

補助部材を用いたバイパス工法による鋼 I 主桁補修

大阪管理部 調査設計課 河野紀利
保全施設部 保全技術課 中村一平
大阪管理部 調査設計課 藤井康男

要 約

「バイパス工法」とは、架設ベントを用いずに鋼 I 主桁の損傷部を跨いで補助部材（パイパス材）を設置し、損傷部を切断除去して主桁に作用していた応力を一時的に迂回させて新部材の取り付け、ほぼ原形に修復する工法である。

本工法は荷重負荷状態のまま本体道路構造物を補修するという過去に例のない工法であるため、主桁応力の伝達状況、現場溶接上の問題点等について詳細な調査、検討および模型実験を行い、この工法の有効性、施工性、安全性等の確認を行った。

この成果に基づいて、実際の構造物にこの工法を適用し、現場計測を併用してこの工法を用いた場合の実橋主桁の応力の伝達状況を確認するとともに、工事完了後の1週間と1年経過後に追跡点検を実施し補修後の性状において良好な結果を得たので報告する。

まえがき

阪神高速道路の道路構造物において床版あるいは桁端部等からの漏水により、鋼桁が腐食する損傷事例が近年になって多数発生している。本文で報告する事例は、大阪府道大阪池田線（環状線）の湊町付近の2径間連続桁のスパン中央部に生じた鋼桁の腐食損傷である。

当該橋梁の路下は、交差点中央部に位置し、また地下には地下街や地下鉄等の地下構造物がある複雑な都市環境にある。また、本線上の全面的な交通閉鎖は困難であるなど制約が厳しい条件下にある。

そこで、この橋梁の損傷を補修するにあたって

種々の手法を検討した結果、架設ベントを用いずに鋼 I 主桁の損傷部を跨いで、補助部材（パイパス材）を設置して損傷（腐食）部を切断除去し、鋼 I 主桁に作用していた応力を一時的に迂回させ、新部材を取り付けて、ほぼ原形に修復することとした。これを「バイパス工法（図-1参照）」と称し、この方式を用いて昭和61年3月に実橋の補修工事を行った。

本文では、腐食部の調査結果、補修方法の検討および補修工法案に対する有効性、施工性、安全性等の確認実験等の成果¹⁾²⁾について報告する。

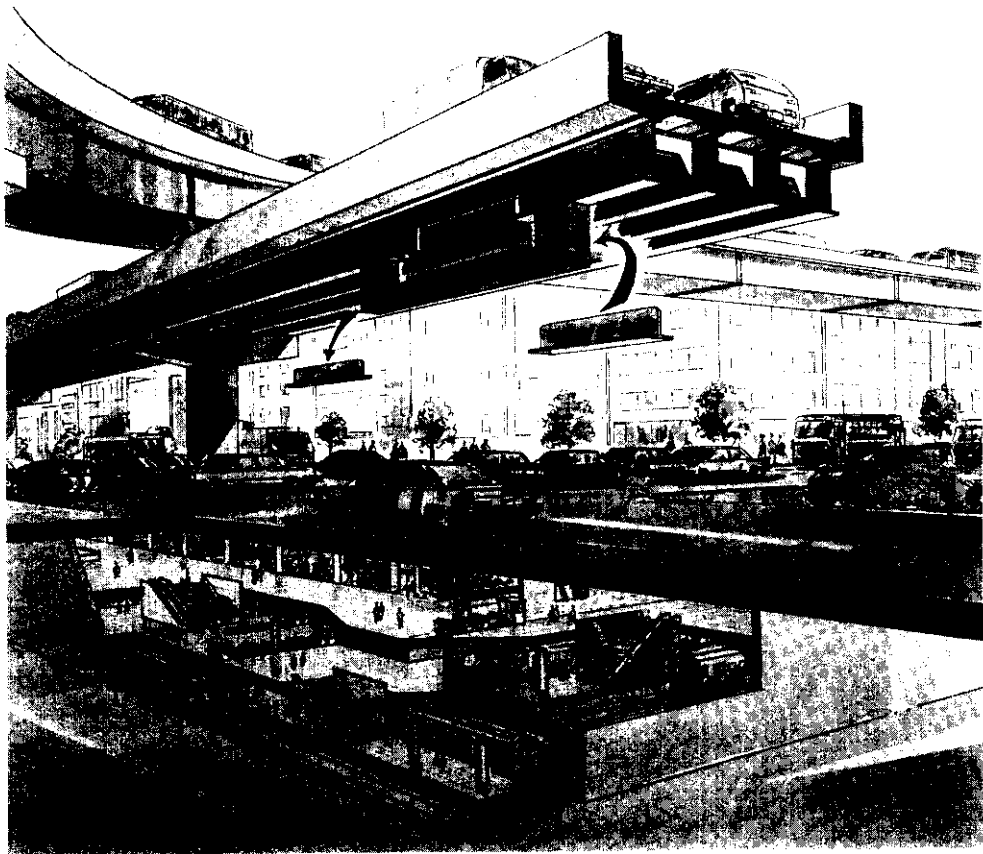


図-1 バイパス工法概念図

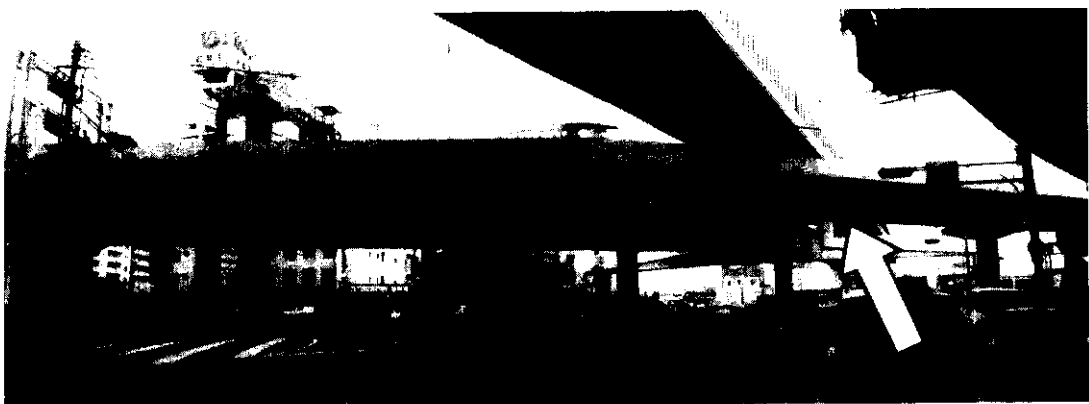


写真-1 周辺状況（施工前）

1. 損傷状況

対象橋梁は、大阪市浪速区湊町1丁目付近の環状線の環S-413桁で、2径間連続非合成桁のうちの1径間である。(図-2、図-3および写真-1参照)



図-2 補修工事の施工箇所位置図

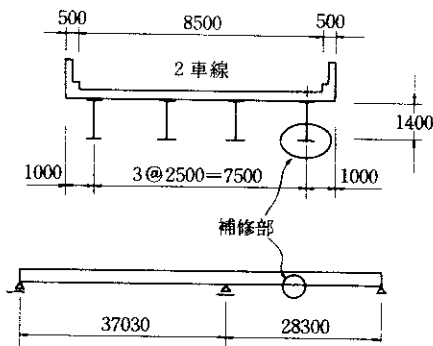


図-3 対象橋梁一般図

鋼I主桁腐食の原因は、床版からの漏水によるものであり、写真-2に示すように、床版打設時に型枠の一部がコンクリートと主桁上フランジ間にはさまり、型枠撤去後もコンクリート中に残ったままになっていた。そのため、床版のクラックを通過したアルカリ分を含んだ水が木片部に滞留して、しずく状に落下し、ウェブ下端から下フランジにかけて広がっており、著しい腐食の範囲が橋軸方向に約2.3mにおよんでいた。また、垂直補鋼材は下部で腐食して鋼材に穴があいた状態になっていた。

鋼材の有効断面を把握するため、超音波探傷にて肉厚を測定した所、その最少厚さは、ウェブ：3.8mm (9mm)、下フランジ：10.6mm (16mm) および17.4mm (19mm) であった。(ただし、カッコ内は設計厚さを示す。)

2. 補修方法の検討

調査結果を吟味し、加えて現地条件を考慮して次のような補修方法を提案した。

- (1) 腐食部の錆をサンダー等により除去し、塗装仕上げする補修案。
- (2) 腐食部の錆を除去後、カバープレートを現場溶接あるいは高力ボルト接合により断面補強する

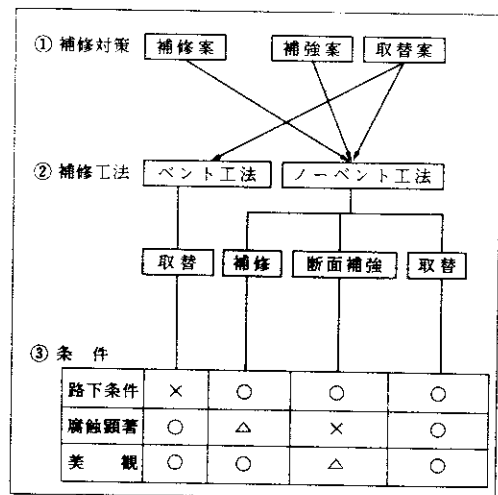
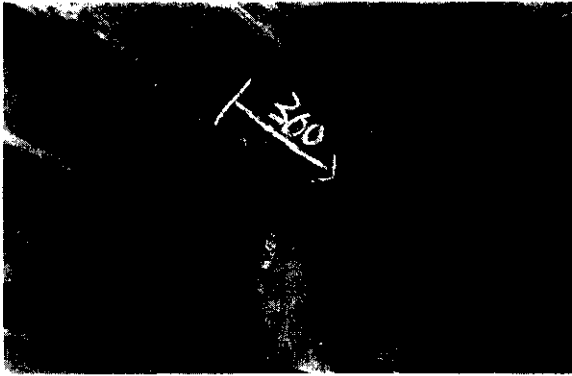
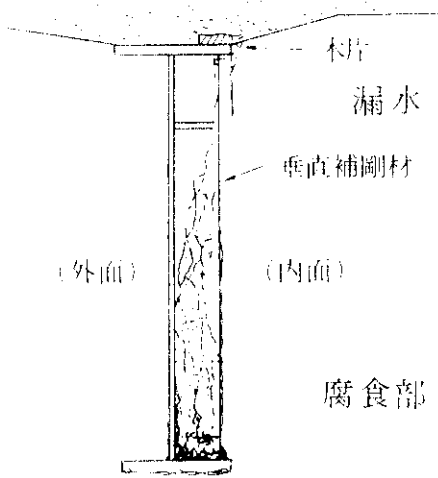


図-4 補修工法比較図(G4桁補修案)



実橋における漏水部



垂直補剛材の腐食状況



下フランジおよびウェブ下端の腐食状況

写真 2 腐食による損傷状況

補強案

(3) 腐食部を切断除去し、新材材を取り付けて原形に復旧する取り替え案。

これらの方法のうち、強度、応力の流れ、景観等について検討の結果、比較的問題の少ないと考えられる(3)の取り替え案を採用した。

腐食部はスパン中央部にあり、一般的には、桁を仮り受けするベントを設けて、損傷部付近の応力を減少させて補修することが安全上望ましいものと考えられる。しかしながら、路下は交通量の多い千日前通りの交差点付近であり、平面街路の交通を阻害する仮り受けベントを設置すること

が難しい。そこで、腐食部断面の切断によって生じる断面力の不足分をあらかじめ、主桁に取り付けた補助部材（バイパス材）に分担させて、鋼Ⅰ主桁の腐食部分を取り替える工法を考案した。この工法をバイパス工法と名付け、この工法を使用した補修工事の実施方針を以下に列挙する。

(a) 腐食部を切断除去し、同形状（ \perp 型）の新材材に取り替える。

(b) 補助部材（バイパス材）を主桁に取り付けて、欠損部に作用する主桁応力を一時的にバイパ

ス材に迂回させる。

(c) 下フランジ部は溶接接合、ウェブ部は高力ボルトにて接合する。

(d) 死荷重を軽減させるため、2径間連続桁の一方の主桁（損傷部の反対側のスパンの桁の路面上）にカウンターウェイトを載荷する。

(e) 活荷重や振動を軽減するため、補修箇所直上の一車線の交通を規制する。

なお、バイパス工法の取り替え順序を図-5に示す。

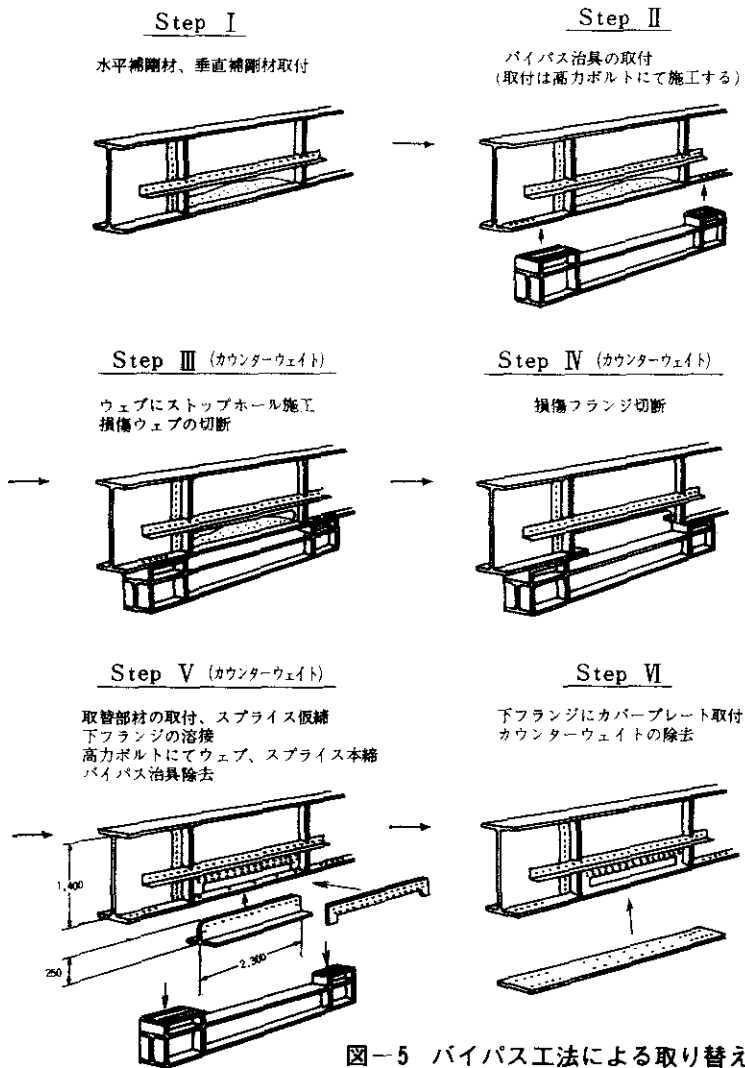


図-5 バイパス工法による取り替え順序

3. 確認実験の実施

3-1 実験条件

補修工事の実施方針に基づき、バイパス工法を適用して、荷重負荷状態下での主桁腐食部の取り替え作業を想定して、ガス切断、溶接作業などバイパス工法の有効性、作業中の安全性、現場での溶接の作業性、等を確認するため、次の実験を行った。

(1) A実験

バイパス工法の有効性を確認する静的実験を、 $0 \Rightarrow 2 \text{ t} \Rightarrow 18 \text{ t} \Rightarrow 34 \text{ t} \Rightarrow 50 \text{ t}$ の荷重サイクルにて行い、バイパス材への主桁応力の流れを確認した。

(2) B実験

交通供用下での作業を想定した振動実験として、アクチュエーターにより、振幅 $0.2\text{mm} - 10\text{Hz}$ 、および $2.0\text{mm} - 2\text{Hz}$ の2種類の振動条件下で、現場でのガス切断、溶接等の一連の作業を行い、現場の作業性、現場溶接の健全性を確認した。

これらの実験には、大阪大学溶接工学研究所に設置された $4500\text{mm} \times 2800\text{mm} \times 3500\text{mm}$ のフレームに、アクチュエーターおよび油圧ジャッキを取り付けた装置を用いた。A実験では、 50t 油圧ジャッキを用い載荷梁を設置して4点を曲げとし、B実験では、 20t のアクチュエーターを用いて 4000mm スパンにて3点曲げとした。(図-6参照)

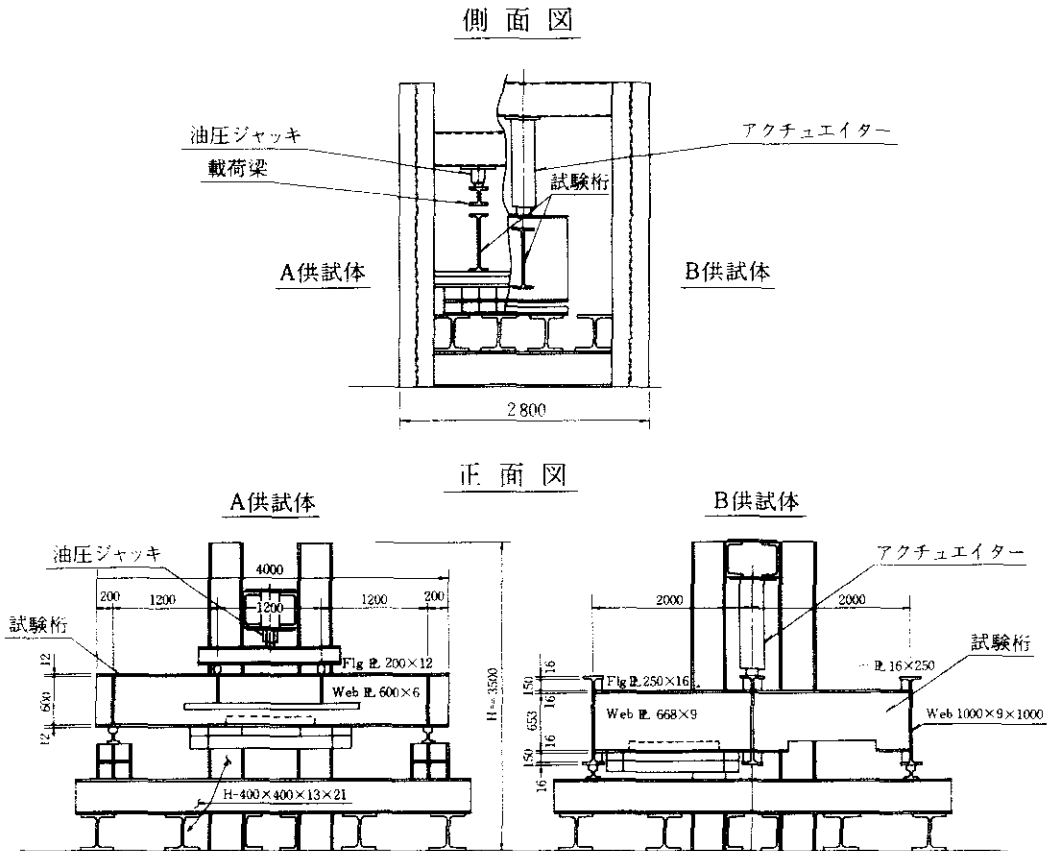


図-6 実験装置および供試体桁の設置図

3-2 実験手順

3-2-1 A実験の場合

A実験の作業手順を図-7に示す。

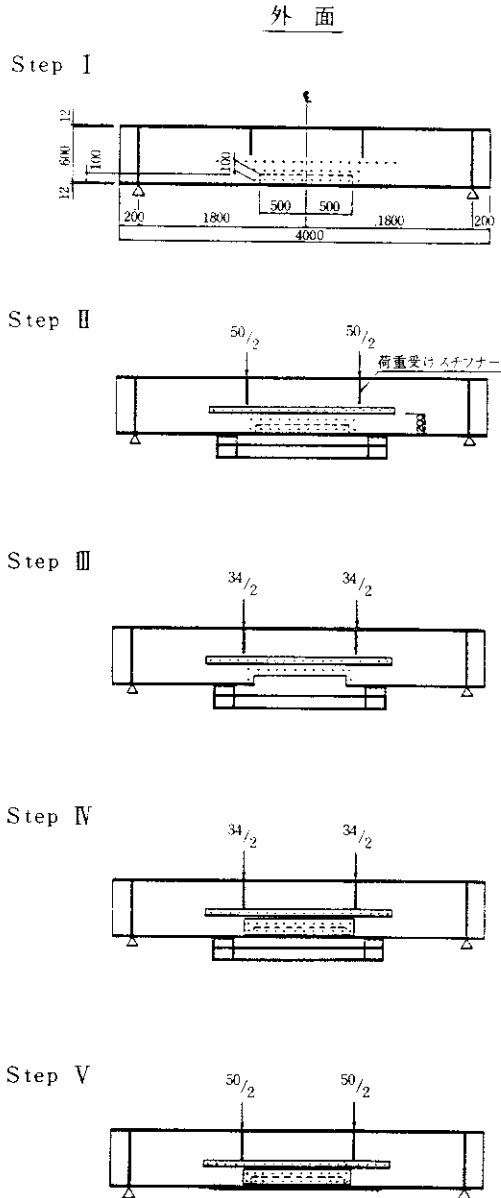


図-7 作業手順 (A実験)

- STEP I ①工場制作、
②供試体桁を載荷フレームにセット。
- STEP II ③50 tまで載荷 (下フランジの設計計算値 $\sigma = 1576 \text{ kg/cm}^2$ に相当)、
④補剛材およびバイパス材の取付け、
⑤34 tまで除荷 (実橋でのカウンターウェイト50 t 載荷時の下フランジの応力値 $\sigma = 1040 \text{ kg/cm}^2$ に相当)。
- STEP III ⑥ガス切断およびV型開先加工。
- STEP IV ⑦ウェブスプライスボルトの半締め、
⑧下フランジ部の溶接接合、
⑨スプライスボルトの本締め。
- STEP V ⑩バイパス材の取り外し、
⑪カバープレートの取付け、
⑫50 tまで載荷、
⑬0 tまで除荷。

この実験では、摺動型変位計にてたわみを、また一軸ワイヤーストレインゲージにてひずみを、図-8に示す位置で測定している。

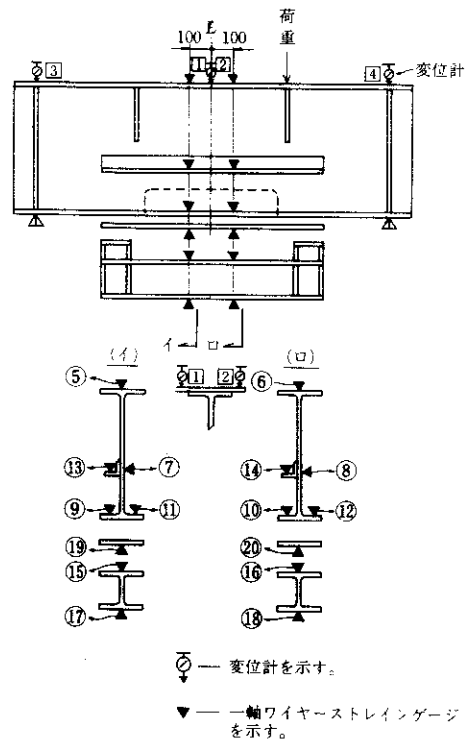


図-8 たわみおよびひずみの測定位置図

3-2-2 B実験の場合

B実験は供試体桁1本に対し、2種類の振動条件で行った。その作業手順を図-9に示す。

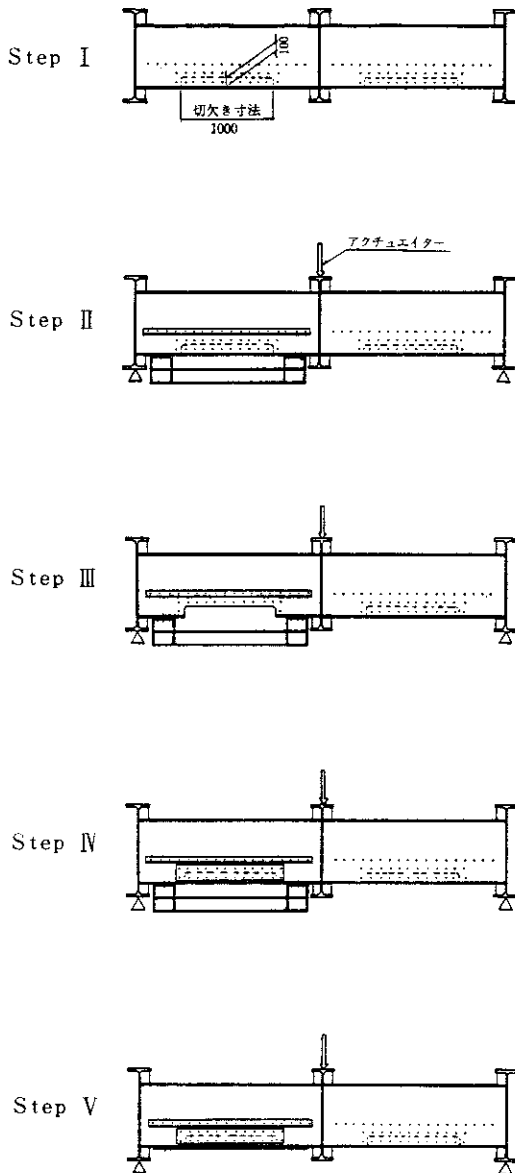


図-9 作業手順 (B実験)

- STEP I ①工場製作、
②供試体桁を載荷フレームにセット。
- STEP II ③バイパス材の取り付け。
- STEP III ④アクチュエーター始動、
⑤ガス切断およびV型開先加工。
- STEP IV ⑥ウェブスライスボルトの半締め、
⑦下フランジ部の溶接接合、
⑧スライスボルトの本締め。
- STEP V ⑨バイパス材の取り外し、
⑩アクチュエーター停止。

4. 実験結果とその考察

4-1 A実験(静的)の結果

A実験で得られた各段階の応力変化を図-10に示す。以下に各実験工程において確認された性状を示す。

(1) Stage I

補助部材を取り付けない状態で、0 t → 2 t → 18 t → 34 t → 50 t と載荷し、逆荷重サイクルにて 2 t まで除荷し、再度 50 t まで載荷し、それぞれの荷重載荷状態における測定点のたわみとひずみを測定した。中央部のたわみは 50 t 載荷時では 4.3 mm、34 t では 2.8 ~ 3.1 mm であった。また、上・下フランジ部の応力は 50 t 載荷時では $\sigma = 1450 \sim 1500 \text{ kg/cm}^2$ であり、34 t 載荷時では $\sigma = 1000 \text{ kg/cm}^2$ と数値計算の値とほぼ一致している。

(2) Stage II

50 t 載荷時にウェブおよびフランジ部にバイパス材を取り付けた。カウンターウェイトによる軽減分を考慮して 34 t に除荷したところ、上・下フランジの応力は $\sigma = 1230 \text{ kg/cm}^2$ となり、フランジバイパス材は圧縮応力値として $\sigma = -160 \text{ kg/cm}^2$ を示した。

(3) Stage III

ガス切断時のたわみは、50 t 載荷時で 5.0 mm であり、上フランジの応力は $\sigma = -1460 \text{ kg/cm}^2$ と切断前より約 $\Delta \sigma = 200 \text{ kg/cm}^2$ 増加し、ウェブの応力も約 500 kg/cm^2 増加した。この時点でバイパス材の応力も大きく変化し、ウェブに取り付けられたバイパス材の応力は $\Delta \sigma = 620 \text{ kg/cm}^2$ 大きく

なり、フランジ部のバイパス材の応力は $\Delta\sigma=700\text{kg}/\text{cm}^2$ 増加した。

(4) Stage IV

新部材（ \perp 型）を仮り付けし、ウェブスプラインプレートのボルトの半締め時には、ガス切断時と比べてたわみおよびひずみの変化は見られなかった。しかし、フランジ部の溶接後たわみが3.7mmと減少し、ガス切断前の値に復元した。

応力の変化状況について観察すると、上フランジ部応力は $\sigma=-1220\text{kg}/\text{cm}^2$ と約 $\Delta\sigma=250\text{kg}/\text{cm}^2$ 減少し、ウェブ部においても $\sigma=-70\text{kg}/\text{cm}^2$ と約 $\Delta\sigma=1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 減少した。反対に、下フランジ部の応力は、溶接前の $\sigma=0$ が突然に $\sigma=1200\text{kg}/\text{cm}^2$ の値を示した。また、バイパス材の応力は、ウェブ部で $\sigma=-50\text{kg}/\text{cm}^2$ 、フランジ部で $\sigma=-160\text{kg}/\text{cm}^2$ と切断前に近い値にもどっていた。

スプラインプレートの締め付けボルト本締め後は、前段階とあまり変化はなく、たわみ量は時間とともに減少した。

(5) Stage V

バイパス材の撤去後は、フランジ部およびウェブ部ともその応力状態はほとんど変化せず、バイパス材の撤去に伴って余分な外力は作用しなかった。このことは、バイパス材の取り付けボルトが容易に外れたことから確認された。

(6) Stage VI

カバープレート取り付け後の部材応力の変化はほとんどみられなかった。

(7) Stage VII

50t 載荷（現場でカウンターウェイトを撤去した状態を想定）後に、50t \rightarrow 34t \rightarrow 18t \rightarrow 2t \rightarrow 0tと除荷した。34t 載荷時に取り付けしたカバープレートの応力は、除荷に応じて圧縮側に変化していた。

これらの結果から次のことが確認された。

- ① ガス切断前後の主桁の応力状態を比較すると、バイパス材には切断された部材の主桁応力が転嫁されている。
- ② 新部材の仮り付けやカバープレートの取り付けなど、ボルト接合された部材は、載荷荷重に変化がなければ無応力状態である。

③ フランジ部の溶接施工前後の変化から、溶接によってバイパス材より転嫁された主桁応力が新部材に伝達される。これは溶接部の冷却収縮により、新部材に引張力が導入された結果と考えられる。

4-2 B実験（振動）の結果

図-11に示す溶接箇所のうち左側のスパン（振幅0.2mm、振動数10Hz）では比較的振動の影響が小さく、溶接作業は容易であった。これに対して右側スパン（振幅2mm、振動数2Hz）においては振動の影響が大きく作用し、予想以上に溶接作業が困難であった。したがって、ここでは、主として2mm-2Hzの振動下で溶接した右側スパンについて考察する。

溶接施工時に次のような問題点が発生した。

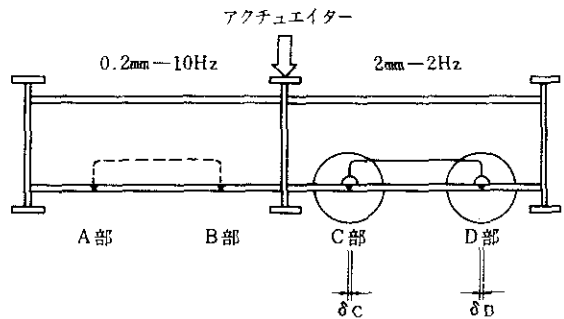


図-11 溶接箇所図（B実験）

4-2-1 C点部の溶接

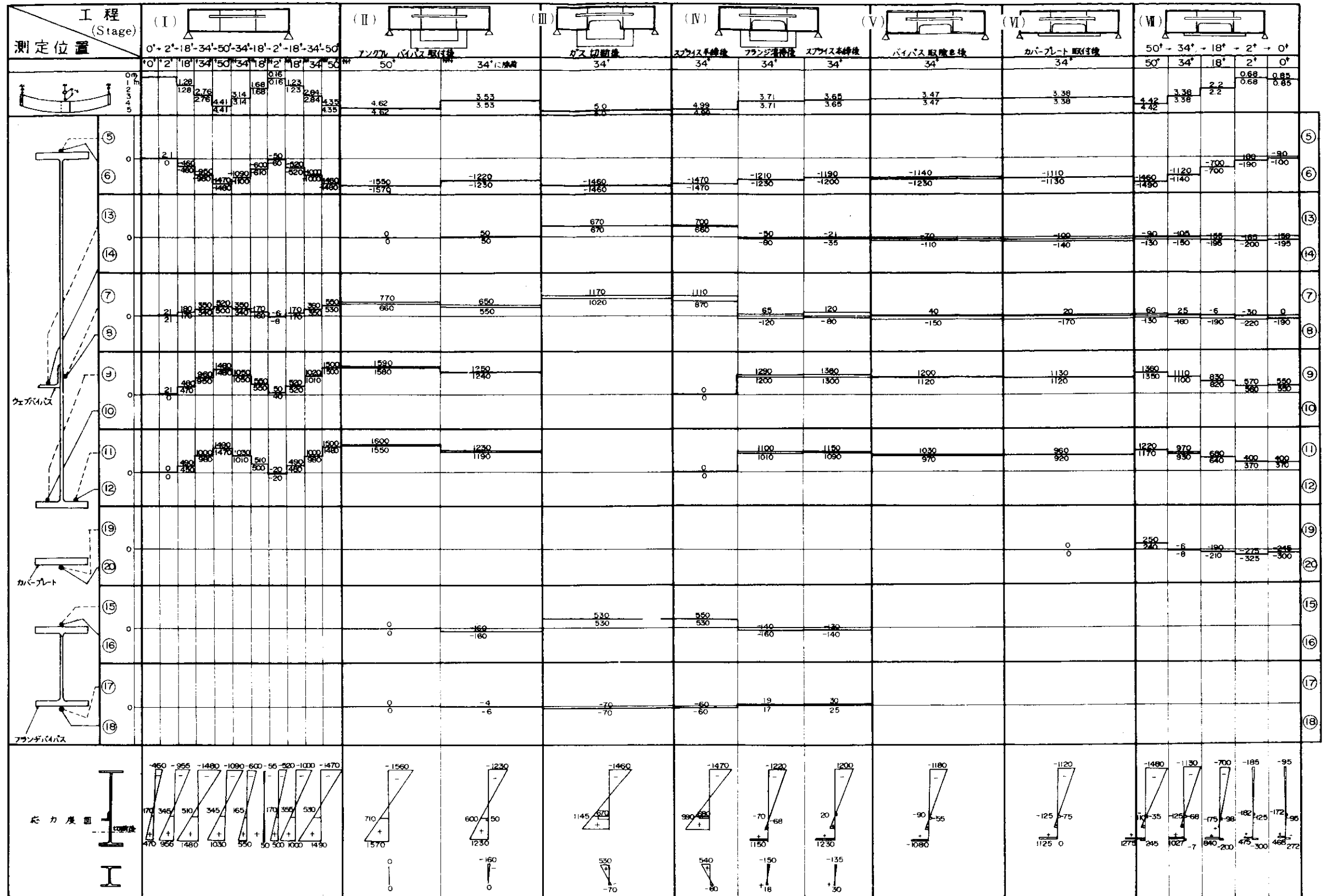
C点部の溶接においては、

- 1) 1層目のアークスタートが振動の影響でスムーズに発達しない場合があった。
- 2) 電流が90A（棒径3mm ϕ ）で最適な運行がえられたが、振動の影響によりアーク切れが生じた。
- 3) ルートギャップは2.7mmであったが裏波は形成された。

4-2-2 D点部の溶接

D点部の溶接においては、C点部より振動の影響は少なかったが、C点部の溶接により収縮し、

図-10 バイパス実験に於ける応力変化グラフ



ルートギャップが3 mmから5 mmに拡大した。このため3 mm φの溶接棒では溶接不可能となり、両面の開先部に肉盛溶接を施した。

図-11に示すA点部、B点部における溶接状態は良好であったにもかかわらず、D点部では通常の溶接ができなかったため、C点部の溶接状態を詳細に検査した。

検査項目とその結果は次のとおりである。

(1) X線透過試験による検査

写真-3に示すように、全長にわたり融合不良が発生しており、両端部にはブローホールが集中している。“割れ”の発生の有無は、見分けが困難であった。

(2) 磁粉探傷試験による検査

図-12に示すように、ビード中央部に“割れ”らしき模様が検出され、超音波探傷試験によりこれを確認した。

(3) 超音波探傷試験による検査

磁粉探傷試験で検出された模様を超音波探傷にて確認した結果、割れの最大深さが5.0mm、融合不良の最大深さが6.5mmと確認された。

(4) マクロ試験による検査

割れおよび融合不良部を図-12に示すように、A, B, C₁, C₂, C₃, D, E, F, Gの9断面にて切断してマクロ試験した結果を写真-4に示す。A-I, C₁-ロ, E-I・ロ, F-I断面では“割れ”が、またB-I・ロ, C₂-I・ロ, C₃-ロ, G-I・ロでは融合不良が、また、C₃-I, D-I, G-Iでは割れと融合不良の混在状態が観察された。

これらの試験結果を考察すると、“割れ”については次のことが推定される。

- 1) 応力集中箇所からは“割れ”は発生していない。
- 2) 割れは初層中で最後に凝固した地点から発生していると推定される。
- 3) 初層以外の層は良好な状態といえる。また、融合不良の発現は開先面が振動し、アーク長が一定に保てなかったこと、加えて、裏波溶接のため大容量の電流を使わず、母材と溶接棒が完全に溶融しなかったために発現したものと推定される。

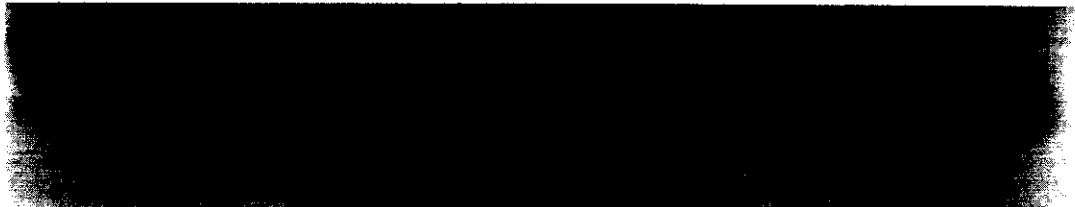


写真-3 X線透過試験結果

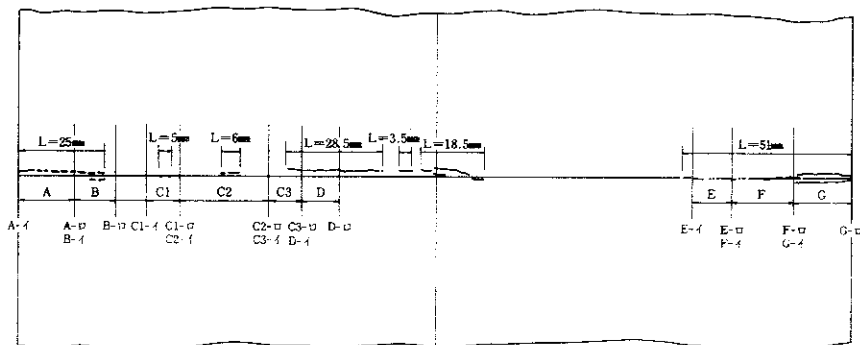


図-12 磁粉探傷検査転写模様図

(5) 光学顕微鏡による溶接部の組織観察

図-13に示す割れ断面の組織観察から、割れは次のように分類される。

- 1) 中央部の空洞部分。
- 2) 割れ口付近の形状が両側で同じ部分。
- 3) 先端の細い部分

(6) 電子顕微鏡による破面観察

試験片を液体窒素により冷却し、ぜい性破壊させた破面を電子顕微鏡により観察した。割れ口付近の破面を写真-5に、割れ中央部の破面を写真-6に示す。この結果から次のことが推定される。

- 1) 空洞部は高温時の割れにより発生している。
- 2) 割れ口付近は、溶接材料凝固後の冷却過程(延性低温域)において、高温割れにひずみが集中して割れが発生している。
- 3) 先端の細い部分は低温割れにより発生している。

5. 施工に対する提案

静的実験の結果、バイパス工法の有効性が確認された。さらに、溶接部の収縮により新部材に主桁応力が再び導入されることが判明した。しかし、振動下の溶接施工においては、初層部で融合不良、割れ等の欠陥が避け難いことも判明した。このため、これらの欠陥を排除すべく、次のように対応することとした。

- (1) 主桁の振動の影響をできる限り少なくする
- (2) 開先形状をXにし、ガウジングにて欠陥層を除去する。
- (3) ルート間隔を最大1.0mmとする。
- (4) 溶接線と交差するウェブにスカラップ(30-40mm)を設け、溶接作業にリレーバス方式を採用する。
- (5) エンドタブを設ける。

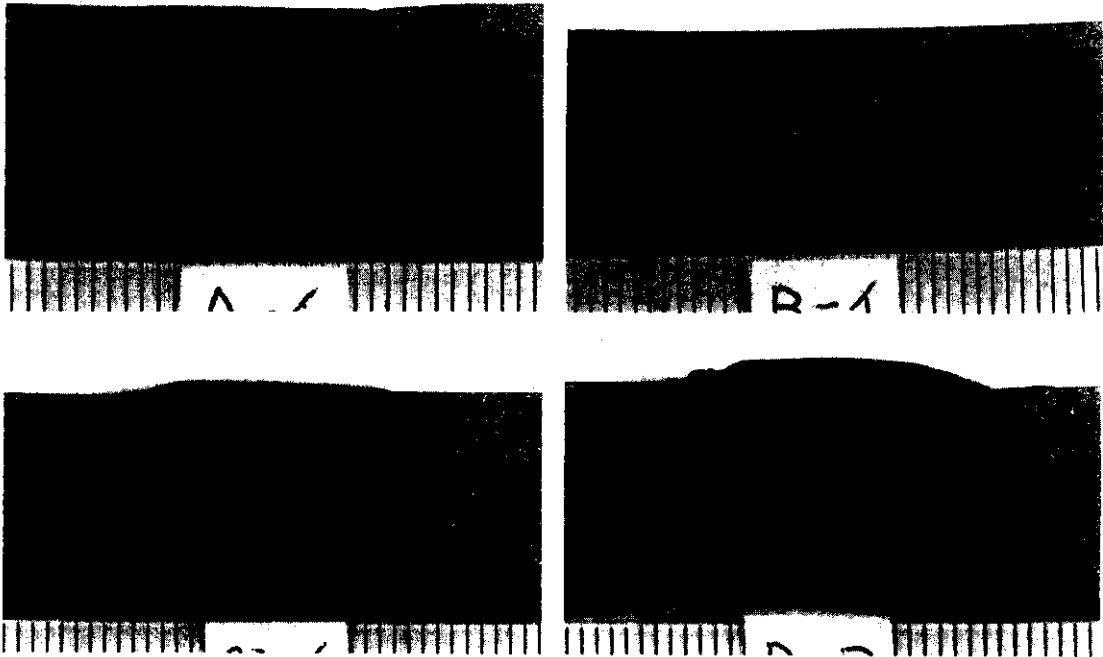


写真-4 溶接断面のマクロ試験例

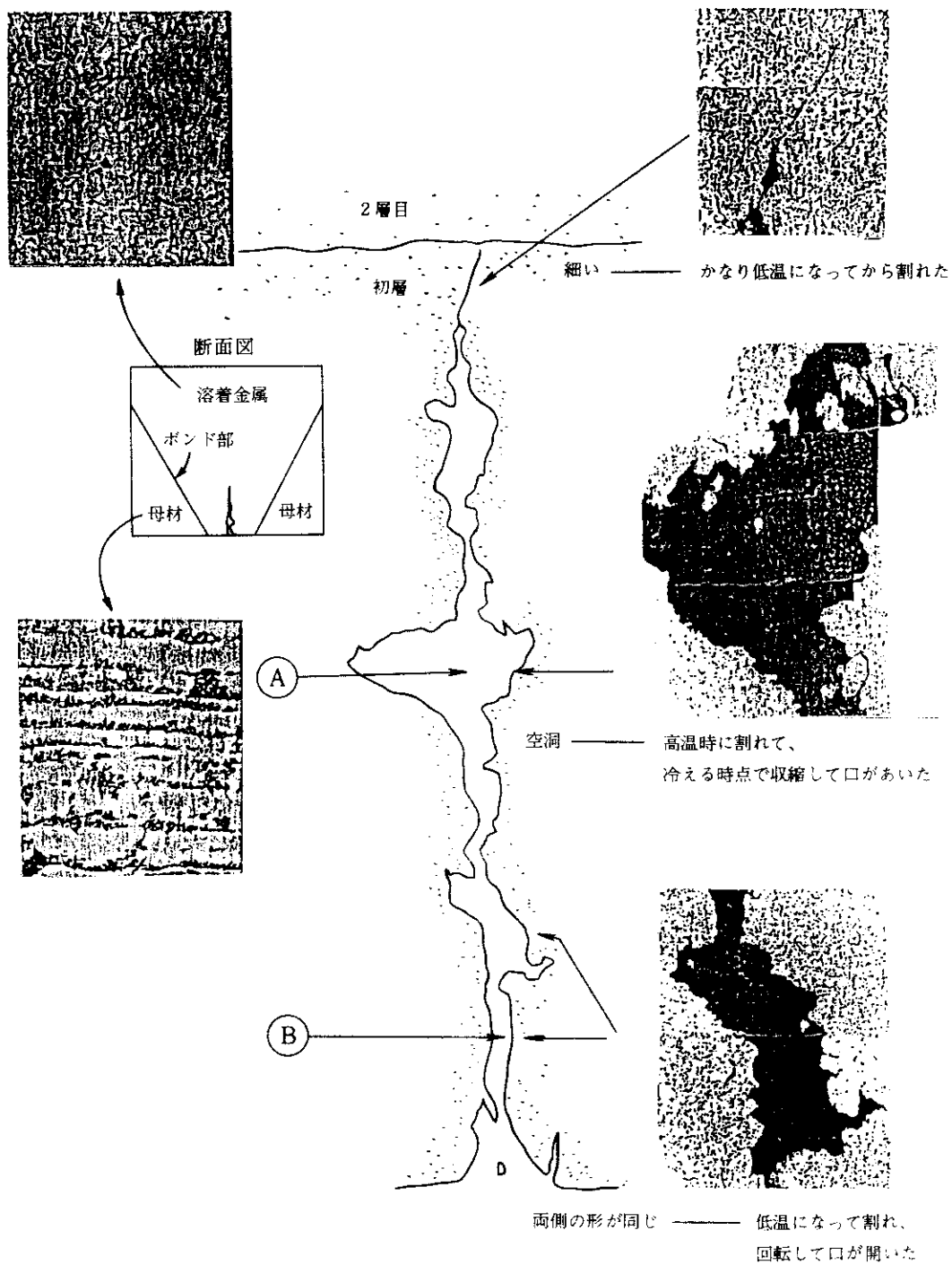


図-13 割れの断面形状



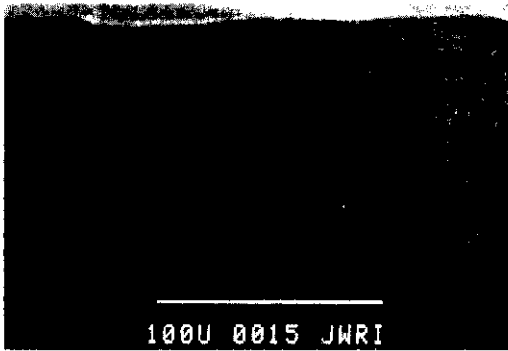
1000U 0014 JWRI

×20



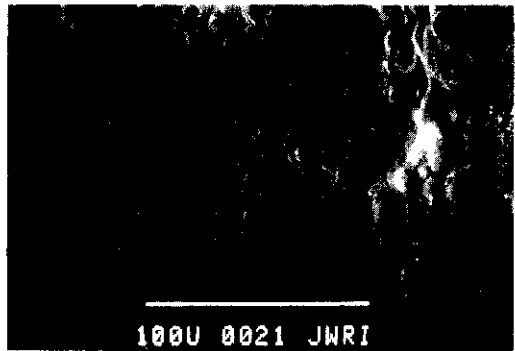
1000U 0020 JWRI

×20



100U 0015 JWRI

×500



100U 0021 JWRI

×500



10U 0016 JWRI

×1000



10U 0022 JWRI

×1000

写真 5 割れ口附近の破面

写真 6 割れ中央部の破面

6. 現場施工

都市高速道路の性格上、全面的な通行止めによる補修が困難であるため、直上の片側1車線のみ交通を規制し、加えて、主桁応力軽減のため側径間部にカウンターウエイトとして25tトラック2台を載荷して補修工事を実施した。

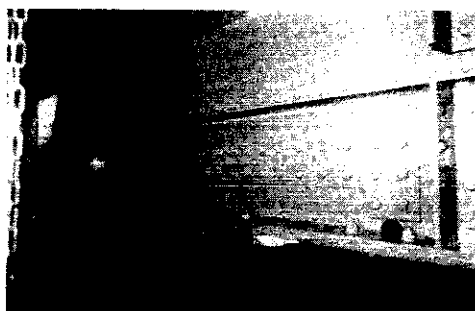
現場での応力測定の結果、カウンターウエイトの作用により、下フランジ部で約 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ の主桁応力の低減が計られ、実験で確認されたほどではないが、主桁応力がバイパス材に転嫁されていることが確認された。主桁の腐食部の切断時に解放された死荷重応力は、主桁の下フランジ部で $320\text{kg}/\text{cm}^2$ 、ウェブ部で $700\text{kg}/\text{cm}^2$ であった。また、取り付けられた新部材には、実験と同様に溶接による収縮のため、フランジ部に $610\text{kg}/\text{cm}^2$ 、ウェブ部に $320\text{kg}/\text{cm}^2$ が配分され、溶接施工によるプレストレス効果が確認された。



写真一七 バイパス材の取り付け、ガス切断状況



写真一八 溶接作業状況



写真一九 完成状況

おわりに

この工事の施工完了1週間後と1年後に、目視、磁粉探傷、カラーチェック、超音波探傷およびX線による追跡点検を実施しており、良好な結果を得ている。

今回考案したバイパス工法の適用にあたっては、溶接の入熱量と収縮量との関係、補修構造物とバイパス材の剛性の関係等の定量的な検討を加えれば、広く同種の損傷の補修工事にも適用できるものと考えられる。

最後に本工法は、昭和61年度土木学会関西支部技術賞、第17回日本道路会議優秀論文賞を受賞しており、御協力をいただいた大阪大学溶接工学研究所、堀川浩甫教授、タカラ技研㈱、ならびに関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 池田圭一、堀川浩甫、中本覚：供用下に於ける鋼桁腐食部の溶接による補修、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集 I - 288、1986.11
- 2) 吉原克衛、松本雅治、中本覚、木代穰：鋼 I 桁腐食部の現場溶接による補修、阪神高速道路公団第19回技術研究発表会論文集、1987. 2