

# — 鋼 I 桁橋の疲労損傷の補修と補強 —

大阪第3建設部 工事第1課 林 秀 侃  
保全施設部 保全技術課 中 村 一 平  
大阪管理部 調査設計課 仲 矢 忠 士

## 要 約

阪神高速道路は、現在供用延長は138.5kmであり、1日平均75万台の車に利用されており、阪神地区の交通の要路となっている。路線別にみた最大断面交通量は往復4車線の道路で約12万台/日と施設容量を上回る状態になっている。

構造物自身の経年による老朽化の進行と当初予想を大幅に上回る交通量の増加、さらに、制限荷重を越える車両の混入などにより、最近、多くの構造物に疲労損傷が発生し始めている。

本報告は、鋼 I 桁橋の主桁と分配横桁、対傾構との取合部、および桁端部横構取付けガセット部に発生している鋼 I 桁橋の疲労亀裂損傷について、損傷の概要、損傷原因の究明および分析、補修・補強工法の提案、疲労実験による安全性の確認、さらに試験施工による補修・補強工法の実橋への適用などの一連の検討内容と成果を紹介するものである。なお、主桁と分配横桁、対傾構との取合部については、技報第6号を参考にされたい。

## まえがき

阪神高速道路は、昭和39年の環状線供用開始以来、路線数、供用延長が飛躍的に増大し、その供用延長は昭和63年9月現在で138.5kmに達し、阪神地区における大動脈となっている。

交通量の増加は著しく、阪神高速道路全線での1日平均通行台数は約75万台に達している。加えて、車両性能の向上と相まって車両重量の増大など過酷な条件下での供用のため、これを支える道路構造物に各種の疲労損傷が出現し始めている。

道路構造物の維持管理にあたっては、入念な構造物点検を行っているが、昭和58年の定期点検においてRC床版鋼 I 桁橋の主桁と分配横桁あるいは

対傾構との取合部補剛材（以下補剛材を、「ウェブギャップ部」という。）と桁端部横構取付けガセット部（以下「ガセット部」という。）において、亀裂損傷が発生した。そこで、これらの損傷発生の原因究明および合理的な補修・補強方法の提案と実験による安全性の確認を行い、実橋での適用性の確認等を含めた一連の検討を実施した。その結果、現場での施工性をも配慮した適応性のある標準的な補修・補強工法が定められたので報告する。

なお、主桁と分配横桁、対傾構との取合部の補修・補強については、技報第6号に報告している。

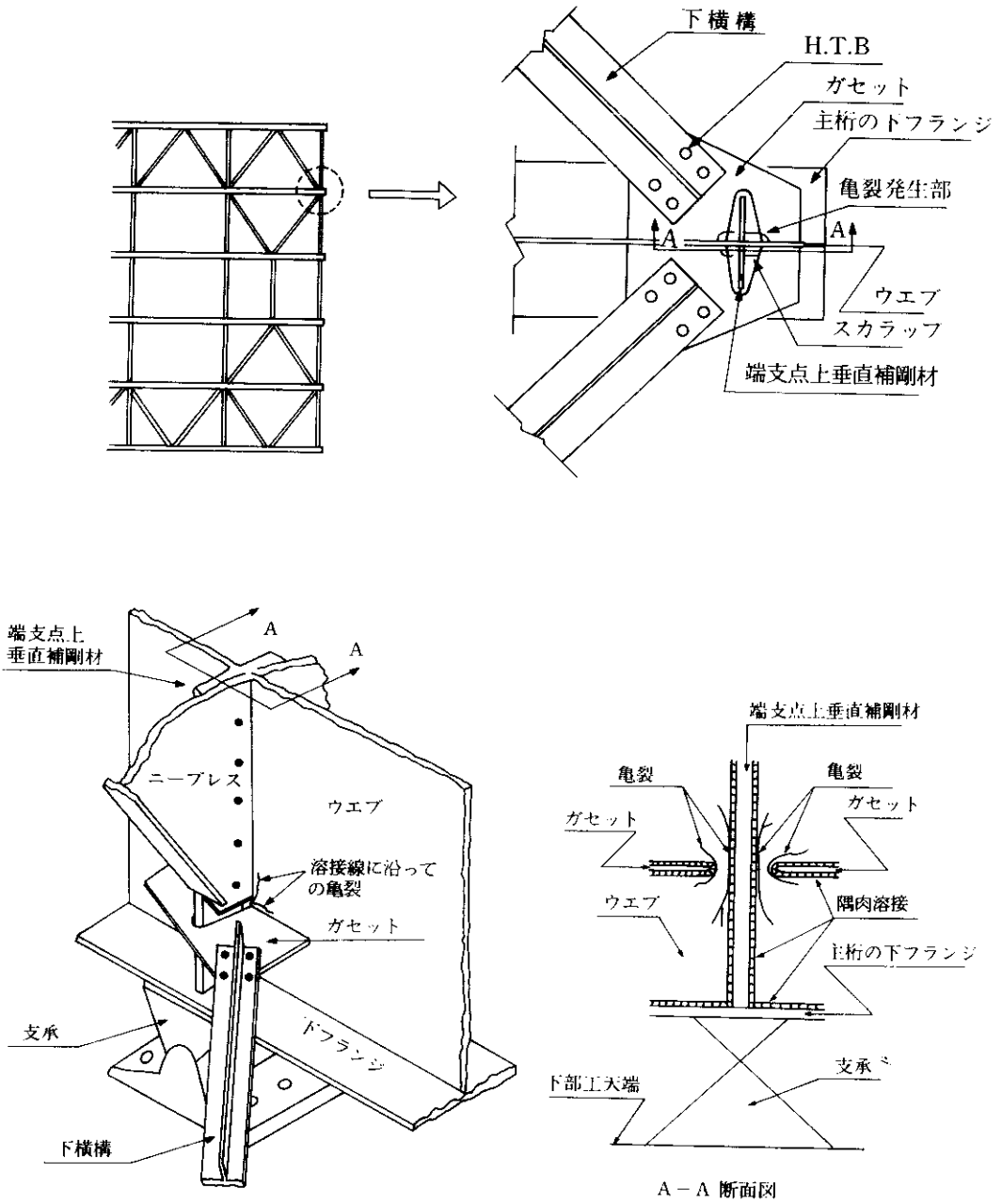


図-1 桁端部横構取付けガセット部略図と亀裂損傷の発生状況

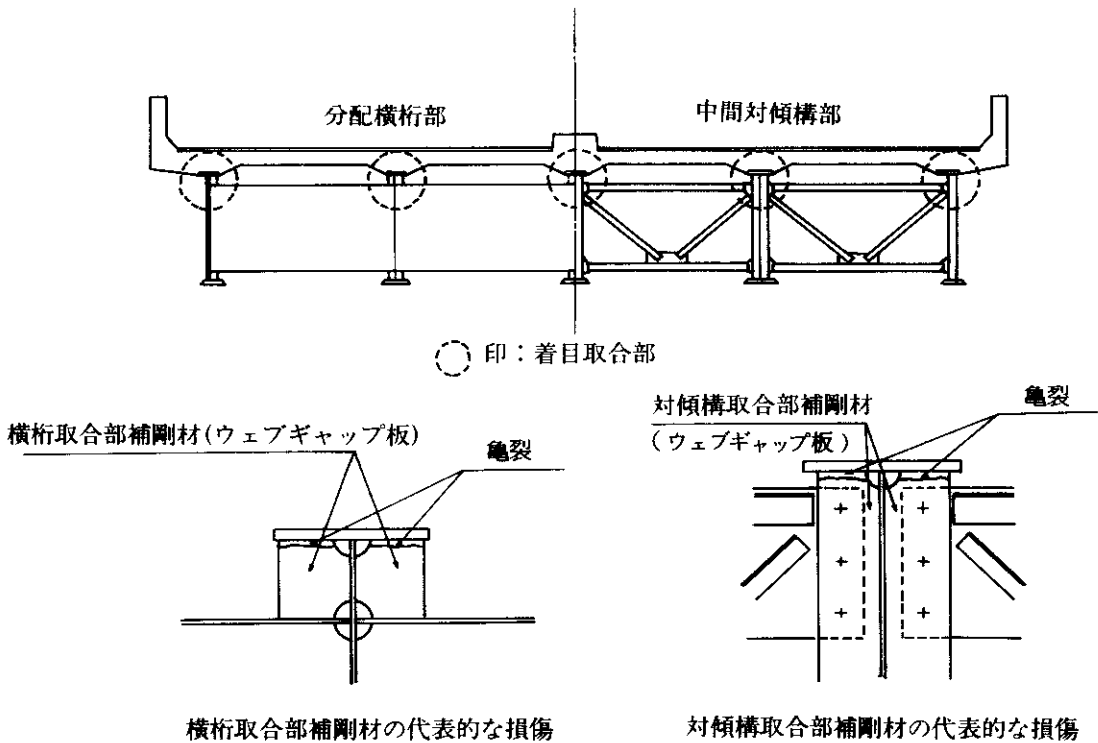


図-2 主桁と分配横桁・対傾構との取合部および亀裂損傷の発生状況

## 1 亀裂損傷の概要

### 1-1 ガセット部

ニーブレス形式の端横桁を有するRC床版鋼I桁橋において、桁端部横構取付ガセット近傍の腹板に亀裂損傷が発生している。桁端部横構取付ガセット部の略図と亀裂損傷の発生状況を図-1に示す。

発生している亀裂の種類は次に分類される。

- ① 端支点上垂直補剛材と腹板の溶接部に沿った鉛直方向亀裂
- ② 横構取付ガセットと腹板の溶接部に沿った水平方向亀裂

### 1-2 ウェブギャップ部

RC床版鋼I桁橋の分配横桁を主桁に取り付ける補剛材および対傾構を主桁に取り付ける垂直補剛材の頂部溶接部において亀裂損傷が発生している。主桁と分配横桁および対傾構との取合部の亀裂損

傷の発生状況を図-2に示す。

発生している亀裂の種類は次のように分類される。

- ① 補剛材と主桁上フランジの溶接部に沿った水平方向亀裂
- ② 補剛材のスカラップより斜め方向に走る亀裂
- ③ 補剛材と主桁腹板の溶接部に沿った垂直方向亀裂
- ④ 主桁上フランジと腹板との溶接部の溶接線方向亀裂

## 2 損傷発生原因の分析

### 2-1 ガセット部

当該部の亀裂損傷の発生原因を究明するため、FEM解析と模型実験による検討を次により実施した。

### 2-1-1 FEM解析

床版を含めた全体モデルを用いて、輪荷重によって発生する橋脚梁部の変形に注目して、橋梁各部の全体的挙動を把握することとしたものである。なお、各部位に作用する局部応力については、着目する部位を含む部分モデルを用いて検討している。解析にあたっては、亀裂が発生している実橋を対象としており、橋梁諸元を次に示す。

形式：単純合成鋼I桁橋  
 支間長：40.8m  
 幅員：18.0m  
 橋脚形式：RC単柱

なお、下横構および端横桁の形式を、図-3示す。また、着目している支点部の支承は1本ローラ支承である。

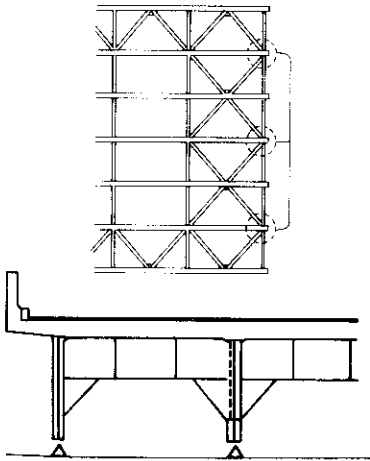


図-3 下横構および端横桁の型式

全体モデルの活荷重（TL-20、衝撃なし）荷重は、着目する腹板に最も大きな応力を生じさせるよう配慮して荷重位置を定めている。また、活荷重荷重による支点反力をRC単柱橋脚に作用させた時に生ずる、下部工の支点沈下に伴う鋼桁への影響も考慮している。

FEM解析の主な結果は次のとおりである。

- ① ガセットプレートのスカラップ付近において、活荷重荷重状態の横構軸力により局部応力が発生する。

- ② 支点部ガセット付近の構造は、風を中心とした横荷重に対して設計されるのが一般であるが、この部分には活荷重の作用または支点沈下によってもかなり大きな応力が発生する。

その主応力度の最大値は、ガセットプレート部で $\sigma \approx 940 \text{ kg/cm}^2$ 、主桁腹板部で $\sigma \approx 2,050 \text{ kg/cm}^2$ である。特に、主桁腹板に局部的な板曲げ応力（腹板の応力度の符号が表裏で逆の状態）が発生している。

- ③ 単柱橋脚の変形に伴う鋼桁着目部に発生する応力度は、活荷重により生じる応力度を軽減させるように作用する。

以上の結果から、桁端部横構取付ガセット部の亀裂損傷は、活荷重により生ずる横構軸力に起因するものであり、局部的に断面欠損箇所となるスカラップの構造が、応力の伝達上問題であると考えられる。なお、横構に生じている軸力は、1.6tであり、腹板の面外変形量は0.13mm程度である。

### 2-1-2 模型による疲労実験

実橋における当該部の応力状態は複雑であるが、FEMの解析結果より次の事項が判明した。

- ① 損傷箇所附近での応力レベルが高いのは、ガセットプレートスカラップ付近の主桁腹板応力が卓越している。

- ② その腹板応力は、板の面外曲げ応力である。

これらの解析結果を考慮すると、主桁腹板に面外曲げ応力を発生させる外力に着目すれば、おね実橋の損傷部の応力状態が把握できるものと考えられる。したがって、本実験では、横構から作用する軸力のうち、主桁腹板に直角方向成分にのみ着目し、図-4に示す実物大のガセットプレートとスカラップ、横構および垂直補剛材からなる現状構造の部分模型（3体）と補強構造部分模型（2種類×3体）を製作し、疲労実験により損傷部付近の応力状態を確認することとしたものである。

疲労実験から得られた疲労強度を図-5に示す。この結果、現状模型では、横構軸力3.5t、繰返し数26万回で、スカラップのまわし溶接ガセット止端部で亀裂が検出された。

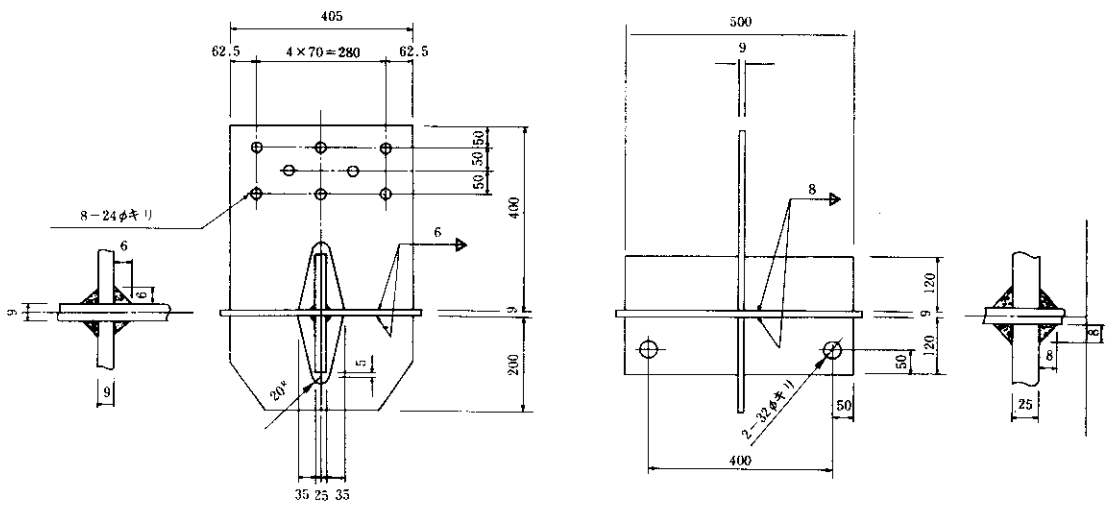


図-4 ガセット部疲労実験模型（現状構造）（単位:mm）

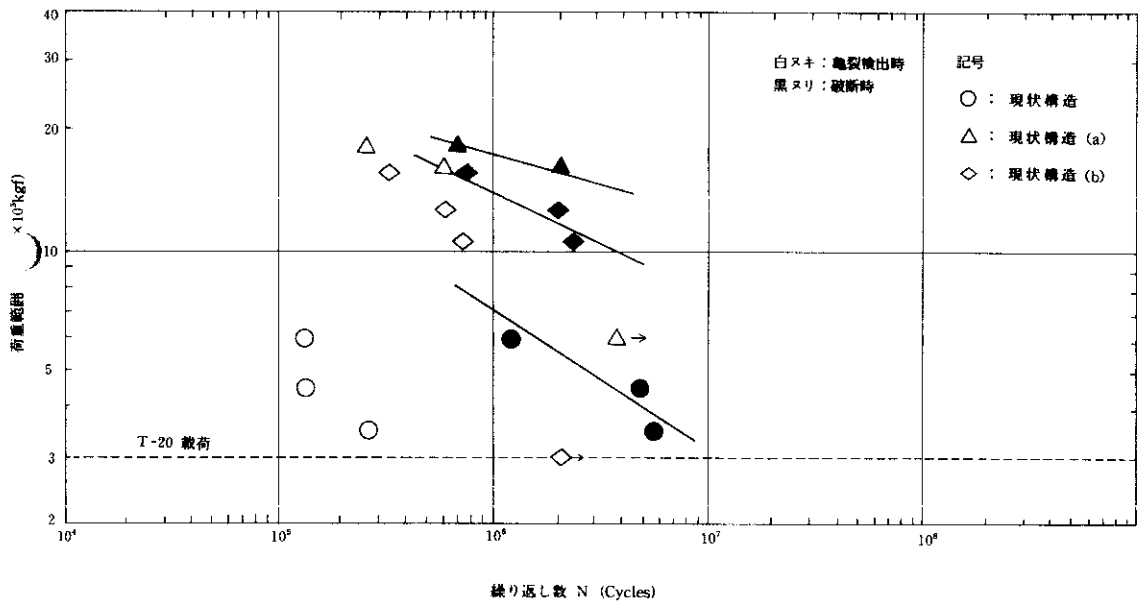


図-5 ガセット部の疲労強度

実橋モデルの静的応力解析によると、20tトラックを想定した場合には、横構からの面外力は約2t(活荷重の影響1.6t、支点沈下による影響0.4t)である。しかしながら、実際の橋梁においては、これ以上の重量車両が通過し、衝撃などの影響があることを考慮すると、実橋の現状構造においては、活荷重による疲労損傷発生の可能性が十分にあることが確認されたものと考えられる。

実橋に採用している桁端部の横構取り付けガセットプレートと腹板の取合部の構造では、ガセットプレートと支点上の垂直補剛材が交差するスカラップ部の腹板の面外剛性が低いため、外力を受けると腹板に大きな変形が生ずることになる。このため、ガセットプレートのスカラップまわし溶接部および支点上の垂直補剛材の腹板への取り付け溶接止端部に大きな応力が発生し疲労亀裂が発生することが明かにされたものと考えられる。

## 2-2 ウェブギャップ部

昭和40年代に建設されたRC床版鋼I桁橋に亀裂損傷が多く発生している。当時の標準的な主桁間隔は3.85mであり、コンクリート床版厚さは18cmである。損傷の実態を考慮すると、ウェブギャップ部の亀裂損傷の発生原因は、主桁上フランジの首振りによる影響や主桁間の相対変位差による影響などが考えられる。また、疲労実験およびFEM解析結果より考察すると、疲労に対する影響は、主桁相互の変位差よりも首振りによる影響の方が大きいことが判明している。<sup>2)</sup>

また、FEM解析結果によると、主桁上フランジの自由端近傍では $2,000\text{kg/cm}^2$ を越える大きな主応力が発生し、スカラップ近傍でも応力集中や応力の乱れが発生していることが判明している。

## 3 補修・補強方法の検討

### 3-1 ガセット部

#### 3-1-1 補強構造

損傷原因を取り除いて構造物の健全性を確保するための種々の補強方法<sup>3)</sup>が検討された。その結果、施工性および工費等から補強構造は、補強板取付

け構造を採用することとしたものである。補強板の取付け方法には、溶接接合と高力ボルト接合が考えられるが、実橋の構造および寸法では高力ボルト接合に必要な孔明け等の施工が困難であるケースが多い。そのため、溶接接合を採用することとしたものである。

補強板はガセット上面に取り付けることとし、補強構造は、図-6に示すように、施工空間の余裕量に応じて次の2種類を採用している。

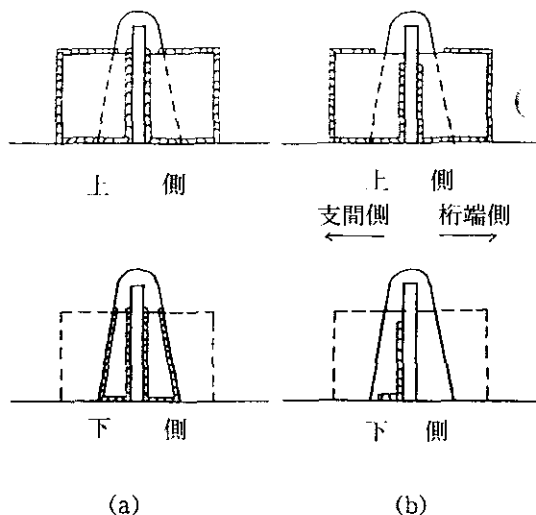


図-6 ガセット部補強方法

- (1) 補強構造(a)は、全周すみ肉溶接によるものであり、ガセットプレートのスカラップ部に十分な縁端距離があり、スカラップの拡孔が可能で、かつガセットと下部工天端間に施工空間を確保できる場合に適用する構造である。
- (2) 補強構造(b)は、主桁およびガセット部等の寸法の違いにより、全周すみ肉溶接が不可能な場合に適用するため、桁端側下面の溶接の一部と上面・下面のまわし溶接を省略した構造である。

#### 3-1-2 疲労実験

亀裂損傷発生原因の分析に適用したのと同じ方法により補強構造(a)、(b)の疲労強度を疲労実験により確認した。この実験により図-5の疲労強度が得られたものであるが、補強構造(a)、(b)ともに、

現状構造に比べ著しく疲労強度が改善されていることが判かる。亀裂検出時の荷重レベルでも予備試験の結果から定めた目標値荷重3t、繰り返し数200万回を大幅に上回っている。

また、補強構造(a)、(b)の疲労強度に大差はなく、まわし溶接をしない補強構造(b)でも、現状構造のものと比較して、時間強度評価で約40倍に改善されている。亀裂の検出から破断に至るまでには、約10倍の繰り返し載荷余裕が確認できていることから判断すると、実橋においては、補強構造(b)による方法を適用すれば十分な効果が達成しうるものと考えられる。

### 3-2 主桁と分配横桁との取合部（ウェブギャップ部）

#### 3-2-1 補強構造

ウェブギャップ部の板厚は、現状構造では $t=9\text{mm}$ が採用されているが、補強目的を達成するためには $t=19\text{mm}$ が必要であり、また、スカラップは応力集中を起こす主要な原因となることが判明している。<sup>1)</sup>

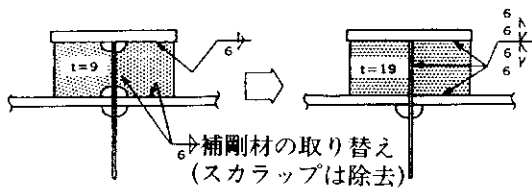


図-7 ウェブギャップ部の補強方法

ウェブギャップ部の板厚を $t=19\text{mm}$ とした場合、溶接量も板厚に見合うサイズとしなければならない。しかしながら、完全溶け込み溶接を採用する場合、溶接熱により主桁上フランジとRC床版との間にすき間が生ずる可能性がある。<sup>4)</sup> この問題はすみ肉溶接を採用にも同様に発生する。そこで、溶接による変形を少なくするため入熱量を減らす補強方法の採用が必要である。ここでは、この問題に対して図-7に示すように、部分溶け込み溶接に

よる補強方法を採用してこの問題を解決している。

#### 3-2-2 疲労実験

補強構造に採用される部分の溶け込み溶接の確実性を確認するため、ウェブギャップ部の実物大モデルにより、疲労実験を実施している。疲労実験に採用した供試体の構造を図-8に示す。疲労実験は、実橋でのウェブギャップ部の応力状態を再現するように工夫し、曲げスパン1,000mmの3点曲げ方式にて実施している。

ウェブギャップ部の溶接方法は、脚長6mmの部分溶け込み溶接とし、ルートギャップ量は、実橋での施工可能な値を想定して、1、2、3mmの3種類としている。補強溶接後のウェブギャップ部の疲労強度を把握するとともに、施工時に避けられないルートギャップの存在が疲労強度におよぼす影響

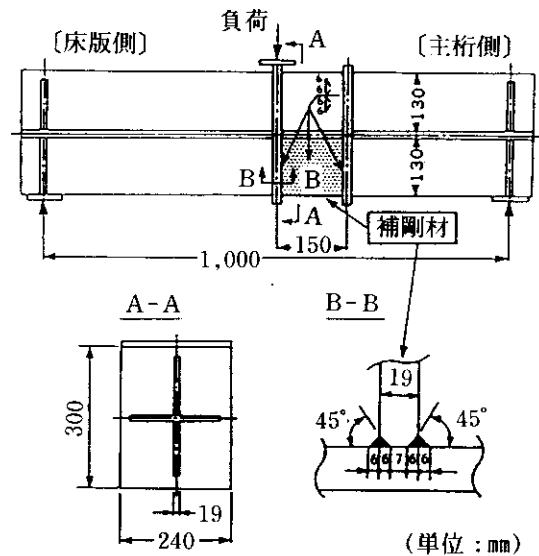


図-8 ウェブギャップ部疲労実験模型

についても確認できるように配慮したものである。

この実験より得られたウェブギャップ部溶接継手の疲労強度を図-9に示す。疲労亀裂起点部の状況から、ルートギャップ量が1mmおよび2mmの場合には、溶接止端部破壊とルート部破壊の両方の破壊形態が見られる。また、ルートギャップ量3mmの場合には、ルート部の溶け込み状態が良好である

ためか、止端部破壊が多い傾向にある。しかしながら、破壊形態には関係なく、ルートギャップ量1、2、3mmとも疲労強度に大きな差異は認められない。

実験で得られたウェブギャップ部の疲労強度と大型車の軸重頻度分布の実測値<sup>9)</sup>から、修正マイナー則により累積疲労損傷度について検討した所、損傷度は小さく、ここで採用した溶接方法で必要

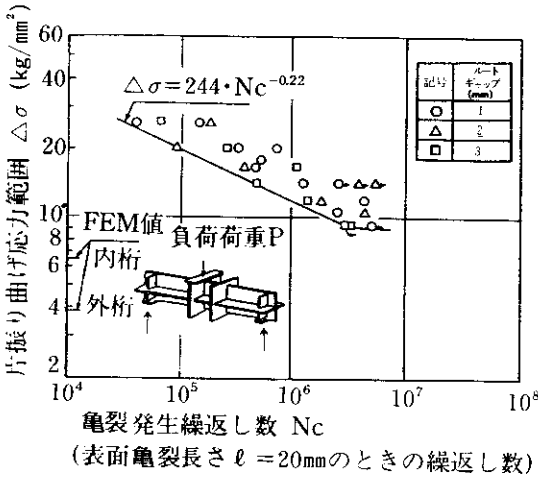


図-9 ウェブギャップ部の疲労強度

な健全性が確保されているものと考えられる。

### 3-3 主桁と対傾構との取合部

この部分に発生している疲労亀裂損傷は、主桁と分配横桁との取合部の補剛材に発生している疲労損傷と発生機構が類似しており、その発生原因も同じであると考えられる。このため、前項の検討内容を参考に図-10に示すような補修方法を採用することとした。なお、分配横桁との取合部に比べ応力度はかなり小さいため疲労実験等による確認は省略することとした。

## 4 現地計測と試験施工

現場溶接による補修・補強工事であるため、試験施工に先立ち、損傷発生個所の振動加速度、ひずみ量、亀裂開口変位量、主桁上フランジの首振り量などの諸要因を事前に現地計測により把握することとした。

これらの要因の測定は、一般車走行により、昼間の交通規制なし、夜間の交通規制“あり”と“なし”の3通りの条件を想定して実施している。

### 4-1 ガセット部

ガセット部で典型的な疲労亀裂が生じており、損

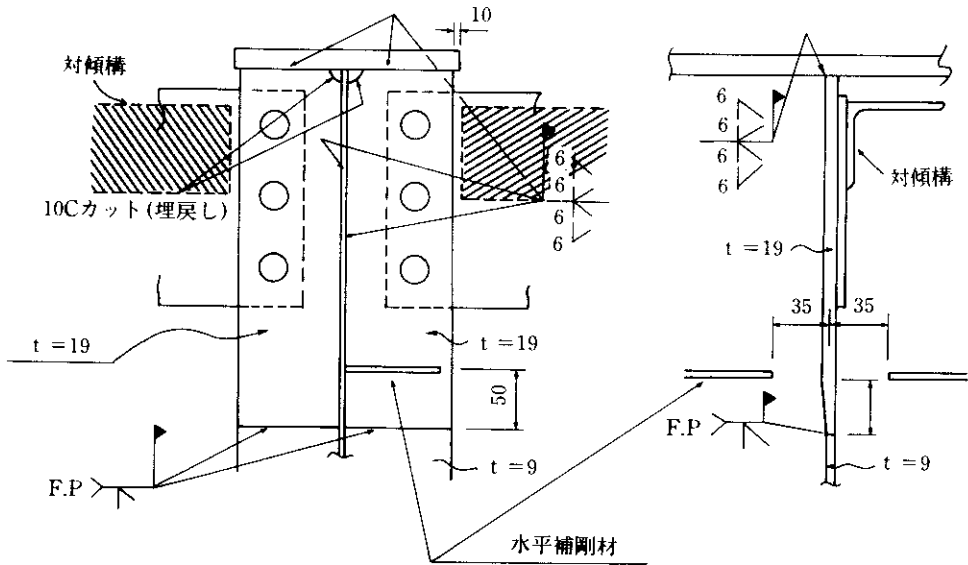


図-10 対傾構部の補強方法 (単位: mm)



傷原因究明のための理論解析のモデルとして採用した橋梁（神G-106桁の神P-107橋脚）上において、提案された補修、補強方法を適用してその施工性を確認するための試験施工を行なった。

#### 4-1-1 現地計測結果

##### (1) 振動

ガセット部において振動加速度および振動変位を測定した結果は次のとおりである。

① 振動加速度は、橋軸方向において3Hz、60Hz前後の振動が卓越し、最大加速度で0.03G、橋軸直角方向においては3Hz前後の振動が卓越し、最大加速度は0.04Gである。また、鉛直方向では、卓越振動数が60Hz前後であり、最大加速度は0.08Gである。

② 振動変位は、いずれの方向においても小さく最大値でも0.08mm程度であった。

振動加速度、振動変位ともどの部位においても許容値<sup>9)</sup>を下回り、現場溶接施工上の支障とはならないものと判断される。

##### (2) 亀裂部開口変位量

供用中の橋梁には、走行荷重により振動や変動応力が発生する。このため亀裂開口部には相対的な変動変位を生じ、溶接時の割れの原因となることがある。そこで、補修溶接を施す必要のある亀裂部の開口変位量を測定し、その値が現場溶接施工に支障とならない範囲内であるかどうか確認することとしたものである。

計測は、図-11に示すように、腹板を貫通する亀裂をはさんでクリップゲージを設置して行っている。

測定された振動変位波形の一例を図-12に示すが、振幅が小さく周波数の大きな3Hz前後の振動と、振幅が大きく周波数の小さい0.3Hz前後の振動が重複して観測されている。最大振幅は、横構を取り付けたままの状態では0.24mm程度である。

また、交通状況と最大亀裂開口変位量の関係を図-13に示す。横構設置状態でのこれらの結果を考慮すると、交通供用下の溶接補修にあたって、一般の低水素系溶接棒を使用した場合には、溶接割れを起こす危険性があると考えられる。そこで、溶

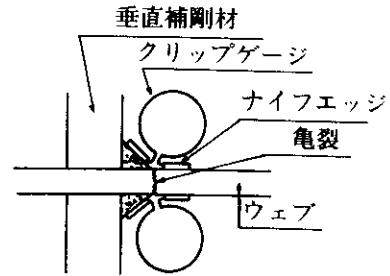


図-11 ガセット部亀裂開口変位測定法

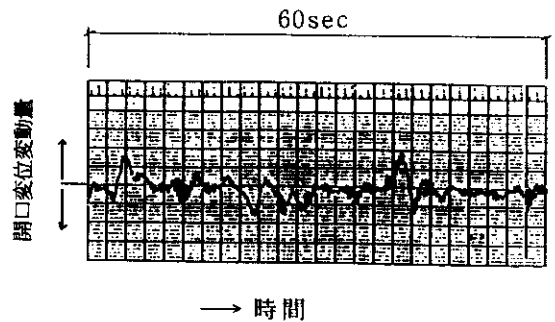


図-12 ガセット部亀裂開口変位変動量

接時には横構との連結を解放し、走行荷重による影響を少しでも軽減することが望ましいものと考えられる。

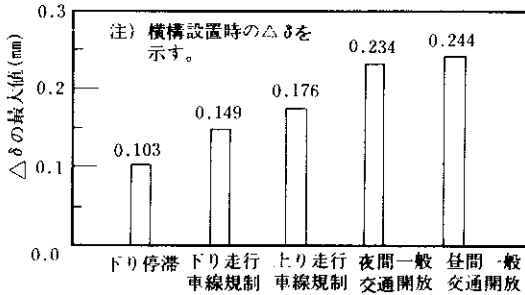


図-13 交通状況と最大亀裂開口変位量

#### 4-1-2 試験施工による確認

実橋に適用したガセット部の補強構造を図-14に示す。補強構造(a)、(b)による補強工事を試験的に実施した結果、次のことが判明した。

- (1) 亀裂部の補強は、完全溶け込み溶接としたものであるが、補修溶接の作業スペースを確保するために、現況のスカラップを35mmから75mmに拡孔すれば十分施工できる。
- (2) 横構の取りはずしと再設置は比較的容易である。また、補強板取り付けのためにニーブレスウェブ下端部を切断することが必要となるが、この作業はさほど支障なく行うことが

できる。

- (3) ガセットプレートの切断および再設置作業には長時間を要する。
- (4) 補強構造(a)、(b)とも補強板取り付けに支障となる問題はない。なお、補強構造(b)では途中で溶接を止めることとなるが、そのタイミングの判断およびグラインダー仕上げに多少の時間が必要である。
- (5) 現場溶接やガウンジングによる熱は、既設の高力ボルトに悪影響とはならない。また、施工後の周辺部に異常な変形を与えるものとはならない。
- (6) 溶接の品質管理は浸透深傷試験により確認しているが実用上の支障はない。

以上のように狭隘部の施工にもかかわらず、ほぼ期待通りの成果がえられている。補強板取り付けによる構造の改善状況を確認するために、亀裂補修前、補修後および補強板取り付け後に、TL-20 載荷によるひずみ計測を実施し、補強板取り付けにより十分な効果が得られていることを確認している。

#### 4-2 ウェブギャップ部

主桁と分配横桁との取合部補剛材に典型的な疲労亀裂を生じている神G-335桁を用いて試験施工を実施した。この橋梁の諸元を次に示す。

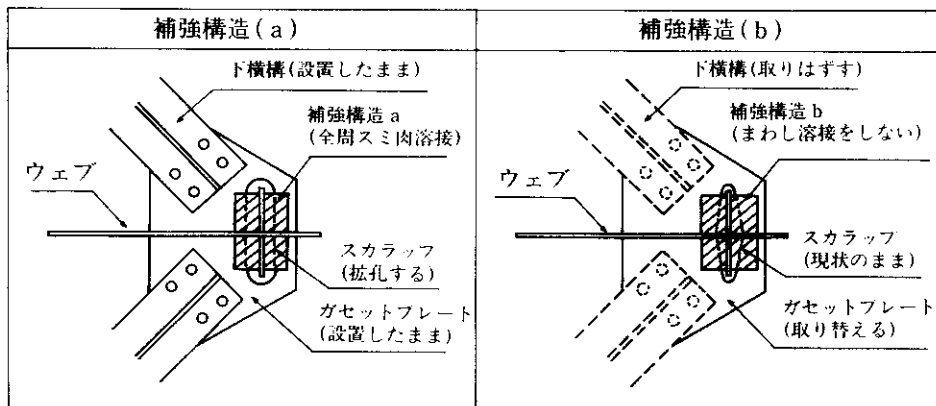


図-14 ガセット部の試験施工

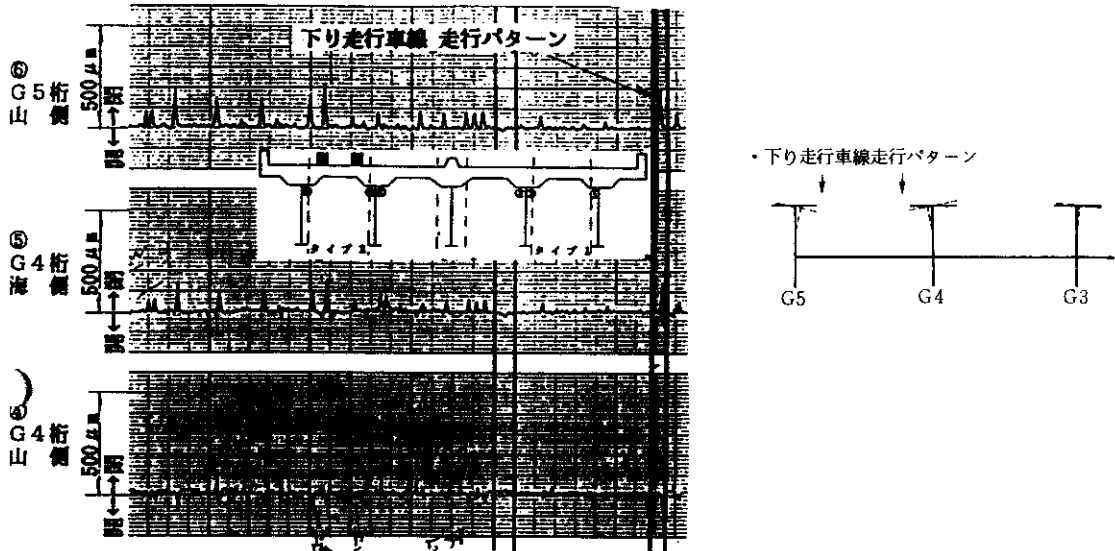


図-15 主桁上フランジの首振り現象

形式：単純合成鋼 I 桁橋  
 支間長：25.0m  
 幅員：18.0m  
 主桁間隔：3.85m  
 床版厚：18.0cm

振動加速度の最大値は0.08G(半振幅)であり、2~4Hz程度の低周波領域の振動が卓越している。4Hz前後の振動は桁の一次モードの固有振動に起因し、3Hz前後の振動は大型車のバネ振動に起因する強制振動と考えられる。

#### 4-2-1 現地計測結果

##### (1) 首振り量

ウェブギャップ部主桁上フランジの首振り量を把握するため旧ウェブギャップ板を撤去し、腹板をはさんだ上フランジ両端の鉛直方向変位量を測定した。その結果を図-15に示すが、逆位相の変形が発生しており首振り現象の発現が確認される。

最大首振り量は、耳桁で0.4mm、中桁では0.3mmである。なお、本線の通行車面を規制すると、ほとんどこの首振り現象は生じない。

##### (2) 振動

上フランジ下面に加速度計を設置して、当該部の振動加速度を計測した結果は次のとおりである。

この計測結果より、振動加速度は現場溶接施工上、さほど問題となる値<sup>9)</sup>ではないと考えられるが、首振り量はかなり大きい値であるといえる。そこで、実際の補強工事の施工においては、次の点に配慮して行うこととした。

- ① ウェブギャップ板の取り替え時にも、腹板をはさんで左右どちらかに少なくとも1枚はウェブギャップ板があること。
- ② 外桁には外桁補強リブを取り付けること。
- ③ 新ウェブギャップ板の取り付けにあたっては、主桁上フランジと主桁ウェブの溶接を先行させること。

これにより供用下での現場溶接は、構造上から

も施工上からも大きな支障なく実施しうるものと判断される。

#### 4-2-2 試験施工による確認

ウェブギャップ部の補強構造の実橋への適用性を確認するため、次により試験施工を実施した。

9mmの旧ウェブギャップ板をガス切断後、切断面をグラインダー仕上げする。その後、板厚19mmの新ウェブギャップ板を脚長6mmの部分溶け込み溶接により設置するものである(図-7参照)。なお、ルートギャップ量は、事前の実験結果、施工性、他の部材への影響等を考慮して最大2mmに抑制している。

この試験施工はほぼ順調に行われたが、狭隘部の作業であり、旧ウェブギャップ板の撤去にあたってはきわめて困難な作業となることから、その施工および品質の確認方法等については、さらに改善することが必要であると考えられる。

#### あとがき

RC床版剛I桁橋の主桁と分配横桁・対傾構取合部補剛材および桁端部横構取付けガセット部の亀裂損傷発見以来、その発生原因の究明、補修・補強工法の適用性確認の検討を進めた。ほぼその全容が解明され、昭和62年度には試験施工が実施され、一応の成果が得られたことを報告したものである。その成果をもとに、昭和63年度からは、計画的な補修・補強工事に着手しているが、現地作業の実施面においては、まだ種々の問題が残されているものと考えられる。

現在、標準的な施工方法をまとめた「補修補強要領」を作成し、現場での施工上の問題についての実態把握に努めているものであるが、今後は現場に則した汎用性のあるものになりたいと考えている。

末筆ながら、これまでに損傷の発生原因究明を始め、補強方策の検討まで熱心にご指導を頂いた方々、特に、「鋼橋の補修に関する調査研究委員会」(委員長 西村昭神戸大学教授)の委員各位に深謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 北沢、大西、川北、林：鋼I桁主桁と横桁あるいは対傾構との取合部の疲労損傷とその対策、技報第6号、(財)阪神高速道路管理技術センター、1986
- 2) 災害科学研究所、阪神高速道路高速公団：合成I桁橋における主桁と横桁の取合部の疲労強度に関する検討報告書、昭和61年3月
- 3) 阪神高速道路公団、石川播磨重工業(株)：I桁端部横構取付けガセット補修法検討業務、昭和62年1月
- 4) 川崎重工業(株)：鋼桁補修工事(60-1-神)報告書、昭和61年3月
- 5) 阪神高速道路道路、設計荷重(HDL)委員会報告書、阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究、昭和61年12月
- 6) 阪神高速道路公団、日立造船(株)：溶接施工性に関する検討業務、昭和57年3月