

側方流動地盤内に存在する杭に作用する荷重評価に関する動的遠心模型実験

佐藤博¹・大保直人²・吉迫和生³

¹正会員 工修 東京電力電力技術研究所 (〒230 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

²正会員 工博 鹿島建設技術研究所 (〒182 東京都調布市飛田給2-19-1)

³正会員 工修 鹿島建設技術研究所 (〒182 東京都調布市飛田給2-19-1)

本報告は液状化に起因する側方流動地盤中に存在する杭に作用する荷重を評価するために行った動的遠心模型実験の結果について述べたものである。1964年の新潟地震以降、側方流動による杭基礎の被害が報告され、1995年の兵庫県南部地震においても大規模な液状化に伴い発生した側方流動による杭基礎の被害が報告されている。しかしながら側方流動が杭に及ぼす荷重を定量的に評価する手法については現在のところ確立されたとは言えない状況にある。ここでは表層地盤の傾斜に起因する側方流動、および今回の兵庫県南部地震で多く見られた護岸の移動に起因する側方流動を対象に、流動地盤中にある杭に作用する荷重を動的遠心模型実験により評価し、両者の違いを分析した。

Key Words : *liquefaction, lateral ground flow, quaywall, pile, bending moment, dynamic centrifuge test, inclined ground*

1. まえがき

1964年の新潟地震以降、側方流動による杭基礎の被害が報告され¹⁾、1995年の兵庫県南部地震においても大規模な液状化に伴い発生した側方流動による杭基礎の被害が報告されている²⁾。杭基礎等の地中構造物に側方流動が及ぼす荷重に関しては、これまでに側方流動のメカニズムの解明と併せて、模型振動実験、被害事例の逆解析等の検討が各機関でなされてきているが^{2)~7)}、荷重を定量的に評価する手法については現在までのところ確立されたとは言えない状況にある。

本報告では、表層地盤の傾斜に起因する側方流動、および今回の兵庫県南部地震で多く見られた護岸の移動に起因する側方流動を対象に、流動地盤中にある杭に作用する荷重を、より実物に近い現象の再現が可能と考えられる動的遠心模型実験により評価し、両者の違いを分析した。その結果、護岸の移動に起因する側方流動については、特に護岸近傍に発生する負圧により液状化地盤の剛性が回復するため、剛性の回復した地盤の土圧に近い荷重が作用することとなり、表層地盤の傾斜に起因する側方流動による荷重とは異なることを把握した。以下にその内容を報告する。

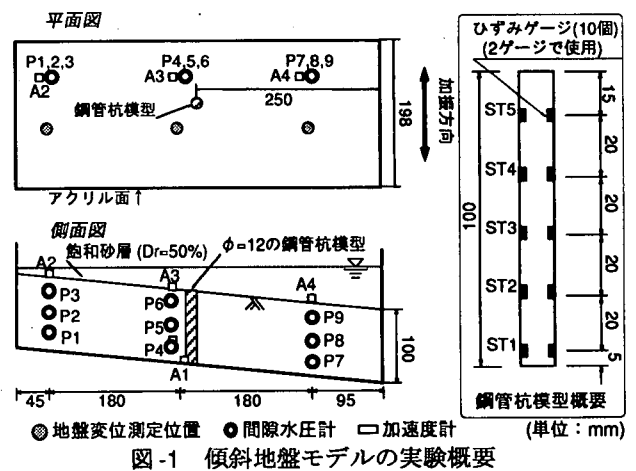


図-1 傾斜地盤モデルの実験概要

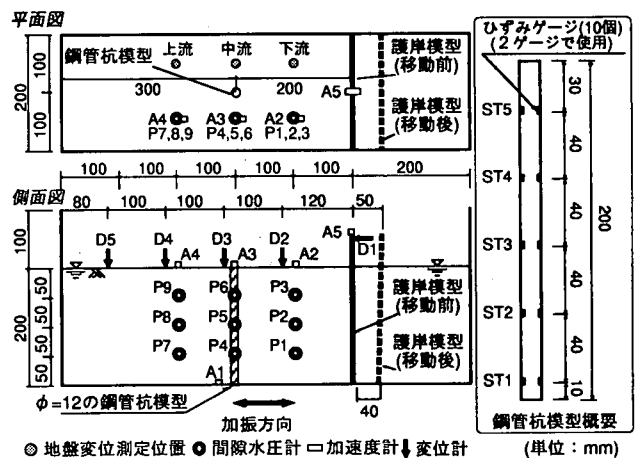


図-2 護岸モデルの実験概要

表-1 実験条件

	モデル条件	地盤層厚	地盤相対密度	最大入力加速度
ケース1	傾斜地盤モデル	10cm	51.2%	19.7G
ケース2	護岸モデル	20cm	53.5%	12.3G
ケース3	護岸モデル	20cm	55.7%	加振せず

2. 実験の概要

図-1、図-2にそれぞれ表層地盤の傾斜に起因する側方流動の実験(傾斜地盤モデル実験と呼ぶ)、および護岸の移動に起因する側方流動の実験(護岸モデル実験と呼ぶ)の概要を示す。また、実験条件を表-1に示す。ケース1の傾斜地盤モデル実験は、地表面勾配10%とした地盤を加振して液状化させ側方流動を発生させた。またケース2の護岸モデル実験では加振後、護岸を移動させることにより側方流動を発生させた。ケース3の護岸モデル実験は、ケース2と比較することを目的にして加振せずに護岸を移動させた実験で、その他の実験条件はケース2と同じである。地盤は初期相対密度約50%の豊浦標準砂を用い、層厚は傾斜地盤モデル実験は10cm、護岸モデル実験は20cmとした。砂層中央には外径12mmのステンレス製の杭模型を下端を土槽に固定して設置した。遠心加速度は50G、間隙流体は透水現象との相似則を考慮し、水の50倍の粘性を有するシリコンオイルを用いた。入力200Hzの正弦波とし、加振時間は傾斜地盤モデル実験では2秒、護岸モデル実験では0.5秒とし、護岸背後地盤が完全に液状化したと考えられる加振開始0.2秒後に護岸を移動させた。主な測定項目は、地盤の間隙水圧、着色砂による側方流動変位、杭の曲げひずみおよび護岸の変位である。

3. 実験結果

(1)地盤の過剰間隙水圧、杭の曲げひずみ

図-3、図-4にそれぞれ傾斜地盤モデル実験、護岸モデル実験(以下、断らない限りケース2を指すものとする)における杭の曲げひずみ、杭近傍の地盤深部の過剰間隙水圧、入力加速度および護岸の変位の経時変化を示す。

傾斜地盤モデル実験では、加振開始直後に過剰間隙水圧が有効上載圧に達して液状化し、加振が終了すると消散している。杭に発生する曲げひずみは、加振開始約0.7秒後に最大値となり、加振終了時にはほぼ0に戻っている。

護岸モデル実験では、加振開始直後に過剰間隙水圧が有効上載圧に達して液状化しているのは傾斜地

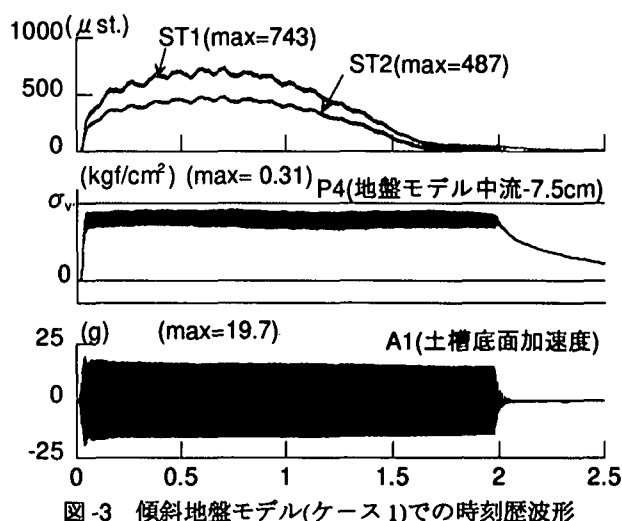


図-3 傾斜地盤モデル(ケース1)での時刻歴波形

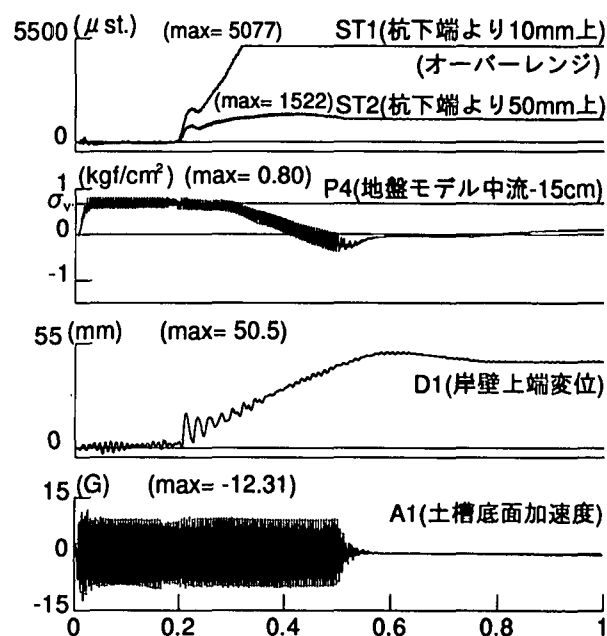


図-4 護岸モデル(ケース2)での時刻歴波形

盤モデル実験と同様である。しかしながら、護岸の移動を開始すると、加振を継続しているにもかかわらず過剰間隙水圧が低下し始め、護岸の移動が終息する頃には負圧となり、護岸が停止すると0に戻っている。杭に発生する曲げひずみは、杭下端部でひずみ計の測定範囲をオーバーし、この部分で杭に塑性変形が生じていたことを実験終了後に確認している。

(2)側方流動変位の深度分布、杭の曲げモーメント

図-5、図-6にそれぞれ傾斜地盤モデル実験、護岸モデル実験における、実験終了後に着色砂を発掘して求めた最終側方流動変位の深度分布を示す。どちらも中流部が杭の近傍における側方流動変位を示している。

いずれの実験も側方流動は地表で大きく、深部に

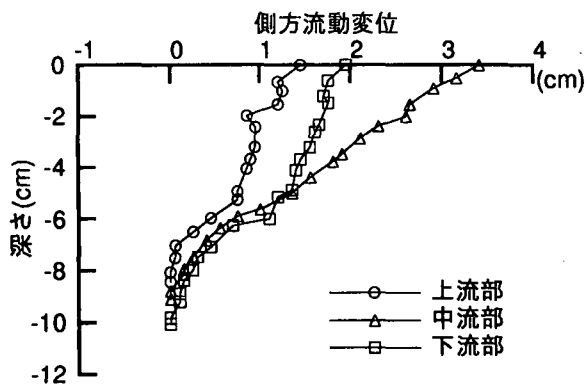


図-5 傾斜地盤モデル(ケース1)の最終側方流動変位量

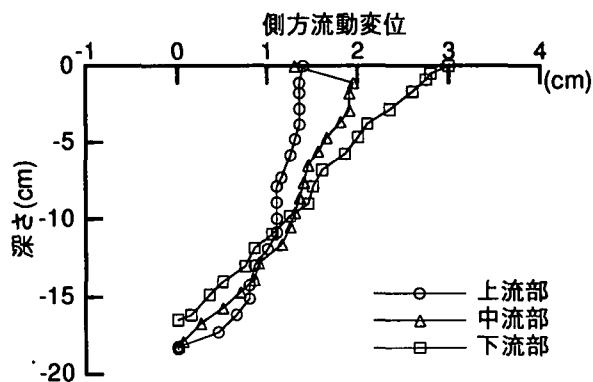


図-6 護岸モデル(ケース2)の最終側方流動変位量

行くに従って小さくなる傾向を示している。傾斜地盤モデル実験では杭近傍の中流部が最も流動変位が大きく、護岸モデル実験では護岸に近い下流が最も流動変位が大きい。杭近傍で比較すれば傾斜地盤モデル実験の方が流動変位は大きい。

次に、図-7、8にそれぞれ傾斜地盤モデル実験、護岸モデル実験における、杭の曲げひずみから求めた最大曲げモーメントの深度分布を実物に換算して示す。ここで護岸モデル実験では杭下端部の曲げひずみはひずみ計の測定範囲をオーバーしていたが、杭の残留変形の状況を考慮し、全断面が規格強さ σ_u に達していたと仮定して次式から求め、参考として示してある。

$$M_u = \sigma_u \times Z_p$$

ここで $\sigma_u : 5200 \text{ kgf/cm}^2$
 $Z_p : \text{塑性一次モーメント}$

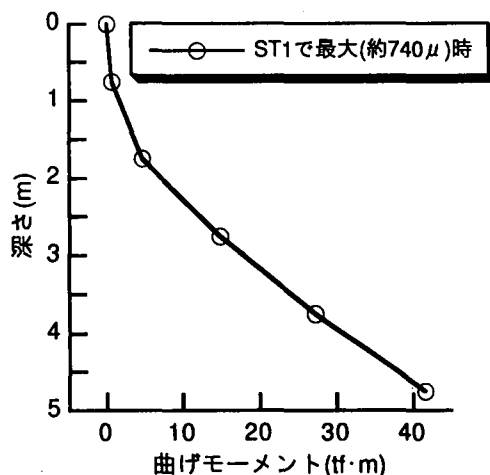
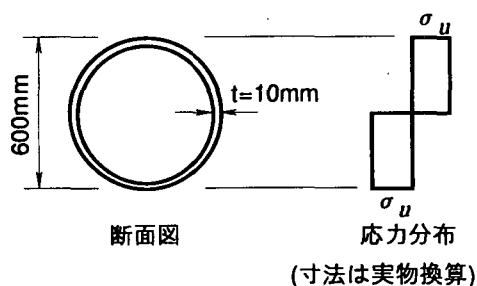


図-7 傾斜地盤モデル(ケース1)の杭に発生する最大曲げモーメント

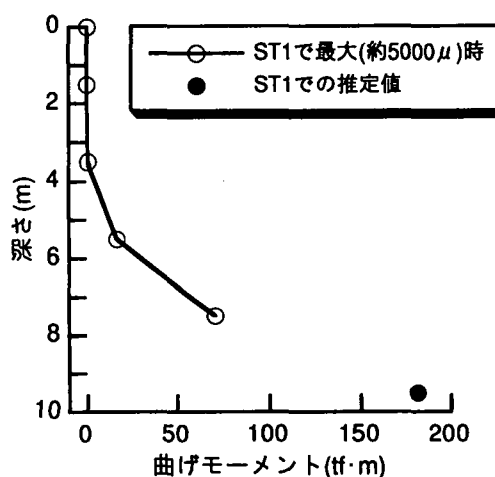


図-8 護岸モデル(ケース2)の杭に発生する最大曲げモーメント

4. 杭に作用する荷重

両実験について、杭に発生した曲げモーメントの深度分布を3次式で回帰し、得られた結果を基に荷重の深度分布を1次式として算定した。

図-9、図-10にそれぞれ傾斜地盤モデル実験、護岸モデル実験における、杭に作用する荷重の深度分布を示す。ここには杭の曲げひずみが小さい段階から最大値に至るまでを示している。但し、護岸モデル実験については、杭ひずみが最大となる時は推定値である杭下端部の値を用いて求めた荷重分布を示してある。また、図-11に地盤を液状化させずに護岸を移動したケース3の護岸モデル実験における杭に作用する荷重分布を示す。

これによると、傾斜地盤モデル実験については、荷重分布は地表で大きく、深部で小さい逆三角形を示し、図-5で示した側方流動変位の深度分布とよく似た形状となっている。

一方、護岸モデル実験では傾斜地盤モデル実験と

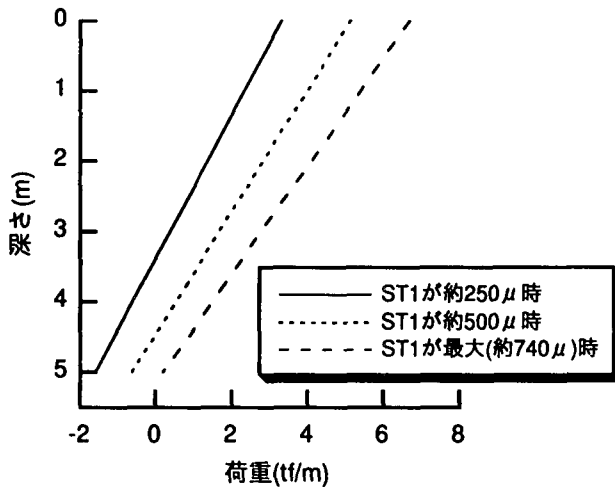


図-9 傾斜地盤モデル(ケース1)の杭に作用する荷重の分布

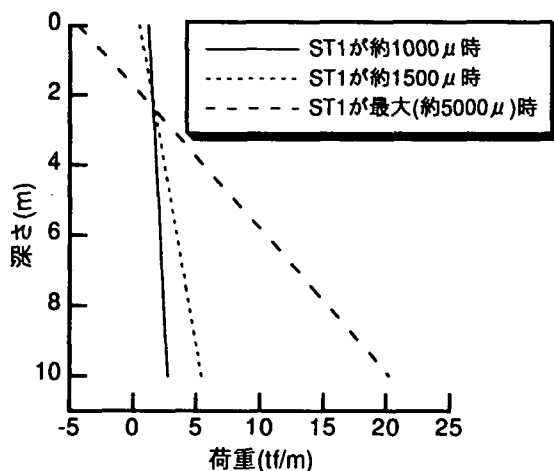


図-10 護岸モデル(ケース2)の杭に作用する荷重の分布

は異なる荷重分布を示している。まず、ケース2については、杭の曲げひずみが小さい段階では、深度方向に様に分布する傾向にあるが、ひずみが大きくなるとしだいに三角形分布に近づいている。これは、護岸が移動した直後は過剰間隙水圧があまり低下しておらず、地盤は液状化に近い状態にあるが、さらに時間が経過すると負圧のために地盤の剛性が回復し、土圧に近い荷重が作用するためと考えられる。また、ケース3は護岸背後地盤の主働崩壊に伴い発生した地盤内の土圧が杭に作用している。ケース2とケース3を比較すると、最大時はケース2の方が大きく、ケース2では単に地盤の崩壊に伴う土圧ではなく、剛性の回復した地盤が流動することの影響が付加されているものと考えられる。ケース2の荷重が傾斜地盤モデル実験のような流動による荷重より大きいのはこのためと考えられる。

5. まとめ

表層の傾斜に起因した側方流動と護岸の移動に起因した側方流動を対象に、側方流動が杭に及ぼす荷

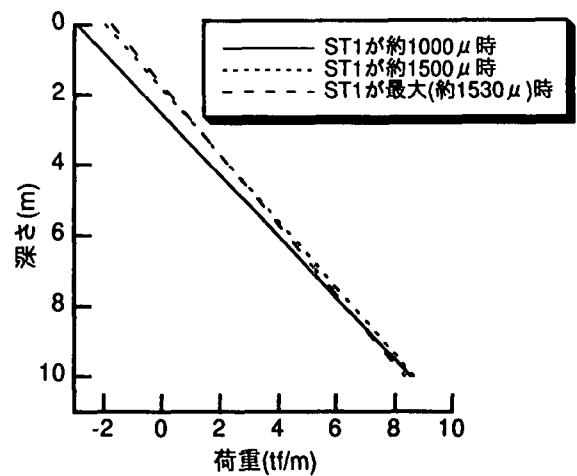


図-11 護岸モデル(ケース3)の杭に作用する荷重の分布

重を評価するために、動的遠心模型実験を行った。その結果、傾斜モデル実験では荷重分布は逆三角形分布となり流動変位の分布とよく似た形状を示した。一方護岸モデル実験では、これとは逆に荷重分布は三角形分布で、流動変位分布とは異なるとともに、その大きさは傾斜モデル実験の値よりも大きく、地盤の主働崩壊に伴い発生する土圧よりも大きい結果になった。これは護岸の移動に伴い地盤に発生する負圧により剛性の回復した地盤が流動することの影響と考えられる。この負圧の発生については兵庫県南部地震において人工島の護岸背後地盤に噴砂が少なかったことと呼応する現象と考えられるが、このような領域の範囲、負圧の影響の程度については護岸の移動速度、形式、地盤条件等の多くの要因が影響しており、今後の検討課題と考えられる。

参考文献

- 1) Hamada, M et al.: Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes, Technical Report NCEER-92-0001, 1992
- 2) 例えば、佐々木他：兵庫県南部地震における東灘(水処理場の被害、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp289-296, 1996
- 3) 大友：側方流動を考慮した耐震設計法の検討—杭基礎に及ぼす荷重特性の評価—、電力中央研究所報告、平成4年12月
- 4) 大友：側方流動による洞道・杭基礎系への外力、第23回地震工学研究発表会、pp373-376、平成7年
- 5) 佐藤他：砂地盤の側方流動現象に関する動的遠心模型実験、第50回年次講演会、A3-A、pp490-491、1995
- 6) 寺内他：岸壁護岸のはらみだしにともなう液状化した背後地盤の側方流動に関する研究、第51回年次講演会、A3-A、pp250-251、1996
- 7) 大保他：砂地盤の側方流動が杭に与える影響に関する動的遠心模型実験、第32回地盤工学研究発表会、1997