鋼製橋脚隅角部における疲労き裂対策について

仲野　悌弘

近畿地方整備局　近畿技術事務所　防災・技術課　（〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町11-1）.

近畿地整管内にて過去に重大な疲労による損傷が発見された橋梁に対して設けられた、橋梁ドクター参加による鋼橋及び鋼製橋脚隅角部の疲労損傷に関する対策委員会において得られた知見を体系的にとりまとめ、今後道路管理者が同様の損傷に直面した場合の鋼橋及び鋼製橋脚隅角部の保全の参考になるものと期待し、技術資料（案）として取りまとめた。

なお、委員会による検討及び審議結果は、鋼橋及び鋼製橋脚隅角部における疲労き裂損傷に特化したものであり、今回の成果は全国的にも貴重なものとなった。

キーワード　疲労き裂，鋼橋，鋼製橋脚，鋼製橋脚隅角部

1. 経緯

近畿地方整備局管内で過去に重大な疲労による損傷が発見された鋼橋及び鋼製橋脚隅角部に対して、それぞれ橋梁ドクター参加による委員会により検討が行われた。委員会による検討及び審議結果は、鋼橋及び鋼製橋脚隅角部における疲労き裂損傷に特化したものであり、全国的にも貴重な成果となった。そこで委員会において得られた知見を体系的にとりまとめ、道路管理者が疲労き裂損傷に対して迅速かつ適切に対策するためのマニュアルとして取りまとめることを目的とした技術資料（案）を作成することとなった。本論文はその中でも鋼製橋脚隅角部に関する技術資料について報告する。

2. 疲労き裂に対する対策方針と管理上の留意点

(1) 管理基本方針

鋼製橋脚を管理する上で、すべての鋼製橋脚（角柱タイプ）隅角部に対して、板組構造、板厚等の基本情報を事前に確認しておくことを原則とする。鋼製橋脚隅角部の疲労き裂損傷に対する維持管理方針は、「鋼製橋脚隅角部検討委員会」及び「浜手 BP 検討会」にて検討を行った、疲労き裂損傷に対する調査・検討結果を受けて、図－１に示す対応を実施する。なお、隅角部にき裂が確認された場合は、落橋に繋がる大きな被害が生じる可能性があることから、速やかに調査職員への報告を行い、き裂の除去等を行うことを基本とする。

これは隅角部のあて板補修を行う際、板組構造がWW以外の場合、隅角部の溶接線があて板によって隠されることや補修設計そのものに関係するからである。（図－２　観察孔の設置を参照）

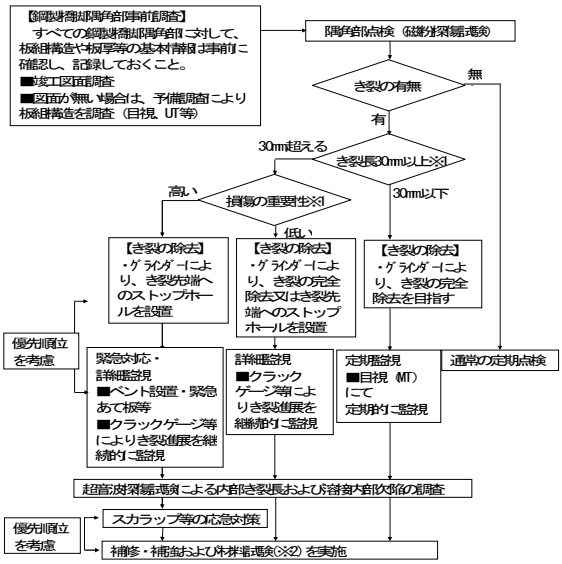

図-1　鋼製橋脚に対する維持管理フロー

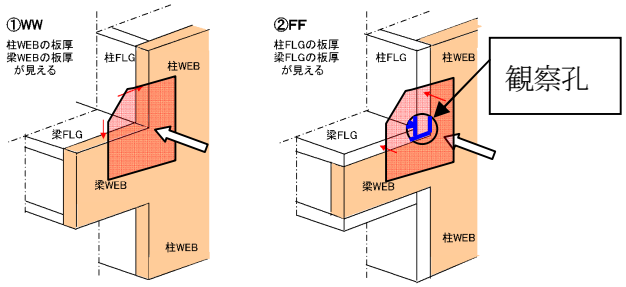

図-2　観察孔の設置

⑵ 点検時の主要着目箇所

一般的な鋼製橋脚隅角部における主要着目箇所を図－３に示す。ただし、図－３に示す範囲を越えて、疲労き裂損傷の発生が疑われる場合は、適宜、着目範囲を拡大して点検するよう定めた。

また、浜手バイパスの橋脚については別途主要着目点を定めている。

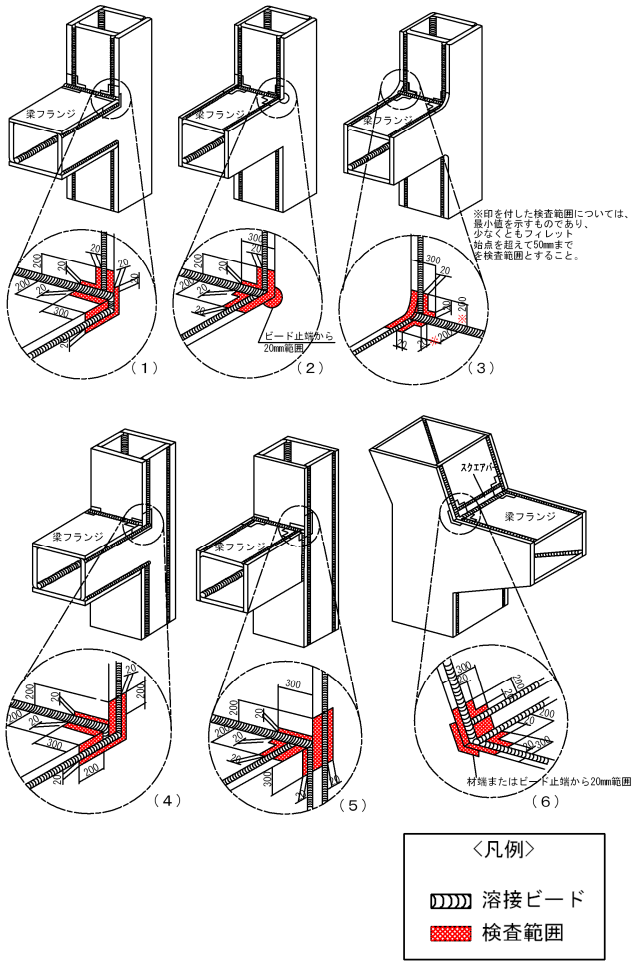

図-3　主要着目箇所

⑶ 磁粉探傷試験によるき裂確認

塗膜割れを発見した場合には、き裂の有無を確認するため、磁粉探傷試験（ＭＴ）を実施し、き裂の有無を確認する。き裂が確認された場合は、速やかに図－４に示すような流れで応急処置（削り込み、ストップホールの設置）を行う。

き裂は全長を除去することを基本とするが、貫通き裂の場合など、き裂の全長除去が出来ない場合は、ストップホールを設けることを原則とする。これはき裂先端に高い応力集中が生じているためであり、き裂確認後は応急対策として、き裂先端部の除去を行うこととした。

き裂先端の応力集中は長さに比例して大きくなるため図－４に準じたき裂先端の処理を速やかに実施し、報告書として各段階で写真撮影をし提出することとした。

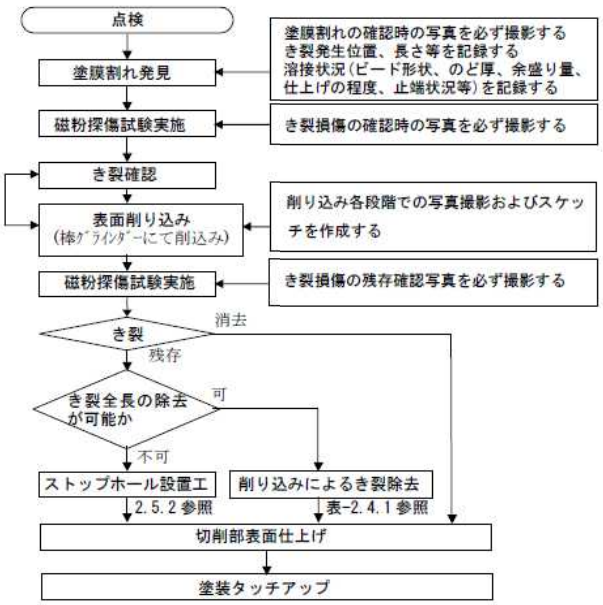

図-4　き裂確認時の応急対策の対応フロー

⑷ き裂確認後の応急対策

a)ストップホール及び削り込み

ストップホールの設置は棒グラインダーにて行うものとし、その大きさはストップホール設置後の磁粉探傷試験が実施出来る程度として、φ２０mm程度を基本とする。ストップホールを明ける場合はき裂先端を確実にとらえる必要がある。

ストップホール設置後は、新たな傷を設けないために棒グラインダー等によりストップホール孔内部を滑らかに仕上げるものとし、角部はストップホール内部が観察できるよう大きく拡大することとした。

仕上げ後は磁粉探傷試験により表面傷がないことを確認した上で目視及び指にて表面粗さ標準片との比較確認を実施する。

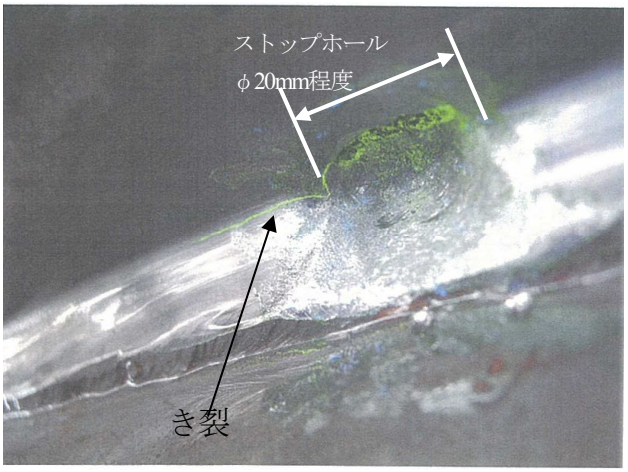

写真-1　ストップホール設置例

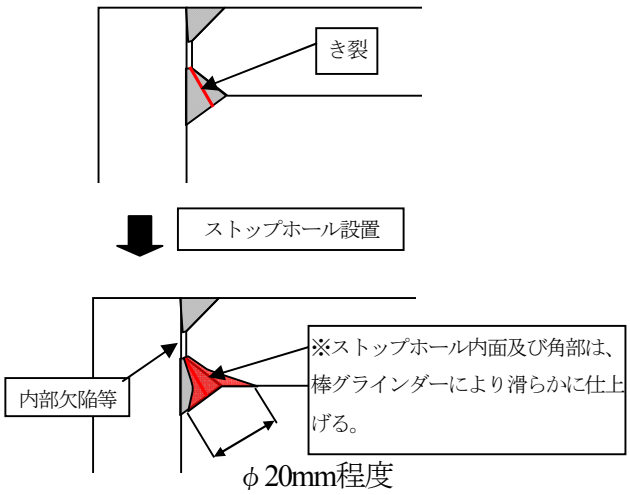

図-5　ストップホール設置概要図

b)スカラップ

隅角部の十時継ぎ手部及び溶接の３線交差部は、溶接不良が生じやすい箇所であり、且つき裂の完全な除去が困難な箇所であることから、き裂先端が柱及び梁母材に進展する可能性があると判断した場合はスカラップの設置を行うことが望ましい場合がある。

スカラップの設置は隅角部母材を大きく切り欠くこととなるためスカラップの設置の有無の判断や設置を行う時期、などは橋梁ドクターなどの学識経験者に相談することとした。

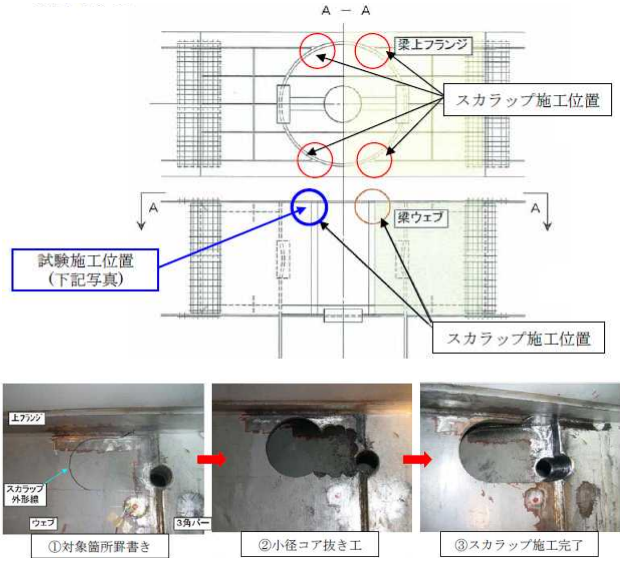

図-6　スカラップ設置位置図

c)監視と経過観察

鋼製橋脚隅角部においてき裂が確認された場合は、通常の定期点検（１回／５年）以外に、定期監視（き裂長さ３０㎜以下）及び詳細監視（き裂長３０㎜を超える）を行う必要がある。

なお、鋼製橋脚隅角部においてき裂が確認された箇所においても主要着目箇所として、経過観測を行っていくものとする。

(5) 材料試験

隅角部から採取した鋼材コア片の一部にて、(a)～(e)の科学成分分析試験を実施することを基本とした。

a)科学成分分析試験

既往鋼材が要求性能（JIS規格値）を満足する成分であるかを判定するために実施する。主に炭素（C）の含有量が重要となる。科学成分分析試験は1部材（損傷箇所のウエブまたはフランジ）につき１つの鋼材コア片を用いて行うことを基本とした。

b)シャルピー衝撃試験

既設鋼材の化学成分がJIS規格外であった場合に、鋼材の温度と脆性との関係（鋼材はある温度以下になると粘りがなくなって、衝撃に弱くなる）を調べるために実施する。一般に衝撃値の大きい鋼材は、引張り強さや伸びも大きく、靭性（じんせい）が あると言われている。

c)マクロ・ミクロ試験

試験No.②の破面観察等を行うために実施する。

d)厚さ方向引っ張り試験

耐ラメラテア性能を数値的に評価する絞り値を計測するために実施する。

e)スランプ試験

鋼材溶接部の熱影響範囲、性状、状態、異常等推定するために実施する。

(6) 非破壊試験

既設橋梁の溶接継手部塗膜割れ及びき裂に対する現地確認試験手法としては、図－７に示すものがあるが、既設橋梁の溶接継手部塗膜割れ及びき裂に対する非破壊試験方法としては、②磁粉探傷試験を基本とし、ラメラテア等の内部欠陥及び内部のき裂等の確認試験として、③超音波探傷試験を用いるものとする。

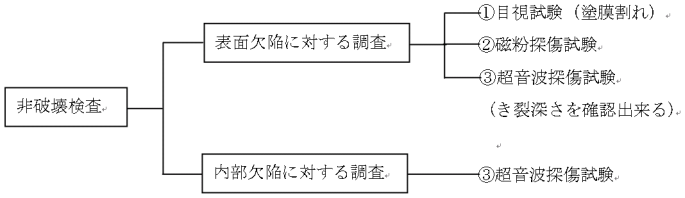

図-7　き裂確認のための非破壊試験方法

a)磁粉探傷試験

鋼製橋脚隅角部の溶接継手部塗膜割れ及びき裂に対する現地確認試験方法は、表面近傍のき裂を検出するのに適した磁粉探傷試験（ＭＴ）にて実施することを基本とした。

b)超音波探傷試験

既設橋梁の内部欠陥及び内部き裂に対する現地確認試験手法は、超音波探傷試験（ＵＴ）にて実施することを基本とした。

超音波探傷試験にて、すみ肉溶接止端部のき裂長さ

（深さ方向）の検知も可能であるが、き裂長さが短い等の原因により、検知することが困難な場合もあることに留意した上で調査提案を行う必要がある。平鋼板部での調査が可能となるラメラテアなどの鋼版に平行する内部の欠陥や、き裂等を検知する場合には問題ない。

(7) 現地車両載荷試験

a) 現地車両載荷試験

既設橋梁において確認されたき裂が過去に殆ど事例のないものであり、損傷要因の特定が困難と判断された場合は、き裂発生部の応力状態や橋梁のたわみ性状等を実橋にて確認するための現地車両載荷試験を行うものとする。なお、現地車両載荷試験を実施する際は、その目的と必要性を明確にし、関係職員と十分協議のうえ実施するものとした。

現地車両載荷試験には静的載荷試験と動的載荷試験があるが、試験の目的及び供用交通の規制等に配慮して、試験方法を選択することとした。

載荷試験に用いる車両は、通行申請が不要で入手が容易である3軸10tfダンプトラック（総重量：20tf程度）を用いることを基本とした。載荷する車両は車線ごとに1台を原則とし、2車線以上の場合は、各車線単独載荷と全車線同時に載荷する並列載荷による影響を確認することとした。

b) 計測位置

車両載荷試験による計測はひずみ計測を基本とし、必要に応じて、たわみ計測（変位計測）等を行うものとした。ひずみ計測位置は、疲労き裂損傷が確認された箇所に加え、疲労き裂損傷が確認された箇所の対称位置などの同等の応力状況となる部位を選択して行うものとした。

なお、き裂長が長いなどの理由から、き裂発生箇所ではひずみの計測が困難な場合は、疲労き裂損傷が確認された箇所の対称位置などの同等の応力状況となる部位を選択して計測を行ってもよいこととした。

車両載荷試験によるひずみ計測は、補修あるいは補強部材取り付け後にも、同一箇所にて計測を行い、補修あるいは補強効果の検証を行うことが望ましい。

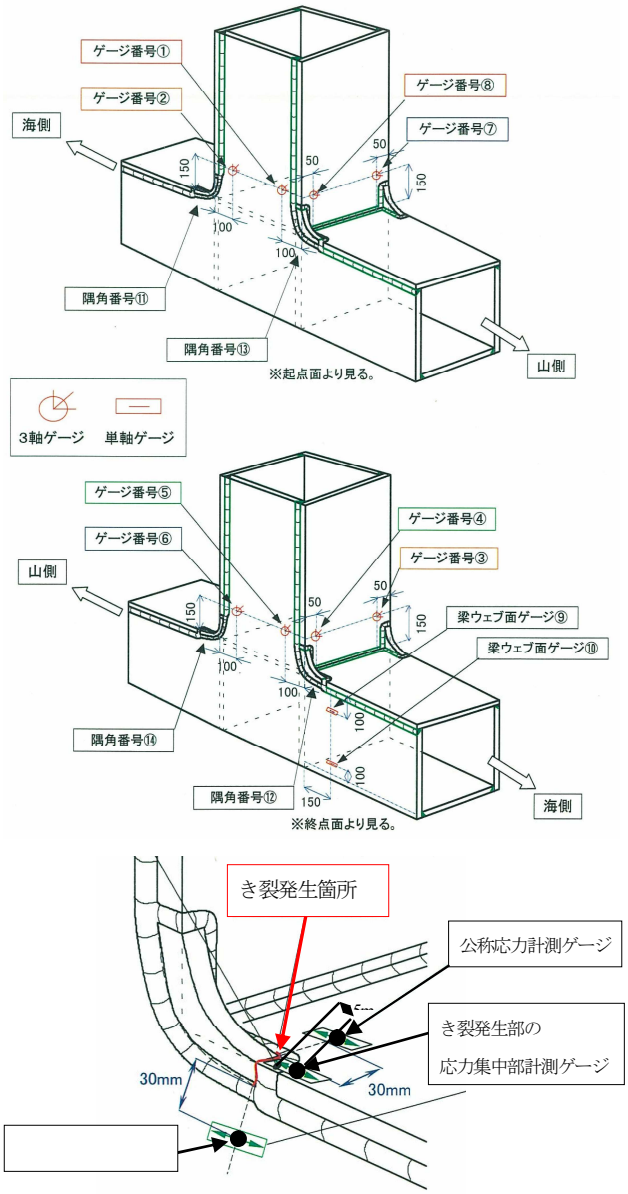

図-8　浜手バイパス高架橋P52橋脚におけるひずみゲージ貼り付け位置（参考）

3. 補強設計

(1) 補強設計方針

補修工事については、一般の交通を供用しながら実施することを原則としているため、補強対策の設計においては、現有耐荷力を確保する必要があるとした。ボルト孔明け工施工時等により現有耐荷力が低下することに配慮した安全照査及び施工計画を立案することが必要である。

疲労寿命は、一般的には変動応力の3乗に反比例するため（3乗則）応力範囲が1/2になると寿命が8倍以上に延びると考えられることから、活荷重応力を現状の50%程度にすることとした。また、隅角部の疲労き裂損傷部には、シエアラグによる応力集中等により、高い活荷重応力が作用していることが判明しており、疲労耐久性の向上のために、この局部応力を補強前の50%程度に低減

させることを設計の目標とした。

隅角部は、疲労き裂損傷の発生の有無あるいは進展を確認する必要があるため、将来的に点検･調査が可能な状態としておくことを基本とする（観察孔を設けることを基本とする）。

支圧接合として実績の多い、支圧接合用打ち込み式高力ボルト(B10T)を使用することを標準とした。なお、現地周辺が騒音に配慮すべき状況にある場合には、磨きボルトを使用することを検討してもよい。

鋼製橋脚の下層柱には、耐震補強として中詰めコンクリートが充填されている場合が多く、補強範囲と重なる場合はその部分の撤去、再充填が必要となる。

浜手バイパス高架橋鋼製橋脚隅角部補強設計施工要領（案）は、浜手バイパス高架橋鋼製橋脚隅角部補強設計のみに適用できる要領として作成されたものであるが、他の公団における検討結果や守口高架橋鋼製橋脚等でのFEM解析結果も参考に作成したものであり、他の補強あて板の詳細設計の参考としても良いこととした。ただし、橋脚毎に条件が異なるため適用にあっては十分注意する必要がある。

(2) FEM解析

FEM解析は、当て板補強による応力の流れ、大きさ、応力集中等を把握し、補強効果を確認するとともに、補強の施工段階での本体の影響を把握することを目的としており、必要に応じて実施することとした。

FEM解析プログラムは、実績を有するプログラムを使用することが望ましく、解析にあたっては、事前にFEM解析プログラム名とその使用実績を明示した計画書を提出することとした。

本解析での目的は、隅角部の応力低減効果の相対的評価、応力集中位置の確認、支圧ボルトの応力照査であることから、計算方法は弾性解析とした。

鋼製橋脚の隅角部に対しFEM解析を行う場合には、支承反力を考慮するために橋脚全体のモデル化が必要となる。

応力集中部位の局部応力を評価するための要素寸法は、構造形式、断面寸法、板厚などによって異なると考えられるため、シェル要素で構成されたモデルの要素寸法としては、板厚程度とする方法があるが、公団等他の検討事例において解析結果と実測値が精度よく合致していることが確かめられている25mmを標準とした。

支圧ボルトのモデル化では、他の公団での要領にならいK＝2,500kN/mmを用いることとした。

(3) 補強後の目標応力低減効果

活荷重を半減させることにより疲労寿命を延ばすことが目的であり条文のように定めた。

ただし、円柱の柱貫通タイプの梁ウエブ部については、円柱と梁ウエブとの溶接不良が多く見られるため、補強後の円柱と梁ウエブとの接合部位の応力が許容応力度以下であることを照査するものとした。

FEM解析においても、活荷重による支圧ボルトに作用するせん断応力が、許容せん断応力（72.2kN）以下であることを確認することとした。

補強によって応力集中位置が変化する場合があるため、補強後の応力集中位置及びその値を確認することとした。

4. 補修・補強対策事例

点検調査の結果、き裂が発見された場合において、き裂に対する緊急処置を行うことが必要と判断される部位及びき裂に対しては、削り込みやストップホール等によるき裂進展防止対策を行うものとする。

補修・補強対策は、疲労き裂損傷部の応力が50%程度低減を図れる構造にて行うものとする。ただし、補強部材の接合や、き裂処理の手法として、原則、溶接を用いてはならないものとする。これは、既設鋼製橋脚の鋼材は、品質的に溶接に不向きなものが多く、施工中における溶接割れや溶接欠陥からの新たなき裂が生じる可能性があることや現場での溶接補修は、溶接姿勢・温度管理・部材の振動等、工場溶接に比べ、施工条件が悪く、熟練技術者においても品質を確保することが困難な場合があるからである。

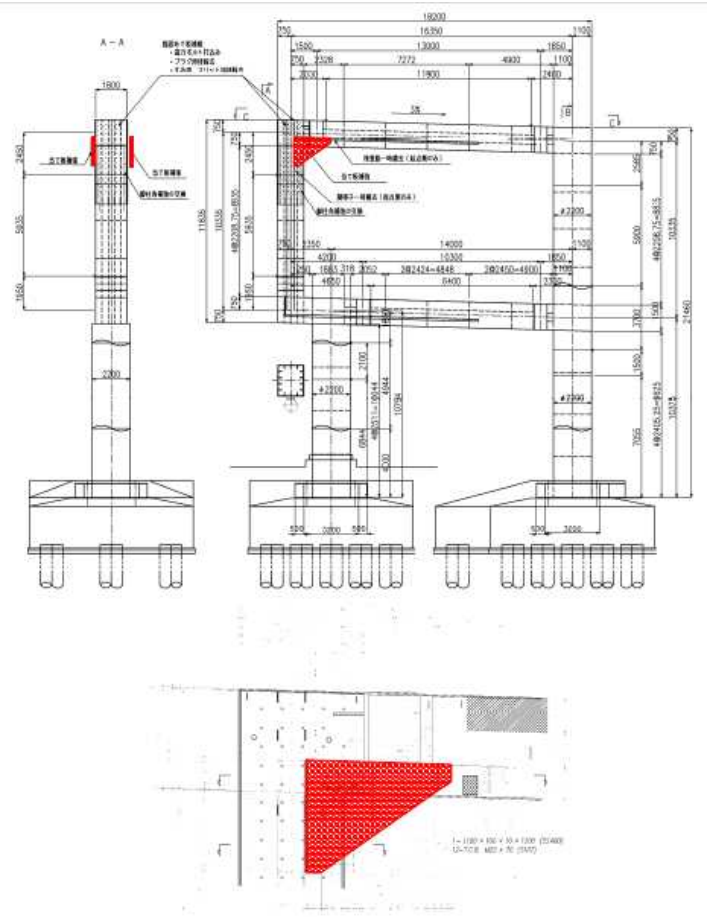

図-9　国道2号　浜手高架橋対策事例

5. 今後の対応

今回作成した技術資料（案）は、あくまで各委員会にて議論されたものである。今後の対応としては、定期点検要領2004年版（平成16年）の改定が計画されており、これらの中に疲労及びその他の損傷（塩害、ASR等）に関する技術資料等の成果を更にブラッシュアップしたものを添付する計画がある。ブラッシュアップを行って作成する“各損傷の対策マニュアル”は、全国発信を目的としており、各地整の事例も幅広く収集する必要がある。また、“各損傷の対策マニュアル”は、委員会等で繰り返し教えて頂いた、基本的な対策（ストップホールの明け方、削り込み面の処理の仕方、ゲージの貼る位置…等）をまとめることが目的であり、基本的なことを、再度、学識経験者に諮らなくても対応できる資料とすることに留意する必要がある。

6. 謝辞

今回の技術資料の作成にあたりご協力頂いた元大阪市立大学大学院　北田名誉教授、関西大学坂野教授に感謝の意を表する。

参考文献

1)　（社）日本道路協会：鋼橋の疲労　平成９年５月
2)　（社）日本道路協会：鋼道路橋の広う設計指針　平成 14 年３月
3)　（社）日本建設橋梁建設協会：鋼橋のＱ＆Ａ設計編　平成 18 年９月
4)　（社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編　平成 24 年３月