

東京国際空港進入灯基礎の水平載荷試験と3次元解析

LATERAL LOADING TEST AND 3D FEM ANALYSIS OF STEEL PIPE PILE FOUNDATIONS FOR APPROACH LIGHTING SYSTEM
AT TOKYO INTERNATIONAL AIRPORT

塩見雅樹*	高橋邦夫**
Masaki Shiomi	Kunio Takahashi
末吉健太郎***	川端規之****
Kentaro Sueyoshi	Noriyuki Kawabata

*運輸省第2港湾建設局 横浜調査設計事務所所長 (〒231 神奈川県横浜市中区北仲通5-57)

**工博 運輸省港湾技術研究所 土質部基礎工研究室長 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

*** (株)構造技術センター 技術本部 第三部部长 (〒112 東京都文京区関口1-13-19)

**** 鋼管杭協会 (〒103 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10)

Full scale lateral loading test of steel pipe pile foundations which consist of four battered piles have been performed at the offshore of Tokyo International Airport construction site. In order to construct the new airfield at the offshore of the existing airport, the approach lighting system signals are designed to be supported by four battered steel piles with the diameter of 1000mm and 60m in length.

It is still not easy to design the pile foundation designed by only battered piles, because the lateral resistance behavior of such foundation is quite complicated. Although the development of FEM by the large computer, 3D soil and pile interaction problems involves some research aspects.

Here, the full scale lateral loading test of such group piles are done and the results are ensured by the 3D FEM analysis including the subgrade soil springs.

1. はじめに

羽田沖合展開事業による東京国際空港の建設に際し、新B滑走路進入灯の基礎は、斜杭のみで構成される4本の鋼管杭(直径1000mm,長さ60m)で設計されている。この立体斜杭は、100mスパンの点検用のトラス橋を支持する橋梁基礎であるが、海底面からの突出長さが大きく、15°の傾きを持つ4本杭からなっている。このような立体斜杭基礎は、水平荷重の比率が大きい場合には、直杭のみで構成される杭基礎よりも斜杭の適用によって基礎の経済化が可能となる。しかし、斜杭のみで構成される杭基礎に関しては、支持力機構及び水平抵抗挙動の両者につ

いて十分に解明されていない問題も多く、設計に際しては種々の検討がなされている。

本報告は建設された立体斜杭基礎を用いて、水平載荷試験を実施し、当初設計の妥当性を検証すると共に、3次元構造である立体斜杭基礎の有限要素解析を行い、これまでの2次元構造での杭軸直角方向地盤反力係数及び杭軸方向バネ定数の適用性について検討したものである。

以下に水平載荷試験の概要と3次元FEMの解析結果の概要を記す。

2.1 橋脚概要

試験の対象としたP₁、P₂橋脚とも斜杭4本で構成され、杭頭部をコンクリートで剛結とした構造である。斜杭の角度は、平面方向に45°鉛直方向に15°であり杭の長さはP₁橋脚が51.5m、P₂橋脚が61.0mである(図2-2参照)。

2.2 地盤概要

地層断面図を図2-3に示す。これによると支持層であるN値50以上の洪積層(Ds3)は、AP-40m～AP-50mと非常に深いところにあり、その上部に軟弱な浚渫埋土や沖積土層が厚く堆積している。Ac1層の一軸圧縮強さ q_u は、 0.24kgf/cm^2 と非常に小さい。Ac2層の q_u は、バラツキはあるが 1.72kgf/cm^2 程度であり、強度は深度方向に増加している。

変形係数(E50)は、Ac1層が12kgf/cm²、Ac2層は86kgf/cm²である。

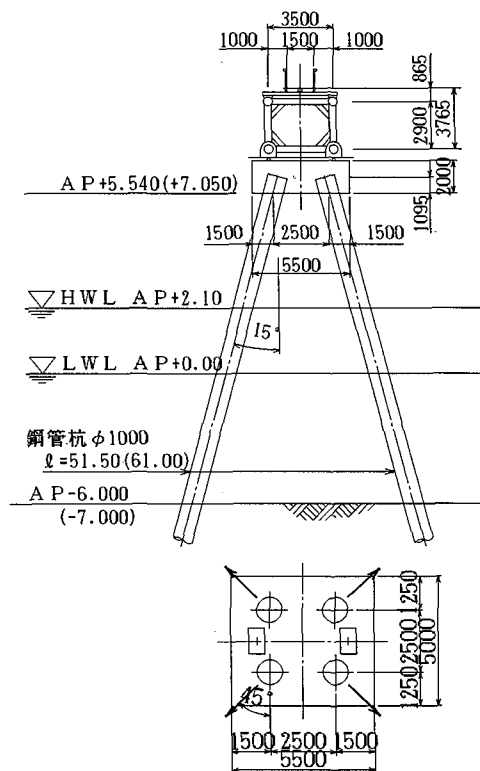


圖 2-2 P_1 (P_2) 橋脚

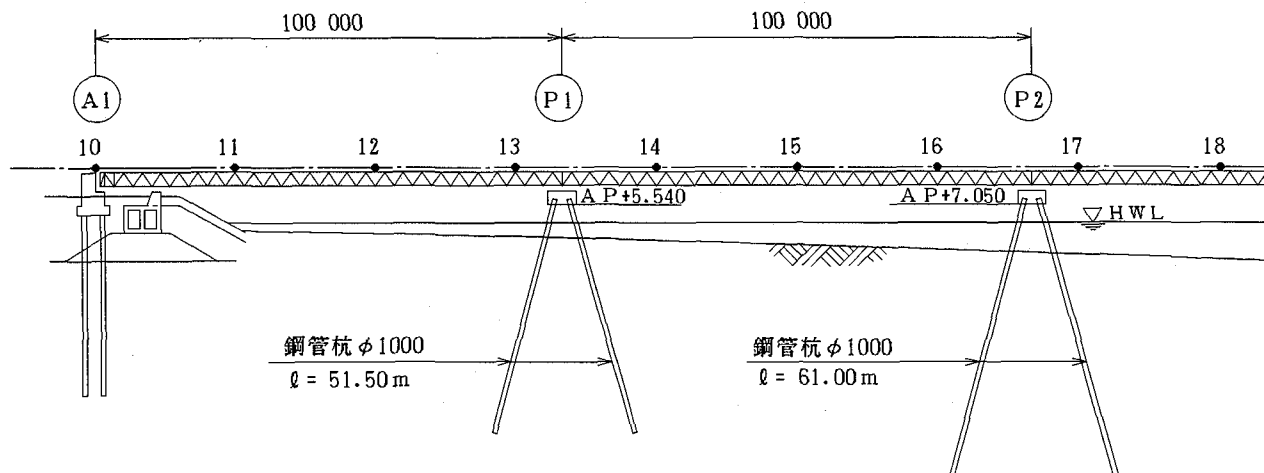


图 2-1 一般图

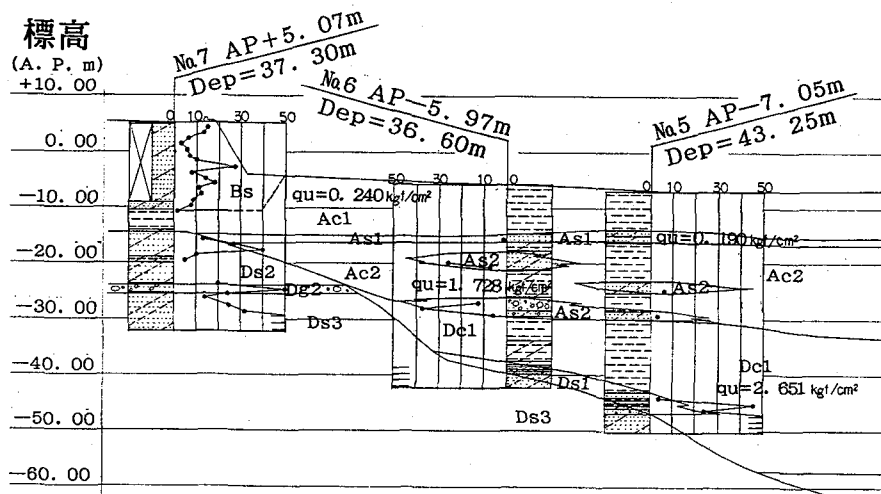


图 2-3 地層断面图

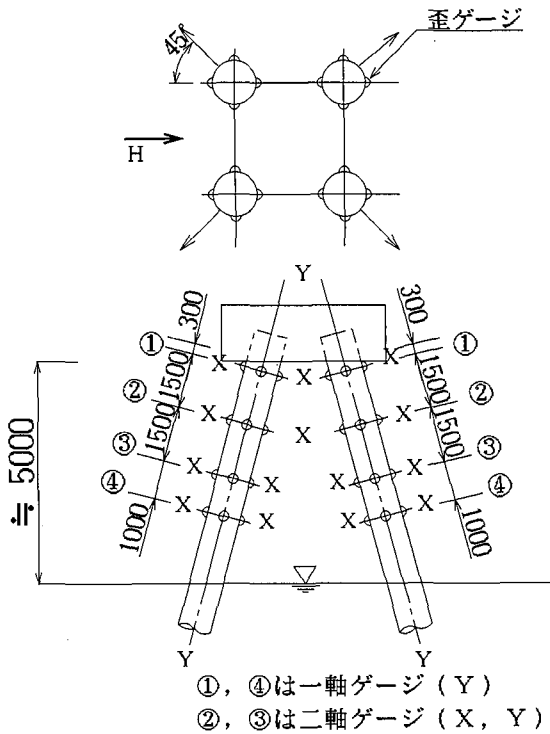


図 3-3 歪ゲージ取付位置

3.4 測定方法

(1) 荷重段階

載荷は、一方向多サイクル方式とし、荷重段階は表3-2に示す。荷重保持時間及び測定時間は、表3-3に示す。

荷重段階は、P C 鋼線の初期張力(30tf)を考慮したものである。後のデータ整理、解析には、初期張力30tfを0点としたロードセルによる測定荷重(0~200tf)を用いている。

(2) 計測方法

計測は、P₁、P₂橋脚の作業足場上で、各々独自に行った。載荷についてもP₁、P₂橋脚に各々ジャッキを設置しており、ジャッキのストロークを見ながら載荷した。

表 3-2 荷 重 段 階

サイクル	荷 重 段 階 (tf)
1(40tf)	30-40-30
2(80tf)	30-40-60-80-40-30
3(120tf)	30-40-80-100-120-80-40-30
4(160tf)	30-40-80-120-140-160-120-80-40-30
5(200tf)	30-40-80-120-160-180-200-160-120-80-40-30
6(230tf)	30-80-160-180-200-230-200-120-40-30

(備考)アンダーラインの荷重；処女荷重階

表 3-3 荷重保持時間・測定時間

	保持時間	測定時間
処女荷重 履歴荷重	2 分	0, 2 分
0 荷 重	15 分	0, 2, 5, 10, 15 分

各橋脚の連絡はトランシーバーを利用した。

計測システムは、図3-4に示すフローを基本とした。

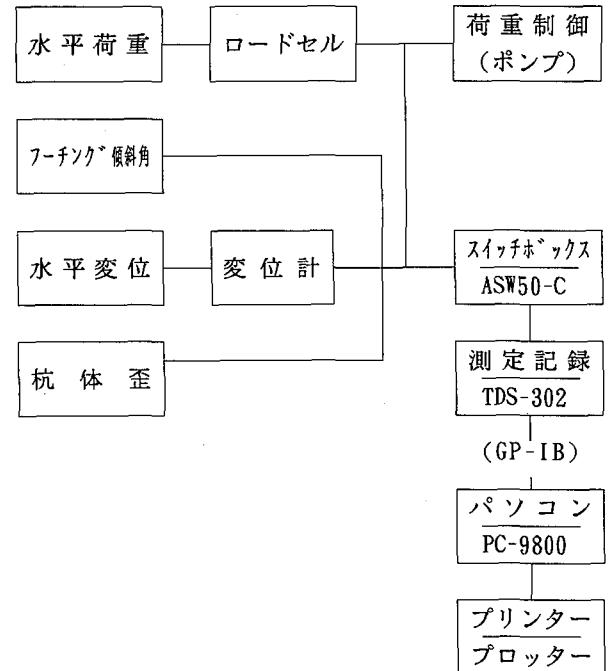
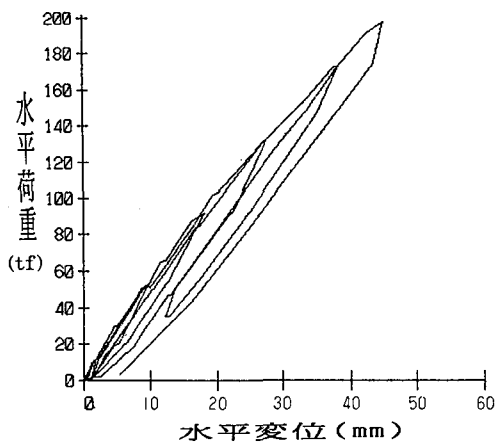


図 3-4 測定システム

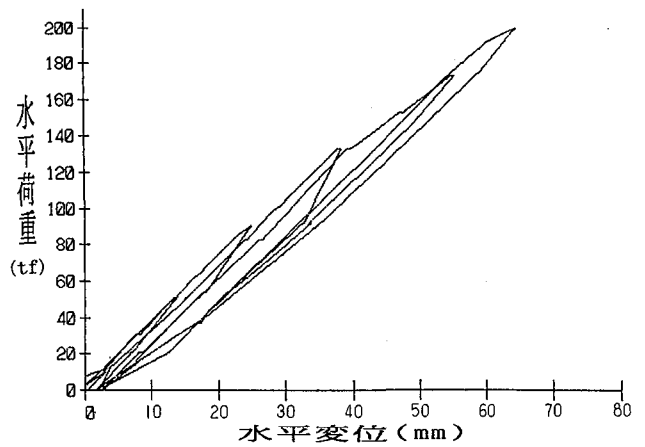
4. 試験結果

荷重～変位曲線を図4-1に示す。杭頭変位は、最大荷重時の200tf(ロードセル荷重)でP₁橋脚は45mm、P₂橋脚で64mmであった。荷重と変位の関係は、100tfまでは直線を示し、それ以後は緩やかな曲線状態を示している。フーチングの回転角を傾斜計で測定したが、P₁橋脚で、 $1.8 \times 10^{-4} \text{ rad}(0.01^\circ)$ 、P₂橋脚で $5.6 \times 10^{-4} \text{ rad}(0.03^\circ)$ と極めて小さな値を示しており、回転による変位は微少であった。

図4-2、図4-3に歪値から求めた曲げモーメント分布図、軸力分布図を示す。最大モーメントは、P₂橋脚で、212.5t・mであった。第1断面の軸力は、杭頭部が中詰めコンクリートの影響を受けていたため、軸力の評価が難しく図4-3には表示していない。また、第4段目の軸力は歪みゲージは海面付近に取付けていたため、誤差が大きかったものと思われる。

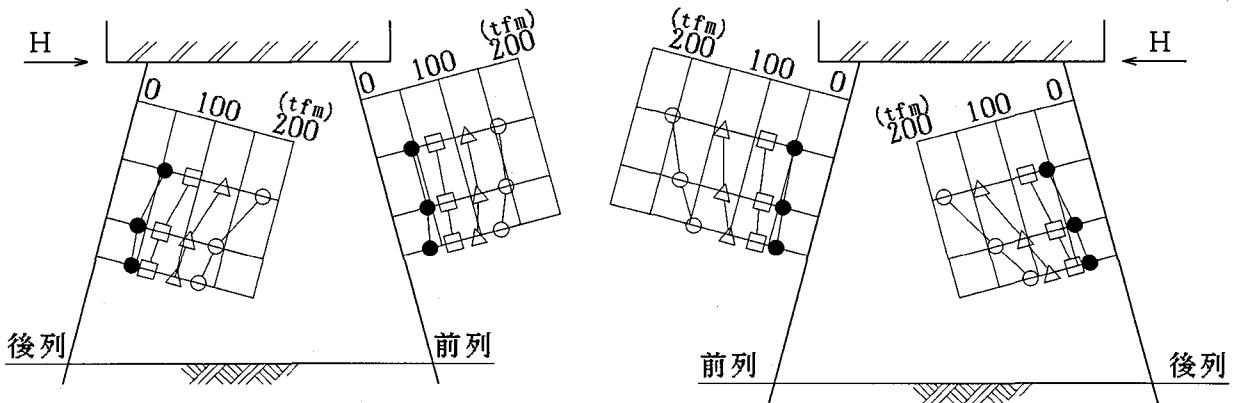


(a) P₁



(b) P₂

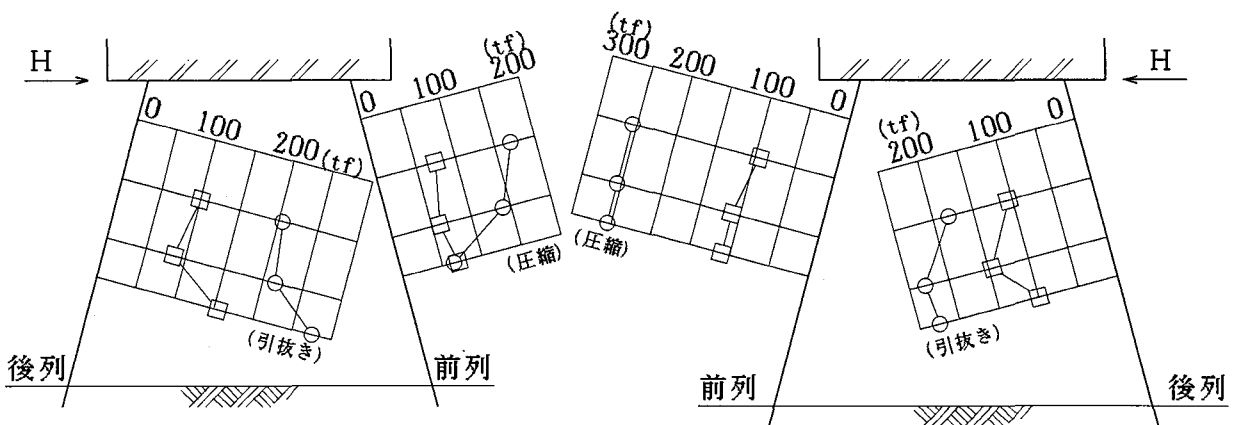
図 4-1 荷 重 ~ 変位曲線



(a) P₁

(b) P₂

図 4-2 曲げモーメント分布



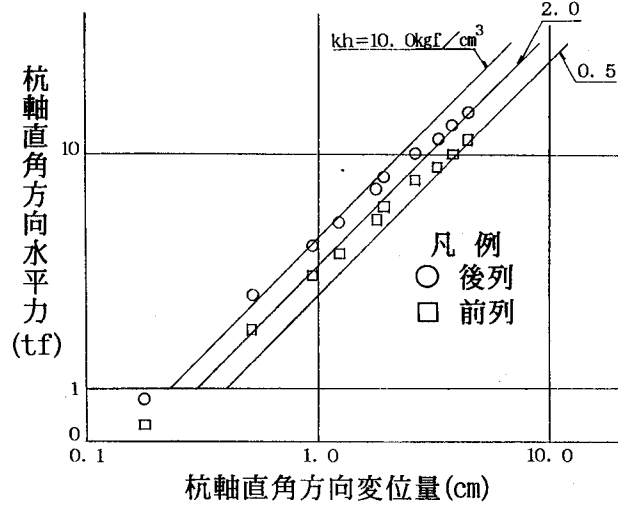
(a) P₁

(b) P₂

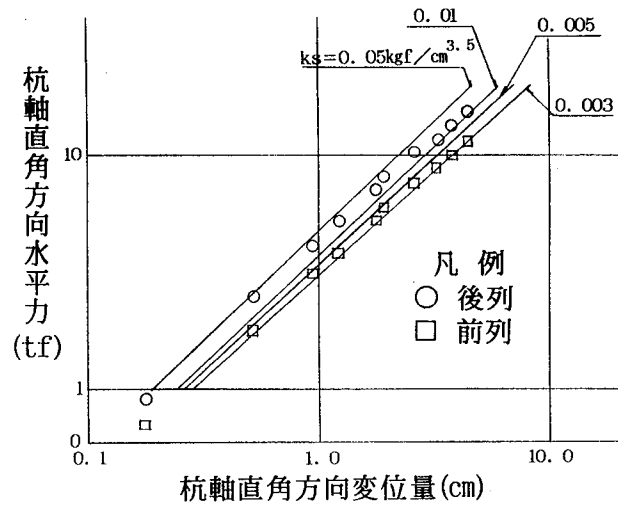
図 4-3 軸 力 分 布

杭軸直角方向地盤反力係数は、Changの方法と、港研方式²⁾(S型地盤)の2通りの方法により求めた。図4-4に推定k値と実測値の関係を示す。ここで荷重は曲げモーメントから求めたせん断力とし、フーチングの回転がないものとして前列杭(イバター)と後列杭(アバター)に分けてk値をプロットした。この図からChangの方法では、前列杭は $kh=0.5\sim2.0\text{kgf/cm}^3$ 、後列杭は $kh=2.0\sim10.0\text{kgf/cm}^3$ 、港研方式では、前列杭は $ks=0.003\sim0.005\text{kgf/cm}^3$ 、後列杭は $ks=0.01\sim0.05\text{kgf/cm}^3$ であった。

なお、上記値は P_1 について求めたものである。



(a) Y. L. Changの方法



(b) 港研方式 (S型地盤)

図 4-4 荷 重 - 変 位 量

5. 試験結果と地盤反力係数

5.1 杭軸直角方向地盤反力係数の算定

単独直杭の載荷試験の杭軸直角方向地盤反力係数については、杭頭の水平力と水平変位を用いて逆算k値が算定できる。群杭でかつ斜杭から構成される杭基礎の個々の杭の逆算k値の算定は容易ではない。本試験は3次元的な群杭の水平載荷試験であるので、図 5-1に示す空間

座標を設定することによって2次元k値と同等なk値の算出を試みた。

図 5-1は杭基礎を構成する1本の杭を抜き出し、x-y-z空間内に示したものである。荷重方向をx軸、杭軸方向をp軸とする。p軸とx、y、z軸とのなす角を θ_x 、 θ_y 、 θ_z とすると、この空間でp軸とx軸とで形成される平面(p-x平面)を考えることにより問題が2次元化されて載荷試験における逆算k値の算定が容易となる。このp-x平面でp軸とx軸のなす角度は余弦定理により、次式で示され、本試験の場合、 $\theta_x=79.45^\circ$ となる。

$$\theta_x = \cos^{-1}(\sin \theta_z \times \cos \alpha) \quad \text{----- (1)}$$

図 5-2の杭軸直角方向のせん断力 H' 、杭軸直角方向の変位 δ' 、杭頭での拘束モーメント M_0 、フーチングの回転角 θ_0 の関係は次式で与えられる³⁾。

$$\begin{Bmatrix} \delta' \\ \theta_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{(1+\beta h)^3 + 1/2}{3EI\beta^3} & \frac{-(1+\beta h)^2}{2EI\beta^2} \\ \frac{-(1+\beta h)^2}{2EI\beta^2} & \frac{1+\beta h}{2EI\beta^2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} H' \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad \text{--- (2)}$$

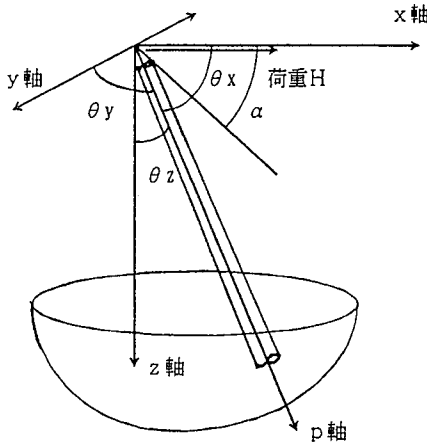


図 5-1 杭の空間座標

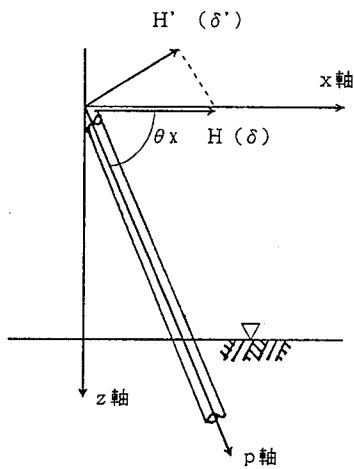


図 5-2 p-x平面

実験において、杭頭での δ 、 θ_0 、 H' および M_0 が測定されているので、(2)式より二つの k 値が算出される。しかし、 θ_0 の測定精度は δ' のそれよりも低いので(2)式中の δ' から算出される k 値を表5-1に示す。P1およびP2脚の逆算 k 値は0.5~5.0kgf/cm³の間にあり、港湾基準²⁾に示される $k_H=0.15N=0.3kgf/cm^3$ よりもかなり大きな値となった。

また、前列杭(out batter)と後列杭(in batter)の k 値は後者の方が大きくなっており、港研における模型実験⁴⁾と同様な結果が得られた。

表5-1 P1, P2橋脚の杭軸直角方向地盤反力係数(H=200tf)

	P 1		P 2	
	前列杭	後列杭	前列杭	後列杭
せん断力 H' (tf)	19.3	22.0	19.5	22.0
モーメント M_0' (tf・m)	189	196	202	205
k_H 値 (kgf/cm ³)	0.5	1.4	1.2	5.0
k_{H2}/k_{H1}	2.8		4.2	

5.2 杭軸方向バネ定数

杭軸方向バネ定数は、載荷試験において杭体に発生する軸力と軸方向の変位置から算出できる。

杭軸方向の変位置は次式によって算出した。

$$w_0 = \delta \times \cos \theta_x \pm R \times \theta_0 \times \sin \theta_x + \delta_v \text{ ----- (3)}$$

ここに、 w_0 ：杭頭部の軸方向変位

δ ：フーチング水平変位

R ：杭頭とフーチング中心との距離

θ_0 ：フーチングの回転角

δ_v ：フーチング重心の鉛直変位

(ただし δ_v は実測による値が微少であるため省略する。)

ひずみゲージから算出される軸力を用いて杭軸方向バネ定数 k_v を算出すると表5-2のようになる。港湾基準²⁾での設計式では、 $k_v = 2AE / (L_t + \lambda)$ ではP1, P2橋脚に対しそれぞれ396tf/cm、280tf/cmであり、ほぼ同等なバネ値となっている。

表5-2 P1, P2橋脚の杭軸方向バネ定数(H=200tf)

	P 1		P 2	
	前列杭	後列杭	前列杭	後列杭
平均軸力 (tf)	156	-219	256	-213
軸方向変位(cm)	0.7	0.7	0.81	0.81
k_v 値 (tf/cm)	223	313	316	266

6. 立体解析による試験結果のシミュレーション

6.1 3次元構造解析モデル

立体斜杭基礎の水平抵抗挙動を把握する事を目的として、3次元の有限要素解析を実施して、載荷試験結果との比較を試みた。3次元杭構造の有限要素解析には種々の手法が提案されているが、ここでは石油掘削用の海洋構造物の解析に適用される解析法に基づくシミュレシ

ョンを行った。3次元有限要素解析における解析の前提条件は以下の通りである。

- 1) 地盤の水平抵抗はバイニリア型の弾塑性地盤反力でモデル化する(図6-1)。
- 2) 杭軸方向のバネは海底面での軸方向バネ定数が港湾基準式²⁾と等しくなるようなバネ要素を杭先端に設定する。従って、周面摩擦による杭の軸力の減少は考慮しない。
- 3) 突出部の杭要素は6自由度の3次元梁要素を用いる(図6-3)。
- 4) 頂版は剛性の等しいコンクリート梁断面でモデル化する。梁要素の中心軸は頂版下面におく。
- 5) 杭先端での水平変位と回転変位は拘束する。

図6-2にP1及びP2橋脚の3次元有限要素モデルを示す。図6-3に示す座標系に基づく杭体の剛性マトリクスは(4)式の通りである⁵⁾。地中部の杭の変形に関しては(5)式で示される杭体の水平方向変位に関する伝達マトリクスを深さ方向に連結して杭先端での境界条件に適合するような海底面での撓性マトリクス(6)式を誘導する。図6-4は伝達マトリクスの誘導における座標軸の設定である。(4)式と(6)式を合成して3次元斜杭の全体剛性マトリクスが解ける。

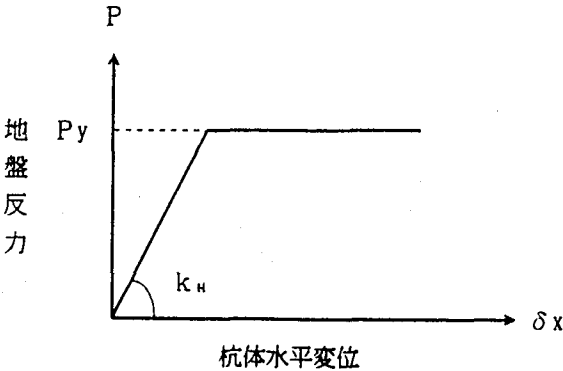


図6-1 p-yの関係

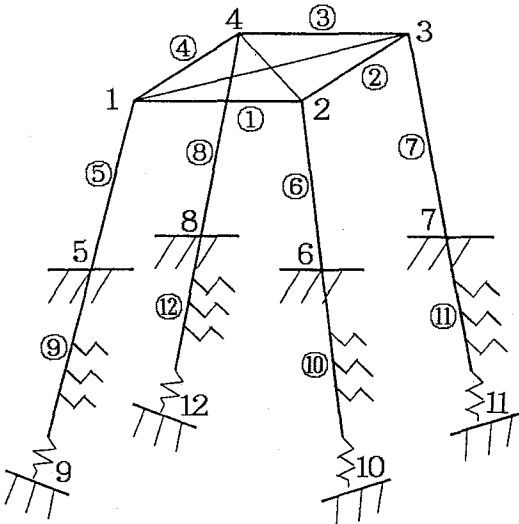


図6-2 3次元有限要素モデル

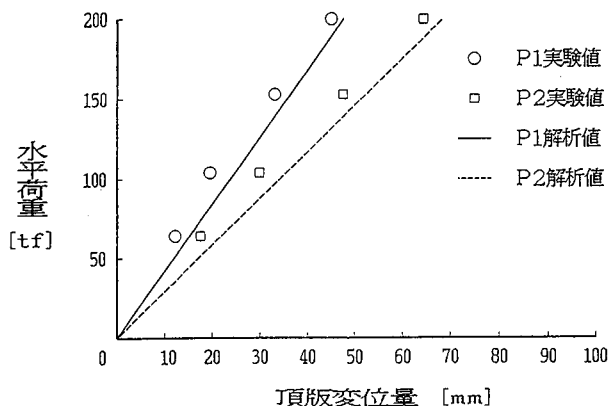


図 6-5 港湾基準式に基づく荷重-変位解析結果

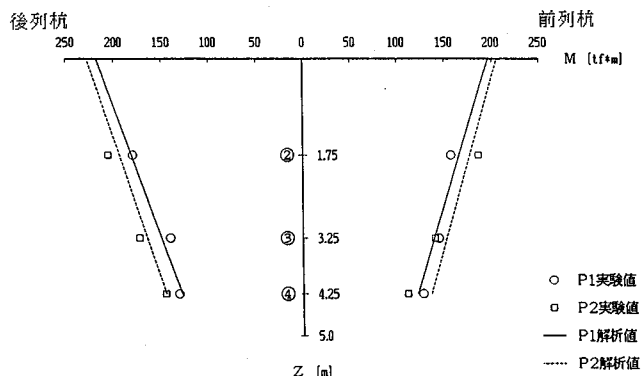


図 6-6 港湾基準式に基づくモーメント解析結果(H=200tf)

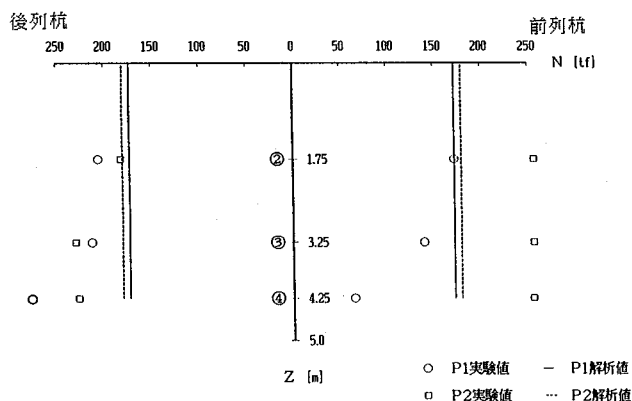


図 6-7 港湾基準式に基づく軸力解析結果

6.3 解析のパラメトリックスタディー

立体斜杭の挙動に関する土質定数の影響を評価する目的で以下の解析定数をパラメトリックに変動させて、その感度分析を行った。

① 杭軸方向バネ定数 K_v

② 杭軸直角方向地盤反力係数

K_{H1} (前列杭), K_{H2} (後列杭)解析ケースの一覧表を表 6-1に示す。

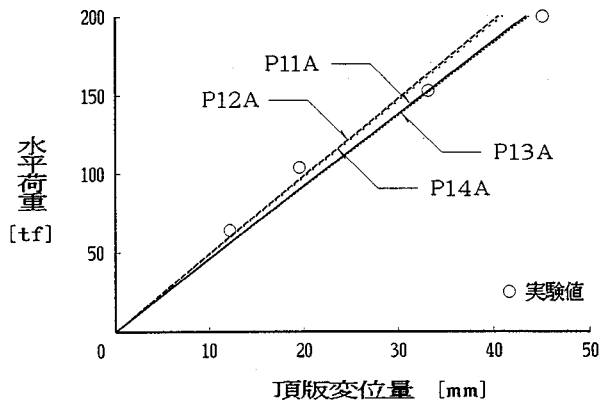
パラメトリックスタディーの結果を図 6-8～図 6-10に示す。

図 6-8(a)～(c)はP1橋脚に関して行った荷重-変位関係の解析結果である。荷重-変位関係に与える土質定数の影響は、杭軸直角方向地盤反力係数 K_H よりも、杭

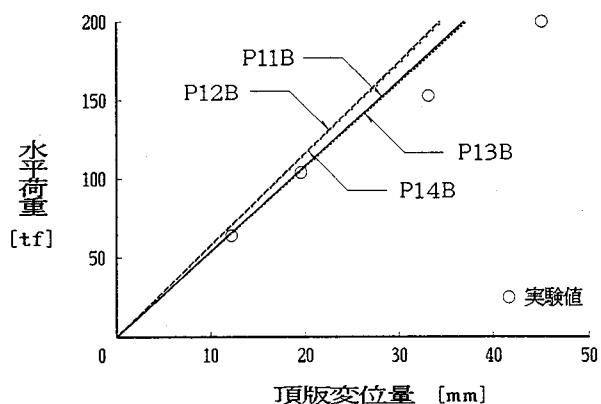
軸方向バネ定数の影響が大きかった。

表6-1 パラメトリックスタディーにおける解析定数の決定

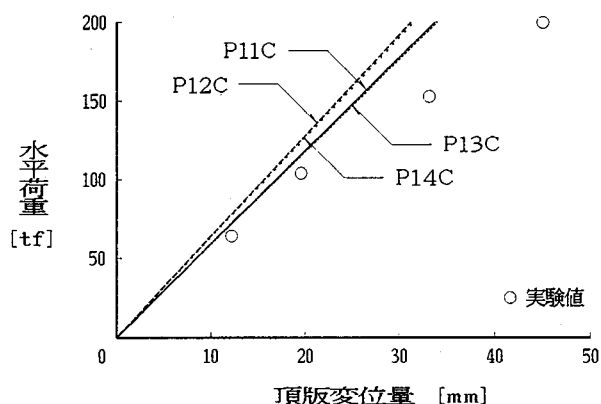
ケース名	K_{H1}	K_{H2}	K_v
P11A	1.0	1.0	423
P11B	1.0	1.0	846
P11C	1.0	1.0	1692
P12A	2.0	2.0	423
P12B	2.0	2.0	846
P12C	2.0	2.0	1692
P13A	0.5	2.0	423
P13B	0.5	2.0	846
P13C	0.5	2.0	1692
P14A	1.0	4.0	423
P14B	1.0	4.0	846
P14C	1.0	4.0	1692



(a) $k_v=423\text{tf/cm}$ の場合



(b) $k_v=846\text{tf/cm}$ の場合

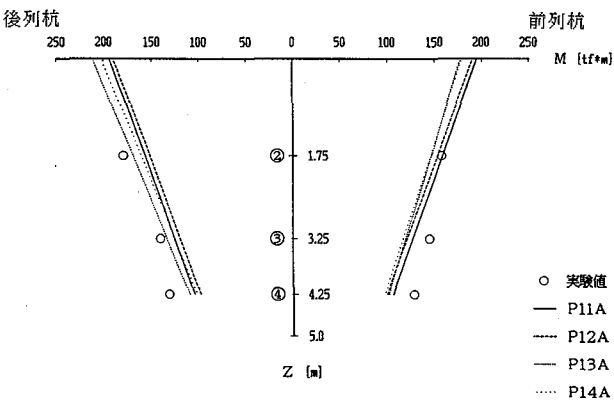


(c) $k_v=1692\text{tf/cm}$ の場合

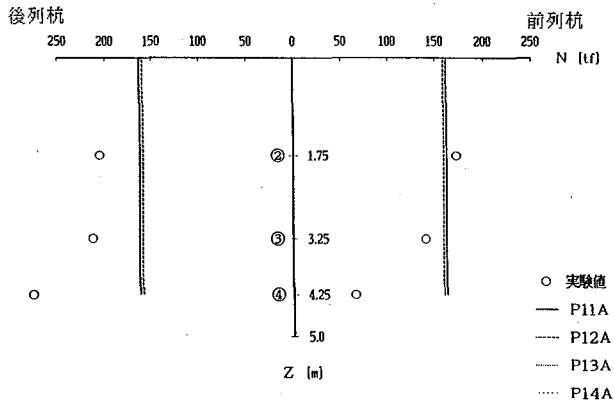
図 6-8 荷重-変位解析結果

図 6-9(a)~(c)は土質定数を変化させた場合の前列杭と後列杭に関する曲げモーメント分布の影響を調べたものである。荷重-変位関係とは異なり K_v を変化させても、モーメント分布はそれほど変化しない。実験結果に現れている後列杭に発生している大きな曲げモーメントを解析で反映させるためには、 k_H の前列杭と後列杭の値の比をさらに大きくする必要があると考えられる。

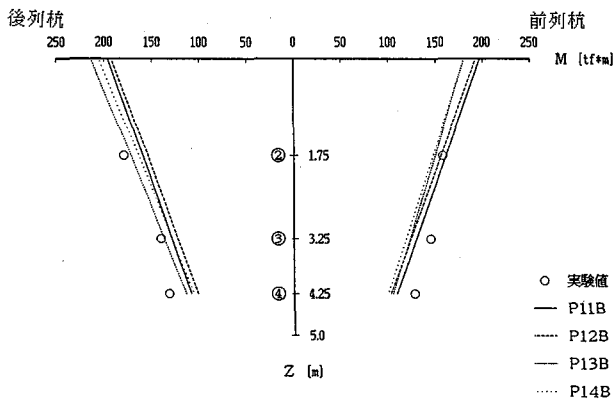
図 6-10(a)~(c)の軸力分布の解析結果は K_v や k_H に変化に対する感度が小さく、実験値と適合するパラメータが見いだせなかった。特に、後列杭の引抜力がいずれの解析結果よりも大きくなっている。この事は、解析上の問題点ばかりではなく、実験における軸力測定の問題にも起因していると考えられる。



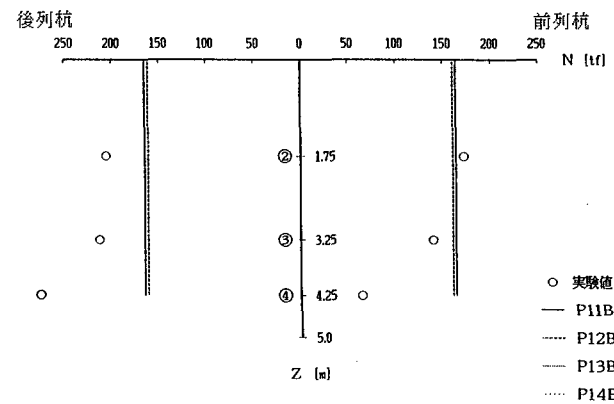
(a) $k_v=423\text{tf/cm}$ の場合



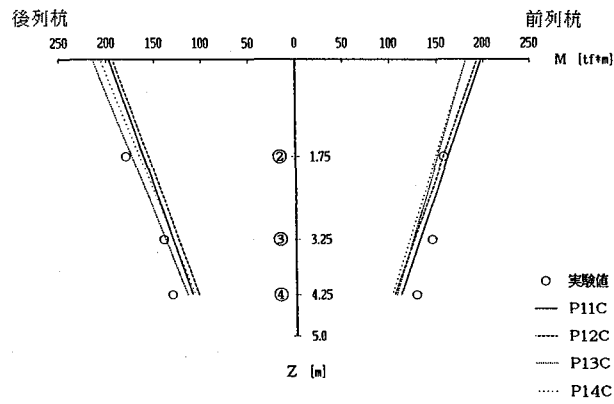
(a) $k_v=423\text{tf/cm}$ の場合



(b) $k_v=846\text{tf/cm}$ の場合

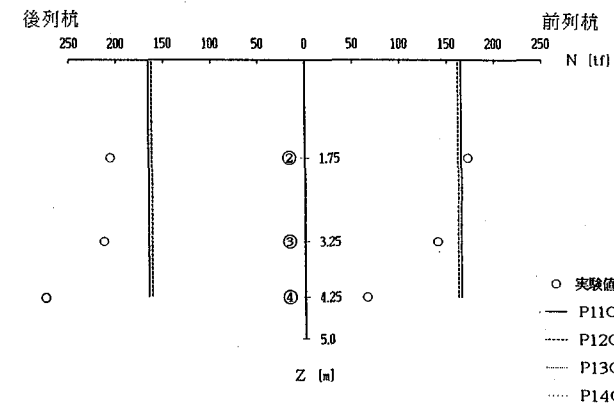


(b) $k_v=846\text{tf/cm}$ の場合



(c) $k_v=1692\text{tf/cm}$ の場合

図 6-9 曲げモーメント分布の解析結果



(c) $k_v=1692\text{tf/cm}$ の場合

図 6-10 軸力分布の解析結果

6. 4平面解析による簡易解析法の検討

3次元構造である立体斜杭基礎の解析をより簡易な解析法によって評価できれば、設計への反映が容易となる。これまでに斜杭を有する杭基礎の設計は、道路橋示方書の変位法に基づく設計、または斜杭には水平荷重のみを分担させる設計が適用されてきた。本研究で対象とした基礎は3次元構造という特徴のみでなく、地盤面からの突出長さが長いという特徴も有している。このような基礎構造においては、鋼管杭に発生する軸力と曲げモーメントの適切な評価のみならず基礎の捩じり剛性等も十分に検討される必要がある。ここでは、立体斜杭の簡易解析法を検討する事を目的として、以下のような簡易構造モデルによる検討を行い、3次元有限要素解析結果との比較を試みた。

- ① 立体斜杭を図 5-1のX-Z平面に投影した2次元モデルで解析する方法。(投影法)
- ② 立体斜杭を図 5-2のp-x平面内で2次元解析する方法。(p-x法)
- ③ 地盤モデルの代替として、1/β点を固定端とする立体構造解析法。
- ④ 地盤モデルの代替として、1/β点を固定端とする投影平面構造解析。

図 6-11に立体解析と投影法及び、p-x法他の5法の荷重変形関係の比較を示す。投影法①及び1/β投影平面法④は斜杭の偏芯の影響や杭剛性の低下の影響等を考慮していないために、他の解析よりも水平剛性を大きく

評価する結果となっている。一方p-x法②は、今回のような荷重の偏芯の影響がなく、杭体の捩じり剛性が水平剛性に影響を与えない条件では、ほとんど立体解析と一致する結果となった。また1/β立体解析法③も地盤を含む立体解析法とほぼ同等な水平剛性を与えている。表 6-2に各解析法による発生断面力の差異を示す。断面力に関してもp-x解析法及び、1/β立体解析法が最も立体解析法に近い結果となっている。これより、立体斜杭の設計における簡易解析法として、p-x底面内での解析法の適用や、1/β立体解析法の適用も考えられる。

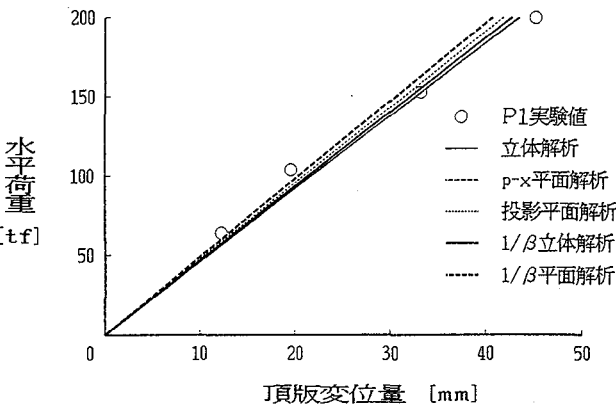


図 6-11 各種解析法による荷重-変位関係の比較

表 6-2 各簡易解析法の断面力の比較

解析法	頂版変位(mm)	曲げモーメント(tf・m)	軸力(tf)
①投影平面法	41.8(96.3%)	191.2(98.7%)	159.9(98.5%)
②p-x平面法	43.4(100.0%)	193.9(100.0%)	162.3(100.0%)
③1/β投影平面法	40.7(93.8%)	191.5(98.8%)	159.8(98.5%)
④1/β立体解析法	42.7(98.4%)	194.5(100.3%)	162.6(100.2%)
⑤立体解析法	43.4(100.0%)	193.9(100.0%)	162.3(100.0%)

7. まとめ

実構造物の立体斜杭の水平載荷試験結果を地盤の影響を考慮した3次元解析によって、3次元構造の有限要素法によるモデル化の妥当性と従来から提案されている土質定数の適用が可能であることを示した。特に、杭軸直角方向地盤反力係数と杭軸方向バネ定数に関して港湾基準による設計定数や、久保による斜杭の影響の評価法の適用性について試験結果及び解析の結果に基づきその妥当性を示した。

また、簡易解析による近似に関して、荷重と斜杭で構成される平面内(p-x面)での解析で、近似が可能である事を示した。しかしながら偏芯荷重や鉛直荷重の影響も大きいものと考えられ、1/β立体解析法の適用等の、

より詳細な検討が必要であろう。

【参考文献】

1) 土質工学会；「杭基礎の水平載荷試験基準・同解説」
2) 日本港湾協会；「港湾の施設の技術上の基準」
3) 横山幸満；「くい構造物の設計法と計算例」山海堂
4) 久保浩；「くいの横抵抗に関する実験的研究」
運輸技術研究所報告，第12巻，第2号
5) W.M.Jenkins；「マトリックス構造解析法」
奥村敏恵他訳

(1994年9月14日受付)