

先端および中間部に拡張部を有する杭の鉛直載荷試験

VERTICAL LOAD TESTS FOR BEARING CAPACITY OF PILES WITH ENLARGED BASE AND INTERMEDIATE NODE

佐野 大作*, 金子 治**, 田口 智也*

Daisaku SANO, Osamu KANEKO and Tomoya TAGUCHI

This report shows the results of static axial compressive and tensile load tests in order to develop a multi-enlarged cast-in-place concrete pile construction method. In the first step, a series of model tests using centrifuge test apparatus were carried out to obtain the mechanism of the bearing capacity and influence of spaces or diameters of enlarged nodes. Next, in-situ full-scale loading tests were carried out to investigate bearing capacity and confirm capability of execution of multi-enlarged nodes.

- 1) Characteristics of compressive resistance and uplift resistance is not similar, because of difference of incline angle and influence span of nodes.
- 2) The uplift resistance of enlarged nodes was decreased according to ratio of diameter of enlarged nodes and axial parts, though compressive resistance was fixed.
- 3) It is necessary to consider influence of cracks with tensile loads for estimate the uplift resistance.

Keywords : Bearing Capacity, Cast-in Place concrete pile, Centrifuge model test, In-Situ test

支持力, 場所打ちコンクリート杭, 遠心載荷試験, 原位置試験

1. はじめに

場所打ちコンクリート杭では先端部を拡張して大きな鉛直支持力を得る拡張杭が多く用いられており、近年では更に大きな支持力を期待した高拡張杭(従来の拡張杭よりも拡張率をさらに大きくした杭)や中間部にも拡張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し、かつ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工法も開発、実用化されている¹⁾。

特に、中間部に拡張部を設ける工法では、拡張傾斜部における荷重伝播機構を考慮して押込み支持力や引抜き抵抗を評価した上で、地盤特性に応じて適切に拡張部を配置する必要がある。また、場所打ちコンクリート杭の中間部に拡張部を構築することから、拡張部のスライム処理、コンクリートの充填性など、施工時の品質管理も重要となる。そこで、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、拡張部の形状や配置間隔が支持力特性に及ぼす影響について検討するための遠心載荷試験を実施した。また、原位置における実大の施工試験によって施工性および品質の確認を行うとともに、遠心載荷試験結果の検証のために鉛直載荷試験を実施した。

本報では、一連の模型実験および実大試験の内容とその結果について示す。

2. 遠心載荷試験

2.1 実験概要

遠心載荷試験は全て遠心加速度 50G(相似比 1 : 50)で実施した。本章では模型スケールで示す。

杭はアルミ合金製で中空(ヤング係数 $E=72\text{GN/m}^2$, 厚さ $t=2\text{mm}$)の内側にひずみゲージを 20~50mm ピッチで貼付けた。杭径は軸部径を 20mm, 拡張部径(中間および先端)を 44mm とし、杭長は地表面から 283.5mm~448.7mm の長さとした。表面は周面抵抗確保のために豊浦砂を貼付けて表面粗さ 76~106 μm を確保した。中間拡張部の傾斜角は、上部は 12 度、下部は実施工時のスライム処理等を考慮して 45 度とした。実験土槽は直径 600mm, 高さ 750mm の鋼製で、豊浦砂(乾燥砂)を用いて空中落下法により相対密度 90~94%の地盤を作製した。

載荷速度は 0.01mm/sec で、変位制御方式で載荷し、変位が拡大径の 1/2 または載荷能力に達するまで載荷した。

図-1, 表-1 に試験ケースを示す。CASE1 は引抜き載荷のみで、それ以外のケースでは押込み載荷および引抜き載荷を実施した。先端および中間を拡張した CASE3 を基本ケースとし、CASE1(直杭), CASE2(拡張杭)との比較によって中間拡張部の効果を、CASE4 および CASE5 では拡張部の間隔比の影響、CASE7, 8 では拡張比の影響について検討した。

2.2 実験結果

(1) 中間拡張部の効果 (CASE1, 2, 3)

図-2 および図-3 に試験によって得られた、①杭頭荷重と杭頭変位 δ を拡大径 D_2 (CASE2, 3)または軸

* 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

** 戸田建設(株)技術研究所 工学修士

Technical Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

Technical Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

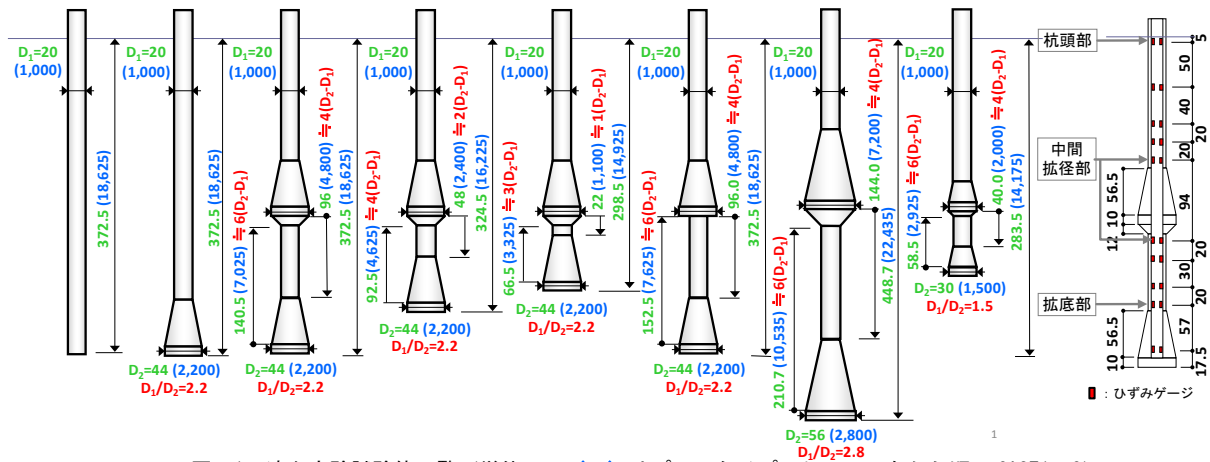


図-1 遠心実験試験体一覧 (単位: mm () はプロトタイプスケール, 左から順に CASE1~8)

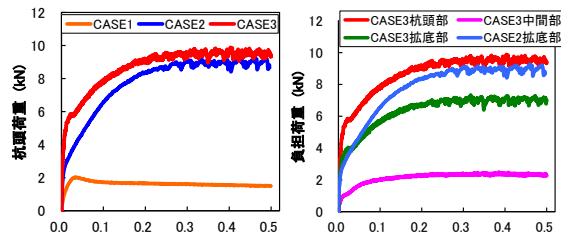
表-1 遠心実験試験ケース (単位: mm () はプロトタイプスケール)

CASE	形状	拡径径: D_2	拡径比	杭長 [地表面から]	拡径部の間隔 L: 間隔比 $L/(D_2-D_1)$	
					引抜き荷重	押し込み荷重
1	直杭	—	—	372.5 (18,625)	—	—
2	拡底杭	44 (2,200)	2.2	372.5 (18,625)	—	—
3(基本)	中間拡径+拡底杭	44 (2,200)	2.2	372.5 (18,625)	140.5 (7,025):5.9	96.0 (4,800):4.0
4	中間拡径+拡底杭	44 (2,200)	2.2	324.5 (16,225)	92.5 (4,625):3.9	48.0 (2,400):2.0
5	中間拡径+拡底杭	44 (2,200)	2.2	298.5 (14,925)	66.5 (3,325):2.8	22.0 (1,100):0.9
6	中間拡径+拡底杭 (中間拡径下部傾斜部なし)	44 (2,200)	2.2	372.5 (18,625)	152.5 (7,625):6.4	96.0 (4,800):4.0
7	中間拡径+拡底杭	56 (2,800)	2.8	448.7 (22,435)	210.7 (10,535):5.9	144.0 (7,200):4.0
8	中間拡径+拡底杭	30 (1,500)	1.5	283.5 (14,175)	58.5 (2,925):5.9	40.0 (2,000):4.0

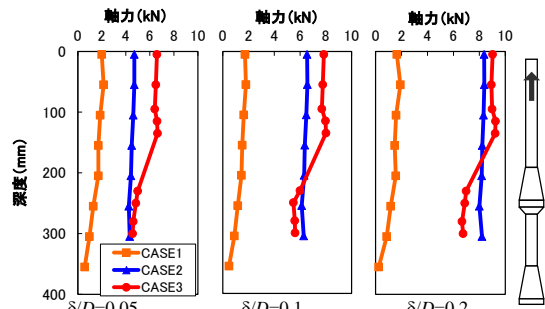
*杭軸径(D1) 20mm (1,000mm)

径 D_1 (CASE1)で正規化した杭頭変位比 δ/D との関係の比較, ②CASE2, 3 の杭頭部・中間拡径部(CASE3のみ)・拡底部の負担軸力と δ/D との関係, ③ $\delta/D=0.05, 0.1, 0.2$ における軸力分布の比較をそれぞれ示す.

図-2 より, 引抜き荷重では, ①に示すように中間拡径部を有する CASE3 は $\delta/D=0.1\sim 0.2$ 付近までは荷重が増大するが, 変位が大きくなると CASE2 との差は小さくなった. ②に示すように $\delta/D=0.05\sim 0.1$ 以降は中間拡径部の軸力は頭打ちになる. また, 拡底部の負担軸力は中間拡径部がない方が大きく, ③



①杭頭荷重-変位 δ/D 関係の比較 ②各部の軸力と変位の関係

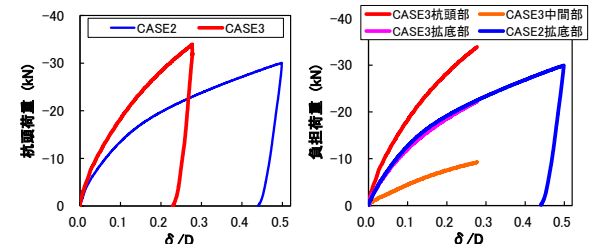


③軸力分布の比較

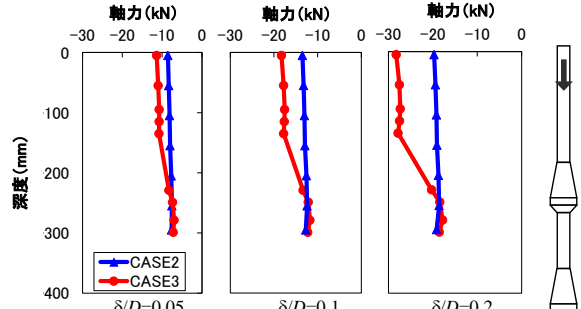
図-2 引抜き荷重時の試験結果 (CASE1, 2, 3)

の軸力分布でもその傾向は確認できる. 図-3 より, 押し込み試験では, 引抜き荷重時とは異なり, $\delta/D=0.2$ 以上の大変形まで拡底部と中間拡径部はほぼ同様な挙動を示している. ②に示すように CASE2 と CASE3 の拡底部の軸力と δ/D の関係はほぼ一致しており, CASE3 の間隔比があれば拡底部の押し込み支持力は中間拡径部の影響を受けないと判断される.

表-2 に $\delta/D=0.1$ 時の軸力 N を拡径部の支圧面積 A_p (=拡径部面積-軸部面積)あるいは拡径部の周面積 A_f で除した負担荷重度と, これをさらに上載圧 σ_v で正規化した値を示す. 引抜き荷重では中間拡径部と



①杭頭荷重-変位 δ/D 関係の比較 ②各部の軸力と変位の関係



③軸力分布の比較

図-3 押し込み荷重時の試験結果 (CASE2, 3)

拡底部の差、拡底部同士の差が押し込み荷重に比べて大きくなっていった。これは、拡径部の上部傾斜部と下部傾斜部の角度の違いによって拡径部が周辺地盤に与える影響が異なるためと考えられる。このことから、荷重方向により中間拡径部が杭全体の支持力特性に及ぼす影響が異なることが示唆される。

表-2 $\delta/D=0.1$ における負担荷重度 (CASE2, 3)

	引抜き荷重			押し込み荷重		
	拡底部(先端拡径部)	中間拡径部	CASE3	拡底部(先端拡径部)	中間拡径部	CASE3
	CASE2	CASE3	CASE3	CASE2	CASE3	CASE3
N/A_p (kNm ³)	5,206	4,650	1,674	8,365	8,063	3,705
$(N/A_p)/\sigma_v$	18.0	16.0	10.5	28.1	27.1	22.1
N/A_r (kNm ²)	874	781	281	※押し込み荷重の先端拡径部の A_r は拡径部面積		
$(N/A_r)/\sigma_v$	3.57	3.19	2.45			

(2) 拡径部間隔の影響 (CASE3, 4, 5)

表-1 より、本実験では CASE3(押し込み時の間隔比 4.0、引抜き時の間隔比 5.9)を標準として、間隔を縮小した 2 ケースをパラメータとして設定した。ここに、拡径部の間隔比は「拡径部の間隔/(拡径部径-軸部径)」として押し込み時および引抜き時に対して、図-4 の通り定義した。

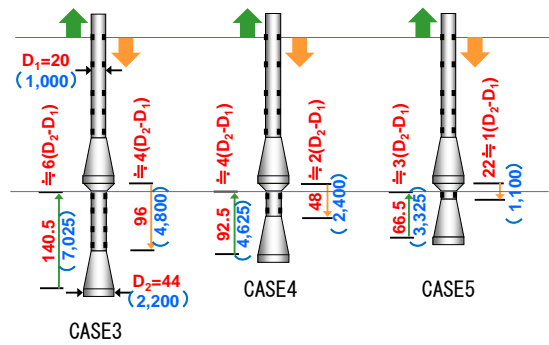


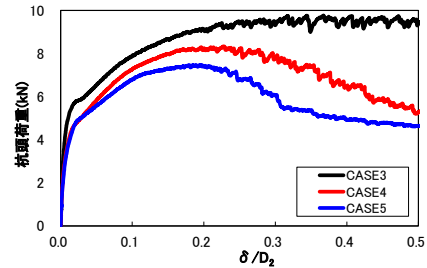
図-4 拡径部の間隔 (CASE3, 4, 5)

上記 3 ケースについて、図-5 に①引抜き試験時の杭頭荷重- δ/D_2 関係、② $\delta/D_2=0.01\sim0.30$ 時の杭の軸力分布を示す。①より、引抜き荷重時の初期剛性は間隔が最も大きい CASE3(間隔比 5.9)が最大で、CASE4(間隔比 3.9)と CASE5(間隔比 2.8)は同程度である。CASE3 では $\delta/D_2=0.27$ 付近で最大荷重に達し、その後は一定となる傾向を示した。一方、CASE4 では $\delta/D_2=0.20$ 付近、CASE5 では $\delta/D_2=0.18$ 付近で最大値を示し、その後杭頭変位の増大に伴って荷重の低下が認められる。これは、間隔比が小さい場合には変位が大きくなると先端拡径部が負担する抵抗領域が中間拡径部まで及び、抵抗機構が変化するためと考えられる。

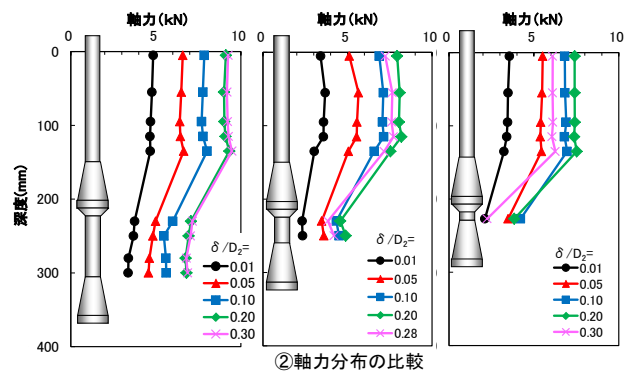
また、②に示すように、いずれのケースも中間拡径部の上下の軸力差は大きく、 $\delta/D_2=0.30$ までの範囲内では特に CASE4 および CASE5 で変位が進むにつれて中間拡径部の負担荷重が増大している。

次に、図-6 に①押し込み試験時の杭頭荷重- δ/D_2 関係、② $\delta/D_2=0.01\sim0.30$ 時の杭の軸力分布を示す。①より、押し込み荷重時の初期剛性は $\delta/D_2=0.05$ 付近までは間隔比に関わらず同程度となっている。実施した実験範囲内において、CASE3(間隔比 4.0)では杭頭変位の増大に伴い荷重も増大しているが、CASE4(間隔比 2.0)と CASE5(間隔比 0.92)は $\delta/D_2=0.15$ 付近までは同一の挙動をし、その後剛性低下が認められる。それ以降は間隔比が大きい CASE4 の同変位時の荷重荷重が CASE5 より大きいことから、この剛性低下は、中間拡径部の抵抗が頭打ちとなったためと考えられる。

②に示した軸力分布については、引抜き荷重時と同様に中間拡径部の負担荷重が大きいことが分かる。

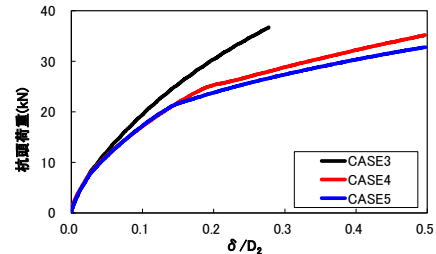


①杭頭荷重-変位 δ/D 関係の比較

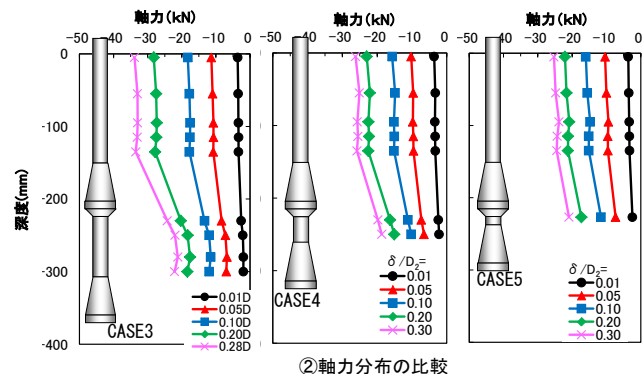


②軸力分布の比較

図-5 引抜き荷重時の試験結果 (CASE3, 4, 5)



①杭頭荷重-変位 δ/D_2 関係の比較



②軸力分布の比較

図-6 押し込み荷重時の試験結果 (CASE3, 4, 5)

ここで、中間および先端拡径部の負担荷重度と拡径部径に対する拡径部変位の関係を図-7 および図-8 に示す。引抜き荷重時の中間拡径部では、間隔比の最も小さい CASE5 の負担荷重度が大きくなっている。CASE3 および CASE4 では拡径部変位の増大に伴って最大荷重度に達した後はほぼ一定の傾向を示すが、間隔比の最も小さい CASE5 では最大荷重度に

達した後は低下傾向を示している。先端拡径部では、間隔比の最も大きい CASE3 の負担荷重度が大きく、最大荷重度に達した後は中間拡径部と同様にほぼ一定となる傾向を示し、CASE4 および CASE5 では最大荷重度に達した後は低下する傾向を示している。

押し込み荷重時の中間拡径部では、 $\delta_1/D_2=0.15$ (δ_1 : 中間拡径部変位) 付近までは CASE3,4,5 の順に大きな剛性で増加傾向を示す。今回の実験範囲内において、CASE3 では変位の増大に伴い負担荷重度が増大しているが、CASE4 および CASE5 では極値を示した後、負担荷重度はほぼ一定となる傾向を示している。先端拡径部では、 $\delta_2/D_2=0.04$ (δ_2 : 先端拡径部変位) 付近までは各実験 CASE で同程度の負担荷重度となっており、それ以降の同変位時の負担荷重度は CASE3 が大きい。

以上の結果から、荷重度に及ぼす間隔比の影響は引抜き荷重時の方が大きく、間隔比が小さい場合には拡径部間の地盤が中間および先端拡径部と連動して挙動し、その間隔比による抵抗機構の違いが中間および先端拡径部の荷重度の大きさに影響を与えたものと考えられる。

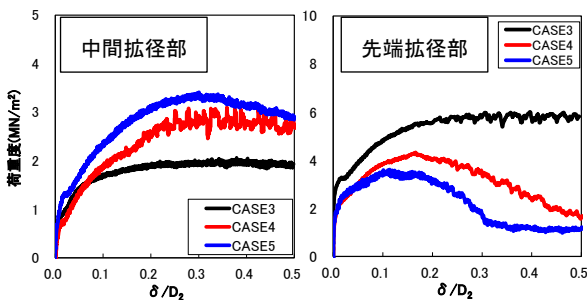


図-7 負担荷重度-拡径部変位/拡径部径(引抜き荷重)

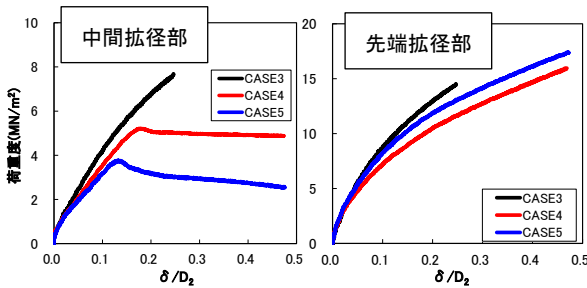


図-8 負担荷重度-拡径部変位/拡径部径(押し込み荷重)

中間および先端拡径部の負担荷重割合と δ/D_2 (杭頭変位比) の関係を図-9 および図-10 に示す。引抜き荷重時の先端拡径部において、間隔比の大きい CASE3 では変位の増大に伴う大きな荷重負担割合の変化は認められないが、間隔比の小さい CASE4 および CASE5 では変位の増大に伴い荷重負担割合が低下している。このように間隔比の影響が認められ、間隔比が小さいほど先端拡径部の引抜き抵抗に及ぼす中間拡径部の影響は大きいことが示唆される。押し込み荷重時では、先端拡径部の荷重負担割合はいずれもほぼ同程度で、中間拡径部も含めて荷重負担の割合の変化は引抜き荷重時よりも小さい。これは、押し込み荷重時の場合、支持力に及ぼす中間拡径部の影響が引抜き荷重時よりも小さいことや変位の増大に

伴う破壊性状が荷重方向により異なることなどが考えられる。

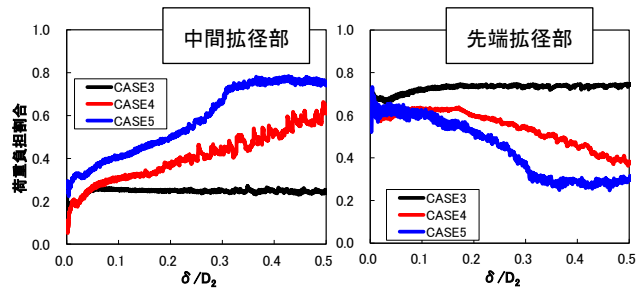


図-9 負担荷重割合-拡径部変位/拡径部径(引抜き)

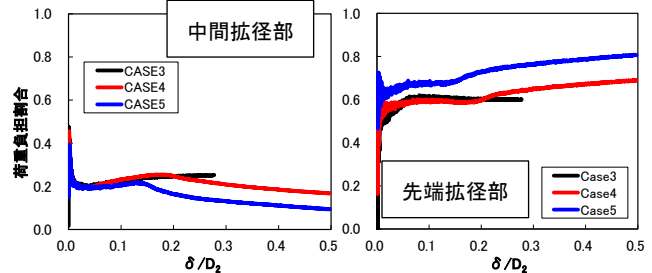


図-10 負担荷重割合-拡径部変位/拡径部径(押し込み)

(3) 拡径部径が支持力に及ぼす影響 (CASE3, 7, 8)

CASE3, 7, 8 の試験結果より、拡径部の径が支持力特性に及ぼす影響について検討する。

図-11 に試験体の詳細を示す。軸部の径 20mm に対して中間拡径部の径は拡径比(拡径部径 D_2 /軸径 D_1) で 1.5~2.8 とし、十分な上載圧を確保するため確保するため設置深度は拡径部の立ち上がり上端位置を地表面から 200mm とした。先端拡径部は中間と同じ径とし、それらの間隔比を共通としている。

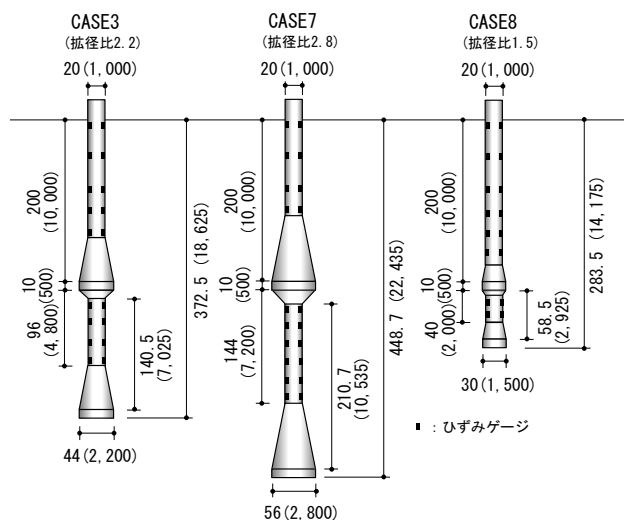


図-11 試験体詳細 (CASE3, 7, 8)

引抜き荷重時の荷重荷重と δ/D_2 の関係を図-12 に示す。各 CASE とも $\delta/D_2=0.3$ 程度の杭頭変位で荷重が最大となっており、以降は CASE8 では荷重が若干低下するが、CASE3 および CASE7 ではほぼ一定である。

各 CASE における $\delta/D_2=0.01\sim0.3$ 倍となる時の杭の軸力分布を図-13 に示す。拡径部上下における

軸力の差を中間拡径部の負担荷重、拡径部上端での軸力を先端拡径部の負担荷重とみなすと、各 CASE ともに拡径部での負担荷重が大きいことが分かる。一方で、軸部での負担荷重は小さいが、拡径部直上の軸部では変位の増加に伴い、摩擦力が正から負に移行する傾向がみられる。これは拡径部の引抜き変位により、軸部周辺地盤が持ち上げられるためであると推定される。

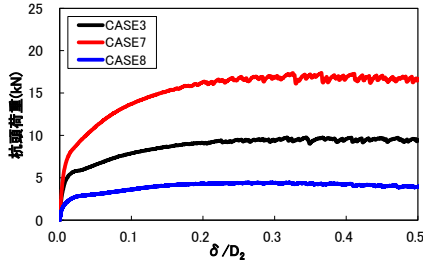
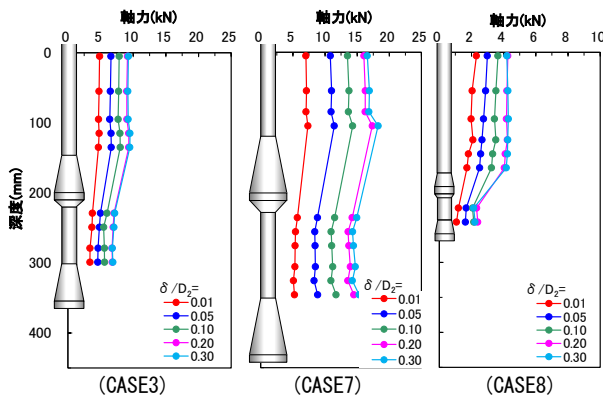


図-12 载荷荷重—拡径部変位/拡径部径(引抜き载荷)



引張軸力：正、D₂：拡径部径

図-13 軸力分布(引抜き载荷)

押し込み载荷時における载荷荷重と δ/D_2 の結果を図-14 に示す。各 CASE ともに変位の増加に伴い荷重は増大し、拡径率が大きくなると初期剛性は大きくなる傾向を示している。

各 CASE における杭の軸力分布を図-15 に示す。引抜き時と同様に拡径部での負担荷重が大きいことが分かる。一方、軸部については変位の増大に伴い中間拡径部直下では周面摩擦力が増大し、拡径部の直上では一部摩擦力が正から負に移行する傾向が認められる。これは拡径部の押し込み変位に伴い、拡径部直下の地盤は圧縮され、直上の地盤は引込による沈下が生じるためであると推定される。

拡径部径に対する拡径部変位の比と負担荷重の関係を図-16 および図-17 に示す。拡径部変位は杭頭変位に杭軸部の軸方向変形を考慮して算定した。また、負担荷重度は拡径部の支圧面積(=拡径部面積-軸部面積)を用いて算定している。引抜き载荷のうち、中間拡径部についてみると、拡径率が小さい CASE8 では他の CASE より荷重度が大きい。一方、先端拡径部についてみると δ/D_2 が 0.2 程度までは各 CASE の荷重度に顕著な差は見られない。ただし、CASE8 では 0.2 以降、荷重度が低下するが、これは拡径部の設置間隔が小さいことが影響していると考えられる。

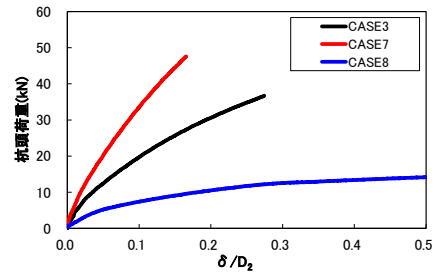
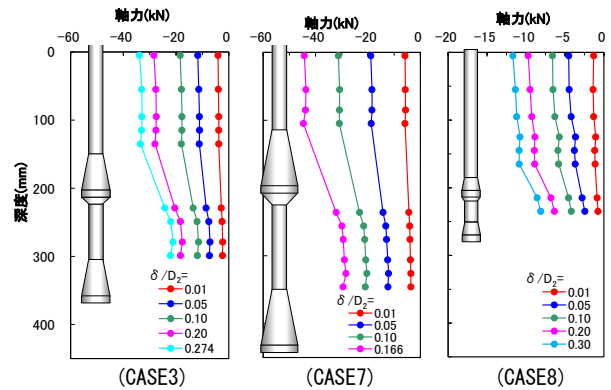


図-14 载荷荷重—杭頭変位/拡径部径(押し込み载荷)



圧縮軸力：負、D₂：拡径部径

図-15 軸力分布(押し込み载荷)

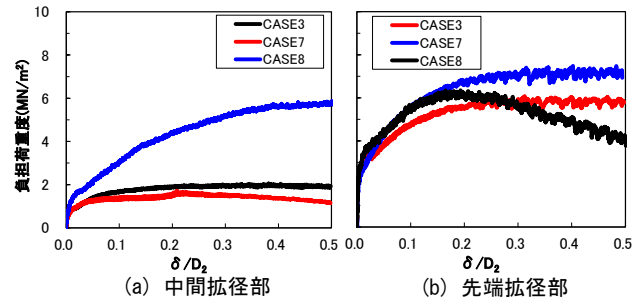


図-16 負担荷重度—拡径部変位/拡径部径(引抜き载荷)

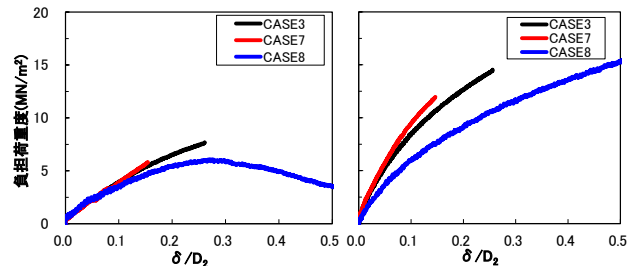


図-17 負担荷重度—拡径部変位/拡径部径(押し込み载荷)

押し込み载荷のうち、中間拡径部の荷重度は概ね同じ値を示している。ただし、CASE8 では δ/D_2 が 0.25 程度を超えると荷重度は低下する傾向を示すが、前述したように拡径部の設置間隔比は同じでも設置間隔が小さいことが影響している。一方、先端拡径部では押し込み载荷時に CASE8 が他の CASE よりも荷重度が小さくなっている。これは、先端拡径部の立ち上がり下端深度が他の CASE に比べ浅いことが原因の一つと考えられる。なお、図-16 および図-17 の結果から、変位が拡径部径の 0.15 倍の範囲まではすべての CASE で拡径部の負担荷重度が増加する傾向

を示している。

図-18は δ/D_2 が0.1における負担荷重度に着目し、上載圧との関係を示したものである。引抜き載荷では拡径部立ち上がり上端位置、押し込み載荷では下端位置での上載圧を算定している。図に示すように拡径部での負担荷重度は引抜き載荷と押し込み載荷で違いがみられるが、上載圧と比例する傾向が認められる。そこで、上載圧に対する負担荷重度の比を算定し、拡径率との関係を整理すると図-19に示す通りとなる。同図より、引抜き載荷では拡径率の増大に伴い、上載圧に対する負担荷重度の比は低下する傾向がみられるのに対して、押し込み載荷では概ね一定となっている。これは上載圧の評価の影響である可能性があるが、詳細なメカニズムについては今後の検討事項である。

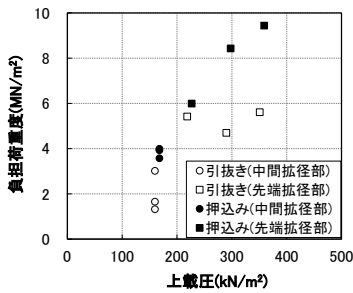


図-18 負担荷重度—上載圧

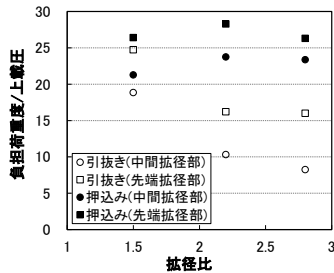


図-19 負担荷重度/上載圧—拡径比

3. 鉛直載荷試験

3.1 試験概要

遠心模型実験結果の検証および施工性確認のために、原位置における鉛直載荷試験を実施した。試験場所は茨城県坂東市の試験場で、試験杭の概要と試験場の地盤柱状図を図-20に示す。試験杭の数は、 N 値50程度の砂層を対象とした押し込み試験杭1本(No.S-1c)、一軸圧縮強度100~350kN/m²程度の粘性土(砂質シルト)および N 値50程度の砂層を対象とした引抜き試験杭2本(No.C-1t, No.S/C-2t)である。試験杭の軸部径は1.0mとし、拡径比はすべて1.5とした。試験杭の仕様を表-3に示す。

試験方法は地盤工学会基準²⁾に準拠し、載荷は油圧ジャッキを用いて行い、反力には反力杭を用いた。載荷方法は段階載荷方式とし、荷重段階は10段階、サイクル数は5サイクルで計画した。主な計測項目は、載荷荷重(ジャッキ荷重)、杭頭部変位、拡径部変位および杭の軸方向ひずみであり、ひずみゲージは主筋に設置した。

表-4に載荷試験日に実施したコンクリートの標

準養生供試体の試験結果(平均値)を示す。なお、No.S-1cについては、試験杭から採取したコア供試体の結果も併記している。

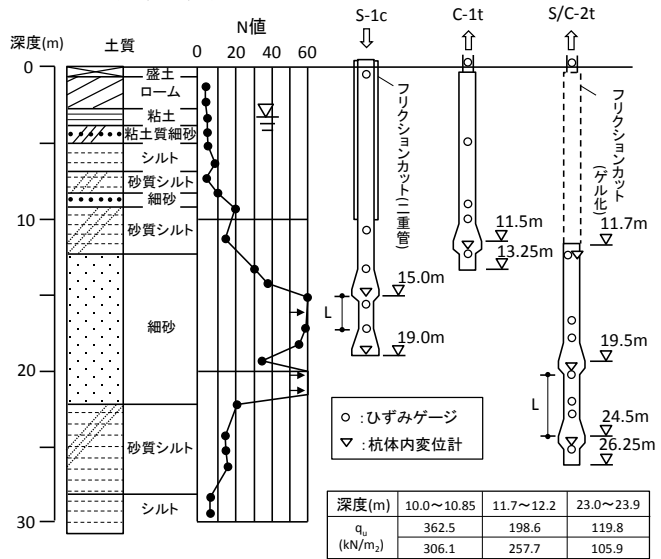


図-20 試験杭および地盤概要

表-3 試験ケースと試験杭の仕様

試験体 No.	軸部径 D_1 (mm)	拡径部径 D_2 (mm)	拡径比 D_2/D_1	拡径部間隔 L (mm)	鉄筋
S-1c (押し込み)	1,000	1,500	1.5	2,325	主筋 8-D32 フープ D13@300
C-1t (引抜き)	1,000	1,500	1.5	—	主筋 12-D35 フープ D13@300
S/C-2t (引抜き)	1,000	1,500	1.5	4,250	主筋 28-D35 フープ D13@300

* 鉄筋の材質: D32 (SD345), D35 (PC鋼棒), D13 (SD295A)

表-4 コンクリート供試体の試験結果

試験体 No.	F_c (N/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)		弾性係数(kN/mm ²)	
		標準養生	コア	標準養生	コア
S-1c	60	94.8	89.2	44.2	42.0
C-1t	45	66.8(4.24)	—	39.2	—
S/C-2t	45	71.5(4.90)	—	40.1	—

* 圧縮強度における()内の数字は割裂強度(N/mm²)

3.2 押し込み試験

(1) 荷重変位関係

押し込み試験杭 No.S-1c における杭頭荷重と変位の関係を図-21に、その $\log P$ - $\log S$ 曲線(30保持後の値)を図-22に示す。杭頭変位は第4サイクルの新規荷重段階から急増し、最大荷重である16.1MNの30分保持後における変位量は193mmであった。杭頭変位が拡径部径 D_2 の10%に達する時点の杭頭荷重は最大荷重直前の15.9MNであるが、杭先端変位が $0.1D_2$ に達する時点での杭頭荷重は16.1MNであることから、第2限界抵抗力は16.1MNであると考えられる。

一方、図-22からは杭頭荷重13.8MNにおいて明確な折れ点が見られることから、第1限界抵抗力は13.8MNであった。

(2) 杭の軸方向力

鉄筋ひずみの軸方向分布および以下の式より算定した軸方向力分布を図-23に示す。符号は圧縮ひず

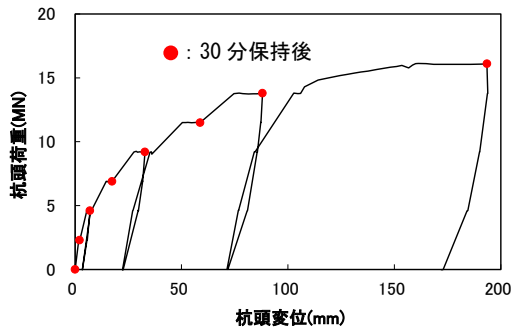


図-21 杭頭荷重-杭頭変位関係

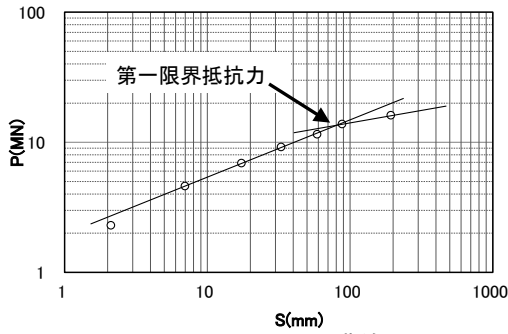


図-22 logP-logS 曲線

みを負としている。

$$P_i = (E_{ci} \cdot A_{ci} + E_{si} \cdot A_{si}) \cdot \varepsilon_i$$

ここに、

- P_i : i 断面における軸方向力
- E_{ci} : i 断面におけるコンクリートの弾性係数
- A_{ci} : i 断面におけるコンクリート断面積
- E_{si} : i 断面における鉄筋の弾性係数
- A_{si} : i 断面における鉄筋の断面積
- ε_i : i 断面における軸方向ひずみ

ここで、鉄筋については公称の弾性係数および断面積を採用した。コンクリートについては当該地で試験杭を掘出したところ、実測外径が計画径と大差ない結果であったことから³⁾、断面積の算定には計画径を採用した。コンクリートの弾性係数の算定には杭頭付近において載荷荷重と軸方向力が等しいと仮定し、ひずみ依存性を考慮した。採用したコンクリートの弾性係数を図-24 に示す。これは、同じく試験体から採取したコア供試体の圧縮試験による弾性係数 42.0 kN/mm^2 (表-4 参照) と概ね一致している。なお、深度方向の影響は考慮せず一定とした。

図-23 に示すように、軸部に比べ中間拡径部における軸方向力の勾配が大きく、中間拡径部での抵抗力が大きいことが確認できる。なお、先端拡径部での抵抗力は杭頭荷重に対して約半分程度である。

(3) 荷重と変位の関係

拡径部における負担荷重度は、遠心載荷試験の場合と同様に、中間拡径部についてはその上下の断面間(図-23 中の 3-4 断面間)における軸力差を拡径部の支圧面積(拡径部面積-軸部面積)で除して算定した。先端拡径部は拡径部面積とした。

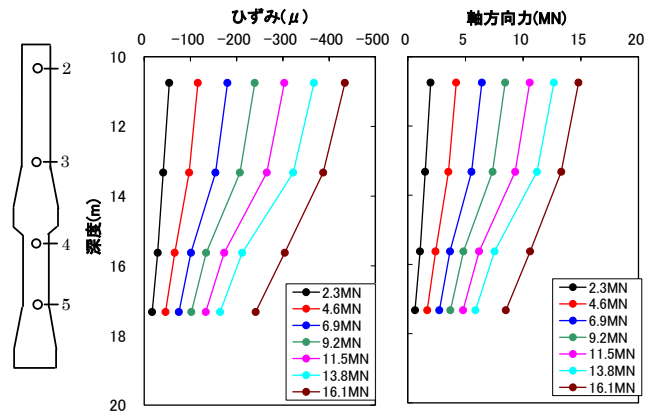


図-23 杭の軸方向ひずみと軸方向力の分布

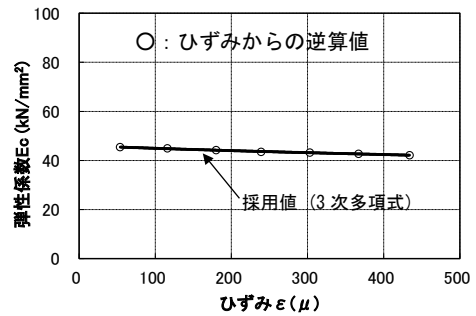


図-24 コンクリートの弾性係数

各拡径部における負担荷重度と変位の関係を図-25 に示す。第 3 サイクル(最大荷重 13.8MN)までの傾向について見ると、拡径部の荷重度は先端よりも中間の方が少し大きくなっているが、両者の荷重変位特性は類似しており、中間拡径部においても支圧型の抵抗をしていることが分かる。第 4 サイクルに入ると変化が生じ、先端の荷重度は最大荷重 16.1MN まで増加しているのに対して、中間部は新規荷重以降徐々に低下している。ここで、中間拡径部の荷重度が最大となる時の杭頭荷重は 14.3MN で、その時の変位量は 97.4mm であり、拡径部径の 6.5%、拡径幅 250mm の約 4 割に相当する。

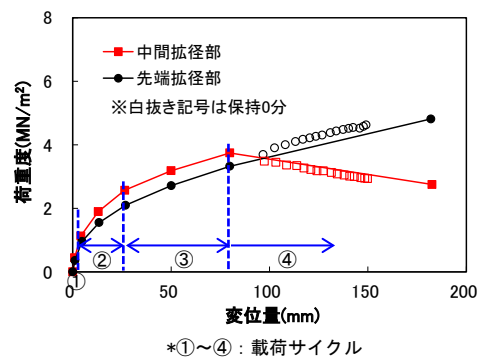


図-25 拡径部における負担荷重度と変位の関係

次に、軸部における周面摩擦抵抗力度と変位の関係を図-26 に示した。中間拡径部上部側の 2-3 断面間における抵抗力度は中間拡径部と同じく杭頭荷重 13.8MN で最大となり、その後はほぼ一定となった。一方、中間拡径部下部側の 4-5 断面間における抵抗

力度は最大荷重まで増加している。これは、杭頭荷重 13.8MN 以降、中間拡径部直下の圧縮抵抗領域が変化し、斜め下方向(主に 4 断面で浅)への広がりから下部方向(4 断面で深まで)への広がりに移行するため、4 断面以深における地盤が圧縮され、周面摩擦抵抗力が増加したと考えられる。

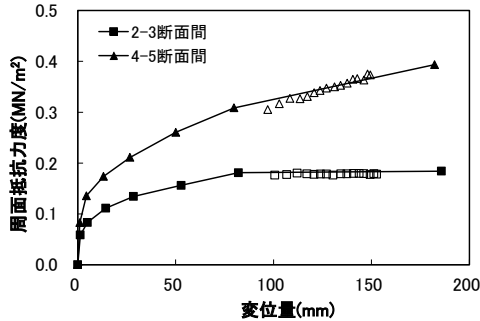


図-26 軸部における周面抵抗力と変位の関係

3.3 引抜き試験

(1) 軸方向力評価のための構造実験

原位置における引抜き試験に先立ち、引張りひび割れが生じる杭の軸力評価を目的とした構造実験を実施した。構造実験に使用した模型杭の仕様を表-5、コンクリート供試体の試験結果を表-6に示す。模型杭は原位置における引抜き試験と同様に、杭主筋には PC 鋼棒を使用した。荷重は主筋の一端をスタブに固定し、もう一端をジャッキで引張り、荷重を加えた。写真-1 に構造実験の概要を示す。

表-5 模型杭の仕様

杭径 D (mm)	杭長 L (m)	主筋	フープ	最大荷重 (kN)
810	1.90	16-D35 (PC 鋼棒)	D13@300 (SD295A)	3,000

表-6 コンクリート供試体の試験結果

Fc (N/mm²)	圧縮強度 (N/mm²)	割裂強度 (N/mm²)	弾性係数 Ec(kN/mm²)
45	50.5	3.32	35.6

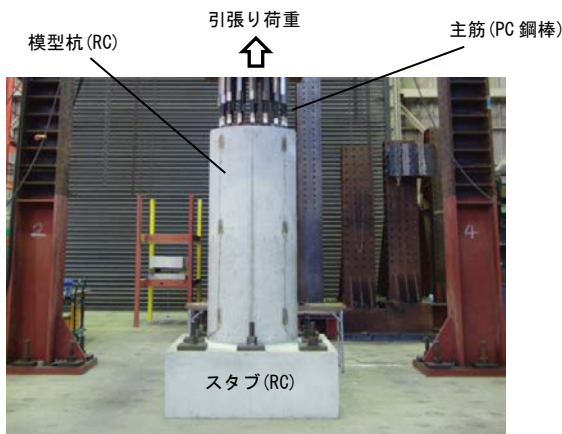


写真-1 構造実験の概要

構造実験では、引張り荷重が小さいうちは主筋とコンクリートは一体として挙動するが、60μ 程度からコンクリートの剛性が低下し、130μ 程度で引張りひび割れが生じるとコンクリートの負担軸力は急激に低下した。杭の軸方向力の算定では、引張りひび割れの影響をコンクリート負担荷重の軸力低減率 α を用いて以下の式で評価するとした。

$$P_i = E_{si} \cdot A_{si} \cdot \varepsilon_{si} + \alpha_i \cdot E_{ci} \cdot A_{ci} \cdot \varepsilon_{ci}$$

ここに、

P_i : i 断面における軸方向力

E_{si} : i 断面における鉄筋の弾性係数

A_{si} : i 断面における鉄筋の断面積

ε_{si} : i 断面における鉄筋ひずみ

(ただし、 $\varepsilon_{ci} = \varepsilon_{si}$ と仮定)

α_i : 軸力低減率

E_{ci} : i 断面におけるコンクリートの弾性係数

A_{ci} : i 断面におけるコンクリート断面積

ε_{ci} : i 断面におけるコンクリートひずみ

図-27 に軸力低減率 α とひずみの関係を示す。また、ひずみ領域ごとの軸力低減率 α の評価式と低減曲線を図中に併記した。

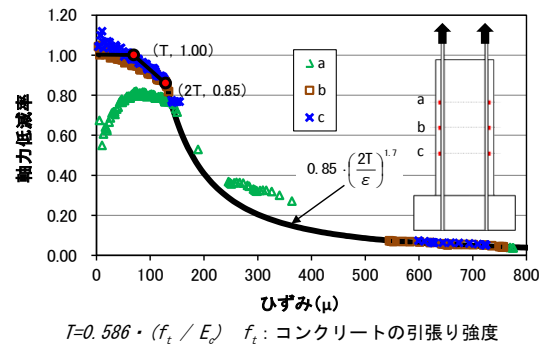


図-27 軸力低減率と PC 鋼棒ひずみ関係

(2) 荷重変位関係

引抜き試験 No.C-1t における杭頭荷重と杭頭変位の関係を図-28、その logP-logS 曲線を図-29 に示す。杭頭変位は第 5 サイクル第 9 荷重ステップ(4.5MN)では 24.1mm であったが、その後杭頭変位が増大した。第 10 荷重ステップにおける最大荷重は 4.77MN であり、logP-logS 曲線の折れ点は 4.0MN 程度であった。

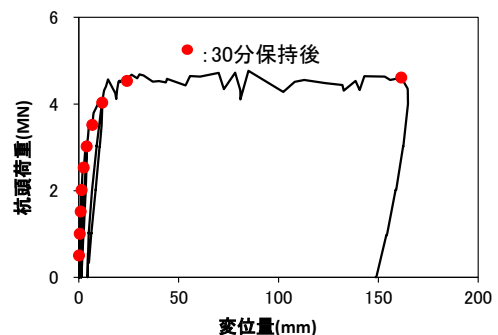


図-28 杭頭荷重-杭頭変位関係 (No. C-1t)

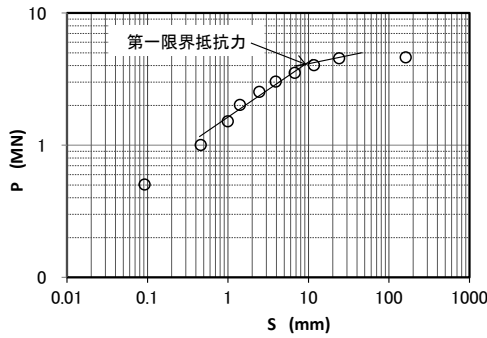


図-29 logP-logS 曲線 (No. C-1t)

引抜き試験 No.S/C-2t における杭頭荷重と杭頭変位の関係を図-30、logP-logS 曲線を図-31 に示す。No.S/C-2t では GL-11.7m 以浅はフリクションカットを行っているため、ここでの杭頭荷重はジャッキ荷重、杭頭変位は GL-12.5m 位置の杭体内変位計の値とした。杭頭変位は第 5 サイクル第 9 荷重ステップ (13.5MN) で 156.6mm に達し、第 10 荷重ステップ (14.2MN) で杭頭変位が約 190mm に達した後に除荷を行った。logP-logS 曲線の折れ点は 9.0MN 程度である。なお、No.C-1t および No.S/C-2t ともに地表面の変位は地盤の弾性変形に伴う軽微な浮き上がりが生じた程度であった。

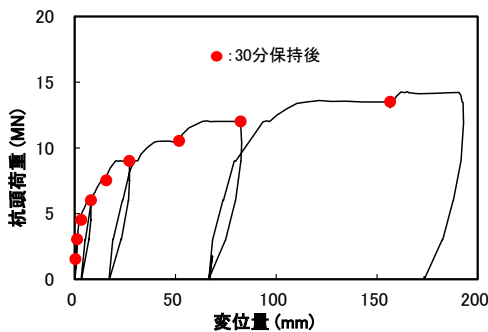


図-30 杭頭荷重-杭頭変位関係 (No. S/C-2t)

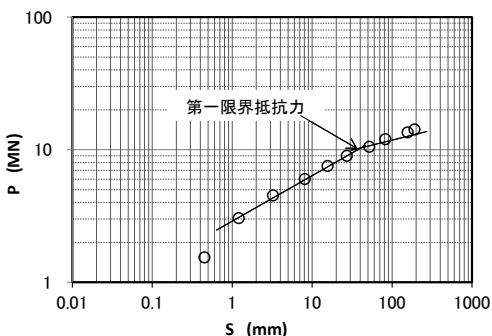


図-31 logP-logS 曲線 (No. S/C-2t)

(3) 杭の軸方向力

No.C-1t における軸方向ひずみと軸方向力の分布を図-32 に示す。軸方向ひずみは、第 6 荷重ステップ (3.0MN) で第 3 断面にひび割れが生じ、その後の荷重増分に伴ってひび割れが広がっている。杭体の軸方向力は構造実験で得られた算定式よりひび割れの

影響を考慮しているが、杭頭部の軸方向力は杭頭上部から露出した鉄筋のひずみより算出している。軸方向力の勾配は拡径部 (5-6 断面間) において大きく、拡径部の抵抗が発揮されていることが分かる。

No.S/C-2t における軸方向ひずみと軸方向力の分布を図-33 に示す。ひび割れは、第 3 荷重ステップ (4.5MN) で第 2 断面に生じ、荷重の増加に伴い下方に広がっている。構造実験を基に評価した軸方向力は、No.C-1t と同様に拡径部 (4-5 断面間および 7-8 断面間) の勾配が大きく、拡径部の抵抗が大きく発揮されていることが分かる。

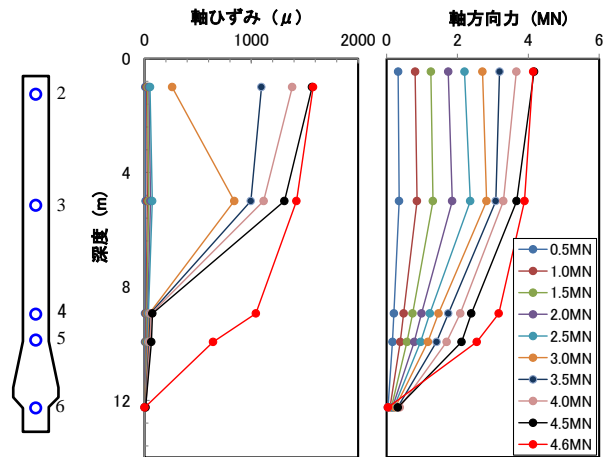


図-32 杭の軸方向ひずみ・軸方向力の分布 (No. C-1t)

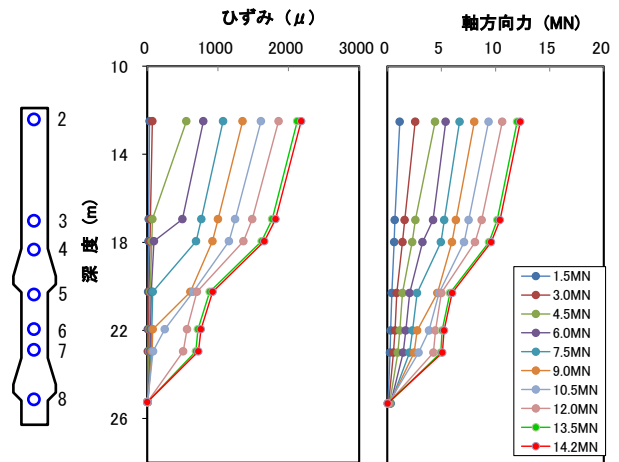


図-33 杭の軸方向ひずみ・軸方向力の分布 (No. S/C-2t)

(4) 荷重度と変位の関係

No.C-1t および S/C-2t の拡径部の負担荷重度と拡径部変位の関係を図-34 にまとめて示す。No.C-1t と S/C-2t の下部拡径部は粘性土を、S/C-2t の上部拡径部は砂質土を対象としている。ここで、拡径部における負担荷重度は、押し込み試験と同様に、拡径部の上下の軸力差を拡径部の支圧面積で除して算出した。3 つの試験体は、いずれも荷重度は引抜き荷重の増加とともに概ね増加傾向を示し、変位量 0.1D₂ (150mm) 付近で最大値に達している。なお、No.S/C-2t の上部拡径部は、押し込み試験体 S-1c と同じ砂質土層を対象としているが、負担荷重度の最大値はほぼ同等の値となっている。

軸部の周面抵抗力度と軸部変位量の関係を図-35

に示す。なお、ひび割れ付近で摩擦抵抗力度が正確に評価されていないと推測される点は除いている。周面抵抗力度は変位 10~20mm で最大値付近に達しているものが多く、その後は緩やかに増加または減少している。従って、変位の増加に伴い、拡径部の荷重負担率が増加している。

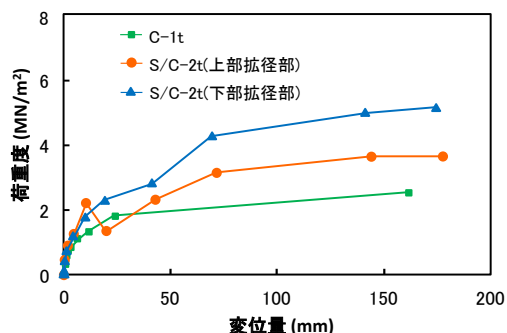


図-34 拡径部の負担荷重度と拡径部変位の関係

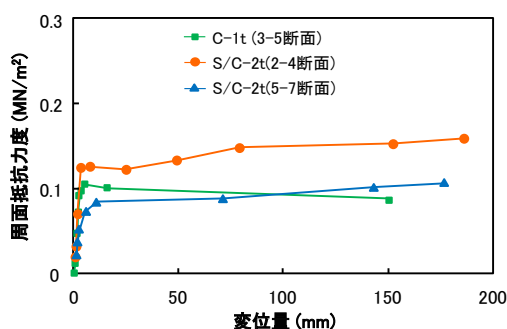


図-35 軸部の周面抵抗力度と軸部変位の関係

4. まとめ

中間部に拡径部を有した場所打ちコンクリート杭の支持力特性を把握するために、遠心模型実験および原位置での実大載荷試験を実施した。以下にこれ

らの実験より得られた所見を示す。

- 1) 押し込み方向と引抜き方向で中間拡径部と先端拡径部が互いに及ぼす影響に違いが見られた。これは、拡径部の上部と下部で傾斜角が異なるため、地盤に及ぼす影響範囲が載荷方向で異なるものと考えられる。
- 2) 上載圧に対する拡径部負担荷重度の比は、引抜き方向では拡径比が増大すると小さくなる傾向を示すが、押し込み方向では概ね一定となる傾向が見られた。
- 3) 原位置載荷試験においても、中間拡径部の押し込みおよび引抜き抵抗が確認できた。引抜き抵抗は原位置試験ではコンクリートのひび割れによる評価等の載荷方法による影響も考慮する必要がある。
- 4) 節部間隔、拡径比が拡径部負担荷重度へ与える影響が認められたが、定量的な評価は今後の課題である。

以上のことから、今後は遠心載荷試験と原位置試験の結果を比較、検証することで拡径部の押し込みおよび引抜き抵抗の支持力特性を評価したい。

謝辞

本研究は、熊谷組、ジャパンパイル、大洋基礎、大豊建設、東急建設、東洋テクノ、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。関係各位に深謝します。

参考文献

- 1) 総合土木研究所 基礎工 Vol.37, No.8, 2009
- 2) 「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」地盤工学会基準解説書, 2002. 5
- 3) 宮田, 宮本, 佐野, 田中, 飯田「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梗概集, 2013. 8