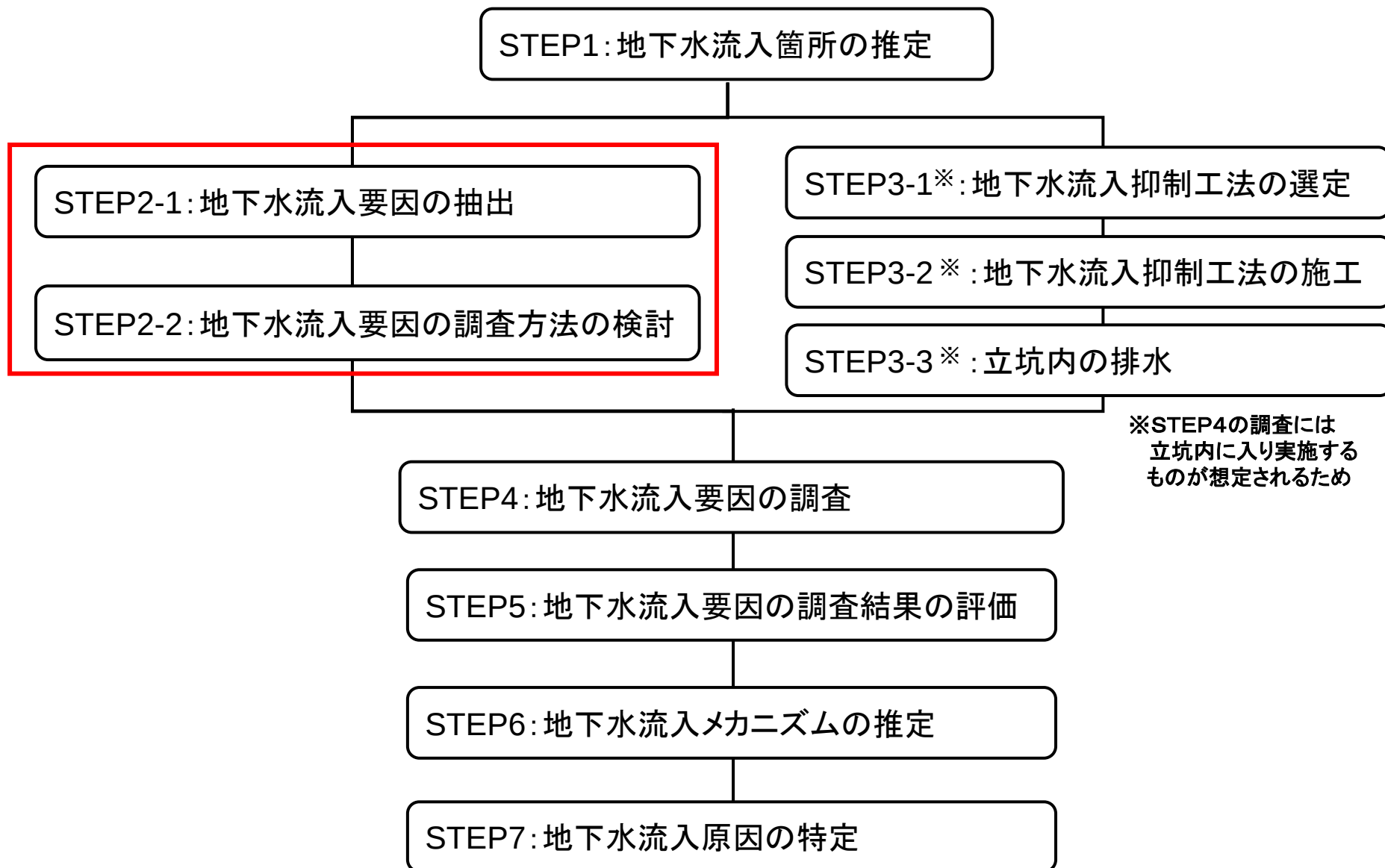


# 令和8年度 第3回 大阪府河川構造物等審議会

## 【資料2】地下水流入原因の特定

# 地下水流入原因の特定

地下水流入原因の特定までの流れ



# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出      まとめ

第2回審議会資料3 再掲(一部追記)

地質、設計、施工のそれぞれの観点について、想定される地下水流入要因を抽出。

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 地質 | <ul style="list-style-type: none"><li>・土質調査による地質縦断図から、本立坑の幅における地質の傾斜を確認したが、ケーソン断面内で東西方向で約1.6m程度、南北方向で0.4mの傾斜を想定。</li><li>・施工時の間隙水圧の測定データでは圧力の分布が確認されたものの、設計値を下回っていた。</li></ul> <p>⇒地盤の傾斜があるものの実測の水圧との明確な関連は見られない。<br/>また、水圧差があるものの設計値を下回っており、現在のデータからは地下水流入の要因になった可能性は低い。</p> |
| 設計 | <ul style="list-style-type: none"><li>・道路橋示方書等の基準に則り設計を実施。曲げモーメント、せん断力、浮上りについて安全であることを確認。</li><li>・ただし、大深度、大断面の適用については基準に記載がない。</li></ul> <p>⇒大深度、大断面であることを踏まえた検討の追加が必要。</p>                                                                                                  |
| 施工 | <ul style="list-style-type: none"><li>・一部に堆積物が残っていることを確認。</li><li>・水中コンクリートの打設間隔が2日以上空くことがあった。</li></ul> <p>⇒コンクリートの一体化施工が不十分な状況があったため、地下水流入の要因になった可能性がある。</p>                                                                                                                |

➡ 設計について、大深度・大断面であることを踏まえた検討を追加  
施工について、コンクリート打設シミュレーションと現地確認事項を整理

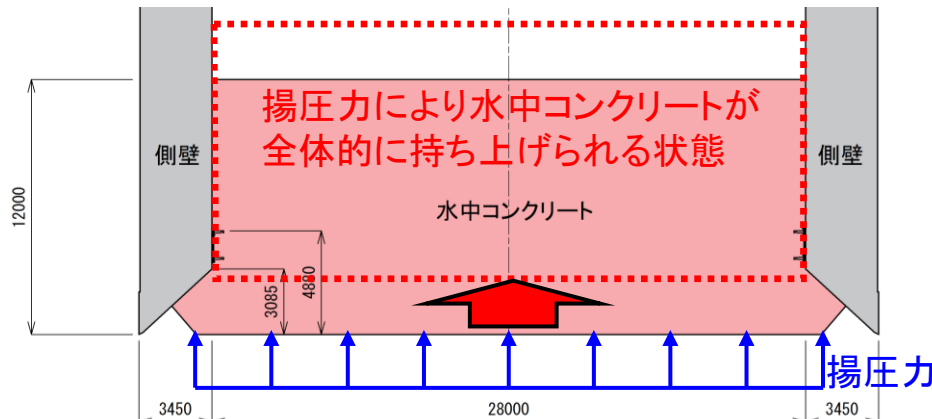
# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

ケーソンと水中コンクリートの界面にせん断力が発生し、付着強度を上回った可能性を踏まえて、「押し抜きせん断」の検討を追加。

|                          | 「道路橋示方書・同解説 IV 下部工編」<br>(社)日本道路協会)(平成24年3月)        | 「シールド工事用立坑の設計」<br>(土木学会)(2015年1月)     | 照査の結果 |
|--------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------|-------|
| 曲げモーメント<br>・<br>せん断力     | 底版と側壁の間の打継目は完全には一体とならないので、底版は周囲を単純支持されたスラブとして設計する。 | 同左                                    | OK    |
| 浮上り                      | 記載なし                                               | 施工時のケーソンは浮き上がりに対して、安全率1.0を満足しなければならない | OK    |
| 押し抜きせん断<br>(大深度地下使用での適用) | 記載なし                                               | 記載なし                                  | 今回    |



# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

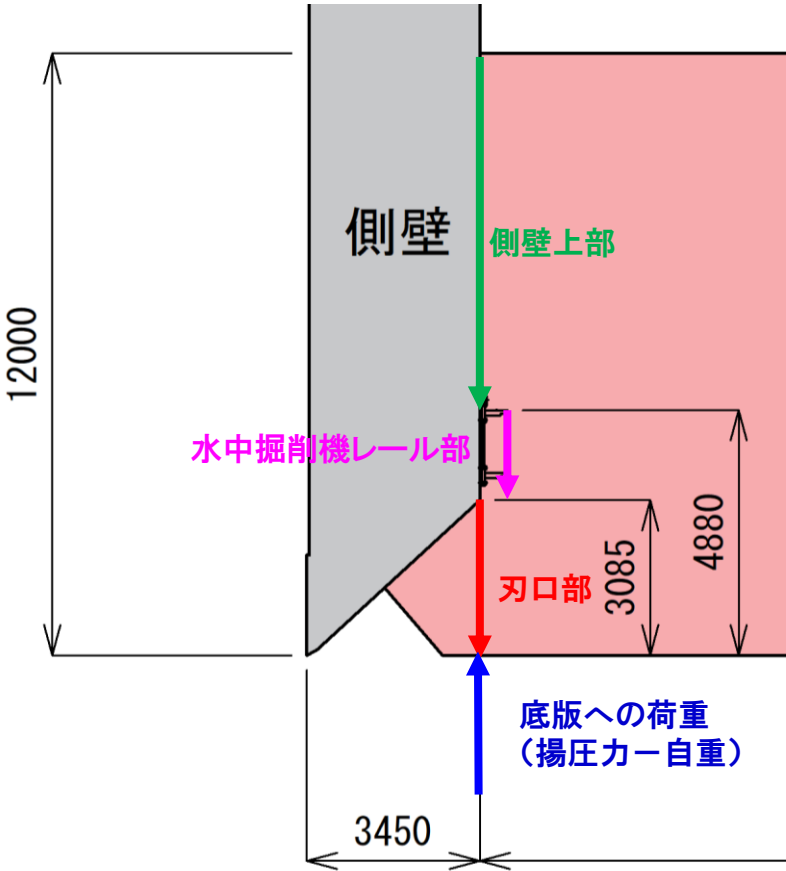
コンクリートは完全に一体化しているものとして、刃口部および水中掘削機レール部のせん断抵抗力、側壁上部の付着力の3つが、地下水圧に対する抵抗力になるものとして計算を実施。  
参考として、3つの抵抗力の影響度合いを確認するため、組み合わせの計算を実施。

## ■ 押し抜きせん断の検討(抵抗力)

|        | (刃口部)<br>せん断<br>抵抗力 | (水中掘削機<br>レール部)<br>せん断抵抗力 | (側壁上部)<br>付着力 |
|--------|---------------------|---------------------------|---------------|
| せん断抵抗力 | ○                   | ○                         | ○             |

## ■ 参考(抵抗力の影響度合いの確認: 抵抗力の組合せ)

|      | (刃口部)<br>せん断<br>抵抗力 | (水中掘削機<br>レール部)<br>せん断抵抗力 | (側壁上部)<br>付着力 |
|------|---------------------|---------------------------|---------------|
| ケース1 | ○                   | —                         | —             |
| ケース2 | —                   | ○                         | —             |
| ケース3 | —                   | —                         | ○             |
| ケース4 | ○                   | ○                         | —             |
| ケース5 | ○                   | —                         | ○             |
| ケース6 | —                   | ○                         | ○             |



# 地下水流入原因の特定

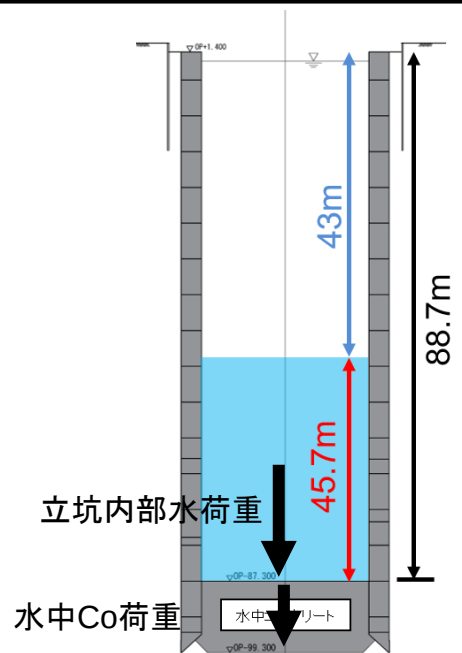
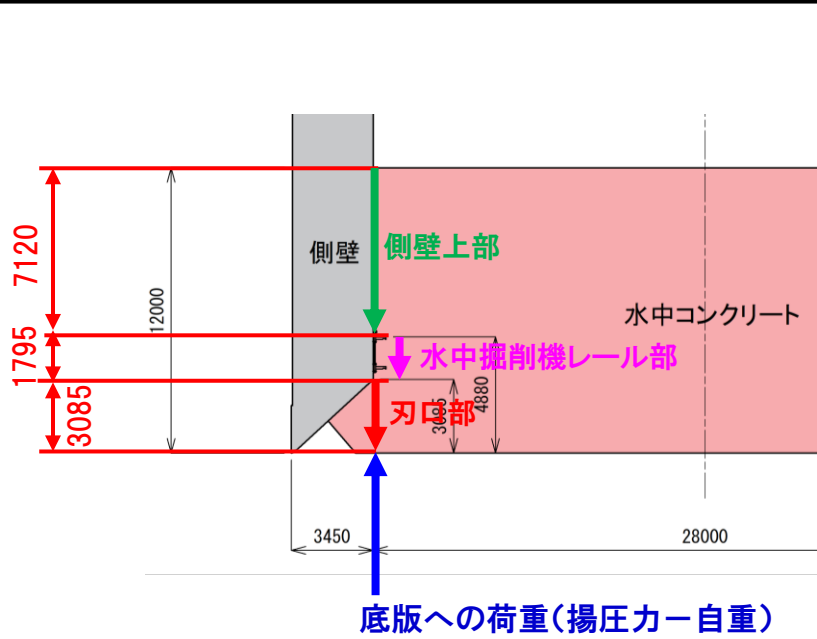
地下水流入要因の抽出

設計

- ・コンクリートのせん断抵抗力 =  $230 \times 1.5 = 345 \text{ kN/m}^2$   
(出典: 道路橋示方書-日本道路協会)
- ・コンクリートの付着力 (丸鋼) =  $900 \text{ kN/m}^2$   
(出典: 道路橋示方書-日本道路協会)

- <各せん断抵抗力>
- ・(刃口部) 水中コンクリートせん断抵抗力 =  $345 \text{ kN/m}^2 \times 3.085 \text{ m} = 1,064.3 \text{ kN/m}$
  - ・(水中掘削機レール部) 水中コンクリートせん断抵抗力 =  $345 \text{ kN/m}^2 \times 1.795 \text{ m} = 619.2 \text{ kN/m}$
  - ・(側壁上部) 水中コンクリート付着力 =  $900 \text{ kN/m}^2 \times 7.120 \text{ m} = 6,408.0 \text{ kN/m}$

- <地下水流入時の底版への荷重>
- ・底版への荷重 (揚圧力 - 水中コンクリート自重 - 立坑内部水43m下げた時点の水圧)  
$$= (100.7 \text{ m} \times 10 \text{ kN/m}^3 - 12 \text{ m} \times 23 \text{ kN/m}^3 - 45.7 \text{ m} \times 10 \text{ kN/m}^3) \times 14 \text{ m} \times 14 \text{ m} \times 3.142 = 168,738.0 \text{ kN}$$
  - ・水中コンクリート周長1m当たりの荷重 =  $168,738.0 \div 28 \div 3.142 = \underline{1,918.0 \text{ kN/m}}$



# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

| 押し抜きせん断の検討 | 立坑内の状態 | (刃口部)せん断抵抗力 | (水中掘削機レール部)せん断抵抗力 | (側壁上部)付着力 | 安全率<br>(せん断抵抗力／底版への荷重) |
|------------|--------|-------------|-------------------|-----------|------------------------|
| せん断抵抗力     | 地下水流入時 | ○           | ○                 | ○         | 8,091／1,918=4.21 OK    |

| 参考(抵抗力の影響度合いの確認) | 立坑内の状態 | (刃口部)せん断抵抗力 | (水中掘削機レール部)せん断抵抗力 | (側壁上部)付着力 | 安全率<br>(せん断抵抗力／底版への荷重) |
|------------------|--------|-------------|-------------------|-----------|------------------------|
| ケース1             | 地下水流入時 | ○           | —                 | —         | 1,064／1,918=0.55 NG    |
| ケース2             |        | —           | ○                 | —         | 619／1,918=0.32 NG      |
| ケース3             |        | —           | —                 | ○         | 6,408／1,918=3.34 OK    |
| ケース4             |        | ○           | ○                 | —         | 1,683／1,918=0.87 NG    |
| ケース5             |        | ○           | —                 | ○         | 7,472／1,918=3.89 OK    |
| ケース6             |        | —           | ○                 | ○         | 7,027／1,918=3.66 OK    |

⇒ 地下水圧に対する抵抗力としてせん断力(刃口部、レール部)および付着力で底盤への荷重に十分に対応できる。

何らかの原因で側壁上部と水中コンクリートの付着力が不足する場合は、安全率が1を下回る。

# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

<最終排水完了時の底版への荷重>

- ・底版への荷重(揚圧力－自重) =  $(100.7\text{m} \times 10\text{kN/m}^3 - 12\text{m} \times 23\text{kN/m}^3) \times 14\text{m} \times 14\text{m} \times 3.142 = 450,173.2\text{kN}$
- ・水中コンクリート周長1m当たりの荷重 =  $450,173.2 \div 28 \div 3.142 = \mathbf{5,117.0\text{kN/m}}$

| 押し抜きせん断の検討 | 立坑内の状態  | (刃口部)せん断抵抗力 | (水中掘削機レール部)せん断抵抗力 | (側壁上部)付着力 | 安全率<br>(せん断抵抗力／底版への荷重) |
|------------|---------|-------------|-------------------|-----------|------------------------|
| 押し抜きせん断    | 最終排水完了時 | ○           | ○                 | ○         | 8,091／5,117=1.58 OK    |

| 参考(抵抗力の影響度合いの確認) | 立坑内の状態  | (刃口部)せん断抵抗力 | (水中掘削機レール部)せん断抵抗力 | (側壁上部)付着力 | 安全率<br>(せん断抵抗力／底版への荷重) |
|------------------|---------|-------------|-------------------|-----------|------------------------|
| ケース1             | 最終排水完了時 | ○           | －                 | －         | 1,064／5,117=0.20 NG    |
| ケース2             |         | －           | ○                 | －         | 619／5,117=0.12 NG      |
| ケース3             |         | －           | －                 | ○         | 6,408／5,117=1.25 OK    |
| ケース4             |         | ○           | ○                 | －         | 1,683／5,117=0.32 NG    |
| ケース5             |         | ○           | －                 | ○         | 7,472／5,117=1.46 OK    |
| ケース6             |         | －           | ○                 | ○         | 7,027／5,117=1.37 OK    |

⇒ 最終排水時においても、せん断抵抗力(刃口部、レール部)と付着力で底盤への荷重に十分に対応できる(影響度合いの確認は地下水流入時と同じ)。

# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

仮に付着応力度が10分の1まで低下(6,408kN/m<sup>2</sup>÷10= 640.8kN/m<sup>2</sup>)したとしても、地下水流入時の水圧に対応できる。

＜地下水流入時の底版への荷重＞

- ・底版への荷重(揚圧力－水中コンクリート自重－立坑内部水43m下げた時点の水圧)  
= (100.7m×10kN/m<sup>3</sup>－12m×23kN/m<sup>3</sup>－45.7m×10kN/m<sup>3</sup>)×14m×14m×3.142=168,738.0kN
- ・水中コンクリート周長1m当たりの荷重 = 168,738.0÷28÷3.142=1,918.0kN/m

|        | 立坑内の状態 | (刃口部)せん断抵抗力    | (水中掘削機レール部)せん断抵抗力 | (側壁上部)付着力            | 安全率<br>(せん断抵抗力／底版への荷重) |
|--------|--------|----------------|-------------------|----------------------|------------------------|
| 再現ケース① | 地下水流入時 | ○<br>1,064kN/m | ○<br>619kN/m      | 1/10に低減<br>640.8kN/m | 2,324／1,918=1.21 OK    |

■ 参考：安全率が1を下回る逆算ケース

|        | 立坑内の状態 | (刃口部)せん断抵抗力    | (水中掘削機レール部)せん断抵抗力 | (側壁上部)付着力     | 安全率<br>(せん断抵抗力／底版への荷重) |
|--------|--------|----------------|-------------------|---------------|------------------------|
| 再現ケース② | 地下水流入時 | ○<br>1,064kN/m | ○<br>619kN/m      | 逆算<br>234kN/m | 1,917／1,918=0.99 NG    |

234kN/m ÷ 6408kN/m ÷ 4%  
本来付着力の4%程度と、極めて小さい値でないと安全率が下回らない 8

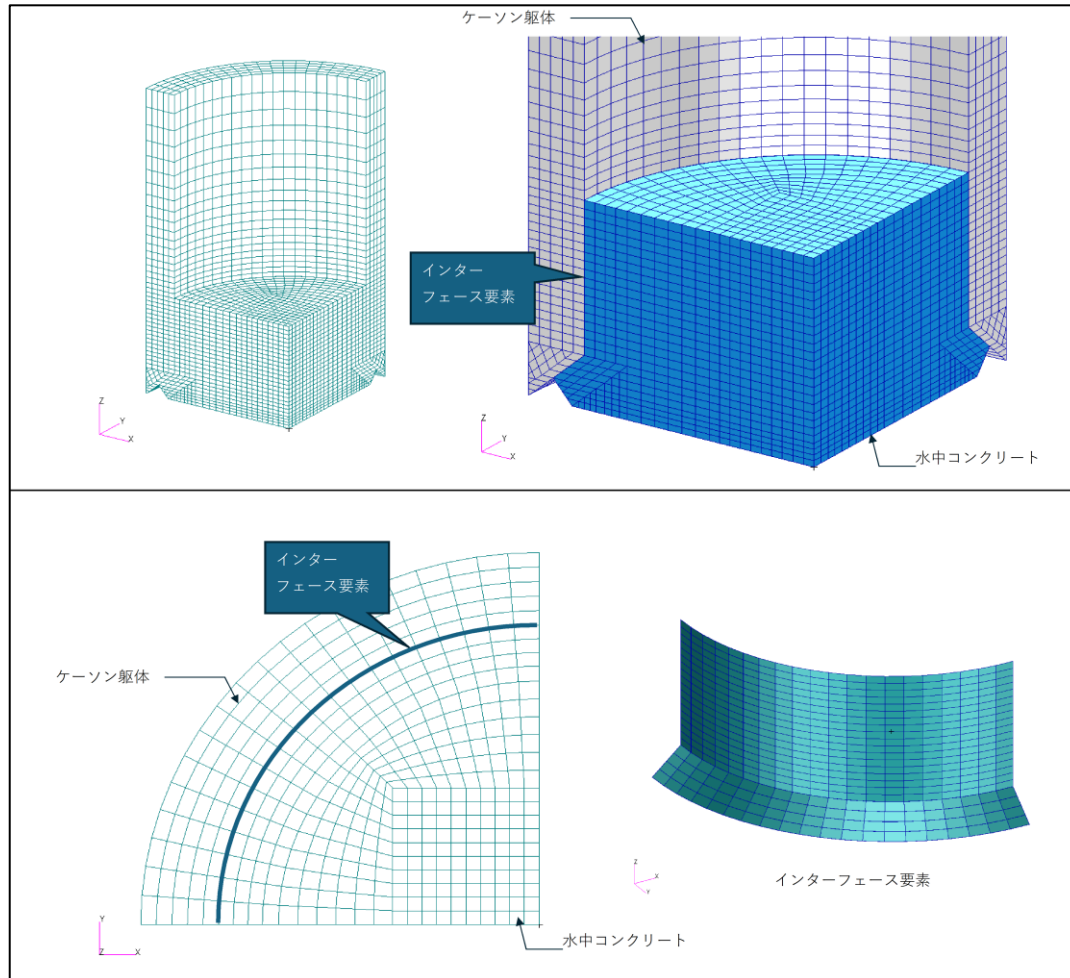
# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

解析にはFEM解析プログラムを用い、水中コンクリート構造物および水中コンクリートとケーソン躯体との界面において非線形解析を実施する。

水中コンクリートとケーソン側壁との境界にはインターフェース要素を入れ、付着力やずれ方向の荷重などを確認する。



## ＜解析条件＞

各部材の使用材料は下記の通りとする。

### ◆水中コンクリート

圧縮強度 24N/mm<sup>2</sup>

引張強度 1.91N/mm<sup>2</sup> ( $0.23f_c^{2/3}$ )

(出典:コンクリート標準示方書)

水中コンクリートには、コンクリート標準示方書に示される無筋コンクリート用のひずみ軟化モデルを適用し、インターフェース要素については、接触・剥離の発生および界面におけるすべりの有無を考慮したモデルとする。

# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

側壁上部と水中コンクリートの付着力が水中コンクリートの挙動に与える影響を確認するために、下記パターンでFEM解析を実施。

|        |                                                        |
|--------|--------------------------------------------------------|
| FEM解析① | 側壁上部と水中コンクリートが一体の場合                                    |
| FEM解析② | 側壁上部と水中コンクリートの付着力が $900\text{kN/m}^2$ の場合 ※前述の照査計算のとおり |
| FEM解析③ | 側壁上部と水中コンクリートの付着力がゼロの場合                                |



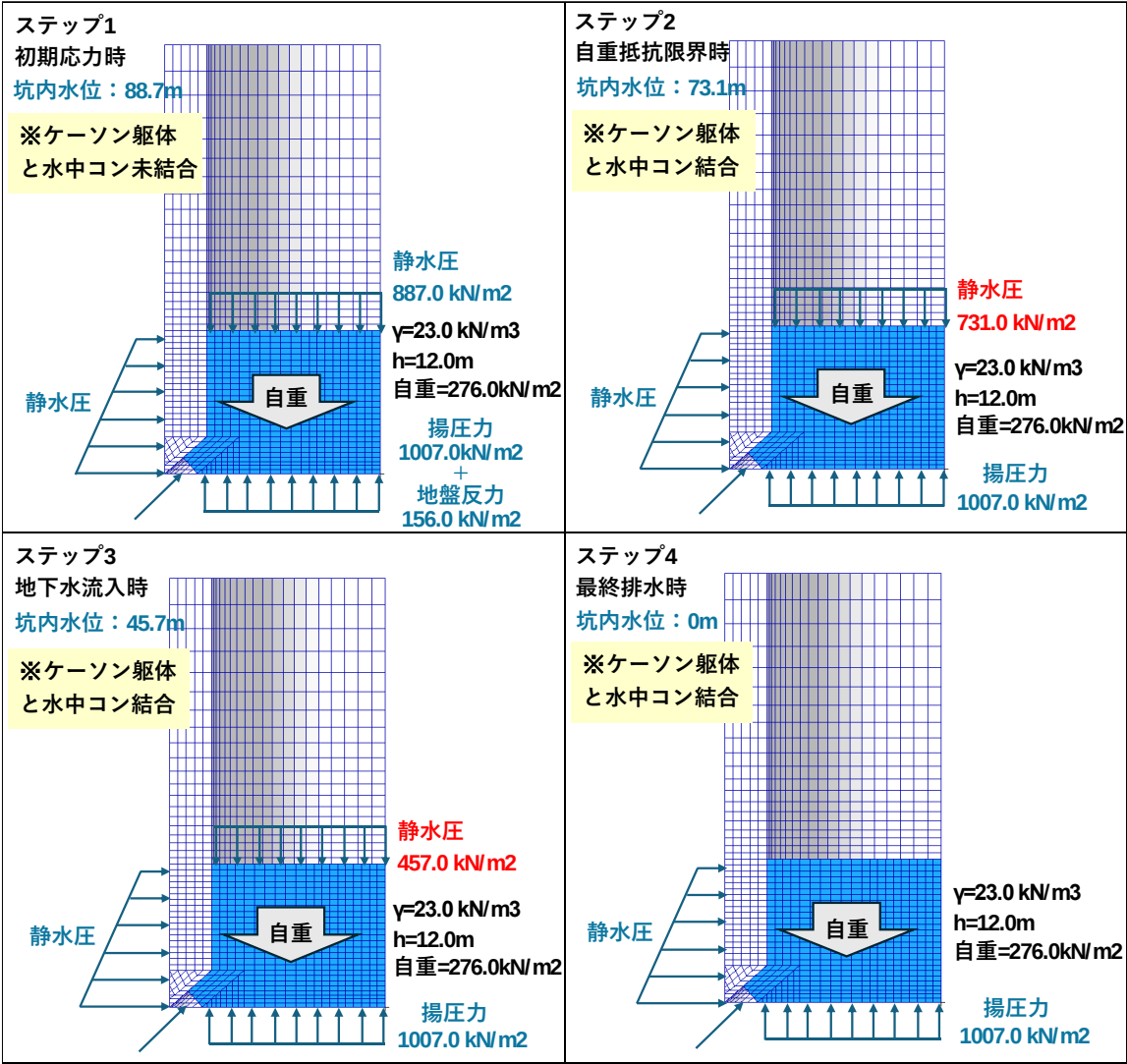
FEM解析の結果、①②では、地下水流入時点において、水中コンクリートは、ケーソン側壁の界面のずれ、ひび割れともに発生しないことを確認。ただし、③では、ずれ、ひび割れともに発生する。

# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

解析ステップは下図の通り。



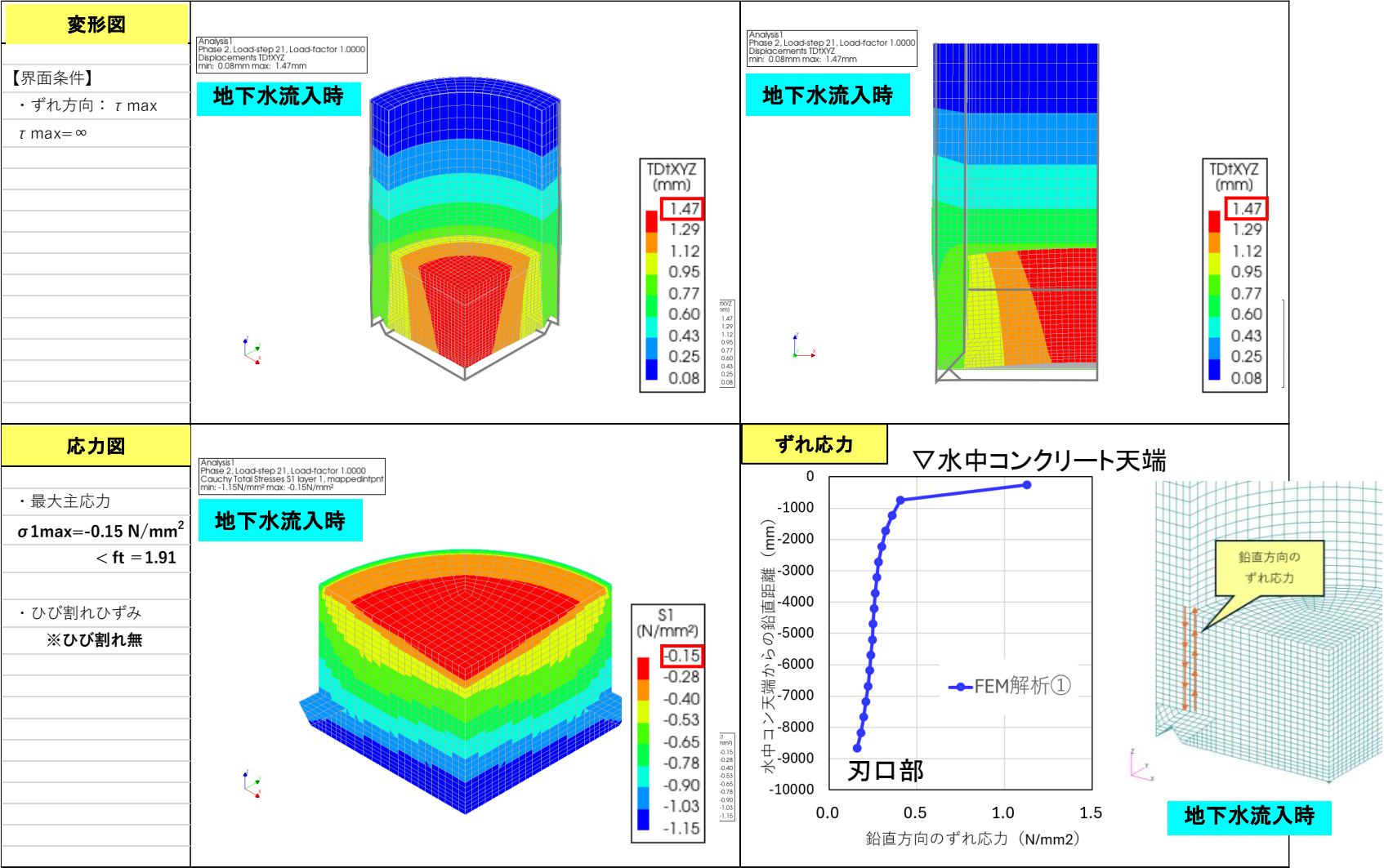
| 解析<br>ステップ       | 立坑内<br>水位 | 荷重作用                                    |
|------------------|-----------|-----------------------------------------|
| STEP1<br>初期応力    | 88.7m     | ・水中コンクリート自重<br>・静水圧(水中コン上下面)            |
| STEP2<br>自重抵抗限界時 | 73.1m     | ・立坑内静水圧減少<br>(-156.0kN/m <sup>2</sup> ) |
| STEP3<br>地下水流入時  | 45.7m     | ・立坑内静水圧減少<br>(-274.0kN/m <sup>2</sup> ) |
| STEP4<br>最終排水時   | 0.0m      | ・立坑内静水圧減少<br>(-457.0kN/m <sup>2</sup> ) |

# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

|        |                                                                                                                                              |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FEM解析① | 側壁上部と水中コンクリートの付着：一体の場合(地下水流入時) <ul style="list-style-type: none"><li>・水中コンクリートとケーソン側壁の界面のずれ ⇒発生しない。</li><li>・水中コンクリートのひび割れ ⇒発生しない。</li></ul> |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



# 地下水流入原因の特定

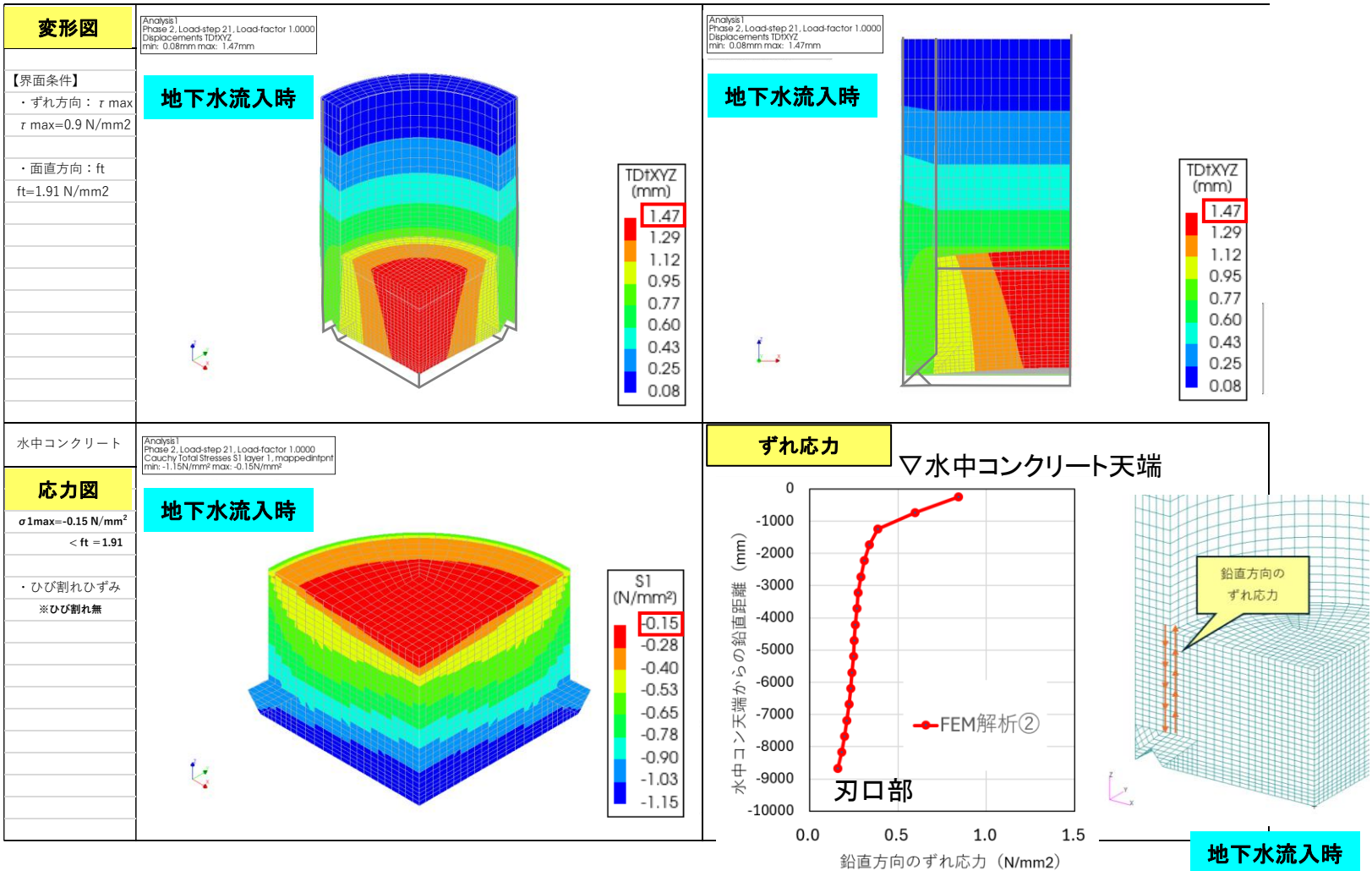
地下水流入要因の抽出

設計

FEM解析②

側壁上部と水中コンクリートの付着:  $900\text{kN/m}^2$  の場合 (地下水流入時)

- ・水中コンクリートとケーソン側壁の界面のずれ  $\Rightarrow$  発生しない。
- ・水中コンクリートのひび割れ  $\Rightarrow$  発生しない。



# 地下水流入原因の特定

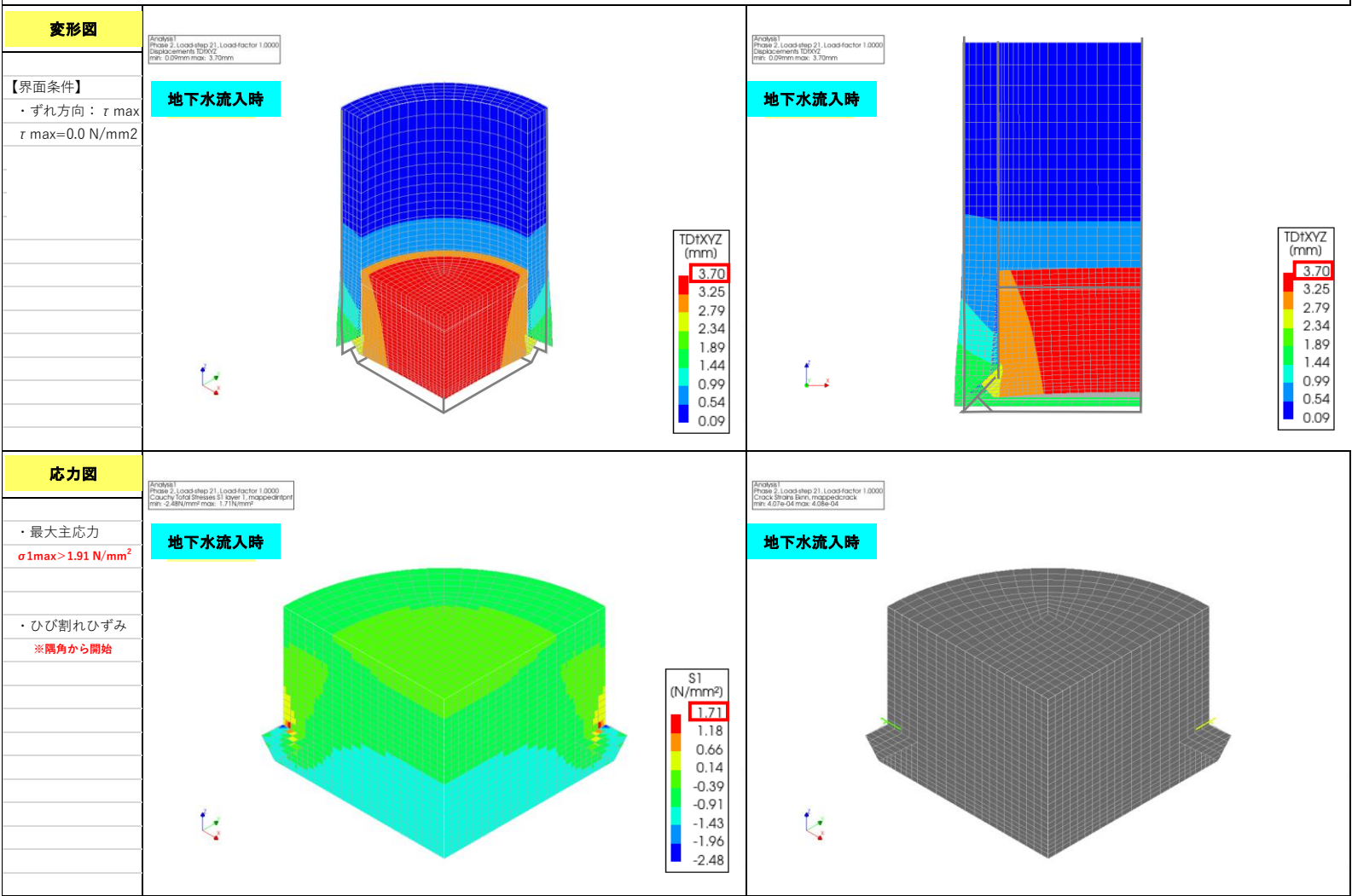
地下水流入要因の抽出

設計

FEM解析③

側壁上部と水中コンクリートの付着：ゼロの場合 (地下水流入時)

- ・水中コンクリートとケーソン側壁の界面のずれ ⇒発生。
- ・水中コンクリートのひび割れ ⇒発生。



# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

施工

水中コンクリートの打設は、事前の流動シミュレーションの結果より、計画流動距離を7.5mに設定し、投入孔のトレミー管を配置。

一方で、高水圧下における水中コンクリートの打設となることから、下記について整理。

(1) 流動シミュレーションの条件

(2) 現地での流動性の確認

## ○水中流動性

・事前に流動シミュレーションにより水中流動性について確認。計画流動距離を7.5mに設定。

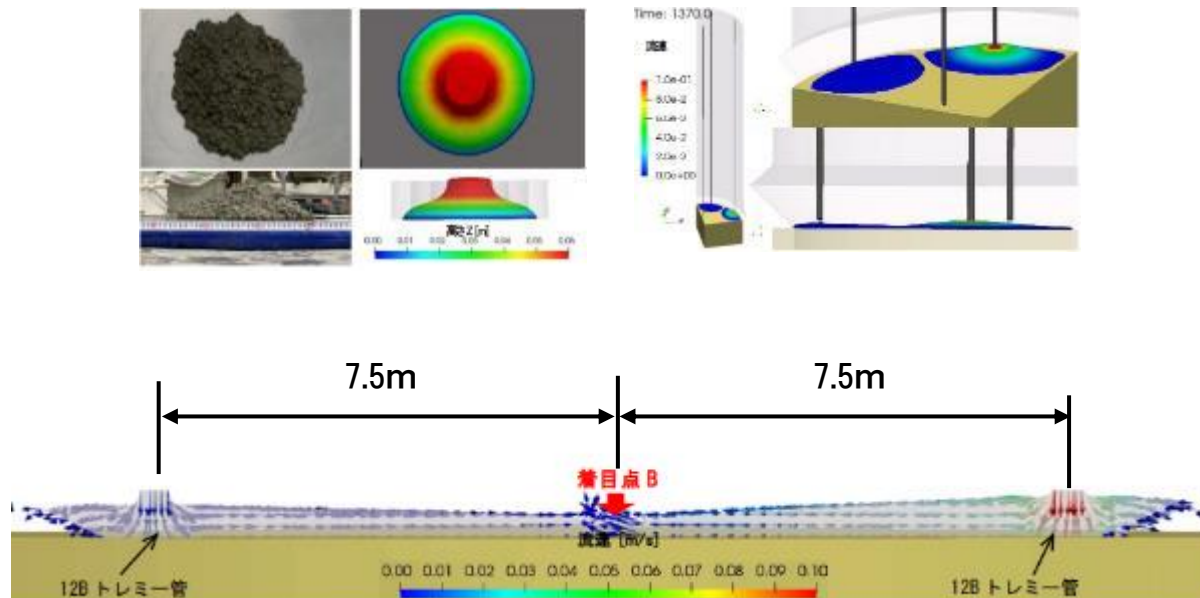


図.流動シミュレーション

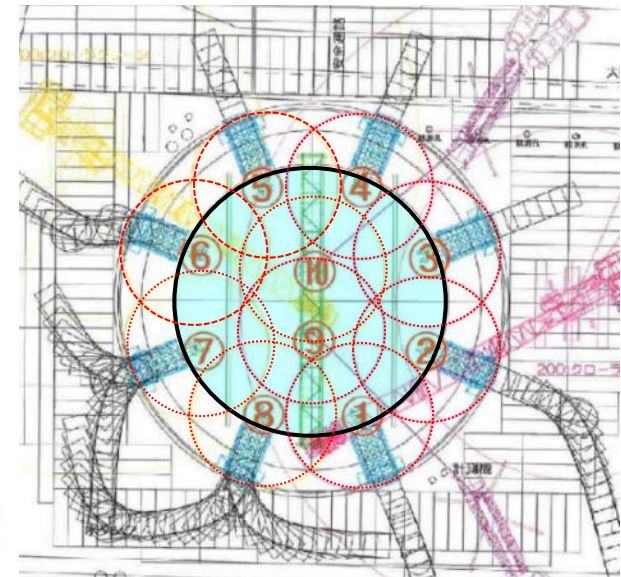


図.打設位置図

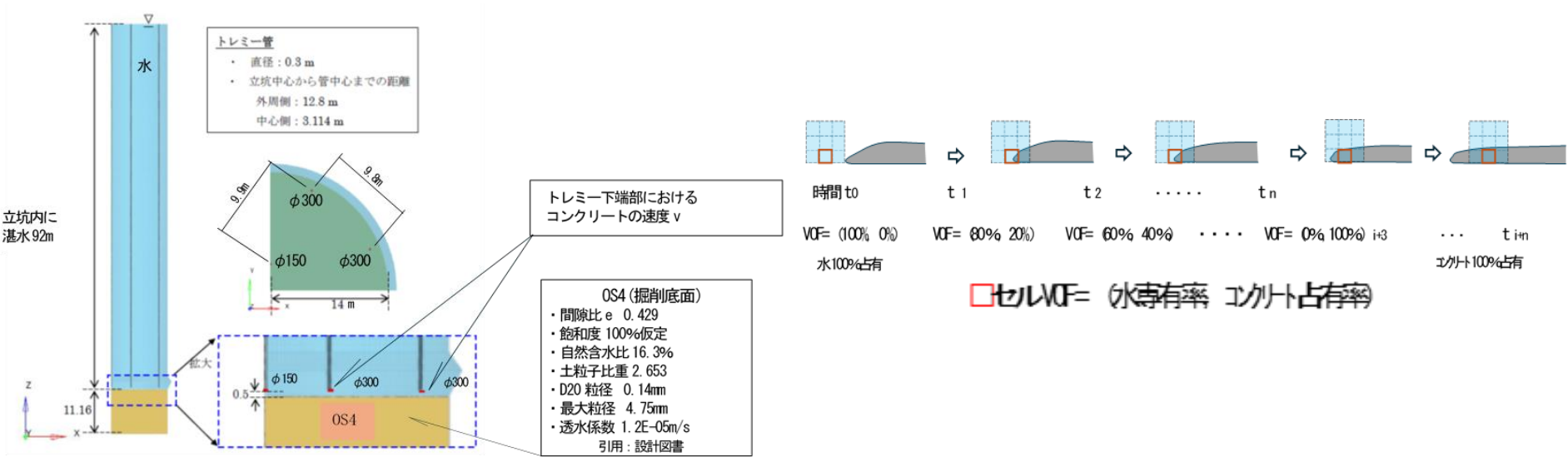
# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

施工

## (1) 流動シミュレーションの条件

- ・水深92mの水中をコンクリートが流動するモデル(格子法)
- ・コンクリートの流動過程において、コンクリートに常に920kN/m<sup>2</sup>の圧力を受ける
- ・解析の要素(セル)は初期状態では、水が占有しているが、徐々に水の占有率が低下し、最終はコンクリートの占有率が100%に置き換わる
- ・一方で、今回のシミュレーションは、コンクリートは均一な流体(セメント、骨材、水の混合物)と仮定し、格子法でシミュレーションしているため、セメントと骨材が分離する可能性についてはシミュレーションしていない。



# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

施工

## (2) 現地での流動性の確認

- ・流動性については、コンクリート打設のたびに、打設後の天端高さをレッドによる深度計測（計16点）で確認し、コンクリートの広がり（流動性）を確認。
- ・結果、水中コンクリートの天端高さは、設計値内に打設できていることを確認。

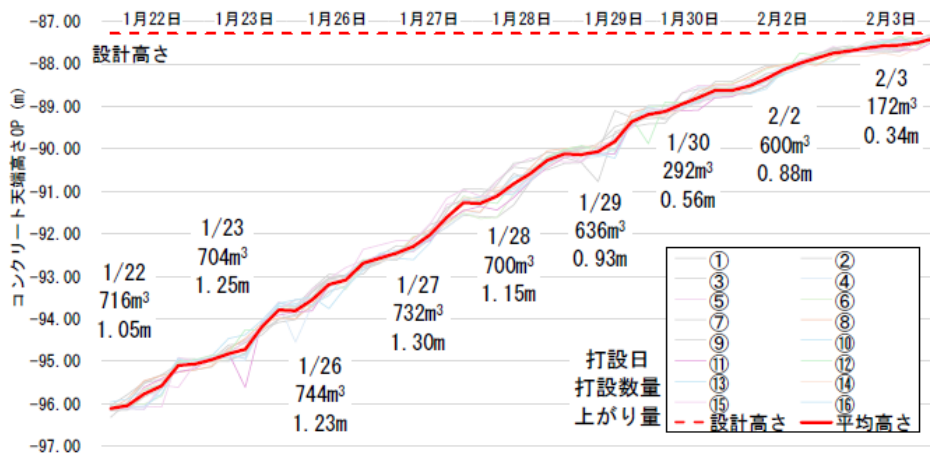
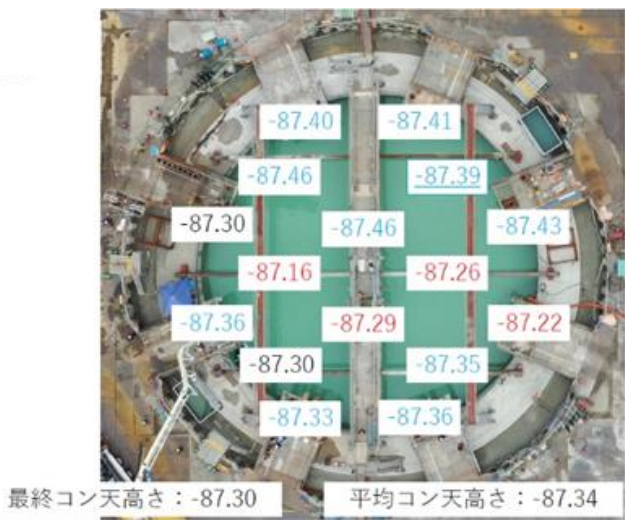
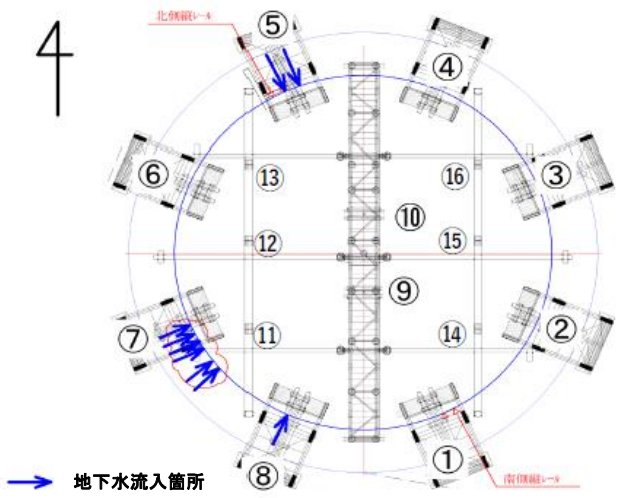


図.レッドによる深度計測

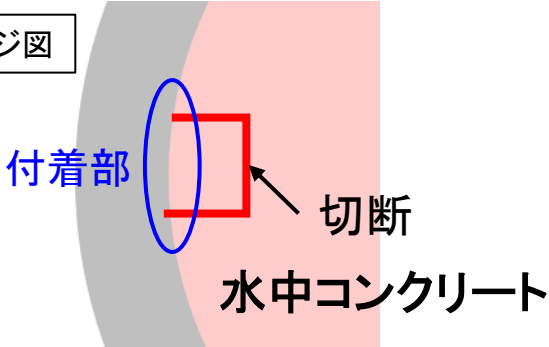
# 地下水流入原因の特定

## 地下水流入要因の調査方法

抽出した地下水流入要因を確認するために、必要な調査方法の検討を行う。

| 地下水流入要因                | 調査方法 ※立坑排水後       |                                     |                                         |
|------------------------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
|                        | 調査手法              | 調査箇所                                | 評価指標                                    |
| 水中コンクリートの<br>一体化施工が不十分 | 付着強度試験            | 現地のケーソン側壁と水中コンクリートの付着部<br>(一部を削り出し) | 付着強度                                    |
|                        | ボーリング調査<br>(コア抜き) | 水中コンクリートで<br>20箇所程度                 | コンクリート打継ぎ目の<br>目視確認および一軸圧縮強度によるコンクリート強度 |
|                        | 弾性波衝撃試験           | 全面                                  | 空洞、ジャンカなどの有無を確認                         |

平面イメージ図



断面イメージ図

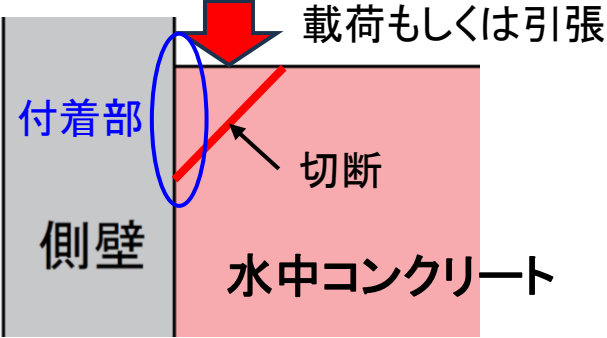


図.付着強度試験イメージ

# 地下水流入原因の特定

## 地下水流入要因の調査方法

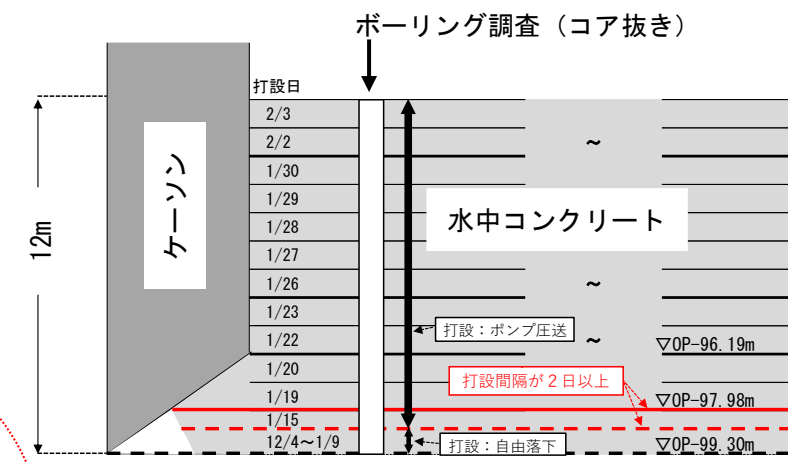
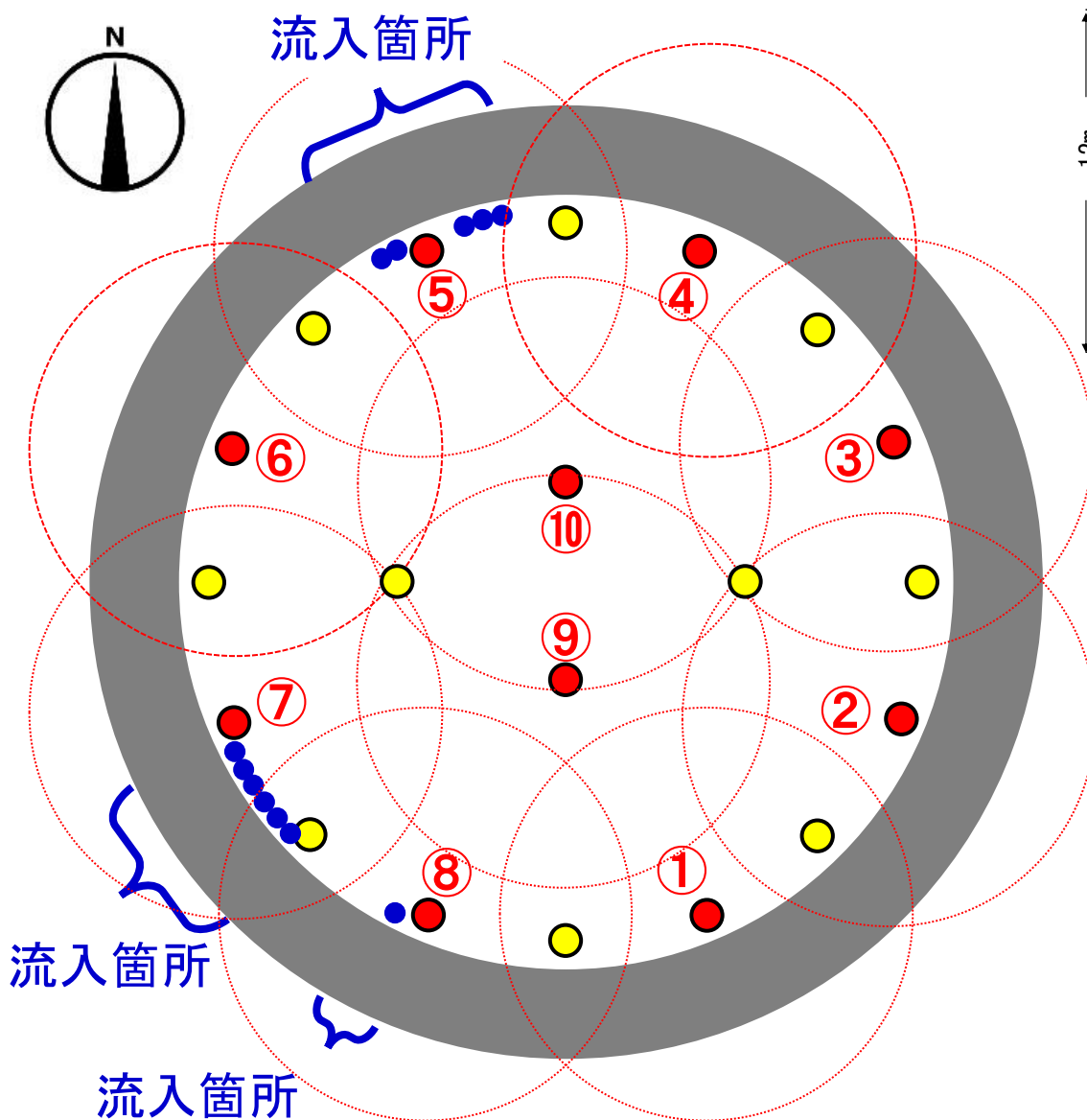


図.ボーリング調査箇所の断面図

- トレミー管設置箇所
- 最もコンクリートが届きにくい箇所
- ①～⑩ トレミー管位置

図.水中コンクリート調査箇所平面図

# 地下水流入原因の特定

## 地下水流入要因の調査方法

水中コンクリート断面内の状況を確認するために非破壊調査を水中コンクリート全面で実施する。**(ダムの堤体で30m程度の実績があるため、水中コンクリート厚さ12mまで確認可能)**



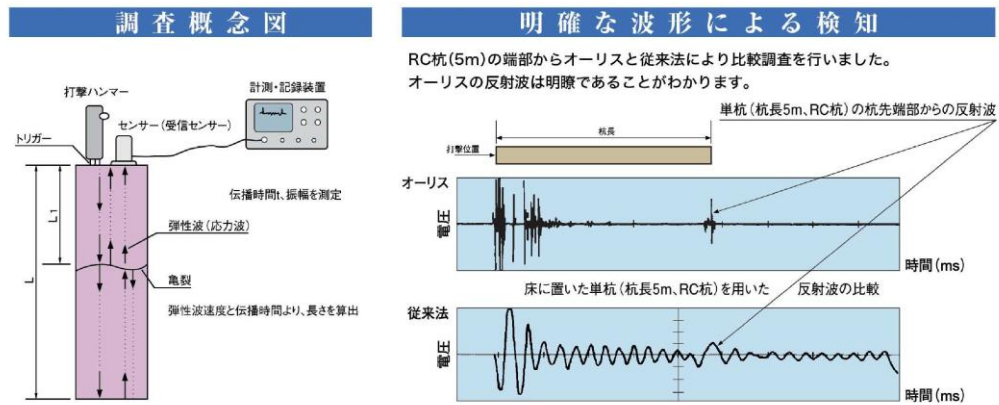
低経費・短時間で広範囲を  
正確に内部亀裂・形状寸法を調査

オーリスとは

「オーリス」は、高周波衝撃弾性波法と呼ばれる非破壊調査システムです。材料内を伝播する弾性波(応力波)の持つ「周波数選択特性」および実験で証明した高周波数の高い指向性を利用した先端技術です。調査に必要な機器は、小型受信センサー、手ハンマーおよびポータブル計測器だけ。きわめて軽量・コンパクトで調査機器の設置が容易なため、広範囲の調査ポイントを短時間でチェックできるなど工期的、経済的な高いメリットがあります。基礎杭・上下部工の土木構造物、グラウンドアンカー工さらには岩盤調査にまで多様な範囲を対象とし、高い精度での状態評価(健全度調査・形状調査)を可能にします。



特許番号 第287759号 第2944515号  
第3519381号 第3571968号  
第4943061号

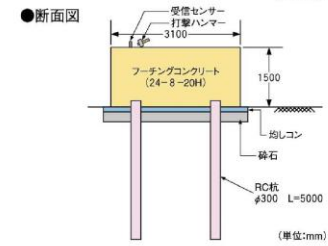
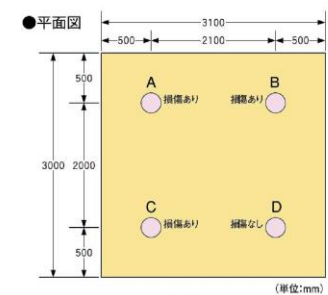
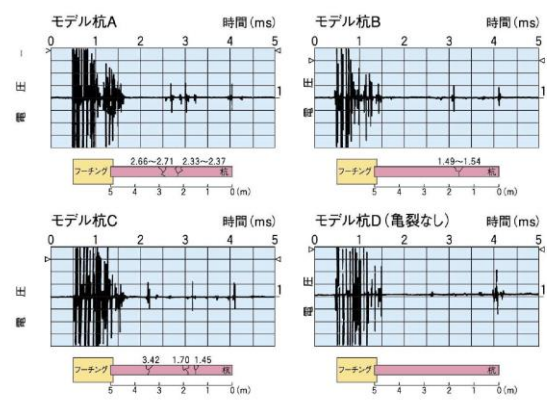


●ハンマーによる衝撃波発生及び反射波の走行時間から亀裂の位置を求める方法は従来の衝撃弾性波法と同じですが、オーリスでは高周波領域で共振周波数をもつ高感度受信センサーを用い、反射波の中から亀裂幅に合った特定の周波数範囲を選択し抽出することが特徴となっています。

### コンクリート杭のモデル実験

フーチングを介在させた亀裂を有するコンクリート杭の杭長を調査した実験結果です。杭長と亀裂位置が検知できることが確認できます。

●調査結果波形図と事前に目視で確認した亀裂(亀裂開口幅0.3~0.9mm)位置図の比較



以下、参考資料

# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

第2回審議会資料3 再掲

城北立坑は、大深度地下使用で定める地下40メートル以深での施工実績があり、城北立坑の深度、外径でも適用範囲とされている自動化オープンケーソン工法で設計。

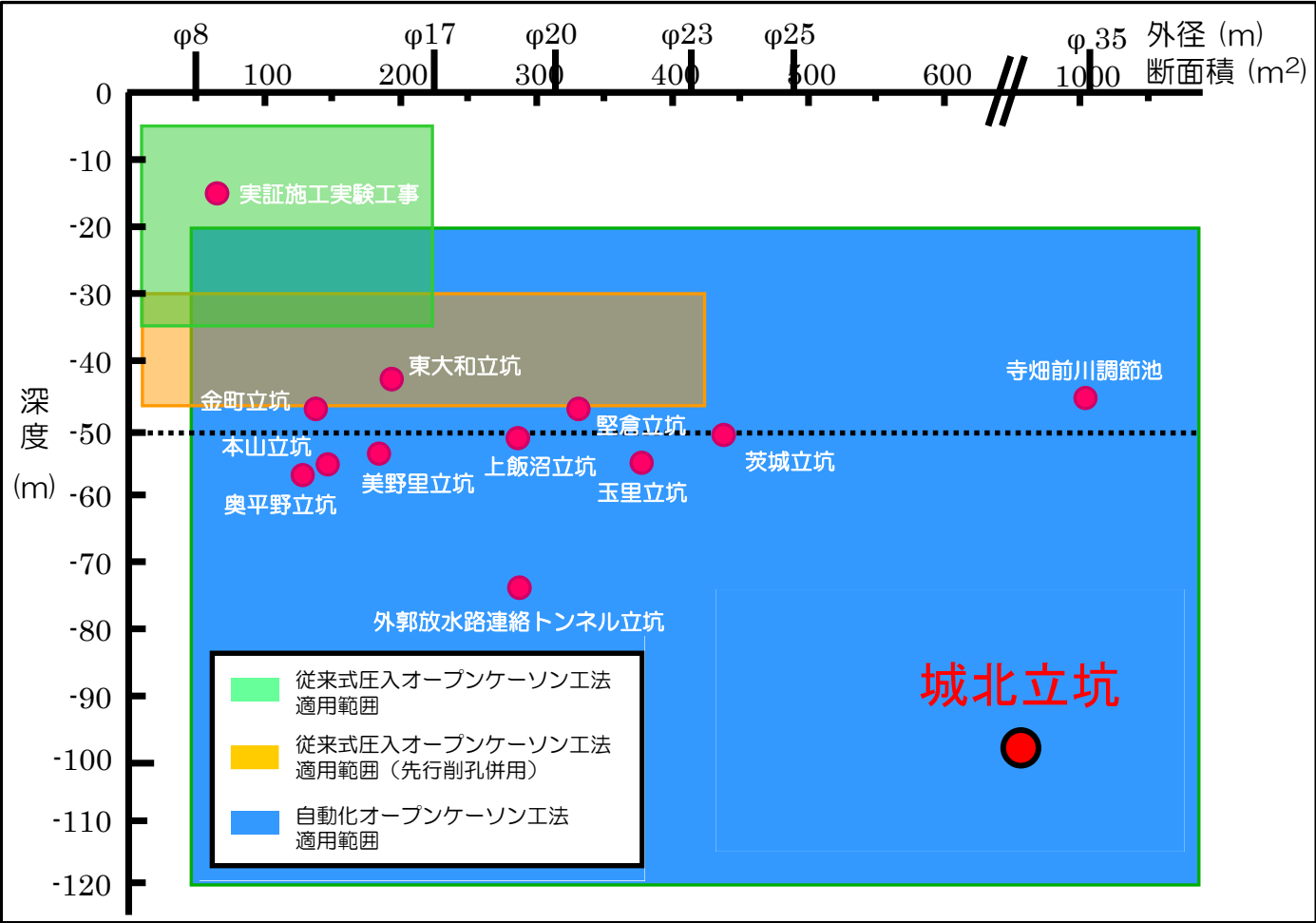


図. 自動化オープンケーソン工法の採用実績と適用範囲  
(出典:PCウェル工法協会資料)

# 地下水流入原因の特定

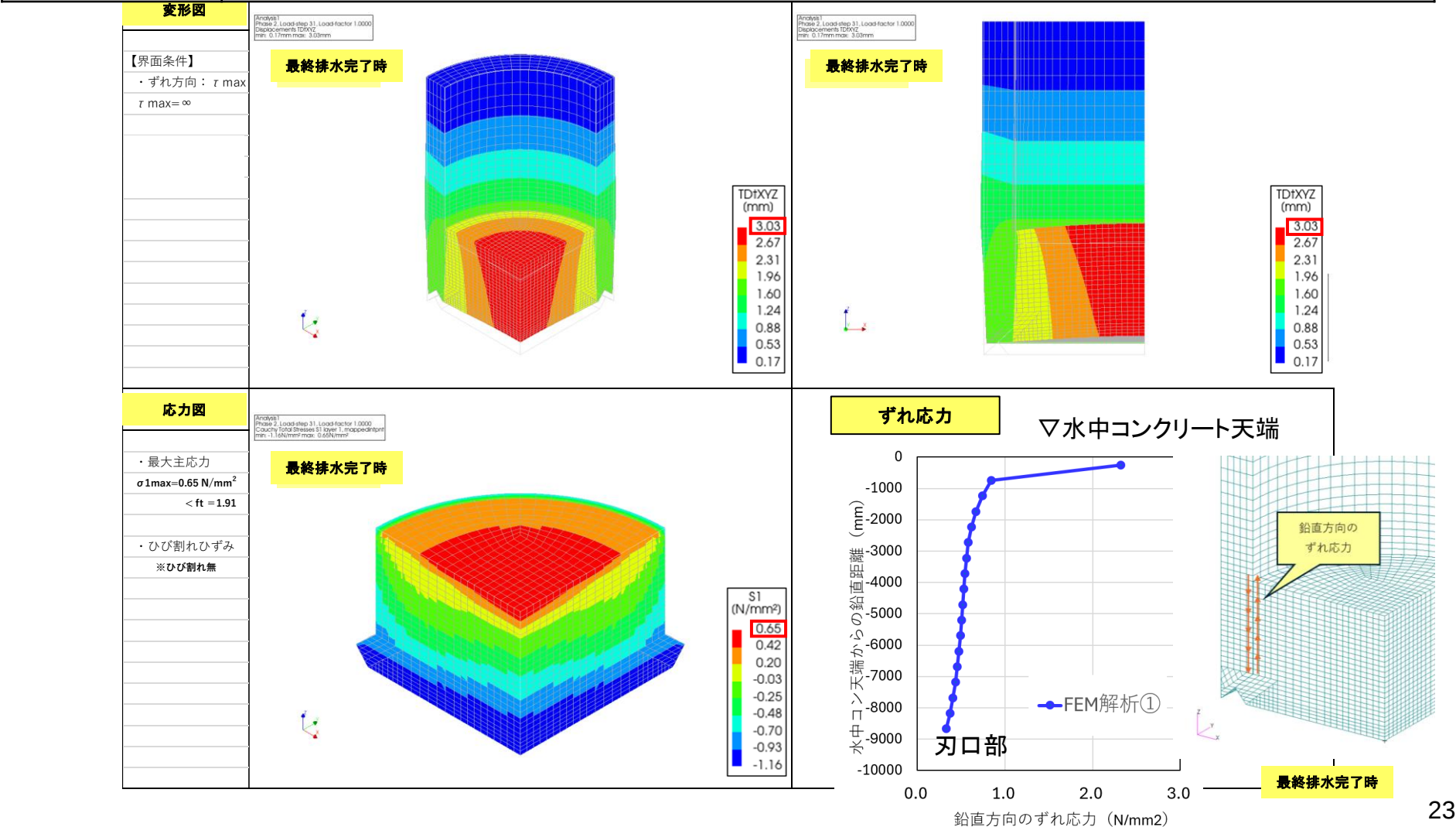
地下水流入要因の抽出

設計

FEM解析①

側壁上部と水中コンクリートの付着：一体の場合（最終排水完了時）

- ・水中コンクリートとケーソン側壁の界面のずれ ⇒発生しない。
- ・水中コンクリートのひび割れ ⇒発生しない。



# 地下水流入原因の特定

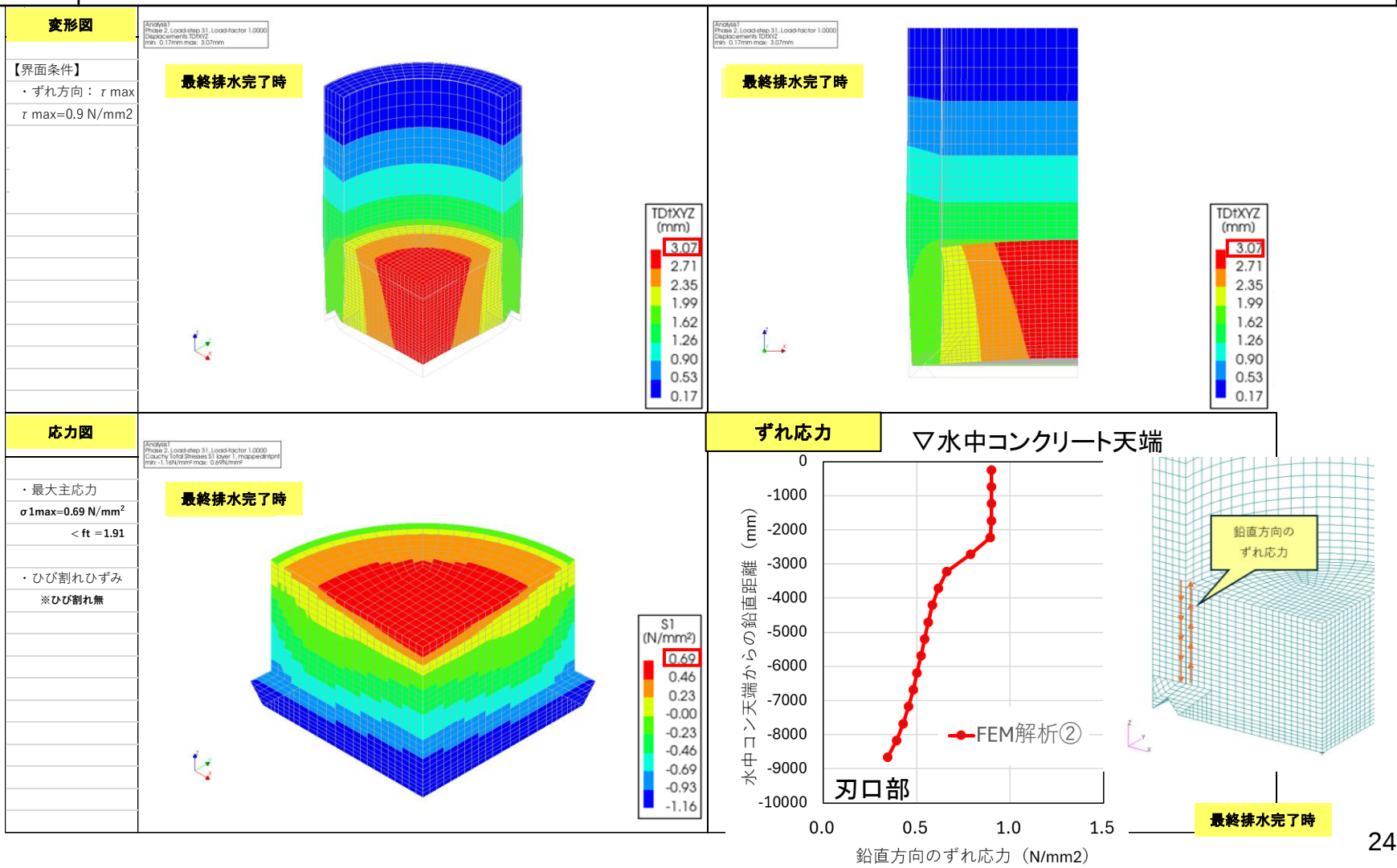
地下水流入要因の抽出

設計

FEM解析②

側壁上部と水中コンクリートの付着 :  $900\text{kN/m}^2$  の場合 (最終排水完了時)

- 水中コンクリートとケーソン側壁の界面のずれ  $\Rightarrow$  発生しない。ただし、天端近くは、最大ずれ応力に到達  $\Rightarrow$  発生しない。
- 水中コンクリートのひび割れ



# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

FEM解析③

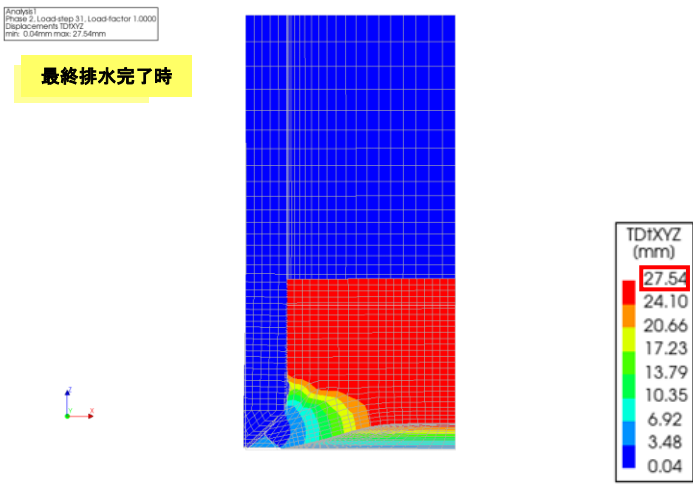
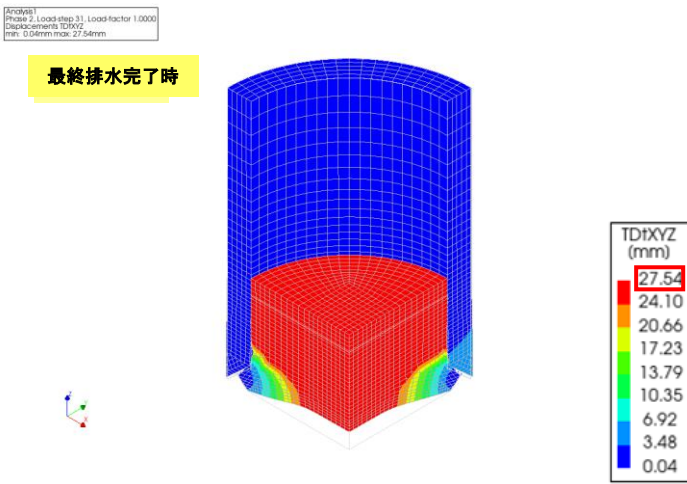
側壁上部と水中コンクリートの付着：ゼロの場合（最終排水完了時）

- ・水中コンクリートとケーソン側壁の界面のずれ ⇒発生。
- ・水中コンクリートのひび割れ ⇒発生。

変形図

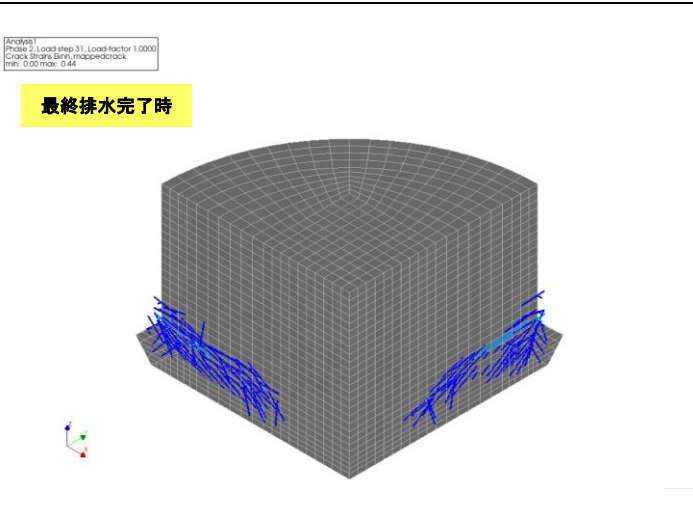
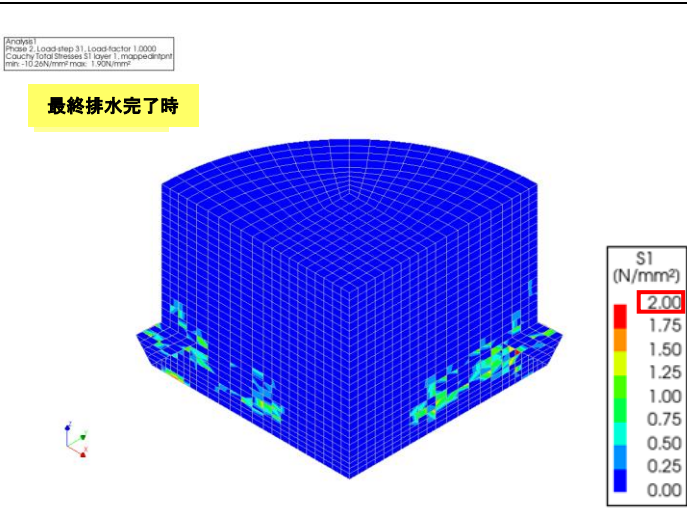
【界面条件】

- ・ ずれ方向：  $\tau$  max
- $\tau$  max=0.0 N/mm2



応力図

- ・ 最大主応力
- $\sigma 1$  max > 1.91 N/mm<sup>2</sup>
- ・ ひび割れひずみ
- ※隅角から進展

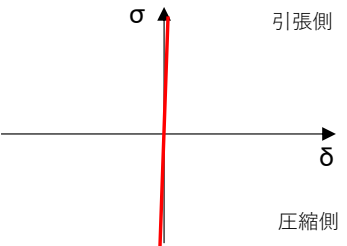
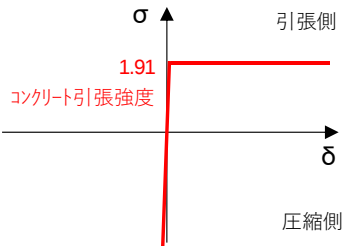
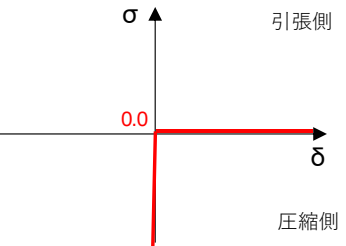
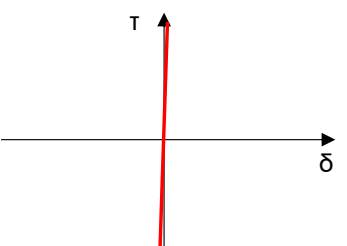
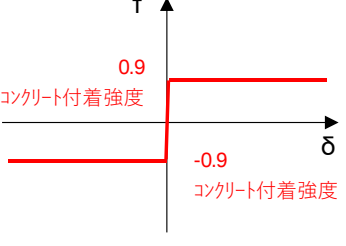
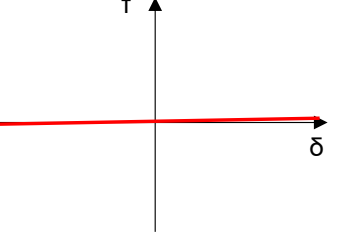


# 地下水流入原因の特定

地下水流入要因の抽出

設計

インターフェイス要素の条件

| インターフェースの設定 |         | FEM解析①                                                                             |          | FEM解析②                                                                              |          | FEM解析③                                                                               |          |
|-------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|
|             |         | 剛結モデル                                                                              |          | 付着強度を設定したモデル                                                                        |          | 付着なしモデル                                                                              |          |
| 面直方向        | 設定値     | 剛性                                                                                 | 強度       | 剛性                                                                                  | 強度       | 剛性                                                                                   | 強度       |
|             | 圧縮側     | 1E+05                                                                              | $\infty$ | 1E+05                                                                               | $\infty$ | 1E+05                                                                                | $\infty$ |
|             | 引張側     | 1E+05                                                                              | $\infty$ | 1E+05                                                                               | 1.91     | 1E+05                                                                                | 0.00     |
|             | 応力と変位   |   |          |   |          |   |          |
| ずれ方向        | 設定値     | 剛性                                                                                 | 強度       | 剛性                                                                                  | 強度       | 剛性                                                                                   | 強度       |
|             | 鉛直・水平共通 | 1E+05                                                                              | $\infty$ | 1E+05                                                                               | 0.90     | 1E-05                                                                                | 0.90     |
|             | 応力と変位   |  |          |  |          |  |          |
| 備考          |         | —                                                                                  |          | 連成考慮(剥離すると滑る)                                                                       |          | 連成考慮(剥離すると滑る)                                                                        |          |

剛性の単位: N/mm<sup>2</sup>/mm (応力と変位の変化率)  
強度の単位: N/mm<sup>2</sup>

<インターフェース要素>

