

繰返しせん断を受ける粘土の変形予測

山口大学工学部 正員○兵動正幸, 村田秀一, 学生員 藤井照久
西日本工業大学 正員 安原一哉

1. まえがき

軟弱な粘土地盤が波浪や交通などの外力を受けるとき、地盤内要素には繰返しせん断応力が長期にわたり作用し、有害な沈下や破壊を生ずることがある。長期の繰返しせん断が作用する間、地盤内の粘土要素は過剰間隙水圧の発生と消散が組み合わされた部分排水状態にあると考えられる。本研究は、このような条件下の地盤の変形を評価するためのモデルを作成し^{1)~3)}、排水を伴う長期繰返しせん断時における地盤の変形量の算出を試みたものである。

2. 長期繰返しせん断を受ける粘土の変形のメカニズム

粘土の長期繰返しせん断に対する変形の主な要因は、次の2つに大別されると考えられる。

(1) 非排水繰返しせん断によるせん断変形

(2) 発生した過剰間隙水圧の消散に伴う体積変化

(1)の要因は、定体積における変形であり体積ひずみは生じないが、方向によって収縮または膨張側の垂直ひずみを与える。(2)は、上昇した間隙水圧の逐次消散に伴う変形であり、変形の進行は粘土の透水性と関係する。

$$\begin{array}{l} \text{Total settlement} \\ \Delta h = \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Settlement due to shear deformation} \\ \Delta h_1 \end{array} + \begin{array}{l} \text{Settlement due to drainage} \\ \Delta h_2 \end{array}$$

図-1 繰返しせん断を受ける粘土地盤の沈下の要因

土は透水係数が小さいので、各サイクルで発生する間隙水圧はそのサイクルでは消散しきれず、いわゆる部分排水状態となることが想像される。しかし、繰返しせん断が長期に及ぶ場合、間隙水圧の生成量が繰返し回数の増加とともに次第に減少して行き、ある時点以降は間隙水圧消散分が発生分を上回るようになって、最終的には間隙水圧は消失すると考えられる。このような間隙水圧の消散により体積ひずみが累積していくのであるが、その量には繰返しせん断によるダイレイタンスが含まれ、かなりの大きさになると思われる。水平地盤の沈下の問題にこの考え方を適用すると図-1のような模式図が考えられる。つまり、全体の地盤沈下は、非排水せん断によるせん断変形の鉛直成分と発生間隙水圧の消散による体積変化の鉛直成分の和で表されることが示されている。

3. 繰返し三軸圧縮試験

上記の2つの要因に基づく変形を評価するために、以下の3つのタイプの繰返し三軸圧縮試験を行った。まず1つは、非排水繰返しせん断試験であり、残留間隙水圧及び残留せん断ひずみの評価を行う。2つ目のタイプは、非排水繰返しせん断後発生した間隙水圧を静的に消散させ、体積変化を調べるものである。その結果から、体積圧縮係数や透水係数等を求める。3つ目のタイプは、排水コックを解放したままで排水を許す形で繰返しせん断を加えるものである。この試験中、載荷速度に比して粘土の透水係数が小さいために、繰返しせん断中供試体内に間隙水圧が分布し、部分排水状態になると考えられる。現地盤でもこれと同じ部分排水状態が想定されるので、この実験は要素試験ではなく模型実験とみなして行う。実験に用いた試料は乱した有明粘土であり、物性値は、 $G_s=2.65$, $w_L=123\%$, $I_p=69$, $C_c=0.70$, $C_s=0.163$, $\phi'=40^\circ$ であった。供試体寸法は、直径3.5cm、高さ8.75cmである。間隙水圧は、下部ペDESTAL中央に埋め込まれた直径3mmのポーラスストーンを通じて間隙水圧計で測定され、排水は供試体側面に巻いたペーパードレーンを通じ下部ペDESTAL側面よりセル外の2重管ビューレットへと行われた。載荷は、初期等方圧密後側圧一定で軸圧を圧縮側片振りで繰返し載荷した。

4. 非排水状態のせん断ひずみと間隙水圧の定式化

非排水繰返し三軸圧縮試験の結果から、残留軸ひずみと間隙水圧について次のような定式化を行った。

$$\langle \text{軸ひずみ} \rangle \quad \varepsilon_a = 0.096 (\Delta \sigma_a / \sigma_c)^{1.745} (\log_{10} 10N)^{1.763} \quad (1)$$

$$\langle \text{間隙水圧} \rangle \quad u_g / \sigma_c = 0.064 (\Delta \sigma_a / \sigma_c)^{1.418} (\log_{10} 10N)^{1.535} \quad (2)$$

次に、ここで得られた残留軸ひずみを用いて、平面ひずみ問題における任意の方向のひずみ成分を評価する方法について述べる。軸対称としての本実験では、側圧 σ_3 が一定で軸圧 σ_1 のみが変化するのに対し、現実には全ての主応力が変動すると思われる。この両者の変動を対応付けるために、いずれも45°面の最大せん断応力を取り出し対応させる。そこで、式(1)を45°面の関係式に改めると、次のようになる。

$$\gamma_{\max} = 0.241 (\Delta \tau_{\max} / \sigma_c)^{1.745} (\log_{10} 10N)^{1.763} \quad (3)$$

この対応から平面ひずみ状態における地盤内の最大せん断ひずみが評価できる。次に、図-2のような軸対称と平面ひずみ問題におけるモールのひずみ円を考える。非排水条件から、軸対称で $\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = 0$ 、平面ひずみで $\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = 0$ という条件が保たれる。したがって、両者に図のようなひずみ円が描かれる。これら2つのひずみ円で互いのせん断ひずみ $\gamma_{\max}$ が対応するものとすれば、 $\gamma_{\max}$ は既知量となる。次いで、平面ひずみでは $\varepsilon_1 = \gamma_{\max}$ であるから最大主ひずみ ε_1 も既知となる。ここで、FEM弾性解析等で主軸方向が得られておれば、いずれの方向のひずみ成分も求めることができる。

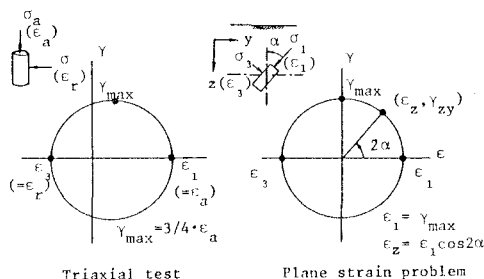


図-2 モールのひずみ円

5. 部分排水繰返しせん断時の変形の評価

粘土の部分排水繰返しせん断時の間隙水圧及び体積ひずみの変化過程を表すモデルとして図-3の概念を仮定する。図のように時刻 t から $t + \Delta t$ において水圧増分 Δu_g を与え、圧密により Δu_g が消失すると考えた。また、その際、体積ひずみが $\Delta \varepsilon_v = m_v \Delta u_g$ で評価される。間隙水圧の発生及びその一部消散の解析は Bookerら⁴⁾が提案した次式によった。

$$\{\nabla\}^T \{k\} \{\nabla u / r_w\} = m_v (\partial u / \partial t - \partial u_g / \partial t) \quad (4) \quad \text{ここに、}\{k\}:$$

透水マトリックス、 r_w :水の単位体積重量、 ∇ :微分演算子。この解析で

求めた体積ひずみは、軸対称では3等分、平面ひずみでは2等分して、非排水の各ひずみ成分と重ね合わせる。

6. 粘土地盤上道路盛土の沈下解析

ケーススタディとして図-4に示す粘土地盤上の低盛土道路に輪荷重5tfの車両が繰返し走行する場合を想定した。応力解析として、図-4の載荷点に鉛直下向きの三角形のバ

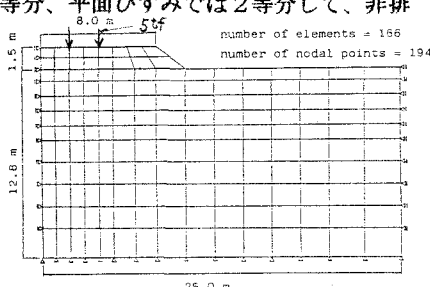


図-4 解析対象地盤

ルス荷重を入力し、FEMによる動的応答解析を行った。上述の方法で沈下量の非排水における成分と発生間隙水圧の排水による成分を重ね合わせ、図-5の結果を得た。しかし、まだ計算結果は現実の沈下量よりかなり小さく現れている。その最大の原因は、本解析が等方圧密後の繰返しせん断試験結果によっているためと思われる。今後、現場の初期応力状態を考慮した実験が必要と考えている。

《参考文献》1)兵動・安原・村田:第31回土質工学シンポジウム論文集,27-32,1986. 2)Hyodo et al: Int. Symp. Geotech. Eng. Soft Soils, Mexico 1987. 3)Hyodo et al: 6th Int. Conf. Num. Meth. Geomech., Austria, 1988, in press. 4)Booker et al: GADFLEA, EERC Report, EERC 76-24, Univ. Calif., 1976.

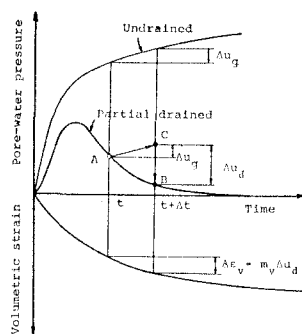


図-3 部分排水せん断の概念

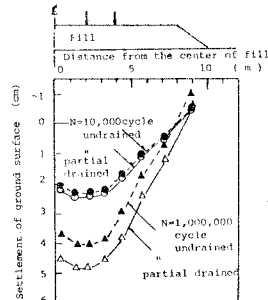


図-5 盛土の沈下量