

短尺な場所打ち杭の鉛直・水平載荷試験

芳賀孝成 崎本純治

Vertical and Lateral Loading Tests on Short Bored Piles

Takashige Haga Junji Sakimoto

Abstract

Bearing capacity characteristics of piles of lengths less than 10D (D: pile diameter) have not been clarified as few loading tests of piles so short have been performed. The authors recently carried out vertical loading tests on two bored piles with lengths of 5.5D and 8.3D and lateral loading tests on pile groups using the vertical loading tests of piles and examined the characteristics of bearing capacities of these piles. It was found that the percentage of the bearing load carried at the pile tip is high at 50% from the stage of low load level and if embedment length in the bearing layer is made about 5D lateral load can be resisted similarly to piles of semi-infinite length.

概要

杭長が10D (D: 杭径) 以下の杭の支持力特性については、載荷試験例もほとんどないため明らかにされていない。

今回、杭長 5.5D と 8.3D の 2 本の場所打ち杭の鉛直載荷試験ならびに各試験杭の杭頭を実構造物と同様の連結梁で固定した組杭の水平載荷試験を行なって、短尺な杭の支持力特性を調べた。試験の結果、荷重が小さい段階から先端支持力の占める割合が50%と大きく、また支持層への根入れを 5D 程度取れば半無限長の杭同様曲げ変形で水平力に抵抗することなどが明らかとなった。

1. まえがき

設計に採用される杭の杭長(l)は、一般に10D (D: 杭径) 以上のものが多い。10D 以下の短尺な杭の支持力については載荷試験例も少なく、算定方法も確立されたものがない。今回、札幌駅付近の砂礫地盤において設計された杭は $\phi=1.09$ m の場所打ち杭で杭長が7~9D の短尺杭であるための支持力の評価が問題となった。そこで、実物大の試験杭を用いた鉛直及び水平の載荷試験を行なって、支持力の確認、さらに短尺杭の支持力特性について調査することとした。鉛直載荷試験は支持層への根入長による差を調べるためN値50以上の砂礫層に2D, および5D 根入れさせた杭長 6 m と 9 m の 2 本の杭について行ない、水平載荷試験は地中梁で連結された実際の杭基礎構造物と同一条件となるように鉛直載荷試験に用いた 2 本の杭の杭頭を連結梁で固定した組杭について実施した。

2. 地盤条件

載荷試験を実施した地点は札幌駅西約 1 km でその地

点の土質ボーリング結果および横方向載荷試験結果を図-1に示す。試験地盤面付近はN値6の砂、GL -0.6~-4.0 m はN値 24~50の砂礫、GL -4.0 m 以深はN値 50以上の玉石混り砂礫となっている。礫径は 3~30mm, 最大では70~100 mm に達する硬質の安山岩質の円礫が主体である。なお、孔内水位はGL -2.45 m である。

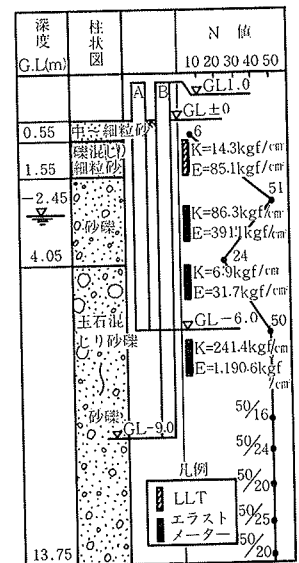


図-1 土質ボーリング結果

3. 鉛直載荷試験

3.1. 試験概要

試験杭はオールケーシング工法により施工された ϕ 1.09 m の場所打ち杭で杭長 6 m ($l/D=5.5$) の A 杭と 9

$m (l/D=8.3)$

のB杭の2本である。これらの杭には主筋としてD19が20本配筋されている。試験杭のスライ

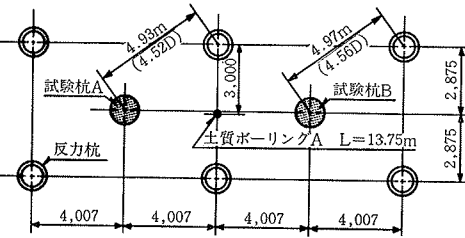


図-2 試験杭の配置

ム処理はバケット方式を用いたが、最終処理で1~2cmのシルト混り砂が残留した。なお、試験の前に2本の試験杭とも杭全長のコアボーリングを行ない、圧縮試験によって圧縮強度と弾性係数を測定した。図-2に試験杭の配置を示す。

試験方法は土質工学会「クイの鉛直載荷試験基準」の緩速多サイクル載荷方法に準じた。載荷サイクルはA杭に対して10サイクル、B杭に対して11サイクルとした。

試験最大荷重は、A杭に対して100 tf、B杭に対して1,185 tfとした。荷重保持時間は、処女荷重および最終0荷重において最大3時間、履歴内荷重において10分、

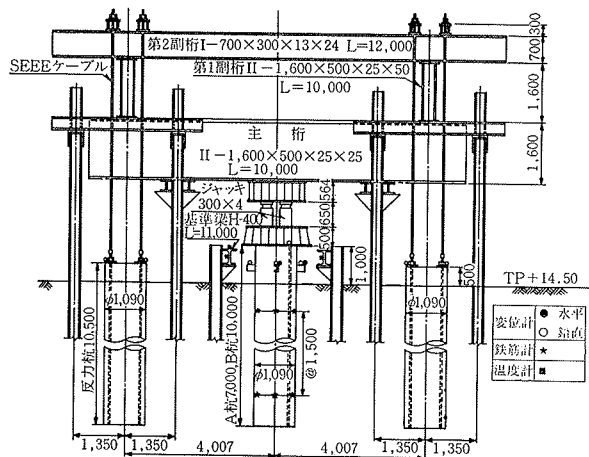


図-3 鉛直載荷装置と計器配置

最終0荷重において60分とした。試験における測定項目は杭頭沈下量、杭先端沈下量、鉄筋計による杭体ひずみ、温度である。図-3に載荷装置と計器配置を示す。

3.2. 試験結果

図-4にA, B杭の荷重-杭頭沈下量の関係を示す。

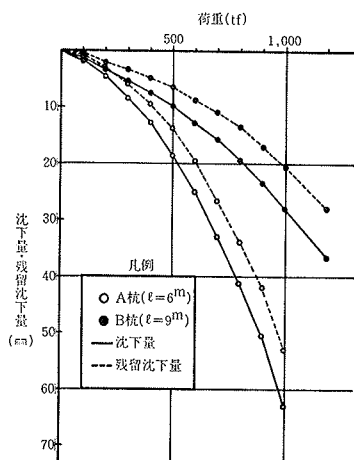


図-4 荷重-杭頭沈下量

なお、図中には残留沈下量についても併記している。

同一荷重においてA杭とB杭の沈下量に比較するとA杭がB杭の2倍強の値を示した。また、杭頭沈下量と残留沈下量の関係から杭はかなり塑性的に沈下していることがわかる。

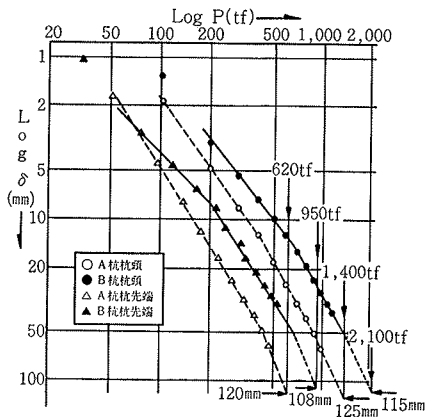


図-5 log P-log S

図-5はA, B杭の杭頭荷重-杭頭沈下量の関係ならびに図-6に示す軸力分布から推定した杭先端荷重-杭先端沈下量の関係を両対数で表示したものである。

杭頭の log P-log S 曲線ではA杭は450 tf付近と900 tf付近の2点、B杭は700 tf付近で折点が見られるが明

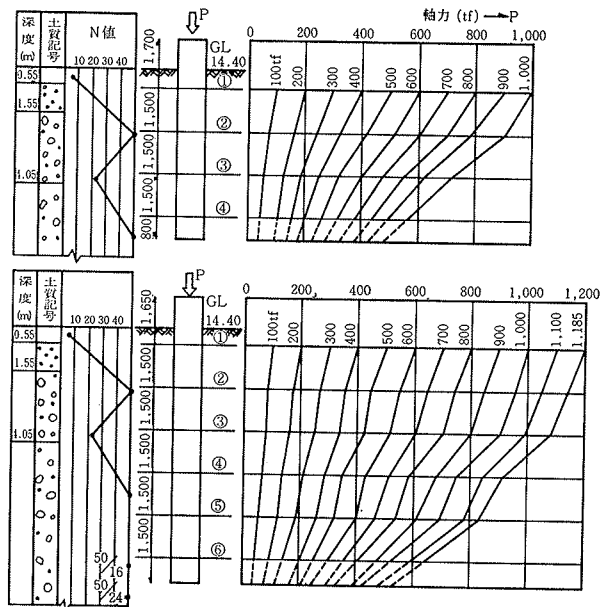


図-6 軸力分布

瞭な降伏点とは認められない。図-6に各荷重における軸力分布を示す。なお、軸力の算定には各深度に対応したコアの弾性係数を用いている。A, B各杭とも杭先端付近の地盤はN値が高い玉石混り砂礫であるため軸力の減少が顕著になっている。

3.3. 結果の考察

(1) 極限支持力

明瞭な降伏支持力や極限支持力が得られていないのでVan der Veenの方法によって極限支持力を推定した。結果はA杭が1,400 tf、B杭が2,100 tfとなった。この

極限支持力に対応した杭頭沈下量を図-5から推定するとA杭は125 mm, B杭は115 mm となり, ほぼ杭径の10%である。また, 杭頭荷重が上記の極限支持力に達した時点の杭先端極限支持力を推定すると, 図-5に示すようにA杭が 620 t_r , B杭が 950 t_r となった。このときの単位面積当りの先端極限支持力度は, A, B杭それぞれ 660 t_r/m^2 , 1,020 t_r/m^2 となり, 道路橋示方書に示されている場所打ち杭の先端極限支持力度 300 t_r/m^2 に対してそれぞれ2倍, 3倍である。

(2) 先端支持力と周面摩擦力

杭先端伝達荷重ならびに周面摩擦力の杭頭荷重に対する比率を図-7に示す。

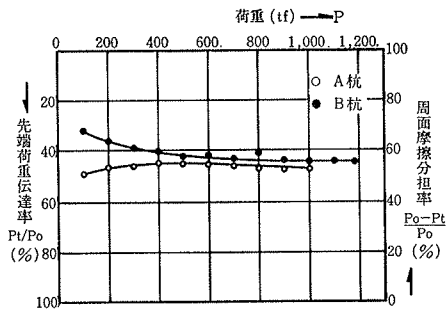


図-7 杭先端荷重伝達率

杭先端荷重伝達率は各荷重に対してほとんど一定値を示し, A杭で約50%, B杭で約45%であった。初期の荷重段階から先端荷重伝達率が高い値を示すのは杭長が短かいための影響と思われる。

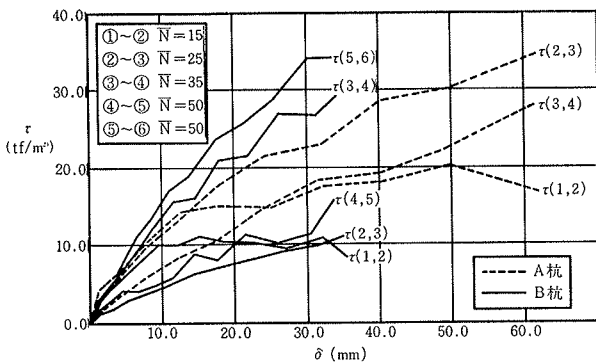


図-8 周面摩擦力度と変位

図-8に杭と地盤の相対変位と周面摩擦力度との関係を示す。周面摩擦力度は, 上部の砂層区間を除いて相対変位が40~60 mmに達しても増加傾向を示し, 砂質地盤特有の挙動を示した。図-7に示したように荷重レベルが大きくなると

周面摩擦力の支持力に対する比率が低下せず一定なのはこのためと認められる。

周面摩擦力度 τ とN値の関係は, 各ひずみ測定区間

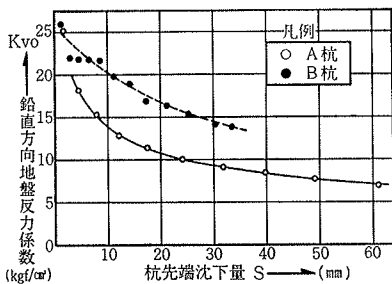


図-9 鉛直方向地盤反力係数

のN値を図-8に記したように仮定すれば, 最大値の認められた上部砂層は $\tau > N/2$, その他の各区間は, $\tau > N/3$ となっている。

(3) 鉛直方向地盤反力係数

杭先端の鉛直方向地盤反力係数と杭先端沈下量の関係を図-9に示す。鉛直方向地盤反力係数は支持層への根入れが深いB杭の方が大きく, 変位が10 mmのときの値はA杭が 14 kg/cm^2 , B杭が 20 kg/cm^2 であった。

4. 水平載荷試験

4.1. 試験概要

鉛直載荷試験に用いた試験杭A, Bの杭頭を幅1.0 m, 高さ1.5 mの梁で連結した組杭に対して試験を行なった。

組杭の杭間隔は7.4Dである。梁下端での地盤との摩擦を切るため梁下端と地表面との間に10 cmの隙隙を設けた。また梁と杭の結合は実際の杭基礎同様に杭を梁コンクリート部に10 cm埋め込んだ。試験方法は急速多サイクル方式とし, 最大荷重220 t_r , 16サイクルとした。荷重保持時間は処女荷重と0荷重において15分とし, 履歴内荷重においては5分とした。載荷はB杭からA杭の方向へ一方向載荷とした。加力高さは試験地盤面から40 cm上とした。試験における測定項目は, 杭頭水平変位, 杭頭傾斜, 鉄筋計による杭体ひずみ, 温度である。なお, 杭頭傾斜は特別な治具(図-10参照)を用いて測定した。図-10に水平載荷装置と計器配置を示す。

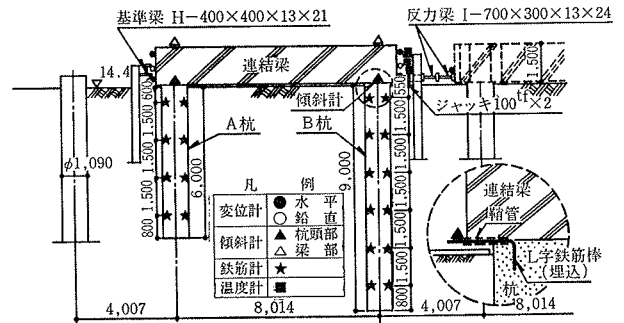


図-10 水平載荷装置と計器配置

4.2. 試験結果

図-11に組杭頭部(加力位置)における荷重-水平変位の関係を示す。図中には残留水平変位も併記した。最大荷重220 t_r における水平変位は18.1 mm, 残留水平変位は6.6 mmである。図-12にA, B杭の杭頭傾斜およびA杭位置の梁上面の傾斜を示す。杭頭傾斜は杭長の短かいA杭の方が杭長の長いB杭よりも大きくなっていく。同じ杭でも梁上面より杭頭部の方が傾斜が大きくなり, 両者の荷重に対する増加割合も杭頭部の方が顕著であ

る。荷重に対して杭頭傾斜が顕著な増加を示したのは梁と杭の固定度が荷重の増加に伴って低下したためと思われる。

図-13に杭体鉄筋応力分を示す。

杭長が短かいにかかわらずA、B杭とも杭中間部で曲げ応力がかなり発生していることから杭先端はかなり拘束を受けていると推定できる。

また、鉄筋応力の顕著な増加はいずれも引張応力が200~250 kgf/cm² ($\epsilon_s = 100 \sim 120 \mu$) に達した時点であり、この時杭体コンクリートにクラックが生じたものと推定される。したがって、最大荷重の220 tf時には両杭の杭頭と中間部にクラックが発生していると思われる。

4.3. 結果の考察

(1) 弾性床土上の梁の式による解析

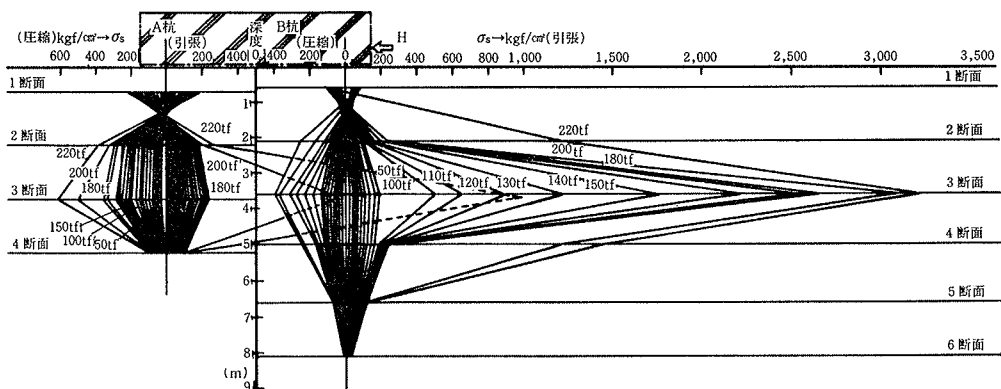


図-13 杭体応力分布

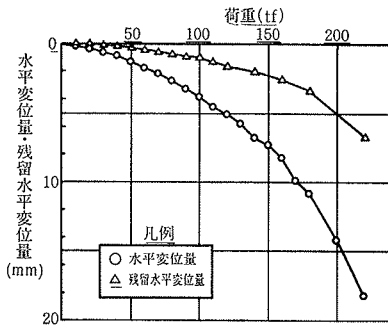


図-11 荷重—水平変位

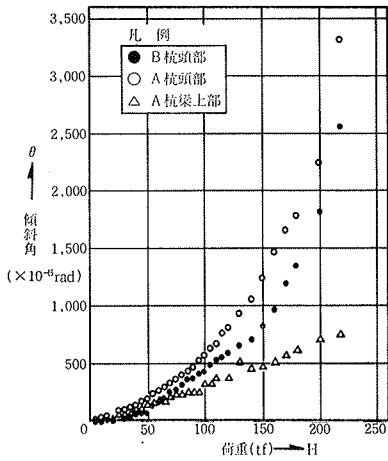


図-12 杭頭傾斜

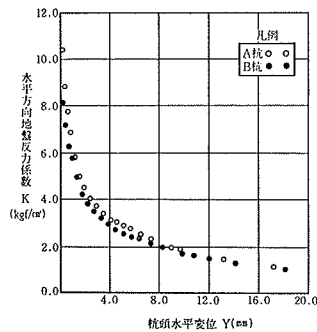


図-14 水平方向地盤反力係数

弾性床土上の梁の式によって杭の水平挙動を解析した。

計算では杭を杭頭固定の有限長杭と仮定した。

図-14に水平方向地盤反力係数と杭頭水平変位の関係を示す。試験地盤面の変位が1 cmのときの基準K値は $K_0 = 1.6 \sim 1.8 \text{ kgf/cm}^3$ であった。

図-15, 16は100, 150, 200 tfの各荷重におけるA, B杭の変形、モーメント分布を示す。杭長が短かいためA, B杭とも変形状態が剛体的になっている。また杭頭を完全固定と仮定しているため、固

定端モーメントが大きく杭中間部の曲げモーメントは非常に小さくなっている。この結果は実測の杭体応力分布をうまく説明できないようである。

(2) 固定度を考慮した骨組構造解析

実際の杭頭固定杭は固定端側の回転変形および杭頭部の固定度が完全でないことによって杭頭に回転を生じる。この現象は図-12に示す杭頭傾斜の実測結果にも現われており、短尺な杭頭固定杭の支持力特性に大きな影響を与えると思われる。そこでこれらの点を評価できる骨組構造解析を行なって杭の水平挙動を調べた。解析における地盤条件は、①K値を三角形分布とする場合、②

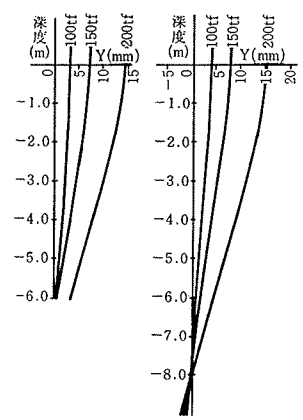


図-15 変形分布 (有限長の式)

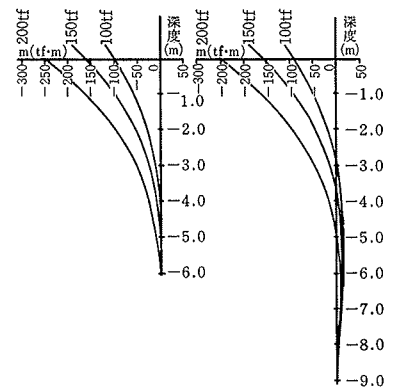


図-16 曲げモーメント分布 (有限長の式)

K値を直線分布とする場合、の2種類とし、構造条件は、杭と梁の結合条件による差を調べるため①杭と梁の結合部に回転バネを考慮する場合、②回転バネを考慮しない場合、③回転バネを考慮せず杭の断面2次モーメントを梁の中心まで延長す

る場合の3種類とした。

解析モデルを図-11に示す。杭と梁の固定度を評価する回転バネは実測曲げモーメント分布から推定した杭頭拘束モーメントを梁上面の傾斜と杭頭部の傾斜の差分で除した値を用いた。解析上基準としたK値(図-17参照)は横方向載荷試験結果を参考にして決めた。なお、この解析では、計算で求めた杭頭変位が実測の杭頭変位に一致するように地盤のK値を変えている。図-18, 19に荷重 100 t_f , 200 t_f が作用したときの杭体変形分布, 曲げモーメント分布を示す。なお、曲げモーメント図には実測ひずみから計算した曲げモーメントを併記した。杭体変形分布は、有限長の式で求めた形状と異なり杭先端部で変形している。

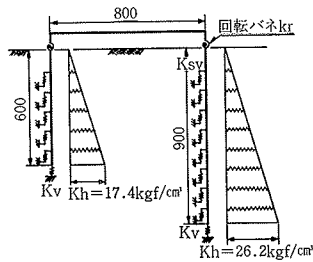


図-17 解析モデル

この傾向はとくにB杭で顕著であり支持層への根入れ長の効果が現われている。

曲げモーメント分布について、解析値と実測値をクラックの発生していない荷重 100 t_f で比較すると構造条件が①と②の場合は比較的良く合っているが、その他の場合については実測値と余り合致していない。

図-20に杭頭傾斜の解析値と実測値の比較を示す。なお、この計算では地盤のK値を三角形分布としている。

構造条件が①の場合は各荷重とも実測値に近似しているが、その他の場合は、荷重が大きくなると次第に差が生じてくる。梁部の傾斜はいずれの解析方法でも実測値に近い。以上より梁と杭の固定度を回転バネで評価する解析方法が組杭の水平挙動を良くシミュレートできるとわかった。また荷重レベルが小さいうちは設計で通常用いている杭の断面を梁中心まで延長する方法も有効と思わ

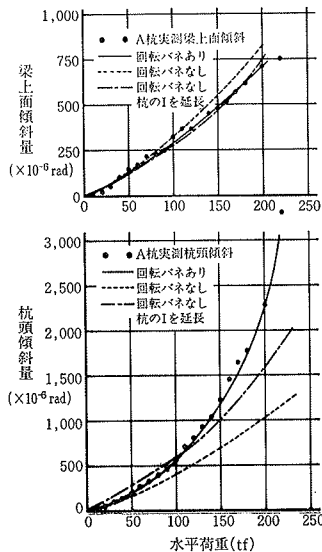


図-20 杭頭傾斜

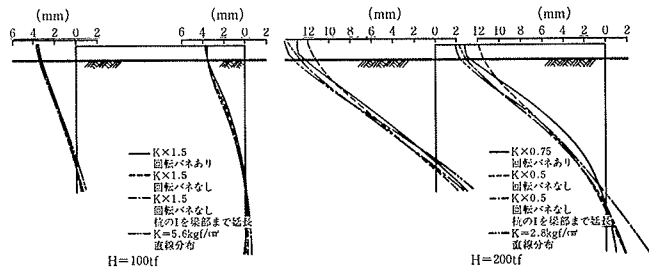


図-18 変形分布

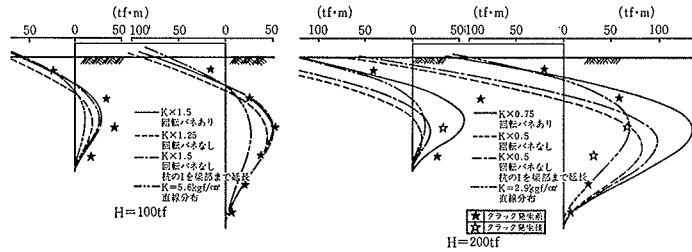


図-19 曲げモーメント分布

れる。

図-21は実験値と最も良い対応を示した構造条件が①の場合の解析によって評価されたK値と基準K₀値(図-17参照)の比を杭頭水平変位に関してプロットしたものである。K値は任意の変位に対して $K = K_0 y^{-1/2}$ の関係を示した。

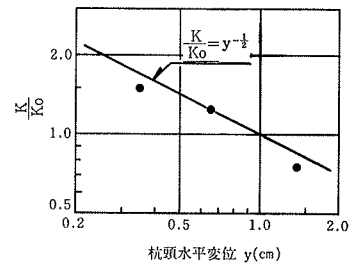


図-21 $\frac{K}{K_0} - \delta$

5. あとがき

今回行った鉛直および水平載荷試験結果から、杭長が 5.5D, 8.3D と短尺な杭の支持力特性は通常の長さの杭と大差ないことが明らかとなった。この結果から杭の支持力特性については単に杭長で評価するのではなく支持層への根入れ長で評価すべきであると判断された。なお、本実験は日本国有鉄道札幌工務局の委託により実施したものであるが試験の実施に際して構造物設計事務所の方々に多大なる御指導を仰いだ。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 海野, 青木, 成田: 短尺場所打ち杭の鉛直載荷試験 第18回土質工学研究発表会講演集, (昭和58.6), pp. 1045~1048
- 2) 青木, 倉田, 崎本: 短尺場所打ち杭を用いた組杭の水平載荷試験, 第18回土質工学研究発表会講演集, (昭和58.6), pp. 989~992