
8	22.3	25
9	15.9	464
10	12.7	1712
11	21.3	22
12	24.5	24
13	14.8	855
14	10.6	4310

試験開始後、溶接止端部の疲労き裂の有無、進展を調べるため、所定の回数ごとに試験機をとめ、目視、および磁粉探傷法により止端部を観察した。その結果、疲労き裂が所定の長さに達している場合には疲労き裂を補修して実験を続行した。これは桁試験体におけるすべてのディテールの疲労強度を明らかにするためである。

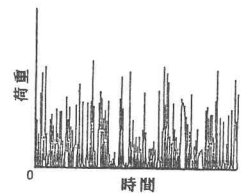


図4 試験に用いた変動波形

3. 実験結果及び考察

ここでは、本実験で得られた疲労試験結果と最近の国内外の疲労試験結果を比較し、

- ・大型の試験体を用いた場合と小型の試験体を用いた場合の疲労強度の違い
- ・実働荷重下と一定振幅下における疲労強度

について検討するとともに、疲労試験結果を現行の疲労設計基準と比較する。

3-1. フランジ・ガセット

(1)疲労試験結果

図5に疲労試験結果を示す。破断寿命は補修時までの载荷繰返し数であり、その時点でのき裂長さは7mm～28mmである。変動荷重下のデータは修正マイナー則に基づく等価応力範囲Sreq (RMC:3乗平均値)を用いて整理している。以下、変動荷重試験のデータは、この等価応力範囲を用いている。図中には、国鉄⁸⁾および

Fisherら⁹⁾が行なった疲労試験の結果を併せて示している。それぞれの試験体におけるガセット長さ、フィレット半径は、図中に示すごとくである。また図中の直線はそれぞれの実験結果から求めた回帰直線である。なお、本実験結果以外はすべて一定振幅荷重下における結果である。

図に示すごとく桁試験体におけるガセットの疲労強度は、小型試験体の疲労強度より低下していることがわかる。これはガセット長さおよびフィレット半径の違いによるものと考えられ、モデル化した小型試験体では、大型の桁試験体におけるフランジ・ガセットの疲労強度を危険側に評価してしまう可能性があるといえる。

また本実験結果は一定振幅荷重下におけるFisherらの実験結果において、き裂の発生しなかった応力レベルで破断している。これは応力範囲の頻度分布が一定振幅下の疲労限をまたいでいるからであり、一定振幅荷重下の疲労限以上の応力範囲成分が疲労損傷に寄与するからである。

疲労き裂の発生・進展状況は、試験体NO.1では、ガセット止端部において下フランジのエッジからき裂が発生・進展するタイプと止端部から貫通き裂として発生・進展するタイプが観察された。試験体NO.2では、ガセット・プレートの溶接止端部からき裂は発生しなかった。

(2) 疲労設計線との比較

図6に国鉄建造物設計標準(JNR)⁷⁾、米国のAASHTO¹⁰⁾、英国のBS5400¹¹⁾、欧州鋼構造連合疲労設計指針案(ECCS)¹²⁾から適宜抜粋した設計線と図5に示した疲労試験結果とを比較したものを示す。図に示すごとく、ECCS71、AASHTO Category Dの設計線は実験結果の下限を与えていることがわかる。JNR C等級の設計線は、小型試験体の実験結果の下限を与えているが、桁試験体の実験結果は、それより短寿命側となっている。これは、この設計線が小型試験体の疲労試験結果に基づいているためと考えられる。

3-2. ウェブ・ガセット

(1) 疲労試験結果

図7に疲労試験結果を示す。本実験結果における破断寿命は、き裂長さが約30mm~50mmに達した時点での載荷繰返し回数である。図中には、山田ら⁸⁾、国鉄⁸⁾、Fisherら²⁾、⁹⁾、Hirtら¹³⁾の疲労

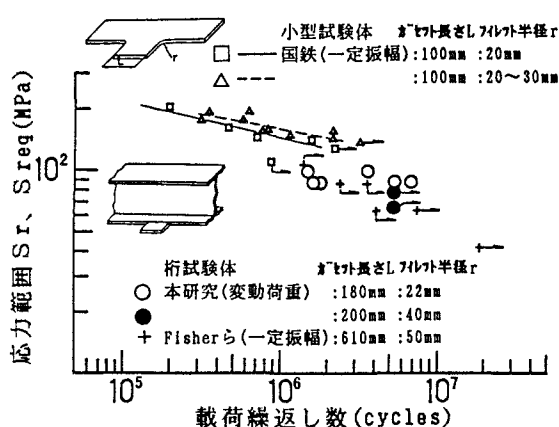


図5 疲労試験結果

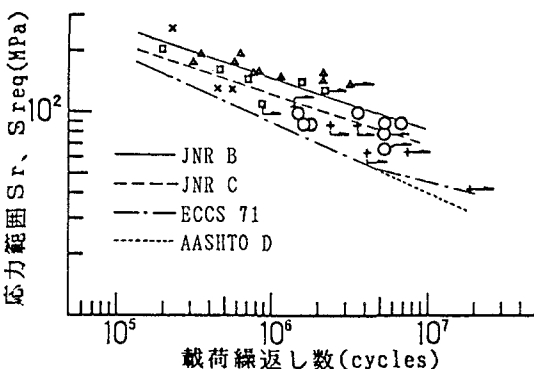


図6 実験結果と疲労設計線の比較

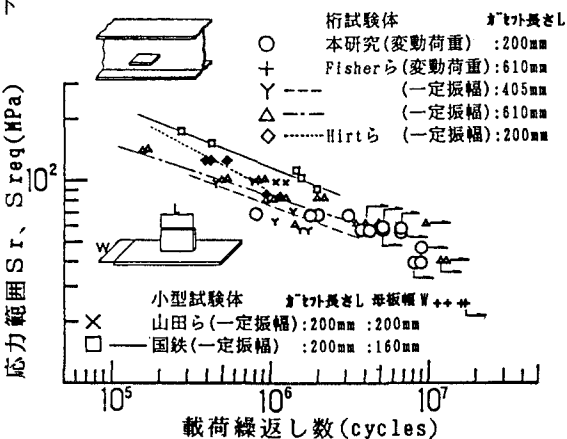


図7 疲労試験結果

試験結果もプロットしている。ガセット長さ等は図に示すごとくである。また、図中の直線はそれぞれの試験結果から求めた回帰直線である。

図に示すごとく桁試験体におけるウェブ・ガセットの疲労強度は小型試験体の疲労強度よりも低下している。例えば、Hirtらの試験結果と国鉄の試験結果に着目してみると、同じガセット長さではあるが疲労強度に違いがみられる。このことは、桁試験体のウェブ・ガセットには、小型試験体より高い拘束応力、残留応力が生じているためと考えられる。

以上のことより小型試験体を持ちて実際の鋼橋におけるウェブ・ガセットの疲労強度を評価する場合、危険側に評価してしまう可能性があると言える。

一定振幅荷重でのFisherらの疲労試験結果と本実験結果を比較してみると、一定振幅荷重下ではき裂の発生しなかった応力範囲レベルでも変動荷重下ではガセットの破断が生じている。これは、応力範囲の頻度分布が一定振幅荷重下の疲労限をまたいでいるからであり、一定振幅荷重下の疲労限以上の応力範囲成分が疲労損傷に寄与するからである。また変動荷重下のデータは一定振幅荷重下のデータから求めた回帰直線の延長上にプロットされている。

疲労き裂発生・進展状況を、写真2に示す。この写真に示すごとく疲労き裂は隅肉溶接止端部で発生し、貫通き裂となってウェブを進展していることがわかる。

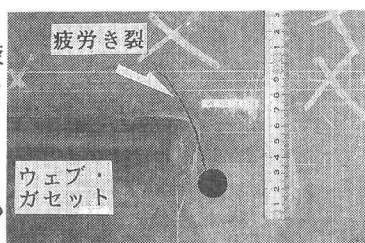


写真2 き裂の進展状況

(2) 疲労設計線との比較

図8に疲労設計線と図7に示した実験結果とを併せてプロットしたものを示す。設計線は先の3-1(2)に記述したもので適宜抜粋した。

図に示すごとくECCS50の設計線は本実験結果の下限を与えている。

BS5400 F2, AASHTO Category Eの設計線では、桁試験体の実験結果の中で、設計線より若干短寿命側になるものが生じてしまう。また、JNR D等級の設計線は、小型試験体の実験結果の下限は与えるが、本実験結果を含む桁試験体の実験結果に対しては危険側の評価となっている。

長寿命域におけるFisherらの変動荷重試験結果に対しては、AASHTO Category E'の設計線がその下限を与えている。その他の設計線では、載荷繰返し数が 10^7 回を越えるような長寿命域における疲労強度評価に問題点があるように思われる。

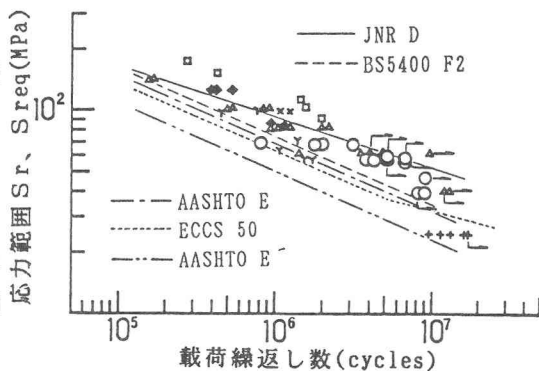


図8 実験結果と疲労設計線の比較

3-3. 垂直スティフナー

(1) 疲労試験結果

図9に疲労試験結果を示す。本実験結果における破断寿命はき裂長さが約30mmに達した時点における載荷繰返し数である。図中には、三木ら¹⁴⁾によるリブ十字継手試験体の疲労試験結果、Fisherら⁹⁾, NCHRP. Data Base⁹⁾の疲労試験結果がプロットされている。なおリブ十字継手試験体を用いた変動荷重下における疲労試験では、本実験における試験体No.3の試験時に用いた荷重載荷方法、変動荷重データを用いている。図中の直線はそれぞれの疲労試験結果から求めた回帰直線である。

図に示すごとく本実験結果は、変動荷重下における小型試験体の結果と比較して若干、短寿命側であるこ

とがわかる。また、Fisherらの桁試験体を用いた一定振幅荷重試験結果も、小型試験体を用いた一定振幅荷重試験結果と比較してやや短寿命側である。以上より、大型の桁試験体におけるスティフナーの疲労強度は、小型試験体の疲労強度より低いといえる。しかしながら、ガセット継手の場合ほど顕著な疲労強度の差はない。小型試験体の疲労強度に基づいて、実際の鋼橋における垂直スティフナーの疲労強度を評価すると若干危険側となる。

変動荷重下の試験結果は、ガセット継手の実験結果と同様に、一定振幅荷重試験の結果から得られた回帰直線上、あるいはその延長上にプロットされている。これは、3-1,2で記した理由と同様である。

本実験では、このディテールから、疲労き裂は発生しなかった。発生したき裂は隅肉溶接止端部に沿って進展するのでき裂の検出は容易ではない。本実験では、1箇所からき裂が発生したが、これは、き裂長さが30mm程度に成長して磁粉探傷によりやっと検出できたものである。

(2)疲労設計線との比較

図10に疲労設計線と図9に示した実験結果とを併せてプロットしたものを示す。設計線は先の3-1(2)に記述したのから適宜抜粋した。

図に示すごとくAASHTO Category Cの設計線は実験結果の下限を与えている。また、JNR C等級の設計線では、小型試験体、桁試験体の実験結果の中で若干短寿命側になるものが生じてしまう。ECCS 80の設計線は、実験結果に対してやや安全側となっている。

3-4. カバープレート

(1)疲労試験結果

図11に疲労試験結果を示す。図中にはFisherらの疲労試験結果⁹⁾を併せ示す。

Fisherらの疲労試験結果に着目してみると、一定振幅荷重下、変動荷重下ともに桁試験体におけるカバープレートの疲労強度は小型試験体のものよりも明らかに低い。したがって、小型試験体により実際の鋼橋におけるカバープレートの疲労強度を評価すると危険側の評価になるということが言える。なお、本実験で破断したカバープレートの疲労強度は、Fisherらの実験結果よりかなり高く、小型試験体の疲労強度と同じ程度であるが、これは、破断寿命の取り方の違いが原因と考える。即ち、本実験では、写真3に示すごとくき裂が上フランジを完全に貫通し、ウェ

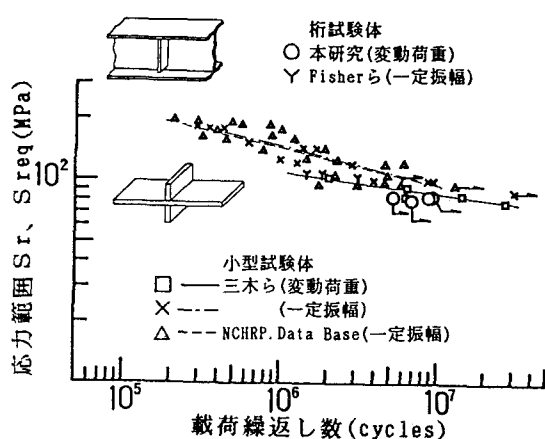


図9 疲労試験結果

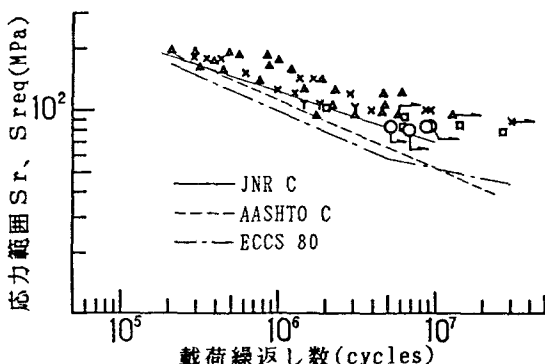


図10 実験結果と疲労設計線の比較

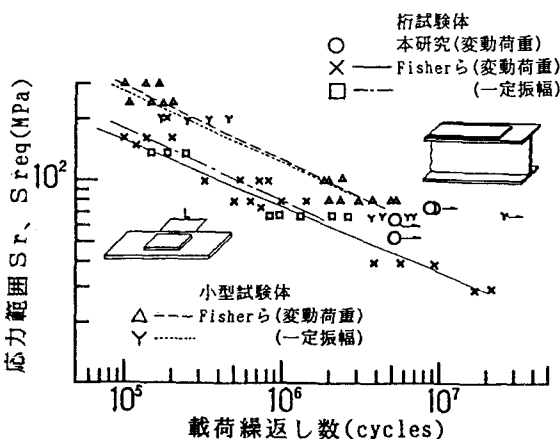


図11 疲労試験結果

ブにまで進展した状態までき裂を発見することができず、その時点を破断寿命としたためである。

変動荷重下の疲労試験結果は他のディテールの場合と同様に、一定振幅荷重下の結果から求められた回帰直線上、あるいはその延長上に位置している。

写真4にき裂の発生状況を示す。写真に示すごとく疲労き裂はカバープレート溶接止端部において2箇所から発生し、半楕円クラックとして進展した様子が観察できる。

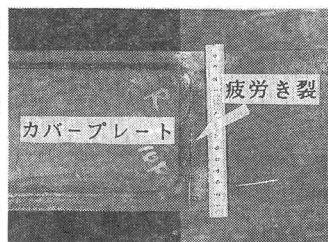


写真3 き裂の進展状況

(2) 疲労設計線との比較

図12に疲労設計線と図11に示した実験結果とを併せてプロットしたものを示す。設計線は先の3-1(2)に記述したものから適宜抜粋した。

図に示すごとくBS5400 G、ECCS50の設計線はすべての実験結果の下限を与えている。また、AASHTO Category Eの設計線では、桁試験体の実験結果のなかで、若干短寿命側となるものが生じてしまう。JNR D等級の設計線は小型試験体の実験結果に対しては下限を与えているが、桁試験体の実験結果に対しては、かなり危険側の評価となっている。

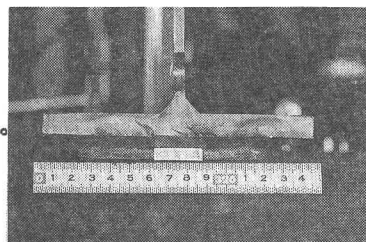


写真4 き裂の発生状況

4. 補修効果

(1) 補修方法

各ディテールにおいて溶接止端部から発生した疲労き裂が所定の長さに達した時に試験を中断し、以下の方法で補修を行った。

(a) ストップホールを開けるだけの補修

(b) ストップホールを高力ボルトで締めつける補修

(c) ストップホールを開け添接板を高力ボルトで摩擦接合する事による補修

ストップホールの径は18mmφであり、添接板は板厚8mm、幅55mmのものを用いている。補修後は疲労試験を続行し、目視と磁粉探傷法によりストップホール縁からのき裂の発生をチェックした。

(2) 補修後の疲労試験結果

補修後の疲労試験結果を公称応力範囲、応力集中を考慮した応力範囲を用いてそれぞれ着目して整理した。図13に公称応力範囲を用いて整理した補修後の疲労試験結果を示す。公称応力範囲は、疲労き裂先端位置におけるものである。ただし、公称応力範囲がき裂の両先端部で異なる場合は、応力範囲の大きい方をとった。図中には、補修効果がどの程度であるかを明らかにするために、JNR C等級、JNR D等級の設計線を併せて示している。図に示すごとくフランジ・ガセットから発生したき裂に対しては、ストップホールを高力ボルトで締めつける補修を施す

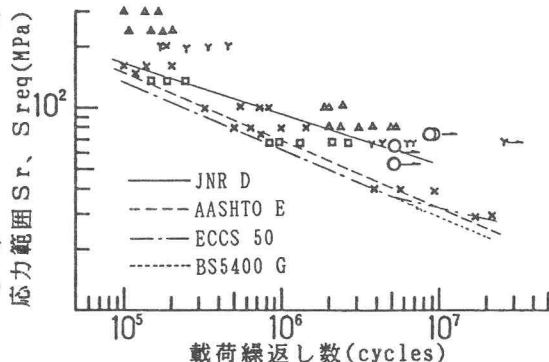


図12 実験結果と疲労設計線の比較

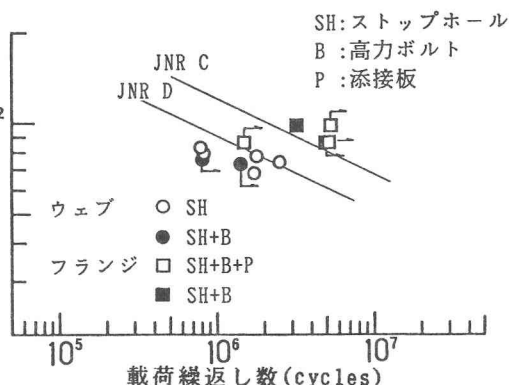


図13 補修後の疲労試験結果 (公称応力による整理)

ことによりJNR C等級程度の疲労強度が期待できると言

える。補修時に添接板を用いれば、補修効果はさらに出てくると考えられる。ウェブ・ガセットから発生したき裂に対しては、載荷繰返し数が100万回前後でき裂が発生している。ストップホールをのみの補修は応急処置的なものと考えた方がよい。ストップホールを高力ボルトで締めつければ、補修効果はストップホールのみの場合よりはあると考えられる。図14に公称応力範囲に応力集中係数を乗じて整理した場合の疲労試験結果を示す。図の縦軸は公称応力範囲にストップホールによる応力集中を考慮したものである。応力集中係数の算出方法を以下に記す。即ち、図15(a)に示すごとくき裂の先端にあげたストップホールを(b)のごとく楕円形の切欠きと考え、ストップホールの応力集中係数を次式により求める。

$$\alpha = 1 + 2\sqrt{a/\rho}$$

公称応力範囲がき裂の両先端部で異なる場合は、応力範囲の大きい方に応力集中係数を乗じるものとする。なお図14中の一点鎖線はSM50の素材の疲労試験結果¹⁵⁾を示している。

図14に示すごとくウェブ・ガセットおよびフランジ・ガセットから発生したき裂に対してはストップホールを高力ボルトで締めつける補修を施すことによりほぼ素材と同程度の強度が期待できると言える。さらに、ストップホールを開け添接板を高力ボルトで摩擦接合する事による補修を施すと素材の強度と同程度か、あるいはそれ以上の強度が期待できるものと考えられる。

図中の実線はウェブ・ガセット溶接止端部から発生したき裂に対してストップホールをのみの補修を施した場合の疲労試験結果からもとめた回帰直線である。この直線を用いれば、疲労き裂の応急処置のためのストップホールの補修効果が検討できると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1)大型桁試験体における溶接継手の疲労強度は、小型試験体の疲労強度より低い。特にウェブ・ガセット、カバープレートは、小型試験体を用いて疲労強度を評価すると危険側となる可能性がある。
- (2)変動荷重下では、等価応力範囲(RMC)が一定振幅荷重下の疲労限以下になっても溶接止端部からき裂が発生し、部材は破断する。また等価応力範囲(RMC)で整理した変動荷重下での疲労試験結果は、一定振幅荷重下の結果から求められた回帰直線上、あるいはその延長上に位置する。このことは、試験体の大きさによらない。
- (3)本研究で採り上げた疲労設計線の中には、大型の桁試験体の実験結果を危険側に評価してしまうものがある。したがって、既存の設計線を用いて鋼橋部材の疲労設計を行う場合、注意を要する。特に長寿命域における変動荷重下の疲労強度評価には、検討の余地があると考えられる。

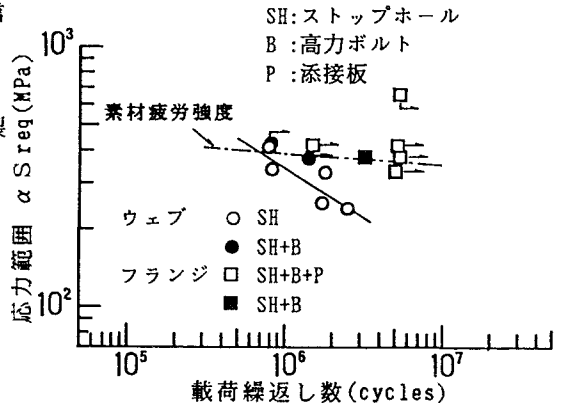


図14 補修後の疲労試験結果
(応力集中を考慮)

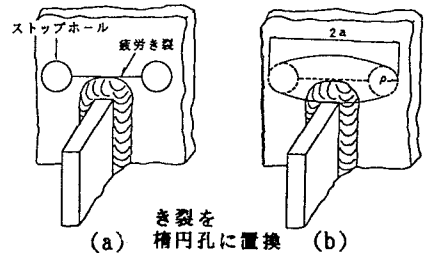


図15 ストップホールのモデル化

- (4) ストップホールを高力ボルトで締めつける補修を施すことによりほぼ素材と同程度の強度が期待できる。
添接板を用いればさらに疲労強度は向上する。

最後に、本研究は、文部省科学研究費補助金（一般研究(C)、課題番号62550327・代表、三木千寿）をうけて行ったことを付記する。

参考文献

- 1) 西川和広：道路橋における疲労問題と補修、補強、橋梁と基礎、Vol.17, No.18, 1983-8
- 2) J.W.Fisher, D.R.Hertz and A.Zhong: Steel bridge members under variable amplitude long life fatigue loading, NCHRP.Report 267 1983-12
- 3) 日本道路公団東京第一管理局、大日本測量：東名高速道路（東京～三ヶ日間）交通量測定調査報告書、1983-2
- 4) 三木千寿、後藤祐司、村越潤、館石和雄：シミュレーションによる道路橋の疲労設計活荷重の研究、構造工学論文集 Vol.32A, 1986-3
- 5) Chitoshi MIKI, Jun MURAKOSI and Masahiro SAKANO: Fatigue crack growth in highway bridges, Structural Eng./Earthquake Eng.Vol.4 No.2, 1987-10
- 6) たとえば J.Schijve: Effect of Sequences on Crack Propagation under Random and Program Loading, Engng.Fract.Mech., 6 P.269, 1973
- 7) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説、1983-4
- 8) 山田健太郎、三ツ木幸子、近藤明雅：ガセット溶接部材の疲れ強さと設計標準、構造工学論文集 Vol.32A, 1986-3
- 9) P.B.Keating and J.W.Fisher: Evaluation of fatigue tests and design criteria on welded details, NCHRP.Report 286 1986-9
- 10) The American Association of State Highway and Transportation Officials: Standard Specification for Highway Bridges, 1977.
- 11) British Standards Institution: Steel, concrete and composite bridges, BS5400 Part10, 1980
- 12) Recommendation for the fatigue design of steel structures: Committee TC6 "Fatigue", European Convention for Constructional Steelwork, Final draft, Publication ICOM 141, 1985-2
- 13) IABSE Colloquium Lausanne 1982: Fatigue of Steel and Concrete Structures, Proceedings of IABSE, 1982.
- 14) Chitoshi MIKI, Jun MURAKOSHI, Yukihiro TOYODA, Masahiro SAKANO: Long life fatigue behavior of fillet welded joints under computer simulated highway and railroad loading, (土木学会論文集に投稿中)
- 15) Chitoshi MIKI, Toshio NISHIMURA, Hiroaki TANABE, and Kazuhiro NISHIKAWA: Study on Estimation of Fatigue Strengths of Notched Steel Members, PROC.OF JSCE, No.316, 1981-12

(1988年10月12日受付)