

小径杭と土のうを併用して応答低減を図る 新しい直接基礎構造

土井 達也* 押田 直之**
山田 聖治*** 室野 剛隆#

New Type of Spread Foundations Composed of Micropiles and Soilbags to Reduce Seismic Response of Structure

Tatsuya DOI Naoyuki OSHIDA
Seiji YAMADA Yoshitaka MURONO

The authors propose a new type of foundations composed of micropiles and soilbags. The foundations are characterized by laying soilbags on the pile head and constructing structures on the soilbags. The expected effects are omissions of junction structures of piles and footing, smaller diameter of piles, and reduction of response acceleration of structures. In this study, to clarify the mechanism of seismic response of the proposed foundation, shaking table tests targeting piers on the supporting ground and on the proposed foundation were carried out. Moreover, reproduction analysis of shaking table tests was conducted, and seismic response of proposed foundation can be reproduced by the analysis model.

キーワード：小径杭，土のう，直接基礎，振動台実験

1. はじめに

直接基礎構造には、地震時にフーチングが浮き上がり、上部構造物に入力される応答加速度が頭打ちとなる効果がある^{1) 2) 3)}ことが知られている。このため、直接基礎構造を用いることで、橋りょう・高架橋などの上部構造物の大断面化を抑制できる可能性がある。一方、地盤が軟弱な箇所では直接基礎構造の適用は難しく、杭基礎などを用いて支持力を確保するのが一般的である。しかし、杭基礎では通常、杭頭とフーチングを剛結するため、構造物の慣性力による水平力が杭頭に作用する。その結果、杭頭に相応の耐力が必要となり、杭頭部の過密配筋がしばしば問題となる。さらに、フーチングの浮上りによる応答加速度の頭打ちが期待できないため、上部構造物の大断面化につながることになる。

そこで、直接基礎を適用できる地盤を軟弱地盤まで拡大し、応答加速度の頭打ち効果を期待する手法の1つとして、通常剛結する杭頭とフーチングを分離する手法が考えられる。この手法では、杭頭とフーチングを分離しているため、直接基礎構造と同様に、フーチングの浮上りによる応答加速度の頭打ち効果が期待できる。さらに、杭基礎と同等の鉛直支持性能を有し、かつ杭頭接合構造

の省略や、杭頭に作用する水平力の抑制、杭の小口径化につながる。例えば西村ら⁴⁾は、軟弱地盤の一部に地盤改良杭を設置した直接基礎形式の橋脚の地震時応答について、軟弱地盤上の直接基礎形式の橋脚や、杭基礎形式の橋脚とあわせて、模型振動実験および数値解析により検討した。検討の結果、同構造が応答加速度の頭打ち効果と、鉛直支持性能の双方を満足する構造形式であることを確認した。一方、西村らの実験では、杭頭とフーチングの間に薄い軟弱層を介在させたため、入力加速度が大きくなると地盤の塑性化と残留沈下が生じた。また、山本ら⁵⁾は、杭頭と基礎底面を切り離れた「杭頭絶縁基礎」に関して、1/10スケールの現場模型実験により、杭頭応力を抑制する効果があることを確認している。

筆者らは、上述した杭頭とフーチングを分離した構造形式として、図1に示す「小径杭併用土のう基礎」（以下、提案構造）を提案している⁶⁾など。提案構造は、小径杭を用い、その杭頭に土のうを敷設して直接基礎を構築す

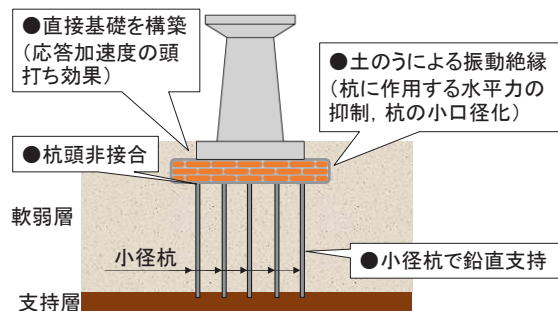


図1 提案構造の概要

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
** 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室（現東海旅客鉄道株式会社）
*** 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
鉄道地震工学研究センター

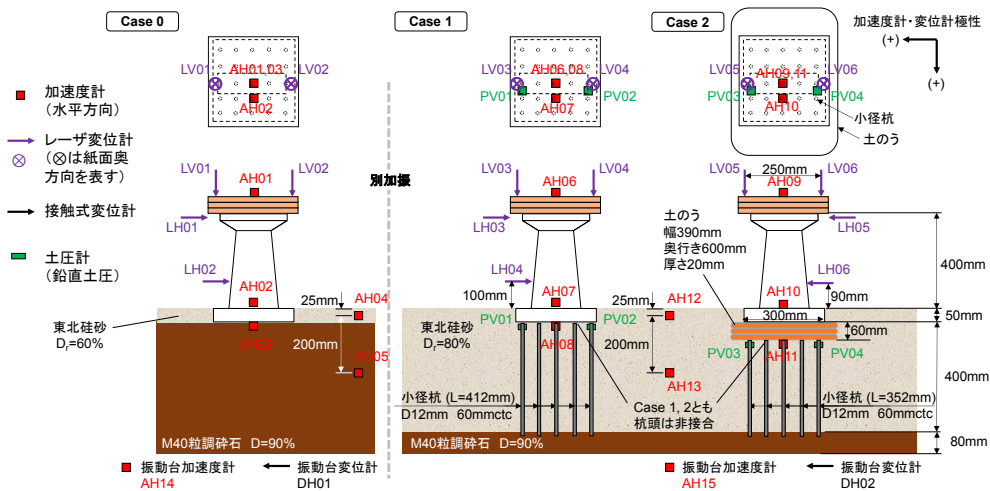


図2 実施ケースの概要と計測器配置

るものであり、応答加速度の頭打ち効果を期待している。また、杭頭とフーチングは土のうを介して絶縁し、杭頭と土のう、フーチングと土のうについても非接合とすることにより、杭頭接合構造の省略、杭頭に作用する水平力の抑制による杭の小口径化が実現できる。さらに、筆者らの提案する工法は、フーチングと杭頭の間に土のうを介在させている点に大きな特徴がある。土のうは鉛直方向の圧縮変形に伴って土のう袋に張力が発生することにより中詰め材を拘束するため、中詰め材を単独で圧縮した場合に比べて圧縮耐力や圧縮剛性が高まることが知られている⁷⁾。こうした特性を有する土のうは、地震時において、フーチング直下の応力条件においても塑性化や破壊が生じにくいいため、端部杭や端部杭周辺の軟弱地盤への応力集中を緩和する役割を果たすことが期待される。ここで、提案構造で用いる土のうは十分な圧縮耐力および圧縮剛性が期待できるジオテキスタイル土のう⁸⁾を想定している。

本研究では、提案構造の地震時応答特性を解明するために、支持地盤上の直接基礎形式の橋脚、小径杭のみを打設した地盤上の直接基礎形式の橋脚とあわせて振動台実験を実施し、応答加速度や小径杭の断面力などについて考察した。さらに、提案構造の地震時応答メカニズムや土のうの敷設効果の考察を深度化するために、振動台実験の数値シミュレーションを実施した。

2. 振動台実験による動的応答特性の解明^{6) 9)}

2.1 振動台実験の概要

杭と土のうを組み合わせた提案構造の全体系の動的応答特性を解明するために、縮小モデルの振動台実験を行った。図2に実施ケースの概要と計測器配置を、図3に小径杭のひずみゲージ設置箇所を示す。実験は、支持地盤上の直接基礎を模擬した Case 0 と、小径杭のみを配置し

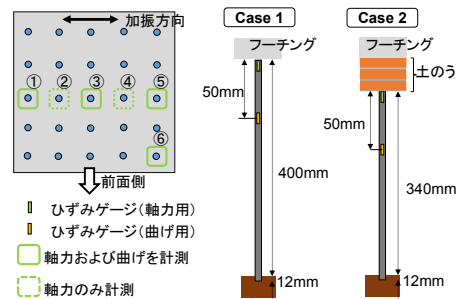


図3 小径杭のひずみゲージ設置箇所

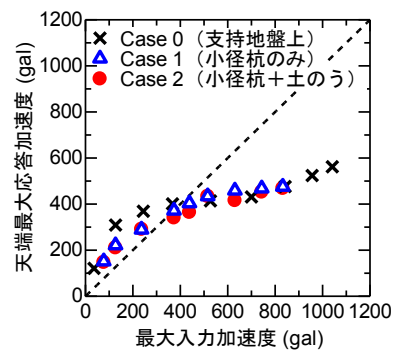


図4 最大入力加速度と橋脚天端における最大応答加速度の関係

た地盤上の橋脚を模擬した Case 1、小径杭と土のうを配置した地盤上の橋脚を模擬した Case 2 を対象に実施した。ここで、Case 1 および Case 2 の、小径杭の杭頭とフーチングまたは土のうは非接合とした。また、Case 1、Case 2 は同時加振とし、Case 0 のみ別加振とした。振動台は、中型振動台および固定土槽（内寸高さ 1.5m、幅 2m、奥行き 0.6m、加振可能周波数 1Hz ~ 25Hz）を使用した。地盤材料は、支持層を締固め密度比 $D=90\%$ の粒調砕石 M40、軟弱層を相対密度 80% の東北珪砂 6 号とした。ただし、Case 0 の埋め戻し土のみ相対密度 60% とした。

橋脚モデルの寸法は実橋脚の 1/25 スケールとし、高さ

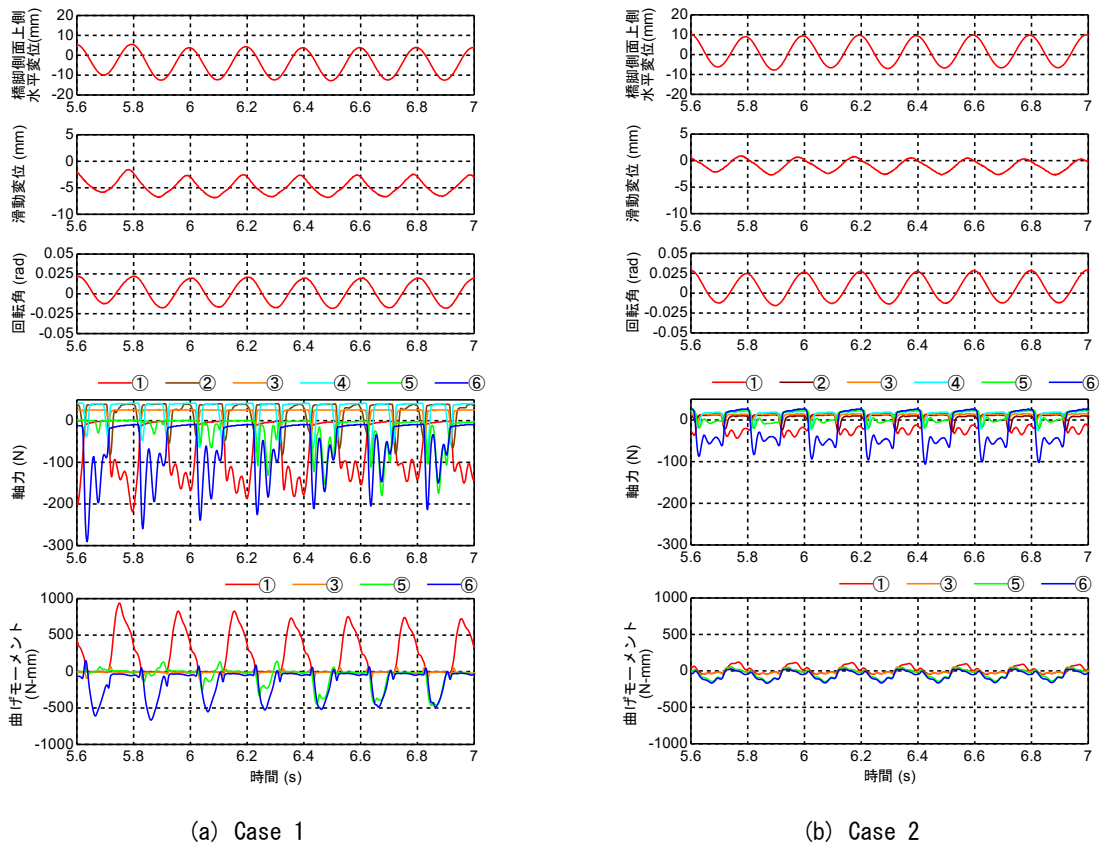


図5 橋脚の応答変位と小径杭の軸力・曲げモーメントとの関係 正弦波 5Hz (目標最大加速度 750gal) 加振時

約 400mm, フーチング幅 300mm × 奥行き 270mm とした。土のうは 1 枚でフーチング下面に敷設できる大きさとして, 幅 390mm × 奥行き 600mm × 厚さ 20mm とし, 3 層敷設した。なお, 土のうの奥行き長さは固定土槽の奥行き長さと一致するように設定した。模型の土のう袋の材質には高密度ポリエチレンのネット (トリカルネット N-3) を用いた。土のう袋の隅角部は縫い合わせにより接合した。なお, 一連の試験において土のうには損傷は生じなかった。また, 中詰め材には鹿島硅砂 2 号を用い, 乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ となるように製作した。小径杭としては, 外径 12mm, 内径 6mm のアクリル製パイプ (ヤング係数 $E=3.4 \times 10^6\text{kN}/\text{m}^2$) を用いた。計測項目は, 橋脚の水平加速度, 水平および鉛直変位, 小径杭のひずみ, 土のう間の圧力とした。入力波形は, 設計標準における L2 地震動スペクトル I 波形 (G3 地盤) (目標最大加速度 100gal から 900gal まで 100gal 刻みで段階加振, 以下 L2SpI 波と称する) の加振を行ったのち, 5Hz の正弦波 10 波 (目標最大加速度 100gal, 300gal, 500gal, 750gal の順に段階加振, 以下正弦波 5Hz と称する) の加振を行った。なお, L2SpI 波については相似則を考慮して時間軸を $1/25^{0.5}=1/5$ に圧縮した。

2.2 実験結果

図 4 に, L2SpI 波を作用させた際の加振レベルごとの

振動台の最大入力加速度 (Case 0 では AH14, Case 1 と Case 2 では AH15 の最大値) と橋脚天端位置における最大応答加速度 (AH01, AH06, AH09 の最大値) の関係を示す。図 4 より, 天端の最大応答加速度は, Case 1, Case 2 とも 400gal 程度で頭打ちとなっており, フーチングの浮き上がりに伴う応答加速度の頭打ち効果が確認できる。また, Case 1, Case 2 の頭打ちを示す応答加速度は Case 0 (支持地盤上の橋脚) と同程度の値である。前述のように直接基礎では, 支持地盤が抵抗しうるモーメントには限界があり, 支持力が限界に達するとフーチングが浮き上がり, 応答加速度が頭打ちになる³⁾ことが知られている。つまり, 頭打ちを示す応答加速度の値が同等程度であれば, 鉛直支持力も同等程度となる。このことから, Case 1, Case 2 とも, Case 0 (支持地盤上の橋脚) と同様, 直接基礎に特有の応答加速度の頭打ち効果が得られ, 鉛直支持力の性能も支持地盤上の橋脚と同程度であるといえる。

図 5 に正弦波 5Hz (目標最大加速度 750gal) 加振時の橋脚の応答変位と小径杭の軸力および曲げモーメントとの関係の比較を示す。ここで, 軸力は引張を正, 曲げモーメントは反時計回りを正とし, 応答が安定した 5.6s ~ 7s (全 10 波中の 3 ~ 10 波目) に着目している。また, 図 5 の結果は, 加振前 1 秒間のデータの平均値を減ずることで, 加振前の状態をゼロとして表示している。なお,

特集：地震対策技術

図中の番号は図3の小径杭の位置と対応している。図5より、Case 1とCase 2に共通した傾向として、橋脚がロックンギングしているため、①の小径杭と⑤、⑥の小径杭の軸力および曲げモーメントの波形が逆位相になっていること、端部杭で軸力や曲げモーメントが大きく、中央杭で小さいことが挙げられる。なお、①の小径杭と⑤の小径杭で軸力や曲げモーメントの値を比較すると、①のほうが⑤よりも大きい傾向がある。考えられる原因としては、正弦波5Hz（目標最大加速度750gal）の加振までに実施した段階加振による残留変位や残留傾斜の影響を受けたことが挙げられる。具体的には、Case 1では左方向に0.12mmの残留変位と反時計回りに0.0018radの残留傾斜、Case 2では左方向に1.52mmの残留変位と時計回りに0.0012radの残留傾斜が生じた状態から加振をしている。

上記のようにCase 1とCase 2には共通した傾向がみられる一方で、軸力や曲げモーメントの値は大きく異なっている。図5(a)より、Case 1では局所的に大きな軸力が生じ、隅角部（小径杭番号⑥）において特にその傾向が顕著である。このような傾向は、田蔵ら¹⁰⁾による基礎杭の振動実験でも指摘されている。これに対し、図5(b)より、Case 2では局所的な軸力の発生が抑制されていることがわかる。これは、土のうを介することで杭1本あたりの軸力が平準化されたことが原因と考えられる。

さらに、図5より、Case 1と比較してCase 2では曲げモーメントが低減していることがわかる。これは、Case 1では杭頭に直接水平力が伝達するのに対し、Case 2では土のうが水平力をいったん受け持って土のう底面や前面に水平力が分散するため、杭頭に伝達する水平力が低減することが原因と考えられるが、詳細には3章の結果と比較して考察する。また、図5(a)より、Case 1では、まず曲げモーメントがピークに到達し、やや遅れて滑動変位がピークに到達し、その後回転角がピークに到達していることがわかる。図5(b)より、同様の傾向はCase 2でもみられる。

以上から、小径杭のみを配置した基礎においては、端部杭に局所的に大きい軸力や曲げモーメントが発生するのに対して、提案構造では土のうを介することにより、局所的な軸力や曲げモーメントの発生が抑制されることがわかった。なお、図5には正弦波5Hz（目標最大加速度750gal）加振時のみの結果を示しているが、L2SpI波を加振した際にも、土のうの敷設により小径杭の軸力や曲げモーメントが低下することを別途確認している。

3. 振動台実験の数値シミュレーション⁶⁾

3.1 数値シミュレーションの概要

提案構造の地震時応答メカニズムや土のうの敷設効果の考察を深度化するために、振動台実験の数値シミュ

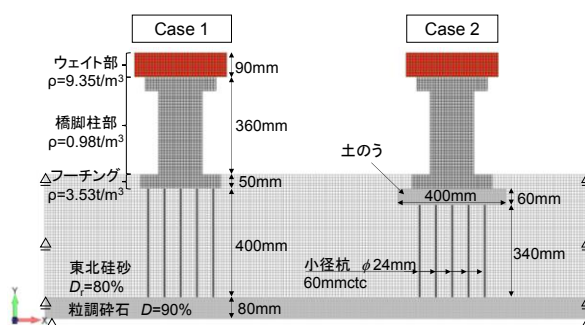


図6 模型振動台実験の数値シミュレーションモデル

表1 解析パラメータ

	湿潤密度 ρ_t (t/m ³)	初期せん断剛性 G_0 (kN/m ²)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)
東北珪砂	1.662	15411*	0.17	0.0	44.4
粒調砕石	1.940	35088	0.49	-	-
土のう	1.840	7047	0.49	-	-

* 東北珪砂層中央部（地表面より深度0.225m）での値

表2 東北珪砂層のGHE-Sモデルのパラメータ

$C_1(0)$	$C_2(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(\infty)$	α	β	$\gamma_{0.5}$
1.000	3.500	0.350	2.500	1.153	2.735	6.21×10^{-5} *

* 東北珪砂層中央部（地表面より深度0.225m）での値

レーションを実施する。模型振動台実験の数値シミュレーションモデルを図6に、解析パラメータを表1に示す。解析は、2次元有限要素法による動的非線形解析とした。解析は、小径杭のみを配置した基礎（Case 1）と、提案構造（Case 2）を対象とした。地盤領域は、実験の土槽スケールに合わせて幅2080mm×高さ530mmとし、下端は鉛直、水平方向固定条件、側面は鉛直方向のみ固定条件とした。小径杭の要素は弾性体の梁要素、橋脚、ウェイト、地盤、土のうは平面ひずみ要素とした。橋脚、ウェイトの密度、小径杭の断面積および剛性は単位奥行あたりに換算した。また、橋脚、ウェイトは十分高い剛性を有する弾性体とした。

Case 1におけるフーチング底面と地盤・杭、Case 2におけるフーチングと土のうの間は、ジョイント要素により結合し、境界面における鉛直方向の押込み・浮上り、水平方向の滑動をモデル化した。フーチング側面と地盤の間は水平方向に剥離を考慮するために、引張方向にはばねの剛性をほぼゼロにした。なお、押込み側にはばねの剛性を十分に大きい値とした。鉛直方向にはばね要素無しとした。土のうと地盤、土のうと杭、杭と地盤の結合部は、全て十分高い剛性のばね要素とした。土のうの圧縮剛性については、別途実施したジオテキスタイル土のうの圧縮試験¹¹⁾における死荷重相当の鉛直応力と鉄道の直接基礎橋脚の設計計算例¹²⁾における最大抵抗モー

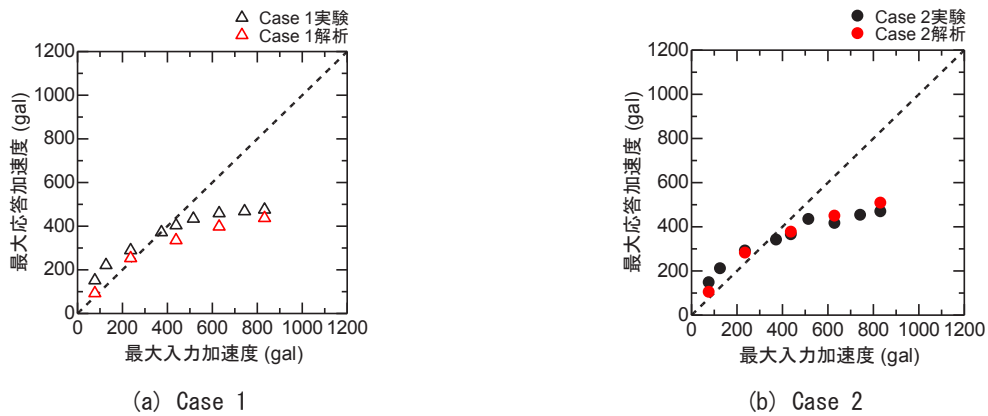


図7 最大入力加速度と橋脚天端位置における最大応答加速度の関係の比較

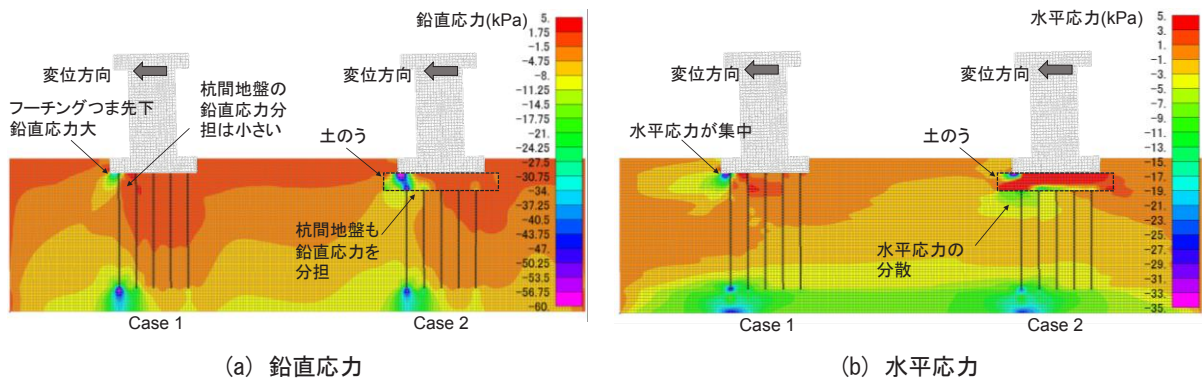


図8 地盤および土のうの応力分布図（橋脚の左方向の応答変位が最大となる時刻）

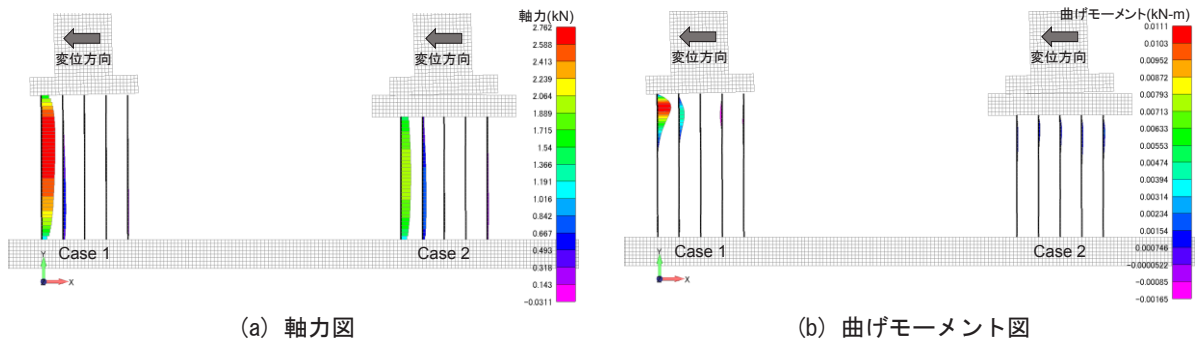


図9 小径杭の断面力図（橋脚の左方向の応答変位が最大となる時刻）

メント時相当の鉛直応力での割線勾配として設定した。東北硅砂層については、マルチスプリングと GHE-S モデル¹³⁾を組み合わせたモデルにより非線形性を考慮した。東北硅砂層の GHE-S モデルのパラメータを表2に示す。粒調碎石層については、弾性体としてモデル化した。入力波形は、振動台実験で加振した L2SpI 波および正弦波 5Hz とした。ただし、実験では L2SpI 波および正弦波 5Hz を段階的に载荷したが、数値シミュレーションは定性的なメカニズムの解明を主目的としているため、段階载荷を考慮していない。解析手法は Newmark- β 法とし、積分間隔は 1/500s とした。減衰マトリクスは、ばね及びジョイント要素の減衰をゼロとし、そ

れ以外の要素に Rayleigh 減衰を与える要素別 Rayleigh 減衰により設定した。

3.2 数値シミュレーション結果

図7に最大入力加速度（L2SpI 波）と橋脚天端位置における最大応答加速度の関係の比較を示す。図7より、解析における橋脚天端位置の最大応答加速度は最大入力加速度に対して頭打ちの傾向を示している。頭打ちを示す加速度は Case 2 がやや大きいものの Case 1, Case 2 で概ね同等程度であり、実験結果の傾向とも整合している。

以上より、実験で見られたフーチングの浮上りや応答加速度の頭打ち傾向が、解析でも概ね再現できており、

特集：地震対策技術

シミュレーション結果は概ね妥当であると考えられる。

また、目標最大加速度 750gal の正弦波 5Hz を入力した際の地盤および土のうの応力分布図を図 8 に、小径杭の断面力図を図 9 に示す。ここで、図 8、図 9 は橋脚の左方向の応答変位が最大となる時刻付近 ($t=5.156s$) に対して作図している。また図 8 は引張方向を正として示しており、コンターのレンジは、東北珪砂層の応力の最小値、最大値を丸めた値とした。図 9 の断面力図は、軸力は圧縮方向、曲げモーメントは反時計回りを正として作図している。図 8(a) をみるとわかるように、Case 1 ではフーチングつま先下に応力が集中し、杭間地盤の応力分担は小さいのに対し、Case 2 ではフーチングつま先下の応力集中が少なく、土のう下の杭間地盤がある程度応力を分担している。さらに、図 9(a) より、左端から 2 列目の小径杭の軸力は、土のうを介している Case 2 のほうが Case 1 より大きい。以上から、Case 2 で端部杭の軸力が小さくなる原因として、土のうを介して地盤に作用する荷重が分散されることにより、土のう直下の地盤の塑性化が抑制されるとともに、端部杭以外に荷重が分散することにより、端部杭への鉛直力の集中が緩和されたことが原因と考えられる。

また図 8(b) をみるとわかるように、土のうに作用した水平力が土のう下の地盤にも分散している。さらに、図 9(b) より、小径杭の曲げモーメントが各杭で平準化されていることがわかる。これは、各杭が杭頭で土のうと接しており、土のうに作用した水平力が土のうを介して杭に分散して作用していることが原因と考えられる。以上から、Case 2 で端部杭の曲げモーメントが Case 1 より小さくなる原因は、土のうを敷設することにより土のう下の地盤に作用する水平力が分散されるとともに、端部杭以外の小径杭にも水平力が分散されたことと考えられる。

4. まとめ

本研究では、小径杭併用土のう基礎の地震時応答特性を解明するために、支持地盤上の直接基礎形式の橋脚、小径杭のみを打設した地盤上の直接基礎形式の橋脚とあわせて振動台実験を実施し、応答加速度や小径杭の断面力などについて考察した。さらに、振動台実験の数値シミュレーションにより、提案構造の地震時応答メカニズムや土のうの敷設効果について考察した。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 模型振動台実験において、橋脚天端位置の最大応答加速度は、小径杭のみを配置した基礎、提案構造とも、支持地盤上の橋脚と同程度の加速度で頭打ちとなった。このため、両者は支持地盤上の橋脚と同程度の鉛直支持性能を有する。
- (2) 小径杭のみを配置した基礎においては、端部杭に局

所的に大きな軸力や曲げモーメントが発生する。一方、提案構造では土のうを介することにより、局所的な軸力や曲げモーメントの発生が抑制される。

- (3) 提案構造における杭の発生曲げモーメントの抑制効果は、土のうの敷設により土のう下の地盤に作用する水平力が分散されるとともに、端部杭以外の杭にも水平力が分散されたことに起因する。

文献

- 1) 林康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果，日本建築学会構造系論文集，No. 485，pp.53-62，1996
- 2) 川島一彦，細入圭介：直接基礎のロッキング振動が橋脚の非線形地震応答に及ぼす影響，土木学会論文集，No.703 / 1-59，pp.97-111，2002
- 3) 羽矢洋，西村昭彦：大地震力を考慮した直接基礎の設計法の提案，土木学会論文集，No.595 / VI-39，pp.127-140，1998
- 4) 西村隆義，本山紘希，井澤淳，室野剛隆：地盤改良併用型直接基礎の免震効果に関する実験的検討，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.68，No.4 (地震工学論文集第 31-b 巻)，2012
- 5) 山本実，中井正一，関口徹，福武毅芳，田地陽一：現場模型実験に基づく杭頭絶縁基礎の地震時挙動の評価，日本地震工学論文集 第 15 巻，第 7 号 (特集号)，2015
- 6) 土井達也，押田直之，山田聖治，室野剛隆，張鋒：小径杭併用土のう基礎の地震時応答特性に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.65A，2019
- 7) 松岡元，劉斯宏，長谷部智久，島尾陸：土のう積層体の変形・強度特性と設計法，土木学会論文集 No.764 / III-67，pp.169-181，2004
- 8) 野中隆博，小島謙一，米澤豊司，佐藤孝史，森野達也，青木一二三：パイルスラブ式盛土における改良杭頭部ジオテキスタイル土のうの特性評価，ジオシンセティックス論文集第 27 巻，2012
- 9) 日野篤志，室野剛隆，豊岡亮洋，土井達也：土のうを敷設した直接基礎橋脚の振動台実験による地震時挙動の評価，第 20 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，2017
- 10) 田蔵隆，清水勝美，広瀬利光：基礎杭の振動破壊実験，清水建設研究報告，第 50 号，1989
- 11) 土井達也，押田直之，豊岡亮洋，室野剛隆：軟弱地盤を土のうで置換した直接基礎の支持力特性 (その 1 土のうの圧縮試験)，第 53 回地盤工学研究発表会，2018
- 12) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 設計計算例 RC 橋脚 (直接基礎)，2015
- 13) 室野剛隆，野上雄太：S 字型の履歴曲線の形状を考慮した土のうの応力～ひずみ関係，第 12 回日本地震工学シンポジウム，pp.494-497，2006