

III-110 液状化した地盤の側方流動解析

東京大学 正 東畑郁生
建設省土木研究所 正 松本秀應

1. はじめに

液状化した地盤が重力と地震加速度の影響の下で側方流動する現象を時間領域で追跡するのが研究の目的である。このような計算を通常のFEMで試みると、高度の材料非線形性、大変形、時間積分という三つの要因が重複して、極めて複雑な解析となる。この困難を解消するために筆者らは、エネルギー原理を使って問題を簡単な一自由度系の振動に置き換えることを試みてきた。以下はその報告である。

2. 解析手法

時間が充分長く経過した後の最終変位量 U (水平)と W (鉛直)は各々水平、鉛直座標 x と z の関数であり、液状化した砂を液体とみなすことにより容易に決定できる¹⁾。ここで変数分離の考え方により、途中の時刻 t での変位 $u(x, z, t)$ と $w(x, z, t)$ が U および W と次の関係にある、と仮定する。

$$u(x, z, t) = \lambda(t) U(x, z) + u_b(t); \quad w(x, z, t) = \lambda(t) W(x, z) \quad (1)$$

ここに $u_b(t)$ は基盤地震動、 λ は時刻 t の関数である。式1を使って地盤のひずみエネルギーと運動エネルギーを計算し、ラグランジュの運動方程式に代入すると、地盤に等価な一自由度系の運動方程式を得ることができる²⁾。

$$m \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + k \lambda = k - n \frac{d^2 u_b}{dt^2} \quad (2)$$

3. エネルギーの減衰機構

式2をそのまま解くと無限に続く自由振動となり、現実と異なる。また変位の進行も速すぎて模型実験結果とまったく一致しない。そこで地盤の真の挙動を調べるため、振動台模型実験を行なった³⁾。

実験によると、地盤に働く慣性力と変位 λ との関係はおおむね図1のようなループを描く。慣性力がピークAとCをすぎると流動が始まり、途中の点BとDに至るとブレーキが作用して(ダイレイタンシーに起因する間隙水圧低下と有効応力上昇)変位の進行が遅くなる。そしてピーク点CとAの手前では運動はほぼ停止している。モデルでは $A \rightarrow B$ 、 $C \rightarrow D$ の間は式2に従う自由流動を採用する。そして点BとDを慣性力=0の時点に設け、ここで運動を急停止させる。このように割り切ったモデル化により、複雑な土質定数を導入することが避けられた。

こうして式2を積分した結果、第 i サイクル後の変位 λ_i に関して次の漸化式が得られた。なお初期条件は $\lambda_0 = 0$ である。式中で A と ω はそれぞれ基盤加速度の振幅と円振動数を表す。

$$\lambda_{i+1} - 1 = (\lambda_{i-1} - 1) \cos^2 \left(\sqrt{\frac{k}{m}} \frac{\pi}{2\omega} \right) + \frac{nA}{m\omega^2 - k} \left\{ \cos \left(\sqrt{\frac{k}{m}} \frac{\pi}{2\omega} \right) - \cos^2 \left(\sqrt{\frac{k}{m}} \frac{\pi}{2\omega} \right) \right\} \quad (3)$$

4. 実験例との比較

長さ100cm、幅20cmの土槽の中で砂をポンプ噴出水で攪拌し、相対密度38%、傾斜15%の地盤を造成した。これを200ガル5ヘルツで長手方向に加振し、変位 λ の実験値を得た。これを図2にプロットし、式3の計算値と比較した。両者の一致は良好である。計算に必要なデータは、地形と液状化する砂層の位置、土の単位体積重量、振動の周期(振幅は結果にほとんど影響しない)だけで足りることが重要である。液状化した砂に粘性係数 η を与えても、同様なエネルギー減衰が起こる。これは式2に粘性項 $c(d\lambda/dt)$ を追加することに相当し、

$$c = \frac{\eta \pi^2}{8} \left\{ \frac{\text{地表変位}^2}{\text{液状化層厚}} \right\} dx \quad (4)$$

積分は解析対象地盤全体について行う。経験的には、臨界減衰比 $c/2\sqrt{mk}$ を10程度にすれば、実験値と良い一致が得られる。しかし図2の例ではこのとき砂の粘性係数が886 Pa・秒になる。この値は水の粘性係数(15度Cで 1.14×10^{-3} Pa・秒)だけでなく、蜂蜜の値(たとえばクローバーで6.610 Pa・秒; 文献4の図から筆者が読みとった値)と比べてもはるかに大きく、現実的でない。

5. まとめ

液状化した地盤の側方流動を時刻領域で追跡する方法を開発した。この方法は複雑な地盤データを必要とせず、かつ精度を犠牲にせずに計算がたやすい、という特長がある。

6. 参考文献

- 1) Towhata et al. (1991) Permanent Displacement of Liquefied Ground, Proc. 9th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Found. Engg., pp.437-440.
- 2) 東畑他 (1991) 液状化による地盤流動の時刻歴解析、土木学会年次講演会第三部。
- 3) Sasaki et al. (1992) Mechanism of Permanent Displacement of Ground Caused by Seismic Liquefaction, to be published in Soils and Foundations.
- 4) N.Mohsenin (1986) Physical Properties of Plant and Animal Materials, Gordon and Breach Sci. Publ., pp.320.

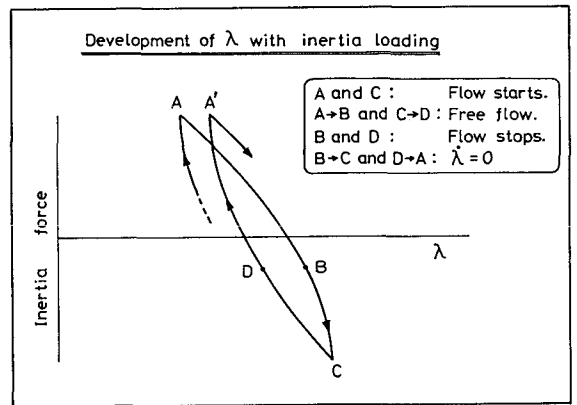


図1 慣性力と変位の関係概念図

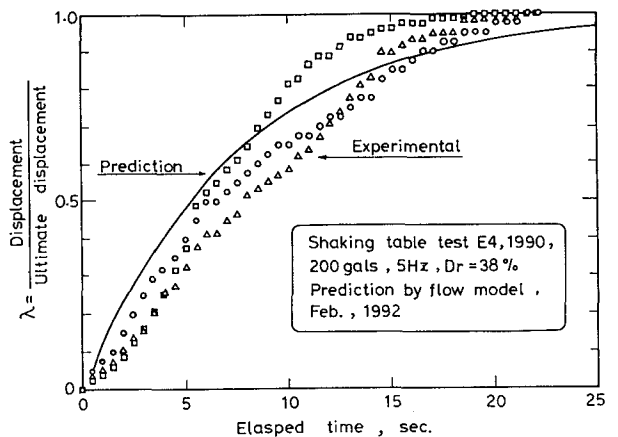


図2 側方流動量の実験値と計算値