

深い基礎の水平抵抗と形状効果

—特に、前面と側面の地盤反力係数について—

Horizontal Resistance and Shape Effects of Deep Foundations

—Especially, the Subground Reaction Coefficient of the Front and Side of Piles—

富沢幸一* 根岸正充**

Kouichi TOMISAWA and Masamitsu NEGISHI

深い基礎の水平挙動については不明な点が多く、水平抵抗における形状効果の的確な解析は明らかでない。

このため、大型の室内模型実験により、深い剛体基礎の水平挙動と形状効果について調査した。

この結果、形状効果は杭に作用する全地盤反力 P を前面地盤反力 P_h と側面地盤反力 P_r に分離すること ($P=P_h+P_r$) により解析できること、杭前面載荷幅 D_1 、杭側面幅 D_2 とすると P_h および P_r には $P_h \propto D_1^{5/8}$ 、 $P_r \propto D_2$ の関係がみられることなどを明らかにした。《基礎；水平抵抗；形状効果；地盤反力》

Many problems related to the horizontal behavior of deep foundations remain unsolved and exact analysis methods of shape effects have been not established. Therefore the relation between the horizontal behavior and shape effects of deep rigid foundations have been investigated with large indoor model tests.

The results confirm that shape effects can be analysed by dividing the sub-ground reaction, P , into front, P_h , and side, P_r , ($P=P_h+P_r$) and further that P_h and P_r are related to $P_h \propto D_1^{5/8}$, $P_r \propto D_2 \times (D_1: \text{front loading breadth of piles, } D_2: \text{side length of piles})$.

Keywords: foundation, horizontal resistance, shape effect, subground reaction.

1. ま え が き

最近、現場では鋼管矢板基礎や地中連続壁を利用した基礎など、さまざまな断面形状を有する大規模基礎^{1),2)}が採用されるようになってきた。

しかし、それらの深い基礎はその断面形状により水平抵抗が種々異なり、水平挙動については不明な点が多い。

このため、室内や現場においてこれら深い基礎の水平抵抗に関連した一連の試験調査を行い、検討を加えてき

たが、今回その一環として、室内で断面形状および載荷幅、側面幅を種々変化させた試験杭を設置し、水平載荷試験を実施した。

本報文では、その実験内容と結果について述べ、深い基礎の水平挙動の適切な解析手法（地盤反力モデル）および断面形状によって水平抵抗が異なる形状効果の推定、特にそのバネ特性について若干の考察を加えた。

*基礎工研究室員 **同室長

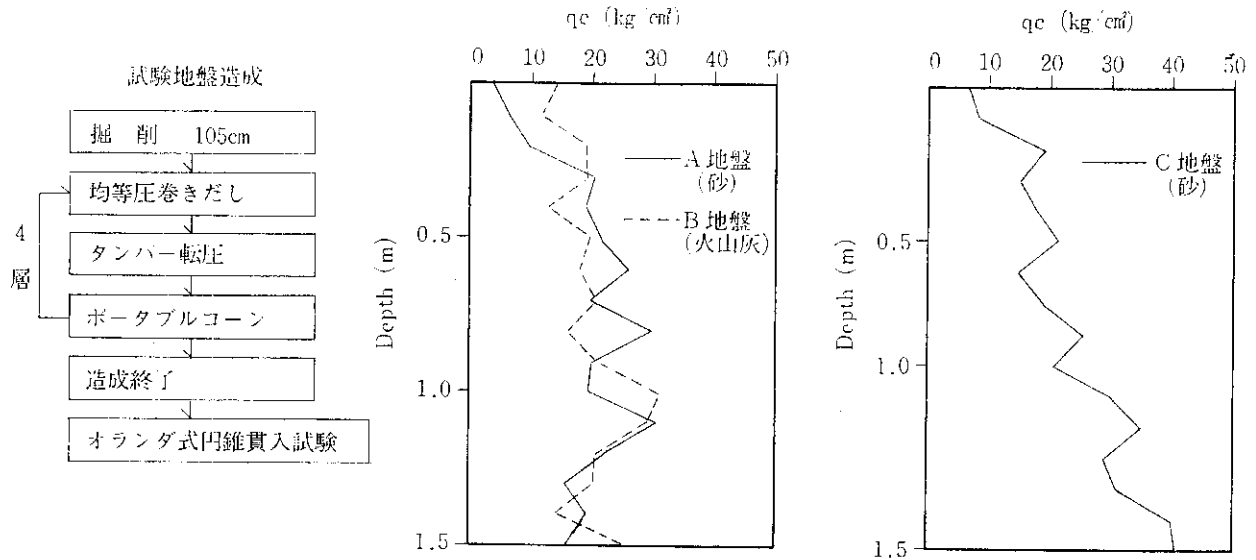


図-1 試験地盤 q_c 分布図

2. 試験概要

2-1 試験地盤

地盤材料としては、砂 (A, C 地盤) および火山灰 (B 地盤) の 2 種類を用いた。それぞれの試験地盤は、室内のテストピット ($A=4.5\text{ m} \times 4.3\text{ m}$, $H=2.5\text{ m}$) 内で、試験に必要な層厚 1.05 m を 4 層に分けてタンバーにより締固め造成した。

各締固め段階で、ポータブルコーン貫入試験を、地盤造成終了後にオランダ式円錐貫入試験をそれぞれ実施し、その代表値を図-1に示す。図のように、A, B, C 地盤とも q_c は多少バラツキているが、 $q_c=15\sim 25(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 程度の緩い状態で造成されている。

また、A, B, C 試験地盤の土質状態を把握するため種

々の土質試験を実施したが、その代表的結果を表-1に示す。A, C 地盤には、同粒形、同材質の砂を用いたが、転圧、含水比の違いなどの原因により、地盤強度に若干の差がみられる。

2-2 試験杭

水平載荷試験に用いた試験杭は、鋼製の模型杭とした。試験は図-2に示すように、A, B 両地盤では CASE-2 以外は載荷幅 D_1 を一定としたプレート 1, 2, 円形, 四角, ひし型, H 型の 6 ケースの断面形状で実施した。また、C 地盤では載荷幅 D_1 および側面幅 D_2 を D , $1.5D$, $2D$ と種々変化させたプレート型, 角型の 11 ケース

表-1 地盤特性

		A 地盤 (砂)	B 地盤 (火山灰)	C 地盤 (砂)	
湿潤密度	$\gamma_t (\text{g}/\text{cm}^3)$	1.462	1.197	1.486	
含水比	$W_n (\%)$	7.73	8.2	9.01	
比重	G_s	2.690	2.288	2.712	
変形係数	三軸圧縮	$E_c (\text{kg}/\text{cm}^2)$	18.8	23.9	58.8
	孔内水平	$E_b (\text{kg}/\text{cm}^2)$	12.5	22.5	29.5
	平板載荷	$E_p (\text{kg}/\text{cm}^2)$	43.8	66.1	83.1

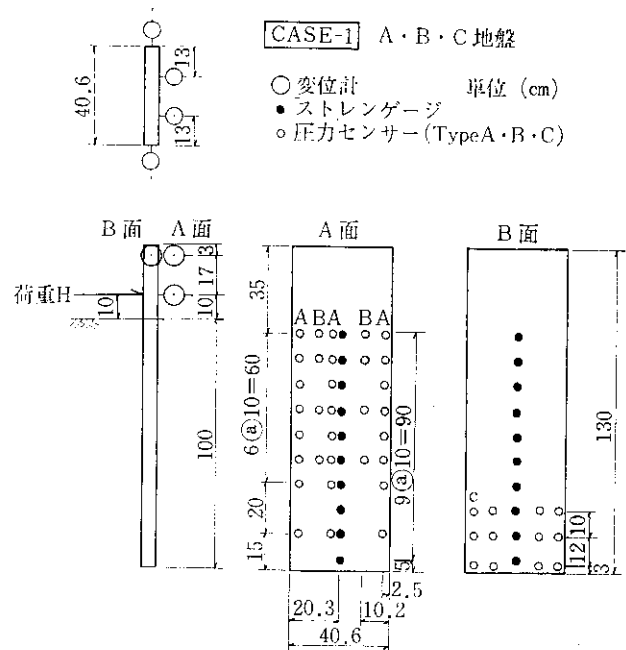
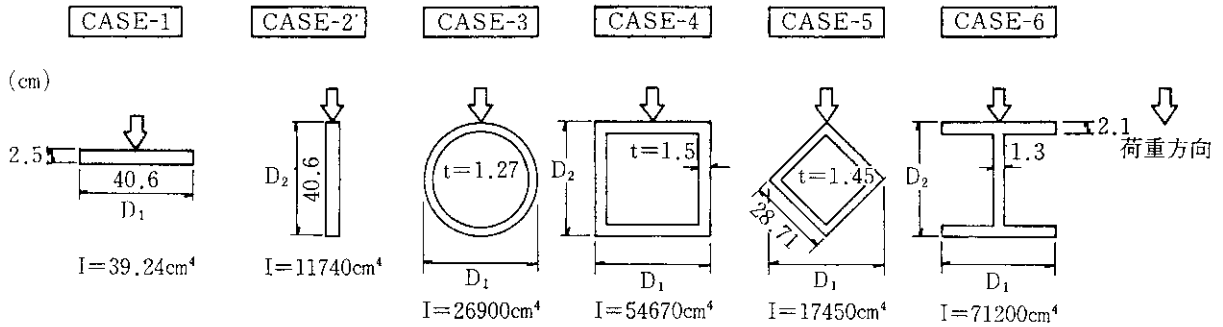


図-3 試験および計器配置図

A 地盤 (砂) ・ B 地盤 (火山灰)



C 地盤 (砂)

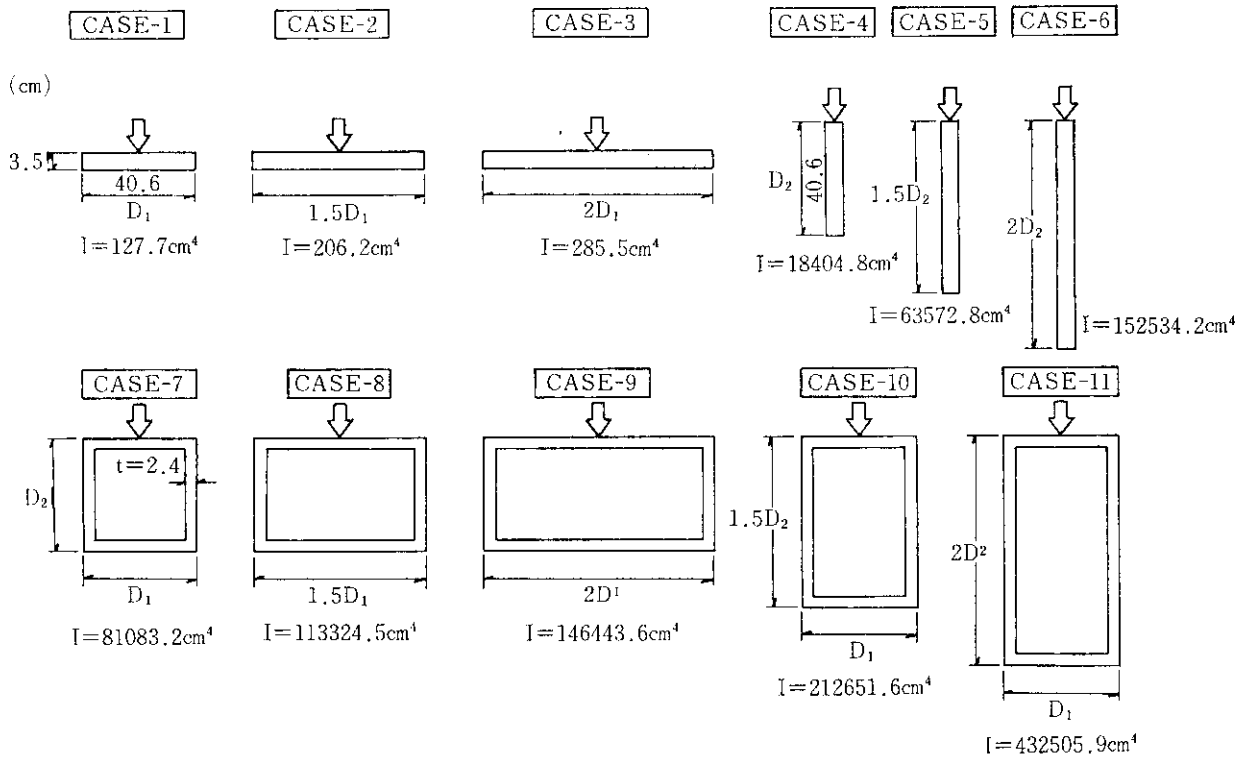


図-2 試験杭断面形状

の断面形状とした。

各試験杭には水平載荷時の地盤反力の分布を把握するため、図-3に例示するように、圧力センサーおよび一部の杭にはストレングージを設置した。

また、試験杭は事前の曲げ試験により、剛性およびセンサー、ストレングージの作動チェックを行ってある。

なお、各杭はほぼ $\beta l \leq 1$ で解析上剛体として扱える範囲にある。

2-3 試験方法

水平載荷試験は、一般的な緩速載荷試験方法に準拠し

て行った。各荷重段階による荷重保持時間は、5分間の水平変位量が2回連続して $1/100 \text{ mm}$ 以下となるまでとし、変位量 3 cm 程度を最大荷重とし、最大荷重までを3~4サイクルに分けて段階的に載荷を行うこととした。

試験杭の根入れはすべて 100 cm とし、解析の際、底面地盤反力が無視できるように、杭の底面と地盤が接しないように 3 cm のクリアランスを設けて杭を設置した。また、プレート型、H型以外の試験杭は杭の深さ方向の変位測定のため、圧入設置後中空とした。

3. 水平載荷試験結果

3-1 荷重 H ~ 変位 y

水平載荷試験の結果得られた A, B, C 地盤の各ケースごとの荷重 H ~ 変位 y の関係を図-4 に示す。

図のように、各地盤で各ケースごとの荷重 H ~ 変位 y の関係が明らかに異なっており、 $y \geq 2$ cm 以上になると地盤が降伏してくる傾向にある。

また、図-5 に各地盤における同一変位に対する荷重 H をとり、CASE-1 の荷重 H_{A1} , H_{B1} , H_{C1} をそれぞれ基準として、他のケースの荷重 H_{An} , H_{Bn} , H_{Cn} の比率 e_{An} , e_{Bn} , e_{Cn} を求め、変位との関係で示す。

図のように、 e_{An} , e_{Bn} , e_{Cn} は形面断状および載荷幅、側面幅の違いにより異なっており、形状効果は明瞭である。 e の値は $y = 0.6 \sim 1.0$ cm 以上になると、ほぼ一定値を示す。A, B 兩地盤では、地盤に関係なく水平抵抗の大きさは各々の CASE において、CASE-2 $< 1 < 5 < 4 \leq 3 < 6$ で、C 地盤では、CASE-4 $< 5 < 6 \div 1 < 2 \leq 3 < 7 < 8 < 10 < 11 < 9$ の傾向にあることがわかる。

3-2 地盤反力分布 P · 変位分布 y

水平載荷時の地盤反力および変位分布の測定例 (A 地盤, CASE-4, $H = 800$ kg) を図-6 に示す。図のように、実測地盤反力 P は同一断面でみると個所によってバ

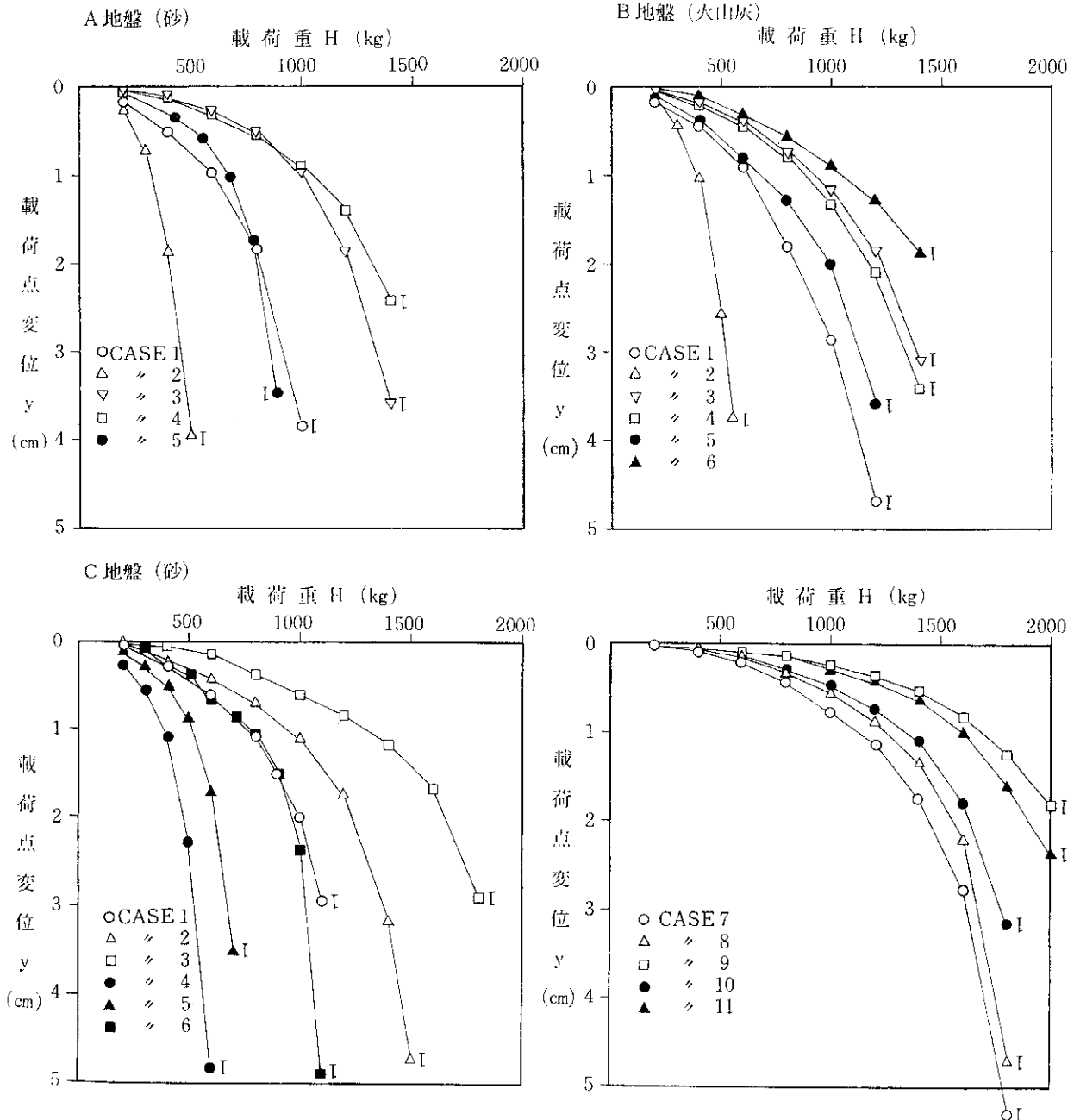


図-4 荷重 H ~ 変位 y

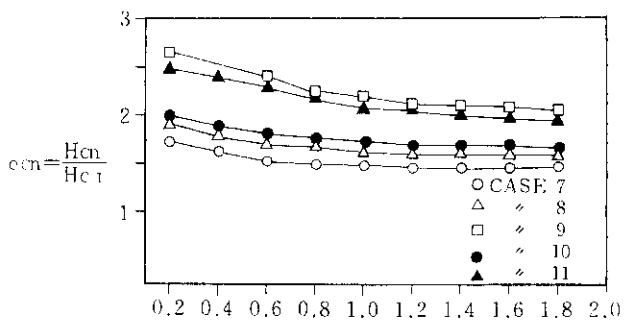
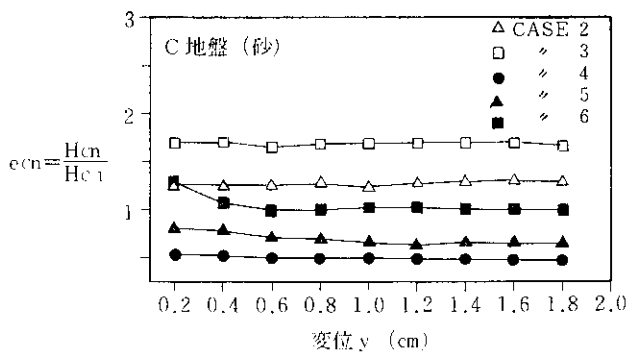
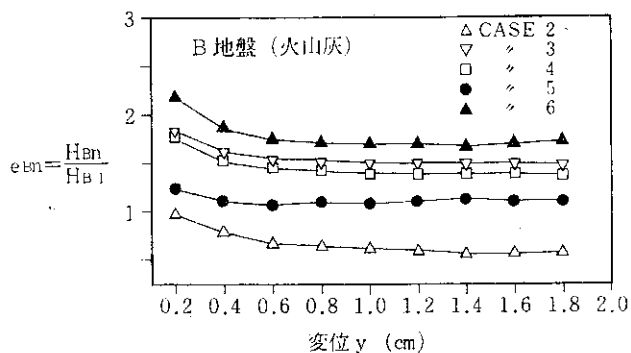
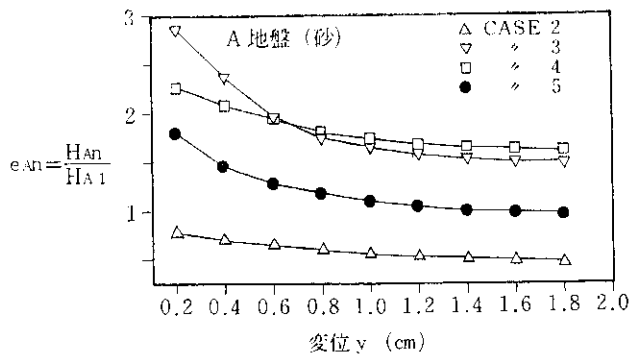


図-5 杭頭バネ ($H_7/H_1 \sim$ 変位 y)

ラッキはあるが、深さ方向では一定の傾向を有し、それは他の地盤、ケース、荷重でも同様で、 P_{max} は深さ30~40 cmおよび最下端にある。また、杭の深さ方向の実測変位は杭が剛体であるため直線分布となっている。

図-7に水平載荷試験の結果得られた各地盤の傾斜角 $\theta \sim$ 変位 y の関係の代表ケースを示すが、地盤、杭種に

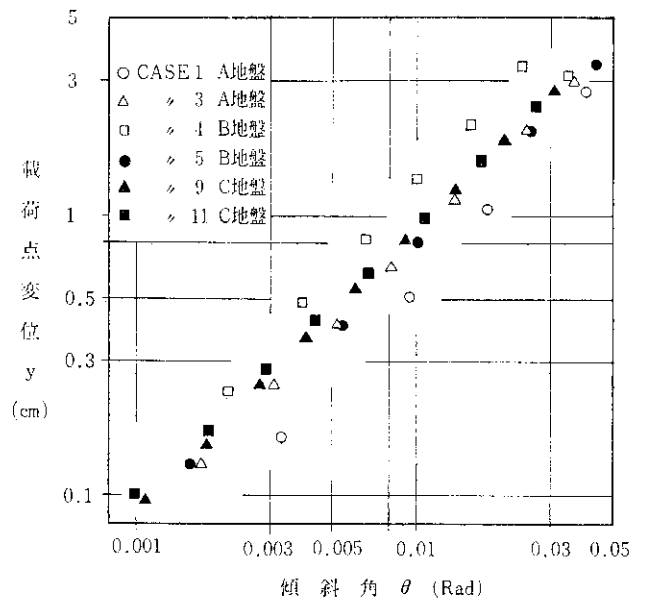


図-7 傾斜角 $\theta \sim$ 変位 y

$$P = K_e \times y \quad P = K_d \times y$$

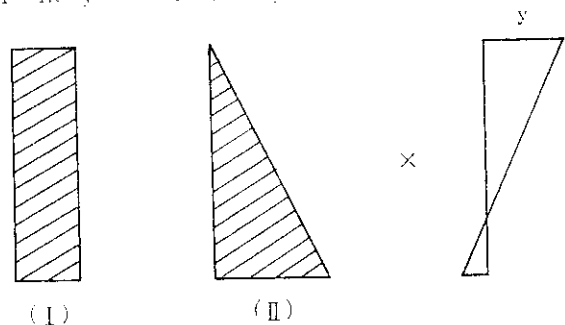


図-8 地盤反力計算モデル

関係なくほぼ一定の直線的分布となっており、回転中心の深さは地盤、ケース、荷重に関係なく約74 cmである。これは、ケーソン設計(剛体基礎)の考え方に基づき、一層系地盤において底面地盤反力を無視し、荷重(水平力 H 、曲げモーメント M)のつりあいより求められる計算値に一致する。

4. 解析と考察

以上の水平載荷試験結果に基づき、水平挙動の適切な解析手法と形状効果の推定およびバネ特性について検討することとするが、今回は $y \leq 2$ cm, $H \leq 1$ t で杭が弾性的挙動を示しうる範囲を検討対象とする。

4-1 水平挙動

深い基礎の水平挙動の解析手法としては種々あるが、ここでは、主に図-8に示したような地盤反力モデルにより解析し、実測値と対比してみる。

図-8 (I) のモデルは、道路橋示方書に示された杭基礎のモデル^{3),4),5)}で、その場合、 K 値は(1)式で与えられる。

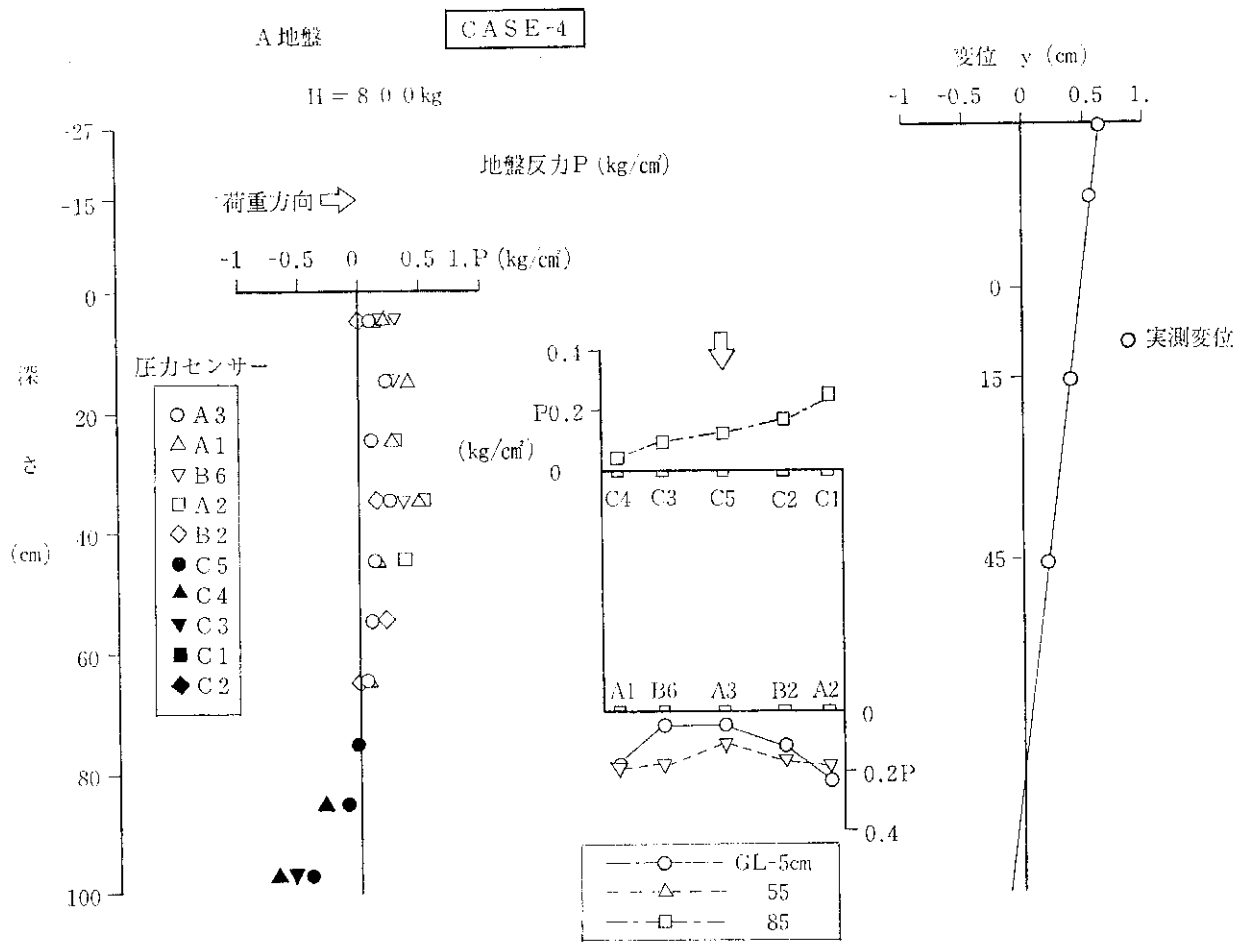


図-6 実測地盤反力 P および実測変位 y

$$K_c = (\alpha_c \cdot E \cdot D^{-0.75}) \cdot y^{-0.5} \quad (1)$$

- α_c : E の求め方に対応する係数
- E : 地盤の変形係数 (kg/cm^3)
- D : 杭径 (cm)

同様に (II) のモデルは、道路示方書に示されたケーソン基礎の計算モデル^{3),6)}で、 K 値は(2)式で与えられる。

$$K_d = 0.512 \cdot \alpha_d \cdot E \cdot B_H^{0.75} \quad (2)$$

- α_d : E の求め方に対応する係数
- B_H : 基礎の換算載荷幅 (cm)

これらの式で、ケーソン基礎では側面効果を考え、水平地盤反力係数 K 値を一率 2 割増ししているが、形状効果を算出できないため K 値に関係なく一定となってしまう。また、ケーソン基礎では変位の大きさに関係なく一定値で与えられる。

これらの K_c および $K_d \cdot L$ に相当するものを、図-4 に示した荷重 H ~ 変位 y 曲線から逆算し、変位との関係で示すと図-9 のようになる。 K_d は地盤、荷重、ケースに

関係なく、 $K_d \cdot L = 4 \sim 4.4 K_c$ となった。また、同図には示方書式より求められる推定 K 値も示したが、載荷幅を一定とした場合および $K_d \cdot L$ にほぼ一致する。

これらの逆算 K 値は、断面形状と変位によって明らかに変化しており、上述の (1), (2) 式で示された示方書の方法の枠内ではすべての傾向を説明することは不可能である。

図-10 は A, B 両地盤の CASE-4, $H=1\text{t}$ の場合について、逆算 K 値を用いた地盤反力 P および変位 y の各分布を計算し、実測値と対比し示すものである。

図に示すように、図-8(I) モデル (Chang 式) では地盤反力、変位とも実測値とかけはなれたものとなり、(II) モデル (ケーソン式) が比較的よい対応を示していることがわかる。

なお、図-10 の実測地盤反力は、圧力センサーを設置した前面の値であるため、後述する側面地盤反力を除いた $P_{ah} = K_{ah} \cdot x \cdot y$ 式の計算地盤反力も示したが、地盤反力、変位とも実測値とほぼ一致している。

同図には、参考のため非線形弾性地盤反力法 $P = K_e \cdot$

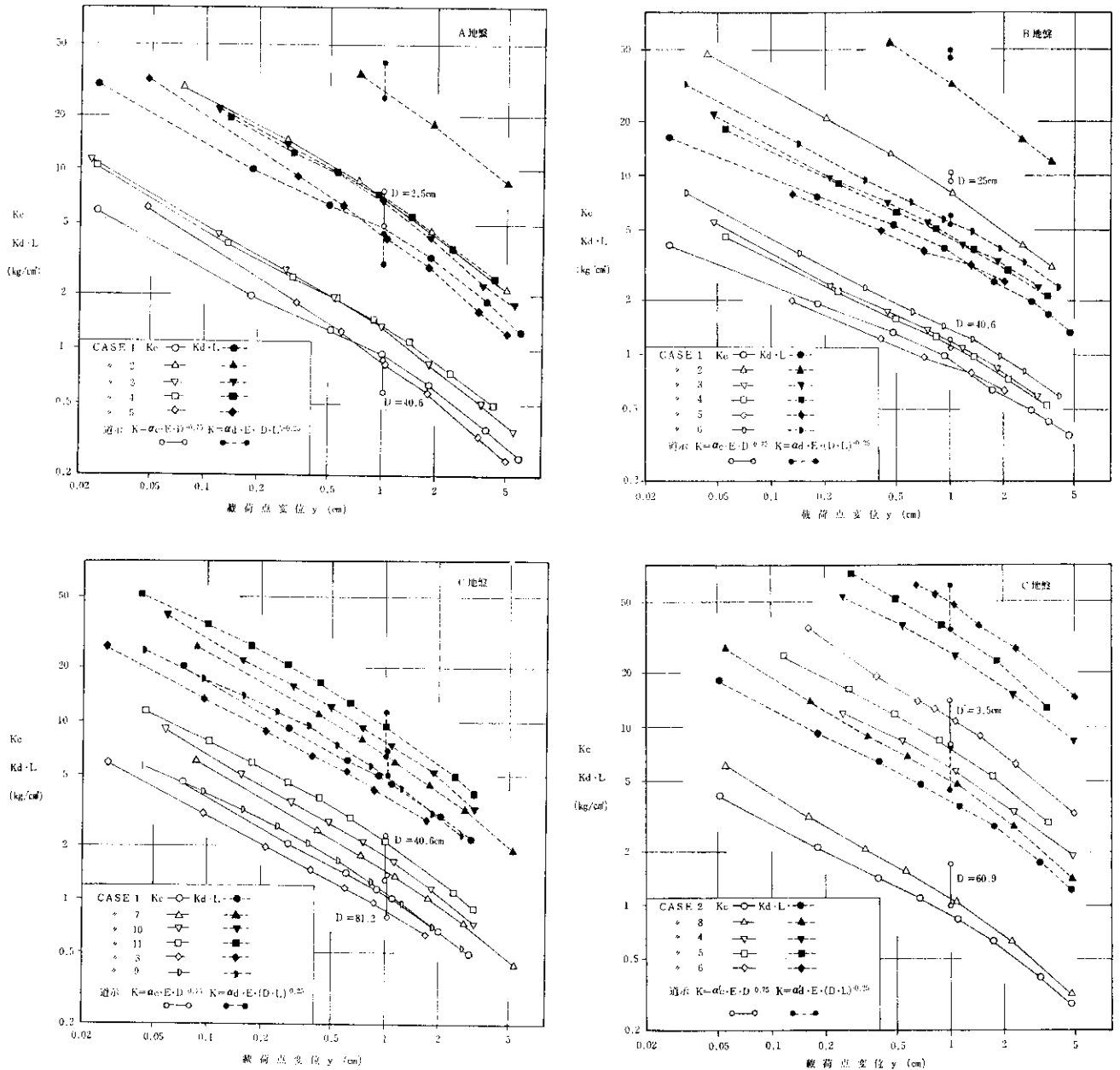


図-9 逆算 $\log K_c$, $\log K_d \cdot L \sim \log y$

$\alpha \cdot y^{1/2}$ による計算結果も示したが、地盤反力分布において、(II) モデルの方が適合性がある。

4-2 形状効果

形状効果およびバネ特性を検討するため、杭に作用する全地盤反力 (P) を、(3)式に示したように前面地盤反力 (P_h) と側面地盤反力 (P_r) に分けて扱う^{7),8)} こととした。

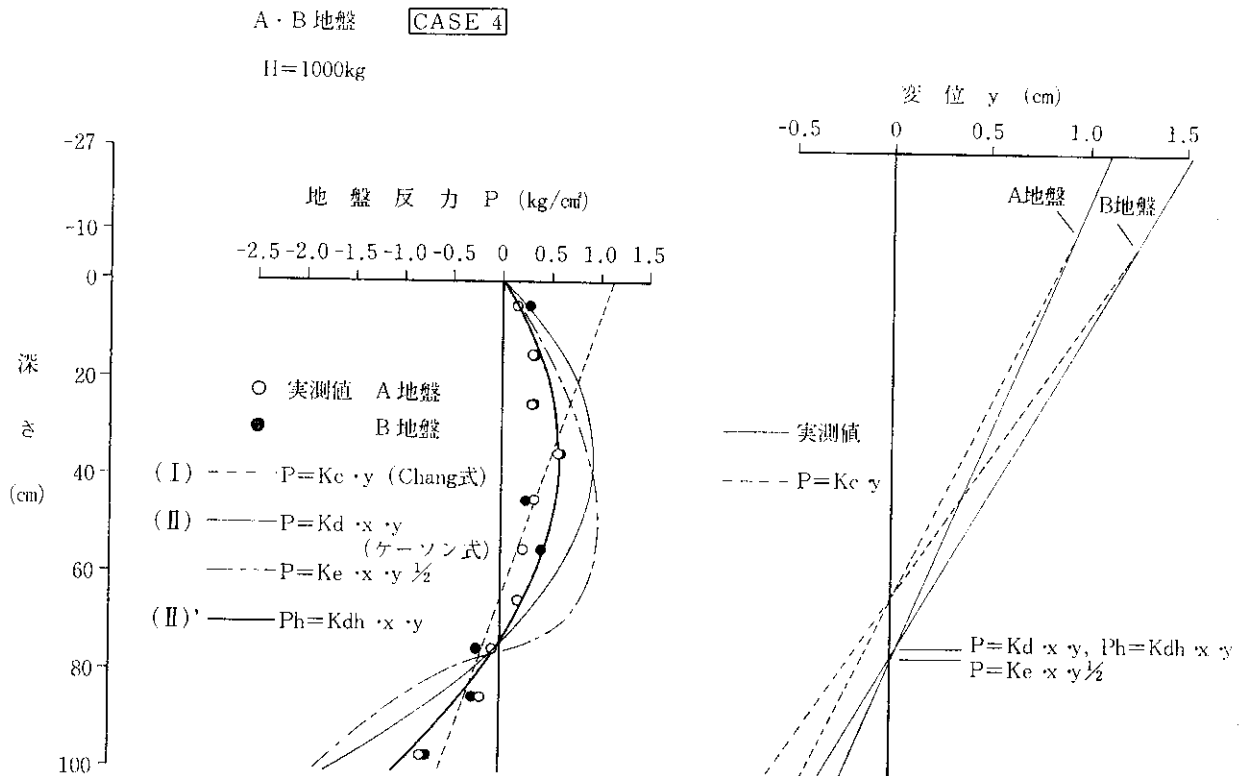
$$P = P_h + P_r = K_h \cdot y_h + \alpha \cdot K_r \cdot y_r \quad (3)$$

図-11に各杭のモデルを示すが、A, B地盤のCASE-1およびC地盤のCASE-1, 2, 3については $K_r = 0$ 、A, B地盤のCASE-2およびC地盤のCASE-4, 5, 6につい

ては $K_h = 0$ と考えることとする。また、A, B地盤のCASE-3, 5のように、地盤反力作用面と作用方向が垂直でない場合は、反力を面直角方向と面水平方向に分離し全地盤反力を求めた。

その結果、各CASEごとの地盤反力は、表-2および表-3に示した計算式(深さ一定)で表わすことができる。なお、表中の地盤反力の値は、各地盤のCASE-1および2を基準1として表わしたものである。

表-2(A, B地盤)において、CASE-2の K_r の計算値は、 $G = E/2(1+\nu) \div 0.35 E$ ($\nu = 0.4$) の関係および直接基礎設計での水平方向せん断バネ定数 $K_s = \lambda \cdot K_p$ ($\lambda = 1/2 \sim 1/5$) の関係より、 $K_r = 0.35 K_h$ として求めたもので



ある。CASE-4の計算値は、CASE-1とCASE-2の組合せで表わされるが、CASE-6の K_r については、H鋼内の土塊の移動を考慮して α を用いて表わしたが、今回計算値は $\alpha=1$ としたときの値である。また、CASE-3, 5の計算値については、 K_h , K_r を求める場合、変位 $y(y \cdot \sin \theta, y \cdot \cos \theta)$ の違いによる補正($K \cdot y^{-0.5}$)を行って求めている。

また、荷重試験の結果、回転角が小さいということから、計算値において回転によって生じる鉛直方向 K_r については今回考慮していない。

実験値については、傾斜角 θ ～変位 y 図でも示したように、すべてのケースにおいて変位の回転中心点がほぼ同一深さにあることから、地盤反力を同一変位の杭頭バネの比較によるものとし、図-5に示した e_{An} , e_{Bn} の関係より求めた。なお、表には変位 $y=0.5$, $y=1$ cmの場合を示した。

この結果、実験値については一部バラツキがあり、またCASE-3についてはなお検討の余地もあるが、実験値と計算値は総じてよい対応を示している。図-10の地盤反力の対比結果なども勘案すると、 K_r による側面抵抗を考慮することにより、杭の水平挙動(形状効果)を説明できることがわかった。

4-3 バネ特性

C地盤での水平荷重試験結果より、荷重幅 D_1 、側面幅 D_2 の違いによる K_h および K_r のバネ特性について検討する。

表-3(C地盤)において、図-11のモデルでもわかるように、CASE-7～11の角型杭についてはCASE-1～6のプレート型杭の組合せで表わされる。

表中の K_h の計算値については、道路橋示方書におけるケーソン K_d 値の考え方より、

$$P_h = K_d \cdot D_1 \cdot L = \alpha \cdot (\sqrt{D_1 \cdot L})^{-3/4} \cdot D_1 \cdot L \quad (4)$$

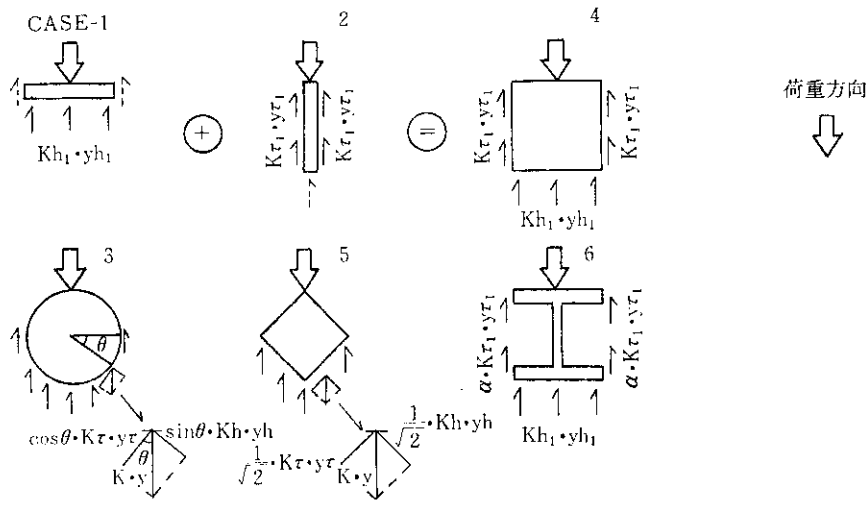
とし、 $P_h \propto D_1^{5/8}$ の関係を用い、CASE-1を基準として示した。また、 K_r の計算値は表-2と同様、 $K_r = 0.35 K_h$ として求めることとし、なお側面幅 D_2 による補正は(4)式で示した K_h と同様と考えた。

実験値については、表-2と同様に図-5に示した e_{Cn} の関係より求め、 $y=0.5$, $y=1$ cmの場合を示した。

その結果、実験値のCASE-7～11はCASE-1～6の組合せで求めたものとよく合致している。CASE-1, 2, 3の計算値と実験値はある程度一致しており、 $P_h \propto D_1^{5/8}$ の考え方はほぼ妥当と思われる。また、CASE-4, 5, 6の実験値は表中にCASE-2を基準として示したが、 $P_r \propto D_2$ の関係がみられる。

しかし、CASE-4, 5, 6の計算値は、実験値と一致せ

A・B地盤



C地盤

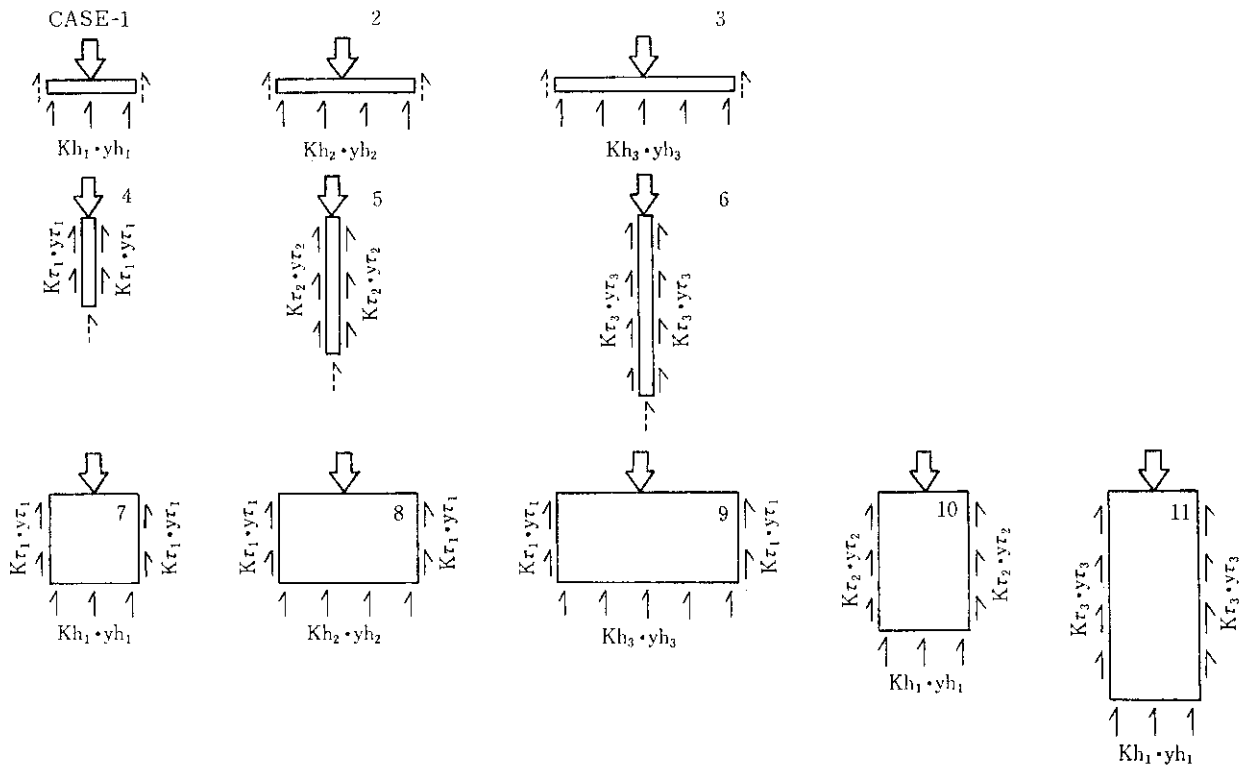


図-11 $Kh \cdot K\tau$ モデル

表一2 形状効果

A・B地盤	計算値 y = Const.	実験値 (図-5 H/H ₁ ~y)				
		y = 1 cm		y = 0.5cm		
		A地盤	B地盤	A地盤	B地盤	
CASE 1 → D ₁	Kh ₁ ・D ₁	1	1	1	1	
〃 2 → D ₂ =D ₁	Kτ ₁ ・2D ₂	0.7	0.55	0.6	0.75	
〃 3 → D ₁	$\frac{\pi}{4}(Kh_1 \cdot D_1 + K\tau_1 \cdot D_2)$	1.2 (1.5~1.7)	1.65	1.5	2.15	1.6
〃 4 → D ₁	Kh ₁ ・D ₁ +Kτ ₁ ・2D ₂	1.7	1.75	1.4	2.0	1.5
〃 5 → D ₁	$\frac{1}{\sqrt{2}}(Kh_1 \cdot D_1 + K\tau_1 \cdot D_2)$	1.14	1.1	1.1	1.4	1.1
〃 6 → D ₁	Kh ₁ ・D ₁ +α・Kτ ₁ ・2D ₂	α=1 1.7	—	1.7	—	1.8

表一3 パネ特性

C地盤	計算値 y = Const.	実験値 (図-5 H/H ₁ ~y)				
		y = 1 cm		y = 0.5cm		
CASE 1 → D ₁	Kh ₁ ・D ₁	1	1	1		
〃 2 → 1.5D ₁	Kh ₂ ・1.5D ₁	1.288	1.247	1.259		
〃 3 → 2D ₁	Kh ₃ ・2D ₁	1.542	1.688	1.704		
〃 4 → D ₂	Kτ ₁ ・2D ₂	0.7	0.506	1	0.519	1
〃 5 → 1.5D ₂	Kτ ₂ ・3D ₂	0.902	0.688	1.360	0.741	1.428
〃 6 → 2D ₂	Kτ ₃ ・4D ₂	1.079	1.0	1.976	1.0	1.927
〃 7 → D ₁	Kh ₁ ・D ₁ +Kτ ₁ ・2D ₂	1.7	1.494	①+④ 1.506	1.574	①+④ 1.519
〃 8 → 1.5D ₁	Kh ₂ ・1.5D ₁ +Kτ ₁ ・2D ₂	1.988	1.623	②+④ 1.753	1.759	②+④ 1.778
〃 9 → 2D ₁	Kh ₃ ・2D ₁ +Kτ ₁ ・2D ₂	2.242	2.208	③+④ 2.104	2.450	③+④ 2.223
〃 10 → D ₁	Kh ₁ ・D ₁ +Kτ ₂ ・3D ₂	1.902	1.753	①+⑤ 1.688	1.852	①+⑤ 1.741
〃 11 → D ₁	Kh ₁ ・D ₁ +Kτ ₃ ・4D ₂	2.079	2.078	①+⑥ 2.0	2.407	①+⑥ 2.0

ず実験値より大きな値となった。この原因は、計算値と異なる杭表面と地盤との間に生ずるせん断パネによるものと考えられ、今回のC地盤の場合、杭表面と地盤との間のせん断パネは $K_r = 0.25 \sim 0.3 K_h$ と推定される。

5. まとめ

検討結果について、その主なものをまとめると次のよ

うになる。

1) 試験の結果、得られた荷重 H および逆算 K 値と変位 y の関係には、明らかに形状効果が認められ、その度合は今回の試験では地盤(砂、火山灰)による相違はない。

2) ケーソン基礎 (K_d) および杭基礎 (Chang 式, K_c) の逆算 K 値は $K_d \cdot L = 4 \sim 4.4 K_c$ の関係にあり、載荷幅

を一定とした場合、道路橋示方書の杭とケーソンの各推定 K 値の関係とはほぼ一致する。

3) 各杭の水平挙動は図-8の(II)モデルを考え、解析することによりかなりの精度で推定できる。

4) 形状効果は、地盤強度に関係なく水平地盤反力(P)を前面地盤反力($P_h=K_h \cdot y_h$)と側面地盤反力($P_r=K_r \cdot y_r$)に分離し解析することにより、ほぼ説明できる。

5) 載荷幅 D_1 、側面幅 D_2 の違い($D, 1.5D, 2D$)による K_h および K_r のバネ特性は、 $P_h \propto D_1^{5/8}$ 、 $P_r \propto D_2$ の関係にある。

6. あとがき

基礎の大型化、複雑化に伴い、今後は形状効果および側面抵抗の適切な評価が設計上の大きな問題となる。

今回の一連の水平載荷試験により、深い基礎の水平挙動と形状効果、特にそのバネ特性についてある程度明らかになることができたと考えている。今後は現場の載荷試験なども取り入れ、地盤特性の違いによる影響を考慮しながら不明な点について究明していく考えである。

参 考 文 献

- 1) 松橋教保ほか：道路橋における地下連壁井筒基礎の設計，基礎工，Vol. 12, No. 12, 1984年.
- 2) 高橋将徳ほか：地下連続による井筒基礎の載荷試験，基礎工，Vol. 12, No. 12, 1984年.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書 同解説，下部構造編，1980年5月.
- 4) 土質工学会：杭基礎の設計法とその解説，1985年12月.
- 5) 横山幸満：くい構造物の計算法と計算例，山海堂，昭和52年.
- 6) 浅間達雄ほか：くいおよびケーソン基礎の設計々算例，山海堂，昭和48年.
- 7) 富沢幸一，森康夫，黒川国夫，菊地実：基礎の水平抵抗と形状効果，土質工学会北海道支部技術報告書，第26号，昭和61年.
- 8) 富沢幸一，根岸正充：基礎の水平抵抗における形状効果とバネ特性，土質工学会北海道支部技術報告書，第27号，昭和62年.

*

*

*