

液状化における間隙圧上昇の過渡現象モデル

大分高専 ○正 長友八郎
大分高専 佐藤 栄

1. まえがき

液状化における間隙圧の上昇過程については、実験的、理論的に色々な立場から研究が行われている。¹⁾ここでは液状化現象と電気回路における過渡現象との相似性から間隙圧上昇過程の一モデルを提案し、液状化実験の結果からモデルの定式化を試みた。

2. 間隙圧上昇過程と電気回路における過渡現象

規則波を載荷した液状化実験における観察によると間隙圧の上昇過程は三つの過程の組合せである事が認められる。即ち①上昇率が変化しながら曲線状に立ち上がる過程、②上昇率が一定となって上昇を続ける過程、③ある間隙圧 U_b (緩み間隙圧と呼ぶ) に達した後上昇率が急増して液状化に至る過程で(図2参照)ある。図1の直流電気回路における起電時の過渡現象は①、②の過程と相似である。この過渡現象の基礎方程式は次式で与えられる。

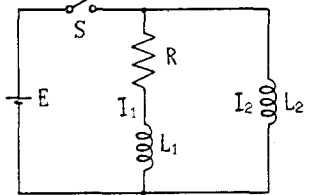


Fig.1 Model circuit

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_1}{dt} + R I_1 = E & \dots\dots (1) \\ L_2 \frac{dI_2}{dt} = E & \dots\dots (2) \end{cases}$$

この方程式の解は良く知られていて次式になる、

$$I = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L_1} t}) + \frac{E}{L_2} t \quad \dots (3)$$

(3)式において電流 I は間隙圧に、起電力 E は間隙圧の上昇を引き起こす要素に、抵抗 R は発生間隙圧の大きさを制限する要素に、インダクタンス L_1 、 L_2 はそれぞれ間隙圧の増大を妨げる要素及び増大率に、時間 t は載荷回数に対応するものと考えられる。

3. 液状化実験におけるモデル

実験は振動三軸試験装置で行った。試料には豊浦標準砂を用い、供試体は空中落下法によって作成した。バックプレッシャー 2.0 kgf/cm^2 を加え、有効拘束圧は 1.0 kgf/cm^2 とした。規則波として正弦波によるくり返し載荷を行った。

間隙圧を U 、載荷回数を N として(3)式を書き換えると次式になる。

$$U = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L_1} N}) + \frac{E}{L_2} N \quad \dots (4)$$

図2に間隙圧上昇の一般的なパターンを示す。この図はせん断応力比 R_s を一定として試料の相対密度を変化させた場合の間隙圧上昇曲線群である。この図にお

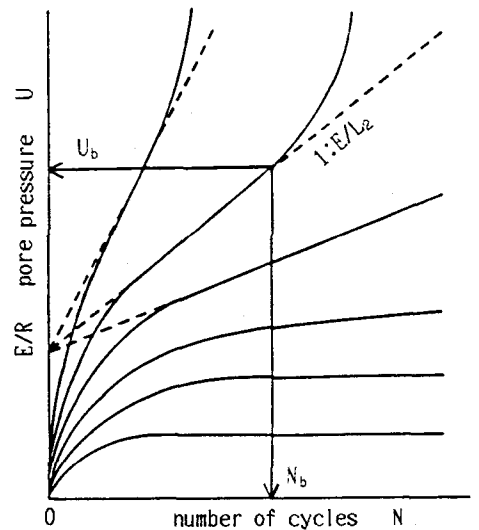


Fig.2 pore pressure buildup in cyclic triaxial tests

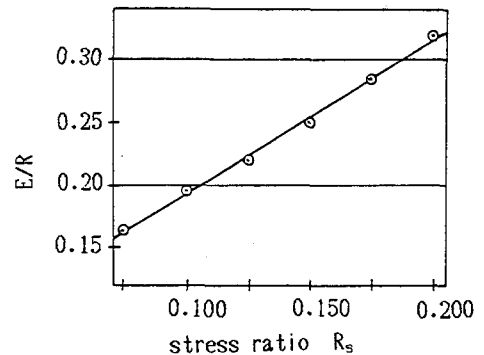


Fig.3 E/R versus stress ratio

いて一定率上昇の直線部の延長と縦軸との切片 E/R が液状化しやすいケース（液状化回数が数十回以下）では大体一定値となる事が分かった。この E/R と応力比 R_s の関係を図3に示す。この図より両者は直線関係にある事が分かり、 R を一定とすると $1/R=1.231$ であり、 E は次式で与えられる。

$$E = R_s + 0.0569 \quad \dots \dots (5)$$

$1/L_1$ は立ち上がり部分の曲線の形状を決める変数であり、実験結果より試算で求めた $1/L_1$ と相対密度 D_r との関係を各応力比 R_s についてプロットしたのが図4である。 R_s 一定の場合には L_1 と D_r との間には近似的に直線関係が認められ下記の回帰式が求められる。

$$1/L_1 = b(1-D_r) - 0.2 \quad \dots \dots (6)$$

$$b = 152.4R_s - 8.000R_s + 0.536 \quad \dots \dots (7)$$

$1/L_2$ は一定上昇勾配 E/L_2 を決める変数であり、応力比 R_s が一定の場合には $\log(1/L_2)$ と相対密度 D_r との間には近似的に直線関係が認められ、 $1/L_1$ の場合と同様に下記の回帰式がもとめられる。

$$1/L_2 = 0.0003 \times 10^{a(1-D_r)} \quad \dots \dots (8)$$

$$a = 240R_s^2 - 5.96R_s + 1.906 \quad \dots \dots (9)$$

間隙圧がある値 U_b に達すると土の骨組が緩み始めて圧力は急上昇を始める。この緩み間隙圧 U_b の値は土質条件・载荷条件によって異なると思われるが今回の実験の範囲ではほぼ一定値 $U_b = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ となった。

間隙圧が U_b を越えて急上昇する過程は、土が間隙圧の増大に対して無抵抗になる過程であり、立ち上がりの過程の逆関数を仮定した。式(6)、(7)と同様に試算と回帰計算により次式を求めた。

$$U' = 0.02 \log \left(1 - \frac{N'}{B} \right) + \frac{E}{L_2} N' \quad \dots (10)$$

$$B = 30000 \times 10^{C(D_r-1)} \quad \dots \dots (11)$$

$$C = 380R_s^2 - 10.8R_s + 2.4 \quad \dots \dots (12)$$

$$U' = U - U_b \quad (U > U_b), \quad N' = N - N_b \quad (N > N_b)$$

式(4)、(10)による計算値と実験結果と比較した例を図5に示す。

4. あとがき

モデルの定式化を主として回帰計算によって行ったが、更に現象の理論的な考察を進めたい。又不規則波荷重の場合に対する適用方法も考えたい。

参考文献 1)(例)Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer, J. (1976): "Pore-Water Change During Soil Liquefaction." Proc. ASCE vol. 102, NO. GT4, PP323~346

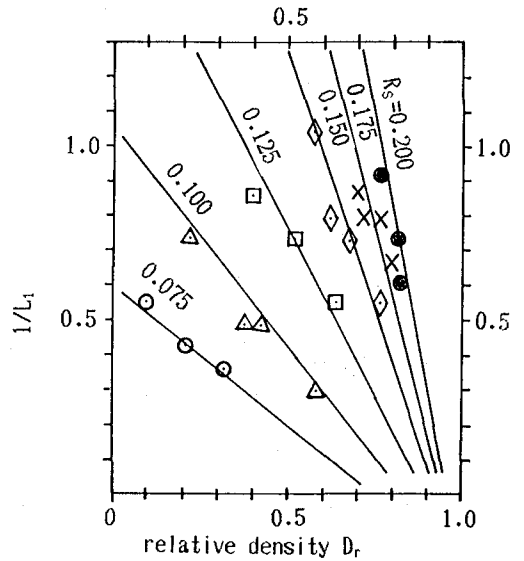


Fig.4 $1/L_1$ versus relative density

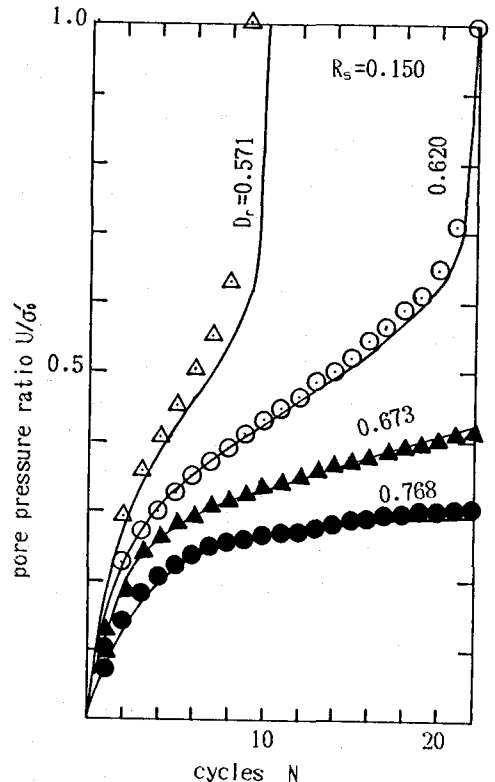


Fig.5 comparison of calculation to test results