

# 底盤改良を行った大規模掘削工事のモデリングとシミュレーション

基礎地盤コンサルタンツ（株） 正会員 阪上最一  
同上 正会員 柴 錦春  
同上 正会員 亀井健史

## 1. はじめに

我国の掘削工事の70%は、深度10～15mにおいて実施されており、深度25～30mに及ぶ掘削工事は30%程度である<sup>1)</sup>が、重要構造物の場合では、比較的大規模な掘削となる場合が多い。一般に、根切りを行えば、地盤は不安定になり根切り底面の膨れ上がりとともに壁が変位し、その結果、地表面が沈下することが知られている。このような大規模掘削では、工事を安全に終了させるためには、地盤の変形を抑える鍵となる山留め工、支保工、根切り底面と背面の安定性が相互に制御されることが極めて重要となる。しかし、地盤内では水圧と土圧の連成に基づく複雑な変状が生じ、施工条件のみならず軟弱地盤の厚さなどの土質条件や地下水位の変動にも影響されるため、これらの変状を予測し得る設計上の有効な手段は提案されるに至っていないのが現状である。

一方、著者らは、既に、物理試験結果のみに基づいた地盤のモデリングと土質定数の評価および関口・太田による弾塑性及び弾粘塑性モデルを有限要素法に適用し、多層粘性土地盤上の盛土に伴う盛土基礎地盤の変形機構を予測する簡易な解析手法を提案し、その適用性について実証している<sup>2)・3)</sup>。

本研究では、本手法の実地盤への適用性をさらに進展させるため、事例研究として施工工程及び施工に伴い生じた地盤変状が詳細に調査・検討された掘削底面の地盤改良を伴った大規模掘削の計測工事<sup>4)</sup>を対象とし、有限要素解析結果と実測結果とを比較することにより、工学的な観点から本手法の有意性を検討している。なお、本研究では、有限要素法に基づく掘削問題が盛土問題に比べてかなり複雑なことから、その適用にあたり、掘削の施工手順、掘削底面での地盤改良及び水位低下工法のモデル化について特に検討を加えている。

## 2. 地盤変状の簡易予測解析手法

著者らが提案する簡易予測手法は、標準貫入試験から得られるN値、物理試験結果から決定される土質定数を粘性土の力学的挙動をよく表す関口・太田による弾塑性／弾粘塑性モデル<sup>5)・6)</sup>に適用し、有限要素法に基づいた地盤変状の予測解析を行うものである。

関口・太田により提案されている土の構成方程式は、原位置における異方応力状態、主応力状態、主応力軸の回転さらにダイレイタンスー効果の変化等を表現できるモデルである。本研究では、より簡便な弾塑性モデルを用いた。

本構成モデルに用いられる土質定数〔圧縮指数 $\lambda$ 、膨潤指数 $\kappa$ 、圧縮側の限界状態での応力比 $M_c$ 、比体積 $N (=1+e_0)$ 、正規圧密時の静止土圧係数 $K_{onc}$ 〕は、工学的な観点から塑性指数PIに基づいて決定される<sup>2)・7)・8)</sup>。

---

Modelling of A Large Scale Excavation Construction Accompanying Soil Improvement and  
Its Numerical Simulation : Saiichi Sakajo, Jin-Chun Chai, Takeshi Kamei  
( Kiso-jiban Consultants Co., Ltd. )

### 3. 本解析手法の掘削工事への適用

#### 3. 1 掘削工事の概要<sup>4)</sup>

掘削工事は、5～8mの緩い砂質土が、35m以上の厚い沖積の正規圧密粘性土層上に浚渫された地盤で行われた。掘削範囲は、37～40m幅で500mの長さにも及ぶ。掘削深度は、G.L.-13～-35mである。掘削は、鉛直鋼管矢板により山留めされて、切梁で平均約3m毎に支保されている。

掘削部で鋼管矢板が打設され、掘削前に掘削部地盤改良が実施された。地盤改良は、G.L.-20.0～-31.6mの範囲で、CDM (Cement Deep Mixing) とCJG (Cement Jet Grouting) により掘削部の底盤改良が行われた。両手法は、掘削底面のヒービング抑制の有効な手段として決定された。このことによって鋼管矢板が掘削面後方(土留め側)に押され、また、その後、掘削深度がG.L.-12.1mに達した時点で、G.L.-38mの矢板の先端部において、ヒービング抑制のために水位低下を実施している。その水圧低下量は、20mにも及んでいる。

#### 3. 2 有限要素による掘削工事のモデリング

##### (1) 概要

有限要素法は、節点に変位・水圧の自由度を与えるSandhu and Wilson<sup>9)</sup>の方法に従いコード化された浸透～変形連成有限要素解析手法を用いた。土留め壁と矢板は弾性体として扱い、それぞれ、ビーム要素とバー要素でモデル化した。粘性土は、関口・太田が提案する弾塑性モデル<sup>5)、6)</sup>で、砂は、弾性体としてモデル化した。また、矢板と地盤の間は、ジョイント要素でモデル化している。掘削施工工程は、7ステップでシミュレートされ、切梁設置時に与えられる切梁のプレロードは、節点荷重によってシミュレートしている。平均プレロードは、切梁1本当たり30tf/mである<sup>4)</sup>。実際に載荷された値を一部変更し用いている。なお、水位低下は、強制的に水位を低下させることによりモデル化している。

##### (2) 地盤改良による変形

掘削前に地盤改良により矢板が山留め側に変形し地盤変状が生じている。また、掘削面側では掘削により掘削底面でヒービングが生じている。このプロセスを完全にシミュレートすることは困難であるが、本解析では、以下のように、これらのプロセスをシミュレートした。

- (i) 地盤改良により生じた土留め壁の初期変形は、強制変位により与える。但し、掘削側の地盤に引っ張りが発生しないように地盤の剛性を低下させた。
- (ii) 掘削側の改良地盤の応力と水圧は、未改良ゾーンの初期値の値として最定義した。強制変位を与えた直後未改良域の適当な値を改良域にセットした。

##### (3) 掘削解放力

掘削解放力は、①全応力に基づき定義されるものと②有効応力に基づく掘削解放力と掘削面の水圧をゼロに固定し定義するものとの2種類考えられるが本研究ではより簡便な前者の手法を用いた。なお、後者は、物理的に掘削面での水の除去の効果を浸透で表現するものである。

#### 3. 3 有限要素モデル地盤

自然地盤を正確にモデル化するために有限要素解析では、G.L.-60mまでを11層に分割した。表-1に解析に用いた土質定数を示す。地盤改良部は、非排水せん断強度 $C_u$ から変形係数 $E$  ( $E=210C_u^{10}$ )を、また、砂層は、標準貫入試験結果 $N$ 値から変形係数 $E$  ( $E=70N^{11}$ )を推定する。弾塑性モデルの土質定数は、 $PI$ に基づいて決定した。なお、 $Ac_1$ 層は、正規圧密状態、 $Ac_2$ 層は、やや過圧密状態( $OCR=1.5$ )と仮定した。

解析に用いた有限要素分割図と境界条件を図-1に示す。境界条件は、掘削面、掘削断面の中

表-1 土質定数

深度 (m)	土質	PI	$\lambda$ (E)	$\kappa$ ( $\nu$ )	$e_0$	$M_c$	$K_{ONC}$	OCR	$k_{v0}$ (m/s)	$(\gamma/m^3)$
0.0-7.5	Bs	-	80	0.31	-	-	-	-	$10^{-6}$	1.8
7.5-9.0	Ac <sub>1</sub>	25	0.134	0.018	1.0	1.65	0.45	1.0	$10^{-9}$	1.45
9.0-12.1	As <sub>1</sub>	-	770	0.31	-	-	-	-	$5 \times 10^{-5}$	1.9
12.1-13.6	Ac <sub>1</sub>	25	0.134	0.018	1.0	1.65	0.45	1.0	$10^{-9}$	1.45
13.6-18.1	As <sub>1</sub>	-	770	0.31	-	-	-	-	$5 \times 10^{-5}$	1.9
18.1-20.9	Ac <sub>1</sub>	25	0.134	0.018	1.0	1.65	0.45	1.0	$10^{-9}$	1.45
20.9-21.5	As <sub>1</sub>	-	770	0.31	-	-	-	-	$5 \times 10^{-5}$	1.9
21.5-38.0	Ac <sub>2</sub>	33	0.170	0.024	1.15	1.65	0.45	1.5	$10^{-9}$	1.55
38.0-41.0	As <sub>2</sub>	-	700	0.31	-	-	-	-	$2.5 \times 10^{-7}$	1.85
CDM/CJG		-	5250	0.31	-	-	-	-	$10^{-9}$	-

注)  $e_0$ は、正規圧密曲線上の $p'=1\text{kgf/cm}^2$ に対応する間隙比である。

中央と左側遠方境界を非排水条件とし、地表面（地下水位）、底面境界で排水条件とした。また、図-2に、今回の解析で仮定したモデル地盤を示す。掘削施工段階を忠実に再現し、掘削開始後200日の地盤の挙動を計算した。

### 3.4 地盤変形解析結果と実測結果との比較

掘削工事で、土留め壁と周辺地盤の変形をコントロールすることは極めて重要である。通常、これらの地盤変状は建設時に測定される。有限要素解析結果として図-3~6に、それぞれ、土留め壁の水平変位、掘削底面のヒービング、周辺地表面の地盤沈下、地盤内水圧を示し、実測結果と比較している。また、図-7, 8に、それぞれ、鋼管矢板に作用する水平土圧、モーメントの解析結果を示す。

#### (1) 土留め壁の変形

この建設現場では、土留め壁の変形は、掘削前の地盤改良に影響されている。計算結果と実測結果を図-3に示す。図中の有限要素解析結果は、全応力に基づく解析結果である。図中のプレロードの値は、解析に用いた値を示している。全体的に有限要素解析は、実測結果の値をよく説明している。しかし、差異が土留め壁の先端と上端で生じている。土留め壁の上部では、土留め壁側への変形は、掘削の初期段階（掘削の6段階以前）では過大評価されている。掘削段階6と7の間の測定された変形増分は、不確定要因のため明瞭でない。掘削6段階以降の掘削側への土留め壁の変形は、若干ではあるが過大評価されている。G.L.-30~-40m間の地盤の剛性は、パラメータとして明確でない。掘削6と7段階での変位の急激な増加は、地盤の局所的な降伏を意味するものと考えられる。

#### (2) 掘削底面のヒービング

掘削底面の地盤改良や水位低下工の一つの理由は、掘削面でのヒービングを防ぐためである。図-4に示されたように、有限要素解析結果は、約2倍の過大評価をしている。しかし、ヒービングの発生傾向は、よくシミュレートされていると評価出来よう。もし、G.L.-29.8mとG.L.-38mでの値の違いを考えれば、解析結果は、実測結果に極めて近いものと考えられる。従って、解析結果と実測結果との違いは、G.L.-38m以深、または、土留め壁の先端より以深の地盤内で生じたものと考えられる。解析結果のヒービングを小さくするには、本解析では考慮されていない微小変

形域での地盤の剛性の増大を考慮すべきであろう。また、実測値も計算結果も、水位低下が生じてからは、ヒーピングが減少している。解析結果は、水位低下の初期にヒーピングの低下を示す結果となっている。

### (3) 周辺地表面の地盤沈下

図-5は、掘削領域端部より40mと80m離れた場所での地盤沈下の経時変化の計算結果と計測結果との比較を示している。この項目に関しては、有限要素解析結果は、十分精度の高い予測を行えることを示している。しかしながら、この増加した沈下速度は、掘削終了時ではよくシミュレートされてない。これは、地表面沈下増加が土留め壁の変形と密接に関連しているためと考えられ、この理由は不明である。

### (4) 地盤内水圧

地盤内の水圧の計算結果と計測結果を図-6に示す。山留め側では、解析結果は実測結果と良好な一致を示している。地盤改良は、G.L.-20~-40mの粘性土層で、いくつかの正の過剰間隙水圧を生じている。また、掘削時、水位低下時には、G.L.-30m以深で静水圧以下の水圧が低下する。他方、掘削側では、地盤改良後定義された改良域内の水圧は、実測値より小さくなっている。引き続き掘削過程では、計算結果も実測値も減少するが、依然、計算結果は実測値を下回る結果となっている。これは、ヒーピングを過大に評価しているためと考えられる。しかしながら、本解析結果は、工学的に十分良い精度でヒーピングを予測し得るものと考えられる。

### (5) 鋼管矢板に作用する水平土圧

計算された水平土圧を図-7に示す。土留め側では、G.L.-40m以浅で水平土圧が初期静止土圧の1.5倍である。掘削時は、土留め壁の変形により、水平土圧はやや減少したものの、初期土圧より大きな値となっている。これに対して、掘削側では、掘削中に水平土圧は増加する。地盤改良域(G.L.-20~-31.6m)では、大きな水平土圧が解析結果に現れている。これは、受働土圧の発達を意味し、この領域での応力集中を意味している。

### (6) 鋼管矢板に作用するモーメント

土留め壁の計算された曲げモーメントは、図-8に示されている。モーメントは、鋼管杭1本当たり値である。地盤改良によって与えられた強制変形を作用させた後は、モデル化の近似度が低いため、若干モーメントの分布はジグザグ形状を示すが、全体では、逆S字形状が明瞭に現れている。最大モーメントは、掘削2~4段階で、約300tf-mでG.L.-12m付近で生じている。対応する最大曲げ応力は、約20000tf/m<sup>2</sup>である。徐々に、切梁の設置とプレロードによりモーメントは、減少する。掘削面以下では掘削中のモーメントの変化は重要である。

以上、有限要素解析結果と実測結果との比較から以下の点が重要と思われる。掘削変形時の土留め壁の変形は、掘削前の地盤改良時の強制変位によってコントロールされる。この工事事例では、地盤改良は、地盤改良時の山留め側への変形が、掘削時には、土留め壁の低い部分を中心に掘削側に移動し、そして、最終的には、地盤改良前の初期鉛直面に近い場所へ変形が戻っている(図-3参照)。地盤改良により土留め壁を山留め側に押すことにより以下の2つの効果が生じていると考えられる。(1) 地盤改良による変形は、掘削時の掘削面側への変形を補償する。そして、(2) 地盤改良時に生じた過剰間隙水圧の消散は、その後の土留め壁の変形を減少させることができる。また、地盤改良を伴う切梁を支保工とする掘削工では、土留め壁に作用する水平土圧が初期の静止土圧よりも大きくなっており、矢板設計上の土圧係数の設定に注意する必要があるものと思われる。

#### 4. 結論

本研究より得られた主要な結論を以下に列記する。

- 1) 有限要素法による掘削工事のモデリングは、底盤改良を行った大規模掘削工事をシミュレートするのに妥当なモデル化であることが明らかとなった。
- 2) CDMとCJGによる掘削底面での地盤改良は、ヒーピングを抑制する他、二次的に土留めの変形の抑制という効果をもたらし、正しく設計・施工されれば、土留め壁の最後の位置は制御し得る可能性があることが明らかとなった。しかし、同時に、多量の地盤改良は、土留め壁を過度に変形させ、土留め壁に作用する水平土圧が掘削前の初期の静止土圧より大きくなることが懸念される。このような土留め壁の設計には、安全のため受動土圧を用いるよう心がけなければならないものと思われる。
- 3) 本解析手法は、簡便でありかつ十分高い精度で掘削施工に伴う実地盤の変形予測に適用できるものであり、工学的な観点から、十分実務に供し得る手法である。

#### 5. 謝辞

最後に、本研究を進めるにあたり、貴重な意見を頂いた基礎地盤コンサルタンツ（株）関東支社八百山孝氏に記して深謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) Kazama, S., Miyazaki, Y., and Sugimoto, T.: Earth Retaining System for Excavation in Japan, Proceedings of Internatinal Symposium on Underground Construction in Soft Ground, New Delhi, India, pp.17-20, 1994.
- 2) 亀井健史・阪上最一：弾粘塑性モデルによる盛土基礎地盤の沈下解析，土と基礎，Vol.41, No.2, pp.23-28, 1993.
- 3) 阪上最一・亀井健史・柴錦春：盛土基礎地盤の簡易変形解析手法の開発，第29回土質工学研究発表会講演集，pp.1299-1302, 1994.
- 4) Inoguchi, H., Kubota, N., Ueki, N., Yaoyama, T. and Sakajo, S.: Field Obsevation on large excavation in reclaimed land in Tokyo Bay, Proceedings of Internatinal Symposium on Underground Construction in Soft Ground, New Delhi, India, pp.111-118, 1994.
- 5) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, Proc. Speciality Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo, pp.229-239, 1977.
- 6) Ohta, H. and Sekiguchi, H.: Constitutive equations considering anisotropy and stress reorientation in clay, Proc. 3rd Int. Conf. on Num. Method in Geomech., Vol.1. Aachen, pp. 475-484, 1979.
- 7) Kamei, T.: A study on the mechanical behaivour of normally consolidated cohesive soils, Doctor Thesis presented to the Tokyo Institute of Technology, 1985.
- 8) Nakase, A., Kamei, T. and Kusakabe, O.: Constitutive parameters estimated by plasticity index, Journal of Geotechnical Engineering, A.S.C.E., Vol.114, No.7, pp.844-858, 1988.
- 9) Sandhu, R.S. and Wilson, E.L.: Finite element analysis of flow in saturated porous media, Proc. A.S.C.E., Vol.95, EM3, pp.641-652, 1969.
- 10) 竹中準之介：一軸圧縮試験、土質調査試験結果の解釈と適用例，初版土質工学会，pp.155-190, 1968.
- 11) 宇都一馬：「基礎地盤の調査」構造物の基礎，土木学会関東支部，1967.

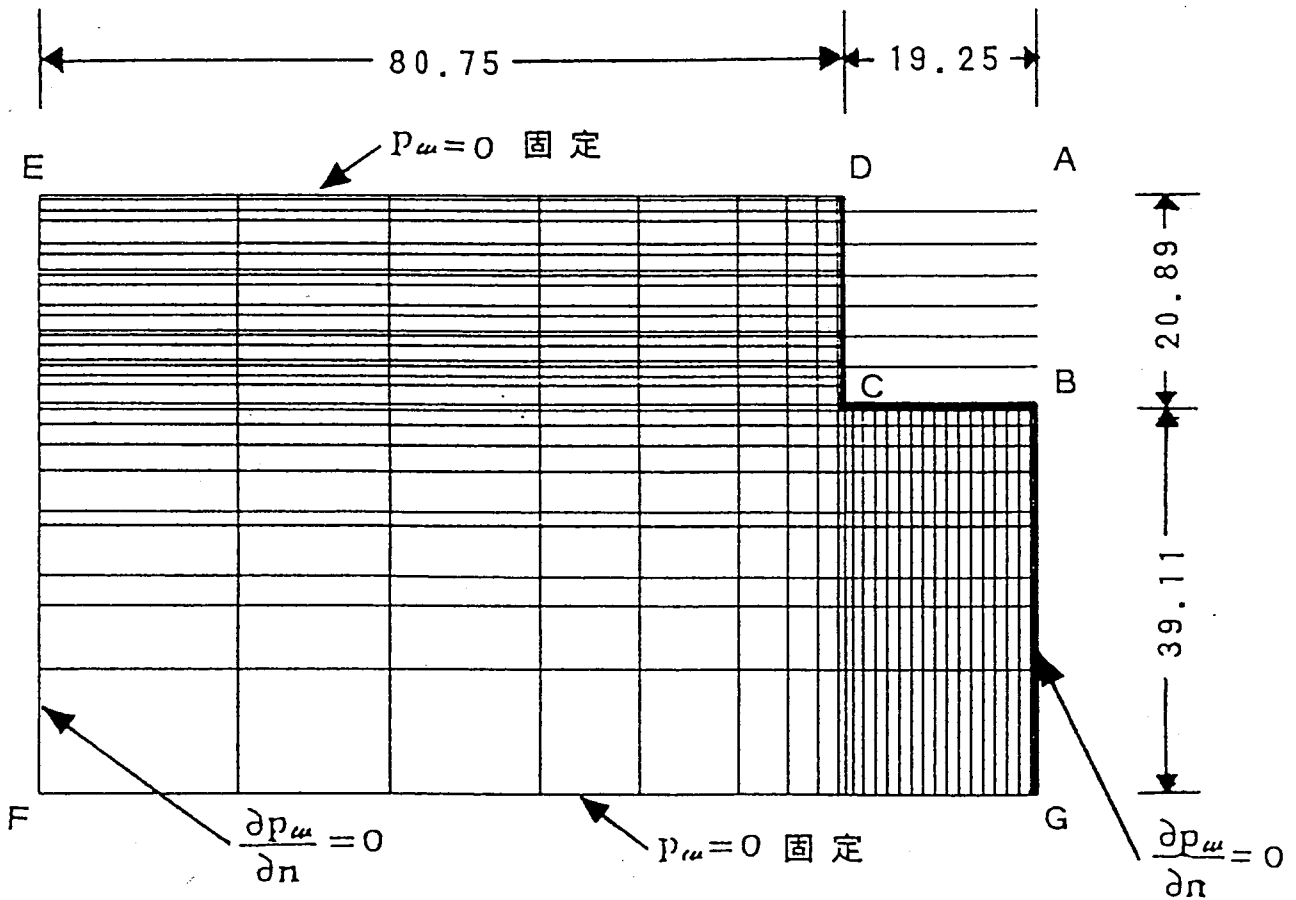


図-1 有限要素分割図と境界条件

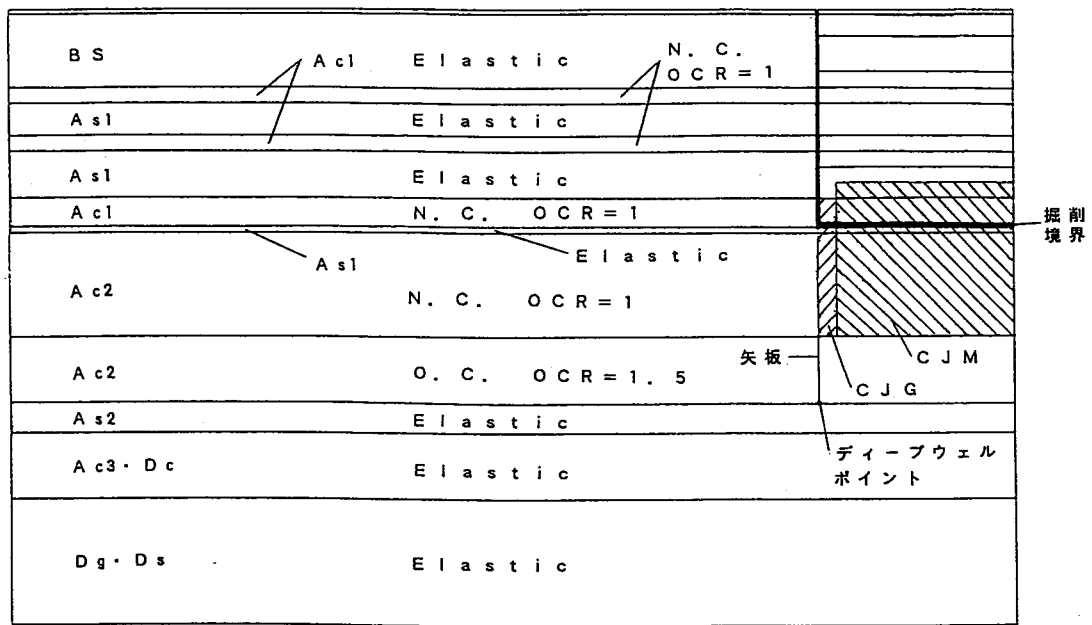
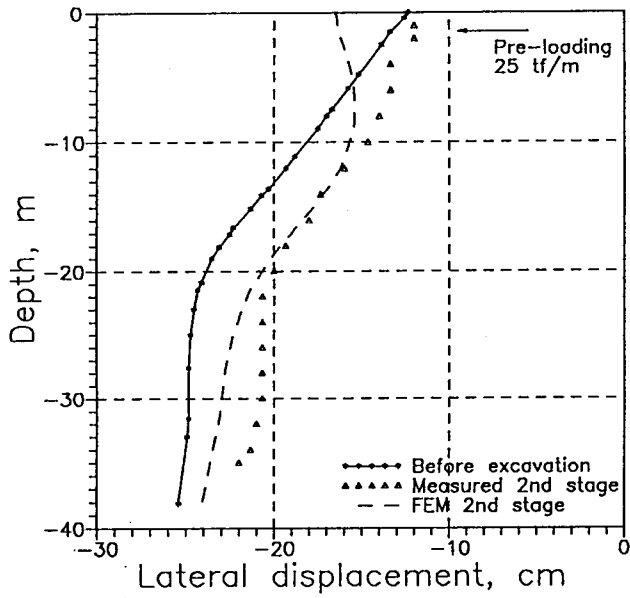
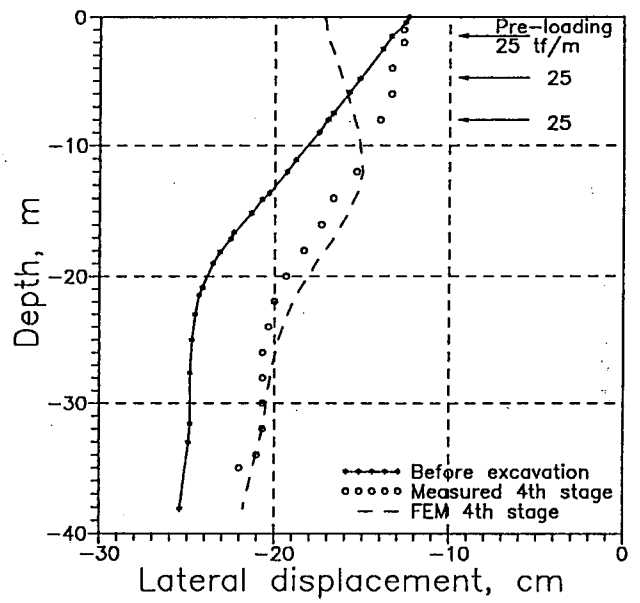


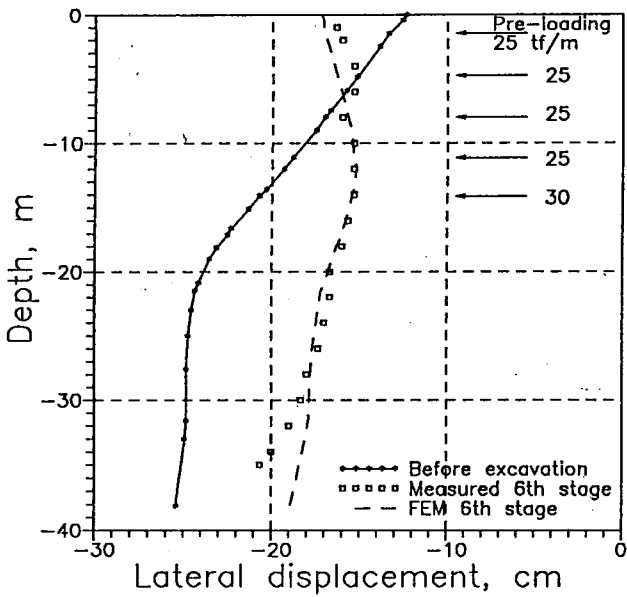
図-2 モデル地盤



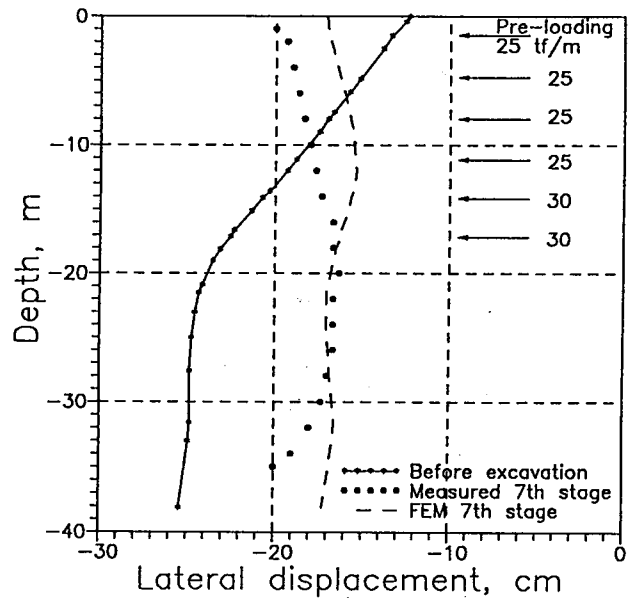
(a) 第2段階掘削



(b) 第4段階掘削



(c) 第6段階掘削



(d) 第7段階掘削

図-3 土留め壁の水平変位

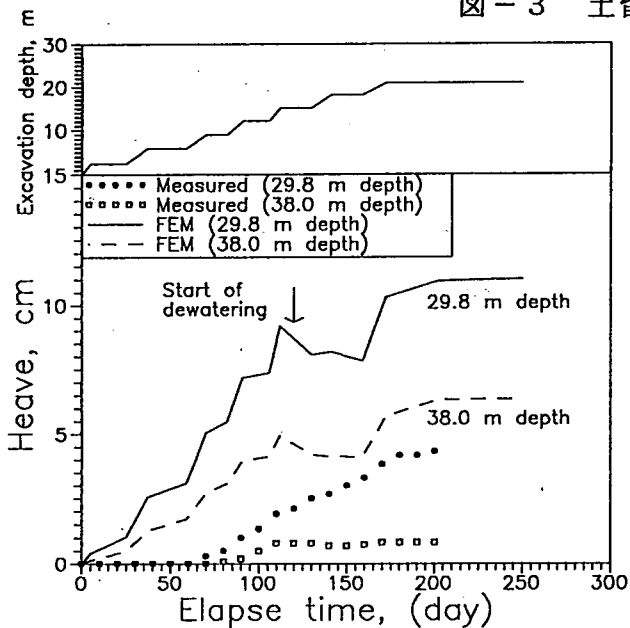


図-4 掘削底面のヒービング

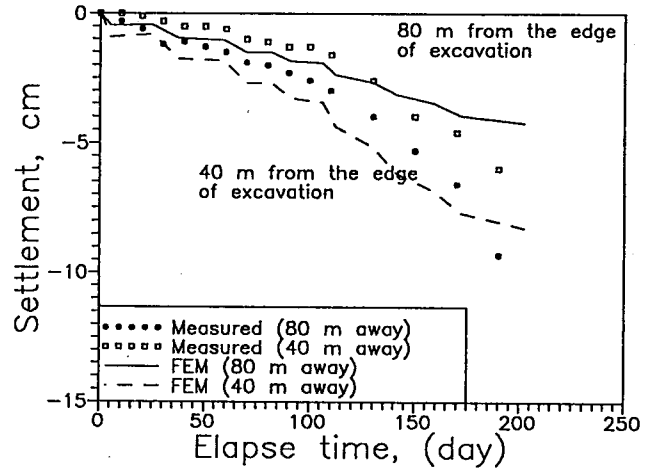


図-5 周辺地表面の地盤沈下

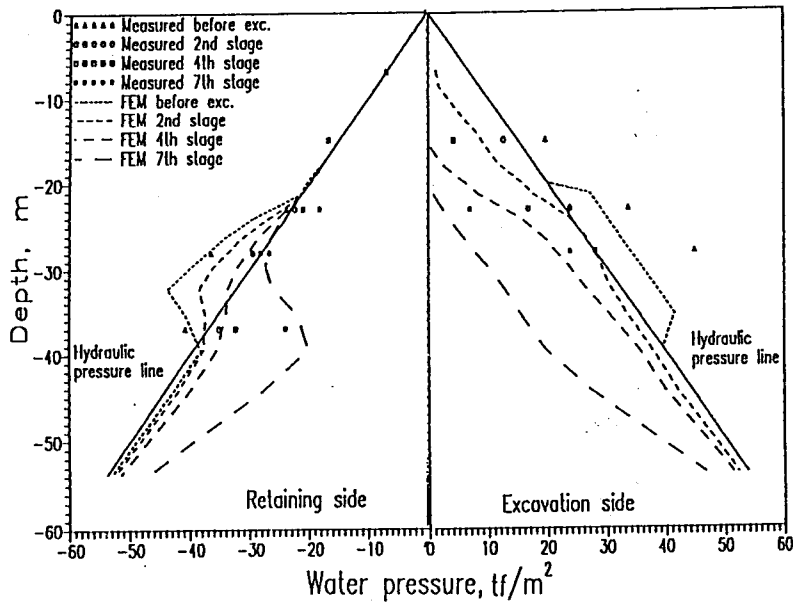


図-6 地盤内水圧

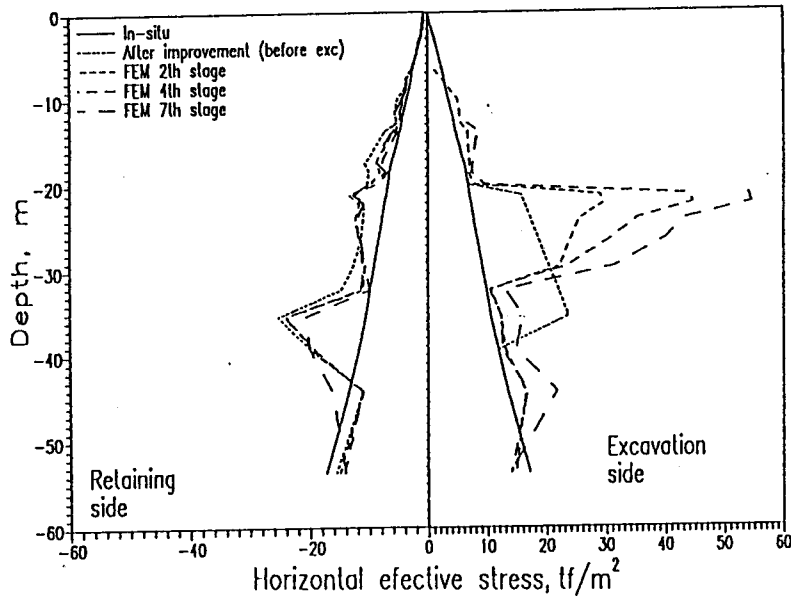


図-7 水平土圧

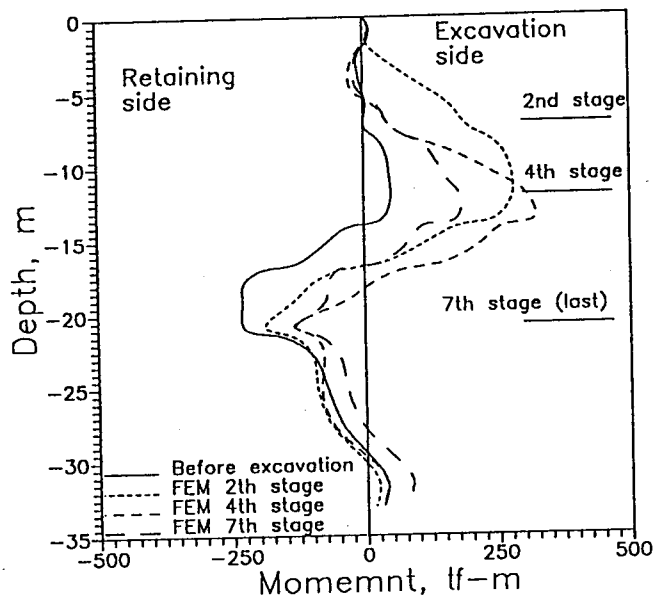


図-8 モーメント