

オープン掘削における地盤変形解析手法の考察

エンジニアリング本部 環境・防災解析部

高橋 圭一

1. はじめに

非固結地盤の開削施工において、近接構造物への影響を評価するため、2次元線形弾性 FEM 解析が多く使われている。当然、その時の物性値やモデル化する範囲の設定によって、解析結果が影響されるので、実務上ではいくつかの方法から、その時の解析に適合すると思われる方法で設定した条件で解析する。解析における各種条件の適合性を客観的に評価するために物性値やモデル化範囲の設定の方法が提案されているが、それらの感度分析を行っている事例が殆ど無い。本稿では、解析モデルの範囲と地盤剛性の地盤変位量への影響に着目し、2次元線形弾性 FEM 解析と3次元線形弾性 FEM 解析を用いて、各種設定条件について考察する。

2. 解析条件

2.1 解析前提

開削施工では一般的に、支保工を用いられるが支保工の規模により、地盤変位へ抑制効果が違う。解析検討上、支保工の影響を除去するため、無支保掘削施工モデルを採用した。

2.2 物性値

弾性係数 $E(\text{kN/m}^2)$ は N 値から一般的に用いられる 2800N とし $N=5$ から $N=35$ まで 5 刻みで検討する。各ケースの N 値、弾性係数 $E(\text{kN/m}^2)$ を表 1 に示す。

また、単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$ 、ポアソン比 ν はそれぞれ $\gamma=18$ 、 $\nu=0.3$ とした。

2.3 モデル条件

本解析のモデルは $\gamma=18$ の 1 層モデルであり、オープン掘削は開削底面幅 $W=3\text{m}$ 、掘削勾配 1:0.5 とする。表 1 に N 値と弾性係数 $E(\text{kN/m}^2)$ の関係を示す。

表 1 解析ケースと地盤剛性

N 値	$E(\text{kN/m}^2)$	備考
5	14000	2800N
10	28000	
15	42000	
20	56000	
25	70000	
30	84000	
35	98000	

2.4 解析モデル

2次元弾性 FEM 解析と3次元弾性 FEM 解析に使用したモデルを図 1、図 2 にそれぞれ示す。

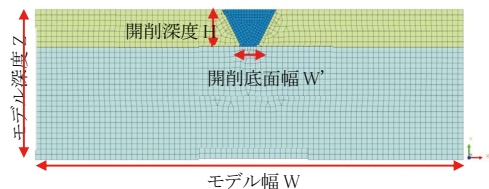


図 1 2次元解析モデル

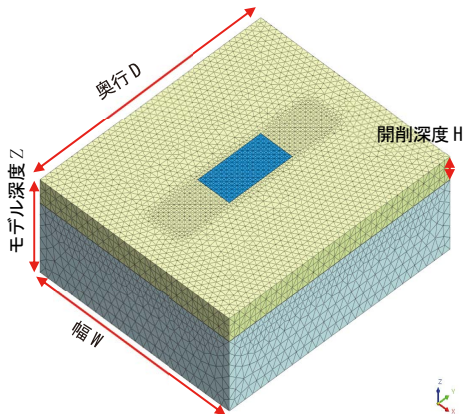


図 2 3次元解析モデル

2次元解析モデルと同様に、3次元解析の開削底面幅を W' 、開削底面奥行は D' とする。

モデル幅 D は、開削深度 H の5倍程度、モデル深度 Z は3倍程度といわれている¹⁾。そのため、この時の結果を基準として各条件との関係を考察する。

この時、モデル幅とモデル深さは下記の通り設定する。

$$\begin{aligned} \text{開削上面幅} &= H \times \text{掘削勾配} \times 2(\text{両側}) + W' \\ W &= H \times 5(\text{倍}) \times 2(\text{両側}) + \text{開削上面幅} \\ Z &= H \times 3(\text{倍}) + H \end{aligned}$$

3次元解析時には上記の式の W を D 、 W' を D' として奥行の値を求める。

また、変位の抽出点は、開削底面の中央とした。

2.5 解析ケース

(1) 2次元弾性 FEM 解析

開削深度を 3m、5m、7m の3ケースを検討した。基準となるモデルサイズを表 2 に示す。

表 2 モデル範囲の基本条件

	H	W	Z
I	3m	36m	12m
II	5m	58m	20m
III	7m	80m	28m

上記モデルに対してモデル範囲の変位量への影響を比較検討するため以下の解析を実施する。

- ① モデル幅と変位の関係(開削深度 $H=3\text{m}$)
- ② モデル深度と変位の関係(開削深度 $H=3\text{m}$)
- ③ モデル幅と変位の関係(開削深度 $H=5\text{m}$)
- ④ モデル深度と変位の関係(開削深度 $H=5\text{m}$)
- ⑤ モデル深度と変位の関係(開削深度 $H=7\text{m}$)
- ⑥ JR 関係基準書 2)に基づいた検討
- ⑦ 土木構造物設計施工標準 2)において、開削施工のリバウンド解析に用いる変形係数は N 値から $2500N$ とした場合の倍程度と記載されている。

表 3 に、それぞれの検討ケースにおける解析モデルの範囲を示す。

表 3 比較検討モデル条件

ケース	H	W	Z
①	3m	66m(10倍)	12m(3倍)
		96m(15倍)	
②	3m	36m(5倍)	21m(6倍)
			30m(9倍)
			39m(12倍)
③	5m	108m(10倍)	20m(3倍)
		158m(15倍)	
④	5m	58m(5倍)	35m(6倍)
			50m(9倍)
			65m(12倍)
⑤	7m	80m(5倍)	49m(6倍)
			70m(9倍)
			91m(12倍)
⑥	モデルはケース I として、弾性係数を $2500N$ の3倍 ²⁾ と設定		

(2) 3次元弾性 FEM 解析

3次元解析では、開削の奥行方向を開削深度の3倍、5倍、7倍、9倍と設定し、表 2 の I と II の解析を

した。こ開削底面寸法とモデル寸法を表 4 に示す。

表 4 3D 解析モデル範囲

開削深度	W'×D'	W×D
3m	3m×9m	36m×42m
	3m×15m	36m×48m
	3m×21m	36m×54m
	3m×27m	36m×60m
5m	3m×15m	58m×70m
	3m×25m	58m×80m
	3m×35m	58m×90m
	3m×45m	58m×100m

2.6 解析ステップと境界条件

解析は、初期解析、開削と 2 ステップである。また、境界条件は、底面は水平方向と鉛直方向を固定、側方は水平方向固定とした。

3. 解析結果

下記に各解析ケースの変位量を示す。

3.1 2次元弾性 FEM 解析

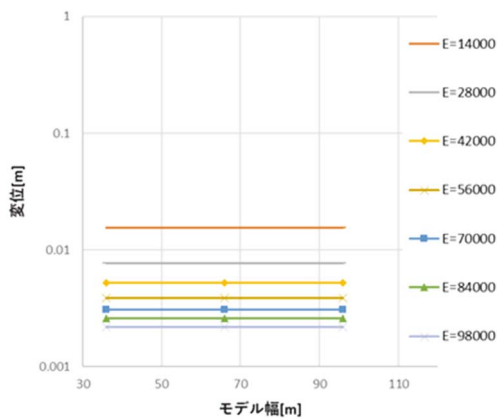


図 3 モデル幅と変位の関係(開削深度 3m)

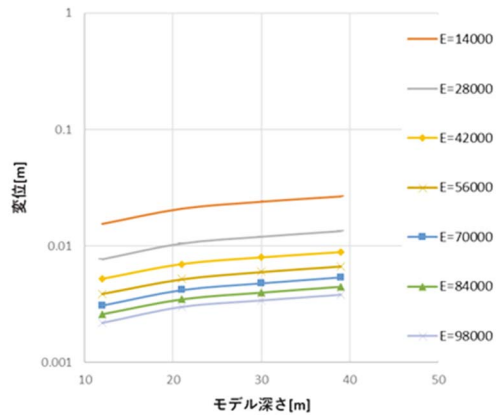


図 4 モデル深度と変位の関係(開削深度 3m)

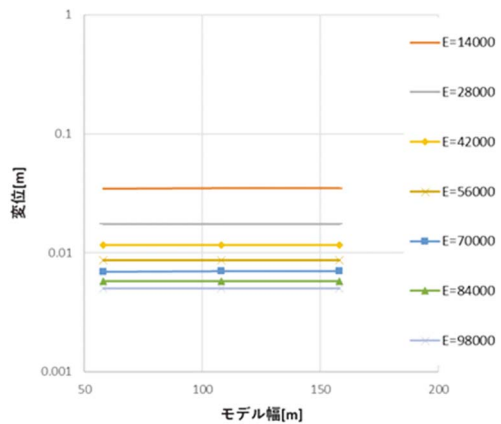


図 5 モデル幅と変位の関係(開削深度 5m)

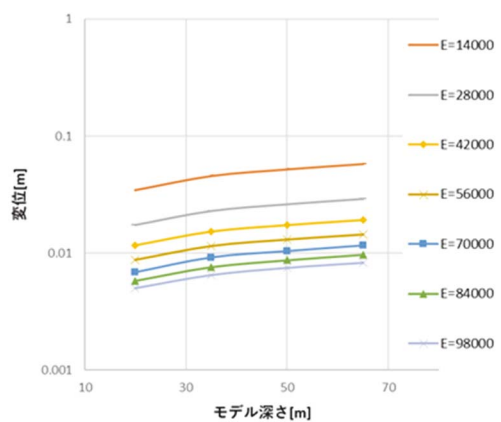


図 6 モデル深度と変位の関係(開削深度 5m)

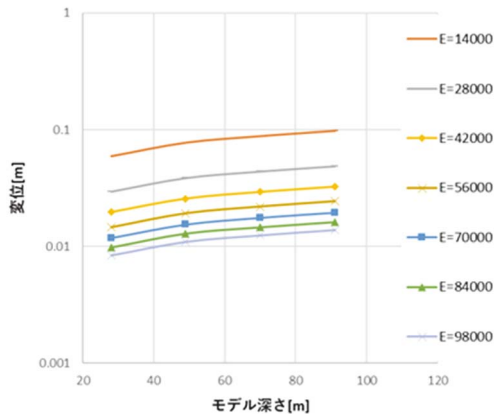


図 7 モデル深度と変位の関係(開削深度 7m)

3. 2 JR 関係基準書に基づいた検討

都市部鉄道構造物の近接施工マニュアル³⁾において掘削面中央の変位量の実測値より近似式(1)を提案された。

$$Y_R = 2.282 + 0.02646\sigma_R \quad (1)$$

ここで、

Y_R : 開削面中央位置のリバウンド量(mm)

σ_R : 掘削による排土荷重(kN/m²)

とする。

このとき、実測値分布の相関直線は、掘削による排土量と変位の関係を示しているため、開削面中央位置での変位量は、弾性係数には依存しない。また、この相関直線のデータ母数は $n=12$ で相関係数は、0.505 であり、データのばらつきが高いことに留意する必要がある。

式(1)に当てはめると本解析の場合、開削による排土量 σ_R (kN/m²) = 54(kN/m²)であるため、開削面中央位置でのリバウンド量 Y_R は、3.71(mm)となる。

一方、弾性係数を 2500N の 3 倍で設定した、2 次元弾性 FEM 解析より得られた変位量と、式(1)の計算値の関係から得られた変位量を図 8 に示す。

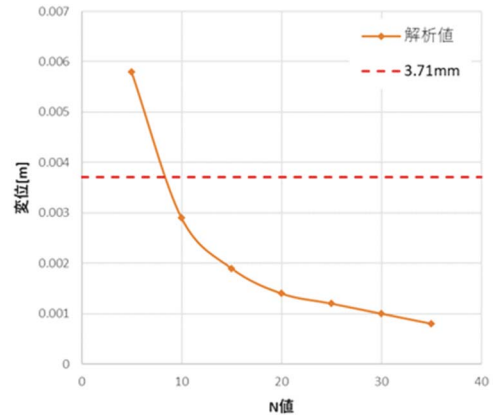


図 8 解析結果と推定式との比較

3. 3 3次元弾性 FEM 解析

① 開削奥行幅と変位の関係(開削深度 3m)

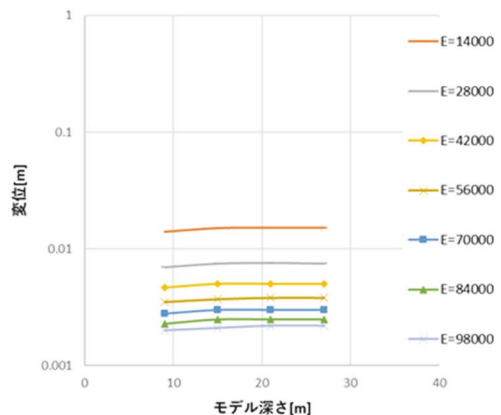


図 9 モデル深度と変位の関係

② 開削奥行幅と変位の関係(開削深度 5m)

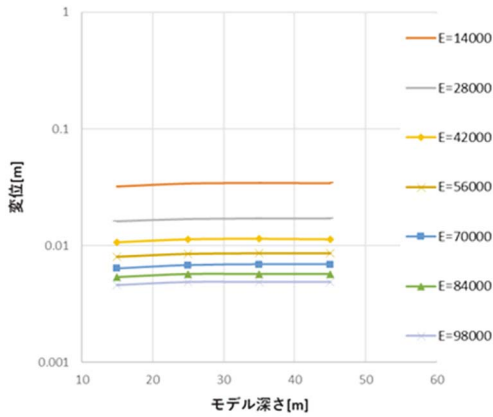


図 10 モデル深度と変位の関係

3. 4 結果比較

表 2 に示す条件での 2 次元弾性 FEM 解析と 3 次元弾性 FEM 解析モデルの奥行を開削深度の 9 倍としたケースの鉛直変位を比較する。

(1) ケース I: 開削深度 H=3m の場合

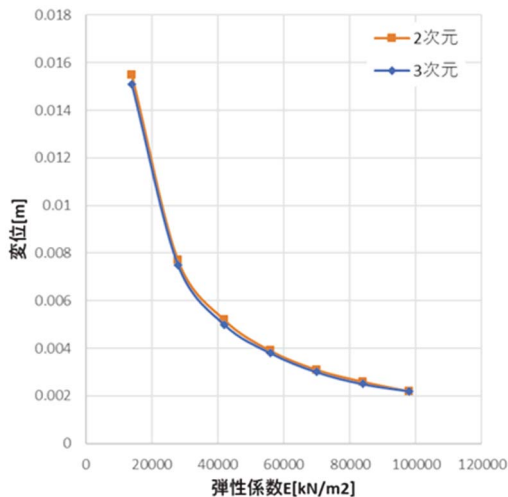


図 11 弾性係数と変位の関係

表 5 解析結果(H=3m)

E(kN/m ²)	2次元解析	3次元解析
14000	0.0155m	0.0151m
28000	0.0077m	0.0075m
42000	0.0052m	0.005m
56000	0.0039m	0.0038m
70000	0.0031m	0.003m
84000	0.0026m	0.0025m
98000	0.0022m	0.0022m

(2) ケース II: 開削深度 H=5m の場合

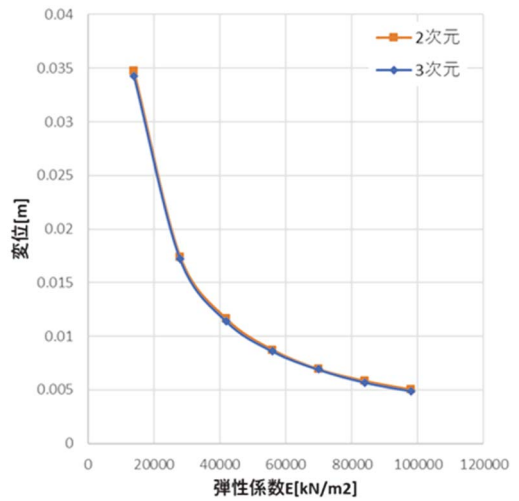


図 12 弾性係数と変位の関係

表 6 解析結果(H=5m)

E(kN/m ²)	2次元解析	3次元解析
14000	0.0347m	0.0343m
28000	0.0174m	0.0172m
42000	0.0116m	0.0114m
56000	0.0087m	0.0086m
70000	0.0069m	0.0069m
84000	0.0058m	0.0057m
98000	0.005m	0.0049m

4. 考察

4.1 2次元弾性 FEM 解析結果

モデル幅と鉛直変位の関係について、開削深度の5倍以上のモデル幅で解析した場合、境界部の拘束条件が開削底面の鉛直変位に対して影響はないといえる。一方で、深度方向のモデル範囲と開削底面変位との関係を見ると、モデル範囲を大きくすると変位も大きくなり、本解析の設定範囲では収束する結果は得られなかった。一方で、3次元解析では結果は一定のモデル深度で変位は収束している。そのため、2次元解析では開削施工という3次元問題を十分にモデル化できていないためと考えられる。2次元モデルにおいては、地盤と開削部が奥行方向に無限に続いていることを意味する。このため、2次元弾性 FEM 解析では奥行方向の拘束効果がなくモデルの深度を大きくしても結果は収束しない。したがって、2次元弾性 FEM 解析で開削施工の変位を解析する場合には深度方向のモデル領域に十分気を付ける必要がある。

また、今回の開削深度 3m,5m,7m の解析結果より、N 値が小さい範囲では N 値の変位への影響が大きいため N 値が小さい軟弱な地盤ほど N 値の精度が必要になる。

4.2 解析結果と施工実測値との比較

図8の通り、N 値 8 程度で値が一致していることがわかる。この実測値は支保工がなされた掘削であるため変位は本解析より小さい値になっていると考えられる。また、実測値分布の関係式では変位量は排土荷重に依存する関数で表されているが FEM 解析では変形係数に依存する。そのため、この実測値より得られた関係式については N 値 8 程度の軟弱地盤に適用できると考えられる。

4.3 3次元弾性 FEM 解析結果

図9、図10に示すように、3次元弾性 FEM 解析では、モデル深度は開削深度の7倍程度で開削底面変位がほとんど収束している結果となった。

4.4 2次元と3次元弾性 FEM 解析の比較

表2で示す I、II の条件で2次元弾性 FEM 解析に対して3次元弾性 FEM 解析をした。3次元解析モデルの開削底面奥行幅を開削深度の9倍とった結果との結果を比較する。表5、表6に示された通り、2次元弾性 FEM 解析と3次元弾性 FEM 解析では結果はほとんど一致していることがわかる。そのため、実務で開削施工を2次元弾性 FEM 解析より解析する場合には、開削底面の奥行方向が開削深度の9倍～10倍程度以上あれば3次元弾性 FEM 解析とほとんど同じ結果を得られる。9倍程度以下の奥行方向掘削幅の場合には、3次元弾性 FEM 解析の結果よりも変位を過大に評価する可能性があることに留意する必要がある。

<参考文献>

- 1) 「トンネル数値解析マニュアル」(日本道路公団, 2002,3)
- 2) 「土木構造物設計施工標準」
- 3) 「都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル」(鉄道総合技術研究所, 2007, 1)