

東京工業大学

○島崎 和司 岸田 英明

1. はじめに

地表面より深さ方面に均一な密度を持つ模型砂層に浸透力を加える事によって応力的にも幾何的にも相似則を満足した模型砂地盤が作成出来る。すでに前報¹⁾²⁾までにこの装置における問題点とその解決法について報告した。今回は、更にこうした装置において問題にされる歪の相似性に触れ、杭の支持力実験に対する適合性を述べると共に密な砂地盤における極限先端抵抗について検討を試みた。更に、軟弱層の下に支持地盤がある場合等の実際の地盤における極限支持力の考え方を示した。

2. 実験概要

i) 実験装置 前報¹⁾²⁾に詳しく述べてあるが、その概略は内径31cm 高さ60cm程度の模型地盤を作成出来るタンク・浸透力を加えるためのポンプ、及び載荷装置から成る。模型杭は直径19mmで先端抵抗と周面抵抗を別々に測定出来る。

ii) 実験に使用した砂 鹿島硅砂5号でその主な性質は前報¹⁾を参照されたい。

iii) 実験の種類及び実験方法 実験は2シリーズに別れ、その概要はTable 1に示す通りである。シリーズi)は、均一で密な砂地盤における極限鉛直抵抗及びその杭径による差をみるための実験、シリーズii)は、埋込み杭の鉛直抵抗を求めるため及び現位置での載荷試験との結果と対応させ歪の相似性の有無を確認する為の実験となっている。尚、表中の B^* は模型地盤の有効応力を乾燥砂地盤の地中応力に等しいとした時に相似側より求まる相当径(mm)である。又 Df/B は設置深さの杭径に対する比、 S/B は押込み量の杭径に対する比を示している。載荷は全て沈下制御方式とし、貫入速度は1.12mm/minとした。

3. 実験結果

Fig.1にシリーズi)における先端抵抗を、Fig.2にシリーズii)における先端抵抗を上載圧との対応でまとめて記した。地盤における杭の極限先端抵抗を「その地盤が地表面から連続的に存在すると仮定した時の押込み杭の先端抵抗-沈下関係」と定義するとFig.1に示すシリーズi)の実験結果が極限先端抵抗を示す事になる。この図を見ると分る様に極限先端抵抗は杭径によって異なる値を取る。又Fig.2を見れば分る様に、埋込杭の先端抵抗

Table 1 List of Tests

	Test No.	Dr	Df/B	S/B	i	B [*]
i)	KS19130001	86	0	21.1	9.7	116
	KS19130002	86	0	21.1	9.5	114
	KS19250001	85	0	20.0	20.2	234
	KS19250002	87	0	21.1	19.1	222
	KS19500001	87	0	20.4	41.6	472
	KS19500002	86	0	21.1	39.2	446
	KS19750001	85	0	20.0	60.7	680
	KS19750002	85	0	21.1	59.7	675
ii)	KS19500601	91	6	3.16	42.5	483
	KS19500602	90	6	3.12	40.3	458
	KS19500801	88	8	3.12	41.5	472
	KS19500802	89	8	6.30	41.2	468
	KS19501001	88	10	3.12	39.3	447
	KS19501002	87	10	8.41	40.8	464
	KS19501201	88	12	8.00	42.4	482
	KS19501202	85	12	0.99	40.8	464
	KS19501203	88	12	3.15	42.1	478
	KS19501401	90	14	2.60	40.5	460
	KS19501402	88	14	6.31	40.4	459
	KS19501601	89	16	3.10	43.8	497
	KS19501602	88	16	7.89	42.5	482
	KS19502001	90	20	3.15	41.4	470
	KS19502002	89	20	5.27	39.8	452
	KS19250601	89	6	2.11	18.5	214
	KS19250602	83	6	3.16	18.2	211
	KS19250801	91	8	2.11	19.5	225
	KS19251001	87	10	2.11	18.2	211
	KS19251201	83	12	4.22	18.5	214
	KS19251202	89	12	2.11	17.4	202

は杭径の7～8倍押込んでも極限抵抗には達していない。

4. 歪の相似性について

シリーズII)における実験で比較的貫入量の多いものについて両対数グラフ上にプロットしたものがFig.3であり、Fig.4は原位置における載荷試験結果である。この両者を比較すると第1極限支持力³⁾に対応する折曲り点を示す S/B は共に0.1～0.2であり、又、それ以降の直線関係の傾きも共に0.42で良い一致を示している。従って、今回の実験における押込み比(S/B)—先端抵抗関係は相似性を満足しているものと解釈され、今回の実験結果によって原位置における挙動を推測出来るものと思われる。

5. 密な砂地盤における極限抵抗

Fig.1を見る事によって密な砂地盤における極限先端抵抗は杭径によって異なる事が明らかになった。更にこれをはっきりとしたものにする為に今回の実験結果に Kerisel (1964)等⁴⁾⁵⁾⁶⁾の既応の実験結果を加え、上載圧(P_u)と支持力係数($Nq^* = q_u/P_v$)との対応で示したのがFig.5である。この図によって密な砂地盤における極限先端抵抗を一般的に説明出来る。つまり、直径40～1000mmの杭における密な砂地盤に対する極限の Nq^* (or 極限先端抵抗)は、杭径の小なるものを包絡線として漸近する曲線群として示され、杭径の大なるもの程漸近の度合は遅い。又、上載圧が 0.5kgf/cm^2 から杭径による差は急激に小さくなり、上載圧 $1\sim 1.5\text{kgf/cm}^2$ で杭径によらずほぼ一義的に定まる。更に、 Nq^* はピーク性を有し、そのピークは杭径の小なるもの程顕著であり、ピークを示す上載圧は低い。又、 Nq^* はピークを過ぎると上載圧の増加に対して減少傾向を示す。

杭径によって Nq^* のピークを示す上載圧が異なるのは、根入れ比が異なる為かと思われる。そこで、この Nq^* を根入れ比との対応に書き直したのがFig.6である。しかし、今度は逆に杭径が小さいもの程ピークを示す根入れ比が大きくなるだけである。従ってこのピークは上載圧と根入れ比との両者の関数となる。しかし、これは既往の支持力理論と対応させる事で割に簡潔に説明出来る。

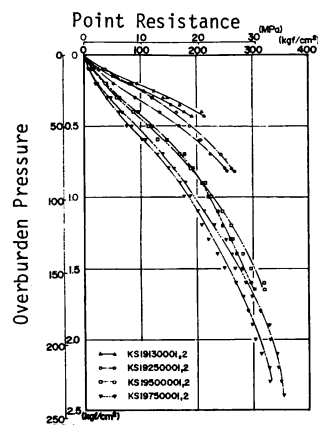


Fig. 1 Experimental Values of Point Resistance to Overburden Pressure

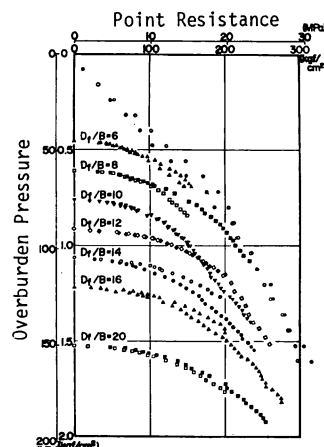


Fig. 2 Experimental Values of Point Resistance versus Embedded Depth

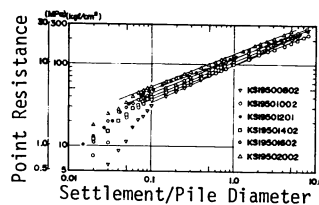


Fig. 3 Experimental Values of Point Resistance to Settlement over Pile Diameter(S/B)

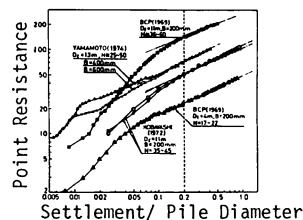


Fig. 4 Experimental Values of Point Resistance (Field Test Results)

極限抵抗を考える場合、密な砂地盤においてはその最大抵抗は剛塑性論で与えられると考えて良いものと思われる。そこで、ここでは Meyerhof の支持力理論及び Terzaghi の支持力理論を軸対称で解いた Berezantev の支持力理論と比較検討する。又、高压下のせん断には ϕ の低下を伴うが、これを支持力理論に適用する為に De Beer (1964)⁷⁾ を参考に、すべり面上での平均主応力の平均値が先端抵抗の $1/10$ であるとして ϕ の低下を考えた。尚、この仮定の適合性については文献⁸⁾を参照されたい。これらの理論値と今回の実験のうち相当径 680mm のものと比較したのが Fig.7、相当径 230mm のものと比較したのが Fig.8 である。これらの結果、上載圧 0.5 kgf/cm^2 までは Meyerhof の支持力理論に、上載圧 $1 \sim 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ 以上については Berezantev の支持力理論に ϕ の低下を考慮したものとよく対応しており、その間においては両者の支持力理論の中間にある。又、近藤の実験結果⁹⁾を用いると上載圧 5 kgf/cm^2 まで Berezantev の支持力理論に ϕ の低下を考慮したものとよく対応している。この事によって、Fig.1 に示される上載圧の低い所での杭径の違いによる極限先端抵抗の差および Fig.5 に示される Nq^* の性状の差は、地表面付近では先端支持機構が Meyerhof の支持力理論に対応する為、根入れの影響も受け杭径によって異なる値を取るが、根入れが深くなり上載圧が増加すると ϕ の低下を考慮した Berezantev の支持力理論に対応する為に杭径による差が無くなるものと説明出来る。

6. 埋込み杭及び実地盤における先端抵抗

埋込み杭の先端抵抗は極限抵抗の場合と異なり載荷初期においてはパンチングせん断的な破壊形式を取る。従って、杭先端部で浅のせん断抵抗は杭の支持力に関与しないと考える。又、軟弱層の下に支持層がある様な場合、軟弱層の支持力を 0 と仮定し、杭が軟弱層中にある時には支持層の土性の変化がないものと仮定すれば、支持層における先端抵抗（これを支持層の極限支持力と呼ぶ）は、丁度支持層の表面に設置した埋込み杭を押し込んだ時の先端抵抗に等しいと考えられる。従ってここでは、埋込み杭の先端抵抗と支持層の極限支持力を同一に扱う。

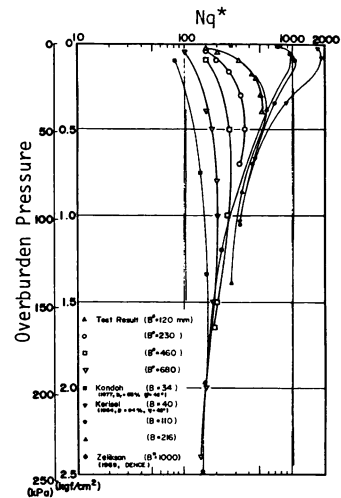


Fig. 5 Experimental Values of Nq^* to Overburden Pressure

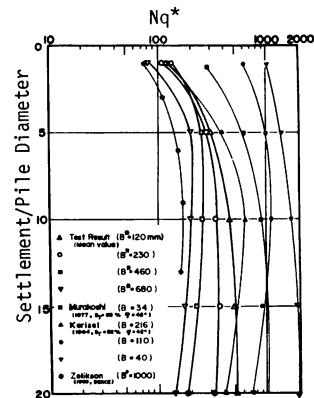


Fig. 6 Experimental Values of Nq^* to Settlement over Pile Diameter (S/B)

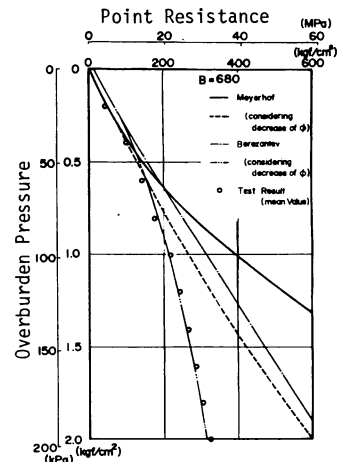


Fig. 7 Comparison between Experimental Values and Calculated Values

埋込み杭の実験結果を両対数グラフで示した Fig.3 を見ると第1極限支持力以降 S/B が8に至っても直線関係は失われていない。これは、この間に支持機構が一定の割合で変化しているか、土性が一定の割合で変化しているか、または、両者が同時に一定の割合で変化しているものと思われる。すると、必ず極限先端抵抗と同一の機構になる時が存在し、その時にはこの直線関係の失われる点が存在しなければならない。これは近藤⁶⁾によって確認されており、その結果、上載圧との間に次式が見出される。

$$(S/B)_u = A(P_v)^{-\beta} \quad (1)$$

A, β の値は砂によって異なると思われるが、近藤の実験では $A=16.5, \beta=0.4$ となる。この係数を入れると $P_v=3.5 \text{ kgf/cm}^2$ で $(S/B)_u=10$ となり Meyerhof (1977)⁹⁾ が原位置の載荷試験から支持層で極限先端抵抗に達するのに必要な根入れを10としているのに良く対応している。又、両対数グラフでの直線関係の傾きは杭径・上載圧にかかわりなく今回の実験では0.42であったが、過去の実験結果を見ると0.4~0.5の間にあり、これを平均的に0.45と考える。するとこの時の埋込み杭の先端抵抗及び支持地盤の極限支持力-沈下比関係は次式で与えられる。

$$q_u = a(S/B)^{0.45} \quad (2)$$

従って、①式で求める沈下比に対応する極限先端抵抗をすでに述べた支持力理論やN値等から推定すれば、②式が確定し、支持層の極限支持力・埋込み杭の先端抵抗が推測出来るものと思われる (Fig.9 参照)。尚、支持層に打込まれた杭の先端抵抗は Fig.9 に示す様になり、その先端抵抗が支持層の極限支持力に達したとしても、3.で定義した極限先端抵抗を示しているとは言えない。

7. 結論

本研究によって均一で密な砂地盤における極限先端抵抗と杭径との関係が明らかになり、又、埋込み杭の先端抵抗・実地盤の極限支持力に対する考え方を提案した。

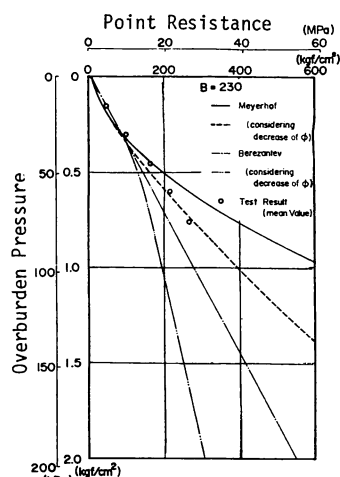


Fig. 8 Comparison between Experimental Values and Calculated Values

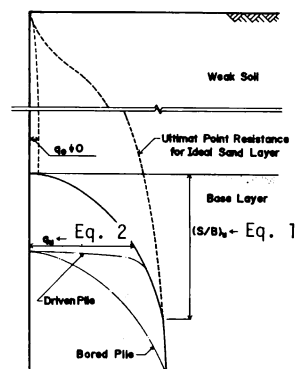


Fig. 9 Relation between Ultimate Point Resistance of Pile and Depth in Base Layer beneath Weak Soil Layer

参考文献

- 1) 帯刀、島崎、高野、岸田 (1977) "浸透力を利用した杭載荷実験" 第12回土質工学会研究発表会
- 2) 帯刀、岸田、島崎 (1978) "浸透力を利用した杭の鉛直支持力実験" 第13回土質工学会研究発表会
- 3) 高野、岸田 (1977) "砂地盤内の埋込み杭の接地圧分布" 建築学会論報 260, 261
- 4) Kerisel (1964) "Deep Foundation Basic Experimental Facts", Proc. North American Conf. on Deep Foundation Engineering
- 5) Zelikson (1969) "Geotechnical Models using the Hydraulic Gradient Similarity Method", Geotechnique, Vol. 19, No. 4
- 6) 近藤、岸田 (1978) "砂地盤における杭の根入れ深さが支持力に及ぼす影響" 第13回土質工学会研究発表会
- 7) De Beer (1963) "The Scale Effect in the Transposition of the Results of Deep-Sounding Tests on the Ultimate Bearing Capacity of Piles and Caisson Foundations", Geotechnique, Vol. XIII
- 8) 島崎 (1978) "均一な砂地盤における単杭の鉛直支持力" 東京工業大学修士論文