

傾斜荷重を受ける杭の支持力特性に関する実験的研究

The Bearing Capacity of Pile Under Inclined Loads

坂田隆博*, 前田良刀**, 徐光黎***, 落合英俊****, 安福規之*****

Takahiro SAKATA, Yoshito MAEDA, Guangli XU, Hidetoshi OCHIAI, Noriyuki YASUFUKU

* (株) 建設技術研究所 福岡支社技術第 2 部部長 (〒810 福岡市中央区大名 2-4-12)

** 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

*** 工博 九州共立大学助手 工学部土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

**** 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

***** 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Piles are extensively used as foundations to support heavy loads. The pile foundations are frequently subjected to a combination of vertical and horizontal loads resulting in inclined resultant and eccentricity loads. Bearing capacity characteristics of pile under inclined loads were investigated herein. Model pile tests in sand under inclined loads have been conducted. Both yield and ultimate bearing capacity of piles were analyzed. It was demonstrated that (1) the bearing capacity of the pile is independent with the inclination of the load. (2) the failure mechanism of pile subjected to inclined load can be classified into three, i.e., in vertical, in horizontal, and in equilibrium failure mode. (3) bearing capacity characteristics of pile under inclined load and inclined pile under horizontal load are similar. (4) the shape of bearing capacity envelop is significantly influenced by the ratio of vertical and horizontal bearing capacity; (5) mutual-perpendicular rule between bearing capacity envelop and displacement increment vector is not revealed.

Key words : Inclined loads, bearing capacity, pile loading test, failure modes

1. まえがき

傾斜荷重を受ける杭のような深い基礎の支持力をどのように評価するかという問題は、構造物設計における重要な検討課題のひとつである。この問題に関して、いくつか研究はあるが、まだ十分に検討されているとは言えない。

基礎には、上部構造の自重などの鉛直荷重と土圧や地震力などの水平荷重が同時に作用する場合がある。このような合成された傾斜荷重は、特に浅い基礎の支持力に大きく影響すると考えられてきた。その支持力の評価方法について、偏心荷重の考え方として、帯基礎については Meyerhof¹⁾あるいは Vesic²⁾の有効基礎幅の考え方、円形基礎については Hansen³⁾の等価有効面積の考え方が示されている。また、傾斜荷重については、駒田⁴⁾の支持力式がある。このため、浅い基礎には荷重の偏心と傾斜を考慮した支持力式が道路橋示方書などの設計基準⁵⁾に反映されている。

一方、杭のような深い基礎の支持力特性は、これまで経験的に荷重の傾斜の影響はあまりないとみなされており、その支持力は鉛直荷重と水平荷重に対し、それぞれ分離して検討されている。しかし、筆者らが行った室内模型実験によると、傾斜荷重を受ける杭の支持力が変化

する傾向が見られた^{6,7,8)}。特に、水平支持力成分が顕著に増加する傾向があり、その実験事実は、鉛直と水平を分離して評価する慣用の支持力理論では説明できない。

今回、傾斜荷重を受ける杭の支持力特性を検討するために、筆者らが過去に行った杭の載荷実験結果をふまえて、上載圧を空気圧で載荷できる大型三軸土槽を製作し、比較的大きな模型杭の支持力実験を行った。本文では、その載荷実験結果と、更に過去に行った載荷実験結果を合わせて、その挙動を考察したものである。

2. 試験概要

2.1 試験地盤の特性

地盤材料として福岡県岡垣町産の岡垣砂を使用した。表-1は岡垣砂の物理的性質を豊浦砂と比較したものである。岡垣砂は均等係数が2.2で、均一な砂と判定できる。粒径は豊浦砂よりやや大きい。

図-1は岡垣砂で行った三軸圧縮試験の試験結果について、乾燥密度 ρ_d とピーク強度時の内部摩擦角 ϕ_p の関係を示したものであり、豊浦砂とほぼ同じ性状を示している。

2.2 大型三軸土槽

過去の実験に用いた土槽と地盤の作成は文献6)を参

考されたい。平成8年度に製作した大型三軸土槽の概要を図-2に示す。大型三軸土槽は、内径900mm、高さ1500mm、円柱土槽であり土槽内の壁面に作用する静止土圧、間隙圧が測定できるとともに、土被り圧に相当する上載空気圧 σ_v を種々載荷できる構造となっている。土槽上部の空気室を利用し上載圧を加えられることと、杭頭に組合せ荷重を載荷できるのが特徴である。

2.3 地盤の作成

地盤は乾燥状態の岡垣砂を用い、専用の砂撒き装置により空中落下方式で作成した。落下高さ $H=210\sim60\text{cm}$ の範囲での経験から、砂の密度は落下高さに余り影響されないため、新たに製作した専用の砂撒き装置を所定の

表-1 岡垣砂の物理的性質

	岡垣砂	豊浦砂
土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.63	2.64
平均粒径, D_{50} (mm)	0.26	0.16
有効粒径, D_{10} (mm)	0.16	0.11
均等係数, U_c	2.20	1.44
最大間隙比, e_{max}	0.93	0.98
最小間隙比, e_{min}	0.56	0.61

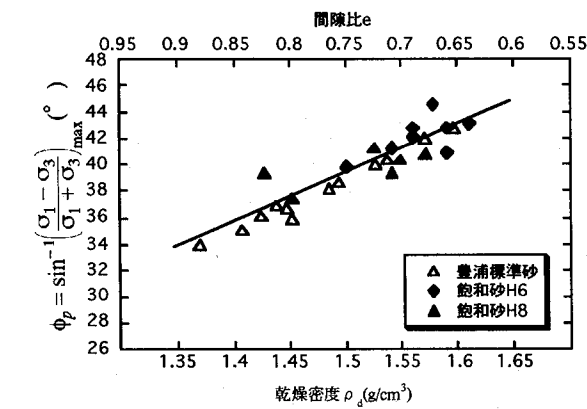


図-1 内部摩擦角 ϕ_p と乾燥密度 ρ_d の関係

位置にセットし、そのバケットから土槽上部までの落下高さを $H=60\text{cm}$ に固定した。このため、試験地盤での落下高さは $H=210\sim60\text{ cm}$ に変化することになる。撒き出し方法は、先端部分の面積 $A=24\text{cm}^2(3\text{cm}\times8\text{cm})$ に加工されたホースの先端から、落下させる方法である。その結果、乾燥密度 $\rho_d=1.47(\text{g}/\text{cm}^3)$ 程度の均一な地盤が作成できた。一方、この試験地盤では、図-1を参考にして三軸圧縮試験により、内部摩擦角 $\phi=38^\circ$ が得られる。また、正確な静止土圧測定のため、ラバーメンブレンを設置しその間にシリコングリスを塗布し摩擦力を除去した。これにより、測定された平均静止土圧係数は $K_0=0.35$ で、測定された値はばらつきは大きいものの、平均値はJakyの経験式 $^{9)}(K_0=0.38)$ とよく一致していることが分かる(図-3)。

2.4 模型杭の諸元と実験方法

表-2は各年度の試験状況についてその諸元をまとめたものである。なお、詳細については文献6)を参照のこと。今回の模型杭は、アルミ製の棒で、径 $\phi=100\text{mm}$ 、根

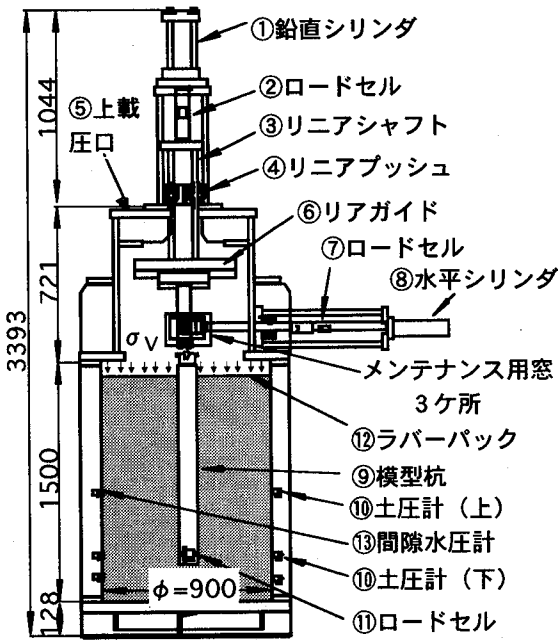


図-2 大型三軸実験土層概要図

表-2 各年度試験状況一覧表

年度	土槽寸法 mm	作成した地盤		モデル杭					備考
		乾燥密度 ρ_d g/cm ³	相対密度 Dr %	材質	寸法 mm	根入れ長 D_i mm	突出量 h mm	上載圧 kgf/cm ²	
H6年度	400×2360×700	1.63	86	アクリル	φ50	440	95	0	Path A&B
	"	"	"	"	"	200	"	0	"
H7年度	400×2360×700	1.63	86	アクリル	φ50	440	95	0	Path B
	"	"	"	"	"	200	"	0	"
今回	φ900×1500	1.47	40	アルミ	φ100	600	0	0.5	Path B

入れ長さL=600 mmで比較的大型である。模型杭の先端には先端支持力度を測定するために、ロードセルを設置してある。荷重の載荷は多段階載荷方式であり、1段階当たりの荷重増分は最終荷重の10等分以上となるように設定した。水平荷重と鉛直荷重の比を一定に保持したまま1分間で載荷し、その後3分間荷重を保持した後、次の荷重段階へと移る方法としている。なお、今回は全ての荷重ケースで、上載圧 $\sigma_v=0.5$ (kgf/cm²)で一定とした。

支持力度の判定としては、第一限界荷重又は降伏荷重は、地盤工学会基準¹⁰を準用した。すなわち、水平方向、鉛直方向のそれぞれについてlogP~logS法により、荷重と変位の関係より曲線の折れ点を求め、この点の荷重を第一限界点あるいは降伏荷重とする。一方、第二限界荷重又は極限荷重は、小径の模型杭で安定した結果を得るために充分な変位を生じさせるものとし、鉛直、水平共に杭径の50%の変位が生じたときの荷重とした。

3. 実験結果とその考察

種々の荷重の組合せを考慮して、杭の支持力実験を行った。荷重載荷は、鉛直荷重のみ、水平荷重のみおよび両者を有する傾斜荷重とする。傾斜荷重の傾斜角 θ は次式による。

$$\theta = \arctan\left(\frac{H}{V}\right) \tag{1}$$

ここで、 θ ：荷重の傾斜角、H：水平荷重成分、V：鉛直

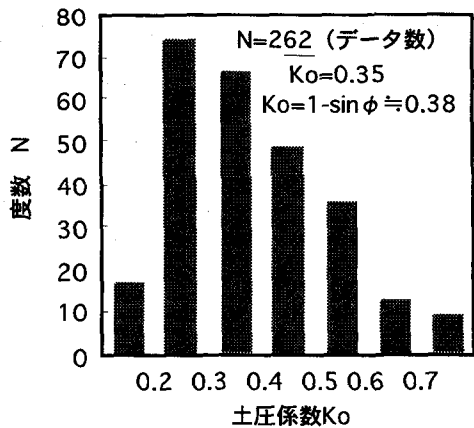


図-3 静止土圧係数 Ko の分布

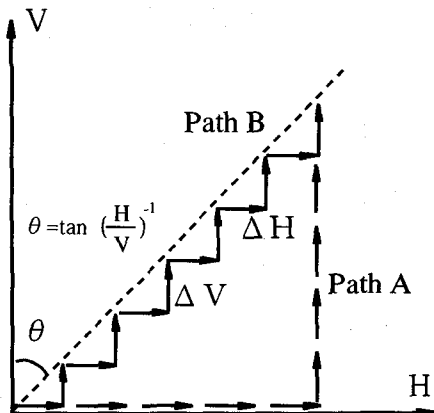


図-4 荷重載荷経路略図

荷重成分である。

3.1 荷重経路と杭の支持力特性

荷重経路としては、図-4に示したように水平荷重載荷後、水平荷重を保持したまま鉛直荷重を増加させる方法 (Path A)と、水平荷重と鉛直荷重を一定の増分で荷重を増加させ、荷重の傾斜を一定に保つ方法 (Path B) の2種の応力経路について実験を行った¹¹⁾。

図-5は、図中の□の場合を除く、Path Aを主体とした場合の降伏荷重と極限荷重について、その結果を鉛直荷重Vと水平荷重Hの空間に示したものである。この場合、水平荷重については、一部降伏荷重をこえている場合もあるが、極限荷重時の破壊モードは必ず鉛直破壊モードとなる。又、図-6はPath Bの場合の降伏荷重と極限荷重を

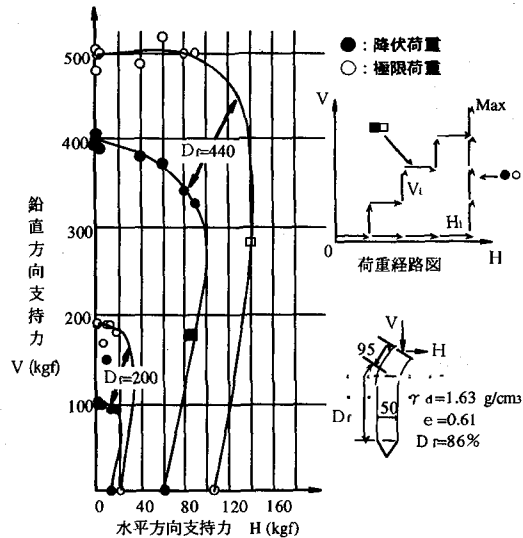


図-5 組み合わせ荷重を受ける杭のH-V空間 (Path A & B)

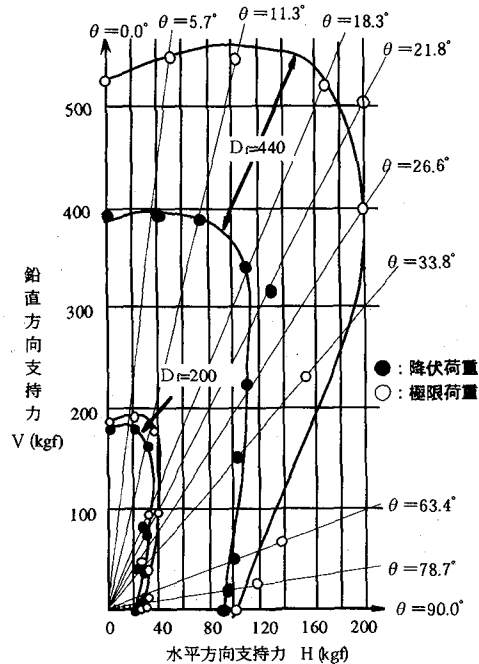


図-6 組み合わせ荷重を受ける杭のH-V空間(Path B)

示したものである。図-6は図-5と異なり、鉛直破壊モードと水平破壊モードおよびつり合い破壊モードが説明出来る⁶⁾。また、鉛直破壊領域 ($\theta=18^\circ$ 以下) では鉛直支持力は多少の支持力増加は見られるが、水平支持力の増加に比べると顕著ではない。これより、杭の支持力は荷重・荷経路に依存しない¹¹⁾。なお、この傾向はアルミ棒積層地盤を用いた実験¹²⁾からも確かめられている。

3.2 破壊モードとその特徴

荷重・沈下曲線の代表的な例を載荷重の水平方向成分、鉛直方向成分と、それぞれの方向の変位成分に分けて図-7、図-8と図-9に示す。既に筆者が指摘したように⁶⁾、いずれのケースでも、荷重の傾斜角 θ によってその荷重・沈下特性が大きく変化し破壊モードが異なり、三つの破

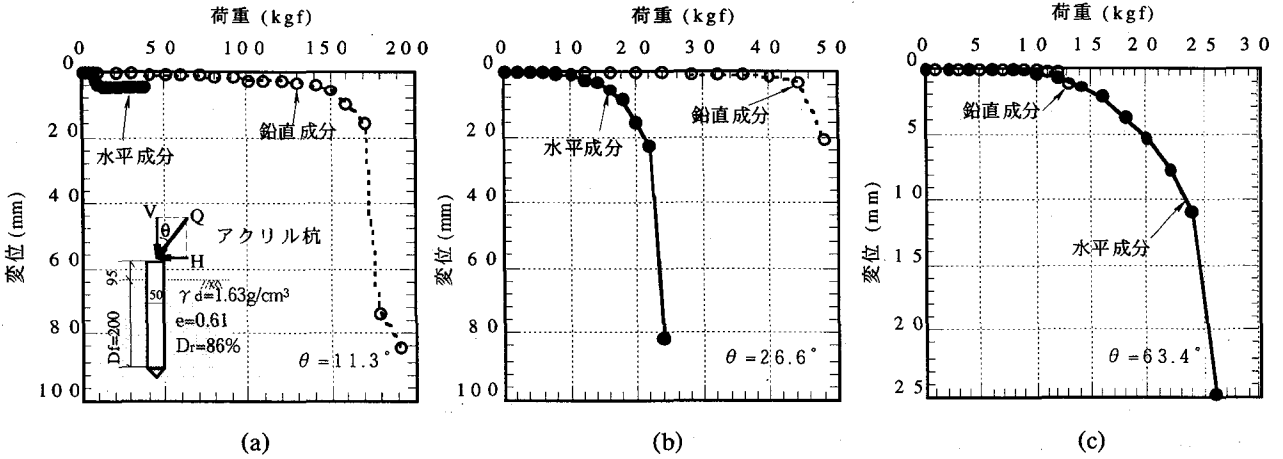


図-7 荷重・沈下曲線(アクリル杭, $D=200$)

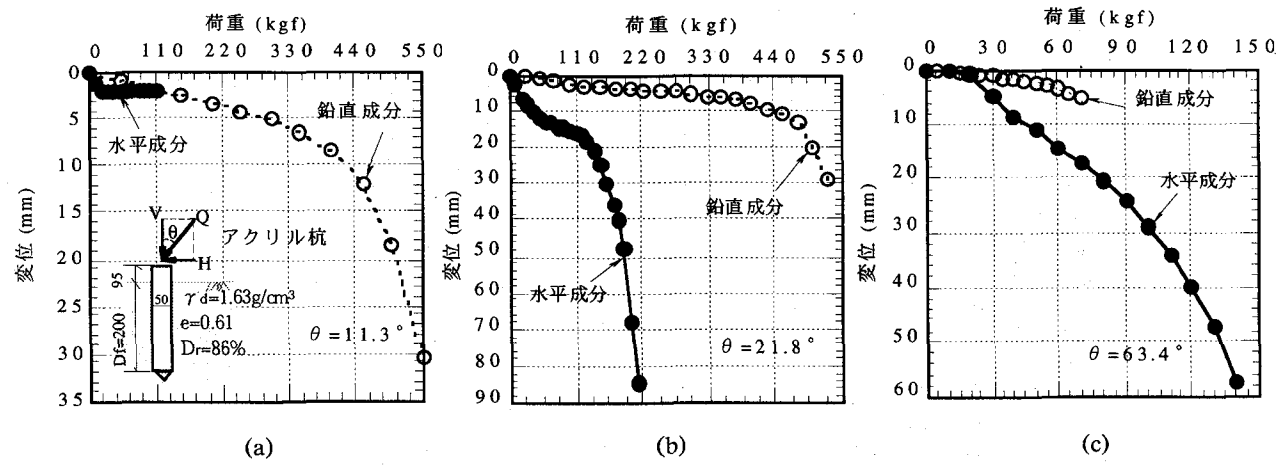


図-8 荷重・沈下曲線(アクリル杭, $D=440$)

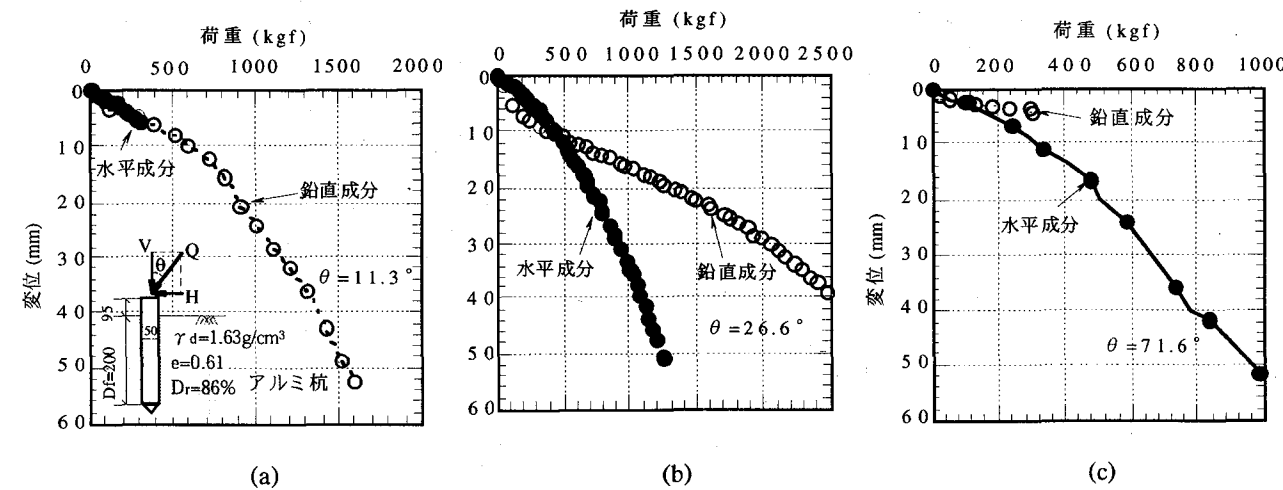


図-9 荷重・沈下曲線(アルミ杭, $D=600$)

壊モードに分類される。すなわち、破壊モード1は鉛直荷重・鉛直変位関係が支配的であり、水平方向成分は降伏変位に対して十分余裕がある。(図-7a,8a,9a)。破壊モード3は水平荷重・水平変位関係が支配的であり、鉛直荷重・鉛直変位関係は杭の支持力に関係しない(図-7c,8c,9c)。一方、図-7b,8b,9bのように、破壊モード2は、鉛直、水平ともに支持力に大きな影響を与え、鉛直荷重成分と水平荷重成分がほぼ同時に限界に達する。荷重の傾斜がこの破壊領域に一致する時、合成支持力が最大となる。この傾向はこれまでの筆者らの模型杭載荷試験結果と同じである。

一方、久保ら¹³⁾は斜杭について検討しているが、破壊メカニズムは傾斜荷重下の直杭と同様と考えられ、乾燥砂中の斜杭に水平荷重を作用させた場合、斜角によって水平荷重～変位関係が異なることが示されている。すなわち、図-10に示された傾斜角がプラスのIn-batter杭の方が、傾斜角がマイナスのOut-batter杭より水平抵抗が大きくなることが示されている。また図-11に示された、地盤反力係数の変化を見てもIn-batter杭の方が大きく、角度による変化も認められる。

In-batter杭では地表面近くの土が杭に沿って下向きに押し下げられることにより、水平抵抗が大きくなること

を示している。鉛直杭についても、傾斜荷重下においては、杭前面の土塊が杭に沿って下向きに押し下げられることにより水平抵抗が大きくなると考えられる。このことから、斜杭の水平荷重問題と、鉛直杭の傾斜荷重問題は、類似の支持力機構となることが予想される。

図-12、図-13と図-14は、鉛直荷重成分と水平荷重成分を鉛直荷重のみと水平荷重のみの降伏支持力および極限支持力でそれぞれ正規化したものである。点線は鉛直荷重のみあるいは水平荷重のみの支持力である。鉛直成分のみの場合の荷重 $V_{\theta=0}$ で正規化した鉛直荷重の成分 $V/V_{\theta=0}$ は、 $V_{\theta=0}$ の1.2倍(アクリル製の模型杭、 $\phi=50\text{mm}$)から1.6倍(アルミ製の模型杭、 $\phi=100\text{mm}$)となる。これに対して、水平成分のみの場合の荷重 $H_{\theta=90}$ で正規化した水平荷重の成分 $H/H_{\theta=90}$ は、 $H_{\theta=90}$ の1.6～2.0倍の水平支持力となる。これらの図に示した陰の部分、鉛直支持力と水平支持力を独立で取扱う現在の設計では、傾斜荷重のもとでは、安全側の設計になっていると思われる領域を示している。

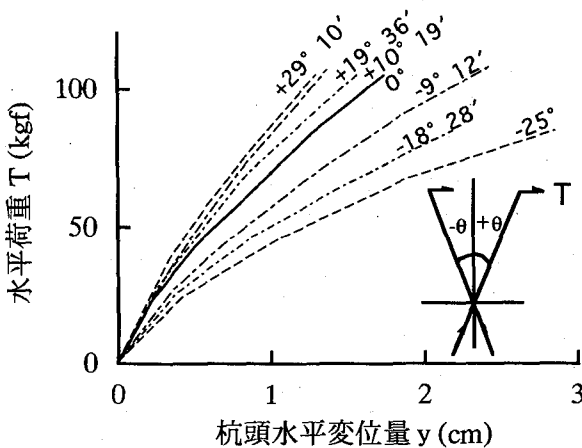


図-10 水平荷重と杭頭変位量関係¹³⁾

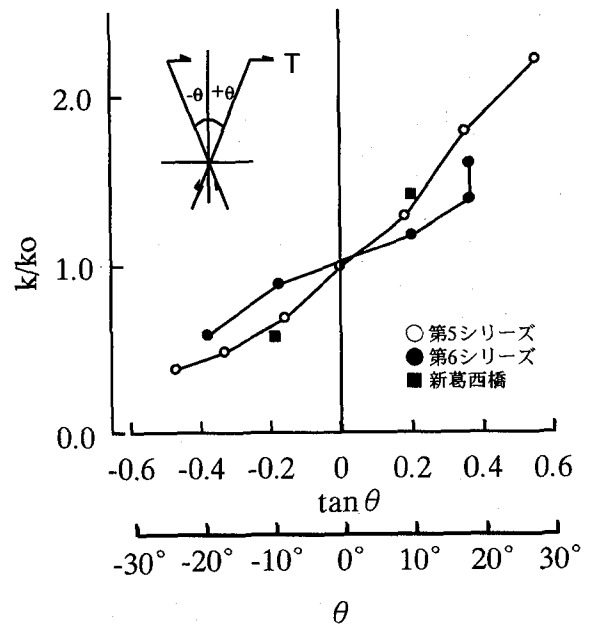


図-11 k/ko と杭の傾斜角の関係¹³⁾

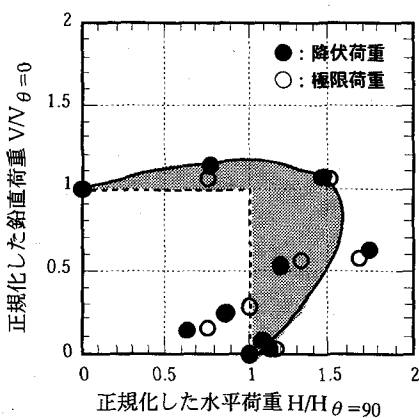


図-12 アクリル杭, $D_t=200$

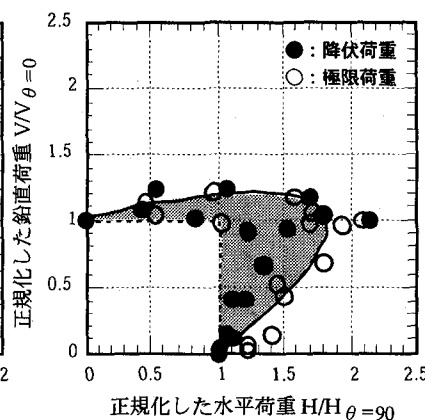


図-13 アクリル杭, $D_t=440$

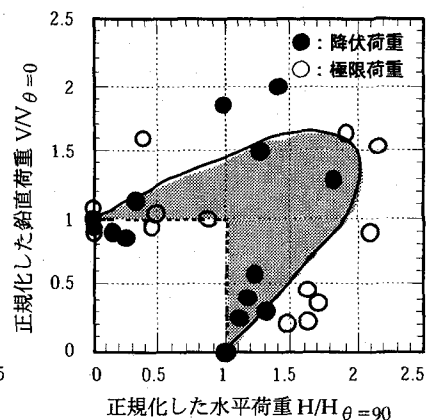


図-14 アルミ杭, $D_t=600$

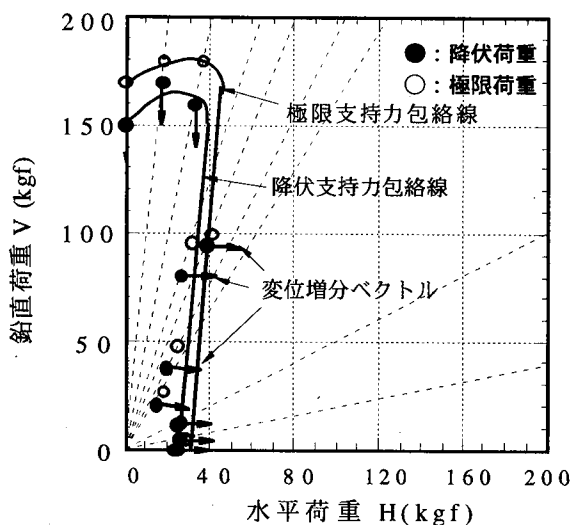


図-15 V-H空間(アクリル杭, $D_f=200$)

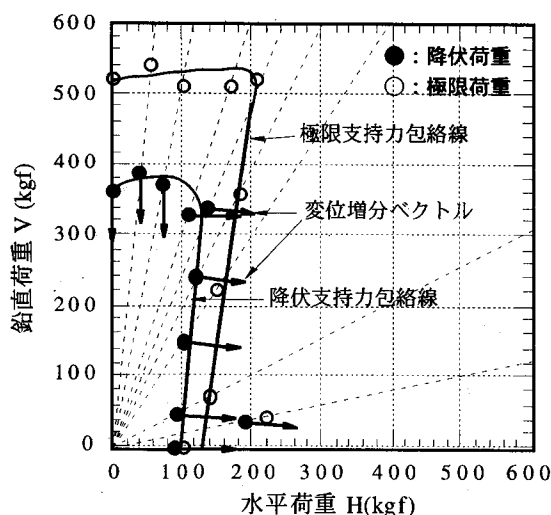


図-16 V-H空間(アクリル杭, $D_f=440$)

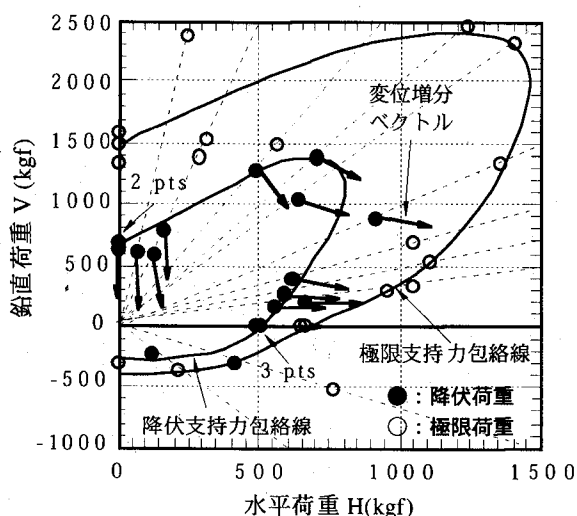


図-17 V-H空間(アルミ杭, $D_f=600$)

なお, Meyerhof¹⁴⁾は, 傾斜荷重下の支持力特性を評価するために, 楕円近似式を提案している. これは, 合成支持力が水平荷重のみの場合より小さい水平支持力成分を与えることを示しており, 実験事実を説明できない. 筆者らはアクリル杭について合成支持力が水平荷重のみの場合より大きくなる事を示す実験式⁹⁾を示しているが, アルミ杭についても同様の表示は可能である.

3.3 荷重傾斜角 θ と支持力特性

図-15, 図-16および図-17はH-V空間での支持力特性を示したものである. 図中には, 降伏荷重付近での変位増加ベクトルを合わせて示している. なお, ベクトルは方向のみを表示している. 支持力包絡線によると, 今回のアルミ杭の水平支持力が大きくなることが特徴的である. 図-15~17より, $H_{\theta=90}$ のみと $V_{\theta=0}$ のみの極限支持力の比が支持力包絡線の形状に影響することがわかる. また, 変位増分ベクトルは降伏荷重の包絡線に対して直交していない. 特に水平支持力比が大きい図-17で, その傾向は顕著である. 図-18は荷重傾斜角と変位増分ベクトル角の関係を整理したもので変位増分ベクトルは降伏荷重時の $\delta u-\delta v$ 関係から求めたものである. 変位増分ベクトルは杭の剛性, 長さによって異なり, 極限支持力の比によっても異なることがわかる. 次に図-19, 図-20と図-21はこれらの結果を再整理したものである. 横軸は荷重傾斜角 θ で, 縦軸は, $\theta=90^\circ$ のときの支持力 $Q_{\theta=90}$ で正規化した支持力である.

これらの図より支持力特性に関して次のような傾向が指摘される. H-V空間において, 限界荷重傾斜角 θ_{cr} が存在する. この限界荷重傾斜角 θ_{cr} の近傍は, モード2の釣り合い破壊領域であり, 合成支持力が最も大きくなり, 顕著な傾斜荷重効果が発揮される. アクリル製の模型杭 ($\phi=50\text{mm}$) では釣り合い荷重領域での荷重傾斜角が $\theta_{cr}=11^\circ \sim 25^\circ$ の範囲にあり, アルミ製の模型杭 ($\phi=100\text{mm}$) 杭では, $\theta_{cr}=21^\circ \sim 35^\circ$ の範囲にある. これから, つり合い荷重破壊領域は対象とする杭の鉛直支持力と水平支持力の相対的な関係に依存すると予想される.

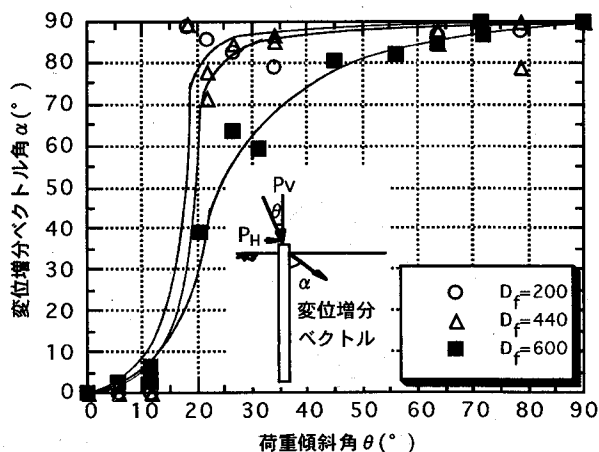


図-18 荷重傾斜角と変位ベクトル角の関係

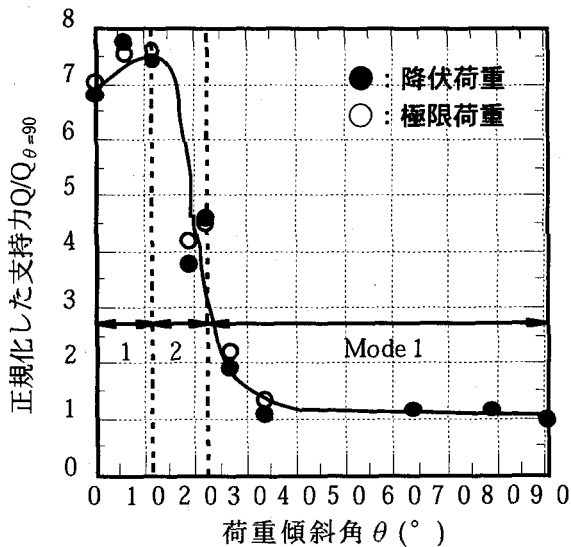


図-19 アクリル杭, $D=200$

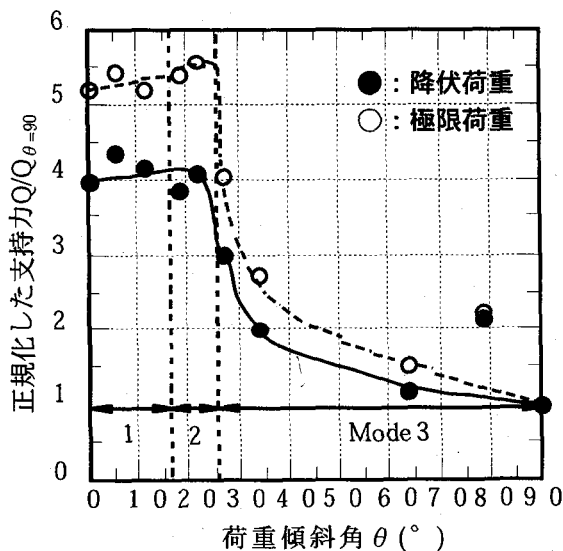


図-20 アクリル杭, $D=440$

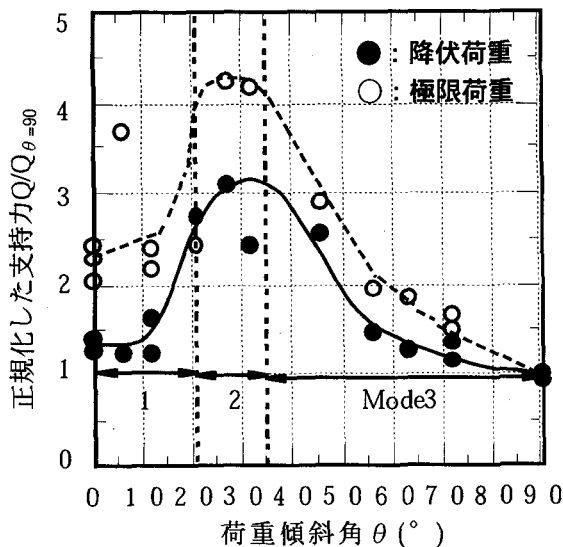


図-21 アルミ杭, $D=600$

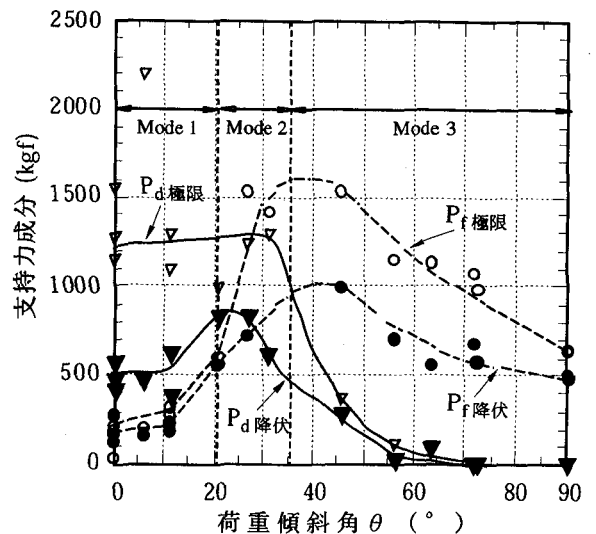


図-22 荷重傾斜角と支持力成分の関係

すなわち、つり合い破壊領域は杭の寸法、根入れ、および支持力比等に依存すると考えられる。

変位増分ベクトルの方向は、荷重傾斜角 θ が限界傾斜角 θ_{cr} より小さい時は、変位増分ベクトルが下向で、方向はあまり変化しない。この時は鉛直沈下が支配的であり、破壊モードはモード1に属する。傾斜荷重効果により、鉛直支持力は荷重傾斜角 θ の増加に伴ない、図-12～14に示したように、アクリル製の模型杭 ($\phi=50\text{mm}$) では2割程度大きく、アルミ製の模型杭 ($\phi=100\text{mm}$) 杭では約6割大きくなる。

しかし、この限界傾斜角 θ_{cr} を超えると、変位増分ベクトルがほぼ水平になっている。すなわち、水平沈下が支配的であり、破壊モードはモード3に属する。この領域の水平支持力の増加は顕著であり、水平荷重のみの場合に比べて、約1.6～2.0倍の水平支持力となっている(図-12, 13, 14を参考)。

今回(H8年度)の杭の載荷試験では、モデル杭の先端にロードセルを設置しているため、先端支持力 P_d と周面支持力 P_f が求められる。ここで、周面支持力は鉛直荷重のみの場合は周面摩擦力であり、水平荷重のみの場合は受働抵抗であり、中間はそれらの組合せである。図-22は荷重傾斜角 θ と先端支持力と周面支持力との関係を示したものである。破壊モード1の領域では、荷重傾斜角 θ の増加に伴って、先端支持力 P_d が増加していく傾向が見られる。垂直破壊領域とつり合い破壊の領域の境界では、先端支持力 P_d が最大値になっている。しかし、この境界を超えると、水平破壊モード(モード3)となるため、先端支持力は減少する。

一方、周面支持力 P_f は、垂直荷重のみの場合、周面支持力 P_f は最も小さい。荷重傾斜角 θ の増加に伴って、周面支持力 P_f は増加し、つり合い破壊の領域の近くで周面支持力 P_f は大きく発揮され、最大周面支持力はつり合い破壊領域と水平破壊領域の境界で生じる。但し、破壊

モード3の領域に入ると、周面支持力 P_t は減少する。さらに水平荷重のみの場合($\theta = 90^\circ$)は、支持力はすべて周面支持力 P_t となっている。

このため、先端支持力 P_d と周面支持力 P_t からなる合成支持力 P はつり合い破壊領域で最大値となることがわかる。

4. あとがき

著者らは、大型三軸土槽を作製し、三種類の模型杭を用いて、傾斜荷重を受ける杭の支持力試験を行った。主要な結果は以下のとおりである。

- (1) 杭の支持力には荷重経路依存性はみられない。
- (2) 従来から提案しているように、傾斜荷重を受ける杭の支持力限界には荷重の組合せにより、鉛直方向破壊、水平方向破壊および鉛直と水平が同時に限界に達するつり合い破壊領域が存在する。
- (3) 傾斜荷重下の鉛直杭の支持力特性は斜杭の水平荷重下の支持力特性に類似している。
- (4) V-H空間での支持力包絡線の形は杭の寸法、根入、粗滑等に影響されるが、鉛直のみ、水平のみの極限支持力比によって大きく変わる。その比率が1に近いほど包絡線のふくらみは大きく、合成支持力が大きくなる。
- (5) V-H空間での支持力包絡線と、変位増分ベクトルの関係について直交則は見い出せなかった。特に包絡線のふくらみが大きいほどその傾向が強い。

今後、以上の実験事実を反映させた理論的な検討を行い、傾斜荷重下における杭の支持力式を提案することを考えている。

参考文献

- 1) Meyerhof, G. G. : The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads, Proc. of the 3rd Int. Conf on soil Mech & Foundation Engineering,

Vol. 1, pp440-445, 1953.

- 2) Vesic, A. C. : Bearing capacity of shallow foundations, Foundation Engineering Handbook, 1st ed, ed. H.F. Winterkom & H.Y. Fong, New York, pp.120-147,1975.
- 3) Hansen, J.B. : The Danish Technical Institute, Bolletion No.11, pp.38-46, 1961.
- 4) 駒田敬一 : 二次元傾斜荷重に対する地盤支持力の計算図表, 土木研究所報告第135号, 1969.
- 5) 日本道路協会 : 道路橋示方書IV下部構造編, 1996.
- 6) 坂田隆博, 前田良刀, 松井謙二, 落合英俊 : 傾斜荷重下の単杭の支持力特性とその考察, 構造工学論文集, Vol.42A, pp1213-1220, 1996,3.
- 7) 横田康行, 坂田隆博, 前田良刀, 徐光黎, 安福規之 : 組合せ荷重と杭の支持力特性 (大型三軸土槽), 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp594-595, 1997,3.
- 8) 前田良刀, 坂田隆博, 横田康行, 落合英俊, 安福規之 : 鉛直沈下を考慮した杭の支持力問題, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp596-597, 1997,3.
- 9) 落合英俊 : ヤーキーの静止土圧係数式, 土と基礎 vol.33, No.4, pp61-63, 1985.
- 10) 土質工学会 : 土質工学会規準, 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 1993.
- 11) 坂田隆博, 前田良刀, 市川博康, 禿和英 : 傾斜荷重の荷重経路と杭の支持力, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp530-531, 1996,3.
- 12) 安福規之, 落合英俊, 大倉章弘, 前田良刀 : 荷重経路に着目した組合せ荷重下の杭基礎支持力, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp590-591, 1997,3.
- 13) 土質工学会 : 杭基礎の設計法とその解説, 第6章杭の水平支持力の算定, pp.458-462, 1985.
- 14) G.G.Meyerhof, Ggopal Ranjan: The bearing Capacity of Rigid Piles Under Inclined Load in Sand I: Vertical Piles, Canadian Geotech Journal 9, pp.430-446,1972.

(1997年9月26日受付)