

(2) 本復旧対策について

1) 段差発生事象の整理

1) 段差発生事象の整理

A2橋台桁端部

長島側 (A1側)

室津側 (A2側)

中央ヒンジ部

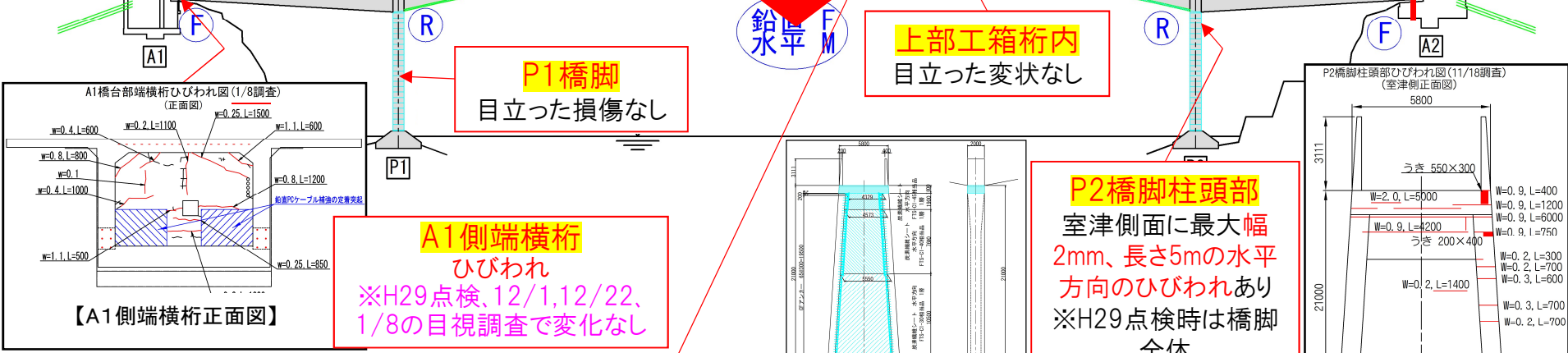


爪の掛かり長80mm程度
(1/8調査: 外気温-1.1℃)



長島側 (南側)

室津側 (北側)

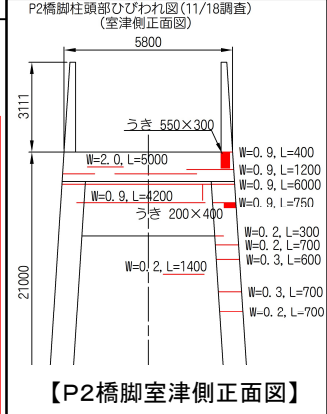
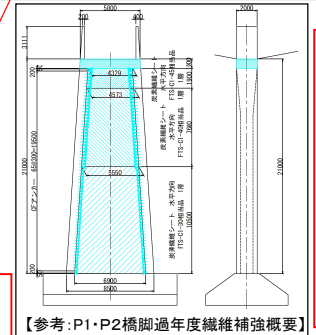
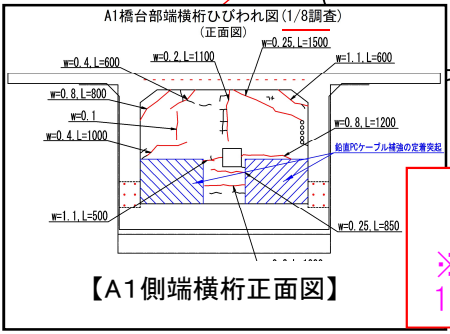


P1橋脚
目立った損傷なし

上部工箱桁内
目立った変状なし

P2橋脚柱頭部
室津側面に最大幅
2mm、長さ5mの水平
方向のひびわれあり
※H29点検時は橋脚
全体
でひびわれなし

A1側端横桁
ひびわれ
※H29点検、12/1,12/22、
1/8の目視調査で変化なし



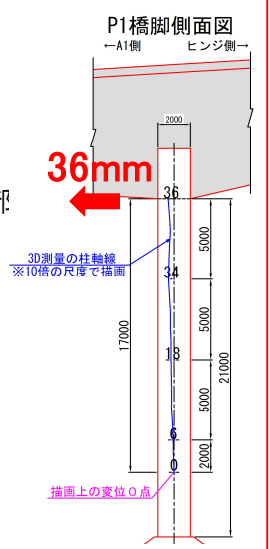
橋面の鉛直方向変位

P1橋脚変形

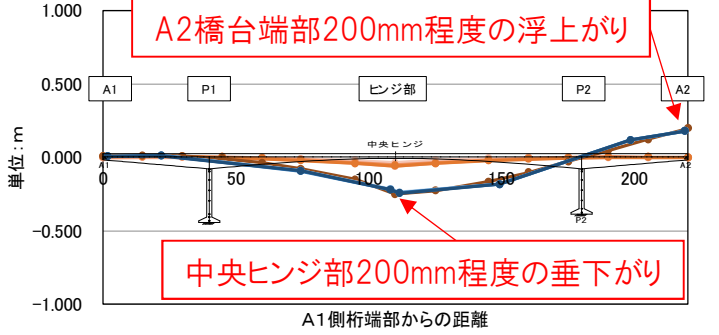
3D測量での変形状態
(鉛直軸からの差異)

- ◆概ねS字形状
- ◆最大変形は柱頭部付近

※水平変位量は
測量を実施できた
柱頭部下方17mを
変形のゼロ点として
整理したもの。



橋面水準測量結果 (H2測量値との差: 青線: GNSS測量結果)



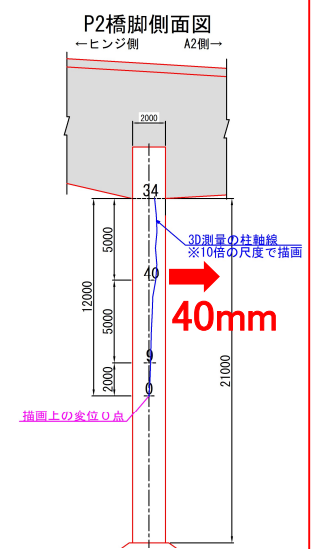
- H4.10.22観測 H2との差
- H6.9.15観測 H2との差
- H8.9.9観測 H2との差
- H10.9.26観測 H2との差
- R2.12.22観測 H2との差
- R2.12.19(GNSS)H2との差
- R2.12.22(GNSS)H2との差
- R2.12.27(GNSS)H2との差
- R3.1.11(GNSS)H2との差

P2橋脚変形

3D測量での変形状態
(鉛直軸からの差異)

- ◆概ねS字形状
- ◆最大変形は柱頭部より5m下付近

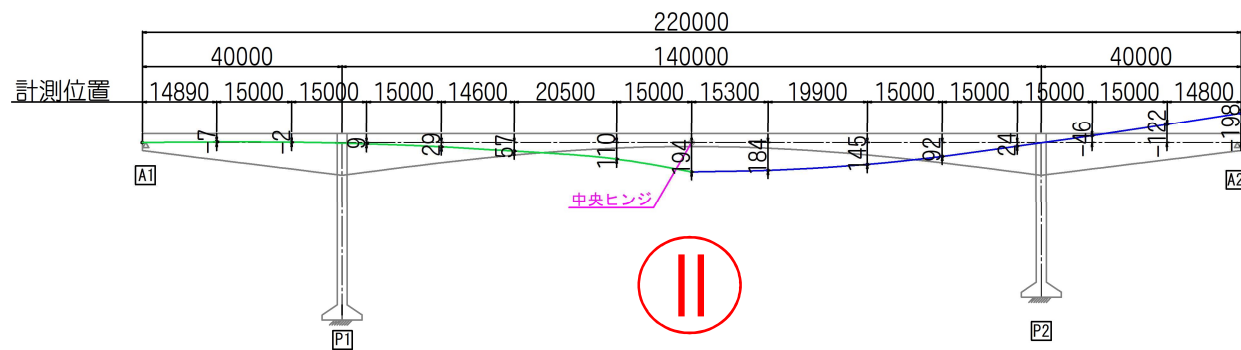
※水平変位量は
測量を実施できた
柱頭部下方12mを
変形のゼロ点として
整理したもの。



1) 段差発生事象の整理

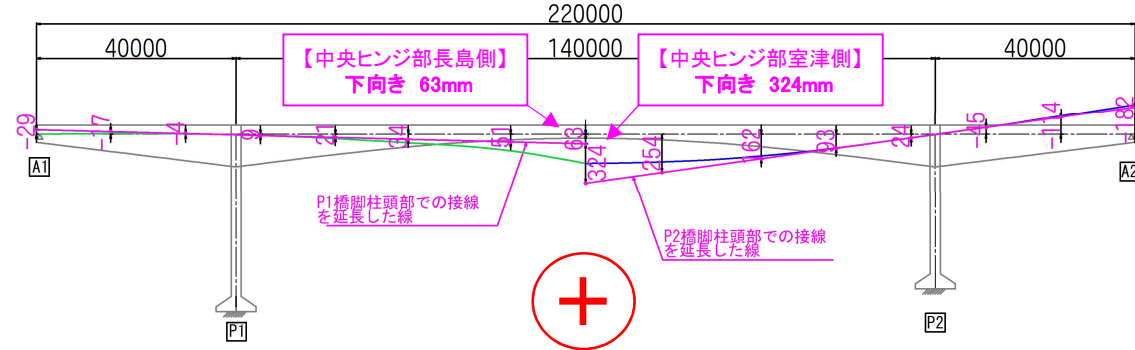
◆ 段差発生による橋面鉛直移動量

段差発生後の橋面の鉛直移動量 (H10. 9. 26測量を基準としたR2. 12. 22測量の差異)



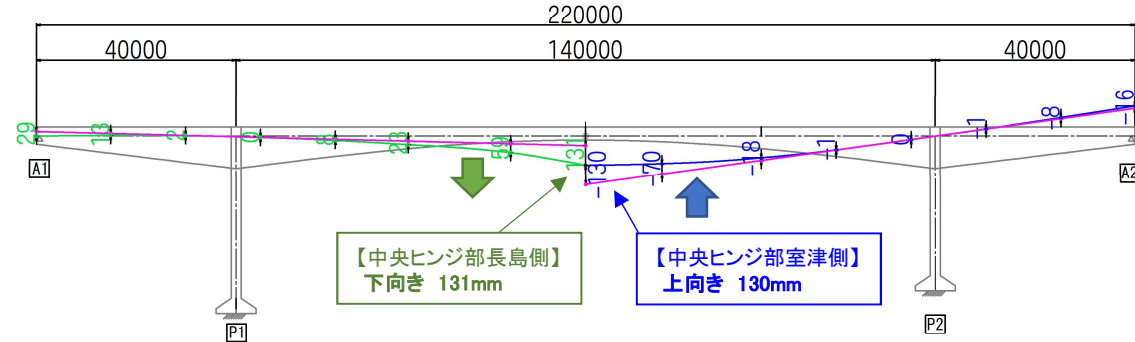
実測による
段差発生に
起因した橋面
の鉛直変位

橋脚の変形による鉛直移動量の推定



橋脚変形に
起因する移
動量の推定

桁のたわみ変形による鉛直移動量の推定

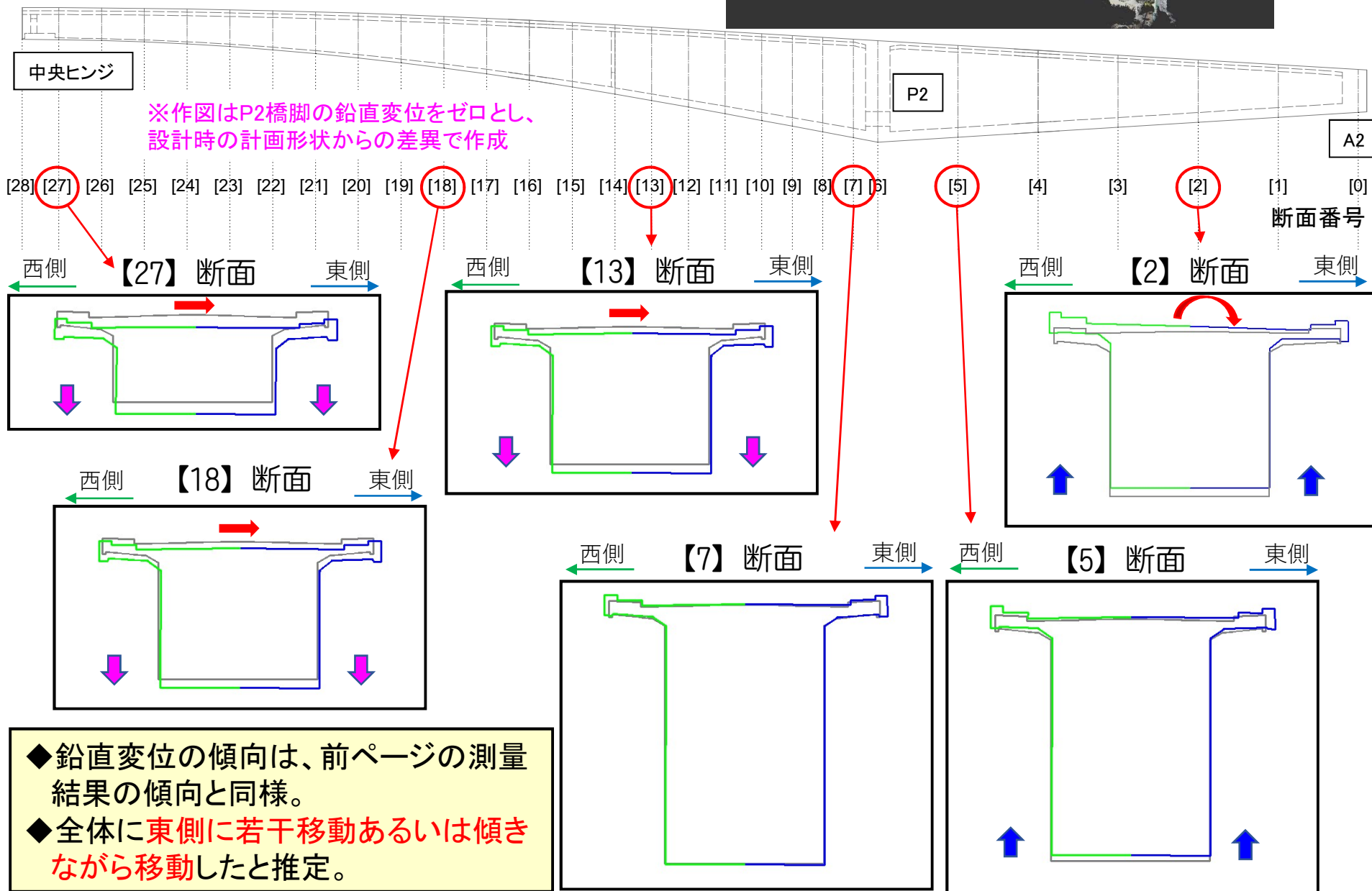


桁たわみ変
形に起因す
る移動量の
推定

※鉛直移動量の単位はmm。実測の30,000倍で描画
※※鉛直移動量は下向きを(+)、上向きを(-)で表記。

1) 段差発生事象の整理

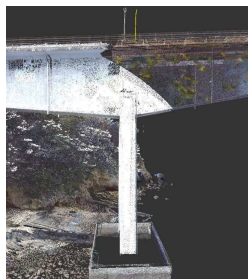
◆3D測量による桁の変形(室津側桁)



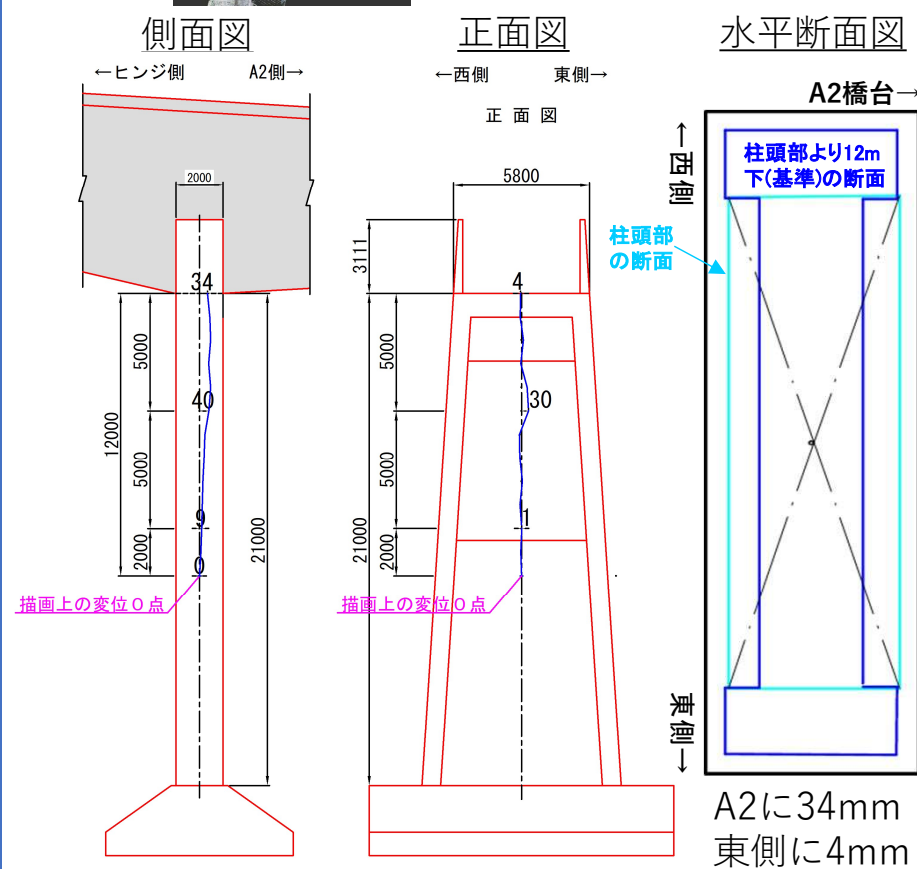
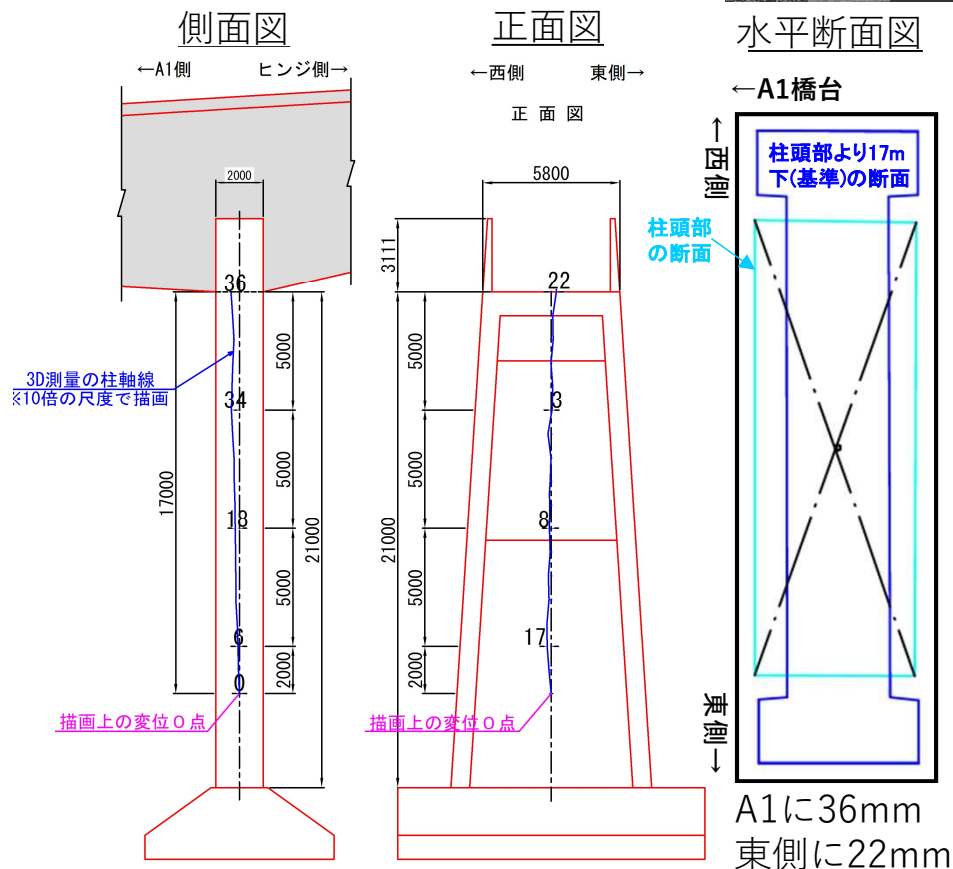
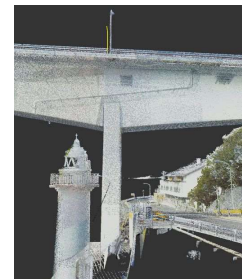
1) 段差発生事象の整理

◆3D測量による橋脚の変形

【P1橋脚】



【P2橋脚】



- ・橋軸方向はA1橋台側に概ねS形状で変形。
- ・直角方向は柱中間部は西側、柱頭部は東側に概ねS形状で変形

- ・橋軸方向はA2橋台側に概ねS形状で変形。
- ・直角方向は柱中間部で西側にはらむように概ねS形状で変形

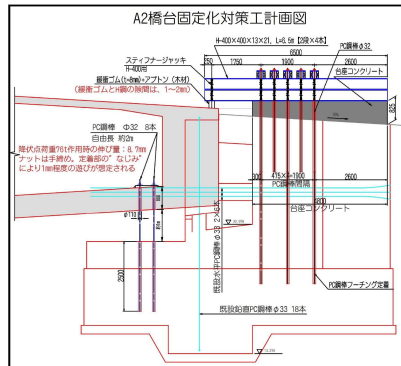
※測量を実施できた柱頭部から17mをゼロ点として作図

※測量を実施できた柱頭部から12mをゼロ点として作図

<参考> 応急復旧①(固定化工事:12/21完了)後の変状の推移

◆ 段差発生部 (A 2 橋台)

・ 段差発生後から鉛直変位の浮き上がり傾向(応力変動) ⇒ 固定化工事による対応



桁押さえ鋼材 (20'12/6)



【桁押さえ部の状況】
・ 緩衝ゴムとH鋼の隙間：1~2mm

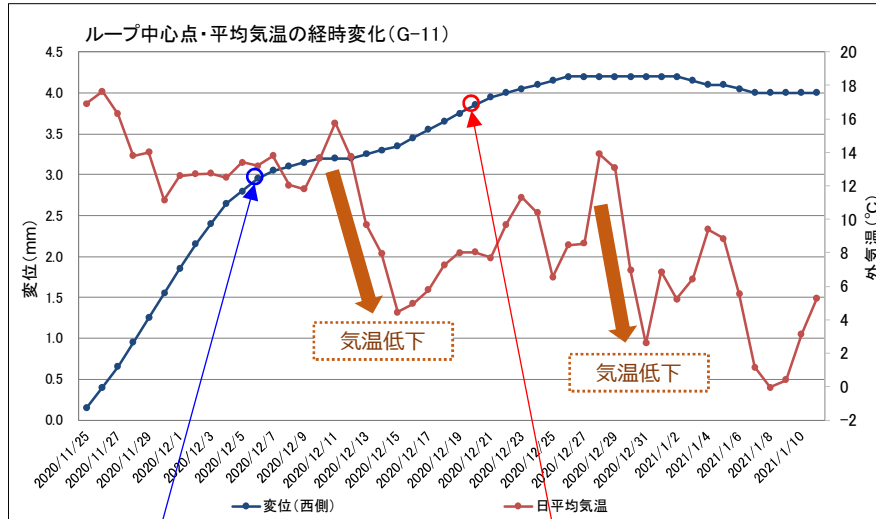
固定化工事 (20'12/21)



【ナットの状況】
・ 設置当初 (12/21) ⇒ 手締め (遊間なし)
・ 現状 (1月時点) ⇒ 変状なし

・ A 2 橋台部の桁の浮き上がり (G N S S 測量による路面高変化)

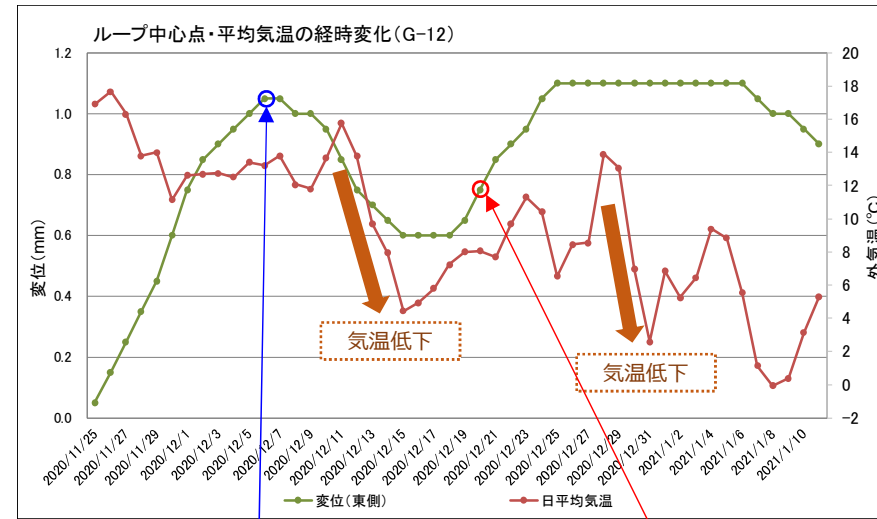
【A 2 橋台路面高：西側】



桁押さえ鋼材 (20'12/6)

固定化工事 (20'12/21)

【A 2 橋台路面高：東側】



桁押さえ鋼材 (20'12/6)

固定化工事 (20'12/21)

11/25~12/1までは温度低下による変位の上昇がみられたが、12/6、12/21以降は変位の上昇が抑えられていると推察される。

2) 段差発生事象の解析的検討

(1) 段差発生前までの復元

【竣工時の復元】

下部工施工～上部工施工（支保工架設・張出架設）～橋面工施工～供用開始 までの17ステップより主要7ステップを考慮したステップ解析により復元。

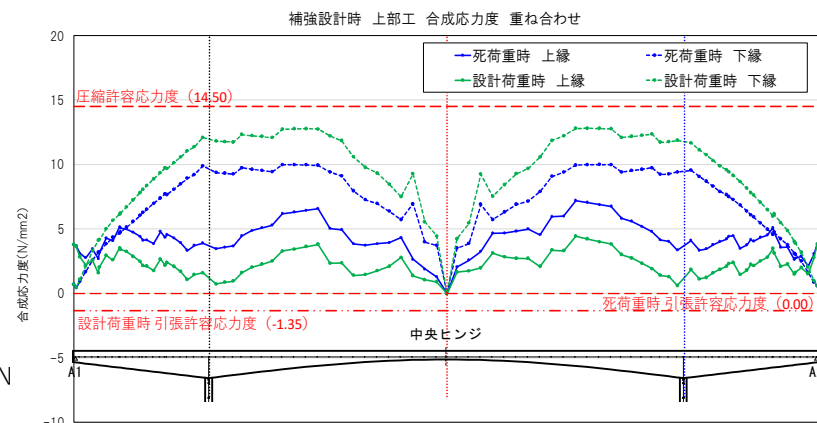
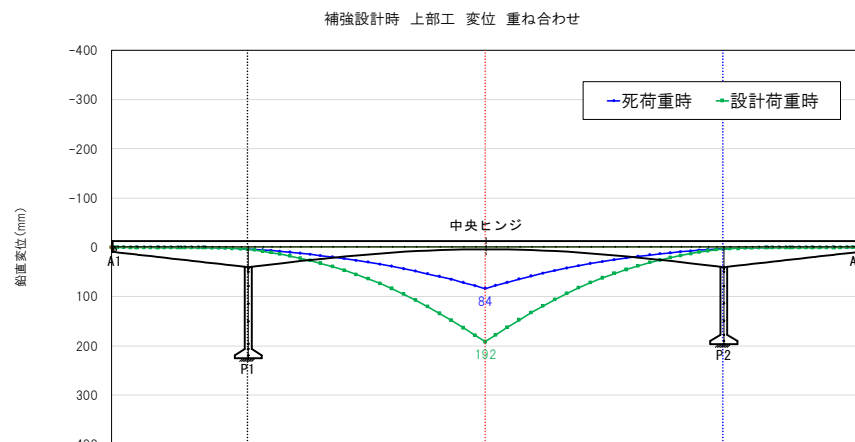
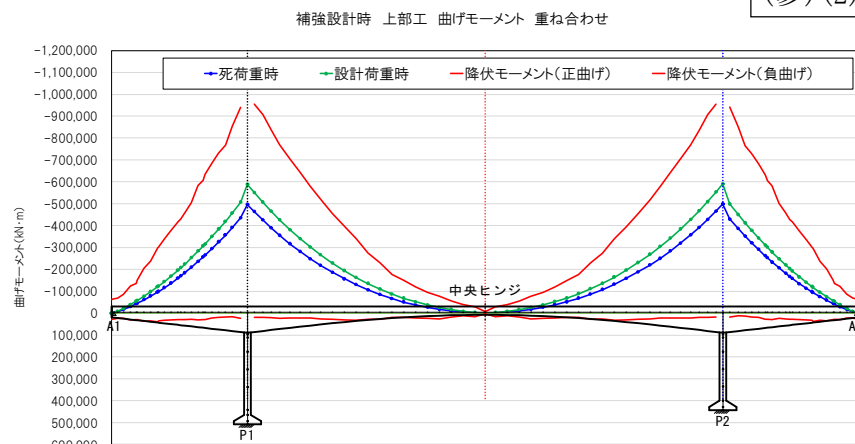
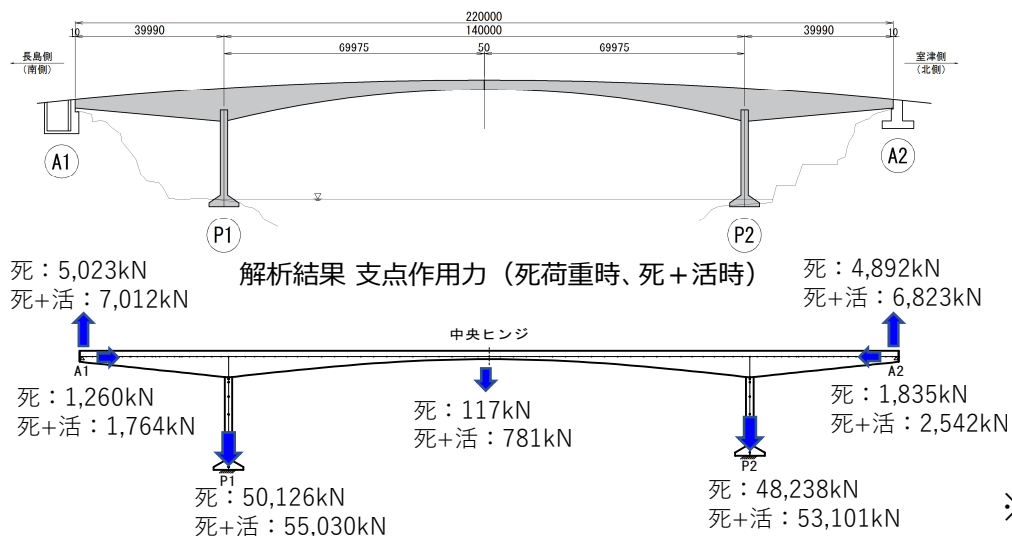
【段差発生前の復元】

竣工時の状況を踏まえた上で、竣工後に施されたB活荷重・耐震補強完了時の状態を復元。

<段差発生前 解析モデル>

上部構造・下部構造は、全断面有効剛性を使用。
支点条件は下表のとおりとする（橋脚基部は固定）。

段差発生前 橋台・ヒンジ部支点条件		
A1・A2橋台	鉛直・水平拘束、 回転拘束無	
ヒンジ部	鉛直拘束、 水平・回転拘束無	



※ 図は、「段差発生前」の復元した解析結果を示す。

(2) 段差発生後の事象のケーススタディ


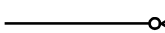
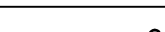
【段差発生後 解析モデル】

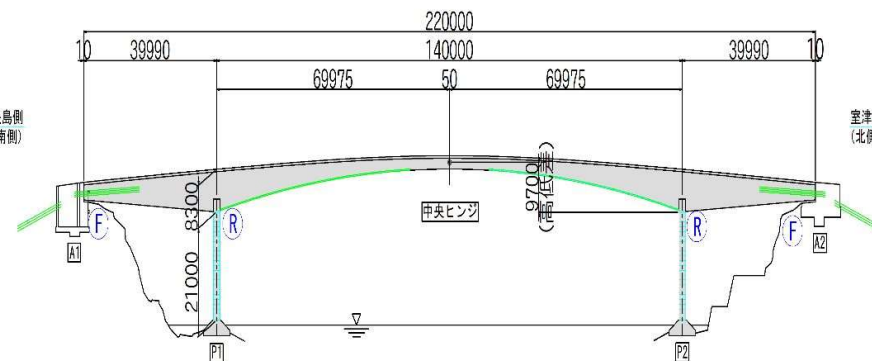
【モデル化における仮定】

A2橋台部の段差発生を踏まえ、A2橋台部の鉛直PC鋼棒が機能しなくなったと仮定したモデルとする。

【ケーススタディ】

仮定を踏まえ、A2支点条件のモデル化に対して、下表の3ケースについて考え、現地計測結果との整合を確認する。

段差発生後 A2橋台 支点条件	
ケース 1	鉛直・水平・回転 拘束無 
ケース 2	水平 拘束、鉛直・回転 拘束無 
ケース 3	水平 バネ支持、鉛直・回転 拘束無 



【A2 水平バネ値の設定】

ケース3では耐震補強で設置した桁端-橋台連結のPC外ケーブルが水平変位を拘束すると仮定し、PC鋼材のバネ値より、支点の水平バネ値を推定する。

PC外ケーブル (F500TD) 1本当たりの水平バネ : 23,824kN /m

設置本数 : 8本

支点 水平バネ : 23,824 kN/m × 8本 ≒ 191,000 kN/m

<参考>

PC外ケーブル (F500TD) 1本当たりの許容耐力 : 4,178kN

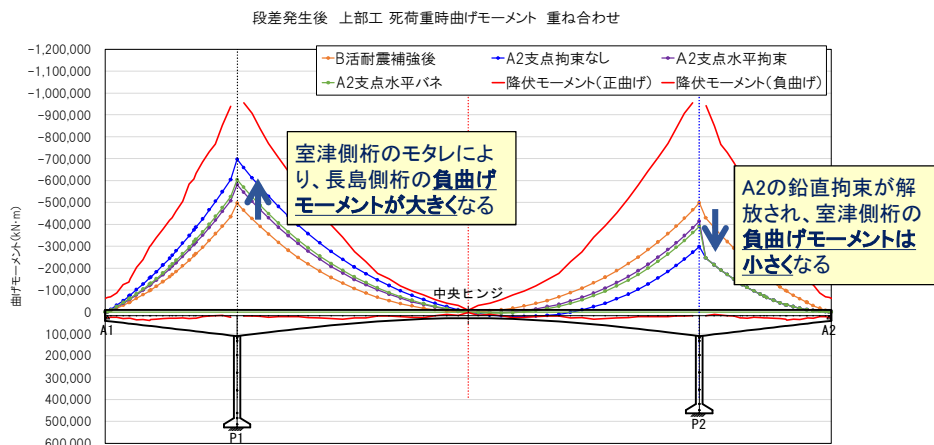
A2橋台部全体の許容耐力 : 4,178 kN × 8本 ≒ 33,400 KN



(2) 段差発生後の事象のケーススタディ

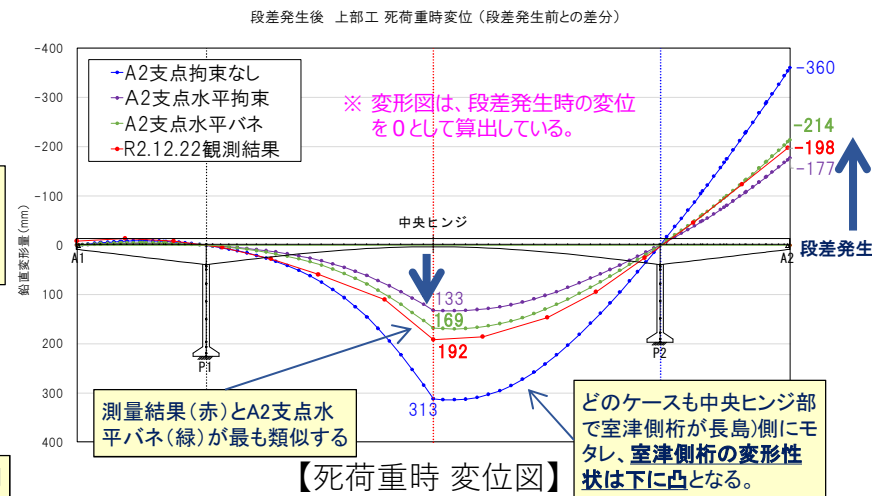
【3ケースの解析結果】

- 解析結果では、段差発生により、室津側の桁が長島側の桁にモタレた状態が見られる。
- 上部構造は、合成応力度が許容応力度を超過する箇所も見られるが、発生モーメントは降伏モーメント内となっている。
- 変位は、段差発生状況に対してA2支点水平バネ支持のケースに類似傾向が見られる。

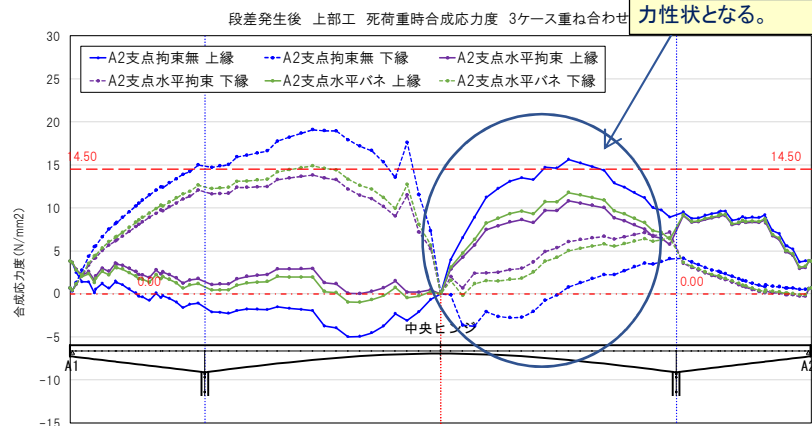


【死荷重時 モーメント図】

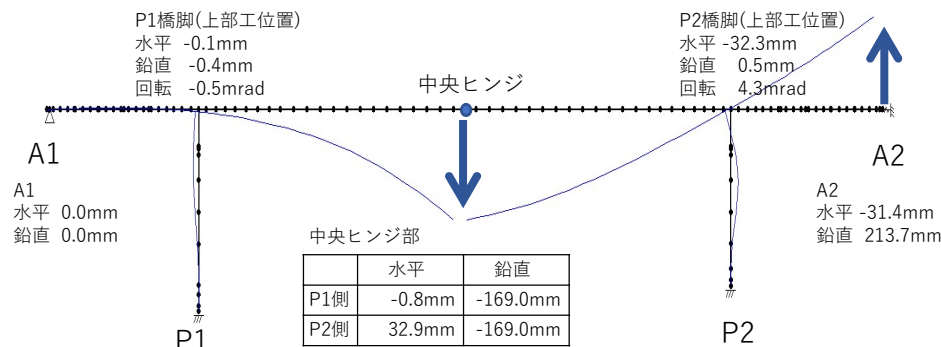
長島側桁へのモタレで、室津側桁は上縁の圧縮が卓越する応力性状となる。



【死荷重時 変位図】



【合成応力度図】

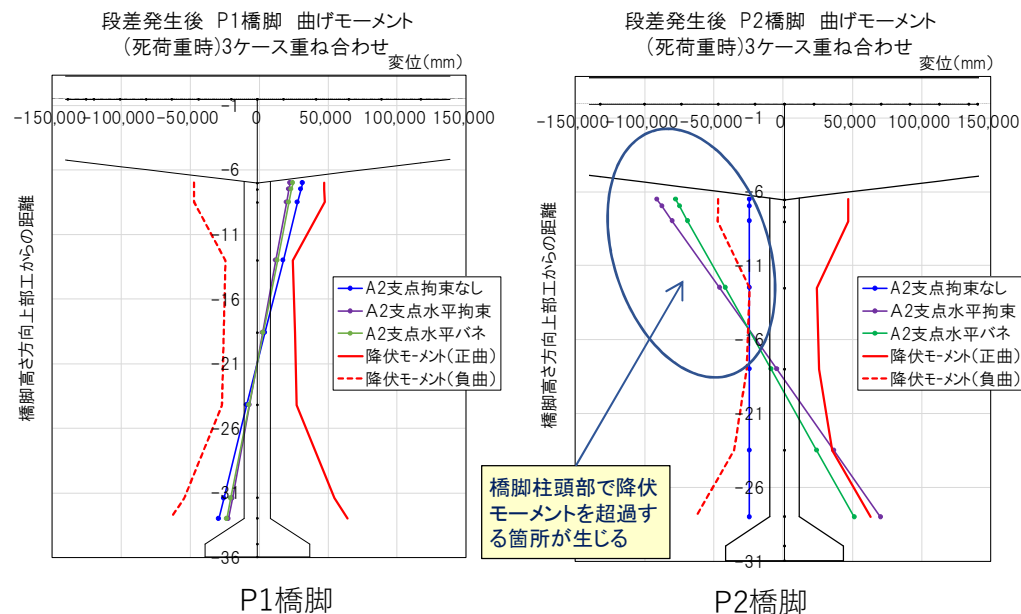


【A2 支点バネ拘束時の変位図 (死荷重時)】

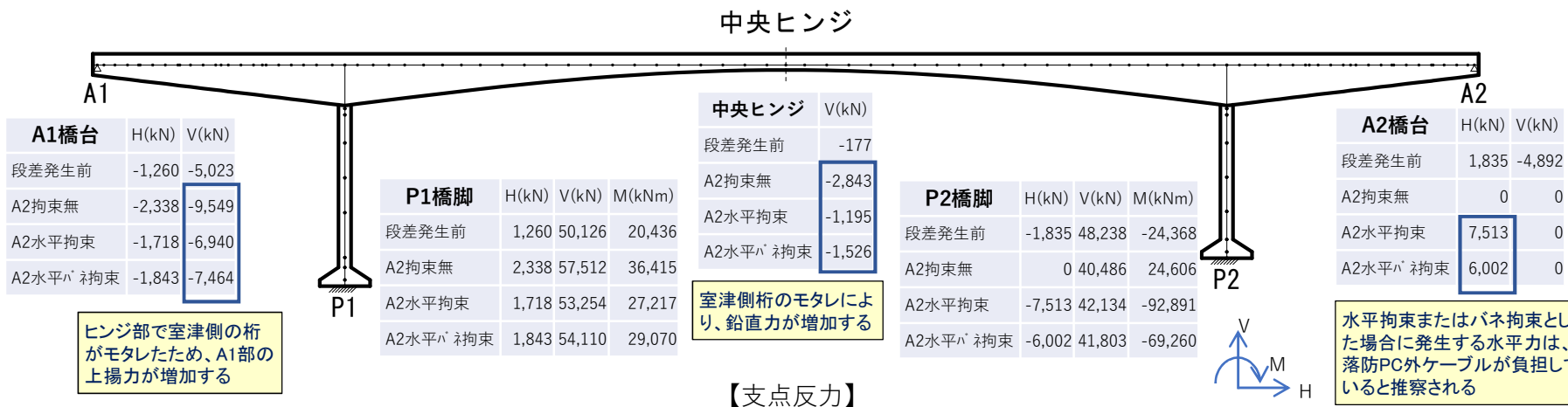
(2) 段差発生後の事象のケーススタディ

【3ケースの解析結果】

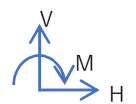
- A2橋台の水平方向を拘束するケースおよびバネ拘束とするケースでは、**解析上P2橋脚柱頭部で降伏曲げモーメントを超過する**（現地調査でP2柱頭部にひび割れ幅最大2mmを確認）。
- 各解析ケースで、**A1橋台(主に上揚力)**および**中央ヒンジ部**の鉛直反力の増加が顕著。
- 段差発生時、A2橋台の水平方向を拘束またはバネ拘束としたケースでは、**A2支点部の水平力が大きく増加する**。



【各解析ケースでの橋脚のモーメント図】



【支点反力】



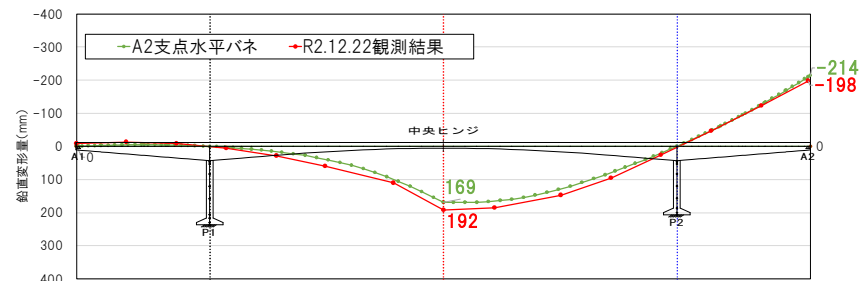
水平拘束またはバネ拘束とした場合に発生する水平力は、落防PC外ケーブルが負担していると推察される

(2) 段差発生後の事象のケーススタディ

【計測結果との整合】

1) 水準測量結果との整合 (橋面鉛直変位)

桁全長で計測結果とA2水平方向をバネ拘束とした場合の解析値の傾向が概ね一致。

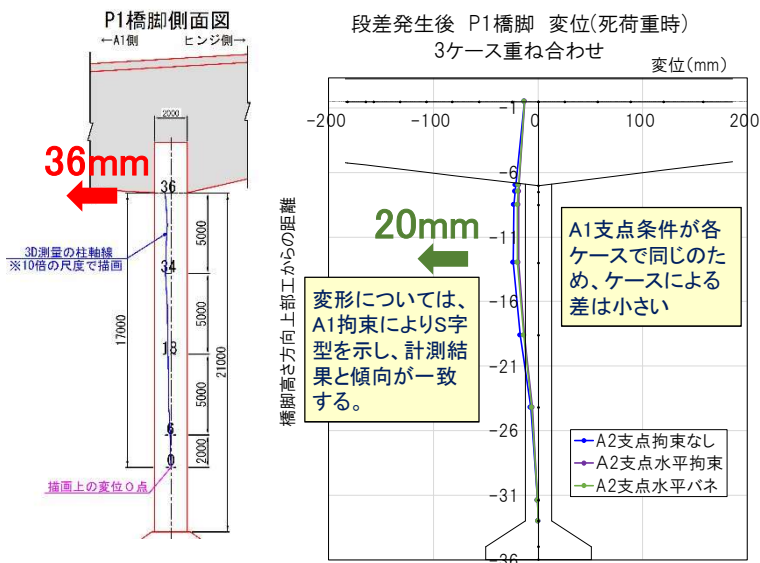


【計測結果とA2水平バネケースとの整合確認【変位図】】

2) 3D測量による橋脚の変形計測結果との整合

計測結果は概ねS字型を示しているが、A2水平拘束なしの場合は片持ち形状の変形モードとなり傾向が異なる。これに対し、バネ拘束を含めA2支点を水平拘束した場合はS字型の変形モードとなり傾向が一致する。

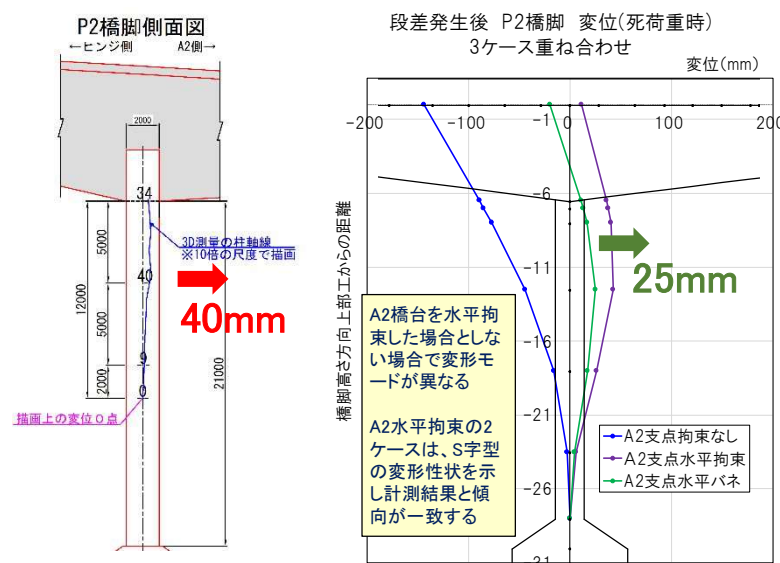
【P1橋脚】



【計測結果】

【解析値】

【P2橋脚】



【計測結果】

【解析値】

- ※ 3D測量による計測
- 計測値は、鉛直軸からの差異として変位量を計測したもの。
 - P1橋脚水平変位量は、測量を実施できた柱頭部下方17mを変形のゼロ点として整理。
 - P2橋脚水平変位量は測量を実施できた柱頭部下方12mを変形のゼロ点として整理。

(2) 段差発生後の事象のケーススタディ

【計測結果との整合】

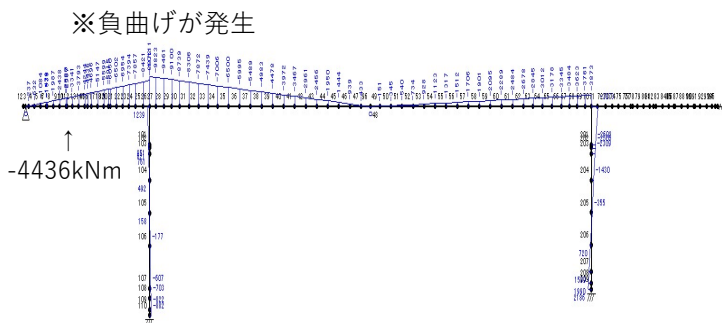
3) 载荷試験結果との整合 (車両走行による影響)

- 鉛直変位では、解析結果と測量結果に差異が見られる。
- 応力度の圧縮・引張の傾向も、解析結果と载荷試験結果で一致しない箇所が見られる。

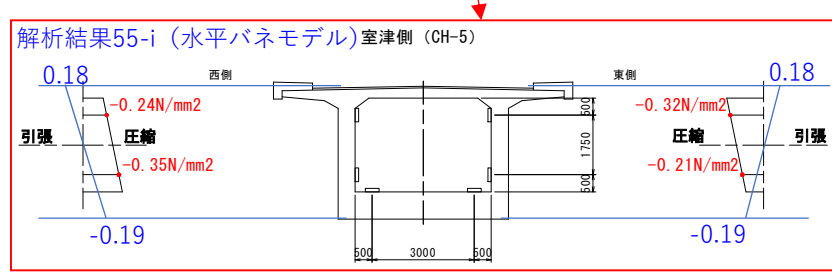
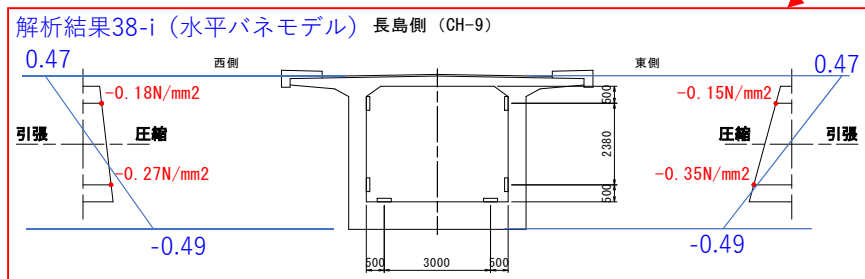
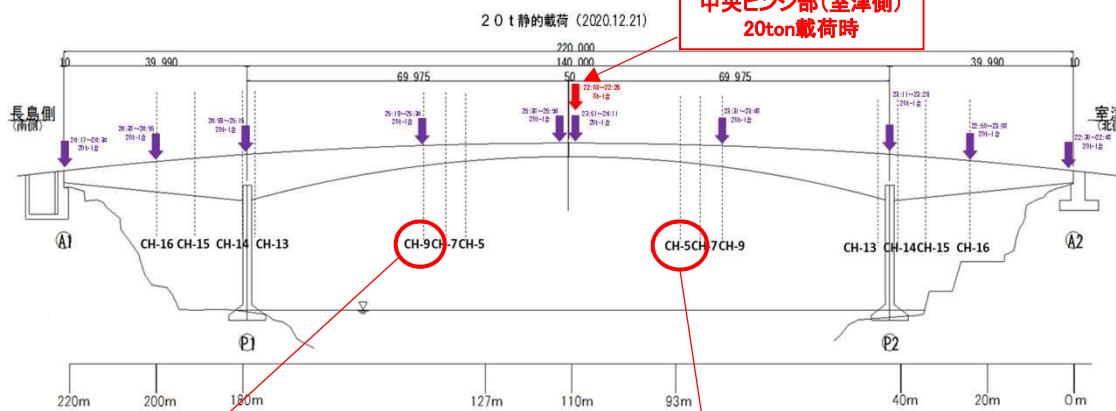
【中央ヒンジ部鉛直変位の検証】

- ◆ 解析結果
ヒンジ部 16.6mm
- ◆ 水準測量結果
【A1側】西側: 1mm
【A1側】東側: -1mm
【A2側】西側: 2mm
【A2側】東側: 0mm

**中央ヒンジ部(室津側)
20ton载荷時**



【モーメント図 (水平バネモデル)】
解析値 (20t载荷荷重のみ)



解析結果では負曲げの応力性状に対し、測定結果は圧縮が卓越する傾向
→中央ヒンジ部で軸力(水平力)を伝達している可能性

解析結果では負曲げの応力性状に対し、長島側の結果と同様に測定結果は圧縮が卓越する傾向
→中央ヒンジ部で軸力(水平力)を伝達している可能性

(2) 段差発生後の事象のケーススタディ

【段差発生時の解析的検討の結果整理】

- ①モデルの変形では、**室津側の桁が長島側にモタれた状態**となり長島側の断面力や反力が増加している。
- ②増加した長島側上部工の応力は一部で許容応力度を超える箇所もあるが、室津側桁を含め**上部工の死荷重時の発生モーメントは降伏モーメント以下**となる。
- ③**段差発生後の桁の変形はA2橋台の水平拘束条件を「バネ支持」とするモデルが最も整合**するが、載荷試験での応力状態との整合が検証できないことや、ヒンジ部の拘束状態など不確定要素もあり、**正確な応力状態の把握は困難**。
- ④**橋脚の変形性状**は、3D測量で確認された「概ねS字の形」に対して、**A2橋台の水平拘束条件を「拘束」あるいは「バネ」としたモデルが変形の形として類似**する。
- ⑤橋脚は、室津側の**P2橋脚柱頭部**（ひびわれ最大2mm発生箇所）において**降伏曲げモーメントを超過している可能性**が高く、橋脚の塑性化も考慮した更なる検証を要する。

【まとめ】

- 複数ケースの解析より、**上部工や橋脚の変形性状が計測結果と概ね整合**するケースがあり、**段差発生後の応力・反力の変化やそれにより負担増となる部位を推察**できた。
- 上記を踏まえ、負担増となる部位が発生している状態を解消し、橋の応力状態を元に戻すには、死荷重時での**中央ヒンジ部の応力を開放**する必要がある。

(3) 「負担増」となる部位の安全監視

【安全監視の目的と監視項目】

- ◆大変形については、応急復旧①により、固定化工事および中央ヒンジ部が正対してぶつかり合う対策を行ったため、落橋することはない。
- ◆解析（ケーススタディ）と計測結果は概ね整合しており、その結果、段差発生により「負担増」となっている箇所が確認できたため、当該箇所については継続的に安全監視を行う。
- ◆想定している橋の挙動と異なる事象が確認された場合、現地にて確認を行う。

①中央径間の引張応力

【理由】解析で引張応力の「負担増」が確認された
 【監視項目】応力の経時変化(ひずみゲージ)

②P2橋脚柱頭部のひび割れ幅

【理由】解析でP2橋脚柱頭部が降伏モーメントを超過するケースが確認された
 【監視項目】ひび割れ幅の経時変化(亀裂変位計(パイゲージ))

③A1橋台部端横桁のひび割れ幅

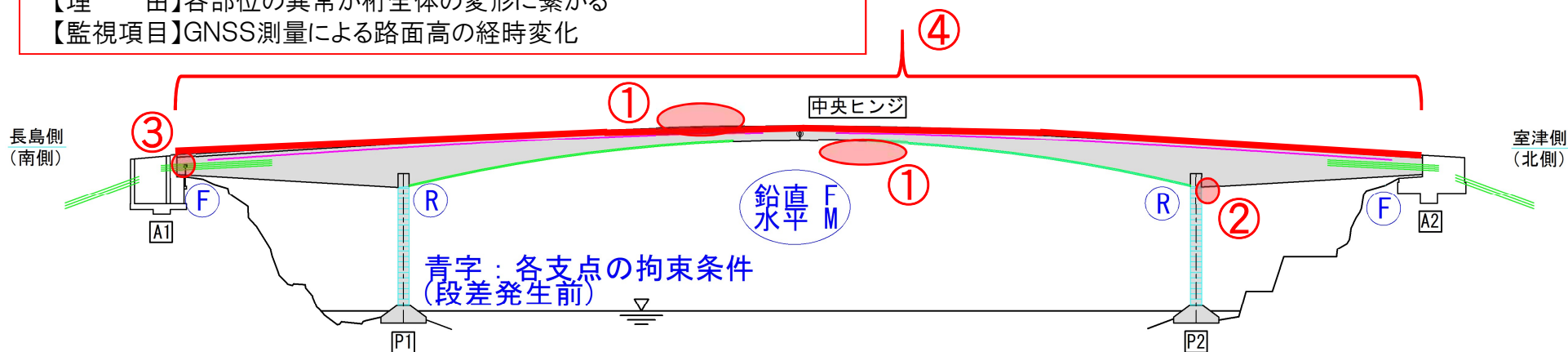
【理由】解析でA1橋台の負反力の増加が確認された
 【監視項目】ひび割れ幅の経時変化(亀裂変位計(パイゲージ))

④桁全体の異常な変形と桁折れ

【理由】各部位の異常が桁全体の変形に繋がる
 【監視項目】GNSS測量による路面高の経時変化

【主な安全監視箇所】

- ①中央径間の引張応力
- ② P 2 橋脚柱頭部のひび割れ幅
- ③ A 1 橋台部端横桁のひび割れ幅
- ④桁全体の異常な変形と桁折れ



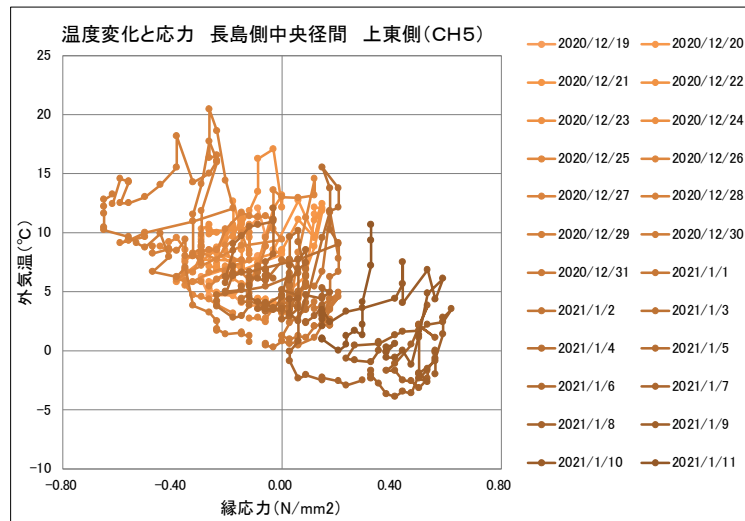
(3) 「負担増」となる部位の安全監視

【「負担増」が懸念される部位の経時変化】

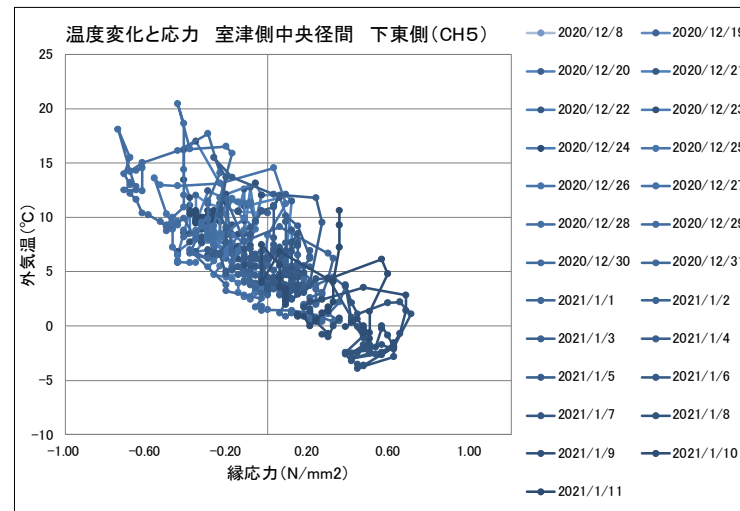
◆解析（ケーススタディ）により確認された「負担増」の状況・部位

⇒ 主に温度変化に対する橋の動きに対して、日々の動きの辻褄が合っているかを監視

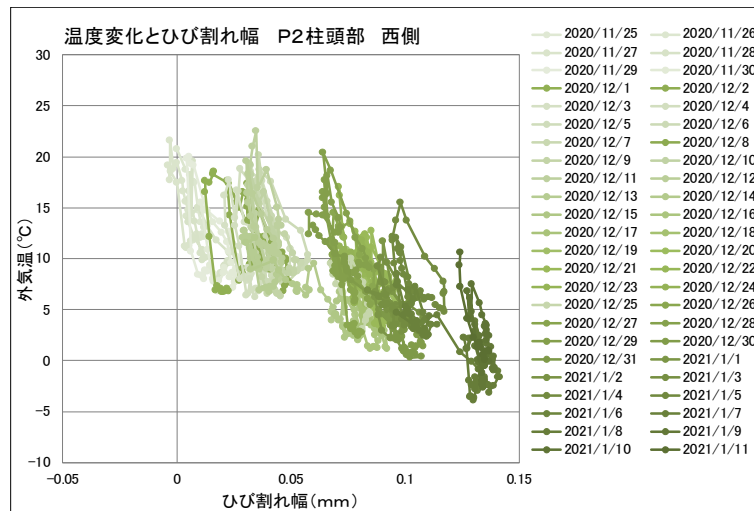
【中央径間（長島側） 上縁応力 の経時変化 引張：+】



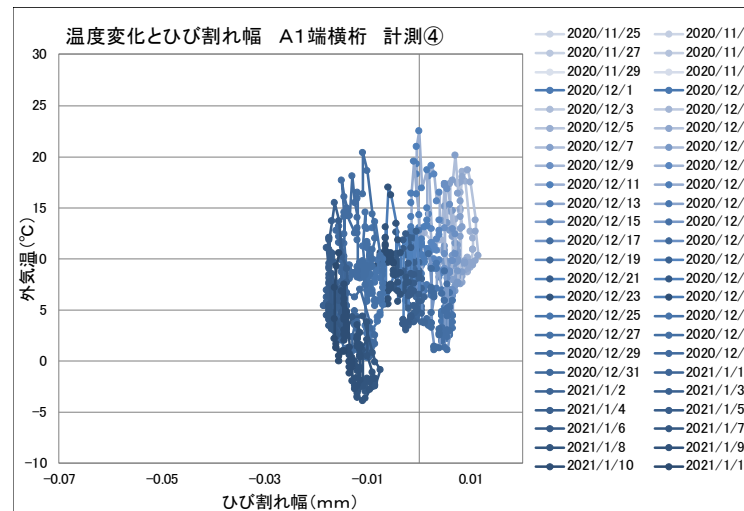
【中央径間（室津側） 下縁応力 の経時変化 引張：+】



【P 2 橋脚柱頭部のひび割れ幅 開き：+】



【A 1 橋台部端横桁のひび割れ幅 開き：+】



(3) 「負担増」となる部位の安全監視

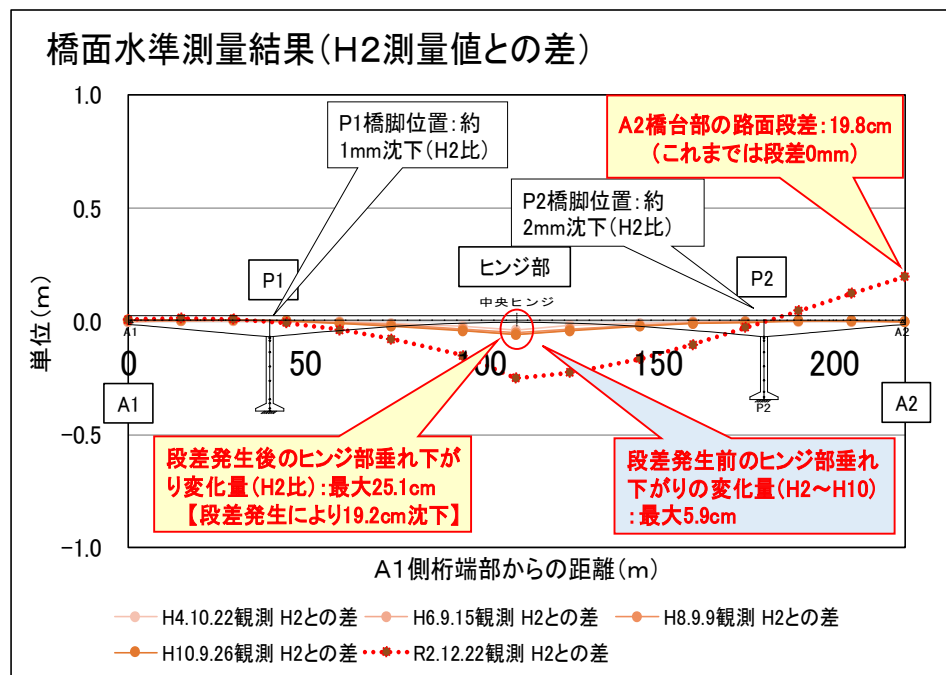
【「負担増」の各部位が異常を示すことによる桁折れ等の監視】

◆「負担増」となる各部位が異常を示すことによる、桁の異常な変形や桁折れが懸念される

⇒ 水準測量・GNSS測量により、桁の通りを監視

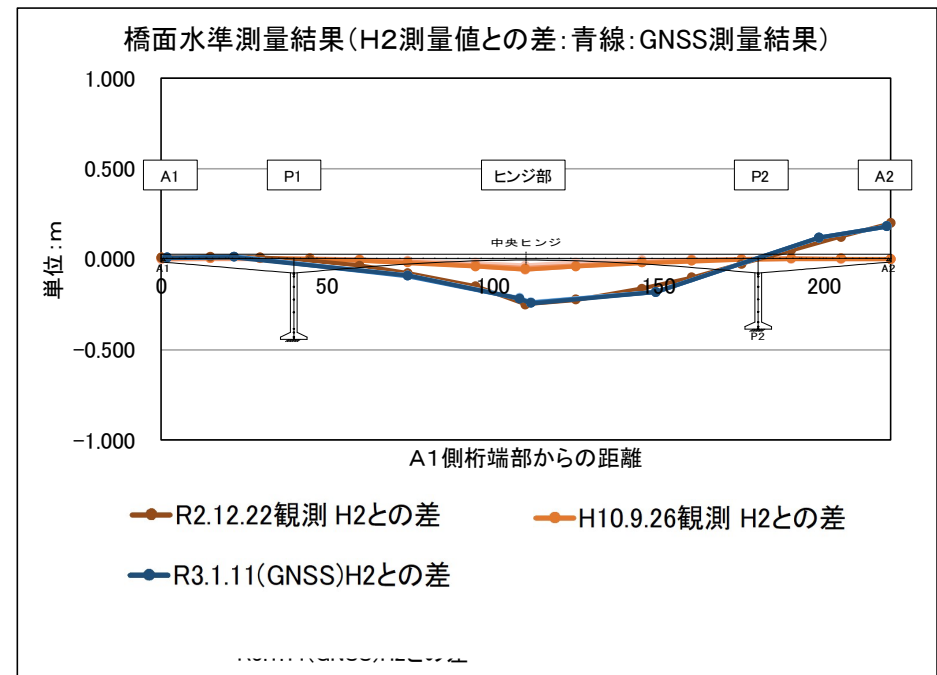
【段差発生前後の桁全体の動き】

・段差発生前後の水準測量結果



【段差発生後の桁全体の動き】

・GNSS測量により桁の通りの経時変化を監視



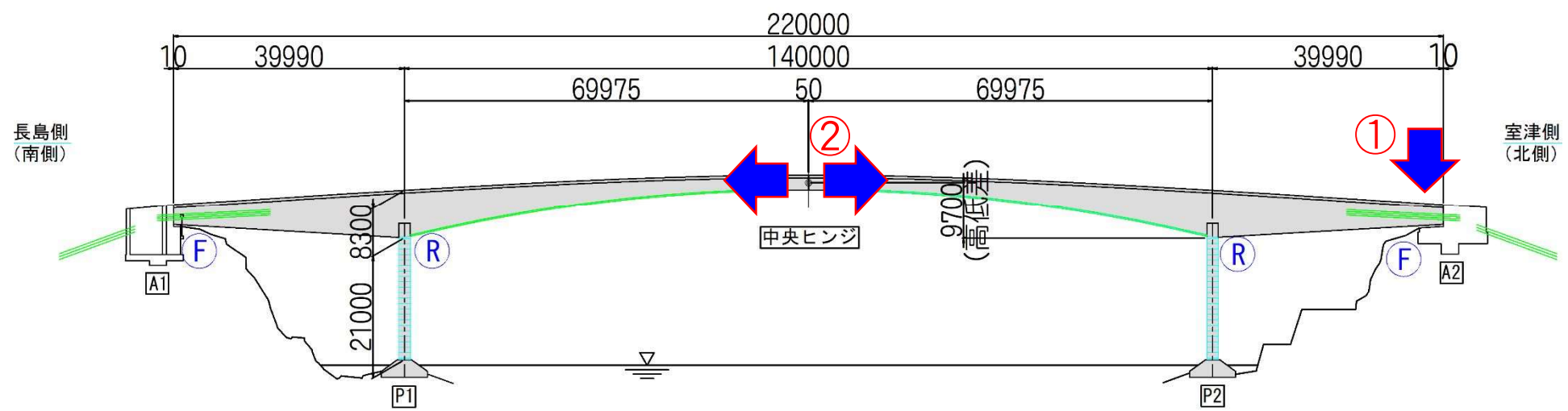
3) 本復旧対策について

◆本復旧対策の方針

＜本復旧＞：橋の応力状態を元に戻すため、**中央ヒンジ部の応力を開放する**

- 1) 20cm浮き上がった**桁を元の位置に戻し、段差を解消する**
- 2) 段差前の構造系は維持し、**各部位で必要な補強を実施する**

1) 20cm浮き上がった**桁を元の位置に戻し、段差を解消する**



【工法例】

② 中央ヒンジ部
 桁端面にジャッキを設置。お互いの桁を水平に押し広げる方向に水平力を作用させる。

① A2橋台桁端部
 桁端部のグラウンドアンカーを橋面から鉛直方向に緊張し、桁を下方向に押し下げる。

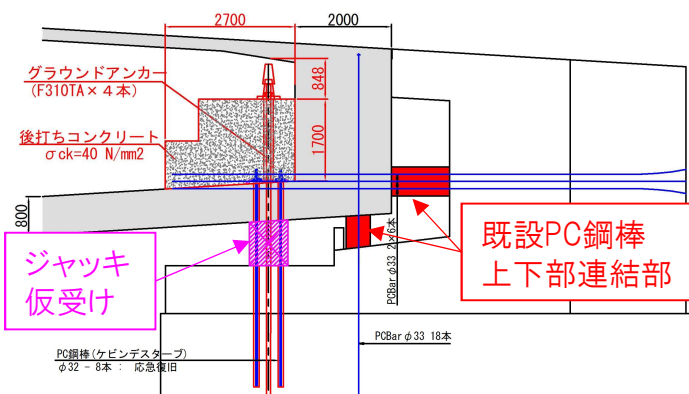
※段差発生後の応力状態を詳細かつ安全側に把握した上で、最適な工法を選定する。

◆本復旧のために必要となる検討・作業内容

<工 事>

【桁を元の位置に戻す前に必要な工事】

- ①A2橋台 既設PC鋼棒上下部連結部の撤去
- ②A 2 橋台部桁下のジャッキ仮受け (グラウンドアンカー緊張による桁下げ調整用)



【桁を元の位置に戻す工事】

- ①A2橋台グラウンドアンカー緊張力導入
- ②中央ヒンジ部へのジャッキ水平力導入

【桁を元の位置に戻した後の各部位の補強工事】

- ①A2橋台鉛直・水平支持機能の復旧
例) コンクリート台座、支承の追加
- ②P2橋脚柱頭部の補強
- ③ (必要に応じ) 上部工・中央ヒンジ部・P1橋脚の補強

<必要となる調査・設計>

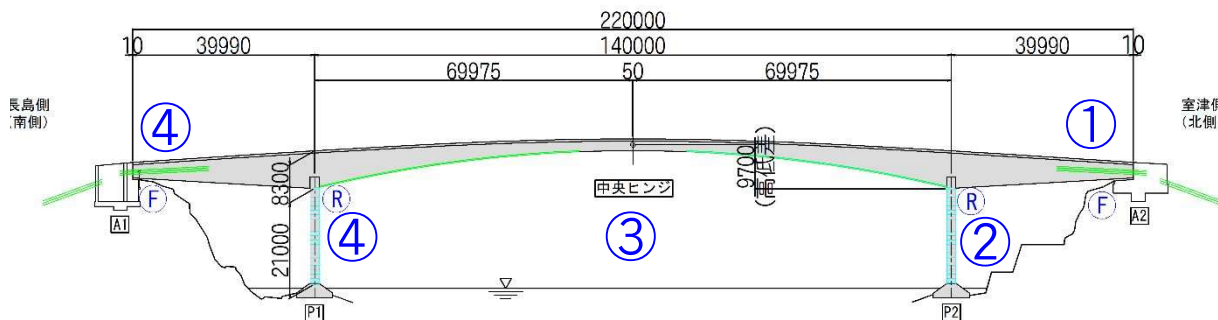
- (調査) A2橋台部の上下部工連結部の調査
- (設計) A2橋台上下部連結部の撤去計画
A2橋台桁下仮受け構造設計

- (解析) 既往補強から段差発生、本復旧までの施工ステップの詳細追跡
- (解析) P2橋脚柱頭部の塑性化を考慮したモデルによる検証
- (設計) 導入張力・ジャッキ反力の最終設定、各部応力度の詳細検証
- (設計) 施工計画、ジャッキ反力導入時の局部応力に対する対処・補強方法
- (調査) 水平外ケーブルの張力調査
- (調査) 鉛直張力導入試験
例) A2グラウンドアンカー試験張力導入

- (設計) 各部位の補強・補修詳細設計
- (調査) 施工時モニタリング
(以下計測モニタリング項目案)
- ・橋面変位 : A2桁端部、ヒンジ部での変位計測
- ・橋脚変状 : P1・P2橋脚の変形、P2柱頭部、A1桁端部のひびわれ幅
- ・応 力 : 主桁主要断面の応力変動

◆(参考)損傷部位に対する補強

2) 段差前の構造系は維持し、各部位で必要な補強を実施



④ 上部工およびP1橋脚
 <※最終解析結果で判断>
 【目的】段差の発生やジャッキ水平力導入による付加応力について必要に応じた補強を実施

➤ 特に下記部材に着目し補強の要否を検討する

- 1) P1橋脚(柱頭・基部)
- 2) 端横桁にひび割れが生じているA1橋台桁端部

② P2橋脚
 【目的】柱頭部に生じた2mmの亀裂に対する補修・補強

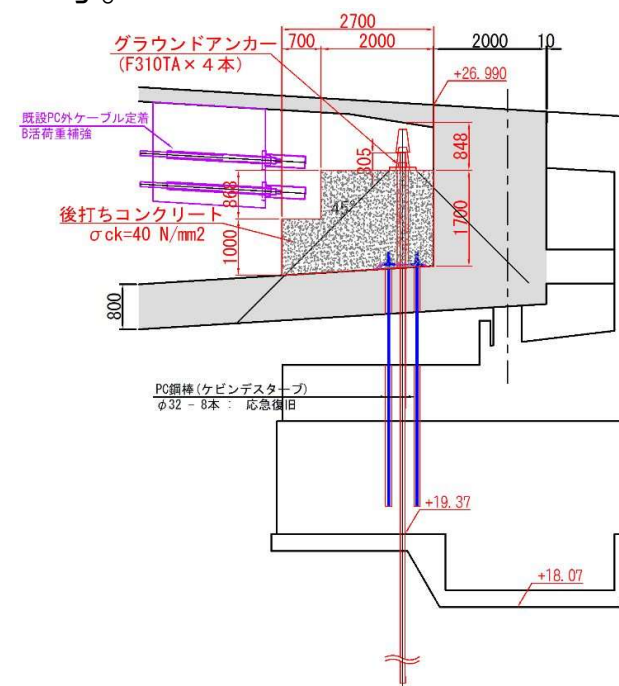
③ 中央ヒンジ部
 <※最終解析結果で判断>
 【目的】段差によりヒンジ部材で想定される最大応力履歴を考慮した補強

➤ ヒンジ部材の塑性化が想定される場合、補完する構造の追加あるいは補強を実施

① A2橋台桁端部

【目的】既設PC鋼棒の失われた拘束力の復元

➤ グラウンドアンカーにて、桁の位置を元に戻すための張力に加え、活荷重に抵抗する鉛直拘束力を付与。



➤ 既設水平PC鋼棒の機能を補完する構造(水平支承の追加等)について検討。

(3) 本検討会議について

◆本検討会議の考え方

時間軸

【検討会議】

【工事】

【原因究明】【安全監視】

<第1回>
1) 損傷原因の調査方法について
2) 検討会議の進め方について

<第2回>
1) 損傷原因の調査状況について
2) 本復旧対策の方向性について

<第3回>
1) 損傷原因について
2) 本復旧対策について

(案)
1) 損傷メカニズムの推定について
2) 同じ構造を持つ橋梁の調査方針について

<応急復旧①> : 現状の変状状態を維持するための緊急対策
A2部各種桁移動制限工
中央ヒンジPC鋼棒相互連結工
ユニブロック設置
20年12月21日

<応急復旧②> : 現状の変状状態を維持するための緊急対策
A2部桁端グラウンドアンカー工
中央ヒンジPCケーブル相互連結工

<本復旧> : 橋の応力状態を元に戻すため、中央ヒンジ部の応力を開放する
1) 20cm浮き上がった桁を元の位置に戻し、段差を解消する
2) 段差前の構造系は維持し、各部位で必要な補強を実施

長寿命化対策

<はつり調査>
1) 鉛直方向のPC鋼棒状態調査
2) 台座前面の橋台コンクリート物性調査

<PC鋼棒取出し>
鉛直PC鋼棒の一部を取り出す

<損傷メカニズム>
1) 鉛直方向のPC鋼棒の成分調査等
2) 台座部分のコンクリート物性調査

多項目

重点部位

定期点検