

# 液状化地盤上にある橋台杭基礎の 正弦入力波による応答に関する基礎的研究

柿永 恭佑<sup>1</sup>・梶田 幸秀<sup>2</sup>・宇野 州彦<sup>3</sup>・北原 武嗣<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程

(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

E-mail:kakinaga@doc.kyushu-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

E-mail:ykajita@doc.kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:Kunihiko.Uno@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup>正会員 関東学院大学理工学部 土木学系 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

E-mail:kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

1964年新潟地震以降地震災害と地盤の液状化が関連付けて考えられるようになり、液状化に関する研究が進められてきた。本研究では液状化地盤上の橋台の地震時の応答に関して基礎的な知見を得るために、入力波の周期や液状化層の位置を変化させたパラメータ解析を行うことで橋台を支える杭への影響を把握することを目的とした。液状化による影響は橋台の変位を大きくし杭への負担も大きくなる。また液状化地盤上では液状化層中の杭の曲げモーメントよりも液状化層の下側の地盤部分や杭頭部分で発生する曲げモーメントの方が大きくなりやすい。さらに液状化層の厚さやその深度によって地盤や橋台の挙動が変化していくので、液状化の発生が考えられる地盤では詳細な地盤調査が必要であることがわかった。

**Key Words :** Liquefaction, Pile, Abutment, Bending moment, Foundation

## 1. はじめに

1964年新潟地震以降地震災害と地盤の液状化が関連付けて考えられるようになり、液状化に関する研究が進められてきた。1964年新潟地震以降にも液状化による構造物の被害が生じており1968年十勝沖地震、1983年日本海中部地震、1993年釧路沖地震、1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取西部地震、2011年東北地方太平洋沖地震でも被害が確認されている。

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方整備局が管理する1504橋のうち364橋で、橋台背面アプローチ部に段差が生じた<sup>1)</sup>。写真-1は被害状況の一例である。地震直後は、段差障害により、緊急車両の通行が妨げられたり、通行時の速度制限が行われたりした。地震直後にも緊急輸送道路としての役割を果たすには、このような被害を減らすことは非常に重要である。



写真-1 橋台背面地盤沈下に伴う段差障害の例  
(H23.6.5撮影)

表-1 モデル地盤土層設定値

| 土層     | D   | N  | $\rho_t$    | $\sigma_{ma}'$ | $G_{ma}$  | $\phi_f$ | $\phi_p$ | 液状化パラメータ |       |     |       |     |
|--------|-----|----|-------------|----------------|-----------|----------|----------|----------|-------|-----|-------|-----|
|        | 層厚  | N値 | 密度          | 基準平均有効拘束圧      | 基準初期せん断剛性 | せん断抵抗角   | 変相角      |          |       |     |       |     |
|        | (m) | -  | ( $t/m^3$ ) | (kPa)          | (kPa)     | (°)      | (°)      | S1       | W1    | P1  | P2    | C1  |
| Layer1 | 2.1 | 5  | 1.8         | 14             | 42202     | 39       | -        | -        | -     | -   | -     | -   |
| Layer2 | 7.9 | 10 | 1.8         | 80             | 67613     | 39       | -        | -        | -     | -   | -     | -   |
| Layer3 | 5   | 2  | 2           | 151            | 22632     | 37       | 28       | 0.005    | 3.476 | 0.5 | 1.123 | 1.6 |
| Layer4 | 10  | 10 | 2           | 206            | 67613     | 38       | -        | -        | -     | -   | -     | -   |
| Layer5 | 5   | 20 | 2           | 261            | 108326    | 39       | -        | -        | -     | -   | -     | -   |

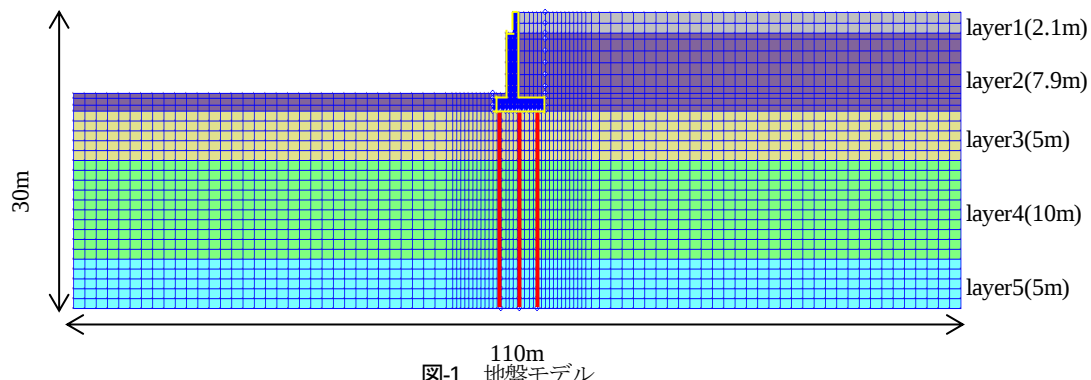


図-1 地盤モデル

表-2 杭設定値

|                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| 密度 ( $t/m^3$ )      | 9.4                |
| ポアソン比               | 0.3                |
| ヤング率 (kPa)          | $9.23 \times 10^7$ |
| 直径 (m)              | 0.8                |
| 断面積 ( $m^2$ )       | 0.02469            |
| 断面二次モーメント ( $m^4$ ) | 0.0019             |

上記の被害は、橋台周辺部、特に、背面地盤の流動によるものであるが、平成 22 年 6 月には、地盤の流動に伴う被害対策のため、「橋台の側方移動対策ガイドライン策定に関する検討(その 2)(土木研究所資料第 4174 号)」が発刊され、軟弱地盤上の橋台の側方移動に対する対策工などが提案されている。また、平成 24 年 3 月に改訂された道路橋示方書<sup>2)</sup>においても、橋台背面アプローチ部の沈下対策に関して、「橋の複雑な地震応答や地盤の流動化による地盤変位等の原因により、橋台背面に著しい沈下が生じる場合においても、通行機能の確保が必要な橋においては、踏掛版の設置等適切な対策を講じることが望ましい」と記載されている。

道路橋示方書においては流動化が生じると判定された橋脚において流動化の算定を行うこととしているが、算定式の橋台への適用性は曖昧なものである。橋台の移動方向は橋軸方向にほぼ限定されることから落橋の原因となりにくいことや、橋台に作用する流動化の影響のメカニズムが明らかとなっていないことから特別な照査方法

は示されていない。背面地盤の沈下においても、橋台背面アプローチ部において踏み掛け板の設置を推奨する程度に留まっており、定量的な評価はなされていない。

しかし、すでに述べたとおり、橋台においても地震時に橋台が橋軸方向に移動し、支承に変形や破損が生じた事例や、背面地盤の沈下により段差が生じた事例などが報告されている。これらを定量的に評価しないことは対策として不十分であり、危険性を抱えている状態であるといえる。

地震動と地盤液状化の研究としては井澤らの研究<sup>3)</sup>がある。この研究では低加速度・長継続時間地震動における液状化強度を評価し、低加速度・長継続時間地震動で液状化に至りやすい地盤の物性に着目して検討を行った。その結果粒径が細かく、粒径分布がなだらかな材料で比較的近年に埋められた地盤で低加速度であっても長時間継続する地震動で液状化が発生する可能性があることを示した。しかし、液状化地盤上にある橋台の応答についての研究は数少なく、橋台への被害の具体的なメカニズムの解明や定量的な指標の提示はなされていない。これには、地震被害を受ける前のデータの不足により被災前後のデータ比較ができずに移動量等の評価ができないこと、橋台や基礎にはそれ自体の慣性力と背面地盤の土圧が作用するので挙動が複雑になること等が挙げられる。実被害のデータについては今後の計測によって増やしていくしかないが、メカニズムの解明へのアプローチとして実験や解析による検討が考えられる。

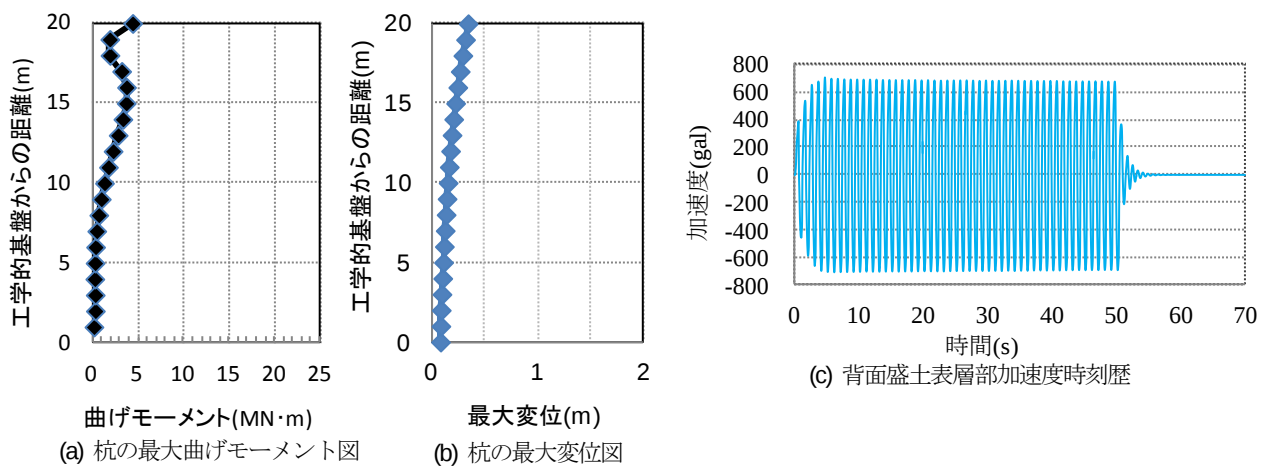


図-3 解析結果(入力波周期 1.0 秒 液状化無)

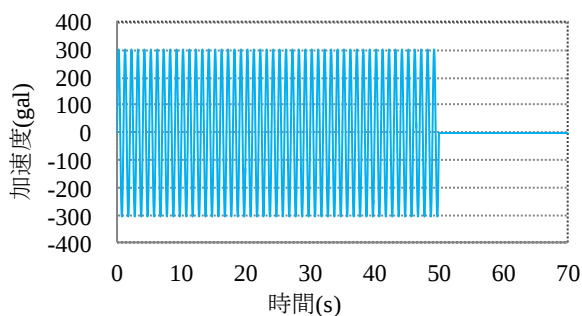


図-2 入力波加速度時刻歴(周期 1.0 秒)

そこで本研究では液状化地盤上の橋台の地震時に応答に関する基礎的な知見を得るために、まずは正弦入力波の周期や液状化層の位置や厚さを変化させたパラメータ解析を行うこととした。解析において着目する点として橋台の応答、地盤の移動量などもあるが、本論文では、杭の応答変位、杭に作用する曲げモーメントに着目して結果をまとめている。

## 2. 解析条件

解析は有限要素法に基づく 2 次元有効応力解析プログラム FLIP<sup>④, ⑤</sup>を用いて行った。地盤モデルを図-1 に、各土層の設定値を表-1 に、杭の物性値を表-2 にそれぞれ示す。なお地盤は想定地盤であるが、杭の本数、大きさは 2002 年の設計基準を満足するように算出した。図-1 において上部の枠囲みの部分が橋台、その下の太線が杭を表している。表-1 中の基準初期せん断剛性は  $G_{m0} = 9.81 \times 1440 \times N$  値<sup>⑥ ⑦</sup>から求めている。また S1, W1, P1, P2, C1 は液状化パラメータである。N 値が 2 である layer3 を液状化層とする。また各層の N 値と層厚から求めたモデル地盤の固有周期(地盤特性値)は 0.47 秒である。解析上の条件として wilson $\theta$  法において  $\theta=1.4$ 、レーレー

減衰において  $\alpha=0$ 、 $\beta=0.002$  で計算を行い、要素の定義は、橋台とフーチング上の土を線形平面要素、杭を線形はり要素、土質を多重せん断メカニズムに基づいた有効応力モデル<sup>⑦</sup>でモデル化した。橋台は大きさが底面 6.5m 高さ 10m、密度が  $2.5 \text{ t/m}^3$  とした。境界条件は側方と底面に粘性境界を与えている。

また本研究では液状化による橋台への影響を確認するために液状化が生じない地盤での橋台及びその杭の挙動についても解析を行った。液状化を考慮しない場合は layer3 の液状化層を削除し、layer4 の非液状化層を厚くしたものをを用いた。

地盤モデルに入力した波は最大加速度が 300gal で 50 波継続させた後、加速度 0 の時間を 20 秒間設けた正弦波を周期 0.5 秒から周期 2.0 秒まで 0.1 秒刻みで作成したものをを用いた。入力波の加速度時刻歴を周期 1.0 秒のものを代表して図-2 に示す。

## 3. 解析結果

### (1) 液状化を想定しない場合

例として周期 1.0 秒の正弦波を入力したときの最大曲げモーメント図、最大変位図、背面盛土表層部での加速度時刻歴を図-3 に示す。液状化しないときの解析ではいずれの解析ケースも杭頭部で一番大きな曲げモーメントが生じた。これは土層間で大きな物性値の変化がなかったため地盤が深さ方向には同位相で振動したため橋台底面と接合している杭頭部の曲げモーメントが最大になったと考えられる。最大変位図では杭の変形は片持ち梁のように変位が生じていることが確認できる。

モデル表層部では入力波と比べると増幅した加速度時刻歴が確認できた。最大加速度が 600gal 強と約 2 倍まで増幅していた。周期による影響を確認するために入力波の周期を横軸に、そのときの杭頭部の最大曲げモーメン

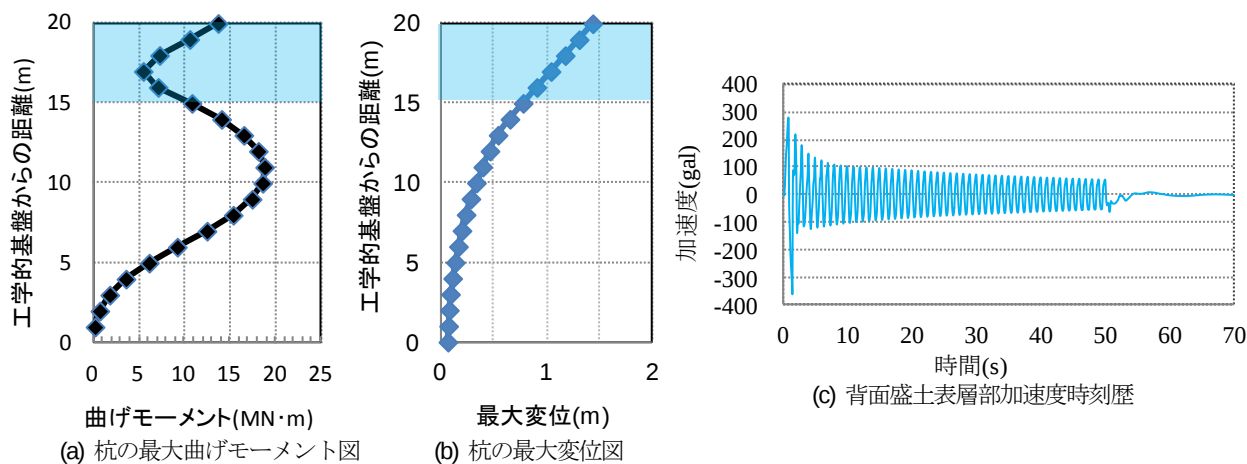
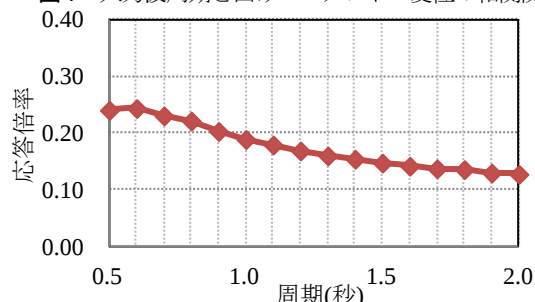
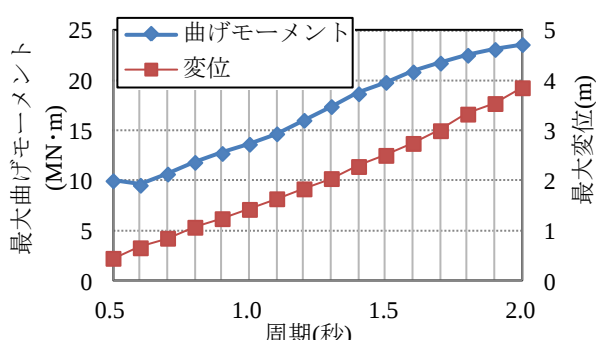
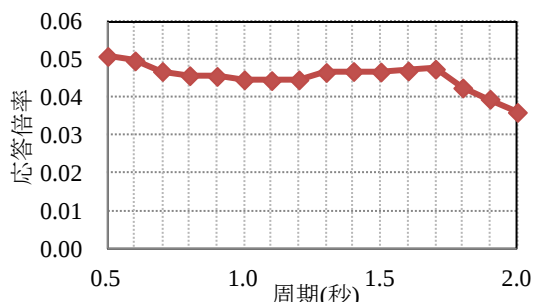
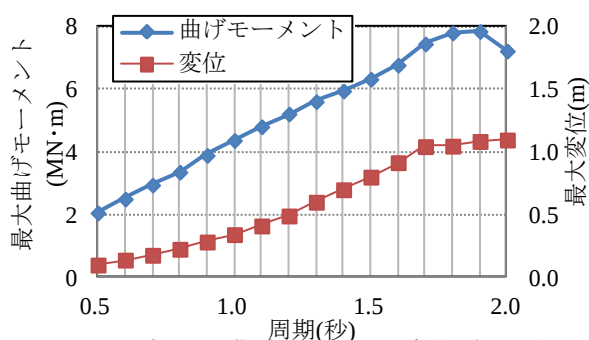


図-6 解析結果(入力波周期 1.0 秒 液状化有)



トと最大変位を縦軸に表わしたものを図-4 に示す。また変位に関しては入力波の周期の変化により入力される変位振幅の大きさが変化するため杭頭部の最大変位(応答値)を入力波の最大振幅で除した応答倍率を周期ごとに比較したものを図-5 に示す。図-4 より入力波の周期が長くなるにつれ応答が大きくなるが周期 1.7 秒を超えると杭頭部の最大曲げモーメントおよび最大変位の増加が小さくなる事が確認できた。図-5 より変位の応答倍率はほぼ横ばいであったが周期 1.8 秒から下がる事が確認できた。今回のモデルでは周期 1.8 秒程度まで杭頭部のモーメントが大きくなった理由は、周期の影響ではなく入力波の変位の増加に伴い杭頭部の応答変位が増加したことが理由であると考えられる。

## (2) 液状化を想定した場合

図-6 に周期 1.0 秒での解析結果をそれぞれ示す。なお最大曲げモーメント図と最大変位図において工学的基盤からの距離が 15m から 20m で網掛けしてある部分が液状化層である。

杭の最大曲げモーメントは液状化層の下の部分である工学的基盤から 10m の地点で大きくなる結果となった。15m 地点では液状化層にかかるため、杭が地盤に押されにくくなり曲げモーメントが小さくなったが、杭頭部では橋台の傾きに伴い変位が大きくなったことから曲げモーメントが大きくなったと考えられる。最大変位は工学的基盤を支点とした片持ち梁のように変位が生じていることが確認できた。これは途中に液状化層があると杭は移動しやすくなるものの基本的には橋台との接合部(杭

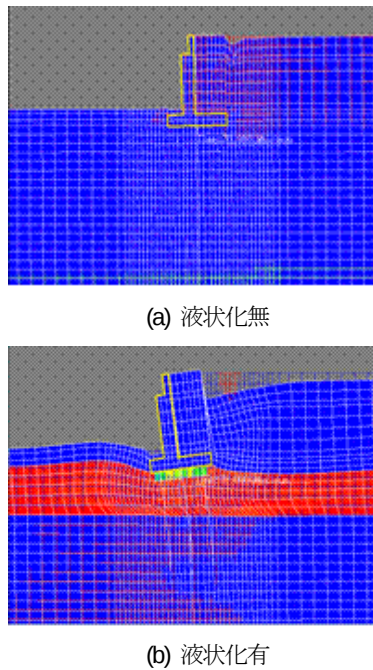


図-9 モデルの解析終了時の変形図

頭部)の変位量に依存して引っ張られる形状となっている。

図-6(c)より背面盛土表層部の加速度は大きく低減される結果となった。これは地盤が液状化し、流体のようになることで免震装置のように地盤が働いたからだと考えられる。また入力波の周期による橋台の応答への影響を確認するために杭頭部の最大曲げモーメントの値と杭頭部の最大変位の値を縦軸、入力波の周期を横軸としたものを図-7に示す。(1)と同様に応答値を無次元して周期ごとに比較したものを図-8に示す。

曲げモーメントと変位の応答値としては長周期になるにつれて増加しているが、変位応答倍率としては徐々に下がっている。そのため曲げモーメントの増加については入力波の周期による影響もあるといえるが、詳細については現在検討中である。

液状化するときとしないときの応答の違いとして、モデルの解析終了時の変形図(応答倍率 1 倍)を図-9に示す。液状化するときとしないときともに橋台は前面側に倒れ込むように変位が生じ、それに伴い背面地盤での沈下を確認できた。また液状化するときではその倒れ込みが大変大きくなり杭の負担も増加した。

### (3) 地盤層厚のパラメータ解析

周期 1.0 秒の正弦波を用いて地盤の層厚や位置を変化させるパラメータ解析を行った。表-1に示した土層状態を基準として case1 には液状化層の厚さを変化させたもの、case2 には液状化層の深度を変化させたものをそれぞれ行った。具体的には case1 の場合は layer3 の層厚を厚くし、その分 layer4 の層厚を薄くしている。

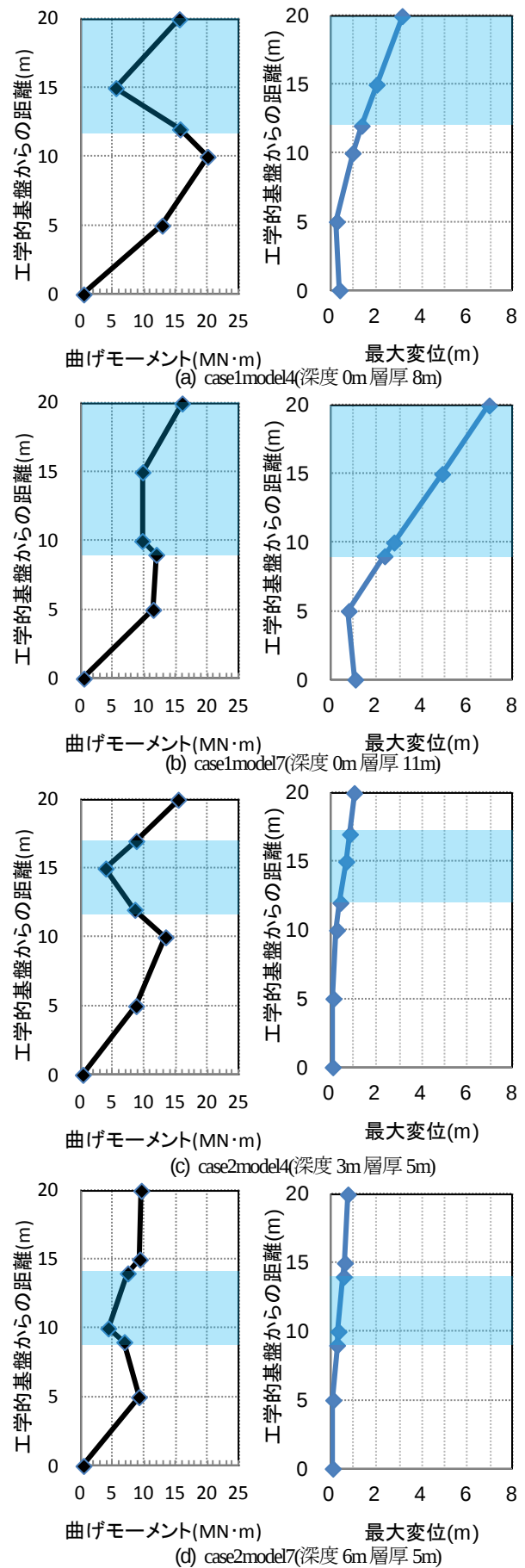


図-10 地盤パラメータ解析結果

表-3 地盤パラメータ解析の case と model の設定値

| case1     |   |   |   |   |   |    |    |
|-----------|---|---|---|---|---|----|----|
| model番号   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6  | 7  |
| 液状化層厚(m)  | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 液状化層深度(m) | 0 |   |   |   |   |    |    |
| case2     |   |   |   |   |   |    |    |
| model番号   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6  | 7  |
| 液状化層厚(m)  | 5 |   |   |   |   |    |    |
| 液状化層深度(m) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5  | 6  |

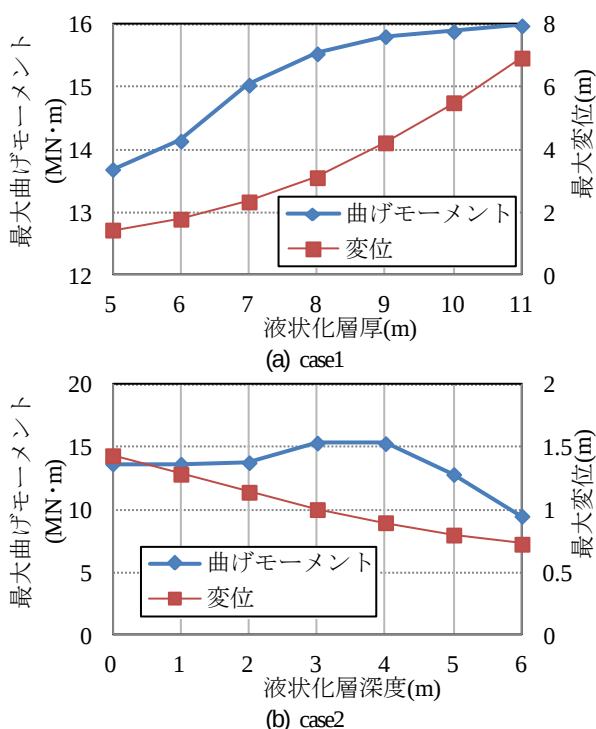


図-11 液状化層厚さ・深度と曲げモーメント・変位の関係

case2 では layer3 を下に設置した分、橋台底面と layer3 の間には layer4 と同じ物性値(有効拘束圧は異なる)の土層が入っている。表-3 に解析ケースを示す。なお case1model1 と case2model1 は同じ解析であり、図-6 に示した結果の解析と同じものである。

地盤パラメータ解析の結果として case1model4 と case1model7 と case2model4 と case2model7 の最大曲げモーメント図を左側に、最大変位図を右側にそれぞれ図-10 に示す。なお図-6 同様に網掛けの部分が各モデルの液状化層を示している。

case1 の結果から液状化層の層厚が大きいほど杭頭部の変位量が大きくなることが分かる。しかし杭頭部での曲げモーメントの大きさに大きな差が生じていないのは液状化層では土層による拘束が小さくなるため変位の大きさに比べて曲げが生じていないからだと考えられる。また液状化層の下側での曲げモーメントは液状化層厚が大きくなることで layer4 の厚さが減少し地盤が杭を押す力が弱まったためだと考えられる。

case2 の結果から液状化層の深度が深いほど杭頭部での変位量は小さくなることが確認できる。それに伴い曲げモーメントも小さくなっている。液状化層が深い所にあることで橋台への影響力が小さくなり、橋台の変位量の減少に伴い杭の変位量も小さくなったと考えられる。液状化層下の曲げモーメントについては case1 と同様に layer4 の厚さの減少に伴って減少したものであると考えられる。また case1, case2 問わずに液状化層中にある杭の曲げモーメントは他の場所比べて低減を示しており、曲げの発生も大きくは無かったことが確認できた。

case1 において液状化層厚と応答値との相関、case2 において液状化層深度と応答値との相関をそれぞれ確認するために縦軸に杭頭部における最大曲げモーメントと最大変位、横軸にそれぞれの変化させたモデル地盤のパラメータをとったものを図-11 に示す。case1 の結果から液状化層厚の増加と杭の変位には概ね二次曲線的に増加する相関があると考えられる。また曲げモーメントの値も液状化層厚の増加に伴い増加しているが曲線の向きが異なるのは、液状化層が増加することで橋台の変位は大きくなりやすくなるものの、杭の曲げの発生が液状化層では起こりづらくなることが原因として考えられる。対して case2 の結果から液状化層深度の増加と杭の変位には概ね線形的に減少する相関があると考えられる。液状化層深度の増加と最大変位の減少に対して曲げモーメントが変位と同傾向に減少していないことについては液状化層が下側に移動することで橋台と液状化層の間に液状化層に比べて固めの地盤が入ることで杭頭部の近くで杭を押す力が発生し曲げが生じているためだと考えられる。

case1 と case2 とともに橋台やその杭の応答に相関を確認することが出来た。液状化層が厚いときには液状化による地盤の流動によって橋台が移動しやすくなり、それに伴う杭頭部の変位の上昇、液状化層が深い所にある場合は液状化による影響が橋台との間にある非液状化層によって小さくなることが今回の地盤モデルのパラメータ解析によって考察される。

#### 4. 結論

本解析では、液状化地盤上の橋台の基礎的な知見を得るために、有効応力解析を行い、特に杭に作用する曲げモーメントや杭の応答変位について考察を行った。本解析で得られた結果を以下に示す。

(1)液状化層を考慮することにより、すなわち、土層の物性値が大きく異なる層を考慮することにより、本解析モデルでは杭基礎の応答変位や作用する曲げモーメントは約 2 から 4 倍程度になった。

(2)液状化層を考慮しない場合は、最大曲げモーメントの発生箇所は常に杭頭部であったが、液状化層を考慮することにより、杭の応答変位については杭頭部が最大となるが、曲げモーメントについては土層の物性値が大きく変わる付近で発生する場合もある。

(3)液状化層の厚さを厚くするにつれ、杭頭部の応答変位も大きくなるが、杭頭部の曲げモーメントの大きさについては収束する傾向にあることが分かった。

(4)液状化層の位置を深くすれば、杭頭部の応答変位は小さくなるが、杭頭部の曲げモーメントの大きさはほとんど変わらず、曲げモーメントの大きさに関していえば、本解析の検討ケースでは、液状化層がどこにあるかわからないことが明らかとなった。

今回の検討は、正弦波入力であったため、今後は実地震動による検討を行っていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所・国土交通省国土技術政策総合研究所：東日本大震災報告会配付資料，地震時の交通機能確保に配慮した道路構造物の技術基準，

<http://www.pwri.go.jp/jpn/news/2012/0328/index.html>（参照 2013-10-01）

- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.143-149，2012.
- 3) 井澤淳，上田恭平，室野剛隆：低加速度・長継続時間地震動による地盤の液状化の評価，第 16 回性能に基づく橋梁などの耐震性能に関するシンポジウム講演論文集，pp. 183-190，2013
- 4) 森田年一・井合進・Hanlong LIU・一井康二・佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料，No.869，1997.
- 5) Susumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEOKA : ANALYSIS OF UNDRAINED CYCLIC BEHAVIOR OF SAND UNDER ANISOTROPIC CONSOLIDATION, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.16-20, 1992.
- 6) 一般社団法人 FLIP コンソーシアム：FLIP 研究会 14 年間の検討成果(事例編)，p.2-5-13  
<http://www.flip.or.jp/history.html>（参照 2014-09-01）
- 7) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling Soil Behavior under Principal Stress Axes Rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp. 523-530, 1985.

## RESPONSE ANALYSES OF THE PILE FOUNDATION OF THE ABUTMENT LOCATED ON THE LIQUEFIED SOIL LAYER BY PERIODIC WAVES

Kyosuke KAKINAGA, Yukihide KAJITA, Kunihiro UNO and Takeshi KITAHARA

The purpose of this study is to obtain the relation between the parameters of ground or input wave and displacement of an abutment or subsidence of the back ground to find fundamental knowledge for displacement of the abutment on liquefied ground by analyzing with changing the input waves and the parameter of the ground characteristics. It is found that the piles' load was been bigger by liquefaction. The bending moment of piles under the liquefaction layer or the pile head is easier to be bigger than that in the liquefaction layer. The actions of the ground and abutment on the liquefaction ground are changed by liquefaction-layer's thickness and depth, so the detailed ground investigation is required on liquefied ground.