

簡易解析モデルを用いた 液状化地盤上の橋台杭基礎の地震応答評価

高橋宏和¹・谷本俊輔²・中田光彦³・七澤利明⁴

¹正会員 修(工) (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員 (同上)

³正会員 修(工) (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員 (同上)

⁴正会員 修(工) (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員 (同上)

1. はじめに

我が国で発生した既往の大地震において、地盤の液状化により落橋や長時間の通行止めを要するような致命的な被害が生じた事例がある。液状化地盤上の橋台では、通行機能に支障を生じるような被害事例が報告されているが、そのような橋台の地震時挙動に関する研究事例は少ない。そのため、著者らは、液状化地盤上の橋台の地震時挙動を明らかにする目的で大型振動台実験を実施した¹⁾。

本報では、液状化地盤における橋台杭基礎の地震応答の簡易評価手法を提案することを目的として、簡易解析モデルによる液状化地盤上の橋台を対象とした振動台実験の再現解析を行った結果について報告する。

2. 解析対象

解析対象とした2ケースの振動台実験の模型諸元を表-1、模型概要図を図-1に示す。2ケースのモデルは、同一の地盤条件のもと、一方が旧基準、他方が現行基準に基づき設計されたもので、杭径及び杭本数に加え、桁の遊間も異なる。振動台実験では、2ケース共に同一の加振条件で実施され、どちらの実験ケースもストラットとたて壁が接触した瞬間に橋台の変位や背面土圧、杭の断面力が同時に最大となった。この実験結果から、ストラットとたて壁が接触した時刻の計測値を再現解析の対象とした。

また、本報で用いた解析方法としては、橋台たて壁及び杭基礎が液状化地盤から受ける土圧を荷重と

表-1 振動台実験の模型諸元

適用基準	基礎の諸元	桁の遊間
S39指針 ²⁾	既製RC杭φ450 8×3列	50mm
H24道示 ³⁾	場所打ち杭φ1200 4×3列	200mm

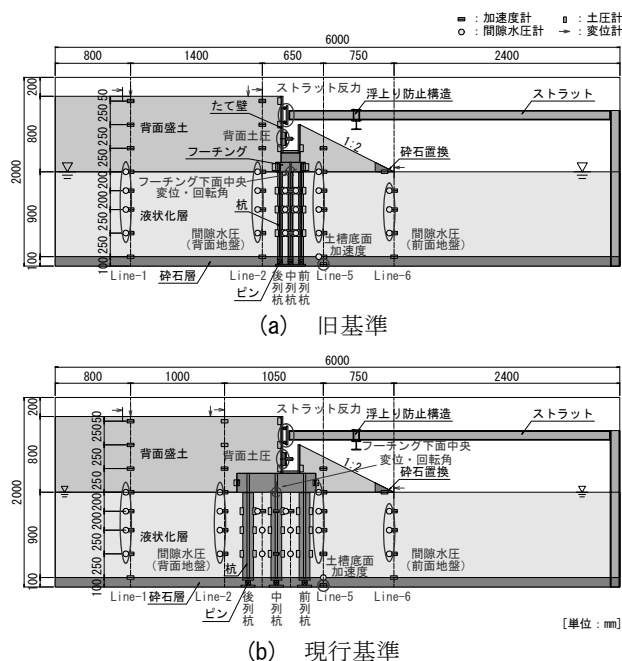


図-1 模型概要図

して与える方法（以下、土圧法という）と応答変位法を用いた。なお、応答変位法において、入力する地盤変位を算定するための地盤変形解析は、液状化の発生による土層の剛性低下を仮定するとともに、土構造物の自重を作用させ、その変形を有限要素法により算定する方法⁴⁾を用いた。以下、解析方法別に検討結果を述べる。

3. 土圧法

(1) 土圧法の解析モデルと解析ケース

土圧法の解析モデルは、図-2に示す通り、2次元はり・ばねモデルとし、たて壁及びフーチングは剛体、杭は線形はり要素とした。境界条件は、実験模型に合わせて杭下端をピン結合、杭頭部を剛結合とした。また、ストラット-たて壁間には、遊間相当の水平変位が生じた後、ストラットにより橋台が拘束されることを考慮するために、ばね定数の第1勾配 $k_1=1\text{kN/m}$ 、第2勾配 $k_2=1\times 10^8\text{kN/m}$ とするバイリニア型のばねを設けた。たて壁に与える土圧は、振動台実験で観測された地盤の加速度から求まる水平震度を用いて、修正物部・岡部の方法⁵⁾により算出した。杭に与える土圧は、既報¹⁾の土圧分布を参考に、液状化層の中間までは深度方向に全上載圧相当とし、そこから液状化層の下端で零になるように深度方向に小さくなる分布を基本とした。

解析ケースは、表-2より杭の土圧分布の折れ点、たて壁と杭に与える土圧の倍率、各杭の荷重分担比率を評価した群杭効果の有無を変えた計6ケースとした。

ここで、水際線沿いの橋脚基礎に作用した流動力の逆解析結果⁶⁾では、液状化層中の杭に作用する流動力を全上載圧の30%程度とすることにより評価できることが明らかにされている。ケース2からケース4では、これを参考に、杭に与える土圧を全上載圧の0.3倍とした。さらに、ケース3では、群杭効果を考慮するために杭の抵抗面積比により補正係数を設定⁷⁾することで、杭位置に応じて異なる土圧を与えた。なお、杭の抵抗面積比は杭径及び杭配置が関係するため、表-2の旧基準と現行基準の杭の分担比率が異なっている。

ケース4では、たて壁に設置した壁面土圧計の実測値を参考に、たて壁に与える土圧を地震時主働土圧の2倍とした。また、ケース5及びケース6では、杭に与える土圧を全上載圧の0.2倍とし、さらにケース6については、振動台実験の土圧分布とより整合するように、杭の土圧分布の折れ点を調整した。

(2) 土圧法の解析結果

解析では、橋台杭基礎の地震時挙動の評価として、杭の曲げモーメント分布に着目した。解析結果について、各解析ケースの杭の曲げモーメント分布を図-3及び図-4、土圧分布を図-5に示す。なお、図-3の各解析ケースの結果では、群杭効果を考慮していないため、杭位置によらず曲げモーメント分布は一致

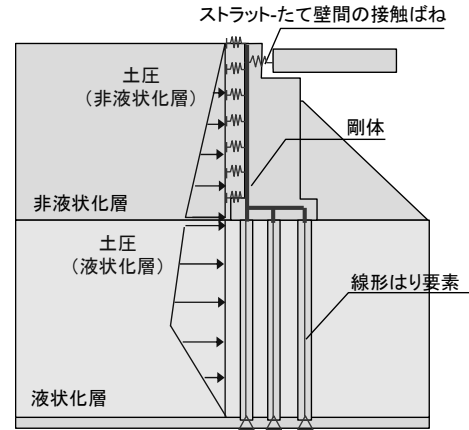


図-2 土圧法の解析モデル

表-2 土圧法の解析ケース一覧

解析ケース	杭土圧分布折れ点	土圧の倍率		群杭効果 (杭の荷重分担比率)	
		たて壁	杭	旧基準	現行基準
1	液状化層の中間	1.0	1.0	-	-
2	液状化層の中間	1.0	0.3	-	-
3	液状化層の中間	1.0	0.3	後列0.96 前・中列0.46	後列0.99 前・中列0.55
4	液状化層の中間	2.0	0.3	-	-
5	液状化層の中間	1.0	0.2	-	-
6	液状化層の中間より0.1m上方	1.0	0.2	-	-

している。

杭に与える土圧を全上載圧相当としたケース1では、図-5より解析値の杭に与える土圧は実験値よりも大きな値となるため、図-3に示す解析値の杭の曲げモーメント分布が実験値に比べて過大となった。杭に与える土圧を全上載圧の0.3倍に低減したケース2及びケース4では、解析値の杭の曲げモーメント分布がケース1に比べて小さくなり、実験値の曲げモーメント分布を概ね再現することができた。この点は、杭の剛性が著しく異なる旧基準と現行基準で共通している。さらに図-4より、ケース3では群杭効果を考慮することにより、実験値のように杭位置による曲げモーメント分布の違いを評価できることが分かる。

ここで、ケース2に対したて壁に与える土圧を2倍にしたケース4では、杭の曲げモーメント分布が同程度である一方で、別途ストラット-たて壁間に設けた接触ばねの反力を確認すると、ケース2の約1.4倍の増加となった。このことから、杭の曲げモーメントには液状化層から受ける土圧の影響が大きく、たて壁に作用する土圧はたて壁に接触したストラットが分担し、杭の曲げモーメントにはあまり影響しないことが分かる。

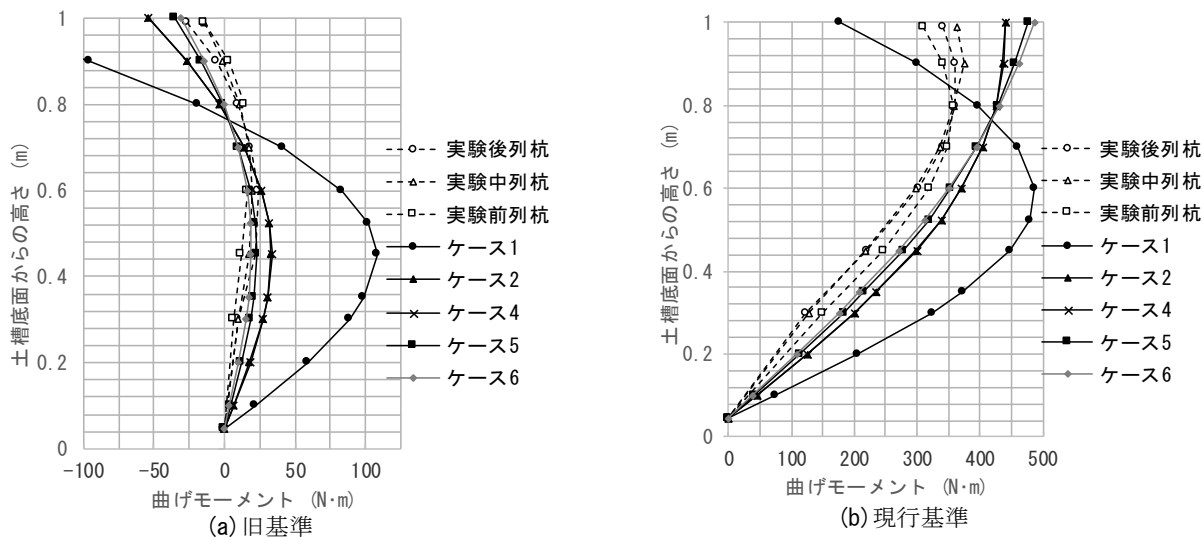


図-3 杭の曲げモーメント分布

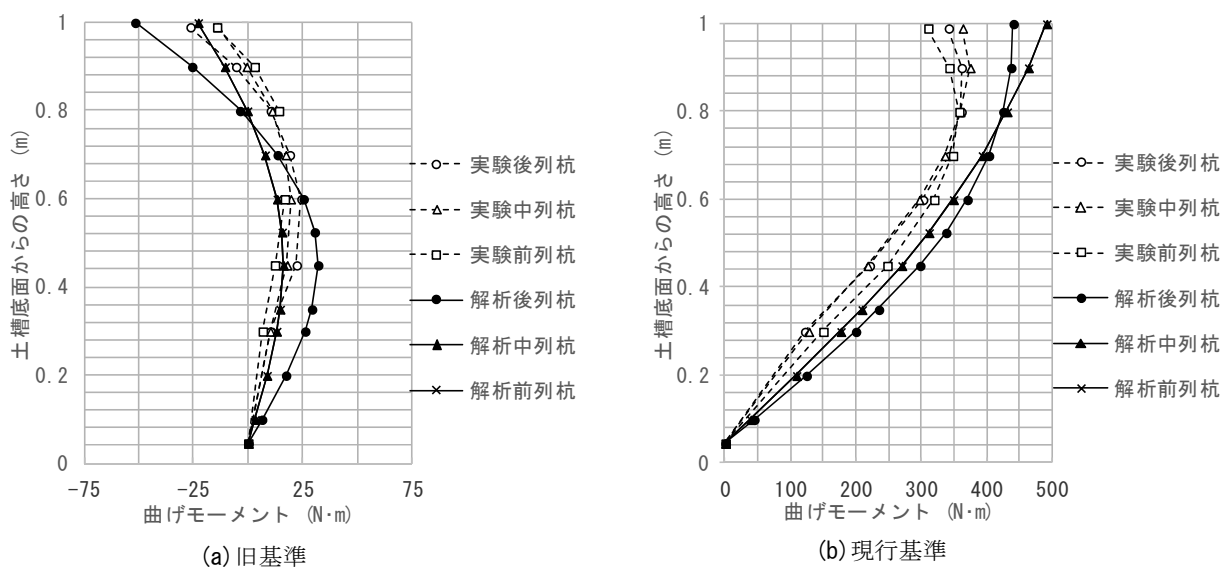


図-4 杭の曲げモーメント分布(ケース3)

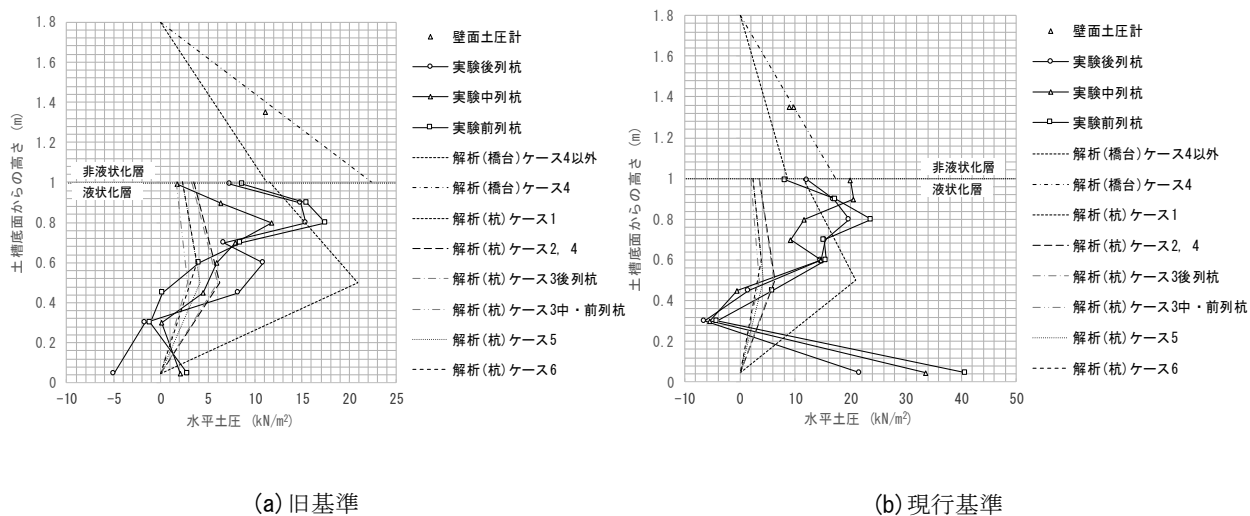


図-5 土圧分布

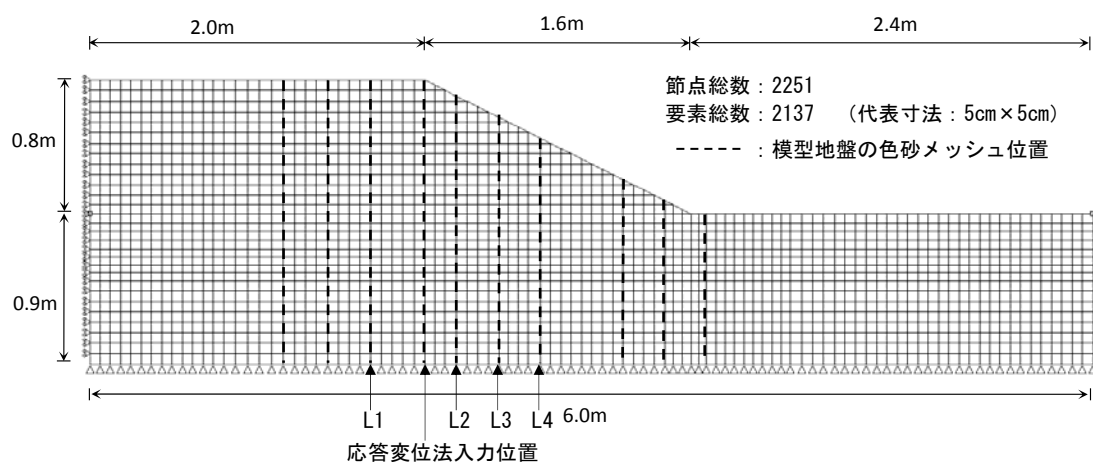


図-6 地盤変形解析モデルのメッシュ図

ケース5及びケース6では、杭に与える土圧を0.2倍に低減したことで、解析値の杭の曲げモーメント分布がより実験値と近くなっている。特にケース6では、土圧分布の折れ点を液状化層の中間より0.1m上方としたことで、土槽底面からの高さ0.6m以下の範囲でケース5よりも実験値と整合する結果となった。

表-3 地盤変形解析の解析ケース

解析 ケース	液状化層の繰返し 三軸強度比 R_L	慣性力の考慮有無 (水平震度 k_h)
A	0.1330	無
B	0.5625	無
C	0.5625	有 ($k_h=450/980=0.459$)

4. 地盤変形解析

(1) 地盤変形解析の解析モデルと解析ケース

地盤変形解析では、橋台背面盛土及び液状化層のみをモデル化し、橋台躯体、杭基礎等の構造体はモデル化しないものとした。本報で解析対象とする2ケースの振動台実験では、模型地盤の残留変形が同程度であったため、地盤変形解析では現行基準の1ケースのみとし、振動台実験で橋台模型を設置していない側面の変形を解析対象とした。図-6に模型地盤の色砂メッシュ位置及び地盤変形解析モデルのメッシュ図を示す。境界条件は、側面を鉛直ローラ（水平変位：固定、鉛直変位：自由）とし、地盤底面を水平変位及び鉛直変位共に固定とした。

地盤の物性値は、振動台実験で用いた地盤材料の室内試験結果に基づき設定した。また、液状化に対する抵抗率 F_L の算出に用いる加速度分布は、液状化地盤中の加速度計による最大加速度の計測値を用いた。

解析ケースは、表-3に示す液状化層の繰返し三軸強度比 R_L 及び地盤慣性力の考慮の有無を変化させた計3ケースとした。

ここで、ケースAの R_L の値は、室内試験結果を用いた。ケースB及びケースCの R_L の値は、解析の橋台背面位置の地盤の残留変形が、図-6の色砂メッシュ位置L1とL2の平均の変形量と一致するように、逆

解析的に求めた。さらにケースCでは、初期状態（剛性低下による変形解析前の状態）には背面盛土及び地盤の慣性力による荷重を考慮した。これは、本報で用いた地盤変形解析手法は、本来地盤の残留変形を算定する解析方法であるのに対し、本報の解析対象は、杭の断面力等が最大となる時刻としているため、擬似的にこの時刻を再現するためである。慣性力の算出に用いる水平震度は、模型地盤中央及び上部での水平加速度の平均値（450gal）を980galで除した値とした。

(2) 地盤変形解析の解析結果

1) ケースAの解析結果

表-3に示す $R_L=0.1330$ 、 $k_h=0.459$ より、 R_L を k_h で除して F_L を近似的に算定すると $F_L=0.29$ 以下となり、 F_L の値は0.8を大きく下回る。そこで、微小抵抗領域の剛性を推定する方法として、安田・稲垣式⁸⁾を F_L が0.8以下の範囲で適用できるように豊田ら⁹⁾が修正したチャートを用いて、地盤変形を算定した。解析の結果、地盤の水平変位は自重による初期変位で数mm程度、剛性低下によるひずみ増分で盛土天端では35cm程度、液状化層では最大1m程度に達し、振動台実験の残留変形1cm程度に対し、地盤変形解析では過大なせん断ひずみが発生し、流動的な地盤変形が生じる結果となった。これは、文献8)の推定方法が河川堤防の被災事例の逆解析結果から提案され

た方法であり、均質で透水性の高い模型地盤への適用性が低いことが一因であると考えられる。

2) ケースBの解析結果

ケースAの地盤変形解析では、大きなせん断ひずみが生じ、この変位を応答変位法の入力地盤変位として用いることは、現実的ではない。したがって、ケースBでは、橋台背面位置の地盤の変形が図-6の振動台実験の色砂メッシュ位置L1とL2の平均の変形に合うような R_L を用いて地盤変位を算定した。図-7に地盤変形解析の結果を示す。なお、図中の凡例のうち実験L1からL4は、図-6の振動台実験の色砂メッシュ位置L1からL4を指す。

3) ケースCの解析結果

ケースCでは、ケースBと同様の液状化強度 R_L を用いて、背面盛土及び地盤の慣性力による荷重を考慮した。図-7より、慣性力を考慮していないケースBと比べ、液状化安全率 F_L 及び微小抵抗領域の剛性は同様の値となるが、慣性力の影響によって背面盛土及び地盤の水平変位はケースBの2倍程度となった。

5. 応答変位法

(1) 応答変位法の解析モデルと解析ケース

応答変位法の解析モデルのうち、たて壁、フーチング、杭、ストラットたて壁間の接触ばねは、土圧法の解析モデルと同様とした。図-8に応答変位法の解析モデルを示す。杭に設けた地盤ばねのうち水平地盤ばねは、杭と地盤の相対変位の方向に応じて作用側にも抵抗側にもなり得るため、相対変位の方向によって水平地盤抵抗の異なる非対称バイリニア型のばねとし、土圧法と同様の群杭効果の荷重分担比率を考慮した。なお、橋台背面側は盛土となっているため、相対変位が橋台背面側となる場合の上限値については、橋台背面盛土を上載圧として考慮した。また、杭に設けた鉛直地盤ばねは線形ばねとしてモデル化した。

その他、たて壁に設けた水平地盤ばねは、既報¹⁾より、橋台背面は受動状態に近い土圧が作用したことから、受動土圧強度を上限値とするバイリニア型のばねとしてモデル化した。

解析ケースは、表-4より水平地盤ばねの抵抗特性と地盤変形解析で求めた地盤変位の組合せを変えた計8ケースとした。

ケース1からケース3については、液状化層を対象に、平成24年道路橋示方書IV 下部構造編に示される、地震時保有水平耐力法に用いる水平方向地盤反力係数 k_{HE} 及び水平地盤反力度の上限値 P_{HU} をそれぞれ

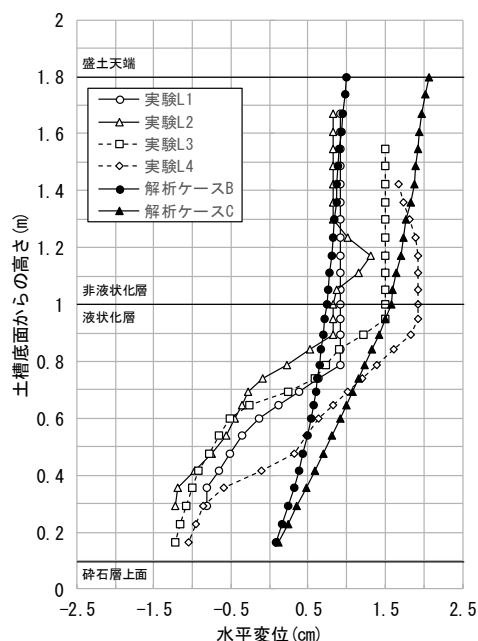


図-7 地盤変形解析結果

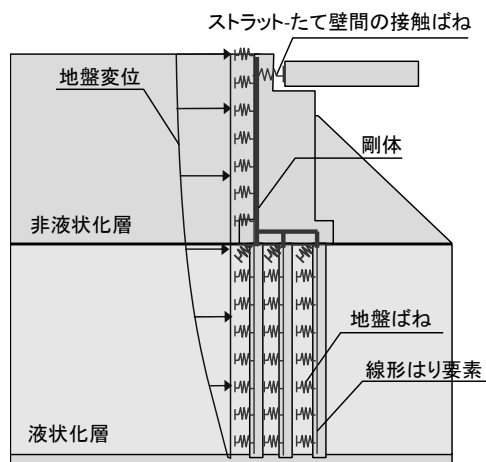


図-8 応答変位法の解析モデル

表-4 応答変位法の解析ケース

解析 ケース	水平方向地盤反力 係数 k_{HE} の倍率		水平地盤反力度の 上限値 P_{HU} の倍率		地盤変形 解析ケース	備考
	たて壁 k_H	杭 k_H	たて壁 P_U	杭 P_U		
1	1.00	1.00	1.00	1.00	ケースB	-
2	1.00	0.30	1.00	0.30	ケースB	-
3	1.00	0.10	1.00	0.10	ケースB	-
4	1.00	1.00	1.00	1.00	ケースC	-
5	1.00	0.30	1.00	0.30	ケースC	-
6	1.00	0.10	1.00	0.10	ケースC	-
7	1.00	0.10	1.00	0.10	ケースC	入力地盤 変位1.5倍
8	1.00	0.10	1.00	0.10	ケースC	入力地盤 変位2.0倍

れ1.0倍, 0.3倍, 0.1倍とし, 地盤変形解析より入力する地盤変位はケースBを用いた。

解析ケース4からケース6については, ケース1からケース3に対し, 地盤変形解析より入力する地盤変位はケースCを用いた。

解析ケース7とケース8については, 液状化層の k_{HE} 及び P_{HU} を0.1倍とし, 後述の応答変位法の解析結果において, 現行基準の橋台杭基礎を対象とした場合, 解析の橋台変位量が小さくたて壁とストラットが接触しなかったため, 接触するように入力する地盤変位の倍率を1.5倍, 2.0倍に大きくしたケースである。

(2) 応答変位法の解析結果

1) 旧基準の解析結果

応答変位法では, 土圧法の解析結果と同様に, 橋台杭基礎の地震時挙動の評価として, 杭の曲げモーメント分布に着目した。

図-9より, ケース1では, 杭の曲げモーメント分布は杭中間部及び杭先端部で実験値と異なる分布を示している。

ケース2及びケース3では, 液状化層の k_{HE} 及び P_{HU}

をそれぞれ0.3倍, 0.1倍に低減した影響により, ケース1の解析結果に対して杭の曲げモーメント分布は杭頭部でより実験値に近づいたが, 杭中間部及び杭先端部ではあまり変化が見られない。

ケース4からケース6では, ケース1からケース3に対して, 地盤の慣性力を考慮した地盤変位を入力したケースである。ケース4ではケース1と同様に杭の曲げモーメント分布は実験値と異なる分布を示しており, ケース5では, ケース4の解析結果に対して, 杭頭部でより実験値に近づいた。

ケース6では, ケース4に対し液状化層の k_{HE} 及び P_{HU} を0.1倍に低減したケースであり, 実験値の杭の曲げモーメント分布を概ね再現することができた。

2) 現行基準の解析結果

旧基準の解析結果と同様に, ケース1からケース6では, 液状化層の k_{HE} 及び P_{HU} , 入力する地盤変位を変えて解析を行ったが, 図-10よりどのケースも杭の曲げモーメント分布は実験値と大きく異なる結果となった。特に旧基準の解析結果では, ケース6の場合に実験値の杭の曲げモーメント分布を概ね再現できたが, 現行基準のケース6の解析結果では, 他のケースに対して曲げモーメントの値は実験値に近

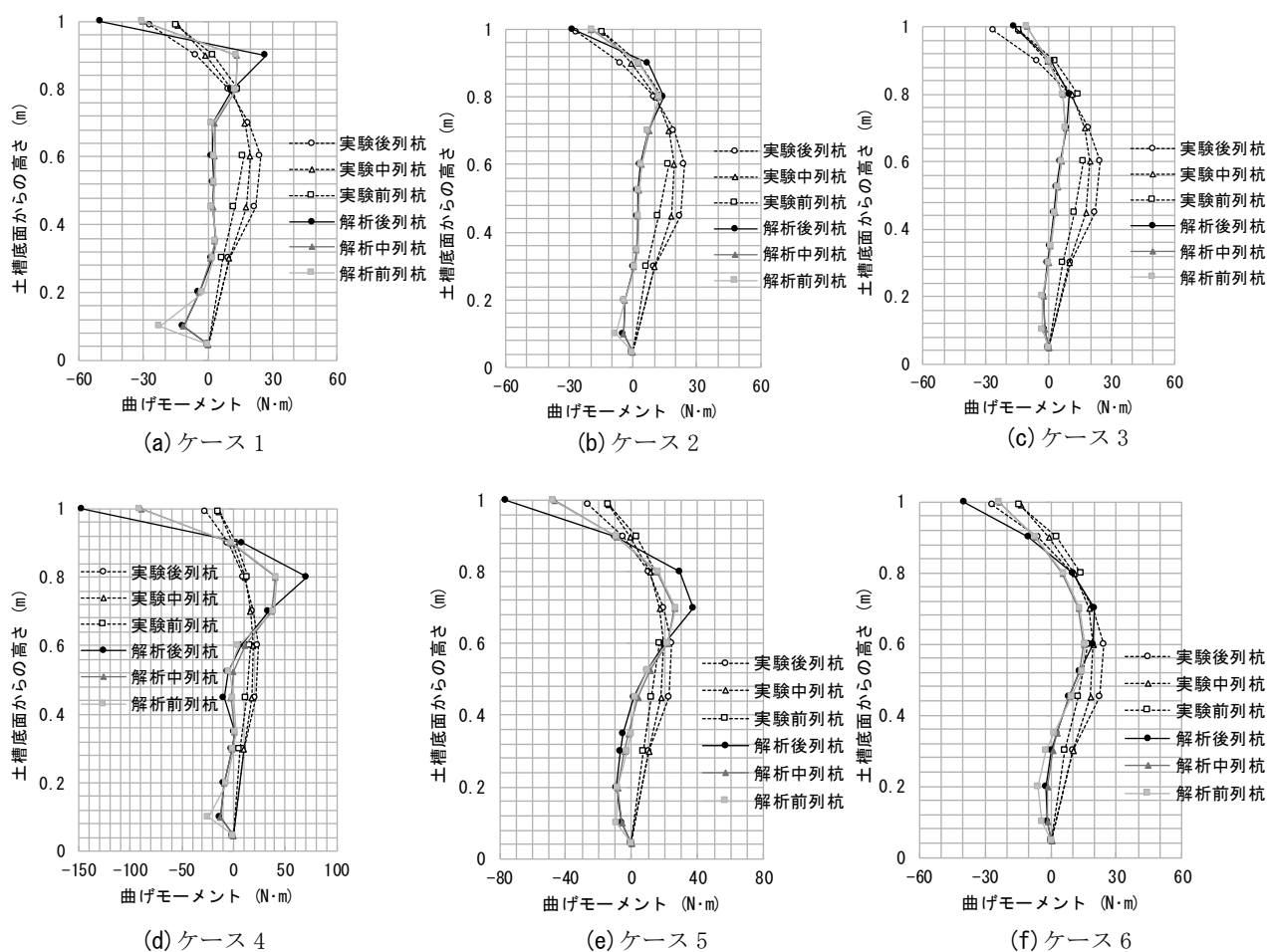


図-9 杭の曲げモーメント分布(旧基準)

づくものの、曲げモーメント分布は実験値の分布に対して反転した形状となる。ここで、図-11は橋台及び橋台杭基礎の水平変位を示しており、ケース6では解析値が実験値の橋台の水平変位に達しておらず、振動台実験で確認されたストラットがたて壁に接触し、背面土圧や橋台杭基礎に作用する断面力が増加する地震時挙動を再現できていない。

そこで、ケース7及びケース8では、応答変位法において入力する地盤変位をそれぞれケース6の1.5倍、

2.0倍に大きくした。図-11のケース7の解析値は実験値の橋台の水平変位に達しており、その時のストラット反力を別途確認すると、実験値のストラット反力7.4kNに対し、解析値は9.6kNとなった。図-12にケース7及びケース8の杭の曲げモーメント分布を示す。図-12よりケース7では、杭中間より下方で解析値の曲げモーメント分布が実験値に近づき、ケース8では、実験値の曲げモーメント分布を概ね再現することができた。

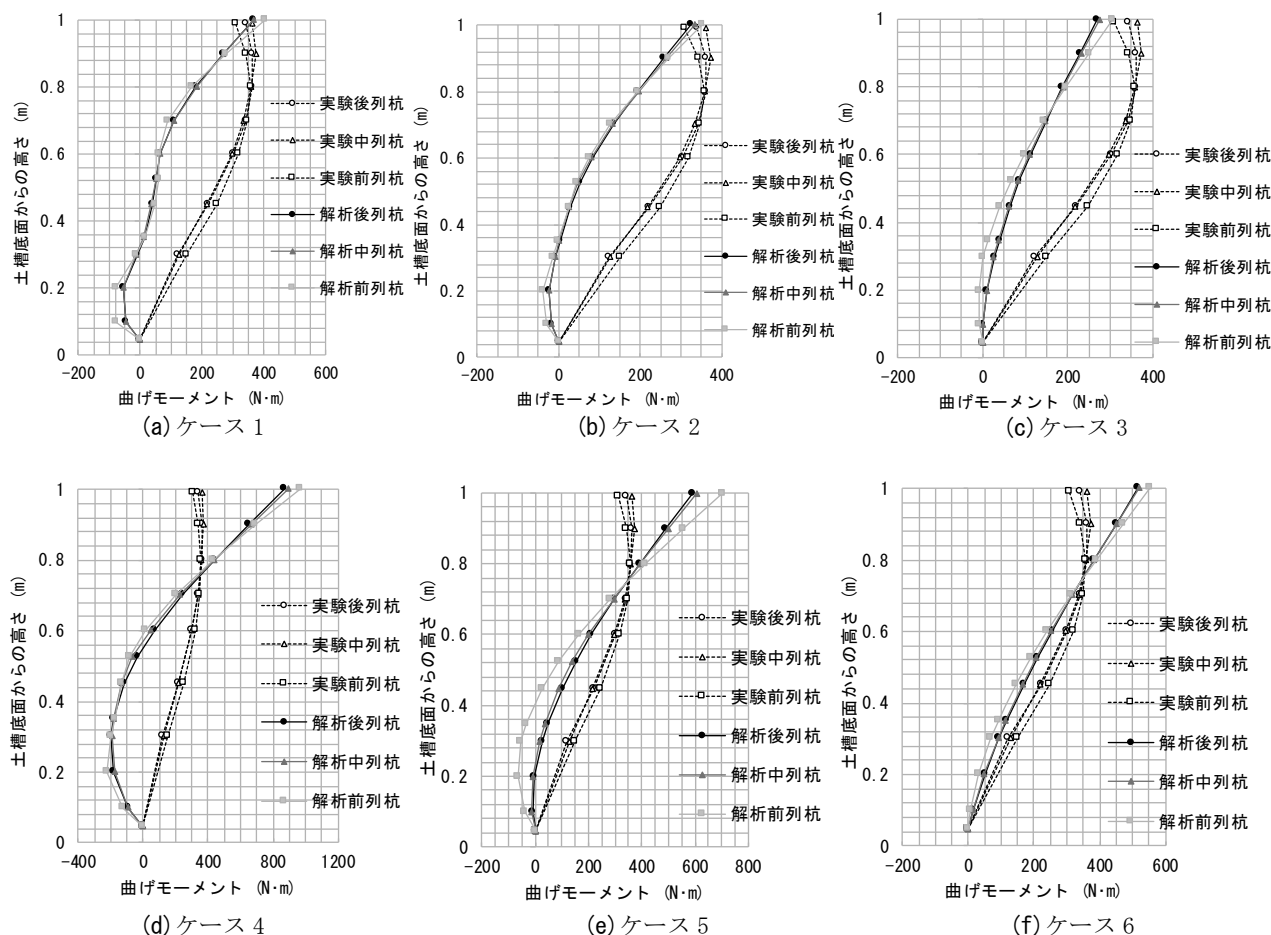


図-10 杭の曲げモーメント分布(現行基準)

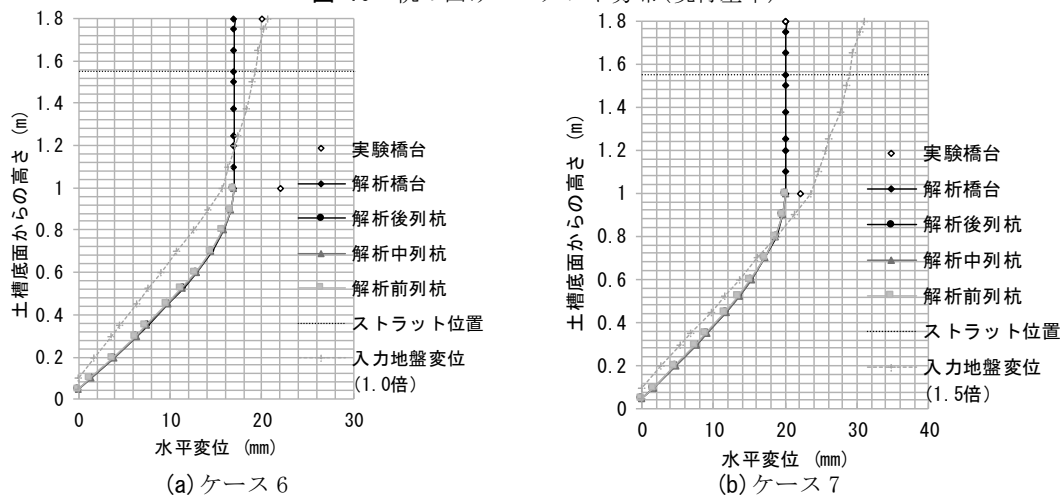


図-11 橋台及び橋台杭基礎の水平変位

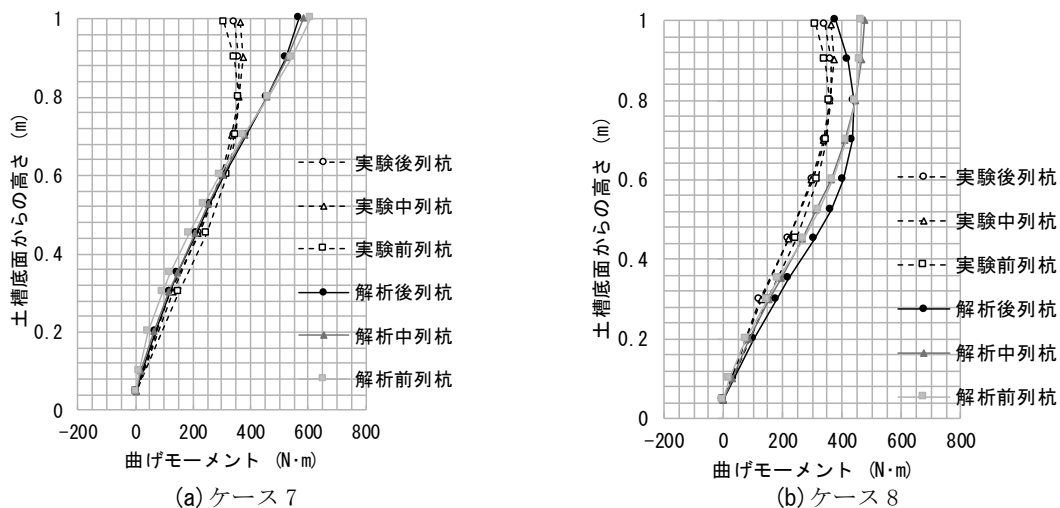


図-12 杭の曲げモーメント分布(ケース7及びケース8)

6. 結論

本報では、液状化地盤における橋台杭基礎の地震応答の簡易評価手法を提案することを目的として、2次元はり・ばねモデルによる液状化地盤上の橋台を対象とした振動台実験の再現解析を行った。以下に本報の解析モデルを対象に得られた知見を示す。

- (1) 土圧法では、ケース2からケース4のように、杭に与える土圧の折れ点を液状化層の中間とし、文献6)の橋脚基礎と同様に土圧の大きさを全上載圧の0.3倍に低減することにより、振動台実験の杭の曲げモーメント分布を概ね再現できることを明らかにした。この結果は、杭の剛性が著しく異なる旧基準と現行基準で共通している。
- (2) 地盤変形解析では、室内試験結果の R_L を用いて地盤変位を算定した場合、模型地盤の変位に対して、解析では過大なせん断ひずみが生じ、うまく再現できない結果となった。
- (3) 応答変位法では、杭に設ける地盤ばね k_{HE} 及び P_{HV} を0.1倍に低減した場合に、振動台実験の杭の曲げモーメント分布を概ね再現できることを明らかにした。ただし、現行基準の解析では、入力する地盤変位を2.0倍としたため、(2)の知見も含めて、今後は地盤変形解析の再現性の向上と応答変位法の解析モデルの改善が課題である。

謝辞：本報は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人：JST)の一環として実施している。また、東京工業大学大学院高橋章浩教授、ならびに、

(一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会との共同研究として実施しているものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 石田修一，谷本俊輔，大住道生，星隈順一：橋台杭基礎が液状化地盤から受ける土圧に関する実験的検討，第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2016.7.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇，1964.3.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2012.3.
- 4) 安田進，吉田望，安達健司，規矩大義，五瀬伸吾，増田民夫：液状化に伴う流動の簡易評価法，土木学会論文集，No.638/III-49，pp.71-89，1999.
- 5) Koseki, J., Tatsuoka, F., Munaf, Y., Tateyama, M. & Kojima, k. : A modified procedure to evaluate active earth pressure at high seismic loads, Special Issue of Soils and Foundations, pp.209-216, 1998.9.
- 6) 田村敬一，東拓生，小林寛，濱田禎：橋梁基礎に作用した流動力の逆解析，土木研究所資料，No.3770，2000.12.
- 7) 白戸真大，野々村佳哲，福井次郎：動的解析における群杭のモデル化に関する検討，土木学会地震工学論文集，2005.3.
- 8) 安田進，稲垣太浩他：液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性，第40回地盤工学研究発表会，pp.525-526，2005.
- 9) 豊田耕一，杉田秀樹，石原雅規：河川堤防の地震被害事例に基づく液状化地盤の剛性に関する検討，日本地震工学会・2005大会・梗概集，pp.226-227，2005.