

中間および先端に拡径部を有する 場所打ちコンクリート杭 (Me-A 工法) の開発

小川敦 * 森利弘 *

場所打ちコンクリート杭の拡径杭工法は、杭先端の径を杭軸部よりも大きくすることにより押し込み方向のみ支持力向上の効果を見込むものである。本工法 (Me-A 工法) は杭の先端に加え、中間にも拡径部 (節部) を設置する場所打ちコンクリート杭であり、開発に際しては従来の杭先端拡径タイプを含め、押し込みおよび引抜き方向における支持力について検討を行った。本報告では、実施した原位置載荷試験および遠心載荷試験による引抜き方向の支持力の評価ならびに適用事例について報告する。

キーワード：場所打ちコンクリート杭、支持力、施工

1. はじめに

本工法は、支持性能の向上のため、杭の先端に加え、中間にも拡径部 (節部) を設置する場所打ちコンクリート杭 (Me-A: Multi Enlarged-nodes Ace pile) 工法である。中間部にも拡径部を設けることで、より小さい軸径、短い杭長で支持力を確保できるとともに、抵抗機構を分散して地盤特性の不確実性のリスクを分散できる。

開発に際しては中間拡径部を持たない従来の拡底杭を含め押し込みおよび引抜きの両方向における支持力について検討を行った。

本報告では、工法の概要、施工方法の妥当性の確認を目的とした施工試験¹⁾、鉛直支持力特性を把握するために実施した遠心載荷試験²⁾と原位置載荷試験³⁾のうち引抜き方向の試験結果について報告し、支持力特性の評価方法

について示す。また、本工法の適用事例について紹介する。

2. 工法の概要

工法の概要図を Fig. 1、杭形状の例を Fig. 2 に示す。杭の中間および先端に拡径部を設けることにより、押し込み方向および引抜き方向の支持力を向上させた場所打ちコンクリート杭で、中間拡径部を有する Me-A(1) 杭と拡底部のみを有する Me-A(2) 杭がある。

3. 施工方法

施工手順を Fig. 3 に示す。Fig. 3 は中間拡径部施工後に拡底部を施工した場合の手順になるが、砂礫や緩い地盤でなければ、先行して軸部を支持層まで掘削し、拡底部を施工した後に中間拡径部を施工することもできる。

中間拡径部は、従来の拡底杭の拡底バケツトを用いて上部傾斜部の掘削を行った後に、スライムの堆積を防ぐための拡径下部傾斜部を専用のバケツトで掘削する。拡

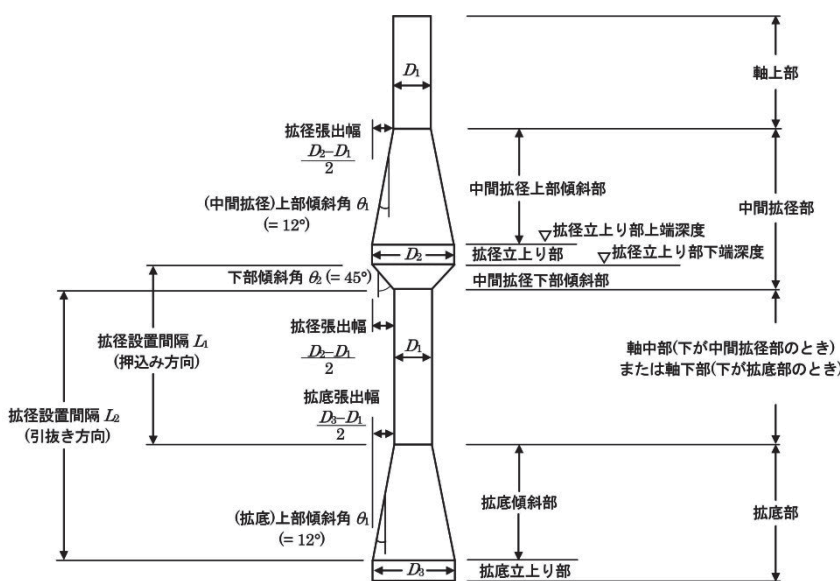


Fig.1 概要図

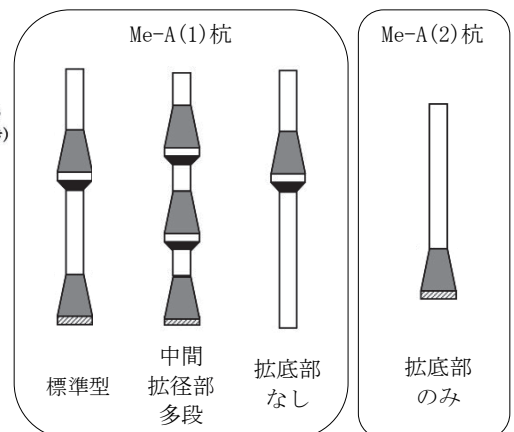


Fig.2 杭形状の例

* 技術研究所 地盤基礎研究グループ

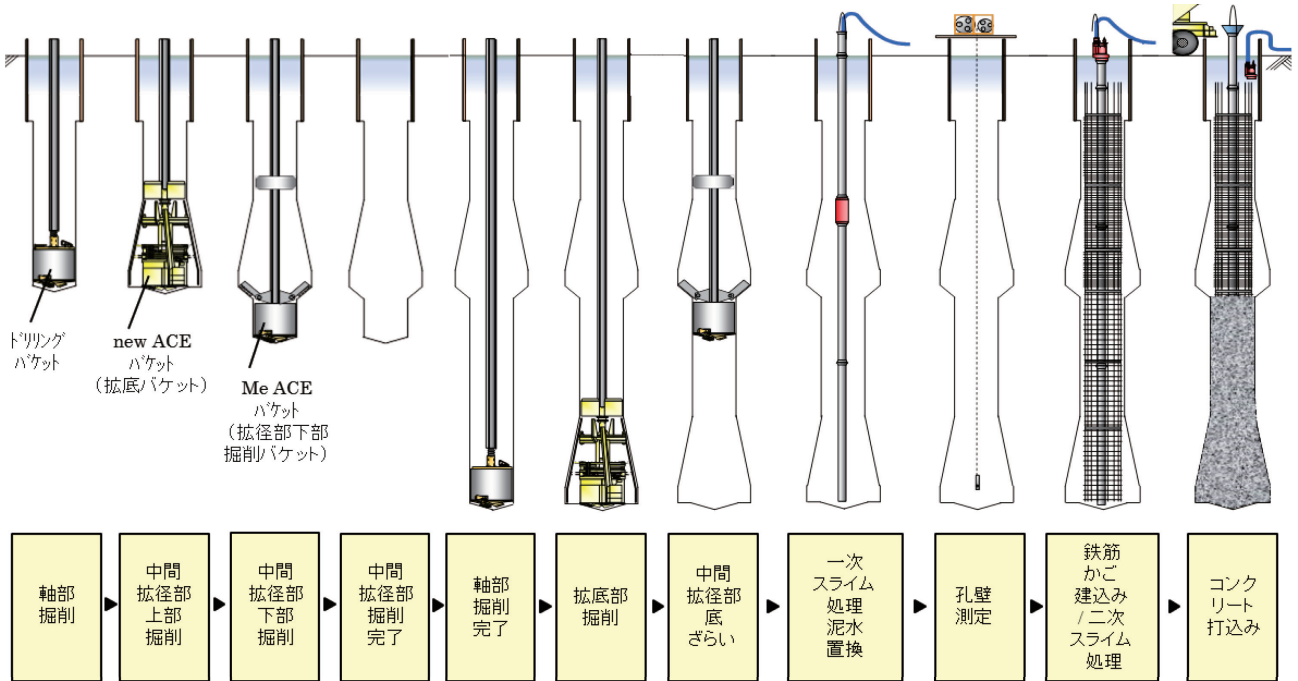


Fig. 3 施工手順

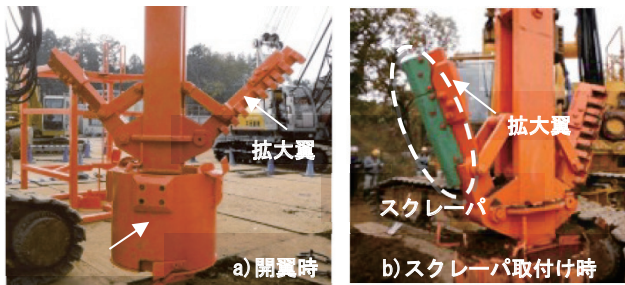


Photo. 1 下部掘削バケット

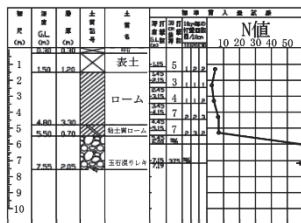


Fig. 4 掘削試験の地盤概要

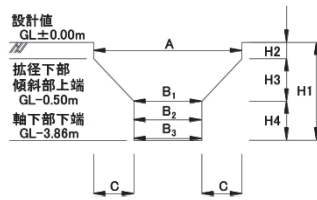


Fig. 5 測定項目

径下部傾斜部のスライムはバケットのビットに取り付けたスクレーパー¹⁾によって掻き落とす。下部掘削バケットをPhoto. 1に示す。スクレーパーと掘削バケットは一体構造となっていることから、スライムを孔底まで沈降させることなく回収できる。スクレーパーの拡翼は、深度計および流量計で管理する。具体的には、事前に地上で拡翼した時の油量と施工時に拡翼した際にモニター画面に表示されている油量を比較することにより、所定の径で拡翼されていることが確認できる。

4. 施工試験

4. 1 掘削試験

適用範囲のうち最大拡大径 4.8m による中間拡径部の掘削試験を実施した。Fig. 4 に地盤概要を示す。掘削および一次スライム処理後に Fig. 5 に示す項目について測定を

Table 1 掘削形状測定結果

計測項目	計画値	実測値(mm)			
		東西方向		南北方向	
拡径上部径	A	4800	4990	4990	
軸下部径	B ₁₋₃	B1	2240	B1	2240
		B2	2230	B2	2230
		B3	2250	B3	2250
拡径張出幅	C	東	1350	西	1350
		南	1350	北	1350
掘削長	H1	3860	3990	3995	3990
拡径上部立上がり部高さ	H2	500	535	545	540
拡径下部傾斜部高さ	H3	1300	1360	1340	1340
軸下部高さ	H4	2060	2095	2110	2110

Table 2 掘出し試験杭の仕様

軸部径 (m)	中間拡径 (m)	杭先端深度 (m)	杭先端深度 (m)	F _c (N/mm ²)	配筋
1.0	1.5	GL-0.45	GL-13.25	45	主筋 12-D35

行った。Table 1 に測定結果を示す。

本工法で規定した施工方法、施工管理方法により最大径 4.8m においても、管理基準値を満足する掘削形状 (拡大径, 中間拡径部下部傾斜角, 立ち上がり部高さ, 張出幅) で掘削可能であること、下部掘削バケットの拡大翼に取り付けたスクレーパーにより中間拡径部下部のスライム処理が可能であることが確認できた。

4. 2 掘出し試験

掘出し調査を実施した試験杭について Table 2 および Fig. 6 に示す。掘出しは深礎工法で行い、揚重機の能力から 2 分割して地上に揚重した。試験杭を横に寝かせた状態で、中間拡径部を含む下部のみデジタルカメラによる 2 次元写真測量およびトータルステーションを使用して形状測定を実施した¹⁾。施工時に測定した超音波孔壁測定結果に、南北方向の形状測定結果を重ねて Fig. 7 に示す。掘出した試験杭の杭径は設計寸法を上回ることで、超音波孔壁測定結果と概ね等しいことを確認した。

また、試験杭の掘出し時に中間拡径下部に付着した土

砂を取り除き、目視でスライムの有無を観察したが、確認できなかった。

5. 鉛直載荷試験と支持力評価

5.1 遠心載荷実験に基づく中間拡径部の支持力評価

縮小模型により実大規模の応力状態を再現できる遠心載荷装置を用いて鉛直載荷試験²⁾を行った。Table 3に遠心載荷試験ケース一覧を示す。本報では引抜き方向の支持力について検討を行う。

中間拡径部の支持力機構について、既往の研究⁴⁾⁻⁶⁾では、支圧法、せん断法、摩擦法の3つの評価法が提案されている。本工法では、上部傾斜角 12° 、下部傾斜角 45° としており、上部傾斜部での引抜き抵抗については摩擦抵抗が卓越、下部傾斜部での押し込み抵抗では支圧抵抗が卓越するものと考えられる。ここでは、引抜き方向載荷時における摩擦応力度に及ぼす傾斜部の影響（傾斜を考慮した支持力評価）とその影響範囲について、遠心載荷試験結果の中間拡径部に対して載荷方向側に位置するひずみの分布形状から検討を行った。

遠心載荷試験による杭の摩擦抵抗から逆算した杭の軸部に作用する代表的な水平土圧分布について、引抜き方向の結果をFig. 8に示す。図中の凡例は、拡径部径 D_2 を基準とした引抜き変位量を示している。

引抜き方向の中間拡径部・拡底部直上の軸部では、中間拡径部および拡底部の影響と考えられる水平土圧の増加が認められる。ここでは示していないが押し込み方向⁷⁾と比較するとその値は1/2以下と小さく、支圧の影響は小さいと判断される。したがって負担荷重を中間拡径（拡底）上部傾斜部の側面に作用する摩擦応力として評価する。なお、中間拡径部の影響を受ける範囲は、拡径部上部傾斜部上端から拡径張出幅の1.5倍程度であった。

引抜き方向の摩擦法に基づいた負担荷重度と N_s の関係性をFig. 9に示す。図中には、No. 1については拡底部について、No. 1以外の試験体については拡底部と中間拡径部の値のいずれについてもプロットしている。負担荷重度と N_s の関係から図中の実線で示すように負担荷重度/ $N_s=5\sim 19$ が得られた。

5.2 支持力評価の方針と影響因子

拡径部の傾斜部分における引抜き抵抗の負担機構を傾斜部の側面における摩擦抵抗として定式化するにあたり、次の3つの項目について、これらを

パラメータとした前述の遠心載荷試験結果を基にその影響を定量的に把握した上で、原位置載荷試験により検証することとした。

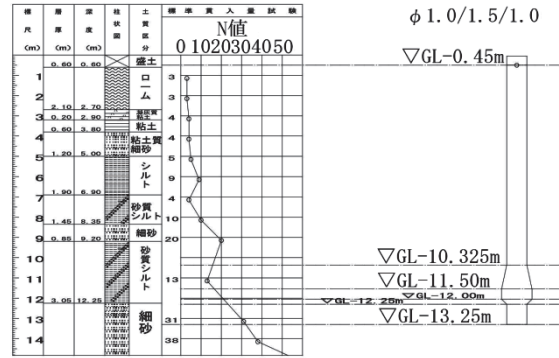
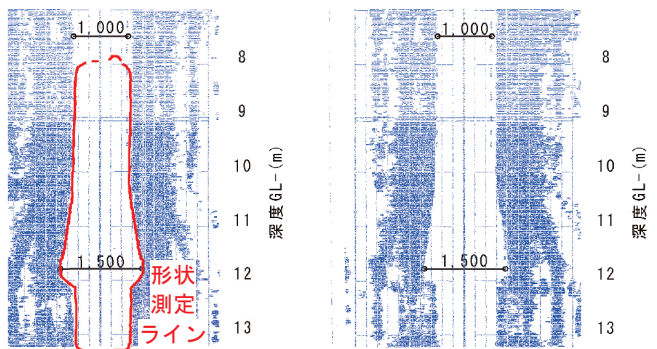


Fig. 6 掘出し試験杭概要



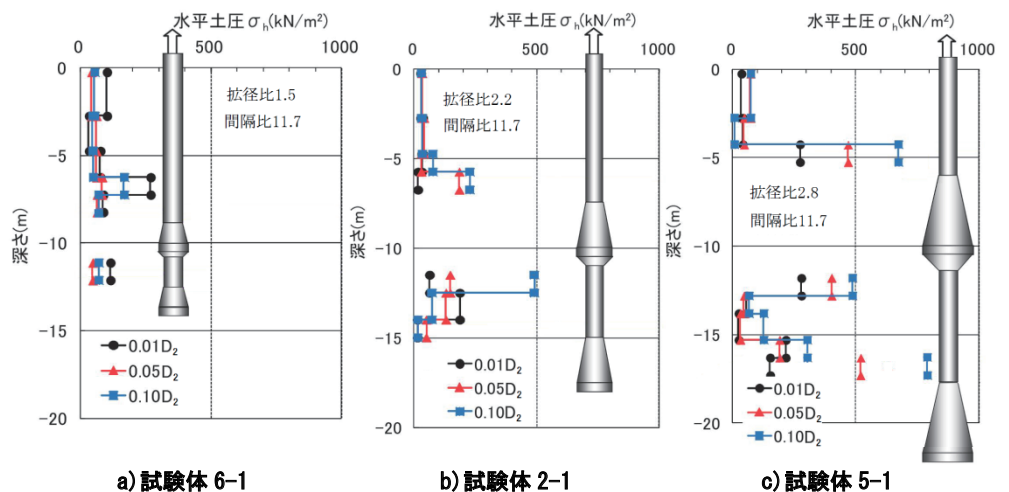
a) 南北方向 b) 東西方向

Fig. 7 掘削形状測定結果

Table 3 遠心載荷試験ケース一覧

No.	軸部径 D_1 (m)	拡径径 D_2 (m)	拡径比 ($=D_2/D_1$)	拡径設置間隔 L_2 (m)	拡径設置間隔比	杭形状
1	1.0	2.2	2.2	-	-	拡底のみ
2-1	1.0	2.2	2.2	7.03	11.7	中間拡径 + 拡底
2-2	1.0			4.80	8.0	
3-1	1.0	2.2	2.2	4.63	7.7	
3-2	1.0			2.40	4.0	
4-1	1.0	2.2	2.2	3.33	5.5	
4-2	1.0			1.10	1.8	
5-1	1.0	2.8	2.8	10.54	11.7	
5-2	1.0			7.20	8.0	
6-1	1.0	1.5	1.5	2.93	11.7	
6-2	1.0			2.00	8.0	

*No. -1: 引抜き方向, No. -2: 押し込み方向 **拡径設置間隔比は L_2 /拡径張出幅



a) 試験体 6-1

b) 試験体 2-1

c) 試験体 5-1

Fig. 8 水平土圧分布 (引抜き方向)

- 1) 拡径比 (軸径 D_1 と拡大径 D_2 の比) の影響
- 2) 設置間隔比 (拡径部の設置間隔 L_2 と拡径張出幅 $(D_2-D_1)/2$ との比) の影響
- 3) 地盤強度 (N 値または一軸圧縮強度 q_u) の影響

Table 4 に原位置載荷試験ケース一覧を示す。原位置載荷試験における定着地盤の粘性土 (砂質シルト) は一軸圧縮強度 $100\sim 350\text{kN/m}^2$ 程度であった。

5. 3 引抜き支持力の評価

1) 拡径比の影響

拡径比をパラメータとした遠心載荷試験から得られた引抜き方向の負担荷重量/ N_s と拡径比の関係を Fig. 10 に示す。図中には拡底部と中間拡底部の値のいずれについてもプロットしている。負担荷重量/ N_s は後述する式(3)の λ (砂質土地盤の支持力係数) に対応する。引抜きでは、拡径比が大きくなると負担荷重量/ N_s は低下する傾向が明らかに認められる。そこで、拡径比 1.9 の値を基準とし式(1)のように拡径比 1.9 を超えた場合については低減係数 ζ_1 によって支持力係数 λ を低減する。

$$\zeta_1 = 1.0 - (D_2/D_1 - 1.9) \quad 1.9 < D_2/D_1 \leq 2.2 \quad \text{式(1)}$$

なお拡径比 2.8 までの実験を実施しているが、施工性を考慮して上限は 2.2 とした。

2) 拡径部設置間隔比の影響

設置間隔比 11.7 の実験結果で基準化した負担荷重量/ N_s と設置間隔比の関係を Fig. 11 に示す。ここから式(2)のように低減係数 ζ_2 によって支持力係数 λ を低減する。

$$\zeta_2 = 1.0 - 0.025 \times [12 - L_2 / \{(D_2 - D_1) / 2\}] \quad \text{式(2)}$$

$$8.0 \leq L_2 / \{(D_2 - D_1) / 2\} < 12.0$$

設置間隔比 12.0 は遠心載荷試験で標準とした間隔比 (=11.7) より設定した。設置間隔比が 12.0 を下回ると支持力は低下する傾向が認められ、その低下特性から ζ_2 を定式化した。ただし、拡径部の設置間隔が極端に小さくなることを避けるために最小設置間隔比は 8.0 とした。

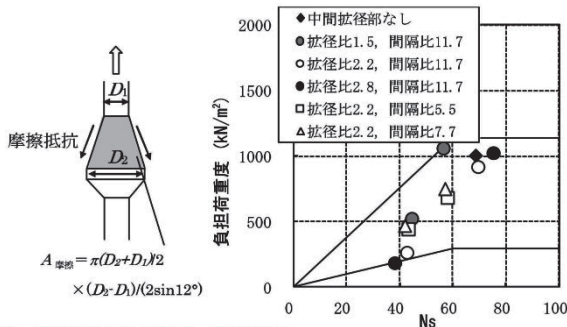


Fig. 9 負担荷重量と N_s 関係 (引抜き方向)

Table 4 原位置載荷試験ケース一覧

名称	載荷方向	軸部径 D_1 (m)	拡大径 D_2 (m)	拡径比 (= D_2/D_1)	拡径設置間隔 L_2 (m)	杭設置間隔比	杭長 (m)	F_c (N/mm^2)	杭形状	拡径部土質
A	引	1.0	1.5	1.5	4.25	17.00	13.75	45	中間拡径2段	①細砂 ②砂質シルト
B	引	1.0	1.5	1.5	-	-	12.80	45	中間拡径1段	砂質シルト
C	押	1.0	1.5	1.5	2.32	9.30	19.50	60	中間拡径1段+拡底	細砂

3) 支持力特性の定式化 (砂質土)

遠心載荷試験および原位置載荷試験から、拡径比および設置間隔比による低減を考慮した負担荷重量/ $(\zeta_1 \cdot \zeta_2)$ と N_s との関係を Fig. 12 に示す。遠心載荷試験のばらつきを考慮した上で、支持力係数 λ を安全側に評価して 8.0 とした。

4) 支持力特性の定式化 (粘性土)

原位置載荷試験により得られた中間拡径部の負担荷重量 q と一軸圧縮強度 q_u の関係を、同じ形状の他工法⁸⁾の試験結果と併せて Fig. 13 に示す。負担荷重量 $\tau = 0.5 \cdot q_u$ (最大荷重量 500kN/m^2) とすると、実験結果は全てこれを上回ることから粘性土地盤の支持力係数 μ を 0.5 とした。なお、原位置載荷試験によって確認されている最大荷重量が 995kN/m^2 であるため、 $\mu \cdot q_u$ の上限値を 500kN/m^2 ($q_u=10$

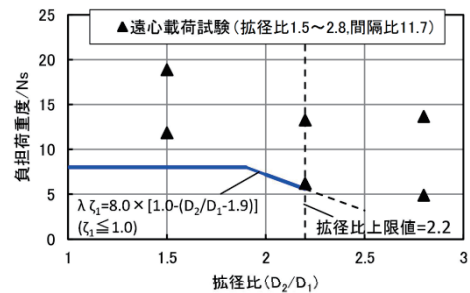


Fig. 10 負担荷重量/ N_s と拡径比の関係 (引抜き方向)

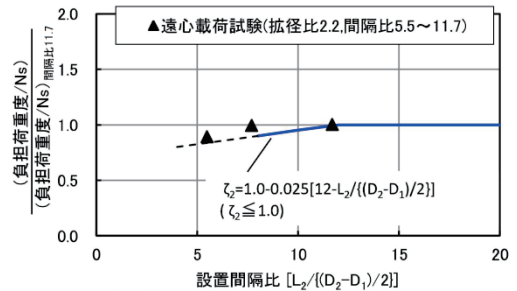


Fig. 11 (負担荷重量/ N_s) / (負担荷重量/ N_s)_{間隔比11.7} と設置間隔比の関係 (引抜き方向)

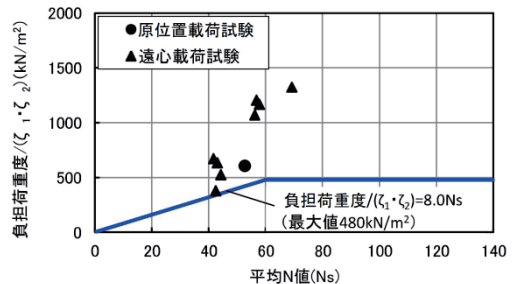


Fig. 12 負担荷重量/ $(\zeta_1 \cdot \zeta_2)$ と N_s の関係 (引抜き方向)

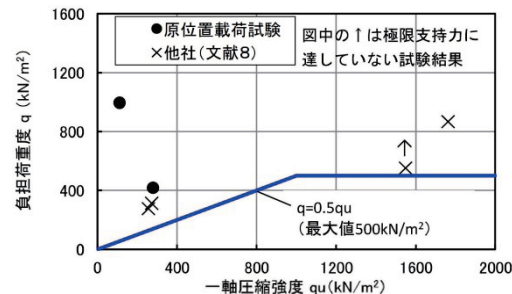


Fig. 13 負担荷重量 q と q_u の関係 (引抜き方向)

00kN/m²)とした。

5) Me-A 工法の支持方式

以上より定めた Me-A(1) 杭の中間拡径上部傾斜部および拡底傾斜部の地盤による引抜き方向の長期許容支持力について支持方式を以下に示す。杭軸部の支持力の算定においては、評価法についてここでは示していないが、拡径部直上の拡径張出幅の 1.5 倍の範囲は考慮しない。

$$R_a = 1/3 \{ \kappa \cdot \bar{N} \cdot A_p + (\lambda \cdot \bar{N}_s \cdot L_s + \mu \cdot \bar{q}_u \cdot L_c) \phi \} + W_p \quad \text{式(3)}$$

- ここに、
- κ : 0 λ : 中間拡径上部傾斜部および拡底傾斜部 $= 8.0 \cdot \zeta_1 \cdot \zeta_2$
- ζ_1 : 式(1)による。 $D_{2(3)}/D_1 \leq 1.9$ の時、 $\zeta_1 = 1.0$
- ζ_2 : 式(2)による。 $12.0 \leq L_2 / \{(D_{2(3)} - D_1) / 2\}$ の時、 $\zeta_2 = 1.0$
- D_1 : 軸部の直径(m) D_2 : 拡径立上り部の直径 (拡径) (m) D_3 : 拡底径(m)
- μ : 中間拡径上部傾斜部および拡底傾斜部 $= 0.5$
- N : 杭の先端付近の N 値の平均値 (60 を超えるときは 60 とする)
- A_p : 杭の先端の有効面積(m²)
- N_s : 杭の周囲の砂質土層の N 値の平均値 (60 を超えるときは 60 とする)
- L_s : 杭の周囲の地盤のうち砂質土地盤に接する長さの合計(m)
- q_u : 杭の周囲の粘性土地盤の一軸圧縮強さの平均値(kN/m²) ($\mu \cdot q_u$ が 500 を超えるときは 500 とする)
- L_c : 杭の周囲の地盤のうち粘性土地盤に接する長さの合計(m)
- ϕ : 杭の周囲の長さ(m) W_p : 杭の有効重量(kN)

6. 適用事例

Me-A 工法の適用事例を Table 5 に示す。いずれも中間拡径部を有さない拡底部のみを有する Me-A(2) 杭で、中層程度の共同住宅を対象に地震時の引抜き抵抗確保のために採用した。ここでは適用事例 A および B について詳しく述べる。

1) 適用事例 A

Fig. 14 に適用事例 A の柱状図を示す。砂質土と粘性土の互層地盤が厚く堆積している。定着地盤は押込み方向については砂礫地盤とし、引抜き方向は、評定 ((一財)ベターリビング CBL FP032-13 号) で定められた規定を満たす砂地盤 (N 値で 30 を超える) あるいは粘性土地盤 (qu で 200kN/m²相当を超える) に定着した。

施工管理においては、押込み方向の定着地盤である砂礫層が杭先端にあることを確認するとともに、拡底傾斜部の上端深度で引抜き方向の定着地盤が出現することを確認した。互層地盤は定着地盤の判断が難しいため注意が必要であるが、本件では比較的確認がしやすい土質が変化する深度 (例えば粘土から細砂) に着目し定着地盤の確認を行った。

Table 6 に Fig. 14 に示す N 値から算出した引抜き方向の短期許容支持力について示す。Me-A 工法の支持力は平成 13 年国土交通省告示 1113 号の基礎ぐいの引抜き方向の許容支持力 (以降、告示式と呼ぶ。) による値の 1.8 倍程度になった。Me-A 工法の支持力の計算値は約 55% が拡底部での負担分であった。

2) 適用事例 B

Fig. 15 に適用事例 B の柱状図を示す。埋め土の下位に関東ローム層があり、その下も更新世の粘性土が主体で、

Table 5 Me-A 工法の適用事例

名称	構造規模	適用本数	軸部径	拡底径	最大杭長	引抜き方向の定着地盤	備考
A	RC造20F	51	1.30-2.00m	1.60-3.90m	33m	砂質土地盤および粘性土地盤	Me-A(2)杭
B	RC造13F/B1F	23	1.40-2.30m	1.40-3.90m	23m	礫質土地盤	Me-A(2)杭
C	RC造14F	10	1.70-2.00m	2.80-3.00m	34m	砂質土地盤	Me-A(2)杭
D	RC造15F	4	1.70-2.00m	2.80-3.00m	34m	礫質土地盤	Me-A(2)杭

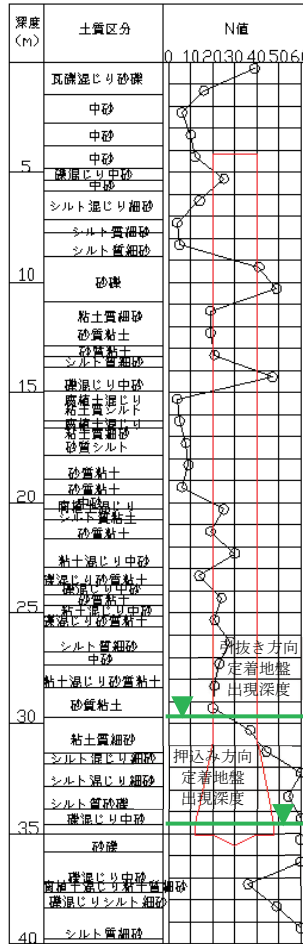


Fig. 14 適用事例 A の柱状図

Table 6 適用事例 A の引抜き方向の支持力(短期)

杭径φ2000 拡底径φ3500 杭長31m		
告示式(kN)		
	拡底部	8908
	杭軸部	9116
Me-A工法支持方式(kN)	全体	7352
	全体	16468
地盤の破壊に関する検討(kN)		
		29853

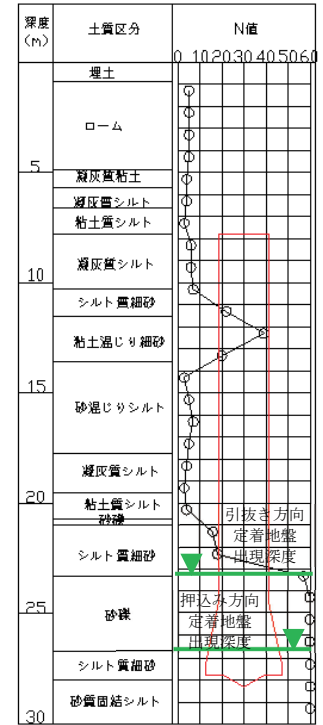


Fig. 15 適用事例 B の柱状図

Table 7 適用事例 B の引抜き方向の支持力(短期)

杭径φ2300 拡底径φ3400 杭長20m		
告示式(kN)		
	拡底部	7580
Me-A工法支持方式(kN)	杭軸部	4662
	全体	12242
地盤の破壊に関する検討(kN)		
		13915

およそ GL-10m で層厚が 3m 程度の細砂層を挟む。約 GL-23m で N 値 50 を超える砂礫層が出現する。

施工管理は適用事例 A と同様に、押込み方向の定着地盤であるシルト質細砂層が杭先端にあることを確認するとともに、拡底傾斜部の上端深度で引抜き方向の定着地盤である砂礫層が出現することを確認した。支持層とする砂礫層で土質とともに大きく N 値が変化するいわゆる L 字型地盤であり互層地盤に比べて支持層確認は容易であった。

Table 7 に Fig. 15 に示す N 値から算出した引抜き方向の短期許容支持力について示す。Me-A 工法の支持力は告示式による値の 2.0 倍程度になった。Me-A 工法の場合の

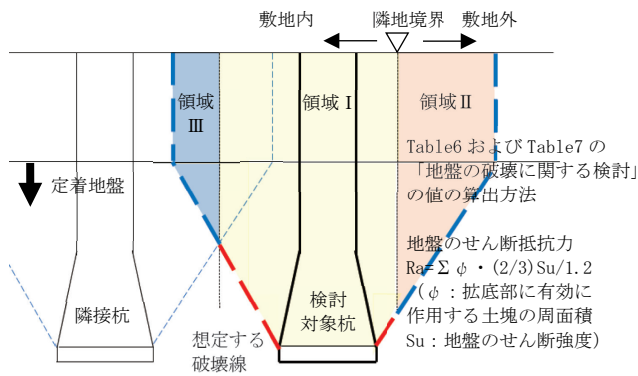


Fig. 16 地盤の破壊に関する検討方法

支持力の計算値は62%が拡底部での負担分であった。

3) 地盤の破壊に関する検討

引抜き方向の支持力検討においては、支持力式による検討に加えて、地盤が破壊しないことを確認⁹⁾する必要がある。Fig. 16に地盤の破壊に関する検討方法の一例について示す。図に示す太破線（青および赤）の破壊線を想定して地盤のせん断抵抗と引抜き抵抗力として有効な土塊重量を評価する。Table 6 および Table 7 に短期許容応力度設計時の地盤破壊に関する検討による値として破壊線に沿ったせん断抵抗のみによる値を示した。

適用事例AおよびBともにMe-A工法の支持力式による値を上回る結果となっているが、杭長が短い適用事例Bでは値の差が小さい。適用事例Bでは、杭長が比較的に短いことに加え、ここでは示していないが、隣地境界までの距離や杭間距離が狭い場所があった。検討対象杭と隣地境界線等がFig. 16に示すような位置関係にあった場合、将来隣接地でどのような建物が建つか予測することは不可能であるため、敷地外（領域II）のせん断抵抗や土塊重量を設計上考慮しなかった。また、杭間距離が狭い場所では、隣接杭の破壊線と重なる領域については重なる深度および平面的な位置関係に応じた検討を行った。例えばFig. 16では領域IIIについてはせん断抵抗や土塊重量を考慮しなかった。これらの影響により、地盤破壊に関する検討方法による値が大幅に低減され、Me-A工法の支持力式による値を大きく下回った杭があったため、それらの杭については引抜き力の不足分に応じて拡径部を増やすか

あるいは杭先端深度を下げて対処した。

7. まとめ

Me-A工法（中間および先端に拡径部を有する場所打ちコンクリート杭）の概要と鉛直載荷試験結果と支持力特性の評価および適用事例について報告した。

杭に引抜き力が作用する建物などを対象に、大きな引抜き抵抗力が期待できる合理的な場所打ちコンクリート杭工法として、本工法の積極的な普及展開を図る予定である。

謝辞

本研究は、ジャパンパイル、大洋基礎、大豊建設、東急建設、東洋テクノ、戸田建設、西松建設、三井住友建設との共同研究として実施したものである。

参考文献

- 1) 宮田ら：先端および中間部に拡径部を有する杭の施工試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 477～478，2013. 8
- 2) 金子ら：先端および中間部に拡径部を有する杭の支持力特性に関する遠心模型実験（その1）～（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 419～424，2012. 9
- 3) 森ら：先端および中間部に拡径部を有する杭の支持力特性に関する鉛直載荷試験（その1）～（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 479～482，2013. 8
- 4) 茶谷ら：場所打ち節付き杭の鉛直交番載荷および引抜き試験（その5），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 477～478，2013. 8
- 5) 渡邊ら：場所打ち節付き杭の押込み試験および引抜き試験（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 615～616，2010. 9
- 6) 若井ら：砂質土地盤における多段拡径杭の中間拡径部の支持力（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 363～364，2011. 8
- 7) 新井ら：先端および中間部に拡径部を有する杭の支持力特性（その1）～（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 415～416，2014. 9
- 8) 平井ら：拡径部を有する場所打ちコンクリート杭の原位置引抜き試験，基礎工，Vol. 39, No. 11, pp. 60～63，2011. 11
- 9) 青木ら：場所打ちコンクリート杭の引抜き特性，基礎工，Vol. 39, No. 11, pp. 21～25，2011. 11

Development of cast-in-place concrete pile with an enlarged base and an intermediate node

Atsushi OGAWA and Toshihiro MORI

Abstract

Generally, it is expected that the bearing capacity of a cast-in-place concrete belled pile improves only into push-on direction comparing with a straight pile, because the pile tip diameter is larger than the other part diameter in same pile.

A multi-enlarged cast-in-place concrete pile has an expanded-base and another expanded portions.

We examined the bearing capacity of a multi-enlarged cast-in-place concrete pile and a cast-in-place concrete belled pile in this development.

This report shows the results of centrifuge model tests and in-situ load tests, and actual application examples.

Keywords: Cast-in-place concrete pile, Bearing capacity, Construction method