

【技術ノート】

疲労亀裂を生じた鋼アーチ道路橋の 実橋調査と補修

Detection and Repair of Fatigue Damage in Roadway Arch

水 木 彰 *
Akira MIZUKI
中 野 政 信 **
Masanobu NAKANO
前 田 研 一 ***
Kenichi MAEDA
作 田 孝 行 ****
Takayuki SAKUTA
町 田 文 孝 ****
Fumitaka MACHIDA
富 沢 光 一 郎 ****
Kouichiro TOMIZAWA

1. まえがき

近年、わが国においても道路橋の疲労によるものと思われる損傷事例が数は少ないが何橋かでてきた。本報告は、19年の歳月の間、塗装以外の補修は行われておらず、近年の交通量の増大、ダム建設に伴う重量車輛の通過時の振動および部材の不連続等により一部の部材にクラックが発見された2鉸アーチ橋（図-1）の目視点検、探傷試験、ガセット部の主応力解析などによる原因調査、実橋載荷試験（静的載荷試験、走行試験）および補強案の策定、補修について報告するものである。

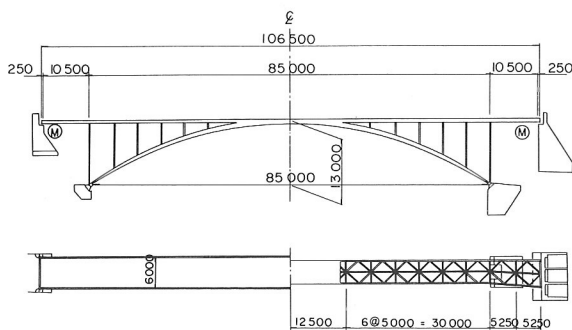


図-1 一般図

2. 目視点検と浸透探傷試験および応急補修

2-1 目視点検と浸透探傷試験

本橋におけるクラックは、巡回中に目視により発見され、補剛桁とアーチリブを介する中間支柱の各々への取付けガセット部（写真-1）および中央径間と側径間の結合部である端支柱上補剛桁腹板（写真-2）に生じていた。

そのため、中間支柱取付けガセット部および端支柱上補剛桁腹板に対し浸透探傷試験を行ったので、その結果を図-2に示す。試験の結果、中間支柱取付けガセット

部で最大65mm、端支柱上補剛桁腹板で最大185mmの亀裂が生じていることがわかった。

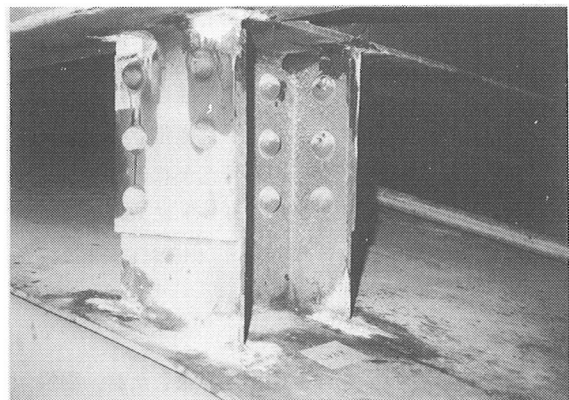


写真-1 中間支柱ガセット部のクラック

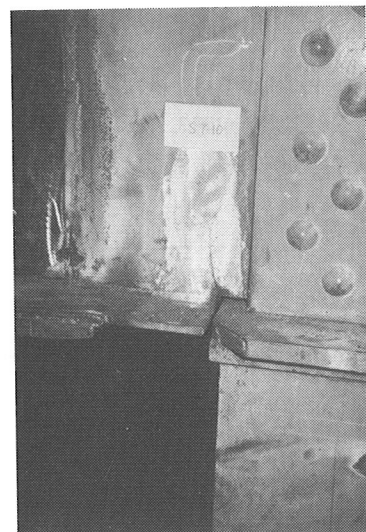


写真-2 端支柱上補剛桁腹板のクラック

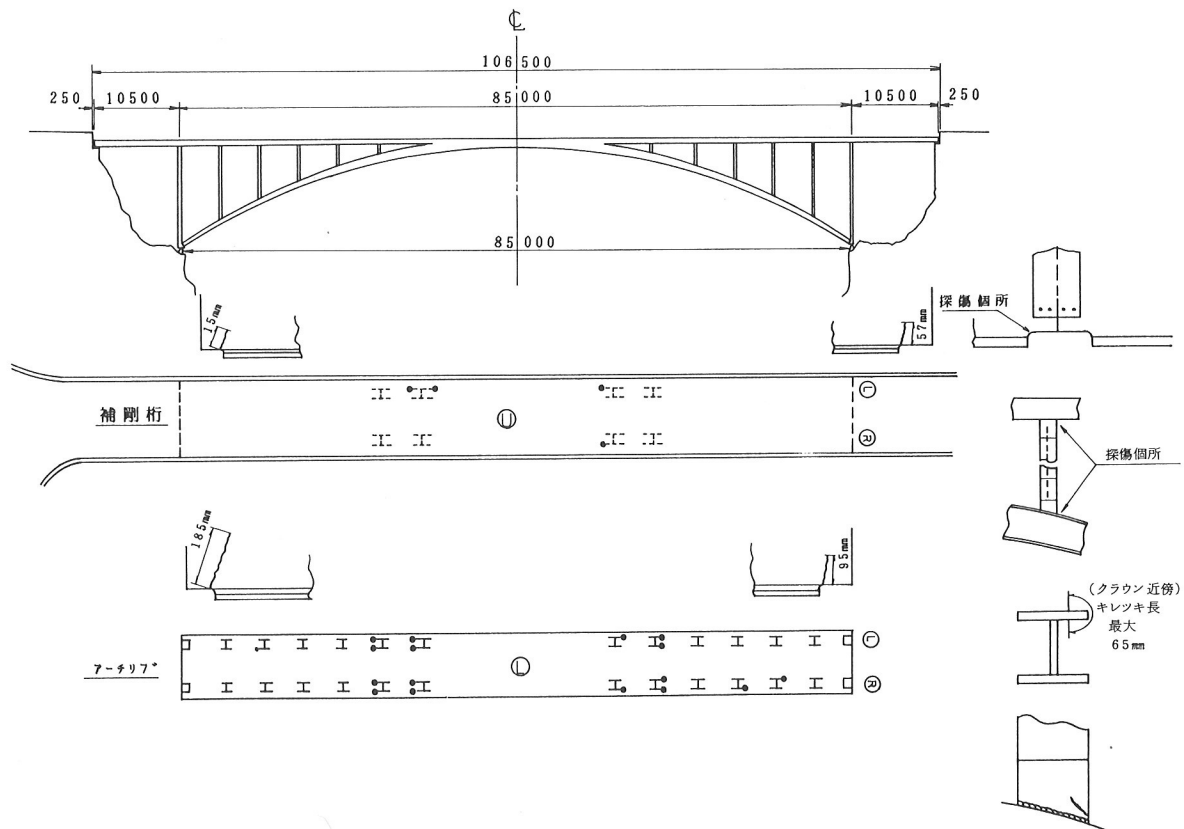


図-2 中間支柱ガセット部および端支柱上補剛桁腹板の浸透探傷試験

2-2 応急補修

図-2に示したクラックおよび亀裂は、微小な応力変動に対しても進行してゆく可能性があり、特に端支柱上補剛桁腹板の亀裂は低温ぜい性破壊につながる恐れがあったため、以下に示す応急的な補修を行った。

端支柱上補剛桁腹板の亀裂に対しては、図-3に示すように全ての端支柱の両側に鋼製ブラケットを設置し、側径間および中央径間の補剛桁の仮支点（線支承）とした。また、亀裂先端にストップホールを設け、進行を妨げる処置を行った。

中間支柱取付けガセット部のクラックや亀裂に対しては、図-4に示すように特に損傷がはげしいアーチクラウン付近のものについてガセットを追加し、曲率のあるガセット形状に改良した。この改良については曲げ剛性の増加に伴う2次応力による悪影響も予測されたが、あくまでも応急の処置として実施した。

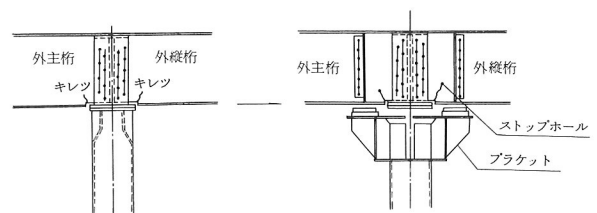


図-3 端支柱上応急補修図

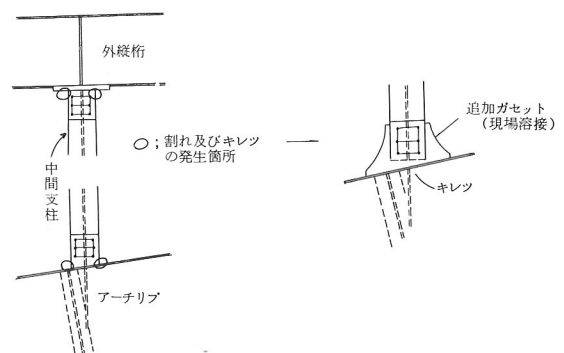


図-4 中間支柱応急補修図

3. 通過交通量の推移

本橋の断面交通量〔7:00～19:00, 推定昼夜率＝1.2(昼/夜)〕の推移を表-1に示す。この表から、供用(昭和38年)後、クラックの発見(昭和57年)までに、200万台程度(20年間として1日平均270台)の重量車輛の通過があったと考えられる。

表-1 通過交通量の推移

	12h 合計 (大型車)	前回比	43年比
昭和43年	379(不明)		
46	396(不明)	1.04	1.04
49	765(201)	1.98	2.02
52	894(186)	1.17	2.36
55	1097(269)	1.23	2.89

4. クラックの原因究明

4-1 中間支柱取付けガセット部

4-1-1 要因の推定

この箇所のクラックは、ほとんどの中間支柱取付けガセット部に生じ、しかも、鋭角側が全て深いなどの規則性があることを考えると、局部的な欠陥によるぜい性破壊とは思われない。また、延性破壊に至る程の過大な断面力が生じたとも思われない。

すなわち、繰り返り荷重によって生じた疲労亀裂と思われる。

本橋では、アーチ面内の変形に対し、取付け部をピンと仮定した設計計算を行っているが、実際には、曲げ剛性を有している構造のため、この曲げ剛性による2次応力から取付けガセットの鋭角側に応力が集中しやすい構造となっている。また、ガセット部の溶接は、設計疲労許容応力度の継手分類においてE等級という低い等級のものであり、このような継手の場合、施工が良好であったとしても残留応力がかなり大きい可能性がある。これらのことより、疲労が主因ではないと思われる。

なお、最近の研究によれば、溶接による残留応力等を考えると、平均応力は圧縮・引張にかかわらず、亀裂発生まではその影響が小さいといわれ、国鉄では、応力比ではなく、応力振幅で疲労強度を定めている¹⁾。ただし、圧縮応力が支配的な場合には、残留応力の解放などによって亀裂進展速度が遅く保守点検による対処が可能とこ

と、および、亀裂がある程度進展しても圧縮部材では耐力はそれ程落ちないこと等を考慮した割増しを行っている。

4-1-2 主応力解析

取付けガセット部の応力集中の検証を行うため、図-5に示すアーチクラウンに最も近い中間支柱取付けガセット部について、図-6に示す立体および平面モデルにおけるNASTRANによる主応力解析を行った。

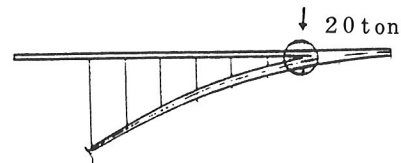


図-5 解析場所

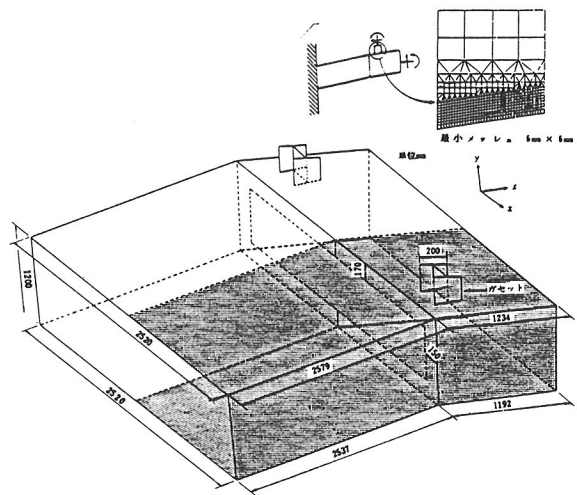


図-6 NASTRANによる解析モデル

解析結果の一部を図-7に示す。平面モデルによる解析結果をみると、応力集中は発生していないが、立体モデルの解析結果をみると、取付けガセット部の応力集中が非常に大きく、クラックが深く生じた鋭角側に絶対値最大の圧縮主応力が生じ、最大引張主応力との応力振幅も鈍角側に比較してかなり大きい。

これより、疲労亀裂の主因となる応力振幅がかなり大きいことがわかり、破壊要因が疲労破壊であることが裏付けられたと思われる。

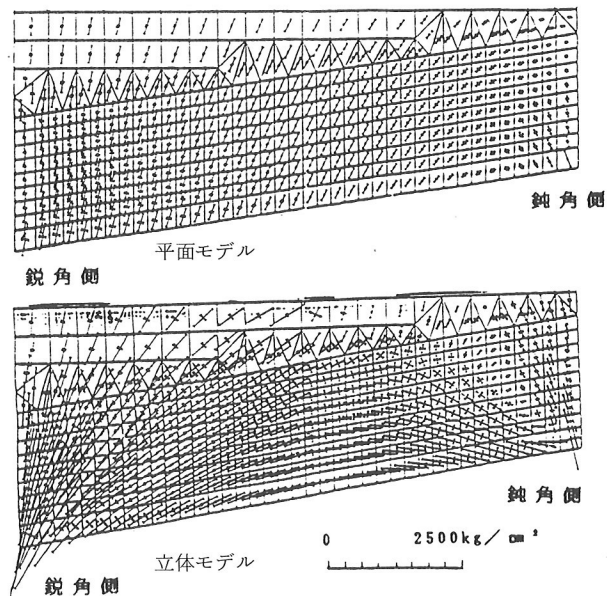


図-7 平面、立体モデルの主応力

4-2 端支柱上補剛桁腹板

このディテールに類似した箇所の疲労亀裂の発生事例は非常に多い。^{1),2)}すなわち、このような構造部では、曲げ抵抗が著しく小さくなった断面に拘束モーメントが生じた上に、切欠き部コーナーの応力集中が重ね合わされること、および、面外変形による2次応力（特に、本橋の場合、図-8に示すように横構の組み方が通常の場合と逆で、中桁に交点があることにより、橋軸直角方向の拘束が弱く、面外変形を生じやすい。）が生じやすいこと等が考えられる。その結果、応力振幅が大きくなり、溶接部ほどではないがガス切断による残留応力が分布することによって両振れであっても引張応力が支配的となって疲労亀裂が生じたものと考えられる。

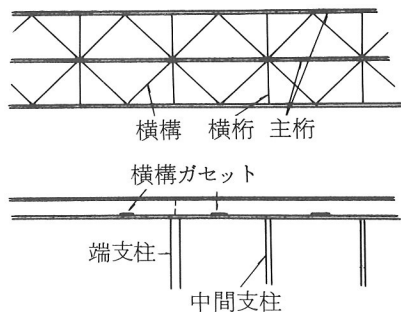


図-8 横構の配置状況

5. 実橋載荷試験

実橋試験は、応急的な補修工事のみでは、短期的な安全性しか確認されていないことを踏まえ、破損原因のより詳細な究明および長期的な安全性を持たせるための補強案の策定を目的として実施された。

これらの目的を満足するためには、構造全体の特性のみならず、局所的な応力、変形状態の把握も必要であり、構造解析結果との比較検討が容易であるように作用外力が明確な試験を行う必要があった。

以上のことを考慮に入れ、通行止めを余儀無くされたが、静的載荷試験と走行試験の2種について行うこととした。

なお、現橋では補剛桁両端の支点が可動支承であるが、将来の補修工法を踏まえ、圧縮方向のみ有効に働く硬質ゴムを桁端部橋軸方向に設置した場合についても試験を行った。

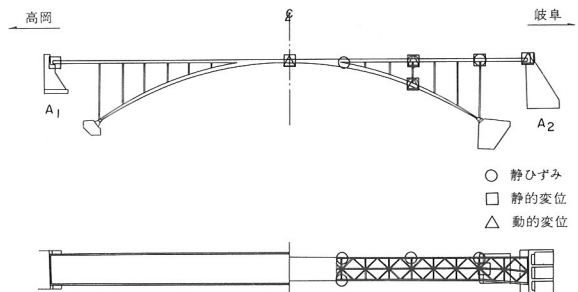


図-9 測定位置

5-1 静的載荷試験

静的載荷試験は、荷重車（20 ton/台）を橋面上に載荷し（中心載荷：4台、偏心載荷：2台）、図-9に示すように補剛桁、アーチリブの鉛直、橋軸および面外方向の静的変位とアーチリブ、中間支柱、中間支柱取付けガセットおよび端支柱上補剛桁腹板の静的応力および主応力分布の測定を行った。以下、測定結果の一部を示す。

5-1-1 静的変位

図-10にアーチ $\frac{1}{4}$ 点に荷重車4台（80 ton）を載荷した時の静的変位を示す。橋軸方向の移動を拘束しない時の橋軸方向変位は、 $\frac{1}{4}$ 点で補剛桁が約9mm、アーチリブが約20mm、鉛直方向変位は、補剛桁、アーチリブともに約36mmであり、各々計算値（実際の荷重と載荷位置を用いて平面骨組理論で計算した値）の40～50

％位となっている。また、橋軸方向の移動を拘束した場合の橋軸方向変位は、 $\frac{1}{4}$ 点で補剛桁が約 5mm、アーチリブで約 14mm、鉛直方向変位は、補剛桁、アーチリブとも約 28mm である。以上より、本橋の耐変形性能については、実測値が計算値の 50％位であるので問題はないと思われる。また、橋軸方向の拘束により、補剛桁、アーチリブの鉛直、橋軸方向およびそれらの橋軸方向相対変位を 60～80％に減少させられることがわかった。

なお、ここでは省略したが、アーチリブの静的応力も同様の傾向であった。

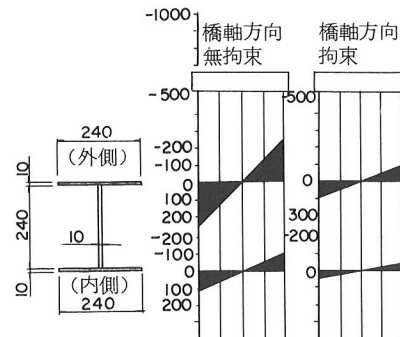


図-11 中間支柱の断面力分布

5-1-3 中間支柱取付けガセット部の主応力

図-12はアーチ $\frac{1}{4}$ 点に荷重車4台(80ton)を載荷した時の中間支柱(アーチ $\frac{1}{4}$ 点の支柱)取付けガセットの主応力分布を示すものである。橋軸方向の拘束が無い場合の主応力を見ると、他の取付けガセットでクラックが発生した付近では、 1700 kg/cm^2 の圧縮応力が導入されており、また、クラック発生した付近より離れるに従って圧縮応力が小さくなっている。これより、設計では取付け部をピン結合と考え、軸力しか伝達しない部材と考えていたが、実際には、曲げ剛度を取付けガセット部が有しているため、曲げの2次応力が発生していることがわかった。また、橋軸方向の拘束を行った場合には、クラックが発生した付近の応力を 1560 kg/cm^2 の圧縮応力に減少させ、取付けガセット部の主応力を低下させていることがわかった。

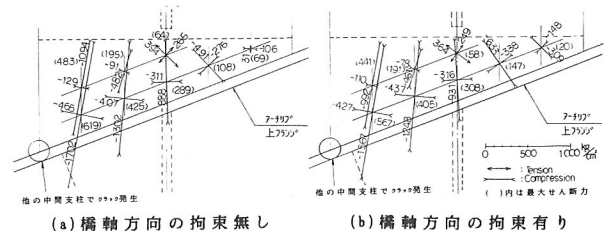


図-12 中間支柱ガセット部の主応力

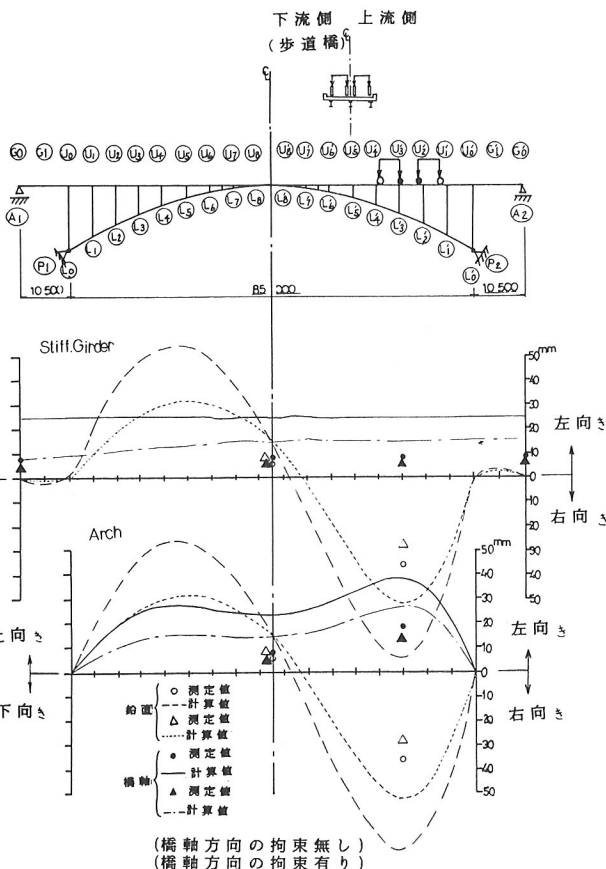


図-10 補剛桁、アーチリブの静的変位

5-1-2 中間支柱の応力

図-11に中間支柱の応力分布の一例を示す。橋軸方向の拘束を行うことにより、中間支柱の曲げ応力を最大50％程度まで減少させることができ、拘束による効果が十分あることがわかった。

5-2 走行試験

走行試験では、荷重車1台を走行させ、補剛桁、アーチリブの動的変位を測定した。図-13に測定結果の一部を示す。

荷重車の走行による動的増幅率は、橋軸方向の拘束が無い場合、橋軸、鉛直方向ともに比較的大きく、道路橋

示方書による(1+衝撃係数)の値1.148を上回る場合も見られ、変位だけではなく、断面力についても動的効果が比較的大きいものと思われる。

また、橋軸方向の拘束を行った場合に、橋軸、鉛直方向変位および橋軸方向の補剛桁とアーチリブの相対変位の動的増幅率を減少させる傾向のあることがわかった。

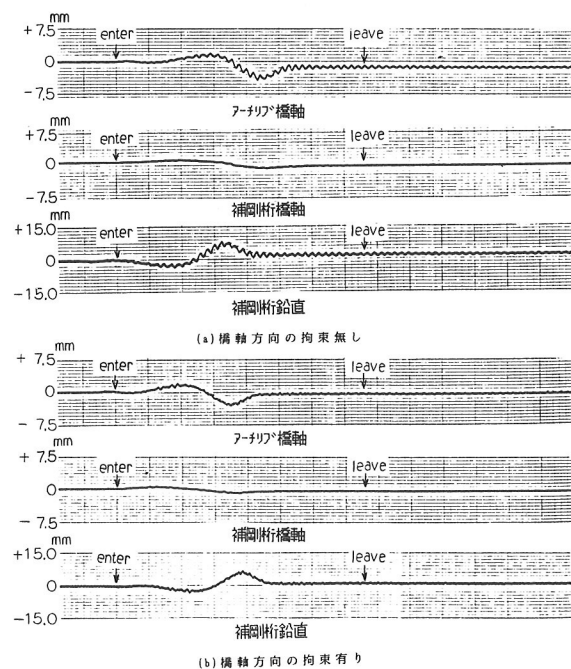


図-13 動的変位

6. 補強案の策定、補修

6-1 補剛桁橋軸方向移動の拘束

橋軸方向の移動を補剛桁両端で固定した場合、理論計算によると片端を固定した場合に比べ、中間支柱に大きな曲げモーメントが生じ、また、気温の変化による追従が行われず、温度による大きな断面力が生じる可能性がある。

次に、片端固定と両端可動の場合を比較すると、理論計算では、中間支柱の曲げモーメントを片端固定の場合減少させるが、固定した側の補剛桁に大きな軸力を発生させてしまう。

また、実橋載荷試験の結果をみると、橋軸方向の拘束を行った場合の方が中間支柱および取付けガセットの応力、静的変形および動的変位についても有効であることがいえる。

以上のことより、片端固定と両端可動の間であり、

アバットの耐力を考え、圧縮のみに働くゴム支承(温度変化による補剛桁の伸びを吸収するためMSストッパーを併用)、または、オイルダンパーの使用を図-14に示すように橋軸方向の拘束案とした。

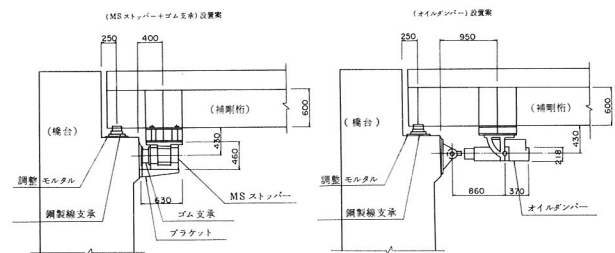


図-14 補剛桁橋軸方向移動の拘束案

両者の案を検討した結果、MSストッパーを併用したゴム支承案が、構造は若干複雑になるものの維持管理が容易かつ経済的であることから補修方法として採用された。

6-2 中間支柱ガセット部の補強

中間支柱取付けガセット部に生じたクラックは、前述のように支柱取付け部が剛結になっているため発生する2次応力(拘束モーメントによる曲げ応力)が高いレベルで繰り返されたための疲労亀裂と考えられた。

したがって、この2次応力の発生を抑制するための取付け部のヒンジ化と隅角部の応力集中を緩和するための補強ガセットの取付けとの2つの方法が考えられる。

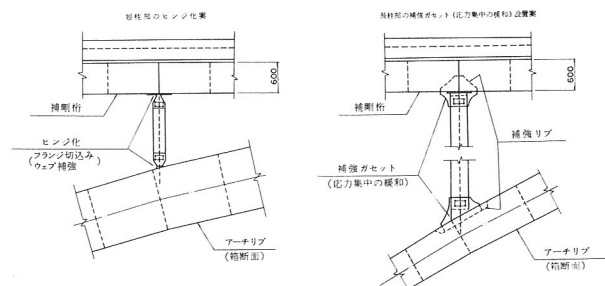


図-15 中間支柱ガセット部の補強案

この2つの方法に対し、短柱部(アーチクラウンから2本目まで)では、部材長が短かく支柱部材の持つ曲げ剛性を落とさない限り2次応力の低減はできないのでヒンジ化を行い、長柱部では、部材が長いことから取付け

部の曲げ剛性増加の2次応力に与える影響が少ないため補強ガセットの取付けを行う案が、図-15に示すように検討された。

しかしながら、圧縮域が支配的な応力集中であり、亀裂発生による残留引張応力の解放も期待できることなどから、補修の実施は見送られた。ただし、亀裂の進展について長期的に観察を継続することとされた。

7. あとがき

以上、橋体の一部に疲労亀裂が生じ応急的な復旧工事を終えた鋼アーチ道路橋について、今後の維持管理上の技術的な判断資料を得る目的で、調査を実施し、亀裂の原因究明と補強案の策定を行った。^{3), 4)}

現在のところ、補修工事を行っており、工事完了後、補強効果確認試験を実施する予定になっている。

最後に、本文を報告するにあたり、数々の御助言を頂いた富山県土木部の方々、並びに建設省土木研究所の

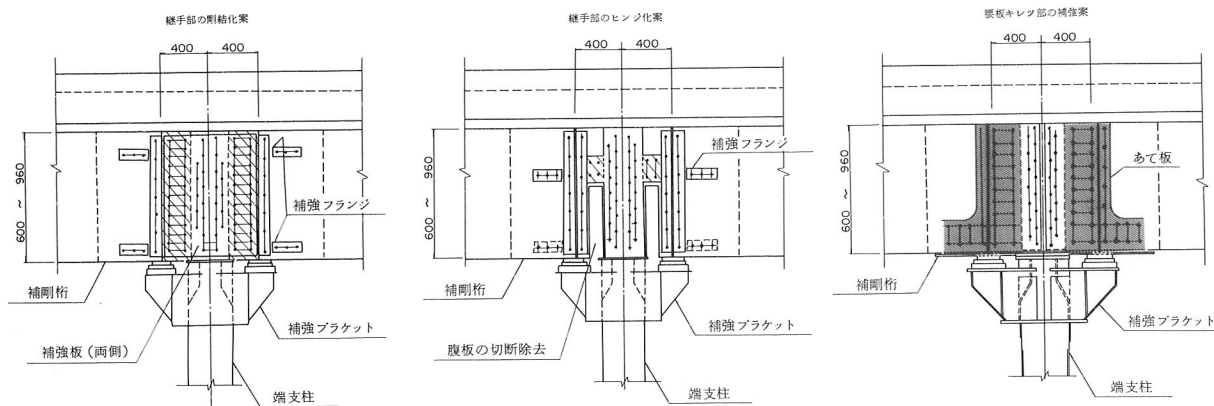


図-16 端支柱上補剛桁膜板の補強案

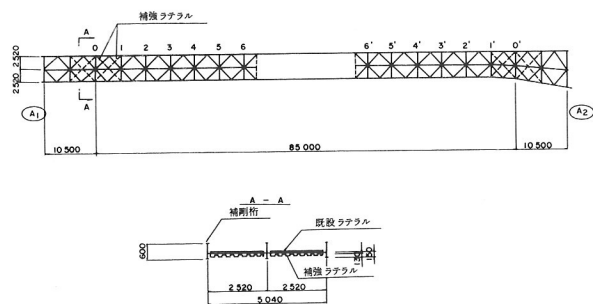


図-17 補強ラテラル設置位置図

6-3 端支柱上補剛桁腹板の補強

クラックの要因推定より、この箇所の亀裂も疲労亀裂と考えられ、対策案としては、図-16に示す継手部の剛結化案、継手部のヒンジ化案および腹板キレツ部の補強案の3案に、図-17に示す面外変形を抑制するための横構の増設を考えた。

種々の検討が加えられた結果、図-16の第3案が図-17の横構の増設とともに、補修方法として採用された。

佐伯彰一橋梁研究室長に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会鋼鉄道橋設計標準に関する研究委員会編：国鉄建造物設計標準解説，土木学会，1983.
- 2) 田島・阿部・佐伯・石黒・三木：溶接構造と疲労，土木学会誌，Annual' 81，1981.
- 3) 竹島・大田・作田・町田：疲労クラックを生じた鋼アーチ道路橋の実橋試験および補強案の策定について，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，1984.
- 4) 宮崎・関・富沢・前田：鋼アーチ道路橋に生じたクラックの原因調査とガセット部の主応力解析について，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，1984.