



建設ICTマスター養成講座
基礎養成編 選択分野別ソフトウェア実習

地盤工学における 有限要素法解析

従来の地盤構造物の設計法

- 安全率にもとづく安定性評価
- 震度法にもとづく耐震設計

近年取り入れられつつある設計法

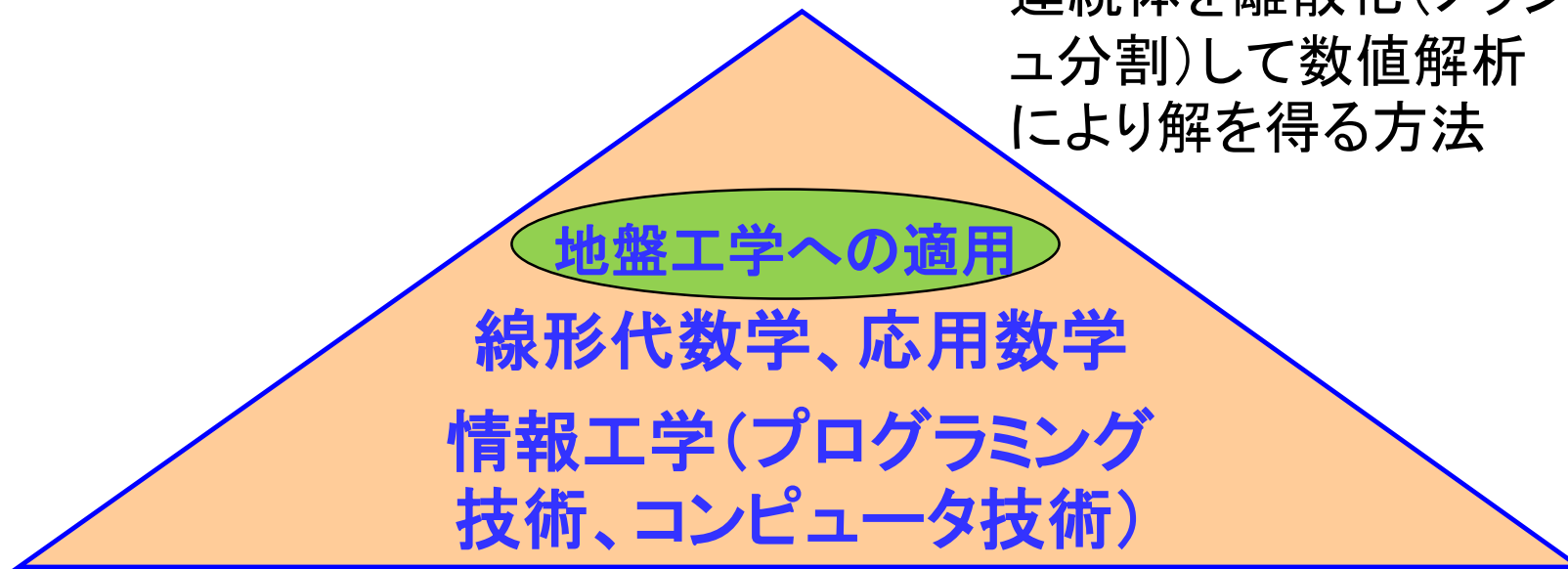
1. 土質調査結果等によるデータ収集
2. 有限要素法に基づく変形解析
3. 変位量、断面照査等による評価
4. 大規模地震に対する性能照査

解析方法

解析方法 項目	極限平衡法	極限定理		弾性解析	弾性解析、弾塑性解析	
		下界定理	上界定理		理論解	数値解析
釣合い	全体 ○ 局所 ×	○	×	○	○	○
適合条件	×	×	○	○	○	○
境界条件	力のみ	力のみ	変位のみ	○	○	○
構成則	破壊条件	剛塑性	剛塑性	弾性	弾塑性	任意
崩壊情報	○	○		×	○	○
崩壊前の 情報	×	×	×	○	○	○
方法	分割法 くさび法			多い	限られる	FEM
コメント	簡単 安全側又は 非安全側	安全側	非安全側	理論解が 得られる	複雑	高い計算能力をもつPC

有限要素法(Finite Element Method) とは

連続体を離散化(メッシュ分割)して数値解析により解を得る方法

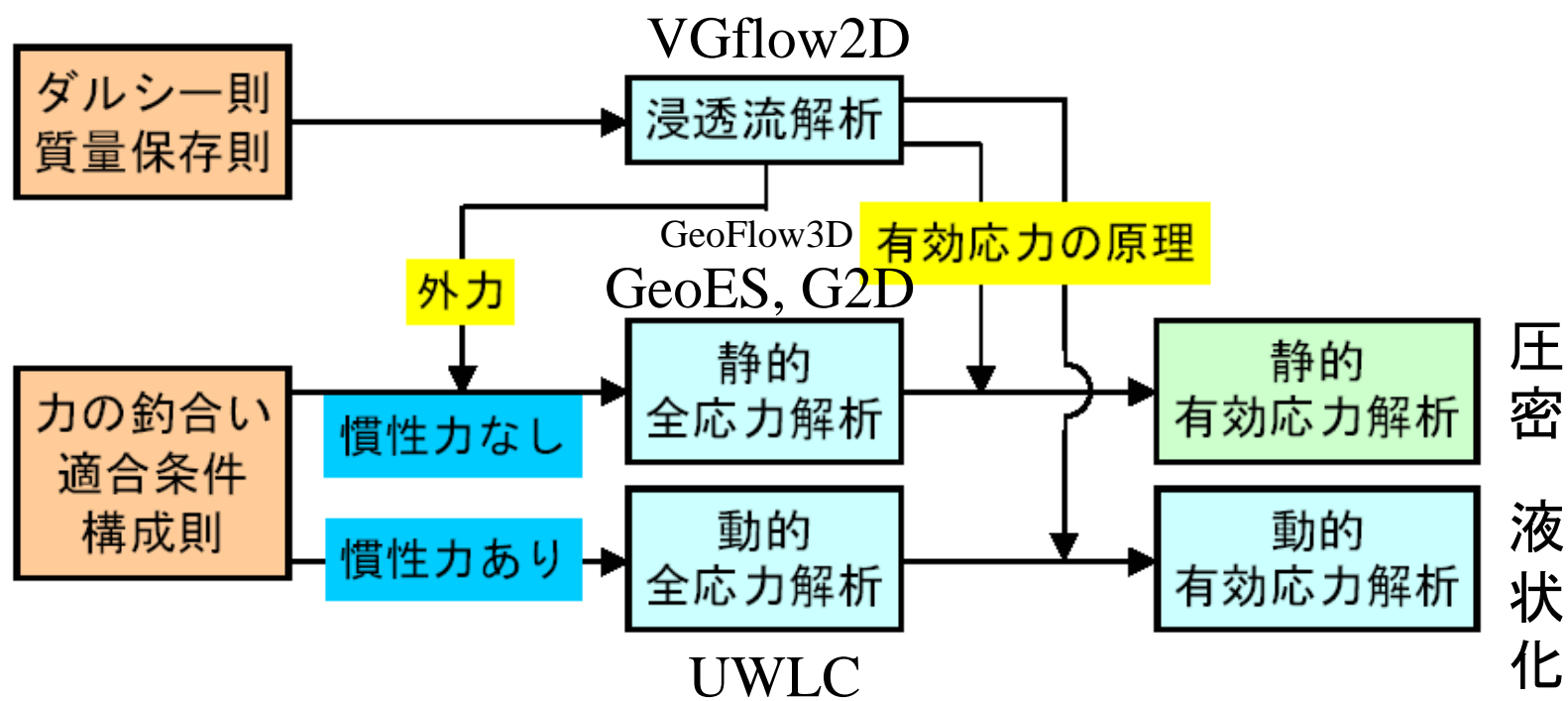


地盤工学の対象構造物＝離散化＝数値解析＝FEM



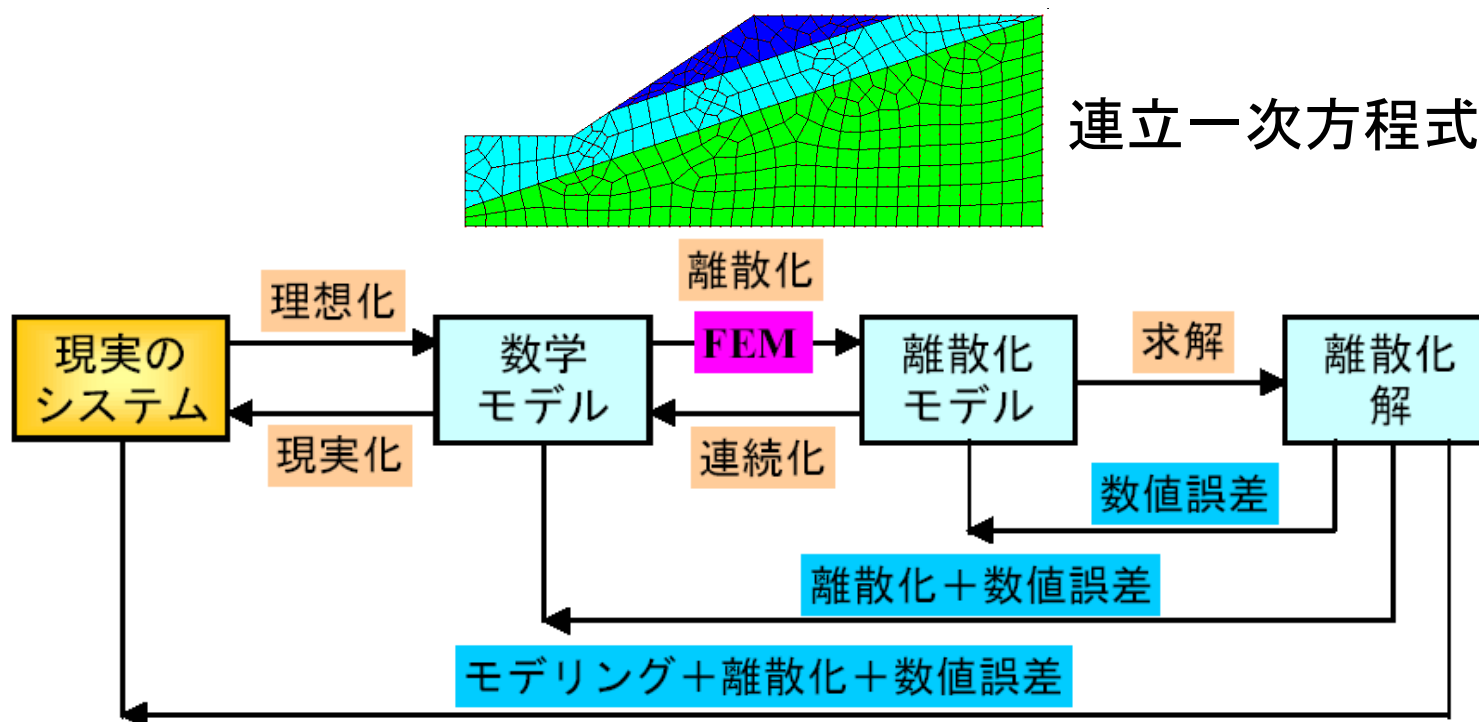
従来の計算手法では求められなかった
変形量、応力、ひずみを得られる

FEM地盤解析の体系



書籍:P.12-13

数値解析の流れ



モデリング: モデル形状、境界条件、材料物性値の設定

数値誤差: 丸め誤差、繰返し計算の打ち切り誤差

離散化誤差: メッシュ分割は細かいほど精度が高い

書籍: P.16-18

内容：

- 有限要素解析の適用手順

目的の明確化（変位量、断面照査）

対象構造物のモデル化（解析範囲、要素の種類等）

数値解析の実行（誤差、収束判定の確認）

解析結果の評価（物理現象としての妥当性、地盤工学の知見に基づく判断、既往事例の参照）

- 簡単な事例による説明

トンネル掘削の事例

書籍：主に第3章
をご参照

モデリング

- 目的の明確化、モデル形状
- 力学モデルの選択、解析手法の検討
平面ひずみ問題、軸対称問題、液状化解析
- 材料の構成式
弾性・弾塑性・液状化材料
- 初期条件の設定
- ステージの設定
- 解析領域・境界条件

全応力解析の適用範囲:

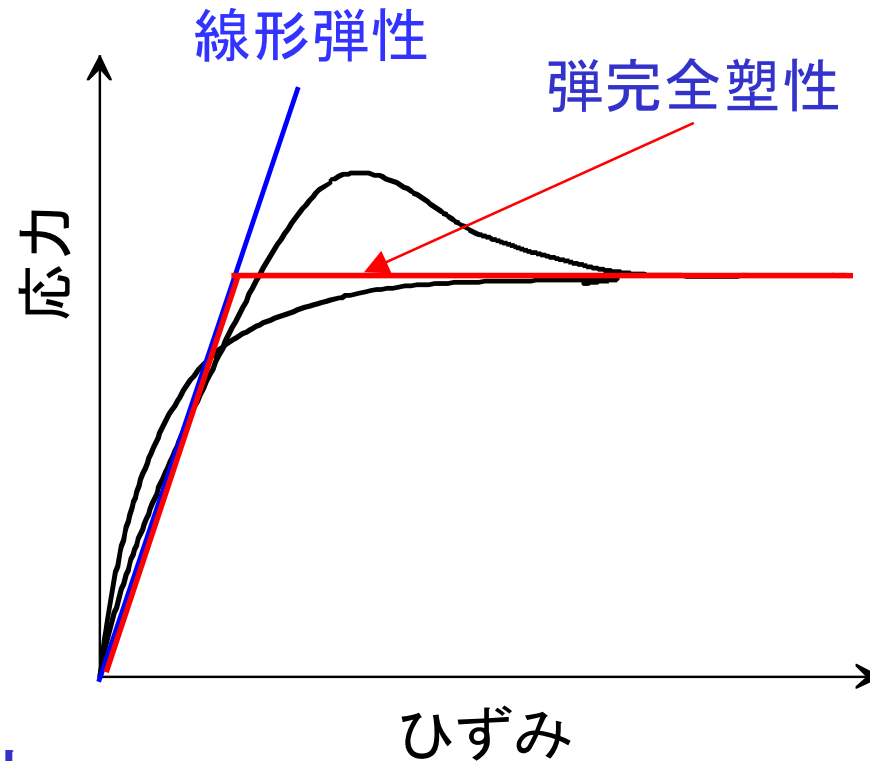
本対象プログラム GeoES, G2D, G3D

- 全応力 σ は有効応力 $\sigma' = \sigma - u$ と等しい。
- 載荷の速度が遅く、載荷により生じる過剰間隙水圧が十分消散できる。
- 土中の水圧の変化や分布を考えずに、土の変形係数やせん断強度を決める。
- 水位分布が不明で、明確に二相(水と土)にする範囲がわからない場合に適用

水圧は外力として入力できる。

構成式を選択

- 線形弾性
- 非線形弾性
- 弾完全塑性
- 一般的な弾塑性



◇ 構造物の重要性

◇ 地盤内の応力・ひずみレベル

◇ 問題の種類（土圧・支持力・斜面安定は弾完全塑性）

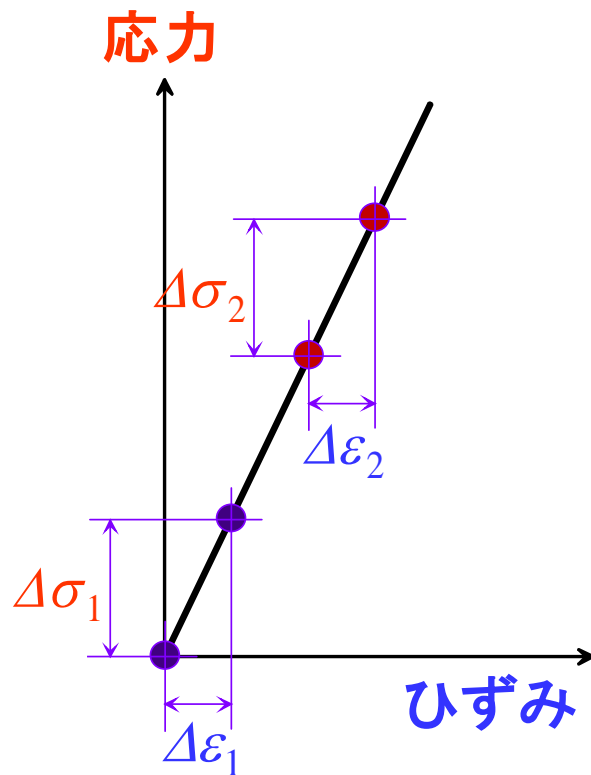
適切な初期条件の設定

正しい初期応力の必要性

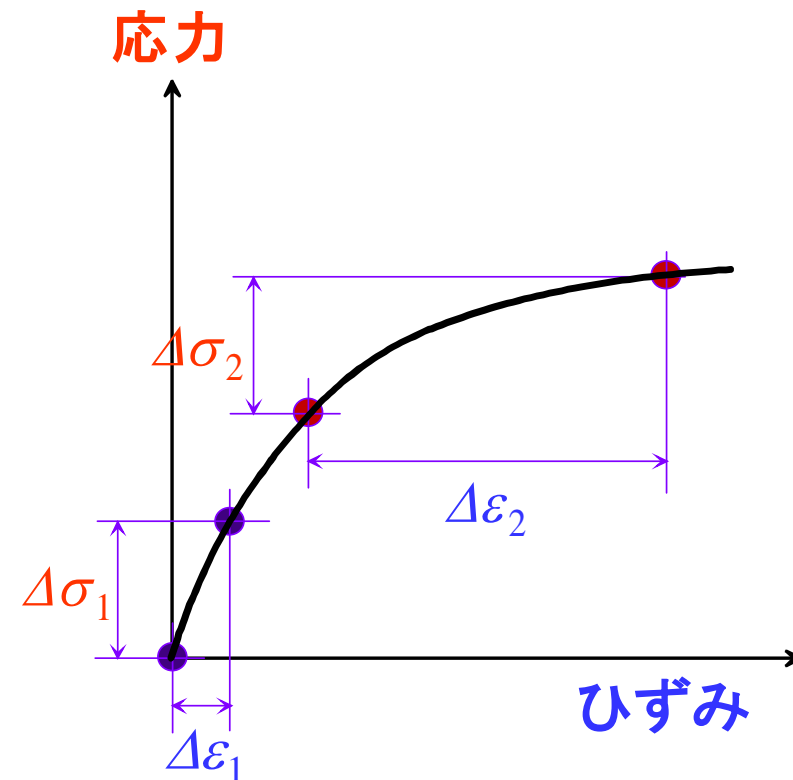
- 非線形解析には、重ね合わせの原理を適用することができない。
- 地盤材料の変形特性やせん断強度は応力に依存する。
- 掘削による解放荷重は、掘削直前ステージの地盤応力(初期応力)を用いて計算する。

適切な初期条件の設定

正しい初期応力の必要性



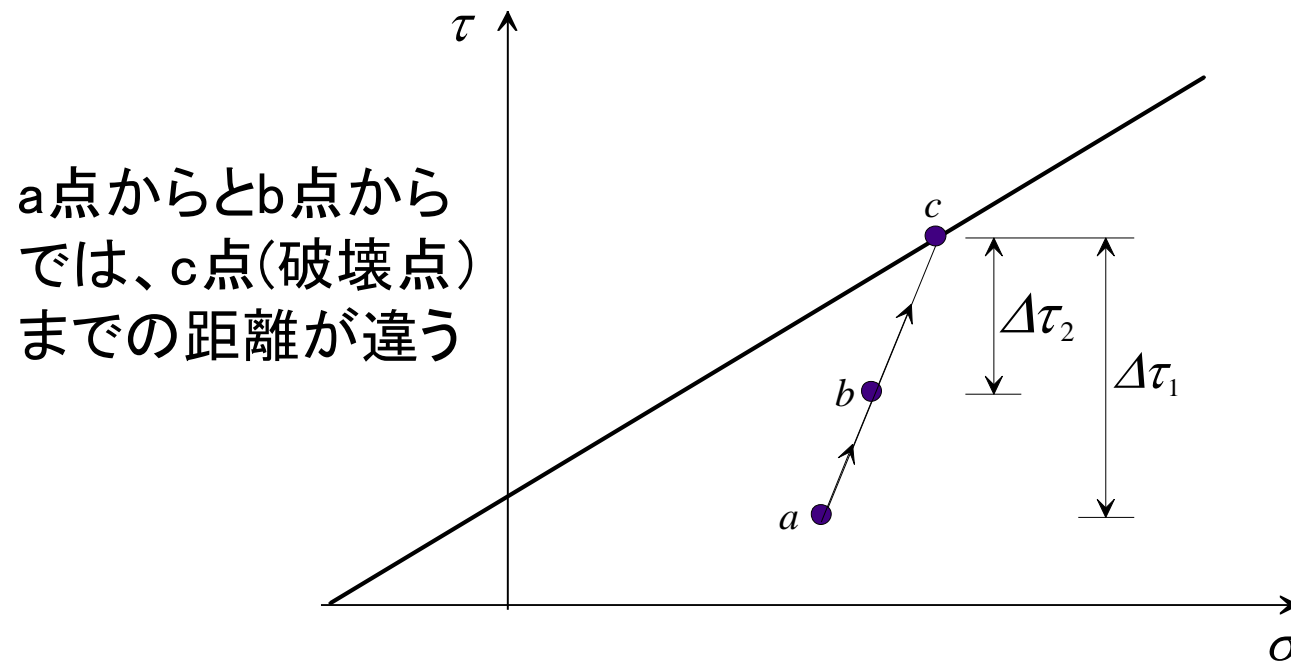
弾性: $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2$
 $\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_2$



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

適切な初期条件の設定

正しい初期応力の必要性



同じ応力経路に沿って载荷するとき、破壊に至るまでの増加荷重は、初期応力の大きさによって異なる。

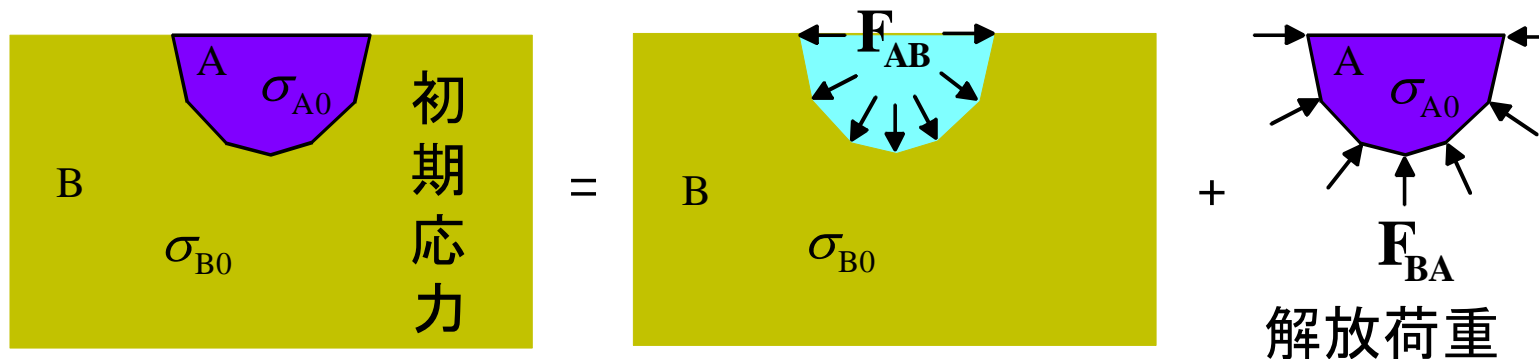
適切な初期条件の設定

正しい初期応力の必要性

- 掘削解析では、掘削による解放荷重は掘削直前ステージの地盤応力（初期応力）を用いて計算する。

掘削による解放荷重：

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



初期応力解析

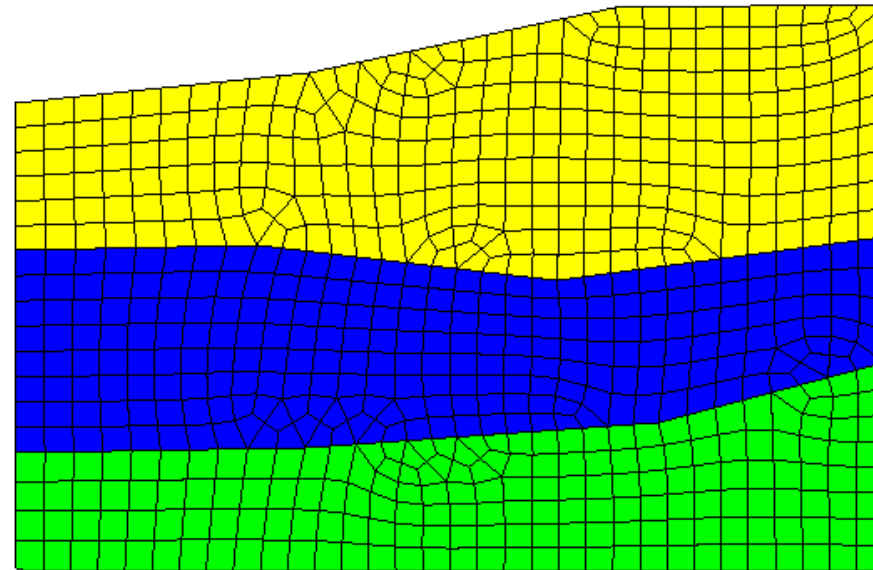
自重計算

自重を地盤にかけ、計算した自重による応力を初期応力とする。

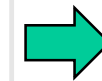
境界条件として:

左右:鉛直ローラー

底面:固定



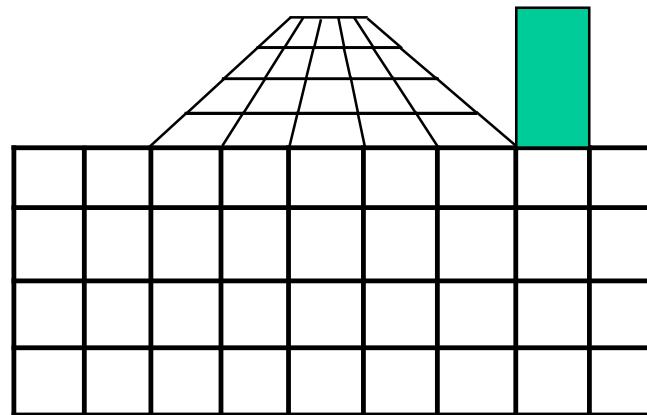
弾塑性解析の場合、計算がなかなか収束しない原因の多くは、傾斜している地盤の安全率が1以下になっていることである。



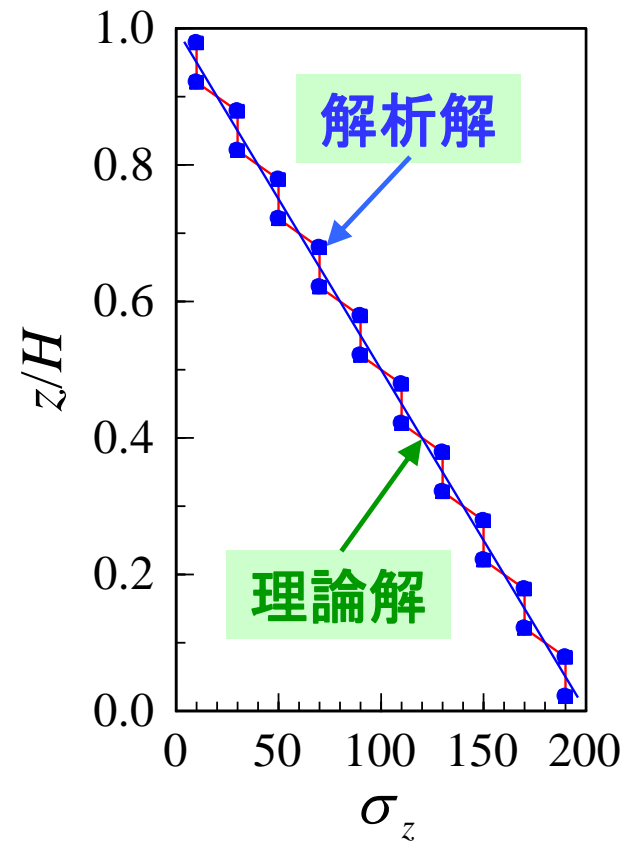
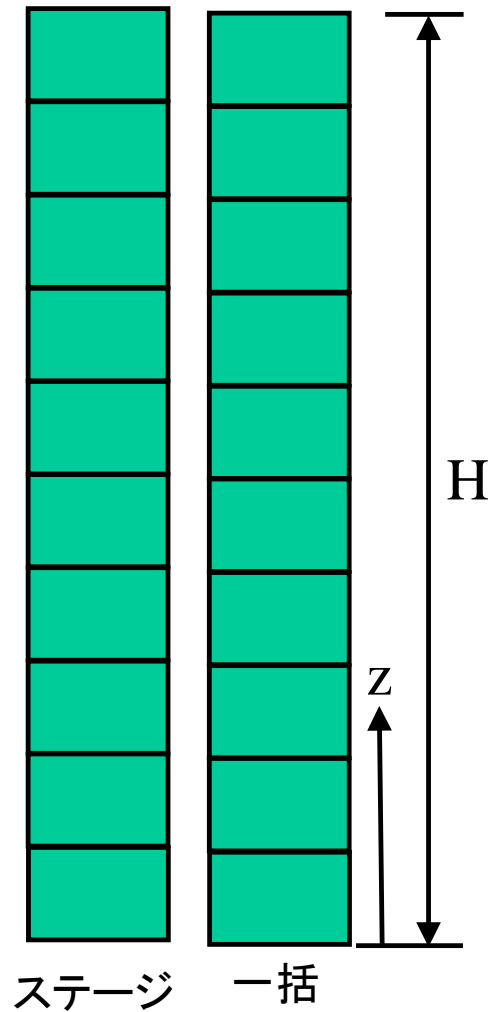
初期応力解析を線形解析とすることも

マルチステージ解析

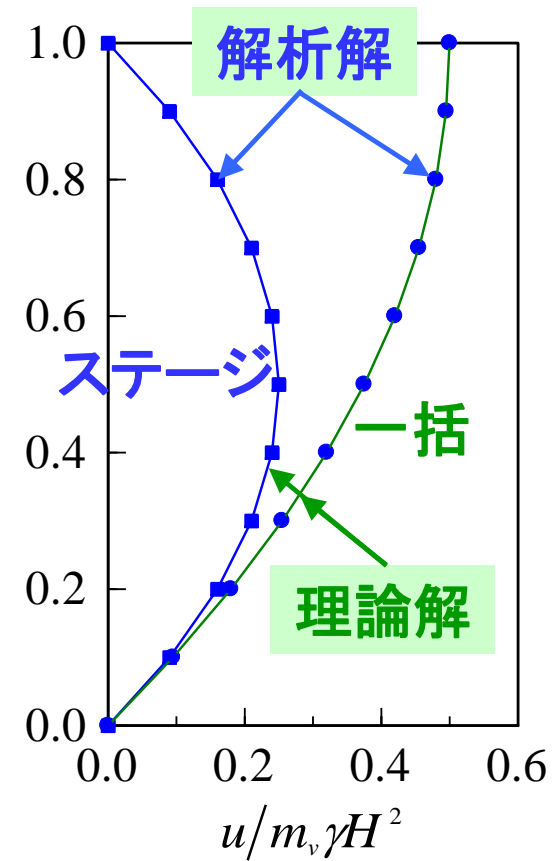
盛土による道路・鉄道・河川堤防の施工、擁壁背面の埋め戻し、土留め掘削、トンネル掘削等のような土工が伴う問題では、地盤領域が変化するために、施工ステップを追ってマルチステージ解析が必要となる。



マルチステージ解析



鉛直応力

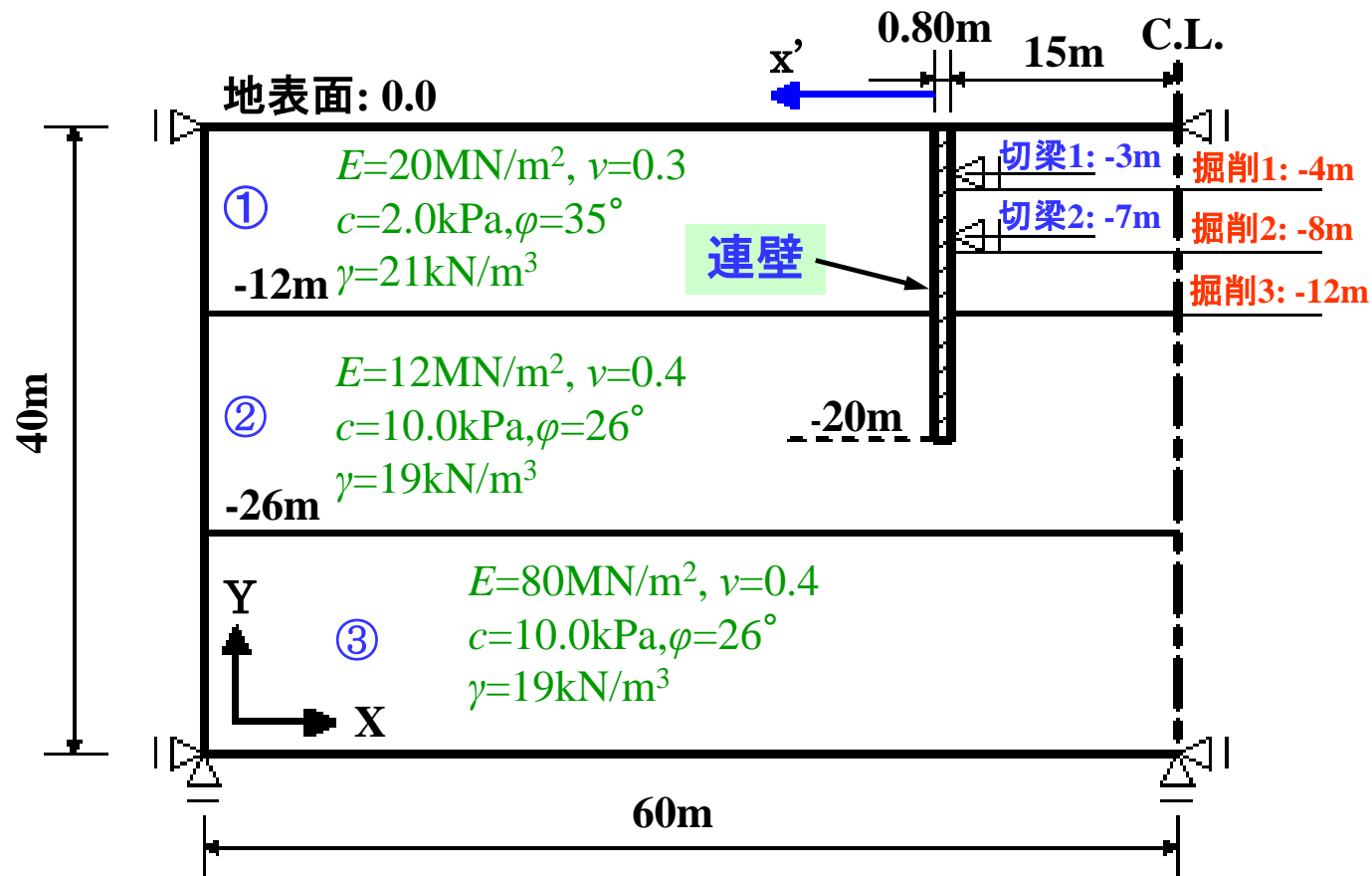


無次元沈下量

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

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

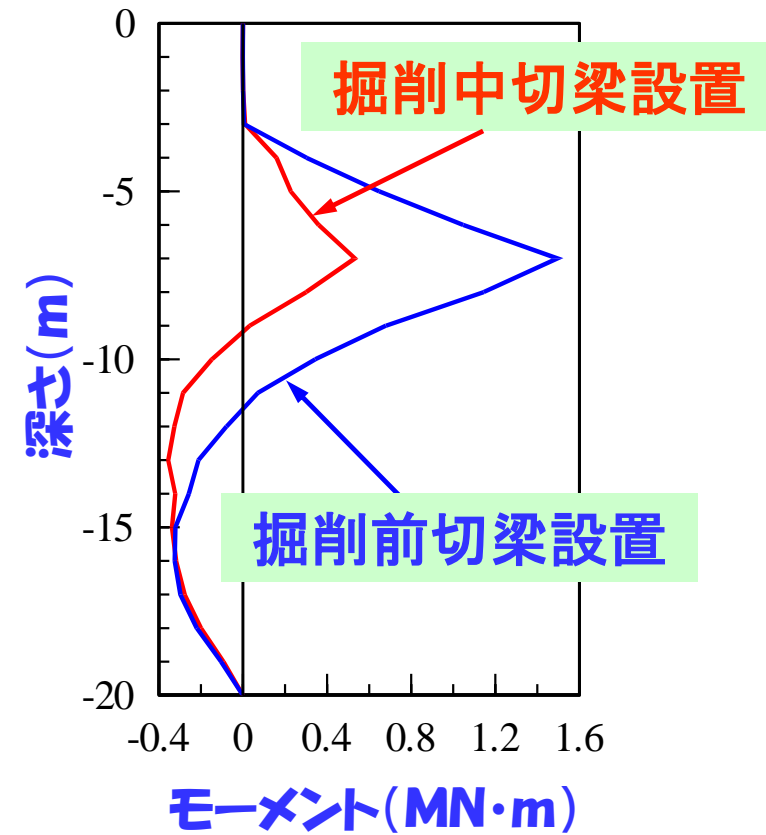
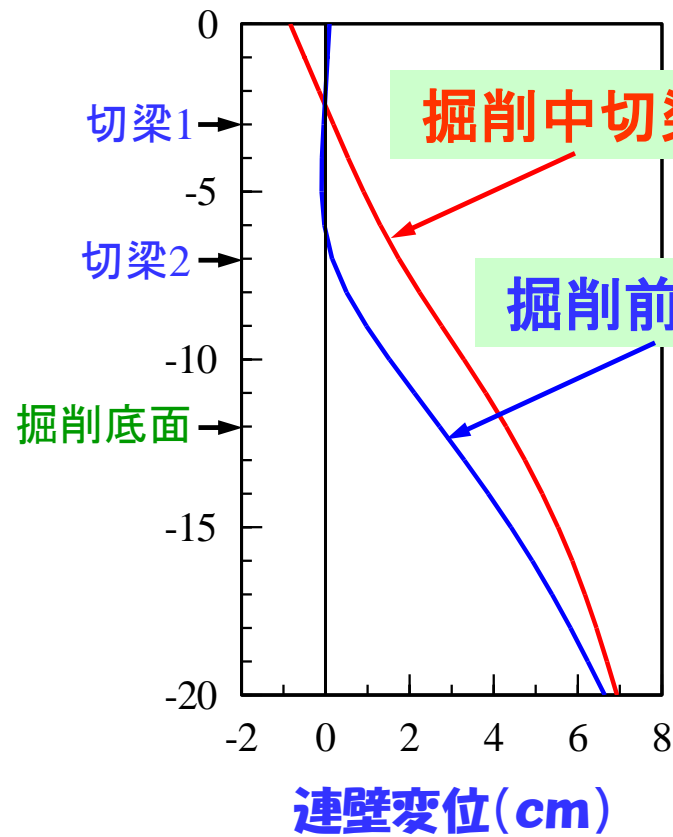
切梁2

掘削1

掘削2

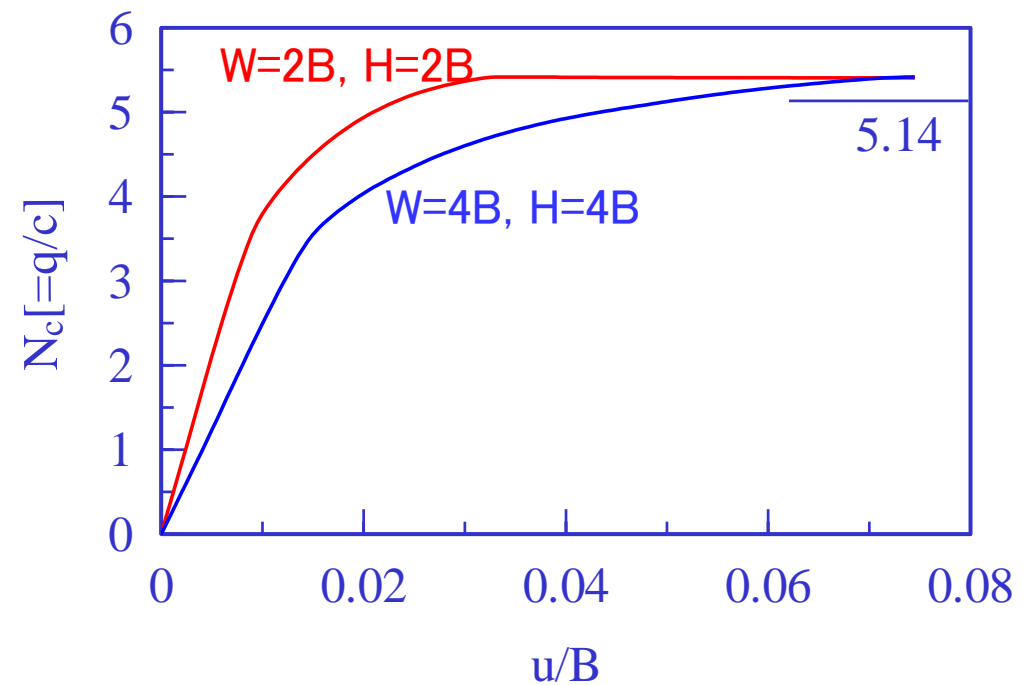
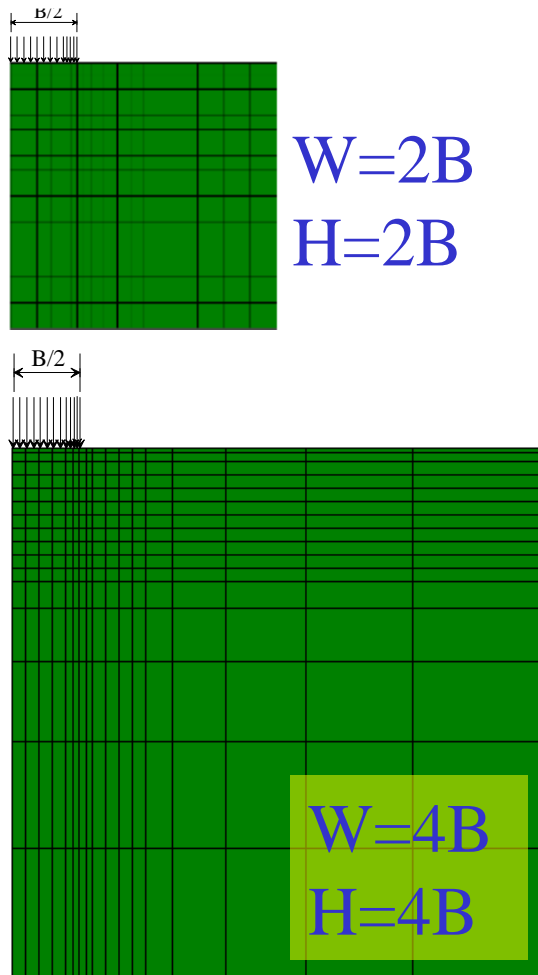
掘削3

土留め掘削のマルチステージ解析:



解析領域

対称性を利用



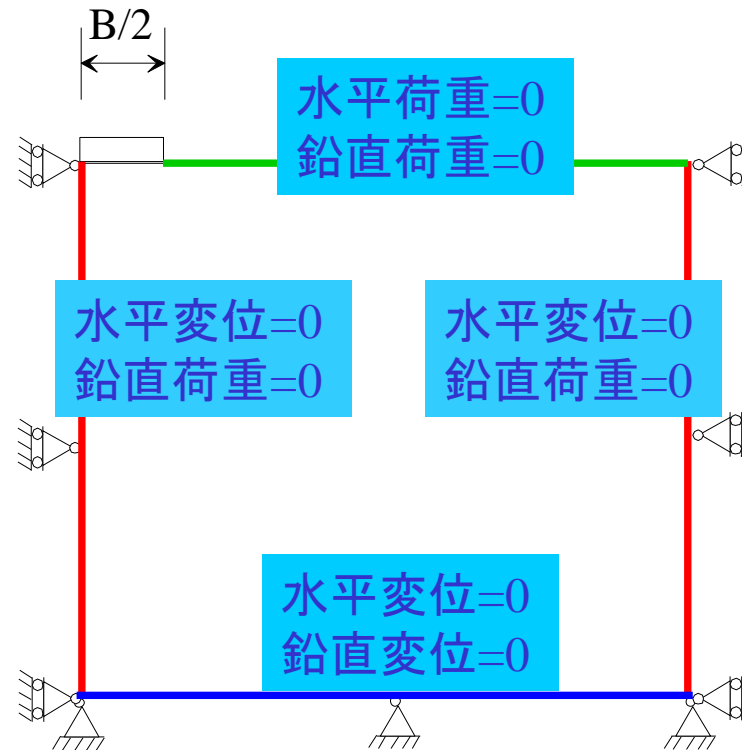
粘土地盤上の剛な帯状基礎の
荷重と変位の関係

境界条件

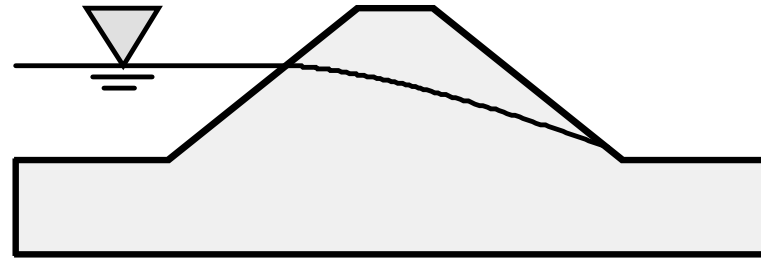
境界条件の種類:

- 力
- 変位

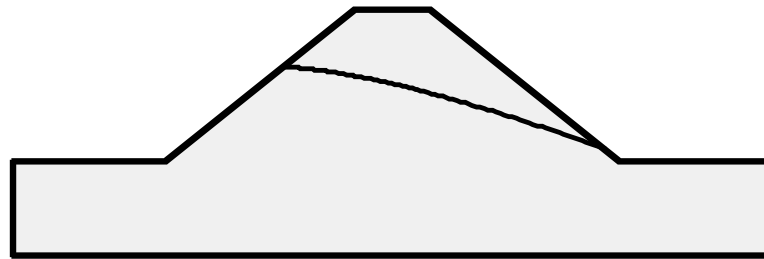
水平変位=0
(水平変位が固定)
鉛直荷重=0
(鉛直変位が自由)



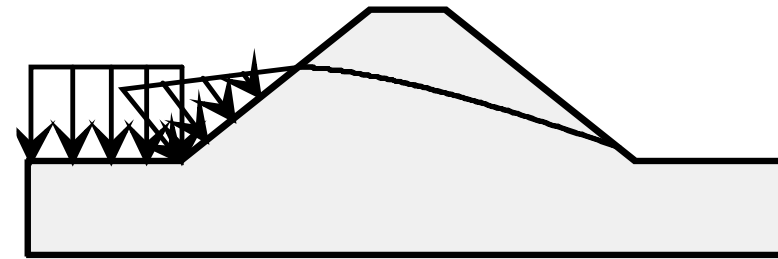
全応力(非連成)解析での水圧の考え方



水浸斜面



体積力法(浮力+浸透力)



応力法

$$\text{体積力法による荷重(節点力)} = \text{応力法による荷重} + \text{表面水圧による荷重}$$

蔡ら：第41回地盤工学会研究発表会、2006年。

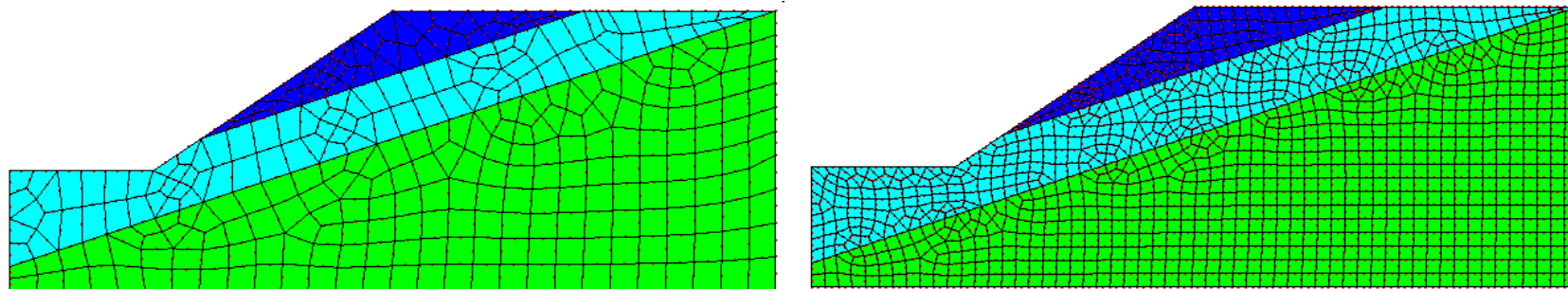
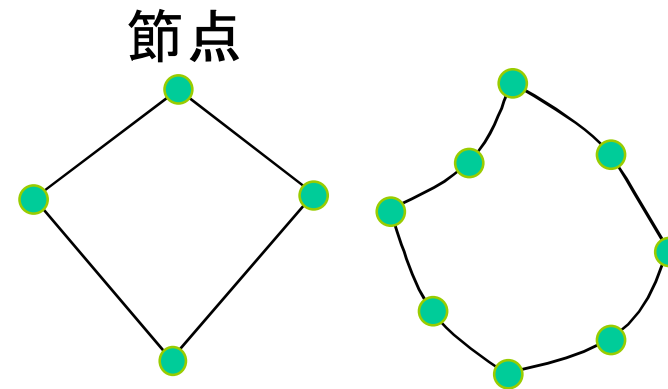
メッシュ分割:

- 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

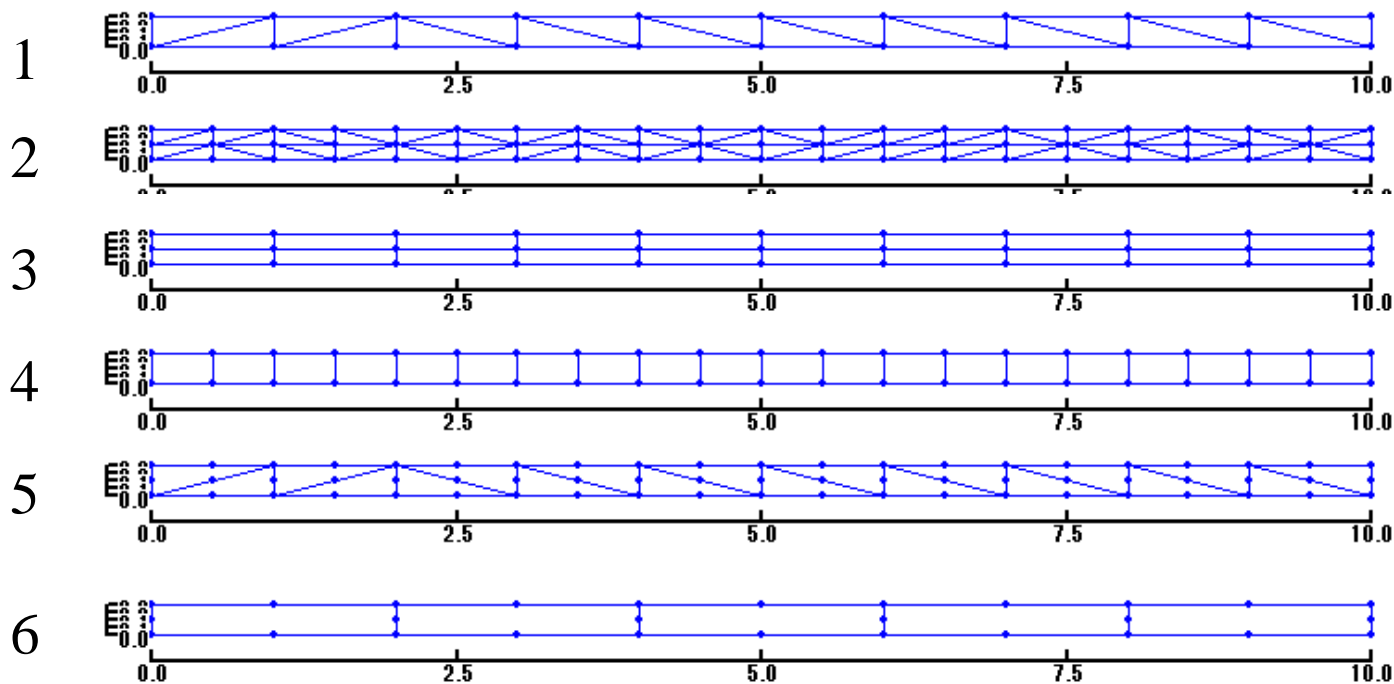


メッシュ	節点数	要素数	解析時間	安全率
粗	1038	321	2 分	0.429
細	3486	1113	12分	0.423

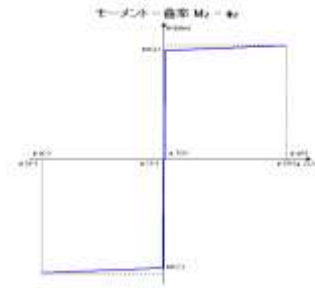
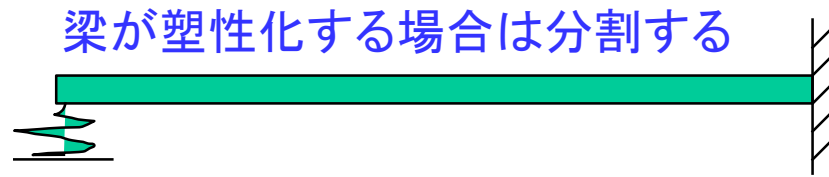
片持ち梁：要素種類とメッシュ分割数

番号	要素種類		中間節点	分割数	鉛直変位量 (m)	数値解析解/理論解
1	3角形	定ひずみ要素	中間節点なし	10 × 1	0.011	4.1%
2	3角形	定ひずみ要素	中間節点なし	20 × 2	0.039	14.6%
3	4角形	一次要素	中間節点なし	10 × 2	0.028	10.3%
4	4角形	一次要素	中間節点なし	20 × 1	0.092	34.3%
5	3角形	二次要素	中間節点あり	10 × 1	0.256	95.4%
6	4角形	二次要素	中間節点あり	5 × 1	0.269	100.2%
理論解					0.268	-

少ない分割数
高い精度



弾性支承をもつバイリニアの片持ち梁

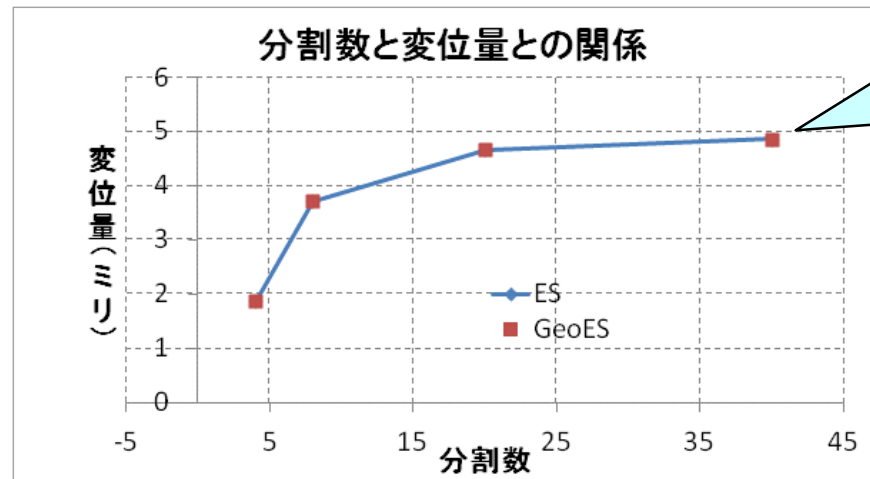


分割数は？

4分割

8分割

・・・分割

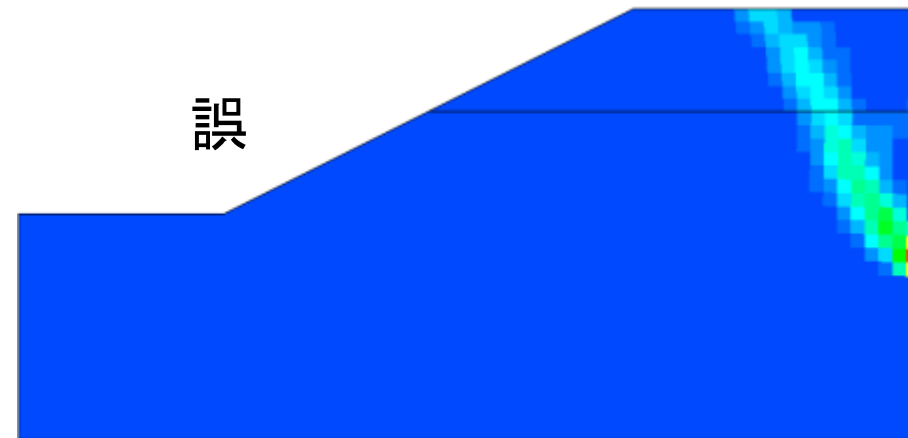
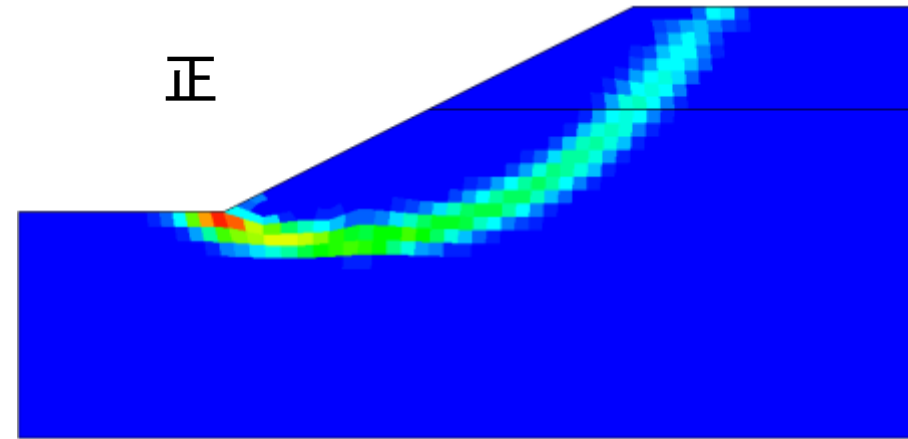


ESの $M\phi$ 要素
とGeoESの
バイリニア梁は
よく一致する。

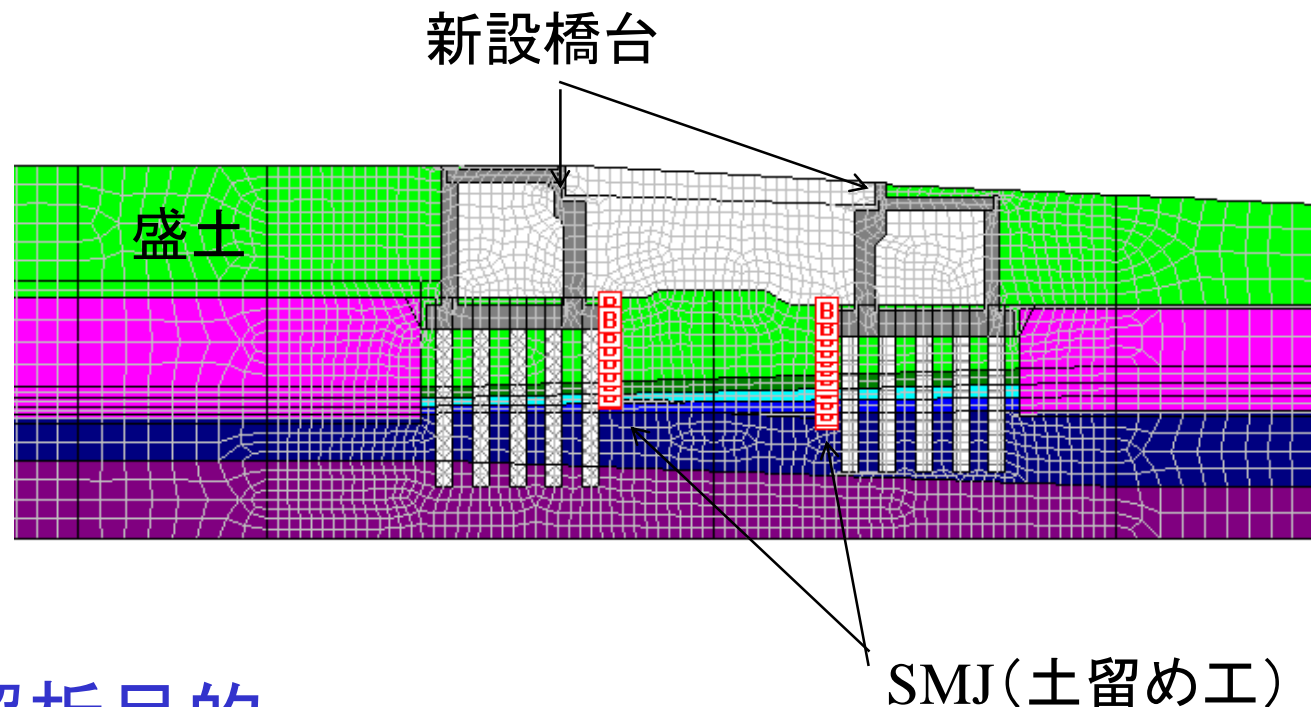
この場合は、
20分割以上がよい

結果がおかしいなー。
どうしたらいいの？

- メッシュ分割
- 解析領域
- 境界条件
- 荷重条件
- ステージ設定
- 初期応力
- 材料の構成式
- 材料プロパティ



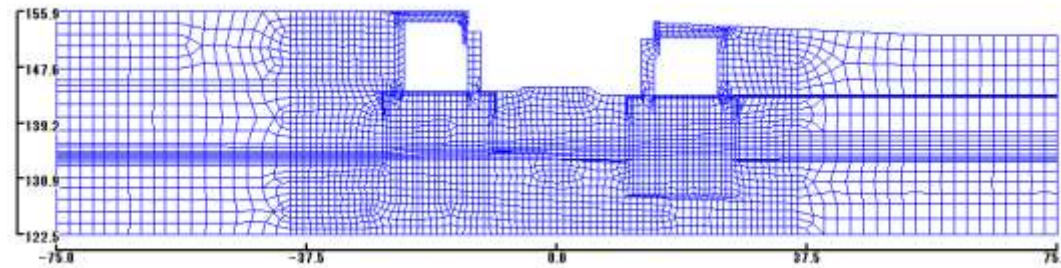
例題：盛土を伴う鉄道横断部の架橋



解析目的：

- 鉄道軌道面への影響
- 地表面の変位

問題のモデル化:



解析ステップ:

- 成層地盤の初期応力を計算する。
- 場所打ち杭を設置する。
- 掘削をする。
- 橋台を設置する。
- 盛土を設置する。

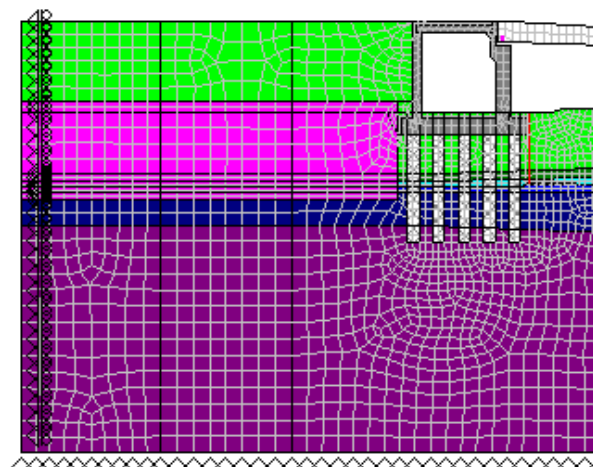
土留め工(梁要素)の材料定数

パラメータ	SMJ
ヤング率 (10^7kN/m^2)	20.0
2次断面モーメント $I(\text{m}^4)$	1.2×10^{-4}
断面積 $A(\text{m}^2)$	0.01853

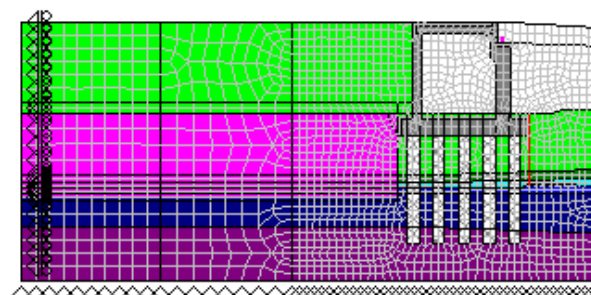
材料プロパティ

番号		記号	色	層厚	標高	N	単体	ポアソン比	E
	単位			m	m		kN/m3		kN/m2
	地表面			TP=	144				
1	埋土層(ローム)	Bs		6.88	137.12	1.0	13.0	0.45	1.200E+04
2	表土、シルト層	Ts		1.25	135.87	2.0	13.0	0.45	5.600E+03
3	軽石層	Cd		1.15	134.72	1.0	11.0	0.45	1.360E+04
4	粘性土ローム層	Dc2		0.6	134.12	2.0	14.0	0.45	5.600E+03
5	粘土混り砂礫層	Dg1-1		2.65	131.47	36.0	19.0	0.3	1.008E+05
6	粘土質砂(スコリア)	Ds1		0.25	131.22	21.0	19.0	0.35	5.250E+04
7	粘土混り砂礫層	Dg1-2		31.22	100	56.0	20.0	0.3	1.568E+05
8	地盤改良体						13	0.45	6.000E+04
9	コンクリート	RC					24.5	0.2	2.50E+07
RC1	場所打ち杭A1	RC1					24.50	0.2	5.93E+06
RC2	場所打ち杭A2	RC2					24.50	0.2	4.70E+06

結果の評価:

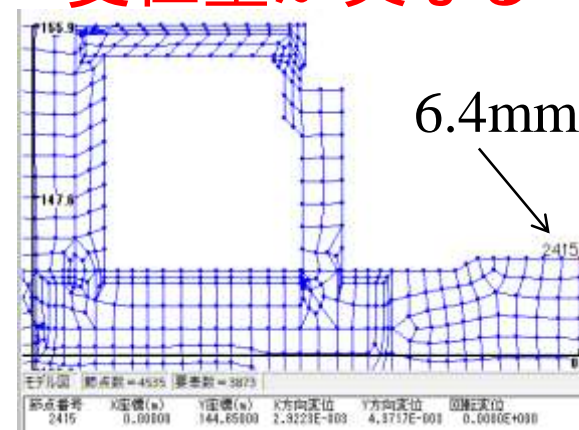


30m

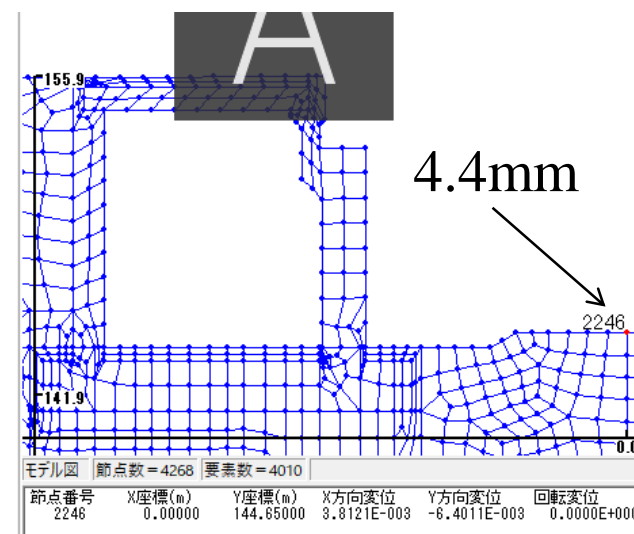


7m

層厚の違いにより
変位量が異なる



6.4mm



4.4mm