

液状化に伴う地盤の透水性の変化

吉田 望¹, Finn, W. D. L.²

¹正会員 工博 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 (〒103 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

²Ph.D., University of British Columbia (2324 Main Mall, Vancouver, B.C., Canada)

液状化の発生以後の透水係数の変化を、遠心力载荷試験の結果をシミュレートすることで検討した。実験に用いられた地盤は、表層がシルト、下層が砂の2層地盤で、加振後すぐに砂層で液状化が発生し、シルト層と砂層の間に水の層が出来たとされている。水の流入・流出を考慮したジョイント要素を用いてこの現象を解析した結果、透水係数は加振直後には初期透水係数の数倍の大きさになっていること、シルト層の透水係数は加振後時間の経過とともに小さくなり、最終的に初期の透水係数まで小さくなることを確認した。

Key Words: Liquefaction, Pore pressure dissipation, permeability, settlement, joint element

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、広い範囲で震度7という非常に大きな地震動が発生した。また、埋立地や人工島では大規模な液状化が発生した。このような大きな地震動を背景として、設計指針等における地震動も大きくなって来たとし、技術者としてもこれまで以上に大きな地震動を考慮しなければならないようになって来つつある。

地盤の液状化が地震被害に大きく影響することは言うまでもないが、このように非常に大きな地震動に対しては、液状化の可能性があるからといって完全に液状化が発生しないような対策を講じることが必ずしも合理的ではなく、ある程度以下の地震動（たとえばレベル1）に対しては液状化が発生しないが、これを越える（たとえばレベル2）地震動に対しては液状化の発生を許容するが被害が生じないように講じるなどの設計も考慮する必要が出てきた。

液状化の発生を許容するとすれば、地盤の液状化以後の挙動も追跡する必要が生じる。その際の一つの興味は、過剰間隙水圧が消散する間での時間や、二次液状化であろう。このような問題に対しては、透水係数が解析結果に大きく影響する。液状化の発生によって透水係数が大きくなるということは、たとえばArulanandanらによって指摘されているが、具体的な数値による検証はほとんど行われていない。本報では、遠心力载荷試験の結果をシミュレートすることによって、液状化後の透水係数の変化を検討する。

2. 遠心力载荷試験の概要

計算に用いたのは、Liuら²⁾によって行われた遠心力载荷実験で、図-1に示すように表層がシルト、下層が砂の二層地盤で、各層の厚さは実スケールに換算して3mである。砂の相対密度は約40%、1gのもとでのシルトと砂の単位体積重量はそれぞれ18.9 kN/m³および19.2 kN/m³、また透水係数はそれぞれ 1.0×10^{-5} cm/s、および 2.13×10^{-3} cm/sと報告されている。実験では間隙水には水が使われている。実験は50gの重力加速度のもとで行われ、実スケールに換算して周期約0.5秒の正弦波を約6秒载荷している。なお、以下の議論では全て実スケールに換算して結果を示す。

図-2に基盤と地表の加速度時刻歴を、図-3に過剰間隙水圧分布の経時変化を示す。また、過剰間隙水圧時刻歴と沈下の時刻歴は、後に図-7、図-8で解析結果と比較して示す。

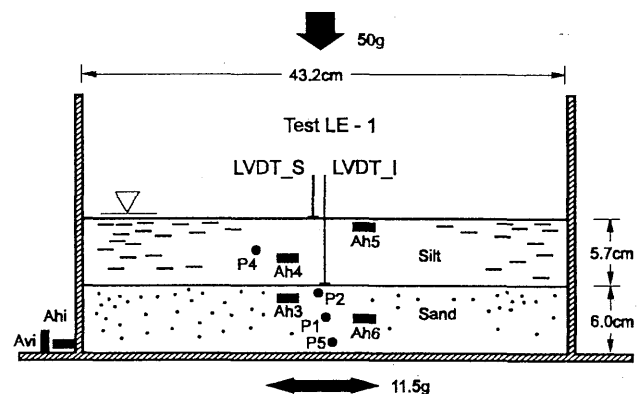


図-1 試験装置および計測器の位置

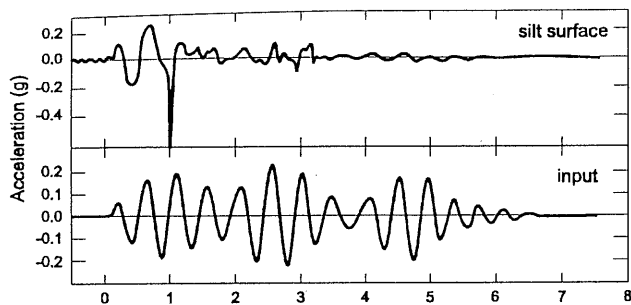


図-2 加速度時刻歴

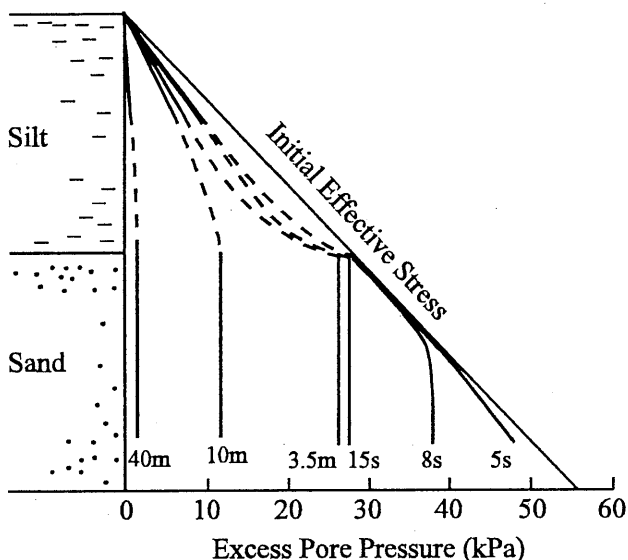


図-3 過剰間隙水圧の分布

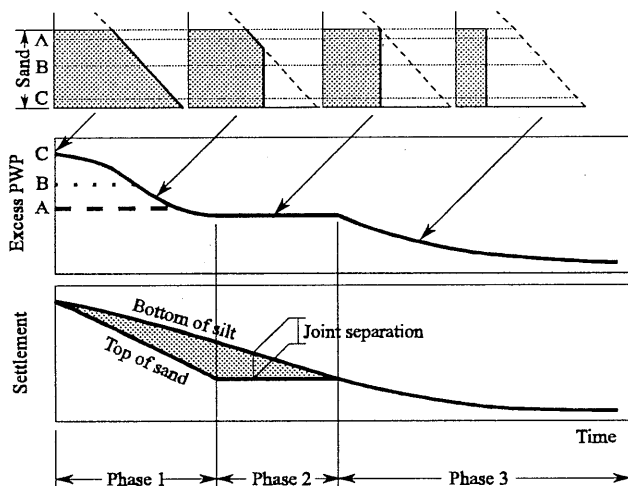


図-4 現象の模式図

ここで着目される事項として、次のようなことが挙げられる。

- ①加振後1秒で、地表の加速度はほとんど0になっている。
- ②加振後15秒から3.5分まで、砂層の過剰間隙水圧の値はほとんど変化しない。

この現象は、図-4に示したようなメカニズムで説明出来ると考えられる。砂層で過剰間隙水圧が発生すると、上方

に向け過剰間隙水圧の消散が始まる（Phase 1の始まり）。しかし、シルト層の透水係数が小さいため、上昇してきた水はシルト層と砂層の間に溜まることになる。水はせん断応力を伝えないため、水の層が出来ると地表では加速度はほとんど0となる。図-2から分かるように、サイクリックモビリティを示唆するような波形も見られない。

水の層が出来ると、その位置での水圧は、上下方向の全応力の釣合から一意的に決まる値となるので、過剰間隙水圧はシルト層下端の初期有効上載圧と同じとなり、変化しない。しかし、砂層内部では過剰間隙水圧の不均衡は存在し、消散が続く。水はシルト層を通して消散しているが、砂の透水係数の方が大きいので、水の層の厚さは次第に大きくなる（Phase 1）。

水の層が出来ている間に砂層の過剰間隙水圧が充分消散すると、砂層内部で過剰間隙水圧はシルト層下部の初期有効上載圧と等しい値で一定となり、以後水の層が完全になくなるまでは砂層の過剰間隙水圧は一定となる（Phase 2）。過剰間隙水圧はこの時点でもシルト層を通して少しずつ消散しているので、水の層の厚さはだんだん小さくなる。

やがて、水の層のが完全になくなると、砂層の過剰間隙水圧は再び現象を始める（Phase 3）。しかし、シルト層の透水係数に比べれば砂の透水係数は十分大きいので、砂層内部では過剰間隙水圧はほぼ置いて位置を保っている。

沈下量計測値では、LVDTは地表と砂層上端の変位を計測するつもりで設置されたが、シルト層で抵抗されたらしく、図-8に見られるように砂層上部ではなく、シルト層下部の変位を計測している²⁾こと、加振直後に2cmと理屈では説明できないような沈下が生じていることなど、設置状況に問題があると考えられるので、以後、主な議論は過剰間隙水圧に基づいて行う。

3. 解析方法

一次元の有効応力解析プログラムDESRA2C³⁾に、水の層の発生、消去が考慮できるジョイント要素⁴⁾、砂の液状化後の体積変化特性に対する構成関係⁵⁾を組み込み、さらに地震後の過剰間隙水圧の消散過程のみを解析出来る機能を追加し、計算に用いた。

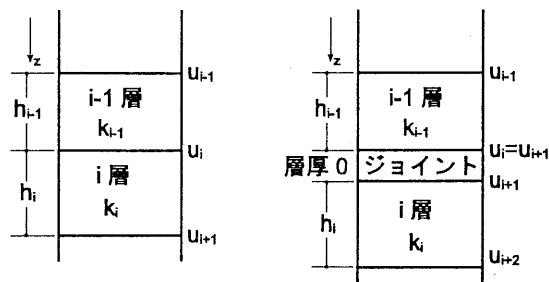
(1) 時刻歴解析

DESRA2Cでは、Biotの式に基づく一次元圧密の基礎式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \bar{E}_r \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \bar{E}_r \frac{\partial \varepsilon_{vd}}{\partial t} \quad (1)$$

を前方差分で解いている。すなわち、

$$u_{i,new} = \left[\frac{k_{i-1}}{h_{i-1}} u_{i-1} + \frac{k_i}{h_i} u_{i+1} - \left(\frac{k_{i-1}}{h_{i-1}} + \frac{k_i}{h_i} \right) u_i \right] \frac{\bar{E}_r dt}{\gamma_w} + d\bar{p} + u_i \quad (2)$$



(a) 通常の場合

(b) ジョイント要素

図-5 解析のためのモデル化

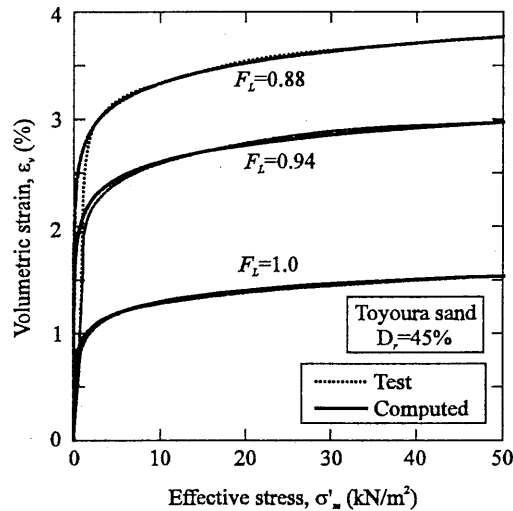


図-6 豊浦砂の液状化後の体積変化特性

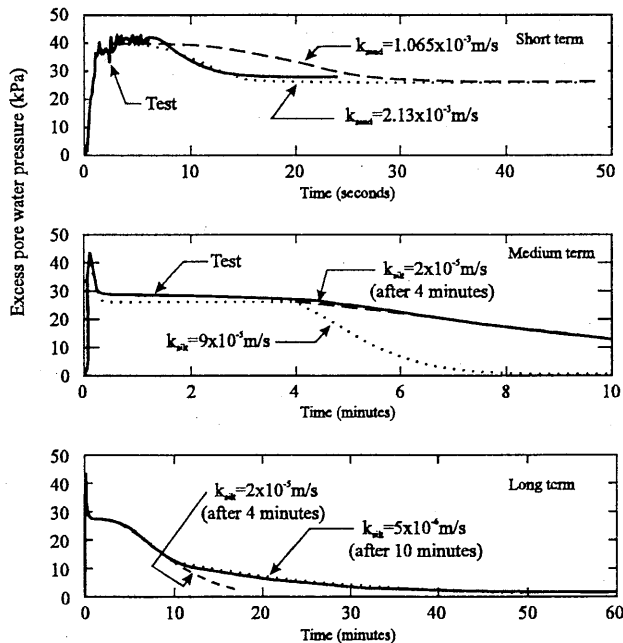


図-7 砂層中央の過剰間隙水圧の比較

ここで、 t は時刻、 u は過剰間隙水圧、 k は透水係数、 γ_w は水の単位体積重量、 z は深さ、 $\bar{E}_r$ は一次元膨潤係数、 ϵ_{vd} はダイランシーにより生じた体積ひずみ、 $d\bar{p} = \bar{E}_r d\epsilon_{vd}$ はダイランシーによる水圧変化、 h は層厚、添字の $i, i+1$ 等は節点や層番号を表している (図-5参照)。

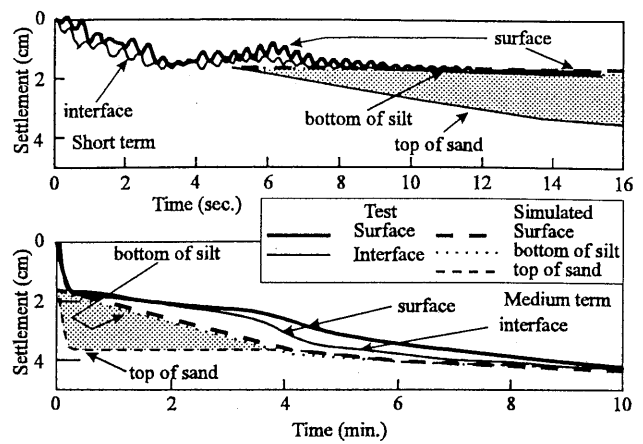


図-8 沈下の比較

2相系材料の解析に用いるジョイント要素については既に報告している⁴⁾。この際は、一般式、および、Christian形式の支配方程式、すなわち過剰間隙水圧を要素重心の値としている場合についての定式化を示した。DESRAは質量中心の位置 (FEMでいう節点) の過剰間隙水圧を未知数としているので、少し定式化が異なる。

図-5(b)を参照すると、ジョイント要素に関する連続の式と釣合式は次式で表される。

$$\frac{k_{i-1}}{\gamma_w} \frac{u_{i-1} - u_i}{h_{i-1}} + \frac{k_{i+1}}{\gamma_w} \frac{u_{i+2} - u_i}{h_{i+1}} = - \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (3)$$

$$E \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

ここで、 v はジョイントの開き、 E はジョイントの剛性である。ジョイントが開いているときには、式(3)はジョイントの幅の変化量を与え、式(4)で $E=0$ より過剰間隙水圧は変化しない。これは、ジョイントより下方 (この例では砂層上部) の過剰間隙水圧が変化しないと言うことを示しており、ジョイントが開いている間は過剰間隙水圧の消散に限度があることを示している。ジョイントが閉じているときには、 E に適当な値を用いればよい。なお、地震中にはジョイントが開かないように、式(3)で $u_i = u_{i+1}$ と置き、ジョイントの存在を無視した式を使っている。

(2) 液状化後の砂の体積変化

砂は、液状化すると、特に過剰間隙水圧が0の付近でせん断変形や体積ひずみが急激に変化する⁹⁾。この関係を、次の様におく⁹⁾。

$$\sigma'_m = \frac{e^{\epsilon_v/c} - 1}{e^{\epsilon_{vo}/c} - 1} \sigma'_{mo} \quad (5)$$

ここで、 σ'_m 、 σ'_{mo} 現在および過剰間隙消散時の有効拘束水圧、 ϵ_v 、 ϵ_{vo} は対応する体積ひずみである。豊浦砂によるシミュレーション (図-6) では

$$c = 0.0007 + 0.053 \epsilon_{vo} \quad (6)$$

で解析でもこれを用いた (式の物理的な意味は文献6参

照)．最終体積ひずみ ϵ_w は実験の最終沈下量から計算した．式(5)は有効拘束圧に関する式であるが，ここではこれを有効上載圧と読み替えて解析に使用した．

(3) シルトの構成関係

シルト層については，増分弾性の関係を用いた．すなわち，

$$\Delta u = \frac{\sigma_v'^{1-m}}{mK_2\sigma_{vo}'^{n-m}} \Delta \epsilon_v$$

ここで， $K_2=0.033$ ， $m=n=0.5$ を用いた．

4. 解析結果と考察

図-3から，加振後5秒程度から過剰間隙水圧の消散が始まったと考えられることから，この時点で，砂層は完全液状化，シルト層は過剰間隙水圧比が全層で同じとして解析を始めた．なお，実験では間隙物質として水を用いているので，相似則よりシルトおよび砂の地震前の透水係数はそれぞれ $k_{o,sand}=5 \times 10^{-6}$ cm/sと $k_{o,silt}=1.065 \times 10^{-5}$ cm/sとなる．

砂層から消散した過剰間隙水圧は砂層とシルト層の間にたまり，図-4のPhase 1の終わりでは砂層全層で過剰間隙水圧が同じになる．ここまでの砂層の挙動にはシルト層の透水係数は解析には影響しない．図-7に解析結果を示す．地震前の透水係数 $k_{o,sand}$ を用いた解析（図-7の破線）ではPhase 1に至るのは約30秒であり，実験と比べ遅く，過剰間隙水圧時刻歴の勾配も緩やかである．これに対し，図の点線は $2 \times k_{o,sand}$ を使った解析であるが，過剰間隙水圧の時刻歴は実験と非常に一致している．

Phase 1が終わると，以後の砂層の過剰間隙の値はシルト層に支配されることとなる．つまり，シルト層の透水係数は砂層の透水係数と比べ十分小さいので，砂層内では常に同じ過剰間隙水圧の値を保ちながら，シルト層を通して過剰間隙水圧が消散した分だけ，砂層の水圧が減少する．

Phase 2に至る時刻は，約4分である．地震前のシルト層の透水係数 $k_{o,silt}$ を使った解析は図には示していないが，この程度の時間では水の層はなくなる．その18倍の透水係数を使った値が図-7の中段（Medium term）に示されているが，Phase 2終了時期が実験値とほぼ同じとなる．

しかし，同じ透水係数をPhase 3でも使うと，過剰間隙水圧は7分で消散し，実験と合わない．そこで，ジョイントが閉じる4分以降を， $4 \times k_{o,silt}$ にして解析してみる（図の破線）と，Medium termの応答はほぼ説明できる．

図-7の下段はLong termの応答である．破線は，先と同じ $4 \times k_{o,silt}$ を用いた解析であるが，10分以降，過剰間隙水圧の消散が急速に起こり，実験値と合わなくなる．そこで，10分以降について，地震前の透水係数 $k_{o,silt}$ を用いて同じ解析を行ったのが，図-7下段の点線である．過剰間隙水圧が完全に消散する60分程度まで，実験値とよく合った結果が得

られている．

これらのシミュレーションから，透水係数は液状化直後には砂層の透水係数地震前の値の2倍，一方シルト層では加振直後の過剰間隙水圧比は約0.5であるが，それでも透水係数は地震前の値の20倍程度の値となっていると考えた方が合理的と考えられる．また，シルト層の透水係数は加振が終了すると急速に小さくなり，10分程度で地震前の値に戻っていることが分かる．

図-8には解析と実験の沈下量の比較を示しているが，特に層の境では両者に差があり，前述の実験の考察が正しいことを示している．

5. まとめ

上層がシルト，下層が砂の地盤では，砂が液状化し，過剰間隙水圧の消散が始まると，シルトと砂の間に水の層が出来，この現象をジョイント要素を使うことで説明することが出来た．

実験で得られた過剰間隙水圧の消散過程をうまく説明するように透水係数を調整したシミュレーションでは実験結果をうまく説明することが出来，その際に得られた透水係数の値から，液状化直後には透水係数が大きくなっており，次第にもとの値に戻る事が確認できた．

参考文献

- 1) Arulanandan, K. and Sybico, J. Jr. (1992): Post-liquefaction settlement of sand -mechanism and in situ evaluation, Proc. 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Honolulu, Hawaii, Technical Report NCEER-92-0019, pp. 239-247
- 2) Liu, L. and Dobry, R. (1993). Centrifuge earthquake modelling of liquefaction and its effect on shallow foundations, Dept. of Civil and Environmental Eng., RPI, New York.
- 3) Lee, M. K, W, and Finn, W. D. L. (1978): DESRA-2, Dynamic Effective Stress Program for Earthquake Response Analysis of Soil Deposits with Energy Transmitting Boundary Including Assessment of Liquefaction Potential, The University of British Columbia, Faculty of Applied Science, Revised in 1985
- 4) 吉田望：液状化解析に用いるジョイント要素の提案、第22回地震工学研究発表会、pp.31-34、1993
- 5) Yoshida, N., Yasuda, S., Miku, M., Masuda, T. and Finn, W.D.L. (1994): Behavior of Sand After Liquefaction, Proc., 5th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Salt Lake City, Technical Report NCEER-94-0026, National Center for Earthquake Engineering Research, U.S.A., pp.181-198
- 6) 吉田望、規矩大義（1997）：液状化解析に用いる砂の体積変化特性モデルに関する検討、第32回地盤工学研究発表会（投稿中）