

# WALL FOUNDATION の水平抵抗に関する研究 (その1)

—室内模型実験(1)—

金谷 祐二 茶谷 文雄

## Study on Lateral Resistance of WALL FOUNDATION (Part 1)

—Laboratory Model Tests (1)—

Yuji Kanatani Fumio Chatani

### Abstract

WALL FOUNDATION (WF) consists of reinforced concrete slurry walls which function as earth-retaining walls for excavation, as basement walls, and as pile foundations. This paper describes the results of experiments in which lateral resistances of piles with rectangular sections, such as WF, were investigated by a series of lateral loading tests. The results of laboratory tests are reported in this Part 1. For model piles with various rectangular sections, lateral loading tests were performed in the directions of the short and long axes of the piles, and the differences in the behaviors of the piles in the two directions and the influences of the shapes of pile sections were studied. It is clarified from the test results that it is proper to evaluate not only the passive resistance, but also the side frictional resistance of the pile in estimating the lateral resistance of a pile with a rectangular section.

### 概 要

WALL FOUNDATION (以下、WF と略記する)とは、RC 地中壁を基礎杭、地中構造壁、山留め壁などの多目的に使用するシステムの呼称である。本報告は、WF のような長方形断面を有する杭に対し、室内および野外において、一連の水平載荷試験を実施し、その水平抵抗について調査した結果のうち、室内実験の結果に関して述べたものである。

室内実験においては、種々の断面寸法を有する模型杭に対し、面外、および面内方向の水平載荷試験を実施し、水平力に対する両方向の挙動の相違、杭断面の辺長比(長辺/短辺)の影響などについて調査した。その調査結果から、杭に作用する全地盤反力を杭前面の受働抵抗と杭側面の摩擦抵抗とに分離し、それぞれを地盤反力係数で評価することによって、杭を弾性床上の梁として扱えることが判明した。

### 1. 序

WALL FOUNDATION とは、OWS-SOLETANCHE 工法によって施工した RC 地中壁を、基礎杭、地中構造壁、山留め壁などの多目的に使用するシステムの呼称であり、以後、本報告では WF と略記する。なお、特に WF を基礎杭として使用した場合、これを WF 杭と呼ぶ。

WF 杭は断面形状がほぼ長方形であるので、杭体の曲げ剛性、および水平力が作用した場合の地盤反力の性状が、面外と面内方向とで異なっている。地盤の抵抗要素を図-1 に示すように、杭前面の受働抵抗  $P_p$  と杭側面

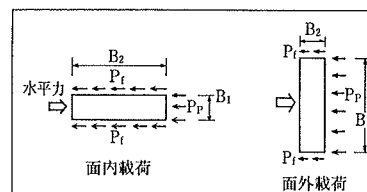


図-1 WF に作用する地盤反力

に作用する摩擦抵抗  $P_r$  とに分離して考えると、面外載荷では  $P_p$  の影響が支配的であり、面内載荷では、逆に  $P_r$  の影響が大

きいと推測される。したがって、面内方向の水平抵抗を検討する場合は、 $P_r$  を評価することが必要となる。筆者らは、過去に地盤条件の異なる3工事場において、断面寸法が  $0.6 \times 2.2$  m の WF 杭の面外と面内方向について水平載荷試験を実施し、その実験結果から上記の摩擦

抵抗の簡便な評価法を提案した<sup>1)</sup>。すなわち、WF 杭を  
 一様な弾性床土上の梁とし、WF 杭に作用する全地盤反力を  
 下式のように、受働抵抗  $P_p$  と摩擦抵抗  $P_f$  とに分離し、  
 それぞれを地盤反力係数を用いて評価しようとするもの  
 である。

$$P = P_p + P_f$$

$$= k_p B_1 y + 2k_f B_2 y \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

- P: 全地盤反力 (kg/cm),
- $B_1, B_2$ : WF 杭断面の長辺と短辺 (図-1 参照)(cm)
- $P_p$ : 受働抵抗による地盤反力 (kg/cm)
- $P_f$ : 摩擦抵抗による地盤反力 (kg/cm)
- $k_p$ : 受働抵抗に関する地盤反力係数 (kg/cm<sup>3</sup>)
- $k_f$ : 摩擦抵抗に関する地盤反力係数 (kg/cm<sup>3</sup>)

なお、摩擦抵抗に関する地盤反力係数、 $k_f$  とは、WF  
 杭側面に作用する単位面積当りの摩擦力と、WF 杭と地  
 盤との相対変位量  $u$  との関係を示す  $f \sim u$  曲線の割線勾  
 配を示す値である。上記した(1)式は、一定の断面寸法  
 (0.6×2.2 m) を有する WF 杭の水平載荷試験から推定  
 した近似式であり、断面寸法が異なった場合、あるいは  
 群杭となった場合の適用性については実験的に確認され  
 ていない。そこで、種々の断面寸法を有する WF 単杭、  
 および3体の WF 杭を並列に配置した単純な形式の群  
 杭を対象とし、下記のような一連の水平載荷試験を実施  
 し、水平力に対する WF 杭の挙動を調査するとともに、  
 (1)式の適用性について検証した。

(I) 土槽を用いた室内模型実験

- (1) アルミニウム製の模型杭に対する実験
- (2) アクリル製の模型杭に対する実験

(II) 実際の地盤中に場所打ちで施工した WF 杭 (実物  
 の1/5モデル) に対する野外実験

(III) 実大実験

上記の実験のうち、(I)―(1)、および(III)は、WF の  
 単杭のみを対象とした実験であり、(I)―(2)、および(II)  
 は、WF の単杭、および群杭を対象とした実験である。  
 なお、(I)の室内実験については、(1)式に示す摩擦抵抗  
 に関して調査する目的で、WF 杭に対して引抜き試験も  
 実施した。

本報告は、上記のうち、アルミニウム製の模型杭に対  
 する実験の結果に関するものである。

2. 実験概要

2.1. 模型杭

模型杭の諸元を表-1 に示した。模型杭は、いずれも  
 長方形断面を有しており、断面の短辺は一定、断面の辺  
 長比 (長辺/短辺) が約 2, 4, 6 の3種類で、本報告で

は、それぞれ AL I, AL II, AL III 杭と呼称することに  
 した。杭長は、すべて 109.5 cm である。各模型杭とも  
 面外載荷用と面内載荷用とがあり、それぞれ杭名称の最  
 後に o, i の記号を付して区別している。また、実大の  
 WF 杭は場所打ち鉄筋コンクリート製であり、表面が粗  
 であるので、模型杭の杭体表面に砂を貼付し、摩擦抵抗  
 が有効に作用するよう考慮した。なお、模型杭には、ヒ  
 ズミゲージを貼付してある。一例として、AL I 杭のヒズ  
 ミゲージ貼付位置を図-2 に示した。

2.2. 模型土槽、および模型地盤

模型土槽は、図-3 に示すように、縦 1.5 m, 横 2.0  
 m, 深さ 1.03 m で、底部に土槽内の砂地盤を水締めする  
 ための送水管が配管されている。地盤中への杭の設置は  
 以下の手順で行なった。

- (1) 土槽内に砂を入れて水を満たす。
- (2) 土槽底部から送水管を通して水を圧送し、地盤を液  
 状化させる。
- (3) 地盤を液状化状態に保った  
 まま、杭を地盤中に垂直に建込  
 む。
- (4) 送水を止め、土槽底部から  
 排水して砂地盤を水締めする。

実験に使用した砂は、以下に  
 示すような鬼怒川産の川砂であ  
 る。

$$D_{max} = 1.2 \text{ mm} \quad U_c = 1.95$$

$$G_s = 2.74 \quad \gamma_t = 1.42 \text{ t/m}^3$$

杭の名称	断面形状			曲げ剛性 EI (kg・cm <sup>2</sup> )
	短辺B (mm)	長辺D (mm)	辺長比 D/B	
AL I-o	21	46	2.2	4.15×10 <sup>5</sup>
AL I-i	21	48	2.3	4.61×10 <sup>6</sup>
AL II-o	21	84	4.0	8.29×10 <sup>5</sup>
AL II-i	23	87	3.8	3.69×10 <sup>7</sup>
AL III-o	21	124	5.9	1.24×10 <sup>6</sup>
AL III-i	21	127	6.0	1.24×10 <sup>8</sup>

表-1 模型杭の諸元

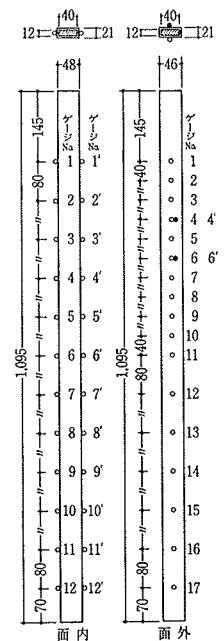


図-2 ゲージ貼付位置

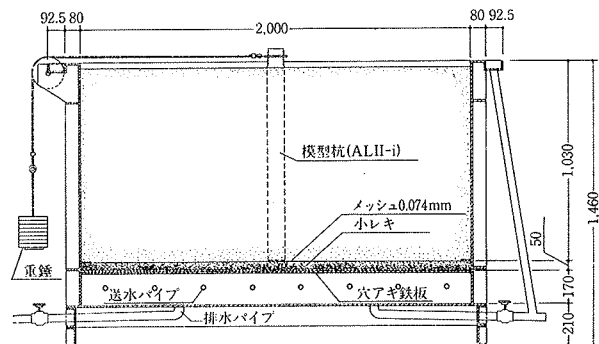


図-3 模型土槽

なお、各杭の水平載荷試験終了後、模型地盤の図-4に示す平面位置、6カ所において、深さ10cmピッチで静的コーン貫入試験を実施した。使用コーンの直径は2.0cm、先端角度30度である。貫入試験結果によると、平面位置による貫入抵抗値の相違は認められなかったため、計36回の試験から得られた貫入抵抗値を、各深さ毎に平均し、この平均値と深さとの関係を図-5に示した。同図中には、データを統計処理して求めた80%信頼区間、および90%信頼区間も併記した。この図によると模型地盤の貫入抵抗値は、上部でやや小さめの値が記録されるものの全体的には4~4.5 kg/cm<sup>2</sup>の範囲でほぼ一定値を示しており、横型地盤が一様に締め固められていることがわかる。

### 2.3. 試験方法

2.3.1. 水平載荷試験 各杭について、面外、および面内方向の水平載荷試験を実施し、水平力に対する両方向の挙動の相違、および杭断面の辺長比(長辺/短辺)の影響などについて調査した。載荷方法は、急速3サイクルの一方方向載荷とし、各荷重段階における荷重保持時間は、一律5分間とした(図-7、参照)。なお、載荷装置については、図-3を参照されたい。測定項目は、杭頭変位、および杭体ヒズミである。

2.3.2. 引抜き試験 面内載荷用の杭については、引抜き試験を実施し、周面摩擦抵抗と引抜き量の関係から水平載荷時において杭側面に作用する摩擦抵抗の影響について調査した。引抜き方法は、図-6に示すように、ウォームジャッキによって、杭を約0.05mm/分の速度で連続的に引抜く変位制御方式である。変位制御方式を採用したのは、下記の理由によるものである。すなわち予備実験に

よって、本模型地盤での摩擦抵抗は、微小な引抜き量で急速に移動されて最大値に達することが判明していたので、引抜き量に対する摩擦抵抗の移動状況を正確に把握するためには、変位制御方式が適切であると判断したからである。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1. 荷重~水平変位の関係について

荷重~水平変位量曲線の一例として、断面寸法の最も大きなALIII杭について、面外載荷時、および面内載荷時の曲線を、それぞれ図-7、8に示した。これらの図から、面外と面内載荷時における、荷重~変位曲線の形状の相違が明確にわかる。すなわち、面外載荷時には、水平変位は荷重の増加にともなってゆるやかに増大し、荷重をゼロに戻したときの残留変位量は比較的小さい。なお、繰返し載荷時の曲線が下に凸になっているのは、1回目の載荷によって、杭前面と地盤との間に間隙があくためである。一方、面内載荷時には、荷重50kg程度を境に低荷重域では、荷重増

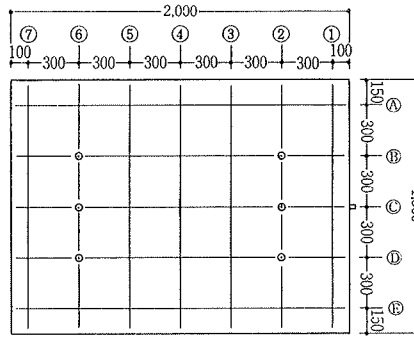


図-4 貫入試験実施位置(平面図)

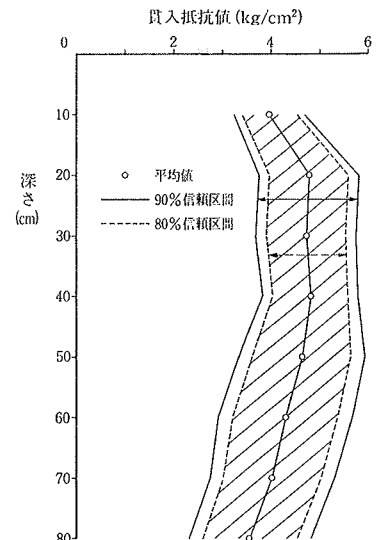


図-5 貫入試験結果

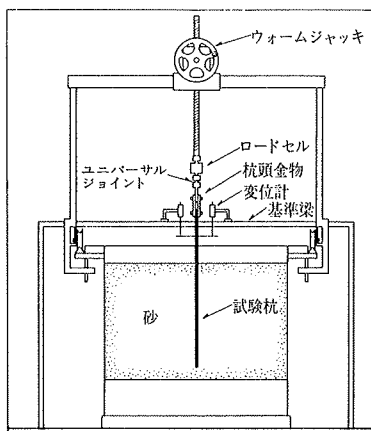


図-6 引抜き装置

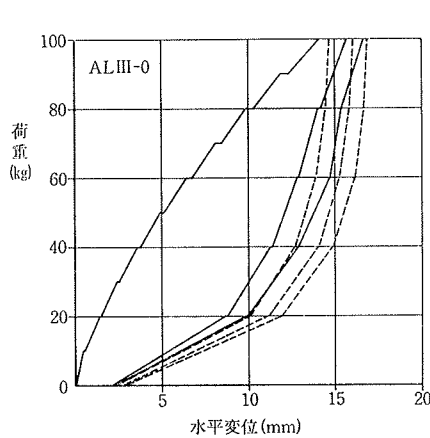


図-7 荷重~水平変位量曲線 (III杭, 面外)

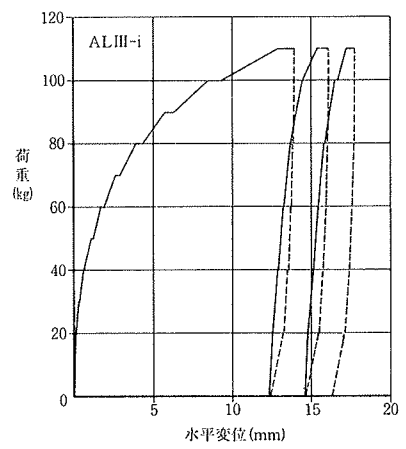


図-8 荷重~水平変位量曲線 (III杭, 面内)

加にともなう水平変位の増加量が非常に小さいが、高荷重域では、荷重の増加にともなって急速に水平変位が増大する。そして、荷重をゼロに戻しても、変位はほとんど戻らず、そのまま残留する。これは、面内載荷時においては、杭体の曲げ剛性が高いので、荷重の増加にともなって、杭全体が剛体的に回転するという、いわゆる短杭的な挙動が顕著になるためと考えられる。なお繰返し載荷時においては、1回目の載荷によって、杭前面の地盤が締固まるために、荷重の増加にともなう水平変位の増加が非常に小さくなっている。

ALⅢ杭の面外、および面内載荷時における変形曲線を、それぞれ図-9、10に示した。なお、これらの変形曲線は、後述のヒズミ分布曲線を2回積分して求めたものである。図-9、10から、面外載荷時においては、長杭的な変形性状を、また、面内載荷時においては、杭先端自由の短杭的な変形性状を示すことがよくわかる。

なお、図には示していないが、ALⅡ杭もALⅢ杭とほぼ同様な挙動を示した。しかしながら、断面寸法が最も小さいALⅠ杭については、面内載荷時においても比較的杭体の曲げ剛性が小さいために、むしろ長杭的な挙動を示した。

各杭の荷重～水平変位曲線の比較を図-11に示した。この図においては、同一荷重での各杭の水平変位を比較すると、断面寸法が大きい杭ほど変位が小さくなる傾向が認められる。また、ALⅠ、Ⅱ、Ⅲ各杭の場合とも面内載荷時の変位は、面外載荷時の変位より小さくなっており、特に、低荷重域では、面外載荷時の数分の1程度の値を示している。すなわち、図-2から、概略、曲げ剛性の高い杭ほど水平変位は小さくなる傾向のことがわかる。しかしながら、面内載荷時の高荷重域においてはALⅡ、およびⅢ杭の水平変位は、荷重の増加にともなって急速に増大し、ALⅠ杭の変位より大きくなっている。これは、ALⅡ、およびⅢ杭は、曲げ剛性が高いので、高荷重域において、既述のような短杭的な挙動が顕著になるためと考えられる。

図-12に、各杭の  $\log P \sim \log \delta$  曲線の比較を示した。これによると、各杭の面外載荷時、およびALⅠ杭の面内載荷時における  $\log P \sim \log \delta$  曲線は、両対数紙上でほぼ直線となるが、ALⅡ、Ⅲ杭の面内載荷時における  $\log P \sim \log \delta$  曲線は、曲線状となっており、長杭と短杭の挙動の相違が認められる。また、各杭の面外載荷時における  $\log P \sim \log \delta$  曲線は、ほぼ平行になっている。

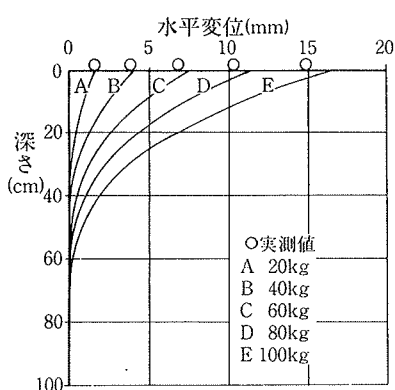


図-9 変形曲線(ALⅢ杭, 面外載荷)

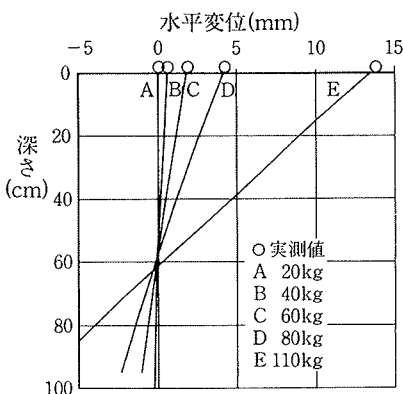


図-10 変形曲線(ALⅢ杭, 面内載荷)

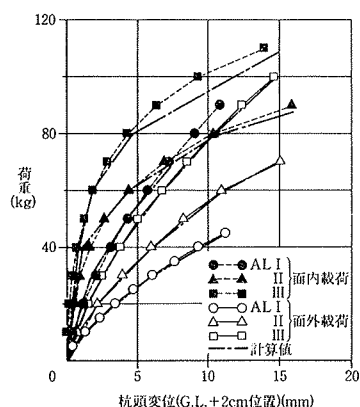


図-11 荷重～水平変位曲線の比較

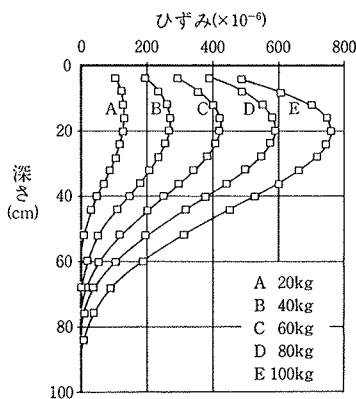


図-13 ヒズミ分布曲線(ALⅢ杭, 面外載荷)

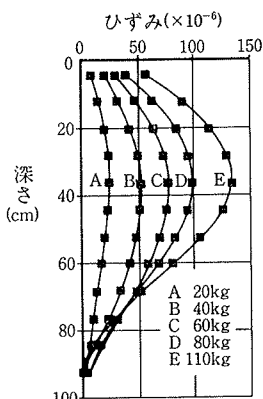


図-14 ヒズミ分布曲線(ALⅢ杭, 面内載荷)

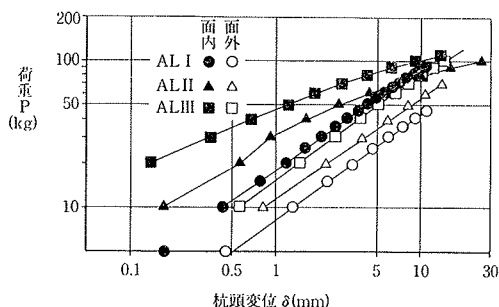


図-12  $\log P \sim \log \delta$  曲線の比較

3.2. ヒズミ分布曲線について

ヒズミ分布曲線の一例として、ALⅢ杭の面外、および面内載荷時における曲線を、それぞれ図-13, 14に示した。これらの図から、杭の曲げ剛性の相違によって、ヒズミ分布曲線の形状が異なることがわかる。すなわち杭の曲げ剛性が小さい面外載荷時においては、ヒズミが深さの増加にともなって急激に増大して最大値に達し、再び急激に減少して地表面下の比較的浅い位置でゼロに収束する。一方、杭の曲げ剛性が大きい面内載荷時においては、ヒズミは、深さの増加にともなってゆるやかに増大して最大値に達し、再びゆるやかに減少して杭先端付近でゼロに収束する。

図-15に、各杭に同一荷重が作用したときの、ヒズミ分布曲線の比較を示した。これによると、各杭の最大ヒズミ値は、断面の大きい杭ほど小さくなっている。また各杭について、面外、および面内載荷時における最大ヒズミ値を比較すると、面内載荷時における最大ヒズミ、 $\epsilon_{max}$  (面内)は、面外載荷時における最大ヒズミ  $\epsilon_{max}$  (面外)の数分の1となっており、 $\epsilon_{max}$  (面内)/ $\epsilon_{max}$  (面外)の値は、断面の大きい杭ほど小さくなる傾向が認められる。

3.3. k 値分布曲線について

k 値分布曲線の一例として、ALⅢ杭の面外、および面内載荷時における曲線を、それぞれ図-16, 17に示した。なお、これらの図は下記の手順で求めた。

- (1) 各荷重段階におけるヒズミ分布曲線を、図上で2回積分、もしくは2回微分して、変形曲線、および地盤反力分布曲線を求める。
- (2) 上記の曲線から、任意の深さにおける水平変位(cm)と地盤反力(kg/cm)を読み取り、地盤反力を水平変位と杭幅で除すことによって、水平地盤反力係数、k 値

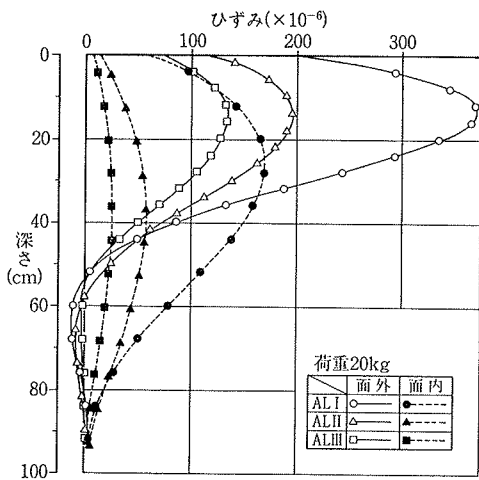


図-15 ヒズミ分布曲線の比較

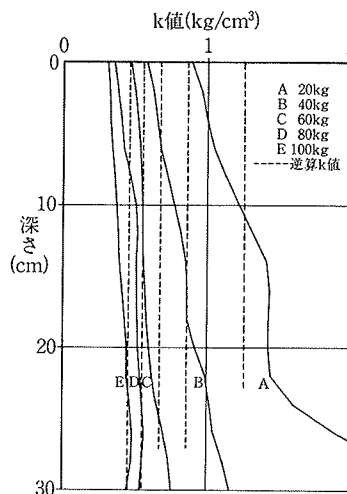


図-16 k 値分布曲線 (ALⅢ杭, 面外)

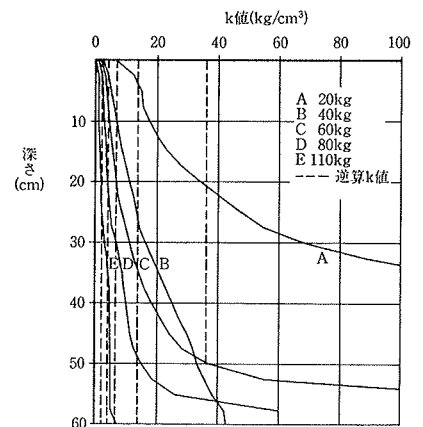


図-17 k 値分布曲線 (ALⅢ杭, 面内)

(kg/cm<sup>2</sup>) の深さ方向分布曲線を求める。なお、杭幅としては、面外載荷時には杭断面の長辺を、また、面内載荷時には短辺を採用した。

このようにして求めた地盤反力係数、k 値は、かなり大きな計算誤差を含むと考えられるが、概略の傾向を調査することは可能である。図-16, 17によると、k 値は面外載荷時には、深さ方向にほぼ一様であり、面内載荷時には、深さの増加にともなって増大する三角形分布に近いようである。なお、面内載荷時における k 値分布曲線の形状は、荷重の増加にともなって三角形分布から一様分布へと移行する傾向が認められた。現時点では、面内載荷時における k 値分布曲線の形状が三角形分布となる理由を、明解に説明することはできないが、下記の点も理由の一つであろうと推測される。

- ① 一般的に、地盤は非線形的な性質を有しているので変位が大きな杭頭部付近では k 値が小さく、変位が小さな杭下部においては k 値が大きくなる傾向がある。
- ② 面内載荷時において杭に作用する地盤反力としては杭側面の摩擦抵抗の影響が大きいと考えられる。一方、後述のように、摩擦抵抗に関する k 値は、受働抵抗に関する k 値と比較して、変位の増加にともなう減少の割合が大きい。したがって、面内載荷時には①に述べた傾向が助長される。

なお、図-16, 17 中には、杭を線形かつ一様な弾性床土上の梁として扱った場合の逆算 k 値も点線で示してある。これらの図から、逆算 k 値は上記の k 値分布曲線の平均的な値となっていることがわかる。

3.4. 弾性床土上の梁としての検討(1)

(線形一様地盤)

杭を線形かつ一様な弾性床土上の梁として扱った場合の検討を行なった。

3.4.1. 面外載荷時の水平地盤反力係数について 既述のように、杭に作用する全地盤反力を受働抵抗と摩擦抵抗とに分離して考えると、面外載荷時には受働抵抗の影響が支配的であると考えられる。そこで(1)式において、摩擦抵抗に関する第2項を無視し得るものと仮定し、杭を弾性床上の梁として、各杭の荷重～水平変位量の関係から、受働抵抗に関する地盤反力係数、 $k_p$ を逆算した。そして、各杭について $k_p$ ～地表面変位の関係を両対数紙上にプロットし、図-18に示した。これによると、 $k_p$ は、地表面変位の増加にともなって、両対数紙上で直線的に減少しており、その関係式を求めると

$$k_p \propto \delta_0^{-0.44} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $\delta_0$ : 地表面変位

となる。従来から、 $k_p$ は、地表面変位、もしくは載荷点変位の平方根に逆比例するとされており、本実験においても、ほぼ同様な結果が得られた。

また、図-18において、同一変位における各杭の $k_p$ を比較すると、杭幅が大きいほど $k_p$ が小さくなっており杭幅の影響が認められる。そこで、 $k_p$ と杭幅との関係を、地表面

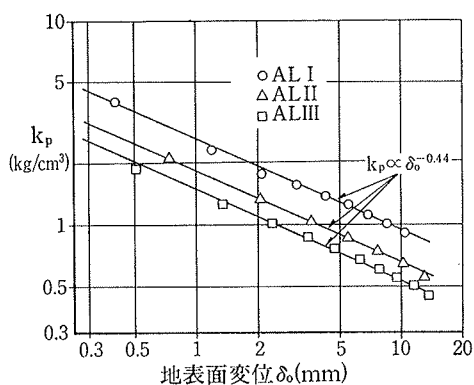


図-18  $k_p$ ～地表面変位の関係

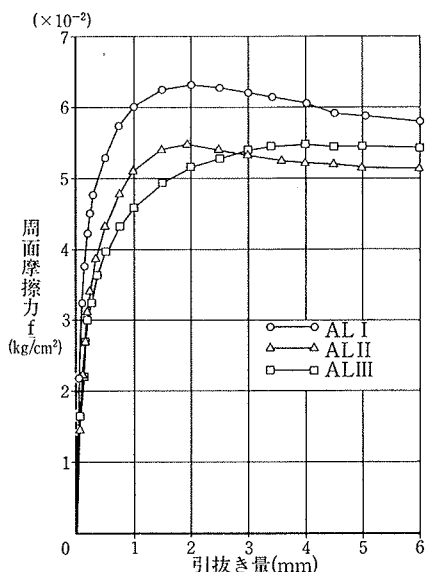


図-20 摩擦抵抗～引抜き量の関係

変位をパラメーターとして図-19に示した。この図によると、 $k_p$ は杭幅の増加にともなって両対数紙上で直線的に減少しており、その関係式を求めると、

$$k_p \propto B^{-0.55} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $B$ : 杭幅

となる。すなわち、(2)、(3)式から

$$k_p \propto B^{-0.55} \delta_0^{-0.44} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$k_p \propto B^{-0.90} (\delta_0/B)^{-0.44} \quad \dots\dots\dots(5)$$

という関係式が導かれる。(4)、(5)式はそれぞれ、 $k_p$ が地表面変位 $\delta_0$ をパラメーターとしたとき、ほぼ杭幅の平方根に逆比例し、 $(\delta_0/B)$ をパラメーターとしたとき、ほぼ杭幅に逆比例することを示す式である。すなわち、 $k_p$ ～杭幅の関係は、パラメーターによって異なることがわかる。

3.4.2. 面内載荷時の水平地盤反力係数について 面内載荷時には、面外載荷の場合とは逆に、杭側面に作用する摩擦抵抗の影響が大きいと推測される。しかしながら、水平載荷時に、杭側面に作用する摩擦抵抗を直接測定することは困難であるので、ここでは便宜上、杭の引抜き試験を行なって摩擦抵抗について調査した。

引抜き試験結果から求めた、各杭の単位面積当りの摩擦抵抗と引抜き量との関係を図-20に示した。なお、引抜き時の杭体ヒズミの測定結果によると、最大引抜き荷重時においても杭体に有意なヒズミは発生せず、杭は、

ほぼ剛体的に引抜かれたと考えられる。

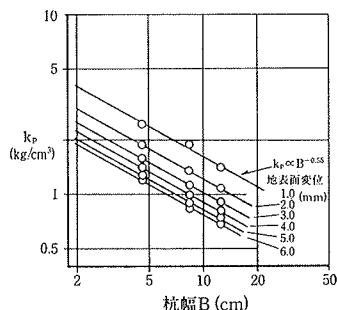


図-19  $k_p$ ～杭幅の関係

図-20から、摩擦抵抗は、わずかな引抜き量で最大値に達することがわかる。また、同図において、引抜き量を杭体と地盤との相対変位量とみなすことにすれば、同図中の曲線の割線勾配が、摩擦抵抗に関する地盤反力係数、 $k_f$ となる。このようにして求めた $k_f$ と、杭と地盤との相対変位量 $u$ との関係を両対数紙上にプロットし、図-21に示した。これによると、 $k_f$ は、 $u$ の増加にともなって両対数紙上で直線的に減少しており、この関係式を求めると

$$k_f \propto u^{-1} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $u$ : 杭と地盤との相対変位量

となる。(2)式と(6)式を比較すると、 $k_p$ がほぼ変位の平方根に逆比例するのに対し、 $k_f$ は変位に逆比例することがわかる。すなわち、 $k_f$ は $k_p$ より、変位の増加にともなう減少の割合が大きい

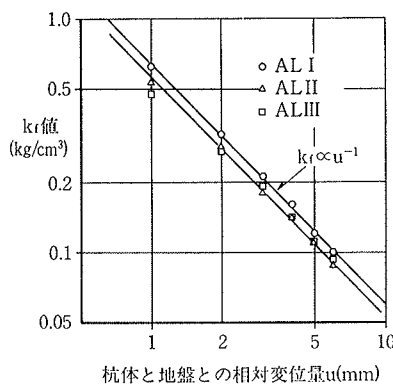


図-21  $k_f$ ～ $u$ の関係

といえる。

図-19, および図-21を用いて, WF 杭の地盤反力に関する近似式, (1)式の妥当性を以下の手順で検討した。

① 面内載荷時における各杭の受働抵抗に関する地盤反力係数,  $k_p$  を求める。すなわち, 図-19から, 各杭の杭断面の短辺長さに対応する  $k_p$  を, 各地表面変位毎に求める。

② 各杭の摩擦抵抗に関する地盤反力係数,  $k_f$  を図-21から求める。なお,  $k_f$  は, 杭と地盤との相対変位量  $u$  の増加にともなって減少するので, いかなる相対変位量ときの  $k_f$  を採用すべきか問題となる。本報告では一応, 水平載荷時における杭の地表面変位が相対変位量に対応すると仮定し, ①で  $k_p$  を求めたときと同一の地表面変位に対応する  $k_f$  を求める。

③ (1)式において

$$E_{sp} = k_p B_1 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$E_{sf} = 2k_f B_2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$E_s = E_{sp} + E_{sf} \quad \dots\dots\dots(9)$$

とおくと,

$$\begin{aligned} P &= P_p + P_f \\ &= E_{sp}y + E_{sf}y \\ &= E_s y \quad \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

となる。

①, ②で求めた  $k_p, k_f$  を用いて, (7), (8), (9)式から各地表面変位毎に  $E_s$  を求め, これを  $E_s$  (推定値) と表示する。

④ 面内載荷時における各杭の荷重～水平変位の関係から, 杭を一様な弾性床土上の梁として,  $E_s$  を逆算し, これを  $E_s$  (逆算値) と表示する。なお,  $E_s$  を逆算する際 AL I

杭は長杭, AL II, III 杭は, 杭先端自由の短杭と仮定する。

⑤ 同一地表面変位における  $E_s$  (推定値) と  $E_s$  (逆算値) を比較し, 両者が一致すれば, (1)式がほぼ成立するものと考えられる。

一例として, AL III 杭について①～④の手順で求めた  $E_s$  (推定値) と  $E_s$  (逆算値) の比較を図-22に示した。なお同図中には, 参考として  $E_{sp}$  と  $E_{sf}$  の値も示してある。図-22によると,  $E_s$  (推定値) は  $E_s$  (逆算値) にかかなり近い値を示している。

さらに, 各杭について, 同一地表面変位における  $E_s$  (推定値) と  $E_s$  (逆算値) の比を求め, これと地表面変位との関係を図-23に示した。この図によると, 各杭の場合とも, 地表面変位に関係なく両者の比は 1.0 に近い値となっており,  $E_s$  (推定値) と  $E_s$  (逆算値) は, ほぼ等しいことがわかる。以上から,  $k_f$  の求め方に下記のような問題点はあるが, (1)式がほぼ成立すると考えてもさしつかえないと思われる。

⑥  $k_f$  を引抜き試験結果から推定したこと (鉛直方向と水平方向とで, 摩擦抵抗が多少異なると考えられる)。

⑦  $k_f$  を求める際, 地表面変位を基準としたこと。

次に, 面内載荷時において, WF 杭に作用する全地盤反力に占める摩擦抵抗の割合について調査した。この割合は, (10)式から,  $E_{sf}/(E_{sp} + E_{sf})$  で表わされる。そこで, 各杭について,  $E_{sf}/(E_{sp} + E_{sf}) \sim$  地表面変位の関係を求め, 図-24に示した。これによると, 摩擦抵抗の割合は, 断面の辺長比 (長辺/短辺) が大きい杭ほど, また, 地表面変位が小さいほど大きくなる傾向が認められる。地表面変位に対するこのような傾向は,

変位の増加にともなう受働抵抗  $P_p$  と摩擦抵抗  $P_f$  の稼働のされ方が異なるためと考えられる。図-25に,  $P_p$ , および  $P_f$  と水平変位との関係を模式的に示した。この図によると,  $P_p$  は, 水平変位の増加にともなって徐々に増大していくが,  $P_f$  は,

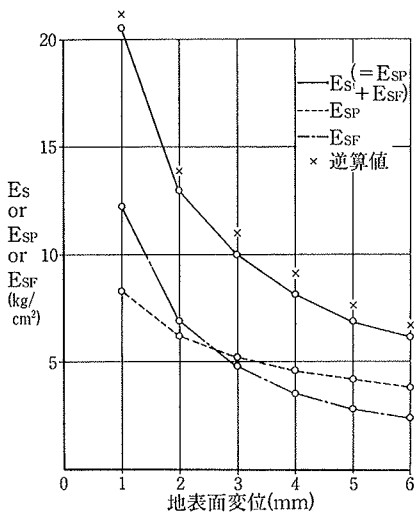


図-22  $E_s$  (推定値) と  $E_s$  (逆算値) の比較

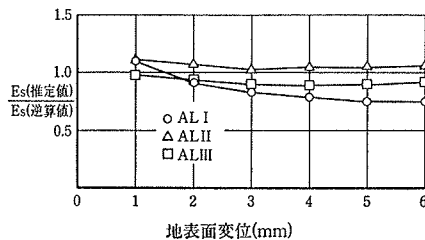


図-23  $\frac{E_s \text{ (推定値)}}{E_s \text{ (逆算値)}} \sim$  地表面変位

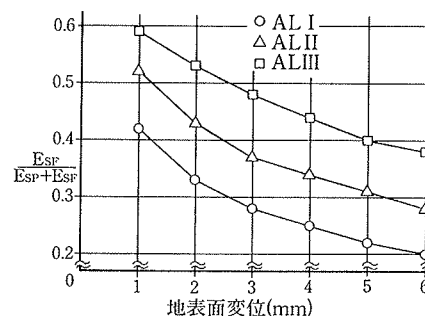


図-24  $\frac{E_{sf}}{E_{sp} + E_{sf}} \sim$  地表面変位

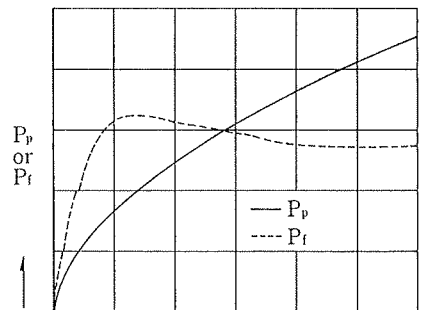


図-25  $P_p, P_f \sim$  水平変位

比較的小さな水平変位で急激に稼動されてピークに達する。したがって、水平変位が小さな範囲内においては、全地盤反力に占める摩擦抵抗の割合が大きいが、水平変位の増加とともにその割合は減少し、水平変位が大きな範囲内では、逆に、受働抵抗の割合が大きくなるものと推測される。

**3.4.3. 曲げモーメントについて** 各杭の荷重～水平変位量の関係から、杭を弾性床上の梁として、各荷重段階において(10)式に示す  $E_s$  を逆算し、さらに、この  $E_s$  を用いて各杭の曲げモーメントを計算した。一例として上記の計算によって求めた、ALⅢ杭の面外、および面内載荷時における曲げモーメント分布曲線を、それぞれ図-26, 27中に点線で示した。同図中には、杭体ヒズミの測定結果から求めた実測の曲げモーメント分布曲線も示してある。これらの図によると、面外載荷時においては計算値と実測値は比較的良好一致しているが、面内載荷時においては計算値は実測値よりかなり小さな値となっており、最大曲げモーメントに関しては、最大30%程度の誤差を示している。面内載荷時において計算誤差が大きくなるのは、本計算では、地盤反力係数が深さ方向に一律であると仮定しているが、実際の地盤反力係数の分布は、図-17に示すように、三角形分布に近いものと考えられる。

**3.5. 弾性床上的の梁としての検討(2)**  
(非線形多層地盤)

弾性床上的の梁の式を多層系に拡張し、さらに、各層の地盤の非線形性を考慮に入れた解析を行なった。

**3.5.1. 解析法** 杭、および地盤を図-28に示すように多層に分割し各層に弾性床上的の梁の式を適用すると、杭の微分方程式は下式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$\begin{cases} \text{(地上部)} & EI_1 \frac{d^4 y_1}{dx_1^4} = 0 & \dots\dots\dots(11) \\ \text{(地中部)} & EI_j \frac{d^4 y_j}{dx_j^4} + P_j = 0 & \dots\dots\dots(12) \end{cases}$$

ここに、 $EI_j$ : j層における杭の曲げ剛性 (kg・cm<sup>2</sup>)  
 $y_j$ : j層における杭の水平変位 (cm)  
 $x_j$ : j層の上端面からの深さ (cm)  
 $P_j$ : j層における地盤反力 (kg/cm)

上記の微分方程式の解を、各層の連続条件、杭頭部、および杭先端部の境界条件を用いて求める。なお、地盤反力  $P_j$  は、下式に示すように、(1), (10)式と同様、杭前面の受働抵抗  $P_{pj}$  と杭側面の摩擦抵抗  $P_{fj}$  の和として表わせるものと仮定する(図-1参照)。

$$\begin{aligned} P_j &= P_{pj} + P_{fj} & \dots\dots\dots(13) \\ &= E_{spj} y_j + E_{sfj} y_j & \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

ここに、  
 $P_{pj}$ : j層における受働抵抗による地盤反力(kg/cm)  
 $P_{fj}$ : j層における摩擦抵抗による地盤反力(kg/cm)  
 $E_{spj}$ : 受働抵抗に関する地盤の定数で、 $P_{pj} \sim y_j$  の関係を示す曲線の割線勾配 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $E_{sfj}$ : 摩擦抵抗に関する地盤の定数で、 $P_{fj} \sim y_j$  の関係を示す曲線の割線勾配 (kg/cm<sup>2</sup>)

地盤の非線形性を考慮し、 $P_{pj}$  と  $P_{fj}$  を水平変位  $y_j$  の関数として与える。それらの関数形は、それぞれ以下の手順で求める。

④ 受働抵抗  $P_{pj}$ : 各杭の面外載荷時における地盤反力分布曲線、および変形曲線から、任意の深さにおける単位杭幅当りの地盤反力  $P_{pj}/B_1$  と水平変位  $y_j$  との関係を求める。なお、その際3.4.と同様、面外載荷時には、受働抵抗の影響が支配的であると考えられるので、(13)式において、摩擦抵抗に関する第2項を無視する。一

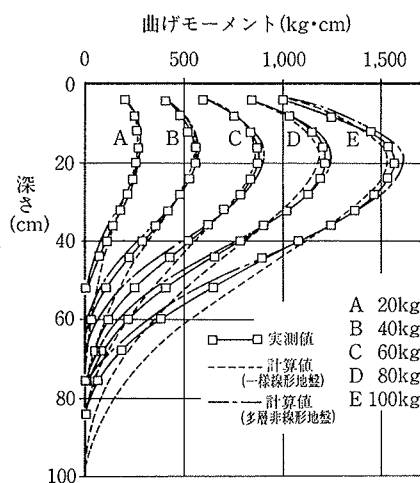


図-26 曲げモーメント分布曲線 (ALⅢ杭, 面外)

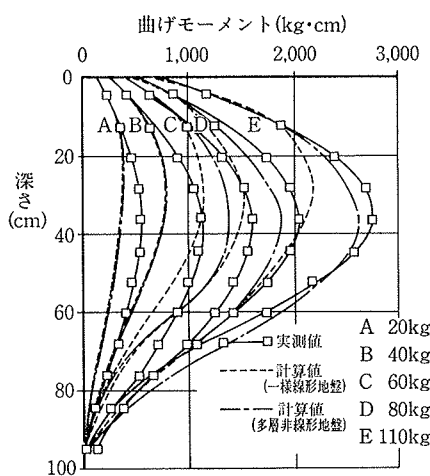


図-27 曲げモーメント分布曲線 (ALⅢ杭, 面内)

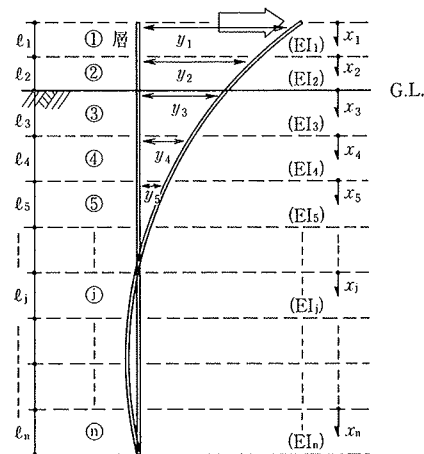


図-28 多層地盤を対象とした解析法



例として, ALIII 杭の  $P_{pj}/B_1 \sim y_j$  の関係を両対数紙上にプロットし, 図-29に示した。この図によると両者の関係は, 両対数紙上でほぼ直線となっており, その直線の勾配は, 深さに関係なく, 0.5程度の値を示している。すなわち, 下式がほぼ成立する。

$$P_{pj}/B_1 = k_{pj} y_j^{0.5} \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここに,  $k_{pj}$ : 地盤常数 ( $\text{kg}/\text{cm}^{2.5}$ )

上式における  $k_{pj}$  は, 地盤の深さによって異なっているが, 深さに対して一定の傾向が認められないので, 深さ方向に一定であると仮定した。各杭について, 杭の水平抵抗に支配的な影響を与えると考えられる地盤の範囲内, すなわち, 本実験では地表面~深さ 30 cm までの地盤の平均的な  $k_{pj}$  を, 既述の  $P_{pj}/B_1 \sim y_j$  の関係から求め, 表-2の上段に示した。

⑥ 摩擦抵抗  $P_{rj}$ : 図-20に示す, 各杭の単位面積当りの摩擦抵抗  $f_j$  と, 杭と地盤との相対変位量, すなわち水平変位  $y_j$  との関係を図-30に示すようにバイリニヤ型にモデル化する。図-30から, 摩擦抵抗  $P_{rj}$  は下式で表わされる。

$$y_j \leq y_{j0} \text{ のとき } P_{rj}/2B_2 = k_{rj} y_j \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$y_j > y_{j0} \text{ のとき } P_{rj}/2B_2 = f_{j0} \quad \dots\dots\dots(17)$$

ここに,  $k_{rj}$ : j 層における摩擦抵抗に関する地盤反力係数 ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )

$f_{j0}$ : j 層における単位面積当りの最大摩擦抵抗 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

なお, 本解析においては,  $k_{rj}$ ,  $f_{j0}$  および  $y_{j0}$  は, すべての層において一定であると仮定した。なお, 図-20を上記のようにモデル化して, 各杭について  $k_{rj}$ ,  $f_{j0}$ ,  $y_{j0}$  の値を求め, それらの値を表-3に示した。

上記の⑤, ⑥で求めた受働抵抗と摩擦抵抗の関数を用いて, 下記の手順で等価線形的に地盤の非線型性を導入

杭 名 称	AL I	ALII	ALIII
$k_{pj}$ ( $P_{pj}/B_1 \sim y_j$ 関係より)	$0.70 \text{ kg}/\text{cm}^{2.5}$	$0.42 \text{ kg}/\text{cm}^{2.5}$	$0.34 \text{ kg}/\text{cm}^{2.5}$
$k_{pj}$ (荷重~水平変位量曲線より)	0.82	0.53	0.46

表-2 面外載荷時における  $k_{pj}$

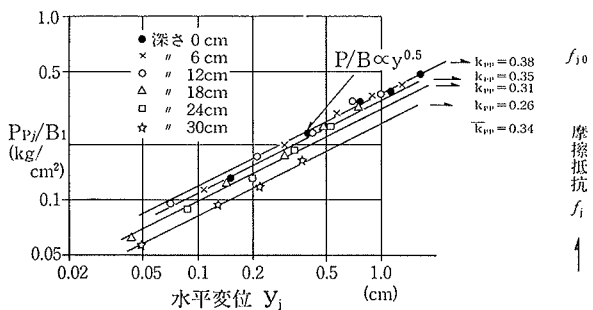


図-29  $P_{pj}/B_1 \sim y_j$  の関係 (ALIII 杭, 面外)

する。

① (15), (16), (17)式における  $k_{pj}$ ,  $k_{rj}$ ,  $f_{j0}$  を決定する。

② (13), (14)式において,  $E_{spj}$ ,  $E_{sfj}$  を仮定し, (11), (12)式を解いて, 各層の境界における受働抵抗  $P_{pj}$ , 摩擦抵抗  $P_{rj}$ , および水平変位  $y_j$  を求める。

③ ②で求めた  $P_{pj} \sim y_j$ ,  $P_{rj} \sim y_j$  の関係が, (15), (16), (17)式を満足するまで,  $E_{spj}$ ,  $E_{sfj}$  を修正して②の計算を繰返す。

④ ③の条件が満足された時点で, 各層の境界における変位, 傾斜角, 曲げモーメント, せん断力などを計算する。

### 3.5.2. 解析結果

(1) 面外載荷時について

本解析法による解が, 各杭の面外載荷時における荷重~水平変位量曲線の実測値に一致するように, 地盤常数  $k_{pj}$  を試行的に求め, 表-2の下段に示した。この値は同表中の上段に示す3.5.1.の⑤で求めた  $k_{pj}$  より, 17~35%程度大きな値となっているが, 両者は比較的良好対応を示しているといえよう。表-2によると,  $k_{pj}$  は杭幅の増加にともなって減少する傾向が認められ, 杭幅の影響が認められる。上記の, 試行的に求めた  $k_{pj}$  と杭幅  $B$  との関係を, 両対数紙上にプロットして図-31に示した。測点が少ないので, 明確な傾向は把握できないが, 概略下式が成立するようである。

$$k_{pj} \propto B^{-0.5} \quad \dots\dots\dots(18)$$

なお, 本解析法によって求めた, 各杭の面外載荷時における荷重~水平変位曲線を, 図-11中に1点鎖線で示した。この図によると, 計算値は全荷重域にわたって実

杭名称	AL I	ALII	ALIII
$k_{rj}$	$1.53 \text{ kg}/\text{cm}^3$	$0.95 \text{ kg}/\text{cm}^3$	$0.68 \text{ kg}/\text{cm}^3$
$f_{j0}$	$0.061 \text{ kg}/\text{cm}^2$	$0.052 \text{ kg}/\text{cm}^2$	$0.051 \text{ kg}/\text{cm}^2$
$y_{j0}$	0.040cm	0.055cm	0.075cm

表-3  $k_{rj}$ ,  $f_{j0}$ ,  $y_{j0}$

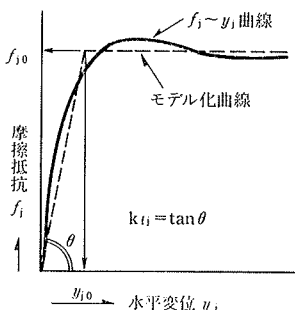


図-30  $f_j \sim y_j$  曲線のモデル化

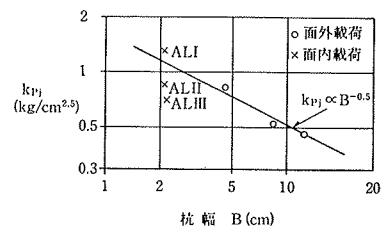


図-31  $k_{pj} \sim$  杭幅の関係

測値と非常に良く一致している。また、一例として、本解析法によって求めた、ALⅢ杭の各荷重段階における曲げモーメント分布曲線を図-26中に1点鎖線で示した。同図中には、3.4で述べた方法による計算値も示してある。図-26によると、本解析法による計算値は、3.4の方法による計算値と比較して、より実測値に近い値となっている。

(2) 面内載荷時について

面内載荷時において、各杭に作用する全地盤反力のうち、摩擦抵抗は、(10)、(17)式、および表-3に示す数値によって表わされるものと仮定し、本解析法による解が、各杭の荷重～水平変位量曲線の実測値に一致するように受働抵抗に関する地盤常数  $k_{pj}$  を試行的に求めた。さらに、この  $k_{pj}$  を図-31中にプロットした。この図によると、面内載荷時における  $k_{pj}$  に、多少のバラツキはみられるが、概略(18)式が成立するようである。したがって、(15)、(18)式から

$$P_{pj}/B_1 = k_{pj0} B_1^{-0.5} y_j^{0.5} \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 $k_{pj0}$ : 杭幅が1cm、かつ水平変位が1cmのときの地盤常数 (kg/cm<sup>2.5</sup>)

となる。

なお、本解析法によって求めた。各杭の面内載荷時における荷重～水平変位量曲線を、図-11に1点鎖線で示した。これによると、計算値は、実測値とかなり良く一致している。また、一例として本解析法によって求めたALⅢ杭の各荷重段階における曲げモーメント分布を図-27に1点鎖線で示した。同図中には、3.4.で述べた方法による計算値も示してある。図-27によると、本解析法による計算値は、3.4.の方法による計算値と比較して低荷重域を除いて、より実測値に近い値を示している。なお、低荷重域においては、本解析法による計算値も3.4.の方法による計算値と同様、実測値よりかなり小さな値となっている。これは、本解析法においては、摩擦抵抗  $P_{rj}$  と水平変位  $y_j$  との関係をバイリニヤ型にモデル化したために、低荷重域、すなわち微小変位の範囲内における実際の  $P_{rj} \sim y_j$  の関係を十分近似できなかったためと考えられる。

4. まとめ

- (1) 本実験結果から、地盤反力に関する近似式、(1)式の妥当性をほぼ検証することができた。
- (2) WF杭を線形かつ一様な弾性床上の梁として扱う解析法によって、水平力を受けるWF杭の挙動を概略推定することができる。
- (3) 弾性床上の梁の式を多層系に拡張し、多層における地盤の非線形性を考慮した解析法によって、水平力を受

けるWF杭の挙動を(2)に述べた方法より正確に推定することができる。

(4) 同一荷重に対する各杭の水平変位を比較すると、曲げ剛性の高い杭ほど水平変位が小さくなる傾向が認められた。特に、低荷重域においては、曲げ剛性の高い面内載荷時における杭の変位は、曲げ剛性の低い面外載荷時における杭の変位より非常に小さく、数分の1程度の値を示した。しかしながら、高荷重域においては、曲げ剛性の高い杭は、短杭的な回転の影響が顕著となって変位が急増するために、曲げ剛性の低い杭より変位が大きくなる傾向が認められた。

(5) 同一荷重における各杭のヒズミ分布曲線を比較すると、曲げ剛性の高い杭ほど最大ヒズミの値が小さく、また、その発生位置が深くなっており、ヒズミ分布曲線の形状がフラットになる傾向が認められた。各杭について同一荷重における面内載荷時の最大ヒズミを  $\epsilon_{max}$  (面内) と面外載荷時の最大ヒズミ  $\epsilon_{max}$  (面外) を比較すると  $\epsilon_{max}$  (面内) は、 $\epsilon_{max}$  (面外) の数分の1であり、 $\epsilon_{max}$  (面外) /  $\epsilon_{max}$  (面内) の値は、杭断面の辺長比 (長辺/短辺) が大きくなるほど、小さくなる傾向が認められた。

(6) 各杭の面外、および面内載荷におけるk値の深さ方向分布曲線を比較したところ、面外載荷時においては、深さ方向にほぼ一様であるが、面内載荷時においては、むしろ、深さの増加にともなってk値が増大する三角形分布に近い形状を示した。

(7) 受働抵抗に関する地盤反力係数、 $k_p$  は、杭幅Bの増加にともなって減少する。本実験範囲内では、 $k_p$  は水平変位  $\delta$  をパラメータとしたとき、ほぼ杭幅の平方根に逆比例し、 $\delta/B$  をパラメータとしたとき、ほぼ杭幅に逆比例する傾向が認められた。

(8) 面内載荷時において、WF杭に作用する全地盤反力に占める摩擦抵抗の割合は、断面の辺長比 (長辺/短辺) が大きいほど、また、水平変位が小さいほど大きくなる傾向が認められた。水平変位に対してこのような傾向を示すのは、摩擦抵抗と受働抵抗の水平変位の増加にともなう稼働のされ方が異なっているためと推測される。

参考文献

- 1) 金谷, 宮崎, 茶谷: 壁グイの水平抵抗, 土と基礎, Vol. 25, No. 8, (1977), pp. 49~53
- 2) 古藤田, 風間: 山どめ壁およびくいの水平抵抗に関する研究 (その2 水平力を受けたくいの挙動), 第10回土質工学研究発表会, (昭和50. 6), pp. 871~874
- 3) 金谷, 宮崎, 茶谷: 壁グイの水平抵抗について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和53. 9), pp. 2093~2094