

砂層に設置されたいの支持力に関する実験（第1報）

—先端支持力について—

小林 幸男
玉置 克之
井上 嘉信

§ 1. はじめに

わが国においては、重量構造物の軟弱地盤地帯への進出が著しく、その基礎としては深い基礎（くい基礎）が普通よく使用される。このような場合には中間層が軟弱であるので、くい周面摩擦による支持力が少ないか、あるいは地盤沈下地帯にあつては逆に摩擦力が荷重となってしまうので、基礎の支持力をくい先端支持力に期待することになる。そのためくいは先端支持ぐいとし、支持層を砂あるいは砂れき層とするのが普通である。

ところで、砂質土層に支持されるくいの支持力は、近年 Kerisel, Berezantsev, Vesic 等が行なつた実験や、わが国で先年東京層を対象としてBCP委員会が行なつた一連の野外実験から、少なくとも次のような諸因子により影響されることが明らかとなつた。

- (1) 支持層のせん断特性と圧縮特性
- (2) 支持層の土粒子の性質
- (3) くいの設置方法
- (4) 載荷方法
- (5) くいの寸法

本実験は、成田層に対比される砂層を対象とし、前述の諸因子（主として、くいの設置方法および載荷方法）がくいの支持力に与える影響を調べるために行なつたものである。

今回の報告では、実験の概要および先端支持力に関する結果を述べる。

§ 2. 実験の位置および地盤

2.1 実験の位置

実験位置は図-1に示すように、千葉市検見川町を通る国道14号線の中央分離帯内である。

2.2 地盤



図-1 実験位置

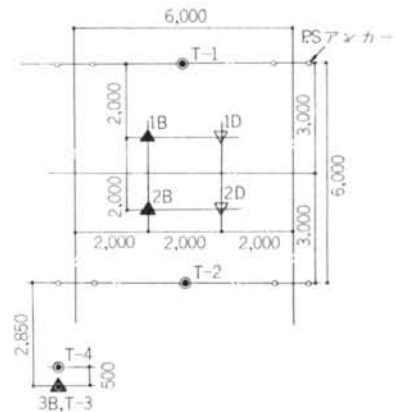


図-2 実験およびボーリング位置

自然地盤の状態を調べるため図-2に示すT-1, T-2の位置で土質調査を行なつた。

地盤は図-3の土質柱状図に示すように、地表面（BM-1 m）からBM-3.5 mはN値2~11の緩い砂層があり、次に軟かい粘性土が約1.5 m 続いている。その下

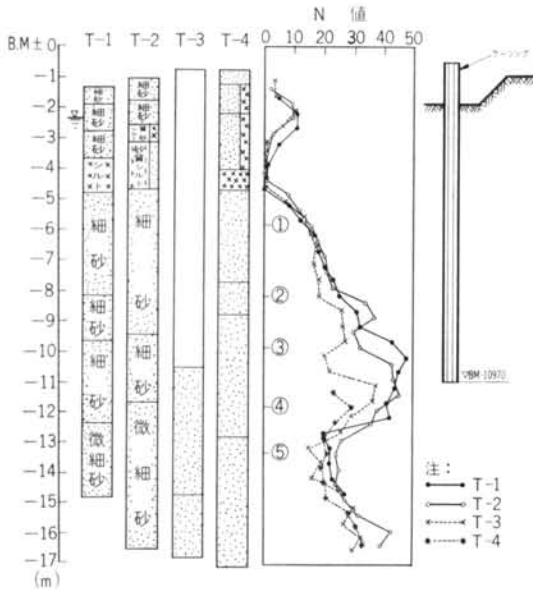


図-3 土質柱状図

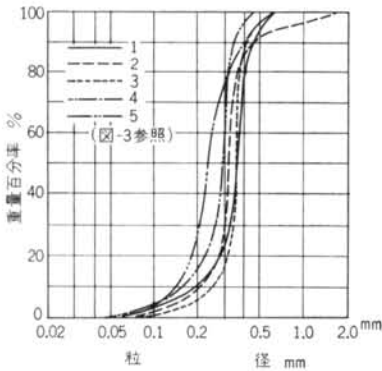


図-4 粒径加積曲線

には台地部において成田層に対比される砂層が続いている。この砂層のN値はBM-5mから次第に増加し、BM-10~12mで40以上の値を示している。しかし、その下にある微細砂層ではN値は約20まで急激に減少している。また、図-3に示す深さで採取した各砂層の粒土分析結果を図-4に示したが、いずれも均等係数が2.0以下の値を示している点が注目される。

なお、実験時の水位は平均BM-2.3mであったが、潮の干満の影響をうけ、1日に数cmの上下が認められた。

§ 3. 実験ぐいおよび測定計器

3.1 実験ぐい

実験に使用したぐいはBCP委員会で使用したぐいと同一のものである。すなわち、ぐいは先端が平面閉そくされた鋼管で、その外径は200mm肉厚30mmである。またぐいは1本1.25mを基準の長さとし、継ぎネジにより必要な長さにできるようになっており、かつ最大載荷重200tonの実験に反復使用できるようになっている。

3.2 測定計器

(1)先端荷重計

ぐいの先端には図-5に示すような荷重計を配置した。歪計はワイヤーストレンゲージであり、それを16枚を貼りつけて1組とした。キャリブレーションの結果、載荷重と測定歪は正比例の関係を示し、かつ測定歪は計算で求めた歪と一致した。また偏心荷重を作用させたときも前述の关系到影響はなかった。

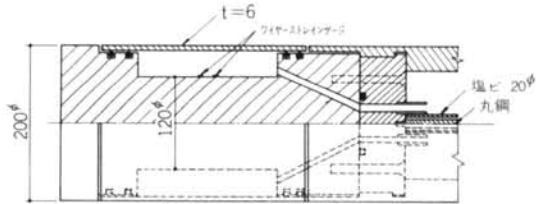


図-5 先端荷重計

(2)先端沈下計

ぐい先端の沈下量を知るために設置した計器で、その構成は、ぐい先端よりぐい頭まで立ち上げた保護管付のロッドと、ぐい頭部に設置したダイヤルゲージよりなる。すなわち、ぐい先端荷重計の上部中央にねじ込み固定したφ13mmのロッド(丸鋼)の外側に内径20mmの塩化ビニール管のケーシングを配し、その塩ビ管を継ぎネジごとにヒモでしばり、ぐい頭まで立ち上げた。

前述のようにぐい頭のダイヤルゲージはぐい頭部に固定してあるので測定値はぐいの伸縮量であるが、ぐい頭部の沈下量より伸縮量を差し引くことにより先端沈下量を求めた。

(3)ぐい頭沈下計

ぐい頭にはダイヤルゲージを4個配し、2個ずつ同時に作用させてぐい頭の沈下量の測定を行なった。(写真-1参照)

(4)ぐい頭荷重計

ぐい頭部の荷重はジャッキに取りつけたプレッシャー

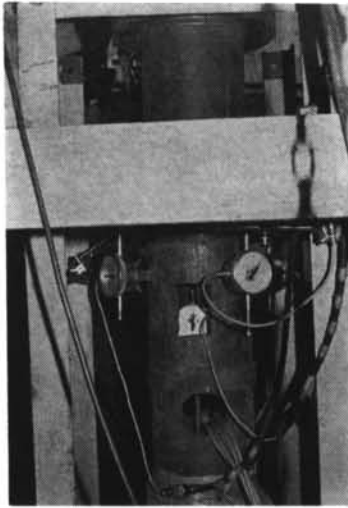


写真-1 くい頭部のダイヤルゲージ取付け状況
ヘッドによって測定した。プレッシャーヘッドのチェックは実験期間中数回にわたりジャッキとくい頭の間ブルーピングリングを挿入し、これによって行なったが、計器は正常であった。

なお、前述の4つの計器はすべて自記録した。

§ 4. 載荷装置

載荷装置は写真-2に示すように主桁1本と副桁2本となり、最大の200ton載荷重に耐えるようにした。また、桁を解体することなく全実験を行えるようにするため、主桁は副桁上を移動でき、そのうえジャッキも主桁上を移動できるようにした。

なお、反力は8本のPSアンカー（ $\phi=16\text{m}$ ）にとった。（図-2参照）



写真-2 載荷装置

§ 5. 実験の種類および載荷方法

実験は設置方法と載荷方法の2つを変えて行なった。

5.1 くい設置方法

一般にくいの設置方法としては、場所打ちぐいのように地盤を掘削して設置する方法、および既製ぐいのように地盤に打ち込んで設置する方法がある。これらの設置方法に対応する方法として、次の設置方法を考えた。

(1)既製ぐいの設置方法に相当する設置方法で、くいを地表面より圧入する方法（押し込みぐいと称する）

……………1Dと2D

(2)場所打ちぐいの設置方法に相当するものとして次のような設置方法をとった。

図-6に示すように、まず $\phi 150$ の羽根付きコアビットにてケーシング設置計画深さの1m上までベントナイトを用いて掘削した。そして $\phi 270$ 肉厚10mmのケーシングをハンマーで1m程度打ち込んで、ケーシング内の土砂を羽根付きコアビットを用いて除去した。これを繰り返して行ってケーシングを設置深さに設置した。さらに実験前にケーシング内に残った土砂を $\phi 250$ の羽根付コアビット（写真-3参照）を用いて除去したあと、ベントナイトを清水置換し、その後くいを建て込んだ。（埋め込みぐいと称する）……………1B

(3)場所打ちぐいを地下水位の高い場所で施工する場合には、往々にしてボイリングを生じさせがちである。そ

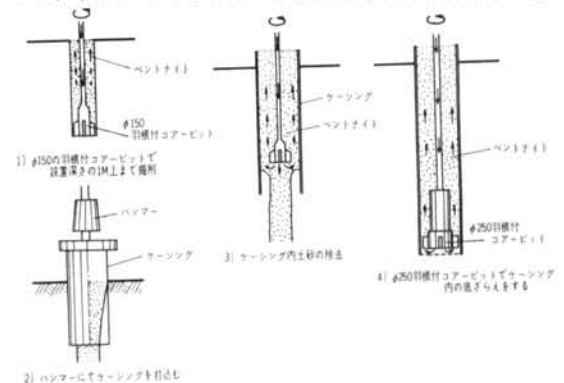
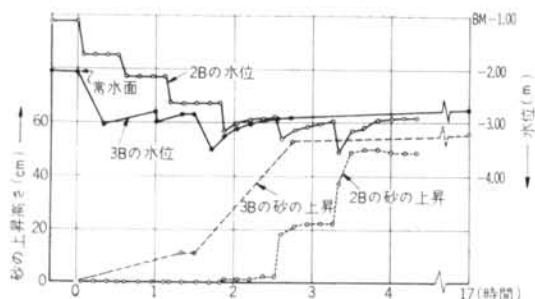


図-6 ケーシングの設置順序



写真-3 $\phi 250$ 羽根付きコアビット



図一七 ボイリングの実験結果

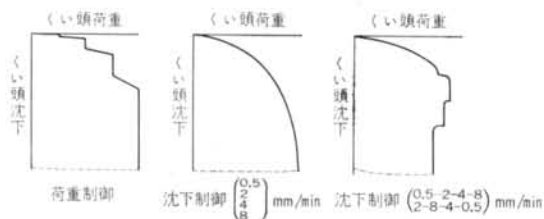
ここで、ボイリングが先端支持力に及ぼす影響を調べるため、(2)と同様な方法でケーシングを設置し清水置換した後、ケーシング内の水位を下げてボイリングをさせる。そしてボイリングによりケーシング内にはいつてきた土砂を、前述のφ250羽根付きコアビットを用いイベントナイトにより除去した後に清水置換を行なって、その後くいを設置する方法を考えた。……………2B

なお、ボイリングを生じさせる方法の検討のための予備実験、およびボイリングにより地盤の強度性状がどのように変わるかを調べる目的から、2Bと同一の方法でケーシングを設置した。……………3B

3Bおよび2Bのボイリングの発生状況を図一七で見ると、予備実験の3Bと本実験に用いる2Bとは同じ様相を示す。すなわち、水位を常水面より1m下げるとボイリングを生じ始め、水位を常水面より1.5m下げると激しくボイリングを生じ、ケーシング内に砂が50cm程度はいった。このことから、3Bと2Bは同じボイリングの状態を示したものと考えられる。また、ボイリングによる地盤の強度低下をN値により調べると(図一三参照)、ケーシング先端より15~45cm間のN値が自然地盤のN値に比して15~20の低下を示すが、ケーシング先端より65~95cm間では、N値は自然地盤のそれと大体同じとなり、それ以深では自然地盤のN値と同じになっている。また、ケーシングの中心より50cmのところ(T-4)でのボイリングの影響をみると、ケーシング先端から、それより上の1m間のN値が自然地盤のN値に比べ20程度低下している。以上のことおよびケーシング先端地盤が上載荷重の除去により強度低下することを合わせ考えると、ボイリングを生じさせる水は、水が通りやすいケーシング外周面を通り、ケーシング先端を回って内に入るため、ケーシング先端の地盤よりも、ケーシング周辺でボイリングの影響が大きく現われているものと推察される。

5.2 載荷方法

載荷方法は別すると荷重制御と沈下制御方法となる。荷重制御では荷重段階を7~10段階とし、1段階の荷重保持時間を原則として30分間とした。また沈下制御では2mm/minの沈下速度を基準とし、0.5, 4, 8mm/minの沈下速度の実験をおりこみ沈下速度の支持力への影響をみた。(図一八参照)



図一八 各載荷方法の模式的「荷重～沈下量」曲線

ただし、沈下速度の制御をくい先端の沈下量で行なうことが難しかったので、沈下制御および荷重制御はともにくい頭で行なった。なお、実験の1回の圧入量は10~15cmであった。

5.3 実験の配置

図一2に示すように、実験1D, 2D, 1Bおよび2Bは各々2m(10d)以上の間隔をとり、各実験が各々相互に影響を及ぼしあわないようにした。

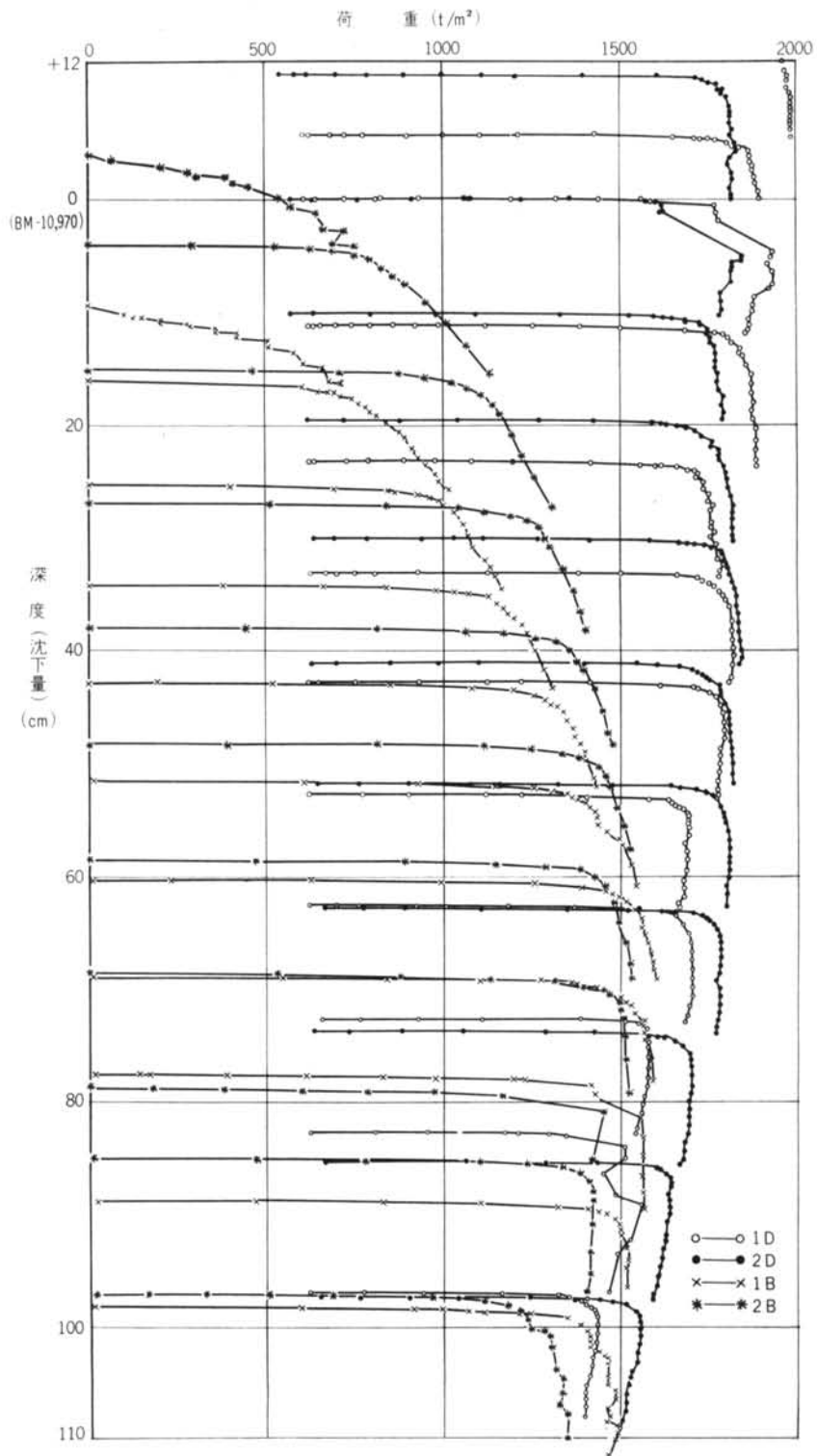
§ 6. 実験結果

6.1 残留荷重について

1Bあるいは2Bの実験区間のうち、実験開始深さより約1m間の先端荷重～先端沈下量曲線(以下先端を省略する)と、それらと同じ深さにおける1Dと2Dの荷重～沈下量曲線を示せば図一9となる。ただし除荷時の荷重～沈下量曲線はグラフが煩雑となるので省略した。

この図をみると、地表面より圧入した1Dおよび2Dには、くい頭荷重を零としたときにくい先端に残留する荷重がかなりあることがわかる。残留荷重は次に述べる機構で生ずる。すなわち、くい頭荷重を減少させてゆくと、浮き上がろうとし、沈下時には正のフリクションであったのが負のフリクションとなる。この負のフリクションに釣り合う荷重が残留荷重となる。そして本実験では、この残留荷重が数日間の放置ではほとんど減少しなかった。

そこで、残留荷重が有る場合と残留荷重を無くした場合とで、荷重～沈下量曲線の性状に違いを生ずるかを確



圖一 9 「荷重～沈下量」曲線

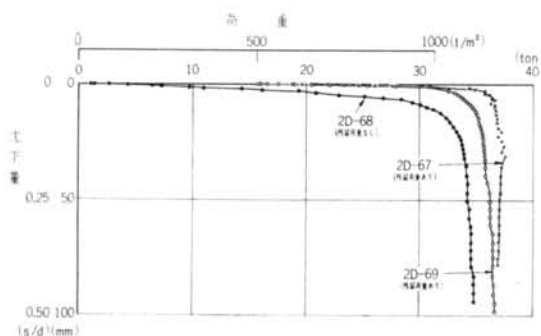


図-10 残留荷重の有る場合と無い場合の「荷重～沈下量」曲線

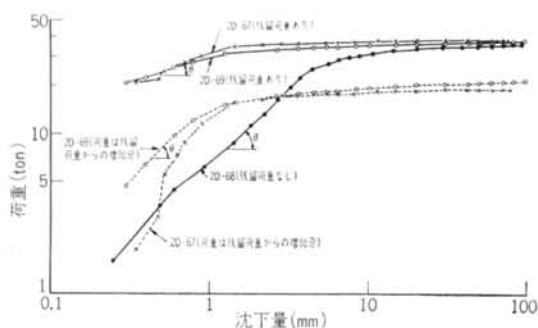


図-11 両対数表示した残留荷重の有る場合と無い場合の「荷重～沈下量」関係

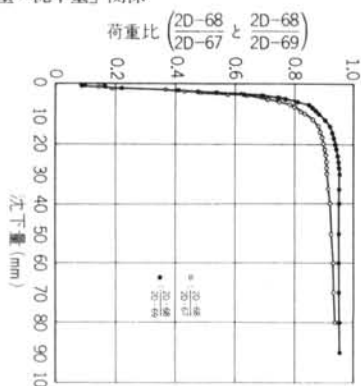


図-12 残留荷重の有る場合と無い場合の荷重比
かめるため、くい頭部でくいを強制的に引き上げるこ
により残留荷重を除去した後に圧入する実験(2D-68)
を行なった。この実験の沈下速度は基準速度の2mm/min
とし、残留荷重の有る場合との比較をするため前後の実
験(2D-67と2D-69)も2mm/minの沈下速度とした。

実験結果を示すと図-10になる。残留荷重を除去した
場合は、除去しない場合に比べて荷重増加が沈下量の増
加に比べて少なくなる状態になるまでの沈下量が多い。
荷重～沈下量関係を両対数表示するとさらに明らかにな
る。(図-11参照)すなわち、沈下量の増加に比して荷

重の増加がほとんどない状態に到るまでの沈下量で、残
留荷重を除去した場合としない場合を比べてみると、残
留荷重を除去した場合は約10mmであるのに対し、除去し
ない場合は1～2mmと少ない。また残留荷重を除去した
場合は、0～5mmの沈下量では、両対数グラフ上で荷重
～沈下量曲線の勾配がほぼ1となるので、荷重～沈下量
は正比例関係を示している。一方、残留荷重を除去しな
い場合は、両対数グラフ上で0～2mmの沈下時の荷重～
沈下量曲線の勾配をみると1より小さい。しかし、残留
荷重からの荷重増加分と沈下量の関係を0～2mmの沈下
時でみるとほぼ正比例していることが認められる。また、
残留荷重を除去したときのくい先端の浮き上がり量が数
mmあったことから、残留荷重の有る場合の荷重～沈下量
曲線も沈下量の補正を行なえば、残留荷重を除去した場
合の荷重～沈下量曲線とほぼ同じになるものとする。

ところで、同一沈下量において残留荷重の無い場合と
有る場合の荷重比を調べると図-12となり、沈下量が3
cm以上になると荷重比が一定で、ほとんど1になる。し
たがって、3cm以上の沈下量時の荷重～沈下量関係を用
いれば残留荷重の影響を考える必要がないので、これ以
後の結果および考察は、各圧入サイクル(1サイクルは
10～15cm)の3cm以上の沈下量の荷重～沈下量関係を用
いる。

6.2 荷重～沈下量関係について

各圧入サイクルのうち、最初から3cmの荷重～沈下量
関係を除いた荷重～沈下量関係の包絡線を図-13に示
す。また同図に40Nで換算したN値を示す。この図およ
び図-9、図-11から次のような点が推察される。

(1) 1Dおよび2Dのように地表面より圧入した場合
は、沈下量が非常に少ないうちに沈下量の増加に比して
荷重の増加量が少ない状態に到達する。一方、1Bある
いは2Bのように実験深さまでの土砂を除去してからく
いを設置した場合には、荷重は数10cmの沈下をするまで
沈下とともに増加する傾向を示している。

(2) 1Bの荷重が1Dあるいは2Dの荷重と等しくなる
にはかなりの沈下量を要し、その量はおよそ60～100cm
である。

§ 7. 実験結果の考察

7.1 設置方法と支持力の関係

(1) 押し込みぐいと埋め込みぐいとの関係

1Dおよび2Dの荷重～沈下量曲線のうち、ケーシ

グ先端深さを実験開始深さとし、かつ荷重～沈下量曲線の初期3cmを、図-12に示す残留荷重の有無による荷重比を用いて補正し、残留荷重が無い場合の荷重～沈下量曲線とした。その荷重～沈下量の包絡線を両対数表示すると図-14になる。

まず、荷重～沈下量曲線の形状により、押し込みぐいと埋め込みぐいの相違を調べる。図-14を見ると明らかのように、両対数グラフ上における荷重～沈下量曲線の勾配が1になる範囲、すなわち荷重～沈下量が正比例関係にある範囲は、押し込みぐいでは0～0.03d (d:く

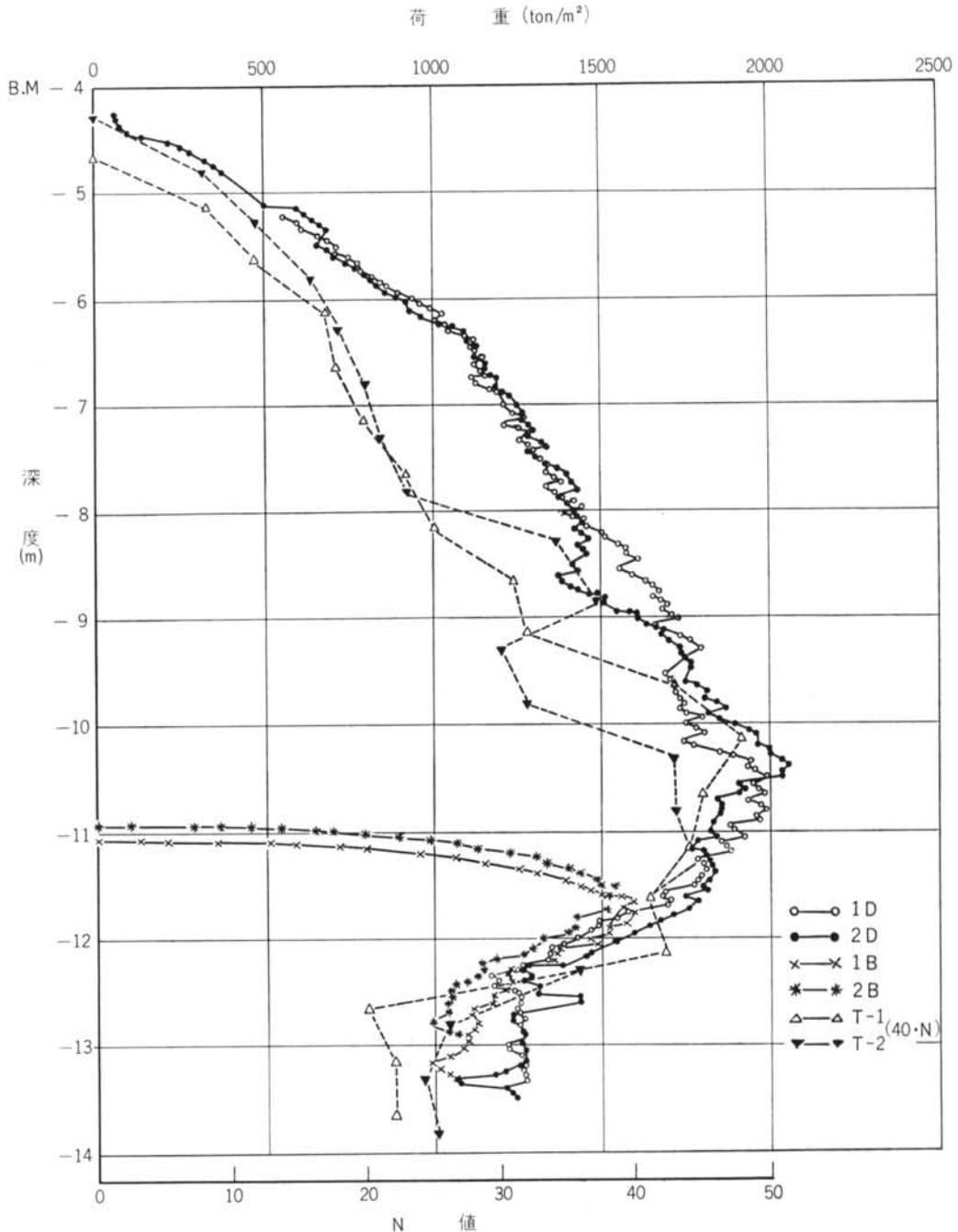


図-13 「荷重～沈下量」曲線の包絡線

い径)であるのに対し、埋め込みぐいでは0~0.1dの範囲である。荷重~沈下量が正比例関係を示す範囲から沈下量が激増するにも関わらず荷重の増加がほとんどみられない状態に到達するまでの過渡的状态は、押し込みぐいでは0.03~0.05dの範囲である。一方埋め込みぐいでは、この過渡的状态が0.1~3dの範囲と広く、この範囲の荷重~沈下量関係は、

$$P = \alpha(S/d)^{0.4} \quad \text{ここで } P: \text{荷重 (t/m}^2\text{)}$$

$$S: \text{沈下量}$$

$$d: \text{ぐい径}$$

$$\alpha: \text{常数 (t/m}^2\text{)}$$

で表わせる。

次に、埋め込みぐいの設置方法の荷重(支持力)への影響が消滅し、押し込みぐいの支持力と同じになるまでに要する沈下量を求めてみる。この時、同じ深さでは、押し込みぐいと埋め込みぐいの実験位置で地盤強度が同じであると仮定すると、押し込みぐいと埋め込みぐいの荷重が同一沈下量時で同じになるか、あるいは荷重~沈下量曲線の形状が同じになる点の沈下量を求めればよい。図-9と図-14から、1Dあるいは2Dとの荷重が等しくなるときの沈下量は3~5dとなる。これを明瞭にするために、同一沈下量における1Bと1Dあるいは2Dの荷重比を求めてみると図-15となる。この図から見ると、設置方法の影響の消滅するのに要する沈下量は3~4dである。

(2) ボイリングの支持力への影響

1Bと2Bとは設置深さが13cm程度違っているが、これによる影響を無視すると、両対数表示した荷重~沈下量曲線(図-14)からみて、両者の荷重~沈下量関係がほとんど一致するので、ボイリングの影響はあまり顕著でないと思われる。これは5.1の(3)でも述べたようにケーシングの先端部分の地盤よりも、ケーシングの上方でかつケーシングの近くの地盤の強度がボイリングにより低下していた事実からも推定される。

7.2 沈下速度の支持力への影響

5.2で述べたように、沈下制御はくい頭部の沈下量で行なっているため、くい頭の沈下速度とくい先端の沈下速度がほとんど等しくなる先端沈下量1cm以上で、なおかつ、6.1で述べた残留荷重の影響が消滅する先端沈下量3cm以上、すなわち3cm以上の沈下量における平均沈下速度と平均荷重を用いて、沈下速度の荷重(支持力)への影響を調べる。

実験は2mm/minの沈下速度を基準にした。沈下速度を0.5, 4, 8mm/minに変えた時は、その前後の実験を

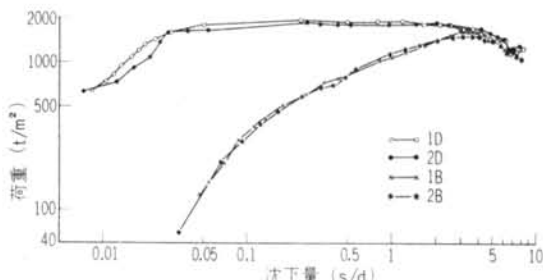


図-14 両対数表示した「荷重~沈下量」関係

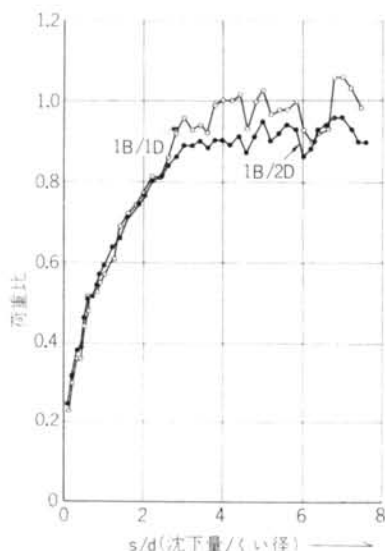


図-15 埋め込みぐいの押し込みぐいに対する荷重比

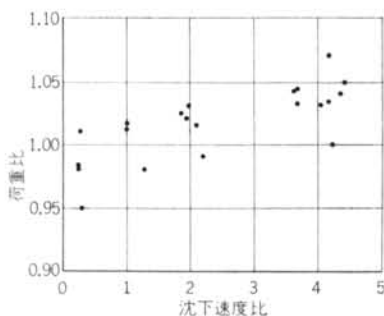


図-16 2mm/minの沈下速度を基準にした「荷重比~沈下速度比」関係

2mm/minとしているので、0.5, 4, 8mm/minの実験と前後の2mm/minの沈下速度の実験結果から、前述の方法で2mm/minの沈下速度および荷重を基準とし、荷重比と速度比の関係をみると図-16となる。最小の速度比0.25から最大の速度比4まで約20倍の速度変化を示しても荷重比(支持力比)は0.98から1.05で約7%の増

加し示さない。

なお、沈下速度の誤差は±10%程度であった。

7.3 N値と押し込みぐいの支持力の関係

図-13を見ると押し込みぐいの支持力とN値の深さ方向の分布形状が非常によく対応している。

ところで、N値は測定長が30cmであるので、この30cm間に対応する1Dおよび2Dの支持力とN値の関係を示すと図-17になる。N値が20以内であれば、N値と支持力 Q の関係は $Q=50\sim 60N$ で表わせる。しかし、N値が20以上になると前式では表わせず、N値の増加に比べて支持力の増加量が少ない。そこで、N値を対数目盛にとり支持力との関係を見ると図-18になる。対数表示のN値の増加に比べて支持力の増加量が少ないことから、支持力が一定値に取れんする傾向を示しているといえる。

§ 8. 結論およびあとがき

(1)荷重～沈下量曲線の形状をみると、次の3段階に分けられる。

(a)荷重～沈下量曲線が正比例の関係を示す範囲。

(b)(a)と(c)との中間の状態で、荷重～沈下量が比例関係を示す範囲。

(c)沈下量の増加が激しいにもかかわらず荷重の増加が少ない部分。

押し込みぐいでは、(a)、(b)の範囲が0～0.03dと0.03d～0.05dと非常に沈下量が少ないのに反し、埋め込みぐいの場合、(a)が0～0.1d、(b)が0.1～3dとかなり沈下量が多い。

(2)埋め込みぐいは、その設置方法による支持力への影響が消えて、押し込みぐいの支持力と同じになるには、くい径の3～4倍の沈下量を必要とする。

(3)沈下速度の支持力への影響は、沈下速度0.5～8mm/minの間では、速度が速くなるにつれて支持力は大きくなる傾向を示す。しかし、その増加量は速度が約20倍になっても支持力の増加は約7%である。

(4)支持力とN値の関係

支持力(Q)とN値の関係は、 $N=20$ までは $Q=50\sim 60N$ で示される。そして、 N が20以上になると支持力とN値が正比例関係を示さず、支持力が一定値に近づく傾向を示している。

今後の課題として次の2点がある。

(1)押し込みぐいの場合に、残留荷重がそのサイクルの最大荷重に比べてかなりの量となっている。その残留荷

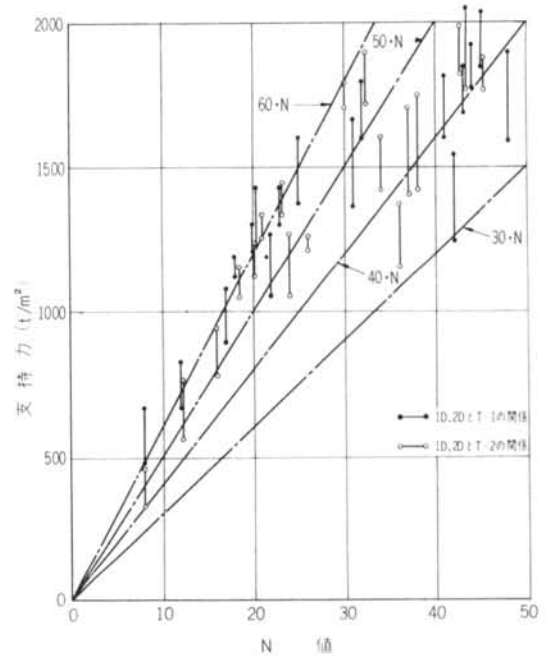


図-17 支持力とN値の関係

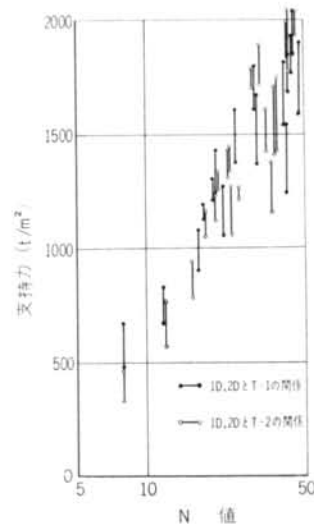


図-18 片対数表示したN値と支持力の関係

重は放置しておけば時間とともに次第に減少し、最後に消滅するものか、あるいはフリクションとの釣り合いであるので永久的に残留するものかを究明する。

また、押し込みぐいを既製ぐいの設置方法である打ち込んで設置する方法と対応させるためには、打ち込んだ場合の残留荷重の有無も確認する必要がある。

(2)N値が増大するにもかかわらず、支持力は一定値に

近づく傾向がある。しかし本実験ではN値は50未満であるので、50以上のところでの支持力とN値の関係を調べて支持力の最大値を求める。

終りに、本実験を実施するにあたり、終始御便宜をはかってくださったプレストレストコンクリート杭施工指針作成委員会施工部会の諸氏に深く感謝致します。

<参考文献>

- 1) BCP委員会：“砂層に支持されるくい/support力に関する実験的研究” 1969年7月