

河川をまたぐ橋梁の複数回地震による被害状況の推定と対策工法の有効性の検討

梶田 幸秀¹・藏元 航平²・松田 泰治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 (Corresponding Author)

²学生会員 九州大学大学院 工学府 土木工学専攻 修士課程
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)
E-mail: kuramoto.kouhei.173@s.kyushu-u.ac.jp

³フェロー会員 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:mazda@doc.kyushu-u.ac.jp

本研究では、橋台背面アプローチ部に着目し、熊本地震の前震と本震の2回の地震動を連続入力することで、前面矢板を用いた補強工法を施した場合の地表面の沈下量や杭の応答について、強震動1回の場合との違いについて検討を行った。過去に実施した研究結果として、橋台背面アプローチ部の地盤改良工法である深層混合処理工法や荷重軽減工法を用いた場合とも比較を行った結果、前面矢板を用いた補強工法では前震、本震の両方で橋台背面アプローチ部の段差量や橋台の傾斜角度については軽減することができたが、杭頂部の応答曲率については大きく低減できない結果となった。

Key Words: Liquefaction, Abutment, Pile, Load reduction method, Cement deep mixing method, Sheet pile method

1. はじめに

平成28年熊本地震において、2つの断層帯が短期間で活動したために、現在の設計地震動(レベル2地震動)相当と考えられる震度6弱以上の揺れがKiK-net 益城観測点では約28時間で5回も観測された。通常、橋梁の設計では、強震動にさらされるのは原則として1回である。写真-1は前震発生翌日(4月15日)に撮影した写真と本震発生後約1か月経過した後(5月13日)に撮影した写真であるが、橋台背面アプローチ部における段差量

が拡大している。また、平成23年東北地方太平洋沖地震においても、本震後の余震による液状化被害の事例が報告されている¹⁾。構造物の損傷が複数回の地震動作用により拡大する可能性があるとき、橋梁の使用性について複数回の地震動を考慮するべきかどうか検討することは重要な課題である。

著者らは、これまでに液状化による地盤変状を抑制するための工法としてよく用いられている荷重軽減工法と深層混合処理工法に着目し、これらの工法による橋台背面アプローチ部の地盤沈下や杭の応答に着目した研究を



(a) 4月15日午後撮影 (段差量約15cm)



(b) 5月13日撮影 (段差量約30cm)

写真-1 宮園橋(益城町)における段差被害の比較

行ってきた²⁾。その結果、対策工法を用いることで段差量の抑制できることや、荷重低減工法では杭の応答を抑制できないことなどを明らかにしてきた。本研究では、引き続き、橋台背面アプローチ部の地盤沈下や杭の応答が大きくなる原因として、地盤が側方流動のように橋台背面から橋梁中央（河川中央）側に水平に移動することが主たる原因であることから、地盤の水平移動を抑制する前面矢板工法に着目し、この工法による効果を把握することを目的とし、追加の検討を行った。

2. 二次元有効応力解析の概要

(1) 構造物及び地盤のモデル化

本解析は液状化による構造物被害予測プログラム FLIP を用いている³⁴⁾。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。図-1 において、灰色で示

す部分が橋台、橋台の間に存在する横棒が橋桁、縦棒が橋脚を表している。また、橋脚と橋台下部には杭基礎が設置されており、この杭基礎は 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た。その結果、鋼種は SKK400、杭径 800mm、橋軸方向に 3 本、橋軸直角方向に 4 本の計 12 本の鋼管杭を設置した。具体的には、図-2 に示すとおり、鋼管杭の曲げモーメント-曲率関係を、降伏モーメントが 670kN・m、降伏曲率が 0.0171/m でモデル化した。本解析モデルでは、土層は 6 つの層から構成されている。図-1 において layer1 と layer2 が橋台背面に存在する地盤、layer3 は橋台底面直下の地盤、layer4 と layer5 がその下部に存在している地盤で、layer6 は工学的基盤を想定している。地下水水位は layer3 の上端と同位置に設置しており、layer3 のみが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。layer3 の液状化パラメータ及びそれぞれのパラメータについての説明を表-2 に示す。これらの数値は layer3 の土層において繰り返しせん断試験による要素シミュレーションを行った際、液状化強度曲線

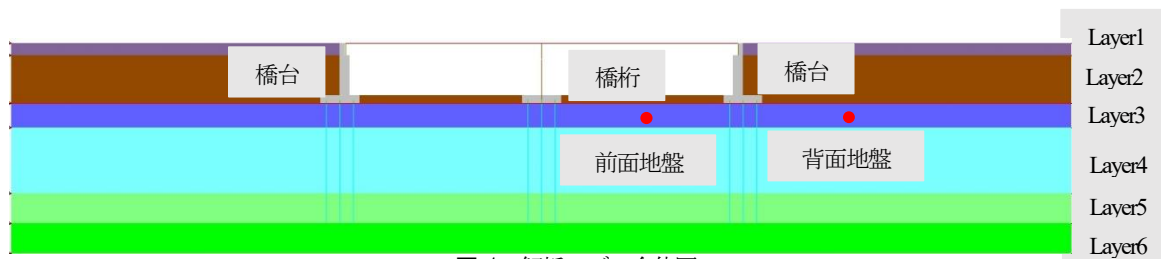


図-1 解析モデル全体図

表-1 土層物性値

	N値	有効上載圧 σ kPa	細粒分含有率 Fc %	層厚 D m	密度 ρ t/m ³	間隙率n	初期せん断剛性 G0 kPa	体積弾性係数 Kla kPa	平均有効拘束圧 Pa kPa	せん断抵抗角 ϕ_f °
layer1	5	20.58	40	2.1	1.92	0.505	44479	115994	15.435	38.28
layer2	10	118.58	40	7.9	1.92	0.518	70606	184129	88.935	36.87
layer3	2	245	40	4	1.92	0.588	24147	62971	183.75	30
layer4	10	401.8	40	11	1.92	0.55	70606	184129	301.35	33.4
layer5	20	558.6	40	5	1.92	0.523	112080	292286	418.95	36.3
layer6	50	656.6	40	5	1.92	0.475	206453	538396	492.45	41.65

表-2 液状化パラメータ

変相角 ϕ_p	28
収縮的ダイレイタンシーによる体積ひずみの終局の値 ϵ_{cdm}	0.1
収縮的ダイレイタンシーを制御するパラメータ $\gamma_{\epsilon_{dc}}$	1
収縮的および膨張的両ダイレイタンシーを制御するパラメータ γ_{ϵ_d}	0.35
過剰間隙水圧上昇から消散における体積弾性係数の低減係数 r_k	0.1
過剰間隙水圧上昇から消散における体積弾性係数の拘束圧依存を表すパラメータ l_k	2
過剰間隙水圧上昇過程の立ち上がりの形状や後半の形状と、これに対応するひずみの伸びを制御することを目的としたパラメータ q_1	10
過剰間隙水圧上昇過程の立ち上がりの形状や後半の形状と、これに対応するひずみの伸びを制御することを目的としたパラメータ q_2	1
液状化考慮時に S_0 の効き方を調節するパラメータ q_4	1
マルチスプリング要素の S_0 相当の変数の下限値 s_1	0.005
液状化抵抗曲線の下限を制御するパラメータ c_1	1

が実験値と一致するようにパラメータの数値を設定している。地盤は、排水条件で解析を行うためにカクテルグラスモデル要素でモデル化した⁹⁾。各土層のカクテルグラスモデルにおける物性値は、カクテルグラスモデル要素パラメータ決定支援環境 FLIPCSIM で決定し、その物性値を表-1 に示す。排水条件で解析を行う場合には透水性の良い地盤を想定し、各土層の透水係数は、砂質土の中位の値である $1 \times 10^{-4} \text{m/s}$ とした。最後に、橋桁と橋台の間には水平方向に図-3 に示すようなばねを用いて接合している。このばねは橋台と橋桁が接触した場合、橋台は橋桁からの反力（接触力）を受け、橋台の過剰な倒れこみを防ぐ役割がある。なお遊間量は実橋に合わせ10cmとした。また、解析モデルの側面境界は半無限の自由地盤を想定した粘性境界とし、底面境界は固定境界とした。

(2) 地盤改良工法

a) 深層混合処理法

右側橋台背面部の深層混合処理法の適用範囲を図-4 に示す。図-4 において赤い線で囲まれ、濃い緑色で示す範囲が深層混合処理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動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動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

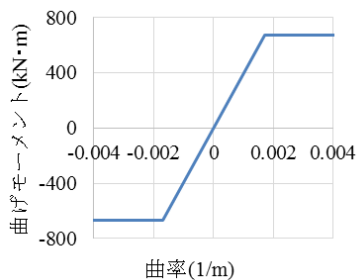


図-2 杭基礎 M- ϕ 関係図

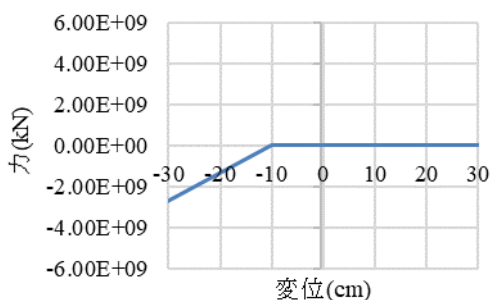


図-3 遊間バネの力-変位関係図

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いる。また深層混合処理法の物性値を表-3 に示す。本解析では深層混合処理法の改良範囲は線形平面要素でモデル化しており、せん断剛性 G は直接入力していないが、比較のためヤング率 E・ポアソン比 ν から算出したせん断剛性 G の値を表-3 に示す。

b) 荷重軽減工法

荷重軽減工法を施したケースの改良範囲は図-5 に示すとおりである。この図-5 において赤い線で囲まれ、黄色色で示す部分が荷重軽減工法を施す範囲である。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。改良盛土の物性値を表-4 に示す。layer1 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。地盤改良として軽量盛土を用いた場合、盛土を通常密度

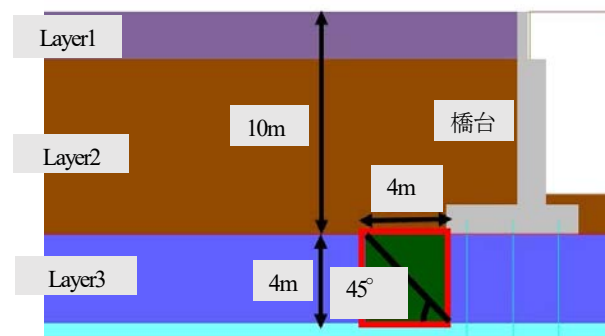


図-4 深層混合処理法適用範囲

表-3 深層混合処理法物性値

ρ	E	G	ν
密度	ヤング率	せん断剛性	ポアソン比
(t/m^3)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	-
2	250000	665000	0.33

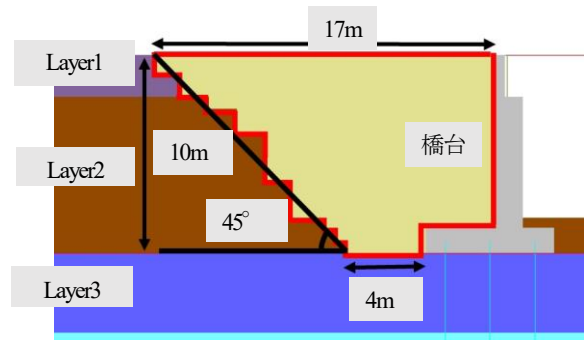


図-5 荷重軽減工法適用範囲

(1.8t/m³)から軽量盛土(1.1t/m³)に置き換えるため、改良盛土で深の初期応力が変化するが、本解析では通常重量の土が存在することは無視し、初期からこの軽量盛土が存在していたという条件で解析を行った。

c) 前面矢板を用いた工法

前面地盤に矢板を施したケースの改良範囲は図-6に示すとおりで紫色の部分で改良範囲である。この工法は橋台の前面地盤側に鋼管矢板を設置する工法で、矢板壁を設置することによって、既設杭に作用する土層の流動力を軽減し、橋台の側方流動を低減することが期待される工法である。施工範囲については、矢板は橋台の既設杭と同じく支持層までの深さまでの長さで設定した。前面矢板は杭径 1.8m からなる鋼管でできており、一般的に鋼管杭において用いられる鋼種である SKK400 の物性値を使用しており、その物性値を表-5 に示す。鋼管の厚さは 9mm であり物性値は中空の鋼管であることを考慮した値となっている。鋼管の降伏強度は 315kN/mm² であり、事前の無対策の解析において応力が十分弾性範囲内に収まっている。

(3) 解析条件

運動方程式の数値積分法としては、Rayleigh 減衰において $\alpha=0$ 、 $\beta=0.002$ で計算を行った。時間積分間隔は 0.001 秒である。FLIP では数値解析の安定性を保つことを目的として、Rayleigh 減衰を剛性比例型として与えて

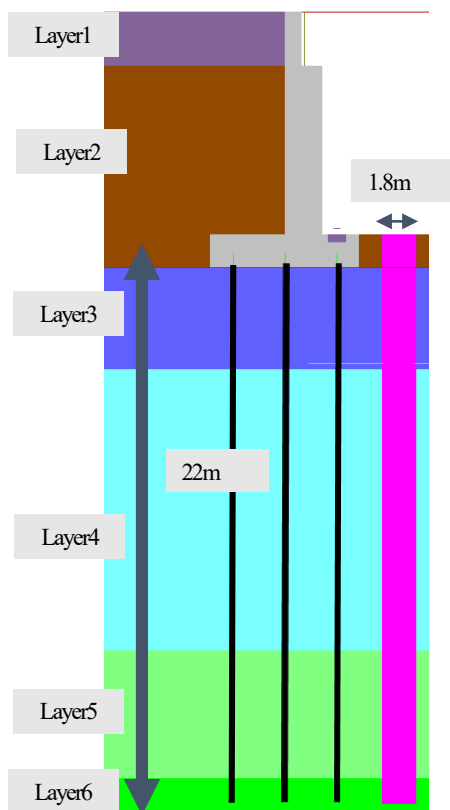


図-6 前面矢板を用いた工法の適用範囲

いる。地盤モデルに入力した地震波はKiK-NET観測波で、観測点コード KMMH16 において 2016 年熊本地震の際に観測された東西方向成分の前震と本震の地表面地震波を k-shake(成層地盤応答解析プログラム 株式会社 構造計画研究所製)により工学的基盤上に引き戻した波を入力した。この k-shake はいくつかの層からなる土層でのせん断波の縦方向伝播に対する応答計算を行うプログラムであり、等価線形法の適用により求められた入力地震動の時刻歴波形を(工学的基盤面) 図-7 と 図-8 に示す。これらの地震動を用いて、前震終了後、2456秒が経過した時点で本震を入力するケースの解析を行った。なお、地震動の入力間隔を 2456 秒とした理由は、前震終了後、液状化層の過剰間隙水圧比が定常状態となる時間である。

3. 解析結果

表-4 軽量盛土物性値

土層区分	ρ	N	Cma	n
	密度 (t/m ³)	n値	初期せん断剛性 (kN/m ³)	間隙率
layer1	1.8	5	42202	0.45
layer2	1.8	10	67613	0.45
改良盛土	1.1	79	338511	0.6

表-5 前面矢板の物性値

	ρ	D	E
鋼種	密度(t/m ³)	杭径(m)	ヤング率(kN/m ²)
SKK400	1.35	1.8	2.05×10^8

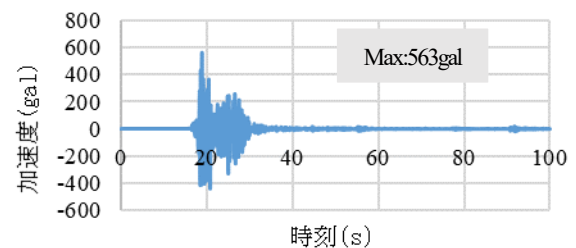


図-7 入力加速度時刻歴(前震)

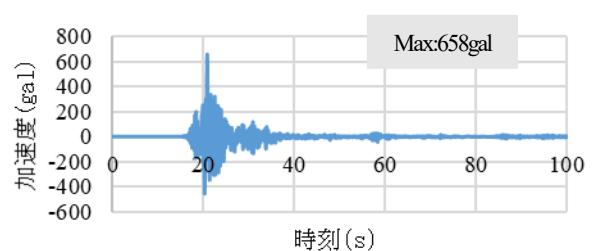


図-8 入力加速度時刻歴(本震)

(1) 過剰間隙水圧比

図-4.7から図-4.9に無対策におけるケースならびに荷重軽減工法におけるケース、CDM工法及び前面矢板を用いた工法における前面地盤、背面地盤及び橋台から背面側に3m地点における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。いずれも前震を入力し、一定時間(2456秒)経過後、本震を入力し、再び一定時間経過(2456秒)経過させた結果である。左右にほとんど違いは見られなかったため、グラフは全て右側の地盤についてのグラフで示している。それぞれの地点における深さ方向についてはlayer3の中間地点とした。水平方向については、前面地盤は橋台フーチング基礎河川側側面から18m、背面地盤は基礎堤防側側面から14mの地点である。図-4.7ならびに図-4.8、図

減工法の場合にかかわらず、前面地盤が一番大きく、次に背面地盤、橋台から3mの順になっている。これは、過剰間隙水圧比は繰り返しせん断によって発生する過剰間隙水圧の初期の有効上載圧(または有効平均応力)に対する比で定義されるため、初期の有効上載圧が大きい橋台付近である橋台から3mの地点、背面地盤、前面地盤の順に過剰間隙水圧比の最大値は小さくなったと考えられる。いずれの工法も、加振中に過剰間隙水圧比が大きく上昇し、排水中に過剰間隙水圧比が徐々に減少し、定常状態になっていることが確認できる。CDM工法において橋台から3mにおける過剰間隙水圧比の消散度合いが低かった理由については、CDMの適用範囲が液状化層に比べ変形しにくいいため圧密がしにくかったためだ

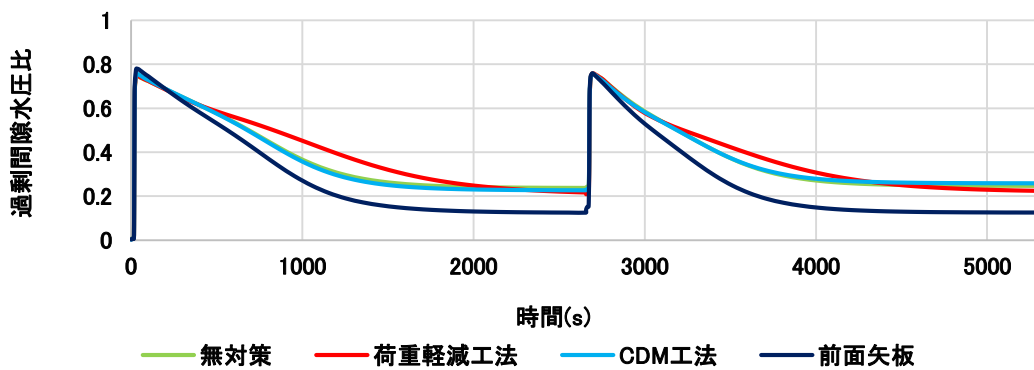


図-7 前面地盤における過剰間隙水圧比時刻歴

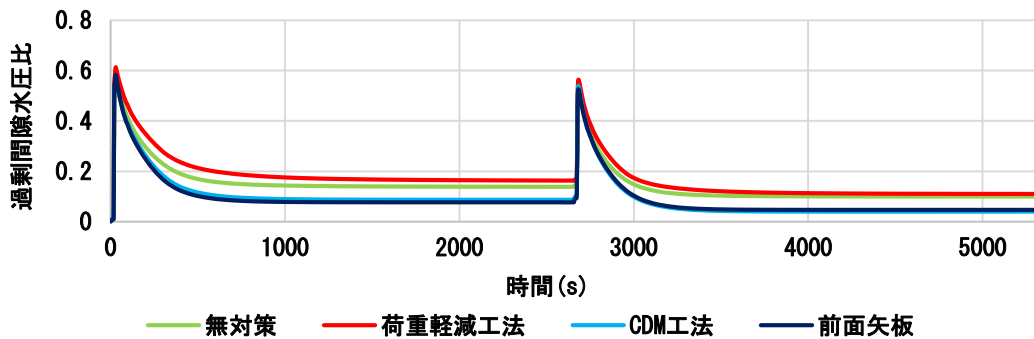


図-8 背面地盤における過剰間隙水圧比時刻歴

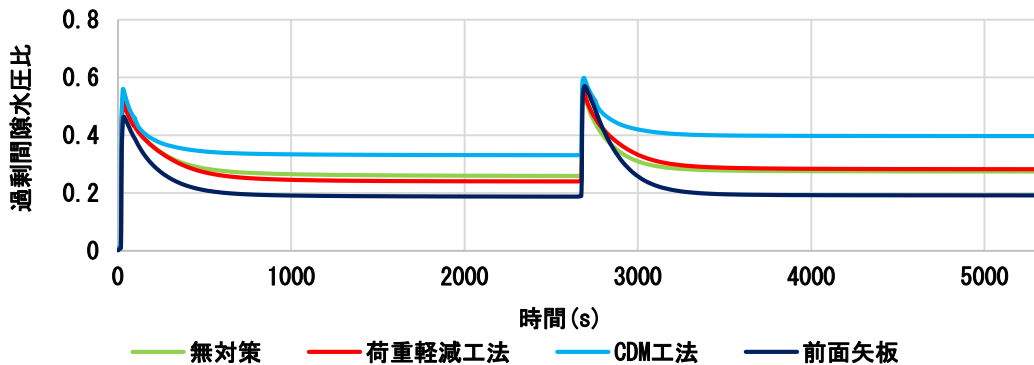


図-9 橋台から3mにおける過剰間隙水圧比時刻歴

4.9より、過剰間隙水圧比の最大値は、無対策、荷重軽減工法、CDM工法、前面矢板の順で小さくなる。また前面矢板を用いた工法において定常

状態における過剰間隙水圧比の値がいずれの地点も小さかった理由については、前面矢板により、土や橋台の横方向の変位が他の工法に比べて小さいため、液状化層の上部により多くの土が存在することによって、土圧が多くなり、圧密が促進されたためであると考えられる。

(2) 段差量

それぞれの解析ケースにおける段差量時刻歴を図-10に示す。図の段差量のグラフは左右両側の橋台背面アプローチ部の段差量の平均をとっている。図-10および表-6より、地盤改良工法を施すことによって、段差量の絶対量を抑制できていることは明らかである。段差量が抑制されているのは、地震発生中の部分であり、排水中の段差量については、いずれの場合でも、前震終了後は約5cm、本震終了後も約6cmと対策工法を施してもほとんど変わらない結果となった。また表-7に橋台背面アプローチ部の中間地点における土層の層厚変化を示す。表-7より、本解析では、いずれの工法も液状化層ならびに、液状化層以外の層のどちらに対しても影響を与えているが、それぞれの土層へ与える影響の大きさは違うことが読み取れる。工法ごとに比較するとCDM工法においては液状化層に、前面矢板を用いた工法では液状化層以外の層に大きく影響を与えていると考えられる。また2段階目の地震動においても無対策に比べ段差量変化が小さくなっていることから、いずれの工法も複数回地震動によって発生する段差量に対して、有効な工法であると考えられる。

表-6 段差量まとめ

	無対策	荷重軽減工法	CDM工法	前面矢板
前震単体と本震単体の和	68.8cm	41.3cm	43.9cm	11.5cm
前震と本震の連続入力	54.3cm	34.6cm	34.1cm	27.3cm

表-7 層厚変化まとめ

	無対策	荷重軽減工法	CDM工法	前面矢板
橋台背面土	20cm	15cm	17cm	8cm
液状化層	24cm	14cm	1cm	16cm

(3) 杭の応答

右側橋台中央の杭において、最大曲率及び最大水平変位の分布図を図-11及び図-12に示す。なお、各地点における解析中の最大値を図化しているため、それぞれの地点で最大値となる時刻は異なっている。荷重軽減工法は、最大曲率の分布、最大応答変位の分布については、

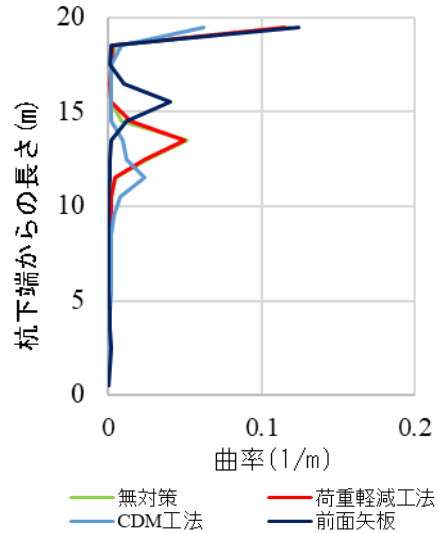


図-11 各工法における杭の曲率

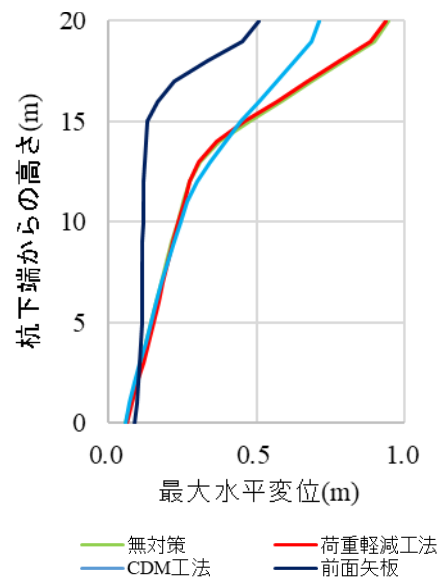


図-12 各工法における杭の最大水平変位

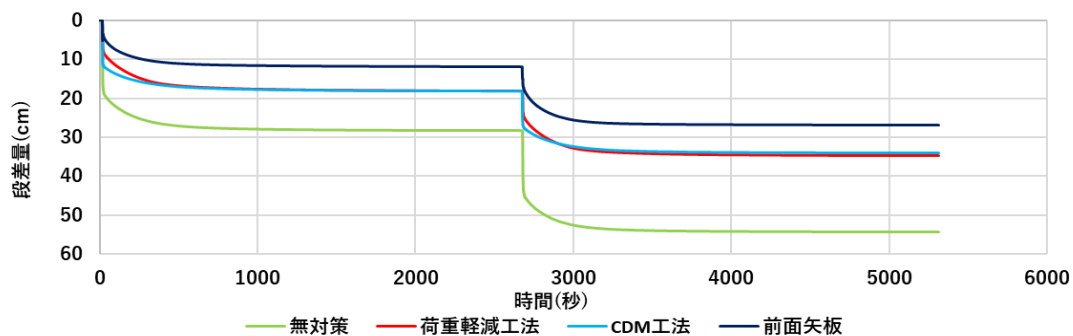


図-10 各工法における段差量時刻歴

変わらないことが分かったのに対し、他の2工法においては曲率、最大水平変位の両方が低減されるという結果になった。これは、荷重軽減工法は液状化層に対して直接的な対策を施していないため、液状化層における土の水平応答変位を抑制することができなかつたのに対し、液状化層に直接的な対策を施した他の2工法ではこれらの値を抑えることができたためであると考えられる。

4. 結論

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、連続した地震動入力時において液状化対策を実施した地盤上に存在する橋台や背面地盤の挙動を把握し、複数回地震動作用時における液状化対策工法の効果について検討を行った。本解析から得られた知見を以下に示す。

- (1) 深層混合処理工法、荷重軽減工法及び前面矢板を用いた工法などの液状化対策工法を適用することにより橋台背面アプローチ部に発生する段差量が低減したことから、複数回地震動においても段差障害に対しては有効であるという可能性が示された。
- (2) 層厚変化を読み取ることによって工法ごとそれぞれの土層に与える影響の要因は違うということが考えられる。またこのことからこれらの工法を組み合わせることによって段差障害をさらに軽減できるのではないかと考えられる。
- (3) 杭の応答については、荷重軽減工法では液状化層に直接的な対策を施していなかったために、効果が小さく、対して液状化層に直接的なアプローチを施した他の2工法では、最大曲率及び最大水平変

位に対し、効果があるということが分かった。

REFERENCES

- 1) 高橋重雄, 他 33 名 : 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾技研資料, No.1231, 2011. [Takahashi S. and 33 others: Preliminary Report on Earthquake and Tsunami Damage to Ports, Coasts, and Airports Caused by the 2011 Great East Japan Earthquake, Port and Harbor Research Institute materials, No.1231, 2011.]
- 2) 梶田幸秀, 福井誠司, 松田泰治, 橋台背面アプローチ部の沈下に着目した複数回地震動による液状化対策工法の効果に関する検討, 第 41 回地震工学研究発表会, 2021.09.[Kajita, Y., Fukui, S. and Matsuda T.: Examination of the effect of the liquefaction countermeasures under the sequenced ground motions focusing on the subsidence of the approaching area of the abutment, 41th Earthquake Engineering Research Presentation, 2021.09.]
- 3) 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. [Morita, T., Iai, S., Hanlong LIU, Ichii, K., Sato, Y.: Simple setting method for various parameters required for FLIP, a program for predicting structural damage due to liquefaction, Port and Harbor Research Institute materials, No.869, 1997.]
- 4) 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.
- 5) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 2011, 35(3): 360-392.

ESTIMATING THE DAMAGE CAUSED BY REPEATED EARTHQUAKES ON BRIDGES ACROSS RIVERS AND EXAMINING THE EFFECT OF COUNTERMEASURE METHODS

Yukihide KAJITA, Kohei KURAMOTO and Taiji MATSUDA

In this study, we compared the difference between the continuous input of two seismic motions, the fore-shock and the main shock of the Kumamoto earthquake, and the case of one strong motion. Focusing on the approaching area of abutment, we investigated the amount of subsidence of the ground surface and the response of piles when the sheet pile method was applied. Compared to the cement deep mixing method and the load reduction method, which are ground improvement methods that approach the approaching area of abutment, the sheet pile method reduces the amount of steps and the tilt angle of the abutment. However, the curvature of the top of the pile could not be reduced.