

The 8th Design Conference, 地盤セッション

2014年11月20日

地盤FEM解析技術 および解析事例

さい ひ

蔡 飛

技術士(総合技術監理、建設部門)

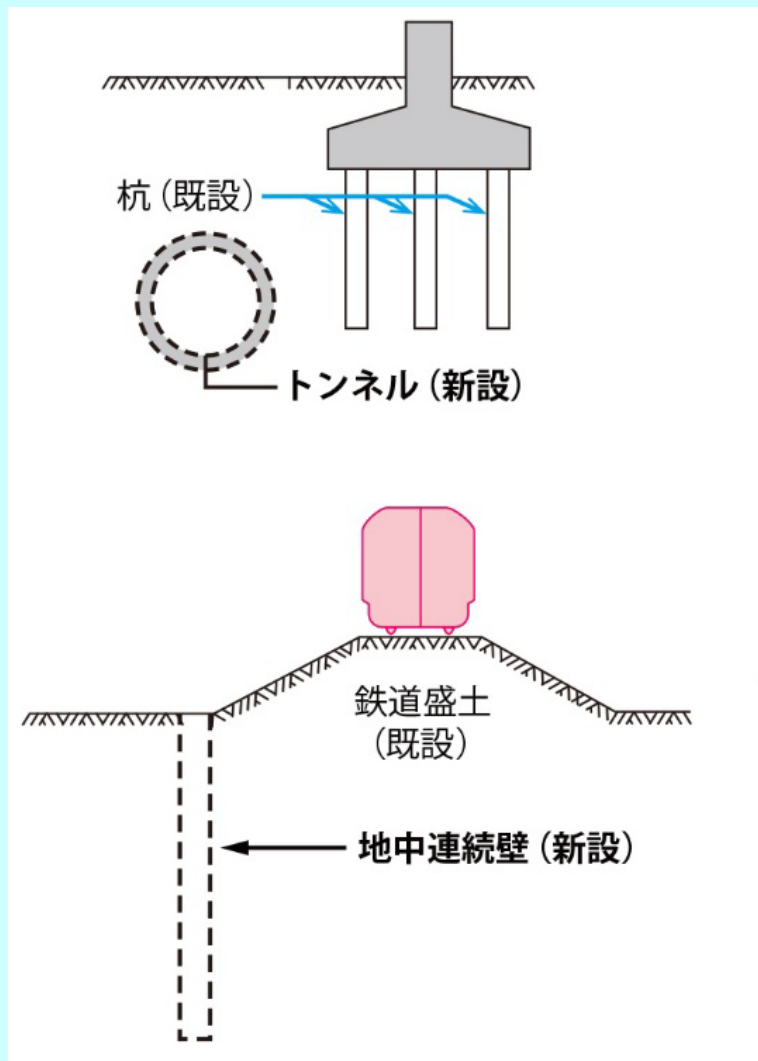
群馬大学大学院 理工学府

環境創生部門

内容：

- はじめに
- 地盤FEM解析技術
- 解析事例

近接施工



計測管理値の一例

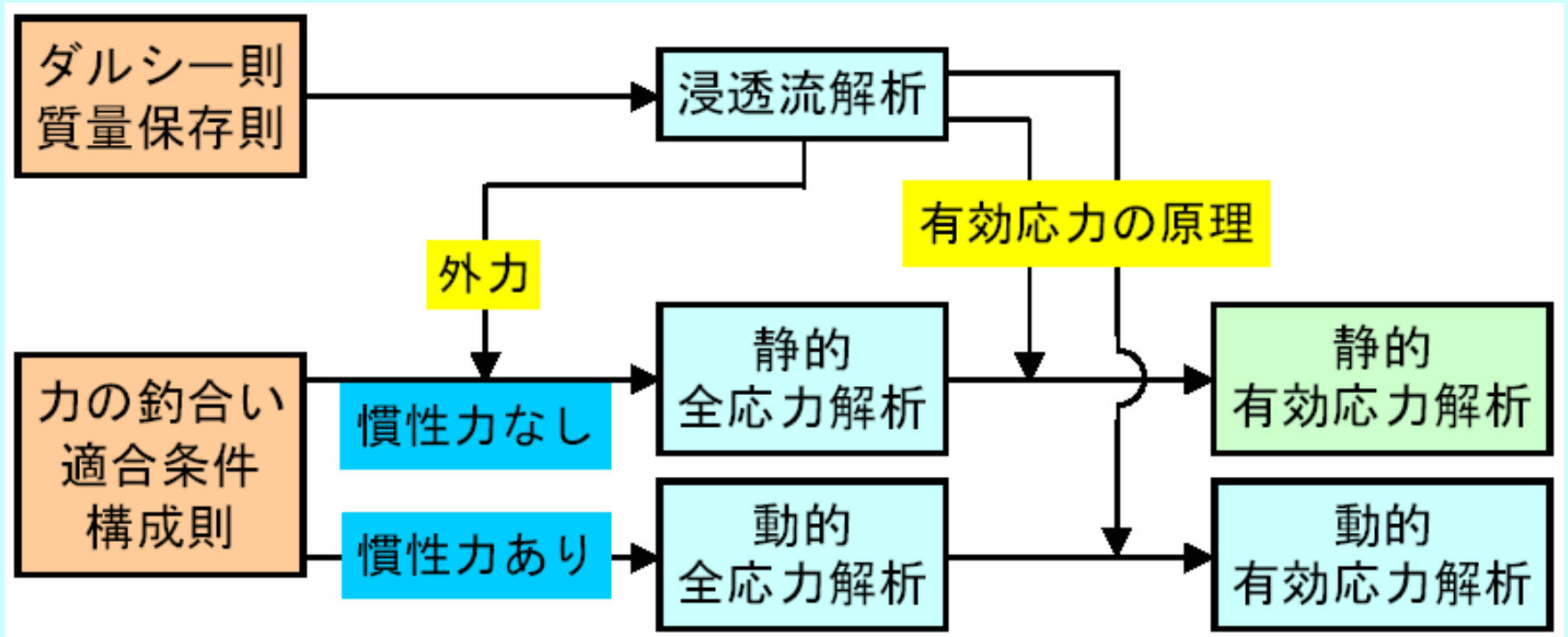
構造物の種別	傾斜量
精密機械工場	1/2000以下
道路構造物	1/500～1/200
高層住宅	1/1000～1/500
一般家屋	1/500～1/300
ガス・通信共同溝	管理者の 定めた基準値
上・下水道	
地下鉄	

- 管理対象の最大値の予測
- 計測機器の設置場所

地盤FEM解析を導入されている設計基準

規準	概要
道路土工 仮設構造物工指針	土留め背面地盤の変形
山留め設計施工指針	山留め背面地盤の変形
河川構造物の耐震性能照査指針 (案)・同解説	液状化に伴う堤防の変形
大深度地下使用技術指針・同解説	トンネル掘削の影響評価
山岳トンネル設計施工標準・同解説	トンネル掘削の影響評価
地下連続壁の溝壁安定の設計施工 の手引	掘削溝壁の安定検討
大規模地震に対するダム耐震性能 照査指針(案)・同解説	築堤解析・湛水解析(動的解 析のための初期応力を求め る)
駐車場設計・施工指針 同解説	地震時地盤ばね定数の算出
鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物	列車の繰返し载荷による残留 変形

有限要素法による地盤解析体系の概略

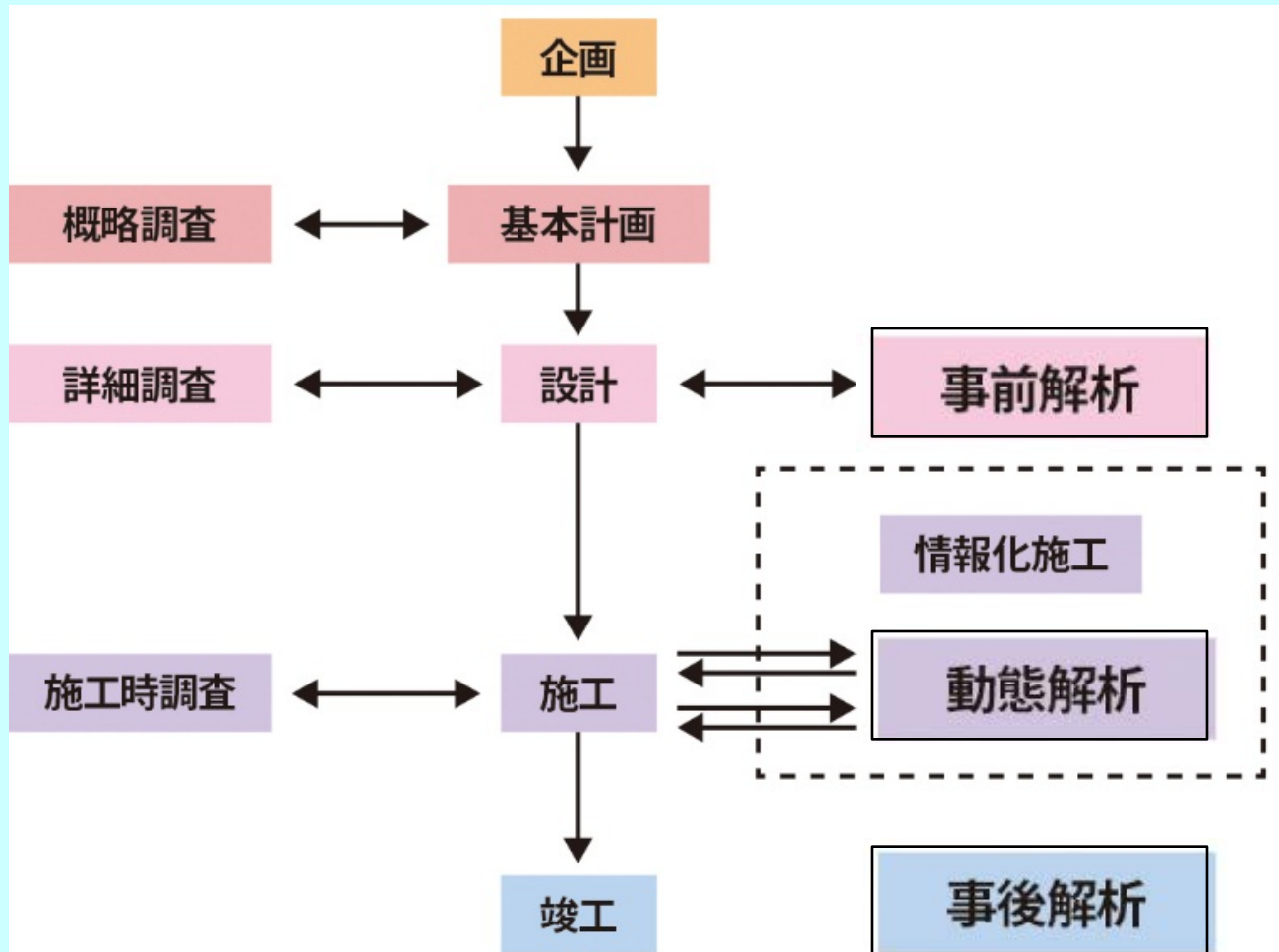


飽和・不飽和浸透流解析: VGFlow

静的全応力解析: GeoFEAS

動的全・有効応力解析: UWLC

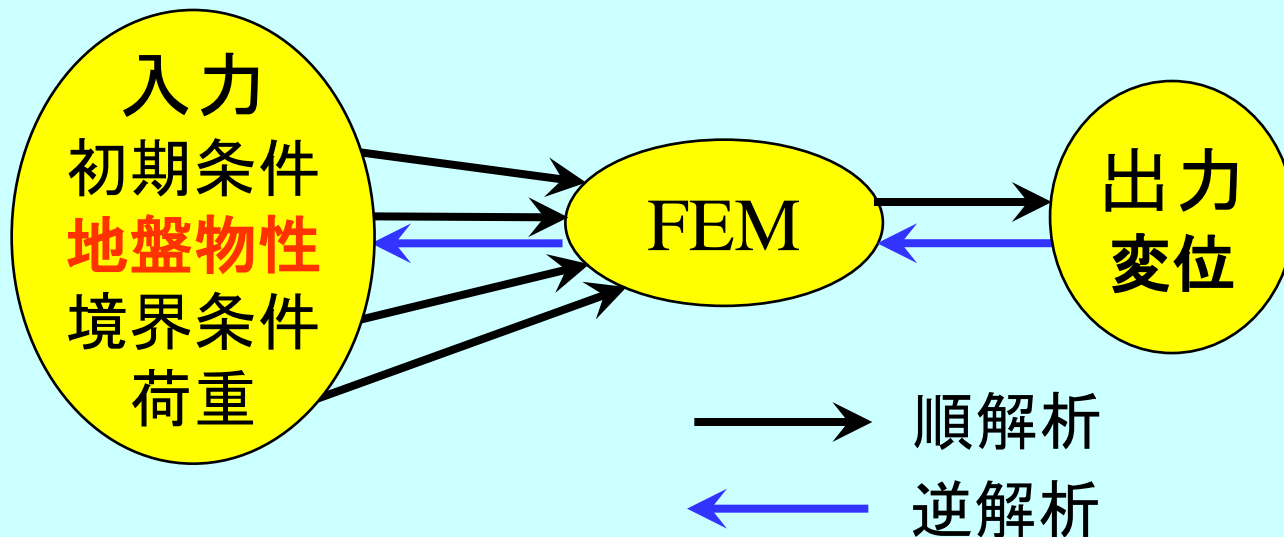
地盤FEM解析の種類



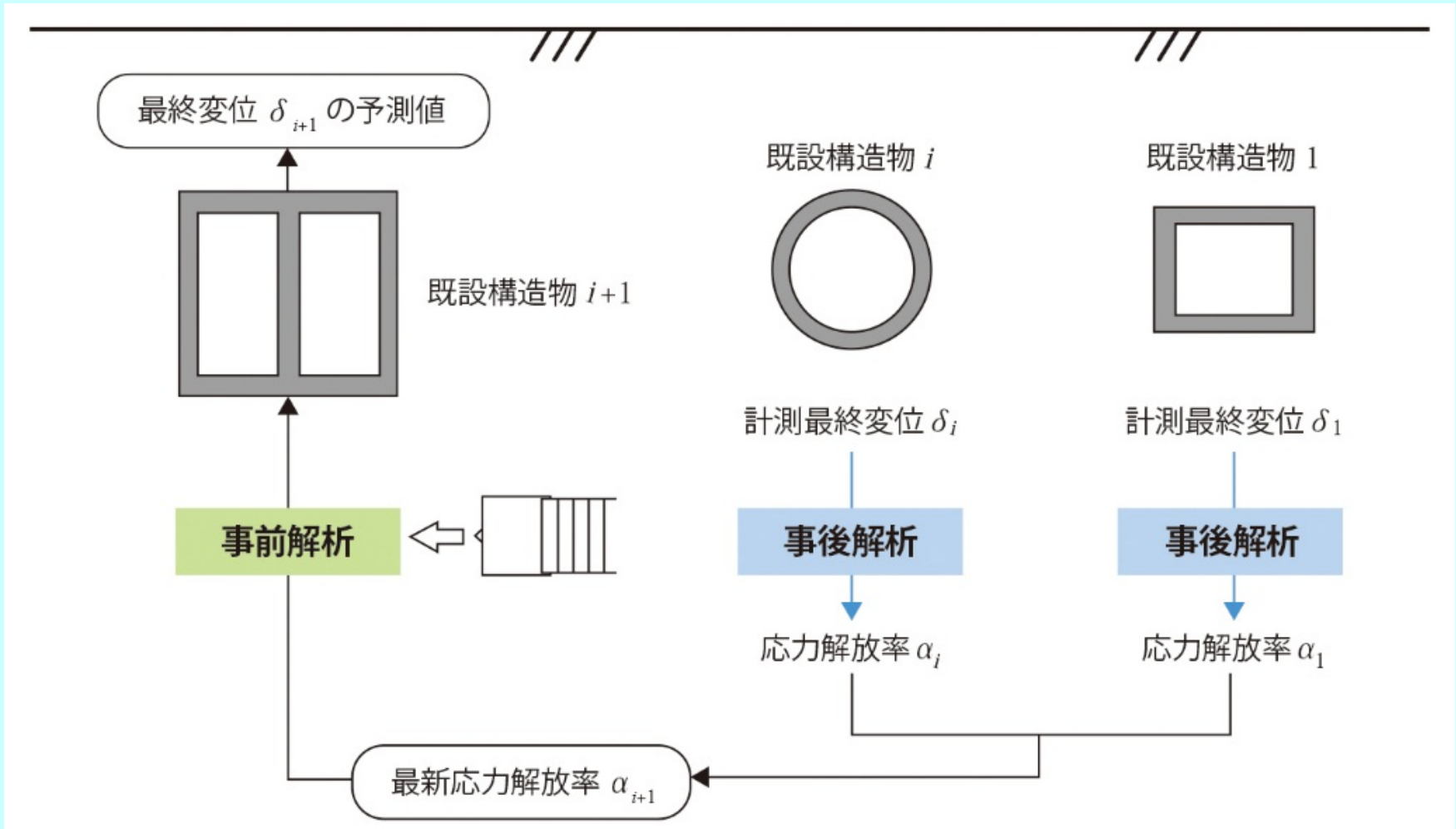
建設事業と地盤調査および地盤FEM解析の関係

解析のタイプ

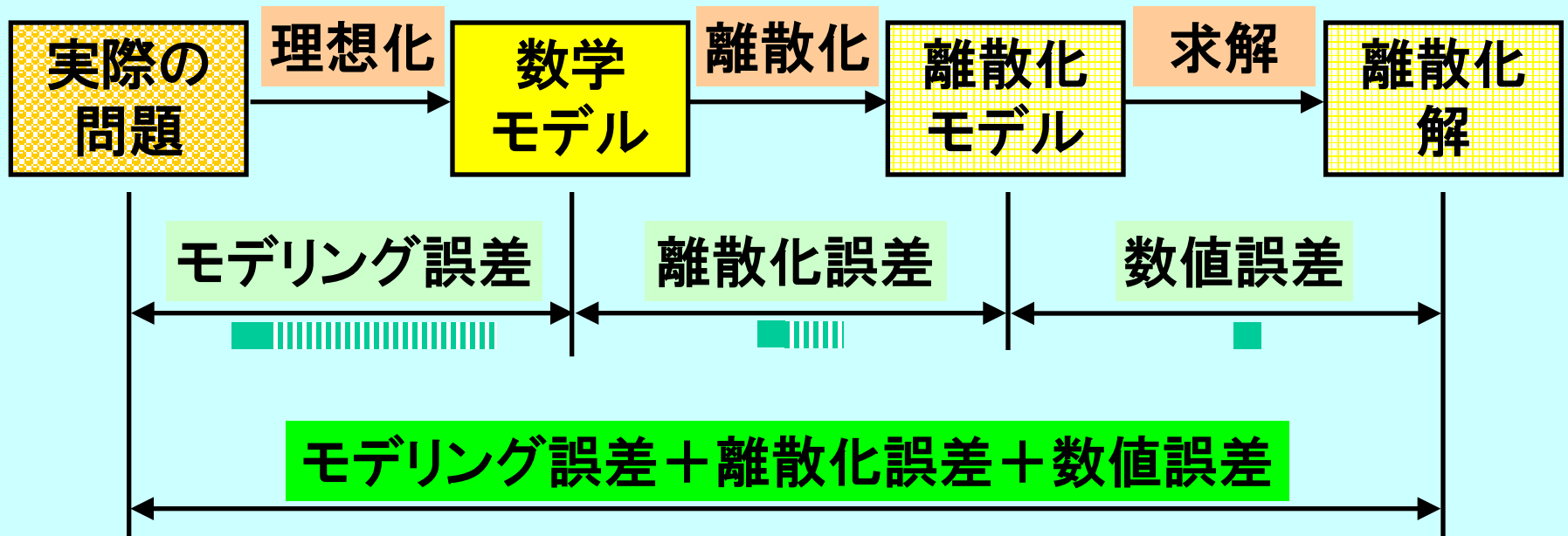
- 事前解析 (順解析: 一般値、経験値)
- 事後解析 (逆解析: メカニズム解明)
- 動態解析 (逆解析→フィードバック→順解析)



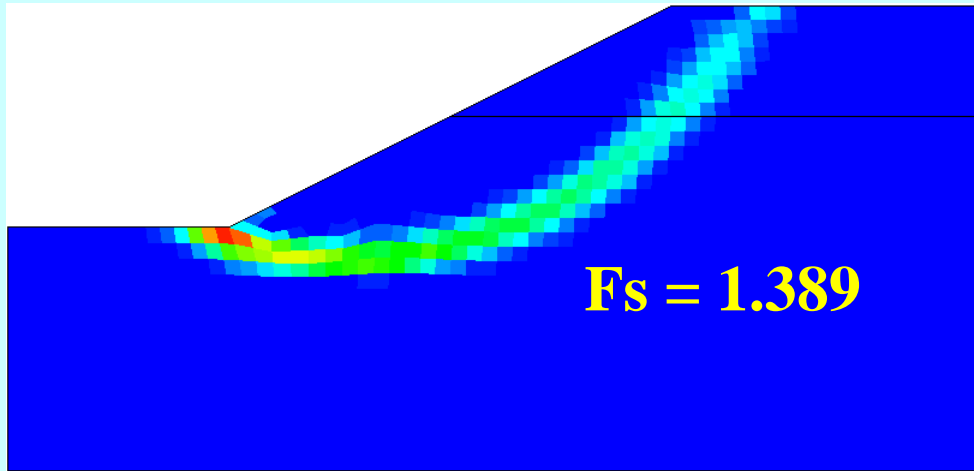
動態解析の一例：同一地盤区間内に行われたトンネル応力解放率の動態解析



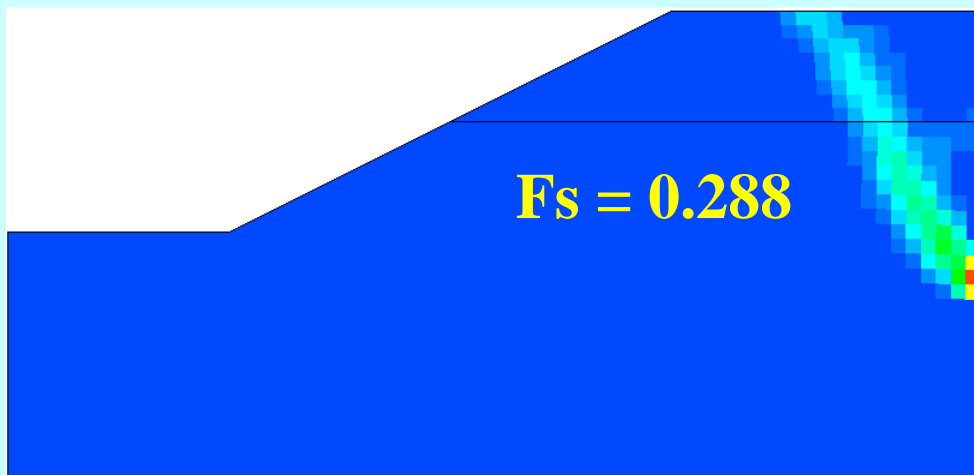
地盤FEM解析の流れ及び誤差



斜面安定解析の事例



水平固定
鉛直自由



水平自由
鉛直自由

実際問題のモデル化

- 与えられた問題の明確化
- 力学モデルの選択、解析手法の検討
静的・動的、全応力解析・連成解析
- 材料の構成式
弾性・弾塑性・弾粘塑性
- 解析領域・境界条件
- 初期条件
- 解析ステージ

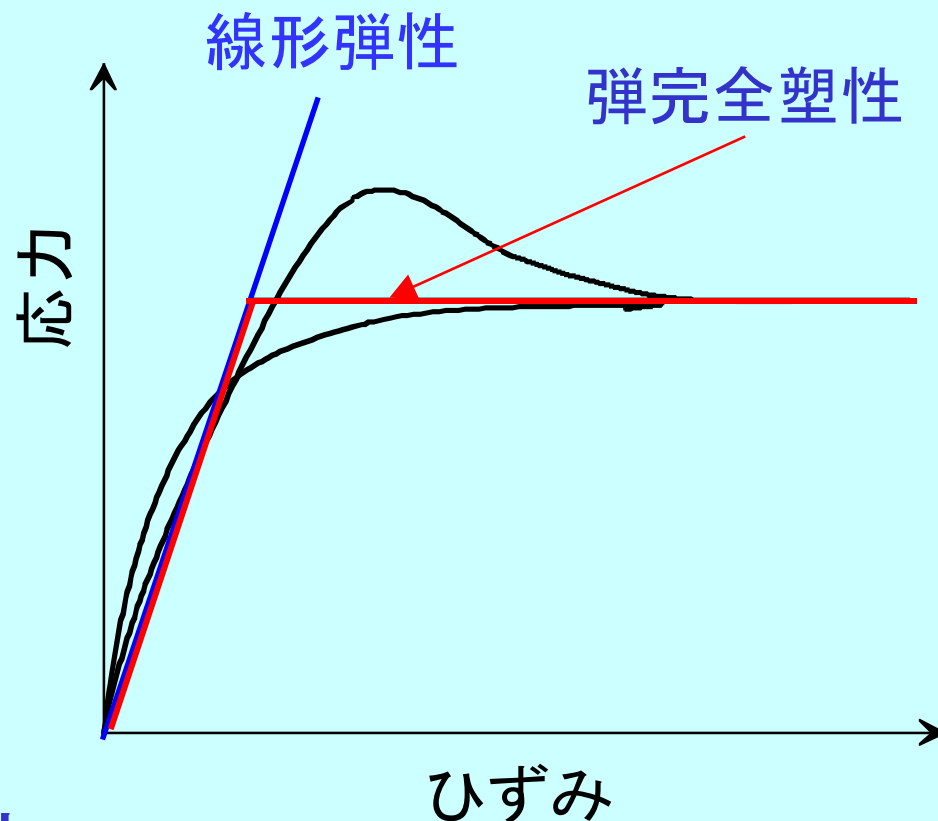
実際の地盤と土構造物の複雑な構造を単純化したモデル ↔ 実際の複雑な構造にできるだけ忠実なモデル

→ **トレードオフ関係**

技術者は解析の目的に適したモデルを構築することが重要。

構成式の選択

- 線形弾性
- 非線形弾性
- 弾完全塑性
- 弾塑性
- 弾粘塑性



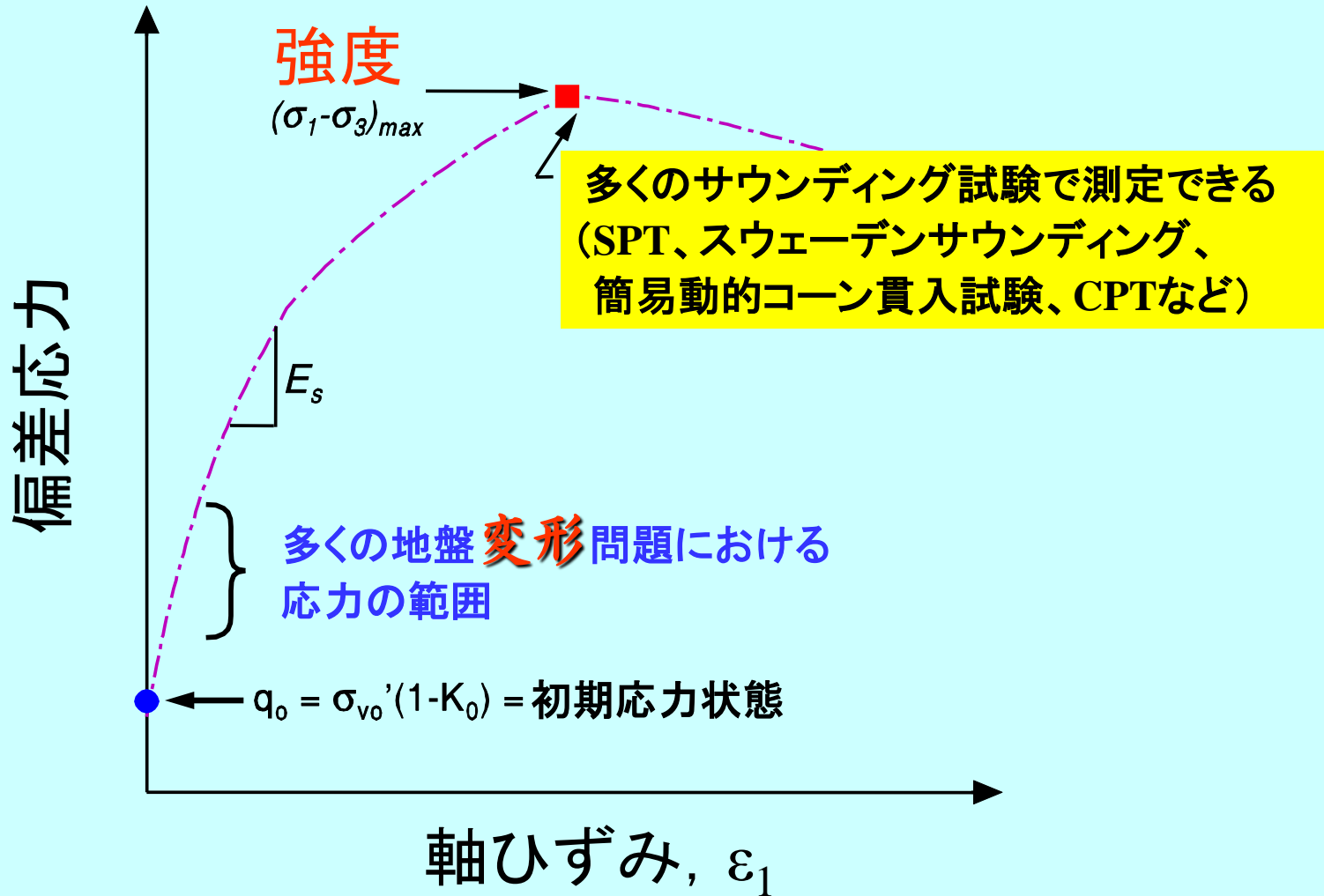
◇ 構造物の重要性

◇ 地盤内の応力レベル

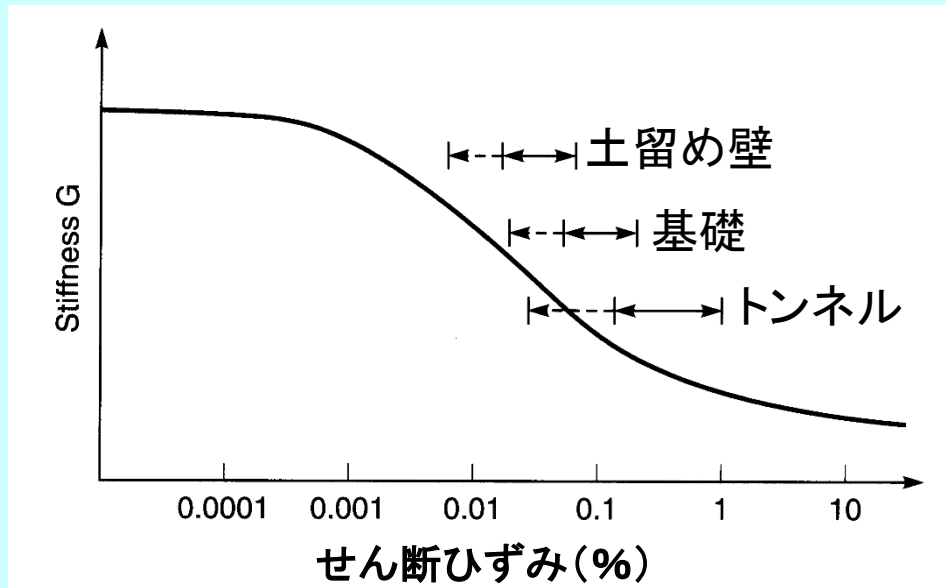
◇ 問題の種類 (土圧・支持力・斜面安定は弾完全塑性)

等価弾性係数

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$$



等方線形弾性構成則



構造物における地盤に生じる
典型的ひずみ範囲

等方線形弾性構成則

N値と弾性係数の経験的な関係式(地盤工学会資料に加筆)

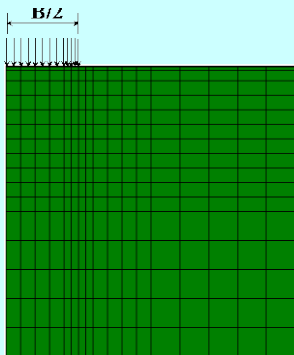
N値と変形係数の関係 (kN/m ²)	適用実績、指針	摘要
$E=700N$	土木研究所資料	トンネル解析での実績多し、 E_{50} 相当
$E=1400N$	建築基礎構造設計指針	地下水の無い場合の正規圧密砂、 地下水位以下の過圧密砂
$E=2100N$	鉄道構造物等設計標準	主に砂質土
$E=2500N$	近接施工技術総覧 鉄道構造物等設計標準	砂質土に適用(シールド解析)
$E=2800N$	道路橋指方書 鉄道構造物等設計標準	主に砂質土(特に洪積砂層が対象)
$E=500N+6900$	土木研究所資料 近接施工技術総覧	N値10以下の粘性土に適用、沖積砂質土にも適用

N値より変形係数の決め方:

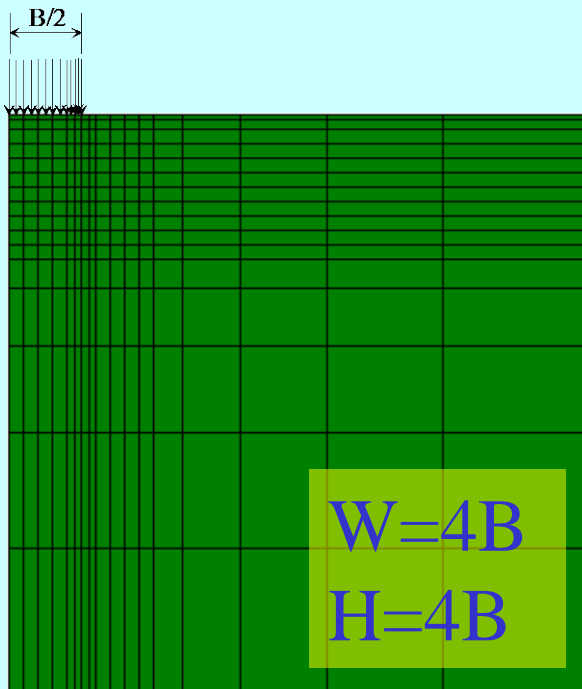
- ① 工事周辺地盤に生じるひずみレベルを見当づける。
- ② 規準・指針に規定されている式を用いる。
- ③ 類似地盤に適用実績がある値を参照して決まる。

解析領域

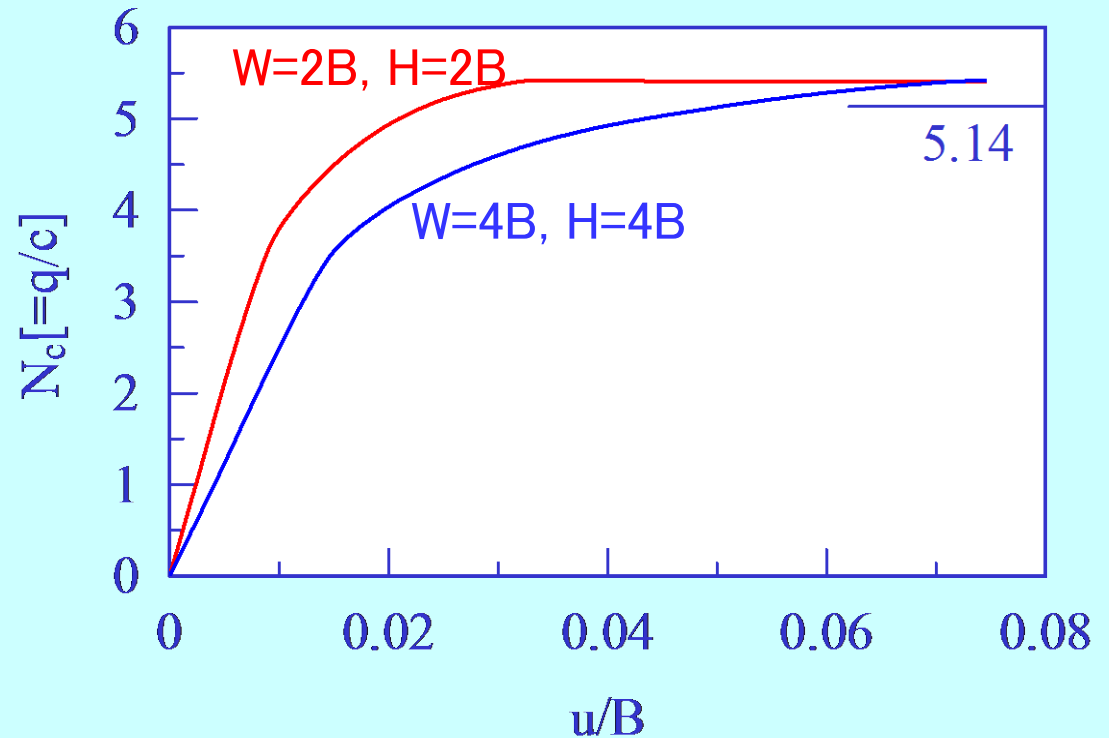
対称性を利用



$W=2B$
 $H=2B$

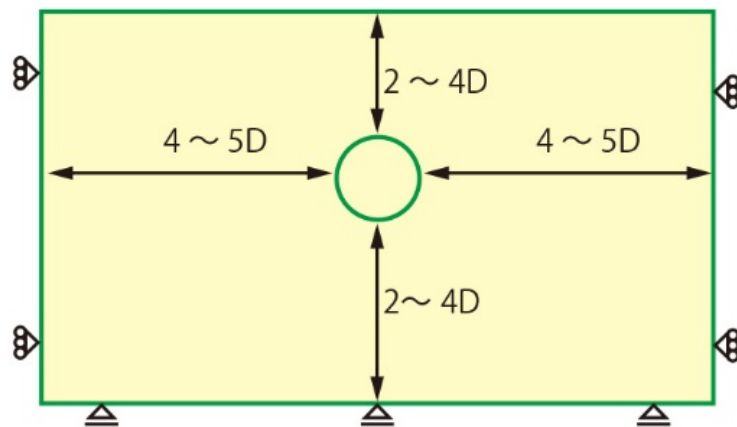


$W=4B$
 $H=4B$

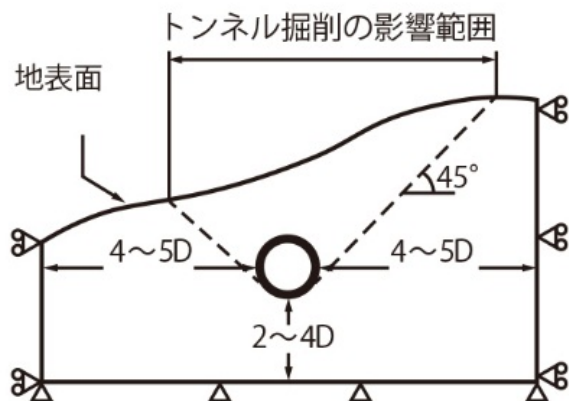


粘土地盤上の剛な帯状基礎の
荷重と変位の関係

解析範囲：トンネル解析の事例

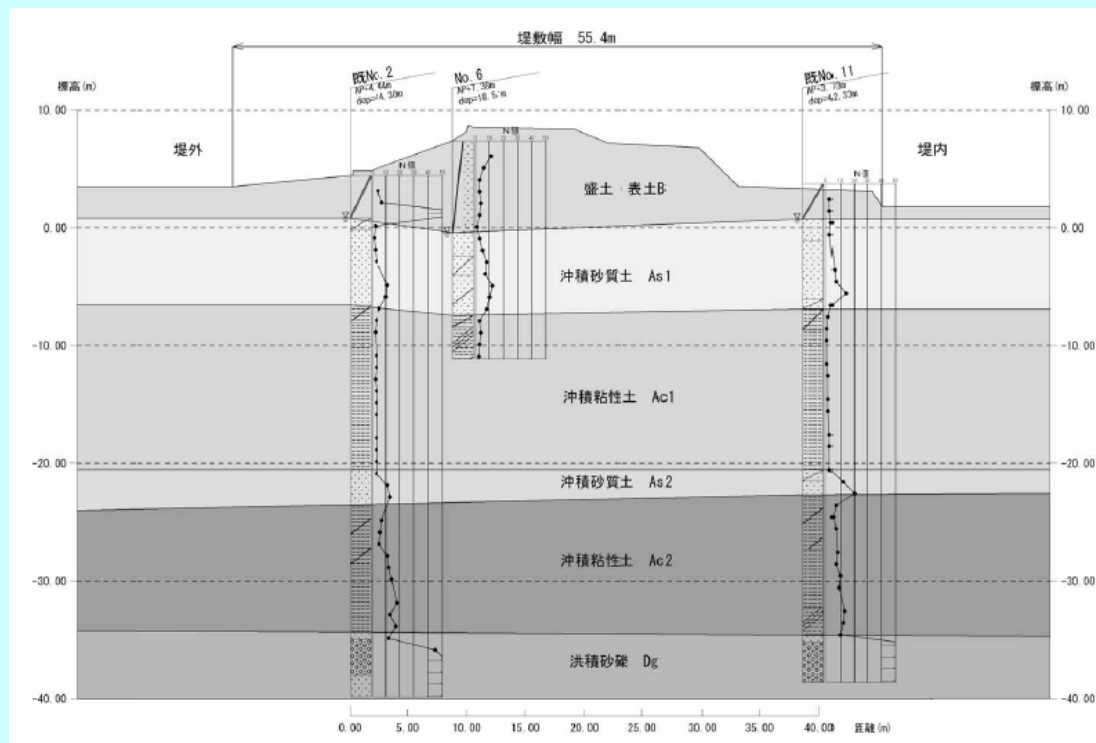


(a) 土被りが厚い場合、上部境界を荷重境界または変位固定境界とする。



(b) 土被りが薄い場合、地表面まで解析領域を設定

解析範囲：液状化に伴う自重変形解析の事例



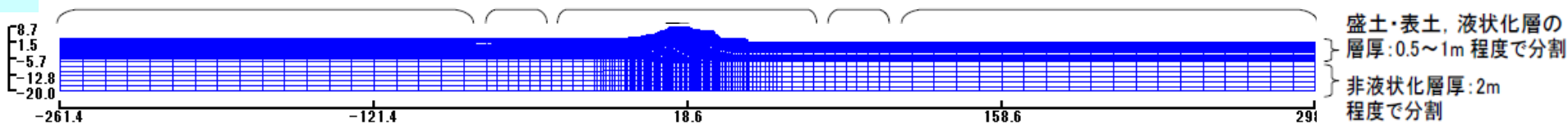
幅 10m で分割

幅 2~5m で分割

幅 0.5~1m で分割

幅 2~5m で分割

幅 10m で分割

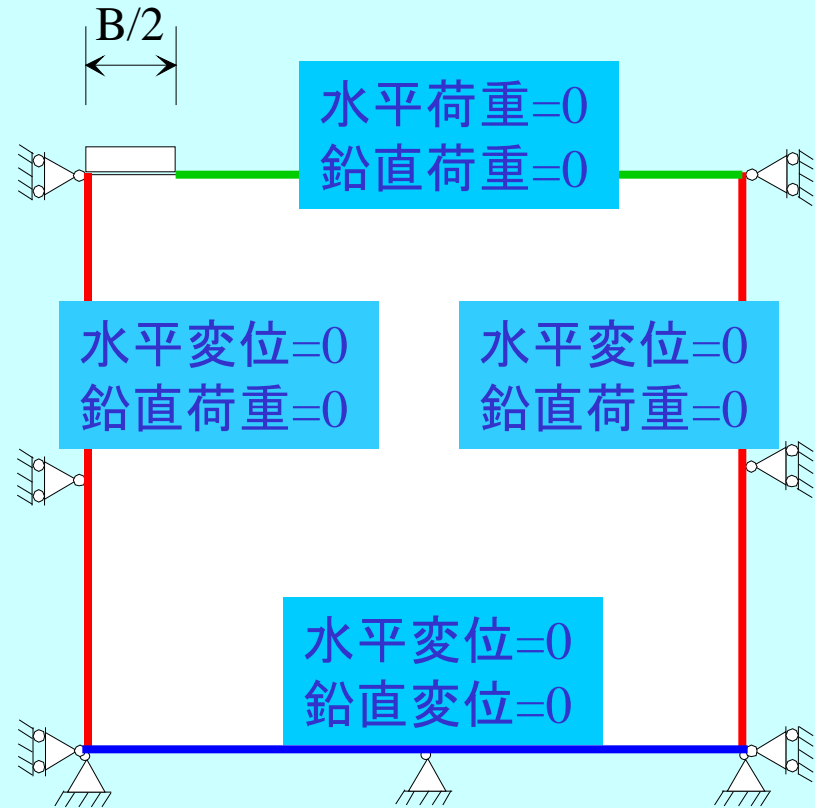


境界条件

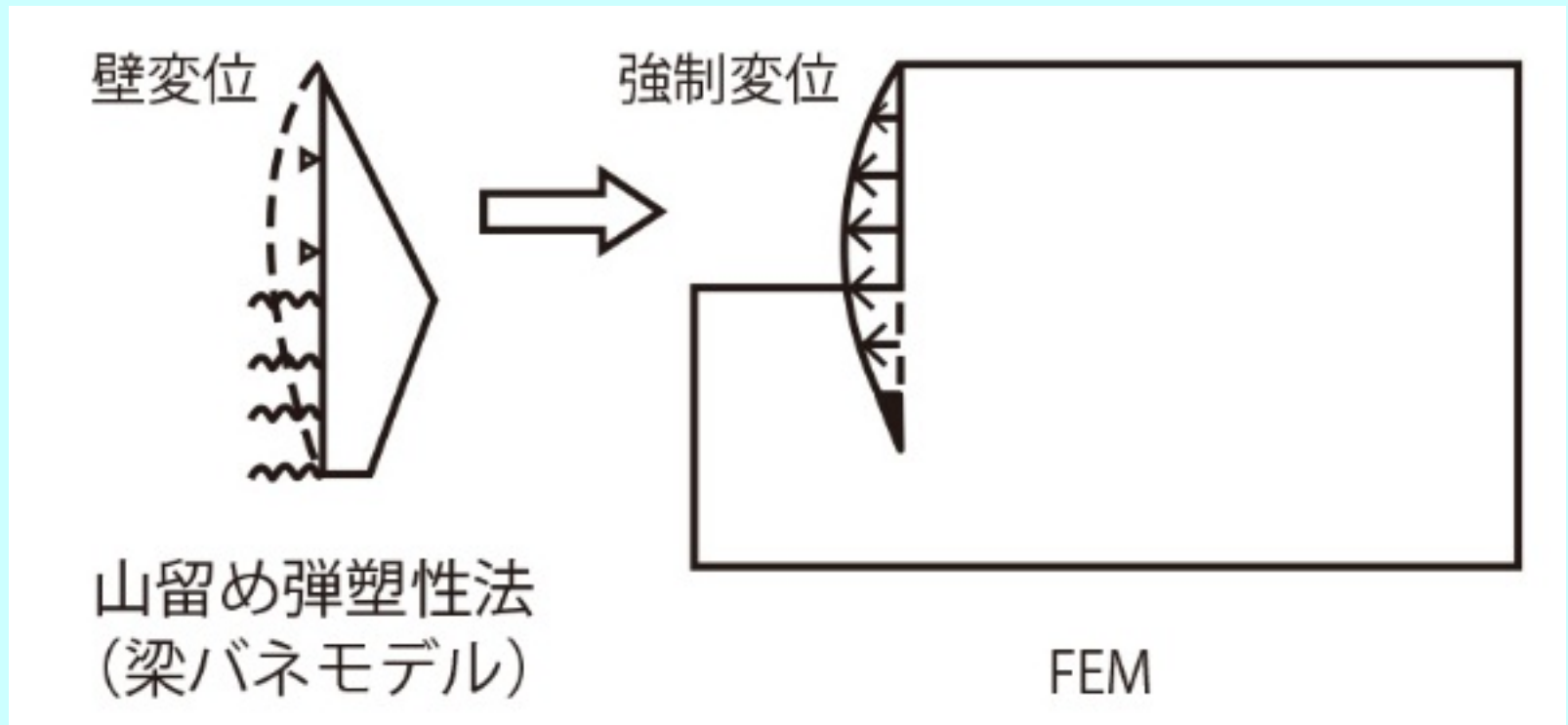
境界条件の種類:

- 力
- 変位

水平変位=0
(水平変位が固定)
鉛直荷重=0
(鉛直変位が自由)

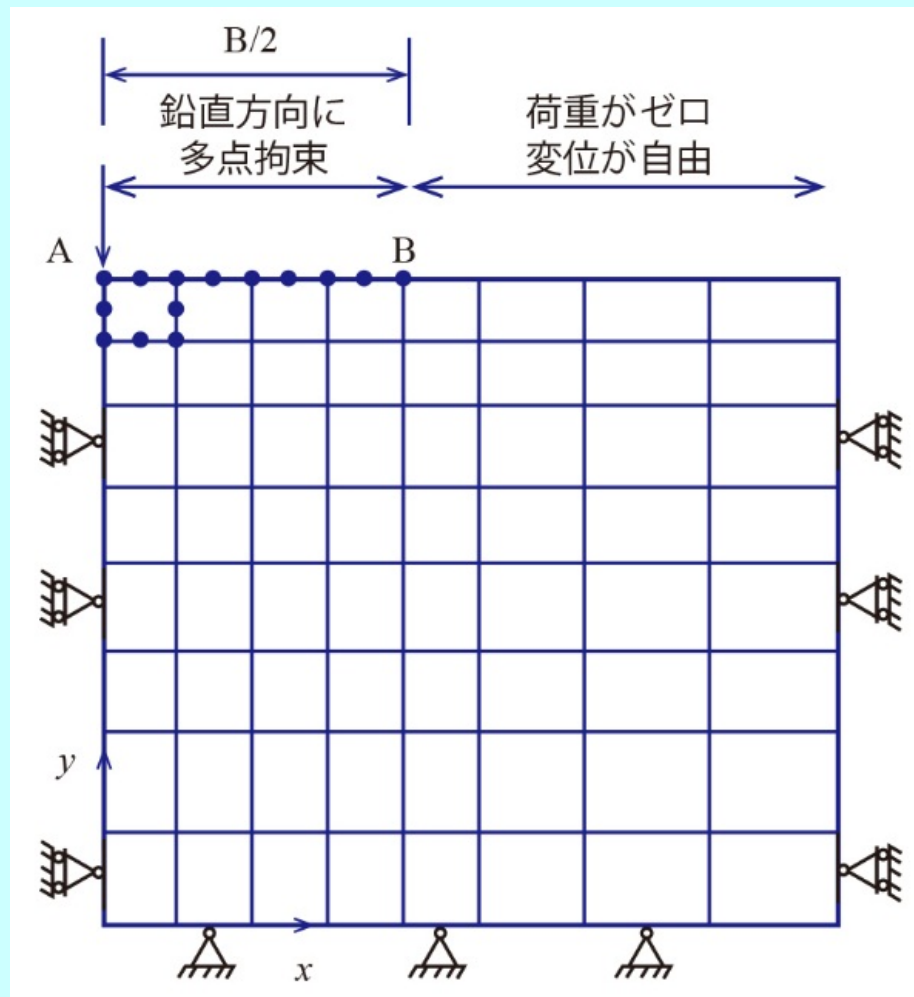


境界条件：強制変位

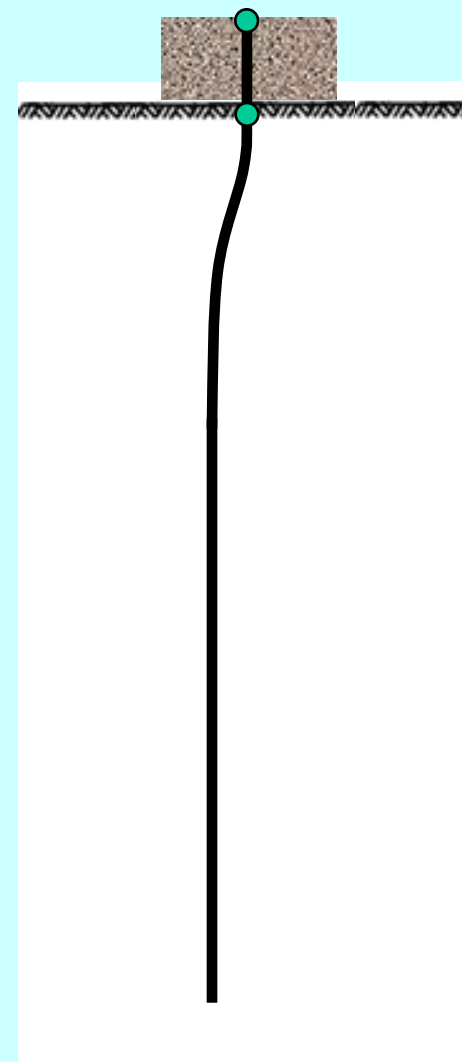


土留め掘削による地表面沈下量
のFEMによる予測の概念図

境界条件：多点拘束



水平方向に
多点拘束
→杭頭回転なし

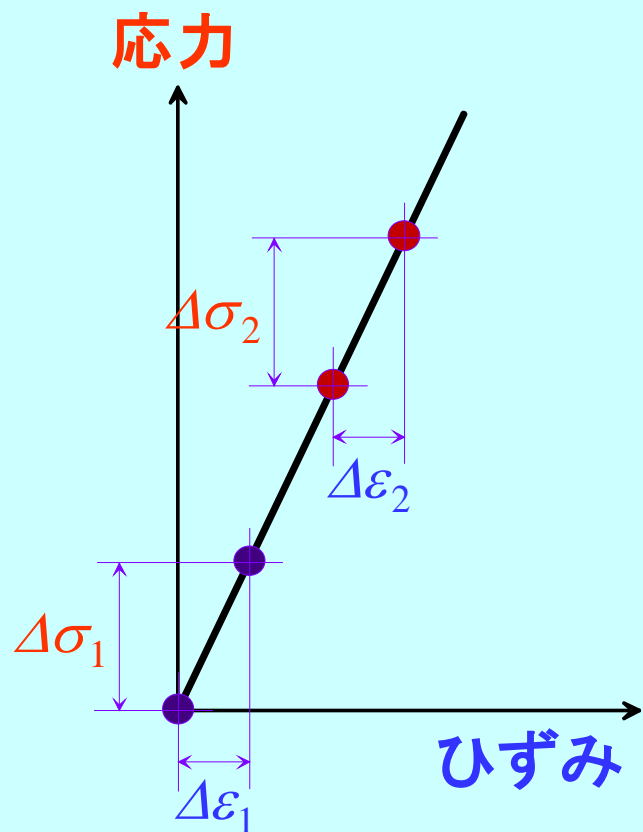


基礎の支持力解析

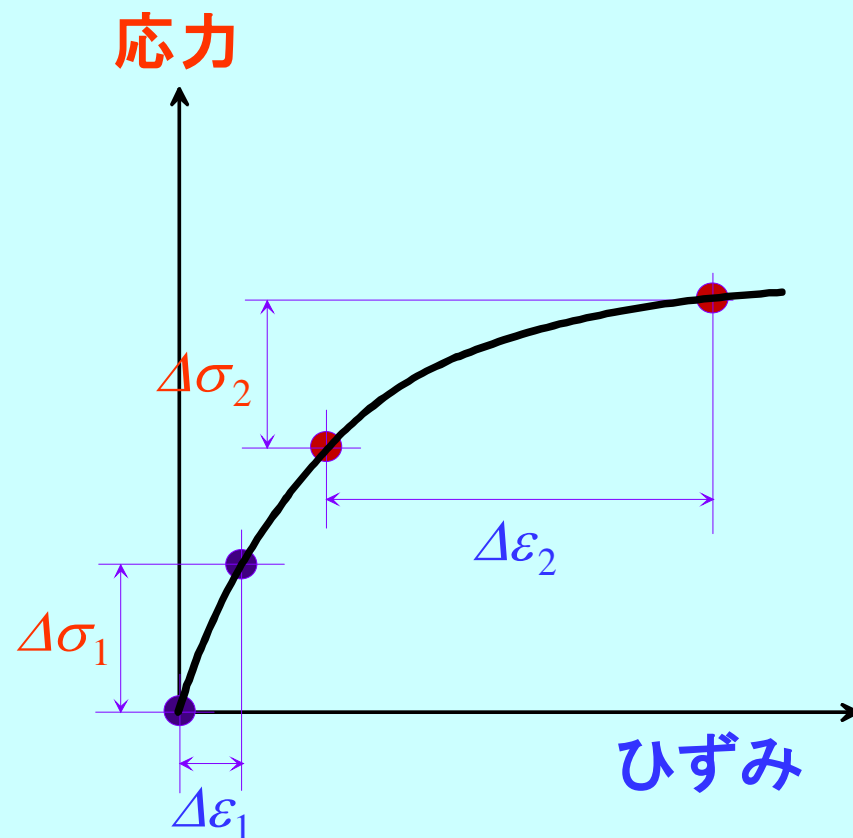
初期応力の設定の必要性

- 非線形解析には、重ね合わせの原理を適用することができない。
- 地盤材料の変形特性やせん断強度は応力に依存する。
- 掘削解析では、掘削による荷重は掘削前の地盤応力を用いて計算する。

初期応力の設定の必要性

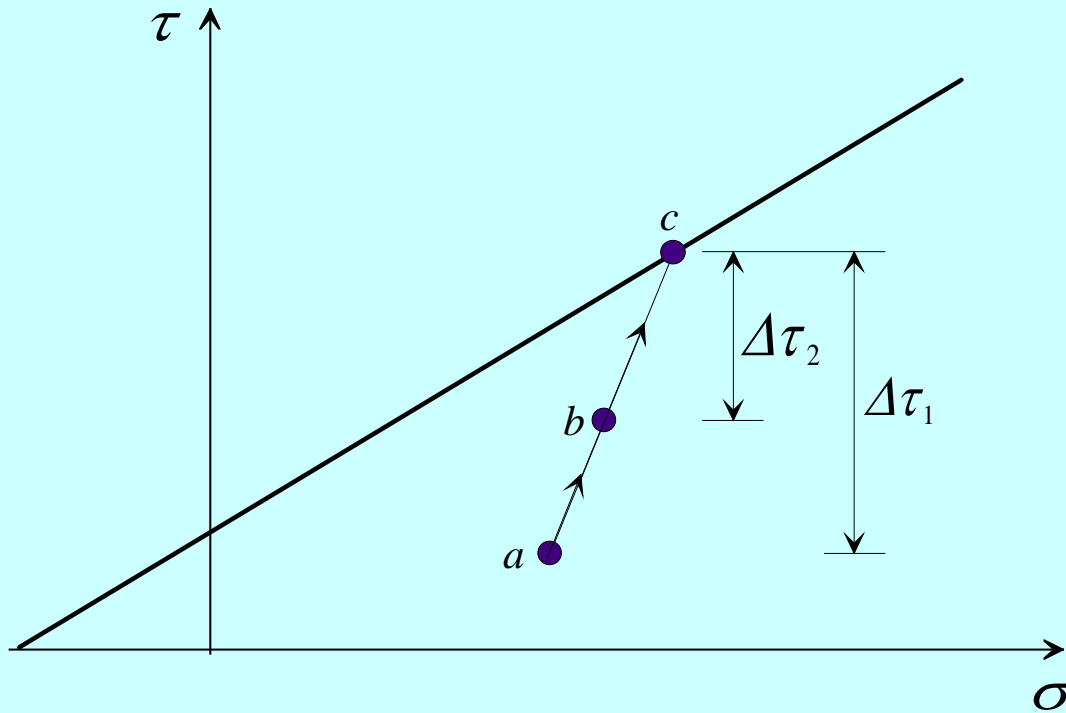


弾性: $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2$
 $\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_2$

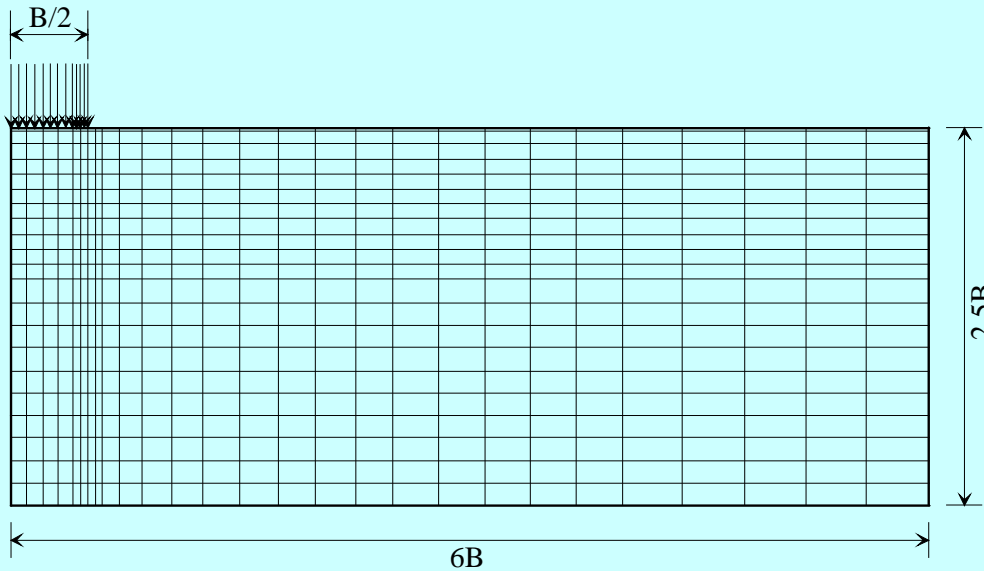


弾塑性: $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2$
 $\Delta\varepsilon_1 \neq \Delta\varepsilon_2$

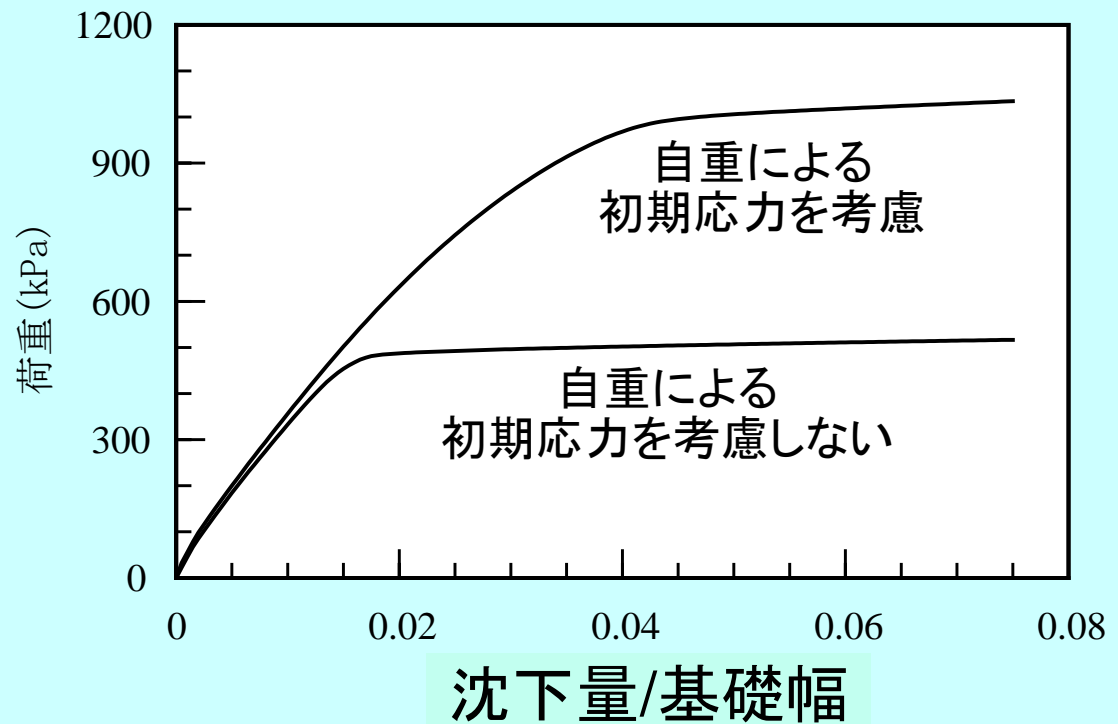
初期応力の設定の必要性



同じ応力経路に沿って载荷するとき、破壊までの荷重は初期応力によって異なる。



初期応力の砂地盤 支持力に与える 影響

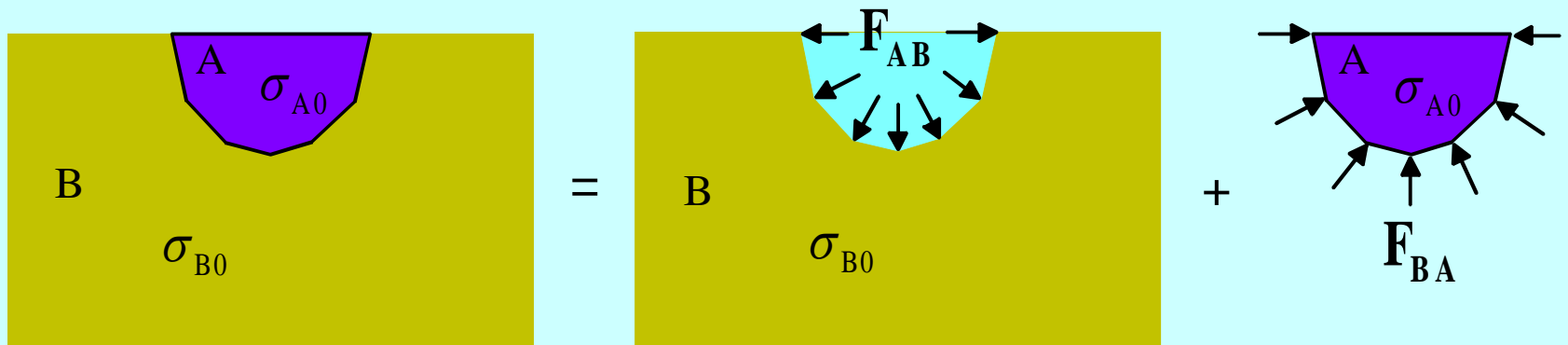


初期応力の設定の必要性

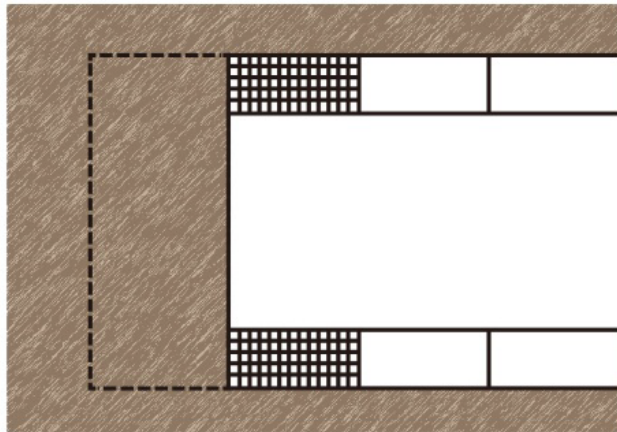
- 掘削解析では、掘削により生じる荷重は掘削前の地盤応力を用いて計算する。

掘削により生じる力:

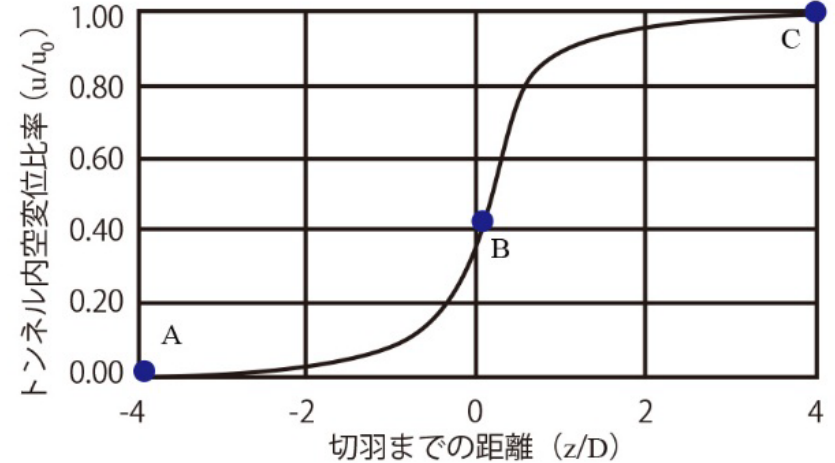
$$F_{exca} = F_{BA} = \int_{\Omega_A} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{A0} d\Omega - \int_{\Omega_A} \mathbf{N}^T \gamma d\Omega$$



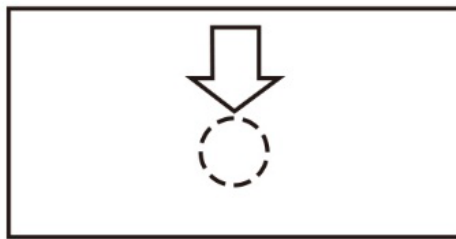
トンネル解析における応力解放率



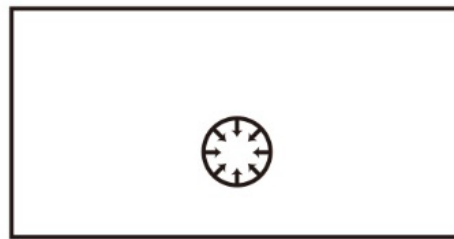
(a) トンネル掘削のイメージ



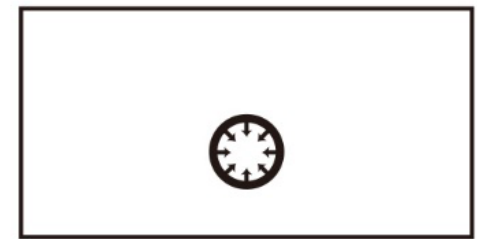
(b) 切羽の進行によってトンネルのある観測断面に生じる変位 u と切羽までの距離の関係 (ここに、 u_0 はトンネルが完全に貫通し平面ひずみ状態が成立するときの最終変位)



Stage 1: 初期応力
(上図の点 A の状態に対応)



Stage 2: 30~40%の応力を解放
(上図の点 B の状態に対応)



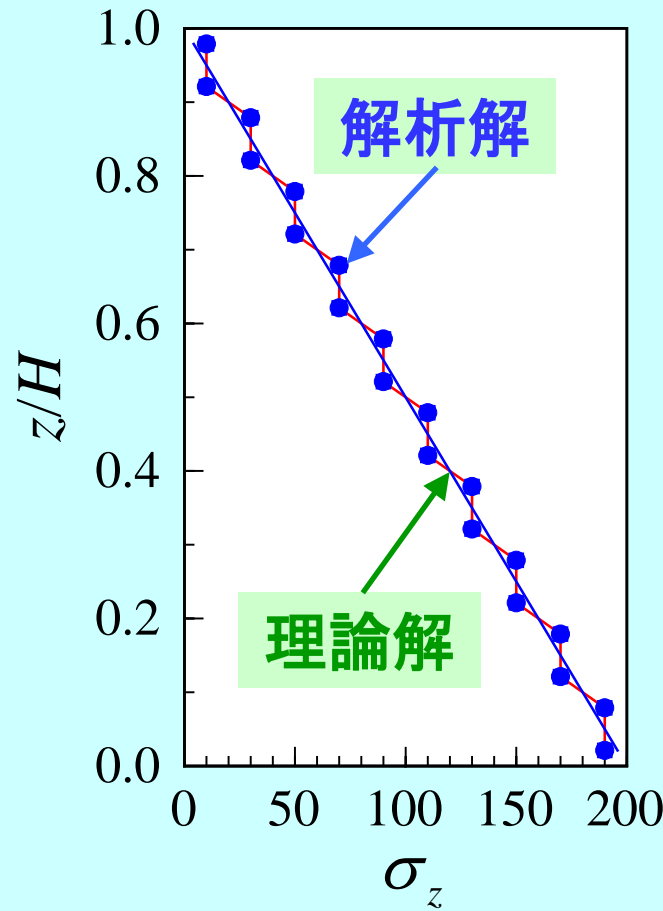
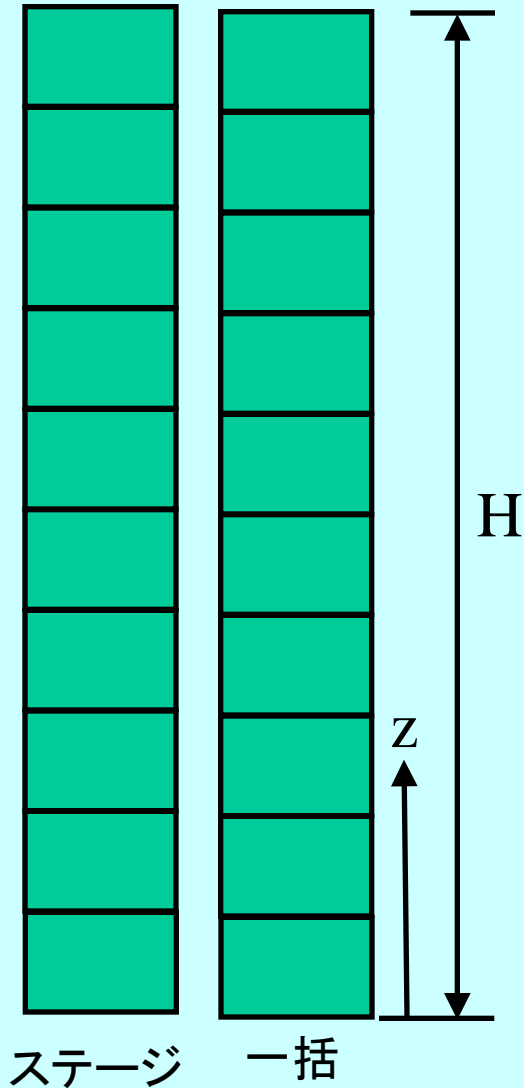
Stage 3: 支保工構築後残りの応力を解放 (上図の点 C の状態に対応)

(c) トンネル掘削における平面ひずみ解析のステージ設定

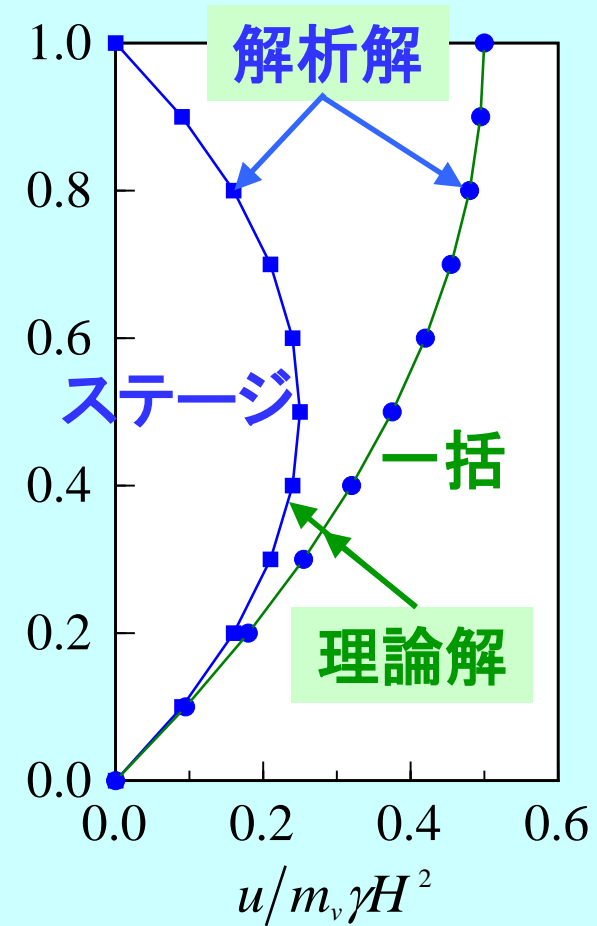
初期応力の設定方法

- 水平成層地盤
- 自重解析
- マルチステージ解析

マルチステージ解析



鉛直応力

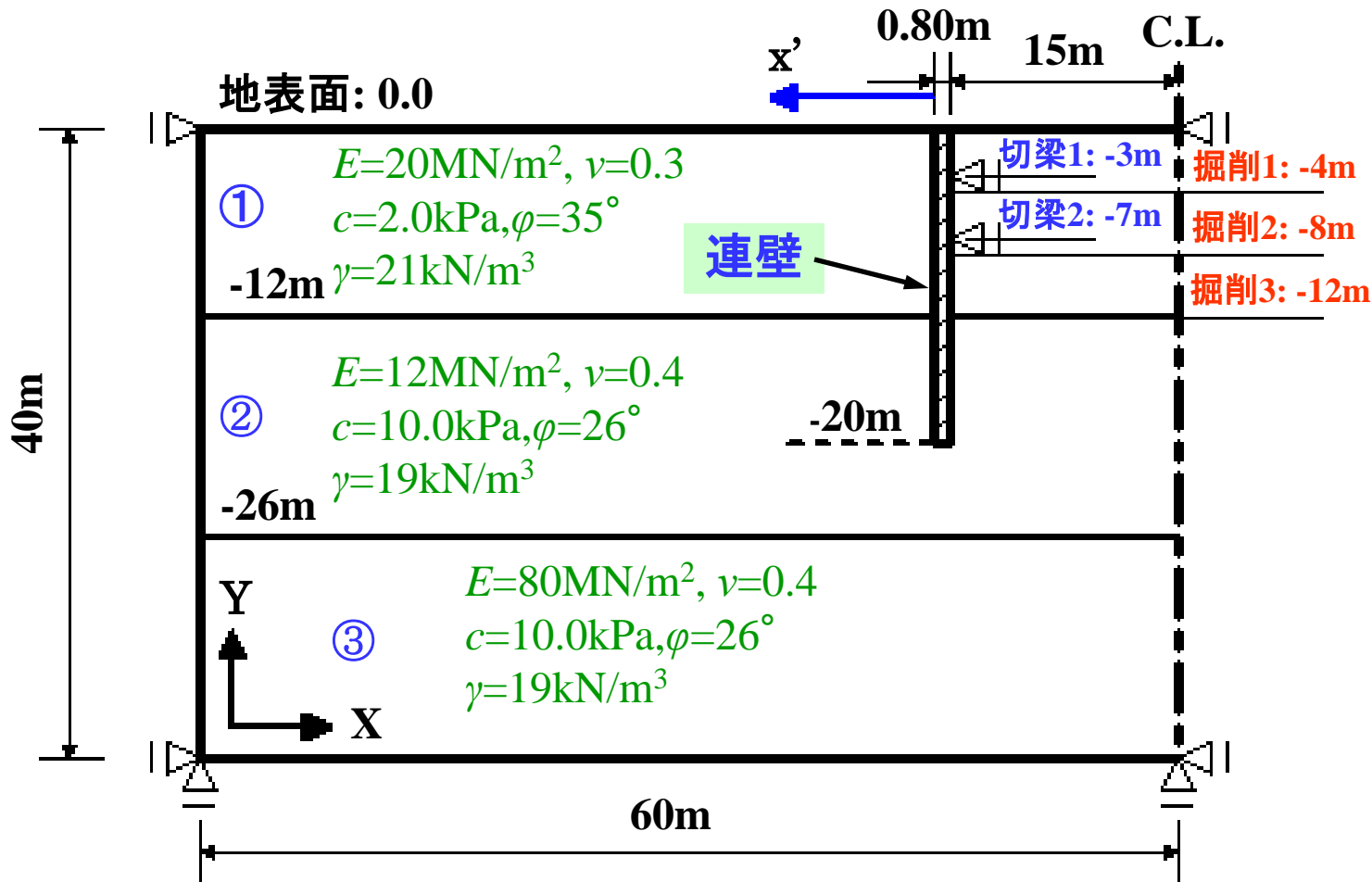


無次元沈下量

$$m_v = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)}$$

石原研而: 土質力学、
1988年、pp.226-227.

土留め掘削のマルチステージ解析



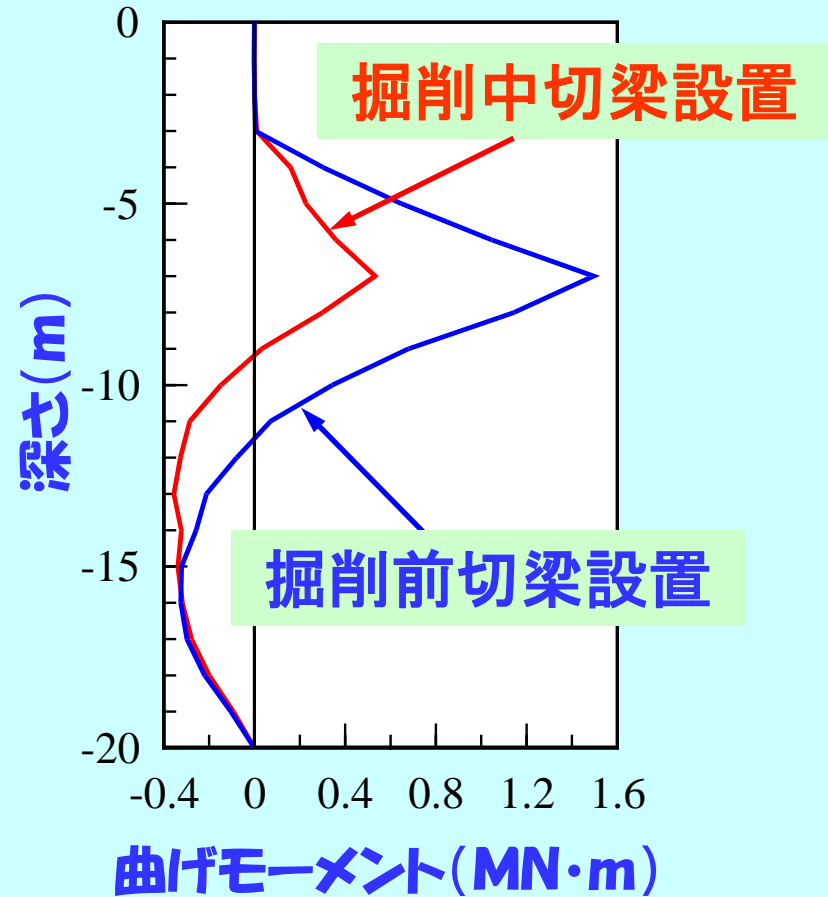
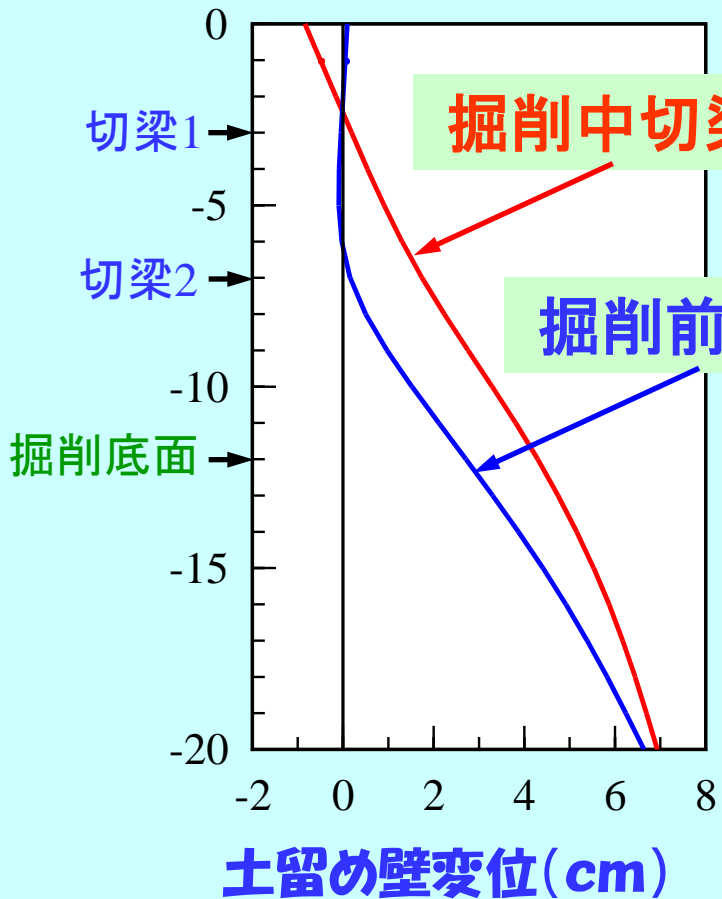
ケース1

掘削1
切梁1
掘削2
切梁2
掘削3

ケース2

切梁1
切梁2
掘削1
掘削2
掘削3

土留め掘削のマルチステージ解析:



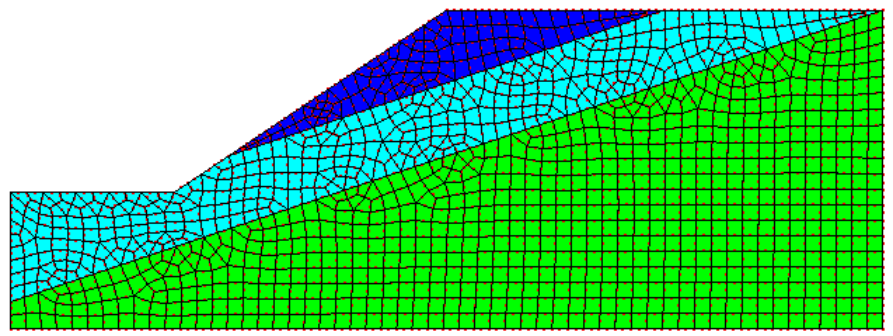
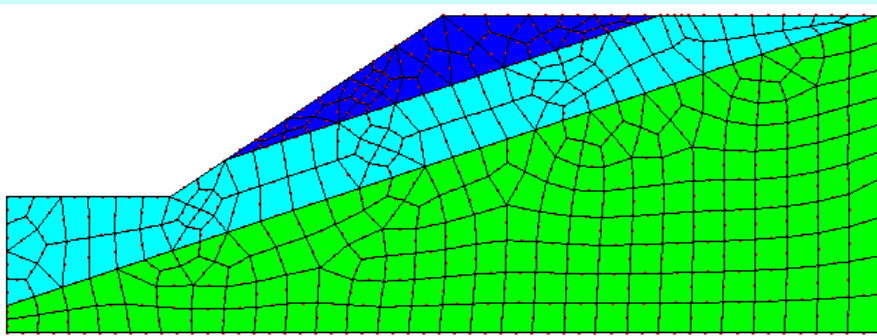
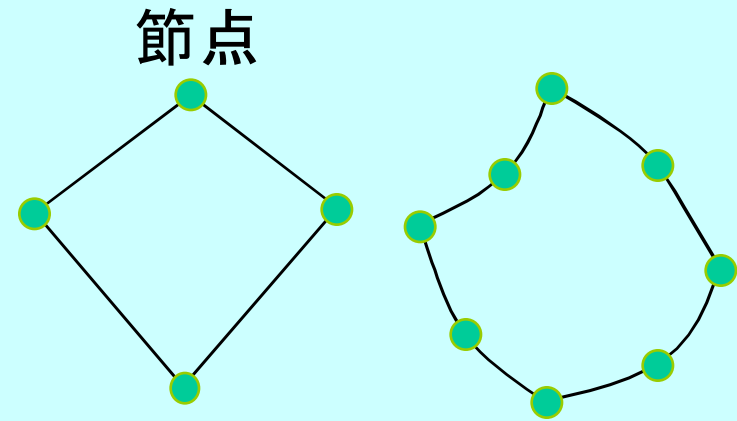
メッシュ分割:

- 要素の種類

三角形・四角形

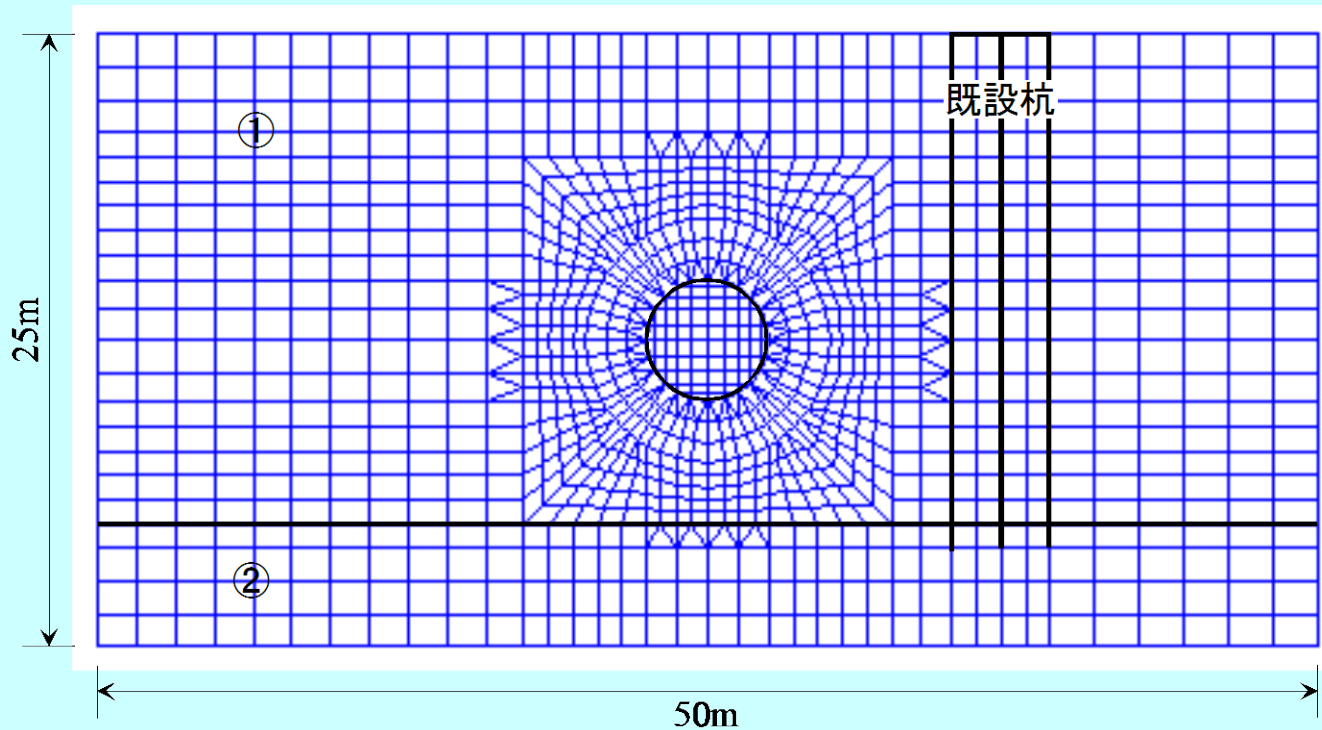
一次要素・二次要素

- メッシュ分割の大きさ



メッシュ	節点数	要素数	解析時間	安全率
粗	1038	321	2分	0.429
細	3486	1113	12分	0.423

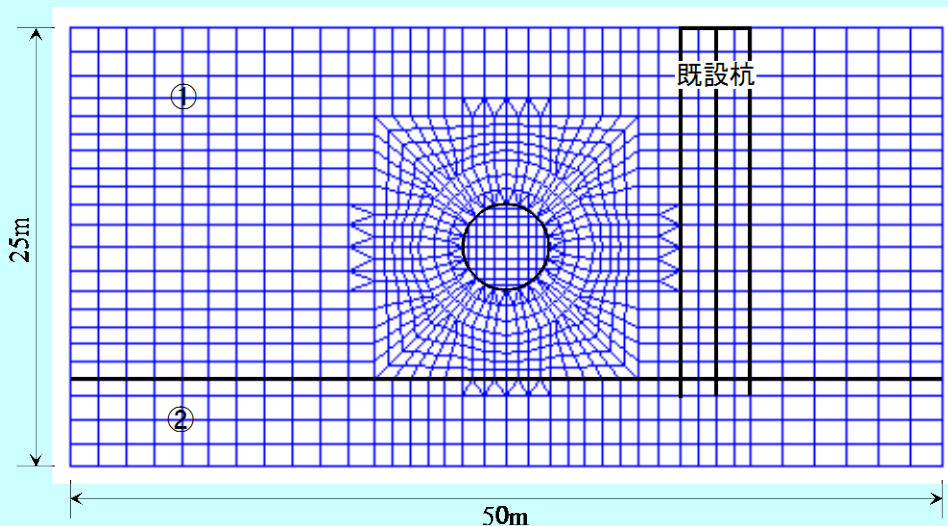
例題：トンネル掘削



解析目的：

- 既設杭への影響
- 支保工内の曲げモーメント
- 地表面の変位

問題のモデル化:



Duncanモデルのパラメータ

パラメータ	①	②
単位体積重量(kN/m ³)	14.5	19.0
K	300.0	10650.0
n	0.5	0.5
粘着力(kN/m ²)	51.0	185.0
内部摩擦角(°)	0.0	0.0
R_f	1.0	1.0
K_{ur}	450.0	10650.0
ポアソン比	0.45	0.45

解析ステップ:

- 成層地盤の初期応力を計算する。
- 既設杭基礎を設置する。
- トンネル掘削を行い、応力解放率を0.3とする。
- ライニングを設置し、応力解放率を0.7とする。

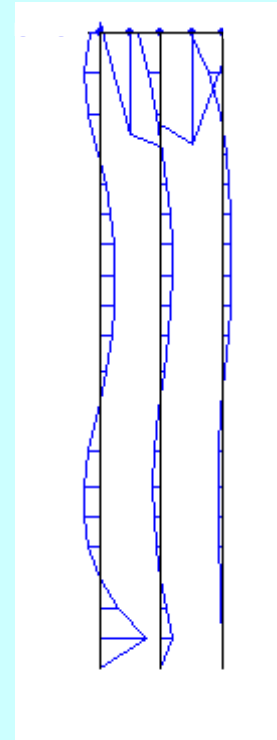
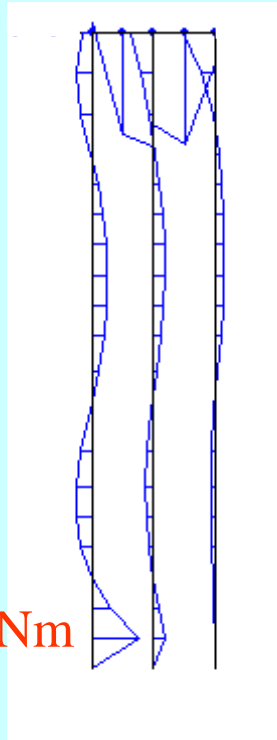
各梁要素の材料定数

パラメータ	杭	基礎	ライニング
ヤング率 (10 ⁷ kN/m ²)	20.0	2.5	2.5
2次断面モーメント I (m ⁴)	8.8×10^{-4}	2.813	5.33×10^{-3}
断面積 A (m ²)	0.148	1.5	0.4

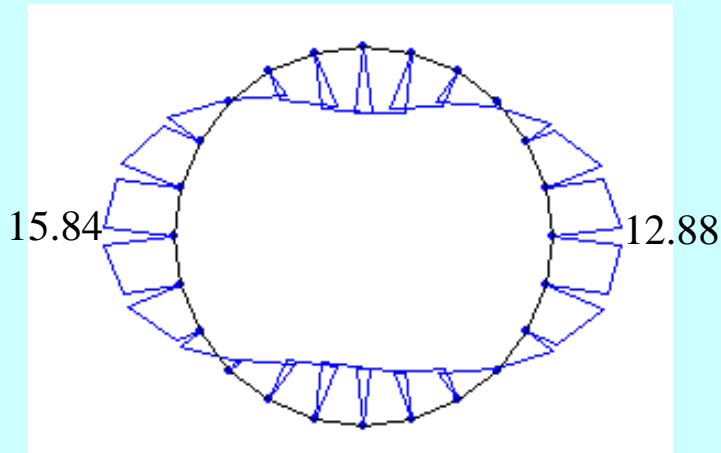
結果の検討:

基礎の傾斜: 1/2800

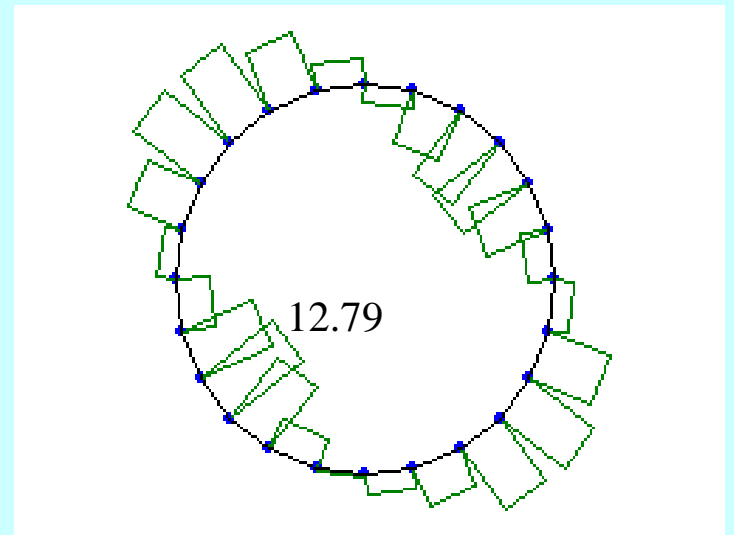
16.65kNm



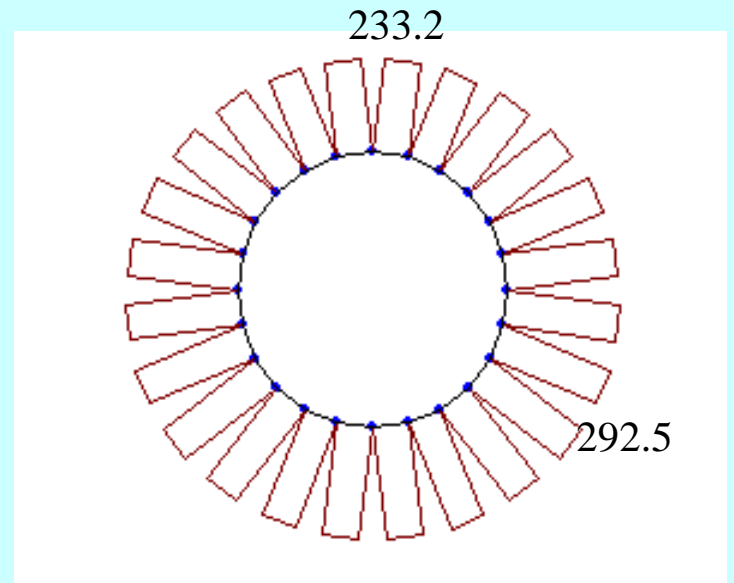
結果の検討:



曲げモーメント(単位:kN·m)



せん断力(単位:kN)



軸力(単位:kN)

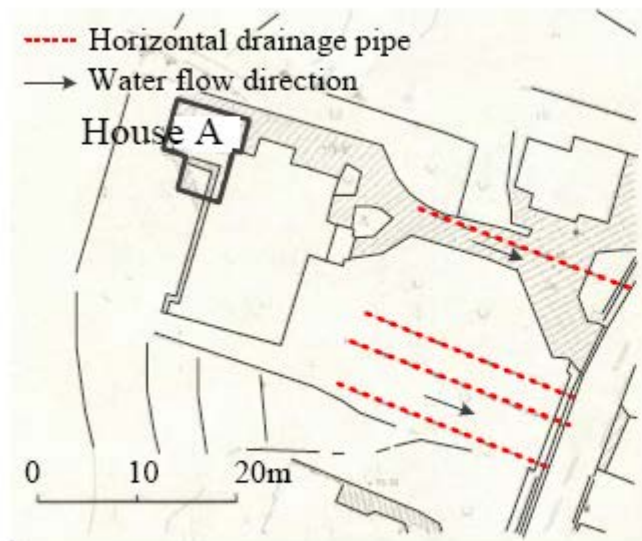
2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例



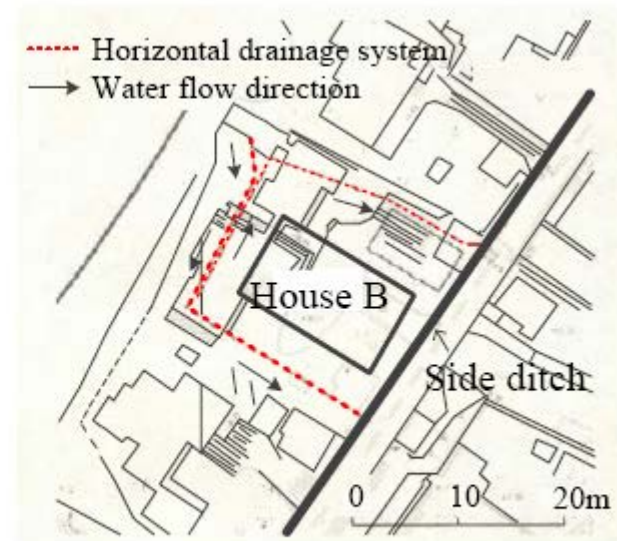
Houses	Damage condition	Countermeasures
家屋 A	全損	排水パイプ
家屋 B	軽微	鋼管杭 表層改良Soil-cement mixtures 排水ドレーン

家屋A: 水平変位130 cm, 鉛直沈下120 cm
 家屋B: 水平変位小さい、不等沈下12cm

2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例



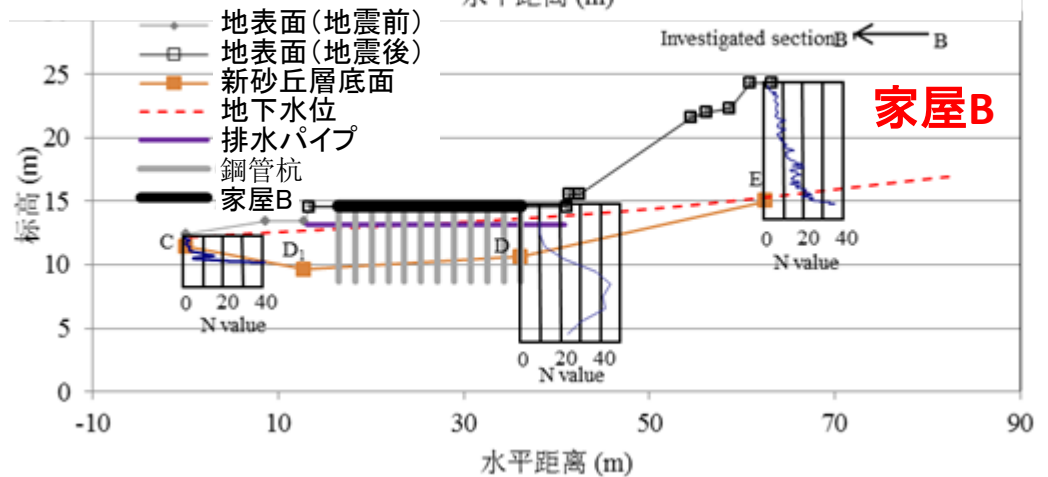
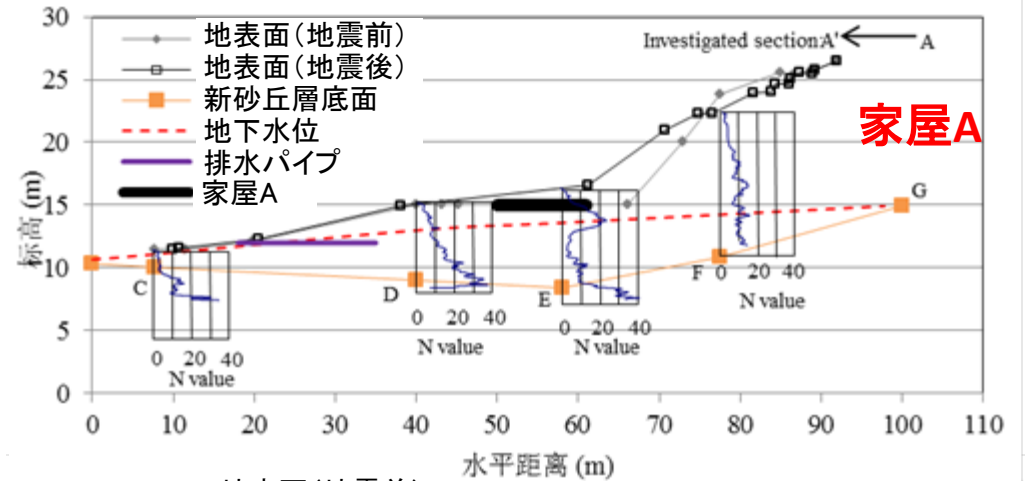
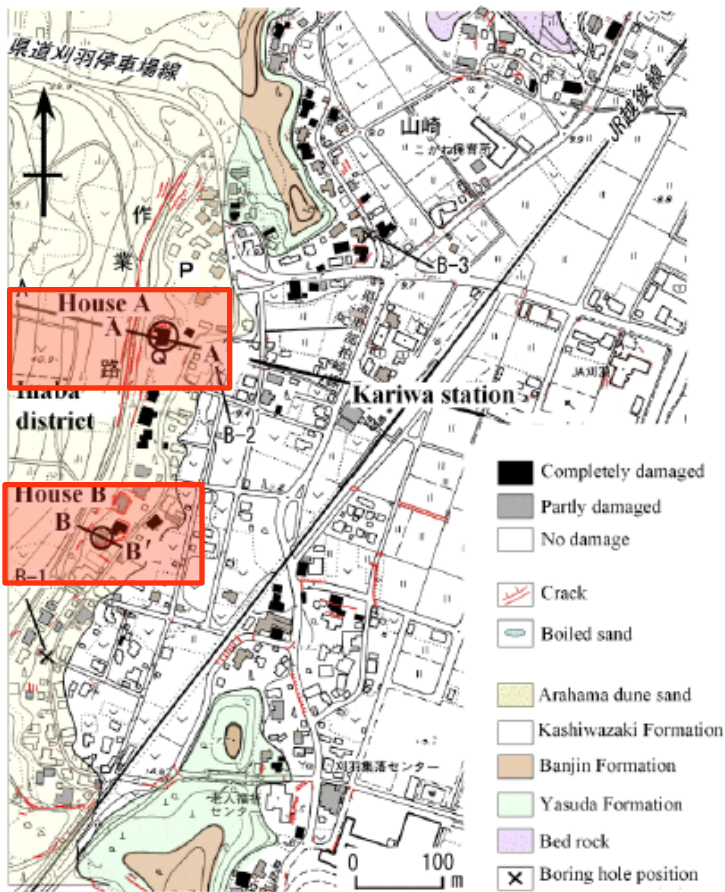
(a)



(b)

2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

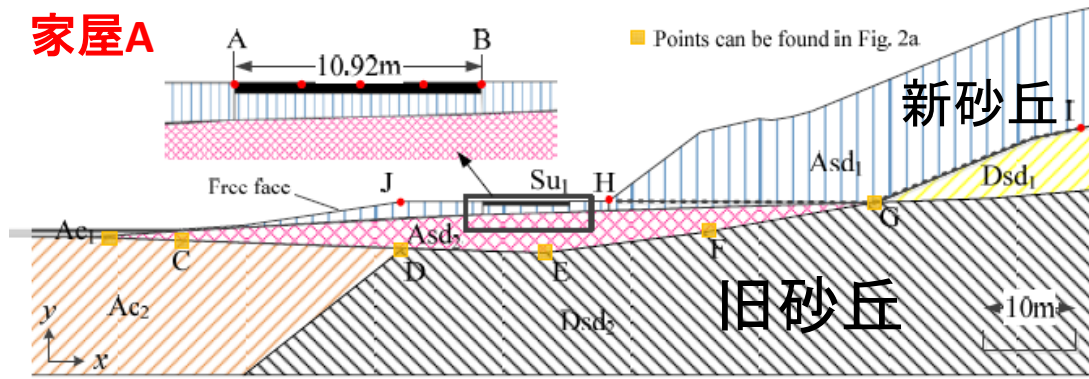
地震後の踏査



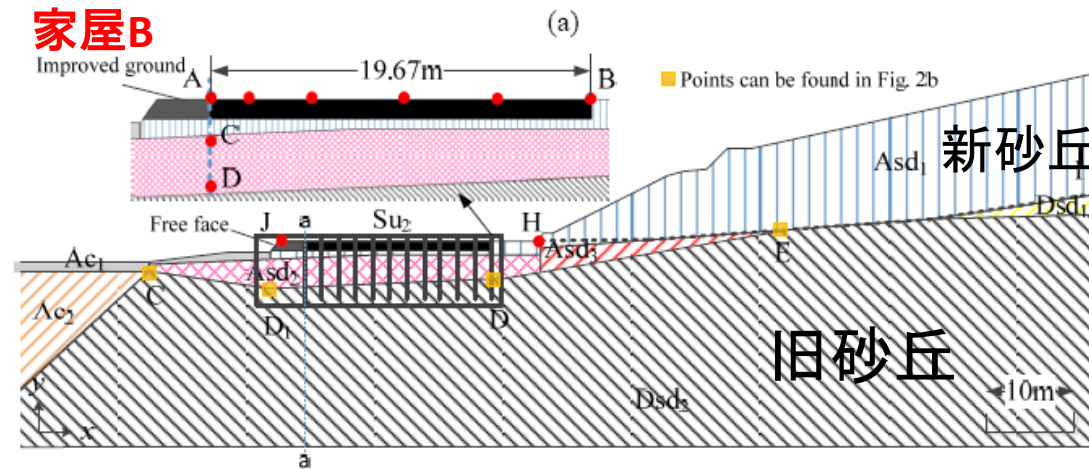
2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

FEMモデル

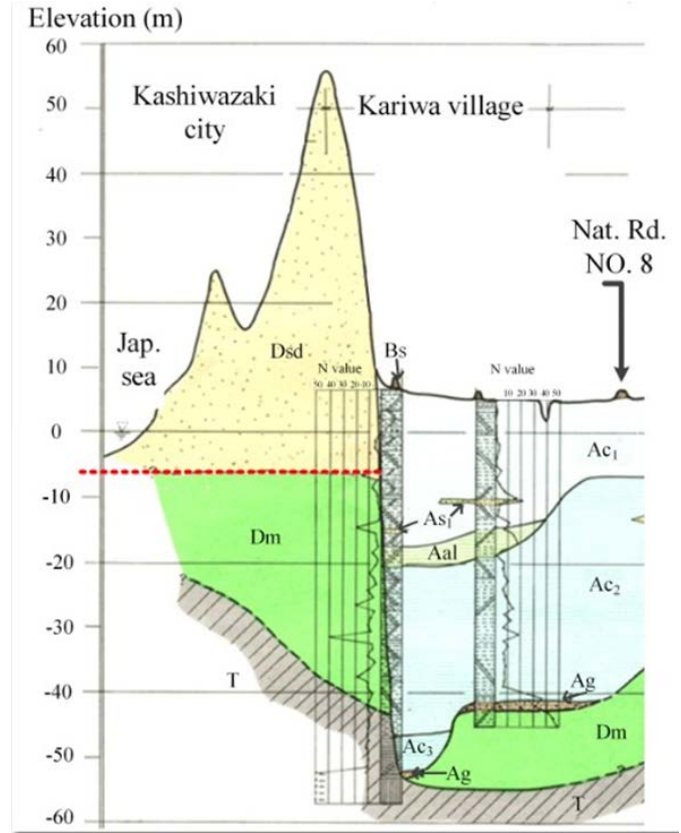
家屋A



家屋B



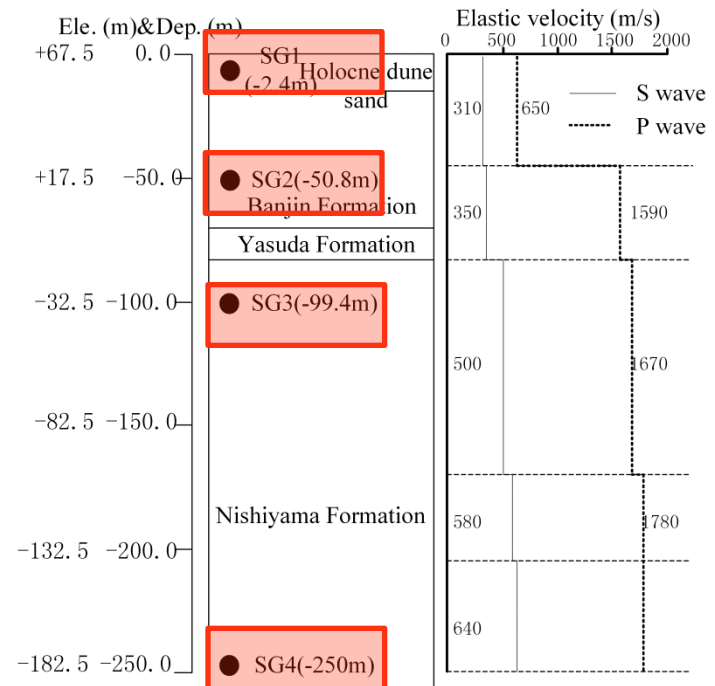
(b)



2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

地震波の選定

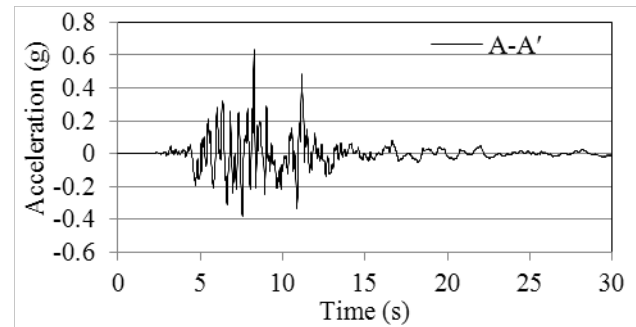
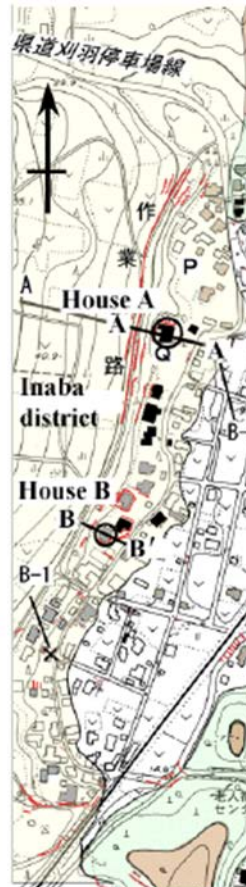
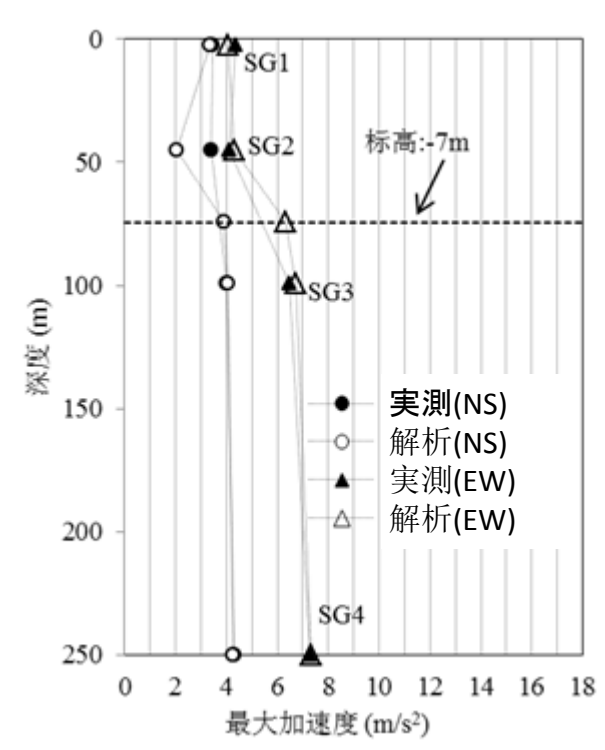
SHAKE 91



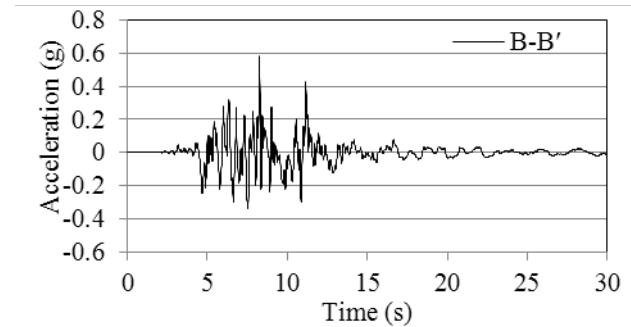
鉛直アレー

2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

入力地震波



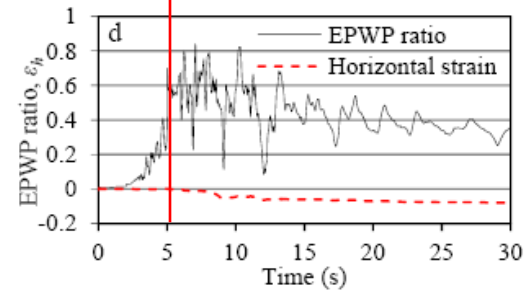
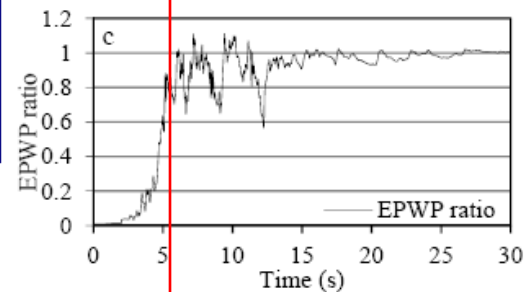
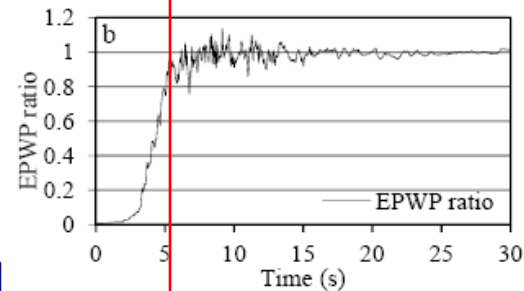
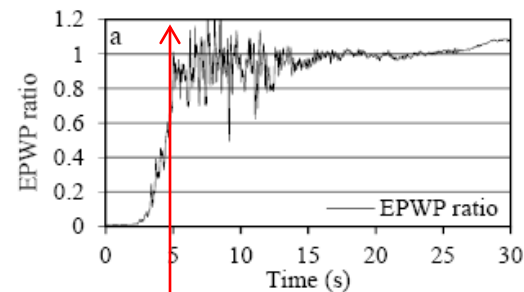
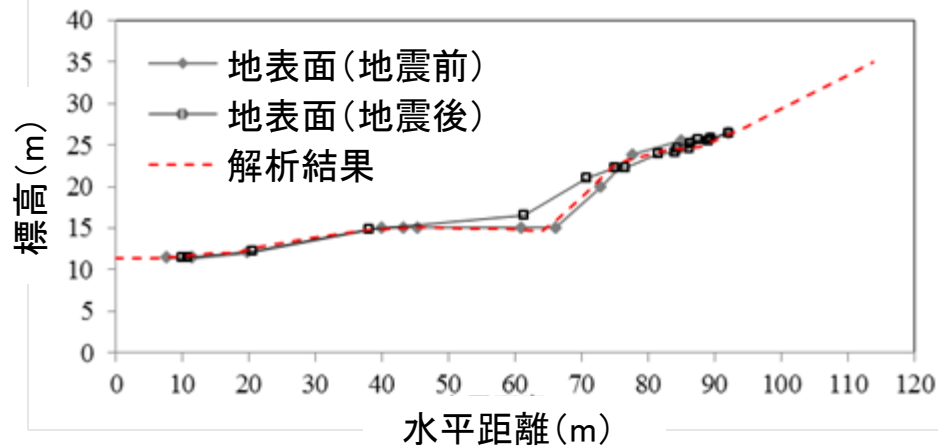
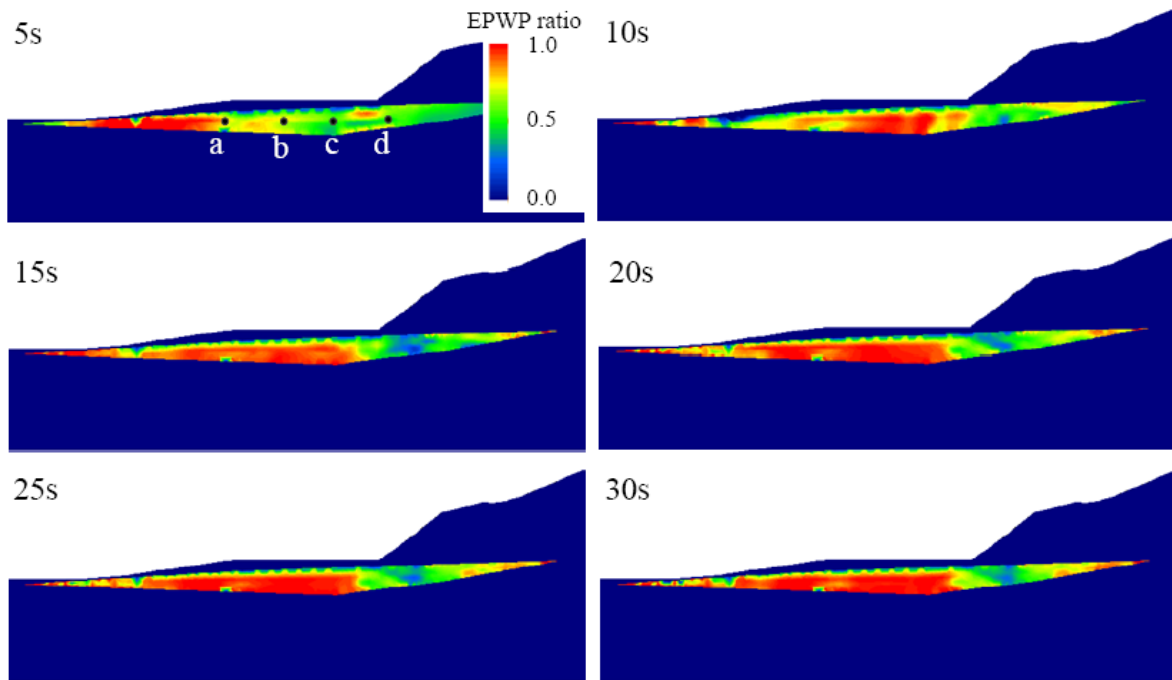
家屋 A



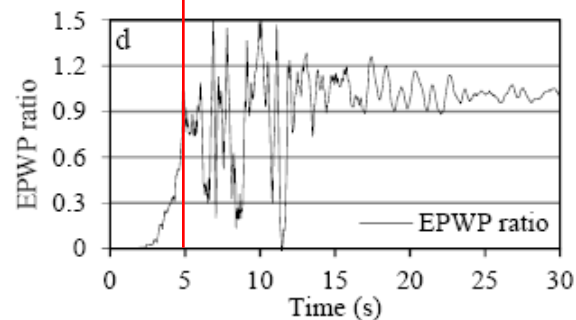
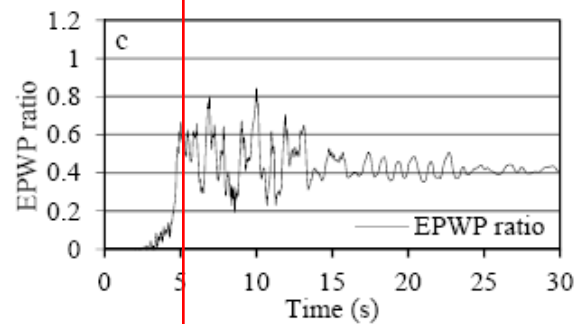
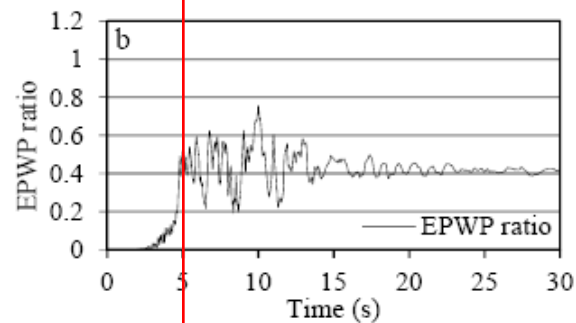
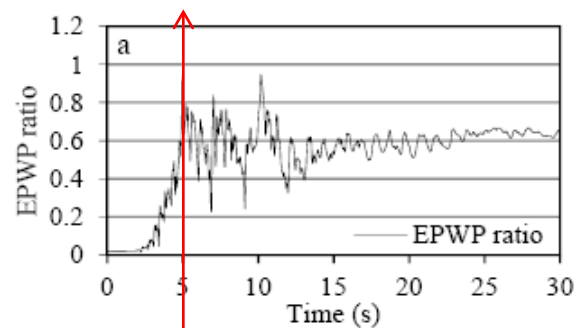
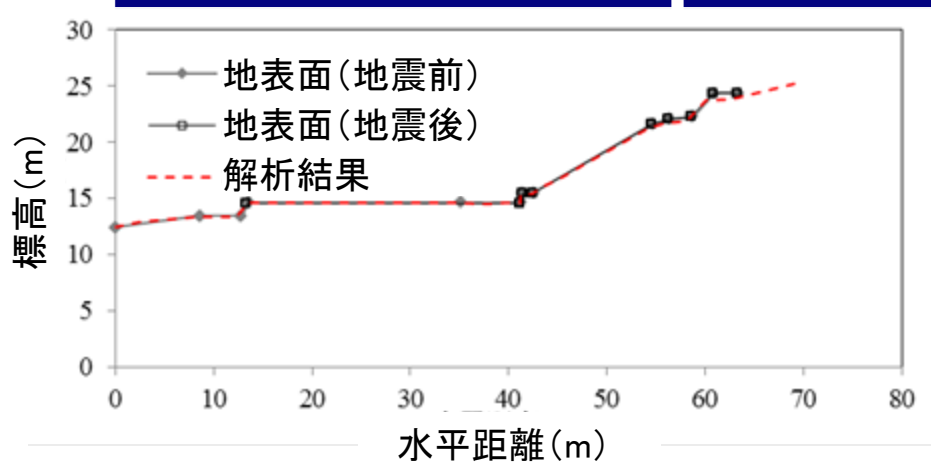
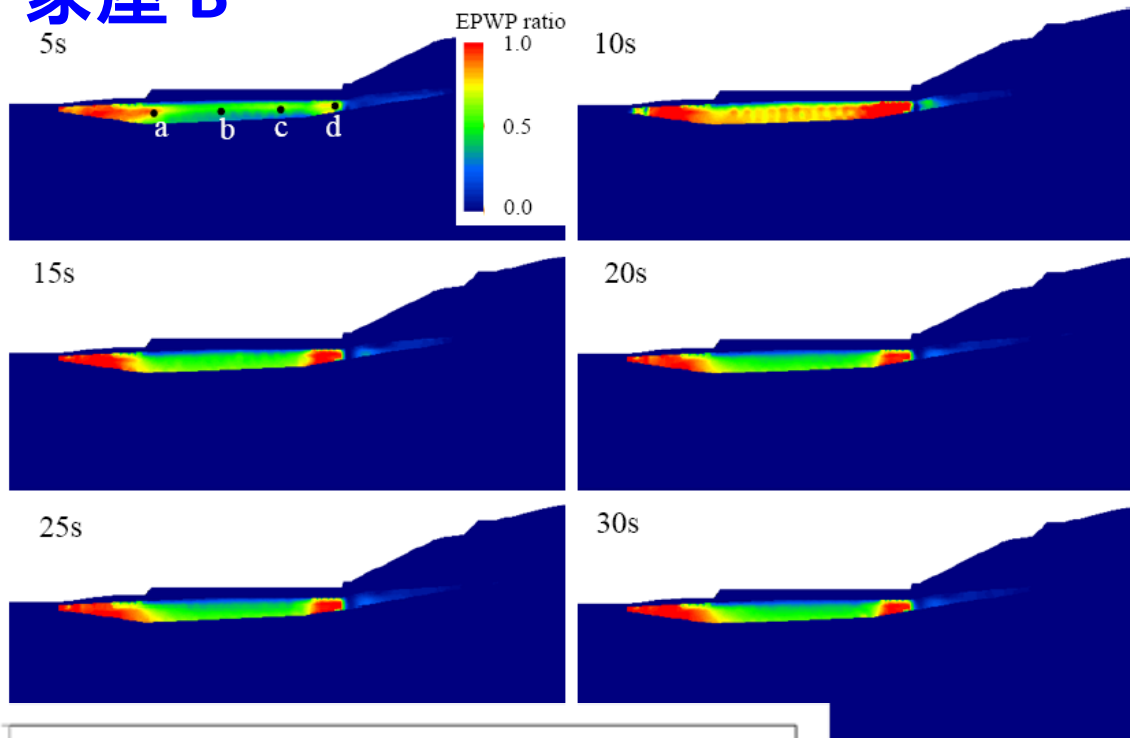
家屋 B

2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

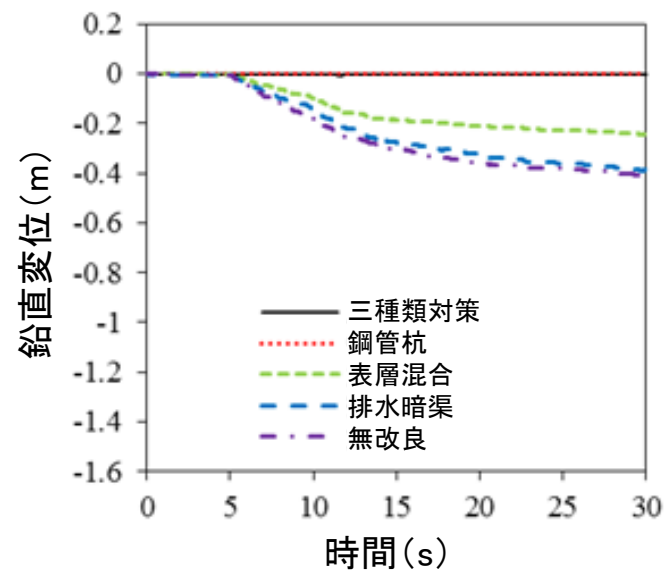
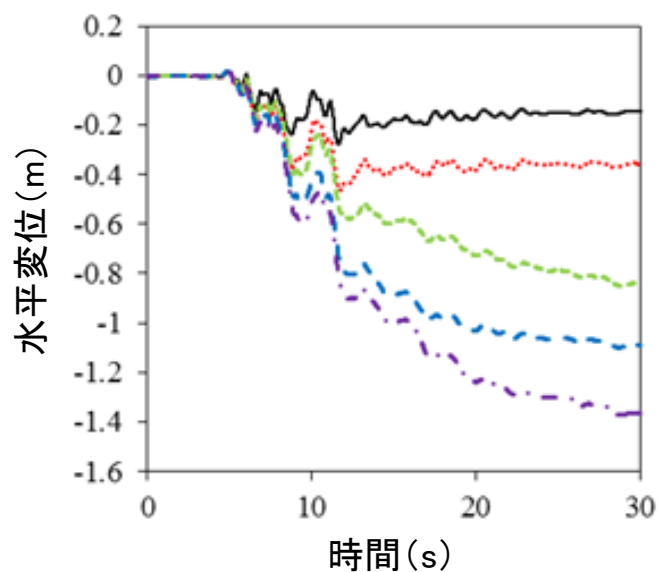
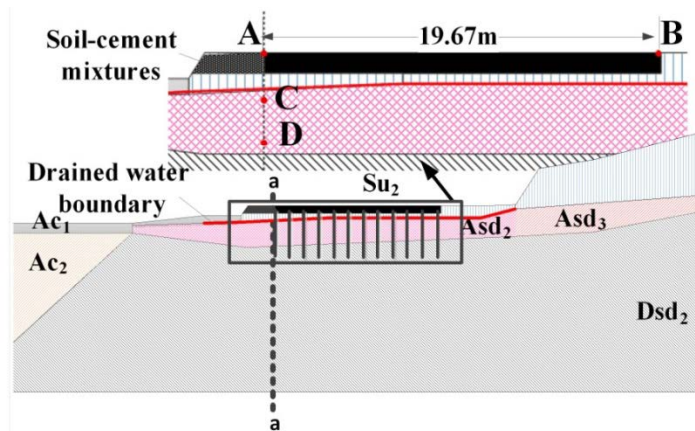
家屋 A



家屋 B

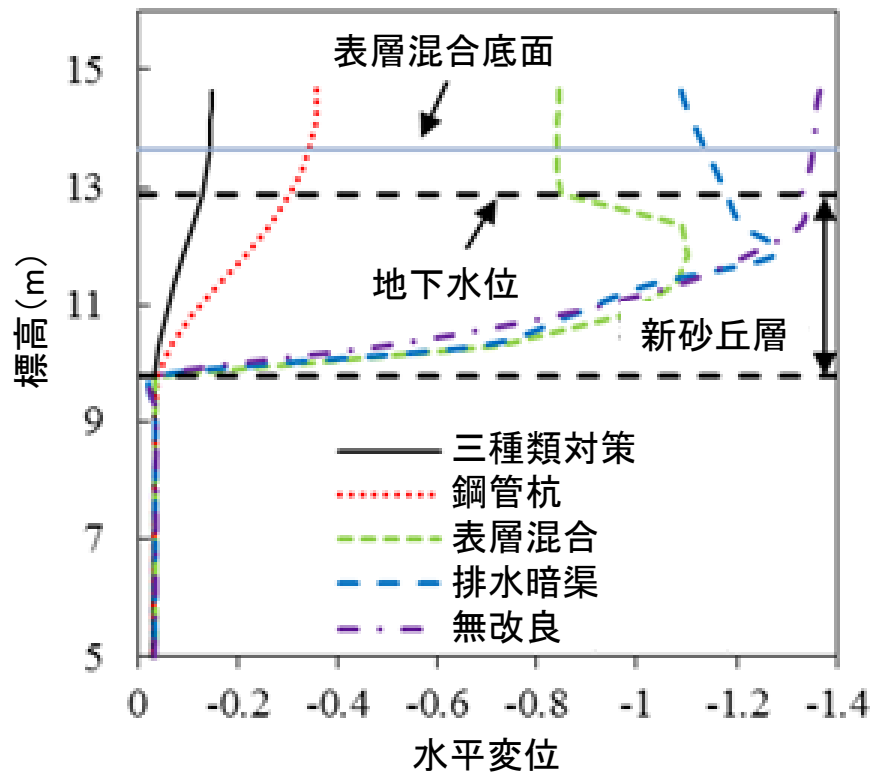
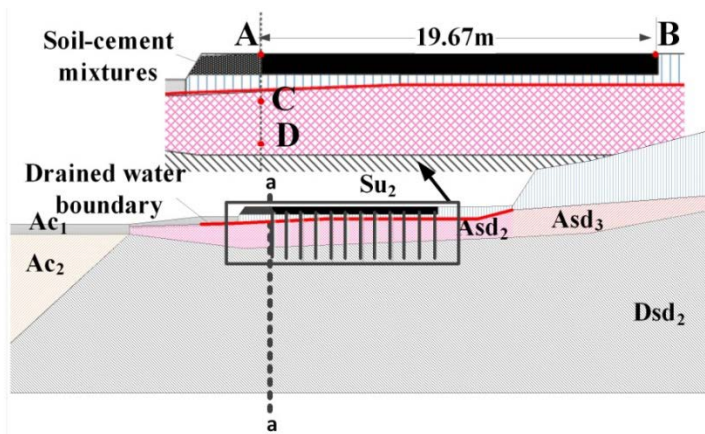


家屋Bにおける 各々の液状化 対策工の効果



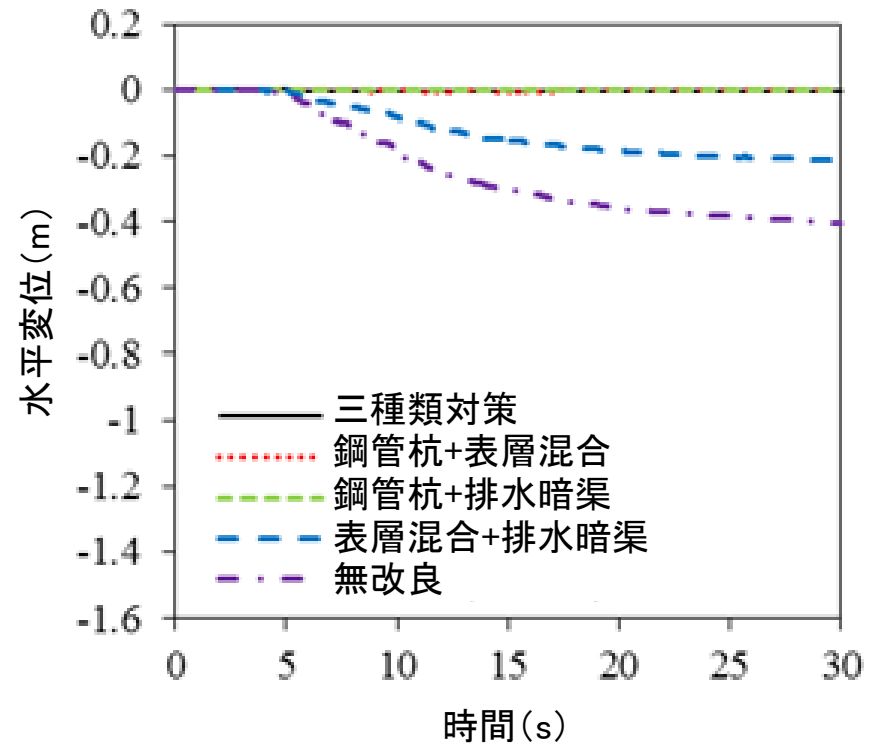
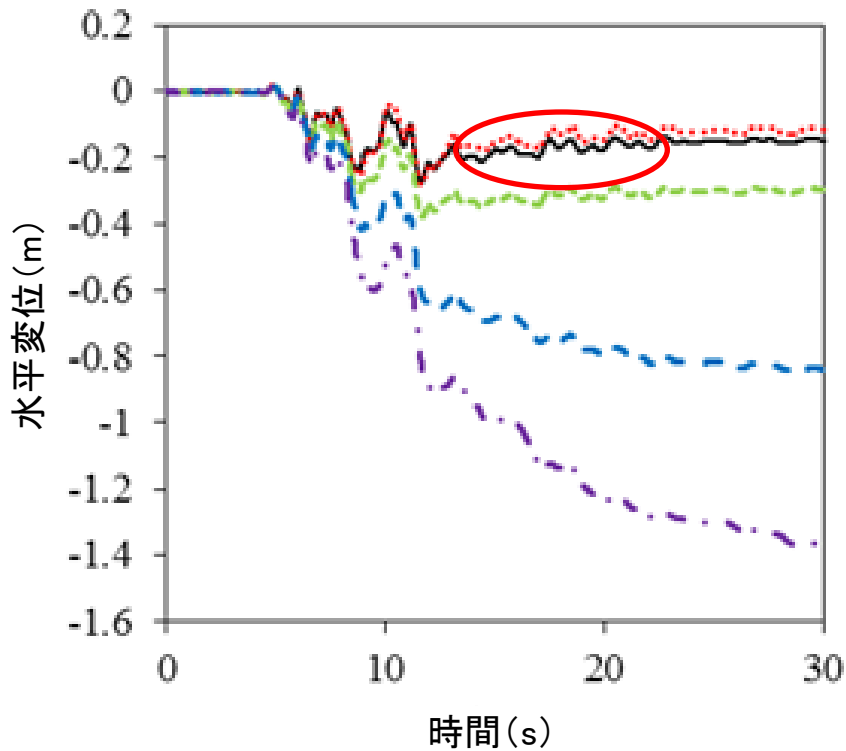
2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

家屋Bにおける各々の液状化対策工の効果

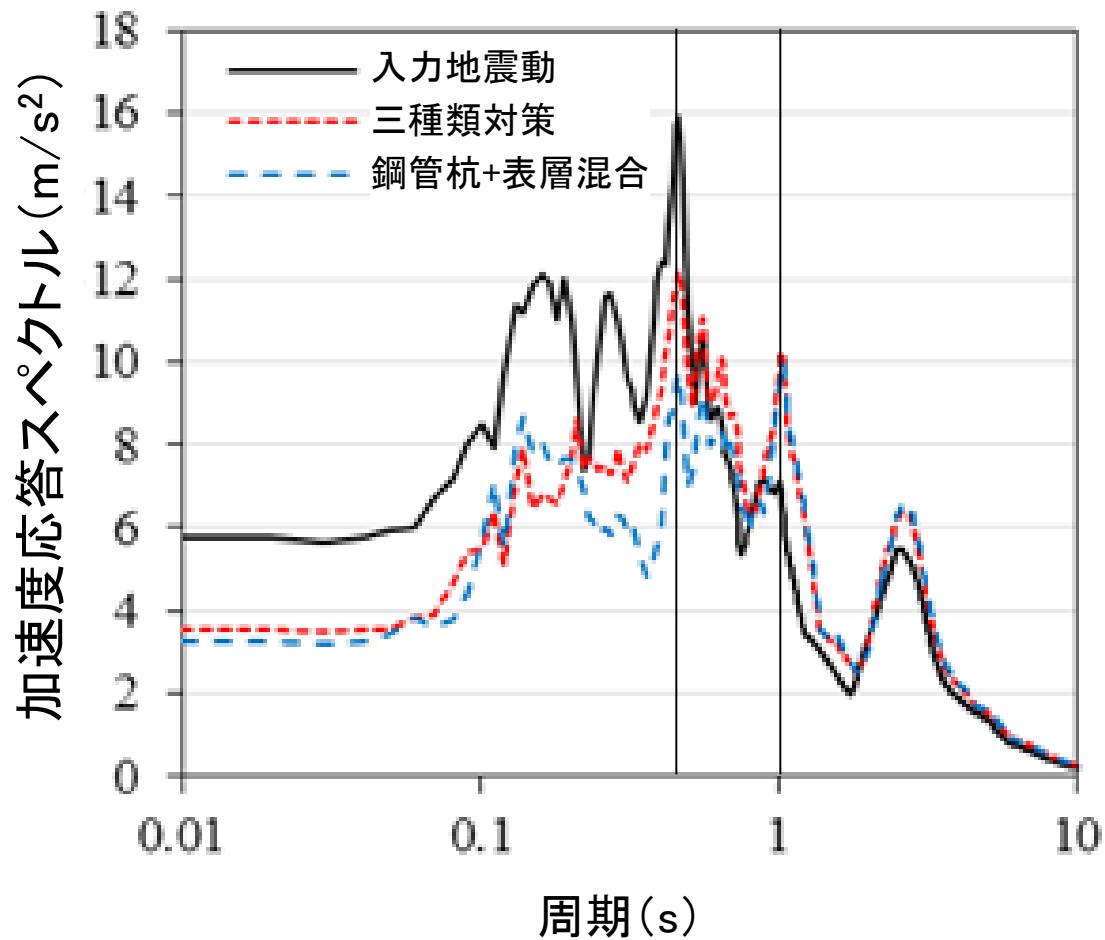


断面a-aの残留水平変位

家屋Bにおける2種類の液状化対策工を組み合わせたときの効果



家屋Bにおける液状化対策工のスペクトル に与える影響



結論

- 比較した液状化対策工の中に、杭基礎の液状化対策効果は最も高い。また、表層改良や排水ドレーンは一定の深さに達しなければ、液状化の対策効果は限定的である。
- FEM解析により、最適な液状化対策工の選定は可能であることを示唆している。

ご静聴いただき
ありがとうございました。