

# 流動化に伴う地盤変位及び橋梁基礎に作用する力に関する研究

東 拓生<sup>1</sup>・田村 敬一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 建設省土木研究所 振動研究室 研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

<sup>2</sup>正会員 工博 建設省土木研究所 振動研究室 室長 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

平成7年兵庫県南部地震では、臨海部の埋立て地盤の広い範囲で液状化が発生するとともに、特に、水際線近傍では液状化に伴う流動化が発生し、橋梁基礎に残留変位が生じた事例が見られた。

本研究は、水際線構造物及びその近傍の地盤における流動化を模型振動実験によって再現することにより、地盤の水平変位及び橋梁基礎に作用する流動力の発生特性について検討を行ったものである。

**Key Words :** Liquefaction, Ground Flow, Shaking Table Test, Sea Wall, Bridge Foundation

## 1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震において、地盤の流動化により橋梁基礎に変状が生じたことに鑑みて、平成8年12月に改訂された道路橋示方書V耐震設計編では、橋に影響を与える流動化が生じる可能性がある場合は、その影響を考慮して耐震設計を行う必要があると規定された<sup>1)</sup>。流動化の発生メカニズム等については未解明な部分が多いが、同示方書では兵庫県南部地震による被災事例に基づいて、流動化の発生条件及び橋梁基礎に作用する流動力の算定方法が規定された。橋梁基礎に作用する流動力は、非液状化層内については受働土圧、液状化層内については全上載圧の30%程度の荷重を基本に、水際線からの距離及び液状化の程度によって補正を行うと規定された。

本研究は、水際線構造物及びその近傍の地盤における流動化を模型振動実験によって再現することにより、地盤の水平変位及び橋梁基礎に作用する流動力の発生特性について検討を行ったものである。

## 2. 実験方法

本実験では、土槽内に護岸構造物模型及びその背後に地盤模型を設置し、これを振動台で加振するこ

とにより液状化及び流動化を発生させた。図-1に模型の概要を示す。実験の手順は次のとおりである。  
①幅6m×奥行2m×高さ2mの土槽内に、護岸構造物模型(幅90cm×奥行2m×高さ1.3m)を設置し、その背後には、豊浦標準砂を用いて水中落下法により、相対密度22%程度のゆるい地盤模型を作成する。  
②実験前に水位を調整することにより、液状化層の上部に非液状化層を設ける。なお、本報告では、液状化層厚100cm、非液状化層厚50cm及び液状化層厚50cm、非液状化層厚100cmの2種類の地盤模型に関する実験結果を示す。

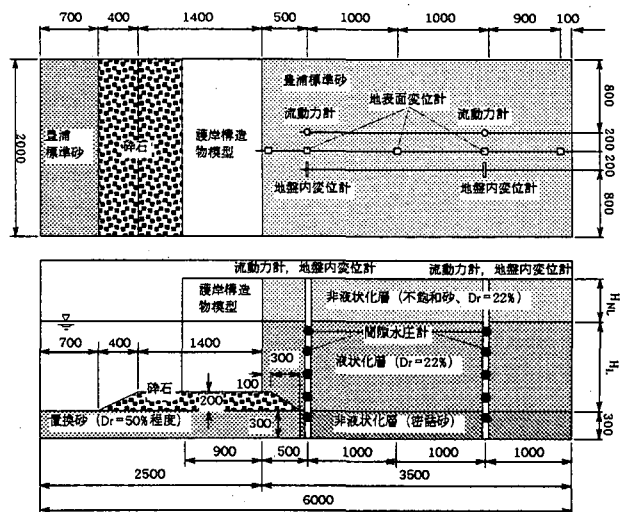


図-1 実験模型の概要

③ 1 模型につき 150gal 及び 500gal の 2 段階の加速度で、土槽の長手方向に加振することにより液状化及び流動化を発生させる。このときの背後地盤の地表面の水平変位、地盤内の水平変位を計測するとともに、背後地盤に埋設した計測器により、流動力を直接測定する。加振は 5Hz の正弦波で 5 秒間行った。

地盤内の水平変位及び流動力を計測するための計測器を図-2 に示す。(a) は、加速度計を設置した 9 枚の薄いステンレス板を蝶番で接続し、これを地盤内に埋設し、地盤の変位を計測するものである。地盤に水平変位が発生すると、ステンレス板は地盤とともに移動して傾きが生じるが、この傾きによる(重力) 加速度の変化から、地盤の水平変位の深度分布を推定するものである。(b) は、剛な支柱の周囲を 9 段の塩ビ管で覆い、支柱と塩ビ管をロードセルで接続したものを地盤模型中に埋設し、塩ビ管に作用する荷重を直接計測するものである。また、地表面の水平変位は巻取り式の変位計で計測し、地盤模型内には加速度計及び間隙水圧計を埋設した。

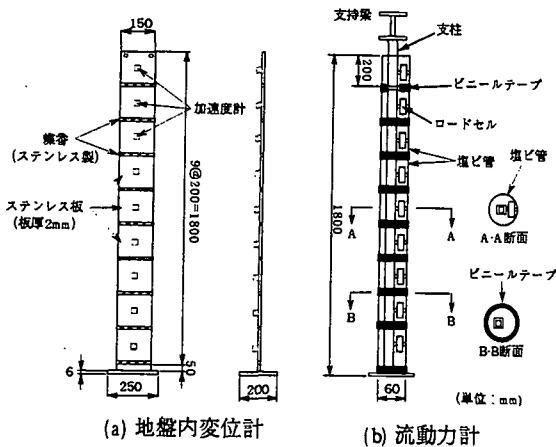


図-2 地盤内変位計及び流動力計

### 3. 地盤及び水際線構造物の挙動

図-3 に、液状化層厚が 100cm の模型を 500gal で加振した場合の振動台及び護岸構造物模型の水平加速度、護岸から 150cm 離れた位置の液状化層内の過剰間隙水圧比、護岸構造物及び地表面の水平変位の時刻歴波形を示す。過剰間隙水圧比が 0.6~0.8 に上昇する 0.4 秒以降では、護岸構造物模型の加速度は振動台の加速度に対して小さくなるとともに、位相のずれが生じている。地表面の水平変位は、0.4 秒

付近で上昇し始め、加振を停止するとともに上昇が止まっている。また、護岸構造物模型から離れるに従って水平変位が小さくなる傾向が見られる。

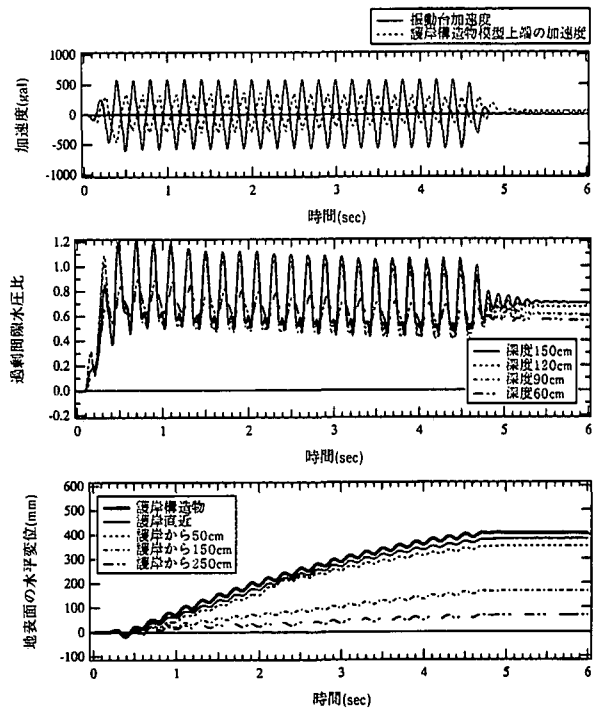


図-3 時刻歴波形の例

図-4 に、護岸構造物模型の水際線側の先端からの距離とその位置で計測された地表面の残留水平変位の関係を示す。護岸からの距離が 0 の点は、護岸の水平移動量を示している。この図から、護岸から遠くなると地表面の水平変位は小さくなる傾向が見られる。また、加振加速度または液状化層厚が大きくなると、水平変位は大きくなる傾向が見られる。

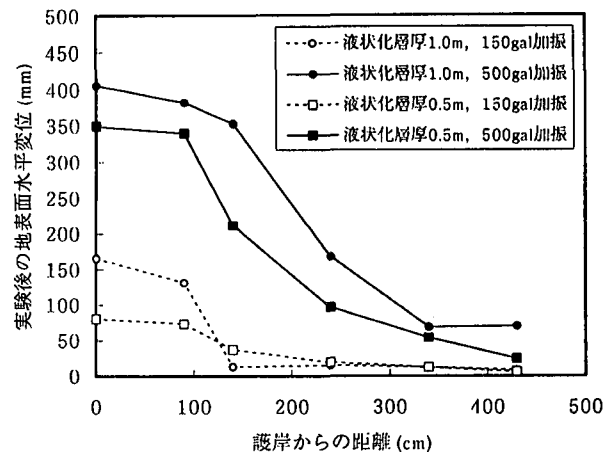


図-4 護岸からの距離と地表面水平変位の関係

図-4 をもとに、地表面水平変位を護岸の変位で除した値と護岸からの距離を護岸の高さで除した値の関係を、図-5 に示す。図中には、兵庫県南部地震後

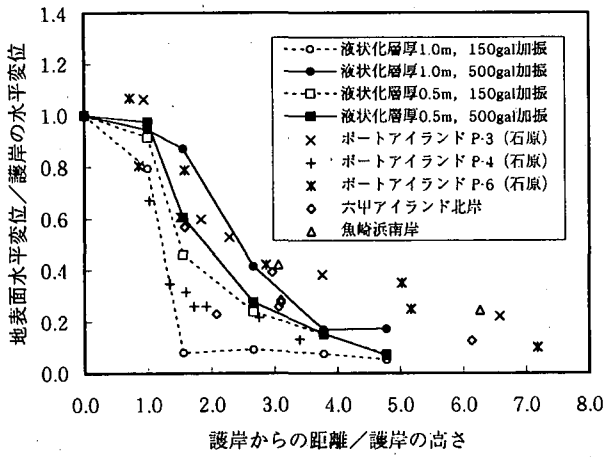


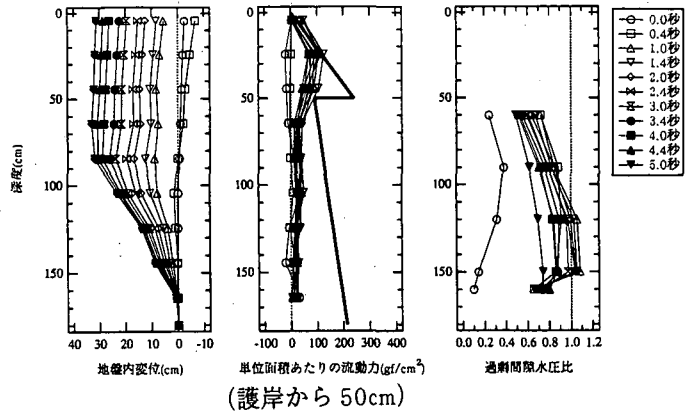
図-5 無次元化した護岸からの距離と地表面水平変位の関係

に測定された値に基づく結果を併記している<sup>2)3)</sup>。データにはばらつきが認められるが、実験結果は実測値に整合的であり、流動化による地表面水平変位と護岸からの距離の関係を、このような方法で評価することができることの可能性が示唆される。

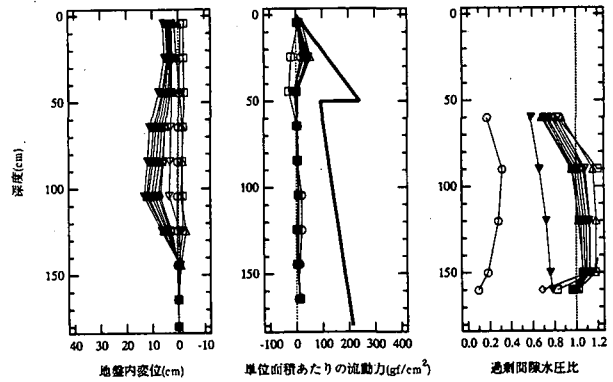
#### 4. 流動力、地盤の水平変位の深度分布

図-6に、液状化層厚100cmの地盤模型を500galで加振した際に計測された、地盤の水平変位、杭に作用する単位面積あたりの流動力（以下流動力という）、過剰間隙水圧比の深度分布を示す。上の図は護岸構造物模型から0.5m離れた位置、下の図は護岸から2.5m離れた位置のものである。水平変位については、液状化層の変位に伴って表層の非液状化層も移動している状況がみられる。また、護岸構造物模型から離れた位置では、水平変位が小さくなっている。流動力を比較すると、非液状化層の方が液状化層よりも大きくなっている。図中の太い実線は、表層の非液状化層内については受働土圧、液状化層内については全上載圧の深度分布を示している。護岸構造物模型から0.5m離れた位置では、表層50cmの非液状化層についてはほぼ受働土圧に相当する流動力が発生し、その下部の液状化層については全上載圧以下の流動力となっている。一方、護岸構造物模型から2.5m離れた位置の非液状化層では、流動力は受働土圧には達していない。図-7は、液状化層厚50cmの地盤模型を500galで加振した際の、護岸から0.5m離れた位置での深度分布であるが、このケー

スでも液状化層100cmの地盤模型と同様の結果が得られた。

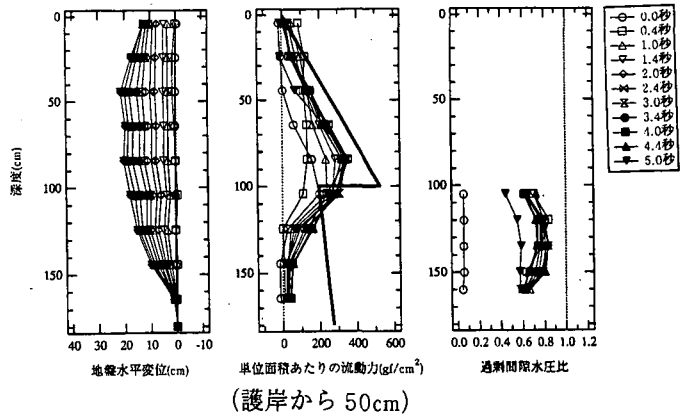


(護岸から50cm)



(護岸から250cm)

図-6 深度分布図 (液状化層厚100cm, 500gal加振)



(護岸から50cm)

図-7 深度分布図 (液状化層厚50cm, 500gal加振)

#### 5. 液状化層内の杭に作用する流動力に関する流体力学的検討

図-8に、液状化層厚100cmのケースにおいて地盤内変位計によって得られた変位の時刻歴波形を直線回帰することにより得られた、地盤の平均水平速度の深度分布を示す。150gal加振では液状化層内で速度が最大値を示すが、500gal加振では地表面から80cmまでの表層部分がほぼ同じ速度で移動している。また、水平速度は、加振加速度が大きく液状化層厚が厚いほど大きかった。

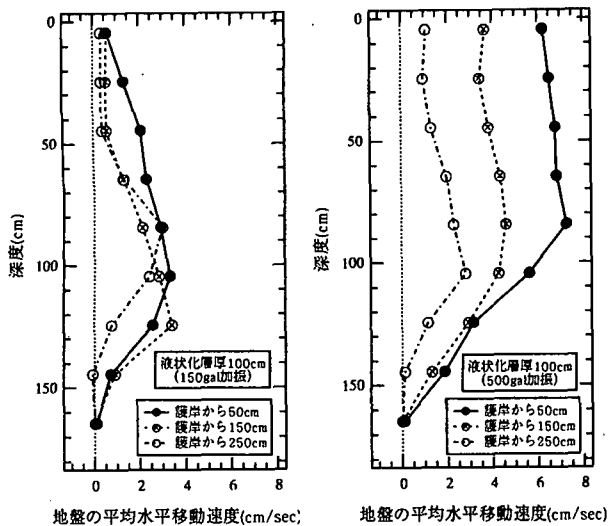


図-8 地盤の平均水平速度の深度分布

この液状化層内の平均水平速度を用いて、液状化層内の杭に作用する流動力について、流体力学的な検討を行った。浜田らは、液状化層内の杭模型を水平に牽引する実験を行い、牽引速度  $V$  と杭径  $D$  を乗じた値と抗力係数  $C_D$  の関係について検討している<sup>4)</sup>。

これによると、 $C_D$  は次式で表現される。

$$C_D = 0.05 \times 10^6 (V \cdot D)^{-0.980} \quad (R_u = 0.95)$$

$$C_D = 0.10 \times 10^6 (V \cdot D)^{-1.053} \quad (R_u = 0.90)$$

$$C_D = 0.22 \times 10^6 (V \cdot D)^{-1.195} \quad (R_u = 0.80)$$

ここに  $C_D$  : 抗力係数

$V$  : 地盤の流動速度 (cm/sec)

$D$  : 杭径 (cm)

$R_u$  : 過剰間隙水圧比

また、粘性流体中の杭に作用する流体の抗力は、下式で表される。

$$p = \frac{C_D \cdot \rho \cdot V^2}{2}$$

ここに  $p$  : 単位面積あたりに作用する流体の抗力

$\rho$  : 流体の単位体積質量

上式より得られた単位面積あたりの杭に作用する抗力と実験で得られた液状化層内の流動力の比較を行った結果を図-9に示す。これによると、液状化層内の杭には、粘性流体の抗力程度またはそれより若干大きい流動力が作用していることがわかる。

## 6. まとめ

護岸構造物及びその近傍の地盤をモデル化して流動化を発生させる実験を行うことにより、地盤の水平

変位及び橋梁基礎に作用する流動力の発生特性について検討した結果、以下の結論が得られた。

- ・護岸構造物模型から離れるにしたがって、水平変位が小さくなる。また、無次元化した実験及び実測の水平変位の挙動は、整合的であった。

- ・液状化層の変位に伴い、表層の非液状化層も液状化層と一体的に移動する状況がみられた。

- ・表層の非液状化層における流動力は、概ね受働土圧に相当する値を示した。その下部の液状化層における流動力は、液状化層を粘性流体と仮定した場合の抗力程度またはそれより若干大きい値を示した。これらのことは、層厚の条件が変化しても同様であった。また、護岸構造物模型から遠い位置では、流動力が小さくなった。

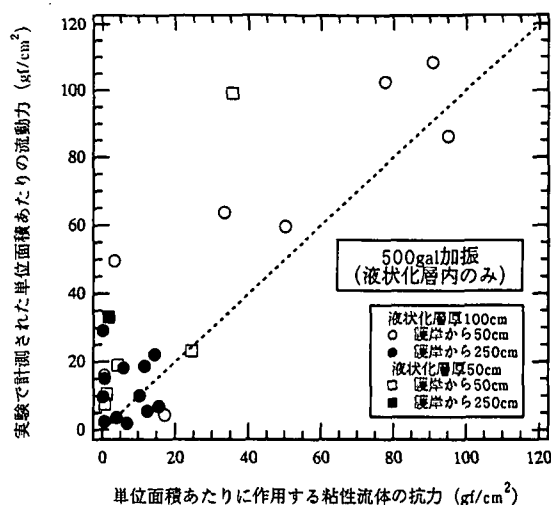


図-9 液状化層を粘性流体と仮定した場合の杭に作用する粘性流体の抗力と実験で計測された流動力の関係

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成8年12月
- 2) 石原研而：地盤の液状化と基礎に及ぼす側方流動の影響，土木学会平成8年度全国大会研究討論会1資料「これからの土木構造物の耐震構造のあり方 - 基本問題検討会議による提言の具体化にむけて -」，pp14-21，土木学会耐震工学委員会，平成8年9月
- 3) 港湾技術研究所：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察，港湾技研資料 No.813，平成7年9月
- 4) 浜田友康、大塚久哲、二宮嘉朗：液状化に伴う流動地盤中の杭に作用する流動力特性，第22回地震工学研究発表会講演概要，pp99-102，平成5年7月