

杭頭免震建物の杭応力評価に関する検討

A Study on the Evaluation for Pile Stress of Pile Top Seismic Isolation Building

相羽均修*1 五十嵐治人*2 土方勝一郎*3

概要

従来、杭基礎構造物の2次設計では、地盤変位と構造物慣性力を個別に杭に作用させ、それらの二乗和平方根で杭応力を求める手法が用いられてきた（以下、SRSS）。一方、建築基礎構造設計指針¹⁾（以下、基礎指針）に示されるように、軟弱地盤におけるレベル2地震のように水平地盤反力と杭体の $M-\phi$ 関係の非線形性が強いケースでは、杭応力の重ね合わせは成立しないため、地盤変位と構造物慣性力を同時に杭に作用させる（以下、同時載荷）ことが合理的と考えられる。

本報では、物流倉庫で採用される、建物の固有周期 T_b が地盤周期 T_g より長い ($T_b/T_g > 1$) 杭頭免震建物を対象として、SRSS および同時載荷で算定した杭の応答値を比較検討した。その結果、同じ建物、地盤条件で慣性力と地盤変位による外力を SRSS によって評価した結果と、同時載荷の結果の包絡値は概ね同等であることが分かった。

key words : 杭頭免震、物流倉庫、2次設計、場所打ち杭、すべり支承、応答変位法

1. はじめに

従来、杭基礎構造物の2次設計では、SRSS が広く用いられてきた。一方、基礎指針に示されるように、軟弱地盤におけるレベル2地震のように水平地盤反力と杭体の $M-\phi$ 関係の非線形性が強いケースでは、杭応力の重ね合わせは成立しないため、同時載荷で杭応力を評価することが合理的と考えられる。

物流倉庫では、建設コストを抑えつつ、地震力の低減を図るため杭頭免震構造が採用されることが多い。これは、杭頭に免震装置を設け、杭頭同士は扁平なつなぎ梁で連結する構造で、地震時に杭頭が回転することとなる。杭頭免震構造の免震装置には、杭頭がピンに近い状態となる積層ゴム支承や、ある程度の回転拘束効果があるすべり支承が用いられる。この杭頭免震構造における杭応力の評価に関する知見は少ない。

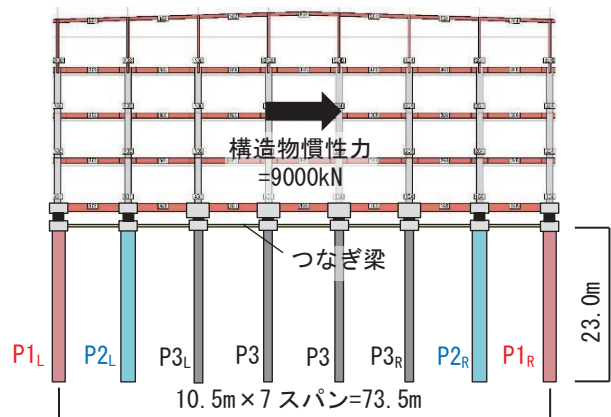
本報では、建物の固有周期 T_b が地盤周期 T_g より長い ($T_b/T_g > 1$) 杭頭免震建物を対象として、SRSS および基礎指針による同時載荷で算定した杭の応答値を比較検討する。なお、検討においては異なる2種類の軟弱地盤を設定した。

2. 解析概要

2.1 建物概要

検討に際しては4階建ての物流倉庫を想定した短辺1フレームを対象とした。軸組図を図-1に示す。上部構造

は柱RC梁S造、下部構造はRC造、架構形式はラーメン構造とした。平面規模は長辺方向103.5m、短辺方向73.5m、建築面積は7,600m²、延べ床面積は30,400m²である(表-1)。



P1、P2 : 場所打ち杭+積層ゴム支承 添字 R : 押込み側
P3 : 既製杭+すべり支承 L : 引抜き側

図-1 軸組図

表-1 建物概要

建築面積	7,600m ²
延べ床面積	30,400m ²
階数	4階
平面形状	73.5m × 103.5m
構造種別	上部 : 柱RC梁S造 / 下部 : RC造
架構形式	ラーメン構造
杭	場所打ち杭、既製杭

*1 Masanobu AIBA

技術本部技術研究所 研究員

*2 Haruhito IGARASHI

技術本部技術研究所 主席研究員

*3 Katsuichiro HIJIKATA

顧問 博士(工学)

2.2 基礎概要

杭の断面性能と免震装置の回転剛性を表-2に示す。場所打ち杭(P1、P2)には積層ゴム支承を設け、既製杭(P3)にはすべり支承を設けた。積層ゴム支承およびすべり支承の曲げモーメントMと回転角θ(上端と下端の相対回転角の関係)は式(1)のように表される。積層ゴムの限界変形時せん断ひずみは一般的に400%²⁾であることを踏まえ、免震装置ゴムのひずみはL2地震時の免震層の水平変位から設定した。ここで、免震装置の回転剛性K_rは式(2)によって評価した³⁾。

$$M = K_r \cdot \theta \tag{1}$$

$$K_r = \frac{k_{rc}}{h} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right\} \varphi_{rc} \tag{2}$$

- k_{rc} : ゴムシートの剛性を積層ゴム高さhで補正した圧縮時有効曲げ剛性
- P : 検討用軸力
- P_{cr} : 免震装置の座屈荷重
- φ_{rc} : 変位依存性を表す係数

2.3 地盤概要

検討に用いた地盤は、表層から深度20m付近まで軟弱粘性土が厚く堆積している湾岸地域の地盤調査結果を参考に設定した。検討では卓越周期が異なる軟弱地盤A、Bを設定した。パラメータは深度5m~18mまでのせん断波速度V_sである。地盤A、Bの地盤定数を表-3に、V_s分布を図-2に示す。重複反射理論により加速度応答倍率を算出した結果、地盤Aの卓越周期は1.22秒、地盤Bの卓越周期は2.41秒であった。

2.4 入力地震動

入力地震動は、極めてまれに発生する地震(告示波L2)の解放工学的基盤面における速度応答スペクトルに基づいて作成した。位相の異なる地震波3波について検討し、地盤応答変位が最大となった兵庫県南部地震神戸海洋気象台NS(以下、KOBEと称す)を採用した(図-3)。地震動の入力位置は、V_s=400m/s以上の条件を満たすGL-24mに設定した。地盤A、Bにおける地盤応答変位を図-4に示す。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

解析は、基礎指針に示される群杭フレームモデル(図-5)を用い、慣性力(9000kN)と地盤変位を作用させた。水平地盤ばねは、基礎指針に示される群杭効率を考慮し、基準水平地盤反力係数k_{n0}、塑性水平地盤反力度P_yを評価した。基礎指針の方法により液状化判定を行った結果、レベル2荷重検討時の地表面水平加速度相当で、層番号③は液状化すると判定した。

表-2 杭の断面性能と免震装置の回転剛性

符号	P1	P2	P3	備考
種類	場所打ち杭		既製杭	F _c :コンクリート強度 K _p :免震装置による杭頭回転ばね ※ヤング率はRC規準式で算定
杭径(mm)	2000	2200	1200	
本数	2	2	4	
F _c (N/mm ²)	30		120	
K _p (kN・m/rad)	6380	12430	750990	

表-3 地盤定数一覧

層	土質	γ	ν
①	盛土	18	0.493
②	粘土	17	0.492
③			
④	シルト	14	0.499
⑤		16	
⑥		15	
⑦	砂混りシルト	16	0.496
⑧	シルト混り細砂	19	0.492
⑨	砂質泥岩	21	0.446

γ:単位体積重量(kN/m³)
ν:ポアソン比

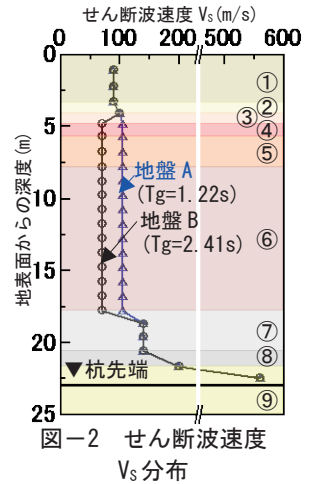
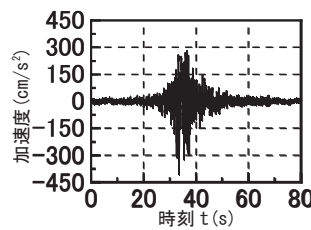


図-2 せん断波速度V_s分布



継続時間と最大応答一覧

位相	KOBE
継続時間	81.91(秒)
最大加速度	408.0(cm/s ²)
最大速度	50.6(cm/s)
最大変位	31.2(cm)

図-3 入力地震動

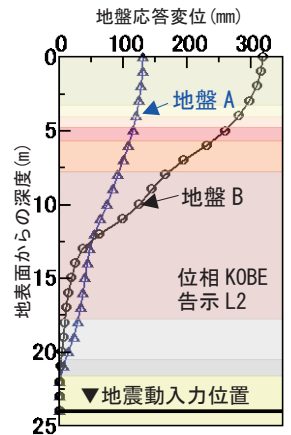


図-4 地盤応答変位

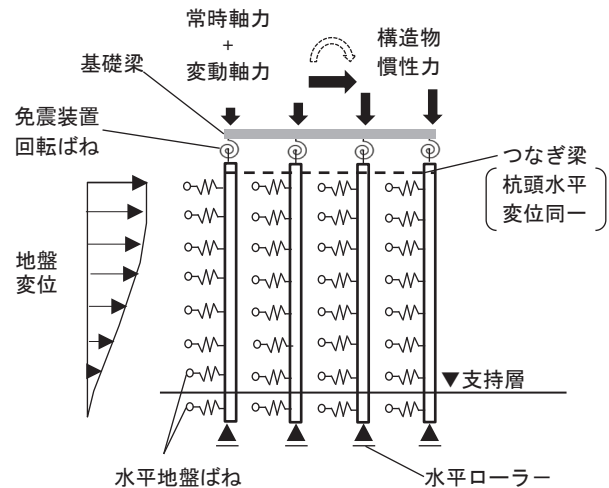


図-5 群杭フレームモデル

3.2 基礎のモデル

杭の M-φ 関係を図-6 に示す。P1、P2、P3 の位置関係は前記図-1 に示した。P1、P2 はコンクリートひび割れ耐力を第 1 折れ点とし、曲げ降伏耐力を第 2 折れ点とする 3 折線でモデル化した。ひび割れ耐力の算定は、変動軸力は考慮せず常時軸力を用いた。曲げ降伏耐力の算定には上部構造物にレベル 2 荷重の水平力を作用させた際の基礎に生じる変動軸力を用いた。P3 は線形モデルとし、変動軸力を考慮して耐力を算定し、解析では耐力を超えないことを確認した。

3.3 地盤ばねのモデル

地盤ばねは、杭と地盤の各質点間をばね要素で結合し、水平地盤反力の非線形性を考慮した。

慣性力による杭応力算定時の水平地盤反力係数 k_h は基礎指針の方法に従った式(3) (以下、基礎指針の式)とした。

応答変位による杭応力算定時の地盤ばねは、Broms の式にて塑性水平地盤反力度を P_y とした。水平地盤反力係数 K_h は基礎指針の式(式(3))および、Francis の式(式(4))を用いた。Francis の式では、水平地盤反力度 P の算出には双曲線モデル(式(5))を用いた (図-7)。

$$P = k_h y \quad (3)$$

$$0.0 \leq y \leq 0.001 \text{ の場合} : k_h = 3.16 k_{h0}$$

$$0.001 < y \text{ の場合} : k_h = \frac{k_{h0}}{\sqrt{\frac{y}{0.01}}}$$

$$k_{h0} = \alpha \xi E_0 \left(\frac{B}{B_0}\right)^{-3/4}$$

$$E_0 = \frac{E_S}{30}$$

P: 水平地盤反力度 (kN/m²)、 k_{h0} : 基準水平地盤反力係数 (kN/m³)
 k_h : 杭水平変位 y 時の水平地盤反力係数 (kN/m³)、 y : 水平変位 (m)
 α : 評価法によって決まる定数 (m⁻¹)
 ξ : 群杭係数、 E_S : V_S から求めた変形係数 (kN/m²)

$$K_h = \frac{1.3 \cdot E_S}{1.0 - \nu^2} \cdot \left(\frac{E_S \cdot B^4}{E_P \cdot I_P}\right)^{1/12} \quad (4)$$

$$E_S = 2(1 + \nu)\rho V_S^2$$

k_{h0} : 水平地盤反力係数 (kN/m³)、 E_S : V_S から求めた変形係数 (kN/m²)
 B : 杭径 (m)、 ν : ポアソン比、 E_P : 杭のヤング係数 (kN/m²)
 I_P : 杭の断面 2 次モーメント (m⁴)、 ρ : 単位体積重量 (kN/m³)

$$P = \frac{K_h \cdot y}{1.0 + \frac{K_h \cdot y}{P_y}} \quad (5)$$

P: 水平地盤反力度 (kN/m²)、 K_h : 水平地盤反力係数 (kN/m³)
 y : 水平変位 (m)、 P_y : 塑性水平地盤反力度 (kN/m²)

3.4 解析ケース

解析ケースは、地盤 2 種類 (A、B)、杭応力の組合せ 2 種類とした。各解析ケースを表-4 に示す。各ケースの水平地盤反力係数 k_h は、地盤 A、B それぞれのせん断波速度 V_S から、基礎指針の式と Francis の式で算定した。

ケース 1 は慣性力に対する k_h は基礎指針の式とし、地盤変位に対する k_h は Francis の式とし、杭応力を SRSS で算定した。

ケース 2 は慣性力に対する k_h および地盤変位に対する k_h 共に基礎指針の式とし、杭応力を SRSS で算定した。

ケース 3 は慣性力に対する k_h および地盤変位に対する k_h 共に基礎指針の式とし、杭応力を同時載荷で算定した。同時載荷では、構造物慣性力と地盤変位の最大値の非同時性を考慮し、4 つの組合せについて解析を行った (図-8)。

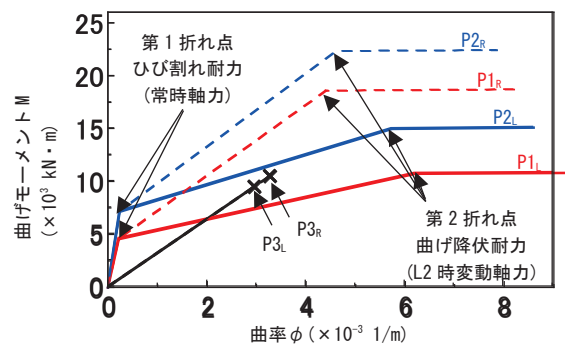


図-6 杭の M-φ 関係

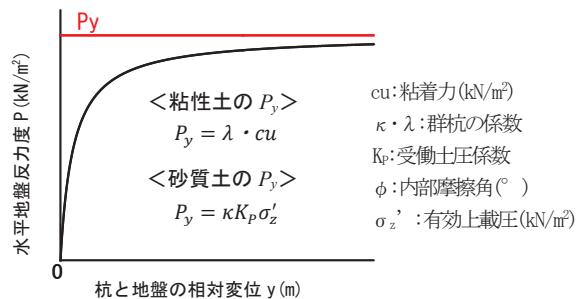


図-7 双曲線モデル

表-4 解析ケース

ケース	応力の組合せ	k_h 算定方法	備考
1	SRSS	K+F	K+F: 慣性力に対しては基礎指針の式、地盤変位に対しては Francis の式
2		K+K	
3	同時載荷	K+K	K+K: 慣性力、地盤変位とも基礎指針の式

※全ケースで地盤 A、B について実施する

※ケース 3 は慣性力、地盤変位の倍率、位相を変えた 4 種類の解析を実施した。

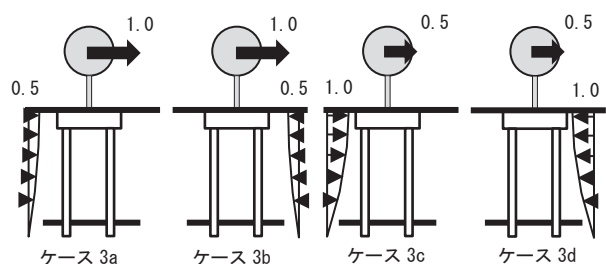


図-8 同時載荷の応答倍率組合せ

4. 解析結果

ケース1とケース2では、SRSSを用いた場合の地盤変位に対する k_h の算定方法の違いを比較する。また、ケース2とケース3では、 k_h の算定に基礎指針の式を用いた場合の、SRSSと同時載荷による杭応答値の違いを比較する。なお、場所打ち杭 P1と P2の解析結果はほぼ同じであったため、代表として P1 の応答値を示す。

4.1 SRSS(ケース1、2)の杭応答値

SRSSで検討する場合を対象とした、ケース1、2(表-4)の押込み側の場所打ち杭 P1_Rと既製杭 P3_Rの杭応答値を図-9に示す。杭曲率も杭応力と同様に慣性力、地盤変位による結果の二乗和平方根とした結果を示す。これらによると、以下のことが言える。

- ・地盤 A では、杭曲げモーメントおよび曲率は、いずれの杭も両ケースでほぼ同じ値となった。せん断力は、ケース1で支持層境界付近の応答値が大きくなった。
- ・地盤 B では、杭曲げモーメントおよび曲率は、ケース1が有意に大きくなった。せん断力は、ケース1で支持層境界付近に加え杭中間部でも応答値が大きくなった。これらの特性は、 k_h の算定値が基礎指針の式に比べて Francis の式の方が大きいため、地盤変位が大きい地盤 Bにおいて、両者の相違が大きく発現したためである。

4.2 同時載荷(ケース3)の杭応答値

同時載荷によって評価した、積層ゴム支承を設けた場所打ち杭 P1_R(押込み側)の応答値を図-10に示す。P1_Rの曲げモーメントは、地盤 A($T_g=1.22s$)、地盤 B($T_g=2.41s$)共に地盤変位に較べ慣性力による影響が大きく、ケース 3a、3b が各深度で最大値を取った。せん断力は、地盤 B では杭頭部と杭先端部でケース 3a、3b が最大となり、中間部でケース 3c、3d が最大となった。また、地盤 A の曲げモーメントと曲率の最大値は、地盤 B よりも大きくなった。これは、地盤変位の作用によって杭に生じる曲げモーメントの深度方向のピーク位置が異なるためと考える。

同時載荷によって評価した、すべり支承を設けた既製杭 P3_R(押込み側)の応答値を図-11に示す。地盤 A では、P3_Rのせん断力は、杭頭部でケース 3a、中間部でケース 3b、3d、杭先端部でケース 3c が最大となっ

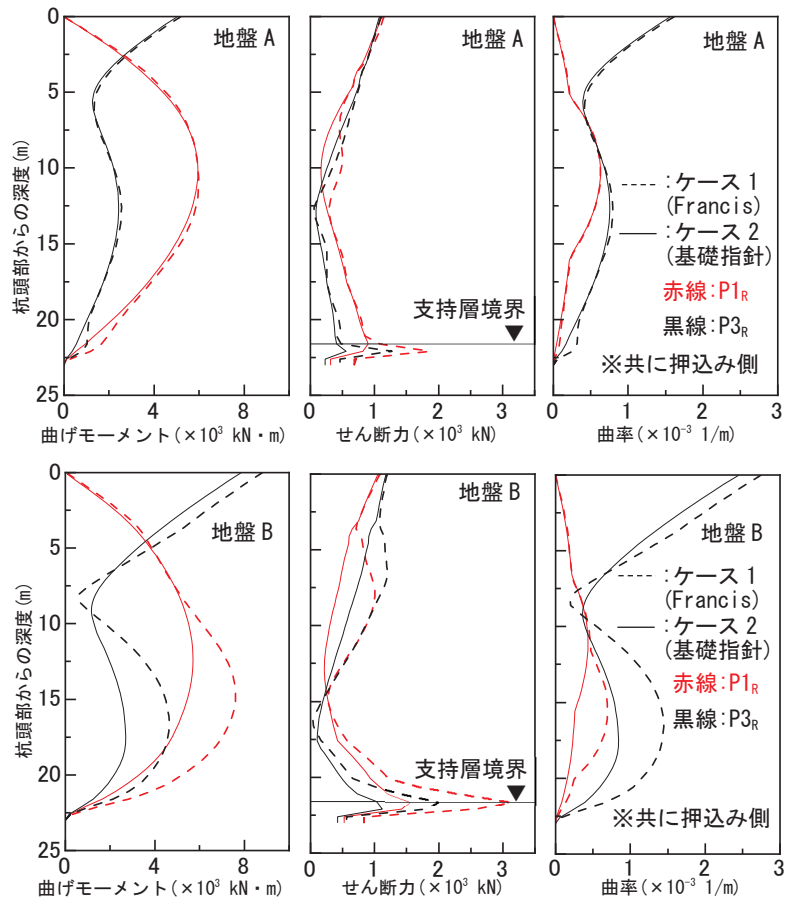


図-9 ケース1、2(SRSS)の杭応答値

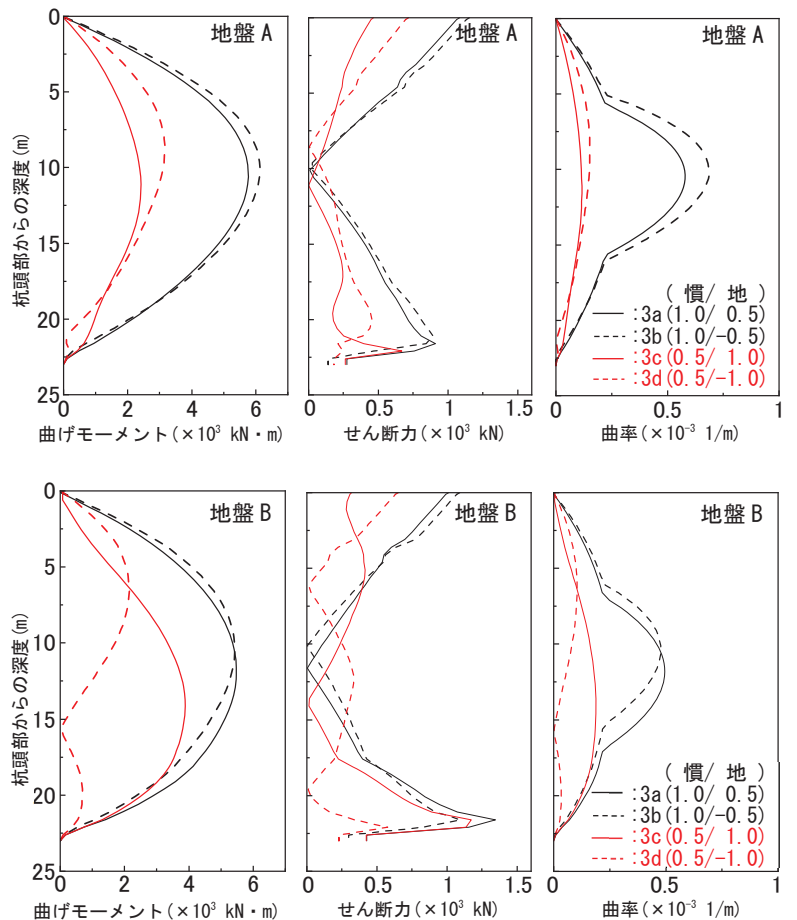


図-10 場所打ち杭 P1_Rのケース3(同時載荷)の杭応答値

た。地盤 B では、 P_{3R} の応答値は、杭頭部でケース 3a、3b、杭先端部付近で 3a、3c、中間部でケース 3c、3d が最大となった。

以上より、杭頭免震構造の杭応力の評価に同時載荷を用いる場合、各深度の杭応力の最大値は、図-8 に示す異なるケースで発現することを確認した。ただし、地中部の曲げモーメントが最大値を取り、かつ杭頭部と地盤層境界でせん断力がほぼ最大となるのはケース 3a であることを確認した。したがって本ケースに着目して杭断面は決められると考える。

4.3 SRSS と同時載荷の杭応答値の比較

杭応答値の比較は、 k_h の算定式を基礎指針の式としたケース 2 (SRSS) とケース 3 (同時載荷) で行った。ケース 3 の杭応答値は、ケース 3a、3b、3c および 3d の、各深度における絶対値の包絡値である。

SRSS と同時載荷で算定した、場所打ち杭 P_{1R} の応答値の比較を図-12 に、既製杭 P_{3R} の応答値の比較を図-13 に示す。地盤 A、B いずれにおいても、 P_{1R} および P_{3R} の応答値の深度方向の分布は、概ね等しい。水平地盤反力と杭の $M-\phi$ 関係の非線形性が強いケースにおいても、SRSS と同時載荷によって評価した杭応答値は、概ね等しいことを確認した。

5. まとめ

杭頭がピンに近い状態となる積層ゴム支承や、ある程度の回転拘束効果があるすべり支承を有する固有周期 T_b が地盤周期 T_g より長い ($T_b/T_g > 1$) 杭頭免震建物の杭について、SRSS および基礎指針による同時載荷で算定した杭の応答値を比較検討した。この結果、杭に生じる曲げモーメント、せん断力について以下のことが分かった。

- ・ SRSS では、せん断力は Francis 式の方が大きくなった。これは、 k_h の算定値が基礎指針の式に比べて Francis 式の方が大きいためであると考えられる。
- ・ 同時載荷によって評価する場合、深度に応じて断面を適宜変更する場合は 4 通りの解析を実施する必要がある。
- ・ 同時載荷では、慣性力 1.0 のケースが、各杭における応答値のほぼ最大値となる。
- ・ 同じ建物、地盤条件で慣性力と地盤変位による外力を SRSS によって評価した結

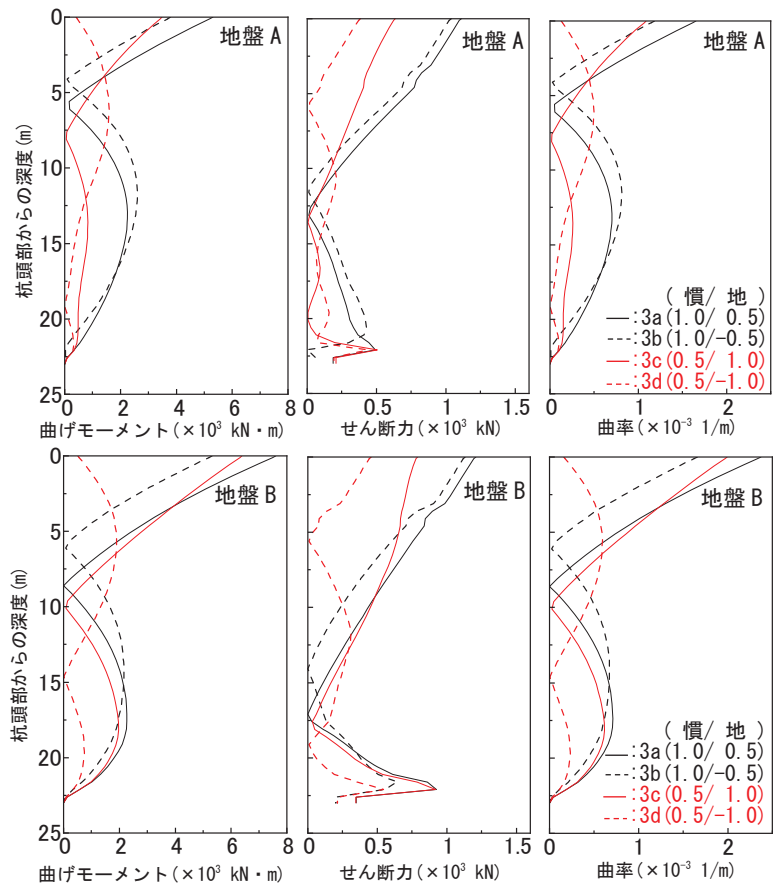


図-11 既製杭 P_{3R} のケース 3 (同時載荷) の杭応答値

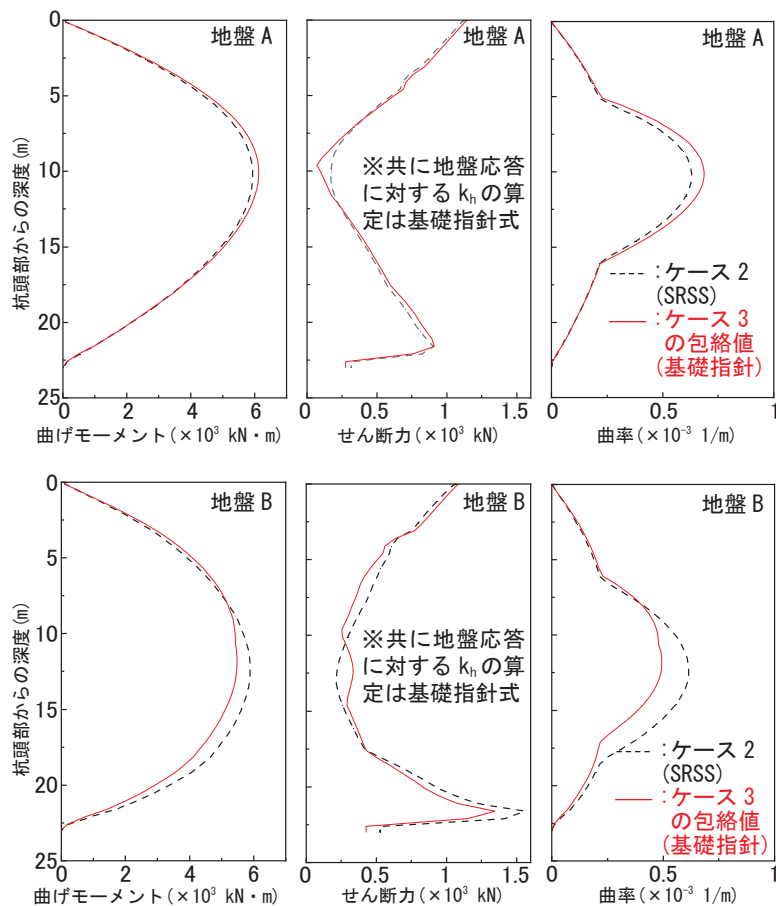


図-12 場所打ち杭 P_{1R} のケース 2 とケース 3 の包絡値の比較

果と、同時載荷の結果の包絡値は概ね同等である。

今後は、建物慣性力の増加にともない杭体に生じる軸力の変動を逐次考慮した非線形解析等により、解析精度を向上させたい。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：基礎構造設計指針、2019.11
- 2) 日本建築学会：免震構造設計指針、2013.10
- 3) 三山剛史：積層ゴムの上下面に回転角を与えた場合の力学性状に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第556号、pp.43-50、2002.6
- 4) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006.2

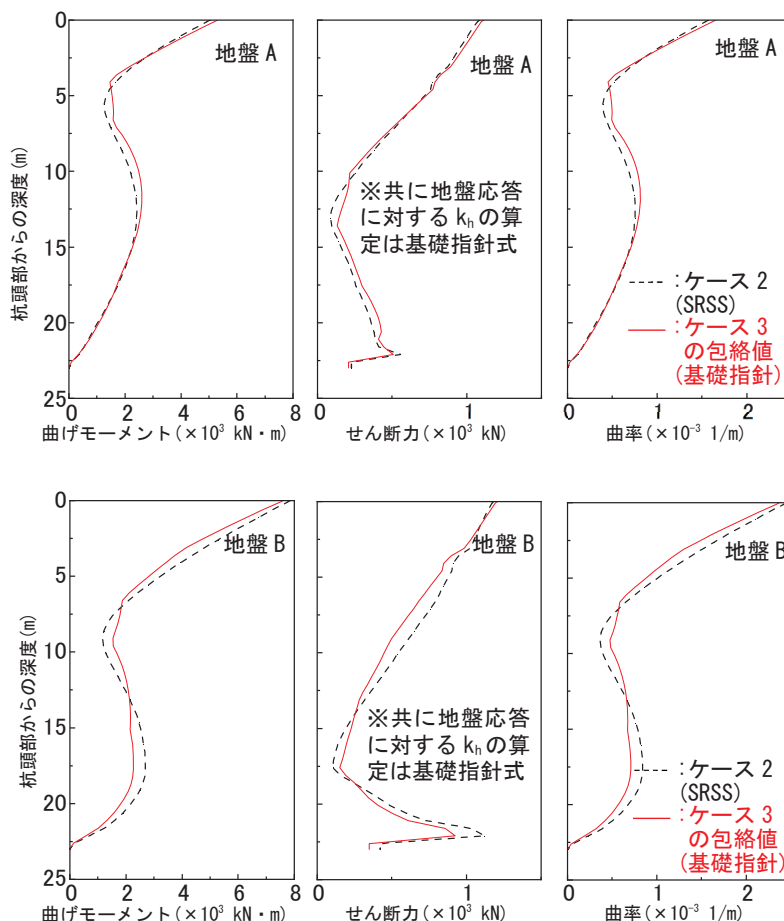


図-13 既製杭 P3_Rのケース 2 とケース 3 の包絡値の比較