

砂地盤の液状化現象とそれに伴う 地盤の挙動に関する研究

鶴見哲也¹・中澤博志²・水本邦男³

¹正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 関東支社企画部計測課 (〒135-0016 東京都江東区東陽 3-22-6)

²正会員 工修 東京理科大学助手 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

³正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 関東支社企画部 (〒135-0016 東京都江東区東陽 3-22-6)

新潟地震, 日本海中部地震, 或いは, 鳥取県西部地震において, 地震動終息後かなり長時間にわたって液状化に伴う噴砂や側方流動現象が生じていたことは良く知られている. しかし, 地震動後に液状化が継続する理由や, それに伴う現象のメカニズムに関する研究はそう多くない. 本研究は, 地震動後の液状化の継続に関するものである. 本論では, 液状化現象を土粒子の沈降と再堆積により説明した先行研究を支持し, 土粒子の沈降に関する運動を定式化した. 次いで, 理論の妥当性のある液状化実験のシミュレーションにより検証した. 最後に, 土粒子の沈降という概念から無理なく想像できる範囲で, 液状化に伴う地盤挙動のメカニズムについて推論した.

*Key words : Liquefaction, Excess pore water pressure, Dissipation, Sedimentation,
Post-liquefaction analysis*

1. はじめに

過去の地震被害において, 液状化による地盤の側方流動や噴砂現象が, 地震動終息後かなり長い時間続いていたという目撃談がしばしば聞かれる. なぜ液状化は長時間継続し, どのようにして終息するのであろうか.

新潟地震 (1964), 日本海中部地震 (1986) の被害調査報告書, および, 著者らが調査に赴いた鳥取県西部地震 (2000) での現地被災者の話によれば, 噴砂現象は地震後少なくとも約 1 時間, 長い場合には 1 日以上継続していたことが目撃されており, この間, 液状化現象が継続していたと考えられる. これに対して, 地震動の継続時間はたかだか 1 分程度である. したがって, 長時間にわたる液状化現象の継続とその終息までの過程について考察するには, 地震動の影響を無視できると仮定して, その後の現象を注視するのがもっともシンプルな方法であろう.

地震動後における過剰間隙水圧の消散過程に着目した研究として, Florin and Ivanov (1961), Scott (1986), および, 國生 (1999) が挙げられる. 何れの研究においても, 実験土槽底面に衝撃または極短時間の外力が与えられ, 一斉に液状化した均質な模型地盤における過剰間隙水圧の消散過程が観測されている. Florin and Ivanov の研究は, 液状化が土粒子の沈降現

象であると述べた最初のものである. ダルシー則を適用した土粒子の沈降に関する簡単な力学モデルを用いて, 実験結果を定量的に説明している. その後 Scott は, 遠心載荷実験における過剰間隙水圧の消散は Florin and Ivanov の示したのと若干異なることを発見した. これは, 土粒子の再堆積面が時間とともに上昇に伴う漸増荷重による圧密であるとしている. 國生は, 液状化層内に難透水の薄層が存在する場合, その直下に水膜が形成される現象に着目した研究を行い, 側方流動や再液状化現象に水膜が重大な役割を果たす可能性を示唆している. その一連の研究の中で, Florin and Ivanov と類似した実験を行い, 同様の実験結果を得ている.

本研究は, Florin and Ivanov が提唱したように液状化地盤内における土粒子の沈降現象に着目したものである. 本論では, 先ず, 土粒子の沈降運動の理論式を誘導し, その妥当性を数値解析により示す. 次いで, 本論では沈降という概念に基づいて液状化に伴う地盤の幾つかの挙動について考察する.

2. 液状化実験の例

図-1 に, 國生の行った実験の一つを示した. この実験は, 直径 13cm, 高さ約 2m の円筒形アクリル土槽内に豊浦砂で構築された均質な地盤を, 土槽底部

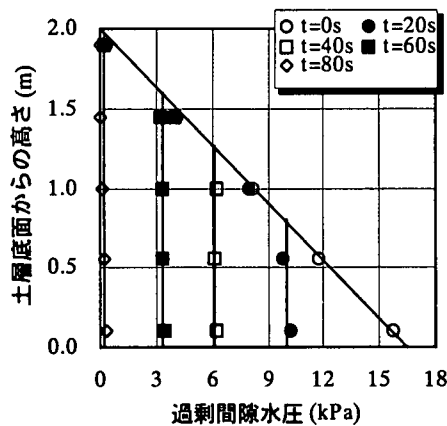


図-1 液状化実験例（國生）

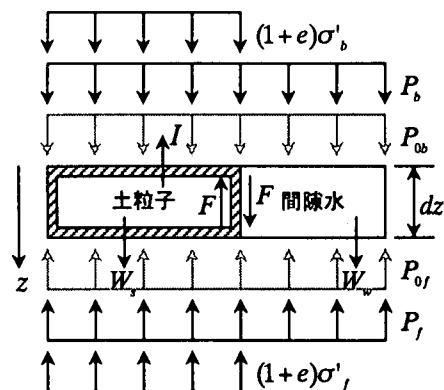


図-2 微少要素に作用する力

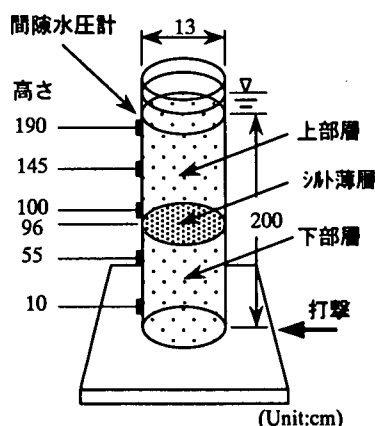


図-3 水膜実験モデル（國生）

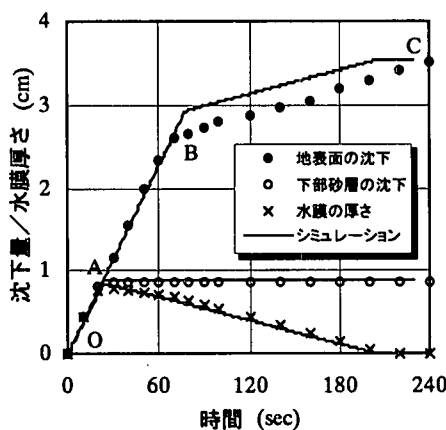


図-4(a) シミュレーション結果①

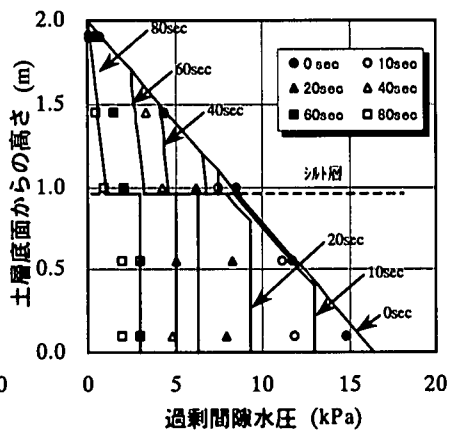


図-4(b) シミュレーション結果②

実線はシミュレーション結果

への打撃により一斉に液状化させたものであり、図-1は過剰間隙水圧分布の時間変化を示している。

図-1より、過剰間隙水圧は台形状を呈しながら消散し、この際、鈍角位置が時間の経過にしたがって上昇するとともに、過剰間隙水圧の最大値が減少する様子が認められる。このことは、Florin and Ivanovの実験でも認められており、論文の中で、鈍角以深では既に土粒子が再堆積した状態にあり、以浅ではまだ土粒子が沈降中であると述べられている。つまり、液状化現象における過剰間隙水圧は地下水中における土粒子の沈降運動によってもたらされ、土粒子運動の静止にしたがって消散することを実験結果は物語っている。

3. 土粒子の沈降運動の定式化

モデル化に際して、以下のことを仮定する。

- 1) 地震動の影響は無視できるとし、液状化発生後の土粒子の重力による沈降運動に着目する。
- 2) 均一な粒径からなる均質な砂地盤を想定する。
- 3) 液状化層は水平な地層であり、水平方向に半

無限に連続し層厚の変化はない。また、地下水位は液状化層表面にあり、これは地表面と一致する。

- 4) 土粒子沈降中における、間隙水の流れはダルシー則に従うとする。

液状化した地盤から高さ dz で単位幅と奥行きを持つ微少要素を取出し、この要素を土粒子部分と間隙水部分に分割する。このとき、微少要素に作用する力を示したものが図-2である。図中、 P_0 は静水圧、 P は過剰間隙水圧、 σ' は有効応力を意味し、下添え字 f は土粒子の沈降運動の前面側、 b は背面側を意味する。また、 W_p は土粒子の重量、 W_w は間隙水の重量、 F は土粒子に作用する水の粘性抵抗力、 e は間隙比、 I は慣性力である。なお、 z 座標は下向きに取る。

土粒子部分および間隙水部分の力の釣合を求めることにより、以下の釣合式を得る。

$$\rho_d \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \gamma' + \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \sigma'}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

ここに、

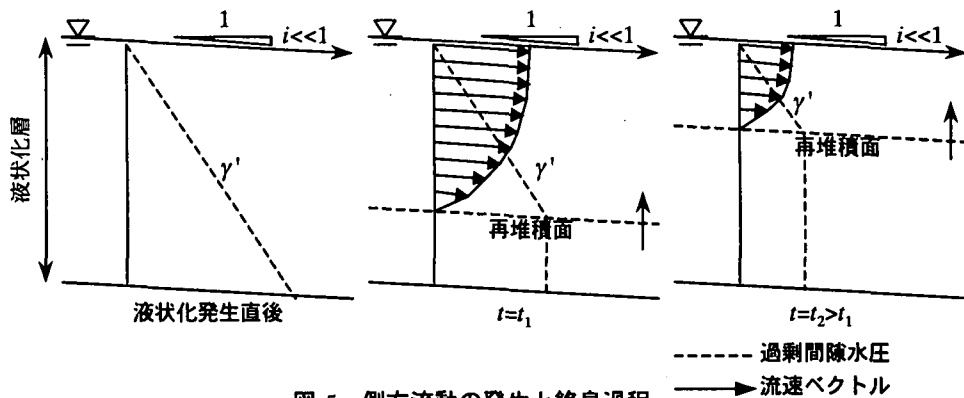


図-5 側方流動の発生と終息過程

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{P_f - P_b}{dz}, \frac{\partial \sigma'}{\partial z} = \frac{\sigma'_f - \sigma'_b}{dz} \quad (2)$$

また、 ρ_d は土の乾燥密度、 γ' は土の水中重量である。

上式にダルシー則を適用すると、

$$\rho_d \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\gamma_w}{k} \frac{\partial u}{\partial t} - \left(\gamma' - \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

ここに、 γ_w は間隙水の重量、 k は透水係数である。

いま、液状化発生直後の土粒子の沈降速度がゼロであるとした場合、重力のみの作用で自由沈降する土粒子が等速沈降状態に至るまでの時間は、一般的な砂の透水係数のオーダーなら1秒もかからない。したがって、上式において慣性項を無視しても差し支えない。この結果、式(1)から次式を得る。

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \sigma'}{\partial z} = \gamma' \quad (4)$$

上式は、この研究分野では良く知られていながら、著者らの知るところ理論的に導かれた例はないように思われる。また、式(4)により図-1の実験結果を説明し得ることが理解されるであろう。一方で、式(3)の慣性項を無視すれば、土粒子の沈降速度に関する式が容易に得られる。

4. 理論による解析例

上記の理論に基づいて國生 (1999)の水膜に関する実験のシミュレーションを行った。実験モデルは図-3に示す通りであり、液状化層ほぼ中央部に薄いシルト層を狭む。この場合、沈降速度の遅いシルト層

の上に砂が堆積することとなり、土粒子と土槽の間に生じる摩擦が無視できない。シミュレーションでは、この摩擦の効果も考慮した。

図-4(a)は地表面および下部砂層上面における沈下量と、シルト層直下に形成される水膜の厚さに関する時刻歴について、実験結果とシミュレーション結果の対比を示したものである。まず、実験結果の解釈を述べる。OB間では地表付近の土粒子は等速沈降状態にある。Bで上部砂層内の全ての土粒子が未だ沈降中のシルト薄層上に堆積する。BC間では上部砂層とシルト薄層が一体となって沈降しており、既にAで再堆積の完了している下部砂層上にCで堆積して液状化が終息する。シミュレーション結果はそのような現象を上手く捉えている。

図-4(b)は過剰間隙水圧の消散パターンについて、実験とシミュレーション結果を比較したものである。上部砂層における土粒子と土槽間に働く摩擦を考慮したことにより、特に、下部砂層における過剰間隙水圧の消散特性が上手く再現されている。

このように、先に示した理論を応用して解析を行うことにより、多層水平成層地盤についても過剰間隙水圧の消散過程を再現することができる。

5. 液状化に伴う地盤の挙動

(1)側方流動

側方流動の発生要因として、地震動によるものと液状化の継続によるものが考えられる。本論では、後者の議論を主体としているので、側方流動の主たる要因が液状化の継続にある場合について述べる。

簡単のため、均質な液状化層を考えることにする。この場合、図-1の実験結果のように、再堆積面は沈降距離の短い液状化層底部から上方に向かって上昇することになる。著者らは、再堆積面より上の部分は流体的、下の部分は固体的に振る舞うと考えた。

ここで、極緩やかな傾斜を有し層厚が一定で、無

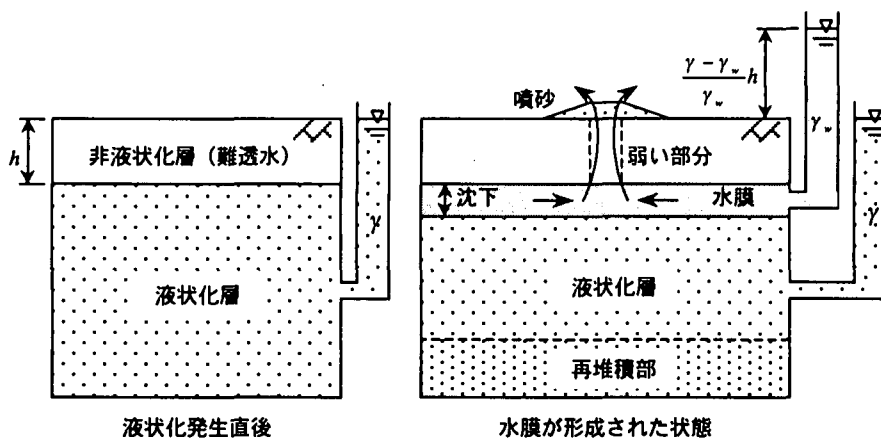


図-6 噴砂の発生機構

限に連続する液状化層があり、地下水面が地表面と一致する条件が設定できれば、図-5 に示すようなメカニズムが考えられる。即ち、地震動により一斉に液状化した地盤は、地表面の勾配による全水頭の差によって水平方向に流体的な運動を開始する。その後、液状化層底部から再堆積面が上昇し、流体的に運動する土層部分が薄くなる。再堆積面が地表面に至るとき、側方流動が終息する。

(2) 噴砂

著者らは鳥取県西部地震の調査で、竹内工業団地で被災した現地の方から次のような話を伺った。

「地震が終わってから約 20 分後、地面から水が噴出し始めた。その約 5 分後から砂の混じった濁水に変わり、30～40 分にわたって噴出が続いた。もっとも勢いのある噴出は、付近のガス抜き用の(高さ 1.7m の)パイプから、その上端より 30cm ほど高いものだった」。著者らは、パイプを伝って噴出した水が地上約 2m の高さに及んだことについて考えた結果、國生が示唆している水膜の生成が実際に起こったという結論に達した。その理由は以下の通りである。

図-6 に示すように、飽和した砂からなる液状化層の上に難透水の非液状化層がある。この 2 つの土層の単位体積全重量は γ であるとする。液状化発生直後、液状化層内の土粒子と水の混合液体のトータルヘッドは地表面に一致する。その後、土粒子の沈降に伴い液状化層が沈下を生じ、非液状化層直下に水膜が生成される。非液状化層に被圧された水膜内の全水頭は、地表面よりも高くなる。

先目の目撃談のように、パイプを伝って地上 2m まで水膜内の全水頭が上昇するためには、非液状化層の単位体積全重量が $\gamma = 17.64 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ である場合、非液状化層厚が約 2.5m あればよい計算となる。

6. まとめ

本研究の主要な成果は、土粒子の沈降に着目して経験的に知られている式(4)の釣合式を導いたことにある。理論の妥当性は、國生による水膜実験の再現解析により概ね示されたと考える。この結果は、有効応力原理とは異なる概念から得られたことを強調したい。

液状化に伴う地盤挙動として、側方流動と噴砂について、現在、著者らの考えていることを述べさせて頂いた。それらは未だ推論の域を超えないが、それほど無理な仮定をせずに容易に説明できるので、本論で紹介させて頂いた。

今後の研究では、液状化現象の本質が土粒子の沈降であることを示す証拠を示すことが必須であり、また同時に、液状化に伴う地盤の諸挙動の機構、および、構造物との相互作用に関する研究の発展が急務であると著者らは考えている。

謝辞：本研究に際し、ご意見・ご指導を賜りました埼玉大学の渡邉啓行教授、小田匡寛教授に深く感謝いたします。また、実験施設を見学させて頂いた中央大学の國生剛治教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Florin, V. A. and Ivanov, P.L.: Liquefaction of saturated sandy soils, *Proc. 5th ICSMFE*, Paris, 1, pp.107-111, 1961.
- 2) Scott, R. F.: Solidification and consolidation of a liquefied sand column, *Soils and Foundation, JSSMFE*, Vol.26, No.4, pp.23-31, 1986.
- 3) Kokusho, T.: Formation of water film in liquefied sand and its effect on lateral spread, *J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg. Division, ASCE*, Vol.125, No.10, pp.817-826, 1999.