六十谷水管橋破損に係る調査委員会

報　告　書
（資料編）

令和４年９月

和歌山市企業局

目　次

① 水管橋設計基準（空気弁）.....1
② 鋼管溶接の問題点.....2
③ 大規模地震による支承部の被害分析事例.....3
④ 塗装の種類と特徴.....5
⑤ 本水管橋の塗装仕様（ふっ素樹脂塗装）について.....7
⑥ 水管橋の劣化にともなう破損事例.....8
⑦ 水管橋設計基準の変遷.....10
⑧ カルマン渦対策の履歴.....12
⑨ 平成 5 年劣化調査結果の概要.....14
⑩ 水管橋崩落時の落橋防止装置の挙動について.....23
⑪ 道路橋等の崩落事故事例.....26
⑫ 鋼材の腐食要因.....28
⑬ 道路橋等の腐食対策（設計段階における腐食の考慮）.....32
⑭ 防食塗装の施工上の留意点.....35
⑮ 道路橋等の維持管理方法.....38
⑯ 水道施設耐震工法指針・解説の改定動向.....41
⑰ 紀の川大堰の設置による周辺環境の変化.....44
⑱ 送水量の変化.....48
⑲ 風の強さの影響.....49
⑳ 大変形有限要素解析インプット・データ.....50

① 水管橋設計基準（空気弁）

10.2　空 気 弁

（1）　水管橋の一番高い箇所には、原則として空気弁を設けるものとする。
　　また、空気弁の選定には、管路特性、メンテナンス性を考慮するものとする。
（2）　空気弁としては、次の種類がある。
　1）　急速空気弁
　2）　凍結防止型空気弁
　3）　単口空気弁

〔解説〕

（1）　水管橋に設ける空気弁には次の役割がある。
　1）　充水時管路凸部のエアー溜まりを排除する。
　2）　水中に溶解している空気が遊離して管路の凸部にたまりやすいので、これを排除する。
　3）　排水時の負圧に対して空気を自動的に管内へ吸引して座屈を防ぐ。
　　なお、空気弁にはメンテナンス等を考慮し、補修弁を設けるか、または補修機能をもった空気弁とすることが望ましい。空気弁の選定を表-解 10.1 に示す。
（2）　寒冷地に設置する場合は、凍結防止対策を講じるものとする。

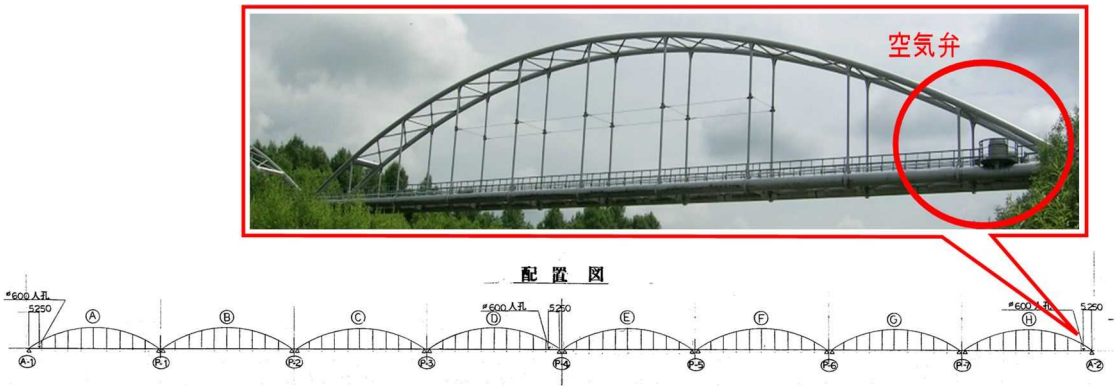
10.3　マンホール

水管橋には必要に応じマンホールを設けるものとし、大きさは 600A を標準とする。

〔解説〕

通水管が 800A 以上の水管橋には、施工および内部の点検を考慮し必要に応じマンホールを設けるものとする。

出典：WSP 007-2019 水管橋設計基準【改定 5 版】



【空気弁を端部に設置した事例】

② 鋼管溶接の問題点

(3) 鋼管（700A 以下）の現場溶接品質（非裏波）に関する問題点

中小口径（700A 以下）の現場溶接では，管内からの溶接作業が行えないため，外面からの片面溶接となる。そのため現在では片面から完全溶け込みが可能な「裏波溶接棒」が使用されている。

しかしながら，わが国では昭和 38 年（1963 年）に裏波溶接棒が開発されるまで，現場溶接部の溶け込み不良は避けられなかった。特に昭和 35 年（1960 年）以前までは，管内の流れを乱すという理由からあえてルート間隔をとらずに施工（非裏波溶接）がなされていた。昭和 38 年（1963 年）に採用された裏波溶接棒では，現行に比較して極めて高い技量が必要であったため，定着までにさらに 10 年ほどを要し，昭和 47 年（1972 年）に現在とほぼ同じ作業性の裏波溶接棒が開発され，その後は現在の技術レベルとほぼ同等のレベルまで溶接品質が改善された（参考文献：「都市ライフラインハンドブック」（土木学会編））。

裏波溶接が採用される以前の片面溶接管は，700A 以下で昭和 50 年（1975 年以前）に布設のものである。（参考文献：「地震による管路被害予測の確立に向けた研究　報告書」平成 25 年 3 月　水道技術研究センター）

上記より，昭和 50 年頃以前の中小口径（700A 以下）の現場溶接は非裏波溶接のため強度が低下している可能性がある。

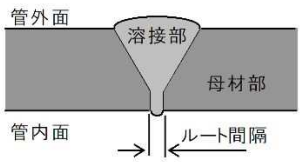


図-2 裏波溶接
（完全溶け込み溶接）

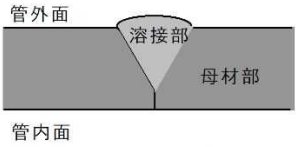


図-3 非裏波溶接
（ルート間隔をとらない不完全溶け込み溶接）

出典：経年劣化に伴う水道鋼管路の耐震性低下に関する考察（日本水道鋼管協会）

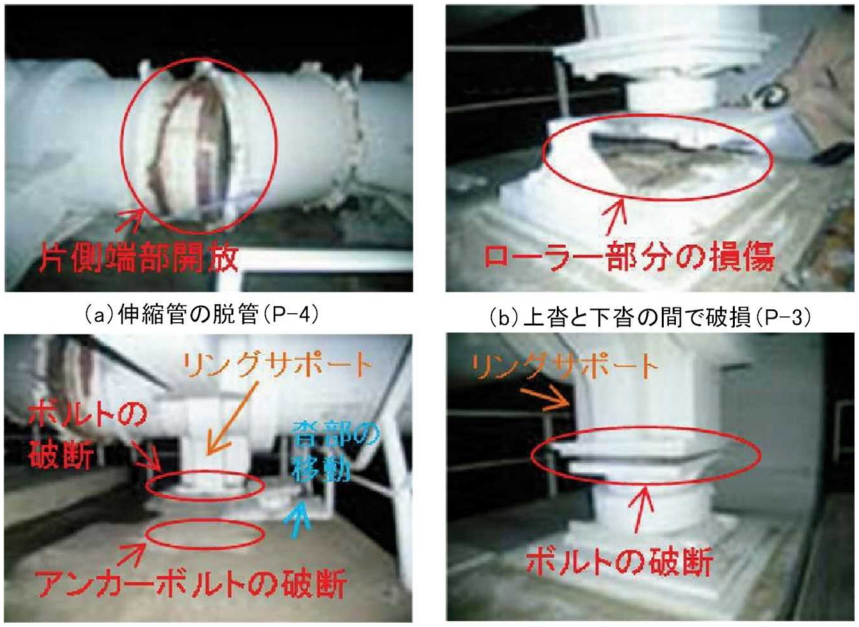
③ 大規模地震による支承部の被害分析事例

【東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋の被害メカニズム】

〔概　要〕

東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋の被害について、水管橋周辺の地震動と微動観測による水管橋の振動特性について調査分析を行う。さらに、本水管橋を 3 次元の骨組要素でモデル化し、時刻歴地震応答解析を行い、上述した被害メカニズムを明らかにすることを目的とする。

〔水管橋の被害状況〕



(a)伸縮管の脱管(P-4)　(b)上沓と下沓の間で破損(P-3)

(c)上沓とリングサポート下端及び下沓でのボルト破断(P-1)　(d)上沓とリングサポート下端でのボルト破断(P-4)

支承、伸縮管の被害状況（提供資料に基づき作成）

水管橋は実際の被害事例が多く、弱点箇所は支承部周辺であることが多い

〔解析結果のまとめ〕

水管橋の 1 次固有振動数の入力地震動は小さかったものの、 lHz 以下の地震動が卓越していたために十分支承が損傷に至ることになった。

今後の課題として以下のことが挙げられる。伸縮管の相対変位(X 方向）に関しては、脱管に至るような変位が発生しなかった。 しかし、被害状況をみると伸縮管の橋軸直角方向への偏芯により、脱管したことも考えられ、今後検討していく必要がある。

動的解析や地盤連成形モデル及び 3 次元性を適切に考慮し解析を行う必要がある

【出典（抜粋・要約)】

東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋の被害メカニズム，上仲亮・鍬田泰子・竹田周平，土木学会論文集 A1（構造・地震工学)，Vol.69，No.4（地震工学論文集 第 32 巻)，1_171-1_181，2013.

【東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋での地震動の評価】

〔概　要〕

東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋の被害について、水管橋周辺における地震動の応答スペクトルを道路橋示方書（平成 14 年版）の標準スペクトルと比較し、被害が生じた要因について考察する。

〔水管橋の概要〕

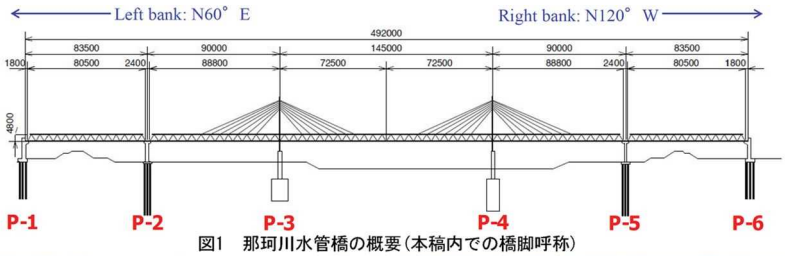


図1　那珂川水管橋の概要（本稿内での橋脚呼称）

写真1　那珂川水管橋の概況

写真2　那珂川水管橋の継手抜け（P-5）[4)]

〔応答スペクトルの比較〕

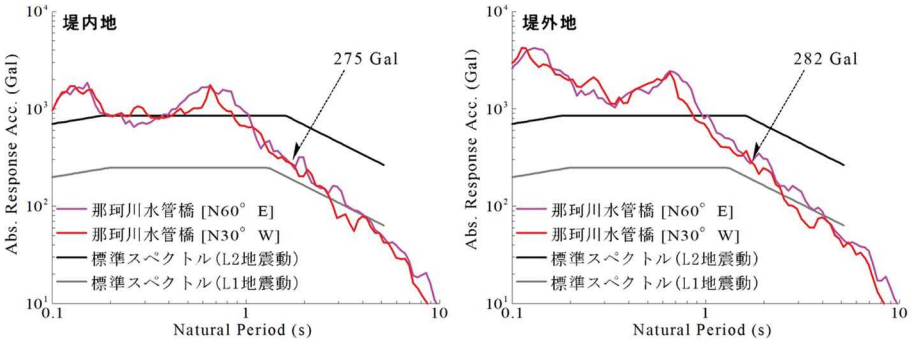


図23　推定地震動の応答スペクトルと道示（H14）による標準スペクトルの比較（表層地盤：線形）

本研究で推定された地震動特有の 0.1～0.2sec の卓越した短周期成分は、支承反力に過大に作用する。設計スペクトルよりも 0.2sec 以下と 0.6sec 付近の 2 つの周期帯で卓越したことによる構造物の地震応答については、今後詳細に検討していく予定である。

動的解析により構造物の応答を適切に評価する必要がある。
レベル 2 地震動の標準スペクトルに対しては、堤内地および堤外地ともに 1.0sec よりも短周期帯域において概ね同等、もしくは周期帯によっては上回っている。

【出典（抜粋・要約）】

経験的サイト増幅･位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋での地震動の評価，秦吉弥・鍬田泰子・野津厚，日本地震工学論文集 第 12 巻，第 4 号（特集号），2012.

④ 塗装の種類と特徴

(1) 塗装の種類

鋼道路橋の防食塗装は、**「一般塗装系」**と**「重防食塗装系」**に区分されている。

□ 新設橋の一般外面用塗装仕様〔一般塗装系〕

塗装系	塗装工程	塗料名・素地調整程度	標準使用量	目標膜厚	塗装間隔
製造工場	素地調整	素地調整程度1種　ブラスト処理　ISO Sa2 1/2	—	—	4時間以内
	プライマー	長ばく形エッチングプライマー	130 g/m^2	15 μm	3ヶ月以内
橋梁製作工場	2次素地調整	動力工具処理 ISO St3	—	—	4時間以内
	下塗	鉛・クロムブリーさび止めペイント(鉛系さび止めペイント)	170 g/m^2	35 μm	1日～10日
	下塗	鉛・クロムブリーさび止めペイント(鉛系さび止めペイント)	170 g/m^2	35 μm	～6カ月
現場	中塗	長油性フタル酸樹脂塗料中塗	120 g/m^2	30 μm	2日～10日
	上塗	長油性フタル酸樹脂塗料上塗	110 g/m^2	25 μm	

□ 新設橋の一般外面用塗装仕様〔重防食塗装系〕

塗装系	塗装工程	塗料名・素地調整程度	標準使用量	目標膜厚	塗装間隔
製造工場	素地調整	ブラスト処理　素地調整程度　ISO Sa2 1/2	—	—	4時間以内
	プライマー	無機ジンクリッチプライマー	160 g/m^2	15 μm	6ヶ月以内
橋梁製作工場	2次素地調整	ブラスト処理　素地調整程度　ISO Sa2 1/2	—	—	4時間以内
	防食下地	無機ジンクリッチペイント	600 g/m^2	75 μm	2日～10日
	ミスコート	エポキシ樹脂塗料下塗	160 g/m^2	—	1日～10日
	下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	540 g/m^2	120 μm	1日～10日
	中塗	ふっ素樹脂塗料用下塗	170 g/m^2	30 μm	1日～10日
	上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	140 g/m^2	25 μm	

□ 塗替え塗装時の一般塗装系塗膜を重防食塗装系に変更

工程	塗料名・素地調整程度	標準使用量	目標膜厚
前処理	成層・水洗い	—	—
素地調整程度	1種または、2種	—	—
防食下地	有機ジンクリッチペイント	600 g/m^2	75 μm
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240 g/m^2	60 μm
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240 g/m^2	60 μm
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	170 g/m^2	30 μm
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	140 g/m^2	25 μm
合計塗膜厚			250 μm

(2) 塗装の特徴

- 現在の鋼道路橋の防食塗装は、大部分は「一般塗装系」を適用しており、**10 年から 15 年ごとに塗替える必要がある。**
- 鋼道路橋の老朽化対策・長寿命化に欠かすことのできない耐食性向上を図るためには、塗替え時に一般塗装系塗膜を重防食塗装系に変更することが必要であり、**重防食塗装系は、厳しい環境ですでにほぼ 30 年の実績がある。**
- 一般塗装系塗膜を重防食塗装系へ変更するためには、**旧塗膜を完全に撤去する必要がある**（有機ジンクリッチペイントは鋼材面に塗付けが必要）。

塗装系	塗装系についての説明
一般塗装系	・防食下地を有さない合計塗膜厚200μm未満の防食システムで、一般環境や、やや厳しい環境にある鋼構造物に適用され、期待耐用年数が概ね15年未満の塗装系 ・素地調整程度3種を適用し、変性エポキシ樹脂塗料下地などジンクリッチペイント以外のプライマーを用いて塗替えた塗装系
重防食塗装系	・無機または有機ジンクリッチペイントを防食下地とし、エポキシ樹脂塗料下塗、ふっ素樹脂塗料上塗やポリウレタン樹脂塗料上塗を用いた長期の耐久性を期待する塗装系 ・合計塗膜厚が200μm以上の防食システムで、厳しい腐食環境においても、期待耐用年数が概ね30年以上の耐久性を有する塗装系

(3) 鋼道路橋塗装の耐久性向上の流れ

「鋼道路橋塗装・防食便覧（平成 17 年 2 月）：日本道路協会」では、ライフサイクルコストの低減のため、鋼橋の塗替え塗装に対して以下の方向性が示されている。

- **一般塗装系から重防食塗装系へ塗替えを行う。**
- **１種ケレンで旧塗膜をすべて撤去する。**
- **防食下地として有機ジンクリッチペイントを用いる。**
- **塗膜の品質向上のためスプレー塗装を原則とする。**

一般塗装系の塗替えには、「全面塗替え塗装」と「部分塗替え塗装」があり、鋼道路橋の経年劣化の範囲等や状況により選定する。

〔全面塗替え塗装〕

〔部分塗替え塗装〕

【出典（抜粋・要約）】

第 23 回鋼構造基礎講座「鋼橋の維持管理-橋梁維持管理の現状と基礎技術-」既設橋における防食技術と施工留意点（2012 年 12 月 11 日）(一社)日本橋梁建設協会 製作小委員会 防食部会資料より抜粋・要約

⑤ 本水管橋の塗装仕様（ふっ素樹脂塗装）について

〈考察〉

塗膜分析結果よりH5塗装更新時には、旧塗装の上からエポキシ樹脂系塗料（下・中塗り）＋ふっ素樹脂系塗料（上塗り）を施していることが分かる。

旧塗膜構成は、特殊加工油変性亜酸化鉛サビ止ペイント（下塗）、MIO系中塗用塗料（中塗）、アクリル変性アルキッド樹脂塗料（上塗）である。

H2鋼橋塗装便覧において[1)2)]、「3種ケレンを行った場合は、鋼材面露出部に変性エポキシ樹脂塗料を塗付してから、下塗り第2層以後の塗料を塗付する。」と記載があり、この方法に倣って施工されたものと考える。

ただし、「一般塗装系塗膜の重防食塗装系への塗替え塗装マニュアル 日本鋼構造協会」にも「塗替え塗装時に素地調整程度3種を適用し、変性エポキシ樹脂塗料下塗などジンクリッチペイント以外のプライマーを用いて塗り替えたものは、重防食塗装系ではない。」と記載があるように本水管橋は重防食塗装仕様にはなっていない。

また、「鋼道路橋防食便覧 H26」[3)]には、「Rc-I塗装系の塗替えに比べて塗膜の耐久性は大幅に劣るので注意が必要」と記載があり、定期的な管理が必要となることが分かる。

加えて、「鋼構造物の塗装Q&A　日本鋼構造協会」に、「素地調整の程度が悪いと塗膜の耐久性が低下することが知られています。特に、錆や塩分が残存している鋼材に塗装すると、塗膜の耐久性は大きく低下します。」と記載があり、塗装更新時の素地調整も重要である。「鋼構造物塗膜調査マニュアル 日本鋼構造協会」[4)]に「塗膜面に付着した塩分により、塗膜層間で膨れや層間剥離が発生することがある。」とされ、「塩分付着量が50mg/m²以上の時は水洗等により塩分が50mg/m²以下になるまで除去することが望ましい。」と記載がある。

(3)　c塗装系（c－1，c－3，c－5，c－6）

新設塗装のC塗装系の塗替えに用いる塗装系であり，上塗りにポリウレタン樹脂塗料を用いる場合はc－1，c－5塗装系を適用し，ふっ素樹脂塗料を用いる場合はc－3，c－6塗装系を適用する。

C塗装系の下塗り第1層には無機ジンクリッチペイントを用いているが，塗替えでは1種ケレンを行うことが困難なため，無機ジンクリッチペイントを塗付することができない。2種ケレンを行って全面の塗膜を除去した場合は，残存さびとの密着が無機ジンクリッチペイントより良い有機ジンクリッチペイントを全面に1層塗付し，その上に下塗り第2層以後の塗料を塗り重ねる。3種ケレンを行った場合は，鋼材面露出部に変性エポキシ樹脂塗料を塗付してから，下塗り第2層以後の塗料を塗付する。

c－5，c－6塗装系は局部補修に用いる塗装系であり，超厚膜形エポキシ樹脂塗料を用いて塗料の塗付回数を少なくしている。超厚膜形エポキシ樹脂塗料は鋼材面との密着が良くないので，密着性の良いエポキシ樹脂プライマーを塗付して，その上に塗り重ねることが必要である。

1)H2鋼橋塗装便覧

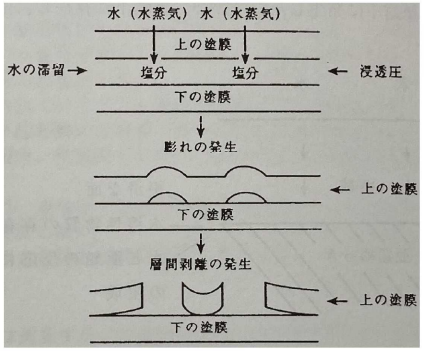
表-Ⅱ.7.3　Rc-III塗装系（はけ，ローラー）

塗装工程	塗料名	使用料 (g/m²)	塗装間隔
素地調整	3種		4時間以内
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗（鋼材露出部のみ）	(200)	1日～10日
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	200	1日～10日
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	200	1日～10日
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	140	1日～10日
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	120	

3)鋼道路橋防食便覧 H26

13.2　原因

海塩粒子や道路凍結防止剤等の塩分が付着している場合、その上に塗られた塗料の裏表に浸透圧を生じ、水（水蒸気）が塗膜に浸透しやすくなる結果、界面に水がたまり、上の塗膜とその下の塗膜の間で膨れや層間剥離が生じる。



4)鋼構造物塗膜調査マニュアル

表-9・3　c塗装系

塗装系	旧塗装系	素地調整	下塗り	間隔	下塗り	間隔	下塗り	間隔	中塗り	間隔	上塗り
c－1	A－1 A－2 A－3 A－4 B－1 C－1 C－2	2種	有機ジンクリッチペイント 300g/m²	1日～10日	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日	ポリウレタン樹脂塗料用中塗 140g/m²	1日～10日	ポリウレタン樹脂塗料上塗 120g/m²
		3種	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²（鋼材面露出部のみ）	1日～10日	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日			
		4種			変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日					
	A－1 A－2 A－3	2種	有機ジンクリッチペイント 300g/m²	1日～10日	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日			
c－3	A－4 B－1 C－1 C－2 C－3 C－4	3種	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²（鋼材面露出部のみ）	1日～10日	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日	変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日	ふっ素樹脂塗料用中塗 140g/m²	1日～10日	ふっ素樹脂塗料上塗 120g/m²
		4種			変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m²	1日～10日					

2)H2鋼橋塗装便覧

⑥ 水管橋の劣化にともなう破損事例

【美唄市導水管水管橋崩落事例

〔概　要〕

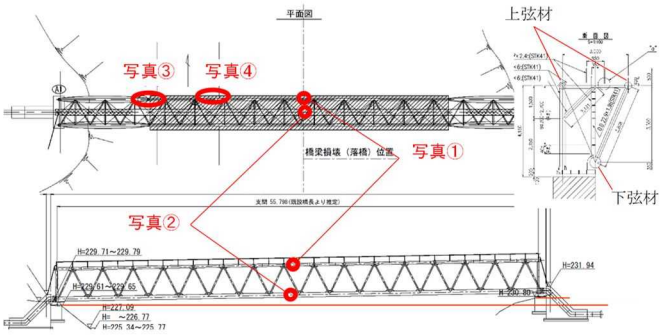
令和 3 年 2 月 24 日、北海道美唄市の導水管水管橋（昭和 51 年竣工）が崩落した事例である。竣工後約 45 年間大規模な修繕工事は行われておらず、経年劣化や積雪による応力増加、溶接部の品質不良等が落橋の要因と推定された。

〔水管橋の構造諸元〕

形　　式 ： 逆三角トラス補剛桁
橋　　長 ； L＝57.7m
水管口径 ： φ500mm
管　　厚 ： 7.0mm（実測 9.0mm）
竣 工 年 ： 昭和 51 年（1976 年）

〔水管橋の損傷状況〕

（落橋状況 全景）

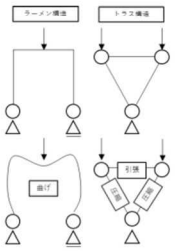


（損傷状況写真 撮影位置）

【上弦材（破断部）】　【下弦材（破断部）】　【上弦材（非破断部）】

（水管橋損傷状況）

〔各種調査の結果と考察〕

項目	調査結果の概要
崩落前の状況	竣工後 45 年間大規模な修繕工事が実施なし。点検用歩廊の手すりが腐食で破損し、脱落。
現地調査	図面と測量結果の寸法違いはあるが、右岸では、橋台の傾斜、移動はレベル測量及び目視では確認されなかった。左岸は、橋台の傾斜が確認された。 上弦材は 1 本が破断し、上面の塗装、溶接部の腐食が著しい。橋の中央部付近で折損。
管体調査	上弦材の破断箇所は、腐食により減肉しており、腐食は数か月前に発生したものでなく、数年前からと判定され、上弦材の破断は崩落以前から発生していた可能性がある。 下弦材の破断箇所の破断面の腐食は最近発生したものであり、落橋後に発錆したと推察される。下面から破断しており、曲げモーメントの増大により破損している。 X 線検査の結果、上弦材の溶接部の状態は悪く、現地施工の溶接が不良であったと推察される。
構造計算	原設計時よりも厳しい積雪荷重の条件であるが、管体が健全であれば降雪時の荷重条件であっても構造的な安定性は確保されている。トラス構造であり、構造力学的には各構成材には軸力しか伝達しないため、大きな曲げモーメントは発生しない（参考：右図）。 

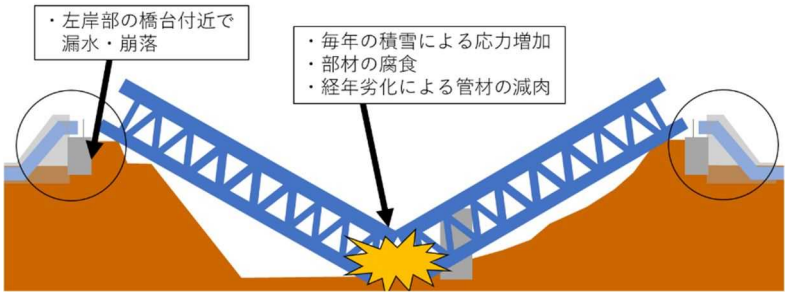
〔落橋要因の推定〕

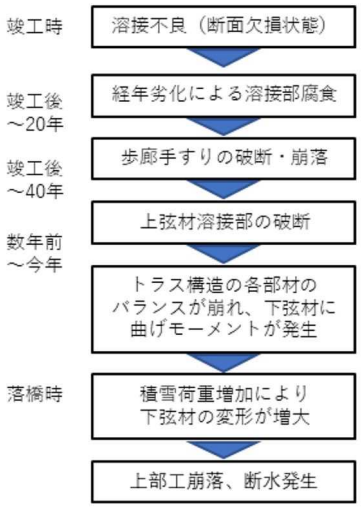
【崩落の主要因】

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限材の破断





（落橋の経過と主要因の推定）

【出典（抜粋・要約）】

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

⑦ 水管橋設計基準の変遷

○水道施設耐震工法指針・解説

※ 水道施設耐震工法指針は 2022 年根 6 月に改訂され、水管橋の内容も大きく変更された。

	池状構造物	PC タンク	鋼製タンク	埋設管路	水管橋	備 考
1920						1916(T5) 震度法の概念が提案される
1930 1940						1923(T12) 関東大震災(M7.9) ・強度不足による被害
1950						1948(S23) 福井地震(M7.1) ・強度不足による被害 ・水道施設の被害が甚大
1960	1953(S28)「水道施設の耐震工法」発行 ・震度法の採用(k_h=0.1 ～ 0.3) ・地震時土圧・水圧を考慮 ・高架水槽の設計震度割増					
1970	1966(S41)「水道施設の耐震工法」 一部改訂					1964(S39) 新潟地震(M7.5) ・液状化被害の認識 1968(S43) 十勝沖地震(M8.1) ・せん断破壊現象
1980	1979(S54)「水道施設耐震工法指針・解説」 ・k_h=0.1 ～ 0.3(標準水平震度は 0.2 を下回らない) ・応答変位法、動的解析法の採用 ・地震時の地盤変位、構造物の慣性力、地震時動水圧、液面揺動を考慮	同左 ・構造計算例で k_h=0.3		1977(S52)「水道用埋設鋼管路耐震設計指針」 ・応答変位法		1973(S48) 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める省令 1977(S52) 新耐震設計法(案) 1977(S52) 地下埋設管路耐震継手の技術基準 (案) 1978(S53) 宮城県沖地震(M7.1) ・PC タンクの損傷 ・RC 橋脚の損傷
1990		1980(S55)「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」	1985(S60)「鋼製石油貯槽の構造(全溶接性) JIS B 8501」改訂 ・耐震設計の必要性	1984(S59) ・SⅡ、S形ダクタイル管路の設計	1981(S56)「水管橋設計基準」 ・震度法、修正震度法	
2000	1997(H9)「水道施設耐震工法指針・解説」改訂 ・新たな震度法(修正震度法と統合)、応答変位法、動的解析 ・レベル 1、2 地震動を用いた耐震水準の設定 ・材料の非線形性を考慮した構造物特性係数	1997(H9)「水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説」 ・地震に対する安全性検討の改定 ・構造物特性係数 ・耐震診断、補修・補強等を追加	1997(H9)「鋼製配水池設計指針 WSP-063-97」 ・レベル 1、2 地震動の導入	1997(H9)「水道用鋼管路における伸縮可撓管」	1997(H9)「水管橋設計基準(耐震設計編)」	1995(H7) 兵庫県南部地震(M7.3) ・土木・建築構造物に甚大な被害 2000(H12) 水道施設の技術的基準を定める省令
	2009(H21)「水道施設耐震工法指針・解説」改訂 ・性能設計の導入 ・経済性照査の紹介			2006(H18) NS、SⅡ、S形ダクタイル鉄管管路の設計		2003(H15) 十勝沖地震(M8.0) ・液面揺動による石油タンクの被害 2004(H16) 新潟県中越地震(M6.8) ・中山間地での孤立集落の発生 2007(H19) 新潟県中越沖地震(M6.8) ・相互応援体制の見直し 2008(H20) 水道施設の技術的基準を定める省令の一部改正

※ 本表では、耐震工法に関する主な規準・示方書の変遷の契機となった主な大地震を備考に示した。
それ以外の大地震は、各論資料（表-Ⅲ.1）等を参照されたい。

出典：水道施設耐震工法指針・解説　2009 年版　Ⅱ各論　表-4.5.5　耐震工法に関する主な基準・示方書の変遷

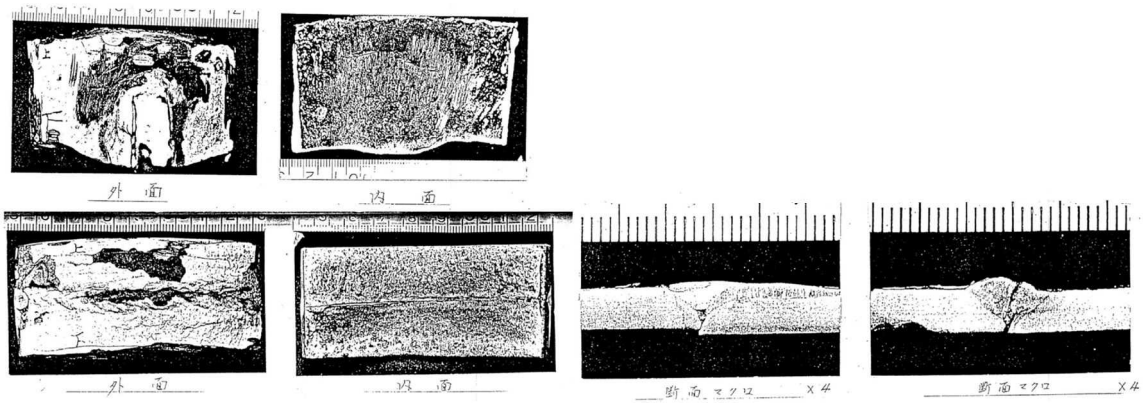
○WSP 水管橋設計基準

		WSP007 水管橋設計基準	WSP064 水管橋設計基準（耐震設計編）
初　版	制定日	昭和46年	平成9年9月24日
改正1版	改正日	昭和49年	平成19年3月23日
	改正点	設計基準、示方書類の改正に伴う改正	『水道施設耐震工法指針・解説』・『道路橋示方書・同解説 Ⅰ共通編、Ⅱ鋼橋編、Ⅴ耐震設計編』等の関連基準との整合、ＳＩ単位系の導入等全面的改正に伴う改正
改正2版	改正日	昭和56年	令和1年12月4日
	改正点	示方書の改正、『水道施設基準解説』の『水道施設設計指針・解説』への移行に伴う改正	『道路橋示方書』が平成29年に大幅に改訂されたこと及び限界状態設計法や部分係数法を導入したことによる改正
改正3版	改正日	昭和63年9月1日	
	改正点	JIS G 3443-1987（水輸送用塗覆装鋼管）制定に伴う改正	
改正4版	改正日	平成11年6月24日	
	改正点	『水道施設耐震工法指針・解説』・『道路橋示方書・同解説 Ⅰ共通編、Ⅱ鋼橋編、Ⅴ耐震設計編』等の関連基準との整合、ＳＩ単位系の導入等全面的改正に伴う改正	
改正5版	改正日	平成31年2月5日	
	改正点	『道路橋示方書』が平成29年に大幅に改訂されたこと及び限界状態設計法や部分係数法を導入したことによる改正	

⑧ カルマン渦対策の履歴

● 昭和 51 年（1976 年）11 月 22 日：**亀裂を確認**

径　間	P1-P2	P2-P3	P3-P4	P4-P5	P5-P6	P6-P7	P7-P8	備　考
亀裂箇所 （箇所）	1	6	14	13	13	12	5	パイプ部（26 箇所）L=10～280mm リブ部　（42 箇所）L=10～145mm



● 昭和 51 年（1976 年）12 月：吊材カルマン渦による振動確認（振動実験）

・実　　験　　：住友精密 KK にて風洞実験を実施

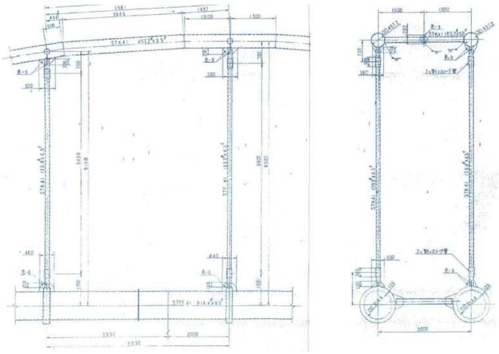
・意見聴取　　：京都大学土木工学　白石成人教授

・風の調査　　：過去の風速調査を和歌山県測候所にて行う

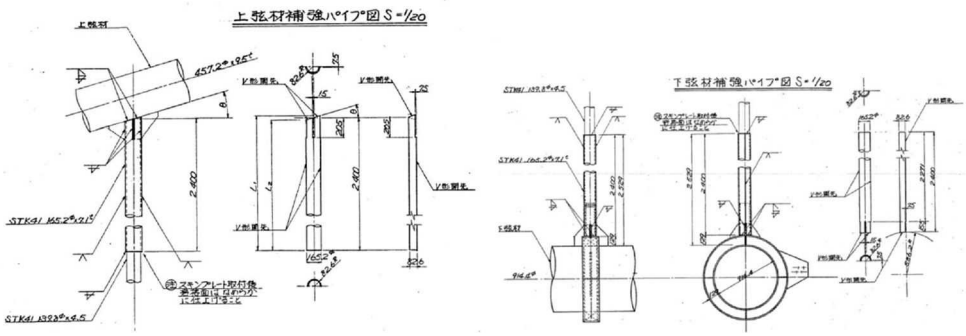
・市対策案打合せ：形を極力変えない、美観を損なわない事を原則として決定

【対策】吊材支点部分を 2 重管に覆い剛性を高める案に決定

● 昭和 52 年（1977 年）1 月～3 月：**吊材補修・補強実施**



（昭和 49 年 建設当初 吊材亀裂前）



（昭和 51 年 カルマン渦対策 **吊材補強**：S52.1～S52.3 補修並びに補強）

● 昭和 51 年（1976 年）3 月～昭和 55 年（1980 年）1 月：補強後調査

・固有振動数　共振風速 ⇒ 応力集中部が補強したリブの溶接止端部になり破断する可能性があるが、S51.11 に亀裂発生点の応力は 1/3 となる。

・吊材リブ付近目視調査

● 昭和 53 年（1978 年）2 月 3 日：**亀裂発見**

・カラーチェックで確認

・静的動的応力測定、亀裂部周辺の応力分布調査、ガセット先端疲労強度実験、ガセットリブ形状を種々変更して静荷重試験並びに疲労試験

● 昭和 54 年（1979 年）7 月 30 日：亀裂調査結果

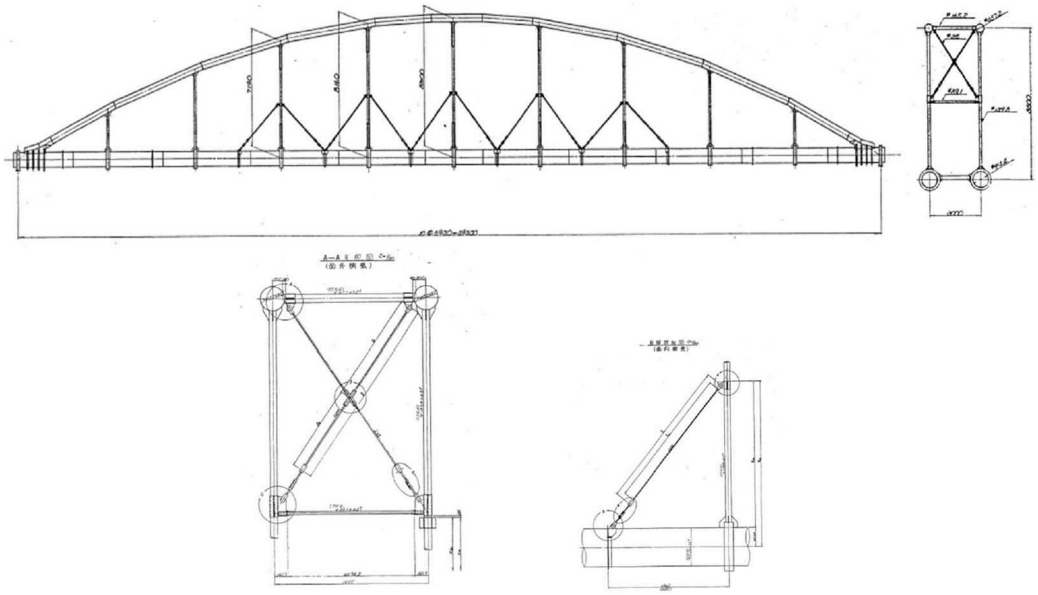
・吊材上部に亀裂確認（10 箇所）

・リブと上下弦材との結合部に大きな応力が発生する。

● 昭和 55 年（1980 年）1 月下旬～3 月上旬：**補強工事実施**

【対策内容】①吊材に節を設けて吊材を丸鋼にて引張剛性を高めてカルマン渦による共振現象を避ける。

②吊材 No.2、No.8（2 番目に短い吊材と思われる）は損傷を受けていないので剛性を No.2（No.8）固有周波数 39Hz になるように補強するような補強案に決定



（昭和 55 年 カルマン渦対策 吊材補強）

【カルマン渦対策の履歴（まとめ）】

S51.11 に発生した亀裂に対し、1 次対策を行いながら実証実験と現場視察を実施し、S53.2 に再亀裂を発見し S55 に対策するまでが一通りの対応であったと考えられる。最終の亀裂箇所と状況の報告書が入手できなかったが、S55.3 に現状の形状になったことは確認できた。

⑨ 平成 5 年劣化調査結果の概要

(1) 調査概要

平成 5 年に実施した本水管橋の塗装更新工事で設置した作業足場を使用して水管橋全体の劣化調査を実施した。主な調査内容は、外面の孔食深さや腐食調査、管厚調査であり、吊材後付け部材周辺の腐食や孔食、部分的な減肉等が確認され、継続して経過観察が必要と判断されている。

（平成 4 年 塗装塗替工事前の状況）

(2) 外面孔食深さ検査

○ 吊　材　公称肉厚 4.5mm（2重管 7.1mm）

検査数 11箇所
最大 1.5mm　最小 0.5mm　平均 0.972mm

○ 下弦材　公称肉厚 9.5mm

検査数 26箇所
最大 1.6mm　最小 0.6mm　平均 0.876mm

○ 上弦材　公称肉厚 9.5mm

検査数 64箇所
最大 2.9mm　最小 0.5mm　平均 1.068mm

（平成5年　外観検査状況）

【H5 検査総評】

〔外観検査〕　**外面孔食は吊材、補強リング部及び現地溶接部近傍に多く発生していた。**また、孔食部には発錆が見受けられた。

〔外面孔食深さ検査〕　**P4-P5 径間が最も外面孔食箇所が多く**、最大孔食深さは 2.9mm であった。また、各部位での最大孔食深さ箇所は上弦材に多かった。

■ カルマン渦による吊材経過（H5 検査時考察）

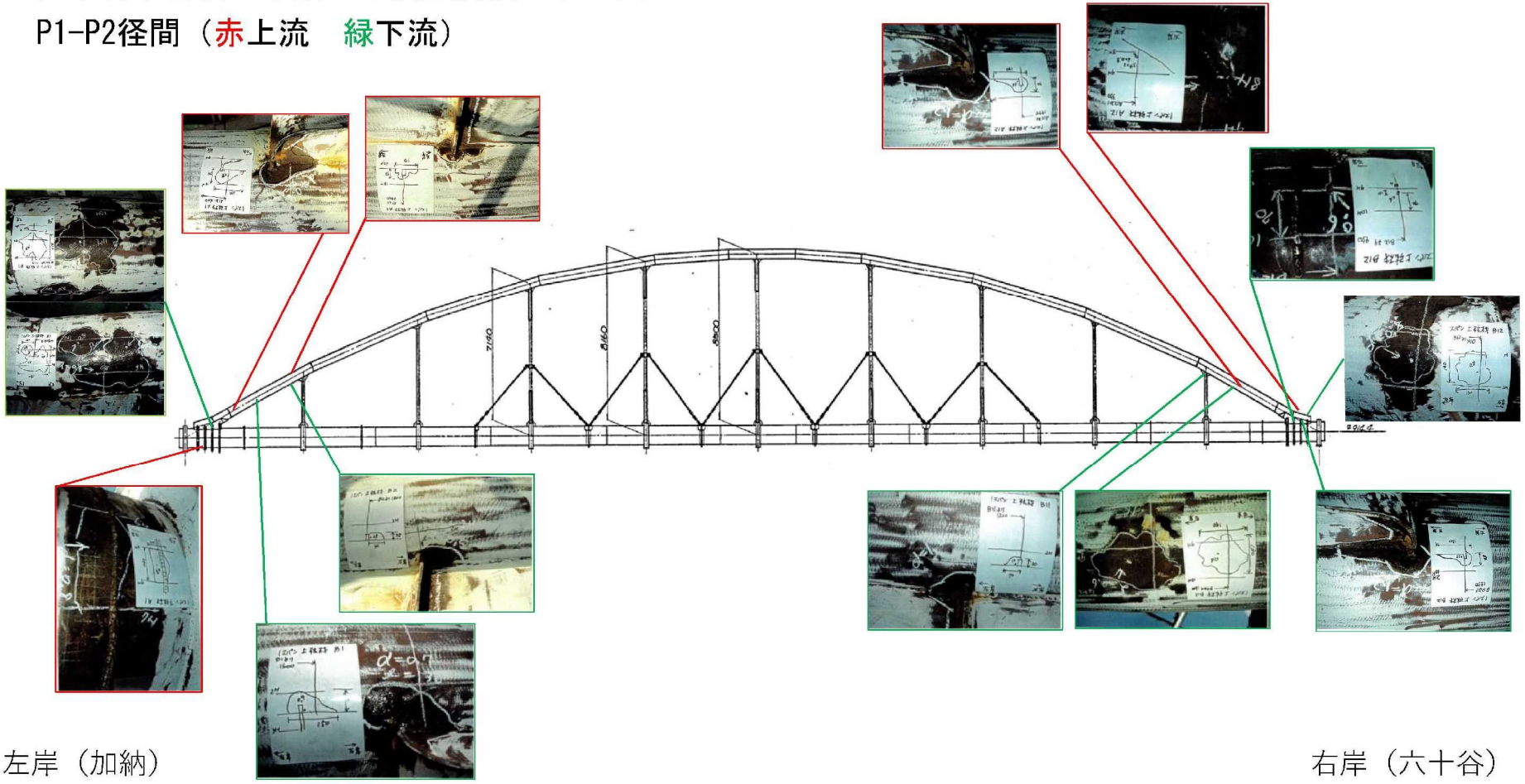
2 回目亀裂発生、補修工事から約 12 年経過しており、今回の検査（浸透探傷試験）でも亀裂が発生していないことから、今後、発生することはないものと考えられる。

(3) 腐食調査（腐食マップ図）

各径間における腐食マップ図を次頁以降に示す。

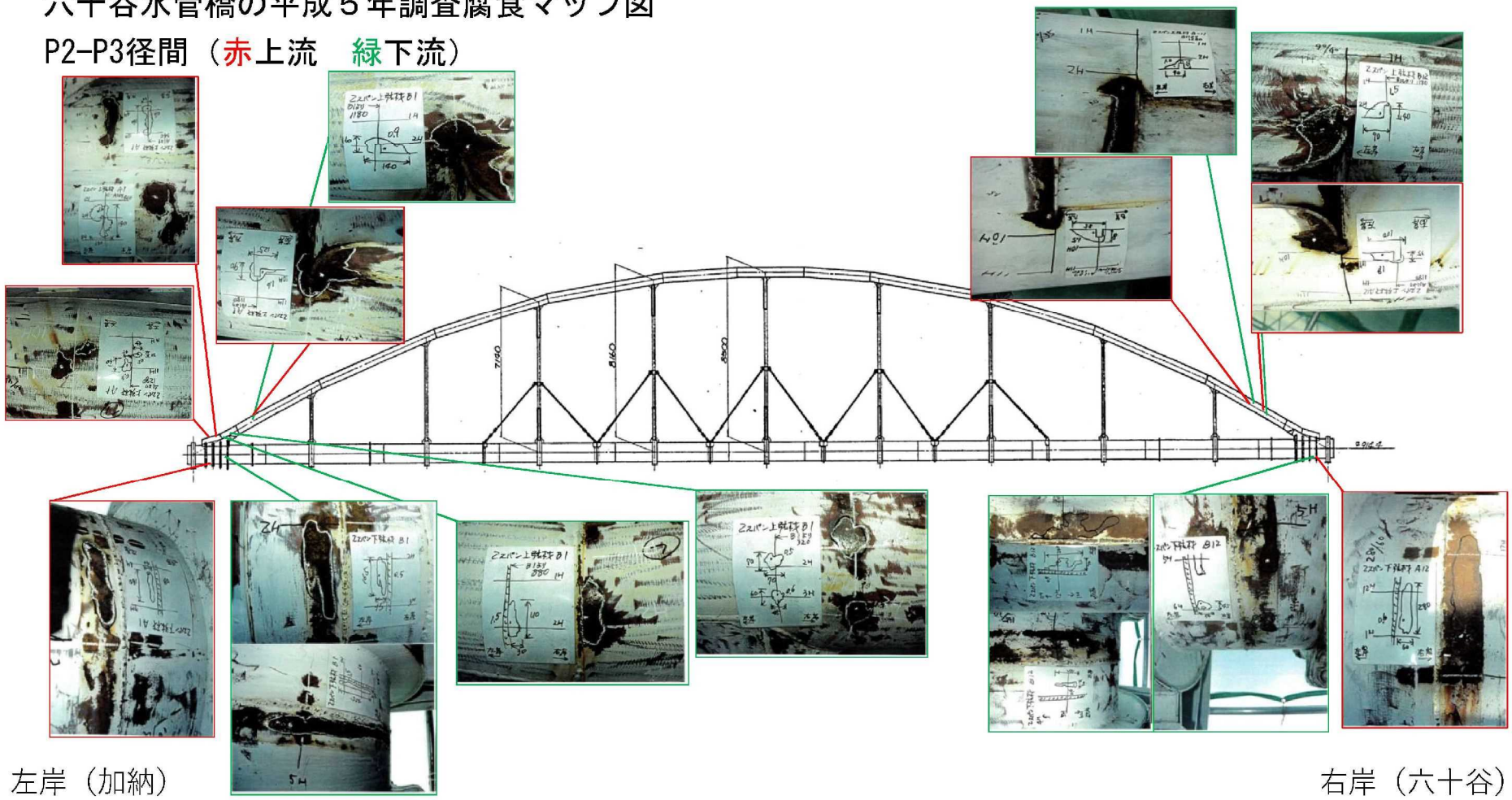
六十谷水管橋の平成５年調査腐食マップ図

P1-P2径間（赤上流　緑下流）



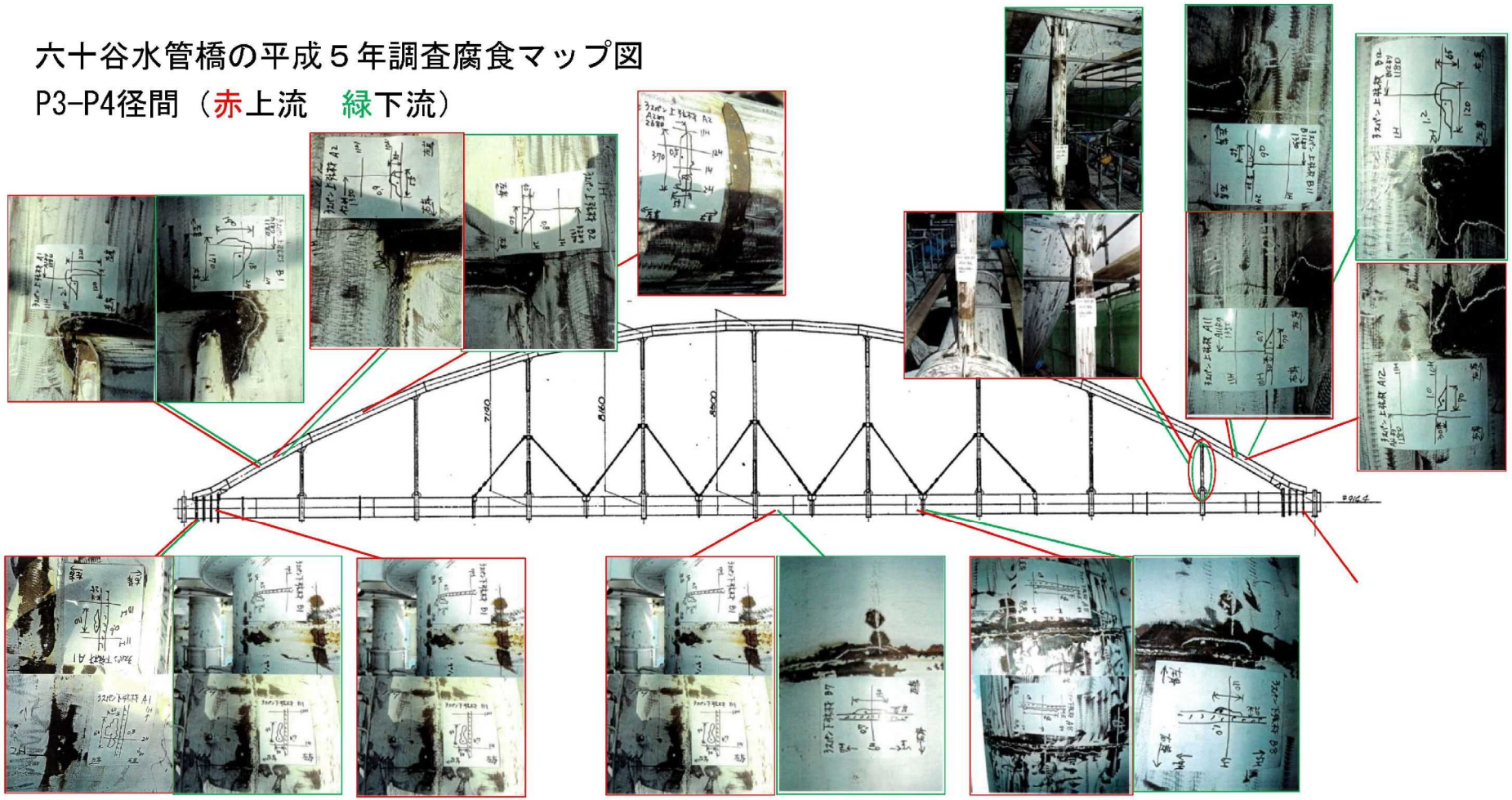
六十谷水管橋の平成５年調査腐食マップ図

P2-P3径間（赤上流　緑下流）



六十谷水管橋の平成５年調査腐食マップ図

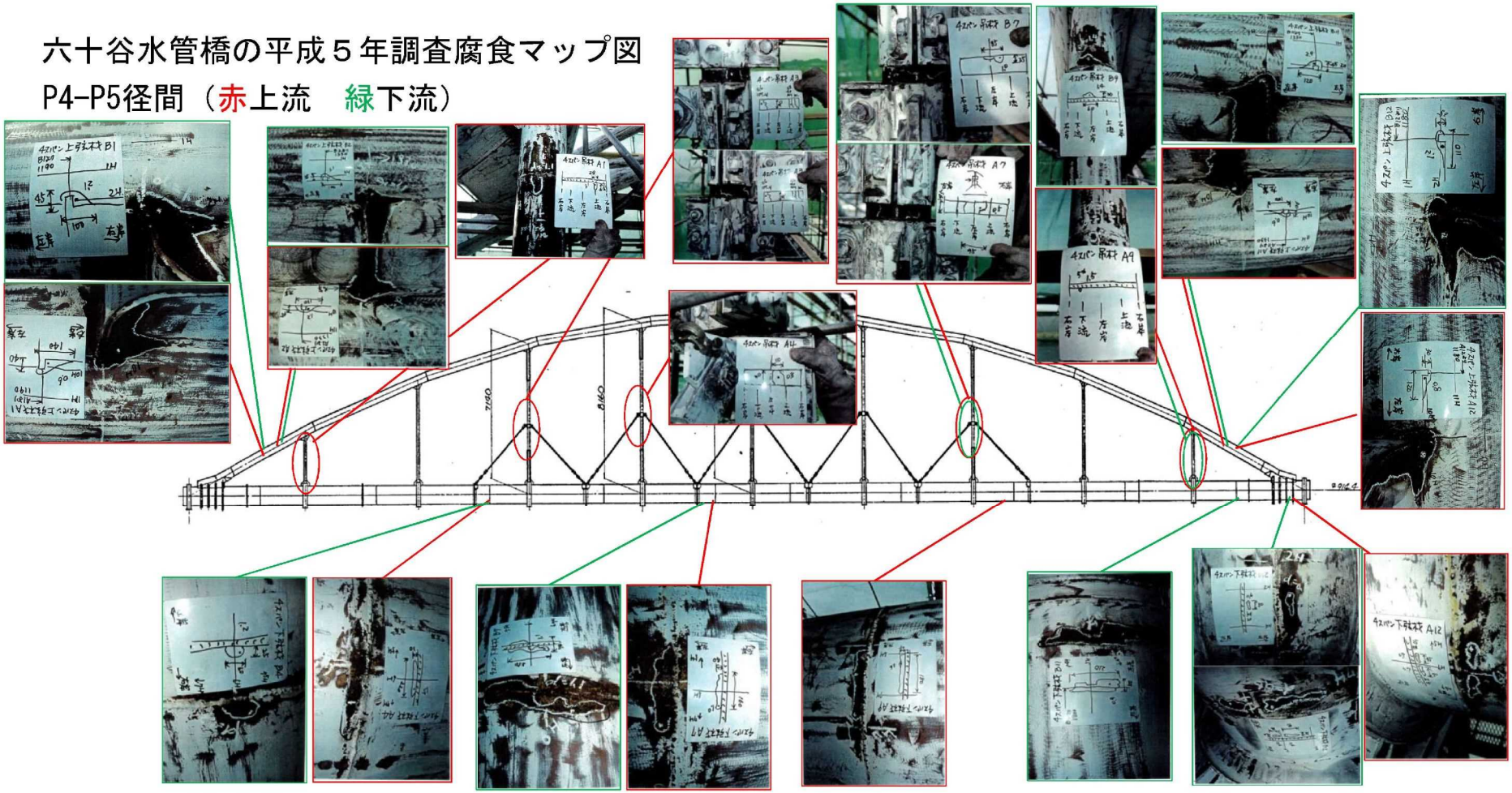
P3-P4径間（赤上流　緑下流）



左岸（加納）　　右岸（六十谷）

六十谷水管橋の平成５年調査腐食マップ図

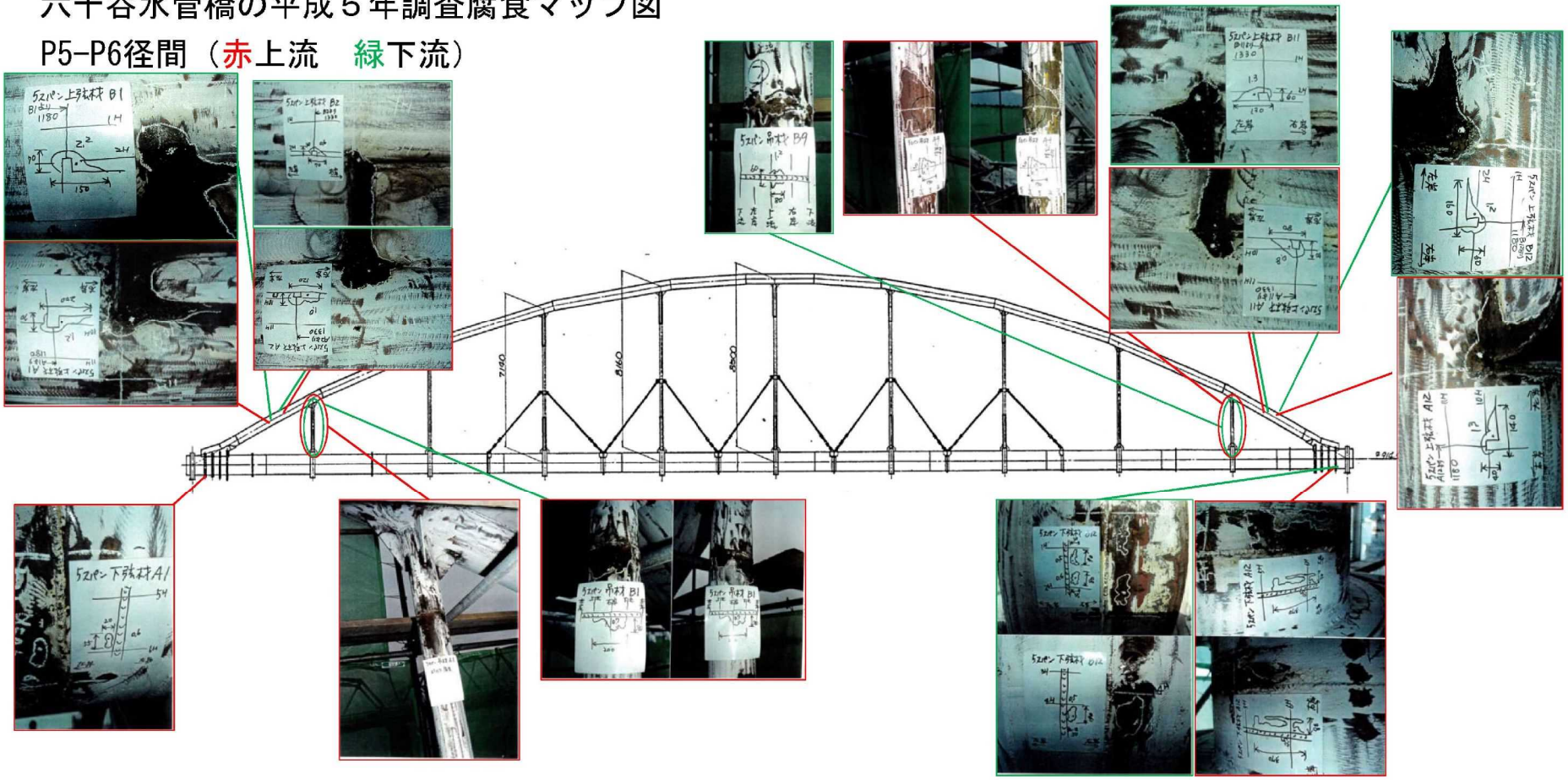
P4-P5径間（赤上流　緑下流）



左岸（加納）　　右岸（六十谷）

六十谷水管橋の平成５年調査腐食マップ図

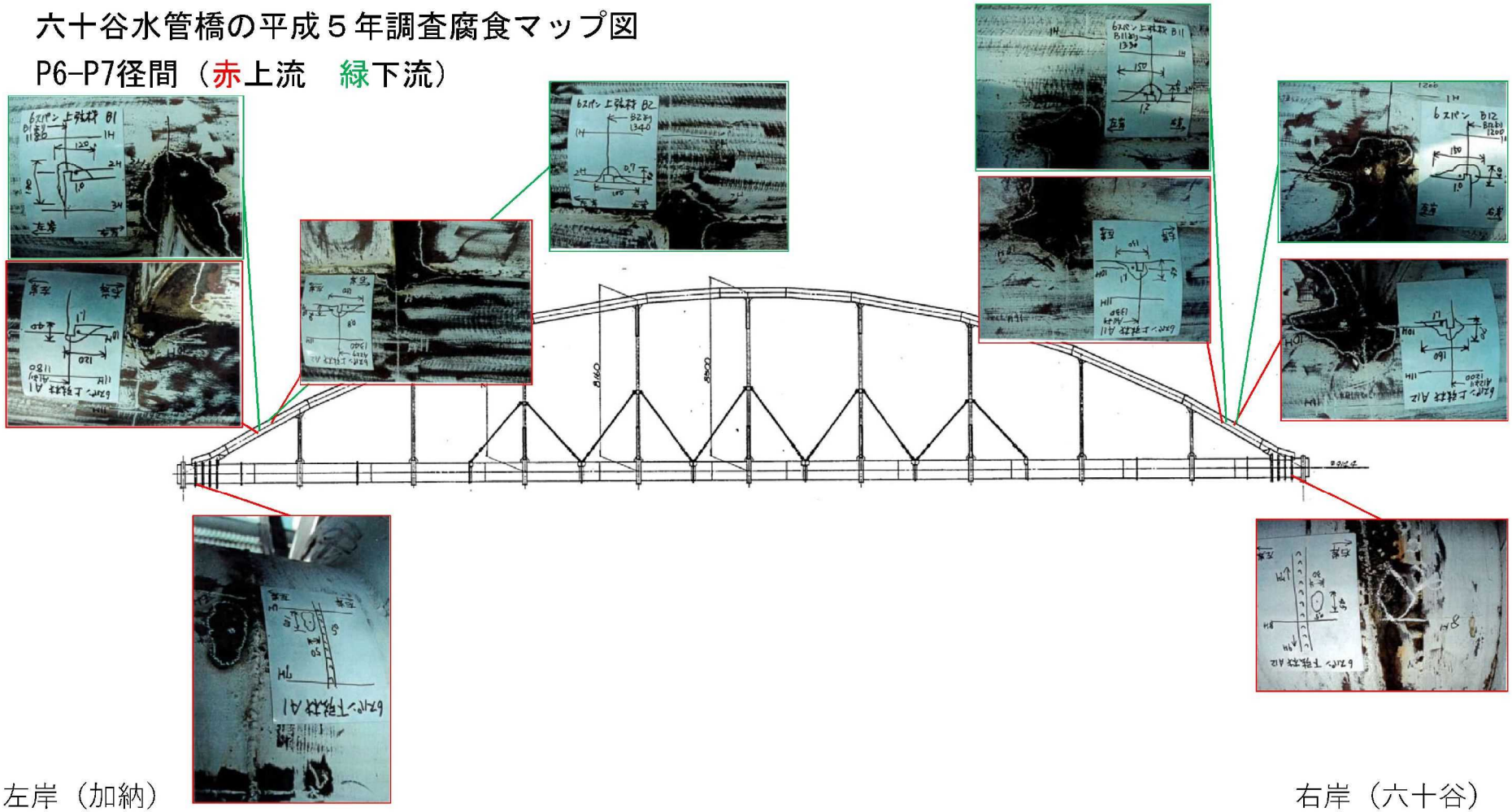
P5-P6径間（赤上流　緑下流）



左岸（加納）　　右岸（六十谷）

六十谷水管橋の平成５年調査腐食マップ図

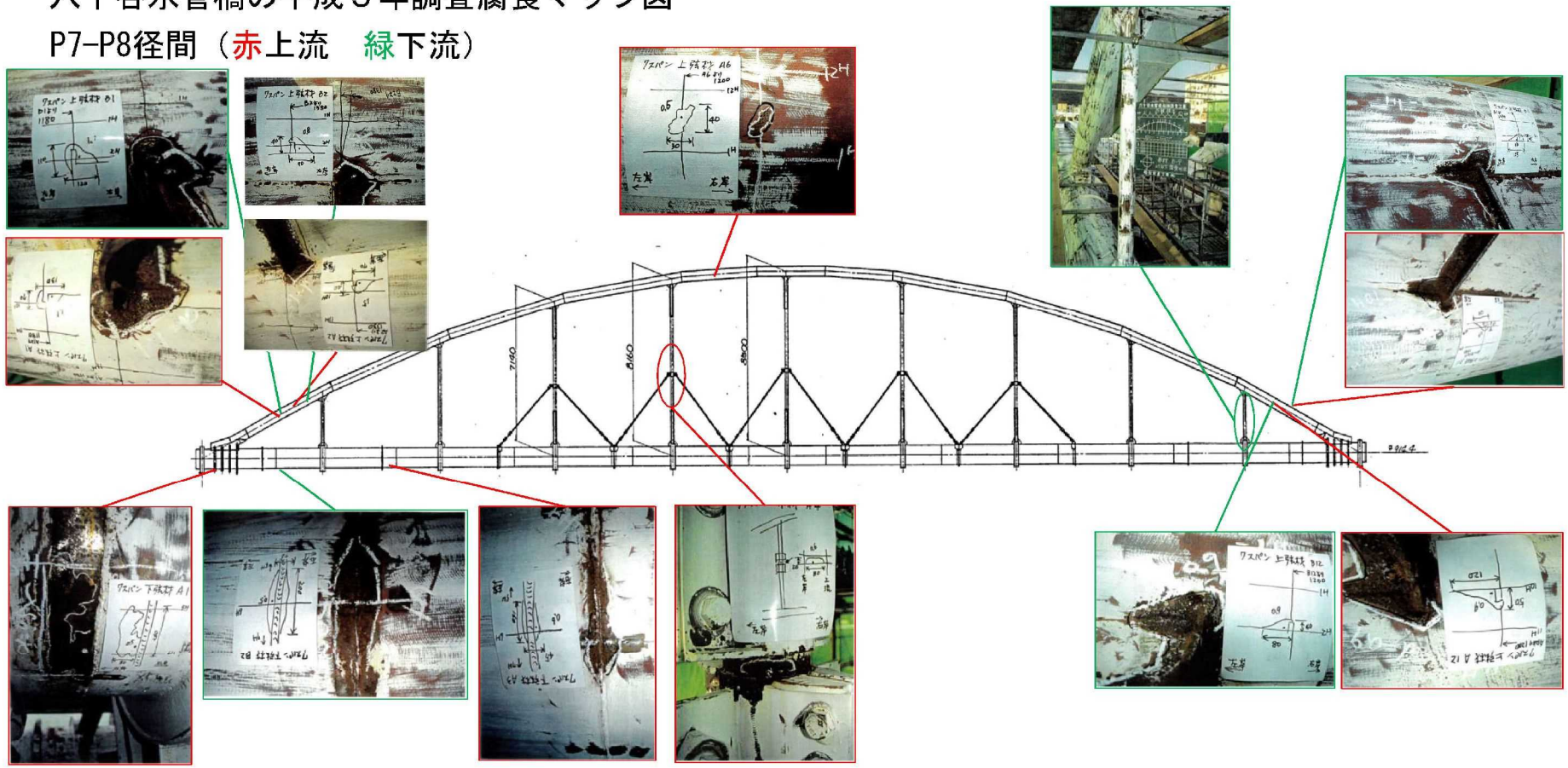
P6-P7径間（赤上流　緑下流）



左岸（加納）　　右岸（六十谷）

六十谷水管橋の平成５年調査腐食マップ図

P7-P8径間（赤上流　緑下流）



左岸（加納）

右岸（六十谷）

(4) 管厚調査

○ 立上り部　　公称肉厚 9.5mm
　検査数 570箇所
　最大 10.3mm　　最小 7.8mm　　平均 9.239mm

○ 下弦材（上流）　公称肉厚 9.5mm
　検査数 4031箇所
　最大 10.4mm　　最小 7.4mm　　平均 9.265mm

○ 下弦材（下流）　公称肉厚 9.5mm
　検査数 4043箇所
　最大 10.5mm　　最小 7.5mm　　平均 9.252mm

○ 上弦材　　公称肉厚 9.5mm
　検査数 7501箇所
　最大 10.2mm　　最小 9.0mm　　平均 9.419mm

（平成5年　膜厚検査状況）

（平成5年　浸透探傷検査状況）

■ H5 検査総評

各測定点によってバラつき及び孔食が認められ、接手周辺の測点と接手周辺の横とにデータのバラつき（接手周辺の測点：管肉厚許容差割れが多い）があるのは、接手周辺の測点は溶接ビート近傍であり超音波厚さ計の探触子を前後約 20 ㎜移動して最小値を記録するため内面ビート止端部の値を検出していると推定され、この止端部は凸状の余盛形状のため水流変化等により**内面塗装が剥離し錆こぶ腐食が発生していると考えられる。今回の内面確認において、重大な腐食は確認されていない。**従って通水管内面ビート部はある程度なめらかにする必要があると思われる。なお、**上弦材については内面無塗装にもかかわらず管肉厚許許容値割れが存在しなかったのは、内容物が空気であり、しかも密閉されているため、空気循環が無いため腐食が発生していないものと考えられる。**

⑩ 水管橋崩落時の落橋防止装置の挙動について

水管橋は、リングサポートの支承部を回転中心として、中央部で“V”の形状に変形し崩落した。右岸側は固定支承であり、下沓とピン結合されているため、水管橋の移動を妨げるが、モーメントが生じると容易に回転する構造である。一方、左岸側の支承は可動支承であり、水管橋は回転も移動も自由である。

水管橋崩落時に落橋防止ケーブルに作用する荷重は以下のようになったと推定する。

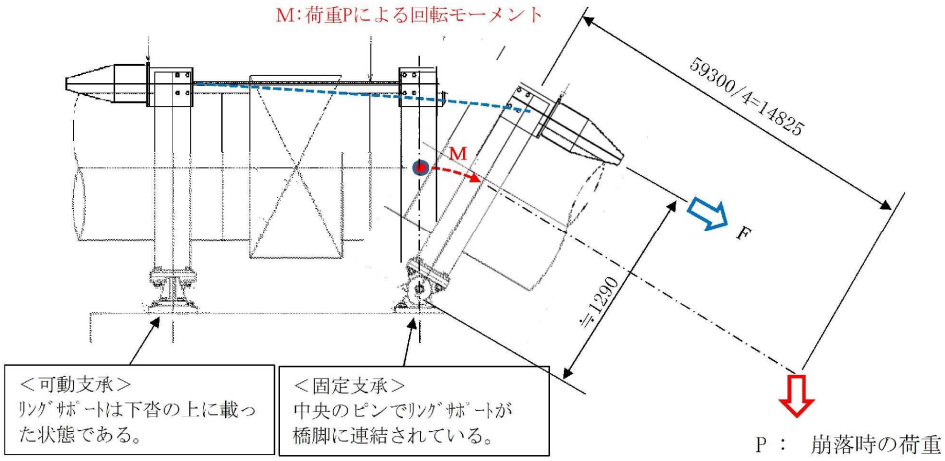
1) 水管橋の荷重 ＝ Wo
2) 崩落時に作用したと予想される荷重　P ＝ Wo／2
3) 崩落が始まる段階の回転モーメント　M ≒ P×59.3／4 ＝ 14.825 P
4) 落橋防止ケーブルの作用する力　F ＝ M／1.29 ＝ 11.49 P ＝ 5.75 Wo
5) 落橋防止ケーブルの設計荷重 ＝ 1.5×Wo×Kh2

レベル 2 地震時の設計水平震度 Kh2 は、設計時に使用された値＝0.54 とした時、0.81Wo となる。この値は、崩落時に作用したと思われる値よりはるかに小さい。

〔補足説明〕

落橋防止ケーブルの設計時には、管内の水重を考慮していない。しかし、実際に鉛直方向に作用する荷重には水重が含まれているため、落橋防止ケーブルには当初の設計荷重をはるかに上回る荷重が作用したと思われる。

左岸側では、落橋防止ケーブルが撓んでいるように見える。据付時の設定値に余裕があり崩落時の伸びを吸収した事も考えられる。



（水管橋崩落時の落橋防止の状況）

本水管橋の落橋防止装置の設計では、「水管橋設計基準 日本水道鋼管協会 2007」に準じて設計荷重が算出されており、水重による慣性力は考慮されていない。

(1) 設計地震力は、考慮する地震動レベルに応じた設計水平震度の 1.5 倍に相当する慣性力を考慮した式（6. 1）、および式（6. 2）により算定する。

$H_{fx}=1.5\ k_h \cdot W' \cdot L$ ……（6. 1）

$H_{fy}=1.5\ k_h \cdot R_v$ ……（6. 2）

道路橋の落橋防止装置は 1.5Rd

ここで、 H_{fx} ：橋軸方向設計地震力（kN）

H_{fy} ：橋軸直角方向設計地震力（kN）

W' ：管内水重および通行荷重を除く鉛直荷重（kN/m）

L ：一連の桁長（m）

ただし、二連の桁を連結する場合はいずれか大きい方の桁長を考える。

R_v ：当該支点部の鉛直反力（kN）

k_h ：設計水平震度

地震動レベル 1 の場合 $k_h = k_{h1}$

地震動レベル 2 の場合 $k_h = k_{h2}$

(1) 落橋防止構造の設計地震力は、最終的な安全装置として考慮する地震動レベルに応じた地震時慣性力の 1.5 倍に相当する地震力に耐えられるものとした。

管内の水に起因する慣性力は、橋軸方向、橋軸直角方向で考え方が異なる。橋軸直角方向については水重による慣性力を考慮し、橋軸方向については管壁が水を強制変位させることがないため水重による慣性力を考慮しないものとした。

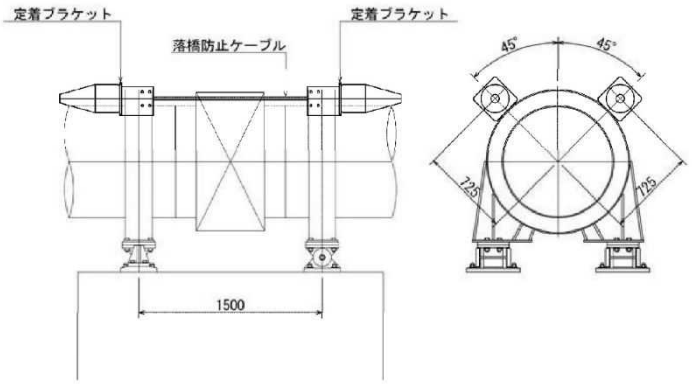
なお、一連の桁とは連続梁形式の場合には連続している桁の全長を言う。

出典：水管橋設計基準 日本水道鋼管協会 2007 p.34

設計計算書

3.4 橋軸方向落橋防止構造の検討

3－1 概略構造



３－２ 設計水平地震力

橋軸方向落橋防止構造は、地震動レベル２作用時の大きな橋軸方向地震時変位を固定及び可動支承両側の伸縮管部で吸収させる為、地震時変位による力を固定及び可動支承に伝達し支承部を損壊させる。

従って、上部工の地震時慣性力と支承部の破断耐力を比較して大きい方を使用する。

上部工の地震時慣性力

$H_{fx} = 1.5 \cdot \Sigma W' \cdot K_{h2}$

$\Sigma W'$： 管内水重を除く全鉛直荷重　870 kN

（落橋防止部材構造計算における上部工重量より）

K_{h2} ： 設計水平震度（地震動レベル２）　0.54

$= 1.5 \times 870 \times 0.54 = 705$ kN

大きい方を採用

固定支承の橋座部（A断面）の破断耐力

$H_{fx} = 942$ kN ---（河西系送水管耐震性等調査 参考資料(1) PAGE 1-3-26 参照）

連結ケーブル４組により、設計地震力を支持させる。

$\therefore \quad P = 1/4 \times 942 = 236$ kN　←1 基あたり

３－３ 連結ケーブルの計算

連結ケーブルは、ＰＣ鋼より線に被覆材を施したＰＣケーブルを使用する。

地震時の許容耐力は、降伏荷重（Ｐy）の 90% とする。：③P67

$Pa = P/0.9 = 236/0.9 = 262$ kN

従って、ＰＣケーブルの必要降伏荷重は $Pa = 262$ kN 以上とする。

必要降伏荷重直近上位の連結ケーブルは以下のとおりである。

ＰＣ鋼より線規格	降伏荷重
JIS G 3536 適合品	330kN
メーカー規格品	271kN

←取り付けられた PC ケーブル

出典：六十谷水管橋落橋防止実施設計業務委託　各種計算書【変更】平成 27 年 10 月

■ P5 橋脚落橋防止装置の推定破断原因

落橋防止装置（PC ケーブル）は、地震時水平力に対して、４箇所が均等に抵抗できるよう設計されている部材であり、**橋梁全体系が健全であることが前提として設計されている**ものである。そのため、今回の P4－P5 間のように橋梁が中央から崩落した場合には、設計で想定している荷重を異なる荷重が作用しており、補剛桁の落橋を防ぐような抵抗はできない。

近畿地方整備局提供の落橋時の映像から推察する限り、吊材の破断をきっかけに補剛桁が崩壊しており、P5 橋脚の落橋防止装置には、設計で想定している水平力と異なる鉛直荷重が作用し、PC ケーブルが破断したものと推測される。さらに落橋時は管内に水が通水されていたため、作用した荷重は、より大きかったものと推定される。

⑪ 道路橋等の崩落事故事例

【ミネアポリスⅠ-35W 橋（米国）〔鋼上路トラス橋（3 径間）〕】

■ 概　要

2007 年 8 月 2 日、米国ミネソタ州ミネアポリス市のミシシッピ川を跨ぐ鋼道路橋（高速道路）が**供用中に突然崩落**し、多数の死傷者が発生

■ 事故状況

・ガセットプレートが破損し、これを起点として橋梁が**脆性的に崩落**

・過去の点検で塗膜劣化による鋼材腐食、溶接不良、支承機能障害、鋼材の疲労亀裂等を確認

・事項当時、片側 4 車線を通行止めにて橋梁改修工事を施工中

■ 事故原因（推定）

・鋼部材の**腐食（経年劣化・鳥糞等による）**や疲労による部材耐力の低下

・ガセットプレートの設計耐力不足

・過大荷重の載荷（改修工事の資材仮置き重量を含む）等

（ミネアポリスⅠ-35W 橋　崩落状況）

出典（抜粋・要約）

米国ミネアポリス橋梁崩落事故に関する技術調査報告（平成 19 年 10 月）、米国ミネアポリス橋梁崩落事故に関する技術調査団

【南方澳跨港大橋（台湾）〔鋼製アーチ橋（1 径間）〕】

■ 概　要

2019 年 10 月、台湾北東部の宜蘭県の港に架かる鋼道路橋（高速道路）が**供用中に突然崩落**し、巻き込まれた通行車両が停泊中の漁船と衝突して多数の死傷者が発生

■ 事故状況

・大型車両の通行中に鋼床板箱桁を吊っていたケーブルが次々に切れ、橋梁が**脆性的に崩落**

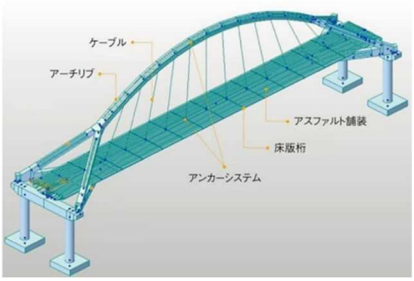
■ 事故原因（推定）

・PC ケーブルや定着部の**腐食**による耐荷力低下（プレストレス作用下での急激な破断）

・腐食原因は、箱桁・ケーブル境界部からの雨水浸入（シール材の経年劣化）、塩分・湿度等と推定

・維持管理体制の不備（特殊構造の点検技術者、点検マニュアル整備、構造計算書の保管等）

（南方澳跨港大橋　崩落状況）



（橋梁構造）

出典（抜粋・要約）日経コンストラクション（2020.12.28）

【辺野喜橋（日本）〔単純鋼桁 RC 床板橋（1 径間）〕】

■ 概　要

2009 年 7 月 15 日、沖縄県国頭村において、落橋の危険性が指摘されていた鋼桁橋が変状モニタリング監視中に崩落した。2004 年から全面通行止のため、人的被害はなかった。

■ 事故状況

・離岸距離約 50m の立地（塩害環境下）で耐候性鋼材を使用

・過去の点検で安全性に影響する鋼桁の著しい腐食状況を把握・監視

・撤去工事が直近に予定されていたが、その前のモニタリング中に崩落

■ 事故原因（推定）

・塩害環境下における鋼部材の著しい腐食（※ 桁の外側面は雨による塩洗浄効果あり）

（辺野喜橋　崩落状況）

（鋼桁腐食状況）

出典（抜粋・要約）

腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングと崩落過程について，2009 年 8 月 26 日，第 2 回 CAESAR 講演会（講演資料）

⑫ 鋼材の腐食要因

（1） 鋼材の腐食分類と特徴

鋼材の腐食には、高温環境下で水分の影響によらず生じる「乾食」と、一般環境下で水分が関わって発生する「湿食」に大きく分類される。このうち、「湿食」は、環境条件や構造条件（材料、部材配置、部材形状、凹凸等）や、腐食要因（漏水・滞水、塵埃、鳥糞等）の作用等により、さらにいくつかの形態に分けられる。

鋼橋の鋼材腐食は、防食塗装などが経年劣化や腐食要因の作用により全体的または局部的に防食機能を失って発生する。

（鋼橋の主な腐食形態と腐食メカニズム）

大分類	小分類	腐食形態	腐食概要・メカニズム	腐食条件
腐食（湿食）	全面腐食	均一腐食	腐食要因が全面的に作用し、鋼材表面が均一に侵食されるもの。	環境
	局部腐食	孔　食	腐食要因が部分的に作用し、鋼材表面が局部的に点、または孔状に深く侵食されるもの。	環境
		隙間腐食	鋼材間の接合部や付着物（スケール・腐食生成物・異物等）との隙間に水分等が停滞し、腐食が孔食状に進行するもの。	
		異種金属間腐食	異なる種類の金属が電解溶液中に電気的に接触している場合、その電位差により腐食が進行するもの。電極電位の低い金属（卑な金属）が腐食される。	環境・材料
		応力腐食割れ	鋼材が腐食性環境下で引張力を受けて割れ（亀裂）を生じ、さらに継続した引張力の作用により腐食と割れが進行して鋼材に大きな強度低下を生じさせる。	環境・応力・材料
		腐食疲労	鋼材が腐食性環境下で繰返し応力を受けて発生する。腐食作用と繰返し応力を同時に受けることで、繰返し応力のみに比べて鋼材に大きな強度低下が発生する。	

〔均一腐食〕*1

〔孔　食〕*2

〔隙間腐食〕*3

〔異種金属間腐食〕*4

〔応力腐食割れ（亀裂）〕*5

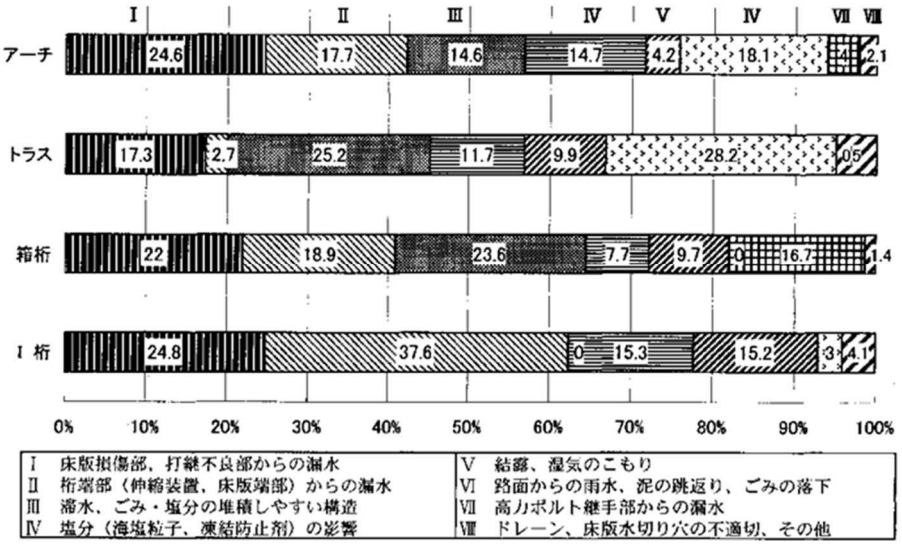
〔腐食疲労（亀裂）〕*6

【腐食（湿食）による損傷形態の例】

※ 引用　*1：掛川市ホームページより　　*4：ウィキペディアより
*2：富山県ホームページより　　*5：道路橋定期点検要領（平成 31 年 2 月）、日本道路協会 より
*3：林野庁ホームページより　　*6：道路橋定期点検要領（平成 31 年 2 月）、日本道路協会 より

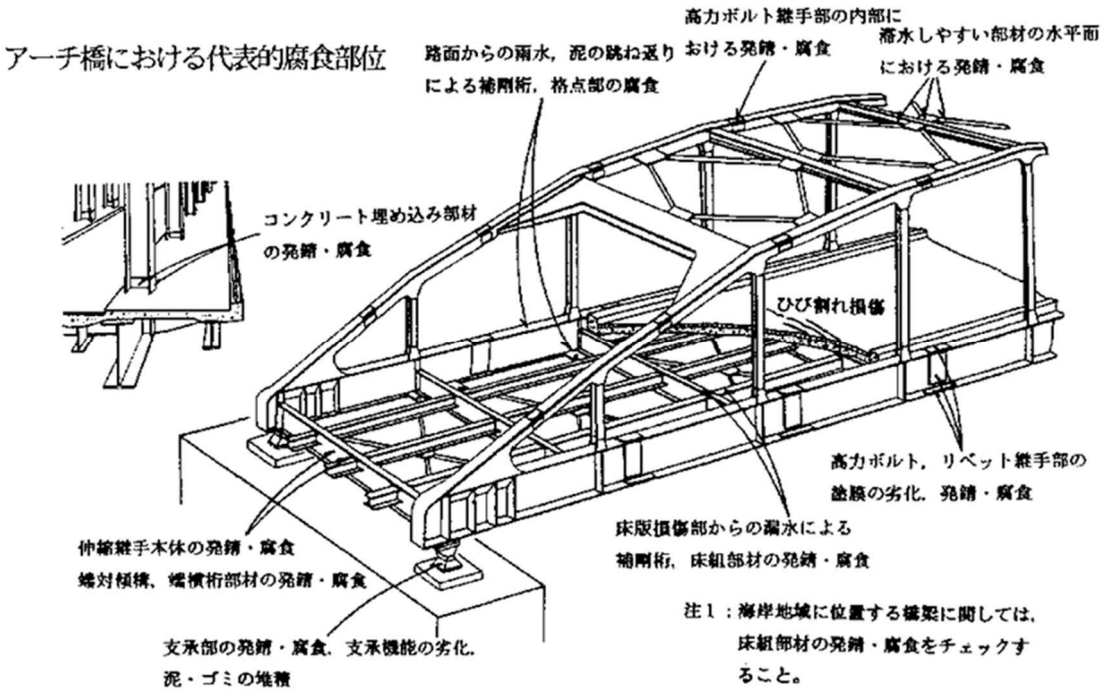
(2) 鋼橋における腐食要因の分析

鋼橋では、さなざまな自然環境（立地環境）や用途、供用条件などにより腐食性環境（腐食要因）や腐食発生部位が異なる。一般的な環境条件における代表的な鋼材腐食要因は、漏水・滞水、結露や湿気などの水分の影響によるものが最も多く、その他に飛来塩分や土砂・塵埃の堆積によるものがある。



（橋梁形式別の腐食発生原因）

出典：鋼橋の腐食事例調査とその分析、土木学会論文集 No.668/Ⅰ-54、299-311、2001.1



（アーチ橋における代表的な腐食部位）

出典：鋼橋の腐食事例調査とその分析、土木学会論文集 No.668/Ⅰ-54、299-311、2001.1

(3) 本水管橋における主な腐食要因と腐食メカニズムについて

本橋は一般的な環境条件にあり、比較的海や道路橋に近いことなどから、代表的な鋼材腐食要因として、次のような要因が考えられる。

（本水管橋において鋼材腐食要因になると考えられる事象）

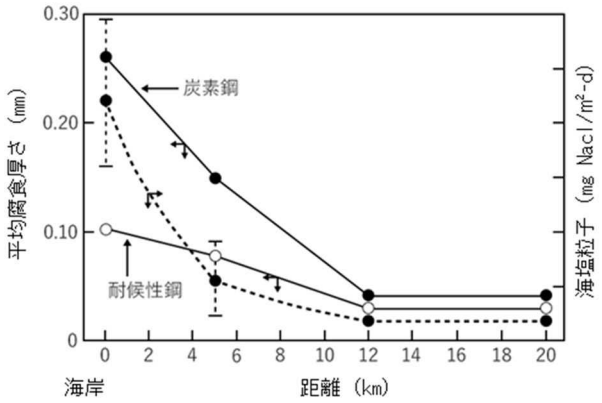
腐食要因	腐食要因であると考えられる理由
① 漏水・滞水	道路橋のように上部工の排水不良による漏水・滞水はないが、直接雨掛かりがあることや、配水管からの漏水（染出し・結露等を含む）により水分の影響で腐食（湿食）が生じる可能性がある。
② 海塩粒子の飛来	紀の川河口付近で海から比較的近いため、強風時に海塩粒子の飛来により、塩化物イオンによる塗膜劣化や鋼材腐食が促進される可能性がある。
③ 塵埃、土砂堆積	本橋は県道に近く、車の通行により路面の塵埃が巻き上げられ、鋼材に飛来することが考えられる。鋼材表面に塵埃がある程度の厚さで堆積すると、降雨時の含水状態が他の箇所よりも長く続き、腐食が進む可能性がある。
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。

【①漏水・滞水】

- 本水管橋は大気中に曝露されており、ほとんどの鋼材に直接雨掛かりがあるため、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。
- 雨掛かりにより鋼材の隙間に水が停滞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。

【② 海塩粒子の飛来（塩害）】

- 本水管橋は**比較的海に近く（約 7km 程度）**、海塩粒子が台風などの強風によって飛来し、鋼部材に付着する可能性がある。
- 塩化物は水に溶けやすく、水溶液は電解質で腐食電流の流れを大きくするため、鋼材の腐食速度が大きくなり、比較的早く鋼材腐食が進展する。
- 特に、雨で洗い流された塩分が滞水しやすい**鋼材各部（水平面、凹部、隅角部、段差部）**、部材裏面など**雨水によって流れ落ちにくい部位**で腐食が生じやすい。



（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

【③ 塵埃・土砂堆積】

- 本橋は県道 141 号線に隣接（離隔約 50m 程度）しており、通行車両によって巻き上げられた塵埃や土粒子が風によって運ばれ、鋼部材に付着・堆積する可能性がある。
- これらは、**鋼材の水平面・凹部・隅角部・段差部等**に直接、または海塩粒子のように雨で洗い流されて堆積し、降雨により含水すると**水分の停滞**により腐食を生じる。
- また、これらの塵埃・土粒子が**腐食性物質**を含んでいたり、堆積物に**バクテリア等が繁殖**する場合には、さらに腐食の危険性が高くなる。

【④ 鳥糞（ふん害）】

- 本橋は紀の川河口付近に位置するため、**水鳥や海鳥が多く飛来する環境**にある。
- 鳥糞にはアンモニアや酸などの**鋼材を腐食させる成分が含まれる**ため、広い範囲で鳥糞が堆積すると**化学的作用**により塗膜の侵食や鋼材の腐食が発生する。
- 2007 年 8 月 1 日に発生した米国のミネアポリス I-35W で発生した橋梁崩壊は、鳥のふん害が原因の一つと推定されている。

⑬ 道路橋等の腐食対策（設計段階における腐食の考慮）

【道路橋示方書・同解説 Ⅰ 共通編（平成 29 年 3 月）】

1）設計耐久期間の設定

・材料の機械的性質や力学的特性等が部材等の耐荷性能の設計における前提に適合する範囲に留まることを期待する期間である**設計耐久期間**を部材等ごとに適切に設定する。

2）経年の影響評価

・経年の影響として、**少なくとも**「鋼部材及びコンクリート部材の疲労」、**「鋼材の腐食」**、「ゴム材料の疲労及び熱、紫外線等の環境作用による劣化」については考慮する。

・経年の影響を評価し、部材等の耐荷性能における前提に適合する期間が、設計耐久期間以上となるように、部材ごとに耐久性を確保する。

3）耐久性確保の方法と照査

・設計耐久期間に対して所要の耐久性を確保するための方法として、方法 1～3 のいずれかを考慮する。

（鋼橋の耐久性確保の方法）

方法1	設計耐久期間内における材料の経年変化を前提とし、これを定量的に評価した断面とすることで、その期間内における当該部材等の耐荷性能に影響を及ぼさないようにする方法（腐食に対する耐候性鋼材の使用、腐食代の考慮等）
方法2	設計耐久期間内における材料の経年変化を前提とし、当該部材等の断面には影響を及ぼさない追加等の別途の手段を付加的に講じることで、その期間内における当該部材等の耐荷性能に影響を及ぼさないようにする方法（塗装やめっき等の被覆系防食被膜による腐食因子の遮断、電気防食による腐食現象の防止等）
方法3	設計耐久期間内において経年の影響が現れる可能性がないか、無視できるほど小さい材料とする方法（耐食性の特に優れた材料の使用等）

出典（抜粋・要約）
「道路橋示方書・同解説 Ⅰ 共通編（平成 29 年 3 月）」（p.86、p87）

【道路橋示方書・同解説 Ⅱ 鋼橋・鋼部材編（平成 29 年 3 月）】

1）耐久性能に関する部材の設計

・鋼部材は、経年的な劣化による影響（**少なくとも鋼材の腐食**及び疲労）を考慮し、必要な耐久性能を確保しなければならない。

・鋼橋を健全に維持していくためには、**適切な防せい防食の処置を講じておく必要がある。**

・耐久性に配慮した設計を行っても、様々な要因から発生を避けることができないことも考えられるため、設計においては、**適切かつ計画的な点検**と、必要に応じて懸念される損傷形態とそれらに対する補修等の方法についても検討し、**必要な維持管理が行えるように配慮**しなければならない。

2）防せい防食

・防せい防食法の選定にあたっては、環境条件や部位などを考慮して選定する。

・防せい防食では、少なくとも「**防せい防食の所定の機能が発揮されることの確実性**」、「防

せい防食の維持管理の確実性と容易さ」に配慮した構造とする（排水設計、点検・更新時の作業空間の確保、桁端部等の狭隘部における部材配置等）。

（鋼橋の代表的な防せい防食方法）

部位･部材区分	主たる防せい防食原理	機能低下形態 （予想外の劣化進行を含む）	機能喪失時の補修方法
① 塗装	塗膜による大気環境遮断	塗膜の劣化	塗替え
② 耐候性鋼材	緻密なさび層の形成による腐食速度の抑制	層状剥離さびの発生とそれに伴う断面減少	塗装等
③ 溶融亜鉛めっき	亜鉛酸化物による保護被膜及び亜鉛による犠牲防食	亜鉛層の減少	塗装等
④ 金属溶射	溶射金属の保護被膜及び溶射金属（アルミ、亜鉛棟）による犠牲防食	溶射金属層（アルミ、亜鉛等）の減少	溶射又は塗装

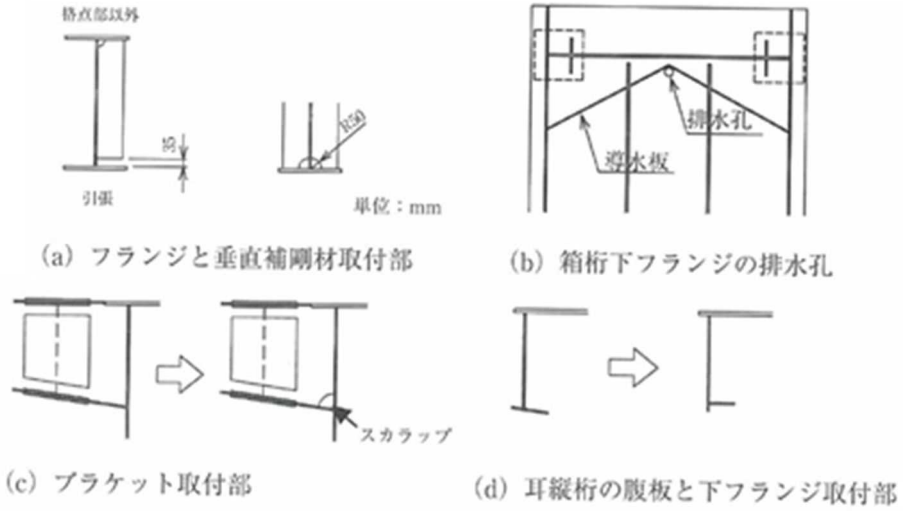
出典（抜粋・要約）
「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編（平成 29 年 3 月）」（p.141～146）

【鋼道路橋設計便覧（令和 2 年 9 月）】

1）耐久性確保のための配慮事項（腐食）

・腐食に対する耐久性を確保するためには、床板への水抜きの設置、鋼桁に直接水がかからないような排水管の設置など**水回りの処理を確実に実施**することや、水が浸入したとても**滞水が生じにくく、塵埃等が堆積しにくい構造とするのがよい。**

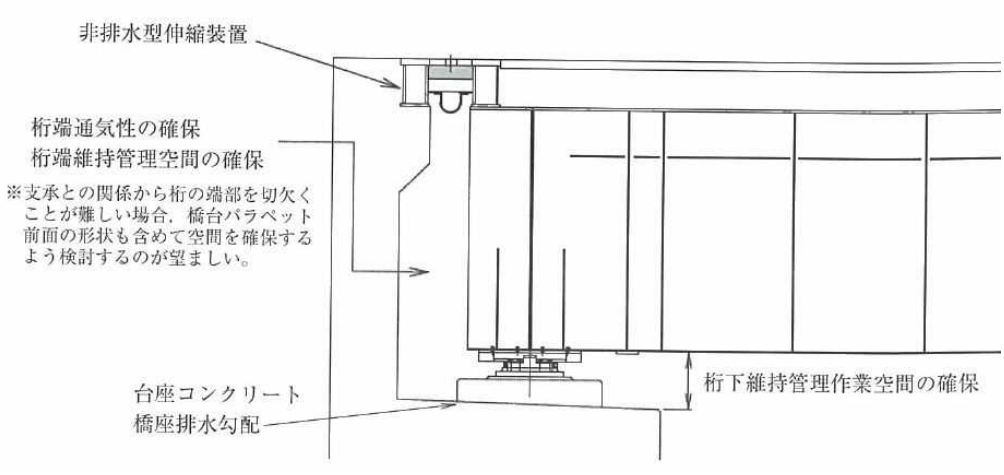
・塗装による防せい防食を行う場合は、塗装作業や塗膜厚の確保が確実に行えるよう、例えば、部材角部は **2R 以上の面取り**を行い曲面仕上げとする、**スカラップの半径を疲労上問題ない程度に大きくする等**の構造設計を行う。



（a）フランジと垂直補剛材取付部　（b）箱桁下フランジの排水孔

（c）ブラケット取付部　（d）耳縦桁の腹板と下フランジ取付部

（腐食に配慮した構造の例）



（腐食や維持管理を考慮した桁端部の構造の例）

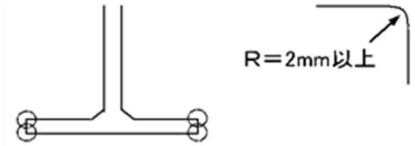
出典（抜粋・要約）
「鋼道路橋設計便覧（令和２年９月）」（p.252～253）

⑭ 防食塗装の施工上の留意点

【道路橋示方書・同解説 Ⅱ 鋼橋・鋼部材編（平成 29 年 3 月）】

・塗装の施工にあたっては、遮断性能と密着性を確保する（素地調整、下層塗膜の乾燥状態等の品質）。

・組立てた後に自由縁となる部材の部材角は被膜が薄くなりやすいため、主要部材に関わらず自由縁の面取り（半径 2mm 以上の局面仕上げ）を行うことが望ましい。



（部材角の曲面仕上げの例）

出典（抜粋・要約）
「道路橋示方書・同解説 Ⅱ 鋼橋・鋼部材編（平成 29 年 3 月）」（p.141～146）

【道路橋の部分塗替え塗装に関する研究－鋼道路橋の部分塗替え塗装要領（案）－】

1）素地調整

・素地調整は塗装の耐久性を左右する大きな要因であるため、鋼材面や塗装面を問わず、**被塗面のさび、劣化被膜、汚れ、粉化物、水等を除去**し、**適度に粗**にする素地調整の作業を確実に行う。

・素地調整はブラスト法によって**「素地調整程度 1 種」**、「除せい度 Sa2 1/2」程度に仕上げることを原則とする。

※ Sa2 1/2：拡大鏡なしで表面には目に見えるミルスケール、さび、塗膜、異物、油、グリース及び泥土がない。残存するすべての汚れは、そのこん跡が(斑)点又はすじ状のわずかな染みだけとなって認められる程度である。（JIS Z 0313：2004）

・素地調整を行う場合にさびや劣化塗膜が残存しやすい**高力ボルト接合部、部材凸部の影の部分、隅角部等**）では、機械工具を併用するなどにより確実に仕上げを行う。

・塗装作業前に素地調整が適切に行われていることを、「除せい度」のほか「鋼道路橋塗装便覧（日本道路協会）」、国際標準規格（ISO 8501-1）等の写真を参考に確認する。

（高力ボルトの仕上げの例）

出典：「鋼道路橋塗装・防食便覧（平成 17 年 12 月）」

2）塗替え塗装

・塗替え塗装は**スプレーにより塗布することを基本**とする。これにより難い場合は事前に適切な施工が行えることを確認した上ではけ塗りやローラー塗りによる施工も行うことができる。

・塗装劣化箇所が点在する場合、タッチアップ塗装は品質上好ましくないため**一定の範囲をまとめて塗替えるのが望ましい**（桁端部など風通しが悪い部分は良好な環境である範囲を含めて塗替える）。

・部分塗替え塗装では、塗膜の付着性に配慮し、弱点となる**新旧塗膜の境界部に塗り重ね部を設けて良好な品質が確保されるよう処理を行う**（適切な塗料の組み合わせが重要）。

出典（抜粋・要約）

「道路橋の部分塗替え塗装に関する研究－鋼道路橋の部分塗替え塗装要領(案)－：国土技術製作総合研究所資料 No.684（2012 年 4 月）」（p.資-7～13）

【鋼橋の維持管理－橋梁維持管理の現状と基礎技術－・既設橋における防食技術と施工留意点】

1）素地調整

・**ブラスト処理は 1 種ケレン**、除せい度は ISO Sa2～Sa2 1/2 で管理（ISO 8501 見本帳と対比）する。

・ブラストされた鋼材表面は、「戻りさび」が生じやすいため、施工時の気象条件（**相対湿度 85%以下**）や施工条件（**1 層目塗装はケレン後 4 時間以内、適切な日施工量の設定等**）の管理を行う。

・表面粗さは 80μmRzjis 以下で管理する（ISO8503 見本板との対比、触診式表面粗さ計等での測定）。

（素地調整と品質管理の例）

2）塗替え塗装

・塗装施工時の適正温度範囲は、塗料の種類に応じて適切な管理を行う。

・結露防止のため、**相対湿度 85%以上では施工を行わない。**

・露点管理を行う場合、露点計にて露点温度（気温と湿度から計算される）を計測し、塗装面（鋼材面）の表面温度との差が 3℃以上で管理される。

・被塗装面に塩分が付着していると塗膜の付着を阻害するため、**海塩ミストや凍結防止剤の影響を受ける場合は付着塩分の管理が必要**となる（管理値は 50mg/m2 以下、それ以上の場合は水洗いを行う）。

出典（抜粋・要約）

「第 23 回鋼構造基礎講座「鋼橋の維持管理－橋梁維持管理の現状と基礎技術－」既設橋における防食技術と施工留意点（2012 年 12 月 11 日）」（p.34～38）

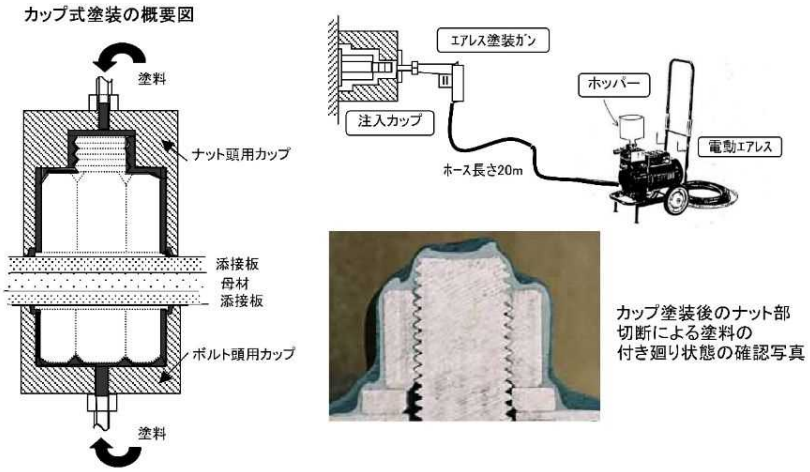
その他資料（ボルト継手部の塗装）

・継手部は、ボルト締め後、すぐにさびがでるため、**ボルト１本ごと丁寧にケレンするのが重要。**

・ボルトは長期の耐久性が求められるため、**数回塗り重ねて塗装を行う。**

出典（抜粋・要約）：施工会社ホームページ（安保塗装 株式会社）

・「鋼道路橋塗装・防食便覧（日本道路協会）」では、高力ボルト・ナットの塗装仕様に「超厚膜形エポキシ樹脂塗料」が適用されているが、材料が高粘度で施工性に劣り、薄膜部が残る可能性があるため、これを改善する方法のひとつとして、**「円筒型カップ注入方式」の塗装方式を開発した。**（※ 同様の塗装工法はいくつか開発されている）



（円筒型カップ注入方式によるボルトの塗装方法）

出典（抜粋・要約）

「連結部ボルト・ナット頭部へのカップ式塗装方法による超厚膜形塗料の適用＜円筒形カップ注入方式＞」（大日本塗料(株)・日塗エンジニアリング(株)）

⑮ 道路橋等の維持管理方法

道路橋の維持管理方法として、**「橋梁定期点検要領 平成 31 年 3 月」（国土交通省道路局）**から本水管橋に関係するものを引用する。

(1) 定期点検の目的

第三者への被害回避、落橋など長期にわたる機能不全の回避、長寿命化への対応など、橋梁の維持管理を適切に行うために必要な情報の取得することを目的とする。

(2) 定期点検の頻度

・初回点検　：**供用開始 2 年以内**

・２回目以降：**1 回/5 年以内**（環境条件、点検結果、修繕予定等により適宜設定）

(3) 対象とする損傷の種類

（対象とする損傷の種類の標準）

<table>
<tr><th colspan="3" rowspan="2">部位･部材区分</th><th colspan="3">対象とする項目（損傷の種類）</th></tr>
<tr><th>鋼</th><th>コンクリート</th><th>その他</th></tr>
<tr><td rowspan="15">上部構造</td><td colspan="2">＊ 主桁</td><td rowspan="13">①～⑤･⑩･⑬
⑱･⑳～㉓</td><td rowspan="2">⑥～⑬
⑱～㉓</td><td rowspan="13">—</td></tr>
<tr><td colspan="2">＊ 主桁ゲルバー部 ＊横桁 ＊縦桁 ＊床板</td></tr>
<tr><td colspan="2">対傾構</td><td rowspan="4">—</td></tr>
<tr><td>横構</td><td>上横構･下横構</td></tr>
<tr><td rowspan="2">主構トラス</td><td>＊ 上･下弦材 ＊斜材</td></tr>
<tr><td>＊ 垂直材 ＊橋門構 ＊格点
＊ 斜材･垂直材のコンクリート埋込部</td></tr>
<tr><td rowspan="3">アーチ</td><td rowspan="2">＊ アーチリブ ＊補剛桁
吊り材 ＊支柱 ＊橋門構 ＊格点
＊ 吊り材等のコンクリート埋込部</td><td rowspan="3">⑥～⑬
⑱～㉓</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td>ラーメン</td><td>＊ 主構(桁) ＊主構(脚)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">斜張橋</td><td>＊ 斜材 ＊塔柱</td><td></td></tr>
<tr><td>塔部水平材 塔部斜材</td></tr>
<tr><td colspan="2">＊ 外ケーブル</td><td>—</td></tr>
<tr><td colspan="2">＊ PC定着部</td><td>①･⑤･㉓</td><td>⑥～⑧･⑫
⑱～⑲･㉓</td></tr>
<tr><td colspan="2">その他</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">下部工</td><td>＊ 橋脚</td><td>柱部･壁部 梁部 隅角部･接合部</td><td>①～⑤･⑩
⑳～㉓</td><td rowspan="2">⑥～⑧･⑩
⑫･⑱～㉓</td><td rowspan="4">—</td></tr>
<tr><td>＊ 橋台</td><td>胸壁 竪壁 翼壁</td><td>—</td></tr>
<tr><td colspan="2">＊ 基礎</td><td>①･②･⑤
㉕～㉖</td><td>⑥～⑦
㉕～㉖</td></tr>
<tr><td colspan="2">その他</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">支承部</td><td colspan="2">支承本体</td><td>①～⑤･⑬･⑯
⑳～㉑･㉓～㉕</td><td>—</td><td>④･⑬･⑯･⑲～㉑
㉓～㉔</td></tr>
<tr><td colspan="2">アンカーボルト</td><td>①～⑤･㉓</td><td>—</td><td rowspan="4">—</td></tr>
<tr><td colspan="2">落橋防止システム</td><td>①～⑤･⑬
㉑～㉓</td><td>⑥～⑧･⑫～⑬
⑲･㉓～㉔</td></tr>
<tr><td colspan="2">沓座モルタル</td><td>—</td><td rowspan="2">⑥～⑦･⑫
⑳･㉓</td></tr>
<tr><td colspan="2">台座コンクリート</td><td>—</td></tr>
<tr><td colspan="2">その他</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

注：部位･部材の区分の「＊印」は、「主要部材」を示す。

【対象とする項目（損傷の種類】

① 腐食	⑥ ひび割れ	⑪ 床板ひび割れ	⑯ 支承部の機能障害	㉑ 異常な音･振動
② 亀裂	⑦ 剥離･鉄筋露出	⑫ うき	⑰ その他	㉒ 異常なたわみ
③ ゆるみ･脱落	⑧ 漏水･遊離石灰	⑬ 遊間の異常	⑱ 定着部の異常	㉓ 変形･欠損
④ 破断	⑨ 抜け落ち	⑭ 路面の凹凸	⑲ 変色･劣化	㉔ 土砂詰まり
⑤ 防食機能の劣化	⑩ 補修･･補強材の損傷	⑮ 舗装の異常	⑳ 漏水･滞水	㉕ 沈下･移動･傾斜

(4) 定期点検の方法

定期点検では、**近接目視を基本とした状態の把握**と次回定期点検までの措置方針の参考とするための**対策区分の判定**を行う。

（状態把握の標準的な方法）

材料	番号	損傷の種類	点検の標準的な方法	必要や目的に応じて採用することのできる方法の例
鋼	①	腐食	目視、ノギス、点検ハンマー	超音波板厚計による板厚計測
	②	亀裂	目視	磁粉探傷試験、超音波探傷試験、過流探傷試験、浸透探傷試験
	③	ゆるみ・脱落	目視、点検ハンマー	ボルトヘッドマークの確認、打音検査、緒音波探傷試験（F11T等）、軸力計を使用した調査
	④	破断	目視、点検ハンマー	打音検査（ボルト）
	⑤	防食機能の劣化	目視	写真撮影（画像解析による調査）、インピーダンス測定、膜厚測定、付着性試験
コンクリート	⑥	ひびわれ	目視。クラックゲージ	写真撮影（画像解析による調査）
	⑦	剥離・鉄筋露出	目視、点検ハンマー	写真撮影（画像解析による調査）、打音調査
	⑧	漏水・遊離石灰	目視	
	⑨	抜け落ち	目視	—
	⑪	床板ひびわれ	目視、クラックゲージ	写真撮影（画像解析による調査）
	⑫	うき	目視、点検ハンマー	打音検査、赤外線調査
その他	⑬	遊間の異常	目視、コンベックス	—
	⑭	路面の凹凸	目視、コンベックス、ポール	—
	⑮	舗装の異常	目視、コンベックス又はクラックゲージ	—
	⑯	支承部の機能障害	目視	移動量測定
	⑰	その他		—
共通	⑩	補修・補強材の損傷	目視、点検ハンマー	打音検査、赤外線調査
	⑱	定着部の異常	目視、点検ハンマー、クラックゲージ	打音検査、赤外線調査
	⑲	変色・劣化	目視	—
	⑳	漏水・滞水	目視	赤外線調査
	㉑	異常な音・振動	聴覚、目視	—
	㉒	異常なたわみ	目視	測量
	㉓	変形・欠損	目視、水糸、コンベックス	—
	㉔	土砂詰まり	目視	—
	㉕	沈下・移動・傾斜	目視、水糸、コンベックス	測量
	㉖	洗堀	目視、ポール	カラーイメージングソナー、水中カメラ

(5) 対策区分の判定・健全度診断

・定期点検では、橋梁の損傷状況を把握したうえで、**構造上の部材区**分または**部位毎**、損**傷種類毎**の対策区分の判定を行う。

・対策区分の判定結果により、**構造上の部材区分**または**部位毎**、**損傷種類毎**に健全性の診断を行う。

（対策区分の判定区分）

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やか補修を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S1	詳細調査の必要がある。
S2	追跡調査の必要がある。

※「道路橋点検要領、平成 31 年 2 月」（p.21）表-6.1.1 対策区分の判定区分より転記

（健全性の診断（判定区分）と対策区分の判定との対応）

区分		状態	対策区分の判定との対応
Ⅰ	健全	道路橋の機能に支障が生じていない状態	判定区分 A、B
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。	判定区分 C1、M
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。	判定区分 C2
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。	判定区分 E1、E2

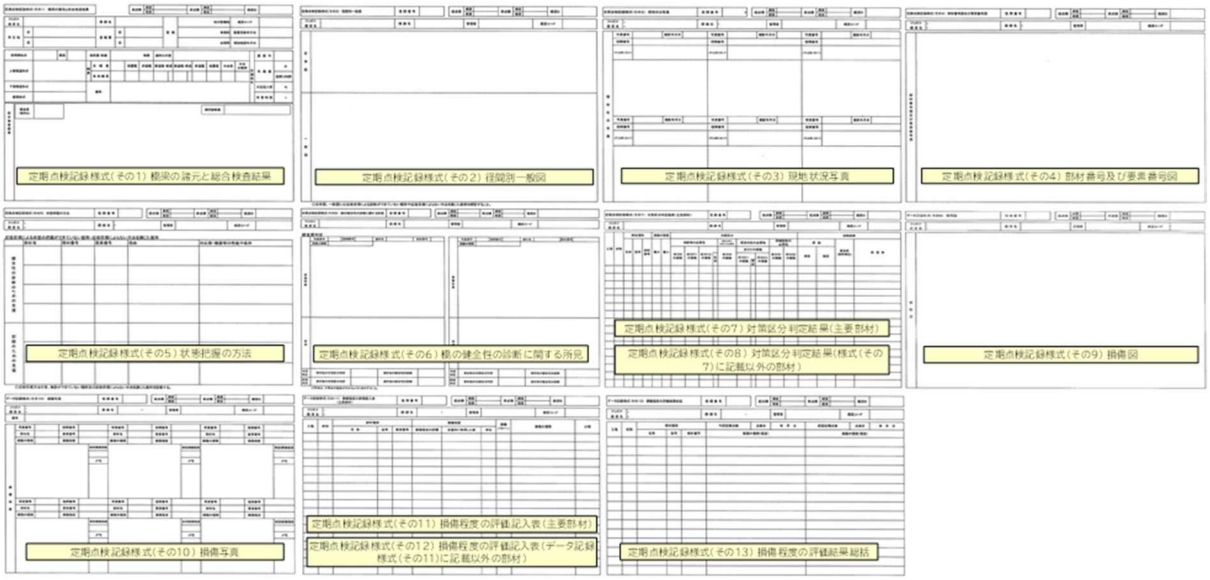
※「道路橋点検要領、平成 31 年 2 月」（p.27）表-7.1 判定区分と本文中の説明より作成

（6） 定期点検の記録

・定期点検で行った健全性の診断の記録は、適切な方法で記録・蓄積しておかなければならない（基本的に、点検の記録は「定期点検記入要領」にもとづき、**点検台帳の様式にて整理・保管**する）。

・損傷評価の程度は、橋梁各部の**外観の状態を客観的かつ記号化して記録**する。

（定期点検要領の台帳記録様式）



出典（抜粋・要約）:「橋梁定期点検要領 平成 31 年 3 月」（国土交通省 道路局 国道・技術課）

⑯ 水道施設耐震工法指針・解説の改定動向

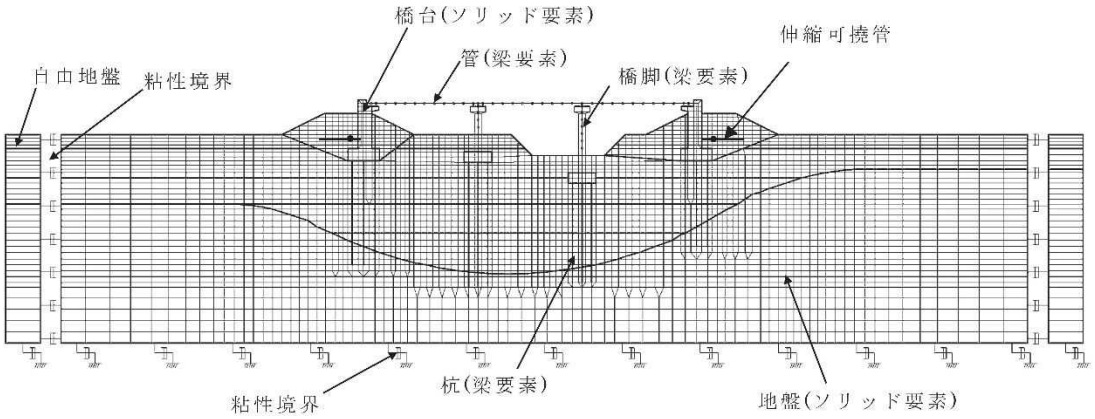
（1） 改定方針

水管橋の耐震計算と性能照査は、従来の道路橋示方書の規定を準拠してきた経緯を継続し下記とする。水路橋はこの水管橋の耐震計算と性能照査を参考に設計。

- **H29 の道路橋示方書の改定に伴い限界状態設計法と部分係数設計法を導入**
- **阪神・淡路大震災より後に発生した地震被害事例調査から留意点を追記**
- **付帯構造物（空気弁の設置方法）についての留意点**

（2） 耐震計算方法

- **動的解析を標準**とするが静的解析が適用可能な場合を記述
- 動的解析は**構造物と地盤一体型の地盤連成系モデルを標準**



（水管橋の動的解析モデル図の例）

水管橋は道路橋と類似した構造物であり、その耐震設計は道路橋示方書に準じた設計となるが、同じ支間長でも上部構造重量は道路橋と比べて格段に小さく、橋軸直角方向の剛性が低い。また、**地盤の変位の影響を受けやすい軟弱地盤に設置する水管橋や長大スパンの水管橋は、地盤の変位応答が支配的になる**場合がある。設計に当たっては、このような点に十分に配慮することが必要である。以下に、静的解析によることができると考えられる水管橋の形式を示す。

① パイプビーム形式水管橋
② フランジ補剛形式水管橋
③ トラス補剛形式水管橋

上記の①から③いずれにも該当しない場合、**液状化の可能性がある地盤などの地盤変位が大きい場合の水管橋、又は地震時の挙動が複雑である形式の水管橋は、動的解析が必要**と考えられる。

（3） 落橋防止システム

落橋防止システム(落橋防止構造、横変位拘束構造)、伸縮可撓管の性能照査においては、下記 1.

から 3. を満足することを照査する。

1. 落橋防止構造及び横変位拘束構造の照査は、支点に掛かる鉛直反力に対する慣性力に対し安全率を考慮した荷重を作用させて発生する断面力が各構造の耐力以下となることを照査する。
2. 落橋防止構造の移動可能量としては、漏水を防止させるために設ける伸縮可撓管の最大移動量を考慮するものとし、地震時の伸縮可撓管の最大移動量は、伸縮可撓管の許容伸縮量を超えないものとする。
3. 伸縮可撓管の許容伸縮量は、温度変化、橋脚橋台変位、地盤歪み、設置誤差、たわみによる移動量、余裕量を適切に組み合わせて設定する。**地震時の地盤の変位については、可動支承側の伸縮可撓管で吸収させることを原則**とするが、長大スパンの水管橋などで、可動支承側の移動量が過度に大きくなる場合は、固定側の伸縮可撓管と連成して吸収する構造としてもよい。なお、挙動が複雑な水管橋については、動的解析によりその挙動を把握し、最大移動量を適切に設定する。

(4) 水管橋の性能を確保するための対策

1. 供用期間中において、水管橋の耐震性を維持するためには、適切な対策と維持管理を行う。
2. 水管橋本体の耐震設計の他に、水管橋の橋台、橋脚間の変位を制限する対策等が必要な場合は、適切な対策を行う。
3. 付帯構造物についても、通水機能を損なわないよう、耐震対策を行う。
4. 「危機耐性」に規定する危機耐性対応として、可能な限りの対策を行う。

〔説　明〕

1.　について

供用期間中に水管橋の要求性能を維持するためには、水管橋の劣化が進行しないよう適切な対応と維持管理が必要である。水管橋鋼材の材質については、設置環境に合った塗装仕様又はステンレス鋼材を使用するなど設計時点で可能な対策を講じる必要がある。また、定期的に点検を行うことも重要であり、早期に補修を継続することで、延命させることができる。特に管の内面については、内面塗装ができない鋼管溶接部には、ステンレスの開先を付けた鋼管を使用する等の腐食防止策が重要である。定期的な点検計画は「水道維持管理指針」、「露出鋼管（水管橋等）～外面塗装劣化診断評価の手引き～（公社　日本水道協会、日本水道鋼管協会）」を参考にするとよい。

2.　について

水管橋の設置する環境条件によっては、水管橋本体以外の箇所で対策を講じる必要がある場合は適切な対策を行う。**特に地震時に液状化するような地盤では、液状化により、左岸、右岸の橋台間、橋脚間の変位が大きくなり、通常の伸縮可撓管では対応しきれないような変位の発生することが想定されるときは、液状化防止対策（地盤改良等）を行うことのほうが得策となる**場合もある。

3. について

水管橋の付帯構造物は主に空気弁であるが、過去の被害事例からは空気弁からの漏水被害が多くみられ、これらの対策も必要である。**空気弁は、空気弁箇所に発生する慣性力の低減を目的に、比較的荷重の軽い急速空気弁等を採用することの他に、接続するフランジ管の長さを極力短くすることで対応する。**なお、フランジのタイプは止水性の高い GF フランジを標準とするとともに、補強金物の取り付けを考慮する。

4. について

基本方針 3.1.7 危機耐性に示す、性能照査規定で定義した事象を超える地震動・津波などにより水道施設の「安全性」が損なわれた場合に、水道施設が危機的な状況に至る可能性を小さくする性能「危機耐性」を考慮することを受け、水管橋における「危機耐性」に対する方策を考えた場合、水道システムとしての重要な管路は、管路系統の多重性(複数系統化、バックアップ体制)を考慮し、管路系統の計画をすることになる。本指針での「危機耐性」に対する方策としては、水管橋単体で講じる方策について考慮する。特に、落橋防止システムを設置することは、支承が損傷した場合に、伸縮可撓管部からの漏水防止と支承部の橋台及び橋脚からの脱落防止を目的に、フェイルセーフ機能として有効である。

（水管橋における被害シナリオと危機耐性の考慮）

<table>
<tr><th colspan="2">想定外事象場面</th><th>性能維持方策</th></tr>
<tr><td rowspan="3">風水害</td><td>河川堤防の決壊</td><td rowspan="3">【大規模】
複数系統化、バックアップ体制
【小規模】
・落橋防止装置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堀防止対策
・衝突荷重の考慮</td></tr>
<tr><td>橋台、橋脚の洗掘による沈下</td></tr>
<tr><td>流木などの衝突</td></tr>
<tr><td rowspan="7">地震・津波</td><td>ウォーターハンマ対策</td><td>空気弁類の水撃圧を考慮した選定</td></tr>
<tr><td>液状化による橋台・橋脚の沈下</td><td>液状化防止対策（地盤改良など）</td></tr>
<tr><td>津波対策</td><td>想定津波水深より高い位置に水管橋を設置</td></tr>
<tr><td>想定外のゆれ</td><td>落橋防止装置の設置による大規模変形・大規模漏水・落橋防止</td></tr>
<tr><td>連続地震動</td><td>落橋防止装置の設置による大規模変形・大規模漏水・落橋防止</td></tr>
<tr><td>地盤の断層変形</td><td>断層変形の恐れのある場所には
極力水管橋は設置しない
どうしても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行う。</td></tr>
<tr><td>堤防周辺の地滑り</td><td>山間部などの橋台背面が地滑りにより、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つける。</td></tr>
</table>

⑰ 紀の川大堰の設置による周辺環境の変化

本水管橋の下流側には紀の川大堰が設置されており、水環境や水生生物の生態系の変化等により、本水管橋に飛来するカワウの生息数にも影響を与える可能性が考えられるため、「紀の川大堰定期報告書（案）概要版 平成 27 年 2 月 16 日」（近畿地方整備局）を参考に、紀の川大堰の設置と本水管橋との関係や、周辺への影響を調査する。

（1） 紀の川大堰の概要

紀の川大堰は、本水管橋の下流側に位置しており、本水管橋の完成（昭和 48 年）よりも後に着工されている。平成 23 年 3 月に建設事業が完了し、同年 4 月から本格運用が開始された。

建設事業の主な内容の中には人工ワンドや干潟の造成、魚道の整備などが深まれており、周辺の生態系環境の改善にも資するものであると考えられ、カワウの餌となる魚類も多く生息するようになったと推測される。

1.2 紀の川大堰の概要

近畿地方整備局

■ 目的

○治　水：
紀の川に可動堰を設置することにより、河道掘削とあいまって、堰設置地点における戦後最大規模の洪水を安全に流下させるための必要な河道を確保し、洪水の疎通能力の増大を図る。

○流水の正常な機能の維持：
既得用水の取水位の確保等、流水の正常な機能の維持と増進を図る。

■ 諸元

○位置：和歌山県和歌山市（河口より約6.2km）
○形式：可動堰
○堰敷高：T.P.−3.00m
○扉高：7.1m
○総延長：542m（うち可動部369m）
○放流設備：主ゲート5門
流量調節ゲート2門
○集水面積：1,620km²
○湛水面積：2.4km²
○総貯水容量：290万㎥
○有効貯水容量：170万㎥

取り組み

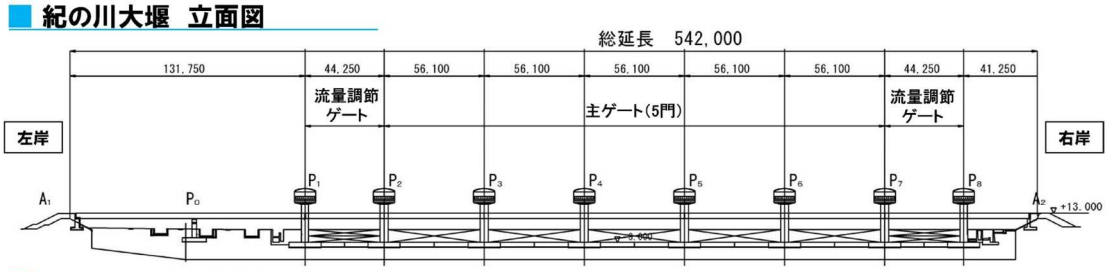
○新六ケ井堰の可動堰への改築
○戦後最大流量に対応する河道掘削
○既得用水の取水位の確保
○既得用水の安定取水容量の確保
○魚道が機能する維持流量の確保
○多様な魚類等に対応する魚道整備

出典：紀の川大堰定期報告書（案）概要版，平成 27 年 2 月 16 日，近畿地方整備局，p.7

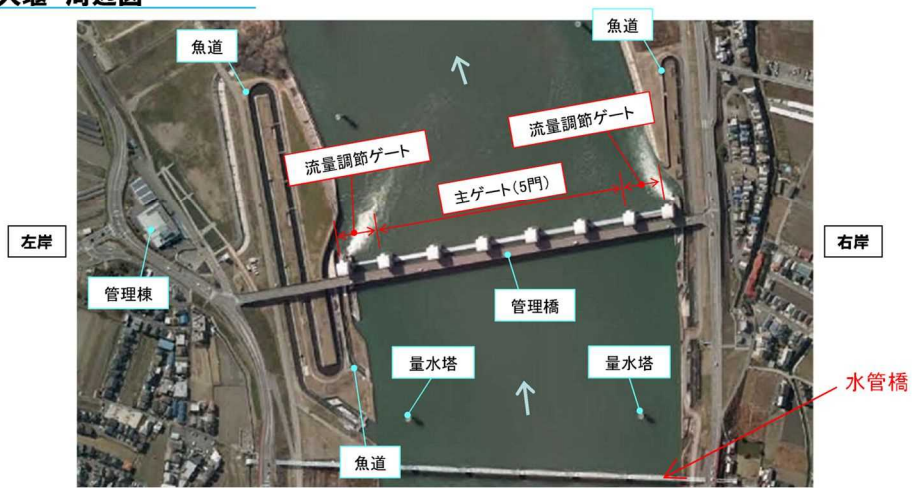
1.2 紀の川大堰の概要

近畿地方整備局

■ 紀の川大堰　立面図



■ 紀の川大堰　周辺図



出典：紀の川大堰定期報告書（案）概要版，平成 27 年 2 月 16 日，近畿地方整備局，p.8

1.3 紀の川大堰建設事業の概要

近畿地方整備局

■ 建設事業の主な実施内容

○新六ヶ井堰の部分撤去

洪水の疎通の障害となっている新六ケ井堰の標高0m以上の部分を撤去。

○河道掘削

戦後最大洪水を安全に流下させるために、阪和自動車道付近から新六ケ井堰の区間で河道を掘削。

○JR阪和線橋梁の架替

河道掘削により、既設のJR橋梁への影響が生じるため、新設橋梁に架替。

○人工ワンド・干潟の造成

大堰建設によって消失する干潟環境や既存のワンドの代償として、人工的にワンドや干潟を造成。

○魚道の整備

魚類等の縦断的な移動経路を確保するため、様々な魚類に対応した3種類の魚道を左右岸に設置。

○六十谷取水施設の改築

大堰の運用によって既存の取水施設に対して影響が生じるため、取水施設を改築。

出典：紀の川大堰定期報告書（案）概要版，平成 27 年 2 月 16 日，近畿地方整備局，p.9

1.3 紀の川大堰建設事業の概要

近畿地方整備局

■ 建設事業の経緯

年 月	事 業 内 容
昭和34年9月	伊勢湾台風 （紀の川大堰建設の契機となる）
昭和40年4月	紀の川水系工事実施基本計画策定
昭和46年4月	予備調査開始
昭和49年4月	紀の川水系工事実施基本計画全面改定 （新六ケ井堰の改築を位置づけ）
昭和53年4月	実施計画調査開始
昭和62年4月	建設事業着手
平成10年3月	直川地区人工ワンド完成
平成15年3月	堰本体工事完成
平成15年6月	試験湛水開始・堰暫定運用開始
平成19年12月	六十谷取水施設改築工事完成
平成20年3月	小豆島地区掘削工事完成
平成20年7月	新六ヶ井堰部分撤去工事完成
平成21年3月	JR阪和線橋梁架替工事完成
平成23年3月	河道掘削工事完成
平成23年3月	堰建設事業完了
平成23年4月	本格運用開始

水管橋設備 →

★

出典：紀の川大堰定期報告書（案）概要版，平成 27 年 2 月 16 日，近畿地方整備局，p.9

5.7 水質のまとめ

近畿地方整備局

■ まとめ

- ○ 大腸菌群数以外の項目は、本格運用開始後は概ね環境基準を満たしている。
- ★○ 水質の経年変化は、暫定運用開始前と本格運用開始後を比べると、概ね同等、または良好な水質を示している。
- ○ 放流水のBOD、T-N、T-Pは、流入水より若干高い値を示している。
- ★○ 湛水域では、水温、DO、濁度の躍層は形成されていない。また、クロロフィルa濃度や植物プランクトン細胞数は変動が大きいが、堰上流の湛水域化による水質障害は生じていない。
- ○ 堰下流では、水温、DOは上層と下層で概ね同程度の値を示している。
- ○ 堰下流の塩分濃度は、大堰暫定運用開始前後ともに弱混合型を示している。
- ○ 底質は、洪水の影響等によって年変動が大きく、大規模な出水後には、粒度組成は砂分の占める割合が高まり、濃度は低下する傾向を示す。

【今後の方針】

- ○ 今後も水質調査を継続し、水質の監視に努める。

出典：紀の川大堰定期報告書（案）概要版，平成 27 年 2 月 16 日，近畿地方整備局，p.49

6.3 生物の生息・生育状況の変化の検証【鳥類】

近畿地方整備局

■ 調査実施地区

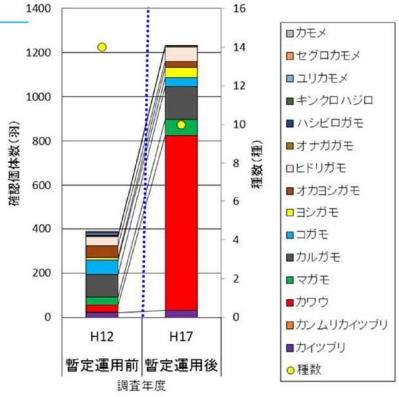
紀の川大堰～川辺橋
（湛水域）

■ 調査結果

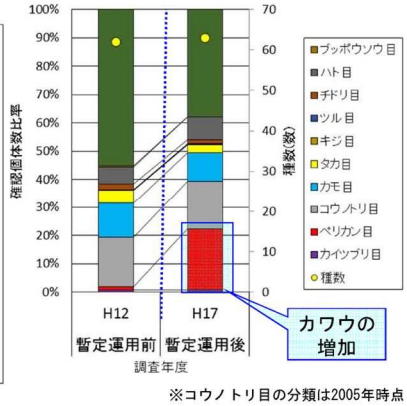
○ 新六ヶ井堰当時の湛水域から、カモ類など水面を利用する鳥類の継続的な利用がされている。

★○ カワウ（ペリカン目）が増加しているが、平成17年度の河川水辺の国勢調査総括資料によると、これは全国的な傾向とある。

★○ カワウ以外の鳥類については、大堰暫定運用開始前後で種構成、個体数等に著しい変化は認められなかった。



★ 水鳥確認状況の経年変化（湛水域）



※コウノトリ目の分類は2005年時点

★ 鳥類の種構成の経年変化（湛水域）

出典：紀の川大堰定期報告書（案）概要版，平成 27 年 2 月 16 日，近畿地方整備局，p.58

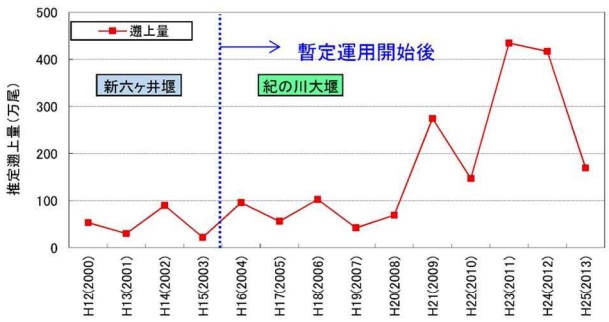
6.6 環境保全対策の効果の評価

近畿地方整備局

■ 魚道の効果の評価①

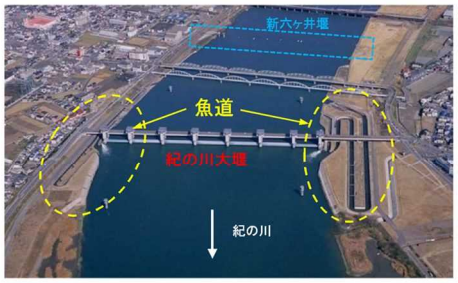
○ 調査結果（アユの遡上）

暫定運用開始以降は、多様な魚道の整備によって、増減はあるもののアユの魚道遡上数が増加している。



★ 暫定運用開始前後のアユ遡上実績

※平成15年度以前の調査は新六ヶ井堰魚道での実施



※新六ヶ井堰の魚道は勾配や落差が大きく、水量が少ない時期には魚道として十分に機能しなかったため、「すくいごし」等により遡上を助けていた。

出典：紀の川大堰定期報告書（案）概要版，平成 27 年 2 月 16 日，近畿地方整備局，p.65

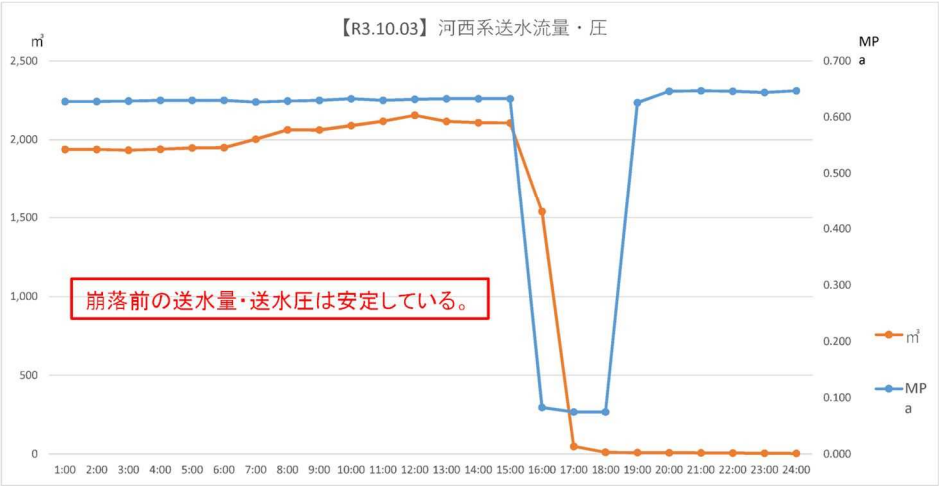
⑱ 送水量の変化

破損事故が発生した 10 月 3 日の日報や監視システムデータにより、送水管の送水量や送水圧による破損の可能性を検証する。1 時間単位で記録した日報では、崩落前の送水量と送水圧は安定しており、さらに、それらをリアルタイムで監視しているシステムデータにおいても、崩落直前まで送水量や送水圧は安定しており、ウォーターハンマー等の影響はみられなかった。

日報　送水本管圧力、送水量　10月3日

2021年10月 3日(日)

時刻	河西系 送水本管圧力	河西系 送水量
時刻	MPa	㎥
1:00	0.628	1,939
2:00	0.628	1,939
3:00	0.629	1,933
4:00	0.630	1,940
5:00	0.630	1,948
6:00	0.630	1,950
7:00	0.627	2,003
8:00	0.629	2,063
9:00	0.630	2,062
10:00	0.633	2,090
11:00	0.630	2,117
12:00	0.632	2,155
13:00	0.633	2,116
14:00	0.633	2,108
15:00	0.633	2,106
16:00	0.083	1,539
17:00	0.075	50
18:00	0.075	13
19:00	0.626	11
20:00	0.646	10
21:00	0.647	9
22:00	0.646	7
23:00	0.644	6
24:00	0.647	5

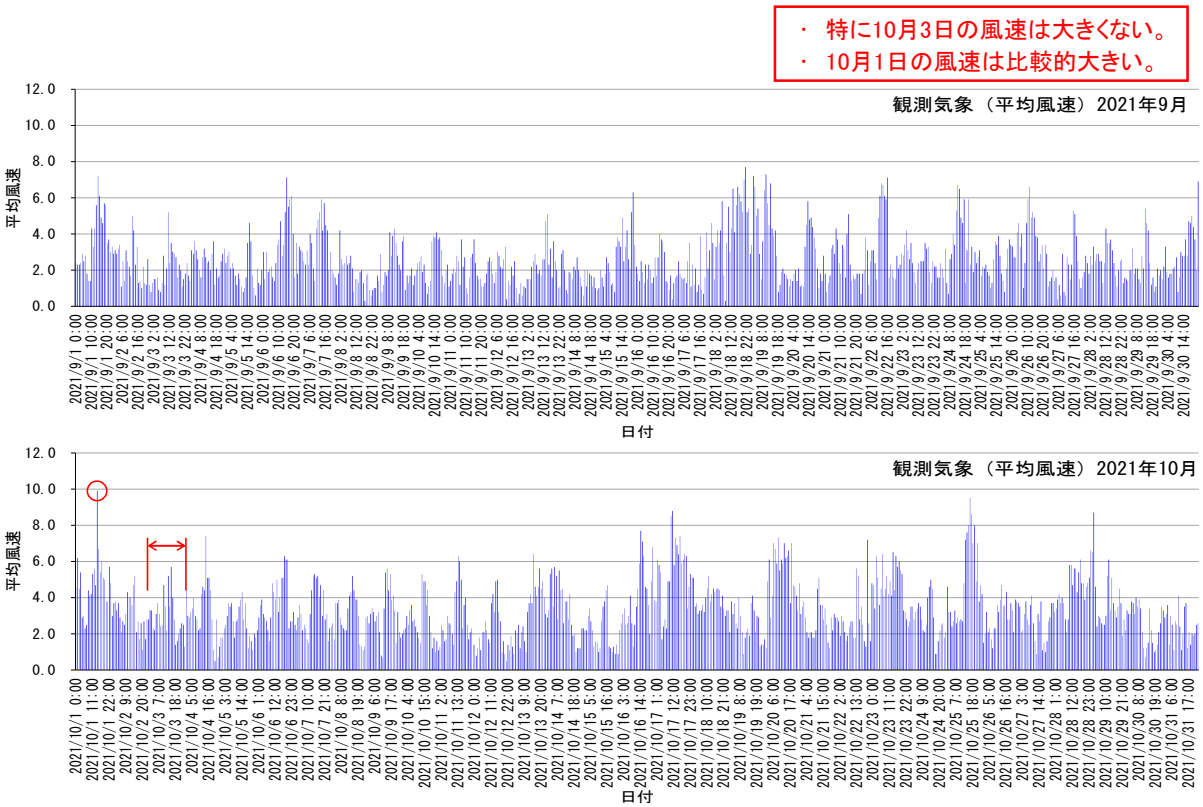


（日報による送水量と送水圧力の経時変化：1 時間毎）

（監視システムによる崩落発生時の送水量と送水圧力の経時変化）

⑲ 風の強さの影響

気象観測データにより、破損事故が発生した 10 月 3 日から一定期間（約 1 ヶ月）遡って風の影響により破損が生じた可能性を検証する。本水管橋付近の平均風速は、崩落前の 10 月 1 日において比較的大きい風速が一時的に観測されたものの、その後の崩落が発生した 10 月 3 日までは、特に大きくはないことが確認された。



（2021 年 9 月～10 月の平均風速）

⑳ 大変形有限要素解析インプット・データ

（1）主な解析条件および解析モデル

有限要素法解析コードおよび解析条件、材料特性を下表に、非線形特性および解析モデルを下図に示す。

解析モデルは、通水管およびアーチリブは 3 次元シェル要素に、桁、横構および吊材とその補強ﾌﾞﾚｰｽは 3 次元フレームにモデル化し、空気弁部の通水管形状も正確にシェル要素にモデル化する。

本文に示した CASE1~CASE5 のモデルは、吊材の有無の違いだけのため、ここでは、CASE1 の吊材健全モデルに関してその概要を示す。

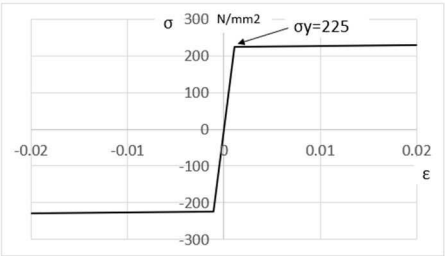
解析節点数は 38025、要素数は 38034 で、固定支承部はピン支持、可動支承部は水平ローラー支持と、吊材破断に伴う衝撃力は考慮せず静的荷重として取り扱う。

（　解析条件　）

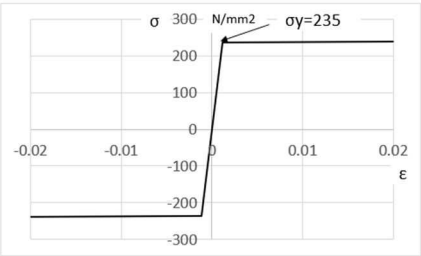
解析コード	汎用有限要素解析ソフト　NX-NASTRAN	
非線形性	アーチリブ・水道管（空気弁を含む）・吊材・横構・横桁	シェル要素、幾何学的・材料非線形考慮
	吊材水平材・アーチリブ横構	梁要素、幾何学的非線形考慮、材料線形
非線形構成則	バイ・リニア	

（　材料特性　）

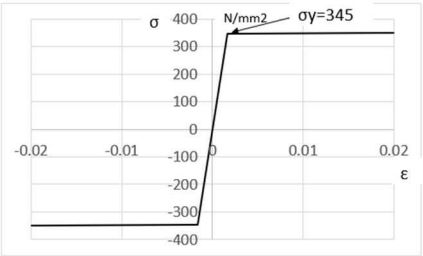
材　　料		弾性係数(N/mm2)	降伏点(N/mm2)
水道本管	STPY400	205000	225
アーチリブ・横構・吊材	STK400		235
吊材補強ブレース材	SD345		345



通水管

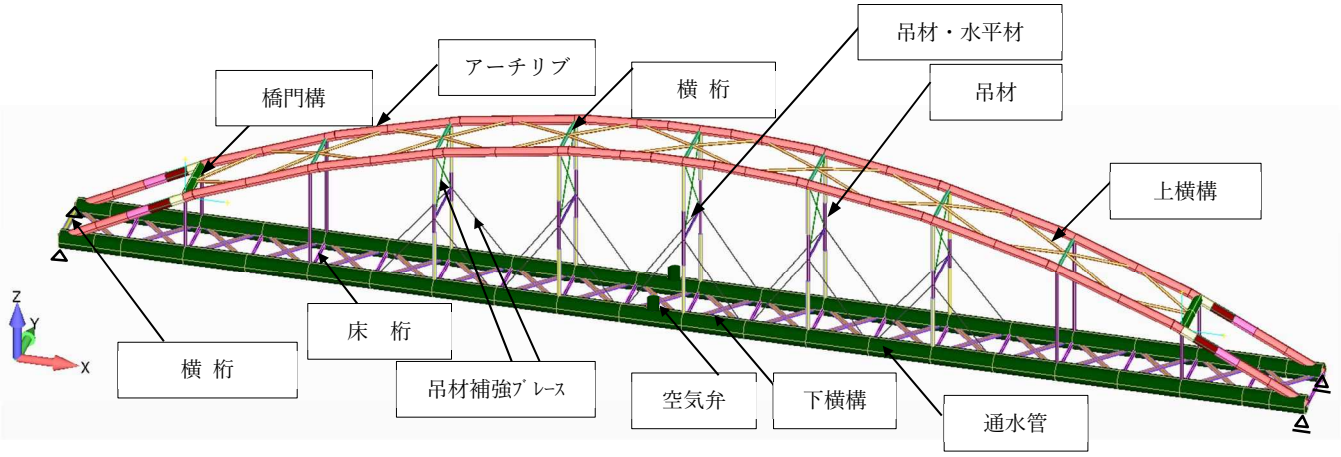


アーチリブ・横構・吊材



吊材補強ﾌﾞﾚｰｽ材

（　非線形特性　）

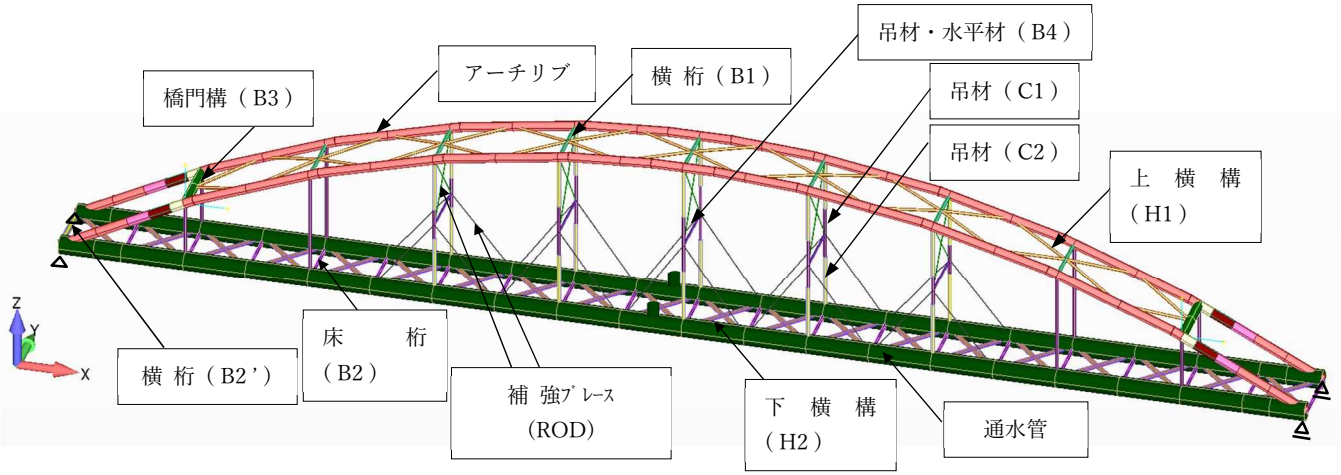


（ 解析モデル ）

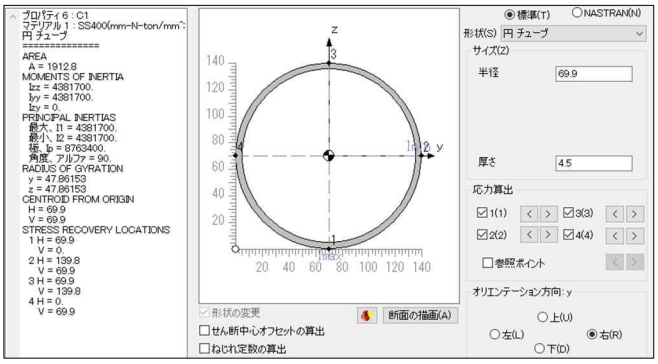
(2) 部材の断面性能

3 次元フレームにモデル化した各部材の断面性能を下図に示す。

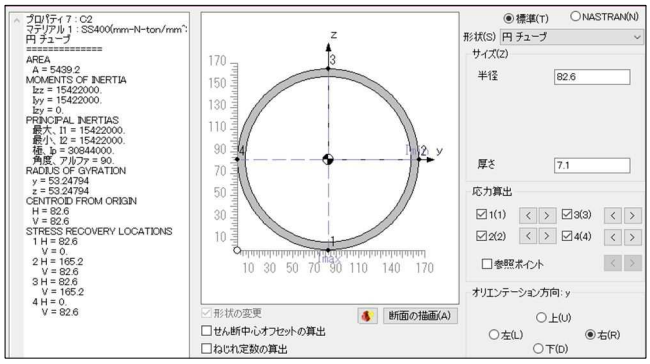
なお、アーチリブ、通水管および空気弁は、3 次元シェル要素で直接モデル化している。



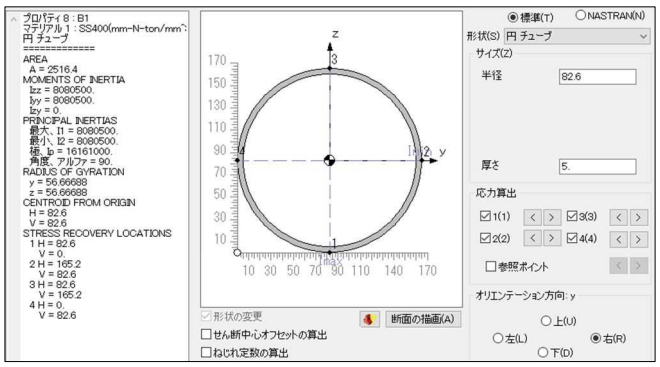
（ 解析モデル ）



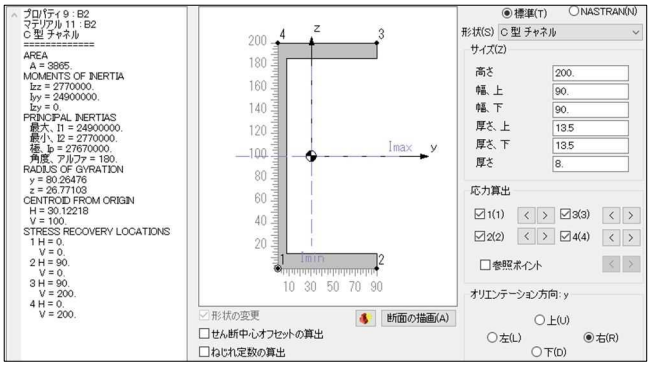
吊 材



吊 材

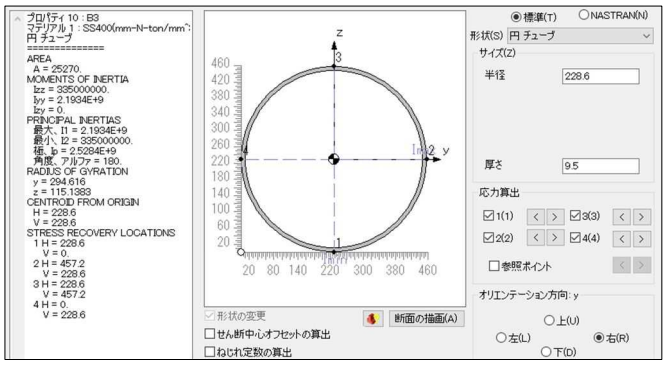


横 桁

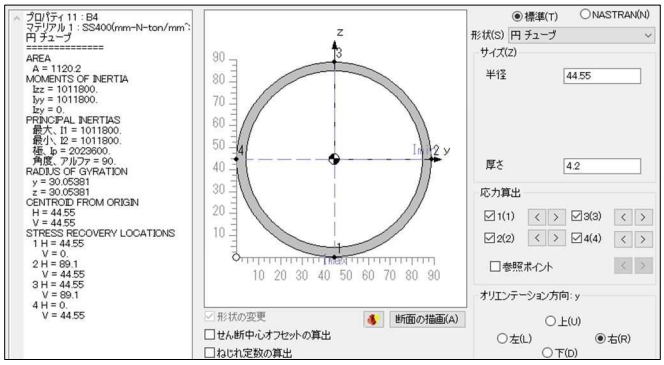


床 桁

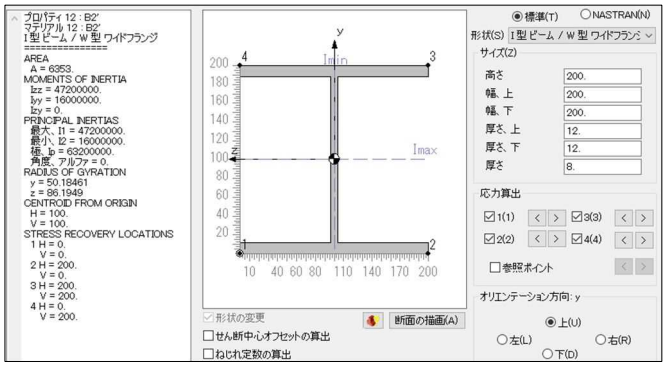
（ 断面性能 ）



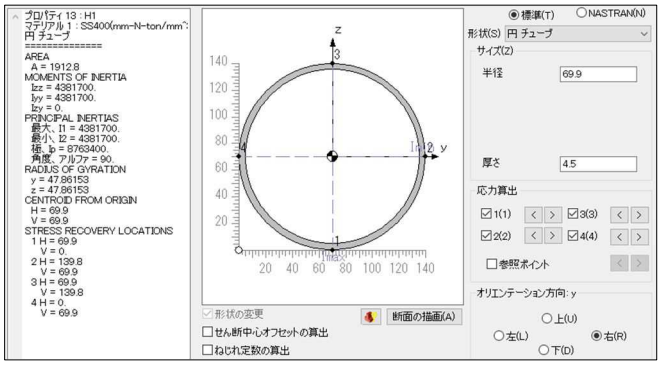
橋門構



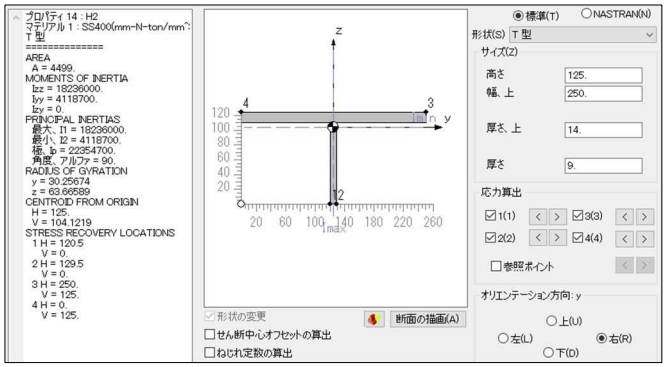
吊 材 ・ 水 平 材



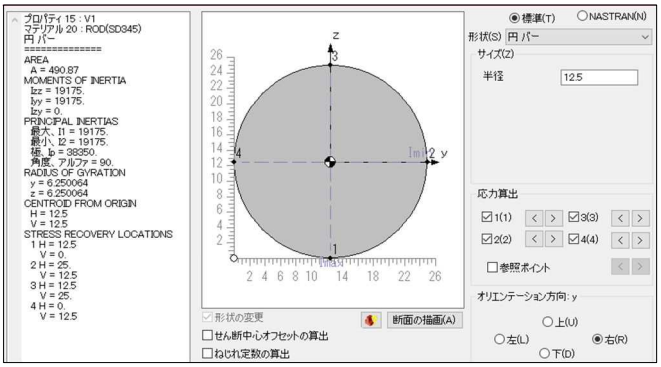
横 桁 (B2 ')



上 横 構



下 横 構

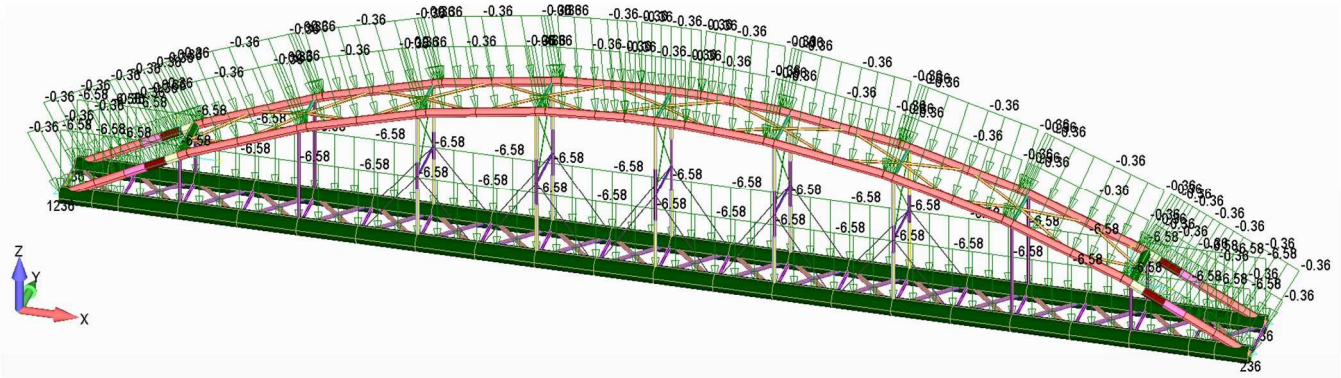


補 強ﾌﾞﾚｰｽ

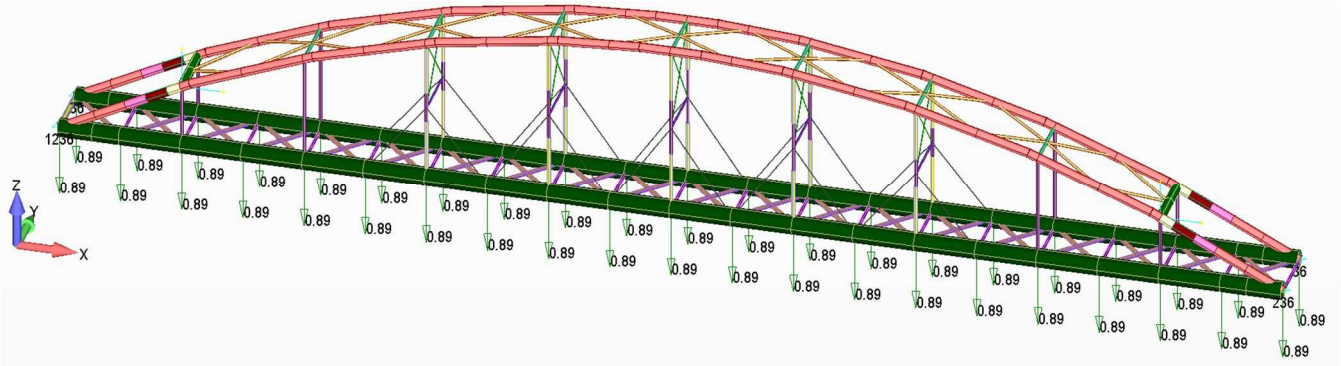
(断面性能)

(3) 作用荷重

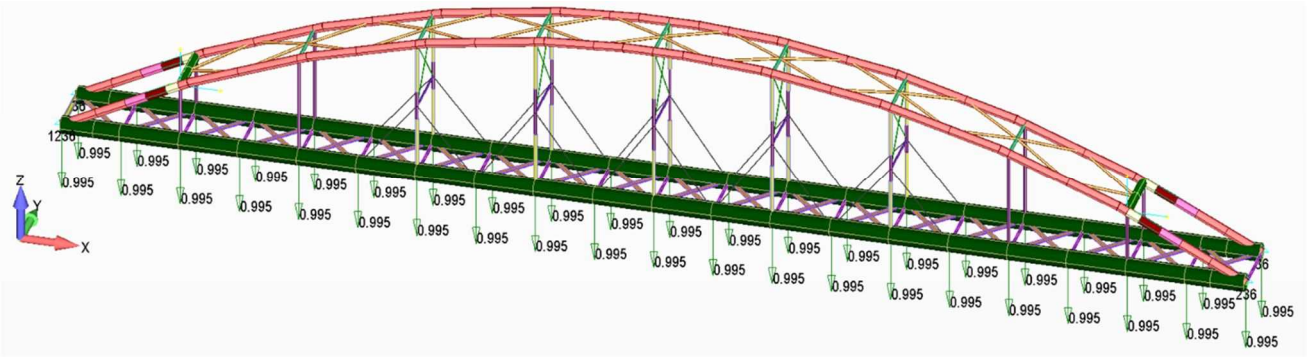
３次元フレームに作用させる線荷重を下図に示す。なお、３次元フレームおよびシェル要素の死荷重は鋼材の密度に重力加速度を作用させることとする。



（　通水管内水重量ほか　）



（　歩廊荷重　）



（　排水管荷重　）