

---

# 埋設管地盤拘束力実験の非線形構造解析

---



# 各基準における地盤反力

# 水道施設耐震工法指針(2009)

## 7 地盤の剛性係数

地震動レベル1に対しては、地盤と管路の滑りを考慮しない耐震計算式を適用する。この場合、埋設管路の管軸方向及び管軸直交方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数が必要となるが、これらは次式によって求める。

$$K_{g1} = C_1 \frac{\gamma_t}{g} V_s^2 = 16729 \text{ kN/m}^2$$

$$K_{g2} = C_2 \frac{\gamma_t}{g} V_s^2 = 33457 \text{ kN/m}^2$$

せん断波速度から算出

ここに、 $K_{g1}$  : 管軸方向の地盤の剛性係数(kN/m<sup>2</sup>)      kN/m<sup>2</sup>

$K_{g2}$  : 管軸直交方向の地盤の剛性係数(kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_t$  : 土の単位体積重量(=18 kN/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度(=9.8 m/s<sup>2</sup>)

$V_s$  : 管路位置での表層地盤(1層目)の剪断弾性波速度

(=77.92 m/s) → N値3から算出

$C_1$ 、 $C_2$  : 埋設管路の管軸および管軸直交方向の単位長さ当たりの地盤

の剛性係数に対する定数であり、一般には、おおむね

$C_1=1.5$ 、 $C_2=3$ 前後の値になると想定される。

# 道路橋示方書

## ② 水平方向地盤反力係数

$$k_H = k_{H0} \left( \frac{B_H}{0.3} \right)^{-3/4} \dots\dots\dots (式 5)$$

ここに、

$k_H$  : 水平方向地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)      **kN/m<sup>3</sup>**

$k_{H0}$  : 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 (kN/m<sup>3</sup>) で、各種土質試験又は調査により求めた変形係数から推定する場合は、次式により求める。

$$k_{H0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \dots\dots\dots (式 6)$$

$\alpha$  : 表 1 に示す地盤反力係数の換算係数

$E_0$  : 表 1 に示す方法で測定又は推定した設計の対象とする位置での地盤の変形係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$B_H$  : 荷重作用方向に直交する基礎の換算載荷幅 (m) で、表 2 に示す方法で求める。

表 1 変形係数  $E_0$  と  $\alpha$

変形係数 $E_0$ の推定方法	地盤反力係数の換算係数 $\alpha$	
	常時・暴風時	地震時
直径0.3mの剛体円板による平板載荷試験の繰返し曲線から求めた変形係数の1/2	1	2
孔内水平載荷試験で測定した変形係数	4	8
供試体の一軸圧縮試験又は三軸圧縮試験から求めた変形係数	4	8
標準貫入試験のN値より $E_0=2,800N$ で推定した変形係数	1	2

**N値からの算出が多い**

道路橋示方書 (H24)  
より引用

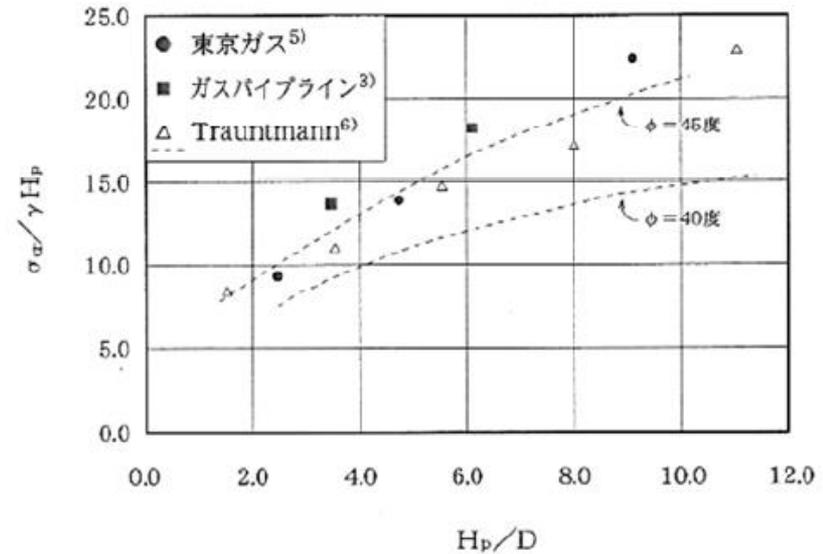
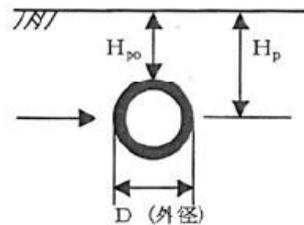
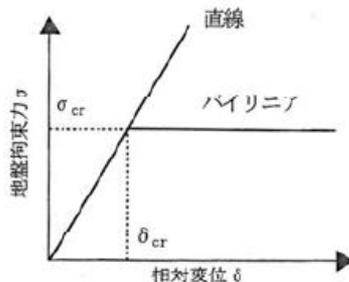
# 高圧ガス導管耐震設計指針(2013)

## 4.4.2 管軸直角方向の地盤拘束力

管軸直角方向の地盤拘束力 $\sigma$ は、単位投影面積あたりの最大地盤拘束力 $\sigma_{cr}$ 及び降伏変位 $\delta_{cr}$ を用いてバイリニアまたはバイリニアの初期勾配を用いた直線で近似する。あるいは別途実測により求めてもよい。なお、表に示されていない呼び径の場合には、補間より求める。

表 4.4-1 呼び径別の管軸直角方向地盤拘束力  
**N/cm<sup>3</sup>**

呼び径 (mm)	最大地盤拘束力 $\sigma_{cr}$ (N/cm <sup>2</sup> )	降伏変位 $\delta_{cr}$ (cm)	地盤ばね係数 $k_2 = \sigma_{cr} / \delta_{cr}$ (N/cm <sup>3</sup> )
100	53	2.6	20
150	51	2.6	20
200	48	2.6	18
300	42	2.7	16
400	39	2.8	14
500	36	2.8	13
600	34	2.9	12
650	33	2.9	11
750	32	3.0	11
900	30	3.1	10



**埋設深さが重要パラメータ**

高圧ガス導管耐震設計指針(2013)  
より引用

# ALA (2005)

[管軸直角(水平)方向]

埋設深さが重要パラメータ

$$P_u = \begin{cases} S_u N_{ch} D & \dots\dots \text{粘性土} \\ \bar{\gamma} H N_{qh} D & \dots \text{砂質土} \end{cases}$$

$$y_u = \begin{cases} 0.07 \sim 0.10 (H + D/2) & \dots\dots\dots \text{緩い砂質土} \\ 0.03 \sim 0.05 (H + D/2) & \dots\dots\dots \text{中位の砂質土} \\ 0.02 \sim 0.03 (H + D/2) & \dots\dots\dots \text{締まった砂質土} \\ 0.03 \sim 0.05 (H + D/2) & \dots \text{硬い} \sim \text{軟らかい粘性土} \end{cases}$$

K : kN/m<sup>2</sup>

ここで,

$P_u$  : 単位長さあたりの管軸直角(水平)方向最大地盤拘束力

$y_u$  : 最大地盤拘束力における管軸直角方向変位

$N_{qh}$ ,  $N_{ch}$  : 係数 (図 2-5-2 および図 2-5-22 参照)

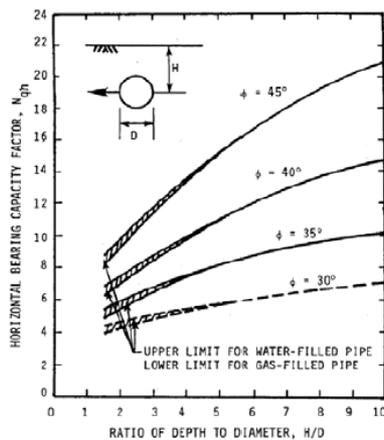


図 2-5-21  $N_{qh}$  と埋設深さ/口径比の関係 (ASCE1984)

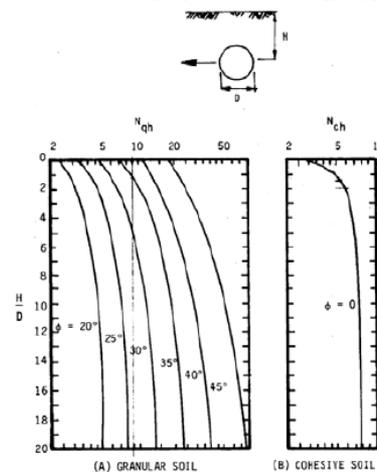


図 2-5-22  $N_{ch}$  と埋設深さ/口径比の関係 (ASCE1984)

# 地盤ばねの比較

	地盤バネ係数	降伏変位	上限値
水道	33457 kN/m <sup>2</sup>	規定なし	規定なし
道路橋	11216 kN/m <sup>3</sup>	19 mm	210 kN/m <sup>2</sup>
高圧ガス	10000 kN/m <sup>3</sup>	32 mm	310 kN/m <sup>2</sup>
ALA	5400 kN/m <sup>2</sup>	60 mm	324 kN/m

※受働土圧を上限値として場合

## 計算条件

口径：φ1000

土被り：1.5m

N値：3（ALAでは中位の砂質土）

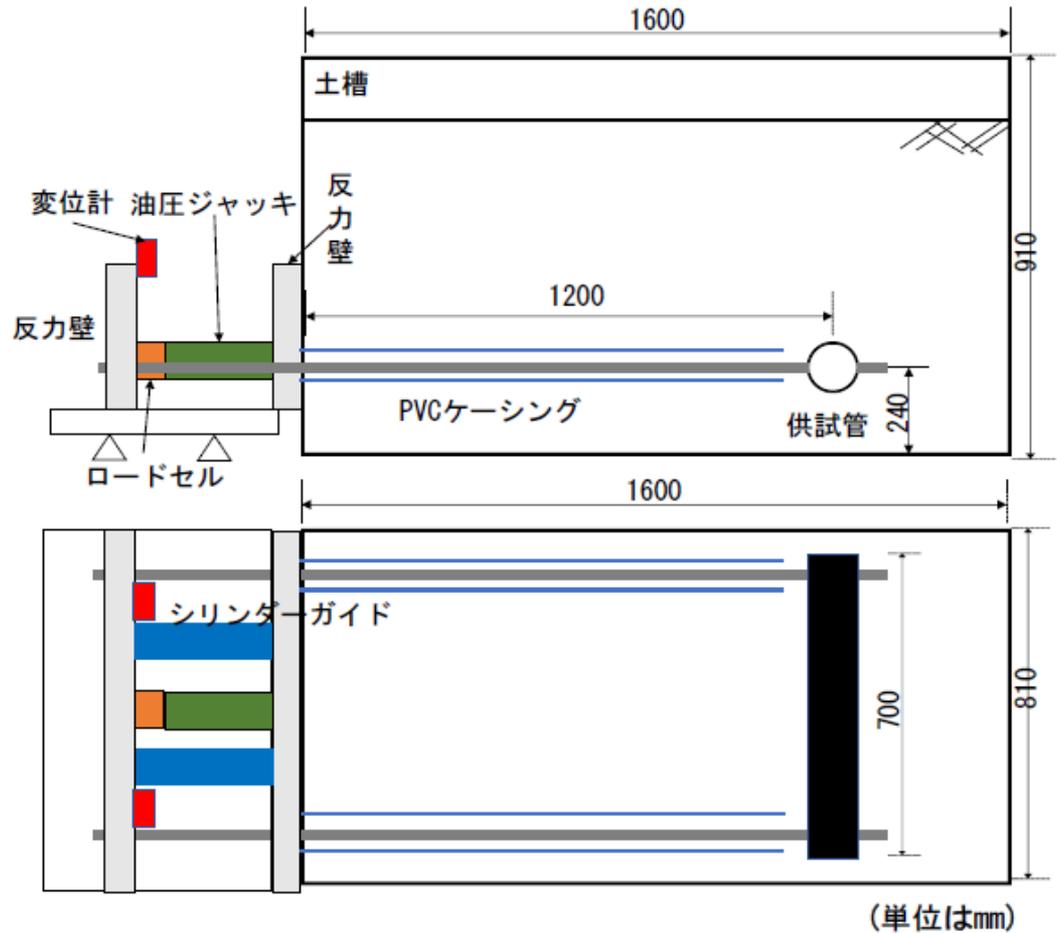
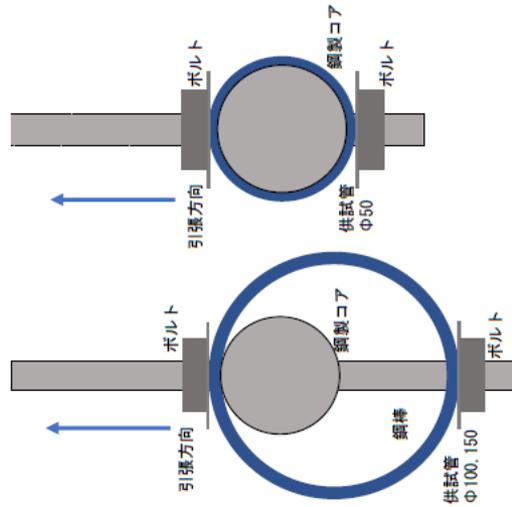
土の単位体積重量：18kN/m<sup>3</sup>

土の内部摩擦角：45°

---

### 3. 地盤反力測定実験

# パイプに作用する地盤反力測定実験



緒方ら、小口径管に作用する管軸直角方向の地盤拘束力のモデル化  
第41回土木学会地震工学研究発表会より引用

# 検討ケース

表-2 水平引張方向実験ケース

管種	SP			PE		
	呼び径	φ 50	φ 100	φ 150	φ 50	φ 100
土被り ケース	2D	2D	2D	2D	2D	2D
	4D	4D	3D	4D	4D	3D
	6D	6D*	4D*	6D	6D*	4D*
	10D*			10D*		

注: \*は上層から 2D 相当分の地盤は、同重量に換算した土のう袋で載積した。

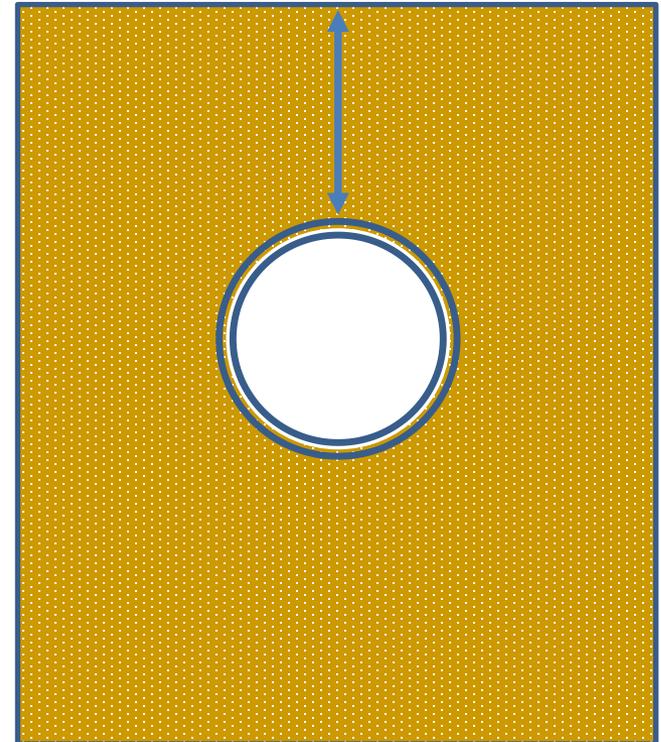
表-3 鉛直上方向引張実験ケース

管種	SP			PE		
	呼び径	φ 50	φ 100	φ 150	φ 50	φ 100
土被り ケース	2D	2D	2D	2D	2D	2D
	4D	3D	2.5D	4D	3.5D	
	6D	6D		6D		
	8D					

表-4 鉛直下方向押し込み実験ケース

管種	SP			PE		
	呼び径	φ 50	φ 100	φ 150	φ 50	φ 100
土被り ケース	1D	1D	1D	1D	1D	1D

土被りを変化させる



緒方ら、小口径管に作用する管軸直角方向の地盤拘束力のモデル化  
第41回土木学会地震工学研究発表会より引用

# 実験結果

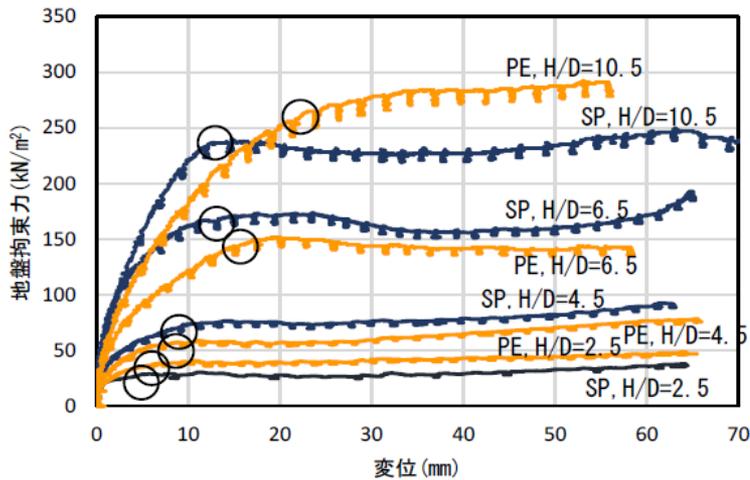


図-5 水平引張試験φ50の地盤拘束力と変位との関係

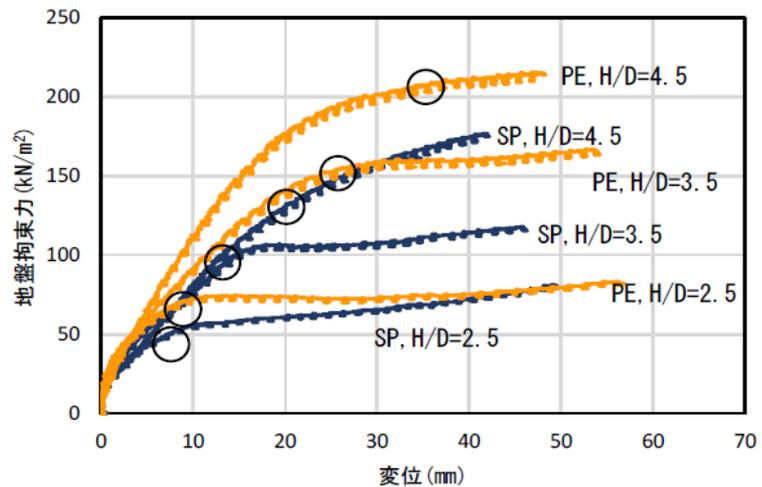
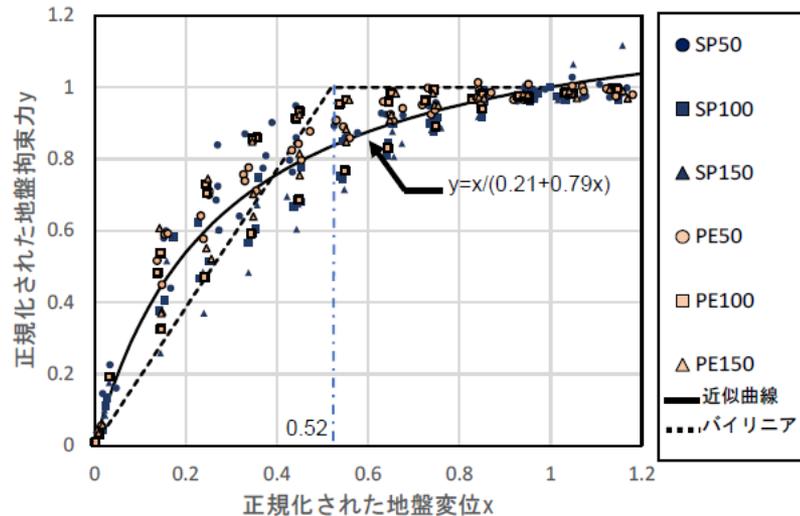


図-7 水平引張試験φ150の地盤拘束力と変位との関係



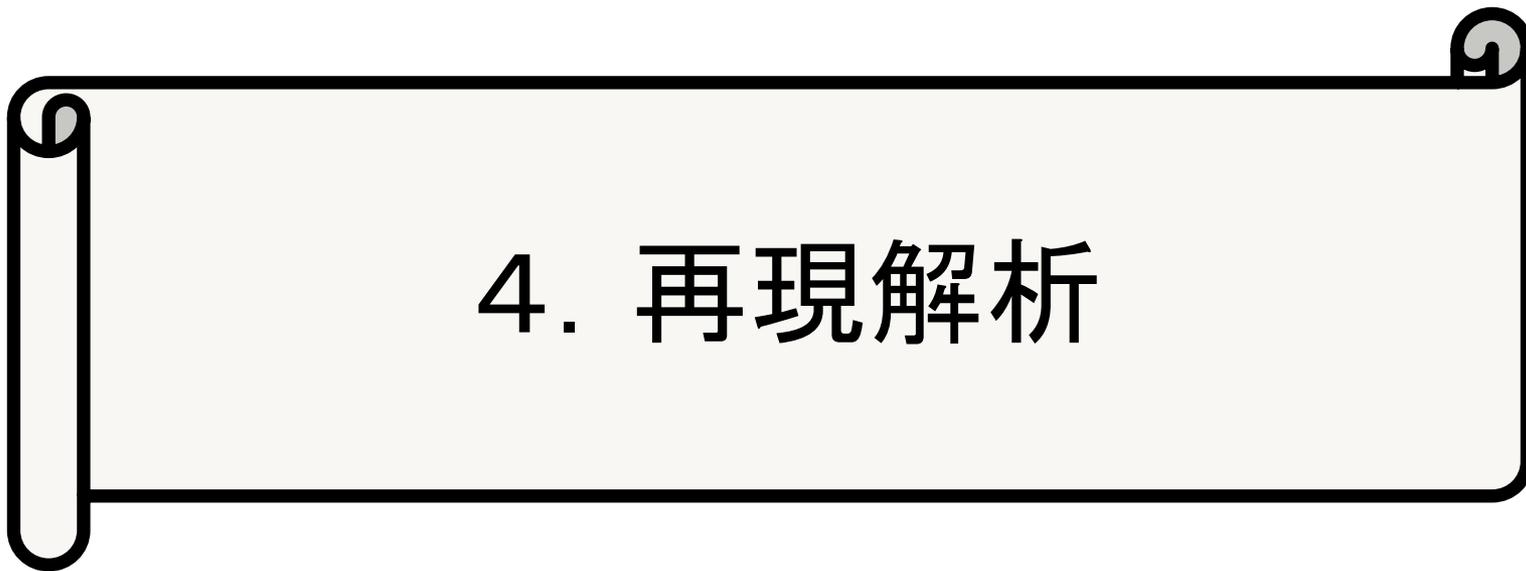
緒方ら、小口径管に作用する管軸直角方向の地盤拘束力のモデル化  
第41回土木学会地震工学研究発表会より引用

## 地盤ばねの定式化

$$\frac{k_h}{k_{h0}} = \left( \frac{D}{D_0} \right)^{-\frac{2}{9}} \quad (3)$$

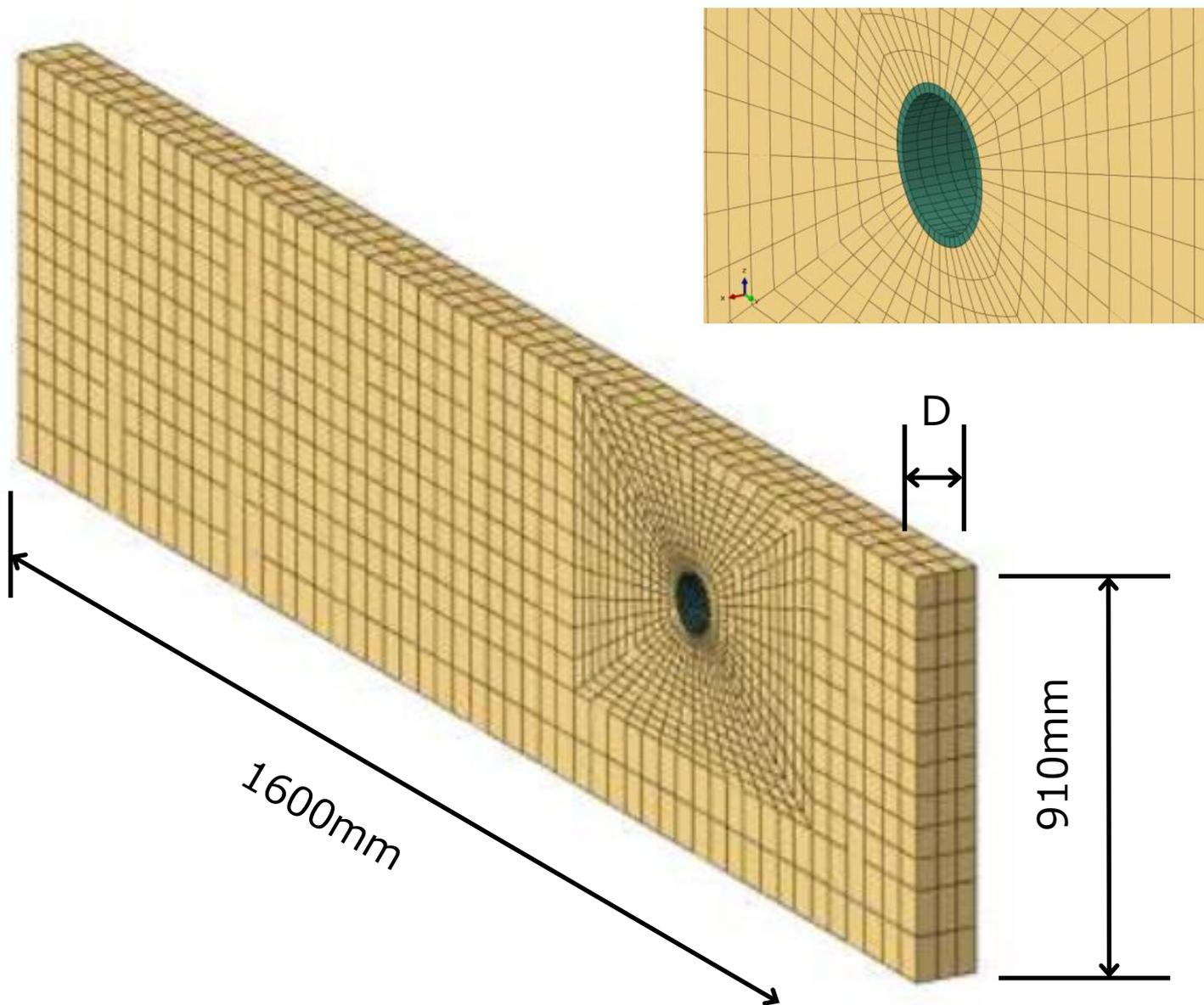
ここで、 $k_h$  : 水平方向地盤ばね係数 (kN/m<sup>3</sup>)  
 $k_{h0}$  : φ100の水平方向地盤ばね係数 (kN/m<sup>3</sup>)  
 $D_0$  : φ100の外径 (mm)

---

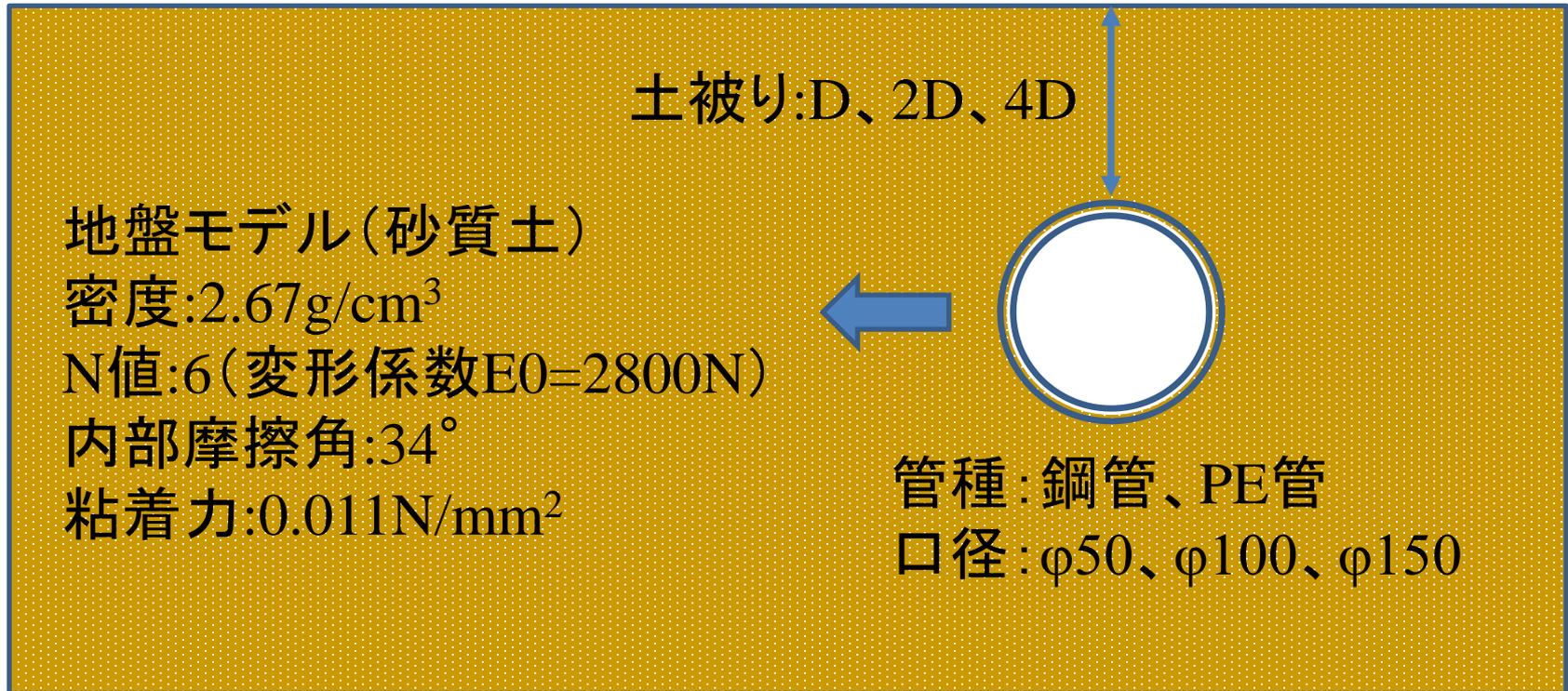


## 4. 再現解析

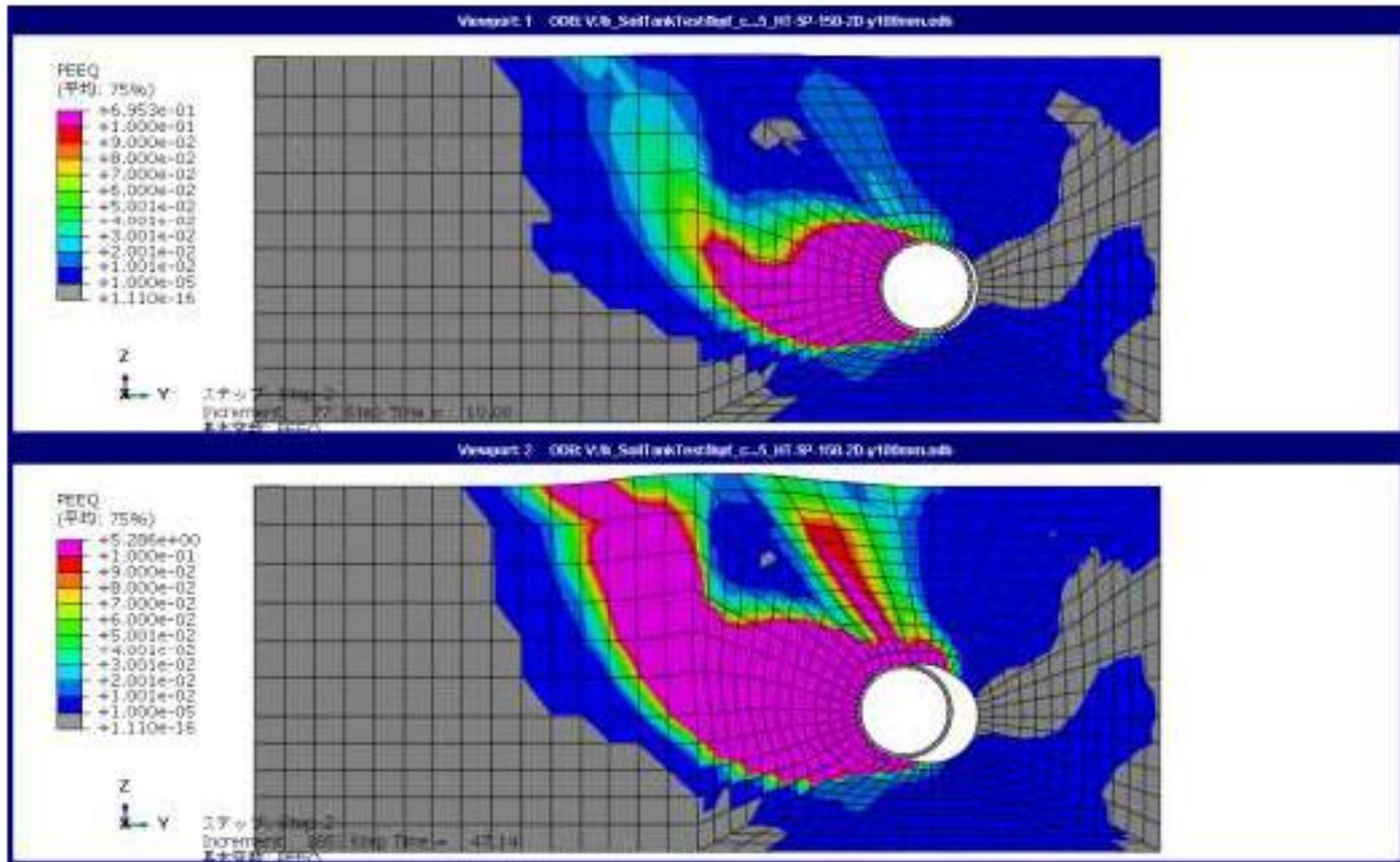
# FEMによる再現解析



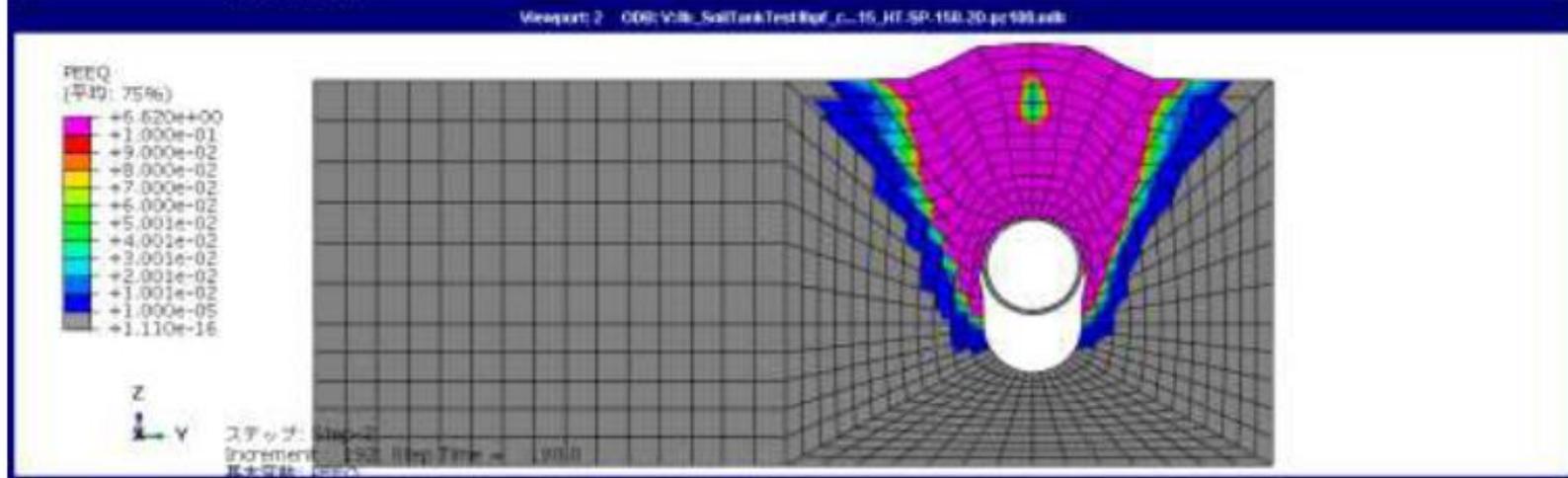
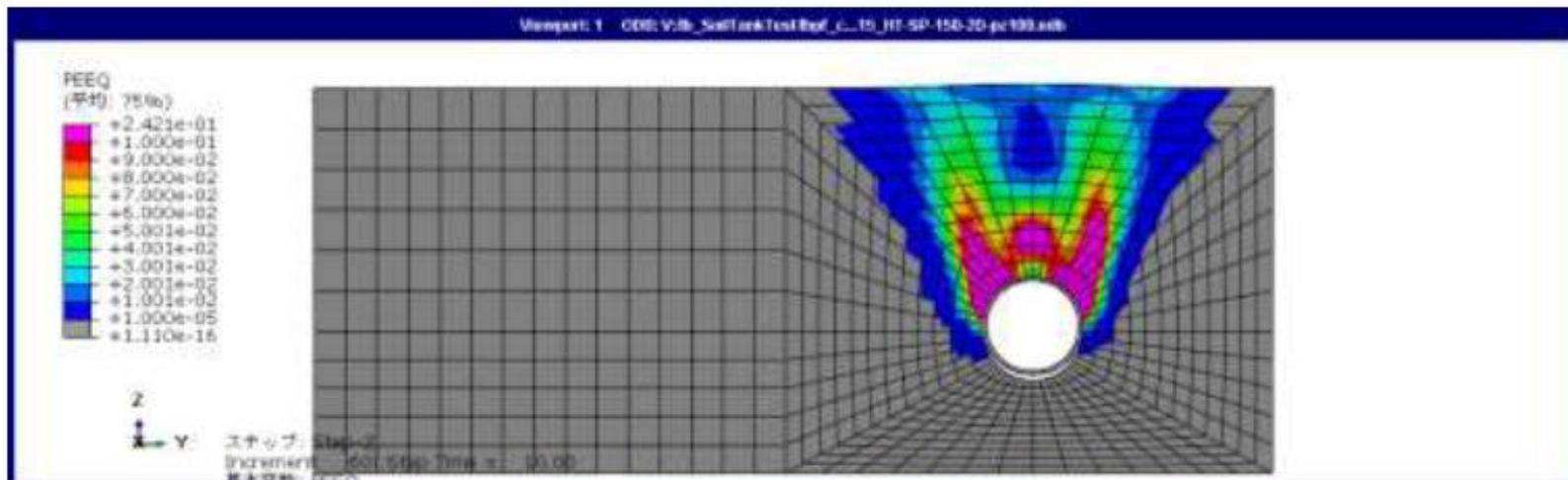
# 解析条件



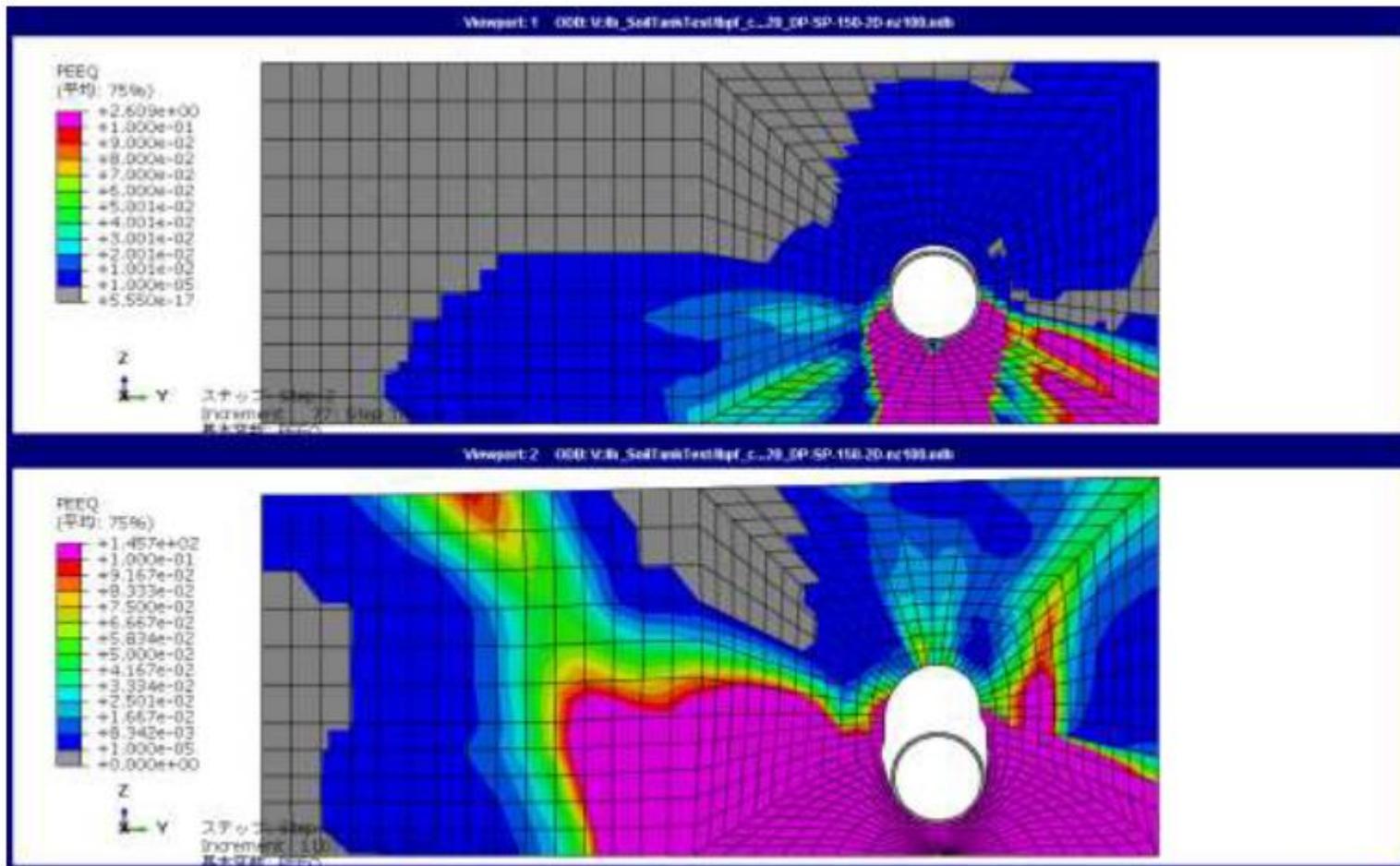
# 計算結果(水平方向 鋼管φ150 土被り2D)



# 計算結果(上方向 鋼管φ150 土被り2D)

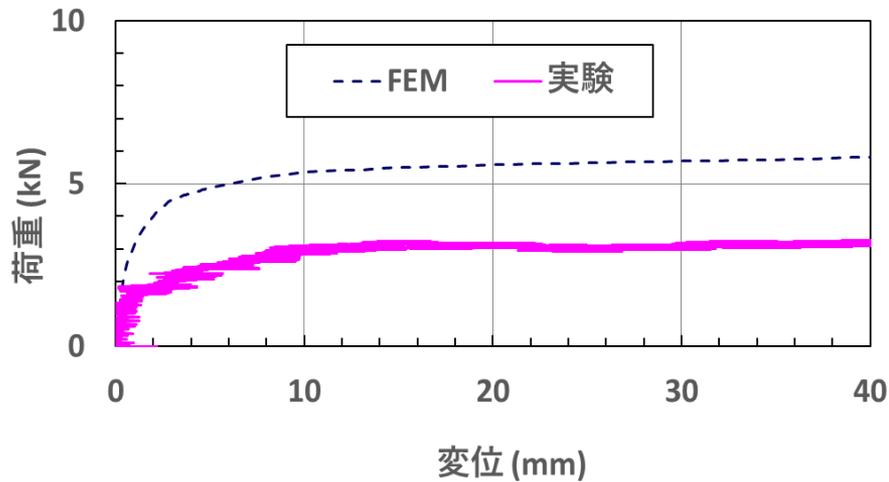


# 計算結果(下方向 鋼管φ150 土被りD)

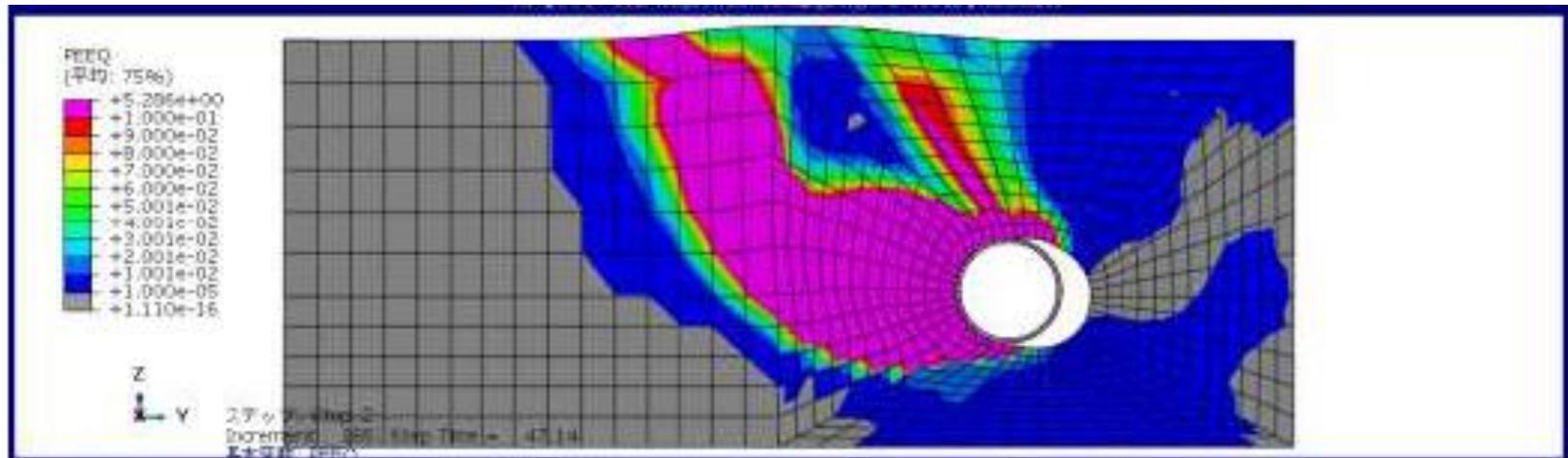
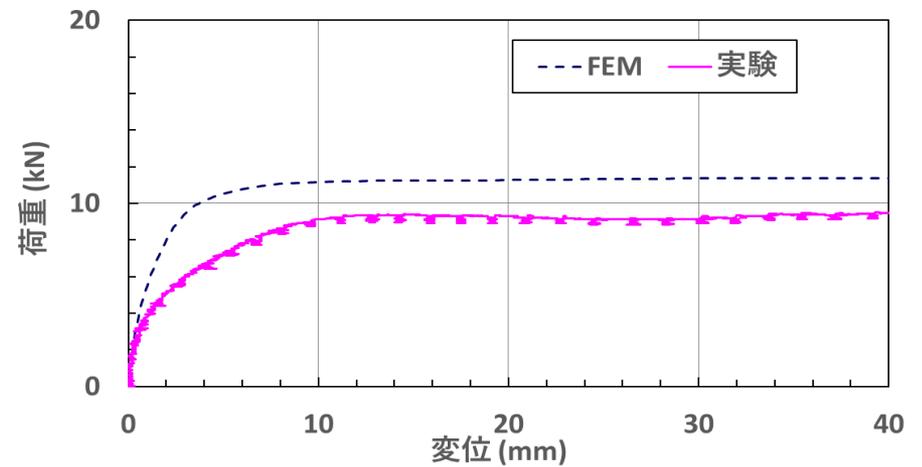


# 実験とFEMの比較(水平方向)

## 水平方向 鋼管φ50 4D



## 水平方向 ポリ管 φ150 2D



# 実験とFEMの比較(上方向)

## 上方向鋼管φ150 2D

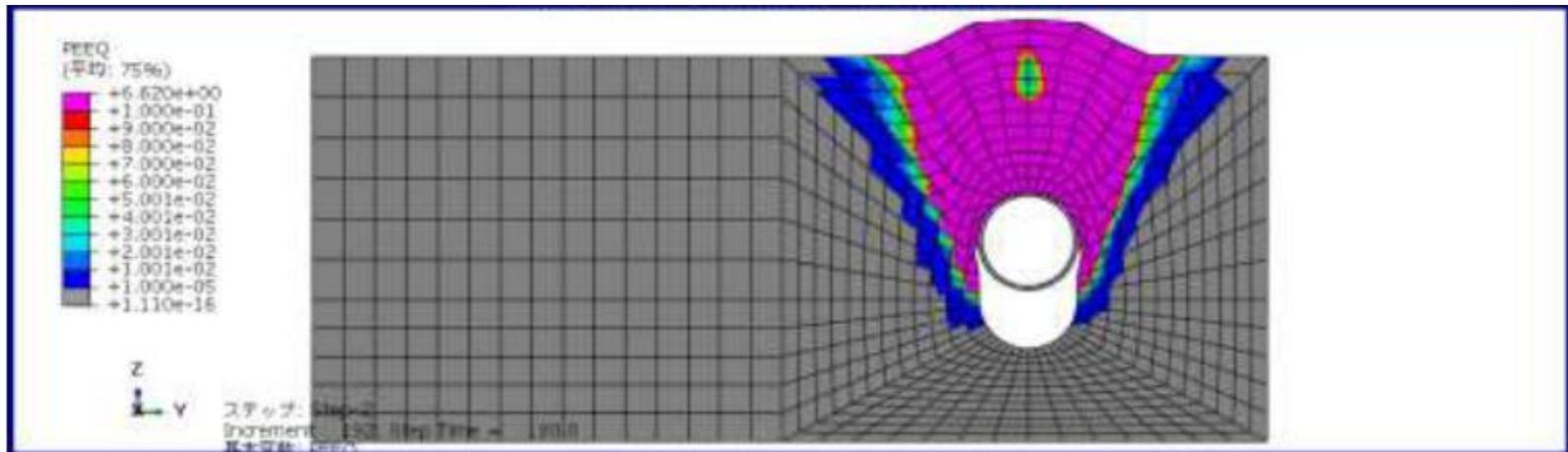
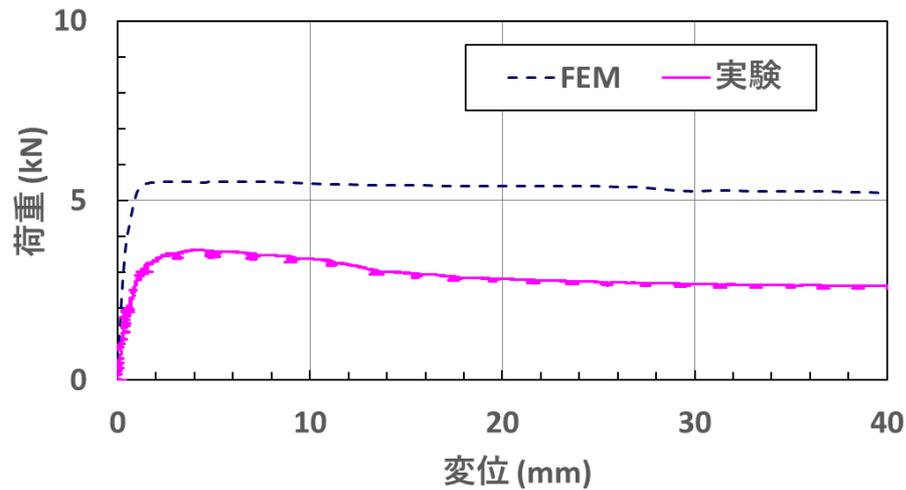
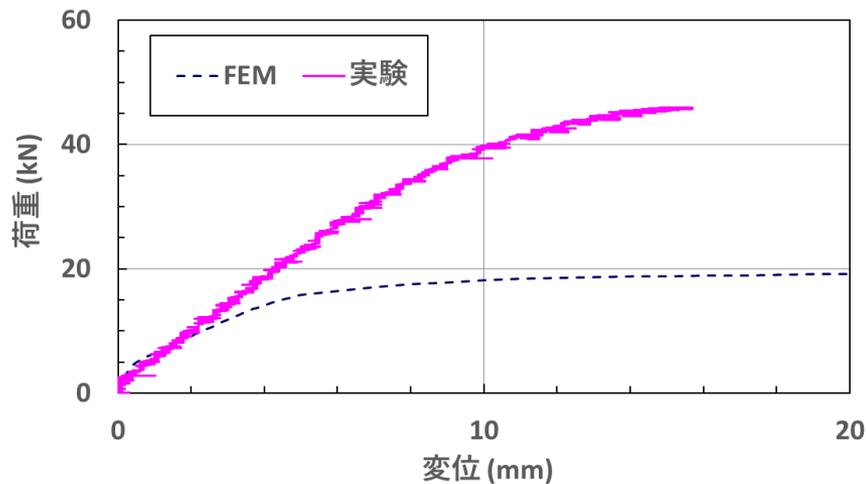


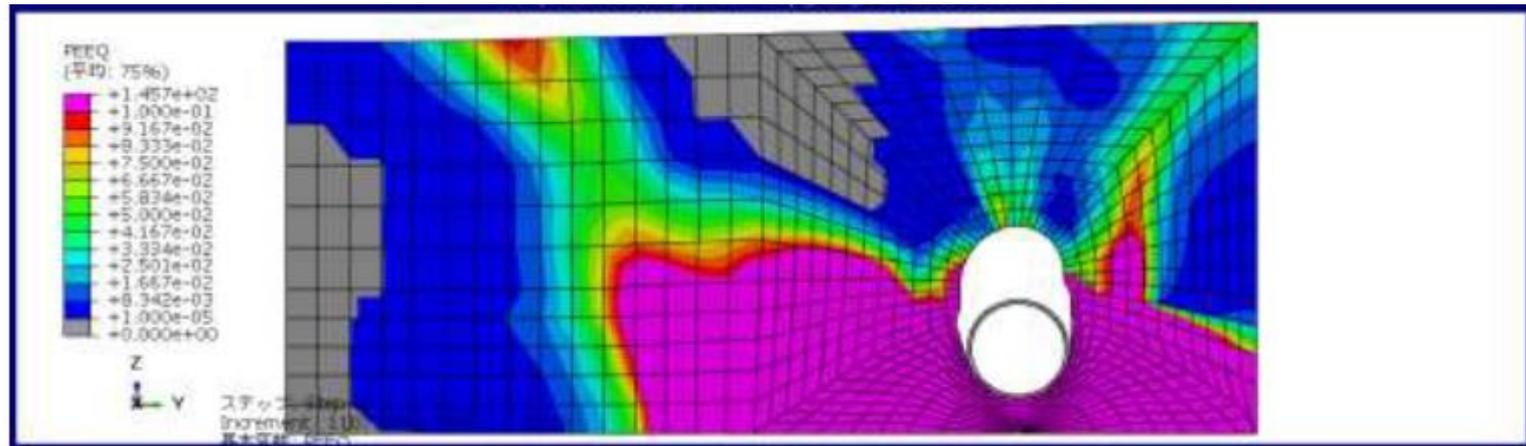
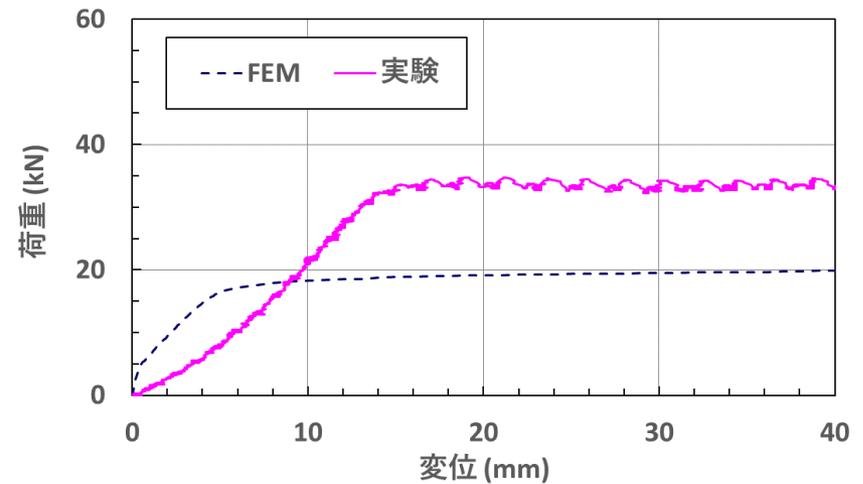
図 39 着目個所の相当塑性ひずみ (ケース 15 の拘束力点および最終入力点)

# 実験とFEMの比較(下方向)

## 下方向 鋼管φ150 1D

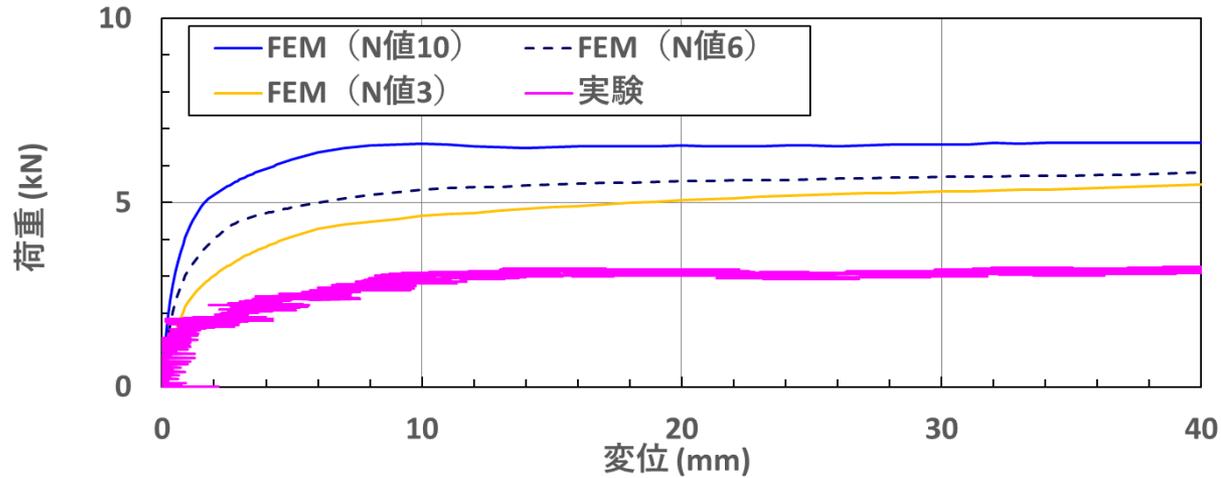


## 下方向 ポリ管φ150 1D

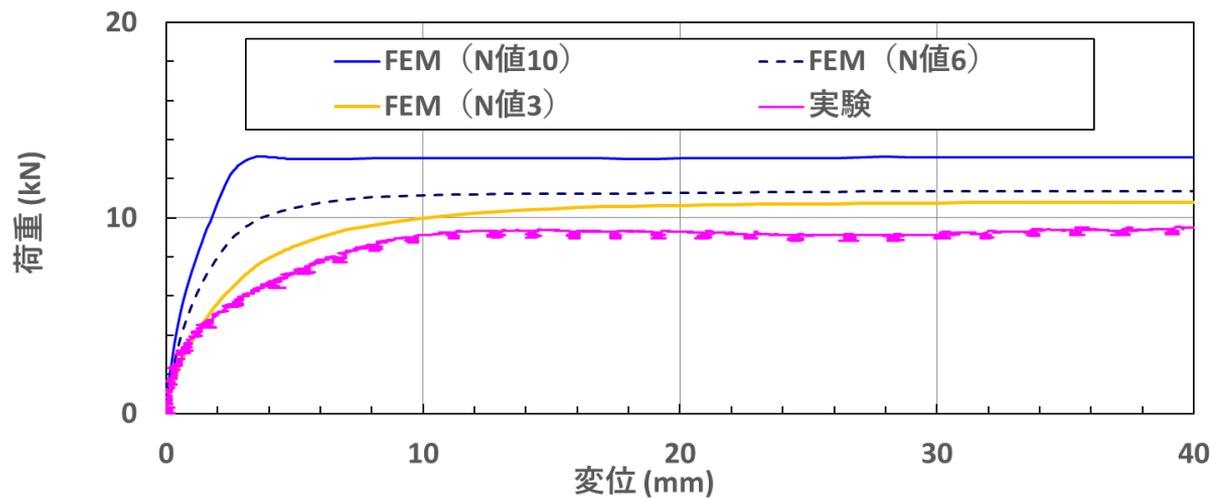


# 感度解析

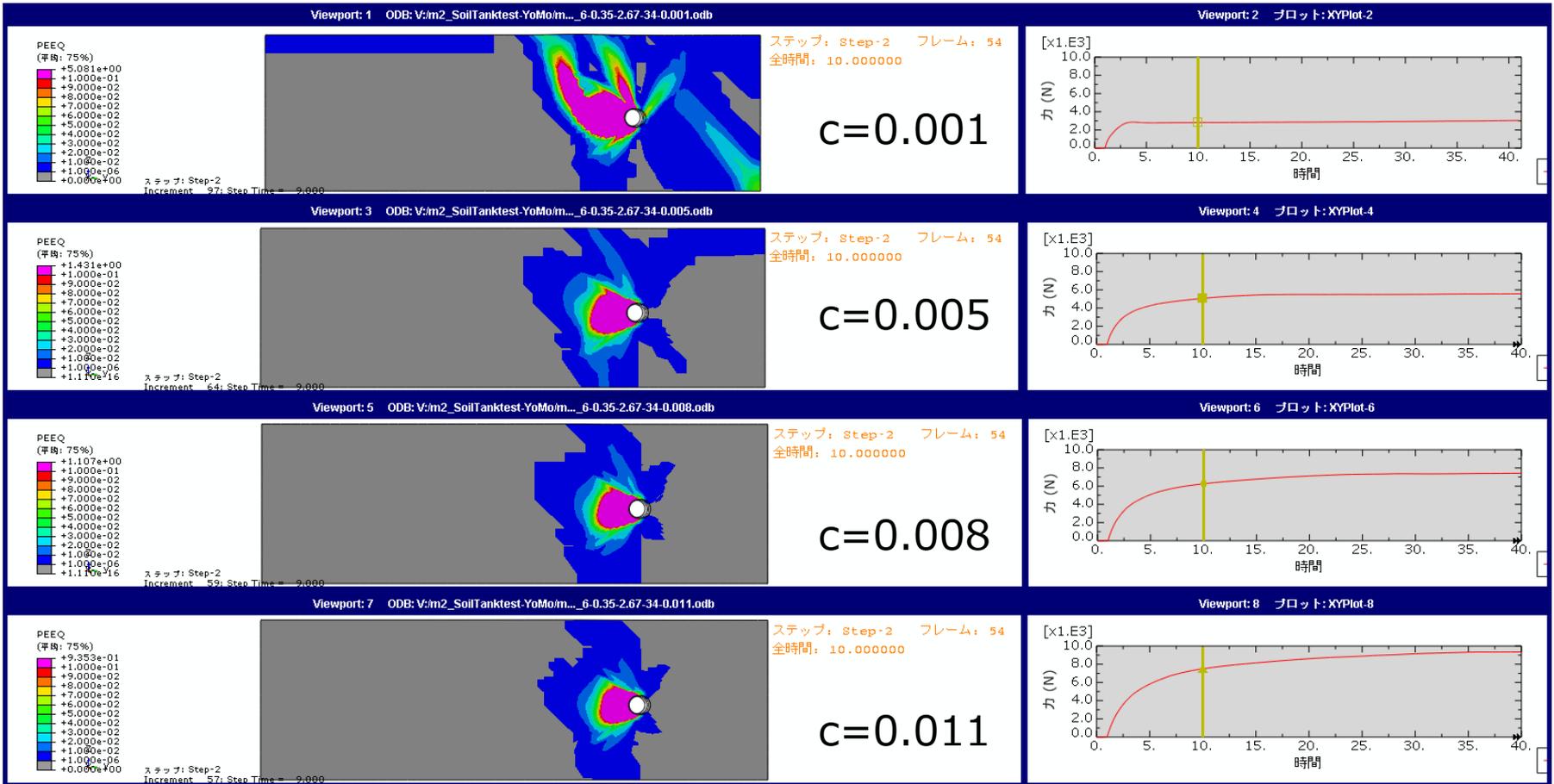
## 水平方向 鋼管φ50 4D



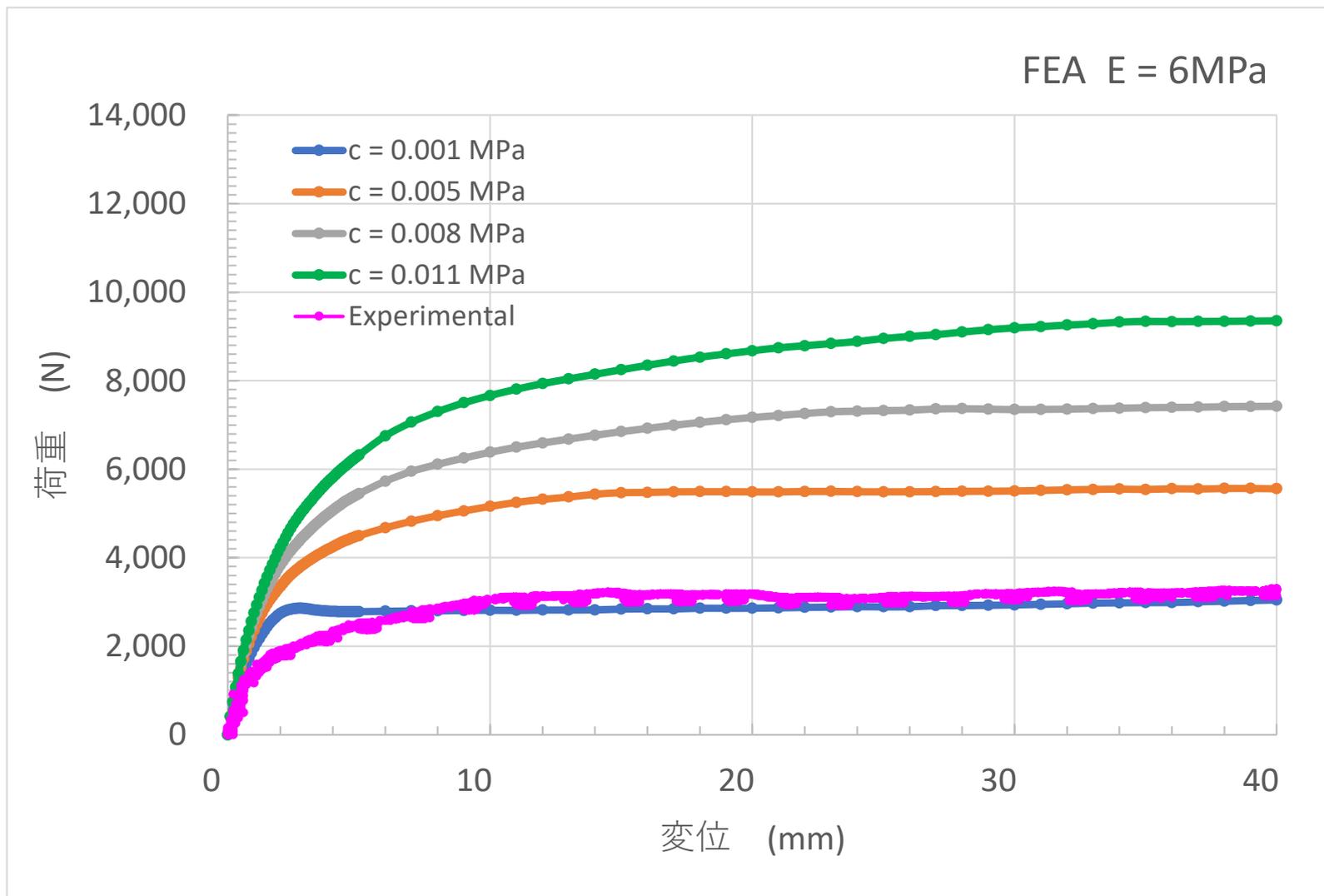
## 水平方向 ポリ管 φ150 2D



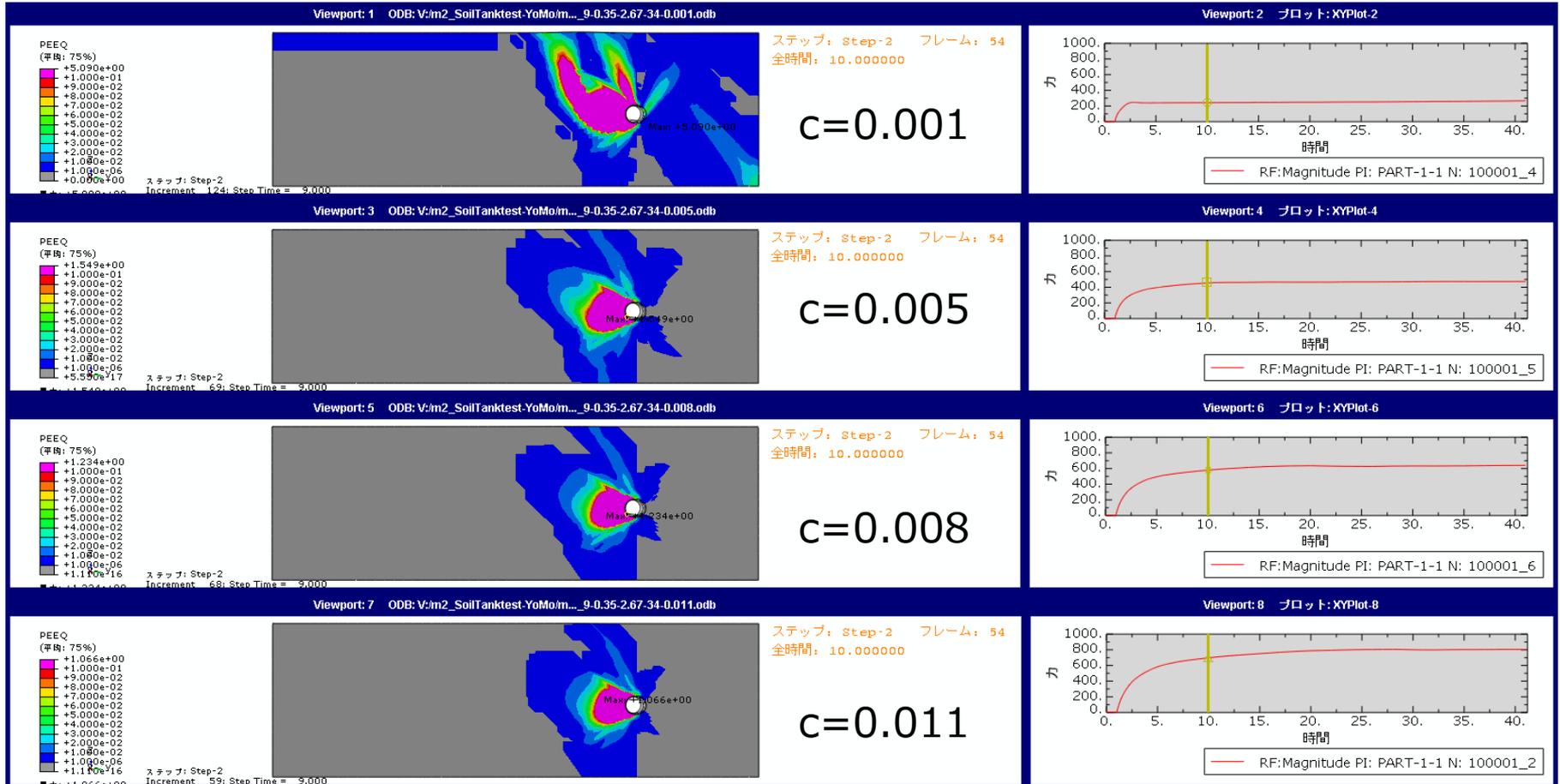
水平, 50A, 4D, SP,  $E : 6\text{MPa}$ ,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



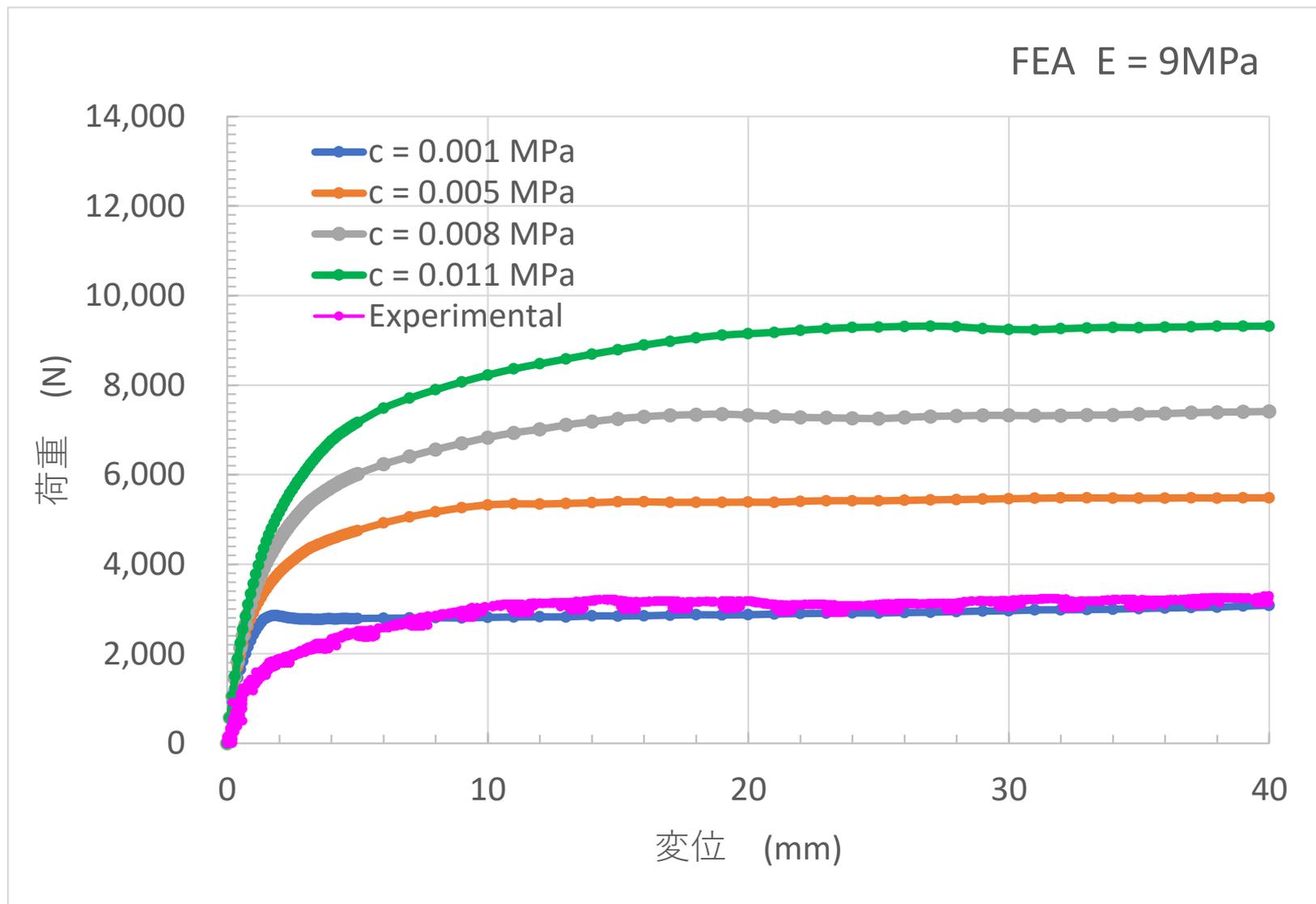
水平, 50A, 4D, SP, **E : 6MPa**,  $\nu : 0.35$ ,  $\varphi : 34\text{deg}$



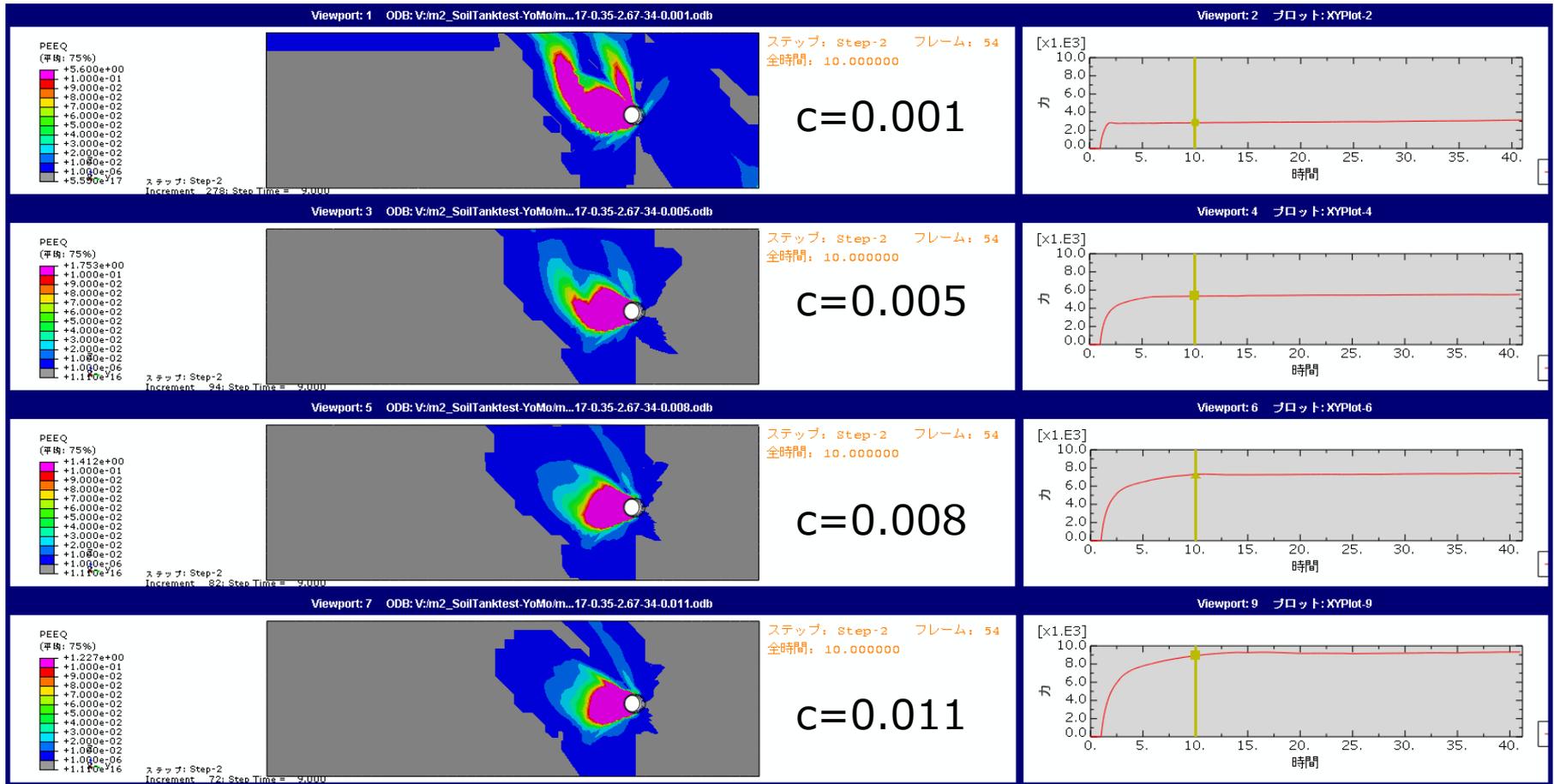
水平, 50A, 4D, SP,  $E : 9\text{MPa}$ ,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



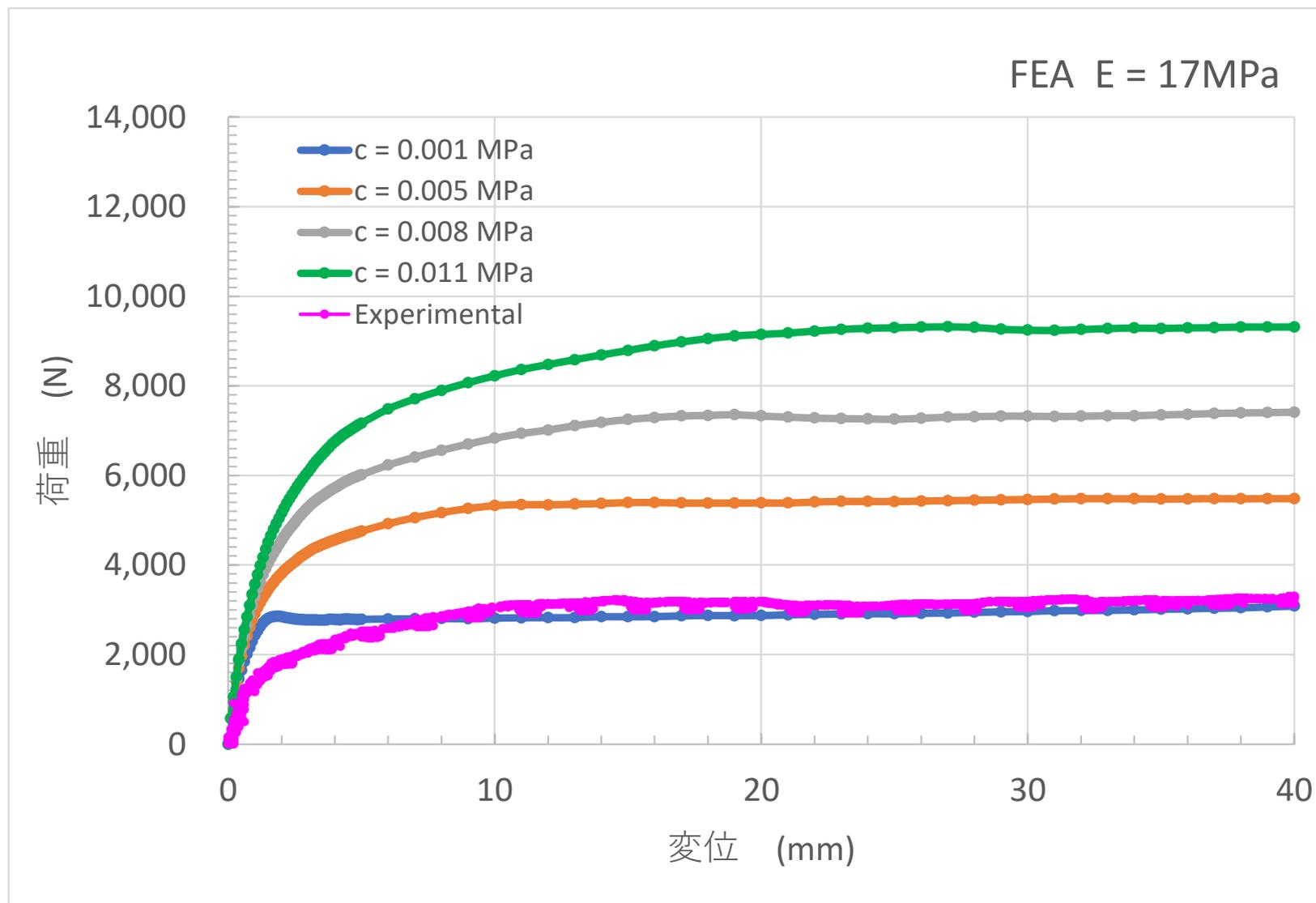
水平, 50A, 4D, SP, **E : 9MPa**,  $\nu : 0.35$ ,  $\varphi : 34\text{deg}$



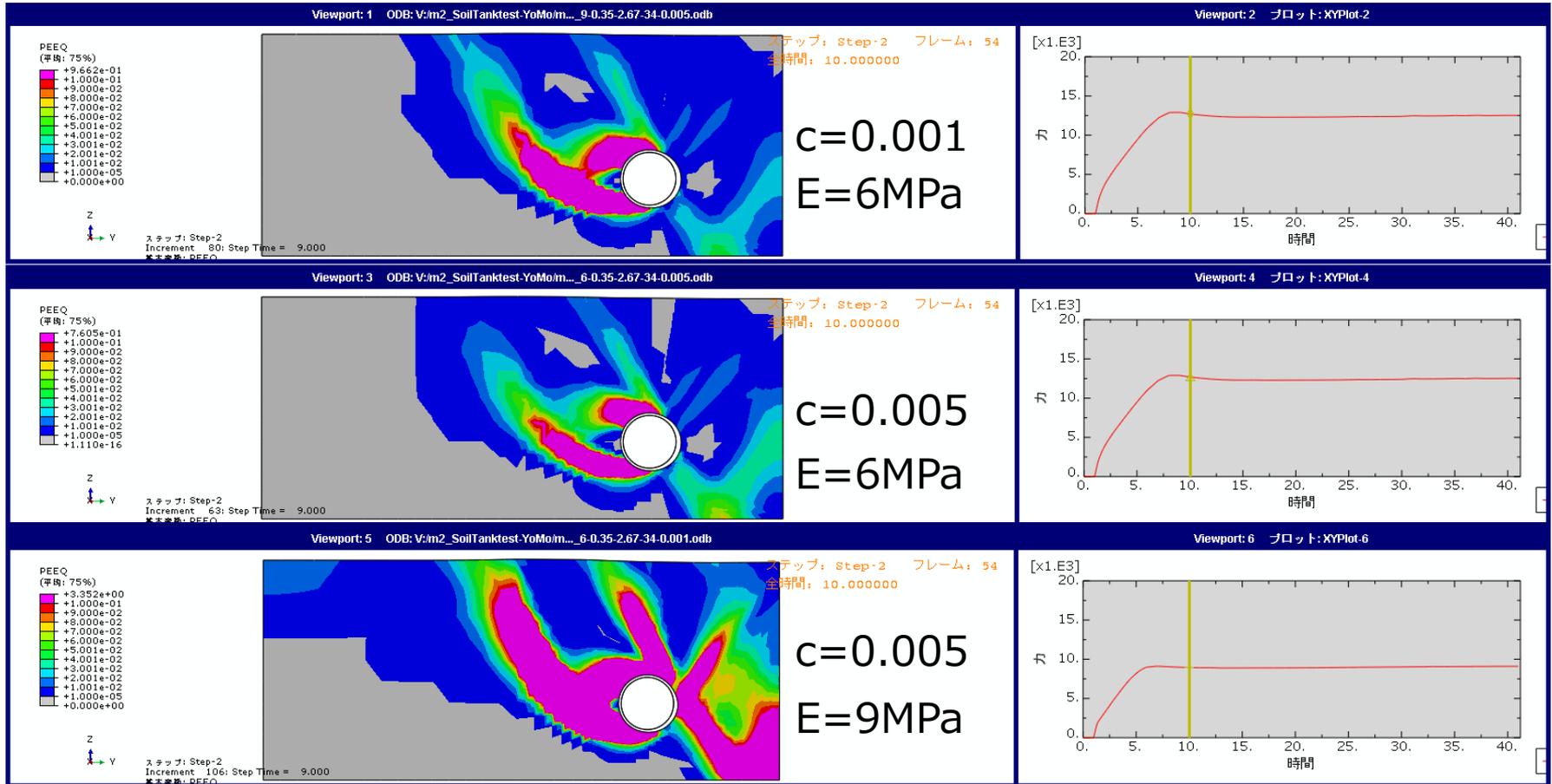
水平, 50A, 4D, SP,  $E : 17\text{MPa}$ ,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



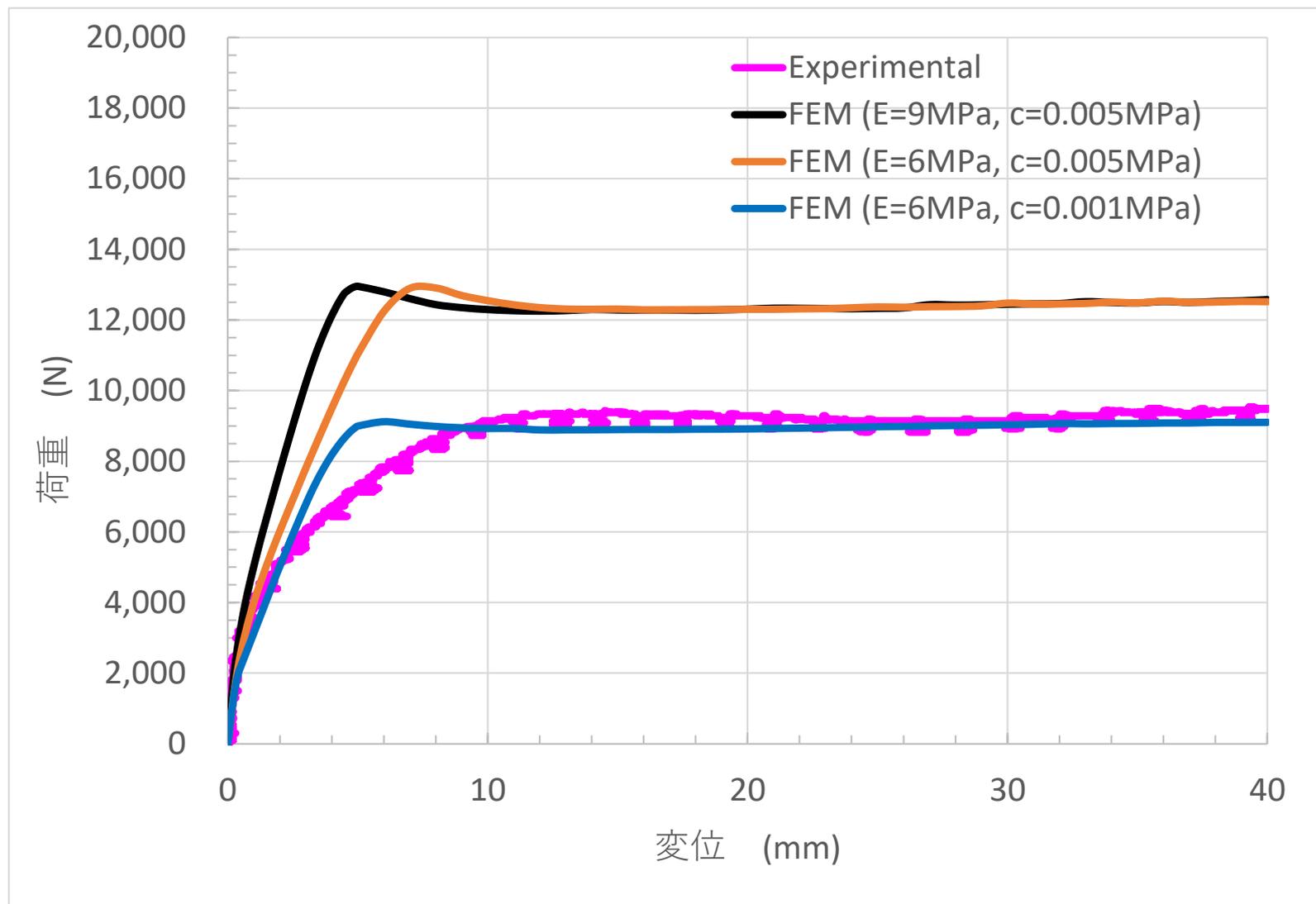
水平, 50A, 4D, SP, **E : 17MPa**,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



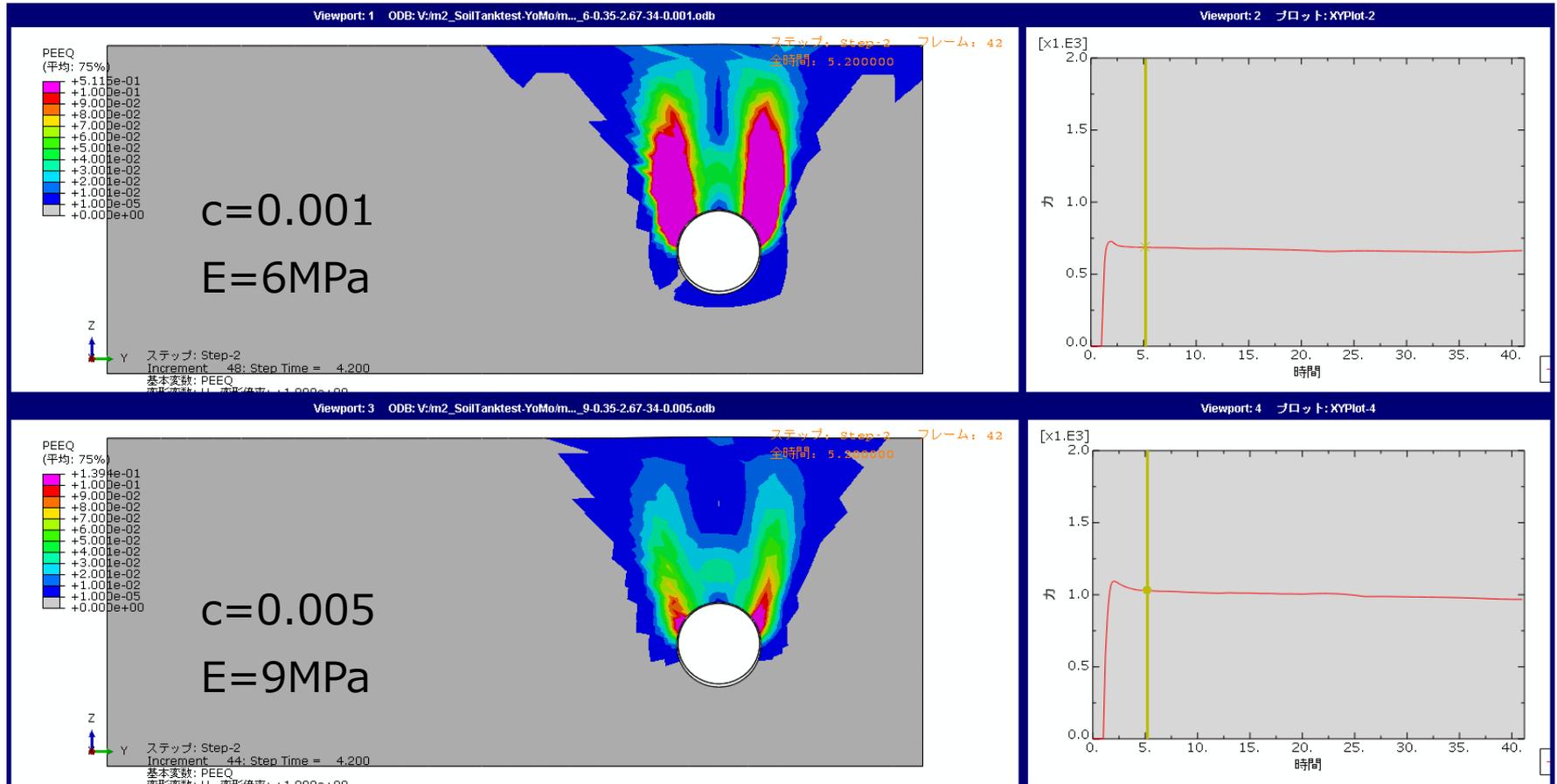
水平, 150A, 2D, PE,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



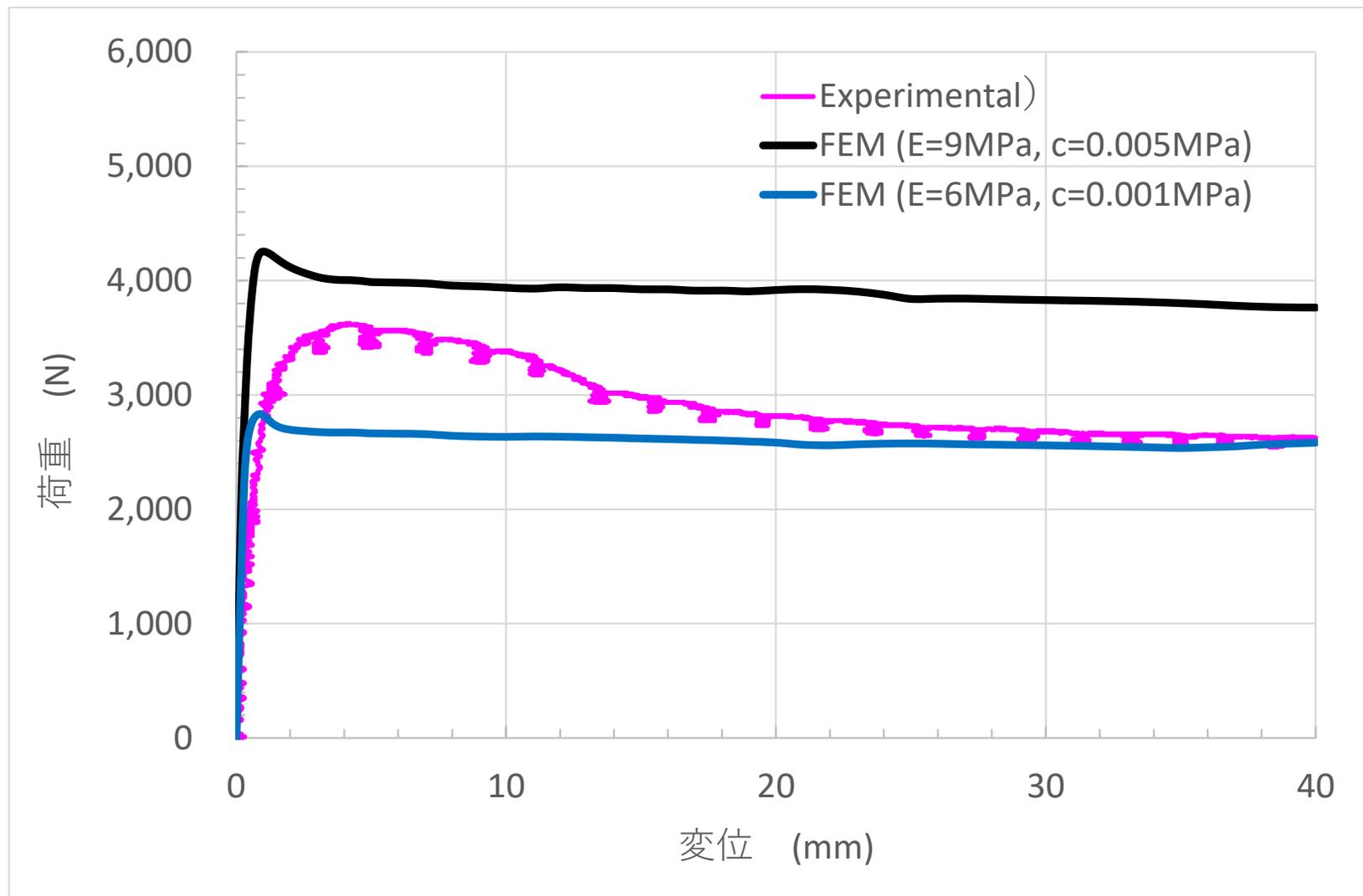
水平, 150A, 2D, PE,  $\nu : 0.35$ ,  $\varphi : 34\text{deg}$



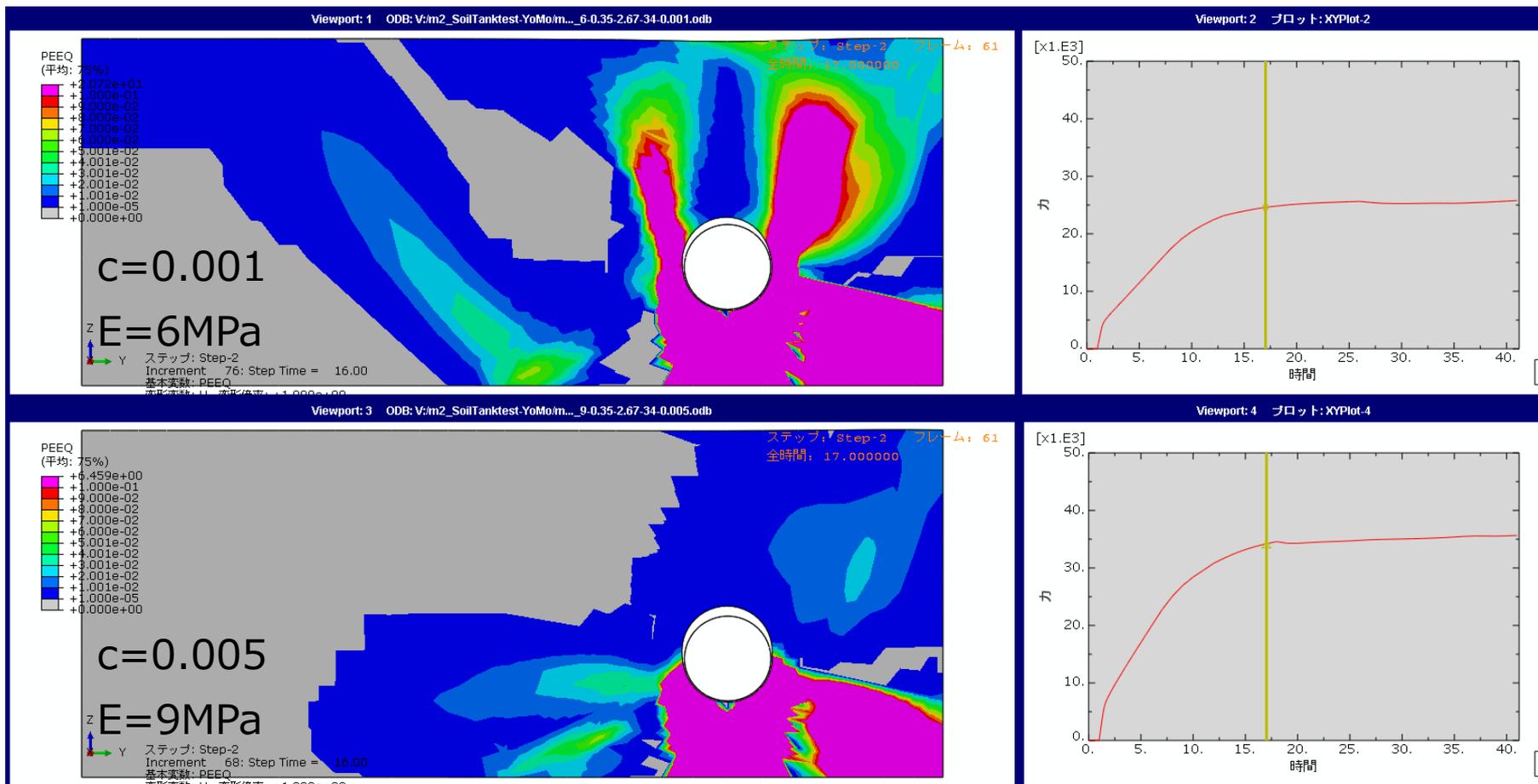
上方, 150A, 2D, PE,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



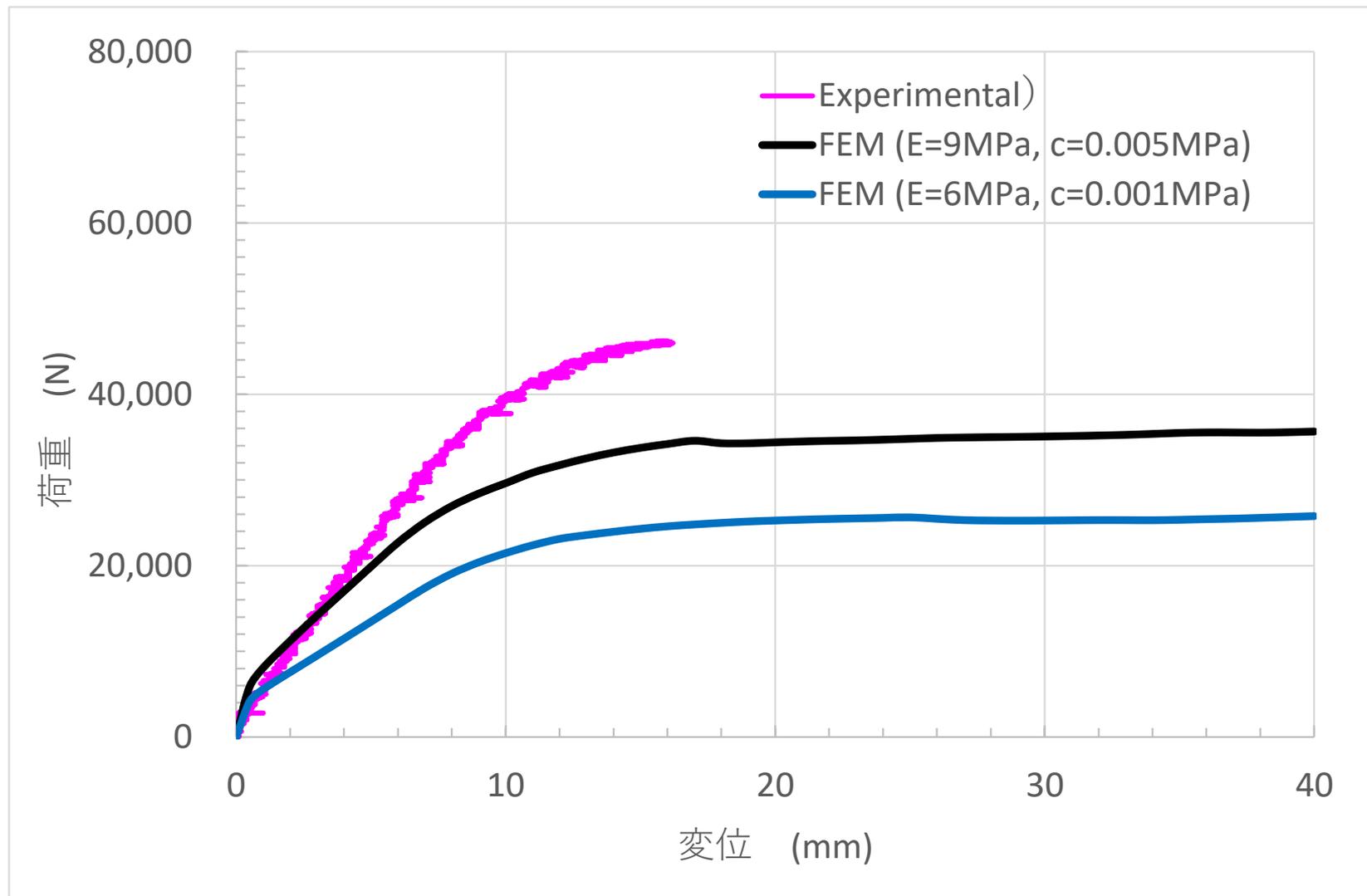
上方, 150A, 2D, PE,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



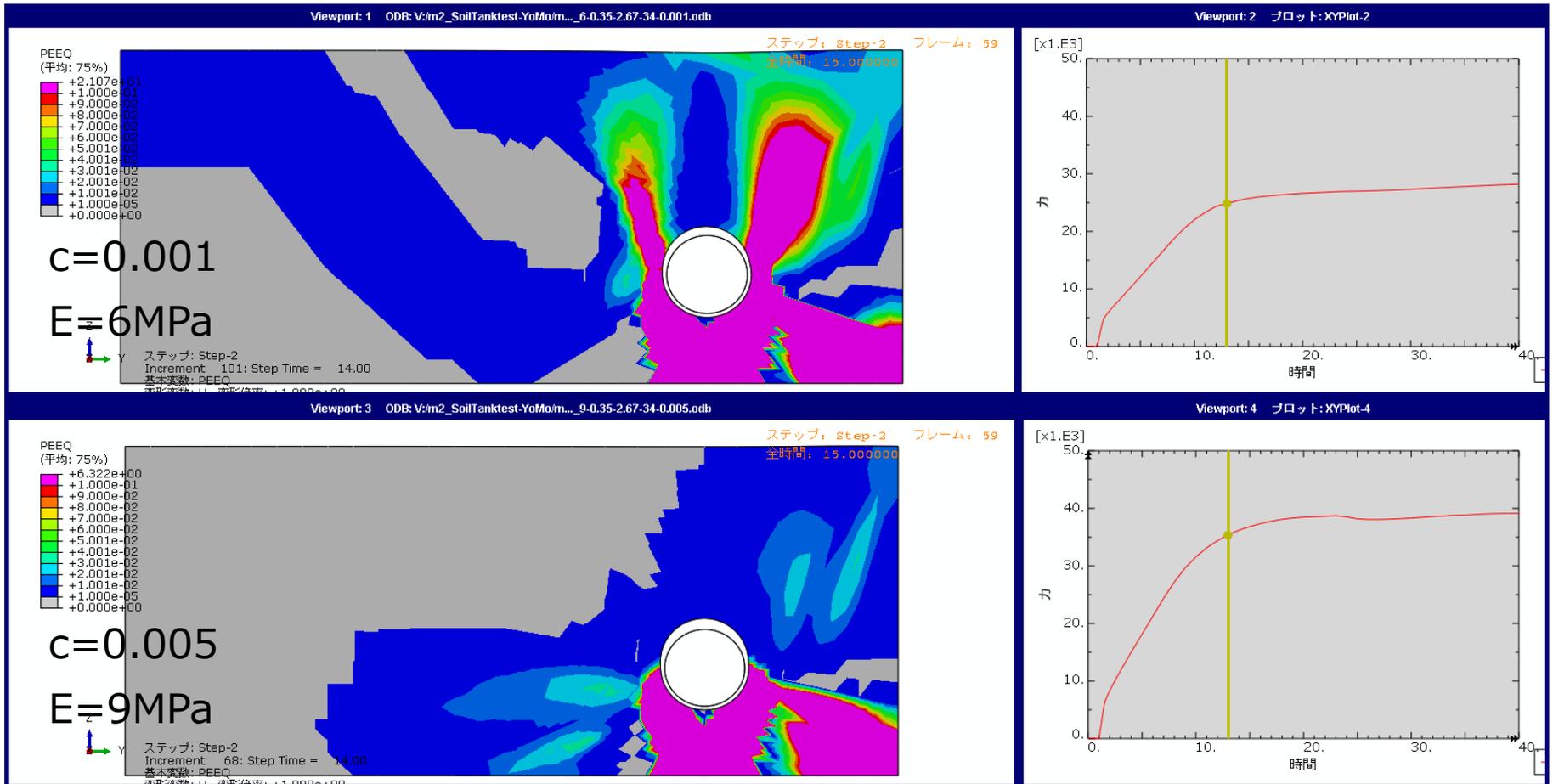
下方, 150A, 1D, SP,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



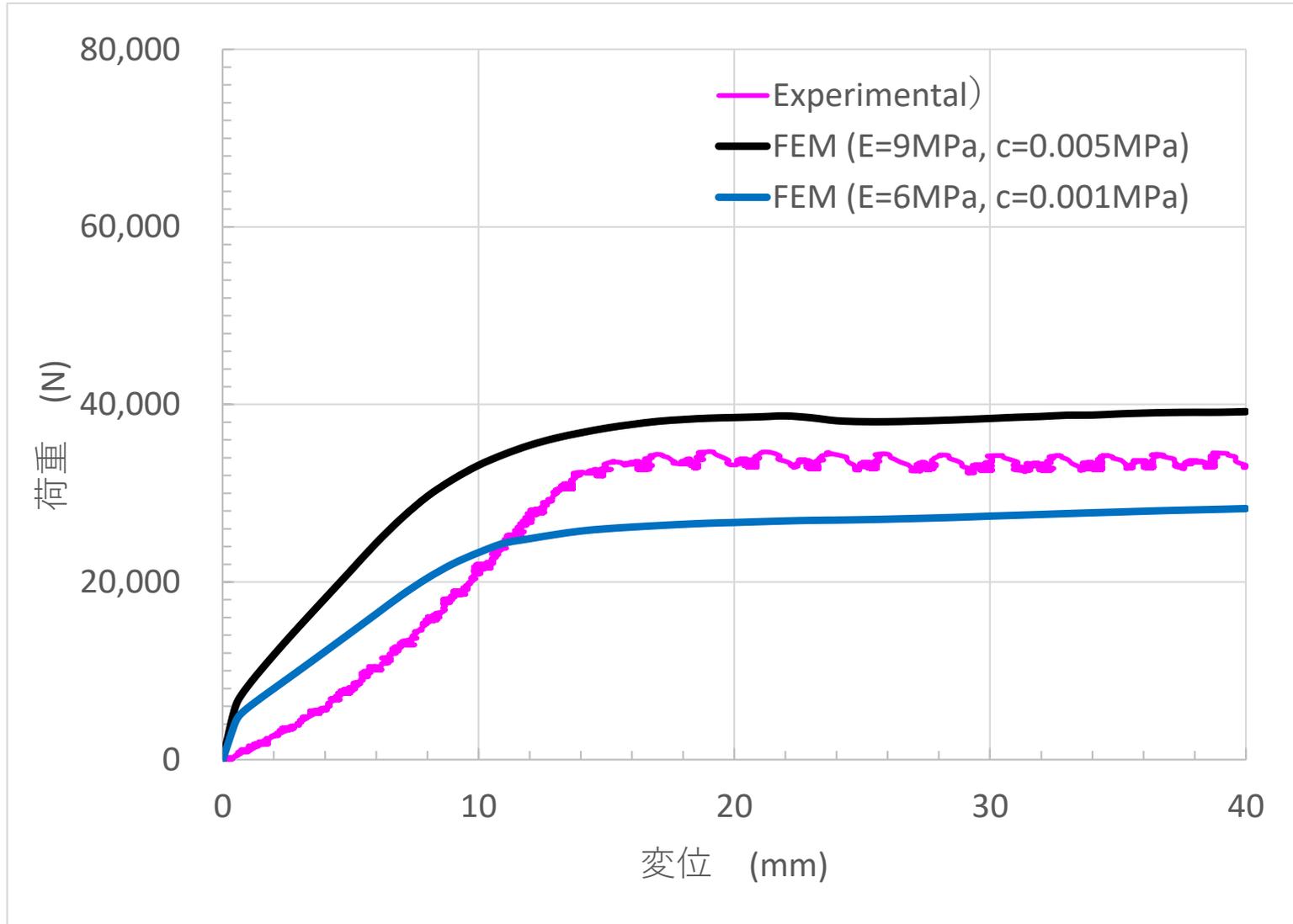
下方, 150A, 1D, SP,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



下方, 150A, 1D, PE,  $\nu : 0.35$ ,  $\phi : 34\text{deg}$



下方, 150A, 1D, PE,  $\nu : 0.35$ ,  $\varphi : 34\text{deg}$



# トンネル標準示方書

## (2) 土質定数

土質定数により解が変わるため、ここではFEM解析で一般的に使用される土質定数を用います。

表 2-7 FEM解析に使用している土質定数

土質	N値	変形係数 (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	単位体積 重量(kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (度)
埋土	2~4	3,000	0.45	15	50	6
シルト	1	800	0.49	16	10	0
	2~3	2,400	0.45	16	30	6
砂質 シルト	4	5,000	0.45	16	30	10
	15	15,000	0.40	17	60	15
粘土	6	5,000	0.45	15	80	6
	8~12	10,000	0.45	15	80	6
	25	20,000	0.45	15	80	6
細砂	10	8,000	0.35	18	0.0	25~30
	20	10,000	0.35	18	0.0	25~30
	30	20,000	0.35	18	0.0	35
	40	25,000	0.35	18	0.0	38
	50	35,000	0.35	18	0.0	42
中砂	50	50,000	0.35	18	0.0	42
礫	40	30,000	0.30	20	0.0	39
	50	50,000	0.30	20	0.0	42

(トンネル標準示方書[開削工法編]土木学会)