

地震時の建物慣性力を受けるパイルド・ラフト基礎の 非線形挙動に関する解析的研究

永井 宏¹

要旨：本研究においては、地震時の建物慣性力を受けたパイルド・ラフト基礎が弾性状態から終局限界状態に至るまでの非線形挙動について解析的に検討した。基礎の変位やそれに伴って発生する杭体応力、基礎スラブ底面や杭周辺の地盤の降伏進行過程について把握すると共に、基礎形状を変化させたパラメトリック解析によって効率的な幾何形状を検討した。その結果、ラフトの滑動と杭頭部の接合条件（回転剛性）が基礎の挙動に多大な影響を及ぼすこと、また少数の杭を間隔を広げて配置するのが効率的な基礎形状であることを示した。

キーワード：パイルド・ラフト基礎、水平荷重、非線形挙動、杭頭接合条件、数値解析

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎とは、直接基礎（ラフト）に摩擦杭（パイル）を併用して建物の沈下量を抑制することを目的とした基礎形式である。特に支持層が深い地盤において有用性が高く、従来の杭基礎に比べて基礎の合理化（基礎スラブの厚さ、杭長・杭径・杭本数などの低減）が可能である。

海外（主にヨーロッパ、オーストラリア）でも、建物の沈下量を予測する手法が提案されており、超高層建物への実施例も多数報告されている。しかし、大地震の発生が少ない国々での研究が多いせいか水平荷重に対する設計法は極めて遅れている。

一方、我が国では、鉛直荷重に対する沈下量の抑制効果が認知されつつも、地震時の挙動が未だ十分に解明されていないため、実施例の多くは比較的中低層の建物である。また、高層建物へ適用される場合でも、鉛直荷重に対する設計のみで、水平荷重に対しては直接基礎や杭基礎の耐震設計を参照して検討されている¹⁾。本基礎形式が基礎設計の選択肢の一つとして広く普及するためには、地震力を受けた時の支持力・変形性状を早急に明らかにし、耐震設計に関する具体的な検討方法を示す必要がある。特に、大地震による終局限界状態に対する適切な検討が必要となる。

パイルド・ラフト基礎の水平力に対する挙動に関して、著者は、数値解析と原位置実験の両面から検討してきた。まず、ラフトー杭ー地盤間の相互作用を考慮した解析法を構築して検討した弾性解析では、ラフトの存在が杭体応力を大幅に低下させること、ラフトと杭頭の接合部をピン接合方式にすることが水平変位をそれ程増加させずに杭体応力面で有利に

なること等を明らかにした²⁾。また、沖積粘性土地盤における原位置水平載荷実験では、損傷限界状態検討用荷重（中地震動時）程度の場合には、上述の解析と同様にラフトの接地や杭頭ピン条件の導入により杭体応力が低減される等の結果が得られたが、それを超え終局限界状態検討用荷重（大地震動時）が作用すると、杭頭ピン接合の有用性が低下する等の傾向が生ずることも明らかとなった^{3),4)}。

この他にも原位置載荷実験⁵⁾や数値解析⁶⁾⁻⁸⁾による既往の研究はあるが、大変形までの挙動に関しては、限定された条件下での事例に留まっており、地盤や基礎に関する種々の条件の及ぼす影響についてはあまり検討されていない。

そこで、本論文では、建物慣性力を受けるパイルド・ラフト基礎が終局限界状態に至るまでの非線形挙動、さらに基礎形状を変化させたパラメトリック解析によって効率的な幾何形状を検討する。

2. 解析方法および検討モデル

2.1 解析方法

Fig.1は、本論文で用いた解析方法の基本的概念図であり、以下に概要を記す。なお、詳細や適用性については、文献^{2),3)}を参照されたい。

外力が作用する基礎全体の荷重－変位関係は、(1)式で表される。また、 $[K]$ は、(2)～(4)式のようにラフト、杭、ラフトー杭頭部間および地盤を構成する剛性マトリックスを結合することで、最終的なラフト／杭／地盤を連成した剛性マトリックスが得られる。

$$\{F\} = [K] \cdot \{\delta\} \quad (1)$$

$$[K] = [K_r] + [K_p] + [K_{rp}] + [K_s] \quad (2)$$

1 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 助教

$$[K_s] = [K_{sf}] + [K_{sn}] \quad (3)$$

$$[K_{sn}] = [K_{sn,r}] + [K_{sn,ph}] + [K_{sn,ps}] + [K_{sn,pp}] \quad (4)$$

ここに、

- {F} : 基礎に作用する外部荷重ベクトル
- {δ} : 基礎に生じる節点変位ベクトル
- [K] : 基礎全体の剛性マトリックス
- [K_r] : ラフトの剛性マトリックス
- [K_p] : 杭の剛性マトリックス
- [K_{rp}] : ラフトー杭頭部間の剛性マトリックス
- [K_s] : 地盤の剛性マトリックス
- [K_{sf}] : 一般地盤の剛性マトリックス
- [K_{sn}] : 近傍地盤の剛性マトリックス
- [K_{sn,r}] : ラフト水平抵抗の剛性マトリックス
- [K_{sn,ph}] : 杭水平抵抗の剛性マトリックス
- [K_{sn,ps}] : 杭周面抵抗の剛性マトリックス
- [K_{sn,pp}] : 杭先端抵抗の剛性マトリックス

[K_r]および[K_p]には、それぞれ有限要素法による薄板要素および梁要素を用いた。なお、[K_p]は、杭材料の応力σ〜ひずみε関係 (Fig.2)を設定し、要素分割法 (Fiber Model) によって曲げモーメントM〜曲率φ関係の非線形性を評価する。また、[K_{rp}]は、ラフトと杭頭部間の接合法に応じて軸力・せん断力・曲げモーメントを伝達する Winkler 型バネにより評価する。

[K_s]については、杭と地盤間のすべり現象や地盤材料の非線形性が強い問題に対しては、非線形性の進行に応じて相互作用を低下させる配慮が必要となる。そこで、(3)式に示したように地盤を介した応力伝播 (相互作用) を表現する一般地盤 (Fig.1の(α))と、ラフトおよび杭周辺の地盤の局所的な塑性化を表現する近傍地盤 (Fig.1の(β)~(δ))とに領域分けをして評価する。これにより、相互作用が過大に評価されないように配慮しながら、比較的簡単にパイルド・ラフト基礎の非線形挙動の追跡を可能にしている。ここで、[K_{sf}]は Mindlin の変位解の逆マトリックスを、また[K_{sn}]はラフトや杭の近傍に応じて(4)式のように分け、Fig.3に示す荷重伝達バネを適用する。なお、この荷重伝達バネは、(i)にてラフト底面の滑動抵抗 (すべり) を、(ii)にて杭の水平変位に伴う周辺地盤の塑性化現象、Fig.3(iii)および(iv)にてそれぞれ鉛直荷重に対する杭周面と地盤とのすべりおよび杭先端部の地盤への局所的な貫入を表現している。

2. 2 検討モデルの形状とその諸元

検討対象としたモデルは、均一な粘性土地盤に設置されたパイルド・ラフト基礎であり、Fig.4のように正方形平面のラフトに場所打ちコンクリート杭が

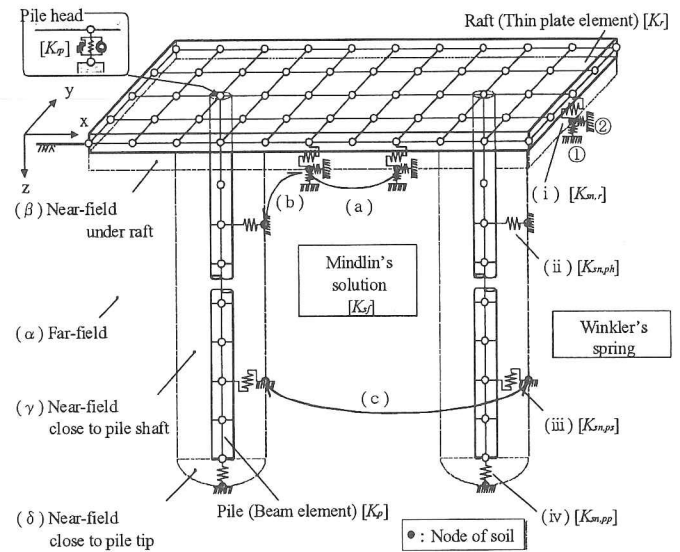


Fig. 1 Hybrid model

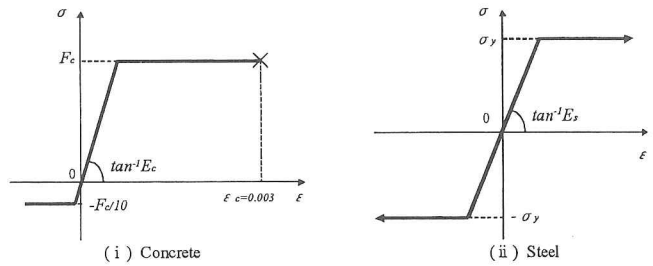


Fig. 2 Stress-strain of pile material

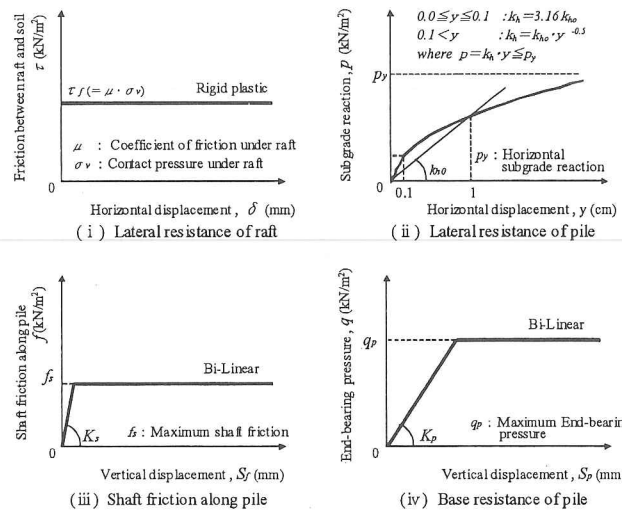


Fig. 3 Spring model in near-field

等間隔に配置されている。Table 1にモデルの諸元を示す。また、杭頭部とラフトの接合条件として、剛接合 (固定度=1.0)、半剛接合 (固定度=0.5) およびピン接合 (固定度=0) の3種類を想定した。なお、半剛接合では、単杭の弾性支承梁の曲げ理論解析において、杭頭の曲げモーメントが剛接合のその0.5となる回転剛性を有しており、杭頭の固定度と回転剛性の関係は、(5)式で表される。

Table 1 Parameter of Analytical model

Soil	変形係数 E_{sf} (kN/m ²)	3.50×10^4
	ポアソン比 ν_s	0.4
	基準水地盤反力係数 k_{h0} (kN/m ³)	1.77×10^4
	塑性水平地盤反力 p_v (kN/m ²)	$66.7 \sim 300 (=2 \sim 9c_u)$
	極限周面抵抗力度 f_s (kN/m ²)	$33.3 (=c_u)$
	極限先端支持力度 q_p (kN/m ²)	$200 (=6c_u)$
ラフト-地盤間の摩擦係数 μ		0.6
Raft (Concrete)	ヤング係数 E_r (kN/m ²)	2.17×10^7
	ポアソン比 ν_r	0.167
Pile (Concrete)	ヤング係数 E_c (kN/m ²)	2.17×10^7
	圧縮強度 F_c (N/mm ²)	21
(Steel)	ヤング係数 E_s (kN/m ²)	2.05×10^8
	降伏強度 σ_v (N/mm ²)	345

Table 2 Parameter

Number of piles (n)	1	9	25	49	81
Pile spacing to diameter ratio (s/d)	2.5	5	10	20	-

$$\alpha = K_\theta / (EI\beta + K_\theta) \quad (5)$$

ここに,

- { α } : 杭頭固定度
- { K_θ } : 杭頭回転剛性
- [EI] : 杭体の曲げ剛性
- [β] : 地盤と杭体の相対剛性

また、4章のパラメトリック解析では、杭本数 n 、隣接杭間隔 s/d を Table 2 のように変化させて基礎形状の影響を検討する。それぞれ太枠で囲んだ因子が基本モデルであり、ある因子を変化させた場合、他の因子は全て基本モデルの値をとる。

荷重は、各杭位置に等しい鉛直荷重 $V_i = 1500 \text{ kN}$ 、($V = \sum V_i$, $i=1 \sim n$; 基本モデルで建物自重 60 kN/m^2 に相当) を作用させた後、建物慣性力 (1 階の層せん断力) として水平荷重 $H = \sum H_i$ を漸増させた。すなわち、増分法による静的弾塑性解析を行う。

3. 基本モデルの変位および応力

3.1 ラフト・杭近傍の地盤の降伏進行過程

Fig.5 は、ラフト水平抵抗バネ (Fig.3 (i)), すなわちラフト底面地盤の降伏状況であり、任意のせん断力係数 (以下、 H/V と略称する。) において降伏している部分をコンター表示している。これを見ると、加力前面から後面、外周部から中央部へと降伏が徐々に進行してラフトが滑動していくのが分かる。これは、鉛直荷重によるせん断成分が加力前面では加算、加力後面では逆に減算されること、また、一般地盤の応力の重なりにより、中央部が端部よりも変形し易いという影響を反映している。なお、杭周辺の地盤は杭体の変形に付随して変形するため降伏

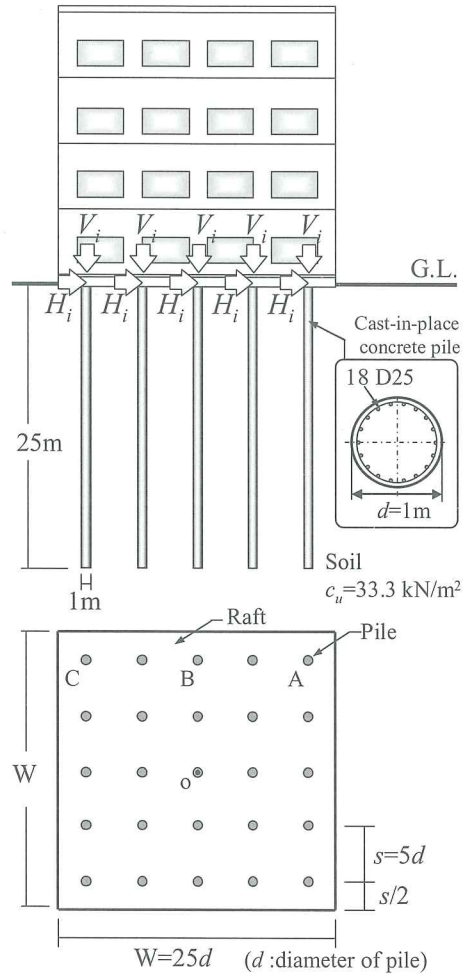


Fig. 4 Analytical model

が遅くなっている。また、杭頭接合条件で比較すると、剛接合、半剛接合、ピン接合の順に降伏の進行が遅い。これは、杭頭の回転剛性が低い接合法ほど杭の曲げ変形がし易く、杭の水平抵抗に対して、ラフトの水平抵抗が相対的に大きくなるためである。

Fig.6 は、杭と地盤間の相対変位 (Fig.3 (ii)) が 1 mm (杭水平抵抗バネの降伏開始時点) に達する H/V を示している。これを見ると、地表面から深部へ、またラフトと同様に加力前面側の杭から降伏が進行していくことが分かる。これは、ラフト底面地盤が降伏すると、ラフト底面から地盤への応力伝播 (変位) が生じなくなることに起因している。すなわち、ラフト底面が降伏した周辺の杭ほど地盤の変位が小さくなるが、杭頭変位は全杭でほぼ等しいので、杭と地盤間の相対変位が大きくなることを反映している。なお、地表面付近は、ラフトの変位に地盤が追随するので降伏は遅くなっている。また、杭頭接合条件で比較すると、深度 $1 \sim 5 \text{ m}$ では剛接合、半剛接合、ピン接合の順に降伏の進行が速い。後述するように、回転剛性の高い剛接合ほどラフトの変位に伴う杭の負担水平力が大きいためである。

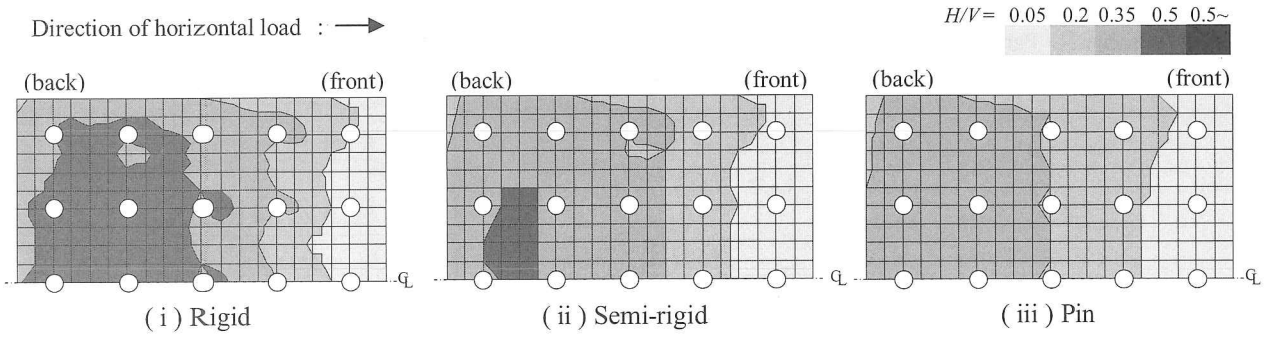


Fig. 5 Yield of raft spring

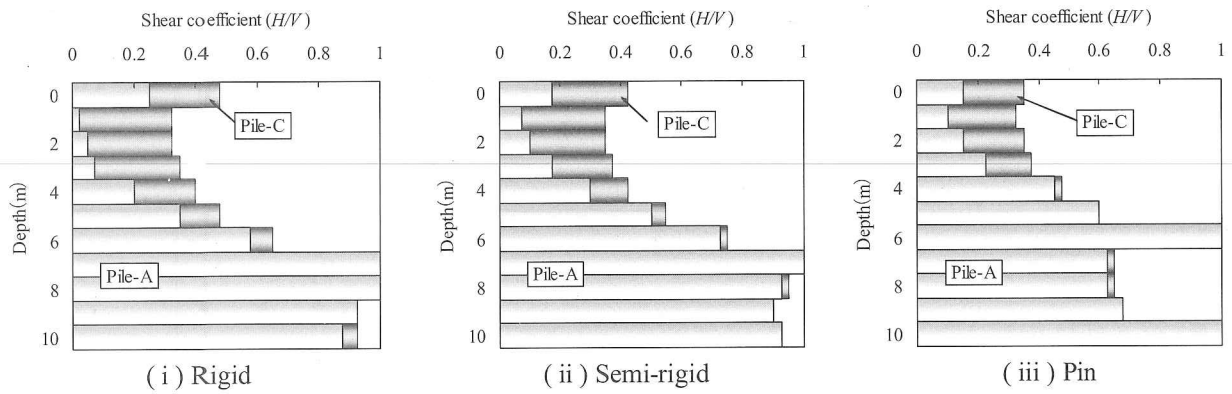


Fig. 6 Yield of pile spring

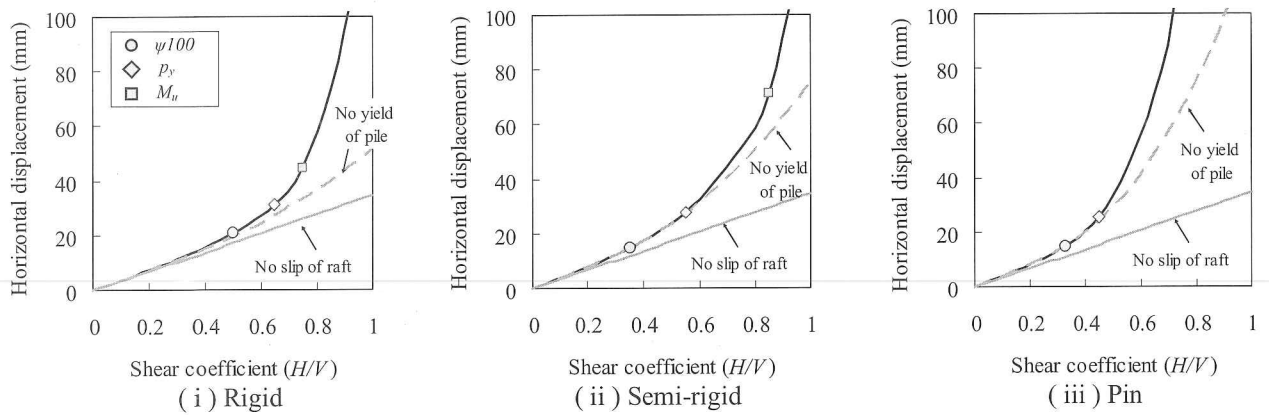
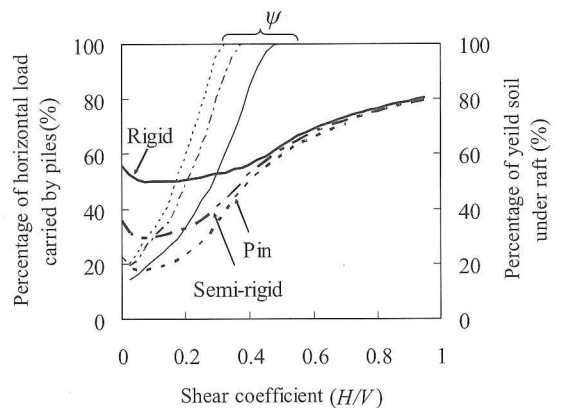
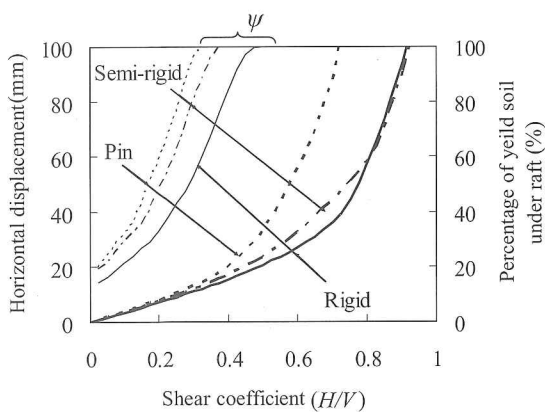


Fig. 7 Load-displacement of raft



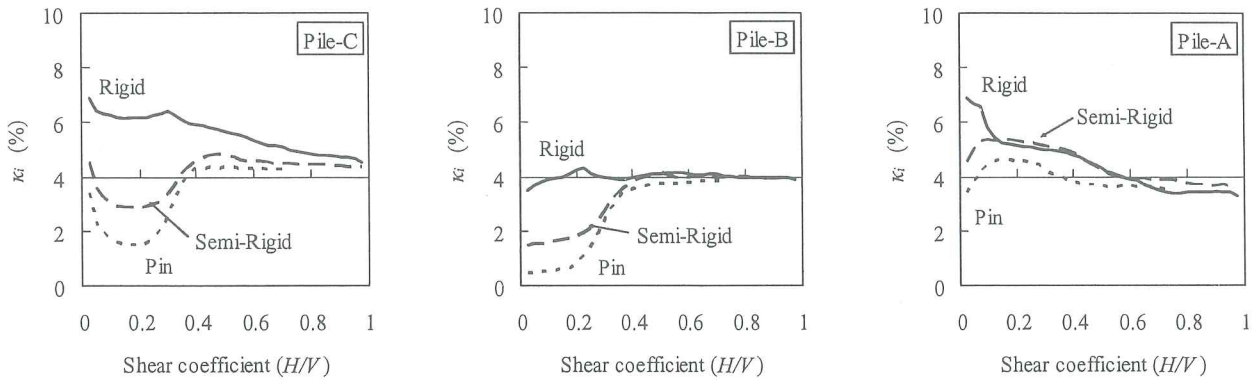


Fig. 10 Shear force of pile head

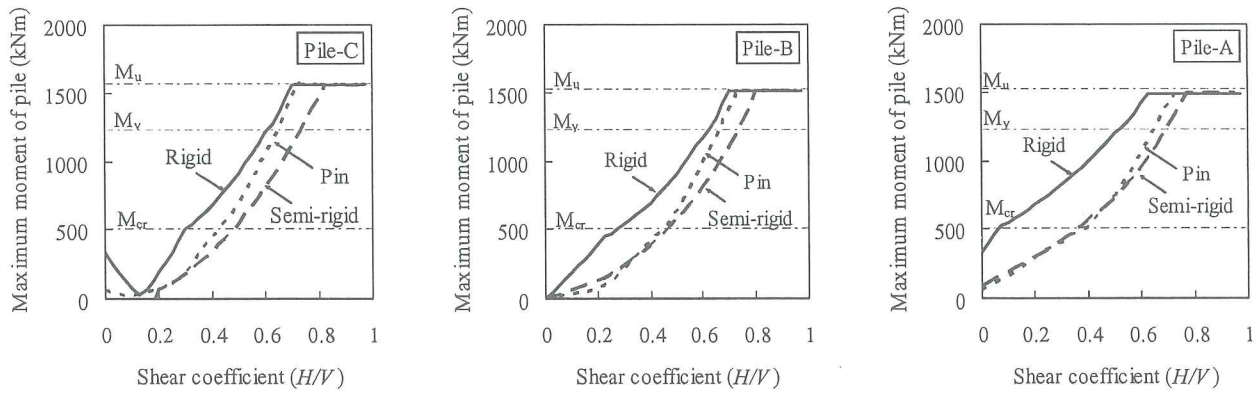


Fig. 11 Maximum moment of pile

3. 2 水平荷重—水平変位

Fig.7は、 H/V とラフト中央の水平変位 δ_o の関係である。ラフト底面地盤の降伏がない(滑動なし)、または杭体の降伏が生じない(高耐力杭)とした場合と比較する。なお、ラフト底面地盤が完全に降伏するとき(後述する降伏割合 $\psi=100\%$)、全杭の周辺地盤で塑性水平地盤反力 p_y に到達したとき、および全杭体で終局曲げモーメント M_u に到達したときをプロットした。それによると、基礎の変位はラフトの滑動により増大し、その後に杭周辺地盤と杭体の塑性化によって大きく水平変位していくことが分かる。特に、 p_y 以降は杭体の剛性低下が著しく変位が急増する。したがって、変位の抑制には、ラフトの水平抵抗を最大限利用することが必須であり、基礎底面の接地圧や地盤のせん断強度を確保すること、または地下室を造成して水平荷重を負担させることが効果的と言える。

Fig.8では杭頭接合条件による差異に着目する。また、(6)式で表されるラフト水平抵抗バネの降伏割合 ψ を併記している。

$$\psi = \sum a_y / A_r \quad (6)$$

ここに、

- a_y : 降伏したラフト水平抵抗バネの負担面積
- A_r : ラフト全面積

ラフト底面の地盤が降伏までは杭頭接合条件に関わらずほぼ等しいが、Fig.5およびFig.6の降伏進行ならびに杭頭部の回転剛性の影響を反映して、降伏後は杭頭部の回転剛性が低いほど大きく変位していく。特に、ピン接合で設計する場合には、設計荷重以降の変位の急増に配慮が必要となる。

3. 3 杭体応力

Fig.9は、全水平荷重に対する杭の負担率 β_p である。 H/V が小さいときには杭頭部の回転剛性が低いほど小さい。しかし、ラフト底面の地盤の降伏に伴い、杭の負担は増大し、剛接合モデルが完全に降伏した $H/V=0.5$ 以降は、荷重の増分を杭のみで負担するため、杭頭接合条件による差異はほぼないのが分かる。

次に、ラフト平面内の杭位置による杭頭せん断力 Q_i の違いに着目し、全杭の負担水平力に対する割合 $\kappa_i (= Q_i / \sum Q_i)$ をFig.10に示す。隅角部のA杭、C杭および中央部のB杭(Fig.4参照)に着目したFig.10を見ると、全体的な傾向として、前面隅角部A杭の負担水平力の割合が大きいのが分かる。特に、剛接

Table 3 Limit state and H/V

限界	算定条件	H/V
損傷限界状態 (中地震動時)	$H = C_i \cdot V$ C_i : 地震層せん断力係数 ($= Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0$) Z : 地域係数 (1.0) R_t : 振動特性係数 ($= 1.0, T < T_c$) ・地盤の固有周期: $T_c = 0.8s$ (第3種地盤) ・建物の固有周期: $T = 0.32s$ ($= 0.02 \cdot h, h$: 高さ16mと仮定) A_i : C_i の分布係数 ($= 1.0$) C_0 : 標準せん断力係数 ($= 0.2$)	0.2
終局限界状態 (大地震動時)	$H = C_i \cdot V$ C_i : 地震層せん断力係数 ($= D_s \cdot F_{es} \cdot Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0$) D_s : 構造特性係数 ($= 0.5$) F_{es} : 形状特性係数 ($= 1.0$) Z, R_t, A_i : 上段と同じ C_0 : 標準せん断力係数 ($= 1.0$)	0.5

合でこの傾向が顕著であり、杭全体の平均値 (4%) の1.5倍以上を負担している。これは、Fig.5およびFig.6で示したように、ラフト底面地盤が前面側から降伏することを反映している。また、ラフト底面地盤が降伏するに伴って近傍の杭負担荷重が増大するが、負担増に伴う杭水平バネの降伏も進行するため、A杭の負担水平力の割合は低下する。更に、後面のC杭でも同様な現象を繰返し、最終的には基礎全体で平均化されていく。

Fig.11はA~C杭において発生する最大曲げモーメント $M_A \sim M_C$ の推移である。なお、 M_{cr} はひび割れ曲げモーメント (コンクリートのひび割れ)、 M_y は降伏曲げモーメント (鉄筋の引張降伏)、 M_u は終局曲げモーメント (コンクリートの最大圧縮ひずみ度が0.3%)を表しており、杭体の断面設計にあたって設計用限界値となる値である。剛接合では杭位置による差異、特に前面隅角部A杭のモーメントが大きく、 M_{cr} 、 M_y 、 M_u に達する H/V も低いのが分かる。一方、ピン接合は H/V が低いときは極めて小さいが、ラフト降伏に伴って急激に増大し、B杭やC杭では剛接合とほぼ同程度の H/V で M_u に到達している。鉛直荷重時 ($H/V=0$)の発生応力や水平荷重に伴う応力の変化、更には、杭位置での推移も勘案すると、杭頭部を半剛接合とするのが有効と言えよう。

4. 諸因子の影響

基礎の形状 (杭本数 n 、杭間隔 s/d) がパイルド・ラフト基礎の挙動に及ぼす影響を検討する。ここでは、ラフトの水平変位 δ_o 、杭の水平荷重負担率 β_p 、ラフト水平抵抗の降伏率 ψ および隅角A杭の最大曲げモーメント M_A と諸因子の関係に着目した。なお、

$H/V=0.2$ は中地震動を想定した損傷限界状態検討用の基礎への作用水平力、 $H/V=0.5$ は大地震動を想定した終局限界状態検討用の基礎への作用水平力を想定しており、Table 3のように建築基準法施行例第88条の規定に基づき設定した地震力に相当する。

4. 1 杭本数の影響

杭本数 n を変化させた Fig.12 を見ると、杭本数が少ないほど、 δ_o 、 β_p 、 ψ および M_A の全てが小さくなっている。これは、ラフトの面積が小さくなるため、基礎の水平変位に伴う地盤内応力の重なりが小さくなることを反映している。なお、 δ_o や M_A のこの傾向は、 $H/V=0.2$ よりもラフト水平抵抗が完全に降伏した $H/V=0.5$ の方が顕著である。

また、杭頭接合条件に着目し、剛接合に対する半剛接合またはピン接合の比をとると、変位は、 $H/V=0.2$ のときにそれぞれ1.07~1.09と1.10~1.15、 $H/V=0.5$ のときに1.12~1.26と1.54~1.71。一方、曲げモーメントは、 $H/V=0.2$ のときに0.30~0.50と0.27~0.51、 $H/V=0.5$ のときに0.49~0.66と0.59~0.70となっており、 M_{cr} 、 M_y 、 M_u に達する H/V は、杭頭部の回転剛性が低い杭の方が遅い。すなわち、杭本数が少ないほど、ラフト底面地盤の降伏後に変位は増大するが、応力の低減効果が高いことが分かる。特に、半剛接合では、水平変位を10~20%程度の増大に抑えて、 M_u に到達する H/V を10~40%程度大きくすることができる。

したがって、本検討モデルのようにラフト底面の水平抵抗が期待できる場合には、変位や応力の許容範囲内でできるだけ少数の杭を用いることが効率的と言えよう。

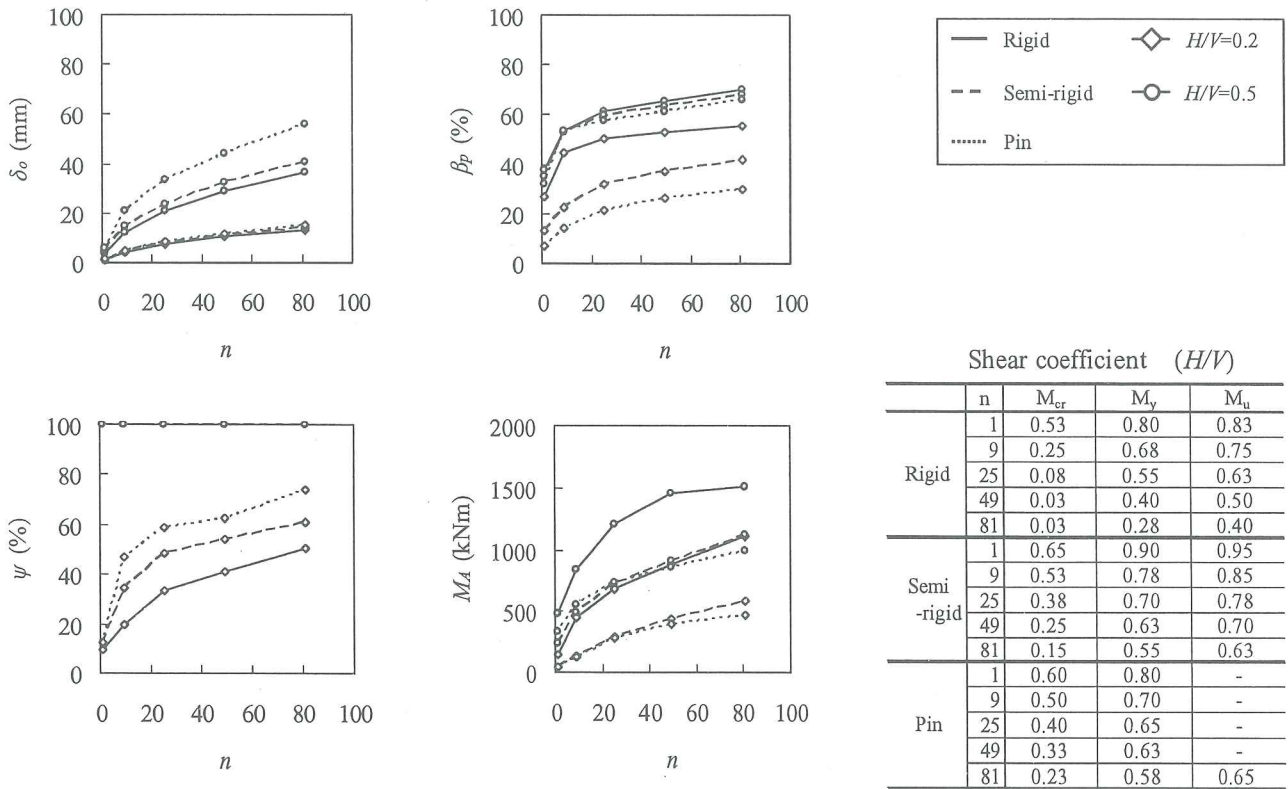


Fig. 12 Influence of pile number

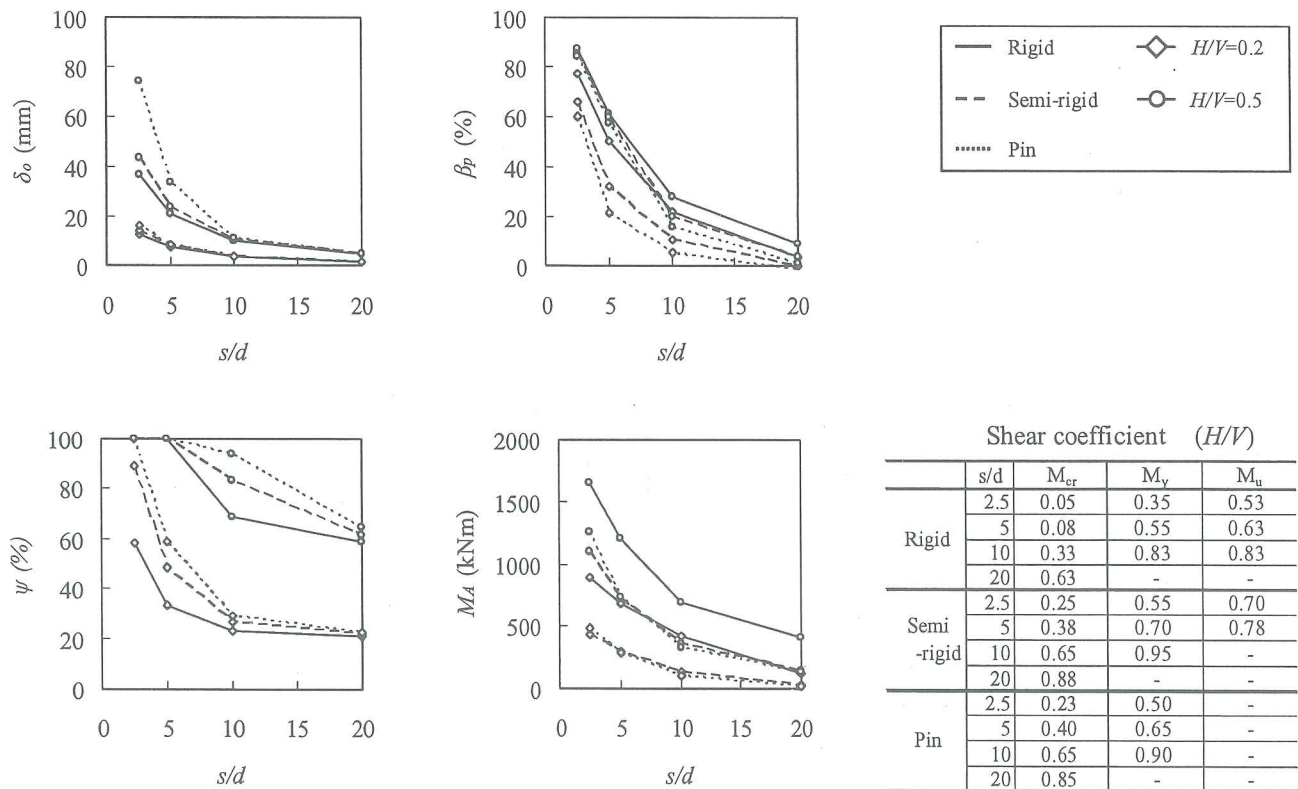


Fig. 13 Influence of pile space

4. 2 杭間隔の影響

杭間隔 s/d を変化させた Fig.13 を見ると、杭間隔が広いほど、 δ_o 、 β_p 、 ψ および M_d の全てが小さくなっている。なお、 δ_o や M_d のこの傾向は、 $H/V=0.2$ よりもラフト水平抵抗の降伏が進行した $H/V=0.5$ の方が顕著である。

また、杭頭接合条件に着目し、剛接合に対する半剛接合またはピン接合の比をとると、変位は、 $H/V=0.2$ のときにそれぞれ 1.01~1.14 と 1.01~1.31、 $H/V=0.5$ のときに 1.02~1.19 と 1.03~2.05。一方、曲げモーメントは、 $H/V=0.2$ のときに 0.27~0.48 と 0.13~0.54、 $H/V=0.5$ のときに 0.36~0.66 と 0.34~0.76 となっている。すなわち、杭間隔が狭いほど、ラフト底面地盤の降伏後に変位は増大するが、応力の低減効果が高いことが分かる。

したがって、パイルド・ラフト基礎では杭を広げて配置することが効率的であると言える。

5. おわりに

本論文の結果を以下にまとめる。

- ① 基礎の水平変位は、ラフト底面の水平抵抗が降伏するまでは杭頭接合条件に関わらずほぼ等しいが、高荷重になって降伏すると、杭頭部の回転剛性が低いほど大きく変位する。
- ② 杭の水平荷重負担率は、ラフト底面の水平抵抗が降伏するまでは杭頭接合条件で大きく異なるが、高荷重になって降伏すると、その影響は小さくなる。
- ③ 杭のせん断力や曲げモーメントは、ラフト底面の水平抵抗の降伏に伴いラフト前面側の杭が一旦大きくなる。しかし、杭近傍の地盤の降伏も進行

していくに伴い、基礎全体で平均化される。

- ④ パイルド・ラフト基礎では、少数の杭を間隔を広げて配置する形式が効率的となる。

参考文献：

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10
- 2) 土屋 勉，永井 宏，池田篤則：地震力を受けるパイルドラフトの挙動に関する解析的研究，構造工学論文集，Vol.48B，pp.343-350，2002.3
- 3) H.NAGAI, T.TSUCHIYA：An analytical model to estimate nonlinear behavior of piled raft, Proceedings of the 2nd China- Japan Geotechnical Symposium, Shanghai, pp.560-563, 2005.10
- 4) 永井 宏，土屋 勉：杭頭拘束条件に着目したパイルド・ラフトの原位置水平載荷実験，日本建築学会構造系論文集，第 579 号，pp.47-53，2004.5
- 5) 長尾俊昌，桑原文夫，小林治男，渡邊 徹：小型基礎の原位置実験より得られたパイルド・ラフト基礎の水平挙動，日本建築学会構造系論文集，第 559 号，pp.121-127，2002.9
- 6) 真野英之，中井正一：地盤の非線形性を考慮した水平力を受けるパイルドラフト基礎の杭応力の簡易算定法，構造工学論文集，Vol.47B，pp.427-434，2001.3
- 7) P.Kitiyodom, T.Matsumoto: A simplified analysis method for piled raft and pile group foundations with batter piles, Int. J. Numer. and Anal. Methods in Geomech., 26, pp.1349-1369, 2002.
- 8) 長尾俊昌，桑原文夫，小林治男，渡邊 徹：水平力を受けるパイルド・ラフト基礎の挙動解析，日本建築学会構造系論文集，第 577 号，pp.63-68，2004.3

AN ANALYTICAL STUDY ON NONLINEAR BEHAVIOR OF PILED RAFT FOUNDATION SUBJECTED TO BUILDING INERTIAL FORCE BY THE EARTHQUAKE

Hiroshi NAGAI

ABSTRACT : This study discusses the nonlinear behavior of piled raft foundations subjected to building inertial force caused by an earthquake. Displacement, stress and yield of soil near the raft and pile of piled raft foundations with various connecting conditions at the pile head are compared by means of a numerical analysis. In addition, we conduct a series of parametric studies in order to identify the parameters that have a large influence on the behavior of piled raft foundations. We identified two main parameters: the number of piles, n ; and the pile-spacing-to-diameter ratio, s/d . The results indicate that slip between raft and soil, and the connecting conditions at the pile head have a large influence on the behavior of horizontally loaded piled raft foundations, and that the optimum design for a piled raft foundation is to arrange a small number of piles that extend over the pile space.

Key words : Piled raft foundation, Horizontal load, Nonlinear behavior, Connecting condition at pile head, Numerical Analysis