

腹板に制振鋼板を用いた I 桁の疲労試験

Fatigue Test of I-Shaped Model Beam Composed of Damping Plate

雅楽川 英 樹^{*(1)} 聖 生 守 雄^{*(2)} 浅 岡 宏 行^{*(3)} 笹 尾 英 弥^{*(4)}
Hideki UTAGAWA Morio SEIRYU Hiroyuki ASAOKA Hideya SASAO
保 科 安 男^{*(5)} 安 波 博 道^{*(6)} 後 藤 信 弘^{*(6)}
Yasuo HOSHINA Hiromichi YASUNAMI Nobuhiro GOTO

抄 録

鋼橋の騒音低減対策を目的に、新日本製鐵が開発した制振鋼板（樹脂サンドイッチ型制振鋼板）の鋼橋への利用技術開発を行っている。これまでに、同鋼板を桁の一部に使用した場合の騒音低減効果を把握すると共に、桁モデルにおける座屈耐力特性、高力ボルト摩擦接合時の力学特性、溶接施工性、疲労特性など構造部材としての適用性評価並びに適用開発を行った。これら一連の開発のうち、制振鋼板を腹板（ウェブ）に適用した I 桁構造で、鋼鉄道橋に用いられる基本的な溶接継手を有する模型桁を対象に行った疲労試験の結果について述べた。本試験により、疲労き裂の発生・伝播特性を把握し、更に疲労設計曲線の設定に必要なデータが得られた。

Abstract

To reduce noise at steel bridges, we are developing a technology for the application of Vibless Plate (steel plate bonded with adhesive) developed by Nippon Steel Corporation to steel bridges. Up to now, the effect of Vibless Plate used in the I-shaped beams on noise reduction has been investigated and the applicability of Vibless Plate as a structural member has been studied by evaluating the load carrying capacity in the model beam, the dynamic characteristics of high-strength bolted joints, weldability, fatigue characteristics, etc. The present paper describes the results of fatigue test of the I-shaped beam composed of Vibless Plate in its web. This test was conducted using an I-shaped model beam with the basic type of welded joint which is widely used for railway bridges. The fatigue crack initiation and propagation characteristics were determined and the data necessary for setting the design curves for allowable fatigue stress were obtained from this test.

1. ま え が き

交通網の整備促進、高速化に伴い、橋梁から発生する騒音が社会問題となっている。生活環境との調和のとれた交通基盤を構築する上で、このような騒音問題を解決することは重要課題である。

新日本製鐵では、制振鋼板を橋梁に用い、橋梁から発生する騒音を低減する試みを行っている。ここでの制振鋼板とは、2枚の鋼板の間に粘弾性樹脂をサンドイッチしたもので、騒音を発生する部材自身が粘弾性樹脂のせん断変形によって振動エネルギーを熱エネルギーに変換し、振動速度及び振幅を低減させることにより、音響放射を少なくする機能を有する鋼板である。この制振鋼板のうち板厚が6 mm程度以下の薄鋼板は、自動車部品、家庭電化製品、建築用材などに適用され、高く評価されている。本報では構造用鋼板として最近製造が可能となった6 mm以上の比較的厚い鋼板を対象としている。

制振鋼板を橋梁等の構造部材に用いるにあたり、耐力、疲労強度、ボルト接合部の挙動などの力学特性、並びに溶接施工性を明らかにしておく必要がある。

本報告は、その一環として制振鋼板の疲労特性を明らかにすることを目的としたものであるが、これまでにを行ったクーボン疲労試験¹⁾に引続き、鋼鉄道橋に用いられる基本的な溶接継手を有する模型桁（ウェブに制振鋼板の厚板を使用）を用い、実応力頻度分布を想定した実働荷重による疲労試験を行った結果を述べる。

2. 試 験 方 法

2.1 試験体の製作方法

試験体は、鉄道橋で疲労の影響を大きく受けるトラスの縦桁を想定した断面構成とし、それに鉄道橋で多く用いられる各種継手を設けて製作した。試験体は2体作成し、フランジとウェブを7 mmのすみ肉で溶接し、支間中央に面外ガセットを溶接したものをA試験

*⁽¹⁾ 鉄構海洋事業部 橋梁構造部
*⁽²⁾ 鉄構海洋事業部 橋梁構造部 室長
*⁽³⁾ 鉄構海洋事業部 技術開発部
*⁽⁴⁾ 技術本部 厚板技術部 部長代理

*⁽⁵⁾ 名古屋製鐵所 熱延部 部長代理
*⁽⁶⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター
主任研究員

体、フランジとウェブを開先溶接で接合し、支間中央に面外ガセットをボルトで接合したものをB試験体とする。A試験体、B試験体の概要図を図1、図2に示す。又、フランジとウェブの溶接詳細を図3に示す。

2.2 試験体の溶接品質

制振鋼板の溶接において注意すべき点は、2枚の鋼板間に熱に弱い樹脂が介在していることである。特に、フランジとウェブの溶接など、樹脂が直接溶融される場合は溶け出した樹脂や発生するガスにより溶接欠陥が生じる可能性が高い。そのため、当該部の溶接では予め樹脂を焼却除去するなどの溶接欠陥を抑制する処理が必要である²⁾が、本試験体製作ではあえてこのような処理を施さず、ウェブを普通鋼とみなした溶接を行った。製作後、フランジとウェブの溶接部の全線に放射線透過試験を行った結果、大小のブローホールが多数観察された。撮影したフィルムについて溶接品質の等級分類を行った結果を表1に示す。A試験体ではほとんどのフィルムが4級に該当した。又、B試験体はA試験体に比べると多少良好な溶接品質であった。

2.3 荷重方法

荷重は、図4に示すように100ton縦型構造物疲労試験機を用い、A、B試験体を並列に設置し、各試験体につき2点荷重、合計4点の同時荷重とした。

荷重荷重は図5に示すものを用いた。この荷重波形は東海道新幹線の実橋での一列車走行をモデル化したもので、1988年に鉄道総合技術研究所で実施された疲労試験^{3,4)}の荷重荷重と同波形である。なお、荷重の絶対値は、同研究所での試験とフランジでの曲げ応力レ

表1 溶接品質等級分類

供試体	箇所	マーク	等級分類 (フィルム18枚)					溶接順序
			1級	2級	3級	4級	合計	
A (すみ肉)	上フランジ	A-U 1	0	0	1	17	18	④
		A-U 2	0	1	1	16	18	③
	下フランジ	A-L 1	0	0	0	18	18	②
		A-L 2	6	3	5	4	18	①
B (開先)	上フランジ	B-U 1	6	1	4	7	18	③
		B-U 2	10	2	3	3	18	④
	下フランジ	B-L 1	5	3	2	8	18	①
		B-L 2	8	3	1	6	18	②
合計			35	13	17	79	144	

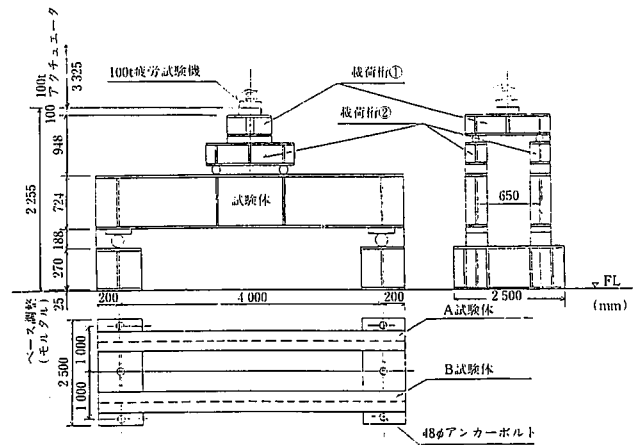


図4 試験装置概要

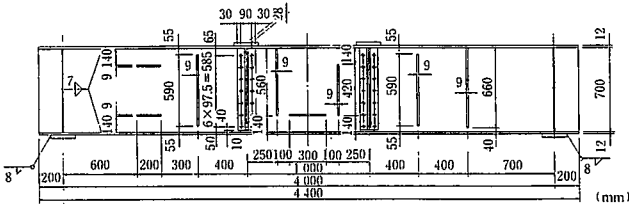


図1 A試験体概要

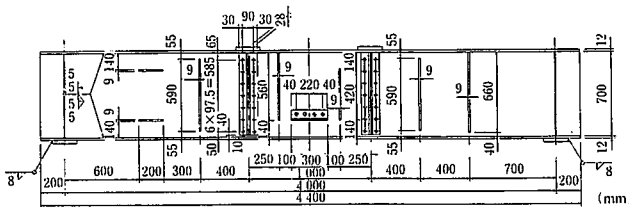
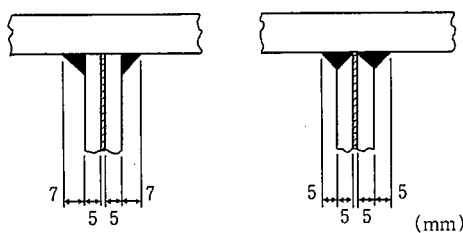
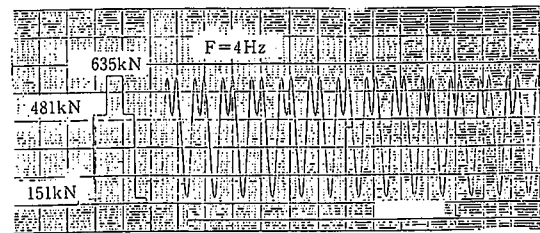


図2 B試験体概要



(a) A試験体 (b) B試験体

図3 フランジとウェブの溶接詳細



F: 繰り返し荷重載荷周期

図5 荷重荷重波形

ベル107.8MPaが一致するよう調整した。等価応力範囲は下記の式を用いて算出した。

$$\Delta\sigma_e = (\sum \Delta\sigma_i^m \cdot n_i / \sum n_i)^{1/m} \quad (m = 3)$$

ここに、 $\Delta\sigma_e$: 等価応力範囲、 $\Delta\sigma_i$: 応力範囲頻度分布の一応力範囲成分、 n_i : 応力範囲頻度分布における $\Delta\sigma_i$ の頻度、 m : 定数である。本式によれば、二次波の影響を考慮した等価応力範囲は主変動応力範囲の1%増となる。

又、疲労試験に先立ち、静的荷重試験を実施すると共に、繰り返し数100万回毎を目標に静的荷重試験を行い、試験体の各溶接継手部の応力と荷重の関係を把握した。

2.4 疲労き裂の検出

疲労き裂の検出は、毎日1回目視でき裂の有無を検査すると共に、自動的に検出する方法として、直径0.2mmφのエナメル被覆銅線をき裂の発生が予想される部位から10mm程度離れた位置に貼付し(図6参照)、き裂が一定の長さに進展すると同時にエナメル線が破断し

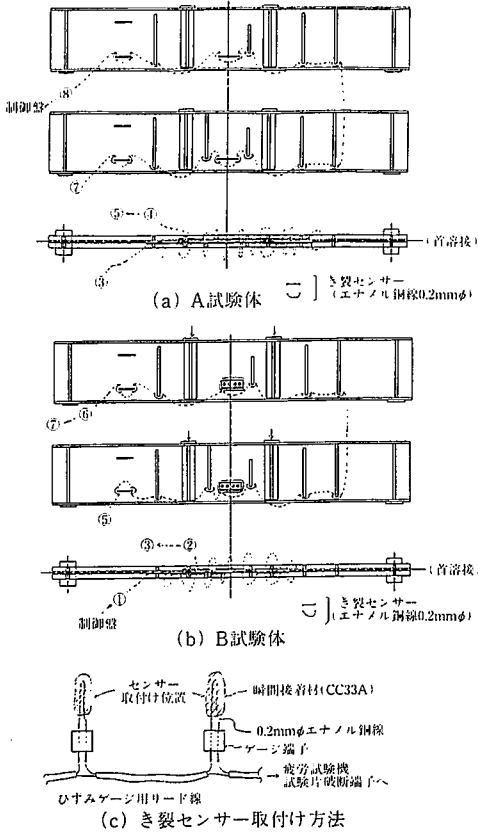


図 6 エナメル被覆銅線貼付位置

て試験機が停止する機構とした。疲労寿命としては、このエナメル被覆銅線が切断された繰返し数とした。

き裂進展の観察では、応力範囲が1/2で各3万回の載荷によりき裂破面にピーチマークをつけ、試験後の破面観察に供した。ピーチマークを入れた繰返し数は、399万回、516万回及び693万回である。疲労試験終了後、破面の拡大写真により、き裂の進展状況の観察を行った。

3. 試験結果

3.1 静的載荷試験結果

疲労試験に先立ち載荷荷重と試験体の発生応力との関係を調査する目的で静的載荷試験を実施した。ここで得られた実測応力と試験体に用いた荷重の載荷時の計算応力との比較、及び実測変位と載荷時の計算変位の比較も行った。図7にひずみゲージ及び変位計の位置、表2に試験結果を示す。この表では各部位に貼付されたひずみゲージから計測された応力の平均値を実測値として記載している。又、載荷時の計算応力は梁の曲げ応力とした。A, B試験体とも水平補剛材の局部応力を除き、計算値と実測値はよく一致していることがわかる。

3.2 疲労試験結果

(1) 疲労き裂発生位置

A, B 両試験体の下フランジとウェブの首溶接部と載荷点カバープレート及びA試験体の支間中央の水平補剛材部にき裂が発生した。載荷は最終的に723万回行った。最終載荷後の検査でも前記以外の部位にはき裂は発見されなかった。表3に各試験体で観察されたき裂位置、き裂発生回数、発生後の処理、発見時のき裂長さを示す。又、

下フランジのき裂発生位置と放射線透過試験の溶接欠陥との関係を図8に示す。き裂発生位置近傍には放射線透過試験で大きな溶接欠陥が観察されており、き裂発生の起点になっている可能性が高いと

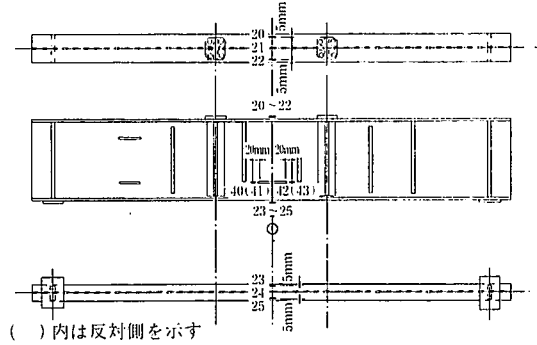


図 7 ひずみゲージ及び変位計位置

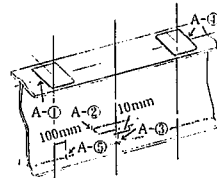
表 2 試験体の静的載荷試験結果 (載荷荷重635kN)

	A試験体		B試験体	
	計算	実測	計算	実測
上フランジ応力 (MPa)	-88.1	-88.5	-88.1	-85.6
下フランジ応力 (MPa)	107.6	105.8	107.6	103.7
水平補剛材応力 (MPa)	65.4	99.6	65.4	77.4
下フランジ変位 (mm)	2.12	2.54	2.12	2.50

表 3 観察された疲労き裂

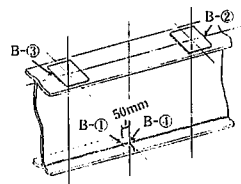
(a) 観察 (破断検知線による) された疲労き裂 (A試験体)

き裂番号	き裂位置	応力範囲 (MPa)	き裂発生回数 (目視回数)	発見後の処置 (処置時の回数)	発見時のき裂長さ (mm) ()内は目視
A-①	載荷点カバープレート	—	(3.41×10 ⁶)	無処置	(150)
A-②	中央水平ガセット (回し溶接止端)	52.9	3.58×10 ⁶ (3.69×10 ⁶)	無処置	(6)
A-③	下フランジ中央	80.0	3.73×10 ⁶ (3.91×10 ⁶)	添接板溶接 (4.36×10 ⁶)	(10)
A-④	載荷点カバープレート	—	(5.16×10 ⁶)	無処置	(111)
A-⑤	下フランジ載荷点近傍	80.0	3.41×10 ⁶ (5.58×10 ⁶)	添接板溶接 (5.73×10 ⁶)	(40)



(b) 観察 (破断検知線による) された疲労き裂 (B試験体)

き裂番号	き裂位置	応力範囲 (MPa)	き裂発生回数 (目視回数)	発見後の処置 (処置時の回数)	発見時のき裂長さ (mm) ()内は目視
B-①	下フランジ中央	80.0	(3.59×10 ⁶)	添接板溶接 (5.93×10 ⁶)	(5)
B-②	載荷点カバープレート	—	(5.16×10 ⁶)	無処置	(109)
B-③	載荷点カバープレート	—	(5.16×10 ⁶)	無処置	(22)
B-④	下フランジ補修の溶接線上	—	6.07×10 ⁶ (7.07×10 ⁶)	無処置	(5)



推測される。

(2)疲労き裂進展状況

き裂発生位置における進展状況を図9, 10, 11, 12に示す。この図より、下フランジとウェブの首溶接部ではいずれもウェブの一方の鋼板とフランジにき裂が生じ、き裂が進展するに従いフランジを

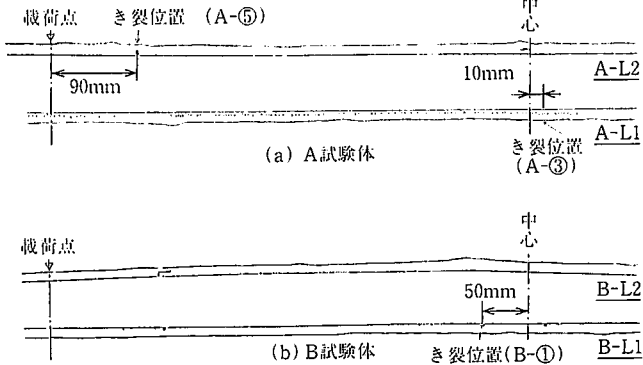


図8 溶接欠陥とき裂発生位置の関係

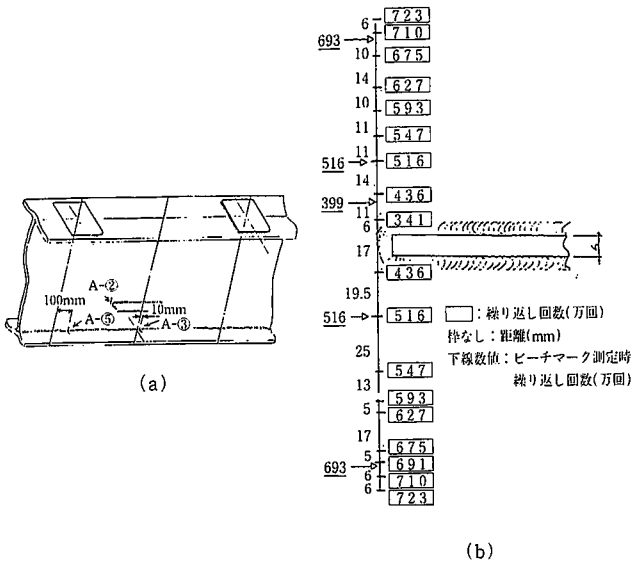


図9 き裂の進展状況(A-2)

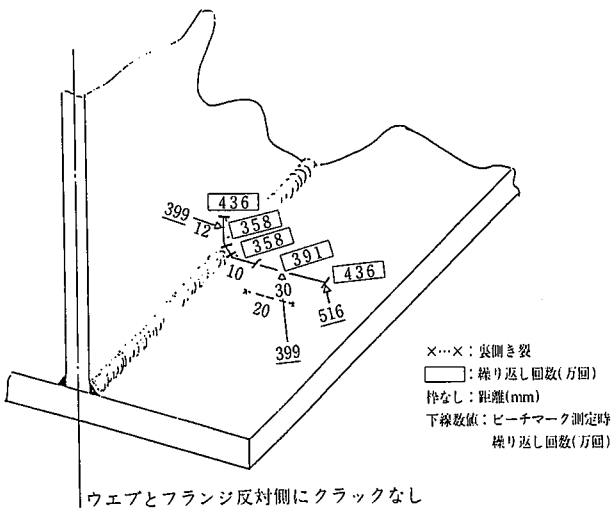
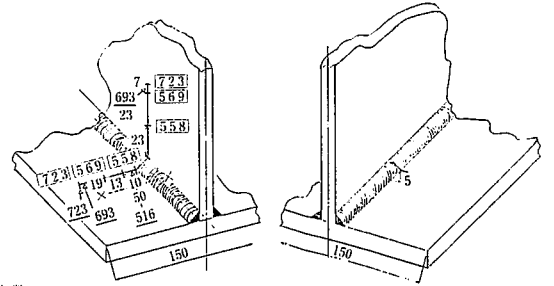


図10 き裂の進展状況(A-3)

介してウェブの他方の鋼板にき裂が進展していくことがわかる。又、ウェブの水平補剛材端部のすみ肉溶接部に発生したき裂は、試験終了段階でき裂長が206mmと大きく成長したにもかかわらず、ウェブの一方の鋼板でのき裂進展に留まっているのが特徴的である。

ウェブの水平補剛材端部に発生したき裂に伴うひずみ(図7に記載のひずみゲージ)の変化を図13に示す。この図によると、き裂が発生したウェブ表面ではき裂発生時にひずみが圧縮側に著しく変化



×…×:裏側き裂
□:繰り返し回数(万回)
枠なし:距離(mm)
下線数値:ピーチマーク測定時
繰り返し回数(万回)

図11 き裂の進展状況(A-5)

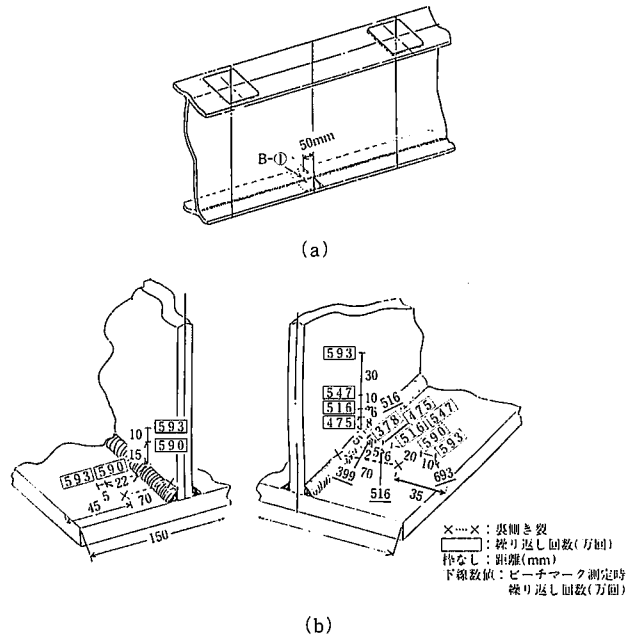


図12 き裂の進展状況(B-1)

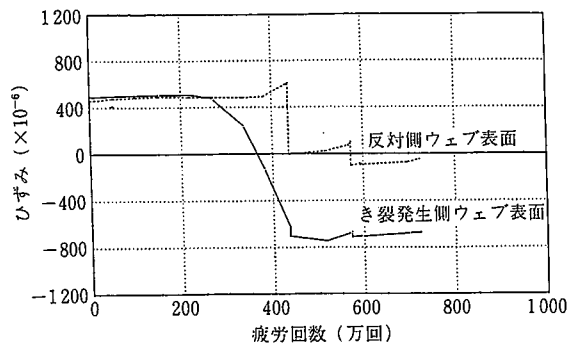


図13 き裂発生によるひずみの変化(A-2)

し始めており、この変化は436万回の下フランジの補修で停止する。この理由は、436万回でき裂は約35mm程度に成長しており、これ以降のき裂の成長がゲージに影響を与えなくなったものと推測される。

一方、き裂が発生していない他方のウェブでのひずみ変化は、わずかに引張側に変化するものの大きな変化は見られない(436万回でのひずみ変化は下フランジの補修添接板によるものである)。このことから、制振鋼板を用いた場合、片方にき裂が生じても他方に大きなひずみ変化をもたらすことがないことがわかる。

(3)破面の観察

写真1にB-①の破面写真及びビーチマークのスケッチを示す。399万回のビーチマークは溶着部に位置するため明確には読み取ることができないが、516万回及び693万回のビーチマークは明確に観察される。このき裂進展より、内部の溶接欠陥からき裂が生じていることが確認できる。

写真2に示すA-③及び写真3に示すA-⑤の破面ではビーチマークは明確に観察することができなかったが、いずれの破面にも大きな溶接欠陥(3~5mm径のブローホール)が介在しており、この欠陥がき裂の起点と考えられる。写真4に示すA-②に関しては、き

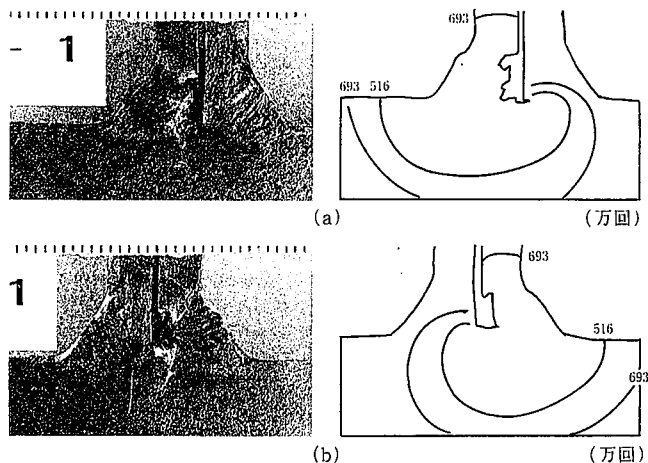


写真1 破面写真(B-①)

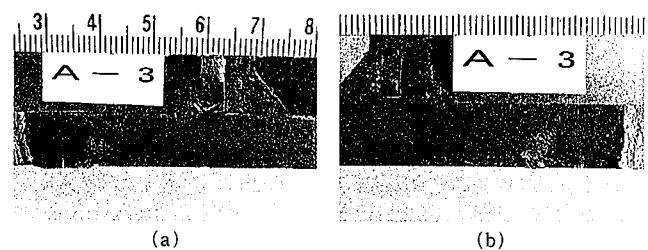


写真2 破面写真(A-③)

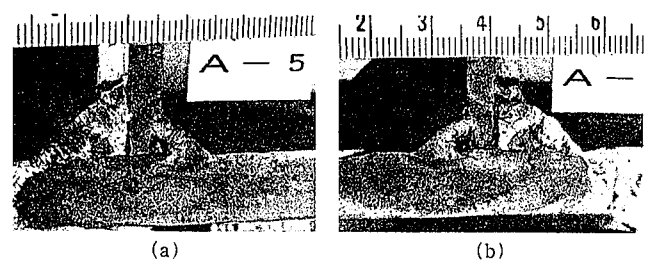


写真3 破面写真(A-⑤)

裂が蛇行しており、破面には大きな段差が観察される。又、ビーチマークは明確には観察されないが、き裂の起点は溶接ビード上と考えられる。

(4)S-N 線図

本試験体の疲労試験結果を、過去に行われた普通鋼板溶接継手の結果⁵⁾及びJSSC疲労設計指針(案)⁶⁾と対比してみた。

図14に、縦方向溶接継手の中ですみ肉溶接継手のデータ⁵⁾とJSSC指針のD等級疲労設計曲線、及び本試験結果を表示する。A, B試験体の結果には大きな相違はなく、ほぼ同様な疲労強度であった。この疲労強度は他の試験結果に比べ低いものになっている。この理由としては、溶接部に生じていたブローホールが起因していると考えられる。先に述べたように前処理として溶接部の樹脂を焼却することにより溶接品質は向上することがわかっており²⁾、本溶接部の疲労強度はD等級と見なせる可能性がある。

図15には面外ガセット溶接継手(水平補剛材)のS-N線図を示す。本試験結果は他の疲労試験結果と同様な直線上にあり、従来の結果と相違ないものと判断される。又、図16にすみ肉溶接継手(鉛直補剛材)S-N線図を示す。この結果も普通鋼と同様の疲労強度を示している。これらのことから、面外ガセット溶接部の疲労特性には樹脂やサンドイッチ構造などの影響は小さく、これまでの普通鋼の疲労強度を用いることが可能であるものと考えられる。

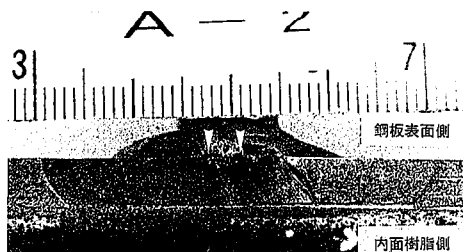


写真4 破面写真(A-②)

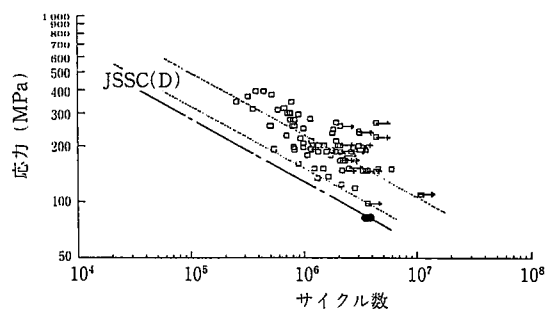


図14 縦方向すみ肉溶接継手のS-N線図

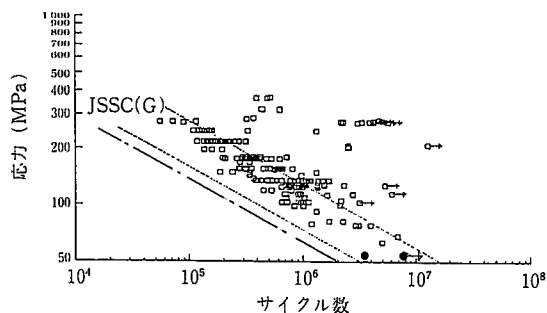


図15 面外ガセット継手のS-N線図

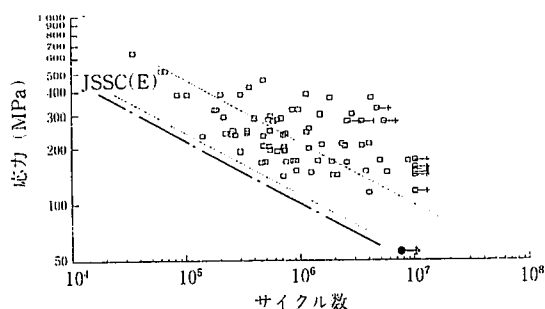


図 16 非伝達すみ肉溶接継手のS-N線図

4. まとめ

本研究では、制振鋼板をウェブに用いたI桁の疲労特性を把握するため、鋼鉄道橋に用いられる基本的な溶接継手を有する模型桁を用い、実応力頻度分布を想定した実働荷重による疲労試験を行い、過去に行われた普通鋼板溶接継手の疲労試験結果や設計S-N線図と比較した。その結果、以下のことがわかった。

- (1)制振鋼板を用いたウェブとフランジ（普通鋼）の溶接部に発生したき裂は、溶接部に内在するブローホールを起点とし、このき裂がフランジを介してウェブの他方鋼板にき裂が進展している。
- (2)制振鋼板を用いたウェブとフランジ（普通鋼）の溶接部の疲労強度は、すみ肉溶接を施した試験体、及び開先溶接した試験体とも同様な強度であり、本試験では両者に明確な差異はなかった。しかし、溶接欠陥の発生確率からみると、B試験体（開先溶接）の方が良いと考えられる。
- (3)ウェブとフランジの溶接部の疲労強度は、JSSC指針(案)のD等

級線上に位置した。本試験体では、制振鋼板内の樹脂により溶接部にブローホールが多数存在しており、溶接品質等級も3～4級とかなり低品質であった。しかし、樹脂を焼却することなどにより溶接品質が向上することから、ウェブとフランジの溶接部の疲労強度は、JSSC(案)のD等級とすることができる可能性が示唆された。

- (4)ウェブの面外ガセットに発生した亀裂は、樹脂を介して他方の鋼板に進展することなく、片側鋼板での亀裂進展に留まっている。
- (5)この面外ガセットの疲労強度は、過去の普通鋼の疲労試験結果とほぼ同様である。これは、制振鋼板表面に取り付けられた溶接であれば、普通鋼と同等級のJSSC(案)のG等級に相当している。

謝 辞

本研究の実行にあたり、名古屋大学工学部土木工学科 山田教授、鉄道総合技術研究所 阪本研究室長をはじめ、同大学、同研究所の方々に多大なご指導をいただきました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 山田健太郎 ほか：制振鋼板溶接継手の疲労強度。名古屋大学平成3年度報告書、1992-3
- 2) 内藤 繁 ほか：制振鋼板の溶接施工性の検討。土木学会第47回年次学術講演会、1992-9
- 3) 阪本謙二、阿部 充、杉館政雄：実働荷重による鋼橋部材の疲労強度(その1)。鉄道総合技術研究所報告。3 (10)、1989-10
- 4) 阪本謙二、阿部 充、杉館政雄：実働荷重による鋼橋部材の疲労強度(その2)。鉄道総合技術研究所報告。5 (5)、1991-5
- 5) 山田健太郎 ほか：疲れ試験データベースの作成と疲労許容応力度の評価。昭和62年度科学研究費補助金研究成果報告書、1988-3
- 6) 日本鋼構造協会疲労設計指針改定小委員会：疲労設計指針(案)。1989-11