

垂直補剛材取付け部の鉄道橋変動荷重疲労実験

RAILWAY VARIABLE AMPLITUDE LOADING FATIGUE TEST OF TRANSVERSE STIFFENER JOINT

坂野昌弘*、三上市藏**、米本栄一***、西村剛****

SAKANO Masahiro, MIKAMI Ichizou, YONEMOTO Eiichi and NISHIMURA Tsuyoshi

*工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-35)

**工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (同 上)

***工修 片山ストラテック(株) 生産技術開発部 (〒551 大阪市大正区南恩加島6-2-21)

**** 関西大学大学院生 博士課程前期課程 (現在: 松尾橋梁(株) 設計部)

Long life fatigue tests are carried out using plate girder specimens with transverse stiffeners attached leaving a gap between the stiffener end and the bottom flange, under constant amplitude loading and two types of railway variable amplitude loading. Fatigue cracks are initiated from the fillet weld toe at the top and bottom ends of stiffeners. Fatigue cracks in tension area lead bottom flanges to failure, while those in compression area are arrested in the vicinity of the weldment. Fatigue failure life of all specimens satisfies JSSC category D with a sufficient margin under constant and variable amplitude loadings. Miner's law, either with or without cut-off limits, can not evaluate the difference in fatigue life under two types of variable amplitude loading, which can be estimated accurately by variable amplitude fatigue crack propagation analysis.

Key Words: fatigue test, railway bridge, variable loading, stiffener joint

1. はじめに

現在、我が国で供用中の鋼鉄道橋の平均年齢は60歳近いといわれており、これは設計で考慮している耐用年数に匹敵するものである¹⁾。また一方では、応力の繰返し数が極めて多い電車荷重による設計の機会が今後とも増加することが予想されており²⁾、既設橋の維持管理、新設橋の疲労設計、いずれにとっても、長寿命域における橋梁各部の疲労強度特性を把握することがますます重要になってきている。

長寿命領域では、構造物の疲労挙動は作用する変動荷重の特性に大きく影響を受ける³⁾。したがって、鉄道橋部材の長寿命疲労特性を把握するためには、実際に鉄道橋に生じるような変動荷重を用いた疲労試験を行う必要がある。三木ら⁴⁾は、コンピュータシミュレーションによって求めた新幹線橋梁のモーメント変動波形を用いてリブ十字継手の疲労試験を行っている。また、阪本ら²⁾は、各種の溶接継手を有する桁試験体に対し、コンピュータシミュレーションおよびプログラム波形発振器によって作成した鉄道橋変動荷重を用いて疲労試験を行っている。いずれも一種類のみの変動荷重波形を用いた限られた条件下の実験であるため、鉄道橋に生じる変動荷重全般について長寿命域の疲労挙動を究明するまでには到っていない。

著者の内の3人⁵⁾は、列車荷重シミュレーション解析

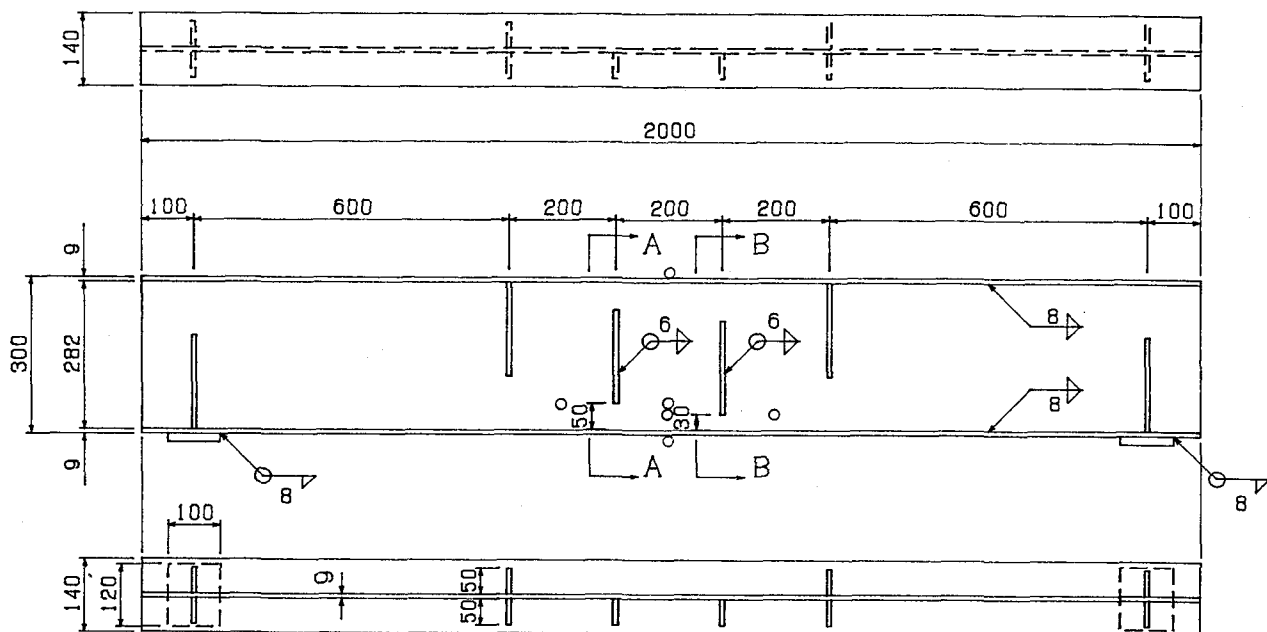
により、鉄道橋に生じる変動荷重のヒストグラムが部材の種類によって大きく異なり、それに伴って長寿命域の疲労寿命曲線も様々な形状となることを示している。本研究では、それらの変動荷重の中から特徴的な2種類を選びだし、それを用いて疲労試験を行うことにより、鉄道橋変動荷重下の長寿命疲労特性を検討しようとするものである。実験対象としては、道路橋を含めて橋梁の中で最も基本的な継手の一つでありながら、未だに一定振幅荷重下の長寿命疲労強度さえ十分に把握されているとはいいがたいプレートガーダーの中間垂直補剛材取付け部^{2), 6), 7)}をイメージした桁試験体を用いた。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体の形状と寸法を図-1に示す。全長2m、高さ30cmのI型断面のプレートガーダーに、引張フランジとそれぞれ30mmおよび50mmの間隔をあけて2か所に中間垂直補剛材を取り付けている。鋼材はフランジとウェブが板厚9mmのSM490A、それ以外はSS400である。使用鋼材の機械的性質と化学成分を表-1に示す。

フランジとウェブの組み立て、補剛材の取付けともに炭酸ガスシールドアーク溶接によるものである。それぞれの溶接条件は表-2に示すとおりである。図-2に疲労亀裂発生位置付近で測定した溶接止端部の角度 θ と曲



図－1 試験体の形状と寸法（寸法の単位：mm、°印はひずみゲージ貼付け位置を示す）

表－1 使用鋼材の機械的性質と化学成分（ミルシート値）

Material	Mechanical Properties			Chemical Composition (%)				
	Y. P. (MPa)	T. S. (MPa)	EL. (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
SM490A	358	523	27	15	34	142	10	2
SS400	275	423	36	15	20	51	10	2

表－2 溶接条件

Location of Weld	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
Web-to-Flange	250	34	37～39	12～15
Stiffner-to-Web	250	33	29～34	14～17

率半径 ρ の分布を示す。厳しい方で $\theta = 60^\circ$ 、 $\rho = 0.5\text{mm}$ 程度、平均的には $\theta = 50^\circ$ 、 $\rho = 1\text{mm}$ といったところである。

2.2 疲労試験方法

(1) 一定振幅荷重試験

疲労試験には、関西大学所有の動的載荷能力 $\pm 600\text{kN}$ の電気油圧式疲労試験機を用いた。図－3に疲労試験状況を示す。載荷方法は2点支持の2点載荷とし、死荷重応力を考慮して下フランジの最大応力が 190MPa 程度とな

るように全ての試験体について荷重の最大値を 333kN 一定とした。なお、疲労試験開始前に図－1に示す位置に1軸のひずみゲージ（ゲージ長さ 5mm ）を貼付け、静的に応力を測定している。

荷重繰返し速度は $2 \sim 3\text{Hz}$ 、亀裂の検出は磁粉探傷法により行い、亀裂確認後は破面にビーチマークを残した。また、2か所の試験部のうち片方のフランジが破断した場合には、図－4に示すように高力ボルトを用いて添接補強を行い、疲労試験を続行した。

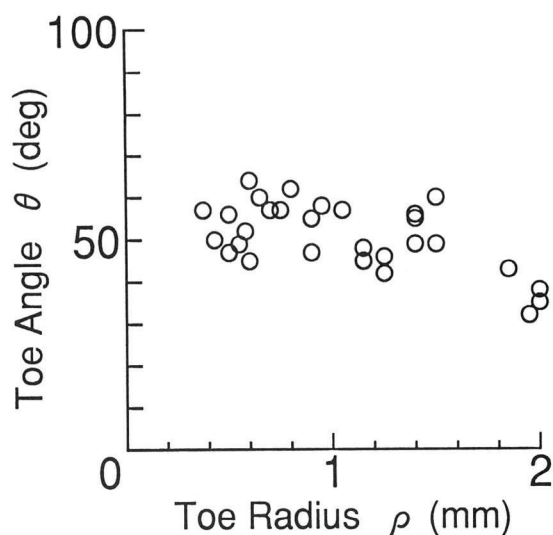


図-2 溶接止端部の角度と曲率半径の分布

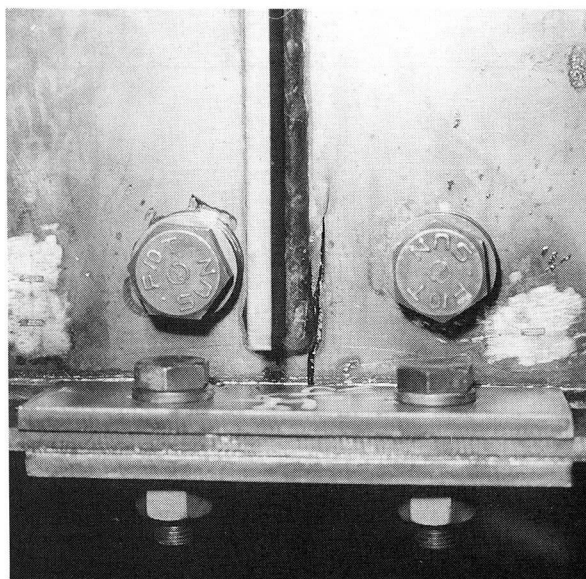


図-4 フランジ破断部の補強対策

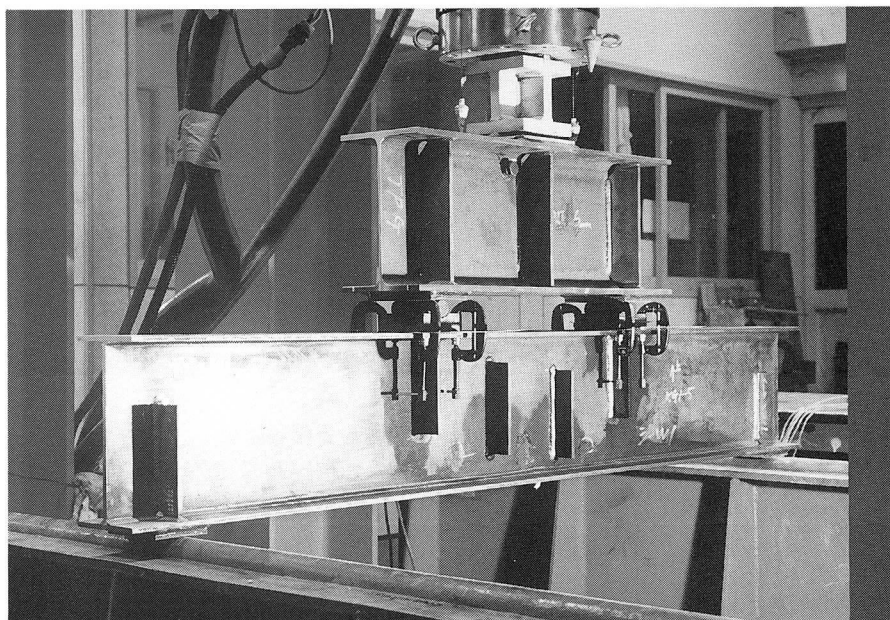


図-3 疲労試験状況

(2) 変動振幅荷重試験

鉄道橋に生じる変動応力は、その応力範囲の頻度分布形状から分離型と集中型に分類することができる⁵⁾。本研究では、それぞれの代表としてスパン10mと20mの単純桁上を列車が通過する際に生じる曲げモーメントの変動波形を用いた。列車の軸配置と軸重分布は実際に運行されている新幹線車両⁸⁾を参考に図-5のように仮定し、モンテカルロシミュレーションを行った。変動荷重載荷方法は基本的には文献4と同様である。図-6にスパン10m、図-7にスパン20mの場合について、曲げモーメントの変動波形とレインフロー法により求めた無次元化

した応力範囲頻度分布を示す。図中の等価応力範囲 $S_{r,eq}$ は全ての応力範囲について3乗平均の3乗根として求めたものである。スパン10mの場合、隣り合う2台の台車ごとに大きいほうと小さいほうの応力範囲が同じ頻度で生じており、頻度分布が左右(大小)に分離した形状となっている。一方、スパン20mの場合には、大きいほうの応力範囲は列車ごとに1回、その7~8割の大きさの応力範囲が隣り合う2台の台車ごとに生じており、頻度分布は等価応力範囲付近に集中する形状となっている。

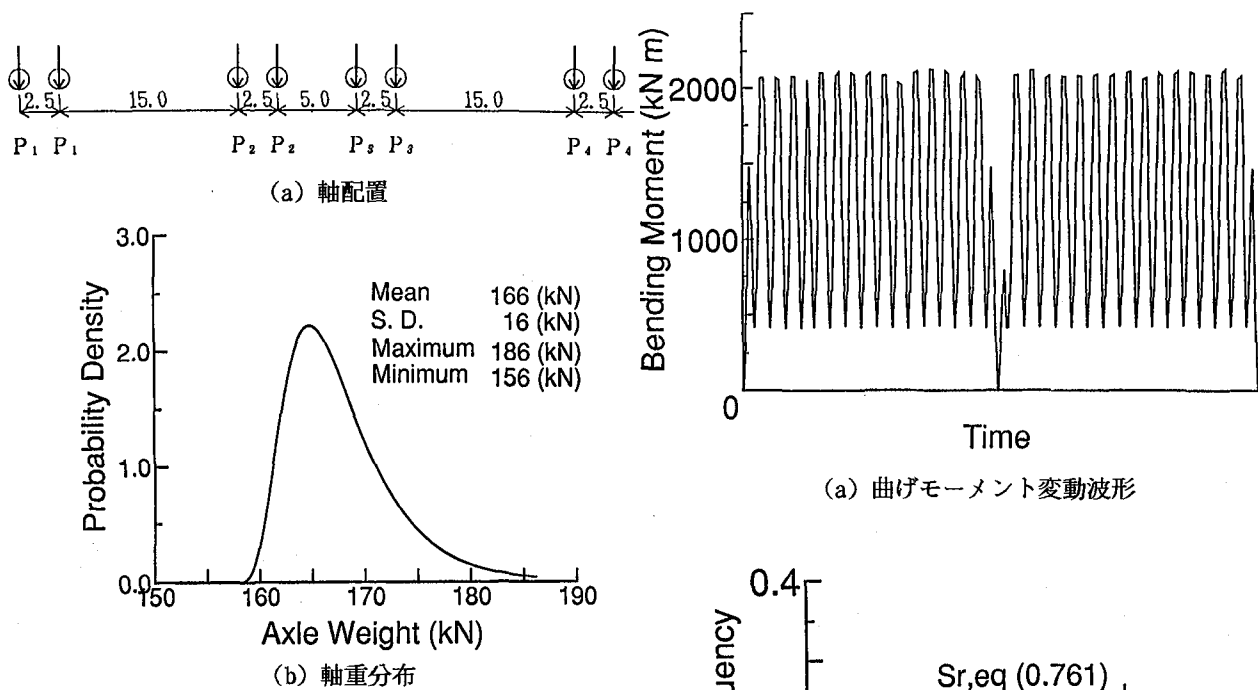


図-5 想定した列車荷重



図-6 スパン10mの変動荷重

3. 疲労試験結果

一定振幅および変動振幅疲労試験結果をそれぞれ表-3および表-4に示す。試験体は一定振幅で3体、変動振幅で2体使用している。 ΔP は荷重範囲、 Sr はいずれも図-1に示したひずみゲージによる応力範囲の実測値である。圧縮側については、載荷点の直下であることからその影響も考えられるが、まくらぎ受け等の当板取付け部などと同様と考え、はりの公称曲げ応力で整理している。 N_d は亀裂発見時の寿命、 N_f はフランジが破断したときの寿命である。ただし、圧縮側については、亀裂がウェブに進展し、停留したために N_f に不等号をつけている。また、 a_d と $2b_d$ はそれぞれ発見されたときの亀裂の深さと表面長さである。一定振幅試験では亀裂発見時に残したビーチマークにより a_d がわかる。変動荷重試験ではビーチマークが残せないため、 $2b_d$ だけである。なお、添字の max は最大値、 eq は3乗平均の3乗根として求めた等価値を表す。

試験体No. 1ははじめ $\Delta P=245kN$ で1100万回を越えても引張側に亀裂が見つからないため、荷重範囲を上げて再

表-3 一定振幅荷重疲労試験結果

Specimen	ΔP (kN)	Location	Sr (MPa)	Nd (Mcycles)	a_d (mm)	$2b_d$ (mm)	Nf (Mcycles)
No. 1	245	Sec. A	90	> 11.42	—	—	> 11.42
		Sec. B	110	> 11.42	—	—	> 11.42
		Comp. Flg	140	3.00	—	22.0	> 11.42
		Comp. Flg	140	3.00	—	25.0	> 11.42
No. 1 (retest)	314	Sec. A	119	> 3.52	—	—	> 3.52
		Sec. B	140	2.77	1.2	4.6	3.52
		Comp. Flg	180	0.00	—	25.0	> 3.52
		Comp. Flg	180	0.00	—	25.0	> 3.52
No. 2	294	Sec. A	106	> 5.00	—	—	> 5.00
		Sec. B	126	2.16	1.1	3.4	3.52
		Comp. Flg	160	2.77	—	30.0	> 5.00
		Comp. Flg	160	2.77	—	25.0	> 5.00
No. 3	270	Sec. A	94	2.48	1.1	4.9	5.21
		Sec. B	115	1.90	2.3	7.3	2.97
		Comp. Flg	146	1.90	—	5.0	> 5.21
		Comp. Flg	146	1.90	—	4.5	> 5.21

表-4 変動振幅荷重疲労試験結果

Spec.	L (m)	ΔP_{max} (kN)	ΔP_{eq} (kN)	Location	Sr, max (MPa)	Sr, eq (MPa)	Nd (Mcycles)	$2b_d$ (mm)	Nf (Mcycles)
No. 4	20	284	216	Sec. A	101	77	> 11.11	—	> 11.11
				Sec. B	122	93	6.50	15.0	9.83
				Comp. Flg	153	116	3.08	5.0	> 11.11
				Comp. Flg	153	116	3.08	5.0	> 11.11
No. 5	10	284	218	Sec. A	102	78	6.51	15.0	8.72
				Sec. B	127	97	3.00	7.0	4.63
				Comp. Flg	160	123	0.94	5.0	> 8.72
				Comp. Flg	160	123	0.94	5.0	> 8.72

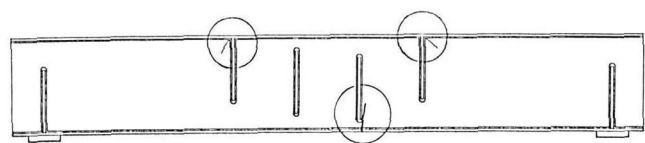
試験を行った。また、試験体No. 4は断面Bが破断後、補強して試験を続行したがフランジの添接部から亀裂を生じ破断したため試験を終了している。

3.1 疲労破壊状況

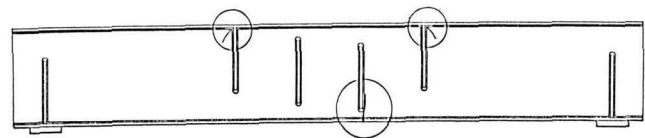
各試験体について、疲労亀裂の発生位置を図-8に示す。引張側では中間補剛材の下端部、圧縮側では載荷点の補剛材上端部に生じている。引張側の亀裂の発生、進展状況を図-9に示す。亀裂（磁粉探傷により白く光ってみえる）は補剛材下端部ウェブ側の溶接止端から発生し、ほぼ鉛直に進展、フランジを破断させている。圧縮側の亀裂の一例を図-10に示す。補剛材上端部のフランジ側の溶接止端に生じた亀裂がウェブに進展し、停留し

ているようすがよくわかる。このような亀裂の発生、進展挙動については変動振幅試験でも同様である。

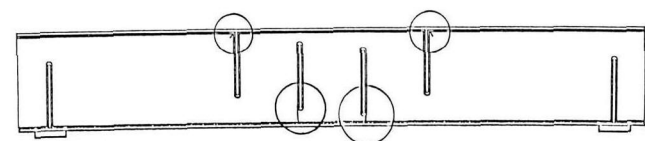
図-11は図-9に示した亀裂の破断面である。表面から発生し、半楕円形状に進展している様子がよくわかる。図-12は、このような破面から読み取った亀裂深さ a および表面長さ $2b$ と繰返し数比との関係を表したものである。表面長さ数mm程度の亀裂を発見したときには、既に寿命の6~8割方進んでしまっていることが分かる。また、亀裂が板厚を貫通した後は急速に進展し、破断していることから、疲労限界状態として板厚貫通時を考えて不都合はない。図-13は、亀裂深さ a と表面半長 b の関係を表したものである。亀裂形状比 a/b は1/1~1/2



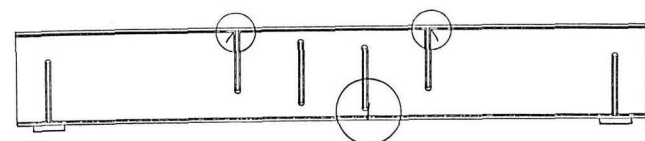
(a) 試験体No. 1



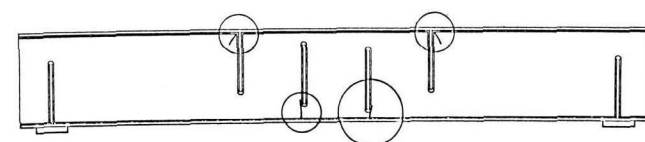
(b) 試験体No. 2



(c) 試験体No. 3

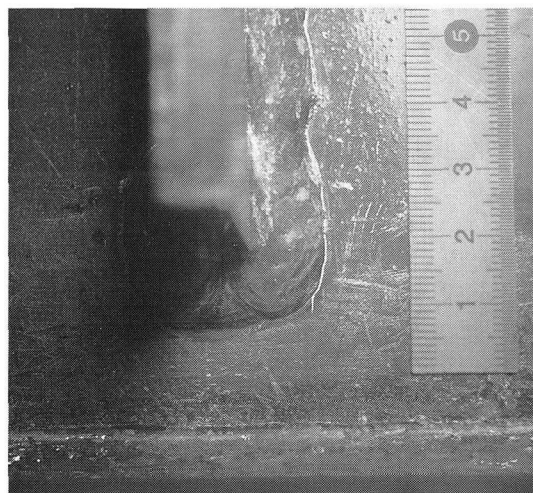


(d) 試験体No. 4

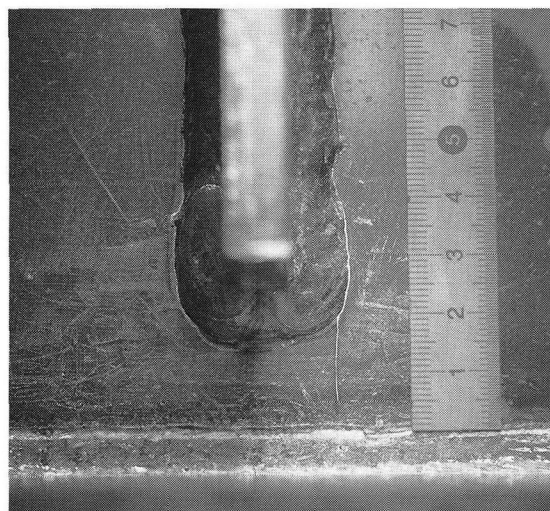


(e) 試験体No. 5

図-8 疲労亀裂発生位置



(a) 亀裂発生 (N=277万回)



(b) 亀裂進展中 (N=340万回)

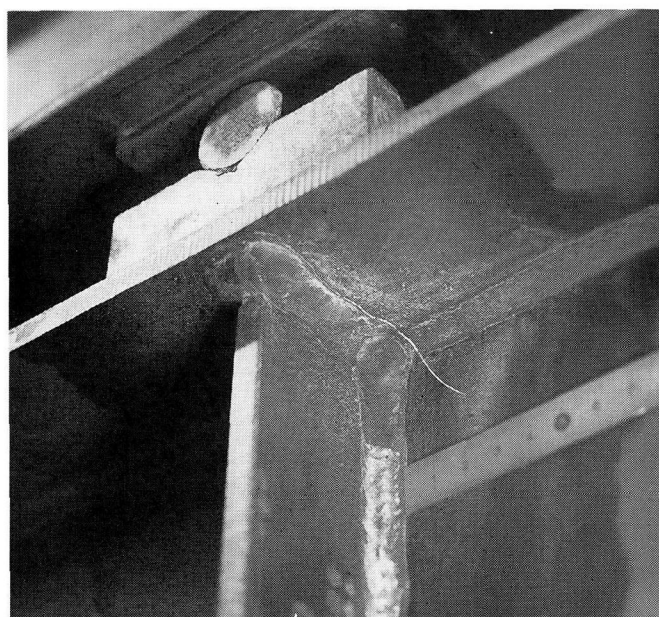
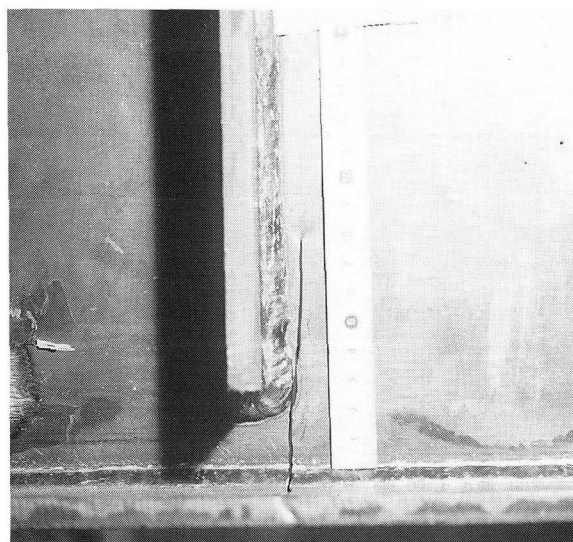


図-10 圧縮側に生じた疲労亀裂 (試験体No. 1)



(c) フランジ破断 (N=352万回)

図-9 引張側に生じた疲労亀裂 (試験体No. 1)

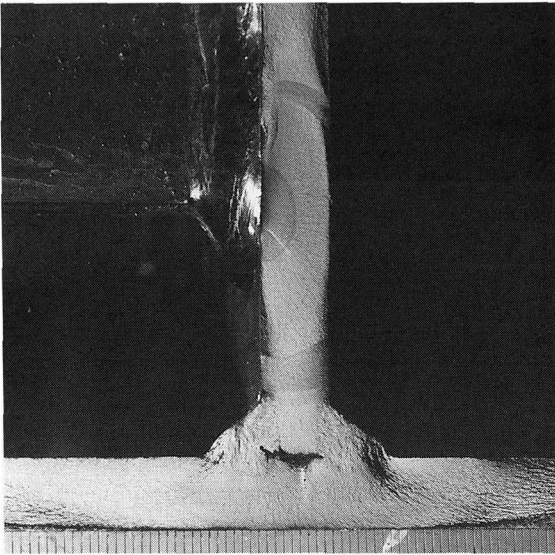


図-11 疲労破断面 (試験体No. 1)

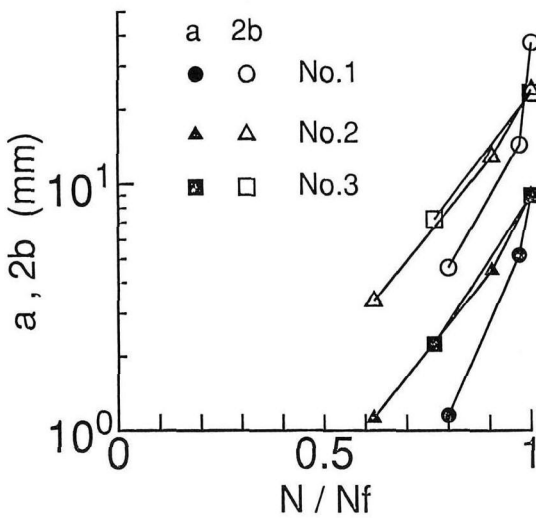


図-12 亀裂進展曲線

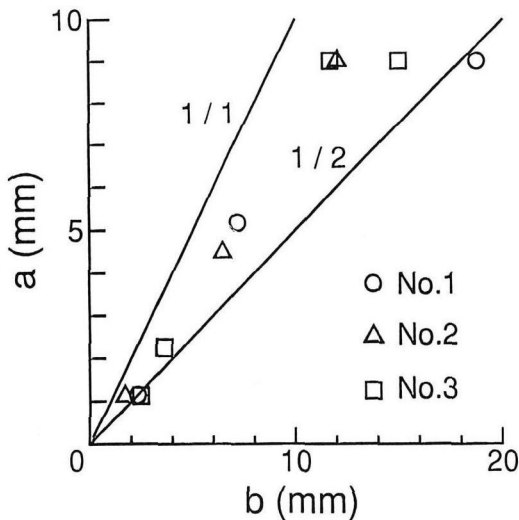


図-13 亀裂深さと表面半長の関係

程度になっている。

3.2 疲労強度特性

(1) 一定振幅疲労強度

図-14に引張側の疲労試験結果、図-15に圧縮側の一定振幅疲労試験結果を示す。引張側では、応力範囲 $Sr=94\text{MPa}$ で亀裂を生じ破断した試験体がある一方、 $Sr=100\sim 120\text{MPa}$ 程度でも亀裂発生が認められない試験体が幾つか存在し、このようなウェブギャップ型のディテール⁷⁾の疲労強度が一般的な補剛材取付けディテール⁷⁾の中で平均的には比較的高いところにあることが示された。ただし、強度等級に関しては、条件が厳しい場合も考慮してJR設計標準⁹⁾のD等級が妥当と考えられる。それでも通常のリブ十字継手に適用されるE等級より1ランク上である。圧縮側についても、 Nf を基準とすれば、やはりD等級を十分に満足している。

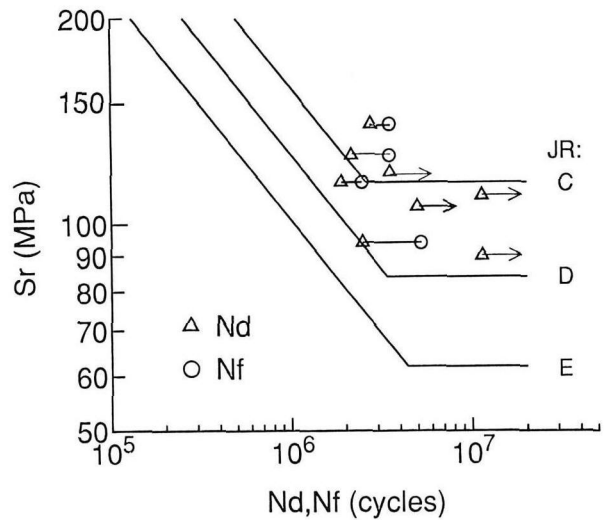


図-14 一定振幅疲労試験結果 (引張側)

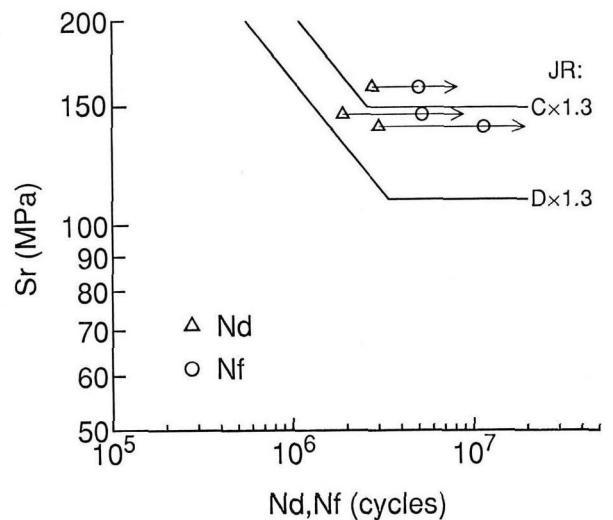


図-15 一定振幅疲労試験結果 (圧縮側)

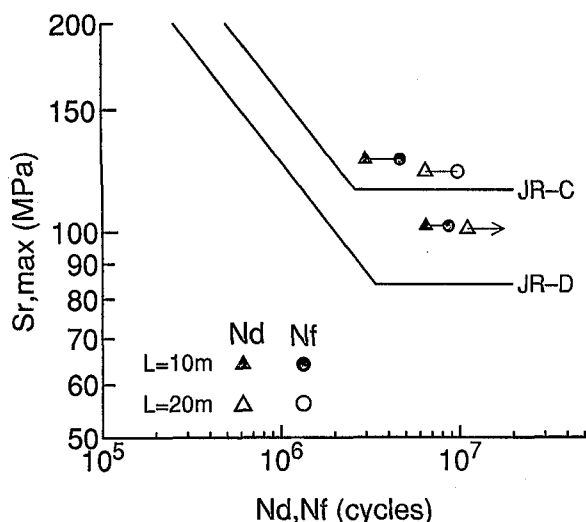


図-16 変動振幅疲労試験結果（引張側、 $S_{r, \max}$ ）

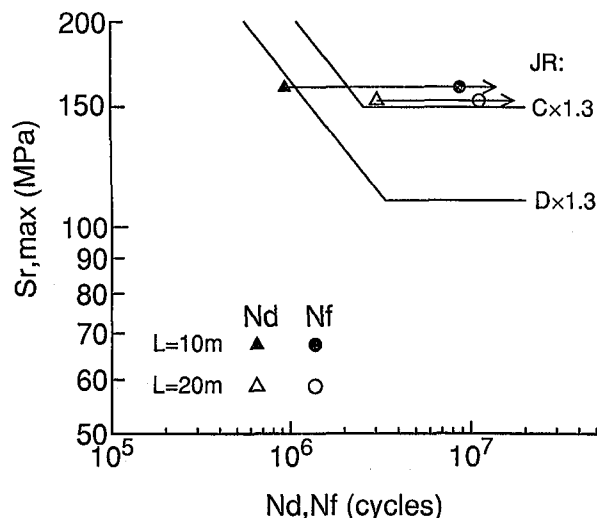


図-18 変動振幅疲労試験結果（圧縮側、 $S_{r, \max}$ ）

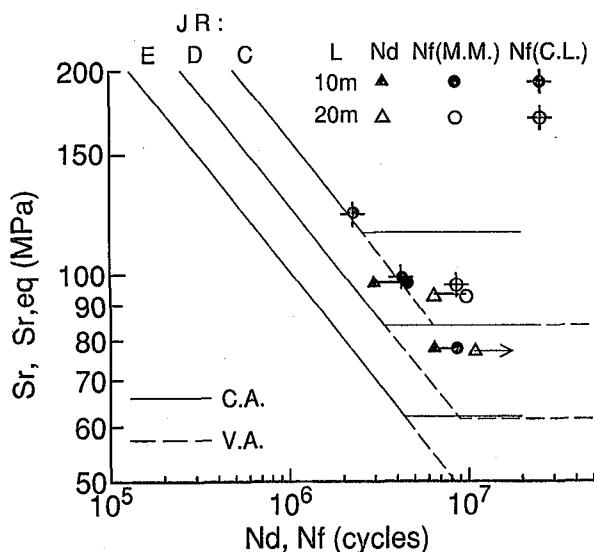


図-17 変動振幅疲労試験結果（引張側、 $S_{r, eq}$ ）

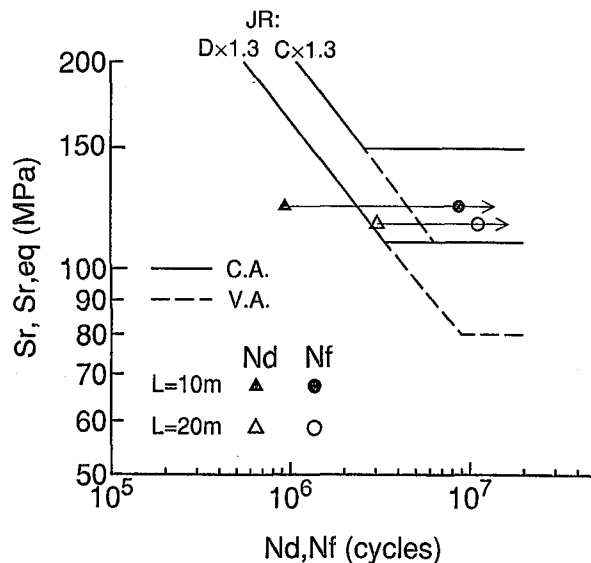


図-19 変動振幅疲労試験結果（圧縮側、 $S_{r, eq}$ ）

(2) 変動振幅疲労強度

引張側の変動振幅試験結果について、図-16は $S_{r, \max}$ と一定振幅の設計曲線、図-17は $S_{r, eq}$ と変動振幅の設計曲線をそれぞれ比較したものである。図-16では、 $S_{r, \max}$ がC等級の疲労限以下でも破壊が生じており、一定振幅試験の結果と矛盾がない。しかしながら、 $S_{r, \max}$ 、 $S_{r, eq}$ ともにほとんど変わらないにもかかわらず、スパン10mの変動荷重波形を用いた試験体の寿命に比べて、スパン20mの変動荷重波形を用いた試験体の寿命は2倍以上長寿命となっており、変動荷重の種類によって疲労寿命に大きく差があることが示された。

図-17では、実験値は、修正マイナー則に従って求めた $S_{r, eq}$ (M.M.)とD等級（C等級でも結果は同じ）の打ち切り限界を使って求めた $S_{r, eq}$ (C.L.)の二通りの方法でプロットしてある。スパン10mの結果の方がスパン20m

の場合に比べて打ち切り限界の影響が大きく現れているが、いずれにしても設計曲線に平行に移動しただけで強度等級上は変わらない。この実験結果に限って言えば、打ち切り限界を使用するメリットはないことになる。いずれにしても、破断寿命を基準とすればスパン10mの波形の結果はC等級ぎりぎり、スパン20mの結果はC等級を十分満たすということになる。

図-18と図-19は、圧縮側の変動振幅試験結果について、 $S_{r, \max}$ と一定振幅の設計曲線、および $S_{r, eq}$ と変動振幅の設計曲線をそれぞれ比較したものである。図-18ではC等級ぎりぎりであるが、図-19で破断寿命を基準とするかぎり、C等級を十分満たすことになる。圧縮側のディテールの疲労限界状態の定義に関しては、本実験のように亀裂がある程度進展したところで停留する場合を含め、十分に議論する必要があると考える。

4. 疲労亀裂進展解析

4.1 解析条件

3章で述べたように、修正マイナー則や打ち切り限界を使ったマイナー則では、変動荷重の種類による疲労寿命の違いを評価することができなかった。この章では、亀裂進展解析により、変動荷重下の疲労寿命特性の評価を試みる。

解析方法は基本的には文献3と同様である。初期亀裂深さ0.05mm、限界亀裂深さは板厚の9mm、亀裂形状比は図-13を参考に1/2、亀裂進展速度はJSSC疲労設計指針の平均的な設計式¹⁰⁾を用いている。亀裂進展経路の応力分布を求める際に、FEM解析(パソコン版COSMOS/Mを使用)で仮定する溶接止端部の ρ と θ は、図-2を参考に、厳しい値としてケースI($\rho=0.5\text{ mm}$ と $\theta=60^\circ$)、平均的な値としてケースII($\rho=1.0\text{ mm}$ と $\theta=50^\circ$)の2種類設定した。

4.2 解析結果

図-20に、それぞれのケースについて求められた応力拡大係数に対する応力分布の補正係数 F_g の分布を示す。ケースIの方が当然ながら初期亀裂深さを仮定した0.05mmで10%ほど大きくなっている。図-21は一定振幅荷重に対して求められた寿命曲線と実験値を比較したものである。厳しい溶接形状を想定したケースI、平均的な形状を仮定したケースII、それぞれが実験値の低強度側と平均的なところをよく表している。

図-22は、2種類の変動荷重に対して求められた寿命曲線と変動荷重試験結果を比較したものである。溶接形状は平均的なケースIIを仮定した。寿命曲線は実験値に比べて若干短寿命側ではあるが、変動荷重の違いによる試験体の寿命の違いをよく表現しているといえる。このように、疲労亀裂進展解析によれば、鉄道橋変動応力下の疲労強度特性の違いを評価することは可能である。

5. まとめ

一定振幅荷重および2種類の鉄道橋変動荷重下において、ウェブギャップ型垂直補剛材をもつ5体のプレートガーダー試験体の疲労試験を実施した。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 疲労亀裂は、引張側、圧縮側ともに生じている。引張側の亀裂は補剛材下端部ウェブ側の溶接止端から発生し、フランジを破断させている。圧縮側の亀裂は補剛材上端部のフランジ側の溶接止端に生じ、ウェブに進展した後、停留した。
- (2) 一定振幅試験結果より、フランジの破断寿命を基準とすれば、引張側、圧縮側ともに、JR設計標準のD等級を十分に満足することが示された。ただし、圧縮側に関しては、亀裂が停留する場合の疲労限界状態の定義を含め、議論の余地がある。
- (3) 変動振幅試験結果より、変動荷重の種類によって疲労寿命に大きく差が生じることが示された。そのため、

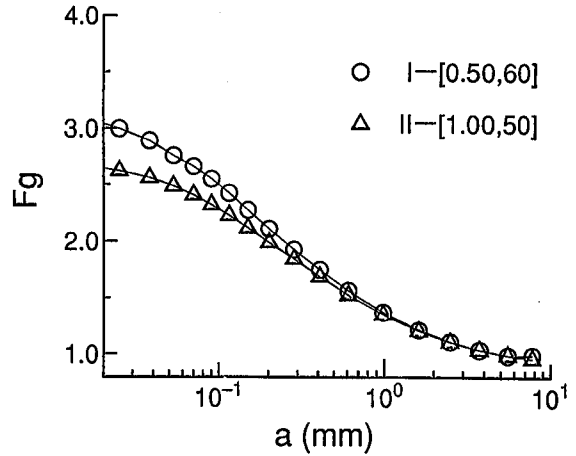


図-20 応力分布の補正係数 F_g

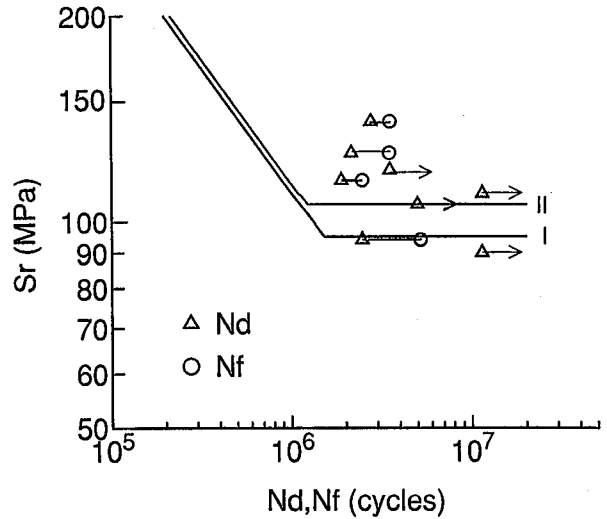


図-21 寿命予測曲線と実験値の比較(一定振幅)

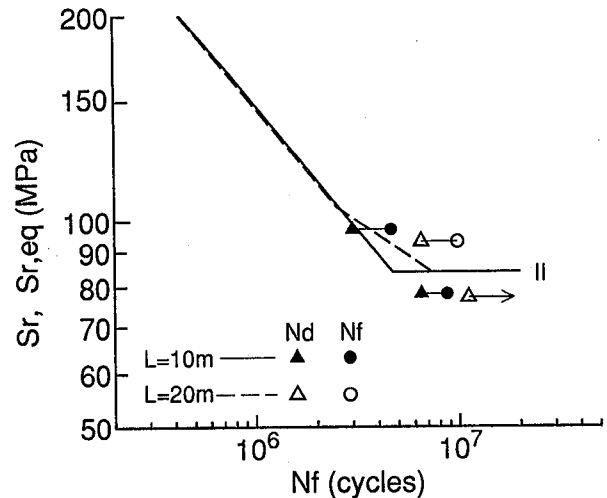


図-22 寿命予測曲線と実験値の比較(変動振幅)

破断寿命を基準とすれば、場合によってはC等級を十分満たすという結果にもなりうる。

(4) 修正マイナー則や打ち切り限界を使ったマイナー則では、変動荷重の種類による疲労寿命の違いを評価することができなかった。

(5) 疲労亀裂進展解析によれば、鉄道橋変動応力下の疲労強度特性の違いを評価することは可能である。

最後に、本研究の一部が文部省科学研究費補助金によるものであることを記し、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，研友社，1992.
- 2) 阪本謙二・阿部允・杉舘政雄：実働荷重による鋼橋部材の疲労強度（その1），（その2），鉄道総研報告，Vol.3, No.10, pp.22-29, 1989, Vol.5, No.5, pp.1-9, 1991.
- 3) 三木千壽・坂野昌弘：疲労亀裂進展解析による疲労設計曲線の検討，構造工学論文集，Vol.36A, pp.409-416, 1990.
- 4) Miki,C., Murakoshi,J., Toyoda,Y. and Sakano,M.

: Long life fatigue behavior of fillet welded joints under computer simulated highway and railroad loading, Structural Eng./ Earthquake Eng., Vol.6, No.1, pp.41s-48s, 1989.

- 5) 坂野昌弘・三上市蔵・西村剛：鉄道橋疲労設計曲線設定のための列車荷重シミュレーション解析，第17回土木情報システム論文集，pp.89-96, 1992.
- 6) 三木千壽・豊田幸宏・森猛・榎戸尚宏：鋼桁ディテールの道路橋シミュレーション荷重疲労，構造工学論文集，Vol.35A, pp.951-960, 1989.
- 7) 坂野昌弘・三上市蔵・米本栄一・安池寿夫：4種類の垂直補剛材取付け部をもつプレートガーダー試験体の疲労実験と寿命予測，構造工学論文集，Vol.38A, pp.999-1010, 1992.
- 8) 阿部英彦：東海道新幹線，橋梁と基礎，90年8月号，p.15, 1990.
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 — 鋼・合成構造物，丸善，1992.
- 10) 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.

(1994年9月14日受付)