

前田建設工業(株) 正員 松井幹雄, 本多 隆

1. はじめに 掘削工事に対する従来の一次元的な山留め計算法は実測値と大きく異なる例が多く、不明確な点も少なくない。にもかかわらず、その計算の容易さのため一般に広く利用されている。また、FEMに適用した二次元非線形弾性解析法も提案されているが、全応力で扱っており、その論拠は土質力学の立場に立っていない。しかしながら、軟弱地盤における大深度掘削工事が急増している昨今の状況からすれば、二次元あるいは三次元的な地盤の挙動も含めた、有効応力によるより本質的な取扱いが必要と思われる。本報告は、実際の掘削地盤に二次元弾塑性解析を適用してこの必要性を検証したものであるが、その際、間隙水による影響が極めて大きいことが確かめられた。

2. 工事概要および解析理論 工事手順は、オープン掘削してから数ヶ月放置した後、鋼管矢板を打ち、切ばりをかきながら53日間で六次まで根切るものであり、この際、矢板による遮水効果は完全であると期待できる。また、地盤は沖積シルト質粘土層が数10mにも及び、周囲からの水の供給も十分であるため、飽和状態を保つとみなせる。したがって、土中の間隙水による影響も考慮する場合、有効応力で考察すべきであると同時に、間隙水が地盤の体積変化を拘束すると考えられるから、飽和土に対するBiotの圧密方程式(1)、(2)式を適用した。また、応力-ひずみ関係の非線形性を考慮するため、関口・太田モデルによる降伏関数(3)式を導入して弾塑性構成式を作成した。

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 \bar{u} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 \bar{u} \quad (2)$$

$$f = \frac{\lambda - K}{1 + e} \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} + D \eta^* - v^p \quad (3)$$

 σ'_{ij} : 有効応力テンソル $\bar{u}$: 過剰間隙水圧 θ : 体積ひずみ t : 時間 γ_w : 間隙水の単位重量 k : 透水系数 σ'_m : 平均有効主応力 v^p : 塑性体積ひずみ $\lambda = 0.434 C_c$ $K = 0.434 C_s$

$$\eta^* = \sqrt{1.5(\eta_{ij} - \eta_{i0})(\eta_{ij} - \eta_{i0})}$$

$$\eta_{ij} = \frac{\sigma'_{ij} - \sigma'_m \delta_{ij}}{\sigma'_m}$$

ここに、Dは柴田によるダイレタンシー係数である。

Christianの方法に従い、(2)式を差分表示して(1)式と共にFEMに適用し、(3)式を用いて増分形の弾塑性応力-ひずみマトリックス D^{EP} を作成すれば、最終的には(4)式の様なマトリックス方程式を逐次解いて行くことになる。

$$\begin{pmatrix} \Delta F + L \bar{u}_t \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K & L \\ L^T & H \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u \\ \bar{u}_{t+\Delta t} \end{pmatrix} \quad (4)$$

3. 数値解析条件 解析は実際の工事例を対象にしたため、図1に示す様なやや複雑ではあるが、トラス・はり材も含めて388節点、398要素のモデルを用いた。実験から求めた土質定数は表1に示す通りであるが、軽微な過圧密地盤であった。なお、矢板と土要素間のせん断力をなくすため、両者の間には摩擦力を働かせない様にした。この条件のもとに平面ひずみ問題

として26ステップの逐次計算を行なったが、(1)式だけで弾性計算CASE-3と弾塑性計算CASE-2、および(1)式と(2)式を連立させ時間項を入れて解く弾塑性計算CASE-1

の3通り行なった。ただし、CASE-1については間隙水による影響を見るため、さらに放置期間として、17ステップ計算し、5年後の状態まで調べた。

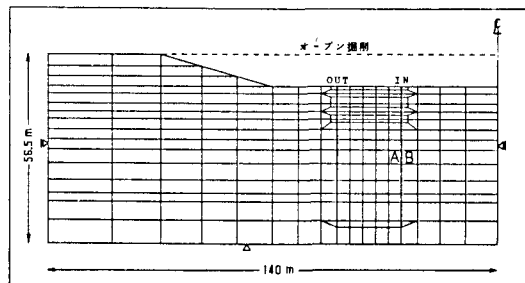


図1 要素分割

表1 土質定数

k (m/day)	τ (t/m ³)	λ	κ	D	K_0	E (t/m ²)
0.00003	1.50	0.05	0.01	0.01	0.5	200
4.0	1.70	0.40	0.15	0.07		4000

4. 結果および考察 図2.(1)～(4)

において、点M～N間が根切り段階を表わす。点Pは弾性状態から弾塑性状態への、また、点Eは弾塑性状態から弾性状態（除荷）への移行点である。CASE-1では根切り段階の σ'_m がほとんど変わらず非排水条件的な径路を描くが、点Pからはダイレタンスの効果により変化する。そして、放置期間になると急変し、要素Aでは除荷域に移行していく。ところが、CASE-2では上述の様な挙動を示さず、その性状は完全に異なり、また、表2に示す通り、根切りによる隆起量も大きい。

一方、矢板の表裏の土圧には一律に主働と受働という関係は存在せず、その土圧差も掘削による解放量より大分小さい。これは従来から多くの実測例で見られたことであり、一次元的な山留め計算法において様々な考え方が提案されていることも相呼応している様に思われる。

なお、オープン掘削によつて地盤が全体的に変形するが、CASE-1では根切り時にもこの変形が続くのに対し、CASE-2では影響が途絶え、矢板自身のたわみと曲げモーメントが小さくなってしまう。

以上、これらのことは一次元的なとらえ方をしているのは決して現われない現象であり、また、間隙水が地盤に及ぼす影響は極めて大きく、全応力表示による解析では意味を持たないことがわかる。

5. おわりに 京都大学・太田秀樹助教授，金沢大学・関口秀雄助教授，京都大学・田村武講師をはじめ、諸先生方には多くの御助言・御指導を賜りましたこと、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Biot, M.A.: General Theory of Three-Dimensional Consolidation, Journ. Appl. Phys., Vol. 12, 1941. (2) Christian, J.T. and Boehmer, J.W.: Plane Strain Consolidation by Finite Elements, Proc. A.S.C.E., SM4, July, 1970.
- (3) Ohta, H. and Sekiguchi, H.: Constitutive Equations Considering Anisotropy and Stress Reorientation in Clay, 3rd Int. Conf. in Numerical Methods in Geomechanics, 1979.

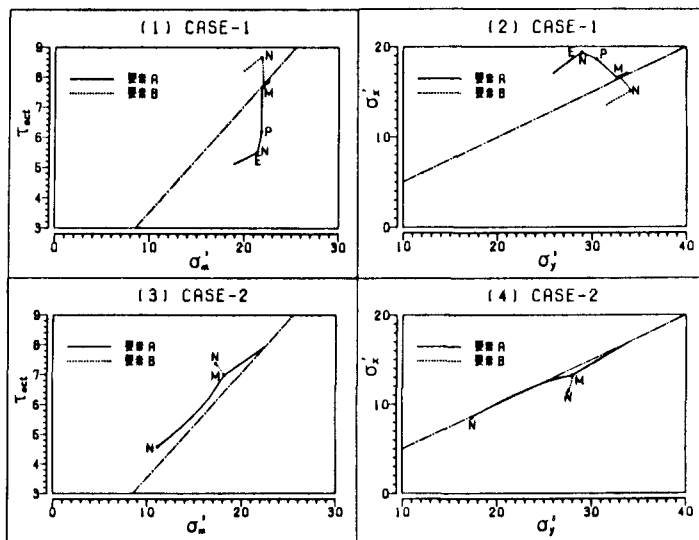


図2 有効応力径路

表2 根切り底の隆起量 (cm)

	OUTER	CENTER	INNER
CASE-1	21.2	20.9	21.1
CASE-2	57.9	58.1	58.8
CASE-3	42.1	42.3	41.9

表3 土圧差 (t/m²)

DEPTH (m)	OUT-SIDE			IN-SIDE		
	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-1	CASE-2	CASE-3
14.60	6.68	6.42	4.87	6.80	6.46	4.90
17.60	6.03	4.60	4.69	6.62	4.42	4.37
21.00	4.35	3.65	2.27	3.60	3.05	1.77
26.60	3.07	2.12	0.47	2.31	1.58	-0.06
30.00	-2.47	-2.08	-0.16	-2.72	-2.42	-0.37
33.25	-3.63	-2.54	-5.27	-3.28	-2.17	-5.21
37.25	-1.90	-1.78	2.62	-1.17	-1.31	2.66

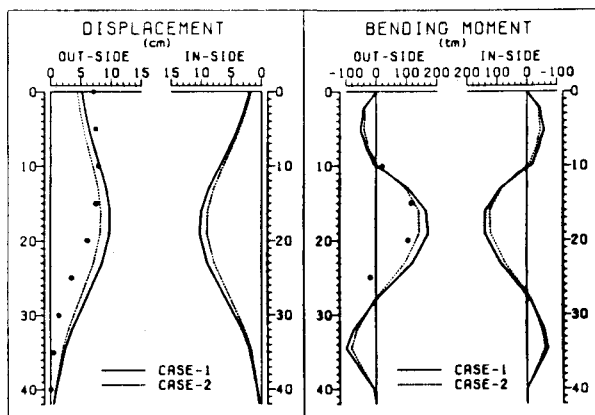


図3 矢板のたわみと曲げモーメント