

変形する液状化地盤内の土粒子の変位挙動の追跡

佐々木康¹・大林淳²・楠木勝也³・井上英彦⁴・常峰寛之⁵

¹フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科(〒739-0046 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

²正会員 博(工) 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 1-2-1)

^{3,4}学生会員 広島大学大学院 工学研究科(〒739-0046 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

⁵正会員 大林組(株) (〒571-0004 三重県鳥羽市管島町 429-1)

本報告では、液状化した地盤の側方境界が移動する場合、並びに地盤表面に設置した模型盛土が沈下する場合の、模型地盤内の土粒子の移動挙動を CCD カメラで撮影し追跡した結果を報告する。この撮影結果と地盤内の間隙水圧計測結果から、液状化後の地盤内の土粒子の移動方向は水平地盤の場合、ほぼ鉛直下方なのに対し、盛土直下とその近傍、側方境界の移動する場合の境界近傍では鉛直下方ばかりではないこと、境界の変位する近傍での土粒子移動量が大きいこと、土粒子の移動量が大きいときには間隙水圧が短時間で小さくなることなどが明らかとなった。

Key Words : liquefaction, excess pore water pressure, trace of soil particles

1. はじめに

著者等はこれまでに液状化後の地盤の変形メカニズムを解明するためにハンマーでの打撃による瞬間的な液状化の再現ができる装置を用いて実験的な検討を行ってきた。その結果、液状化地盤はきわめて流体的な挙動をすることが確認され、別報¹⁾で報告するように水平地盤の液状化後の挙動は、地盤内の過剰間隙水圧が上昇し暫時その値を継続した後、消散し始めるまでの時間(以後、高間隙水圧継続時間 T_d とする)と粒子の沈降時間 (T_{mv}) がほぼ等しく、体積変化のほとんどが高間隙水圧継続時間中に生じていることが確認された。このことから液状化後の高間隙水圧継続時間の間は土粒子が懸濁状態になっていることが分かり、この場合の粒子の変位は概ね鉛直下方のみに生じることが明らかとなった。このように液状化した地盤の側方境界は移動せず、液状化した地盤の表面に構造物が載っていない場合をここでは“水平地盤”と記述する。

本報告では、1) 液状化した地盤の側方境界が背後地盤の液状化の原因のため移動する場合、2) 水平地盤表面に模型盛土が設置されている場合について水平地盤の時と同様にハンマーの加震による液状化再現模型実験を行い CCD カメラで土粒子の移動を撮影し追跡した結果を報告する。

2. 実験装置および実験方法

緩く堆積させた砂層を作成しアクリル製の土槽壁面にハンマーで1回衝撃を与え地盤を瞬間的に液状化させる。ここでは水平地盤に剛体の模型盛土を設置した場合、水平地盤の側方に模型擁壁を設置し側方境界を移動させる2つの場合についての模型実験を行った。模型実験装置の概要を図-1に示す。

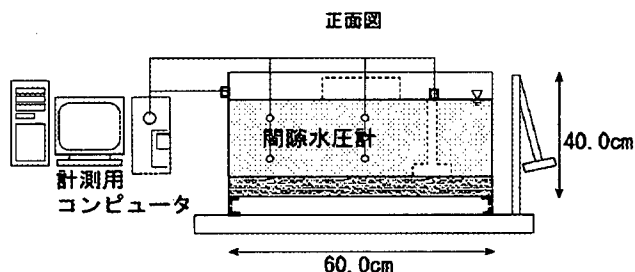


図-1 模型実験装置概要

地盤材料には豊浦砂を用い、初期相対密度 10%~35%、層厚は模型擁壁設置実験 10cm、模型盛土設置実験で 14cm として模型地盤を作成した。また、CCD カメラを用いて土槽側面から地盤内の土粒子群を撮影し液状化後の土粒子の移動軌跡を追跡した。CCD カメラで土粒子を撮影し、その挙動を追跡した画像例を図-2に示す。また、図-3に間隙水圧、土粒子の沈下時刻歴の代表的なもの

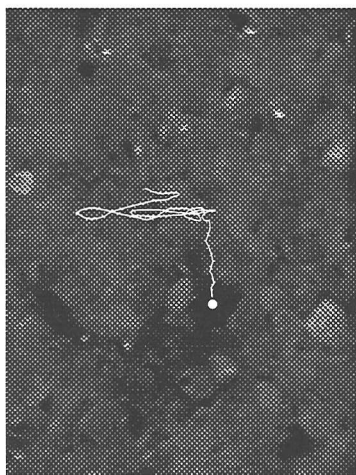


図-2 CCDカメラで撮影した土粒子

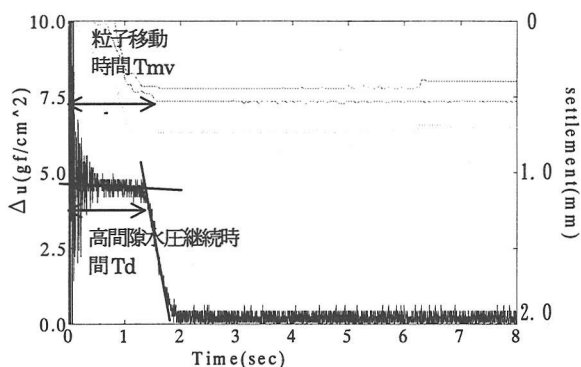


図-3 Td と Tmv

を示す。

模型実験では1ケースにおいてCCDカメラで撮影できる観測点は4点に限られるので地盤内の土粒子移動をくまなく観測するために観測点を変えて繰返し実験を行った。模型実験で地盤を液状化させたときの土粒子の移動軌跡例を図-4に示す。図-4では1つのカメラ撮影位置で3つの粒子を対象として画像解析を行い軌跡を追跡している。同じカメラ位置であっても土粒子の軌跡、移動量は異なっており液状化地盤の土粒子骨格構造が破壊されていることが確認できる。以降の議論で用いる土粒子の移動量は同一視野内の複数(3粒子以上)粒子の移動量の平均を用いる。また、これまでの研究より液状化地盤中を移動する土粒子の移動時間、及び高間隙水圧継続時間は、液状化層厚が同じならば初期相対密度に相関があることが分かっている。したがって、実験ケースの違いにより異なる初期相対密度の影響を除去するため、各ケースにおいて加震前の土粒子の位置を原点、最終移動位置を終点とするベクトルを擁壁の移動量、盛土の沈下量、地盤の沈下量で除することにより粒子の移動を無次元量に正規化し全てのケースで土粒子の移動を同じ条件で議論できるようにした。

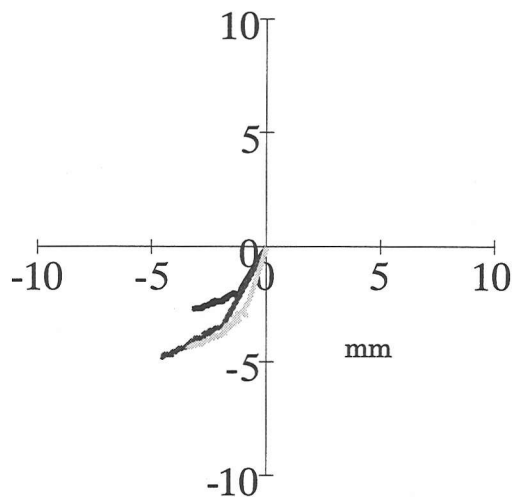


図-4 土粒子の移動軌跡例

3. 実験結果

(1) 側方境界が移動する場合の土粒子の挙動

模型地盤に擁壁を設置し擁壁が地盤の液状化により側方に移動するときの液状化地盤の土粒子の挙動を追跡した。地盤表面から深さ5.0cmの位置での過剰間隙水圧の時刻歴と、その位置における土粒子の沈下量の時刻歴、擁壁移動の時刻歴を示したのが図-5である。この水圧挙動から擁壁に近い場所ほど高間隙水圧継続時間が短くなっていることが分かる。また、擁壁直背後の5cmの位置においては加震直後から間隙水圧が急激に減少した後回復し、完全には液状化に至っていないのが確認できる。

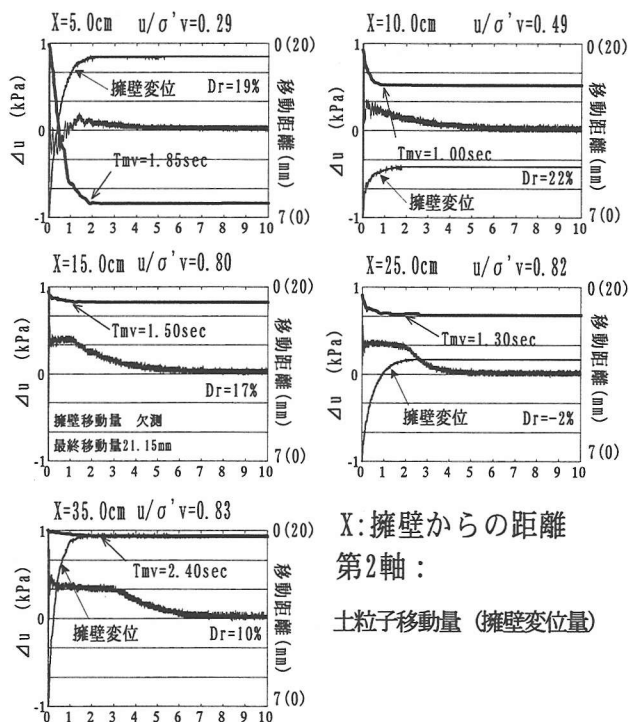


図-5 過剰間隙水圧、粒子移動時刻歴

土粒子の移動停止時間 T_{mv} と高間隙水圧継続時間 T_d とを擁壁から同じ距離で比較すると、擁壁から一番遠い 35cm の位置では水平地盤の場合と同じように高間隙水圧継続時間 T_d と T_{mv} はほぼ一致しているのが分かる。しかし、擁壁に近い位置になるほど間隙水圧は初期上載圧以下であっても粒子は移動を継続していることが確認できる。また、土粒子の沈下量は擁壁に近づくにつれ大きくなる傾向が認められる。擁壁から 25 cm の位置における粒子移動量が比較的大きくなっているのは相対密度が-2%と非常に緩いためであると考えられる。各位置において粒子移動時間 T_{mv} の時刻における間隙水圧と有効応力の比をグラフの右上に併記した。擁壁から 15, 25, 35cm の位置では過剰間隙水圧比は 0.80 以上であり高間隙水圧継続時間の間に粒子の移動は停止している。擁壁から 5cm, 10cm の位置では 0.3, 0.5 程度であり有効応力はそれぞれ 70%, 50%回復していると考えられ土粒子は互いに接触した状態で変形を継続していることが分かる。

図-6 は模型擁壁実験における高間隙水圧継続時間と粒子移動時間の関係を示し、水平地盤の実験から得られたデータも併記する。この図より擁壁からの距離が近い位置においては高間隙水圧継続時間は粒子移動時間に比べて短くなる場合があることが分かり、水平地盤の場合には見られなかった挙動が生じている。

次に、追跡した土粒子の模型実験装置内の移動軌跡分布図について考察する。実験方法の項で述べた方法により無次元化した土粒子の最終移動割合が土槽内でどのように分布するかをコンターで表したのが図-7 である。また、この図には土槽内の土粒子追跡観測点における土粒子の無次元化した移動割合の合成変位ベクトルと過剰間隙水圧消散後の地盤表面の代表的な形状を併記した。

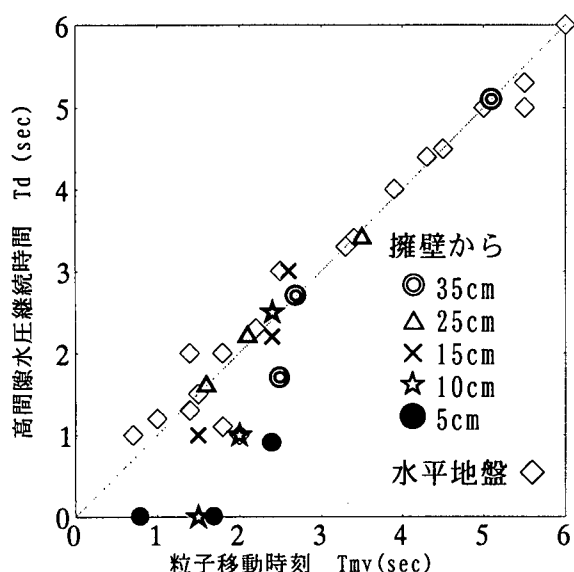


図-6 模型擁壁実験の $T_d \sim T_{mv}$ 関係

擁壁から離れた位置における土粒子の移動はほとんど鉛直方向のみに生じており、擁壁変位の影響が無いものと考えられ、ほぼ水平地盤の場合と同様な挙動を示す。また、擁壁直背後では擁壁から遠い位置に比べ沈下量が大きく背後の液状化地盤の変位がすべての位置で一様ではない。擁壁から約 10cm の範囲においては擁壁移動の影響で土粒子が水平方向にも変位している。なお、この領域では過剰間隙水圧は加震直後に負の値を示している。

これらから考察し、擁壁直背後地盤の有効応力と間隙水圧の関係について模式的に示したのが図-8 である。加震により過剰間隙水圧は初期有効応力まで瞬間的に上昇するが、模型擁壁の移動に伴い背後地盤も変形し、懸濁状態にあった地盤内の土粒子同士が接触を回復したためダイレイタンス効果によって過剰間隙水圧は急激に減少し負の値を示す。その後、擁壁の移動速度の減少により過剰間隙水圧が上昇し消散する、と考えることができる。図中の (a), (a') は擁壁から遠い位置、及び水平地盤における有効応力と過剰間隙水圧の関係を表している。

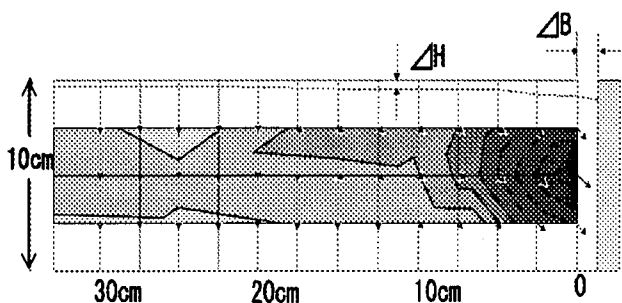


図-7 移動割合合成ベクトルの土槽内分布と地盤表面の変状

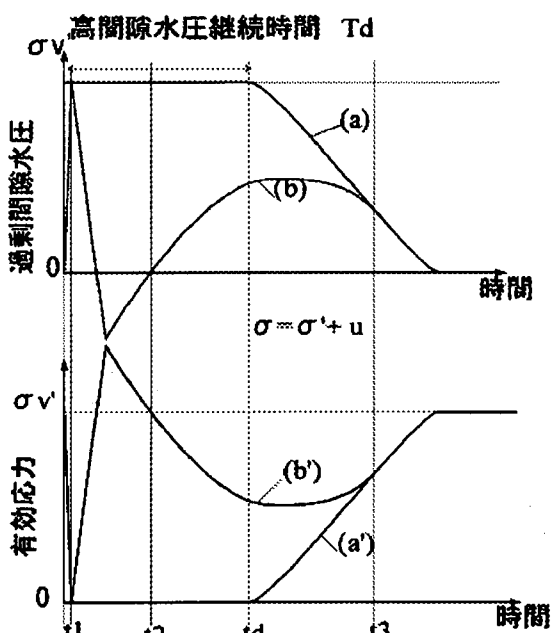


図-8 $\Delta u \sim \sigma_v'$ 関係を示した模式図

(2) 模型盛土を設置した土槽実験

図-9は液状化前の粒子の位置を原点にして、土粒子の移動停止位置を終点とするベクトルを前述の通り無次元量にして土槽内における土粒子の移動軌跡を表している。図から、土粒子の軌跡は盛土中央においてほぼ鉛直下方であるが、盛土の端に近づくにつれ盛土の外側に押し出されるような挙動をすることが分かる。水平地盤の場合と異なり、土粒子の移動軌跡分布が地盤内で一様ではないことが確認できる。また、盛土直下で鉛直変位が大きく盛土端から外側に向かって顕著に土粒子の沈下量が小さくなっていることも確認できる。

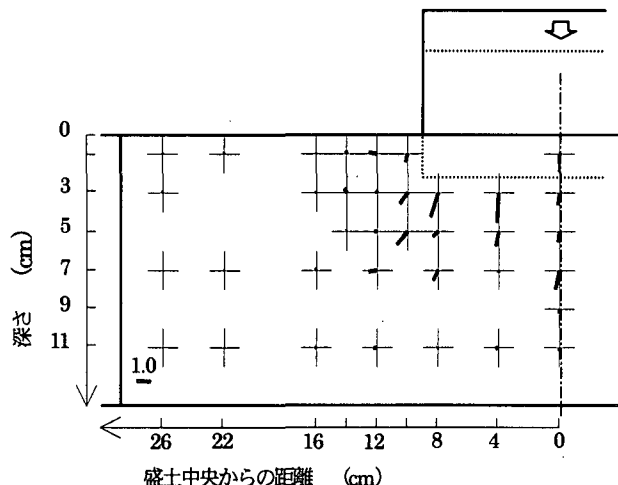


図-9 土粒子移動軌跡の土槽内分布

図-10に盛土中央直下、土槽左側面から7.0cmで地表面からの深さ7.0cmの位置での過剰間隙水圧の時刻歴を示す。土槽の外側から7.0cmの位置における過剰間隙水圧は加震直後に初期の有効上載圧まで上昇しており高間隙水圧継続時間継続後、消散しており水平地盤の場合と同様な挙動を示していると考えられる。盛土中央直下では地盤表面に盛土が設置されているため盛土の外側の領域に比べて初期の有効上載圧が大きくなるため、加震直後の過剰間隙水圧は盛土の設置圧分だけ大きくなっているのがわかる。また過剰間隙水圧継続時間 T_d は、同じ深さにおける盛土の影響がないと考えられる盛土端から外側の位置に比べ、深さ7.0cmの位置で短くなっており、深さ10.5cmの位置ではほとんど存在せず過剰間隙水圧の上昇直後から消散過程に入っている。

図-9の粒子移動軌跡と高間隙水圧継続時間とを総合的に考察すると、高間隙水圧継続時間が短い盛土中央直下においては土粒子の移動量は大きく、盛土の影響がないと考えられる外側の位置では高間隙水圧は水平地盤の場合と同様の挙動を示している。これらを総じて考察すると、上載荷重によって懸濁した状態にある土粒子と水との混相体全体が変形する場合には土粒子移動量が大きくなるが高間隙水圧の継続時間が水平地盤の場合に比較

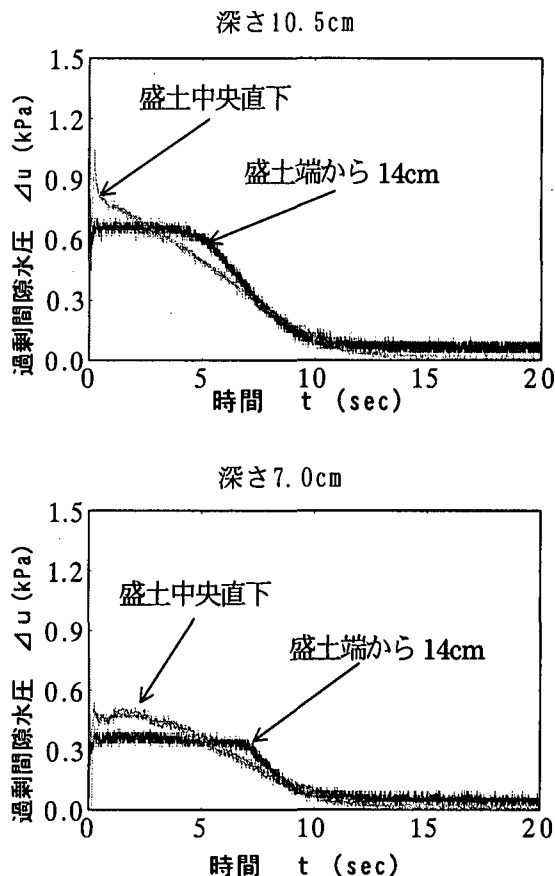


図-10 盛土中央直下と水平地盤の間隙水圧

して短くなる。これは、模型擁壁実験の時に擁壁移動の影響が少なくなる、擁壁から遠い位置ほど高間隙水圧継続時間が長く観測されていたことと同様の傾向である。

4. 結論

この実験から以下のことが分かった

- 1) 境界の移動を伴う場合には土粒子は鉛直方向のみならず水平方向にも変位する。
- 2) 土槽内の土粒子の移動軌跡分布、実験後の地盤表面の形状から液状化地盤の境界移動に伴う地盤変形は局所的に大きくなる場合があることが明らかになった。
- 3) 境界が移動する近傍において、その影響から土粒子の変位が大きくなる領域においては高間隙水圧継続時間が短時間であることが明らかとなった。

本研究の実施に当たり(社)鋼材倶楽部からの研究助成を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大林 淳、佐々木 康、小方 義昭、楠木 勝也：液状化した地盤の粒子挙動、第26回土木学会地震工学研究発表会、2001. 8(投稿中)