

液状化地盤における水平地盤反力の速度依存性に関する実験的研究

森光 太郎¹・田村 敬一²・東 拓生³・小林 寛⁴

¹正会員 (株) エイトコンサルタント (岡山県岡山市津島京町 3-1-21)

²正会員 工博 建設省土木研究所 振動研究室 (茨城県つくば市大字旭 1 番地)

³正会員 建設省土木研究所 振動研究室 (茨城県つくば市大字旭 1 番地)

⁴正会員 工修 建設省土木研究所 振動研究室 (茨城県つくば市大字旭 1 番地)

液状化を考慮した基礎構造物の耐震設計では、液状化による地盤反力の低減を適切に評価することが重要である。本研究は、模型地盤表面上に載圧を加えられる加圧式土槽を用いた振動台実験により、液状化地盤における水平地盤反力の速度依存性に関して検討を行ったものである。実験結果から、液状化地盤と構造物の間に生じる水平地盤反力は強い速度依存性を示しており、地盤-構造物間の相対速度が速くなるほど周辺地盤に正のダイレイタンスが生じ、大きな水平地盤反力が発生することがわかった。

Key Words: *Liquefaction, Horizontal Subgrade Reaction, Velocity Dependence Shaking Table Test*

1. はじめに

過去に経験した多くの液状化事例から、地盤反力の低下による基礎の損傷や杭の破壊等が報告されている。道路橋示方書¹⁾等の現行設計基準では、液状化に対する抵抗率 F_L と深度に応じて、地盤反力係数等の土質定数に乗じる低減係数を定めているが、液状化による地盤反力の低減については未解明な点も多い。

液状化地盤における地盤反力の速度依存性に関しては、これまでもいくつかの研究報告²⁾がある。これらの研究はおもに液状化に伴う流動現象を対象としており、流動化地盤を粘性流体とみなして、地盤反力の速度依存性が検討されている。本実験は、液状化地盤と基礎構造物の相互作用に関する研究の一環として、液状化地盤と基礎構造物の間に生じる相対速度が地盤反力に及ぼす影響を検討したものである。

2. 実験概要

図-1 に本実験に用いた装置の概要を示す。土槽内の地盤材料を振動台加振により液状化させ、土槽側面から載荷ピストンを水平方向に貫入して地盤反力を計測するものである。使用した鋼製の加圧式土槽(内寸 100×50×50cm)は、土槽と上蓋の間にゴム膜を挟み、空気圧をゴム膜上方に加えることにより地盤材料に所定の上載圧がかけられる構造になっている。土槽内には間隙水圧計(4

箇所)、土圧計(1 箇所)、加速度計(5 箇所)を設置した。地盤反力は、ピストン先端に取り付けた円柱状の載荷板($\phi 60 \times 90\text{mm}$)に作用する反力をロードセルで計測した。載荷ピストンの駆動装置には、油圧式アクチュエータを使用し、載荷ピストンの貫入量は 95mm とした。

地盤材料には豊浦砂を用い、目標相対密度を $Dr=50, 70\%$ の 2 種類とした。ボーリングと予備加振により所定の相対密度を有するように地盤を調整し、上載圧を加えた後、静水圧状態まで排水した。地盤材料に加える上載圧は $9.8\text{kPa}(0.1\text{kgf/cm}^2)$ とした。

地盤作成後、任意の加振加速度で繰返し 20 回の正弦波加振を行い、加振完了後ただちに載荷ピストンを地盤内に貫入して地盤反力を計測した。このとき土槽内は、振動台加振開始から載荷ピストン貫入終了まで、一定の上載圧を保つようにした。加振周波数は、予備実験結果から、液状化後の地盤のせん断ひずみを大きく増幅させる周波数を求め、 $Dr=50\%$ で 2.0Hz、 $Dr=70\%$ で 3.0Hz とした。

表-1 の実験ケースに示すように、載荷ピストンの貫入速度と加振加速度を変化させ実験を繰返し、地盤反力の速度依存性に関して検討を行った。表中の振動台加振加速度は、振動台加振時に計測した加振加速度の平均振幅である。本実験では加振中の地盤のせん断ひずみが 10^{-2} 以上生じた液状化地盤を対象とした。

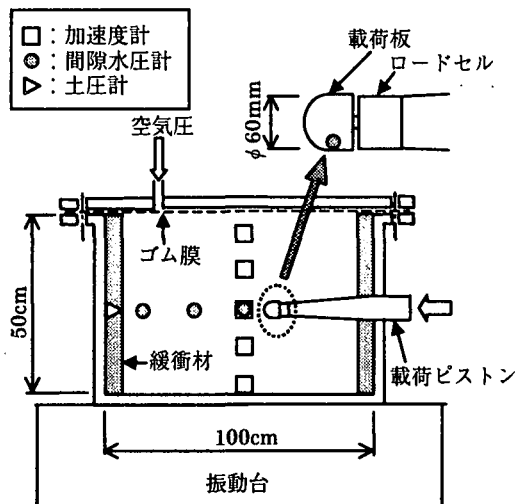


図-1 実験装置の概要

表-1 実験ケース

相対密度 (%)	载荷ピストン 貫入速度 (mm/sec)	振動台加振加速度 (m/sec ²)
50	1	2.58, 3.48, 3.50, 4.68, 無加振
	10	2.34, 2.82, 3.48, 4.25
	50	2.45, 3.14, 3.69, 4.99
	100	2.92, 3.05, 3.36, 4.36
	200	2.66, 2.99, 3.76, 4.47
	400	2.75, 3.27, 3.99
70	1	4.28, 4.55, 6.19, 6.74, 無加振
	50	4.38, 4.54, 5.09, 5.92
	200	4.54, 4.56, 5.33, 6.79

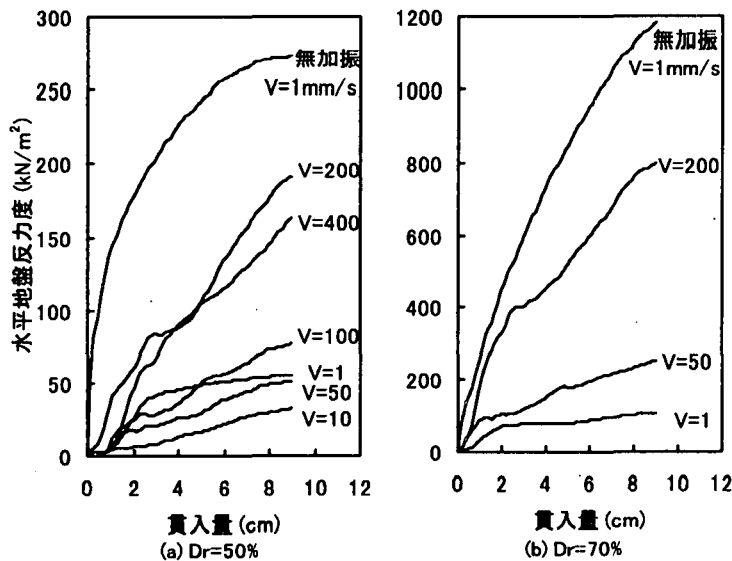


図-2 貫入量と水平地盤反力度

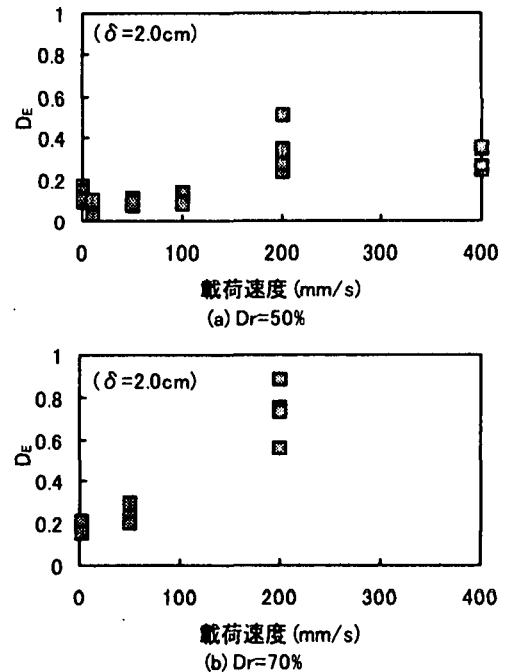


図-3 载荷速度と D_E の関係

3. 载荷速度と水平地盤反力の関係

载荷ピストン貫入時に得られる水平地盤反力度の一例を図-2に示す。水平地盤反力度はロードセルで計測した地盤反力を载荷板の投影面積で除した値である。図-3には载荷速度と水平地盤反力係数の低減率 D_E の関係を示す。ここで、水平地盤反力係数 k_H は着目する貫入量と水平地盤反力度の割線勾配で評価した。図-3における着目貫入量は $\delta=2.0\text{cm}$ である。また、水平地盤反力係数の低減率 D_E は、振動台を加振せずに貫入試験だけを行ったケース（無加振・ $V=1\text{mm/s}$ ）の水平地盤反力係数を k_{H0} とし、 $D_E=k_H/k_{H0}$ として算出した。図-3の着目貫入量を $\delta=2.0\text{cm}$ としたのは、貫入量が大きくなれば水平地盤反力に及ぼす土槽拘束の影響が大きくなることと、一方、 $Dr=50\%$ の場合、貫入量が小さい 1cm 程度までの水平地盤反力度には 0 に近い値を示すものが多く、本実験

では载荷速度による水平地盤反力の違いが認められなかったことを考慮したものである。

図-2,3 から次のことが考察される。

- ① $Dr=50\%$ の载荷速度 $V=1\text{mm/s}$ を除けば、 $V=200\text{mm/s}$ 程度までは、液状化地盤の水平地盤反力は载荷速度が速いほど大きくなる。
- ② $Dr=70\%$ の $V=200\text{mm/s}$ では D_E が 0.9 程度を示すものもあり、液状化したにもかかわらず高い水平地盤反力が得られた。
- ③ $Dr=50\%$ の载荷速度 $V=200, 400\text{mm/s}$ に着目すると、水平地盤反力の増大に関与する载荷速度には限界があると推測される。
- ④ 载荷速度が速いほど水平地盤反力が大きくなる傾向は、相対密度が高いほど顕著である。

4. 載荷試験に伴う間隙水圧の変化

水平地盤反力の速度依存性を、載荷ピストンの貫入に伴う間隙水圧の変化で考察した。図-4に貫入量と過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v$ の関係を示す。ここで、載荷速度は(a)1mm/s,(b)10mm/s,(c)50mm/s,(d)200mm/sであり、すべて $Dr=50\%$ の結果である。着目した間隙水圧計は載荷板に取り付けたW1と載荷板の貫入方向に固定した

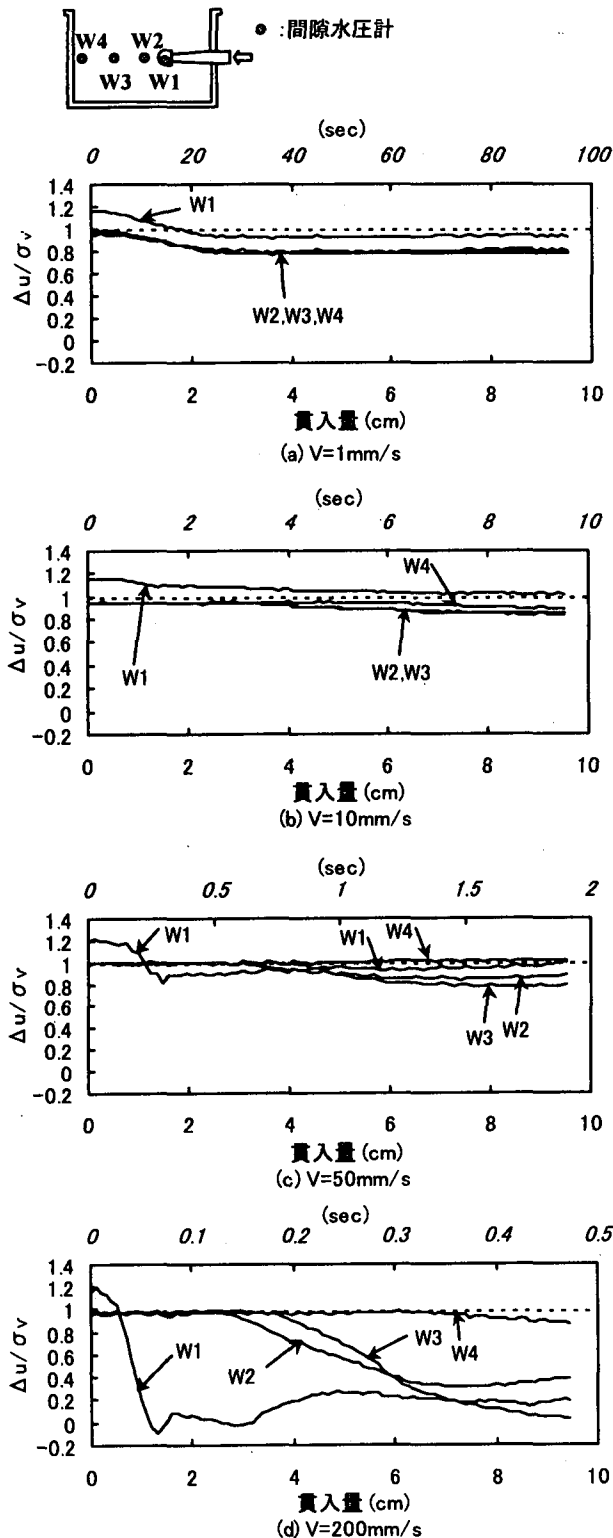


図-4 載荷試験に伴う過剰間隙水圧比の変化

W2,W3,W4である。ここで、W1の受圧面は動水圧の影響を避けるため土槽底面に向けた。その他の受圧面は、貫入方向に平行する土槽側面に向けて設置した。

載荷ピストン貫入直前の過剰間隙水圧比は、(a)~(d)いずれのケースでもほぼ1.0を示している。W1の値だけが極めて高いのは、受圧面の向きに関係すると考えられる。

(a) $V=1\text{mm/s}$ では、貫入量3cmまでにすべての計測点の過剰間隙水圧比が2割程度の低下を示し、その後はほぼ一定値をとる。低下した2割の過剰間隙水圧比は、地表面から間隙水圧計を設置した土槽中央までの土の有効重量に相当することから、貫入量3cmまでに過剰間隙水圧の消散が起こったものと判断される。 $V=1\text{mm/s}$ の水平地盤反力が $V=10,50\text{mm/s}$ より大きくなったのは、過剰間隙水圧の消散が影響したものと考えられる。

(b) $V=10\text{mm/s}$,(c) $V=50\text{mm/s}$,(d) $V=200\text{mm/s}$ の貫入量3cmまでに着目すると、載荷板に設置したW1が載荷速度に従って大きく低下しており、 $V=200\text{mm/s}$ では過剰間隙水圧比が0付近にまで達している。このとき、W2,W3,W4は概ね過剰間隙水圧比1.0を保ったままであり、間隙水圧の低下が載荷板の周辺だけに発生している。載荷速度が速くなるほど載荷板周辺の地盤に正のダイレイタンスが生じ、大きな水平地盤反力が発生したと判断される。貫入量3cm以降は、W2→W3→W4の順に間隙水圧が低下を示しており、地盤の抵抗範囲が徐々に広がっていく状況がわかる。

図には示していないが、 $Dr=50\%$ の $V=400\text{mm/s}$ では、間隙水圧の低下が $V=200\text{mm/s}$ と同程度であり、水平地盤反力の増大に関与する載荷速度には限界があると考えられる。また、載荷速度に応じた間隙水圧の低下は、 $Dr=50\%$ より $Dr=70\%$ の方が顕著であり、相対密度が高いほど載荷速度の影響を受けやすいと考えられる。

本実験で得られた水平地盤反力の速度依存性は、低拘束圧の条件下で得られた傾向であり、高い拘束圧での検証については別途行う必要がある。

5. 土槽拘束の影響

土槽側壁に設置した土圧計の計測結果より、本実験で得られた水平地盤反力が土槽壁による拘束の影響をどの程度受けているか考察した。図-5に貫入量と側壁土圧の関係を示す。

加振せずに貫入試験だけを行ったケース(無加振・ $V=1\text{mm/s}$)に着目すると、 $Dr=50,70\%$ ともに載荷ピストン貫入直後から側壁土圧が上昇しており、液化化したケースに比べ土槽拘束の影響を強く受けている。 $Dr=50\%$ と70%を比較すると、相対密度が高い $Dr=70\%$ の方が土槽拘束の影響が大きい。

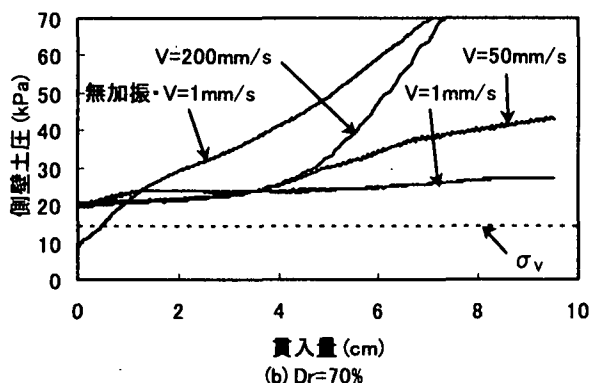
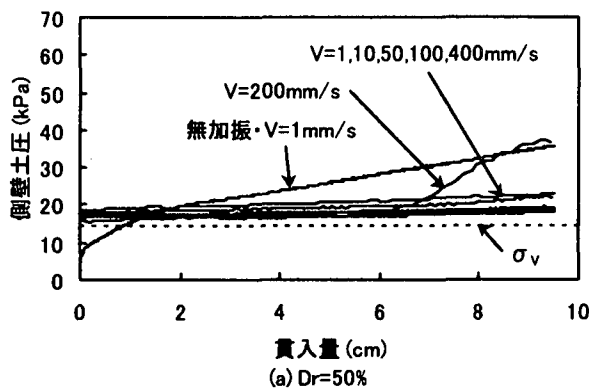


図-5 側壁土圧の変化

液状化したケースの側壁土圧に着目すると、(a)Dr=50%では貫入量6cmまで、(b)Dr=70%では貫入量3cmまで、側壁土圧の上昇がほとんどなく土槽拘束の影響は小さいと判断される。

6. 液状化程度と水平地盤反力係数の関係

図-3の载荷速度と水平地盤反力係数の低減率 D_E の関係によれば、同じ载荷速度でも得られた水平地盤反力係数の値には差がある。静的な载荷で水平地盤反力を求めた実験³⁾では、液状化地盤の水平地盤反力は液状化程度が大きいほど低下傾向を示している。そこで、液状化程度の違いが水平地盤反力係数の低減率 D_E に及ぼす影響を検討した。ここでは、液状化程度の指標として振動台加振時に地盤に生じた最大せん断ひずみ両振幅 γ_{DA} を用いた。地盤のせん断ひずみは地盤内加速度を2回積分して地盤変位を算出し、土槽中央における地盤変位の勾配より求めた。

図-6に最大せん断ひずみ両振幅 γ_{DA} と水平地盤反力係数の低減率 D_E の関係を示す。V=200mm/sではDr=50,70%ともに、最大せん断ひずみ両振幅 γ_{DA} が大きいほど水平地盤反力係数の低減率 D_E が低下しているのがわかる。しかしながら、その他の载荷速度では、低減率 D_E が最大せん断ひずみに依存しない、または、最大せん断ひずみに応じて低減率 D_E が増加するケースもある。液状化程度と水平地盤反力係数の低減率 D_E の系統的な関係を導出するためには、実験ケースを増やしてさ

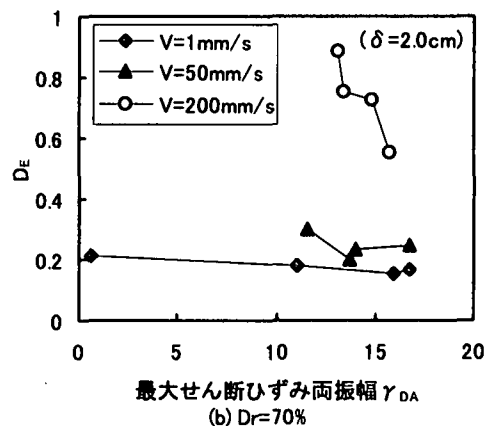
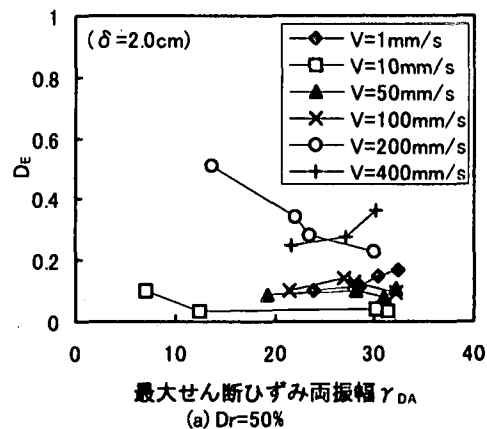


図-6 最大せん断ひずみ γ_{DA} と D_E の関係

らに詳細な検討が必要であると考えられる。

7. まとめ

本実験の結果から、液状化地盤と構造物の間に生じる水平地盤反力は強い速度依存性を示しており、地盤—構造物間の相対速度が速くなるほど周辺地盤に正のダイレイタンスが生じ、大きな水平地盤反力が発生することがわかった。

今後、以下の点に関してさらに検討が必要であると考えられる。

- ①比較的高い拘束条件における速度依存性の検証
- ②液状化程度と水平地盤反力係数の低減率 D_E の関係

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，1996
- 2) (社) 地盤工学会：委員会報告 3. 地盤流動が地中構造物に与える影響，地震時の地盤・土槽構造物の流動性および永久変形に関するシンポジウム pp. 71-86，1998
- 3) 森光，田村，東，小林：液状化地盤における地盤反力の低減に関する実験的研究，(社) 地盤工学会 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム pp. 527-530，1999