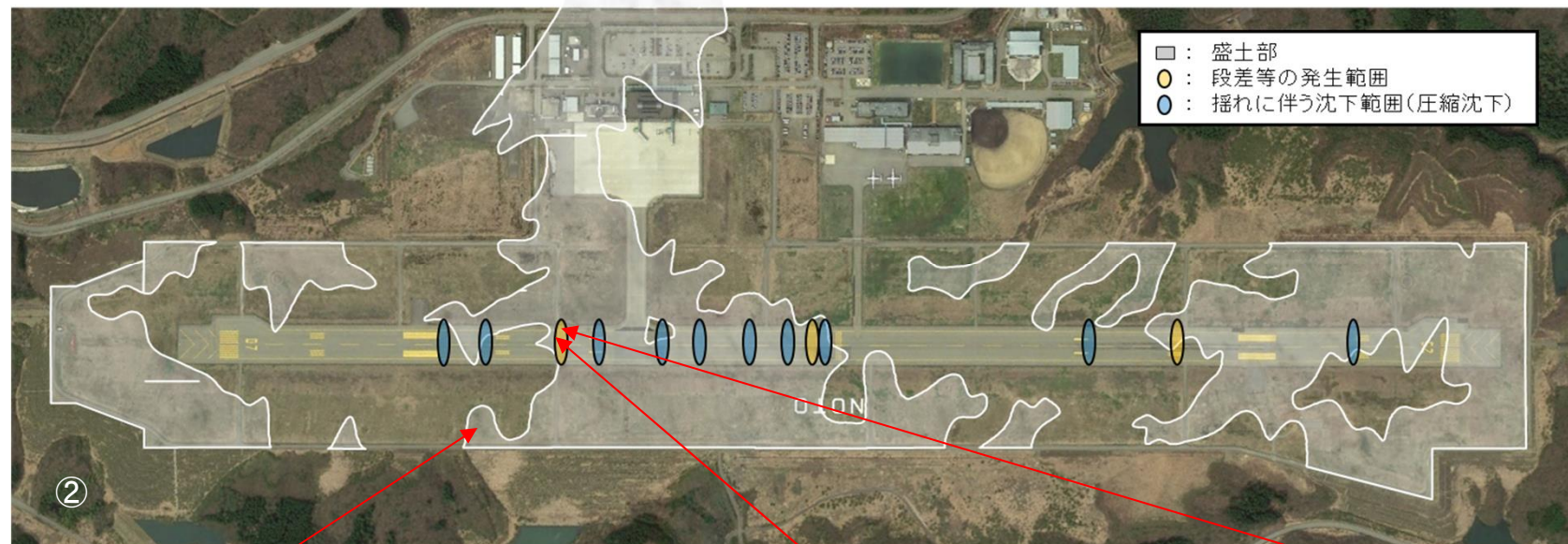


# 盛土地盤変状対策の解析方法

---

国土交通省 航空局  
令和7年7月

- 能登半島地震により、能登空港の切盛土境界部周辺において滑走路に大きな亀裂、着陸帯に最大75cmの段差等が生じている。盛土法面の亀裂、はらみ、崩落は確認されていないことから、亀裂や段差の発生は、盛土部の沈下(ゆすりこみ沈下、盛土法面の水平変位に伴う鉛直変位等)が要因と想定している。
- 能登空港と同じく盛土で造成された空港(新千歳、釧路、函館、広島、高松、熊本、鹿児島)について、同様の事象が生じる可能性について検証し、必要な対策を実施する。



着陸帯において最大75cmの段差



切盛境界で段差発生 滑走路で最大10cm以上



ひび割れ幅2cm以上

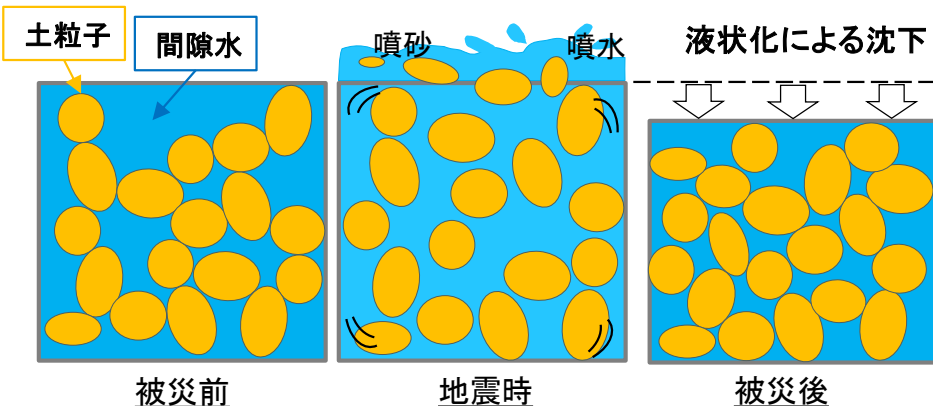
## 被災メカニズムの検証

能登空港の滑走路等の亀裂や段差の要因と想定している盛土地盤の沈下(ゆすりこみ沈下)は、地震動による盛土地盤への繰返しせん断によって地盤の体積が収縮され、地盤変形が生じるものであるため、“盛土地盤の体積収縮を考慮した解析方法”について検討かつ能登空港の地盤変形の照査をし、盛土部における被災メカニズムの検証を行う。

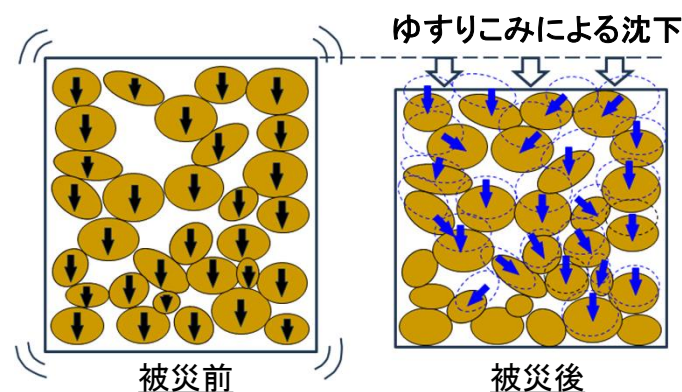
## 体積収縮を考慮した解析(プログラム構築)のプロセス

1. 能登空港の地盤変形について地震応答解析(FLIP)による検討を行う。
  - ✓ 地震動の設定は、能登半島地震の再現地震動を設定
  - ✓ 解析モデルは、既往資料を基に盛土構成及び断面位置を設定
  - ✓ 地盤の変形特性(せん断抵抗角等)は、能登空港建設当時の調査資料を基に設定
2. 盛土地盤の液状化による地盤沈下の影響検討を行う。
  - ✓ 地震応答解析(FLIP)により液状化する地盤の範囲を特定し、盛土地盤の沈下量を算定
3. 盛土地盤の体積収縮による沈下を解析するプログラムを構築する。
  - ✓ 液状化地盤とは別の範囲で、ゆすりこみにより生じる盛土地盤の沈下量を評価する機能を構築する。

## 盛土地盤の液状化による沈下の解析



## 盛土地盤の体積収縮による沈下の解析

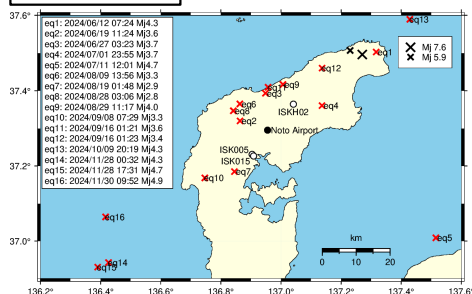


・地震により盛土箇所が揺らされて地盤の体積が収縮したことが原因で、盛土箇所で沈下(ゆすり込み沈下)が発生したものと想定

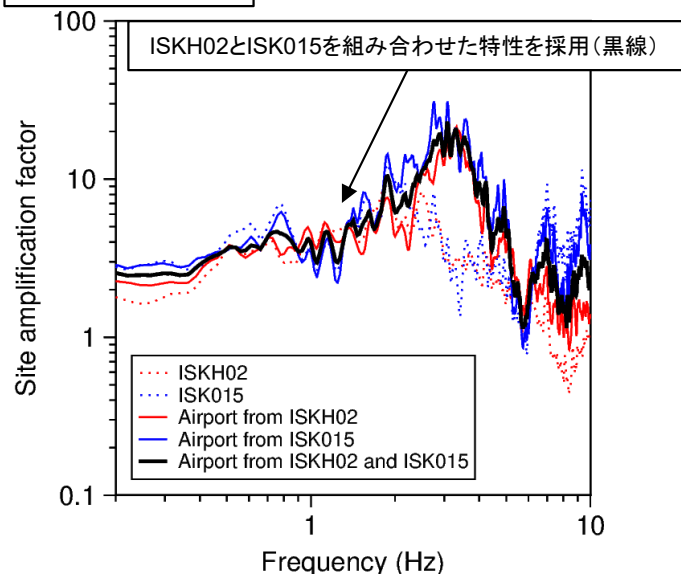


能登半島地震の再現地震動は、2024年6月10日から10月24日までに得られた地震記録を用いて、能登空港の近隣となる観測地点KiK-net「ISKH02(柳田)」,K-NET「ISK005(穴水)」,ISK015(大町)」におけるサイト増幅特性の補正結果を比較し、能登空港地盤のサイト増幅特性を設定し、これを用いて2つの断層モデルにより設定した再現波から設定した。これらの再現波のフーリエスペクトルや地震動のPSI値(スペクトル強度)は大きな差が生じなかったため、地震応答解析結果の“累加せん断ひずみ”が大きい傾向となる再現波②を採用する。

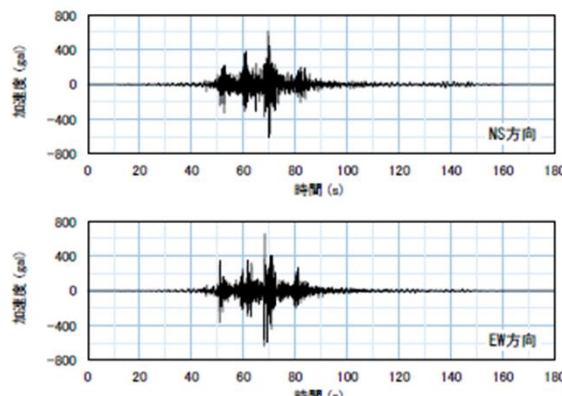
## 地震記録



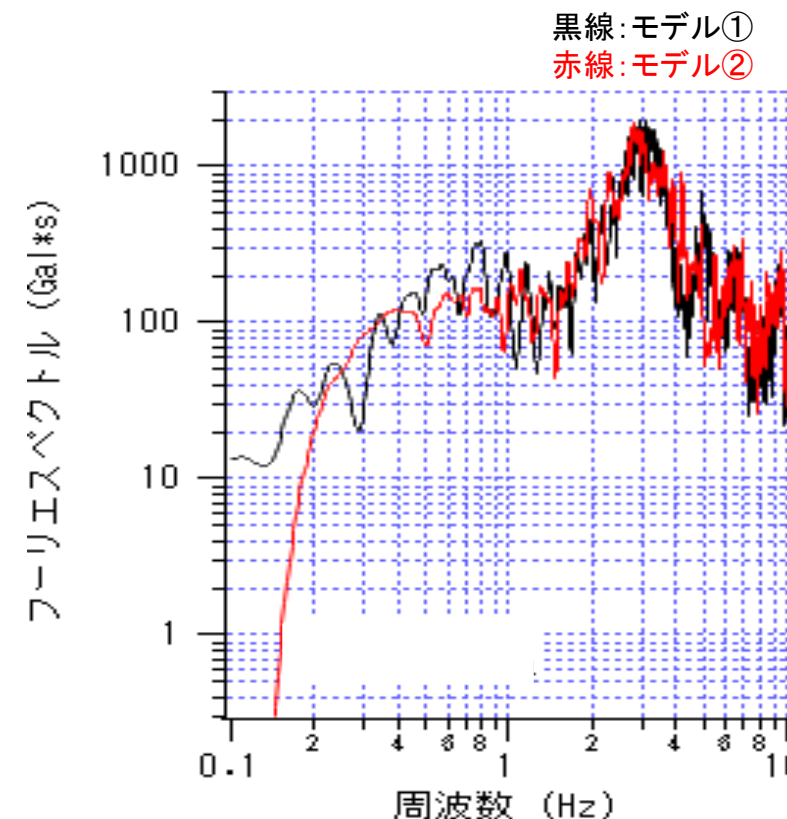
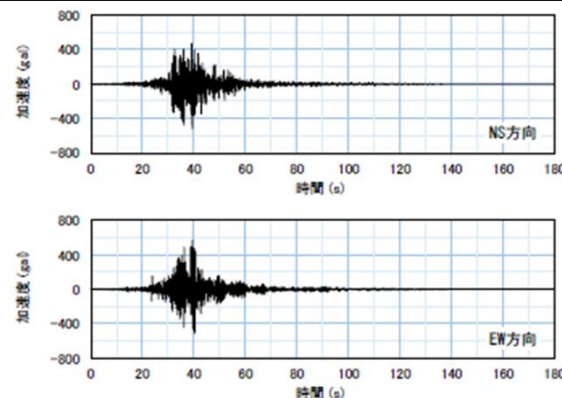
## サイト増幅特性



## 再現波①PSI値 NS:93 EW:93

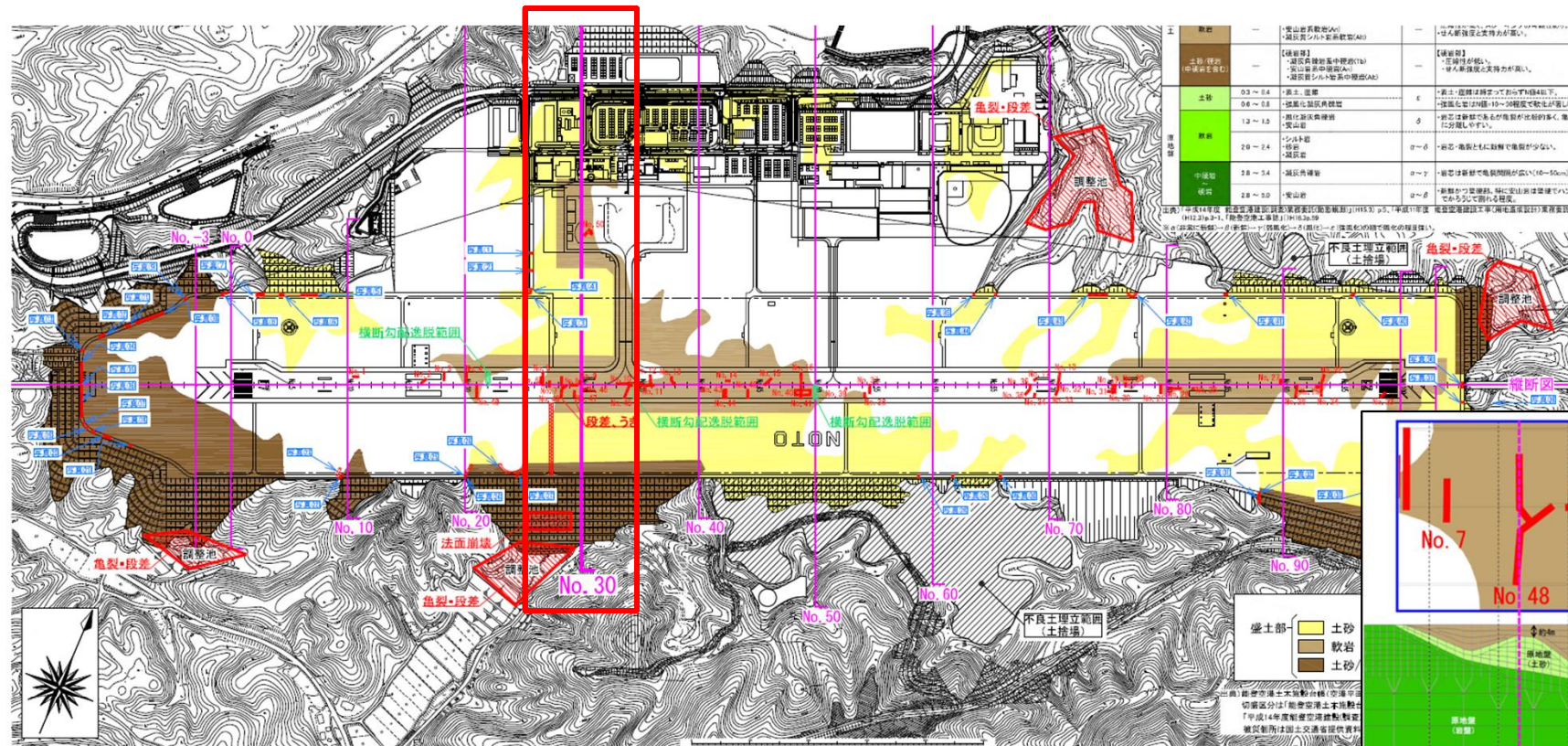


## 再現波②PSI値 NS:85 EW:84

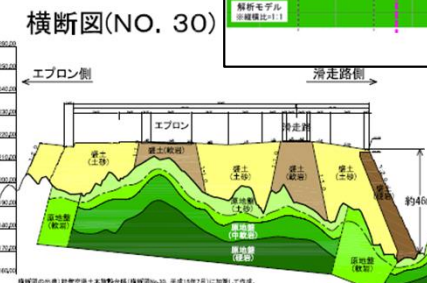
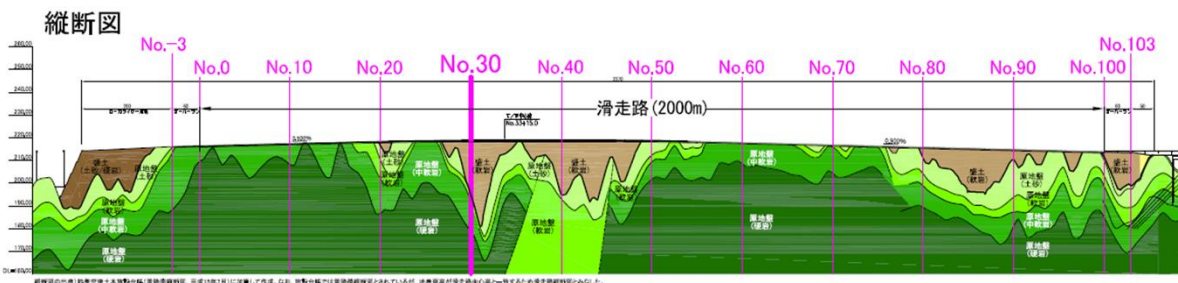
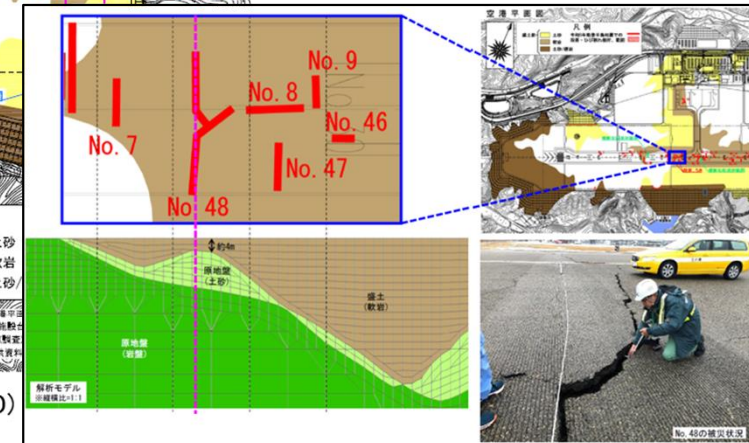




能登空港の解析モデルについて既往資料を基に盛土構成及び断面位置を設定する。



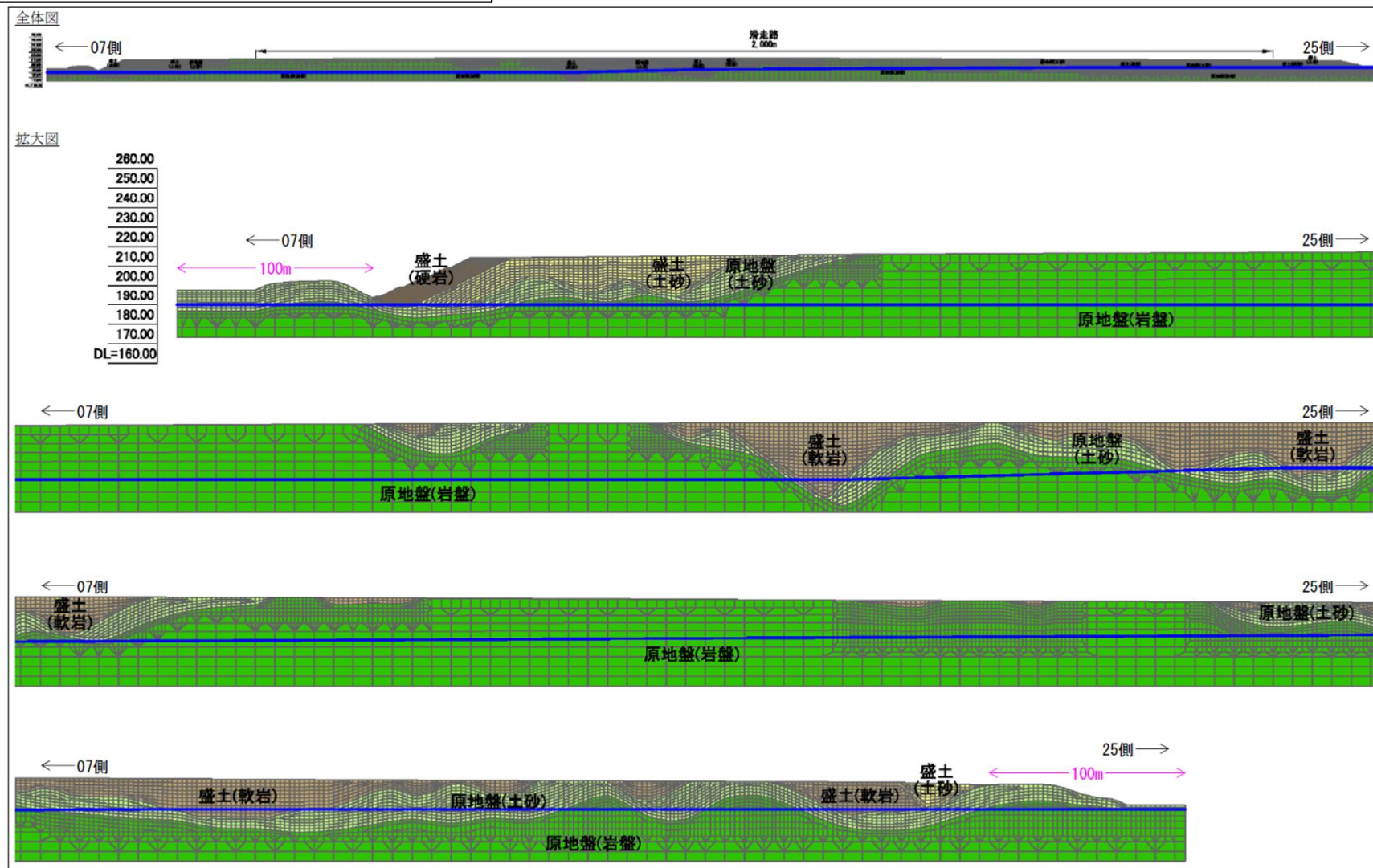
滑走路で15cm程度の段差が生じた箇所に近く、盛土層厚が厚い断面の例



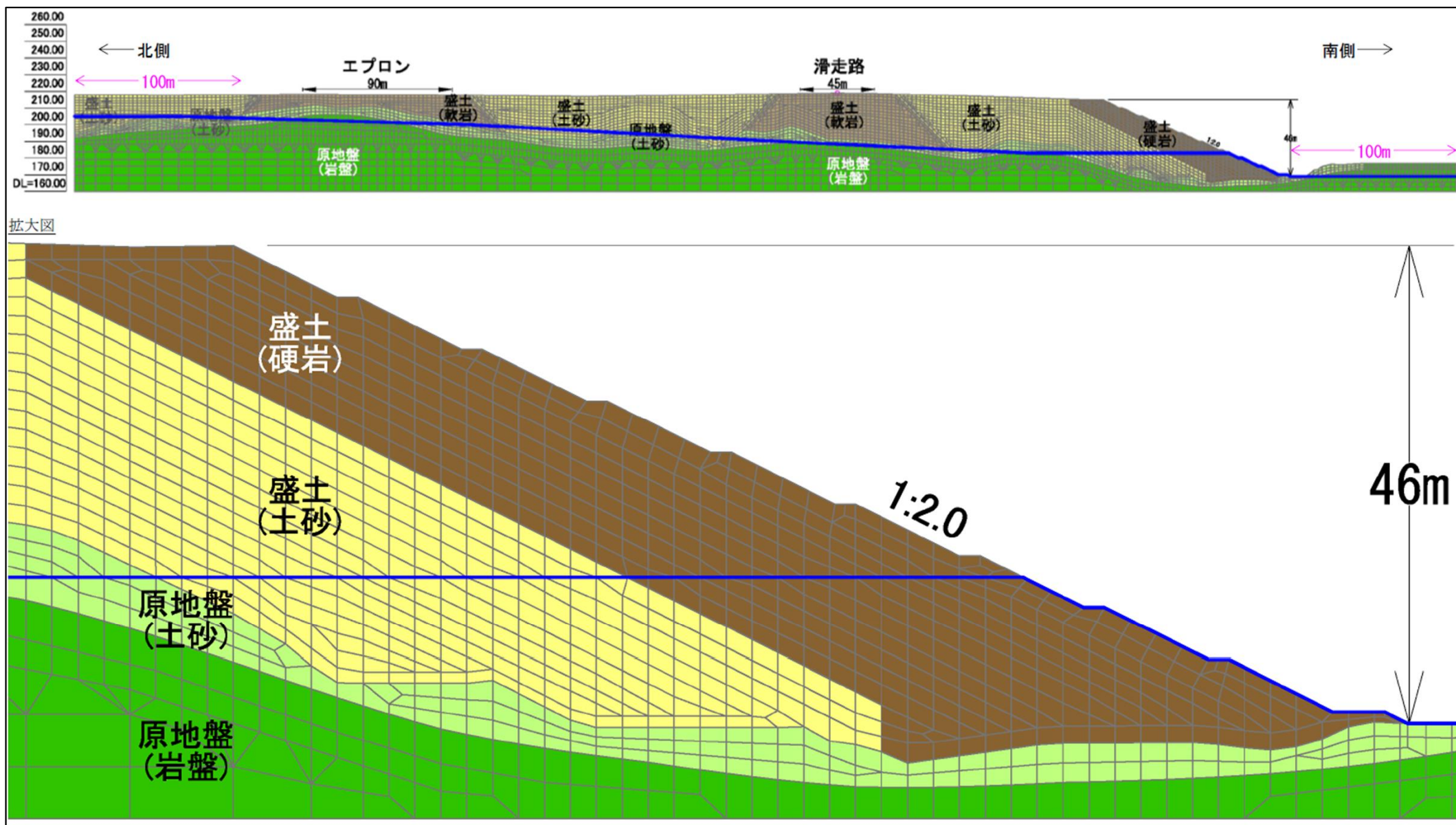


解析モデルは滑走路を含む切盛土部分を網羅する範囲として作成し、メッシュについては盛土部分を細分化し、地盤変形をより詳細に評価できるようにする。

## 解析モデル：縦断メッシュ図



## 解析モデル: 横断メッシュ図





盛土地盤の変形特性の設定は、能登空港造成後の土質調査データが残されていないことから、盛土材に使用した土の工学的特性を評価する試験結果を用いて設定することとし、土の三軸圧縮試験で得られたせん断抵抗角( $\phi_f(^{\circ})$ )からN値(地盤の強度を表す指標)を推定し、解析モデルの構築にあたり個々のN値に対応する一般的なせん断弾性係数、ポアソン比等の地盤の変形特性の数値を使用する。

| 土層区分    | 相対密度<br>$D_r(\%)$ | せん断抵抗角<br>$\phi_f(^{\circ})$ | 備考                                                |
|---------|-------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| 盛土(土砂)  | —                 | 30.2                         | CU試験結果 ( $\phi'$ )                                |
| 盛土(軟岩)  | —                 | 33.2                         | CD試験結果 ( $\phi_d$ )                               |
| 盛土(硬岩)  | —                 | 40.0                         | CD試験結果 ( $\phi_d$ )                               |
| 原地盤(土砂) | 64.4              | 40.7                         | $\tan \phi_f = 0.863$ より、 $\phi_f = 40.7^{\circ}$ |

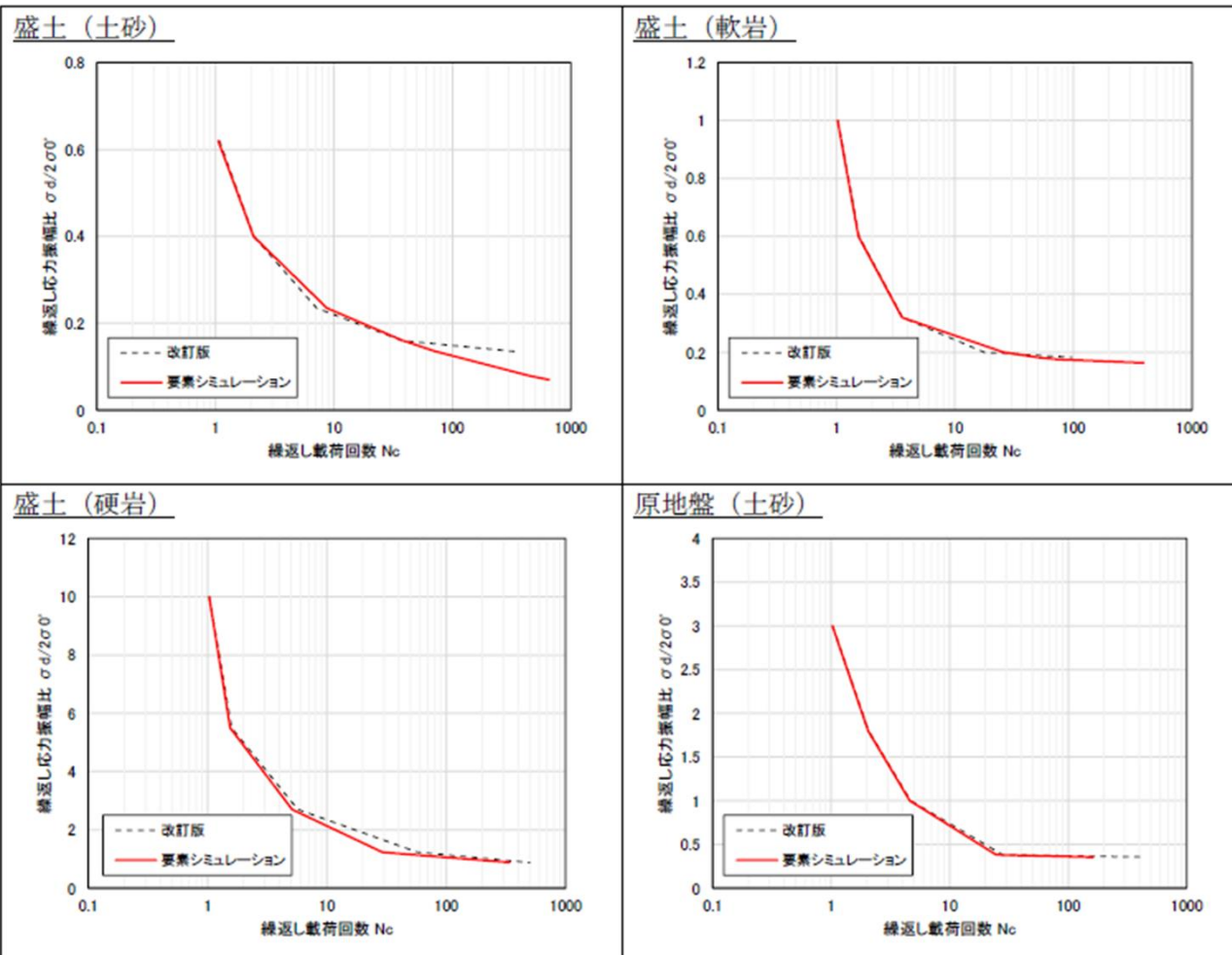
※原地盤(土砂)のせん断抵抗角 $\phi_f$ は小数第2位を切り捨てて設定した。

| 土層区分    | $N_{131}$ | せん断弾性係数<br>$G_{ma}(\text{kN/m}^2)$ | ポアソン比<br>$\nu$ | 体積弾性係数<br>$K_{ma}(\text{kN/m}^2)$ |
|---------|-----------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| 盛土(土砂)  | 5         | 42,123                             | 0.33           | 109,850                           |
| 盛土(軟岩)  | 13        | 80,668                             | 0.33           | 210,369                           |
| 盛土(硬岩)  | 44        | 184,828                            | 0.33           | 482,002                           |
| 原地盤(土砂) | 25        | 125,840                            | 0.33           | 328,171                           |

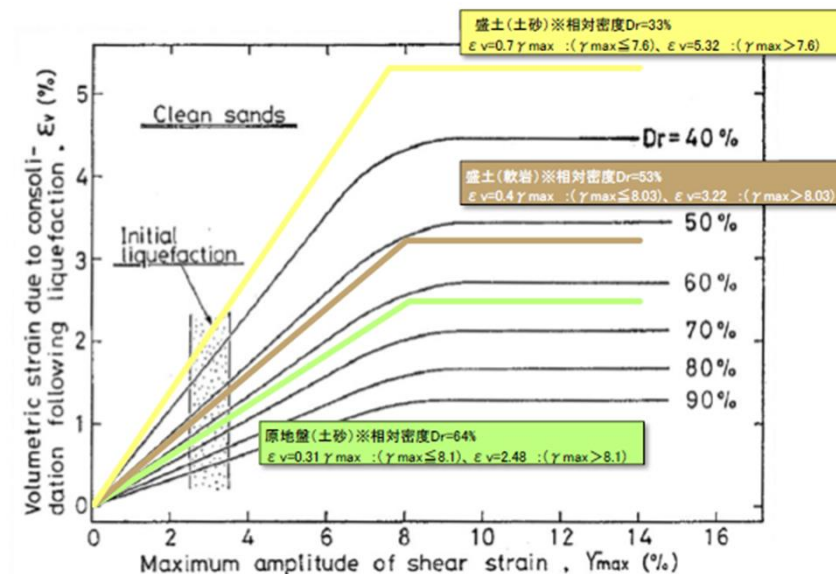
| 土層区分    | せん断波速度<br>$V_s(\text{m/s})$ | 密度 $\rho$<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | せん断弾性係数<br>$G(\text{kN/m}^2)$ | ポアソン比<br>$\nu$ | ヤング率E<br>$E(\text{kN/m}^2)$ |
|---------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------|-----------------------------|
| 原地盤(岩盤) | 1,471                       | 2.18                             | 4,717,173                     | 0.33           | 7,093,494                   |



盛土地盤の液状化特性の設定は、N値から推定する簡易な設定方法を使用した。また、液状化地盤の過剰間隙水圧消散に伴う体積ひずみについては、石原・吉嶺のきれいな砂における体積ひずみの関係を利用する。



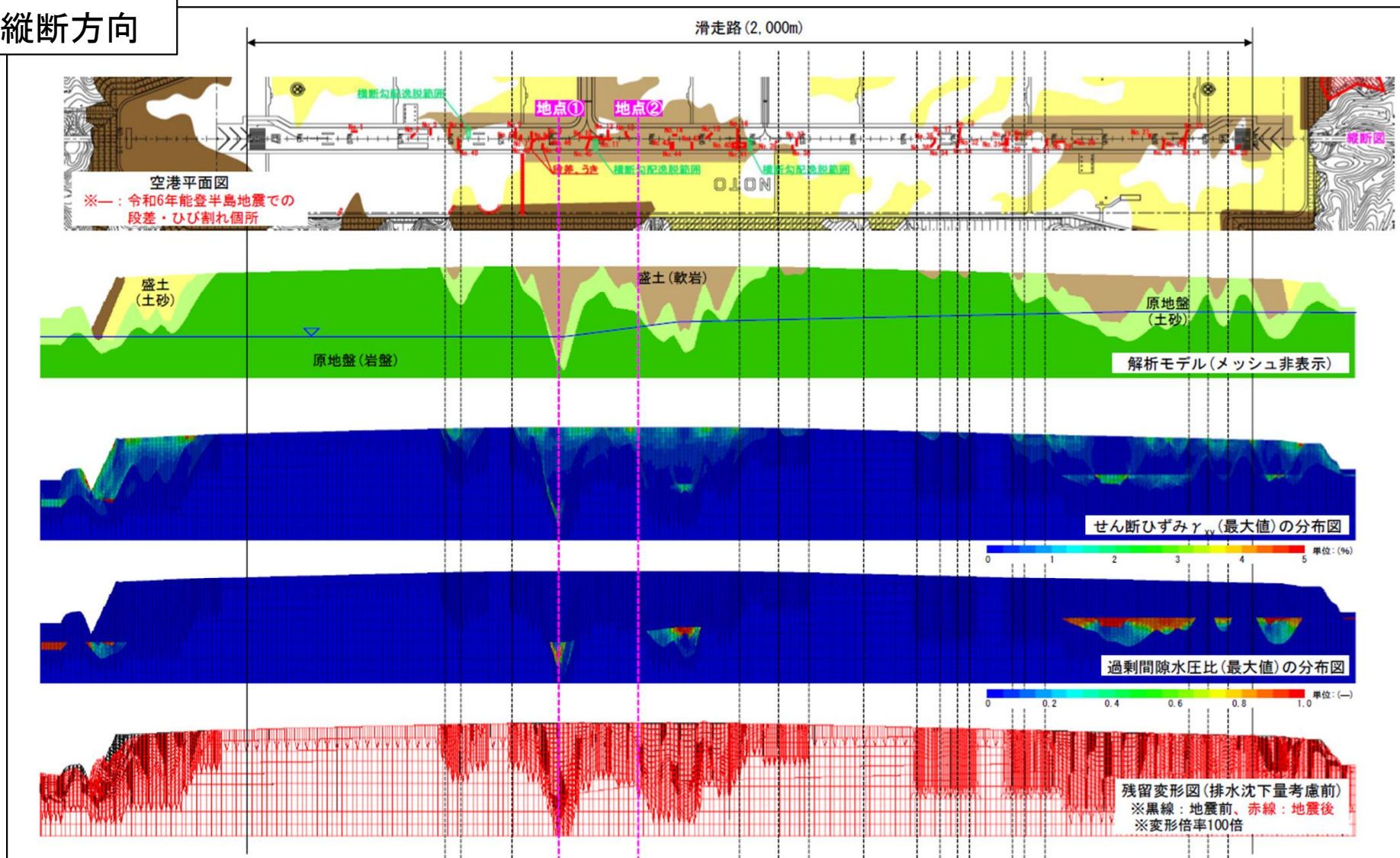
体積ひずみの設定:  
いわゆる石原・吉嶺のチャート  
(きれいな砂)の体積ひずみを利用



盛土(土砂), 盛土(軟岩): 沖積砂(液状化地盤)相当の強度

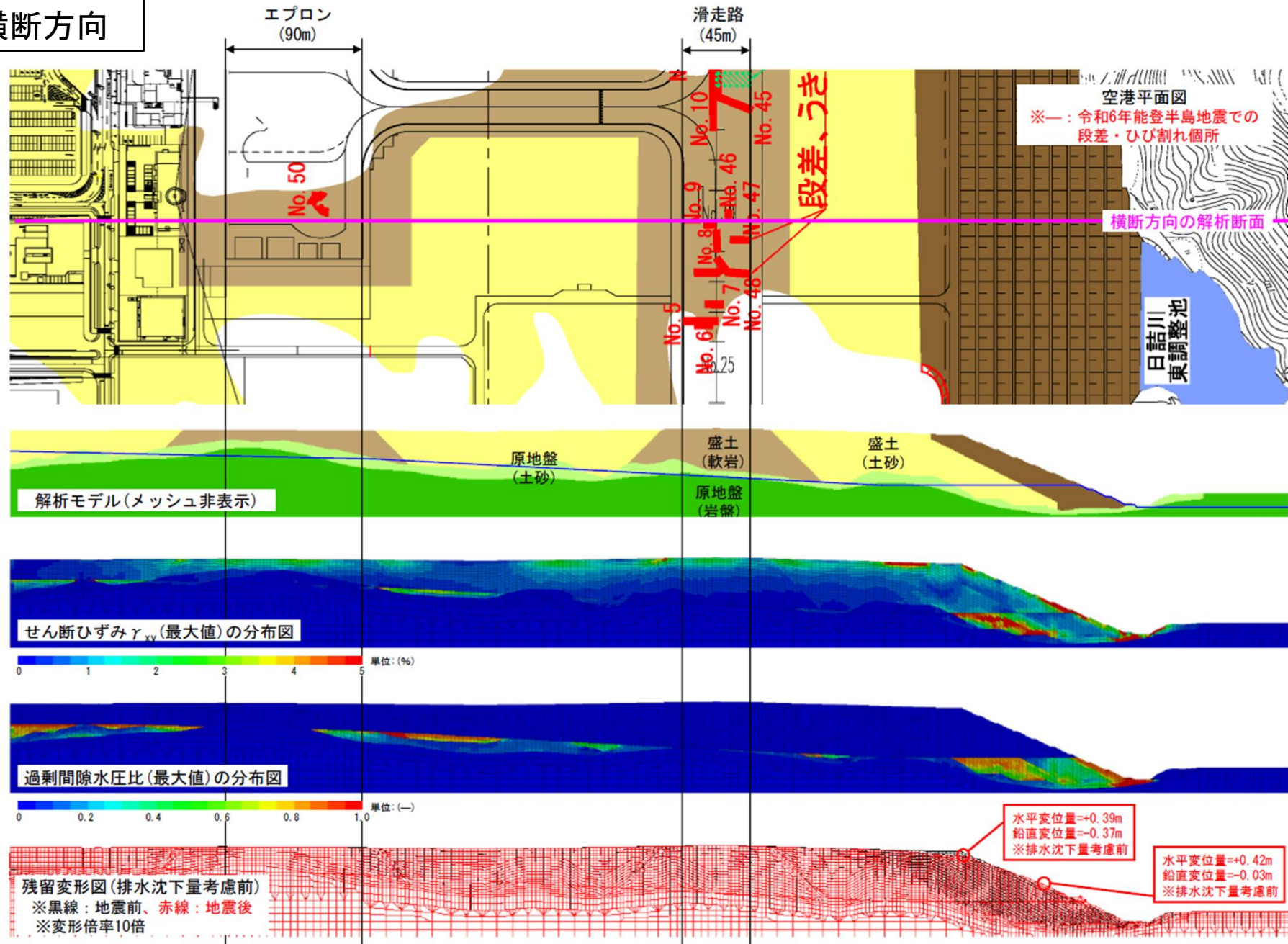
盛土地盤の沈下量の検証は、地震応答解析(FLIP)により液状化が発生する箇所を判定し、液状化した層の過剰間隙水圧消散に伴う体積ひずみを考慮し、鉛直変位(体積ひずみ×層厚)が地表に発生すると仮定した場合の滑走路縦断方向又は横断方向の変位と現地測量結果をグラフで比較整理する。

## 滑走路縦断方向

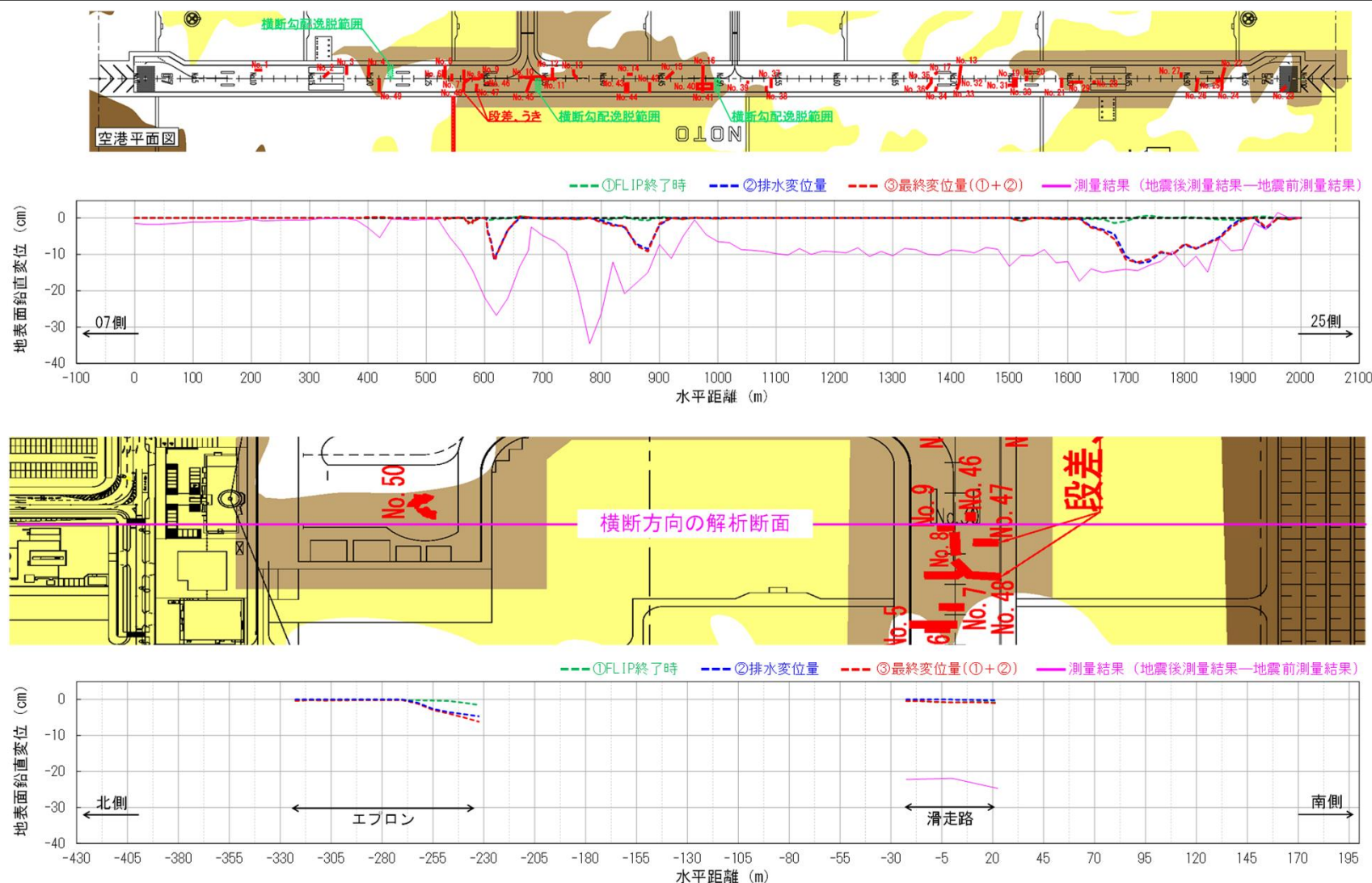




## 滑走路横断方向



盛土地盤の沈下量の算定結果と地震後の現地測量結果とを比較すると、縦断方向では変位(沈下)が発生する範囲及び沈下量の相違が確認されたため、能登空港の盛土地盤の沈下については液状化が原因ではないと考えられる。



※現地測量結果は、地震による能登空港の地殻変動量(23cmの隆起)を差し引いたものである。



盛土地盤の体積収縮を考慮した変形解析のプログラムは、液状化地盤とは別に生じる盛土地盤の沈下量を評価するため、地震応答解析(FLIP)のひずみ時刻歴を引継ぎ、盛土地盤における“過剰間隙水圧が発生しない場合の体積ひずみ”を評価する機能(盛土地盤用のアルゴリズム)を持たせ、地震応答後の盛土地盤の地盤変形を評価できるプログラムとして構築する。

## 【盛土地盤の体積収縮を考慮した変形解析プログラムにかかる実装フロー】

### 地震応答解析(FLIP)

- ・地震時の変位・応力を計算



過剰間隙水圧  
ひずみ時刻歴を引き継ぐ

### 盛土地盤の体積収縮を考慮した変形解析(プログラム:『PARI-GDA』の機能改良)

- ・地震時の累積損傷を計算(★)⇒“累加せん断ひずみと体積ひずみの関係”を利用
- ・地震後の変位・応力を計算(★)

### 液状化地盤

- ・液状化による沈下量は過剰間隙水圧、累積損傷で評価(★)  
(液状化した地盤でも損傷程度で沈下量が異なることも評価可能)

※★の機能はPARI-GDAの既往機能



### 盛土地盤

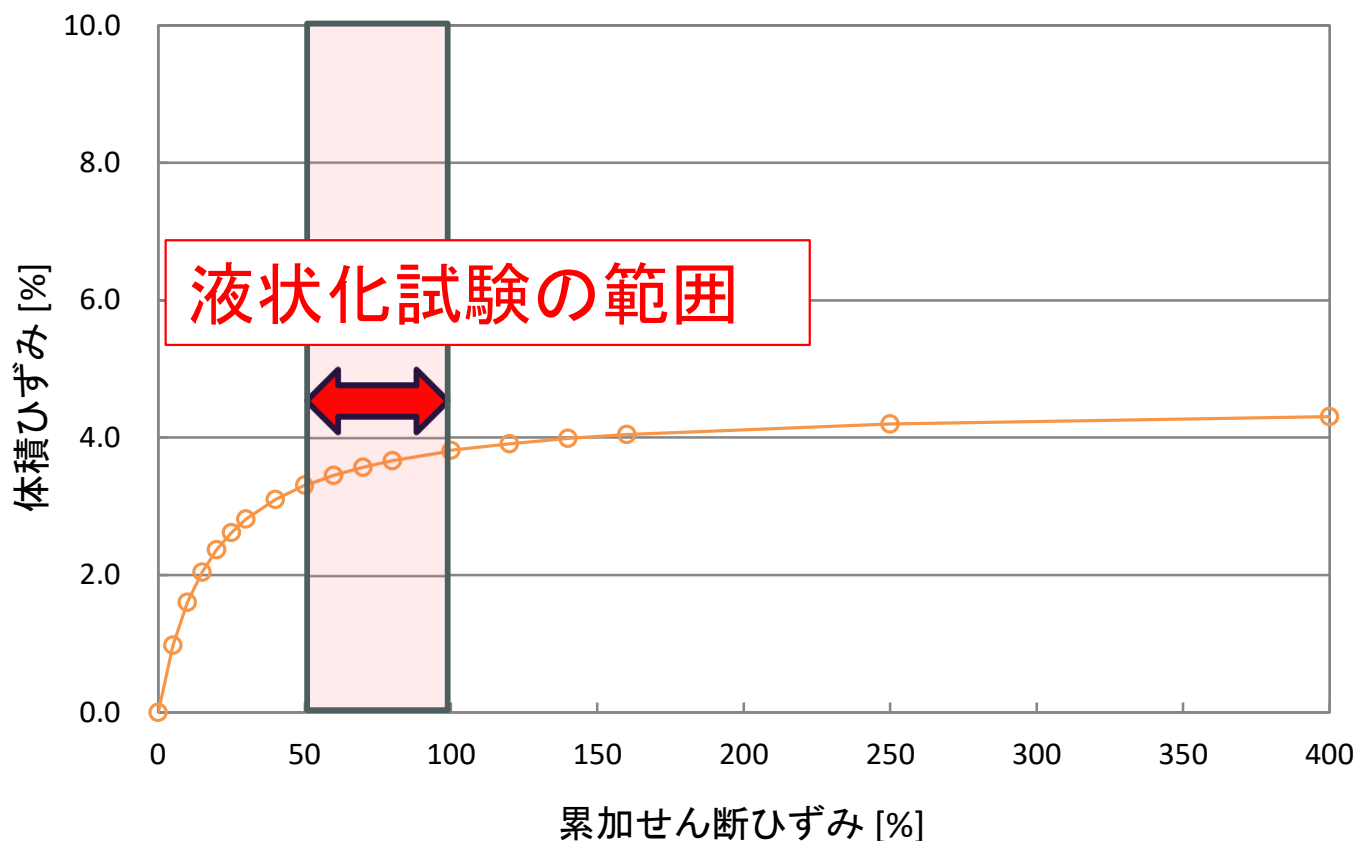
- ・盛土地盤の沈下量は累積損傷で評価  
(過剰間隙水圧を扱わないアルゴリズムを考案)



変形照査

『PARI-GDA』の地盤定数は、地震応答解析(FLIP)から引継ぎ利用することになるが、地盤の累積損傷(地震時の繰返しせん断に伴う地盤の変形量)の計算に必要な地盤材料の“累加せん断ひずみと体積ひずみの関係”(繰返しせん断により生じる地盤の変形累積量に応じて生じる地盤の体積変化量(=地盤の体積収縮))については、能登空港の土質データがないことから、通常、実験で用いる「きれいな砂(珪砂)」の試験結果を利用することとした。

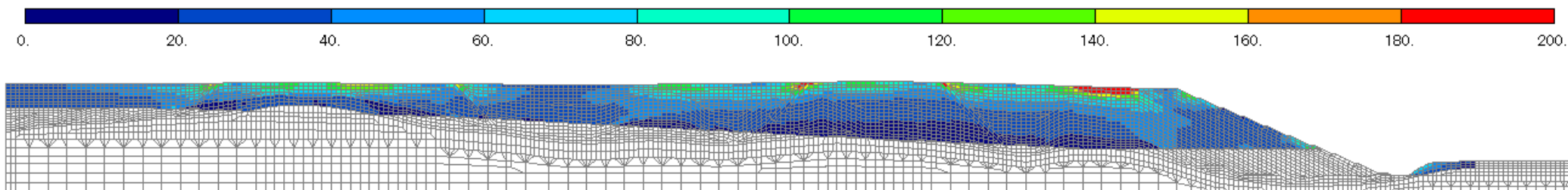
## 「きれいな砂(珪砂)」の累加せん断ひずみと体積ひずみの関係



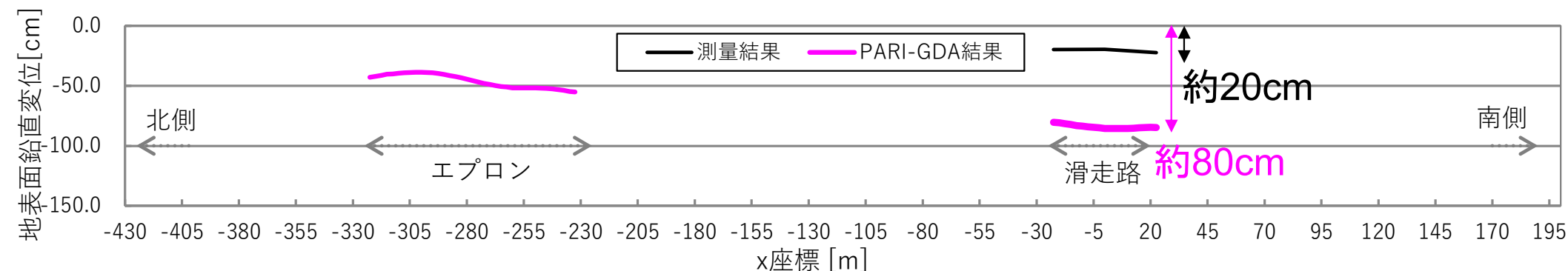
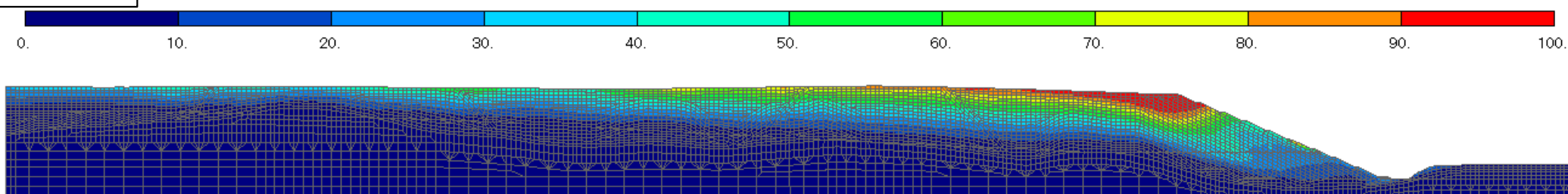


『PARI-GDA』での横断方向における地盤変形の解析結果は、累加せん断ひずみが大いところで200%が確認された。また、沈下量は滑走路位置においては約80cmという結果が出たが、現地測量の沈下量約20cmという結果に対し、大きな乖離が生じているが確認された。

## 横断方向「累加せん断ひずみ」の解析結果



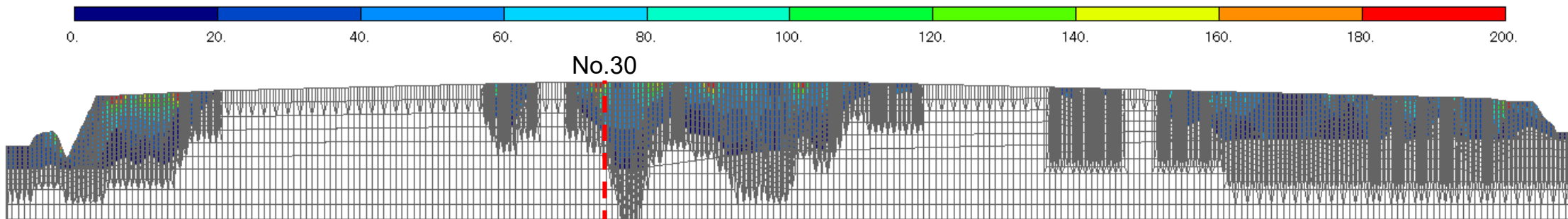
## 変位量



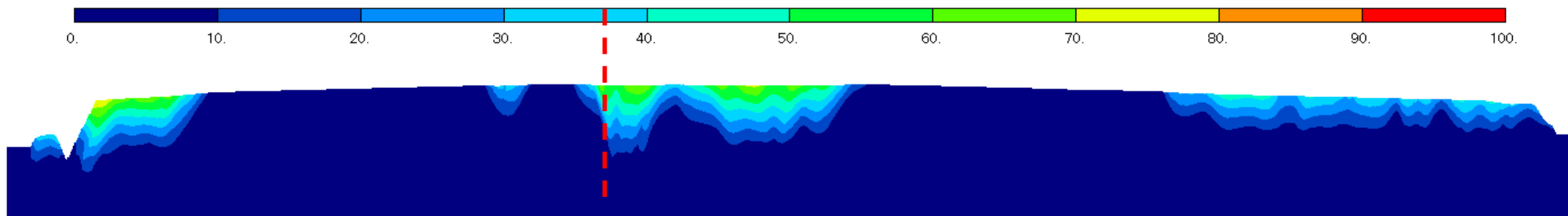
※現地測量結果は、地震による能登空港の地殻変動量(23cmの隆起)を引いたものである。

『PARI-GDA』での縦断方向における地盤変形の解析結果については、No.30の位置で累加せん断ひずみが200%となることが確認された。また、沈下量は、滑走路位置において約70cmという解析結果が出ている。

## 縦断方向「累加せん断ひずみ」の解析結果



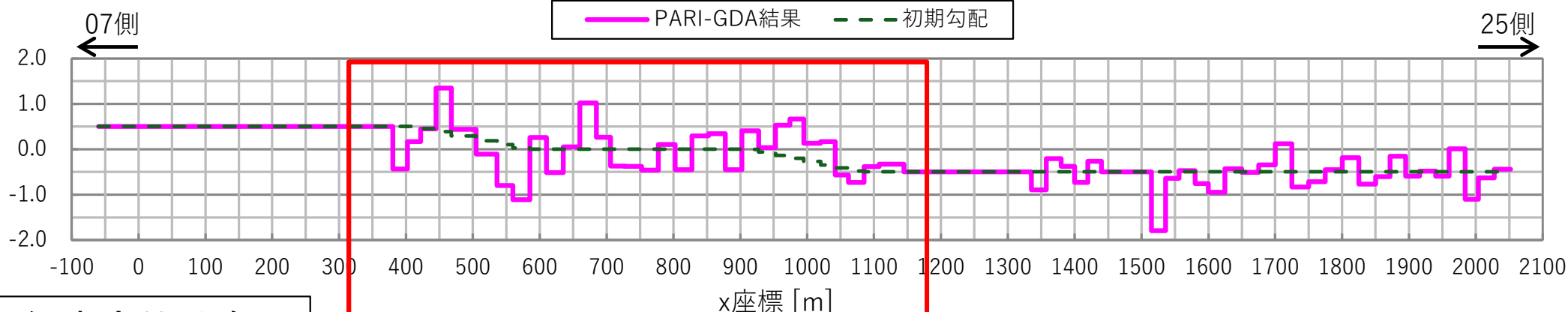
## 変位量



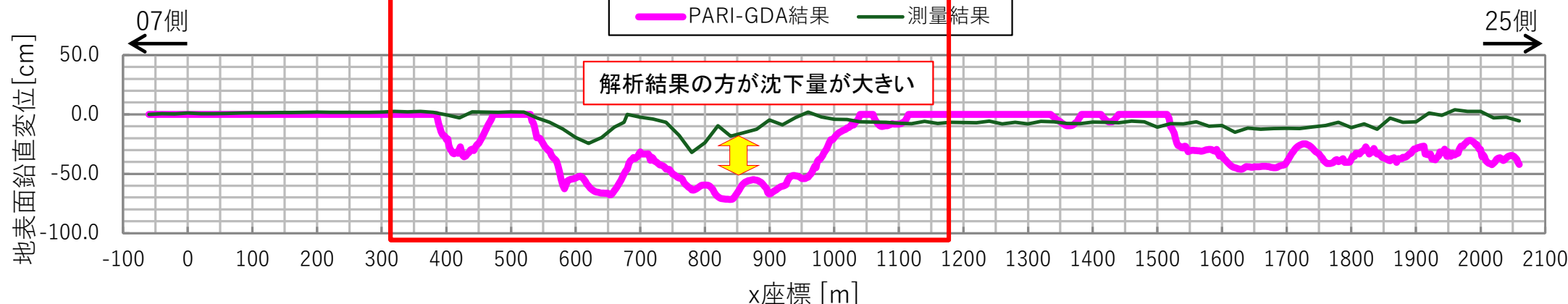


縦断方向について、変形照査結果(勾配が大きい位置)は、能登空港の測量及び調査結果による変位分布と被害クラック位置に対して概ね整合していることが確認される。なお、横断方向と同様に解析結果の沈下量と測量結果の沈下量との間には、大きな乖離が生じていることが確認された。

## 勾配分布



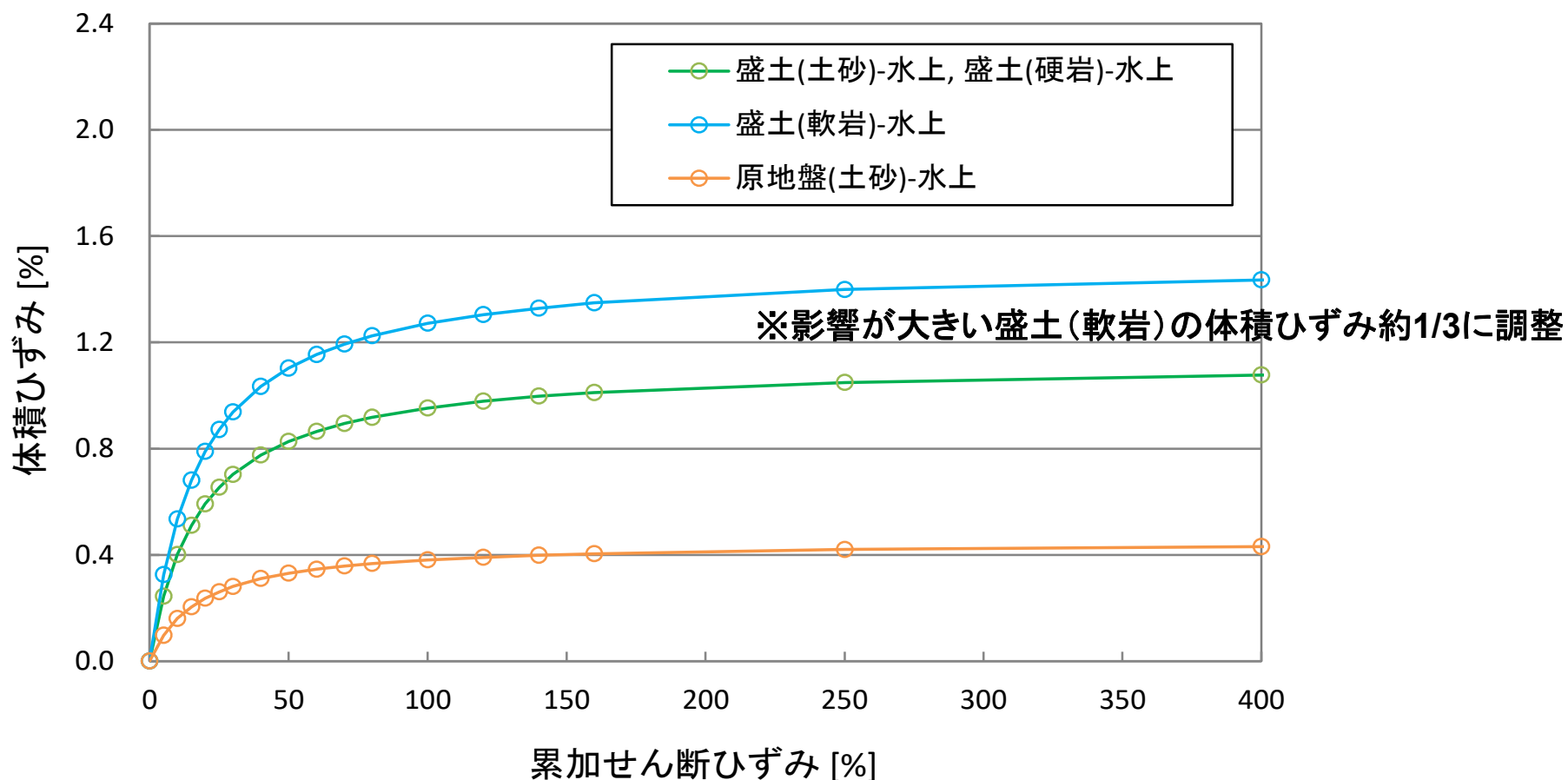
## 鉛直変位分布



※現地測量結果は、地震による能登空港の地殻変動量(約23cmの隆起)を引いたものである。

解析結果の沈下量が測量結果に対して過大となっていることから、盛土(土砂)等の“累加せん断ひずみと体積ひずみの関係”について体積ひずみの大きさを調整した。なお、地盤定数設定の観点にあたり、地盤のせん断剛性や強度も見直し、地震応答解析における累加せん断ひずみの再評価の必要性がある。

## 体積ひずみ調整後の“累加せん断ひずみと体積ひずみの関係”

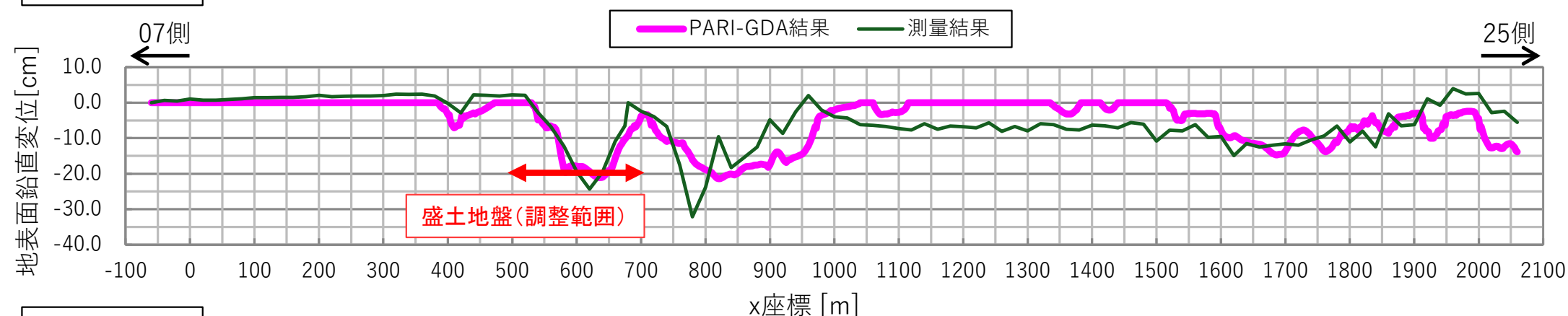




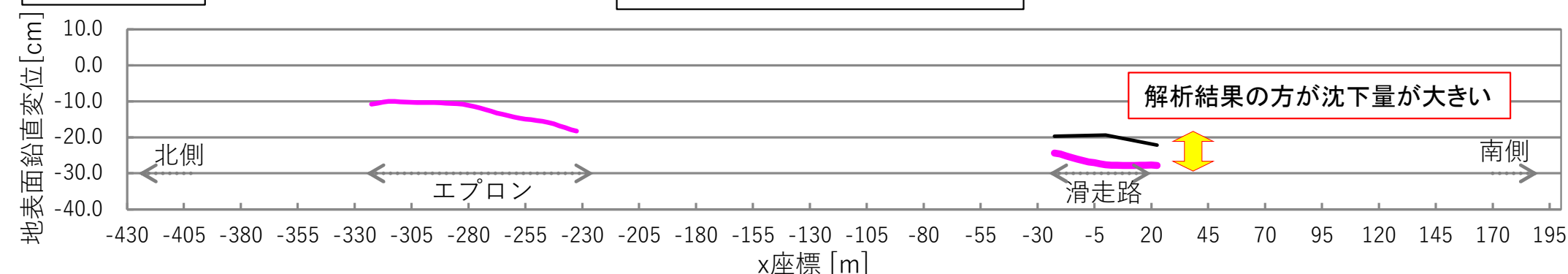
# 盛土地盤の体積収縮を考慮した変形解析 解析結果

盛土(土砂)の“累加せん断ひずみと体積ひずみの関係”調整後の解析結果と測量結果を比較したところ、滑走路の段差が発生箇所であり、地盤定数を調整する際のターゲットとした縦断方向500～700m区間の盛土地盤位置において沈下量の傾向が近いことがみられた。このことから、『PARI-GDA』による盛土地盤の体積収縮を考慮した変形解析により盛土地盤の沈下量と範囲は概ね評価できるものとする。ただし、今回の解析に用いた地盤定数は体積ひずみを調整したものであるため、全体的な変形を確認するためには原地盤の地盤定数を用いて解析する必要がある。

## 縦断方向



## 横断方向



※現地測量結果は、地震による能登空港の地殻変動量(23cmの隆起)を引いたものである。

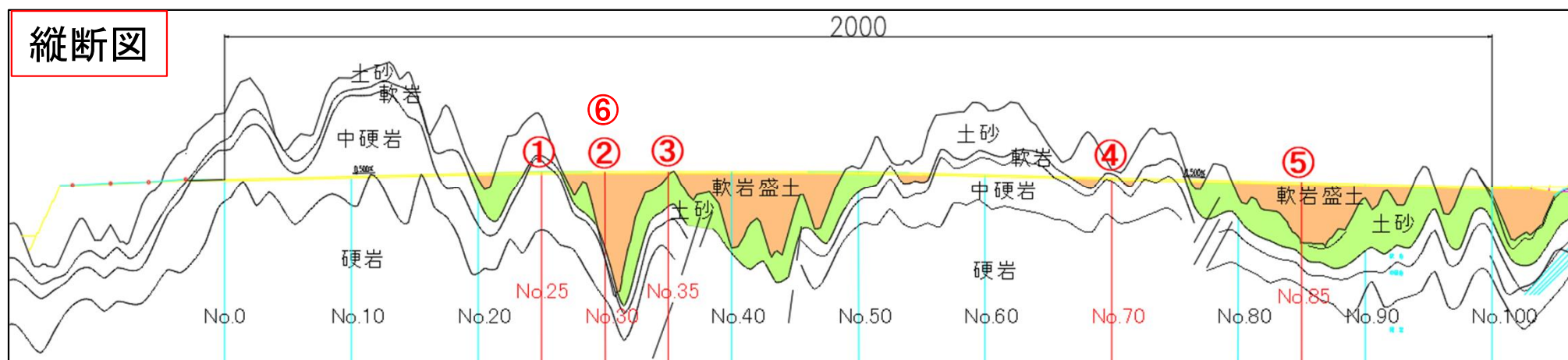
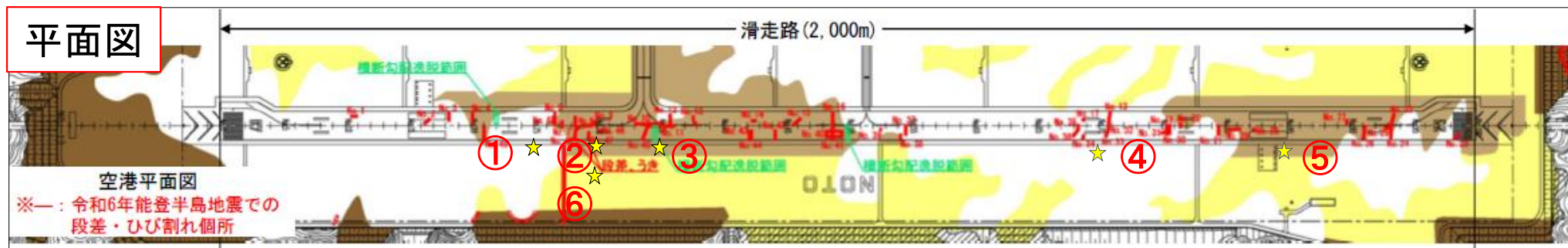
本検証では、地震応答解析のひずみ発生範囲や変形解析の沈下範囲は、被災状況と概ね整合した結果が得られたものの能登空港盛土地盤の土質データがなく建設当時の盛土材料の試験データをもとに簡易的に設定した値を用いて解析を行っていることから、変形解析の変位量(沈下量)について現地測量結果と乖離が発生しており、解析プログラムによる再現性を高めることが求められる。

以上から、地盤定数設定(せん断抵抗角、“累加せん断ひずみと体積ひずみの関係”等)を再設定し、盛土地盤の変形について再現性を高めるために必要な土質データの収集を目的として能登空港における土質調査(ボーリング調査・土質試験)を行うことが必要となる。

## 土質調査地点位置

調査地点の優先度の考え方

②>⑥>③>④>⑤>①



## ボーリング調査

オールコアボーリング(本孔):コアを連続的に採取(乱れた試料)するボーリング。

ノンコアボーリング(別孔):コアを採取しないボーリング。サンプリング(乱れの少ない試料)を行う。

## 現場試験

### <本孔>

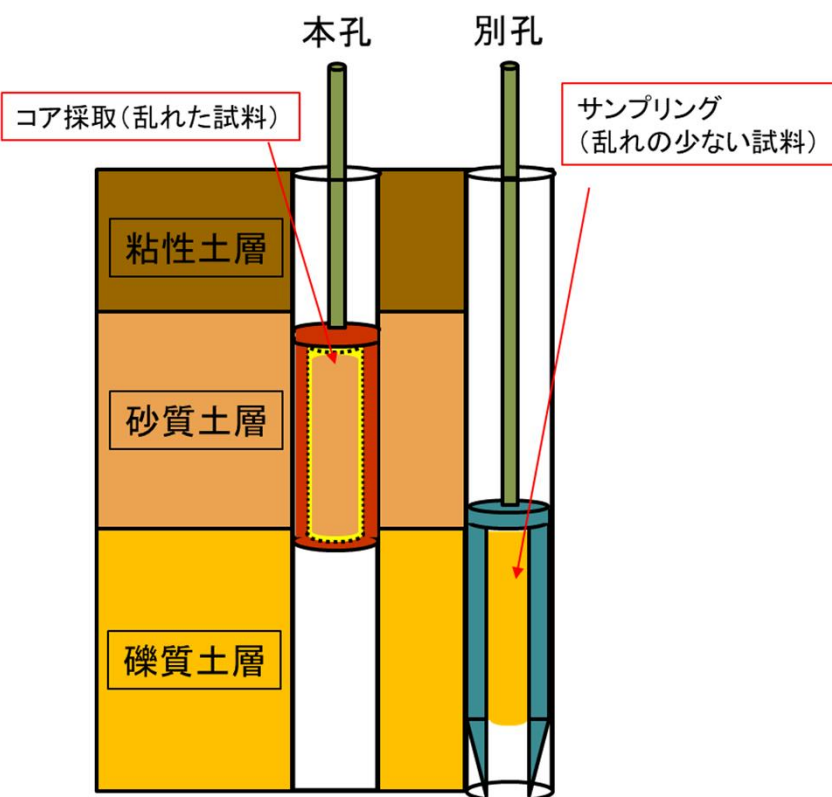
標準貫入試験:地盤にサンプラーを打込み、30cm貫入させるのに要した打撃回数をN値として記録。

(N値は地盤の工学的性質とされ多いほど硬くて強い地盤と言える)

PS検層:ボーリング孔を用いて、地盤中を伝搬する弾性波動の伝搬時間を測定し、地盤のP波(縦波)・S波(横波)速度を求める。

密度検層:ガンマ線の散乱強度が物質の密度と関係があることを利用し、孔壁部の密度を測定。

現場透水試験:観測孔の地下水位を、注水もしくは揚水により自然水位から変動させ、流量(定常法)又は水位変化(非定常法)を観測。



| 現場試験   | 試験結果    | 備考            |
|--------|---------|---------------|
| 標準貫入試験 | N値      | 地震応答解析        |
| PS検層   | P波・S波速度 | 地震応答解析        |
| 密度検層   | 地層密度    | 地震応答解析        |
| 現場透水試験 | 地盤の透水性  | 体積収縮を考慮した変形解析 |



## 土質試験

### <物理試験>(乱れた試料)

土粒子密度試験 : 土は三相(土粒子(固相)、水(液相)、空気(気相))で構成されており、この土粒子(固相)部分の単位体積あたり質量を算出。

含水比試験 : 土の含水比は、土粒子の質量に対する土中の水の質量の比と定義され、この質量比を算出。

粒度試験(ふるい): 土粒子の粒径ごとの含有量を質量百分率で表す(レキ分(75mm~2mm)、砂分(2mm~0.075mm)、細粒分(0.075mm未満))。

液性限界試験 : 土が塑性体から液体に移るときの境界の含水比を算出。

塑性限界試験 : 土が塑性体から半固体に移るときの境界の含水比を算出。

湿潤密度試験 : 土全体の単位体積(1cm<sup>3</sup>)当たりの質量を測定。

### <力学試験>(乱れの少ない試料)

三軸圧縮試験(CUB試験): せん断中に発生する過剰間隙水圧を測定・試料の有効応力を測り、 $\Phi$ (せん断抵抗角)、 $C$ (粘着力)を算定。

三軸圧縮試験(CD試験): 圧密を生じさせた後の $\Phi$ (せん断抵抗角)、 $C$ (粘着力)を算定。

地盤材料の変形を求めるための繰返し三軸試験: 片振幅応力 $\sigma_d$ と片振幅ひずみ $\varepsilon_a$ から等価ヤング率 $E_{eq}$ や履歴減衰率 $h$ を算出。

地盤の変形特性を求めるための繰返し三軸試験: 累加せん断ひずみ $\gamma_{acm}=50\%, 200\%, 500\%, 1000\%$ まで繰返し載荷した後の体積ひずみと累加せん断ひずみの関係を求める。

| 物理試験      | 試験結果  | 備考         |
|-----------|-------|------------|
| 土粒子密度試験   | 土粒子密度 | 土の物理的特性の把握 |
| 含水比試験     | 含水比   | 土の物理的特性の把握 |
| 粒度試験(ふるい) | 粒度    | 土の物理的特性の把握 |
| 液性限界試験    | 液性限界  | 土の物理的特性の把握 |
| 塑性限界試験    | 塑性限界  | 土の物理的特性の把握 |
| 湿潤密度試験    | 湿潤密度  | 土の物理的特性の把握 |

| 力学試験                  | 試験結果                        | 備考            |
|-----------------------|-----------------------------|---------------|
| 三軸圧縮試験(CUB試験)         | せん断抵抗角、粘着力<br>※有効応力に基づく強度定数 | 地震応答解析        |
| 三軸圧縮試験(CD試験)          | せん断抵抗角、粘着力<br>※圧密後          | 地震応答解析        |
| 地盤材料の変形を求めるための繰返し三軸試験 | ヤング率、履歴減衰率                  | 地震応答解析        |
| 地盤の変形特性を求めるための繰返し三軸試験 | 体積ひずみと累加せん断ひずみの関係           | 体積収縮を考慮した変形解析 |

- ✓ 地盤・地震の専門家を構成員に含めた有識者委員会(『空港内の施設の維持管理等に係る検討委員会』)を開催し、地盤応答解析・地盤変形解析の解析結果の妥当性、対策範囲の考え方、条件等を検討・とりまとめ
- ✓ 対策範囲の考え方では、滑走路等の早期復旧のために必要となる対策を「事後対策(維持保全)」と「事前対策(盛土地盤変状対策)」に区分し、合理的かつ効果的な対策範囲を設定
- ✓ 有識者委員会の提言を踏まえ、事前対策(盛土地盤変状対策)の設計・工事を実施

|                         |                                     | R6d | R7d   |                          |          |       | R8d   |       |          |       | R9d～ |
|-------------------------|-------------------------------------|-----|-------|--------------------------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|------|
|                         |                                     |     | 4,5,6 | 7,8,9                    | 10,11,12 | 1,2,3 | 4,5,6 | 7,8,9 | 10,11,12 | 1,2,3 |      |
| 有識者委員会                  |                                     |     |       | ★                        |          | ★     |       | ☆     |          | ☆     |      |
| 解析プログラム開発<br>被災メカニズムの検証 |                                     |     |       | 能登空港土質調査・解析プログラムによる再現性向上 |          |       |       |       |          |       |      |
| 調査                      | 土質調査等<br>(切盛境界図<br>作成、ボーリン<br>グ調査等) |     |       |                          |          |       |       |       |          |       |      |
|                         | 地盤応答解析<br>地盤変形解析                    |     |       |                          |          |       |       |       |          |       |      |
| 設計<br>工事                | 対策範囲、<br>工法検討                       |     |       |                          |          |       |       |       |          |       |      |
|                         | 設計・工事                               |     |       |                          |          |       |       |       |          |       |      |