

# 側方流動により護岸近傍の杭に作用する 分布荷重の評価実験

仙頭紀明<sup>1</sup>・藤木広一<sup>1</sup>・柳澤栄司<sup>2</sup>

1 正会員 工修 熊谷組 技術研究所 (〒305 茨城県つくば市鬼が窪 1043)

2 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (〒980 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

液状化に伴う側方流動で護岸近傍に位置する杭に作用する分布荷重の評価について、曲げ剛性の小さい杭を対象として、特に表層非液状化層の影響、及び杭先端の支持条件の違いに着目した1G場における模型振動実験を行った。分布荷重は、評価精度向上を目標に実測曲げモーメントに対して平滑近似処理を行い近似関数を微分することにより求めた。杭に作用する分布荷重は表層非液状化層及び下部非液状化層で地盤が杭を押し返す方向、液状化層では地盤が杭を押す方向に作用することがわかった。杭先端支持条件の違いが分布荷重に及ぼす影響は下部非液状化層で大きく現れるものの、表層非液状化層、液状化層では小さい結果となった。また分布荷重を土圧と考えて評価したときの大きさについて若干の考察を行った。

**Key Word:** Liquefaction, Deformation, Pile foundation, Load, Distribution, Quay wall

## 1. はじめに

実地盤においては液状化を伴う地震において地下水位位置より上では地盤の剛性はあまり低下しない一方、地下水位より下の液状化する地盤では、剛性が大きく低下し、地下水位位置を境に地盤の剛性差が生じ、杭体の応力に影響を及ぼすと考えられる。そこで液状化に伴う側方流動で護岸近傍に位置する杭に作用する分布荷重を1G場の模型振動実験により求め、表層非液状化層の影響について検討を行った。

また杭基礎をモデル化した模型実験において、実地盤ではヒンジ条件に近いと考えられる杭先端の支持条件を現象を単純化するため固定条件とすることが多い。そこで実験における杭先端支持条件の違いが分布荷重に与える影響についても評価を行った。なお、杭に作用する分布荷重は杭の曲げ剛性の大きさに変わってくると考えられるが、本論文では曲げ剛性の小さい杭について評価を行ったものである。

## 2. 実験の概要および実験条件

### (1) 実験概要

実験は図-1に示すように、振動台上に鋼製土槽を設置して行った。土槽中には地盤として地表面から表層非液状化層、液状化層、下部非液状化層の3層構成とした。ケーソン護岸、およびケーソン護岸基礎についてもモデル化してある。杭はケーソン護岸

背面に位置するとし、杭に作用する分布荷重について地盤の側方流動のみの影響を求めるため、単杭で杭頭に重量は付加しない条件のもとで実験を行った。加振は土槽長手方向にサイン波（最大150ガル、周波数10Hz、4秒間（前後テーパー1秒ずつ））を入力し、ケーソン護岸の移動に伴い、側方流動する地盤中の杭の挙動を評価した。

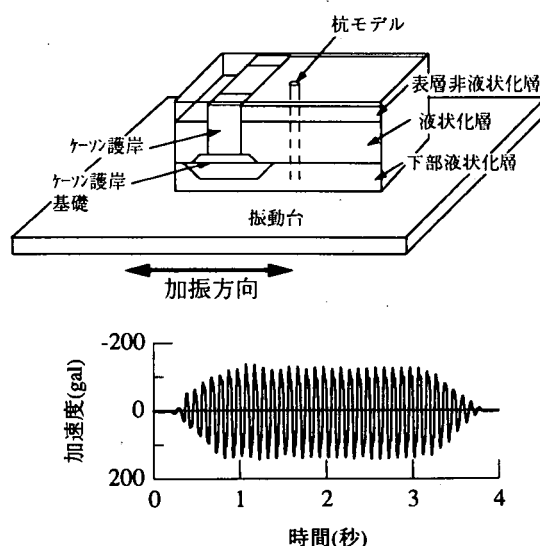


図-1 実験概要

## (2) 実験条件

実験は杭先端が固定条件，ヒンジ条件について行った。実験モデルの縮尺は1/30とし，井合の相似則を適用した。相似則で考慮した物性についての縮尺を表-1に示した。

実験モデルの寸法および計測配置図を図-2に示す。液状化層，下部非液状化層およびケーソン護岸基礎の砂置換部の模型地盤材料は豊浦砂とし，地盤は水中落下法で作成した。表層非液状化層，およびケーソン護岸基礎のマウンドは砂利（粒径2～5mm）を用いた。地盤作成時の砂の相対密度，砂利の乾燥密度を表-2に示した。

ケーソン護岸は土層側面の摩擦の影響を避けるため3分割し，高さ37cm，幅20cmで奥行は分割した中央部のケーソンで30cm，両側面部のケーソンで15cmとした。ケーソンは比重が約2.2となるよう重量を調整し，底面部には摩擦係数を調整するため，耐水ヤスリ（＃180）を貼り付けた。

杭は曲げ剛性が小さいPC杭( $EI=2.3 \times 10^{10} \text{kgfcm}^2$ )を想定し，曲げ剛性に関する縮尺（杭1本あたり $(1/30)^{4.5}$ ）を満たすようモデルには塩ビパイプ（VP18， $EI=12500 \text{kgfcm}^2$ ）を用いた。

間隙水は，透水係数に関する縮尺（ $(1/30)^{0.75}$ ）を満たすよう約12cpsの粘性をもつメチルセルローズ溶液とした。

計測項目は，図-2に示す配置で加速度，過剰間隙水圧，ケーソン護岸に作用する土圧，杭およびケーソン護岸の変位，杭の縁ひずみとした。杭の縁ひずみは本実験条件では杭に軸力がほとんど作用しないことから圧縮，引張方向交互の深度で，約25mm間隔で26点測定した。

## 3. 実験結果

### (1) 実験結果の概要

実験終了後の地盤の変形状況を図-3に示す。地盤の変形状況は土槽側面地盤に設置した着色砂の変形の観察によるものとする。ケーソン護岸背後の地盤はケーソンの海側への移動に伴い液状化層の下端から変形が生じ，液状化層の上部ほど変形が大きくなるが，表層非液状化層ではせん断変形がほとんど生じていない分布となっている。杭の縁ひずみ分布から求めた杭の変形分布と地盤変位の状況を抜粋したものを図-4に示した。表層および下部非液状化層で杭の変位は地盤の変位よりも大きく，液状化層のほとんどの部分で地盤の変位は杭の変位より大きくな

表-1 実験に用いた相似則の縮尺

|                    | 縮尺               |
|--------------------|------------------|
| 長さ                 | $\lambda$        |
| 加速度                | 1                |
| 時間                 | $\lambda^{0.75}$ |
| 透水係数               | $\lambda^{0.75}$ |
| 杭の曲げ剛性<br>(杭1本当たり) | $\lambda^{4.5}$  |

表-2 地盤の密度

|         | 相対密度 (%) | 乾燥密度 ( $\text{gf/cm}^3$ ) |
|---------|----------|---------------------------|
| 表層非液状化層 | —, —     | 1.59, 1.57                |
| 液状化層    | 52, 47   | —, —                      |
| 下部非液状化層 | 65, 65   | —, —                      |
| マウンド    | —, —     | 1.48, 1.48                |
| 置換砂     | 46, 30   | —, —                      |

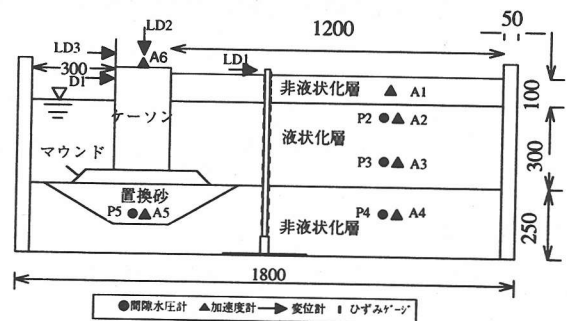


図-2 実験モデルと計器の配置

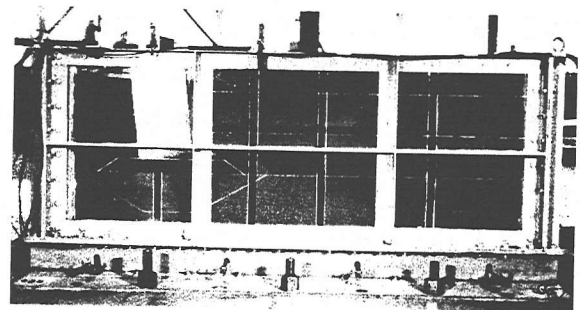


図-3 実験状況（加振終了後）

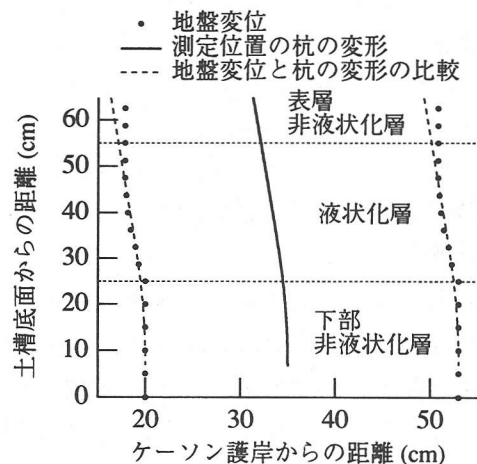


図-4 地盤変位と杭の変位の比較

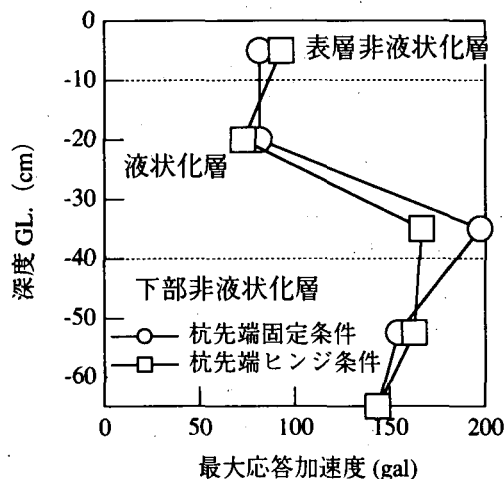


図-5 最大応答加速度分布

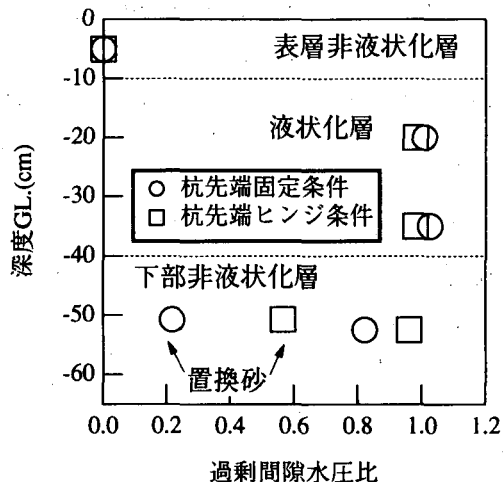


図-6 最大過剰間隙水圧比分布

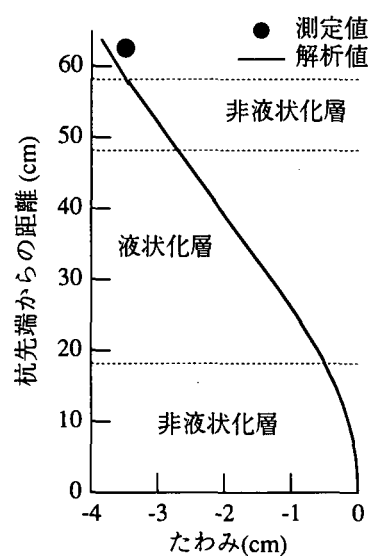
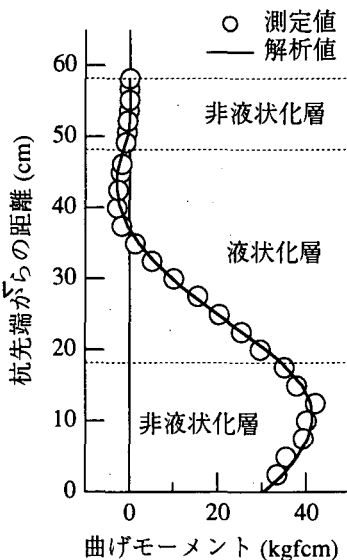
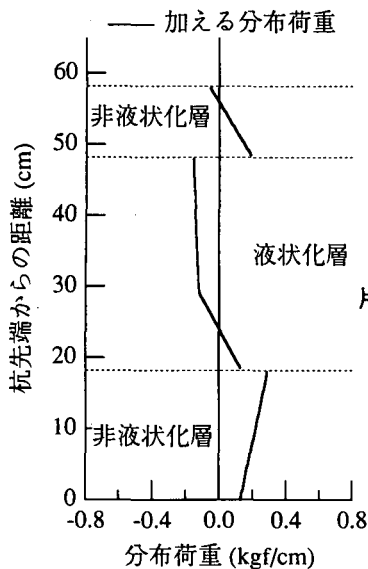


図-7 近似処理で得られた分布荷重の検討 (杭先端固定条件, 加振開始後 3 秒)

り、後に示す杭の分布荷重の傾向が層により異なることの要因となっている。

## (2) 地盤の応答特性

地盤の最大応答加速度分布、および最大過剰間隙水圧比分布を図-5、図-6に示す。2つの図から液状化層では応答加速度の低下および最大過剰間隙水圧比がほぼ1であることから液状化状態にあることがわかる。下部非液状化層は過剰間隙水圧比は上昇しているものの応答加速度は低下しておらず大幅な剛性低下は生じていないと考えられる。

## (3) 杭に作用する分布荷重

### (a) 分布荷重の算定

杭に作用する分布荷重は実験で得られた縁ひずみの測定値から曲げモーメント分布をスプライン関数<sup>2)</sup>を用いた平滑近似処理<sup>3)</sup>で求め、2回微分することにより求めている。ここで求めた分布荷重は土層の層境で不連続条件となるような境界条件を用いてあり、本実験条件のように異なる物性をもつ層の分布

荷重の評価には有効である。得られた分布荷重が妥当なものであるかの検証するため、杭先端固定条件、加振開始後 3 秒のケースについて杭を片持ち梁にモデル化し分布荷重を作用させた FEM 解析結果を図-7に示す。分布荷重を加えたときの曲げモーメント分布および杭頭の変位は測定結果とほぼ等しい。このことから、本手法により得られる分布荷重は杭モデルに作用している分布荷重を適切に評価していることがわかる。

### (b) 杭に作用する分布荷重

杭に分布荷重について各土層ごとの傾向、および大きさについて考察する。加振開始後 1, 3, 60 秒後の分布荷重を図-8に示す。表層非液状化層、および下部非液状化層では地盤が杭を押し返す分布荷重、液状化層では地盤が杭を押す分布荷重が卓越しており、液状化層が杭を押して、上下の非液状化層が杭を支える状態となっている。これは、図-4に示した杭と地盤の変形状況と傾向で概ね一致している。ま

た液状化層の分布荷重は側方流動地盤の流動力とみなすことができる。

杭先端支持条件の違いは下部非液状化層では顕著であるが、表層非液状化層および液状化層においては大きくならず、本実験のような土層構成の模型実験においては、杭先端条件は固定条件としても表層部の分布荷重に与える影響は小さいことがわかる。

分布荷重の大きさについて、土圧を比較対象とした結果を図-9に示す。ここで図の横軸は分布荷重(杭1本当たり)を土の単位体積重量 $\gamma$ 、深度 $z$ 、杭径 $B$ の積で割った値であり、土圧係数 $K$ と影響範囲(杭径に対する倍率)の積と解釈できる。表層非液状化層では約6となり、本実験に用いた砂利の受働土圧係数 $K_p$ (3.54)の2倍弱の値となっている。杭先端から30cm以上離れた液状化層では深度および時間によって値は異なるが2~5の範囲にある。これは例えば道路橋示方書<sup>4)</sup>と比較すると大きめの値となっている。この原因として間隙水(メチルセルローズ溶液)の粘性の影響で液状化した地盤の粘性が高くなっていること、杭の剛性の違いが考えられるため、詳細な検討は間隙水として水を用いるケース、曲げ剛性の大きい杭を使用するケースの結果を検討してから評価する予定である。

#### 4. 結論

(1)杭先端支持条件の違いは本模型実験では表層非液状化層、液状化層の分布荷重にはほとんど影響しない。

(2)杭に作用する分布荷重は液状化層で地盤が杭を押し、上下の非液状化層で杭を支えるような傾向となり、杭と地盤の変形分布と対応した結果となった。

#### 今後の課題

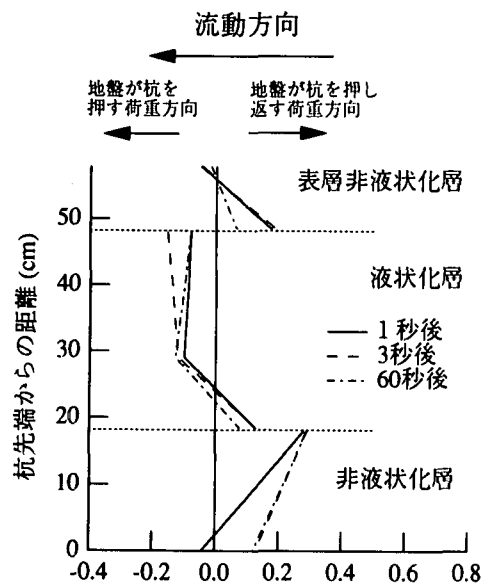
杭に作用する分布荷重が評価できることがわかったため、今後間隙水の粘性の影響、曲げ剛性の大きい杭について検討する。

参考文献 1) S.Iai: Similitude for shaking table test on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, 港湾技術研究所報告第27巻第3号, 1988

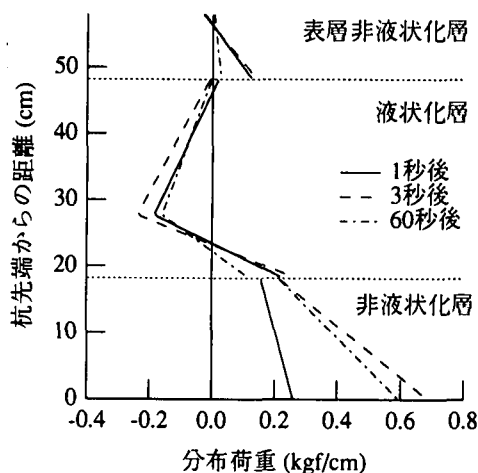
2) 市田浩三, 吉本富士市: スプライン関数とその応用, 教育出版

3) 藤木広一, 仙頭紀明, 柳澤栄司: 護岸近傍の杭に作用する側方流動力の評価手法, 第32回地盤工学研究発表講演集(投稿中), 1997

4) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 日本道路協会, 1996.12, pp.85~90



(a) 杭先端固定条件



(b) 杭先端ヒンジ条件

図-8 杭に作用する分布荷重

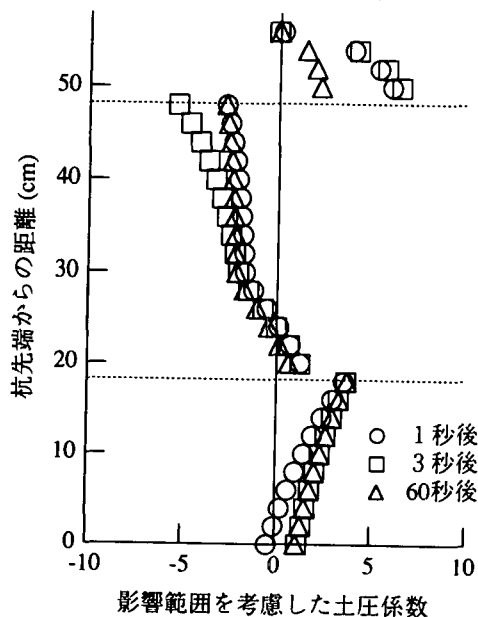


図-9 分布荷重と土圧  
(杭先端固定条件)