

鉛直地盤ばねによる埋戻し土を考慮した直接基礎の浮き上がり・滑り現象の検討

山下 典彦¹・久保田 晃平²・宮脇 幸治郎³

¹正会員 大阪産業大学教授 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)
E-mail: yamasita@ce.osaka-sandai.ac.jp

²学会会員 大阪産業大学大学院 工学研究科都市創造工学専攻 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)
E-mail:s22mk01@ge.osaka-sandai.ac.jp (Corresponding Author)

³元大阪府立工業高等専門学校 (〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町 26-12)

地震時に直接基礎端部の浮き上がりによる非線形挙動が生じ、基礎底面地盤が大きく塑性化する場合はあるが、その浮き上がり・滑り現象の動的相互作用について、地盤ばねのエネルギー収支に着目した研究は少ない。本研究では、直接基礎で支持される RC 橋脚を対象に回転地盤ばねを鉛直地盤ばねに置き換え、浮き上がり機構を Mechanical モデルで表現し、非線形応答解析を実施する。そして、地盤ばねのエネルギー収支の観点から埋戻し土を考慮した直接基礎の浮き上がり・滑り現象について検討する。

Key Words: Energy balance, Slide phenomena, Vertical soil spring, Stepping effect, Spread foundation

1. はじめに

エネルギーにおける研究では、加藤ら¹⁾が Housner の研究を発展させ、エネルギー入力を地震動の継続時間内に構造物に加えらるる総エネルギー量であることを定義し、西澤ら²⁾が主要動付近の瞬間的な入力エネルギーと最大応答速度や最大靱性率応答などの間に相関関係があることを証明している。しかしながら、1 自由度系に対して検討されたものであり直接基礎を有する道路橋を対象としていない。さらに、井上ら³⁾が基礎の浮き上がりを考慮できるように改良されたマクロエレメントモデルを用いて、非線形動的相互作用による橋脚の断面力低減効果についてエネルギー収支に着目し考察したもの等がある。

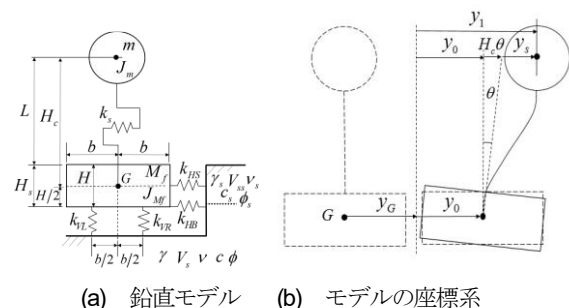
2017 年度版の道路橋示方書⁴⁾では、直接基礎の鉛直荷重に対する支持の照査の方法が見直されている。しかしながら、経験的に常時・レベル 1 地震時に対し適切な設計がなされれば、レベル 2 地震時にも橋の性能に影響を与える過大な残留変位は生じないと考えられていることから、直接基礎の大変形挙動に関する新たな知見をもとに、レベル 2 地震時における直接基礎の安定照査について検討が望まれている⁵⁾。そこで本研究では、直接基礎で支持される RC 橋脚を 3 自由度系のスウェイ・ロッキ

ングモデル(以下、SR モデル)で表現し、回転地盤ばねを鉛直地盤ばねに置き換える⁶⁾ことで、浮き上がり機構を Mechanical モデルによって表現する。そして、非線形地震応答解析を行うことで埋戻し土を考慮した直接基礎の浮き上がり・滑り現象が地盤ばねのエネルギー収支に与える影響について検討する。

2. 解析モデル

(1) 運動方程式

解析モデルは、直接基礎で支持される RC 橋脚を 3 自由度系 SR モデルで表現し、基礎の回転運動を図-1 に示す等価な 2 つのばねモデルとした。運動方程式は、回転



地盤ばねを基礎重心位置に集約させた回転ばねモデルと、浮き上がり機構を表現するために鉛直地盤ばねを基礎の中央から $b/2$ の距離に設けて導出した⁷⁾。

(1) 鉛直地盤ばねの浮き上がり機構

基礎-地盤系の復元力特性には、土の引張強さは無視するものとし、さらにモール・クーロンの破壊基準に従うものと仮定した Winkler モデルの考え方を採用する。このモデルでは、円形基礎を仮定して定式化されているが、正方形基礎に対しても断面二次モーメントが等しい等価な半径を用いることで、適用させることができる。

基礎側面の周囲に存在する埋戻し土は、図-1 の基礎重心位置に作用する水平地盤ばね k_{HS} により集約して表現し、骨格曲線はトリリニア型として評価する。道路橋示方書¹⁰⁾より、埋戻し土の効果は固結していないもので埋戻すときもあり、埋戻し材料により横抵抗に対して期待できるか否かが判れるため、基礎の水平地盤ばねに対し、0.0 から 1.0 までの係数を埋戻し土係数として、埋戻し土係数 0.0 の時を埋戻しなし、1.0 の時を完全に埋戻した状態として乗じることで、埋戻し土による浮き上がりへの影響を評価する。次に、回転地盤ばねと鉛直地盤ばねについて概説する。基礎の回転地盤ばねは、骨格曲線をトリリニア型として評価しており、基礎の回転角が $\theta_{Ry}^{(1)}$ を向かえることで底面と地盤間に剥離が生じ、 $\theta_{Ry}^{(3)}$ から底面地盤の圧縮破壊が始まる。また、極限支持力 q_u は道路橋示方書から算出する。

基礎の鉛直地盤ばねは道路橋示方書⁹⁾より、大きな地震力が作用したときの図-2(a)(b)のような三角形分布として評価しており、鉛直地盤ばねを基礎の中央から $b/2$ の距離に設けることで、回転地盤ばねと同様に基礎の回転角が $\theta_{Ry}^{(1)}$ を向かえることで浮き上がりが生じる。基礎底面と地盤との接地面積の変化を接地面積率で表し、鉛直地盤ばねに乗じることで評価する。具体的には、回転角が 3 時の位置から時計回りで、図-2(c)(d)に示すように接地面積率が 0.5 を境界として鉛直地盤ばねの様相が変化する。図-2(c)の $\bar{A}/A > 0.5$ では、浮き上がりが生じているが、 $k_{VL}^{(1)}$ (線形) が分担する領域のみで左側の接地面積率 $\bar{A}/A = \sqrt{\theta_{Ry}^{(1)}/\theta}$ を $k_{VL}^{(1)}$ に乗じることで $k_{VL}^{(2)}$ (非線形) となる。さらに、図-2(d)の $\bar{A}/A \leq 0.5$ では、さらに浮き上がりが大きくなり、 $k_{VL}^{(2)}$ が分担する領域は無くなり、 $k_{VR}^{(1)}$ (線形) が分担する領域のみで右側の接地面積率 $\bar{A}/A = \sqrt{\theta_{Ry}^{(1)}/\theta}$ を $k_{VR}^{(1)}$ に乗じることで $k_{VR}^{(2)}$ (非線形) となる。なお、回転角が反時計回りの場合でも同様な機構である。

図-3 に示すように鉛直地盤ばねの履歴の評価方法は降伏点変位までは線形を保ち、降伏点変位を迎えると傾きが第 2 勾配(曲線)に変化し、除荷する場合は初期剛性で考慮する。モーメントが原点と同様になる回転角を

新たな原点 θ' として浮き上がりが生じる回転角を考慮し、塑性変形を評価する。塑性変形後における除荷時の接地面積率は、速度の符号が変化することで、新たに考慮した浮き上がりが生じる回転角 $\theta_{Ry}^{(1)'}$ とその時の回転角 θ' 使用して $\bar{A}/A = \sqrt{\theta_{Ry}^{(1)'}/\theta'}$ で評価する。

基礎底部地盤ばねの骨格曲線は第 1 象限、第 3 象限からなる完全弾塑性型として評価する。浮き上がりが発生することで基礎底部地盤ばね k_{HB} の降伏点変位は、接地面積率 $\bar{A}/A = \sqrt{\theta_{Ry}^{(1)}/\theta}$ を乗じることで回転運動の影響を受けた複雑な挙動となる。また、基礎底部の変位が降伏点変位を超えることで滑り現象が生じる。

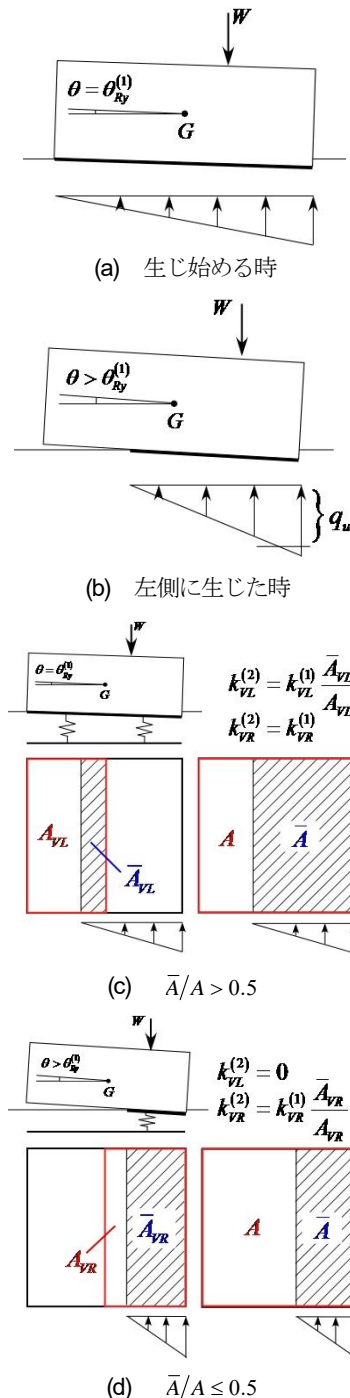


図-2 鉛直地盤ばねの浮き上がりと接地面積率

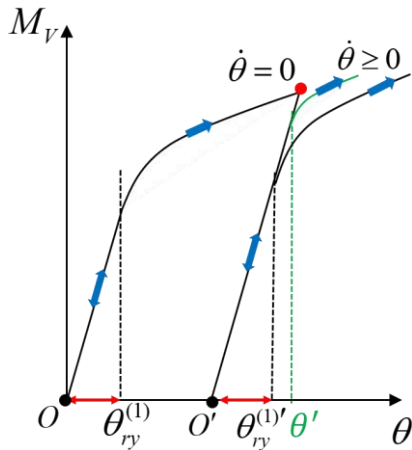


図-3 鉛直地盤ばねの特性

3. 数値解析例

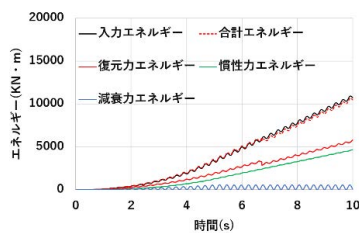
本研究では、浮埋戻し土を考慮したケース 1, 2(回転ばねモデル, 埋戻し土係数 0.5, 1.0), ケース 3, 4(鉛直ばねモデル, 埋戻し土係数 0.5, 1.0)の 4 種類を設定した。埋戻し土係数は 1.0 を基準とし、基礎底部地盤ばねの非線形特性が生じやすい埋戻し土係数 0.5 を加えた 2 通りで行う。非線形応答解析は、増分法($\beta=1/6$)で Rayleigh 減衰(固有解析結果から 1 次と 3 次より算出)を使用し、RC 橋脚及び基礎の減衰定数はそれぞれ 5,10% と定め、微小時間を 0.001 秒とし入力地震動及び正弦波で実施した。また、入力地震動は道路橋示方書⁹⁾の平成 7 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台地盤上 NS 成分を線形補間して使用した。図-4 は、埋戻し土係数 1.0 による両モデルの固有値解析結果 1 次モードの振動数 1.92(Hz)で加振した正弦波を用いた回転ばねモデルと鉛直ばねモデルによる

線形、非線形相互作用システムのエネルギー収支である。復元力、慣性力、減衰力エネルギーを足し合わせた合計エネルギーは、入力エネルギーと一致しており、回転ばねモデルと鉛直ばねモデルによる合計エネルギーを比較すると大きな差は生じていない。また、非線形、線形によるエネルギー収支では、外力に線形、非線形の異なる速度を乗じることで入力エネルギーを求めており、10 秒時点では 17.68 倍と線形の方が大きい。

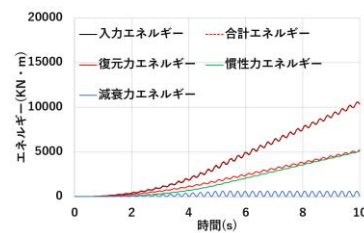
(1) 浮き上がり・滑り現象が地盤ばねのエネルギー収支に与える影響

本研究では各剛性の復元力とそれに伴う変位による履歴から台形面積を算出することで各地盤ばねの復元力エネルギーを求める。図-5 は、埋戻し土を考慮した鉛直ばねモデルと回転ばねモデルによる各復元力エネルギーと同区間における履歴ループ及び変位波形である。最初に、図-5(a)による上部構造物の水平ばねの履歴では、埋戻し土係数の影響で最大変位を比較すると両ケース共にあまり差が生じていない。また、異なるモデルの影響により、ケース 3,4 では、トリリニアの領域まで達することで非線形特性が大きく生じており、最大応答値が 0.03(m)程の差が生じている。図-5(b)は、上部構造物の水平ばねの復元力エネルギーである。ケース 1,2 とケース 3,4 では 5.7 秒以降から非線形特性が大きく生じたケース 3,4 で差が生じ始めており、30 秒時点では 1.15 倍となっている。

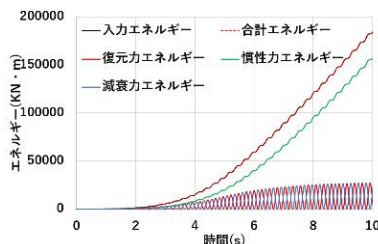
図-5(c)は鉛直地盤ばねと回転地盤ばねの履歴であり、異なるモデルの影響によるケース 1,2 の第 2 勾配は、ケース 1,3 より小さい。ケース 1 とケース 3 による回転角の最大値を比較すると 0.00174(rad)と大きく異なっている。また、埋戻し土係数の影響は、ケース 1,2 の方で大きく



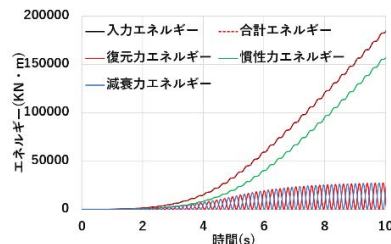
(a) 回転ばねモデル(非線形)



(b) 鉛直ばねモデル(非線形)



(c) 回転ばねモデル(線形)



(d) 鉛直ばねモデル(線形)

図-4 線形、非線形相互作用システムのエネルギー収支

見受けられる。図-5(d)は、鉛直地盤ばねと回転地盤ばねの復元力エネルギーであり、回転角がケース 1,2, ケース 1,3 に影響を与えており、異なるモデルによるエネルギーの最大値は 4.5 倍程となっている。また、異なるモデルの影響により、各復元力エネルギーの中で最もエネルギーに差が生じている。

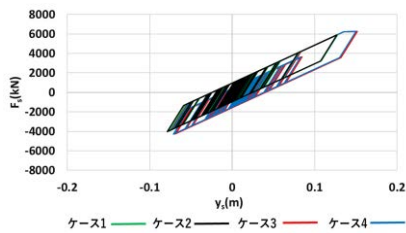
図-5(e)は基礎の水平地盤ばねの履歴であり、ケース 1,2, ケース 3,4 の最大変位はエネルギーに差が生じている。

図-5(e)は基礎の水平地盤埋戻し土係数が減少することで増加している。図-5(f)は、基礎の水平地盤ばねの復元力エネルギーであり、埋戻し土係数が減少することでケース 1,2, ケース 3,4 共にエネルギーが減少している。

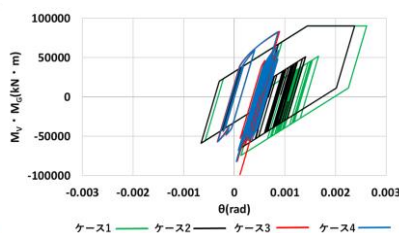
図-5(g)による基礎底部地盤ばねの履歴では、ケース

1,2 の埋戻し土係数が減少することにより、接地面積率の影響を受けた基礎底部地盤ばねの非線形特性が大きく生じた複雑な挙動を第3象限で示しており、図-5(h)の変位波形で残留変位が確認できる。しかし、ケース 3,4 による非線形特性は生じておらず、基礎回転角の影響も大きく関係している。図-5(i)は、基礎底部地盤ばねの復元力エネルギーであり、埋戻し土係数が減少することでケース 1,2, ケース 3,4 共にエネルギーが増加している。

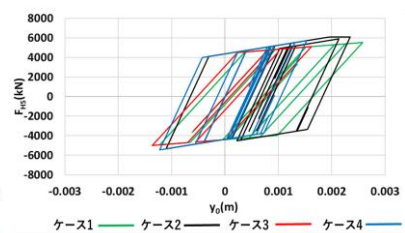
図-5(j)は左右の鉛直地盤ばねの履歴とエネルギーであり、左右の鉛直地盤ばねでは、エネルギーが大きく異なっており、左右のエネルギーを足し合わせると図-5(d)における鉛直地盤ばねのエネルギーと一致している。よって、埋戻し土係数の影響による地盤ばねのエネルギー



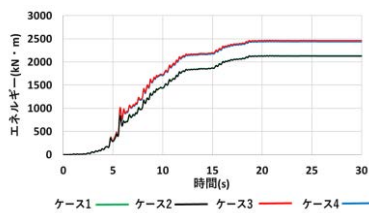
(a) 上部構造物水平ばねの履歴



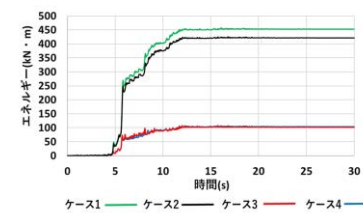
(c) 回転及び鉛直地盤ばねの履歴



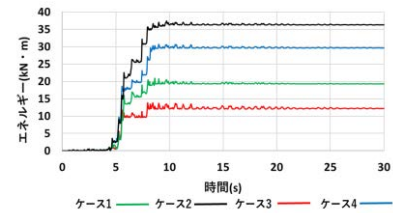
(e) 基礎水平地盤ばねの履歴



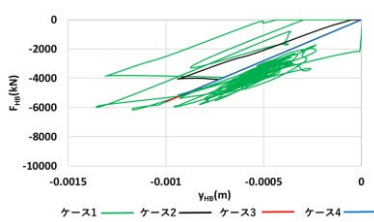
(b) 上部構造物水平ばねのエネルギー



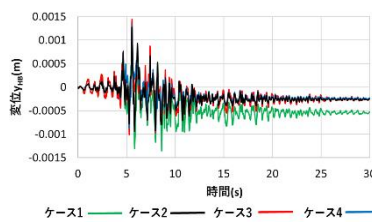
(d) 回転及び鉛直地盤ばねのエネルギー



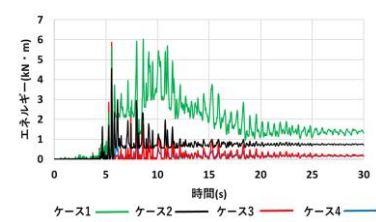
(f) 基礎水平地盤ばねのエネルギー



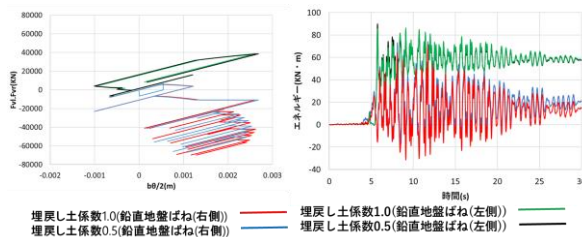
(g) 底部地盤ばねの履歴



(h) 底部地盤ばねの変位波形



(i) 底部地盤ばねのエネルギー



(j) 鉛直地盤ばね(左右)の履歴及びエネルギー

図-5 埋戻し土を考慮した復元力エネルギーと応答図面

ギーは、基礎底部地盤ばねに表れている。埋戻し土係数が減少することで履歴が複雑になり、基礎底部地盤ばねのエネルギーは増加するのだが、基礎水平地盤ばねのエネルギーは減少する真逆の関係を示している。

回転地盤ばねと鉛直地盤ばねの評価方法の違いにより、上部構造物の変位は鉛直地盤ばねの方が大きくなる。

4. まとめ

本研究では、埋戻し土を考慮した直接基礎の浮き上がり・滑り現象が地盤ばねのエネルギー収支に与える影響について検討した。

本検討により得られた結果は以下の通りである。

(1) 埋戻し土係数の影響による地盤ばねのエネルギー収支は、基礎底部地盤ばねに表れており、基礎底部地盤ばねのエネルギーは増加するのだが、基礎水平地盤ばねのエネルギーでは減少する真逆の関係である。

(2) 回転地盤ばねと鉛直地盤ばねの評価方法の違いにより、上部構造物の変位は鉛直地盤ばねの方が大きくなる。

本検討により、浮き上がり・滑り現象が地盤ばねのエネルギー収支に与える影響について示したが、未解明な点も多く、鉛直地盤ばねによる浮き上がり・滑り現象について検討する必要がある。

REFERENCES

- 1) 加藤勉・秋山宏：強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷，建築学会論文報告集，第 235 号，pp.9-18, 1975 [Kato,B.and Akiyama,H.:Energy input and damages in structures subjected to severe earthquake,Transactions of the Architectural Institute of Japan, Issue 235, pp.9-18, 1975]
- 2) 西澤英和・金多潔：1 自由度振動系のエネルギー応答について（第 1 報）鉄骨造及び鉄筋コンクリート造架構モデルのオンライン実験，日本建築学会構造系論文報告集，第 424 号，pp.117-124, 1991 [Nishizawa,H.and KanetaK.:On The energy response of single degree of freedom system subjected to an intense earthquake : part I. on-line simulation of steel and reinforced-concrete models,Transactions of the Architectural Institute of Japan Journal of Structural and Construction Engineering, Issue 424, pp117-124, 1991]
- 3) 井上貴文・三神厚：基礎の浮き上がりと地盤の材料非線形による橋脚の断面力低減効果の検討，地盤工学ジャーナル，Vol.10, No.1, pp.1-16, 2014 [Inoue,T.and Mikami,A.:Study on stress reduction effect of bridge piers due to basemat uplift and soil yielding,Japanese Geotechnical Journal,Vol.10,No1,pp1-16,2014]
- 4) 井上貴文・三神厚：非線形動的相互作用による橋脚の断面力低減効果のエネルギー収支に基づく検討，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.70, No.4, pp.I_1132-I_1143,2014[Inoue,T.and Mikami,A.:Investigation of stress reduction effect of bridge piers due to non-linear dynamic interaction using energy concept,Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering), Vol.70, No4, pp.I_1132-I_1143,2014]
- 5) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，2017 [Japan Road Association Specifications for Highwaybridges Part4 Substructures, 2017]
- 6) 独立行政法人土木研究所橋梁構造研究グループ：性能規定体系における直接基礎の安定照査法に関する研究，土木研究所資料第 4255 号，2014 [Bridge and Structure Research Group of Public Works Research Institute.:A study on stability verification method of spread foundation in performance standard system, Technical Report of Public Works Research Institute, Issue 4255, 2014]
- 7) 山下典彦・久保田晃平・宮脇幸治郎：鉛直地盤ばねによる埋戻し土を考慮した直接基礎の浮き上がり効果の検証，Kansai Geo-Symposium 2021, pp.175-180, 2021 [Yamashita,N. and Kubota,K. and Miyawaki,K.:Verification of the stepping effect of the spread foundation considering the backfill soil by the vertical soil spring,Proceedings of the Kansai Geo-Symposium 2021,pp.175-180,2021]
- 8) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV 下部構造編，2012 [Japan Road Association Specifications for Highwaybridges Part4 Substructures, 2012]
- 9) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編，2012 [Japan Road Association Specifications for Highwaybridges part5 Seismic Design , 2012]

STUDY ON SLIPING AND THE STEPPING EFFECT OF THE SPREAD FOUNDATION WITH THE BACKFILL SOIL OF THE VERTICAL SOIL SPRING

Norihiko YAMASITA, Kohei Kubota, Kojiro MIYAWAKI

The bottom soil of the foundation may plasticize greatly when nonlinear behavior by stepping of the spread foundation edge caused by earthquake, and dynamic interaction of the slipping and the stepping effect that few studies have focused on energy balance of soil spring.

In this study, the rotating soil spring under the spread foundation of the RC pier was replaced with the vertical soil spring, and the stepping effect of the spread foundation was evaluated and performed nonlinear response analysis. And then, studying about slipping and the stepping effect of the spread foundation with the backfill soil from the point view of energy balance of soil spring.