

六十谷水管橋破損に係る調査委員会

報 告 書 (本編)

令和 4 年 9 月

和歌山市企業局

はじめに

令和 3 年 10 月 3 日に発生した六十谷水管橋の落橋により、市民の皆さまをはじめ、関係各位に大変なご不便とご迷惑をお掛けしましたことを、改めてお詫び申し上げます。

この度の事故は、紀の川以北地域への唯一の送水ルートである六十谷水管橋の吊材が破断し、中央部の径間が落橋したことにより、約 6 日間、約 6 万世帯が断水した重大な事故となりました。

このような中、日本水道協会をはじめ地元協力会社、道路関係機関、河川管理者等の皆さまに多大な協力をいただくことで、落橋事故の発生から 8 日後の 10 月 10 日には紀の川以北全域での給水が可能となり、架替工事についても河川内での工事が可能な 6 月 15 日までの非出水期間内に無事完了することができました。

事故発生時から仮設工事や復旧工事を進めながらも、事故の重大性を鑑みて、事故原因の究明と検証、再発防止を目的とした、4 名の有識者による調査委員会を立ち上げ、オブザーバーとして国土交通省及び厚生労働省からもご参加いただきました。

調査委員会においては、事故原因の究明はもとより、復旧方法や今後の維持管理方法についてご提言いただくことで、水管橋維持管理マニュアルの策定にも繋がりました。

本報告書は、事故の克明な記録と破損状況を記録するとともに、調査委員会で得られた知見や教訓を事業運営に反映し、再発防止に取り組むことを目的に作成いたしました。

事故の記憶や経験を風化させず、市民の皆さまとの信頼関係を再度、築いていけるようにライフラインの管理に課せられた社会的責務を果たしていく所存であります。

和歌山市公営企業管理者 瀬崎 典男

六十谷水管橋破損に係る調査委員会

2021 年 10 月 3 日に発生した六十谷水管橋（和歌山市企業局、昭和 48 年度供用開始）の落橋事故では、約 6 万世帯が約 6 日間の断水を招くなど、水道利用者に深刻な影響を与える甚大な事故となった。この事故を受けて、市をはじめとして有識者や専門技術者等による『六十谷水管橋破損に係る調査委員会』（以下「委員会」と称する。）が招集された。

本委員会では、水管橋の落橋事故について、再発の防止とより安全な水道施設の構築を目指し計 4 回の会議が実施された。

設立の主旨を踏まえた基本方針は以下のとおりである。

【本委員会の基本方針】

- 科学的根拠に基づき、水管橋の落橋メカニズムや腐食のメカニズムを評価する。
- 水管橋の劣化・補強対策に関しては、今回の要因や誘因を排除することを目的として方針の提案を行う。
- 様々な対応方法やその維持管理方法を提案する。
- 現状よりも劣化対策面や構造面での安全余裕度を確保することを目指す。
- 検討結果が全国の水道事業に反映されることに留意する。

委員会の開催にあたっては、本水管橋の落橋事故について、上記の主旨を踏まえた上で、さまざまな角度から調査や分析、並びに高度な方法による検証解析などを行い、事故の要因やメカニズムの検討を行った。そして、これまでの本市での維持管理における課題などを明確にしたうえで、復旧工事の対応や今後の対応について審議された。

本報告書は、これらの審議において使用された各種調査や検討結果を整理したものである。本報告書の要点、並びに委員会の審議の結果として、今回の落橋事故の要因やメカニズムは、以下のとおりである。

【落橋の要因とメカニズム】

吊材の著しい腐食を十分に確認できず、腐食の影響により吊材のほとんどが連鎖的に破断したことで、水管橋全体が脆性的に落橋した。

本報告書では、このような結果を受けて、これまでの維持管理において十分に対応できていなかった事項や反省すべき事項についても明らかにした上で、今後の維持管理の基本的な方針についても整理した。そして、本市独自の水管橋に関する維持管理マニュアルの作成に反映された。本市では、この維持管理マニュアルについて適宜改編しつつ職員一同が活用し、適切に水管橋の維持管理を行い、水道利用者により高いレベルの安定供給が可能となるよう水道事業を運営する。

なお、全国各地には、本水管橋と同様に経年化が進んでいるものの、十分な維持管理が実施されていない水管橋が多く存在するようである（2.8.1 水管橋の補剛形式と点検状況 参照）。そのため、今回の事故は、全国の水管橋における今後の維持管理方法を検討する上でも重要な教訓になるものと考えている。よって、本報告書分析結果については、水道事業の運営において重要な要素になるものと考えており、成果は広く活用されれば幸いである。

六十谷水管橋破損に係る調査委員会 委員名簿

氏名	役職	所属
えぐさ のぶゆき 江種 伸之	教授	和歌山大学システム工学部 システム工学科
くわた やすこ 鍬田 泰子	准教授	神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻
けんもち みつのお 剣持 光信	副主幹	公益社団法人 日本水道協会 工務部 技術課
なかやす しんじ 中安 眞司	課長	阪神水道企業団 技術部 工務課

50音順

調査機関

- 日鉄パイプライン&エンジニアリング株式会社
- 株式会社日水コン

調査委員会開催日程

回	日時	場所	議題
第1回	令和3年 10月21日（木） 13:00～17:00	和歌山市勤労者総合 センター 6階 文化ホール	(1) 経緯について (2) 六十谷水管橋について (3) 落橋に至った要因について ・落橋した瞬間の映像 ・ドローンで撮影した映像 ・現場視察（六十谷水管橋） (4) 本復旧について
第2回	令和4年 2月1日（火） 10:00～12:00	オンライン	(1) 六十谷水管橋破損に係る調査委員会 の検討事項について (2) 落橋した水管橋の引き揚げ後の画像 について (3) 第3回六十谷水管橋破損に係る調査 委員会について (4) その他
第3回	令和4年 5月20日（金） 14:00～16:00	中央コミュニティ センター 1F多目的ホール(小)	(1) 各種調査結果の報告 (2) 破損の要因とメカニズムについて (3) これまでの維持管理について (4) 復旧及び今後の対策について (5) 水管橋維持管理マニュアルについて (6) 最終報告書の骨子（案）について
第4回	令和4年 7月5日（火） 14:00～16:00	和歌山市役所 14階 大会議室	(1) 報告書取りまとめについて (2) 講評

講評

六十谷水管橋の落橋事故により、市の北側の給水区域約 6 万世帯に及ぶ断水、さらには仮設配管設置のために県道 141 号六十谷橋を長期にわたって通行止めにせざるを得ず、市民に多大な生活支障をもたらしました。

一方で、企業局だけでなく水道事業関係団体や河川、道路関係機関には地域横断的な多大な協力により、出水期を迎える月までに架け替え工事を早期に完了することができたことに感謝申し上げます。

本調査委員会を通じて、今回の落橋事故は、昭和 51 年にカルマン渦対策として吊材に取付けた補強材料（以下、後付け材料）の接続箇所が著しく腐食し、吊材が破断したこと、またその破断に至る現状を認識出来なかったことが主たる要因であり、吊材の破断が無ければ落橋に至ることは無かったことが確認できました。

吊材は、後付け材料との接続箇所において、塗替え工事時に適切な処理がされずに重防食塗装がされたこと、またスケールや鳥の糞、ほこり等が滞留しやすく、且つ雨による洗い流しを受けにくい形状であったことから、腐食因子が高濃度に堆積され局所的に塗膜の劣化及び鋼材の腐食が生じたと考えられます。

事故発生以前も、目視点検を中心とした点検は実施されていたものの、六十谷水管橋の経歴や特徴等を考慮した維持管理が行われてはいませんでした。このため、今後は水管橋を構成する全ての部材を対象とした点検をはじめ、適切な維持管理を行うことが必要であります。

特に、六十谷水管橋のような大規模で構造が複雑な水管橋については、点検の死角となる場所が多く、構造上においても注意すべき点多岐に渡ります。さらに、復旧工事の結果、更新した 3 径間と補修対応の 4 径間が混在した状態になっている特異な状況も考慮した維持管理マニュアルを整備することについては意義が大きいと言えます。

今後の点検においても目視が基本となりますが、劣化が進んでいる箇所においては打音検査など直接触れるようにして劣化状況を把握し、通常点検よりもさらに細かいスケジュールで維持管理することを徹底するとともに、維持管理システムを確実に未来へ繋ぐために、事業体職員がしっかりと知見を持てるような人材育成も必要です。

維持管理マニュアルの完成後は、しっかりとマニュアルを活用することはもちろん、新たな知見や技術も取り入れながらブラッシュアップしていくこと、また、着実に実行するための組織的な体制を確保することが重要であります。

最後に、水道事業において過去に例を見ない大きな出来事であった落橋事故を二度と繰り返すことがないように、組織全体として持続的に取り組んでいかれることを期待しています。

今回の水管橋の架け替え復旧で留まることなく、別の水源もしくはルートで紀の川以北地域への安定供給ができるように、長期的な視野で水道システムの設計、維持管理を進めていただきたいと思います。

六十谷水管橋破損に係る調査委員会 座長 楢田 泰子

目 次

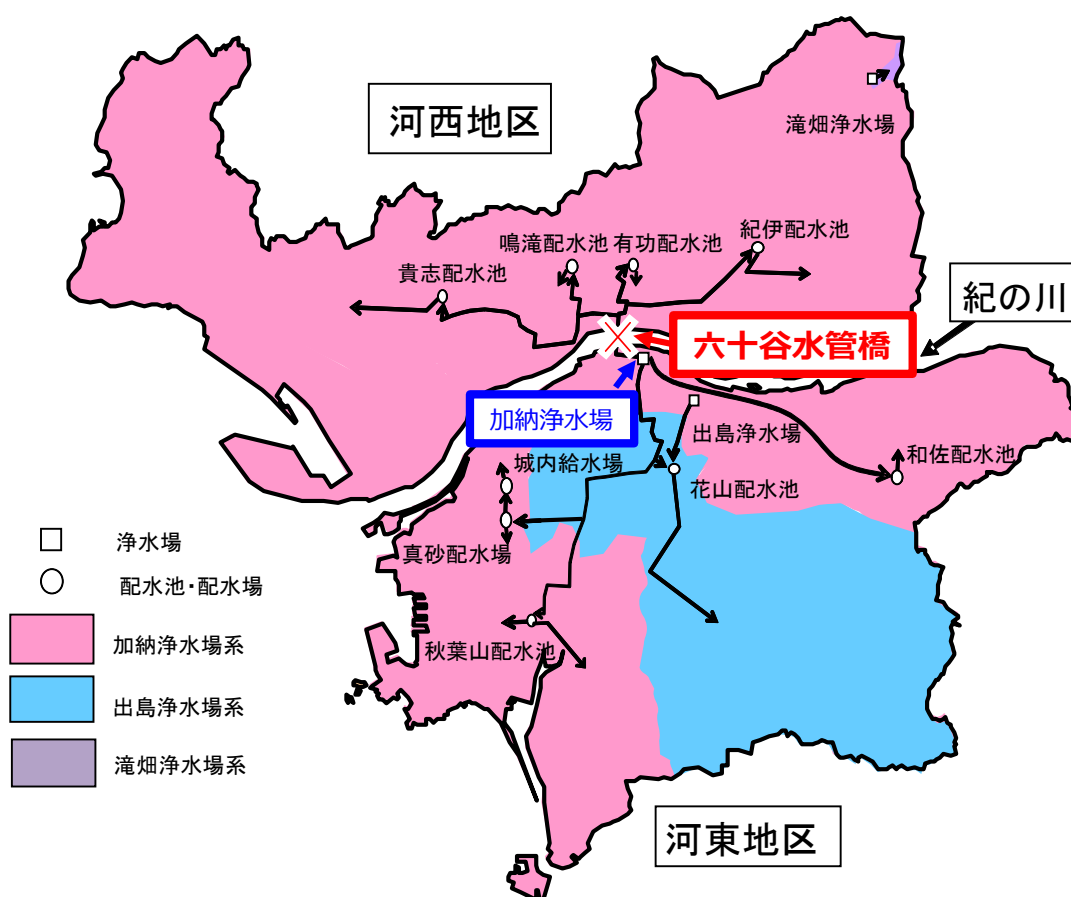
1. 経緯について	1
1.1. 六十谷水管橋の沿革.....	1
1.2. 事故発生から応急給水までの経過.....	2
1.3. 応急復旧工事.....	3
1.4. 落橋状況の概要.....	4
1.5. 本復旧工事の概要	5
2. 六十谷水管橋についての整理.....	6
2.1. 水管橋の基本構造条件	6
2.2. 構造的な特徴.....	7
2.3. SS 材（一般構造用圧延鋼材）の特徴	8
2.4. 空気弁の特徴.....	8
2.5. 溶接技術の特徴.....	9
2.6. 支承部の特徴.....	9
2.7. 塗装の特徴	10
2.8. 全国的にみた水管橋の課題など	11
2.8.1. 水管橋の補剛形式と点検状況.....	11
2.8.2. 水管橋等の劣化に伴う落橋事例	11
2.9. 設計基準類との整合.....	13
3. 水管橋の改修履歴の整理.....	14
3.1. 風（カルマン渦）対策（1976 年）	14
3.2. 塗装更新（1993 年）	15
3.3. 耐震補強工事（2015 年）	16
4. 各種調査結果とその考察.....	18
4.1. 2021 年 10 月に発生した六十谷水管橋崩落調査報告書（2022 年 5 月、土木学会）	18
4.2. 水管橋の調査・分析.....	21
4.2.1. 調査項目.....	21
4.2.2. 調査・分析結果のまとめ.....	21
4.3. 各種調査結果.....	27
4.3.1. 腐食調査結果	27
4.3.2. 管厚測定結果	28
4.3.3. アーチ材（上弦材）破断面観察結果.....	30
4.3.4. 吊材破断面観察結果	31
4.3.5. 引張試験結果	32
4.3.6. 更新区間の落橋・腐食状況調査結果（外観目視調査）	33
4.3.7. 残存区間の腐食状況調査結果（外観目視調査）	38
5. 腐食メカニズムや要因の分析.....	42
5.1. 腐食メカニズム	42

5.2.	鋼材腐食の要因の抽出	42
5.3.	カワウの生息状況（鳥糞による腐食）	43
5.3.1.	本水管橋周辺のカワウ確認個体数	43
5.3.2.	カワウ飛来の可能性	44
5.3.3.	本水管橋におけるカワウ確認数	45
5.4.	海からの飛来塩分による影響	46
6.	落橋メカニズムや要因の分析	47
6.1.	落橋メカニズム	47
6.2.	動画解析による落橋過程の分析	47
6.2.1.	落橋過程の推定	47
6.2.2.	落橋メカニズムの推定	49
6.3.	構造解析による落橋過程の分析	50
6.3.1.	構造解析による分析の目的	50
6.3.2.	解析方法や解析条件など	51
6.3.3.	解析結果	52
6.3.4.	落橋メカニズムの推定	55
7.	水管橋の維持管理履歴と課題の整理	56
7.1.	落橋前の維持管理について	56
7.1.1.	維持管理点検の実施状況	56
7.1.2.	維持管理の履歴と課題	57
7.2.	既往の各種点検マニュアルとの比較	57
7.3.	これまでの維持管理の課題	61
8.	復旧及び今後の対応について	62
8.1.	復旧工事で実施した改良点	62
8.1.1.	更新区間	62
8.1.2.	残存区間	64
8.2.	今後の対応方針	66
8.2.1.	残存区間の対応（補強・補修工事）	67
8.2.2.	更新区間の対応（更新工事）	67
8.2.3.	今後の維持管理項目について	67
8.2.4.	より高いレベルの対策について	67
8.3.	給水安定性確保に向けた展望	74
8.3.1.	本市の水道施設計画における本水管橋の整備の在り方	74
8.3.2.	本水管橋の耐震性について	74
8.3.3.	地震対策について	74
8.3.4.	維持管理マニュアルの策定に向けて	75
8.3.5.	今後の展望の具体化	77

1. 経緯について

1.1. 六十谷水管橋の沿革

六十谷水管橋（以下、「本水管橋」と記す。）は、図 1.1 に示すように本市の基幹浄水場である加納浄水場から供給された水道水を、貴志配水池、鳴滝配水池、有功配水池、紀伊配水池の 4 つの配水池を経由し、紀の川以北（河西地区）約 6 万世帯（約 13 万 8 千人）へ供給する唯一の送水管となっている。このように送水ルートが 1 つしかないことから、本市では、和歌山市水道ビジョン（平成 21 年 3 月）において、被災時に備えた送水ルートの追加整備を実施する構想としていた。



加納浄水場



六十谷水管橋（落橋前）

図 1.1 六十谷水管橋位置図

1.2. 事故発生から応急給水までの経過

事故発生から仮復旧工事による応急給水までの経過を以下に示す。

【令和3年】

- 10月3日（日）

- 15時44分 加納浄水場にて送水量の低下を示す異常を感知
- 16時10分 六十谷水管橋の落橋を本市職員が現地確認
- 19時30分 企業局記者会見（水道の断水について）
- 20時00分 第1回対策本部会議



図 1.2 水管橋落橋状況

- 10月6日（水）

- 10時00分 部材到着・仮復旧工事着手



図 1.3 応急復旧工事状況

- 10月8日（金）

- 22時30分 仮復旧工事完了
- 22時38分 配水池への送水開始

- 10月9日（土）

- 8時30分 順次給水開始

- 10月10日（日）

- 20時00分 紀の川以北地域全域への飲料水としての使用が可能となる

約6日間断水（最大6万世帯）

1.3. 応急復旧工事

断水している世帯にできるだけ早く水道水を供給する必要があったため、本水管橋に隣接して並走する県道 141 号六十谷橋の車道を全面通行止めにして仮設バイパス管を設置する応急復旧工事を行った。

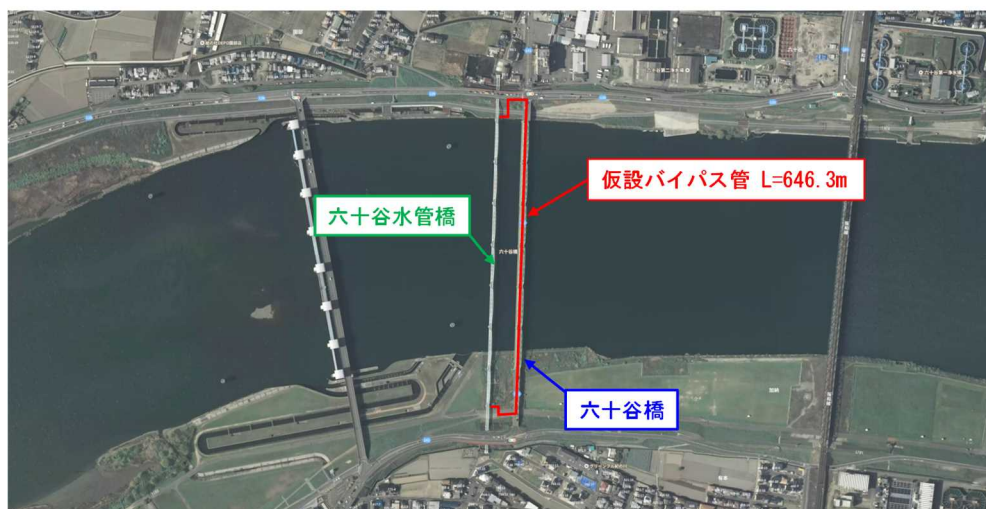


図 1.4 仮設バイパス管布設ルート（応急復旧工事）

【令和 3 年】

● 10 月 6 日（水）

- 10 時 00 分 六十谷橋全面通行止め
工事部材の搬入開始
応急復旧工事着工
- 17 時 00 分 水管橋北側河川敷布設部 足場設置完了
水管橋南側河川敷布設部 足場設置完了
六十谷橋布設部 H 鋼敷設開始

● 10 月 7 日（木）

- 7 時 00 分 水管橋南側河川敷布設部 L= 23.6m
六十谷橋布設部 L=264.0m
- 20 時 30 分 水管橋北側河川敷布設部 L= 7.0m
水管橋南側河川敷布設部 L= 52.7m
六十谷橋布設部 L=456.0m
計 L=515.7m（全施工延長 646.3m）

● 10 月 8 日（金）

- 22 時 30 分 工事完了
水管橋北側河川敷布設部 L=78.3m
水管橋南側河川敷布設部 L=84.0m
六十谷橋布設部 L=484.0m
計 L=646.3m（全施工延長 646.3m）
- 22 時 38 分 通水開始

【令和 4 年】

● 6 月 10 日（金）仮設配管撤去完了【非出水期間内】



図 1.5 応急復旧工事状況

1.4. 落橋状況の概要

本水管橋の落橋は P4 橋脚と P5 橋脚の間で発生しており、通水管を含む構造部材が河川内に落下（落橋）している状況が確認された。水管橋を構成する部材では、次図に示すようにアーチ材の座屈と溶接部の破断が生じており、吊材にも破断がみられた。また、両端の橋脚部分で通水管の脱落がみられた。

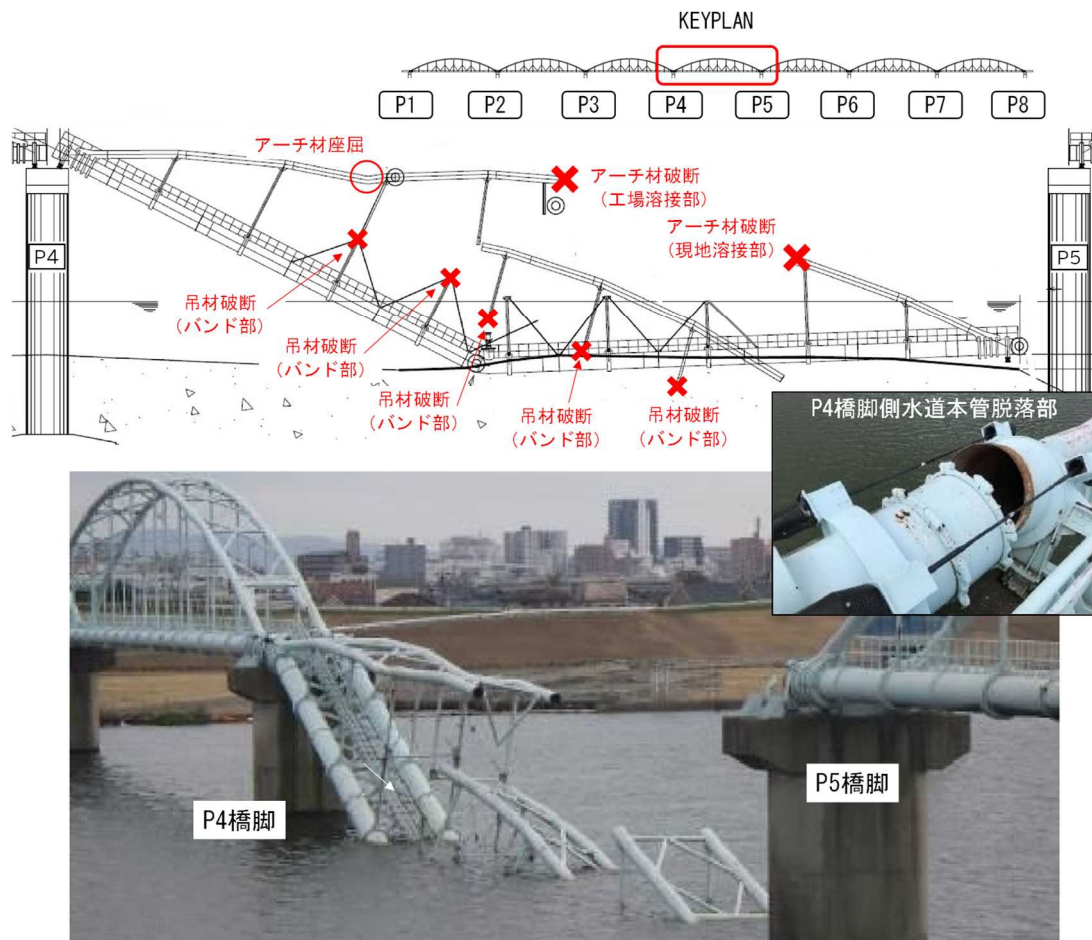


図 1.6 水管橋の落橋状況

1.5. 本復旧工事の概要

本復旧工事は、非出水期間内における河川区域内からの仮設管路の撤去と、仮設管路が布設されている六十谷橋の通行止めを解消するために、早急に実施する必要があった。そのため、本委員会と並行して実施した。

これらの本復旧工事の概要を図 1.7 に示す。下図に示すように、落橋した径間に隣接する 2 径間についても、支承部をはじめとし落橋による影響が考えられたことと、既に複数の吊材の破断が確認されるなど腐食が著しいことから、更新する計画とした。また、他の径間については既設を残存させて継続使用するも、吊材や風対策部材は更新・改修とした。さらに、詳細な劣化調査を行い、細部において腐食が確認された箇所については、技術的評価を行ったうえで、必要に応じて補修工事をし、塗装全面更新を行う計画とした。

このような計画で実施する本復旧工事について、本委員会では、様々な視点から調査・分析を行ったうえで審議を行うものとした。そして、本委員会での意見や審議事項については、本復旧工事の進捗に応じて可能な限り反映し、できない項目は今後の対応として、段階的な対応について示すものとした。また、新たに維持管理マニュアルの策定にも着手し、審議事項を反映するものとした。

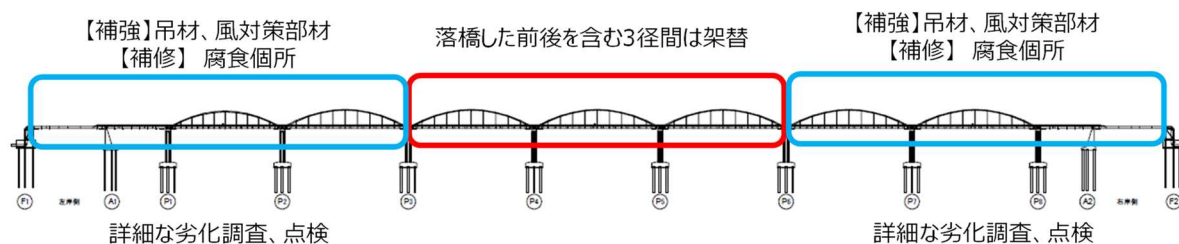


図 1.7 本復旧工事の概要

2. 六十谷水管橋についての整理

本水管橋の落橋原因の究明や、今後の残存区間を含む対策方法及び維持管理方法を検討するためには、本水管橋の構造や塗装などに関する特徴を整理することが重要である。そこで本章では、本水管橋の構造や使用材料をはじめ、空気弁や支承部、部材の接合方法、塗装など、様々な特徴について整理した。

2.1. 水管橋の基本構造条件

本水管橋の基本構造条件を以下に示す。

表 2.1 六十谷水管橋の基本構造条件

通水管径	900A（外径 914.4mm）×2 条
形式	ランガー補剛形式及び二径間連続支持パイプビーム形式
橋長	546.55m
使用鋼材	STPY41、STK41、SS41
使用塗料	ふっ素樹脂塗装 架設当時：アクリル変性アルキド樹脂塗装（外面）、エポキシ樹脂塗装（内面）
伸縮管	摺動型伸縮管
支承	ローラー及びピン支承
供用開始	昭和 48 年度

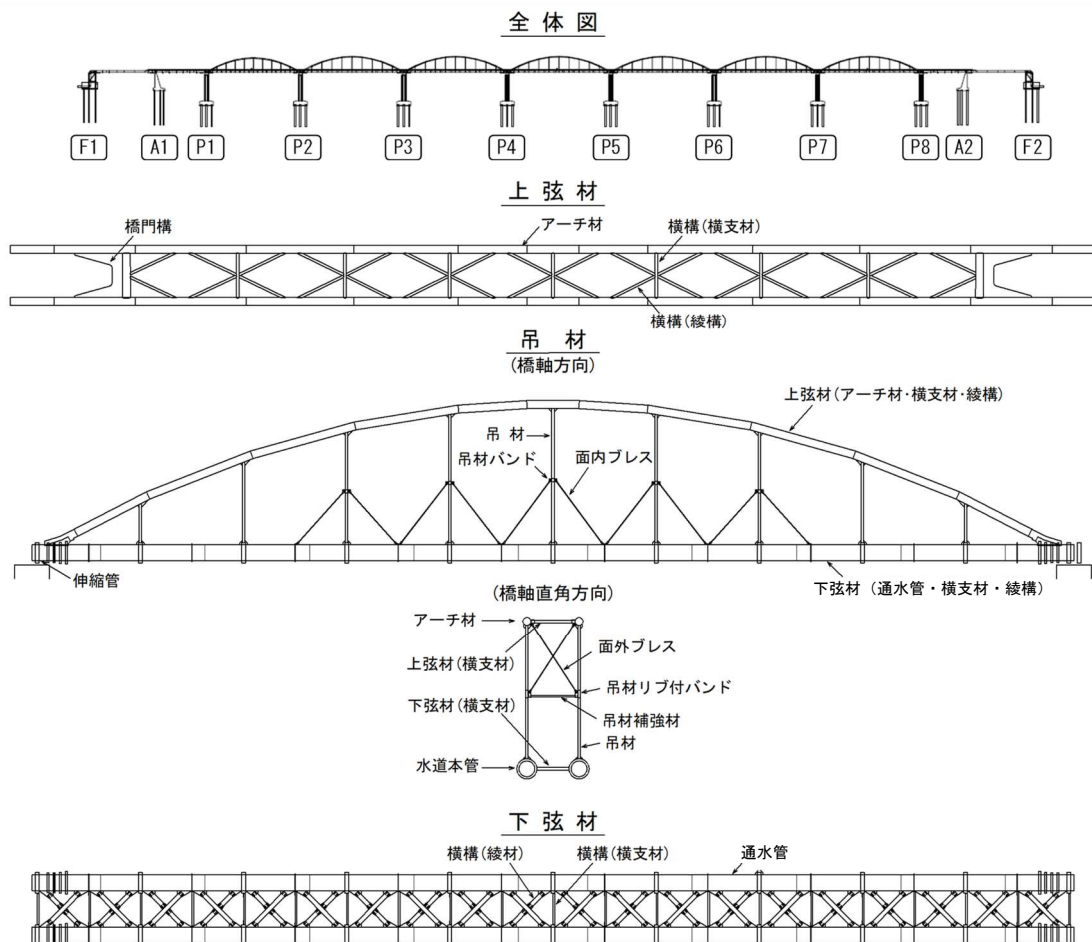


図 2.1 六十谷水管橋の構造諸元



図 2.2 水管橋の各部材名称

2.2. 構造的な特徴

本水管橋の構造的な特徴を図 2.3 に整理する。本水管橋は、アーチ補剛形式（ランガー橋）の構造形式であり、我が国の水管橋では多く見られる標準的な形式である。構造的な特徴としては、アーチ補剛材を使用することで、比較的大口径の通水管路であっても、長い支間長とすることで橋脚の数も含めて経済的な構造とできる長所がある。橋脚の数は河川通水断面にも影響する。その一方で、パイプビーム方式（補剛材のない通水管のみの構造）などと比べて、構造が複雑で規模が大きく点検範囲が広い。また、補剛材によりバランスを保っているため、それらの破断などによりバランスを失えば脆性的に落橋する可能性がある。さらに吊材は、通水管やアーチ材に比べて直径が小さく部材厚さも薄い材料であるが、鋼材の腐食スピードは材料に関係なく同等であると考え、最も腐食の影響が生じやすい部材であると言える。

今回の事故では、重要な構造部材であるアーチ材や吊材の破断が生じており、水管橋全体のバランスが崩れ安全性（耐荷力）が急激に低下し、落橋に至ったと考えられる。

【構造的な特徴】

- 本水管橋のようなアーチ補剛形式（ランガー橋）の水管橋は、全国に数多く設置されている一般的な構造物である。
- 構造上、吊材には大きな引張力、アーチ材には大きな軸圧縮力が作用し、構造全体として、力学的な作用がバランスを保っているため、部材寸法の大小に関係なく全て構造的に欠かせない重要な部材である。

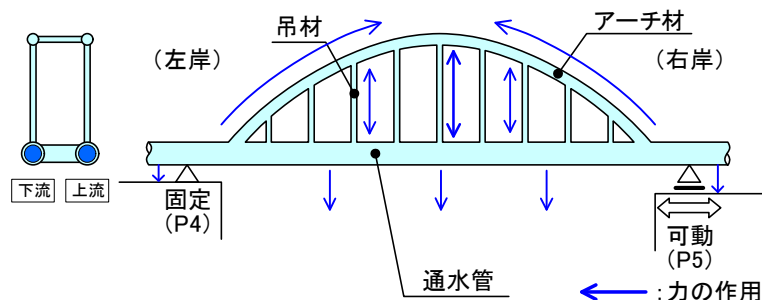


図 2.3 アーチ補剛形式（ランガー橋）の水管橋 各部材における力の作用

各部材に作用する力の作用や部材強度に影響する経年劣化による鋼材の腐食対策などは、構造的な安全性を評価する上で重要な要素となるため、水管橋全体系の構造的な特徴を十分に踏まえておくことが重要である。

2.3. SS 材（一般構造用圧延鋼材）の特徴

本水管橋の主要部材には一般構造用圧延鋼材（SS 材）が使用されており、その部材の特徴を以下に整理する。

【使用部材（一般構造用圧延鋼材）の特徴】

- 材料の特性として、本水管橋の設計時にも広く採用されている。
- 設計強度の基準値は、建設当時と変わっていない。
- 基本的に塗装による腐食対策を行っており、設計時には腐食することを前提にしていない。

SS 材は、塗装による適切な腐食対策を実施することで幅広く使用されている材料であるが、腐食が生じた場合に管厚の減少や、その進展により部材強度の低下が生じる。そのため、防食対策として塗装の状況が施設の耐用年数を大きく左右し、塗装の適切な施工と塗装の劣化状況の管理が非常に重要である。

なお、ステンレス材料は、耐腐食性が高いことなどから昨今多く使用されているが、価格が高くランガー形式の水管橋への適用事例は極めて少ない。比較的支間長が短い小規模な水管橋では採用される傾向にある。

2.4. 空気弁の特徴

水管橋の最も高い箇所には空気弁を設けることが設計基準（WSP 007-2019 水管橋設計基準【改定 5 版】）に定められており、送水を行うにあたり必要な設備である。しかし、本水管橋では空気弁が載せられた T 字管付近で大きな座屈変形がみられ、これらの開口部が弱点となった可能性がある。水管橋の空気弁の設計基準については資料編①に示すものとし、ここでは、本水管橋の空気弁の特徴について整理する。

【空気弁の特徴】

- 大きく変形した通水管に設置されている空気弁は、主に充水時に管内空気を排除することを目的として設置される重要な設備である。
- 空気弁部の構造は、現地溶接部の内面塗装の実施等、施工時の人孔を兼用することが多く、大口径（φ 600mm）の分岐構造となっている。
- 空気弁の設置位置は、主に効率的に管内空気を排除することを目的として水管橋の中央部（最高点）に設置されることが多いが、維持管理上の都合から、橋脚から作業が可能となるよう、支間の端部に設置する事例もある。
- 通常の設計においては、空気弁接合部の通水管の詳細な構造部分（通水管に大きな開口がある）の評価は行わず、これを考慮しない形で水管橋を一様断面としている。

空気弁は、水管橋の水理的な機能を維持するために、必要不可欠なものである。ただし、構造的には通水管の円環断面の欠損部となり、構造上の弱点となる可能性がある。そのため、空気弁

設置部において大きな荷重作用が生じる場合などにおいては、より詳しく構造検討を行うことを目的として、設計で一樣断面として評価するのではなく、局所的な構造変化（開口）を適切に考慮し、水管橋全体の安全性に与える影響を解析により評価することが重要である。



図 2.4 空気弁部の下弦材（通水管）の座屈状況

2.5. 溶接技術の特徴

本水管橋では、アーチ材の工場及び現場溶接部で破断が生じており、これらの溶接部が弱点となった可能性がある（詳細は資料編②参照）。本水管橋の溶接部の特徴を以下に整理する。

【溶接部の特徴】

- アーチ材は裏当て金溶接で接合されており、架設当時から今現在も広く用いられている溶接方法である。
- この方法は、施工方法によっては、架設当時の溶接技術では裏当て金の内側に未充填部が残る傾向がある。
- 現在では JIS に基づいた試験を行っており、機械の安定性、溶接棒の性質自体もレベルアップされ、これらの課題は大きく改善されている。

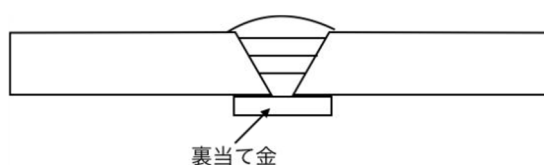


図 2.5 裏当て金溶接

本水管橋では、上記のように架設当時の溶接技術のレベルにより溶接が万全ではなく、アーチ材の溶接部の強度低下やそれにより破断した可能性もある。これについては、更新区間の詳細な調査結果や構造解析結果なども踏まえ、水管橋全体の安全性を適切に評価する必要がある。

2.6. 支承部の特徴

本水管橋では、通水管が支承部で抜け落ち、部材の破壊が生じている。支承部の変状は、支承構造に起因する可能性がある。本水管橋の支承部の特徴を以下に整理する。

【支承部の特徴】

- 本水管橋の支承はピン支承であり、近年一般的に設けられている支承板支承とは異なる。
- 支承高さの高いピンローラー支承は、水平荷重が作用した場合に弱く、現在は極力使用を避けるのがよいとされている。
- 本事例では、可動支承が移動量を超過し、破壊したものと考えられる。

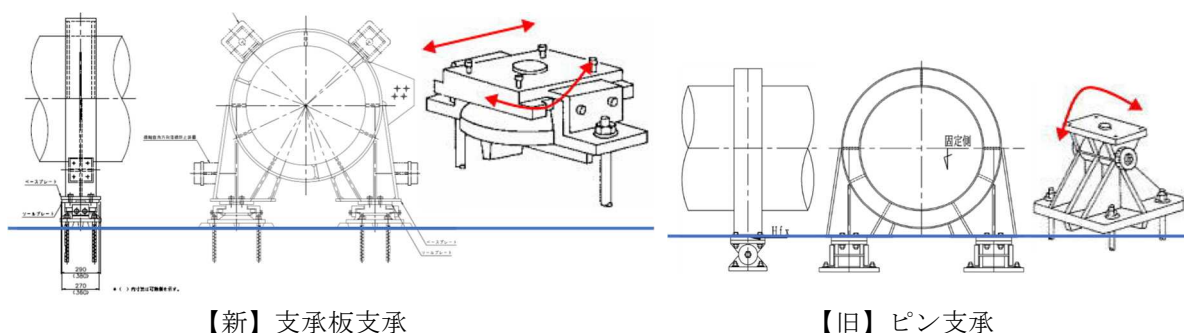


図 2.6 支承構造

支承は、想定外の作用により破壊したと考えられる。現状の基準類などを参考に、支承板支承への変更が望ましい。また、できるだけ可動域を大きくするのが望ましい。また、資料編③に示すように過去の地震において損傷被害の報告が多く、耐震上の弱点として考える必要がある。

2.7. 塗装の特徴

本水管橋では、主要部材をはじめ、鋼材の腐食による部材の管厚減少などに伴う部材強度の低下を防止するために全面に防食塗装が施されている。塗装の塗膜は経年劣化や施工品質等により防食効果が低下し、構造物の安全性に影響を与える。以下に、本水管橋の塗膜の耐久性や施工品質など特徴を整理する。

【塗装の特徴】

- 本水管橋の架設時の塗装種類は、アクリル変性アルキド樹脂塗装であった。
- 平成 5 年更新時の塗装はふっ素樹脂塗装であり、一般的には約 30 年以上の寿命を期待できる最も耐久性の高い塗装と考えられる（資料編④参照）。親水性が高く、スケールなどが洗い流され付着防止効果がある。
- ふっ素樹脂塗装において、長期の耐用年数を期待するには、いくつかの施工条件を満足する必要がある。例えば、新しい塗膜の剥離が生じないように下地（建設時の塗装）を完全に除去する必要があるが、一般的に本水管橋のように河川への影響がある場合には、有害物を含む可能性のある既設塗装の全面塗装撤去は難しい（資料編⑤参照）。

現在の本水管橋の塗装（ふっ素樹脂塗装）は、塗装材料自体の耐食性は高いことから、その耐食性を有効に発揮できるように、適切な施工条件として、下地と上塗り材が付着しやすく、かつスケールなどが堆積しないような凹凸部のない構造とし、難しい場合は、適切な維持管理を行う必要がある。

2.8. 全国的にみた水管橋の課題など

2.8.1. 水管橋の補剛形式と点検状況

本水管橋の落橋事故を受けて、厚生労働省において全国の上水道事業者の水管橋管理状況を把握するための緊急調査が行われ、その結果が2021年12月24日に公表された。その中で全く点検を実施していない水管橋があるほか、補剛材を点検していない施設を含めると、概ね半数の施設において十分な点検が行われていないことが明らかとなっている。

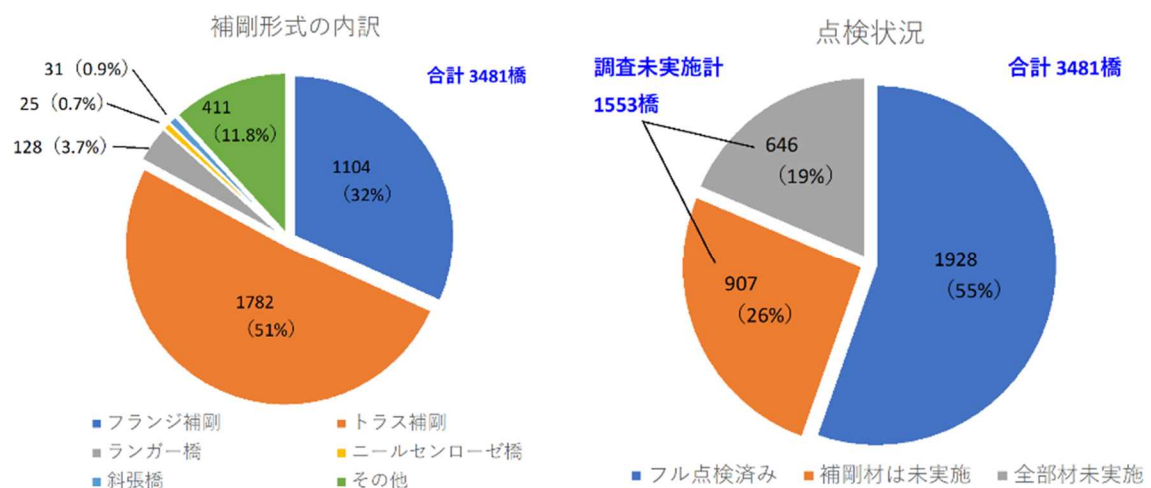


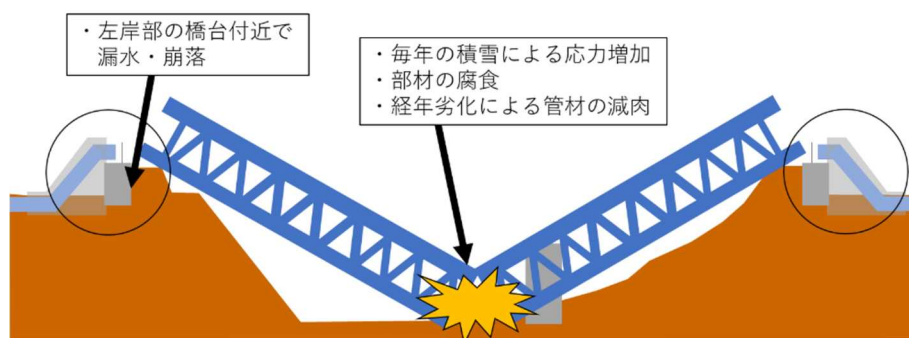
図 2.7 全国の水管橋補剛形式の内訳と点検状況

出典：全国上水道水管橋緊急調査結果（厚生労働省：2021年12月24日）より

2.8.2. 水管橋等の劣化に伴う落橋事例

2021年2月24日に発生した美唄市の水管橋落橋事例であり、本水管橋と同様に経年的な腐食による劣化などが落橋の要因として考えられる事例である（詳細は資料編⑥参照）。また、本水管橋と同様に溶接部の破断が確認されており、溶接部が構造的な弱点となる可能性があることを示している。

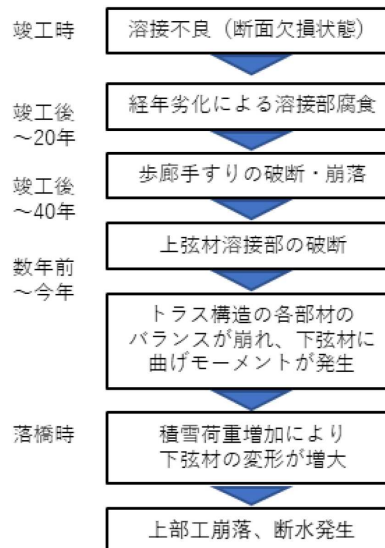
【美唄市導水管水管橋落橋（2021年2月24日発生）】



形式	逆三角トラス補剛形式
橋長	57.7m
水管口径	φ500mm
管厚	7.0mm（実測9.0mm）
竣工年	昭和51年

【崩落の主要因】

- ①施工時の上弦材溶接部不良および経年劣化による腐食に伴う上弦材の破断
- ②上弦材の破断による下弦材への曲げ応力増加
- ③降雪による上載荷重の増大に伴う下弦材の破断



出典：美唄市水道事故に関する報告書
令和3年12月 美唄市都市整備部上下水道課

2.9. 設計基準類との整合

本水管橋の落橋事故に際し、残存区間を含め今後の対策を行う上では、現行の設計基準に適合した対策を行う必要がある。資料編⑦に水管橋の設計基準類の変遷を示す。

本水管橋と現行の設計基準類との整合性は次のとおりである。

【設計基準類との整合】

- 本水管橋の設置以降、関係する基準類は複数回の改訂を重ねており、現行の基準類には対応できていない。
- 対応できていない事項（構造細目）として主に、レベル2地震対応（伸縮管の性能、支承の性能）などが挙げられる。
- 過去に実施された耐震補強工事において、落橋防止対策が実施されている。
- 水道施設耐震工法指針が2022年6月に改訂され、危機耐性の考慮や高度な解析手法を推奨している（4.1.9 水道施設耐震工法指針（2022年6月）の主な改定動向 参照）。
- 道路橋などの現行の基準類では、耐久性確保（腐食対策）のための配慮事項（滞水しにくい構造、塗膜が確実に確保できる構造など）が示されている。

本水管橋では、現在の設計基準類の適合していない項目があり、残存区間を含む対策において段階的な対応により最新の基準類との整合を目的とした補強が必要である。また、2022年6月に改訂された水道施設耐震工法指針に示す危機耐性の考慮についても、想定外の事象を考慮した災害対策の実施を目指して検討することが望ましい。

表 2.2 水管橋で考慮する危機耐性対策の例

想定外場面	事象	危機耐性方策
風水害	河川堤防の決壊	【大規模】 複数系統化、バックアップ体制 【小規模】 落橋防止システムの設置による大規模変形・大規模漏水・落橋防止 護岸工などによる洗掘防止対策 衝突荷重の考慮
	橋台、橋脚の洗掘による沈下、転倒、流出	
	流木などの衝突	
地震・津波	ウォーターハンマー対策	空気弁類の水撃圧を考慮した選定
	液状化による橋台・橋脚の沈下、転倒	液状化防止対策（地盤改良など）
	津波対策	想定津波高さより高い位置に水管橋を設置
	想定外のゆれ	落橋防止システムの設置による大規模変形・大規模漏水・落橋防止
	連続地震動	落橋防止システムの設置による大規模変形・大規模漏水・落橋防止
	地盤の断層変形	断層変形のおそれのある場所には極力水管橋は設置しないやむを得ず設置する必要がある場合は、可能な限り断層変位量を想定し、これに対応可能な伸縮可撓管を設置するなどの対策を実施
	堤防周辺の地すべり	山間部などの橋台背面が地すべりにより、配管が抜け出し漏水した被害例もあり、このような箇所は想定以上の伸縮が可能な伸縮可撓管を設置し、また離脱防止機能も同時に設置

出典：水道施設耐震工法指針・解説 2022年版 pp.187

3. 水管橋の改修履歴の整理

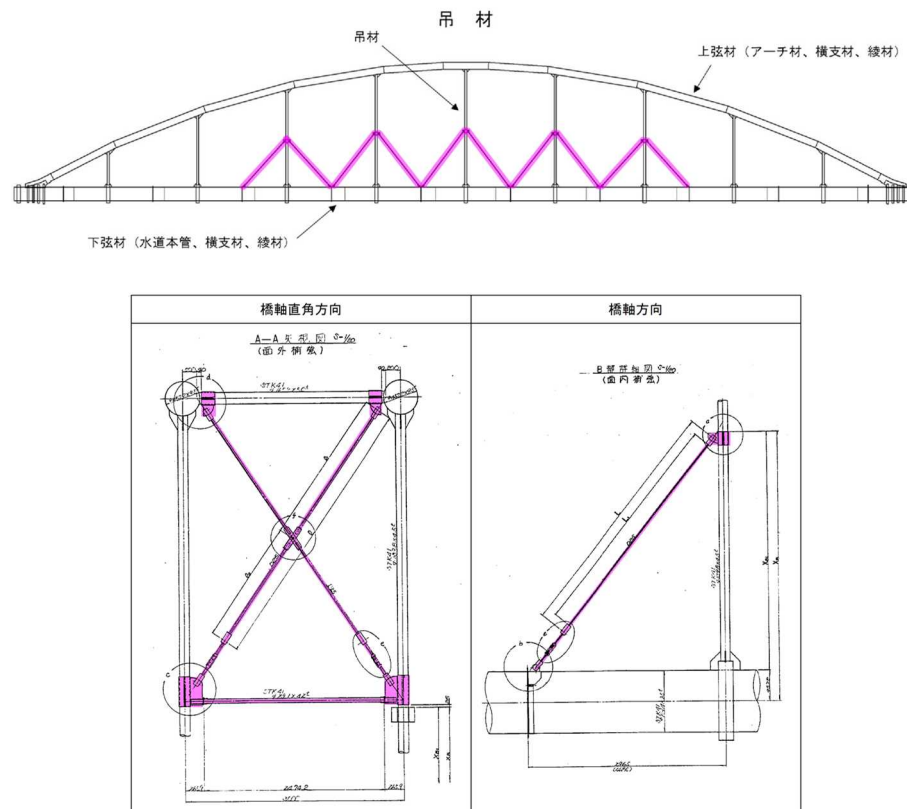
本水管橋は、完成からこれまでの間に、下表に示すような風に対する補強対策や塗装更新、耐震補強工事などの改修工事を行っている。これらの改修履歴の概要を以下に示す。

表 3.1 六十谷水管橋の改修履歴

日時	内容
1974 年 (昭和 49 年)	六十谷水管橋完成
1976 年 (昭和 51 年)	吊材に亀裂が発生し、風対策として上下部を $\phi 150$ の二重管とする補強を実施
1978 年 (昭和 53 年)	吊材に亀裂が再度発生
1980 年 (昭和 55 年)	補強材として後付け部材を設置
1993 年 (平成 5 年)	塗装塗替え実施、トップコートを除去し、ふっ素樹脂塗装
2006 年 (平成 18 年)	耐震診断実施。上部工は耐震性なし、下部工は L1 地震動のみ耐震性あり
2015 年 (平成 27 年)	落橋防止装置設置工事。吊材補強材の横材を取り換え。
2021 年 (令和 3 年 10 月)	中央部 1 径間の落橋
2022 年 (令和 4 年 6 月)	中央 3 径間の更新、残り 4 径間の補強、修繕。 更新部：吊材の大きさを $\phi 125$ から $\phi 250$ に変更、上部工は L2 耐震性あり 補強部：吊材の大きさを $\phi 125$ から $\phi 150$ に変更、補強材を溶接取付に変更

3.1. 風（カルマン渦）対策（1976 年）

本水管橋は、1976 年に吊材にカルマン渦を原因とする亀裂が多数発見されたため、図 3.1 のように吊材の面外及び面内に水平材や斜材を取り付けて補強を行っている（詳細は資料編⑧参照）。



■：風（カルマン渦）対策補強部材を示す（S55）

図 3.1 風（カルマン渦）対策概要図

3.2. 塗装更新（1993 年）

平成 5 年にふっ素樹脂塗装への全面更新工事が実施されている。その際、風対策を目的に設置された吊材の後付け補強材の下面は塗装を更新されていなかった。また、塗装の更新にあたっては、既設のトップコートのみ撤去・更新し、既設の塗装を完全に撤去していないことが確認できた。なお、塗装の更新工事に併せて同時に詳細な劣化調査が実施され、下図に示すように吊材の後付け補強材周辺の局所的な腐食が確認されている。この時点から吊材の腐食に注目した維持管理点検を実施する必要があったものとする。ただし、吊材は破断などの著しい腐食状況ではなく、これ以降、落橋事故までの間に大きく進展したものと推察される。詳細は資料編⑨に示す。



図 3.2 吊材の腐食状況（1993 年劣化調査）

3.3. 耐震補強工事（2015 年）

本水管橋の耐震補強工事として、2015 年に橋軸方向及び橋軸直角方向の落橋防止装置が設置されている。この装置は、フェールセーフ機能の確保が目的であり、設計想定外の地震作用（外力や変位）が生じても落橋しないことを目的として設置するものである。ただし、資料編⑩に示すように、この装置は地震対策が目的であり、今回の事故のように吊材が破断した状況において落橋を防止する耐力は有していない。

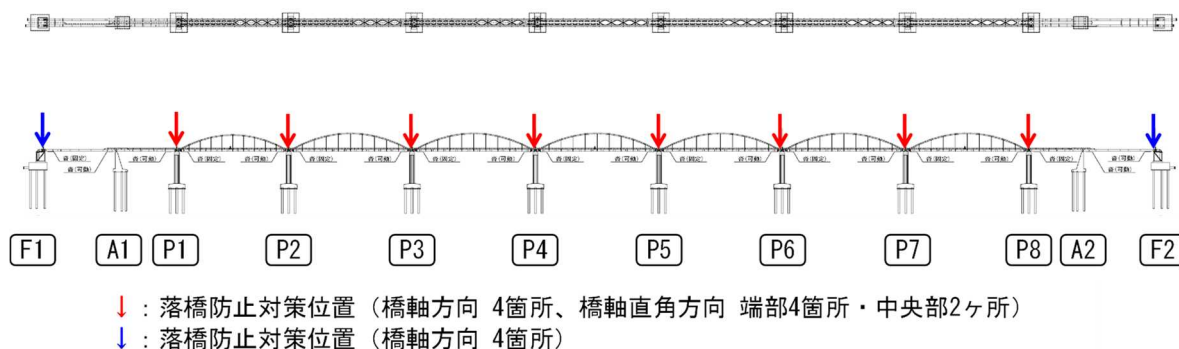
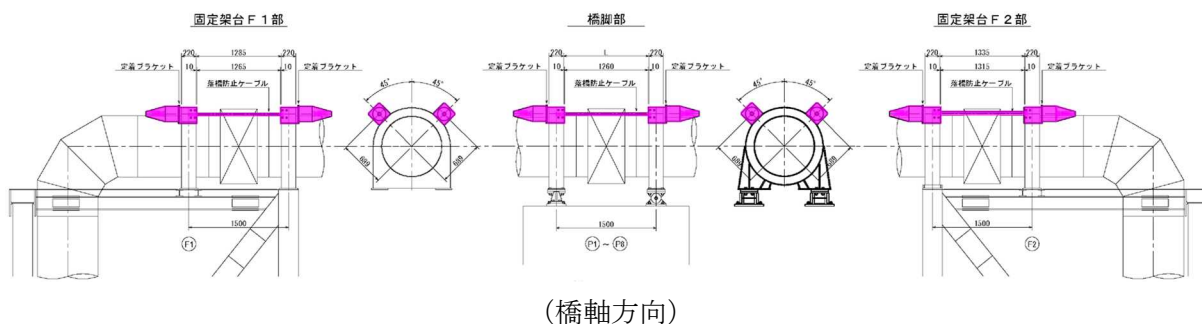


図 3.3 落橋防止対策実施位置（2015 年）



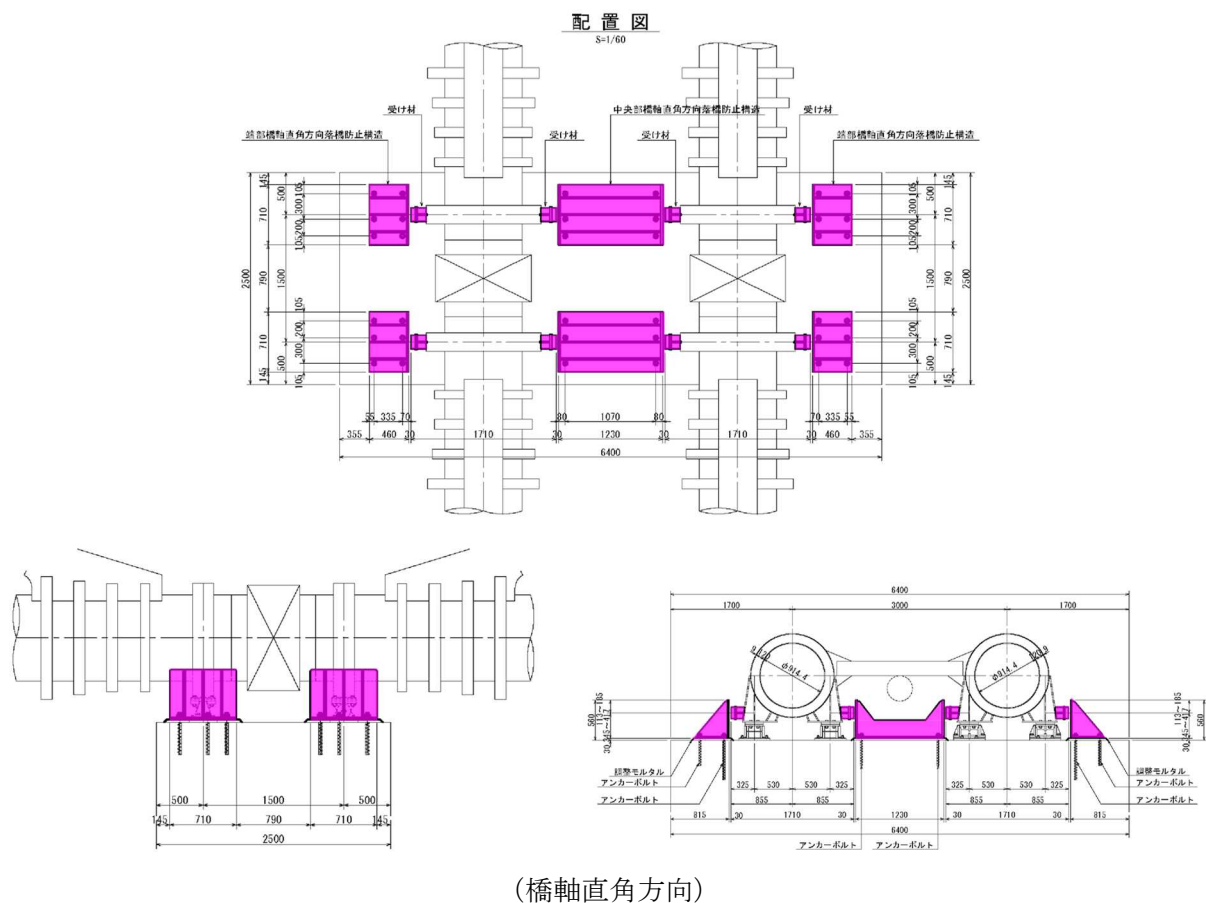


図 3.4 落橋防止装置の構造

なお、平成18年度に実施した耐震診断では、所定の耐震性能を満足しない結果となっている。
必要最小限の補強として落橋防止装置が設置されているものの、今後は下部構造を含め段階的な耐震補強工事の実施ならびにフェールセーフ機能の強化を検討する必要がある。

4. 各種調査結果とその考察

落橋事故の調査・分析に先立ち、各委員による指摘事項も踏まえ、落橋要因や腐食要因、維持管理方法、構造計算方法（解析方法）、落橋しやすい弱点部等の検討に資する情報を収集することを目的として、既往文献や資料の調査・分析を行った。文献調査の対象としては、水管橋だけでなく、道路橋に関する文献についても対象とした。これらの調査結果は、本水管橋において調査すべき項目の選定や、今後の対策検討に反映させた。これらの既往文献や過去の被害事例調査の結果は資料編に取りまとめ、本項では公益社団法人土木学会関西支部（以下、「土木学会」と称する。）により行われた調査の内容について示す。

4.1. 2021 年 10 月に発生した六十谷水管橋崩落調査報告書（2022 年 5 月、土木学会）

土木学会が 2022 年 5 月に発表した調査報告書であり、本委員会とは別に現地調査や各種調査・分析を行い、その結果にもとづき落橋要因などを分析したものである。今回の本委員会の報告では、それらの調査結果や知見も参考に取り入れ、成果を取りまとめた。調査報告書の主な概要を以下に示す。

【現地調査のまとめ】

- 崩落後の調査より、崩落した径間及び隣接径間（崩落径間の右岸側）において吊材の破断箇所は上部と下部の 2 種類存在することが確認できた。上部破断の場合はブレース材がアーチリブと吊材を連結し通水管の死荷重がアーチリブに伝達されるが、下部破断の場合は吊材がアーチリブから切り離され荷重を受け持たなくなる。
- 崩落以前に撮影された Google map のストリートビューの画像情報から複数の吊材上部が 2020 年 12 月時点で破断していることが確認できた。

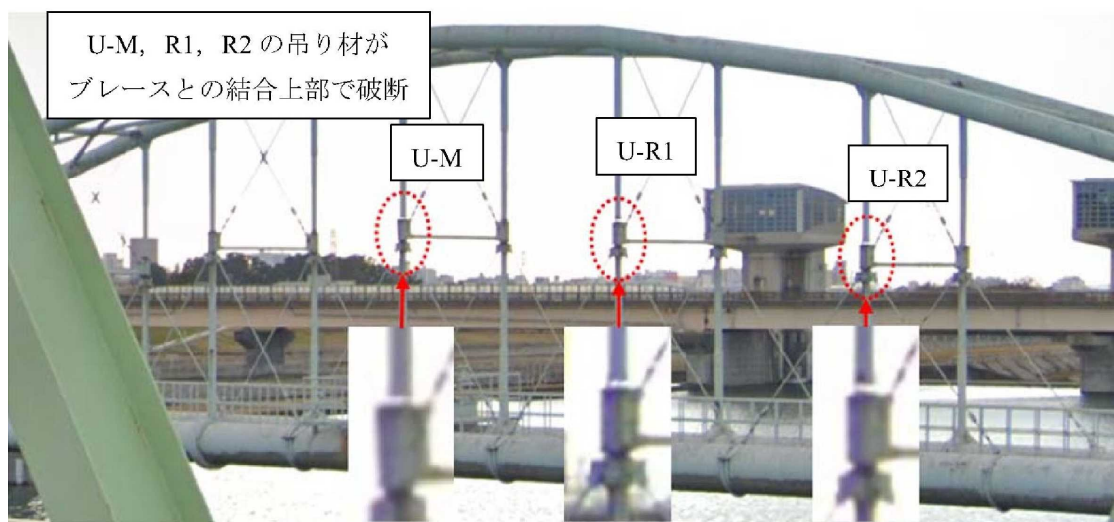


図 4.1 崩落した径間の 2020 年 12 月における写真

【腐食に関する計測結果】

- 外観観察より、ほとんどの部材で塗膜の劣化が確認され、一部で局所的なさびが観察された。特に風の防振対策で後から取り付けられた部材の回りで局所的なさびが激しいことが確認できた。
- 局所的に塗膜の劣化が始まり、鳥の糞等の付着物によってさびの発生が促進されたと考え

られる。

- 表面塩分量について、両径間には大きな差があり右岸側径間は左岸側に比べて 13～30 倍程度大きい値となった。また、鳥の糞についても右岸側径間に多く観察された。これらは右岸側径間において腐食が進行している原因の一つである可能性がある。

【付着に関する分析のまとめ】

- 塗膜に付着した鳥糞等の付着物を溶解した溶液はアルカリ性を示した（pH9 程度）。
- 塗膜に付着した鳥糞等の付着物に蓄積された塩分量は 222～378mg/m²であった。
- 塗膜や塗膜下に生成したさびには、塩分の侵入は認められない。
- 一部のフェノール MIO 塗膜層（初期塗装）は、外力による剥離が生じやすい状態であった。
この塗膜層で剥離が生じると塗装系の大半を失い深刻な影響が及ぶ。
- 一部の上塗り塗膜では、架橋部であるウレタン結合が少なかった。劣化あるいは塗料の配合不良が原因と推察されるが、特定はできない。
- 一部の上塗り/中塗り層間では付着性が低く、層間剥離が生じていた。

【吊材破断要因の推定】

- 吊材の外側にクランプ材が取り付けられている。このような構造では、吊材/クランプ材間のすき間の内外で酸素の濃淡が生じ、すき間の内部で腐食が生じやすくなる。
- 吊材の塗膜は、風による振動でクランプ材から外力を受け、物理的な損傷を生じやすい。
- 腐食因子や塵埃が滞留しやすく、なおかつ雨による洗い流しを受けにくいいため、高濃度に蓄積される。さらに、水も滞留するため、腐食が促進する可能性がある。
- これらの複合的な要因により塗膜の損傷及び鋼材の腐食が促進的に生じ、破断に至ったものと考えられる。

【数値解析のまとめ】

水管橋崩落後に調査を実施した際の現地状況のとりまとめを行い、有限要素解析によって崩落のシナリオ解析を試みた。なお、今回実施した解析は、部材の経年腐食による管厚減少は考慮せず、また、部材破断時の衝撃的荷重再配分を考慮しない部材消去による静的解析であり、部材が連続的に破断するような進行性崩壊は再現でない。解析によって得られた知見は次のとおりである（空気弁形状はモデル化せず）。

- 吊材において、全てのブレース材接合部の上部で破断が発生したとしてもブレース材によって通水管の死荷重がアーチリブに伝達されるため、構造系に降伏や座屈は見られず、構造を維持することが確認できた。
- 現地調査の結果から判明した吊材破断箇所に加えて、破断箇所が不明であった D-R1-R2 を下部破断とし構造系に最も厳しい荷重状態とした場合においても部材降伏やアーチリブの座屈は生じず、耐力力を維持することが確認できた。

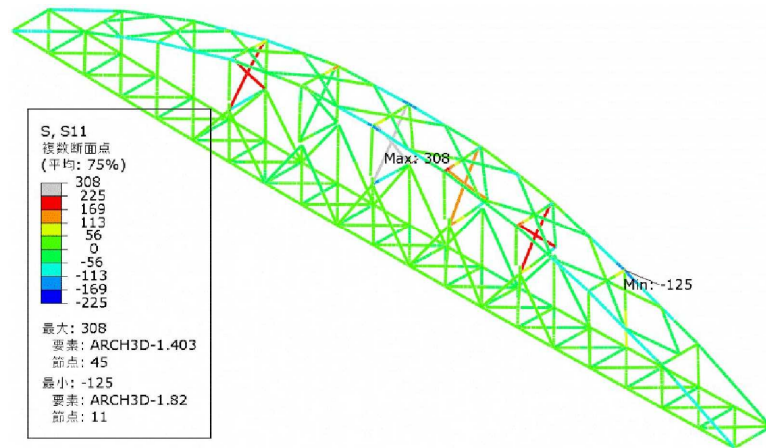


図4.2 U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1-R1-R2)

- 解析より、水管橋が崩落に至るには、吊材の一部が破断し、さらにブレース材も腐食等により本来の強度を発揮できずに破断し、その際に生じる荷重の再配分によって他構造部材に想定外の応力が発生することが原因だと推測できた。したがって、吊材の破断のみが今回の崩落の原因ではなく、その他の部材の損傷や、シナリオ前段のブレース材の降伏・破断などに伴う荷重再配分による影響に続き、腐食の進行に伴う部材抵抗力の低下と相まって崩落したと推測できる。

〔解析によって得られた水管橋崩落のシナリオ〕

- 複数箇所の吊材上部が破断し、ブレース材によって荷重を伝達している状態となる。
- いずれかの吊材下部が破断したことによりブレース材に作用する荷重が増加し破断する。
- アーチリブの 1/4 点に過大な鉛直荷重が作用し、面内座屈によりアーチリブが崩壊する。
- アーチリブの面内座屈により径間全体で支持機能を喪失した通水管も自重に耐えられず崩壊する。

出典：2021 年 10 月に発生した六十谷水管橋崩落調査報告書 2022 年 5 月 公益社団法人土木学会関西支部

4.2. 水管橋の調査・分析

4.2.1. 調査項目

本水管橋の落橋原因を様々な視点から解明するため、回収された部材や、残存する部材の状況及び周辺の腐食環境条件などに注目し、表 4.1 に示す調査・試験を行った。

調査、試験は受注者である日鉄パイプライン&エンジニアリングにて実施し、調査、試験の確実性を担保するために日水コンにて第 3 者調査を実施した。

表 4.1 調査内容

対象区間・部位		目 的	調査項目・方法等	備考
落 橋 区 間	全体	落橋・腐食状況調査	外観目視	腐食部位の確認 塗膜劣化状況の確認
		腐食要因の調査	付着物(塩分・鳥糞)調査 風向調査(飛来塩分) 振動調査 事故時の風の強さ調査 カワウの影響調査 送水量の変化調査	腐食の影響確認 落橋要因の可能性確認
	吊材	破断・腐食状況の詳細調査	破断面観察(目視・SEM) 引張試験 管厚測定	破壊形態の確認 (延性・脆性) 強度低下要因の確認
		塗膜劣化状況の詳細調査	塗膜厚さ測定 塗膜付着力測定 塗膜劣化調査(目視)	塗装品質の確認 塗膜劣化状況の確認
	アーチ材 (座屈箇所)	破断・腐食状況の詳細調査	破断面観察(目視・SEM) 引張試験	破壊形態の確認(延性・脆性) 強度低下要因の確認
	アーチ材 (破断箇所)	破断・腐食状況の詳細調査	破断面観察(目視・SEM) 引張試験	破壊形態の確認 (延性・脆性) 強度低下要因の確認
	落橋防止ケーブル	必要強度の確認	構造計算	対策の必要性を確認
	全体	腐食状況の詳細調査	外観目視	部材の劣化状況の確認
	吊材	腐食状況の詳細調査	管厚測定	部材劣化要因の確認
	アーチ材	腐食状況の詳細調査	管厚測定	強度低下要因の確認
残 存 区 間	通水管	腐食状況の詳細調査	溶接部の管厚測定	対策の必要性を確認

4.2.2. 調査・分析結果のまとめ

本水管橋の落橋に対する調査結果を総合的に分析した結果の概要を以下にまとめる。また、各調査結果の概要を表 4.2～表 4.5 に整理する。調査結果の詳細は資料編に示す。ここに示す調査結果においては、前述の土木学会による調査報告書に記載の結果も併せて示す。なお、これらの調査・分析結果のうち、腐食の要因やメカニズム、落橋の要因やメカニズムについては、後章において詳しく説明する。

これらの調査・分析結果の要点として、本水管橋の落橋原因としては、設計や工場製作時における、何らかの不具合によるものは確認されず、吊材の風対策として取り付けられた後付け材周辺の著しい腐食が原因である。また、溶接部の未溶着や外面腐食による強度低下が確認された。ただし、この強度不足は、落橋の直接的な要因ではなく、吊材破断後のアーチ材における溶接部破断の原因となったことを確認している。したがって腐食による落橋の要因としては、塗装の更新時期を見逃したことが挙げられる。

残存区間については、更新対象である吊材以外のアーチ材や通水管にも局所的な腐食が確認され

たが、補修工事により使用可能な程度の軽微な腐食であることを確認した。

【調査結果の考察】

● 使用材料（母材）

- ・母材の強度不足や金属組織における問題は確認されなかった。

● 鋼材腐食

- ・腐食はスケールが溜まりやすい部材間の隅角部や段差部で多くみられ、特に風対策として吊材に取り付けた材料周辺において、著しい腐食が確認された。

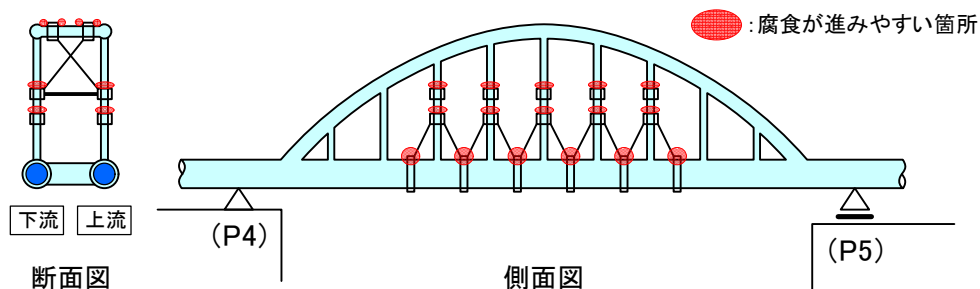


図 4.3 鋼材腐食が特に進みやすい箇所

● 溶接部

- ・工場溶接箇所と現場溶接箇所の各 1 ヶ所において強度不足が確認された。
- ・溶接箇所の強度不足の要因は、水管橋設置工事時に十分な溶着が行われていなかったことや、外面腐食の可能性などが考えられる。

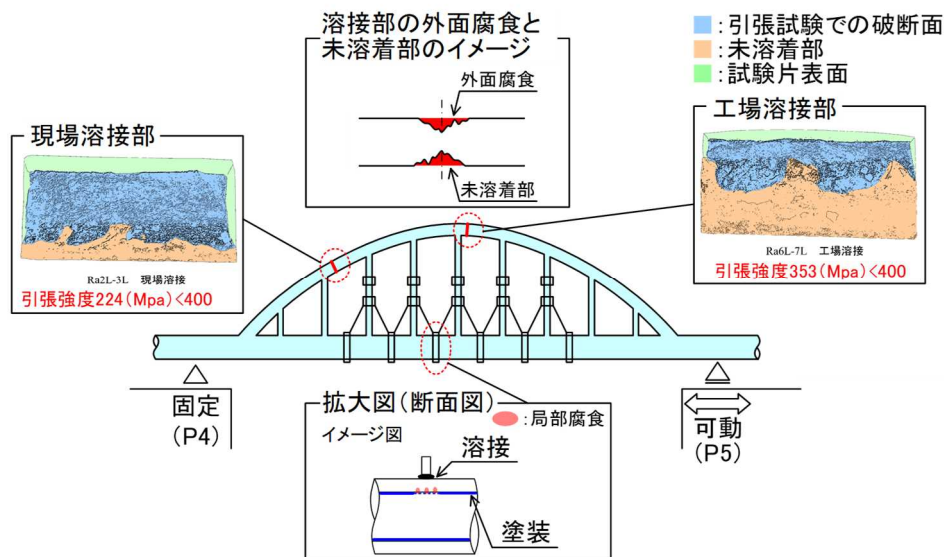


図 4.4 溶接部の強度試験結果とその要因

- 通水管内面

- ・主に管外面溶接部の管内において局部的な腐食がみられたが、全体としては健全な状態であることが確認された。

- 落橋後の部材変状状況

- ・風対策を目的とした後付け材を設置した吊材のほとんどで破断が確認された。
- ・アーチ材において、溶接部の破断 4 箇所（上・下流側）、座屈箇所 2 箇所（上・下流側）が確認された。

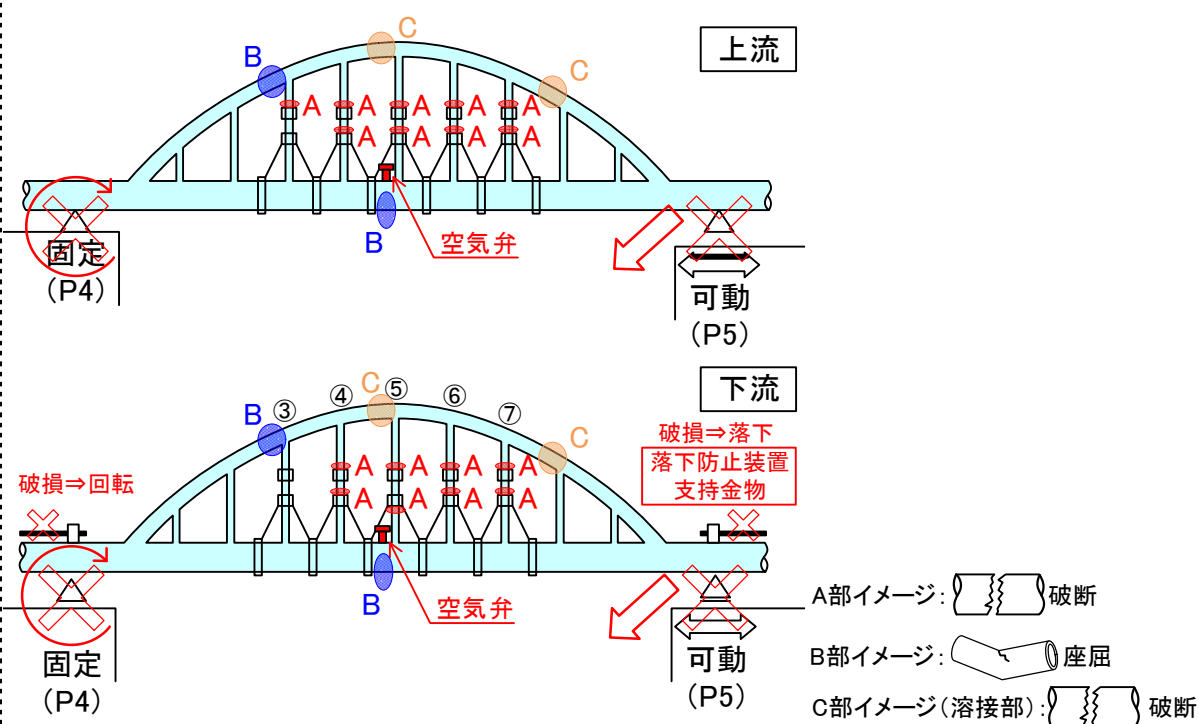


図 4.5 落橋後の部材変状状況

表 4.2 調査結果のまとめ【更新区間】(1)

対象部位	調査項目	内容	結果・考察
全体	落橋・腐食状況	落橋・腐食状況の目視調査	■ 吊材 ・破断部(後付け材設置箇所 10 箇所のうち 9 箇所)では著しく腐食が進展。 ・スケールが堆積しやすい位置で腐食し、破断したと推定される。 ・後付け材下面の塗装未更新部が周辺の腐食を進展させた可能性がある。 ■ アーチ材[破断箇所(2ヶ所×2条:工場・現場溶接部)] ・溶接部の強度を上回る荷重作用によるせん断的な破断と推定(破断部では曲げ変形はみられない)。 ・溶接部の外面腐食や溶接不良等により溶接部強度が低い可能性もある。 ■ アーチ材[変形箇所(2ヶ所×2条)] ・曲げ変形の確認により、変形(座屈)は曲げの作用によるものと推定。 ・座屈箇所近傍の溶接部は破断していないため、アーチ材破断部の溶接強度の低下が示唆される。 ■ その他部材 ・通水管変形箇所:1 か所×2 条(空気弁部)。 ・空気弁周辺の腐食は見られない。 ・外面の腐食は主に表面凹凸部(構造変化部、溶接部等)に見られる(塗装による防食効果は期待できない)。 ・通水管内部は広範囲に腐食するが比較的軽度である。 ⇒ 吊材、アーチ材の一部以外は注目すべき変形や腐食は確認されない。
	腐食要因の調査	付着物(塩分・鳥糞)	・土木学会の評価:pH は弱アルカリ性(9)であり、鳥糞由来と思われるリン酸イオンを多く含む。 ・塩分は海からの飛来塩分で、塩分量は、右岸側においてかなり大きく(左岸側の 13~30 倍、最大 1500mg/m² 程度)鳥糞も右岸側で多く確認されるため、右岸側の腐食進行が著しい原因の一つである可能性がある。 ・年間の風向は東から西への方が多く、西(海側)からの強い風速(20m/s)の風が確認される(飛来塩分の要因が考えられる)。 ・日鉄 P & E の調査では、pHは腐食レベルにない。 ⇒腐食の要因は、水、塩分及び鳥糞などの複合的な要因によるものと考えられる。
		振動の影響	・土木学会の評価:振動により塗膜が物理的な損傷を受けやすい。
		風の強さ	・特に落橋に対する直接的な影響は考えられない。
		カワウの状況	・周囲にカワウの大規模なねぐらがあり、採食のため飛来している可能性がある。 ・水管橋は野鳥に適した環境である(振動や人の立入り、水のよどみ等が少ない)。 ・カワウの数は右岸側に多い傾向があり、右岸側の腐食進行が著しい原因の一つである可能性がある。
		送水量の変化(常時、落橋時)	・ウォーターハンマーによる振動は確認されない。

表 4.3 調査結果のまとめ【更新区間】(2)

対象部位	調査項目	内容	結果・考察
全 体	構造計算	荷重・変形・剛性変化の影響 推定	・ほぼ全ての吊材が破断し、水管橋が落橋する現象が確認できた。 ・一部の吊材破断では大きく変位しない。 ・空気弁部の著しい座屈現象は解析により検証できた(構造的な弱点分である)。 ・空気弁による開口を考慮しない場合、後付け材設置部の吊材のほとんどが破断しても変形量は小さい(土木学会の評価:ほとんどの吊材と風対策のブレース材破断により崩壊)。 ⇒ 管厚減少箇所や溶接充填不良箇所を考慮しても、平常時(吊材あり)の状況であれば、安定した構造と評価できる。
	動画解析	吊材の破断や鋼材の座屈	・水管橋落橋の過程は、吊材破断⇒通水管落下⇒アーチ材・通水管座屈や破断⇒支承部落橋⇒水没のステップであった。 ・水管橋が水没する直前は、ほぼ全ての吊材は破断していた。 ⇒ 吊材破断により連鎖的に水管橋が落橋した。
吊 材	破断・腐食状況の詳細調査	破断面観察(目視・SEM) 引張試験 管厚測定	・吊材の破断箇所(9ヶ所)のうち、7ヶ所で延性破断を確認(落橋直前まで完全に破断していなかった可能性あり)。 ・腐食により破断前には部材の引張耐力が極度に低下していたと推定。 ・破断部周辺の防食効果は腐食によりほとんど期待できない状態である。 ・母材の強度不足はみられない(2者による試験結果の違いなし)。 ・腐食が著しく、管厚は公差管厚のマイナスを下回る(特に、後付け材下面や周辺の値は低い)。 ・土木学会コメント:繰返し荷重(振動)による破断ではない。 ⇒ 部材の材料強度上の問題ではなく、腐食による破断と考える。 ⇒ 腐食により引張耐力の限界に近い状態であった複数の吊材が連続的に破断したと考えられる。(風対策材部のブレース材の腐食と破断も要因。 ⇒ 腐食スピードは、塗装による防食効果を考えると、平成5年塗装更新からの腐食スピードは速いとの見方も可能。
	塗装劣化状況の詳細調査	塗膜厚さ 塗膜付着力 塗装劣化調査	・土木学会の評価:塗膜厚のばらつきが大きく、最大標準偏差値は約 90 μm であったことから、局所的に塗装の劣化が始まり、鳥糞などの付着物によって錆の発生が促進されたと考えられる。 ・吊材破断部周辺では付着強度は著しく低い(見かけの塗装劣化部もその効果は低いと考える)。 ・既往の塗装未撤去面で上塗りを行っており、塗膜の層間剥離が多くみられる(土木学会評価:下層既往塗装面に剥離が見られ、深刻な影響が考えられる)。 ・層間剥離は、塗膜下面の錆や塩分の影響が考えられる(土木学会調査:層間剥離が見られるが塩分の侵入は見られない)。 ・関連基準類では、既往塗装は長期の耐用年数が期待できる重防食系塗装として取り扱えない。 ⇒ 塗装の更新時期を見逃したことが考えられる。 ⇒ 環境条件等により、一般的な長期寿命が期待できる重防食塗装系ではなく、比較的短期間の間隔の維持管理が必要と考える。

表 4.4 調査結果のまとめ【更新区間】(3)

対象部位	調査項目	内容	結果・考察
アーチ材 (座屈箇所)	破断・腐食状況の詳細調査	破断面観察(目視・SEM) 引張試験	・吊材破断に起因したアーチ材の吊材破断部と残置部の境界付近における大きな曲げ作用による座屈と推定(設計時の想定外の現象)。 ・健全な強度(設計基準値以上)を有し、延性も残存するため座屈は構造的に説明可能。 ・鋼材本来の延性破壊がみられる。 ・座屈箇所に近接した溶接部や座屈範囲にある溶接部でも健全な強度を確認。 ⇒吊材破断後の座屈に対する構造的な説明や破壊形態の説明が可能。従来の設計においては取り扱えないような課題はないものと考える。 ⇒強度的な問題はなく残存区間のアーチ材は補強など必要がないと考える。
アーチ材 (破断箇所)	破断・腐食状況の詳細調査	破断面観察(目視・SEM) 引張試験	・管の下側がせん断破壊のような破断(大きな負荷応力が生じた可能性あり)、上側は延性効果による変形が多い(落橋時の曲げ作用方向と整合する)。 ・破断面のミクロには主に延性破壊が多いが脆性破壊の箇所もあり、部材の許容応力(腐食や溶接不良による低下も考えられる)を大きく上回る荷重作用により、見かけ上せん断的に破断したことが考えられる。 ・破断面の状況から、アーチ材の破断は腐食(外側)と溶接充填不足(内側)による影響が大きいと考えられる。 ・溶接部において強度が設計基準値を大きく下回る箇所がある。 ⇒残置区間のアーチ材も考慮し、引張強度の不足による構造的な影響を解析などで評価が必要。
落橋防止 ケーブル	構造計算	強度の確認	・設計基準類の設計方法に準拠し、落橋防止ケーブルの設計では管内の水重は未考慮。 ⇒実際には落橋時に水重が作用していたため、落橋防止ケーブルには当初の設計荷重はるかに上回る荷重が作用したと考えられる。

表 4.5 調査結果のまとめ【残存区間】

対象部位	調査項目	内容	結果・考察
全体	腐食状況の詳細調査	落橋・腐食状況	・右岸側を中心に後付け材設置部の吊材に比較的顕著な腐食が確認される。 ・アーチ材の表面凹凸部において局所的な腐食を確認。 ・腐食の傾向としては、更新区間と異なるような注目すべき変形や腐食は確認されなかった。 ⇒吊材の更新による対応。 ⇒大きな孔食箇所については補修対象とする。
吊材	腐食状況の詳細調査	管厚測定	・全体においてバンドなどの後付け材下面を中心に腐食による公差管厚のマイナスを下回る箇所が多くみられる。 ⇒吊材の更新による対応。
アーチ材	腐食状況の詳細調査	管厚測定	・右岸側の径間において、アーチ材溶接部に腐食による公差管厚のマイナスを下回る箇所が多くみられる。 ⇒腐食は軽度であり構造解析による安全性を確認。
通水管	腐食状況の詳細調査	溶接部の管厚測定	・右岸側の径間においてバンドなどの後付け材下面を中心に腐食による公差管厚のマイナスを下回る箇所が多くみられる。 ⇒腐食は軽度であり構造解析による安全性を確認。

4.3. 各種調査結果

調査結果の詳細な内容等については、調査結果編に示すものとし、ここでは、各種調査結果の概要を示す。なお、ここで示す試験供試体は、図 4.6 に示す部材番号をもとに設定した。

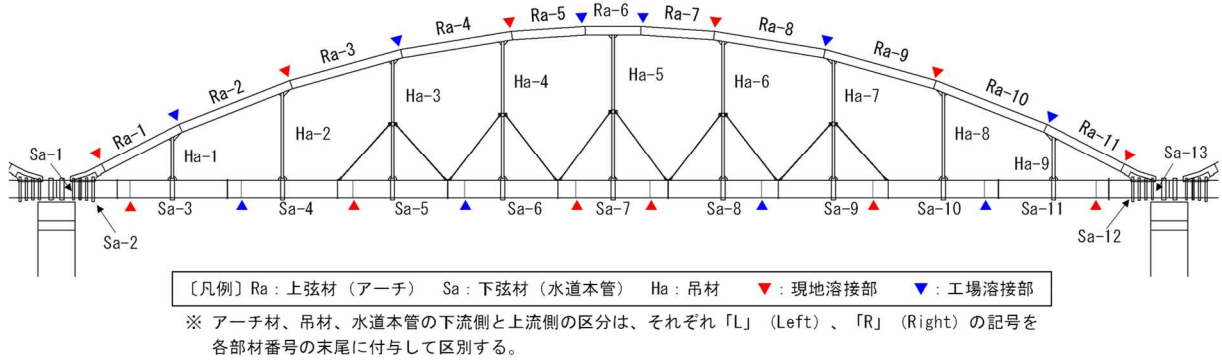


図 4.6 部材番号

4.3.1. 腐食調査結果

本水管橋の径間ごとの腐食面積と腐食発生図を以下に示す。

【腐食調査結果】

- 腐食の発生面積は、右岸側と左岸側では大きな差異がある。
- 左岸側の P1 橋脚～P2 橋脚、P2 橋脚～P3 橋脚では、全体的に腐食範囲が散らばる傾向を示しているが、P6 橋脚～P7 橋脚では径間中央に腐食範囲が集中しており、P7 橋脚～P8 橋脚では、河川側に腐食範囲が集中している。
- 各径間によって腐食の分布が異なるため、架設位置によって腐食のメカニズムが異なると考えられる。

表 4.6 各径間ごとの腐食面積

径間	発錆面積(mm ²)	比率(P1-P2比)
P1-P2 (左岸)	49,817,157	---
P2-P3	76,711,533	1.54
P6-P7	108,364,272	2.18
P7-P8 (右岸)	109,965,422	2.21

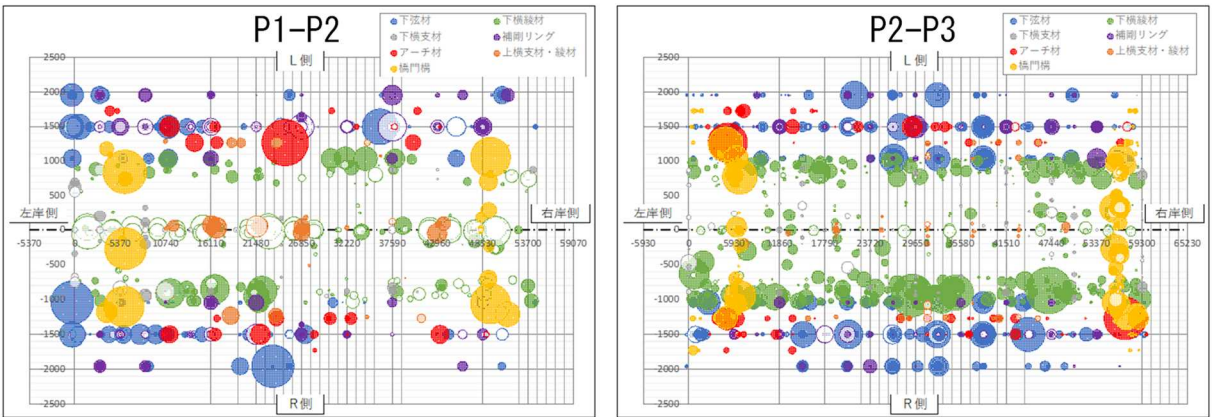
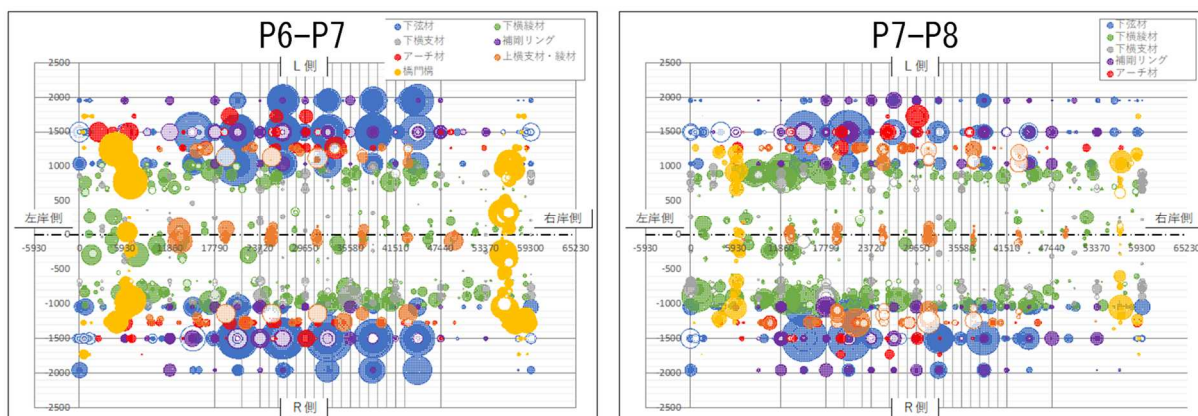


図 4.7 (1) ランガー橋腐食発生分布図 (P1 橋脚～P2 橋脚、P2 橋脚～P3 橋脚間)



【凡例】●下弦材 ●下横支材 ●アーチ材 ●橋門構 ●下横綾材 ●補剛リング ●上横支材・綾材

図 4.7 (2) ランガー橋腐食発生分布図 (P6 橋脚～P7 橋脚、P7 橋脚～P8 橋脚間)

4.3.2. 管厚測定結果

本水管橋の残存区間と更新区間のアーチ材（上弦材）、吊材、通水管（下弦材）の管厚測定結果を以下に示す。なお、これらの部材はともに鋼管材料であり、管厚の基準値は各鋼管のマイナス側の公称管厚とした。

【管厚測定結果】

- 左岸側の P1 橋脚～P3 橋脚の径間では、目立った管厚減少は確認されない。
- 更新区間の P4 橋脚～P5 橋脚の径間や更新区間に近い右岸側の P6 橋脚～P7 橋脚の径間では、上弦材、吊材、下弦材ともに管厚減少が確認される。
- 右岸側の P7 橋脚～P8 橋脚の径間においても、吊材や下弦材で部分的に管厚減少が確認されるが、上記の区間に比べて管厚減少箇所は明らかに少ない。
- 管厚の減少傾向についても腐食と同様に、架設位置によってメカニズムが異なると考えられる。

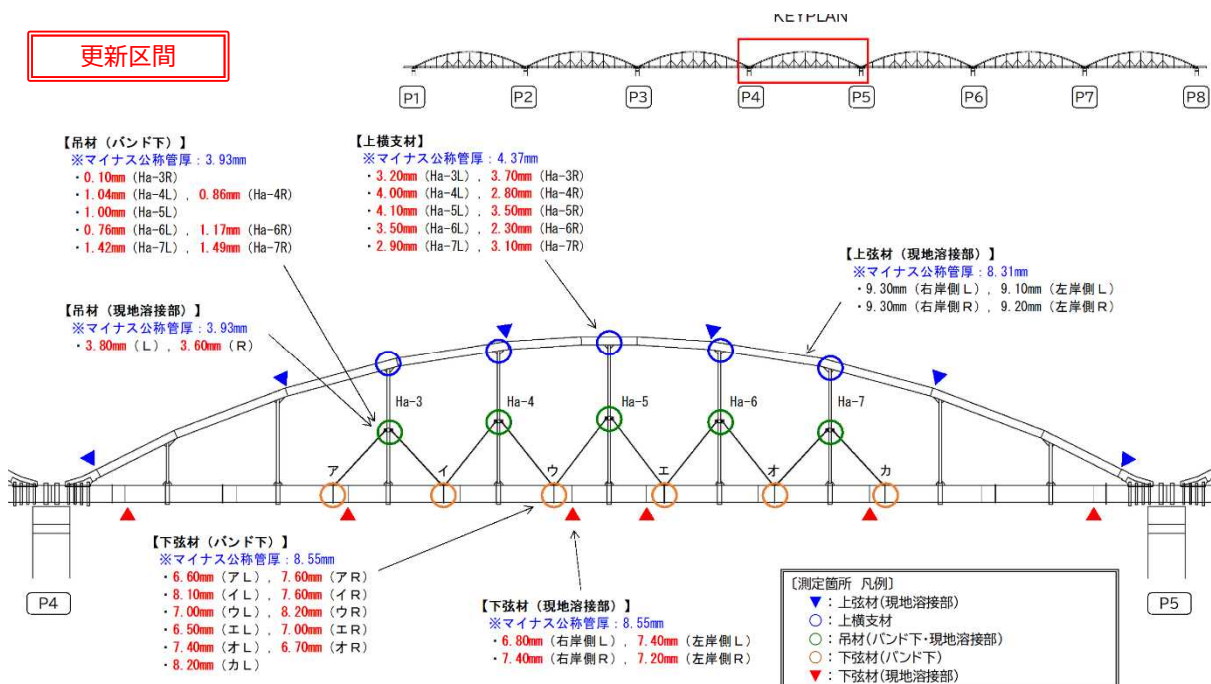


図 4.8 (1) 管厚測定（詳細調査）結果 (P4 橋脚～P5 橋脚間)

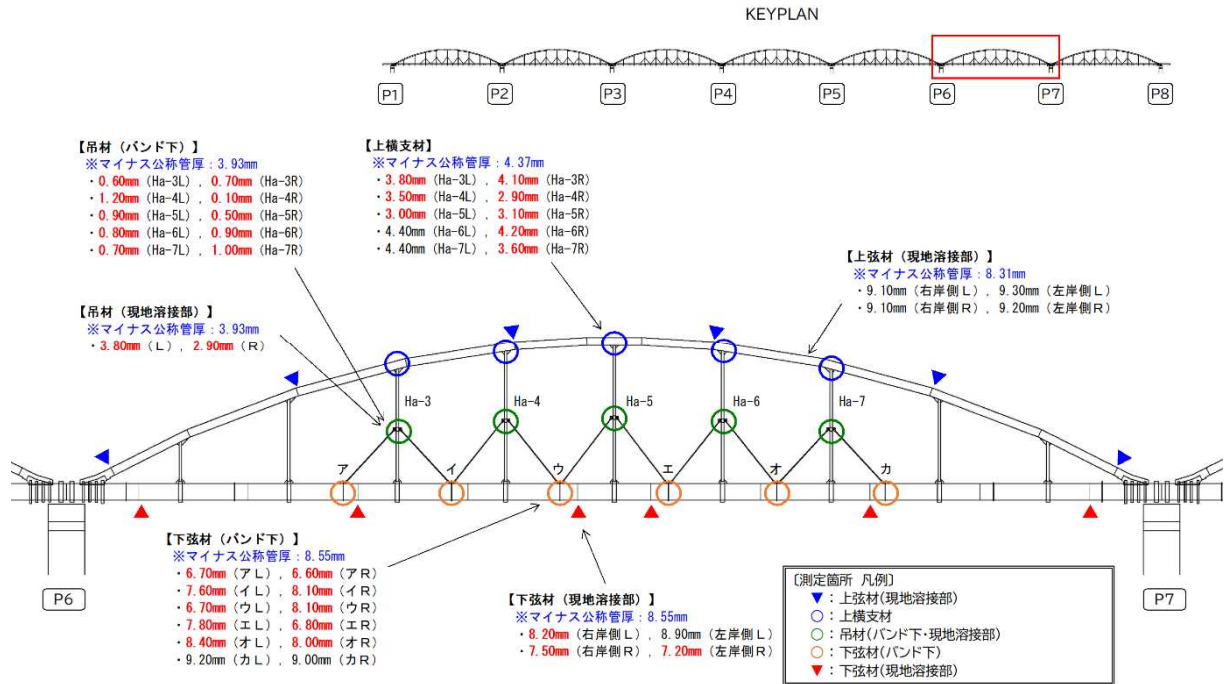


図 4.8 (2) 管厚測定（詳細調査）結果（P6 橋脚～P7 橋脚間）

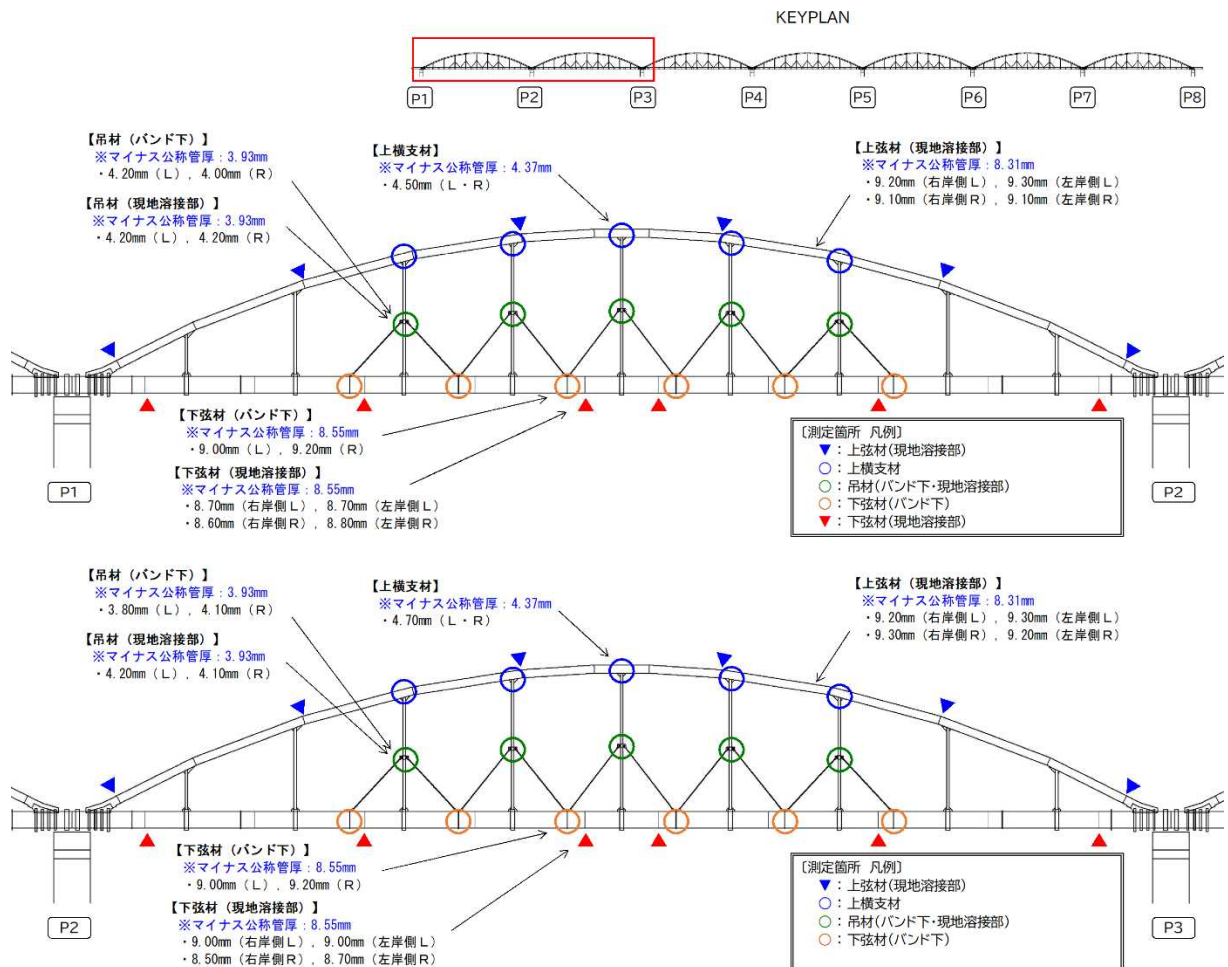


図 4.8 (3) 管厚測定結果（P1 橋脚～P2 橋脚、P2 橋脚～P3 橋脚間）

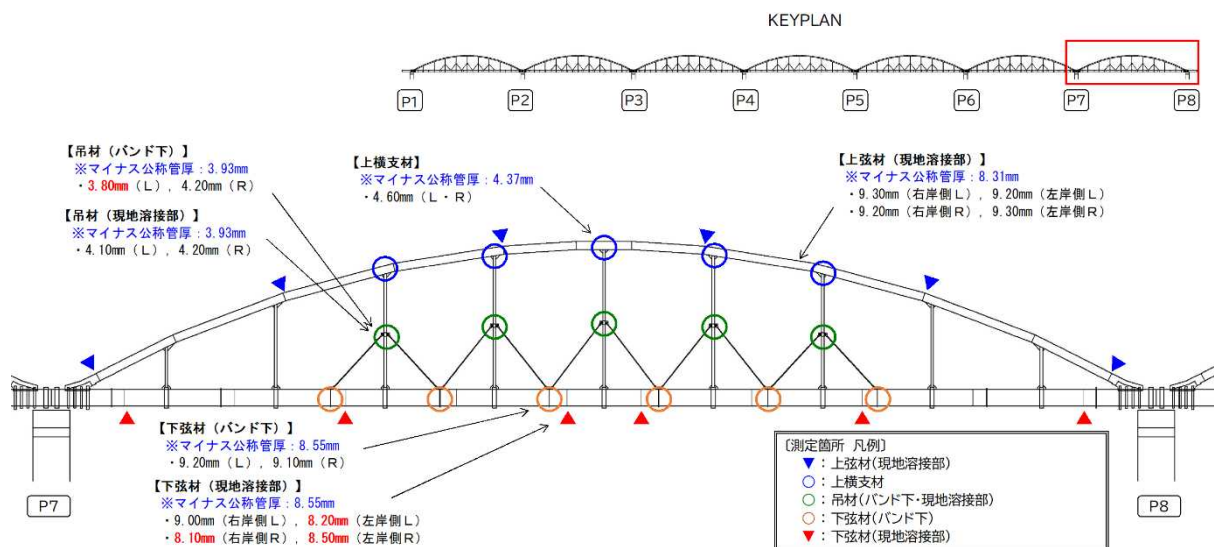


図 4.8 (4) 管厚測定結果（P7 橋脚～P8 橋脚間）

4.3.3. アーチ材（上弦材）破断面観察結果

水管橋の落橋メカニズムを解明する上で重要な情報を得ることを目的として、更新区間のアーチ材（上弦材）の破断面の外観目視観察と、破断面箇所両側から切り出した試料を走査電子顕微鏡（SEM）で観察し、破壊形態（延性破壊、脆性破壊等）判定した。破断面観察結果を以下に示す。

【アーチ材（上弦材）の破断面観察結果】

- 外観では、部材の下側がせん断破壊のような破断、上側は延性効果による変形が多い。
- 破断面のミクロには主に延性破壊が多いが、見かけ上せん断的に破壊したとみられる脆性破壊箇所や、腐食損傷による破壊もいくつか確認される。
- 破断面の状況から、アーチ材の破断は腐食（外側）と溶接充填不足（内側）による影響が大きいと考えられる。

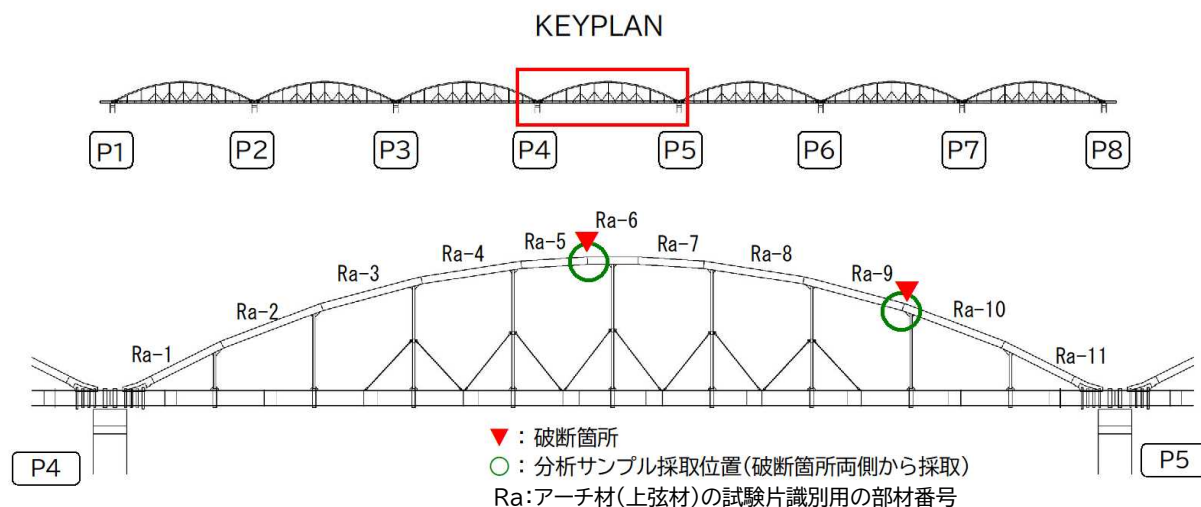
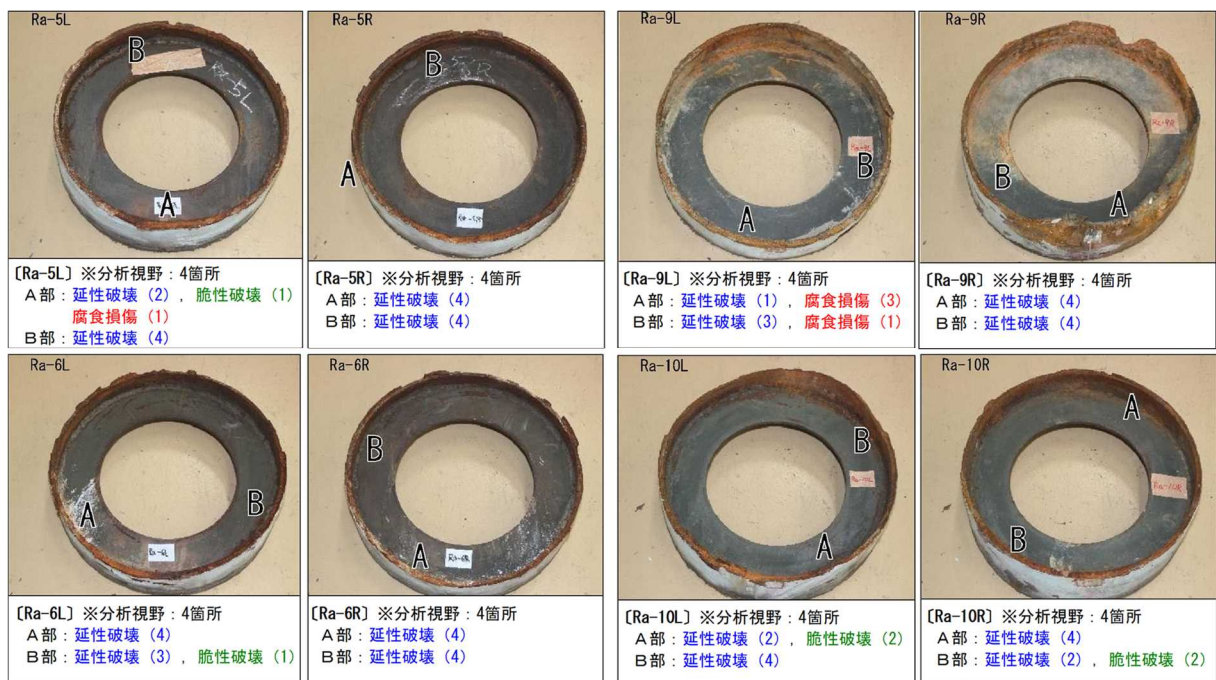


図 4.9 アーチ材（上弦材）破断面観察試料位置図



Ra:アーチ材(上弦材)の試験片識別用の部材番号で、末尾のLは左(下流側)、Rは右(上流側)を示す。

図 4.10 アーチ材（上弦材）破断面観察（SEM）による破壊形態判定

4.3.4. 吊材破断面観察結果

アーチ材（上弦材）と同様に、更新区間の吊材についても外観目視と走査電子顕微鏡（SEM）により破断面の観察を行った。破断面観察結果を以下に示す。

【吊材の破断面観察結果】

- 吊材の破断面箇所（9箇所）のうち、7箇所延性破断を確認した。
- 破断面のミクロには主に延性破壊が多いが、見かけ上せん断的に破壊したとみられる脆性破壊箇所や、腐食損傷による破壊も確認される。
- 破断部周辺の腐食が著しく進んでおり、防食効果はほとんど期待できない状態であった。

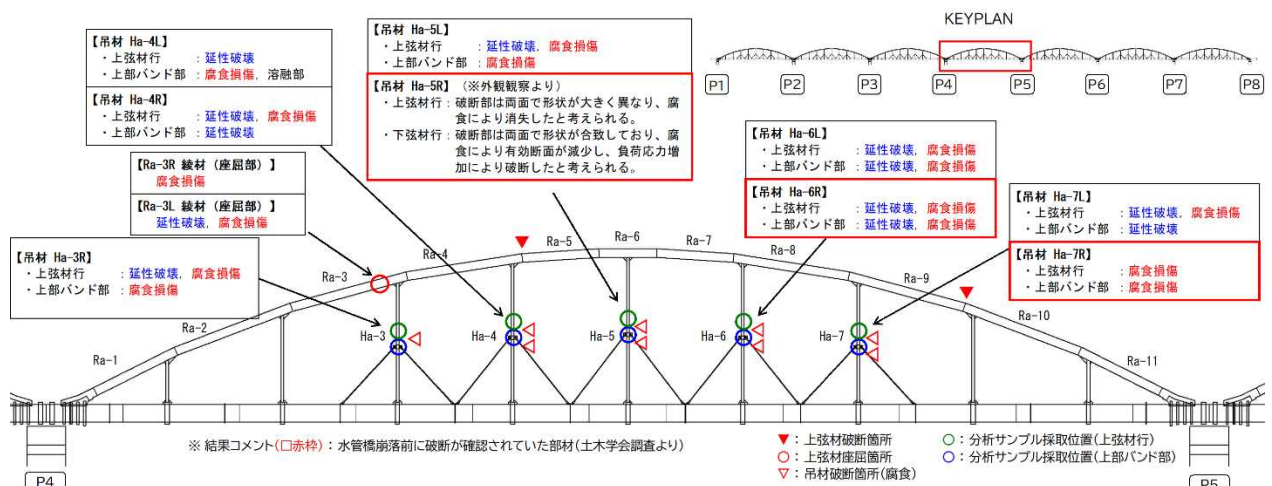


図 4.11 吊材の破断面観察結果と試料位置図



図 4.12 吊材の外観状況（分析試料採取前）

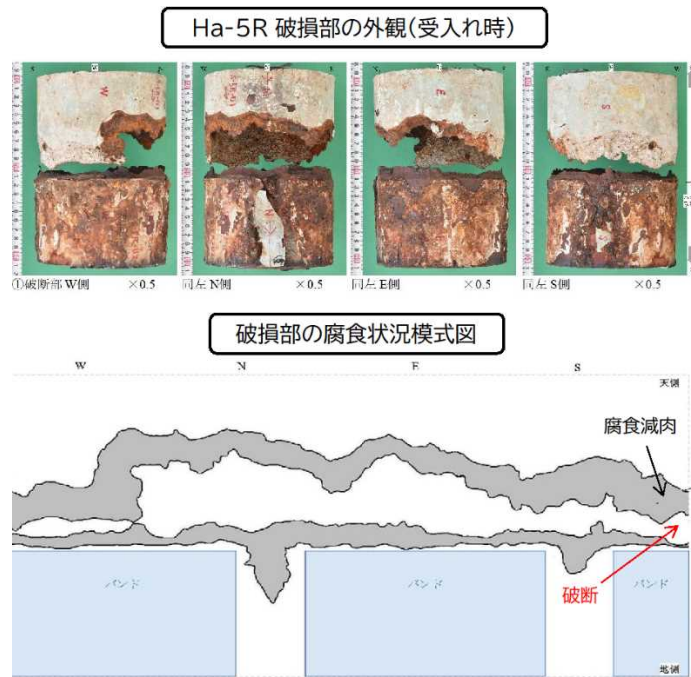


図 4.13 吊材（Ha-5R）の落橋部の外観と腐食状況模式図

4.3.5. 引張試験結果

更新区間のアーチ材（上弦材）と吊材、通水管（下弦材）の引張試験を行い、主要部材の強度を確認した。アーチ材については、落橋の原因を推定するため、座屈変形がみられる箇所や溶接部からも試験片を採取し、座屈部の強度低下の有無や破断が生じた溶接部の強度確認を行った。吊材と通水管については、比較的健全な部分で母材の強度を確認した。各部材の引張試験の結果を以下に示す。

【引張試験結果】

- アーチ材（上弦材）については溶接部で引張強さが小さく、引張試験による破断面には、未溶着部が確認された。
- 溶接部を除くアーチ材は、座屈部を含んで強度低下は確認されなかった。
- 吊材や通水管（下弦材）についても強度低下はみられなかった。
- 腐食による管厚減少部や溶接部を除き、各部材の母材強度に問題はないと考えられる。
- アーチ材が破断した溶接部分（現場溶接、工場溶接）では、当時の溶接技術のレベルや外面腐食の影響により引張強度が低下していた可能性があり、破断要因のひとつと考えられる。

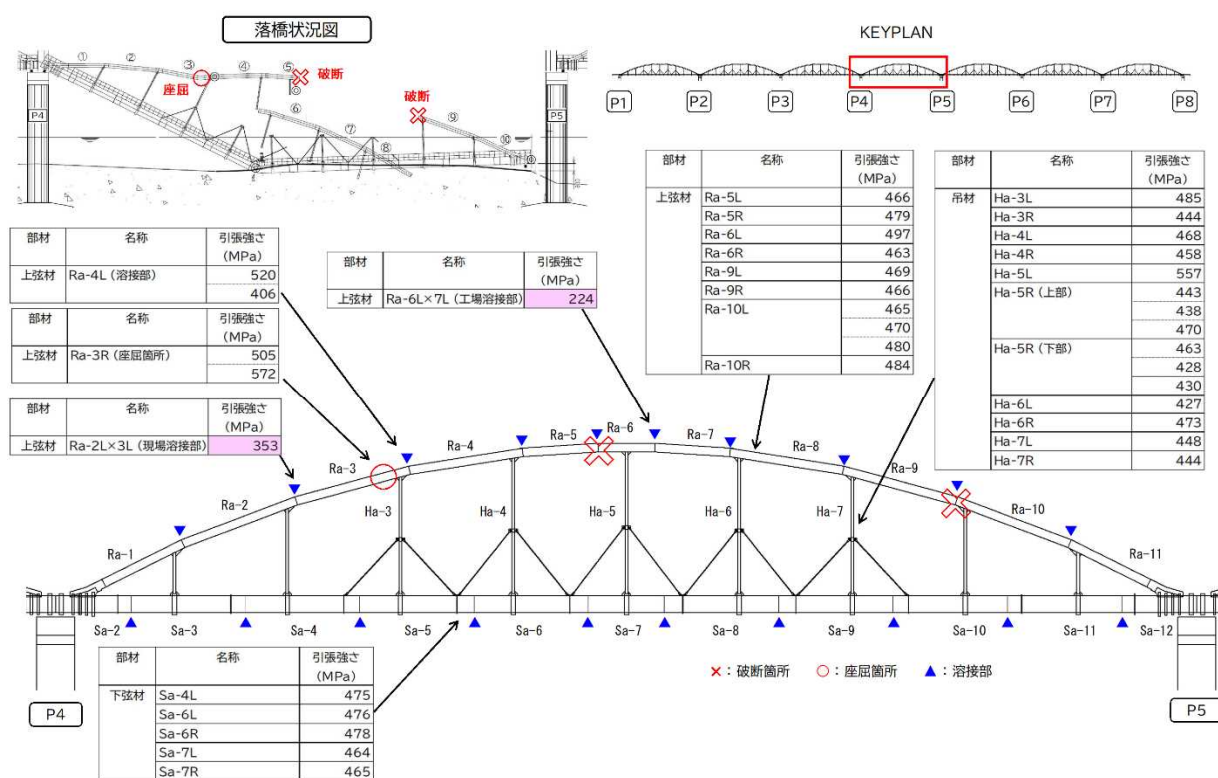
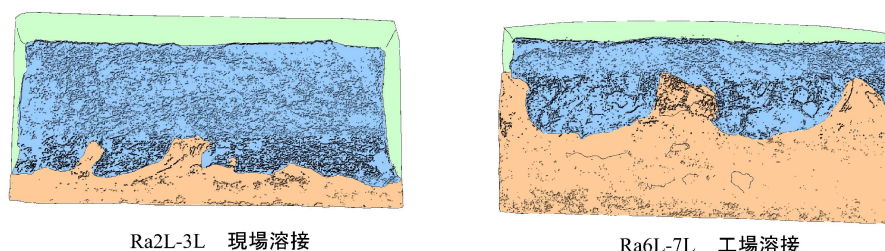


図 4.14 引張試験結果



Ra2L-3L 現場溶接

Ra6L-7L 工場溶接

■：引張試験での破断面 ■：未溶着部 ■：試験片表面

図 4.15 アーチ材溶接部の引張試験片の状況

4.3.6. 更新区間の落橋・腐食状況調査結果（外観目視調査）

更新区間の部材を回収し、仮置きした状態でそれぞれの部材の状況を確認した。また、更新区間両端の支承の状態を現地にて確認した。それらの外観目視結果について以下に示す。

【更新区間の外観目視調査結果】

- それぞれの部材には破損～落橋までの過程の衝撃などによる変形もみられる。
- 空気弁付近では通水管（下弦材）が折れ曲がった状態であり、円環断面において開口による断面欠損の影響があるものと推察される。
- 吊材の後付け材付近で顕著な腐食により破断が生じている。
- 部材接合部等の凹凸がある部分や隅角部等で腐食が進行している状況が確認される。
- 全体的に塗膜劣化が生じており、防食機能が低下しているとみられる。
- 支承部では、可動側の支持金具は完全に破断し、固定側では伸縮管の脱管が確認される。

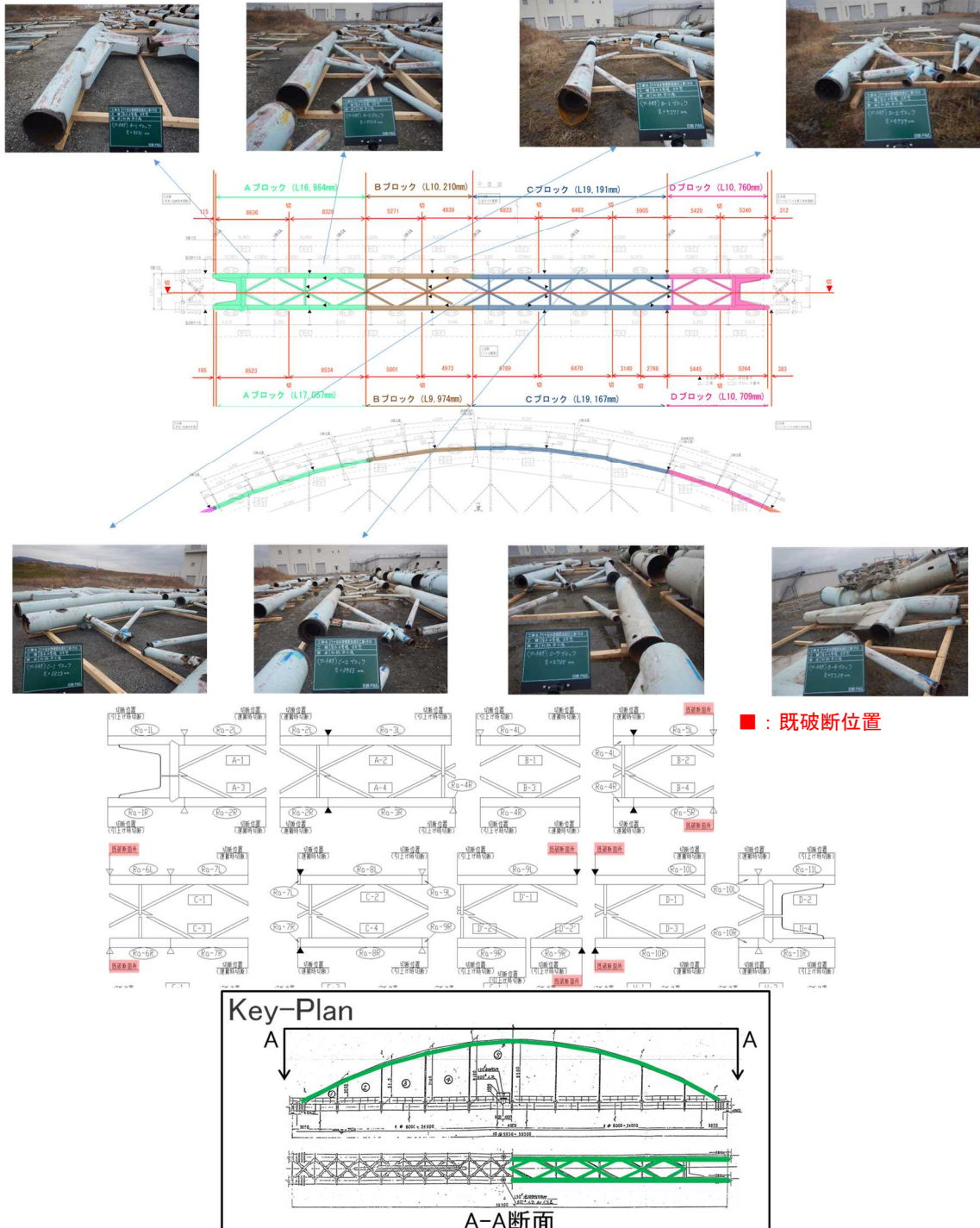


図 4.16 (1) 上弦材（アーチ材、横支材、綾材）の状況【更新区間】



図 4.16 (2) 上弦材（アーチ材、横支材、綾材）の状況【更新区間】

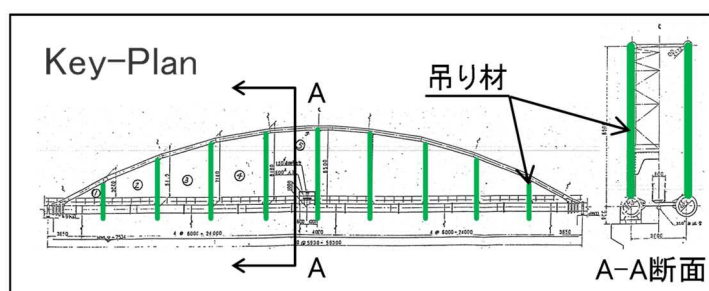
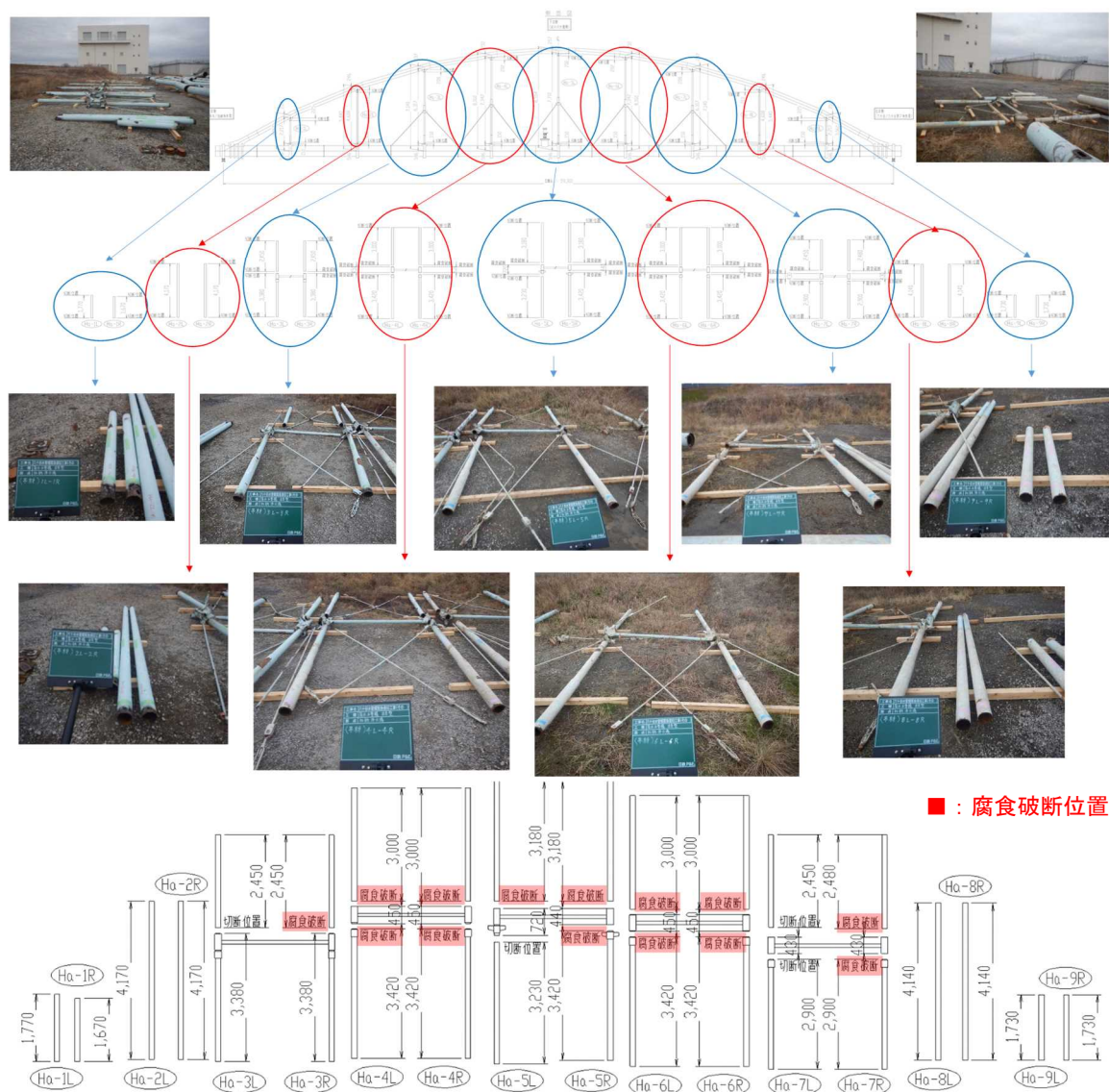


図 4.17 (1) 吊材の状況【更新区間】



図 4.17 (2) 吊材の状況【更新区間】

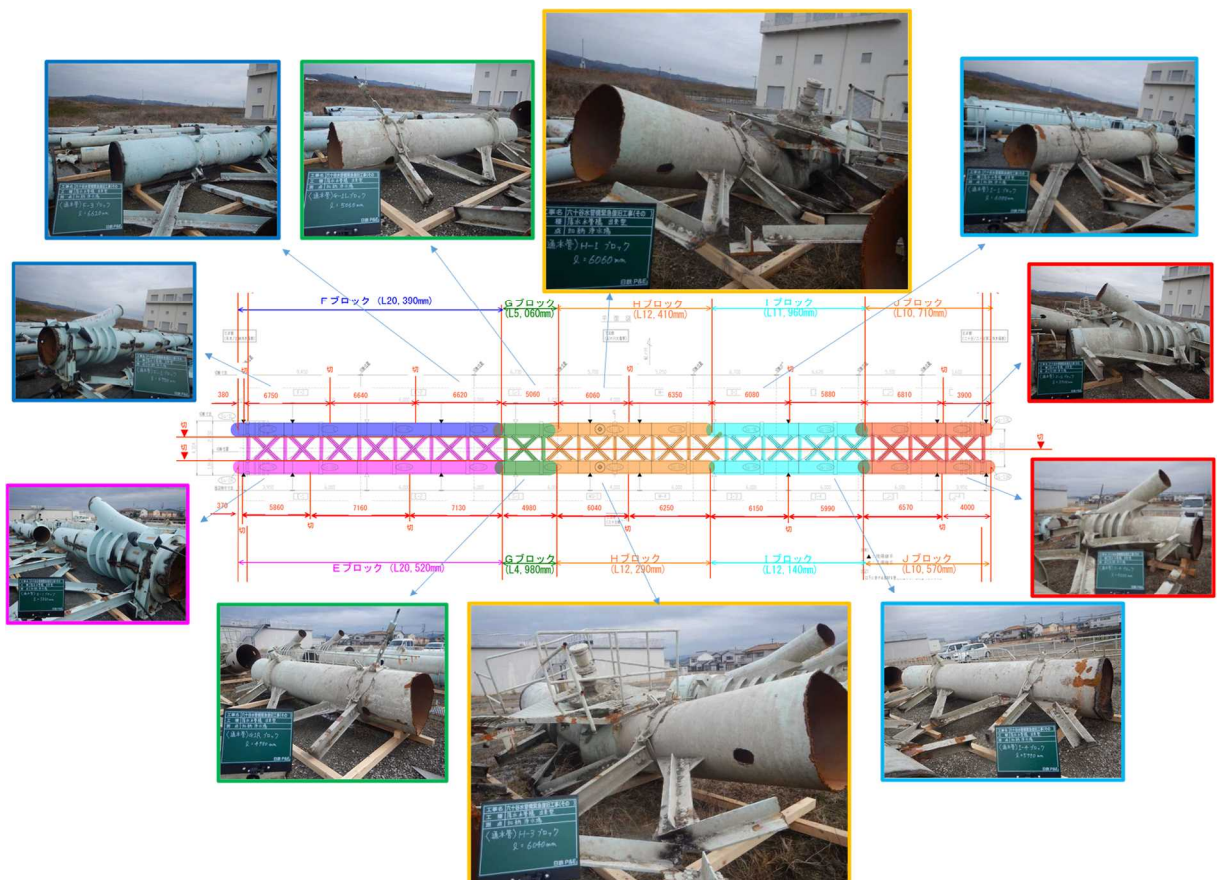


図 4.18 (1) 下弦材（通水管、横支材、綾材）の状況【更新区間】

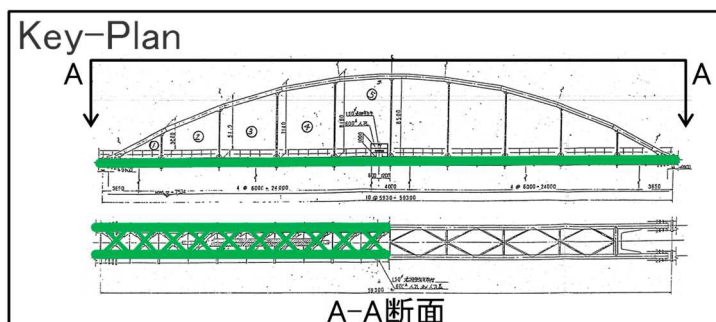
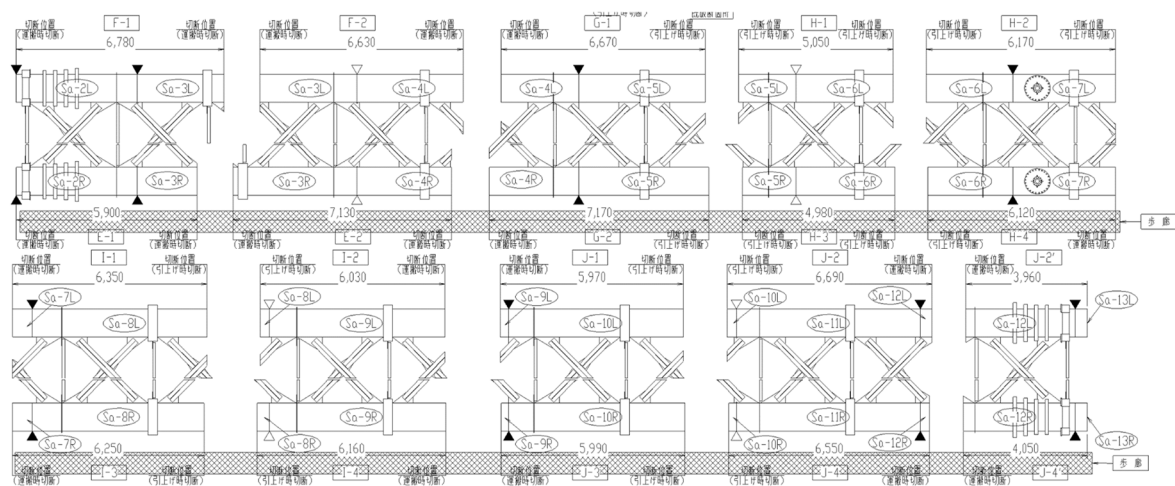


図 4.18 (2) 下弦材（通水管、横支材、綾材）の状況【更新区間】



図 4.19 支承部の状況【更新区間】

4.3.7. 残存区間の腐食状況調査結果（外観目視調査）

残存区間についても、塗装の劣化や鋼材の腐食などにより水管橋全体の構造的な安全性を低下させる要因が残る可能性があるため、これらの劣化の進行状況を確認した。残存区間の外観目視調査結果について以下に示す。

【残存区間の外観目視調査結果】

- 部材接合部等の凹凸がある部分や隅角部等で腐食が進行している状況が確認される。
- 更新区間と同じく、吊材の後付け材付近で顕著な腐食が生じている。
- 新旧の塗装の間に層間剥離がみられ、特に狭隘部（部材接合部や隅角部、ボルト等の凹凸部等）や溶接部等、塗重ねや旧塗膜の撤去が十分に行えない箇所では塗装の劣化が多くみられる。
- 支承部の腐食も顕著であり、スケールや水が滞留しやすい部分で腐食が進行している。
- 全体的に塗装の劣化が進んでおり、防食効果が低下しているとみられる。

なお、ここに示す部材状況は、図 4.20 に示す部材ごとに整理した。

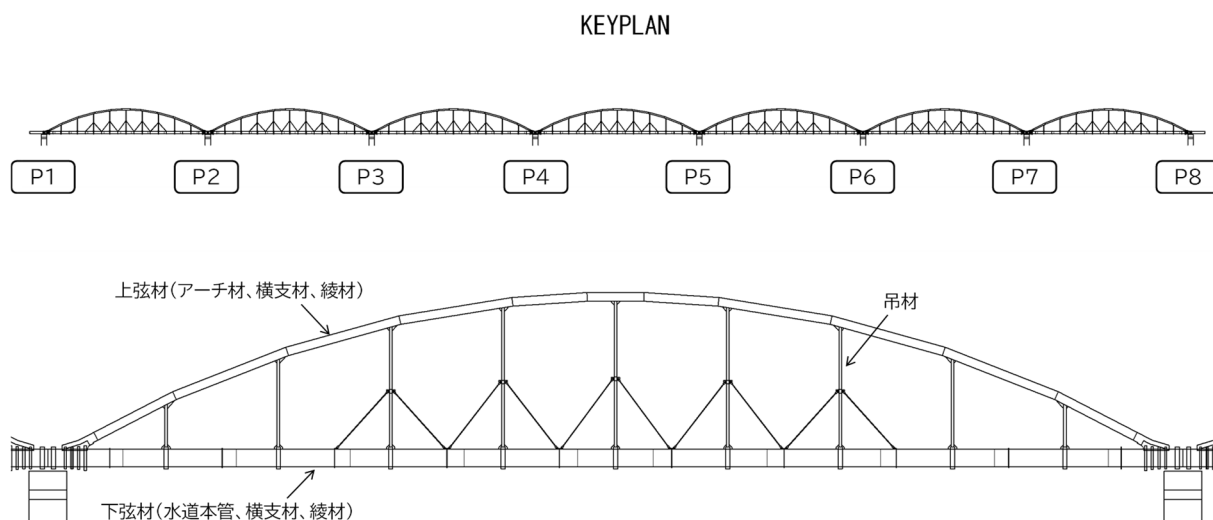
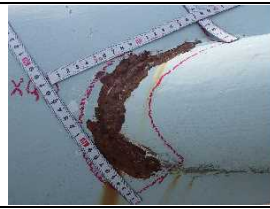


図 4.20 残存区間の外観目視調査結果の部材名称

■上弦材（アーチ材・横支材・綾材）



■吊材



■下弦材（通水管：外面）



■下弦材（横支材・綾材）



図 4.21 残存区間（P1 橋脚～P2 橋脚間）の状況

■上弦材（アーチ材・横支材・綾材）



■吊材



■下弦材（通水管：外面）



■下弦材（横支材・綾材）



図 4.22 残存区間（P2 橋脚～P3 橋脚間）の状況

■上弦材（アーチ材・横支材・綾材）



■吊材



■下弦材（通水管：外面）



■下弦材（横支材・綾材）



図 4.23 残存区間（P6 橋脚～P7 橋脚間）の状況

■上弦材（アーチ材・横支材・綾材）

■吊材



■下弦材（通水管：外面）

■下弦材（横支材・綾材）



図 4.24 残存区間（P7 橋脚～P8 橋脚間）の状況

残存区間の各径間ごとの腐食状況調査により、図 4.25 に示すような代表的な箇所で鋼材腐食が進行する傾向が確認された。

【鋼材腐食が生じやすい代表的な箇所】

- 溶接部
- 部材接合部
- 隅角部
- 塗装劣化部
- 後付け部材の取付部（吊材バンド、継手等）
- 支承部
- 点検歩廊

スケールや雨水が滞留しやすい箇所や狭隘部は、塗装更新時に旧塗膜の除去が困難であり、塗り重ねを行うことによる新旧塗膜の層間剥離が生じやすい。さらに、塗膜の劣化に伴う防食機能の低下によって腐食が進行しやすい。

また、残存区間の塗装は全体的に経年劣化が進行しており、今後さらに腐食が進むことが予想されるため、劣化対策や腐食しやすい箇所を中心とした点検を実施する等、本水管橋を安全な状態で維持していくための方策が求められる。

■ 上弦材・横支材・綾材

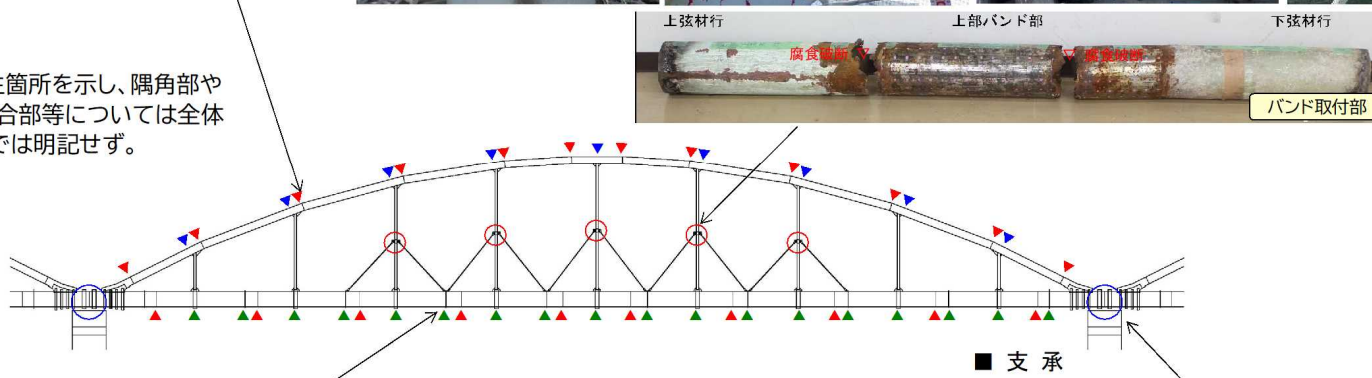


■ 吊材



- ▲：溶接部
- ▲：上弦材横支材・綾材、吊材(上部)接合部
- ▲：下弦材横支材・綾材、吊材(下部)接合部
- ：吊材バンド取付部
- ：支承部

※ 図の位置は代表的な腐食発生箇所を示し、隅角部や塗装劣化部、その他の部材接合部等については全体的に多数存在するため、ここでは明記せず。



■ 下弦材・横支材・綾材



■ 支承



図 4.25 代表的な腐食箇所

5.1. 腐食メカニズム

【本水管橋の腐食メカニズム】

-
- 下流 上流
- 固定 (P4)
- 可動 (P5)
- 複合的な要因による劣化
- 拡大図 (断面図)
- イメージ図
- 塩分飛散
- 水や鳥糞等の付着物が溜まりやすい (雨などでも洗い流されにくい)
- 拡大図 (断面図)
- イメージ図 (より万全な対応例)
- 剥離
- 旧塗装 (pink line)
- 新塗装 (blue line)

図 5.1 吊材の腐食メカニズム

鋼材腐食に関する既往文献等の資料調査により、本水管橋における主な鋼材腐食要因として考えられるものを以下に抽出する。本水管橋は一般的な環境条件にあると考えられるため、代表的な鋼材腐食要因として次のようなものが考えられる。

表 5.1 本水管橋の鋼材腐食要因になると考えられる事象

腐食要因	腐食要因であると考えられる理由
① 漏水・滞水	道路橋のように上部工の排水不良による漏水・滞水はないが、直接雨掛かりがあることや、通水管からの漏水(染出し・結露等を含む)により水分の影響で腐食(湿食)が生じる可能性がある。
② 海塩粒子の飛来	紀の川河口付近で海から比較的近いため、強風時に海塩粒子の飛来により、塩化物イオンによる塗膜劣化や鋼材腐食が促進される可能性がある。
③ 塵埃、土砂堆積	本水管橋は県道に近く、車の通行により路面の塵埃が巻き上げられ、鋼材に飛来することが考えられる。鋼材表面に塵埃がある程度の厚さで堆積すると、降雨時の含水状態が他の箇所よりも長く続き、腐食が進む可能性がある。
④ 鳥糞	鳥の糞にはアンモニアや酸の成分が含まれており、大量かつ長期間堆積すると塗膜劣化や鋼材腐食が生じることが知られている。車に付着した鳥糞が塗装を侵食し、腐食するもこれにあたる。

これらの腐食要因の中で、環境条件（曝露条件）や構造的な特徴により、本水管橋では次のような腐食が発生する可能性がある。

- 水管橋は一般的に、ほとんどの鋼材が降雨にさらされるため、塗装が劣化すると水分と酸素が鋼材に触れ、腐食が発生する（特に、塗膜厚が薄くなりやすい部材角やボルト部では腐食が進みやすくなる）。
- 下部工の天端面や鋼材の水平面・凹部・隅角部・段差部等では滞水が生じやすく、鋼材腐食が発生する。
- 降雨により鋼材の隙間に水が滞留することで隙間の内外で電位差が生じ「隙間腐食」（マクロ電池腐食）が生じる。

一方で、本水管橋は海からの飛来塩分やカワウに代表される鳥類の生息により鳥糞による腐食も発生する可能性が考えられるため、次節以降でこれらの腐食要因について詳しく述べる。

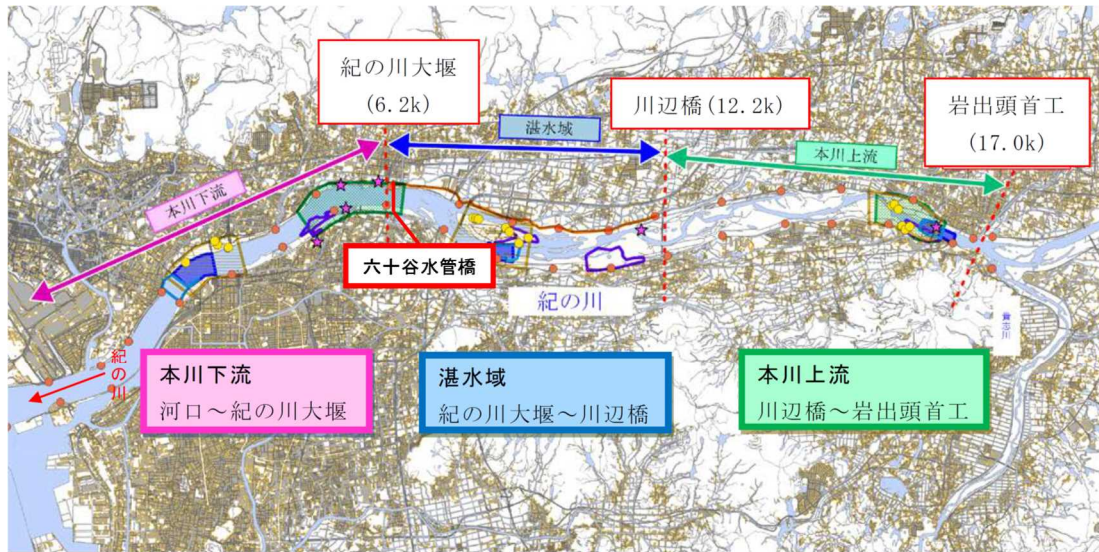
5.3. カワウの生息状況（鳥糞による腐食）

鋼材の腐食要因には鳥糞による腐食があり、本水管橋の周辺ではカワウが生息することが知られている。カワウは主に河川部や湖沼などに生息する水鳥の一種であり、採餌や休息、睡眠等の一連の活動を集団で行う。

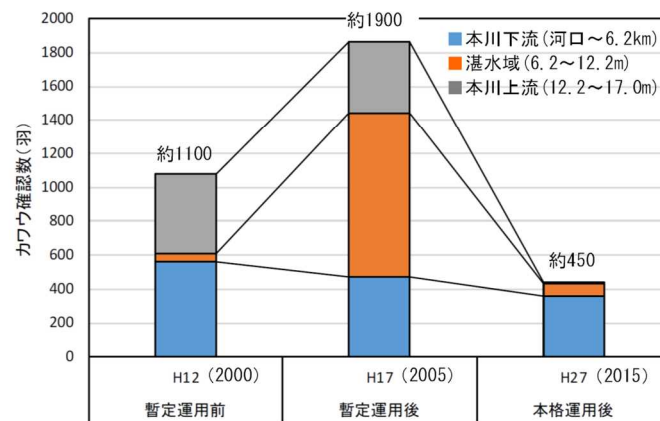
既往資料等による本水管橋周辺のカワウの生息状況や本水管橋におけるカワウの確認数等の調査結果をもとに、鋼材腐食要因としての鳥糞の影響について評価する。

5.3.1. 本水管橋周辺のカワウ確認個体数

国土交通省近畿地方整備局の調査によれば、紀の川河口から 12km 地点におけるカワウの確認個体数は、2000 年度が約 1100 羽、2005 年度が約 1900 羽、2015 年度が約 450 羽であった。カワウの確認個体数は、2005 年度に湛水域で大幅に増加したものの、2015 年度には 2000 年度程度まで減少した。2005 年度の調査では、秋の渡り時のみ確認数が多く、一時的なものであったと考えられる。



紀の川大堰周辺の生物調査範囲



カワウの経年変化

カワウの調査時期と調査方法

調査年度	調査範囲	調査時期	調査方法
平成12年 (2000)	本川下流	H12.04	ラインセンサス法、集団分布地調査
	湛水域内 (湛水前)	H12.05～6	
		H12.06	
		H12.10	
	本川上流	H13.01～2	
平成17年 (2005)	本川下流	詳細不明	詳細不明
	湛水域内 (湛水前)		
	本川上流		
平成27年 (2015)	本川下流	H27.05	スポットセンサス法、集団分布地調査
	湛水域内 (湛水前)	H27.06	スポットセンサス法、集団分布地調査、 ラインセンサス(H27.01～02のみ実施)
		H27.10	
		本川上流	H27.01～02

図 5.2 カワウ確認個体数の経時変化

出典：令和元年度 紀の川大堰定期報告書（近畿地方整備局）

5.3.2. カワウ飛来の可能性

2015年度の紀の川での鳥類調査結果により、本水管橋近傍では約20羽程度が確認されており、さらに20km程度上流では集団ねぐら（約500羽）が確認されている。環境省の「特定鳥獣保護管理計画策定のためのガイドライン及び保護管理の手引き（カワウ編）」によれば、カワウはねぐらから15（～40km）ほど離れた場所まで採食のため移動するため、上流の集団ねぐらに生息するカワウが本水管橋周辺まで飛来する可能性がある。なお、本水管橋の下流側で紀の川大堰が設

置（詳細は資料編⑰参照）されたことで、水面のよどみがなくなり、水管橋周辺がカワウの採食において良好な環境になったと考えられる。ただし、紀の川大堰の設置とカワウの生息との関係を示す定量的なデータはなく、現状ではあくまでも推測の域を出ない。

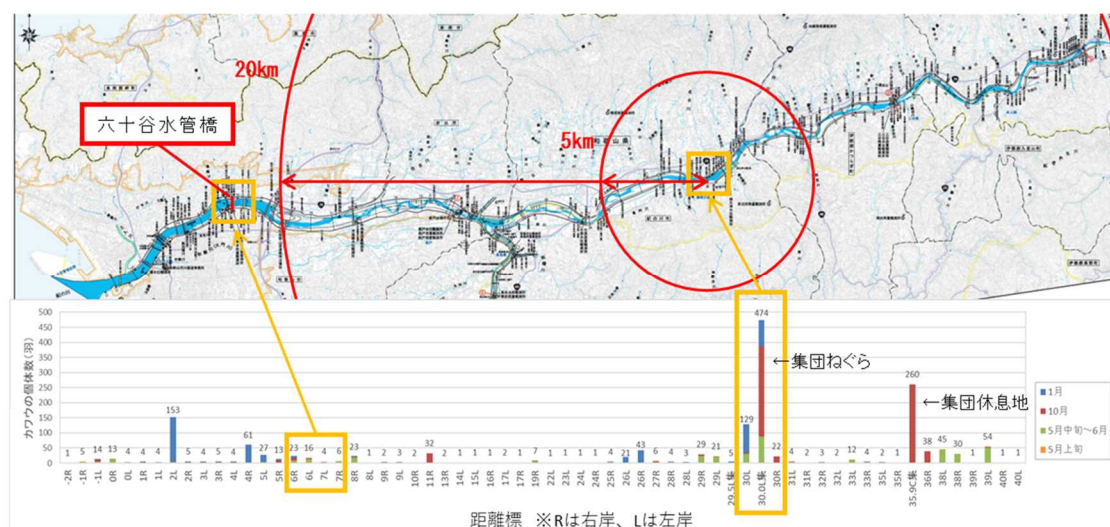


図 5.3 紀の川におけるカワウ個体数

出典：河川水辺の国勢調査結果より整理 (http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/ksnkankyo/dl_86_index.html)

5.3.3. 本水管橋におけるカワウ確認数

2012 年 11 月～2021 年 10 月までに本水管橋で確認されたカワウの確認数を場所ごとに整理した結果を以下に示す。カワウは右岸側に多くみられる傾向が顕著であり、左岸側では少ない。これは、図 4.7 のランガー橋腐食発生分布図に示すように鋼材腐食の状況と整合しており、今回の調査では直接的な要因は明らかにできなかったものの、カワウの飛来と鋼材腐食との間になんらかの関係性があることは確かである。

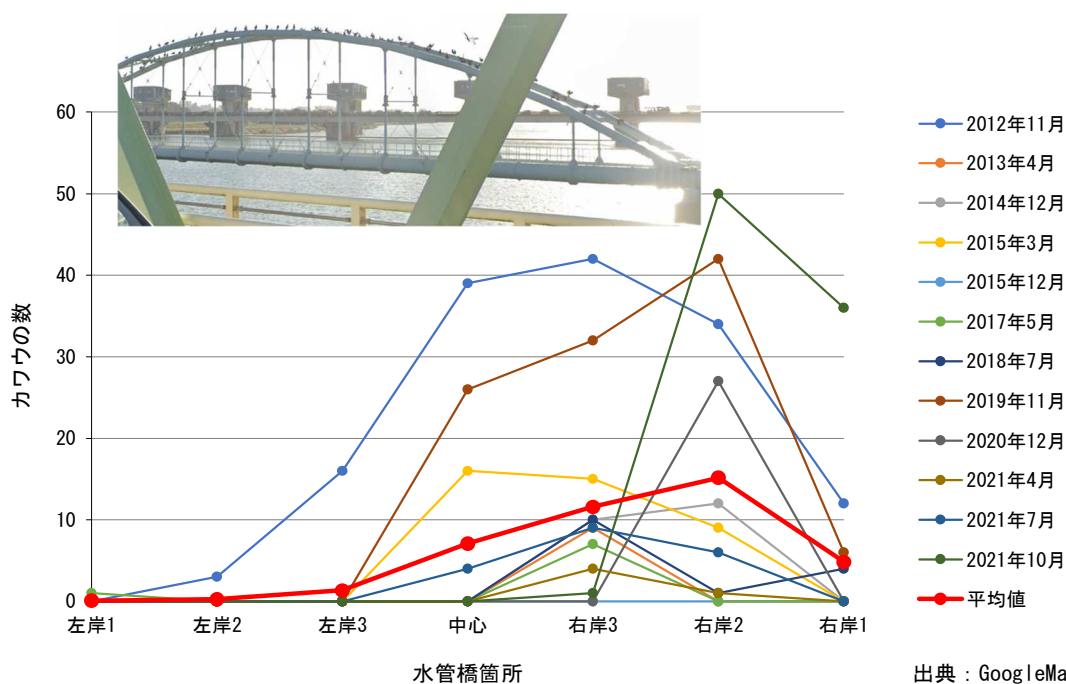


図 5.4 本水管橋における場所ごとのカワウ確認個数

出典：GoogleMap

5.4. 海からの飛来塩分による影響

本水管橋は紀の川河口から約 7km 上流側に位置しており、比較的海に近い距離にある。飛来塩分による鋼材の腐食は、海岸から約 12km の距離から海側に近くなるにつれて比例的に進行する傾向にあり、本水管橋も飛来塩分による腐食が発生する可能性が考えられる。

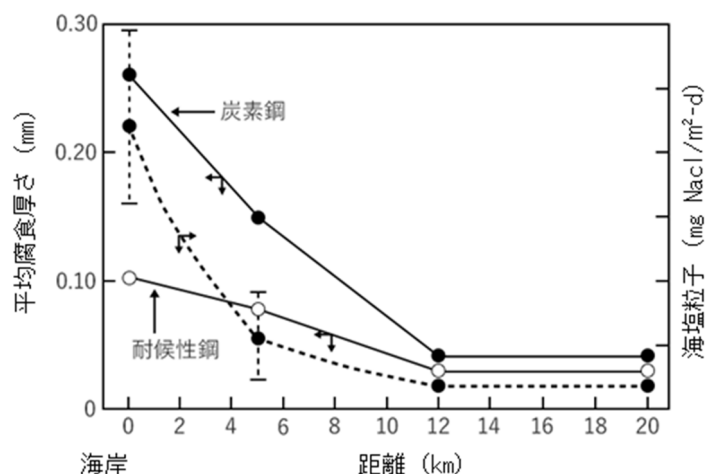


図 5.5 海岸からの海塩粒子・腐食量の関係

出典：「鉄の腐食損傷と防食技術」1983 年、小岩正倫

一方で、塩分が飛来するには海から内陸に向かう風の影響が不可欠である。和歌山地方気象台の観測データにより、本水管橋周辺の風向・風速を整理したものを図 5.6 に示す。

本水管橋周辺では、平常は内陸から海に向かう東北東（ENE）の風向が卓越し、海からの飛来塩分は供給されにくい傾向にある。しかし、最大風速では、南西（SW）から南南東（SSE）の風向が卓越しており、気象条件によっては海からの比較的強い風が吹く傾向がある。今回の調査で付着塩分量を調べた結果では、右岸側を中心に付着塩分濃度が高くなる傾向を示しており、本水管橋にも飛来塩分の影響があると考えられる。

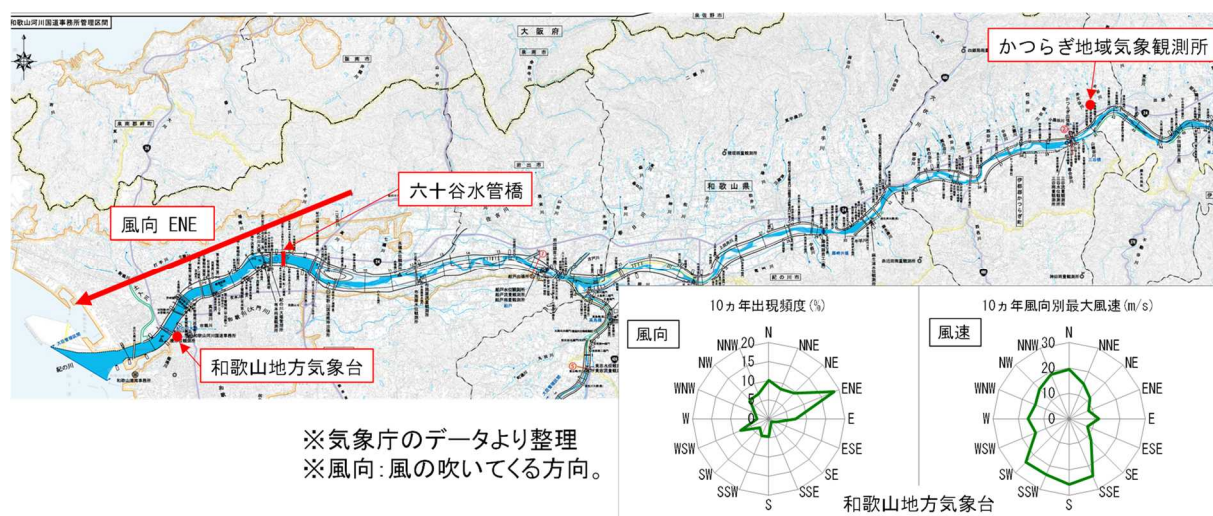


図 5.6 本水管橋周辺の風向・風速

出典：和歌山地方気象台観測データより

6. 落橋メカニズムや要因の分析

6.1. 落橋メカニズム

動画解析及び構造解析によると、腐食によって一部が欠損し、事故発生時、荷重を負荷できる限界の状態であった吊材が、風対策用後付け部材の上下部において連続的に破断したことにより構造的なバランスを失い、水管橋自体が大きく変形し、次にアーチ材や通水管において破断や座屈が生じ、この時点で水道施設としての通水機能を失った。さらに支持部材が破損したことで落橋するに至ったことが推定できた。

6.2. 動画解析による落橋過程の分析

6.2.1. 落橋過程の推定

落橋時に撮影されていた動画を解析し、今回の調査による部材の破壊形態や落橋状況、変形状況などを踏まえ、本水管橋が破損し落橋に至った過程を整理する。

【ステップ①（落橋前）】

- 吊材の一部が破断
- 破断していない吊材に荷重が分配されるが、そのほとんどは腐食等により荷重を負担できる限界の状態に破断寸前であった（推測）

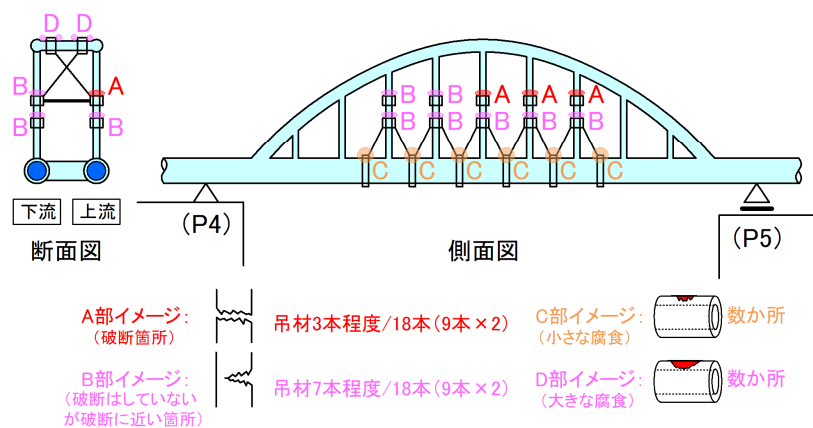


図 6.1 ステップ①（落橋前）の状況

【ステップ②（落橋時）】

- 吊材の腐食が要因となり、吊材の風対策用後付け部材の上下部において、連続的にほぼ全ての吊材が破断
- アーチ構造において吊材の支持力が消失したため、通水管中央部が下方方向に大きく変位



図 6.2 ステップ②（落橋時）の状況

【ステップ③（落下時）】

- 通水管の下方方向変位に伴い、アーチ材の破断（溶接部）や座屈により大変形が発生



図 6.3 ステップ③（落下時）の状況

【ステップ④（水没・河底への着床時）】

- さらに、橋脚の支持部分が破損し、落下
- 水管橋全体が水没や河底への着床時に衝撃を受け、アーチ材がさらに破断した可能性あり

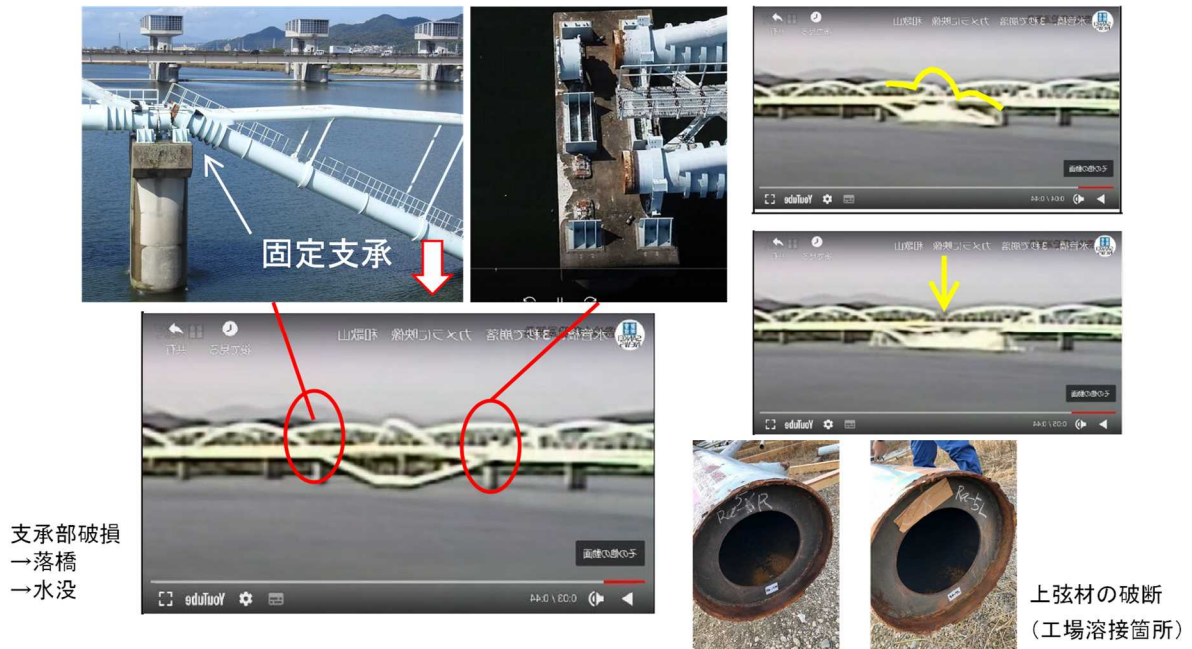


図 6.4 ステップ④（水没・河底への着床時）の状況

6.2.2. 落橋メカニズムの推定

動画解析による落橋ステップの分析結果により、本水管橋の落橋メカニズムを次のように推定する。

- 事故時、多くの吊材や一部のブレース材の腐食による連続的な破断が**直接的な要因**となって水管橋全体が大きく変形し、次にアーチ材や通水管において破断や座屈が生じ、この時点で、要求する水道施設としての**機能(通水機能)を失った**。
- さらに**支持部材が破損したことで落橋するに至った**。
- 吊材などの破断時の衝撃的荷重再配分による連続的に破断するような進行性崩壊の可能性はあるが、これまでの検討では考慮できていないなど、落橋のメカニズムを詳細には把握することはできていない。
- ただし、多くの吊材やブレース材における破断や破断に近い状態でなければ、水道施設としての機能を維持できない状態には至らなかったことは確かであるため、**最も大きな要因は吊材の腐食による破断**と考える。

6.3. 構造解析による落橋過程の分析

6.3.1. 構造解析による分析の目的

前項までの調査・分析結果より、六十谷水管橋の落橋は、吊材の腐食によるところが大きいことが推定できた。ただし、社会的にも大きなインパクトのあった今回の事故を考慮し、落橋状況を構造的により詳しく検証することが求められると考えることと、事故の再発防止と施設の弱点に応じた合理的な維持管理点検を行うことなどを目的として、落橋過程のより詳しい（定量的）分析は重要である。

このようなことから、ここでは、水管橋の常時の状態における構造的バランスや落橋過程を高度な構造解析により定量分析を行うものとする。

そして、具体的には以下の事項について明らかにするものとする。

【構造解析による分析の主な目的】

- 全ての部材が健全な状態の構造解析において、各部材の応力状態を確認し、重要な部材や構造的弱点部として、例えば、大きな応力負担が発生している個所を把握する。
- 落橋が力学的に説明できるものかを確認するために、また、構造解析で説明できないような課題が潜在しないかを確認するために、構造解析により吊材が破断した後の水管橋全体の変形状態を再現し検証する。
- 事故の検証と施設の安全余裕度を把握するために、吊材がどの程度破断することで、構造的なバランスを失うか把握する。
- 今後に残存区間を含め水管橋を運用していく上で重要となる構造的な弱点部の可能性がある箇所として、空気弁が設置された通水管の円環断面欠損部や、溶接部の強度低下部（溶接不十分や腐食などによる）及び局所的な管厚減少部の安全性などについて把握する。

6.3.2. 解析方法や解析条件など

構造解析による落橋過程の分析に用いた解析方法や解析モデルは、表 6.1 のとおりとした。

【解析方法の特徴】

構造解析の方法については、構造部材を弾性体として扱う線形解析と、作用する荷重条件や変位条件によっては、部材の降伏などに伴う塑性変形が生じることを表現できる非線形解析といった方法がある。今回の事故においては、大きな部材の塑性変形が確認されていることから、それらを表現できる非線形解析法を適用するものとする。これにより表 6.1 に示すようなより実際に近い構造解析が可能になる。

表 6.1 解析方法やモデルの概要

	解析手法・条件など
解析ソフト	NX Nastran
解析モデル	3次元フレーム+3次元シェル
解析方法	静的非線形解析(大変形)
考慮できる 構造物への作用	荷重による影響 (部材降伏後の大変形にも対応)
考慮できる 構造形状・寸法の影響	ビーム要素、プレート要素、シェル要素 (水道本管の空気弁部の形状も再現可能)
主な特徴	崩壊の進行状況、構造のどこに問題があったか(溶接不具合箇所や腐食による強度低下箇所含む)、構造安全性の定量評価が可能。 構造部材が目に見えて大変形し、その結果、構造系の形状・作用荷重の大きさ・方向が変化し、最終的には局部座屈・全体座屈により崩壊する現象を逐次追跡することが可能。

次に、解析モデル図を図 6.5 に示す。図に示すように構造解析に用いた解析モデルは、通水管及びアーチリブは 3 次元シェルモデル、桁、横構及び吊材とその補強ブレースは 3 次元フレームにモデル化した。また、空気弁部の形状も正確にシェル要素にモデル化した。

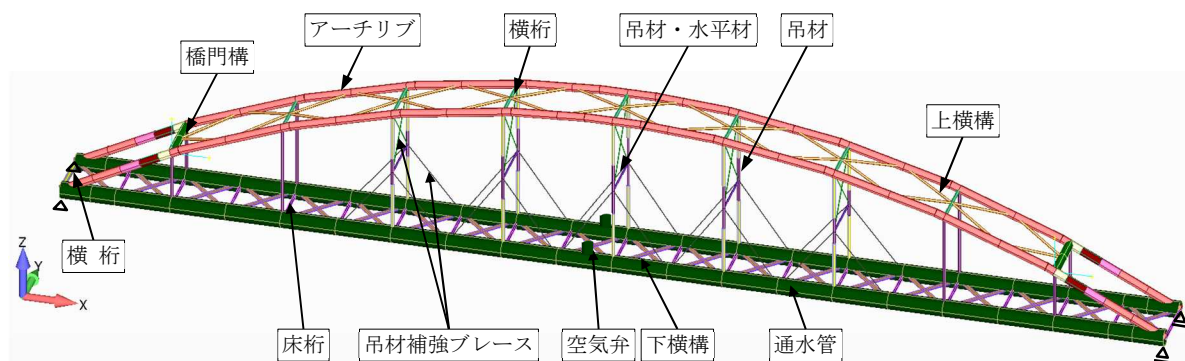


図 6.5 解析モデル

解析ケースについては、前述した解析の目的を踏まえ表 6.2 のようにした。

表 6.2 解析ケース

ケース	モデル	吊材破断本数・破断箇所	構造物の状態等
CASE1	吊材健全モデル	—	落橋前(実際):健全な状態
CASE2	吊材破断モデル	3本:吊材バンド上部	落橋前(実際):2022年12月(3本の破断を確認)
CASE3		3本:吊材バンド上・下部	落橋過程の分析ケース
CASE4		6本:吊材バンド上・下部	落橋過程の分析ケース
CASE5		9本:吊材バンド上・下部	落橋過程の分析ケース(実際に9本の破断を確認)

6.3.3. 解析結果

解析結果として、全てのケースの解析結果（代表点の応力・ひずみ、鉛直変位）を表 6.3 に示す。

表 6.3 解析結果（代表点の応力・ひずみ、鉛直変位）

ケース	モデル		部 位	VonMises (N/mm ²)		ひずみ		最大鉛直変位 (mm)	
CASE1	吊材健全モデル		アーチリブ	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央
				69	71	0.00014	0.00010	-28	-30
			同上 溶接不良箇所	125		0.00015		-20	
			空気弁	39		0.00020		-31	
CASE2		吊材バンド上部 3本破断	アーチリブ	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央
				75	73	0.00015	0.00012	-31	-32
			同上 溶接不良箇所	154		0.00017		-21	
			空気弁	40		0.00020		-36	
CASE3	吊材破断モデル	吊材バンド上・下部 3本破断	アーチリブ	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央
				214	152	0.00068	0.00048	-62	35
			同上 溶接不良箇所	238		0.00063		-52	
			空気弁	64		0.00031		-88	
CASE4	 ひずみ、変位が 大きく進展	吊材バンド上・下部 6本破断	アーチリブ	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央
				236	237	0.003	0.006	-136	211
			同上 溶接不良箇所	259		0.031		-103	
			空気弁	81		0.00039		-198	
CASE5		吊材バンド上・下部 9本破断	アーチリブ	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央	1/4点付近	中央
				241	242	0.027	0.030	-1048	971
			同上 溶接不良箇所	273		0.088		-784	
			空気弁	242		0.021		-1573	

(1) 常時の応力分布状況（吊材健全モデルの結果より）

吊材健全モデルの解析結果を図 6.6 に示す。これより、通水管には大きな応力は発生していないが、吊材には大きな応力が発生していることがわかる。特に風対策として、後付けの補強材を設置した吊材の応力が大きい。このことから水管橋全体において吊材が最も大きな応力を負担しており、部材径が小さく管厚も小さいことから外面腐食による耐荷性低下の影響も生じやすいことも併せて考慮すると、維持管理点検においても最も注目すべき部材であることがわかる。

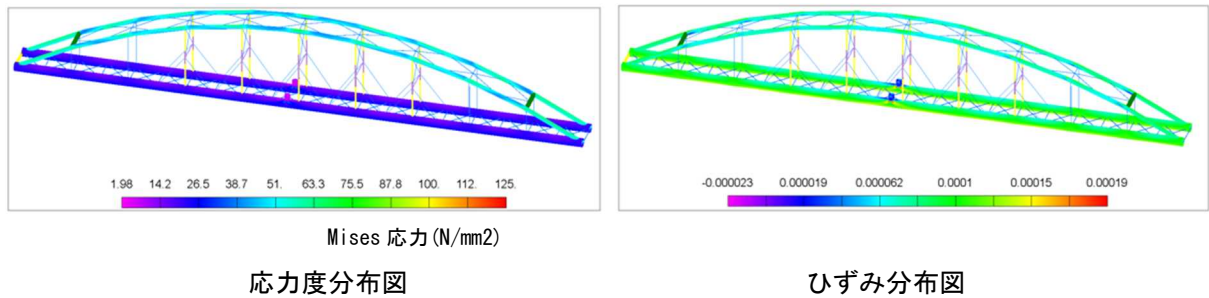


図 6.6 吊材健全モデル（CASE1）の解析結果

(2) 落橋状況の再現性（吊材 9 本破断モデルの結果より）

吊材 9 本破断モデルの解析結果を図 6.7 に示す。事故時の動画や事故後の調査から落橋時に破断が確認されている解析ケースの結果である。図に示すように、吊材破断により、アーチ材中央部は複数箇所で座屈が生じ 1m 程度上方に変位し、通水管・空気弁付近は座屈が生じ 1.5m 程度下方に変位する結果となった。これは、併せて掲載する落橋初期の写真の変形モードと類似していることがわかる。この結果より、解析による落橋過程は、動画解析等による本水管橋の落橋過程や破壊状況が概ね再現できており、前項で示した落橋ステップについては構造解析により定量的に説明できるものと考ええる。

また、これらの解析により事故状況を再現できたことから、大変形非線形有限要素解析によれば構造安定性及び部材耐力を適正に評価可能であることが確認できる。

なお、これらの解析方法や解析モデルにより事故状況を再現できたことから、以降の吊材破断時の解析精度も確保できるものと考えられるほか、本水管橋をはじめとした類似構造の水管橋の今後の対策検討を行ううえで、ここに示した解析方法の活用が期待できる。

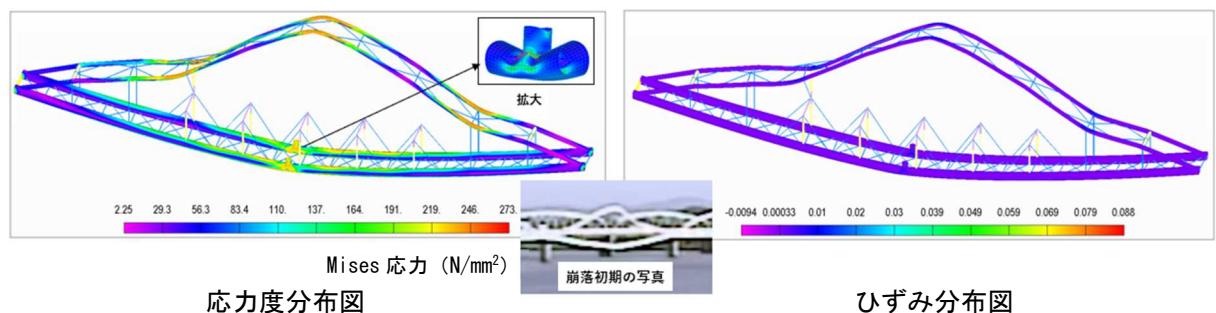


図 6.7 吊材破断モデル（CASE5：9 本破断）の解析結果

(3) 吊材破断本数の影響（吊材 3 本、6 本破断時の結果より）

吊材 3 本、6 本破断モデルの解析結果を図 6.8 に示す。また、これらの解析結果の考察を以下に示す。解析結果として、本水管橋については、多くの吊材が破断しなければ構造的なバランスを失うことはないことを確認できた。

- 吊材 3 本がバンド上部で破断したケース（CASE2）では、破断後に面外方向のブレースが引張力を負担するため全体構造は健全な状態（CASE1）とほぼ変化がない。この時点で落橋は生じない結果となり、落橋前に確認された実際の状況とも整合する。また、吊材 3 本がバンド上・下部で破断したケース（CASE3）でも、部材応力度は降伏点には至らなかった。
- 吊材 6 本（上流側 3 本、下流側 3 本）がバンド上・下部で破断ケース（CASE4）では、部材応力度は降伏点強度を超過しており、吊材が 5～6 本破断した場合に構造系全体が限界点に達する可能性があるかと推測される。

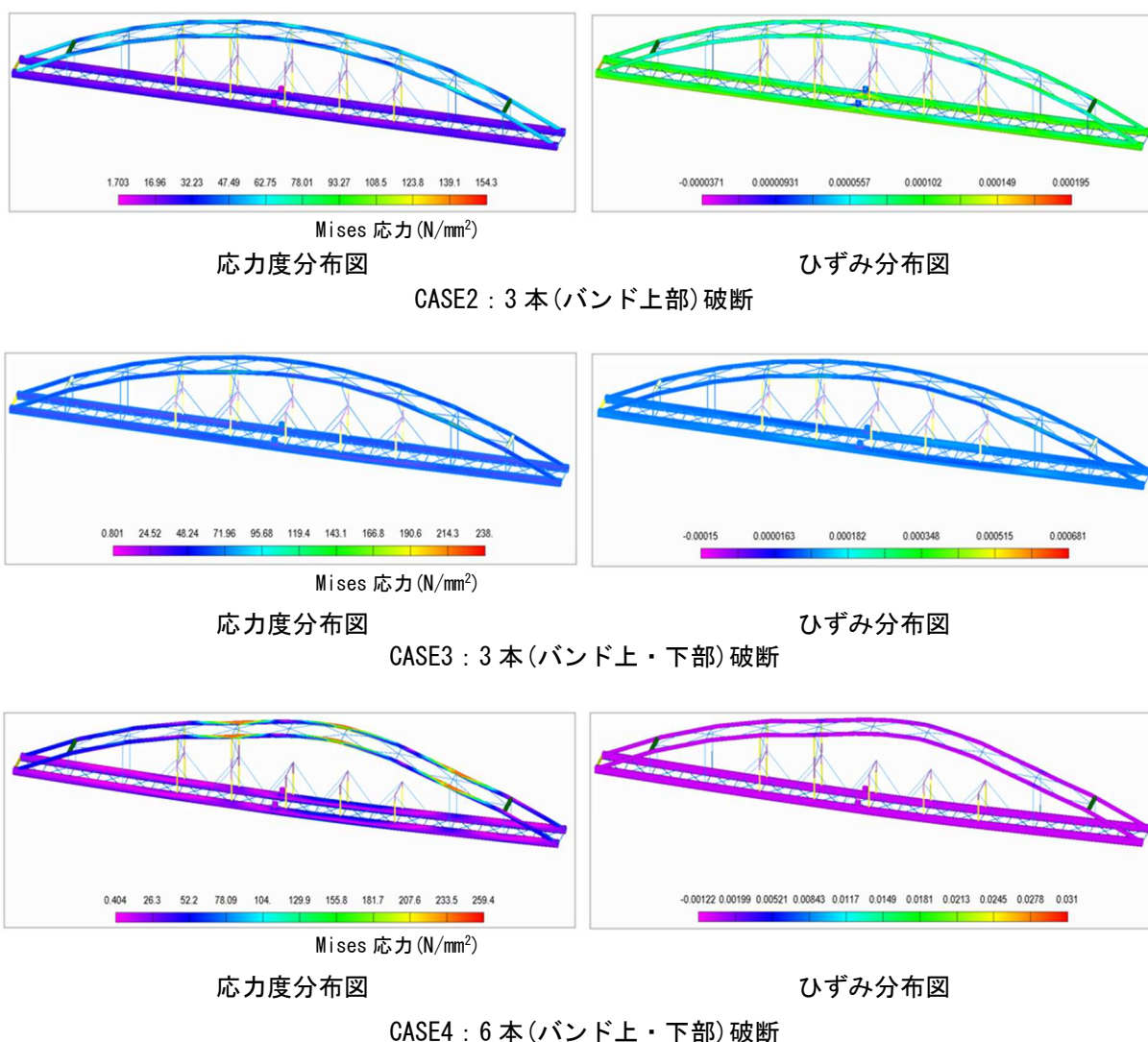


図 6.8 吊材破断モデル（CASE2：3 本破断～CASE4：6 本破断）の解析結果

(3) 弱点部の考察（その他の解析結果より）

本水管橋の落橋に影響を与える可能性が考えられる弱点部（溶接部、外面腐食、空気弁部等）について、構造解析等により検証を行った結果を以下に示す。解析の結果により、これら弱点部の影響は、吊材の腐食による破断のように水管橋全体系の落橋を引き起こす直接的な要因ではなく、吊材破断により水管橋構造が不安定となったあとに生じる部材の変形や落橋などを誘発するものであると考えられる。

【溶接部の強度低下の影響】

- アーチ部の破断箇所について、溶接部の断面積を減少させたモデルで解析を行った結果、吊材健全モデルでは構造的影響はない。
- ただし、吊材破断モデルでは、溶接不良箇所で応力集中が生じてひずみが局部的に増大するため、本解析では見込んでいない構造の初期不整や構造劣化などにより変形が更に進展すれば、今回の落橋現象のように溶接不良箇所の大部分が破断レベルのひずみ（20%程度）に達する可能性（崩壊の可能性）があると判断された。

【局所的な外面腐食の影響】

- 吊材が健全であれば、アーチ材や水道管において発生する曲げやせん断は小さく、局所的な腐食による管厚の減少は問題とならない。

【空気弁の影響】

- 水道管において、空気弁の存在による応力集中により、水道管全体の変形性能は小さくなる。吊材破断時には、この部分は弱点となる。

6.3.4. 落橋メカニズムの推定

構造解析によって再現された落橋過程や落橋状況により、本水管橋の落橋メカニズムを次のように推測する。

- 風対策を実施したほとんどの吊材が破断した場合、水管橋落橋初期の変形現象は解析にて再現でき、さらなる変形が進展すれば、空気弁部（開口）に塑性ヒンジ、アーチリブに座屈が生じ、水道施設に要求される通水機能の消失に繋がることが考えられる。
- 落橋前に吊材の破断が3箇所で確認されていた2020年12月時点では、水管橋の構造部材の発生応力やひずみは、ともに問題となるレベルではない。特に、吊材上部で破断したケースでは、面外方向のブレースが引張力を肩代わりするため、水管橋全体系において健全な状態との間に大きな差はない状態である。
- 吊材が6本破断すると、ひずみが急激に大きくなり、鋼材の降伏応力度をオーバーする部材が生じる。つまり、吊材の破断本数が5本～6本に達すると、落橋に至ると考えられる。

7. 水管橋の維持管理履歴と課題の整理

7.1. 落橋前の維持管理について

7.1.1. 維持管理点検の実施状況

本水管橋の落橋前に行われていた維持管理点検の内容を以下に示す。

表 7.1 落橋前の維持管理点検

種 別	頻 度	点検の主な目的	点検方法
月次点検	月 1 回	漏水の有無 等	県道 141 号六十谷橋からの遠望目視
年次点検	年 1 回	水管橋全体の異常の有無	水管橋歩廊からの近接または遠望目視

月次点検は、隣接する県道 141 号六十谷橋からの遠望目視調査であり、漏水の有無を確認することが主な目的である。この方法では、水面への水の滴下等で漏水確認は可能であるが、部材の腐食や劣化状態の確認については死角も多く、距離もあるため、双眼鏡等を用いても困難であり、水管橋全体の構造的な安全性を確認することはできない。



図 7.1 県道 141 号六十谷橋から望む本水管橋の確認範囲

年次点検は、水管橋の歩廊から水管橋全体の異常を確認するものであり、この点検により水管橋の中央径間から右岸側にかけて多量の鳥糞が付着していることなども確認されていた。この調査方法は、水管橋に近接して調査が行えるものの、調査範囲は歩廊から視認できる範囲に限られており、部材の死角部分が多くあるため、本水管橋の構造的な安全性を確認するための十分な調査は行えない。なお、これまでの年次点検では、多量の鳥糞やスケールの付着により部材表面の確認が困難であったため、やむを得ず下弦材（通水管）の漏水確認を中心に点検を行っていたことや、重要部材である吊材の後付け部材周辺が腐食しやすいとの認識が薄く、さらに目視しにくい部分であるため十分な点検が行えていなかった等の反省点が本委員会で指摘されている。



図 7.2 歩廊からみた水管橋の状況

7.1.2. 維持管理の履歴と課題

本水管橋の改修工事や耐震診断等の検討業務の段階において、適切な維持管理等が行われていれば、落橋を回避できた可能性がある。これらの各段階に対する維持管理の履歴と課題について、表 7.2 に整理する。

表 7.2 各段階における維持管理の履歴と課題

時期	工事・検討業務等	維持管理の履歴・課題
昭和 48 年(1973 年)	設置工事	供用開始後の点検基準を作成していなかった。
昭和 51 年(1976 年)	吊材の風対策工事	重要な引張部材に後付け材を設置したため、結果的として段差に腐食要因となるスケールや水が溜まり易い構造となった。
平成 5 年(1993 年)	塗装更新工事	防食効果の高いふっ素樹脂塗装にて施工するも、既存のすべての塗膜除去を行わず、重ね塗りを行ったことにより、塗膜の劣化が進行した可能性がある。
	足場設置による水管橋全体の劣化調査時	後付け部材周辺における腐食や孔食を確認、また部分的な管厚減少(管厚測定による)を確認しており、経過観察が必要と示されていた。
平成 18 年(2006 年)	耐震診断に伴う劣化調査	歩廊などから通水管を中心とした目視可能範囲のみ調査しており、下弦材(通水管)以外の劣化調査を行っていなかった。
平成 27 年(2015 年)	耐震補強工事に伴い水平材の一部を更新	足場等を利用して近接目視できる機会であったが、水平材の交換のみに留まり、吊材(後付け材周辺)の腐食状況を確認していなかった。

平成 5 年の劣化調査(近接目視)にて、重要部材である吊材の後付け材周辺の腐食や孔食、管厚減少等の異常が確認されており、経過観察が必要と指摘されていたが、その後の維持管理においては、これらの指摘を反映した維持管理が行われていない。

7.2. 既往の各種点検マニュアルとの比較

本水管橋と類似する構造物の点検や健全度・維持管理対応の評価に用いられている次の既往の構造物点検マニュアルの内容と本市の維持管理点検での対応を比較し、その問題点を整理する。

- ・水道施設の点検を含む維持・修繕の実施に関するガイドライン(令和元年 9 月): 厚生労働省
- ・橋梁定期点検要領(平成 31 年 3 月): 国土交通省道路局
- ・露出配管(水管橋等)～外面塗装劣化評価の手引き～(平成 25 年 3 月): 日本水道協会他

各項目の内容における本市の対応評価の結果をまとめたものを表 7.3 に示す。

既往の各種点検マニュアルと本市の点検状況を比較した結果、点検範囲、項目、頻度、判定などにおいて、対応できていない事項や、対応が不十分であった事項が多く見られた。ただし、一般的には職員による対応が難しい専門的な技術を必要とする点検・判定事項や、物理的に日常の点検だけでは対応が困難な事項もあり、マニュアル通りの職員の対応には限界がある。

調査委員会ではこれらの結果を踏まえ、施設の特徴と維持管理体制や維持管理水準(技術的能力)などに応じた適切な維持管理計画を策定することが重要であるとの提言がなされた。

一般事項

表 7.3 (1) 既往の各種点検マニュアルと本市の対応評価

項 目	対応評価	水道施設の点検を含む維持・修繕の実施に関するガイドライン(R1.9) 厚生労働省	橋梁定期点検要領(H31.3) 国土交通省道路局
基本事項	評 価	△ (対応していたが不備があった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・点検範囲、点検項目・方法、劣化度評価等、点検業務全般【不備】	・必要に応じた詳細調査や追加調査等が未実施【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	・近接目視点検の実施(各部材ごと)【困難】
施設管理方法	評 価	△ (対応していたが不備があった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・予防措置として塗装更新工事を計画していたが、劣化に対する適切な状況判断ができていない【不備】	・部材単位で健全性を評価していない【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	—
点検頻度	評 価	○ (対応できていた)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	—	・供用開始後、大規模改修後 2 年以内の初回点検が未実施【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	—
点検種類	評 価	▲ (対応できていなかった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	—	・構造物の損傷・劣化把握を目的とした各種点検は未実施【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	—
点検内容と実施体制	評 価	▲ (対応できていなかった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・巡視・点検の頻度、方法のマニュアル化と状況に応じた適宜見直し【未対応】 ・重要度等を考慮した合理的な点検方法の選択【未対応】	・近接目視、触診・打音を基本とした状態把握は未実施【未対応】 ・道路橋維持管理等に必要な知識や経験、相応の資格を有する技術者(本要領では「橋梁診断員」と称す)を配置していない【未対応】 ・対策区分判定や健全性診断の最終判断において、必要な詳細調査や別途専門知識を有する有識者の助言を得た管理者判断が未実施【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	・必要な専門知識や技能を備えた点検者(職員)の育成・配置【困難】	・必要な専門知識や技能を備えた点検者(職員)の育成・配置【困難】 ・措置の意思決定の一元化、迅速化(道路・水道施設管理者等の調整、予算執行等)【困難】
記 録	評 価	△ (対応していたが不備があった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・点検結果表のみ作成【不備】	・現地状況写真、部材番号及び要素番号図、損傷図及び損傷写真、損傷程度の評価と対策区分判定結果(部材ごと)等が整理されていない【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	—

鋼 構 造 物

表 7.3 (2) 既往の各種点検マニュアルと本市の対応評価

項 目	対応評価	水道施設の点検を含む維持・修繕の実施に関するガイドライン(R1.9) 厚生労働省	橋梁定期点検要領(H31.3) 国土交通省道路局
点検対象	評 価	▲ (対応できていなかった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	部位・部材ごとの損傷・劣化を対象とした点検が未実施【未対応】	部位・部材ごとの損傷・劣化を対象とした点検が未実施【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	—
点検項目	評 価	▲ (対応できていなかった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・防食塗装、鋼材の亀裂、構造物の変位等の重要箇所の点検が未実施【未対応】	・腐食、亀裂、ゆるみ・脱落、破断、変形・欠損、遊間異常、支承機能障害、滞水等の主要な損傷の状態把握が未実施【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	—
点検頻度	評 価	○ (対応できていた)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	—	・供用開始後や大規模改修後 2 年以内の初回点検が未実施【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	—
点検方法	評 価	▲ (対応できていなかった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・構造物全体の目視点検、簡易計測による現地調査、書類調査等を実施していない【未対応】 ・板厚検査、溶接部検査等を実施していない【困難】	近接目視、触診・打音を基本とした点検を実施していない【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	構造的に重要な部材・部位すべての近接点検【困難】
判 定	評 価	△ (対応していたが不備があった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	予防措置として塗装更新工事を予定していたが、構造弱点部の腐食を見逃したことで、必要な応急処置が実施されなかった【不備】	健全度判定の基準が整理されておらず、現状の劣化状態について適切な判定がなされていない【未対応】 (※本要領では、現状の健全性をⅠ～Ⅳに区分して判定し、それぞれの段階に応じた対策区分や対応を規定) 〔健全性判定区分〕 ●Ⅰ(健全):道路橋の機能に支障が生じていない状態 ●Ⅱ(予防措置段階):道路橋の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態 ●Ⅲ(早期措置段階):道路橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態 ●Ⅳ(緊急措置段階):道路橋の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態
	現実的に対応が困難な事項	—	現状の職員による点検では現場判断が難しいと考える【困難】

水管橋

表 7.3 (3) 既往の各種点検マニュアルと本市の対応評価

項 目	対応評価	水道施設の点検を含む維持・修繕の実施に関するガイドライン(R1.9) 厚生労働省	露出鋼管(水管橋等)～外面塗装劣化診断評価の手引き～(H25.3) 日本水道協会・WSP
点検対象	評 価	▲ (対応できていなかった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・上部工主構部(アーチ材、吊材)、下部工(橋台、橋脚等)を対象とした点検が未実施【未対応】	・水管橋の構造部材を対象とした点検が未実施【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	—	—
点検項目	評 価	▲ (対応できていなかった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・外面塗装の状況(剥離・発錆)、変形の有無及び腐食の点検が未実施【不備】	・外面塗装の防食性(さび、はがれ、われ、上塗りの状態)に着目した点検未実施【未対応】 ・構造部材の劣化(腐食、変形、破損等)に着目した点検が未実施【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	・下部工の沈下、傾斜、洗堀の有無等の点検【困難】	—
点検頻度	評 価	○ (対応できていた)	○ (対応できていた)
	未対応・不備	—	—
	現実的に対応が困難な事項	—	—
点検方法	評 価	▲ (対応できていなかった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・ガイドラインの推奨事項である引張部材(吊材等)の近接点検や必要に応じた引張試験(サンプル調査)が実施されていない【未対応】 ・近接困難な場所の点検方法(ロボット等の最新調査技術)の検討、実施がなされていない【未対応】	・近接しての触診調査が未実施【未対応】 ・近接困難な場所の点検方法(デジタルカメラの光学高倍率ズーム撮影画像解析等の最新調査技術)の検討、実施がなされていない【未対応】
	現実的に対応が困難な事項	・常に引張応力を受ける吊材等の重要部材、重要箇所の近接点検【困難】 ・適切な荷重レベルでの引張載荷試験【困難】	—
判 定	評 価	▲ (対応できていなかった)	▲ (対応できていなかった)
	未対応・不備	・評価基準が整理されておらず、現状の劣化状態について適切な評価がなされていない【未対応】 ※本ガイドラインでは、現状の評価を A～D、N に区分して評価 〔評価区分〕 ● 評価 B: 詳細調査を実施し、修繕工事等の必要性検討が必要 ● 評価 C: 今後継続して損傷調査が必要 ● 評価 D: 現状では大きな問題はない ● 評価 N: 未点検または不明	・評価基準が整理されておらず、現状の劣化状態について適切な評価がなされていない【未対応】 ・場所(右岸、配管部、左岸)と部位(頂部、側部・上流、側部・下流、底部)ごとの評価がなされていない【未対応】 ※本手引きでは、塗装の評価については「景観性」、「防食性」を点数評価し、構造部材については損傷程度を A～C に区分し、それぞれの区分により対策区分を判定 〔外面塗装の評価〕 ● 「景観性」、「防食性」のいずれも 0～40 点 : 定期点検 ● 「景観性」、「防食性」のいずれかが 40～100 点 : 重点管理 ● 「景観性」、「防食性」のいずれも 40～100 点 : 塗装塗替え対象 〔構造部材〕 ● A: 劣化・損傷なし ● B: 軽微な劣化・損傷あり(次回の点検で再確認・評価) ● C: 劣化・損傷あり(詳細検討で塗替え基準の管理区分 1 段階引上げ)
	現実的に対応が困難な事項	・現状の職員による点検のみでは現場判断が難しいと考える【困難】	・現状の職員による点検では部材重要度や損傷進行状況、環境条件等の様々な要因を総合的に判断することが難しいと考える【困難】 ・点数化による統計的な評価では、今回のような吊材の局所的な腐食に伴う事故を見逃す恐れが高い【困難】

7.3. これまでの維持管理の課題

本市におけるこれまでの維持管理の課題や問題点を以下に整理する。

- 本市独自のマニュアルや基準を持っていなかったことから、構造部材である吊材の重要性など点検の要点整理が出来ておらず、近接目視点検が行えていなかった。
- 風対策である後付け材料が吊材に及ぼす影響についての認識が薄かった。
- 点検表や点検方法の整理が出来ていなかったために、人事異動による点検者の交代や、工事等における状況について情報の伝達が出来ていなかった。
- 目視しにくいことに加え、点検記録が水管橋全体で評価したものであったため、腐食の経過を正しく認識していなかった。
- 腐食の経過を正しく認識していなかったことから、ふっ素樹脂塗装（重防食塗装）の塗装効果年数を修繕における判断材料としていた。
- 水管橋全体の評価とし、径間毎や各重要箇所での評価が出来ていなかった。

これらの課題を具体的に評価すると図 7.3 のように整理できる。同図に示すように維持管理において何らかの対応は実施していたが、多くの項目において、施設の条件や維持管理条件に踏まえた対応が不十分であったことが最も重要な課題である。今後は、同図に示す維持管理条件に注目した上で、十分に対応していなかった事項の改善が必要である。

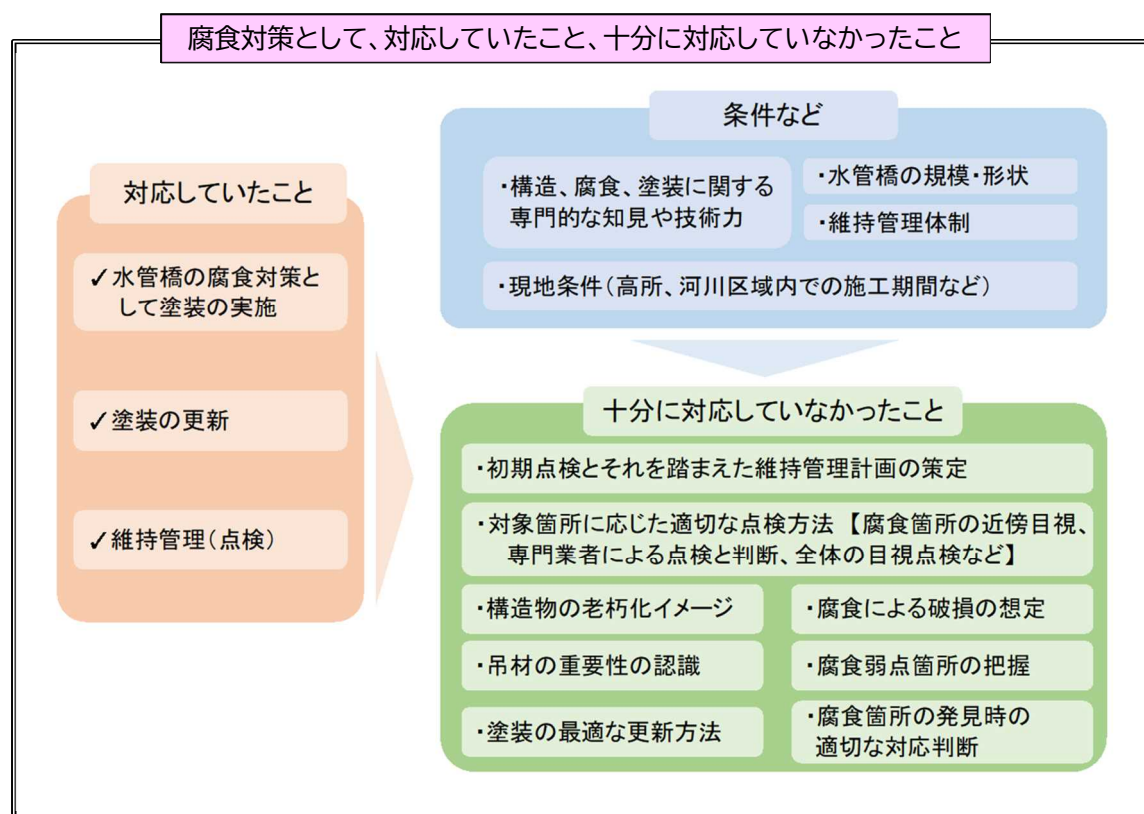


図 7.3 本水管橋における維持管理対応評価

今後、本水管橋の安全性を維持するためには、これらの課題を踏まえて適切に維持管理を行っていく必要がある。

8. 復旧及び今後の対応について

8.1. 復旧工事で実施した改良点

今回の事故を踏まえ、本水管橋の復旧工事では、更新区間及び残存区間においていくつかの改良を行った。それぞれの区間における改良点を以下に示す。

8.1.1. 更新区間

更新区間では、設計仕様として次の改良を行った。

【設計仕様（更新区間）】

1. 本水管橋設計は、一部条件を既設水管橋計算書から踏襲するが、「WSP007-99 水管橋設計基準（改正4版）」（以下WSP007と呼ぶ）に基づいて行うものとする。
2. 吊材の口径については、カルマン渦対策としてWSP007の基準に則り1/35以下の細長比とするため、250A（6.6t）の口径の鋼管を使用する。
3. 「WSP064-2007 水管橋設計基準（耐震設計編）」に基づき、主構部は地震動レベル1照査とし、橋門構、リングサポート、支沓についてはレベル2照査とする。
4. 3. の照査結果により、橋門構の鋼管は $\phi 457.2 \times 9.5t$ から $\phi 457.2 \times 12.7t$ に板厚を変更する。
5. 同じく 3. の照査結果により、リングサポート用鋼板を 16.0t（SS400）から、22.0t（SM490）に変更する。
6. ロッカー支沓は製造中止となっているため、高力黄銅支承板支承（BP・A）を使用する。
7. 支沓高がロッカー支沓と異なるため、リングサポート高を 650 mm から 735 mm に高くして、水道管（下弦材）の橋座よりの高さを既設水管橋に合わせる。
8. 伸縮管の性能をUPさせるため、伸縮管にセンタリングボルトを設置し、伸縮性能を ± 50 mm から ± 100 mm にUPさせる。
9. 地震時の伸縮管部からの漏水を防止するため、軸方向落橋防止ケーブルの伸縮性能を、伸縮管と同じ ± 100 mm とする。
10. 可動支沓の許容移動量は、伸縮管が許容できる伸縮量である ± 100 mm とする。しかし、レベル2地震時の水管橋移動量は、可動支沓が許容する移動量を超過することが想定されることから、このような状況では、可動支沓の上沓を破損させ、過度な応力が水管橋本体に及ばない構造とする。
11. 点検用歩廊は、将来の取替を容易にするため、ボルト取付とする。また歩廊全体をブロック化し、運搬と現地取付けを容易な構造とする。

更新区間の主な改良点は、カルマン渦対策として腐食破断の原因となった補強材が不要となる口径を採用したことや、支承をピン支承から水管橋の変位による影響の少ない構造の支承板支承に変更したこと、防食塗装の品質や塗装更新時の作業性に配慮して歩廊の構造を改善したこと、などがあげられる。図 8.1～図 8.3 に更新区間の主な改良箇所を示す。

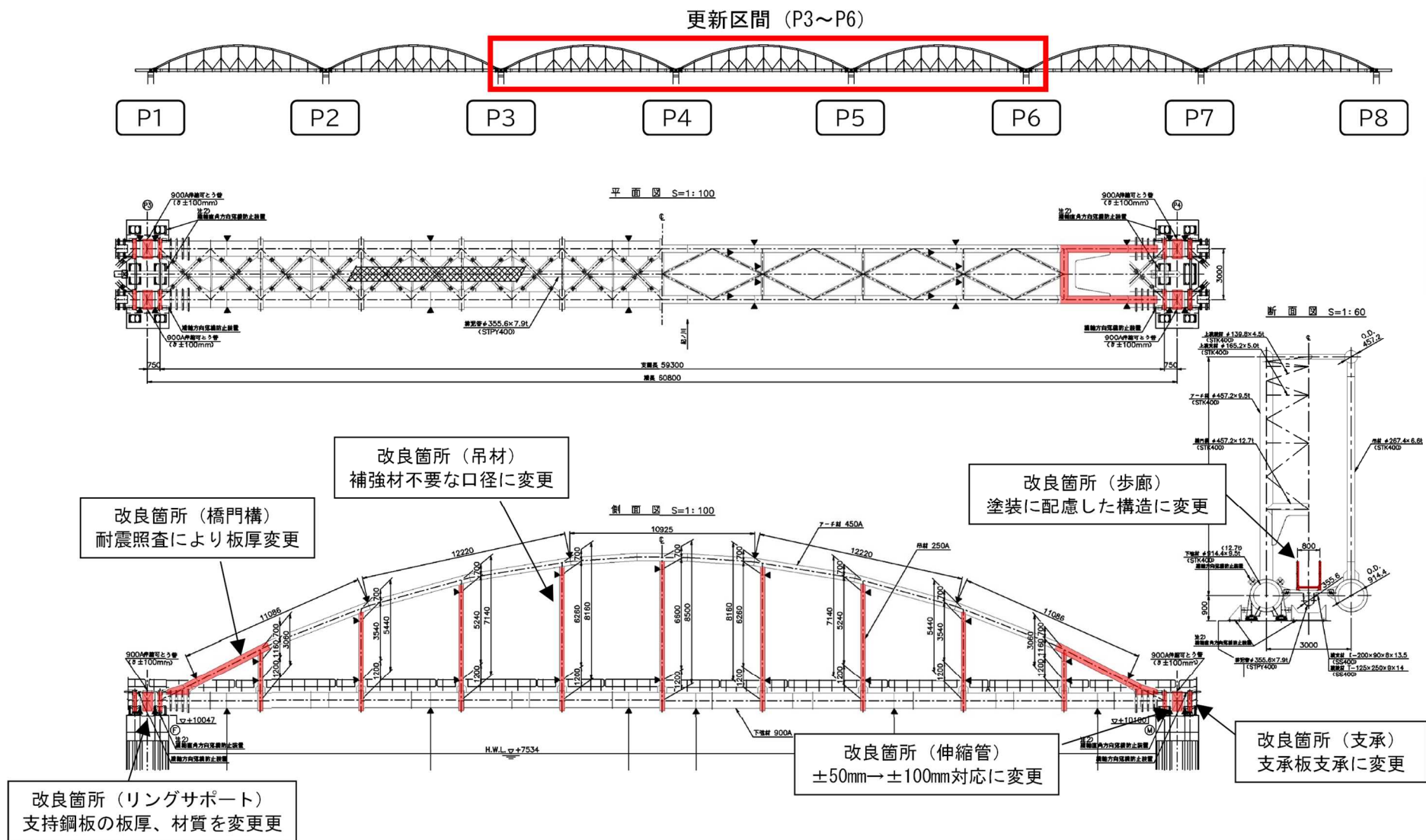


図 8.1 更新区間の主な改良点



既設支承部（左：ローラー支承 右：ピン支承）



更新支承部（左：支承板支承【可動】 右：支承板支承【固定】）

図 8.2 支承部分の改良（更新区間）

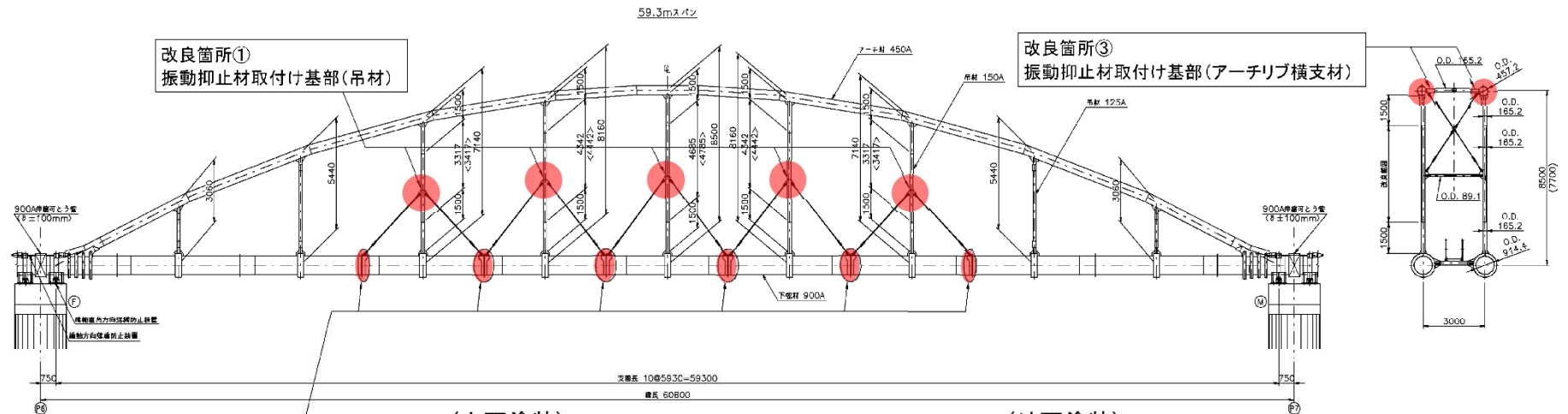


吊材をφ125（4.5t）からφ250（6.6t）に変更 ⇒ 風対策としての補強が不要となった。

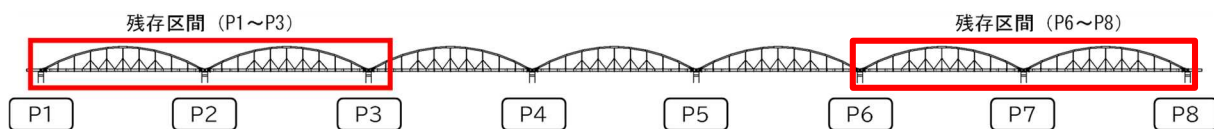
図 8.3 吊材の改良（更新区間）

8.1.2. 残存区間

残存区間については、水管橋の構造部材が存置されており、更新区間のような大掛かりな改良を行えない。ただし、少なくとも落橋を誘発する原因となった吊材後付け部について改良を行う必要があるため、図 8.4～図 8.5 に示す改良を行った。また、管厚減少や孔食などの著しい腐食がみられる箇所については、図 8.6 に示す補修（穴埋め、当て板補強等）を行った。



65



既設吊材に 2 つの割管を溶接取付する構造とし、吊材外形を $\phi 125$ から $\phi 150$ に補強するとともに、管厚を 4.5mm から 7.1mm とした。
 ⇒ 吊材と風対策部材との接続方法を変更し、接続部に雨水やスケールなどの堆積を防止
 ⇒ ケレン再塗装により防食機能を改善
 ⇒ 腐食部の溶接補強

図 8.5 吊材の改良（残存区間）



図 8.6 腐食箇所の補修状況（残存区間）

8.2. 今後の対応方針

本水管橋の今後の対応については、経年劣化等のリスクが残る残存区間と新たに新設した更新区間に分けて検討する必要がある。ただし、径間ごとに新旧の構造物が混在することを念頭に置く必要がある。検討にあたっては、部材劣化対策のほかに、2022 年 6 月に改訂された水道施設耐震工法指針（日本水道協会）の基準における耐震基準や危機耐性の考え方を取り入れる等、最新

の基準類に準拠した対応を検討する必要がある。

本委員での意見や審議内容については、前項で示した通り可能な限り復旧工事に反映したが、出来なかった項目は今後の対応として、残存区間と更新区間に分けて段階的に実施していく考えである。以下、具体的対応を示す。

8.2.1. 残存区間の対応（補強・補修工事）

今回の事故に関する調査・分析結果により、残存区間にも経年劣化リスクや、溶接部の不確実性等の部材強度に関するリスクが存在することが明らかとなり、これらのリスクを踏まえた対策を行う必要がある。残存区間において想定される被害シナリオに対してリスク評価を行い、本復旧工事での対応や今後の対策方針を整理したものを表 8.1 に示す。

8.2.2. 更新区間の対応（更新工事）

今回の事故を受け、落橋径間ならびに隣接する 2 径間（更新区間）では新たに部材を新設する更新工事（本復旧工事）が行われた。更新区間では、部材更新によって残存区間とは異なる被害シナリオが想定されるため、これらを考慮して本復旧工事での対応や今後の対策方針を整理する。更新区間におけるこれらの対応方針を表 8.2 に示す。

8.2.3. 今後の維持管理項目について

本水管橋では、維持管理方法の課題や問題点が浮き彫りとなったことから、構造物の安全性を維持するための管理項目や点検対象及び健全度評価などに関する対応例を示す。

更新区間については、部材の新設によって経年劣化が改めて開始となるため、これを踏まえた対応として残存区間と共通するリスクとともに整理する。

一方で、残存区間についてはすでに経年劣化が進んだ状態でリスク要因が多く残存しているため、特に注意すべき残存リスクとその対応について整理する。全区間（更新区間と残存区間共通）と残存区間における維持管理項目と対応を表 8.3 に示す。

8.2.4. より高いレベルの対策について

本水管橋は、紀の川以北地域へ水道水を供給する重要な基幹管路であるため、安定供給の観点から、これまでに示した対応のほかに、ある程度の破損が生じても通水機能を確保できるような対策を行うことも重要である。

吊材破断後の落橋を防止するためには、通水管の全重量を負担できる落橋防止装置と脱管防止のため伸縮可撓管（ベローズ式等）の設置やそれらの対策を前提とした空気弁部の座屈防止などが考えられるが、本水管橋（ランガー橋）は、そもそもアーチ材への曲げ応力などの荷重負担は期待できないため、アーチ材を利用した落橋防止対策を行うことは容易ではない。

今回の各種調査や構造解析により、本水管橋の座屈箇所や破断箇所の力学的な説明ができたことから、これらの知見を活用して吊材破断などの不測の事態にも対応できるよう、可能な範囲でできるだけ構造全体系の耐力を向上させる方策を検討することが望ましい。

表 8.1 (1) 今後の対応方針【残存区間の補修・補強工事】〔部材劣化対策〕

	被害シナリオ	各種課題など	リスクの評価（診断・調査結果）	本復旧工事時の対応	今後の対策
部 材 劣 化 対 策	吊材の破断	凹凸部などにおける吊材の腐食進展による破断	・各種調査の結果、吊材の後付け材設置部などの凹凸部において著しい腐食の確認と塗装劣化が顕著などの腐食要因を確認した。	・凹凸の少ない部材への更新により水や糞などのスケール等の腐食要因の堆積を抑制した。 ・ただし、構造的な制約により風対策設備は必要となり、ガセットプレートなどの凹凸部は残る。	・今回の教訓を踏まえた適切な維持管理マニュアルに基づいた維持管理を実施する。 ・ガセットプレート取り付け部の凹凸は残存するため、それらの箇所を中心とした維持管理の徹底。
		振動の影響による塗装劣化の進展	・各種調査の結果、吊材の振動は比較的大きく、物理的に塗装表面の劣化を進展させる可能性があるとして評価された。	・吊材をφ125 からφ150 に増径することで剛性の向上を図り、振動抑制による塗装表面の亀裂を抑制。 ・ただし、風対策設備は必要となり、更新区間と比べて局所的な振動の影響は大きいことを否定できない。	
	主要鋼材の強度低下による座屈	材料的な要因により強度不足の改善	・更新区間の組成試験や強度試験においては、健全性を確認(対策必要なし)。		
		外面腐食の影響による強度不足	・P6～P7 区間をはじめ、広い範囲で著しい腐食が確認されている。 ・溶接部の管厚が、公差下限値を満足しない結果が確認されている。	・著しい孔食部や腐食部に対しては補修工事を実施した。 ・ただし、今後も局所的であっても腐食状況の点検は重要。	・今回の教訓を踏まえた適切な維持管理マニュアルに基づいた維持管理を実施する。 ・溶接部の腐食は比較的進展しやすいといった傾向を十分に踏まえた維持管理の徹底。
			・塗装更新未実施部分や既存の塗装未撤去による塗装上塗りなどの施工上の課題が確認されている。	・適切な方法による新規外面塗装により対応するも、一般的な水管橋と同様に施工上の制約などにより、既設塗装の未撤去などの塗装の長期寿命を期待するには万全ではない部分が残る。	・今回の教訓を踏まえた適切な維持管理マニュアルに基づいた維持管理を実施する。 ・既設塗装の未撤去など、長期的な塗装の寿命を期待できる状態には至っていないことを十分に踏まえた維持管理の徹底。 ・ドローンなどによる一体管理、管理情報の共有など。
		内面腐食の影響による強度不足	・目視調査などの結果、内面塗装は、外面溶接箇所を除き健全であり、腐食は局部的。強度的な問題とならないことを確認した。	・腐食箇所の撤去と内面塗装の更新を行った。	
	溶接部の強度低下による破断	溶接技術の要因による溶接不具合や外面腐食による溶接部の強度不足	・強度試験の結果、溶接不具合と外面腐食による強度不足が確認された。また、解析の結果、この強度不足がアーチ材破断の要因であることが確認された。 ・ただし、吊材の多くが破断しなければ、今回確認された強度低下量であれば、安定性を維持できる結果を確認した。	・吊材の全面更新により吊材破断に伴う主鋼材への作用荷重の増大の影響はない。 ・ただし、荷重作用の大きさに関係なく、設計基準強度を不足する箇所がないことを完全に否定できない(全ての溶接部について強度を計測できない)ため、地震の影響など何らかの影響で構造バランスが乱れた場合に応力集中などの弱点が残存する。	・今回の教訓を踏まえた適切な維持管理マニュアルに基づいた維持管理を実施する。 ・溶接部の強度不足といった構造的な弱点箇所が残存する可能性があることを十分に踏まえた維持管理の徹底。
	伸縮管のボルト材劣化による脱管	摺動形伸縮管のボルト材腐食劣化による強度不足	・伸縮管は既設同形式(摺動形)のものが採用されており、多数のボルトがある。 ・他事業体において著しい腐食による漏水報告あり。	・ボルトナットを新しいものに交換した。	

表 8.1 (2) 今後の対応方針【残存区間の補修・補強工事】〔耐震化（耐震性向上）〕

	被害シナリオ	各種課題など	リスクの評価（診断・調査結果）	本復旧工事時の対応	今後の対策
耐震化（耐震性向上）	地震被害（上部工）	水道施設耐震工法指針への対応（2022）	・指針の改訂内容より、耐震計算法の大幅な見直しが行われているため、WSP 基準と併せて新しい指針への対応（耐震診断⇒耐震補強）が必要。 ・今後、耐震診断実施するが、基準を満足しないことが考えられる。		耐震診断⇒耐震補強の実施 ⇒動的解析による、より安全、より効率的な耐震対策の実施。 ⇒今回の劣化調査結果も考慮（アーチ材溶接部の強度低下を考慮した照査など）。
	地震被害（下部工）	同上	同上		同上

表 8.1 (3) 今後の対応方針【残存区間の補修・補強工事】〔危機耐性（より安全な施設とするための課題）〕

	被害シナリオ	各種課題など	リスクの評価（診断・調査結果）	本復旧工事時の対応	今後の対策
危機耐性	吊材破断等により構造バランスを失った場合の通水管（空気弁部）の座屈や変形	多くの吊材破断時において通水管の中央部分での座屈と大きな変形（落橋要因）	・空気弁部の分岐がある場合、後付け材設置部の吊材がない状態では実際の現象と同様に落橋することを解析により確認。 ・一方、同分岐がない場合は、空気弁部がある場合と比べて、変形量がかなり小さい解析結果となるため、この弱点箇所の対策は重要。	・空気弁の位置や空気弁部の構造条件は大きく改善されない。 ・ただし、吊材の腐食対策を徹底（部材劣化対策を参照）することで、想定外のリスクを大幅に軽減。	耐震補強工事に併せた補強工事の実施について検討する。 ・空気弁位置の検討 ・落橋防止ケーブルの増径・追加等 ・一体管路型の伸縮管への交換等
	吊材破断等により構造バランスを失った場合の落橋防止装置の破断	多くの吊材破断時において設計荷重を上回る荷重作用による落橋防止装置の破断に伴う落橋	・検討の結果、耐震対策を目的とした設計条件では、水管橋の落橋は防止できないことを確認。	未対応 ⇒元設計：設計基準に沿った設計。	
	吊材破断等により構造バランスを失った場合の伸縮管の脱管	多くの吊材破断時において設計荷重や許容変位量を上回る作用による伸縮管の脱管に伴う落橋	・摺動形の部材を使用しているが、一体管路型の伸縮管でないと想定以上に対応できない。	未対応 ⇒現在：摺動形の部材を使用。	

表 8.2 (1) 今後の対応方針【更新区間の更新工事】〔部材劣化対策〕

	被害シナリオ	各種課題など	リスクの評価（診断・調査結果）	本復旧工事時の対応	今後の対策	
部 材 劣 化 対 策	吊材の破断	凹凸部などにおける吊材の腐食進展による破断	・各種調査の結果、吊材の後付け材設置部などの凹凸部において著しい腐食の確認と塗装劣化が顕著などの腐食要因を確認した。	・凹凸の少ない部材への更新により水や糞などのスケール等の腐食要因の堆積を抑制した。	・職員による目視点検の強化と専門業者による吊材（鋼材腐食、塗装の劣化）の近接目視や点検頻度の増などによる適切な維持管理により対応。 ・ドローンなどによる一体管理、管理情報の共有など。	
		振動の影響による塗装劣化の進展	・各種調査の結果、吊材の振動は比較的大きく、物理的に塗装表面の劣化を進展させる可能性があるとして評価された。	・吊材をφ125 からφ250 に増径することで剛性の向上を図り、後付け部材無しでも振動を抑制した。		
	主要鋼材の強度低下による座屈	外面腐食の影響による強度不足	・強度試験と解析の結果、外面腐食が要因と考えられる強度低下に伴う座屈は生じていないことを確認。 ・破損時に見られた主鋼材の座屈現象は、多くの吊材が破断したことによるもので、構造解析により力学的に説明できる。 ・主鋼材の腐食による強度不足が要因でないことを確認した。	・既設から追加の対応は必要なく、適切な材料の製造と外面塗装により対応した。		
			・調査の結果、凹凸部において塗装の早期劣化や、それに伴う局所的な主鋼材の腐食進展が確認された。	・塗装劣化や局所的な腐食の要因となる凹凸部の少ない部材に更新した。		
			内面腐食の影響による強度不足	・内面の目視調査の結果、強度低下を招くような腐食は確認されなかった。		
	溶接部の強度低下による破断	溶接技術の要因による溶接不具合や外面腐食による溶接部の強度不足	・強度試験の結果、溶接不具合と外面腐食による強度不足が確認された。 ・また、解析の結果により、この強度不足がアーチ材破断の要因であることが確認された。	・溶接方法の改善や重防食塗装の使用により、溶接部の強度低下を防止。		

表 8.2 (2) 今後の対応方針【更新区間の更新工事】〔耐震化（耐震性向上）〕

	被害シナリオ	各種課題など	リスクの評価（診断・調査結果）	本復旧工事時の対応	今後の対策
耐震化（耐震性向上）	地震被害（上部工）	水道施設耐震工法指針への対応（2022）	・指針の改訂内容より、耐震計算法の大幅な見直しが行われているため、WSP 基準と併せて新しい指針への対応（耐震診断⇒耐震補強）が必要。	未対応 ⇒本復旧設計：静的解析など（現行指針：動的解析）。	新しい手法や基準による診断と必要に応じて耐震対策の実施 ⇒動的解析による、より安全、より効率的な耐震対策の実施。
		その他耐震対策（構造細目による安全性の向上）		・部分的な鋼管やリングサポートの板厚のアップ、伸縮管の性能アップ、軸方向落橋防止装置の性能アップ支承部の機能アップなど。	
	地震被害（下部工）	水道施設耐震工法指針への対応（2022）	・指針の改訂内容より、耐震計算法の大幅な見直しが行われているため、WSP 基準と併せて新しい指針への対応（耐震診断⇒耐震補強）が必要。	未対応 ⇒建設時の設計：構造物独立モデルなど（現行指針：地盤－構造物連成系モデル）。	新しい手法や基準による診断と必要に応じて耐震対策の実施 ⇒動的解析による、より安全、より効率的な耐震対策の実施。

表 8.2 (3) 今後の対応方針【更新区間の更新工事】〔危機耐性（より安全な施設とするための課題）〕

	被害シナリオ	各種課題など	リスクの評価（診断・調査結果）	本復旧工事時の対応	今後の対策
危機耐性	吊材破断等により構造バランスを失った場合の通水管（空気弁部）の座屈や変形	多くの吊材破断時において通水管の中央部分での座屈と大きな変形（落橋要因）	・空気弁部の分岐がある場合、後付け材設置部の吊材がない状態では実際の現象と同様に落橋することを解析により確認。 ・一方、同分岐がない場合は、空気弁部がある場合と比べて、変形量がかなり小さい解析結果となるため、この弱点箇所の対策は重要。 ・ただし、解析の結果、吊材の多くが破断しない限り、通水管の座屈は生じないことから、この想定外リスクは小さいことが確認できた。	・水管橋復旧の緊急度や設計～工事期間の短縮などの要因から空気弁の位置や空気弁部の構造条件は大きく改善されない。 ・ただし、吊材の腐食対策を徹底（部材劣化対策を参照上記参照）することで、想定外のリスクを大幅に軽減。	耐震補強工事に併せた補強工事の実施の検討。 ・空気弁位置の検討 ・落橋防止ケーブルの増径・追加等 ・一体管路型の伸縮管への交換等
	吊材破断等により構造バランスを失った場合の落橋防止装置の破断	多くの吊材破断時において、設計荷重を上回る荷重作用による落橋防止装置の破断に伴う落橋	・現行基準においては、検討の結果、耐震対策を目的とした設計条件では、想定外の事象により構造バランスを失った際には、水管橋の落橋は防止できないことを確認した。	未対応 ⇒本復旧設計：設計基準に沿った設計。	
	吊材破断等により構造バランスを失った場合の伸縮管の脱管	多くの吊材破断時において、設計荷重や許容変位量を上回る作用による伸縮管の脱管に伴う落橋	・摺動形の材料を使用しているが、一体管路型の伸縮管でないと想定以上に対応できない。	未対応 ⇒本復旧設計：摺動形の部材を使用。	

表 8.3 (1) 今後の維持管理項目の例【全区間（更新区間・残存区間共通）】

全区間(更新区間・残存区間共通)の管理項目						
管理対象		塗装の劣化状況の管理		構造の劣化状況の管理		
点検	対象項目	塗装の劣化		通水管の欠損	構造の状況 溶接部(現場、工場)の劣化	
	対象箇所	目視可能範囲 (特に腐食が生じやすい箇所)	構造系全体	通水管	目視可能範囲 (特に腐食が生じやすい箇所)	全ての構造体 (年次点検で確認出来ない箇所を重点的に実施)
	点検内容	表面状況の確認 (ひび割れ、剥離、錆汁など)		漏水の有無	表面状況の確認 (ひび割れ、剥離、錆汁など)	
	点検方法	歩廊からの目視・触診 (点検可能な全ての範囲)	近接目視 (ドローン・ロボットカメラ等) 触診 (点検可能な範囲)	遠方目視 (六十谷橋より)	点検可能な範囲の 目視・触診・打音	近接目視、触診・打音調査 (ドローン・ロボットカメラ・ロープアクセス等)
	点検頻度	2回/年	1回/5年	毎月	2回/年	1回/5年～10年 (塗装の劣化状況から設定する)
	点検者	職員	専門業者	職員	職員	専門業者
	記録方法	写真、点検記録表		点検記録表	写真、点検記録表	
評価	評価方法	劣化グレード判定		漏水の有無	劣化グレード判定	
	上記評価 NG 時の対応	5年に1回⇒2年に1回⇒塗替え		補修工事	5年に1回⇒2年に1回⇒補修工事	

表 8.3 (2) 今後の維持管理項目の例【残存区間】

残存区間の注意すべき管理項目							
残存リスク		旧塗装の残存		溶接部の強度低下		吊材形状	
		旧塗装の下塗りを残し、上塗りを更新している。 (下塗りの全除去は技術、費用、期間的に困難なため)		旧技術、基準による溶接部の劣化や腐食 による管厚の減少		凹凸部などにおける吊材の腐食進展 振動の影響による塗装劣化進展	
点検	対象項目	塗装の劣化		溶接部等の腐食、欠損	溶接部(現場、工場) の劣化	吊材の塗装の劣化	
	対象箇所	目視可能範囲 (特に腐食が生じやすい箇所)	構造系全体	目視可能範囲 (特に腐食が生じやすい 箇所)	全ての溶接部	吊材凹凸部	
	点検内容	表面状況の確認 (ひび割れ、剥離、錆汁など)		表面状況の確認 (ひび割れ、剥離、錆汁など)		腐食因子の有無、表面状況の確認、腐食の有無	
	点検方法	歩廊からの目視・触診 (点検可能な全ての範囲)	近接目視 (ドローン・ロボットカメラ等) 触診 (点検可能な範囲)	歩廊からの目視・触診・打音 (点検可能な全ての範囲)	近接目視 触診・打音調査 (ドローン・ロボットカメラ・ロープアクセス等)	歩廊からの目視 (点検可能な全ての範囲)	近接目視、触診・打音調査 (ドローン・ロボットカメラ・ロープアクセス等)
	点検頻度	年2回	5年	年2回	5年～10年 (塗装の劣化状況から 設定する)	年2回	5年～10年 (塗装の劣化状況から 設定する)
	点検者	職員	専門業者	職員	専門業者	職員	専門業者
	記録方法	写真、点検記録表		写真、台帳記録		写真、台帳記録	
評価	評価方法	劣化グレード判定		劣化グレード判定		劣化グレード判定	
	上記評価NG 時の対応	5年に1回⇒2年に1回⇒塗替え		5年に1回⇒2年に1回⇒補修工事		5年に1回⇒2年に1回⇒塗替え	

8.3. 給水安定性確保に向けた展望

8.3.1. 本市の水道施設計画における本水管橋の整備の在り方

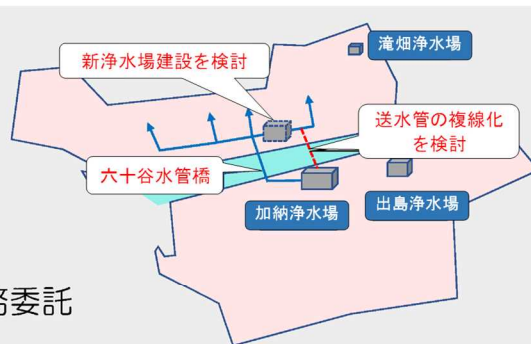
本水管橋の今後の課題は、耐震化や維持管理、更新を含む計画を立案することであり、これらの計画は、市全体の水道事業計画として現在進められている「リダンダンシー（冗長性）」を確保するための取り組みの中で検討する必要がある。

・リダンダンシー確保のための検討

市内全域の安定給水を確保するため、送水管の複線化又は新浄水場の建設、既存浄水場も含めた水道施設全体の在り方を再検討する。

（令和4年度）

委託名：和歌山市水道施設基本方針策定業務委託



・六十谷水管橋の計画を立案

六十谷水管橋の耐震診断を実施し、リダンダンシーの計画と共に、耐震化や維持管理、更新等の計画を立案する。

※調査委員会の意見を取り込んだものとする。

図 8.7 本市の水道事業計画の概要と本水管橋における計画の位置付け

8.3.2. 本水管橋の耐震性について

本復旧工事における更新、補強、補修や今後の維持管理方法を改善することにより、通水機能の復旧や老朽化への対応は完了する。耐震性においては、今回の更新工事で更新 3 径間と既存 4 径間、下部工に区分される状態となっており、平成 18 年に実施した耐震診断結果から、次のような耐震性評価となる。

【本水管橋の現時点の耐震性評価】

- 平成 18 年度の耐震診断結果では、上部工においては移動量不足が指摘されており、下部工についても補強が必要とされている。
- 今回実施した更新工事では、本水管橋全体の維持管理性や耐風性は向上したが、耐震性については改善したとはならない。

8.3.3. 地震対策について

地震対策では、過去の大規模地震で落橋等が生じた箇所（弱点部）に着目して設計と対策を行うことや、構造が複雑で規模も大きい本水管橋の耐震性評価により適した解析手法を適用することなどが求められる。

【本水管橋における地震対策について】

- 過去の大規模地震では、主に支承部（支承、伸縮可撓管、リングサポートなど）の被害事例が数多く報告されているため、これらの実際に被害が生じた弱点部に着目した設計や対策検討を行う必要がある。
- 水管橋の各部位に作用する地震の振動モードが複数あるなど、静的解析では表現できない被害事例も多いため、複雑な地震時挙動の評価には動的解析の適用が重要となる。
- 静的解析などの比較的簡単な耐震計算法では、耐震性 NG となる結果であっても、動的解析などのより高度な解析を適用することで、実際の被害と整合する経済的な耐震設計や耐震補強を導ける可能性がある。

本水管橋は構造規模が大きいため、大規模地震時には実際の被害事例の多い支承部に比較的大きな地震作用が生じることや、地震時に複雑な挙動を示すことが想定される。今回の更新工事や過年度の耐震補強工事で一部の耐震性は向上したが、経済設計を行う観点からも、2022年6月に改訂された最新版の水道施設耐震工法指針の考え方を取り入れ、より高度な解析によって耐震性能を評価することが重要である。

8.3.4. 維持管理マニュアルの策定に向けて

本水管橋において、事故の再発を防止し、今後も安全な状態を維持していくためには、漏水確認を主体としたこれまでの維持管理方法を見直し、落橋の要因となった吊材の腐食など、水管橋の主要部材や弱点部の点検や評価が確実にできるよう、新たに維持管理マニュアルを策定することが重要となる。維持管理マニュアルでは、今回検討されたこれまでの維持管理方法の問題点や落橋原因を踏まえた改善点に留意し、主に次のような内容について整備することが必要と考えられる。

- 重点的に点検する必要がある重要部材や劣化しやすい箇所の明確化
- 主要な構造部材の点検方法（近接点検）
- 劣化度の判定基準の明確化（客観性確保）
- 劣化度判定基準に基づく対策区分（経過観察、詳細調査、緊急対応等）の明確化
- 点検記録様式（各径間・部位毎等）の整備と記録保存・情報共有の方法
- 点検体制（本市職員や専門業者委託等）、適切な点検頻度等

維持管理マニュアルに則って点検を行うためには、マニュアルの内容が実務において確実に実施でき、かつ、点検者の技術レベルによらず客観的に劣化の状況を評価できるようなものであることが望ましい。また、劣化状況や必要に応じて適宜見直しを行うことや、管理する本市職員の技術レベルの向上を図ること等によって、より良い維持管理が行えるもの

と考えられる。

現在、本市では水管橋の維持管理マニュアルを策定し、本水管橋の落橋事例を反映した内容となるよう、事故の再発を防止するための真摯な取り組みを行っているところである。

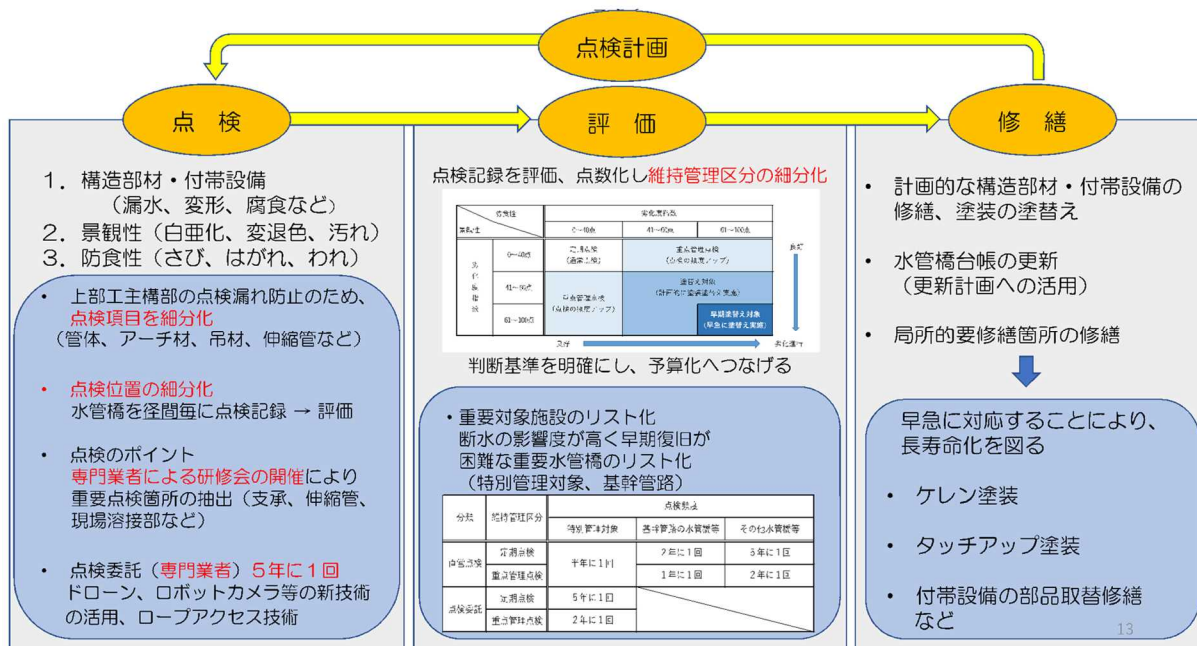


図 8.8 維持管理マニュアルの骨子

専門業者による定期点検の実施(5年に1回)

水管橋は道路橋と違い、橋梁点検車による近接目視が困難なことから

○断水の影響度の高い水管橋等を特別管理対象(7箇所)としてリスト化し詳細に管理を行う。

○ドローン、ロボットカメラ、浮き桟橋、ロープアクセス技術を用いた専門業者による点検を実施。



●ドローン点検



●ロボットカメラ点検



●浮き桟橋点検



●ロープアクセス技術点検

例)六十谷水管橋の定期点検(5年に1回)

○上部工はロボットカメラの映像において塗装や現場溶接部などの点検を実施

○支承を含む下部工においては、ロープアクセス技術により近接目視やボルト等の打音検査を実施

図 8.9 点検頻度や点検方法の検討案(和歌山市)

8.3.5. 今後の展望の具体化

本水管橋の今後の展望については、令和4年度に実施する和歌山市水道施設基本方針策定業務委託において具体化していく。

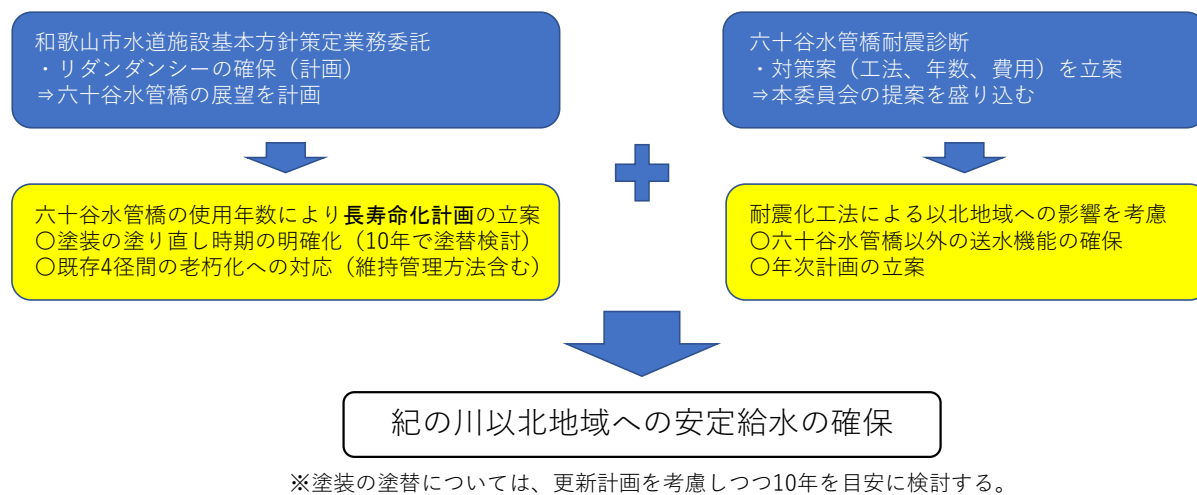


図 8.10 本市の水道事業計画と本水管橋の今後の展望