

# 東京下町低地におけるネガティブフリクションの実測

小林 幸男  
井上 嘉信

## § 1. はじめに

昭和30年代には、良質な地盤の場所が少なくなってきたことと、長尺の杭が可能になったことから、軟弱な地盤地帯への構造物の進出が著しくなり、それにつれてネガティブフリクション(以下NFと称する)による構造物の障害が出はじめた。NFについてはかなり以前からその現象は指摘されてはいたが、このような障害がなかったか、あるいは障害の規模や数が少ないか目でとまらなかつたため、NFは大して注目されなかつた。しかし、条件を整えばNFによる障害が非常に大きくなることが現実の構造物で実証されるにつれて、研究も行なわれるようになった。今までにわが国で行なわれた研究で大きな成果をおさめたものは、昭和39年に土質工学会が実施した一連の実大実験と国鉄が昭和45年より数年間実施した一連の実験である。この2つの実験から、打込み杭に関する次のような貴重な結果が得られた。

単杭に関しては次の2点が明瞭になり、

- (i) 杭先端支持力あるいは杭先端地盤剛性の大きさと、中立点の深さとの関係

- (ii) 周面摩擦力の大きさと土質定数との関係

群杭に関しては、杭本数の多い群杭では群杭効果(NF低減効果)がかなり有ることが明らかになった。

本測定は、この2つの実験結果をまふえて、杭本数の少ない群杭のNF低減効果を究明するとともに、群杭のNF低減効果をより明確にすることを目的とした。

全体計画では、載荷重の影響を調べる実験を考えているが、今回はNFのみの場合の結果について報告する。

## § 2. 測定位置および地盤

測定の場所は図-1の案内図にも示したように東京の下町低地にある当研究所(東京都江東区越中島3-4-17)の敷地内の新築実験棟の増築予定部分を用いた。

地盤は図-2に示すように、地表面よりG.L.-4m間は埋土で、その下にG.L.-8mまで緩い砂質土層があり、G.L.-8~G.L.-28mに軟弱なシルト、G.L.-28m~G.L.-32mに中位の粘性土層が続いている。G.L.-32m~G.L.-36mには境界層の硬質粘土を4mはさみ洪積の砂層(層厚3m)、砂礫層と続いている。考察に用いる各層の土質定数は土質試験結果(図-2、図-11参照)から図-3のように定めた。

## § 3. 測定計画

### 3.1 測定杭の種類および配置

今回の測定の目的は、前記のように数本の杭よりなる群杭のNF低減効果を調べることである。また、今までに得られている国鉄の実験結果との対応を考えて杭は国鉄で用いた杭と同じ仕様にした。

すなわち、杭は外径711.2mmの鋼管杭

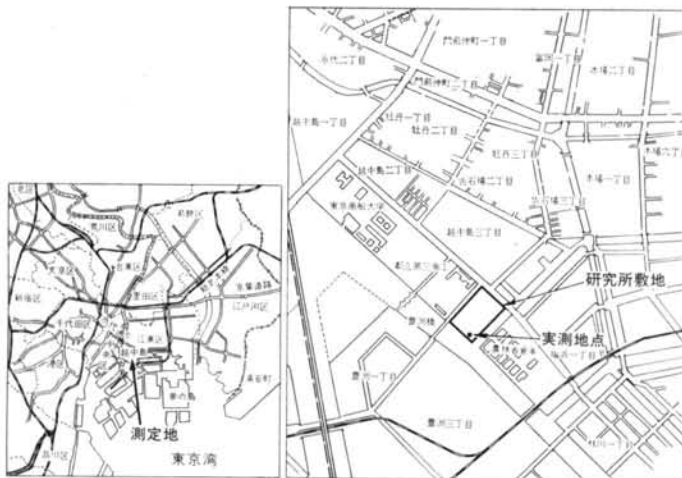


図-1 案内図および敷地位置図

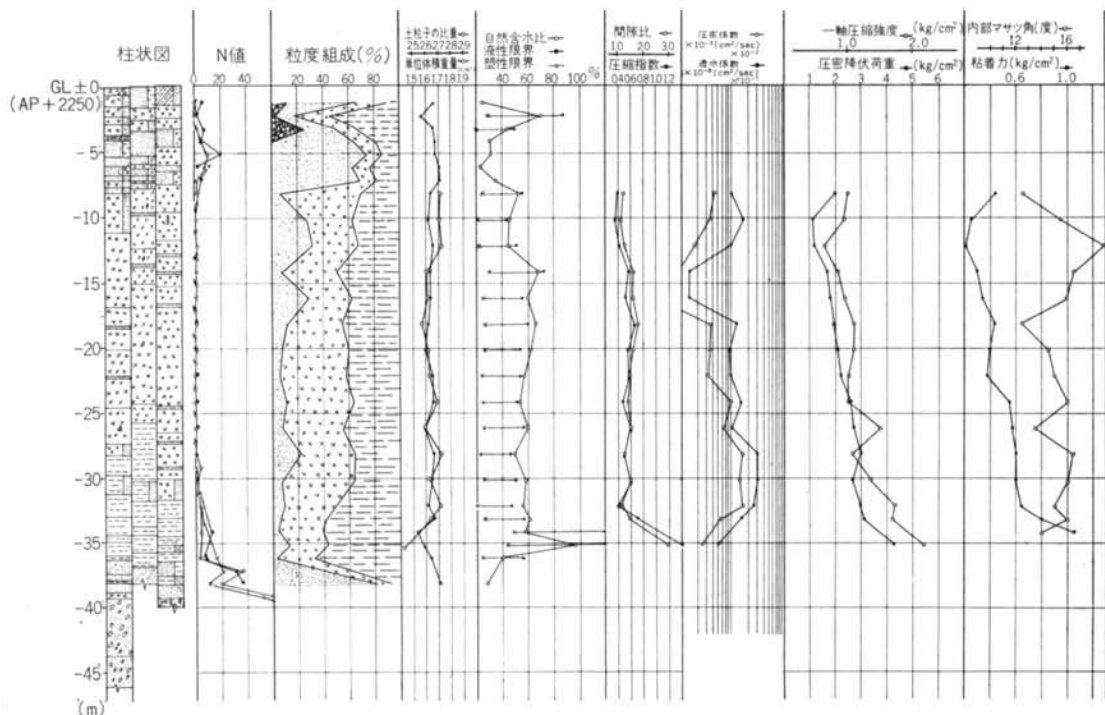


図-2 土質試験結果一覧

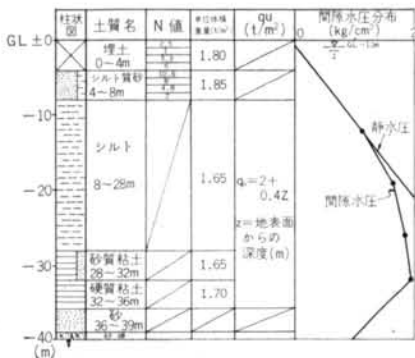


図-3 検討用土質常数

(諸元は表-1参照)で先端閉端とし、また杭の設置方法は打込みの方法をとった。

各杭間隔は杭径の2.5倍とし、杭の配置は図-4に示すように2本群杭と5本群杭を考えた。この2種類の群杭を考えた根拠は、周囲に杭に囲まれない杭(2本群杭が最少単位)の低減効果と、周囲に杭に囲まれた杭(5本群杭が最少単位)の低減効果がわかれば、杭の配置がどのような基礎でも群杭効果は推定できるであろうということによる。

なお、当然のことながら、群杭効果を検討するのに基準になる単杭の測定杭も近くに配置した。

外径(mm)	肉厚(mm)	断面積(cm <sup>2</sup> )	断面係数(cm <sup>3</sup> )
711.2	12.7	278.7	4,780

表-1 杭の諸元

### 3.2 測定項目および計器の配置

#### (1)杭体に関する測定

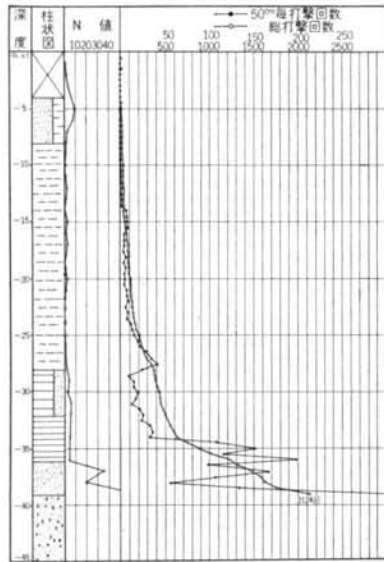
杭体に関しては、杭体に生ずる歪(軸力)と杭体の沈下を測定の対象とした。

杭体の歪の測定には差動トランス型歪計を用いた。中立点の位置と最大軸力を精度よくとらえるため、歪計の

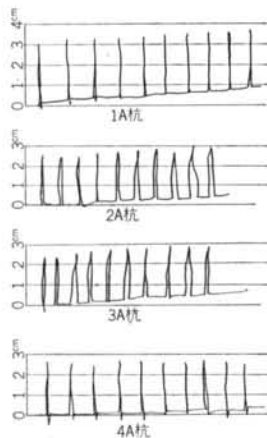


図-4 杭および計器配置図

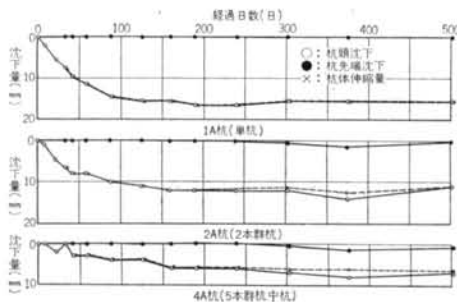




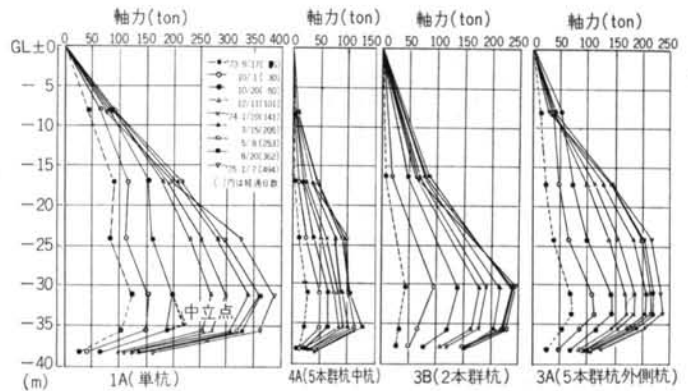
図一六 深度と打撃回数の関係（1A杭）



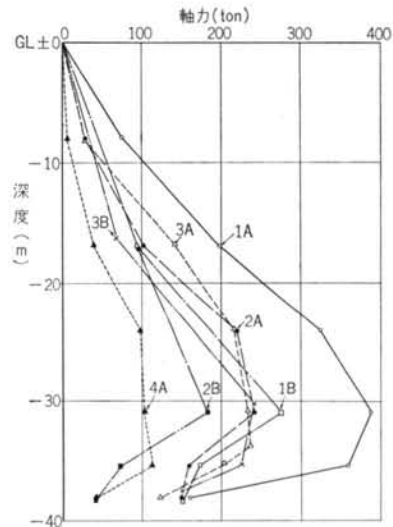
図一七 リバウンド測定例



図一八 杭頭、杭先端沈下および杭体伸縮量の経時変化  
とどなく、2本、5本群杭も同様に杭先端はほとんど沈下していない。また、杭頭の沈下量は単杭→2本群杭→5本群杭の真中の杭の順に小さくなっており、群杭の効果を示している。



図一九 各杭の軸力分布の推移



図一〇 測定開始後約500日における各杭の軸力分布

## 5.2.2 杭体の応力

杭体の応力（軸力）の経時変化は図一九に示すように、各杭ともに測定開始後約150日頃までは比較的急増し、それ以降は緩やかになるが、約500日経過しても中立点近傍は漸増傾向にあって、各杭ともこの傾向は同じである。

測定開始後約500日後の各杭の軸力分布は図一〇のとおりであり、これらの単杭との軸力比は深さに対してほぼ一様で、2本群杭と5本群杭では0.4~0.7、5本群杭の中杭では0.1~0.3と、近接杭によるNFの低減効果は明らかに認められる。

## 5.3 杭周辺地盤状況に関する測定

### 5.3.1 杭周辺地盤の強度変化

昭和46年10月と杭打ち後2ヵ月の昭和48年10月および

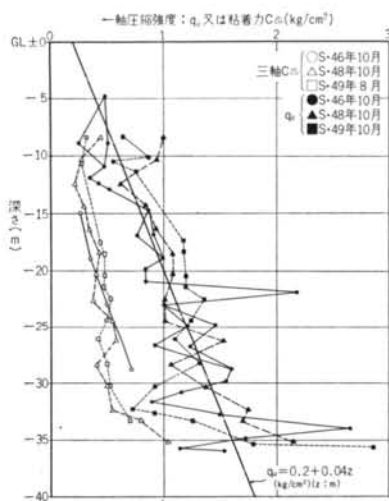


図-11 一軸圧縮強度と粘着力の分布



図-12 層別沈下量の補正方法

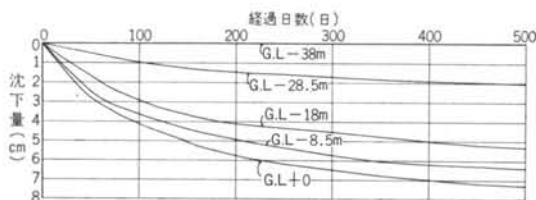


図-13 層別沈下量経時変化

杭打ち後1年の昭和49年8月の地盤調査結果のうち、一軸圧縮強度と三軸圧縮試験の粘着力( $C_{cu}$ )から、地盤の強度変化を調べると図-11になる。この土質試験結果をみる限りにおいては、周辺地盤の強度変化はみられない。

### 5.3.2 周辺地盤に関する測定

#### (1) 地盤沈下量

層別の沈下測定は昭和48年10月から実施したので杭体に関する測定に比べ1ヵ月のずれが生じた。このずれは図-12に示す方法で補正量を求め、これを測定値に加える方法で補正した。

図-13に示すように沈下速度は当初から150日位まで大きい、それ以後は小さくなっている。これは杭打ちにより上昇した間隙水圧がこの期間に消散し、それ以降は自然地盤沈下になったためと思われる。

#### (2) 間隙水圧

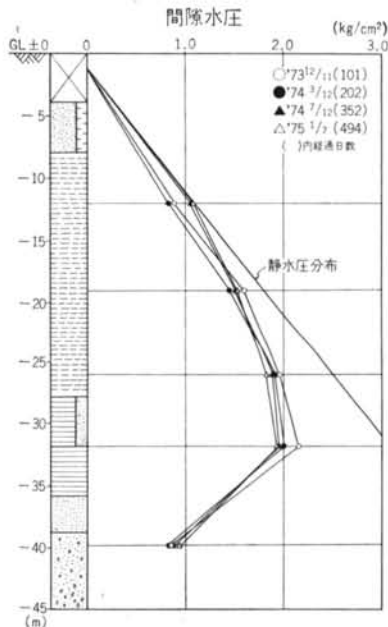


図-14 間隙水圧分布

間隙水圧の測定は昭和48年12月より開始した。実験棟工事のためウェルポイントをかけた時期があり、地表面に近いところではその時期に多少変動しているものの、ほとんど変化なしとみなせる程度である。間隙水圧分布は図-14に示すとおりで、静水圧分布に対しかなり減少している。地下水汲上規制が実施されてから水位は上昇していると報道されているが、本測定では砂礫層の水圧は低く、また上昇の傾向も見られない。

## § 6. 結果の考察

### 6.1 単杭に関する考察

#### 6.1.1 中立点

図-15に示すように地盤と杭の間の相対沈下が零のところが中立点であるので、測定した地盤沈下量と杭の沈下量から中立点を求めると図-16になる。

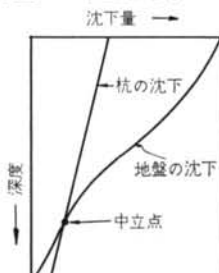


図-15 中立点

また、軸力分布から図-9に示すように中立点付近の軸力を延長し、その交点を最大軸力点(=中立点)とみなしたのも図-15に示す。

沈下の方から求めても、軸力の方から求めても中立点の位置はほとんど同じで、 $l_n/l$  ( $l_n$ : 地表面より中立点までの

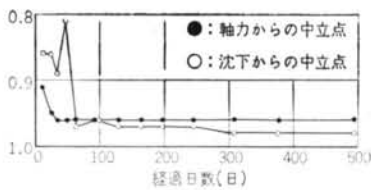


図-16 中立点の推移

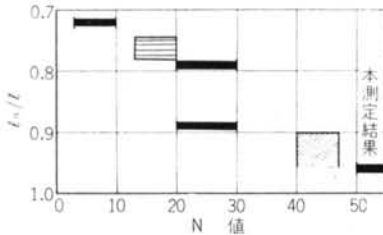


図-17 中立点と杭先端地盤N値の関係

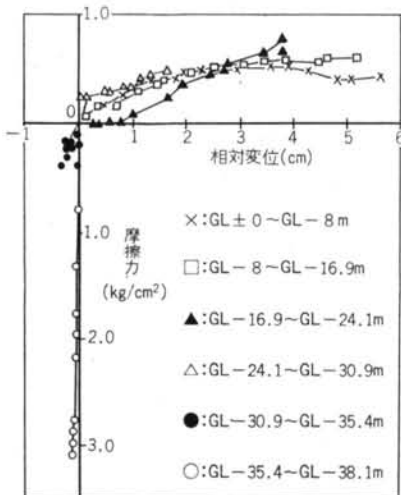


図-18 「摩擦係数～変位」関係

距離、 $l$ : 地表面より圧縮層下面までの距離(36m)は0.96~0.98に収れんしている。

土質工学会および国鉄の実測によれば、図-17に示すように中立点は杭先端地盤の剛性あるいは支持力に関係し、剛性あるいは支持力が大きくなれば中立点の位置は深くなることを示している。そして、今回の結果もこの関係を満足させている。

これからみるとN値50以上の支持層に打込んだ先端閉端杭の中立点の値( $l_n/L$ )は0.95程度は考えねばならないことを示している。

### 6.1.2 摩擦力について

摩擦力と変位の関係を調べてみると図-18になる。地表面よりG.L.-17m程度までに摩擦力がほぼ最大値に到達しており、また、G.L.-24m程度までもう少し

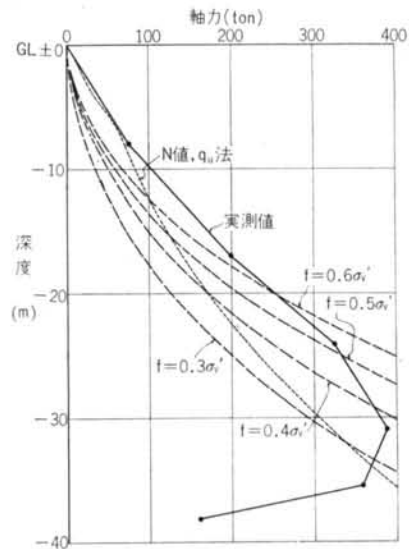


図-19 実測軸力と算定軸力との対応

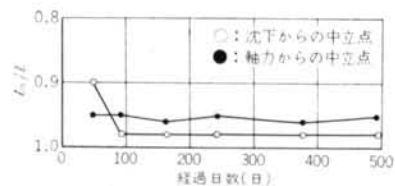


図-20 群杭の中立点の推移

の沈下で摩擦力は最大値になろうとしていることがわかる。しかしながら、これ以深の摩擦力は沈下がすすめば摩擦力も大きくなることを示している。

最終状態で中立点近傍の軸力がどの程度まで大きくなるか分からないが、現状(測定開始後約500日)の軸力分布と提案されているNF算定法による軸力との対応を行なってみると図-19になる。N値,  $qu/2$ 法で

軸力を算定すると地表面よりG.L.-8m間の砂質土では  $f = N/3 + 3$  (ここで  $f$ :

摩擦力:  $t/m^2$ ,  $N$ : N値)を用いて算定した軸力と実測値との対応はよい。しかし粘性土層で  $f = qu/2$ を用いて軸力を求めると、算定値は実測値に比べてかなり小さく実測値は増加中であるので、最終状態ではこの差はもっ

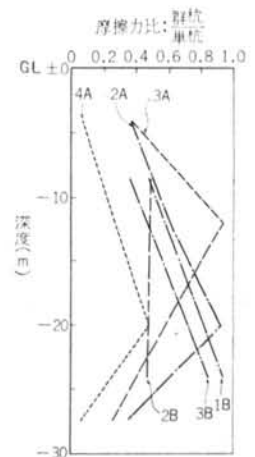


図-21 各深度における単杭と群杭の摩擦力の比

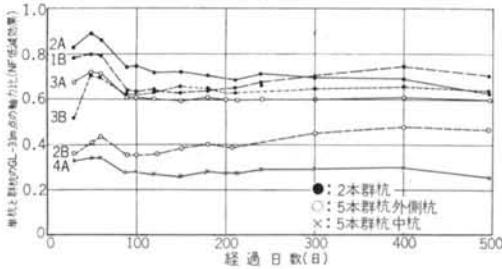


図-22 NF 低減効果の推移

杭名称	1A	2A	1B	3B	3C	3A	2B	1C	2C	4A
杭頭沈下量	15.5	11	13	14	15	9.7	9	11	10.5	45
単杭との比(%)	100	71	86	93	97	63	58	71	68	7

表-4 単杭と群杭の杭頭沈下比

杭名称	1A	2A	1B	3B	3A	2B	4A
正の摩擦力比(%)	100	41	53	41	52	64	27

表-5 単杭と群杭の正の摩擦力比

と大きくなる。また有効応力法  $f = \alpha \cdot \sigma'_v$  ( $\alpha$ : 定数,  $\sigma'_v$ : 鉛直有効応力:  $t/m^2$ ) で,  $\alpha$  を土質に関係なく一定値とし軸力を算定してみると図-19になり, 実測値との対応が難しいことがわかる。前にも記したように摩擦力は地表面から G.L.-17m の間しか最大値に達していないので, この間の実測軸力から  $\alpha$  を逆算してみると, 地表面から G.L.-8m の砂質土層では  $\alpha = 0.88$ , G.L.-8~G.L.-17m のシルト層では  $\alpha = 0.52$  になる。このように土質により  $\alpha$  の値はかなり変わる。

## 6.2 群杭に関する考察

### 6.2.1 中立点

単杭の場合と同様に, 自然地盤沈下と杭の沈下が零になる深さ  $l_n$  (中立点深さ) を, 6本の測定杭について求め, その平均値を圧縮層厚  $l$  で除した値と時間との関係は図-20になる。また, 軸力分布を図-9の単杭の場合と同様にして修正しその最大軸力を示す深さを  $l_n$  とし,  $l_n$  の平均値の  $l$  に対する割合を求めると図-20になる。(軸力分布が G.L.-30.9m 以深で乱れている 2A, 1B, 2B は除いた。)

この図と単杭の結果(図-16)を比べてみればわかるように, 群杭の中立点と単杭の中立点はほとんど同じ値を示している。そしてまた, 群杭の中立点は他の実測例での単杭の支持杭とも同じになっている。

### 6.2.2 群杭効果(摩擦力低減効果)

最大軸力点以浅において, 各点の実測軸力の差から求めた摩擦力の群杭と単杭の比は図-21に示す分布とな

り, 2本群杭0.2~1.0(各杭の平均は0.6~0.7), 5本群杭の外側杭0.2~0.9(各杭の平均は0.5~0.6), 5本群杭の中杭0.1~0.4(平均0.3)である。また, 本例では単杭でも先端沈下はほとんどなく(測定誤差を考慮しても数mm以下), 杭頭の沈下は各杭ともすべて杭体の圧縮によるもので, 杭頭沈下量の群杭と単杭の比は, 正の摩擦力を含めて平均的な低減効果を示しているといえる。これを求めると表-4のようになり, 2本群杭で0.7~1.0, 5本群杭の外側杭で0.6~0.7, 中杭で0.45で, これらも大略前記と同じ結果を与える。

2例を除いて, 最大軸力は G.L.-30.9m にあり, またこの2例も G.L.-30.9m までの平均摩擦力の方が, 最大軸力点までの平均摩擦力より大きいので, G.L.-30.9m における単杭と群杭の軸力比 (=NF 低減効果) を求め, 時間との関係を調べてみると図-22になる。測定開始後100日頃までは軸力比は変化しているが, それ以降はあまり変化せず, 約500日経過した現在ではほとんど落ち着いている。最終値は2本群杭で0.6~0.7, 5本群杭の外側杭で0.4~0.6, 中杭で0.25となり, 前記の摩擦力および沈下から求めた値とほぼ同じ範囲にある。

以上の結果から, 群杭によるNFの低減効果は平均的にみて, 2本群杭で0.7, 5本群杭の外側杭で0.6, 中杭で0.3となり, 各杭のばらつきはそれぞれの平均値に対し±50%の範囲にある。

なお, 正の摩擦力については図-9の軸力分布あるいは図-18の単杭の摩擦力~変位関係から類推すれば明らかのように, 群杭ではその發揮が悪い。最大軸力点以深の平均摩擦力を求め, 単杭との比を求めると表-5になり, 2本群杭では0.4~0.5, 5本群杭の外側杭では0.5~0.6, 中杭では0.3となる。このことから群杭による摩擦力の低減効果は, 負の場合だけでなく正の場合も考慮せねばならない場合もありうることを示している。

群杭によるNF低減効果の推定方法として, 下式による  $r_e$  から求める方法が提案されている<sup>1)</sup>。

$$r_e = \left( \frac{D\bar{f}_n}{\bar{\gamma}} + \frac{D^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ここで,  $r_e$ : 等価重量負担半径

$D$ : 杭の直径

$\bar{f}_n$ : 中立点深さまでの平均NF

$\bar{\gamma}$ : 中立点深さまでの土の平均単位体積重量

この式で  $\bar{f}_n$  を単杭の軸力から求めた  $5.64t/m^2$  を,  $\bar{\gamma}$  としては土の湿潤単位体積重量  $\gamma_t$ , 間隙水圧の実測もとに  $\sigma'_v$  から逆算した単位体積重量と土の水中単位体積重量  $\gamma'$  の3つを考慮して, それぞれについて  $r_e$  を算定し

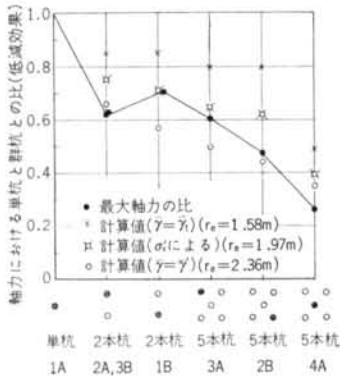


図-23 群杭のNF低減効果

本測定で2本群杭、5本群杭の場合の低減の割合を求めると図-23になる。なお、 $\gamma_t$ の場合を除いて他の2つの場合は円の半径が大きくなるため、実験棟の基礎杭の影響も考慮する必要が生じた。実験棟の杭は $\phi 558.8$ で測定杭より多少小さいが、単位面積当りの摩擦力は測定杭と同じとし、この杭による影響も計算に入れた。

この算定値と実測の軸力による低減の割合は、いずれも傾向としてはよく合っているが、低減の割合は $\gamma_t$ によるものが最小で、 $\gamma'$ によるものが最大であり、 $\sigma_v'$ から逆算したものが中間的値になっている。実測との対応は $\sigma_v'$ から逆算したものと $\gamma'$ による方が、 $\gamma_t$ によるものよりよい。しかし $\gamma'$ による場合は低減効果が過大になっているものがあるから、 $\gamma'$ を用いて設計することは危険側になる可能性が大きいといえる。したがって、設計においては間隙水圧の分布を実測して $\sigma_v'$ を求めるか、 $\gamma_t$ を用いて行なうべきである。

## § 7. 結論

検討結果から得られた結論を列記すれば次のようになる。

### <単杭に関して>

(1)中立点の位置は杭先端地盤の剛性あるいは支持力が大

### <参考文献>

- 1) 遠藤正明：“鋼グイ-鋼グイ研究委員会報告-ネガティブフリクション（土質工学会編土質基礎工学ライブラリー6）”1969.9
- 2) 岡部・鬼頭：“武蔵野ヤードにおけるネガティブフリクションの実験”構造物設計資料，No. 27（1971. 9）
- 3) 岡部達郎：“軟弱な地盤および地盤対策のための調査，設計およびこれらに関する行なった実験的研究”鉄道技術研究所報告，No. 897（1974）
- 4) 岡部・鬼頭・坂東・山本：“ネガティブフリクションの算定とその対策”基礎工，1974. 1
- 5) 井上嘉信：“沖積層が厚い軟弱地盤での負の摩擦力とクイの設計”土と基礎，1974. 8

きくなるにつれて深くなる。そしてN値50以上の層に打込んだ先端閉端杭の中立点の深さは、圧縮層の95%程度のところを考えねばならない。

(2)摩擦力をN値、 $q_u$ 法で求めるとNFを過小評価する場合もある。また有効応力法により求める場合は少なくとも土質により常数を変えねばならない。

### <群杭に関して>

(1)群杭の軸力分布の増加傾向は単杭と同じである。

(2)群杭でも中立点の深さは単杭と同じである。

(3)単杭のNFに対する群杭のNFの低減の割合は、平均的に考えて2本群杭で0.7、5本群杭の外側杭で0.6、5本杭の中杭で0.3となり低減効果は大きい。

(4)正の摩擦力も群杭による低減効果を考えねばならない場合もある。

(5)NFの低減効果を提案式により算定する場合には、単位体積重量としては間隙水圧の分布を実測して $\sigma_v'$ を求め、これから逆算した単位体積重量を用いるのがよい。間隙水圧の分布の実測ができない場合は、単位体積重量として湿潤のそれを用いる。

## § 8. おわりに

本測定から、単杭の場合には先端閉端の打込み杭の中立点の確認、群杭の場合には杭本数の少ない群杭のNF低減効果が明らかになった。そして本測定結果を国鉄、土質工学会の実験結果に加えて考えれば、先端閉端の打込み杭についてのNFの性状はかなり明瞭になったものと思う。しかしながら、杭には先端閉端の打込み杭や、場所打ち杭、埋込み杭など種々あり、これらの杭にこれらの結果がそのまま適用されるかは疑問であり、これについては今後測定を行ない解決する必要がある。

最後に、測定杭施工にあたり協力いただいた実験棟作業所の池谷所長と、測定およびデータ整理に協力願った岩淵氏に心から感謝の意を表します。