

杭と土のうを組み合わせ 建造物の揺れを抑える

高架橋や橋脚などの建造物を支える基礎には、直接基礎や杭基礎などがあります。直接基礎は地盤が強い場所、杭基礎は地盤が弱い場所でよく用いられます。直接基礎には、地震の際に建造物に揺れが伝わりにくいため、建造物に生じる力も抑えられます。しかし、杭基礎ではこのような効果は期待できません。そこで、直接基礎と同じように建造物に揺れが伝わりにくく、しかも杭基礎と同じように地盤が弱い場所でも適用できる新しい工法として、従来は剛結するのが一般的であったフーチングと杭を切り離し、間に『土のう』を挟む新しい基礎構造を提案しています。ここでは、提案した構造の概要と、効果を検証するための実験について紹介します。



土井 達也
Tatsuya Doi
鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
研究員
[専門分野] 地震工学



山田 聖治
Seiji Yamada
構造物技術研究部
建築研究室
室長
[専門分野] 建築構造、
地震工学



室野 剛隆
Yoshitaka Murono
研究開発推進部
JR部長
[専門分野] 地震工学



張 鋒
Ho Cho
名古屋工業大学
教授
[専門分野] 地盤工学

はじめに

高架橋や橋脚などの建造物を支える基礎には、直接基礎や杭基礎などがあります。直接基礎は桁やく体の荷重を地盤に分散させて建造物を支える基礎で、固い地盤が地中の浅いところにある場所で用いられます。一方で、地盤が弱く、地中深くまで掘らないと固い地盤が現れない場所では、直接基礎では建造物を支えられません。そこで、直接基礎に代えて、杭基礎がよく用いられます。杭基礎は、杭を打って建造物の荷重を地中深くの固い地盤に伝えることにより、桁やく体の荷重を支

える基礎です。杭基礎を用いると、地盤が弱く、直接基礎では建造物を支えられないような場所にも、建造物を構築することができます。図1に直接基礎と杭基礎の比較を示します。

さて、直接基礎では、建造物が地震を受けて揺れると、左右にバタンバタンと振動し、フーチングが浮き上がることがあります。このため、地震の際に建造物に揺れが伝わりにくくなり、建造物に生じる力（曲げモーメントやせん断力）も抑えられる効果があります。一方、杭基礎では通常、杭頭とフーチングを剛結（部材と部材の結合部で

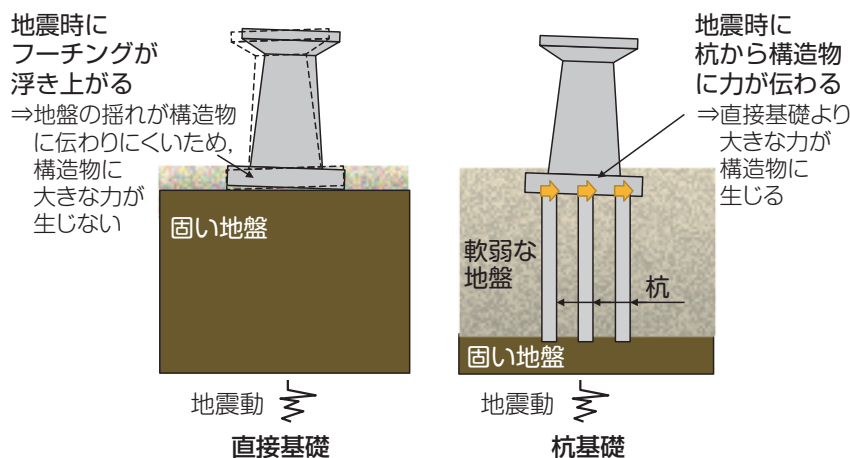


図1 直接基礎と杭基礎の比較

回転しないように、しっかりと結びつけること) するため、杭を通して構造物に力が伝わります。このため、地震のときに、直接基礎と比べて大きな力が構造物に伝わってしまいます。

もしも地盤が弱い場所で、杭基礎と同じように構造物の荷重を支えることができて、しかも直接基礎と同じように地盤の揺れが構造物に伝わりにくい構造が実現できれば、今までの杭基礎よりも地震時の安全性を高めることが期待できます。

なぜ杭と土のうを組み合わせるのか

「はじめに」で述べたように、杭基礎では通常、フーチングと杭が剛結されるため、構造物に揺れが伝わってしまいます。そこで、杭とフーチングを切り離してしまえば、地盤が弱い場所でも基礎が構造物を支えることができ、しかも直接基礎と同じように、地震時に構造物に揺れが伝わりにくくなります。ただし、この方法には課題もあります。それは、**図2**に示すように、端に設置した杭に、局所的に水平方向の摩擦力や、鉛直力が作用してしまい、端の杭に大きな負担がかかることです。

そこで、フーチングと杭を切り離したうえで、フーチングと杭の間に『土のう』を挟む新しい基礎構造（以下、提案構造）を提案しています。提案構造の概要を**図3**に示します。なお、ここでの土のうは災害対策等で用いられる一般的な土のうとは違い、橋脚の下のような大きな荷重に耐える必要があるため、引張強度が大きい材料であるジオテキスタイル（※参照）で碎石を囲ったものを用います。

提案構造は、杭を用いて構造物の荷重を支えるため、地盤が軟弱な場所に適用できます。また、杭と構造物を切り離しているため、構造物は直接基礎

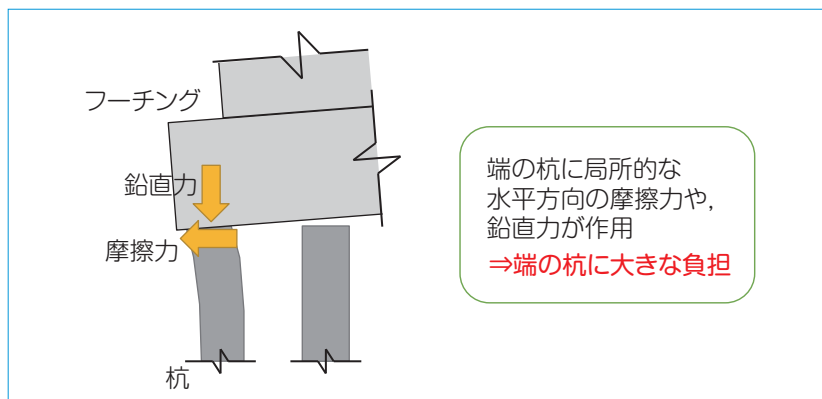


図2 杭とフーチングを切り離した場合の課題

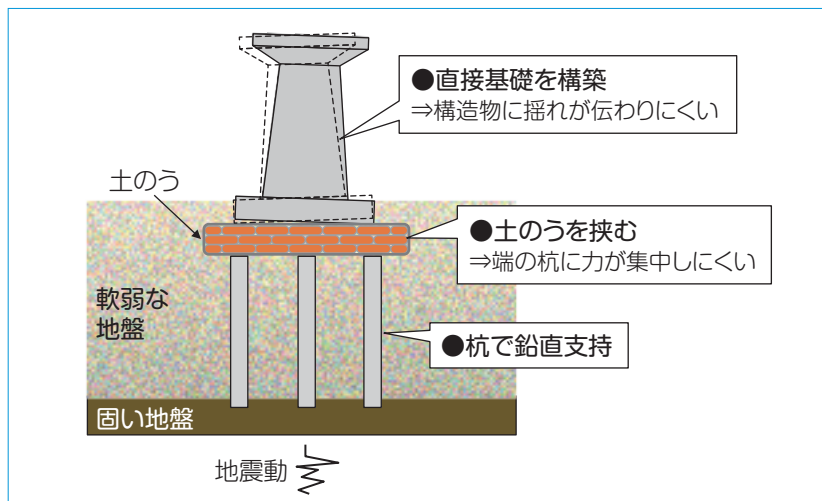


図3 提案構造の概要

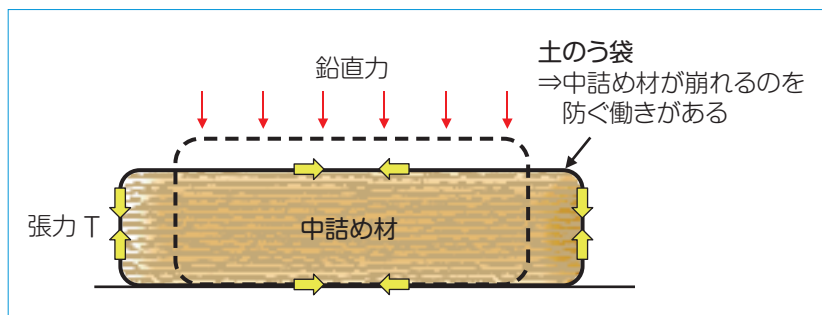


図4 土のう袋の働き

のように振る舞います。このため、地盤の揺れが構造物に伝わりにくく、構造物に生じる力を抑えられる効果も期待できます。

さらに、提案構造は、フーチングと杭頭の間に土のうを挟んでいる点に大

きな特徴があります。土のうに入れる碎石（以下、中詰め材）は、鉛直方向に圧縮力を受けると、横方向に崩れようとしていますが、土のう袋があることにより、中詰め材が崩れるのを防いでくれるため（**図4**）、中詰め材だけを圧縮

※ ジオテキスタイル

土の補強などに用いる合成高分子製の材料で、編んだもの、織ったもの（織布）および織らないもの（不織布）の3種類があります。主として、基礎の支持力を増加させたり、土構造物の安定性を向上させたり、土圧を軽減させたりする目的に利用されます。

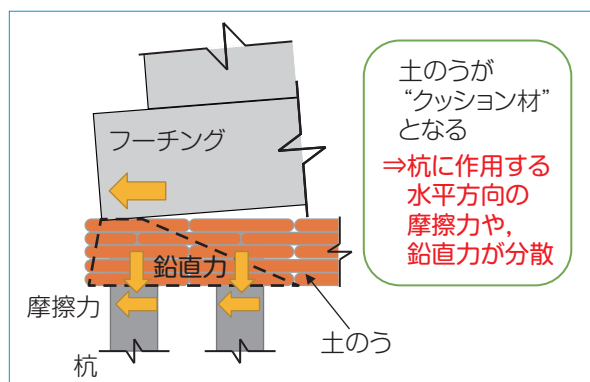


図5 土のうの“クッション材”としての働き

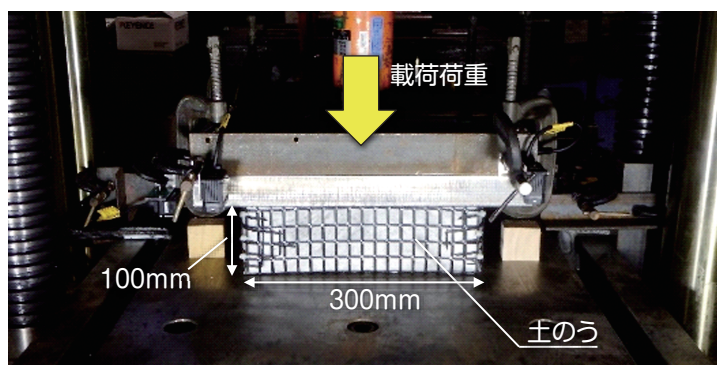


図6 土のうの圧縮試験の概要

した場合よりも、圧縮耐力（土のうが壊れずに耐えられる力）や圧縮剛性（圧縮方向の変形のしづらさ）が高まるということが知られています¹⁾。こうした特徴をもつ土のうは、地震時に構造物が地震を受けて左右に振動し、大きな荷重が作用しても、破壊や変形が生じにくいのです。このため、端に配置した杭に力が集中するのを抑える“クッション材”としての役割を果たすことが期待できます（図5）。

以下では、提案構造の効果を把握するために、土のうの変形の様子を把握する実験や、提案構造全体を模擬した模型実験を行ったので、その内容を紹介します。

土のうはどのように変形するのか

まず、土のうが鉛直方向の圧縮力を受ける場合の圧縮耐力や圧縮剛性を検証するため、土のうの圧縮試験²⁾を行いました。この試験では、実構造物で使用することを想定している、ジオテキスタイルで碎石を囲った土のうに対して圧縮試験を実施しました。土のうのサイズは幅300mm×奥行き300mm×高さ100mmで、実物の1/3程度の大きさです。図6に土のうの圧縮試験の概要を示します。

図7に圧縮試験から得られた土のうの鉛直応力と鉛直ひずみの関係を示します。図7には、一般的な材料の圧縮

特性のイメージもあわせて示しています。一般的な材料では、図7の破線で示すように、ひずみが増加するにしたがって鉛直応力と鉛直ひずみ関係の傾きが緩やかになっていきます。一方、土のうの場合、図7の実線をみるとわかるように、鉛直ひずみが大きくなるにしたがって、鉛直応力と鉛直ひずみ関係の傾きが急になっています。つまり、土のうは鉛直方向にひずむほど、圧縮方向に変形しづらくなり、かつ、大きな荷重にも耐えられることがわかります。

提案構造の効果の検証

杭と土のうを組み合わせた提案構造で、地盤の揺れが構造物に伝わりにくくなる効果や、端の杭に大きな力がかからない効果があることを確認するために、模型振動実験³⁾を行いました。模型振動実験の概要を図8に示します。この実験では、次の3パターンの模型を製作しました。

- 直接基礎：支持地盤上に設置した直接基礎の橋脚
- 杭のみ：杭とフーチングを切り離した橋脚
- 杭+土のう：杭とフーチングを切り離し、間に土のうを挟んだ橋脚（提案構造）

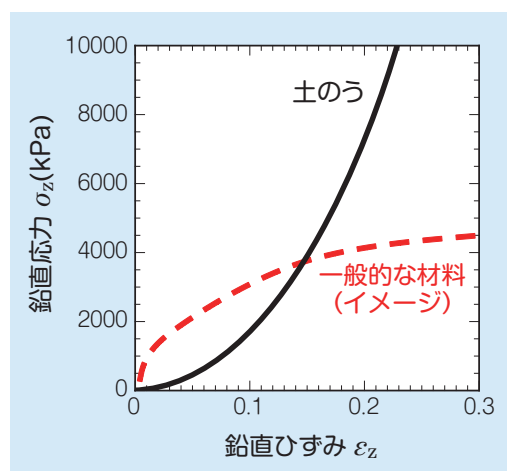


図7 土のうの鉛直応力と鉛直ひずみの関係²⁾

模型の大きさは、実物の1/25としました。製作した模型を、鉄道構造物の耐震設計で用いられる地震動や正弦波で揺らしました。

図9に、鉄道構造物の耐震設計で用いられる地震動で揺らした場合の、最大入力加速度（振動台の最大加速度）と橋脚天端（橋脚の一番上の箇所）の最大応答加速度の関係を示します。図9より、天端の最大応答加速度は、いずれのケースも400gal程度で頭打ちとなっています。このため、杭とフーチングを切り離した橋脚、提案構造とも、直接基礎の橋脚と同じように、構造物に地盤の揺れが伝わりにくいことがわかりました。

次に、土のうを挟むことによる、杭の曲げモーメントの抑制効果について説明します。図10に、正弦波で揺ら

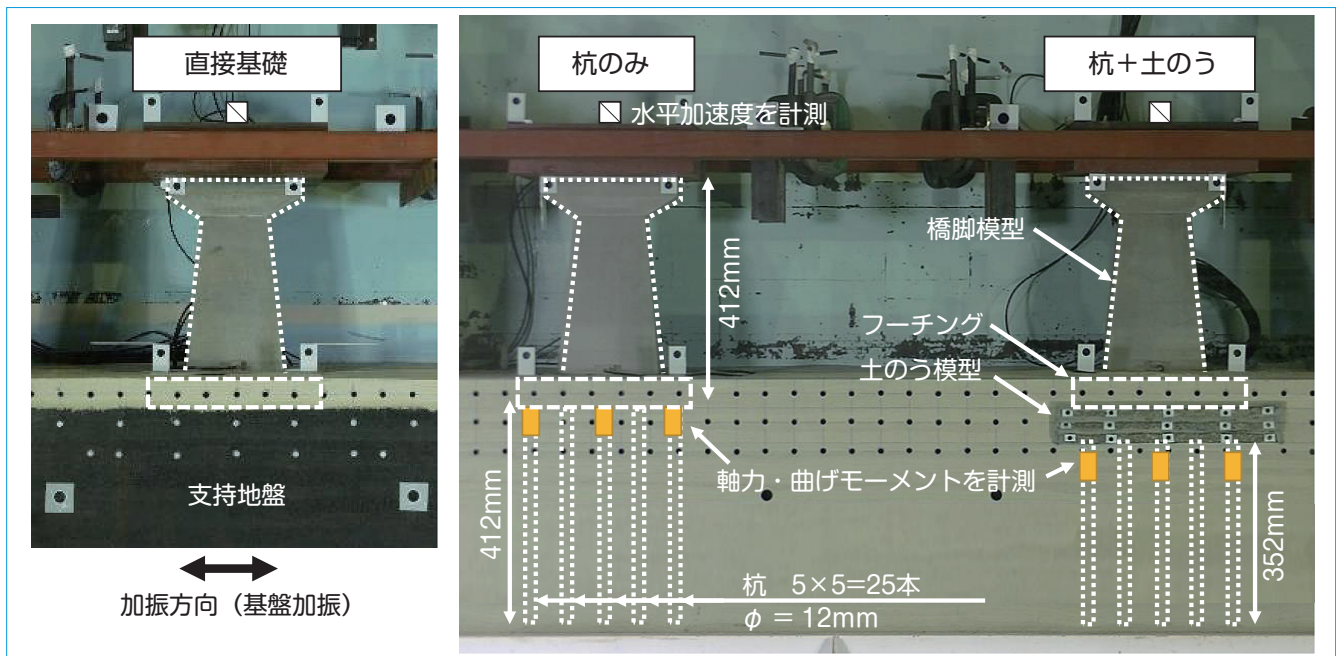


図8 模型振動実験の概要

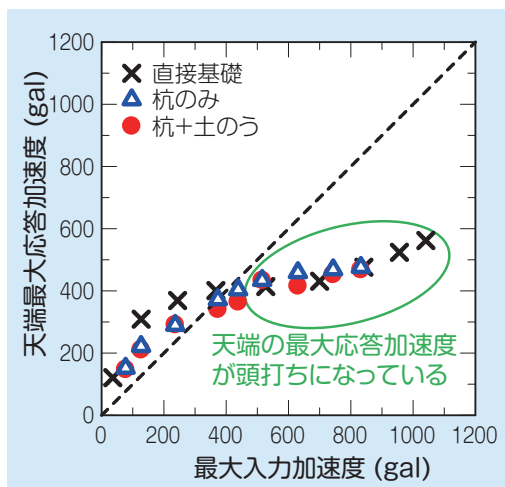


図9 入力加速度と天端の最大応答加速度の関係³⁾

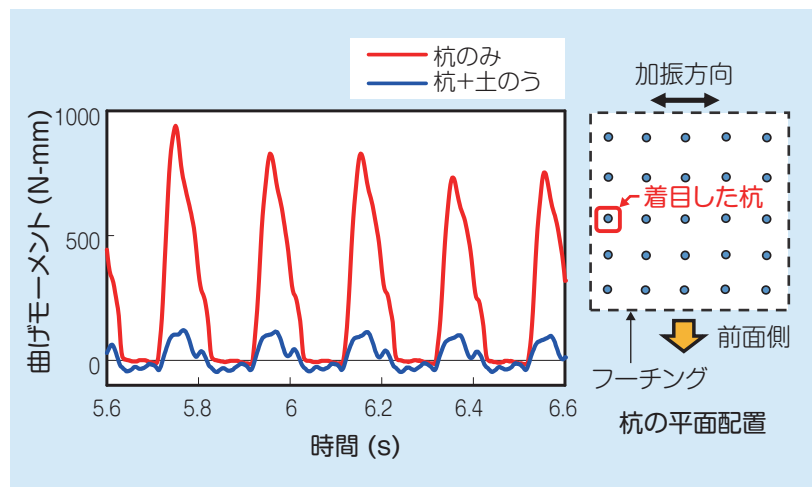


図10 左端の杭の曲げモーメントの変化(正弦波加振)³⁾

した場合、左端の杭の曲げモーメント時刻歴を示します。図10より、杭とフーチングを切り離れた橋脚と比較して、提案構造では、杭の曲げモーメントが大きく低減していることがわかります。このことから、杭とフーチングの間に土のうを挟むことにより、端の杭に大きな力がかかるのを防ぐ効果があることがわかりました。

おわりに

ここでは、杭と土のうを組み合わせ

ることで、地震時の構造物の揺れを抑えることが期待できる新しい基礎構造の研究開発を紹介しました。新たに開発した基礎構造では、フーチングと杭基礎の間に土のうを挟むことにより、構造物に揺れが伝わりにくく、しかも端の杭への力の集中を避けることができます。

今後は、提案構造の適用範囲や施工上の課題点に関する検討など、実用化に向けた研究開発を進めていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 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
- 2) 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
- 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