

話題その2

「立坑構造物の耐震解析モデルに関する考察」

の中で検討した“地盤ばね”



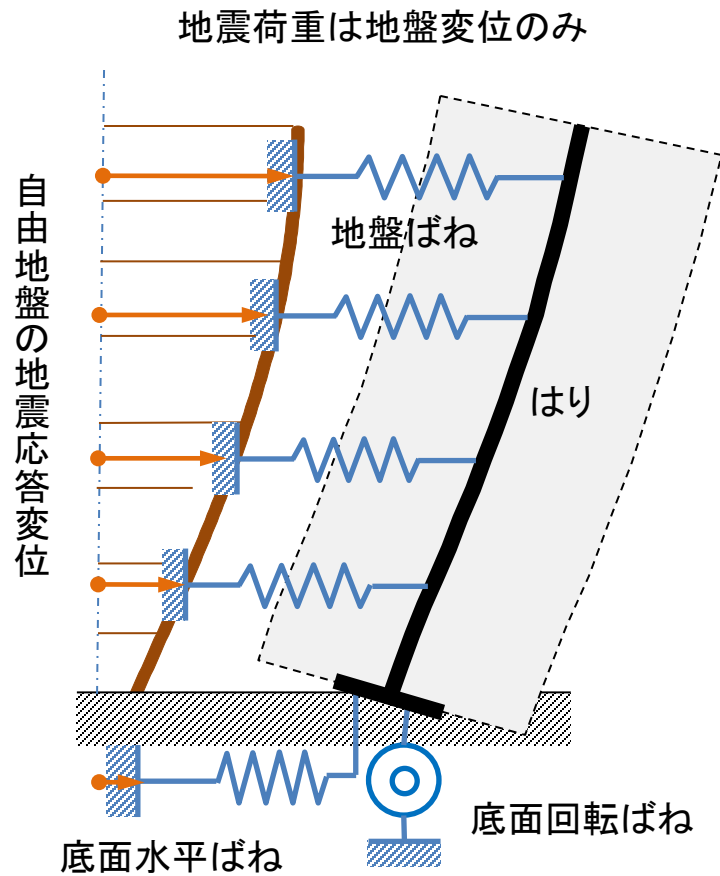
“地盤ばね”のことをこれ以上追及しても益なし

捨て去って、違うことをやった方がいい

志波の個人的意見です

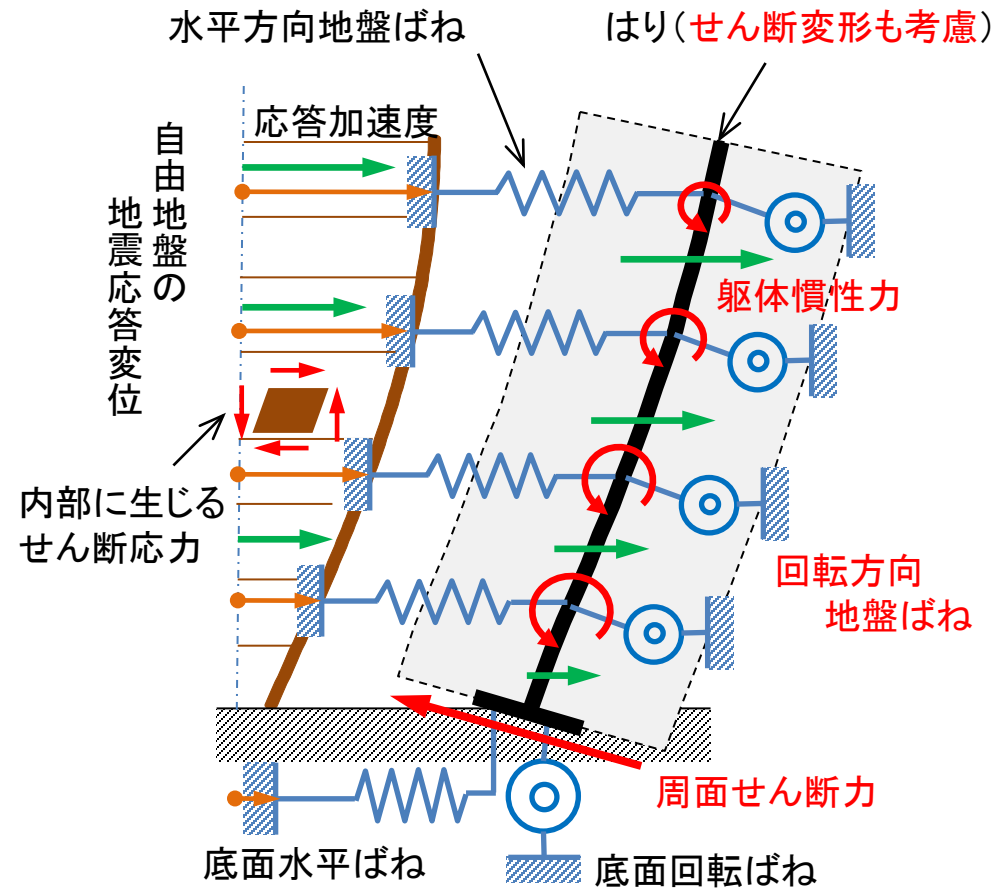
立坑の耐震計算法の中で最も使われているもの：“はり・ばねモデル”による応答変位法

従来の(現行の)方法



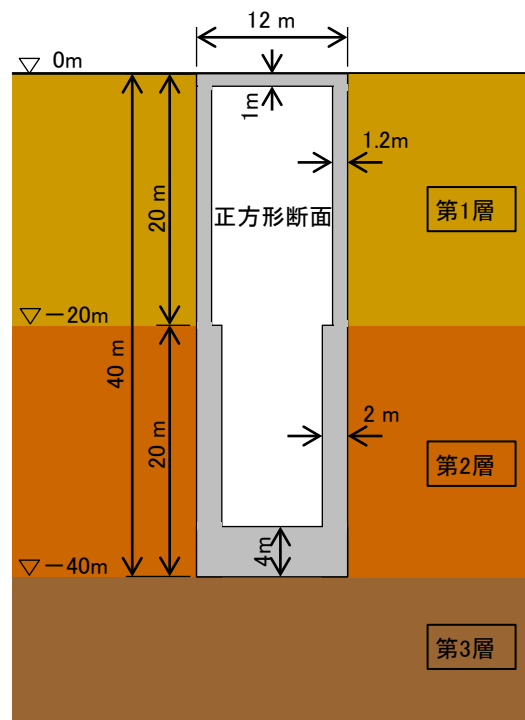
改良型応答変位法を提案

理論的な考察の域を出なかった。
実務にも適用できるはず,と主張。



副題：—改良型応答変位法の実務性能の検証—

検証対象



入力地震動

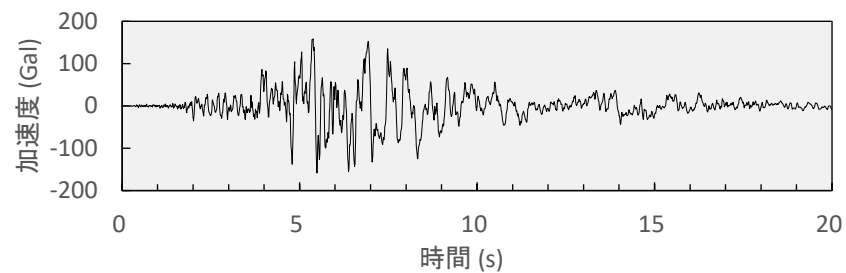
2016年熊本地震での益城町の地中観測波

立坑(鉄筋コンクリート造)の諸元

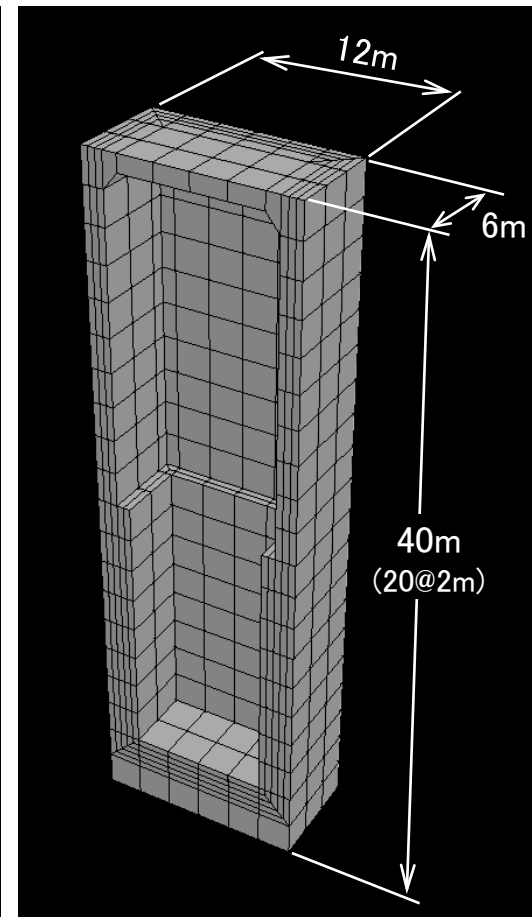
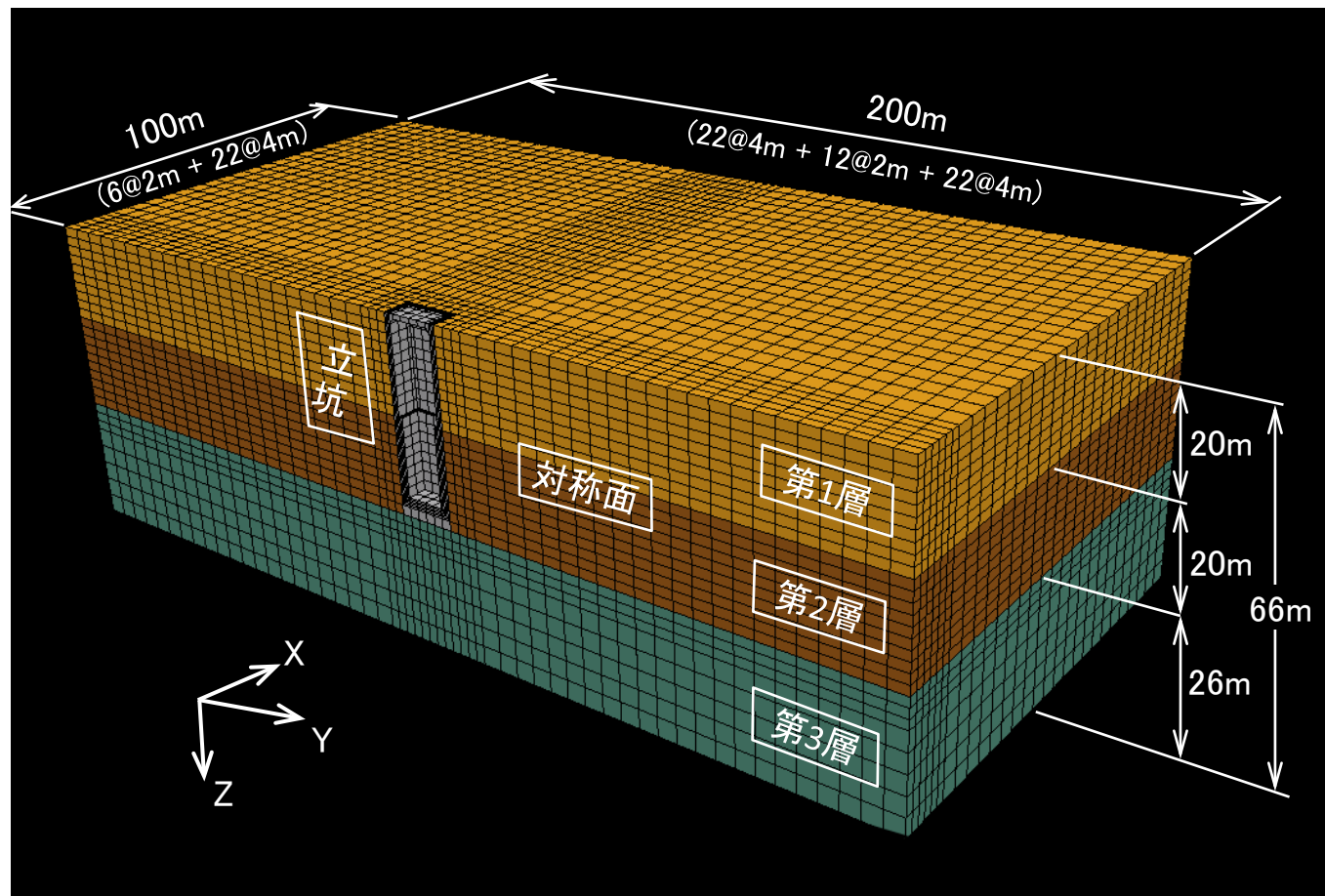
単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング率 (kPa)	ポアソン比	減衰比
25	2.5×10^7	0.20	0.03

地盤の諸元

地層	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断波速度 (m/s)	ポアソン比	減衰比
第1層	18	120	0.45	0.10
第2層	20	200	0.45	0.10
第3層	20	400	0.40	0.03

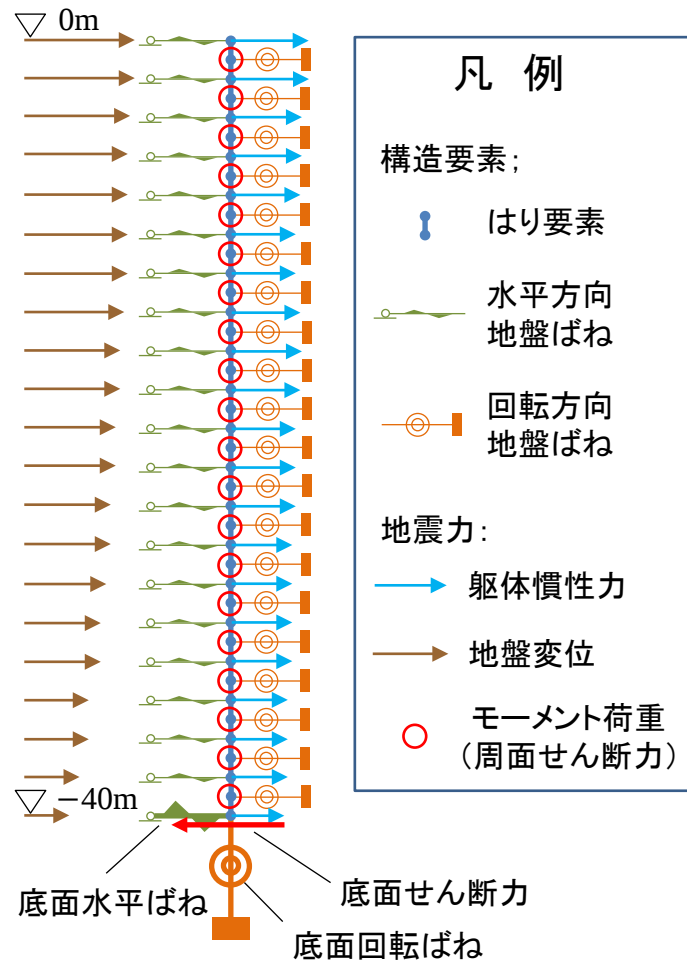


比較対象: 3D-FEMモデル(フル・ソリッド要素)による動的解析



この計算結果を“正解値”とみなす

改良型のはり・ばねモデル応答変位法 (自由地盤内のせん断ひずみが最大になる時間断面での静的解析)



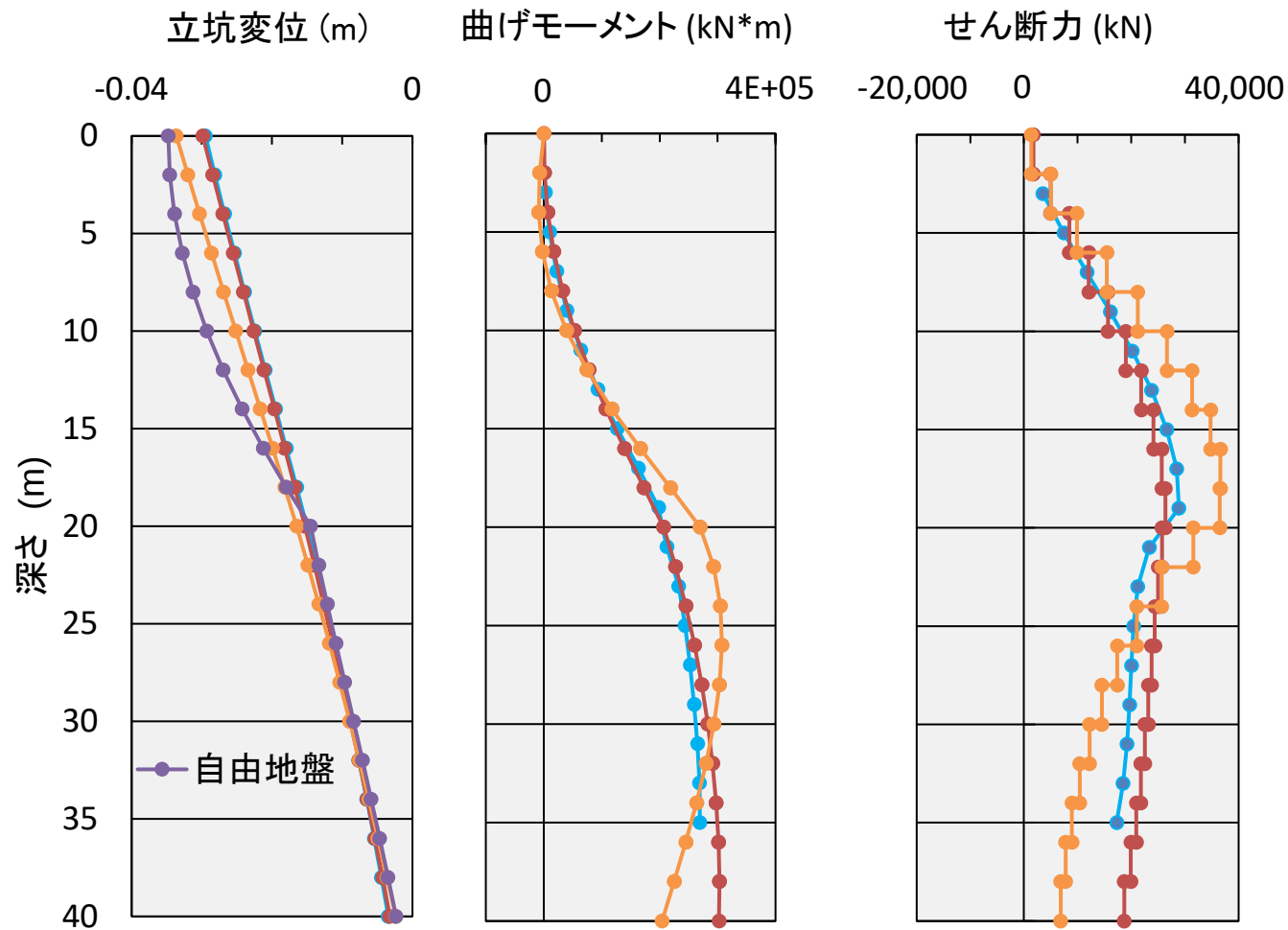
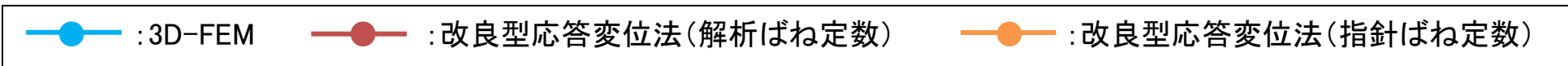
■地盤ばねの設定

①指針ばね定数

道路橋示方書下部構造編を参考にして算定する

②解析ばね定数

地盤・立坑一体の3D-FEM解析により、荷重・変位関係から算定する



論文のまとめの文(抜粋)

改良型計算法の実務への有効性が示されたと思う。

・・・さらなる課題としては、**地盤ばねの問題が最も大きい**と思われる。ばね定数を合理的に算定する方法の確立のほか、大ひずみ時の非線形性を如何に考慮するかなど、応答変位法全般に共通する非常に難しい問題でもある・・・

“指針ばね定数”の設定方法

道路橋示方書・同解説IV下部構造編
に示されている地盤反力係数の準用

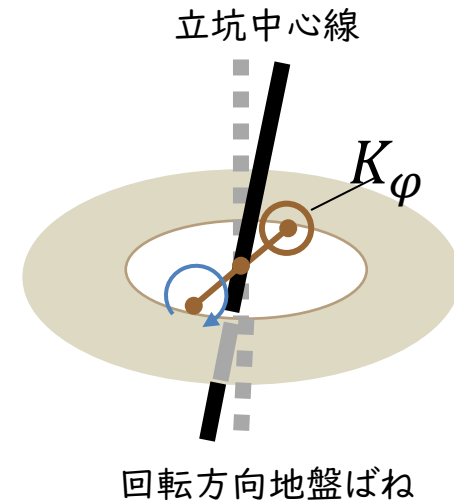
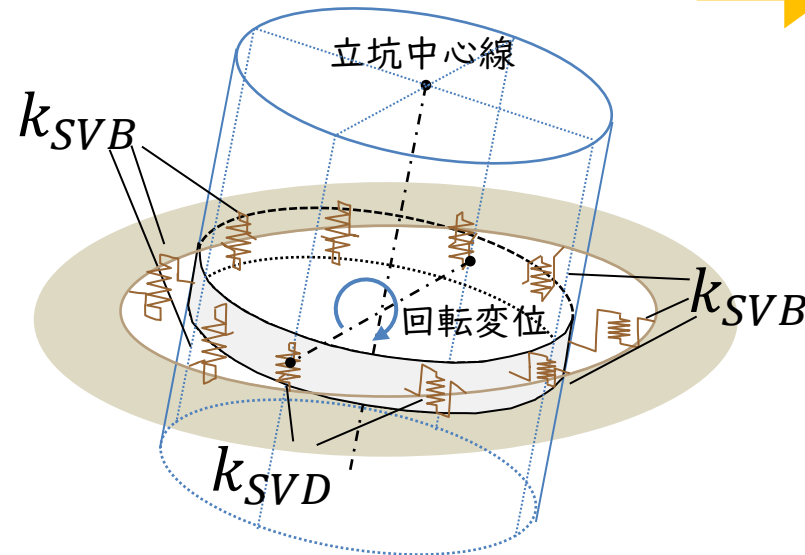
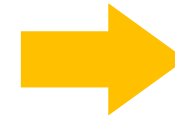
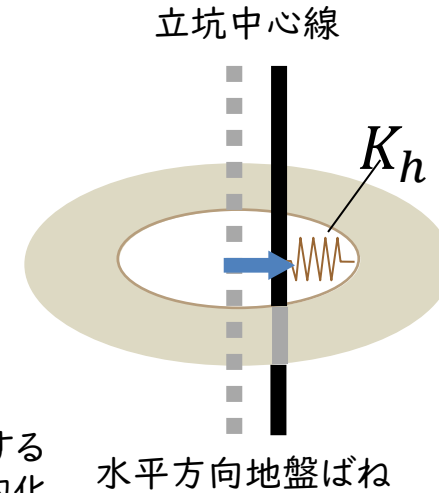
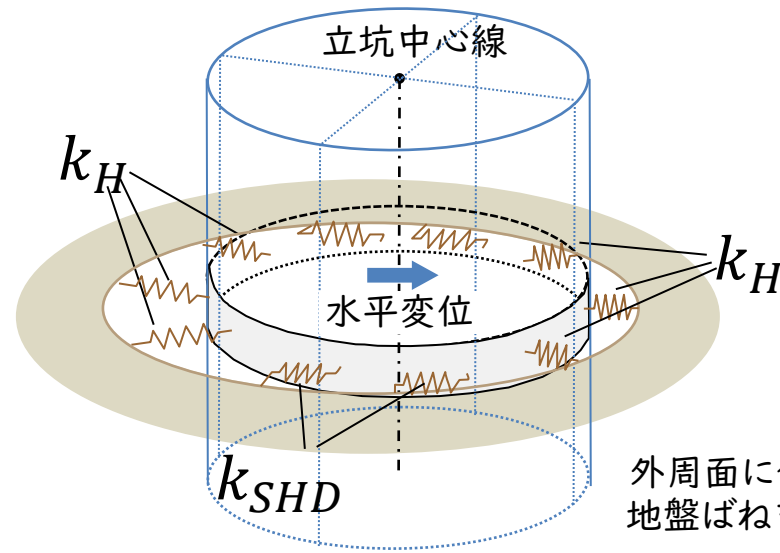
$$k_H = \alpha_k \cdot k_{H0} \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

k_{H0} : 直径0.3mの剛体円板による平板載荷試験の値に相当する水平方向地盤反力係数で、地盤の変形係数 E_g から

$$k_{H0} = \frac{1}{0.3} E_g$$

B_H : 前背面の有効幅

α_k : 補正係数



“解析ばね定数”の算出方法

節点荷重載荷

立坑頂部の中心節点に水平力を
節点力として静的に作用させる

別法による検算のつもりで実施

静的震度載荷

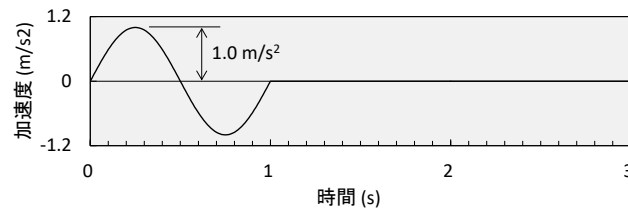
モデルの全体に一様震度を水平
方向に静的に作用させる

案に相違して
2方法で結果が大きく異なった！

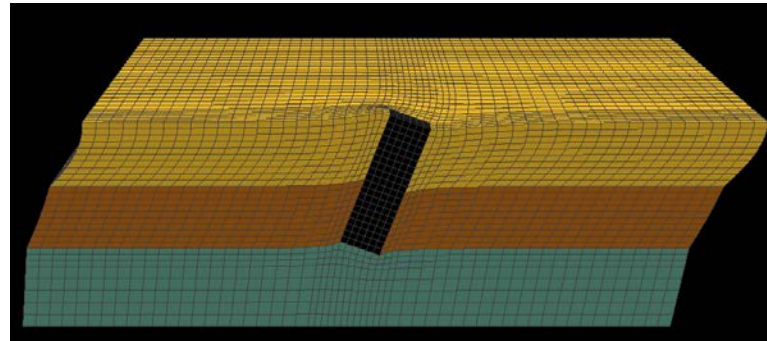
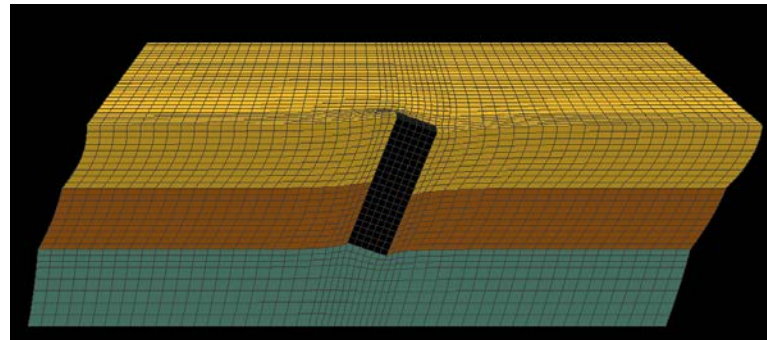
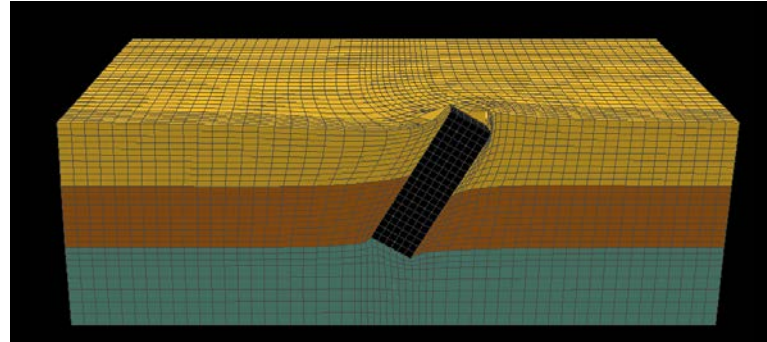
原因が分からず、もう1方法を試行するはめに

動的震度載荷

動的応答変位が最大になった時間断面



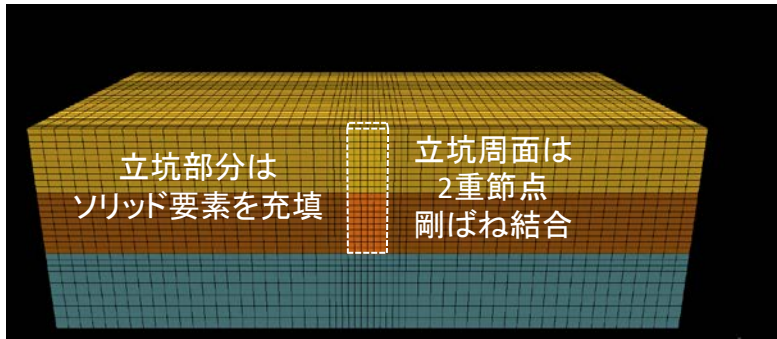
立坑部分を剛体とした3D-FEMモデルを作成



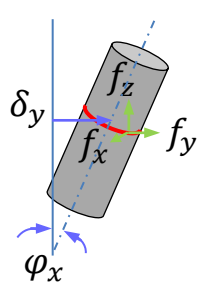
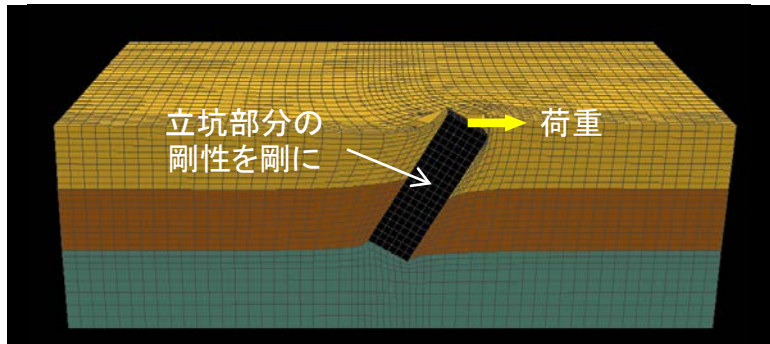
普通に考えればcrazyだと思います。
正解値を得るために3D-FEMモデル
を作ったのでやったことです。

3D-FEM解析による地盤ばね定数の算出方法

基本の解析モデル



節点荷重載荷の場合



2重節点間の剛ばねの節点力

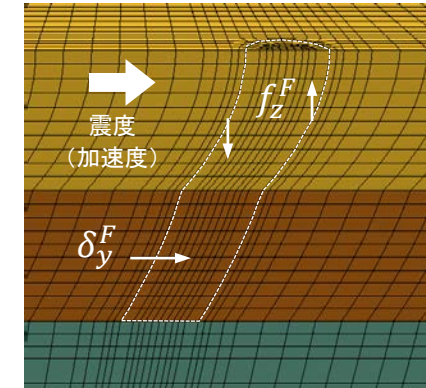
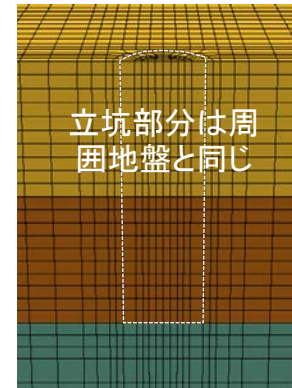
$$K_H = \frac{\sum f_{yi}}{\delta_y} \quad K_\phi = \frac{\sum f_{zi} \cdot y_i}{\phi_x}$$

立坑の深さごとに計算

静的・動的震度載荷の場合

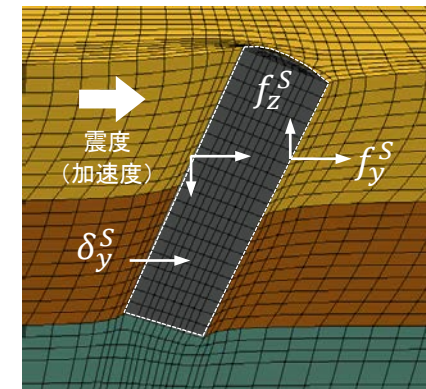
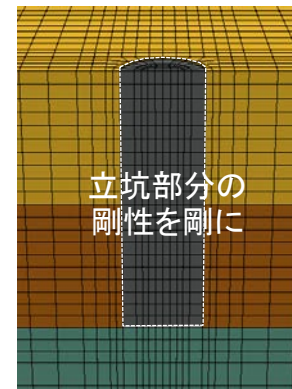
立坑が無くても地盤に変位が生じるので、単に応答変位で演算してはダメ。
free-fieldの応答からの変位・作用力の差分に対して演算しなければならない。

free-field
(立坑が無い状態)
に対する応答解析



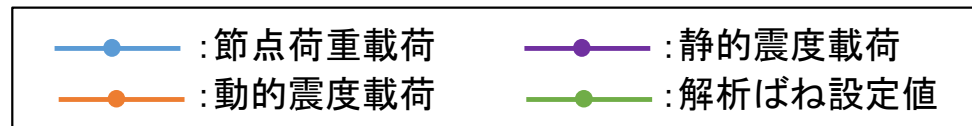
$$f_{xi}^F = f_{yi}^F = 0$$

立坑が有る状態に
に対する応答解析



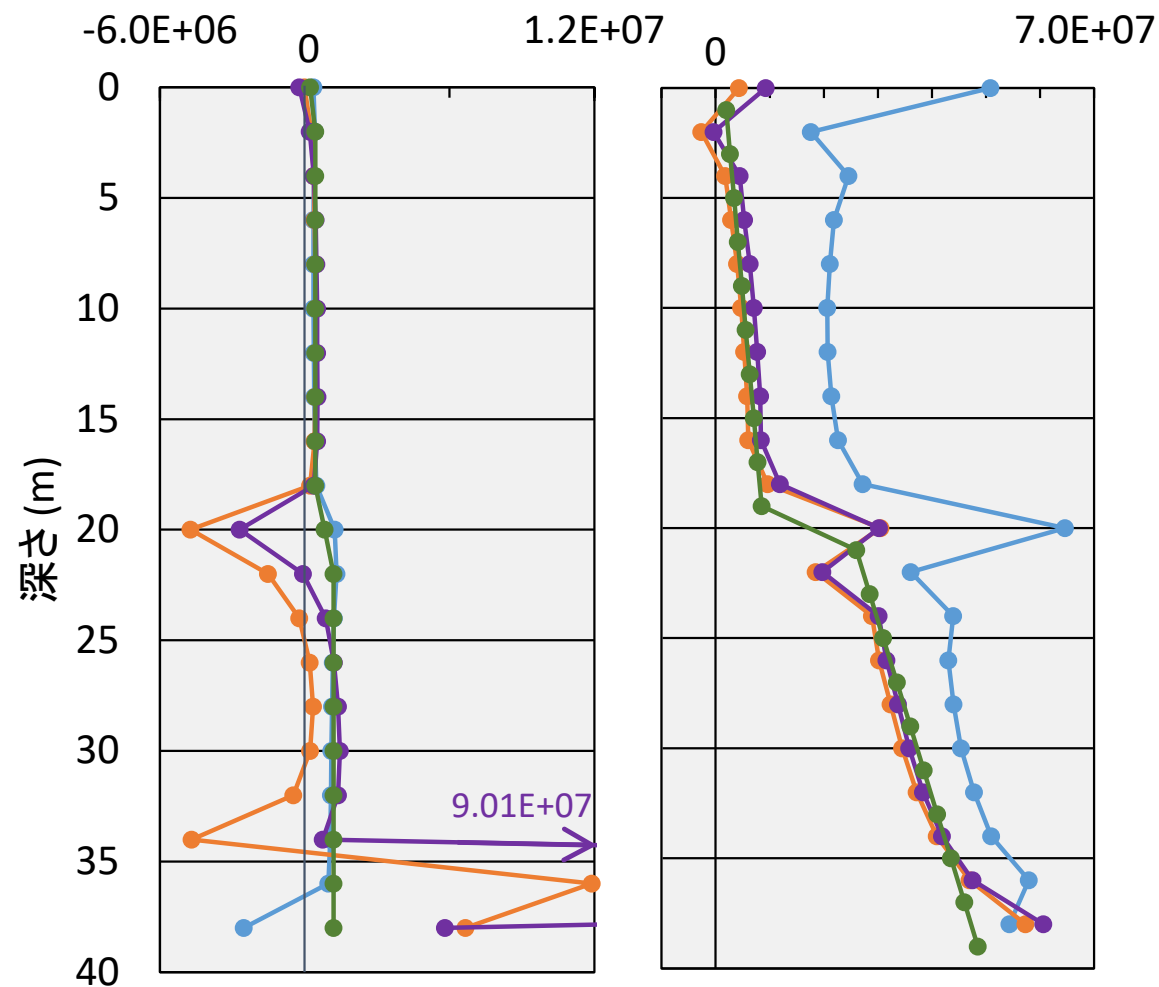
$$K_H = \frac{\sum f_{yi}^S}{\delta_y^S - \delta_y^F}$$

$$K_\phi = \frac{\sum (f_{zi}^S - f_{zi}^F) \cdot y_i}{\phi_x}$$



水平方向地盤ばね (kN/m)

回転方向地盤ばね (kN*m)



3方法で全部結果が異なる

立坑と地盤の変位パターンによって、ばね定数が違ってくるのではないか？

ということは、ばね定数は“定数”ではない！

深度 (m)	指針ばね定数		解析ばね定数	
	水平 (kN/m)	回転 (kN*m/rad)	水平 (kN/m)	回転 (kN*m/rad)
0	6.17E+05		2.20E+05	
1		1.11E+07		1.94E+06
2	1.23E+06		4.40E+05	
3		1.11E+07		2.67E+06
4	1.23E+06		4.40E+05	
5		1.11E+07		3.40E+06
6	1.23E+06		4.40E+05	
7		1.11E+07		4.13E+06
8	1.23E+06		4.40E+05	
9		1.11E+07		4.86E+06
10	1.23E+06		4.40E+05	
11		1.11E+07		5.59E+06
12	1.23E+06		4.40E+05	
13		1.11E+07		6.31E+06
14	1.23E+06		4.40E+05	
15		1.11E+07		7.04E+06
16	1.23E+06		4.40E+05	
17		1.11E+07		7.77E+06
18	1.23E+06		4.40E+05	
19		1.11E+07		8.50E+06
20	2.52E+06		8.20E+05	
21		3.43E+07		2.60E+07
22	3.81E+06		1.20E+06	
23		3.43E+07		2.85E+07
24	3.81E+06		1.20E+06	
25		3.43E+07		3.10E+07
26	3.81E+06		1.20E+06	
27		3.43E+07		3.35E+07
28	3.81E+06		1.20E+06	
29		3.43E+07		3.60E+07
30	3.81E+06		1.20E+06	
31		3.43E+07		3.85E+07
32	3.81E+06		1.20E+06	
33		3.43E+07		4.10E+07
34	3.81E+06		1.20E+06	
35		3.43E+07		4.35E+07
36	3.81E+06		1.20E+06	
37		3.43E+07		4.60E+07
38	3.81E+06		1.20E+06	
39		3.43E+07		4.85E+07
底面	8.27E+06	3.31E+08	1.40E+07	6.00E+08

もちろん, 指針ばねと解析ばねとは, 大きく違う

地盤ばねを正しく設定する方法が見い出せない!

ことの経緯 その翌年 第40回(2020年)地震工学研究発表会

副題：—3D地盤・はりモデルの有用性—

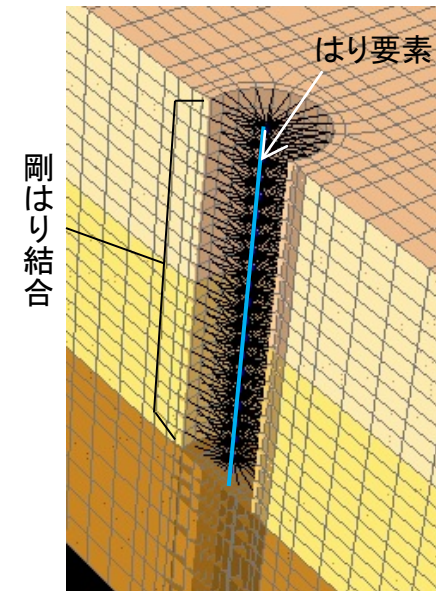
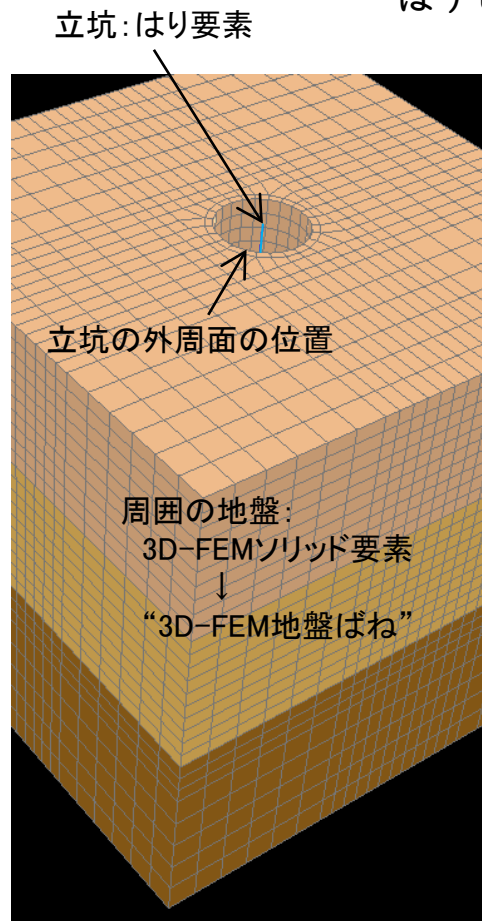
周囲地盤を“地盤ばね”でモデル化するのは無理。諦める。

“はりモデル”の周囲を3D-FEMソリッド要素で取り巻いた解析モデルとする。

スプリング型の地盤ばね → 3D-FEM地盤ばね

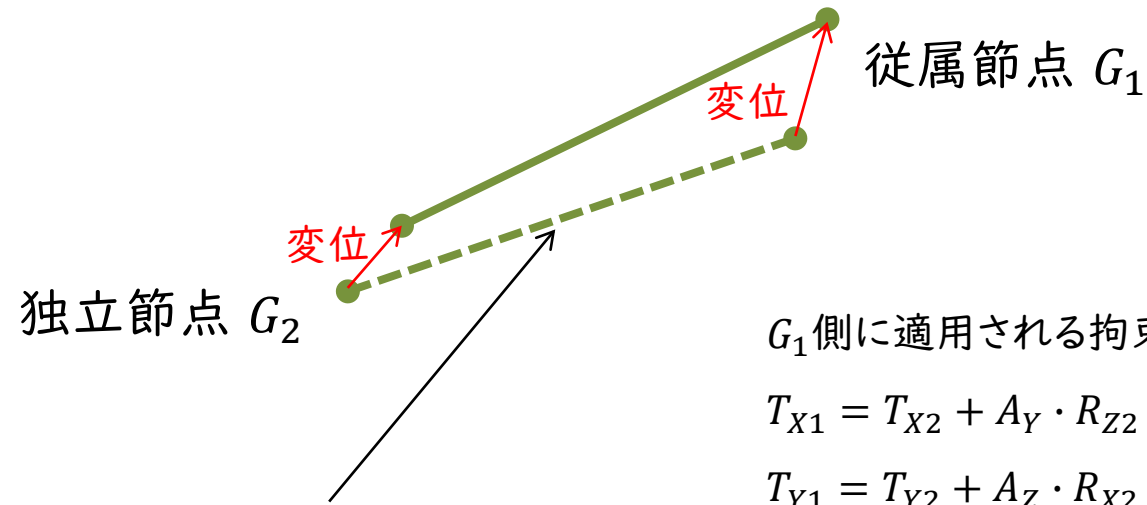


“はり”との連結は「剛はり結合」



剛はり結合

(汎用3次元動解析プログラムTDAP® III)



伸縮しない, 撓まない はりで
結ばれているように関係付ける

G_1 側に適用される拘束条件

$$T_{X1} = T_{X2} + A_Y \cdot R_{Z2} - A_Z \cdot R_{Y2}$$

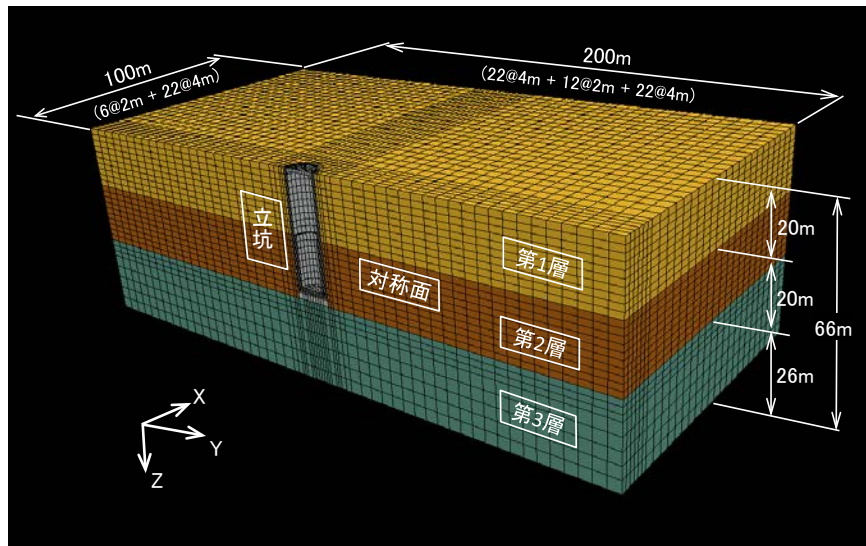
$$T_{Y1} = T_{Y2} + A_Z \cdot R_{X2} - A_X \cdot R_{Z2}$$

$$T_{Z1} = T_{Z2} + A_X \cdot R_{Y2} - A_Y \cdot R_{X2}$$

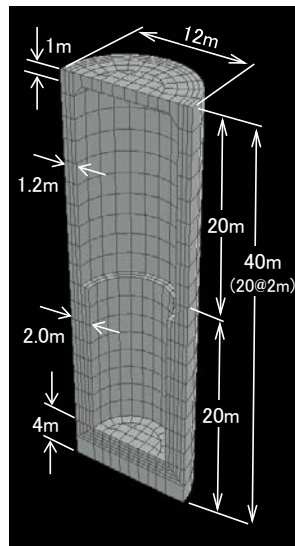
$$R_{X1} = R_{X2} \quad A_X : G_2 \text{ の } X \text{ 座標} - G_1 \text{ の } X \text{ 座標}$$

$$R_{Y1} = R_{Y2} \quad A_Y : G_2 \text{ の } Y \text{ 座標} - G_1 \text{ の } Y \text{ 座標}$$

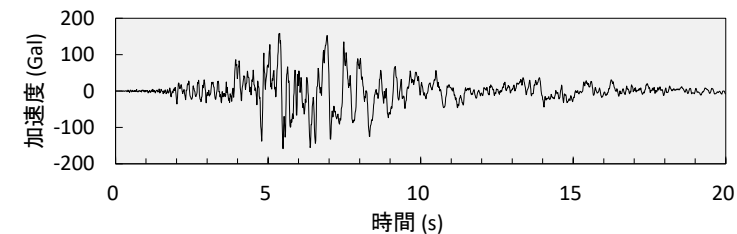
$$R_{Z1} = R_{Z2} \quad A_Z : G_2 \text{ の } Z \text{ 座標} - G_1 \text{ の } Z \text{ 座標}$$



3D-FEMフルモデル

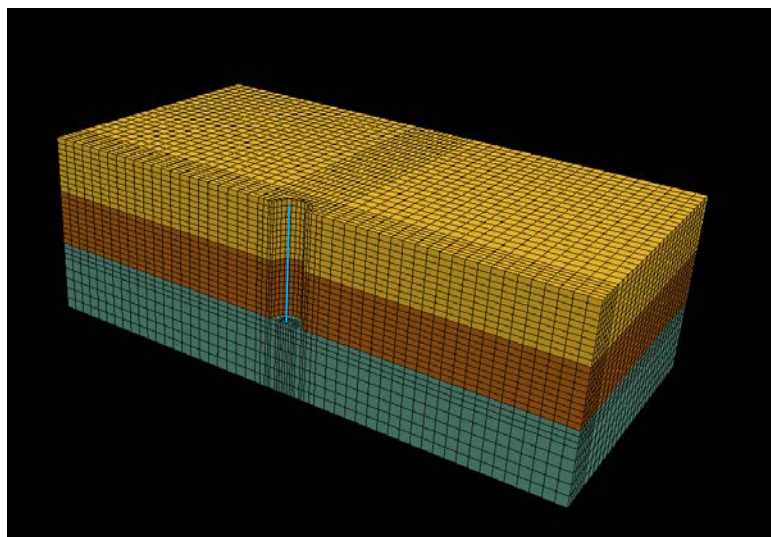
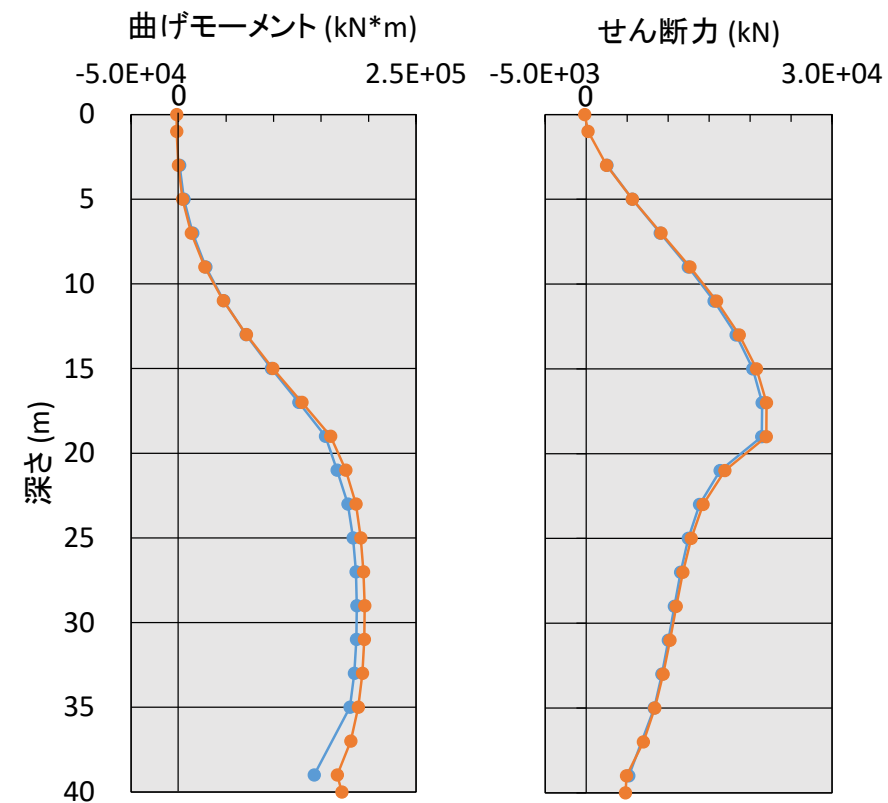


入力地震動

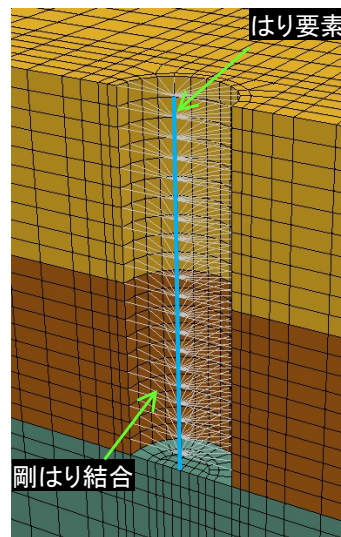


立坑の地震時断面力の計算結果

- : 3D地盤・はりモデル_動的解析法
- : 3D-FEMフルモデル_動的解析法



3D地盤・はりモデル



ことの経緯 昨年 第41回(2021年)地震工学研究発表会

副題：—各種解析モデルの一覧比較—

5種類の解析モデルによる一斉解析

3D-FEM系モデル
(地盤・構造物一体の解析)

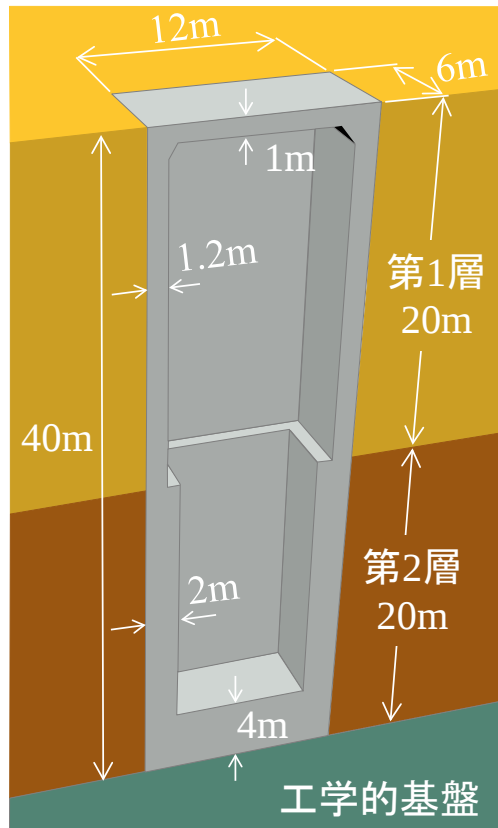
- ソリッド要素モデル
 - シェル要素モデル
 - はり要素モデル
-

はり・ばね系モデル
(構造物を分離した解析)

- 従来モデル (地盤ばねは“指針ばね”)
 - 改良モデル
-

計算対象

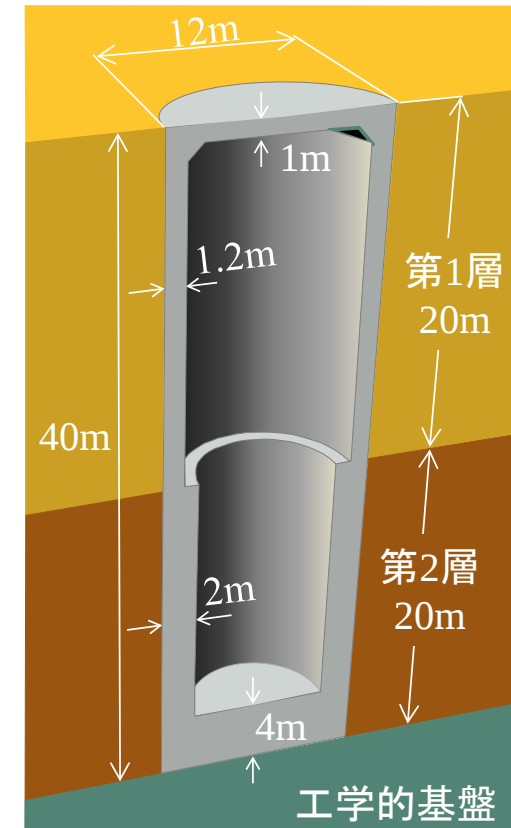
正方形断面の立坑



立坑および地盤の諸元

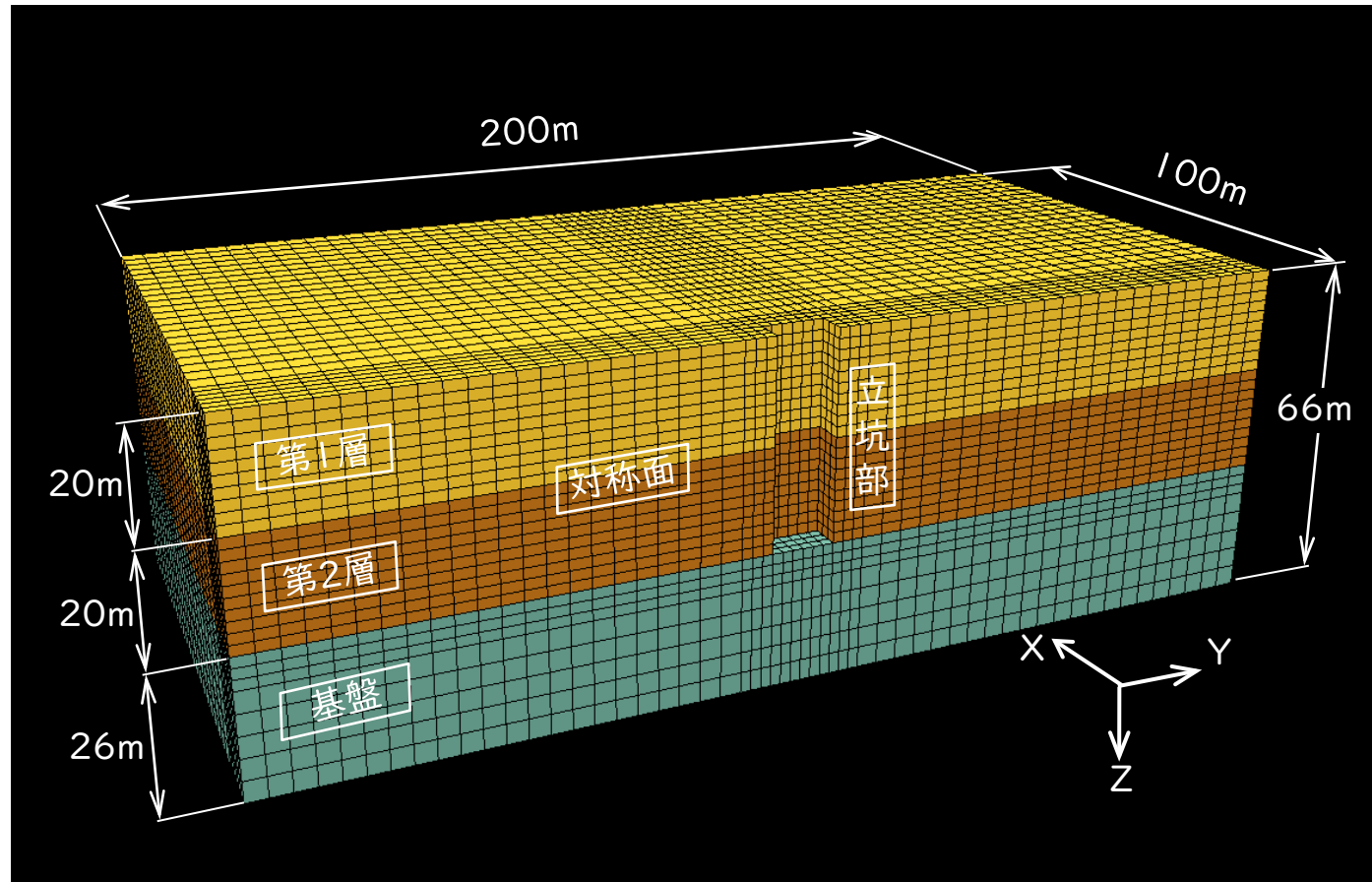
部位		単位体積重量 (kN/m^3)	ヤング率 (kPa)	せん断波速度 (m/s)	ポアソン比
立坑(鉄筋コンクリート造)		25	2.5×10^7	2,020	0.20
地盤	第1層	18	7.7×10^4	120	0.45
	第2層	20	2.4×10^5	200	0.45
	工学的基盤	20	9.1×10^5	400	0.40

円形断面の立坑



3D-FEM系モデル(地盤・構造物一体の解析)

3種類の解析モデルとも地盤部分は共通



1/2対称モデル

節点数=47,637
要素数=43,544

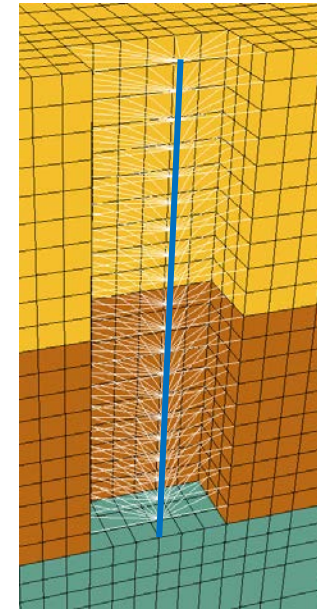
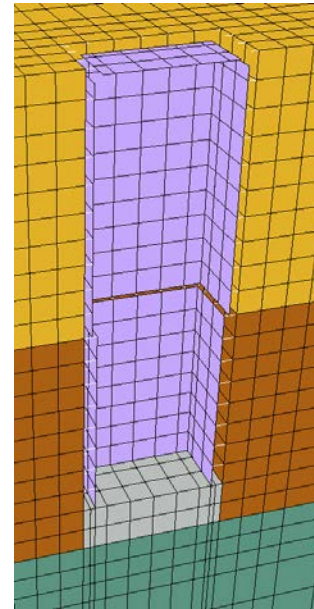
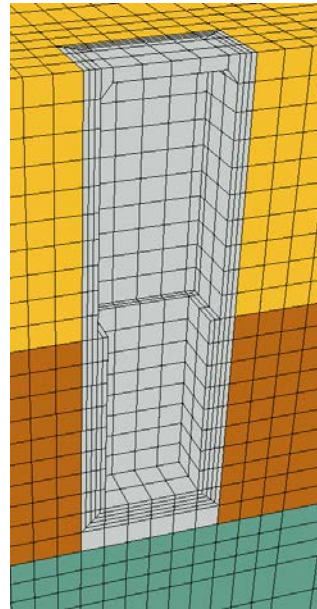
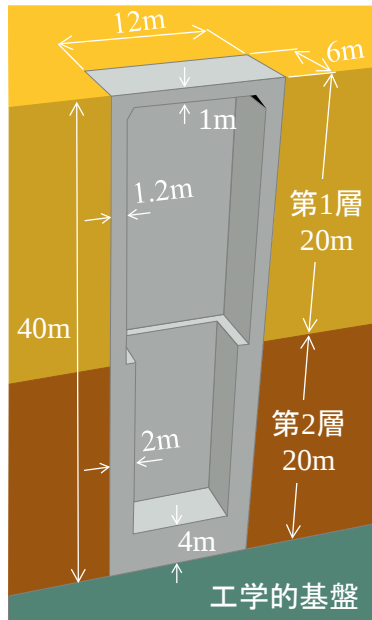
3D-FEM系 立坑部

ソリッド要素モデル

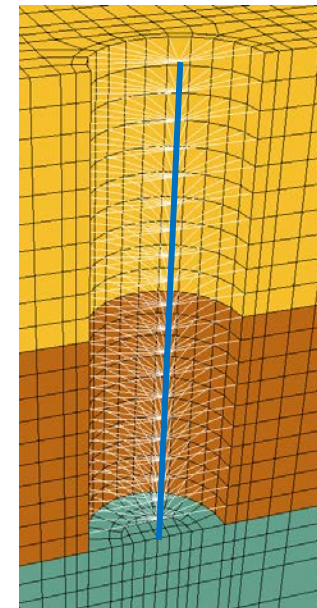
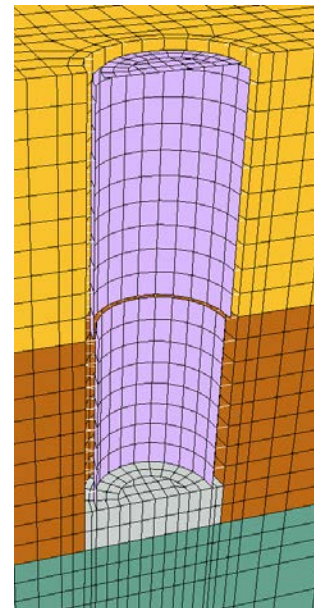
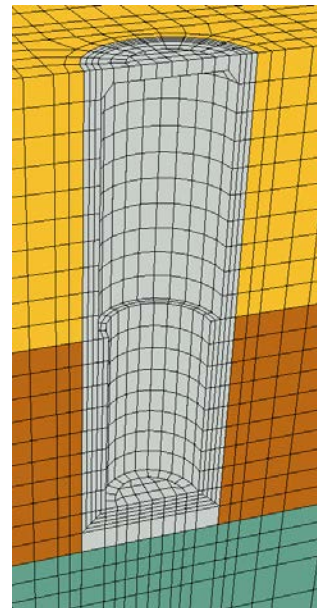
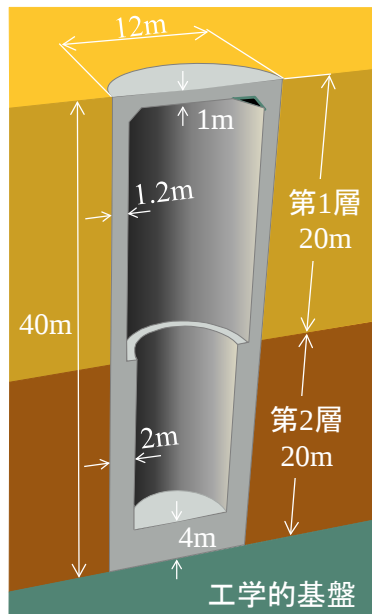
シェル要素モデル

はり要素モデル

正方形断面

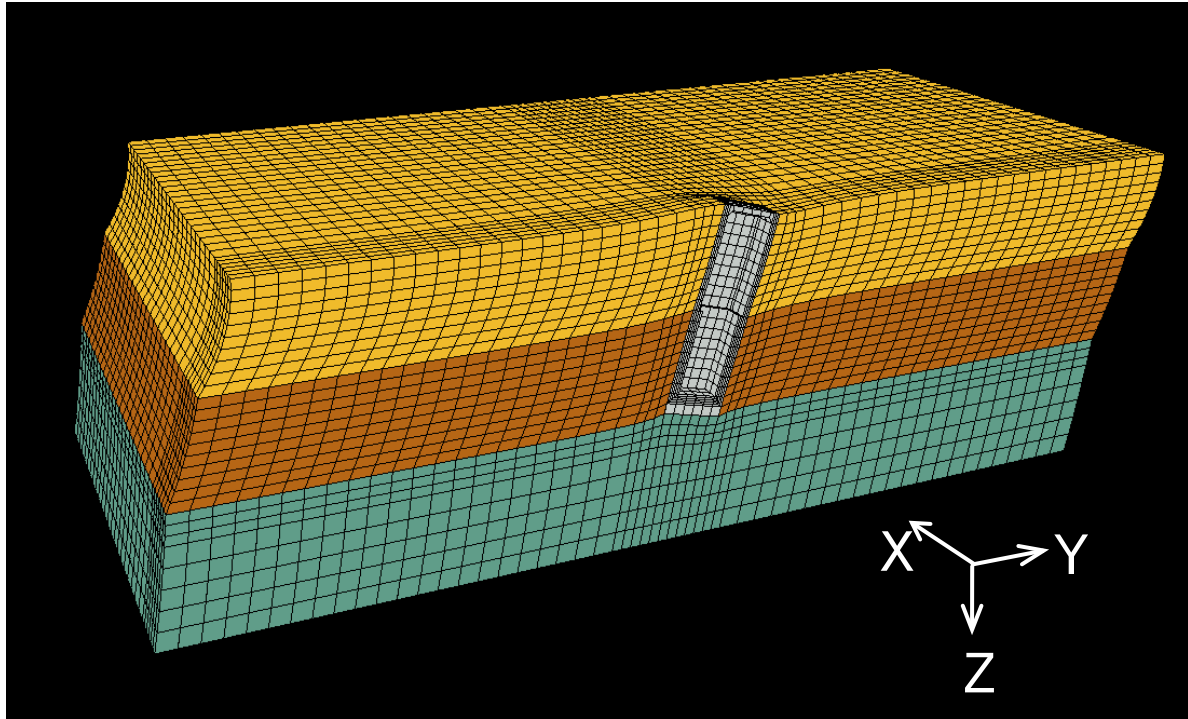


円形断面

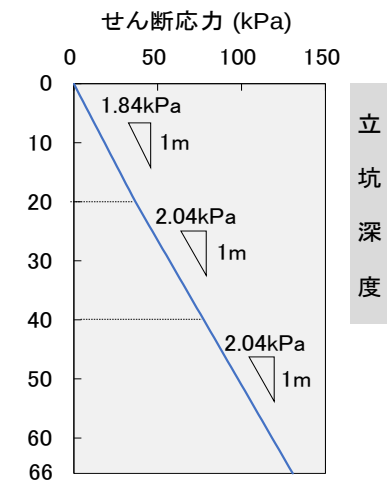
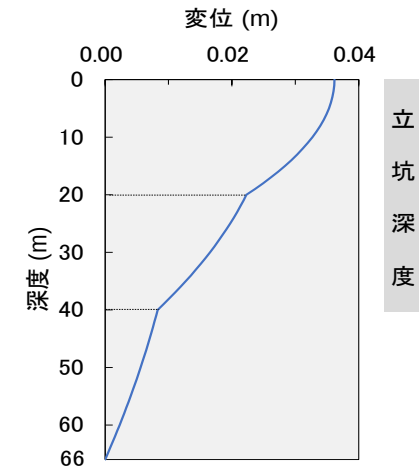


地震荷重：一様な静的水平震度を与える(100Gal相当)

自由地盤の応答(理論値)
はり・ばねモデルでの地震力

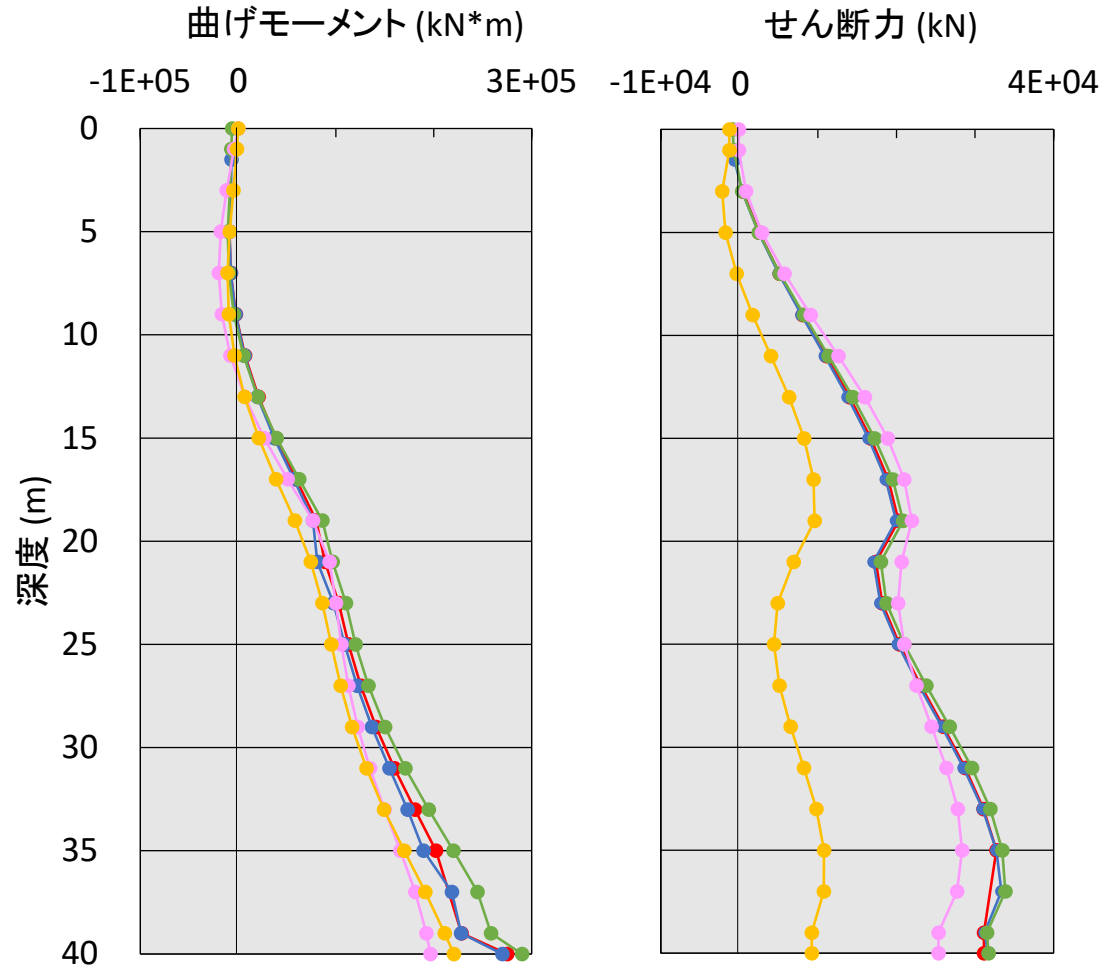
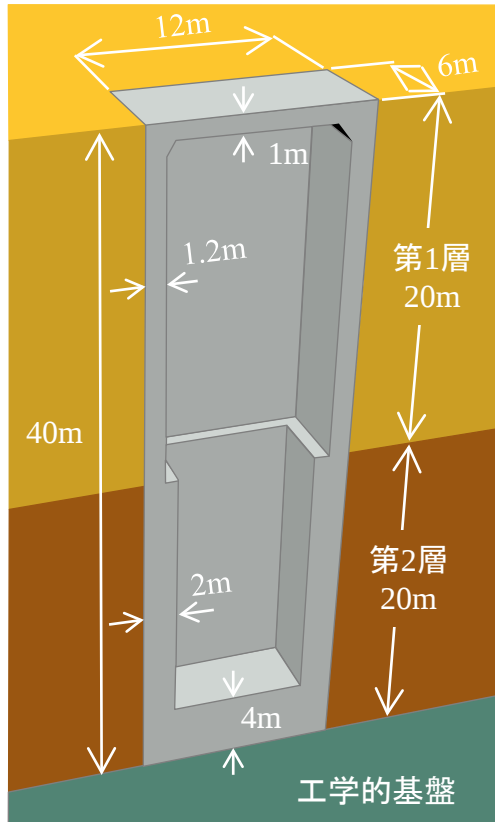


3D-FEM_ソリッド要素モデルの地震応答の様子
(構造寸法に対し変形量を500倍に拡大して描画)



- : 3D-FEM_ソリッド要素モデル —●— : はり・ばね_改良モデル
- : 3D-FEM_シェル要素モデル —●— : はり・ばね_従来モデル
- : 3D-FEM_はり要素モデル

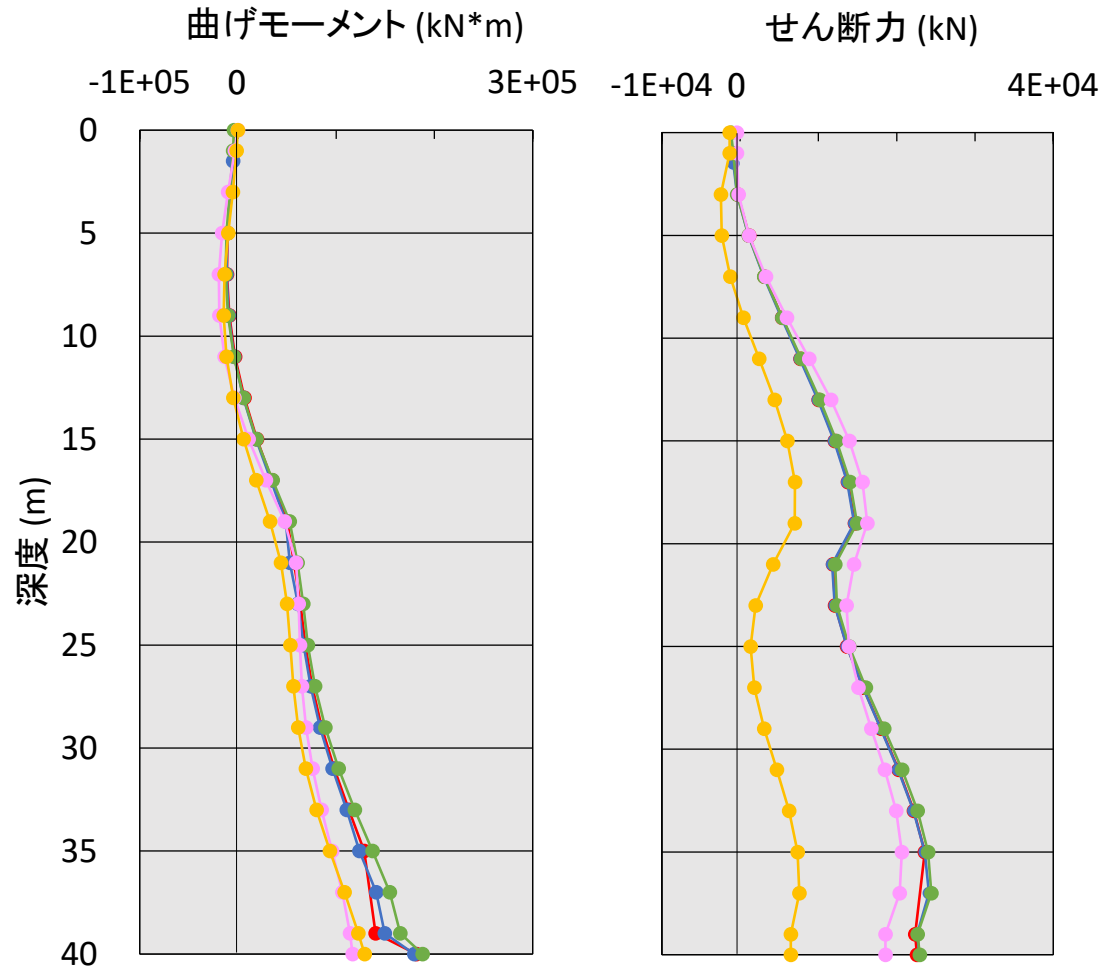
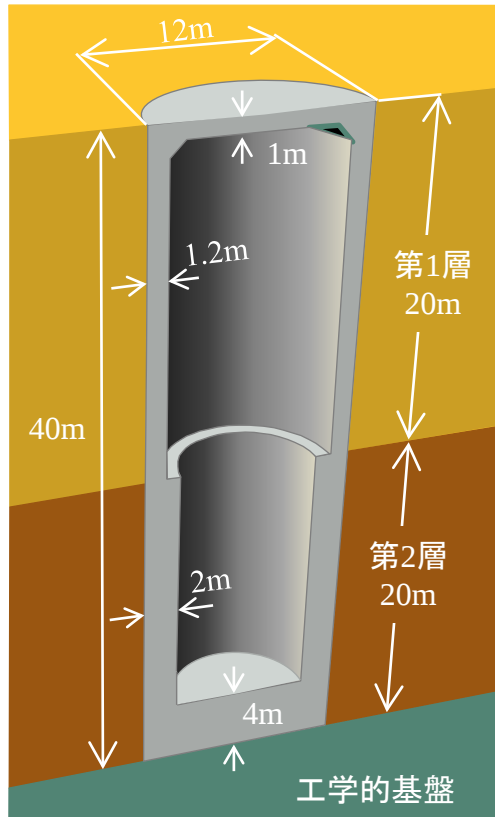
正方形断面の立坑



- ① はり・ばね_従来モデルで計算したせん断力が異常に小さい。
- ② 3D-FEM系の3つの解析モデルの計算結果が、互いによく一致している。
- ③ はり・ばね_改良モデルは、3D-FEM系に近い値を出しているが、十分とは言えない。

- : 3D-FEM_ソリッド要素モデル —●— : はり・ばね_改良モデル
- : 3D-FEM_シェル要素モデル —●— : はり・ばね_従来モデル
- : 3D-FEM_はり要素モデル

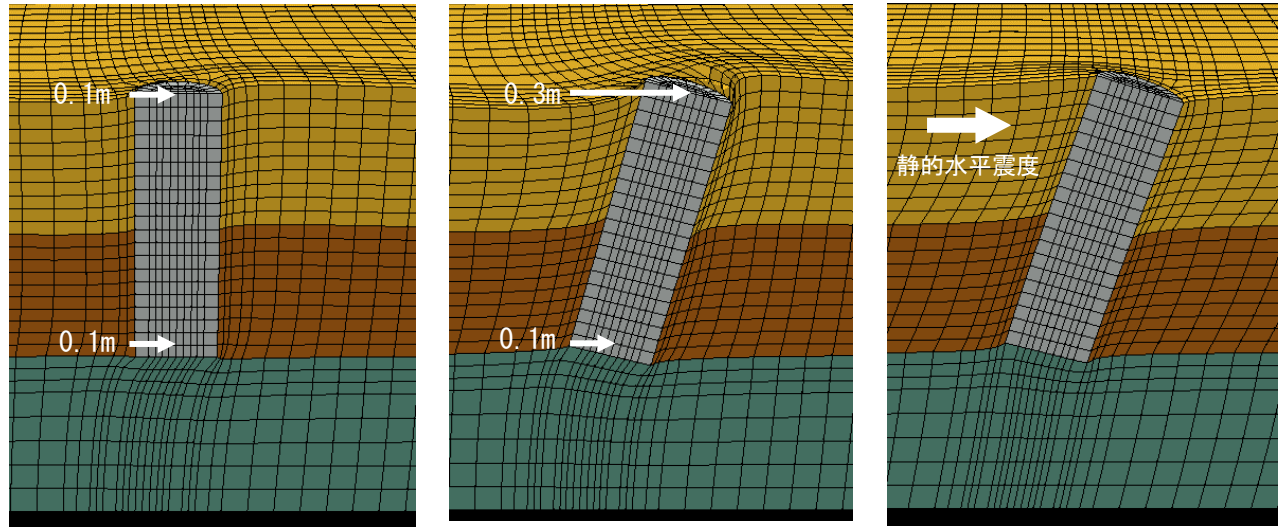
円形断面の立坑



- ① はり・ばね_従来モデルで計算したせん断力が異常に小さい。
- ② 3D-FEM系の3つの解析モデルの計算結果が、互いによく一致している。
- ③ はり・ばね_改良モデルは、3D-FEM系に近い値を出しているが、十分とは言えない。

付録: 参考解析

円形断面の立坑



強制水平変位を与える
(立坑が地盤を変位させる)

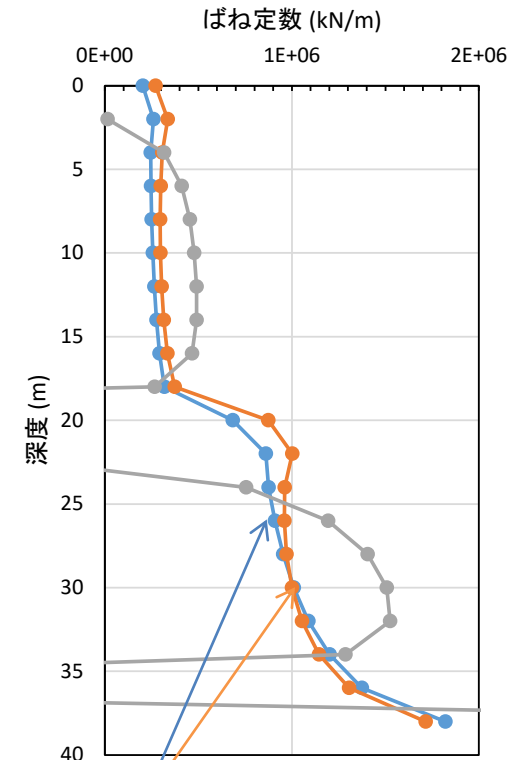
強制水平変位+回転変位

静的水平震度を与える
(地盤も自ら変位する)

立坑の変位姿勢は似ている
立坑周面の作用力はだいぶ異なる
ばね定数=作用力/変位

水平地盤ばね定数

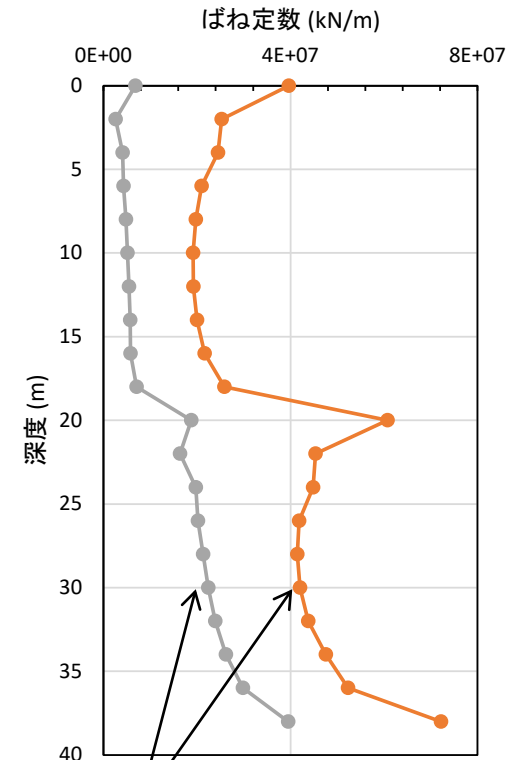
● 水平変位载荷 ● 水平・回転変位载荷
● 静的水平震度载荷



これはよく合っている

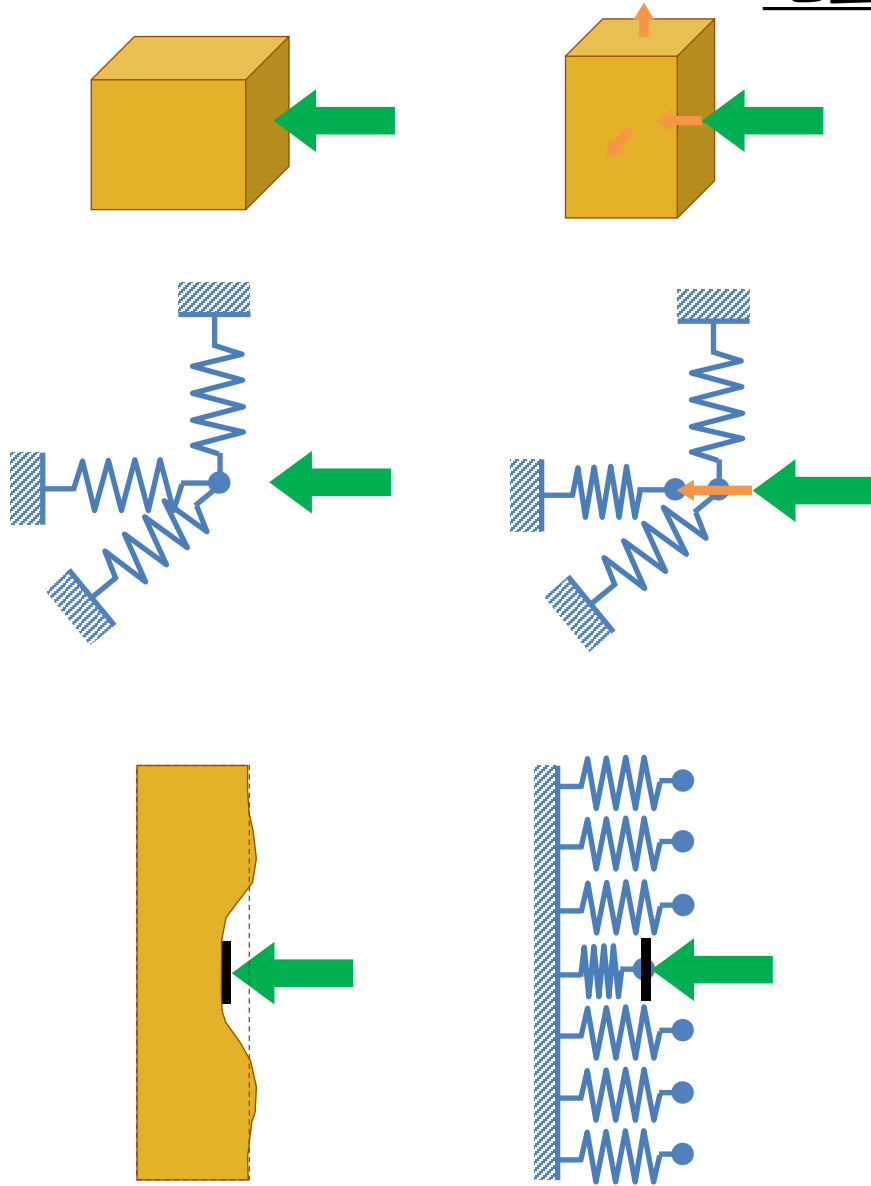
回転地盤ばね定数

● 水平・回転変位载荷
● 静的水平震度载荷

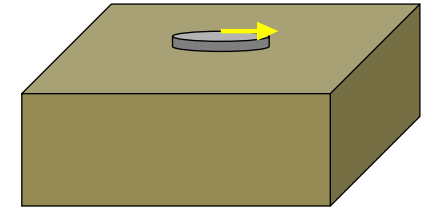
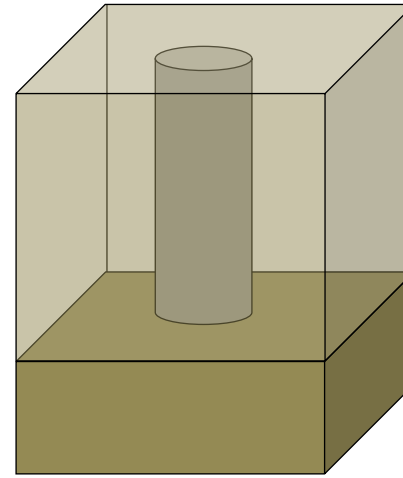


こんなに違う

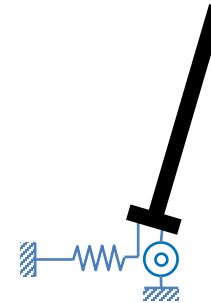
地盤ばねをめぐる諸問題



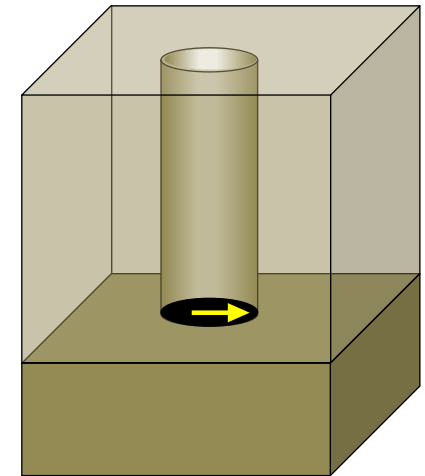
Winklerばねでは再現できない



半無限地盤状の円盤載荷の
理論値があったとしても



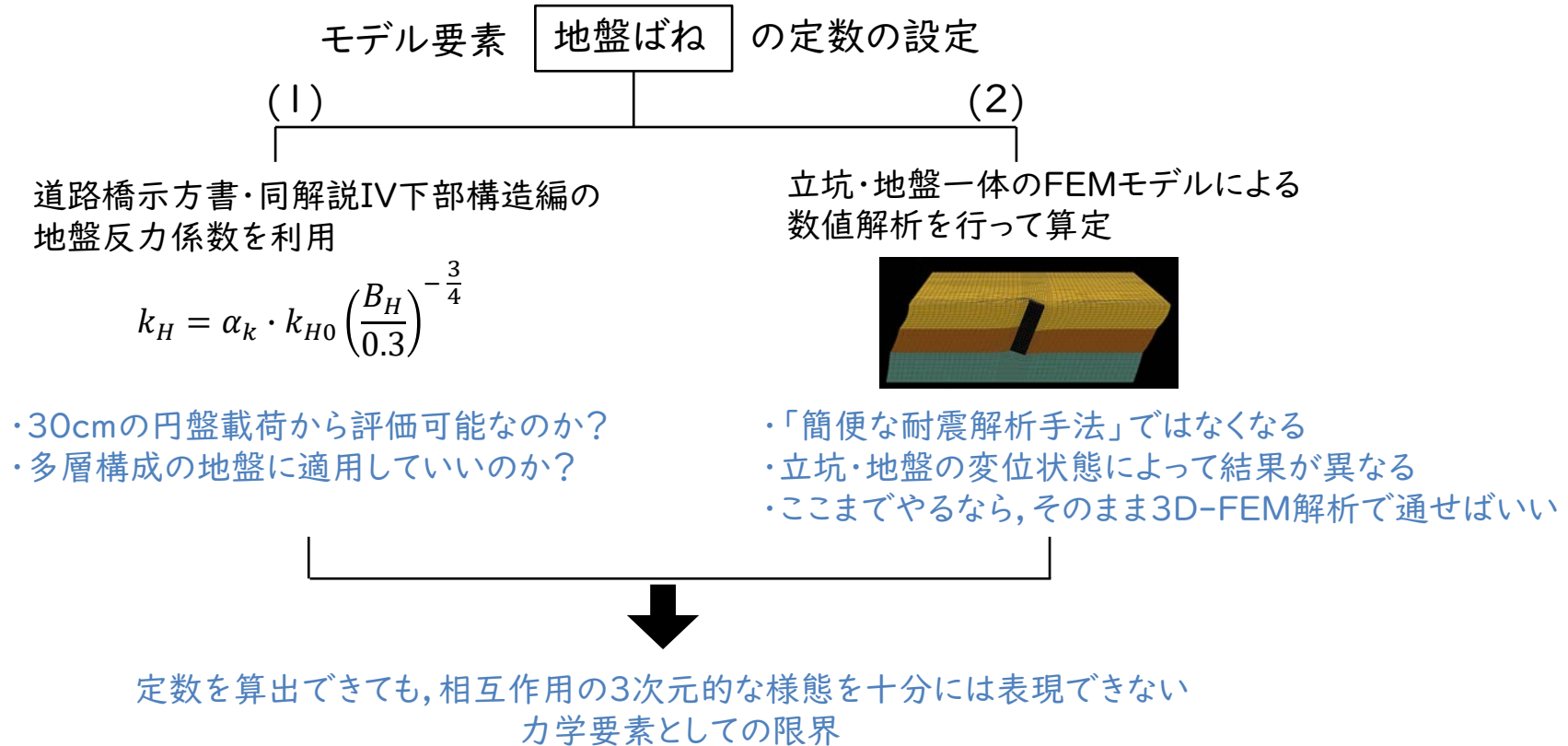
底面ばねのばね定数を設定したい



この条件とでは、値が
だいぶ違ってくるだろう

まとめ & 問題提起

立坑構造物の耐震解析法：“はり・ばねモデル” 応答変位法



“地盤ばね”のことをこれ以上追及しても益なし

捨て去って、違うことをやった方がいい

志波の個人的意見です

「応答変位法」を脱して「応答震度法」が開発された歴史もある