

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

A Study on Local Stresses and Fatigue Crackings
at the End of Sole Plate of Steel Girder Bridges

三木 千寿*妹尾賢一郎**森 猛***

by Chitoshi MIKI, Kenichirou SENOH and Takeshi MORI

Fatigue cracks have been found along the toe of transverse fillet welds at the end of sole plate of steel girder bridges. In order to examine the causes and retrofitting methods, local stresses in the vicinity of girder ends are studied analytically and experimentally. The improvements of local stresses at the critical locations for fatigue cracking by the changes of structural details, such as increasing sole plate thickness, removing transverse fillet welds and adding other vertical stiffeners, are also studied.

1. はじめに

近年、鋼道路橋の各部に疲労損傷が発生しはじめている。図-1に示す支承部のソールプレート端の損傷も複数の路線の複数の橋に生じており、鋼道路橋での一般的な損傷になりつつあるといえよう^{1)~5)}。ソールプレートは我国の道路橋では板厚22~25mmの鋼板を用い、通常下フランジにその全周をすみ肉溶接することにより取付けられている。多くの場合、疲労き裂は下フランジ下面のソールプレートの前面すみ肉溶接止端のウェブ直下近傍位置から発生し、すみ肉溶接の止端に沿って進展しており、下フランジを貫通し、ウェブまで侵入した例もある。これを放置しても損傷断面が橋台や橋脚上に位置するため落橋には至らないであろうが、道路としての機能を停止することになり、早い時期に適切な補修・補強を施す必要がある。そのような観点からは、多くの橋で報告されている対傾構や分配横桁を取付けた垂直補剛材上端部近傍の疲労き裂よりも重大な損傷といえよう。

疲労に対してより厳しい環境の鉄道橋では溶接構造が普及し始めたころ、すみ肉溶接でソールプレートを取付けた事例が少数ではあるがあつた。しかし溶接によりソールプレートが変形するなどの理由から現在は28mm板厚のソールプレートを高力ボルトで下フランジに取付けている⁶⁾。

ソールプレートの取付部に対して疲労許容応力度を設定している設計基準類は見当たらないが、近いディテールとしてカバープレートと考えるとBS5400⁶⁾ではG等級(2×10^6 回で66MPa)、AASHTO⁷⁾ではE'等級(2×10^6 回で41MPa)、JSSC疲労設計指針(案)⁸⁾ではH等級(2×10^6 回で40MPa)となる。カバープレートは板厚が増すと疲労強度が低下することや、ソールプレートではカバープレートより応力の流れが複雑なこ

* 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京目黒区大岡山2-12-1)

** 大林組(研究時、東京工業大学 学生)

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

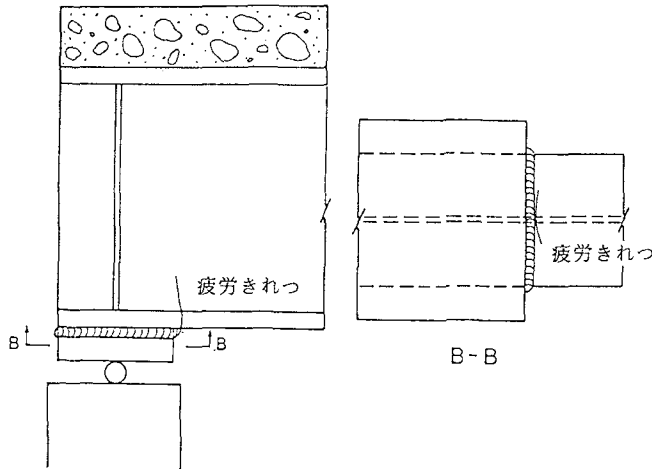


図-1 鋼橋支承部ソールプレート端の疲労損傷

とを考えると、疲労強度はカバープレートと同等かむしろ低いと考えるのが妥当であろう。

原因や対策を考える上で疲労きれつ発生点近傍の局部的な応力の分布性状が重要である。ほとんどの事例で疲労きれつはウェブ直下から発生していることから、支点反力による高い集中荷重をうけていること、およびソールプレートを取付けたことによる剛性の急変と溶接止端形状に起因した応力集中に関係していると予想される。その補修・補強として、応力集中に対しては例えば TIG などを用いた溶接止端形状の改善等¹⁰⁾が有効と思われるが、このディテールに対してはそれに加えて支承部近傍の応力の流れを改善することにも必要であろう。この損傷に対する補修・補強工事は極めて狭い空間の、悪い作業環境で行わざるを得ないため、できるだけ施工が簡単でかつ確実な方法が望ましい。むやみに部材を添加すること、溶接することは新たな損傷につながる可能性もある。本研究では有限要素法解析とモデル実験から、ソールプレート端の局部応力挙動を調べるとともに、ソールプレートの取付け方、ソールプレートの厚さ、端補剛材および垂直補剛材の配置や板厚など、局部応力に影響をおよぼすであろう構造ディテールの変更策について検討した。

2 解析対象および解析のモデル化

解析対象は図-2に示す合成プレートガーダー橋とし、建設省の昭和46年版標準設計図を参考として解析対象の諸元を与えている。構造ディテールの変更に関する検討は、実験桁の諸元を用いて解析を行った。

解析はパソコン用汎用有限要素解析プログラムCOSMOS/Mを用いて行った。ソールプレート、フランジ、ウェブおよびスティフナーのいずれについてもSHELL要素を用い、全体をモデル化した。

図-3に支承部近傍の要素分割を示す。下フランジとソールプレートの間のすみ肉溶接は、すみ肉溶接ののどと同じ厚さを有する板要素でおきかえて、下フランジとソールプレートを結合させた。また下フランジとソールプレート間にはバネ要素で節点を結び、解析結果で引張りを示したバネ要素は取り除くという作業を繰り返し、すべての接触面での反力が圧縮力となるようにした。ここで用いたバネ要素は軸力のみを受け持つもので、バネの剛性には、鋼のヤング係数と1本のバネがソールプレート内で占める面積を乗じた値を使った。従って、この解析では下フランジとソールプレートとの接触面での摩擦は考慮できていない。合成プレートガーダー橋主桁の上フランジはコンクリートと鋼で構成されているが、この上フランジに対しては複合要素を用いた。この要素は、SHELL要素に属するものであり、異なった材質、厚さの平面を重ね、張り合わせたものを1つの平面とみなし、その厚さの方向における応力分布は、ヤング係数と断面積の関係により配分されるようになっている。

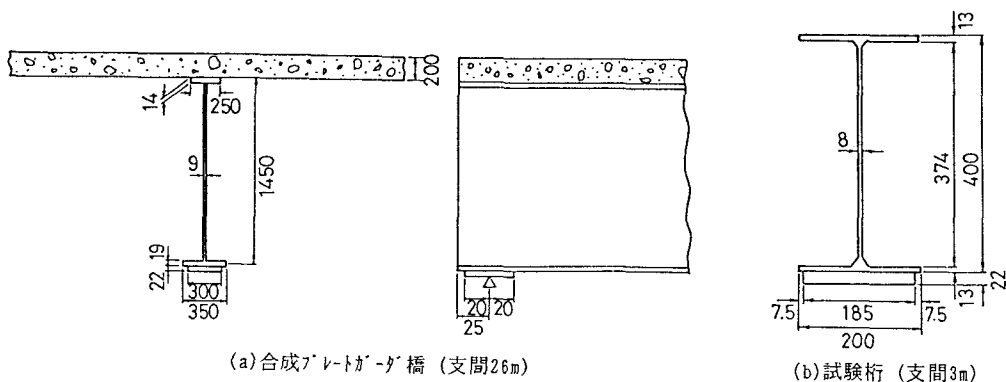


図-2 解析対象

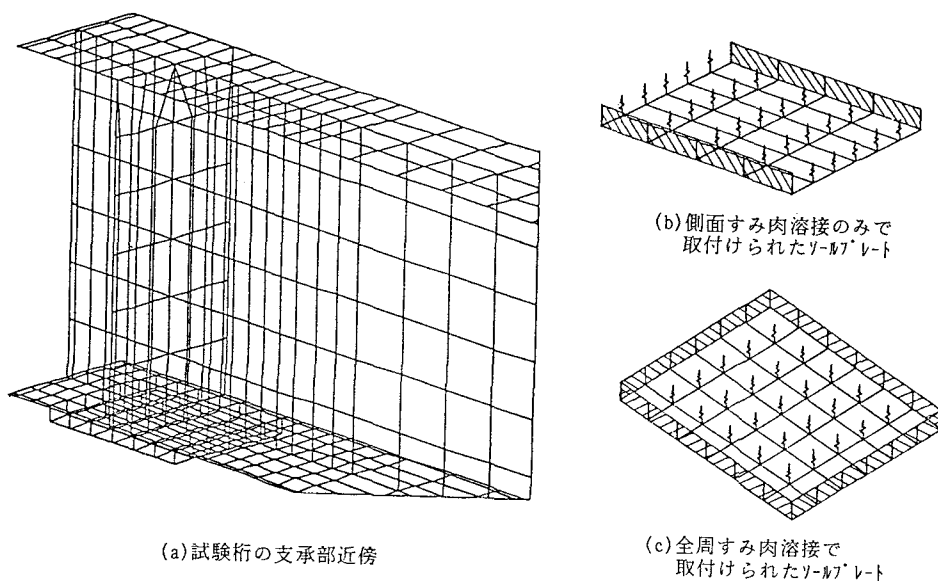


図-3 要素分割の例

3. 解析結果

(1) 現行ディテール

図-4(a)に合成桁の支間中央に20tfの集中荷重を作用させたときの下フランジの上面、下面における直応力の分布および板曲げによる応力成分の分布を示す。支点部近傍では、疲労亀裂の起点である下フランジ下面とソールプレートの境界部で橋軸方向の直応力がはり理論より計算される応力よりもかなり上回ることが分かる。また、局所的なフランジの板曲げも生じている。図-4(b)に下フランジ下面のソールプレートを取付けた前面すみ肉溶接止端に沿った直応力の分布を示す。直応力はウェブ直下にあたるフランジ中央でかなり高くなっており、疲労き裂の発生がこの位置に集中していることと合致した傾向を示している。

図-5に支承部の変位および回転をそれぞれ完全に拘束した場合の下フランジ下面の直応力分布を示す。これはシェーの機能が低下すると単純支持の固定端では回転拘束に近づき、自由端では変位が拘束されることを考慮したものである。支点の変位あるいは回転を完全に拘束すると、ソールプレートとの境界面で大きな応力が生じていることがわかる。また、その傾向は特に支点の回転が拘束された時に顕著に現われる。しか

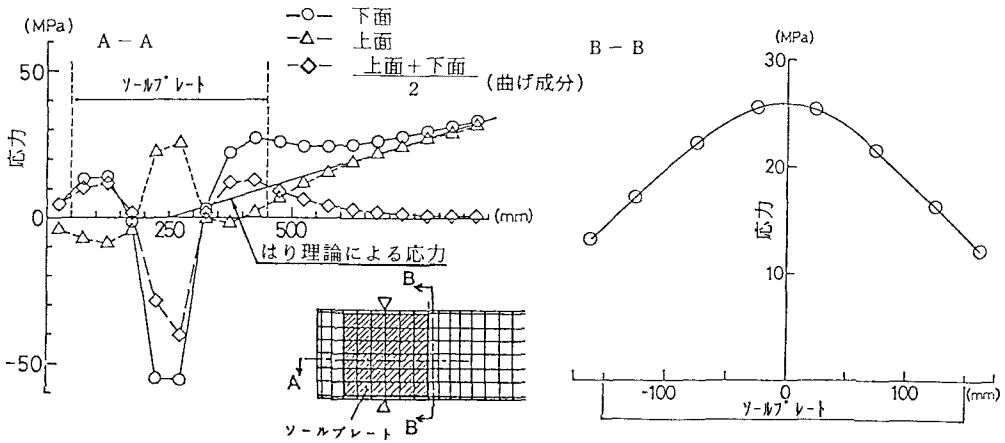
し、フランジ内での応力の分布を見ると、フランジ両端が最大値となり、疲労き裂の起点であるウェブ真下が最も応力の小さくなることから、支点的の異常はこの亀裂発生 of 直接的な原因とは考えにくい。

(2) 支承部の構造ディテール変更と局部応力

ソールプレート取付部近傍の応力を低減することを目的として、以下のような各種の構造ディテールの変更とそれに伴うソールプレート前縁の応力の挙動を試験体の諸元を用いて検討した。支間は3mであり、その中央点に1.5tonの集中力を作用させている。

a) ソールプレートの側面のみをすみ肉溶接で取付ける

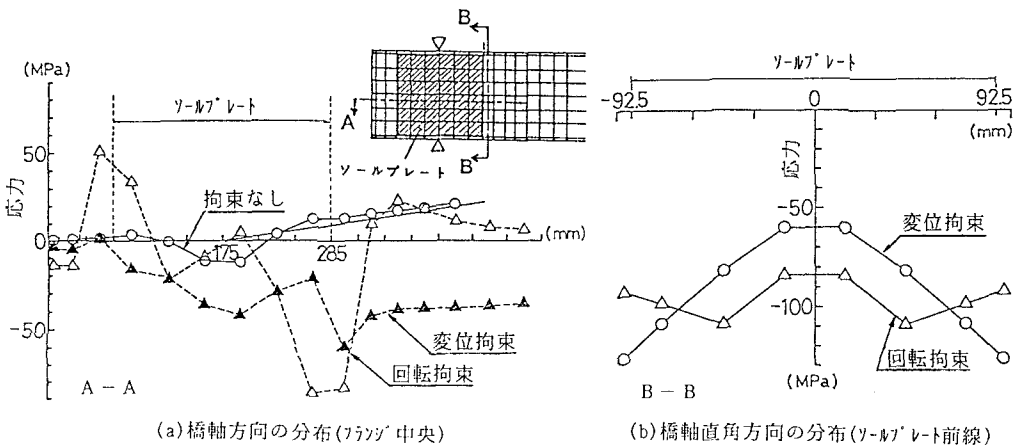
図-6にソールプレートの側面のみをすみ肉溶接で下フランジに取り付けた場合の応力分布を示す。側面のみ溶接でとりつけるとウェブ真下の応力は全周溶接で取付けた場合に比べて高くなっているが、この位置には溶接部が存在しないため、この応力上昇は疲労強度の低下にはつながらない。このディテールでの疲労上の弱点は側面すみ肉溶接の端部となるが、この位置の応力は全周を溶接したときに比べて低くなる。側面すみ肉溶接の端部に隣接する母材に対しては、BS5400、AASHTOともカバープレートの前面すみ肉溶接止端と同じ疲労許容応力を与えている。したがって、全周溶接した場合のフランジ真下の溶接止端前縁の応力と側面すみ肉端部の応力の差が疲労強度の差と考えてよい。



(a) 橋軸方向の分布 (フランジ中央)

(b) 橋軸直角方向の分布 (ソールプレート前縁)

図-4 合成桁下フランジの応力分布



(a) 橋軸方向の分布 (フランジ中央)

(b) 橋軸直角方向の分布 (ソールプレート前縁)

図-5 支承部の変位および回転を拘束したことによる下フランジ下面の応力変化

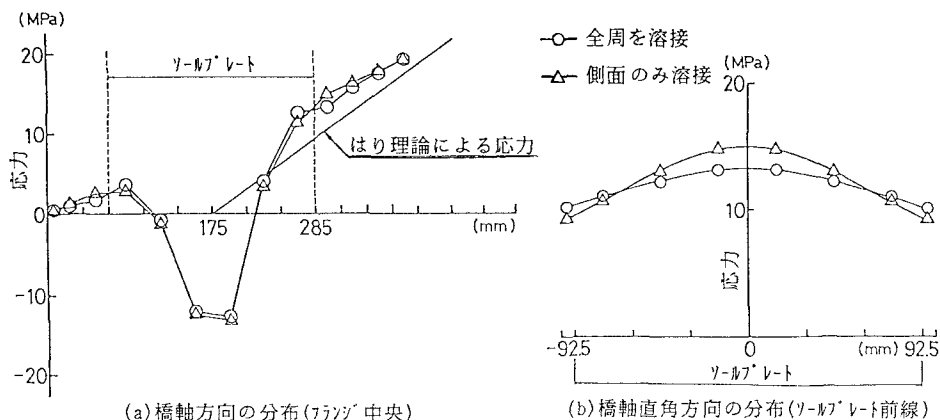


図-6 ソールプレート側面のみすみ肉溶接で取付けた場合の下フランジ下面の応力

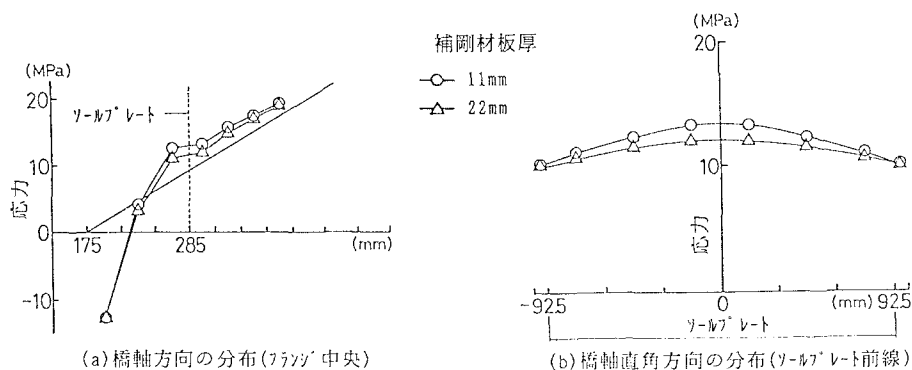


図-7 端補剛材の厚さと下フランジ下面の応力

b) 端補剛材およびソールプレートの板厚を上げる

図-7に支承上の端補剛材の厚さを11mmから22mmにした場合の応力分布を示す。支承部での反力の伝達が滑らかになるため、下フランジの応力は低くなっている。また、ソールプレート前縁に沿っての応力の上昇の程度も低くなっている。

図-8にソールプレートの厚さを22mmから32mmに変更した場合の応力分布を示す。ソールプレートを厚くすることによっても対象位置での応力は低減されている。

c) 垂直補剛材の追加

図-9に端補剛材の近傍に垂直補剛材を追加した場合の応力分布を示す。垂直補剛材はソールプレートを取付けた前面すみ肉溶接の直上その他、それから端補剛材側および外側にも追加している。垂直補剛材を取付けることにより下フランジの応力はかなり変化し、いずれのケースにおいても、追加した補剛材の端補剛材側の下フランジ応力は上昇し、その反対側は低くなる。また補剛材をとりつけることによりソールプレート前縁に沿ったフランジ下面の応力分布はかなり変化する。追加する補剛材の長さを2/3とし、上フランジ側を空けた場合についても解析したが、応力分布はほとんど変わらなかった。したがって補剛材を追加する場合、全部の高さにする必要はないと言える。

d) 水平板の追加

図-10に支承部近傍のウェブおよびフランジに鋼板を水平にとりつけた場合の応力分布を示す。ウェブに鋼板をとりつけても下フランジ応力は変化しない。しかし下フランジに取付けると当然のことではあるが、

応力は面積の増加分だけ低下する。

(3) 補強策の検討

(2)の結果に基づいて次の4タイプの補修策を検討した。

Aタイプ：全周を溶接したまま、ウェブ高の2/3の高さの垂直補剛材をソールプレートを取付けた前面すみ肉溶接より外側に入れる。[(2) c) 参照]

Bタイプ：前面すみ肉溶接を取り除く。[(2) a) 参照]

Cタイプ：前面すみ肉溶接を取り除き、前面すみ肉より外側に垂直補剛材を入れる。[(2) a), c) 参照]

Dタイプ：前面すみ肉溶接を取り除き、 $200 \times 120 \times 9$ の鋼板を下フランジ水平方向にとりつける。[(2) a), d) 参照]

表-1に着目点である①下フランジの前面すみ肉溶接に隣接したウェブ直下の要素の応力および②側面すみ肉溶接の最も先端に隣接した要素の応力を示す。解析のモデル化および要素分割に多少の問題を含んでいる

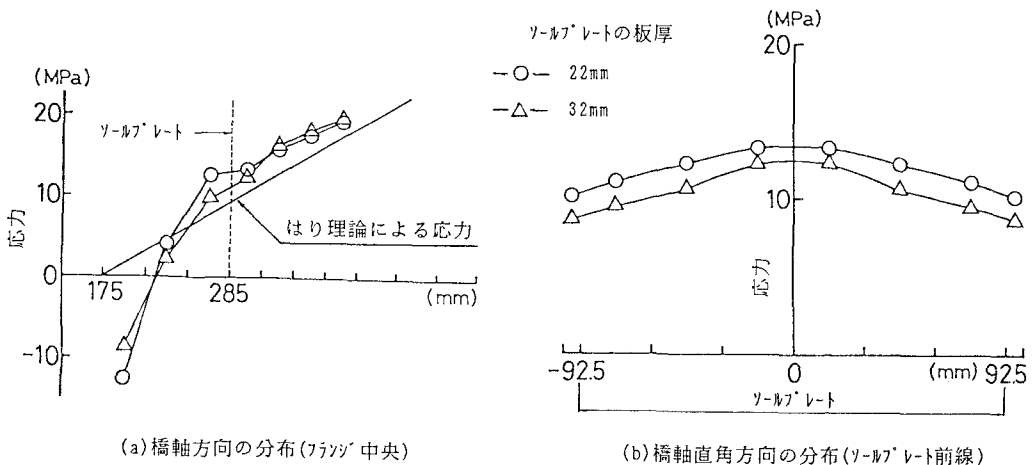


図-8 ソールプレートの厚さと下フランジ下面の応力

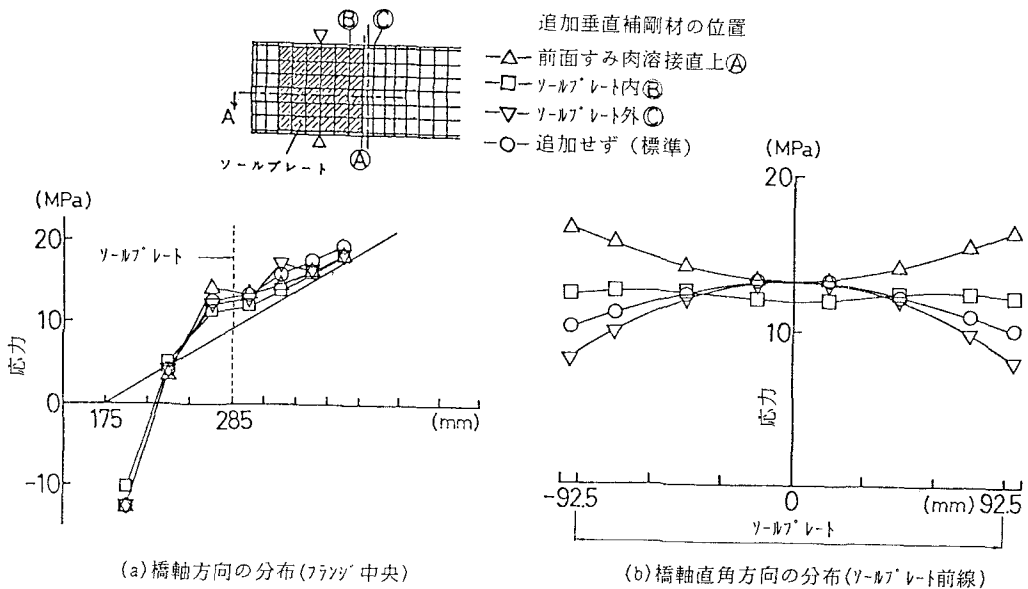


図-9 垂直補剛材を追加したことによる下フランジ下面の応力変化

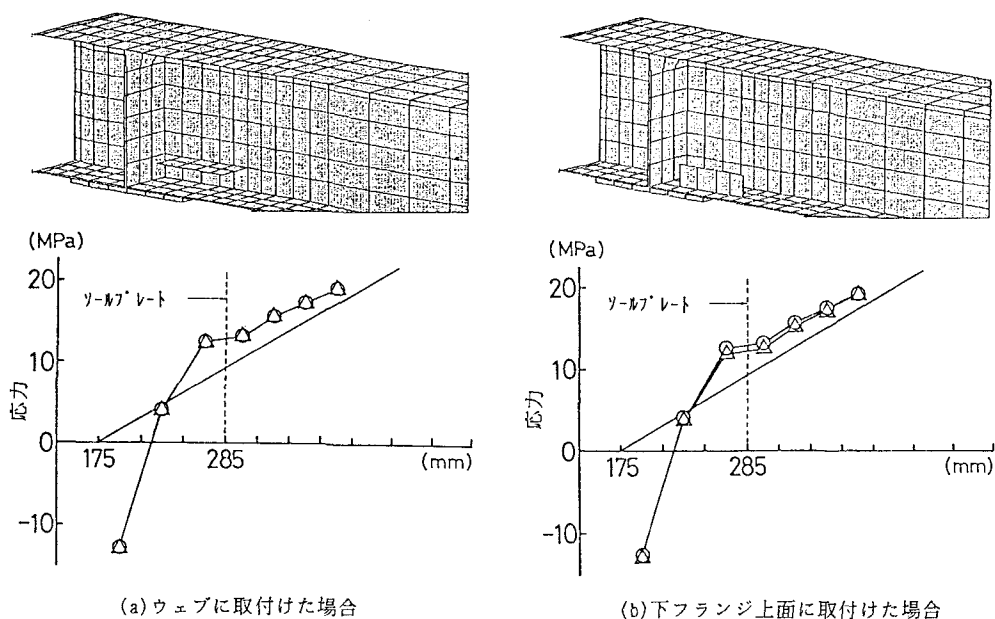


図-10 水平板を追加したことによる下フランジ下面の応力変化(橋軸方向)

表-1 構造ディテールの変更と局部応力の改善効果

ディテール	① 前面すみ肉溶接中央 σ (MPa)	② 側面すみ肉溶接部 σ (MPa)	疲労を支配する応力の標準からの低減率 (%)
標準	25.7	—	—
A	20.6	—	20
B	—	16.1	37
C	—	18.0	30
D	—	11.8	54

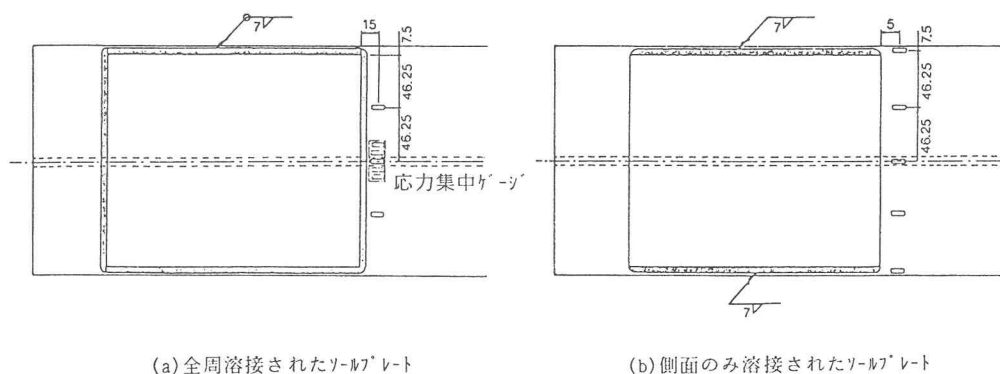
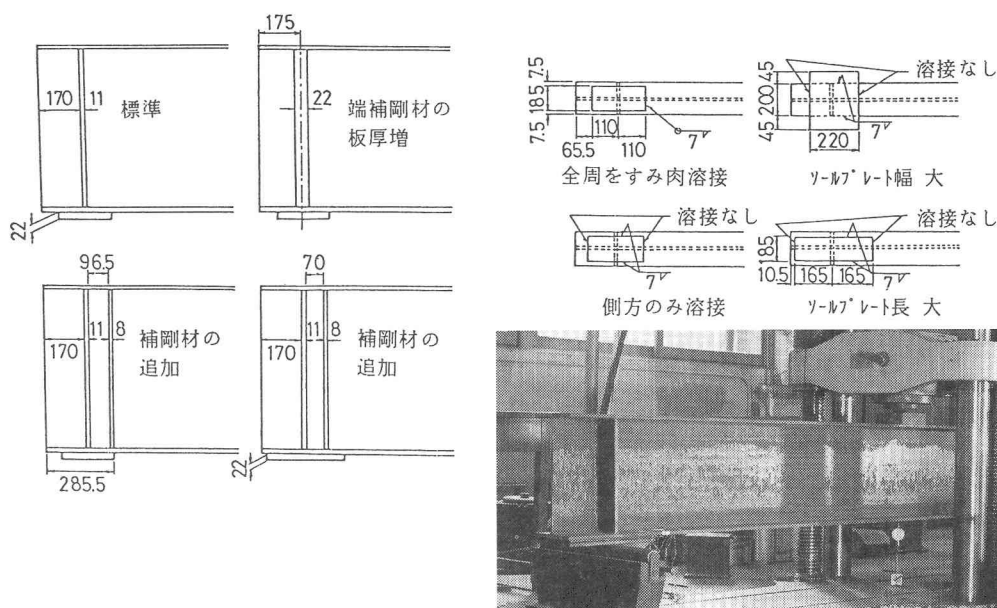
とは思われるが、補強対策による応力分布の変化の概その傾向はつかめると思われる。Aタイプの補強により①の応力は若干低下している。B、C、Dタイプの補強では①の応力は上昇するが、溶接を取り除いているため、この応力上昇は疲労に関係しない。B、C、Dでは②の応力が疲労に関係するが、いずれのタイプの補強もかなり効果があることを示している。

4. モデル桁の載荷試験

3.の解析には接触面をバネで置き換えているすみ肉溶接を板要素で表現するなどの仮定をおいている。したがってそこから得られた結果を簡単な載荷試験で確認することにより、仮定の妥当性を検証しておく必要がある。

(1) 試験体および応力測定

図-11に試験桁の形状寸法を示す[図2(b) 参照]。試験桁は支間約3 π であり、支間中央および1/4点に載荷した。支承部の各種の構造ディテールは3.での結果に基づいて決めたものである。



載荷試験での主な目的は①ソールプレートの全周を溶接で取付けた場合の疲労きれつ発生点である下フランジ下面中央近傍での局部応力分布を確認すること、②ソールプレートを側面溶接のみで取付けた場合の側面すみ肉溶接部の応力を確認すること、および③補剛材板厚の増加や補剛材の追加などの対策が疲労きれつ発生点（全周溶接の場合：前面すみ肉溶接の中央、側面のみ溶接の場合：側面すみ肉溶接の端部）の応力におよぼす影響を見ることにある。図-12にひずみゲージの位置を示す。

(2) 応力測定の結果

図-13にソールプレートの全周を溶接した場合の下フランジ下面中央近傍のすみ肉溶接前縁のフランジ表面のひずみ分布を示す。測定ひずみはウェブ直下である中央点で最も高くなっている。

図-14にソールプレートを全周溶接で取付けたまま、支承部の構造ディテールを各種変更した場合の、ドフランジ下面中央（ウェブ直下）における測定ひずみを示す。いずれのディテールの変更によってもこの位置の応力は低下しており、解析で得られた傾向と一致している。

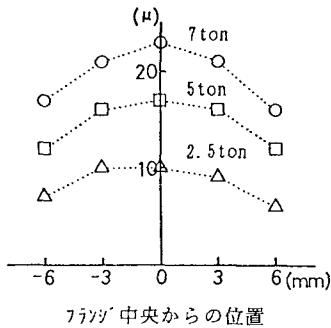


図-13 フランジ下面中央近傍のひずみ分布

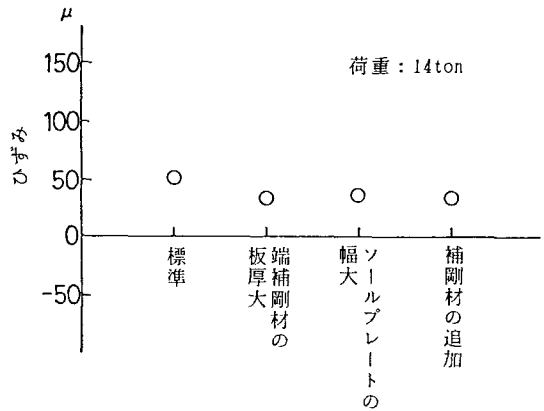


図-14 フランジ下面中央の前面すみ肉溶接前縁の応力

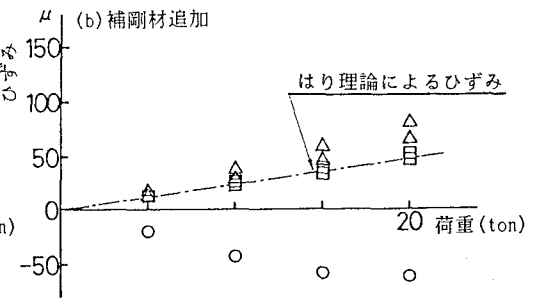
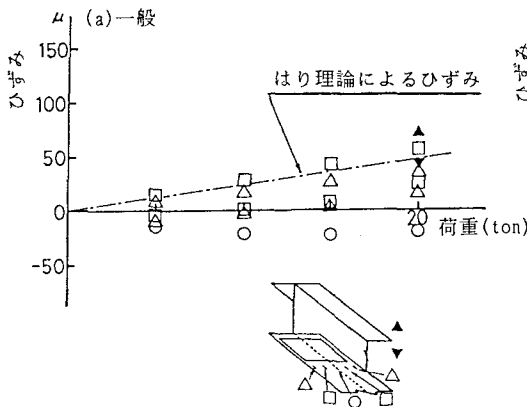


図-15 ソールプレートを側面のすみ肉溶接のみで取付けた試験体での下フランジ下面の荷重とひずみの関係

図-15(a)にソールプレートを側面溶接のみで取付けた場合の下フランジ下面各測定点での荷重とひずみ関係を示す。下フランジ下面の中央(ウェブ直下)でひずみは圧縮であり、しかも荷重の増加に対して非線形性を示す。図-15(b)にソールプレートを側面溶接のみで取付け、さらにソールプレート上に補剛材を追加した場合の各測定点での荷重-ひずみ関係を示す。この場合も下フランジ中央点が圧縮となっている。この下フランジ中央点が圧縮となり、さらに荷重に対して非線形な挙動をするのは側面溶接のみでソールプレートを取付けたディテールすべてに共通した傾向である。このような非線形挙動は溶接によりフランジおよびソールプレートが変形し、その間に若干のすき間が生じたためである。このディテールでは疲労が問題となる側面すみ肉溶接の端部の応力は補剛材を追加する前に比べて増加しており、解析の傾向と一致している。

図-16に各種ディテールでの側面すみ肉溶接端部の応力を示す。解析結果と同様、側面すみ肉のみでソールプレートを取付けたとき疲労が問題となる側面すみ肉溶接端部の母材部の応力は、補剛材を追加した場合

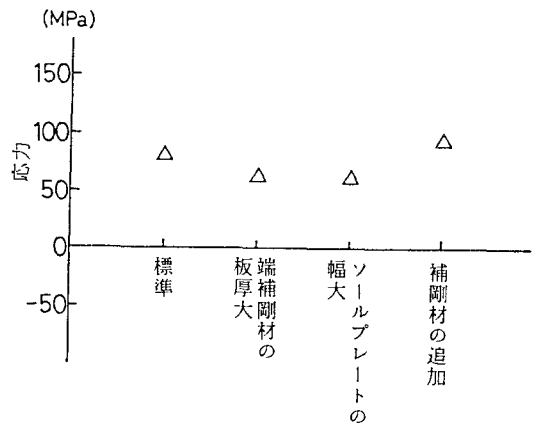


図-16 側面すみ肉端部の応力

を除いて全周溶接した場合の同じ位置の応力に比較してかなり低くなっており、このような支承部の構造ディテールの変更が疲労に対して有効であることを示している。

5. 結論

本研究で明らかになった主な事項は以下の通りである。

- 1) ソールプレートの厚さが大きいほど、そのきれつ発生する箇所に働く引張応力は小さくなる。またソールプレート幅が下フランジ幅を上回る場合には、境界部でのフランジ端における応力は減少する傾向にある。
- 2) 端補剛材は厚いほど支点反力を十分伝達しやすくなるため着目部での引張応力は減少する。
- 3) 疲労きれつ発生に対する補強策にはまずソールプレートと下フランジの溶接を全周ではなく側方のみに施すものが有効である。全周溶接のままであるならば上フランジに接しない垂直補剛材をソールプレートとの接触面内に追加することも効果がある。

ここでは検討していないが、発生している疲労きれつが小さい場合はガウジングでそれを取り除き、再溶接している止端部をTIGで仕上げることも効果的であろう。きれつが極めて小さい場合はガウジングあるいは追加溶接も不要なことも考えられる。ここで提案した構造ディテールの併用と、止端の形状改善とを併用することは非常に効果が高い補強案であると考えられる。

ここで示した結論は、各種の力学的な仮定を含みしかもかなり粗い要素分割による有限要素法解析の結果と単純な桁モデルの実験から導かれたものである。したがって局部応力や疲労強度に関する傾向をつかむ程度のレベルであり、絶対値での議論はできない。実際の補修・補強策を決めるには疲労試験を含めたさらに詳細な検討が必要である。

本研究は文部省科学研究費総合研究A（代表：中井 博 大阪市大教授）の補助をうけて実施したものである。

参考文献

- 1) 明石重雄：溶接部疲労の現状と研究、土木学会論文集、No.350、pp.1-7、1984.
- 2) 阪神高速道路公団：阪神高速道路における土木構造物補修事例集Ⅱ、昭和62年3月
- 3) 三木千寿、坂野昌弘、館石和雄、福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析、土木学会論文集、No.392、pp.403-410、1988.
- 4) 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、18号、1989.
- 5) 森脇清明、真田健司、谷口健男：鋼構造物における疲労きれつの伝播解析、土木学会第43回年次学術講演会、I-65、1988年10月
- 6) BS5400: Steel, Concrete and Composite Bridges, part10, Code of Practice for Fatigue、1980.
- 7) AASHTO: Standard specifications for Highway Bridges、1983.
- 8) 日本鋼構造協会：疲労設計指針（案）、1989.
- 9) 阿部允氏、私信、1989年9月28日
- 10) Miki,C., Takenouchi,H., Mori,T., and Ohkawa,S., : Repair of Fatigue Damage in Cross Bracing Connections in Steel Girder Bridges, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.6, No.1, 31s-39s、土木学会論文集Ⅰ、April, 1989.

（1989年10月 2日 受付）