

橋桁の影響を考慮した液状化地盤上にある 橋台の地震時応答に関する基礎的研究

梶田 幸秀¹・柿永 恭佑²・宇野 州彦³・北原 武嗣⁴

¹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

²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

³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

⁴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

本研究では、橋桁を考慮した液状化地盤上にある橋台の地震時応答に着目し、橋桁を考慮しない場合との応答の比較を行った。橋桁を考慮した場合、橋桁が橋台前面側への倒れ込みを抑制するため、橋台の応答変位は大幅に減少すること、それに伴い、杭頭部の変位も大きく減少することが確認できたが、杭に発生する曲げモーメントについては、橋桁を考慮してもそれほど変わらないことが確認された。橋台背面地盤の沈下量についても橋桁を考慮すると、橋桁が無い場合に比べて低減することが確認でき、また、液状化層の厚さが変化しても橋台背面地盤の沈下量はそれほど変わらないことも確認された。

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

1. はじめに

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¹⁾。写真-1は被害状況の一例である。この被害に対しては橋台背面地盤の流動化が主たる理由として考えられている。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。

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



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)

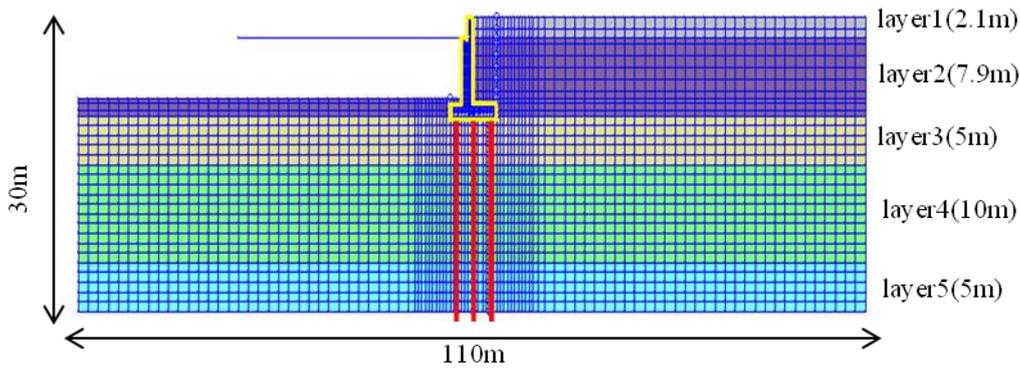


図-1 地盤モデル(橋桁考慮)

表-1 モデル地盤土層設定値

土層	D	N	ρ_t	σ_{ma}'	G_{ma}	ϕ_f	ϕ_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	S1	W1	P1	P2	C1
	(m)	-	(t/m^3)	(kPa)	(kPa)	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	-	-	-	-	-
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	-	-	-	-	-	-

表-2 ジョイント要素設定値

	自重解析			動的解析		
	Kn	Ks	ϕ_j	Kn	Ks	ϕ_j
フーチング横	1000000	0	15	1000000	1000000	15
フーチング底面	1000000	1000000	31	1000000	1000000	31
杭	0	0	15	0	1000000	15

た道路橋示方書²⁾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。

著者らは液状化地盤上の橋台の地震時応答に関して基礎的な知見を得るために、正弦波地震動の周期、液状化層の厚さ、液状化層の位置などをパラメータとした数値解析を行った³⁾。しかし、この研究では、橋桁の影響を考慮していなかったため、橋台の前面側倒れ込み量が1メートル以上発生しており、実際の橋梁構造物としての被害を再現できていないことは明らかであった。そこで、著者らは橋桁による橋台の前面倒れ込みの抑制の影響を考慮するため、橋桁を移動しない棒と仮定し、橋桁と橋台の間の遊間量を考慮し、橋台が遊間量を超えて前面側に倒れ込むと橋桁による反力が生じるモデルを新たに追加して解析を行い、あらためて液状化地盤上の橋台の地

震時応答に関する検討を行った。

2. 二次元有効応力解析条件

解析条件は基本的には文献3)と同じであるが、あらためてここで記載する。解析は有限要素法に基づく二次元有効応力解析プログラム FLIP^{4), 5)}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、フーチング・杭と地盤との間のジョイント要素の設定値(断面水平方向の剛性 Kn, 断面鉛直方向の剛性 Ks, 内部摩擦角 ϕ_j)を表-2に、杭の物性値を表-3にそれぞれ示す。表-2に示すジョイント要素の設定値は文献9)を参考とした。なお地盤は想定地盤であり、橋台は実橋で用いられている大きさとし、杭の本数、大きさは2002年の道路橋示方書の照査を満足するように決定した。地下水位については、フーチング下面の位置を地下水位面として設定し

表-3 杭設定値

密度(t/m ³)	9.4
ポアソン比	0.3
せん断弾性剛性率	9.23×10 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

表-4 地盤パラメータ設定値

model	1	2	3	4
液状化層厚(m)	5	7	9	11

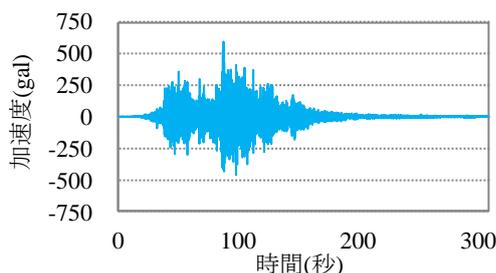


図-3 入力波加速度時刻歴

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, 橋台から張り出している要素が橋桁を表している. 表-1 中の基準初期せん断剛性は $G_{m0} = 9.81 \cdot 1440 \cdot (N \text{ 値})^{0.68}$ から求めている⁷⁾. また S1, W1, P1, P2, C1 は液状化パラメータである^{4), 5)}. N 値が 2 である layer3 を液状化層と想定した. 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 秒であった. 解析上の条件として wilson θ 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⁸⁾に基づいた有効応力モデルでモデル化した. なお, 杭頭はフーチングと剛結している. 橋台は大きさが底面 6.5m 高さ 10m, 密度が 2.5t/m³ とした. 境界条件は側方と底面に粘性境界を与えている. 2次元動的有効応力解析による一体解析では, 杭と地盤で節点を共有すると, 杭は壁状にモデル化されてしまうため適当でない. そのため土が杭間をすり抜けるような状況を表現する必要がある. そこで2次元一体解析を行うことを前提に, 杭と地盤を結ぶ非線形ばね(以下, 相互作用ばねと呼ぶ)に必要な特性が FLIP 研究会において検討されている. 相互作用ばねの設定にあたっては様々な検討がなされている. それらの検討から相互作用ばねが FLIP に設定されており, 今回

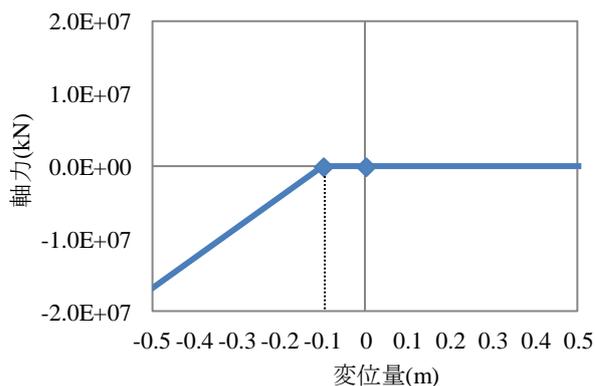


図-2 桁のばね剛性

の解析検討においても, 上記の内容を踏まえて杭と地盤の間に相互作用ばねを使用した. 具体的には, 杭の変位と杭間における地盤変位との相対変位が表現されるようにばね剛性が設定され, 振動時に水圧の上昇等によって地盤剛性が変化することを相互作用ばねにおいても表現できるようになっている.

橋桁の影響を再現するために, まず, 橋桁を剛な移動しない棒と仮定し設置した(図-1の橋台天端の左側に見える横棒). この棒の右側の節点と橋台天端の節点をばね要素で結んでいる. ばね要素の軸力-変位量関係として, 図-2に示すような関係を与えた. すなわち, 遊間量を 10cm と仮定し, 遊間量を超えて橋台が前面側(図-1では左側)に倒れ込もうとすると, 橋台は橋桁から反力を受けることになり, 遊間量以内の前面側倒れ込みや背面側に倒れ込んだ場合は橋桁からは何も反力は受けない. 図-2で設定したばね剛性としては, 想定した橋梁の桁の軸剛性とほぼ同じ値(3.8×10^7 kN/m)となっている.

表-4に解析ケースを示す. 地盤モデルに入力した波は K-NET 観測波で, 2011年東北地方太平洋沖地震における福島県相馬において地表面観測された地震波を, 観測地点の地盤情報を用いて成層地盤の地震応答解析プログラム K-SHAKE(構造計画研究所株式会社)により工学的基盤での地震波として算出したものを用いた. 図-3に用いた地震波の工学的基盤での加速度時刻歴を示す.

3. 解析結果

(1) 橋桁を考慮しない場合

桁を考慮しないときの結果として解析終了時の変位図(model1:液状化層厚 5m)を図-4に, 杭の最大曲げモーメント図, 最大変位図を図-5に示す. 図-4では枠で囲まれている部分が橋台を示しており, 地盤中の色が異なる

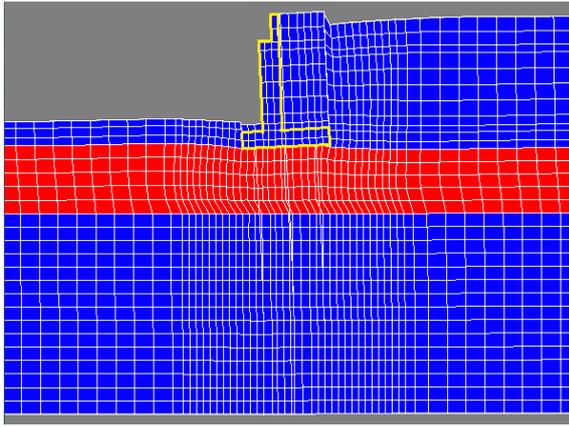
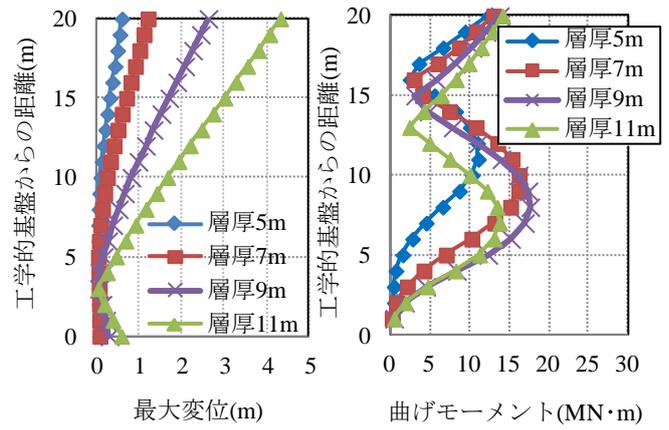


図-4 解析終了時の変位図(model1: 層厚 5m)



(a) 杭の最大変位図 (b) 杭の最大モーメント図

図-5 杭応答図

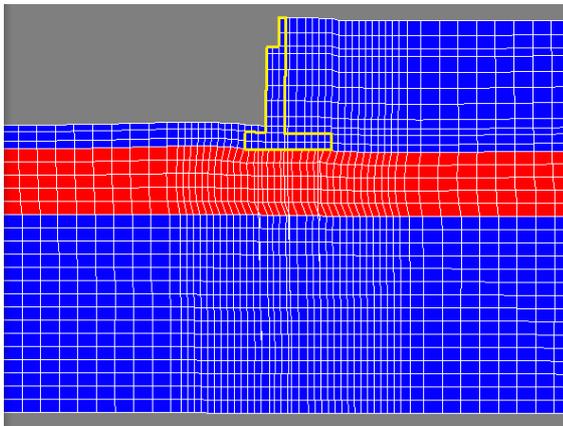
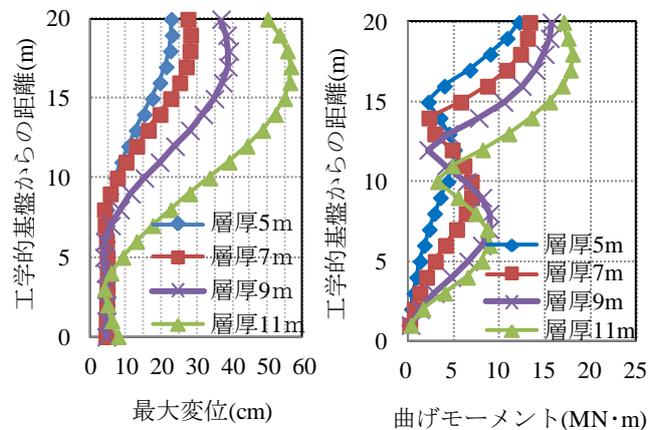
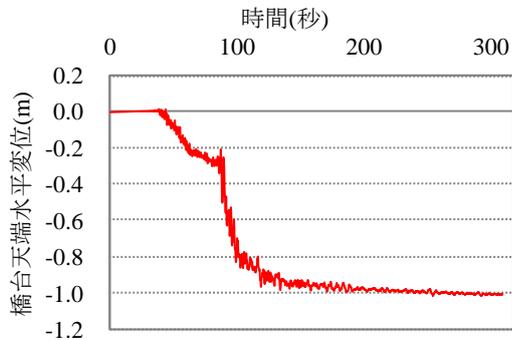


図-6 解析終了時の変位図(model1: 層厚 5m)

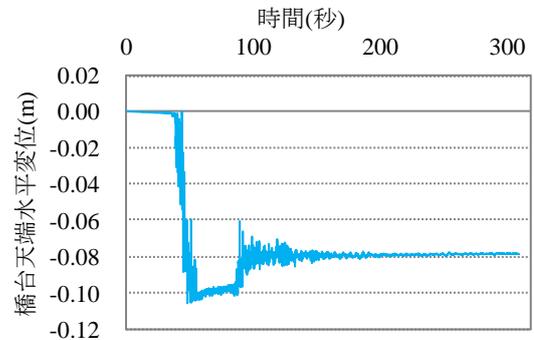


(a) 杭の最大変位図 (b) 杭の最大モーメント図

図-7 杭応答図

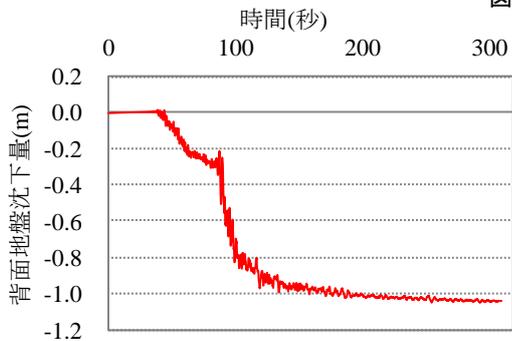


(a) 橋桁を考慮しない場合

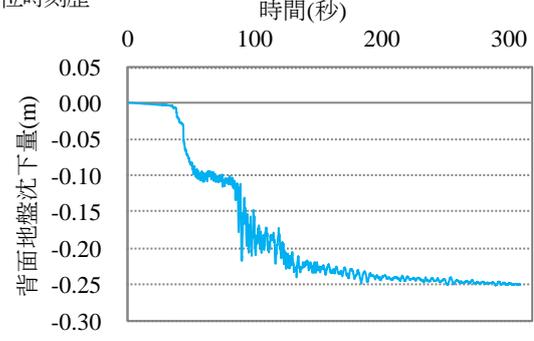


(b) 橋桁を考慮した場合

図-8 橋台天端水平変位時刻歴



(a) 橋桁を考慮しない場合



(b) 橋桁を考慮した場合

図-9 背面地盤沈下量時刻歴

部分が液状化層であり液状化していることを示す。図-4から橋台が前面側に大きく傾いていることがわかる。背面地盤では沈下が生じており橋台と段差が生じていることが確認できた。さらに図-5(a)より液状化層が厚くなるほど杭頭部付近での変位が大きくなることわかる。これは橋台の変位が大きくなり引っ張られることによるものと考えられる。図-5(b)より変位応答と同様に液状化層が厚くなることで曲げモーメントも増加した。また液状化層の位置で一度曲げモーメントは下がり橋台の変位により杭頭部で曲げモーメントが増加する。液状化層と非液状化層の境界付近でも地盤特性が大きく変わること地盤の相対変位が大きくなり曲げモーメントが増大している。

(2) 橋桁を考慮する場合

次に橋桁を考慮した場合の解析結果を(1)と同様に図-6、図-7にそれぞれ示す。図-6から橋桁を考慮することで橋台変位および背面地盤沈下が大幅に減少することが分かる。図-6ではわかりにくいですが橋台は背面側にわずかに傾く結果となった。これは、橋桁を設置しているため前面側に倒れ込むことができず背面側へ倒れ込んだものと考えられる。図-7(a)より橋桁を考慮した場合には変位量は小さくなるものの桁を考慮しないときと同様に液状化層が厚くなるほど杭頭部付近で前面側への変位が増加することがわかる。これは液状化層が厚くなることで橋台下部が前面方向に変位しやすくなるためだと考えられる。図-7(b)から最大モーメントに関しては、桁を考慮しても、応答値はそれほど低減しないことがわかったが、この理由は現在、考察中である。

図-8に液状化層厚が5mの場合(model1)の橋台天端部の変位の時刻歴応答を示す。橋台が背面側に移動したときが図中では正の変位量となる。図-8(a)より、橋台は背面側に移動する時もあるが、基本的には、橋桁が無いため橋台が45秒付近から徐々に橋台前面側に倒れ込んでいるのがわかる。一方、図-8(b)より、橋桁を考慮すると、前面側は橋桁により、背面側は背面地盤により倒れ込みが抑制されるため、おおむねプラスマイナス10cm以内の移動量で収まっている。続いて、図-9に液状化層厚が5mの場合の背面地盤沈下量の時刻歴を示す。正の値は地盤が上方に移動しており、負の値は地盤が沈下していることを表している。図-9(a)では、橋台の倒れ込みにともない、背面地盤も徐々に沈下を続けていることがわかるが、桁を考慮すると、橋台の移動量がそれほど無いため、背面地盤沈下量も橋桁を考慮しないときほど大きな値とはならない結果となっている。

4. 結論

本解析では、液状化地盤上の橋台の動的応答に対する基礎的な知見を得るために、有効応力解析を行い、作用する曲げモーメントや杭の応答変位、背面地盤沈下量など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) 橋桁が無いモデルでは橋台は前面側に傾き、橋台の変位量と背面地盤沈下量も大きく出たが、橋桁を考慮したモデルでは橋桁にぶつかり橋台下部が前面側に移動することで傾きは背面側となり橋台変位量と背面地盤沈下量が大幅に小さなものとなった。これらの結果から桁のストッパーとしての働きの確認できた。
- (2) 杭の変位量は桁の有無で大きな差が生じたが、最大モーメントに関してはグラフ形状は異なるがどちらも杭頭部と液状化層境界で大きくなることが確認できたので橋桁を考慮する場合においても曲げモーメントの値に着目するべきといえる。

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，第34回 <http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/houkoku2/houkoku2.htm> (2015年9月10日閲覧)
- 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) 梶田幸秀，柿永恭佑，宇野州彦，北原武嗣：液状化地盤上にある橋台杭基礎の地震時応答に関する基礎的研究，第34回地震工学研究発表会講演論文集，No.628，2014
- 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) 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集(平成19年改訂版)上巻，p.1-68，2007
- 7) 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> (2015年09月10日閲覧)
- 8) 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

SEISMIC RESPONSE ANALYSES OF
THE ABUTMENT WITH CONSIDERATION INTO THE GIRDER
ON THE LIQUEFIED SOIL LAYER

Yukihide KAJITA, Kyosuke KAKINAGA, Kunihiko UNO and Takeshi KITAHARA

The purpose of this study is to obtain the seismic response of the abutment on the liquefaction ground. Especially, the bending moment of the piles and the horizontal displacement of the abutment are focused on. Firstly, from the analytical results by not considering the girder, the abutment fall forward and the displacement and the back foundation settlement are large. The bending moment and the displacement of the piles are large too. Secondary, from the analytical results by considered the girder, the abutment fall backward. The displacement of the abutment and the settlement of back foundation become very small. But the bending moment of the piles got the big value. The girder worked as a stopper for the abutment falling.