

青木歩道橋桁ずれに対する連続化構造での復旧について

高橋 秀爾

近畿地方整備局 兵庫国道事務所 管理第二課 (〒650-0042兵庫県神戸市中央区波止場町3番11号)。

国道43号青木歩道橋は、供用後50年以上経過した国道を南北及び東西に横断する歩道橋であり、単純箱桁、2径間連続I桁、単純I桁から構成され、単純箱桁に溶接されたフック構造により2径間連続I桁並びに単純I桁が支持されている。令和元年11月、フックが破断し、単純箱桁と単純I桁間に段差が生じた。全国で施設の老朽化が進むなか、本歩道橋と同様にフック構造を有する施設が多数存在するため、再発防止の一助となることを期待し、補修方法を一事例として報告する。

キーワード 上部工連続化、桁ずれ、恒久復旧

1. はじめに

令和元年11月、国道43号上に架かる供用中の青木歩道橋において、橋脚に支持された箱桁の桁端部に溶接された2ヶ所のフックのうち片方のフックが破断し、フックによって支持されていた桁にねじれるような桁ずれが発生し、路面に20cm程度の段差が生じた。このため、青木歩道橋は一時的に通行止め措置が取られたが、近隣住民に加え周辺の事業所の従業員の通勤や地元の小中学校の通学にも利用されているため、早期の復旧の必要があった。

本稿では、損傷原因の解明とそれらを踏まえた再発防

止策を講じるための復旧計画策定及び補修詳細設計の内容について報告するものである。

2. 歩道橋の概要と損傷状況

(1) 歩道橋の概要

青木歩道橋は、図-1に示すように東西方向の国道43号と南北方向の市道を横断する変形T字形の平面形状を有しており、国道43号の横断箇所は2径間連続I桁、市道の横断箇所は単純箱桁、市道左折専用レーン横断箇所は単純I桁から構成され、それぞれの端部に階段桁又は斜接支持されており、単純箱桁橋の桁端ダイヤフラム及び

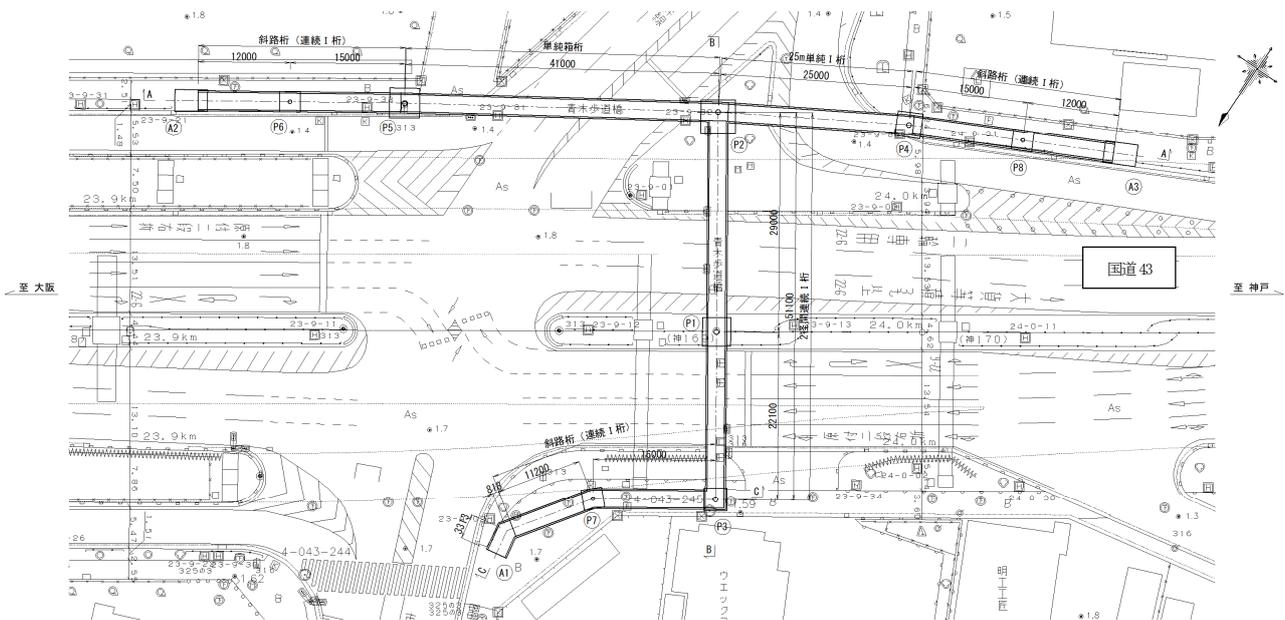


図-1 青木歩道橋の平面図

路桁が接続されている。P2橋脚上では、単純箱桁橋が直側面部にあたる腹板に溶接されたフック構造にて単純I桁と連続I桁橋がそれぞれ支持されている。

P2橋脚上のフック構造は、図-2に示すように単純箱桁橋端部ブロックの端ダイヤフラム及び腹板にフックが溶接されており、フックの孔にピンが挿入され2径間連続I桁と単純I桁の端支点が支持される構造であった。

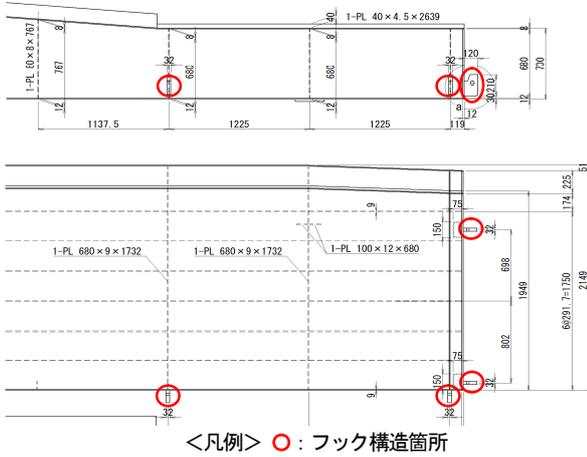


図-2 P2 橋脚上の細部構造

(2) 損傷状況

損傷した箇所は、P2-P4橋脚間の単純I桁でP2橋脚部の片側のフックである。フック構造が溶接されている端ダイヤフラムから破断し路面に約20cmの段差が生じたもので、写真-1に示すように、破断していないもう一方のフックのみで支持されている状態となった。



写真-1 桁ずれ発生直後の橋面上の状況



写真-2 単純箱桁端ダイヤフラム破断箇所（下方より撮影）

この際、歩道橋の通行止めを行うと共に、仮設ペント等にて仮支持を行い、一時的な安全性を確保した上で、損傷部及びその周辺構造の確認・調査を行った。損傷箇所は、写真-2に示すように単純箱桁の端ダイヤフラムに溶接されたフックの溶接ビードの止端部に沿うように端ダイヤフラムの母材が全線破断していた。

また、併せて2径間連続I桁側のフックが溶接されている単純箱桁腹板の内側について、目視確認を行った結果、写真-3に示すような亀裂が確認された。



写真-3 新たに確認された単純箱桁腹板の亀裂

3. 損傷要因

(1) 損傷要因

本橋は兵庫県南部地震により被災しているため影響がないとは断定できないが、破断面に塑性変形は確認されないことから、ピン構造の破断における主たる要因は経年劣化（疲労破壊）によるもので、その後破断が進展した後に、桁の温度収縮等の外力により全線破断に至り桁ずれが発生したと考えられる。先述のとおり破断面の状況から疲労破壊と推定され、塑性変形は見られないことから弾性状態での繰り返し荷重による高サイクル疲労である。このような損傷に至らした繰り返し荷重は、風や橋の振動等の水平荷重が繰り返し連結部に作用する面外方向の外力や温度変化による軸方向の繰返し荷重であると推測される。

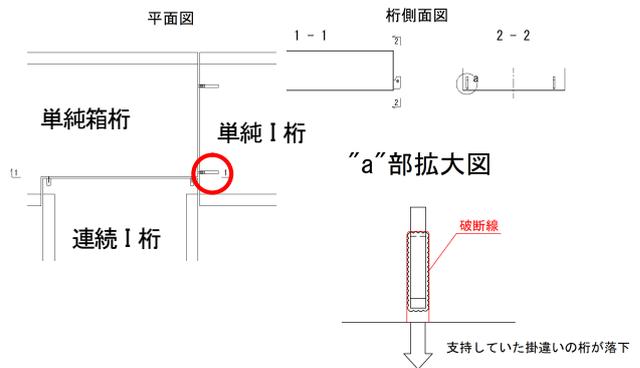
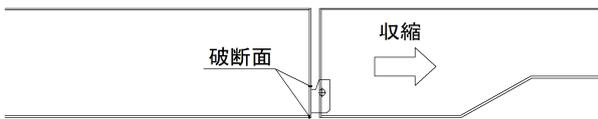


図-3 損傷箇所と損傷概要

(2) 段差発生のプロセス

段差発生のプロセスは、図4に示すように、ダイヤフラムに溶接されているフック周囲の溶接ビード止端部から発生した疲労亀裂がダイヤフラム母材に進展し、これがフック全周に至って温度変化による伸縮を繰り返した後に、亀裂がフック取付き部のダイヤフラム母材に全周で貫通し破断したものである。破断した片側のフック部がそのまま垂れ下がり、破断に至っていないもう一方のフックのみで支持される状態となり約20cmの段差が発生したと考えられる。

ステップ① 温度変化による収縮



ステップ② ダイアフラムの離脱



ステップ③ 桁ずれ発生

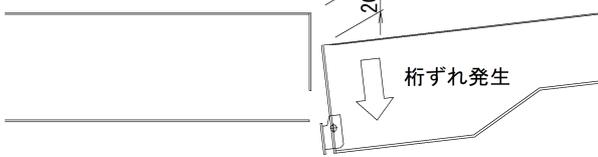


図4 段差発生のプロセス

4. 復旧方針の検討

(1) 検討方針

損傷が発生した既存構造（フック・ピン）構造は、同様の事象を引き起こす可能性が高い上に、目地部からの漏水や細部の目視点検が困難であり、その構造特性から長期的な維持管理に問題があるため、復旧構造としては不適切であると判断した。したがって、このような課題

を抜本的に解決し得る連続化構造案を基本としつつ、フックとは別に受け構造を設ける案等も含めて比較検討を行い決定する方針とした。さらに、検討対象は、桁ずれが発生した単純I桁のみならず、同構造であり一部で亀裂の発生が確認されている連続I桁についても含めるものとし、一体的な復旧計画を立案することとした。

(2) 既存構造固有の特性を踏まえた比較検討

既存構造は昭和49年竣工でリベット接合から溶接接合への転換期であり、溶接技術に対する信頼性が材料的にも施工的にも現在に比べて劣っている他、使用材料も溶接構造用圧延鋼材(SM材)ではなく一般構造用圧延鋼材(SS材)である。また、連続化には箱桁断面からI桁断面に変化させる必要があり、さらに桁高や腹板ラインの不一致等の構造的課題が存在しており、遷移区間を設ける等のスムーズな応力伝達への配慮も求められる。一方で、利用者も多く早期復旧が望まれる状況であるため、コスト縮減に加えて工期短縮の観点からも既存部材の有効活用も念頭に検討する必要があった。先述の基本方針に加え、このような既存構造固有の特性や社会的要請を踏まえ、表-1に示す復旧構造に関する比較案を抽出した。

(3) 検討結果

前述比較案について検討を行った結果、経済性や周辺への影響において若干劣る部分があるが、損傷要因の除去、長期的な維持管理性、施工性・品質確保の観点において優れる連続化案（第2案～第4案）が望ましいと判断した。その内、第2案は経済性や周辺影響、施工性で著しく劣るため、非選定とした。一方で、第3案は既設構造を極力活用しコスト縮減を目指した案であるが、既設構造物固有の特性に配慮した疑似箱断面としての追加部材等を含めると現場工費の増加が避けられず、さらに、複雑な部材配置により施工性や維持管理性が悪化することも明らかになった。したがって、他案に比べて総合的に優位であると考えられる第4案：上部工連続化構造案③を選定した。

表-1 復旧構造の比較案

	第1案 既存支柱梁設置案	第2案 連続化構造案① 単純I桁全長架け替え	第3案 連続化構造案② 部分取り替え(既設活用)	第4案 連続化構造案③ 部分取り替え	第5案 支柱新設案
工法概要	受け側となる構造物を上部構造から下部構造に変更する。既存支柱に直接受け梁と斜材を単純I桁側と2径間連続I桁側の2方向に設置して支承構造で飯桁を支持する。	損傷箇所を含めた既存の1径間(単純I桁)を全て撤去し、P2橋脚上で単純I桁、単純I桁、2径間連続I桁の3つの上部構造を連続化するために橋脚上及び遷移区間のブロックを部分的に再製作・再架設すると同時に、単純I桁部分は新規製作した箱桁を再架設して2径間連続箱桁とする。	P2橋脚上で単純箱桁、単純I桁、2径間連続I桁の3つの上部構造を連続化するために、必要最小限の橋脚上ブロックを部分的に再製作・再架設する。遷移区間は、横桁及び下横構を追加設置することで、疑似箱桁として既設構造を活用する。	P2橋脚上で単純箱桁、単純I桁、2径間連続I桁の3つの上部構造を連続化するために、橋脚上及び遷移区間のブロックを部分的に再製作・再架設する。	既存支柱とは別に単純I桁と2径間連続I桁の2方向で支点を受ける支柱(杭基礎)を新たに設置して支承構造で支持する。
構造概要図					

5. 連続化構造及び設計

(1) 基本構造

損傷部の現況構造は、P2橋脚に支持された単純箱桁の端部ダイヤフラムと側面腹板に設置されたフック構造に単純I桁と2径間連続I桁がそれぞれピン連結されている。これに対して、復旧構造は、P2橋脚上に支持されている箱桁と単純I桁及び2径間連続I桁の両方を一体にする連続化構造とした。I桁側の既存構造は極力再利用することを基本とし、P2橋脚上から単純I桁側と2径間連続I桁側の両方に箱断面を延長して連続構造とした上で、遷移区間を経て箱断面からI断面に変化させた。この部分は、損傷状況や接続構造から既存構造の転用は困難であったため、全て再製作とした。

(2) 遷移区間の構造

a) 構造的な検討の背景

復旧に伴い連続化することで、箱断面→I断面のように主桁の断面形状が急変することになる。断面形状が急変する箇所では断面力性状や応力伝達経路が複雑となり、想定外も含めた様々な外力に対して精度よく挙動を把握できないと考えられる。一方で、その起点となるP2橋脚上は3つの上部構造が一体化する箇所で平面的には隅角

形状となっており、さらに複雑さを増している。このように本橋の連続化箇所は、複雑な構造部位と断面形状の急変部位が近傍で混在することから、不確実要素を多く内包しており、一般的な取り扱いが困難であると考えられた。したがって、各部位の断面力性状や構造的特徴を踏まえ、不確実性に対する安全代を有するよう適切に遷移区間を設定することとした。

b) 断面力性状による遷移区間の設定

連続化することで負のモーメントのピークは、3つの上部構造が一体化するP2橋脚上に生じることになる。構造解析では、様々な外力を設計荷重として考慮するが、計算上考慮できない要因、建設当時からの経年変化等全てを万全に見込めないということも念頭に置いておくべきである。特に、本橋の復旧対象箇所は、3方向からの連続化という複雑な構造を採用するにあたり、挙動等の不確実性を考慮し十分安全代を担保しておくべきと考えた。これらを踏まえ、構造解析で算出される断面力を基本とするものの、3方向連続化の起点となるP2橋脚位置から一般断面に至る各方向の断面が変化する領域を遷移区間と位置付け、それぞれの断面形状の変化に伴う断面力性状と応力伝達の不確実性度を踏まえ、剛域部の断面を延長する範囲を設定するものとし、図-5に示すように、負のモーメント発生領域の範囲を遷移区間とした。

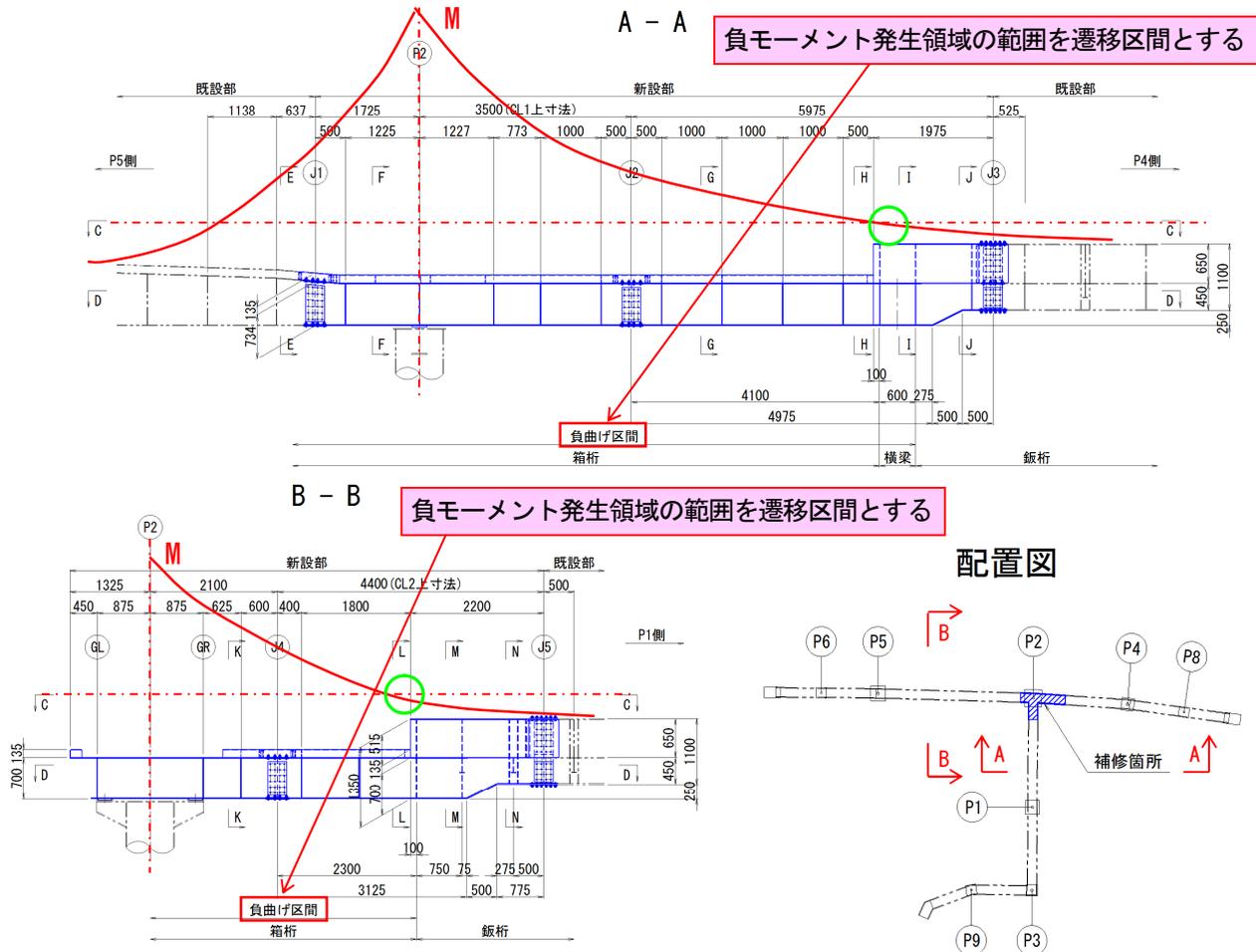


図-5 遷移区間の設定

(3) 詳細設計

設計断面力は、P2橋脚を中心として直交する平面形状を有することから、立体骨組解析により算出した。既存の構造物を改築することから、現況構造→ベント仮受→既設桁部分撤去による除荷→新規製作桁の架設という施工手順を取り込んだステップ解析を行った。また、現況構造ではフック部をピン、改築構造では剛結としてモデル化すると共に、構造系の変化による既存部材への断面力の変動影響を最小化するために、単純箱桁の仕口部については架設ヒンジを設け、現場継手ではヒンジ連結とし、構造解析にも反映した。図-6に、単純箱桁と単純I桁の連続化部(P5-P2-P4)と単純箱桁と連続I桁の連続化部(P2-P1-P3)における連続化前と連続化後の曲げモーメントの変化を示している。連続化前と連続化後を比べると、前者では、中間支点となるP2橋脚部の負モーメントが増大しているが、P5-P2及びP2-P4支間部共に正モーメントは逆に減少している。後者においても、剛結となるP2橋脚部近傍では負モーメントが増大しているが、P2-P1支間部では正モーメントが減少し、P1橋脚上及びP1-P3支間部への影響は極軽微であることが認められる。したがって、改築しない各支間部及びP1橋脚上については、設計断面力が概ね同等もしくは減少しているため、補強無しで既存部材を再利用することが可能であった。一方で、P2橋脚近傍については、全て再製作するため、設計断面力から適切な断面設計を行った。

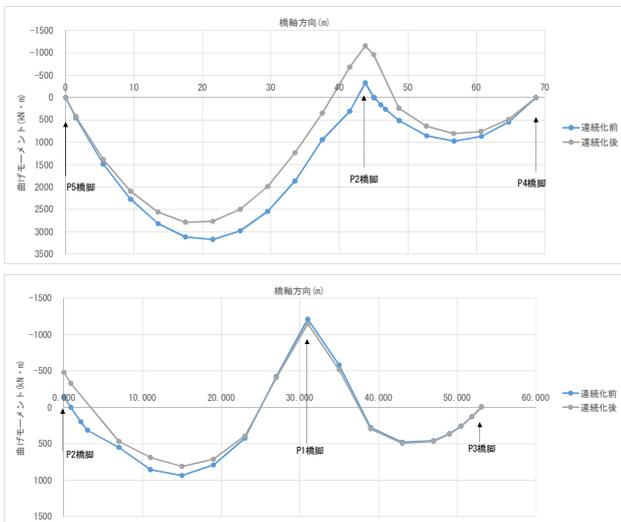


図-6 連続化前後の曲げモーメント

6. 階段及び斜路桁フック部の構造改良

青木歩道橋では、損傷が発生したP2橋脚のフック構造以外にもP3,P4,P5橋脚上の掛け違い部において階段桁や斜路桁がフック構造で支持されていた。幸いにもこれらは支間が短く反力が小さいことから損傷は認められなかったが、基本的構造は損傷部と同じであり、長期的には同様の損傷が生じるリスクを内包している。そこで、

この機会に維持管理性の向上や将来のリスク排除を目的として、現フック構造の改良を計画した。構造改良は、主桁もしくは横桁の腹板同士を添接板で直接連結する構造を基本とした。こうすることで、強固に連結することが可能となり、近接目視も可能であるため維持管理性にも優れる。また、十分な強度を有する複数のボルトで連結することを前提とするため、ボルト等の一部に変状が生じても部分取替も可能であり、不測の事態における冗長性においても、一点連結のフックピン構造に比べて優位となる。実構造は各構造物毎に様々であるため、その都度、構造に応じて細部検討が必要となるが、写真4に青木歩道橋におけるフック部の構造改善の一例を示す。



写真4 階段桁及び斜路桁のフック部構造改良例

7. 結論

青木歩道橋は令和元年11月に損傷が発生したが、全国的にも同様の事例が無かったため、国土技術政策総合研究所との技術相談を行いながら慎重な検討を重ねた上で詳細設計を行い、令和3年6月に復旧工事に着手した。そして、令和4年9月に桁架設が完了し、付帯工事を含めて令和4年12月に完全復旧を迎えることができた。この間、近隣の利用者の方々には、約3年の長期に亘り通行止めや迂回、仮橋通行等ご不便をおかけしたが、無事開通できたことは喜ばしい限りである。

今回の要因究明・復旧計画を通じて得られた知見とし

て、全国に多数建設された立体横断施設においては、同様のフック構造が標準的に採用されており、同様のリスクを抱えているということである。この構造は、立体横断施設の標準図にも示されているが、永らく基準等の抜本的な改訂が為されておらず、現在でも採用されているようである。同じ構造であっても、反力が小さい階段桁や斜路桁より、むしろ事例は少ないが、今回の事例のように反力の大きい桁構造を支持している場合はリスクが高いと言える。したがって、今後は維持管理の予算が限られる中、構造物の特性を十分に把握し上で、優先度をつけて適宜対策を実施していく必要があると考えられる。本稿では、損傷の要因究明から、再発防止に向けた一

連の検討・復旧計画立案を通じて、同様の構造物における対策の一つをお示しできたものと考えている。これが、同様の構造を有する立体横断施設において、再発防止策や維持管理性向上等、安心・安全の確保において、参考となれば幸いである。

謝辞：本橋の損傷要因判定および復旧計画策定にあたっては、坂野昌弘関西大学教授（当時）をはじめ、国土技術政策総合研究所橋梁研究室 白戸昌大室長以下関係者の皆様、八千代エンジニアリング株式会社にご助言、ご協力いただきました。ここに謝意を表します。