

液状化した地盤内の粒子挙動

大林淳¹・佐々木康²・小方義昭³・楠木勝也⁴

¹正会員 工博 不動建設(株) ジオ・エンジニアリング事業本部 (〒110-0016 東京都台東区台東一丁目2-1)

²フェロー会員 工博 広島大学教授 工学部第四類 (〒739-0046 広島県東広島市鏡山一丁目4-1)

³正会員 工修 復建調査設計(株) 山口支社 (〒751-0828 山口県下関市幡生町2-4-28)

⁴学生会員 広島大学大学院 工学部第四類 (〒739-0046 広島県東広島市鏡山一丁目4-1)

基礎地盤の液状化による直接基礎構造物の変形メカニズムを解明するために、液状化後の土の力学特性が時間とともにどのように変化するのかに着目して実験を行った。ここでは筒型土槽にガラスビーズを用いたゆるぎの模型地盤を作成し、ハンマーによる一回打撃によって液状化を発生させ、液状化した地盤の粒子挙動をCCDカメラを用いて直接観察した。同時に、液状化による体積ひずみ量や地盤内の間隙水圧挙動について調べた。それらの結果から、液状化後の粒子沈降の大部分は有効応力の失われている時間中に生じていることが明らかになった。さらに、計測結果から明らかになった粒子挙動をモデル化し、液状化した地盤内の粒子挙動について考察し、流体として振る舞う層の時間変化の推定方法について提案した。

Key Words : *liquefaction, excess pore water pressure, boiling, flow, particle sedimentation*

1. はじめに

地震時における基礎地盤の液状化に起因する構造物の破壊・変形事例は既往の大規模地震で多く見られている。しかし、これらの破壊・変形について得られている詳細な情報は主として地震後の記録に基づくものであり、変形がいつ始まり、どのように進行していくかについては未だ不明な点が多い。すなわち、基礎地盤の液状化にともなう構造物の変形が、液状化による地盤の力学特性の変化とどのような関係にあるかは未だ明らかではない。

これまでに確認された液状化にともなう構造物の変形プロセスに関する知見は、新潟地震の際に昭和大橋の崩壊が主要動の終了後1~2分経てから起こったという目撃証言¹⁾や日本海中部地震では能代南バイパスが地震直後は通行できたにもかかわらず、その後に変形が生じて通行不能になった事例²⁾などがある。

これらの事例に基づいて、定性的には地震の発生と変形の開始には時間的な差があるものと考えられている。したがって、変形量を定量的に求めるためには液状化後の地盤の力学特性が時間とともにどのように変化するかを解明する必要があると考えられる。筆者らのこれまでの研究で、液状化した後の地盤は流体として振る舞うことを確認した³⁾。しかし、流体的な挙動を示す層が過剰

間隙水圧の消散にともなって、強度を回復する過程については、まだ十分に明らかにされていない。

ここでは、液状化した後の土粒子の挙動を直接的に観察し、地盤の骨格構造の崩壊とその後の沈降再堆積現象について調べ、地盤の力学特性の経時変化について考察した結果について述べる。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験装置は図-1に示すアクリル製の筒型土槽(外径200mm, 厚さ5mm, 高さ500mm)を用いた。土槽底部に

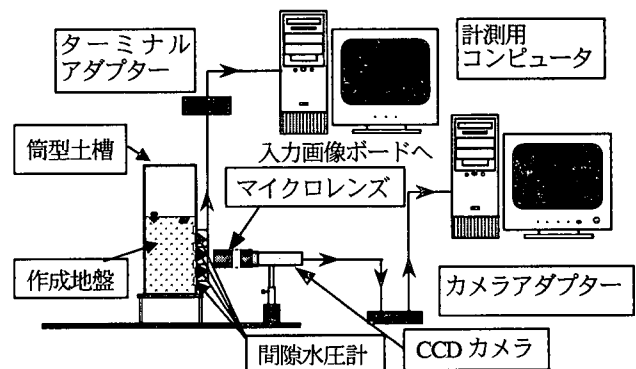


図-1 実験装置

は土槽内部への給排水用の経路が取り付けられており、バルブを介して給排水が可能となっている。

計測項目は地盤内の過剰間隙水圧の時刻歴、粒子挙動、液状化前後の層厚変化で、過剰間隙水圧および粒子挙動は図-1に示す計測経路で行った。

(2) 実験材料

実験材料には単一粒径の3種のガラスビーズを用いた。粒径は公称0.1, 0.2, 0.4mmであるが、これらは製品段階で粒径にばらつきが見られたために、ふるいによって粒度調整を行った。ガラスビーズを用いた理由は、以下の点である。①粒子の形状や品質がほぼ均等である。②粒子の着色により画像解析時の識別が容易になる。③比較的球形に近い場合、単純化した条件の下で沈降現象が検討できる。④比較的球形に近い場合、粒子の向きが変わっても重心位置のずれが少なく、自動追跡が容易になる。

3. 実験結果

(1) 粒子沈降挙動

CCDカメラによって直接計測した液状化後の粒子挙動と地盤中に設置した間隙水圧計で計測した過剰間隙水圧の時刻歴とを図-2に比較して示す。過剰間隙水圧はハンマーの打撃直後にそれぞれの間隙水圧計の設置深度に応じた初期有効土被り圧相当まで上昇し、一定時間その値を保った後に深いところから順次、消散過程に入る。ここでは、過剰間隙水圧が初期有効土被り圧と等しくなっている時間を高間隙水圧比継続時間と定義した。一方、水圧計を設置した深さと同じ深さにある粒子の沈降挙動を見ると、粒子の沈降は高間隙水圧比継続時間中に生じており、過剰間隙水圧が消散過程に至るとほぼ停止していることが明らかである。実験を行った全てのケースについて、CCDカメラで計測した粒子の沈降時間と、計測した粒子と同じ深さに設置した間隙水圧計によって得られた高間隙水圧比継続時間との関係を図-3に示した。この結果、両者はよい一致を示すことから、地盤が完全な液状化状態に達した後の体積変化の大部分は高間隙水圧比継続時間中に生じているものと考えられる。

図-4には初期層厚を20cmとした実験で計測された各深さにおける粒子沈降距離の分布を示す。図中のシンボルは平均値を示し、水平の線は標準偏差の範囲を示している。また、シンボルの横に示した数字は計測した粒子の個数である。粒子沈降距離は深部から表層に向かってほぼ直線的に大きくなっていることから、各深さにおける圧縮がほぼ均等に生じていることが明らかである。しかしながら、粒径0.1mmのケースにおける表層付近の粒子沈降距離に着目すると、粒子沈降距離はその下部の

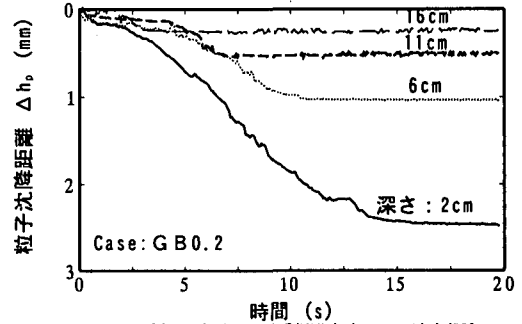
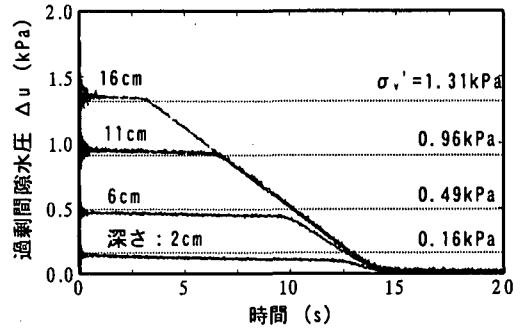


図-2 粒子沈降と過剰間隙水圧の時刻歴

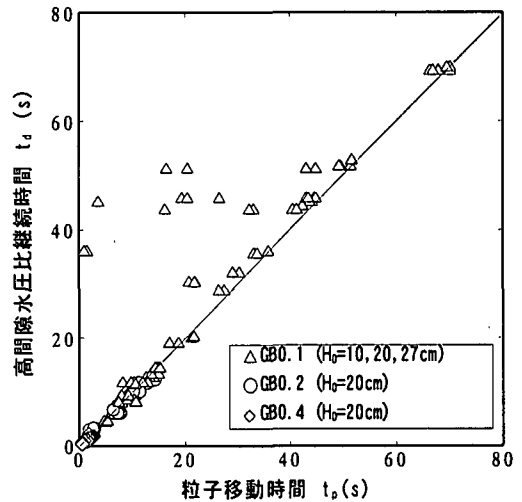


図-3 粒子沈降時間と高間隙水圧比継続時間

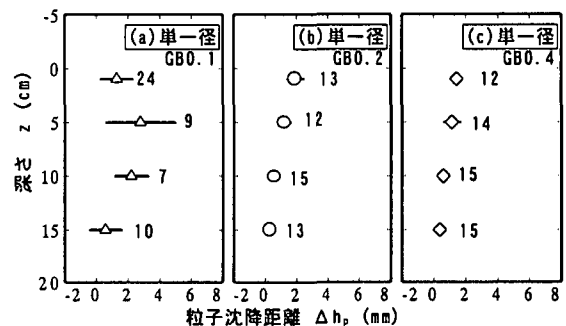


図-4 粒子沈降距離の深さ分布

沈降距離に比べて小さくなっており、この区間の層が伸長したような結果を示している。

(2) 体積圧縮特性

完全に液状化した後の体積変化を実験前後に計測した層厚の変化量から求め、体積ひずみとして整理して、図-5に示した。土粒子の沈降が高間隙水圧比継続時間中に生じていることから、この体積ひずみの大部分は有効

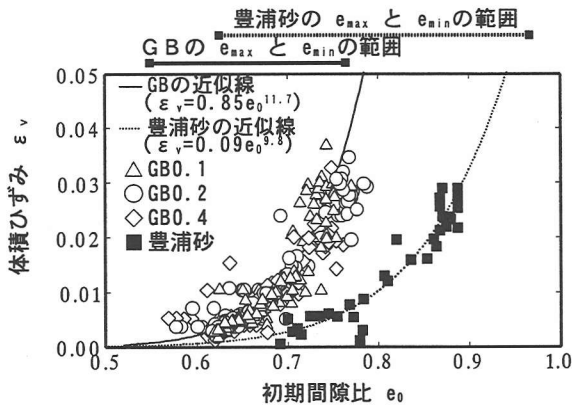


図-5 体積ひずみと初期間隙比

応力がゼロの状態が生じていることになる。実験は材料の粒径や初期層厚を変化させて実施しているが、結果はこれらの影響をほとんど受けずに、初期間隙比のみの関数となっている。これは、完全に液状化した後の体積変化が骨格構造の崩壊と沈降再堆積の結果であることを示しており、初期の有効応力状態に依存していないことを示している。

図中には別途実験した豊浦砂のデータも併記した。

(3) 粒子の沈降速度

静水中において水面から静かに沈降させた単粒子ならびに複数粒子の沈降速度を計測し、計算値と比較した結果⁹⁾を図-6に示す。単粒子の場合には Stokes 式および Rubey 式のうち Rubey 式による計算結果が実験値を比較的よく近似している。一方、複数粒子の沈降速度は単粒子に比べて小さい。

図-7は複数粒子の場合の沈降速度と Rubey 式によって計算される値とを比較して示したものである。このとき、粒子同士の相互干渉を受けていることを考慮する必要があるため、Richardson⁹⁾の提案を用いて計算した。その結果、実測から求められる粒子の沈降速度は計算値に比べて小さく、その比率を平均的に求めると、計算値の 1/2.7 となる。

この要因として以下の点が考えられる。①計算値は粒子の運動方程式から導かれる時間無限大における終末沈降速度について解いているのに対し、実測は粒子沈降の開始から終了に至る平均的速度であること。②計算式には抗力係数などの経験式が含まれており、それらの不確定要素が影響していること。③Richardson の実験範囲の上限付近に本実験の間隙率があるため、相互干渉の影響は計算値より大きい可能性があること。

4. 液状化した地盤内の粒子挙動に関する考察

(1) 粒子沈降のモデル化

液状化によって地盤の骨格構造が崩壊し、粒子が沈降

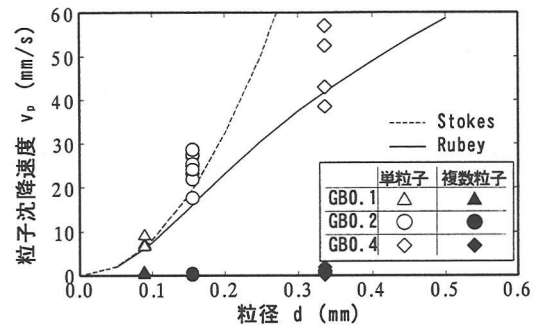


図-6 静水中の沈降速度と計算値⁹⁾

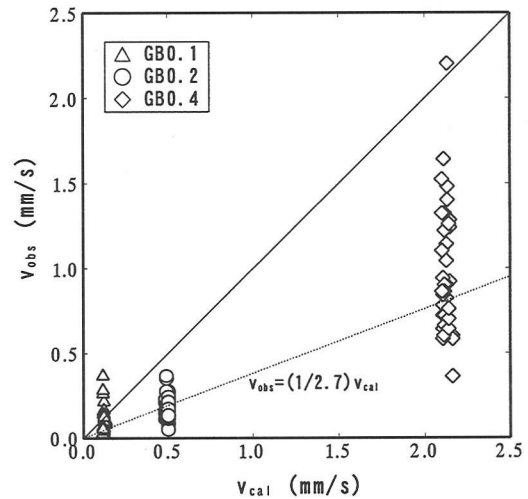


図-7 本実験の計測値と計算値

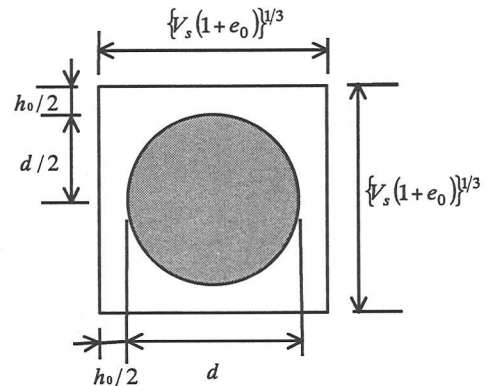


図-8 粒子のモデル

堆積している間の地盤は間隙水と粒子からなる懸濁状態であり、流体的な性質を呈するものと考えられる。したがって、任意の深さにおける粒子が沈降している時間を計算することができれば、流動的挙動を呈するポイリング領域の時間変化を推測することができる。

ここでは、図-8に示すように地盤内の粒子が平均的な粒子間距離を保って均等に配置していると考えたモデルによって、粒子の沈降プロセスを検討した。

図-8に示す様な配列では、液状化前の粒子間の距離は間隙比を用いて式(1)のように表すことができる。

$$h_0 = \{v_s(1+e_0)\}^{1/3} - d = d \left[\left\{ \frac{\pi}{6}(1+e_0) \right\}^{1/3} - 1 \right] \quad (1)$$

同様に液状化後の粒子間の距離も間隙比を用いて示す

ことができる。さらに、液状化後の間隙比は図-5の関係から液状化前の間隙比と体積ひずみによって求めることができるから、液状化前後の粒子間距離の変化量は体積ひずみを用いて式(2)で計算できる。

$$\Delta h = \left\{ v_s (1 + e_0) \right\}^{1/3} \left\{ 1 - (1 - \varepsilon_v)^{1/3} \right\} \quad (2)$$

この関係から、任意の深さにおける粒子移動量は、底面からその深さまでに存在する粒子の個数を考えれば式(2)を用いて式(3)で計算できる。

$$\Delta h(z) = \left\{ 1 - (1 - \varepsilon_v)^{1/3} \right\} (H_0 - z) \quad (3)$$

式(3)で計算した結果を実験値と比較すると図-9(a)のようになり、両者は比較的よい一致を示している。

計算された、粒子の移動距離を粒子沈降速度で割ると粒子の沈降時間を求めることができる。粒子の沈降速度は先の考察から、計算値に補正を加えることで求めることができ、それを用いて計算した結果と実験によって観察された粒子沈降時間を比較して図-9(b)に示す。

(2) 豊浦砂への適用

同様の手法によって、豊浦砂に適用した計算結果を図-10に示す。ここでは、豊浦砂の平均粒径を0.17mmとし、初期層厚と初期間隙比から計算される流体的挙動の継続時間を計算した。このとき、計算に用いた粒子の沈降速度は先の考察による補正に加え、実験結果から導かれた粒子形状による補正を加えている。

Kokusho⁹⁾は2層地盤を円筒筒型容器で液状化させ、各層上面の沈降時間を計測している。その実験における各層の層厚と密度を図-10にプロットすると各層が沈降を継続する時間は概ね下部砂層で28s、上部砂層で70sと推測される。一方、実験においてKokushoが計測した時間は下部砂層で25s、上部砂層で55sとなっており、概ねよい一致を示していると考えられる。

5. 結論

これらの研究から以下の点が明らかになった。

- ①粒子の沈降は高間隙水圧比継続時間中に生じており、液状化後の体積圧縮のほとんどは有効応力が失われている間に生じることが明らかになった。
- ②粒子が沈降再堆積するプロセスをモデル化し、粒子沈降時間すなわちボイリングの継続時間を予測する手法を提案した。
- ③提案した手法はKokushoの実験結果を説明できることを示し、その妥当性を確認した。

なお、本研究の実施にあたり(財)先端建設技術センターの研究開発助成を受けた。

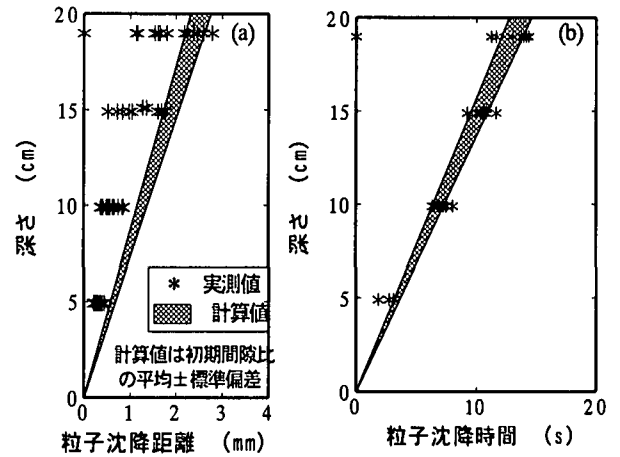


図-9 粒子沈降距離と沈降時間
(GB0.2 $H_0 = 2.0$ cm)

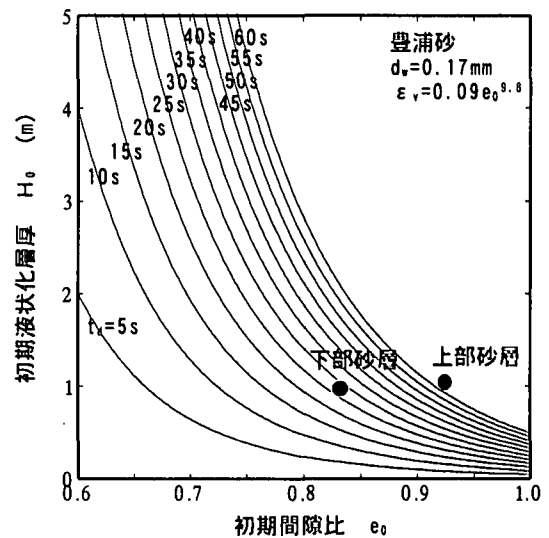


図-10 液状化層厚と初期間隙比から計算される流体的挙動の継続時間

参考文献

- 1) 石原研而：土構造物の耐震設計法の現状と問題点、土と基礎、Vol. 28, No. 8, pp. 3-8, 1980.
- 2) 北羽新報社：日本海中部地震 M7.7 真昼の恐怖—直撃地能代・山本の記録—, p. 154, 1983.
- 3) Sasaki, Y., Ohbayashi, J., Shigeyama, A. and Ogata, Y.: Model tests on a seismic failure of an embankment due to soil liquefaction, Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol. 2, pp. 691-696, 1999.
- 4) 小方義昭, 佐々木康：CCDカメラによる液状化地盤の撮影と粒子挙動に関する考察、第35回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1661-1662, 2000.
- 5) Richardson, J.F. and Zaki, W.N.: Sedimentation and fluidisation: Part I, Transaction of the Institution of Chemical Engineers, Vol. 32, pp. 35-53, 1954.
- 6) Kokusho, T.: Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 10, pp. 817-826, 1999.