

◆ 液状化特集 ◆

# 液状化地盤における地盤反力係数に関する実験的検討

小林 寛\* 森光太郎\*\* 東 拓生\*\*\* 田村敬一\*\*\*\*

## 1. はじめに

一般に、液状化地盤に対する土木構造物の耐震設計では、基礎を支えている地盤の地盤反力係数等を液状化しないときよりも低減させることにより液状化の影響を考慮している(例えば1),2),3)。しかし、例えば道路橋示方書で規定している地盤反力係数の低減割合は兵庫県南部地震の被災事例と過去の実験的研究などを踏まえたデータから工学的に定められたものであり、基準類ごとにその値は異なっている。この原因としては、液状化による地盤反力係数の低減特性については、現象の複雑さから十分な知見が得られているとは言い難い状況にあることが考えられる。これまでの実験的研究<sup>4)~10)</sup>では、主として地盤反力係数の低減割合を表す $D_E$ を評価するための指標として、過剰間隙水圧比 $L_u$ (過剰間隙水圧 $\Delta u$ を有効上載圧 $\sigma'_v$ で除した値)が用いられてきた。しかし、これらの研究結果では $L_u$ と $D_E$ の関係は実験条件によって一定の傾向を示すものの明確に整理されていないのが現状である。また、基礎構造物の耐震性能の照査を行う上での $D_E$ を評価するための指標は $L_u$ だけでなく液状化に対する抵抗率 $F_L$ 、地盤のせん断ひずみ振幅、基礎構造物と地盤の相対速度等が挙げられる。なかでも $F_L$ は耐震設計上 $D_E$ を評価するための重要な指標である。

本研究では上記のことに鑑み、模型振動台実験により、過去の研究で未解明な点に着目しながら、液状化による地盤反力係数の低減を評価すること

を目的とした。実験結果から、液状化に対する抵抗率 $F_L$ 、地盤のせん断ひずみ振幅、基礎構造物と地盤の相対速度等の諸因子が地盤反力係数の低減に与える影響を検討した。ここでは、着目点の異なる次に示す2種類の実験を行った。

実験Ⅰ： $F_L$ と地盤のせん断ひずみに着目した実験  
液状化による地盤反力係数の低減と液状化に対する抵抗率 $F_L$ および液状化地盤のせん断ひずみとの関係を明らかにすることを目的とする。

実験Ⅱ：地盤反力係数の速度依存性に着目した実験

液状化地盤における基礎構造物と地盤の相対速度が地盤反力係数の低減に与える影響について明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験概要

図-1に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、土槽側面から载荷ピストンを水平方向に貫入して地盤反力を計測する。使用した土槽(内寸100×48×50cm)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をかけられる加圧式土槽である。地盤反力については、ピストン先端に取り付けた载荷板に作用する反力をロードセルで計測する。ピストンの载荷は、実験Ⅰでは貫入速度0.83mm/sec(50mm/min)、貫入量55mmとし、実験Ⅱでは、油圧式アクチュエータを用い、貫入速度を1~400mm/secの範囲で変化させ、貫入量は95mmとした。また、加速度計は、土槽中央部に土槽底面から10cm間隔で5箇所に取り付けた。

図-2に実験方法および実験のフローを示す。地盤材料には豊浦砂を用い、ボーリングと予備加振によって所定の相対密度に地盤を作成し、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9.8kPa(0.1kgf/cm<sup>2</sup>)に統一した。地盤作成後、所定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载荷ピ

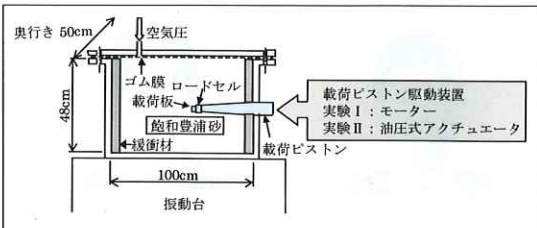


図-1 実験装置の概要

実験Ⅰ ( $F_L$  と地盤のせん断ひずみに着目した実験)

①地盤作成  
 地盤材料 飽和豊浦砂  
 相対密度  $D_r = 50, 70, 80\%$   
 上載圧 9.8kPa (0.1kgf/cm<sup>2</sup>)  
 作成方法 ボイリング  
 → 予備加振  
 → 圧密排水

②振動台加振  
 所定の加振加速度で繰返し 20 回の正弦波加振を行う。  
 加振周波数  $D_r = 50\% \rightarrow 2\text{Hz}$   
 $D_r = 70, 80\% \rightarrow 3\text{Hz}$

③载荷ピストン貫入  
 加振完了後ただちにピストンを地盤内に貫入し、地盤反力を計測する。  
 载荷方法 変位制御  
 貫入速度 0.83mm/sec (50mm/min)  
 貫入量 55mm

④繰返し実験  
 加振加速度を変化させ①～③を繰返し、液状化程度の違いが水平地盤反力の低減に及ぼす影響を検討する。

(a) 実験Ⅰ

実験Ⅱ (地盤の速度依存性に着目した実験)

①地盤作成  
 地盤材料 飽和豊浦砂  
 相対密度  $D_r = 50, 70\%$   
 上載圧 9.8kPa (0.1kgf/cm<sup>2</sup>)  
 作成方法 ボイリング  
 → 予備加振  
 → 圧密排水

②振動台加振  
 所定の加振加速度で繰返し 20 回の正弦波加振を行う。  
 加振周波数  $D_r = 50\% \rightarrow 2\text{Hz}$   
 $D_r = 70\% \rightarrow 3\text{Hz}$

③载荷ピストン貫入  
 加振完了後ただちにピストンを地盤内に貫入し、地盤反力を計測する。  
 载荷方法 変位制御  
 貫入速度 1, 10, 50, 100, 200, 400mm/sec  
 貫入量 95mm

④繰返し実験  
 貫入速度と加振加速度を変化させ①～③を繰返し、液状化地盤における水平地盤反力の速度依存性を検討する。

(b) 実験Ⅱ

図-2 実験方法とフロー

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载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。振動台の加振周波数は、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、相対密度  $D_r = 50\%$  で 2.0Hz、 $D_r = 70, 80\%$  で 3.0Hz とした。

実験Ⅰでは、振動台の加振加速度を変化させて、液状化に対する抵抗率  $F_L$  や地盤のせん断ひずみの違いが水平地盤反力の低減に及ぼす影響を検討した。一方、実験Ⅱでは、载荷ピストンの貫入速度を変化させて、液状化地盤における基礎構造物

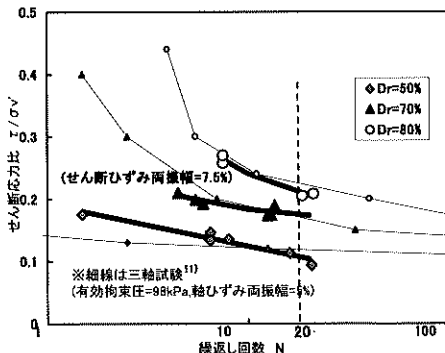


図-3 液状化強度曲線

と地盤の相対速度が地盤反力係数の低減に与える影響について検討を行った。

### 3. 液状化程度の評価

液状化の程度を評価するために、液状化に対する抵抗率  $F_L$  を次式により求めた。

$$F_L = \frac{R_{L20}}{L} \quad (1)$$

ここで、 $R_{L20}$  は、相対密度ごとに図-3 から算出された繰返し回数 20 回に相当するせん断応力比と定義した。なお、図-3 に示す繰返し回数  $N$  は図-4 のせん断応力比の時刻歴からせん断ひずみ両振幅が 7.5% になるまでの繰返し回数を読みとった。また、図-3 の液状化強度曲線は既往の研究結果<sup>11)</sup>と同様の傾向を示し

ている。

$L$  は実験ケースごとに決定されるが、20 回繰返し加振したせん断応力比の平均振幅とした。具体的には、せん断応力比の時刻歴波形から半波ごとの積分面積値が同じになるように振幅調整した補正正弦波を作成し、補正正弦波の平均振幅をとることとした。図-4 に示すように計測波形は液状化後にスパイク状の波形となるが、補正正弦波では液状化前後で同程度の振幅が得られた。

図-5 に実験から得られた  $F_L$  と 20 回加振直後の過剰間隙水圧比  $Lu$  の関係を示す。この関係は、既往の三軸試験のデータ解析<sup>12)</sup>による比較的液状化強度の低い砂と類似の傾向を示した。 $D_r = 50\%$  において  $D_r = 70, 80\%$  の場合より液状化強度が若干高い傾向が見られるが、その理由

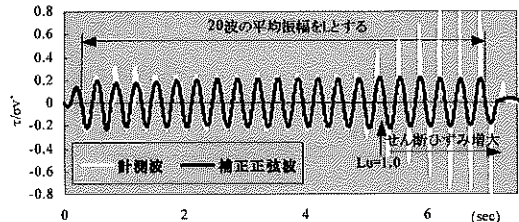


図-4 補正正弦波の作成

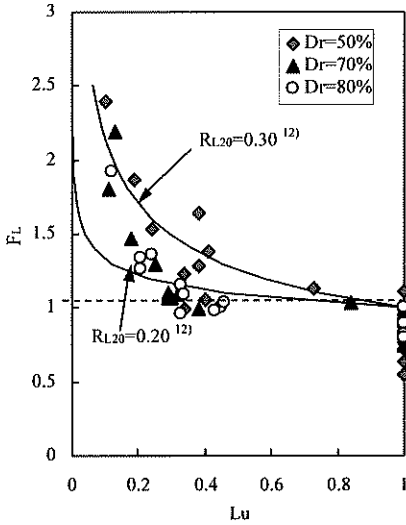


図-5  $F_L$  と  $L_u$  の関係

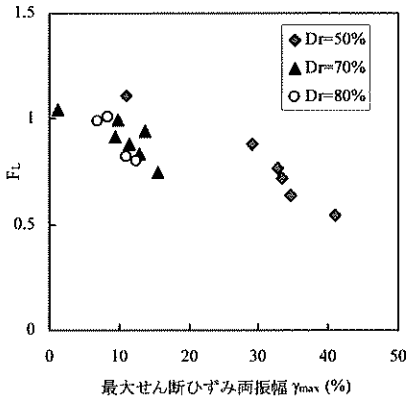


図-6  $F_L$  と  $\gamma_{max}$  の関係

としては本実験では、 $D_r = 50\%$ の加振加速度が他より小さかったため、振動台の加振波に含まれる高振動数成分(ノイズ)の影響を強く受けたことが考えられる。図-6には、 $L_u$ が1.0に達した加振ケースについて、地盤内に生じた最大せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{max}$ と $F_L$ の関係を示す。 $F_L$ が小さいほど大きなせん断ひずみが生じていることがわかる。

#### 4. 液状化程度と地盤反力度の関係

##### 4.1 貫入量と地盤反力度の関係

載荷ピストン貫入時に得られた貫入量と地盤反力度の関係の一例を図-7に示す。地盤反力度はロードセルで計測した地盤反力を載荷板の投影面積で除した値である。この図の荷重(地盤反力度)-変位(貫入量)関係から次のことが考察できる。なお、本実験での載荷ピストン貫入量は土槽寸法に対して十分小さく、土槽壁面の影響は少ないものと考えられる。

- (1) 無加振の荷重-変位関係を基準に考えた場合、地盤反力度の低下は、相対密度に関わらず、 $F_L < 1.1$ を示した実験ケースに認められる。
- (2)  $D_r = 50\%$ では、 $F_L < 1.0$ の実験ケースに貫入量1cm程度まで、地盤反力度が出現しない無抵抗領域が存在する。この無抵抗領域は、加振時に30%程度以上の最大せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{max}$ を経験したケースに認められたものであり、 $\gamma_{max}$ が7%であった $F_L = 1.06$ のケースでは確認され

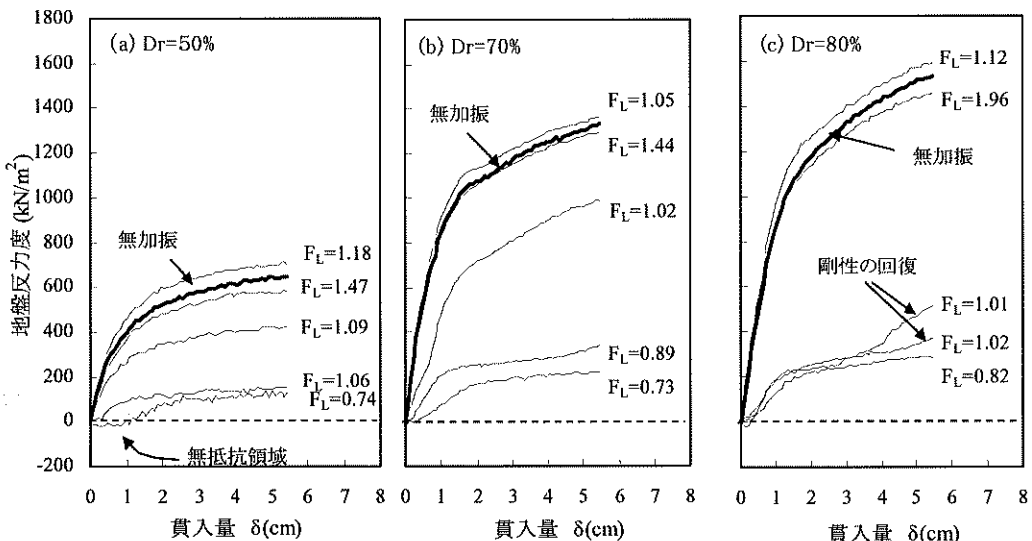


図-7 貫入量と地盤反力度

なかった。

(3)  $D_r = 80\%$ の実験ケースには、液状化によって地盤反力度は低下するものの、変位がある程度進行した後に剛性の回復が確認できるケースがある。剛性の回復が認められる実験ケースの  $F_L$  は、回復が認められない実験ケースの  $F_L$  より大きい値を示している。また、剛性の回復が認められる実験ケースの  $\gamma_{max}$  は、回復が認められない実験ケースより小さい値を示していた。図-8に示す载荷ピストン貫入時における間隙水圧の変化によれば、剛性の回復は間隙水圧の低下を伴っており、正のダイラタンシーが発生したことにより、有効応力が回復したものと考えられる。このことは、液状化によって地盤反力度は低減するものの、基礎構造物と地盤との相対変位がある程度大きくなると地盤反力度の回復が生じることを示唆するものである。剛性が回復する変位や回復量は、地盤の相対密度や液状化程度によって異なるものと推察される。

#### 4.2 液状化に対する抵抗率 $F_L$ と地盤反力係数の低減率 $D_E$ の関係

地盤反力係数  $k_H$  は道路橋示方書下部構造編に規定されるように着目する貫入量と地盤反力度の割線勾配で定義した。また、地盤反力係数の低減率  $D_E$  は加振しないケースの地盤反力係数を  $k_{H0}$  とし、 $D_E = k_H/k_{H0}$  として算出した。図-9に  $F_L$  と着目貫入量を  $\delta = 3.0\text{cm}$  とした場合の  $F_L$  と  $D_E$  の関係を示す。 $D_E$  は  $F_L = 1.0$  をはさんで急激に低下し、 $F_L < 1.0$  では  $F_L$  の減少に伴い緩

やかな低下傾向を示した。 $F_L$  と  $D_E$  の関係に関して、相対密度による違いは確認できなかった。また、地盤反力係数の着目変位量  $\delta$  が 1.0、5.0cm の場合においても、図-9と同様の結果が得られた。

### 5. 貫入速度と地盤反力度の関係

#### 5.1 貫入速度と地盤反力度の関係

図-10は载荷ピストン貫入時に得られた貫入量と地盤反力度の関係の一例である。図中、 $V$  は载荷ピストンの貫入速度を表す。図-11には貫入速度と地盤反力係数の低減率  $D_E$  の関係を示す。図-11における着目貫入量は  $\delta = 2.0\text{cm}$  である。また、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-11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载荷ピストンと土槽の壁との距離が近くなり、土槽の影響が生じる可能性があることと、また、 $D_r = 50\%$  の場合、貫入量が小さい 1cm 程度までの地盤反力度には 0 に近い値を示すものが多く、本実験では貫入速度による地盤反力度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-10、11から次のことが考察される。

- (1)  $D_r = 50\%$  の貫入速度  $V=1\text{mm/s}$  を除けば、 $V=200\text{mm/s}$  程度までは液状化地盤の地盤反力度は貫入速度が速いほど大きくなる。
- (2)  $D_r = 70\%$  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地盤反力度が得られた。
- (3)  $D_r = 50\%$  の貫入速度  $V = 200, 400\text{mm/s}$  に着目すると、地盤反力度の増大に参与する貫入速

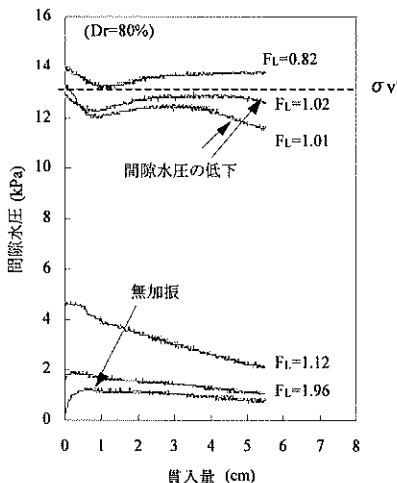


図-8 貫入量と間隙水圧

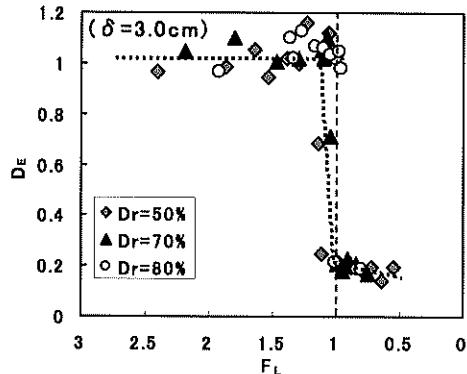


図-9  $F_L$  と  $D_E$  の関係

度には限界があると推測される。

(4) 貫入速度が速いほど  $D_E$  が大きくなる傾向は、  
相対密度が高いほど顕著である。

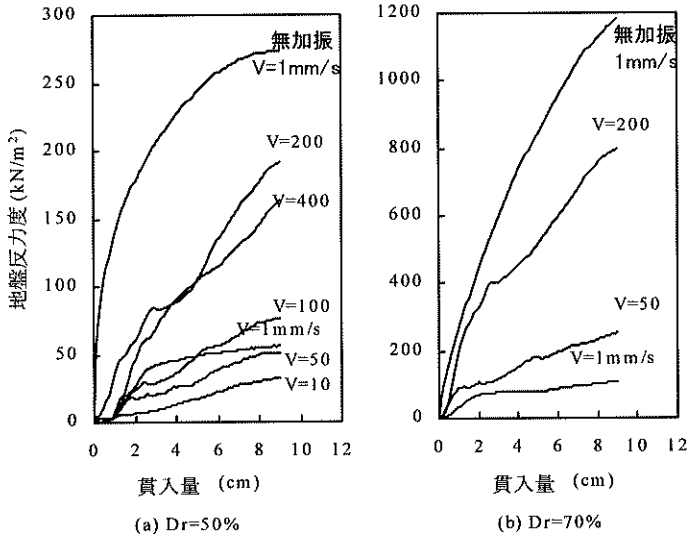


図-10 貫入量と水平地盤反力度

### 5.2 荷重ピストンの貫入に伴う間隙水圧の変化

基礎構造物と地盤の相対速度が地盤反力の低減に与える影響について、荷重ピストンの貫入に伴う間隙水圧の変化で考察した。

図-12 に貫入量と過剰間隙水圧比の関係を示す。ここでは、 $D_r = 50\%$ 、貫入速度 (a)1mm/s、(b)200mm/s についてのみ示した。着目した間隙水圧計は載荷板に取り付けた  $W_1$  と載荷板の貫入方向に固定した  $W_2, W_3, W_4$  である。 $W_1$  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。

荷重ピストン貫入直前の過剰間隙水圧比は、(a)、(b) いずれのケースでもほぼ 1.0 を示している。 $W_1$  の値だけが高めであ

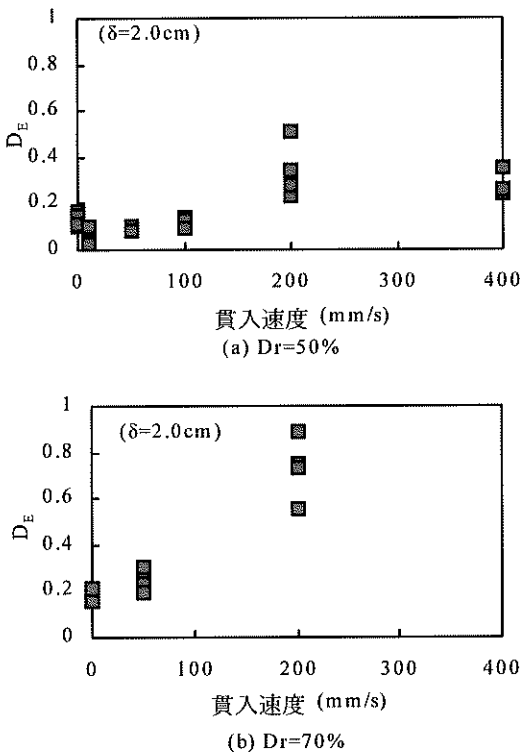


図-11 貫入速度と  $D_E$  の関係

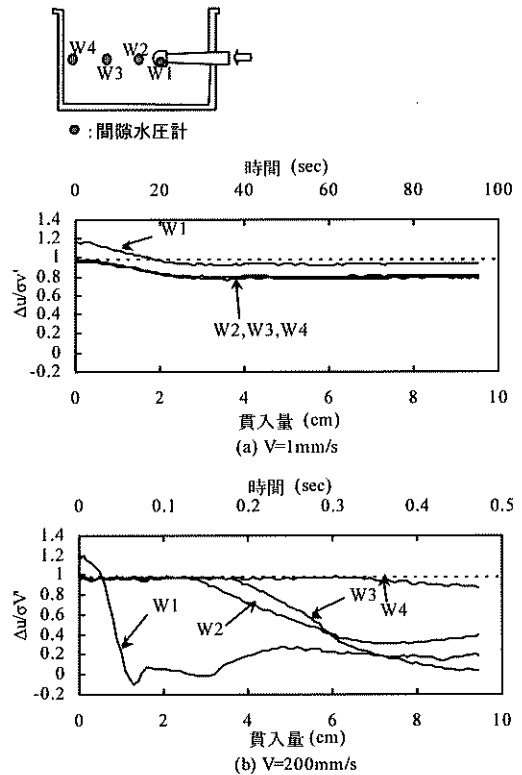


図-12 荷重試験に伴う過剰間隙水圧比の変化

るのは、受圧面の向きに関係すると考えられる。実験結果から、 $V = 1\text{mm/s}$ 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。これに対して  $V = 200\text{mm/s}$ では、貫入量 3cm までに着目すると、載荷板上に設置した  $W_1$  が貫入速度に従って低下し、過剰間隙水圧比が 0 付近にまで達している。このとき、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  は概ね過剰間隙水圧比 1.0 を保ったままであり、間隙水圧の低下は載荷板の周辺だけに発生している。貫入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、大きな地盤反力度が得られたと判断できる。

## 6. 結論

液状化による地盤反力係数の低減を評価することを目的に、着目点の異なる 2 種類の模型振動台実験を行った。本実験より以下のことが明らかになった。

(1) 液状化による地盤反力係数の低減率  $D_E$  は液状化に対する抵抗率  $F_L = 1.0$  をはさんで急激に低下し、 $F_L < 1.0$  では  $F_L$  の減少に伴い緩やかな低下傾向を示した。

(2) 相対密度が高い地盤では、液状化によって地盤反力度は低減するものの、基礎構造物と地盤との相対変位がある程度大きくなると地盤反力度の回復が生じると考えられる。地盤反力度が回復する変位や回復量は、地盤の相対密度や液状化程度によって異なるものと推察される。

(3) 液状化地盤における基礎構造物と地盤との相対速度が大きくなると、ある程度地盤反力度及び  $D_E$  は増大するが、地盤反力度及び  $D_E$  が増大する相対速度には限界があると推測される。また、地盤反力度及び  $D_E$  が増大する傾向は、相対密度

が高いほど顕著である

(4) 基礎構造物と地盤の相対速度が大きくなると基礎周辺地盤に正のダイレイタンスが生じ、大きな地盤反力が発生する。

## 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) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999.10。
- 3) (社)日本建築学会：建築基礎構造設計指針，1988。
- 4) 常田賢一、木全俊雄、吉田精一：地盤の流動化特性およびその影響に関する実験的検討，第 16 回土質工学研究発表会講演概要集，pp.629-632，1981。
- 5) 野田節男、喜田浩、飯田毅：液状化過程における孔あき杭の水平抵抗について，第 20 回地震工学研究発表会講演概要集，pp.281-284，1990。
- 6) 規矩大義、安田進、吉田剛：埋設管に対する地盤の拘束力と液状化程度の関係，第 20 回地震工学研究発表会講演概要集，pp.277-280，1990。
- 7) Orense, R., Towhata, I. and Yamashita, Y. : Response of Pipes Subjected to Ground Displacements Induced by Liquefaction, 第 28 回土質工学研究発表会講演概要集，pp.1175-1178，1993。
- 8) Hagiwara, R., Ninomiya, Y., Sento, N. and Hamada, H. : Model Test on the Horizontal Liquefied-subgrade Reaction in Pile-foundation Ground, Proc. 4th U. S. -Japan Workshop on Soil Liquefaction, pp.371-374，1994。
- 9) 箕輪親宏、水野二十一、阿部秋男：液状化過程における杭基礎の挙動(その 1、その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.371-374，1993。
- 10) 佐々木康、松本秀應、近藤益典：液状化地盤中のくいの水平載荷試験，土木技術資料 29-11，pp.21-26，1987。
- 11) 東拓生、大塚久哲、二宮嘉朗：砂質土の相対密度を考慮した液状化強度曲線の定式化，土木学会第 49 回年次学術講演会，pp.528-529，1994。
- 12) 安田進： $F_L$  と過剰間隙水圧比の関係，第 21 回土質工学研究発表会，pp.841-842，1986。

小林 寛\*



国土交通省土木研究所  
耐震技術研究センター  
振動研究室研究員  
Hiroshi KOBAYASHI

森光 太郎\*\*



(前 振動研究室交流研究員)  
Taro MORIMITSU

東 拓生\*\*\*



国土交通省土木研究所企画部情報資料課資料係長  
(前 振動研究室研究員)  
Takuo AZUMA

田村 敬一\*\*\*\*



国土交通省土木研究所耐震技術研究センター振動研究室長、工博  
Dr.Keichi TAMURA