

掘削に伴う山留め壁背面地盤の鉛直変位の評価

Evaluating Vertical Ground Displacement behind Earth Retaining Wall under Excavation

實松 俊明 島中 祐樹

要 約

都市部での地下工事は既設構造物との近接施工となるケースが多く、掘削時の山留め壁周辺地盤の変位を精度よく予測する必要がある。今回、山留め壁の背面地盤の鉛直変位に着目し、2現場において掘削時の山留め変位と掘削側地盤の鉛直変位および背面側地盤の鉛直変位の計測を行い、山留め変位と背面地盤の鉛直変位の関係について検討した。検討の結果、背面地盤の鉛直変位は、掘削除荷による浮上りの影響と山留め壁変位による沈下の影響を複合的に受け、その影響度合いは山留め壁から離れるに従って減少する傾向を確認した。また、近接施工時の既設構造物の挙動評価において実務で多く用いられている2次元FEM解析（強制変位法）を対象に、山留め壁の背面地盤変位のシミュレーション解析を行い、本解析法に適したモデル化手法の検討を行った。その結果、解析領域および地盤剛性を適切に設定することで山留め壁に比較的近い位置における背面地盤の鉛直変位を概ね評価でき、モデル化手法の有効性を示した。

目 次

- I. はじめに
- II. 計測データおよび計測結果の概要
- III. 山留め壁背面地盤の鉛直変位
- IV. FEM解析（強制変位法）による挙動解析
- V. おわりに

I. はじめに

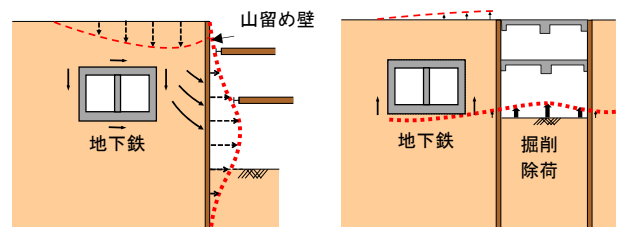
市街地の建築工事では、隣接する建物や地下鉄などの既設構造物との近接施工となる場合が多く、山留め壁の変位だけでなく、掘削に伴う周辺地盤変位を精度良く予測することが求められている。

掘削工事に伴う周辺地盤挙動の模式図を Fig.1 に示す。掘削時には、山留め壁の変位や掘削除荷などの影響で、周辺地盤に水平方向あるいは鉛直方向の変位が生じる¹⁾。周辺地盤の水平変位は、主に山留め壁の水平変位の影響を受け、山留め壁から離れるに従ってその大きさは減少する²⁾。一方、周辺地盤の鉛直変位は、山留め壁の水平変位による沈下や掘削による浮上り（リバウンド）の影響を受ける。

掘削時の周辺地盤変位の評価手法としては、FEM解析が

用いられている¹⁾。しかしながら、FEM解析はモデル化の範囲や地盤パラメータの設定法が解析結果に影響を与える^{1),3)}。鉄道構造物を対象とした近接施工では、近接構造物の管理基準値は数mm～十数mm程度と小さく⁴⁾、周辺構造物に影響を及ぼさず、かつ合理的な山留め計画を行うためには、精度の高い予測が重要となる。

このような背景のもと、筆者らは周辺地盤変位の予測手法として近接協議の実務で多く用いられている2次元FEM解析（強制変位法）^{1),3)}を対象に、解析法に適したモデル化手法の検討を進めている。既報⁵⁾では、山留め壁背面地盤の水



(a)山留め壁変位の影響 (b)掘削による除荷の影響

Fig.1 掘削工事に伴う周辺地盤挙動の模式図
(Example of Backside Ground Behavior under Excavation Work)

キーワード：山留め、掘削、近接施工、周辺地盤、鉛直変位、FEM解析

Keywords：earth retaining, excavation, neighboring construction, backside ground, vertical displacement, finite element method

平変位について報告した。今回は、FEM 解析の妥当性を検証するために取得した実測データを基に、掘削時の山留め壁背面地盤の鉛直変位の傾向について考察を行った。また、2次元 FEM 解析（強制変位法）による山留め壁背面地盤の鉛直変位のシミュレーション解析を行い、既報告である山留め壁背面地盤の水平変位の解析結果と併せて、解析領域や地盤剛性の設定法などのモデル化手法について検討した。本報告では、これらの検討結果を示す。

II. 計測データおよび計測結果の概要

Table 1 に計測現場の概要を示す。2現場で山留め壁の水平変位と掘削側地盤および背面側地盤の鉛直変位の計測を行った。床付け以浅の地盤は2現場とも粘性土地盤である。また、最大掘削深さは約13m~15m、山留め壁はソイルセメント壁、地下工法は順打ち（切梁）工法である。山留め壁の水平変位は固定式傾斜計、掘削側および背面側地盤の鉛直変位は層別沈下計により計測した。なお、A現場とB現場は既報⁵⁾のA現場、B現場と同一である。

Table 1 計測現場の概要
(Outline of Measurement Site)

現場	床付け以浅の主な土質	掘削深さ	掘削平面	地下工法	山留め支保工	山留め壁		地盤の鉛直変位計測			平面図	備考	
						工法	応力材仕様	山留め壁水平変位計測	掘削側				背面側
									計測方法	計測方法			
A	沖積粘性土	8.8m 中央14.5m	63m × 58m	順打	1段 (下段1段)	ソイルセメント壁	H450 × 200 @0.675m ℓ=15.3m ソイルセメント長さ16.3m	固定式傾斜計	層別沈下計	層別沈下計	6.8m	<ul style="list-style-type: none"> 掘削完了時 傾斜計下端深度：山留め壁 GL-37.3m 層別沈下計下端深度：掘削側地盤 GL-59.1m 背面側地盤 GL-59.1m 	
B	沖積粘性土	9.6m 中央12.6m	40m × 102m	順打	2段	ソイルセメント壁	H500 × 200 @0.45m ℓ=20.4m ソイルセメント長さ21.4m	固定式傾斜計	層別沈下計	層別沈下計	19.5m	<ul style="list-style-type: none"> 掘削完了時 傾斜計下端深度：山留め壁 GL-20.4m 層別沈下計下端深度：掘削側地盤 GL-64.1m 背面側地盤 GL-64.1m 	

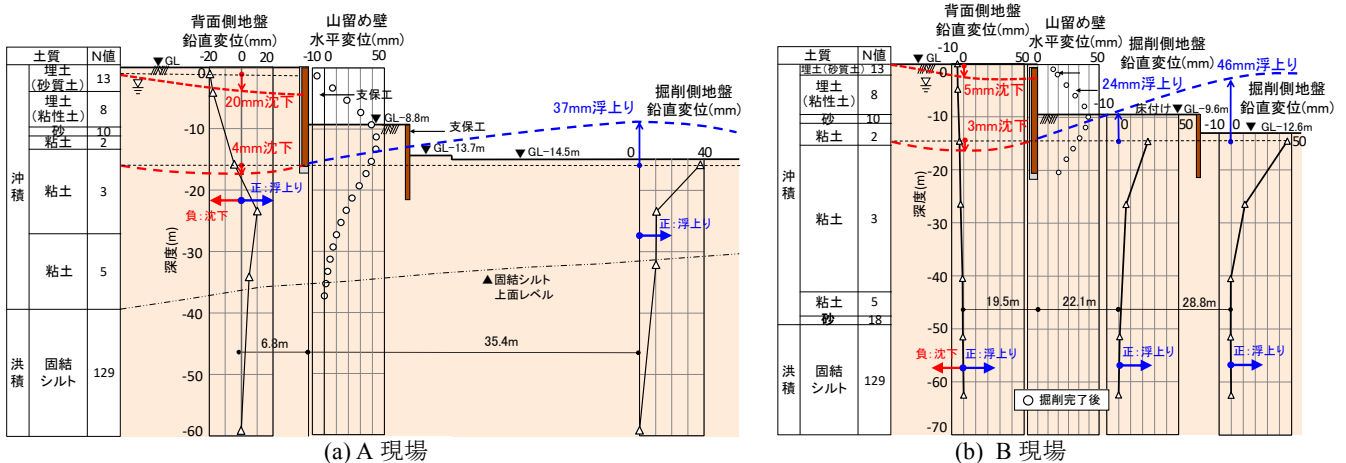


Fig.2 山留め壁の水平変位と掘削側および背面側地盤の鉛直変位の計測結果

(Measurement Result of Horizontal Displacement of Earth Retaining, Vertical Displacement of Excavated and Back Side Ground)

離が離れており (19.5m), 掘削除荷による浮上りよりも山留め壁の水平変位による影響が卓越したものと考えられる。

Fig.3 および Fig.4 に, 掘削内外の地盤(一部構造物を含む) の鉛直変位の実測値を整理した結果 ¹⁾に加筆を示す。図には複数事例の既往データを示すとともに A 現場と B 現場の実測データを追加している。Fig.3 は, 掘削底から 10m 以内の深さで計測した鉛直変位の実測値を掘削側の最大浮上り量で無次元化した値と, 山留め壁からの距離を検討断面における掘削幅で無次元化した値の関係を示している。掘削側地盤の鉛直変位は, 必ずしも掘削平面中央で計測されていない。そこで掘削平面中央位置に対する掘削平面中央位置における沈下係数 ⁶⁾の比を実測値に乗じることで最大浮上り量を推定している。Fig.3 より, 掘削底付近における山留め壁近傍の背面地盤は全体的に浮上りが卓越し, 山留め壁から離れるに従って減少する傾向がみられる。今回の 2 現場は軟弱粘性土地盤で, 掘削底付近でも山留め変位が生じており, その影響でやや沈下側になっている。Fig.4 は, 山留め壁背面地盤の地表面付近(床付け深さ以浅)の鉛直変位を, Fig.3 と同様に掘削側の最大浮上り量で無次元化した値と, 掘削幅で無次元化した山留め壁からの距離の関係を示している。山留め壁背面地盤の地表面付近の変位は主に沈下側に分布し, 掘削底付近よりも山留め変位の影響を大きく受けていることが確認された。

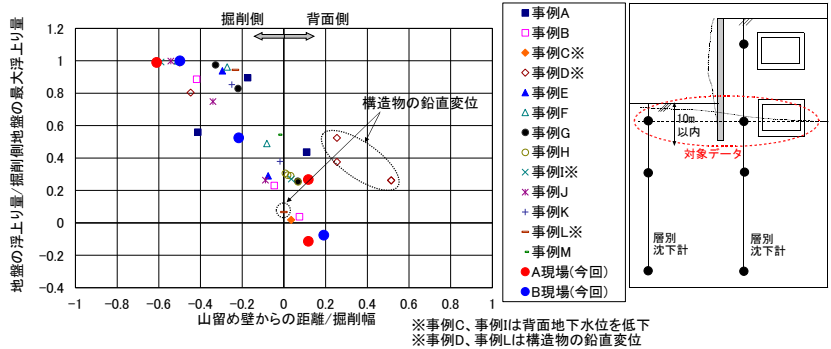


Fig.3 山留め壁背面地盤の浮上り量 (掘削底から深さ 10m 以内) ¹⁾に加筆
(Vertical Displacement of Backside Ground of Earth Retaining (Within 10m Depth from Bottom of Excavation))

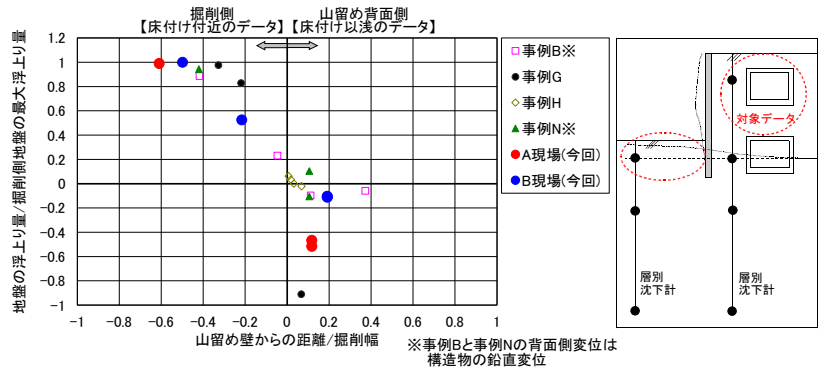


Fig.4 山留め壁背面地盤の浮上り量 (地表面付近) ¹⁾に加筆
(Vertical Displacement of Backside Ground of Earth Retaining (Near Ground Surface))

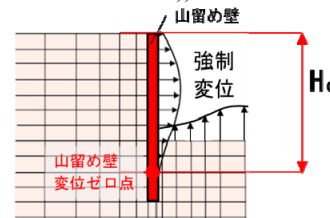


Fig.5 FEM 解析 (強制変位法) ¹⁾に加筆
(FEM Analysis (Forced Displacement Method))

IV. FEM 解析 (強制変位法) による挙動解析

1. 解析法の概要

掘削時の山留め壁背面地盤変位を求めるための FEM 解析には「強制変位法」と「逐次解析法」がある ¹⁾³⁾。ここでは, 近接施工の挙動評価において実務で多く用いられている「強制変位法」を対象に, 山留め壁背面地盤の鉛直変位のシミュレーション解析を行い, モデル手法について検討した。Fig.5 に強制変位法の概要を示す。山留め壁の水平変位および掘削底面の浮上り変位の実測値を強制変位として与えて背面地盤の鉛直変位を評価した。浮上り変位は, 層別沈下計による掘削底面における実測変位に合うように, 弾性論 (Steinbrenner 式) で算定した値に補正係数を乗じて評価した。

2. 解析ケース

本検討では, 背面地盤の水平変位の解析を行った既報 ⁵⁾と同様に, 解析結果に影響を及ぼす条件として水平方向の解析

Table 2 解析条件および解析ケース
(Analytical Condition and Case)

解析条件		case1	case2	case3	case4	case5	case6	備考
背面側領域	1H ₀	○		○		○		H ₀ : 山留め壁の変位ゼロ点の深度 (m)
	2H ₀		○		○		○	
変形係数	全て E ₀	○	○					E ₀ : 砂質土 2500N (kN/m ²) 粘性土 210c (kN/m ²) E _i : せん断波速度から評価した変形係数 (kN/m ²)
	主働すべり線内側: E ₀			○	○			
	主働すべり線外側: E _i /2							
	背面側主働すべり線外側: E _i					○	○	
掘削底床付け深: E _i /2								

※境界条件: 側面は鉛直ローラー, 底面は水平・鉛直方向とも固定
N: N 値, c: 粘着力

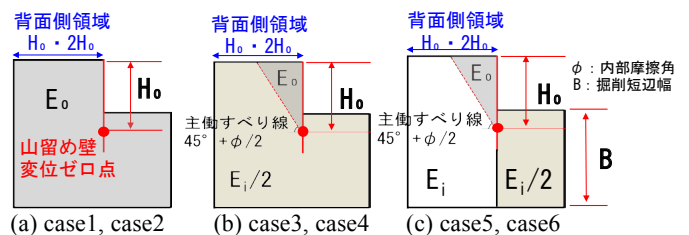


Fig.6 解析ケースの模式図
(Schematic Drawing of Analytical Case)

領域と変形係数に着目した。Table 2 に解析条件および解析ケースを、Fig.6 に解析ケースの模式図を示す。水平方向の解析領域は、山留め壁から山留め変位ゼロ点までの深さ H_0 の1倍 (case1,3,5) および2倍 (case2,4,6) とした⁵⁾。鉛直方向の解析領域は、床付け面から掘削短辺幅 B の1倍とした⁵⁾。なお、B現場の変位ゼロ点は、Fig.2(b)の山留め壁の下端変位を下方に延長してGL-31mと評価した。

強制変位法に用いられる地盤の変形係数は、代表的なものとして下式が提案されており、実務でも用いられている^{7),8)}。

$$\text{砂質土} : E_0 = 2500N \quad (\text{kN/m}^2) \quad \dots \quad (1)$$

$$\text{粘性土} : E_0 = 210c \quad (\text{kN/m}^2) \quad \dots \quad (2)$$

ここに、 N : N 値、 c : 粘着力 (kN/m^2)

(1)、(2) 式は、ある程度地盤変位が生じている状態を想定した変形係数であるが、一般的には掘削エリアから離れるに従って地盤変位(ひずみ)は小さくなり、変形係数は領域ごとに異なると考えられる。そこで本検討では、変形係数を一律 E_0 で設定するケース (case1,2) と、実務的な簡便性を考慮して主働すべり線の内側を E_0 とし、床付け以深を含むその他の領域を、ひずみレベルが小さいことや鉛直変位の評価で提案されている関係を考慮して、微小ひずみに対する変形係数 E_i の $1/2$ 倍⁸⁾ としたケース (case3,4) を設定した。また、掘削側床付け以深を case3,4 と同様に $E_i/2$ 、主働すべり線外側はさらに変位が生じないことを想定して E_i としたケース (case5,6) を設定した。微小ひずみに対する変形係数 E_i は、せん断波速度 V_s から (3) 式⁶⁾ で評価した。

$$E_i = 2(1 + \nu) \cdot (\gamma / g) \cdot V_s^2 \quad \dots \quad (3)$$

ここに、 V_s : せん断波速度 (m/s)、

- ν : ポアソン比、
- γ_t : 単位体積重量 (kN/m^3)、
- g : 重力加速度 (m/s^2)

Fig.7 に A 現場および B 現場の FEM 解析モデル (case5) を、Table 3 に地盤モデルを示す。主働すべり線は、山留め壁の変位ゼロ点から考慮し、境界条件は、側面を鉛直ローラー、底面は水平・鉛直とも固定とした。

3. 解析結果

Fig.8 に各現場における背面地盤の鉛直変位の解析結果と実測値の比較を示す。山留め壁から計測地点までの距離が約 7m と比較的近い A 現場の背面地盤の鉛直変位の实測値は、深い深度から浮上りが卓越し、地表面に近づくに従って沈下

Table 3 地盤モデル (Soil Properties)

(a) A 現場										
地層	土質	下端深度 (GL-m)	N 値	γ_t (kN/m^3)	粘着力 C (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	ポアソン比 ν	変形係数 (kN/m^2)		
								E_0	$E_i/2$	
沖積	F1	埋土 (砂質土)	4.6	13	14.3	25	16	0.40	32,500	66,130
	F2	埋土 (粘性土)	9.9	8	14.1	40	0	0.45	8,400	75,240
	As	砂	10.8	10	17.4	0	29	0.35	25,000	28,980
	Ac(1)	粘土	12.8	2	14.8	45	0	0.45	9,450	28,940
	Ac(2)	粘土	25.6	3	14.3	80	0	0.45	16,800	30,440
洪積	Ac(3)	粘土	29.0~37.8	5	17.4	90	0	0.45	18,900	70,020
	Dc	固結シルト	48.1	129	18.8	1040	0	0.40	218,400	871,700
	Ds	砂	72.5	152	18.8	50	45	0.30	380,000	482,330

(b) B 現場										
地層	土質	下端深度 (GL-m)	N 値	γ_t (kN/m^3)	粘着力 C (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	ポアソン比 ν	変形係数 (kN/m^2)		
								E_0	$E_i/2$	
沖積	F1	埋土 (砂質土)	1.2	13	14.3	25	16	0.40	32,500	66,130
	F2	埋土 (粘性土)	8.4	8	14.1	40	0	0.45	8,400	75,240
	As	砂	9.5	10	17.4	0	29	0.35	25,000	28,980
	Ac(1)	粘土	12.6	2	14.8	45	0	0.45	9,450	28,940
	Ac(2)	粘土	35.5	3	14.3	80	0	0.45	16,800	30,440
洪積	Ac(3)	粘土	39.5	5	17.4	90	0	0.45	18,900	70,020
	As	砂	40.5	18	17.7	30	34	0.35	45,000	164,660
	Dc	固結シルト	44.6	129	18.8	1040	0	0.40	218,400	871,700
	Ds	砂	52.2	152	18.8	50	45	0.30	380,000	482,330

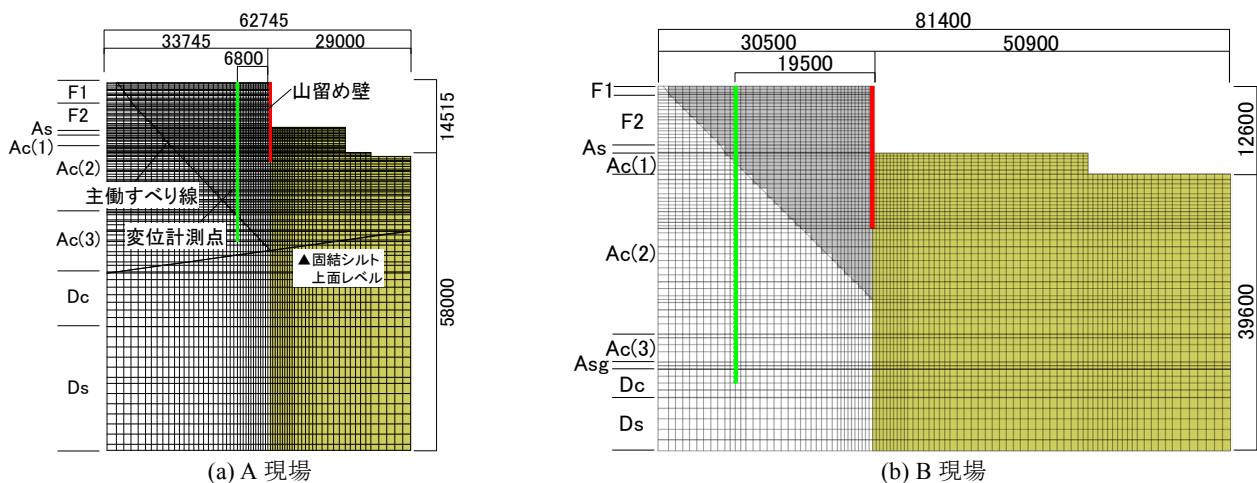


Fig.7 FEM 解析モデル (case5) (FEM Calculation Model(case5))

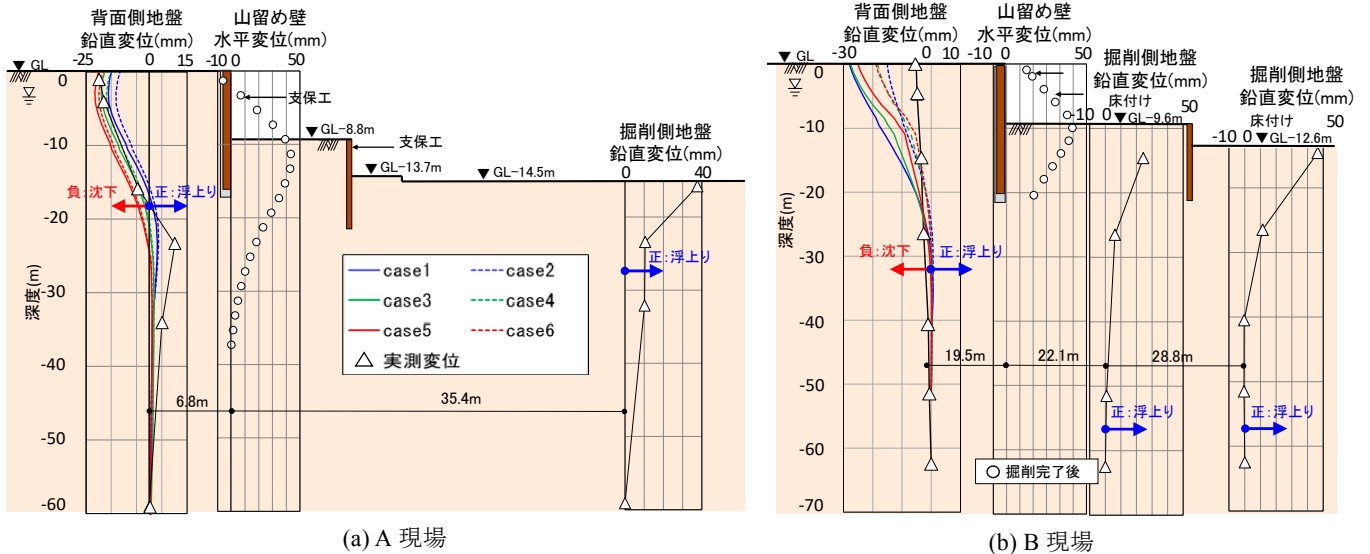


Fig.8 背面地盤の鉛直変位の解析結果と実測値の比較
(Comparison of Analysis Results and Measured Values of Vertical Displacement of Backside Ground)

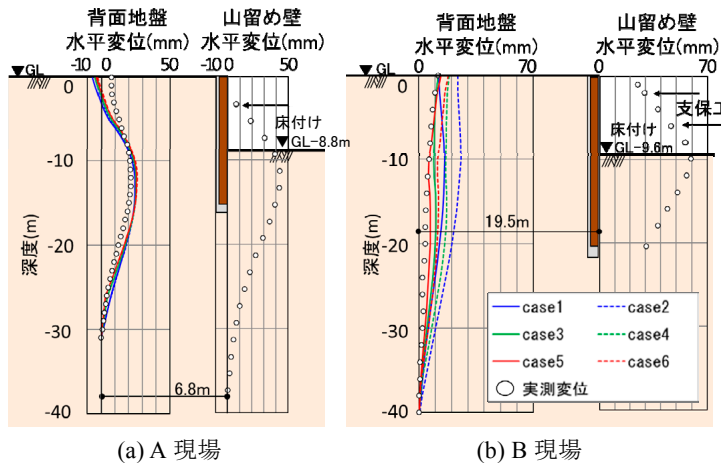


Fig.9 背面地盤の水平変位の解析結果と実測値の比較
(Comparison of Analysis Results and Measured Values of Horizontal Displacement of Backside Ground)

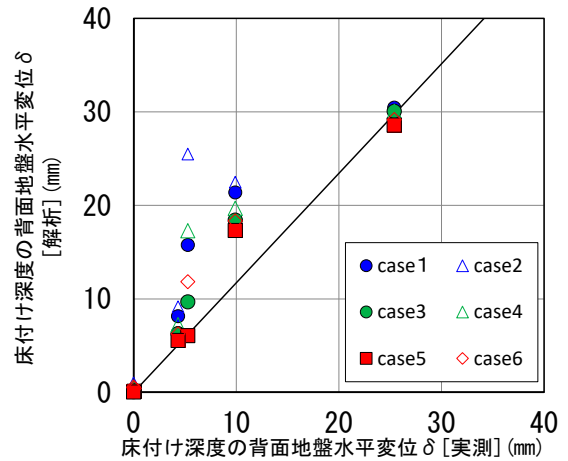


Fig.10 床付け深度の背面地盤水平変位の解析結果と実測値の比較
(Comparison of Analysis Results and Measured Values of Horizontal Displacement of Backside Ground at Excavation Depth)

する傾向を示している。解析結果は浮上りを若干小さめに評価しているものの、深度方向の地盤挙動を概ね表現できている。また、山留め壁から計測地点までの距離が約 20m と離れている B 現場の背面地盤の鉛直変位の解析結果は、深い深度の鉛直変位は良く対応しているが、地表付近の沈下を過大に評価することが確認された。山留め壁からの距離が離れている地点の背面地盤の鉛直変位評価は今度の課題である。なお、各解析ケースの比較については、いずれのケースも同様の傾向であり、解析ケースによる差異は少ない結果となった。

一方、背面地盤の水平変位の解析結果について、Fig.9 に両現場における背面地盤の水平変位の解析結果と実測値の比較を、Fig.10 に背面地盤の床付け深度における水平変位の

解析結果と実測値の比較を示す。なお、既報⁵⁾の解析では強制変位は山留め変位のみであったが、Fig.9 および Fig.10 は、山留め変位の他に浮上りの強制変位を与えて再解析した結果を示している。背面地盤の水平変位については、case5 が実測値との対応が良い結果が得られている。

背面地盤の鉛直変位と水平変位の両方の解析結果を考慮すると、山留め壁から計測地点までの距離が離れている B 現場の鉛直変位を除き、case5 が背面地盤の水平および鉛直変位の実測値を最も良く評価できる条件であると考えられる。

V. おわりに

掘削時の山留め壁背面地盤の鉛直変位について、現場実測

データの分析, および 2 次元 FEM 解析による実測値のシミュレーション解析を行った。得られた知見を以下に示す。

- a. 2 現場で山留め壁背面地盤の鉛直変位計測を行い, その挙動について検討した。その結果, 背面地盤の鉛直変位は, 掘削除荷による浮上りの影響と山留め壁変位による沈下の影響を複合的に受け, その度合いは山留め壁から離れるに従って減少する傾向が確認された。
- b. 近接施工の実務で用いられている強制変位法による 2 次元 FEM 解析を対象に, 背面地盤の鉛直変位のシミュレーション解析を行った。その結果, 解析領域や地盤の変形係数を適切に設定することで, 山留め壁から比較的近い位置における背面地盤の鉛直変位を概ね評価でき, モデル化手法の有効性を示した。

今後は, 様々な地盤・掘削条件における実測および解析事例をさらに蓄積し, 解析の信頼性向上を図っていきたいと考える。

参考文献

- 1) 日本建築学会; 山留め設計指針, 2017, pp.233-241.
- 2) 元井康雄ほか; 山留め工事における地盤変位, 基礎工, Vol.51, No.4, 2023.4, pp.20-25.
- 3) 日本建築学会; 近接山留めの手引き, 2015, pp.46-48.
- 4) 山下俊英ほか; 鉄道構造物に対する近接施工の現状と課題, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 2004.8, pp.747-748.
- 5) 村木佑ほか; 根切りに伴う山留め壁背面地盤の水平変位計測と挙動解析 (その 1) (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 2022.9, pp.373-376.
- 6) 日本建築学会; 建築基礎構造設計指針, 2019, pp.141-144.
- 7) 鉄道総合技術研究所; 都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, 2007, pp.227-229.
- 8) 鉄道総合技術研究所; 鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル, 2001, pp.59-64, pp.429-436.

Evaluating Vertical Ground Displacement behind Earth Retaining Wall under Excavation

Toshiaki Sanematsu and Yuki Hatanaka

In urban areas, the number of cases of construction next to underground structures or existing buildings is increasing, so there is a definite need to accurately estimate ground displacement around construction sites. In this paper, the horizontal displacement of an earth retaining wall and the vertical displacement of the backside ground were measured at two sites to estimate ground behavior behind the wall during excavation. As a result, it was confirmed that the vertical displacement of the backside ground was affected by both rebound (uplift) due to the excavation and settlement due to the displacement of the retaining wall, and that the degree of influence tended to decrease as the distance from the wall increased. Next, in a 2D-FEM analysis based on a forced displacement method used to examine construction-neighboring railways etc., a simulation analysis of the displacement of the backside ground measured at the two sites was performed, and which modeling method would be suitable for FEM analysis was examined. The vertical displacement of the backside ground relatively close to the retaining wall during excavation could be evaluated by appropriately considering the analysis area and ground rigidity, demonstrating the applicability of the modeling method.