

開削工事に伴う地表面最大沈下量の予測に関する研究*

PREDICTION FOR THE MAXIMUM SETTLEMENTS
OF GROUND SURFACE BY OPEN CUT

杉 本 隆 男**

By Takao SUGIMOTO

The present paper is concerned with the prediction for the maximum settlements of ground surface adjacent to open cut. Using many field measurements, statistical analysis were made for the maximum settlement and the distance from wall where more than 2mm settlement occurred. It became clear that those values are influenced considerably by the following factors; (1) ground type, (2) cutting depth H and width B , (3) deformation modulus of soils under excavated base, and (4) wall type. The parametric study by the FEM have confirmed the significance of statistically analyzed results. And it is shown that maximum settlements are influenced by the proposed cutting factor $(BH/\beta_D D)$. D is the wall length under excavated base and β_D is coefficient related to the wall stiffness and deformation modulus of soil.

まえがき

市街地で開削工事を行う場合、周辺地盤の変形問題は土圧や土留壁の安定性の問題とともに、重要な検討項目である。このため、計画や設計段階で周辺地盤にどの程度の変形を与えるかを予測し、変形が大きいと予測される場合には対策工を施す必要がある。

周辺地盤の変形量の予測に関して、最近では有限要素法などによる数値解析が可能である。しかし、土質定数の評価、地盤や施工手順のモデル化、そして、電子計算機による数値解析に多くの労力と費用を要する。また、周辺地盤の変形は、種々の要因が複雑にからみあって生じるため、演繹的な予測手法の開発は十分とはいえない。一方、既往の研究では、開削工事に伴う土留壁背面の地表面沈下に影響する要因として、次のような項目に注目している。

①地盤の硬さと最大掘削深さ¹⁾、②土留壁の変形^{2)~4)}、③安定係数⁵⁾、④土留壁剛性や粘着力⁶⁾、⑤円弧すべり

安全率⁷⁾、⑥圧密沈下^{8),9)}などである。

これらの研究は、周辺地盤の変形量を予測するうえでいずれも重要である。しかし、種々の地盤での多様な開削工事での予測には十分とはいえない。こうした意味で、多くの実測例をもとに、種々の要因を取り入れた予測方法を開発することの工学的意義は少なくない。

本論文は、開削工事に伴う周辺地盤の変形として、土留壁背後の地表面沈下量に注目し、84件の実測例をもとに数量化理論を用いて要因分析を行い、要因の寄与順位を明らかにした。そして、寄与順位の高位の要因をもとに誘導したパラメーター（掘削係数と呼称する）と地表面最大沈下量との関係を示した。さらに、有限要素法による検討から、その関係が数値解析的にも成立することを示した。また、上記84件の実測例とは別に新しく収集した実測例24件で、掘削係数と最大沈下量の関係の有効性を検証し、その関係を最大沈下量の予測関数として提案した。

1. 地表面沈下量の要因分析

数量化理論は多くの要因が複雑にからみあう現象を定量的に説明するうえで有効な統計的手法であり、斜面の安定問題¹⁰⁾や地震時の水道管の危険度予測¹¹⁾などに用いられている。ここでは、開削工事に伴う地表面沈下に影響する種々の要因の中で、寄与順位の高位のものを明らかに

* 本論文は、第19回土質工学研究発表会 (No. 438, 昭和59年6月)、第20回土質工学研究発表会 (No. 476, 昭和60年6月)、第21回土質工学研究発表会 (No. 525, 昭和61年6月)にて発表したものに、一部修正、追加を行って、まとめ直したものである。

** 正会員 工修 東京都土木技術研究所地象部研究員
(〒108/港区港南 1-1-18)

かにする目的で、数量化理論Ⅰ類により要因分析を行った。

(1) 数量化理論Ⅰ類による要因効果の比較方法⁽²⁾

地表面最大沈下量や沈下範囲などの目的変数 Y の予測値 \hat{Y} が、地盤の硬さや掘削深さなどの説明変数(要因) X_j の一次多項式で表わされるものと仮定すれば、

$$\hat{Y} = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_m = \sum_{j=1}^m X_j \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

$$X_j = \sum_{k=1}^{l_j} \delta_{(jk)} \cdot x_{(jk)} \dots\dots\dots(2)$$

$x_{(jk)}$ はアイテム・カテゴリ数量、 $\delta_{(jk)}$ はクロネッカーのデルタである。要因 X_j の範疇区分 k に該当する場合に $\delta_{(jk)}=1$ 、該当しない場合は $\delta_{(jk)}=0$ 。

目的変数の実測値 Y_i とその予測値 \hat{Y}_i との平均二乗誤差 $e^2_{Y\hat{Y}}$ を最小にする条件から、次の連立方程式を得る。

$$\sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^{r_u} n_{(jk)(uv)} \cdot x_{(uv)} = \sum_{i=1}^n (j^k) Y_i \dots\dots\dots(3)$$

$$(j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, l_j)$$

ここで、 $n_{(jk)(uv)}$ はアイテム・カテゴリ $c_{(jk)}$ かつ、 $c_{(uv)}$ への該当数、 $\sum_{i=1}^n (j^k)$ は $c_{(jk)}$ に該当した個体 i だけの和。

この連立方程式を解いて得られた要因 j のアイテム・カテゴリ数量 $x_{(uv)}$ の最大値と最小値の差をレンジとよぶ。レンジの大きい要因は、目的変数に対して大きな影響を与えるので、レンジで要因効果の比較を行った。

(2) 目的変数の選択

開削工事に伴う土留壁背面地盤の地表面沈下を表現する数量には、次のようなものが挙げられる。

① 最大沈下量、② 最大沈下量の発生位置、③ 土留壁から測った沈下範囲、④ 沈下範囲内の沈下体積などである。これらのうち、実務的には最大沈下量と沈下範囲が問題となる。そこで、目的変数にはこの2つの変数を選択した。なお、この場合は、土留壁撤去時の沈下を含まない。また、沈下範囲については、実務上の観点から、2mm 以上の沈下量が測定された範囲とした。

(3) 要因の選択

要因の選択では、次の点に留意した。第1に、地盤特性、土の力学特性、土留壁の構造特性、そして、掘削規模を表わす要因をそれぞれ1つ以上選択する。第2に従来の研究でとくに影響が大きいといわれたもの。第3に、計画や設計段階で必ず考慮され、かつ、収集した工事例に共通した要因であること。その結果、選択した要因は、表-1 に示す8要因で、おのおのの範疇区分は3

表-1 要因と要因ごとの範疇区分

(単位: m)

要因	範 疇 区 分			
① 掘削部の地盤種別	砂地盤	互層地盤	粘土地盤	
② 掘削部の地盤の硬さ	ゆるい、もしくは軟らかい	中 位	締まった、もしくは硬い	
③ 根入部の地盤の硬さ	ゆるい、もしくは軟らかい	中 位	締まった、もしくは硬い	
④ 掘削深さ H	H ≤ 5	5 < H ≤ 10	10 < H ≤ 15	15 < H
⑤ 掘削幅 B	B ≤ 5	5 < B ≤ 10	10 < B ≤ 15	15 < B
⑥ 根入長 D	D ≤ 5	5 < D ≤ 10	10 < D	—
⑦ 排水状況	強制排水	釜場排水	湧水なし	
⑧ 土留壁の種類	親杭 鋼矢板	鋼矢板	連続壁	柱列壁 鋼管 矢板

表-2 地盤種別ごとの地盤の硬さの判定

地盤の硬さ 地盤種別	ゆるい、もしくは軟らかい	中 位	締まった、もしくは硬い
砂地盤	N ≤ 10	10 < N ≤ 30	30 < N
互層地盤	N ≤ 8	8 < N ≤ 20	20 < N
粘土地盤	N ≤ 5	5 < N ≤ 10	10 < N

(Nは標準貫入試験によるN値)

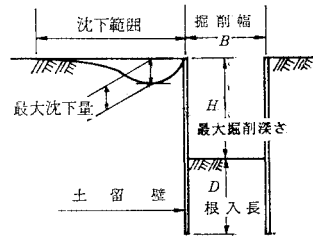


図-1 土留模式図

~5 区分とした。なお、土留模式図を図-1 に示した。

(4) 要因の範疇区分

a) 地盤種別

二、三の設計指針^{(13),(14)}では、各種の地層を砂質土、標準貫入試験の N 値が4より大きい粘性土、および、 N 値が4以下の粘性土の3種類に分け、層厚の合計の一番大きいものをその地盤の土の種類としている。ここでは、地盤種別をより明確に区別するため、ボーリング柱状図で土の種類が不明確な埋土層を除き、地表面から最大掘削深さまでの地層を次の判定基準で区分した。

- ① 砂地盤 : $h_s/H \geq 0.55$, かつ, $h_s/h_c \geq 1.5$
- ② 粘土地盤 : $h_c/H \geq 0.55$, かつ, $h_c/h_s \geq 1.5$
- ③ 互層地盤 : ①, ② 以外の地盤

ここで、 h_s, h_c は、砂質土または粘性土の層厚の合計、 H は最大掘削深さである。

b) 掘削部と根入部の地盤の硬さ

式(4)で計算した層平均 N 値をもとに、Terzaghi と Peck⁽¹⁵⁾ のコンシステンシーと N 値の関係を参考にして、表-2 のように地盤の硬さを区分した。

$$\tilde{N}_c = (\sum_{i=1}^n N_i \cdot h_i) / H, \quad \tilde{N}_b = (\sum_{i=1}^n N_i \cdot h_i) / D \dots\dots(4)$$

ここで、 \tilde{N}_c と \tilde{N}_b は、掘削部と根入部の層平均 N 値、

N_i と h_i は、掘削部または根入部の i 層の N 値と層厚、 H と D は、最大掘削深さと根入長である。

c) 掘削深さと掘削幅

既述の設計指針などでは、指針の適用範囲を掘削幅は 3 m 以上、掘削深さは良質地盤で約 20 m、もしくは 15 m 程度まで、軟弱地盤では地盤の安定性を確保できる深さまでとしている。これらを参考にして、掘削深さや掘削幅の範疇区分は、表-1 のように 5 m 間隔とした。

d) 根入長と排水状況

根入長は掘削深さの範疇区分に準じて、表-1 のように 5 m 間隔とした。また、排水状況の区分は、ウェルポイント工法などにより強制的に地下水位を低下させる場合、掘削底の一部に釜場と称する集水場を設けて排水する場合、そして、湧水がない場合の 3 区分とした。

e) 土留壁

壁の曲げ剛性やその遮水性は地表面沈下量に影響すると考えられるので、表-1 のように土留壁の種類で範疇区分した。

以上の要因と範疇区分に従い、84 件の実測例について度数分布を調べた結果を図-2 に示した。なお、84 件

の実測例の最大沈下量の平均値は、砂地盤で 20 mm、互層地盤で 33 mm、粘土地盤で 105 mm であった。沈下範囲の平均値は、砂地盤で 17 m、互層地盤で 23 m、粘土地盤で 25 m であった。

(5) 要因効果比較

84 件の実測例をサンプルとした場合（以後、全工事例の場合という）、および、地盤種別ごとに区分した場合について、要因効果の比較を行った結果を図-3 に示した。目的変数が最大沈下量の場合と沈下範囲の場合に分けて示した。上位 3 位までの要因を主要因とよぶことにする。

a) 全工事例

最大沈下量の主要因は、① 土留壁の種類、② 掘削幅、③ 地盤種別である。沈下範囲の主要因は、① 土留壁の種類、② 排水状況、③ 地盤種別であり、土留壁の種類の要因効果が大きい。すなわち、地表面沈下量に影響する最も重要な要因は、土留壁の種類であり、地盤種別、掘削幅、排水状況も重要な要因である。

b) 砂地盤

最大沈下量の主要因は、① 掘削幅、② 掘削深さ、③ 土留壁の種類であり、掘削幅と掘削深さの要因効果が大きい。沈下範囲の主要因は、① 掘削幅、② 排水状況、③ 掘削深さである。砂地盤での特徴は、掘削幅や掘削深さという掘削規模を表わす要因が主要因であることである。

c) 互層地盤

最大沈下量の主要因は、① 土留壁の種類、② 根入長、③ 掘削幅である。沈下範囲の主要因は、① 根入長、② 掘削深さ、③ 根入部地盤の硬さである。砂地盤と比較すると、排水状況の代わりに根入長や根入部地盤の硬さが主要因の 1 つになっている。

d) 粘土地盤

最大沈下量の主要因は、① 土留壁の種類、② 掘削深さ、③ 掘削幅であり、根入長の要因効果も掘削幅に近い。沈下範囲の主要因は、① 土留壁の種類の要因効果が著しく大きい。② 根入部地盤の硬さと、③ 掘削深さも主要因である。砂地盤の場合と比較すると順位は異なるが、土留壁の種類に加えて掘削規模に関する要因が主要因である。また、根入部地盤の硬さが主要因の 1 つになっていることは、互層地盤の場合と同じである。

このように、要因間の相互関連を考慮した数量化理論 I 類による分析結果から、① Ro-

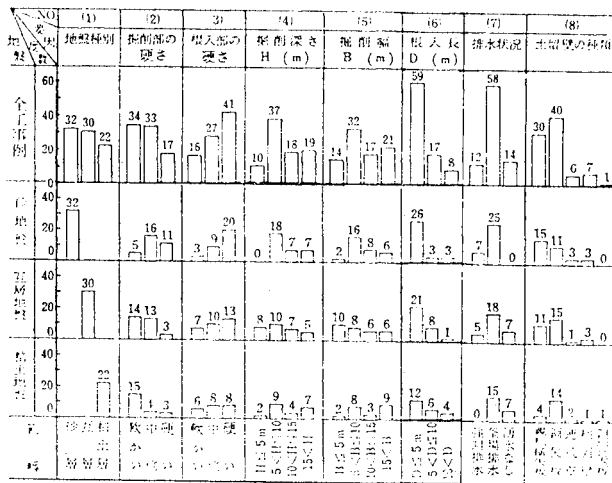
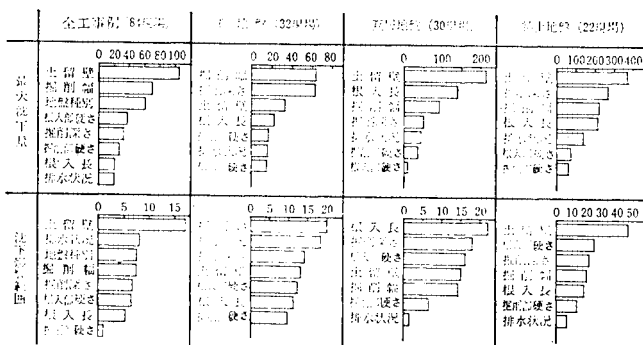


図-2 要因ごとの範疇の度数分布



(横軸はレンジである)

図-3 要因の寄与順位

scoe ら²⁾や内藤ら⁴⁾が明らかにした壁の変形と密接に関連する土留壁の種類, ② Peck¹⁾が重視した地盤の硬さ, 特に, 根入部地盤の硬さ, そして, ③ 掘削深さや掘削幅の要因効果が大きいことが明らかになった。

2. 主要因と最大沈下量の関係

1. の地表面沈下量の要因分析で用いられた要因のうち, 掘削深さ, 掘削幅, 排水状況(排水量)は, 値が大きくなると最大沈下量が大きくなる要因である。一方, 根入長, 土留壁剛性, 地盤の硬さは, 最大沈下量を小さくする要因である。個々の要因の最大沈下量に及ぼす影響を考慮して, 要因を組み合わせた種々のパラメーターと最大沈下量の関係を検討した。

検討したパラメーターは, ① 掘削幅と掘削深さの比, ② 掘削幅と掘削深さの積, ③ 壁剛性と根入部地盤の平均 N 値の積, ④ 掘削底部の土留壁の水平変位計算値, そして, ⑤ 式 (5) に示す掘削係数などである。

式 (5) の分母は, 弾性支承ばりとしての長杭と短杭の概念¹⁰⁾を土留壁の根入長に利用したもので, これは, 半無限長杭(杭頭自由)の第一不動点深さ $L_0 = \pi/2 \beta$ (ここで, $\beta = \sqrt[4]{E_s/4EI}$) に対する根入長 D の比としてもよいが, パラメーターとして取り扱う都合上, β の代わりに式 (6) の β_D を用いて, $\beta_D \cdot D$ とした。式 (5) の分子は, 掘削規模を表わしている。

$$\text{掘削係数 } \alpha_c = \frac{B \cdot H}{\beta_D \cdot D} \quad (\text{m}^2) \dots\dots\dots (5)$$

ここで, B は掘削幅, H は最大掘削深さ, D は根入長である。 β_D は式 (6) で表わされるパラメーターであり, ここでは根入係数と呼称した。

$$\text{根入係数 } \beta_D = \sqrt[4]{\frac{\bar{E}_s}{E \cdot I}} \quad (\text{m}^{-1}) \dots\dots\dots (6)$$

ここで, E と I は壁材料の弾性係数と断面二次モーメント, \bar{E}_s は根入部地盤の土の変形係数の平均値である。

根入部地盤の土の変形係数は, Terzaghi¹¹⁾ が提案した N 値と土の変形係数の関係から計算し, 根入部地盤の層平均値として求めた。なお, $1.0 \text{ t/m}^2 = 9.8 \text{ kPa}$ である。

$$\text{粘土地盤の場合 } E_s = 4 N \times 10 \quad (\text{t/m}^2) \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{砂地盤の場合 } E_s = n_h \cdot Z \times 10 \quad (\text{t/m}^2) \dots\dots\dots (8)$$

ここで, E_s は土の変形係数, N は標準貫入試験の N 値, Z は地表面からの深さ (cm), n_h は N 値との関係から求められる横方向地盤反力係数 (kg/cm^2) である。

検討したパラメーターと最大沈下量の散布図のうち, 最もよくまとまった関係として, 図-4 が得られた。

図-4 では, 地盤種別ごとに掘削係数と最大沈下量の関係を示した。根入部地盤の地層に, 表-2 に示した地

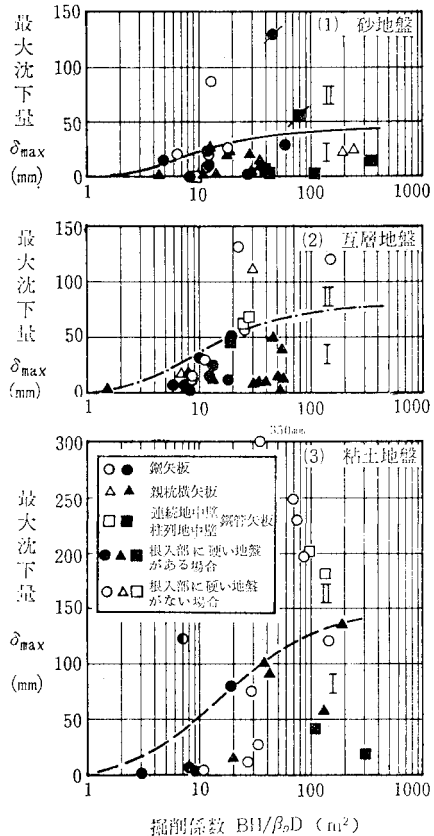


図-4 掘削係数と最大沈下量の関係

盤の硬さの範囲区分の「締まった砂, もしくは硬い粘土層」を含む場合を黒記号 (●, ▲, ■ 印) で示し, その上限包絡線を領域 I と II の区分曲線とした。また, 土留壁の種類を凡例に示す記号で区分した。

地盤種別にかかわらず, 根入部に「締まった砂, もしくは硬い粘土層」がない場合 (○, △, □ 印) は, 掘削係数の増加に伴って最大沈下量が大きくなるのが認められる。そして, 領域 II は, 根入部に「締まった砂, もしくは硬い粘土層」がない場合, 掘削部に腐植土層を挟在する場合 (◐ 印), そして, 偏土圧が作用した場合 (◑, ◒ 印) の最大沈下量である。

このように, 領域 II の実測例は, 特殊な施工条件や地盤条件のものであり, 掘削係数に取り入れた要因以外の影響が著しいものと推察される。

3. 有限要素法による掘削係数の検討

前章 2. の実測例から誘導した掘削係数と最大沈下量の関係を予測に用いるためには, 数値解析的にもその関係が成立するか否かを明らかにする必要がある。こうした場合, 有限要素法による地盤変形解析が有効である。

(1) 解法と地盤のモデル化

収集した実測例の排水状況が示すように(図一2), 排水工を伴った実測例が多い。したがって, 変形解析では排水の影響を考慮できる有効応力解析が必要である。こうした場合の解法の基本は, Biot¹⁸⁾の多次元圧密方程式である。ここでは, Christian¹⁹⁾の方法で定式化した有限要素法²⁰⁾を適用した。

また, 地盤と構造物は次のようにモデル化した。

- ① 地盤: 4 節点長方形要素
- ② 土留壁: 二次元はり要素
- ③ 土と土留壁の境界: Goodman²¹⁾のジョイント要素
- ④ 切ばり: 一次元ばね要素

掘削境界荷重は, 応力解放法²²⁾を用いて逐次掘削過程の掘削境界節点荷重として計算した。

解析モデル地盤は, 根入部に硬い粘土層のない飽和した軟弱粘性土地盤を想定し, 初期地下水位は, G.L. - 1.0m とした。主な入力定数を表一3 に示した。東京の墨田区内の沖積粘性土で行った土質試験結果である。表中の定数, K, n, R_f は Duncan²³⁾らの非線形式(9)の係数であり, 試験結果の一部を図一5 に示した。

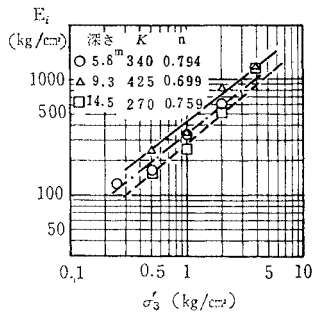
$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma'_3}{p_a} \right)^n \left\{ 1 - \frac{R_f (\sigma'_1 - \sigma'_3)_f}{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f} \right\}^2 \dots (9)$$

ここで, E_t は土の変形係数, $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f$ は破壊時の軸差応力, p_a は応力と同じ単位の大気圧である。なお, 掘削底の下の地盤は, 応力解放と土留壁根入部の変形の

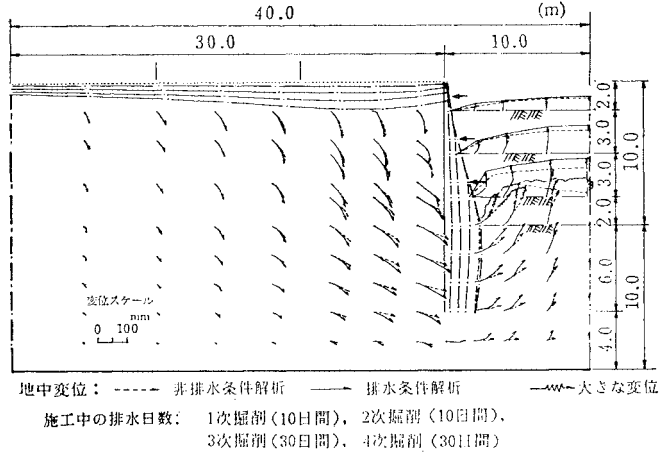
表一3 解析上の入力定数 (1.0 t/m² = 9.8 kPa)

深さ H	土圧係数 K _o	土の密度 ρ	粘着力 C	内部摩擦角 φ	式(9)の係数			ジョイント		透水係数	
					K	n	R _f	E _{ij}	E _{nj}	水平	鉛直
m	-	t/m ³	t/m ²	°	-	-	t/m ²	t/m ²	m/day	m/day	
0~1	0.5	1.8	1.0	38.6	112	0.61	0.65	100	14000	1.09	1.09
1~4	0.6	0.66	1.0	36.9	340	0.79	0.91	252	14000	2.05	11.56
4~5	0.6	0.66	1.0	33.7	425	0.70	0.80	700	14000	1.35	13.07
5~8	0.6	0.66	1.0	41.3	270	0.76	0.84	920	14000	3.37	10.46
8~12	0.5	0.66	1.6	25.4	265	1.13	0.87	1200	14000	2.05	11.56
12~16	0.5	0.66	2.0	27.9	200	1.18	0.97	1200	14000	1.35	10.91
16~20	0.5	0.66	3.2	23.5	139	1.34	0.98	1	1	3.37	0.91

土留壁 損失率の割合: E_t = 2.4 × 10⁴ t/m² E: 鋼材のヤング率
切 歪 土留壁の断面積: A = 0.92 ~ 1.64 × 10⁴ m² I: 断面二次モーメント
切 歪 比: L = K_o / (1 + K_o) K_o: 静止土圧係数



図一5 式(9)の定数決定 (5 kg/cm² = 0.49 MPa)



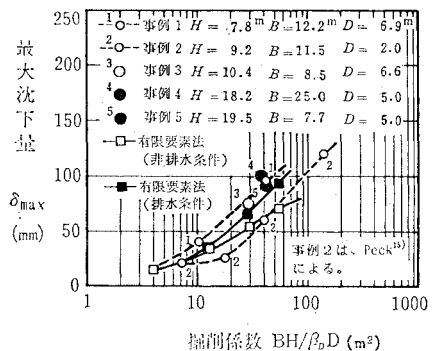
図一6 排水条件の相違による地中変位ベクトル比較 (計算例)

影響で主応力方向が回転し, 伸張応力状態となる。そこで, 主応力方向の回転による破壊時の軸差応力の補正²⁴⁾を行った。

(2) 解析結果

非排水条件と排水条件で解析した地中変位ベクトルの比較を図一6 に示した。排水は掘削底面からのみ起こるものとし, 非排水条件とは掘削底から排水のない場合に当たる。排水条件は, 施工中, 図一6 に示した期間, 底面から排水が生じた場合である。排水条件解析による地中変位ベクトルは, 非排水条件の場合に比べて, 土留壁背面で沈下量 が大きい。また, 土留壁の根入部周辺では, 両解析条件ともに水平変位が鉛直変位より卓越した。掘削側では排水条件の場合の膨れ上がり量が多い。これは, 三次掘削後の排水の影響により掘削底の直下の地盤で破壊域が拡大するため, Peck¹⁾が安定係数と掘削底の塑性域の発達に関して記述した内容と一致する²⁵⁾。

この解析例における掘削係数と地表面の最大沈下量の関係を 図一7 に示した。排水条件解析の場合, 掘削深さが深くなるに従い排水の影響が著しくなるため最大沈下



図一7 掘削係数と最大沈下量の関係

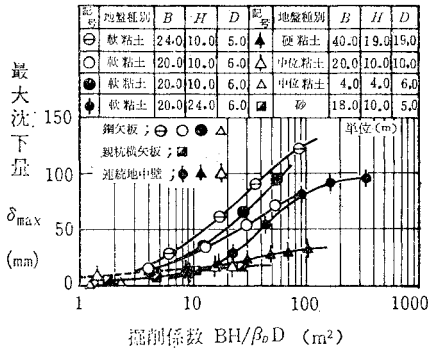


図-8 種々の地盤モデルにおける掘削係数と最大沈下量の関係

量が大きくなり、非排水条件の場合との差が大きくなる。図中には、最大掘削時の掘削係数が解析例に近い値の実測例を併記した。実測例と解析例の掘削係数と最大沈下量の関係は、近似した傾向を示した。また、排水条件解析の場合は、2. で示した粘土地盤の場合の領域区分曲線と近似した。

(3) 種々の地盤における掘削係数と最大沈下量の関係

軟らかい粘土地盤、中位の硬さの粘土地盤、硬い粘土地盤、および、砂地盤での掘削工事を想定したモデルで、掘削係数と最大沈下量の関係を検討した結果を図-8 に示した。各モデルでの土留壁の種類、掘削幅 B、掘削深さ H、根入長 D は凡例に示したとおりである。

軟らかい粘土地盤の解析例は、いずれも実測値に基づく粘土地盤での領域区分曲線(図-4 (3))の形状に近似した。中位および硬い粘土地盤、そして、砂地盤での解析例は、実測値に基づく砂地盤での領域区分曲線(図-4 (1))に近い関係が成立した。

このように、種々の地盤と掘削規模の解析例で求めた掘削係数と最大沈下量の関係は、実測例から求めた領域区分曲線の関係と近似した。

4. 要因のパラメトリック・スタディー

統計的分析と有限要素法による数値解析で得た掘削係数と最大沈下量の関係を、対策工の検討に利用するうえでは、掘削係数に用いられた1つ1つの要因の影響を土質工学的・現場的に検討することが重要である。ここでは、有限要素法による数値解析(非排水条件)で個々の要因の影響度を検討した。解析モデルは、厚さ 24.0 m の飽和した軟弱粘性土地盤での掘削工事を目的をしばった。

(1) 掘削幅、壁剛性、切ばり剛性の影響

土留壁の根入長が 5.0 m の場合の掘削幅、壁剛性、

切ばり剛性の影響を検討した結果を、図-9、図-10、図-11 に示した。h/H は最大掘削深さ H に対する逐次掘削深さ h の比である。

掘削幅の増加に伴い最大沈下量は大きくなり、掘削深さが深くなるほどその傾向が著しい(図-9)。壁剛性については、掘削深さが深くなるに従い剛性効果が現われるが、掘削幅に比べて影響は小さい(図-10)。また、切ばり剛性の影響も小さい(図-11)。

(2) 根入部の硬質層厚さの影響

実測例による掘削係数と最大沈下量の関係から、根入部硬質層の有無は最大沈下量に著しく影響することが確かめられた。そこで、根入部硬質層の厚さを変えて、その影響について検討した結果を図-12 に示した。土留壁の種類が鋼矢板Ⅲ型と連続地中壁の場合について示した。

根入部硬質層厚さ D_f が大きくなるに従い、最大沈下量は小さくなる。また、鋼矢板と連続地中壁での計算例で示したように、根入部に硬質層がある場合には壁剛性の影響が顕著になる。

(3) 根入長の影響

根入部に硬質層がない場合の根入長の影響を検討した結果を図-13 に示した。根入長を長くしても最大沈下量への影響はない。これは、壁のたわみ分布に示したように、根入部を含めて壁のたわみ分布が根入長の影響をほとんど受けなためである。

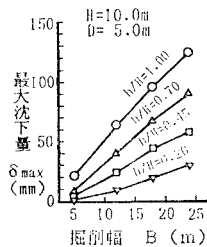


図-9 最大沈下量に及ぼす掘削幅の影響

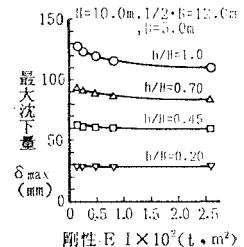


図-10 最大沈下量に及ぼす壁剛性の影響 (1.0 t/m²=9.8 kPa)

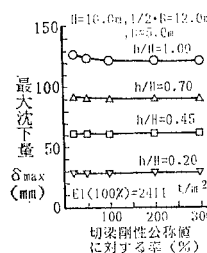


図-11 最大沈下量に及ぼす切ばり剛性の影響 (1.0 t/m²=9.8 kPa)

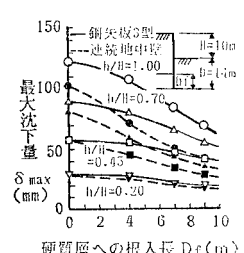
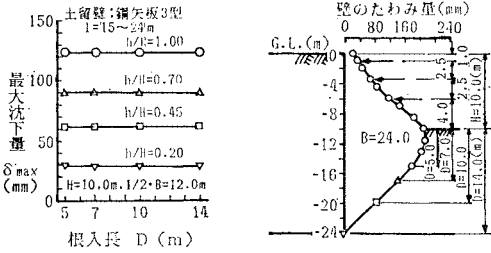
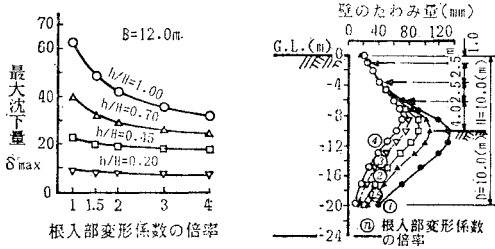


図-12 最大沈下量に及ぼす根入部硬質層の影響



図一13 最大沈下量に及ぼす根入長の影響とたわみ分布



図一14 最大沈下量に及ぼす根入部変形係数の影響とたわみ分布

(4) 根入部地盤の変形係数の影響

根入部地盤の変形係数の影響を検討した結果を図一14に示した。根入部の変形係数は(1)と(3)の入力値を基準にした。変形係数が大きくなるに従い、最大沈下量は急激に小さくなる。これは、壁のたわみ分布に示したように、根入部のたわみ量の差に起因したものである。

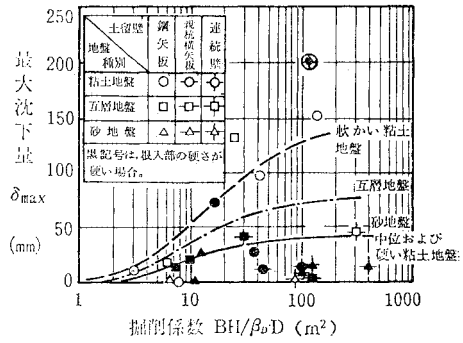
以上の結果から、掘削係数に取り入れた要因の影響は数値解析的にも大きいといえる。

5. 最大沈下量の予測図の提案

84件の実測例とは別に新しく24件の実測例が収集できたので、すでに示した図一4の關係の妥当性の検証を試みた。図一15に示した3本の曲線は、図一4の地盤種別ごとの領域区分曲線である。なお、中位および硬い粘土地盤の場合には、砂地盤の領域区分曲線に近似する。

根入部に締まった砂、もしくは硬い粘土層がある場合(黒記号)、いずれの地盤種別の場合も領域区分曲線より小さな最大沈下量となった。根入部にこれらの層がない場合(白抜記号)は、掘削係数が10以下、もしくは、連続地中壁を採用した場合を除き、領域区分曲線付近かそれを越えた最大沈下量となった。圧密沈下量が大きい場合(⊕印)も領域区分曲線を越えた。また、連続地中壁を採用した場合は、掘削係数が大きいにもかかわらず、砂地盤、中位および硬い粘土地盤の領域区分曲線付近か、それ以下の最大沈下量となった。

以上のことから、通常の掘削形式の場合、図一15は、掘削幅、掘削深さ、根入長、壁剛性、および、根入部地



図一15 最大沈下量の予測図

盤の硬さを勘案して最大沈下量を予測するうえで有効と思われる。

まとめ

以上の要因分析、主要因と最大沈下量の關係、および、有限要素法による数値解析の検討結果をまとめ、開削工事に伴う地表面最大沈下量の予測法を提案すると、次のとおりである。

- ① 最大沈下量や沈下範囲に影響する主要因は、地盤種別ごとに異なるが、土留壁の種類、掘削深さや掘削幅、根入部地盤の硬さ、そして排水状況である。
- ② 要因を組み合わせた種々のパラメーターと最大沈下量の關係を検討し、掘削係数と呼称するパラメーターと最大沈下量の關係を誘導した。
- ③ 実測例から求めた掘削係数と最大沈下量の領域区分曲線は、有限要素法で解析的に求めた掘削係数と最大沈下量の關係とよく近似した。
- ④ 掘削係数に取り入れた要因は、有限要素法による数値解析からも要因効果大きいことが判明した。
- ⑤ 開削工事に伴う地表面最大沈下量の予測方法として、掘削深さと掘削幅、壁剛性と根入部地盤の変形係数、そして、根入長から計算される掘削係数と最大沈下量の關係図を提案した。

本研究は、東京都建設局が約15年間にわたり実施してきた調査の実測例を基本とし、既往の学術誌等での実測例を加え、数値化理論と有限要素法により検討して整理を試みたものである。これらの結論は、開削工事に伴う地表面最大沈下量の概略値を予測し、対策工選定の用に供することを目標とした。

謝辞：本文をまとめるにあたり、終始技術的指導を賜った森 麟・古藤田喜久雄両早稲田大学教授を始めとし、貴重なご意見を賜った方々、ならびに、実測例を提供していただいた関係機関に対し厚く感謝の意を表し

ます。

参 考 文 献

- 1) Peck, R.B. : Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, Proc. 7th ICSMFE, State of the Art Volume, pp. 225~290, 1969.
- 2) Roscoe, K.H. : The Influence of Strains in Soil Mechanics, Geotechnique, Vol. 20, pp. 129~170, 1970.
- 3) Bransby, P.L. and Milligan, G.W.E. : Soil Deformations near Cantilever Sheet Pile Walls, Geotechnique, Vol. 25, No. 2, pp. 175~195, 1975.
- 4) 内藤多伸ほか : 施工に伴う地盤沈下による公害とその防止に関する研究, 日本建築学会, 1958.
- 5) 幾田悠康ほか : 地盤条件に応じた山止め計測管理項目と計測管理費, 山留めの諸測定に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 69~78, 1978.
- 6) 木島詩郎・阿部 裕 : 軟弱粘性土の地盤の大規模掘削工事における周辺地盤の沈下について, 第12回土質工学研究発表会講演集, pp. 1161~1164, 1977.
- 7) 松尾 稔・川村国夫 : 掘削現場周辺地盤の沈下予測, 第26回土質工学シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 61~68, 1981.
- 8) 森 麟・赤木寛一・小松 寛 : 掘削工事に伴うせん断変形で生じた乱れによる周辺地盤の圧密沈下解析, 第36回土木学会年次学術講演会, III-260, pp. 558~559, 1981.
- 9) Osaimi, A.E. and Clough, G.W. : Pore-Pressure Dissipation during Excavation, Jour. of G.E. Div., ASCE, Vol. 105, No. GT 4, pp. 481~498, 1979.
- 10) 小橋澄治・今井篤雄・今井重利 : 切取のり面の安定度予測法の検討, 鉄道技術研究所報告, No. 895 (施設編第407号), 1974.
- 11) 市原松平・山田公夫 : 地震時における名古屋市の水道管の相対的危険度, 土木学会論文報告集, 第316号, pp. 51~63, 1981.
- 12) 駒澤 勉 : 多元的データ分析の基礎, 朝倉書店, pp. 27~39, 1979.
- 13) 土木学会 : 開削トンネル指針, p. 49, 1977.
- 14) 日本国有鉄道 : 掘削土留工設計指針 (案), pp. 1~2, 1979.
- 15) 星 莖 和ほか共訳 : 新版テルツァギ・ベック土質力学応用編, p. 303, 丸善, 1970.
- 16) 建築学会 : 建築基礎構造設計基準・同解説, p. 258, 1974.
- 17) Terzaghi, K. : Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction, Geotechnique, Vol. 5, No. 4, pp. 297~326, 1955.
- 18) Biot, M.A. : General Theory of Three-Dimensional Consolidation, Jour. of Applied Physics, Vol. 12, February, pp. 155~164, 1941.
- 19) Christian, J.T. : Undrained Stress Distribution by Numerical Methods, Jour. of S.M.F. Div., ASCE, Vol. 94, No. SM 6, pp. 1333~1345, 1968.
- 20) 杉本隆男 : 地盤と構造物との付着抵抗が圧密変形に与える影響, 第15回土質工学研究発表会, No. 200, pp. 797~800, 1980.
- 21) Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L. : A Model for Mechanics of Jointed Rock, Jour. of S.M.F. Div., ASCE, Vol. 94, No. SM 3, pp. 637~659, 1968.
- 22) 川本腓万・上野建昭・宮地克人 : 双設トンネルの開削に伴う応力および変形状態について, 第24回土木学会年次学術講演会, III-95, pp. 277~280, 1969.
- 23) Duncan, J.M. and Chang, C.Y. : Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, Jour. of S.M.F. Div., ASCE, Vol. 96, No. SM 5, pp. 1629~1653, 1970.
- 24) 杉本隆男・佐々木俊平 : 盛土による地中構造物を含む地盤の変形解析, 東京都土木技術研究所年報, 昭和53年, pp. 335~354, 1978.
- 25) 杉本隆男・佐々木俊平 : 掘削時の浸透を考慮した地盤変形の有限要素法解析, 第21回土質工学研究発表会, No. 525, pp. 1371~1372, 1986.

(1986.5.8・受付)

●土木学会新刊案内●

昭和 61 年 6 月下旬刊・B 5 判 804 ページ 25 000 円 会員特価 22 000 円 (〒とも)

マ タ デ イ 橋 工 事 誌

昭和 61 年 7 月上旬刊・B 5 判 538 ページ 13 000 円 会員特価 11 000 円 (〒とも)

構 造 力 学 公 式 集

昭和 61 年 7 月上旬刊・B 5 判 228 ページ 4 800 円 会員特価 4 000 円 (〒350 円)

トンネル標準示方書 (開削編) ・ 同解説

昭和 61 年 7 月上旬刊・B 5 判 220 ページ 4 800 円 会員特価 4 000 円 (〒350 円)

トンネル標準示方書 (シールド編) ・ 同解説