

# 杭併用土のう基礎の縦ずれ断層変位に対する 優位性に関する基礎的検討

土井 達也<sup>1</sup>・室野 剛隆<sup>2</sup>・張 鋒<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: doi.tatsuya.45@rtri.or.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 研究開発推進部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: murono.yoshitaka.51@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 名古屋工業大学教授 都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: cho.ho@nitech.ac.jp

著者らは軟弱地盤上に直接基礎を構築する手法として、杭併用土のう基礎を提案している。本構造は杭頭に土のうを敷設し、構造物を構築するものであり、もともとは杭とフーチングを分離することにより、応答加速度の頭打ちや、杭頭接合部の省略、杭の小口径化を期待した手法であるが、杭とフーチングの分離により、縦ずれ断層変位に対して従来の杭基礎に比べてフーチングや杭の損傷が抑制され、復旧性が向上する可能性がある。そこで本検討では、提案構造と杭基礎に対して縦ずれ断層変位が作用した場合の変位や断面力を比較した。検討の結果、提案構造では軌道面の変位が杭基礎に比べてやや大きくなるが同程度であること、フーチングの曲げモーメントや杭の応答曲率は杭基礎に比べて大幅に抑制できることを確認した。

**Key Words:** soilbag, pile, spread foundation, pile foundation, fault displacement

## 1. はじめに

内陸活断層による地震では、断層運動に伴って地表断層変位が生じる場合がある。海外における代表的な被災事例としては、1999年のトルコ・コジャエリ地震における道路橋の落橋<sup>1)</sup>や、同年台湾集集地震における石岡ダムの崩落<sup>2)</sup>などが挙げられる。また、国内においては、古くは1891年の濃尾地震の際に、水平方向で最大8.0m、鉛直方向に最大6.0mの地表断層変位が観測された<sup>3)</sup>。近年においても、2014年の長野県北部の地震では、地表断層変位による約95cmの鉛直変位が生じた<sup>4)</sup>。また、2016年の熊本地震においては、横ずれ断層により水平方向に最大2.0m程度の地表断層変位が観測された<sup>5)</sup>。

地表断層変位は土木構造物に甚大な被害をもたらす場合があるため、構造物の計画段階において、既往の断層調査結果等を参考にしながら活断層の近傍を避けるなどの配慮をすることが望ましい。しかし、鉄道や道路といった線状構造物では、線形の関係から活断層と交差して構造物を建設せざるを得ない場合がある。このような場合、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計<sup>6)</sup>では断

層変位の影響を受けにくい構造物(土構造など)を選定することを第一に検討するとよいとされているが、実際には橋梁・高架橋形式を選定せざるを得ない場合がある。このため、橋梁や高架橋が断層変位を受けた際の損傷メカニズム解明や、断層変位の影響を受けにくい橋梁・高架橋形式の開発が喫緊の課題となっている。

これまで、横ずれ断層変位に対しては、断層交差角度に着目した研究<sup>7)</sup>や、PCラーメン高架橋を対象とした損傷メカニズムに関する研究<sup>8)</sup>など、多くの研究がある。一方、縦ずれ断層変位に対する既往の研究として、例えばGazetasら<sup>9)</sup>は、直接基礎および杭基礎の構造物が縦ずれ断層変位を受ける場合の応答を解析的に研究し、縦ずれ断層変位に対しては直接基礎、杭基礎とも、独立フーチングを採用すると上部構造物の被害が大きくなるため、一体型フーチングの採用が望ましいとしている。同様の検討は日野ら<sup>10)</sup>がラーメン高架橋を対象に行っており、地中梁を設置したほうが上部構造物の損傷レベルが小さくなることを示している。Gazetasら<sup>9)</sup>はまた、杭基礎に対しては、フーチングを強く、杭体を弱く設計することで、杭頭に損傷を誘導することが有効であるとしている。

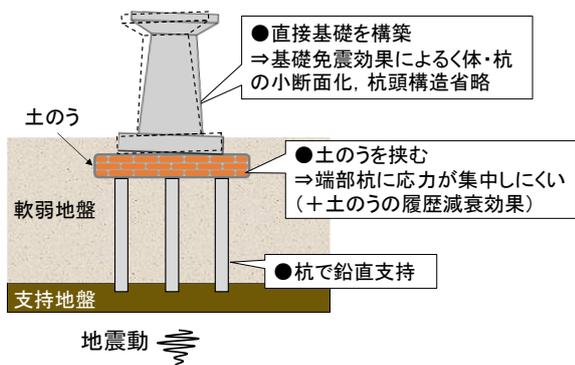


図-1 杭併用土のう基礎の概要<sup>14)</sup>

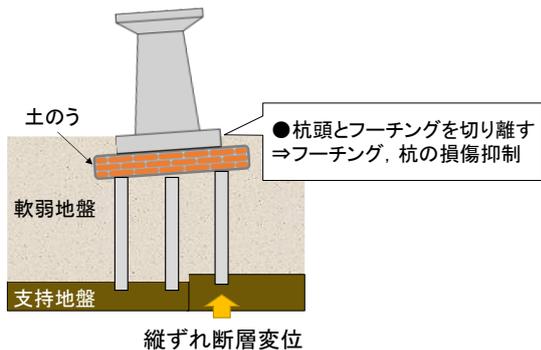
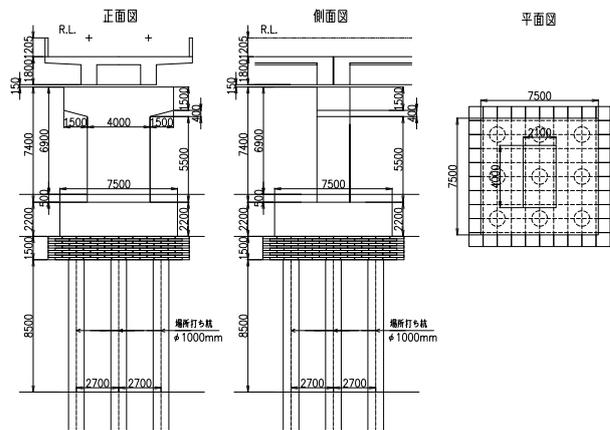


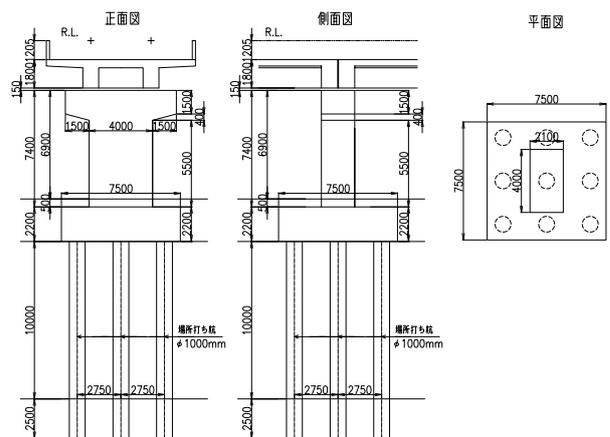
図-2 杭併用土のう基礎に縦ずれ断層変位が作用した場合の応答のイメージ

日野ら<sup>10)</sup>は縦ずれ断層変位の影響を受けにくい高架橋として1径間の直接基礎形式のラーメン高架橋を提案している。また、鈴木ら<sup>11)</sup>は、台湾集集地震で落橋や橋脚のせん断破壊などの被災を受けた烏溪橋を対象に、被害の主たる原因を縦ずれ断層変位と考えた場合の解析的検討を行っている。同様に、Linら<sup>12)</sup>は台湾集集地震で複数径間の単純支持桁が落橋の被害を多く受けたことを念頭に、3径間の単純支持桁を対象に縦ずれ断層変位による落橋メカニズムをFEM解析により研究している。このように、縦ずれ断層変位に対しても近年、構造物の被災メカニズムや対策工法の研究が進んでいるが、特に、軟弱地盤上で適用できる有効な対策工法の提案が必要といえる。

以上の背景および既往の研究を踏まえ、本研究では、著者らが提案している杭併用土のう基礎<sup>13),14)</sup>など(以下、提案構造)に縦ずれ断層変位が作用した際の、杭基礎に対する優位性について検討する。提案構造のもともとのコンセプトは、図-1のように、杭とフーチングを緩衝材の役割を有する土のうを介して分離することにより、地震時にく体の応答加速度の頭打ちや、杭頭接合部の省略、杭の断面力の低減を実現することである。これに加え、図-2に示すように、縦ずれ断層変位に対しても、杭頭とフーチングを分離することで、従来の杭基礎に比べてフーチングや杭などの部材の損傷レベルを抑制でき、復旧



(a) 提案構造



(b) 杭基礎

図-3 検討対象構造物

性の向上につながると考えられる。この概念は、上述したGazetasら<sup>9)</sup>の「杭頭を損傷させることで上部構造物の被災を軽減できる」という指摘とも調和的である。本研究では基礎的検討として、提案構造と杭基礎について、縦ずれ断層変位を作用させた場合のフーチングや杭の断面力や損傷レベルを数値解析により試算し、提案構造の優位性を検討する。

## 2. 解析モデルおよび解析条件

### (1) 検討対象構造物と検討の概要

検討対象構造物を図-3に示す。橋脚と上部工は、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)<sup>15)</sup>と同様の諸元とした。土のうの部分は、著者らが実施した既往の検討<sup>10)</sup>と同様に、土のう袋にジオテキスタイル(規格値<sup>17)</sup>より、引張変形係数980kN/m、引張耐力69kN/m)、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、断層変位に対して積み重ねた土のうを一体に挙動するよう、外側からジオテキス

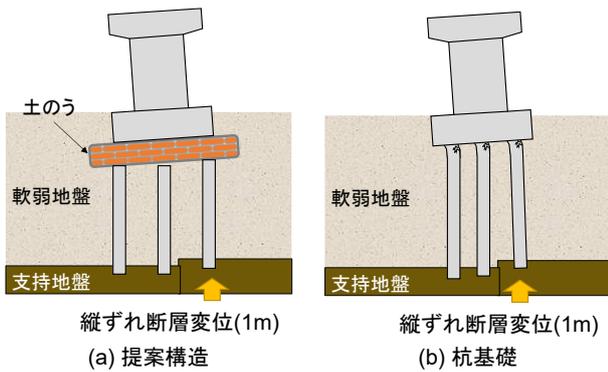


図4 検討概要

タイルで一体化して構築することを想定した。杭諸元については、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。図-4 に検討概要を示す。本検討で作用させる断層変位量であるが，地表断層変位は断層の規模や深さ，沖積層の厚さなど多くの要因が関係しており，地表断層変位を考慮した耐震設計の際には慎重に決める必要がある<sup>18)</sup>が，本研究は提案構造と杭基礎の断層変位を受けたときの性能の相対的な比較を目的としているため，ここでは作用させる断層変位量を 1m と設定した。断層変位の作用角度は単純なケースとして，地表面の方向に対して 90°とし，提案構造，杭基礎それぞれ，右杭の先端地盤および周面地盤から作用する場合を検討した。簡単のため，隣接構造物による桁の拘束効果は考慮せず，上部工は質量要素としてモデル化した。地盤条件は表-1 に示すとおりとし，表層地盤として N 値 10 の粘性土地盤が 10 m 分布する条件を想定した。なお，地下水位は考慮しない。

(2) 解析モデルおよび解析条件

提案構造および杭基礎は，既往検討<sup>16)</sup>で用いたモデルと同様に，実績のある梁ばねモデルでモデル化した。図-5 に解析モデルを示す。断層変位については，杭先端の鉛直ばねおよび杭周面の鉛直ばねの，杭側ではない方の節点に鉛直方向の強制変位として作用させた。

解析モデルの詳細は既往検討<sup>16)</sup>で述べているが，重要であるため概略を再掲する。提案構造の土のうについては土のう部分は応力を評価する目的で，平面ひずみ要素でモデル化した。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。また，土のうの物性は，図-6 の赤線に示す単体の土のうの圧縮解析から得られた鉛直応力 - 鉛直ひずみ関係と概ね等価となる弾性体（青線）とした。なお，土のうを包むジオテキスタイルの効果は，図-6 の赤線の結果に含まれるため，図-5(a)のモデルには土のうを包むジオテキスタイルのばね要素は設定しない。土のうの変形係数は図-6 の青線に

表-1 地盤条件

層厚 (m)	土質	N 値	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	変形係数 (kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (deg)
2.7	砂質土	2	18	55835	0.0	30
10	粘性土	10	16	225736	62.5	0.0
2.5	砂質土	50	19	1019160	0.0	43

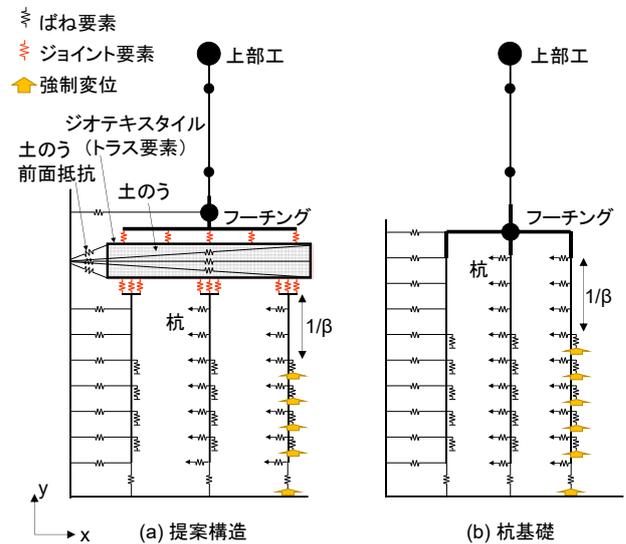


図-5 解析モデル

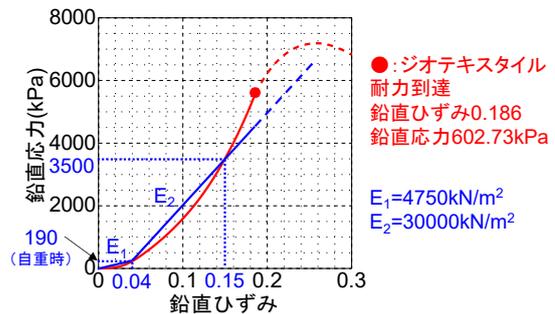


図-6 土のうの変形係数の設定

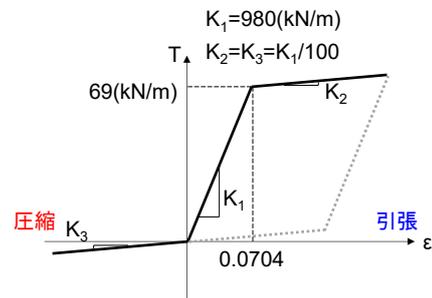
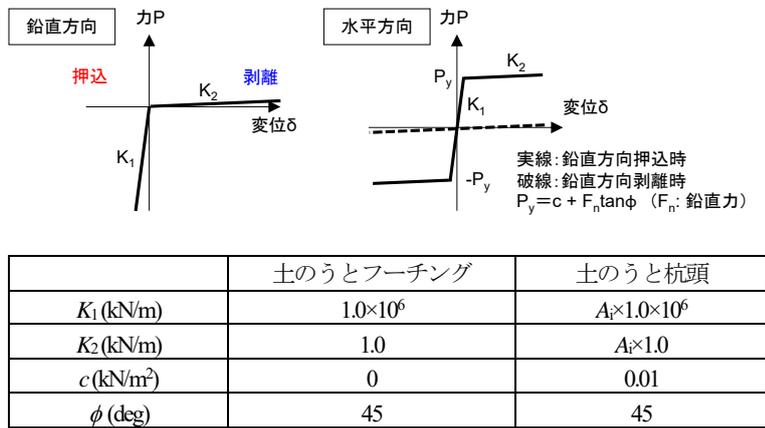
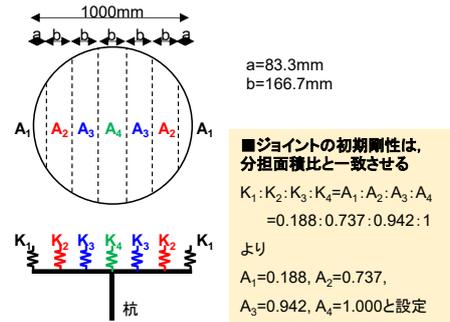


図-7 土のう一体化用ジオテキスタイルの非線形特性

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。中詰め材の単位体積重量は，既往の土のうの圧縮試験<sup>19)</sup>と同様に  $1.8 \text{ t/m}^3$



(a) ジョイント要素のパラメータの設定値



(b) 杭頭ジョイント要素の初期剛性の設定

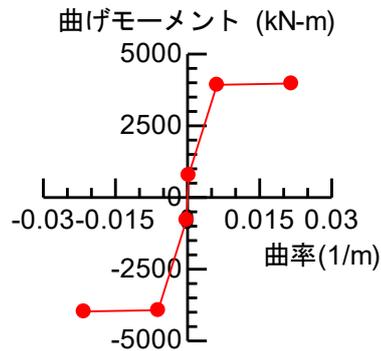
図-8 ジョイント要素の特性

とした。

土のう一体化用ジオテキスタイル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。物性は、土のうのジオテキスタイルと同様とした。図-7に土のう一体化用ジオテキスタイルの非線形特性を示す。なお、提案構造のモデルにおいて、く体および杭はフーチングの奥行き 7.5 m 分を考慮しているため、土のうの単位体積重量は  $1.8 \text{ t/m}^3$  の 7.5 倍の値、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、図-6、図-7 の値の 7.5 倍の値を実際に入力値とした。また、提案構造では、実現象では土のう下面と接する杭間地盤が杭とともに上向きに変位して土のうと接することで、土のうの応力が緩和される可能性も考えられるが、断層変位が作用した場合の土のうと杭間地盤の接触状況には不確実性が大きいこと、杭基礎のケースで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。

提案構造の土のうとフーチング、土のうと杭の境界面はジョイント要素でモデル化した。それぞれのジョイント要素の特性を図-8に示す。ジョイント要素の摩擦角  $\phi$  は、施工段階で摩擦を十分に確保するよう配慮するものとして、 $45^\circ$  と仮定した。なお、杭頭のジョイント要素については、図-8(b)に示すように、初期剛性の比を分担面積の比と一致するように設定した。

図-9に場所打ち杭の非線形特性を示す。場所打ち杭の非線形特性は自重状態の軸力におけるひび割れ(C)、降伏( $Y_b$ )、最大耐力(M)点を結ぶトリリニアモデルでモデル化し、履歴ルールはClough型モデルを適用した。また、提案構造モデルの杭頭には土のうと杭頭の接触面積を考慮するため、十分に剛性の大きい梁部材を配置した。フーチングは剛域とした。フーチングの重量については、自重解析時では全重量を考慮し、断層変位を入力する解析では地震時の検討に準じて有効重量<sup>9)</sup>を考慮した。地盤ばねについて、断層変位作用時の杭の支持力について



$M_c$ (kN-m)	$M_{Yb}$ (kN-m)	$M_m$ (kN-m)
$\phi_c$ (1/m)	$\phi_{Yb}$ (1/m)	$\phi_m$ (1/m)
780.92	3929.07	3973.71
$2.20 \times 10^4$	$5.365 \times 10^3$	$2.1586 \times 10^2$

図-9 場所打ち杭の非線形特性

は十分な知見がないが、本検討は提案構造と杭基礎の断層変位に対する性能の比較が目的であるため厳密な議論は避け、通常の耐震設計と同様に鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物<sup>20)</sup>により水平、鉛直、杭先端、フーチング前面の地盤ばねをバイリニア型のばねでモデル化した。さらに、杭の支持力の推定精度の不確実性による感度を確認するため、基礎の支持力を2倍にした検討も実施した。なお、杭周面の鉛直ばねは、 $1/\beta$ 以深において考慮した。ここで、 $\beta$ は杭の特性値である。

解析は、自重解析を行った後、断層変位 1m を強制変位として杭先端ばねおよび杭周面ばねを介して入力する静的非線形解析により行った。ステップ数は、自重解析、断層変位を入力する解析とも、1000 ステップとした。

### 3. 解析結果および考察

本章では、まず基礎の支持力をもとの値とした条件で、断層変位が作用した際の変形モードおよび軌道面の変位、フーチングの曲げモーメント、杭の損傷レベル、提案構

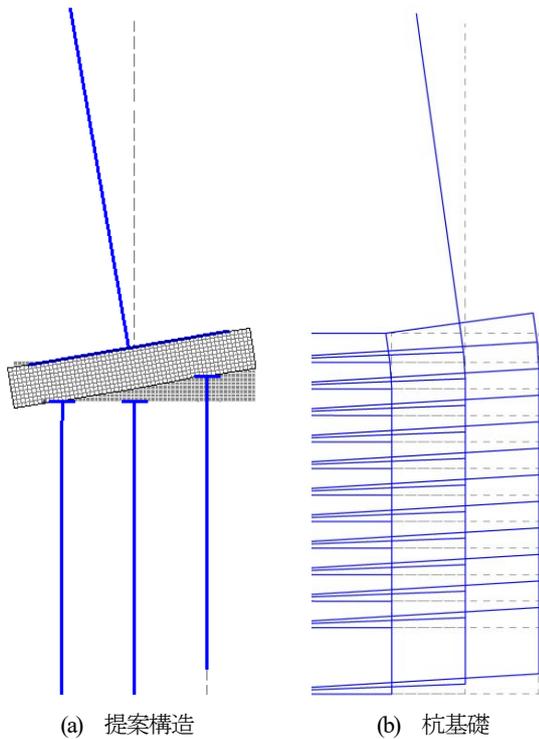
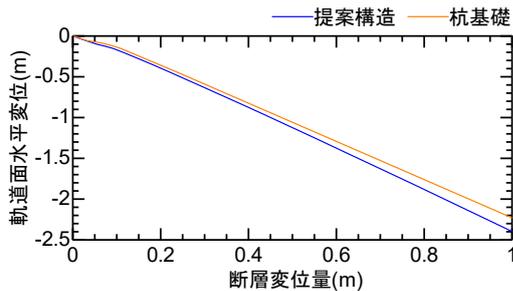
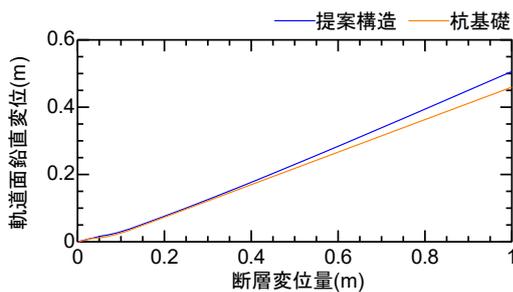


図-10 断層変位 1m 作用時の変形モードの比較



(a) 軌道面水平変位—断層変位量関係 (右向き正)



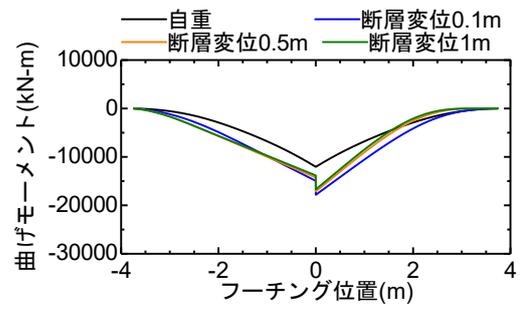
(b) 軌道面鉛直変位—断層変位量関係 (上向き正)

図-11 軌道面変位—断層変位量関係

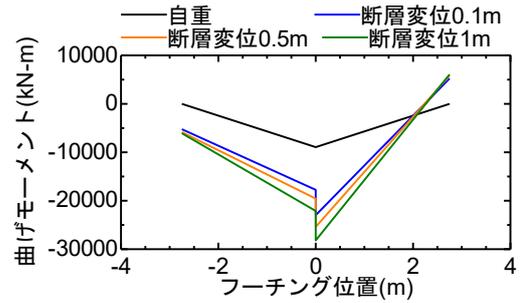
造の土のうの応力について比較と考察を行う。次に、基礎の支持力をもとの値とした結果と2倍とした結果とを比較し、基礎の支持力による感度を確認する。

### (1) 変形モードおよび軌道面の変位

図-10 に断層変位 1m 作用時の変形モードの比較を示



(a) 提案構造



(b) 杭基礎

図-12 自重状態、断層変位 0.1m, 0.5m, 1.0m 時のフーチングの曲げモーメント図 (フーチング上側引張が正)

す。また、図-11 に各検討の軌道面変位—断層変位量関係を示す。図-10(a)より、提案構造では右杭が土のうおよびく体を持ち上げることで、中央杭が土のうから離れ、左右の杭でく体と土のうが支持されている。また、杭とフーチングを分離しているため、杭に大きな曲げ変形は認められない。一方、図-10(b)より、杭基礎では、杭とフーチングを剛結しているため、断層変位の作用により杭頭付近で曲げ変形が生じていることがわかる。断層変位 1m 作用時の軌道面変位量は、水平方向については図-11(a)より、提案構造で 2.4m、杭基礎で 2.2m である。鉛直方向については図-11(b)より、提案構造で 0.51m、杭基礎で 0.46m である。水平、鉛直いずれも、提案構造のほうがやや (1 割程度) 大きい、同程度の変位量である。

以上より、軌道面変位は鉛直方向、水平方向とも、提案構造のほうが杭基礎よりもやや大きくなるが、同程度となることがわかった。

### (2) フーチングの曲げモーメント

図-12 に自重状態、断層変位 0.1m, 0.5m, 1.0m 時のフーチングの曲げモーメント図を示す。また、フーチングの曲げモーメントの考察に関連して、図-13 に杭頭軸力と断層変位量の関係を示す。ただし軸力は引張を正としている。図-12(a)より、提案構造では断層変位が増加してもフーチングの曲げモーメントは自重状態からあまり増加しない。これは、杭とフーチングが切り離されているため、断層変位によって杭が持ち上げられても、フーチ

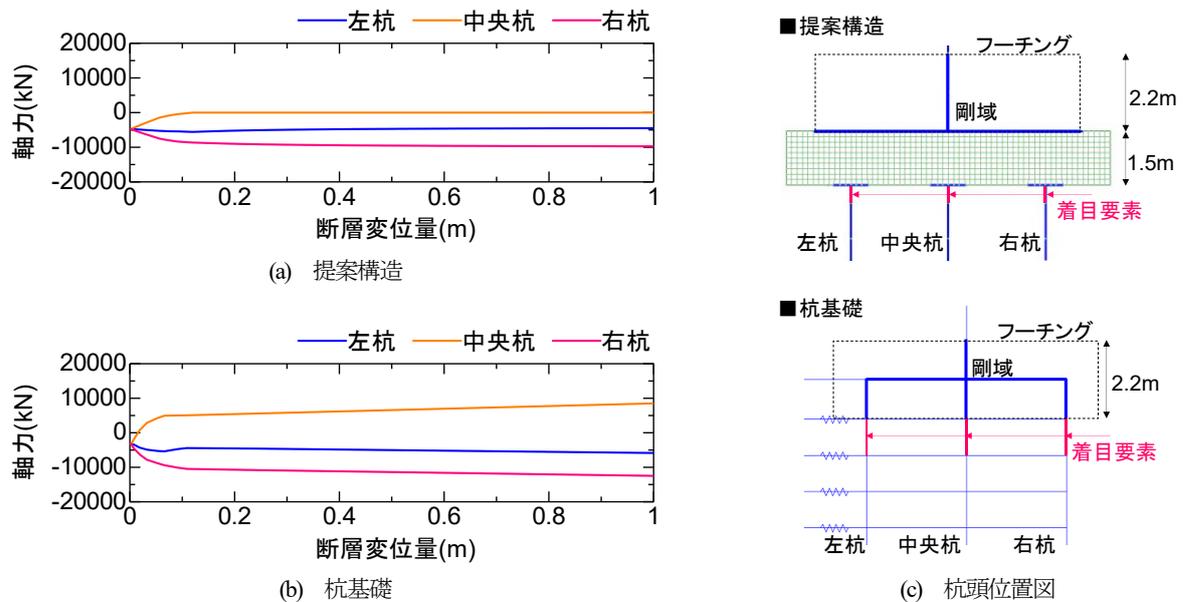


図-13 杭頭軸力-断層変位量関係（軸力は引張が正）

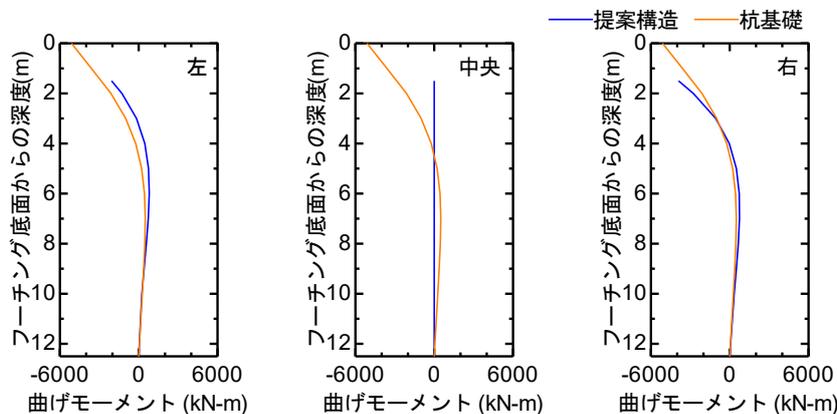


図-14 断層変位 1m 作用時の杭曲げモーメントの比較

ングが土の上で回転して、フーチング底面の地盤反力分布が多少変化する程度であるためと考えられる。このとき、図-13(a)より、提案構造の杭頭には引抜力が作用せず、(1)で考察したように断層変位が大きくなるにつれ左杭と右杭で圧縮力を分担するようになる。一方、図-12(b)より、杭基礎ではフーチングの曲げモーメントが提案構造に比べてかなり大きいこと、断層変位が増加するにつれてフーチングの曲げモーメントが増加し続けることがわかる。これは、杭頭とフーチングが剛結されていて、杭頭で軸力や曲げモーメントがフーチングに伝達するためと考えられる。図-13(b)より、杭基礎では断層変位を受ける右杭と、その反対側の左杭で圧縮力を、中央杭で引抜力を分担しており、図-12(b)のフーチングの曲げモーメントの結果と対応している。

以上より、提案構造の採用により、断層変位に対してフーチングの曲げモーメントを大幅に抑制できることがわかった。

### (3) 杭の曲げモーメント分布と応答曲率

図-14に断層変位 1m 作用時の杭曲げモーメントの比較を示す。図-14より、提案構造は杭基礎よりも曲げモーメントの最大値が小さい。また、提案構造では土のうと接している左杭と右杭に曲げモーメントが発生している一方、杭基礎ではすべての杭に曲げモーメントが発生している。これらは、杭基礎においてはフーチングと杭が剛結されていることが原因である。

次に、図-14で曲げモーメントの最大値が生じている杭頭部について、曲げモーメント-曲率関係を図-15に、曲げモーメント-断層変位量関係を図-16に示す。図-15より、提案構造の杭は降伏点( $Y_b$ )を超過していないが、杭基礎では図-9に示す最大耐力点( $M$ )の曲率を大幅に超過していることがわかる。また、図-16より、提案構造では断層変位の増加に対する曲げモーメントの増加が緩やかであるが、杭基礎では提案構造よりも曲げモーメントの増加が急であり、0.1m程度の断層変位が作用した時

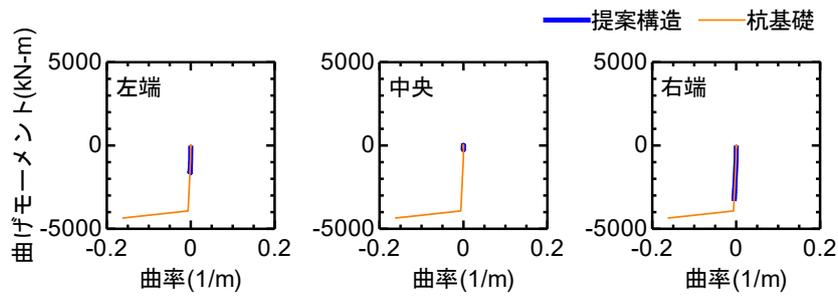


図-15 杭頭の曲げモーメントー曲率関係

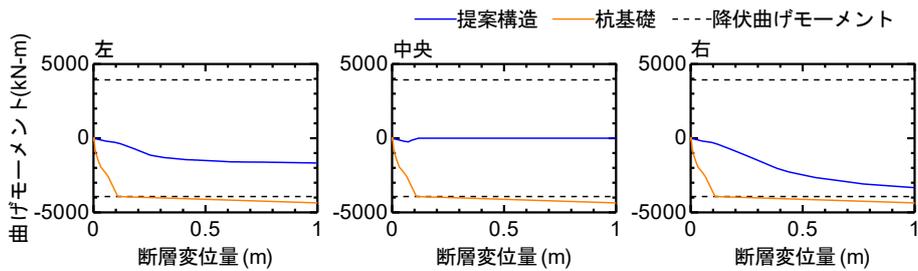


図-16 杭頭曲げモーメントー断層変位量関係

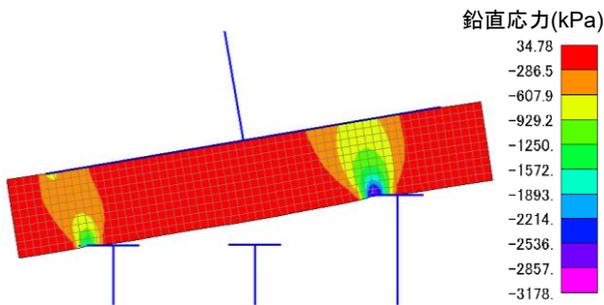


図-17 断層変位 1m 作用時の提案構造の土のうの鉛直応力 (引張が正)

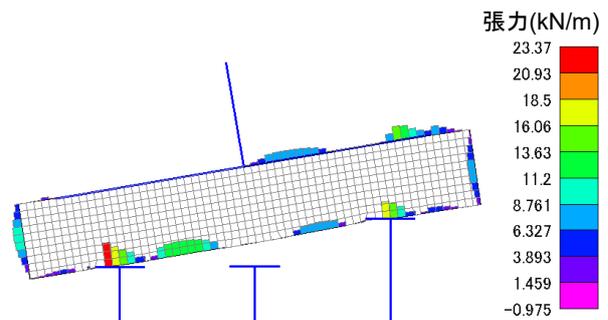


図-18 断層変位 1m 作用時の一体化用ジオテキスタイルの張力 (引張が正)

点で降伏点( $Y_b$ )のモーメントを超過している。

以上より、提案構造は杭基礎に比べ、断層変位作用に対して杭の損傷を大幅に抑制可能であることがわかった。

#### (4) 提案構造の土のうの応力

断層変位作用時の土のうの健全性を確認するため、土のうの応力状態および、積層した土のうを一体化するジオテキスタイルの張力を確認する。

断層変位 1m 作用時の提案構造の土のうの鉛直応力を図-17に示す。また、断層変位 1m 作用時の提案構造の一体化用ジオテキスタイルの張力を図-18に示す。コンターは引張を正とし、コンターのレンジは最大値、最小値に調整している。図-17より、土のうが左右杭の直上で鉛直応力を分担している。圧縮方向の鉛直応力の値は図-6に示す単体の土のうの圧縮耐力 (6027.3kPa) 以内である。また、図-18より、一体化用ジオテキスタイルの張力は杭頭直上、杭間、フーチング下の右側などで生じているが、引張耐力 69kN/m 以内となっている。

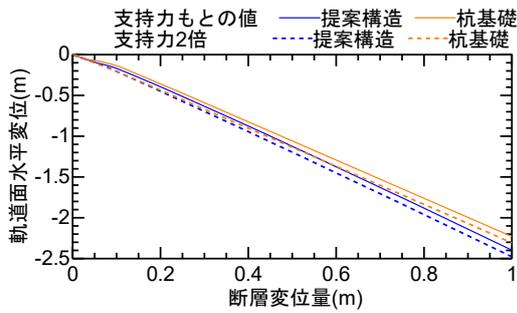
以上より、提案構造の土のうは今回想定した断層変位作用に対して健全であることが確認できた。

#### (5) 基礎の支持力の影響

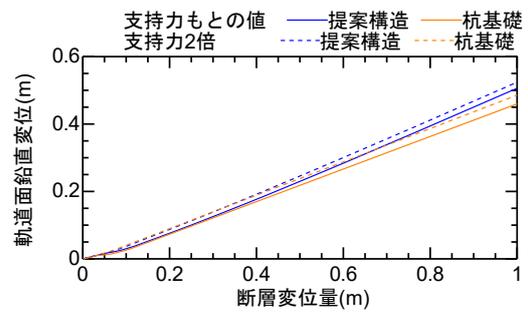
ここでは(1)~(4)で示した基礎の支持力をもとの値とした結果と、2倍の値とした結果を比較し、基礎の支持力による結果に対する感度を確認する。

##### a) 軌道面の変位に対する影響

図-19に軌道面水平変位ー断層変位量関係を示す。また、後の考察で重要であるため、図-20に杭先端ばねおよび杭周面ばねの履歴曲線を示す。図-20は地盤に対して杭が押込まれる方向を正としている。図-19より、提案構造、杭基礎とも、基礎の支持力を2倍としたほうが若干、軌道面の水平変位や鉛直変位が増加している。これは、図-20に示すように、支持力が増加することで、断層変位が作用する右杭の先端ばねや周面ばねの塑性化の程度が小さくなってばね変位が小さくなり、断層変位がより構造物に伝達しやすくなったことが原因と考えら

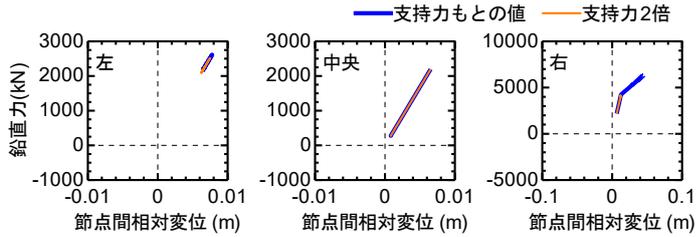


(a) 軌道面水平変位—断層変位量関係 (右向き正)

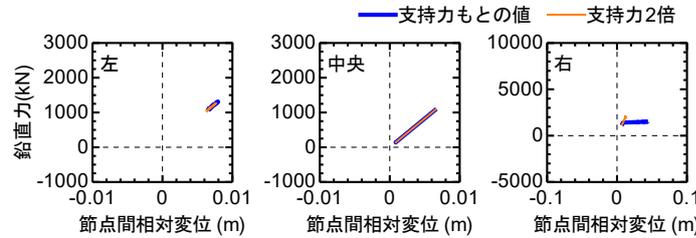


(b) 軌道面鉛直変位—断層変位量関係 (上向き正)

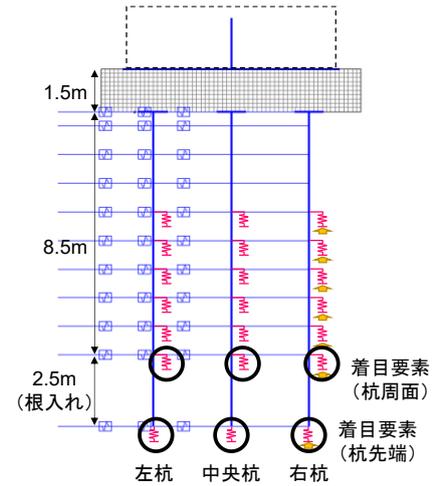
図-19 軌道面変位—断層変位量関係



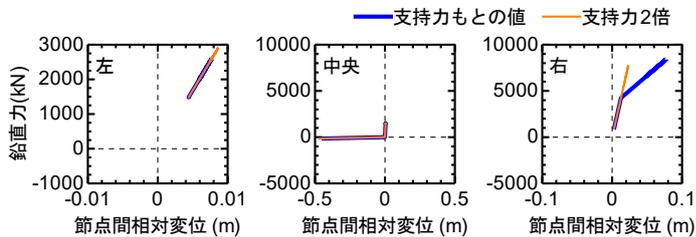
(a) 提案構造 杭先端ばね



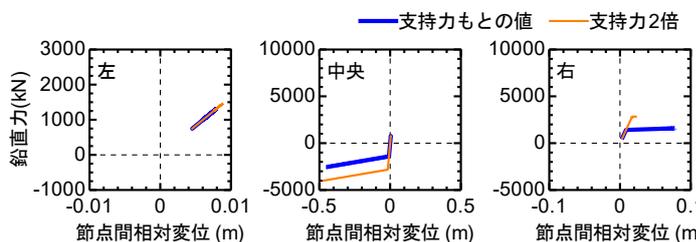
(b) 提案構造 杭周面ばね



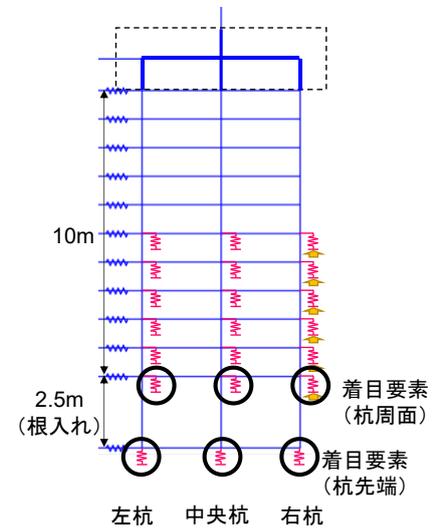
(c) 提案構造の着目ばね位置図



(d) 杭基礎 杭先端ばね



(e) 杭基礎 杭周面ばね



(f) 杭基礎の着目ばね位置図

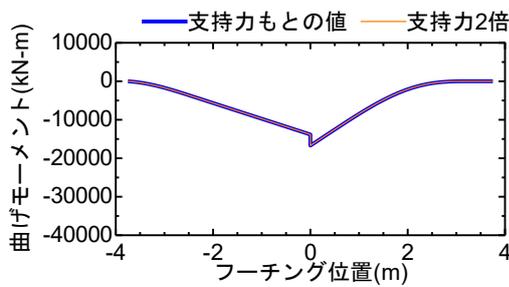
図-20 杭先端ばねおよび杭周面ばねの履歴曲線 (レンジは適宜変更している, 押し込み方向为正)

れる。

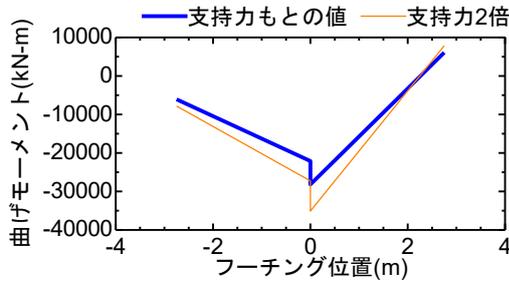
b) フーチングの曲げモーメントに対する影響

図-21に、断層変位が1m作用した場合のフーチングの曲げモーメントの比較を示す。また、図-22に杭頭軸力と断層変位量の関係を示す。軸力は引張を正としている。図-21(a)より、提案構造においては、基礎の支持力を2倍

としてもフーチングの断面力には大差ない。これは、(2)でも考察したように、杭が断層変位により持ち上げられても、フーチングが土の上で回転するだけであることが原因と考えられる。また、図-22(a)より、杭頭軸力も基礎の支持力によってほとんど変動がない。一方、図-21(b)より、杭基礎においては、基礎の支持力を2倍

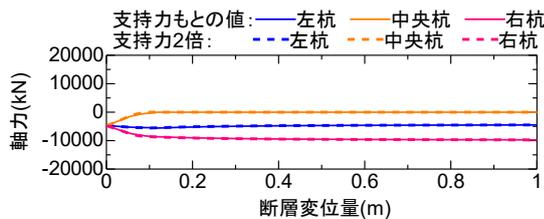


(a) 提案構造

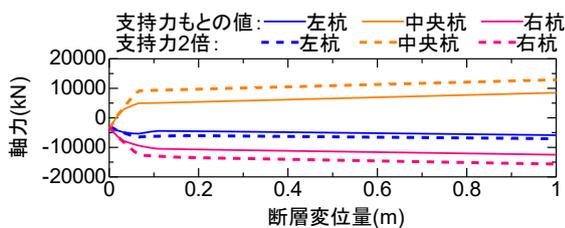


(b) 杭基礎

図-21 断層変位 1m 作用時のフーチングの曲げモーメント図 (フーチング上側引張が正)

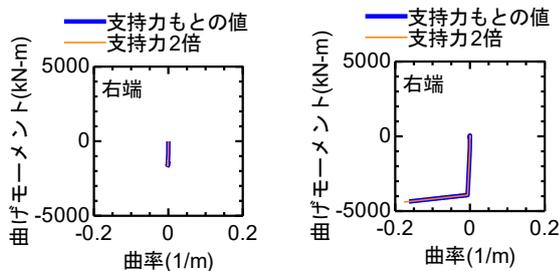


(a) 提案構造



(b) 杭基礎

図-22 杭頭軸力ー断層変位量関係 (軸力は引張が正)



(a) 提案構造

(b) 杭基礎

図-23 右杭頭の曲げモーメントー曲率関係

とした場合にはフーチングの曲げモーメントが大きくなることがわかる。これは、図-22(b)の杭頭軸力図をみるとわかるように、杭の支持力が増加することで、同じ断層変位量が生じた際に杭が負担する軸力がより大きくなり、杭と剛結されているフーチングの曲げモーメントを増加させたことが原因と考えられる。

### c) 杭の応答曲率に対する影響

図-14 で、検討したケースで全体的に曲げモーメントの応答値が大きい右杭の杭頭要素について、曲げモーメントー曲率関係を比較する。図-23 に右杭頭の曲げモーメントー曲率関係を示す。杭基礎においては基礎の支持力を2倍としたほうがわずかに応答曲率が大きいですが、提案構造、杭基礎とも全体としては応答曲率に大差はなく、基礎の支持力の応答曲率に対する感度は小さい結果となった。

以上の a)~c)より、提案構造、杭基礎とも、基礎の支持力が大きいほど軌道面の変位は大きくなることがわかった。また、提案構造においては、基礎の支持力のばらつきが杭やフーチングの曲げモーメントに及ぼす感度は小さい一方で、杭基礎では基礎の支持力が大きくなると、杭の応答曲率はあまり変化しないものの、フーチングの曲げモーメントは大きくなることがわかった。

## 4. まとめ

本研究では、著者らが提案する杭併用土のう基礎と杭基礎と、同一のく体諸元の杭基礎を対象に、縦ずれ断層変位を作用させた場合の応答変位やフーチング、杭の断面力を数値解析により試算し、提案構造の優位性を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 軌道面変位は鉛直方向、水平方向とも、提案構造のほうが杭基礎よりやや大きくなるが、同程度である。
- (2) 提案構造は杭基礎に比べ、断層変位作用に対してフーチングの断面力や杭の応答曲率を大幅に抑制できる。
- (3) 提案構造の土のうの鉛直応力および、積み重ねた土のうを一体化するジオテキスタイルの張力は、今回想定した断層変位作用 (1m の鉛直変位) に対して耐力以内となり、想定した作用に対して健全である。
- (4) 提案構造、杭基礎とも、基礎の支持力が大きいほど軌道面の変位は大きくなる。また、提案構造においては、基礎の支持力のばらつきが杭やフーチングの曲げモーメントに及ぼす感度は小さい。一方、杭基礎では、基礎の支持力が大きくなると、杭の応答曲率はあまり変化しないものの、フーチ

ングの曲げモーメントは大きくなる。

今後の課題としては、縦ずれ断層変位の作用位置や作用角の影響、横ずれ断層変位に対する適用性、慣性力と断層変位の同時作用の影響に関する検討などが挙げられる。

## 参考文献

- 1) 川島一彦, 橋本隆雄, 鈴木猛康: トルコ・コジャエリ地震による交通施設の被害概要, 第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 409-416, 1999.
- 2) 川島一彦, 家村浩和, 庄司学, 岩田秀治: 1999年集集地震(台湾)における道路橋の被害, 第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 425-432, 1999.
- 3) 中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会: 1891 濃尾地震 報告書, 2006.
- 4) 勝部亜矢, 近藤久雄, 谷口薫, 加瀬裕子: 2014年長野県北部の地震(Mw6.2)に伴う地表地震断層の分布と変位量, 地質学雑誌, Vol. 123-1, pp. 1-21, 2017.
- 5) 土木学会: 地震被害調査シリーズ I 2016年熊本地震被害調査報告書, 丸善出版, 2017.
- 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) 室野剛隆, 弥勒綾子, 紺野克昭: 断層交差角度に着目した橋梁の挙動に関する基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, 2003.
- 8) 浦川洋介, 吉川卓, 大塚久哲, 角本周: 橋軸直角方向の断層変位に対する連続ラーメン橋の地震性能に関する一検討, 第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2006.
- 9) Gazetas, G., Pecker, A., Faccioli, E., Paolucci, R., Anastasopoulos, I: Preliminary design recommendations for dip-slip fault-foundation interaction, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, pp. 677-687, 2008.
- 10) 日野篤志, 室野剛隆: 縦ずれ断層の影響を受けにくい新しいラーメン高架橋形式の提案, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 7, pp. 47-52, 2017.
- 11) 鈴木直人, 幸左賢二, 田崎賢治: 断層変位を受ける連続橋の被災メカニズムに関する解析的研究, 第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム, pp. 133-136, 2000.
- 12) Lin, Y., Zong, Z., Lin, J., Li, Y., Chen, Y.: Across-fault ground motions and their effects on some bridges in the 1999 Chi-Chi earthquake, *Advances in Bridge Engineering*, Vol. 2, pp. 1-21, 2021.
- 13) 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.
- 14) 土井達也, 室野剛隆, 張鋒: 杭と土のうを併用した基礎免震工法への取り組み, 基礎工 8月号, 2021.
- 15) (公財) 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.
- 16) 土井達也, 室野剛隆, 張鋒: 小径杭併用土のう基礎の地震応答特性と杭基礎に対する優位性, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 77, No. 1, pp. 42-58, 2021.
- 17) RRR 工法協会: RRR-B 工法材料マニュアル, 2013.
- 18) 常田賢一: 土木構造物における地震断層変位の工学的対応に関する考察, 土木学会論文集, No. 752/I-66, pp. 63-77, 2004.
- 19) 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.
- 20) 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.

## FUNDAMENTAL STUDY ON SUPERIORITY OF FOUNDATION COMPOSED OF SOILBAGS AND PILES AGAINST VERTICAL FAULT DISPLACEMENT

Tatsuya DOI, Yoshitaka MURONO and Feng ZHANG

The authors have proposed a new type “spread foundation” composed of micropiles and soilbags as a method of constructing a spread foundation on soft ground. By separating the piles and the footing, the response acceleration can be reduced, the pile-head joints can be omitted, and the diameter of the piles can be reduced. Moreover, the separation of the piles and the footing may reduce the damage of the footing and the piles and improve the recoverability against the vertical surface fault displacement. In this study, therefore, the displacement and cross-sectional forces of the proposed structure and the pile foundation under the vertical surface fault displacement were compared analytically. The analysis results showed that the bending moment of the footing and the response curvature of the piles can be suppressed significantly compared to the pile foundation, although the displacement at the track may be slightly larger in the proposed structure than in the pile foundation.