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



2021年10月3日,紀の川にかかる和歌山市企業局の六十谷水管橋の7径間のうち4径間目が崩落しました.土木学会関西支部では、この崩落が土木構造物の品質と維持管理に関わる重要な事象であるとの認識から、杉浦邦征京都大学教授を団長とする調査団を立ち上げ、調査・解析に取り組みました.調査・解析の実施にあたっては、当支部が近畿圏の府県等と締結している「災害時における調査等の相互協力に関する協定」に基づき、和歌山市企業局に当該施設へのアクセスや資料提供などで協力を頂きながら、独自の立場で調査・解析を進めたものです。一部の調査・解析には(国研)土木研究所の専門家の協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

社会基盤施設の維持管理は土木分野における重要課題の一つとなっています。2013 年には「インフラ長寿命化基本計画」が政府により策定され、官民挙げて様々な取組みが進められています。 土木学会でも、「インフラ健康診断」や教材の出版、講習会の開催などに取り組んでいます。一方、維持管理の基準や方法には管理者間でばらつきがみられたり、国・地方の技術職員数の削減によって点検・維持管理に十分な体制がとられないなどの課題も指摘されうるところです。このような状況を踏まえ、本調査報告が社会基盤施設の品質と維持管理について議論を進めていくための参考情報の一つとして活用されることを願っております。

(公社) 土木学会関西支部 支部長 三村 衛

目次(執筆担当)

(LU)(C
1. 概要(京都大学)
2. 橋梁諸元(京都大学)
3. 現地調査(京都大学)
3.1. 構造全体の状況
3.2. 吊り材の状況
3.3. ブレース材の状況
3.4. 支承部の状況
3.5. 他径間損傷状況
3.6. Google map ストリートビューによる崩落前の状況確認
3.7. まとめ 1
4. 腐食に関する現地計測(京都大学)
4.1. 現地計測項目 1
4.2. 計測箇所 1
4.3. 計測結果 1
5. 腐食に関する分析(土木研究所) 1
5.1. 分析項目 1
5.2. 塗膜付着物の分析1
5.2.1. 分析方法 1
5.2.2. 分析結果 1
5.3. 塗膜断面の分析 1
5.3.1. 分析方法 1
5.3.2. 分析結果 1
5.4. 塗膜表面の分析 1
5.4.1. 分析方法 1
5.4.2. 分析結果 1
5.5. 分析のまとめ 2
6. 数值解析(京都大学) 2
6.1. 解析モデルの検証 2
6.2. 安全性の評価 2
6.3. 吊り材の破断位置がブレース材上部の場合の応力状態2
6.4. 吊り材の破断位置がブレース材下部の場合の応力状態2
6.5. 崩落シナリオの検証2
6.6. 想定される崩落のシナリオ3
6.7. まとめ 3
あとがき・謝辞
付録A 六十谷水管橋・採取試料の化学分析結果
付録B 六十谷水管橋・回収部材の検分報告

1. 概要

2021年10月3日に和歌山市内を流れる紀の川に架かる六十谷水管橋が崩落した。崩落した橋 梁は支間長約60mのランガー桁形式の7径間連続アーチ橋の4径間目である。事故直後の調査では、崩落箇所の隣接径間において吊り材の腐食や破断が確認された。

本報告書では、崩落発生後の2021年10月17日および11月2日に実施した現地調査、ならびに2022年2月に行った回収部材の検分内容をとりまとめた。また、解析モデルを用いた再現解析により崩落メカニズムの検証を試みた。なお、現地調査団の構成を表1.1にまとめる。

年月日	参加者氏名(所属)	備考
	越後信哉(京都大学大学院地球環境学堂・教授)	橋梁外観調査
2021 年	杉浦邦征(京都大学大学院地球環境学堂・教授)	
	北根安雄(京都大学大学院工学研究科・准教授)	
10月17日(日)	高瀬和男(京都大学大学院地球環境学堂・客員教授)	
	永谷秀樹(宮地エンジニアリング・橋梁技術者)	
	杉浦邦征(京都大学大学院地球環境学堂・教授)	塗膜・付着物等
	Wint Thandar (京都大学大学院工学研究科・研究員)	の
2021年	佐藤顕彦(京都大学大学院工学研究科・博士学生)	調査
11月02日(火)	西崎 到(土木研究所 iMaRRC・グループ長)	
	冨山禎仁(土木研究所 iMaRRC・上席研究員)	
	島袋智尋(土木研究所 iMaRRC・研究員)	
	杉浦邦征(京都大学大学院地球環境学堂・教授)	回収した落橋
2022 年	北根安雄(京都大学大学院工学研究科・准教授)	部材の検分
02月08日(火)	大城雄希(京都大学大学院工学研究科・博士学生)	
	佐藤顕彦(京都大学大学院工学研究科・博士学生)	

表 1.1 現地調査の実施状況

2. 橋梁諸元

対象橋梁の橋梁諸元を表 2.1 に,橋梁全体横断図を図 2.1 に,崩落箇所一般図を図 2.2 に示す.

2 100/6682						
名称(所在,設計年)	六十谷水管橋(和歌山市紀の川上,昭和47年10月)					
形式 (全長)	ランガー桁および 2 径間連続梁(550.0m)					
	ランガー桁	59.30m@6				
支間構成	7 2 22 - 111	53.70m@1				
火 间(帶)及	2 径間連続梁	35.00m+31.45m@1				
	2 怪间建就朵	27.05m+35.00m@1				
水道本管中心間隔	3.000m					

表 2.1 橋梁諸元

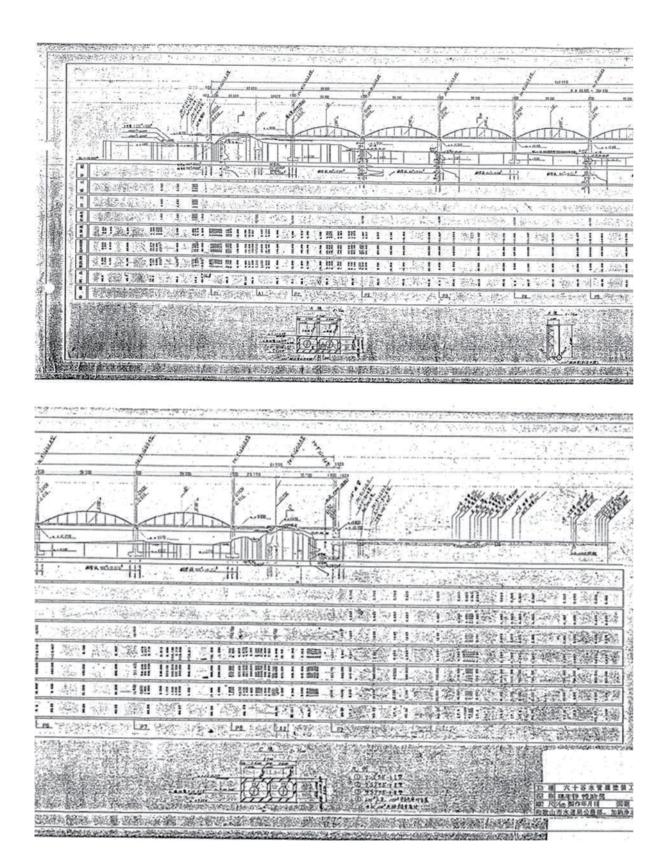


図 2.1 橋長全体横断図

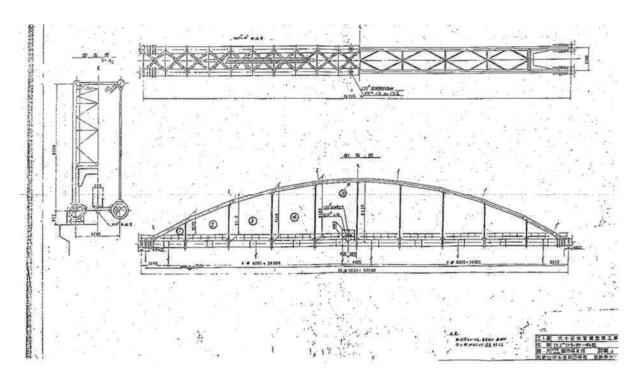


図 2.2 崩落箇所一般図

3. 現地調査

事故発生後に実施した三回の現地調査の内容をまとめる.

3.1. 構造全体の状況

図3.1の隣接径間を用いて、吊り材番号を定義する.

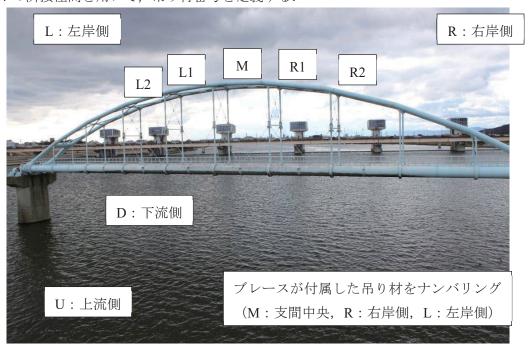


図3.1 吊り材番号(写真は例として隣接径間を示している)

崩落した径間全体の落橋の外観を図3.2,図3.3 および図3.4 に示す.水上で確認された範囲内ではアーチ部分で2箇所の破壊が確認され、さらに吊り材の破断が多数確認された.



図3.2 崩落した径間状況(上流側から撮影)



図3.3 崩落した径間状況 (右岸側から撮影)



図3.4 崩壊した径間状況(左岸側から撮影)

3.2. 吊り材の状況

次に、以下では、「吊り材の破断→アーチ全体の崩壊」という崩落シナリオを想定し、ブレースを有するアーチ吊り材(L2~R2)に着目して破断状況を記述する。ここで、各吊り材について上流下流に応じて U、D を付けてナンバリングを行う。

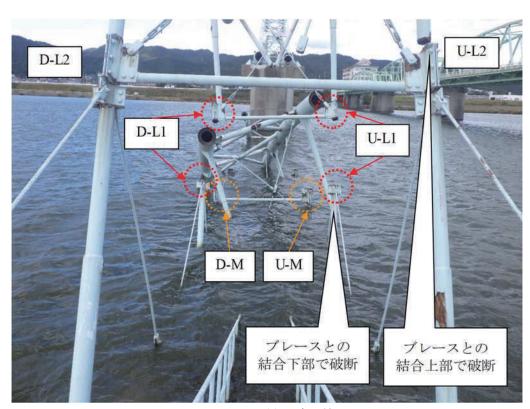


図3.5 吊り材の破断箇所

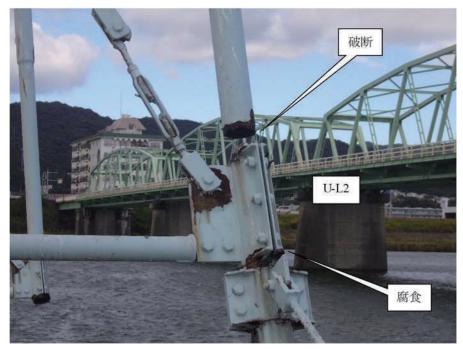


図 3.6 吊り材の破断箇所(U-L2 詳細)

水上で確認された吊り材の損傷状況を図3.5 および図3.6 に示す。吊り材の破断箇所は2タイプ確認された。すなわち、ブレース材との結合部より上で破断するケースと下で破断するケースである。前者は吊り材破断後もブレース材の引張+曲げで本管がアーチ構造に接続されるが、後者は吊り材が破断された時点でアーチと本管が構造的に切り離される。水上で確認された範囲内では吊り材 U-L2, U-M が前者、吊り材 U-L1 が後者であった。

3.3. ブレース材の状況

ブレース材の状況を図 3.7 および図 3.8 に示す。吊り材がブレース材との結合上部で破断した L2, M ではブレース材も破断していた。これはすなわち,ブレース材との結合下部で破断した吊り材 L1 も含めて,吊り材 L2~M では崩落時にアーチと本管が切り離された状態にあることを意味する。

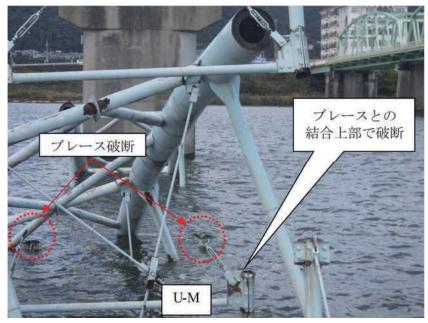


図3.7 ズレース材破断状況(M詳細)

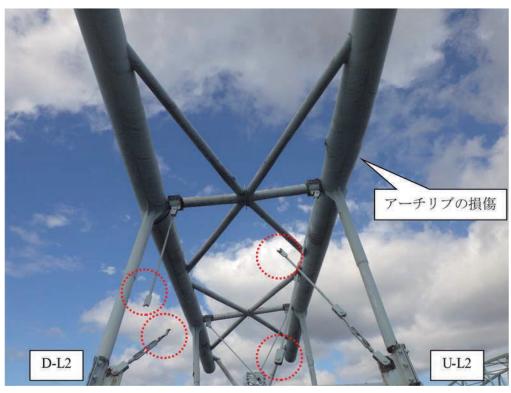


図 3.8 ブレース材破断状況(L2詳細)

3.4. 支承部の状況

図3.9 に固定側支承部付近,図3.10 に移動側支承部付近の写真を示す.これらより,固定側のピン支承では,本管同士の結合は外れているが,支承上には固定された状態であった.一方の稼働側のローラー支承では,支承から逸脱し,河川内に構造物が落下している状態であった.



図 3.9 固定側支承部付近状況(左岸側)



図 3.10 移動側支承部付近状況(右岸側)

3.5. 他径間損傷状況

他径間(崩落径間の右岸側隣接径間)での吊り材の破断状況を**図 3.11** および**図 3.12** に示す. 前述の通り,吊り材の破断箇所は二か所考えられる.崩落していない近隣の径間においてはブレース材上部での破断(ブレース材によってアーチリブとの結合は維持される),ブレース材下部での破断(アーチリブとの結合は断たれる)の両方を確認することができた.

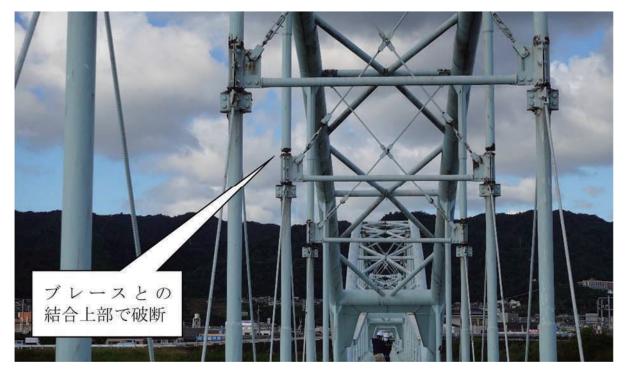


図3.11 吊り材のブレース材上部での破断状況

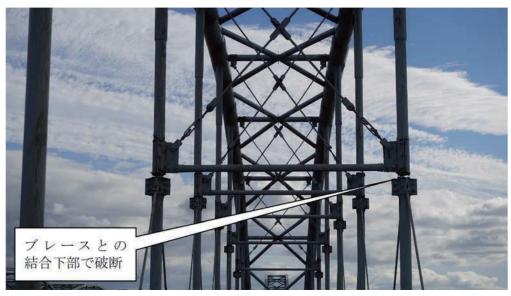


図3.12 吊り材のブレース材下部での破断状況

3.6. Google Map ストリートビューによる崩落前の状況確認

図3.13 に示すように 2020 年 12 月時点の Google Map ストリートビュー画像において U-M, U-R1, U-R2 の吊り材がブレース材上部で破断していることが確認できた。また、崩落以前としては直近となる 2021 年 7 月の Google Map ストリートビュー画像においても同様の箇所で破断が確認でき、その他の部材については D-R1 の吊り材がブレース材下部で破断しているようにも見えるが、画像の解像度の問題もあり断定はできなかった。

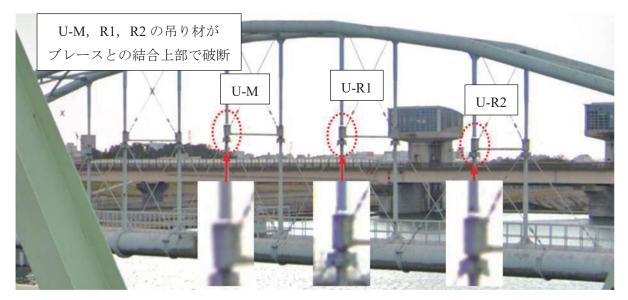


図 3.13 崩落した径間の 2020 年 12 月における写真

3.7. まとめ

現地調査によって得られた知見は次のとおりである.

- 崩落後の調査より、崩落した径間および隣接径間(崩落径間の右岸側)において吊り材の破断箇所は上部と下部の二か所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り材を連結し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り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 U-M, U-R1, U-R2 の 吊り材上部が 2020 年 12 月時点で破断していることが確認できた. (図 3.13)
- 損傷状況まとめを図3.14 に示す.

図3.14 損傷状況まとめ

4. 腐食に関する現地計測

事故発生後、表面塩分量計測や塗膜厚試験等の現地で計測可能な項目については現地で計測を実施した.現地計測は京都大学が実施した.以下に各計測項目についてまとめる.

4.1. 現地計測項目

現地計測を実施した項目を表 4.1 に示す.

計測項目	計測内容	計測目的
	測定セルを計測点表面に取り付け純水を	
表面塩分量計測	注入し撹拌することで、電気伝導率法によ	腐食環境の把握
	り表面塩分量を計測する.	
塗膜厚計測	電磁膜厚計を用いて各部材の塗膜厚を複	塗膜劣化の把握
坐 医 学 司 侧	数点計測する.	坐牍为16076堆
塗膜付着力試験	自動付着性試験機を用いて各部材の塗膜	冷酷火ルの加根
	の付着力を計測する.	塗膜劣化の把握

表 4.1 実施した現地計測項目と内容および目的

4.2. 計測箇所

計測箇所は**図 4.1** に示すように左岸側から 2 番目の径間および、右岸側から 2 番目の径間とした。また、それぞれの径間の上流側と下流側にて、マンホール部・C 形下横構・T 形下横構の 3 部材で計測を実施した。それぞれの部材における計測点を**図 4.2** に示す。

表面塩分量の計測は表面塩分計(サンコウ電子研究所製 SNA-3000)を用いて行い、各計測箇所から測定セルが取り付け可能な位置を選定した。測定セルより小さい面や、曲面、セルに注水できないほど表面が粗い面などでは計測が困難である。

塗膜厚計測はデュアルタイプ膜厚計 LZ-370 (ケツト科学研究所製)を用いて、各部材に対して 複数箇所で計測を行った.

塗膜付着力の計測は自動付着性試験機(Elcometer 製 Elcometer 510 model T)を用いて行った. 接着にはアラルダイト 2 液性接着剤(ハンツマン・ジャパン製)を用いた. ここで,今回は時間的な制約から約 3 時間の硬化時間で試験を実施したが,接着剤で破壊が生じ十分な塗膜付着力を得ることができなかった.



図 4.1 計測径間

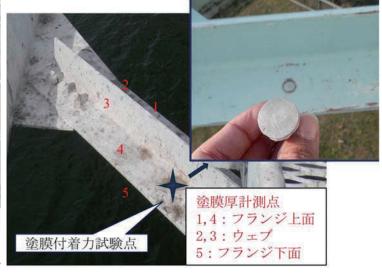


(b) C形下横構

塗膜付着力試験点

3
2

塗膜厚計測点
1~5:上面
6~10:側面



(a) マンホール

(c) T形下横構

図 4.2 各計測部材

4.3. 計測結果

本計測によって得られた左岸側径間と右岸側径間の結果をそれぞれ表 4.2,表 4.3 に示す.ここで,右岸側径間の結果について,左岸側径間の計測結果より上流側と下流側でのばらつきは小さいとし下流側のみで計測を実施した.また,計測時間の制約上同一部材内の計測点数を減らしている.

本計測より得られた結果を以下にまとめる.

- ① 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.
- ② マンホール上面や下横構フランジ面において塗膜厚のばらつきが大きいことが確認され、最大標準偏差は約 90μm であった.この点から、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.
- ③ 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て多く観察された. 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.

④ 塗膜付着力試験について、今回は時間的な制約から通常の試験に比べて接着剤の養生時間が 短かったため、接着剤での破壊が発生した.従って、十分な精度を有する結果とは言い難い. 一方で、外観観察において塗膜の剥離を確認することができる箇所も存在した.

表 4.2 現地計測結果 (左岸側径間)

径間位置		左岸側径間											
上下流			上流	到			下流側						
計測部材	マンホ	ニール	C形	鋼	T形	鋼	マンホ	ニール	C形	鋼	T形鋼		
表面塩分量 (mg/m²)	46.4		52.	4	26.	26.9		39.0		45.8		46.9	
	計測	膜	計測	膜	計測	膜	計測	膜	計測	膜	計測	膜	
	点	厚	点	厚	点	厚	点	厚	点	厚	点	厚	
	1	523	1	621	1	457	1	567	1	560	1	462	
	2	304	2	503	2	467	2	558	2	418	2	499	
	3	364	3	514	3	524	3	496	3	473	3	475	
NA -1/1	4	320	4	470	4	509	4	589	4	454	4	551	
塗膜厚(μm)	5	424	5	695	5	462	5	582	5	453	5	447	
	6	437	6	493			6	373	6	579			
	7	338					7	403					
	8	430					8	414					
	9	356					9	462					
	10	369					10	407					
塗膜付着力 (MPa)					2.86		3.35		4.6	7			

表 4.3 現地計測結果 (右岸側径間)

径間位置	右岸側径間												
上下流			上流	〔側			下流側						
計測部材	マンホ	ニール	C形	鋼	T形	錮	マンホ	ニール	C形	鋼	T形鋼		
表面塩分量 (mg/m²)							48	6	628		1458		
	計測点	膜厚	計測点	膜厚	計測点	膜厚	計測 点	膜厚	計測点	膜厚	計測点	膜厚	
	1		1		1		1	534	1	536	1	519	
	2		2		2		2	516	2		2	431	
	3		3		3		3	473	3		3	489	
	4		4		4		4		4		4		
塗膜厚(μm)	5		5		5		5		5		5		
	6		6				6		6				
	7						7						
	8						8						
	9						9						
	10						10						
塗膜付着力 (MPa)							3.0	9	3.8	32	2.0)9	

5. 腐食に関する分析

現地計測では困難な化学分析は試料を採取し、室内実験により実施した.本化学的分析は土木研究所材料資源研究グループによって実施されたが、巻末に付録 A として詳細な分析結果を添付し、ここでは分析結果の要約を示す.

5.1. 分析項目

現場で採取した試料について、実験室で表5.1に示す分析を行った.

表 5.1 実施した分析項目と内容および目的

分析項目	分析内容	分析の目的
(1) 塗膜付 着物の分析	ガーゼ拭き取りにより塗膜に付着した物質を採取. 採取物を溶解した溶液の pH 測定, イオンクロマトグラフ法による塩化物イオンの定量等を行った.	腐食環境の 把握
(2) 塗膜断 面の分析	塗膜剥離部より小片(下層から上層まで)をサンプリングし、 断面の電子顕微鏡観察、元素分析(EDS)を行った。	塗装系の確認 腐食因子の 影響の把握
(3) 塗膜表	上塗り塗膜を微量サンプリングし,赤外分光 (IR) 法による化	塗膜劣化の
面の分析	学構造分析を行った.	把握

5.2. 塗膜付着物の分析

5.2.1. 分析方法

一定面積の部材表面を脱イオン水で濡らしたガーゼにより塗膜表面が露出するまでふき取り、部材表面に付着した鳥糞を含む付着物を採取した. 図 5.1 に示す箇所から採取した付着物を超音波洗浄することで脱イオン水中に抽出し、この溶液をイオンクロマトグラフ法により分析し、陰イオン (F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻) 濃度を求めた.分析にはイオン分析計(東亜ディーケーケー:IA-300)を用いた.塩化物イオン (Cl⁻) の全量が塩化ナトリウム (NaCl) に由来するものと仮定し、塩化物イオン (Cl⁻) 濃度から部材付着塩分量 (mg/m^2) を求めた.

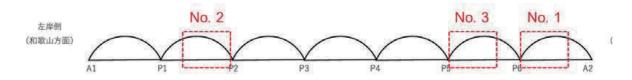


図 5.1 塗膜付着物の分析に用いた試料の採取箇所

5.2.2. 分析結果

分析結果を**表** 5.2 に示す。付着物を抽出した溶液の pH は約 9.0 であり弱アルカリ性を示した。溶液中には鳥糞由来と思われるりん酸イオン (PO_4 ³⁻) が多く含まれていた。塩化物イオン濃度から換算した付着塩分量は $222\sim378$ mg/m² となり,海から飛来する塩分が付着したものであると推察される。右岸側(No.1 と No.3)と,左岸側(No.2)とで,pH,付着塩分量に大きな差異はなかった。

試料				換算付着						
番号	рН	分析	Е-	C1-	NO -	D	NO -	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	塩分量
留り			F^{-} Cl^{-} NO_2^{-} Br^{-} NO_3^{-}	PO4	SO ₄ ²	(mg/m^2)				
1		1回目	0	4.06	0	0	0.359	29.5	7.73	222
1 9.16	2回目	0	4.02	0	0	0.119	27.5	7.31	222	
2	2 9.20	1回目	0.124	4.45	0.11	0	0.29	19.3	16	250
2 9.20		2回目	0.215	4.65	0.382	0.053	0.38	18.8	16	250
3 8.84*	1回目	0.388	4.83	0.18	0	0.142	16.9	6.24	378	
3	0.04	2回目	0.366	4.8	0.186	0	0.106	16	6.18	3/8

表 5.2 塗膜付着物の分析結果

※試料 No.1, No.2 は 500mL, 試料 No.3 は 1000mL の脱イオン水で抽出したため, 試料 No.3 の pH は他よりもやや小さい値となっている.

5.3. 塗膜断面の分析

5.3.1. 分析方法

図 5.2 に示す箇所で塗膜剥離箇所より塗膜片(下層から上層まで)を採取し、これをモールドを用いてエポキシ樹脂中に包埋した。包埋樹脂が硬化後、底面を鏡面研磨し、塗膜断面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察およびエネルギー分散型 X 線分析 (EDS) 装置による元素分析に供した。

なお、試料表面は無蒸着とし、電子顕微鏡(日立ハイテクノロジーズ: SU3500)の低真空モードで観察および分析を行った。

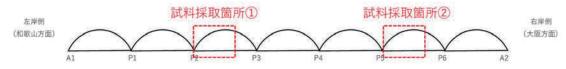


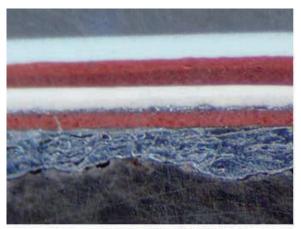
図 5.2 塗膜断面の分析に用いた試料の採取箇所

5.3.2. 分析結果

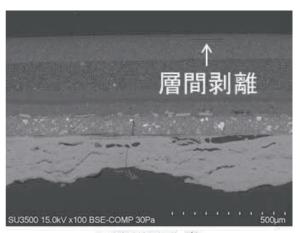
元素分析の結果, 塗膜片の断面は炭素 (C), 酸素 (O), 鉄 (Fe), 鉛 (Pb), カルシウム (Ca), ケイ素 (Si), チタン (Ti), マグネシウム (Mg), バリウム (Ba), 塩素 (Cl) などの元素で構成 されていることがわかった.

EDS により検出されたそれぞれの元素について、塗膜断面での濃度分布を表すマッピング像を作成した.以下に主な結果を示す.なお、同一のマッピング像の中では、輝度が高い領域ほど相対的に多くの元素が含まれていることを示している.

①反射電子像:図5.3 に実体顕微鏡像および反射電子像を示す。反射電子像では組成の違いが白黒のコントラストで示されている。この図では上側が塗膜の上層、下側が下層(鋼材側)を示している。また、図中の最上部、最下部の濃いグレーの部分は包埋樹脂である。組性の異なる複数の塗料が塗り重ねられている様子がわかる。また、上塗り/中塗り層と思われる一部の箇所で、剥離を示す微細なき裂が認められた。



実体顕微鏡像



反射電子像

図 5.3 実体顕微鏡像および反射電子像

②炭素、鉄、酸素: 図 5.4 に炭素、鉄、酸素の元素マッピング像を示す。元素分析にて炭素が検出された領域は、有機物(樹脂)が存在しているものと考えられる。一方、炭素がほとんど検出されなかった領域には、鉄や酸素が豊富に存在していることがわかる。なお、高い濃度の鉄が検出された、最下層の厚さ 200~300μm の領域は、鋼材の腐食生成物(さび)であると考えられる。さび層の上にも鉄濃度の高い層があるが、これは塗膜に含まれる鱗片状酸化鉄(MIO)顔料であると考えられる。

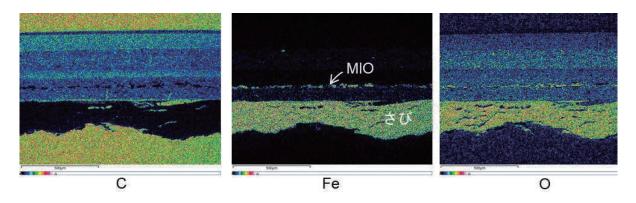


図5.4 炭素,鉄,酸素の元素分析

③鉛, チタン, カルシウム:元素分析においてこれらの元素が検出されたので, 防錆顔料, 着色顔料, 体質顔料として塗料に用いられている可能性がある. 鉛が多く検出された下層の塗膜は, 鉛系さび止め塗料であると推定される.

④その他の元素:元素分析においては、さらにケイ素、マグネシウム、バリウムが検出されたが、いずれも塗膜に含まれる顔料由来のものと思われる. 図 5.5 に示す塩素の元素マッピング像より、分析最上層からは塩素が検出されたが、これはふっ素樹脂塗料の分子構造に含まれる塩素に由来するものと考えられる. 塩素は他層の塗膜やさび層からは検出されなかったことから、塗膜表面に付着した塩分の塗膜内部への侵入は無く、この箇所で発生したさびも海塩の影響はほとんど受けていないものと考えられる.

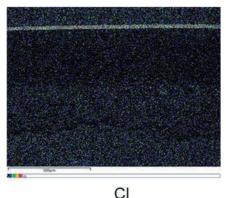


図 5.5 塩素の元素分析

以上の元素分析結果、および現状の塗装記録の内容を踏まえると、図 5.6 の塗り重ね構成が推定される. すなわち、新設時には「鋼道路橋塗装便覧(S54)」の A-3 塗装系相当が、1993 年に実施された塗替え塗装では「鋼道路橋塗装便覧(H2)」の C-3 塗装系が、それぞれ塗装されたものと推定される. 現状における新設時塗装塗膜の厚さは 180μm 程度、塗替え塗装塗膜の厚さは 240μm 程度であった. なお、上記結果とは別の部位で採取した塗膜片の断片について、元素分析の結果は上記と同様であったが、フェノール MIO 塗膜層にき裂を認めた. 現地で採取した塗膜片は既に部材から剥離していたものであり、このき裂がいつの時点で生じたものかは不明である. ただし、何らかの外力を受けた場合にき裂を生じやすい、すなわち剥離しやすい状態であったと言える. この塗膜層で剥離が生じると塗装系の大半を失うこととなり、塗膜の防食性に深刻な影響が及ぶものと思われる.

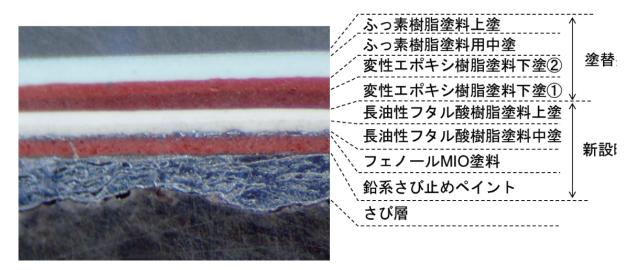


図 5.6 推定される塗り重ね構成

5.4. 塗膜表面の分析

5.4.1. 分析方法

「5.3 **塗膜断面の分析**」と同じ箇所より塗膜片(付着物あり/なし)を採取し、分析に用いた. 塗膜片を脱イオン水中で超音波洗浄することで付着物を除去し、乾燥後、最上層の塗膜表面より微量(数 mg)の試料を採取し、赤外分光(IR)分析に供した. 分析は KBr 錠剤法により行った.

5.4.2. 分析結果

分析によって得られた赤外吸収スペクトルを図 5.7 に示す. 図の縦軸は透過率を示している. これより, ふっ素樹脂および顔料由来 (C-F 結合, Ti-O 結合, C-H 結合)の吸収は,「付着物あり」の塗膜と「付着物なし」の塗膜とで大きな違いは認められない. 一方で,架橋部位であるウレタン結合 (-NH-COO-)のピークは,「付着物なし」の塗膜よりも「付着物あり」の塗膜の方がやや弱くなった. ウレタン結合 (-NH-COO-)の吸収ピークが小さくなる要因には,①ウレタン結合 (-NH-COO-)の切断 (劣化)が生じた,②塗料の配合不良により硬化剤成分が少ない,ことが考えられる. また,ウレタン結合 (-NH-COO-)の切断 (劣化)が生じる要因としては赤外線,水,酸素のほか,鳥糞等の付着物も考えられるが,今回の分析では基準となる初期の塗膜が無く,また,検体も限られていることから,これ以上の解析は困難である.

赤外分光分析に用いた塗膜片(付着物あり/なし)では、いずれも、一部の箇所で上塗り/中塗り層(塗り替え塗装時)の塗膜剥離が生じていた。「付着物あり」の塗膜は「付着物なし」に比べて容易に上塗り塗膜が剥離できる状態であった。

また、現地では上塗り塗膜が消失し下塗り塗膜(赤さび色)が露出している、特徴的な塗膜異状部が確認された。上述の通り、施工不良による上塗り/下塗り塗膜の層間剝離、または上塗り塗膜の紫外線・酸素・水による劣化によって生じたと考えられる。下層の塗膜が健全であれば、この状態から直ちに鋼材腐食へ進展することは無いが、下塗り塗膜は上塗り塗膜よりも耐候性が低く消耗が速い上に、塗装系全体としての環境遮断性は確実に低下しているため、いずれ鋼材腐食へと繋がっていくものと思われる。

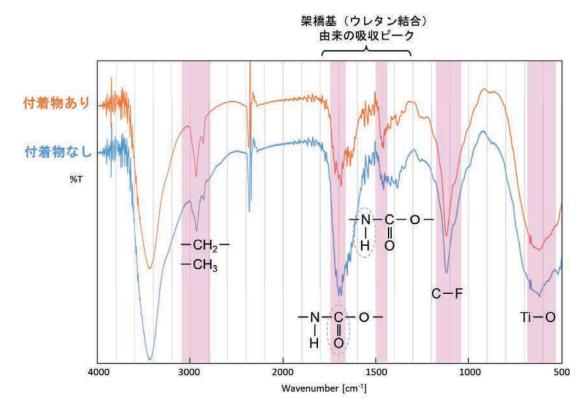


図 5.7 上塗り塗膜の赤外吸収スペクトル

5.5 分析のまとめ

以下に、土木研究所材料資源研究グループによって実施された、腐食に関する分析結果をまとめる.

- ① 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.
- ② 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.
- ③ 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.
- ④ 一部のフェノール MIO 塗膜層は、外力による剥離が生じやすい状態であった.
- ⑤ 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。
- ⑥ 一部の上途り/中途り層間では付着性が低く、層間剝離が生じていた。

なお、吊り材破断箇所の塗膜系や塗膜の状態、クランプ材の取付位置の施工内容については確認できなかった. 当時の防食設計・塗装技術ならびに破断しなかった箇所の外観から推察すると、以下のような複合的な要因により塗膜の損傷および鋼材の腐食が促進的に生じ、破断に至ったものと思われる.

- 吊り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、吊り材/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.
- 吊り材の塗膜は、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。
- 腐食因子や塵あいが滞留しやすく、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.

6. 数值解析

6.1. 解析モデルの検証

有限要素解析ソフト Abaqus2020 を用いて水管橋モデルを作成し、今回の崩落メカニズムを推定する. 作成した解析モデルの妥当性を検証するため、設計計算書に示される設計荷重時の断面力 (曲げモーメント・せん断力・軸力) と解析値の比較を行った.

解析モデルは、梁モデルで作成し、メッシュ間隔は 270mm とした. 解析に用いた各部材の材料 特性を表 6.1 に、解析モデルを図 6.1 に示す.

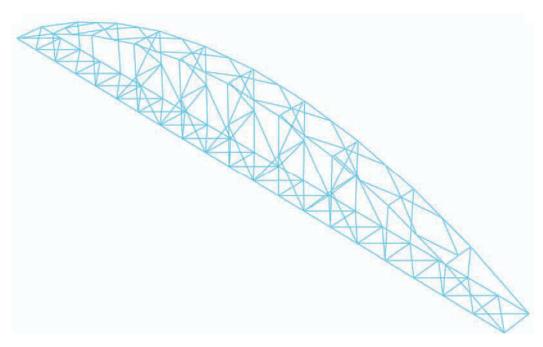
	弹性係数(MPa)	降伏点(MPa)	引張強さ(MPa)	
STPY400(本管)		225	400	
STK400(アーチリブ, 上横構, 吊り材)	200000	235	400	
SD345(ブレース材(不明))	200000	345	490	
SS400(下横構(不明))		245	400	

表 6.1 材料特性

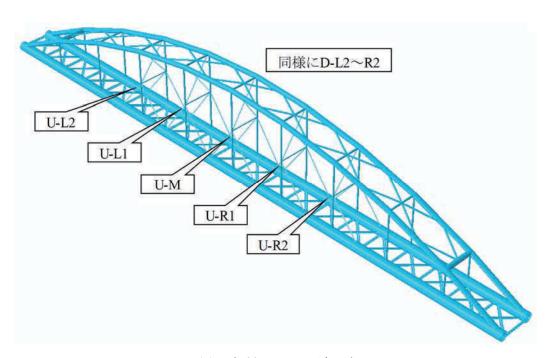
なお、本解析において、用いた設計荷重を表 6.2 に示す。FE 解析では、横分布荷重として単位 長さあたりの力で入力するため、表 6.2 中の設計荷重に重力加速度 9.81m/s² を乗じた値を入力し ている。図 6.2 (本管の曲げモーメント分布)、図 6.3 (本管のせん断力分布) および図 6.4 (主構 造部材の軸方向力分布) の結果より、作成した解析モデルから得られた結果と設計計算値は概ね 一致しており本解析モデルを用いて再現解析を実施することに問題はないと判断した。

アーチリブに作用 本管に作用 本管 426 アーチリブ 221 歩廊 60 上横構および橋門構 53 死荷重(kg/m) その他 吊り材 28 36 下横構および吊環 258 その他 40 管内流水 (満水) 1272 活荷重(kg/m) 歩廊通行荷重その他 78 合計 総荷重(kg/m) 2160 310

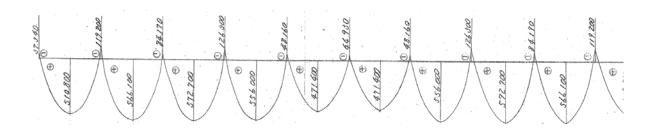
表 6.2 設計荷重条件



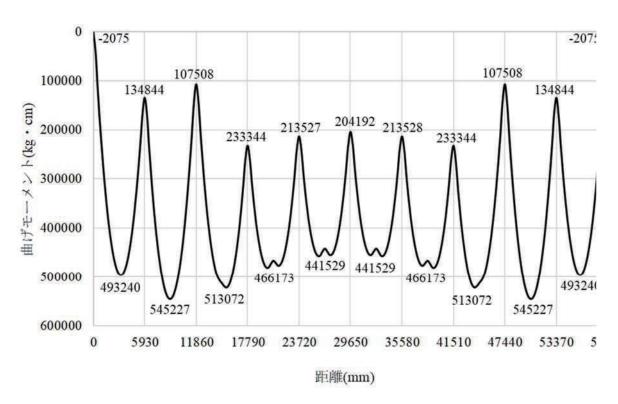
(a) 骨組み



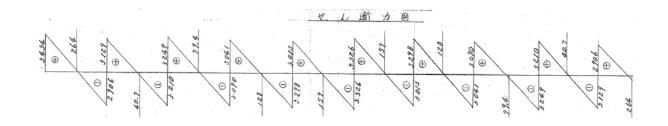
(b) 部材断面レンダー時 図 6.1 解析モデル



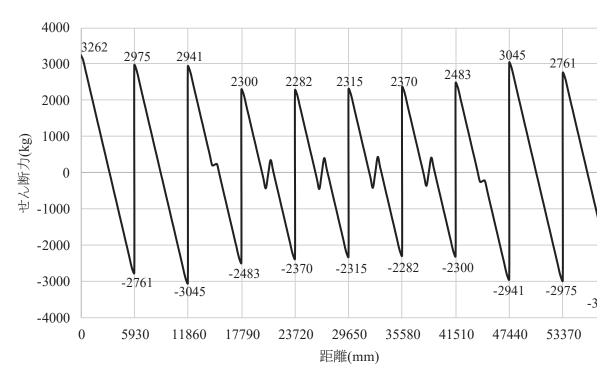
(a) 設計計算書の値



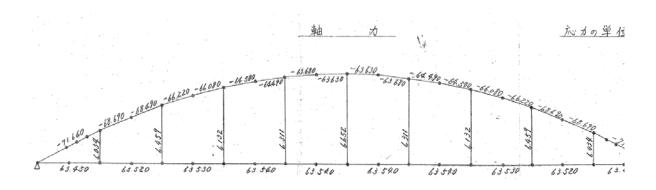
(b) 有限要素解析による値 図 6.2 本管の曲げモーメント分布図



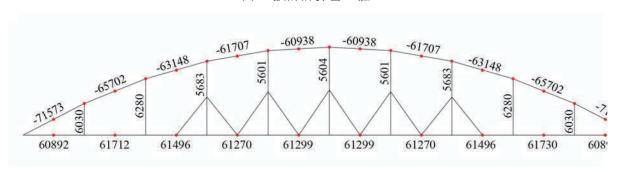
(a) 設計計算書の値



(b) 有限要素解析による値 図 6.3 本管のせん断力分布図



(a) 設計計算書の値



(b) 有限要素解析による値 図 6.4 アーチリブおよび本管の軸力分布図

6.2. 安全性の評価

妥当性を検証したモデルを用いて解析を実施する.解析手順としては、図 6.5 に示すように吊り材の梁要素の一部を消去することによって、腐食による破断を再現する.破断箇所は図 3.13 で判明している箇所以外は明らかな破断点は分かっていないため、破断部位を任意の組み合わせで設定し、その都度該当する部材を消去する要素と変更した.なお、荷重は設計荷重を用いて実施した.

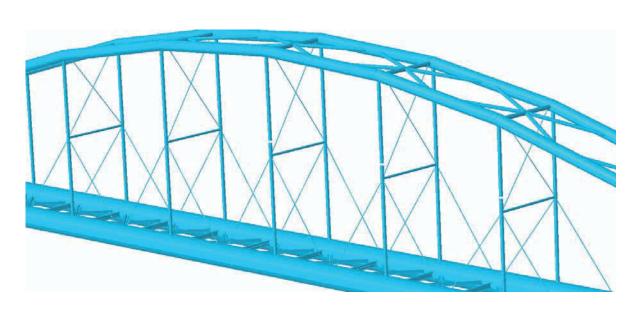


図 6.5 吊り材要素消去時の解析モデル(図 3.13で判明している U-M, U-R1, U-R2を破断)

6.3. 吊り材の破断位置がブレース材上部の場合の応力状態

される.

節点: 729

各解析ケースにおける結果を以下に示す。各解析ケース名と破断箇所の関係は、解析ケース名が「U-O-O-O_D-×-×-×」の時、Uの後に続くOが上流側の吊り材破断箇所であり、同様にDの後に続く×が下流側の吊り材破断箇所となる。図 6.5 に示す解析ケースは「U-M-R1-R2_D」とし、上流側の U-M, U-R1, U-R2 において、吊り材がブレース材接合部上部で破断しており、下流側では破断していないケースである。ここでは、図 3.13 を参考にブレース材上部での破断とした。解析結果において、部材が降伏するかどうかを判定するため、図 6.6 から図 6.9 において軸応力をコンター図として表した。ここで、コンター図の最大値は最も降伏点の低い STPY400 に合わせて 225MPa としている。降伏点に達した部材は赤色(降伏応力を超過する部材は灰色)で表示

S, S11 複数断面点 (平均: 75%) 225 169 113 56 -113 -169 -225 最大: 47 要素: ARCH3D-1.2187 節点: 127 最小: -59 要素: ARCH3D-1.662

図 6.6 U_D(健全時)

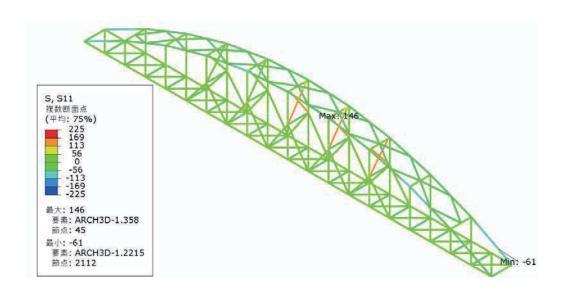


図 6.7 U-M-R1-R2_D

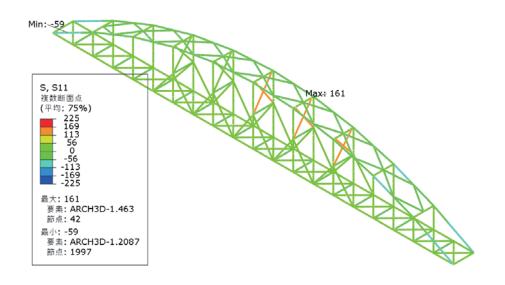


図 6.8 U-M-R1-R2 D-M-R1-R2

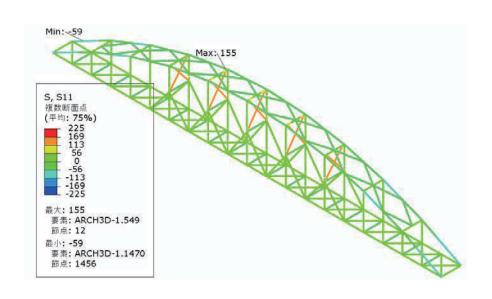


図 6.9 U-L2-L1-M-R1-R2 D-L2-L1-M-R1-R2

これらの結果より、吊り材の破断箇所がブレース材上部の場合、ブレース材によってアーチリブと吊り材が連結されるため部材に生じる応力は最大でも 160MPa 程度となり、すべての部材が降伏に達することはないことが分かった。また、図 6.8 と図 6.9 の比較から僅かではあるが、吊り材全てが破断したケースよりも部分的に破断した方が、部材剛性比の違いにより荷重分担の傾向が異なり、発生する応力が高くなる場合があることが分かった。

6.4. 吊り材の破断位置がブレース材下部の場合の応力状態

前節の解析結果より、吊り材の破断位置がブレース材上部のみの場合は、すべての吊り材の箇所で、水管の荷重が、吊り材→ブレース材→アーチリブに力が伝達されるため崩落しない.従って、水管橋が崩落したのは吊り材により、水管荷重をアーチリブに伝達できなくなる箇所で破断が生じる場合であると考えた.吊り材による力の伝達が断たれる経路は次の二種類ある.①吊り材の破断位置がブレース材の下部となるケース、もしくは②吊り材の破断位置がブレース材の上

部であり、その後ブレース材が破断するケースが考えられる。ここで、崩落以前に判明していた U-M-R1-R2 の吊り材上部の破断、および崩落後の調査で確認できた破断箇所を**表** 6.3 にまとめる。 表では吊り材の上部または下部が破断していた場合は、破断箇所(上 or 下)に×を記し、健全で ある場合はOとした。ブレース材は位置に関係なく破断が確認できたものは×とした。

図3.4および図3.5に示した破断状況の写真および表6.3に基づき崩壊シナリオを推測する.

● L2:U側吊り材の上部およびブレース材が破断している.

U-L2 上部が破断→ブレース材が荷重を伝達→ブレ―ス材では負担できない大きさの荷重が作用し破断(付録 B 図 B. 3. 17(a)を参照)

● L1:UD 両側吊り材の下部が破断しブレース材は健全

U-L1, D-L1 下部が破断→ブレース材は荷重を受け持たないため健全→荷重を伝達しなくなったことにより他吊り材の荷重負担が増加(付録 B 図 B. 3. 17(b)を参照)

● M: UD 側吊り材の上部およびブレース材が破断

U-M, D-M 上部が破断→ブレース材が荷重を伝達→ブレース材では負担できない大きさの荷重が作用し破断(付録 B 図 B. 3. 17(c)を参照)

● R1, R2: U側吊り材の上部が破断, その他不明

U-R1-R2 上部が破断→ブレース材が荷重を伝達(付録 B 図 B. 3. 17(d, e)を参照)

部材	対象断面	L2	L1	M	R1	R2
吊り材	U(上流側)	上×	下×	上×	上×	上×
	D (下流側)	0	下×	上×		
ブレース材		×	0	×		

表 6.3 崩落後の部材破断状況

6.5. 崩落シナリオの検証

崩壊シナリオを検証するため、前述の情報をもとに再度解析を実施した.ここで、崩落径間以外のブレース材が破断している箇所は報告されていないことから、ブレース材の腐食による強度低下は考慮しない.すなわち、ブレース材が破断するためにはいずれかの吊り材がブレース材下部で破断を起こし、ブレース材に生じる荷重が増加する場合である.よって、今回の水管橋崩落のシナリオを次のように推測する.

(シナリオの前段:共通)

I:複数箇所の吊り材上部が破断し,ブレース材によって荷重を伝達している状態となる.

Ⅱ:いずれかの吊り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.

(シナリオの後段:パターン1 (本管の曲げ破壊が先行))

Ⅲ: アーチリブからの支持を喪失した径間中央の本管が曲げ破壊し、アーチリブの径間 1/4 点付近での死荷重の負荷が急激に大きくなる.

IV:アーチリブの面内曲げ座屈により、全径間で支持を失った本管とともに全径間が崩壊する.

(シナリオの後段:パターン2(アーチリブの座屈が先行))

Ⅲ:アーチリブによる支持を失った径間中央の本管は弾性変形内に留まるが、アーチリブの径間 1/4 点付近での鉛直荷重の増加が、アーチリブの面内曲げ座屈を生じさせる.

IV: アーチリブの面内座屈にともない,本管は全径間で支持機能が喪失し,アーチリブとともに 全径間が崩落する.

表 6.3 を基に、崩落シナリオの前段から後段にいたるまでの過程を各ケースごとに検証した. 作成した解析モデルによる解析結果(軸方向応力コンター図)を、図 6.10 から図 6.13 に示す. 解析ケース名の括弧内の文字は吊り材を下部で破断させた箇所であり、括弧がついていないものは上部で破断させた箇所である.

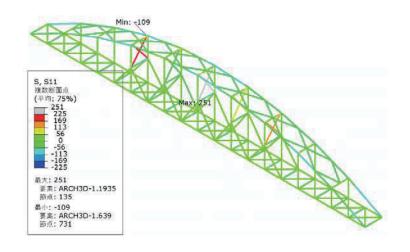


図 6. 10 U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1)

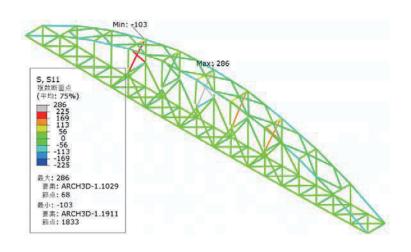


図 6. 11 U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1-R1)

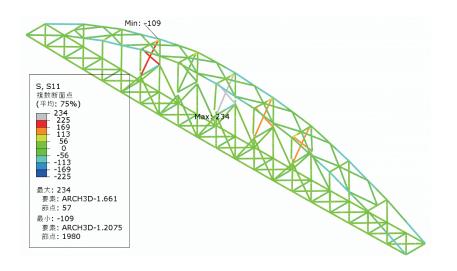


図 6.12 U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1-R2)

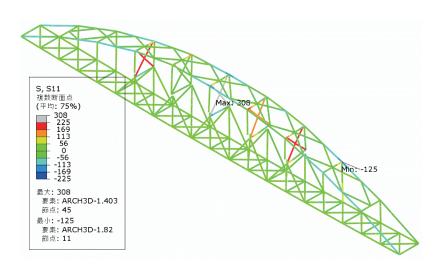


図 6. 13 U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1-R1-R2)

図 6.13 は、想定される全ての吊り材下部が破断する構造上最も厳しいケースであるが、この場合でもブレース材に発生する最大応力は 308MPa であり、SD345 材の降伏点応力である 345MPa 以下であり、水管橋の崩落は生じない結果となる。したがって、吊り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。

6.6. 想定される崩落のシナリオ

前節までに示したように、崩落前の画像情報および現地調査によって得られた情報から考えうる吊り材の破断が発生したとしても静的解析では、ブレース材の破断等の水管橋が崩落に至るような損傷を再現することはできなかった。そこで、本節ではブレース材(バックル等の取り付け部を含む)が腐食に進行によって本来の性能を発揮できなかったと仮定し解析を実施する.

まず、最もクリティカルなケースを想定する.最もクリティカルになるケースは、図6.13に示

す吊り材の破断状況に加えてブレース材が破断した時である. **図** 6.13 に示す解析結果から,ブレース材(M 断面)に最も大きい応力が生じているため、**図** 6.13 の解析条件に加えて当該部材を消去した状態をシナリオ前段の起点として解析を継続実施する. 削除したブレース材を Δ として解析ケース名の末尾にB- Δ として示す.

ここで、これまでの解析結果より、本管が先に降伏に達することはないと考え、コンター図の降伏点応力をブレース材の降伏点に合わせて 345MPa に設定した。また圧縮側においては座屈設計ガイドラインに示されるアーチの支間 1/4 点の限界軸力式(16.2.1)をアーチリブ断面で除して得られる応力(-203MPa)に設定した。図 6.14 より、B-M が破断したと仮定して要素を消去することにより、B-L2-R1-R2 も降伏点応力に達することが確認できる。また、図 6.14、図 6.15 で示す状態の時、アーチリブの支間 1/4 点付近において限界応力-203MPa を超過する-230MPa が確認できる。また、支間 1/4 点の応力状態に着目すると発生応力-140MPa に対して、軸力による応力が-58.67MPa、曲げモーメントによる応力が-81.57MPa となり合計応力が-140MPa であった。これより、アーチリブには曲げと軸力が連成しつつも曲げが支配的となる応力状態であることが分かる。

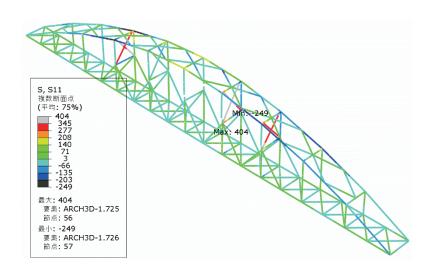


図 6.14 U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1-R1-R2)_B-M

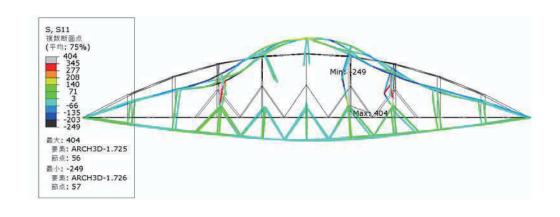


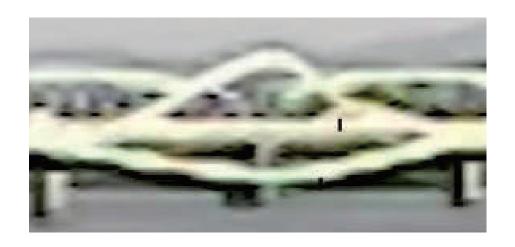
図 6.15 U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1-R1-R2)_B-M(側面:変形倍率 20 倍)

また、この時の本管の最大応力状態は引張側で約93MPa、圧縮側で-48MPaとなり強度上は応力的に余裕があることが確認できた。したがって、本解析で用いた吊り材の破断状況に加えてB-Mが破断する条件では、B-L1を除くブレース材は全て破断し、同時にアーチリブに面内座屈が生じることが分かる。この時点で本管に大きな応力が作用していないことから、アーチリブが座屈により崩壊することによって本管が荷重に耐えきれなくなり崩壊するパターン2のシナリオだと推測できる。

なお、この時の変形形状側面図(変形倍率 20 倍)を図 6.15 に示す。これは、図 6.16 に示す毎日新聞社によって報道された水管橋崩落の定点カメラ映像から分かる変形形状と類似していることが確認できる。



(a) 崩落直前



(b) 崩落の瞬間 図 6.16 毎日新聞社投稿の定点カメラ映像

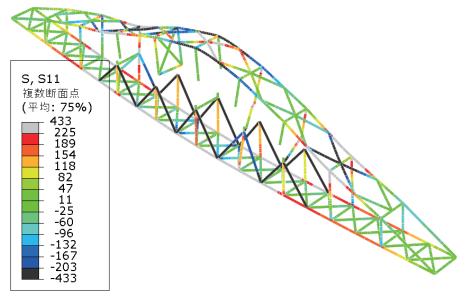


図 6. 17 U-L2-M-R1-R2-(L1) _D-M-(L1-R1-R2) _B-L2-M-R1-R2

図 6.17 は、図 6.14 に示した解析結果の後に B-L2-R1-R2 が追加で破断したと仮定して要素を消去して再計算を実施したものである。ここで、コンター図は赤色の最大が 225MPa を示しており、これは本管の降伏点応力である。図より、中央から広範囲の本管が赤色および灰色(降伏応力を超過する場合は灰色)を示しており、曲げ降伏したことが確認できる。なお、アーチリブにおいても降伏点応力 225MPa および座屈限界応力-203MPa を超過する発生応力が確認できた。

6.7. 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減肉は考慮せず,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きない.解析によって得られた知見は次のとおりである.

- 吊り材において、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. (図 6.9)
- 現地調査の結果から判明した吊り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、耐荷力を維持することが確認できた. (図 6.13)
- 解析より、水管橋が崩落に至るには、吊り材の一部が破断し、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分配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。また、解析によって得られた崩壊シナリオは以下の通りである。(図 6.14~図 6.17)
- I. 複数箇所の吊り材上部が破断し、ブレース材によって荷重を伝達している状態となる.
- Ⅱ. いずれかの吊り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.
- Ⅲ. 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.
- IV. 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本管も自重に耐えられずに崩壊する.

あとがき・謝辞

人口減少条件下におけるインフラの維持管理は、その種類を問わず容易ではないが、我が国が世界に先んじて取り組まざるを得ない課題である。水道においても、令和元年施行の改正水道法では、その目的が「水道の計画的な整備」から「水道の基盤の強化」に変更され、これまで築き上げたシステムの維持と強化に重点が置かれることとなった。このような状況下で起きた今回の事故により我々は、バックアップルートの確保が難しい水管橋の特殊性と重要性、そして水道システム全体のより合理的かつ効果的な点検・維持管理手法の必要性を強く再認識することとなった。この手法の確立への道のりは険しいものであるが、本報告書がその一助になることを願う。

最後に、本報告書をとりまとめるにあたり、和歌山市企業局、和歌山市が設置した調査委員会等、関係の諸氏に改めて感謝申し上げる。お蔭をもって滞りなく調査報告書をとりまとめることができた。今回の事故では人命に被害が出なかったことは誠に不幸中の幸いであったが、断水という形で地域住民の生活に多大な影響を及ぼした。今後二度とこのような事故が起こらないこと、また、六十谷水管橋が一日も早く本復旧し、地域住民へのライフラインの永続的な提供を切望する。

付録A

六十谷水管橋・採取試料の化学分析結果

土木研究所

A. 1. 分析項目

現場で採取した試料について,実験室で表 A.1 に示す分析を行った.

分析項目	分析内容	分析の目的
(1) 塗膜付着物の分析	ガーゼ拭き取りにより塗膜に付着した物質を採取. 採取物を溶解した溶液の pH 測定, イオンクロマトグラフ法による塩化物イオンの定量等を行った.	腐食環境の把握
(2) 塗膜断面の分析	塗膜剥離部より小片(下層から上層まで)をサンプリングし,断面の電子顕微鏡観察,元素分析(EDS)を行った.	塗装系の確認 腐食因子の影響の把握
(3) 塗膜表面の分析	上塗り塗膜を微量サンプリングし、赤外 分光法による化学構造分析を行った.	塗膜劣化の把握

表 A. 1 実施した分析項目と内容,目的

A. 2. 塗膜付着物の分析

A. 2. 1. 分析方法

一定面積の部材表面を脱イオン水で濡らしたガーゼにより塗膜表面が露出するまで拭き取り、部材表面に付着した鳥糞を含む付着物を採取した.採取した付着物を超音波洗浄機を用いて脱イオン水中に抽出し,この溶液をイオンクロマトグラフ法により分析し,陰イオン(F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) 濃度を求めた.分析にはイオン分析計(東亜ディーケーケー:IA-300)を用いた.塩化物イオン(Cl^-) の全量が塩化ナトリウム(NaCl)に由来するものと仮定し,塩化物イオン(Cl^-)濃度から部材付着塩分量(mg/m^2)を求めた.

(参考) イオンクロマトグラフ法:液体試料中のイオン成分を検出する手法.溶離液と呼ばれる 移動相に液体試料を導入し,試料中のイオン成分を固定相である分離カラム内で分離さ せる.カラムで分離した各イオン成分の保持時間はイオン成分ごとに異なるため,ピー ク位置(保持時間)を標準試料と比較することで定性分析を行うことができる.また, 測定強度と溶液中のイオン成分濃度が比例関係となるため,濃度既知の標準溶液との比 較によりイオン成分の定量分析も可能.

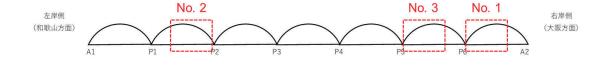


図 A. 1 塗膜付着物の分析に用いた試料の採取箇所



図 A. 2 付着物を抽出した溶液試料と付着物採取に使用したガーゼ

A. 2. 2. 分析結果

_	Z = Z Z 123 - 23 1/142 / Z										
試料				陰イオン濃度 (mg/L)					換算付着		
	番号	рН	分析	Г-	01-	NO -	D -	NO -	DO 3-	GO 2-	塩分量
番号		F C1 NO ₂ Br NO ₃	$NO_3^- PO_4^{3-}$	SO ₄ ²⁻	(mg/m^2)						
	1 9.1	0.16	1回目	0	4.06	0	0	0.359	29. 5	7. 73	000
		9. 10	2回目	0	4. 02	0	0	0.119	27. 5	7. 31	222
2	2	9. 20	1回目	0. 124	4. 45	0.11	0	0. 29	19. 3	16	250
			2回目	0. 215	4.65	0.382	0.053	0.38	18.8	16	250
3	3	8.84**	1回目	0.388	4. 83	0.18	0	0. 142	16. 9	6. 24	270
			2回目	0.366	4.8	0. 186	0	0. 106	16	6. 18	378

表 A. 2 塗膜付着物の分析結果

※試料 No. 1, No. 2 は 500 mL, 試料 No. 3 は 1000 mL の脱イオン水で抽出したため, 試料 No. 3 の pH は他よりもやや小さい値となっている.

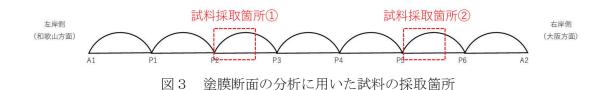
A. 3. 塗膜断面の分析

A. 3. 1. 分析方法

現地の塗膜剥離箇所より塗膜片(下層から上層まで)を採取し、これを φ 30 mm のモールドを用いてエポキシ樹脂中に包埋した。包埋樹脂が硬化後、底面を鏡面研磨し、塗膜断面の走査型電子顕微鏡(SEM)観察およびエネルギー分散型 X 線分析(EDS)装置による元素分析に供した。なお、

試料表面は無蒸着とし、電子顕微鏡(日立ハイテクノロジーズ: SU3500)の低真空モードで観察および分析を行った。

(参考) EDS: 試料表面に電子線を照射したときに試料から発生する特性 X 線を検出し、そのエネルギーと強度から、試料表面の元素とその濃度分布を調べることができる.



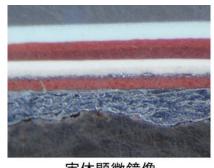
全膜片 包埋樹脂 Φ 30 mm

図 A. 4 断面観察用試料の作製

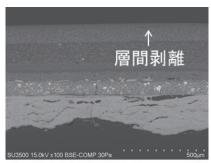
A. 3. 2. 分析結果

元素分析の結果,塗膜片の断面は炭素 (C),酸素 (O),鉄 (Fe),鉛 (Pb),カルシウム (Ca),ケイ素 (Si),チタン (Ti),マグネシウム (Mg),バリウム (Ba),塩素 (C1)などの元素で構成されていることがわかった.

EDS により検出されたそれぞれの元素について、塗膜断面での濃度分布を示すマッピング像を作成した.以下に主な結果を示す.なお、同一のマッピング像の中では、輝度が高い領域ほど相対的に多くの元素が含まれていることを示している.

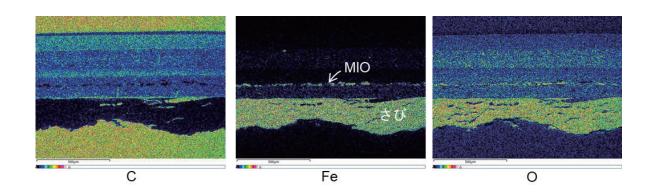


実体顕微鏡像

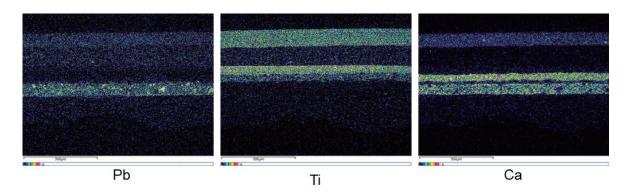


反射電子像

①反射電子像:この図では組成の違いが白黒のコントラストで示されている。この図では上側が 塗膜の上層,下側が下層(鋼材側)を示している。また,図中の最上部,最下部の濃いグレーの部 分は包埋樹脂である。組成の異なる複数の塗料が塗り重ねられている様子がわかる。また,上塗 り/中塗り層間と思われる一部の箇所で,剥離を示す微細なき裂が認められた。



②炭素,鉄,酸素:炭素が検出された領域は、有機物(樹脂)が存在しているものと考えられる. 炭素がほとんど検出されなかった領域には、鉄や酸素が豊富に存在していることがわかる. 高い濃度の鉄が検出された、最下層の厚さ $200\sim300\,\mu\,\mathrm{m}$ の領域は、鋼材の腐食生成物(さび)であると考えられる. さび層の上にも鉄濃度の高い層があるが、これは塗膜に含まれる鱗片状酸化鉄(MIO)顔料であると考えられる.



③鉛, チタン, カルシウム: 防錆顔料, 着色顔料, 体質顔料として塗料に用いられている可能性がある. 鉛が多く検出された下層の塗膜は, 鉛系さび止め塗料であると推定される. また, 実体顕微鏡像と照合すると, チタンが多く検出された領域は淡彩色となっており, 塗膜に酸化チタン顔料(白色)が含まれているものと考えられる.

④その他の元素:ケイ素、マグネシウム、バリウムが検出されたが、いずれも塗膜に含まれる顔料由来のものと思われる。最上層からは塩素が検出されたが、これはふっ素樹脂塗料の分子構造に含まれる塩素に由来するものと考えられる。塩素は他層の塗膜やさび層からは検出されなかったことから、塗膜表面に付着した塩分の塗膜内部への浸入は無く、この箇所で発生したさびも海塩の影響はほとんど受けていないものと考えられる。

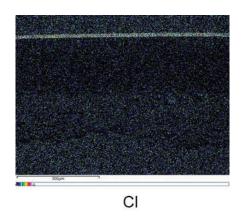


図 A.5 塗装記録

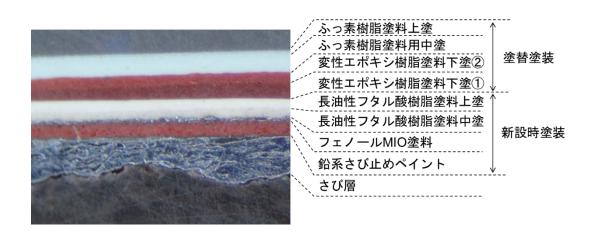


図 A.6 推定される塗り重ね構成

以上の元素分析結果,および現状の塗装記録 (図 A.5) の内容を踏まえると,図 A.6 の塗り重ね構成が推定される.すなわち,新設時には「鋼道路橋塗装便覧 (S54)」の A-3 塗装系相当が,1993年に実施された塗替え塗装では「鋼道路橋塗装便覧 (H2)」の C-3 塗装系が,それぞれ塗装された

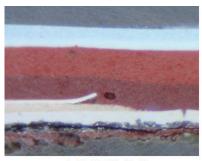
ものと推定される. 現状における新設時塗装塗膜の厚さは $180\,\mu\,\mathrm{m}$ 程度, 塗替え塗装塗膜の厚さは $240\,\mu\,\mathrm{m}$ 程度であった.

「鋼道路橋塗装便覧(S54)」新設用A-3塗装系

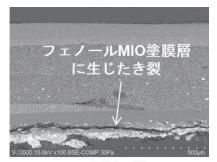
工程		塗料名	目標膜厚 (μm)		
	下塗り	鉛系さび止めペイント1種	35		
工場塗装	下塗り	鉛系さび止めペイント1種	35		
	下塗り	フェノールMIO塗料	45		
市坦冷壮	中塗り	長油性フタル酸樹脂中塗塗料	30		
現場塗装	上塗り	長油性フタル酸樹脂上塗塗料	25		

「鋼道路橋塗装便覧(H2)」塗替用c-3塗装系

工程	塗料名	目標膜厚 (μm)
素地調整	(3種)	-
下塗り	変性エポキシ樹脂塗料下塗 (鋼材露出部のみ)	60
下塗り	変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
下塗り	変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗	30
上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗	25



実体顕微鏡像



反射電子像

図 A.7 フェノール MIO 塗膜層に生じたき裂



(a) 初期の状態



(b) 塗膜剥離→腐食へと進展した状態

図 A.8 塗膜の物理的欠陥と腐食の例

図 A. 7 は上記とは別の部位(図 A. 3 の「試料採取箇所②」)で採取した塗膜片の断面である.元素分析の結果は上記と同様であったが、フェノール MIO 塗膜層にき裂を認めた.現地で採取した塗膜片は既に部材から剥離していたものであり、このき裂がいつの時点で生じたものかは不明で

ある. ただし、何らかの外力を受けた場合にき裂を生じやすい、すなわち剥離しやすい状態であったと言える. この塗膜層で剥離が生じると塗装系の大半を失うこととなり、塗膜の防食性に深刻な影響が及ぶものと思われる.

図 A. 8 は、現地で確認された特徴的な塗膜異状部の一つである。図 A. 8 (a) は塗膜に何らかの外力が作用し、き裂が生じた状態と考えられる。き裂部からは塗膜内部へ腐食因子が容易に浸入できるようになり、塗膜下の鋼材で腐食が始まるとともに、図 A. 7 で示したような脆弱部を伝ってき裂 (剥離) が拡大していき、図 A. 8 (b) のような状態に繋がっていくものと考えられる。その際、塩分や汚染物質等の付着があれば、通常よりも腐食が促進される可能性がある。

A. 4. 塗膜表面の分析

A. 4. 1. 分析方法

「3. 塗膜断面の分析」と同じ箇所より塗膜片(付着物あり/なし)を採取し、分析に用いた. 塗膜片を脱イオン水中で超音波洗浄することで付着物を除去し、乾燥後、最上層の塗膜表面より 微量(数 mg)の試料を採取し、赤外分光(IR)分析に供した.分析は KBr 錠剤法により行った.

(参考) 赤外分光分析:物質に赤外光を照射し,透過または反射した光のスペクトルを解析することで,物質の分子構造に関する情報を得る分析方法.赤外線の振動周期と原子の振動周期が一致する場合に,個々の原子,原子団はそれぞれの周期に応じてエネルギーを吸収し,この吸収が赤外線スペクトルの吸収となって現れる.

KBr 錠剤法: 固体試料 1~2mg をめのう製乳鉢で粉末とし、これに赤外透過材の一種である臭化カリウム(KBr)0.10~0.20g を加えて希釈混合し、錠剤成型器に入れて加圧製錠したものを試料として用いる赤外分光分析の測定法の一種.

A. 4. 2. 分析結果

分析により得られた赤外吸収スペクトルを図 A.9 に示す。図の縦軸は透過率を示している。600~700cm⁻¹付近に顔料由来と思われる Ti-0 結合のピーク, $1100\sim1150$ cm⁻¹付近に C-F 結合のピーク, $1450\sim1500$ cm⁻¹付近,1700cm⁻¹付近にウレタン結合(-NH-C00-)のピーク, $2800\sim3000$ cm⁻¹付近に C-H 結合のピークが見られた。これらのうち,ふっ素樹脂および顔料由来(C-F 結合,Ti-0 結合,C-H 結合)の吸収は,「付着物あり」の塗膜と「付着物なし」の塗膜とで大きな違いは認められない。一方で,架橋部位であるウレタン結合(-NH-C00-)のピークは,「付着物なし」の塗膜よりも「付着物あり」の塗膜の方がやや弱くなった。ウレタン結合(-NH-C00-)の吸収ピークが小さくなる要因には①ウレタン結合(-NH-C00-)の切断(劣化)が生じた,②塗料の配合不良により硬化剤成分が少ない,ことが考えられる。また,ウレタン結合(-NH-C00-)の切断(劣化)が生じる要因としては紫外線,水,酸素のほか,鳥糞等の付着物も考えられるが,今回の分析では基準となる初期の塗膜が無く,また,検体も限られていることから,これ以上の解析は困難である。

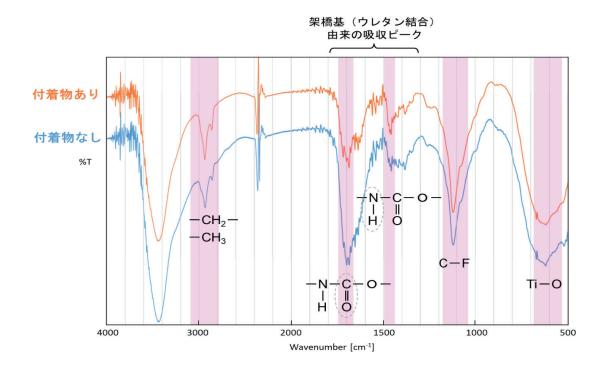


図 A.9 上塗り塗膜の赤外吸収スペクトル

図 A. 10 に赤外分光分析に用いた塗膜片の外観写真を示す. いずれも,一部の箇所で上塗り/中塗り層間の塗膜剥離が生じていた.「付着物あり」の塗膜は「付着物なし」に比べて容易に上塗り塗膜が剥離できる状態であった.

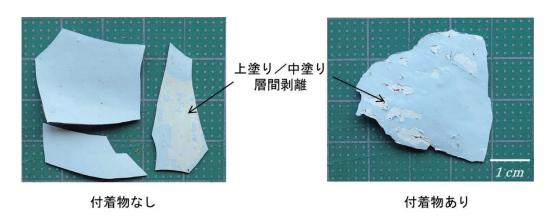


図 A. 10 赤外分光分析に用いた塗膜片の外観





図 A. 11 下塗り塗膜の露出の例

図 A. 11 は、現地で確認された特徴的な塗膜異状部の一つであり、上塗り塗膜が消失し下塗り塗膜(赤さび色)が露出している例である。上記の通り、上塗り塗膜の劣化または施工不良による上塗り/下塗り塗膜の層間剝離と、上塗り塗膜の紫外線・酸素・水による劣化による消耗によって生じたと考えられる。下層の塗膜が健全であれば、この状態から直ちに鋼材腐食へ進展することは無いが、下塗り塗膜は上塗り塗膜よりも耐候性が低く消耗が速い上に、塗装系全体としての環境遮断性は確実に低下しているため、いずれ鋼材腐食へと繋がっていくものと思われる。

A. 5. 分析のまとめ

- ① 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.
- ② 塗膜に付着した鳥糞等の付着物に蓄積された塩分量は 222~378 mg/m²でああった.
- ③ 塗膜や塗膜下に生成したさびには、塩分の浸入は認められない.
- ④ 一部のフェノール MIO 塗膜層は、外力による剥離を生じやすい状態であった.
- ⑤ 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.
- ⑥ 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.

なお、吊り材破断箇所の塗装系や塗膜の状態、クランプ材取付時の施工内容については確認できなかっため、当時の防食設計・塗装技術ならびに破断しなかった箇所の外観から推察すると、以下のような複合的な要因により塗膜の損傷および鋼材の腐食が促進的に生じ、破断に至ったものと思われる.

- ・吊り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、吊り材/クランプ材間のすき間の内外で環境の濃淡が生じ、すき間の内部で腐食が生じやすくなる.
- ・吊り材の塗膜は、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.

・腐食因子や塵あいが滞留しやすく、なおかつ雨による洗い流しを受けにくいため、高濃度に蓄 積されている可能性がある.



図 A. 12 破断箇所と同様の構造を持つ部位



図 A. 12 破断箇所と同様の構造を持つ部位(続き)

付録B

六十谷水管橋・回収部材の検分報告

京都大学

B. 1. 概要

2021 年 10 月 3 日に和歌山市内を流れる紀の川に架かる六十谷水管橋が崩落した.本報告書では,2021年2月に実施した調査により,崩落発生後に河川内から撤去された当該径間の各部材の状況を写真と共に取りまとめた.

B. 2. 崩落後当該径間状況

崩落後の当該径間状況略図を図 B. 2.1 に示す.

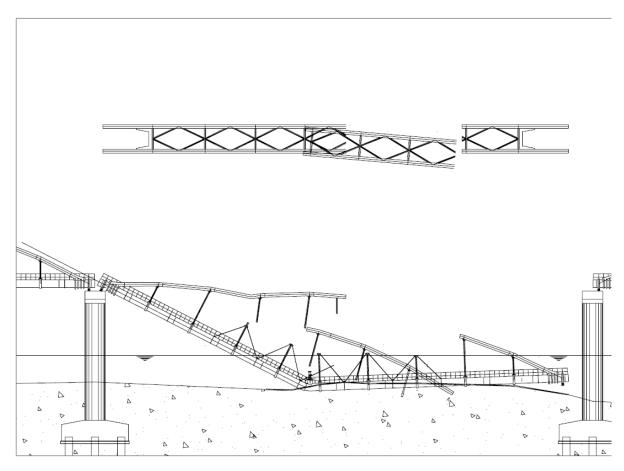


図 B. 2.1 崩落後の当該径間状況略図

B. 3. 撤去後当該径間状況

当該径間は撤去された後,加納浄水場内に保管された.河川からの引き揚げおよび運搬時には 大きさの都合上,現地でガス切断機を用いた箇所が複数存在する.また,腐食による鋼材の板厚 減少が著しい箇所や,崩落時の衝撃によって損傷を受けたであろう箇所では撤去の過程で部材が 破断している恐れがある.したがって,撤去後の状況において部材破断等の損傷が見られる場合 の損傷発生タイミングは次の4通りあり,必ずしも崩落発生時の状況とは一致しない.①崩落以 前に既に損傷,②崩落時の衝撃により損傷,③崩落後河川内残置時に損傷,④撤去時に損傷.

B. 3. 1. 部材全体

図 B. 3.1 は撤去後の部材全体配置図を図 B. 3.2 は全体写真を示している. また,図 B. 3.3 は当該径間の溶接条件を示した図である.

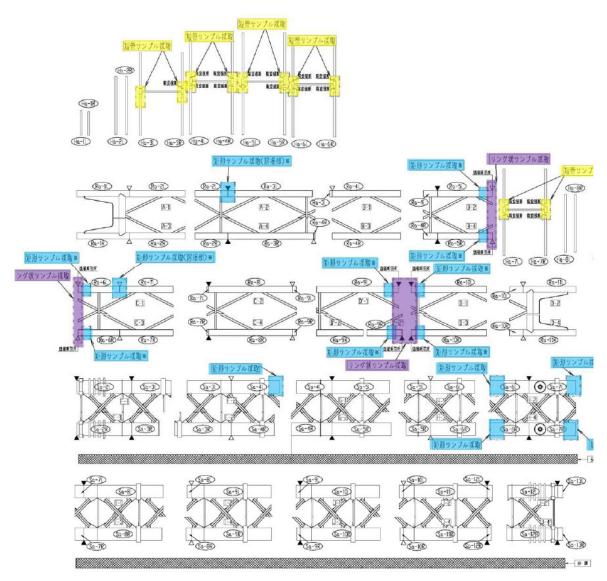


図 B. 3.1 撤去後部材配置図





図 B. 3.2 撤去後の部材全体写真

赤〇 現地溶接個所

※吊材の接続は全て現地溶接

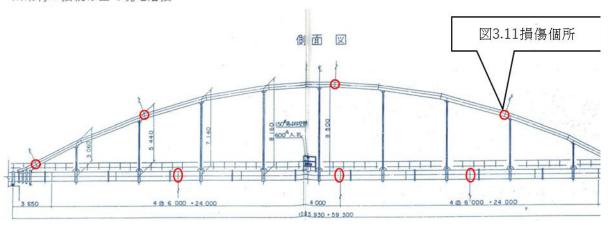


図 B. 3. 3 当該径間溶接条件図

B. 3. 2. 本管

以下に撤去後の本管の写真を示す。 図 B. 3. 5 より本管に大きな曲げが作用し、曲げ圧縮破壊が生じていることが確認できる.



図 B. 3. 4 本管全体写真



図 B. 3. 5 支間中央部状況写真



図 B. 3. 6 右岸側本管端部状況写真

B. 3. 3. アーチリブ

以下に撤去後のアーチリブの写真を示す。図 B. 3. 8、図 B. 3. 9 よりアーチリブに座屈が生じており、アーチリブに大きな圧縮力が作用したことが確認できる。また、図 B. 3. 11 に示す写真では

アーチリブを現地溶接した箇所における損傷が確認できる.溶接位置での損傷であり、現地溶接時における溶接不良の可能性が考えられる.



図 B. 3. 7 アーチリブ全体写真



図 B. 3.8 A-4 区間アーチリブ損傷状況写真





図 B. 3. 9 B-1 区間アーチリブ損傷状況写真



図 B. 3. 10 アーチ部横構損傷状況写真





図 B. 3. 11 アーチリブ溶接位置損傷状況写真

B.3.4. 吊り材

以下に撤去後の吊り材の写真を示す.



図 B. 3. 12 吊り材全体写真(R2 を除く)

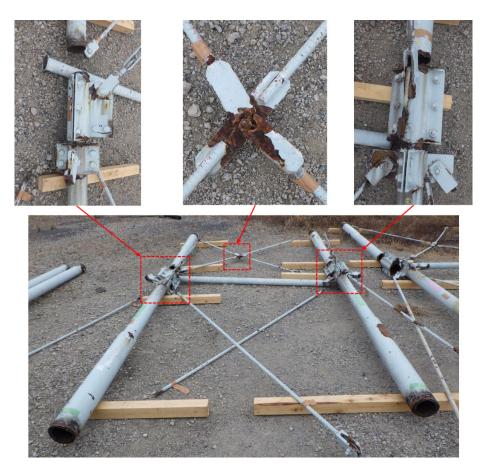


図 B. 3. 13 L2 損傷状況写真

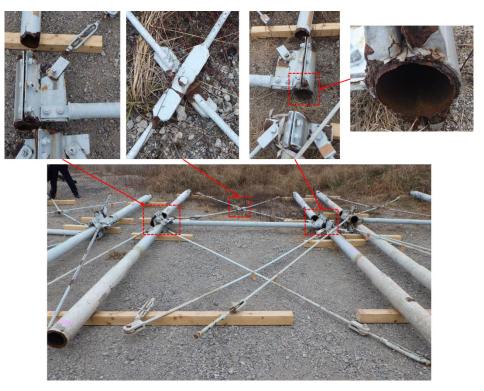


図 B. 3. 14 L1 損傷状況写真



図 B. 3. 15 M 損傷状況写真

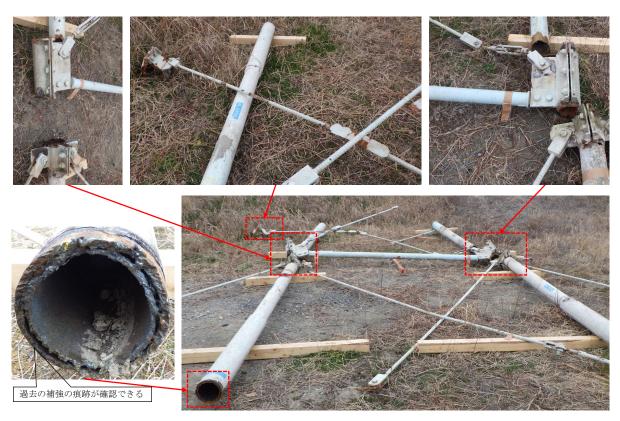
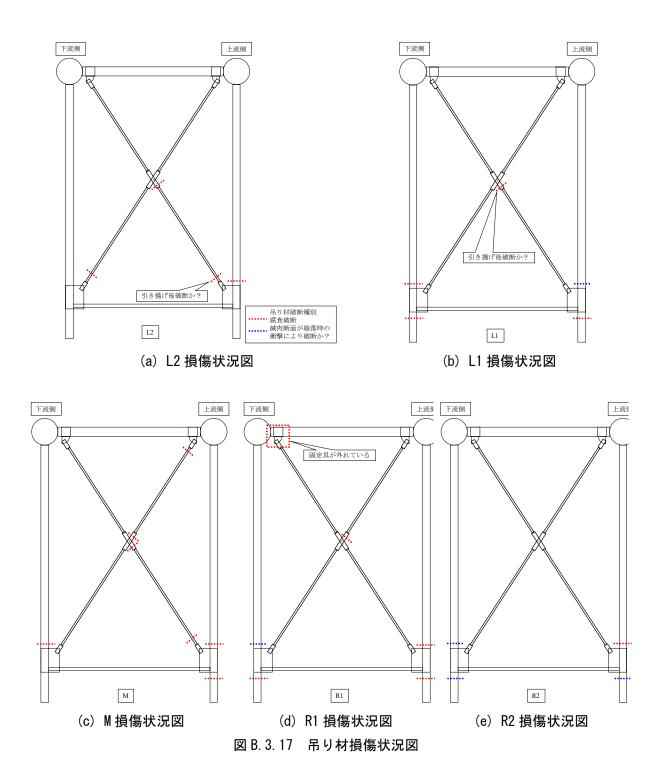


図 B. 3. 16 R1 損傷状況写真





これらの図より、各吊り材やブレース材(鉄筋)の破断の有無が確認できる. 図 B. 3. 13 から分かるように、ブレース材同士の結合点での破断が多くみられた. その他、図 B. 3. 16 では過去に実施された補強によって、断面が二重になっている様子が確認できる. 図 B. 3. 17 に写真で示した各吊り材の損傷状況をまとめた. 図 B. 3. 18 (a) に示すように、腐食による破断と推察される断面では断面全体が腐食し脆い状態になっている. 一方で図 B. 3. 18 (b) に示す断面では金属が光沢を有する箇所が確認でき、鋼材が引張によって破壊を起こしたと推察される.





(a) 腐食による破断

(b) 引張破壊による破断

図 B. 3. 18 吊り材破断面

2021年10月に発生した六十谷水管橋崩落調査報告書

令和4年5月13日 第1版 第1刷発行

編集者……公益社団法人 土木学会関西支部

和歌山市六十谷水管橋損傷(崩落)に関する調査団 団長 杉浦邦征

発行者……公益社団法人 土木学会関西支部 支部長 三村 衛

発行所……公益社団法人 土木学会関西支部

〒541-0055 大阪市中央区船場中央 2-1-4-409

TEL 06-6271-6686 FAX 06-6271-6485

https://www.jsce-kansai.net/

©JSCE2022/Kansai Branch of JSCE

ISBN978-4-8106-1080-2

印刷・製本・用紙:(株)田中プリント

・本書の内容を複写または転載する場合には、必ず土木学会関西支部の許可を得てください。

