

土留め掘削の設計理論と実際

Design and Practice of Braced Open Cuts

杉 江 茂 彦 (すぎえ しげひこ)

㈱大林組技術研究所土木基礎・耐震研究室 主任研究員

竹 村 次 朗 (たけむら じろう)

東京工業大学助教授 工学部土木工学科

松 田 義 則 (まつだ よしのり)

八千代エンジニアリング㈱東京事業部構造部 副部長

1. はじめに

土留め掘削の設計・施工で重要な検討課題に挙げられる土留めの周辺地盤の変形予測について、現行の設計ワークでの代表的な方法を挙げ概要を述べる。続いて矢板と2段支保による掘削施工を模擬した遠心荷重模型実験の例^{1),2)}を紹介し、土留めと周辺地盤の変形を小さく抑える上での支保工の設置のタイミングの重要性、ならびに与えるプレロード量の影響について述べる。最後に Biot (ビオ) の多次元圧密理論に基づく連成 FEM の現場解析事例を紹介し、同解析法に期待される設計ツールとしての可能性を述べる。

2. 現行設計での周辺地盤の変形予測

土留め掘削で生じる周辺地盤の変形の予測には、大きく分けて、(1)数値計算による方法、(2)類似工事例の計測結果に基づく方法が挙げられる。このほかにも地盤のすべり面を円弧や対数らせんで仮定して地盤の変位と発生範囲を求める方法が提案されている。

2.1 数値計算による方法

有限要素法の活用が多い中で、図-1の①の方法が慣用的に用いられている。土留め掘削の周辺地盤や近接する既設構造物を FEM でモデル化しておき、土留め計算

(梁・ばねによる弾塑性法) から得られる壁変位を強制変位として与える方法である。周辺地盤の沈下・変形形状は割合現実的な形で得られる。しかしながら、施工過程で生じる地盤と構造物の相互作用、応力履歴によって変わる地盤の変形・強度特性、物件に応じた三次元性を考慮することができない。圧密の影響についても、別途に検討する必要がある。

図-1の②の方法は Biot (ビオ) の多次元圧密理論に基づくものであり、地盤の応力・変形計算と地下水の浸透流計算とを同時に連立させて解くところに特徴がある。非定常計算の中で掘削、土留め支保工、地下水処理など種々の施工条件を実際の経過時間に合わせて模擬でき、各施工過程での地盤と土留めの動き、地下水の環境の変化が得られる。代表的な公開プログラムに DACSAR³⁾がある。同プログラムでは施工過程のモデル化に加えて土骨格の構成則に関口と太田の提案による非線形モデル⁴⁾を選択できる。これによりダイレイタンスーヤクリープ・応力緩和といった土特有の挙動を考慮できる。予測法②は先の慣用法①に比べてより詳細なものといえるが、結果の信頼性を高めるためには初期条件・境界条件の設定により精緻な吟味が必要となる。

2.2 類似工事例の計測結果に基づく方法

実測事例を数多く集計して種々の相関を求めた図がい

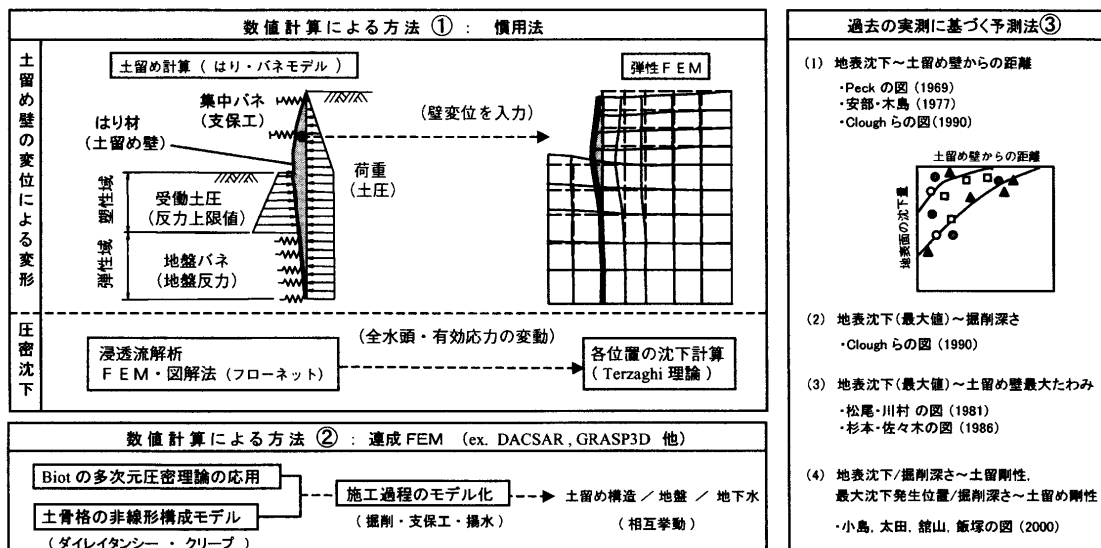


図-1 設計実務における周辺地盤の変形予測法

くつか提案されており、これらの方法の解説は文献5)を参照されたい。図—1の③に例を挙げる。中でもPeckの図が有名である。設計の手始めに地盤と採用工法と照らし合わせてこれらの図から大まかに見積もる。続く詳細検討では予測値の妥当性の判断にベンチマークとして活用する。設計時の事前予測においても実測傾向とのクロスチェックが欠かせない。

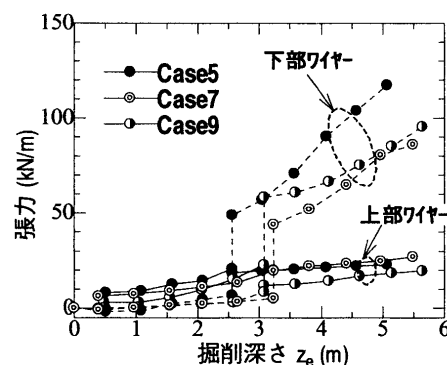
3. 山留め掘削に関する遠心模型実験

構造物と地盤の相互作用が極めて重要となる山留め掘削では、施工過程も掘削地盤の挙動に大きく影響を及ぼす。山留め支保工を用いた掘削における重要な施工条件として支保設置のタイミング（余掘り深さ）やプレロード量がある。筆者の一人が所属する東京工業大学土質研究室では、遠心力場内で実際に土を掘削除去し（口絵写真—5）、支保工の設置過程をシミュレートできる二次元掘削装置（口絵写真—6, 7）を開発し、2段支保矢板掘削実験（口絵写真—8）を行った^{1), 2)}。このシステムでは、矢板の横補強材に取りつけたワイヤーを容器側面のフックを介して巻上げ機で引っ張ることにより、任意の掘削深さで矢板補強材に水平力を付与することができる。ここでワイヤーへの張力の付与は切梁、もしくはアースアンカーの設置とプレロードに、またその後の張力の増加は切張り軸力等の増加に対応する。実験はすべて50 gの遠心加速度場で行っており、対応する実物の寸法は模型の50倍となる。

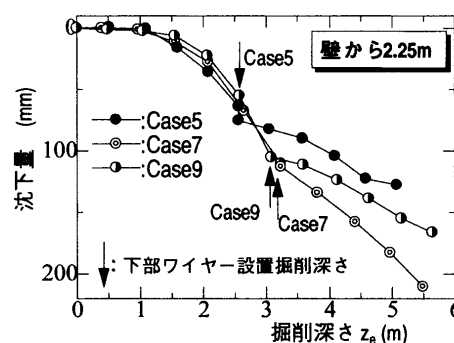
この実験シリーズでは、薄い上部砂層と下部支持層としての砂層に軟弱な正規圧密粘土層が挟まれた地盤を作製し、下段のワイヤーへ張力を付与する掘削深さとプレロードの大きさの影響について調べた。図—2は掘削深さと上段および下段ワイヤーの張力の変化を示したものであるが、この関係における上向きの増加がワイヤーへ張力の付与、すなわち支保の設置に対応する。なお、結果はすべて実物寸法で示してある。

図—3は掘削深さと壁近傍の沈下量の関係を示したものである。いずれのケースも $z_e = 2.5$ mまではほぼ同様の沈下傾向を示し、この深さで下段支保を設置したCase5以外では、次の掘削で大きな沈下が生じている。 $z_e = 3.1$ m前後で下段支保を設置したケースでは、プレロードが大きなCase9でその後の沈下はやや小さくはなっているが、支保設置前に生じたCase5との差を回復することはできていない。図—4に示すように土の応力ひずみ関係の非線形性ならびにヒステリシス特性により土の剛性は載荷方向によって大きく異なる。掘削背面の土を考えるとプレロードによる載荷時（鉛直土圧がほぼ一定で水平土圧が増加するため、偏差応力 q は減少する）の剛性は掘削除荷時（水平土圧が減少し、 q は増加）のそれよりかなり大きい。これがプレロードをかけてもいったん生じてしまった壁変形は簡単には基に戻せないことの主な原因と考えられる。

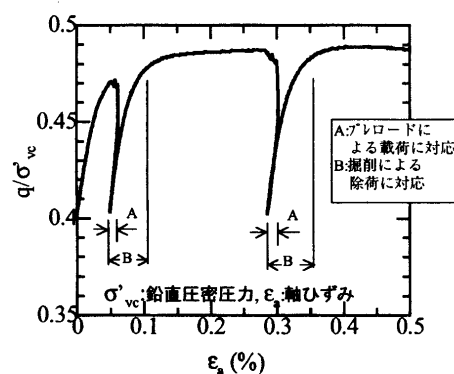
ここで示した実験では、地盤内の塑性化が進み施工で生じては好ましくないような大きな変形が生じており、



図—2 ワイヤー張力の変化



図—3 掘削に伴う壁背面地盤の沈下



図—4 K_0 圧密カオリン粘土の応力ひずみ関係

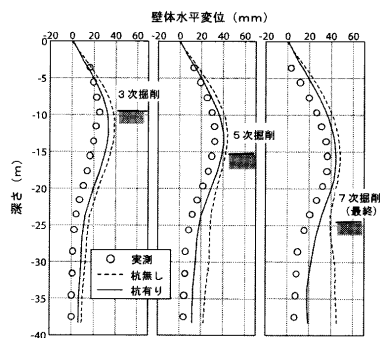
土の非線形性の影響がより現れたと考えられる。これを考慮しても、施工過程の影響が土の非線形性と大きく関係していることが明確にわかる。

4. ビオの理論による連成 FEM の可能性

建物の基礎工事⁶⁾の解析事例を紹介する。検証の目的は掘削底部に設けられた場所打ち杭の地盤補強効果であった。もともと、場所打ち杭に求められた役割は鋼真柱を介した建物荷重の支持と地震時の引抜き抵抗であった。これに加えて土留めや地盤の安定向上への効果を期待したものである。ここで解析には三次元解析プログラム GRASP3D⁷⁾を用いた。

4.1 土留め掘削事例と施工過程のモデル化

施工断面の概要を口絵写真—9に示す。場所打ち杭の平面配置ならびに後述する計算結果の検証位置を口絵写真—10に示す。厚く堆積する沖積粘土を対象に深さ24 mまでを、RC 連壁と本設の RC 床板を支保工に逆打ち工法で掘削したものである。最終掘削時には洪積中間砂



図—5 土留め壁の水平変位

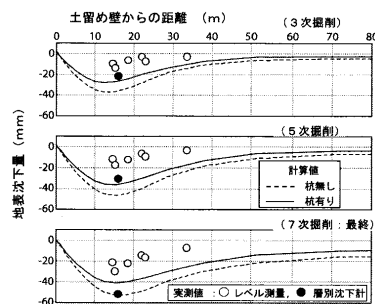
層の被圧による盤ぶくれが懸念されたため、掘削域の外側にディープウェル (DW) を複数設けて同層の水圧を下げて対応した。用いた有限要素メッシュを口絵写真—11ほかで示す。軟弱な粘土層には関口と太田の提案²⁾による弾塑性構成式を、砂層には Drucker-Prager の破壊条件を用い、地盤の強度・変形の非線形性を表現した。連壁ならびに場所打ち杭の該当部には、その周面に薄層の地盤要素を設け、地盤の非線形性によって接触部の抵抗を表現した。施工過程のモデル化については、掘削と RC 床板の交互施工から最終掘削時の DW 揚水までを、実際の施工時間に従い順次シミュレートした。

4.2 土留め壁と地盤の挙動

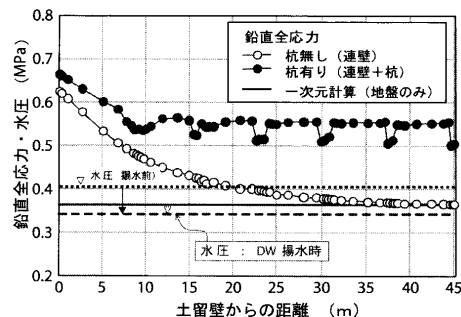
本工事の場所打ち杭は大口径であり、密に配置されている。また鋼真柱を介して上部から大きな荷重を受けて拘束されている。これらの杭の条件をモデル化した場合と杭が無い場合の2ケースの計算結果を比較する。

土留め壁と地盤の変位を図—5, 6 および口絵写真—10に示す。実測値も加えている。杭の有ることにより、土留め壁と周辺地盤の水平変位が抑えられている。また土留め壁背面の地表沈下も低減している。

地盤の鉛直全応力コンターを口絵写真—12に示す。洪積中間砂層の上端レベルでの鉛直全応力・水圧値を図—7に示す。同砂層に盤ぶくれ対策の DW 揚水を模擬した最終掘削時の値である。同図には地盤のみによる一次元掘削計算で得られた鉛直全応力値も実線でプロットしている。一次元計算による鉛直全応力値は設計ワークでの湿潤密度から求まる土被り圧と同じ値になる。杭有りの鉛直全応力 (●) は連壁と杭の両者の拘束効果により大きく一様に残留している。水圧に対しても十分な余裕がある。これに対して杭無しの鉛直全応力 (○) はすり鉢状に分布し、掘削部中央付近では一次元計算値 (実線) とほぼ等しくなっている。ただしこの位置でも水圧を上回るように DW 揚水が計画・実行された。盤ぶくれの安定評価において、連成 FEM を用いて土留め壁や杭などの効果を考慮し、安定度合いの低くなりそうな場所を



図—6 土留め壁背面地盤の沈下



図—7 最終掘削時における底部下の被圧砂層上部の応力・水圧分布 (計算値)

限定してみる。このような評価法が実用化できれば、土留め・地盤変形・地下水処理への対応に相互の連関を考慮した安全でより合理性の高い対策が計画できるのではないか。地盤の応力と変形に加えて水圧に関する情報も同時に提供できる連成 FEM の設計ツールとしての可能性は大きいと考える。

参考文献

- 1) 竹村次朗：軟弱地盤の山留め掘削に関する遠心模型実験，基礎工，Vol. 27, No. 8, pp. 21～25, 1999.
- 2) Takemura, J., Kondoh, M., Esaki, T., Kohda, M. and Kusakabe, O.: Centrifuge model tests on double propped wall excavation in soft clay, Soils and Foundations, Vol. 39, No. 3, pp. 75～87, 1999.
- 3) Iizuka, A. and Ohta, H.: A determination Procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol. 27, No. 3, pp. 71～87, 1987.
- 4) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency of clay, Proc. Specialty Session 9, 9th ICSMFE, pp. 475～484, 1977.
- 5) 山留め架構の設計・施工に関する研究委員会 (地盤工学会主催シンポジウム No. 108)：根切り・山留めの設計・施工に関するシンポジウム発表論文集，1998.
- 6) 上野孝之・水口 譲：大規模建築施工例，基礎工，Vol. 21, No. 7, pp. 97～101, 1993.
- 7) 杉江茂彦：実務分野における三次元土／水連成 FEM 解析の利用状況，土と基礎 (小特集：数値解析と実務)，Vol. 43, No. 7, pp. 11～14, 1995.

(原稿受理 2002.5.16)