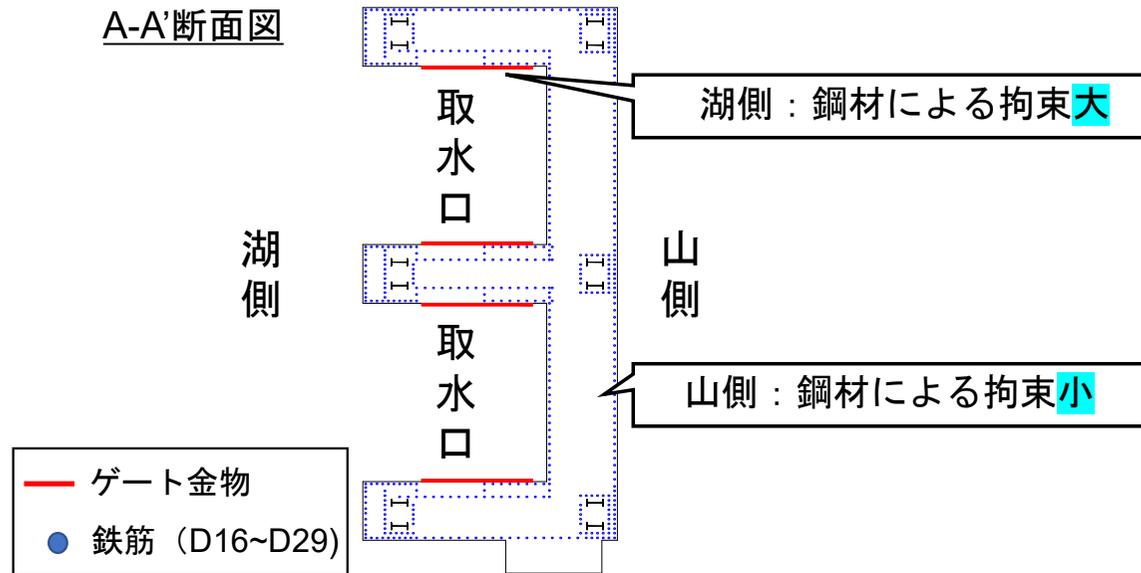
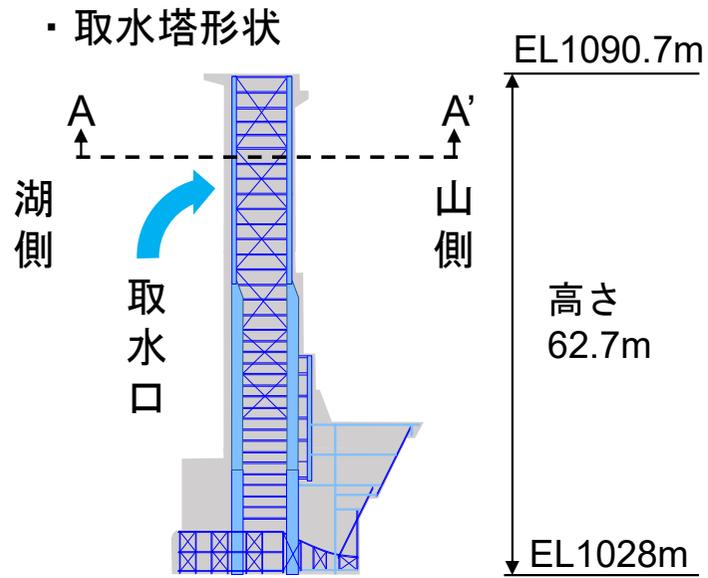


PC鋼線による補強を実施した取水塔の モニタリングデータの分析

2024.12.19
創成研究Ⅱ インターンシップ成果発表会

金沢大学大学院 コンクリート構造研究室
滝澤 航大

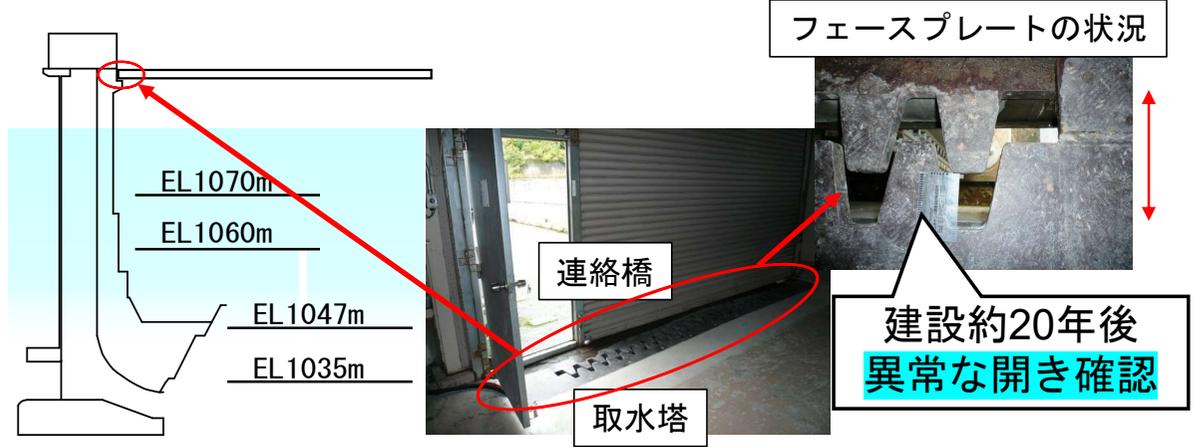
取水塔の概要



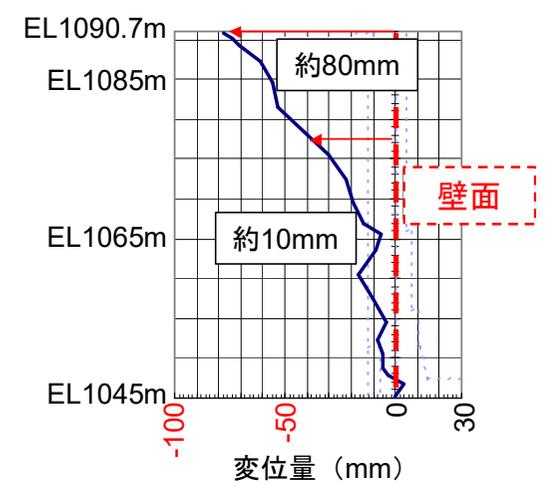
取水塔の変形とその要因

変状説明

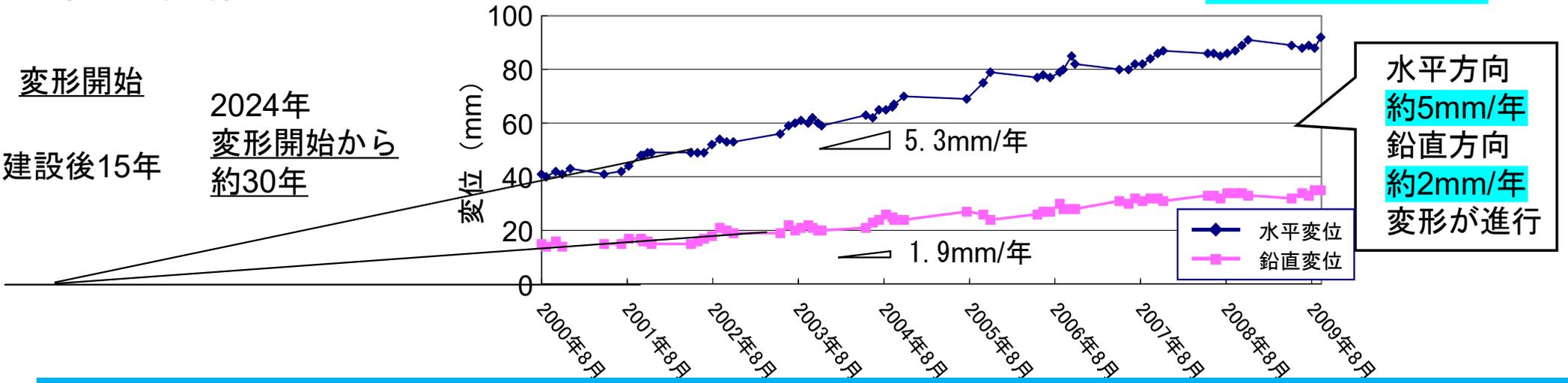
・ 取水塔の変状発見



・ 壁面形状調査



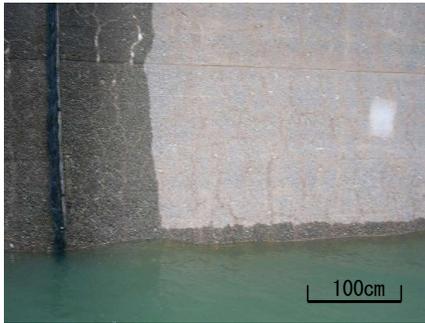
・ 変状の経時変化



建設後20年で取水塔の変形確認、変形は水平・鉛直方向に進行している

変形の要因説明

・ 外観観察

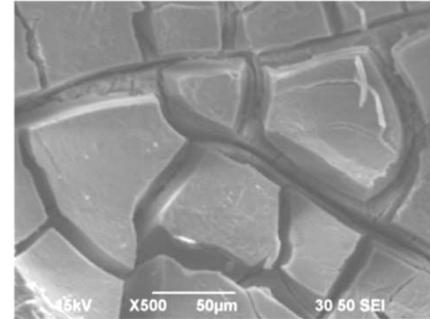


広範囲に
亀甲状のひび割れ



内面壁

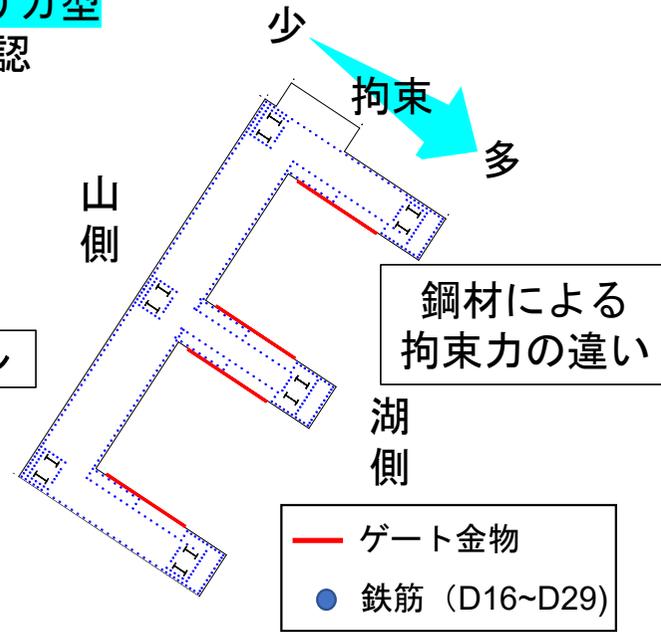
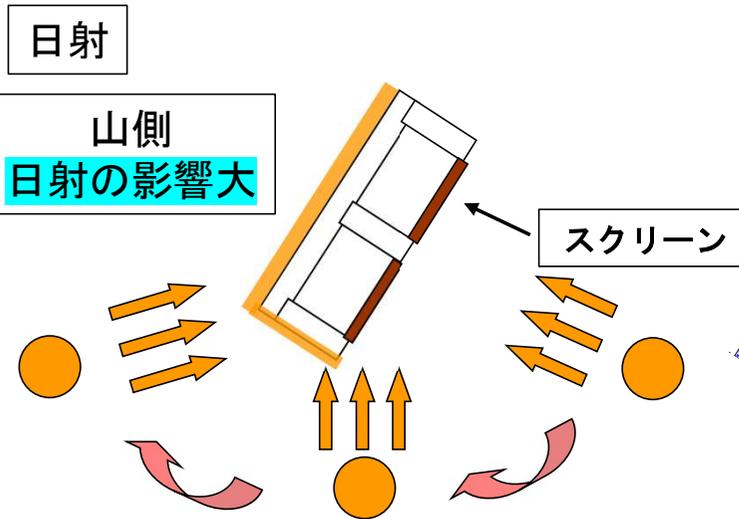
・ SEM観察



アルカリ-シリカ型
のゲル確認

アルカリシリカ反応
に伴う膨張により
変形が進行

・ 環境的要因



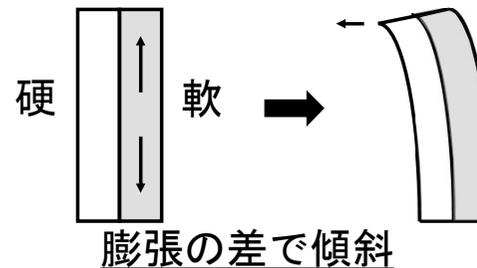
環境や構造条件の違いによりASR反応膨張の差が発生⇒取水塔が湖側に傾斜

変形の要因説明

・外

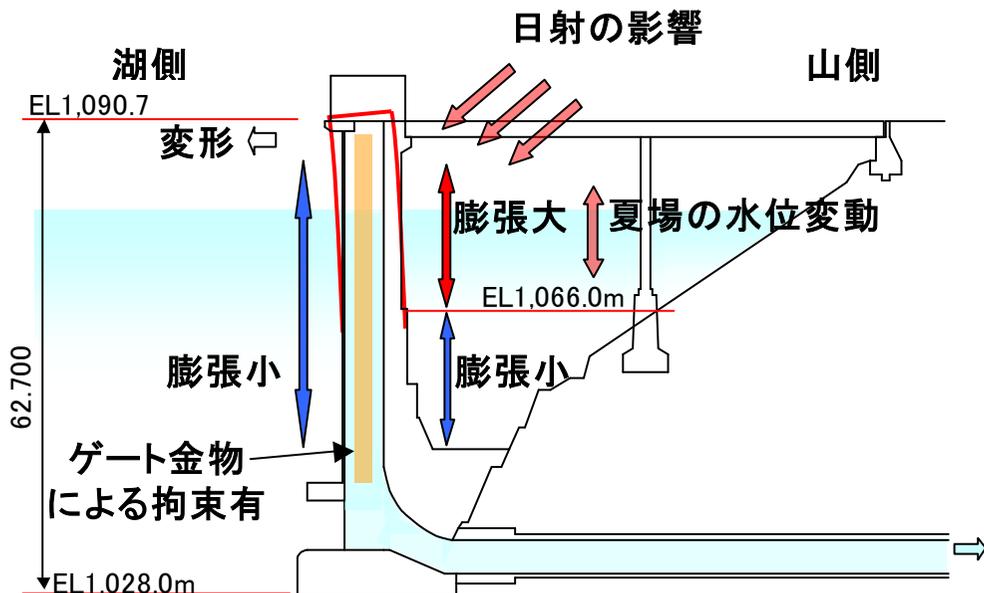
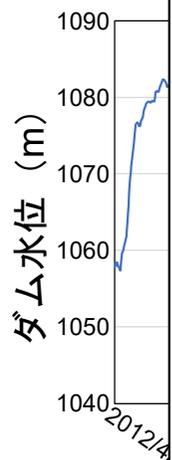
- ・変形の要因
 - ✓ ASR反応
 - ・環境条件
 - ✓ ダム水位の上下変動
 - ✓ 日射の影響
 - ✓ 鋼材の拘束による影響
- これらが複合的に働いて変形が進行

変形のメカニズム (委員会資料より)

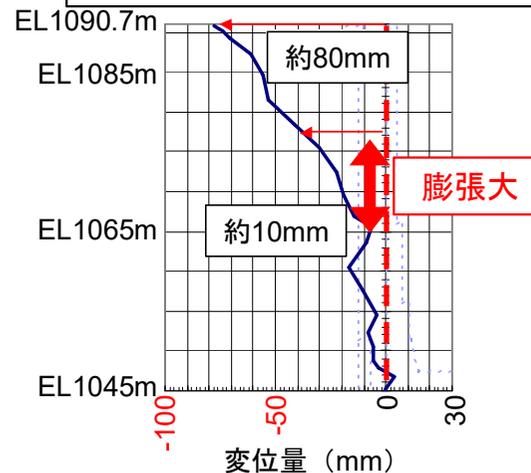


シリカ反応
膨張により
が進行

・躯体変



上部で変形が大きく出る



多
鋼材による
拘束力の違い

ト金物
(D16~D29)

環境や構造条件の違いによりASR反応膨張の差が発生⇒取水塔が湖側に傾斜

対策の実施とその効果

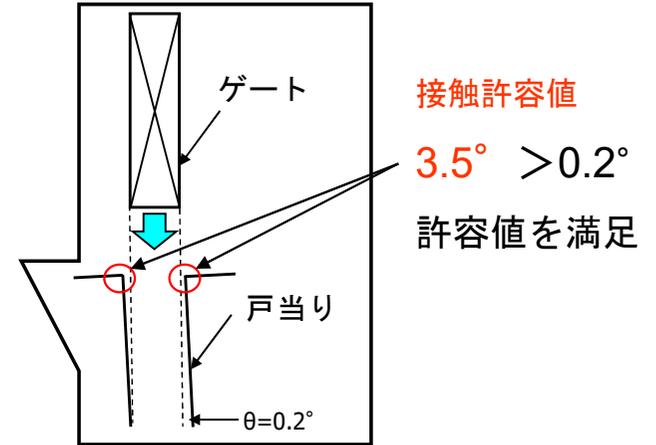
ASR対策工の説明

・取水塔の安定性評価

ケース		基準	判定
常時	転倒	偏心距離4.9m以内	OK
	滑動	安全率1.5以上	OK
地震時	転倒	偏心距離7.1m以内	OK
	滑動	安全率1.2以上	OK

設計時の基準を満足

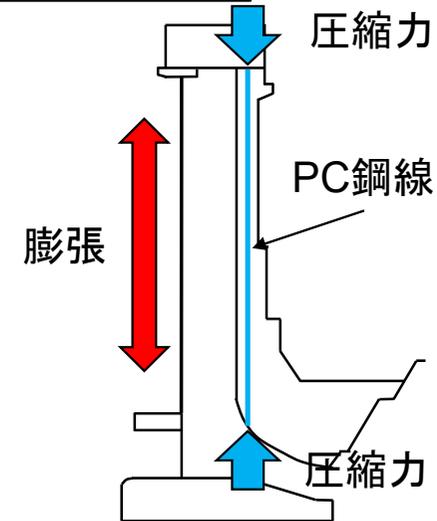
・使用性



安全性、使用性に問題はないがASRが今後も進行すると考えると予防的な対応が妥当である

・対策方法の選定

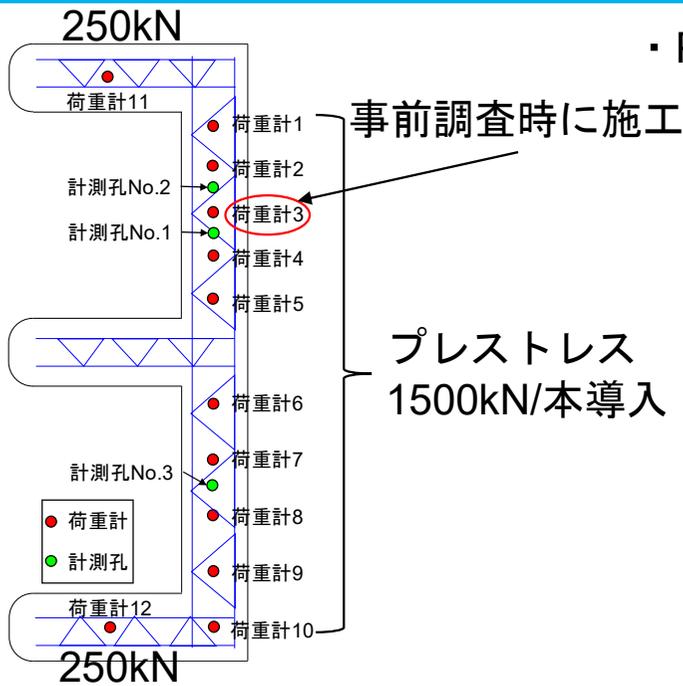
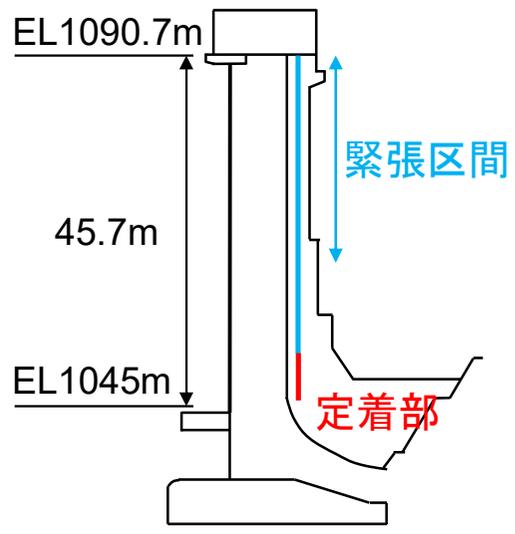
目的	工法例	今回の適用性
ASR反応抑制	表面への塗料塗布による水分遮断	× (取水塔下部が水中にあるため)
ASR変形拘束	PC鋼線による変形拘束	○
	外面へのプレキャスト板・鋼板巻付	△ (形状が複雑で拘束が困難)
劣化部除去	断面修復 (部分的改築)	× (大規模な修繕工事のため)



今後のASR進行を考慮し、予防的な対応としてPC鋼線による変形拘束を行う

対策工の効果

・ 対策工の概要

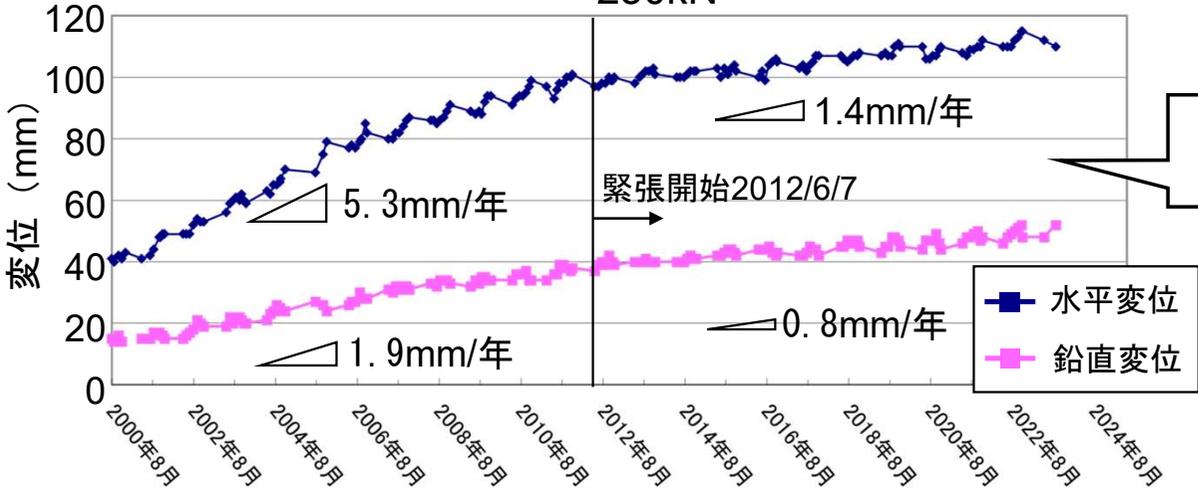


・ PC鋼線諸元

項目		仕様
ケーブル諸元	ケーブル構成	19本 × φ12.7mm
	公称径	63.5mm
	断面積	1875.5mm ²
	PC鋼より線の単位質量	15.70kg/m
定着体諸元		φ120mm, l=4700mm
引張荷重		3477kN
降伏点荷重		2964kN

国内最大クラスのPCアンカー

・ 対策工の効果



水平・鉛直変位
変形が鈍化



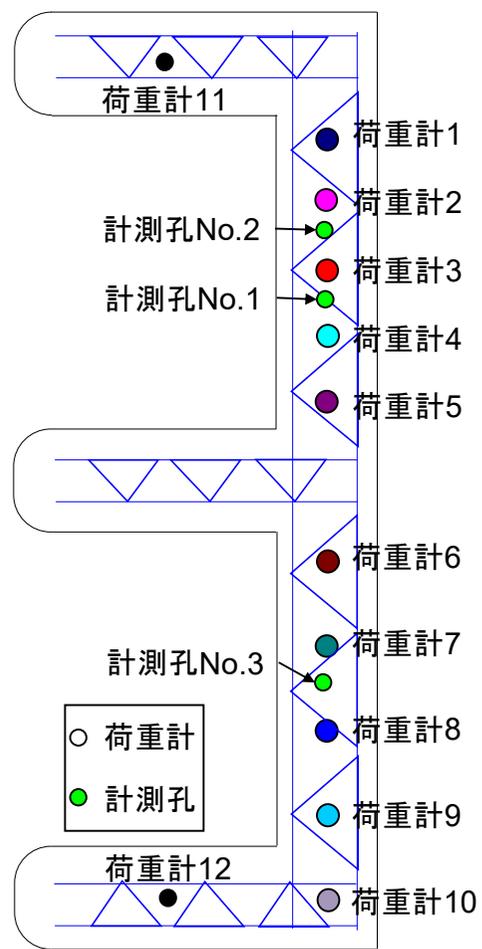
対策工による効果あり

PCアンカーによる変形拘束により
取水塔の水平・鉛直変位の増加傾向が鈍化
対策工による効果が確認された

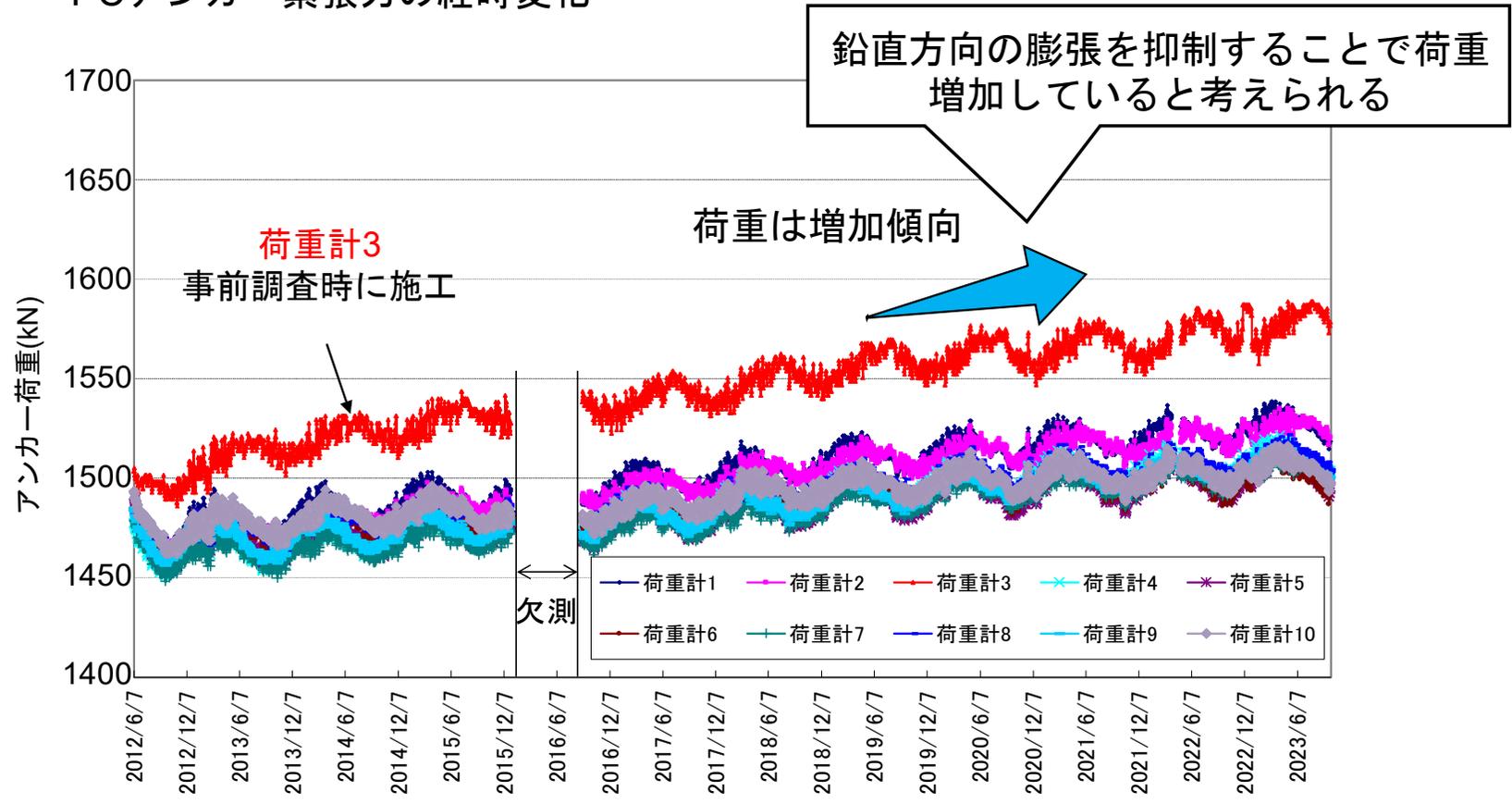
対策後のモニタリング

対策工後のモニタリング項目（アンカー荷重）

・ 荷重計設置箇所

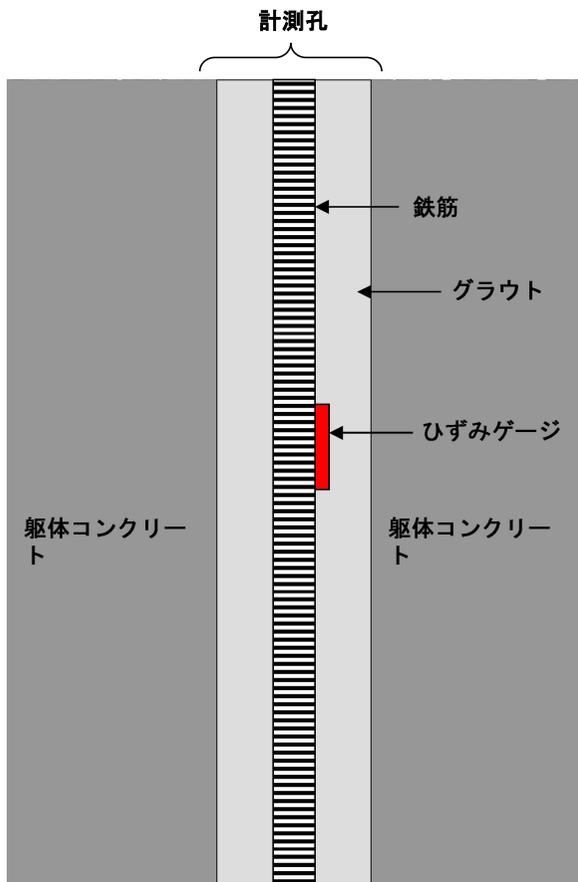


・ PCアンカー緊張力の経時変化

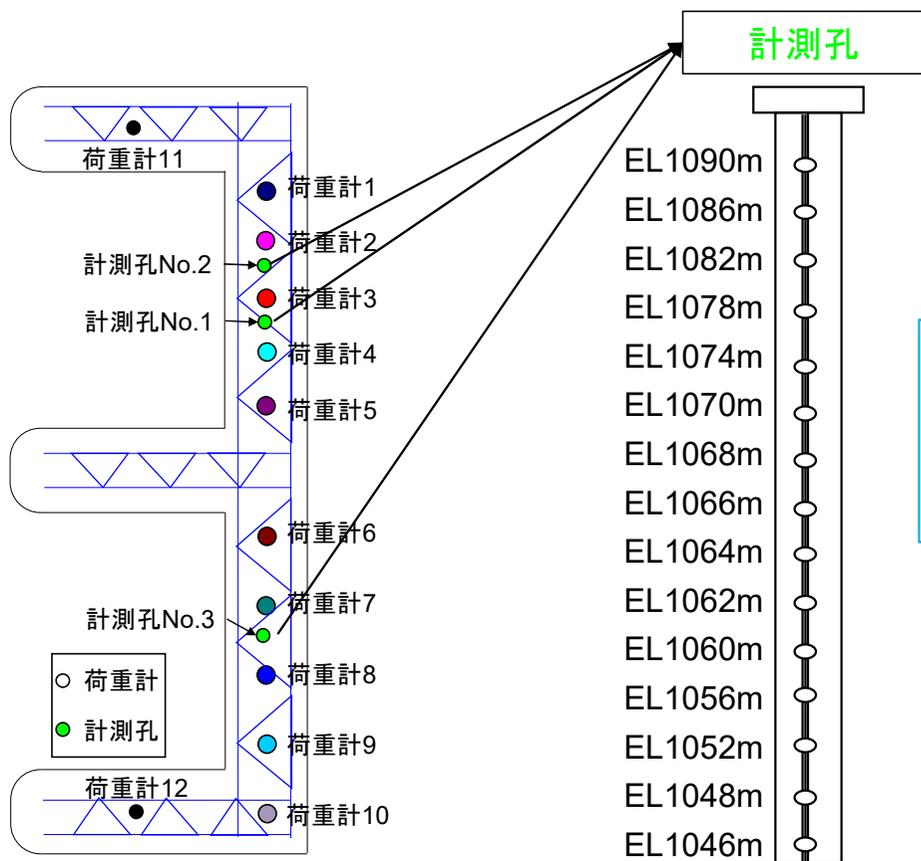


対策工後のモニタリング項目（ひずみ）

・ ひずみゲージ貼付状況



・ 計測孔でのひずみ計測



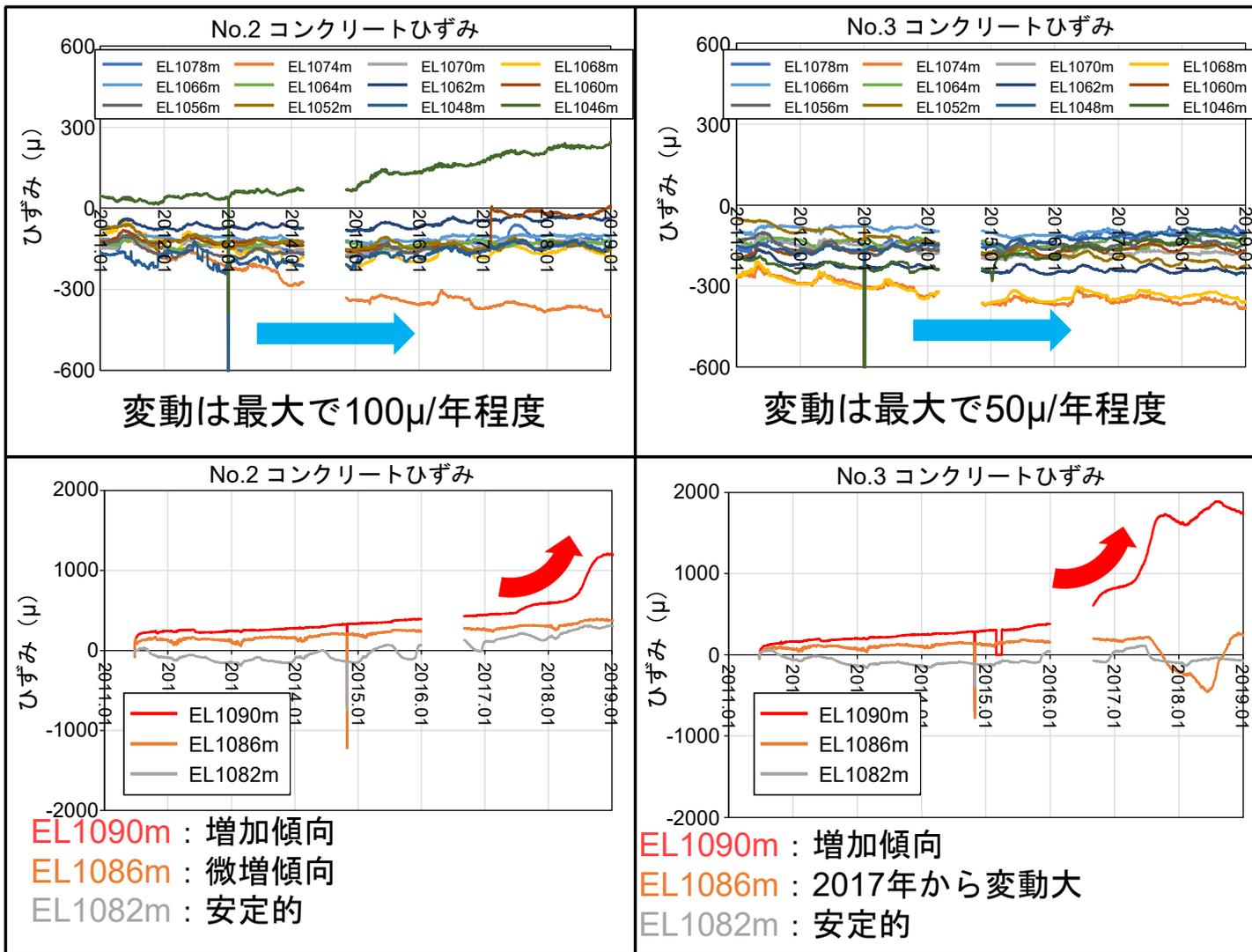
計測孔No.2
計測孔No.3
取水塔両側の代表値として
分析を行った

鉄筋のひずみゲージ（焼付型15深度
2~4mピッチ）

計測孔でひずみのモニタリングが行われており、本検討ではひずみに関して分析を行った

ひずみ分析結果

分析結果 ひずみの経年変化

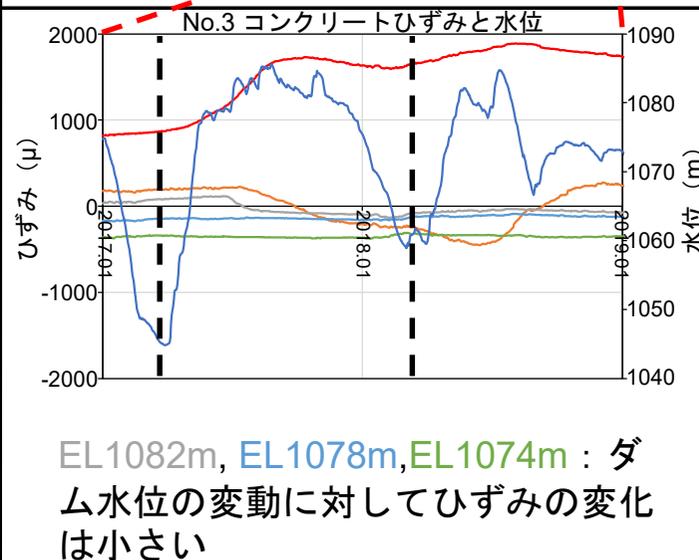
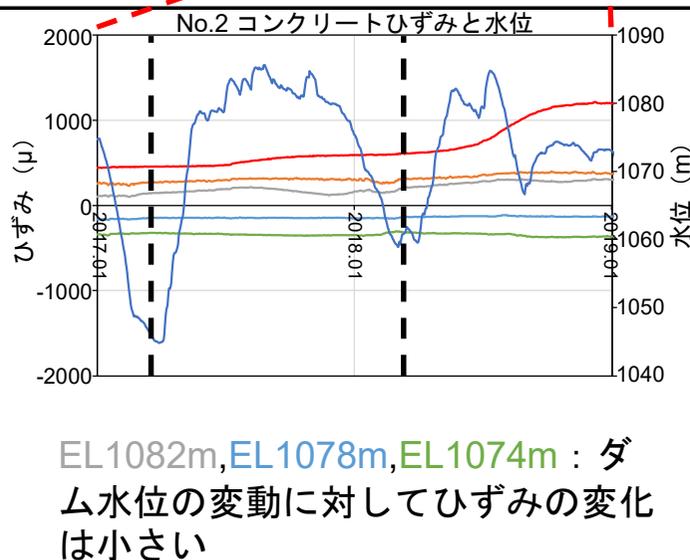
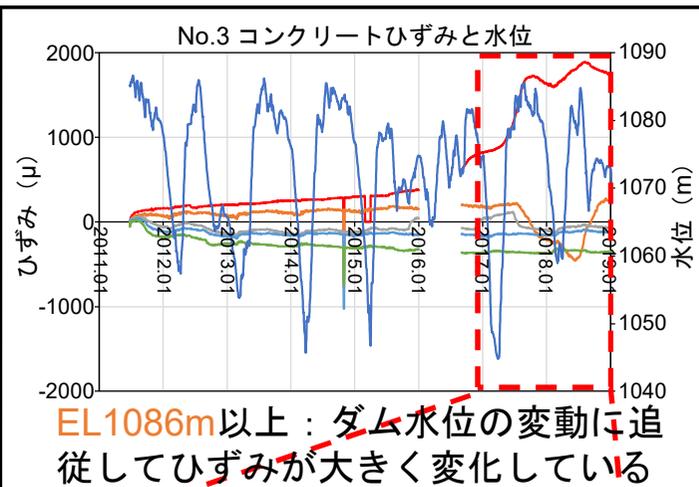
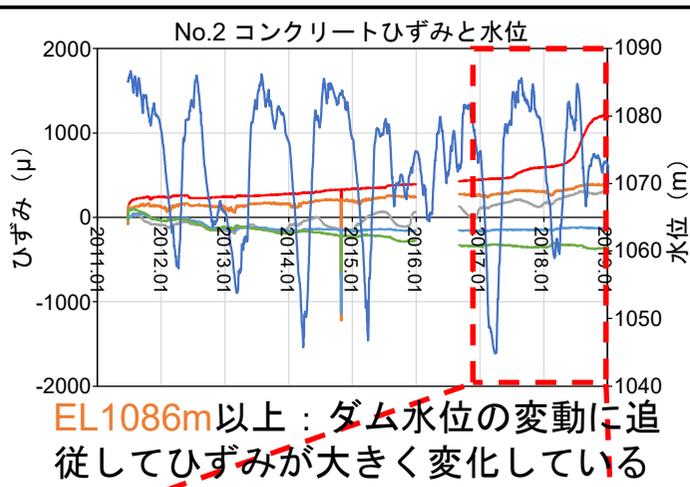


EL1046m~EL1078mはひずみは変動幅が小さく安定的

EL1086m以上はひずみの変動幅が大きく、増加傾向を示す深度も存在する

EL1086m以下でひずみの経年変化の変動は小さい、EL1086m以上で変動が大きく増加傾向が示唆される

分析結果 ひずみとダム水位



EL1086m、EL1090m

2017年以降特にダム水位の変動に追従して大きいひずみが発生する挙動がみられた



水位変動の影響を受ける

EL1078m以下

水位の変動に対して発生するひずみは小さい

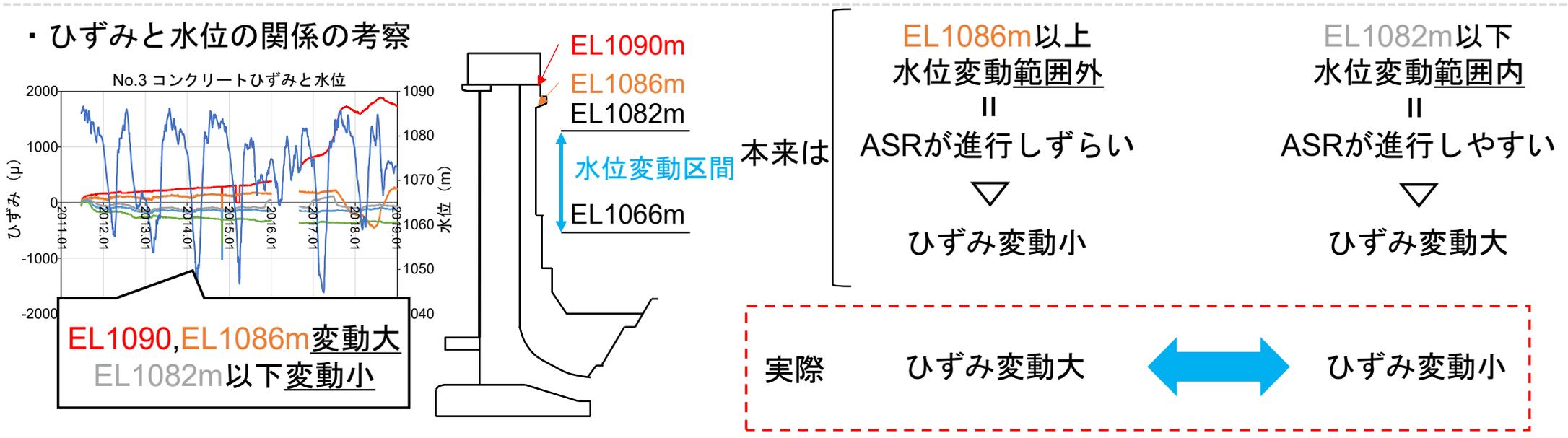
EL1086m以上で、2017年以降特にダム水位の変動に追従して大きいひずみが発生する挙動がみられた

ひずみの経年変化分析結果に対する考察

・分かったこと

- ① EL1082m以下でひずみの経年変化の変動は小さい、EL1086m以上で変動が大きく増加傾向が示唆される
- ② EL1086m以上2017年以降特にダム水位の変動に追従して大きいひずみが発生する挙動がみられた

・ひずみと水位の関係の考察



・検討すべき事項

- ✓ 水位変動範囲内のASRの反応性
- ✓ 水位変動範囲外の取水塔上部における変形の挙動

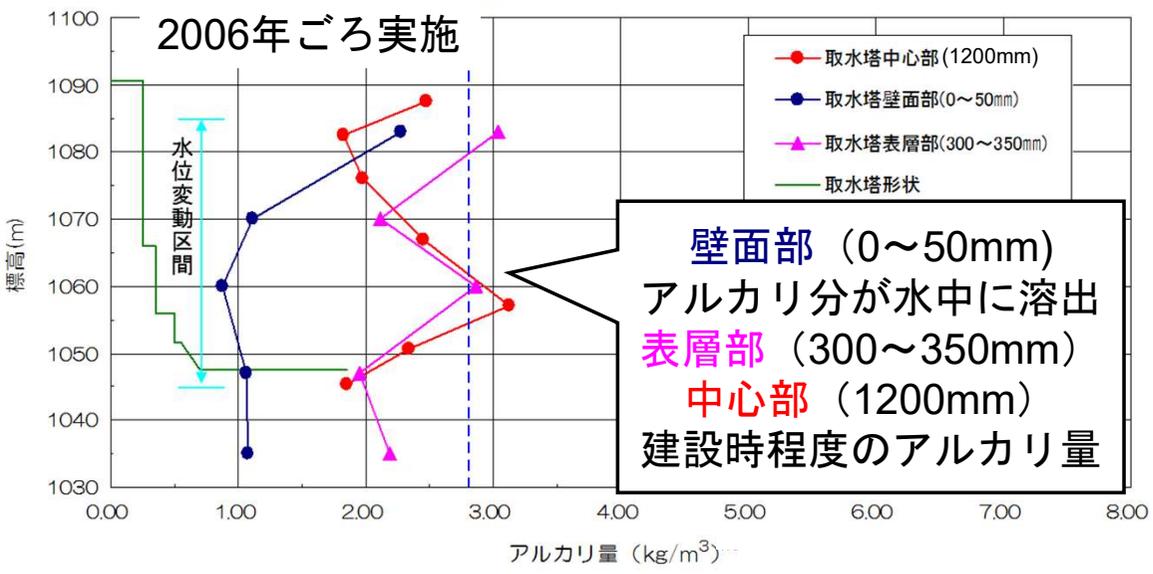
水位変動範囲外で取水塔上部のひずみ変動が大きく、ASR反応、上部の変形による影響が考えられる

ASRの反応性に関する検討

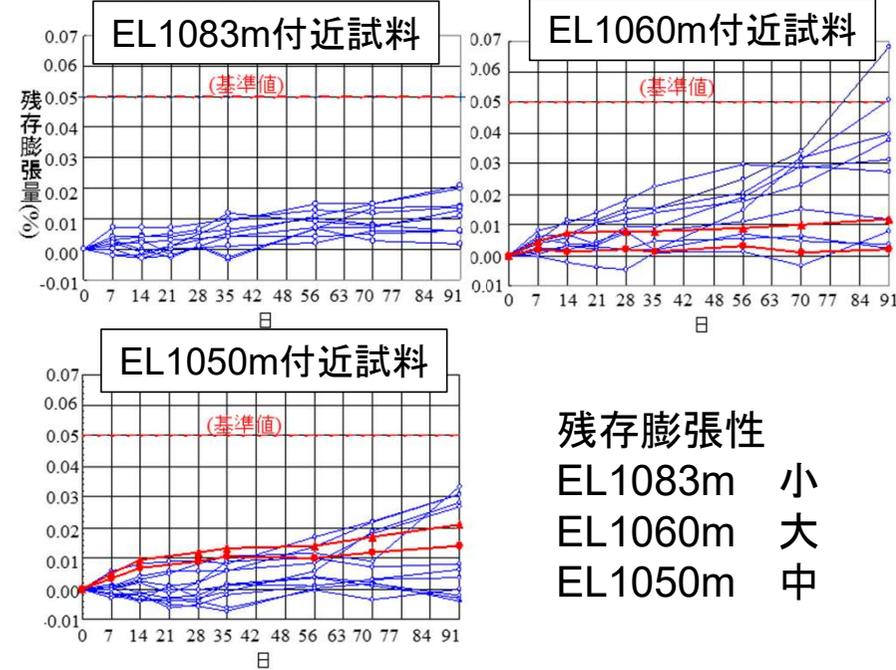
ASR反応の反応性に関する検討

・ アルカリ含有量試験結果

建設当時の推定アルカリ量2.8kg/m³



・ 残存膨張量試験結果 2006年ごろ実施



・ ひずみの大きいEL1086m以上：残存膨張性が基準値以下であるがアルカリ量が大きい
⇒アルカリシリカ反応が発生する余地がある (=収束していない)

・ ひずみの小さいEL1082m以下

①残存膨張性およびアルカリ量はEL1060m付近では高い値を示すもののひずみには表れていない。

②その他の深度では残存膨張性は基準値以下であり、アルカリ量も上部より小さい。

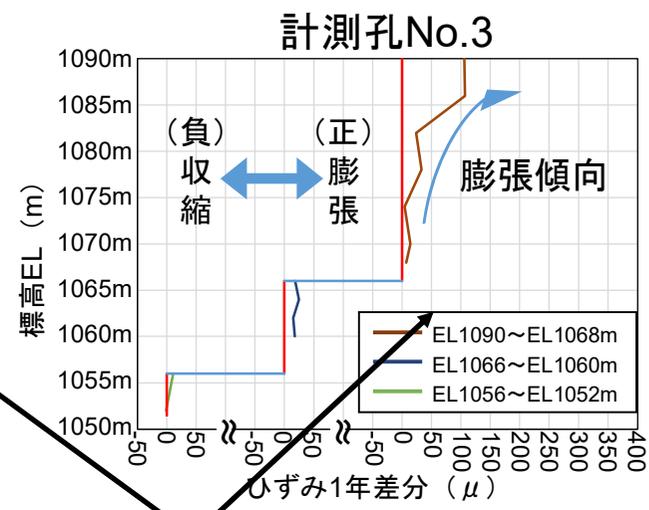
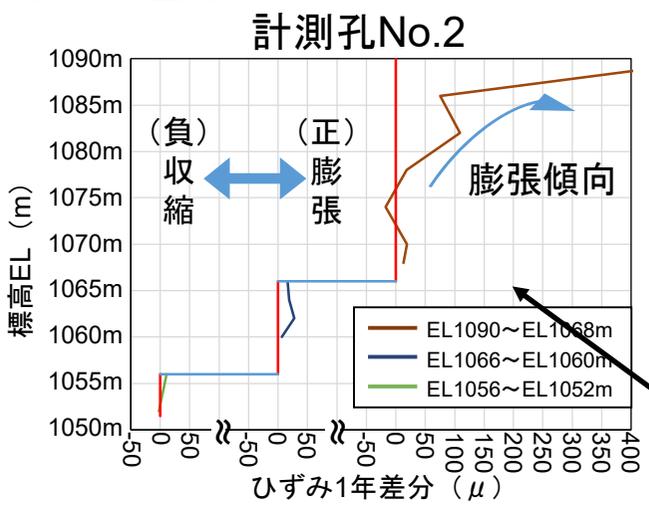
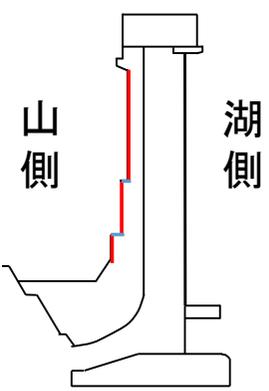
⇒①②より全体的にはアルカリシリカ反応は収束的

水位変動範囲内の取水塔中部ではASRが収束的、水位変動範囲外の上部ではASR進行の余力がある

取水塔上部の変形の挙動に関する検討

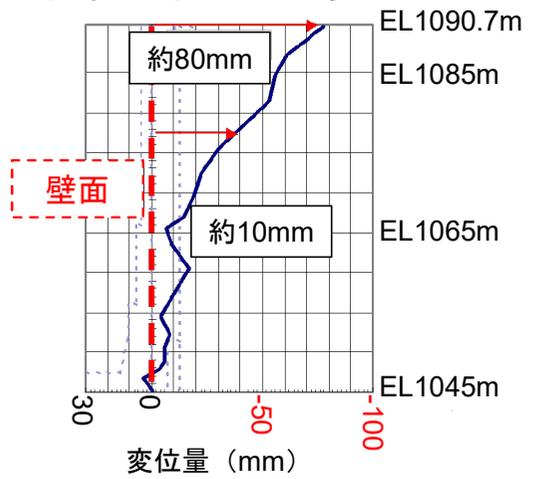
取水塔上部のひずみに関するさらに詳細な検討 (①深度ごとの1年間ひずみ差分)

・深度ごとの1年間のひずみ差分



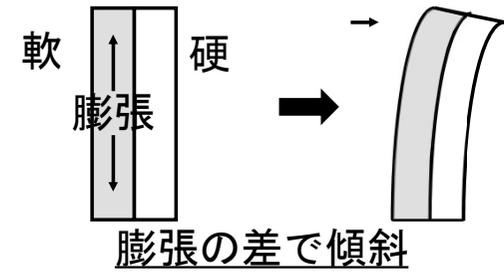
ひずみ差分増加傾向
||
膨張

・取水塔の水平方向変形



取水塔の変形形状と似ている

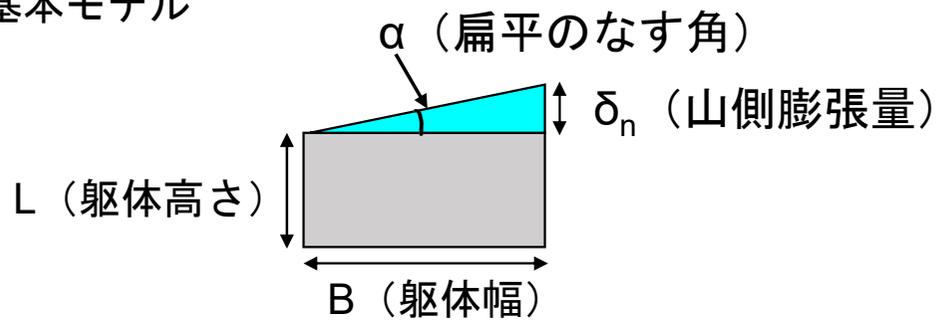
変形のメカニズム (委員会資料より)



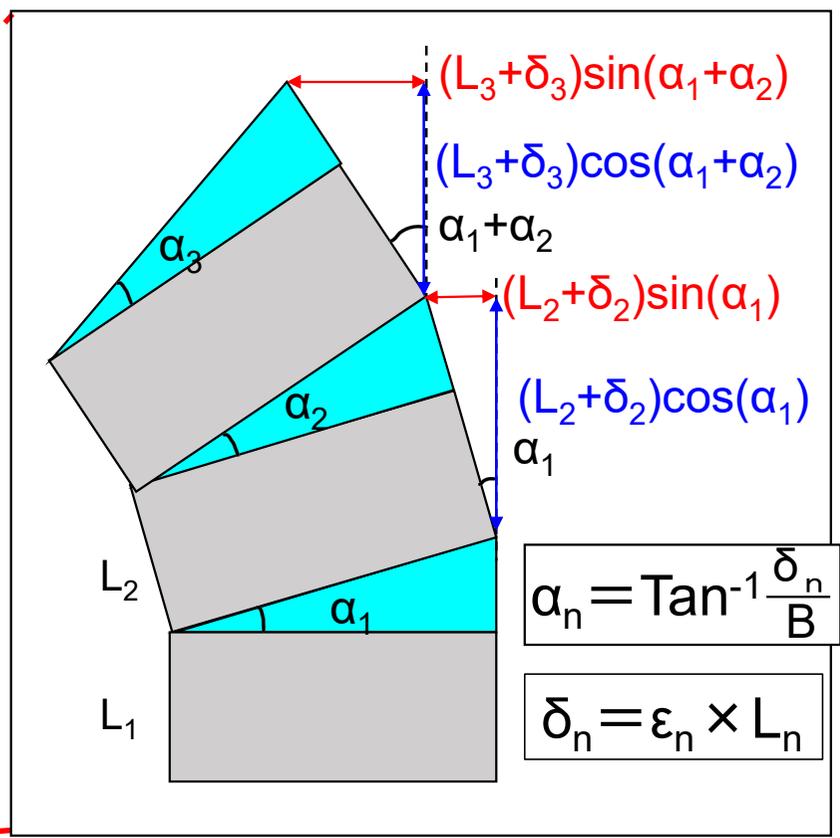
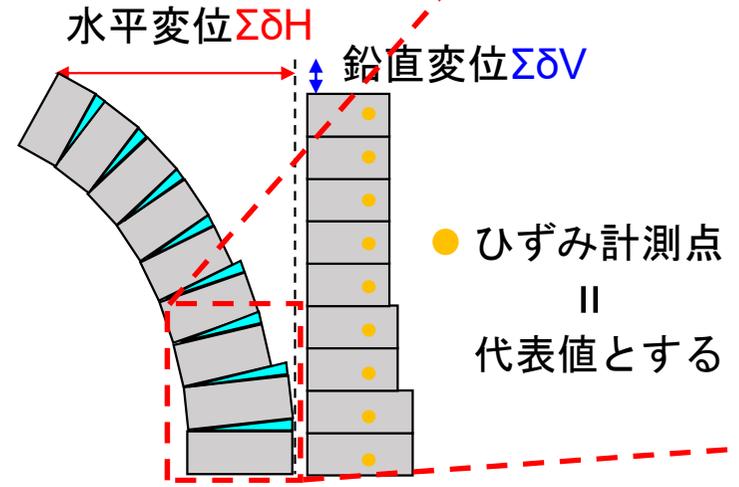
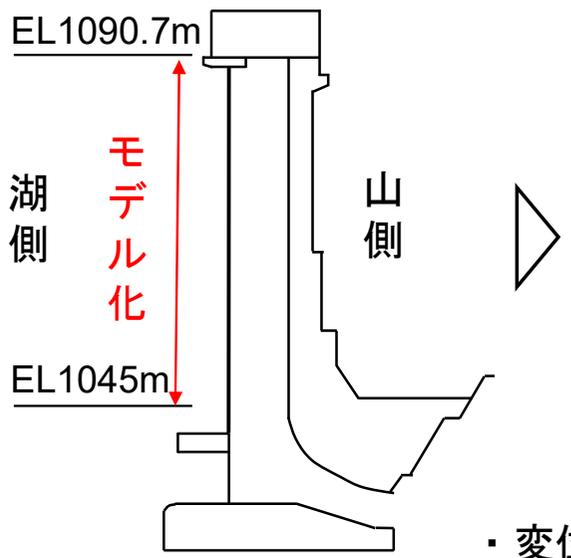
1年間のひずみ差分から取水塔上部でコンクリートが膨張傾向であることが分かった

取水塔上部のひずみに関するさらに詳細な検討 (②ひずみ→変形量の算出)

・基本モデル



・取水塔モデル化



$$\alpha_n = \tan^{-1} \frac{\delta_n}{B}$$

$$\delta_n = \epsilon_n \times L_n$$

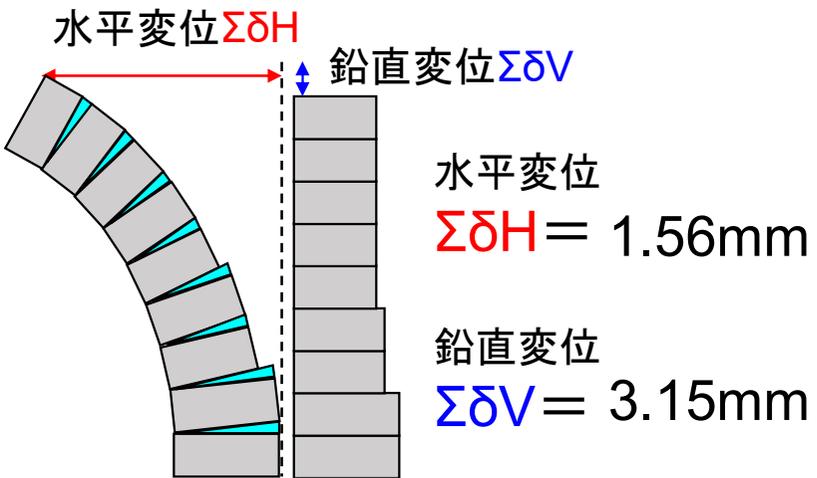
・変位量計算式

$$\Sigma\delta H = (L_2 + \delta_2) \sin(\alpha_1) + (L_3 + \delta_3) \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + \dots + (L_n + \delta_n) \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{n-1})$$

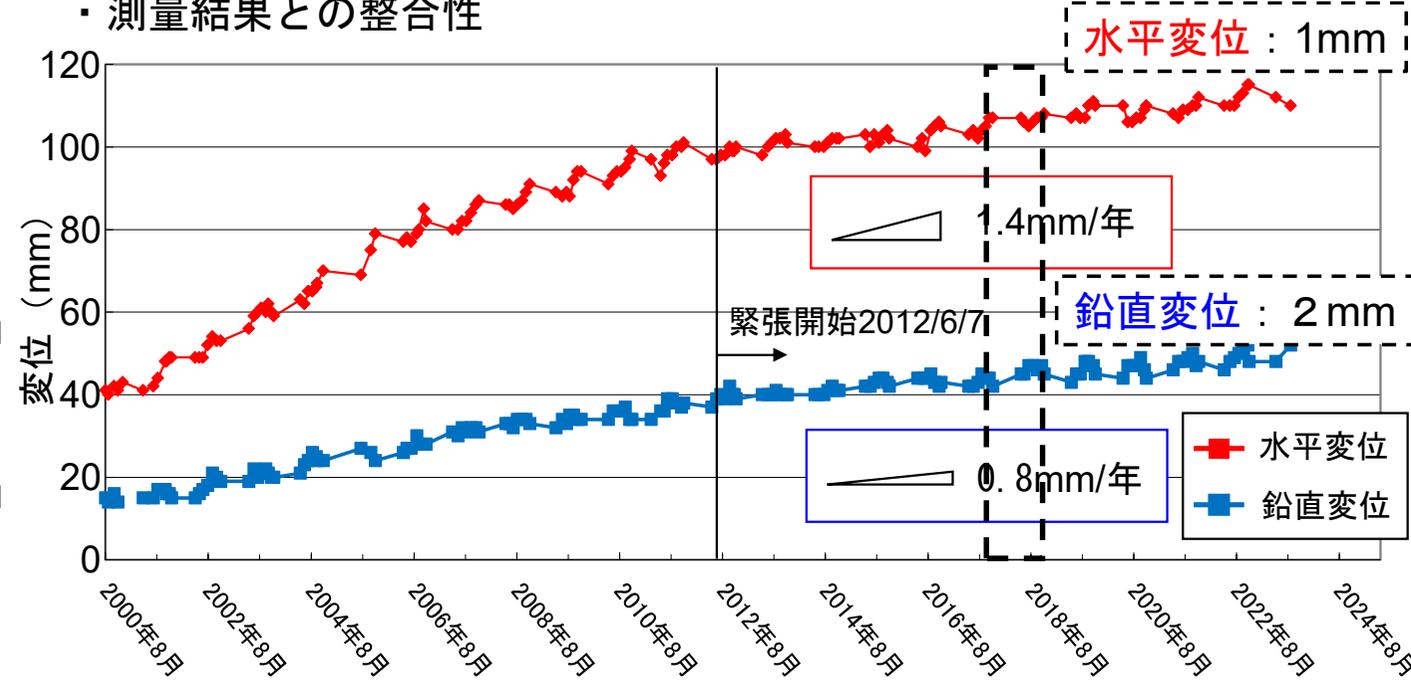
$$\Sigma\delta V = L_1 + \delta_1 + (L_2 + \delta_2) \cos(\alpha_1) + (L_3 + \delta_3) \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + \dots + (L_n + \delta_n) \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{n-1}) - \Sigma L$$

取水塔上部のひずみに関するさらに詳細な検討 (②ひずみ→変形量の算出)

・ 計算結果 (2017年~2018年の変形量)



・ 測量結果との整合性



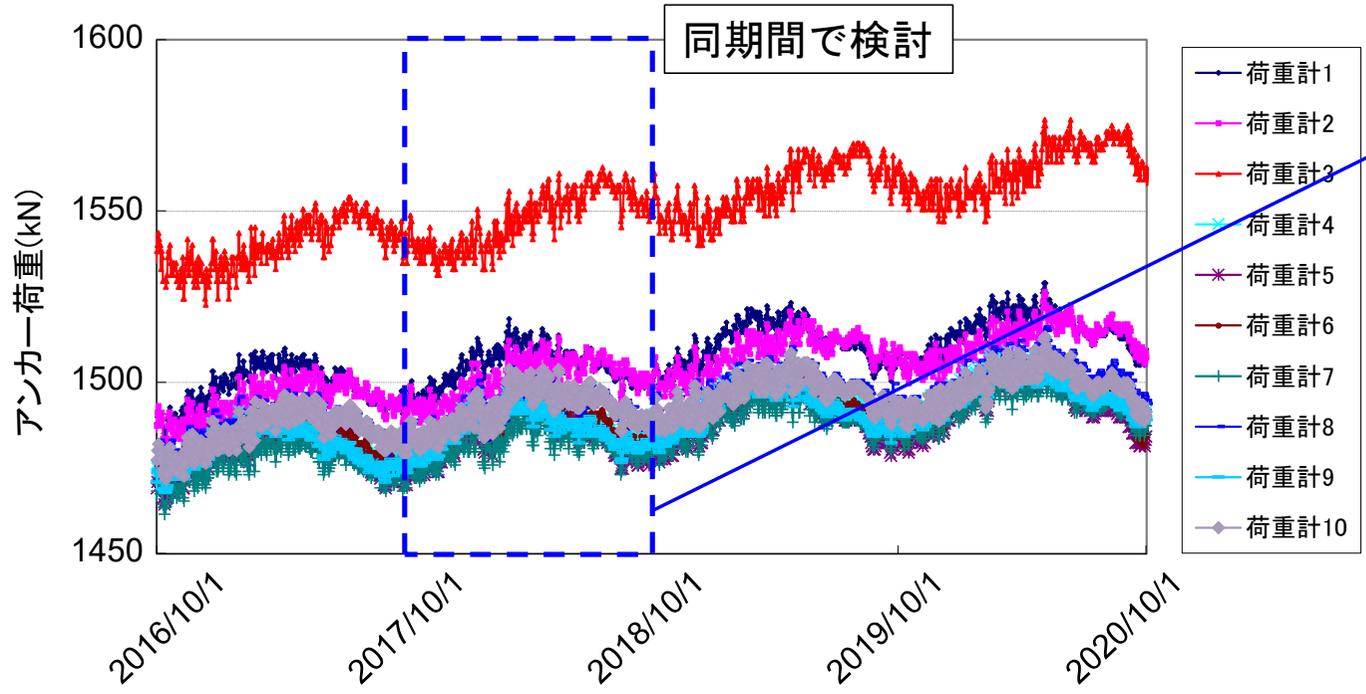
計算値の比較	計算値	年変動値	2017~2018の測量値から算出した変動
水平変位 (mm)	1.56	1.4	1
鉛直変位 (mm)	3.15	0.8	2

計算での水平変位≒測量での水平変位 計算での鉛直変位≒測量での鉛直変位

計算での水平変位≒測量での水平変位 計算での鉛直変位≒測量での鉛直変位

アンカー荷重から算出した鉛直変位量

・アンカー荷重



2017年～2018年において
アンカー荷重変化量から鉛直変位を算出

・アンカー諸元より

アンカー断面積 A_s (mm ²)	1875.5
弾性係数 E_s (N/mm ²)	200000
アンカー長さ (m)	38.7

・鉛直変位計算式

$$\Sigma\delta V = \Delta L = L \times \frac{\Delta\sigma_s \text{ アンカー応力増分}}{A_s E_s}$$

・計算結果 (2017年～2018年の変形量)

荷重計No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
鉛直変位 (mm)	0.98	1.28	1.62	1.15	0.97	0.89	1.18	1.20	0.89	1.17

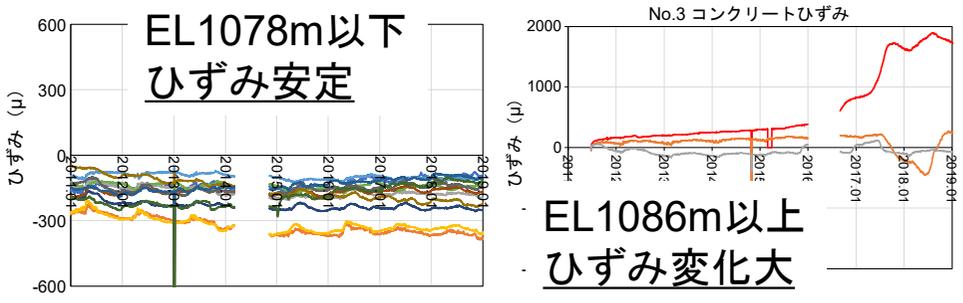
平均鉛直変位 $\Sigma\delta V = 1.13\text{mm}$ (測量での鉛直変位0.8mm/年、測量での2017～2018の鉛直変位2mm)

アンカー荷重から鉛直変位を算出した結果、年変動値や測量での鉛直変位と近い値が得られた

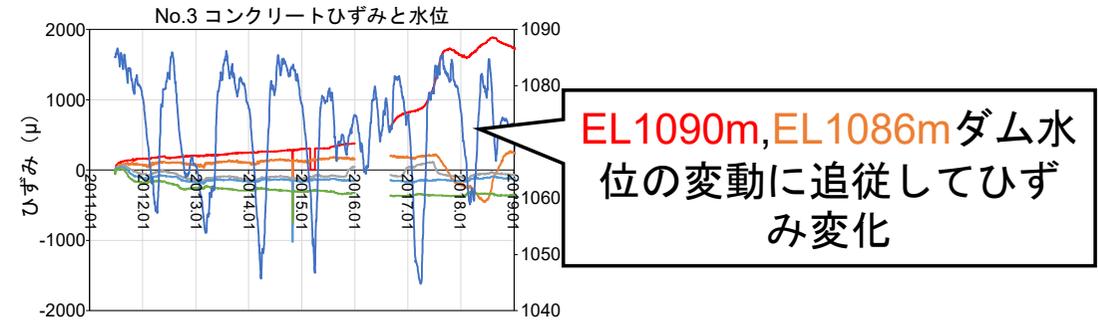
まとめ

ひずみの分析結果まとめ

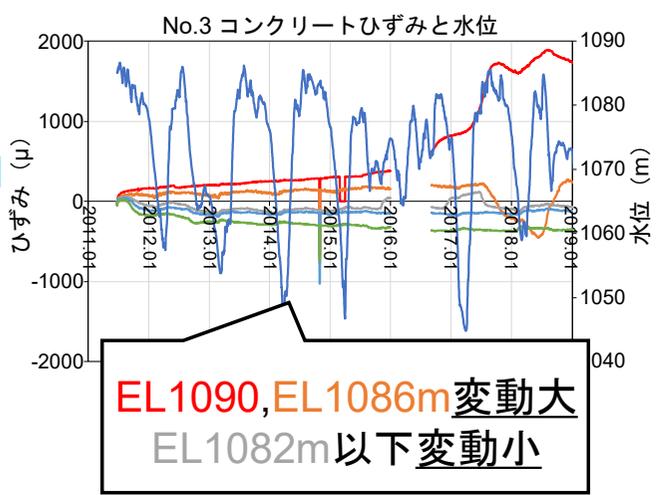
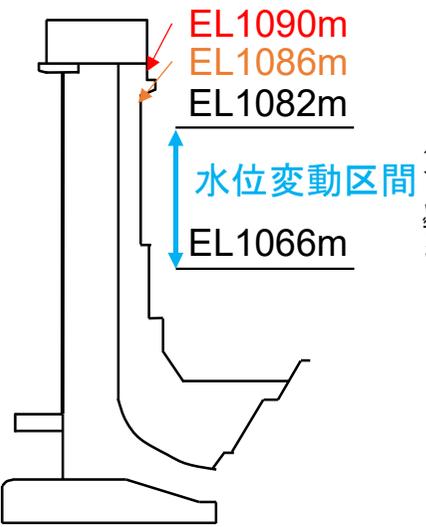
① EL1082m以下でひずみの経年変化の変動は小さい、EL1086m以上で変動が大きく増加傾向が示唆される



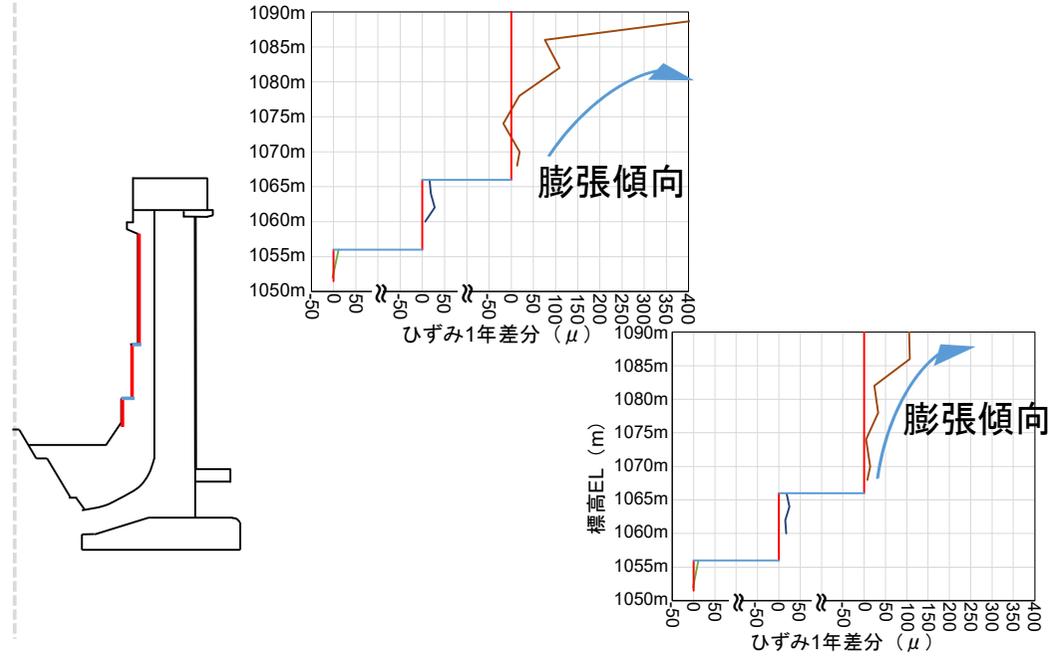
② EL1086m以上で、2017年以降特にダム水位の変動に追従して大きいひずみが発生する挙動がみられた



③ ひずみの変動は水位変動区間内
水位変動区間外

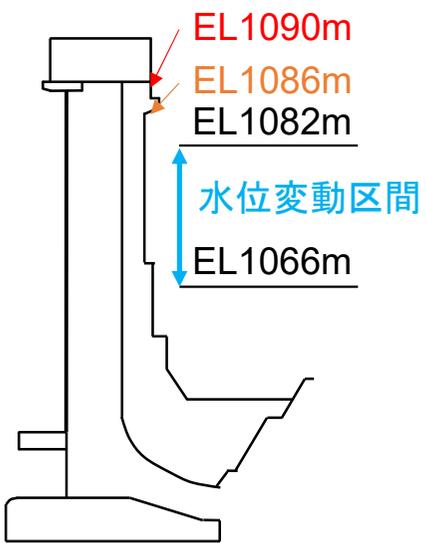


④ 取水塔上部でコンクリートは膨張傾向を示した



考察のまとめ

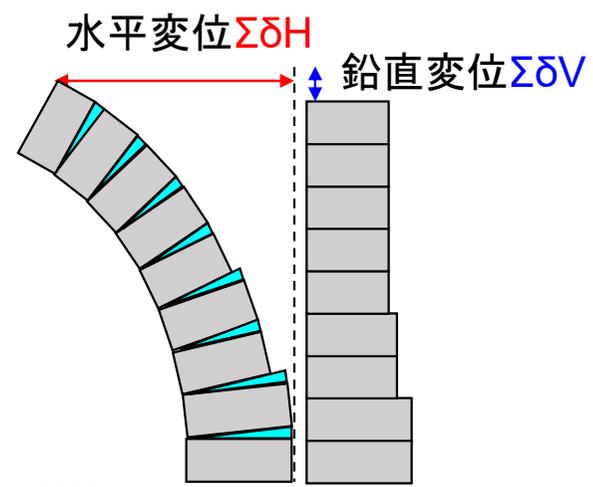
- ① ASRは水位変動区間以下で反応が収束的
水位変動区間外の取水塔上部で
ASR進行の余力がある



ASR進行余力あり

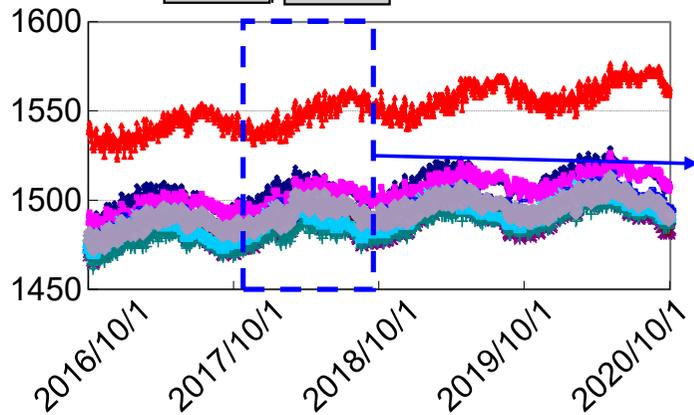
ASR収束的

- ② ひずみから算出した水平変位
≒測量での水平変位≒水平変位の年変動値
アンカー荷重から算出した鉛直変位
≒測量での鉛直変位



水平変位 $\Sigma\delta H = 1.56\text{mm}$

測量結果 1.4mm/年



鉛直変位 $\Sigma\delta V = 1.13\text{mm}$

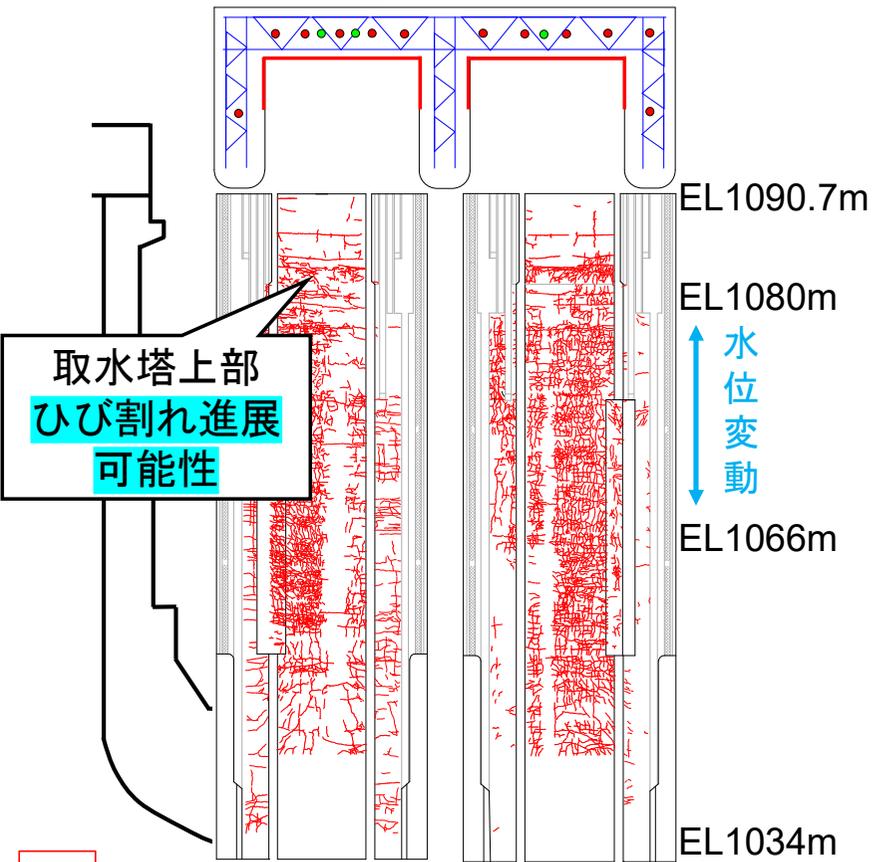
測量結果 0.8mm/年

変形形状の推定ができる可能性が示された

今後の対応方針（案）

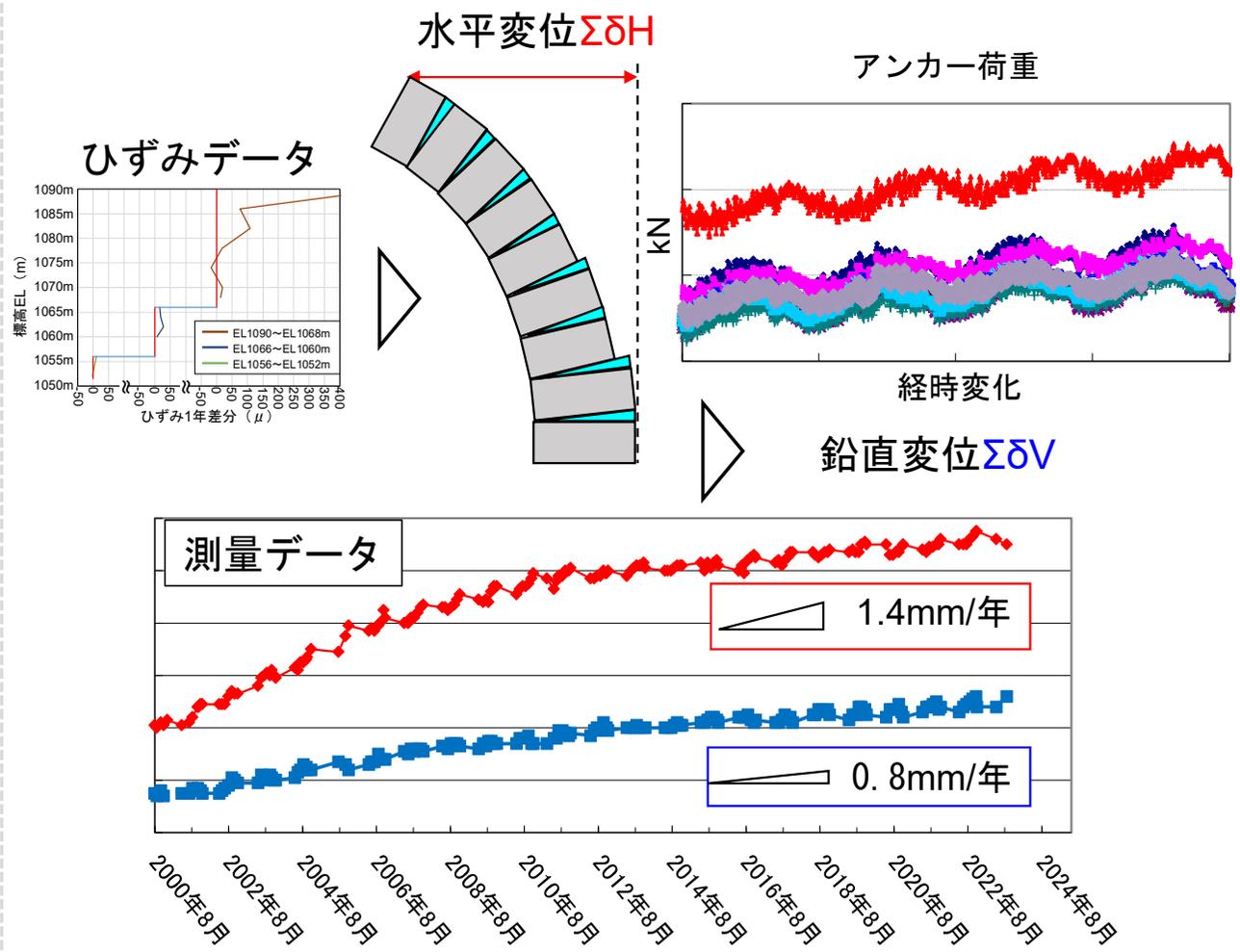
①ひび割れ進展調査によるASRの監視
ASR進行の監視の着眼点

✓余力のある取水塔上部で進行の可能性
内壁面のひび割れ図



方法 取水塔壁面でのドローン撮影
画像解析などによるひび割れ進展調査

②取水塔変形の監視→ひずみデータとアンカー荷重で可能



測量結果と併せて
データを用いた監視も行っていく（測量ができない冬期間特に有効）