

エネルギーに着目した直接基礎の浮き上がり効果に関する検討（シンポジウム講演概要） Study on the stepping effect of the foundation from viewpoints of energy (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

山下 典彦（大阪産大・工） 久保田 晃平（大阪産大院・工） 宮脇 幸治郎（元府立高専）
Norihiko YAMASHITA, Osaka Sangyo University
Kohei KUBOTA, Graduate School of Osaka Sangyo University,
Kojiro MIYAWAKI, Former Osaka Prefecture College of Technology
E-mail: yamasita@ce.osaka-sandai.ac.jp

In this study, the rotating soil spring under the spread foundation of the RC pier with the backfill soil was replaced with the vertical soil spring, and the stepping effect of the spread foundation was evaluated. And then, aforementioned study introduced energy balance, the stepping effect of the spread foundation cased the superstructure was investigated from viewpoints of energy.

1. はじめに

時刻歴応答解析による瞬間的な分析だけの解析結果では、解析プログラムの誤り等の理由から正当性を主張できず、応答相互関係を的確に示すエネルギーの釣合式による根拠が必要であると考えられている¹⁾。

本研究では、回転地盤ばねを鉛直地盤ばねに置き換え、直接基礎の浮き上がり効果を検討した著者ら²⁾の解析モデルにエネルギーを導入することで、各ばねのエネルギーの観点から直接基礎の浮き上がり効果が上部構造物に与える影響について検討した。

2. 各ばねのエネルギー評価方法と規準化

多自由度系におけるエネルギーの釣合式として、式(1)のマトリクス表記された多自由度系運動方程式から導出する方法がある³⁾。しかしながら、この方法では、第3項の復元力エネルギー W_p は各ばねの合計値であり、各ばねにおける個々のエネルギーは求まらない。

$$\int_0^t \{\dot{y}\}^T [M] \{\ddot{y}\} dt + \int_0^t \{\dot{y}\}^T [C] \{\dot{y}\} dt + \int_0^t \{\dot{y}\}^T [K] \{y\} dt = - \int_0^t \{\dot{y}\}^T [M] \{I\} \ddot{y}_g dt \quad (1)$$

本研究では、既往の解析モデルから各ばねのエネルギーを Fig.1 に示すような各ばねの履歴曲線に台形則を用いて斜線部分を求め、解析ステップ n から $n+1$ の各ばねのエネルギーを足し合わせることで式(2)の復元力エネルギーを算出する。左辺の第1項は上部構造物水平ばね、第2項は基礎水平地盤ばね、第3項は基礎底部水平ばね、第4項は鉛直地盤ばね(括弧の左側)、回転地盤ばね(括弧の右側)の台形面積によるエネルギーとなる。また、弾性、弾塑性範囲では加算、除荷範囲では引算された合計面積 $OABCE$ が半サイクルの各ばねのエネルギーとなる。

$$S_{ks} + S_{khs} + S_{kvb} + (S_{kvr}, S_{kr}) = \int_n^{n+1} \{\dot{y}\}^T [K] \{y\} dt \quad (2)$$

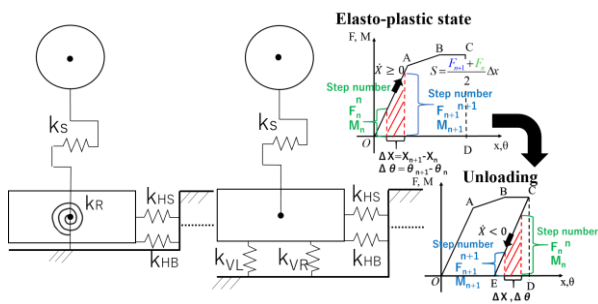
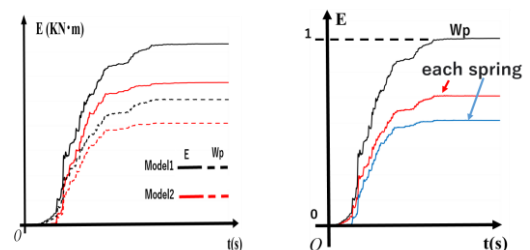


Fig.1 multi degree of freedom Trapezoidal rule

式(1)左辺の入力エネルギー E は、速度の影響でエネルギーの大きさが異なり、Fig.2(a)に示すようにエネルギーの釣合関係から右辺の復元力エネルギーは入力エネルギーに依存する形となる。エネルギーの割合を導出するには、入力エネルギーの影響を軽減させる規準化が必要であり、本研究では、規準化の評価方法として各ばねのエネルギーを地震動終了後の全復元力エネルギーで除することで Fig.2(b)のような最大値1とした各ばねのエネルギーの割合を評価する。

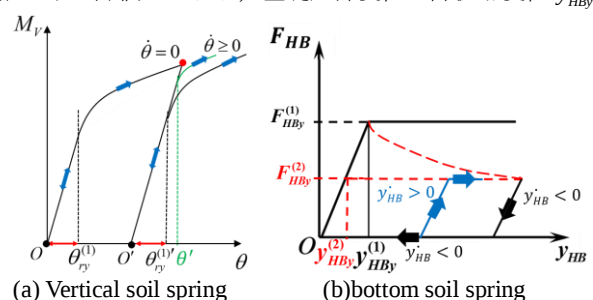


(a) input energy (b) Standard energy
Fig.2 Input energy and standard energy

3. 浮き上がり効果の復元力特性

鉛直地盤ばねの履歴曲線は、Fig.3(a)に示すように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 $\bar{A}/A = \sqrt{\theta_{ry}^{(1)}/\theta}$ で表し、鉛直地盤ばねに乗じて第2勾配を曲線で評価する。除荷時は初期剛性で考慮し、モーメントが原点と同等になる回転角を新たな原点 O' として塑性変形を評価する。また、塑性変形後は、回転角が $\theta_{ry}^{(1)}$ を向かえることで浮き上がりが生じ、載荷時の浮き上がりは、接地面積率 $\bar{A}/A = \sqrt{\theta_{ry}^{(1)}/\theta'}$ を鉛直地盤ばねに乗じて浮き上がりを評価する。

基礎の底部地盤ばねは、Fig.3(b)に示す第1象限と第3象限のみで評価しており、基礎底部変位が降伏点変位 $y_{HB}^{(1)}$ を



(a) Vertical soil spring (b) bottom soil spring
Fig.3 Hysteresis loop

向かえることで滑り現象が生じる。また、浮き上がりが生じることで $y_{HBy}^{(1)}$ に接地面積率 $\bar{A}/A = \sqrt{\theta_{Ry}^{(1)}/\theta}$ を乗じて $y_{HBy}^{(2)}$ と逐次変化させ、第2勾配を曲線で評価する。塑性変形後の載荷時は初期剛評価し、第2勾配は、除荷開始時の降伏応力 $F_{HBy}^{(2)}$ から評価する。

4. 解析結果

本研究では、鉛直ばねモデル(柱高さ 11,8,5m を Type1,2,3), 回転ばねモデル(柱高さ 11,8,5m を Type4,5,6)とした。非線形応答解析は、増分法 ($\beta=1/6$) で Rayleigh 減衰を使用し、RC 橋脚及び基礎の減衰定数はそれぞれ 5%, 10% で定め、微小時間を 0.001 秒として実施した。入力地震動は道路橋示方書の平成 7 年兵庫県南部地震の神戸洋気象台地盤上 NS 成分を線形補間して使用した。

Fig.4 は、異なるモデルによる上部構造物水平ばね及び回転、鉛直地盤ばねモデルの履歴曲線とエネルギーを示している。Fig.4 を異なるモデルの最大値で比較すると、Fig.4(a)(b)の Type1,4 では 0.023 m, 9.0×10^{-4} rad の差が生じているが、柱高さが小さい Type3,6 では 0.001m, 6.0×10^{-5} rad と差が小さくなっている。また、Fig.4(c)(d)の 30 秒時点では同様の傾向を示しており、Type1,4 を比較すると Fig.4(c)(d)で 209.79KN・m, 247.71 KN・m の差が生じ、柱高さが小さい Type3,6 では Fig.4(c)で 5.37KN・m, Fig.4(d)で 16.83 KN・m と差が小さくなっている。

Fig.5 は、Fig.4 を規準化した図面である。Fig.4(c)(d)と Fig.5(a)(b)を比較すると Fig.5(a)の Type3,6 では、上部構造物水平ばねエネルギーの割合が明確になり、入力エネルギーの影響が大きいことがわかる。Fig.5(b)の Type1 では規準化することで回転地盤ばねのエネルギーが 0.16 と全体の 1 に対して 1 割強を占めていることがわかる。

Fig.6 は、Type6 による上部構造物水平ばね、回転地盤ば

ねの応答波形及びエネルギーの増分の応答が最も大きくなる前後 5~6 秒間を示しており、浮き上がり効果による上部構造物への影響を検討している。Fig.6(a)の応答波形では、5.58 時点で回転角に差異が生じているが、上部構造物への影響は見受けられない。しかし、Fig.6(b)の同時刻でのエネルギーの増分を検討すると、上部構造物水平ばねエネルギーに 1.02×10^{-3} KN・m と僅かに差異が生じており、エネルギーの観点では、上部構造物水平ばねに影響を与えていることわかる。

5. まとめ

各ばねのエネルギーの観点から直接基礎の浮き上がり効果が上部構造物に与える影響について検討した。

- (1) エネルギーを規準化することで、上部構造物水平ばねエネルギーの割合が明確になり、入力エネルギーの影響が大きいことがわかる。
- (2) 基礎の浮き上がり効果をエネルギーの増分で検討することで上部構造物水平ばねエネルギーに 1.02×10^{-3} KN・m と僅かに差異が生じており、エネルギーの観点では、上部構造物水平ばねに影響を与えていることわかる。

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築物の耐震性能評価手法の現状と課題—限界耐力計算・エネルギー法・時刻歴応答解析—, 日本建築学会, pp.143-144, 2009.
- 2) 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.
- 3) 秋山宏:エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, p.7, 1999.

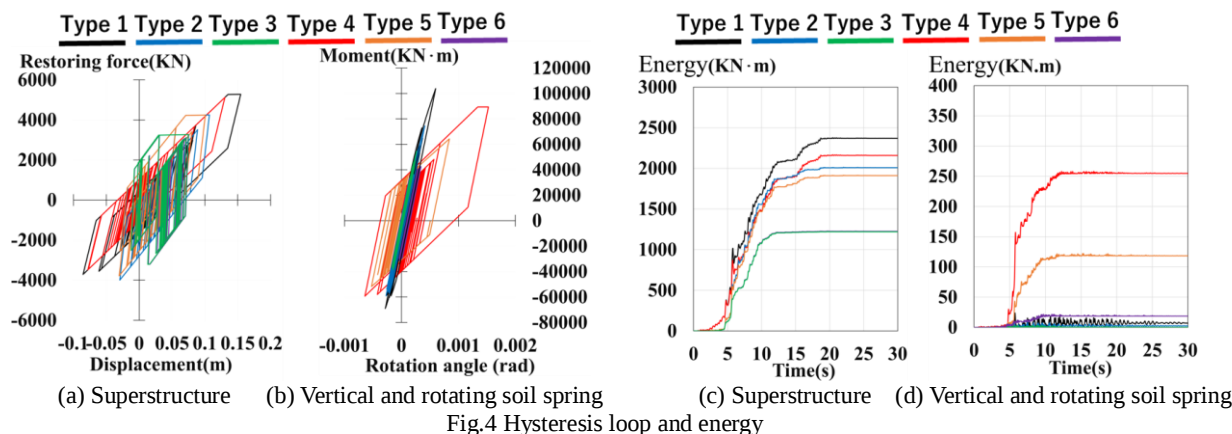


Fig.4 Hysteresis loop and energy

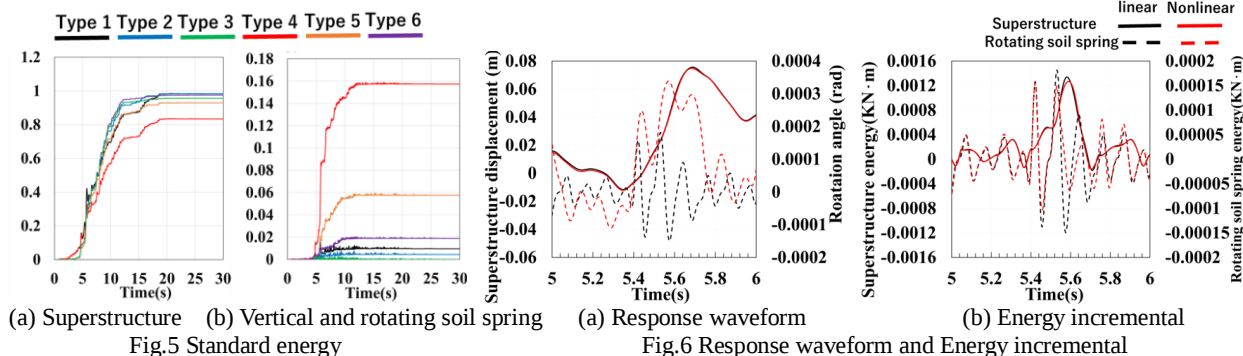


Fig.5 Standard energy

Fig.6 Response waveform and Energy incremental