

# プレートガーダー支承部の疲労損傷とそのディテール改良に関する研究

館石和雄\*・名取 暢\*\*・三木千寿\*\*\*

プレートガーダー支承部の疲労損傷発生原因と疲労強度について、支承の機能低下およびソールプレートと主桁下フランジ間の空隙と、桁端の局部応力との関係に着目して実験およびFEM解析により検討した。その結果、支承の機能低下およびソールプレートと下フランジ間の空隙によって疲労寿命が著しく短くなることが明らかとなった。様々な改良ディテールに対して疲労試験を行った結果、ソールプレートを上査よりも長くし、かつ上査の直上のウェブを鉛直リブで補強する改良方法が応力低減効果が高く、疲労強度も高いことが明らかとなった。

**Key Words** : fatigue, plate girder bridge, shoe, sole plate, local stress

## 1. はじめに

近年、鋼橋支承部のソールプレート周辺部に疲労き裂が数多く発見されている。この損傷は鉄道、道路橋を問わず複数の橋に発生しており、今後、鋼橋での一般的な疲労損傷となることが考えられる<sup>1), 2)</sup>。橋梁の支承部近傍は死・活荷重を集中的に受ける、橋体の中で最も厳しい荷重集中点であり、この箇所での損傷は橋梁全体に重大な影響を与えることが予想される。

これまでに支承部近傍に疲労損傷が生じた橋梁では、交通荷重に対する支承の移動、回転がほとんど見られない状態であること<sup>1)~6)</sup>、また試験体を用いた検討により支承が可動である場合には問題となるような高い応力は発生しないことが明らかとなっており<sup>3), 7), 8)</sup>、この損傷は支承の可動機能と関係があるものと考えられている。よってこの損傷を防止するための最も直接的で有効な対策方法は、支承の可動機能を供用期間中、常に維持しておくことであると思われる。しかし長期間にわたり支承の機能を維持することは現実的にはかなりの困難を伴う<sup>9)</sup>。したがって、支承の機能低下が生じた場合の桁端での応力状態を把握した上で、その場合でも疲労強度上問題となるような応力が生じないような桁端ディテール、あるいは十分な疲労強度を有したディテールを検討しておく必要がある。

本研究では様々な端部ディテールを有する桁試験体を用いた載荷実験およびFEM解析により、桁端部での局所的な応力状態を明らかにし、疲労き裂の発生原因を詳細に解明する。また疲労実験により各ディテールの疲労強度を明らかにする。これらの検討から、支承の機能

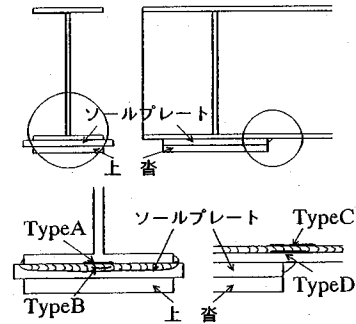


図-1 疲労き裂の分類

低下が生じた場合でも疲労損傷を防止することのできる桁端改良ディテールについて考察する。

## 2. 疲労き裂の分類と発生原因の仮定

実橋梁に生じた疲労き裂は大きくわけて図-1に示す4タイプに分類することができる<sup>1), 2)</sup>。TypeAはソールプレートと下フランジの前面隅肉溶接部の下フランジ側止端に発生するものである。き裂はウェブの直下で発生し、止端に沿って進展する。フランジを貫通した後、ウェブにまで達した例もある。TypeBは同溶接部のピード上に見られるものであり、溶接ルート部から発生したと推定されるタイプである。TypeCはウェブと下フランジの首溶接部のウェブ側止端に、TypeDは下フランジ側止端に生じるタイプである。TypeC, Dのき裂は、ソールプレートの端部、すなわち剛性が急変している位置付近から発生し、橋軸方向に進展している。

これまでの実橋での応力測定や過去の研究から、これらのき裂を発生、進展させる応力の発生要因として次のものを挙げることができる。

- 交通荷重に対する支承の水平移動機能や回転機能が低下することによって桁端に生じる拘束応力
- 伸縮継手に段差などがあった場合、そこを車両が

\* 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科  
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

\*\* (株)横河ブリッジ研究所

\*\*\* 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

表-1 鋼材の機械的性質・化学成分

	鋼種	板厚 (mm)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	C ×10 <sup>2</sup>	Si ×10 <sup>2</sup>	Mn ×10 <sup>2</sup>	P ×10 <sup>3</sup>	S ×10 <sup>3</sup>	Cu ×10 <sup>2</sup>
ウェブ	SM490A	9	397	558	26	16	45	145	27	4	1
フランジ	SM490YA	16	428	564	23	16	45	145	27	4	1

支承部の機能低下

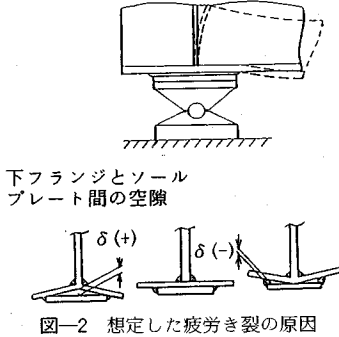


図-2 想定した疲労き裂の原因

通過する際に生じる衝撃力

- c) 主桁のねじれ，たわみ差などによって生じる二次応力
- d) ソールプレートと下フランジの間に隙間があることによってソールプレート取付溶接部近傍に生じる局部応力

これらの要因のうち損傷橋梁に共通してみられたのは支承の機能低下であり，これがこの部位の疲労損傷に最も密接に関係しているものと考えられる。伸縮継手の不整による衝撃力は要因としては考えられるものの，実測においてこのような応力の発生が見られない橋梁にも損傷が生じた例があり，二次的な要因として位置づけられる。主桁のねじれ，たわみ差による二次応力についても同様である。ソールプレートと下フランジの間の隙間については，ソールプレート溶接時に取付面となる下フランジ下面での平面性にほとんど注意が払われていないのが実状である。実橋における測定でもかなりの橋梁で0.2～1.0 mm程度の隙間が生じている可能性があることが確かめられている。支承の機能低下による拘束があるときにこの隙間が存在すると，ソールプレートの取付溶接部近傍には局部的に高い応力集中が生じるものと思われ，疲労損傷の原因となることが考えられる。そこで本研究では，支承の機能低下による桁に対する拘束応力およびソールプレートと下フランジの間の隙間によって生じる局部応力の2つをこの損傷の主要因とし，これらと桁端の疲労強度の関係について検討を行う(図-2)。なお，下フランジとソールプレートの隙間 $\delta$ の正負は，以下，図中に示すようにとるものとする。

### 3. 疲労試験

#### (1) 試験方法

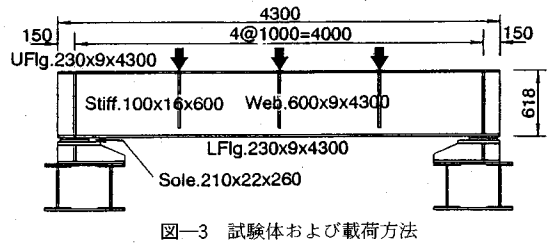


図-3 試験体および荷重方法

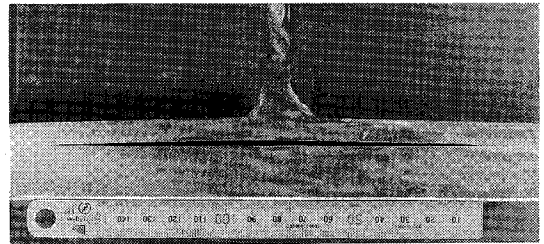


図-4 ソールプレートフランジ間の空隙

図-3に試験体の形状，寸法および荷重状況を，表-1に供試鋼材の機械的性質・化学成分を示す。下フランジとソールプレートの溶接は，施工での実状を考慮して上向きの手溶接で行った。支承部が十分な回転，移動機能を有している時には，問題となるような高い応力は発生しないことが明らかになっていることから，ここでは図に示すように支点を箱型断面梁にボルトで固定し，桁端を拘束して実験を行った。

試験体は下フランジとソールプレート間の隙間の目標値を+3，+1，0，-1，-3 mmとした5タイプを作製した。隙間の大きさは，すべての試験が終了した後に垂直補剛材から30 mm離れた位置で桁を切断して調査した。図-4に切断面の例を，表-2に測定した空隙量を示す。目標値よりはやや小さめの値となっているが，相対的にはほぼ想定通りの空隙量が導入されていることがわかる。

疲労試験は最大能力±30 tonfの油圧サーボ式載荷ジャッキを3本用い，同位相で2～22 tonfの一定荷重振幅で実施した。なお，同時に2本の桁に載荷しており，1支承あたりの反力変動幅は15 tonfである。疲労試験終了後，き裂破面を露呈し観察を行った。

#### (2) 疲労試験結果

図-5に発生したき裂タイプごとの破面およびその模式図を示す。TypeAのき裂はソールプレート下フランジ溶接部のウェブ直下の下フランジ側止端から発生し，桁端方向に向かってほぼ45度傾斜した面に沿って

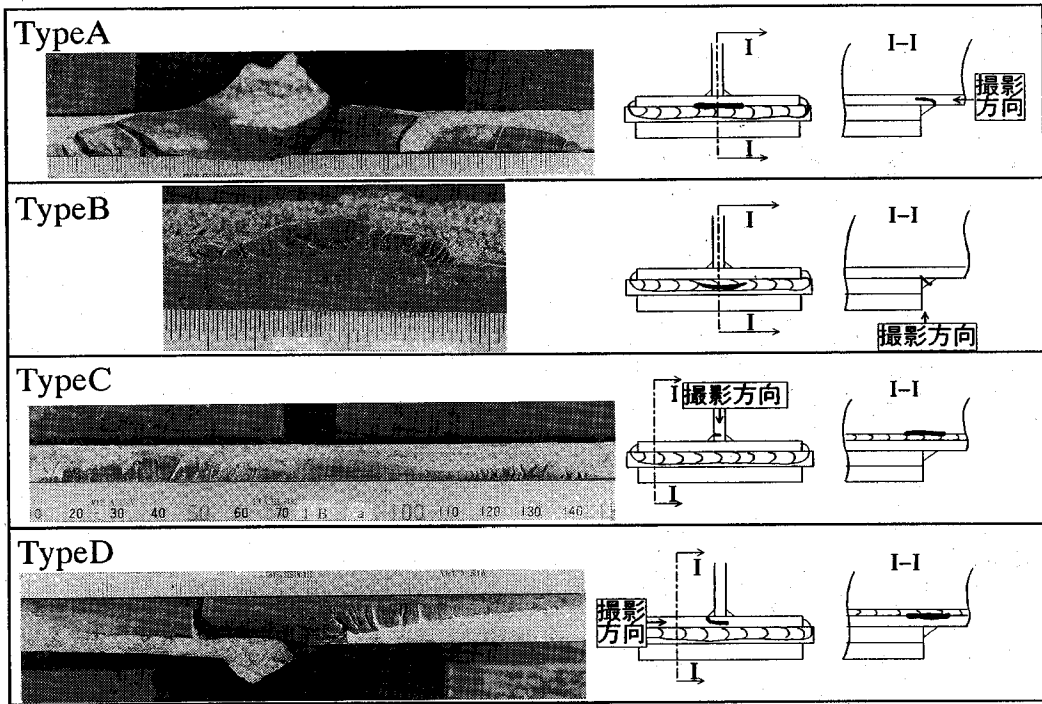


図-5 発生した疲労き裂

表-2 空隙量の実測結果

No.	目標空隙量	実測結果				
		1	2	3	4	5
1-1	0mm	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0
1-2	0mm	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
1-3	0mm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2-1	+3mm	0.0	1.4	2.2	1.2	0.0
2-2	+3mm	0.0	1.3	2.1	1.3	0.0
3	+1mm	0.5	0.8	0.8	0.9	0.0
4	-3mm	2.2	1.1	0.0	1.1	2.1
5	-1mm	1.5	1.0	0.0	0.8	1.1

進展した。その後徐々に進展方向がほぼ水平に、すなわち下フランジを板厚方向に引き裂くような形で進展した。TypeB のき裂は同溶接部のウェブ直下のルート部から溶接の断面に沿って進展している。TypeC のき裂はウェブ下フランジ溶接部のソールプレート端部直上のウェブ側止端に生じ、ほぼ水平面内を橋軸方向に進展しているが、その深さは比較的浅いものが多い。TypeD のき裂はウェブ下フランジ溶接部のソールプレート端部直上の下フランジ側止端から発生し、発生直後の進展方向はウェブ板の中心方向に向かって約45度の角度である。すなわち、溶接部をえぐるような形で曲面を描いて進展しており、ある程度進展した後はTypeA のき裂と同じく、下フランジ板を板厚方向に引き裂くように進展した。TypeA と TypeD のき裂がと

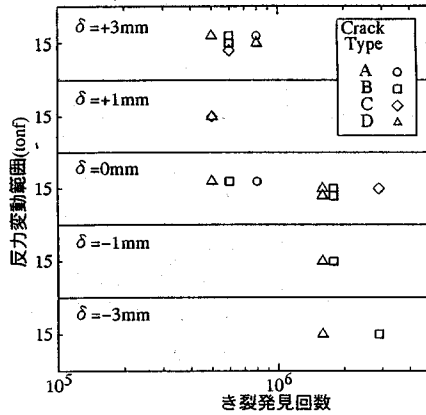


図-6 反力変動範囲と疲労寿命の関係

も発生した試験体の中には、両者がほぼ水平な面内で合体しているものもあった。

図-6 に  $\delta$  の値によって区別した疲労試験結果を示す。横軸は磁粉探傷法による観察で得られたき裂発見回数で示している。ただし、TypeB のき裂について、ルート破面観察の結果その存在が確認されたが溶接部表面には至っていなかったものについては、試験終了時の載荷回数でプロットした。

TypeB, TypeD のき裂は  $\delta$  の大きさによらず全ての試験体で発生している。 $\delta$  の有無や大きさと発生したき裂のタイプに相関は認められず、いずれの試験体でも似たような損傷パターンとなっている。また発生したき裂

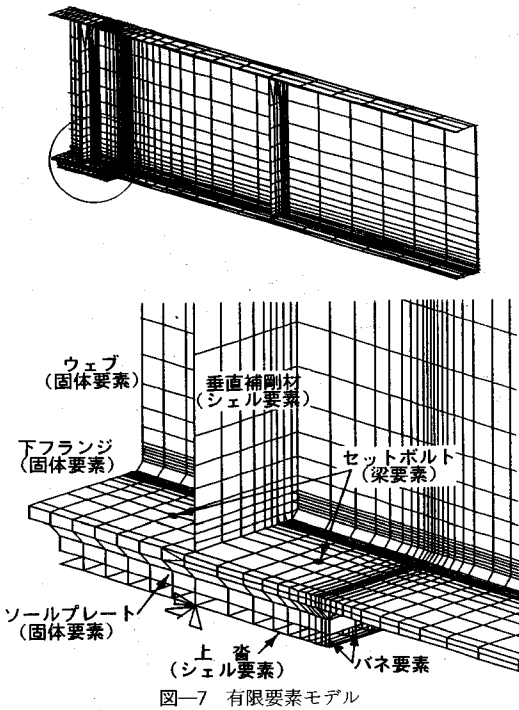


図-7 有限要素モデル

の発生順序に関しても明確な傾向は認められない。このことから、いずれのき裂もそれぞれ独立に発生する可能性があるものと考えられる。

$\delta > 0$ 、すなわちウェブ直下でフランジとソールプレートが接触していない場合、いずれの試験体においても極めて早期にき裂が発生した。また  $\delta = 1 \text{ mm}$  と  $3 \text{ mm}$  の試験体間に疲労強度の違いは認められない。 $\delta = 0$  の試験体 3 体のうちの 2 体は比較的長い疲労寿命となっているが、1 体については他の 2 体と比べて極めて早期にき裂が生じている。この試験体は表-2 に示した [1-1] であり、目標隙間量を 0 とした他の 2 体の試験体と異なりわずかに隙間が空いている。表に示した測定結果は垂直補剛材近傍でのものであり、ソールプレート前面溶接部付近での空隙量は不明であるが、この試験体の疲労強度が  $\delta > 0$  のものとはほぼ等しいことから考えて、この 1 体については試験体製作上わずかな空隙が残されていたものと考えられる。この 1 体を除いて考えると  $\delta = 0$  および  $\delta < 0$  の試験体はほぼ同等の疲労寿命となっており、 $\delta > 0$  の試験体と比べて明らかに疲労強度が高いことがわかる。

#### 4. 桁端部の応力状態

##### (1) 荷重試験および応力解析方法

前章に示した試験体、荷重方法によって疲労試験前に実施した応力実測結果、および FEM 解析結果により、桁端部での局所的な応力状態を詳細に検討した。図-7 に解析モデルを示す。上フランジ、垂直補剛材および上

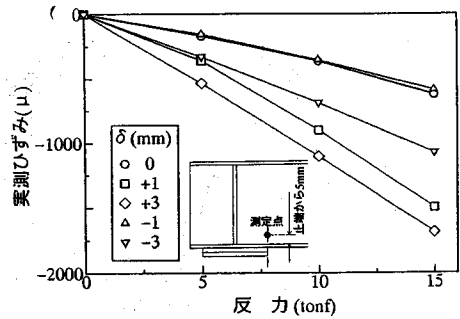


図-8 反力とひずみの関係

沓をシェル要素、セットボルトを梁要素、他は固体要素でモデル化した。境界条件として垂直補剛材直下の位置で上沓の全自由度を拘束した。

下フランジとソールプレートの間およびソールプレートと上沓の間の接触は、両板間に線形バネを入れ、解析の結果引張力の生じたバネを取り除く作業を繰り返すことにより表現した<sup>3)</sup>。空隙  $\delta$  の影響は、 $\delta > 0$  の場合は下フランジとソールプレート間のバネ要素を全て取り除くことにより、 $\delta < 0$  の場合はウェブ直下以外のバネ要素を取り除いて解析することにより表現できるものとした。 $\delta$  の大きさおよびソールプレートと下フランジの摩擦の影響は考慮していない。

##### (2) 桁端部の応力状態

###### a) 荷重とひずみの関係

図-8 に、反力とウェブ-下フランジ溶接部ウェブ側止端から  $5 \text{ mm}$  離れた位置での実測ひずみの関係を示す。 $\delta = +1$  のものについては反力が大きくなるにしたがってひずみにやや非線形性が生じているが、これは荷重の増加によりソールプレートと下フランジの接触や離間が生じるためであると考えられる。その他のものについては概ね線形関係にあるといえる。この傾向は他の溶接部近傍で測定したひずみについても同様であった。

###### b) ソールプレート前面溶接部

図-9 (a) にウェブ直下でのソールプレート前面溶接部下フランジ側止端近傍の応力測定結果および解析結果を示す。この応力は Type A のき裂を発生、進展させると想定されるものである。応力は 1 支承あたりの反力  $15 \text{ tonf}$  のときの値で示した (以下、同様)。 $\delta$  の有無によらずソールプレート端から  $40 \text{ mm}$  程度までの短い区間に著しい応力集中が生じている。また  $\delta > 0$  の場合には  $\delta = 0$  の場合の約 2 倍の実測応力値となっている。これは、隙間の存在によりソールプレートと下フランジ間の面的な荷重伝達が行われず、隅肉溶接のみによって行われることにより、ソールプレート前面隅肉溶接部周辺に反力が集中し、下フランジに局所的な変形が生じるためと考えられる。解析値では  $\delta = 0$  と  $\delta < 0$  の場合の応力はほぼ等しくなったが、これは支点が拘束を受けてい

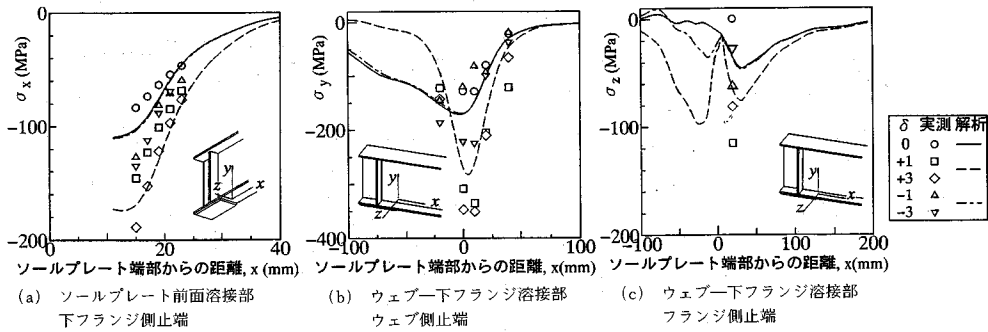


図-9 桁端部の応力分布

ることによりウェブ直下のソールプレート端部周辺に反力が集中し、ウェブ直下以外での面的接触による荷重伝達がほとんど影響しないためである。しかし実験値では  $\delta=0$  に場合に比べて  $\delta<0$  ではやや高い応力が生じており、これは実験における支点の拘束が完全固定ではないため、 $\delta=0$  の場合には解析よりも広い範囲で板間の接触が生じ、実測応力が小さくなるためと考えられる。

解析結果、実測結果とも溶接止端に近づくにつれ応力増加の割合が大きくなっており、き裂発生点となる溶接止端部では  $\delta=0$  の場合でも非常に高い応力集中が生じていることがわかる。 $\delta>0$  の場合にはさらに高い応力集中が生じている。これらの応力発生性状は、疲労試験において  $\delta=0$  の試験体にも TypeA のき裂が発生したこと、 $\delta>0$  の場合には非常に早期にき裂が発生した傾向と一致している。

c) ウェブ下フランジ溶接部ウェブ側止端

図-9 (b) に下フランジウェブ溶接部のウェブ側止端から 5 mm 離れた位置での鉛直方向応力実測結果、解析結果を示す。 $\delta>0$  の場合に非常に大きな応力が生じており、実測値でみると  $\delta=0$  の場合の約 3 倍程度の応力集中が生じている。 $\delta>0$  の場合の応力のピーク値は解析結果の方がやや小さめとなっているものの、解析結果と実測結果の傾向は比較的良好に一致しており、解析結果からみると  $\delta>0$  の場合にはソールプレート上のウェブ（図中で横軸が負の範囲）ではほとんど応力が生じておらずソールプレート端部の極めて短い範囲に応力が集中しているのに対して、 $\delta=0, <0$  の場合にはソールプレート上のウェブに全体的に応力増加が見られることがわかる。

d) ウェブ下フランジ溶接部下フランジ側止端

図-9 (c) にウェブ下フランジ溶接部下フランジ側止端から 5 mm 離れた位置での橋軸直角方向応力を示す。疲労試験では全ての試験体についてこの応力と関係があると思われる TypeD のき裂が発生したが、応力実測値をみると  $\delta=0$  の場合には測定点での応力は非常に小さく、 $\delta>0$  の場合でも応力の絶対値はそれほど大き

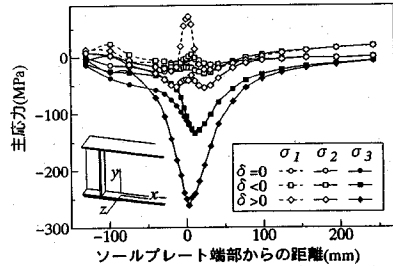


図-10 ウェブ下フランジ溶接部フランジ側止端の主応力分布

な値ではない。また、解析値は  $x=0$  付近で応力分布形状が局部的に極めて大きな変動を示している。

図-10 に、溶接止端に最も近い要素での主応力の解析値を示す。ただし止端半径などをモデル化できるほどの細分割ではないことから、応力の絶対値は参考値程度のものである。止端から 5 mm 離れた位置での応力分布形状（図-9 (c)）とは大きく異なり、止端位置での主応力はソールプレート端 ( $x=0$ ) でピークを持つ形状となっている。

$\delta=0, \delta<0$  の場合には主応力  $\sigma_3$  のピークはソールプレートからやや支間中央より、すなわち剛性が減少した位置に見られるが、 $\delta>0$  ではピーク位置がソールプレート端直上であり、応力増加はその前後の広い範囲に及んでいる。これは  $\delta=0, <0$  の場合にはソールプレート上で下フランジとソールプレートの接触により荷重伝達が生じるのに対し、 $\delta>0$  の場合には下フランジとソールプレートに接触がないため、ウェブからの荷重伝達によりソールプレート上の下フランジに橋軸直角方向の面外曲げが生じるためであると考えられる。

図-11 に、絶対値が最大である  $\sigma_3$  の主方向を示す。主方向はソールプレート端からの距離によって大きく変化しており、ソールプレート端部直上での下フランジは非常に強い多軸性をもつ応力状態となっていることがわかる。ソールプレート端部における  $\sigma_3$  の方向は、ほぼ  $y-z$  面内でかつウェブ中心へ向かって斜め上の方向である。この止端のき裂はソールプレート端部直上で発生し、

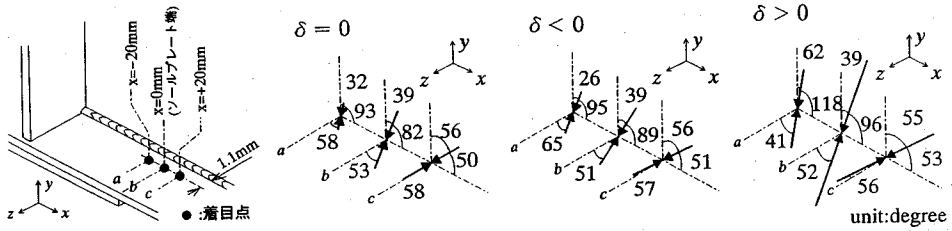


図-11  $\sigma_3$  方向と  $x, y, z$  軸との角度

ウェブ中心に向かって斜め下方に進展したことから、 $\sigma_3$  の方向とき裂の進展面とはほぼ直交しており、解析結果は実験によるき裂の発生、進展性状とよく一致している。

応力実測および解析の結果、桁端を拘束することにより疲労き裂の発生したすべての溶接止端部で著しい応力集中が発生し、 $\delta > 0$  の場合にはさらにその程度が大きくなることが明らかとなった。しかし  $\delta > 0$  であることにより増加する応力集中の程度は、いずれの溶接止端部でもそれほど大差なく、 $\delta > 0$  の場合に特に発生しやすいき裂タイプなどは特にならぬようである。すなわち、桁端が拘束されることのみで全てのタイプのき裂が発生する可能性があり、 $\delta > 0$  であることの影響はその発生寿命が著しく短くなることにより現れるものといえる。

### 5. 桁端部の改良ディテールの検討

#### (1) 改良ディテール

桁端部の応力実測および解析の結果、 $\delta = 0$  でも桁端に拘束を与えた場合には剛性の急変点であるソールプレート端部直上ではいずれの溶接止端部にもかなりの応力集中が見られること、特に  $\delta > 0$  の場合にはいずれの溶接止端にもさらに大きな応力集中が発生することが明らかとなった。これらの応力集中を緩和し、疲労き裂の発生を防止するためには、ソールプレートを取り付けたことによる剛性の急変を緩和すること、下フランジの変形を抑えることなどの補強が有効であるものと考えられる。そこで、改良ディテールとして表-3に示す5タイプについて試験体による応力測定および疲労試験を行った。

R1は垂直補剛材をソールプレート端部の直上に追加し、この位置での変形の集中を抑制しようとするものである。R2はソールプレートを上沓より100mm長くし、ソールプレート端での剛性の急変を緩和するもの、R3はさらにソールプレート端にテーパをつけることにより応力の流れをよりスムーズにしようとするものである。R4はソールプレートを100mm長くし、かつ上沓端部の直上に垂直補剛リブを溶接したものであり、R1とR2の両方の効果をねらったものである。補剛リブとウェーブフランジ溶接部との交差部では補剛リブの角をカットし、後に溶接により埋め戻している。R5は疲労

表-3 改良ディテール

タイプ	詳細図	$\delta$ (mm)	備考
R1		0	垂直補剛材追加
R2		0	ソールプレート延伸
R3		3	ソールプレート延伸 端部テーパ
R4		0,3	ソールプレート延伸 端部テーパ 垂直補剛リブ
R5		0	前面隅内溶接省略

き裂の発生点となるソールプレートの前面隅内溶接を省略したタイプである。空隙量 $\delta$ は、R3は+3mm、R4については0mmおよび+3mmの2タイプ、他は0mmとした。いずれの試験においても桁端には拘束を与えている。また、前章まで扱った試験体を標準タイプと呼ぶこととし、比較に用いた。

なお、これらの改良ディテールは、現行ディテールを基本に、それをできるだけ簡易な方法で補強することに主眼を置いて設定したものである。したがって、鉄道橋において採用されているようなソールプレートを高力ボルトにより接合する方法、あるいは桁端における腐食、座屈をも考慮して下フランジ、ウェブ板厚を増厚するなどのディテールは検討から除外している。

#### (2) 改良ディテールの桁端応力分布

図-12~図-15に、各改良ディテールの応力解析結果を示す。応力は前章と同じように1支承あたりの反力

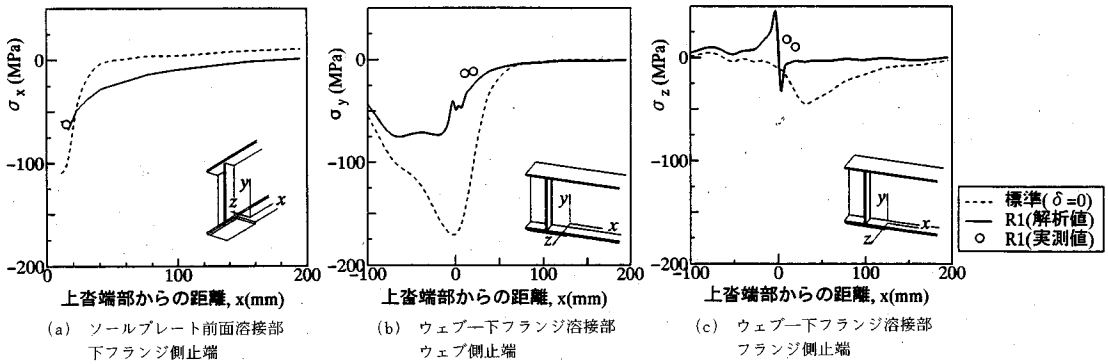


図-12 R1 デTAILの応力分布

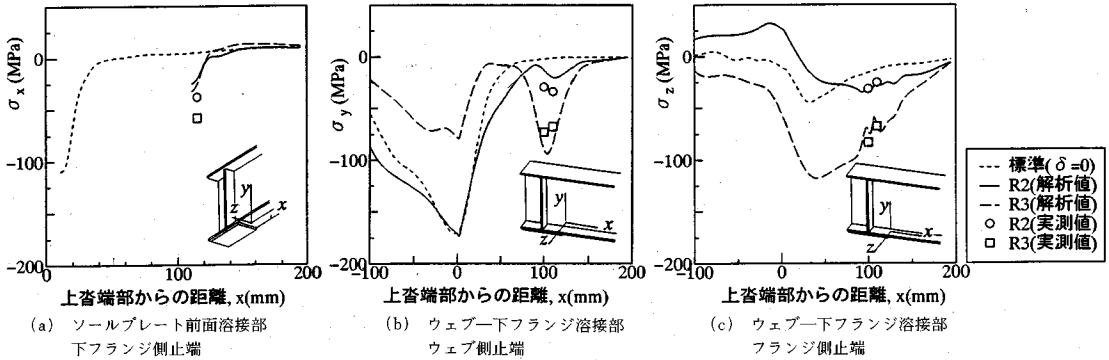


図-13 R2, R3 デTAILの応力分布

15 tonf のときの値で示した。また図中には応力実測結果も示した。全体的に解析値は実測値の傾向をよく表している。

a) R1 デTAIL

図-12にR1 デTAILの桁端部での応力分布を示す。この補強方法はソールプレートの長さに変更を加えないことからもっとも簡便な補強方法であるが、標準タイプと比べて疲労き裂の発生点となる各溶接部近傍の応力は減少している。

b) R2, R3 デTAIL

図-13にR2, R3の改良方法による応力分布を示す。どちらの改良方法もソールプレートを長くしたものであるが、R2は $\delta=0$ 、R3は $\delta=3\text{mm}$ であることから、両者の応力分布は大きく異なっている。

ソールプレートと下フランジの溶接部では、剛性の変化が緩和されることから標準タイプと比較して応力解析値は7割程度減少しており、非常に高い改良効果があることがわかる。

ウェブ下フランジ溶接部ウェブ側止端では、 $\delta=0$ のR2の場合、上脊端部直上に依然として大きな応力集中がみられる。ソールプレート端部直上の剛性急変位置にも応力増加が見られるが、その程度は小さい。 $\delta>0$ のR3の場合、上脊端部付近ではソールプレートと下フランジの接触がなく荷重伝達が生じないことから、こ

の位置での応力増加は $\delta=0$ の場合(R2)と比較して小さいが、ソールプレート端部の剛性急変位置で大きな応力増加が見られる。

ウェブ下フランジ溶接部の下フランジ側止端では、 $\delta=0$ (R2)のときには標準タイプと分布形状は大きく異なるものの絶対値としてはほぼ同程度の応力が生じている。 $\delta>0$ (R3)の場合には、下フランジとソールプレート間に接触がなく、下フランジはソールプレートの周溶接部のみで支えられていることから、ウェブからの荷重伝達により下フランジに橋軸直角方向に面外曲げが引き起こされる結果、高い応力が生じている。

c) R4 デTAIL

図-14にR4による改良効果を示す。ソールプレート下フランジ溶接部の応力はR2, R3のものと同様であり、ソールプレートを長くすることによる応力低減効果がみられる。ウェブ下フランジ溶接部のウェブ側止端の応力が著しく減少しており、特に $\delta>0$ の場合でも十分な改良効果が認められる。ウェブ下フランジ溶接部のフランジ側止端では比較的大きな応力集中が見られるが、 $\delta>0$ の場合にも標準タイプの $\delta=0$ のものと比較して応力のピーク値は小さくなっている。

d) R5 デTAIL

図-15にR5のDETAILの桁端での応力分布を示す。ただし図-5(a)に示す下フランジ下面の応力は、

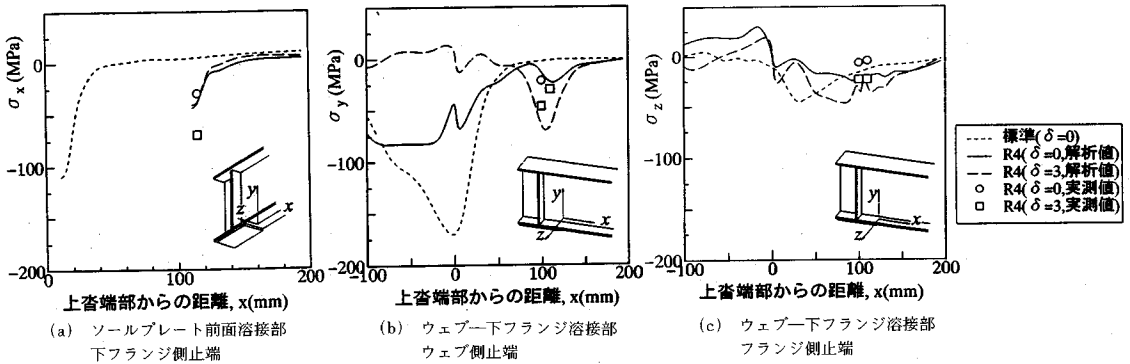


図-14 R4ディテールの応力分布

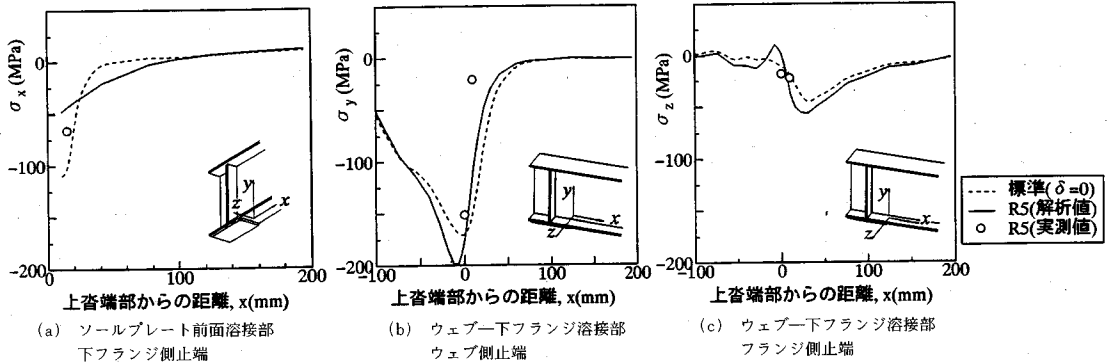


図-15 R5ディテールの応力分布

側面隅肉溶接端部近傍のものである。このディテールではき裂の発生点となるソールプレート前面隅肉溶接を省略していることから、TypeA, Bのき裂が発生する恐れはないが、ソールプレートを取り付けたことによる剛性の変化は改善されないため、TypeC, Dのき裂に対しては効果がないものと思われる。応力解析結果でもウェブ下フランジ溶接部近傍の応力は標準タイプと比較して小さくなっていない。

以上より、ソールプレートを長くし上咨端部直上に補剛リブを設けたR4の改良方法がすべての溶接部に対して応力低減効果があり、最も有効であると思われる。垂直補剛材を追加するのみのR1の改良方法は簡便であり、すべての溶接部に対して応力低減効果はあるもののその程度はあまり大きくない。ソールプレートを長くすることによる改良効果はTypeA, Bのき裂には有効であるが、TypeC, Dには効果が薄いものと考えられる。

(3) 疲労試験による改良効果の確認

疲労試験は1支承あたりの反力変動範囲15 tonfで200万回まで行い、その後18.75 tonfに上げて行った。ただしR4については当初から反力変動範囲18.75 tonfで行った。図-16に各改良ディテールに対して行った疲労試験結果を示す。反力変動範囲18.75 tonfで荷重した分については、15 tonfでの寿命に換算して示して

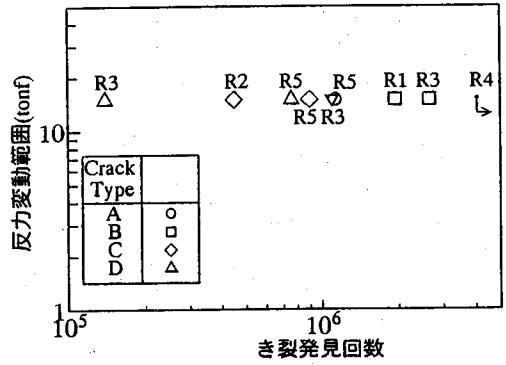


図-16 改良ディテールの疲労強度

いる。

ソールプレートを延伸し、テーパをつけたR3に、最も早くTypeDの疲労き裂が発見された。これは応力解析結果からわかるように、 $\delta > 0$ であることにより下フランジが橋軸直角方向の面外曲げを受け、ウェブ下フランジ溶接部に曲げ応力が発生するためであると考えられる。また $\delta = 0$  mmのR2にも比較的早くTypeCの疲労き裂が発見された。このき裂は上咨端部直上付近から発生したものであり、この位置での応力集中が見られた応力解析の結果と一致している。ソールプレート前面溶接部ではいずれのタイプのき裂も発見されなかつ



た。以上より、ソールプレートの延伸のみによる補強は TypeA, B のき裂に対しては有効であるが、TypeC, D のき裂に対しては効果が薄く、特に  $\delta > 0$  の場合にはテーパの有無によらずその効果はほとんどないといえる。

ソールプレートの前面隅肉溶接を省略したタイプにも、TypeC, D のき裂が発生している。この対策法ではソールプレートを取り付けたことによる剛性急変を緩和できていないことより TypeC, D の疲労き裂の発生は当然であるといえる。また側面隅肉の端部からもき裂が発生している（図-16 中では TypeA としている）ことから、この方法による改良効果はほとんどないといえる。

垂直補剛材を追加した R2 は、応力解析の結果ではいずれの溶接部に対してもある程度の応力低減効果があったが、疲労寿命でみると標準タイプと比較してそれほど寿命の伸びはみられない。

ソールプレートを長くし、垂直リブを溶接した R4 では、換算寿命 400 万回時点で  $\delta = 0, 3 \text{ mm}$  とともに疲労き裂は発見されなかった。この改良方法は応力解析の結果から非常に高い応力低減効果があることが明らかとなったが、特に  $\delta = 3 \text{ mm}$  の試験体についても疲労き裂の発生が見られなかったことで、この補強方法の効果が非常に高いことが確認できた。

### 6. 局部応力による疲労試験結果の整理

本研究で対象としたプレートガーダー支承部は、公称応力が定義できないディテールの典型的な例であり、その疲労強度を定量的に評価し、余寿命評価や補強効果の確認を行う上では、局部応力による疲労照査に依らざるを得ない<sup>9),10)</sup>。そこで疲労実験により得られた結果を局部応力により整理した。疲労照査を行う応力として、ここでは溶接止端から 4 mm と 10 mm の位置の応力値から溶接止端部へ直線外挿して求めたホットスポット応力を用いた。算定に用いた応力はすべて解析値とした。各き裂タイプごとの具体的な算出方法を以下に示す。

**TypeA:** ウェブ直下のソールプレート前面溶接フランジ側止端から 4 mm と 10 mm の位置の応力解析値を止端部へ直線外挿することにより求めた。R5 ディテール（前面隅肉溶接を省略したタイプ）については、ウェブ直下ではなく側面隅肉溶接の端部に同様に求めた。

**TypeB:** このき裂はソールプレート前面溶接のルート部から発生することから、き裂発生点の応力を測定により直接知ることはできない。ここでは溶接止端部の応力との相関が高いものと仮定し、TypeA の場合のホットスポット応力をそのまま流用した。

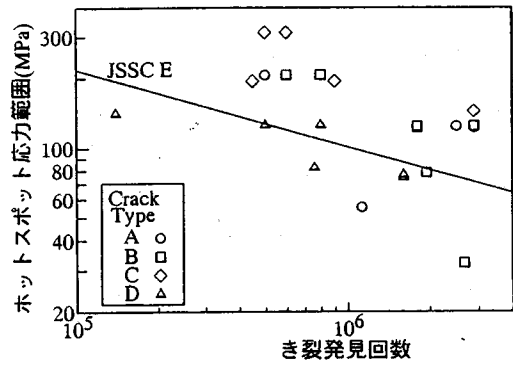


図-17 ホットスポット応力で整理した疲労試験結果

**TypeC:** このき裂の原因となるウェブ下フランジ溶接部ウェブ側止端応力は、実測結果、解析結果ともソールプレート端部または上沓端部でピークを持つことが明らかとなったことから、ソールプレートと上沓が同じ長さのディテールについてはその端部、ソールプレートを長くしたタイプ (R2, R3, R4) については上沓端部に着目し、止端から 4 mm と 10 mm の点からの外挿により求めた。

**TypeD:** この止端での応力は 2 次的に非常に複雑に変化することが明らかとなったが、ここではソールプレートと上沓が同じ長さのディテールについては図-9 (c) を参考にその端部から 30 mm 支間中央によった位置で、ソールプレートを長くしたタイプ (R2, R3, R4) については図-13 を参考に上沓端部から 30 mm 支間中央によった位置で、止端から 4 mm と 10 mm の点からの外挿により求めた。

図-17 に以上のようにして求めたホットスポット応力により整理した疲労試験結果を示す。横軸の疲労寿命はき裂発見時の繰返し回数で示している。図中には JSSC の疲労設計指針での E 等級もともに示している。データはかなりばらつきがみられるが、これは実測値と解析値にやや差があること、き裂発見時の長さによらつきがあることなどの影響であると考えられる。

TypeA のき裂は 1 点だけ JSSC の E 等級を下回っているが、これは R5 (前面隅肉溶接を省略したタイプ) のデータであり、側面溶接の終端であることによるピード形状の荒れなどが影響したものと考えられる。これを除くと TypeA, TypeC のき裂については、各溶接止端近傍で前述のようにして求めたホットスポット応力により、JSSC の E 等級で疲労照査を行うことは概ね安全側であるといえる。溶接ルート部から発生する TypeB のき裂も 1 点を除いてほぼ JSSC の E 等級を満足している。この 1 点は R3 試験体 ( $\delta = 3$ ) であり、 $\delta$  が存在する場合には TypeB のようにルート部から発生するき

裂の疲労強度を、止端部でのホットスポット応力によっては照査することは適切でないといえる。TypeDのき裂はJSSCのE等級を下回っているものが多い。これは応力解析で明らかになったように、溶接止端部での主応力が水平面に対してほぼ45度の角度をもち、絶対値も大きいことから、下フランジ表面での橋軸直角方向応力から推定したホットスポット応力では止端部の応力を過小に評価しているためと考えられる。

## 7. 結 論

1. 桁端に拘束が作用している状態で疲労試験を行った結果、実橋で観察されるものと同種の4タイプの疲労き裂が発生したことから、桁端の損傷は支承の可動機能低下によって引き起こされることが明かとなった。しかしこれらの疲労き裂の発生パターン、発生順序に傾向は見られず、それぞれ独立に発生したものと考えられる。
2. ソールプレートと下フランジの間に隙間が存在し、ウェブ直下での荷重伝達がない状態ではいずれの疲労き裂もその発生寿命が短くなった。隙間の存在によって、発生するき裂タイプが異なるといった傾向はみられなかった。
3. 疲労損傷を防止するためには、ソールプレート端での剛性の急変を緩和するためにソールプレートを上沓よりも長くし、かつ上沓直上での剛性変化点での変形を抑えるために垂直補剛リブを取り付けたディテールが望ましい。
4. 疲労強度をホットスポット応力で整理した結果、ソールプレート前面溶接止端およびウェブ下フランジ溶接部ウェブ側止端ではJSSCのE等級以上となった。
5. ソールプレート前面溶接部のルートから発生するき裂に対する疲労照査は、ソールプレートと下フランジの隙間がない場合には止端部でのホットスポット応力により疲労照査を行えばほぼ安全側となるが、隙間が存在する場合には適切でないことがわかった。

6. ウェブ下フランジ溶接部の下フランジ側止端は局部的に強い多軸応力場となっており、疲労照査応力としてフランジ表面から外挿により求めたホットスポット応力を用いると危険側となった。

謝 辞：本研究の実施にあたり、東京工業大学技官竹淵敏郎氏と千代田化工建設(株)徳納優氏(研究当時東京工業大学大学院生)に手伝っていただいた。ここに記して感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 杉山功・佐藤仁男・前田俊雄：3径間連続鋼床版箱桁端部の応力性状と補修，阪神高速道路公団技報，第4号，1984。
- 2) 岩崎雅紀・名取暢・深沢誠・寺田博昌：鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策，横河橋梁技報，No.18，1989。
- 3) 三木千壽・妹尾賢一郎・森猛：鋼橋支承部ソールプレート端に生じた疲労損傷と局部応力についての考察，構造工学論文集，Vol.36 A，1990.3。
- 4) 中島拓・小林深・青山高志・須藤典助・坂元義一・曾我明：鋼I桁橋支承部の疲労亀裂損傷(上)，橋梁と基礎，1991.5。
- 5) 一樹久充・鹿野頭一・青山高志・松本巧・木暮深：鋼I桁橋支承部の疲労亀裂損傷(下)，橋梁と基礎，1991.9。
- 6) 西川和廣・村越潤・広瀬隆宏：鋼桁支承ソールプレート部の疲労に着目した実橋応力測定結果の分析，土木学会第47回年次学術講演会，1992.9。
- 7) 西川和廣・村越潤・佐々木靖雄・広瀬隆宏：鋼桁支承ソールプレート部の構造が局部応力に及ぼす影響について，土木学会第47回年次学術講演会，1992.9。
- 8) 三木千壽・館石和雄・徳納優・名取暢：プレートガーダーソールプレート部の疲労，土木学会第47回年次学術講演会，1992.9。
- 9) 徳田浩一・岩崎雅紀・溝淵修治・杉山功：取替えによる支承の機能回復に関する研究，土木学会第48回年次学術講演会，1993.9。
- 10) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版1993。
- 11) 三木千壽・館石和雄・山本美博・宮内政信：局部応力を基準とした疲労評価手法に関する一考察，構造工学論文集 Vol.38 A，1992。

(1993.7.29 受付)

## FATIGUE DAMAGE OF SHOES IN PLATE GIRDER BRIDGES AND IMPROVEMENT OF THEIR DETAILS

Kazuo TATEISHI, Tohru NATORI and Chitoshi MIKI

Fatigue damages around shoe of plate girder bridges were investigated focusing on the two causes, the deterioration of movability of shoe and the gap between sole plate and lower flange of main girder. The results of fatigue test and FEM analysis showed that these two causes raised high stress concentration around shoe leading to fatigue crackings. Five types of improved details in order to prevent fatigue damage around shoe were tested and their effectiveness were discussed.