

波形鋼板ウェブ橋の継手部および首溶接部の疲労耐久性に関する研究

Study on the Fatigue Durability of Welded Joints in a Corrugated Steel Web Bridge

岩下 宏*¹ 山下 久生*¹ 能登 宥 愿*²
Hiroshi IWASHITA Hisao YAMASHITA Hiroyoshi NOTO

Summary

A corrugated steel web bridge, which is superior to a conventional PC box bridge in terms of easy construction and cost reduction, is being constructed widely in Japan. In conventional joint structure of this type of bridge, the lap joints with scallops are used in webs and two corrugated steel webs are welded by boxing. However, boxing joint is inferior in weldability and its fatigue strength could be degraded by stress concentration. Therefore, the authors are proposed a new joint structure between web plates in a corrugated steel web bridge. In this study, cyclic loading tests were performed to determine the fatigue strength of the proposed joint structure in the corrugated steel web bridge.

キーワード：波形鋼板ウェブ、疲労亀裂、スカーラップ、すみ肉溶接

1. まえがき

近年、国内の橋梁建設においては、橋梁形式の合理化や建設コスト縮減などの観点から、従来のPC箱桁橋のウェブに波形鋼板を適用した波形鋼板ウェブ橋が注目されている。波形鋼板ウェブ橋は、①鋼板を使うことで死荷重が軽くなる②せん断座屈強度が高いので補剛材が省略できる③橋軸方向の伸縮性を活かしプレストレスを効率よく導入できる、などの特性を有する。

この橋梁形式は鋼とコンクリートの互いの利点を有効に活用した複合橋梁であることから、鋼部材とコンクリート部材との接合部に関する研究が進められている。さらに鋼部材どうしの接合部もまた、施工性とともな耐荷力・耐久性に優れた継手構造の開発が課題とされている。

ここでは、波形鋼板ウェブを有するPC箱桁橋のウェブ接合構造を提案し、溶接部疲労強度確認の載荷試験を行うものとする。

本試験の目的は、鋼部材どうしの接合における現場継手および首溶接の実験的検証であり、検証項目は以下の2点である。

- ①提案するウェブ接合部の疲労強度の確認
- ②波形鋼板ウェブと鋼フランジ溶接部の疲労強度の確認

2. 疲労試験の方針

まず実橋を想定した面内骨組解析、および3次元FEM解析により、主桁作用時・床組作用時の応力状態を確認の上、載荷荷重範囲を決定した。ここで想定するPC鋼波形ウェブ箱桁斜張橋を図-1に示す。次にウェブ接合部を有する試験体をモデル化したFEM解析により応力状態の確認を行い、繰返し載荷試験を行った。

載荷試験では、波形鋼板ウェブの面内載荷および面外載荷を実施した。面内載荷荷重は、実橋のウェブに発生するせん断応力（最大L活荷重～最小L活荷重の差による応力）と等価になるよう載荷した。また面外載荷荷重は、T活荷重3軸（6輪荷重=6×10tf）が、着目する継手部上下端のスカーラップまわし溶接部、および折り曲げ部の首溶接に最大の応力を与えるように載荷した。試験体はそれぞれ1体ずつ用意した。

なお試験体に亀裂が生じ、その後さらに発生する亀裂を観測する場合、先行した亀裂にストップホール、または補強を行って繰返し載荷試験を続行させるものとした。

*技術本部技術開発部技術開発課

*技術本部技術開発部部長

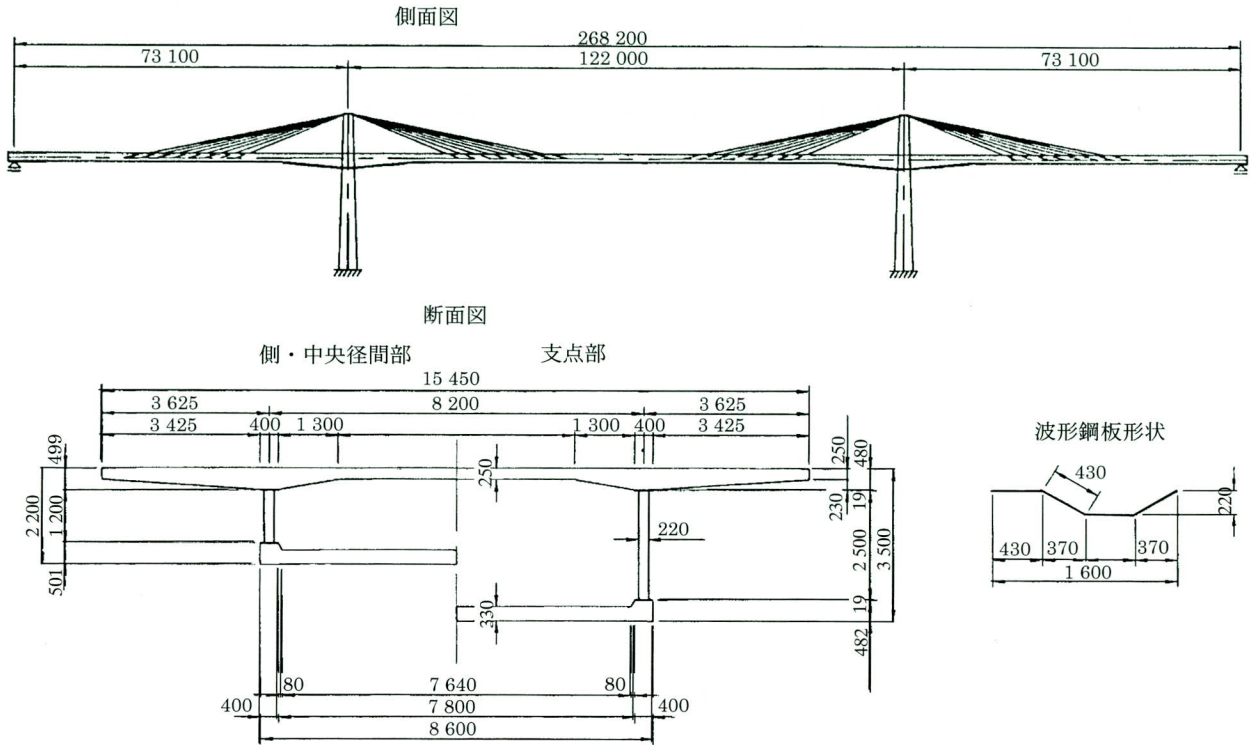


図-1 実橋モデル図

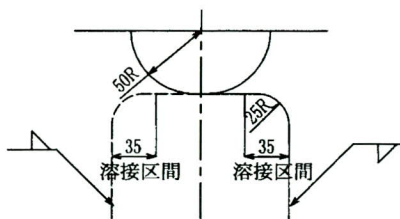


図-2 継ぎ手形状図

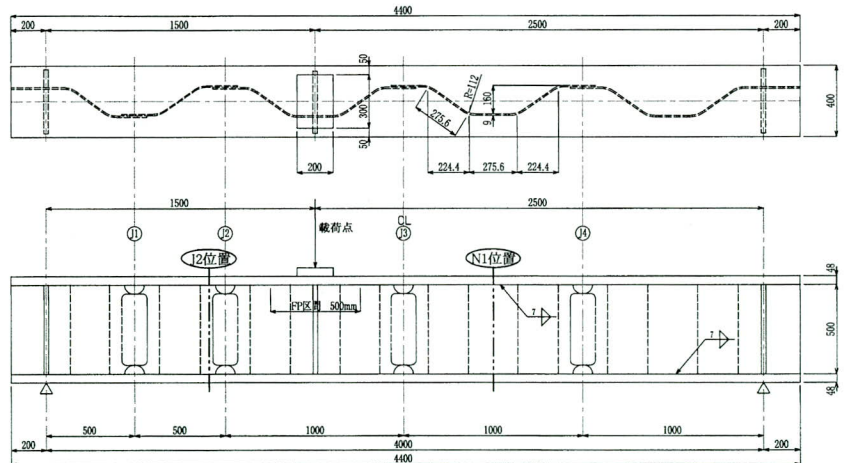


図-3 面内試験梁モデル図

3. 提案する波形鋼板ウェブ接合部の概要

波形鋼板ウェブの現場継手に関して、疲労耐久性向上を図る溶接継手構造の一提案形式を図-2に示す。現場施工の省力化を考慮して、波形鋼板を重ね合わせ、すみ肉溶接により接合する構造とする。その際、側面すみ肉溶接の始末端はスカーラップ内に入れず、同一面内にビード始末端を設けるものとする。この構造を提案した背景について以下に記す。

- ①すみ肉溶接のルート部や止端部は大きな応力集中が生じる。さらに鉛直方向に長い溶接は、上下端に応力が集中する。
- ②上下端のすみ肉溶接がスカーラップ内に入ると、溶接を一方から連続させることが不可能となり、断続部ができる。
- ③この断続部は溶接施工上難しい箇所であり、かつ応力集中によって疲労強度上弱点になる。

4. 面内曲げ試験

(1) 試験概要

梁モデルの縮小試験体に鉛直方向の繰返し荷重を載荷して、提案するウェブの重ね継手の疲労強度を検証する試験を実施した。

ウェブ高500mmかつ支間長4mの、単純梁モデルの試験体と波の形状を図-3に示す。上下フランジはPC床版に代えて剛度的に等価な $t=48\text{mm}$ の厚板を使用した。また添接部は4箇所配置した。

(2) 荷重範囲と荷重載荷位置

荷重範囲は、実橋における載荷条件を想定し、活荷重によるせん断応力範囲 29MPa (300kgf/cm^2) に合わせるのを基本とした。

荷重載荷位置は、梁支間の中央から橋軸方向に500mmシフトさせるものとして、荷重載荷位置～支点間が広い

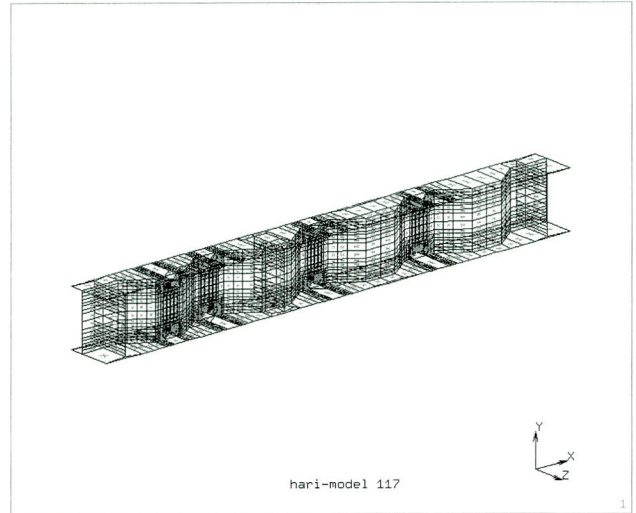


図-4 解析モデル図

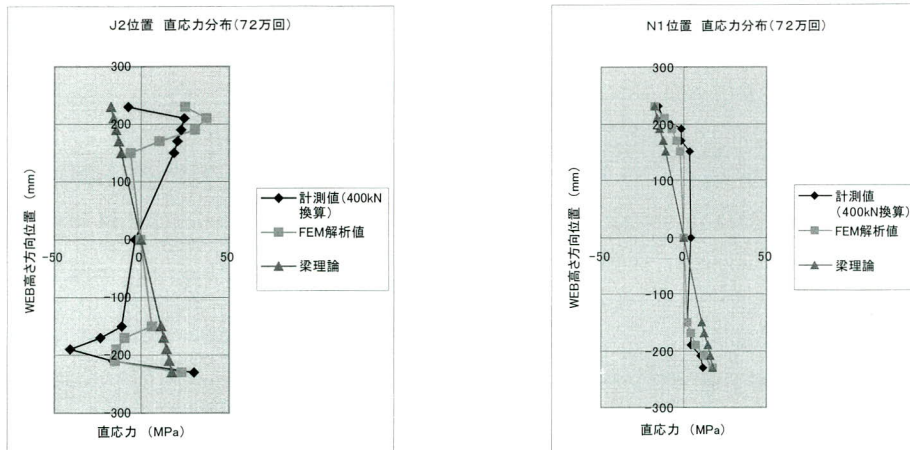


図-5 直応力分布 (J2, N1位置は図-3を参照)

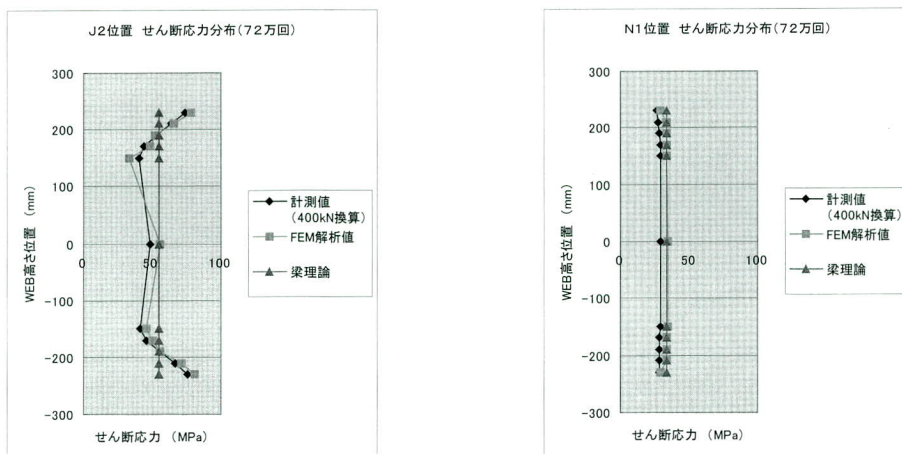


図-6 せん断応力分布 (J2, N1位置は図-3を参照)

2500mmの範囲で、公称応力によるせん断応力範囲が29MPaとなるように設定した。

以上、載荷荷重は最大荷重380kN、最小荷重20kN、荷重範囲360kNとし、載荷周波数は2.5Hzとした。

(3) 試験体のFEM解析モデル

実験結果の検証を目的とするFEM解析の解析モデルを図-4に示す。FEM解析ソフトは汎用解析プログラムMARCを使用した。要素はすべてシェル要素を用いて、試験体を忠実に再現した。添接部のすみ肉溶接部もシェル要素とし、その板厚は溶接ビードののど厚と等しくした。

(4) 静的載荷試験結果に見る応力分布

最大400kNまで静的荷重を載荷した場合、添接部J2と一般部N1（図-3参照）における、直応力およびせん断応力分布を図-5~6に示す。

波形鋼板ウェブは、直応力がほとんど発生しないとされている。本試験においても、ウェブの大部分では計測値・FEM解析値とも直応力の発生はほとんど無い。しかしフランジ近傍、すなわちウェブ高500mmのうち上下端それぞれ100mm程度の範囲では、直応力が発生している。また計測値とFEM解析値の高さ方向の応力分布は、ほぼ一致している。

FEM解析結果によると、添接部J2において、上フランジ側のスカーラップ周辺は荷重載荷点側が圧縮、支点側が引張である。下フランジ側のスカーラップ周辺は逆に荷重載荷点側が引張、支点側が圧縮である。

一般部N1では、上フランジ側が圧縮、下フランジ側が引張という妥当な分布となっている。また、フランジ近傍では値自体も梁理論による計算値とよく一致している。

せん断応力についても、計測値とFEM解析値はよく一致している。梁理論による計算値とも添接部の無い一般部N1では、一致している。添接部J2では、スカーラップ

の影響によりウェブ上下端でせん断応力が増加していることが分かる。このモデルでの影響範囲は、ウェブ高500mmに対して直応力の場合と同じく上下フランジから100mm程度である。ウェブ中心位置では梁理論による計算値と一致している。

主ひずみ分布によると、添接部J2では上側スカーラップの支点側では引張ひずみが大きく、下側スカーラップの支点側では圧縮ひずみが大きくなっている。一般部N1では、上フランジ側では圧縮ひずみが大きく、下フランジ側では引張ひずみが大きくなる通常の梁での分布となっている。また、上下フランジから離れたウェブの大部分では、引張・圧縮ひずみの絶対値が近くなりせん断力が卓越している傾向がわかる。

(5) 試験経過

荷重範囲は360kNで、途中磁粉探傷試験による亀裂調査、静的載荷試験を行いながら繰返し載荷回数を重ね、340万回で試験を終了した。本試験体に発生した損傷は、3タイプに分類できる（図-7）。また、全体損傷状況を図-8に示す。

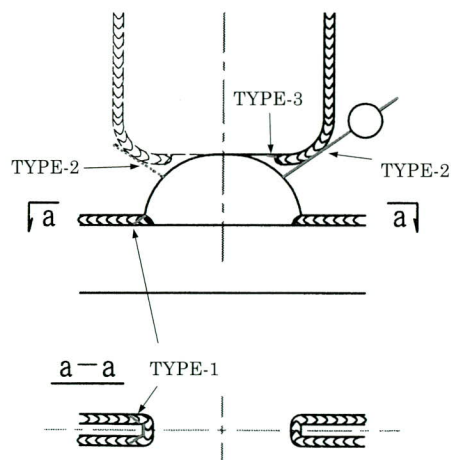


図-7 損傷TYPE図

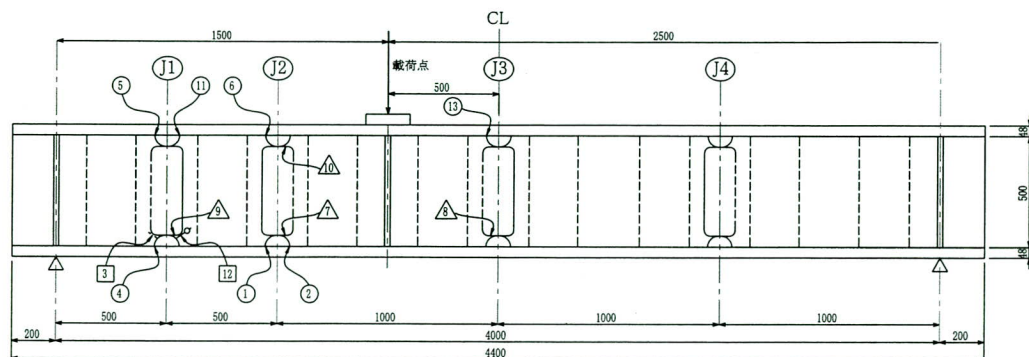


図-8 全体損傷状況

○：損傷TYPE-1
□：損傷TYPE-2
△：損傷TYPE-3
数字は、損傷を発見した順序を示す。

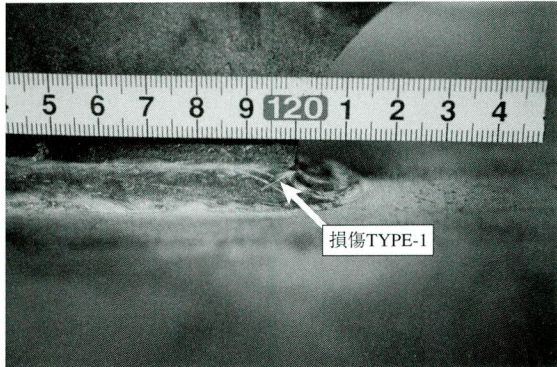


写真-1 TYPE-1損傷部 (図-8 ② 301万回時)

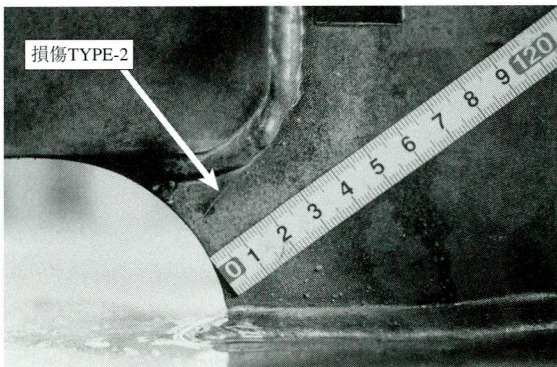


写真-2 TYPE-2損傷部 (図-8 ② 301万回時)

1) TYPE-1: スカールップまわし溶接ビードの亀裂と進展 (写真-1参照)

- ① スカールップのウェブ側止端部から発生する。
- ② 発生点からフランジ方向に進行した。

2) TYPE-2: 添接下側コーナー部の亀裂と進展 (写真-2参照)

- ① ウェブの添接下側コーナー部から発生した。
このタイプの亀裂は、本試験では2箇所いずれもJ1下部に発生した。
- ② スカールップ方向と、ウェブ中心方向へそれぞれ進行した。

3) TYPE-3: 添接部溶接ビード始末端部の異常

外見上、磁粉探傷による目視では亀裂の発生は確認できていないが、磁粉液が息を吹いているのが確認された。最も早かったJ2下側で、125万回到達時に確認したが、本試験を終えた340万回まで外見上の変化は無かった。さらに溶接ビード始末端部を切り出し断面を検査したが、損傷は確認できなかった。

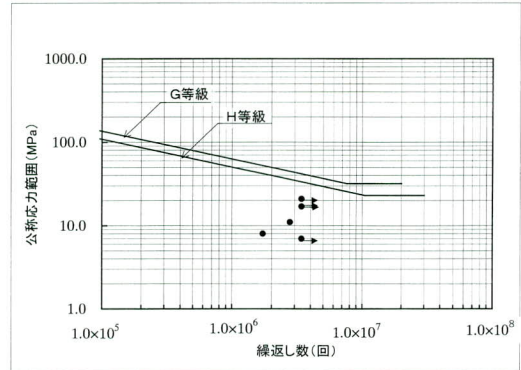


図-9 TYPE-1 S-N曲線図1

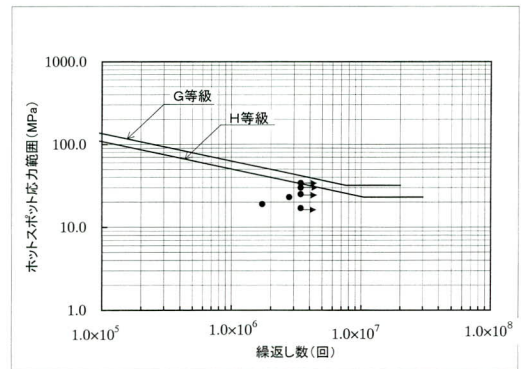


図-10 TYPE-1 S-N曲線図2

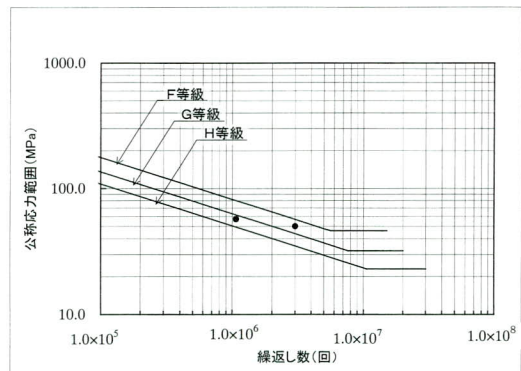


図-11 TYPE-2 S-N曲線図1

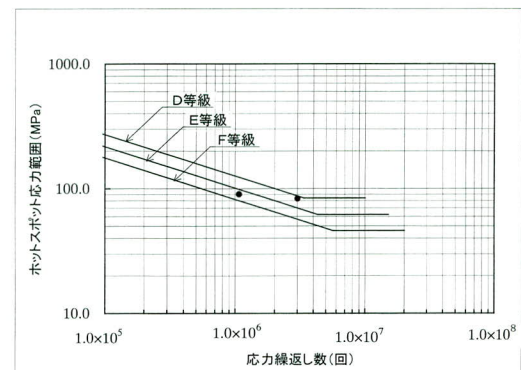


図-12 TYPE-2 S-N曲線図2

(6) 面内曲げ試験結果による疲労強度の評価

試験結果による損傷のタイプ別、すなわちTYPE-1, 2についてS-N曲線図を用いて疲労強度を評価する。疲労試験結果によるS-N曲線図を図-9~12に示す。

1) TYPE-1: スカーラップまわし溶接部の亀裂

スカーラップ部が疲労強度上、弱点になることはよく知られている。本試験においても、損傷箇所が多くあらわれた。ここでは、亀裂の長さが10mmに達した時点でのデータを集計する。公称応力範囲は、FEM解析結果による値を用いた。また局部応力の影響をホットスポット応力¹⁾としてまとめた。ここでは、溶接止端から4mmと6mmの点で外挿する方法を用いた。

公称応力にて集計した場合には、H等級にすべて達しておらず、ばらつきも大きい(図-9)。スカーラップによる断面欠損の影響で応力集中が発生し、直応力分布が複雑になり、かつせん断応力の影響も大きいと考えられる。I型断面主桁のスカーラップ部に関する既往の実験²⁾では、亀裂はフランジ側溶接止端部から発生し、溶接ビード上をフランジ方向に進展していた。I桁のために、上下フランジが全体的に薄くスカーラップ左右でフランジの曲げの影響が大きい。本試験の波形鋼板ウェブの場合は、PC床版相当のフランジに一体化されているため直接ウェブに影響が及んだと思われる。

なお、ホットスポット応力によりまとめた場合でも、H等級を下回る箇所が2箇所あった(図-10)。その他の4箇所は、最終荷重回数340万回到達時においても10mmに達せず、参考値として矢印をつけてプロットした。

以上の結果は、今回参考にした設計応力の約1.7倍の応力が作用する範囲(図-8で示す荷重載荷位置の左側)で亀裂の大部分が発生している。しかし実施設計応力レベルの作用する範囲(図-8で示す荷重載荷位置の右側)では、図-8③に示す1箇所、310万回時に6mmの長さで発見したが、340万回の試験終了時まで、これ以上進展しなかった。

2) TYPE-2: 添接下部コーナー部ウェブの亀裂

直応力を受けるすみ肉溶接による重ね継手の疲労強度はH等級となっている³⁾。本試験においても、FEM解析値を公称応力としてまとめた場合、H等級を満たし、さらに2箇所のうち1箇所はG等級をも上回った(図-11)。またホットスポット応力でまとめた場合、F等級を満足

する結果となった(図-12)。

このTYPE-2の損傷も設計応力レベルの範囲(図-8で示す荷重載荷位置の右側)では1箇所も発生せず、設計応力の約1.7倍となる範囲(図-8で示す荷重載荷位置の左側)での発生のみであった。しかしながらスカーラップまわし溶接部と同様、重ね継ぎすみ肉溶接部においても不良箇所が出ないように十分慎重に溶接を行う必要があると思われる。

5. 面外曲げ試験

(1) 試験概要

波形鋼板ウェブで支持した床版モデルの縮小試験体に鉛直方向の繰返し荷重を載荷して、上フランジとウェブの首溶接の疲労強度を検証する試験を実施した。

ウェブ高500mmかつ支間長2mの、2主桁を有する床版モデルの試験体と波の形状を図-13に示す。上フランジは剛性の高いPC床版を想定した $t=37\text{mm}$ の厚板を使用した。

添接部は、支間中央から橋軸方向に500mm離すものとした。この構造決定に際して、支間中央にウェブ現場継手を設ける場合と設けない場合それぞれのFEM解析モデルを作成し、解析によってひずみ分布を得るものとした。FEM解析モデルを図-14に示す。その結果、最大・最小主ひずみは、支間中央のウェブ現場継手の有無に関係無く、ウェブの折り曲げ部付近に発生するのを確認した。従って、本試験では支間中央にウェブ現場継手を設けず、ウェブ折り曲げ部における首溶接の疲労特性に着目するものとした。

(2) 荷重範囲と荷重載荷位置

本試験の荷重を決めるために、実橋を考慮したFEM解析を行った。解析モデルは図-15に示すように対称性を考慮し1/2モデルとした。また桁高は2.5mとし、10tfの車両荷重を静的載荷した場合の、板曲げを除く応力度を算出した。

以下に、FEM解析結果による波形鋼板ウェブの鉛直方向の応力度を記す。

引張応力最大値: 28.5MPa (291.1kgf/cm²)

圧縮応力最大値: -34.8MPa (-354.5kgf/cm²)

これらの応力度は、疲労に関しては小さいと評価できる。そこで本試験では、①着目する首溶接部には直応力よりも板曲げ応力が卓越すると考えられ、②縦方向のす

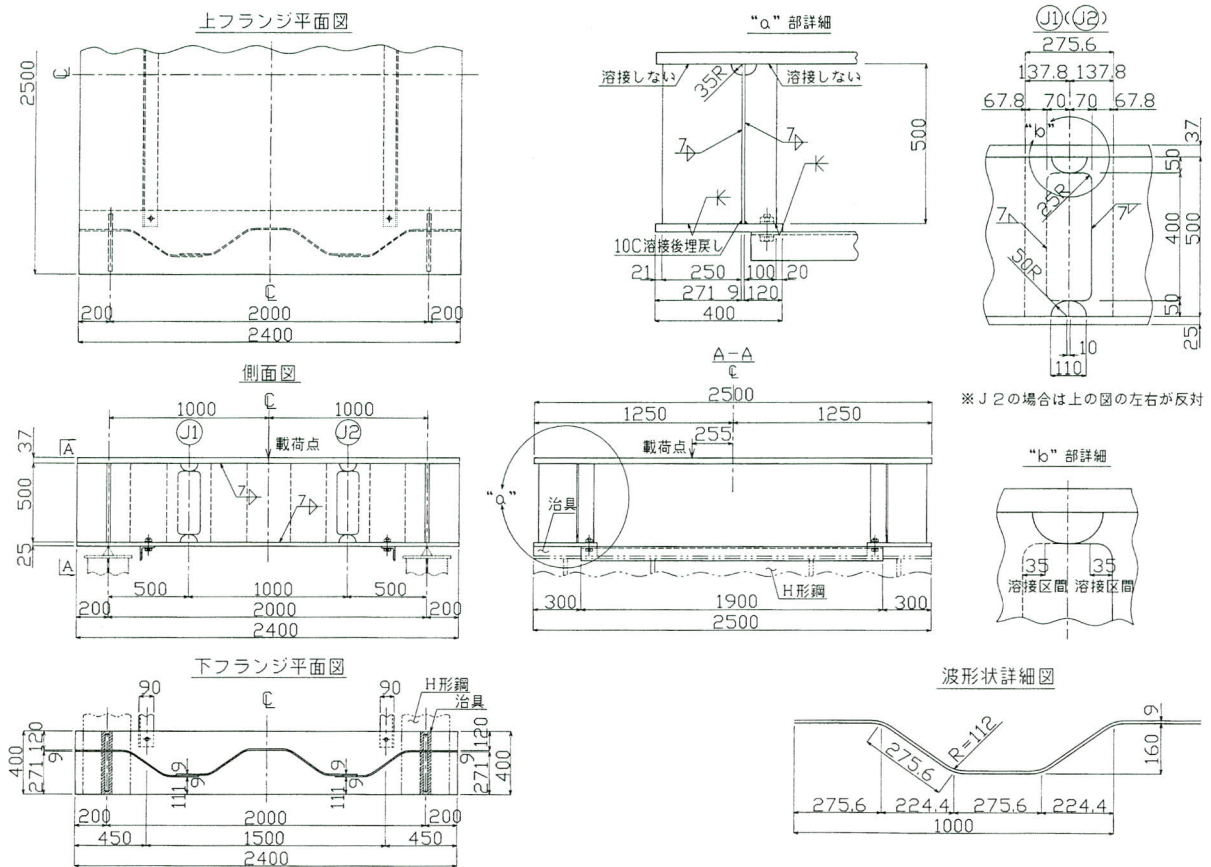


図-13 面外試験 床版モデル図

み肉溶接継手の疲労強度がD等級³⁾であることを考慮して、首溶接近傍に発生する鉛直方向の応力度を100MPaに合わせるものとした。

荷重載荷位置は桁間中央から255mm偏心させ、2枚のウェブそれぞれに異なる繰返し応力を発生させるよう設定した。ここでは安全率を1.4と設定して、一方のウェブの首溶接部近傍に100MPa程度の応力を、もう一方に140MPa程度の応力が発生するように設定した。

以上、載荷荷重は最大荷重130kN、最小荷重10kN、荷重範囲120kNとし、載荷周波数は4Hzとした。

(3) 静的載荷試験結果に見る応力分布

130kNまで静的載荷した場合の、ウェブ支間中央における長手方向および鉛直方向の応力分布を図-16に示す。また、ウェブ折り曲げ部における鉛直方向の応力分布を図-17に示す。便宜上、荷重載荷点に近いウェブをL-WEB、他方をR-WEBとする。また床版支間側の面を内面、他方を外面とする。

図-16より、支間中央のウェブ外面における計測値と

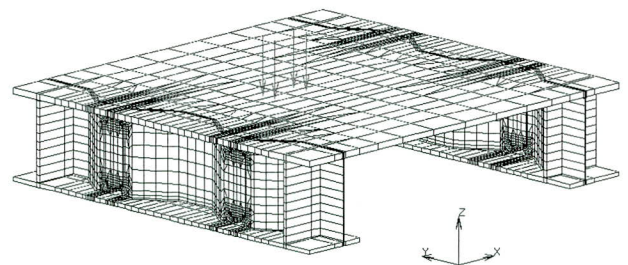


図-14 解析モデル図
(すべてソリッド要素を使用)

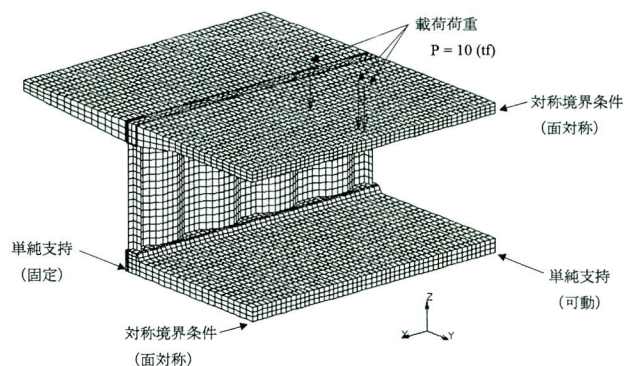
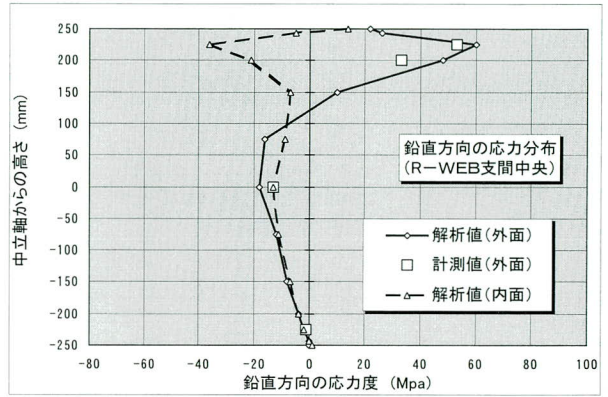
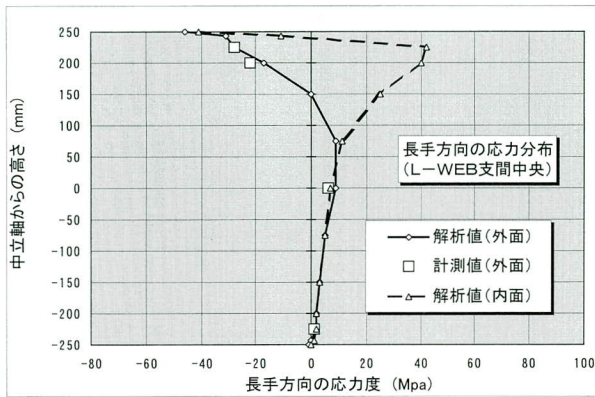
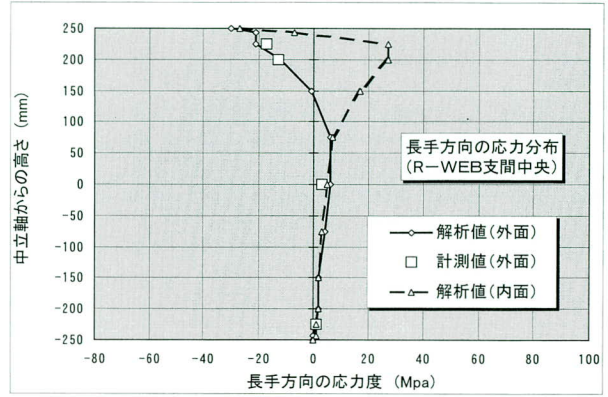
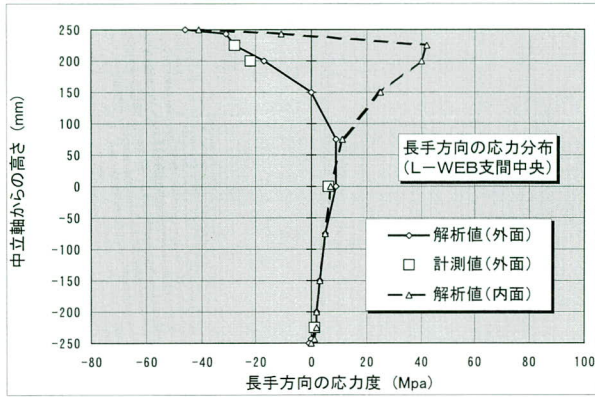
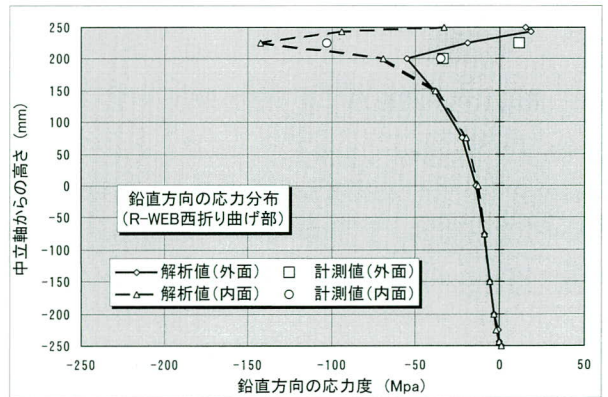
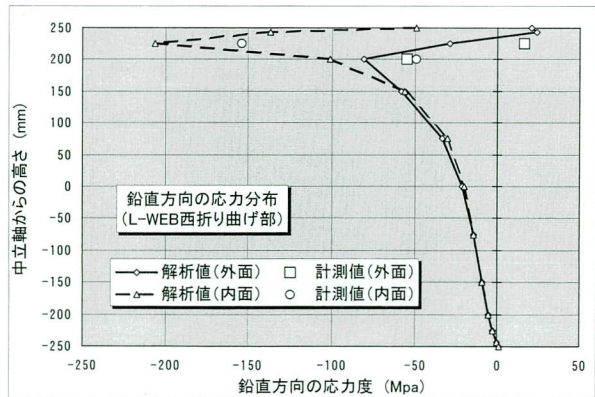
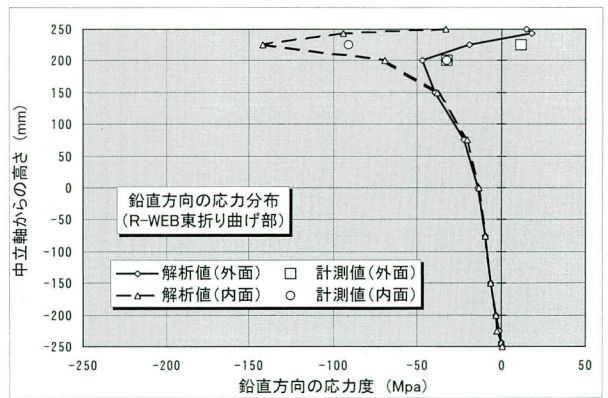
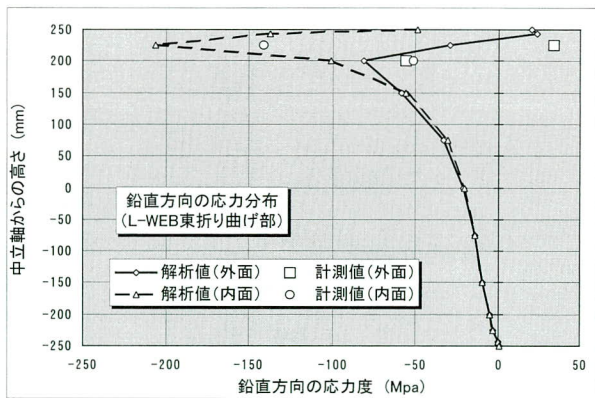


図-15 実橋を考慮したFEM解析モデル図
(床版はソリッド要素、ウェブはシェル要素を使用)



図一六 支間中央における長手方向および鉛直方向の応力分布 (左がL-WEB、右がR-WEB)



図一七 折り曲げ部における鉛直方向の応力分布 (左がL-WEB、右がR-WEB)

FEM解析値はよく一致している。図-17は、各ウェブに設けた支間中央付近の折り曲げ部2ヶ所（東・西とする）において、所要の圧縮応力が生じているのを示す。計測値と解析値は、多少誤差があるが傾向は一致している。

支間中央における鉛直方向の応力に着目した場合、ウェブ最上部付近の外面には引張りずみ、また内面には圧縮ひずみが生じている（図-16）。

これらは波形鋼板ウェブの鉛直方向に高い剛性のため、面外荷重による上フランジの回転が拘束され、ウェブ最上部に局部的に板曲げ応力が発生したものと考えられる。

また、折り曲げ部における鉛直方向の応力は、ウェブ内面の圧縮応力が支間中央と比較し3倍以上となっている（図-17）。

(4) 試験経過

試験開始後64万回到達時に、L-WEBの折り曲げ部で、首溶接にビード止端亀裂を発見した。亀裂はウェブ側止端部・フランジ側止端部共に発生した。

95万回到達時にはもう一方のL-WEB折り曲げ部で、さらに155万回到達時にはR-WEB折り曲げ部で、ウェブ側止端亀裂を発見した（図-18）。

200万回に到達したが、もう一方のR-WEB折り曲げ部が健全だった。そこで荷重載荷位置を中央に移し、該当部分における鉛直方向の応力範囲を上げ、亀裂発生を促進したが、269万回到達時点で試験を終了した。外観にお

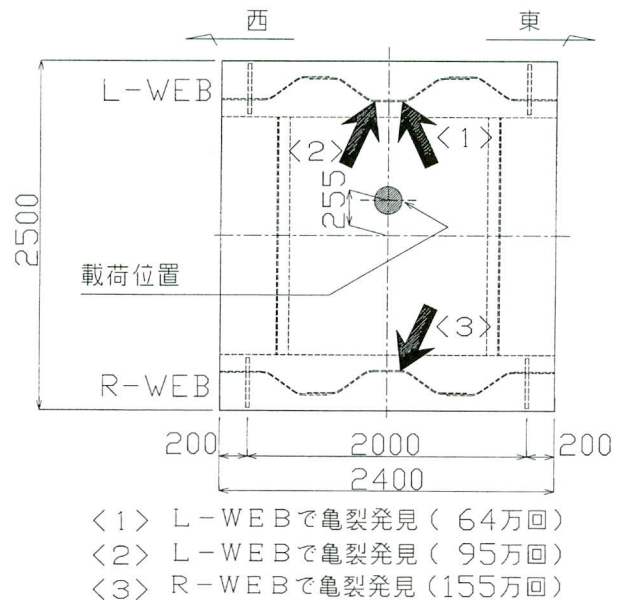


図-18 亀裂発生順序の説明図

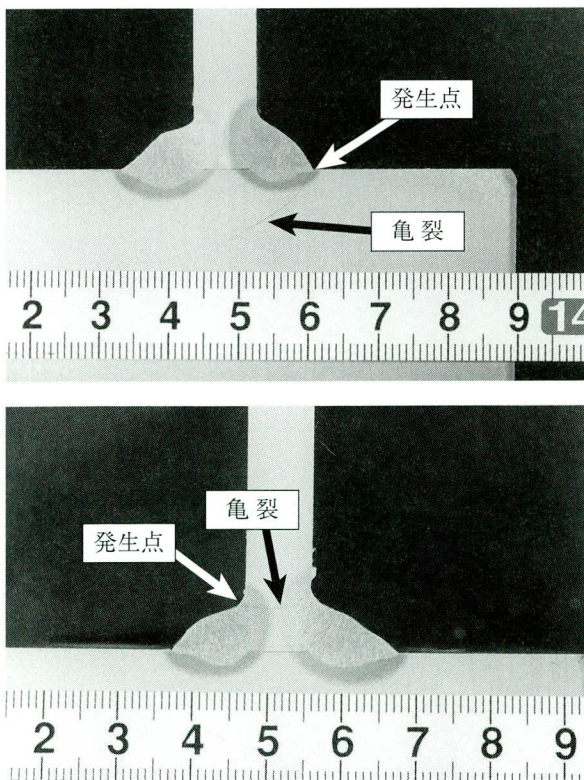


写真-3 マクロ試験における亀裂進展状況
 (上：フランジ内部 下：ウェブ板厚方向)

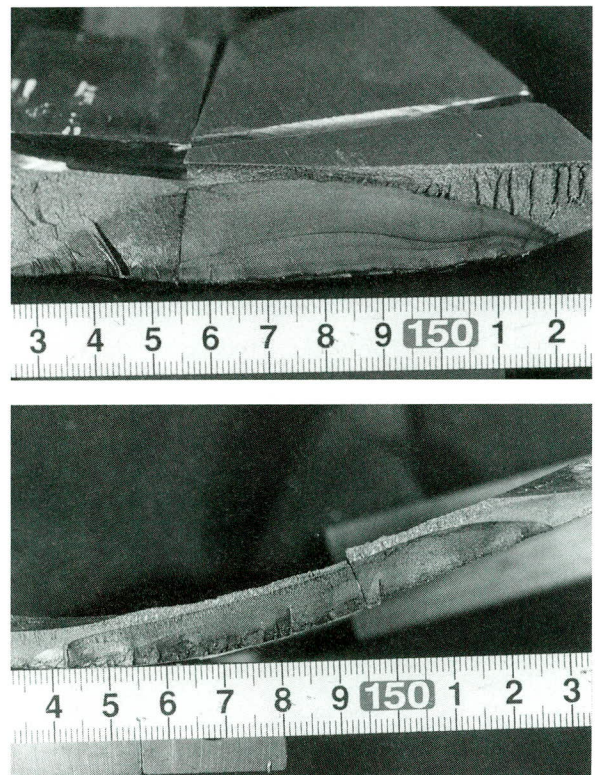


写真-4 採取した亀裂破面の一部
 (上：フランジ内部 下：ウェブ板厚方向)

いて最も進展が速い亀裂は、1万回あたり0.33mmだった。

ひずみ実測結果より、亀裂発生に伴い、首溶接における繰返し応力範囲は徐々に減少していた。これを鉛直方向の力によって生じる鉛直方向のひずみと、ウェブに対し面外方向からの力によって生じる曲げひずみとに分解したところ、曲げの成分が、鉛直方向の成分と比較してより低下していることが確認された。

繰返し载荷試験終了後、マクロ試験を実施した（写真-3）。上フランジ止端部から発生した亀裂は、上フランジの中を斜めに進展した。一方ウェブ側止端部から発生した亀裂は、ウェブのほぼ板厚方向に進展した。

次に亀裂の破面を観察したところ、止端部側には表面の凹凸が多く亀裂の内部には少なかった（写真-4）。この凹凸はビード止端部における亀裂が数箇所発生し、隣り合う亀裂どうしが接した時に生じたものと推察される。

面外载荷におけるウェブ側溶接止端亀裂が、圧縮応力の繰返し作用下で生じた点に関しては、溶接後の残留引張応力の影響もあったと考えられる。

6. あとがき

2種類の疲労試験結果から得た項目を以下に記す。

(1)まず、単純梁モデル試験体を使用した面内载荷試験から、以下の項目を確認した。

- ①今回提案する、水平部の溶接をスカラップの手前で止める形式は、溶接会合部に発生する亀裂を避けることとなり、疲労試験結果からも良い結果を得られた。
- ②スカラップの溶接部は、各溶接部の中で疲労強度が最も低く評価されている。しかし、設計荷重時に生じる応力では亀裂が発生することがなかった。
- ③スカラップの疲労亀裂は、形状的にウェブ板厚面とすみ肉溶接部が形成する交差面が鋭角になることに大きく起因している。疲労特性に関して弱点になり得るので、この点に注意した溶接施工を行いたいと考える。

(2)次に、2主桁試験体を使用した面外载荷試験から、以下の項目を確認した。

- ①亀裂は、すみ肉溶接の折り曲げ部が起点になっており、すみ肉溶接のウェブ側、フランジ側のどちらの亀裂も確認された。

外観において、最も進展が速い亀裂は1万回で0.33mmであった。

- ②首溶接における鉛直方向の応力範囲を140MPa程度に

設定した側のみならず、100MPa程度に設定した側からも亀裂が発生し、疲労特性を確認することができた。

- ③破面観察とマクロ観察を行い、発生点および進展状況を確認した。ウェブ側止端部に発生した亀裂は板厚方向に進展し、貫通によって応力分布に悪い影響を及ぼすと考えられる。したがって、折り曲げ部はスカラップまわし溶接部と同様に、より慎重な溶接施工をするのが望ましいと思われる。

最後に本試験を行うにあたり、ご協力、ご助言を頂いた関係各位に御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 三木千寿、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.38A、1992.3
- 2) 南邦明、三木千寿、館石和雄：スカラップを有する厚板I型断面桁現場溶接継手部の疲労強度、土木学会論文集、No.577、1997.10
- 3) 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、1993.5

2003. 1. 15 受付