

### 弾粘塑性有限要素法による土留め開削工事における大阪中之島粘土地盤の変形解析

京都大学大学院	正会員	肥後 陽介	フェロー	岡 二三生
中之島高速鉄道(株)		中野 道夫		
京阪電気鉄道(株)		向井 寛行		泉谷 透
大成・戸田・鉄建・熊谷 JV	正会員	武田 信一	正会員	天野 健次
(財)地域地盤環境研究所	正会員	長屋 淳一		

#### 1. はじめに

大阪中之島の中之島線整備事業(図1)として、厚く堆積した軟弱な沖積粘土層において土留め支保工による開削工事を行ってきた。安全で経済的な施工管理とその検証のため、本研究では、粘性土の時間依存性塑性挙動と内部構造の変化によるひずみ硬化および軟化などを表現可能な弾粘塑性構成式を用い、開削工程にそって水-土連成有限要素解析法により開削工事のシミュレーションを行った。参考文献<sup>1)</sup>では、本稿よりも小さな解析モデルで種々の検討を行ったが、本稿ではより大きな解析モデルを設定し、近接構造物の基礎と土留め壁根入れ以深の地盤の影響も考慮して解析を行った。

解析の結果と計測結果を比較し、掘削時の地盤及び土留め支保工などの挙動について考察を行った。また、掘削中、粘土層内に発生する粘塑性偏差ひずみの蓄積量に着目し、工事中の粘土層の安定性について検討した。

#### 2. 弾粘塑性有限要素解析法と解析条件

本研究では、ひずみ速度依存性やクリープ挙動などの時間依存性挙動と内部構造の劣化に起因したひずみ軟化及び構造形成に対応する硬化を表現可能な弾粘塑性構成式<sup>2)</sup>を用いた。また、解析法は有限変形理論に基づく水-土連成有限要素解析法<sup>3)</sup>である。

解析に用いたメッシュ図と境界条件を図2に示す。SMW土留め壁はビーム要素とソリッド要素によりモデル化した。粘性土層は弾粘塑性構成式でモデル化し、粘性土層以外は線形弾性体としてモデル化した。断面の左側には川が流れており護岸構造物の基礎が存在するため、これをビーム要素でモデル化した。断面右側は土留め壁の10m背面にビルが存在し、沖積粘土層(Ma13)をCJG工法により改良した地盤を基礎としている。そこで本稿では、改良地盤をMa13より堅固な粘塑性体として模擬し、初期せん断弾性係数 $G_0$ 、膨潤指数 $\kappa$ 、粘塑性パラメータ $C_{01}$ 、 $C_{02}$ を変化させた。表1に解析に用いたパラメータを示す。また、Asg層にはリリーフウェルを模擬し、掘削工程に伴い水位を低下させる水位境界条件を設定した。

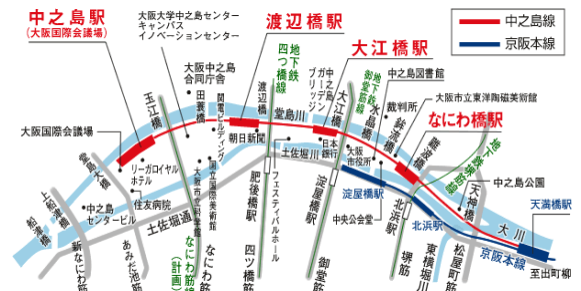


図1 中之島線概要図(解析対象は渡辺橋駅部)

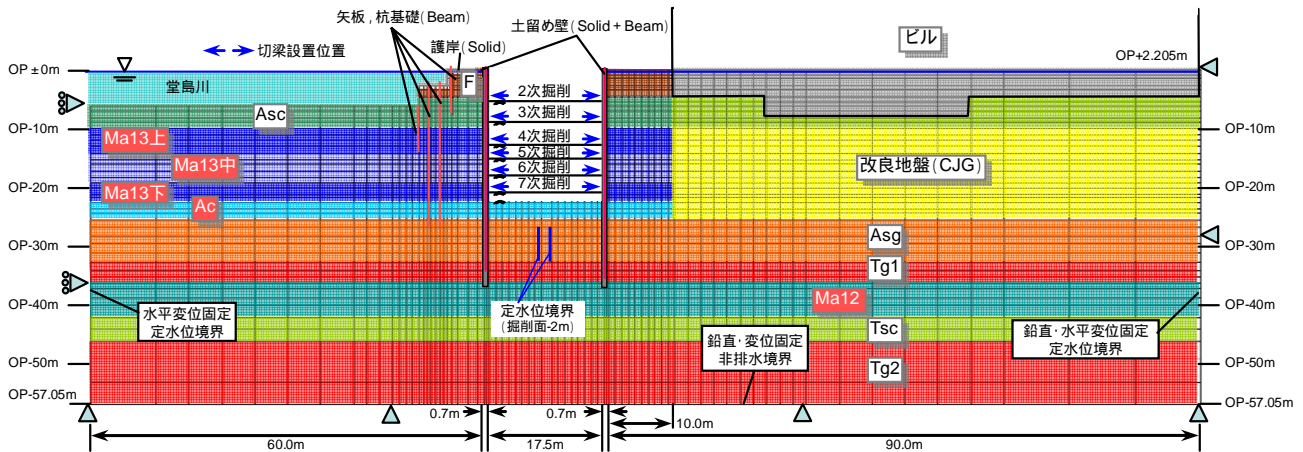


図2 解析に用いたメッシュと境界条件

キーワード 掘削, 弾粘塑性, 有限要素解析  
 連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂CクラスターC1棟583 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻  
 地盤・水工学講座 地盤力学分野 075-383-3193

表 1 解析に用いたパラメータ<sup>4), 5)</sup>

	Ma13上	Ma13中	Ma13下	Ac	Ma12	
初期間隙比 $e_0$	1.15	1.45	1.22	1.22	1.23	
圧縮指数	0.230	0.360	0.330	0.330	0.491	
膨潤指数	0.0343	0.0569	0.0438	0.0438	0.0760	
膨潤指数(改良)	0.0013	0.0010	0.0011	0.0011	-	
初期せん断弾性係数 ( $\sigma_v=100\text{kPa}$ の時)	$G_0(\text{kPa})$	1.56E+04	2.35E+04	1.98E+04	1.98E+04	2.30E+04
初期せん断弾性係数 ( $\sigma_v=100\text{kPa}$ の時, 改良)	$G_0(\text{kPa})$	7.78E+04	1.17E+05	9.90E+04	9.90E+04	-
変相応力比	$M_m$	1.31	1.38	1.37	1.37	1.25
粘塑性パラメータ	$m^1$	15.66	20.38	12.22	12.22	27.59
粘塑性パラメータ	$C_{01}(1/s)$	2.00E-10	4.50E-11	6.00E-12	6.00E-12	2.00E-14
粘塑性パラメータ	$C_{02}(1/s)$	8.00E-11	4.00E-11	2.00E-11	2.00E-11	2.00E-13
粘塑性パラメータ(改良)	$C_{01}(1/s)$	2.00E-15	4.50E-16	6.00E-17	6.00E-17	-
粘塑性パラメータ(改良)	$C_{02}(1/s)$	8.00E-16	4.00E-16	2.00E-16	2.00E-16	-
圧密降伏応力	$\sigma_{mbi} / \sigma_{m0}$	2.423	2.387	2.510	2.510	2.663
構造パラメータ	$\sigma_{mat} / \sigma_{mbi}$	1.333	0.75	0.696	0.696	0.579
構造パラメータ		35	10	10	10	15
密度	( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.65	1.65	1.65	1.75	1.55
透水係数	$k(\text{m}/\text{sec})$	4.87E-10	7.11E-10	1.00E-09	1.00E-08	5.52E-10

	Asg	Tg1	Tsc	Tg2	ピル
ヤング率 $E(\text{kPa})$	9.800E+04	1.680E+05	6.440E+04	1.680E+05	2.100E+06
ポアソン比	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.90	2.00	1.80	2.00	2.00
透水係数 $k(\text{m}/\text{sec})$	8.15E-04	2.05E-03	9.07E-05	2.05E-03	0.00E+00

	土留め壁 (Solid部)	護岸	F	Asc	Asc改良
ヤング率 $E(\text{kPa})$	1.000E+05	2.100E+06	1.960E+04	2.240E+04	1.120E+05
ポアソン比	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30
密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.00	2.00	1.70	1.75	1.75
透水係数 $k(\text{m}/\text{sec})$	1.00E-10	8.00E-07	1.21E-04	9.07E-05	9.07E-10

	土留め壁 (Solid部)	2,3,4段切梁 @3.75m	5,6,7段切梁 @3.75m	矢板 (新護岸/矢板 (旧護岸))	鋼管杭 @3m
ヤング率 $E(\text{kPa})$	9.800E+04	1.680E+05	6.440E+04	1.680E+05	2.100E+06
ポアソン比	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.90	2.00	1.80	2.00	2.00
透水係数 $k(\text{m}/\text{sec})$	8.15E-04	2.05E-03	9.07E-05	2.05E-03	0.00E+00
土留め壁	H-700*300 *13*24	H-400*400 *13*12	H-500*500 *25*25	A型	型
鋼管杭					1000 t19
EA ( $\text{MN}/\text{m}$ )	700.0	-	-	47.9	18.4
EA ( $\text{MN}/\text{m}$ )	8242.5	1224.7	2062.5	1562.4	1285.2
E ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	2.100E+05	2.100E+05	2.100E+05	2.100E+05	2.100E+05
A ( $\text{m}^2/\text{m}$ )	3.925E-02	5.832E-03	9.821E-03	7.440E-03	6.120E-03
I ( $\text{m}^4/\text{m}$ )	3.333E-03	-	-	2.280E-04	8.740E-05

3. 解析結果と計測結果の比較および考察

図3に計測と解析における土留め壁の変形図を示す。解析結果は計測結果に見られる変形モードを再現できていると言えるが、変形量は解析結果が計測結果に比べて大きな値を示している。この理由として計測では根入れ部の変位量を0と仮定していることが挙げられる<sup>1)</sup>。また、解析における根入れ部の掘削側側の変形は、リリースフェイルを施しているAsg層と、その下に存在するMa12層が掘削背面側と掘削構内側の土圧差により変形した事に起因していると考えられる。

図4に最終掘削前と最終掘削完了時の蓄積粘塑性偏差ひずみ $\gamma^p$ の分布図を示す( $\gamma^p = d\gamma^p, d\gamma^p = \sqrt{de_{ij}^p de_{ij}^p}, de_{ij}^p$ :粘塑性偏差ひずみテンソル)。 $\gamma^p$ は粘性土が塑性変形により乱された度合いの指標である。 $\gamma^p$ は最終掘削前の掘削底面で最大値を示し4.3%となり、最終掘削完了時では掘削底面中央部で3.4%となる。しかし、掘削背面では一貫して $\gamma^p$ は1%以下であった。このことから、土留め支保工が有効に機能し、沖積粘土層を大きく乱さず施工することができていたと考えられる。

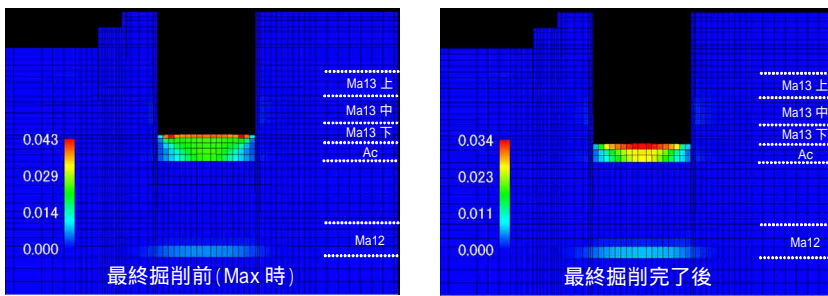


図4 粘塑性偏差ひずみの第二不変量の蓄積量 $\gamma^p$ 分布図

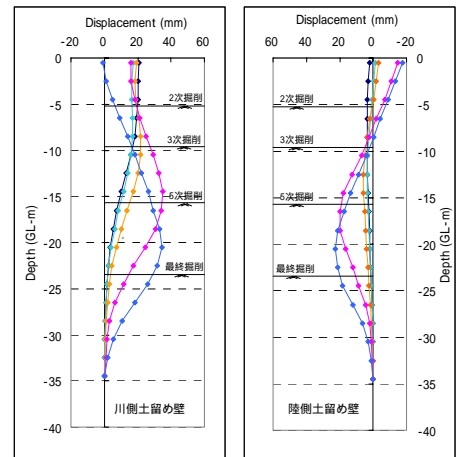
4. 結論

弾粘塑性有限要素解析により、大阪中之島における開削工事のシミュレーションを行った。解析の土留め壁の変位量は計測結果よりも大きな値であったが、土留め壁の変形モードは概ね再現できた。

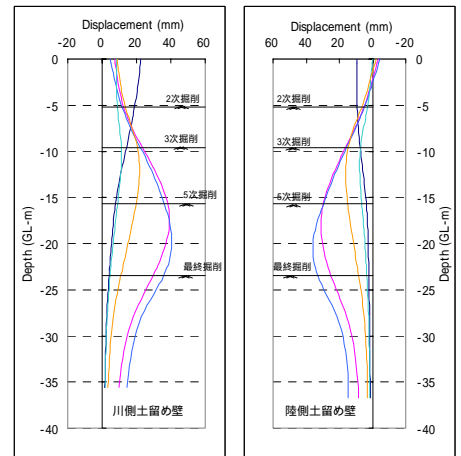
また、解析結果において、沖積粘土層の蓄積粘塑性偏差ひずみ $\gamma^p$ を指標に乱れの度合いを検討した結果、掘削背面において大きな乱れは見られなかったため、安全に施工が行われたと考えられる。

参考文献

- 1) 肥後・岡・中野・向井・武田・天野・長屋, 第42回地盤工学研究発表会, 平成19年度発表講演集, 名古屋, 2007, 2) Kimoto, S. and Oka, F. (2005), *Soils and Foundations*, 45, 2, pp.29-42., 3) Higo, Y., Oka, F., Kodaka, T., and Kimoto, S. (2006), *Philosophical Magazine*, 86, 21-22, pp.3205-3240., 4) 渡部・肥後・長屋・岡, 第41回地盤工学研究発表会, 平成18年度発表講演集, 165, 鹿児島, 2006, 5) 肥後・岡・長屋・渡部, 土木学会全国大会, 第61回年次学術講演会概要集, 3-262, 草津, 2006.



(a) 計測結果



(b) 解析結果

図3 土留め壁の変位深度分布図