

7) 国際地震工学センター

7) - 7 非線形動的相互作用効果が建築物の入力と応答に及ぼす影響に関する研究【安全・安心】

A Study on Effects of Nonlinear Soil-Structure Interaction on Input Motions and Seismic Behaviors of Buildings

(研究開発期間 令和 4～令和 6 年度)

国際地震工学センター 中川博人
International Institute of Seismology and NAKAGAWA Hiroto
Earthquake Engineering

We validated a simplified analysis method to capture the seismic behaviors of structures considering soil nonlinearity. In the simplified method, the soil-foundation system is replaced by a nonlinear rotational spring, a linear rotational dashpot, and linear horizontal spring and dashpot. In order to investigate the applicability of the simplified method, we compared the analysis results with 1-g shaking table tests having a building with a square-shaped spread foundation placed on soft clay soil. This comparison revealed that the simplified method could capture the response of the building during dynamic excitations, although it has some limitations.

【研究開発の背景・概要】

大きな振幅を伴う地震動が建物に入力する際には、建物基礎近傍の局所的な非線形性が有効入力動や建物応答に及ぼす場合のあることが指摘されている^{例えは 1)-3)}。大きな振幅を伴う地震動が入力する際の建物挙動を精緻に評価する一つの方法として、対象とする地盤－基礎－建物系全体を有限要素等によりモデル化することが考えられる^{例えは 4)5)}。しかしながら、有限要素解析モデルの設定や得られた計算結果の妥当性を評価するために有限要素解析に関する知識や経験が求められることや、地盤－基礎－建物系全体を 3 次元の有限要素等でモデル化すると計算自由度が大きくなることから、一般的にはその取扱いが容易ではない⁶⁾。

以上を踏まえ、本検討では少ない計算自由度でありながら建物基礎近傍の局所的な非線形性を考慮することのできる簡易応答解析手法についての検討を行った⁷⁾。

【研究開発の内容】

図 1 に示すように本検討で用いる簡易応答解析手法では既往の簡易解析手法⁵⁾と同様に、地盤－基礎系を非線形の回転地盤ばね(図 2)⁵⁾⁸⁾、線形の水平地盤ばね⁹⁾およびダッシュポットに置換した。既往の簡易解析手法⁵⁾では上部構造を剛体として扱っており、上部構造がせん断変形する場合の検討は行われていない。また、既往の簡易解析手法の適用性についての検討¹⁰⁾は数値計算に基づいており、実験との比較による検証はなされていない。これらに対し本検討では、上部構造がせん断変形する場

合の簡易応答解析手法について検討した⁷⁾。また、本手法の適用性を検討するため、軟弱な粘土地盤上に直接基礎の建物模型を設置して重力場での振動台実験⁴⁾を行い、実験結果と解析結果を比較した⁷⁾。

図 3 に実験結果と解析結果の時刻歴波形をあわせて示す。図中の黒線が実験結果、赤線が回転地盤ばねに非線形性を考慮した解析結果、青線が回転地盤ばねに非線形性を考慮しない場合の解析結果である。図の時刻歴波形は上から順に地表面の加速度、上部質点の加速度、層間変形角および基礎の回転角である。なお、実験結果の層間変形角および基礎の回転角はレーザー変位計により計測したものである。線形の計算結果(青線)は上部質点の加速度、層間変形角および基礎の回転角のいずれも実験(黒線)に比べて大きくなっていることがわかる。一方で非線形の計算結果は(赤線)は、基礎の回転角は実験結果に比べてやや大きくなっているが、上部質点の加速度および層間変形角は実験結果とおおむね対応しているように見える。また、位相に着目すると、線形の計算(青線)では回転地盤ばねを初期剛性のみで計算しているため計算結果の山と谷の位置が実験結果のそれらと対応していない。一方で、非線形の計算結果(赤線)では回転地盤ばねの剛性が基礎の回転角に伴い変化するので、計算波形の山と谷の位置が実験結果のそれらとおおむね対応している。

図 4 に加振 27 ケースにおける上部質点の加速度、層間変形角、基礎の回転角のそれぞれ最大値を示す。上部質

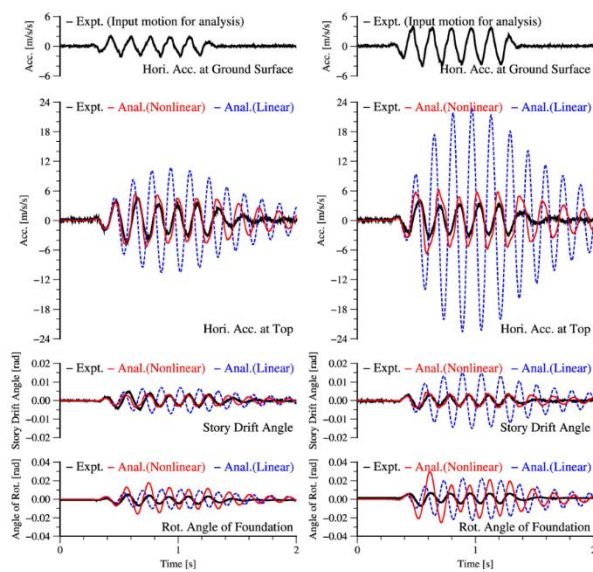
点の加速度および層間変形角についてみると、線形の計算結果（青線）に比べて、非線形の計算結果（赤線）の方が実験結果（黒線）と対応していることがわかる。また線形の計算結果（青線）では入力振幅の大きい場合には応答周期が実験結果とは異なっていることがわかる。一方で基礎の回転角についてみると、非線形の計算結果は振動数 4~8Hz において実験結果を過大評価している。これを改善するためには、回転地盤ばねの非線形特性と粘性減衰の設定方法についてさらなる検討が必要である。

【研究開発の結果】

本検討で用いた簡易応答階手法による計算結果は、上部質点の加速度および層間変形角についてはおおむね実験結果と対応するものの、基礎の回転角については入力振幅が大きい場合に実験結果を過大評価する傾向が見られ、回転地盤ばねの非線形特性と粘性減衰の設定方法についてさらなる検討を要することがわかった。

【参考文献】

- 1) 宮本 (2006), 第 8 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム, AIJ, 3-12.
- 2) Gazetas (2015), SDEE, **68**, 23-39.
- 3) 柏ほか (2019), AIJ 構造系論文集, **84**(756), 183-193.
- 4) Nakagawa et al. (2022), Proc. 3ECEES, 192-201.
- 5) Anastasopoulos & Kontoroupi (2014), SDEE, **56**, 28-43.
- 6) 中谷ほか (2008), 土木研究所資料, (4101)
- 7) 中川・柏 (2024), JAEE 論文集, **24**(5), 244-253.
- 8) Gazetas et al. (2013), SDEE **47**, 83-91.
- 9) Gazetas (1983), SDEE, **2**(1), 2-42.
- 10) Sieber et al. (2020), EESD, **49**, 1388-1405.



(a) 加振振幅 2 m/s²

(b) 加振振幅 4 m/s²

図3 時刻歴波形の比較（加振振動数 6 Hz の場合）⁷⁾

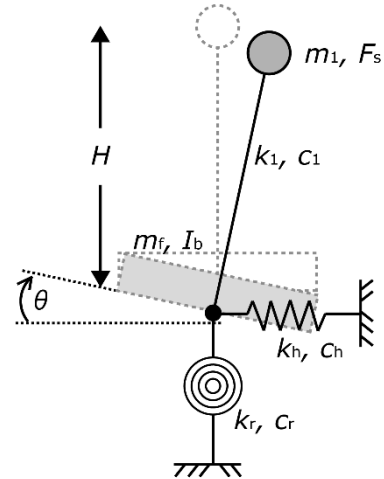


図1 解析モデルの概要⁷⁾

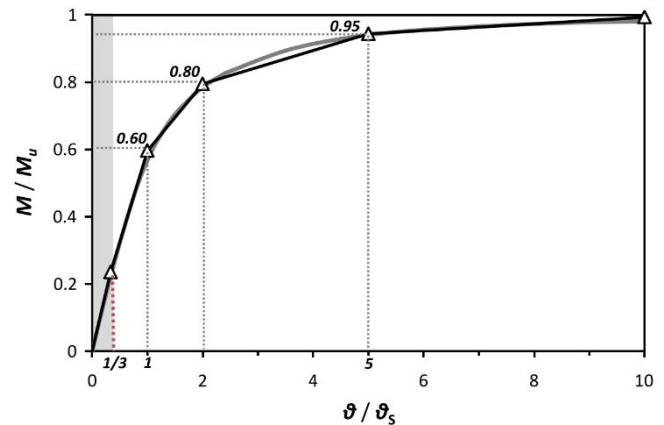


図2 無次元化されたモーメントー基礎回転角の関係⁵⁾

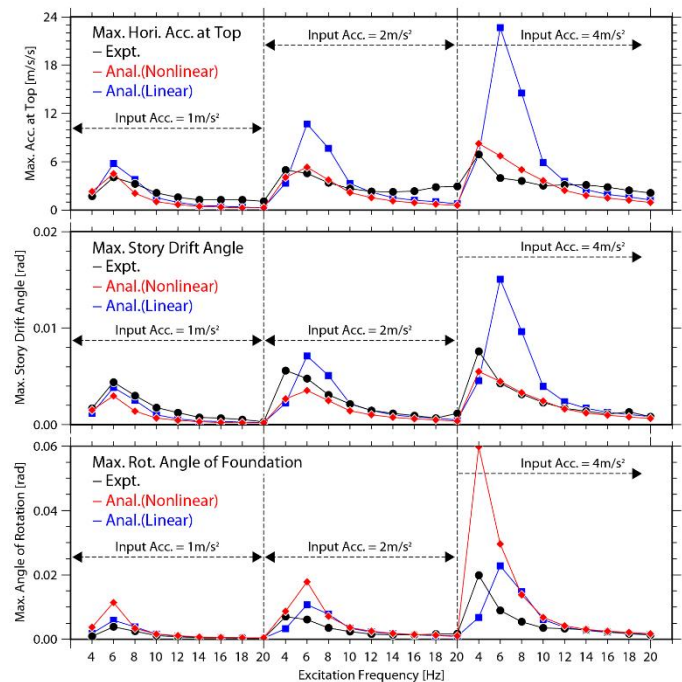


図4 応答最大値の比較⁷⁾