

# 上関大橋復旧検討会議 (第4回)

---



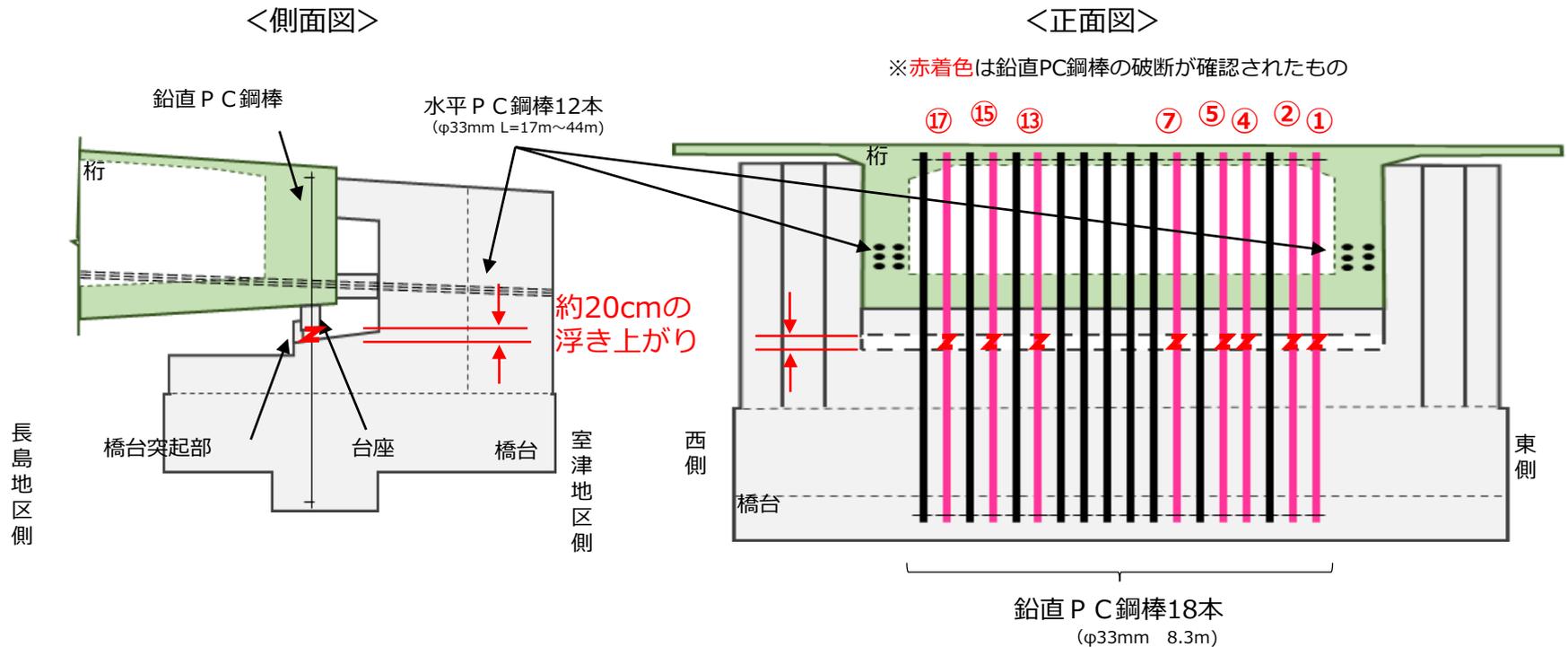
# (1) 損傷原因について

---



## 鉛直 P C 鋼棒の損傷について

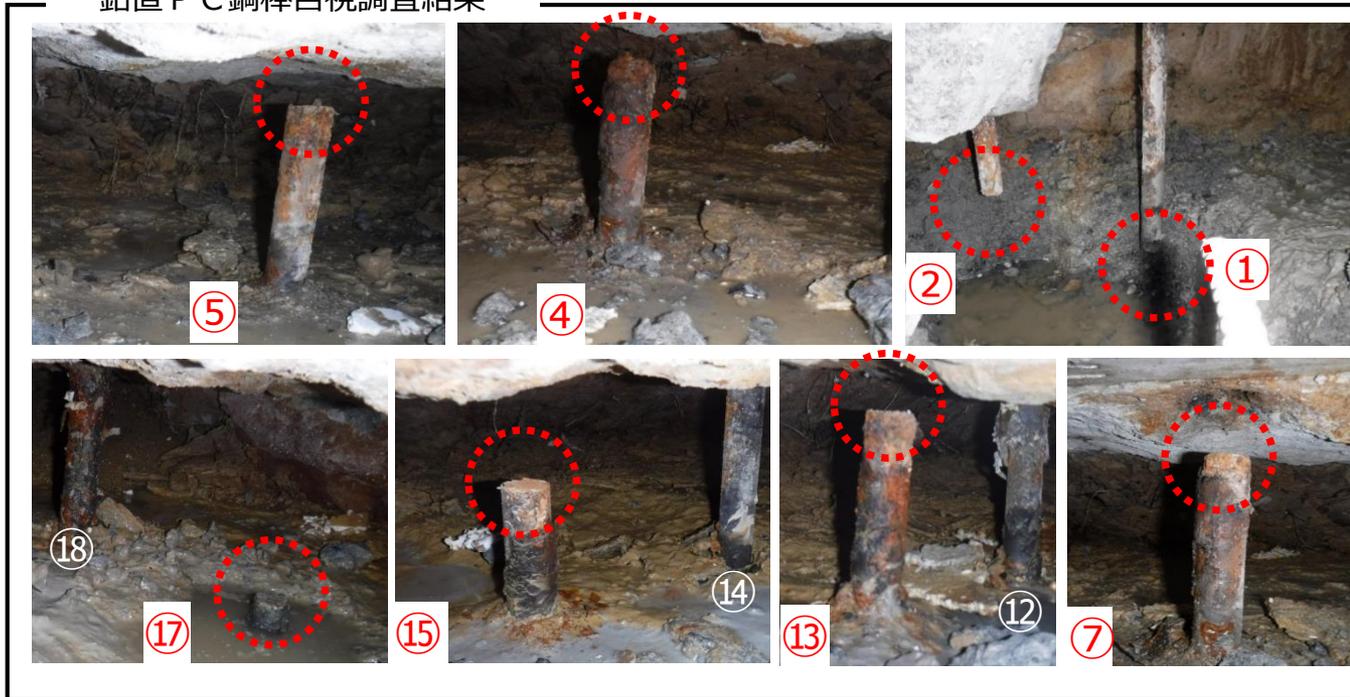
- ・ 調査の結果、鉛直 P C 鋼棒全18本のうち、8本の破断を確認。



## 鉛直 P C 鋼棒の損傷について

- ・ 調査の結果、鉛直 P C 鋼棒全18本のうち、8本の破断を確認。

鉛直 P C 鋼棒目視調査結果



## 今後の調査計画について

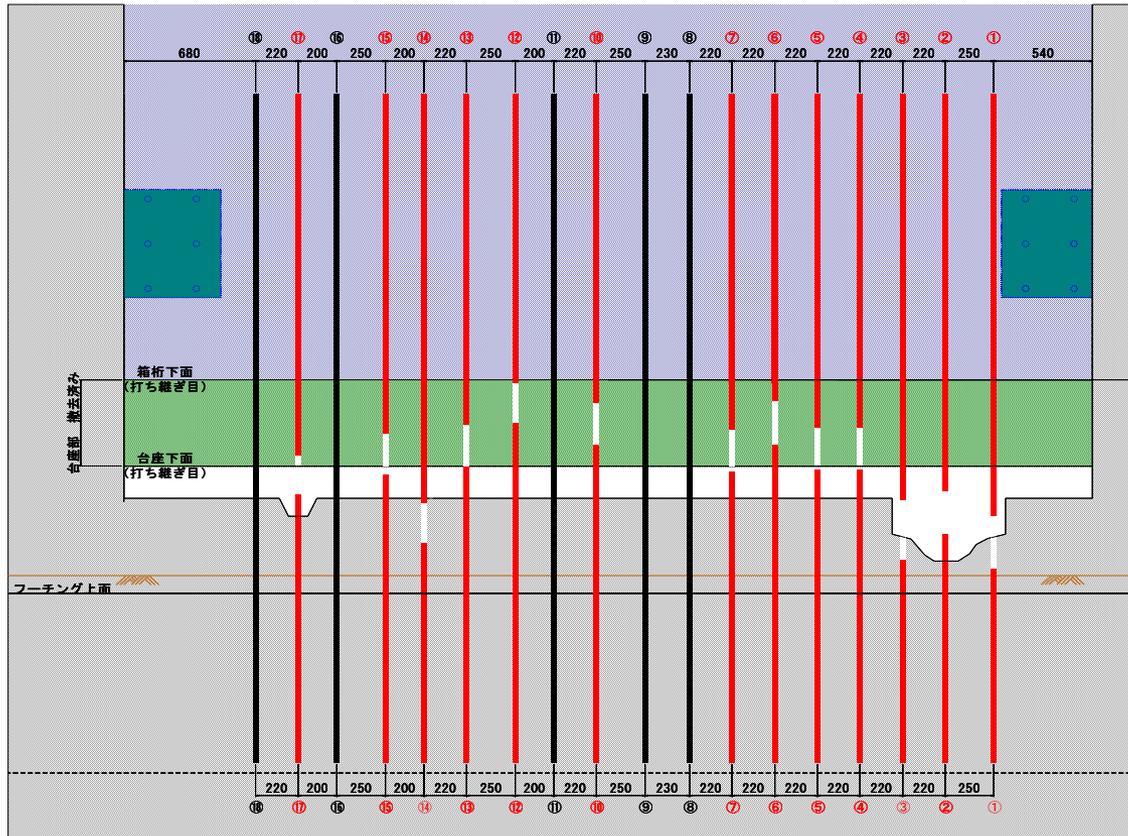
- ・ 今後、原因を究明するため、桁端部の固定化工事完了後、破断した鉛直 P C 鋼棒を摘出し、外観や破断面の観察、成分分析等の調査を実施。

## 鉛直PC鋼棒の調査結果一覧

詳細調査項目	調査内容	調査結果
① 鉛直PC鋼棒の破断状況調査	最終の応急復旧工事による桁の固定化が実施された段階で、台座部及び下部工突起部を電動ピックにてはつり、鉛直PC鋼棒の破断状況調査を行った。	鉛直PC鋼棒全18本のうち、13本の破断を確認
② 非破壊検査による鉛直PC鋼棒の調査	応急復旧工事による桁の固定化が実施された段階で、かつ、橋面上から突出している状況が確認されなかったため、超音波探査による鉛直PC鋼棒の非破壊検査を行った。	鉛直PC鋼棒全18本すべてが破断している可能性が高い
③ 鉛直PC鋼棒のシース及びグラウト充填の有無に関する調査	鉛直PC鋼棒のシース及びグラウトの有無について、竣工図書では確認できなかったため、破断状況にあわせ現地にて確認を行った。	鉛直PC鋼棒は、上下部工ともに瀝青材で防錆処理されていることを確認
④ 水の浸入経路に関する調査	水の浸入経路について、現地の状況を調査し、水の浸入経路を調査した。	2つの浸入経路(定着部と伸縮装置)を確認
⑤ コンクリートや土砂等の塩分量測定	コンクリートや土砂、滞水について、塩分量測定を行った。	コンクリートの塩分量が腐食発生限界量を超過
⑥ 圧縮強度試験及び静弾性係数試験	下部工及び台座部のコンクリートの健全性を確認するため、圧縮強度試験及び静弾性係数試験を行った。	圧縮強度及び静弾性係数ともに問題なし

## ①鉛直PC鋼棒の破断状況の確認

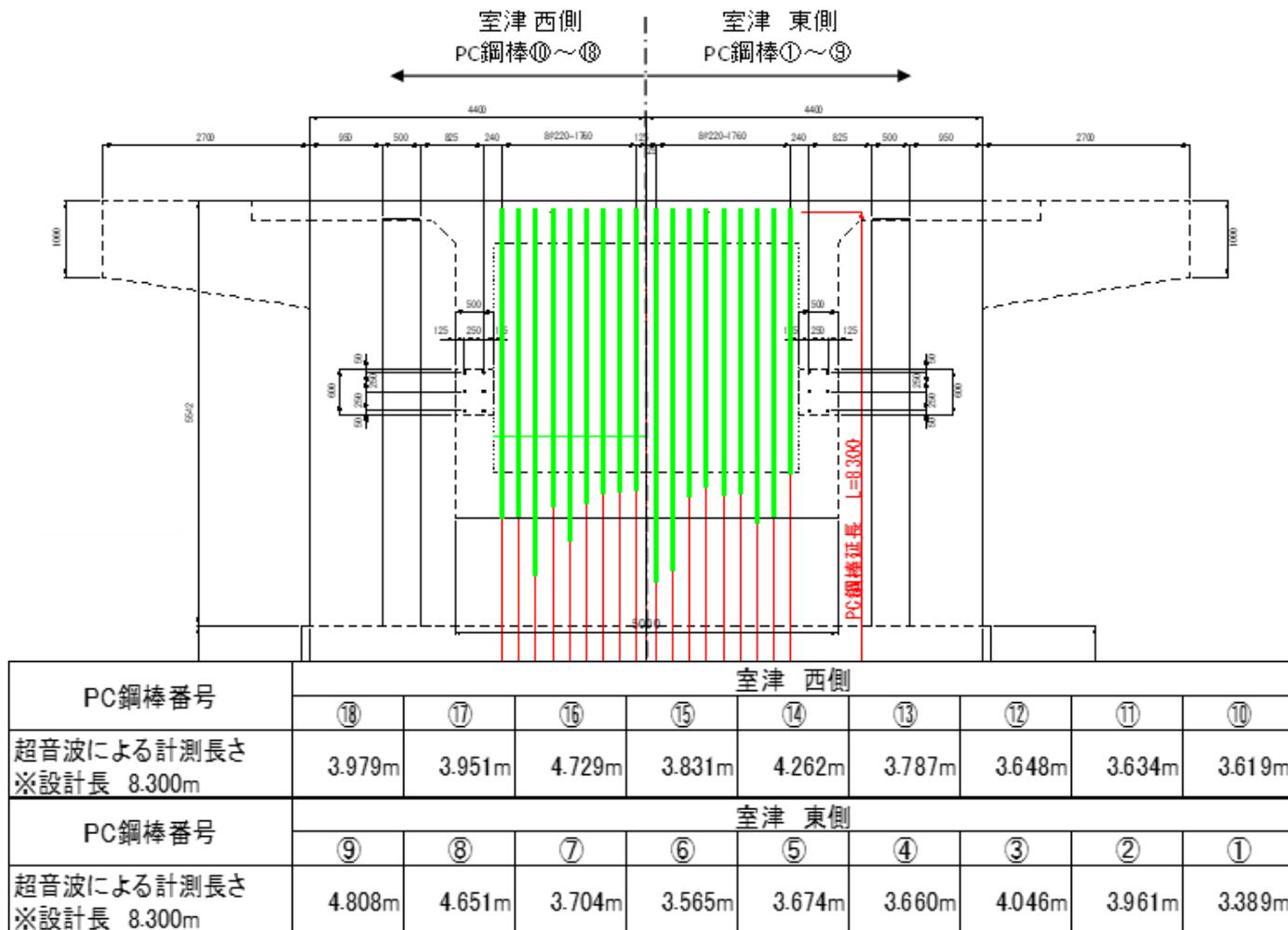
- ・ 全18本の鉛直PC鋼棒のうち13本破断していることを確認。
- ・ 全18本の鉛直PC鋼棒は、すべて腐食していることを確認。



鉛直PC鋼棒①⑦ 腐食状況

## ②非破壊検査による鉛直PC鋼棒の調査

- ・ 18本全ての鉛直PC鋼棒が設計長未満。



## ③ シース及びグラウト充填の有無に関する調査

- ・ シースとグラウトは上部工内・下部工内ともに確認されず、瀝青材による防錆処理がなされている状態。
- ・ 瀝青材の一部が劣化。
- ・ 鉛直PC鋼棒に結露が見られ、定着部からの水の浸入の形跡があった。



鉛直PC鋼棒⑫下部工側(防錆処理)

シースとグラウトは  
確認されなかった



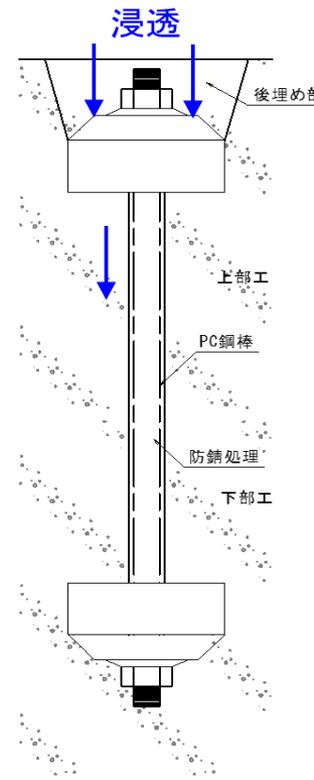
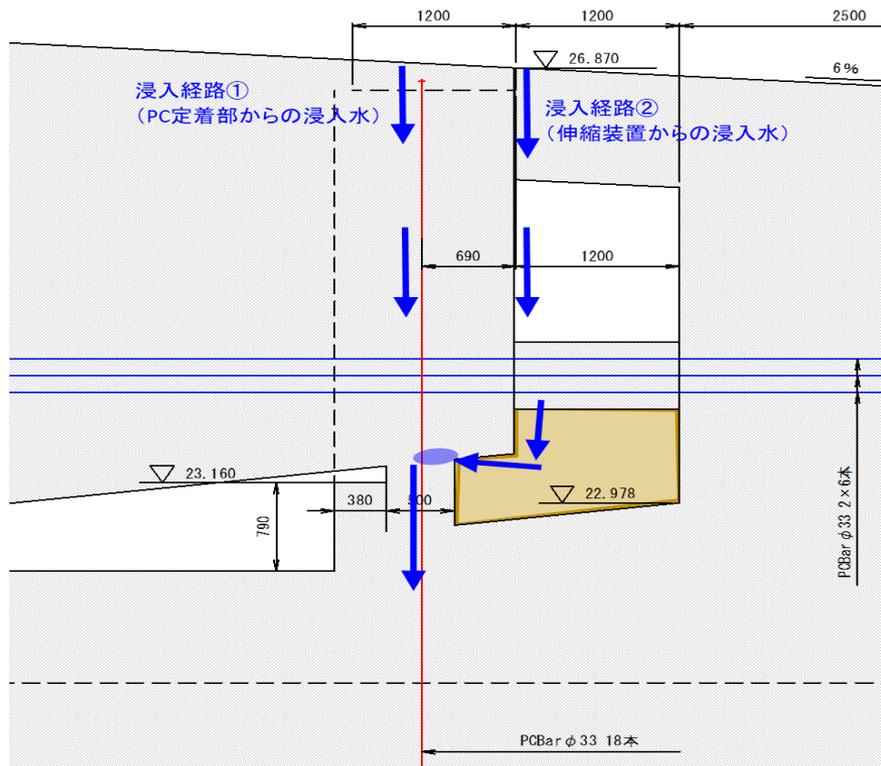
鉛直PC鋼棒⑫上部工側

## ④水の浸入状況に関する調査

浸入経路①：建設当時に橋面防水が未設置であったことや瀝青材の劣化状況から、鋼棒定着部からの浸入を推定。

浸入経路②：橋座部の漏水跡や水の滞水状況から伸縮装置からの浸入を推定。

**橋座部は厳しい腐食環境であった。**



伸縮装置からの漏水跡

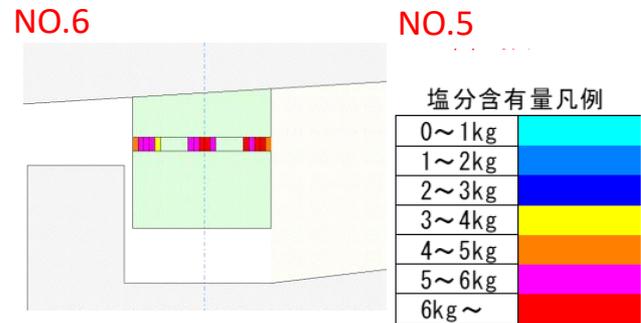
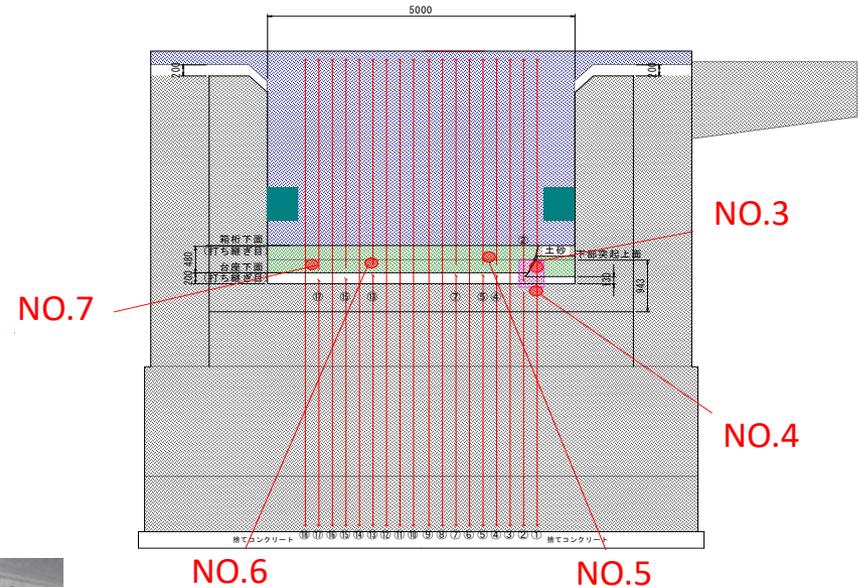


## ⑤ コンクリートや土砂等の塩分量測定

### a) コンクリート内部の塩分量

- ・ 台座部及び下部工突起部コンクリートは、内在塩分量が腐食発生限界量 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超過。
- ・ 鉛直PC鋼棒は腐食していたが、周辺の鉄筋は腐食していなかった。

採取位置		最大値 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	最小値 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	腐食発生 限界量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	判定 ※最大値で判定
No.3	突起部	6.67	0.69	1.2	腐食が 起こり得る
No.4	縦壁	6.01	3.12	1.2	腐食が 起こり得る
No.5	台座 コンクリート (海側)	6.89	3.51	1.2	腐食が 起こり得る
No.6	台座 コンクリート (PC鋼棒⑬位置)	7.07	4.43	1.2	腐食が 起こり得る
No.7	台座 コンクリート (山側)	7.66	3.10	1.2	腐食が 起こり得る



## ⑤ コンクリートや土砂等の塩分量測定

### b) 土砂の塩分量

- ・今回土砂から検出された塩分量は海水の25分の1～55分の1程度。

採取箇所	検出塩分量 (mg/kg)	参考：海水 (mg/kg)
海側	350	19,350
中央	580	19,350
山側	790	19,350

### c) 滞水の塩分量

- ・検出された塩分含有量は、腐食発生限界量の20分の1程度。

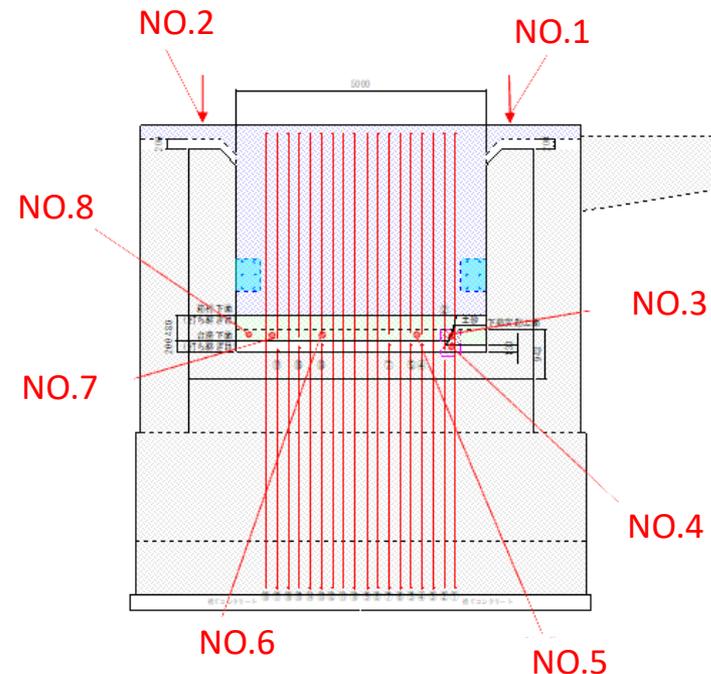
検出塩分量 (mg/リットル)	参考： 腐食発生限界量 (mg/リットル)	検出塩分濃度 (%)	参考： 海水塩分濃度 (%)
66	1,200	0.12	30～35
59	1,200	0.11	30～35

## ⑥ 圧縮強度試験及び静弾性係数試験

A2橋台からコンクリートコア供試体を採取し、圧縮強度試験と静弾性係数試験を行った結果、基準値を概ね満足する値が得られ、コンクリート品質に問題はないことを確認。

供試体番号	採取箇所	圧縮強度試験結果			静弾性係数試験結果		
		圧縮強度	設計基準強度	評価	静弾性係数	基準値	評価
No.1	待ち受けコンクリート (東側)	42.3	21	健全	35.1	19.1~34.2	健全
No.2	待ち受けコンクリート (西側)	27.1	21	健全	28.4	16.2~25.8	健全
No.3	下部工突起部 (東側)	17.5	21	設計基準強度の80%を上回っている	18.7	8.4~17.8	健全
No.4	下部工突起部 (東側)	24.9	21	健全	10.5	13.1~21.3	静弾性係数基準値を下回っている
No.5	台座部(東側)	25.8	21	健全	14.3	13.1~21.3	健全
No.6	台座部 (PC⑬位置)	28.6	21	健全	17.6	16.2~25.8	健全
No.7	台座部 (PC⑭⑮間)	31.4	21	健全	18.5	16.2~25.8	健全
No.8	台座部(西側)	28.6	21	健全	18.5	16.2~25.8	健全
No.9	下部工突起部 (中央)	28.4	21	健全	20.4	16.2~25.8	健全
No.10	下部工突起部 (西側)	28.1	21	健全	18.9	16.2~25.8	健全

構造部位	平均圧縮強度	設計基準強度
台座コンクリート	28.6	21
突起部コンクリート	24.7	21

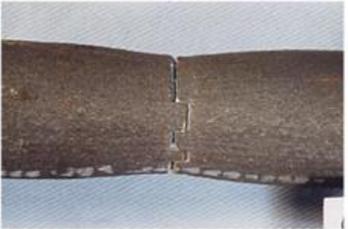
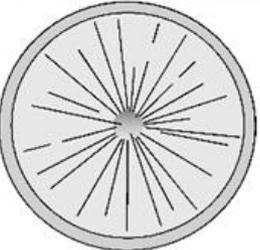
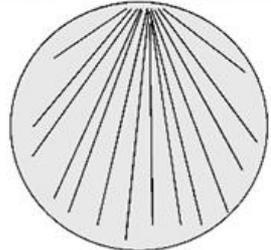
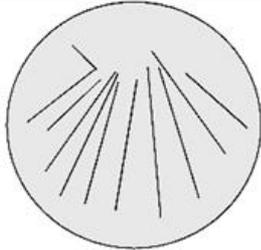


## 鉛直PC鋼棒の室内試験結果一覧表

調査・試験項目	調査・試験数	調査・試験内容	調査結果
① 外観観察	全サンプル対象 (18本) ①～⑱	・全18本のサンプルの破断面や先端形状の腐食状況確認を行う	破断面及び全長にわたり腐食が認められた。 破面形態は、表面を起点とした脆性破面を呈していた。
② 走査型電子顕微鏡による破面観察 (SEM観察)	破断サンプル対象 (13本) ①②③④⑤⑥⑦⑩ ⑫⑬⑭⑮⑰	・破断面を有するサンプルに対して、走査型電子顕微鏡で破断面の組織観察を行い、より詳細に破面観察を行う ・観察倍率は6倍、500倍で行う	腐食の影響により組織観察が不明瞭な破断面もあったが、延性破壊と考えられる破面形状は確認されなかった。
③ 単位質量測定	破断サンプル対象 (13本) ①②③④⑤⑥⑦⑩ ⑫⑬⑭⑮⑰	・破断面を有するサンプルの重量を錆除去前後で測定して比較する ・測定により得られたサンプル重量について1m換算を行い、錆除去前後での重量差異を算出する	錆除去前後の単位質量の減少(錆の付着量)は0.08～0.44kg/mであった。
④ PC鋼棒径の計測	破断サンプル対象 (13本) ①②③④⑤⑥⑦⑩ ⑫⑬⑭⑮⑰	・破断面を有するサンプルの径を測定し、設計径との比較により、寸法差異を算出する	錆除去前後の径の減少(錆の付着量)は0.71～2.93mmであった。
⑤ 金属組織観察	全サンプル対象 (18本) ①～⑱	・サンプルの金属組織に熱影響等の疑いのある変状が無いかを光学顕微鏡を用いて確認する ・破断起点部近傍及び未破断部の金属組織を観察し、組織比較を行う	金属組織は正常なパーライト組織であり熱影響等による異常は認められなかった。
⑥ 硬度測定	全サンプル対象 (18本) ①～⑱	・サンプルの破断面近傍及び未破断部に対して硬度測定を行い、熱影響等による異常の有無を確認する	破断部と未破断部の硬度に差異は認められなかった。
⑦ 化学成分分析	全サンプル対象 (18本) ①～⑱	・JIS(日本産業規格)の内、JIS G 3109に規定されているPC鋼棒の成分規格値と比較して、サンプル内の検出成分値が許容内に収まっているかを確認する	JIS G 3109(PC鋼棒)に規定される成分値を満足した。
⑧ 水素含有量測定試験	抜粋サンプル対象 (3本) ②⑫⑰	・サンプルの水素含有量を測定し、水素脆化が起きた可能性について考察する ・試験サンプルは東側・中央部・西側からそれぞれ1本ずつ選出し、計3本について行う	検出可能下限値を下回る数値となり、PC鋼棒に含まれる水素量は微量であることが確認された。

## 鉛直PC鋼棒の破断形態

- 破断が確認された鉛直PC鋼棒については、全て脆性破断を示す模様（放射線状）を呈していることを確認。
- 延性破断を示す模様は確認されなかった。

		引張試験破断時(PC鋼棒)	遅れ破壊破断時(PC鋼棒)	疲労試験破断時(PC鋼より線)
外観	側面	延性破断（細って破断） 	脆性破断（細らず破断）  発錆, 孔食	脆性破断（細らず破断）  ・PC鋼より線の軸疲労試験による破断面の一例 ・PC鋼棒の疲労破面が同様の形態を呈するか不明
	断面	起点部位置：中心部付近 	起点部位置：表面部 	起点部位置：表面部 
概略図				



鉛直PC⑤破断面



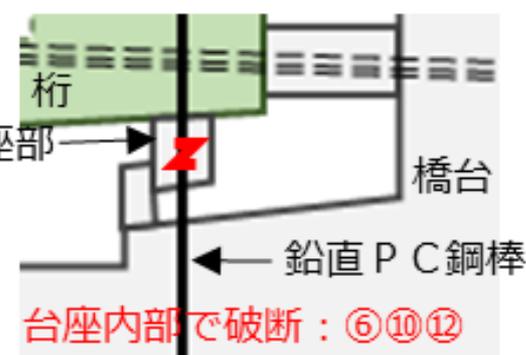
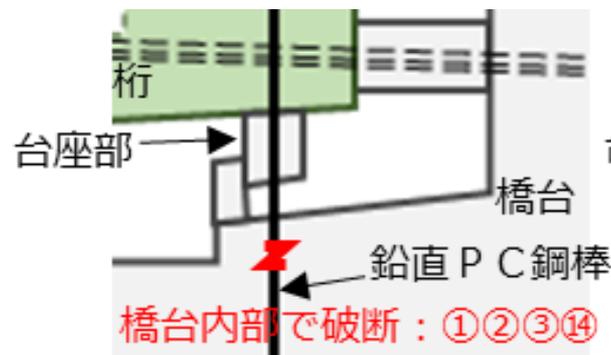
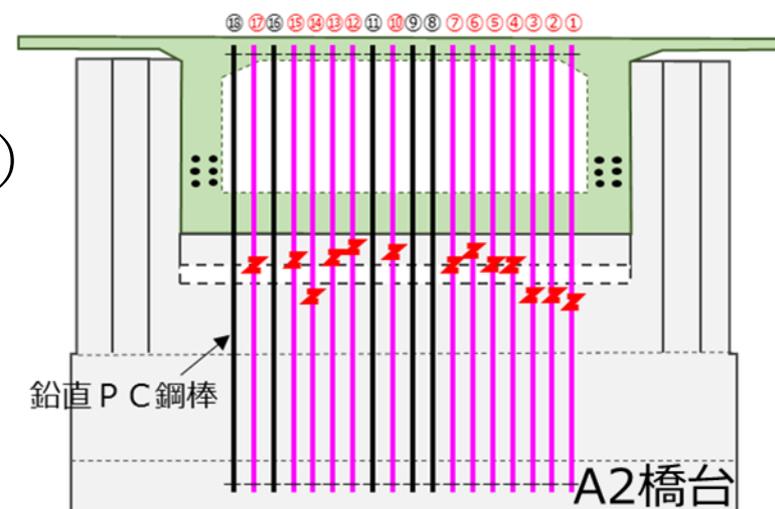
鉛直PC⑭破断面

## 鉛直PC鋼棒の破断位置

- 破断した位置は、バラツキがある。
- 橋台内部で4本破断 (①②③⑭)。
- 台座部と下部工の境界付近で6本破断。  
(④⑤⑦⑬⑮⑰)
- 台座内部で3本破断 (⑥⑩⑫)。
- 残る5本は、超音波探査試験により、台座部付近や台座部と下部工の境界付近での異状を確認。

<正面図>

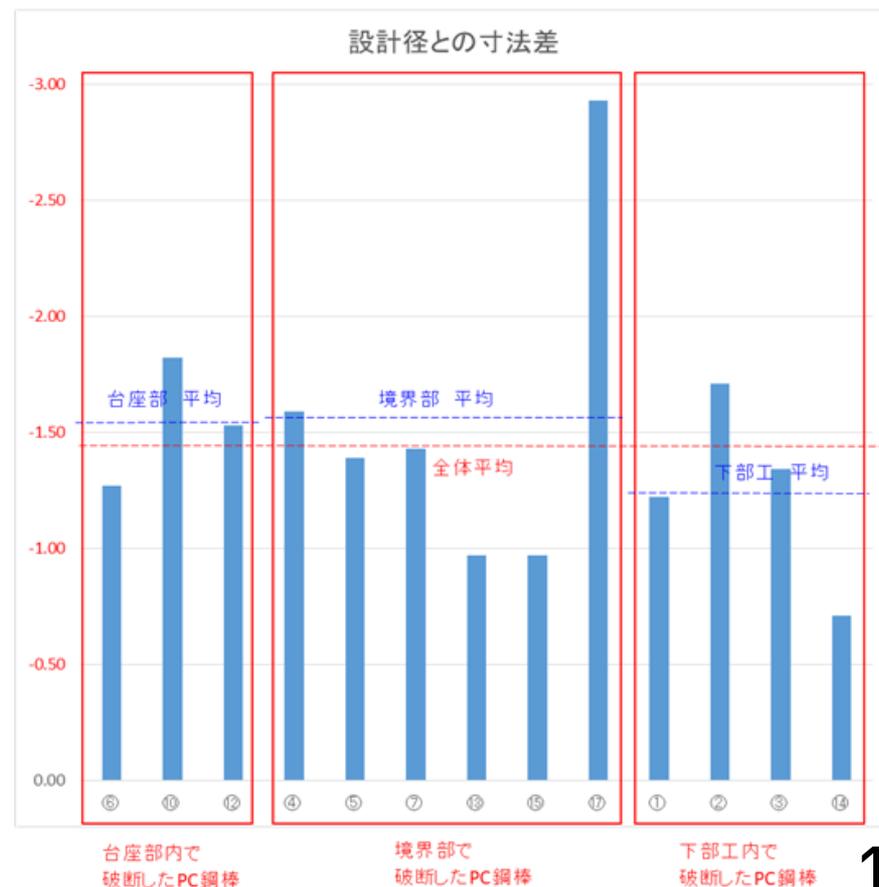
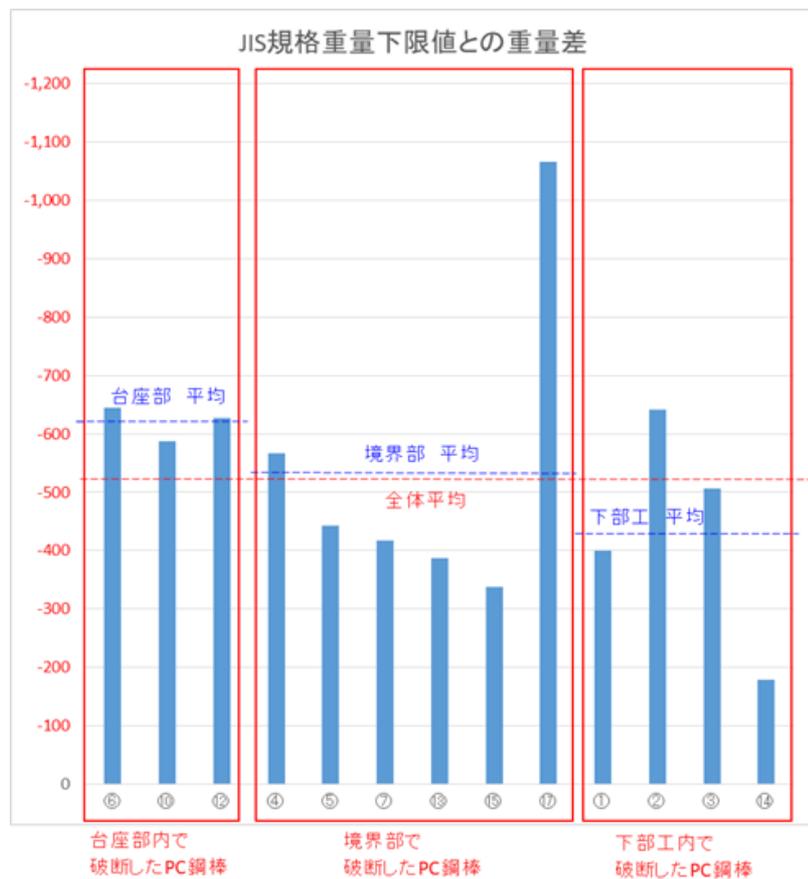
○赤色は目視により破断を確認した鉛直PC鋼棒(13本)



鉛直PC鋼棒の破断した位置<側面図>

## 鉛直PC鋼棒の破断位置別での腐食量

- ・破断位置別で腐食量に特質すべき事項はなかった。
- ・腐食量にバラツキがあり、いつ破断したのか不明。
- ・破断した後に腐食が進行した可能性もある。



# 鉛直PC鋼棒破断原因の推定

## 鉛直PC鋼棒の破断に至った原因

調査結果から

- ・ 13本すべてに脆性破断の特徴を有する模様が見られた。
- ・ 延性や疲労による破断の特徴を有する模様は見られなかった。
- ・ 化学成分分析など材質調査の結果、鋼棒の材料品質はJIS規格を満足していた。

### ①腐食による脆性破断

- ・ 破断面に孔食が発生した痕跡は確認できていないが、破断面に確認された模様から、鉛直PC鋼棒の外縁の一点を起点とした放射状の模様が確認されていることから、引張り応力が加わった状態で材料表面に形成された不働態皮膜が何らかの原因によって局部的に破壊され腐食環境に置かれた後に、急速に亀裂が発生・成長し破断する「**応力腐食割れ**」の可能性**がある。**

# 鉛直PC鋼棒破断原因の推定

## 鉛直PC鋼棒の破断に至った原因

### ②水素脆化による脆性破断

水素含有量測定試験を行ったところ、検出可能限界値を下回る結果であったため、腐食発生による水素生成及び水素混入による**水素脆化による破断の可能性は低い**と推定される。

※一般的にPC鋼棒は水素脆化の感受性が高い材料であり、水素脆化しやすい傾向にあり、水の供給がPC鋼棒位置まで浸入していることから、腐食によるアノード反応・カソード反応の中で水が分解され、水素が発生した可能性がある。※1,※2

※1 西村六郎：腐食環境における金属材料の水素脆性、材料と環境,62,410-415(2013)

※2 財団法人高速道路調査会：仮設PC鋼材設計・施工マニュアル,平成9年7月

### ③疲労亀裂発生による脆性破断

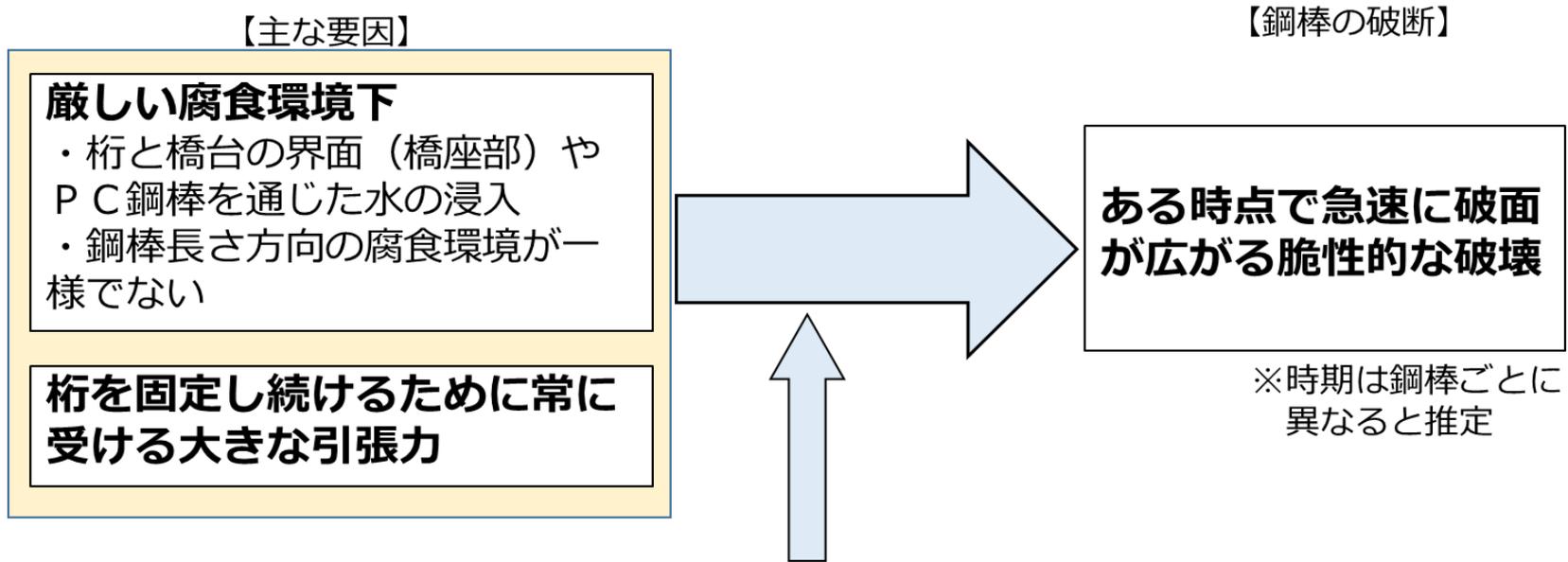
鉛直PC鋼棒破断面の観察では、腐食が激しく破断面を観察しづらい鉛直PC鋼棒があったが、繰り返し荷重の蓄積による疲労を受けた疑いのある形跡は確認されなかったため、**疲労による破断の可能性は低い**と推定される。

※設計上は、想定する全ての荷重状態において、主桁と橋台の接合部であるコンクリート受台には引張応力や疲労が生じないように、鉛直PC鋼棒に緊張力を与えていることから、疲労による破断の可能性は低いと推定。

# 鉛直PC鋼棒破断原因の推定

## 鉛直PC鋼棒の破断に至った原因

鉛直PC鋼棒の破断に至った原因は、破断した鉛直PC鋼棒の破断面、外観の観測、室内試験等の結果から、高い引張応力が加わった状態で、腐食環境に置かれているとき、局所的な腐食を起点に、急速に割れが広がるという、「応力腐食割れ」と呼ばれる現象が生じた可能性が疑われる



【主な要因】

【鋼棒の破断】

### 厳しい腐食環境下

- ・ 桁と橋台の界面（橋座部）やPC鋼棒を通じた水の浸入
- ・ 鋼棒長さ方向の腐食環境が一樣でない

桁を固定し続けるために常に受ける大きな引張力

ある時点で急速に破面が広がる脆性的な破壊

※時期は鋼棒ごとに異なると推定

【その他影響を及ぼした考えられる要因】

- ・ 日々生じる応力の変動
- ・ 他の鋼棒の破断による負担の増加

## 破壊メカニズムについて

**【ケース1】:鉛直PC鋼棒がすべて同時期に破断し、段差が発生**

鉛直PC鋼棒ごとに発生した錆の付着量が異なっており、腐食の進行度合いが異なっていること、破断した位置にばらつきがあることから、**鉛直PC鋼棒全18本が同時期に破断して段差が発生した可能性は低い。**

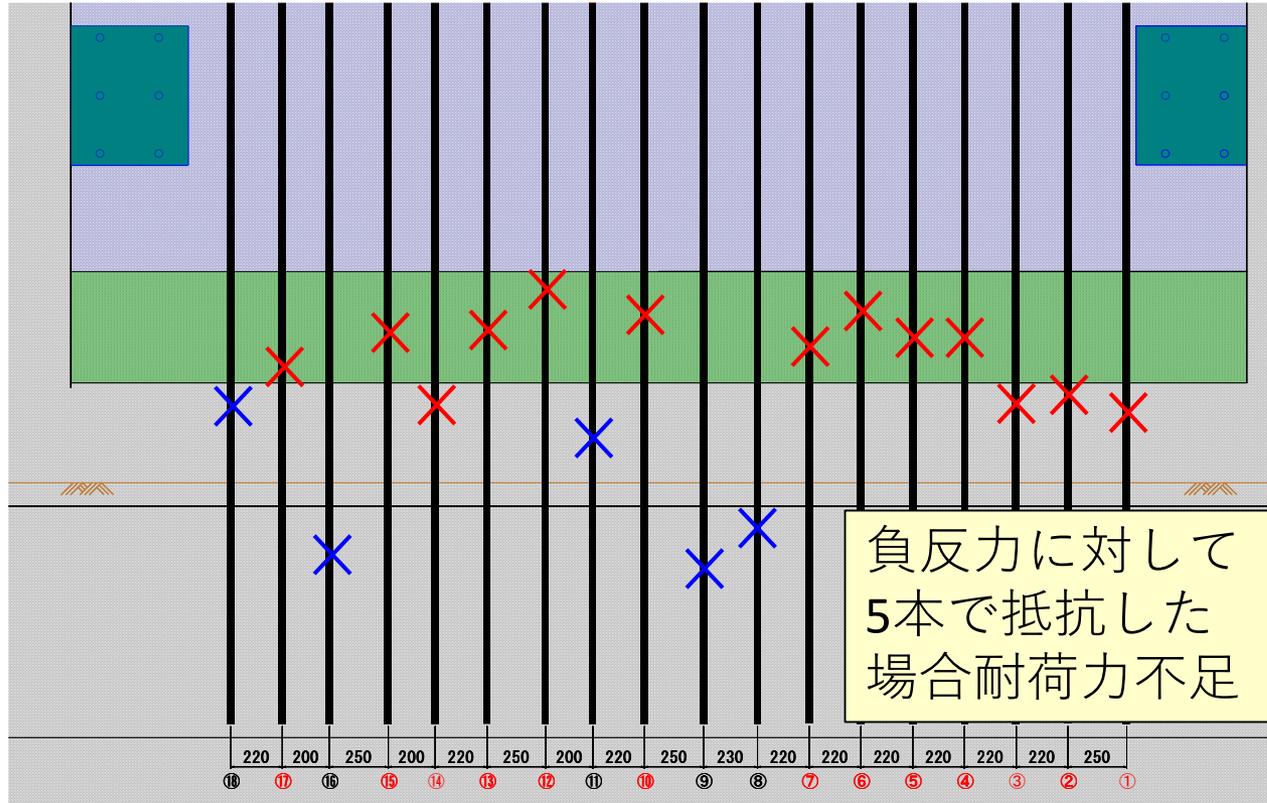
**【ケース2】:鉛直PC鋼棒が1本、また1本と脆性破断していき、段差発生直前まで破断せずに機能していた鉛直PC鋼棒が、疲労により脆性破断し、段差が発生**

鉛直PC鋼棒ごとに発生した錆の付着量が異なっており、腐食の進行度合いが異なっていること、破断した位置にばらつきがあることから、破断面が確認された13本は同時ではなく、徐々に脆性破断した可能性がある。当該部位には活荷重等による変動荷重が生じ、残り5本が変動荷重による疲労で脆性破断した可能性がある。ただし、変動荷重は死荷重による負反力と比較して小さいため、**疲労による脆性破断の可能性は低い。**

# 鉛直PC鋼棒破断原因の推定

## 破壊メカニズムについて

**【ケース3】** :鉛直PC鋼棒が1本、また1本と脆性破断していき、段差発生直前まで破断せずに機能していた鉛直PC鋼棒が、延性破断し、段差が発生

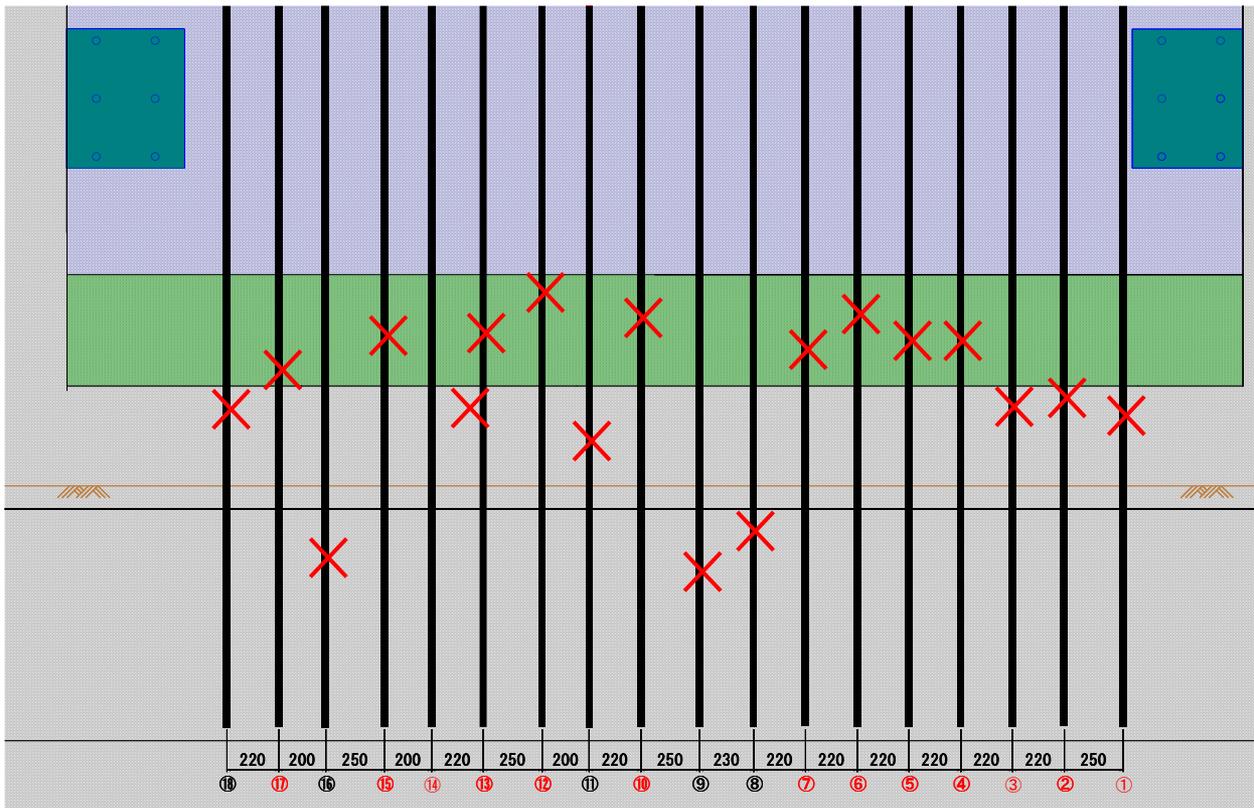


破断が確認できていない5本については、段差発生直前まで機能していたが、他の13本が破断したことにより当初の想定を上回る引張応力が作用したことにより、**延性破断した可能性**がある。

# 鉛直PC鋼棒破断原因の推定

## 破壊メカニズムについて

**【ケース4】** :鉛直PC鋼棒が1本また1本と脆性破断していき、段差が発生



鉛直PC鋼棒18本すべてが、同時期ではなく順次、脆性破断を起こし、段差が発生したと推定される。ただし、鉛直PC鋼棒は、計算上、死荷重及び活荷重に対して、耐荷力を満足するには6本機能しておく必要があることから、6本を下回った段階で、**残りの鉛直PC鋼棒が同時に脆性破断した可能性はあると推定される。**

## 破断に至った要因の整理

### 【構造に係わる事項】

- ・ 構造上重要な部材となる鉛直・水平 PC 鋼棒が外から目視で確認できない構造であったこと。
- ・ 浸入した水の処理（排水）ができない構造であった。
- ・ なお、施工については、建設当時の施工関係書類が現存していないため不明である。

### 【点検に係わる事項】

- ・ 構造上重要な部位となる鋼棒を目視できない構造について、A1橋台側の損傷履歴を反映した点検方法の選定につなげられていなかった。

## 【再発防止策】

### ① 上下部接続部の補強対策

- ・ A2橋台部で引張材として活用しているPCケーブル類の止水・防水対策。
- ・ A2橋台部でPCケーブル類の状態確認のためのモニタリング機材設置。
- ・ A1橋台部で過去に設置した主桁-橋台連結ケーブルへの対応。  
(止水・防水対策、状態の確認、バックアップ構造設置)

### ② 点検の留意事項

- ・ 今回の事象に関する情報の伝達。
- ・ PCケーブル類の状態をモニタリング機材により監視、平常時の状態把握。
- ・ 構造特性を踏まえた適切な診断が行えるよう、橋各部の把握すべき情報やその把握方法を検討し、点検を実施。

### ③ 記録の保管

- ・ 過去の調査結果や補強工事等の情報に関して、確実に保管。



ロードセルによるグラウンドアンカー監視



過去に設置したA1橋台部の上下部連結構造



拡大



箱桁内部ひずみゲージ

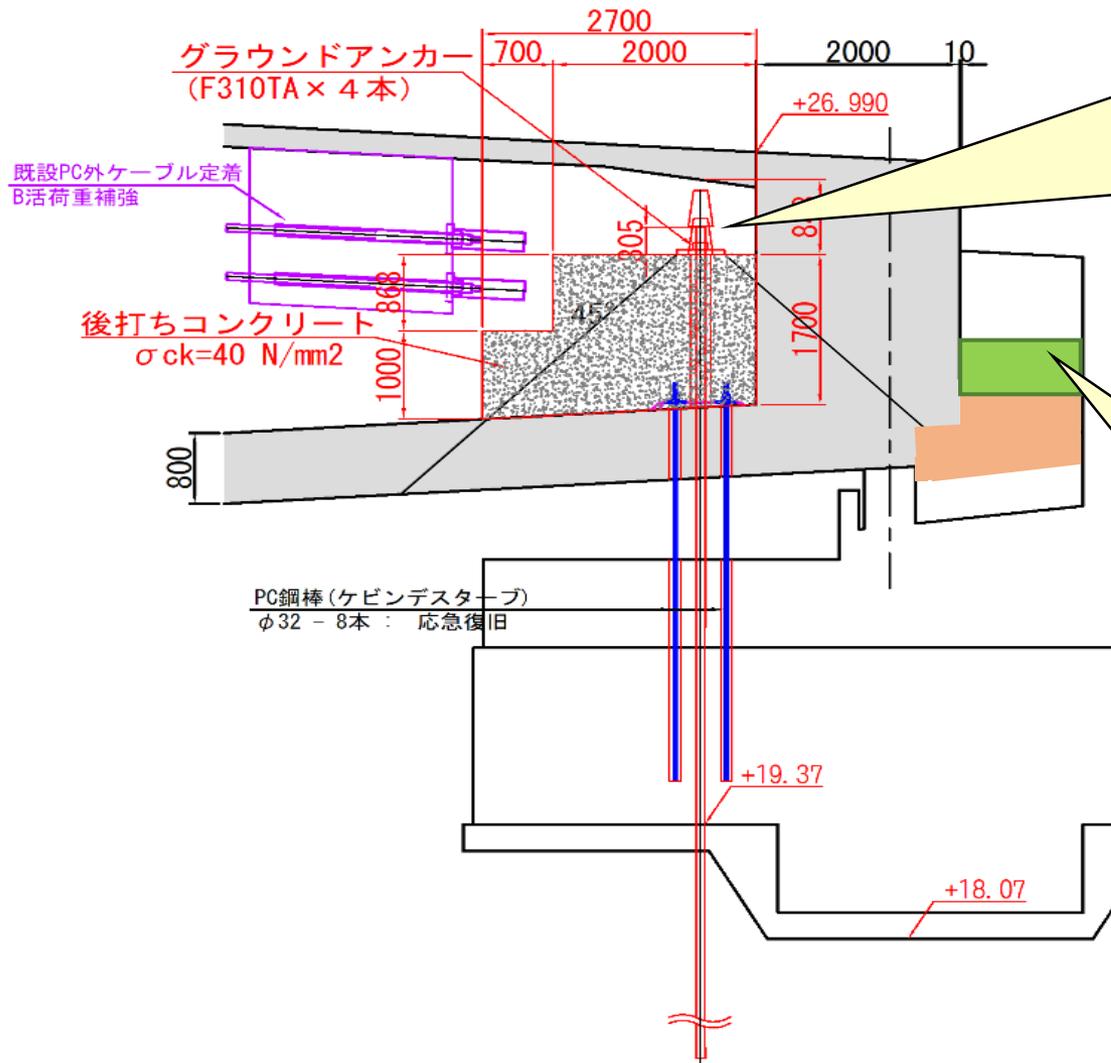
## (2) 本復旧対策について

---



## 第3回検討会議以降の調査

### 【A2橋台側面図】



#### 【調査】

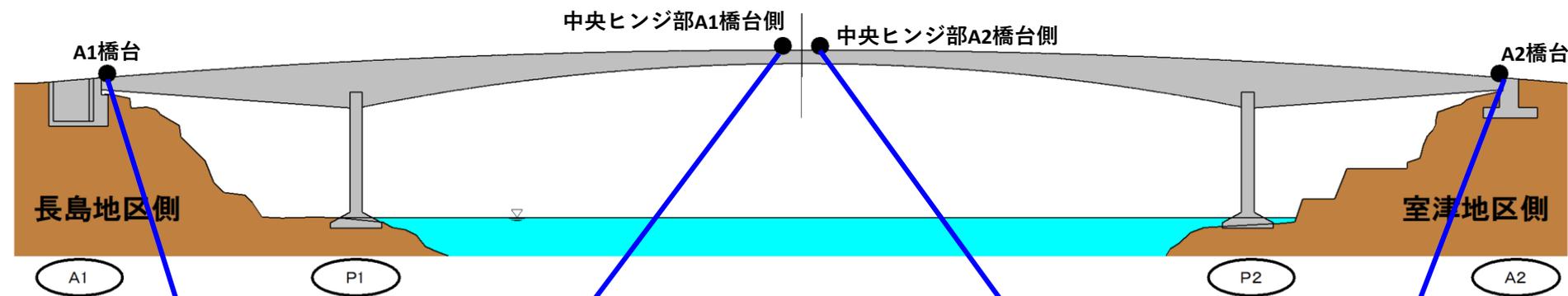
- ・グラウンドアンカーの試験緊張による桁の動きの把握。
- ・車両走行試験による変形及び応力状態の把握

#### 【調査】

- ・水平ロッカー沓の視認
- ・桁裏空間の寸法測定

# 本復旧対策について

## グラウンドアンカーの試験緊張結果 【水準測量による橋面変位】



A1橋台	
緊張力	鉛直変位 (下向き+)
20ton	-1mm
40ton	+1mm
80ton	+2mm

中央ヒンジ部A1橋台側	
緊張力	鉛直変位 (下向き+)
20ton	-1mm
40ton	-2mm
80ton	-5mm

中央ヒンジ部A2橋台側	
緊張力	鉛直変位 (下向き+)
20ton	0mm
40ton	-1mm
80ton	-3mm

A2橋台	
GA本当緊張力	鉛直変位 (下向き+)
20ton	0mm
40ton	0mm
80ton	0mm

- ・ 80ton (20ton/本) の緊張力を導入しても、A2橋台部の桁に動きがみられなかった。

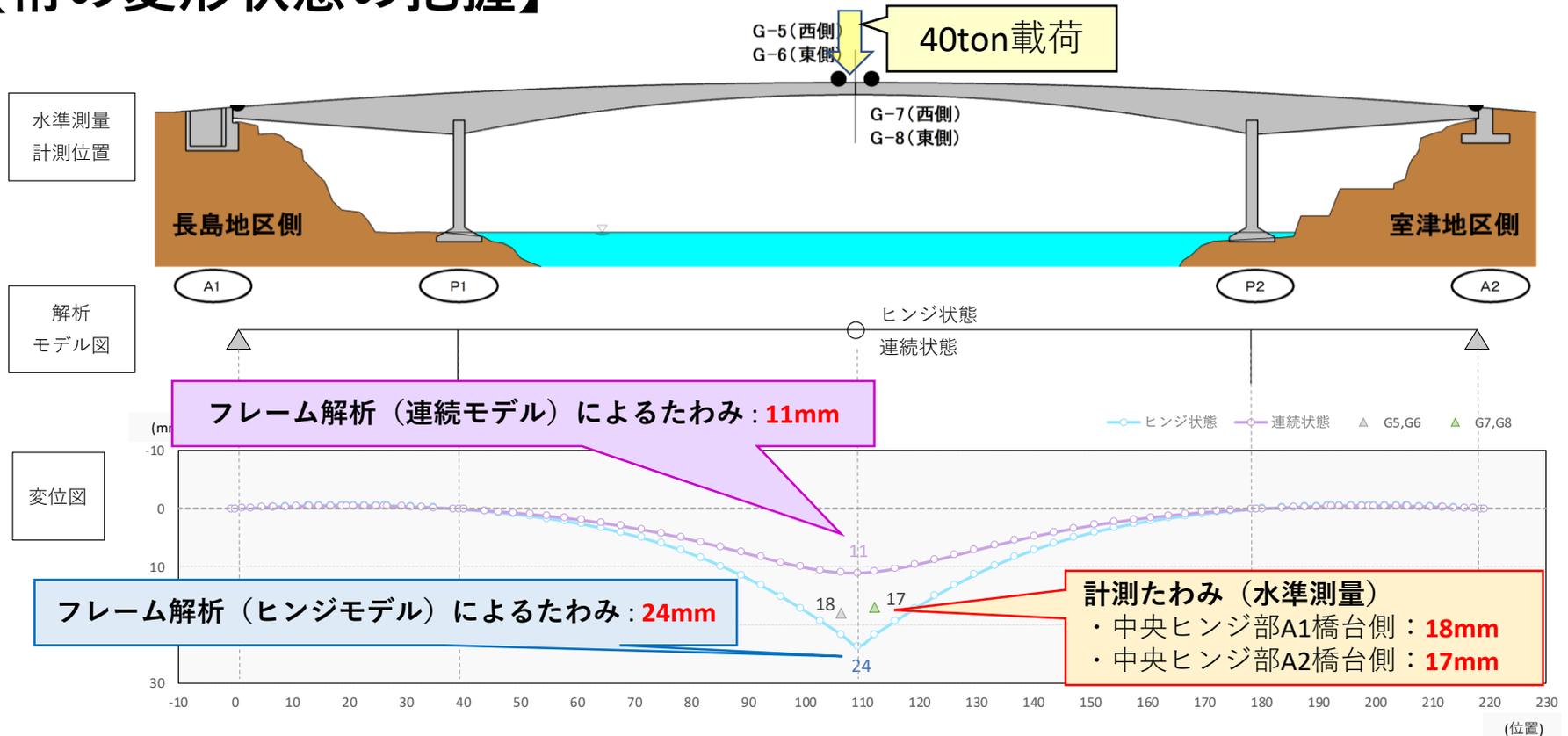


**桁の動きを拘束している要素の確認が必要**

# 本復旧対策について

## 車両走行試験結果

### 【桁の変形状態の把握】

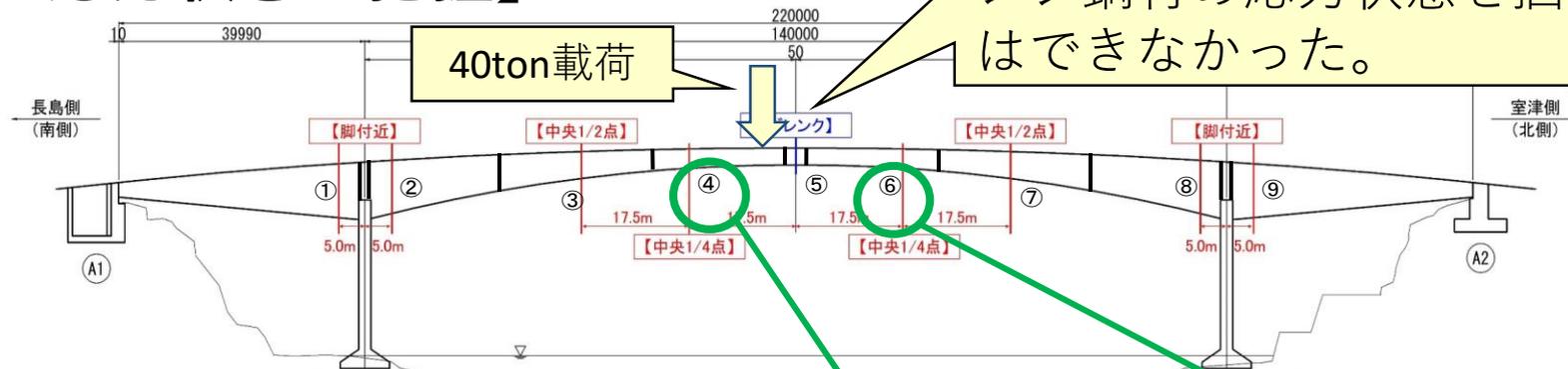


- 中央ヒンジ部 (A1橋台側) に40ton相当の車両を載荷した場合の計測たわみは、ヒンジ部を連続化した場合とヒンジにした場合の解析値の中間的な値を示した。

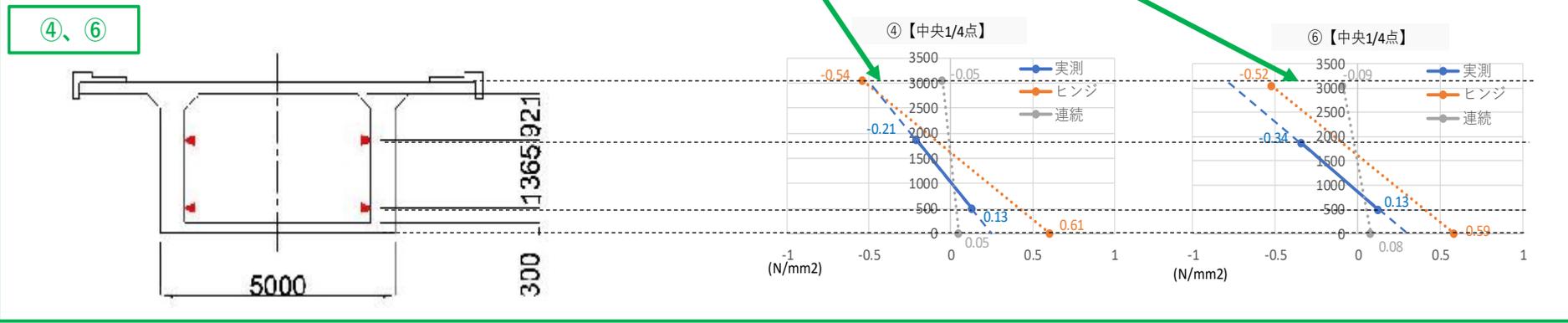
# 本復旧対策について

## 車両走行試験結果

### 【桁の応力状態の把握】



中央ヒンジ部のゲレンク沓爪に設置したひずみゲージでは、ヒンジ鋼材の応力状態を掴むことはできなかった。



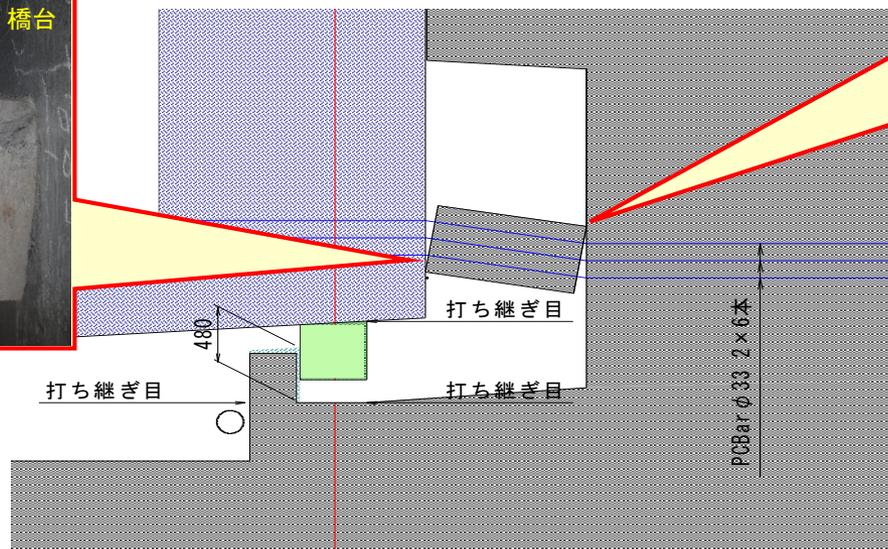
- ・コンクリートの縁応力（計測値）もヒンジ部を連続化した場合とヒンジにした場合の解析値の中間的な勾配を示した。変形状態と応力状態の把握により **ヒンジ部で桁が拘束されているものと推定**される。

# 本復旧対策について

## 水平ロッカー沓の視認

(東側ロッカー沓)

(西側ロッカー沓)

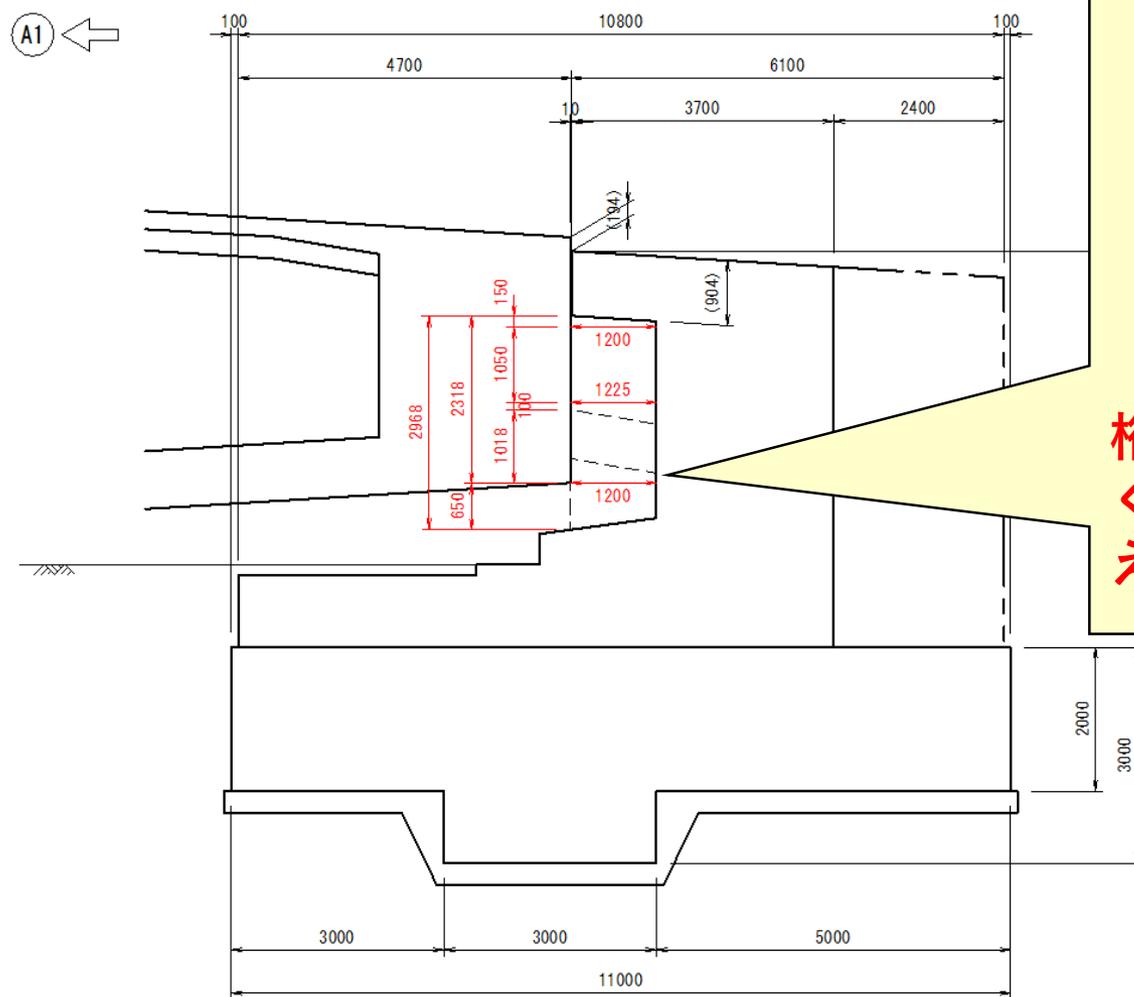


水平ロッカー沓  
内部鉄筋の変形

- ・ 水平PC鋼棒を覆う水平ロッカー沓にコンクリートの割裂が確認された。
- ・ **桁の鉛直方向の移動を拘束する要素の一つとして、せん断破壊した水平ロッカー沓であると確認された。**

## 桁裏空間の寸法測定

【A2橋台桁裏空間寸法（赤字：計測値）】



### 【桁裏空間の幅】

- ・ 竣工図寸法（1200mm）  
に対して桁裏空間の上下  
端で**同値**を計測



桁が海側に移動した形跡はなく、鉛直に浮き上がったと考えられる

## 本復旧対策に向けた現状と課題

### 【現状と課題】

- ・ 事故前とは異なる応力状態にあり、この状態が続いている。
- ・ 桁が浮き上がったことによりA2橋台側の桁がA1橋台側の桁にモタレかかった状態にあり、設計や施工時の記録、段差発生後の調査結果等からの応力状態や安全性の正確な評価に限界がある。
- ・ A2橋台の水平ロッカー沓に割裂が生じ、桁を固定している水平PC鋼棒に塑性変形が生じている可能性があり、安全余裕の回復が必要。



**応力状態や安全性の評価の現状と課題を踏まえると、本復旧対策は、できるだけ応力状態の評価に関する不確実性を減らす内容とする必要がある。**

## 本復旧対策の目的・内容・方法

### 【目的】

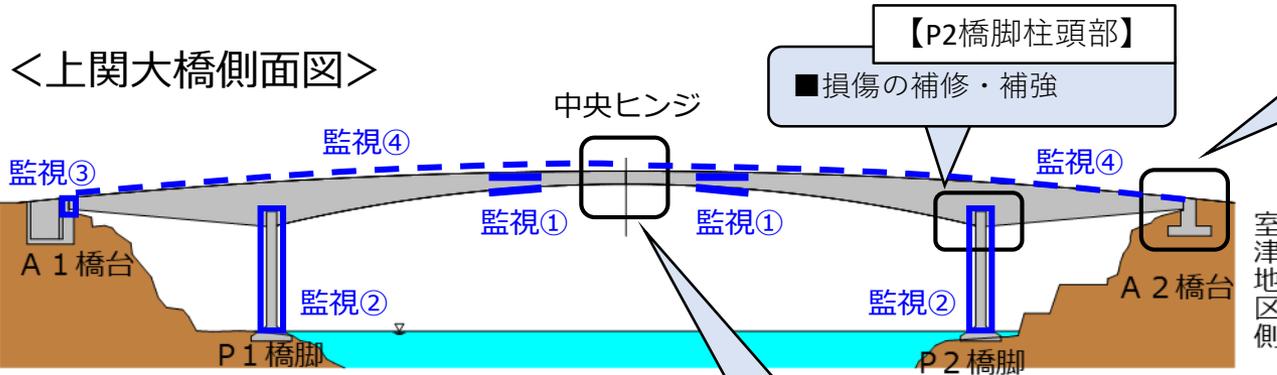
監視と通行規制による管理の状態から、安全性を向上し、他の橋と同様に定期点検やパトロール等により、管理ができる状態に戻すこと

### 【内容・方法】

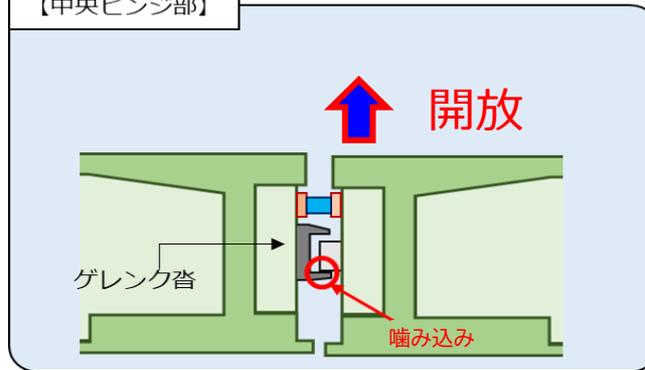
- ・ 応力状態の不確実性を解消し、橋各部の安全性や信頼性を向上させるため、中央ヒンジ部で応力を開放するとともに、可能な範囲で桁や橋脚の位置を是正する。
- ・ その後、桁本体、桁端、橋脚等に必要な補強を実施する。
- ・ 工事中の橋各部の安全性の把握や、補強設計で用いた仮定や設計結果の妥当性を把握するために、工事中也引き続きモニタリング等の計測を行う。
- ・ 今回の事案と同様の事態を防ぐため、新たに設置する部材は維持管理の確実性と容易さについても配慮する（点検や修繕方法の検討、バックアップ部材の設置等）。

## 【参考】本復旧対策の内容・方法

＜上関大橋側面図＞



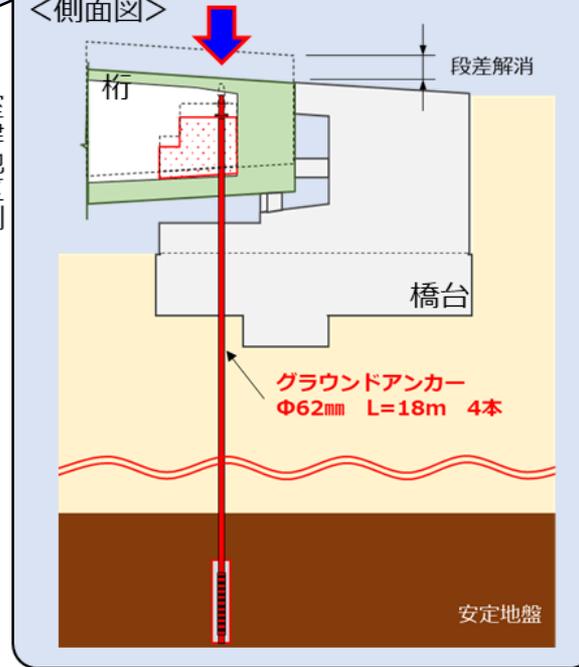
【中央ヒンジ部】



【A2橋台側の桁端部】

- グラウンドアンカーによる桁の再固定化
- 段差解消、中央ヒンジの応力開放

＜側面図＞



### 【主な監視項目】

事故後の調査・解析により負担が増加すると想定される箇所を念頭に、主に以下の項目について監視する。

#### ①中央径間の主桁応力

(A1橋台側：上縁引張・下縁圧縮、A2橋台側：上縁圧縮・下縁引張)

#### ②P2橋脚柱頭部の傾斜、両橋脚の応力

#### ③A1橋台部端横桁のひびわれ幅

#### ④桁の異常な変形と桁折れ

# (3) 同種橋の維持管理 (調査方針等) について



今回の事案を繰り返さないよう、架橋位置や設計条件を勘案し、上下部接続部の補強対策や構造特性を踏まえた点検の実施、記録の保管など、様々な再発防止策を講じる。

## ①上下部接続部の補強対策

例えば以下のように鉛直・水平PC鋼棒への適切な対策を施す。

- ・ 防水対策やバックアップ構造の設置を検討。
- ・ 橋の安全性において重要な引張材については、点検が確実にできる構造となるように設計。

## ②点検の留意事項

- ・ 点検が確実にできる構造とするなど、設計時から致命的な事態を回避するための配慮を検討。
- ・ 架橋位置や設計条件等の構造特性を踏まえた適切な診断を行えるよう、橋毎に点検で把握すべき各部の情報やその把握方法を検討。

## ③記録の保管

- ・ 設計図書をはじめ、工事記録、点検結果、補修履歴等の記録を確実に保管し、これらの記録を活用するためのシステムを構築。