

液状化地盤の流動特性に関する一考察

基礎地盤コンサルタンツ 正会員 鶴見 哲也

1. はじめに

砂地盤が主に地震動によるせん断を受け土粒子骨格が崩れ、土粒子が地下水中で浮遊状態となり液状化に至る。液状化による地盤流動は地震動が終息してから数分から数十分、長ければ数時間継続することが知られており、この間土粒子は地震力を受けずに地下水中を沈降している。著者らは既往の実験的研究成果¹⁾³⁾⁴⁾に見られる特徴から現象を考察し、國生の液状化実験結果¹⁾の再現を試みた結果、一次元的な過剰間隙水圧消散過程を土粒子の沈降運動により説明できることを示した²⁾。本考察は、液状化による地盤流動が地盤内水圧の不均衡により生じ土粒子の再堆積により終息するという概念に基づき、液状化地盤の流動特性について検討したものである。

2. 土粒子の沈降運動

土粒子の沈降に関する運動については別の文献²⁾に既に示したので詳細は割愛するが、結論を要約すると、土粒子が沈降を開始してから等速に至るまでの時間は液状化の継続時間に比べると極めて短時間であると推定され、土粒子の沈降に関する運動方程式において慣性項を無視することができ、次式に示される関係を常に満足する。

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial s'}{\partial z} = g' \quad (1)$$

ここに、 z ：鉛直下向きの座標軸、 P ：過剰間隙水圧、 s' ：有効応力、 g' ：土の水中重量である。

3. 地盤流動

液状化後の地盤が液状化以前より密で均質な状態になると仮定すれば、土粒子が再堆積するまでに沈降する距離の短い液状化層底面から地表に向かって再堆積面が等速上昇するので、地盤が流動する部分の層厚は時間経過とともに小さくなり、十分な時間が経過すると土粒子の再堆積が全層で終了し流動が終息する。

層厚が一樣でほぼ水平と見なせる非常に緩やかな勾配 i を持つ均質な地盤を考える。図-1 に示すように地盤が液体として流動するとき、運動方程式は次式で表すことができる。

$$\frac{\partial v}{\partial t} - n \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = gi \quad (2)$$

ここに、 v ：地盤の流動速度、 g ：重力加速度、 n ：液状化地盤の動粘度である。

4. 地盤流動計算例

液状化による地盤流動特性について、流動速度と変位の分布、及び、それらの時刻歴変化を定性的に把握するため数値計算を実施した。地盤条件は表-1 に示す通りである。

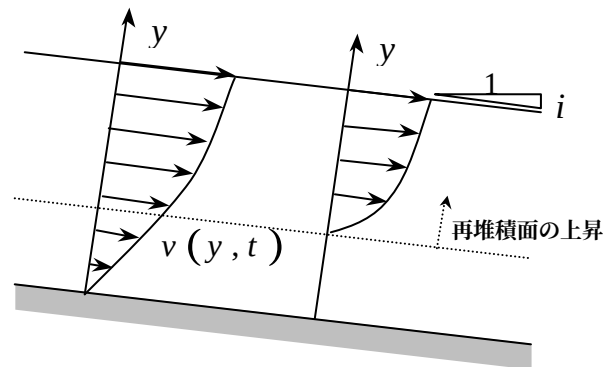


図-1 地盤モデルと流動形態

表-1 解析物性値一覧

地盤条件・物性	値
層厚 (m)	5.0
地表面勾配 (%)	0.1
土粒子の比重	2.662
飽和単位体積重量 (kN/m ³)	18.24
初期の間隙比 (相対密度)	0.931 (40%)
再堆積後の間隙比 (相対密度)	0.873 (55%)
透水係数 (m/sec)	1.63×10^{-3}
流動化地盤の粘度 (Pa-s)	2.00×10^3

物理・透水特性は珪砂5号の試験値を参照した

キーワード：液状化、地盤流動、土粒子の沈降

連絡先（〒135-0016 東京都江東区東陽 3-22-6, TEL:03-5632-6824, FAX:03-5632-6816, E-mail: tsurumi.tetsuya@kiso.co.jp）

図-2 から、土粒子の再堆積により流動速度を失う範囲が時間の経過に伴って上昇していることが分かる。図-3 から、流動変位の分布は液状化層底面から 1/4 周期の正弦分布ではなく半周期の余弦分布を示していることが分かる。今回の計算では流動地盤の粘度は水の約 200 万倍の値を適用しているが、図-4 によれば地表における流動変位量は 4m 近くまで達していることが分かる。また、地表の流動速度が液状化発生後約 15 秒で最大となり、その後緩やかに減速している様子が示されている。これは流動層厚の減少による粘性の効果が発揮されているからである。

5. 考察

計算例では適当な地盤モデルが見当たらなかったため、物性が既知の材料（珪砂 5 号）からなる透水性の良い地盤を想定した。このため、液状化継続時間は約 100 秒と短くなっているが、通常の沖積砂層は 10^{-5} m/s オーダーの透水係数を示すので実際には 100 倍程度の時間を要することになる。従って、粘着力の無視できる砂層では、相対密度が小さい、透水性が悪い、液状化層が厚いほど液状化の継続時間は長くなることが容易に理解できる。

流体的に地盤流動を捉えるとき、液状化した実地盤の動粘度を評価することは極めて困難であり、この方法で地表の永久変位量を予測できるとは思わないが、ほぼ均質な砂地盤に関する流動開始から終息までの定性的な流動特性が把握されたものと考えられる。

地盤流動が構造物に与える影響に関して、液状化部分の地盤流動が地中構造物に与える最大外力は、流動速度最大時の流体抵抗によるものではないかと考えている。

6. おわりに

地震動後の液状化の継続を考えたことにより、本検討で示された流動特性は数多くの実験的研究から得られた知見とは様子を異にする。これは加振実験においてモデルの縮尺に応じた加振時間と透水速度の相似を成り立たせることが困難であったからだと思われる。液状化層厚、液状化前後の地盤の密度状態、及び、透水性に見合った時間だけ液状化が継続するという考え方には今のところ物理的不合理は見当たらないし、地盤流動を経験した被災者証言との整合も取れている。このように、液状化に伴う地盤流動の状態が時間に依存して変化するなら、種々の地中構造物に及ぼす地盤流動の影響を評価するためには、土粒子と水からなる固液二相の混相流の特性を知ること、流体力学に立脚して構造物と混相流の相互作用特性について検討することが今後必要ではないかと筆者は考える。

<参考文献> 1) 國生：水膜現象が液状化砂層の側方流動に与える影響，土と基礎，pp.11-14，1999 年 4 月；2) T.Tsurumi, K.Mizumoto and S.Okada：Experimental Consideration on The Mechanism of Liquefaction, 12th WCEE, No.2405, 2000；3) Florin, V.A. and Ivanov, P.L.：Liquefaction of Saturated Sandy Soils, Proc. 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1, pp.107-111, 1961；4) Scott, R.F.：Solidification and Consolidation of A Liquefied Sand Column, Soils and Foundation(JSSMFE), Vol.26, No.4, pp.23-31, 1986

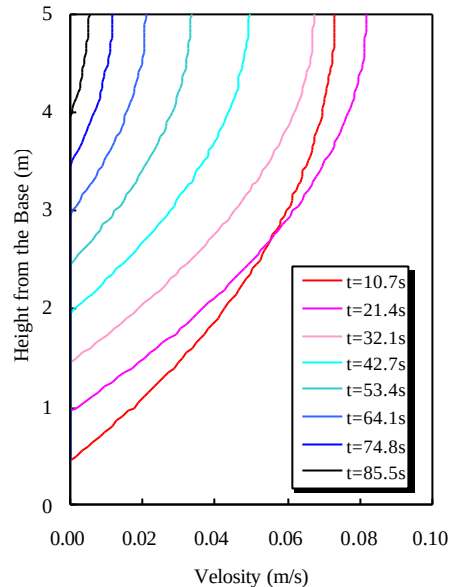


図-2 流動速度の分布形状

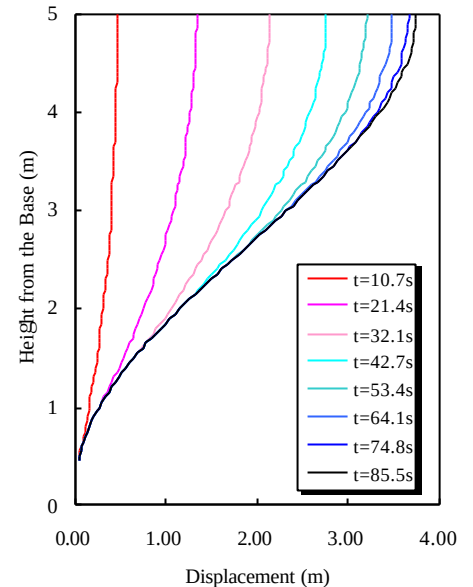


図-3 流動変位の分布形状

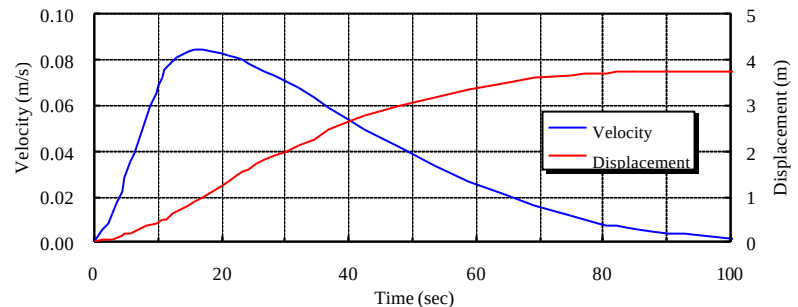


図-4 地表における流動速度と変位の時刻歴