

軟弱地盤における杭頭免震構法の適用性

—基礎梁の曲げ剛性を考慮した基礎構造の合理化—

Adaptability of pile head seismic isolation structures on soft grounds

相羽均修*¹ 五十嵐治人*²

概 要

軟弱地盤上に建つ免震建物では、積層ゴムアイソレータの挙動を安定させるために、免震装置上下に剛性の高い基礎梁を設けた基礎免震構法が多く採用されている。一方、杭頭免震構法は、免震装置下部の基礎梁断面を縮小した合理的な構法であるが、軟弱地盤では地盤変位が大きくなるため採用されることが少ない。しかし、基礎梁の曲げ剛性を考慮し、杭頭部の回転変形を抑えることができれば軟弱地盤でも杭頭免震構法を適用できる可能性があると考えられる。

そこで、地盤条件の異なる軟弱地盤に対し、免震装置下部の基礎梁の曲げ剛性および配置計画を考慮して杭頭免震構法の適用性について検討した。その結果、軟弱地盤上の免震建物であっても、基礎梁の曲げ剛性を考慮し剛性の高い基礎梁と扁平梁を適切に配置することで、杭頭免震構法が適用できる可能性があることが分かった。

key words : 杭頭免震、軟弱地盤、基礎梁、曲げ剛性、杭頭回転角

1. はじめに

一般的に軟弱地盤上の大型物流倉庫は、杭の変形を抑えるため、基礎免震構法が採用されるが、基礎免震構法は、地震時に積層ゴムアイソレータ（以下、免震装置）を安定して挙動させるため、免震層の上下を剛性の高い基礎梁で構築する。このため、基礎免震構法は躯体量や掘削量が多くなり、建設コストが増大する傾向にある。一方、杭頭免震構法は免震装置下部の基礎梁の断面を縮小することで、基礎構造の合理化を図っているが、免震装置支承部に作用する杭頭の回転を考慮する必要がある（図-1）。

通常、杭頭免震構造における免震装置下部は、剛性の低い扁平梁や構造スラブ構築するため、基礎梁による曲げ剛性を期待できず、杭頭変位の平面保持のみが期待できる。本報では、基礎構造の合理化を目的として扁平梁の曲げ剛性を考慮し、軟弱地盤における杭頭免震構法の適用性を検討した結果について報告する。

2. 解析概要

本検討では、上部構造と杭基礎の分離型モデルを用いて、免震層下部の基礎梁の曲げ剛性が杭の応答へ与える影響について考察した。具体的には、断面形状の異なる基礎梁を設定し、その平面配置を計画することで、杭頭回転角をどの程度制御できるか、①基礎の曲げ剛性、②軟弱地盤条件をパラメータとして解析を行った。

設計クライテリアは、杭頭回転角 $1/100\text{rad}$ 以下とした。これは、上下フランジの傾きの差が $1/100\text{rad}$ 程度以内であれば、免震装置の力学的特性におよぼす影響は小さいという知見^{1),2),3)}による。

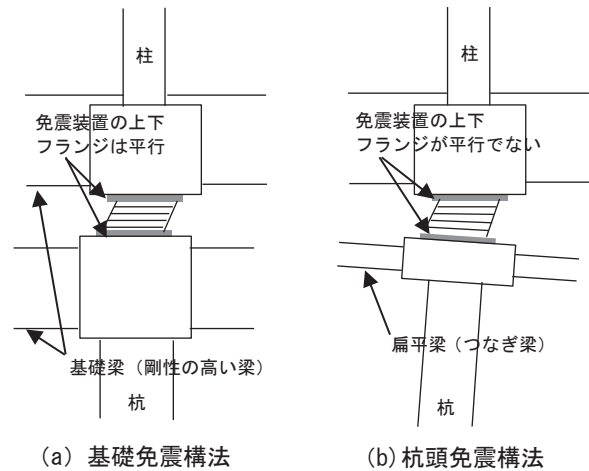


図-1 免震構法の区別

表-1 建物概要

建築面積	24,200m ²
延べ床面積	96,800m ²
階数	4階
平面形状	110m×220m
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	現場打ち杭、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

2.1 建物概要

検討対象とした建物は4階建ての大型物流倉庫である。建物概要を表-1に示す。上部構造は柱RC梁S造、平面規模は長辺方向220m、短辺方向110m、建築面積は24,200㎡である。

2.2 地盤概要

地盤概要を図-2に示す。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、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3m~18mまでのせん断波速度(V_s)である。地盤Aの V_s は、深度3~5m: $V_s=90$ (m/s)、5~18m: $V_s=105$ (m/s)、地盤Bは地盤A同一区間の V_s の2/3倍とした。

重複反射理論により算出⁴⁾した加速度応答倍率の結果を図-2に示す。地盤Aの卓越周期は1.22秒、地盤Bで2.41秒であり、いずれの地盤も卓越周期が0.75秒を超え、軟弱地盤(第三種地盤)と判定される。しかし、地盤Aは地盤Bと比較すると卓越周期が短く、軟弱地盤の中でも比較的良好な地盤条件といえる。

2.3 入力地震動

入力地震動は平成12年建設省告示第1461号の極めて稀に発生する地震(L2)相当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、位相の異なる地震波3波について検討した。

3. 解析ケース

解析ケースは、地盤2ケース(A、B)、基礎梁の配置で3ケースとした。基礎梁の配置は以下のケースとした。

- 1) 基礎梁なし
- 2) 全てが扁平梁
- 3) ランプ範囲(範囲Ⅲ)が剛強梁、それ以外(範囲Ⅰ・範囲Ⅱ)が扁平梁

地盤A、Bにおける地盤応答変位を図-4に、基礎梁の配置計画の範囲を図-5に示す。解析ケースはこれらを組み合わせた6ケースとした。各解析ケースを表-2に示す。地震波は後述するKOBE波とする。

表-2 解析ケース一覧

解析ケース	地盤	範囲Ⅰ	範囲Ⅱ	範囲Ⅲ
		基礎梁断面 幅×せい(mm)		
1-A	A	なし	なし	なし
2-A		2500×400	1600×400	2500×400
3-A		2500×400	1600×400	1000×1600
1-B	B	なし	なし	なし
2-B		2500×400	1600×400	2500×400
3-B		2500×400	1600×400	1000×1600

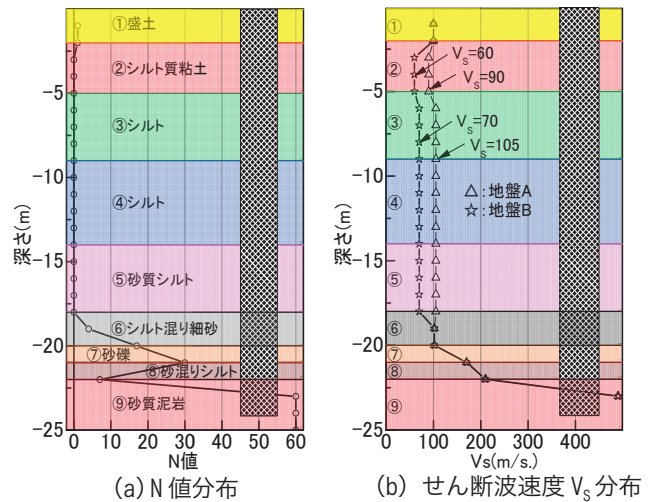


図-2 地盤概要

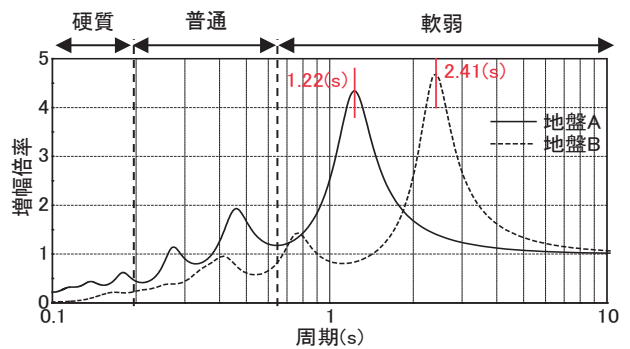


図-3 加速度応答倍率

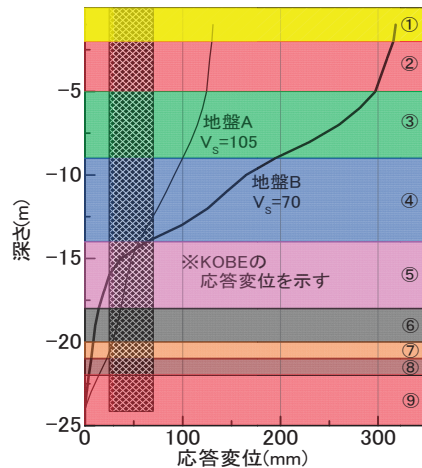


図-4 地盤応答変位

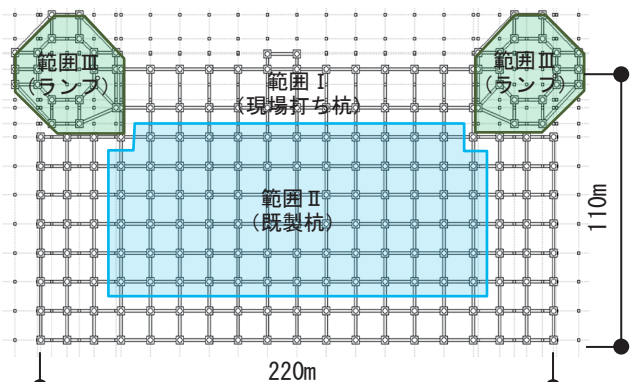


図-5 基礎梁の配置計画における範囲

3.1 解析モデル

上部構造と杭基礎の分離型モデルにより、杭基礎の設計用応力値を求めた。分離型モデルの模式図を図-6に示す。ここでは、大地震時における設計のみを対象とし、上部慣性力と、地盤変位による外力の影響を検討した。

慣性力 (ΣQ_0) は、上部構造物の解析により算出した。杭基礎のモデルは、慣性力を免震層下部の基礎梁に作用させ、各杭の杭頭変位が等しくなる条件で解析を行った。地盤変位の作用は、地盤応答変位法により地盤変位を算出し、算出した地盤変位による応力が地盤ばねを介して杭に作用する梁ばねモデルを用いた。

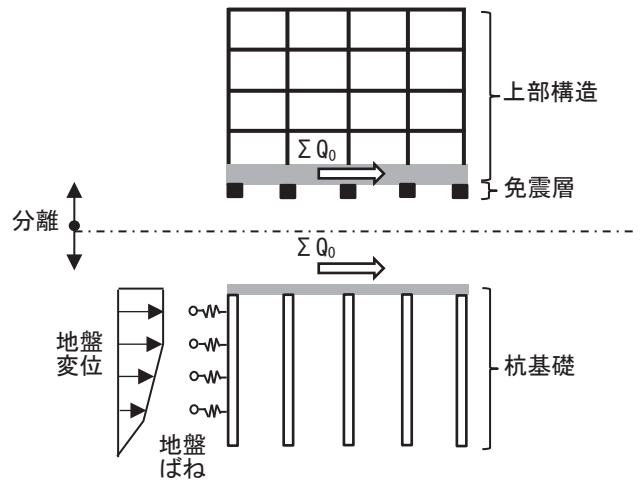


図-6 分離型モデル

3.2 地盤の応答変位

地盤応答変位は、等価線形化解析⁵⁾(解析コード: SNAP-WAVE)により地盤の非線形性を考慮し算出した。解析は、応答変位(図-4)が最大となった位相 KOBE 波を用いた。入力地震動を図-7に示す。

3.3 基礎梁のモデル

基礎梁は、基礎梁内法長 (L_0) の 1/2 の点をピンとし、曲げ剛性を考慮した(図-8)。基礎梁は、逆対称モーメントが作用するものとし、線形とした。基礎梁の断面性能を表-3に示す。表-3に示す扁平梁の曲げ剛性は、材長が同じ場合、剛強梁の 3/100 程度となった。

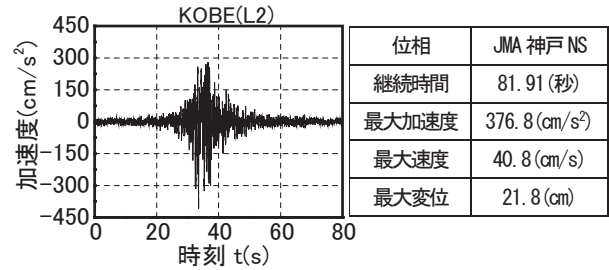


図-7 入力地震動

3.4 杭基礎のモデル

杭基礎のモデルを図-9に示す。杭基礎は不均一地盤に適用させるため、地盤を複数のばねとする梁ばねモデルとした。杭応力の算出には解析コード: RESP-Dを用いた。

上部慣性力による解析では、杭に生じる軸力および施工誤差によって生じる杭頭曲げモーメントを考慮した。各杭が負担する慣性力は杭頭変位を同一とした、線形解析により算出した。

地盤変位による解析では、応答変位解析により求めた地盤変位を地盤ばねに強制変位として与えた。

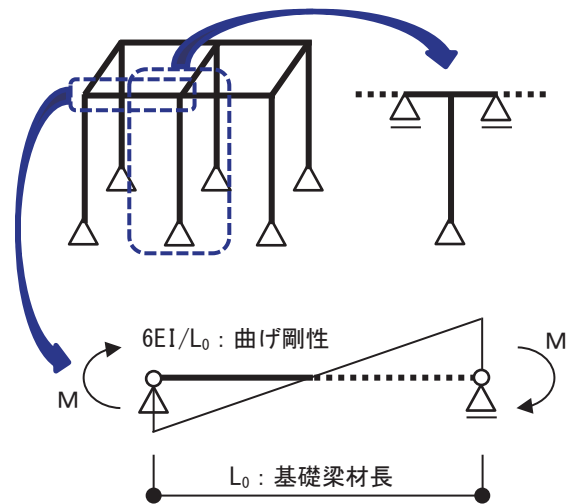


図-8 基礎梁のモデル

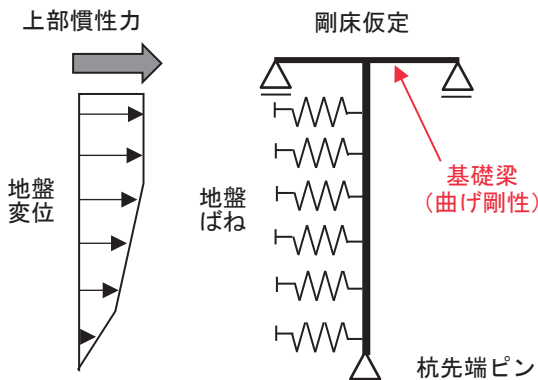


図-9 杭基礎のモデル

表-3 基礎梁の断面性能

基礎梁	Fc	上端主筋 下端主筋	EI
幅×せい(mm)	(N/mm ²)		× (10 ¹⁴ N・mm ²)
扁平	24	28-D32 (SD390)	4.29
2500×400		28-D32 (SD390)	4.29
扁平	24	16-D32 (SD390)	2.66
1600×400		16-D32 (SD390)	2.66
剛強	24	16-D41 (SD390)	113
1000×1600		16-D41 (SD390)	113

表-4 杭の断面性能

符号	P1 (a)	P2	P3	P4	P5	P6 (a)	P7	P8	P9	P10 (a)
本数	24	26	48	4	2	18	20	2	67	9
杭径(mm)	2000								1200	
種類	現場打ち杭								既製杭	
杭長(m)	22.475								23	
コンクリート強度 f_c (N/mm ²)	30								123	105
杭ヤング率 E_p ($\times 10^7$ kN/m ²)	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	4.22	3.97
杭有効断面積 A_p (m ²)	3.28	3.28	3.37	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	1.25	1.30
杭断面2次モーメント I_p (m ⁴)	0.84	0.84	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.12	0.13

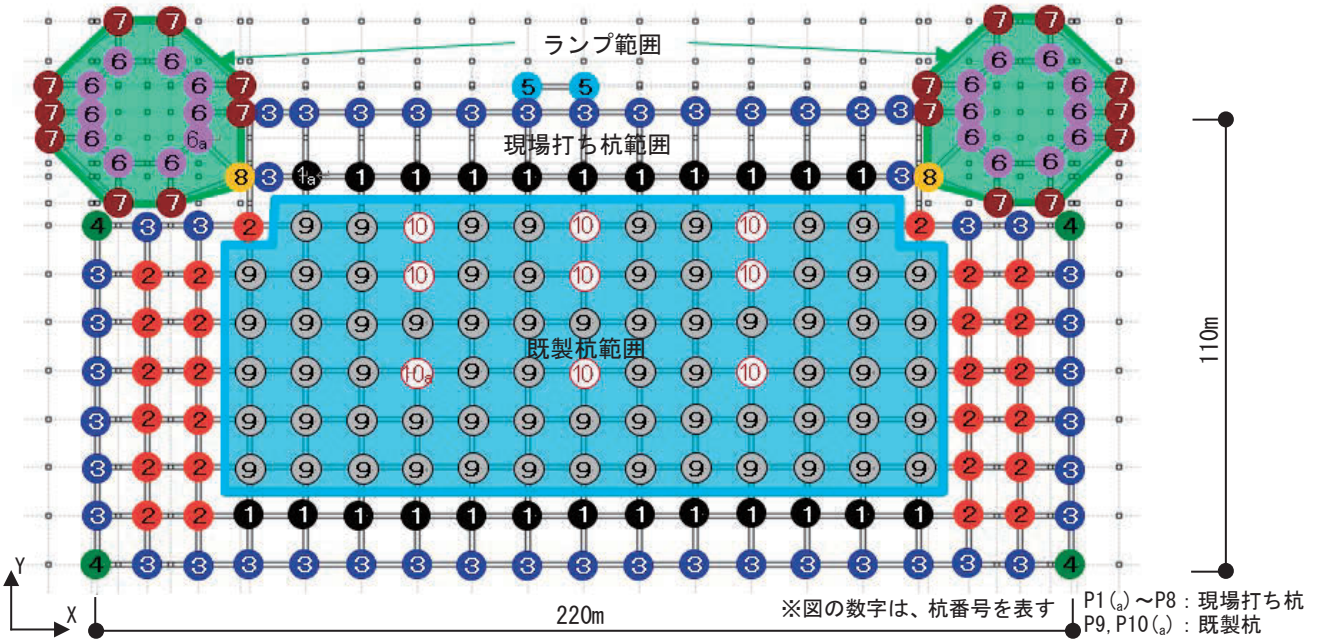


図-10 杭配置図

杭の断面性能を表-4に、杭配置図を図-10に示す。加力方向はX・Y軸正方向の2方向で検討したが、ここでは、各杭の応答値が最も大きい値を示したX軸正方向加力時の結果について報告する。

3.5 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た。慣性力による杭応力算定時の地盤ばねは基礎指針の式(1)とし、応答変位による杭応力算定時の地盤ばね(水平地盤反力度)PはBromsの式(2)にて塑性水平地盤反力度を P_y とした双曲線モデル(図-11)とし、水平地盤反力係数KはFrancisの式(3)を用いた。

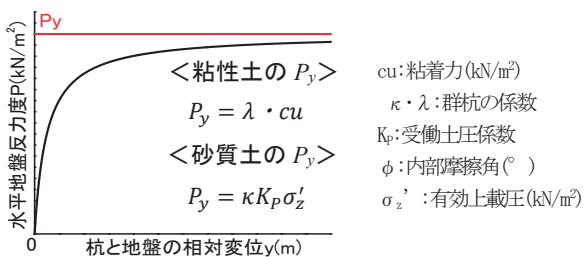


図-11 双曲線モデル

$$P = k_n y \tag{1}$$

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

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

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_n : 杭水平変位 y 時の水平地盤反力係数 (kN/m³), y: 水平変位 (m)
 \bar{y} : 無次元水平変位 (y/0.01)

$$P = \frac{K \cdot y}{1.0 + \frac{K \cdot y}{P_y}} \tag{2}$$

P: 水平地盤反力度 (kN/m²), K: 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)

$$K = \frac{1.3 \cdot E_s}{1.0 - \nu^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot B^4}{E_p \cdot I_p} \right)^{1/12} \tag{3}$$

$$E_s = 2(1 + \nu)\rho V_s^2$$

K: 水平地盤反力係数 (kN/m³), E_s : 地盤ヤング係数 (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)

4. 解析結果

4.1 杭頭回転角

範囲Ⅰ、範囲Ⅱ、範囲Ⅲの杭頭回転角の最大値を表-5に示す。杭頭回転角は、慣性力と地盤応答変位による解析結果の二乗和平方根（SRSS）によって算出した、

1-Aは、基礎梁の曲げ剛性を考慮しないケースであるが、いずれの範囲の杭頭回転角も1/100rad以下となった。1-Bでは杭頭回転角はいずれの範囲の杭も1/100radを超え、最大で1/65rad (P1_a) となった。このことから、軟弱地盤（第三種地盤）であっても、地盤条件によっては、杭頭免震の適用が可能であることが分かった。一方、2-Bは、杭頭回転角が1/100radを超えたが、3-Bでは1/100rad以内となった。地盤条件が悪い軟弱地盤であっても、扁平梁と剛強梁を適切に配置することで、杭頭免震の適用が可能であることが分かった。

4.2 杭の応答値

杭頭回転角の値が最大となった杭P1_aについて各ケースの応答値の違いを比較する。

深度方向の杭の回転角分布を図-12に示す。いずれの地盤においても、基礎梁の剛性を考慮しない1-A、1-Bでは杭先端から杭頭にかけて回転角が増大する傾向があった。基礎梁の曲げ剛性を考慮した2-A、2-B、3-A、3-Bでは、杭中間部から杭頭にかけて回転角が減少する傾向があった。すべての基礎梁を扁平梁としたケースは、梁なしのケースとランプ範囲を剛強梁としたケースの間の値となった。

深度方向の杭の曲げモーメント分布を図-13に示す。慣性力による解析では、付加曲げモーメントを考慮しているため杭頭部の曲げモーメントは0にはならない。いずれのケースにおいても、杭中間部で最大曲げモーメントが生じたが、基礎梁の曲げ剛性を考慮することによって、杭に生じる最大曲げモーメントは低下した。

杭頭回転角の値が最大となった杭P1_aについて、各ケースの杭頭回転角と杭の最大曲げモーメントの結果を表-6に示す。扁平梁と剛強梁を適切に配置することで、基礎構造の合理化ができる可能性があると考えられる。

深度方向の杭のせん断力分布を図-14に示す。杭のせん断力は慣性力と地盤応答変位による解析結果の単純和により算出した。地盤Aは地盤Bと比較し、3ケースとも

表-5 各範囲の杭頭回転角の最大値

解析ケース	地盤	範囲Ⅰ (P1 _a)	範囲Ⅱ (P10 _a)	範囲Ⅲ (P6 _a)
		杭頭回転角(rad)		
1-A	A	1/103	1/109	1/108
2-A		1/145	1/205	1/147
3-A		1/155	1/197	1/316
1-B	B	1/65	1/65	1/67
2-B		1/94	1/142	1/94
3-B		1/101	1/128	1/243

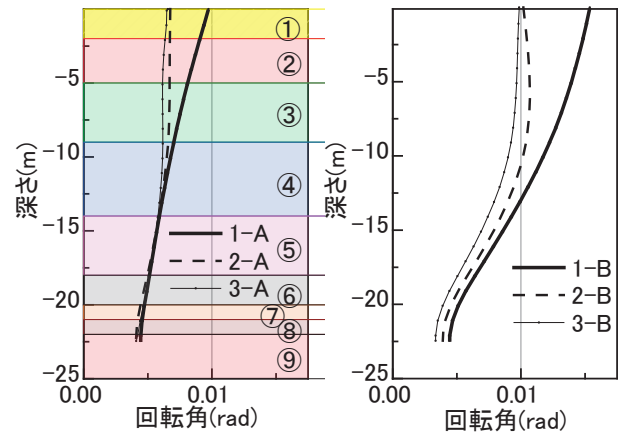


図-12 杭の回転角分布 (P1_a)

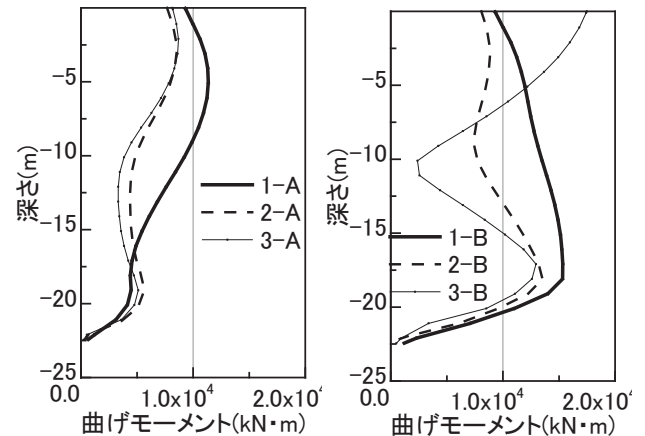


図-13 杭の曲げモーメント分布 (P1_a)

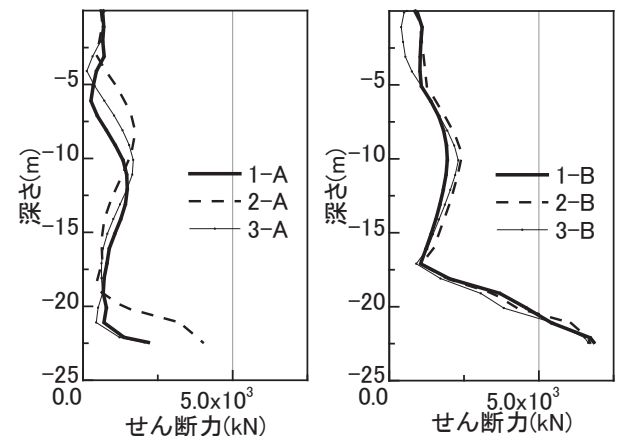


図-14 杭のせん断力分布 (P1_a)

表-6 杭頭回転角と最大曲げモーメント (P1_a)

解析ケース	地盤	基礎梁	回転角	杭最大M	生起位置
			(rad)	(kN·m)	(m)
1-A	A	なし	1/103	11357	10
2-A		扁平	1/145	8519	8
3-A		扁平(一部剛)	1/155	8693	8
1-B	B	なし	1/65	15333	17
2-B		扁平	1/94	15056	18
3-B		扁平(一部剛)	1/101	13527	18

せん断力が小さくなった。

深度方向の杭の変位分布を図-15に示す。地盤Aは地盤Bと比較し、3ケースとも変位が小さくなっている。杭のせん断力は、基礎梁の曲げ剛性の違いによる影響は小さく、地盤条件による影響が大きいことが分かった。

以上より、基礎梁の曲げ剛性は杭頭回転角、曲げモーメントの低減には効果があるが、杭の変位、せん断力の低減には期待できないと考えられる。

5. まとめ

基礎梁の曲げ剛性を考慮した杭頭免震の軟弱地盤への適用性について検討した結果、以下の知見が得られた。

- ① 軟弱地盤（第三種地盤）であっても、地盤の固有周期が0.75秒に近い地盤条件であれば、基礎梁の曲げ剛性を考慮しなくても杭頭免震が適用できる可能性がある。
- ② 杭頭免震構法で扁平梁の曲げ剛性を考慮することで、杭の曲げモーメントが小さくなり、下部構造を合理化できる可能性がある。
- ③ 固有周期が2秒を超える地盤条件の場合、基礎梁の曲げ剛性を考慮し、適切に配置することで、適用が可能であると考えられる。

今後、立体フレーム解析等による、更なる最適化について検討を進めていく予定である。

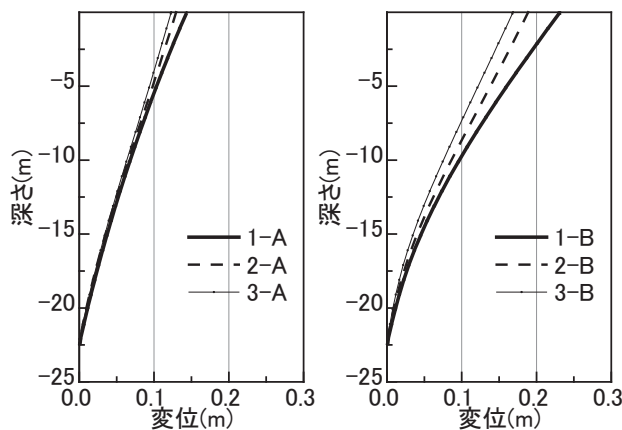


図-15 杭の変位分布 (P1a)

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針、2013.10
- 2) 前野慧、山野祐司、寺田隆一、福島孝志、福田滋夫、柳勝幸、開発美雪：大径免震部材を用いた杭頭免震の設計手法と実大傾斜試験(その3)天然ゴム系積層ゴム傾斜試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.477-478、2012.9
- 3) 牧田敏郎、土田堯章、野中康友、樋渡健、飯塚信一、中岡章郎、加藤秀章、小林正人：杭頭回転角を考慮した免震部材の構造性能(その1 高減衰系積層ゴムの傾斜付水平加力試験)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.449-450、2016.8
- 4) 建築行政情報センター：2015年版建築物の構造関係技術基準解説書、2017.10
- 5) 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