

段階盛土における地盤挙動の解析手法に関する研究

西林 清 茂 上野 孝 之
杉江 茂 彦 中尾 通 夫
(本社 電子計算センター)

Study on Ground Behavior Analysis Method for Embankment Constructed in Layers

Kiyoshige Nishibayashi Takayuki Ueno
Shigehiko Sugie Michio Nakao

Abstract

The construction method of building in layers is applied to high embankments on soft ground to ensure stability of the ground. Generally, slope stability analysis and one-dimensional consolidation analysis are used to grasp the behavior of the ground to be banked in layers before construction is started. The authors performed FEM analysis on behaviors of the ground for both undrained and consolidated conditions. In these analysis, non-linear elastic analysis with Duncan-Chang's tangential Young's modulus is applied for undrained conditions, and two-dimensional consolidation analysis by Biot's theory for consolidated conditions. This report gives a summary of the analysis method, an example of calculation by this analysis method, and the applicabilities of the method of predicting failure obtained from the results of calculations.

概 要

軟弱地盤上の高盛土の施工では、安定性を確保するために段階盛土施工法が適用されている。段階盛土における地盤挙動を施工前に予測解析するには、従来スベリ安定解析と圧密解析が用いられているが、今回有限要素法による非排水変形解析と圧密解析を合わせて解析できる手法を検討した。この解析手法では非排水変形の解析にはDuncan-Changの接線弾性係数式を用いた非線形弾性解析を、圧密解析にはBiotの理論に基づく二次元圧密解析を適用している。

この報文では、解析手法の概要を述べるとともに、軟弱地盤上の盛土の数値解析、およびその結果に基づいて把握された破壊予測手法の適用性について報告している。

1. まえがき

軟弱地盤上の盛土工事においては、地盤のスベリ破壊により盛土に著しい変状が生じる危険性を常に予想しておく必要がある。そこで、施工時には各種計器を用いた動態観測を実施し、地盤の破壊を予測する方法、いわゆる情報化施工が一般的に行なわれている。

著者らも実際の軟弱地盤上の盛土工事に提案されている破壊予測手法を適用し、これらの有効性を確認するとともにいくつかの問題点を把握¹⁾した。

ところで、盛土荷重による軟弱地盤の安定問題を検討する場合、地盤内の応力、変形を把握することが重要で

ある。今回は、有限要素法を用い、段階施工を考慮した軟弱地盤の変形解析を試みた。

この解析では、盛土荷重による即時変形に対しては、Duncan-Changの接線弾性係数式を用いた非線形弾性解析を、また圧密変形に対してはBiotの理論に基づく多次元圧密解析を適用した。なお、段階盛土では即時変形の解析と圧密解析を荷重段階ごとに繰り返す必要があるため、中継プログラムを作成し解析した。

この報文では、解析手法の概要を述べるとともに、軟弱地盤上の盛土の数値解析、およびその結果に基づく破壊予測手法の適用性について報告する。

2. 解析手法の概要

今回の解析は、載荷直後に即時的に生じる非排水変形とその後時間の経過とともに生じる圧密変形とに分けて解析する方法を用いた。図-1に、この解析方法を段階盛土モデルに適用した時のフローチャートと解析プログラムの構成を示す。なお、解析はモデル形状(帯状載荷)を考慮し平面ひずみ条件とした。以下、解析に用いた理論の概要を示す。

2.1. 非排水変形(即時変形)解析

土の応力とひずみの関係は、拘束応力に大きく依存し、非線形性を示す。この特性を考慮し、次式に示す Duncan-Chang²⁾の接線弾性係数式を用いる非線形弾性解析を行なった。

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

ただし、 $E_i = K \cdot Pa (\sigma_3/Pa)^n$

ここに、 E_t : 土の接線弾性係数 E_i : 土の初期接線弾性係数、 σ_1, σ_3 : 最大・最小主応力、 K, n : E_i 決定のための実験定数、 R_f : 破壊比、 C, ϕ : 強度定数、 Pa : 大気圧を示す。

盛土荷重の増加により地盤内に発生する過剰間ゲキ水圧は、各位置の全応力の増分から算定できる。この算定には、以下に示す Skempton による提案式を用いた。

$$\Delta u = B \cdot [\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 A, B は実験定数を示す。

2.2. 圧密変形解析

有限要素法による Biot の多次元圧密方程式の解析は、Sandhu & Wilson, Christian & Boehmer などいくつかの研究が報告されている。この解析では、Sandhu & Wilson の方法を用いた。基礎方程式を以下に示す。

応力の釣り合い式

$$[K] \{u\} - [C] \{h - h_0\} = \{F\} \dots\dots\dots(3)$$

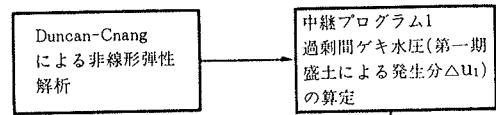
間ゲキ水の連続式

$$[D] \frac{\partial}{\partial t} \{u\} + [S] \frac{\partial}{\partial t} \{h\} + [A] \{h\} = \{Q\} \dots\dots\dots(4)$$

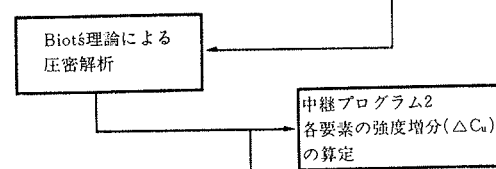
ここに、 $[K]$: 剛性、 $[C]$ 、 $[D]$: 飽和度、 $[S]$: 間ゲキ率、 $[A]$ は透水に関する各マトリックスを示す。また、 $\{u\}$: 変位、 $\{h\}$ 、 $\{h_0\}$: 間ゲキ水圧、 $\{F\}$: 外力、 $\{Q\}$ は流量に関する各ベクトルを示す。

圧密解析では、非排水変形解析で求められた過剰間ゲキ水圧と変位を初期条件とした。なお、解析にあたり各節点における過剰間ゲキ水圧の算定は、山上、植田の方法³⁾を参考として、各節点で会合した要素の過剰間ゲキ水圧の平均値をその節点の過剰間ゲキ水圧とした。また、

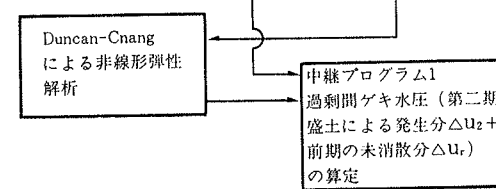
①第一期盛土の非排水変形の解析



②第一期盛土の圧密変形の解析



③第二期盛土の非排水変形の解析



④第二期盛土の圧密変形解析

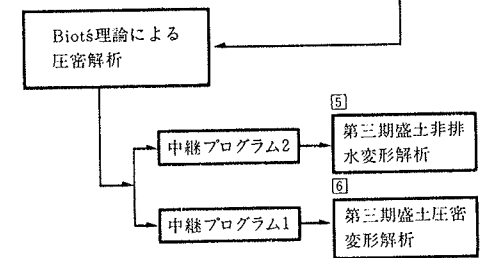


図-1 解析フローとプログラムの構成

上述の値と前段階の未消散の過剰間ゲキ水圧の和を各盛土段階の圧密変形解析における過剰間ゲキ水圧の初期値とした。

ここで、非排水変形解析の結果の読み込み、節点過剰間ゲキ水圧の算定、および圧密解析の初期値のデータ・ファイル作成については、中継プログラムを用い自動処理を行なうものとした。

圧密放置期間の地盤の強度増加は、圧密に伴う平均主応力の増分値に強度増加率 (C_u/P) を乗じて求め、次段階の盛土時の非排水変形解析にその圧密放置の効果を反映させた。

3. 想定盛土による変形解析

2章で述べた解析手法を用いて、想定盛土による地盤の変形解析を行なった。盛土は図-2に示すような層厚6mの均一な粘性土地盤上に高さ6mの台形盛土の施工を想定した。

盛土施工は厚さ2mの盛土を3段階に分けて施工する

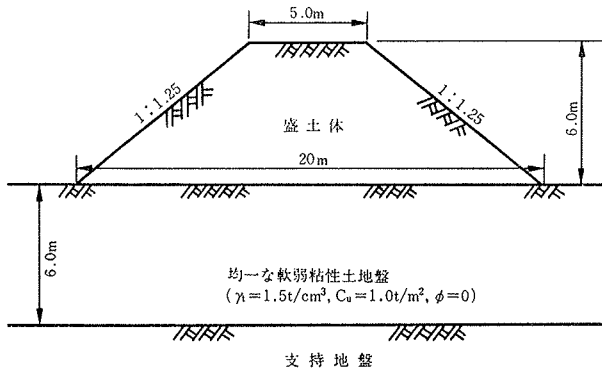


図-2 想定盛土の形状図

方法を想定した。解析にあたっては、盛土は瞬時的に行なわれることとし、その後、120日の圧密放置期間を設定することとした。また、この圧密を考慮した段階盛土と比較するために圧密を無視した非排水解析を急速盛土と仮定して解析している。解析に用いた有限要素モデルおよび地盤条件を図-3に示す。

急速盛土の解析より得られた盛土下地盤の沈下量と法先部の側方変位量の分布を図-4に示す。当然のことであるが、沈下量と側方変位量は、盛土が進むにつれて増加しており、盛土厚が2.5mから3.0mにいたる時点で沈下量の増加が大きい。有限要素解の局部破壊現象が盛土厚2.5m時点で発生し、盛土厚3.0mで急激に拡大している状況を考え合わせるとすれば、この付近で破壊が発生するものと思われる。

なお、地盤の変形を連続体として仮定する有限要素解析では、破壊後のすべり面を有するような変形は表現できない。したがって、全般破壊に至りすべりが発生する場合においては、解析上の仮定が実状とは異なったものとなることに注意が必要である。

上記の圧密を伴わない非排水解析結果を参考にして、このテーマである圧密と非排水変形を考慮した段階盛土施工の解析では、地盤に塑性破壊が生じないように各段階の盛土厚を2.0mと定めた。

盛土中央部の地盤の沈下量、法先部の地盤の側方変位量、および盛土中央部（深度3m）の間ゲキ水圧の経時変化を図-5に示す。

盛土工事の動態観測では、盛土直後に即時沈下と側方変位の発生および過剰間ゲキ水圧の上昇がみられる。

同図は実際の地盤で見られる現象と同様の傾向を示している。

図-6に各盛土段階の沈下量と法先部の側方変位量の分布を示す。各段階において非排水変形と圧密変形が繰り返して生じることによって、沈下は常に進行する。しか

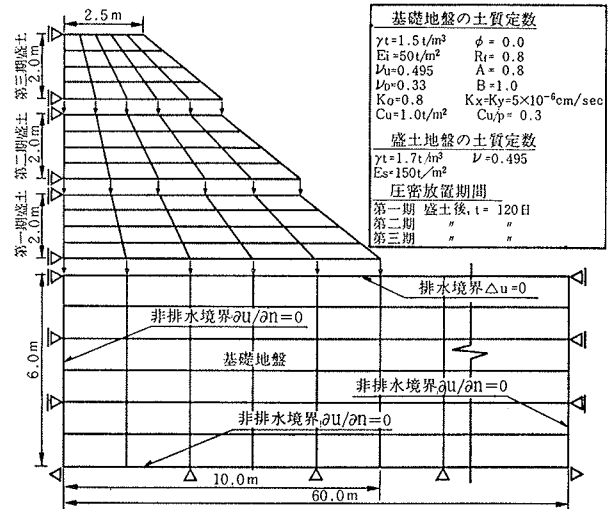


図-3 有限要素モデルと地盤条件

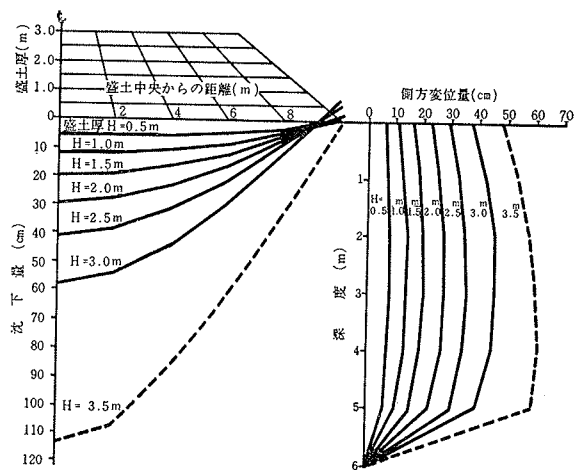


図-4 地盤の変位分布

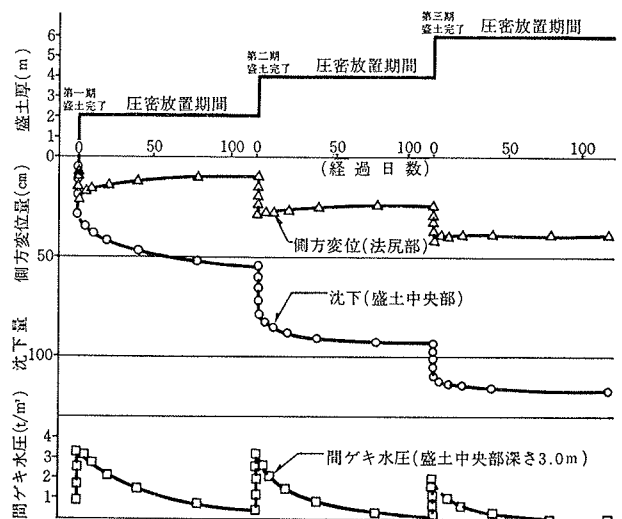


図-5 沈下・側方変位・間ゲキ水圧の経時変化

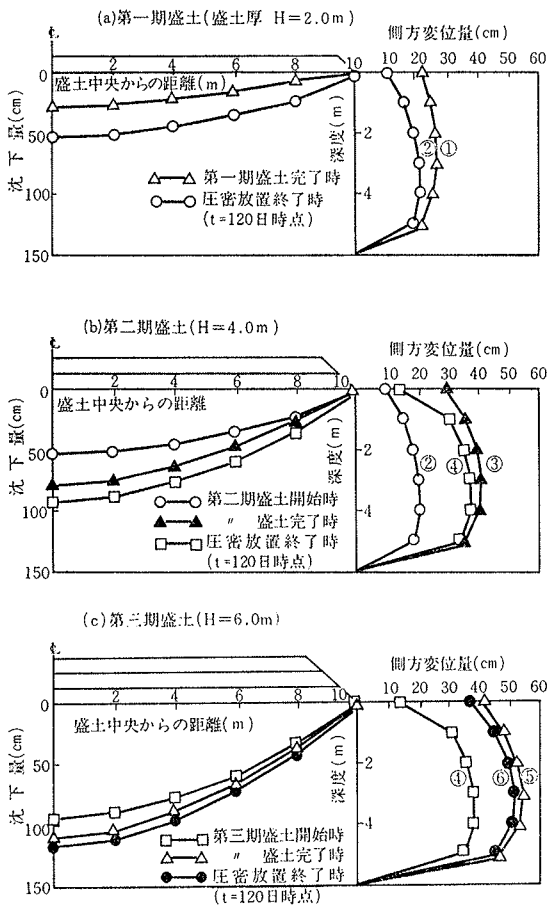


図-6 各盛土段階における変位分布

し、法先部の側方変位は非排水変形による外側への変位と圧密に起因する盛土下部への変位が生じて、瞬時載荷時点では盛土の外側方向に変位し、圧密期間に入って徐々に内側方向に変位する。解析では盛土載荷を瞬時に、したがって非排水変形も瞬時に生じると仮定しているため、盛土外側への変位と内側への変位が交互に生じる形となるが、実際では、盛土施工にも時間を要するので合算されたものとなる。この点は今後の課題である。

各盛土段階進行時の沈下量および側方変位量は急速盛土施工(図-4)とは逆に、各段階の両者の増分は減少する方向にあり、圧密による地盤の強度増加が寄与していることが分かり、実際の現象を良く説明している。

図-7に第二期盛土後120日経過時点の圧密によって増加した盛土中央、法先部等での強度分布を参考までに示す。

通常、軟弱地盤上の盛土施工においては、施工中の破壊を未然に防ぐために、計測機器による施工管理が行なわれており、管理規準として各種の方法が適用されている。そこで、上記で得られた想定盛土の解析結果をそれらの二つに適用してみた。

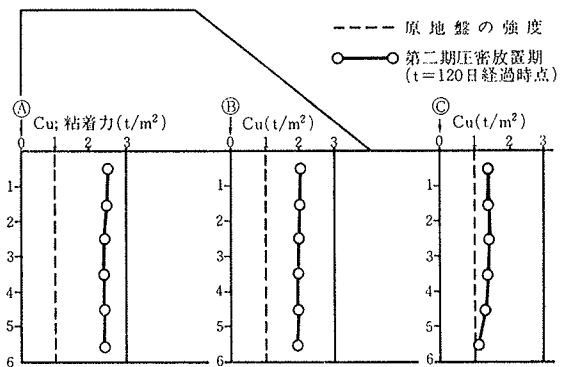


図-7 圧密放置後の地盤強度分布

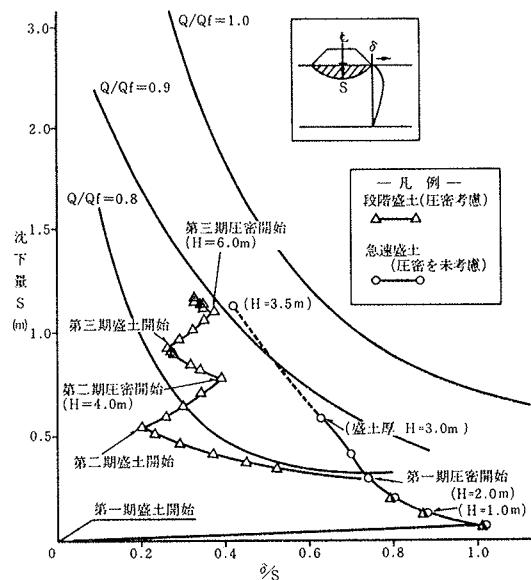


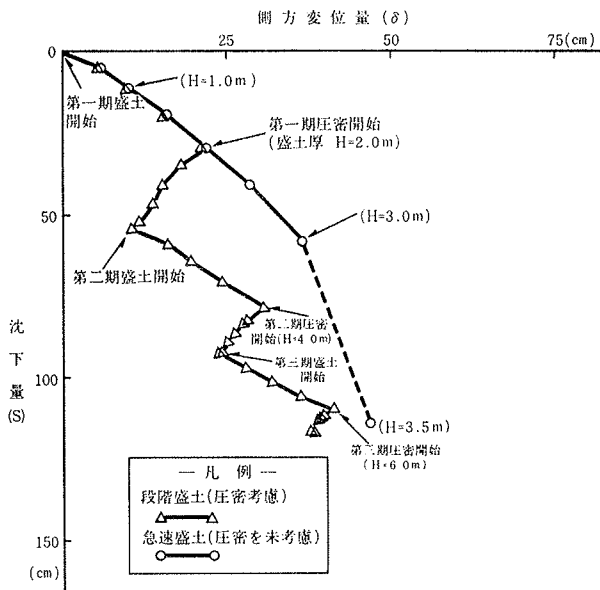
図-8 松尾・川村の管理図

図-8に松尾・川村の管理図を示す。この管理図は図上の変位過程が $Q/Q_f=1.0$ の等値線に達した時点で盛土が破壊する場合は多いとされ、この等値線は破壊規準線と称されている。

圧密放置期間を設けない急速盛土の場合では、変位過程は常に Q/Q_f 値が増加する方向に向っており、盛土破壊が発生したと考えられる盛土厚 $H=2.5\sim 3.0\text{m}$ の時点では、 $Q/Q_f=0.85\sim 0.90$ となる。実際には盛土施工中においても圧密が生じるため、破壊時点は後にずれることになる。

一方、圧密を考慮した段階盛土の場合では、載荷時は Q/Q_f 値が増加し、不安定な状態に移行するが、圧密放置すると安定化の方向に向う。ただし、今回の例では圧密が進行して δ/s の減少が顕著にみられるものの、安定度合の増加はそれほど大きくない。

次に、図-9に富永・橋本の管理図を示す。この管理



図—9 富永・橋本の管理図

図では、勾配の増減により安定あるいは不安定な状態への移行を把握するものである。急速盛土の場合では、変位過程は破壊が生じたと考えられる盛土厚 $H=2.5\sim 3.0\text{m}$ の時点まで、ほぼ一定の勾配を保ちながら右下に向っている。段階盛土では、各盛土段階の载荷時点において変位過程は急速盛土の場合と同様に右下に向うものの、圧

密放置期間に入ると左下方向に反転して安全側に向う様子を明確に示している。

4. あとがき

段階盛土における地盤強度の有限要素法解析を行なうに際し、非排水変形には非線形弾性解析を、圧密変形には Biot の多次元圧密解析を組合わせて解析できる手法を解析した。その応用として想定盛土による解析を行ない、圧密を考慮した軟弱地盤の挙動を試算してみた。その結果、実際にみられる地盤の挙動を良く説明できることが確認された。今後は、この解析手法により、軟弱地盤上の盛土施工における破壊予測手法を詳細にわたり検討して行く考えである。

参考文献

- 1) 西林, 上野, 杉江: 軟弱地盤上の堤体盛土に伴う情報化施工とその評価, 大林組技術研究所報, No. 29, (1984), pp. 93~97
- 2) Duncan, J. M. and Chang, C. Y: Nonlinear Analysis Of Stress And Strain In Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM5, (1970), pp. 1629~1653
- 3) 山上拓男, 植田康宏: 多次元圧密の非連成数値解析について, 土木学会論文報告集, No. 316, (1981. 12), pp. 87~96