



土 木 研 究 所 資 料

第 674 号

くいの水平方向地盤反力係数について

昭 和 46 年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所

くいの水平方向地盤反力係数について

目 次

1. ま え が き	1
2. くいの水平方向地盤反力係数に関する既往の研究	3
3. 載荷試験結果の収集と統計的処理の意味	7
4. 載荷試験結果の整理	13
5. くいの水平方向地盤反力係数の推定	40
6. 既往の推定値との比較	42
7. あ と が き	48

1. ま え が き

道路橋下部構造設計指針・くい基礎の設計篇が刊行されたのは昭和39年のことである。当時はくい基礎について設計計算が行なわれ始めたばかりで、多くの点に問題を残していたが、実務を担当する技術者の手引き書になればとの意図から発刊に踏みきったと言われている。これがきっかけとなり、その後くい基礎に関する調査・試験・研究が数多く行なわれ、設計面でも施工の面でも著しく進歩していることは言うまでもない。

一方、くい基礎の設計篇が発行されてからすでに6年の時日が過ぎ去っており、指針を手直しする必要があるとの声が強い。そこで、昭和45年度始めより指針の改訂に着手している。改訂に際しては新たにまとめる必要のある点が多くあり、本資料はその一部である1本のくいの水平方向地盤反力係数の推定方法についてまとめたものである。

水平方向地盤反力係数のひとつの推定方法についてはすでにケーソン基礎の設計篇に示されており¹⁾²⁾、それは直径30cmの剛体円板による平板載荷試験より求まる場合を基準として、種々な試験方法間の関係を実験により確かめたものであり、剛体基礎を設計する場合に用いられている。

くいの水平方向地盤反力係数の場合にも、また、同様の関係がその一部では成り立つ。すなわち、地盤調査方法の違いによる補正についてはケーソン基礎の設計篇に示されたものと全く同じであり、載荷幅による補正も成り立たなければならない。ただ異っている点はいくいの可撓性の影響が加味されなければならないことと載荷面の形状が異なっていることである。

そこで、くいに適用できるように水平方向地盤反力係数を修正することが必要であり、その修正はいくいの載荷試験結果に基づくのが最も望ましいと考えられ、その結果可撓性の影響と形状の相違による影響を包含することができうる。

本資料は、既応のくいの載荷試験例を収集し、地盤調査結果から求まる地盤反力係数と載荷試験結果から換算したものとを比較して、くいの水平方向地盤反力係数のひとつの推定方法を説明したものである。

この方法は、既応の研究成果を発展させることにより、くい基礎の設計に適用で

きうる水平方向地盤反力係数の推定方法を、載荷試験結果の収集を行なって、体系化したものであると言えよう。

尚、本資料をまとめるに当って、くいの載荷試験データを提供して下さいった日本道路公団、首都高速道路公団の担当者を始めとして多くの方々に感謝の意を表する。また、本調査の端緒を開いて下さった前基礎研究室長の吉田 巖氏に心から御礼を申し上げる。

昭和46年3月

基礎研究室

浅 間 達 雄

足 立 義 雄

永 田 哲 郎

2. くいの水平方向地盤反力係数に関する既往の研究

水平方向地盤反力係数は基礎構造物から地盤に作用する荷重強度と地盤の変形量を結びつける基本的な定数であり、くいの場合には水平力を受けるくいの挙動を推定する重要な役割を持つ。したがって、これに関する研究は数多く行なわれており、種々方法でのアプローチが試みられている。以下にそれらのうち、主なものを概略説明する。

(1) 設計上の取扱い

水平方向地盤反力係数は地盤の種類のみで決まるものではなく、載荷幅、変位量およびくいの根入れ長さ方向に異なった値を示すものである。載荷幅によって水平方向地盤反力係数が異なることは、圧力球根の大きさによって地盤内の応力分布が変わってくることから明らかであり、それについてはすでに報告されている¹⁾²⁾。

くいの変位量によって異ってくることについては、地盤の非線形性より理解することができる。また、くいの深さ方向の関数となることに関しては、地盤材料の力学的性質が自重の影響を受けることから理解できる。

したがって、水平方向地盤反力係数は明らかに次の形で表わされる。

$$K = F(x, y, B) \quad (1)$$

ここに、 K ：水平方向地盤反力係数

x ：くいの根入れ長さ方向の位置

y ：変位量

B ：くい径

さらに、最近ではくい材料の種類に応じて水平方向地盤反力係数が異なってくると言われている。これに対して実際の設計では、chang の式を利用して、水平方向地盤反力係数は定数として取扱われているので、設計数値としてどのような値を考えればよいかが問題となる。

まず、変位については吉田の提案が明確に答えている³⁾⁴⁾。図-1に示したように、くいの荷重と変位の関係は曲線OABで表わされる。これに対して、設計上必要な点としてはAのみが要求される。したがって、A点にのみ着目すれば、勾配 α

をもつ直線OACで代用しても等価である。

この考え方から、水平方向地盤反力係数は変位に対して一定であるとみなされる。変位が変わると、勾配 α を変化させるとよい。この提案を今井が拡張して⁵⁾、基準値 k を用いて表わし、変位の $(1/2 \sim 2/3)$ 乗に逆比例するとして説明している。

次に、くいの変形に対してどれ位の深さまでの地盤の影響が大きいのかについては明らかでない。一般的に考えて、表層部数 m の区間が大きく関係することはくいの変形状態からみて判断できうる。また、くい頭変位が設計上のポイントとなることから考えて、表層数 m ということも納得できうる。久保によると大局的にながめてN値の漸増する地盤については地表面下1mの位置の値を採用している。また、林-宮島は地表面下2~3mの区間の平均値を採用しており、港湾技術研究所ではchangの式を使用するときには、 $\beta^{-1}(m)$ の区間の平均値を用いるとしている⁶⁾。いずれにしても表層の部分のみが対象となっていると考えてよい。

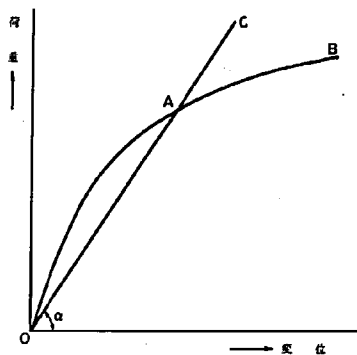


図-1 荷重と変位の関係

② 水平方向地盤反力係数の推定値

くいの水平方向地盤反力係数の推定値は種々な土質試験、原位置試験と対比、その相関性に基づいて行なわれている。例えば、砂の相対密度、粘土のコンシステンシー、標準貫入試験によるN値、ボーリング孔内での載荷試験による変形係数などがファクターとして用いられている。

N値との相関性に基づいているもののうち、最もよく知られているものは現行のくい基礎の設計篇に示されている福岡-宇都の研究である⁷⁾。この関係はくい基礎の設計篇が刊行されて以来、現在に至るまでくい基礎の設計に主として用いられており、簡単に図面から求められるので多用されている。しかし、この関係は水平方向地盤反力係数としてボーリング孔内における土研式ゴムチューブ法による値を用いており、くいの挙動と直接的な結びつきのないことに注意しなければならない。

さらに、最近用いられている関係式は吉中によりまとめられたものがある⁸⁾。これはくいの載荷試験結果を25例集め、くい頭変位が1 cmに相当する場合の水平方向地盤反力係数を載荷試験結果から逆算することにより求めたもので、次式により示されている。

$$K_h = \frac{E_p}{1.2 B^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

ここに、

K_h : くいの水平方向地盤反力係数 (Kg/cm^2)

B : くい径 (cm)

E_p : ボーリング孔内での載荷試験より求めた変形係数 (Kg/cm^2)

しかし、この関係式は収集された載荷試験例が少ないので、載荷試験結果を多く収集し、一般性をもつように修正する必要がある。

また、赤井も載荷試験例を収集し、N値との相関関係を求めている。

ボーリング孔内における載荷試験による変形係数から推定する方法については、今井によりまとめられている⁹⁾。これは応用地質調査事務所のL.L.T.により測定される変形係数から、L.L.T.とくいの応力状態の相違を考慮に入れて補正を行なったものであると言える。

(3) 地盤の非線形性を直接考慮に入れた方法

今まで述べた方法はすべて、水平方向地盤反力係数の算出に地盤の非線形性を考慮に入れて、くいの挙動の推定はchangの式による線形計算で行なっている。それに対して、ここで述べる方法はくいの挙動の推定を直接、非線形方程式によって求める方法である。これは港湾技術研究所で長年研究された成果であり、室内模型実験と現地における実物試験とから導かれたものである¹⁰⁾。

非線形方程式の解法としては、方程式より直接簡単な形で解を求めることができないので、相似則を利用して、基準ぐいすなわち模型ぐいの挙動から実ぐいの挙動を推定する方法が用いられている。

くいの挙動を示す関係式は、

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -pB = -kx^m y \quad (3)$$

ここに、

EI : くい の 曲げ剛性

x : くい の 根入れ長さ方向の位置

y : くい の 変位量

p : 深さ x の点の地盤反力度

B : くい 径

k : 地盤の性質によって定まる定数

m, n : 指 数

で表わされる。この場合の地盤反力係数は k で示されるものに相当し、ディメンジョンは $[TL^{-m-n}]$ となる。(1), (2) で説明した方法では、地盤反力係数の算出に x, B などの影響を考えているのに対して、この方法ではくいの挙動を表わす方程式の中で x, B などの影響を取扱っており、 k は地盤の種類のみによる定数と考えている点に特徴がある。

k の値としては、地盤を S 型地盤と C 型地盤に分類して、載荷試験結果を用いて、標準貫入試験結果と関連づけている。

この方法は地盤の非線形的な性質を考え合わせて、くいの挙動を忠実に説明することはできるが、計算がかなり繁雑であるから、道路橋の設計に対しては全く使用されていない。

3. 載荷試験結果の収集と統計的処理の意味

くいの水平方向載荷試験は数多く行なわれている。最近では組ぐい、群ぐい、斜ぐいに関するデータも豊富になってきた。ここでは、単ぐいで直ぐいに関する一方からの水平方向載荷試験のデータのみを収集した。

載荷試験結果の収集は関係官庁、公団などに依頼し、それらの協力のもとに行なったものである。各団体とも最近ではデータをまとめて整理しているので、表-1に示すように合計227例の載荷試験結果が集まった。

表-1 載荷試験結果の収集数

建設省	都道府県	日本道路公団	首都高速道路公団	水資源開発公団	民間企業	その他	計
71	11	54	42	5	42	2	227

これらの載荷試験結果から統計的処理を行なって、水平方向地盤反力係数を決定する場合につきのような問題点が生ずる。

- (1) くいの載荷試験方法が試験の実施者によって異なっており、統一した方法で試験が行なわれていないので、各載荷試験結果の精度が違っている。
- (2) 地盤調査は種々の方法で行なわれているが、各実施者によって精度に差がある。
- (3) 載荷試験は必ずしも試験のみを目的として行なわれるものではなく、施工管理の目的から行なわれているものもある。
- (4) くい打ちによる地盤の乱れや場所打ちくいの穿孔による地盤の乱れなど施工条件の差が載荷試験に影響を与えている。
- (5) 施工時点から載荷試験までの日数に差があり、施工による地盤の乱れの回復に差がある。

したがって、表-1に示すデータをまとめて、水平方向地盤反力係数を求めるとばらつきを生ずる。しかし、これらのデータを統計的に処理し、定量的に地盤反力係数を決めることは、設計を行なうという実用上の目的からは十分である。

そのような意味から、載荷試験結果を地盤条件との関係の上でまとめてみたもの

である。227例の載荷試験結果のうち、載荷荷重が小さく変位が0.5mmを越えていないもの、明らかに地盤調査結果が誤っていると考えられるもの、載荷点・変位測定点が全く不明なものなど、データとして使用することができないものを除いて、150例の載荷試験結果を統計的にまとめた。

150例の載荷試験結果を表-2に一覧表として示す。表-2には、くいの種類、くいの寸法、荷重作用点、変位の測定点、地表面変位5, 10, 15mmに相当する作用荷重、くいの根入れ長さの1/3の深さまでの地盤種別と平均N値を示した。変位のとり扱い、平均N値については4に説明されている。

これらを分類すると、

図-2～5に示すようになる。図-2はくい径またはくい幅で分類したものの、図-3はくいの根入れ長さで分類したものの、図-4は地盤条件で分類したものの、図-5はくいの種類で分類したもので

ある。

地盤調査結果としては、

いずれの載荷試験の

場合にも行なわれている標準貫入試験結果によるN値を利用

した。他の地盤調査方法との間の相関関

係はすでに明らかにされている。

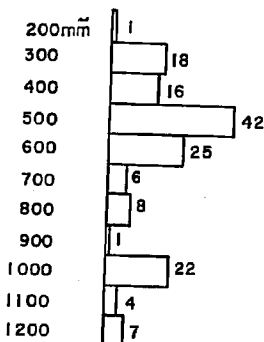


図-2 くい径またはくい幅による分類

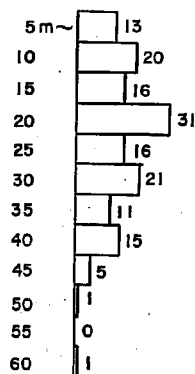


図-3 くいの根入れ長さによる分類

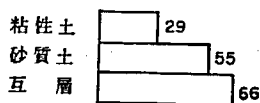


図-4 地盤条件による分類

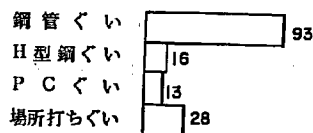


図-5 くいの種類による分類

表-2 載荷試験結果一覧表

番号	くいの種類	くいの寸法	作用荷重(t)			荷重作用点 (cm)	測定点 (cm)	地盤種別	平均N値	備 考
			変位 5mm	変位 10mm	変位 15mm					
1	鋼管くい	φ500mm×9mm×39m	4.8	7.3	9.6	75	75	粘土層	1.7	
2	P C くい	φ500mm×24m	6.8	8.5	10.6	30	30	互層	2.2	
3	鋼管くい	φ500mm×9mm×29m	6.0	10.5	12.0	75	75	"	5.4	
4	"	φ500mm×9mm×22m	6.0	10.5	16.0	20	25	"	9.8	
5	"	"	8.0	13.3	17.3	40	40	"	9.4	
6	H型鋼くい	15mm×15mm×300mm×305mm×25m	10.0	17.5	20.0	30	30	砂礫層	43.2	y軸方向に載荷
7	鋼管くい	φ457.2mm×9.5mm×12m	9.0	16.0	22.0	60	60	"	32.4	
8	"	"	7.0	13.0	18.5	"	"	"	32.4	
9	"	"	10.0	17.2	24.6	"	"	"	32.4	
10	"	φ609.6mm×16mm×18m	6.5	9.9	14.8	60	40	ローム層	10.1	
11	"	φ609.6mm×16mm×20m	6.8	12.0	16.8	20	20	"	10.9	
12	"	"	6.5	12.0	17.9	"	"	"	10.9	
13	"	φ609.6mm×12mm×30m	11.5	18.0	22.8	40	40	互層	5.2	
14	H型鋼くい	390mm×305mm×15mm×24m	2.9	4.2	5.3	0	10	"	5.9	y軸方向に載荷
15	鋼管くい	φ500mm×9mm×11m	21.5	42.5	60.0	60	60	砂層	56.8	
16	"	φ508mm×9.5mm×33m	8.0	13.0	18.0	50	50	"	11.7	
17	"	"	11.0	16.0	19.0	"	"	"	11.7	
18	"	φ609.6mm×12.7mm×32m	5.0	6.9	8.0	30	30	互層	4.6	
19	P C くい	φ350mm×12m	2.0	2.8	3.2	17.5	17.5	砂層	6.5	
20	"	"	2.5	3.4	4.0	"	"	"	6.5	
21	"	"	2.5	4.0	4.5	"	"	"	6.5	
22	"	"	2.1	3.3	4.1	"	"	"	6.5	
23	"	φ400mm×70mm×12m	3.1	4.0	4.9	60	60	互層	3.0	
24	"	"	2.7	3.6	4.2	"	"	"	3.0	
25	"	φ300mm×60mm×7m	1.4	1.8	2.3	"	"	"	3.0	
26	"	"	0.9	1.5	1.8	"	"	"	3.0	
27	"	φ300mm×60mm×12m	1.8	2.5	3.1	73	73	"	3.0	
28	"	"	1.5	2.3	3.0	68	68	"	3.0	
29	"	φ400mm×70mm×8m	2.5	3.4	3.8	58	58	"	3.0	
30	"	"	2.2	3.1	3.6	"	"	"	3.0	
31	鋼管くい	φ609.6mm×9.5mm×24m	7.7	12.5	18.0	50	50	"	3.4	
32	H型鋼くい	250mm×255mm×14mm×14mm×5m	2.0	4.3	5.7	10	10	砂礫層	4.0	y軸方向に載荷
33	場所打ちくい	φ1000mm×9m	15.7	24.0	—	15	40	粘土層	11.8	
34	"	"	17.5	25.0	—	"	10	"	11.8	
35	"	φ1000mm×15m	25.0	38.0	49.0	40	40	"	14.7	
36	"	φ1000mm×11m	26.0	33.0	38.0	100	100	互層	16.9	
37	鋼管くい	φ609.6mm×12.7mm×28.6m	2.5	6.0	7.5	50	50	"	2.9	
38	"	"	3.5	5.0	7.0	50	50	"	2.9	
39	"	φ508mm×9.5mm×25.5m	3.0	4.5	6.0	30	30	"	4.5	
40	"	φ508mm×9.5mm×22m	8.0	10.0	12.0	50	50	粘土層	2.0	
41	"	φ609.6mm×12.7mm×29m	8.0	11.5	15.0	20	20	互層	2.3	
42	"	φ508mm×9.5mm×32m	3.3	6.6	10.0	50	50	"	5.6	
43	"	φ508mm×12.7mm×30m	13.0	22.0	30.0	15	15	"	10.8	
44	"	φ508mm×12.7mm×18m	4.0	9.0	12.0	20	20	ローム層	8.6	

番号	くいの種類	くいの寸法	作用荷重(t)			荷重用点 (cm)	測定点 (cm)	地盤種別	平均N値	備 考
			変位 5mm	変位 10mm	変位 15mm					
45	鋼管くい	φ609.6mm×127mm×30.5m	8.3	11.0	14.0	50	50	互層	3.4	
46	"	φ609.6mm×127mm×35m	5.5	8.0	11.0	"	"	"	3.4	
47	"	φ508mm×127mm×18m	9.0	17.5	22.0	70	70	砂礫層	25.0	
48	"	"	7.3	10.0	15.5	"	"	"	25.0	
49	H型鋼くい	394mm×405mm×18mm×18m	7.0	13.0	18.5	70	70	"	25.0	y軸方向に載荷
50	鋼管くい	φ508mm×127mm×22.5m	8.0	12.0	17.0	50	50	"	25.0	
51	"	φ508mm×95mm×15m	8.5	14.0	20.0	50	50	"	25.0	
52	"	φ609.6mm×127mm×27.7m	7.5	14.0	17.5	20	20	砂層	3.2	
53	"	φ508mm×95mm×8m	4.0	10.0	14.0	45	45	砂礫層	14.6	
54	H型鋼くい	400mm×400mm×11mm×12.5mm×8m	3.0	4.5	5.0	24	24	互層	7.6	x軸方向に載荷
55	"	"	4.0	6.0	8.0	"	"	ローム層	2.4	y軸方向に載荷
56	鋼管くい	φ812.8mm×16mm×36.5m	8.0	12.0	16.0	40	40	"	1.9	
57	"	"	10.0	12.0	16.5	"	"	"	1.9	
58	"	φ609.6mm×95mm×15m	8.0	14.0	18.0	"	"	砂層	5.3	
59	"	φ609.6mm×95mm×11.8m	10.0	17.0	23.0	"	"	"	3.1	
60	"	φ1016mm×127mm×16m	20.0	33.0	48.0	30	30	"	25.3	
61	場所打ちくい	φ1000mm×16.5m	20.0	26.0	29.0	50	50	互層	5.3	
62	"	φ1000mm×7.8m	38.0	60.0	—	20	20	"	11.5	
63	"	φ1000mm×8.0m	17.5	21.5	25.5	0	0	"	5.7	
64	"	φ1000mm×12.0m	27.5	37.0	—	22	22	"	30.0	
65	鋼管くい	φ800mm×12mm×29m	12.0	17.5	22.0	30	30	ローム層	2.6	
66	"	φ800mm×12mm×28m	10.0	17.0	23.5	"	"	互層	3.7	
67	H型鋼くい	305mm×300mm×15mm×15mm×13m	1.5	2.2	3.3	100	100	粘土層	3.8	y軸方向に載荷
68	"	"	0.6	1.0	1.4	"	"	"	3.8	x軸方向に載荷
69	鋼管くい	φ324mm×7mm×17.5m	1.3	1.8	3.5	90	90	砂層	2.4	
70	H型鋼くい	400mm×400mm×13mm×21mm×21m	3.0	6.6	8.5	17	17	"	3.7	x軸方向に載荷
71	"	"	7.4	12.6	18.0	"	"	"	3.7	y軸方向に載荷
72	場所打ちくい	φ500mm×8.0mm×16m	6.0	10.0	15.0	"	"	"	3.6	
73	鋼管くい	φ609.6mm×127mm×21m	6.5	12.0	15.0	"	"	"	3.6	
74	"	φ508mm×127mm×26m	10.0	20.0	30.0	15	15	砂礫層	9.2	
75	"	φ609.6mm×127mm×20.5m	11.0	20.0	30.0	"	"	"	7.3	
76	"	φ711.2mm×127mm×19.9m	12.0	20.5	30.0	"	"	"	6.5	
77	"	φ812.8mm×127mm×20.5m	17.0	28.0	36.0	"	"	"	6.0	
78	"	φ508mm×95mm×23m	7.6	12.2	14.8	35	35	砂層	5.9	
79	"	φ508mm×127mm×44.5m	2.6	6.2	10.0	25	50	"	3.7	
80	"	φ812.8mm×127mm×60m	2.0	4.7	5.5	50	50	シルト層	1.0	
81	"	φ914.4mm×127mm×30.5m	19.0	25.5	32.5	70	70	互層	4.6	
82	"	φ609.6mm×127mm×4.5m	9.6	14.0	—	"	"	"	1.7	
83	"	φ508mm×127mm×4.5m	7.7	12.1	14.8	"	"	"	1.7	
84	"	φ508mm×127mm×22.5m	8.3	12.5	16.6	50	50	砂礫層	28.1	
85	"	"	8.5	12.5	17.1	"	"	"	28.1	
86	"	φ609.6mm×95mm×22.5m	5.5	8.2	10.0	40	40	シルト層	6.4	
87	"	"	6.0	8.5	10.5	"	"	"	6.4	
88	"	"	4.0	6.2	8.5	"	"	"	6.4	
89	場所打ちくい	φ1000mm×14.5m	19.0	25.0	30.0	50	50	互層	4.2	
90	"	φ1000mm×41.5m	30.0	39.0	45.0	25	25	"	14.5	
91	"	"	42.0	—	—	"	"	"	14.5	

番号	くいの種類	くいの寸法	作用荷重(t)			荷重用点 (cm)	測定点 (cm)	地盤種別	平均N値	備考
			変位 5mm	変位 10mm	変位 15mm					
92	場所打ちくい	φ1000mm×30.4m	25.0	33.0	37.5	20	20	互層	13.4	
93	"	φ1000mm×30.24m	27.0	34.0	37.5	"	"	"	13.4	
94	"	φ1000mm×44.22m	36.0	48.0	—	"	"	"	7.9	
95	"	φ1000mm×43.92m	35.0	47.0	—	"	"	"	7.9	
96	"	φ1270mm×31.22m	36.0	45.0	—	22	22	砂層	6.1	
97	"	φ1270mm×30.90m	43.0	—	—	"	"	"	6.1	
98	"	φ1270mm×32.6m	53.0	67.0	—	20	20	互層	11.3	
99	"	φ1270mm×32.82m	60.5	—	—	27	27	"	11.3	
100	"	φ1100mm×38.81m	25.0	31.0	—	18	18	"	4.4	
101	"	φ1100mm×39.32m	23.0	29.0	—	18	39.5	"	4.4	
102	"	φ1100mm×35.2m	39.0	47.0	—	30	30	"	6.4	
103	"	φ1100mm×35.2m	31.0	42.0	48.0	"	"	"	6.4	
104	鋼管くい	φ711.2mm×16mm×48.96m	12.0	19.0	24.8	20	18.5	"	4.1	
105	"	φ711.2mm×16mm×48.545m	11.0	17.0	21.8	20	33	"	4.1	
106	"	φ711.2mm×16mm×48.995m	—	16.5	21.0	18	18	"	0.5	
107	H型钢くい	300mm×305mm×15mm×10.5m	2.0	3.1	5.0	50	50	砂層	1.3	y軸方向に載荷
108	"	300mm×305mm×15mm×14m	1.1	2.4	3.0	150	100	"	1.2	"
109	鋼管くい	φ800mm×14mm×28m	24.5	40.0	—	40	40	砂層	24.5	
110	"	φ508mm×9.5mm×31.2m	9.0	15.0	20.0	0	3	砂層	8.1	
111	"	φ508mm×9.5mm×28.3m	8.8	12.0	15.0	0	3	"	7.8	
112	"	φ1016mm×10.3mm×28m	15.0	20.0	23.0	50	50	粘土層	3.0	
113	"	"	15.0	18.0	22.0	"	"	"	3.0	
114	H型钢くい	350mm×350mm×19mm×30m	2.5	2.8	5.7	15	15	"	3.0	y軸方向に載荷
115	"	"	1.8	2.6	3.1	"	"	"	3.0	x軸方向に載荷
116	鋼管くい	φ508mm×9.5mm×24m	3.6	6.8	9.6	50	50	砂層	16.6	
117	"	"	4.2	8.0	11.0	"	"	"	15.2	
118	"	φ508mm×12.7mm×42m	4.0	8.0	11.0	"	"	"	24.7	
119	"	φ650mm×10mm×40m	10.8	14.0	—	65	65	"	6.5	
120	"	φ485mm×9mm×40m	5.0	9.0	12.0	"	"	"	6.5	
121	H型钢くい	400mm×400mm×11mm×125mm×24.1m	6.8	10.2	12.0	74	74	互層	24.4	y軸方向に載荷
122	"	"	8.0	10.0	12.6	77	77	"	24.4	"
123	鋼管くい	φ508mm×12.7mm×40m	1.4	2.2	4.0	135	135	"	12.4	
124	"	"	3.2	3.8	4.6	"	"	"	12.4	
125	"	φ508mm×9.5mm×36m	13.0	20.0	25.5	0	10	"	20.7	
126	"	"	17.0	27.0	—	"	"	"	20.7	
127	"	φ508mm×9.5mm×42m	8.0	12.2	15.0	20	20	"	4.9	
128	"	"	3.0	7.0	10.0	"	"	"	4.7	
129	"	φ508mm×9.5mm×40.9m	4.4	8.2	11.4	"	"	"	3.3	
130	"	φ508mm×12.7mm×21m	1.8	2.8	4.0	20	20	シルト層	1.0	
131	"	φ508mm×12.7mm×36m	4.0	6.0	8.8	85	85	"	4.0	
132	"	φ609.6mm×9.5mm×30m	5.5	10.0	13.0	50	50	粘土層	3.8	
133	"	φ609.6mm×9.5mm×12m	10.0	17.0	25.0	50	50	互層	8.1	
134	"	φ508mm×14mm×28m	10.0	12.5	15.5	60	60	砂層	5.2	
135	"	φ400mm×9mm×40m	9.0	13.2	16.2	30	30	砂層	18.4	
136	"	φ400mm×6mm×30m	4.5	6.6	8.8	40	30	砂層	16.6	
137	"	φ500mm×15mm×42.5m	11.0	18.0	24.0	55	55	シルト層	3.8	
138	"	φ1200mm×12.7mm×23m	30.0	43.0	56.0	50	50	互層	25.1	

番号	くいの種類	くいの寸法	作用荷重(t)			荷重 作用点 (cm)	固定点 (cm)	地盤種類	平均N値	備 考
			変位 5mm	変位 10mm	変位 15mm					
139	割管くい	φ1200mm×127mm×23m	290	430	—	50	50	互層	24.1	
140	"	"	290	435	565	"	"	"	24.1	
141	"	φ7112mm×127mm×18m	110	190	300	"	"	"	19.7	
142	"	φ609.6mm×95mm×55.4m	128	180	200	35	35	"	20.9	
143	"	φ508mm×127mm×26m	120	190	280	15	15	砂礫層	9.6	
144	"	φ609.6mm×127mm×20.5m	120	210	310	"	"	"	7.5	
145	"	φ7112mm×127mm×20.5m	110	220	280	"	"	"	6.6	
146	"	φ8128mm×127mm×20.5m	200	270	400	"	"	"	6.1	
147	場所打ちくい	φ1000mm×195m	120	190	240	25	25	互層	4.1	
148	"	φ1016mm×335m	65	124	147	150	150	粘土層	2.3	
149	"	φ1016mm×34m	55	100	128	"	"	"	2.3	
150	"	φ1000mm×1650m	200	250	300	50	50	砂層	5.0	

4. 載荷試験結果の整理

(1) 載荷試験結果からの逆算

載荷試験結果からの水平方向地盤反力係数の算出は chang の式に基づいて行なった。図 - 6 に示すように、くい頭部が地表面より上にあり、かつくい頭が自由な場合の変位を算出する式は、

$$y = \frac{H}{6EI\beta^3} \{ \beta^3 H^3 + 3\beta^3 h x^2 - 3\beta(1+2\beta h)x + 3(1+\beta h) \} \quad (4)$$

ここに、

y : 地表面より x なる点の変位 (cm)

x : 地表面より変位測定点までの距離 (cm)

H : 載荷荷重 (Kg)

h : 地表面より載荷点までの距離 (cm)

E : くい弾性係数 (Kg/cm²)

I : くの断面 2 次モーメント (cm⁴)

β : $\sqrt[4]{\frac{KD}{EI}}$ (cm⁻¹)

D : くい径 (cm)

K : 水平方向地盤反力係数 (Kg/cm³)

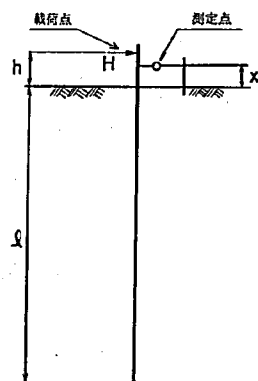


図 - 6 くの变位

この式を用いて荷重 - 変位曲線における載荷荷重と変位を代入すると、 β の値が得られる。 β の値より水平方向地盤反力係数は次式により得られる。

$$K = \frac{4EI\beta^3}{D} \quad (5)$$

この場合に基準と考える変位をいくらに取るかが問題となるが、くい基礎を設計する場合に対象としている許容変位量を中心に考え、地表面変位で 0.5, 1, 1.5 cm とした。また、2 cm 以上も変位が生ずるような載荷試験結果は非常に少ない。ここで求まる載荷試験結果から逆算した水平方向地盤反力係数を $K_{\text{測}}$ と記号づける。

(2) 地盤調査結果からの算出

地盤調査結果からの水平方向地盤反力係数の算出には、ケーソン基礎のような剛

体基礎に適用されている計算方法を使用した。くいは曲がりやすく、かつ載荷面の形状が異なっているので、その影響が加味されなければならないので、その補正は(3)以下に示す方法で行なう。

地盤調査結果としては、いずれの載荷試験のときにも測定が行なわれている標準貫入試験のN値に基づくこととした。

$$E_0 = 28N \quad (6)$$

$$K_{H0} = \frac{1}{30} \alpha E_0 = 0.93N \quad (7)$$

$$K_H = K_{H0} \left(\frac{B_H}{30} \right)^{-\frac{2}{3}} = 12.8 K_{H0} B_H^{-\frac{2}{3}} \quad (8)$$

ここに、

K_H : 地盤調査結果から求まる水平方向地盤反力係数 (Kg/cm)

K_{H0} : 直径30cmの剛体円板による平板載荷試験の値に相当する水平方向地盤反力係数 (Kg/cm)

B_H : 基礎の換算載荷幅 (cm)

E_0 : 標準貫入試験結果より推定した変形係数 (Kg/cm)

α : 試験方法の相違による補正係数で、ここでは $\alpha = 1$

N : 標準貫入試験のN値

ここで問題となるのは、換算載荷幅のとり方とそれに対応するN値のとり方である。

くいの挙動に大きな影響を及ぼす深さは地表面に近い位置であることは明らかであるので、次の深さまでを考えて試算してみた。

- (1) モーメントが最大となる位置
- (2) くいの第1不動点の位置
- (3) たわみ角が0となる位置
- (4) くいの根入れ長さの1/3の位置
- (5) くいの根入れ長さの1/2の位置

したがって、基礎の換算載荷幅としては、次のようになる。

$$B_H = \sqrt{A_H} = \sqrt{D \cdot \ell'} \quad (9)$$

ここに、

ℓ' : 地表面より上に示した各位置までの深さ (cm)

A_n : 換算載荷幅を考慮する場合の面積 (cm^2)

この深さに対応する N 値は測定結果より平均的な N 値を求めた。すなわち、図-7 のような分布をする場合に平均 N 値は次式による。

$$\bar{N} = \frac{\sum N d}{\sum d} \quad (10)$$

ここで求まる地盤調査結果からの水平方向地盤反力係数を K_{h1} と記号づける。

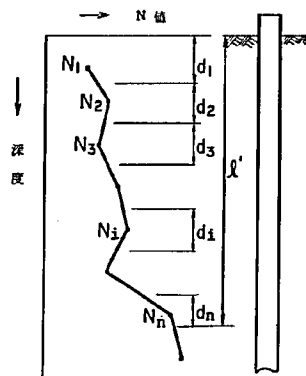


図-7 N 値の取扱い

(3) 水平方向地盤反力係数の相関

(1)(2)で算出された K_{h1} と K_{h2} を、たて軸に K_{h1} と

をとり、横軸に K_{h2} をとってプロットすると、図-8~22に示すようになる。図-8~12は地表面変位が 0.5 cm に相当する場合、図-13~17は地表面変位が 1 cm に相当する場合、図-18~22は地表面変位が 1.5 cm に相当する場合である。

各変位量における図面の相違は、くいの挙動に影響を与えると考えられる深さを変えたもので、(2)に説明した順序で図面番号が付してある。各図面とも、くいの種別は記号が変えて明確に判明できるようにになっている。

この両者の関係を原点を通る直線で表わし、最確値を求めてみると、図に示したようになる。すなわち、剛体基礎に適用される方法を基準として、それよりくいの水平方向地盤反力係数が求められるように両者の相関関係を求めたものである。いま、

$$K_{h1} = a K_{h2} \quad (11)$$

とすると、それぞれのケースにおける a の値は表-3に示すようになる。表-3には、変位量 1 cm の場合を基準とした比率も示してある。

表-3 係数 a の値

変位量	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
	a	比	a	比	a	比	a	比	a	比
5mm	0.736	1.27	1.056	1.24	1.241	1.22	1.367	1.26	1.547	1.28
10	0.597	1	0.857	1	1.027	1	1.083	1	1.210	1
15	0.527	0.89	0.764	0.88	0.915	0.90	0.948	0.87	1.078	0.89

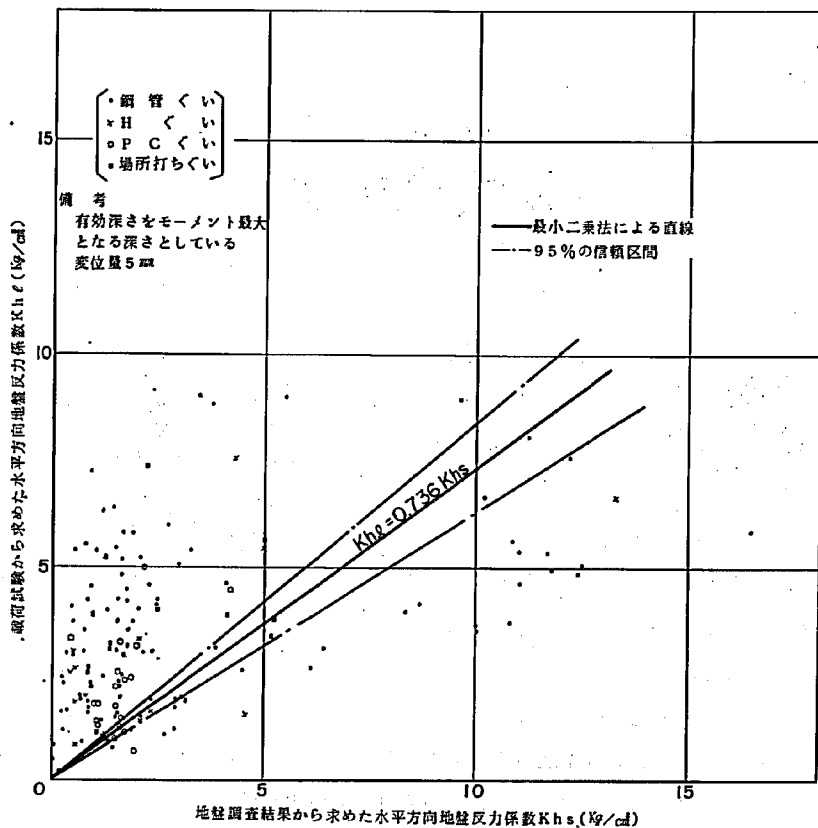


図-8 水平方向地盤反力係数の関係(1)

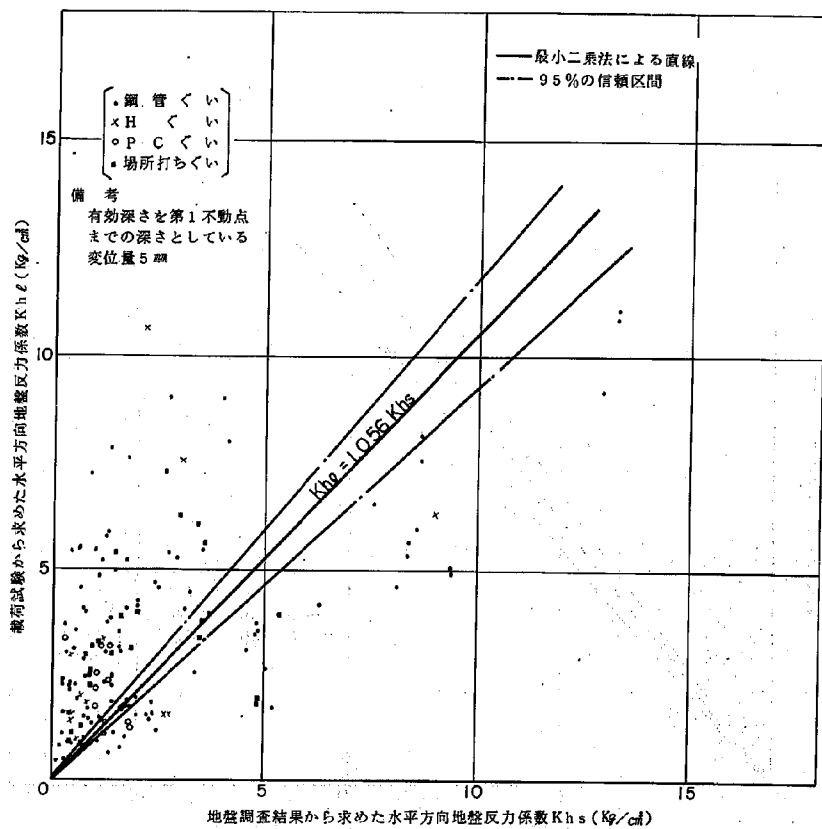


図-9 水平方向地盤反力係数の関係(2)

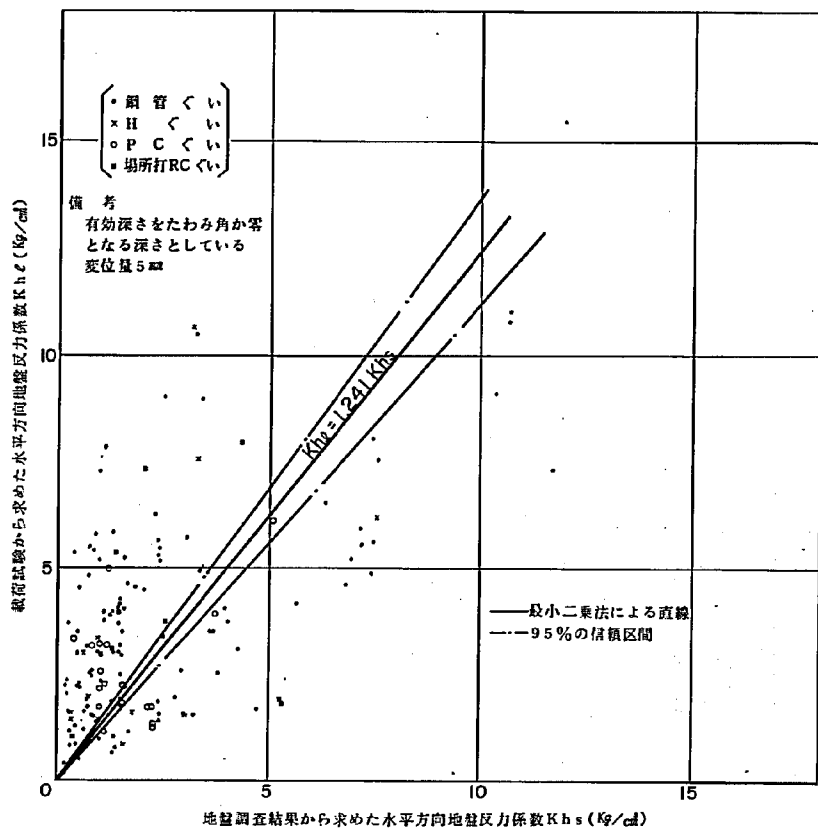


図-10 水平方向地盤反力係数の関係(3)

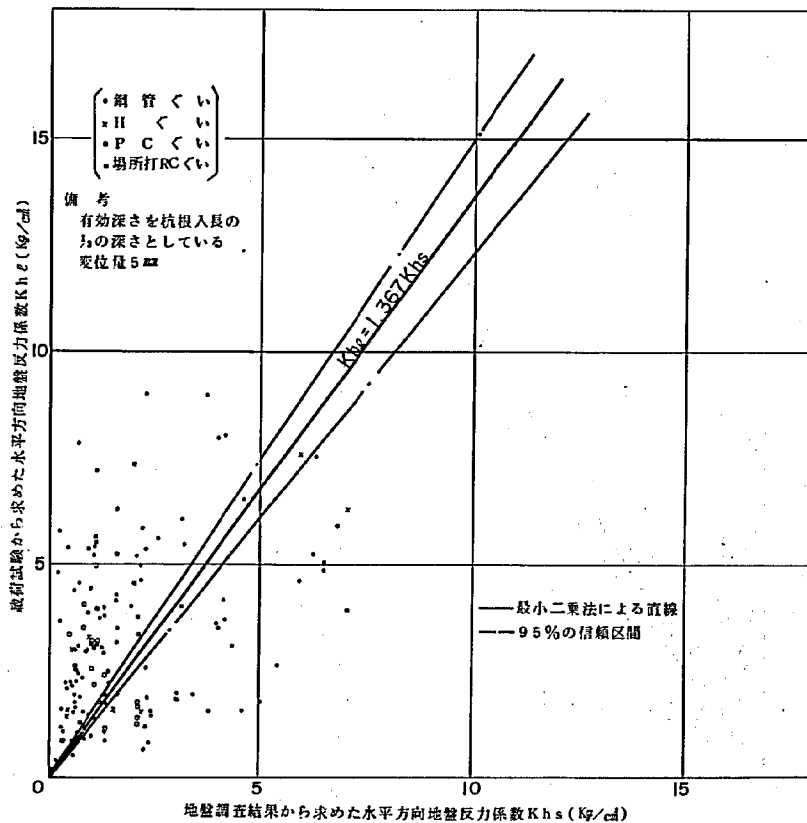


図-11 水平方向地盤反力係数の関係(4)

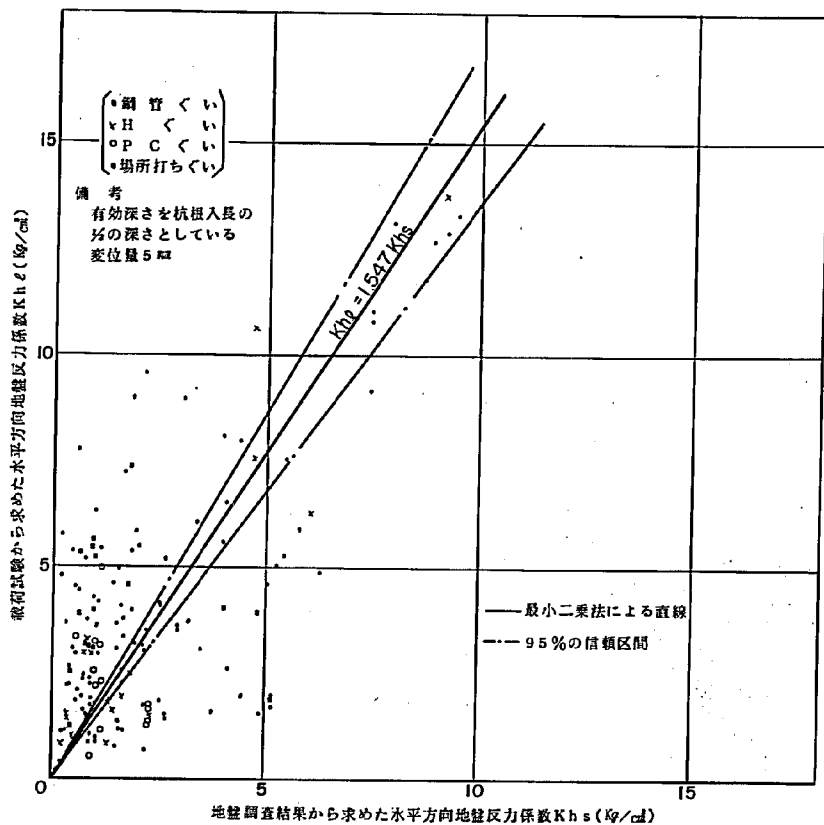


図-12 水平方向地盤反力係数の関係(5)

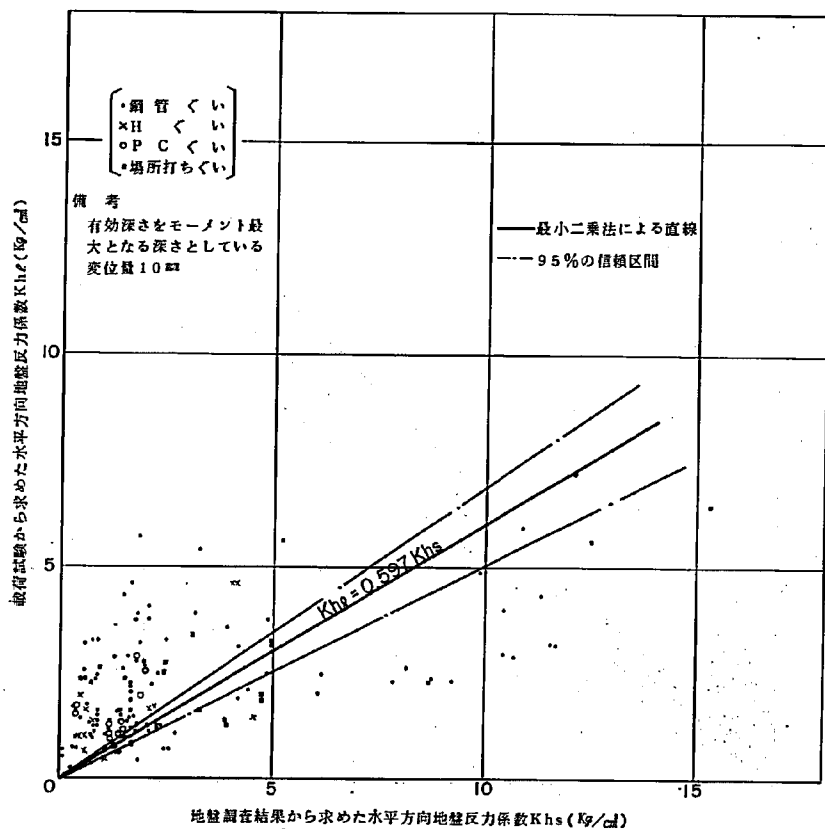


図-13 水平方向地盤反力係数の関係(6)

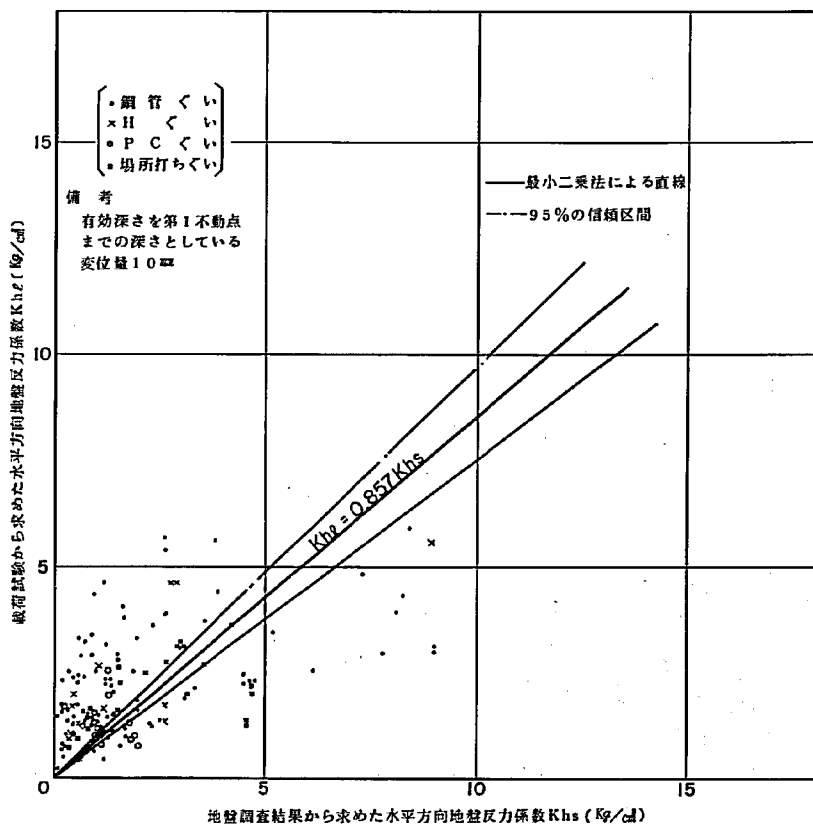


図-14 水平方向地盤反力係数の関係(7)

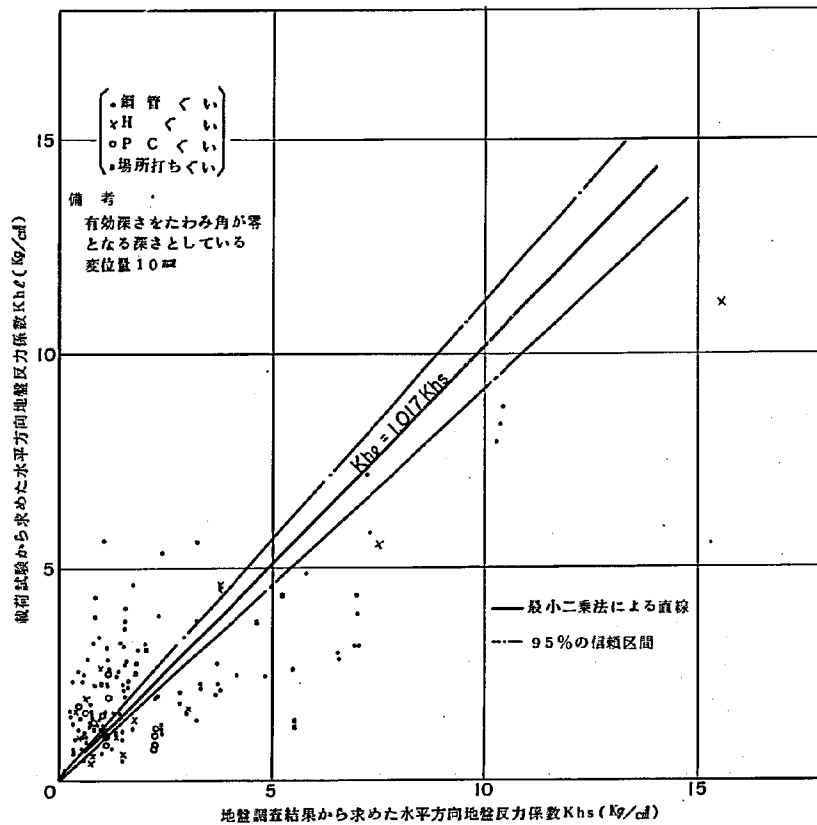


図-15 水平方向地盤反力係数の関係(8)

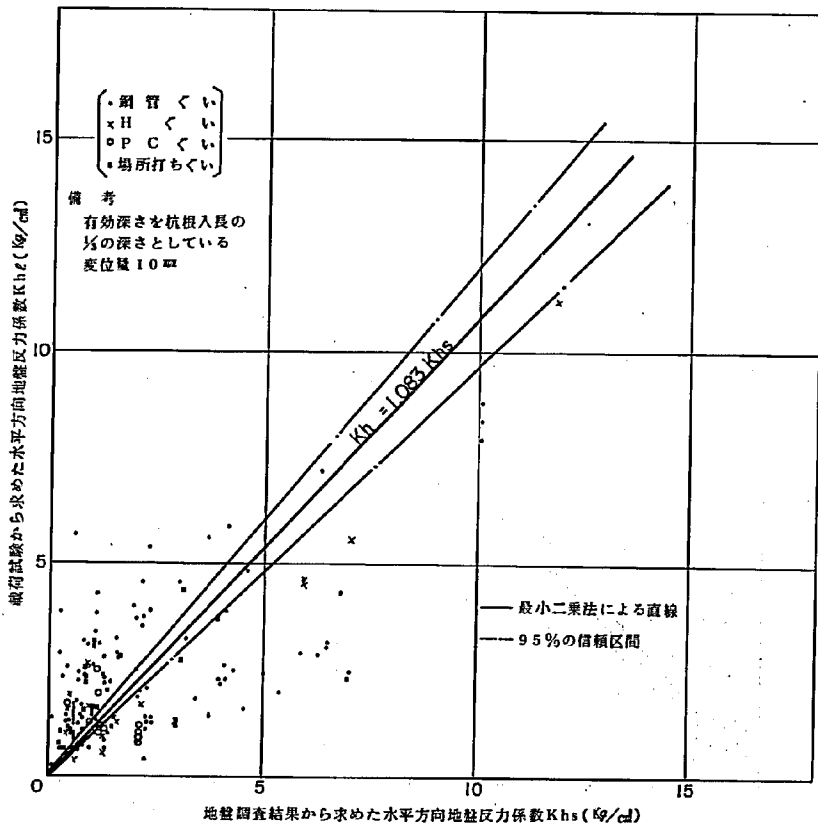


図 - 16 水平方向地盤反力係数の関係 (9)

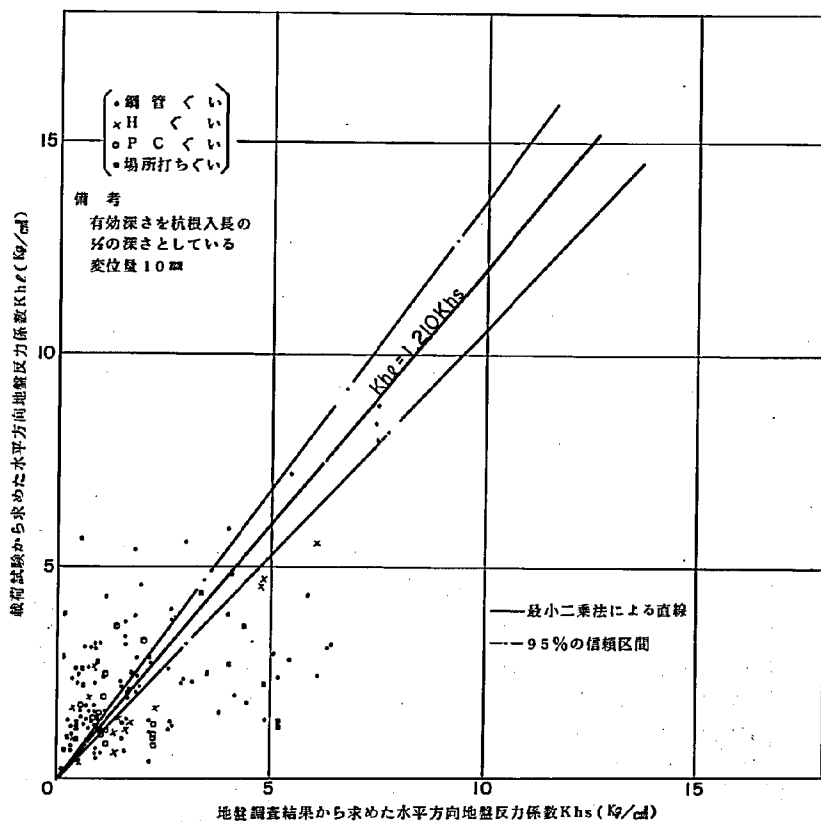


図-17 水平方向地盤反力係数の関係(Ⅱ)

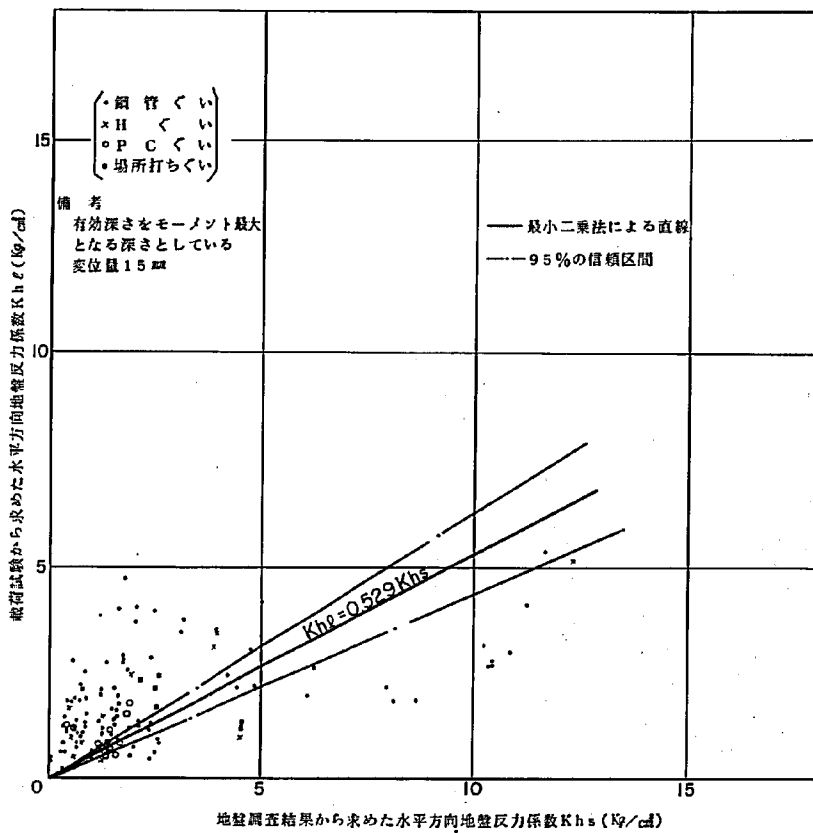


図-18 水平方向地盤反力係数の関係(II)

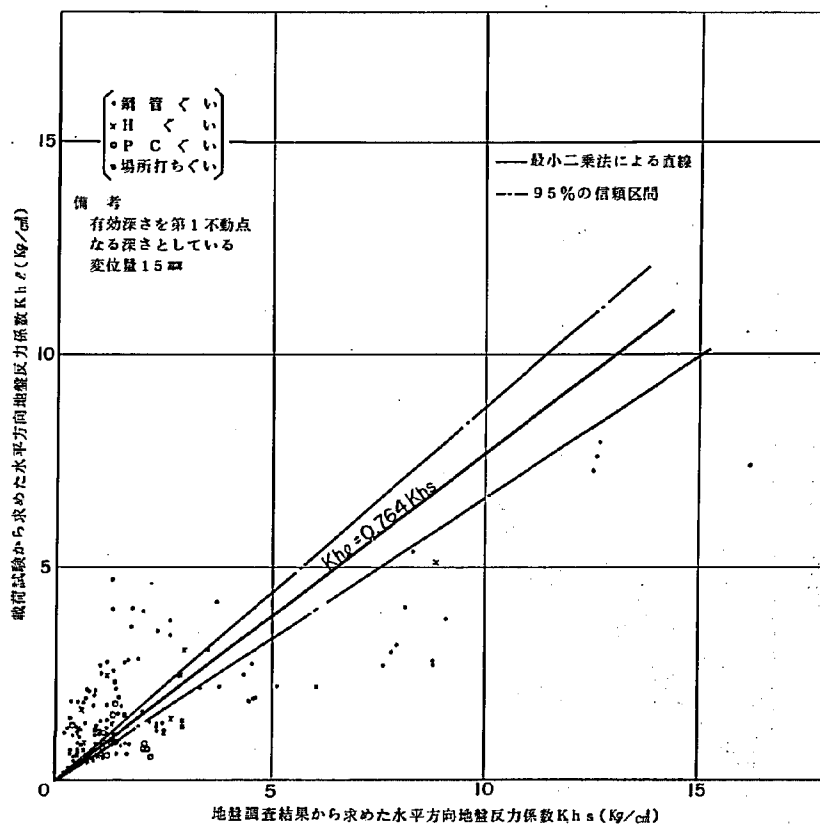


図-19 水平方向地盤反力係数の関係図

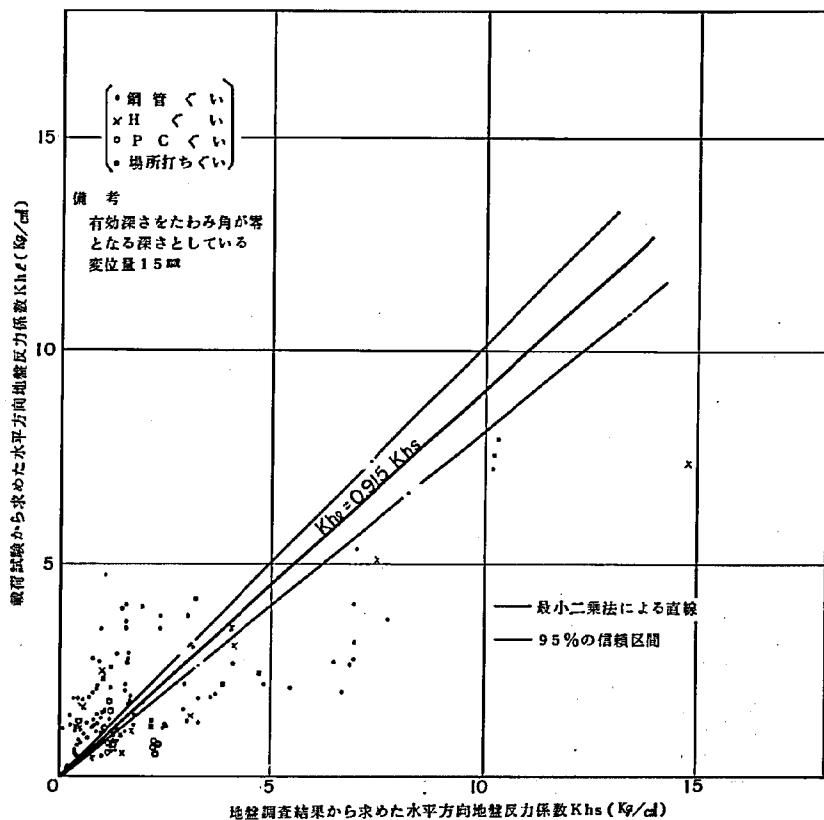


図-20 水平方向地盤反力係数の関係 (13)

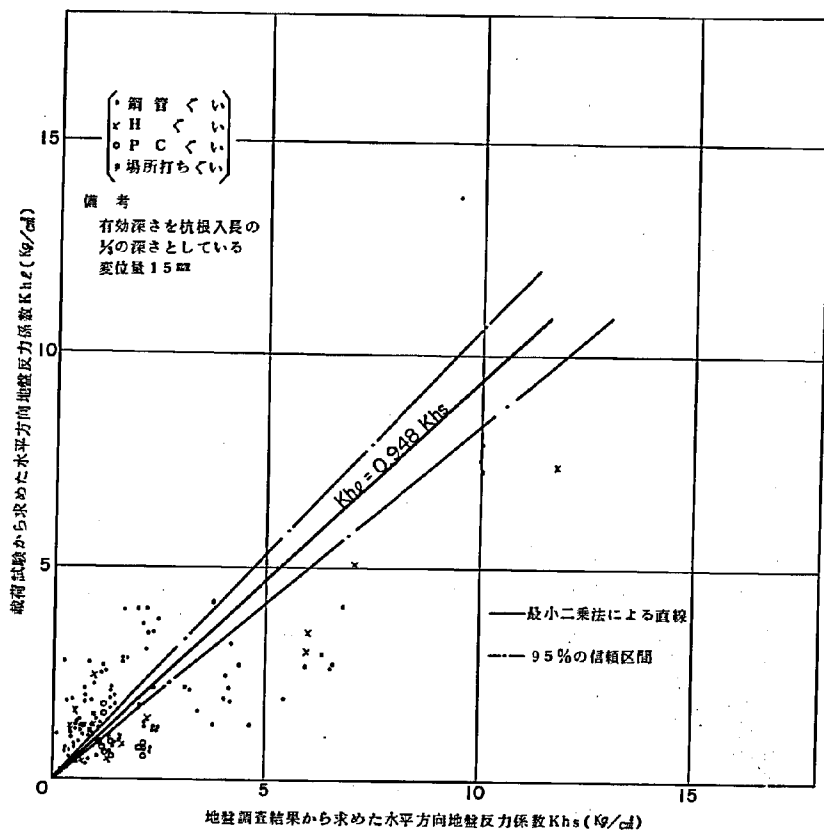


図-21 水平方向地盤反力係数の関係 (4)

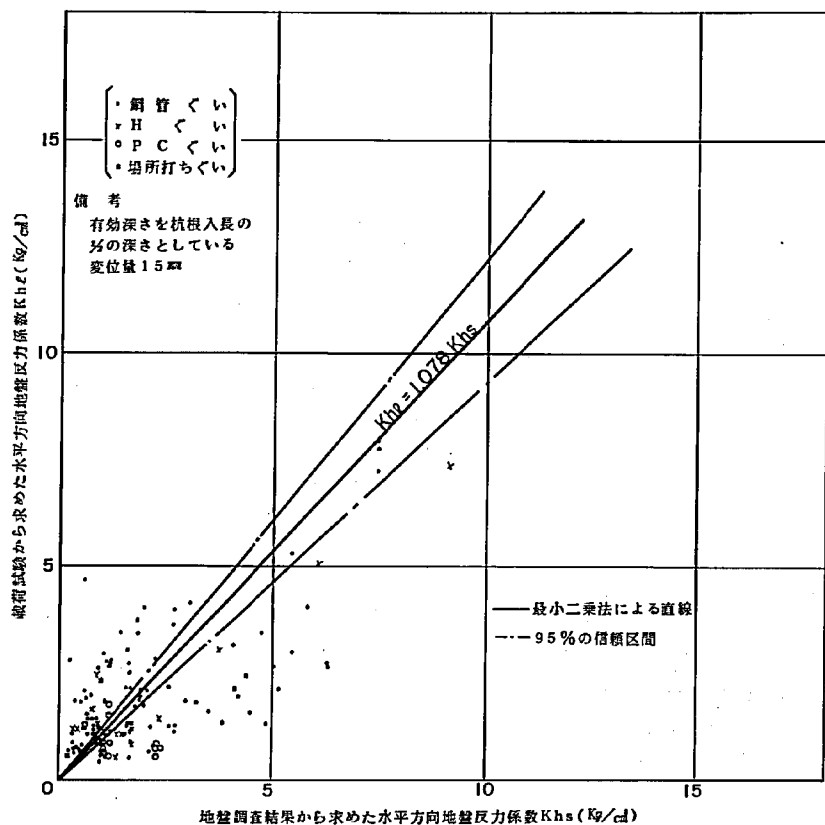


図-22 水平方向地盤反力係数の関係(15)

図-8~22をみると、データにばらつきがあるので、信頼度が問題となる。そこで、それぞれに対応する式(III)の信頼区間を求め、推定値の95%信頼区間を図示した。

図-8~22および表-3から次の点が指摘できる。

- (i) 載荷試験から求まる水平方向地盤反力係数と地盤調査結果から求まる水平方向地盤反力係数の間にはかなりのばらつきがある。これを最確値に着目して考えると、地盤調査結果から求まる水平方向地盤反力係数の方が大きい値を示す傾向にある。このことは、くいの可撓性の影響と載荷面の形状の相違によると考えてよい。
- (ii) 地盤調査結果から求まる水平方向地盤反力係数は載荷幅の $3/4$ 乗に逆比例して減少するために、くいの挙動に影響をおよぼすと考えられる深さを深くしてゆくと、地盤調査結果から求まる水平方向地盤反力係数は小さくなってゆき、載荷試験から求まる水平方向地盤反力係数に近づいてゆき、 a の値が大きくなる。
- (iii) 地表面変位量による増減の割合は影響をおよぼす深さにはほとんど関係なく、地表面変位量 10mm を基準とすると、 5mm の場合には25%増、 15mm の場合には10%減とみなしうる。
- (iv) くいの剛性と載荷面の形状の相違によって、くいの種類別に水平方向地盤反力係数が異なるはずである。しかし、鋼管くい以外のくいについては、図-5からわかるようにデータの数がきわめて少ないので誤差が大きくなる。また、簡単な係数で補正している関係上、くいの種類別に係数を定める必要性もない。したがって、ここではくいの種類別毎に係数を定めることは行わなかった。

(4) Demingの方法による最確値の検討

(3)において最小二乗法を用いて最確値を求めたが、この場合には横座標、すなわち地盤調査結果から求まる水平方向地盤反力係数には、誤差がないものという仮定に基づいて算出されている。しかし、地盤調査結果にも、くいの載荷試験結果に考えられると同じような問題点があり、それから算出された水平方向地盤反力係数には当然誤差が含まれている。したがって、それにも誤差が含まれている場合につい

て、最確値を検討する必要がある。

最確値を求める測定点のたて座標、横座標ともに誤差を有する場合には Deming の方法を利用して計算することができる。いま、この方法を用いて測定値をあてはめ、係数 a を求めることができるが、未知の最確値がひとつであるので計算式が簡単になる。

あてはめる方程式を

$$y = a x \quad (12)$$

と表わし、最確値 a が近似値 a' と補正量 ϵ_a により、

$$a = a' - \epsilon_a \quad (13)$$

であるとする。この場合に補正量 ϵ_a は次のような式で計算できる。

$$\epsilon_a = \frac{[p_o f_o f_a]}{[p_o f_o f_a]} \quad (14)$$

この式中の p_o , f_o , f_a は各測定値の重みを同じとすると、

$$f_o = y - a' x$$

$$f_a = -x$$

$$p_o = \frac{1}{f_o^2 + f_a^2} \quad (15)$$

$$f_a = -a'$$

$$f_r = 1$$

であるから、(14)式は次のようになる。

$$\epsilon_a = \frac{[p_o f_o f_a]}{[p_o f_o f_a]} = \frac{\left[\frac{-x(y - a'x)}{a'^2 + 1} \right]}{\left[\frac{x^2}{a'^2 + 1} \right]} = - \frac{[xy] - a'[x^2]}{[x^2]} = a' - \frac{[xy]}{[x^2]} \quad (16)$$

したがって、

$$a = \frac{[xy]}{[x^2]} \quad (17)$$

この式は横座標に誤差がないと仮定して最確値を求めた場合の式と同一であるので、原点を通る直線のときには、横座標の誤差のある場合にも、ない場合と同じ最確値が得られる。

(5) 条件の相違による水平方向地盤反力係数の比較

(3)において、地表面の変位量とくいの挙動に影響をおよぼす深さを変化させて、くいの水平方向地盤反力係数を算出する関係式を求めたが、それぞれの条件の相違によって計算される値がどのようなになるか、一例を計算して比較してみた。

図-23に示したような地盤の所に、直径81.28mm、肉厚12.7mmの鋼管くいが38mの深さまで打込まれている場合について計算してみた。計算結果になるべく差が生じやすいように、地盤条件が複雑で、載荷試験結果の収集データ数が少ないくい径と根入れ長さの場合を例として取り上げた。計算結果を表-4に示す。表-4の結果は、図-23に示したようなくいの地表面より70cmの位置に載荷されたときに、地表面変位量が5, 10, 15mmに相当する場合の水平方向地盤反力係数を求めたものである。これから次のことが考えられる。

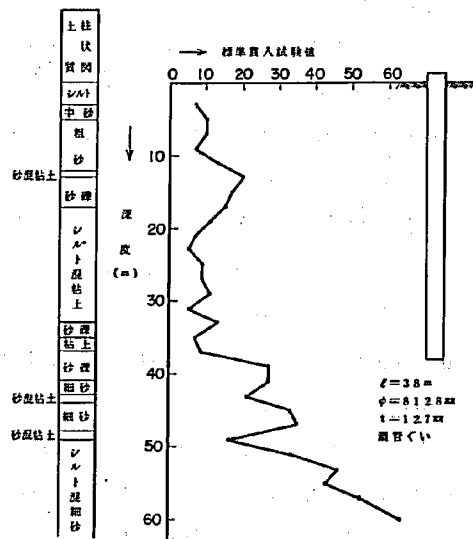


図-23 計算例の条件

表-4 くいの水平方向地盤反力係数の計算例(1)

変位量 mm	(1)				(2)				(3)				(4)				(5)			
	平均値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比	平均値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比	平均値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比	平均値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比	平均値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比
5	7	2.3	1.6	1.27	8	4.9	1.5	1.24	8	7.4	2.0	1.23	10	12.7	2.1	1.26	12	19.0	2.6	1.28
10	7	2.4	1.2	1	8	5.2	1.4	1	9	7.8	1.6	1	10	12.7	1.6	1	12	19.0	2.0	1
15	7	2.5	1.1	0.87	8	5.4	1.3	0.89	9	8.1	1.4	0.89	10	12.7	1.4	0.89	12	19.0	1.8	0.89

(1) 標準貫入試験値を平均する深さは2.3~1.9mであるので、図-23と合せて考えると、標準貫入試験結果の分布から深い位置までを平均した方が大きい

水平方向地盤反力係数が得られている。

- (2) このことは、この計算例では換算載荷幅による減少効果より、標準貫入試験結果の方が大きな影響をおよぼしていることを意味している。この2つの影響の度合は個々の場合によって異なり、この影響によりあまり違う値を与えることは設計上使いづらい。
- (3) しかし、変位量 10 mm に着目してみると、1.2 ~ 2.0 kg/cm² の範囲内にあり、平均して考えると、1.6 kg/cm² 程度の水平方向地盤反力係数とみなしうる。
- (4) 逆に標準貫入試験結果からみてみると、表層近くでは貫入試験の測定値が少なく、また(1)の場合のように、ひとつのN値のみを使用することになると、その値の精度に大きく影響され、特に砂礫が表層に分布するときなどには問題が残る。
- (5) 以上の結果を考えに入れると、少しでも多くのN値より平均値を求めた方が望ましいと考えられ、計算例の場合でも平均的な値を与えている(2)、(3)または(4)の場合が用いやすい。
- (6) 変位量の相違による割合は、変位量 10 mm を基準とすると、5 mm では 25% 増、15 mm では 10% 減である。

以上の考察から、(2)、(3)、(4)が設計上使用されうると考えられるが、これにも一長一短がある。すなわち、(2)ないし(3)によって推定する場合には平均する深さをくり返し計算によって決めなければならず、計算が繁雑となる。また、くい頭条件によって平均する深さが異なってくるため、一義的に定めにくい。これは例えば、図-23の計算例で、地表面突出長がなくくい頭自由な場合については、表-4のようになり、有効数字の関係でわかりにくい、表-5と少し異なった値を与える場合がある。したがって、適用に当たっては繁雑で、むずかしい点が残る。

表-5 くい水平方向地盤反力係数の計算例(2)

変位量	(1)				(2)				(3)				(4)				(5)			
	平均したN値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比	平均N値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比	平均N値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比	平均N値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比	平均N値	平均した深さ	水平方向地盤反力係数	比
5	7	2.9	1.4	1.26	8	5.5	1.8	1.24	9	8.0	2.0	1.27	10	12.7	2.1	1.26	12	19.0	2.6	1.28
10	7	3.1	1.1	1	8	5.8	1.4	1	8	8.5	1.6	1	10	12.7	1.6	1	12	19.0	2.0	1
15	7	3.2	1.0	0.87	8	6.0	1.3	0.89	8	8.6	1.4	0.89	10	12.7	1.4	0.89	12	19.0	1.6	0.89

これに対して(4)を用いると、くり返し計算をする必要がなく、かつくい頭条件によって異なった値を示さない。これらの点を考慮に入れると、(4)を用いるのが最も妥当であろう。

したがって、くいの水平方向地盤反力係数は次式から求めるものが最も望しいと考えてよい。

$$\begin{aligned} K &= 1.367 K_H (\delta = 0.5 \text{ cm の場合}) \\ &= 1.083 K_H (\delta = 1 \text{ cm の場合}) \\ &= 0.948 K_H (\delta = 1.5 \text{ cm の場合}) \end{aligned} \quad (18)$$

ここに、

K : くいの水平方向地盤反力係数 (Kg/cm^2)

K_H : 4(2)で求まる地盤調査結果より算出される水平方向地盤反力係数 (Kg/cm^2)

δ : くいの地表面変位量 (cm)

以上より、上記の考え方にしたがって、くいの水平方向地盤反力係数をひとつの値として推定することができる。(18)式で算出する場合に換算載荷幅 B_H は

$$B_H = \sqrt{\frac{1}{3}} D \ell \quad (19)$$

ここに、

D : くい径 (cm)

ℓ : くいの根入れ長さ (cm)

で与えられるので、くい径と根入れ長さから載荷幅を定め、それを用いて補正式(19)にて算出することに相当すると考えられる。このことは、くい径と根入れ長さという2つの値を固定して算出することに相当する。すなわち、載荷幅は一定となっている。したがって、逆にくい径のみに着目して補正する式を導き、それによる方法によっても同等の価値で有すると考えてよい。その上、くい径のみによると、さらに計算過程が簡単になる利点を有する。

そこで次にくい径に注目した場合についてまとめてみる。

(6) くい径に着目した相関性

(3)でまとめた手法と同じ方法で、くい径を換算載荷幅に用いて相関関係を求めると、図-24~26に示すようになる。この場合に地盤調査結果から水平方向地盤反力係数を求めるときに、標準貫入試験結果を平均する深さとしては、くいの根入れ長さの1/3の位置までとした。表-6 くいの水平方向地盤反力係数計算例(3)

この結果を用いて、図-23の例で水平方向地盤反力係数を計算すると、表-6に示すようになる。表-3の値と比較すると、十分なる精度を有していると考えられる。実用上はこれによる方法が最も簡単である。

変位量	係数 a^*	計算例の水平方向地盤反力係数
5	0.538	2.2
10	0.419	1.7
15	0.353	1.5

$$* K_{1\delta} = a K_{1s}$$

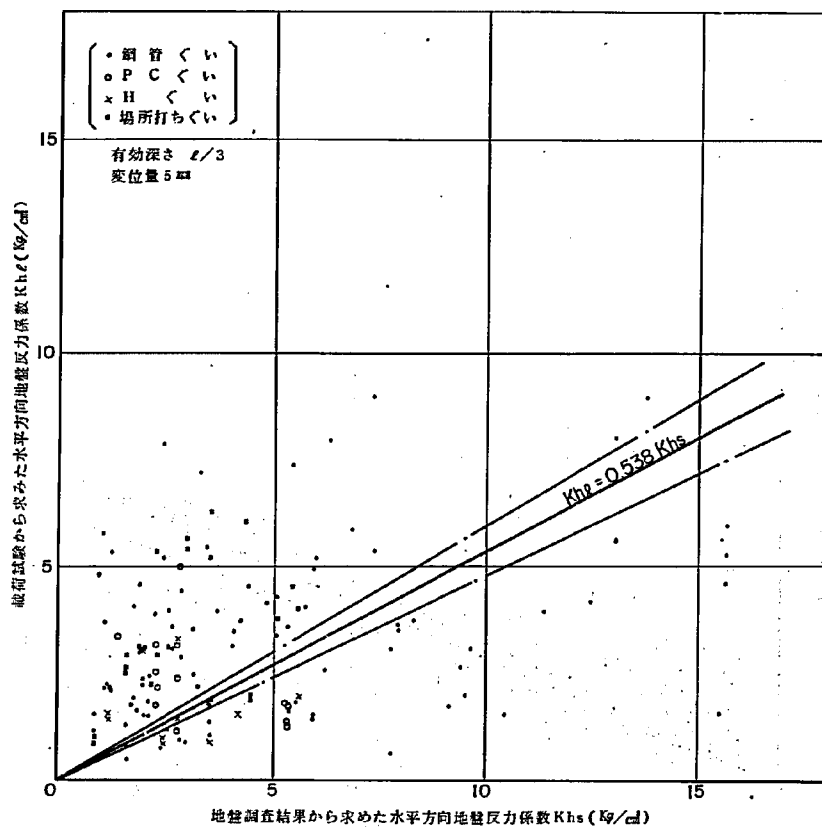


図-24 水平方向地盤反力係数の関係 (16)

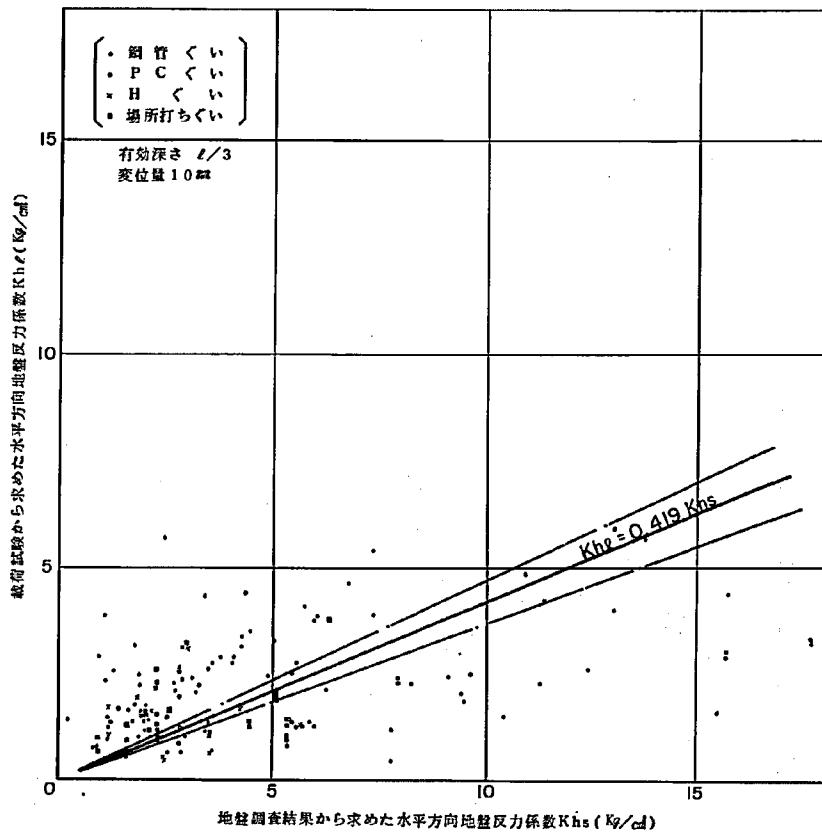


図 - 25 水平方向地盤反力係数の関係 (7)

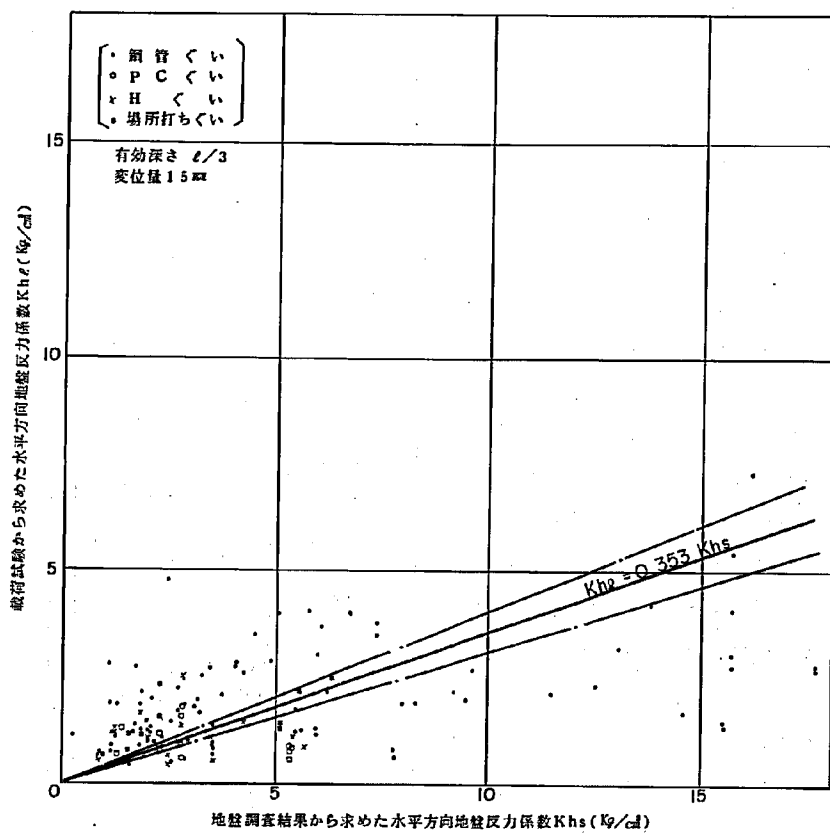


図 - 26 水平方向地盤反力係数の関係 (8)

5. くいの水平方向地盤反力係数の推定

前節で、地表面変位量、くいの挙動に関与する深さ、載荷幅、誤差条件などを変化させて、くいの載荷試験結果に統計的処理を施し、1本のくいの水平方向地盤反力係数の推定値について詳細な検討を行なった。これから、剛体基礎に適用される水平方向地盤反力係数を基準として、それを補正することによってくいの水平方向地盤反力係数とすることができることが判明した。この補正によって、くいの形状、可撓性、地表面の影響を満足させることができた。以下に前節での結果をまとめて、くいの水平方向地盤反力係数の推定方法を述べ、設計との結びつきをはかる。

(1) 現地盤のモデル化

地盤調査結果から各測定点の変形係数 E を図-27のように求める。ある試験方法により変形係数を求める方法は、剛体基礎に適用されるものと全く同一である。例えば、標準貫入試験結果の N 値からは、

$$E_s = 28N \quad (20)$$

となる。

各測定点の厚みを考慮に入れて、くいの根入れ長さの $1/3$ の深さまで、 E_s 値を平均する。

$$\bar{E}_s = \frac{\sum E_s \cdot d}{\sum d} \quad (21)$$

この変形係数のような地盤とみなす。

(2) 水平方向地盤反力係数の推定

基準とする直径30cmの剛体円板による平板載荷試験の値に相当する水平方向地盤反力係数を求める。

$$K_s = \frac{1}{30} \alpha \bar{E}_s \quad (22)$$

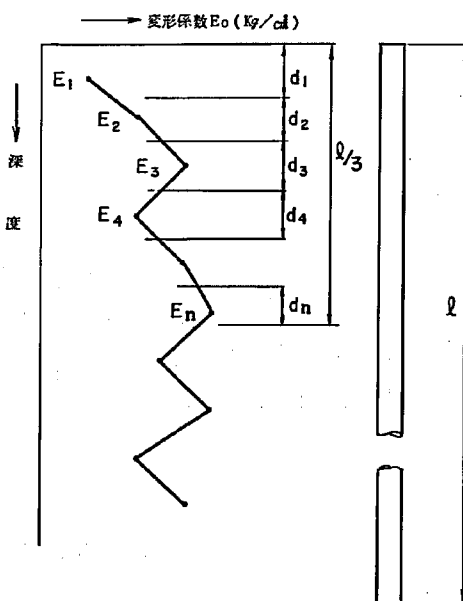


図-27 地盤のモデル化

ここに、 α は変形係数の測定方法の相違に対する補正係数である。これから、1本のくいの水平方向地盤反力係数は次のようになる。

$$K = aK_0 \left(\frac{B_H}{30} \right)^{-\frac{1}{2}} = 128aK_0 B_H^{-\frac{1}{2}} \quad (23)$$

この式において、補正係数 a の値は変位量と載荷幅のとり方によって異った値を示す係数で、表-7にまとめて示す。

表-7 a の 値

載 荷 幅	変位量	a
$B_H = \sqrt{\frac{1}{3}} D \ell$ の場合	5	1.37
	10	1.08
	15	0.95
$B_H = D$ の場合	5	$0.54 = \frac{1}{1.9}$
	10	$0.42 = \frac{1}{2.4}$
	15	$0.35 = \frac{1}{2.8}$

* D : くいの径またはくいの幅

ℓ : くいの根入れ長さ

6. 既往の推定値との比較

2で既往の研究について要約して説明したが、5にまとめた推定値と既往の推定値をここでは比較することとした。

(1) 標準貫入試験との相関による比較

くいの水平方向地盤反力係数は標準貫入試験との相関で表わされることが多いので、標準貫入試験値でもって比較してみた。一例として、地表面変位量が1cmで、標準貫入試験結果を根入れ長さの1/3の位置まで平均した場合についてプロットした結果を図-28に示す。図-28には、5にまとめた推定値、福岡-宇都の推定値、吉中の推定値、赤井の推定値を同時に図示した。

ここでの推定値は吉中の推定値を少し下回っているが、これは地盤調査結果から求められる水平方向地盤反力係数の推定方法が若干異なっていることと載荷試験結果の収集数の相違と考えられる。

福岡-宇都の推定値や赤井の推定値とは異なる値を示しているが、図-28より考えてここでまとめた推定値の方が妥当であるとみなしうる。しかし、標準貫入試験値が小さい所、例えば $N < 3$ の範囲では、ここでの推定値を用いると福岡-宇都の推定値よりかなり小さい値を示している。このことは図-8~22、図-24~26からも載荷試験結果より小さい値を示していると判断することができる。しかし、ここでは一貫したひとつの方法で推定することとした。

また、本資料での推定値により、換算載荷幅を用いて求めると、くいの根入れ長さによって水平方向地盤反力係数が異なってくる。これはくいの挙動を考えると矛盾していることになるが、図-28では標準貫入試験値が深さ方向に変化しないという仮定が入っているため、実際には深さ方向に変化するので問題はないと考えられる。

(2) くい径による比較

くい径との相関を図-29に示す。図-29は横軸にくい径、たて軸にボーリング孔内試験から求まる変形係数に相当する値と水平方向地盤反力係数の比をとってプロットしたもので、図-28と同様に地表面変位量1cmで、根入れ長さの1/3

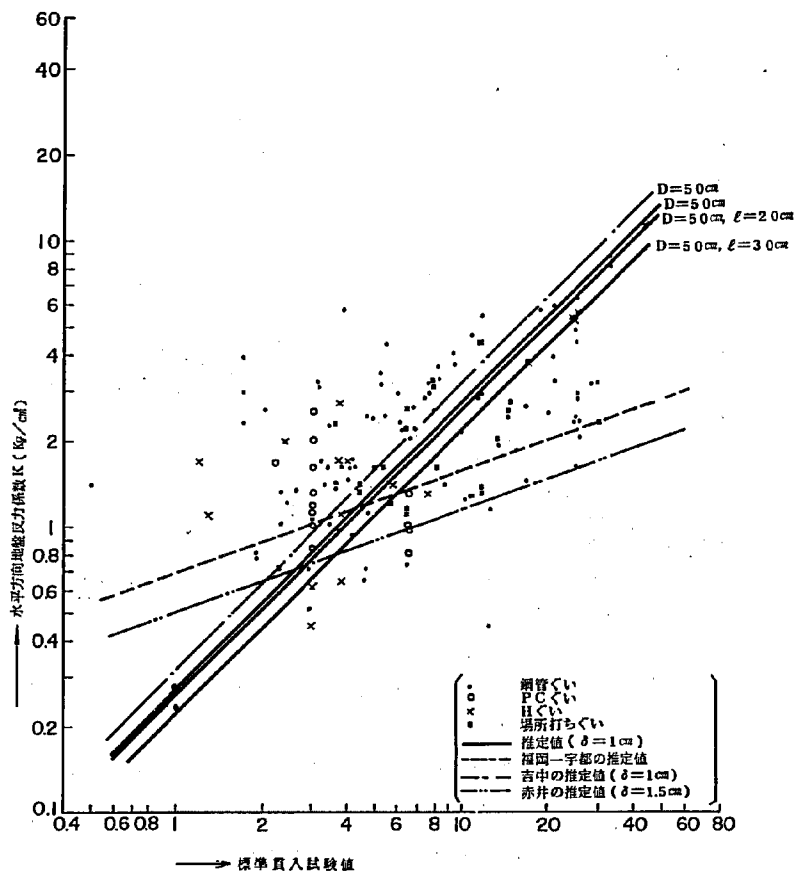


図-28 標準貫入試験との相関

の位置まで平均したものが図示してある。この図のたて軸はメナールがくい径との相関で図示したものと同一である¹¹⁾。

図-29より、メナールの砂質土と粘性土に対する推定値の中間の値を示し、吉中の推定値と大差ないことがわかる。

载荷幅として、換算载荷幅を用いたものとくい径を用いたものとは少し差があり、

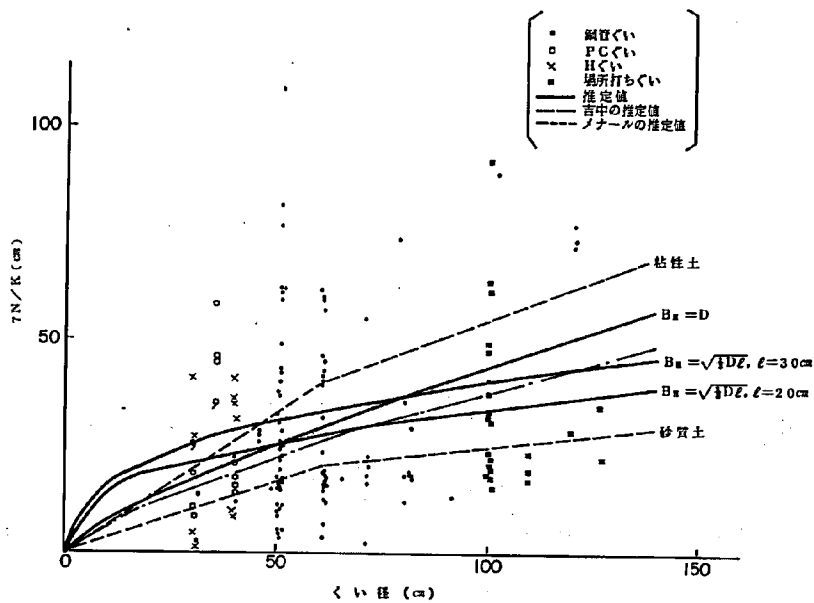


図-29 く い 径 と の 相 関

いずれも径の増大とともに水平方向地盤反力係数が小さくなっているが、換算載荷幅を用いたものは減少割合が少ない。このことは、くい径がある程度以上大きくなると減少割合が少くなるという、久保が示している模型実験結果に近い値を与えている。

(3) 根入れ長さによる比較

既応の推定値で根入れ長さが水平地盤反力係数を求める要素となっているものはない。本資料による推定方法では換算載荷幅を用いたときに根入れ長さが考慮に入

られていること、地盤の変形係数を推定するときに深さ方向に平均化することのひとつの特色がある。

第一の点については、係数で補正することになっているので、全く問題はなく、第二の点については、地盤の変形係数をなるべく多く平均することが望しく、これについてはすでに説明されている。

(4) 変位による比較

地表面変位量を考慮に入れて水平方向地盤反力係数を求めているものは、久保の方法と今井の方法がある。これによると、 $y = 1 \text{ cm}$ に相当するときの値を基準値とすると、一般に、

$$k_r = k \cdot y^{n-1} \quad (24)$$

で与えられ、 n の値を種々な方法により決めているものである。

いま、 $0.5, 1.5 \text{ cm}$ に対する比を示すと、表-8のようになる。これからわかるように、本資料での推定方法によると、従来のものより変化割合が少ない。これは、従来の推定方法では、

表-8 変位による比較

変 位	推 定 値	久保による推定値	今井による推定値
0.5 cm	1.2 5	1.4 1	1.41~1.58
1	1	1	1
1.5	0.9 0	0.8 2	0.76~0.82

1本のくいについて変位を変化させてその変化状態を追求しているが、ここでは各載荷曲線から相当する変位に対する荷重を求めてそれから相関関係を求めているので、若干の相違がでたと考えられる。すなわち、荷重-変位曲線の最確値を求めていることに相当するとみなしうる。本資料では設計という観点からまとめているので、この方法で十分な信頼性を有していると考えてよい。

(5) 非線型性を考えた場合との比較

2で説明したように、非線型性を直接考慮に入れた場合には、本資料で取扱った地盤反力係数とディメンションが異っている。したがって、簡単に比較することができない。そこで特別な場合について比較することとする。

いま、深さ 1 cm の位置で、くい頭変位量を 1 cm とすると、そのときの値がKDに

相当し、本資料で取扱っている地盤反力係数にくい径を乗じたものに相当する。この仮定のもとで、S型地盤とC型地盤の場合と本資料の推定値を図示すると、図-30のようになる。

これによると、S型地盤、C型地盤いずれの値をも大きく上まわった値を示している。このことは一般に複雑な地盤の場合には、簡単にモデル化した地盤で考えることがむずかしいことを表わしている。このことから地盤の非線型性を考慮に入れて直接計算することは非常にむずかしいことがわかる。

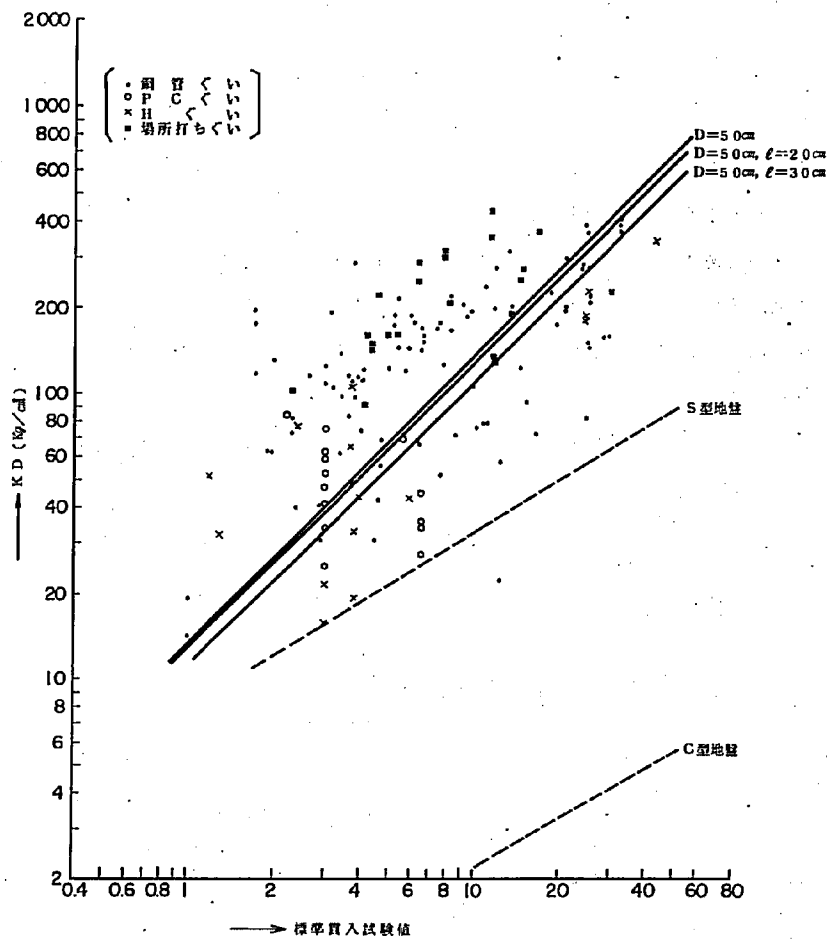


図-30 非線型性理論との対比

7. あ と が き

以上で、ケーソン基礎に用いる水平方向地盤反力係数を発展させることによりくい基礎に用いる水平方向地盤反力係数を推定する方法を述べた。ここで示した水平方向地盤反力係数はくい1本に対して適用されるものであるので、くい群になったとき、どのような値を示すかは今後の問題として残る。これについては現在データを整理中であるから、いずれ機会を見て印刷したい。

また、くいの形状による補正がどれ位かについて、すなわち本資料で説明した補正量の内訳を調べる必要がある。これについては、まもなく実験を行ない、理論値と合わせる予定にしている。

この資料がくい基礎を設計する上で、設計者の一助となれば幸いである。

以 上

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針・ケーソン基礎の設計篇，昭和45年3月
- 2) 吉田 巖，足立義雄：ケーソン基礎の静的水平抵抗に関する実験研究，土木研究所報告 第139号，昭和45年3月
- 3) 吉田 巖：くい設計に用いる横方向地盤係数K値について(I)，土木技術資料5-11，昭和38年5月
- 4) 吉田 巖：くい設計に用いる横方向地盤係数K値について(II)，土木技術資料6-11，昭和39年5月
- 5) 今井常雄：地盤の横方向K値の研究(3) — 設計に用いるK値，土と基礎17-11，昭和44年11月
- 6) 土質工学会：鋼グイ — 鋼グイ研究委員会報告，昭和44年9月 など
- 7) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針・くい基礎の設計篇，昭和39年3月 など
- 8) 吉中龍之進：地盤反力係数とその載荷幅による補正，土木研究所資料第299号，昭和42年7月
- 9) 今井常雄：水平力をうけるクイの挙動の推定 — L L T測定結果の適用，第3回土質工学研究発表会，昭和43年6月 など
- 10) 久保浩一：杭の横抵抗の新しい計算法，港湾技術研究所報告，第2巻第3号，1964年 など
- 11) L. Ménard : Regles pour le calcul de la force portante et du tassement des foundations en fonction des resultants pressiométriques, Proc. of 6th Int. Conf. of S.M.F.E.