

有機質土が優勢な軟弱地盤の盛土施工における弾塑性 FEM の解析値と実測値との比較・検討

興亜開発(株) 正会員 ○菅野康範 西原彰夫

茨城大学 正会員 村上哲 フェロー 安原一哉

1. はじめに

有機質土が厚く堆積する本解析対象地盤では盛土施工中沈下が著しく、さらに盛土周辺地盤に隆起が生じた。通常、変形量の算定には簡易判定¹⁾が用いられるが、FEMにより精度良く変形量・変形モードが推定できれば、後の計画・施工・対策において非常に有益である。本稿は、下負荷面の概念を導入した修正カムクレイに基づく弾塑性解析を行い、その結果を実測された沈下・変形量と比較・検討したものである。

2. 解析対象地域の地盤特性

本稿の解析対象地盤は図-1に示すように、地表面からおよそ10mにわたり軟弱粘土層が堆積する地域であり、その半分以上を自然含水比 $w_n=300\sim600\%$ のAp(以降、図-1、表-1の記号参照)が占める。図-1は軟弱粘土層対象のボーリングおよび三成分コーン貫入試験の結果から作成した盛土構築後550日後の地盤内変形図を示したものである。

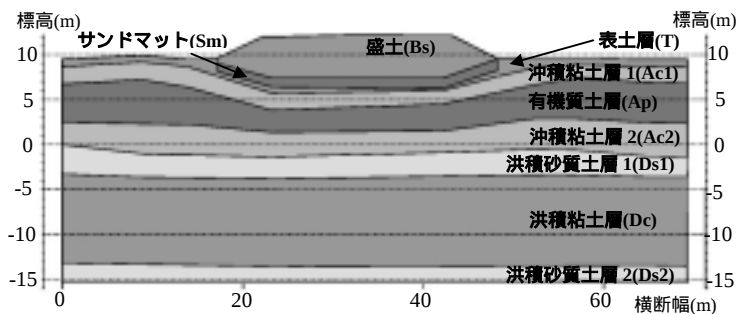


図-1 解析対象地盤の土質断面図

3. 弾塑性モデル(下負荷面を考慮した修正カムクレイモデル)の概要および解析条件

土骨格の変形を表す構成モデルとして、橋口²⁾によって提案された下負荷面弾塑性構成モデルを用い、降伏関数に修正カムクレイモデルを用いた。このモデルでは、従来の古典的弾塑性構成式では表現することが出来なかった繰返し時の塑性変形を表現することが可能であるだけでなく、応力・ひずみ関係を滑らかに表現でき、より現実的な解析を行うことができるものである。以下に下負荷面を考慮した応力・ひずみ関係³⁾を示す。

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} \quad (1)$$

$$D_{ijkl} = E_{ijkl} - D_{ijkl}^p \quad (2)$$

$$E_{ijkl} = \tilde{\lambda} \delta_{ij} \delta_{kl} + \tilde{\mu} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (3)$$

$$D_{ijkl}^p = \frac{E_{ijmn} n_{mn} n_{pq} E_{pqkl}}{n_{mn} E_{mnpq} n_{pq} + n_{mn} \sigma'_{mn} \left(\frac{n_{pp}}{D_c} + \frac{U}{R} \left\| \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right\| \right)} \quad (4)$$

$$n_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \left/ \left\| \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right\| \right. \quad (5)$$

$$f = p' \left\{ \left(\frac{\eta'}{M} \right)^2 + 1 \right\} \quad (6)$$

$$\eta' = \frac{q}{p'}, q = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma'_{ij} - p' \delta_{ij}) (\sigma'_{ij} - p' \delta_{ij})}, p' = \frac{1}{3} \sigma'_{ii} \quad (7)$$

$$D_c = \frac{\lambda_c - \kappa_c}{1 + e}, R = \frac{f(\sigma')}{p'_y}, U = -\mu_R \ln R \quad (8)$$

表-1 解析に用いたパラメータ

盛土およびサンドマットの荷重						5.28 tf/m ²		
土質	記号	層厚(m)	M	λ	κ	ν	μ_d	k/γ_w
沖積粘土-1 および表土層	Ac1 T	3	0.805	0.634	0.073	0.333	40.0	7.21×10^{-3}
有機質土-1	Ap1	2	1.200	1.549	0.197		20.0	1.44×10^{-2}
有機質土-2	Ap2	2	1.200	2.834	0.280		10.0	
沖積粘土-2	Ac2	4	0.891	0.313	0.035		70.0	2.08×10^{-3}
洪積砂質土-1	Ds1	2	1.500	0.010	0.005		10.0	1.00×10^{-1}
洪積粘土	Dc	10	1.059	0.326	0.007		50.0	3.34×10^{-1}
洪積砂質土-2	Ds2	3	1.500	0.010	0.005		10.0	1.00×10^{-1}

ここで、 σ'_{ij} は有効応力テンソル、 $\dot{\sigma}'_{ij}$ は有効応力速度テンソル、 $\dot{\epsilon}_{kl}$ はひずみ速度、 $\tilde{\lambda}$ と $\tilde{\mu}$ はラメ定数、 λ_c は圧縮指数、 κ_c は膨潤指数、 M は限界状態応力比、 η' は有効応力比、 e は間隙比、 p'_y は圧密降伏応力、 μ_R は下負荷面パラメータであり、本稿では水-土骨格連成有限要素解析方法⁴⁾に上記の弾塑性構成モデルを組み込んだ数値解析を行った。表

-1は室内土質試験結果を基に決定した解析に用いる材料パラメータである。なお、Tは耕作土(田畑)であるが、本解析ではAc1と同等の地盤物性と仮定した。さらに、Apは層の上下で大きく物性が変化するので、上下層に分けた。解析モデル地盤は、盛土施工前のボーリングおよび三成分コーン貫入試験結果から作成した土質断面図より片断面を作成し、盛土およびSmは分布荷重として与えた(表-1)。対象地域の地下水位は地表面より-0.3m付近で

キーワード 弾塑性解析 有機質土 軟弱地盤 変形 沈下

連絡先 〒130-0022 東京都墨田区江東橋 5-3-13 興亜開発株式会社 TEL. 03-3633-7351

あるので圧密沈下時の盛土体の沈下に伴う浮力補正を考慮し分布荷重を決定している。図-2は実際の盛土施工の実績であり、これをもとに時間ステップを与えた解析を行った。図より短期間に盛土が構築されたことが分かる。

4. 解析値と実測値の比較・検討

図-3より、盛土施工による地盤沈下は、ほぼ軟弱粘土層で発生していると考えられる。さらに表-2も併せると、 A_p が盛土施工による地盤沈下に支配的であることが分かる。表-2の各土層の解析および測量結果から得た沈下量を比較すると、各土層の沈下量が総沈下量に占める割合は解析および測量結果ではほぼ同等であるので、本稿で用いた弾塑性構成式は土質特性を十分表現可能であると考えられる。図-4をみると解析および測量の総沈下量に0.7m程度の違いが生じている。これは解析においてTをAc1と仮定したこと、 A_p における分解の進んでいない植物繊維の混入による土の不均一が要因の1つと考えている。また、解析と同じパラメータを用いた $e-\log p$ 法による沈下計算結果も併せて示している。両者のシミュレーション結果を比較すると総沈下量はほぼ一致するものの、沈下履歴は解析結果のほうが滑らかに表現できていることが分かる。

隆起量の実測値は沈下量と違い、隆起発生後から測量を行っている。そのため隆起発生以前の測量値がなく、絶対隆起量が求められていないので、解析および測量結果の隆起量の変動履歴に関して検討を行った。解析では盛土の剛性は考慮されていないものの、図-5ののり尻より2mの解析結果プロットはそれに伴う巻き込み沈下をよく表現しており、さらに測量結果ともほぼ一致する。のり尻より5, 10, 15m地点の両者の結果は、地盤変形の影響が最も小さい15m地点ではほぼ一致している。しかし現地調査の際、隆起の大きさが目立った5, 10m地点の解析結果の300日以降は良く一致しているが、盛土施工後(220~300日)の期間はバラツキがみられる。その理由として本解析は微小変形解析を実施しており、 A_p のような大変形が生じる土質の変形挙動を十分に表現できなかったことが考えられる。

5. まとめ

本解析結果より、各土層の沈下量の傾向は測量結果と概ね一致し、本解析モデルの有効性が示された。隆起傾向は、測量結果をほぼ表現できたが、実際に隆起が著しい地点の表現は不完全であった。今後は盛土のような不飽和土の挙動、有機質土のような変形モードが大きい土質を考慮した構成式の適用について検討していきたい。

参考文献 1)日本道路協会：道路土工・軟弱地盤対策工指針，pp.75-78。

2)橋口公一：最新塑性学，朝倉書店。 3) S. Murakami and K. Yasuhara：Deformation Analysis of Light-weight Breakwater on Soft Clay, Proc. of BGA International conference on Foundations-Innovations, pp.675-684, 2003。 4)赤井浩一・田村武：弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析，土木学会論文報告集，第269，pp.95-104，1978。

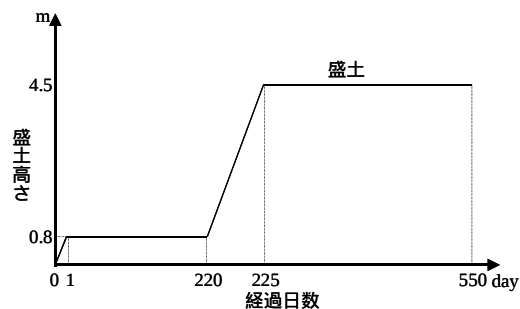


図-2 盛土施工実績

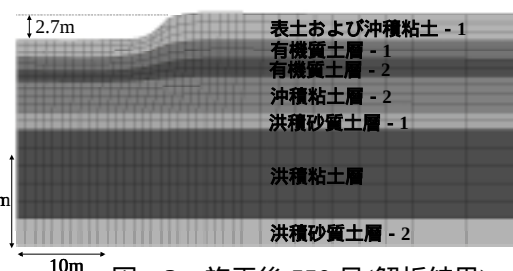


図-3 施工後550日(解析結果)

表-2 解析結果と測量結果の比較

土質	記号	測量結果		解析結果		全沈下量に対する各土層の沈下量の割合(%)	
		層厚(m)	沈下量(m)	沈下量(m)	測量結果	解析結果	
沖積粘土層-1 および表土層	Ac1 T	3	0.60	0.96	28.6	36.8	
有機質土層-1	Ap1	2	1.00	0.48	47.6	46.7	
有機質土層-2	Ap2	2		0.74			
沖積粘土層-2	Ac2	4	0.50	0.43	23.8	16.5	

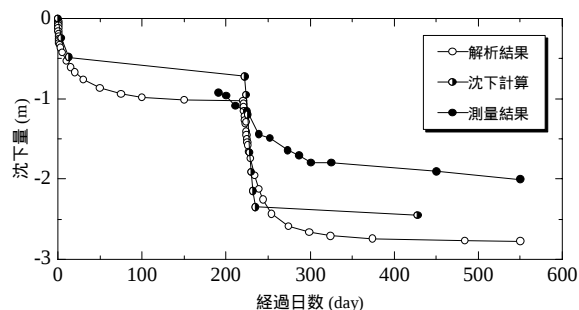


図-4 経過日数と盛土中央の沈下量の関係

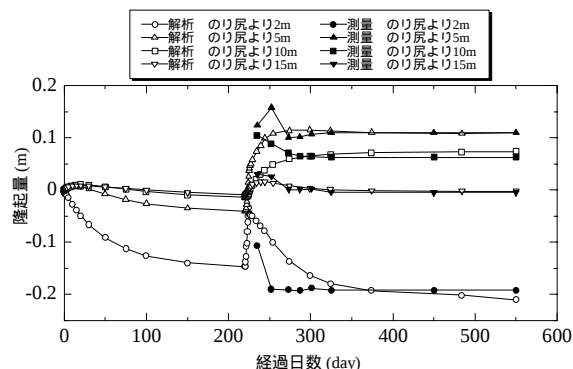


図-5 経過日数と盛土周辺地盤隆起量の関係