

ターフフロントにおける土木構造物の施工を考えてみよう。埋立てや人工島の建設にあたって、まず護岸が建設される。重量構造物が局部的に造られるため、地盤側から見ると極端な局部的急速載荷を受けることになる。変形は非排水の度合が大きく、側方への変形も起こりやすい。こうした条件下では土要素の応力状態は破壊線に近づく方向に推移する。土は破壊に近づくほどひずみの発生が大きくなる強い非線形性を有するので、破壊しないまでも大きなひずみが生じることになる。その後背面側に広く埋立て荷重が載荷されると局部載荷の条件は解消され、地盤の透水性に見合った速度で載荷が行われれば地盤は安定した挙動を示す。しかしながら、一様な完成断面に至った後でも、建設当初に局部的な載荷を受けた護岸部では埋立て地内よりも大きな塑性変形が残留する<sup>250)</sup>。この変形の中味は、初期の局部的急速載荷によって生じたせん断変形と上載荷重による圧密変形による成分の和である。ここで、そのいずれの成分もが地盤の側方流動に起因する変形の寄与を受けていることも指摘しておかなければならない。こうした地盤の塑性変形現象を正確に評価するためには、載荷工程、すなわち loading の正確なモデル化が不可欠である。施工手順を詳細に解析に組み込むことの重要性については、太田<sup>251)</sup>、本多<sup>252)</sup>も指摘しているとおりでである。

### 3.4.10 掘削による地盤の変形問題の考え方と解き方

(1) 概要 掘削による地盤の変形問題は、次の2種類に大別して考えることができる。

すなわち、掘削の行われる地盤面が地表に向かって開放された開削問題と、掘削面が開放されていないトンネルのような掘削問題である。このような地盤の掘削を保存則と構成式に境界条件を加えた力学場の問題として解こうとした場合には、下記の三つの留意すべき点がある。

- ① 外力条件のモデル化
- ② 構成式の選択
- ③ 三次元モデルによる土-水連成解析

まず、運動量保存則に相当する静的な力の釣合い式に関係する外力の境界条件のモデル化について考えてみる。開削工事や切羽が自立したトンネル掘削問題では、掘削部分の土砂の自重による初期応力が掘削により除荷されたことに相当する力学的作用が外力に当たる。

ところが、切羽がシールド機により密閉された、例えば泥水式シールドトンネル掘削の場合には、トンネル切羽に作用する力としては、泥水の圧力とシールド機の切羽面板と地山切削用のカッター部分が地山を押し力がある。泥水シールド工事の現場では、これら三つの力の合力の一部がシールド機を推進するジャッキ推力として実測される。これは、シールドトンネルの掘削による地盤の変形問題を力学場の問題として解くうえでは、外力を直接に決定することができるので非常に有効な情報であ

る。更に、シールド機の切羽面が通過した後は、シールド機の後方でテールボイドが発生することによって、地盤は上記の開削工事と同様に掘削によって土砂が排除された場合と同等の力学的作用を受けることになる。

次に、このような掘削による地盤の変形問題を解くうえで用いる土の構成式は、以下の点に留意して選択する必要がある。前項までに述べられた盛土による地盤の変形問題では地盤内の平均主応力(全応力)が増加するのに対して、地盤の掘削問題では平均主応力は一定または減少することになる。すなわち、地盤の掘削問題に用いる土の構成式は、このような平均主応力が一定または減少するような場合の土の力学的作用を適切に表す必要がある。

もう一つの留意点は、実際の地盤の掘削による変形問題は、幅と奥行きを持った空間の三次元の問題であるとともに、圧密現象などを通して時間的に非定常な問題であることである。しかしながら、従来の地盤の掘削問題の有限要素法解析の大半は計算に必要な記憶領域や計算時間の制限などから、開削区間やトンネルの横断面や縦断面を取り上げて、二次元または軸対称問題として全応力解析により解く場合が多かった。ところが、近年、電子計算機を取り巻く環境は一変し、大容量かつ高速な計算が豊富なソフトウェアを利用して比較的容易に行えるようになった。その結果、適切な境界条件をもった三次元問題を土-水連成作用を考慮して解くことが可能になっている。また、特に各種の地下構造物が錯綜した都市部での掘削に伴う地盤の変形挙動予測を行うためには、三次元モデルを利用した土-水連成の有効応力解析が不可欠である。

以上が、掘削による地盤の変形問題を力学場の問題として解くときに留意すべき点である。以下では、地盤の開削問題、シールドトンネル掘削問題を取り上げる。これらを力学場の問題として有限要素法を用いて具体的にどう解くかという点に絞って解説し、それぞれの解析結果の一例を示す。

#### (2) 開削による地盤の変形問題の考え方と解き方

a) 基本的な考え方 開削による地盤の変形に対して支配的な影響を及ぼす外力は、掘削により排除された土砂の自重による地盤内応力の除荷に伴う力学的作用である。

b) モデル化の方法 開削に伴う地盤内初期応力の除荷に相当する外力増分は、有限要素法を利用して次のような方法で求めることができる<sup>253)</sup>。

一般に、開削が行われる前の地盤の初期応力は、鉛直方向有効応力  $\sigma_{v0}'$  と静止土圧係数  $K_0$  を用いて計算される水平方向有効応力  $\sigma_{h0}' = (K_0 \sigma_{v0}')$  で表される。この静止土圧係数  $K_0$  の値は、Jaky の式を使うと土の内部摩擦角  $\phi'$  を用いて  $K_0 = 1 - \sin \phi'$  により決定できる。地

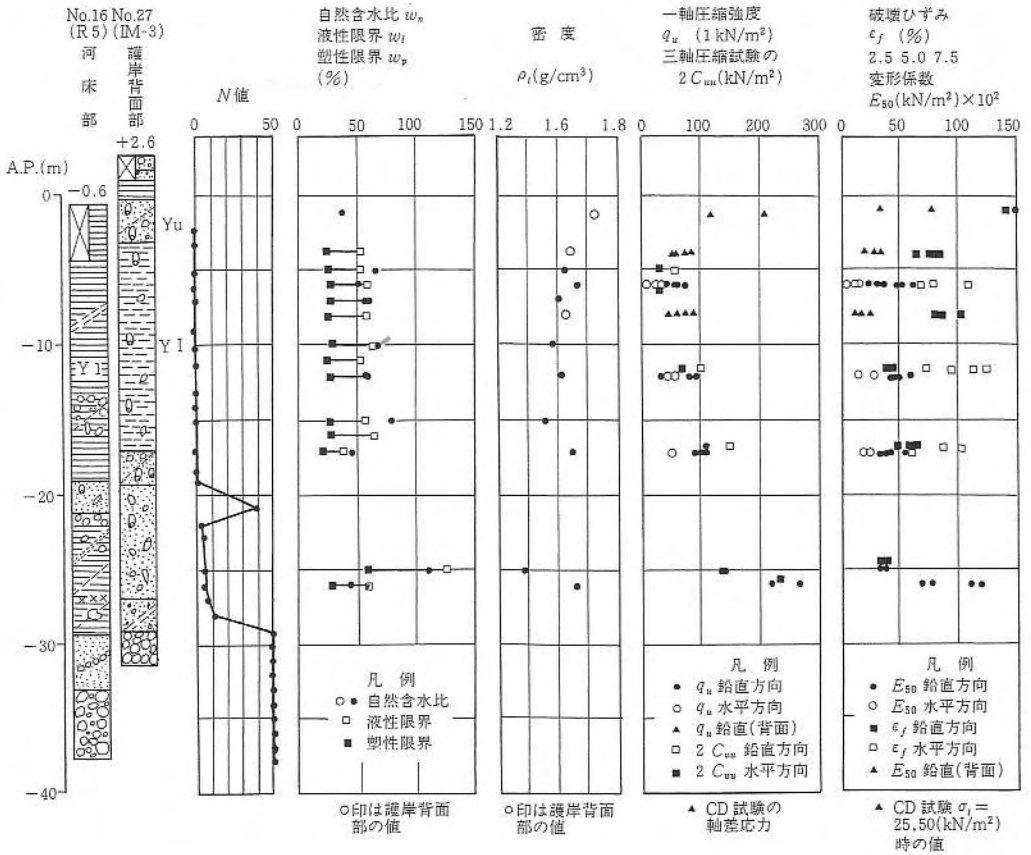


図-2.3.158 ボーリング柱状図および土質試験結果

表面が平坦で水平面と一致する場合には、この初期応力の値を地盤内部の各有限要素に適用することができる。

一方、地表面形状が平坦でなく水平面と一致しない場合には、その形状を考慮した初期応力を求める必要がある。こうした場合の初期応力計算法として、各有限要素の自重を基に初期応力を求める方法がある。各有限要素の自重  $\{\gamma\}$  に相当する要素の構成節点力増分  $\{\Delta F\}$  は、次式 (2.3.348) で求めることができる。

$$\{\Delta F\} = -\int_v [N]^T \{\gamma\} dV \quad (2.3.348)$$

ここで、 $[N]^T$  は有限要素の形状関数の転置マトリックスである。

地盤を構成する有限要素すべてについて式 (2.3.348) を適用し、自重に相当する荷重ベクトル増分  $\{\Delta F_0\}$  を求める。更に、この  $\{\Delta F_0\}$  に対応する節点の変位ベクトル増分  $\{\Delta U_0\}$  を次式により求める。

$$\{\Delta U_0\} = [K]^{-1} \{\Delta F_0\} \quad (2.3.349)$$

ここで、 $[K]^{-1}$  は有限要素の全体剛性の逆マトリックスである。

この変位ベクトル  $\{\Delta U_0\}$  を基に、任意形状の地表面をもつ地盤内の各有限要素の初期応力ベクトル増分  $\{\Delta \sigma_0'\}$  を次式により求めることができる。

$$\{\Delta \sigma_0'\} = [D][B]\{\Delta U_0\} \quad (2.3.350)$$

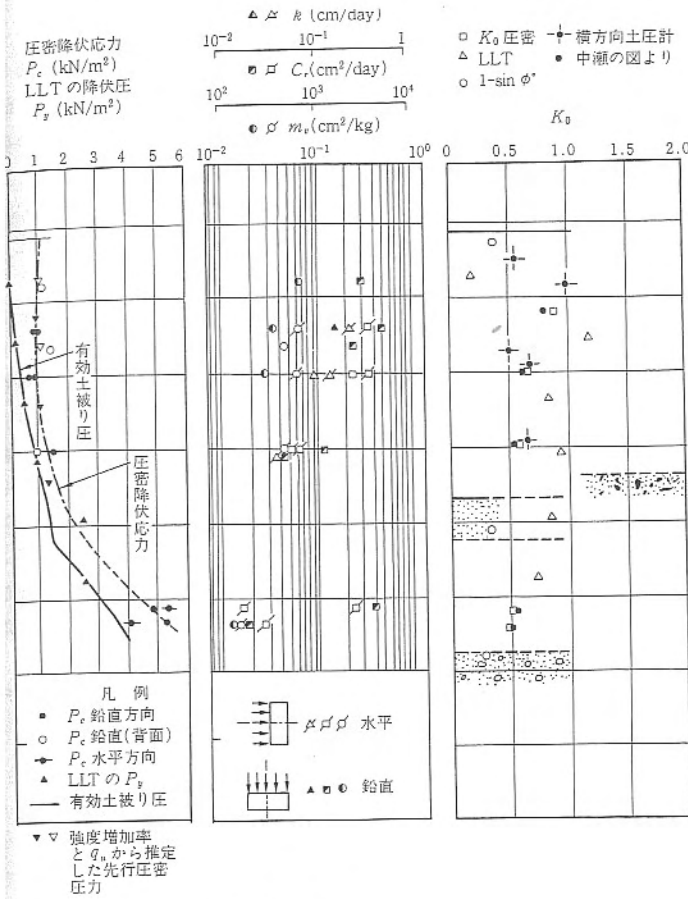
ここで、 $[D]$  は有限要素の応力-ひずみマトリックス、 $[B]$  はひずみ-変位マトリックスである。

以上のようにして求めた初期応力ベクトル  $\{\Delta \sigma_0'\}$  を基にして、各有限要素にあたる地盤が掘削されたときの初期応力の除荷と等価な節点荷重ベクトル増分  $\{\Delta F_n\}$  を次式により求めることができる。

$$\{\Delta F_n\} = (\int_v [B]^T \{\Delta \sigma_0'\} dV - \int_v [N]^T \{\gamma\} dV) \quad (2.3.351)$$

ここで、 $\{\Delta \sigma_0'\} = \{\Delta \sigma_0'\} + \{u_0\}$  ( $\{u_0\}$  は静水圧または定常浸透流がある場合には、浸透水圧) である。

c) 解析結果の例 解析対象地盤は、図-2.3.158 のような土層、土質構成を有する東京江東区の軟弱地盤である。深さ約 20 m 付近までは、自然含水比が液性限界よりも大きい  $N$  値が 0 のシルト質粘土が堆積している。一軸圧縮強度  $q_u$  は深さとともに増大している。また、サンプリングした供試体の切出し方向を鉛直と水平方向とした場合に、それぞれせん断強度や変形係数が異なり異方性が認められた。圧密降伏応力  $p_v$  は、その点の有効土被り圧  $\sigma_{v0}'$  より大きくわずかに過圧密状態にあった。一方、鉛直および水平方向切出し試料の段階荷荷に



(江東区業平) (文献 256) に加筆修正)

よる圧密試験により求めた透水係数  $k_v$  と  $k_h$  は、水平方向供試体の  $k_h$  の方が大きい。

この軟弱粘性土地盤での幅 20 m、深さ 10 m までの 4 段階の開削工事を想定して有限要素法による解析が行われた。ここでは、開削の興行き方向は十分長いことを考慮して、開削横断面の二次元問題が土と水の連成作用を考慮して解かれている。

土留め壁は長さ 16 m の鋼矢板Ⅲ型で、切梁は 1 段目が 250 H、2、3 段目が 300 H の H 型钢とし水平間隔は 4 m である。土と鋼矢板との境界には、Goodman (グッドマン)<sup>250</sup> により提案されたジョイント要素を配置して、地盤の変形に伴う鋼矢板とのすべり現象が考慮されている。粘性土の構成式には、Kondner

(コンドナー)<sup>255</sup> の土の三軸試験の主応力差と、軸ひずみの双曲線近似式を基本とする Duncan-Chang<sup>256</sup> の接線係数  $E_t$  に関する式 (2.3.352) を適用している。

$$E_t = KP_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \times \left\{ \frac{1 - R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{(2c' \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi)} \right\}^2 \quad (2.3.352)$$

ここで、 $P_a$  は  $\sigma_3$  と同じ単位で表した大気圧、 $K$  と  $n$  は実験定数、 $c'$  と  $\phi'$  は土の粘着力と内部摩擦角である。表-2.3.5 は、解析に用いた入力定数を示している。これらの値は、いずれも実験的に求められた値である。

解析上の変位と排水に関する境界条件は、次のとおりであった。

(変位に関する境界条件)

- ① 掘削底面と土留め壁背後の地表面：鉛直、水平方向ともに自由
- ② 解析モデルの左右端面：鉛直方向自由、水平方向拘束
- ③ 解析モデルの下端面：鉛直、水平方向ともに拘束

(排水に関する境界条件)

- ① 掘削底面：排水条件または非排水条件
- ② 土留め壁：非排水条件
- ③ その他の境界面：非排水条件

開削工事に伴う外力は、4 段階にわたる掘削によって除去された地盤の初期応力の除荷に相当する節点荷重ベクトル増分  $\{\Delta F_n\}$  を前記の方法で求めたものを順次作

表-2.3.5 解析上の入力定数 (文献 253) に加筆修正)

深さ	土係数	土密度	の	粘膏力	内部摩擦力	式 (2.3.352) の係数			ジョイントの係数	要素	透水係数	
						$K_0$	$\rho'$	$C'$			$\phi'$	$K$
$H$	$K_0$	$\rho'$	$C'$	$\phi'$	$K$	$n$	$R_f$	$E_{ij}$	$E_{nj}$	$K_H \times 10^{-3}$	$K_V \times 10^{-3}$	
m	-	t/m <sup>3</sup>	kn/m <sup>2</sup>	-	-	-	-	10 N/m <sup>3</sup>	10 kN/m <sup>2</sup>	m/day	m/day	
0~1	0.5	1.8	10	38.6	112	0.61	0.65	100	14 000	1.09	1.09	
1~4	0.6	0.66	10	36.9	340	0.79	0.91	250~500	14 000	2.05	1.56	
4~5	0.6	0.66	10	33.7	425	0.70	0.90	700	14 000	1.35	9.07	
5~8	0.6	0.66	10	41.3	270	0.76	0.84	900~1 200	14 000	3.37	0.46	
8~12	0.5	0.66	16	25.4	265	1.13	0.97	1 400~1 600	14 000	2.05	1.56	
12~16	0.5	0.66	20	27.9	200	1.18	0.97	2 000~2 200	14 000	1.35	0.91	
16~20	0.5	0.66	32	23.5	130	1.34	0.99	-	-	3.37	0.46	

土留め壁 鋼矢板の剛性:  $EI = 2.41 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ ,  $E$ : 鋼材のヤング率

切梁 H 鋼の断面積:  $A = 0.92 \sim 1.64 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ ,  $I$ : 断面二次モーメント

ポアソン比  $\nu = K_0 / (1 + K_0)$

$K_0$ : 静止土圧係数

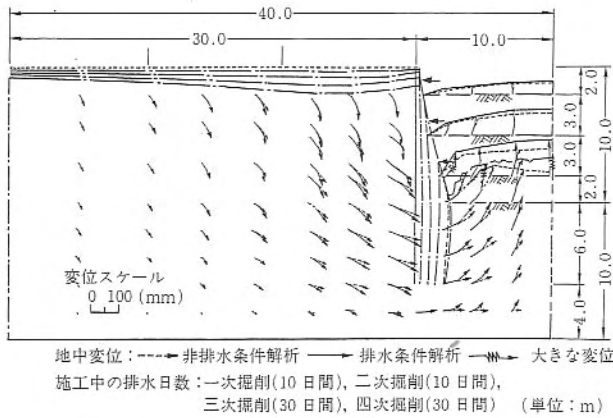


図-2.3.159 掘削底の排水条件の相違による地中変位ベクトル(計算例)<sup>260)</sup>  
用させている。

図-2.3.159は、4段階の開削に伴う地盤内の節点の変位ベクトルを示したものである。なお、ここでは掘削底面の排水条件を排水とした場合のベクトルを実線で、非排水とした場合のベクトルを破線で示してある。排水条件の解析では、段階掘削の施工中に図中に示した期間排水を許した場合の結果が示されている。土留め壁の背面側と掘削面側のいずれにおいても、排水条件の場合の変位ベクトルの方が大きくかつその方向も異なっている。特に、掘削底面では非排水条件では側方へ向いていた変位ベクトルが、上方に変化している。

(3) シールドトンネル掘削による地盤の変形問題の考え方と解き方

a) 基本的な考え方 シールドトンネル掘削による地盤の変形問題における外力は、(2)と同様に掘削された土砂の自重による地盤内初期応力の除荷に伴う力学的作用である。しかしながら、特に軟弱地盤の場合には、シールド機の掘進時の地盤の三次元的な変形に対して推進ジャッキによる推力も外力として重大な影響を及ぼす。ここでは、まずトンネルの横断方向断面を取り上げた二次元有限要素法解析結果の事例を解説する。次に、シールド機を含めた二次元有限要素法解析におけるシールドトンネル掘削に伴う外力のモデル化の方法と解析結果の事例を解説する。

b) シールドトンネル掘削の二次元有限要素法解析のモデル化と解析例<sup>267)</sup> 掘削に伴うシールドトンネル横断面内の地盤の変形に重大な影響を及ぼすのは、テールボイドと呼ばれるシールド機後方に生じるシールド機外径と一次覆工に相当するセグメントリング外径との間の約10cm程度の空隙である。シールドトンネル横断

面内の地盤の変形を求めるためには、このテールボイドの発生に伴う地盤内応力の除荷による地盤の応力-変形挙動を適切にモデル化し、解く。なお、ここでは土-水の連成解析は行われていない。

このテールボイド発生に伴う現象を実際の施工手順を含めて、できるだけ詳細にモデル化した手順が図-2.3.160に示されている。モデル化の手順はフローチャートの第2段階で素掘り状態としたときの地山の変位を算定し、この値がテールボイド量を上回る場合には第3段階で地山の変位量をテールボイド量に限定するのに必要な応力解放に相当する節点力を求める。第5段階では、第2段階の素掘り状態に相当する節点力と第3段階の節点力の差をセグメントライニングに作用させて、セグメント自身の変位量を求める。第3段階と第5段階の計算結果を重ね合わせて、第6段階ではセグメントリングを含めた地盤全体の変形と応力を算定する。

図-2.3.161は、解析に用いられた地盤の横断面モデル

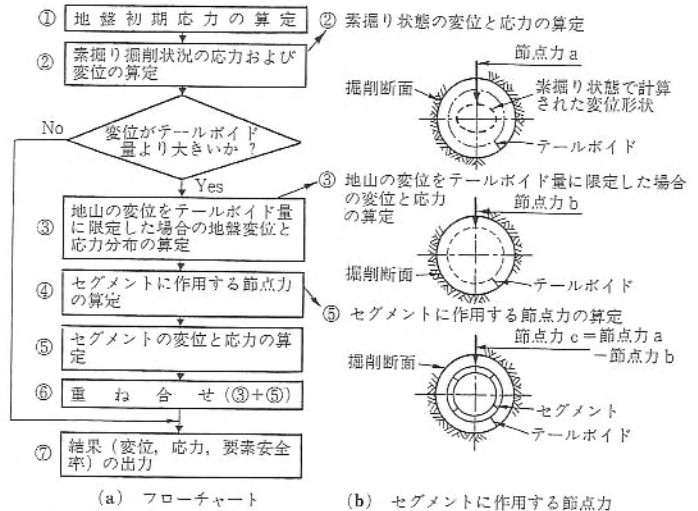


図-2.3.160 解析フローチャートおよびセグメントに作用する節点力<sup>260)</sup>

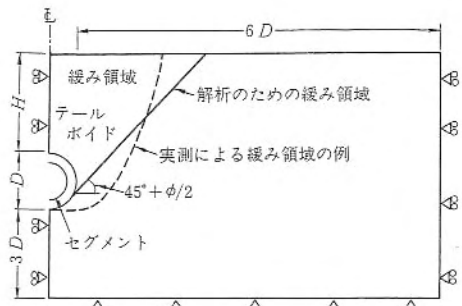


図-2.3.161 横断解析断面モデル<sup>260)</sup>

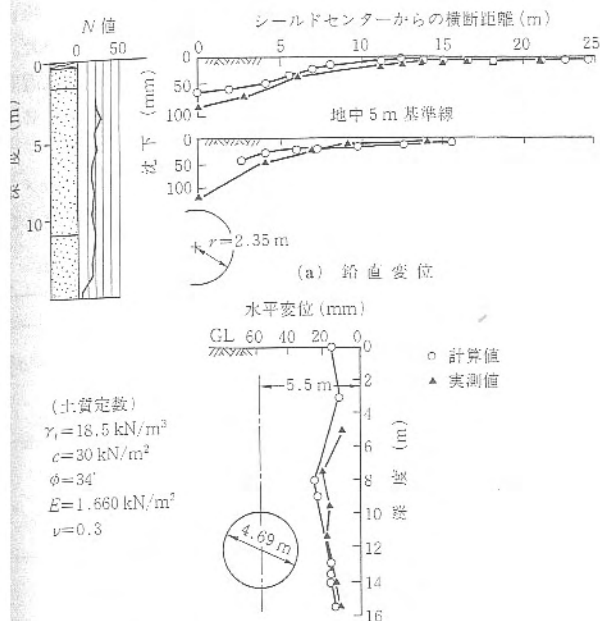


図-2.3.162 計算値と実測値の比較(篠崎幹線 6-1)(文献 260)に  
加筆修正)

ルである。地盤の地表面沈下の計算結果から考えて、トンネル掘削に伴う緩み範囲は  $45^\circ + \phi/2$  ( $\phi$ : 内部摩擦角) とすれば実測の緩み範囲を用いた計算結果とほぼ同等である。また、解析モデルの寸法は幅をシールド径( $D$ )の3倍、深さを3倍程度に取れば十分とされている。この計算では地盤材料の構成式は等方線形弾性のフックの法則が用いられているが、トンネル掘削に伴う地盤の乱れによる弾性係数の低下を考慮している。

図-2.3.162 は、東京江戸川区の軟弱粘性土地盤におけるシールド工事について、この方法で得られた地盤変位の計算結果と実測結果を比較したものである。地表面、地中沈下および水平変位ともに計算値と実測値がよく一致している。なお、図中には計算に用いた土質定数が併せて示されている。なお、地盤のトンネル掘削前の弾性係数  $E_1$  は原位置の孔内水平載荷試験を行って決められたものである。

c) シールドトンネル掘削の三次元有限要素法解析のモデル化と解析例<sup>260), 261)</sup> 図-2.3.163 は地盤内を掘進するシールド機と地盤の縦断面図であり、シールド機後方の推進ジャッキの外力によるシールド機掘進状況のモデル化の概略を示している。

図中斜線で示した要素が切羽前面に配置された掘削要素である。この掘削要素の剛性は、掘削で乱された土を反映して十分小さい。これに対して、シールド機に相当する部分の要素の剛性は地盤要素に比して十分大きな値である。ある時刻  $t$  において、図の(a)のシールド機要素の後方にジャッキ推力に対応する節点力を作用させる。

すると、剛なシールド機要素は掘削要素およびシールド機切羽近傍の地盤要素を押し変形させ、1計算ステップ  $dt$  時間後には図の(b)の状態になる。

ここで、次の計算ステップ実行の前に、掘削要素

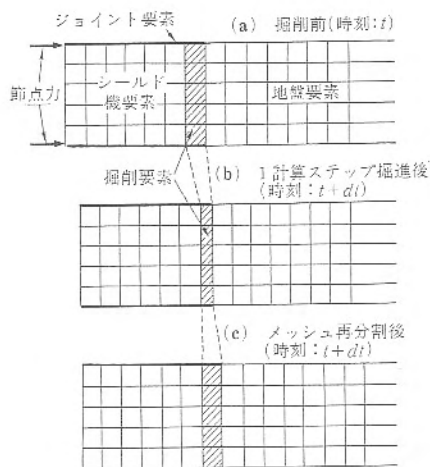


図-2.3.163 掘削状況のモデル化<sup>261)</sup>

素と地盤要素についてシールド機要素の切羽部分に(a)の掘進前と同じ厚さと形状をもつ掘削要素が存在するように要素の再分割を行う。この再分割後のモデルを新たな初期状態として、ジャッキ推力を外力として次の計算ステップを実行する。以上の手順を繰り返すことにより、シールド機後方のジャッキ推力を外力としてシールド機が右方向に移動した状況が再現できる。

このような有限要素の再分割を水で飽和された地盤モデルで行う場合には、再分割後の要素についてそれぞれ正しい間隙水圧と有効応力を求めておかねばならない。ある時刻  $t$  において、有効応力  $\{\sigma_a'\}$ 、間隙水圧  $\{p_a\}$  の状態であった、例えば4節点のアイソパラメトリック要素  $\alpha$  を考える。

計算ステップ  $dt$  の間に要素を構成する節点  $n_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) に  $\{\Delta u_i\}$  の変位ベクトル増分が生じ、要素  $\alpha$  が時刻  $t+dt$  に図-2.3.164の破線で示す状態にあるとする。このとき

要素  $\alpha$  の有効応力の変化量  $\{\Delta \sigma_a'\}$  は次式で与えられる。

$$\{\Delta \sigma_a'\} = \int_v [D_a] [B_a] \{\Delta u_i\} dV \quad (2.3.353)$$

ここに、 $[D_a]$ : 有限要素  $\alpha$  の土粒子骨格の応力-ひずみマトリクス、 $[B_a]$ : 要素  $\alpha$  の変位-ひずみ

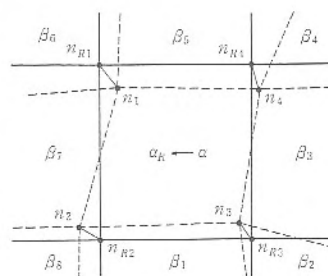


図-2.3.164 有限要素メッシュの再分割<sup>261)</sup>

マトリクス,  $V$ : 要素 $\alpha$ の体積

したがって, 時刻 $t+dt$ における要素 $\alpha$ の有効応力 $\{\sigma_\alpha'\}_{t+dt}$ は,

$$\{\sigma_\alpha'\}_{t+dt} = \{\sigma_\alpha'\}_t + \{\Delta\sigma_\alpha'\} \quad (2.3.354)$$

となる。

次に, 時刻 $t+dt$ における要素 $\alpha$ を図-2.3.164の实線で示すような要素 $\alpha_R$ に再分割することを考える。アイソパラメトリック要素内の任意の点の変位増分は, 変位増分を求める点の局所座標値を要素の形状関数に代入して, 節点の変位増分 $\{\Delta u_i\}$ に乗ずることによって求めることができる。したがって, 要素 $\alpha$ に隣接する要素を $\beta_1 \sim \beta_8$ とすると, 要素再分割後の節点 $n_{Ri}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )の変位ベクトル $\{\Delta u_{Ri}\}$ は, 次式で求めることができる。

$$\{\Delta u_{Ri}\} = \Sigma \{N_j^e\} \{\Delta u_j^e\} \quad (2.3.355)$$

ここで,  $\{N_j^e\}$ は $u_{Ri}$ を含む再分割前の要素 $e$ の形状関数であり,  $\{\Delta u_j^e\}$ は節点の変位ベクトル増分である。

この $\{\Delta u_{Ri}\}$ を用いると, 計算ステップ $dt$ 間の再分割後の要素 $\alpha_R$ の有効応力ベクトル増分 $\{\Delta\sigma_{\alpha R}'\}$ は,

$$\{\Delta\sigma_{\alpha R}'\} = \int_V [D_\alpha] [B_{\alpha R}] \{\Delta u_{Ri}\} dV \quad (2.3.356)$$

となり, 再分割後の要素 $\alpha_R$ の有効応力ベクトル $\{\sigma_{\alpha R}'\}_{t+dt}$ は,

$$\{\sigma_{\alpha R}'\}_{t+dt} = \{\sigma_\alpha'\}_t + \{\Delta\sigma_{\alpha R}'\} \quad (2.3.357)$$

で求めることができる。

この要素の再分割による有効応力の補正に見合う間隙水圧の補正は, 要素の平均有効応力の補正值を用いて次式のように行う。

$$p_{\alpha R}|_{t+dt} = p_\alpha|_{t+dt} + \sigma_m' - \sigma_{mR}' \quad (2.3.358)$$

ここに,  $p_{\alpha R}|_{t+dt}$ : 補正後の間隙水圧,  $p_\alpha|_{t+dt}$ : 補正前の間隙水圧,  $\sigma_m'$ : 補正前の要素の平均有効主応力,  $\sigma_{mR}'$ : 補正後の平均有効主応力

図-2.3.165は計算に用いた三次元有限要素モデルで

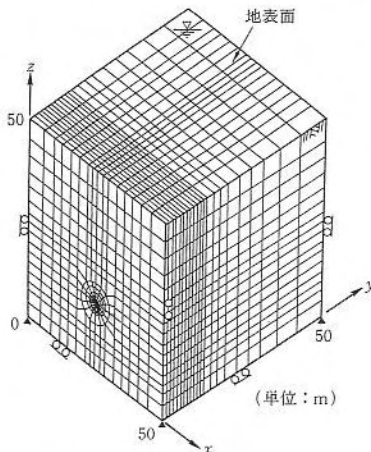


図-2.3.165 三次元解析モデル<sup>20)</sup>

ある。このシールド工事は, 東京足立区の深さ約40mまで軟弱な粘性土が厚く堆積した沖積地盤で行われた。シールド機は, 地表面から31.82mの地盤内に位置している。計算に用いられた粘性土地盤の構成式は, 弾塑性理論に基づく粘性を含まない関口・太田モデル<sup>20)</sup>である。実験等により求められた計算に必要な入力パラメーターは, 表-2.3.6にシールド機要素, 掘削要素および

表-2.3.6 入力パラメーター (文献261)に加筆修正)

要素	パラメーター	
シールド機要素	弾性係数 $E$	$1.96 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$
	ポアソン比 $\nu$	0.499
	単位体積重量 $\gamma$	$29.4 \text{ kN/m}^3$
掘削要素	弾性係数 $E$	$138.3 \text{ kN/m}^2$
	ポアソン比 $\nu$	0.100
	単位体積重量 $\gamma$	$15.9 \text{ kN/m}^3$
粘性土地盤要素	圧縮指数 $\lambda$	0.320
	膨潤指数 $\kappa$	0.054
	ポアソン比 $\nu$	0.355
	静止土圧係数 $K_0$	0.55
	限界状態パラメーター $M$	1.05
	圧密降伏応力 $\sigma_0'$	図-2.3.166
	初期鉛直有効応力 $\sigma_{vz}'$	図-2.3.166
	初期水平有効応力 $\sigma_{vz}' = \sigma_{vz}' = K_0' \sigma_{vz}'$	図-2.3.166
	圧密降伏応力時の間隙比 $e_0$	図-2.3.167
	初期間隙比 $e_f$	図-2.3.167
	鉛直方向透水係数 $K_v$	図-2.3.168
水平方向透水係数 $k_x = k_y = 20k_z$		
ダイレイタンシー係数 $D = \frac{\lambda - \kappa}{M(1 + e_0)}$		
土粒子の比重 $G_s$	2.680	
飽和単位体積重量 $\gamma$	平均 $15.9 \text{ kN/m}^3$	
ジョイント要素	降伏値 $\tau_y$	$4.9 \text{ kN/m}^2$

シールド機と地盤の界面に設けたジョイント要素の物性とともに示している。なお, 図-2.3.166から図-2.3.168はモデルの深さ方向の初期有効応力, 間隙比および透水係数の分布を示している。

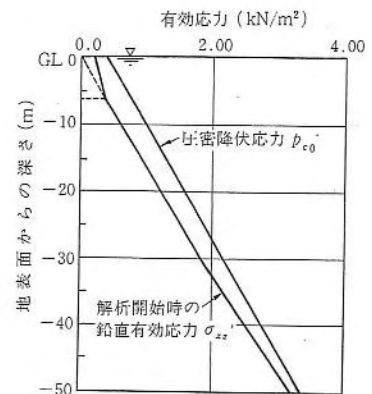


図-2.3.166 解析開始時の応力状態<sup>20)</sup>

図-2.3.169(a), (b)は, トンネルクラウン部上方1mの位置におけるテールボイド発生に伴う地中変位の発生状況を示したものである。図-2.3.169(a)は, シールド機通過に伴う地盤の, いわゆる沈下トラフを三次元的に示している。図-2.3.169(b)は, シールド機後方の

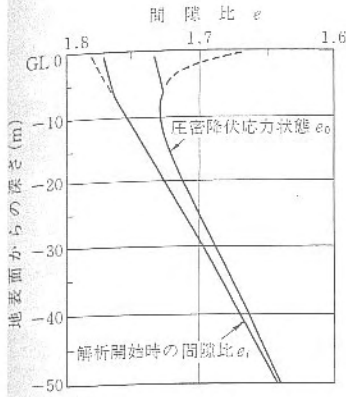


図-2.3.167 解析開始時の間隙比<sup>281)</sup>

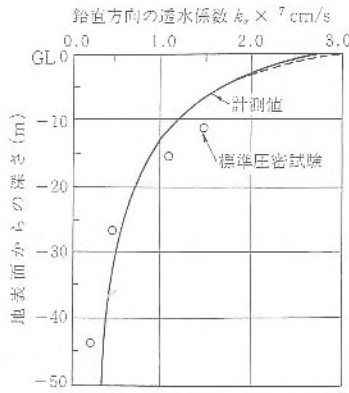
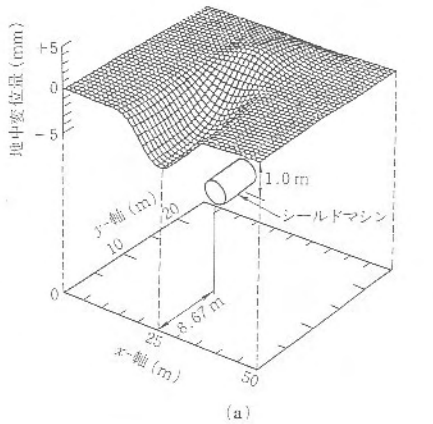


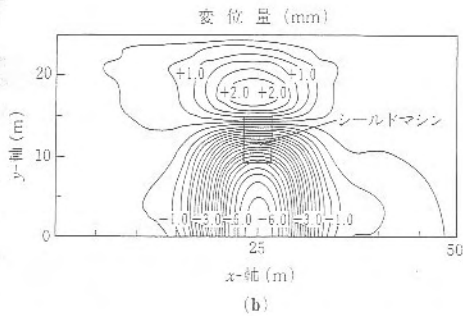
図-2.3.168 解析開始時の透水係数<sup>281)</sup>

沈下および前方の隆起の水平面内の分布状況である。シールド機は図の  $y$  軸方向に推進されているので、その方向に向けて地盤の隆起が生じている。図-2.3.170 は、計算で得られた地表面および地中の地盤変位の時間的な変化を実測結果と比較している。シールド機の切羽が通過してテール通過直前になったときの沈下量の計算値は、実測値とほぼ同等の値が得られている。

図-2.3.171 は、トンネルクラウン部における間隙水圧のシールド通過に伴う変化量を経過時間に対して



(a)



(b)

図-2.3.169 テールボイド発生による地中変位の発生状況<sup>282)</sup>

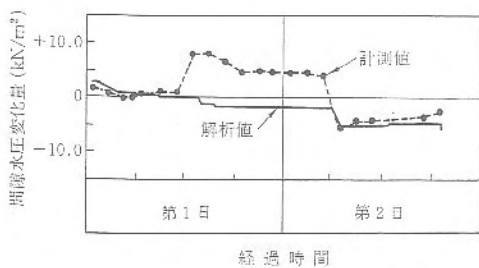


図-2.3.171 間隙水圧の変化状況 (クラウン上部)<sup>281)</sup>

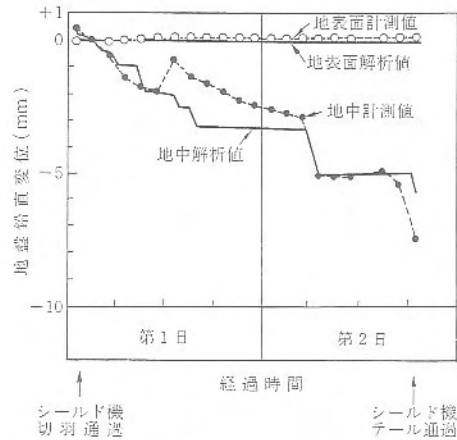


図-2.3.170 地盤変位と経過時間の関係<sup>281)</sup>

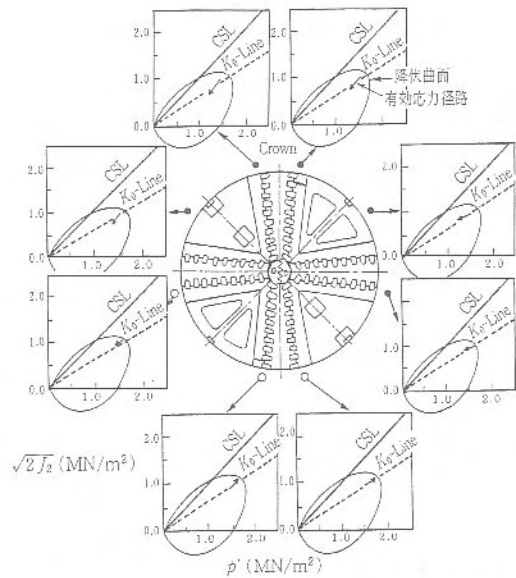


図-2.3.172 シールド機近傍要素の有効応力径路<sup>282)</sup>

プロットしている。シールド機通過に伴う水圧の低下量は、実測値に対応した計算値が得られている。図-2.3.172は、シールド機近傍の8個の有限要素について得られた、シールド機の通過中の有効応力径路を示している。シールド機下方の白丸(○)を付した要素は負荷過程にあるが、シールド機上方の黒丸(●)を付した要素はいずれも除荷過程にある。このことから、掘削による地盤の変形問題で用いられる土の構成式としては、弾性域での応力-ひずみ挙動を適切に表現できる必要があることが分かる。

以上のような地盤変位や有効応力-間隙水圧挙動は、シールドトンネル掘削に伴う外力をシールドジャッキ推力として捉え、三次元の土-水連成解析を実施してはじめて得ることができるものである。

### 3.5 地盤の安定解析

#### 3.5.1 塑性論の基礎

(1) はじめに 図-2.3.173 に示す様な断面の部材をその軸に沿って引張り、あるいは圧縮力を作作用させるときに得られる変形( $\delta$ )-荷重( $F$ )関係を単純化すると図-2.3.174 のよう

になる。原点から出発する直線部分を弾性範囲、それから先の折れ曲がった部分を塑性範囲とそれぞれいう。弾性範囲を超えて塑性領域に入ること降伏、また、両者の境目の荷重の大きさ $F_Y$ を降伏荷重とそれぞれ呼ぶ。降伏して塑性状態にある部材に作用している荷重 $F$ を小さくすると、塑性状態であった元の線をたどらずに、弾性範囲の直線とほぼ平行に変形が回復することが知られている。このように荷重 $F$ の大きさを小さくして弾性範囲に戻すことを徐荷、反対に大きくすることを載荷という。図-2.3.175のように降伏状態から徐荷を続けて、荷重 $F$ を0にまで戻しても変形は0に戻らない。このように荷重状態が0にあるにもかかわらず残留している変形 $\delta^p$ を塑性変形という。もし、塑性状態に至らずに徐荷した場合には、このような塑性変形は発生しない

ので、この塑性変形は塑性状態にあるときに生じたものと考えられる。

そこで図-2.3.176のように塑性状態で載荷をしている場合を拡大して考察する。荷重を $\Delta F$ 増大させると、 $\Delta\delta$ だけの変形が生じる。ここで、荷重増分 $\Delta F$ を徐荷すると、やはり弾性部分と同じ勾配で変形が回復する。したがって、 $\Delta F$ の載荷時に生じた変形 $\Delta\delta$ は二つの成分に分けて考えることが自然である。

$$\Delta\delta = \Delta\delta^E + \Delta\delta^P \quad (2.3.359)$$

ここに右辺第1, 2項をそれぞれ弾性変形増分、塑性変形増分という。塑性モデルの第一歩は変形を弾性成分と塑性成分に分けることにある。

図-2.3.177のように、いったん降伏したあと徐荷し、更に載荷(再載荷という)に転じると、直前に徐荷した荷重の大きさまでは弾性的に挙動する。そして再び降伏し、塑性状態に入る。これらのことから分かるように、降伏して更に載荷を続けると、降伏荷重 $F_Y$ は増加する。このように塑性変形とともに降伏荷重が増加する現象を塑性硬化あるいは加工硬化と呼ぶ。材料によっては図-2.3.178のように塑性状態に入ると降伏荷重 $F_Y$ が減少する場合もある。これは塑性軟化という。また、図-2.3.179のように硬化も軟化もしないような場合には、完全塑性という。

一般に、弾性状態の剛性(変形増分に対する荷重増分の比)は塑性状態のそれより大きい。これを十分大きいとすると図-2.3.180のようなモデル化ができる。つまり、全体の変形に占める弾性変形は微小だということが無視する方法である。これを剛塑性という。したがって、剛塑性材料では塑性変位しか考慮しない。更に図-2.3.181のように剛塑性であり完全塑性の場合には、剛-完全塑性ということが多い。

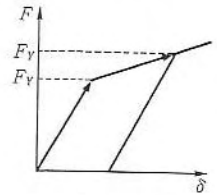


図-2.3.177 塑性硬化

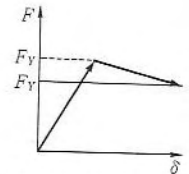


図-2.3.178 塑性軟化

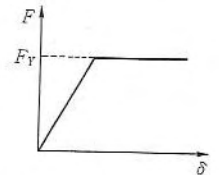


図-2.3.179 弾-完全塑性

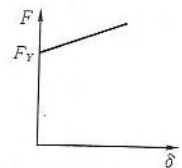


図-2.3.180 剛塑性

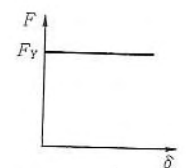


図-2.3.181 剛-完全塑性(剛塑性)



図-2.3.173 一様な棒の引張り

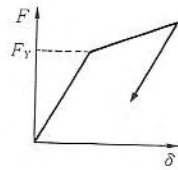


図-2.3.174 変形と部材材力

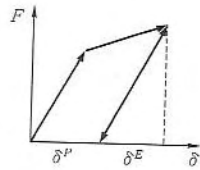


図-2.3.175 弾性変形と塑性変形

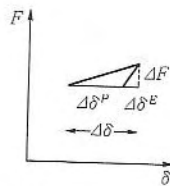


図-2.3.176 弾性変形増分と塑性変形増分