

1. 杭頭免震建物における部材構成や地盤条件を変動因子とした解析的検討

Parametric Analytical Study on the Influence of Structural Members and Ground Condition about Base Isolated Building with Inclination of Pile Top

山内 豊英*¹ 橋本 拓*² 中澤 敏樹*¹
森 浩二*¹ 飛田 喜則*¹

要 旨

近年、物流施設等で数多く採用されている杭頭免震工法について、下部構造の部材構成や地盤条件を変動因子とした解析的検討を行った。その結果、下部構造の部材応力や免震装置の曲げ回転角等、杭頭免震建物における下部構造の構造特性と変動因子との関係を明らかにした。また、杭頭免震建物では、免震層における反曲点高さが免震装置の中央高さよりも下方に移動することを示し、従来設計における仮定とは異なることがわかった。更に、応答変位法による下部構造の評価結果と地震応答解析結果が概ね対応していることを示すとともに、地盤振動が下部構造の振動特性に与える影響についても示した。

キーワード：杭頭免震／魚骨モデル／静的解析／地震応答解析

1. はじめに

近年、免震構造の物流施設等において、杭頭免震工法が数多く採用されている。杭頭免震工法は、杭頭の直上に免震装置を設置し、免震層直下の基礎梁あるいはマットスラブを軽微なものとする事で基礎工事の合理化を可能とする工法である。

一方、杭頭免震工法は、従来の基礎免震構造よりも基礎梁やマットスラブの剛性が小さいため、杭頭に生じる回転変形への対応が問題となる。特に、積層ゴムを使用する場合には、杭や基礎梁の部材構成と地盤条件の関係について検討を行い杭頭の回転変形を制御して、積層ゴムの曲げ回転変形を規定値以内に納める必要がある。

このように、杭頭免震工法の構造特性は、下部構造の部材構成や地盤条件に依存するため、それらの条件に応じた合理的な設計が重要となる。例えば、既往研究¹⁾では、静的解析による検討により、免震層下部の基礎マットスラブの剛性に依じて、免震層の荷重-変形関係や杭の曲げモーメント分布が異なることを示している。

本研究では、基礎梁の剛性に加えて、杭種別や地盤条件も変動因子とした解析的検討を行い、杭頭免震建物における下部構造の構造特性について調べた。解析による検討は、静的解析と地震応答解析によって行い、杭頭免震建物における下部構造の構造特性と変動因子との関係について調べるとともに、静的解析に基づく現行設計法（応答変位法）と地震応答解析との関係についても比較を行った。

2. 検討対象建物と試設計の概要

検討対象建物を図-1に示す。建物概要を下記に示す。

建物用途：物流施設

階数：地上4階

延床面積：40,000 m²（各階面積：10,000 m²）

平面形状：10m×10m スパン（X、Y方向共通）

構造：柱RC 梁S ハイブリッド構法およびS造
基礎免震構造（杭頭免震）

1～3階の構造は、柱を鉄筋コンクリート（以下、RCと称す）造、梁を鉄骨（以下、Sと称す）造とした柱RC 梁S ハイブリッド構法とし、4階をS造とした。

試設計では、上部構造を多質点系等価せん断型モデルに置換し、最大速度0.5m/secに基準化した観測3波（EL CENTRO NS、TAFT EW、HACHINOHE NS）による地震応答解析を行い、上部構造の断面設計と免震装置の選定を行った。以下の解析モデルにおける上部構造と免震装置は、本試設計に基づいて設定している。

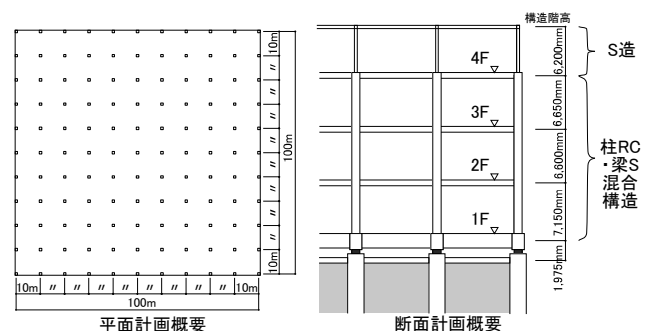


図-1 検討対象建物

*¹ 技術研究所構造研究グループ

*² 東京本店設計部

3. 魚骨モデルによる静的解析

3.1 魚骨モデル概要

図-1のように、物流施設は、平面形状が単純でスパン割りも均等となっていることが多いため、1スパンのみを取り出した魚骨モデルで代表させて解析による検討を行うこととした。

静的解析に用いる魚骨モデルを図-2に示す。魚骨モデルは、1階柱の反曲点から下部をモデル化し、1階柱・梁、免震装置、基礎梁、杭および水平地盤反力ばねで構成した。試設計の結果より、1階柱の断面は900mm×900mm、1階梁の断面は幅700mm×せい1800mmとし、ともにRC造でコンクリートの設計基準強度（以下、Fcと称す）を36N/mm²とした。免震装置は、直径1050mm、ゴム総厚250mm、100%せん断変形時の等価せん断弾性係数が0.35N/mm²の高減衰ゴム系積層ゴムとした。また、基礎梁下端から支持層までの厚さは20mとした。なお、柱、1階梁、基礎梁、杭は、弾性梁要素とした。

3.2 解析における変動因子

解析における変動因子を図-2に示す。変動因子は、杭種別、基礎梁の断面（剛度）、地盤のN値とした。杭は、鋼管杭と場所打ちRC造杭の2種類とし、基礎梁は、杭とピン接合としたものと、杭と剛接合とした4種類の扁平梁の計5種類とした（同図に示す剛比は、1階梁の剛度を1.0とした場合の剛比を示す）。地盤のN値は、1、5、10、15および20の5種類とし、N値1のみ粘性土、その他を砂質土として、いずれも一様地盤とした。

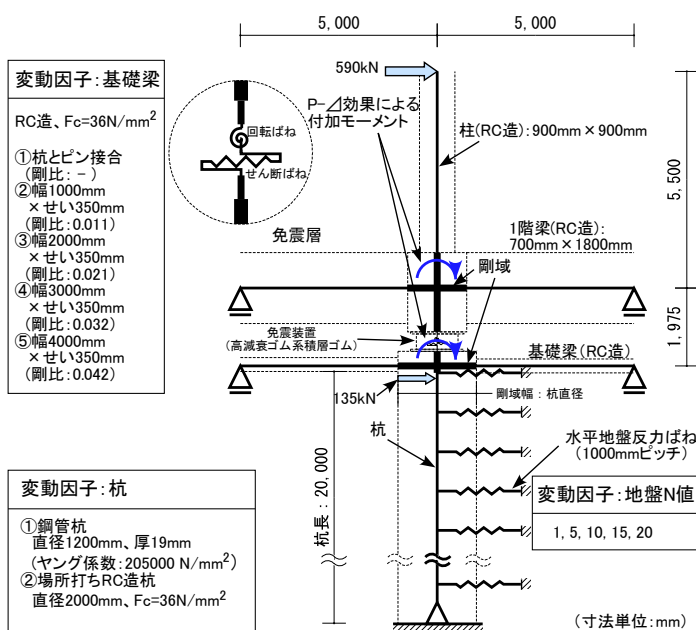


図-2 静的解析の魚骨モデル

3.3 水平地盤反力ばねのモデル化

水平地盤反力ばねの初期剛性は、文献²⁾の Francis の式に群杭係数^{2),3)}を考慮した式(1)により算定し、非線形特性には双曲線モデル²⁾を使用した。また、同ばねの極限地盤反力は、文献⁴⁾の Broms の式で算定した。地盤のヤング係数は、式(2)で算定することとし、土の密度 ρ は、一律 17.7kN/m³、S波速度 V_s は、文献⁵⁾より、地盤のN値から推定する式(3)によった。

$$k_{js} = \frac{1.3 \cdot E_s}{1 - \nu_s^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot B^4}{E_p \cdot I_p} \right)^{1/12} \cdot H \cdot \beta_H^{4/3} \quad \text{式(1)}$$

k_{js} : 水平地盤反力ばね定数(kN/m), E_s : 地盤のヤング係数(kN/m²),
 ν_s : 地盤のポアソン比(0.48), B : 杭直径(m),
 E_p : 杭材料のヤング係数(kN/m²), I_p : 杭の断面二次モーメント(m⁴),
 H : 区分された土層厚(m), β_H : 群杭係数

$$E_s = 2 \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot (1 + \nu_s) / g \quad \text{式(2)}$$

ρ : 土の密度(kN/m³), V_s : S波速度(m/sec),
 g : 重力加速度(9.80665m/sec²)

$$V_s = \begin{cases} 100 \cdot N^{1/3} & \text{粘性土} \\ 80 \cdot N^{1/3} & \text{砂質土} \end{cases} \quad N: \text{地盤のN値} \quad \text{式(3)}$$

3.4 免震装置のモデル化

免震装置のせん断ばねは、バイリニア型でモデル化し、回転ばねは、既往研究⁶⁾を参考に式(4)により定めた。図-3に試設計に基づく柱軸力(8000kN)において算定した曲げ回転角と曲げモーメントの関係を示す。免震装置の回転ばねは、約 0.004rad.まで弾性的挙動を示し、それ以降は非線形となることから、0.004rad.と 0.01rad.で折れ点をもつトリリニア型でモデル化した。

$$M = \frac{E_{rb} \cdot I_{eq}}{H_R} \theta \quad \text{式(4)}$$

M : 免震装置に生じる曲げモーメント(kN・m),
 E_{rb} : 積層ゴムの曲げに対する見かけの弾性係数(kN/m²),
 I_{eq} : 積層ゴムの有効断面二次モーメント(m⁴),
 H_R : ゴム総厚(m), θ : 回転角(rad.)

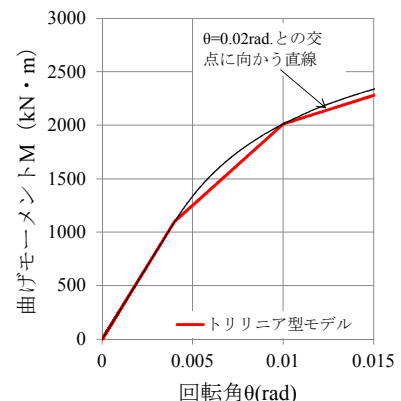


図-3 免震装置の回転ばねのモデル

3.5 荷重条件

一般に、下部構造の構造設計は応答変位法で行い、上部構造からの慣性力作用時の応力状態と、地震による地盤変形作用時の応力状態とを重ね合わせて評価するが、まずは、変動因子と下部構造特性の基本的な関係を調べるため、慣性力のみを外力とした静的解析を行った。

荷重条件の概要を図-2に示す。1階柱の反曲点位置には免震装置のせん断変形が62.5cm（ゴム総厚の250%）となる水平力590kNを作用させ、基礎梁芯には基礎重量と水平震度0.3に基づく水平力135kNを作用させた。

また、P- Δ 効果は、簡易的に考慮するものとし、柱軸力8000kNに31.25（62.5/2）cmを乗じた付加曲げモーメントを1階梁芯と基礎梁芯に作用させた。なお、P- Δ 効果は、免震装置のせん断力に寄与しないものとした。

3.6 静的解析結果

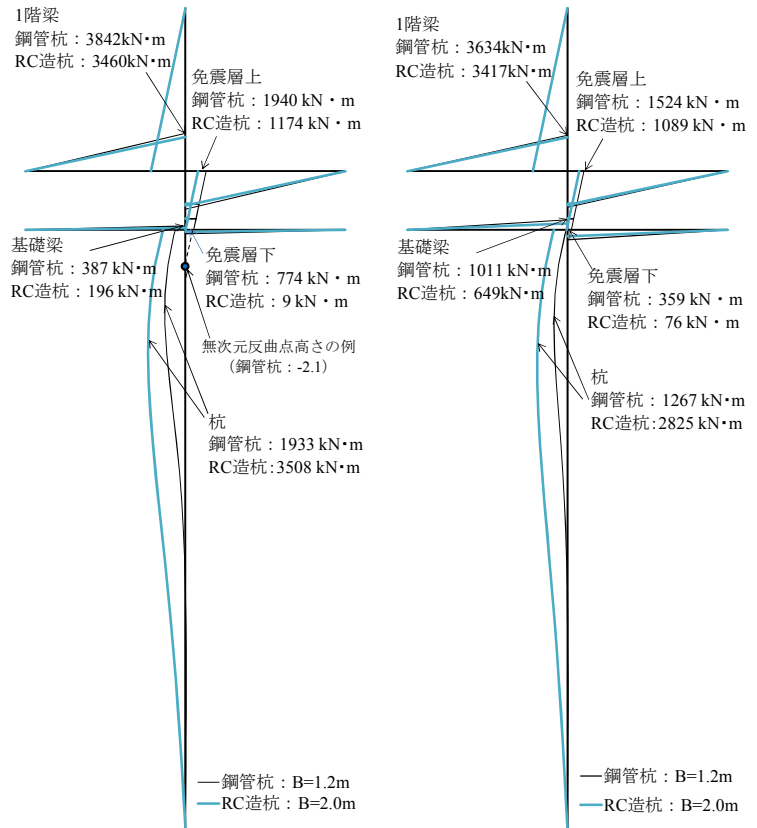
3.6.1 曲げモーメント分布

代表例として、N値が10で、基礎梁幅が1000mm（剛比：0.011）および4000mm（剛比：0.042）の場合の曲げモーメント分布を図-4に示す。基礎梁の剛比の増加に伴い、基礎梁の曲げモーメントの負担割合が増加し、杭の曲げモーメントの負担割合が減少している。また、鋼管杭よりも剛性の高いRC造杭の方が、曲げモーメントの負担割合が大きいことがわかる。

3.6.2 最大曲げモーメントと免震装置の変形

全ケースでの傾向を見るため、基礎梁および杭の最大曲げモーメント（絶対値）と基礎梁剛比の関係を図-5および図-6に示す。なお、基礎梁の曲げモーメントは、剛域端の値である。基礎梁の最大曲げモーメントは、N値=1の場合が顕著に大きく、RC造杭よりも鋼管杭の方が1.5～2倍程度大きい。一方、杭の最大曲げモーメントは、RC造杭の方が1.5～2倍程度大きい。

次に、免震装置の最大曲げ回転角と基礎梁剛比の関係を図-7に示す。鋼管杭では、弾性範囲を超えるケース（曲げ回転角が0.004rad.以上）が多く見受けられる。特に、N値=1のピン接合基礎梁（剛比0.000）と幅1000mmの基礎梁（剛比0.011）の場合には、曲げ回転角が第2折れ点の0.01rad.を大きく上回っている。一方、RC造杭では、N値=1のピン接合基礎梁（剛比0.000）を除き、0.004rad.以内となる。免震装置の回転ばねが弾性範囲を超えると、鉛直軸力の分力により生じる付加せん断変形の影響が顕著になる¹⁾ため、特に鋼管杭の場合には留意しておく必要がある。



(a) 基礎梁：幅 1000mm

(b) 基礎梁：幅 4000mm

図-4 曲げモーメント分布 (N値=10)

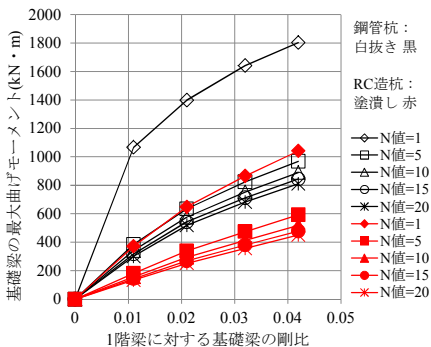


図-5 基礎梁の最大曲げモーメント

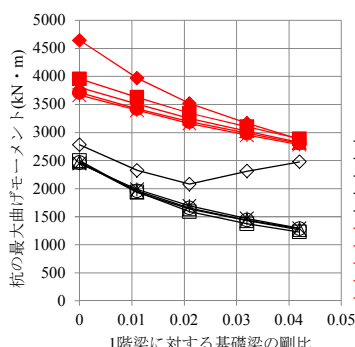


図-6 杭の最大曲げモーメント

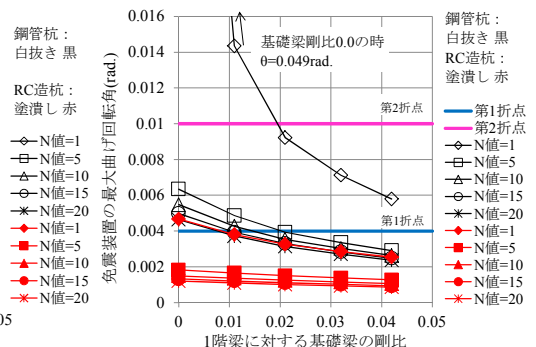


図-7 免震装置の最大曲げ回転角

更に、1 階の最大変位（基礎梁レベルからの相対変位）に対する免震装置の回転成分による変位（以下、曲げ回転変位と称す）の割合と基礎梁剛比の関係を図-8 に示す。図-8 によると、図-7 で曲げ回転角が 0.01rad.を超えたケースを除き、曲げ回転変位の割合が 1%未満であり、1 階の最大変位に殆ど寄与していないことがわかる。

3.6.3 免震層における反曲点高さに関する考察

免震建物を上・下構造分離モデルで設計する場合、免震装置の P- Δ 効果に加えて、せん断力に伴う付加曲げモーメントを考慮する。図-9(a)のような従来の基礎免震建物の場合は、免震装置の中央高さに反曲点があると仮定して検討を行うが、杭頭免震建物のように 1 階梁よりも基礎梁が小さい場合は、反曲点が下方に移動するものと考えられる。そこで、本研究の解析モデルについて、免震層の反曲点高さと変動因子との関係を調べた。

図-10 に無次元反曲点高さと基礎梁剛比の関係を示す。無次元反曲点高さとは、基礎梁芯を 0.0、免震装置中央高さ (62cm) を 1.0 として正規化した値を示す (図-9 参照)。図-10 によると、殆どのケースで無次元反曲点高さが負の値を示しており、鋼管杭は全ケースが負の値となる。図-9(b)に示すように、無次元反曲点高さが負の値となることは、基礎梁への付加曲げモーメントが従来とは反対方向に作用することを意味し、1 階梁には従来よりも大きな付加曲げモーメントが作用することを意味する。

3.7 応答変位法による評価

応答変位法に従い、ここまでの検討で得られた慣性力作用時の応力状態に、地震による地盤変形作用時の応力状態を重ね合わせて下部構造の特性を評価した。重ね合わせ方法として、文献²⁾では、地盤の 1 次固有周期が建物の 1 次固有周期よりも短い場合には二乗和平方根を、その逆は単純和を用いることを提案している。後述の固有値解析より、地盤の 1 次固有周期が建物の 1 次固有周期 (約 4.6sec) よりも短いことから、本検討では、応力の重ね合わせ方法として二乗和平方根を用いることとした。

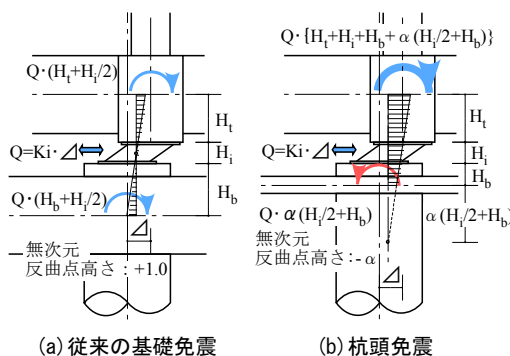


図-9 せん断力による付加曲げモーメント

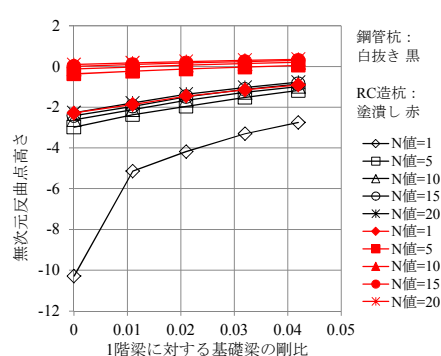


図-10 無次元反曲点高さ

地盤変形作用時の解析に用いるモデルは図-2 と同様とし、後述の自由地盤の地震応答解析から得られた表層地盤各層の最大相対変位を（水平地盤反力ばねの端部節点への）強制変位として作用させた。N 値が 5 および 15 の場合の表層地盤各層の最大相対変位を図-11 に示す。

解析の変動因子は、基礎梁は、幅 1000mm×せい 350mm（以下、「幅 1m 基礎梁」と称す）と幅 4000mm×せい 350mm（以下、「幅 4m 基礎梁」と称す）の 2 種類、杭は、鋼管杭と RC 造杭の 2 種類、地盤 N 値は、5 および 15 の 2 種類とした。

応答変位法による基礎梁および杭の最大曲げモーメント（絶対値）と基礎梁剛比の関係を図-12 および図-13 に示す。基礎梁の最大曲げモーメントを見ると、鋼管杭は、慣性力のみの場合（図-5 参照）と殆ど差異が無いのに対し、RC 造杭は、地盤変形の影響で曲げモーメントが増加し、特に N 値=5 の幅 4000mm 基礎梁（剛比 0.042）では鋼管杭の曲げモーメントを大きく上回っている。また、杭の最大曲げモーメントも、RC 造杭の方が地盤変形の影響を大きく受けていると考えられる。

次に、免震装置の最大曲げ回転角と基礎梁剛比の関係を図-14 に示す。免震装置の最大曲げ回転角も、鋼管杭は、慣性力のみの場合（図-7 参照）と殆ど差異が無いのに対し、RC 造杭は、地盤変形の影響で曲げ回転角が増大し、N 値=5 の場合では鋼管杭と同等以上となっている。

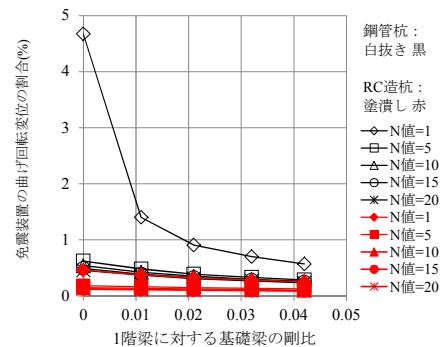


図-8 免震装置の曲げ回転変位の割合

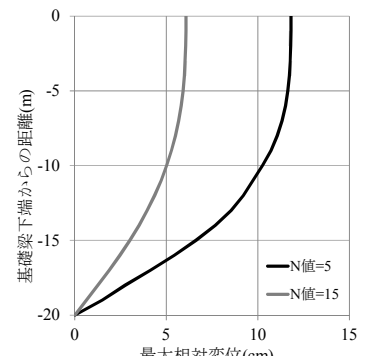


図-11 自由地盤の最大相対変位

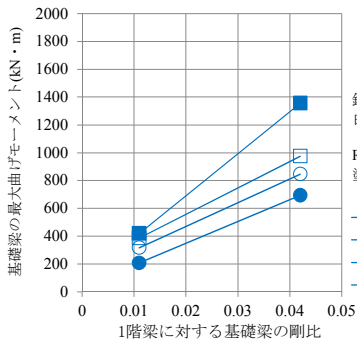


図-12 基礎梁の最大曲げモーメント

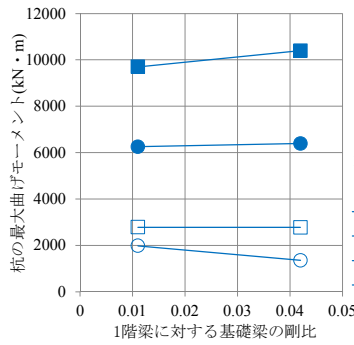


図-13 杭の最大曲げモーメント

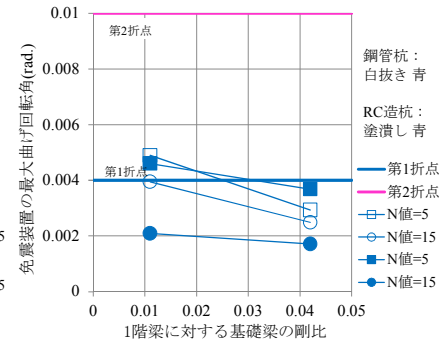


図-14 免震装置の最大曲げ回転角

4. 魚骨モデルによる地震応答解析

4.1 魚骨モデル概要

地震応答解析に用いる魚骨モデルを図-15に示す。魚骨モデルは、静的解析のモデルに上部構造と自由地盤を追加して構成した。上部構造の諸元は、試設計結果によった。上部構造には、各層1スパンの負担重量に応じて柱梁接合部に質点を設け、杭には、杭の区分重量に相当する質点を設けた。なお、杭には周辺地盤等による付加質量を設けていない。

4.2 解析における変動因子

解析における変動因子は、基礎梁は、幅1m基礎梁と幅4m基礎梁の2種類、杭は、鋼管杭とRC造杭の2種類、地盤N値は、5および15の2種類とした。

4.3 自由地盤のモデル化

自由地盤は、建物モデルの影響を受けない断面積10000m²の土柱とし、土層区分間におけるせん断ばねの非線形特性には、修正Ramberg-Osgoodモデル⁷⁾を使用した。修正Ramberg-Osgoodモデルの歪依存特性は、告示第1457号の値を図-16のように回帰して設定した。

4.4 動的相互作用要素のモデル化

杭と自由地盤をつなぐ要素は、水平地盤反力ばねと減衰要素で構成し、文献²⁾のFrancisの式とGazetasらの方法により式(5)で定めた。また、両要素は、後述する自由地盤の地震応答解析結果に基づき、自由地盤各層の有効歪み時（最大歪みの0.65倍）におけるせん断剛性の低下と減衰定数の増加を考慮した等価剛性および等価減衰係数として設定した。

$$k_{fs} = \frac{1.3 \cdot E_s}{1 - \nu_s^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot B^4}{E_p \cdot I_p} \right)^{1/12} \cdot H \cdot \beta_H^{4/3} \quad \text{式(5)}$$

$$c_{gs} = 1.57 \cdot \rho \cdot B \cdot (V_{La} + V_s) \cdot H$$

ここで、 V_{La} : Lysmerの波動速度 $\left(= \frac{3.4 \cdot V_s}{\pi \cdot (1 - \nu_s)} \right)$
 c_{gs} : 減衰係数

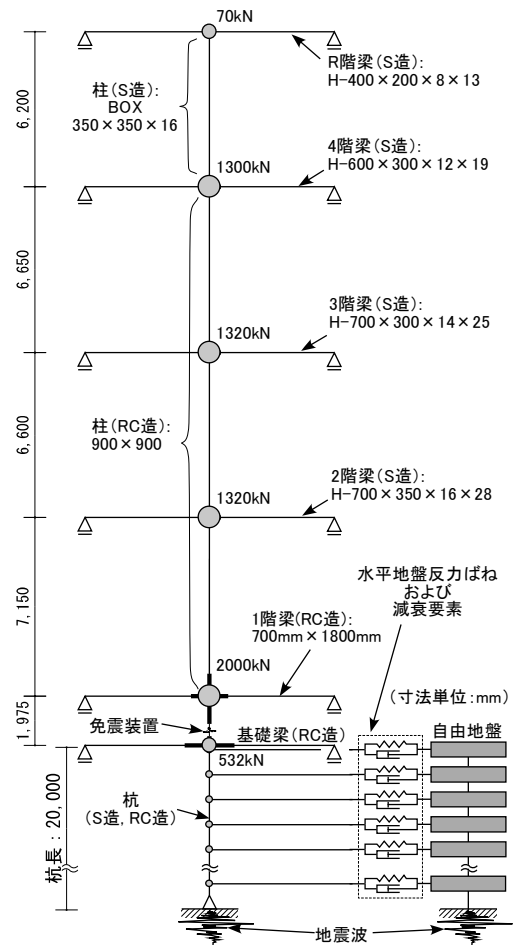


図-15 地震応答解析の魚骨モデル

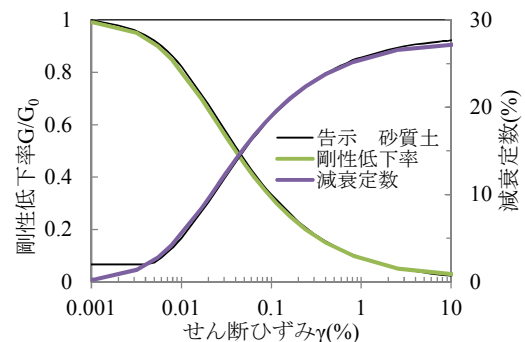


図-16 歪依存特性

4.5 入力地震波

図-15の自由地盤モデルだけを取り出し、支持層境界部に逸散減衰を表すダッシュポット⁸⁾を設けた単独の自由地盤モデルを作成し、当該モデルの逐次非線形地震応答解析から得られた支持層境界部の応答加速度を入力地震波とした。単独の自由地盤への入力波は、告示第1461号の解放工学的基盤における極稀地震動の加速度応答スペクトルに基づいて作成した(位相特性：乱数)。図-17に地震波の時刻歴波形と速度応答スペクトルを示す。

なお、地震応答解析では、P- Δ 効果を考慮できないため、免震装置の「せん断変形 $\times 1/2$ 」の時刻歴に柱軸力(8000kN)を乗じた付加曲げモーメントを作用させた⁹⁾。

4.6 地震応答解析結果

4.6.1 固有値解析結果

代表例として、幅1m基礎梁・鋼管杭の魚骨モデルと、単独の自由地盤モデルの刺激関数を図-18に示す。魚骨

モデルの1次モードは、N値によらず固有周期が4.6sec前後であり、モード形状からも明らかなように、免震層のせん断変形に伴うモードである。同モデルの2次モードは、単独の自由地盤の1次固有周期とモード形状から、自由地盤の影響を含んだモードとなっている。また、N値=5の魚骨モデルの4次モードにも、自由地盤の2次モードによる影響が見られる。魚骨モデルの固有周期一覧を表-1に示す(網がけは自由地盤の影響によるモード)。

4.6.2 最大応答変位

1階部分と基礎部分における最大応答変位の分布を図-19に示す。ただし、1階部分の変位は、基礎からの相対値、基礎部分の変位は、杭先端からの相対値を示す。1階部分は、N値=5で53~55cm、N値=15で43~44cm程度、基礎部分は、N値=5で12~14cm、N値=15で6~7cm程度となった。基礎梁および杭の変動因子による顕著な差異はない。

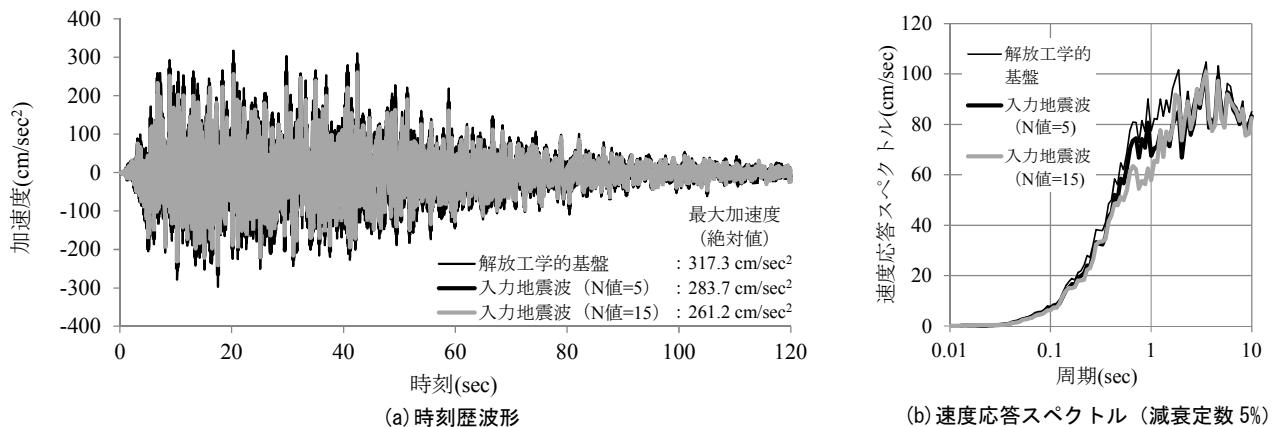


図-17 地震波の概要(告示第1461号の極稀地震動、位相特性：乱数)

表-1 魚骨モデルの固有周期一覧

	N値	基礎梁幅 (mm)	固有周期(sec)				
			1次	2次	3次	4次	5次
鋼管杭 (B=1.2m)	5	1000	4.610	1.730	0.852	0.487	0.372
		4000	4.603	1.730	0.852	0.487	0.372
	15	1000	4.584	0.959	0.852	0.372	0.291
		4000	4.579	0.959	0.852	0.372	0.291
RC造杭 (B=2.0m)	5	1000	4.617	1.730	0.852	0.487	0.372
		4000	4.613	1.730	0.852	0.487	0.372
	15	1000	4.582	0.959	0.852	0.372	0.291
		4000	4.580	0.959	0.852	0.372	0.291

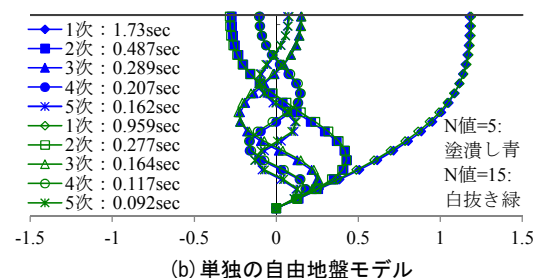
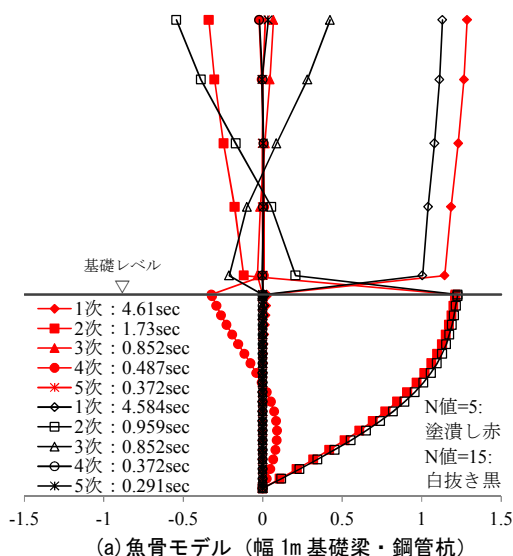


図-18 刺激関数

4. 6. 3 曲げモーメント分布

幅 1m 基礎梁について、免震装置のせん断変形が最大となる時の各層の応答変位（杭先端からの相対変位）を図-20に示し、その時の1階柱以下の曲げモーメント分布（N値=5）を図-21に示す。図-21によると、基礎梁や杭の最大曲げモーメントについては、静的解析とほぼ同様の傾向が見られ、免震層の反曲点高さについても、静的解析と同様、免震装置の中央高さよりも下方に移動していることが確認できる。

4. 6. 4 最大曲げモーメントと免震装置の変形

地震応答解析の結果による基礎梁および杭の最大曲げモーメント（絶対値）と基礎梁剛比の関係を図-22および図-23、免震装置の最大曲げ回転角と基礎梁剛比の関係を図-24に示す。なお、図-22～図-24には、前述の応答変位法の結果（青色プロット・点線）を併せて示す。

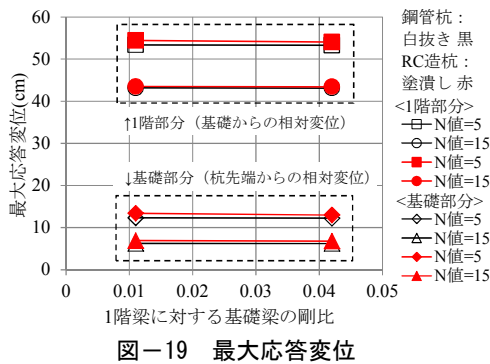


図-19 最大応答変位

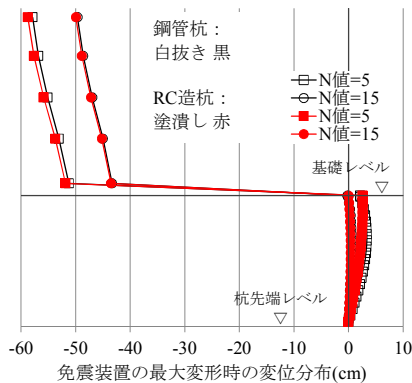


図-20 各層の応答変位

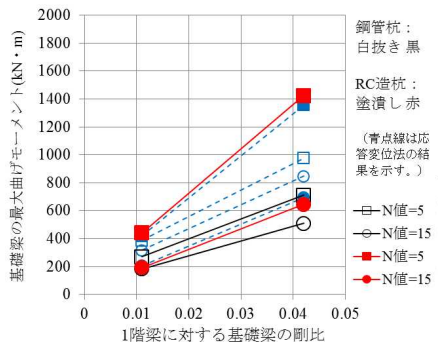


図-22 基礎梁の最大曲げモーメント

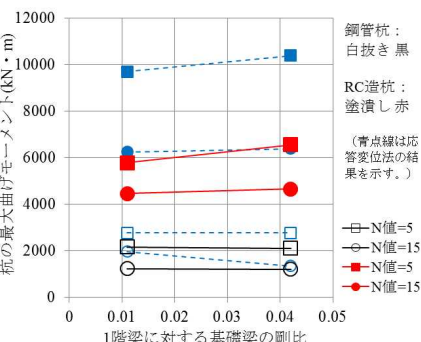


図-23 杭の最大曲げモーメント

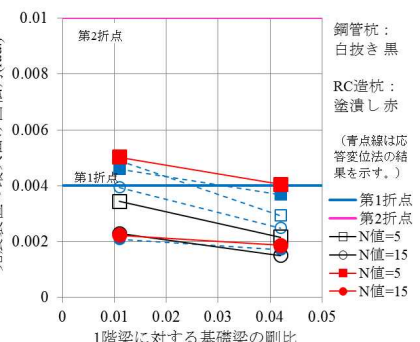
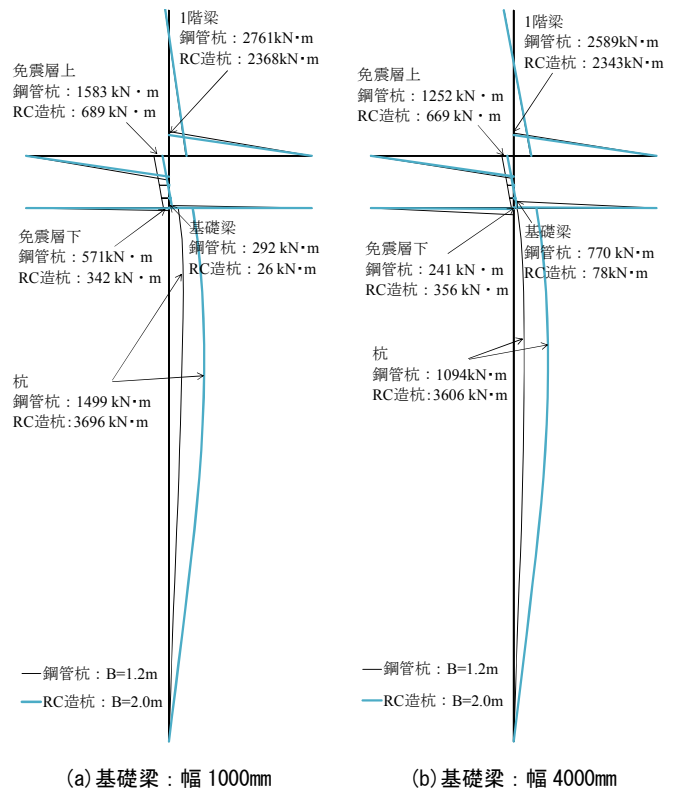


図-24 免震装置の最大曲げ回転角

図-22の基礎梁の最大曲げモーメントおよび図-24の免震装置の最大曲げ回転角は、応答変位法と同様に、剛性の高い RC 造杭の値が鋼管杭の値を大きく上回るケースが見られ、特にN値=5でその傾向が顕著である。また、図-23の杭の最大曲げモーメントも、応答変位法と同様に、鋼管杭よりも RC 造杭の方が大きい値を示している。

続いて、応答変位法との対応を見ると、図-22の基礎梁の最大曲げモーメントおよび図-24の免震装置の最大曲げ回転角は、鋼管杭では地震応答解析よりも応答変位法の方が1.5倍程度大きい値を示すが、RC造杭では両者が概ね一致し、N値=5では地震応答解析の方が大きい値を示している。図-23の杭の最大曲げモーメントは、RC造杭では地震応答解析よりも応答変位法の方が1.5倍程度大きい値を示し、鋼管杭では両者が概ね一致している。



(a) 基礎梁：幅 1000mm

(b) 基礎梁：幅 4000mm

図-21 曲げモーメント分布 (N値=5)

4.6.5 免震装置の曲げ回転角に関する考察

前述の応答変位法や地震応答解析の結果によると、本検討の範囲では、鋼管杭よりも剛性の高い RC 造杭の方が地震による地盤変形の影響が顕著となる傾向が見られた。特に、基礎梁の最大曲げモーメントおよび免震装置の最大曲げ回転角では、N 値=5 のケースにおいて地震応答解析が応答変位法を上回る結果となった。

そこで、N 値=5 における免震装置の曲げ回転角の時刻歴波形を図-25 に示す。幅 1m 基礎梁および幅 4m 基礎梁のいずれにおいても、RC 造杭には、明らかに短周期成分の波形が見られる。次に、幅 1m 基礎梁における曲げ回転角のスペクトルを図-26 に示す。いずれの杭も魚骨モデルの 1 次モードに当たる周期 4.6sec 付近にピークが見られ、RC 造杭の方には自由地盤の 1 次固有周期に相当する 1.73sec 付近にもピークが見られる。このことから、剛性の高い RC 造杭では、自由地盤からの振動がより顕著に免震装置の回転ばねに伝達され、曲げ回転角の振動特性にも影響を与える可能性があるものと考えられる。

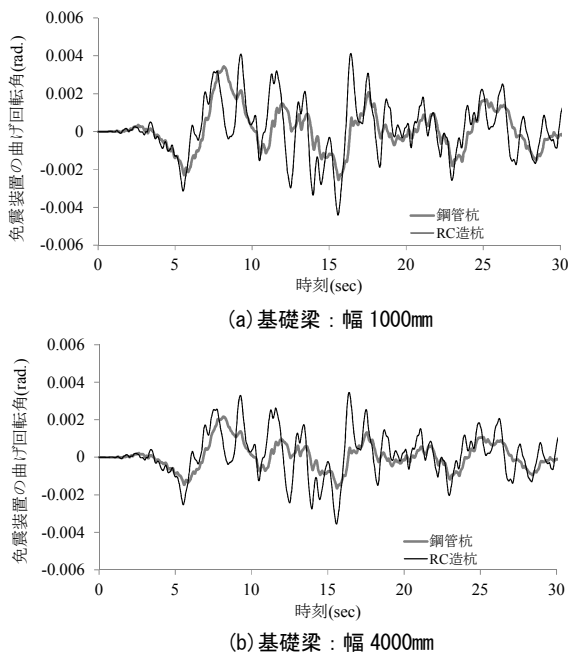


図-25 免震装置の曲げ回転角の時刻歴波形(N 値=5)

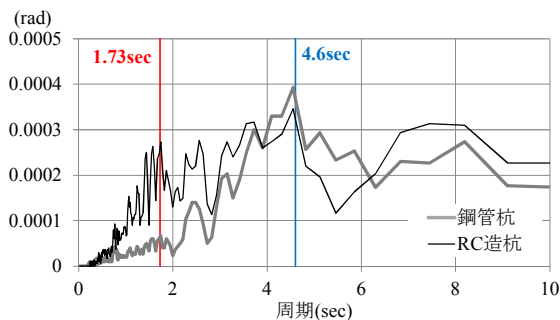


図-26 免震装置の曲げ回転角のスペクトル

5. まとめ

杭頭免震建物について、下部構造の部材構成や地盤条件を変動因子として静的解析および地震応答解析による検討を行い、以下のことを示した。

- (1) 下部構造の部材応力や免震装置の曲げ回転角と変動因子との関係を明らかにした。
- (2) 杭頭免震建物では、免震層における反曲点高さが免震装置の中央高さよりも下方に移動するため、免震装置のせん断力に伴う付加曲げモーメントを算定する際に考慮する必要がある。
- (3) 応答変位法による下部構造の評価結果と地震応答解析結果は概ね対応している。
- (4) 鋼管杭と比較して、剛性の高い RC 造杭では、地盤振動がより顕著に免震装置に伝達され、免震装置の曲げ回転角が増大する可能性がある。

杭の剛性に応じた地盤振動と免震装置の曲げ回転角との関係の詳細については今後の課題とする。

[謝 辞]

最後に、本研究を行うにあたり、多くの御指導を頂いた東京理科大学・理工学部建築学科の北村春幸教授、佐藤利昭助教に深く感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 浅野三男、嶺脇重雄、椿原康則、藤村勝：積層ゴムを用いた杭頭免震構造物の静的漸増解析、日本建築学会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.547-548、2000。
- 2) 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。
- 3) 護雅史、森川和彦：加振方向を考慮した群杭効率の推定式の提案、第3回日本地震工学会研究発表会、pp.416-417、2004。
- 4) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2012。
- 6) 浅野三男、嶺脇重雄：取付部の柔性を考慮した免震用積層ゴムの水平剛性評価、日本建築学会技術報告集、pp.57-62、1999。
- 7) 土木学会：新体系土木工学 18 土の力学 (Ⅲ)、1981。
- 8) 北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門、2009。
- 9) 椿原康則、嶺脇重雄、山下清：基礎部材の変形を考慮した杭頭免震建物の地震応答解析、日本建築学会学術講演梗概集、構造Ⅰ、pp.615-616、2007。