

# 小径杭と土のうを併用する基礎を適用した橋脚の地震応答解析

土井 達也\* 室野 剛隆\*\* 張 鋒\*\*\*

Seismic Response Analysis of Piers with Foundation Composed of Micropiles and Soilbags

Tatsuya DOI Yoshitaka MURONO Feng ZHANG

In this paper, the authors propose a new type of foundation, which is a combination of micropiles and soilbags. The proposed foundation is characterized by laying soilbags on the pile head and constructing structures on the soilbags. The effects by the adoption of the new foundation are expected to result in the omission of joint between piles and a footing, a reduction of diameter of piles, and a reduction of response acceleration of structures. In this study, seismic response evaluation method for the proposed structure with actual size was constructed to compare the seismic responses of the proposed foundation with those of pile foundation under the different conditions of input acceleration.

キーワード：土のう，小径杭，直接基礎，応答加速度，耐震性能

## 1. はじめに

直接基礎には、地震時にフーチングの浮き上がりや支持地盤の塑性化により構造物が長周期化し、く体に入力される応答加速度が頭打ちとなる免震特性と類似した効果（以下、基礎免震効果と呼ぶ）があり<sup>1)</sup>など、橋りょう・高架橋など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一般的な基礎工法の1つである杭基礎では、通常、杭頭とフーチングを剛結するため、地震時に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、基礎免震効果が期待できないため、く体の大断面化につながる。そこで、軟弱地盤上で鉛直支持性能を確保しつつ直接基礎を構築し、応答加速度の頭打ち効果や杭の小径化を期待する手法として、杭頭とフーチングを分離する手法が提案されている。例えば西村ら<sup>2)</sup>は、軟弱地盤の一部に改良杭を設置した直接基礎橋脚の地震応答を模型振動実験により検討し、同構造が基礎免震効果と鉛直支持性能を有することを確認した。一方、この実験では、入力加速度が大きくなると改良杭が折損して残留沈下が生じた。この結果は、単にフーチングと杭を切り離すだけでは、端部杭に応力集中の懸念があることを示している。

以上の背景を踏まえ、著者らは図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<sup>3)</sup>など。提案構造は、小径杭を打設し、杭頭上に土のうを敷設して疑似的に直接基礎を構築するものであり、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している。これにより、フーチングの浮き上がりによる基礎免震効果、杭頭接合構造の省略、杭頭の水平力の抑制による杭の小径化が実現できる。また、本工法ではフーチング下に「土のう」を敷設することに特徴がある。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し、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<sup>4)</sup>。こうした特性を有する土のうは適度な剛性を有し、地震時のフーチング直下の応力条件下でも過度な塑性化が生じにくい。また、「緩衝材」として杭への応力集中を緩和することが期待できる。なお、提案構造で用いる土のうとしては、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<sup>5)</sup>を想定している。

著者らはこれまで、重力場の模型振動台実験やその再現解析により、提案構造の基礎免震効果や土のうの敷設効果について検討してきた<sup>3)</sup>。一方、提案構造の実用化に向けては、提案構造の実応力での応答メカニズムの解明や、杭基礎などの従来の基礎形式との得失の比較が必要と考えられる。小型の模型振動台実験では応力レベル

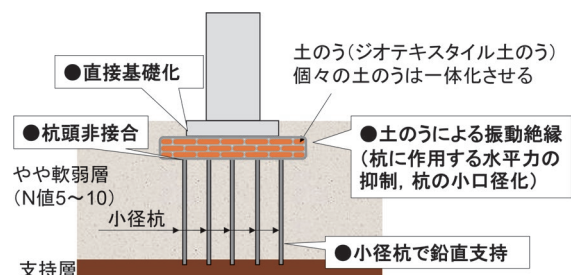


図1 提案する基礎構造の概要<sup>3)</sup>

\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

\*\* 研究開発推進部

\*\*\* 名古屋工業大学大学院

の違いから、実構造物に適用した際の地震応答の評価については限界があると考えられる。

そこで本研究では、実規模の提案構造の応答値評価モデルを構築し、従来の杭基礎や、杭頭とフーチングを切り離し、杭頭に土のうを敷設していない基礎（以下、杭頭絶縁基礎と呼ぶ）とあわせて動的応答を試算することにより、提案構造の動的応答メカニズムや効果を明らかにする。

## 2. 比較検討の概要

### 2.1 検討対象構造物

検討対象構造物を図2に示す。本検討では、提案構造（図2(a)）と、小径杭のみを設置し、杭頭とフーチングを分離した杭頭絶縁基礎（図2(b)）、杭基礎（図2(c)）について検討した。上部工の形式は、起点方はRC単純T形桁（L=20m）、終点方はRC単純T形桁（L=15m）とし、支承はゴム支承（起点方：可動、終点方：固定）とした。地盤条件は図3に示すように、埋め戻し土としてN値2の砂質土が2.7m、表層地盤としてN値10の粘性土が10m存在する条件とした。検討に用いた地盤パラメータを表1に示す。入力地震動は鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計<sup>6)</sup>に記載のG1地盤（基盤）に対するL2地震動スペクトルII（以下、L2SpII波）およびL1地震動とし、耐震設計上の基盤面より入力した。ただし杭頭絶縁基礎についてはL2SpII波のみ検討した。検討は線路直角方向に対して行った。土のうの部分は、土のう袋にジオテキスタイル、中詰め材にM-30粒調砕石を使用した幅900mm×奥行き900mm×高さ150mmの土のうを鉛直方向に10段積層し、さらに外側からジオテキスタイルで一体化して構築することを想定した。また、杭諸元については、図2の(a)提案構造および(b)杭頭絶縁基礎と、(c)杭基礎で杭断面、杭本数が異なることから、構造物の死荷重に対する鉛直支持力の照査値が同等程度となるように設定した。提案構造では、杭の例として杭径300mmのPHC杭（A種、プレストレス4N/mm<sup>2</sup>）を25本配置し、施工法は打ち込み工法とした。なお、PHC杭の杭頭には、土のうの全幅に均等に荷重が作用するよう、直径900mmのプレートを設置することを想定した。杭頭絶縁基礎では、土のうの有無による提案構造との比較の観点から、提案構造と同じ杭を使用し、杭長を土のうの厚さ1500mm分だけ長くした。杭基礎構

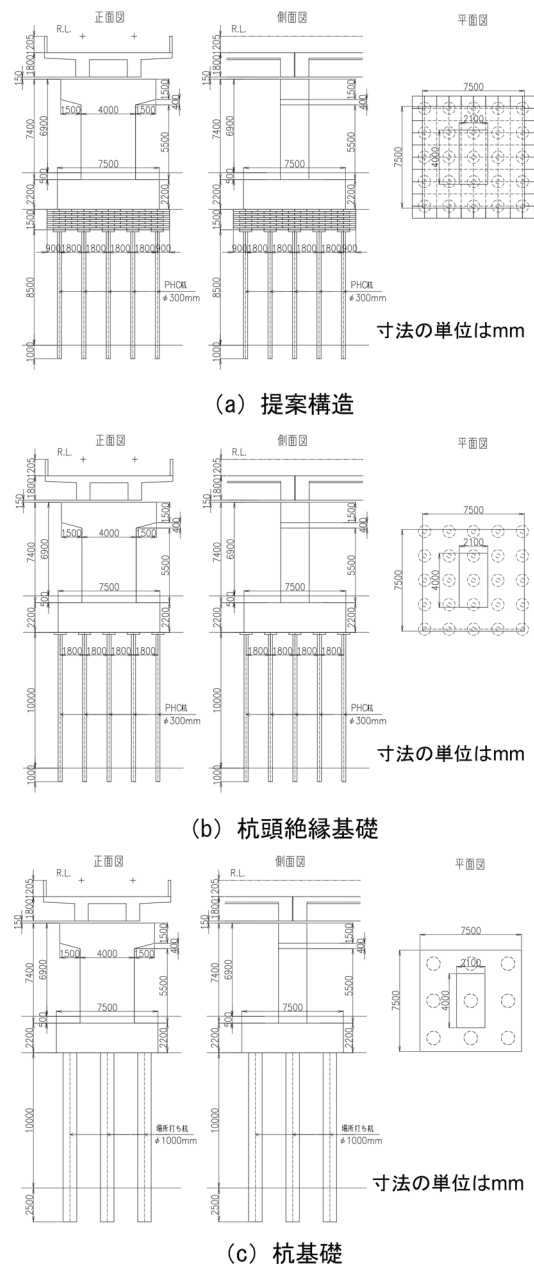


図2 検討対象構造物

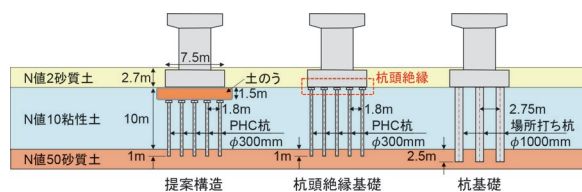


図3 地盤条件

表1 検討に用いた地盤のパラメータ

	単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度(m/s)	変形係数(kN/m <sup>2</sup> )	粘着力(kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角(deg)
N値2砂質土	18	101	55,835	0.0	30
N値10粘性土	16	215	225,736	62.5	0.0
N値50砂質土	19	430	1,019,160	0.0	43

造では、杭径 1000mm の場所打ち杭（オールケーシング工法、自然泥水）を 9 本配置した構造とした。

## 2.2 解析モデル

提案構造のモデル化においては、今後の設計実務への展開を考慮し、実績のある地盤・構造物一体型の梁ばねモデルを用いた動的解析によることとした。図 4 に解析モデルを示す。また、動的解析とは別に、地盤変位を考慮せず、慣性力作用に対する荷重-変位関係や損傷過程を把握することを目的として、プッシュ・オーバー解析を実施した。プッシュ・オーバー解析は、図 4 における土柱を固定とし、水平震度を漸増载荷する静的非線形解析により行った。

提案構造において、実現象では土のう下面と接する杭間地盤が抵抗力を発揮する可能性もあるが、杭間地盤は地震時に揺すり込み沈下する可能性があることや、杭基礎や杭頭絶縁基礎の応答解析では、図 4(b)、図 4(c) に示すように、一般的な梁-ばね系モデルによる応答解析と同様に杭間地盤の影響を評価していないことから、本検討では土のう下面の杭間地盤の効果は考慮しない。また、土のうについては、土のうの応力を評価する目的で、平面ひずみ要素でモデル化した。個々の土のうは緊密に一体化され、一体挙動すると考え、土のう間の相互作用を無視した。土のうの物性は、既往検討<sup>7)</sup>で評価した鉛直応力-鉛直ひずみ関係（図 5 参照）と概ね等価となる弾性体とした。土のうの変形係数は図 5 に示す通り、自重荷重に対する土のうの変形係数を  $E_1$ 、自重荷重からの荷重の変動に対する変形係数を  $E_2$  とし、それぞれ鉛直応力-鉛直ひずみ関係の割線勾配より  $E_1=4750\text{kN/m}^2$ 、 $E_2=30000\text{kN/m}^2$  とした。ただし、実現象では、圧縮試験と異なり土のうに作用する圧縮力が一様にならない影

響、隣接する土のうの影響、土のうに圧縮力とせん断力が同時かつ繰り返し作用することによる剛性低下や残留ひずみによる影響が考えられるが、本検討の土のうのモデルではこれらを実評価できない。この影響については、今後検討が必要である。中詰め材の単位体積質量は、圧縮試験と同じ値として、 $1.8\text{t/m}^3$  とした。また、図 4(a) で、土のう一体化用ジオテキスタイル（引張変形係数  $980\text{kN/m}$ 、引張耐力  $69\text{kN/m}$ ）はトラス要素でモデル化し、土のう節点とは密着条件とした。なお、本モデルにおいて、く体および小径杭はフーチングの奥行き  $7.5\text{m}$  を考慮していることから、土のうの単位体積重量、土のうの剛性、土のう一体化用ジオテキスタイルの剛性および引張耐力は  $7.5$  倍の値を実際に入力値とした。

提案構造の土のうとフーチングおよび、土のうと杭の境界面は、図 6 に示すジョイント要素でモデル化し、鉛直方向の接触・剥離や、水平方向の滑動（水平力の上限值を超過した際と、鉛直方向に剥離が生じた際）を表現した。水平力の上限値は  $c+F_n \tan \phi$  とした。ここで、 $F_n$  は鉛直力である。 $\phi$  は摩擦角で、提案構造と杭頭絶縁基礎での構造形式の違いや、施工方法等に依存すると考えられるが、現時点では十分な知見がないため、既往の模

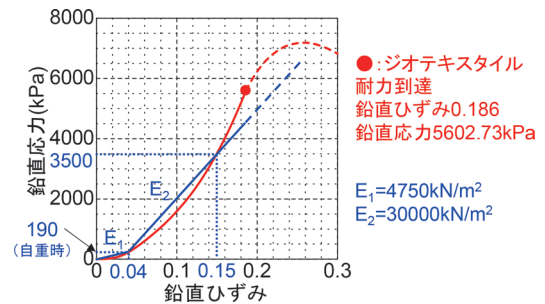


図 5 土のうの変形係数の設定

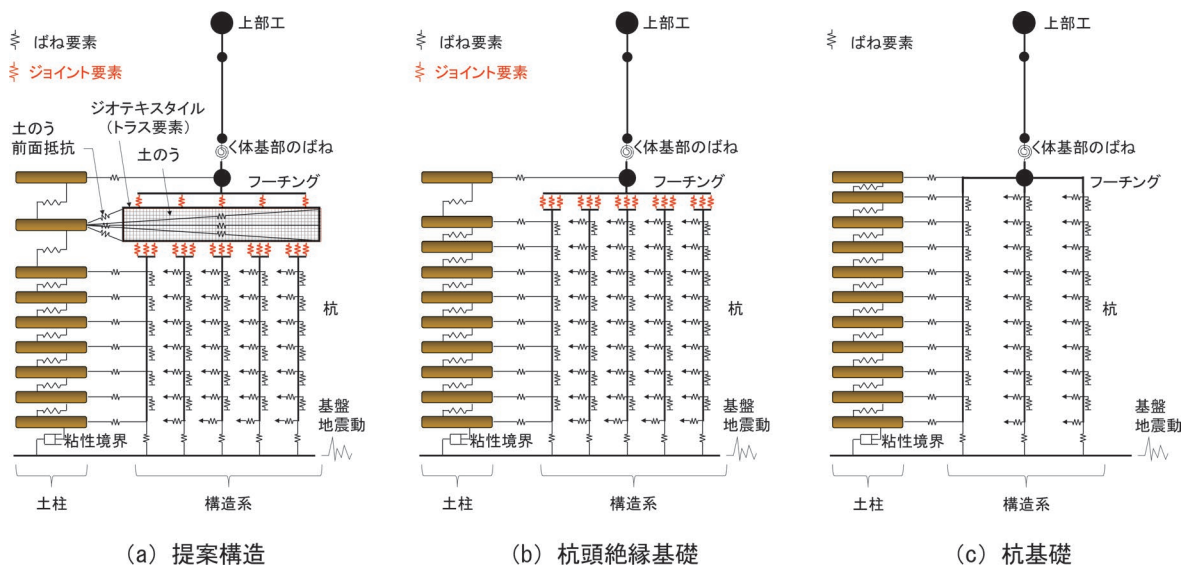


図 4 解析モデル

型振動台実験の再現解析<sup>3)</sup>を参考に45°と仮定した。cは粘着力で、ゼロに近い値に設定した。

図7に橋脚基部および杭の非線形特性を示す。非線形特性の設定においては、橋脚基部、杭とも、自重による初期軸力における骨格曲線を鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計<sup>6)</sup>に基づいて設定し、履歴ルールはClough型モデルを適用した。橋脚基部の骨格曲線の非線形性はM-θ関係でモデル化し、ひび割れ(C)、降伏(Y<sub>b</sub>)、最大耐力(M)点を結ぶトリリニアモデルでモデル化した。PHC杭はM-φ関係でモデル化し、ひび割れ(C)、降伏(Y)点を結ぶバイリニアモデルでモデル化した。場所打ち杭はM-φ関係でモデル化し、ひび割れ(C)、降伏(Y<sub>b</sub>)、最大耐力(M)点を結ぶトリリニアモデルでモデル化した。また、PHC杭の杭頭に設置するプレートは、本来はプレートの諸元に応じた剛性を与えるとともに、プレートの耐力照査等も行う必要があるが、本検討の趣旨は提案構造の地震応答の試算であることから、概略的に十分に剛性の大きい梁部材としてモデル化した。

杭および土のうと連結されている自由地盤は、提案構造および杭頭絶縁基礎においては深さ1D=0.3mを目安に、杭基礎においては深さ1D=1.0mを目安に地盤を分割した。自由地盤の節点にはフーチング面積の100倍の断面積を与えた土柱を設定した。これは、構造物の応答が自由地盤の応答に影響を及ぼさないようにするため

である。この土柱を、各杭の水平地盤ばねを介して杭と接続した。土柱のせん断特性はGHE-Sモデル<sup>8)</sup>により考慮した。GHE-Sモデルの規準ひずみはせん断強度と初期せん断剛性の比から算出し、それ以外のパラメータは標準値<sup>9)</sup>を使用した。なお、底面の地震動入力位置には粘性境界を設定し、反射波を吸収させた。

自由地盤と構造物の間の相互作用ばねは図3の地盤条件より、鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物<sup>10)</sup>より、水平、鉛直、杭先端、フーチング前面の地盤ばねをバイリニア型でモデル化した。ここで、基礎の支持力修正係数α<sub>r</sub>=1.0とした。杭周面の鉛直ばねは、1/β以深において考慮した。ここで、βは杭の特性値である。

減衰マトリクスは、初期剛性の大きいジョイント要素で過大な減衰が発揮されるのを防ぐために、提案構造と杭頭絶縁基礎の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。Rayleigh減衰の定数α、βは、1/4波長則により求めた表層地盤の1次の固有振動数(3.417Hz)と10Hzで減衰定数が3%となるように、α=0.960、β=7.117×10<sup>-4</sup>と設定した。ここで定数α、βは、[C]を減衰マトリクス、[M]を質量マトリクス、[K]を剛性マトリクスとして、[C]=α[M]+β[K]と定義した。

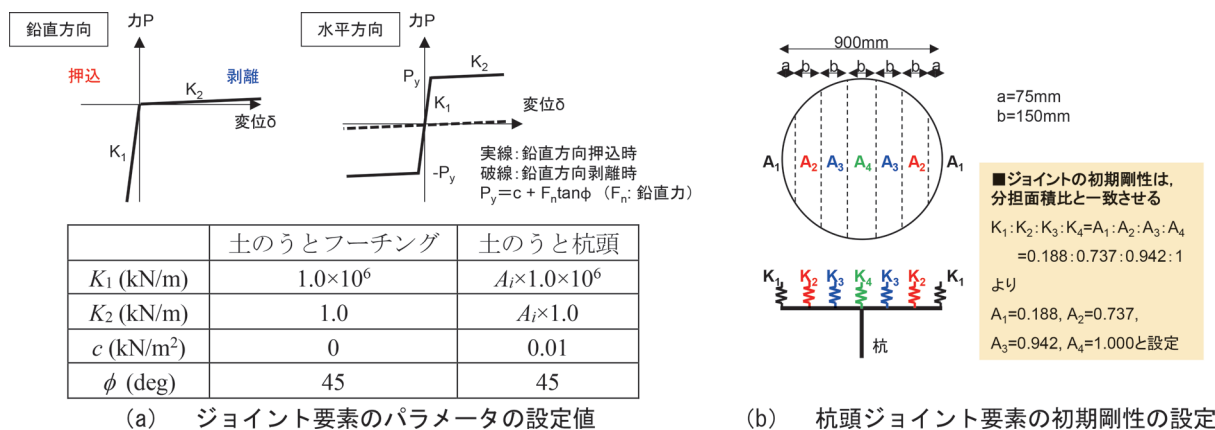


図6 ジョイント要素の特性

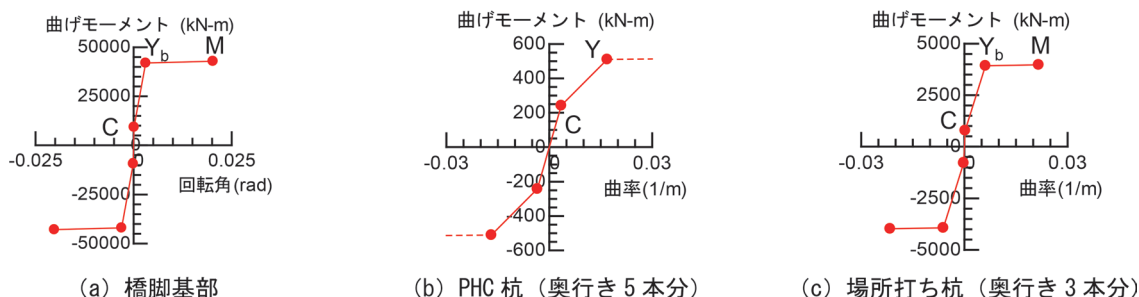


図7 橋脚基部および杭の非線形特性

### 2.3 解析条件

入力地震動は耐震設計上の基盤面より入力した。数値計算は Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) により行った。積分間隔は計算が安定する十分小さい値 (提案構造, 杭頭絶縁基礎の全ケース, 杭基礎の L1 地震動の検討においては 0.001s, 杭基礎の L2SpII 波の検討においては表 2 の値) とした。

## 3. 解析結果

### 3.1 固有値解析およびプッシュ・オーバー解析による振動特性の評価

表 3 に、固有値解析による各ケースの構造物 1 次モードの弾性固有周期を示す。ただし、固有値解析では、ジョイント要素はジョイント要素の初期勾配と同じ勾配のばね要素に置き換えた。表 3 より、提案構造の方が杭基礎構造よりも、構造物 1 次モードの弾性固有周期が長い。これは、フーチング下に比較的剛性の低い土のうを敷設したことによる。また、杭頭絶縁基礎と杭基礎の固有周期がほぼ同じとなっている。これは、杭頭絶縁基礎の固有値解析ではジョイント要素をモデル化することができず、フーチングの浮き上がりによる長周期化を考慮していないためである。

図 8 にプッシュ・オーバー解析から得られた各ケースの荷重-変位関係を示す。図中には部材や基礎の損傷イベントを示している (◆: 橋脚基部の曲げ降伏, ▲: 橋脚基部の最大曲げモーメント到達, ○: 杭先端の支持降伏, □: 杭部材の曲げ降伏)。なお、一般的な RC 部材では、最大曲げモーメント (Mm) 超過以降に荷重低下が生じるが、本検討における橋脚基部や杭部材の骨格曲線には、最大曲げモーメント到達後の荷重低下を考慮していないため、最大曲げモーメント到達後の荷重-変位関係は破線で示している。まず、図 8 の初期勾配をみると、杭基礎と杭頭絶縁基礎がほぼ同じで、提案構造はそれより小さい。これは、表 3 の固有値解析結果の傾向とも整合している。また、図 8 より、提案構造や杭頭絶縁基礎では杭基礎と比較して、同じ水平震度での変位が大きい。これは提案構造や杭頭絶縁基礎における、フーチングの浮き上がりに伴う回転剛性の低下や、杭の支持降伏によるものである。その結果として、提案構造や杭頭絶縁基礎では、杭基礎に比べて地震時に橋脚の長周期化による免震効果が大きく、く体の慣性力応答が低減すると想定される。図 9 に提案構造のフーチングの浮き上がり状況の一例として、水平震度 0.5 における変形図を示す。水平震度の増大によって橋脚がつま先立ちになり、最前列の杭が他の杭より大きく沈下している。また、土のうの鉛直応力は、つま先立ちになったフーチングの直下や杭頭直上で大きい。

表 2 杭基礎の L2SpII 波の検討における積分間隔の設定値

基礎種類	L2SpII 波の振幅倍率	積分間隔 (s)
杭基礎	0.05, 0.2	0.0005
	0.5, 1.0	0.0002
	1.5	0.0001

表 3 各ケースの構造物 1 次モードの弾性固有周期

基礎種類	周期 (s)
提案構造	0.986
杭頭絶縁基礎	0.624
杭基礎	0.633

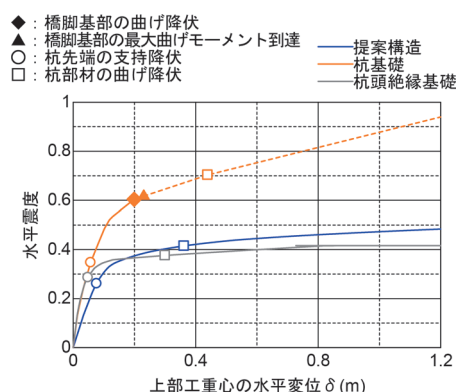


図 8 各ケースの荷重-変位関係

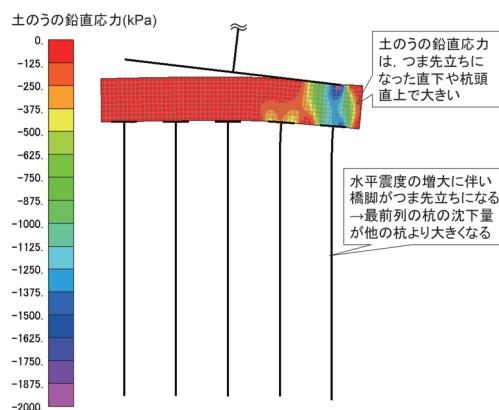


図 9 提案構造の水平震度 0.5 における変形図

### 3.2 提案構造の動的応答特性

#### 3.2.1 提案構造の基礎免震効果

提案構造の応答加速度の頭打ち効果の考察にあたり、まず橋脚の慣性力作用に影響を及ぼす地表面加速度 (耐震設計上の基盤面に入力した入力波形に対する、土柱の地表面位置での応答加速度) について考察する。図 10 に、地表面加速度を用いた弾性加速度応答スペクトルを示す。図中の加速度応答スペクトルは、L2SpII 波 (振幅 1.0 倍) に対する提案構造, 杭頭絶縁基礎, 杭基礎の地表面

応答加速度について表示している。また、縦線は、表3に示した構造物の1次モードの弾性固有周期を表している。図10より、加速度応答スペクトルは各構造ではほぼ同じであり、概ね0.5~1.0sの周期帯で卓越していることがわかる。提案構造においては弾性固有周期が1.0s程度であり、さらに大地震時の構造物の損傷による長周期化も考慮すると、今回の地震作用および構造条件においては、杭頭絶縁基礎や杭基礎よりも慣性力作用が小さくなると想定される。ただし、極端に長周期の地震に対しては、応答が増幅する可能性も考えられる。このような場合における提案構造の適用性は今後の検討課題である。

次に、入力地震動の大きさに応じた橋脚の応答加速度の頭打ち傾向を評価するために、L2SpII波の振幅を0.005, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5倍に設定したケースを対象に動的応答を比較する。なお、本研究で実施した解析において、橋脚基部で図7(a)のM点を超える応答(図8の荷重-変位関係の破線部に至る応答)は生じなかった。図11に地表面位置の最大加速度と上部工重心位置の最大加速度の関係を示す。図11より、杭基礎では地表面応答加速度に対して上部工重心位置の応答加速度が増幅する傾向がある一方、提案構造および杭頭絶縁基礎では、地表面応答加速度が200~300gal程度の範囲では若干の増幅はみられるものの、地表面応答加速度が大きくなるにしたがって上部工重心位置の応答加速度が頭打ちになる傾向がある。また、いずれの地表面加速度のレベルにおいても、提案構造および杭頭絶縁基礎の方が杭基礎よ

りも上部工重心位置の応答加速度が小さい。このような上部工重心位置の応答加速度が頭打ちとなる傾向は、既往の模型振動実験<sup>3)</sup>の傾向や、図8で提案構造および杭頭絶縁基礎において水平震度0.4程度で頭打ちになることとも合致する。

また、図12に、L2SpII波(振幅1.0倍)を加振した場合の橋脚基部部材の曲げモーメント-回転角関係を示す。曲げモーメントの最大値(絶対値)は、杭基礎の37200kNmに対して、提案構造では27400kNm、杭頭絶縁基礎では25700kNmと、杭基礎より3割程度小さくなっている。この傾向は、図11の応答加速度の頭打ち傾向(図中の赤枠で囲った結果)と対応している。これらは、提案構造および杭頭絶縁基礎におけるフーチングの浮き上がりによる長周期化が原因である。

### 3.2.2 提案構造における小径杭の断面力低減効果

提案構造と杭頭絶縁基礎で小径杭の断面力を比較し、土のうの敷設による小径杭の断面力低減効果について検討する。図13に提案構造および杭頭絶縁基礎の、小径杭の曲率分布図および曲げモーメント-曲率関係を示す。ここで、曲率分布図は、着目要素の曲率最大時刻について作図しており、レンジは曲率の応答値が最も大きい杭頭絶縁基礎の曲率の最大値、最小値を丸めた値としている。図13(a)(i)より、提案構造では、両端の杭で損傷が大きい傾向がある。また、杭の深度方向にみると、杭頭部と杭頭部より下方で応答曲率が大きい範囲がみられる。このうち、杭頭部の応答曲率は杭頭に設置したブ

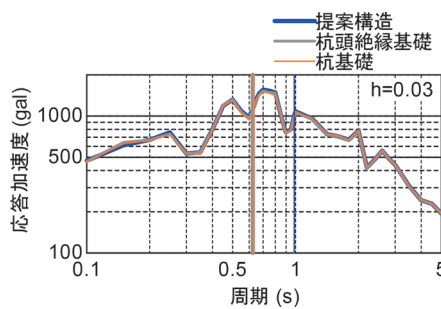


図10 地表面加速度の弾性加速度応答スペクトル (L2SpII波, 振幅1.0倍, 減衰定数3%)

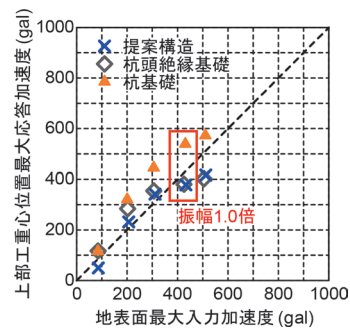


図11 地表面位置の最大加速度と上部工重心位置の最大加速度の関係 (L2SpII波)

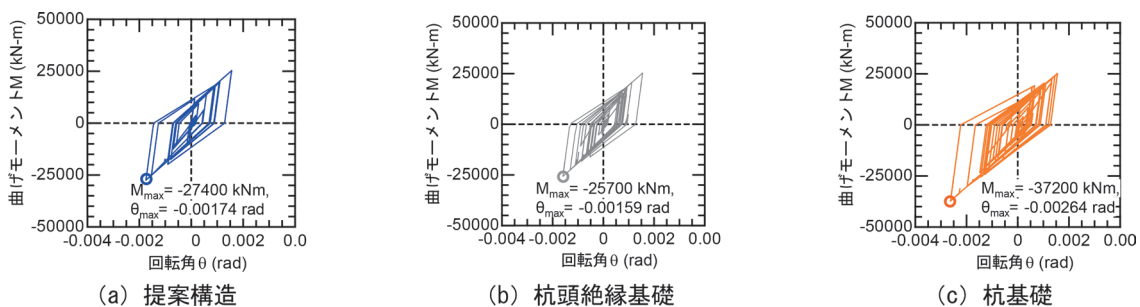


図12 橋脚基部の部材の曲げモーメント-回転角関係 (L2SpII波, 振幅1.0倍, 時計回りが正)

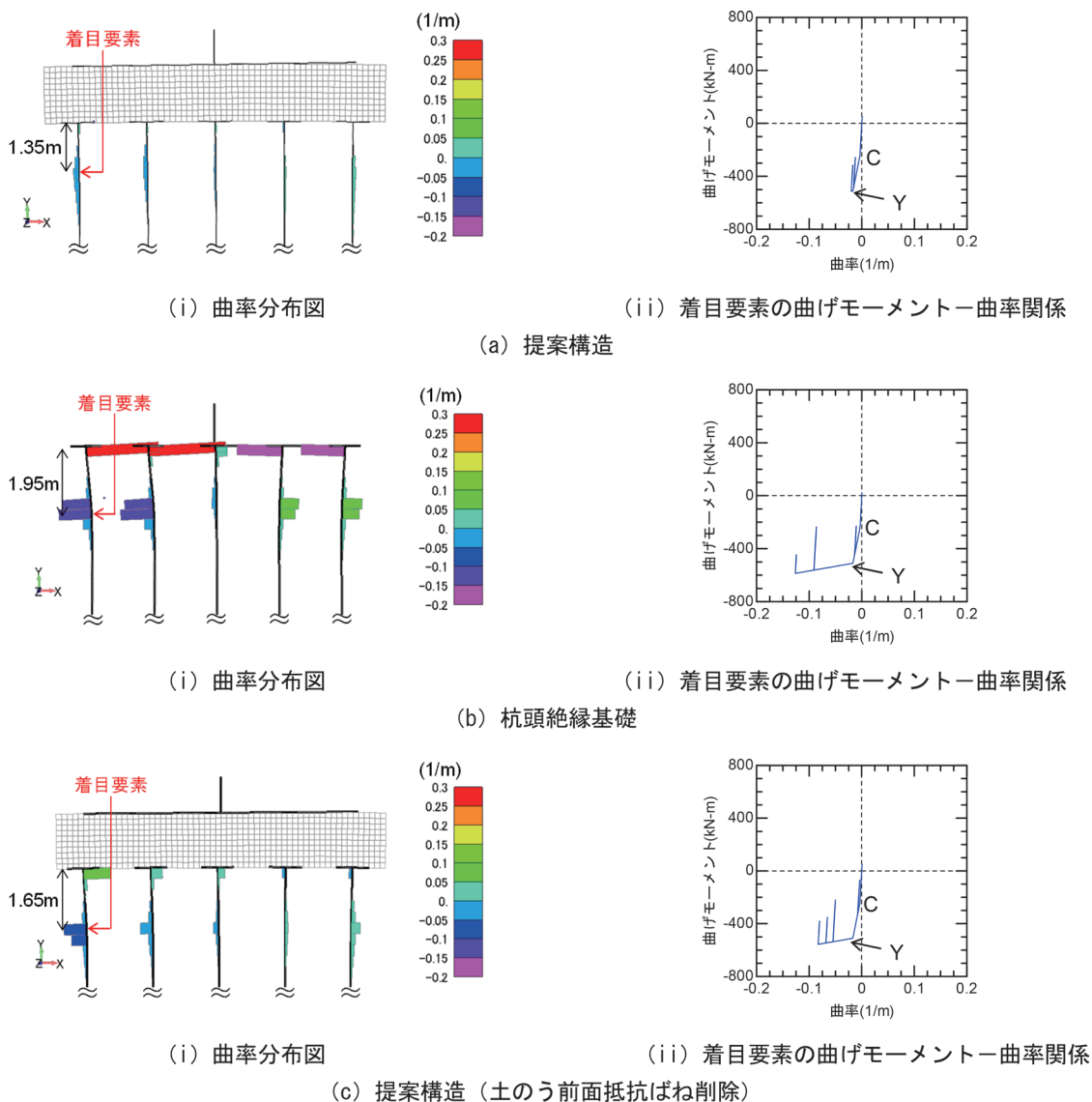


図 13 小径杭の曲率分布図および着目要素の曲げモーメントー曲率関係 (L2Sp11 波, 振幅 1.0 倍)

レートに作用する鉛直力の影響で生じたものであり、杭頭より下方の応答曲率は杭頭に作用した水平力の影響で生じたものである。杭頭より下方で、加振後の応答曲率が最も大きい要素に対する曲げモーメントー曲率関係を図 13(a) (ii) に示す。図 13(a) (ii) より、杭の損傷レベルは降伏点 (Y) をわずかに超過する程度である。一方、図 13(b) (i) より、杭頭絶縁基礎では、杭の応答曲率は提案構造に比べてかなり大きい。また、杭頭より下方で、加振後の応答曲率が最も大きい要素に対する曲げモーメントー曲率関係を図 13(b) (ii) に示す。図 13(b) (ii) より、杭の損傷は降伏点 (Y) を大きく超過していることがわかる。このように、フーチングの直下に設置した杭が大きく損傷する結果は、西村ら<sup>2)</sup>による模型振動実験でも示されている。この要因として、(i) 土のうを介することで、杭頭に伝達する鉛直力や水平力が他の杭に分散されること、(ii) 土のうの前面抵抗ばねが水平力

を受け持つため、杭頭に作用する水平力が減少することが考えられる。

そこで、(i)、(ii) の要因がどの程度小径杭の曲げモーメントに影響するかを考察するため、図 4(a) で土のうの前面抵抗ばねを削除することで、(ii) の要因を取り除いたモデルに対しても応答解析を行った。図 13(c) に、土のう前面抵抗ばねを削除したモデルに対する結果を示す。図 13(a) ~ (c) において、(a) 提案構造、(b) 杭頭絶縁基礎、(c) 提案構造 (土のう前面抵抗なし) の応答曲率の絶対値の最大値は、それぞれ  $0.0182\text{m}^{-1}$ 、 $0.292\text{m}^{-1}$ 、 $0.0954\text{m}^{-1}$  である。(b) と (c) の比較より、土のうの敷設による応力分散効果により応答曲率の絶対値が約 1/3 となる。さらに、(a) と (c) の比較により、土のうの前面抵抗がない場合に比べ、ある場合では応答曲率の絶対値が約 1/5 となる。このため、土のう自体の応力分散効果に加え、土のうの前面抵抗が杭の損傷の抑

制に寄与していることがわかる。

### 3.2.3 提案構造における応答変位および走行安全性

本項では、提案構造と杭基礎に対して、応答変位や走行安全性を比較する。図14に上部工重心位置の応答変位(L2SpII波、振幅1.0倍)を示す。図14より、提案構造の最大応答変位が若干大きいものの、残留変位は杭基礎とほぼ同等である。このため、提案構造の残留変位は、土のうとフーチングや小径杭の間に十分な摩擦が確保されれば、杭基礎構造と同等程度となるといえる。

次に、提案構造と杭基礎でL1地震動に対する走行安全性を比較するため、軌道面位置のスペクトル強度SIを評価する。ここで、SIは、応答速度の周期成分を積分して、応答の総和であるスペクトル強度として算出するものであり、式(1)のように表される。

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(h, T) dT \quad (1)$$

ここで、 $S_v(h, T)$  は応答速度スペクトルである。提案構造と杭基礎の速度応答スペクトルの比較を図15に示す。ただし、減衰定数は鉄道構造物等設計標準・同解説変位制限<sup>11)</sup>より5%を仮定した。図15より、提案構造では、短周期側では杭基礎よりスペクトルの値が小さいが、長周期側では大きい。これは、提案構造の方が杭基礎よりも等価固有周期が長いことが原因と考えられる。その結果、杭基礎のSIは1850.79mm、提案構造のSIは2351.83mmと、提案構造の方が杭基礎より大きくなる。ただし、図16に示す走行安全性に関する限界値 $SI_L$ <sup>11)</sup>は下回っており、走行安全性の照査は満足する。

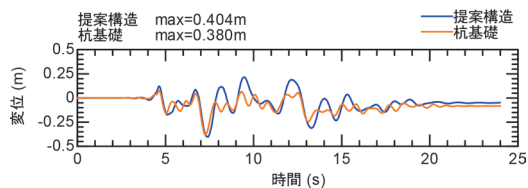


図14 上部工重心位置の応答変位の比較 (L2SpII波、振幅1.0倍)

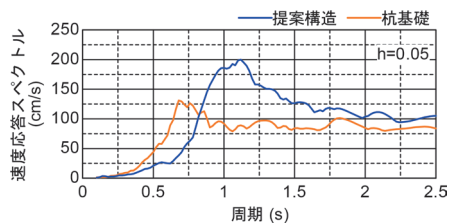


図15 L1地震動に対する軌道面位置の応答加速度の速度応答スペクトル

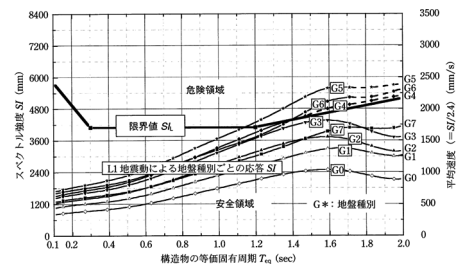


図16 走行安全性に関する限界値 $SI_L$ <sup>11)</sup>

## 4. まとめ

本検討では、実規模の小径杭と土のうを併用する基礎を有する橋脚の応答値評価モデルを構築し、杭頭とフーチングを切り離し、杭頭に土のうを敷設していない杭頭絶縁基礎や、場所打ち杭を有する杭基礎とあわせて耐震性能を数値計算により比較した。

本検討から得られた結論を以下に示す。

- (1) 提案構造、杭頭絶縁基礎、杭基礎について、地表最大加速度と上部工重心位置の最大応答加速度の関係を比較し、提案構造および杭頭絶縁基礎において上部工位置の応答加速度が頭打ちになることを確認した。これは、フーチングの浮き上がりによる長周期化が原因であり、既往の模型振動実験や、その再現解析の傾向とも合致する。
- (2) (1)と対応し、提案構造および杭頭絶縁基礎では杭基礎構造に比べ、橋脚基部に発生する曲げモーメントや回転角が抑制される。
- (3) 杭頭絶縁基礎に比べ、提案構造では土のうの敷設により杭の損傷が抑制される。これは、土のうを介することにより水平応力や鉛直応力が端部以外の杭に分散することと、土のうの前面抵抗により杭頭に作用する水平力が低減することによる。
- (4) 今回の検討条件では、提案構造の採用によりL1地震動に対する軌道面位置のスペクトル強度SIが増加するが、走行安全性の限界値 $SI_L$ は満足する。

## 文献

- 1) 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
- 2) 西村隆義, 本山絃希, 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), pp.I\_598-I\_607, 2012
- 3) 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, pp.164-177, 2019

- 4) 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
- 5) 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, pp.93-100, 2012
- 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012
- 7) 土井達也, 室野剛隆, 岩井裕正, 張鋒: 軟弱地盤を土のうで置換した直接基礎の支持力特性に関する解析的検討, 第54回地盤工学研究発表会, 2019
- 8) 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応力～ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.494-497, 2006
- 9) 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, No.2-0014, pp.1-7, 2009
- 10) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, 丸善出版, 2012
- 11) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限, 丸善出版, 2006