



土 木 研 究 所 資 料

第 8 4 8 号

くい先端部の閉塞効果について

昭和 48 年 5 月

建 設 省 土 木 研 究 所

ま え が き

先端開放ぐいの閉塞効果を判定するために、模型ぐいを使って、内部侵入土の抵抗特性とぐいの鉛直支持力性状との関連を調べた。

使用したぐいは、径 48.6 mm から 216.3 mm までの範囲であり、一様砂地盤中に根入れ長を変えて実験を行なった結果、同一地盤条件においては、内部土の抵抗は根入れ比（ぐいの根入れ長／ぐいの内径）をパラメーターとして表示しうることがわかった。一方、地盤条件、施工条件から決まるパラメーターとしては、ぐい内壁に伝わるせん断応力と内部土の鉛直応力の比および、発揮されるせん断応力の最大値の 2 つが支配的な影響を及ぼすことが明らかになり、以上 3 つのパラメーターを使って、内部侵入土の抵抗力を求める実験式を得た。

他方、ぐい先端地盤の支持力度も根入れ比と共に増大するが、根入れ比がある程度以上になるとほぼ頭打ちになった。そこで、内部侵入土と先端地盤のそれぞれの抵抗特性を比較することによって、砂層に支持された先端開放ぐいの支持力を根入れ比の関数として表示することを試みた。

なお、実験の実施と結果の整理にあたっては大槻省吾技官、島崎一男技官に多大な協力を得たので感謝の意を表する。

昭和 48 年 5 月

基礎研究室

駒 田 敬 一

山 川 朝 生

くい先端部の閉塞効果について

目 次

1. 目 的	1
2. 実験方法	1
3. 実験結果	7
4. 考 察	19
5. ま と め	29

1. 目 的

近年、構造物の大型化、施工の省力化の要請とそれに伴う施工技術の進歩によって大口径のくいが盛んに用いられるようになった。従来一般に使われてきたくい基礎においては、先端開放であっても打込み中に内部へ侵入する土砂によって充分な閉塞効果を与えられるものと見なされてきた。ところがくい径が大きくなると、中掘り工法によって設置するくいはもちろんのこと、打込みくいであっても、土質、根入れ深さによっては内部侵入土に完全な閉塞効果を期待することができない。従ってこの場合には、閉端の基礎とは異なった方法で先端抵抗を評価しなければならないが、支持力機構に不明確な点が多いため、現場での載荷試験によって支持力を確認しているのが現状である。

今回の実験は、先端開放の打ち込みくいを対象とし、一様な砂地盤での模型実験によって支持力機構を調べることを目的とした。特に、以下にあげる項目を重点にとりあげ、測定、検討を行った。

- 1) 打込み深さと内部土の侵入量の関係
- 2) 打込みエネルギーと内部土の侵入量の関係
- 3) 内部土の侵入量と密度の関係
- 4) 打込み深さと内部土の摩擦抵抗の関係
- 5) 4)に及ぼすくい径の影響
- 6) 先端地盤支持力と内部土摩擦抵抗との大小比較による閉塞性の判定

2. 実験方法

実験はいずれも基礎研究室実験土槽 ($8\text{ m} \times 5\text{ m} \times 4\text{ m}$) において、模型くいを使って行なったが、46年度、47年度の2回にわたって実施したので、前者を実験-I、後者を実験-IIとして以下にその方法を述べる。

1) 実験-I (46年度実施)

実験地盤は、土槽の砂を3m掘削排土した後、厚さ20cmずつ15層に分けて、バイブレータにより一様に締め固めた。使用した砂の粒径加積曲線を図-2.1に、締め固め時にサンプリングして得た各層の含水比、密度の分布図と、試験後に行なった標準貫入試験の結果を図-2.2に示す。

模型くいとしては $\phi 48.6\text{ mm}$ と $\phi 101.6\text{ mm}$ の2種類の鋼管4本を用いたが、先端開放のまま打ち込むため、ゲージ保護を目的として、貼付位置に図-2.3に示すような溝(幅5cm)を円周

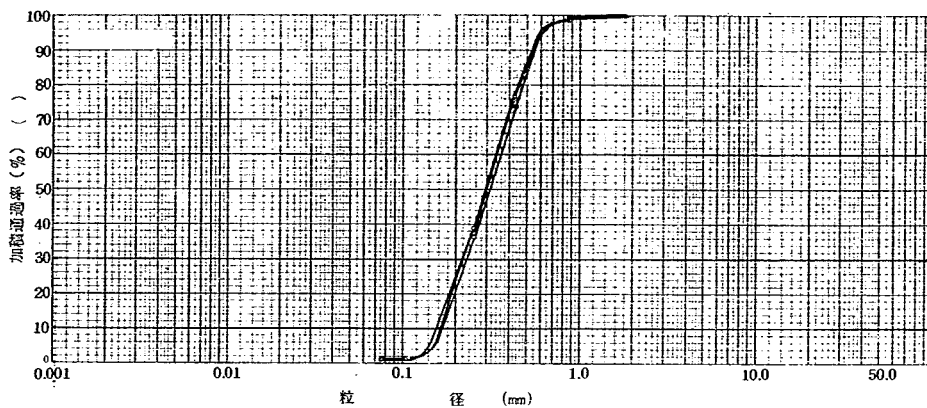


図-2.1 実験砂の粒径加積曲線

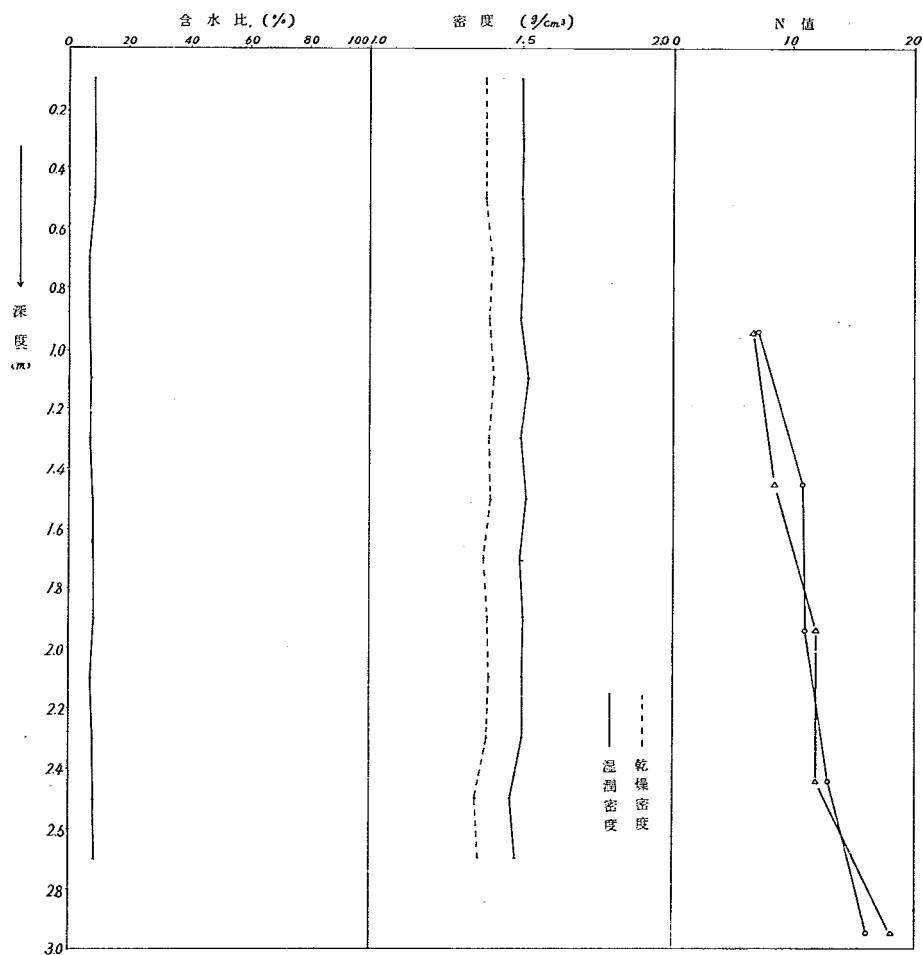


図-2.2 実験 I 地盤 - 含水比・密度・N 値分布

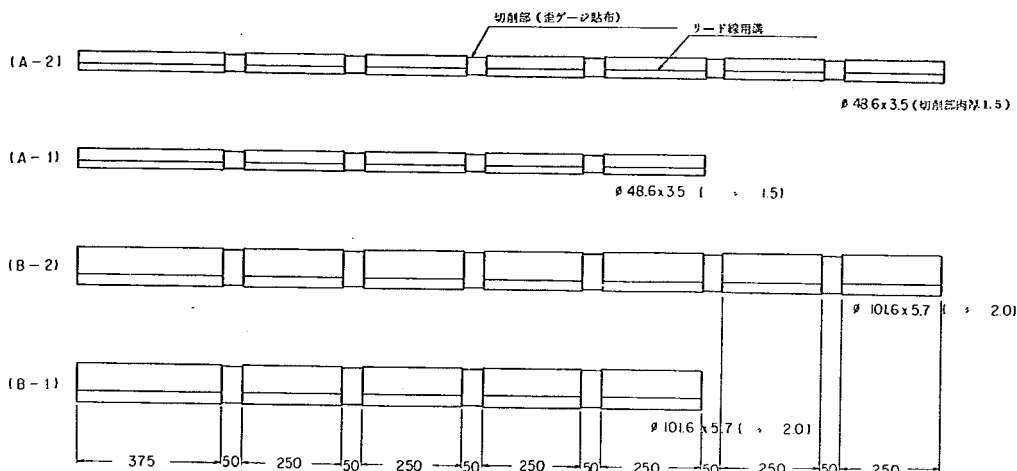


図-2.3 実験-I 模型ぐい諸元

方向に切削した。そして、ゲージ貼付後アルラナイトとハマタイトによって埋め戻し、ぐい表面と面を合わせた。一方、リード線はホルマル線（単線，抵抗 $0.086 \Omega/m$ ）を用い、やはり杭の軸方向に切削した細い溝を通して、表面からはみ出ないようにした。ゲージは箔ゲージを各断面につき4枚ずつ貼付し、いずれも実験前にキャリブレーションを行なって使用した。

ゲージ貼付終了後の模型ぐいを写真-1に示す。

模型ぐいは、周囲にガイドを設置してから標準貫入試験用の落錘（63.5kg）を所定の高さから落下させて打ち込み、打撃によるひずみを測定すると共にぐい中におろしたさげふりによって内部に侵入する土の高さを逐次測定した。落下高さは20 cmから70 cmまで適宜選択して決めた。打ち込み要領図を図-2.4に示す。

今、図-2.3に従って、径48.6 mm，長さ1575 mmのぐいをA-1，長さ2175 mmのぐいをA-2，径101.6 mm，長さ1575 mmのぐいをB-1，長さ2175 mmのぐいをB-2と名付ける。実験順序は、A-1，B-1ぐいについては根入れ長1.0 m，1.4 mの位置で鉛直載荷試験（緩速多サイクル試験）を行なった後，1.4 m位置で引

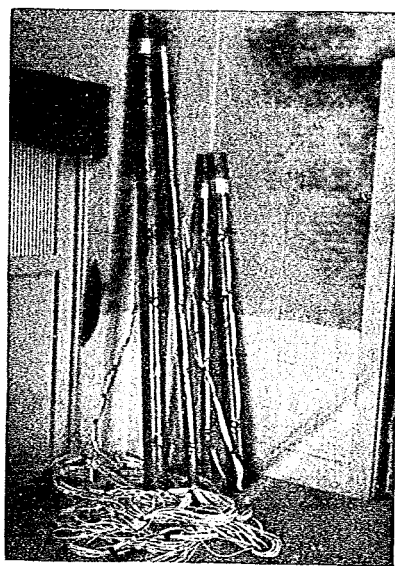


写真-1 実験-I 模型ぐい

抜試験（緩速多サイクル試験），およびくい周辺の土の締まり具合を調べるため，急傾斜地崩壊研究室で開発した簡易貫入試験機を借用して，周辺土の貫入試験を実施した。

さらにその後，くいを掘り出して横にし，内部に侵入した土の押し抜き試験を行なった。

一方，A-2，B-2 ぐいについては根入れ長 1.4 m，1.7 m，2.0 m の位置で鉛直載荷試験を行なった後，2.0 m 位置で引抜試験，くい周辺土の貫入試験を行ない，その後，くいを掘り出して内部侵入土の押し抜き試験を実施した。押し抜き試験の要領図を図-2.5 に示す。

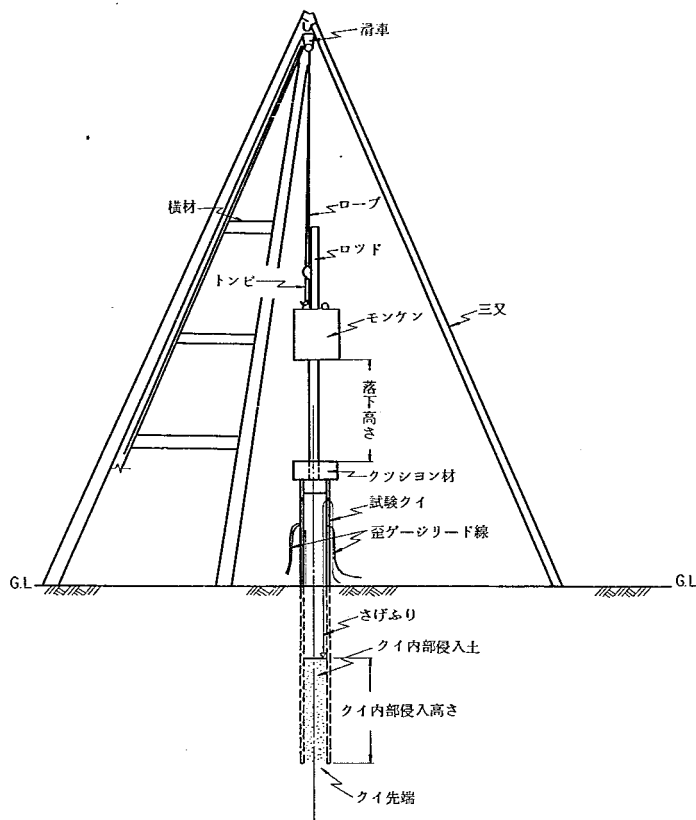


図-2.4 くい打込み要領図

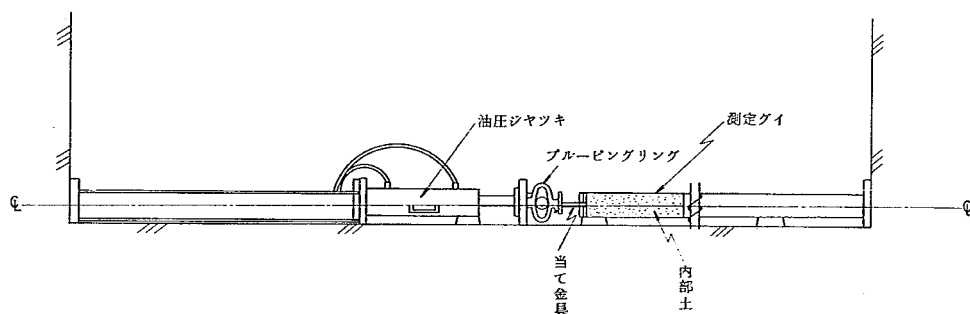


図-2.5 押し抜き試験要領図

2) 実験-II (47年度実施)

実験-Iでは、くい外周面に働く摩擦力の影響を調べるために、くい体に細かい加工をしてひずみゲージを貼付したが、試験の結果、くい周面の摩擦力はほとんど無視しうる大きさであることがわかった。さらに、実験-Iではくい本数が少ない上に、根入れ長に比較してくい径が小さいために、閉塞効果の判定に関する十分なデータが得られなかった。そこで、実験-IIでは、打込み時にはゲージを貼らず、くい径と根入れを多様に変えて実験し、閉端ぐいとの比較も行った。

実験地盤は、実験-Iと同一の砂を深さ2mにわたって同じ方法で様に締固めた。従って、図-2.6に示すように、密度、含水比共、実験-Iとほぼ同一条件である。今回は力学試験は行なわなかったが、これまでの試験データから内部摩擦角は $25 \sim 30^\circ$ 程度と推定される。

模型ぐいは開端ぐい15本、閉端ぐい4本の計19本の鋼管を使用した。それぞれのくい径、肉厚、根入れ長、断面率を一括して表-2.1に示す。ここで断面率とは、鋼管の純断面積を全断面積で割った値を指し、最小径である $\phi 48.6$ のぐいと、比較のために意図的に肉厚を厚くした $\phi 101.6$ のぐいを除いては、開端ぐいの断面率は10%程度である。表-2.1にあるように、くい径は4種類とし、それぞれについて根入れ長を3通りに変えた。その他、 $\phi 101.6$ のぐいについては、断面率の影響を調べるため肉厚を2種類に変え、また各くい径につき、根入れ1mの開端ぐいを打設して載荷試験を行ない、開端ぐいとの比較をした。ただし、 $\phi 216.3$ のぐい

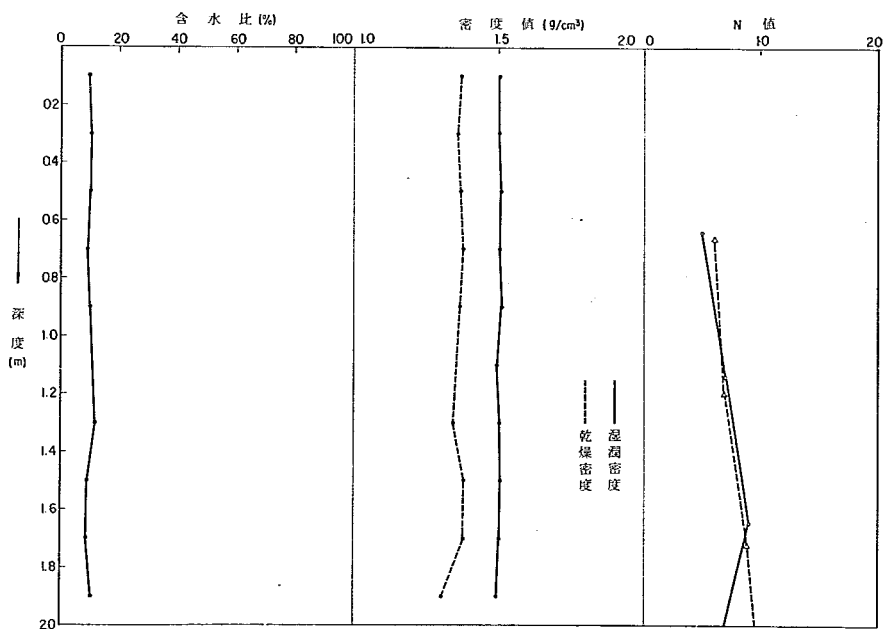


図-2.6 実験-II 密度分布

表-2.1 実験-II 模型くい諸元

	くい諸元 No.	くい径 (mm)	肉厚 (mm)	根入れ長 (cm)	断面率 (%)
開 端 く い	1	48.6	2.4	30	18.3
	2	48.6	2.4	60	18.3
	3	48.6	2.4	100	18.3
	4	101.6	3.2	30	12.2
	5	101.6	3.2	60	12.2
	6	101.6	3.2	100	12.2
	7	101.6	5.7	30	21.2
	8	101.6	5.7	60	21.2
	9	101.6	5.7	100	21.2
	10	165.2	4.5	50	10.6
	11	165.2	4.5	100	10.6
	12	165.2	4.5	150	10.6
	13	216.3	5.8	50	10.4
	14	216.3	5.8	100	10.4
	15	216.3	5.8	150	10.4
閉 端 く い	16	48.6	2.4	100	18.3
	17	101.6	3.2	100	12.2
	18	165.2	4.5	100	10.6
	19	216.3	5.8	90	10.4

については打ち込み不能のため、あらかじめ60cmだけ地盤を掘って建て込んだ後、90cmまで打ち込んだ。

打ち込みは、実験-Iと同じく、くい周囲にガイドをしてから、落錘(63.5Kg)を5cmから1mの範囲で適宜定めた高さから落下させて、所定の深さまで入れた。

打ち込まれたすべてのくいについて鉛直載荷試験(急速2サイクル試験)を実施した後、開端くいを掘り出して横にし、内部に侵入した土の抵抗と、それが壁面の摩擦を通してくい体に伝達される機構を調べるため、くい外周面にひずみゲージを貼布してから押し抜き試験を行ない、さらに、鋼管を輪切りにして、試験終了後の内部土の密度分布も調べた。ただし、各くい径において、一番根入れが深いくいについては、内部土に十分大きな抵抗が予想されたので、押し抜き試験は省略し、密度測定だけ行なった。したがって、この場合には、くいを地盤中に打ち込んだ状態での、内部侵入土の密度分布が得られることになる。

3. 実験結果

1) 実験-I

実験-Iで行なった諸試験の結果は「くい閉塞効果に関する委託試験報告書」(昭和47年)にすべて記載されているので、ここでは省略し、必要なデータについては、次の2)実験-IIの項に含めて述べる。ただし、図-3.1に1例をあげたように、載荷試験時のひずみゲージの測定結果より、今回の試験ではくい外周面の摩擦は十分小さいことが明らかになり、しかも実験-IIでは根入れ長がさらに短いことから、以下の結果の整理では周面摩擦の影響は無視して考える。

2) 実験-II

1) くい打ち込みと、それに伴う内部土砂の侵入

打ち込みによるくいの貫入量と、その時の内部土の侵入量の相関関係をくい径ごとに図-3.2~3.6に示す。この曲線と45°の直線との勾配のずれが、内部土の高さと地盤面との差の広がり程度を表わすことになる。この差は、くい径が小さいほど少ない根入れから表われてくるが、くいの貫入量、内部土の侵入量をともにくい内径で割って無次元表示すると、図-3.7に示すようにくい径によらず、ほぼ同一の曲線になる。このことは、くいの先端閉塞効果は、くい貫入量を内径で割った値

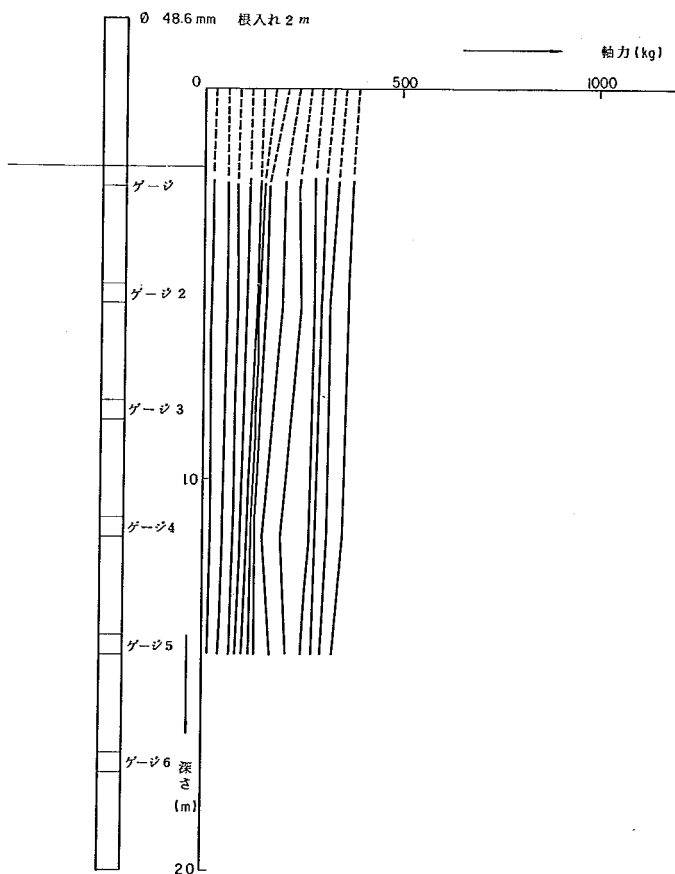


図-3.1 鉛直載荷試験軸力分布(1例)

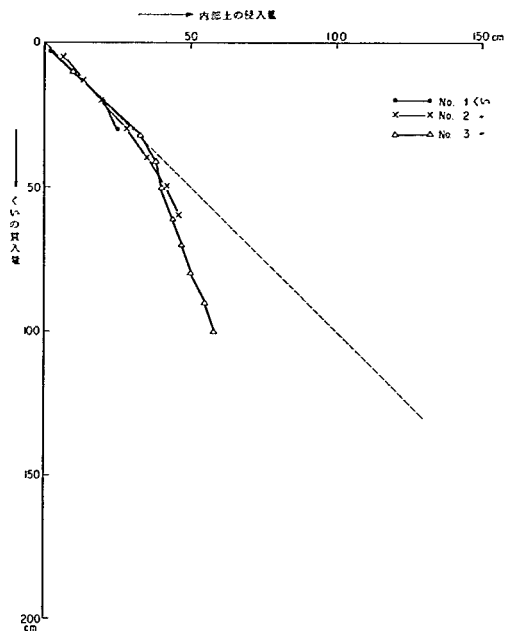


図-3.2 くいの貫入量—内部土の侵入量
($\phi 48.6$, $t 2.4$)

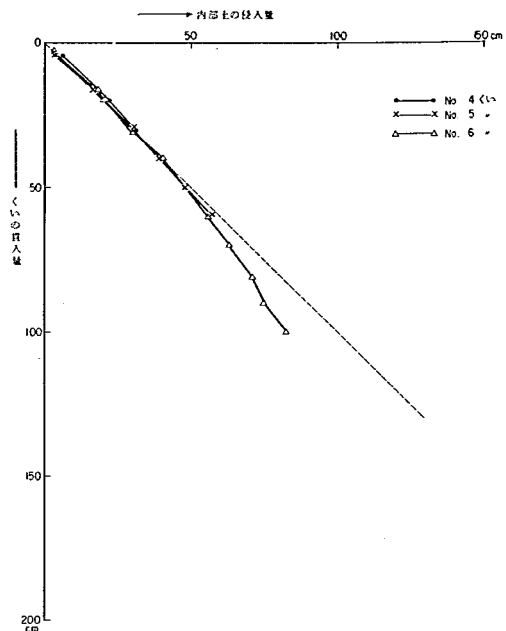


図-3.3 くいの貫入量—内部土の侵入量
($\phi 101$, $t 3.2$)

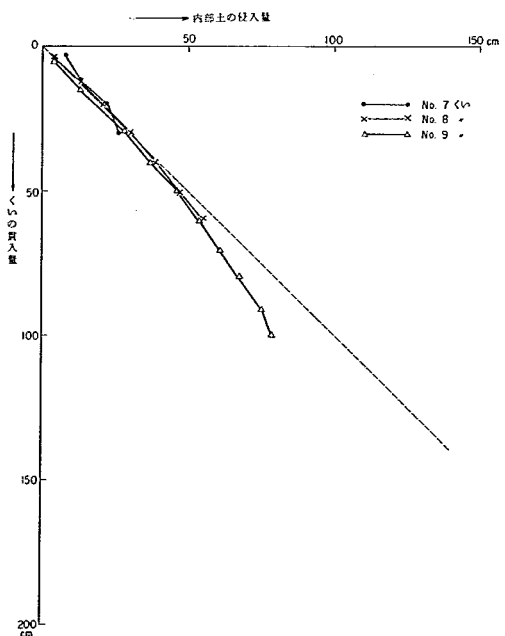


図-3.4 くいの貫入量—内部土の侵入量
($\phi 101.6$, $t 5.7$)

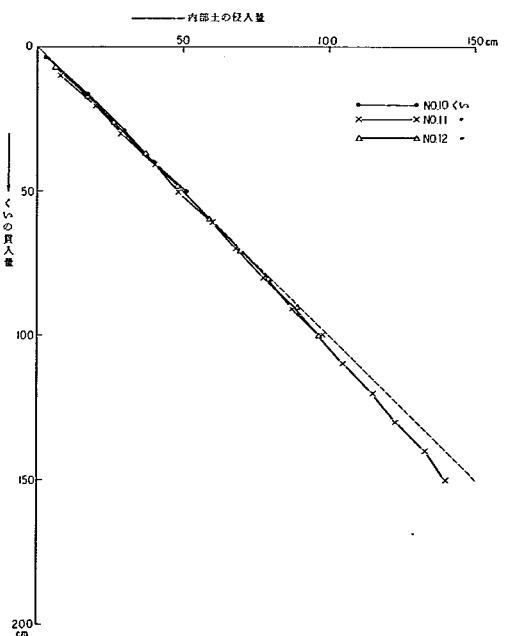


図-3.5 くいの貫入量—内部土の侵入量
($\phi 165.2$, $t 4.5$)

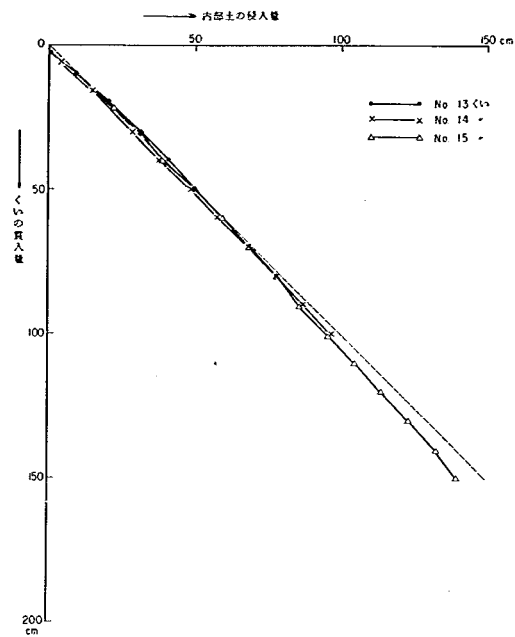


図-3.6 くいの貫入量—内部土 ($\phi 101.6$, $t 3.2$) の侵入量

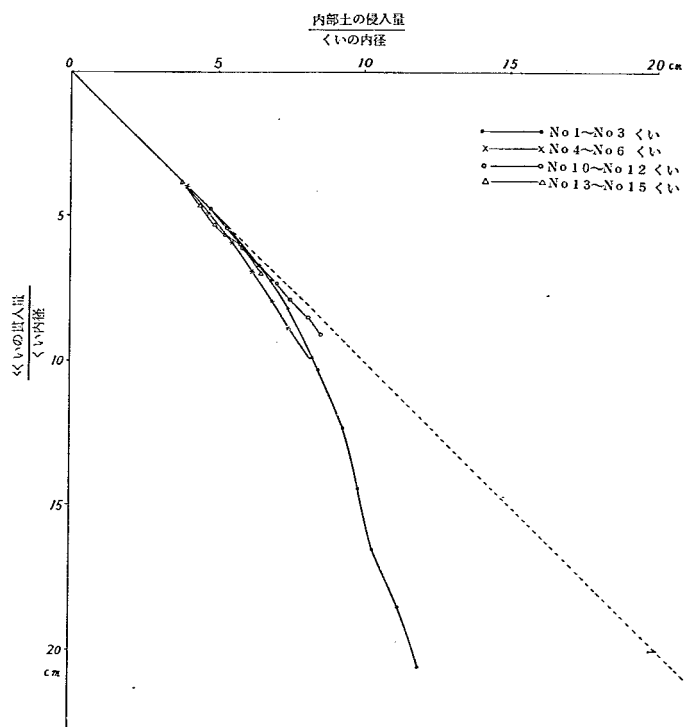


図-3.7 くいの貫入量比—内部土の侵入量比

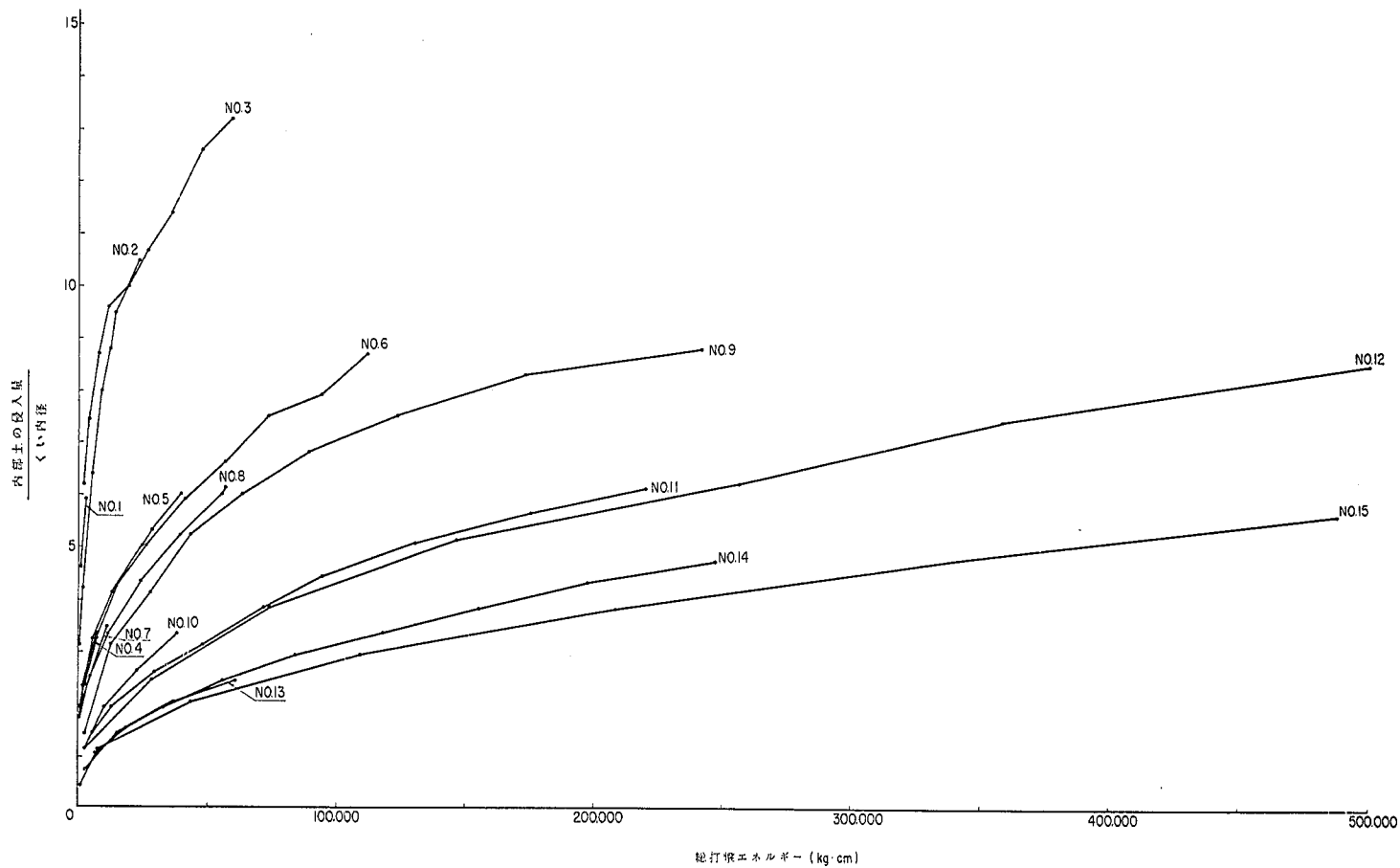


図 - 3.8 内部土の侵入量比 - 総打撃エネルギー

をパラメーターにして判定しうることを示唆している。

一方、内部土の貫入量と、打撃エネルギーとの関係を調べるために、縦軸に内部土の侵入量をくいの内径で割った値、横軸に、そこまで打ち込むのに必要とした総打撃エネルギーをとってグラフ化した(図-3.8)。ここで総打撃エネルギーとは、落錘重量(W)と落下高さ(H)の積($W \times H$)を1打撃あたりのエネルギーとし、それを累加したものである。次に、横軸の総打撃エネルギーをくいの内径の3乗で割った値に変えて表現しなおすと、図-3.9に示すようにくいの径によらずほぼ同一の曲線に集まる。このことについては4のV)で言及する。

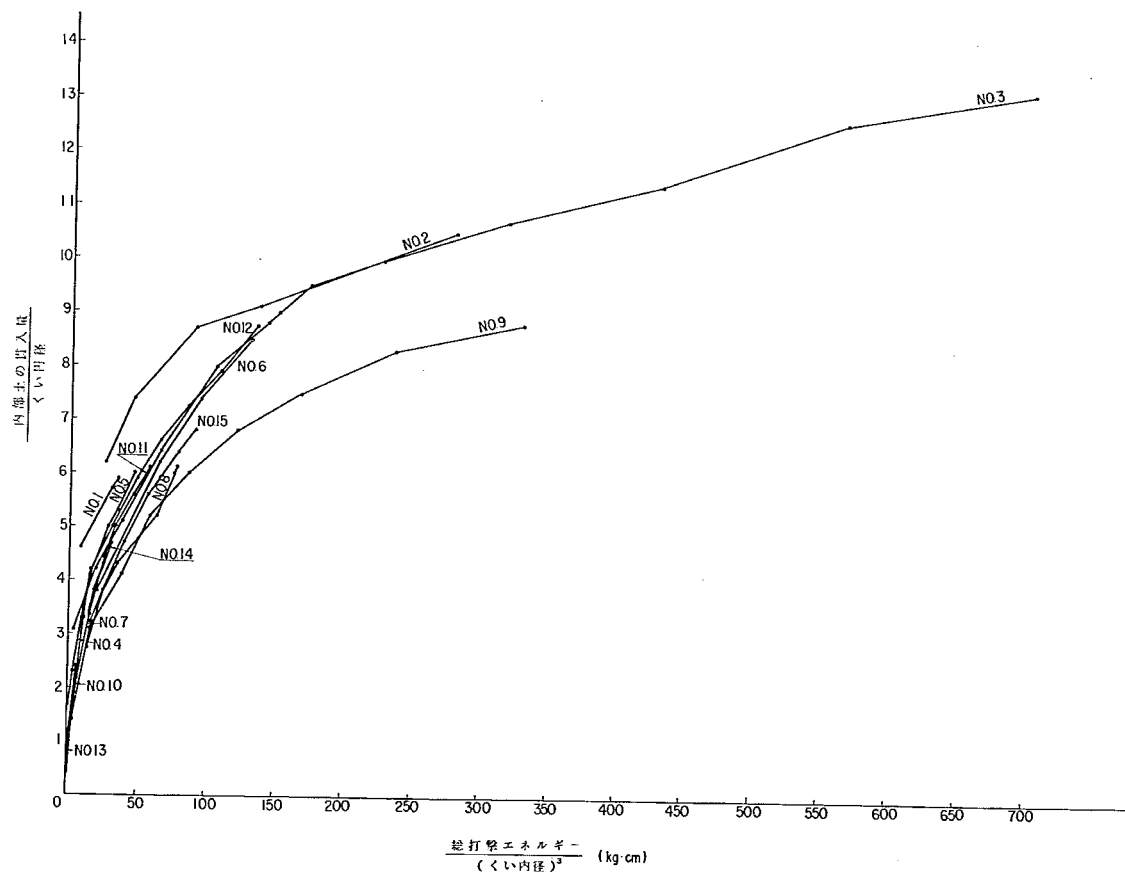


図-3.9

ii) 鉛直載荷試験

各くいの鉛直載荷試験の結果、くい径ごとに図-3.10～図-3.15に示す。載荷試験は多サイクルで行なっているが、図には荷重-変位曲線の包路線を示してある。

iii) 内部侵入土押し抜き試験

開端ぐいのうち、内部侵入土の押し抜き試験を実施したくいについて、内部土の極限抵抗力とそのくいの極限鉛直支持力を表-3.1に示す。この結果、 N_4 、 N_7 、 N_{13} のくいについては内部土の抵抗力が極限鉛直支持力に近いか、それより小さく、くいの支持力が内部土の抵抗によって決まっていることがわかる。

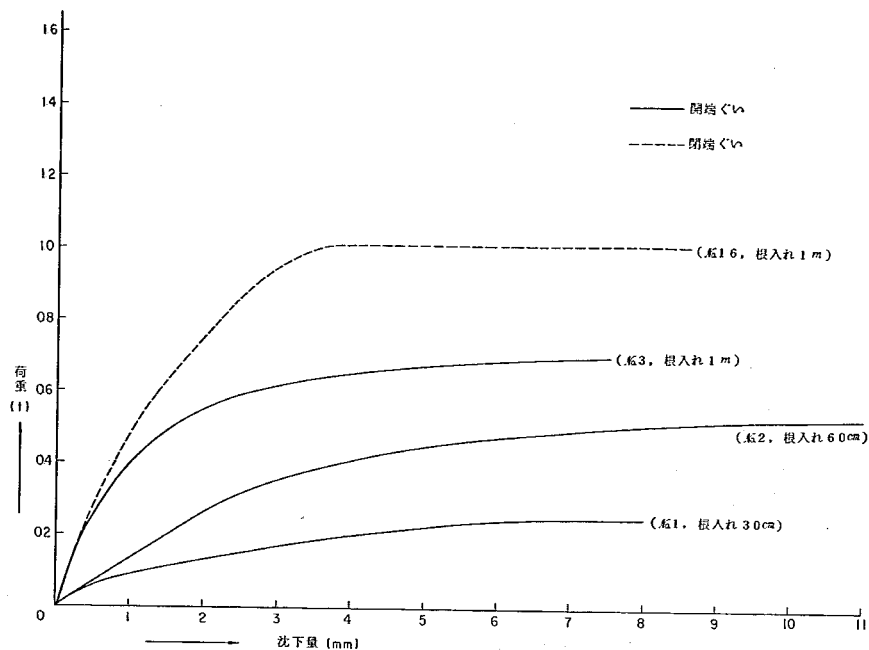
表-3.1 くいの極限鉛直支持力と内部土の押し抜き極限抵抗力

くい№	くい径(mm)	肉厚(mm)	根入れ長(cm)	内部土侵入高さ(cm)	極限鉛直支持力(t)	内部土の押し抜き極限抵抗力(t)
1	48.6	2.4	30	26	0.255	1.8
2	48.6	2.4	60	46	0.6	5.4
4	101.6	3.2	30	31	1.12	1.39
5	101.6	3.2	60	57	1.4	13.9
7	101.6	5.7	30	31	1.0	0.75
8	101.6	5.7	60	55	1.9	5.8
10	165.2	4.5	50	51	2.7	4.43
11	165.2	4.5	100	96	5.04	>20.0
13	216.3	5.8	50	50	3.7	2.3
14	216.3	5.8	100	97	7.5	>20.0

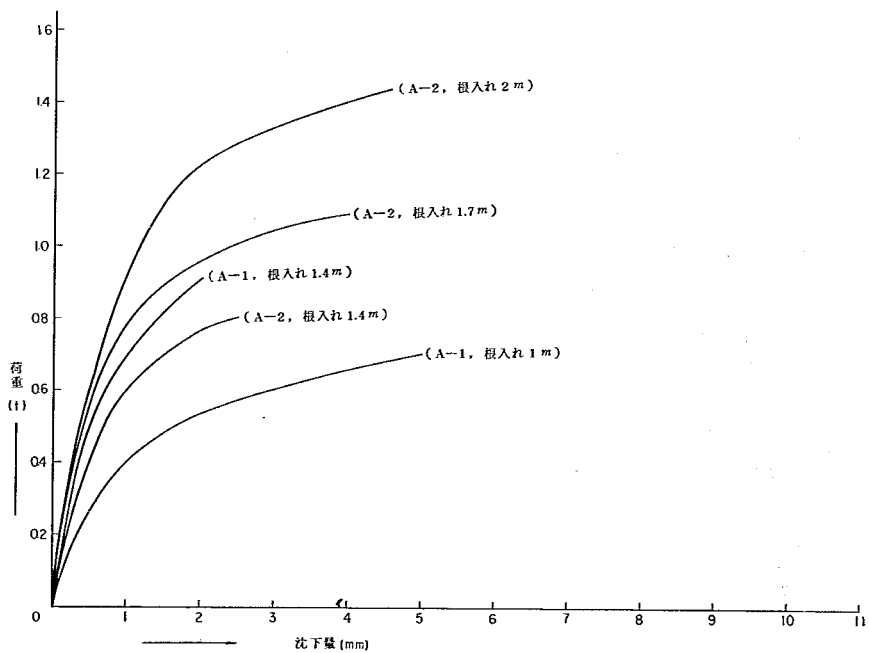
iv) 内部侵入土の密度分布

開端ぐいのうち、押し抜き試験を実施しないくいについて行なった内部土の密度測定結果を、くい径ごとに原地盤の密度と対比させて、図-3.16～3.20に示す。

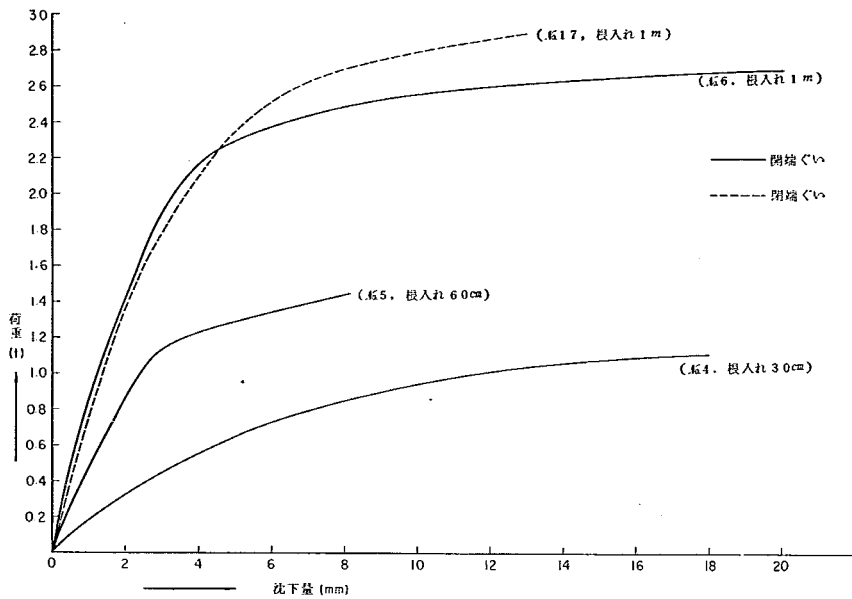
ただし、鋼管を輪切りにする時に誤差が生じやすいので図-3.16～3.20は概略の目安を与えるデータである。



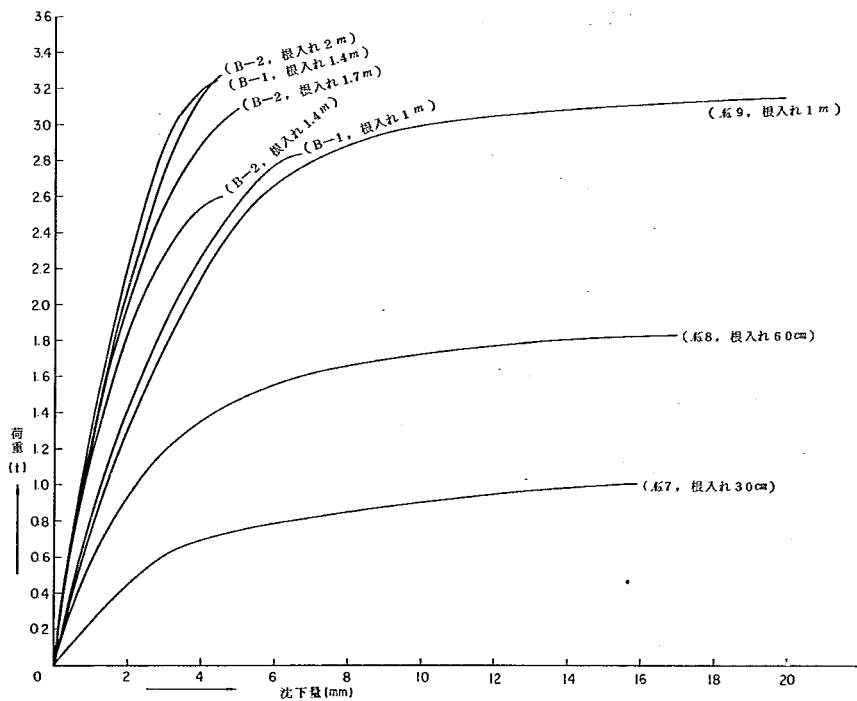
図一 3.10 鉛直載荷試験結果 ($\phi 48.6$, $t 2.4$)



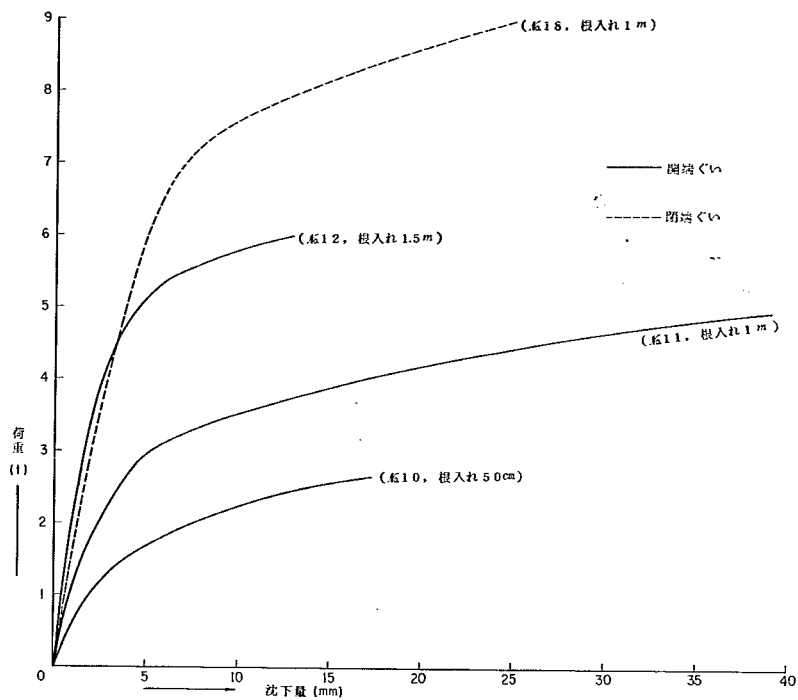
図一 3.11 鉛直載荷試験結果 ($\phi 48.6$ mm, $t 3.5$ mm)



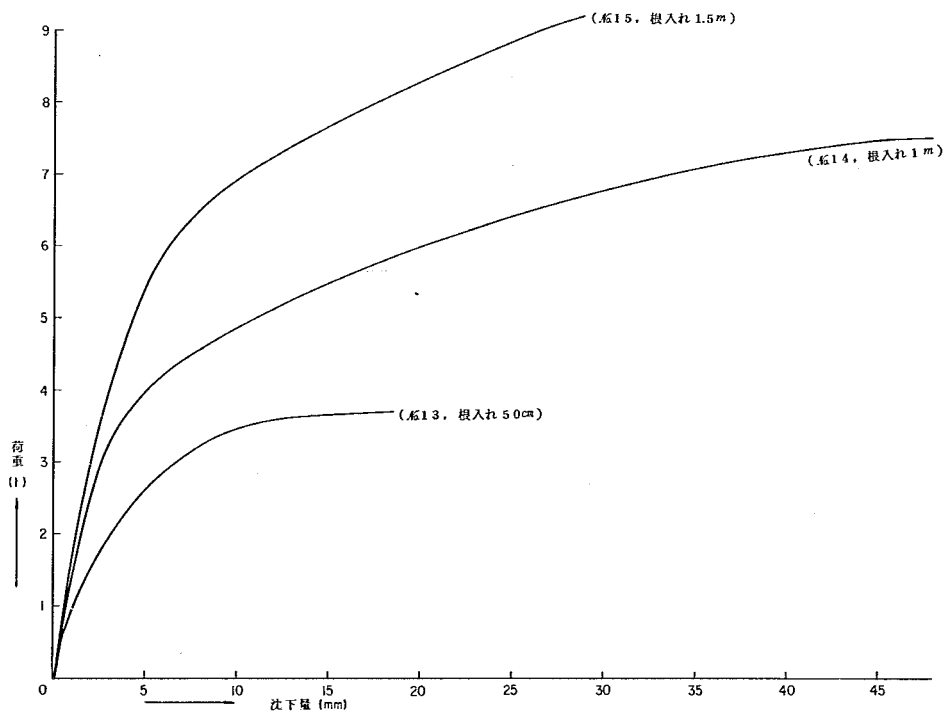
図一 3.12 鉛直載荷試験結果 ($\phi 101.6mm$, $t 3.2mm$)



図一 3.13 鉛直載荷試験結果 ($\phi 101.6mm$, $t 5.7mm$)



図一 3.14 鉛直載荷試験結果 ($\phi 165.2\text{mm}$, $t 4.5\text{mm}$)



図一 3.15 鉛直載荷試験結果 ($\phi 216.3\text{mm}$, $t 5.8\text{mm}$)

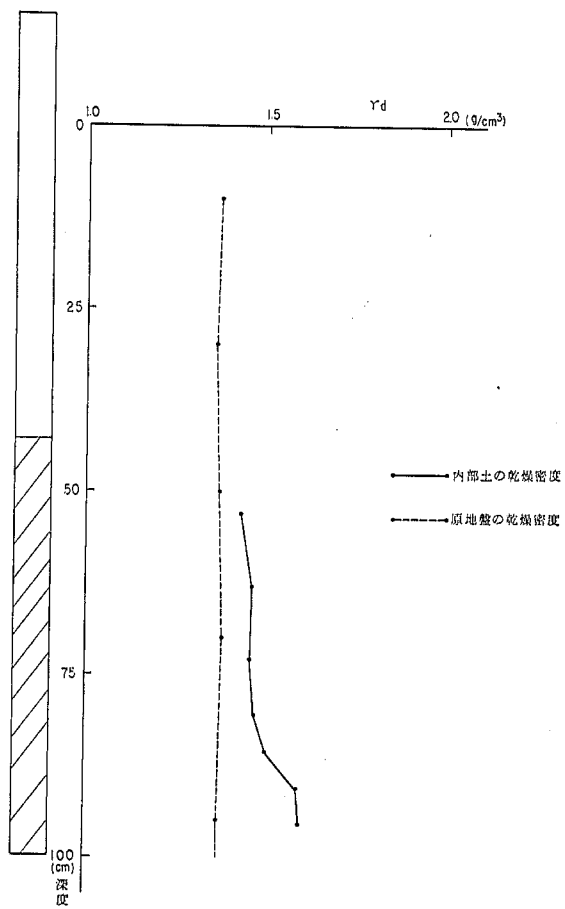


図-3.16 内部土の密度分布(№3くい)

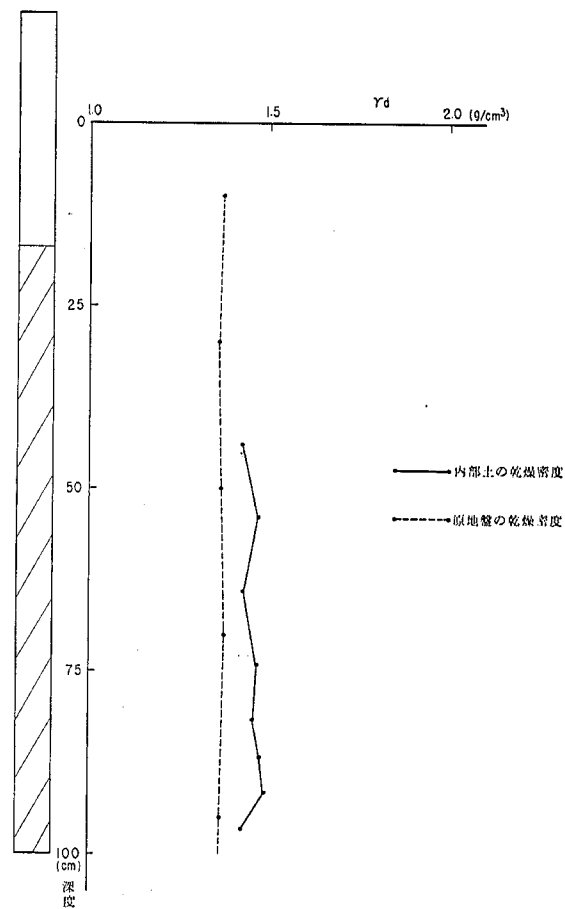


図-3.17 内部土の密度分布(№6くい)

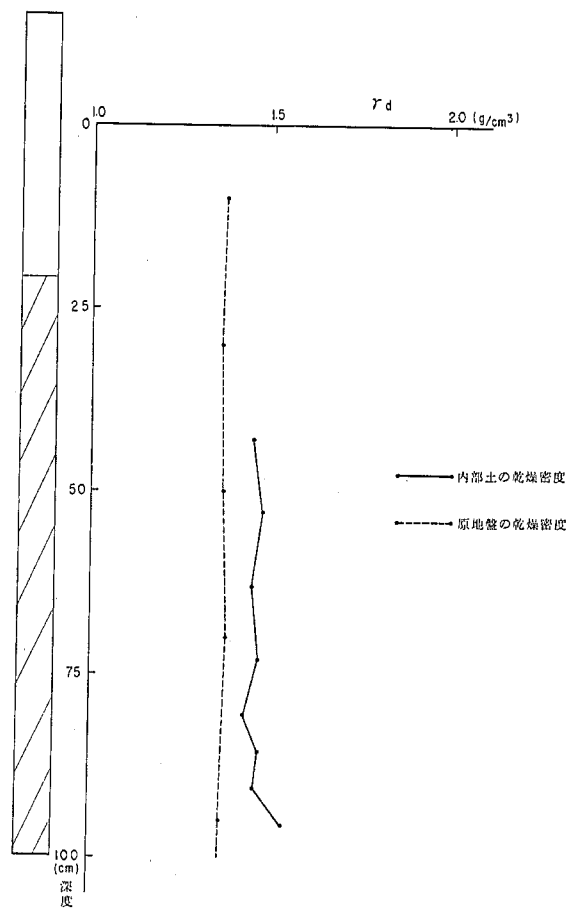


図-3.18 内部土の密度分布 (No. 9)

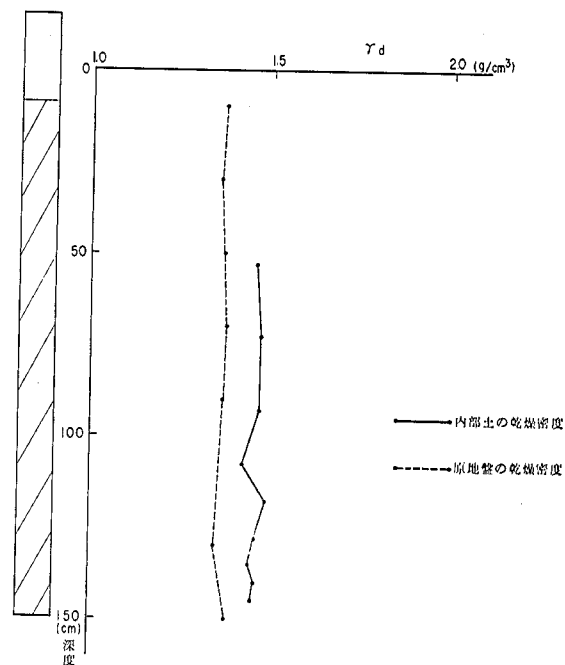
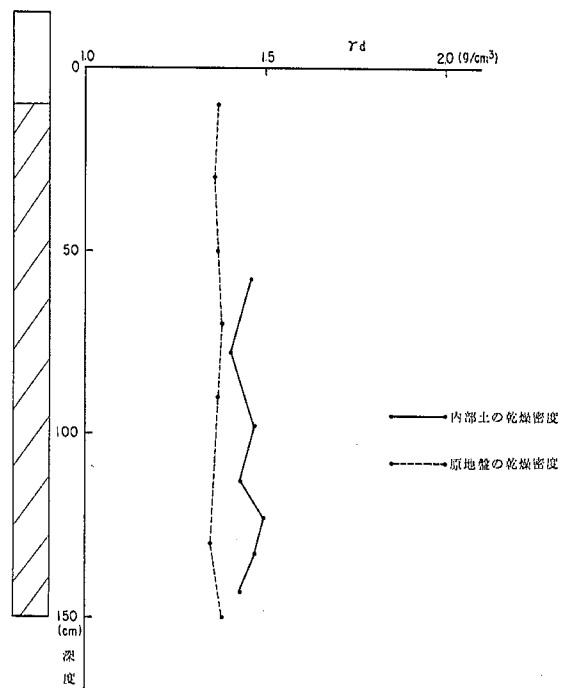


図-3.19 内部土の密度分布 (No. 12)



図— 3.20 内部土の密度分布 (No. 15 くい)

4. 考 察

1) 理論

内部侵入土の抵抗については山原が理論的に論じている。それによると、図-4.1に示した釣り合いから

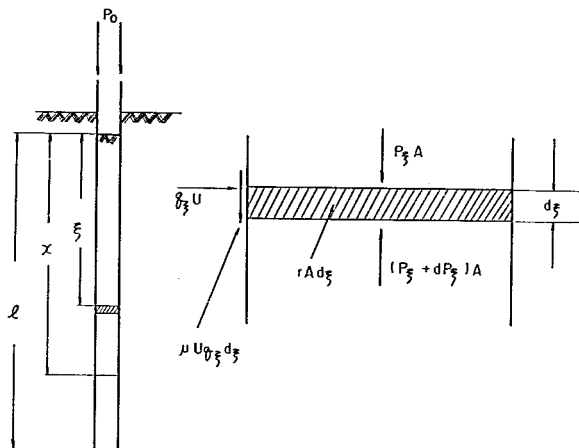


図-4.1

$$(p_{\xi} + dp_{\xi}) A = p_{\xi} A + \mu U q_{\xi} d\xi + r A d\xi \quad \dots\dots\dots (3 \cdot 1)$$

ここで

p_{ξ} = 深さ ξ における鉛直圧力 Kg / cm^2

q_{ξ} = 深さ ξ における水平圧力 Kg / cm^2

U = 管内周長 cm

A = 管内断面積 cm^2

r = 土の単位体積重量 Kg / cm^3

μ = 土の壁面における摩擦係数

さらに、 $q_{\xi} = \nu p_{\xi}$ (ν は比例定数) とおいて、(3-1) 式を積分すると、 $\xi = x$ の点の最大鉛直圧力 p_x は

$$p_x = \frac{r A}{\mu \nu U} \left(e^{\frac{\mu \nu U}{A} x} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (3 \cdot 2)$$

で与えられる。

(3・2)式で $\mu\nu$ は、土の壁面における摩擦係数(μ)と水平圧力と鉛直圧力の比(ν)の積であり、これはすなわち、内部土を介して土の壁面に伝達されるせん断応力(τ)とその点での内部土の鉛直圧力の比を意味している($\mu\nu = \tau/p_z$)。この $\mu\nu$ の値が、抵抗力に大きな影響を与えるので、まずその特性を調べる必要がある。

ii) $\mu\nu$ の値

実験-IIでは、押し抜き試験の際に、鋼管に数ヶ所(1ヶ所につき2枚)ひずみゲージを貼付し、土から鋼管へ力が伝達される状況を調べた(図-4.2)。図-4.2で、載荷圧力 p_0 とゲージ1~5の読みから、それぞれの点での内部土の鉛直応力 $p_1 \sim p_5$ が求まる。一方、壁面に伝わるせん断応力は鉛直応力の差から得られるので、結局、図の①から⑤の各ブロックにおける平均のせん断応力と鉛直応力は各荷重段階につき次のようになる。

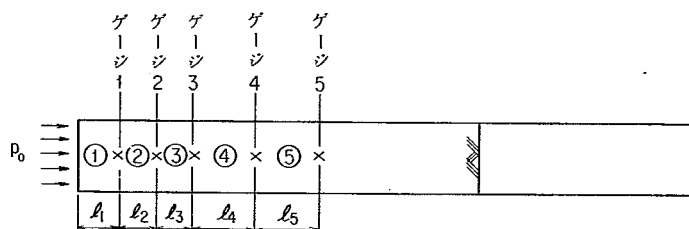


図-4.2

ブロック	平均せん断応力	平均鉛直応力
①	$(p_0 - p_1) A/U l_1$	$(p_0 + p_1) / 2$
②	$(p_1 - p_2) A/U l_2$	$(p_1 + p_2) / 2$
⑤	$(p_4 - p_5) A/U l_5$	$(p_4 + p_5) / 2$

以上のような手順で求めたせん断応力と鉛直応力の関係を試験ぐいの各ゲージ間隔について、図-4.3に一括して図示する。

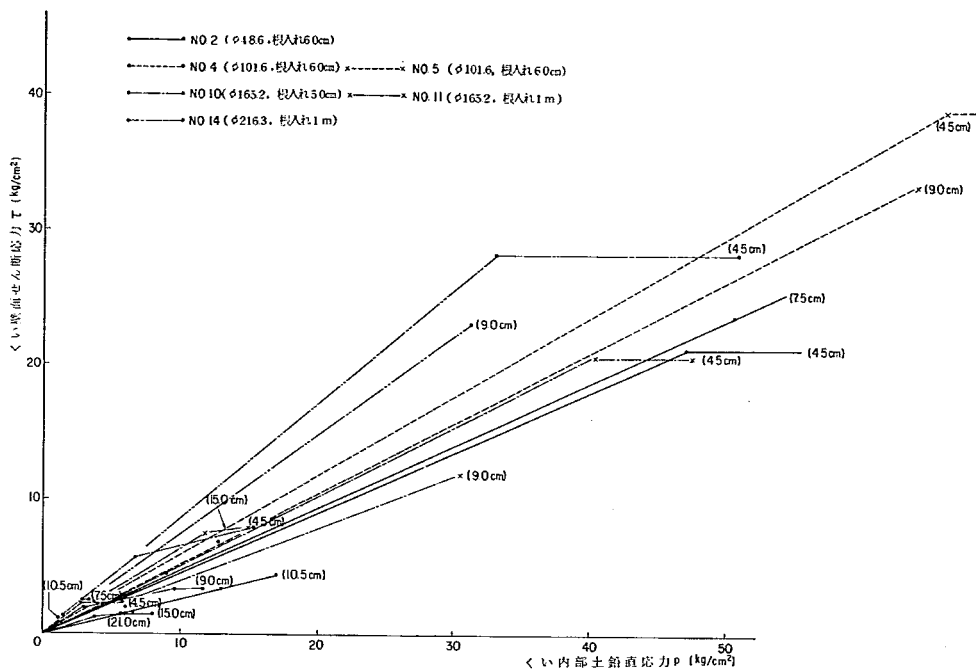


図-4.3 鉛直応力-せん断応力の関係

この図から判断されるように、ばらつきはあるが平均的には、せん断応力と鉛直応力の関係は、くい径、根入れ長、くい内壁上の着目点にかかわらずほぼ一定とみなされ、今回使用した砂と鋼管の間では

$$\mu \nu = 0.5$$

となっている。

Ⅲ) 内部土の有効抵抗長さと最大せん断応力

ⅰ) で述べた山原の理論計算では内部土の貫入長 ℓ を全長有効と考えているので、抵抗が非常に大きくなり押し抜き試験結果と合わない。

図-4.4 に示したのは、押し抜き試験において、内部侵入土が極限抵抗を発揮する時のくい内壁上に沿うせん断応力分布である。この図で縦軸は深さ(ℓ)をくい内径(D_i)で割って無次元化してある。図から明らかなことは、内部土の抵抗として、くい先端からある範囲の土だけが有効に効いていること、およびくいの根入れ(ℓ_0)がある程度以上になると壁面に働くせん断応力は頭打ちになり、それ以後は最大せん断応力に達した領域(塑性領域と名づける)が増大していく傾向にあることであ

る。この、せん断応力が最大値に達する時の根入れを ℓ_* と書くと、今回の実験では、

$$\ell_* \approx 6 D_i \dots\dots\dots (3 \cdot 3)$$

また、最大せん断応力は

$$\tau_{\dots} \approx 40 \text{ Kg/cm}^2 \dots\dots\dots (3 \cdot 4)$$

となっている。

IV) 内部土極限抵抗力

i) で述べた理論に、ii), iii) で示した $\mu\nu$ および $\tau_{\dots}$ の実測値、および有効抵抗長の概念を加味して、内部土極限抵抗力(p , (Kg/cm^2))を次のような手順で求める。これまでの議論から、 p は

$$p = f(\tau_{\dots}, D_i, \ell_1, \ell_2, \mu\nu) \dots\dots\dots (3 \cdot 5)$$

の関数形に表わせると考えられる。

ここで

$\tau_{\dots}$: くい孔壁で発揮される最大せん断応力

D_i : くい内径

ℓ_1 : 内部侵入土中の有効抵抗領域

のうち、せん断応力が最大値($\tau_{\dots}$)に達していない部分(弾性領域)の長さ

ℓ_2 : 有効抵抗領域のうち、せん断応力が最大値に達している部分(塑性領域)の長さ

$\mu\nu$: くい孔壁に伝達されるせん断応力とその点の鉛直応力の比

相似則を適用すると(3・5)式は

$$p = \tau_{\dots} f\left(\frac{\ell_1}{D_i}, \frac{\ell_2}{D_i}, \mu\nu\right)$$

と表わされる、さらに、 ℓ_1/D_i , ℓ_2/D_i はいずれも $\mu\nu$ と ℓ_*/D_i (ℓ_* はくい根入れ長)の関数と考えられるから、結局

$$p = \tau_{\dots} f(\ell_*/D_i, \mu\nu) \dots\dots\dots (3 \cdot 6)$$

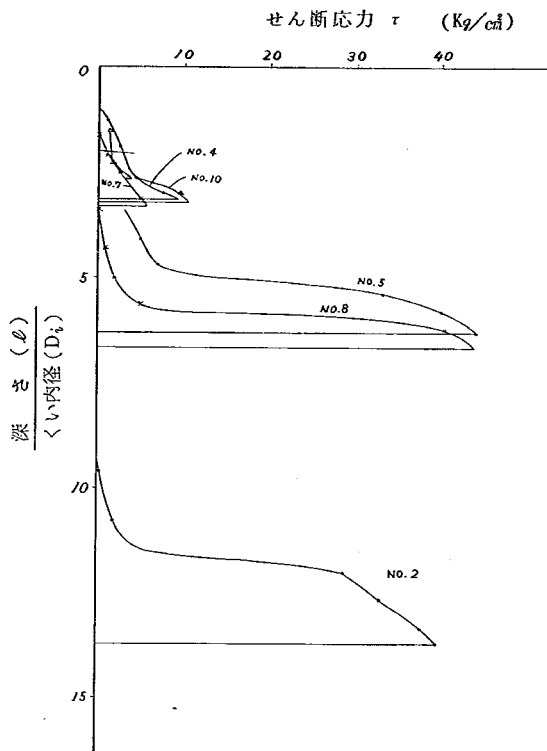


図-4.4 くい孔壁に沿うせん断応力分布

と書ける。

ところで、くい先端におけるせん断応力がちょうど τ_{max} に達する根入れ深さ ℓ_* における内部土極限抵抗力は明らかに

$$P_* = \tau_{max} / \mu \nu \quad (\ell_* = \ell_*) \dots\dots\dots (3 \cdot 7)$$

となる。

$\ell > \ell_*$ になると、 $\tau = \tau_{max}$ の領域（塑性領域）の抵抗が（3・7）に加わるから、塑性領域の長さを ℓ_2 とすると

$$P_* = \tau_{max} / \mu \nu + \tau_{max} \ell_2 U / A$$

$U = \pi D_i$, $A = \pi D_i^2 / 4$ を代入すると

$$P_* = \tau_{max} (1 / \mu \nu + 4 \ell_2 / D_i) \quad (\ell \geq \ell_*) \dots\dots\dots (3 \cdot 8)$$

となる。

次に、 $\ell < \ell_*$ ではくい内壁のせん断応力は弾性領域にあるので、（3・1）式を参考にして、（3・6）式の関数 f は次の形をとると仮定する。

$$P_* = \frac{\tau_{max}}{\mu \nu} \alpha \left(e^{\beta \mu \nu \frac{\ell_*}{D_i}} - 1 \right) \quad (\ell < \ell_*) \dots\dots\dots (3 \cdot 9)$$

ここで、 α, β : 定数

（3・9）式において $\ell = \ell_*$ の時（3・7）式と同じになることが必要であるから

$$\alpha \left(e^{\beta \mu \nu \frac{\ell_*}{D_i}} - 1 \right) = 1 \dots\dots\dots (3 \cdot 10)$$

この式は恒等式であることから

$$\mu \nu \ell_* / D_i = \text{Const}$$

となるはずである。ところで、今回の実験より得られた（3・2），（3・3）より

$$\mu \nu \ell_* / D_i = 3$$

すなわち

$$\ell_* = \frac{3}{\mu \nu} D_i \dots\dots\dots (3 \cdot 11)$$

となる。

これを(3・10)に代入すると

$$\alpha = \frac{1}{\rho^{3\beta} - 1}$$

従って(3・9)式は

$$p_* = \frac{\tau_{*}}{\mu\nu} \frac{e^{\beta\mu\nu \frac{\ell_*}{D_i}} - 1}{e^{3\beta} - 1} \quad [\ell_* < \ell_{*}] \quad \dots\dots\dots (3 \cdot 12)$$

以上によって、内部土の極限抵抗力を求める式が(3・8)と(3・12)で表わされた。

ここで、(3・8)式の ℓ_2 (塑性領域の長さ)は $\ell_* - \ell_{*}$ (塑性領域が生じ始めてからの根入れ深さ)に比例すると考え、

$$\ell_2 = K (\ell_* - \ell_{*})$$

とおく。今の議論では、(3・6)式に示したように p_* を τ_{*} , $\mu\nu$, ℓ_*/D_i のみの関数と考えているので、この K と(3・12)式の β はくい材料、地盤条件によらない定数とみなし、実験結果から値を定める。今回の実験における τ_{*} と $\mu\nu$ の値は(3・2)(3・4)のようにあらかじめ求められているので、押し抜き試験による極限抵抗値(p_*)に最も良く適合するように $\ell_* < \ell_{*}$ の領域から β を、 $\ell_* \geq \ell_{*}$ の領域から K を定めると

$$\beta = 0.8$$

$$K = 0.25$$

となる。これを(3・8), (3・12)に代入すると、結局、内部土の極限抵抗値を求める一般式は次のように書き表わせる。

$$p_* = \frac{\tau_{*}}{10\mu\nu} (e^{0.8\mu\nu \frac{\ell_*}{D_i}} - 1) [\ell_* < \ell_{*}] \quad \dots\dots\dots (3 \cdot 13)$$

$$p_* = \frac{\tau_{*}}{\mu\nu} (\mu\nu \frac{\ell_*}{D_i} - 2) [\ell_* \geq \ell_{*}] \quad \dots\dots\dots (3 \cdot 14)$$

$$\text{ここで} \quad \ell_{*}/D_i = 3/\mu\nu$$

上式を今回の実験にあてはめた時の曲線と、実測による p_* 値を図-4.5に示す。この図で、実線で示したのが上の実験式(3・13), (3・14)であり、○, △が実測値である。ただし、△で示した $\#7$, $\#8$ のくいは肉厚が厚いので、他のくいに比べて内部土の抵抗力は小さく

なる。

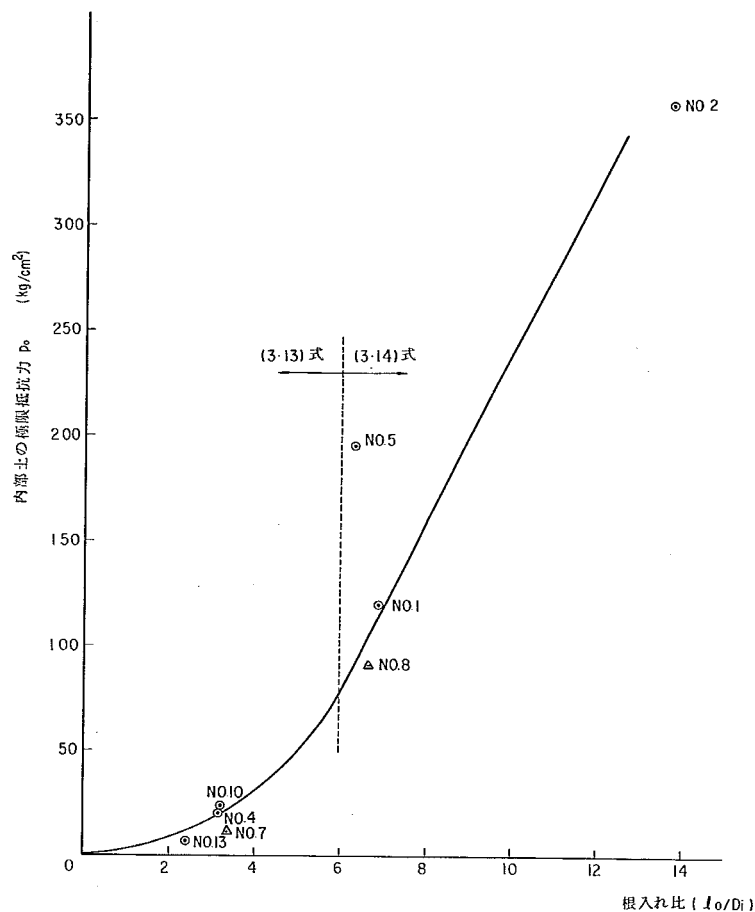


図-4.5 $p_s - l_0/D_i$ 関係

V) エネルギーの釣り合いからの考察

i) ~ iv) までは、静的な力の釣り合いから出した内部土の抵抗に関する理論式をもとに、実験結果にもとづく修正、パラメーターの決定を行なって、砂中に鋼管を打ち込んだ場合の管内侵入土の抵抗を数値的に表示した。ここで、視点を変えて、くい打ち込み時の打撃エネルギーと内部土の抵抗の釣り合いに着目してみる。ただし、以下の議論ではくいの肉厚部分による先端抵抗は無視して考える。

今、落錘の重量を W (Kg), 落下高さを H (cm) とすると、1回の打撃によって加えられるエネルギー ΔE (Kg · cm) は

$$\Delta E = W \times H$$

で表わされる。

一方、ある貫入量での管内侵入土の静的な極限抵抗を p (kg/cm^2) とし、動的な貫入抵抗はそれにある係数 α を掛けた αp (kg/cm^2) で表わされ则认为。その時、1 回の打撃によって管内に侵入する土の高さを $\Delta \ell$ (cm) とするとエネルギーの釣り合いより

$$\Delta E = \alpha p A \Delta \ell$$

書きかえると

$$\frac{\Delta E}{D_i^3} = \left(\frac{\pi}{4} \alpha p \right) \frac{\Delta \ell}{D_i} \dots\dots\dots (3 \cdot 15)$$

ここで、図-3.8 と図-3.9 を振りかえると、総打撃エネルギー (E) と内部土の貫入量 (ℓ) の関係はくいによって種々異なるが、 E/D_i^3 と ℓ/D_i の関係で表示するとほぼ 1 つの曲線に集まる。これはすなわち、(3・15) 式より、内部土の抵抗は、くい径によらず、 ℓ/D_i の関数になることを意味している。一方、図-3.7 より、 ℓ/D_i も ℓ_o/D_i (くい根入れ長/くい内径) によってほぼ一義的に定まると考えてよいから、結局、内部土の抵抗は ℓ_o/D_i の関数として表現できることになり、これまで議論してきた結果は動的なエネルギーの釣り合いからも裏付けられる。

V) くい先端地盤支持力

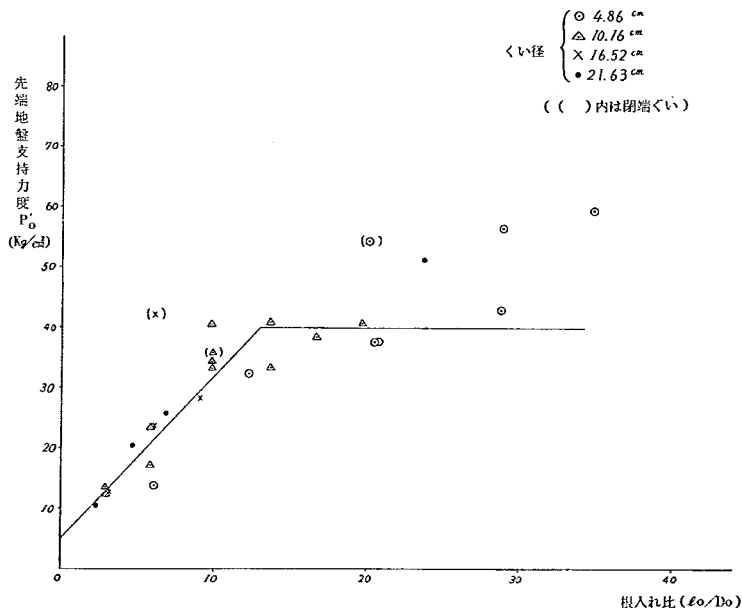


図-4.6 先端地盤支持力—根入れ比

以上、管内侵入土の抵抗について述べてきたが、これと、くい先端地盤の支持力との大小比較によって閉塞性の判定がなされる。実験—I、IIで行なった鉛直載荷試験の結果求めた単位面積当りの先端支持力 (p'_s (kg/cm^2)) を根入れ長/くい外径 ($l./D_o$) に対してプロットすると図-4.6に示すようになり、この場合もくい径にかかわらず、一義的な関係が認められる。すなわち、 $l./D_o =$ 約13までは p'_s は $l./D_o$ に比例して増大するが、それ以上根入れが大きくなっても、 p'_s は地盤によって定まるほぼ一定の値 (実験地盤では約 $40 \text{ kg}/\text{cm}^2$) にとどまる。

vi) 閉塞効果の判定

図-4.5に示した根入れ比と管内侵入土の抵抗との関係および、図-4.6に示した根入れ比と先端地盤支持力度の関係を同一グラフ上に描いたのが図-4.7である。ただし、前者はくいの内径と内面積で議論しているのに対し、後者はくいの外径と外面積を対象にしているので若干のずれがあるが、試験くいの断面率が10%強 (表-2.1) なのでその差は無視して考えた。

図-4.7より、 $l./D_o$ が約2.5のあたりを境にして、それより大きいところでは管内土の抵抗が上回るので、先端地盤の強度がそのままくいの支持力として発揮されるが、境界よりも少ない根入れ長では閉塞効果が十分でなく管内土の抵抗によってくいの支持力が決定されることになる。すなわち、今回実験を行なった砂地盤では、くい先端の閉塞効果が十分となる根入れ長はくい径の約2.5倍であるということになる。

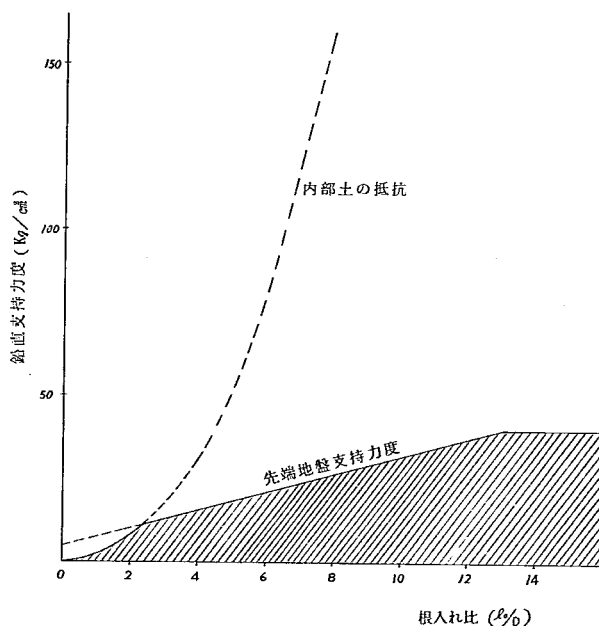


図-4.7 くいの鉛直支持力度—根入れ比

V) 実ぐいへの適用

これまで述べてきた実験結果を使って、実際のぐいの先端閉塞効果を判定するためには、さらに少なくとも次の2点が明らかにされなければならない。

(1) 大口径の実ぐいに対し、模型ぐいの結果がそのまま適用できるか。

(2) 他の地盤条件に対し、パラメーターの定量化をいかに行なうか。

(1)の点については、実験では $\phi 48.6$ mmから $\phi 216.3$ mmまでのぐいを使い、この範囲では、根入れ長をぐい径で割って無次元化すればぐい径の影響を除けることが判明した。しかし、1mとか2mとかの径になった場合には、ぐい中央の土が、壁面近くの土と同じように抵抗するかどうか疑問があり、ここで述べたことがそのまま拡張できるとは限らない。この問題は模型実験の範囲を越えており実ぐいによる試験に頼らざるを得ないが、支持力機構に基本的な差はなく、同じような考え方が適用できるものと考えられる。なぜならば、先端閉塞効果は土の極限強度を対象とする問題であり、しかも図-4.3からわかるように壁面摩擦は完全弾塑性体にきわめて近い挙動を示すので、土を扱う通常の問題に比べて相似則が適用しやすいと考えられるからである。

(2)の点は、(I V)で示した一般式に含まれるパラメーターを、他の地盤条件に対していかに定量化するかという問題である。そのために、各パラメーターについて、どのような要素が影響するかを考えてみる。(3・13)式と(3・14)式において、地盤条件に依存するパラメーターは $\tau_{\dots}$ と μ_v の2つである。 μ_v はぐい先端に作用する力が壁面の摩擦を介してぐい本体に伝達される機構を支配する要素であり、土の種類、密度、ぐい壁面の粗さ、ぐいの設置方法等によって変化すると考えられる。今回の試験では、N値10程度の一様な砂地盤に打撃によって鋼管を設置した場合 $\mu_v \approx 0.5$ という値が得られたが、別に、同じ材料を用い、人工的に砂を鋼管中に投入して同程度の密度に締め固め押し抜き試験を実施したところ、 $\mu_v = 0.3 \sim 0.4$ とやや低い値になった。このことは、 μ_v 値はぐいの設置方法にも影響されることを示し、その適切な評価にはさらに詳しい検討が必要である。

一方、ぐい壁面のせん断応力はある値($\tau_{\dots}$)で頭打ちとなりそれ以上増大しないが、これは、限界値を越えると、せん断はぐい孔壁でなく、壁面に近い土内部で起きるようになるからではないかと推定される。こう考えれば、 $\tau_{\dots}$ は地盤固有のせん断強度に由来するものであって土の種類から一義的に決まることになり、今回の実験地盤で得られた 40 Kg/cm^2 という数値は1つの目安を与えることになる。

5. ま と め

以上をまとめると、今回の試験により次の諸点が結論づけられる。

- i) くいの根入れ長をくい内径で割った無次元量(根入れ比)を変数として扱えば、模型実験の範囲内では、管内侵入土の抵抗をくい径にかかわらず統一的な形で表現できる。これは打ち込み時の打撃エネルギーの釣り合いからも裏付けられる。
- ii) 管内侵入土の抵抗を支配するのは、根入れ比の他に、地盤条件等から決まる次の2つのパラメーターが主なものである。1つは、くい壁面に伝わるせん断応力と内部土の鉛直応力の比(μ_v)であり、土の種類、密度、くい壁面の粗さ、くいの設置方法等に影響されると考えられるが、今回の試験では $\mu_v \div 0.5$ であった。他は、くい孔壁に働く最大せん断応力(τ_{max})であり、これは地盤を構成する土に固有の値と推定され、今回使用した比較的均一な粒径(平均粒径0.3mm)の砂では $\tau_{max} \div 40 \text{ Kg/cm}^2$ であった。
- iii) 理論的な考察と、試験結果による定数の決定を行なって、管内侵入土の抵抗を求める実験式をたてると(3・13)、(3・14)式のようになり、根入れ比の関数として表わせる。
- iv) くい先端地盤の単位面積当りの支持力も根入れ比の関数として表わされ、あるところまでは根入れ比に比例して増大するが、それ以降はほぼ一定値となる。この限界の根入れ比は、今回の実験地盤では約1.3であった。
- v) くいの肉厚部分の先端抵抗に、iii)で求まる管内侵入土の抵抗を加えた値と、iv)で求まる先端地盤の抵抗のうち小さい方がくいの先端支持力となる。試験地盤においては、管内侵入土の抵抗が先端地盤の抵抗を上回る限界の根入れ長、すなわち先端閉塞効果が完全に発揮されるのに必要な根入れ長はくい径の約2.5倍であった。