

III-78 弾塑性応力ひずみ時間関係式に基づく粘土地盤の経時変形解析

長崎大学 正員 ○ 棚橋 由寿
同 正員 伊勢田哲也

1. まえがき

近年道路工事の大規模化にともない、20~30m におよぶ厚の軟弱地盤上に4m以上の高盛土を築造するケースが増えてきている。このような盛土は盛土築造中にすべり破壊を生じたり、破壊しなくても交通開放後長時間にわたり沈下が続く。道路本体の維持もさることながら、周辺地盤の沈下にもなるような保岸問題もからみ深刻な問題を引き起こしている。周辺地盤をも含めた二次元的な経時変形挙動の解析手法の確立は土木工学上の急務の問題であるが、この方面の研究は未だ数える程しかないのが実情である。本報告は上記の事情をふまえ、先に報告した弾塑性応力ひずみ時間関係⁽¹⁾を有限要素法へ適用し、福岡県遠賀郡国道3号バイパスを対象に、現場の実測データと解析結果の比較検討により、その有用性を確かめたものである。

2. 弾塑性応力ひずみ時間関係式

弾塑性応力ひずみ時間関係式の誘導過程は先の報告⁽¹⁾に詳しいので、ここではFEM荷重増分法プログラムに組み込んだ平面ひずみ条件の増分式を掲げておく。(y方向を平面ひずみ方向)

$$\{d\sigma\}^t = \mathbf{L}_p \mathbf{D}' \mathbf{L}_p^t \{d\epsilon\} \quad (1)$$

$$\text{ここに } \{d\sigma\} = \{d\sigma_x, d\sigma_z, d\tau_{xz}\}, \quad \{d\epsilon\} = \{d\epsilon_x, d\epsilon_z, d\epsilon_{xz}\}$$

$$\mathbf{L}_p = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix}$$

なお左式中の θ は最大主応力増分軸とx軸と時計まわりになす角度であり、次式で与えられる。

$$\theta = (1/2) \cdot \arctan \{2d\tau_{xz} / (d\sigma_x - d\sigma_z)\}$$

$$\mathbf{D}' = \frac{1}{Q} \begin{bmatrix} P_{22} & -P_{12} & 0 \\ -P_{21} & P_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q/P_{33} \end{bmatrix}$$

$$\text{ここに } Q = \det \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix},$$

$$P_{11} = C_{11} - C_{12} \cdot C_{13} / C_{22}$$

$$P_{12} = C_{23} (1 - C_{12} / C_{22})$$

$$P_{21} = C_{31} (1 - C_{23} / C_{22})$$

$$P_{22} = C_{33} - C_{12} \cdot C_{23} / C_{22}$$

$$P_{33} = 2 (C_{33} - C_{31})$$

$$C_{11} = \{(S_c + 3S_s) + \sqrt{2}S_d\} / 9, \quad C_{23} = \{(2S_c - 3S_s) - 2\sqrt{2}S_d\} / 18$$

$$C_{22} = (S_c + 3S_s) / 9, \quad C_{31} = \{(2S_c - 3S_s) + 2\sqrt{2}S_d\} / 18$$

$$C_{33} = \{(S_c + 3S_s) - \sqrt{2}S_d\} / 9, \quad C_{12} = (2S_c - 3S_s) / 18$$

$$S_c = S_c^e + S_c^{vp} = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{1}{p} \left[\kappa + (\lambda - \kappa) (t/t_{jc})^{m_c} \right]$$

$$S_d = S_d^e + S_d^{vp} = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{1}{p} \left[0 + \mu (t/t_{jd})^{1-m_d} \right] \quad (2)$$

$$S_s = S_s^e + S_s^{vp} = \frac{1}{p} \left[\nu + \frac{\mu}{1+e} \cdot \frac{N_o}{H_o - \eta} (t/t_{js})^{1-m_s} \right]$$

所要のパラメータは12個

弾塑性パラメータ: $\kappa, \lambda, \mu, \nu, H_o, N_o$

時間パラメータ: m_c, m_d, m_s

寸法効果パラメータ: n_c, n_d, n_s

ただし上式中の関係比 e は次の漸化式に従う。 $e_i = e_{i-1} - d\epsilon (1 + e_{i-1})$ また(2)式中の t_{jc}, t_{jd}, t_{js} は次式で表わされる。 $t_{jc} = (H_e/H^*)^{n_c} \cdot t_f$, $t_{jd} = (H_e/H^*)^{n_d} \cdot t_f$, $t_{js} = (H_e/H^*)^{n_s} \cdot t_f$

ここに H^* は供試体の有効排水距離、 H_e は各要素の有効排水距離、 t_f は室内試験における一荷重増分あたりの測定時間である。また(2)式中の p, η はそれぞれ次式で与えられる。

$$p = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3, \quad \eta = \{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2)\}^{1/2} / (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = 8/p$$

最後に降伏条件式は圧縮に対して $\xi = \xi_m$ 、せん断に対して $\eta = \eta_m$ (3)。ここに $\xi = P/p_o$ で、平均主応力を大気圧 p_o で除いた無次元量、 η は正八面体応力比、 ξ_m, η_m はそれぞれ ξ, η が現在までに経験した最大値である。したがって(2)式は $\xi = \xi_m$ かつ $d\xi > 0$ and $\eta = \eta_m$ かつ $d\eta > 0$ の場合の式であり、 $\xi < \xi_m$ または $d\xi < 0$ のときは $S_c^{vp} = 0$, $\eta < \eta_m$ または $d\eta < 0$ のときは $S_d^{vp} = S_s^{vp} = 0$ を代入する。

3. 解析方法および条件

i) 土質特性 遠賀地区海成粘土の土性および等方圧密試験と平均主応力一定試験より求まる解析に所要のパラメーターの値をそれぞれ表-1、表-2に示す。なお寸法効果パラメーターは今後実験的に決定されるべきもので、本解析では $n_c = n_d = n_s = 1.6$ と仮定した。

ii) 解析モデル 現場は深度18~24mにあぶる三月の粘土地盤で基礎は傾斜している。解析モデルを図-1に示す。図中の影線部分はサンドドレーン処理区域と意味する。

iii) 解析方法 ドレーン処理区域内の要素は平均有効排水距離として $H_e = (d_e - d_w)/4$ を採用した。

ここに d_e はドレーン等価有効半径、

d_w はドレーン径。ドレーン区域外

の要素はオトリ近似としてドレーン処

理区域の端までの水平距離と、地表

面までの鉛直距離を比較し、小さい

方の値を要素の H_e とした。また粘

土各層には資料⁽²⁾に基づき、各々異なる土性を与

えている。なお道路盛土高は3.9mで、盛土を4

段に分け、各増分計算で経過時間 t を(2)式に

代入し逐時解析を行なっている。

表-1 試料土性 (深度7.8m)

比 重	G_s	2.66
自然含水比	w_n	120~140 %
液性限界	w_L	143 %
塑性限界	w_p	38 %
塑性指数	I_p	105 %
固相単位重量	γ_s	13.0~14.2 kN/m ³
間隙比	e	3.20~3.60

表-2 所要パラメーター

弾 性 性 パラメーター	時 間 パラメーター
$\lambda = 0.743$	$m_c = 0.470$
$\kappa = 0.029$	$m_d = 0.359$
$\mu = 0.536$	$m_s = 0.494$
$\nu = 0.051$	寸 法 効 果 パラメーター
$M_0 = 0.639$	
$N_0 = 0.407$	
	$n_c = 1.6$
	$n_d = 1.6$
	$n_s = 1.6$

iv) 解析条件

解析したケースはまとめて表-3に示す。

表-3において○印は対応するひずみ項を考慮、×印は対応する塑性ひずみ増分を neglect したことを意味している。CDSは基本計算で、変形の要因分析のためのその他のケースも計算している。例えばDSは圧密項=平均主応力増分 dp に起因する塑性体積ひずみ増分 du_v^p を neglect した計算を意味する。

4. 解析結果と考察

盛土セクターにおける時間次下量曲線を図-2に示す。図中白丸を実線で結んだのが実測値、黒丸を実線で結んだのがFEM計算値、細実線が慣用二次元圧密計算値である。FEM計算値は両者の

中間に位置し、盛土施工開始から交通開放される時点までは実測値との対応は良好である。またS.51.8月実測再開後の両者の曲線もほぼ平行であり、その差約30cmが交通荷重による動的な沈下と起因するものと考えられる。図-3は地盤変位図の一例である。図はS.56.2月時のCDSとDSの計算値をプロットしたものであり、その差が圧密項、変形に寄与した成分とみなせる。執教の都合で解析結果の詳細とその考察は当日会場で報告する予定である。なお計算には九大大型

計算機セクター FCOM M-200 を利用したことを附記する。また未筆の資料⁽²⁾を提供頂いた建設省九州地建、基礎地盤コンサルタント他多くの方々に深謝の意を表します。

引用文献: (1) 棚橋、伊勢田; 才16国土工学学会研究発表会議要録, 5月, 1981 (2) 建設省九州地建九州国道工事事務所他; 遠賀地区軟弱地盤換填業務報告書, 1980

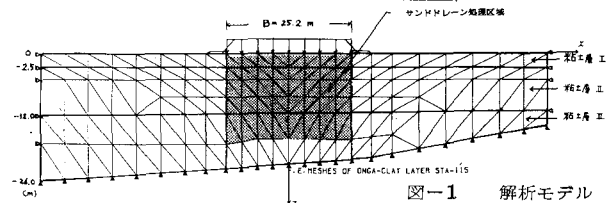


図-1 解析モデル

表-3 解析条件

記 号	圧密項 (C)	ダイレタンシー項 (h)	せん断ひずみ項 (s)
CDS	○	○	○
CD	○	○	×
DS	×	○	○
CS	○	×	○
C	○	×	×
D	×	○	×
S	×	×	○

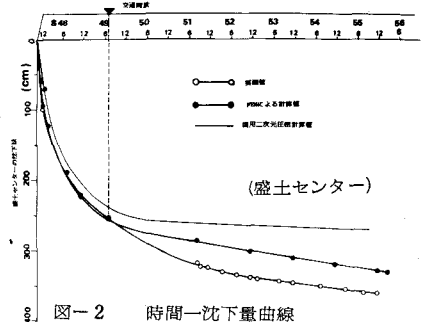


図-2 時間-沈下量曲線

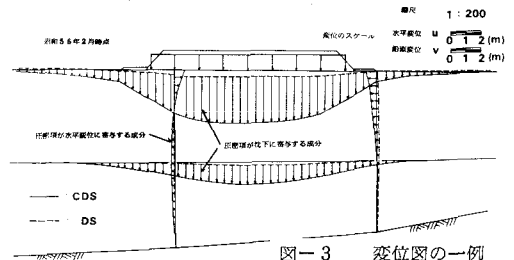


図-3 変位図の一例