

# 種々の掘削工法を検討できる山留め計算法

## A New Design Method of Earth Retaining Structure Considering the Effects of the Excavation Procedure

かしわ 柏 ぎ 木 かつ 淳 お 男\*  
 いい 飯 づか 塚 あつし 敦\*\*\*  
 くま 熊 がい 谷 とし 俊 お 雄\*\*  
 すが 菅 い 井 まさ 正 ずみ 澄\*\*\*\*

### 1. はじめに

施工中の計測結果を利用して山留めの挙動を予測し、必要に応じて対策をとるという手法が広く用いられている。この結果、最近では山留めの崩壊といった事故を耳にすることが少なくなった。しかし、市街地における掘削工事では、こうした重大な事故はもとより、背面地盤の沈下や側方移動をも抑える必要がある。こうした問題に対しては、施工中に実施できる対策の効果に限界があるので、当初の設計がやはり大切である。ことに、地盤改良や切梁プレロードといった有効な補助工法の計画を山留めの断面計画と有機的に結びつけるような設計法の確立が必要であろう。

このような観点に基づく山留め設計法として最も有望なものは、有限要素法である。この方法では、工事形状にかかわる諸条件を直接考慮できるから、例えば地盤改良範囲の影響を地盤の剛性に換算するといった困難を避けることができる。

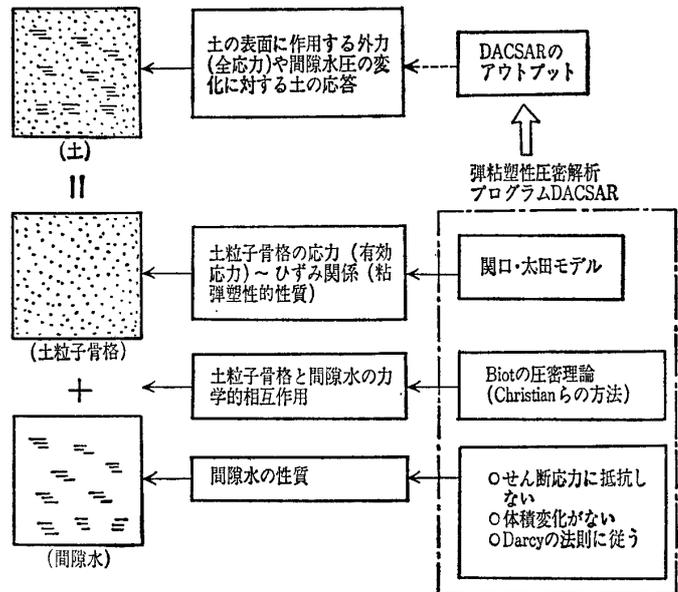
有限要素法によって、山留めを設計しようとする試みは、古くから<sup>1)</sup>行われており、最近では土の圧密や降伏を考慮した有限要素法<sup>2)</sup>も適用できるようになってきた<sup>3)-5)</sup>。しかしながら、このような方法を広く実務に利用する上で、次の問題がある。

- ① メッシュや境界条件等をその都度作成する必要がある、計算に手間がかかる。
- ② 個々の計算の入力条件に共通点が少なく、適用例を集積しても、適切な計算条件を把握することが困難である。

そこで筆者らは、文献3)~5)の成果を文献2)の有限要素法に組み込み、メッシュや地盤の初期応力条件等をプログラム内部で生成する、山留め計算専用の有限要素法プログラムを作成した。本報告では、このプログラムの内容を紹介するとともに、これを実際の掘削工事に適用した結果について報告する。

### 2. 基本としたプログラム「DAC SAR」について

はじめに、今回作成した山留め計算専用プログラムをべ



図一 DAC SAR の構成

ースとした汎用プログラム、「DAC SAR」について簡単に説明する。

図一に DAC SAR の構成を示す。土粒子骨格と間隙水の相互作用は、一般に Biot (ビオ) の圧密理論で表されるが、これを有限要素法で扱う方法として、Christian (クリスチャン) らの方法を用いている。

一方、間隙水の性質 (せん断応力に抵抗しない、体積変化に対する剛性が土粒子骨格のそれよりも一般に大きい、ダルシーの法則に基づいて流動する) は比較的明確であるので、こういった解析法で主に問題とされてきた点は、土粒子骨格の性質をどのようにモデル化するかという点であった。DAC SAR では、この土粒子骨格の性質として関口・太田の弾塑性モデル<sup>6)</sup>を用いている。

関口・太田モデルに関しては、これまでにいくつかの報告がなされているが、このモデルは圧密試験やせん断試験における土の挙動を統一的に表現する形で構成されており、したがって、入力すべき諸定数を、通常の土質試験結果によって直接決定できるという点を特に強調しておきたい。

DAC SAR は汎用プログラムであり、種々の問題ごとに、最適と考えられるメッシュや境界条件をその都度定めて用いる。有限要素法プログラムの、複雑な工事条件を考慮できるという利点と、それが汎用的プログラムであるという点とは、表裏一体の関係にある。今回この利点を敢えて制

\*東京電力(株) 送変電建設本部建築副部長  
 \*\*東電設計(株) 建築技術部次長  
 \*\*\*金沢大学工学部 助手  
 \*\*\*\*前田建設工業(株) 技術研究所

限してまでも、山留め計算専用のプログラムを作成した理由は、「はじめに」に示した。

### 3. 山留め設計専用有限要素法プログラムの概要

前述した趣旨で専用プログラムを作成する場合、汎用プログラムを用いる際の作業のどの部分までを計算機にやらせるかという点が問題である。計算機に任せる部分が多いほど設計作業が楽になるが、考慮し得る各工事の特殊条件は限定されることになる。以下に示すプログラムは、こうしたバランスを検討した上での一つの結論である。

今回作成した山留め設計専用の有限要素法プログラムを、DABRS (Deformation Analysis of Braced Retaining Structures) と名づけた。このプログラムは、前述した DACSAR をベースとし、これに主に次の機能を付加したものである。

- ① メッシュデータ自動作成機能
  - ② 地盤・山留め壁・支保工の、初期応力条件・物性条件データ自動作成機能
  - ③ 増分計算における制御データ自動作成機能
  - ④ 山留め壁の剛性変化を処理する機能
- DABRS の入力データは次の四つである。

- ① 形状データ
- ② 山留め壁データ
- ③ 工事工程データ
- ④ 地盤データ

以下では、これらの入力条件の説明を通じ、プログラムの概要を紹介する。

#### 3.1 形状データ

形状を表すデータとして、図-2 の  $L_1 \sim L_3$  および  $L_w$  を入力する。

有限要素法による山留め計算では、山留めを含むある一定の範囲内（解析領域）の地盤挙動が計算され、その一端としての山留めの挙動が求められる。 $L_1 \sim L_3$  は解析領域を定めるためのデータであるが、これらの決定に当たっては、境界条件を考慮する必要がある。

DABRS では、図-3 に示した境界条件をあらかじめプログラム内で設定済みである。したがって、このような境界条件が満たされるように、解析領域を定める必要がある。例えば、図-3 の A-B なる境界では、水平方向の土の

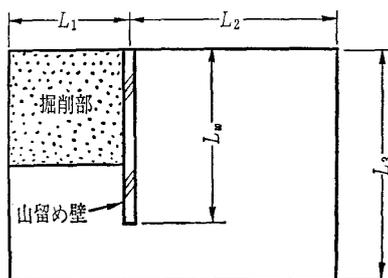


図-2 形状データ

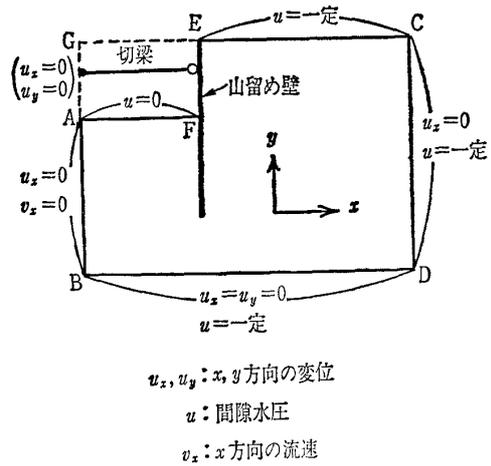


図-3 境界条件（プログラム内で決定）

変位や間隙水の流速が0であると取り決めた。このような条件に適合する境界としては、掘削部の対称軸が挙げられる。したがって、 $L_1$  としては掘削幅の半分の長さを入力すればよい。

DABRS では、平面ひずみ・平面流れ条件を仮定している。したがって、通常の手留め計算法と同様、掘削平面が極めて狭い工事には本来適用できない。また、掘削工事における地下水の流れは軸対称流に近いので、地下水の流量を予測することには向いていない。しかし、山留め壁周辺地盤内の間隙水圧分布は、平面流れの仮定で概略近似できるものと考えられる。すなわち、山留め壁背面地盤の圧密沈下の検討には適用できる。

#### 3.2 山留め壁データ

山留め壁としてRC連続壁を用いる場合、曲げクラックの発生とともに山留め壁の剛性が変化する。DABRS では、この点を考慮している。

山留め壁データとしては、深さ方向に山留め壁の仕様が異なる部分ごとに、図-4 に示す  $\phi_c$ ,  $M_c$ ,  $\phi_y$ ,  $M_y$  および、山留め壁の断面積  $A$  を入力する。図-4 には、ある工事における DABRS への入力値と出力値との関係の例をあわせて示した。図に見られるように、数値計算上の精度は良好である。

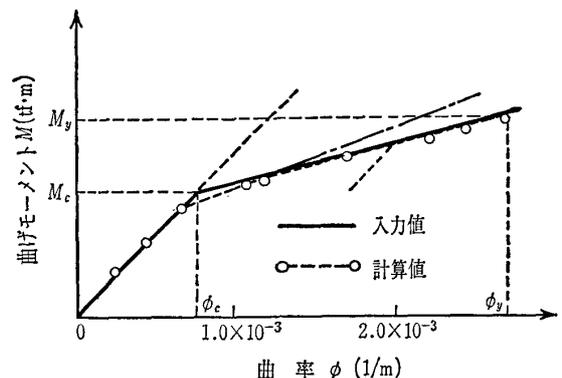


図-4 山留め壁の曲げモーメント-曲率関係と計算結果の例

(a) 工事工程

手順	施工の概要	施工日数	手順	施工の概要	施工日数
1	掘削 ↓ 2m	3日間	4	プレロード10(tf/m) ↓	1日
2	放置 ↓	20日間	5	掘削 ↓ 3m	5日間
3	切梁架設 ↓	3日間	6	放置 ↓	20日間

(b) 入力データ

掘削深度(m)	切梁深度(m)	切梁データ	施工日数
N <sub>0</sub> (m)	(m)	E (tf/m <sup>2</sup> /m), φ (m <sup>2</sup> /m), プレロード (tf/m), Δ (d)	
1	2.0		3.0
2			20.0
3	3.0	5.25, 0.8	1.0
4			5.0
5	3.0		20.0

図-5 工事データの入力方法

3.3 工事データ

DACSAR や DABRS は、圧密や土の塑性的性質を考慮するため、工事手順や掘削速度によって計算結果が異なるので、掘削工事の工程を入力する必要がある。

そこで、例えば図-5(a)の工程を、同図(b)のように入力することとした。図-5(a)の各工程を、同図(b)の一行で表している(ただし、切梁のプレロード荷重は切梁

架設データとともに記述する)。

3.4 地盤データ

地盤の性質に関しては、図-6に示すデータを入力する。これらの入力データに基づき、図の手順で関口・太田モデルで用いる諸定数が求められる(図-6の計算は、DABRSが行う。この点の詳細は文献2), 5)を参照されたい)。

DABRS や DACSAR のように圧密を考慮するプログラムでは、計算のはじめに地盤内の間隙水圧分布を入力する必要がある。この

間隙水圧分布が圧密途中にあるような分布であると、何ら工事を行わなくても、圧密によって地盤が沈下したり隆起したりする結果になってしまう。この問題は、図-7のような地盤調査結果が得られた場合に生じる。

DABRS では、図-7の  $u_T$ ,  $u_B$  を入力し、初期間隙水圧分布を、次式<sup>7)</sup>により計算することとした。

$$u(z) = u_T + \gamma_w z - \int_0^z \frac{dz}{k} (\gamma_w H - u_B + u_T) \dots (1)$$

ここで、

$u(z)$ : 深さ  $z$  における間隙水圧

$H$ : 全土層厚

図-7の間隙水圧分布の「計算値」は、上式によって計算されたDABRSの出力である。この間隙水圧分布は定常状態にある。すなわち、工事等による条件の変化がなければ、この間隙水圧分布が変動することがなく、圧密が生じない。上式は、間隙水が鉛直方向にのみ流動していると仮定して求めたものであるが、筆者らがこれまでに経験した工事では、実測値とよく適合している。

4. 各種掘削工法の検討方法

有限要素法を用いる場合には、図-8に示す方法<sup>8)</sup>で各種の条件を考慮することができる。

丘陵地等においては、図-8(b)のような工事も多いであろうが、このような問題はDABRSの適用範囲外である。

最近では都心部の地下水位が回復傾向にあるので、今後は浅い掘削工事においても、図-8(c)のような揚水の可否を検討する

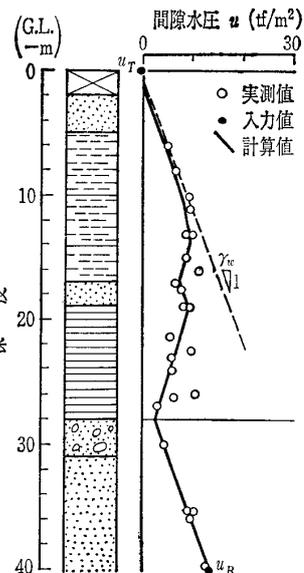


図-7 掘削開始前の地盤内間隙水圧分布

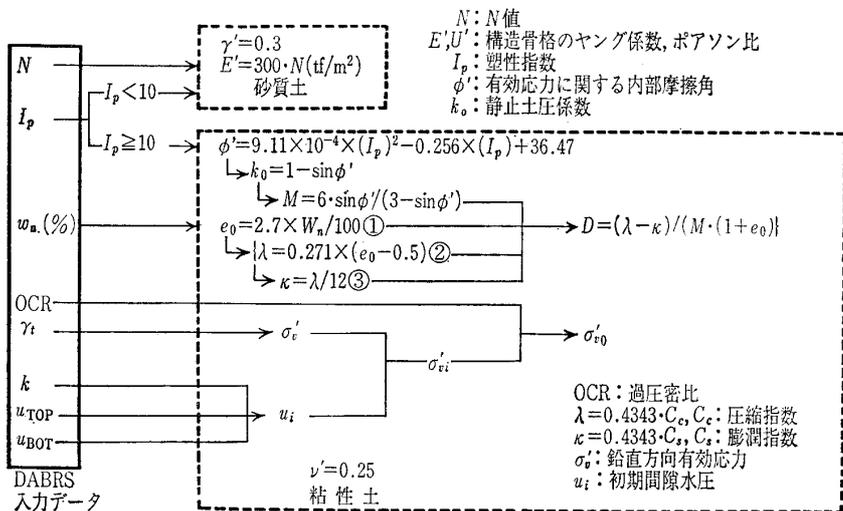


図-6 土質パラメータの作成手順

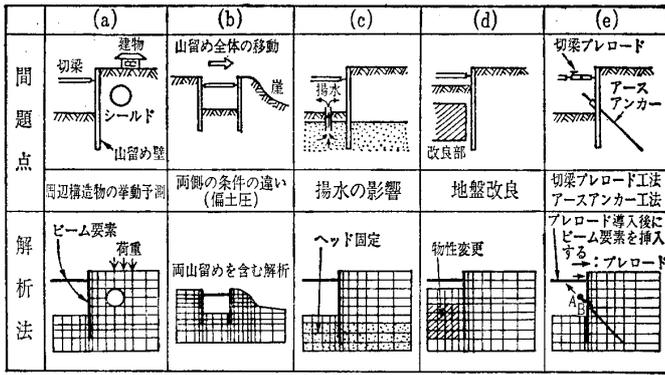


図-8 各種条件の考慮方法

必要が増すであろう。このような場合、周辺地盤は山留め壁の変形に伴う沈下と水位低下に伴う圧密沈下とを同時に受けることになるが、DABRSでは過去の地下水位低下の影響を考慮した上で、これを求めることができる。地盤改良は、改良部の物性を変更することで考慮できるので、図-8(d)のように山留め壁と地盤改良部が離れている場合等も検討することができる。

図-8(e)の切梁やアースアンカーのプレロードは、プレロード荷重を載荷した後にトラス材を挿入することで考慮できる。

5. 適用例

ここでは、前述した掘削工法の検討方法を、実際の工事への適用例に基づいて具体的に説明する。

5.1 掘削工事の概要

適用する掘削工事の形状条件を図-9に示す。また工事工程の概要を表-1に示す。

5.2 地盤概要

土質調査によって得られた地盤の諸定数を図-10に示す。これらがDABRSへの入力値である。圧密試験によって得られる透水係数は、間隙比の変化とともに変化するが、筆者らは透水試験結果<sup>9)</sup>によって、除荷時の透水係数は圧密降伏時のそれからあまり変化しないという結果を得た。掘削時においては、地盤内の広い範囲の土が除荷を受けるので、透水係数としては圧密試験によって得られた、圧密降伏時の値を用いることとしている。一方、前述した図-7の間隙水圧分布は、この工事地点のものであり、(1)式によ

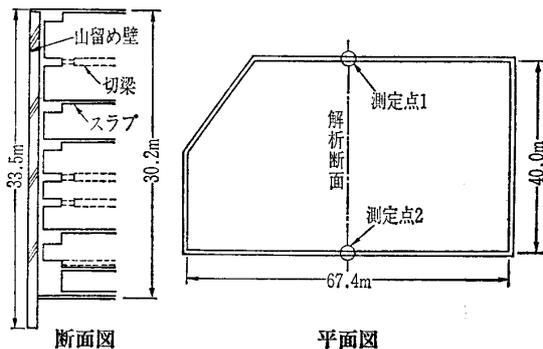


図-9 DABRSを適用する掘削工事

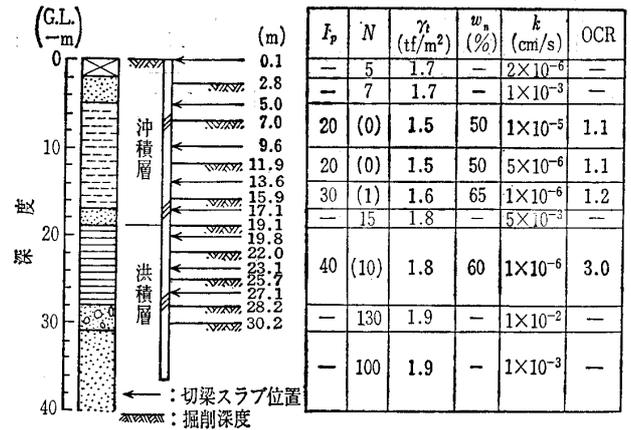


図-10 地盤条件

表-1 掘削工事の工程

No.	工種	日数	備考
1	一次掘削	15	
2	放置	644	基礎杭築造等
3	1 Fスラブ, 二次掘削	15	地盤改良(沖積粘土層)
4	放置	75	
5	1段切梁プレロード	1	
6	三次掘削	15	
7	放置	75	
8	B 1 Fスラブ, 四次掘削	15	
9	放置	105	
10	B 2 Fスラブ, 五次掘削	15	
11	放置	60	
12	2段切梁プレロード	1	
13	六次掘削	15	
14	放置	90	
15	3段切梁プレロード	1	
16	七次掘削	15	地盤改良(洪積砂層)
17	放置	105	
18	B 3 Fスラブ, 八次掘削	15	
19	放置	45	
20	B 4 Fスラブ, 九次掘削	15	

って計算した間隙水圧分布は、実測値と若干異なる形状を示した。図-10の透水係数は、(1)式による計算値が図-7の実線になるように多少変更したものである。

5.3 補助的な工事

(1) 地盤改良

この工事では、一次掘削終了後に生石灰パイルによる沖積粘性土層の地盤改良が行われた(この地盤改良の主目的は、トラフィカビリティーの改善にあり、山留め壁に近接した位置の改良は行われなかった)。また、主に掘削底のボーリング防止の目的で、第七次掘削底より洪積砂層の地盤改良が行われた。これらの条件は、それぞれが実施された時点から、図-11に示した範囲の土の物性を変更して考慮した。

生石灰パイルによる地盤改良では、改良前後の間隙比や、圧密降伏応力に基づいて物性値を決める方法<sup>5)</sup>があるが、ここでは簡単に図-11の条件を用いた。また、洪積砂層の地盤改良に関しては、透水係数のみを低減した。

(2) 揚水

この工事では、揚水が行われなかったが、図-11のA点

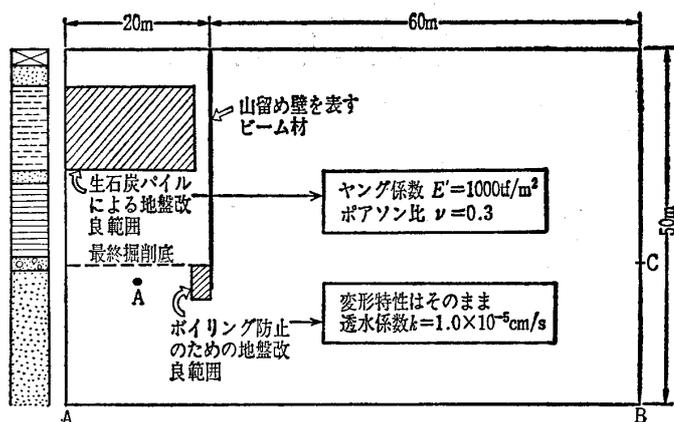


図-11 解析領域と地盤改良範囲

から揚水を実施した場合の計算も行った。

揚水に伴う地下水の流動方向は複雑であるので、本来は詳細な地下水解析<sup>10)</sup>に基づいてDABRSの水理境界条件を決めるべきであるが、ここでは仮に図-11のA点、および、B-C境界上の間隙水圧が一定であるものとし、A-B境界（通常は間隙水圧が $u_B$ で一定）は地下水の出入りがないものとした。

### 5.4 計算結果

#### (1) 山留め壁の変位

図-12に山留め壁の変位の実測値と計算値を示した。

図に見られるように、一次掘削における変位分布は比較的良好に一致しているが、それ以降の掘削時には、山留め壁の天端や下端の変位が異なる。これは主に次の理由によるものである。

この工事では、一次掘削、二次掘削の間の2年あまりの期間に、既存建物基礎の撤去・基礎杭工事等により、山留め壁の天端変位が増大した（図-12の⇒）。また、この工事では、山留め壁に近接して基礎杭が築造され、基礎杭と山留め壁の間の地盤改良が行われたので、実際には山留め壁下端の変位が拘束されている。このような条件は、地表

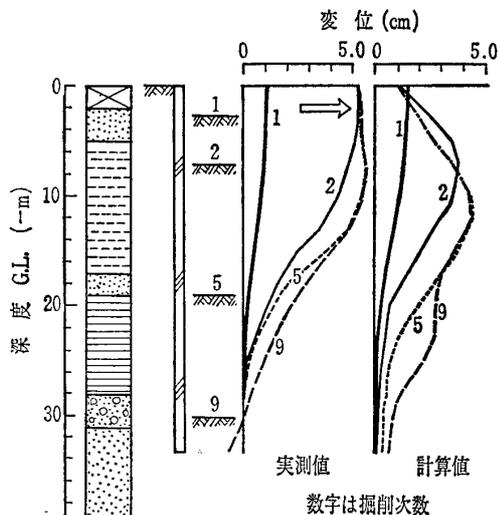


図-12 山留め壁の変位

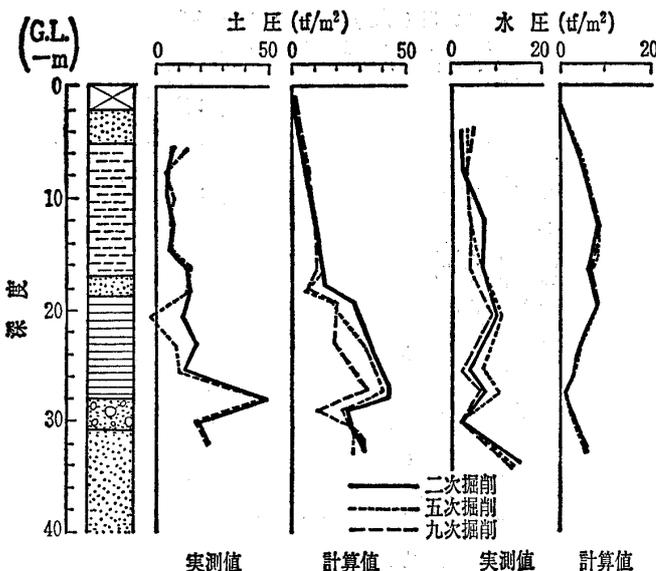


図-13 山留め壁に作用する土圧、水圧

付近の砂層の剛性を便宜的に低減したり、山留め壁の長さを実際より長くしたりして考慮することができるが、本報告ではDABRSの性質を明確にするため、このような操作は行わなかった。

一方、G.L.-19~28 m 付近の洪積粘土層の剛性は、計算で仮定しているものが明らかに小さすぎる。また、基礎杭の影響があるにしても、洪積砂層の剛性にも問題がありそうである。このようにDABRSにおける土質定数の決定法（図-6）には、改善の余地がある。ただしここで問題となるのは、圧密降伏応力や膨潤指数といった、土質試験によって直接把握できるものであり、DABRSでは、通常山留め計算法で問題となる仮想支点の位置や地盤反力係数等に比して、問題の所在が明確である。

#### (2) 山留め壁に作用する土圧（側圧）

図-13に、山留め壁に作用する土圧（ここでは、いわゆる側圧の意）の計算結果を示す。土圧の計算値を見ると、洪積粘土層（過圧密粘土）の初期の土圧が目立って大きい。これは過圧密粘土の静止土圧係数が、正規圧密粘土のそれに比して著しく大きいこと（土質試験上の事実であり、DABRSにおいても地盤の初期応力状態の決定に用いている）によるものである。一方、土圧の実測値にはこのような傾向は見られない。土質試験において得られる結果と実測土圧との間のこの矛盾は、次のように説明できる。

実測土圧、計算結果の双方に見られるように、洪積粘土層の土圧は掘削の進行とともに著しく減少している。これは、洪積粘土層の剛性が相対的に大きい（自立性が高い）ことによるものである。このような過圧密粘土層の土圧減少は、山留め壁築造時にも発生しており、土圧計で計測される時点の土圧は、自然状態の土圧よりも小さくなっているものと考えられる。したがって、洪積粘土層の静止土圧係数は土質試験から想定されるものよりも小さくする必要があると考えられる。

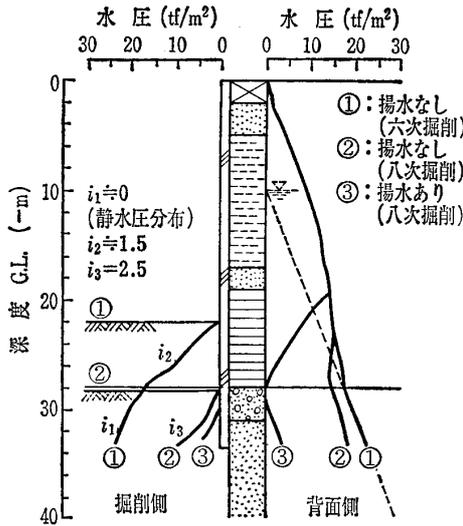


図-14 山留め壁に作用する水圧

### (3) 地下水の挙動

この工事が行われた地点では、現在までに洪積砂層の地下水位が著しく上昇している。したがって、今この工事を実施するとすれば、洪積粘土層の盤ぶくれや洪積砂層のポイリングが問題となるであろう。そこで、洪積砂層の地下水位が G.L.-10 m にあると仮定して、前記と同様の計算を行ってみた。ただし、洪積砂層の地盤改良は行われないものとした。

この計算で得られた山留め壁近傍の水圧分布（山留め壁に作用する水圧）を図-14に示す。DABRS では、地盤内の詳細な応力変化は出力しないので、この図に基づいて盤ぶくれやポイリングを考えることにする。

この図の水圧分布①は、掘削が洪積粘土層まで進んだ段階のものである。この際には、山留め壁の下部を回り込んだ地下水が洪積粘土層を通して掘削底に浸出する。この地下水の流量は極めてわずかであるので、洪積砂層の間隙水圧は静水圧分布のままである（図の動水勾配  $i_1=0$ ）。一方、洪積粘性土層内の動水勾配  $i_2$  は、1.5 であり、水中単位体積重量 ( $\gamma'=0.8$ ) よりもはるかに大きく、この土層は破壊状態にある（DABRS では山留め壁に隣接する土要素の降伏・破壊等の状態を出力する）。実際には、この段階で工事不能となるわけであるが、さらに計算を進めてみた。

水圧分布②は、洪積粘土層を掘り終わった時点に関する計算結果である。この際には、掘削底から湧出する地下水の量が極めて多くなり、山留め壁の背面側においても間隙水圧の低下が生じている。図中の洪積砂層の動水勾配  $i_3$  は、2.5 であり、ポイリングが発生していることになる。

一方、水圧分布③は、3. に示した方法により、揚水を行ったとした場合の計算結果である。この場合には、盤ぶくれやポイリングの危険がないが、山留め壁背面地盤の間隙水圧が大きく低下しているので、なんらかの対策が必要である。

### (4) 山留め壁背面地盤の沈下量分布

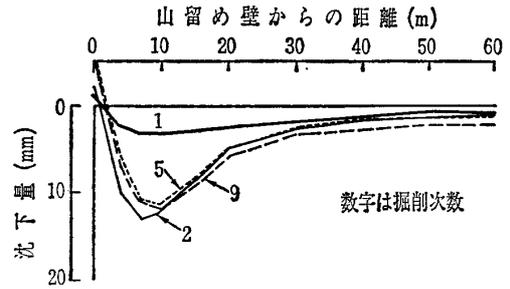


図-15 背面地盤の沈下量

DABRS では、前項で示した間隙水圧の低下や、山留め壁の変形に起因する地盤変位量を出力する。これを図-15に示す。図に見られるように、掘削に伴うリバウンドの影響（掘削が進むほど大きくなる）により、山留め壁近傍が若干隆起している。今回の計算では洪積砂層の剛性が小さすぎる（リバウンド量が大きすぎる）かもしれないが、このような傾向は実際に生じるものと考えられる。

## 6. おわりに

今回紹介したプログラムのような有限要素法の利用法には、ある種の危険も伴うと思われる。このようなプログラムは、有限要素法の利点のある程度減殺するものであることを、念頭に置いておく必要がある。

とはいえ、このプログラムを作成したことによって、有限要素法の利用が極めて容易になった。今後、諸条件の設定法に関する研究や適用例の集積を進め、よりよいものにしてゆきたい。

### 参考文献

- 1) Bjerrum, L., Clausen, C.J.F. and Duncan, J.M.: Earth pressures on flexible structures, State-of-the-art Report, Proc. 5th Eur. Conf., SMFE, pp.169~196, 1972.
- 2) 飯塚 敦: 軟弱地盤の変形・安定解析に関する基礎的研究, 京大大学学位請求論文, 1988.
- 3) 東電設計(株): 超高圧地下変電所に関わる周辺地盤への影響に関する解析(その2), 報告書, Vol.2, 1982.
- 4) 昌昭次郎・太田秀樹・吉田昭二・北村浩行・本多 隆: A deep excavation in soft clay, Proc. 5th ICNMG, Vol. 1, pp.725~730, 1985.
- 5) 本多 隆: 山留めの施工管理における有限要素法の適用に関する研究, 前田建設工業技術研究所報, Vol.28-2, 1986.
- 6) 関口秀雄・太田秀樹: Induced anisotropy and time dependency in clays, Proc. Specialty Session 9, Proc. 9th ICSMFE, pp.229~238, 1977.
- 7) 高根弘志・柏木淳男・山内一秀・熊谷俊雄・本多 隆: 飽和粘土の透水特性について, 第22回土質工学研究発表会発表講演集, pp.233~236, 1987.
- 8) 本多 隆: 地盤工学における数値解析の実務, 土質工学会, pp.212~214, 1987.
- 9) 高根弘志・柏木淳男・有泉浩蔵・山内一秀・早川 敦: 飽和粘土の透水特性について, 第21回土質工学研究発表会発表講演集, pp.179~182, 1986.
- 10) 太田秀樹・高根弘志・柏木淳男・山内一秀・青柳隆之・本多 隆: Deep excavation performed after restriction of deep well pumping in Tokyo, Proc. 9th Eur. Conf., SMFE, pp.715~718, 1987.

(原稿受理 1989.2.3)