

杭頭免震構造の開発（その2）

杭頭部の設計用荷重の提案と6階建て物流倉庫の試設計

Development of Pile-head Seismic Isolation Structure (Part2) Proposal of Pile-head Design Load and Trial Design of The 6-Story Logistics Warehouse

山崎 康雄*

成田 悠**

Yasuo Yamasaki

Yuu Narita

高橋 孝二**

飯塚 信一***

Koji Takahashi

Shinichi Iizuka

要 約

杭頭免震構造は、一般的な基礎免震構造と比べ、基礎構造の合理化が可能であり、平面規模の大きい物流倉庫などの建物で普及が進んでいる。前報では、杭頭免震構造と基礎免震構造の地盤-杭-建物連成系一体解析モデルを用いて地震応答解析を実施し、両モデルの解析結果を比較した。杭頭回転角 $1/100 \text{ rad}$. 以下であれば、両モデルの解析結果に有意な差が見られなかったことから、杭頭免震構造を採用する場合でも、基礎免震構造と同様の設計法とすることが出来る可能性を示した。

しかし、杭頭免震構造の設計では、杭頭の回転により各部材に生じる応力を考慮する必要がある。本報では、その応力の算出方法の提案と、6階建て物流倉庫の試設計について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 杭頭部の設計用荷重の提案
- § 3. 6階建て物流倉庫試設計
- § 4. 杭頭免震構造と基礎免震構造の比較
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

杭頭免震構造は、一般的な基礎免震構造と比べ、基礎構造の合理化が可能であり、平面規模の大きい物流倉庫などの建物で普及が進んでいる。しかし、杭頭免震構造では、杭頭部に免震部材を直接設置し、二重基礎梁を簡略化するため、杭頭の回転が免震部材下部に作用し、各部材に生じる応力が基礎免震構造と異なることが考えられる。

前報¹⁾では、杭頭免震構造と基礎免震構造の地盤-杭-建物連成系一体解析モデル（以下、一体解析モデル）の時刻歴応答解析結果を比較し、杭頭回転角 $1/100 \text{ rad}$. 以下の範囲においては、有意な差がないことを確認した²⁾。

杭頭部に生じる応力を解析的に把握する場合、一体解

析モデルを用いることは有用であるが、解析モデルの設定などが複雑であり、設計的観点からすると実用的ではない。実務設計では上部構造と下部構造を分離して設計することが多いが、その設計法を杭頭免震構造に適用するためには、杭頭の回転により各部材に生じる応力を考慮する必要がある。

そこで本報では、前報の一体解析モデルの解析結果を考慮し、杭頭免震構造の杭頭部の設計用荷重の算定方法を提案する。さらに、提案する算定法を用いて、杭頭免震構造と基礎免震構造の基礎構造の比較を目的とし、6階建ての物流倉庫の試設計を行う。

§ 2. 杭頭部の設計用荷重の提案

2-1 杭頭部の各種設計用荷重の提案

杭頭免震構造の杭の設計用荷重は、免震部材に生じる軸力 P と変位 δ による $P-\delta$ 効果（曲げモーメント）、免震部材に生じる軸力 P と杭頭回転角 θ による $P-\theta$ 効果（せん断力）、免震部材に生じるせん断力 Q による曲げモーメントを考慮する必要がある。杭頭部の設計用荷重の概要を、図-1に示す。

(1) 軸力

杭設計用軸力 N_p は、免震部材に生じる軸力 N と免震部材などの重量 W を考慮する（(1)式）。なお、免震部材に生じる軸力 N は、上下動の影響を考慮する。

* 技術研究所建築技術グループ

** 本社建築設計部構造一課

*** 技術研究所

$$N_p = N + W \quad (1)$$

(2) せん断力

杭設計用せん断力 Q_p は、免震部材に生じるせん断力 Q と、免震部材に生じる軸力 N と軸心の傾斜 $\theta/2$ による $P-\delta$ 効果による付加せん断力を考慮する ((2) 式)。

ここで、回転角 θ が $1/100 \text{ rad.}$ 程度と仮定すると、 $P-\theta$ 効果は免震部材に生じる軸力の 0.5% 程度である。

$$Q_p = Q + N \times \theta/2 \quad (2)$$

(3) 曲げモーメント

杭設計用の曲げモーメント M_p は、免震部材に生じる軸力 N と水平変形 δ による $P-\delta$ 効果、免震部材の回転剛性 K_r と回転角 θ 、せん断力 Q_p により生じる曲げモーメントを考慮する ((3) 式)。式中の $K_r \times \theta$ は、その他の曲げモーメントに対して逆向きに作用する³⁾。

$$M_p = N \times \delta/2 - K_r \times \theta + Q_p \times H/2 \quad (3)$$

ここで、(2) 式より、

$$M_p = N \times \delta/2 - K_r \times \theta + (Q + N \times \theta/2) \times H/2 \quad (4)$$

さらに、(4) 式を $N \times \delta/2$ の項 ($P-\delta$ 効果) で整理すると、(5) 式となる。

$$M_p = (1 + \theta/2 \times H/\delta) \times N \times \delta/2 - K_r \times \theta + Q \times H/2 \quad (5)$$

$P-\theta$ 効果による付加せん断力の影響は、 $P-\delta$ 効果の曲げモーメントを $\theta/2 \times H/\delta$ だけ増加させたものとみなすことができる。 δ/H を積層ゴムの見かけのせん断変形角 γ とすると、 $\theta/2 \times H/\delta = \theta/2/\gamma$ となり、軸心の傾斜角 $\theta/2$ とせん断変形角 γ の比になることがわかる。

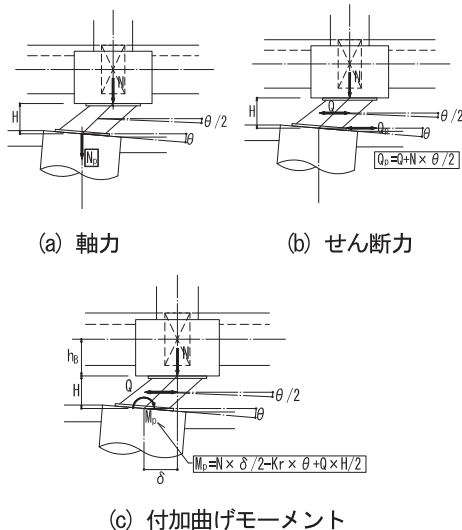


図-1 杭頭部の設計用荷重

ここで、 $\theta = 1/100 \text{ rad.} = 1\%$ 、 $\gamma = 100 \sim 250\%$ とすると、 $0.2\% < \theta/2/\gamma < 0.5\%$ となり、 $N \times \delta/2$ ($P-\delta$ 効果) に対する付加せん断力による曲げモーメントの増加は極僅かであり、無視できるとすると、(6) 式となる。

$$M_p = N \times \delta/2 - K_r \times \theta + Q \times H/2 \quad (6)$$

また、回転剛性 K_r は、免震部材の水平変形量の増大に伴い、低下する⁴⁾が、係数 α_1 を用いて (6) 式の右辺第1項、第2項をまとめ、(7) 式のように整理する。

$$M_p = N \times \delta \times \alpha_1 + Q \times H/2 \quad (7)$$

2-2 時刻歴応答解析結果を考慮した係数の設定

基礎免震構造の場合、杭頭部に回転が生じないため、前節 (6) 式の右辺第1、2項 $N \times \delta/2 - K_r \times \theta$ と (7) 式の右辺第1項 $N \times \delta \times \alpha_1$ より、 θ を 0 rad. とすると、係数 α_1 は 0.5 と既知となり、免震部材上下に生じる $P-\delta$ 効果による曲げモーメントの比率は等分となる。

一方、杭頭免震構造の場合、杭頭部に回転角が生じるため、曲げモーメントの比率は等分とならず、係数 α_1 は未知である。

そこで、前報の一体解析モデルを用いて、地盤条件をパラメータとした時刻歴応答解析結果より、最大杭頭回転角と免震部材上下に生じる $P-\delta$ 効果による曲げモーメントの傾向を分析し、係数 α_1 を設定する。

(1) 解析条件

解析モデルは、前報の杭頭免震構造の平面フレームモデルによる一体解析モデル (図-2) とする。各部モデル化の詳細は前報¹⁾による。

地盤条件を一様地盤6ケース、二層地盤3ケース、三層地盤3ケース、実地盤2ケースの合計14地盤とし、表-1と図-3に示す。また、入力地震動はレベル2相当の7波とし、表-2に示す。

(2) 解析結果

免震部材下部 (杭頭部) の係数 α_1 と免震部材上部の

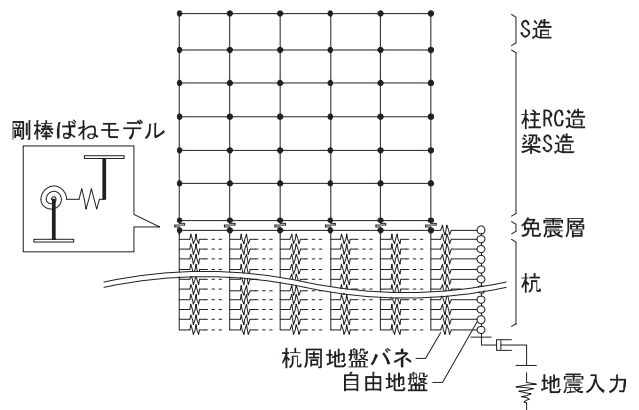


図-2 一体解析モデル

表-1 検討地盤条件

モデル名	一様地盤						二層地盤			
	Vs150 -40	Vs200 -40	Vs250 -40	Vs300 -40	Vs150 -50	Vs150 -60	Vs150-250 -40	Vs250-150 -40	Vs150-300 -40	
Vs1 (m/s)	150	200	250	300	150	150	150	250	150	
Vs2 (m/s)							250	150	300	
Vs3 (m/s)										
H (m)	40			50		60		40 (H1:20m, H2:20m)		
Tg (sec)	1.067	0.800	0.640	0.533	1.333	1.698	0.746	1.007	0.681	

モデル名	三層地盤		実地盤	
	Vs100-200-300 -40	Vs150-200-250 -40	No1	No2
Vs1 (m/s)	100	150		
Vs2 (m/s)	200	200	※1	※1
Vs3 (m/s)	300	250		
H (m)	40 (H1:20m, H2:10m, H3:10m)		36	46
Tg (sec)	0.800	0.954	0.668	1.221

※1 図-2参照

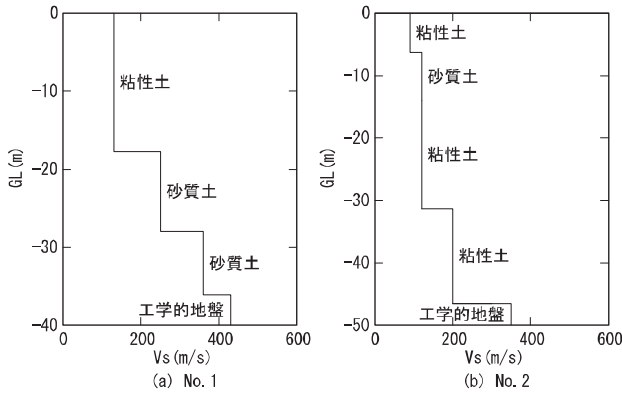


図-3 実地盤条件

表-2 検討用入力地震動

地震波	位相特性	最大加速度	最大速度	最大変位
		Amax (cm/s ²)	Vmax (m/s)	Dmax (cm)
Hachinohe	八戸港湾 (EW成分)	348.5	48.9	41.9
TOHOKU	東北大学 (NS成分)	292.9	51.8	50.4
Kobe	神戸海洋気象台 (NS成分)	381.2	54.3	38
RAM1	乱数位相1	379.52	52.4	38.5
RAM2	乱数位相2	364.46	50.52	41.43
RAM3	乱数位相3	354.36	45.05	41.03
BCJ-L2	BCJ-L2	355.66	57.36	45.05

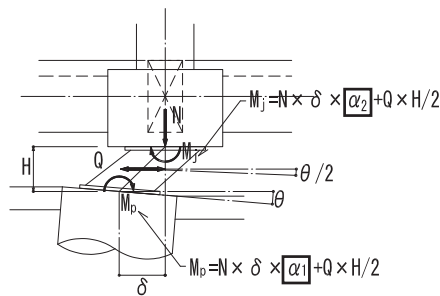


図-4 杭頭部の係数 α_1 と免震部材上部の係数 α_2

係数 α_2 の概要を図-4に示す。

杭頭部の係数 α_1 と杭頭回転角 θ に関する解析結果を図-5、免震部材上部の係数 α_2 と杭頭回転角 θ に関する解析結果を図-6に示す。ここでは、横軸に最大杭頭回転角、縦軸に係数 α_1, α_2 とした。また係数 α_1, α_2 は、時刻歴応答解析結果の最大値を用いて、(8)式、(9)式により算出した。

$$\alpha_1 = (M_p_max - Q_max \times H/2) / (N_max \times \delta_max) \quad (8)$$

$$\alpha_2 = (M_j_max - Q_max \times H/2) / (N_max \times \delta_max) \quad (9)$$

※ max は、時刻歴応答解析結果の最大値を示す。

図-5より、免震部材下部の係数 α_1 は杭頭回転角 $1/100 \text{ rad.}$ 以下で0.5以下となっている。また、地盤、地震波によっては係数 α_1 が0.25程度になる場合もある。免震部材の回転剛性 K_r は免震部材の水平変形が大きくなると小さくなるため⁴⁾、係数 α_1 は0.5に近付き、0.5を超えることはない。よって、杭頭回転角が生じる場合においても、係数 α_1 を0.5と設定すると、設計上安全側であると考えられる。

図-6より、免震部材上部の係数 α_2 は0.5を若干超えているが、免震部材の水平変形が大きくなると係数 α_2 は0.5に近づく傾向にある。よって、設計時の免震部材の水平変形が大きい場合には係数 α_2 は0.5として問題ないが、水平変形が小さい場合には係数 α_2 が0.5を若干超える可能性がある事に注意が必要である。

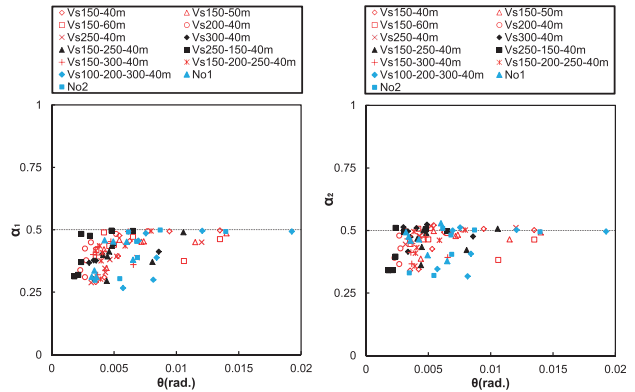


図-5 α_1 - θ 関係図

図-6 α_2 - θ 関係図

§3. 6階建て物流倉庫の試設計

3-1 建物概要

前章で提案した杭設計用荷重の算定法を用いて、試設計を行う。

建物概要を表-3に、免震層伏図を図-7に、軸組図を図-8に示す。試設計建物は6階建ての物流倉庫とした。平面規模は長辺方向120m、短辺方向50m、延床面積36,000m²であり、構造種別は1~5階が柱RC、梁S造、6階がS造である。検討ケースは、杭頭免震構造と基礎免震構造の2ケースとし、免震層および上部構造は両ケースとも同一とした。

地盤諸元を表-4に示す。地盤は液状化の恐れのない第2種地盤とし、工学的基盤をGL約47mに設定した。

3-2 設計概要

本報では、免震層より上部の上部構造と、免震層より下部の下部構造に分離したモデルにより検討を行う。

上部構造は、荷重増分解析および地震応答解析を行い、

表-3 建物概要

建築面積	建面6,000 m ² 延面36,000m ²
平面形状	120m × 50m (10m×10m スパン)
階数	地上6階 地下0階 塔屋0階
軒高	41.1m
構造種別	上部：1～5階 RCS造、6階 S造 下部：RC造
架構形式	純ラーメン構造
免震部材	天然ゴム系積層ゴム(NRB) 高減衰系積層ゴム(HDR) 低摩擦型弾性すべり支承(ESB) 積層ゴム一体型U型ダンパー(UD)
基礎地業	場所打ちコンクリート杭

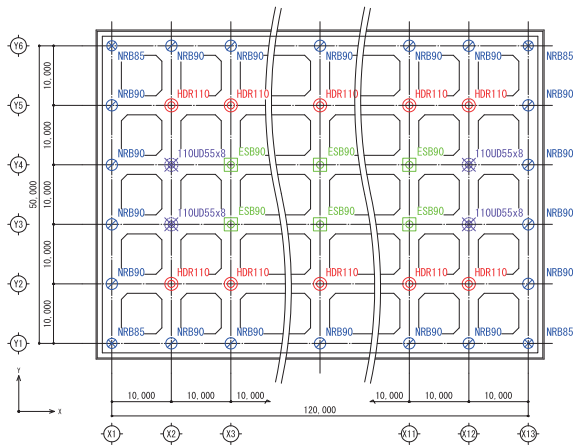


図-7 免震層伏図

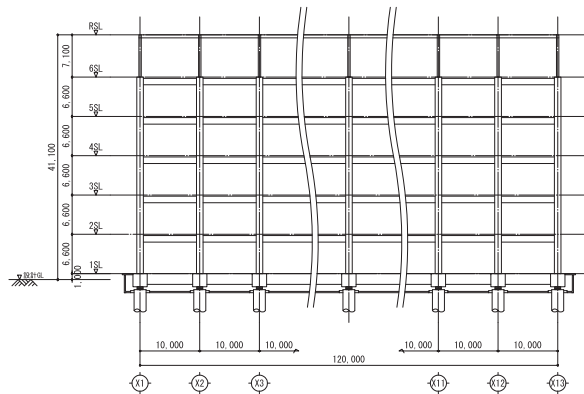


図-8 杭頭免震構造の軸組図

表-4 地盤諸元

深度 [m]	土質	単位重量 [kN/m ³]	N値	Vs[m/s]	備考
0.50	粘土	17.0	2	120	▽基礎底面
1.90	粘土	17.0	1	120	
3.25	シルト	16.0	1	100	▽工学的基礎
5.85	細砂	18.0	4	130	
8.50	砂質シルト	17.0	2	130	
17.05	シルト	16.0	0	130	
20.95	シルト質粘土	16.0	1	180	
23.10	砂混じりシルト	17.0	4	210	
32.15	砂質シルト	18.0	5	230	
35.80	砂混じりシルト	18.0	7	250	
38.50	細砂	19.0	59	300	
46.75	砂礫	20.0	40	360	
60.00	土丹	19.0	95	600	

荷重増分解析は弾塑性立体フレームモデルとし、地震応答解析は免震層と1階から6階を質点に置換した7質点系等価せん断ばねモデルとした。設計用入力地震動の諸元を表-5に示す。入力地震動は、告示波3波、観測波3波(50 cm/secに基準化)、サイト波1波の計7波を用いた。

下部構造(杭)の解析モデルを図-9に示す。解析モデルは単杭モデルとし、杭を線材に、地盤をばねに置換した多層地盤ばねモデルとした。設計用荷重は、上部構造の最大応答せん断力による水平力のほか、地盤変位による影響を応答変位法によって考慮し、それぞれの応力は二乗和平方根(SRSS)で重ね合わせることにした。部材モデルは、杭頭回転角を適切に評価するために、杭と地盤ばねを弾塑性モデルとし、杭はファイバーモデル(コンクリート:New RCモデル、鉄筋:バイリニア)、地盤ばねは、基礎指針⁵⁾に準じて算出した。杭頭部の境界条件は、杭頭免震構造はピン、基礎免震構造は固定とした。

杭頭免震構造の杭頭部の付加応力を図-10に示す。

表-5 設計用入力地震動

入力地震動	継続時間 (sec)	加速度 (cm/sec ²)	速度 (cm/sec)
告示波(東北大位相)	60	432.8	82.3
告示波(八戸位相)	119	428.0	83.7
告示波(乱数位相)	120	396.1	76.7
ELCENTRO 1940 NS	50	511.0	50.0
TAFT 1952 EW	50	497.0	50.0
HACHINOHE 1968 NS	234	349.0	50.0
サイト波(西部首都直下地震)	120	270.0	41.6

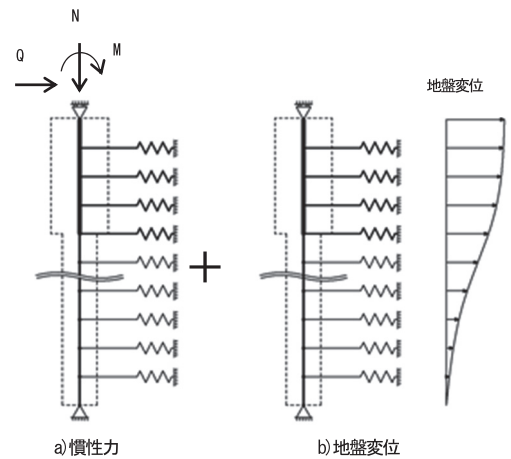


図-9 杭の解析モデル

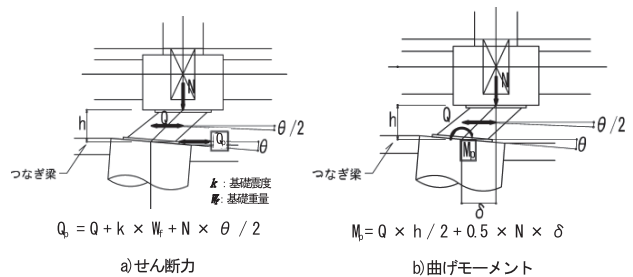


図-10 杭頭部の付加応力

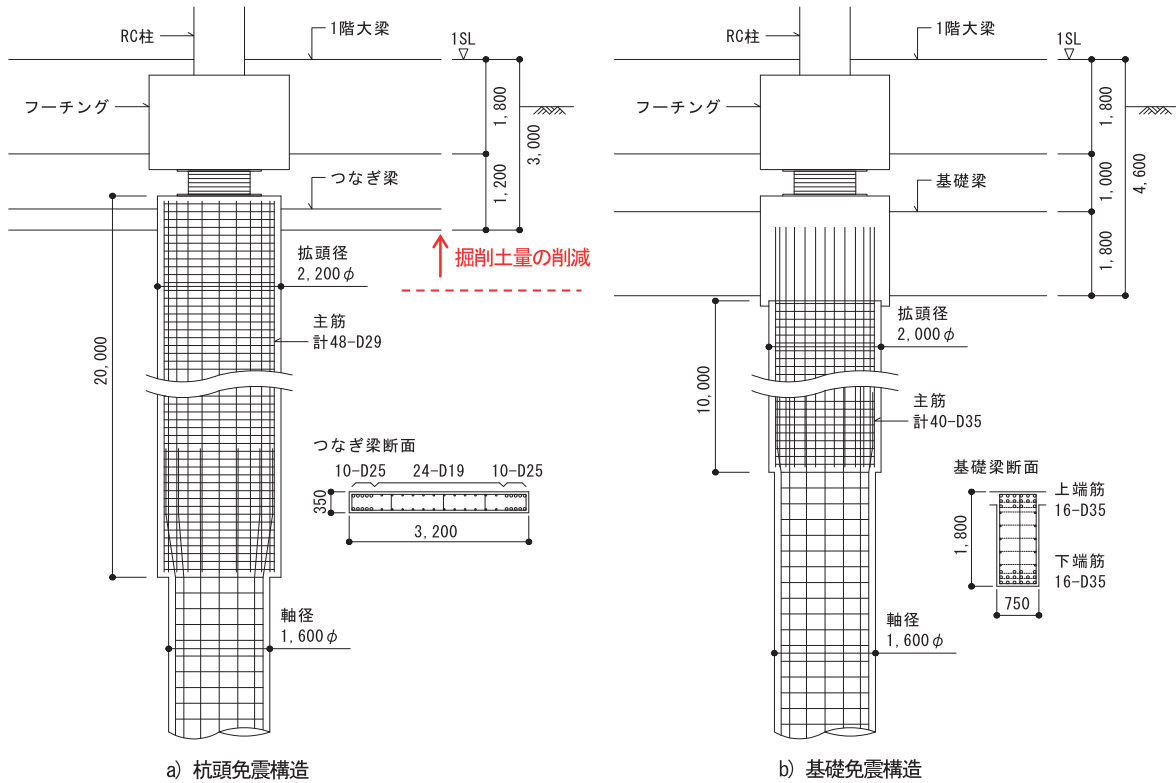


図-11 基礎構造断面

杭頭部の付加応力として、免震部材の変位による P- δ 効果および杭頭回転角による P- θ 効果、免震部材のせん断力により生じる曲げモーメントを考慮した。前章より免震部材下部の係数 α_1 は、0.5 とした。基礎免震構造は、P- θ 効果を除いた付加応力を基礎梁にて負担させた。

§ 4. 杭頭免震構造と基礎免震構造の比較

4-1 基礎構造断面の比較

基礎構造断面を 図-11 に示す。杭は場所打ちコンクリート杭の拡頭杭を採用した。杭頭免震構造は、基礎梁をつなぎ梁と称する扁平梁とし (図-11a)、基礎免震構造は一般的な二重基礎梁とした (図-11b)。

4-2 杭の曲げモーメントおよび回転角の比較

杭の曲げモーメントを 図-12 に、杭の回転角を 図-13 に示す。

図-12 の杭頭曲げモーメントは、図-12 a) 杭頭ピンの杭頭免震構造では付加曲げモーメントのみ (約 5,000 kNm) が生じているのに対し、図-12 b) 杭頭固定の基礎免震構造では、杭頭が固定であるために杭頭免震構造に比較して約 2 倍 (約 10,000 kNm) の杭頭曲げモーメントが生じている。図-13 の杭頭回転角は、杭頭免震構造は、0.0062 (1/161) rad. であり、免震部材の性能に影響が小さいとされる 1/100 rad. 以下に納まっている⁶⁾。基礎免震構造は、概ね 0 である。

本報の設計条件における杭断面は、杭頭免震構造は杭

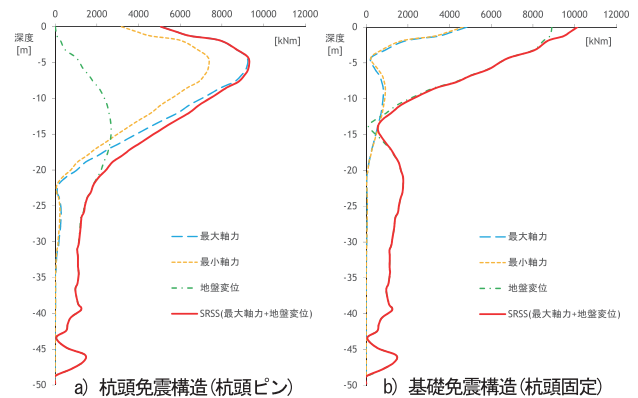


図-12 杭の曲げモーメント

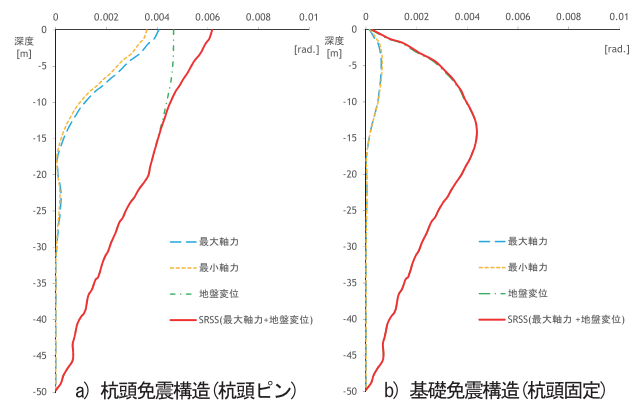


図-13 杭の回転角

頭回転角の制御によって決まり、基礎免震構造は杭頭曲げモーメントによって決定された。つまり、杭頭免震構造を採用して基礎構造の合理化を図るためには、杭頭回

転角を制御するために拡頭杭を採用するなどして、杭頭部の水平地盤反力を増大させるとともに杭の断面剛性を確保することが重要であると考えられる。

§5. まとめ

本報では、杭頭免震構造の設計に用いる、杭頭の回転による各部材に生じる応力の算出方法の提案と、6階建ての物流倉庫を用いて、杭頭免震構造および基礎免震構造の試設計を行い、基礎構造の比較を行った。

杭頭免震構造は、拡頭杭を採用するなどして、杭頭部の水平地盤反力を増大させるとともに杭の断面剛性を確保することで、杭頭回転角を免震部材の性能に影響が小さいとされる回転角に制御することが可能である。また、二重基礎梁を無くすことによって、基礎免震構造と比べて根伐底を浅くし、掘削土量を大きく削減することによって基礎構造の合理化が図れることが確認できた。

謝辞. 本報は、杭頭免震構造研究会（青木あすなろ建設、安藤ハザマ、東亜建設工業、西松建設、長谷工コーポレーション）における成果の一部を報告したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 成田悠 他：杭頭免震構造の開発（その1）、西松建設技報, vol.39.
- 2) 村田鉄雄 他：地盤－杭－建物連成系一体解析モデルを用いた杭頭免震構造の地震応答解析（その1～4）、日本建築学会学術講演梗概集, pp.605-612, 2015年9月.
- 3) 小林正人 他：端部回転を有する積層ゴムの部材端荷重に関する分析、日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第48号, pp.569-574, 2015年6月.
- 4) 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年6月.
- 5) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 2011年12月.
- 6) 牧田敏郎 他：杭頭回転角を考慮した免震部材の構造性能（その1～4）、日本建築学会学術講演梗概集, pp.449-456, 2016年8月.
- 7) 上田英明 他：地盤－杭－建物連成系一体解析モデルを用いた杭頭免震構造の地震応答解析（その9, 10）、日本建築学会学術講演梗概集, pp.473-476, 2016年8月.