

## セッション1 断層変位評価

電力中央研究所 原子力リスク研究センター

澤田 昌孝

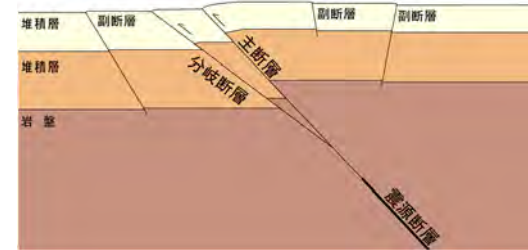
土木学会 原子力土木委員会 地盤安定性評価小委員会講演会  
「原子力施設に関する地盤安定性評価技術の現状—どこまでできて、何が課題か—」

2020年7月28日

電力中央研究所

## 原子力施設での敷地内断層問題

- ◆ 規制基準
  - 耐震重要施設は将来活動する可能性のある断層等の露頭がないことを確認した地盤に設置する
- ◆ 原子力施設の立地条件
  - 詳細な地質調査により、重要施設直下に主断層は存在しない
- ◆ 断層変位評価
  - 主断層の活動により、副断層は動くか。
  - 主断層の活動により、副断層のずれ変位はどの程度か。



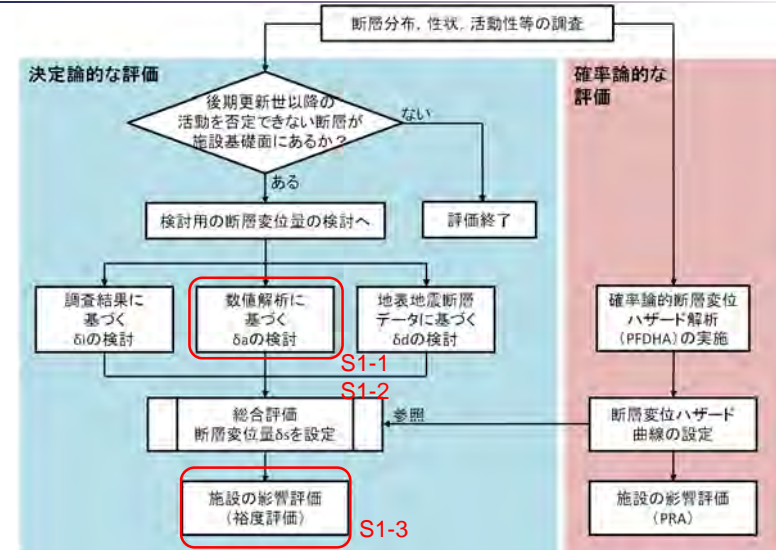
**主断層:**地震を発生させると考えられる断層が地表まで到達したもの  
**副断層:**主断層と地質構造の関連性は認められないが、主断層の活動に伴って形成された2次的な断層で、主断層の活動により変位する可能性が否定できないもの

## 学会等での検討

- ◆ 原子力安全推進協会(2013)
- ◆ 土木学会・原子力土木委員会・断層変位評価小委員会(2013~2015)
- ◆ 土木学会・原子力土木委員会・地盤安定解析高度化小委員会(断層変位評価WG)(2015~2018)
- ◆ 日本原子力学会・「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会(2014~2017)

## 断層変位量評価手順

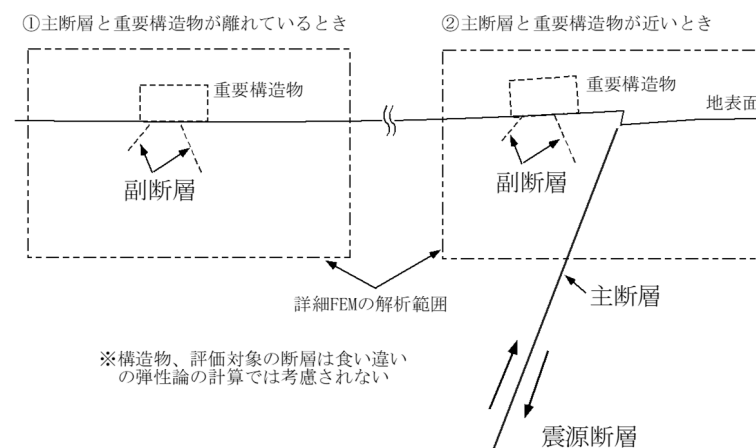
日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会



# 従来技術

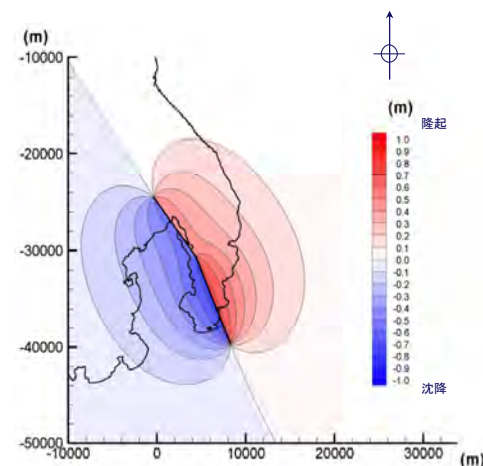
# $\delta a$ の評価(数値解析)

## 食い違い弾性論による変形計算



# $\delta a$ の評価(数値解析)

## 食い違い弾性論による変形計算の例



地殻: 半無限・連続・一様・線形弾性  
主断層・分岐断層: 不連続面にずれ

境界変位 or 換算応力

詳細FEM解析の境界条件

旧原子力安全委員会  
地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会  
第70回ワーキング・グループ2  
資料WG2第70-3-2号より抜粋・編集

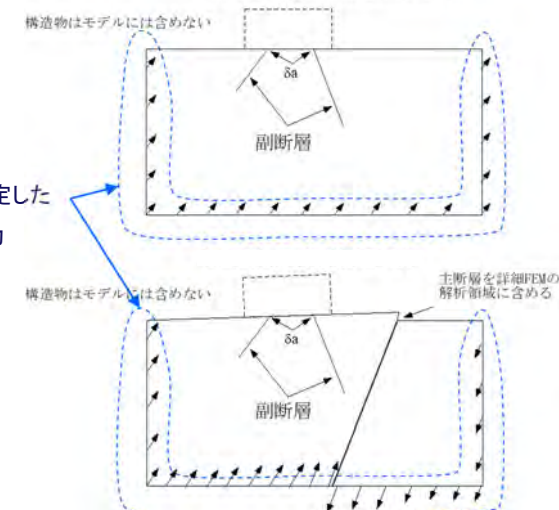
# $\delta a$ の評価(数値解析)

## 二次元詳細FEMによる断層変位計算

①主断層と重要構造物が  
離れているとき

食い違いの弾性論により算定した  
境界変位 or 換算応力

②主断層と重要構造物が  
近いとき



## 従来の解析手法の課題

---

### ◆ 解析手法

- 食い違いの弾性論により主断層のずれに対する地盤の変位を求める
- それを境界条件とした二次元FEMを行う

### ◆ 課題

- 断層運動は三次元挙動である
- 地表まで主断層のずれ変位が与えられており、その伝播過程が考慮されていない
- 解析対象領域の端まで副断層が延びる場合、境界条件によってはその変位が拘束される
- 地下構造、地殻応力、地下深部での破壊過程の不確実性

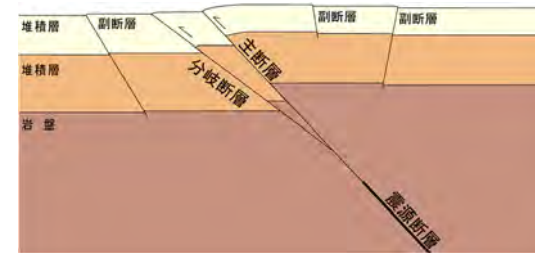
## 原子力施設における断層変位評価の目的

### ◆ 原子力施設の立地条件

- ▶ 詳細な地質・地質構造調査が実施され、重要施設の直下に主断層がある可能性は極めて低い

### ◆ 評価目的

- ▶ 主断層が動いた時に、構造物施設地盤での副断層の変位を不確実性を考慮した上で予測する



**主断層:**地震を発生させると考えられる断層が地表まで到達したもの  
**副断層:**主断層と地質構造の関連性は認められないが、主断層の活動に伴って形成された2次的な断層で、主断層の活動により変位する可能性が否定できないもの

日本原子力学会 (2017)

## 高性能計算を用いた断層変位評価 (2) 予測解析におけるずれ変位の設定方法の検討

○ 澤田 昌孝 (電力中央研究所)  
 羽場 一基 (大成建設)  
 堀 宗朗 (海洋研究開発機構)

土木学会 原子力土木委員会 地盤安定性評価小委員会講演会  
 「原子力施設に関する地盤安定性評価技術の現状—どこまでできて、何が課題か—」

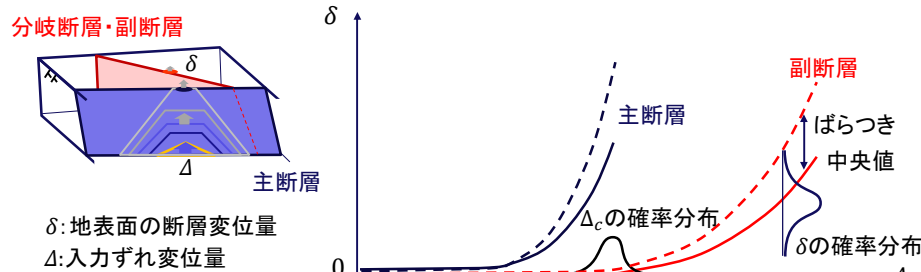
2020年7月28日

※本研究の一部は、経済産業省資源エネルギー庁 発電用原子炉安全対策高度化技術基盤事業 (原子力発電所のリスク評価、研究に係る基盤整備)として実施したものである  
 ※本内容は、土木学会第74回年次学術講演会(2019年9月3日、香川大学)での発表に基づく

## 高性能計算を用いた断層変位解析

- ◆ 岩盤・断層の連続体モデルにより、地下での入力ずれ変位が断層上を伝播する過程を解析する
- ◆ 断層を陽に配置する(高次ジョイント要素)
- ◆ 周辺を含めた三次元大規模解析(capability computing)
- ◆ 不確実性を考慮し、ずれ変位を評価(capacity computing)
- ◆ 評価の指標
  - ▶ 地表でずれ変位が発生する限界入力ずれ変位 $\Delta_c$
  - ▶ 地表でのずれ変位の大きさ $\delta$

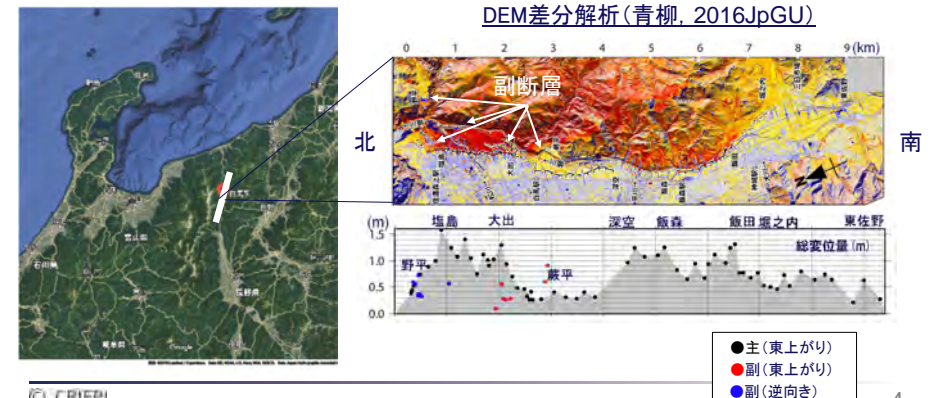
高性能計算  
 • 並列FEM  
 • 多ケース解析



## 対象とする実地震

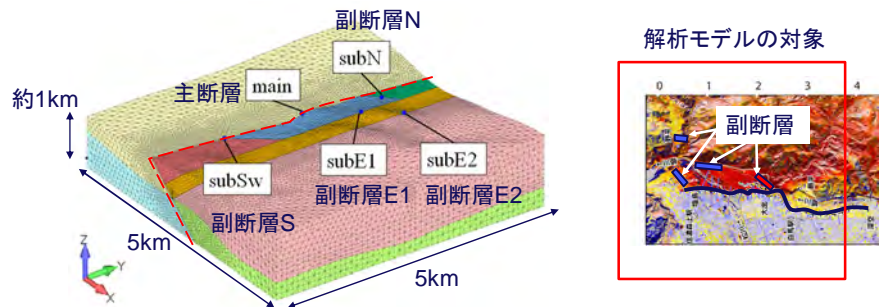
### ◆ 2014年長野県北部地震

- ▶ 2014年11月22日に発生、 $M_{JMA}6.7$ ,  $M_w6.3$ , 最大震度6弱
- ▶ 発震機構: 西北西—東南東に圧縮軸を持つ**逆断層型**、東側が隆起
- ▶ 震源深さ: 5km, 破壊長さ: 20km, 破壊深さ: 12km
- ▶ 震源域南側9kmに地表地震断層、北端で**副断層**が発生

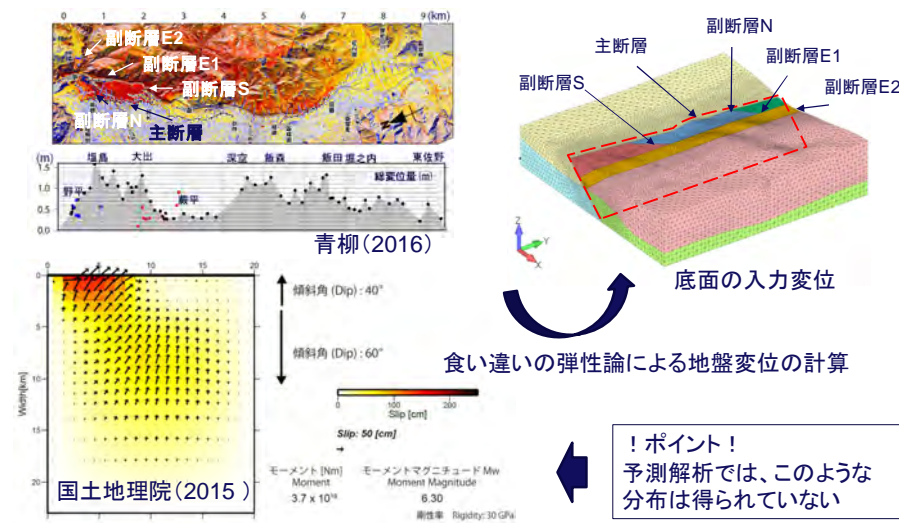


## 解析モデル(2014年長野県北部の地震)

- ◆ 副断層が発生した北側5km x 5km x 約1km
- ◆ J-SHIS地盤データベースに基づく2層
- ◆ 主断層の傾斜40°, 副断層は4面(E1, E2, N, S)を考慮
- ◆ 約258万自由度



## 入力ずれ変位の設定(再現解析)



## 予測解析における入力ずれ変位設定の考え方

強震動予測手法“レシピ”と同様の手順で背景領域のずれ量を決定する

1. 震源断層の諸元(位置・大きさ・深さ・傾斜など)を設定

主断層の大きさ(地震発生層内) ⇒  $S = 400$  [km<sup>2</sup>]

2. 地震モーメント  $M_0$  の算出

2014年長野県北部の地震 ⇒  $M_w = 6.3$

$$M_0 = \left( \frac{S}{2.23} \times 10^{15} \right)^{3/2} \times 10^{-7}$$

3. 平均ずれ量  $D$  の算出

※ここではアスペリティは設定していない

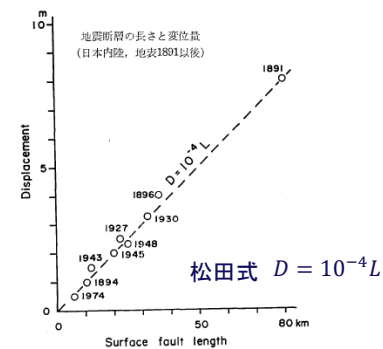
$$D = M_0 / (\mu \cdot S) \quad \mu: \text{剛性率}(=30 \text{ [GPa]})$$



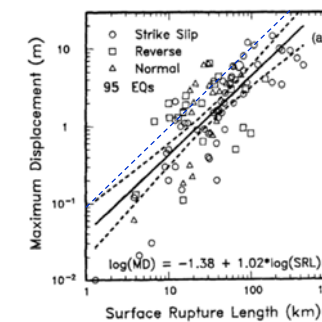
$$M_0 = 7.6 \times 10^{18} \text{ [N m]} \\ D = 0.633 \text{ [m]}$$

## 予測解析における入力ずれ変位設定の考え方

副断層の変位が発生しやすいケース ⇒ 近傍にずれの大きい領域の設定



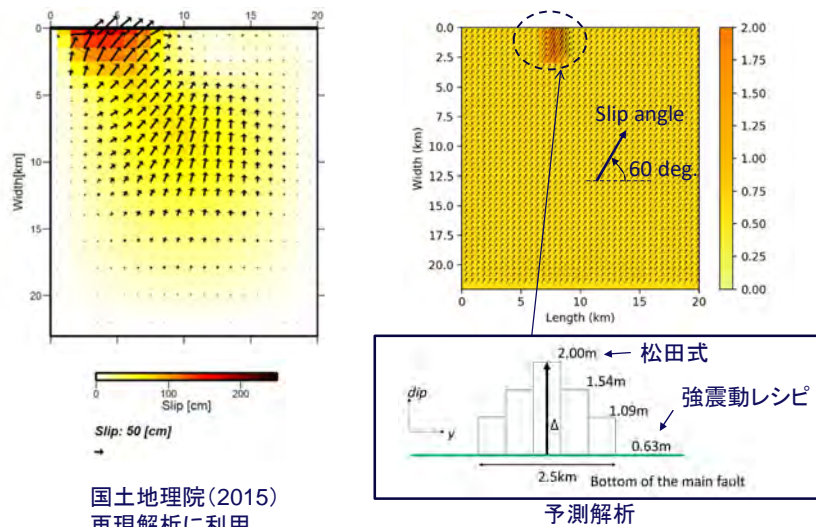
松田ほか(1981)



Wells and Coppersmith (1994)

地表断層の長さではなく、断層全体の長さを代入  
 $L = 20$  [km] ⇒  $D = 10^{-4} L = 2.0$  [m]

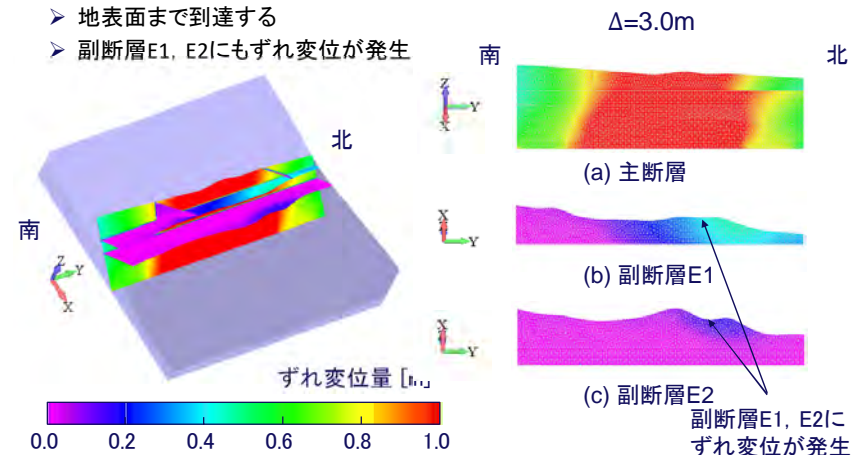
## 予測解析における入力ずれ変位設定の考え方



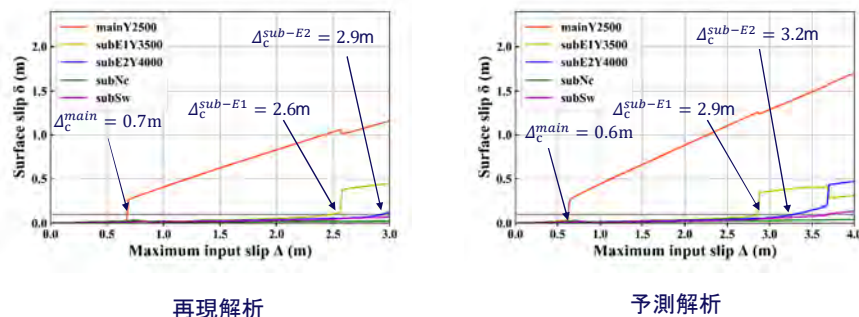
## 計算結果(再現解析): 断層面のずれ変位

### ◆ 断層面上のずれ変位量

- 底面のずれ変位が断層面上を伝播散逸
- 地表面まで到達する
- 副断層E1, E2にもずれ変位が発生



## 入力ずれ変位と地表ずれ変位の関係 (再現解析vs予測解析)



再現解析と予測解析で主断層, 副断層E1, 副断層E2に地表ずれ変位が生じる入力ずれ変位 $\Delta_c$ は類似している。

## まとめ

- ◆ 高性能計算による断層変位評価において, 予測解析を想定し, 入力ずれ変位の設定方法を提案した
- ◆ 強震動レシピを参考にした背景のずれ変位の設定
- ◆ 副断層が動きやすい条件として, 副断層近傍の主断層での大ずれ変位領域の設定
- ◆ 確率論的な断層変位評価への発展
- ◆ 他の地震(2016年熊本地震など)への適用

## 断層の動力的破壊解析とトンネルへの影響評価

地盤安定性評価小委員会講演会  
「原子力施設に関する地盤安定性評価技術の現状  
—どこまでできて、何が課題か—」(2020年7月28日:Online)  
構造計画研究所 三橋 祐太

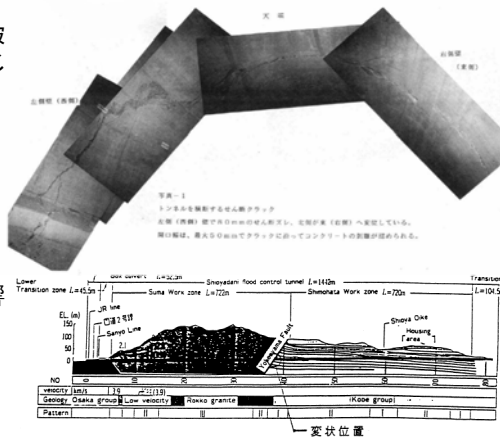
## アジェンダ

- ① はじめに
- ② 解析モデル
- ③ 動的効果の影響検討
- ④ コンクリートの材料非線形の静的解析
- ⑤ まとめと今後の課題

参考文献:  
Yuta MITSUHASHI, Gaku HASHIMOTO, Hiroshi OKUDA, Fujio UCHIYAMA, Fault Displacement Simulation Analysis of the Kamishiro Fault Earthquake in Nagano Prefecture Using the Parallel Finite Element Method, Model Design and Simulation Analysis, Communications in Computer and Information Science 603, p102-109, 2016.  
三橋祐太, 孫宏農, ラジャセカラン, シャンタヌ, 野口博, 丸田誠, 橋本学, 奥田洋司, 断層の動的破壊を考慮した食い違い変位を受けるトンネルの3次元有限要素解析, 平成30年土木学会全国大会第73回年次学術講演会, 2018.8

## ① はじめに

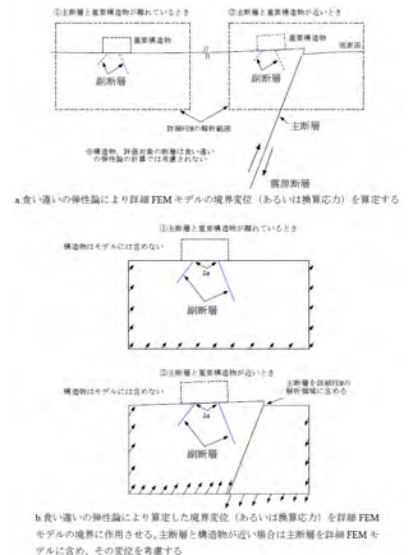
- ▶ 原子力発電所の敷地内にある破砕帯等の不連続面に活動が生じた際に、構造物に与える影響の評価が課題になっている
- ▶ これまで地震動による構造物の影響検討は多く行われてきたが、変位の影響はあまり着目されてこなかった(頻度が低く、不確実性が高い)
- ▶ 断層変位が構造物へ与える影響を評価するためには、断層変位量の予測が不可欠である



阪神大震災の際の塩屋谷川放水路トンネルの被害例  
(地盤工学会阪神大震災調査委員会, 阪神・淡路大震災調査報告書, 1996.)

## ① はじめに

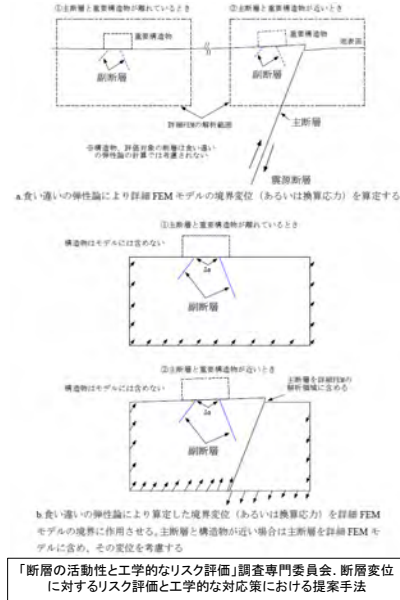
- ▶ 断層変位に係る検討において、例えばANSI-FDE-01や原子力学会調査報告では以下のようなアプローチが提案されている
  - ① 広域の地盤を考慮した食い違い弾性論などにより、変位評価領域境界の変位を得る
  - ② 重要構造物を含め詳細にモデル化した変位評価領域モデルに①で得られた変位を静的に作用させる
- ▶ 断層の大きさ・・・1km～100km  
構造物の大きさ・・・1m～10m
- ▶ 大きさの違いから同時にモデル化するのは困難であり、工学的には妥当な提案であると考え



「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会, 断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策における提案手法

# ① はじめに

- ▶ 2段階に分けて考える解析手法には以下のような問題点が挙げられる
  - ① ②の解析における解析領域をどのぐらいに設定すればよいのかわからない
  - ② 食い違い弾性論により検討するため、基本的には静的なアプローチを想定している。「断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策[143]」においても、動的な応力評価の必要性が課題として挙げられている。
  - ③ ②の解析手法は、地殻のひずみエネルギーがずれを考える断層ですべて解放された後の変形量と条件で与える解析となる。実際の地震時には、動的な影響などを評価することで、その他の断層にも活動が生じることが考えられる
- ▶ これらの問題点を解消できる検討手法として、力学的破壊シミュレーションによる食い違い断層変位を受ける構造物の解析を実施する



# ① はじめに

- ▶ 最終的には大規模FEM解析により
  - ① 断層の破壊進展(力学的破壊シミュレーション)
  - ② 地中構造物への断層変位入力
  - ③ 地中構造物の非線形挙動の一連を一度に解けるようにしたい
- ▶ 本発表では、①と②、③を別個に検討して問題点などを整理今後、①～③をすべて考慮した検討を進めていく
- ▶ 解析は大規模並列有限要素解析を実施可能なFrontISTRをカスタマイズして実施した

# ② 解析モデル

- 神城断層地震のシミュレーションモデル

- ▶ 解析モデル(力学的破壊シミュレーション)
  - ✓ 断層の大きさ:長さ18km×幅12.2km(深さ10.0km)
  - ✓ せん断弾性係数 $\mu=30\text{GPa}$ (地殻で一般的な値)
  - ✓ ポアソン比 $\nu=0.25$ (ポアソン媒質)
  - ✓ 単位体積重量 $\gamma=2.5\text{ (t/m}^3\text{)}$
  - ✓ 震源位置:深さ5.0km

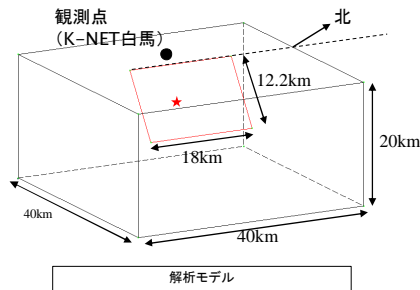


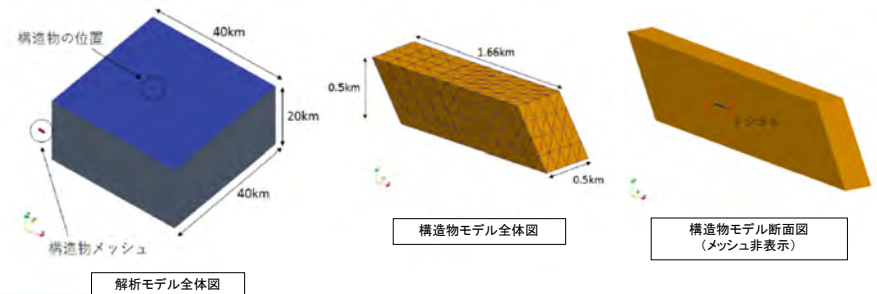
表 断層パラメータ			
断層幅	W	12.2	km
断層長さ	L	18.0	km
走向角	$\theta$	12	度
傾斜角	$\delta$	50	度
応力降下量	$\Delta\tau$	1.00	MPa
断層せん断剛性	$k_s$	1.20E+04	kN/m/m <sup>2</sup>
断層鉛直剛性	$k_v$	1.20E+07	kN/m/m <sup>2</sup>

積分刻み $\Delta t=0.01\text{ (s)}$

# ② 解析モデル

- 周辺地盤と構造物のモデル

- ▶ 神城断層地震のシミュレーション解析により得られた断層モデルを用いて、断層にまたがるトンネルをモデル化することで、断層の破壊を受ける構造物の検討を実施する
- ▶ 原子力発電所の地中構造物の例では、震源断層と構造物が交差することは想定されないが、本検討では簡便のために震源断層とトンネルが交差するものとする

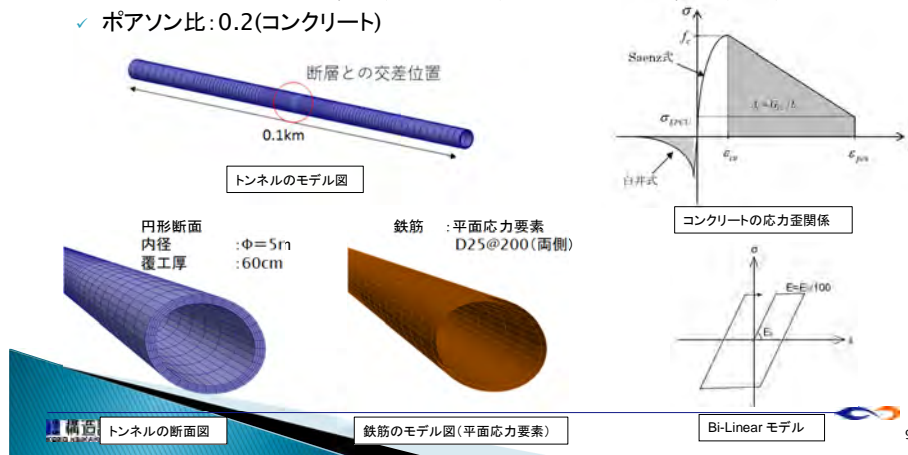




## ② 解析モデル

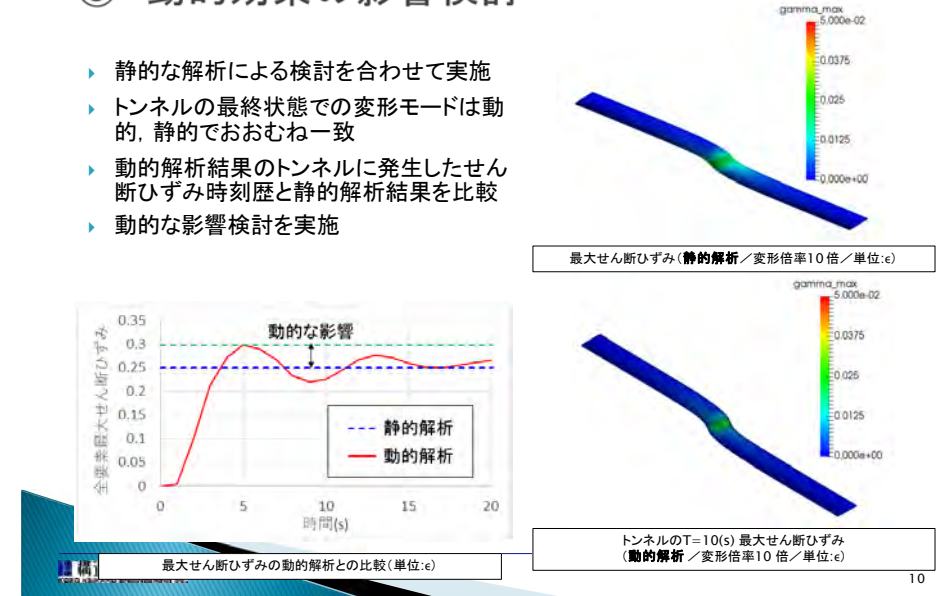
### 構造物のモデル

- 解析モデル (※元千葉大学野口研コンクリート構成則を移植)
- トンネル:ソリッド要素(コンクリート非線形)、鉄筋:平面応力要素(バイリニア)
- 弾性係数:2.0×10<sup>7</sup>kN/m<sup>2</sup>(コンクリート)、2.05×10<sup>8</sup>kN/m<sup>2</sup>(鉄筋)
- ポアソン比:0.2(コンクリート)



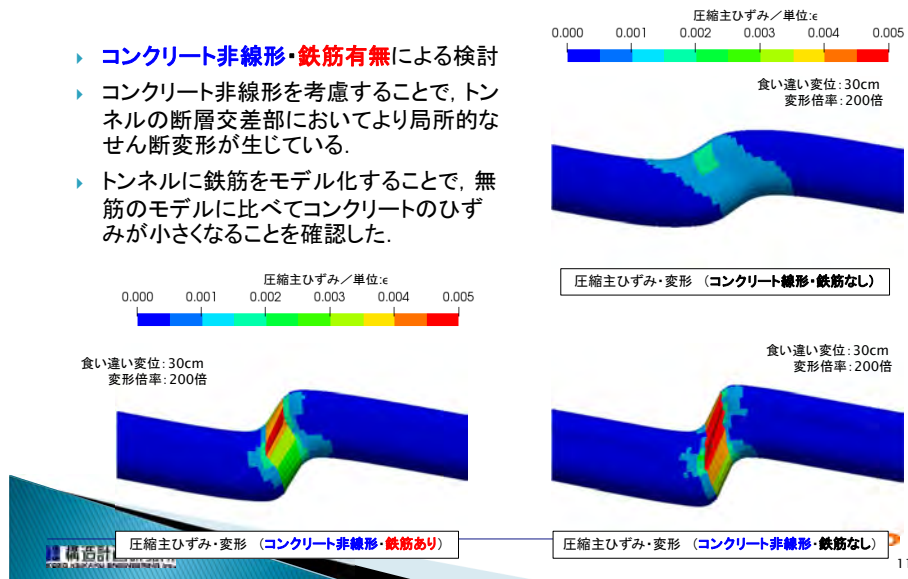
## ③ 動的効果の影響検討

- 静的な解析による検討を合わせて実施
- トンネルの最終状態での変形モードは動的、静的でおおむね一致
- 動的解析結果のトンネルに発生したせん断ひずみ時刻歴と静的解析結果を比較
- 動的な影響検討を実施



## ④ コンクリートの材料非線形の静的解析

- コンクリート非線形・鉄筋有無による検討
- コンクリート非線形を考慮することで、トンネルの断層交差部においてより局所的なせん断変形が生じている。
- トンネルに鉄筋をモデル化することで、無筋のモデルに比べてコンクリートのひずみが小さくなることを確認した。



## ⑤ まとめと今後の課題

### <まとめ>

- 断層変位を受ける地中構造物の影響検討を動的に行うことを目的とし、動力学的破壊シミュレーションによる断層の破壊伝播が地中構造物に入力される条件で解析的検討を行った
- 本検討により、断層変位を受ける地中構造物の動的な影響評価が可能であることを示した。ただし、結果は断層の物性値などに影響を受けるため、この結果はある特定の条件下でのものである。
- コンクリートの非線形性を考慮した検討を、まずは静的に実施した

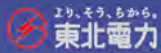
### <今後の課題>

- 今後、上記二つを組み合わせることで動力学的破壊伝播シミュレーションとコンクリートの非線形性を考慮した検討を動的に実施したい
- 断層の物性値などの不確実性の影響評価を行う必要がある。特に実際の値・分布を推定するのが難しいパラメータも多い

# 断層変位が作用した土被りが異なるRCカルバートの応答と損傷モード

2020年 7月28日  
地盤安定性評価小委員会講演会

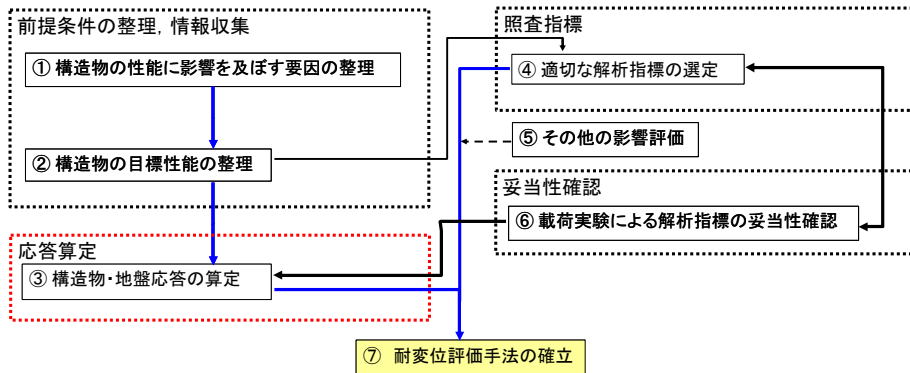
東北電力(株) 山口 和英 伊藤 悟郎 肥田 幸賢  
(株)大林組 ○堤内 隆広 米澤 健次 永井 秀樹



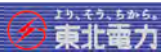
All rights Reserved. Copyrights © 2017, Tohoku Electric Power Co., Inc.

## (補足)断層変位センター共研の全体構成 ※追加ページ

3



- ①・② コンクリート標準示方書および原子力マニュアルに準拠し、カルバートの機能・要求性能と目標性能を整理
- ③ 岩盤の断層線上に構築された2連ボックスカルバートの1ブロックを対象に、構造物・地盤の連成系での三次元有限要素法により、断層変位作用時の構造物応答を算定(断層センス・走向・傾斜角・土被りをパラメータとした9ケース)
- ④ 三次元有限要素法の解析結果から損傷を評価する損傷指標とその閾値の既往研究収集・整理
- ⑤ その他の影響因子(岩盤との付着・地震との重畳・隣接ブロックとの相互影響)に対する評価方針の整理
- ⑥ ¼スケール縮小模型実験とその再現解析による、破壊モードの再現性の確認と損傷指標の閾値の整理



## 1. はじめに

2

### ■ 土木構造物の断層変位に対する照査の現状

- 断層変位に対する工学的対応事例(ex.新神戸駅)が蓄積されつつある。
- しかし、既設構造物の安全性や使用性を指標とする定量的な評価は不十分。
- 原子力発電所の新規制基準では、断層変位に対する研究が更に必要との判断から、断層等の上には耐震重要施設の設置を認めていない。



断層変位に対する評価手法の確立が必要

### ■ 目的

- 断層変位が作用する土木構造物の機能に影響を及ぼす損傷や破壊等に対する裕度を数値解析により定量的に評価する手法(耐変位評価手法)の確立

### ■ 本発表の内容

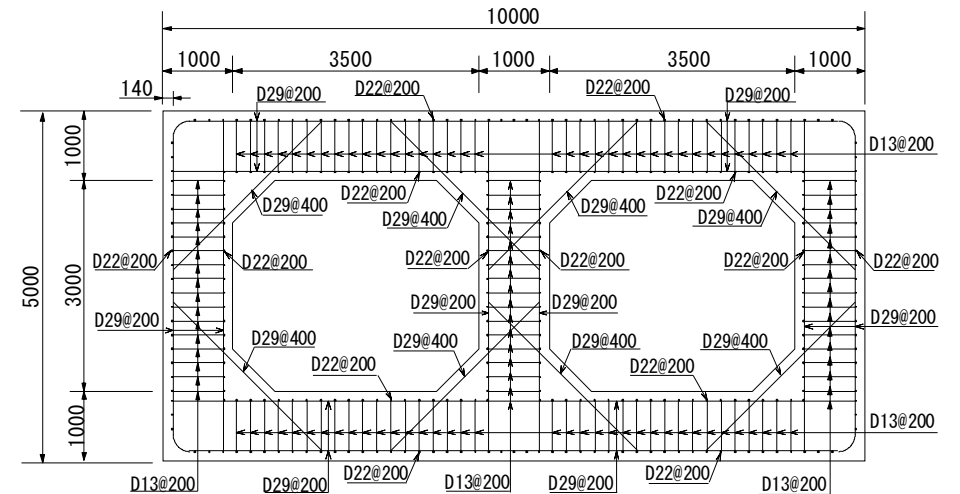
- 岩盤上に構築されたボックスカルバートを対象に、斜交断層による変位が作用した場合の構造物の応答と損傷の進展を三次元非線形解析により評価
- 解析パラメータとして土被りの違いによる応答、損傷進展の性状の違いを評価



## 2. 解析条件

4

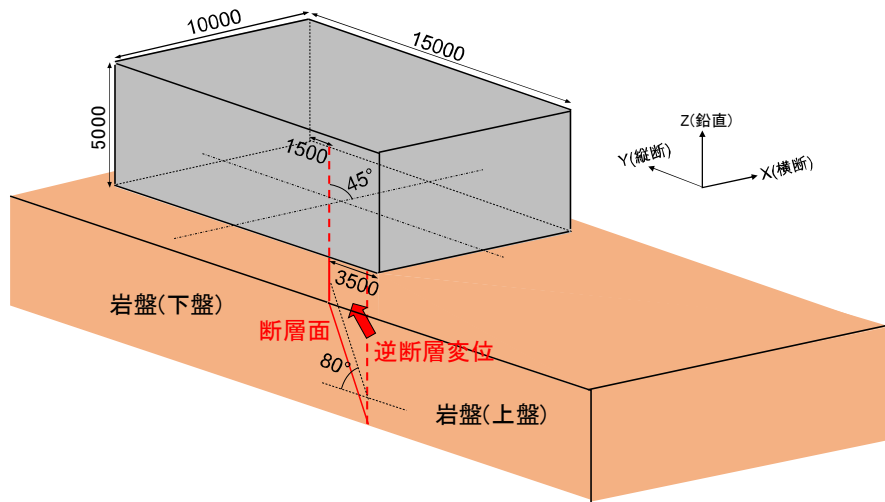
### ■ 対象構造物:2連ボックスカルバート(幅10m×高さ5m×延長15m)



## 2. 解析条件

5

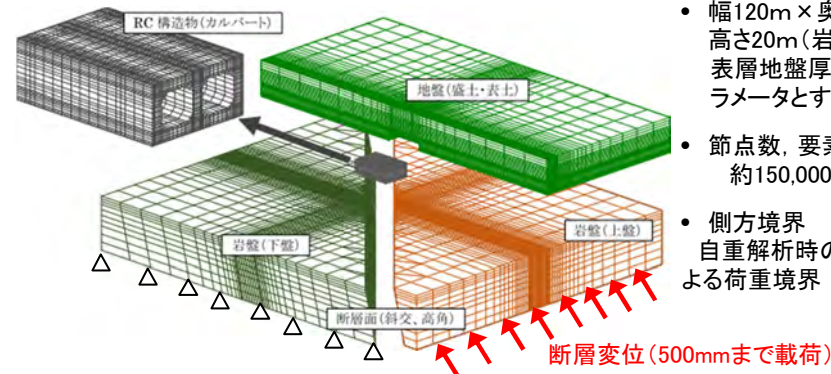
■断層と構造物の関係:高角度の逆断層との斜交  
(断層傾斜角 $80^\circ$  , 斜交角 $45^\circ$  )



## 2. 解析条件

6

■三次元非線形FEMモデル



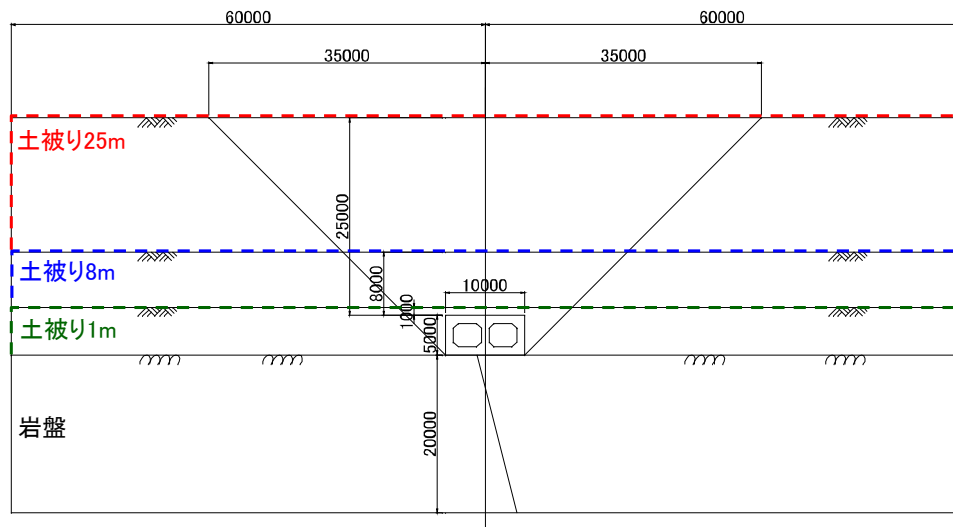
- 幅120m×奥行140m×高さ20m(岩盤部分)  
表層地盤厚さは解析パラメータとする
- 節点数, 要素数  
約150,000
- 側方境界  
自重解析時の水平反力による荷重境界

対象	要素	備考
岩盤	ソリッド要素(線形)	
地盤	ソリッド要素	非線形性:D-Pモデル
鉄筋コンクリート	RC要素	修正Ahmadモデル、出雲モデルetc...
無筋コンクリート	ソリッド要素	修正Ahmadモデル、出雲モデルetc...

## 2. 解析条件

7

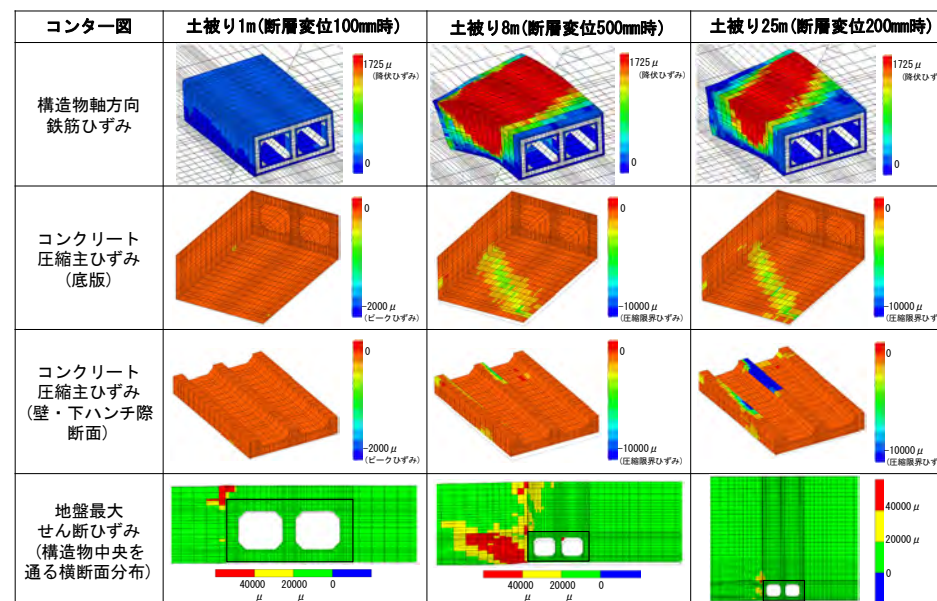
■土被りの設定:1m・8m・25m



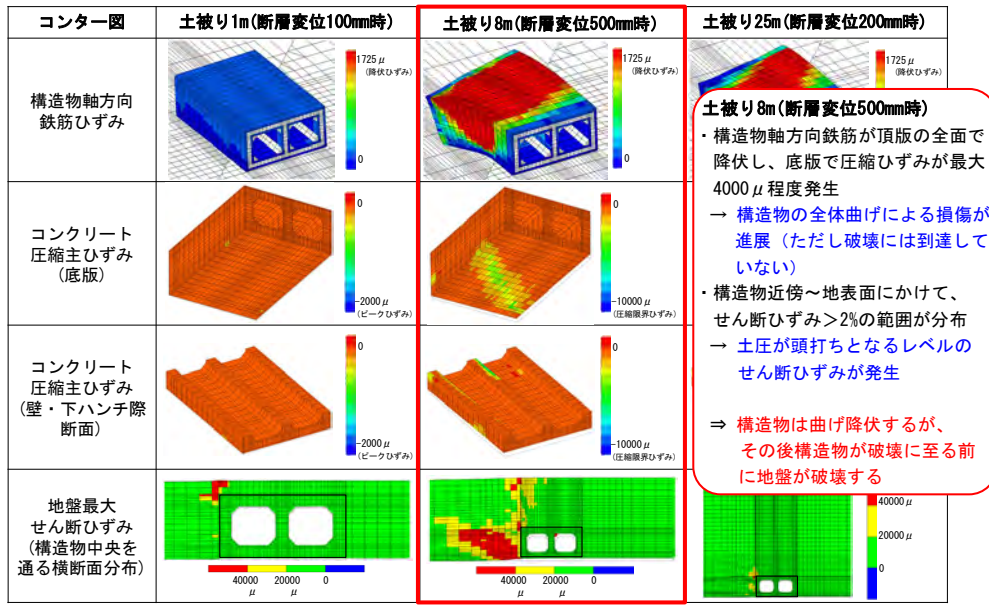
解析プログラム:大規模・高速化非線形有限要素法プログラム「FINAL-GEO」

## 3. 土被りの違いによる構造物損傷状況の比較

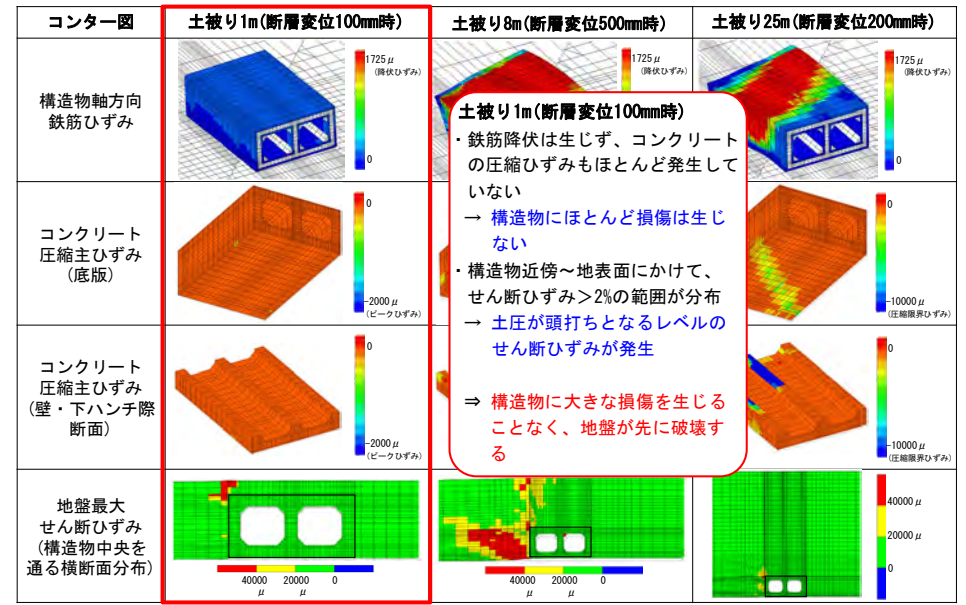
8



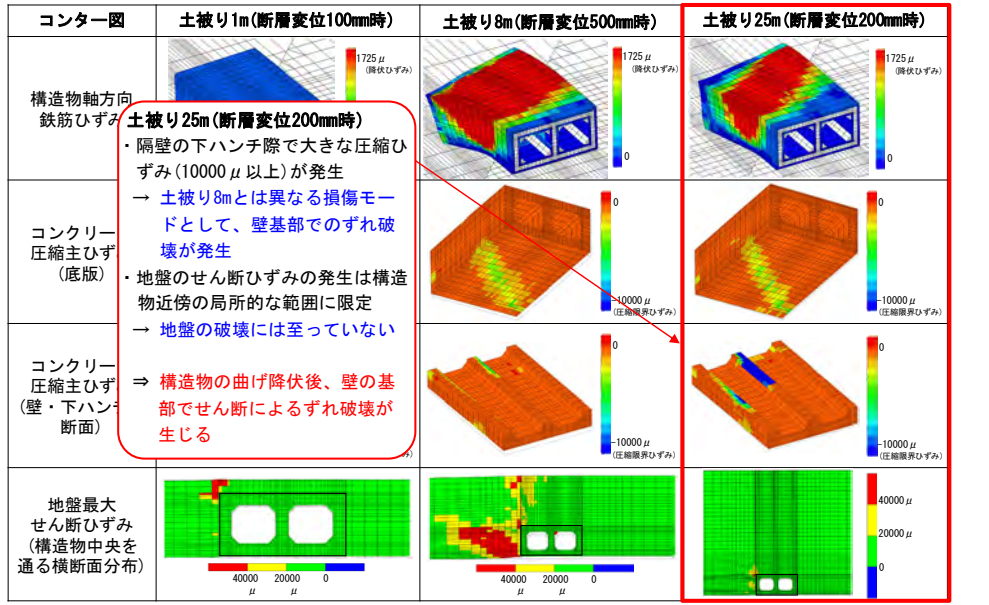
### 3. 土被りの違いによる構造物損傷状況の比較



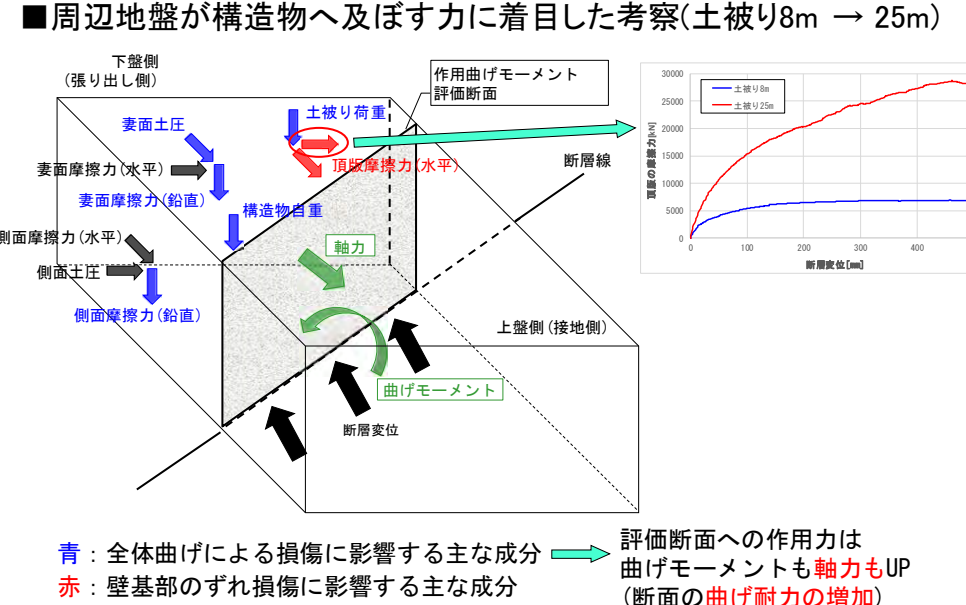
### 3. 土被りの違いによる構造物損傷状況の比較



### 3. 土被りの違いによる構造物損傷状況の比較



### 3. 土被りの違いによる構造物損傷状況の比較



- 岩着したRCボックスカルバートに逆断層変位が作用する場合を対象に、構造物や地盤の応答、破壊モードに影響を与えるパラメータとして土被りの違いに着目した、3次元有限要素法での連成解析による評価を行った。
- 上記の解析手法により、土被りの違いによる地中構造物および地盤の応答、破壊モードの変化が評価可能であることを示した。
- 今後は隣接するブロックをモデルに含め、隣接ブロックとの相互作用を考慮できるモデルでの検討を行う予定である。

ご静聴ありがとうございました。