

砂地盤と対比した礫地盤の地震時挙動に関する遠心模型実験（その5）

鹿島建設(株) 正会員 ○笹岡里衣 岡本道孝
中央大学名誉教授 正会員 國生剛治

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震以降、重要施設の耐震評価では従来の設計基準^{1,2)}では対象外とされてきた大径岩砕を含む礫質土の液状化を考慮することが求められるようになった。国内でこれまでに報告されている礫質土の液状化は比較的緩い層で生じている可能性が高いことが指摘されているが³⁾、前述した耐震性評価では施工による締固め履歴のある礫質土についても緩い砂質土と同様に扱うことが求められる。このような評価条件の妥当性を確認することを目的として、筆者らは遠心模型実験を実施し、相対密度 D_r が同等であっても礫質土と砂質土では加速度や過剰間隙水圧の応答が異なることを明らかにしてきた⁴⁾。本報では、これらの違いをエネルギーの視点を含め考察する。

2. 実験概要⁴⁾

遠心模型実験は50 Gの遠心加速度場で実施し、礫質土として最大粒径 $D_{max}=9.5$ mmのケイ砂、砂質土として豊浦砂を用いた。試料の物理特性を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。図-1には埋立地¹⁾や道路関係の基準^{2,5)}に記載されている液状化リスクを考慮すべき粒度範囲を併記した。

遠心模型実験ではせん断土槽($L:650$ mm, $H:300$ mm, $W:200$ mm)を使用し、高さ170 mm(不飽和層:10 mm, 飽和層:160 mm)の模型地盤を、相対密度 $D_r=60\sim70\%$ となるように締め固めて作製した。本検討は大粒径を含む礫質土と砂質土の比較を目的としており、豊浦砂の場合は透水性の相似則を保つため粘性流体(50 cSt)を間隙流体に用いたが、礫質土については脱気水を用いて、1G場における透水性よりもさらに大きな透水性を想定しその効果を確認した。加振では最大加速度約500 gal, 周期1.2 Hzの正弦波を20波入力した。その際、地盤内の3深度(G.L.-1.5, -4.5, -8.5 m)で水平方向の加速度と過剰間隙水圧を計測した。

3. 実験結果

ここでは、図-2にG.L.-1.5 mの加速度と過剰間隙水圧 Δu の時刻歴を示すが、結果の詳細は既報⁴⁾を参照されたい。豊浦砂では、3深度で過剰間隙水圧比 $r_u(=\Delta u/\sigma'_v, \sigma'_v$:有効土被り圧)が1を超え、全層で液状化が確認された。また、G.L.-1.5, -4.5 mの加速度応答値は入力値(500 gal)から大きく減少した。一方、礫質土では、G.L.-1.5 mにおいて $r_u>1$ となったが、G.L.-4.5 m以深の r_u は1未満であった。加速度応答値はG.L.-1.5, -4.5 mともに入力値よりも増大し、G.L.-1.5 mの最大値は入力値の3.6倍であった。

4. 地震波動エネルギーによる検討

4.1 地震波動エネルギーの算出

加速度応答値を用いて、地盤内に供給された地震波動エネルギーを算出した。水平成層地盤では、鉛直方向に入射された地震波は透過と反射が繰り返され、下方から上方へ入射する成分(上昇波)と上方から下方へ入射する成分(下降波)の重ね合わせが応答波として観測される。そこで、実験から得られた加速度応答値を地表全反射条件の等価線形1次元重複反射理論に基づき、深度ごとに上昇波と下降波に分解し、式1~3を使って上昇波エネルギー E_u と下降波エネルギー E_d 、また、両者の差分である損失エネルギー $E_w(=E_u-E_d)$ を求めた⁶⁾。ここで、 \dot{u}_u および \dot{u}_d は各成分の加速度応答値を時間積分した速度、 ρV_s は地盤のインピーダンス、 t は計測時間である。

表-1 試料土の物理特性

項目		礫質土	豊浦砂
土粒子の密度	ρ_s g/cm ³	2.612	2.642
最大粒径	D_{max} mm	9.5	0.4
礫分含有率	G_c %	60.0	0.0
細粒分含有率	F_c %	7.7	0.4
均等係数	U_c	31.7	2.4
透水係数(1G場)	k m/s	2.1E-04	1.3E-04
最大間隙比	e_{max}	0.594	0.985
最小間隙比	e_{min}	0.193	0.605
乾燥密度	ρ_d g/cm ³	1.980	1.504
相対密度	D_r %	69	60

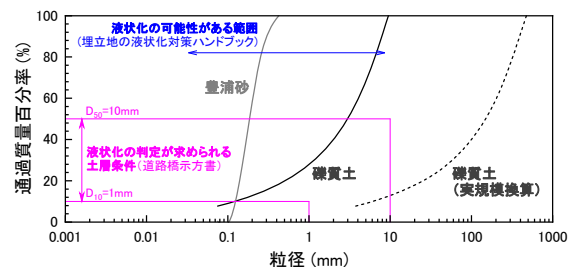


図-1 粒径加積曲線

キーワード: 礫質土, 液状化, 遠心模型実験, 地震波動エネルギー
連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 土質・地盤 Gr TEL042-489-1111

$$E_u = \rho V_s \int_0^t \dot{u}_u^2 dt \quad \text{式 1}$$

$$E_d = \rho V_s \int_0^t \dot{u}_d^2 dt \quad \text{式 2}$$

$$E_w = E_u - E_d \quad \text{式 3}$$

基盤より地表面へ入射された地震波は層境界において上昇波と下降波に分離するが、これらの波動の振幅比は上下層のインピーダンス比に依存する。地震波が伝播する際に地盤内で内部減衰が生じることから、上昇波と下降波のエネルギーは必ずしも一致しない。この差が損失エネルギー E_w であり、地盤の内部減衰により消費されるエネルギーといえる。液状化層においては激しい内部減衰が生じることから、大きな E_w が生じる。國生らは鉛直アレー記録の分析により、液状化層において E_u が急減し、 E_w が増加する関係を明らかにしている⁷⁾。

4.2 遠心模型実験結果の比較

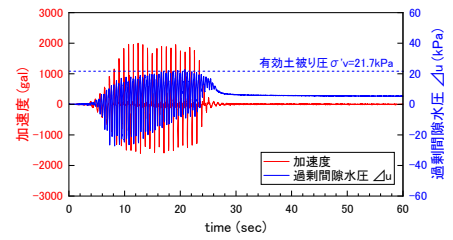
図-3に当実験での加速度時刻歴から計算したエネルギー深度分布を示す。模型地盤の D_r に約10%の差があるため一概に比較することはできないが、 E_u 、 E_d 、 E_w の絶対値は全層において豊浦砂よりも礫質土の方が大きかった。礫質土、豊浦砂ともに E_u は表層に近づくほど減少し、実地盤地震記録を用いた既往研究⁸⁾と同様の傾向を示した。図-4はG.L.-8.5 m(基盤層)における E_u を基準にした E_u の変化割合である。豊浦砂では、G.L.-4.5 mで約3%であり、基盤からG.L.-4.5 m間で急激に減少した。これは、前述のように全層で液状化したことが原因と考えられる。一方、礫質土の E_u は基盤層からG.L.-1.5 mまでの変化割合は豊浦砂に比べ緩やかだった。G.L.-1.5 mでは $r_u > 1$ を示したものの、G.L.-1.5 m～G.L.-4.5 m間において E_u が急激に減少しなかったのは、礫質土のダイレイタンスーやそれに伴うサイクリックモビリティが豊浦砂より顕著に発揮されたことが要因のひとつと考えられる。

5. まとめ

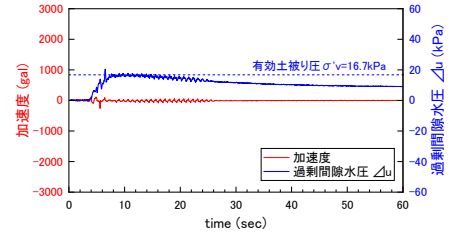
遠心模型実験による加速度応答値から地震波動エネルギーを算出した。その結果、全層で液状化した豊浦砂については、既往研究と同様に上昇波エネルギーは表層に向かって急減した。礫質土についても、上昇波エネルギーは表層に向かって減少した。ただし、表層付近で過剰間隙水圧比 $r_u > 1$ を示したが、上昇波エネルギーの減少割合は砂質土に比べて小さく、既往結果とは異なる傾向を示した。入力加速度に対して応答値が増大したことも踏まえると、礫質土では砂質土よりもダイレイタンスー特性が発揮されやすいことや透水性が高いことから、瞬間的に $r_u = 1.0$ に達したとしても地盤の剛性が保持されたことが一因と考えられる。

参考文献

- (財)沿岸開発技術研究センター:埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), 1997.
- (社)日本道路協会:道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説, 2012.
- 田中幸久, 金谷守, 幡谷竜太, 佐藤清隆, 河井正, 工藤康二:事例調査に基づく砂礫地盤の液状化発生条件の検討, 土木学会論文集, No.666, III-53, pp.55-72, 2000.
- 朝山勇治, 笹岡里衣, 岡本道孝, 國生剛治:砂地盤と対比した礫地盤の地震時挙動に関する遠心模型実験(その3), 土木学会全国大会第76回年次学術講演会, CS 11-05, 2021.
- (社)日本道路協会:道路土工 軟弱地盤対策工指針, 2012.
- 國生剛治:地震地盤動力学の基礎-エネルギー的視点を含めて-, 鹿島出版会, 2014.
- 國生剛治, 本山隆一:地震波の上昇波と下降波の分離による表層地盤でのエネルギー収支, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.257-267, 2000.
- 國生剛治, 鈴木拓:強地震鉛直アレー記録に基づいた地盤中の波動エネルギーフロー(補遺), 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第7号, pp.62-68, 2012.



(a) 礫質土



(b) 豊浦砂

図-2 過剰間隙水圧と加速度の時刻歴 (G. L. -1.5 m)

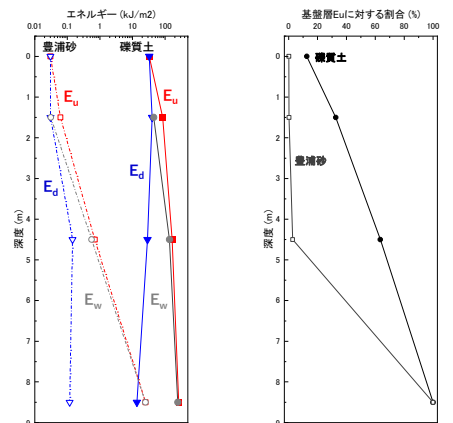


図-3 エネルギーの深度分布

図-4 上昇エネルギーの変化割合