地震時における橋台背面アプローチ部の 沈下対策に関する基礎的検討

梶田 幸秀1·斧田 和樹2·宇野 州彦3

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: onoda@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

本研究では、液状化地盤上に存在する橋梁を対象として有効応力解析を実施し、地盤改良による橋台背 面アプローチ部の沈下の抑制や、杭の損傷低減の効果について検討を行った.改良工法として液状化層を 直接改良する深層混合処理工法、橋台背面盛土を改良し、液状化層への上載圧を低減させる荷重軽減工法 を取り上げた.いずれの工法でも、橋台背面アプローチ部の沈下に関しては効果があったが、深層混合処 理工法では、杭に作用する曲げモーメントが増加する可能性があることが確認された.

Key Words : Liquefaction, Abutment, Pile, Bending moment, Deep layer mixing, Lightweight Banking

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.2016年熊本地震でも、河川を跨ぐ橋梁に おいて橋台背面アプローチ部の段差が数多く報告されて いる.**写真-1**に被害の一例を示す.これらの被害は、側 方流動によって橋台が側方に移動したことが原因である と予測されるものもある.地震直後はこの段差により、



写真-1 橋台背面部の沈下による段差障害

緊急車両が通行不可能になったり,通行時の速度制限が 行われたりした.地震直後のこのような被害を解消する ことは非常に重要である.

橋台の側方移動現象は地震時に起きるとは限らず,常時においても軟弱地盤上では発生する可能性があることは指摘されており、2009年には土木研究所より「橋台の 側方移動対策ガイドライン策定に関する検討」が報告されている¹⁾. 2010年にも内容を充実させた「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)」が報告されている². 検討(その2)では,種々の側方移動対策 工について検討されているが,これらは常時における検討であり,地震発生時に橋台や橋台背面盛土がどのよう に挙動するかについては言及されていない.

そこで、本研究では、側方移動対策工のうち、軟弱層 を直接改良する深層混合処理工法と橋台背面盛土を改良 し、軟弱層への上載圧の低減を行う荷重軽減工法に着目 し、これらの工法を施したときに、河川を跨ぐ橋梁にお ける地震時の挙動について検討を行うことを目的とした.

2. 二次元有効応力解析の概要

(1) 構造物および地盤部分のモデル化

本解析は FLIP「液状化による構造物被害予測プログ ラム」を用いている. FLIP は有効応力法に基づく地震 応答解析プログラムであり 2次元有限要素法に基づいた 有効応力解析を行う.本研究では、図-1 に示す解析モ デルを用いて解析を行った.このモデルにおいて、深層 混合処理工法を施した場合、荷重軽減工法を施した場合、 深層混合処理工法と荷重軽減工法を併用したケースにお いて解析を行った.図-1 において、灰色の部分が橋台、 両岸橋台の間にある横棒が橋桁を、解析モデル中心の縦 棒が橋脚を表している.地盤は5つの層で構成されてお り、その物性値を表-1 に示す.表-1 において layer1 と layer2 が橋台背面に存在する地盤となる.layer3 は橋台底 面直下の地盤であり、layer4 と layer5 がその下部に存在 している地盤である.本解析では layer3 のみを液状化層

として過剰間隙水圧比の上昇が考慮されている. 地盤は 全てマルチスプリング要素として非排水条件でモデル化 している.モデルに入力する物性値は N 値や密度を任 意に決定し、それらから FLIP のパラメータ決定の補助 機能 FLIPSIM を用いて算出している. また, この解析 モデルの底面には工学的基盤を想定した粘性境界を、側 面には半無限に続く自由地盤を想定した粘性境界を設置 している.橋台,橋脚,杭基礎といった構造物と土層の 間には境界条件を表現するための表-2 に示す物性値の ジョイント要素を設置している.ジョイント要素は引っ 張り方向の応力は負担せず, 圧縮側では Kn(垂直方向初 期剛性)に応じた力を負担し、せん断方向においては線 弾力がせん断強度に達するまでは Ks(せん断方向初期剛 性)に応じた力を負担する...本解析でのジョイント要 素は文献3)に述べられているものを使用した. 杭基礎の M- φ関係は図-2 に示すように二次剛性 0 のバイリニア モデルとして杭径 800mm の鋼管杭をモデル化しており,



図-1 解析モデル全体図

表-1 地盤物性値

	D	Ν	ρ	Dr	φf	 				
土層区分	層厚	N値	密度	相対密度	せん断抵抗角	放気化パクタータ				
	(m)	-	(t/m ³)	(%)	(°)	S1	W1	P1	P2	C1
layer1	2.1	5	1.8	50	39					
lay er2	7.9	10	1.8	50	39					
layer3	4	2	2	18	37	0.005	3.412	0.5	1.126	1.6
lay er4	11	10	2	36	38					
lay er5	5	20	2	46	39					

		自重解析		動的解析			
	Kn	Ks	摩擦角φ	Kn	Ks	摩擦角φ	
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	

ま_9 ジョイント更表動性値





図-3 入力加速度時刻歴

この杭は layer3 を N 値 10 の通常地盤として置き換えた 際に 2002 年の道路橋示方書の照査を満足するように設 定し,鋼管杭 800mm,肉厚 12mmの杭を橋軸方向に 3本, 橋軸直角方向に 4 列の計 12 本とした.なお,橋台と橋 脚は同じ杭径としている.

(2) 解析条件

解析上の条件として、wikson θ 法において θ =1.4, Reyleigh 減衰において α =0, β =0.002 で計算を行った. FLIP では数値解析の安定性を保つことを目的として, Reyleigh 減衰を剛性比例型として与えていてる.既往の 研究では自由地盤部の 1 次元モデルにおいて β を変えた 感度解析を行っており、 β を小さくしていくと最大応答 変位が収束する臨界値が存在することが知られている. FLIP では Reyleigh 減衰の決定法として、非液状化非線形 解析を自由地盤部において行い、最大応答変位が収束す る臨界値を採用する方法が提案されているため、本研究 においてもその方法を採用して β の値を決定した.地盤 モデルに入力した地震波は K-NET 観測波で、観測点コ ード FKS001 において観測された地震波を k-shake により 引き戻した入力地震動は図-3 のとおりである.

(3) 深層混合処理工法のモデル化

本解析では、橋台の側方移動によって生じると考えられる橋台背面アプローチ部の沈下を低減させるために、 深層混合処理工法を両岸橋台背面側の液状化層に施した. 改良範囲は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)で述べられている範囲とした². 右岸橋台 背面部の深層混合処理工法の適用範囲を図-4 に示す.



図-4 深層混合処理工法適用範囲

表-3 深層混合処理工法物性値

	ρ	Е	ν
	密度	ヤング率	ポアソン比
	(t/m ³)	(kN/m^2)	-
CDM	2	250000	0.33

図-4 において濃い緑色で示す範囲が深層混合処理工法 を施す範囲であり、この地盤改良の範囲は橋台に対して 主働側となる橋台の後趾位置と軟弱層の最下層から45。 のすべり面を仮定した主働崩壊角で立ち上げた位置を橋 台の側方移動に対する影響範囲と考え、この影響範囲を 改良範囲として決定されている.深層混合処理工法とは、 改良材と軟弱土を原位置で攪拌・混合し、化学的硬化作 用により地盤を改良する工法である.本解析では、地盤 が固化されたと考え、図-4 に示した改良範囲は土の物 性値から固化された土の物性値に変化させ、液状化させ ないモデルとした.固化された土と周囲の土層は完全付 着として変位が同一となるようにモデル化しており、文 献4)を参考として決定した深層混合処理工法の物性値を 表-3 に示す.

(4) 荷重軽減工法のモデル化

本解析では荷重軽減工法を施した場合の解析も行って いる.荷重軽減工法を適用することによって盛土荷重が 軽減し、上載圧や橋台背面に作用する土圧が軽減され、 その結果橋台の側方移動が抑制され背面アプローチ部の 沈下も抑制されることが期待される.ることが期待され る.改良盛土については実際に用いられている改良盛土 を参考として物性値を決定した.その物性値を表-4 に 示す.layerl 及び layer2 の物性値と比較すると、荷重軽 減工法を施した範囲の密度は施工前の約 60%となる. また、荷重軽減工法を施す範囲は橋台フーチング底面か ら盛土との境界の傾斜までの距離を 4m として 45°の傾 斜をつけた図-5 の範囲とした.この図-5 において、黄 土色で示す部分が荷重軽減工法を施す範囲である.



図-5 荷重軽減工法適用範囲

表-4 荷重軽減工法物性値

	ρ	Ν	n		
土層区分	密度	N値	間隙率		
	(t/m ³)	-	-		
layer1	1.8	5	0.45		
layer2	1.8	10	0.45		
改良盛土	1.1	3.5	0.6		

(5) 検討ケース

検討ケースとして、地盤改良を施さないケース、深層 混合処理工法単体で用いるケース、荷重軽減工法単体で 用いるケース、深層混合処理工法と荷重軽減工法を併用 するケースの4つのケースにおいて解析を行った.深層 混合処理工法と荷重軽減工法を併用したケースにおいて は、深層混合処理工法を単体で適用した図-4の範囲と、 荷重軽減工法を単体で適用した図-5の範囲に地盤改良 を行った.この4つのケースにおける橋台背面部の段差 量や杭の応答を確認し、比較していくこととした.段差 量としては解析終了時の橋台天端の節点の鉛直変位と橋 台天端から背面側に 4.5m はなれた節点の鉛直変位の差から求めた.

3. 解析結果

(1) 段差量

地盤改良を施さないケース,深層混合処理工法単体で 用いるケース,荷重軽減工法を単体で施すケース,深層 混合処理工法と荷重軽減工法を併用するケースの4つの ケースのそれぞれの終局図を図-6から図-9に示す. 下に示すコンターは過剰間隙水圧比を表しており,1に 近いほど赤く0に近いほど青く示されている.図-6~図



図-9 終局図(深層混合処理工法と荷重軽減工法の併用)

-9 を見てみると、全てのケースにおいて解析終了時に は液状化層全体で過剰間隙水圧比が1に近づいており, 液状化が発生していることが分かる. 図-6 の地盤改良 をまったく行わないケースにおいては両岸橋台は大きく 後ろに傾いており,背面地盤が大きく沈下するとともに 橋台背面部の液状化層が橋台下部へもぐりこむような動 きをしていたり,橋台下部の液状化層が前面側へ大きく 移動していることが分かる.また,図-7と図-9の深層 混合処理工法を施したケースにおいては地盤改良を施さ ないケースほどの変形は見られない.荷重軽減工法を施 したケースにおいては、地盤改良を施さないケースより も液状化層の変形は減少しているものの、深層混合処理 工法を施したケースよりもその変形は大きかった. それ ぞれのケースにおける段差量を図-10 に示す. 文献 5)よ り,段差量が 15cm 以上の場合,軽自動車では走行が不 可能になり、乗用車や大型トラックでも通行可能速度が 制限されることが分かっているため、本研究では段差障 害が発生する段差量は 15cm としている. このことを踏 まえると、地盤改良を施さないモデルでは両岸において 段差量が 15cm 以上となり段差障害が発生しているが、 地盤改良を施したモデルにおいては段差障害が発生しな い程度に段差量が低減していることが分かる.また、荷 重軽減工法単体よりも液状化層を直接改良する深層混合

処理工法単体で用いたケースの方が段差量は小さくなり, 深層混合処理工法と荷重軽減工法を併用したケースにお いては深層混合処理工法を単体で用いたケースよりも段 差量が増大するという結果になった.

(2) 杭の応答

右岸橋台下部の中央杭に作用する曲げモーメントの最 大値分布図、曲率の最大値分布図、杭の最大変位の最大 値分布図を図-11 から図-13 に示す.曲げモーメント, 曲率、最大変位については正負は考慮されておらず、降 伏モーメントは 670kN·m で降伏曲率は 0.008(1/m)である. 図-11 と図-12 を見ると液状化層と非液状化層の境界部 であるモデル下面からの高さ 16m 付近と杭上端である モデル下面からの高さ 20m 付近において杭の曲率が大 きくなり、それに伴って杭に作用する曲げモーメントが 降伏値である 670kN·m を迎えていることが分かる.液 状化層と非液状化層の境界においては液状化発生後、地 盤の剛性が急激に変化する点となるために液状化層と非 液状化層の境界付近で杭に作用する曲げモーメントが増 大し、杭が降伏してしまったのではないかと思われる. また、杭の最大水平変位は液状化層の存在する 16m~ 20mの地点において最大水平変位が急激に増加して杭上 端で最大値を迎えている. 杭の最大水平変位は杭上端で

最大値を迎えているため、図-11 に示すように杭上端で



曲げモーメントが最大値を迎えたと考えられる.荷重軽 減工法を単体で施したケースにおいては地盤改良を施さ ないケースと比較して全体的に曲げモーメントが低減し ていることが分かるが、図-12 を見ても分かるように杭 の曲率の減少は深層混合処理工法単体で施したケースほ ど見られなかった. 深層混合処理工法を単体で施した場 合には図-11 と図-12 に示すようにモデル下面からの高 さが 13m 付近で曲げモーメント及び曲率が増大してい ることが分かる.これは図-14 の深層混合処理工法単体 を施した場合の解析終了時の右岸橋台拡大図を示すよう に、深層混合処理工法を施した範囲が上載圧によって押 し込められた結果、深層混合処理工法を施した範囲の前 面側の土層が前面側へ押し出され杭に圧力がかかったた めではないかと思われる. この対策として荷重軽減工法 を併用したケースの杭に作用する曲げモーメントの最大 値分布図と曲率の最大値分布図を見てみると、曲げモー メント・曲率ともに深層混合処理工法単体を施したケー スよりも減少し、杭の最大水変位変位も全体的に減少し ていることが分かった.しかし,深層混合処理工法と荷 重軽減工法を併用したケースにおいても杭の降伏が解消 されることはなかった.



図-14 右岸橋台拡大図(変形倍率2倍)

4. おわりに

本研究では地盤と橋梁の連成を考慮した地震応答解析 を実施し、液状化発生時における橋台や背面地盤の挙動、 それらの被害に対する地盤改良の効果の確認を目的とし て検討を行った.本解析で得られた結論を以下に示す.

- (1) 今回用いたモデルにおいて、地盤改良を施さない場 合においては段差量が段差障害を生じる 15cm 以上 となったが、地盤改良を施した 3 ケースにおいては そのどちらもが段差量が段差障害を生じない 15cm 以内に収まった.しかし、今回検討した地盤改良範 囲においては深層混合処理工法と荷重軽減工法を併 用したケースにおいては深層混合処理工法を使用し たケースと比較して段差量が増加したことが確認さ れた.
- (2) 深層混合処理工法を単体で使用した場合,地盤改良前のケースよりも杭に作用する曲げモーメントや最大水平変位が一部で増加していたが,荷重軽減工法を用いることである程度の杭に作用する曲げモーメントの減少が確認できた.しかし,今回検討した地盤改良範囲においては杭の降伏は解消されなかった.

謝辞:本研究は JSPS 科研費 JP15K06182 の助成を受けた ものです.

参考文献

- 独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センタ ー橋梁構造研究グループ:橋台の側方移動対策ガイドラ イン策定に関する検討,土木研究所資料,第 4124 号, 2009
- 独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センタ ー橋梁構造研究グループ: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、2010
- 3) 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
- 山本陽一,高橋直樹,黒川幸彦:杭式深層混合処理工法の液状化対策効果に関する解析検討,三井住友建設技術研究所報告,第4号
- 5) 阿部雅人,藤野陽三,吉田純司,朱平:高架橋の3次元 動的解析モデルを用いた桁間連結装置および車両通行性 能の評価,土木学会論文集,No.773/I-69, pp.47-61, 2004.

Investigation on the effect of the countermeasure method for subsidence of soil at the approaching area of abutment

Yukihide KAJITA, Kazuki ONODA, Kunihiko UNO

The purpose of this study is to confirm the effect of soil improvement for prevention of a difference in level at the back of abutment on the liquefaction layer and prevention of pile damage. In the case that a ground improvement is conducted, difference in level at the back of abutment is reduced. It was confirmed that in the case using both the deep mixing and the load relieving, the step amount increased compared to the case using only deep mixing. However, the piles under the abutment yielded in the all case.