

地盤の非線形性を考慮した 構造物の応答解析手法に関する検討

中川博人

(国研)建築研究所 国際地震工学センター

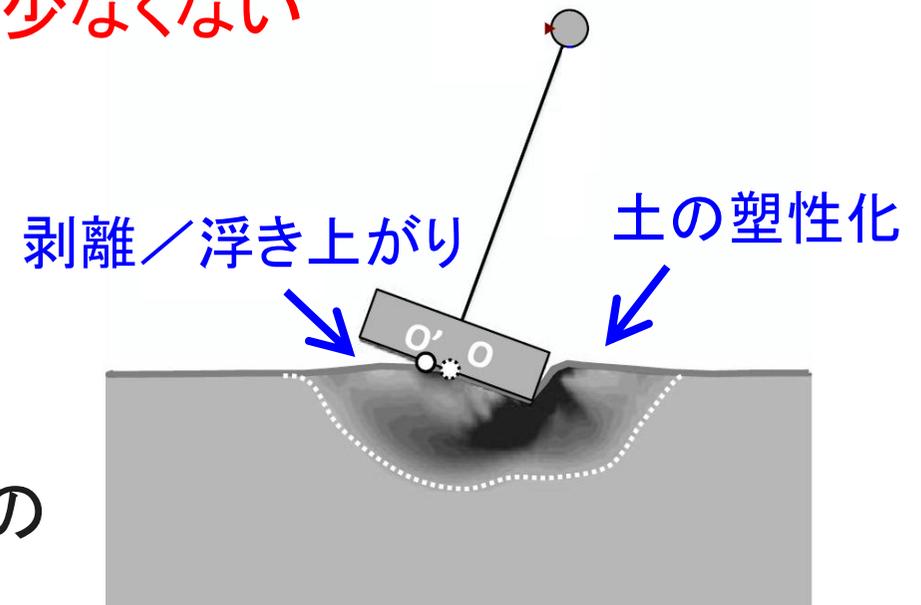
2025/2/21(金)

※謝辞: 本検討を実施するにあたって、中井正一先生(千葉大)およびGeorge Gazetas先生(アテネ工科大)に多大なご協力をいただきました

検討の背景・目的

- 近年の地震では、大きな振幅の地震動が観測されている
→建物被害は軽微であることも少なくない

- 大きな振幅の地震動が建物に作用した際には、右図に示す要因(非線形動的相互作用効果)等が建物挙動に影響を及ぼす場合のあることが指摘されている
e.g. Gazetas(2015); 柏ほか(2019)



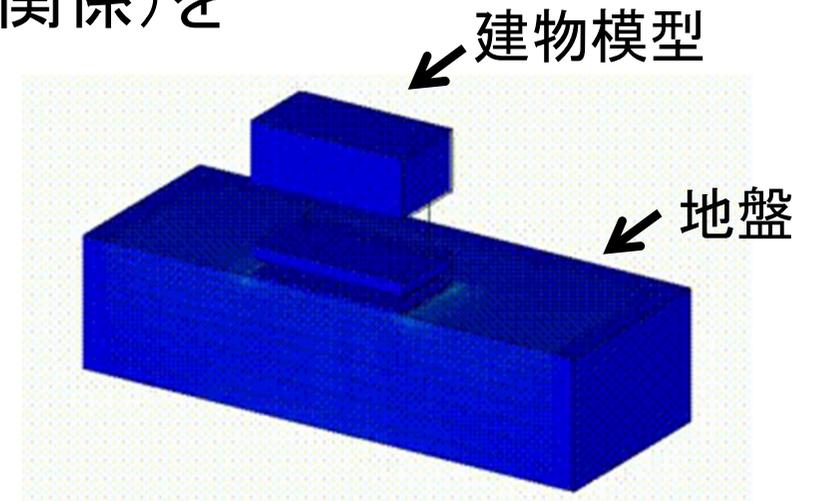
Gazetas(2015)を一部修正・加筆

- 非線形動的相互作用効果が建物挙動に及ぼす影響の理解に資するため、2つの解析手法(3次元有限要素法(FEM)およびSRモデル)を用いて応答解析を実施し、振動台実験と比較する

検討の概要

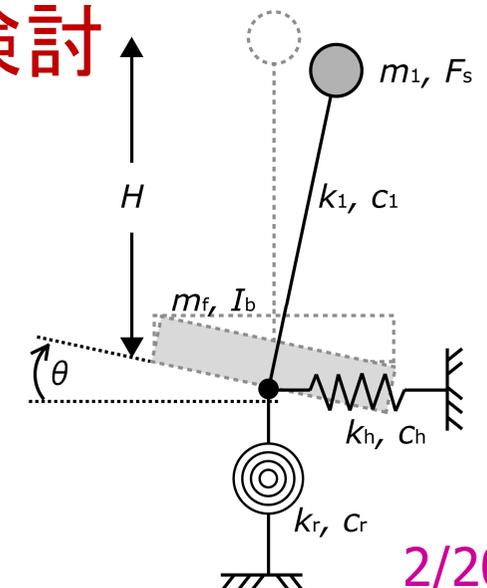
■ 3次元FEMによる検討

- 単純な土の構成則(応力-ひずみ関係)を解析に適用した場合に、どの程度振動台実験の結果を再現できるのかを把握するために検討を行う
Nakagawa et al. (2022)



■ 簡易な応答解析手法(SRモデル)による検討

- 少ない計算自由度でありながら、非線形動的相互作用効果の影響を考慮した簡易な応答解析手法の適用性を検討するため、振動台実験との比較を行う 中川・柏(2024)

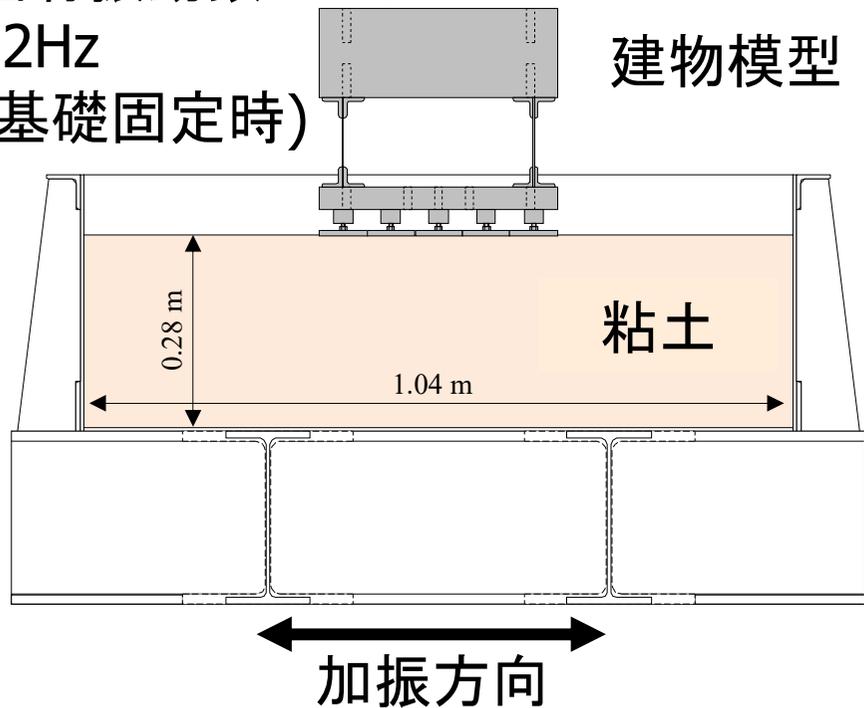


振動台実験の概要

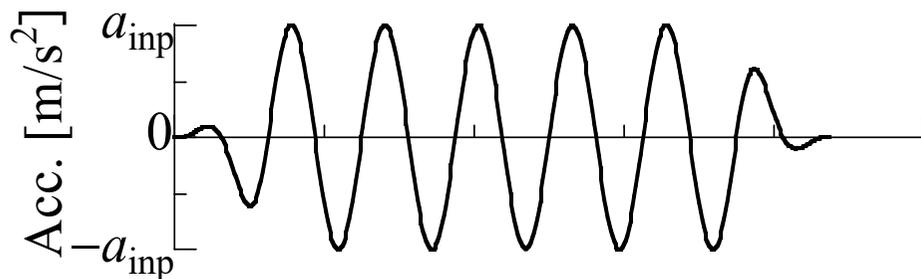
固有振動数

12Hz
(基礎固定時)

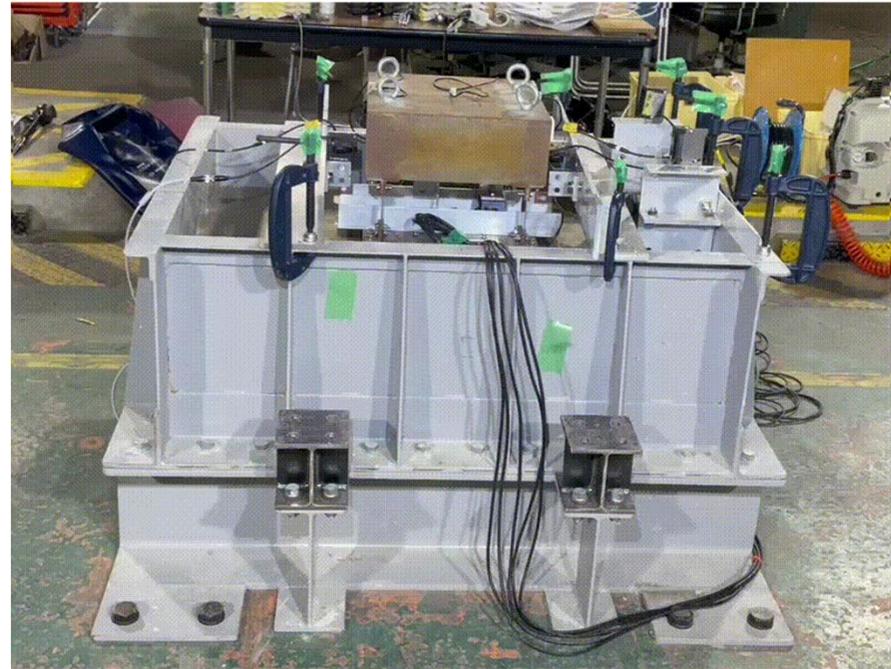
実験装置概要



加振条件



実験の状況(建研・中型振動台)



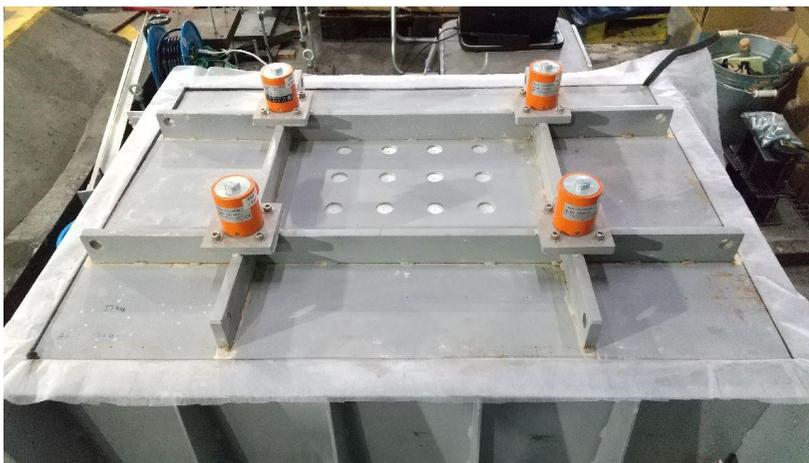
- 5つのピークを持つ正弦波タイプ
- 3つの最大加速度 $a_{inp} = 1, 2, 4 \text{ m/s}^2$
- 9つの加振振動数 4~20Hz(2Hz毎)
- 計27ケースの加振を小振幅側から連続で実施

粘土地盤の作製状況

土槽への粘土の充填



圧密用の蓋の設置



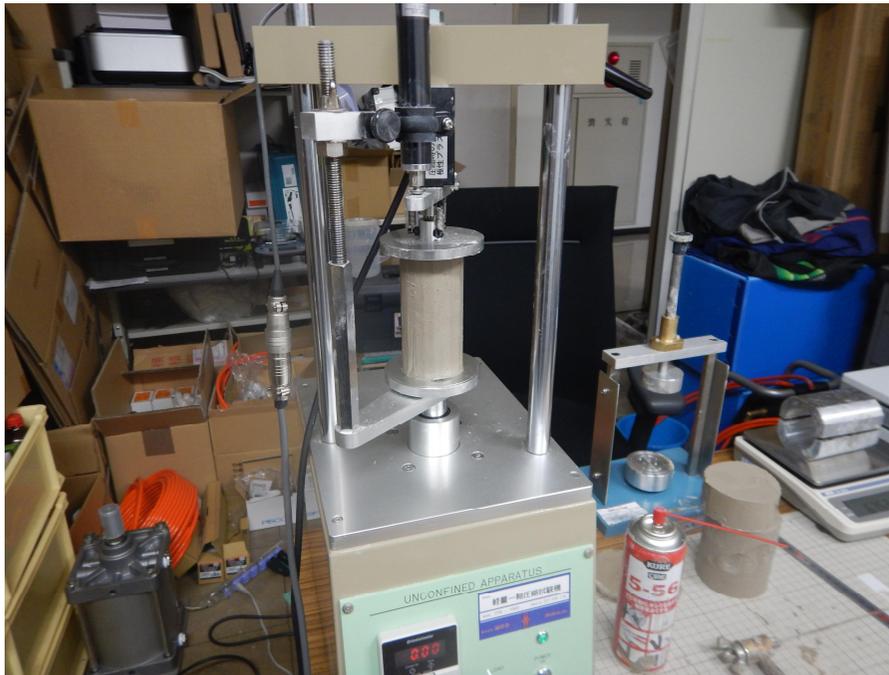
圧密(空圧による鉛直载荷)



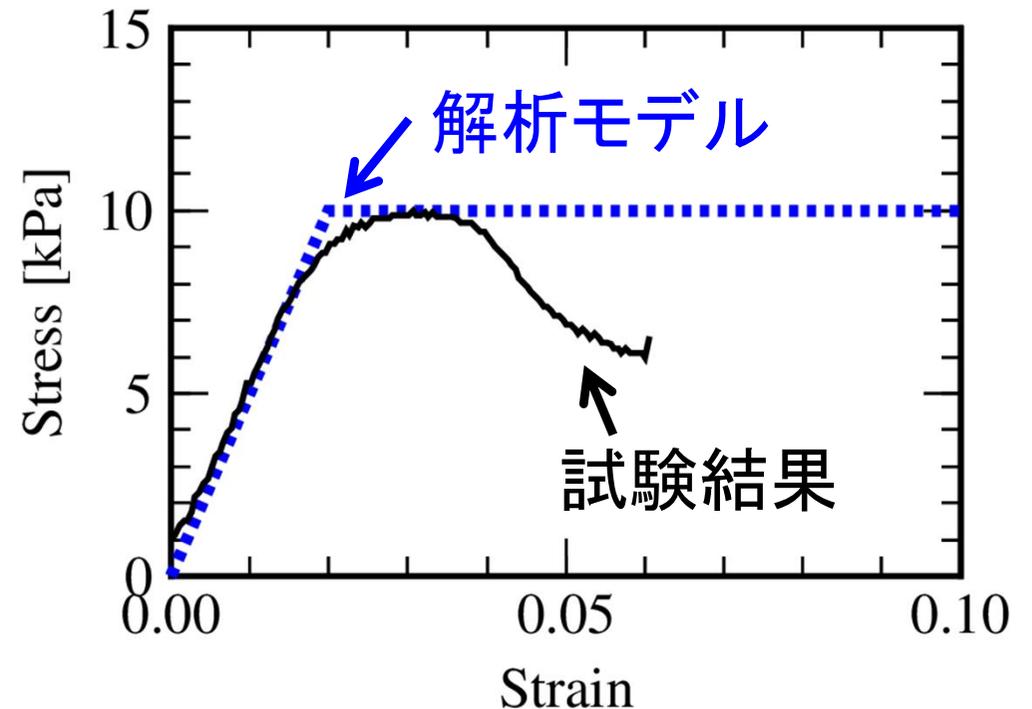
- 粘土粉末:水=1:1.25
- 上下二面排水
- 圧密の荷重は5段階(1.2, 3, 6, 12, 25kPa)
- 圧密期間は、約2ヵ月

3次元FEMによる検討の概要

土の一軸圧縮試験の状況

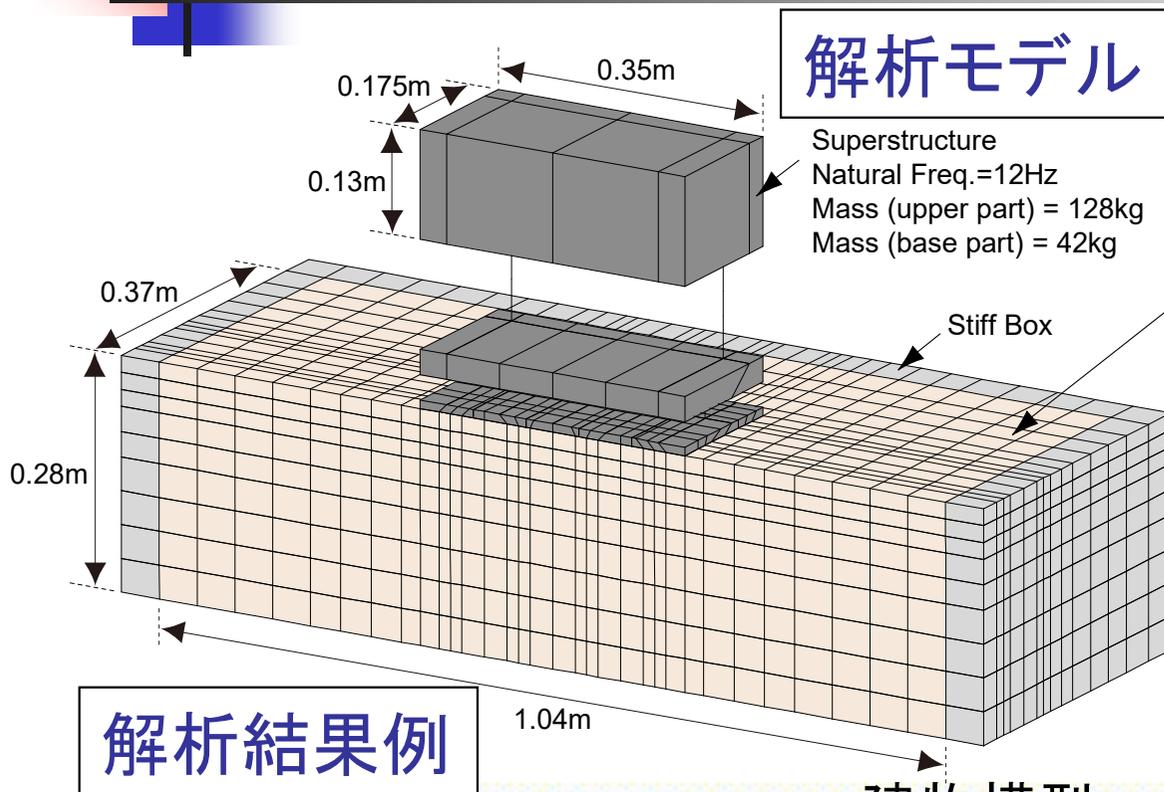


土の一軸圧縮試験結果の例



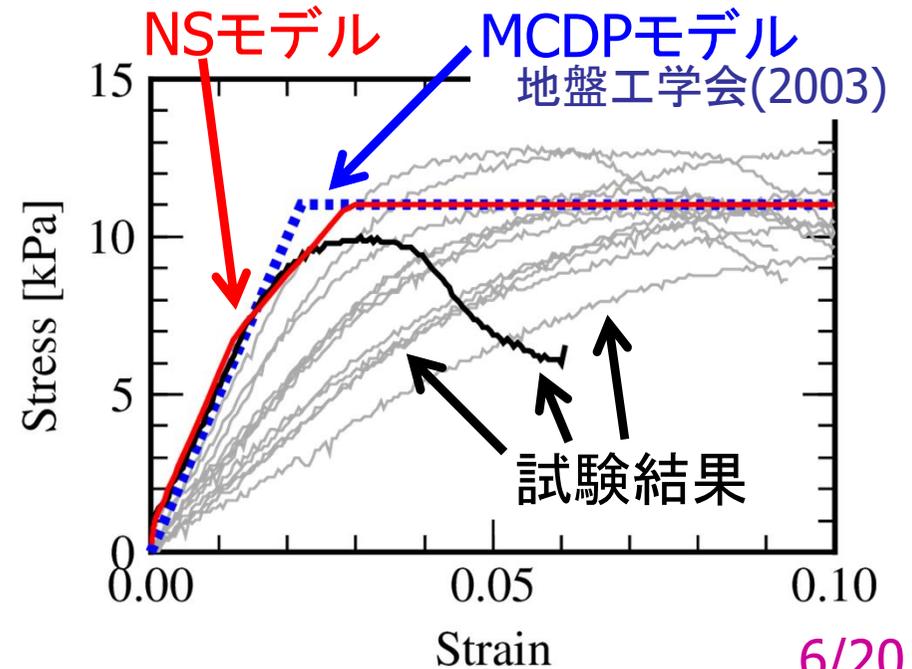
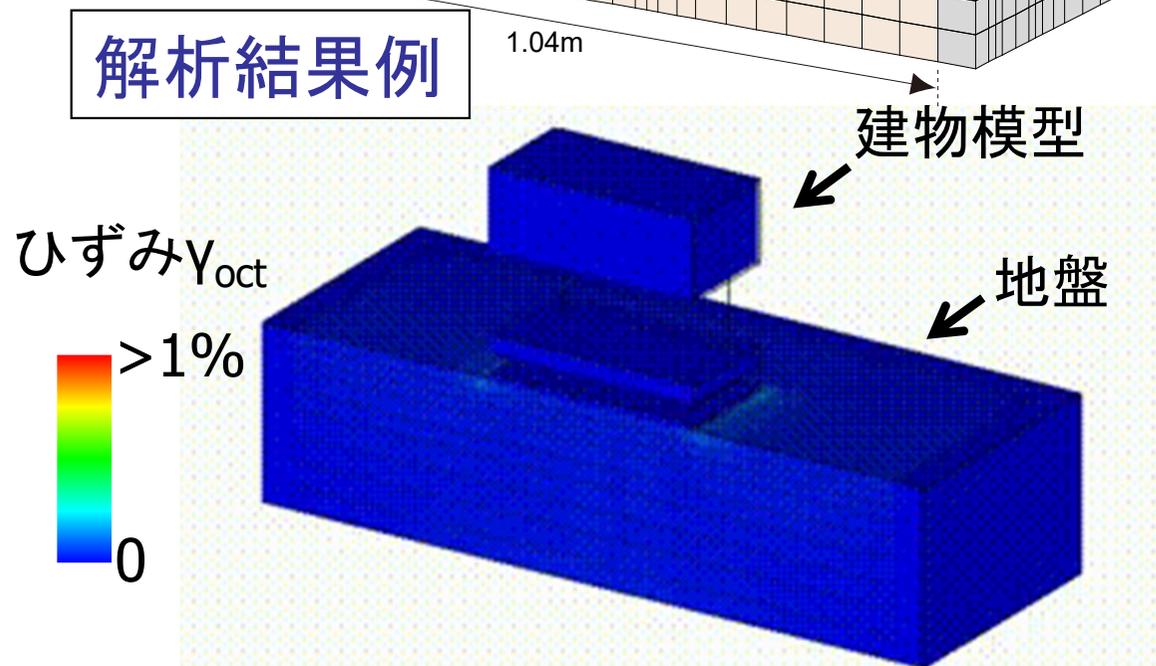
- 3次元FEMの地盤要素に、単純な土の構成則(応力-ひずみ関係)を適用した場合、どの程度、振動台実験の結果を再現できるのか

解析モデル(FEM)と解析結果例



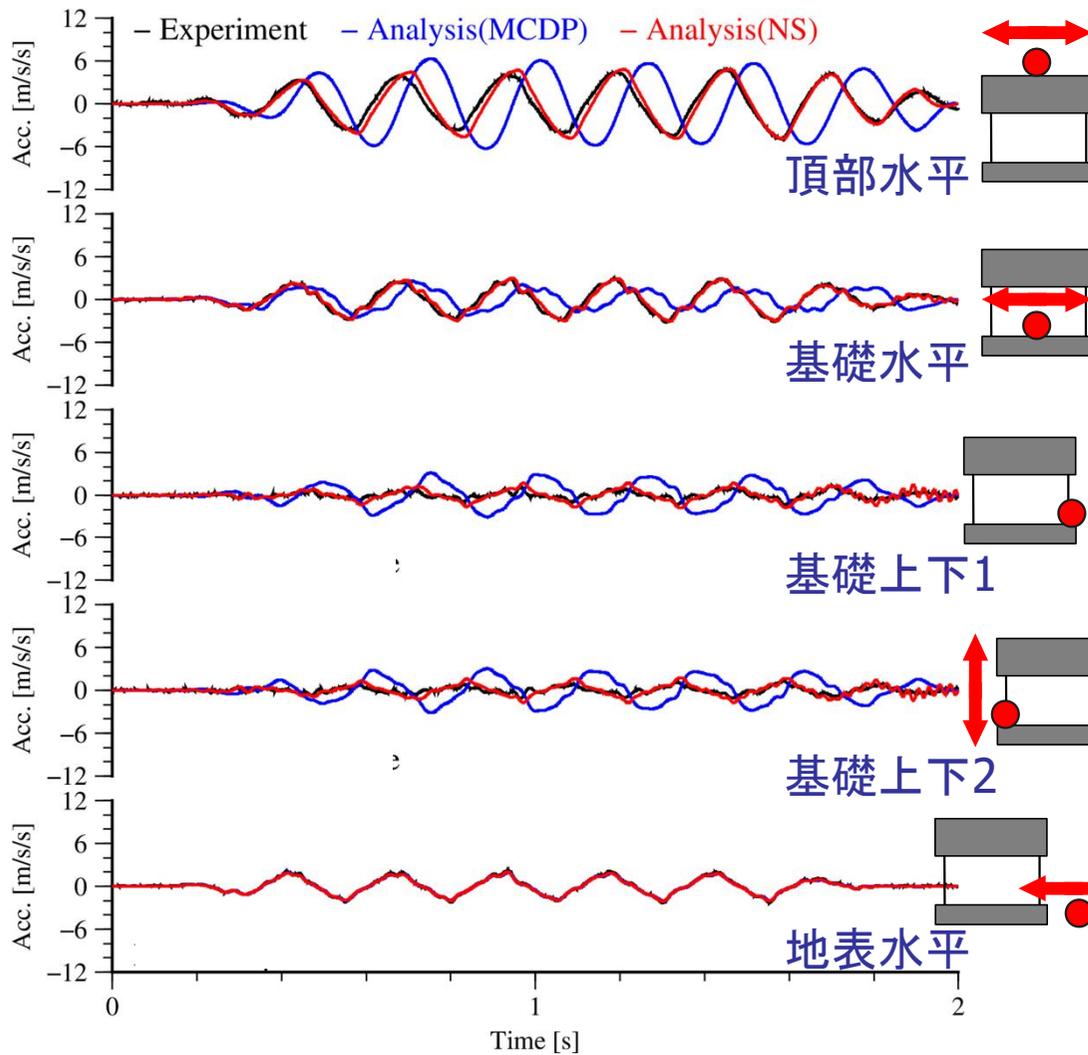
- 1/2対称モデル
- 節点数5,800、要素数4,701
- 計算方法:
Nakagawa et al. (2020)

一軸圧縮試験結果とモデル化

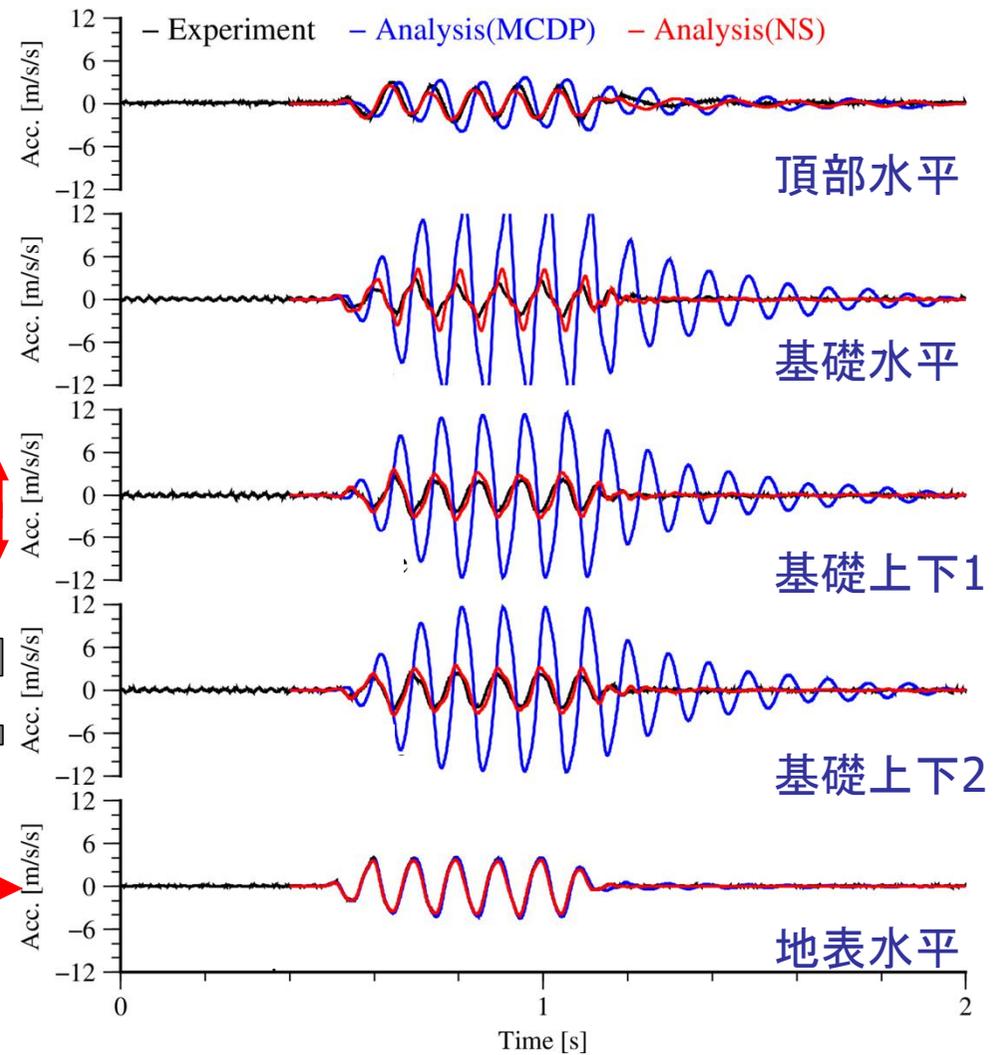


加速度波形の比較 (実験 vs 解析(FEM))

入力振幅: 2m/s^2 , 入力振動数: 4Hz

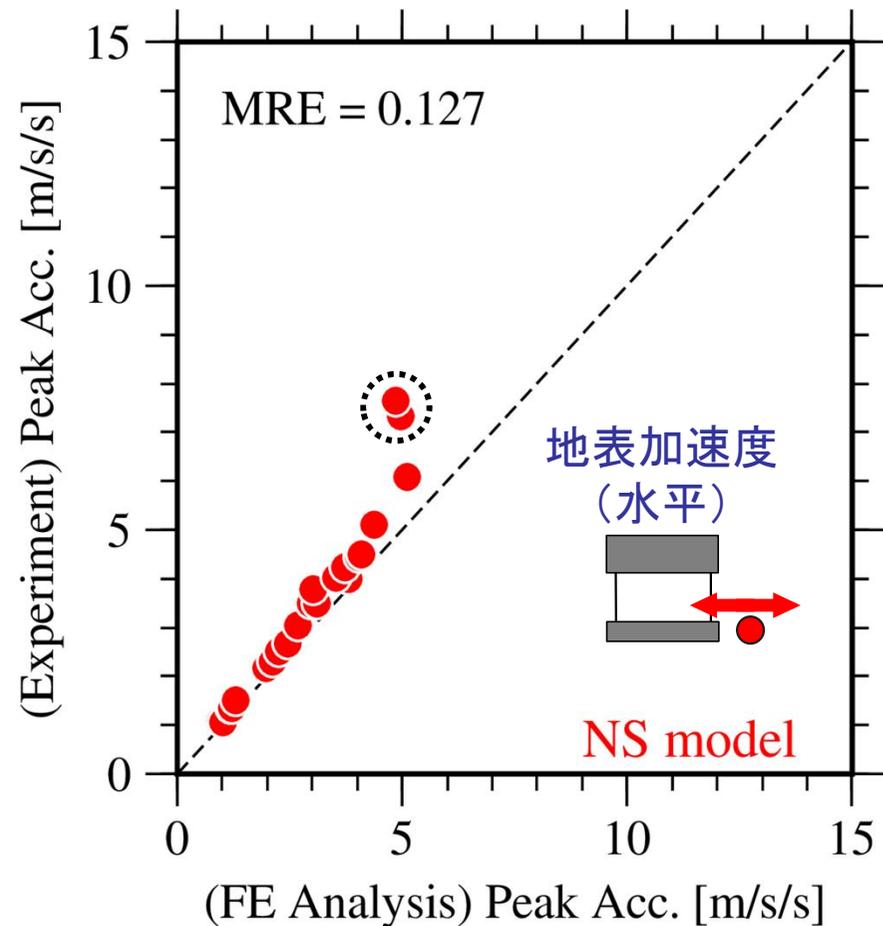
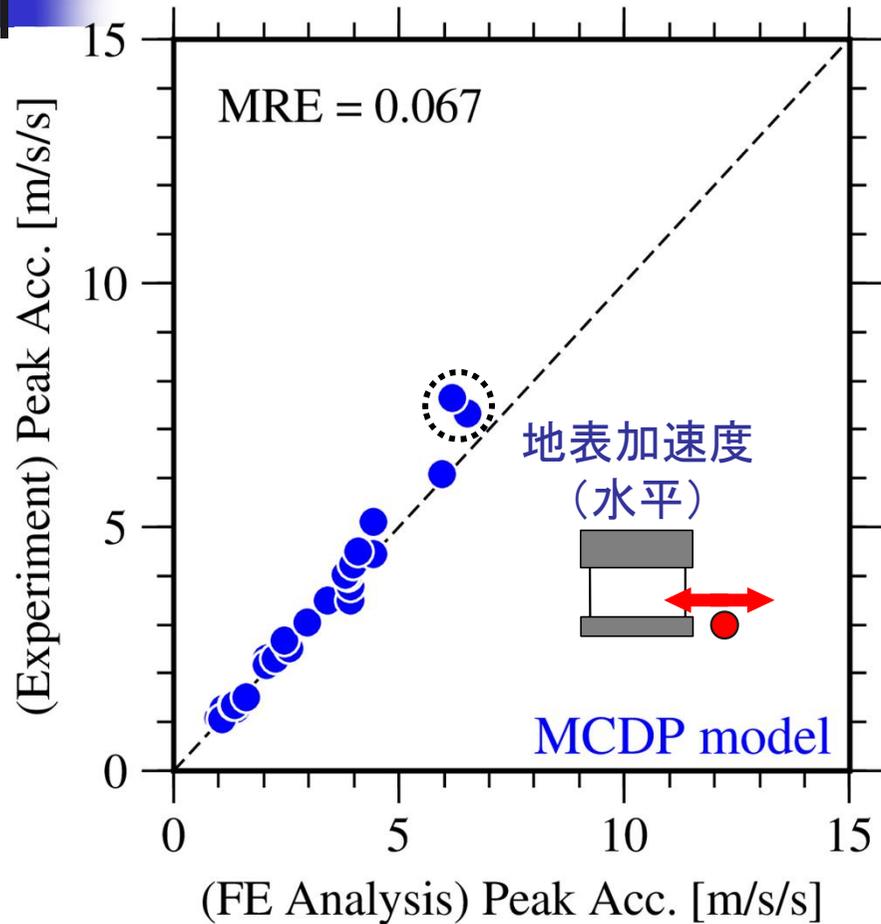


入力振幅: 4m/s^2 , 入力振動数: 10Hz



- 地表の水平動は実験と解析は対応するが、建物の応答波形を見ると、特にMCDPモデル(弾完全塑性モデル)で実験結果との差異が認められる 7/20

地表の最大加速度の比較（実験 vs 解析(FEM)）

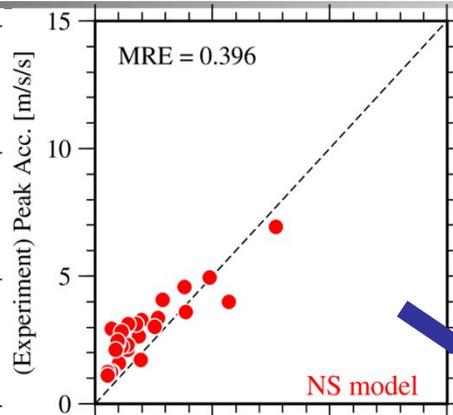
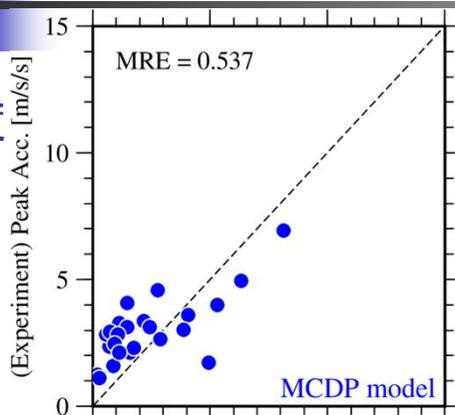
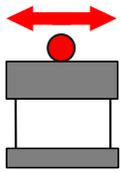


- 地表面での水平動は実験と解析はおおむね対応する。実験が解析よりも特に大きくなっている2点（図中の破線の○）は実験結果にスパイクが見られたため

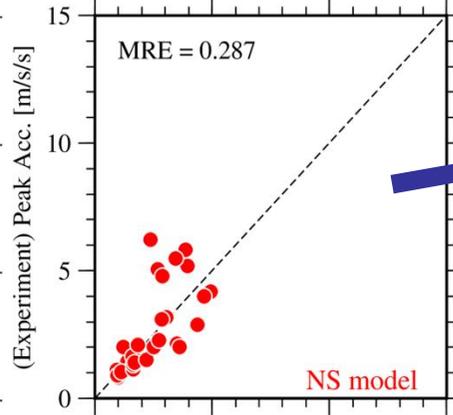
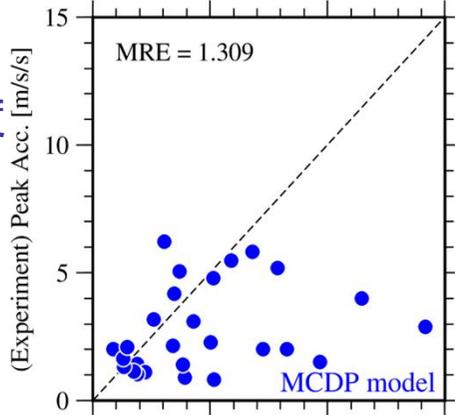
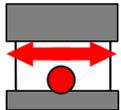
- 平均相対誤差 $MRE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|a_{\max,i,\text{analysis}} - a_{\max,i,\text{experiment}}|}{a_{\max,i,\text{experiment}}}$ は小さな値である

建物の最大加速度の比較（実験 vs 解析(FEM)）

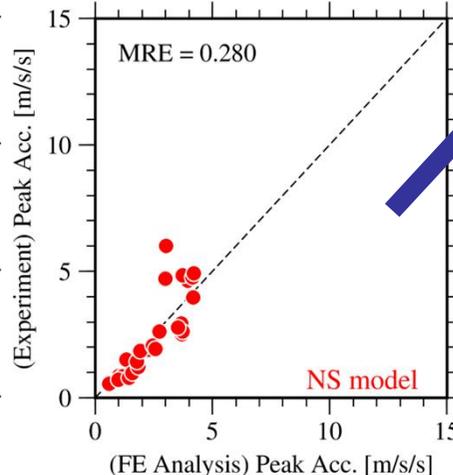
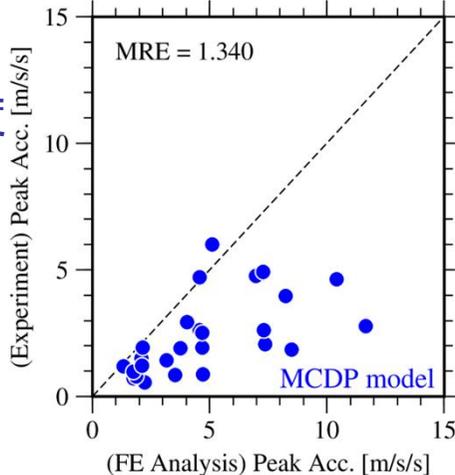
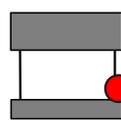
頂部加速度
(水平)



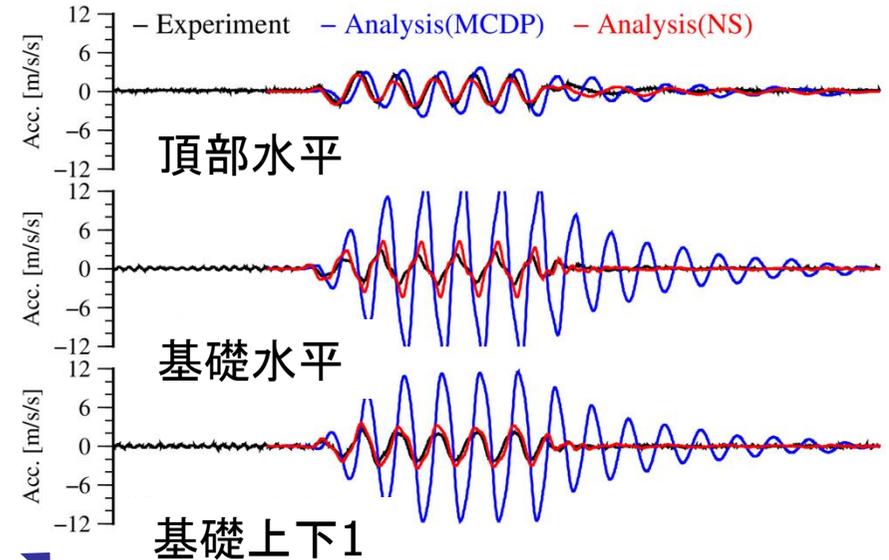
基礎加速度
(水平)



基礎加速度
(上下)

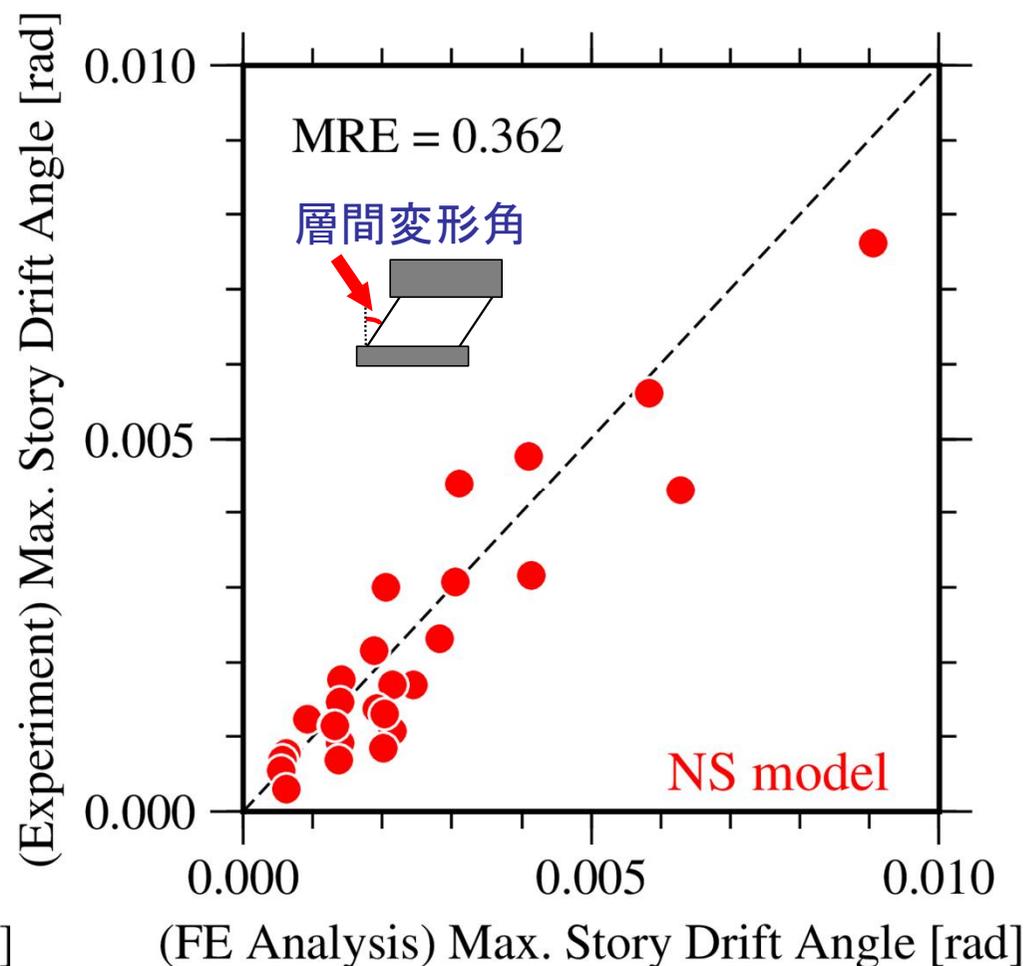
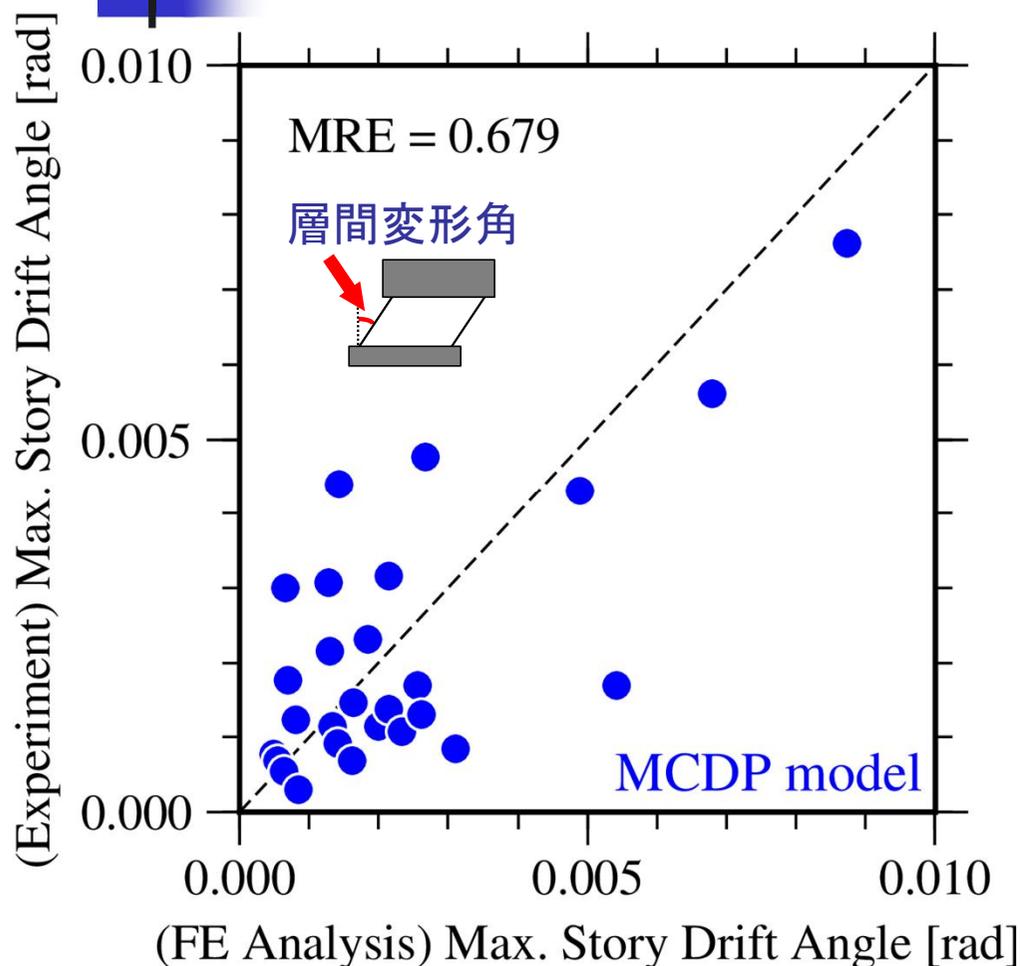


入力振幅: 4m/s^2 , 入力振動数: 10Hz

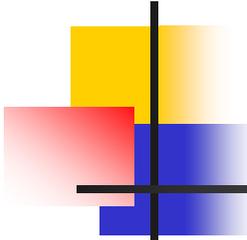


- MCDPモデル (弾完全塑性モデル) では、基礎の水平動および基礎端部の上下動の評価に特に注意が必要である

最大層間変形角の比較 (実験 vs 解析(FEM))



- 他の応答値と同様に、建物の最大層間変形角についても、**MCDPモデル(弾完全塑性モデル)**に比べて**NSモデル(降伏曲面の重ね合わせモデル)**の方が実験結果との対応がよい。



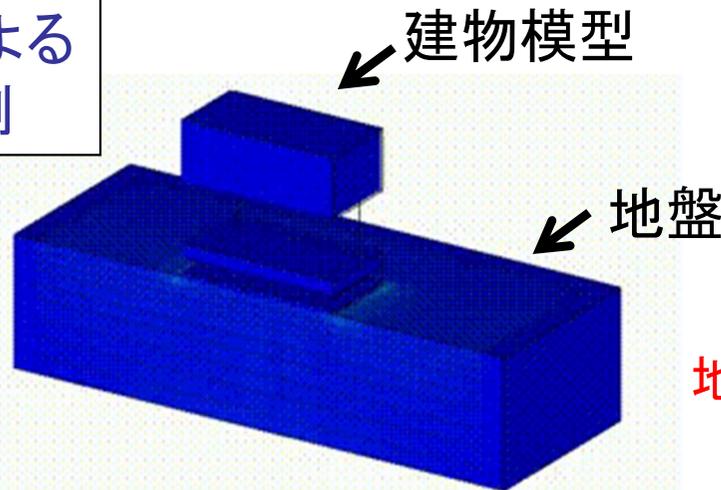
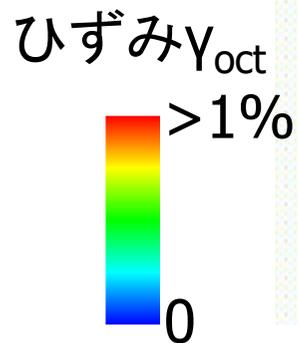
FEMによる検討のまとめ

- 地盤－建物系の振動問題(土の非線形性を含む)を対象に、単純な構成則による解析結果がどの程度実験を再現できるものであるのか把握するため、以下を実施した
 - 1g場の振動台実験(粘土地盤+直接基礎建物)
 - 3次元FEMによるシミュレーション解析
- 弾完全塑性モデル(MCDPモデル)よりもNSモデルの方が実験との対応がよい。弾完全塑性モデルを用いた解析では基礎の水平動および基礎端部の上下動の評価に特に注意が必要であることがわかった
- 今回の解析では、実験結果をうまく再現できないところもあり、今後、追加で土質試験等を行って地盤のパラメータを再設定して解析を行う等、さらなる検討が必要である

SRモデルによる検討の背景と概要

- 3次元FEM等による建物—地盤系の非線形相互作用解析の課題
 - 地盤を表現するソリッド要素への適切な構成則の設定
 - 基礎の浮き上がりや剥離を表現するための特別な要素の導入
 - モデル設定や得られた計算結果の妥当性 → FEM解析の知識・経験が必要
 - 計算自由度の増大(ハンドリングが困難)

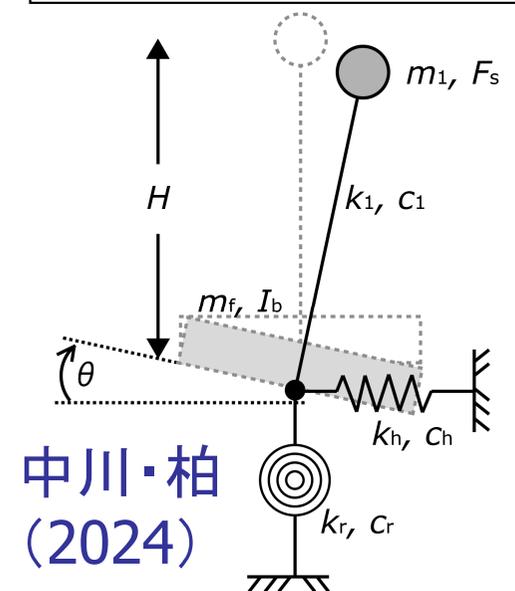
3次元FEMによる
解析結果例



Nakagawa et al. (2022)

地盤をばねに置換

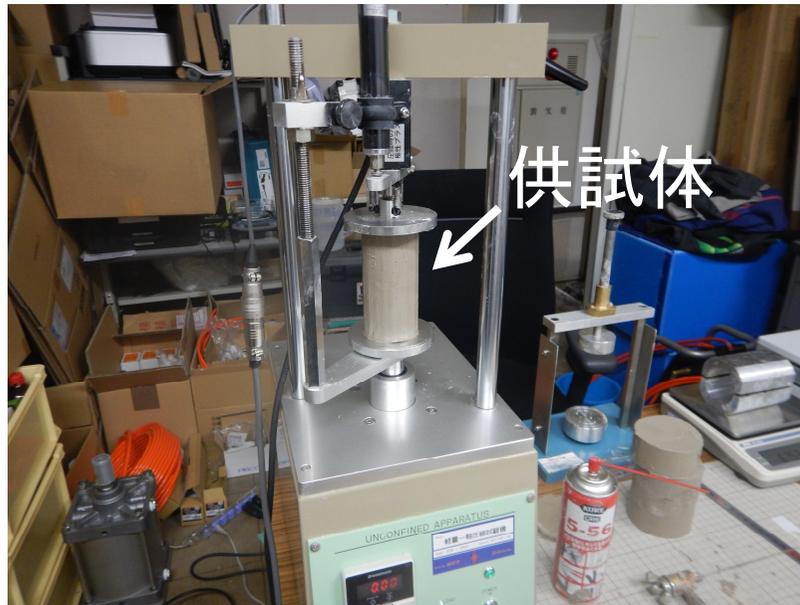
簡易な解析モデル



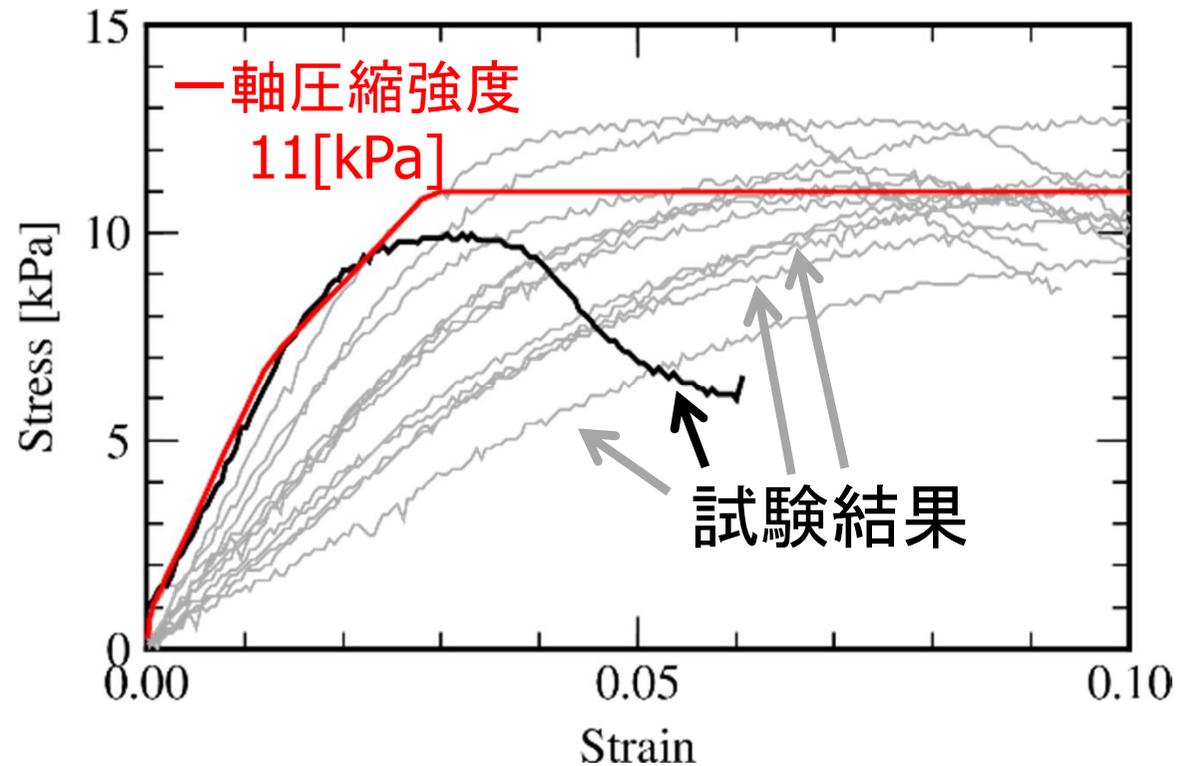
- 少ない計算自由度でありながら、非線形相互作用の影響を考慮できる簡易な応答解析手法を検討 → 振動台実験と簡易な応答解析手法を比較

地盤の諸定数の設定(土質試験)

土の一軸圧縮試験の状況



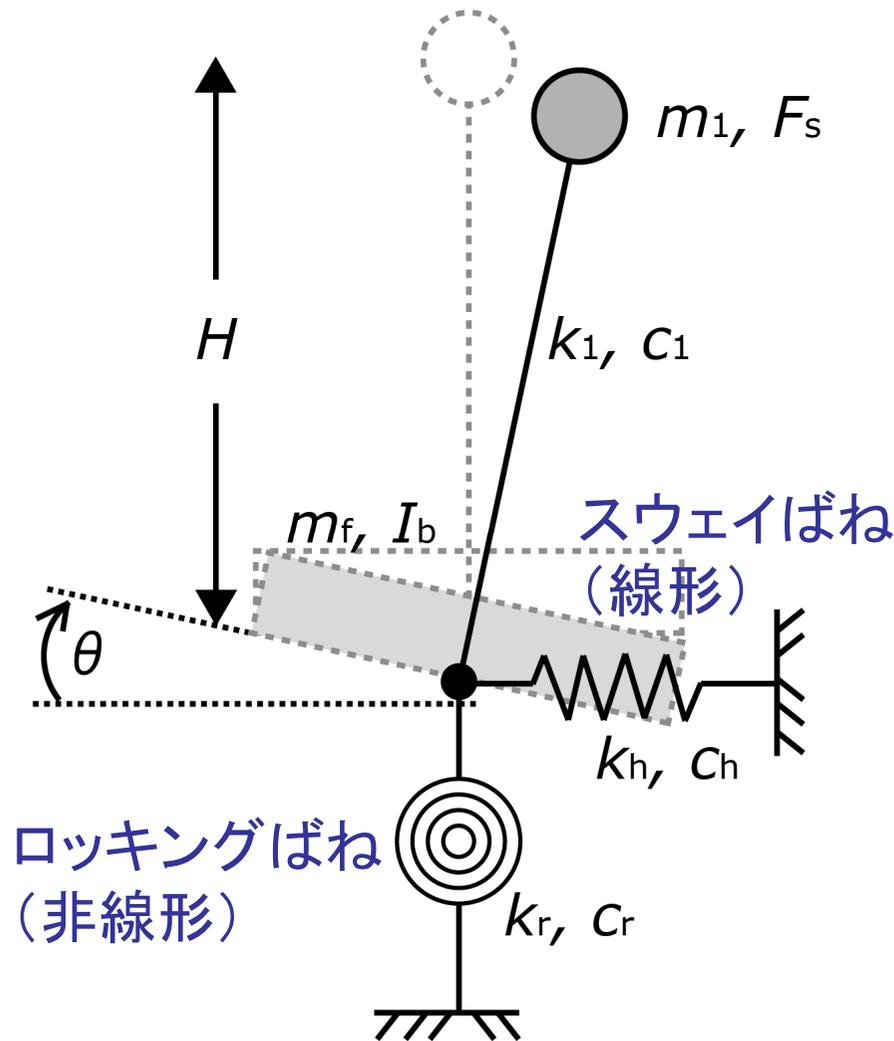
土の一軸圧縮試験結果



- 土の一軸圧縮試験より、
非排水せん断強さ $S_u = \text{一軸圧縮強度} / 2 = 11 \text{ [kPa]} / 2 = 5.5 \text{ [kPa]}$
- 粘土地盤における正方形基礎の極限支持力: $N_{u0} \approx (\pi+3)S_u B^3 = 4,138 \text{ [N]}$
- 建物模型(170kg)の自重による鉛直荷重: $N_u = 1,667 \text{ [N]}$ ↑ 基礎幅0.35[m]
- 本検討での安全率: $F_s = N_{u0} / N_u \doteq 2.5$

解析モデル(SRモデル)の概要

解析モデル (スウェイ・ロッキングモデル)



■ スウェイばね

$$k_h = \frac{8G_0R}{2-\nu} \left(1 + \frac{R}{2H_s} \right)$$

せん断剛性 (shear modulus) 等価基礎半径 (equivalent foundation radius)
 ポアソン比 (Poisson's ratio) 地盤の層厚 (soil layer thickness)

Gazetas (1983)

$$c_h = 2k_h\xi/\omega_n$$

Anastasopoulos et al. (2014)

■ ロッキングばね (初期)

$$k_{re} = \frac{8G_0R^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{R}{6H_s} \right)$$

Gazetas (1983)

$$c_r = 0.10k_{re}/\omega_n$$

Anastasopoulos et al. (2014)

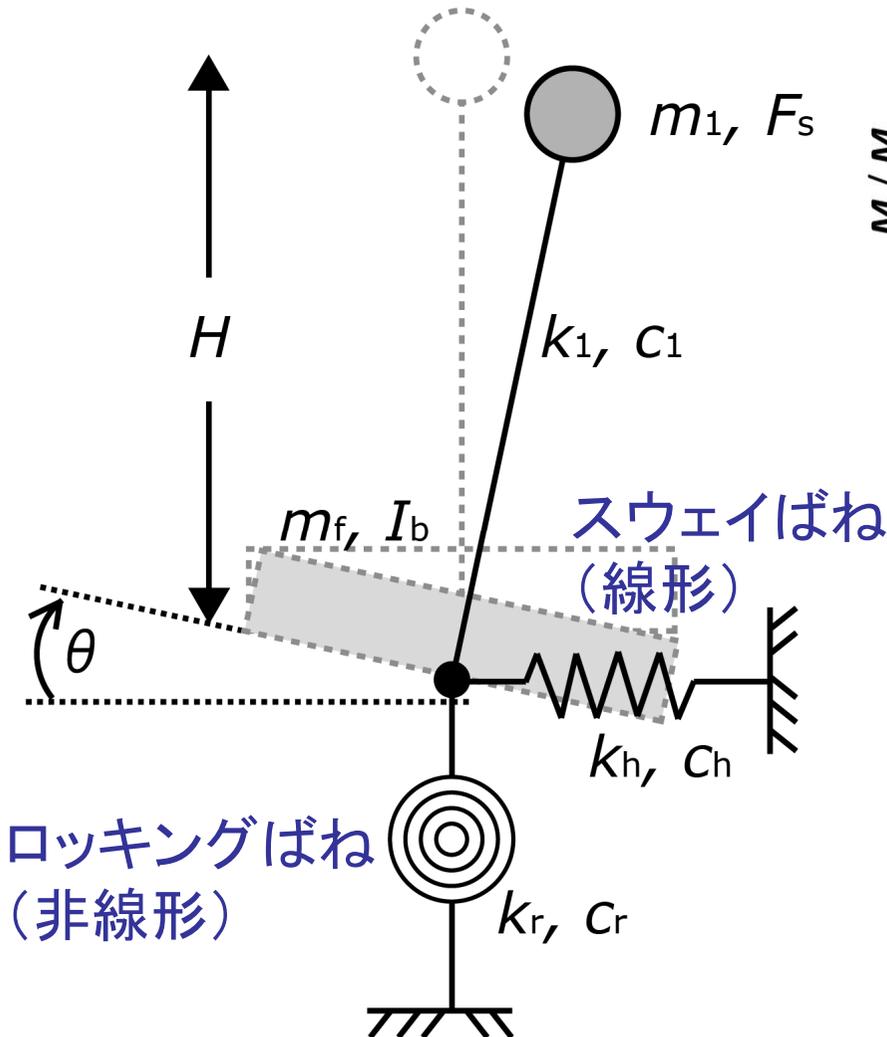
$$\omega_n = 2\pi/T_n$$

Gazetas et al. (2013)

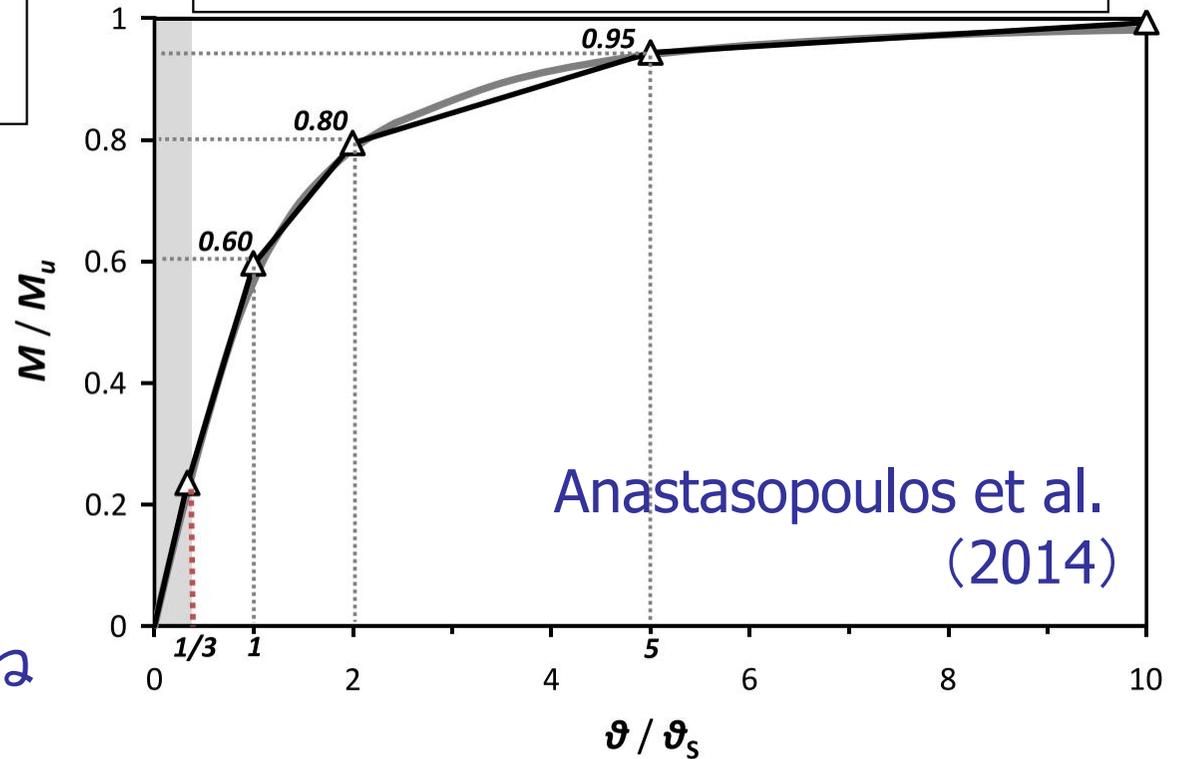
$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m_1H^2}{k_{re} \left(1 - \frac{0.8}{F_s} \right) - m_1gH}}$$

解析モデルの概要(ロッキングばねの非線形特性)

解析モデル
(スウェイ・ロッキングモデル)



ロッキングばねの非線形特性



$$\theta_s = \frac{N_u B}{4k_{re} \left(1 - \frac{0.8}{F_s}\right)} \left\{ 1 - 0.22 \left(1 - \frac{1}{F_s}\right)^2 \right\}$$

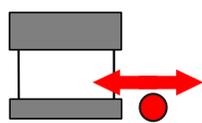
$$M_u = 0.55 N_{u0} B \left(\frac{1}{F_s} - \frac{1}{F_s^2} \right) \text{Gazetas et al. (2013)}$$

時刻歴波形の比較（実験 vs 解析(SRモデル)）

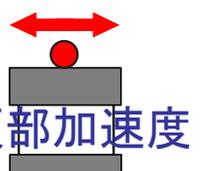
入力振幅 / 振動数: 2m/s^2 , 12Hz

入力振幅 / 振動数: 4m/s^2 , 12Hz

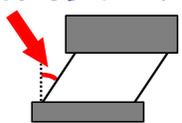
地表加速度



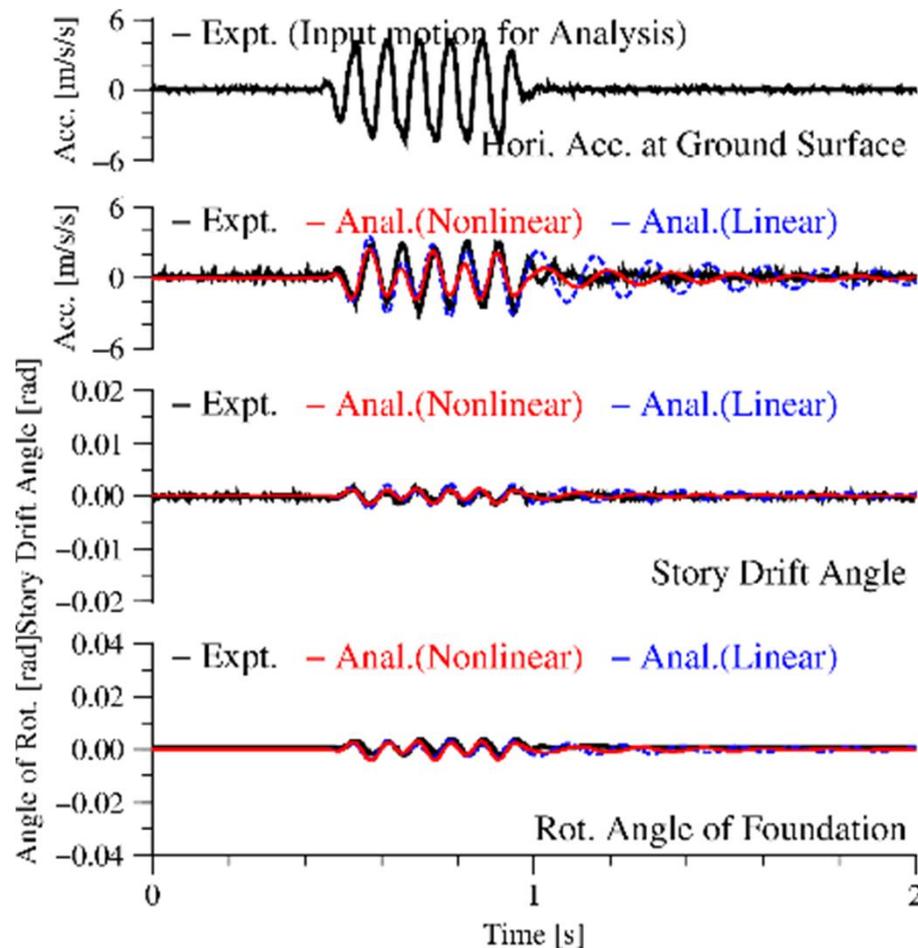
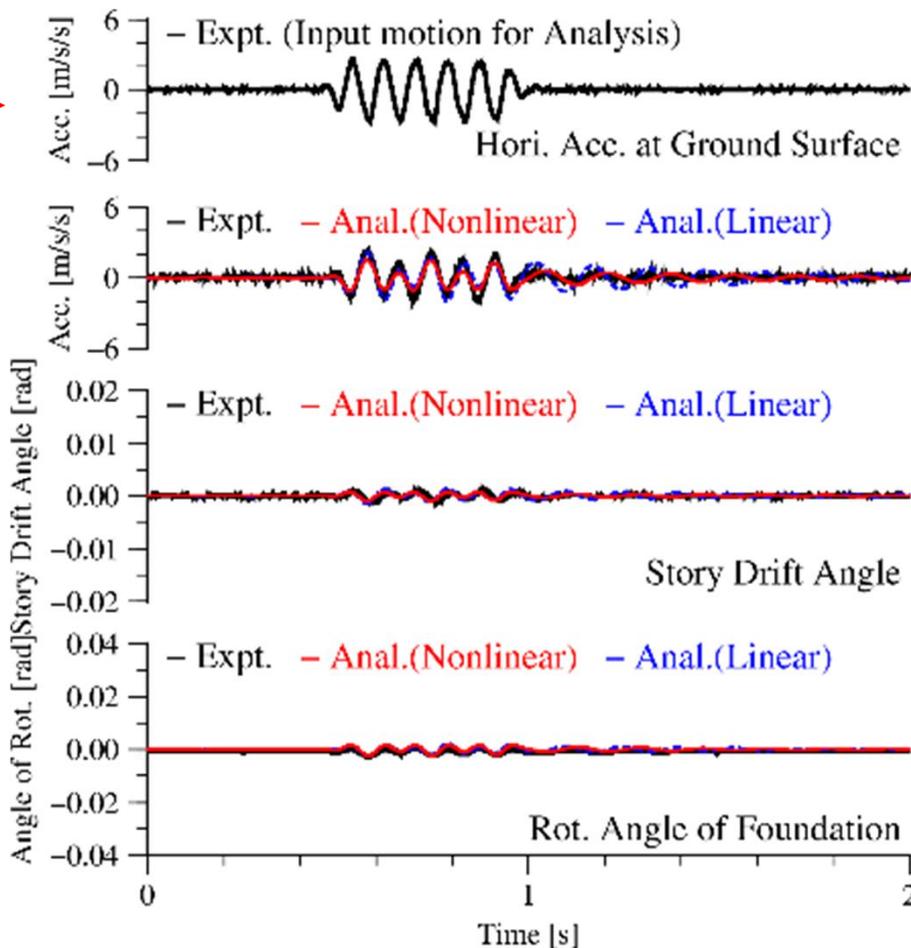
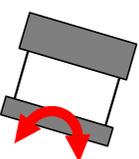
頂部加速度



層間変形角



基礎回転角



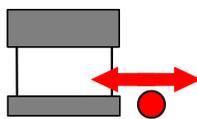
- 入力振動数が 12Hz 時の解析結果は、ロッキングばねが**非線形の場合**も**線形の場合**も実験結果とおおむね対応する 16/20

時刻歴波形の比較（実験 vs 解析（SRモデル））

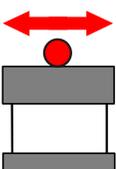
入力振幅 / 振動数: 2m/s^2 , 6Hz

入力振幅 / 振動数: 4m/s^2 , 6Hz

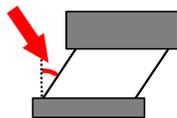
地表加速度



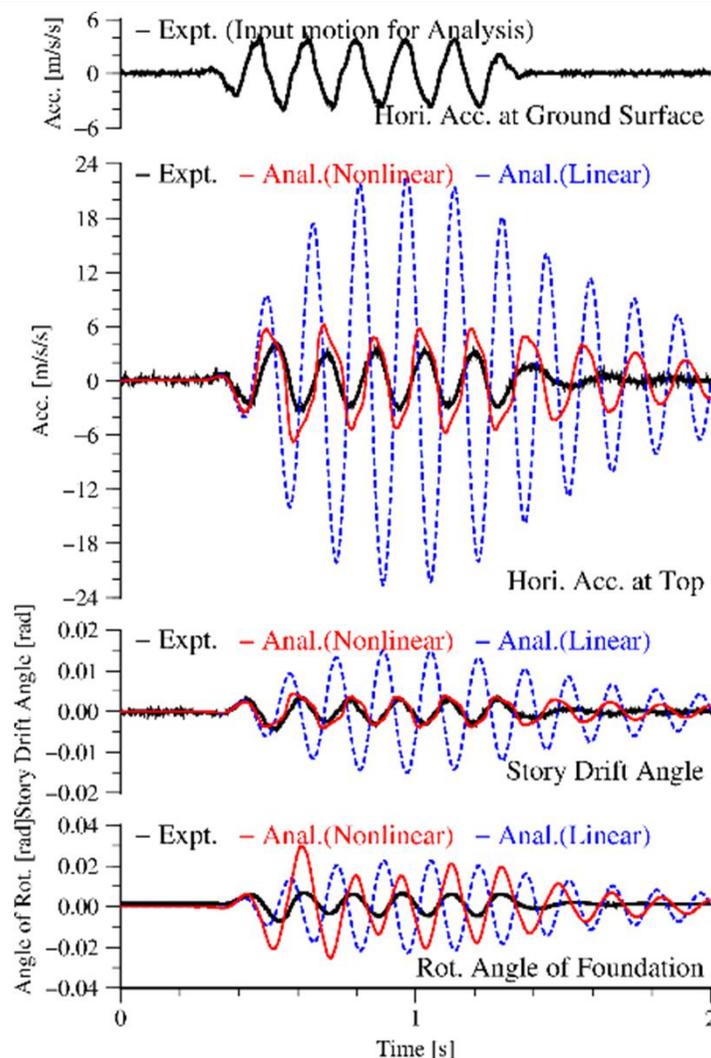
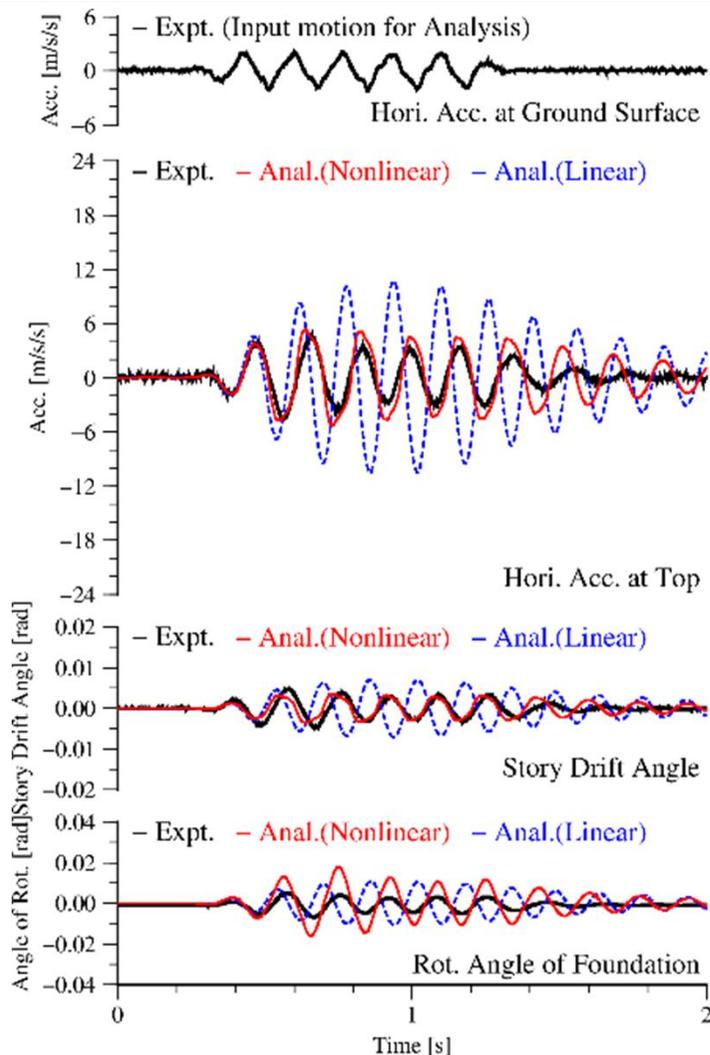
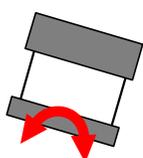
頂部加速度



層間変形角



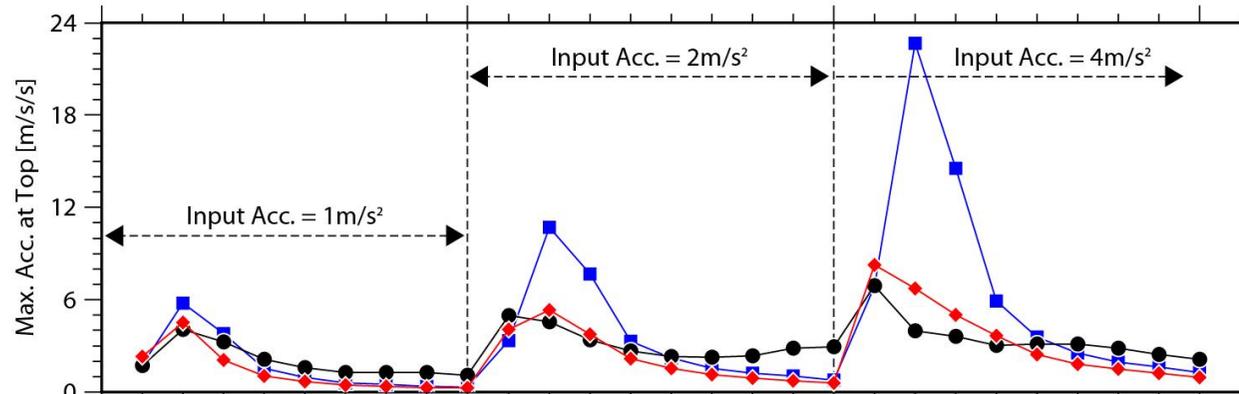
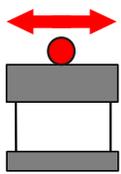
基礎回転角



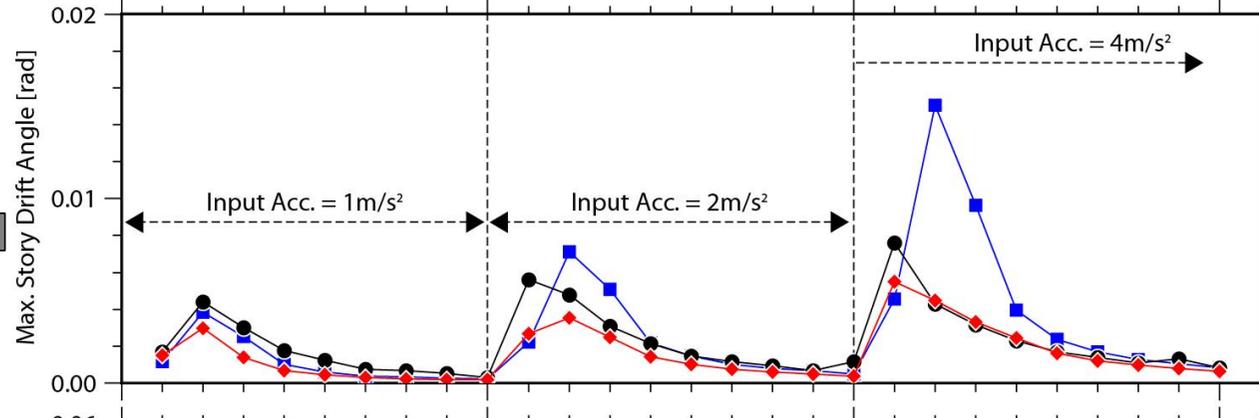
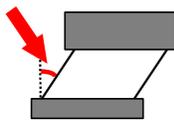
- **ロッキングばねが線形の場合は、実験結果と大きな差異。**
ロッキングばねが非線形の場合は、基礎回転角を過大評価

応答最大値の比較（実験 vs 解析(SRモデル)）

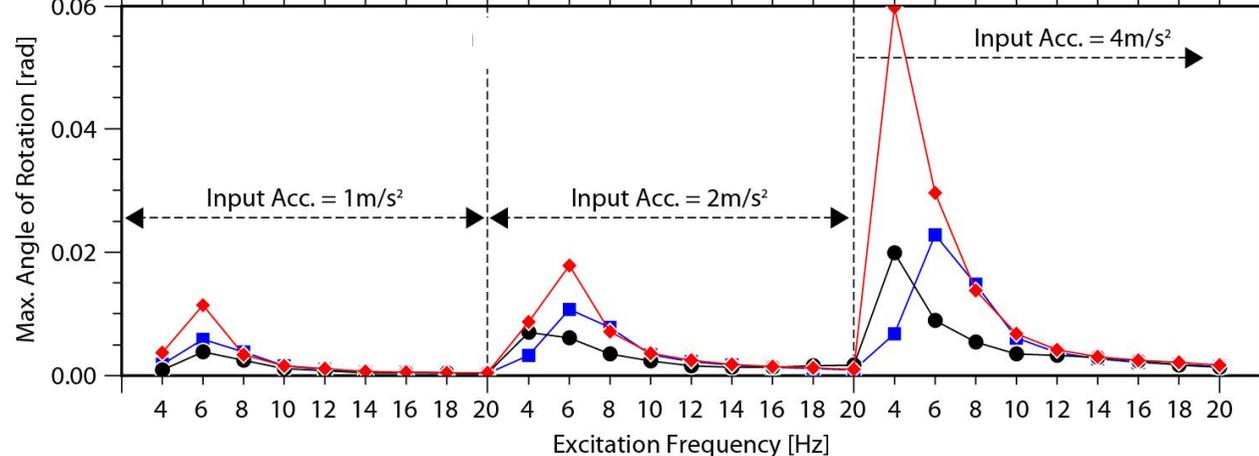
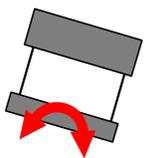
頂部
加速度



層間
変形角



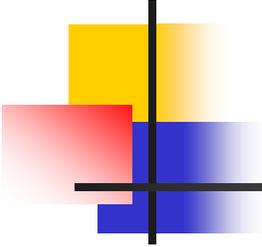
基礎
回転角



- 実験
- 簡易解析 (ばね非線形)
- 簡易解析 (ばね線形)

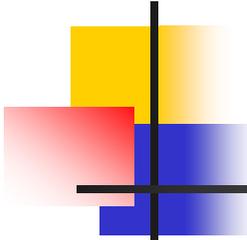
■ 簡易解析結果 (ばね非線形) の頂部加速度および層間変形角は、おおむね実験結果を捉えている

■ 基礎の回転角は入力振動数4-8Hzにおいて実験結果を過大評価



SRモデルによる検討のまとめ

- 地盤の非線形性を伴う構造物の地震時挙動を簡便に評価するための簡易な応答解析手法について検討した
 - 地盤－基礎系を、非線形の回転地盤ばね、線形の水平地盤ばね＋ダッシュポットに置換した解析モデル
 - 1g場の振動台実験（粘土地盤＋直接基礎建物）との比較
- 簡易応答解析手法(SRモデル)による計算結果について、頂部の加速度および層間変形角は実験結果とおおむね対応する
- 基礎の回転角は、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に課題がある



まとめ

- **非線形動的相互作用効果**が建物挙動に及ぼす影響の理解に資するため、2つの解析手法(**3次元FEM**および**SRモデル**)を用いて応答解析を実施し、振動台実験と比較を行った
- **FEMによる検討**: **弾完全塑性モデル(MCDPモデル)**よりも**NSモデル**の方が実験との対応がよい。**弾完全塑性モデル**を用いた解析では基礎の水平動および基礎端部の上下動の評価に特に注意が必要である
- **SRモデルによる検討**: 頂部の加速度および層間変形角は実験結果とおおむね対応するものの、基礎の回転角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に課題がある
- ただし、本検討では実験条件が限られており、他の建物や地盤の条件下でさらなる検討を行うことが望ましい