

軟弱地盤における掘削工事の挙動データとシミュレーション解析

Behavior of Earth Retaining Structures and Simulation Analysis of Excavation in Soft Ground

實松俊明 磯部隆寿
三浦徹也 杉本健太郎

要 約

近年、掘削工事に際して、山留め壁の変形のみならず近接構造物の変形に対する影響も予測する必要性が高まっている。周辺地盤を含めた全体的な掘削時の地盤の挙動を評価できる手法としてFEM解析は有効であるが、適切な入力パラメータの設定法に関する検討や、様々な地盤条件における実工事に対する適用例を積み重ねていく事が解析精度を高める上で重要である。このような背景のもと、軟弱粘性土地盤における掘削工事で実施された山留め挙動データに対して、線形弾性モデルおよびDuncan-Changモデルを用いた二次元FEMによるシミュレーション解析を実施した。その結果、弾性解析ではN値あるいは一軸圧縮強度から評価される弾性係数を用いることで最終掘削時の山留め壁の変形量を、非線形解析ではサイスミックコーン貫入試験によるせん断波速度から得られた初期剛性と三軸UU試験から得られる強度定数を用いることで、周辺地盤も含めた全体的な地盤の挙動を概ね評価することができた。

目 次

- I. はじめに
- II. 地盤および山留め工事概要
- III. 解析条件
- IV. 実測結果とシミュレーション解析結果
- V. おわりに

I. はじめに

近年、掘削工事に際して近接構造物の変形に対する建物所有者・管理者からの要求が年々厳しくなり、掘削時の近接構造物への影響を評価する必要性が高まっている。そのため、掘削によって生じる山留め壁の変形のみならず、周辺地盤の変形の予測精度をより向上させる必要がある。周辺地盤の変形を含めた全体的な掘削時の地盤の挙動を評価できる手法としてFEM解析は有効であり、地盤を弾性体と仮定した弾性FEM解析は、最近実務でも用いられるようになっている。一方、Duncan-Chang¹⁾モデルや粘性土に対する関口・太田モデル²⁾など、地盤のもつ非線形性や圧密現象を考慮した構成則は幾つか提案されているが、これらのモデルを取り入れた非線形解析は入力パラメータ数が多く、またパラメータの設定が難しいことから実務における普及が妨げられている。これらのモデルを実務に適用するためには、構成則の妥当性は勿論のこと、適切なパラメータの設定法に関する検討や、様々な条件に対する適用例を積み重ねていく必要がある。このような背景のもと、今回、地盤条件が比較的単純な軟弱地盤における大平面掘削工事の山留め挙動データ（山留め壁の変形、切梁軸力、背面地盤鉛直変位）が得られたので、その結果を整理し、弾性モデルおよびDuncan-Changモデルを用いた二次元FEMによるシミュレーション解析を実施した。本報告では、山留め挙動の実測結果とシミュレーション解析結果について述べる。

II. 地盤および山留め工事概要

1. 地盤概要

敷地は沖積平野上の市街地に位置している。地盤は層厚3mの埋土の下にN値が0の非常に軟弱な沖積シルトが厚く堆積し、薄い砂層を挟んでGL-25m付近から本建物の支持地盤となるN値50以上の土丹層が出現する。敷地内ではボーリング調査が行われ、標準貫入試験の他にシルト層と土丹層については三軸UU試験、一軸圧縮試験および圧密試験等が実施されているが、この他にサイスミックコーン貫入試験³⁾を実施し、地盤のせん断波速度を測定している。Fig. 1にボーリング調査結果、サイスミックコーン貫入試験によるせん断波の測定波形およびせん断波速度を示す。

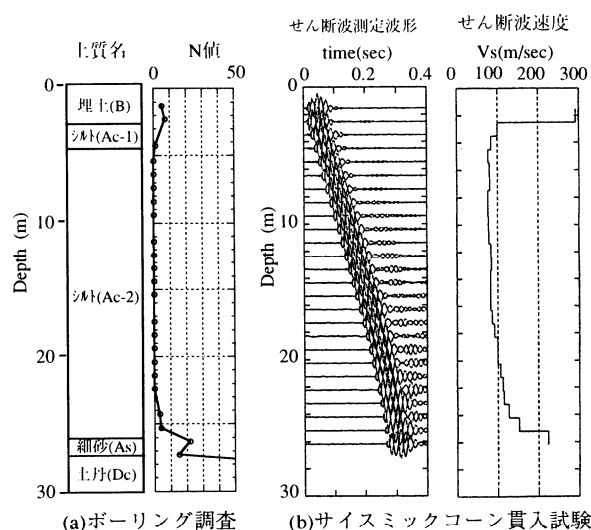


Fig. 1 地盤調査結果
(SPT and Seismic CPT Results)

キーワード：掘削，山留め，計測，FEM，
シミュレーション

2. 山留め工事概要

建設される建物は、地下1階・地上14階のS造（地下SRC造）の事務所ビルである。山留め架構平面及び計測位置をFig. 2に、山留め架構断面をFig. 3に示す。掘削平面は一部の隅欠き部があるが、66×51mと平面的に広く、最終掘削深さは8.0mである。山留め壁はソイルセメント柱列壁（芯材：H-396×199×7×11, L=13.5m, @900）である。山留め支保工は切梁2段（1段切梁：H-300×300×10×15, 2段切梁：H-350×350×12×19）で、1段切梁には60tf, 2段切梁には120tfのプレロードを導入している。また、周辺地盤・近接構造物への影響が懸念されることから、安全計測管理としてFig. 2に示す位置で、山留め壁の変形を挿入式傾斜計により、切梁軸力を盤圧計により、周辺地盤の沈下をレベル測定器により測定している。

III. 解析条件

Fig. 2に示した山留め壁の変形測定位置及び切梁軸力の測定位置を通るA-A'断面において、二次元FEMによるシミュレーション解析を実施した。Fig. 4に要素分割図を示す。山留め架構の半分をモデル化し、地盤および架構は二次元平面ひずみ問題として扱い、山留め壁と切梁は線形のビーム要素としている。解析範囲は、山留め壁の背面側に117m、深さ方向に30mとし、境界条件は、側面を鉛直方向に移動可能なローラー、底面をピンとしている。また、Ac2層では室内土質試験（一軸圧縮試験・三軸UU試験）が3深度で実施されているため、Ac2層を3層に分割している。地盤の変形特性には弾性モデル(case1)および非線形モデル(case2)の2ケースを想定し、両ケースとも全応力解析とした。なお、解析工程は5工程（①一次掘削、②1段切梁プレロード、③二次掘削、④2段切梁プレロード、⑤三次掘削）としているが、非線形解析では、各工程をさらに細かく分割して逐次計算している。

1. 弾性解析(case1)

解析に用いた地盤の物性値をTable 1に示す。地盤の弾性係数Eは、埋土・砂に関してはN値、シルト・土丹に関しては一軸圧縮試験結果を基に、弾性解析において比較的良好に用いられる下式⁴⁾により評価した。

埋土、砂 : $E=2.8N(\text{MPa}) \cdots \cdots (1)$

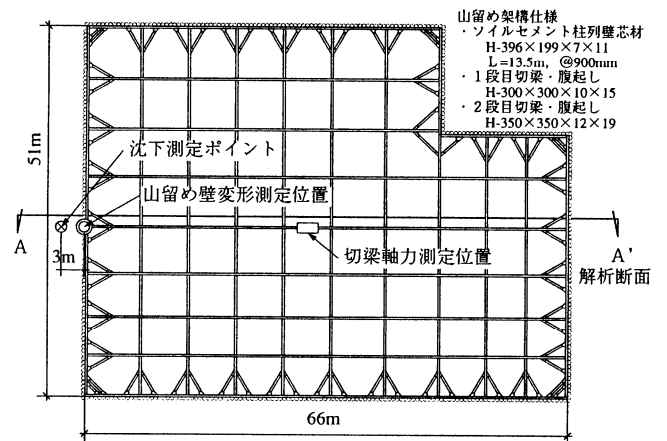


Fig. 2 山留め架構平面
(Plan of Earth Retaining Structures)

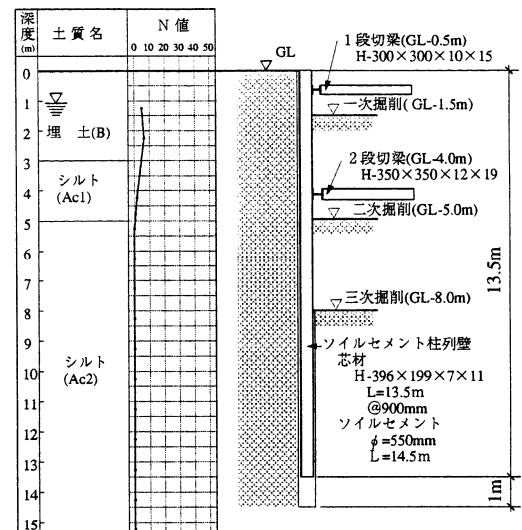


Fig. 3 山留め架構断面
(Section of Earth Retaining Structures)

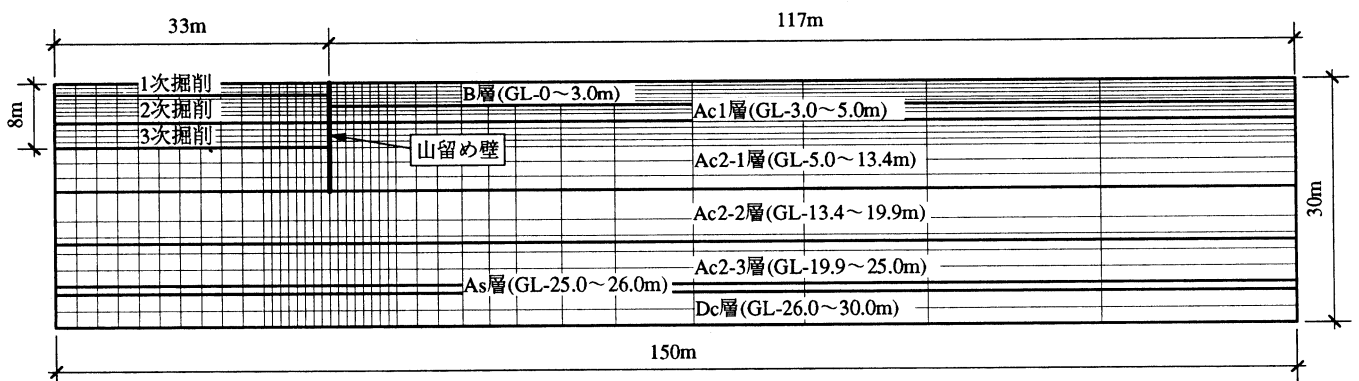


Fig. 4 要素分割図
(Finite Element Model)

Table 1 地盤の物性値
(Properties of Soil)

地層	深度 (m)	単位体積重量 γ (tf/m ³)	ポアソン比 ν	case1(弾性解析)	case2 (非線形解析:Duncan-Changモデル)					
				弾性係数 E (MPa)	せん断波速度 V_s (m/sec)	K	R_f	n	c (KPa)	ϕ (度)
埋土(B)	0.0~3.0	1.50	0.33	16.8	250	7520	1.0	0.5	0	25.0
シルト(Ac1)	3.0~5.0	1.57	0.45	3.8	120	934	1.0	0.5	16	9.9
シルト(Ac2-1)	5.0~13.4	1.45	0.45	7.7	75	224	1.0	0.5	32	0
シルト(Ac2-2)	13.4~19.9	1.40	0.45	11.1	85	208	1.0	0.5	49	9.8
シルト(Ac2-3)	19.9~25.0	1.47	0.45	15.4	135	477	1.0	0.5	72	1.2
細砂(As)	25.0~26.0	1.80	0.33	56.0	220	1716	1.0	0.5	0	35.0
土丹(Dc)	26.0~30.0	1.95	0.45	388.5	590	10646	1.0	0.5	185	0

シルト, 土丹: $E=105q_u$ (2)

ここで q_u : 一軸圧縮強度(MPa)

ポアソン比は, 砂層および埋土は0.33, シルト層および土丹層は0.45とした。

2. 非線形解析(case2)

非線形解析に用いたDuncan-Changモデル¹⁾は, 軸差応力と接線弾性係数の関係として下式で定義されており, 双曲線による応力-ひずみ関係の非線形性と拘束圧による剛性変化の影響を考慮したモデルとなっている。

$$E_t = K \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 \cdot E_i \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで E_i : 初期弾性係数, E_t : 接線弾性係数

P_a : 大気圧, c : 粘着力, ϕ : 内部摩擦角

σ_1 : 最大主応力, σ_3 : 最小主応力

K : 初期弾性係数を定義する定数

n : 弾性係数の拘束圧依存性を表す定数

R_f : 破壊比 $(=(\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult})$

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: 双曲線モデルの漸近線

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: c と ϕ から求まる土の最大主応力差

非線形解析に用いた地盤の物性値をTable 1に示す。ここで, K の値はFig. 1に示したサイクリックコーン貫入試験により測定したせん断波速度 V_s の値から求めた初期弾性係数 E_i に対応するよう, (3)式から算定している。破壊比 R_f は, 双曲線モデルの漸近線の位置を定義する定数であり, $R_f < 1$ とした場合, 双曲線の見かけ上の漸近線は, c と ϕ から求まる土の強度以上に設定されるが, 今回の解析では破壊比 R_f を1.0とした。この場合, c と ϕ から求まる土の強度と, 双曲線モデルの漸近線は一致している。また, 弾性係数は拘束圧の0.5乗に比例するものと仮定して $n=0.5$ とした。なお, 粘着力 c と内部摩擦角 ϕ は, シルトおよび土丹は三軸UU試験結果から求め, 埋土および砂層は三軸試験が実施されていないため, $c=0$ とし, ϕ は大崎による砂質土に対する N 値と ϕ の相関式⁵⁾ $\phi = \sqrt{20N} + 15$ で評価した。静止土圧係数は $K_0 = \nu / (1 - \nu)$ とした。

IV. 実測結果とシミュレーション解析結果

1. 山留め壁変形

各掘削工程毎の山留め壁の変形の実測結果とシミュレーション解析結果を比較してFig. 5に示す。山留め壁の実測変形量は掘削が進行するにつれて増大し, 最大変形量は三次(最終)掘削時にGL-

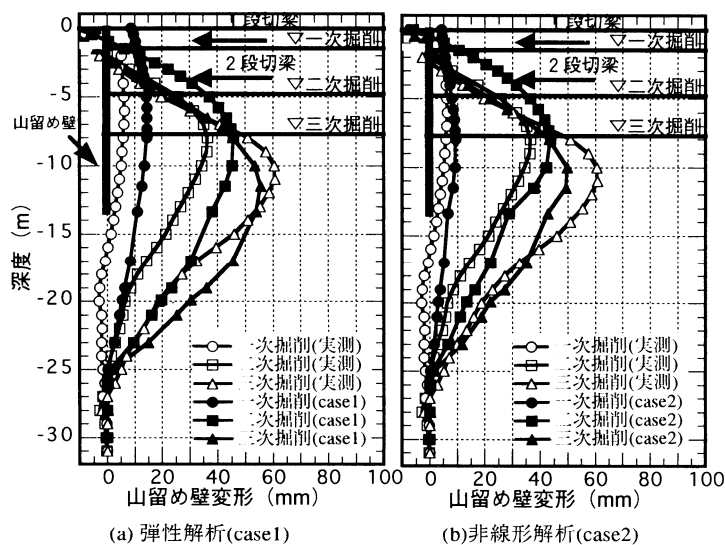


Fig. 5 山留め壁の変形
(Deformation of Retaining Wall)

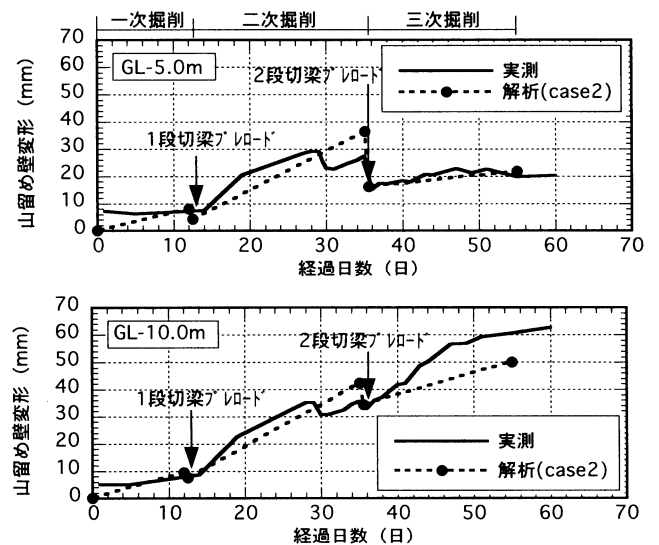


Fig. 6 山留め壁の変形の経時変化
(Time History of Deformation of Retaining Wall)

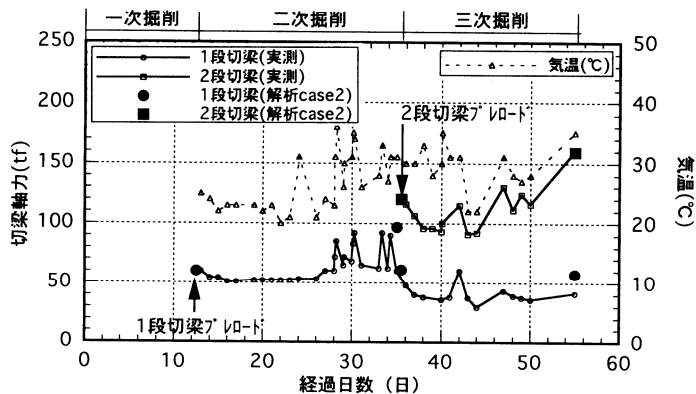


Fig. 7 切梁軸力の経時変化
(Time History of Axial Loads of Struts)

10m付近で61mmとなっている。一方、Fig. 5の解析結果をみると、変形状は弾性解析(case1)と非線形解析(case2)共に各掘削工程の挙動を定性的に表しているが、変形量については、弾性解析(case1)は一次と二次掘削時の変形を大きく評価している。非線形解析(case2)は各掘削工程にわたり良く一致している。

Fig. 6は、深さ5m及び10mにおける山留め壁の変形量の経時変化を示したものである。Fig. 6中には各工程におけるcase2の解析結果を併せてプロットしている。実測結果は、掘削の進行に伴って変形が徐々に増加しており、GL-5mの実測結果では、2段切梁のプレロード時に変形が減少している。Fig. 6の実測結果と解析結果を比較すると、case2による解析結果は、2段切梁のプレロードによる変形の減少も含め、全掘削工程において山留め壁の挙動を良く表現できているといえる。

2. 切梁軸力

Fig. 7は1段および2段切梁の軸力の経時変化の実測値とcase2による解析値を示したものである。また、同図中には参考のため気温変化も併せて示している。切梁軸力の実測をみると、温度変化の影響を受けて変動しているが、掘削の進行に伴って切梁軸力は徐々に増加し、1段目の最大値は二次掘削時に90tf程度、2段目は三次掘削時に160tf程度となっている。2段切梁プレロード後は、1段目の軸力は低下している。また、実測結果と解析結果を比較すると、解析結果(case2)は掘削による軸力の増加傾向および2段切梁プレロード時の1段切梁軸力の低下傾向を良く表現できているといえる。

3. 地盤変状

Fig. 8に各工程における山留め壁の背面地盤の地表面沈下量の解析値(case2)を示す。Fig. 8中には山留め壁の変形測定位置から直交方向に3m離れた測定点における地表面沈下量の実測値を併せてプロットしている。地表面沈下量の実測値は一次掘削時で、1mm、二次掘削時で2mm、三次掘削時で7mmである。本工事では山留め壁から3m離れた地点で地表面の沈下を測定しているため、実測値との比較はその点でのみとなるが、解析値と良く一致している。解析結果によると、10mm以上の変形は、山留め壁か

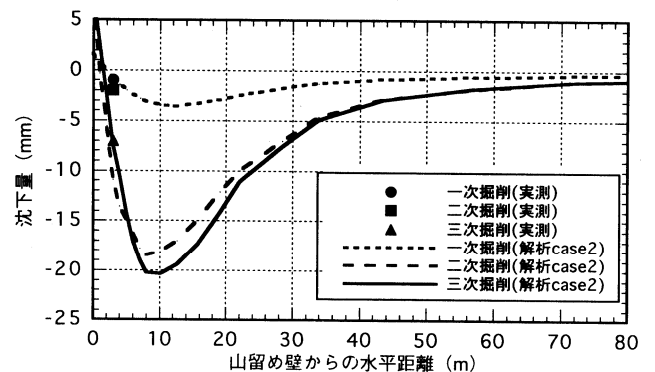


Fig. 8 周辺地盤の沈下量
(Settlement of Surrounding Area)

ら25m離れた範囲まで生じ、最大沈下量は山留め壁から10m離れた地点で約20mmとなっている。

V. おわりに

地盤条件が比較的単純な軟弱地盤における大平面掘削工事の山留め挙動データ(山留め壁の変形、切梁軸力、背面地盤鉛直変位)に関し、その結果を整理し、弾性モデルおよびDuncan-Changモデルを用いた二次元FEMによるシミュレーション解析を実施した。その結果、本地盤においては、弾性モデルでは一軸圧縮試験あるいはN値から評価される弾性係数を用いることで最終掘削時の山留め壁の変形量を、また、非線形モデルにはサイスミックコーン貫入試験によるせん断波速度から得られた初期剛性と三軸UU試験から得られたパラメータを用いることで、周辺地盤も含めた掘削時の地盤の挙動を掘削全工程にわたり概ね評価することができた。今後は様々な地盤条件における検討事例を通じ、弾性解析の適用範囲を明らかにするとともに、非線形解析に関してもパラメータの設定方法等について検討する予定である。

最後に、山留め工事のデータ入手にあたり、御協力頂いた関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) James M. Duncan and Chin-Yung Chang; Nonlinear analysis of stress and strain in soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers(1970), pp.1629-1653.
- 2) Sekiguchi, H. and Ohta, H.; Induced anisotropy and time dependency in clays, Proc. Specialty Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo (1977), pp.229-239.
- 3) 鈴木康嗣, 笹尾光, 西謙治, 武居幸次郎; サイスミックコーンとロータリーパーカッションドリルを併用した地盤調査システム, 日本建築学会技術報告集, 第1号(1995.12), pp.180-184.
- 4) 近接施工技術総覧編集委員会, 近接施工技術総覧, (株)産業技術サービスセンター, 1997, p.69, p.340.
- 5) 大崎順彦, 建築基礎構造, 技報堂出版, 1991, p.392.