

プレートガーダー橋の横桁連結部の疲労試験

FATIGUE TESTS OF CROSS-BEAM CONNECTIONS IN PLATE GIRDER HIGHWAY BRIDGES

大倉一郎* 井上博之** 福本勇士*** 山田靖則****

By Ichiro OKURA, Hiroyuki INOUE, Yuhshi FUKUMOTO and Yasunori YAMADA

Fatigue cracks are often detected at the connections of cross beams to main girders in plate girder highway bridges. In this research, fatigue tests are conducted on the specimens consisting of a concrete slab and cross-beam connections. The patterns of cracking at the connections are disclosed. The stress state at the connections is examined. The effects of the connection details between concrete slab and girder flange on the cracking are investigated.

1. 序 論

道路あるいは鉄道プレートガーダー橋において、横桁、対傾構、横構等の2次部材と主桁の連結部に疲労亀裂がしばしば発見されている。これらの疲労亀裂の中で、道路プレートガーダー橋の横桁と主桁の連結部の疲労亀裂は、図-1に示すように分類される。

タイプ1：横桁の上フランジと主桁の上フランジとの間のコネクションプレートで、コネクションプレートと主桁の上フランジとの間の隅肉溶接に発生する疲労亀裂。

タイプ2：コネクションプレートの上側のスカラップの縁から発生し、コネクションプレートを斜めに進展する疲労亀裂。

タイプ3：コネクションプレートと主桁のウェブを連結する隅肉溶接のスカラップ内の回し溶接部の溶接止端から発生し、コネクションプレート側の溶接止端に沿って伝播する疲労亀裂。

タイプ4：主桁の上フランジとウェブとの間の隅肉溶接で、ウェブ側の溶接止端に沿って発生・伝播する疲労亀裂。

実橋の横桁連結部で応力実測が行われ、図-2に示すように、コネクションプレートの上端に生じる鉛直

* 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

** 工修 通商産業省特許庁 (〒100 千代田区霞が関3-4-3) 研究当時大阪大学大学院生

*** 工博 Ph. D. 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

****高田機工㈱ 設計部課長 (〒556 浪速区敷津西2-1-12)

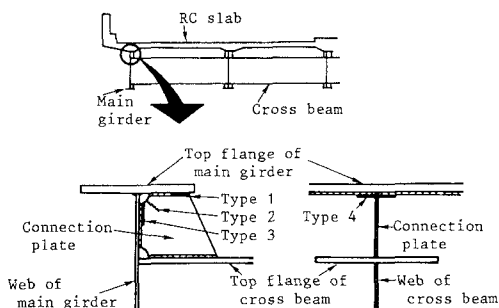


図-1 横桁連結部に発生する疲労亀裂

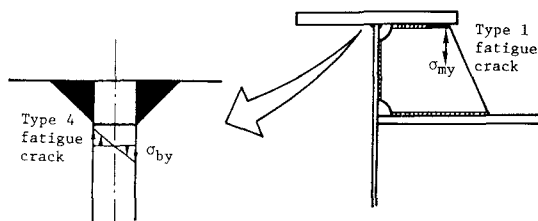


図-2 疲労亀裂を発生させる応力

方向の膜応力 σ_{my} と主桁ウェブに生じる板曲げ応力 σ_{by} （膜応力と板曲げ応力の定義を付録に示す）がそれぞれタイプ1とタイプ4の疲労亀裂の発生原因であることが明らかにされた^{1,2)}。これらの応力とコンクリート床版の回転および横桁の回転の関係が次のように定式化された^{3,4)}。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{my} \\ \sigma_{by} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{m1} & k_{m3} (\gamma - k_{m123}) \\ k_{b1} & k_{b3} (\gamma - k_{b123}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{s0} \\ \theta_g \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 θ_{s0} ：コンクリート床版の輪荷重による変形によって引き起こされるコンクリート床版の回転角（図-3参照）、 θ_g ：主桁の鉛直変位によって導入される横桁の回転角（図-3参照）、 γ ：車道の幅員方向の輪荷重の位置に依存する係数、 k_{m1} 、 k_{m3} 、 k_{m123} 、 k_{b1} 、 k_{b3} 、 k_{b123} ：定数。

式(1)から分かるように、 σ_{my} と σ_{by} の各応力は、回転角 θ_{s0} と θ_g によって生じる応力成分の線形和として与えられる。これは、 σ_{my} と σ_{by} の各応力に対して、 θ_{s0} と θ_g の影響が独立に取り扱えることを表している。さらに、タイプ1の亀裂はコンクリート床版の回転角 θ_{s0} によって生じる応力成分のみによって発生する可能性があることが報告されている⁵⁻⁸⁾。

したがって、コンクリート床版の回転が横桁連結部の疲労亀裂発生に与える影響を調べるために疲労試験を行った。本論文は、この疲労試験の概要とその結果について述べる。

2. 試験体

疲労試験体を図-4に示す。試験体は、実橋の横桁連結部の横桁の上フランジから上部とコンクリート床版を主鉄筋方向に切断した帯状の床版から成る。試験体Aと試験体Bは、それぞれ実橋の外主桁と中主桁に

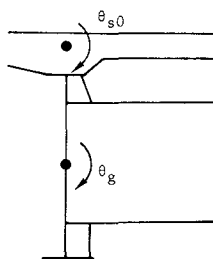
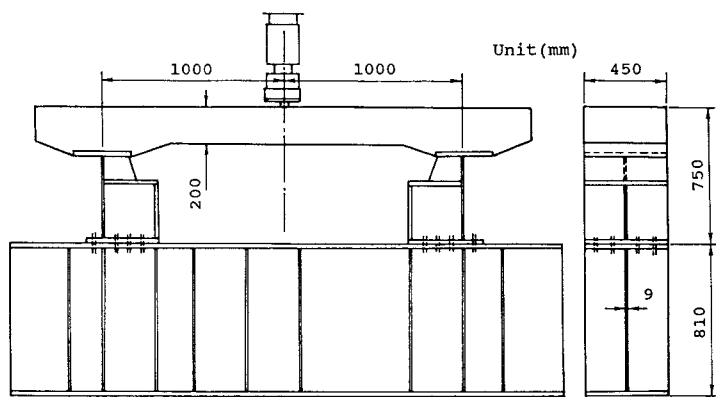
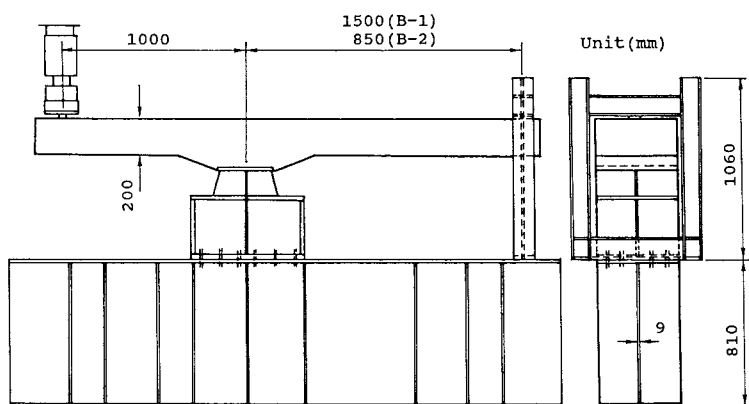


図-3 コンクリート床版の回転角と横桁の回転角



(a) Series A



(b) Series B

図-4 疲労試験体

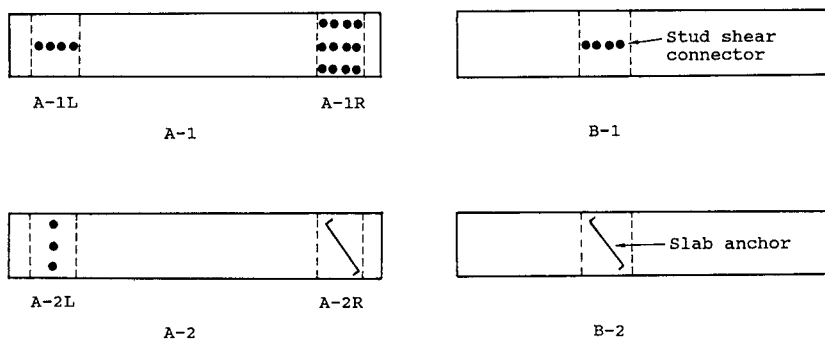


図-5 コンクリート床版と主桁上フランジの間の連結構造

対応する。試験体の横桁連結部はH桁の上フランジに高力ボルトで連結されている。試験体Aでは、荷重を床版支間中央に載荷し、試験体Bでは、床版の左端に載荷した。試験体Bでは、床版の鉛直荷重を支持する門型フレームを横桁連結部の右側の床版に設けた。したがって、試験体Bにおいては、横桁連結部のコンク

表－１ 材料特性

(a) Steel

	Connection plate (SS41)	Web (SM50A)
Young's modulus (MPa)	0.205×10^6	
Yield strength (MPa)	291	412
Tensile strength (MPa)	452	559
Elongation (%)	29	24

(b) Concrete

Specimen	age (day)	Young's modulus (MPa)	Compressive strength (MPa)
A-1	44	0.311×10^5	40.4
A-2	122	0.336×10^5	49.5
B-1	83	0.299×10^5	42.1
B-2	122	0.336×10^5	49.5

表－２ 載荷荷重と繰返し回数

Specimen	Loading step	Upper load (kN)	Lower load (kN)	Load range (kN)	Cycles ($\times 10^4$)
A-1	1	98	5	93	233.3
	2	118	5	113	257.7
	3	137	5	132	206.2
	4	157	5	152	116.5
A-2	1	98	5	93	783.5
	2	118	5	113	455.9
B-1	1	49	5	44	219.8
	2	29	2	27	397.2
B-2	1	39	2	37	299.2

リート床版に負の曲げモーメントが生じる。

主桁フランジの幅と厚さ、主桁ウェブの板厚、横桁の上フランジの幅と厚さ、コネクションプレートの寸法は応力実測が行われた実橋^{1,2)}のそれと同じである。実橋の応力実測において、横桁の上フランジの板幅の間の領域で主桁ウェブに大きな板曲げ応力 σ_{yy} が観察された^{1,2)}。したがって、試験体のコンクリート床版の幅を横桁の上フランジの板幅に等しくとった。

コンクリート床版と主桁上フランジの連結構造が疲労亀裂の発生・伝播に与える影響を調べるために、図－５に示すように、各横桁連結部でスタッド・ジベルの配列および本数を変えた。試験体A－２の連結部A－２Rと試験体B－２ではスラブ・アンカーを用いた。

鋼材JIS-SS41をコネクションプレートに用い、それ以外の鋼板に対して鋼材JIS-SM50Aを用いた。これらの鋼材の材料特性を表－１に示す。同表には、床版のコンクリートのヤング率と圧縮強度も示してある。これらはコンクリートの標準円柱供試体（ $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ ）の圧縮試験から得られた。応力－ひずみ曲線の除荷時の傾きをコンクリートのヤング率に採用した。

主応力の大きさと方向を決定するために３軸ひずみゲージをコネクションプレートに貼付した。膜応力と板曲げ応力を分離するために主桁ウェブの表裏面に１軸ひずみゲージを取り付けた。スタッド・ジベルに生じる軸力と曲げモーメントを分離するために、２枚の１軸ひずみゲージをスタッド・ジベルに貼付した。床版の鉛直たわみ、主桁のフランジの鉛直変位と水平変位をダイヤルゲージで測定した。

サーボタイプの疲労試験機を用いて荷重制御で疲労試験を行った。載荷荷重の大きさは、横桁連結部の疲労亀裂の進展状況あるいは床版の鉛直たわみの増加量を考慮して段階的に変えた。載荷荷重の大きさとその繰返し回数を表－２に示す。

３． 疲労亀裂

疲労試験終了時における横桁連結部の亀裂の進展状況を、試験体A－１の連結部A－１Lと試験体B－１に対してそれぞれ図－６、７に示す。図－１に示すタイプ１とタイプ４の亀裂に類似する疲労亀裂がこれらの試験体に発生している。

試験体Aでは、タイプ１とタイプ４の亀裂が発生した。連結部A－２Rを除いて、タイプ１の亀裂は、亀裂長さが２、３ cmに達した後停留した。タイプ４の亀裂は、試験体Aの全ての連結部で、荷重の繰返しとと

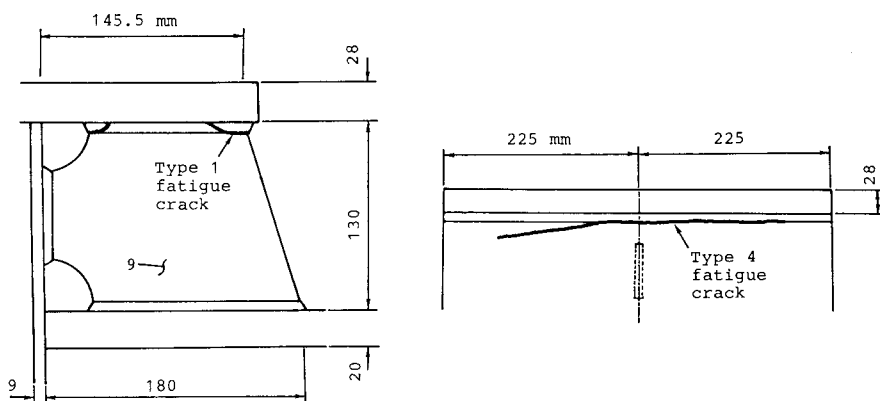


図-6 試験体A-1の連結部A-1Lに発生した疲労亀裂

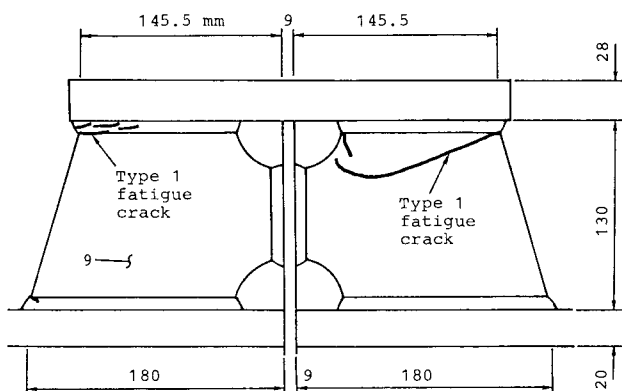


図-7 試験体B-1に発生した疲労亀裂

もに成長を続けた。連結部A-1Lでは、最初、タイプ4の亀裂が発生した後、タイプ1の亀裂が発生した。しかし、連結部A-1Rでは、この発生順序が反対であった。したがって、外主桁の横桁連結部では、タイプ1とタイプ4の亀裂は独立に発生する。

試験体Bでは、タイプ1の亀裂のみ発生した。試験体B-1では、右側のコネクションプレートより左側のコネクションプレートに早く亀裂が発生した。しかし、図-7に示すように、疲労試験終了時には、右側のコネクションプレートの亀裂が左側のコネクションプレートの亀裂より長かった。試験体B-2では、左側のコネクションプレートの方に亀裂が発生した。

4. 応力状態

コネクションプレートの主応力分布を、試験体A-1の連結部A-1Lと試験体B-1に対してそれぞれ図-8、9に示す。コネクションプレートの上端にはほぼ鉛直に大きな膜応力が生じている。

主桁ウェブに生じる鉛直方向の表面応力 σ_{sy} （表面応力の定義を付録に示す）の分布を試験体A-1の連結部A-1Lに対して図-10に示す。コネクションプレートに向かって σ_{sy} が増加することが分かる。

荷重の繰り返し回数が1000回と617万回（疲労試験終了時）の時の主桁ウェブに生じる鉛直方向の表面応力 σ_{sy} の分布を試験体B-1に対して図-11に示す。前者の繰り返し回数では、 σ_{sy} が小さく、コネクショ

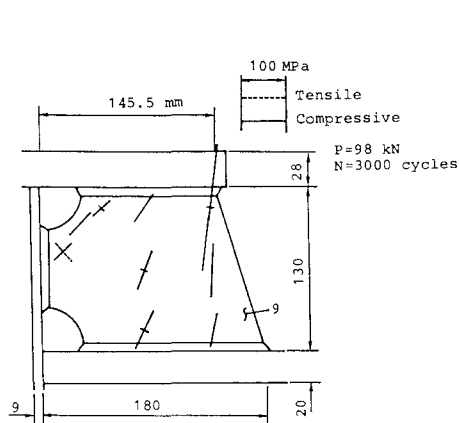


図-8 コネクションプレートの主応力分布
[連結部A-1L]

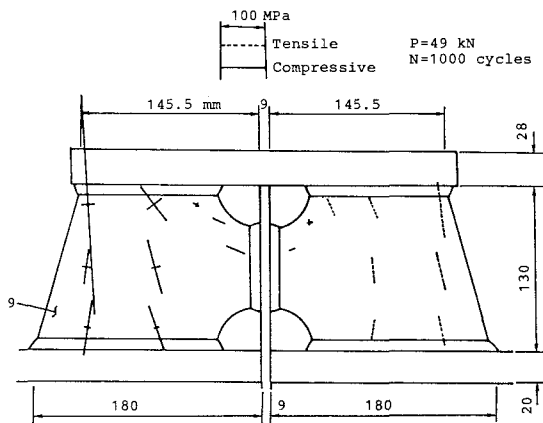


図-9 コネクションプレートの主応力分布
[試験体B-1]

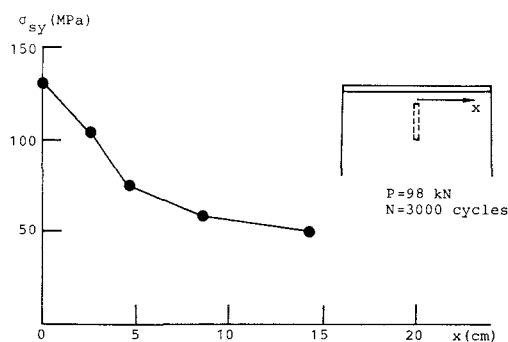


図-10 σ_{sy} の分布 [連結部A-1L]

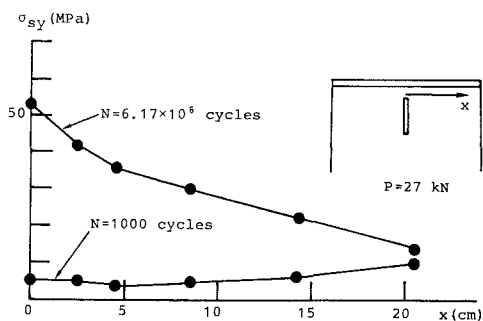


図-11 σ_{sy} の分布 [試験体B-1]

プレートにタイプ1の亀裂が発生していなかった。後者の繰返し回数では、 σ_{sy} が大きく、図-7に示すようなタイプ1の亀裂がコネクションプレートに発生していた。したがって、中主桁の横桁連結部においては、コネクションプレートのタイプ1の亀裂の進展が主桁ウェブに生じる板曲げ応力 σ_{sy} を増加させ、タイプ4の亀裂を発生させると考える。

5. S-N曲線

タイプ1とタイプ4の亀裂に対してS-N曲線を作成した。亀裂発生点の近傍に添付したひずみゲージが示すひずみ範囲が亀裂の通過によって急激に低下した時の繰返し回数を寿命Nに用いた。載荷荷重の変化あるいは他の亀裂の進展によってこのひずみ範囲は変動するので、次式によって定義される等価応力範囲を応力Sに対して用いた。

$$\Delta \sigma = \left[\sum_{i=1} \{ (\Delta \sigma_i)^3 (N_i / N \epsilon) \} \right]^{1/3} \quad (2)$$

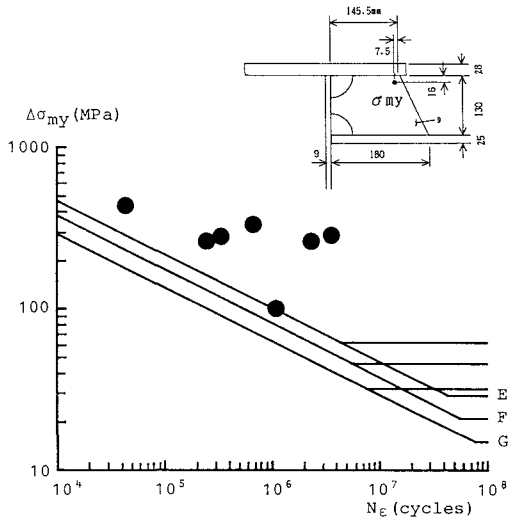


図-12 $\Delta\sigma_{my}$ と $N\epsilon$ の関係

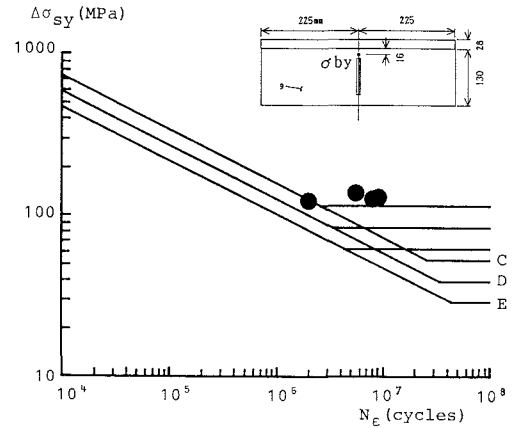


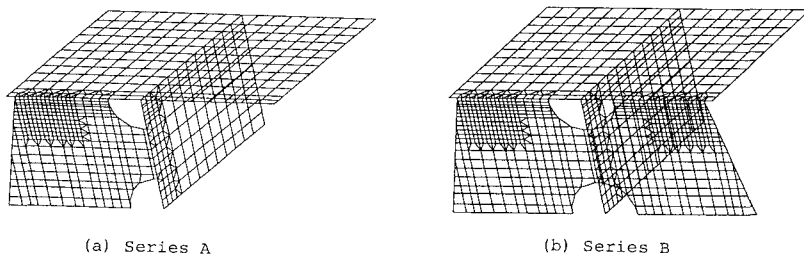
図-13 $\Delta\sigma_{sy}$ と $N\epsilon$ の関係

ここに、 $\Delta\sigma$ ：等価応力範囲、 $\Delta\sigma_i$ ：レベル i の応力範囲、 N_i ： $\Delta\sigma_i$ の繰り返し回数、 $N\epsilon (= \sum_{i=1} N_i)$ ：全繰り返し回数。

タイプ1の亀裂に対する等価応力範囲 $\Delta\sigma_{my}$ と $N\epsilon$ の関係、タイプ4の亀裂に対する等価応力範囲 $\Delta\sigma_{sy}$ と $N\epsilon$ の関係をそれぞれ図-12、13に示す。これらの図には、日本鋼構造協会発行の疲労設計指針（案）⁹⁾に規定される許容疲労応力範囲も示してある。タイプ1とタイプ4の亀裂に対してそれぞれFとD曲線が適当と考える。

6. 応力 σ_{my} と σ_{by} の発生特性

応力 σ_{my} と σ_{by} の発生特性を調べるために、図-14に示すモデルに対して有限要素法解析を行った。これらのモデルは、主桁フランジ、主桁ウェブ、コネクションプレートから成っている。主桁ウェブとコネクションプレートの下端を固定した。図-15に示す力を主桁フランジに作用させた。これらの力は、コンクリート床版の鉛直たわみの測定結果、スタッド・ジベルとコネクションプレートのひずみの測定結果から決定された¹⁰⁾。図-15に示す鉛直力は、スタッド・ジベルあるいはスラブ・アンカーの引き抜き作用とコンクリート床版と主桁フランジとの間の接触作用によって生じる。試験体Aにおいては、スタッド・ジベルあるいはスラブ・アンカーのせん断抵抗によって主桁フランジに水平力が生じる。



(a) Series A

(b) Series B

図-14 有限要素法モデル

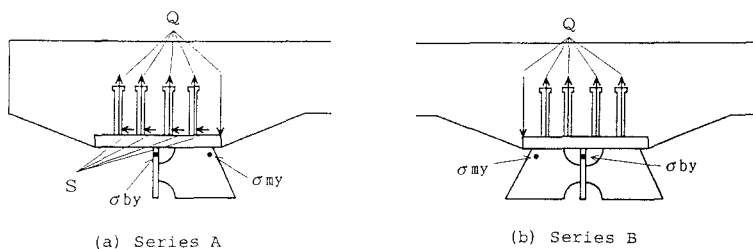


図-15 主桁フランジに作用する力

有限要素法値と測定値の比較を、試験体A-1の連結部A-1Lと試験体B-1に対してそれぞれ図-16、17に示す。 σ_{my} に関して、有限要素法値は測定値に近い値を示す。 σ_{by} に関しては、有限要素法値と測定値の分布傾向は同じであるが、両者の値はかなり離れている。

次式に示すように、有限要素法解析によって得られた膜応力 σ_{my} と板曲げ応力 σ_{by} を、主桁フランジに作用する鉛直力によって生じる応力成分と主桁フランジに作用する水平力によって生じる応力成分に分解した。

$$\begin{aligned}\sigma_{my} &= \sigma_{myQ} + \sigma_{mys} \\ \sigma_{by} &= \sigma_{byQ} + \sigma_{bys}\end{aligned}\quad (3)$$

ここに、 σ_{myQ} と σ_{byQ} ：それぞれ、主桁フランジに作用する鉛直力によって生じる σ_{my} と σ_{by} の応力成分、 σ_{mys} と σ_{bys} ：それぞれ、主桁フランジに作用する水平力によって生じる σ_{my} と σ_{by} の応力成分。

これらの応力成分の値を表-3に示す。表の各応力成分の値は、亀裂発生点に最も近く貼付されたひずみゲージの位置（図-12、13の中の挿入図参照）で得られたものである。表のQとSの列には、主桁フランジに作用する鉛直力と水平力の各総和が与えられている。連結構造A-OとB-Oは横桁連結部にスタッド・ジベルあるいはスラブ・アンカーが設けられていない構造であり、有限要素法解析だけに用いられたモデルである。これらの連結構造の有限要素法解析においては、コネクションプレートの直上の主桁フランジの端

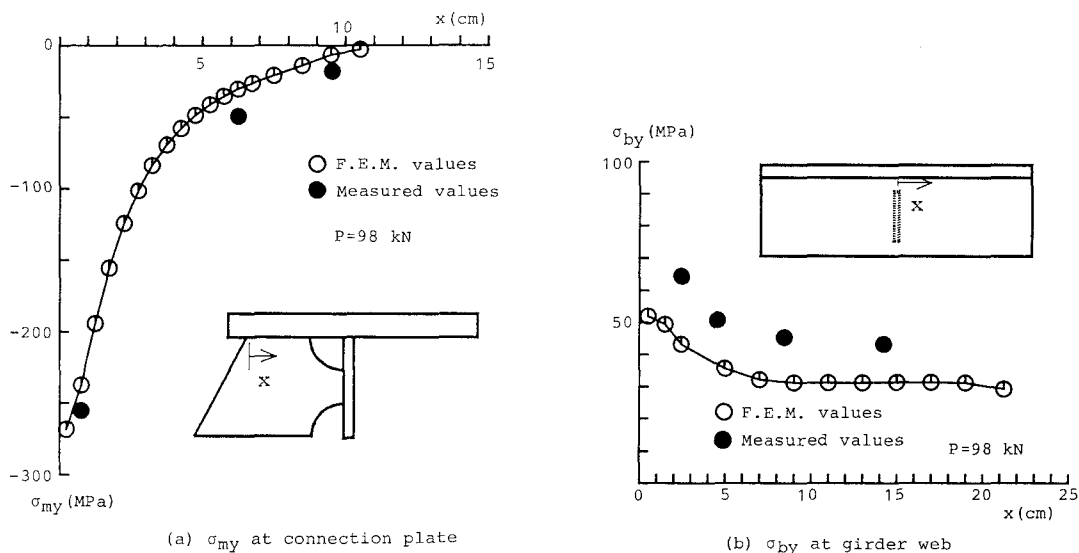


図-16 有限要素法値と測定値の比較〔連結部A-1L〕

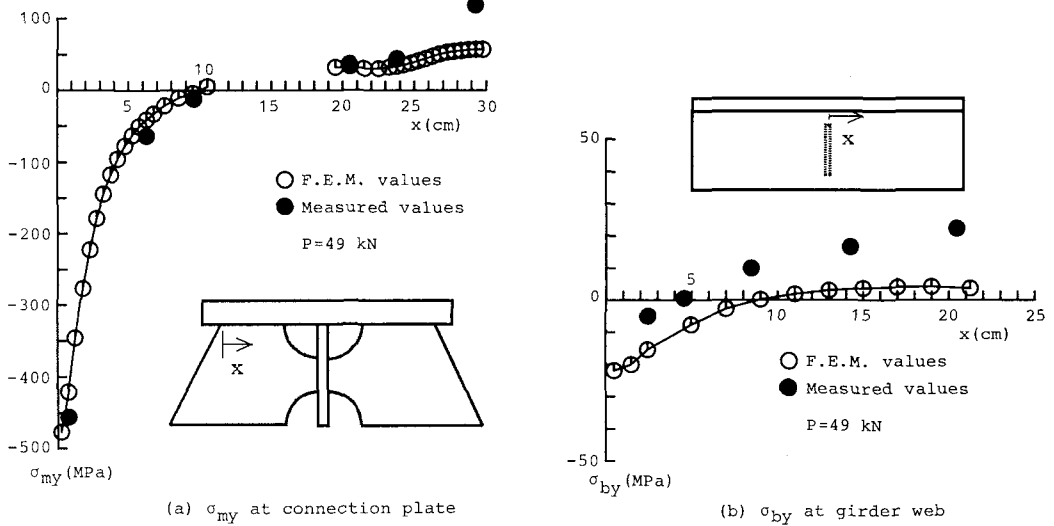


図-17 有限要素法値と測定値の比較〔試験体B-1〕

表-3 QとSによって生じる応力成分の比較

Connection	Q (kN)	S (kN)	σ_{my} (MPa)	σ_{myG} (MPa)	σ_{mys} (MPa)	σ_{by} (MPa)	σ_{byG} (MPa)	σ_{bys} (MPa)
A-1L	49.0	41.6	-238.2	-241.2	3.0	43.5	8.7	34.8
A-1R	49.0	56.3	-291.3	-295.2	3.9	96.2	49.0	47.2
A-2L	49.0	57.8	-240.8	-244.7	3.9	67.6	18.6	49.0
A-2R	49.0	51.7	-345.2	-348.6	3.4	31.1	-13.9	45.0
A-0	49.0	0.0	-183.9	-183.9	0.0	-9.8	-9.8	0.0
B-1	49.0	0.0	-276.4	-276.4	0.0	-10.2	-10.2	0.0
B-2	49.0	0.0	-249.7	-249.7	0.0	-10.3	-10.3	0.0
B-0	49.0	0.0	-180.0	-180.0	0.0	-7.4	-7.4	0.0

に集中荷重を作用させた。表-3から次のことが言える。

- コネクションプレートに生じる膜応力 σ_{my} に関して、主桁フランジに作用する鉛直力によって生じる応力成分が大きく、主桁フランジに作用する水平力によって生じる応力成分は非常に小さい。主桁ウェブに生じる板曲げ応力 σ_{by} に関して、これらの鉛直力と水平力に対応する応力成分の大きさは同等である。
- 連結構造A-0とB-0の値は他のどの連結構造の値より小さい。したがって、スタッド・ジベルやスラブ・アンカーを横桁連結部から取り除くことにより、膜応力 σ_{my} と板曲げ応力 σ_{by} を低減させることができる。

7. 結 論

本研究の主な結果は次の通りである。

- スタッド・ジベルの配列、本数にかかわらず、横桁連結部に疲労亀裂が発生する。スラブ・アンカーが用いられた横桁連結部においても同様な疲労亀裂が発生する。
- 外主桁の横桁連結部においては、タイプ1とタイプ4の疲労亀裂がそれぞれ独立に発生する。中主桁の

横桁連結部においては、タイプ1の亀裂が発生・伝播した後、タイプ4の疲労亀裂が発生する。

- 3) スタッド・ジベルあるいはスラブ・アンカーを横桁と主桁の連結部から取り除くことにより、タイプ1とタイプ4の亀裂を発生させる応力を低減させることができる。

付 録 [表面応力と膜応力及び板曲げ応力の関係]

図-A.1を参照して、板に生じる応力の板厚方向の分布は直線を示す。この応力分布で、板表面に生じる応力 σ_1 、 σ_2 を表面応力と呼ぶ。この表面応力は、軸力 N に対応する応力 σ_m と曲げモーメント M に対応する応力 σ_b に分解される。前者と後者をそれぞれ膜応力、板曲げ応力と呼ぶ。

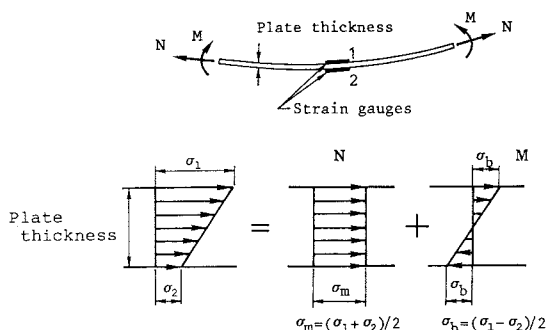


図-A.1 表面応力と膜応力、板曲げ
応力の関係

参考文献

- 1) Okura, I., Hirano, H. and Yubisui, M.: Stress measurement at cross beam connections of plate girder bridge, Tech. Reports of Osaka Univ., Vol.37, No.1883, pp.151-160, 1987.
- 2) Okura, I. and Fukumoto, Y.: Fatigue of cross beam connections in steel bridges, IABSE, 13th Congress, Helsinki, pp.741-746, 1988.
- 3) 大倉一郎・指吸政男・平野浩：プレートガーダー橋の横桁連結部の局部応力と橋の3次元挙動の関係、構造工学論文集、Vol.33A、pp.373-382、1987。
- 4) Okura, I., Yubisui, M., Hirano, H. and Fukumoto, Y.: Local stresses at cross beam connections of plate girder bridges, 土木学会論文集, 第392号, pp.111-119, 1988.
- 5) Okura, I., Takigawa, H. and Fukumoto, Y.: Structural parameters governing fatigue cracking at cross-beam connections in plate girder highway bridges, Tech. Reports of Osaka Univ., Vol.39, No.1980, pp.289-296, 1989.
- 6) Okura, I., Takigawa, H. and Fukumoto, Y.: Structural parameters governing fatigue in highway bridges, 土木学会論文集, 第410号, pp.253-256, 1989.
- 7) 大倉一郎・瀧川浩之・福本嘯士：プレートガーダー橋の横桁連結部の疲労亀裂を支配する構造パラメータ、構造工学論文集、Vol.35A、pp.921-928、1989。
- 8) Okura, I. and Fukumoto, Y.: Fatigue of cross-beam connections in plate girder highway bridges, IABSE, Workshop, Lausanne, pp.167-176, 1990.
- 9) 日本鋼構造協会発行：疲労設計指針（案）、1989。
- 10) 井上博之：プレートガーダー橋の横桁連結部の局部応力と疲労、大阪大学修士論文、1991。

(1991年9月30日受付)