

圧縮性の高い地盤における非排水挙動の予測

右古屋文 松尾 稔 右古屋文 鈴木 章裕
右古屋文 川村国光 熊谷組 並木 茂房

1. まえがき: 本報告は、圧縮性の高い地盤の非排水挙動に注目し、過去に盛土施工が行なわれた現場観測例と Duncan-Chang らに基づく有限要素法(以下 F.E.M.)による計算例とを比較検討してゐるのである。また、解析の中で適用した初期接線係数についても若干の考察が行なわれている。

2. 非線型応力-ひずみ関係と考慮した有限要素法: 今回の非線型応力-ひずみ関係を考慮した F.E.M. は上記 Duncan-Chang の方法によるイソパラメトリック要素を用いている。すなわち、各応力レベルの接線弾性係数 E_{it} は、次式(1)で評価されている。

$$E_{it} = \left\{ 1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{(2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi)} \right\} \cdot K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_1}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 p_a は大気圧、 K 、 n は定数である。一方、計算に必要な他の変形係数 ν (ポアソン比) は非排水挙動であるため、近似的に 0.5 としている。

3. 初期接線係数 E_{it} についての考察: 今回の解析目的の一つは、一軸圧縮試験から求められた初期接線係数 E_{it} による解析結果と、この E_{it} の三軸圧縮試験の初期接線係数 E_{it} を推定して行なわれた解析結果とを比較検討することである。 E_{it} 、 E_{it} の検討は過去に Ladd と Simons らにより、行なわれている。

Ladd はいろいろな試験法より求められた各種粘性土の接線係数に関して各応力レベルで比較検討を行なっている。それによれば、三軸等方圧密非排水試験(CIU)による $\frac{E_{it}}{E_{cu}}$ は三軸非圧密非排水試験(UU)による $\frac{E_{it}}{E_{cu}}$ の約 5 倍とあり、さらに一軸圧縮試験(U)による $\frac{E_{it}}{E_{cu}}$ の 1/5 倍となったことを発表している。なお、ここで E_{cu} は破壊時の応力比 0.5 の応力レベルで結ばれる初期接線係数であり、 σ_c は圧密圧力、 σ_v は現場垂直有効応力である。一方、Simons はシルト-粘土について後者の関係が約 10 倍程度となることを報告している。さらに、 E_{it} が粘土の物理的、力学的性質に依存していることが予想されるが、D'Appolonia は各種粘性土の E_{it} と非排水せん断強度 C_u との比 $\frac{E_{it}}{C_u}$ をとくに物理的性質との関係で調べた。

その結果、 $\frac{E_{it}}{C_u}$ はとくに塑性指数 I_p と有機質含有量 w に大きく影響され、 I_p や w が大きくなる程、 $\frac{E_{it}}{C_u}$ が小さくなる傾向を示した。図 1 は Ladd の研究成果をもとに試験法の違いによる E_{it} の関連をまとめてみたものである。横軸に E_{it} を求めるための、原点と結ぶ応力レベルと破壊応力の比 $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ をとり、縦軸に CIU による $\frac{E_{it}}{E_{cu}}$ と UU による $\frac{E_{it}}{E_{cu}}$ の比、および U による $\frac{E_{it}}{E_{cu}}$ の比がとられている。なお、CIU による $\frac{E_{it}}{E_{cu}}$ は同一粘土について $\sigma_c \geq \sigma_v$ の条件であればあまり変化しないことが確かめられている。図 1 によれば $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ が $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ に近づくにつれて接線係数の比はともに増加する傾向にあり、とくに応力比

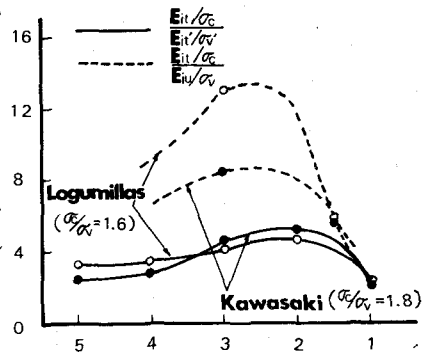


Fig. 1 Tangent modulus ratio versus $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ stress level for variable compression test

このピーク時では $\frac{E_{sh}/\sigma_c}{E_{sh}/\sigma_v}$ は 5~6 倍、 $\frac{E_{sh}/\sigma_c}{E_{sh}/\sigma_v}$ は 8~14 倍となっている。Duncan-Chang によれば定義した E_{sh} は $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3)$ が与えられて大きい値をとるとその接線係数と考えられる。今回、 $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3) > 5$ の範囲であり大きく変化しないとすれば、解析に於いて E_{sh}/σ_c と E_{sh}/σ_v との関係は

$$\frac{E_{sh}/\sigma_c}{E_{sh}/\sigma_v} = 6.0 \quad (2)$$

と予想されるので、以後の計算は式(2)に基づいて計算した。

4. 現場観測結果と解析結果の比較検討： 札幌市郊外にある月寒川盛土の基礎地盤は、事前調査によれば地表面下約 6.0 m まで泥炭が占められている。地盤のフーン指数 q_c は 1.0 kg/cm^2 、自然含水比 w_n 1000% 以上、強熱減量 $70 \sim 95\%$ 、湿潤密度 1 t/m^3 、および比重 G_s 1.4 と泥炭の特徴を備えており、 ρ は圧縮指数 $C_c \approx 8$ 、初期間げき比 $e_0 = 1.2 \sim 1.5$ とおいて圧縮性が高い軟弱地盤である。盛土の初期計画高は 3.5 m とし、施工要度は試験盛土ということと 0.3 m ~ 0.6 m とおいて大きな施工速度であった。なお、盛土材料は砂質ローム土締固め密度 1.5 t/m^3 の盛土であった。月寒川盛土の非排水挙動は本章で述べた Duncan-Chang の非線型弾性解析 F.E.M. によって解析した。その際、初期接線係数 E_{sh} は $E_{sh}/\sigma_v = 25$ と推定された。これによって、 E_{sh}/σ_c は式(2)の関係を用いて、 $\sigma_v = \sigma_c$ とおいて $E_{sh}/\sigma_c = 150$ とおいて決定されるであろう。一方、泥炭の C_u は過去の軟弱地盤の調査結果をもとに、 $C_u \approx 10 \text{ kg}$ と使用し、 $C_u \approx 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の値が採用された。なお、現場を正規圧数状等とみなすことにより先行圧数荷重 σ_v がその初期垂直有効応力となり、初期静止圧係数 K_0 は 1 とした。さらに地表面下深さ 6 m 以上の地盤は $q_c > 6 \text{ kg/cm}^2$ の固いシルト層のため解析の対象に入っていない。計算の結果、局部破壊の進行状況は盛土中央部直下付近からノリ付直下に向かうことが確認され、Höeg & D'Appolonia の現場間げき水圧の推定した状況とほぼ一致する。図 2 は、盛土中央直下の掘下量 d 、ノリ付直下の側方変位量 δ 、および中央下各深さの同じき水圧などを計算し、現場データと比較したものである。なお局部破壊後の接線係数は $1/1000 E_{sh}$ と評価された。図 2 の d は実験値が E_{sh} 、 E_{sh} の値を用いて行なった計算結果より大きいことを示し、一方、 δ は実験値はほぼそれらの中間値にあり d と傾向を異にする。軟弱地盤における間げき水圧の推定については、Skempton, Burland, Höeg, Hanke らはそれぞれ提案式によって計算している。今回は、Burland らは、平面ひずみ条件下で荷重増加によって発生する主応力増加分 $\Delta \sigma_1$ 、 $\Delta \sigma_3$ を計算し、次式(3)から間げき水圧 Δu を推定していることに注目した。

$$\Delta u = \frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3}{2} \quad (3)$$

式(3)の方法で算出された結果が図 2 に同時に示されている。各荷重段階での応力増分より計算された結果に鑑み、地表面から相対的に深くなるほど実験値と計算値がほぼ一致しているものの、地表面近くになると計算値が最大で 1 kg/cm^2 ほど実験値を上回る傾向を示した。

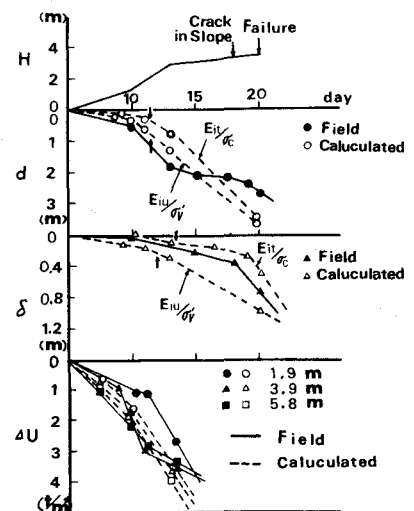


Fig. 2 Comparison of field data and calculated results for settlement (d), pore pressure (Δu) below centerline of embankment and lateral movement (δ) below toe of embankment at Tsukisapau