

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

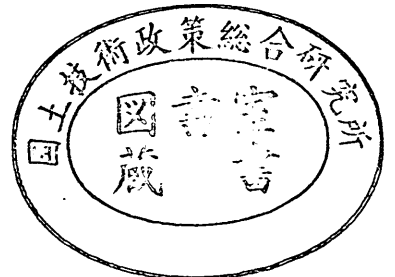
---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 30      NO. 2(1)      JUNE 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第30巻 第2号 (Vol. 30, No. 2) 1991年6月 (June, 1991)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Investigation of Cross-shore Sediment Transport Rates and Flow Parameters  
in the Surf Zone using Field Data ..... Yoshiaki KURIYAMA ..... 13  
(現地データによる砕波帯内の岸沖漂砂量と流速特性の検討  
..... 栗山 善昭)
2. 避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討  
..... 平石 哲也・本城 智 ..... 59  
(Characteristics of the motion and tension of a ferry moored in a storm  
..... Tetsuya HIRAISHI and Satoshi HONJO)
3. 離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション  
..... 細川 恭史・古川 恵太 ..... 155  
(Modeling of Discrete Vortices Induced by an Inclined Flat Plate  
Yasushi HOSOKAWA and Keita FURUKAWA)
4. プラスティックボードドレーンで改良された不均一地盤の沈下特性  
..... 田中 洋行・太田 一己・丸山 隆英 ..... 211  
(Performance of Vertical Drains for Soft and Ununiform Soils  
..... Hiroyuki TANAKA, Kazumi OHTA and Takahide MARUYAMA)
5. 杭の横抵抗における捨石層の評価  
..... 高橋 邦夫・壹岐 幸史 ..... 229  
(Lateral Resistance of a Pile in Rubble Mound  
..... Kunio TAKAHASHI and Yukifumi IKKI)
6. サンドドレーンの効果に関する有限要素解析  
..... 小林 正樹 ..... 275  
(Finite Element Analysis of the Effectiveness of Sand Drains  
..... Masaki KOBAYASHI)
7. 接円式深層混合処理地盤の挙動  
..... 北誥 昌樹・中村 健・寺師 昌明 ..... 305  
(Reliability of Clay Ground Improved by the Group Column Type DMM with  
High Replacement)  
..... Masaki KITAZUME, Takeshi NAKAMURA and Masaaki TERASHI)

8. 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗	寺師 昌明・北誥 昌樹	327
(Influence of a slope on the Lateral Resistance of a Long Pile	Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)	
9. 液状化による矢板岸壁の変形の数値解析	井合 進・亀岡 知弘	349
(Analysis of Deformation in Sheet Pile Quaywall due to Liquefaction	Susumu IAI and Tomohiro KAMEOKA)	
10. 盛土の地震被災事例に基づく円形すべり安定解析手法の検討	上部 達生・長田 信	381
(Circular Arc Analysis of Earthquake Damage of Embankments on Saturated Sand Layers	Tatsuo UWABE and Makoto OSADA)	
11. ねじりを受ける長大ケーソンの力学特性	清宮 理・山田 昌郎	445
(Mechanical Properties of Long Caisson Subjected to Torsion	Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA)	
12. 歩行式水中調査ロボットの開発		
— (第2報) 軽量防水型実験機の設計 —	朝倉 修・秋園 純一・岩崎 峯夫・根本 孝志	483
(Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection	— (Second Report) Design of the Light-weight Type Aquatic Walking Robot —	
Osamu ASAKURA, Jun-ichi AKIZONO, Mineo IWASAKI	and Takashi NEMOTO)	
13. 水平管における空気混入軟泥の流動特性	岡山 義邦・鮎貝 基和・鈴木 誠・福本 裕哉	533
(Fluidity Characteristics of Muddy Slurry with Compressed Air in	Horizontal Pipe	
Yoshikuni OKAYAMA, Motokazu AYUGAI, Makoto SUZUKI	and Hiroya FUKUMOTO)	

## 杭の横抵抗における捨石層の評価

高橋 邦夫\*  
壹岐 幸史\*\*

### 要 旨

栈橋などの杭構造では、捨石層が地表面付近に存在し杭の横抵抗に寄与すると考えられるが、そのメカニズムは明かにされておらず、せつけい上無視されることが多い。そこで、捨石層が杭の横抵抗に与える影響を定量的に評価するために室内実験を行った。捨石材の最大粒径 ( $D_{max} = 40\text{ mm}$ ,  $80\text{ mm}$ ) や密度 (締固め度合い) を変えて作製した一様地盤および下層が砂の二層系地盤の中での、模型杭の水平載荷試験である。模型杭も、その曲げ剛性 ( $EI$ )、杭幅、杭形状 (鋼板と鋼管) などを変化させてある。

その結果、以下のようなことがわかった。

- (1) 地盤反力  $p$  と変位  $y$  の関係は、両対数図面上ではほぼ0.5の傾きを持ち、港研方式杭の横抵抗計算法が成り立っている。
- (2) 捨石地盤の締固めた地盤 ( $\gamma = 1.5\text{ tf/m}^3$  程度) と緩い地盤 ( $\gamma = 1.35\text{ tf/m}^3$  程度) とでは、 $T-y_{top}$  関係に違いがみられ、それぞれ港研方式のS型地盤とC型地盤として評価できた。また、二層地盤はC型地盤で近似できた。
- (3)  $T-y_{top}$  関係から求めた港研方式杭の横抵抗定数を用いることによって、捨石地盤や二層地盤においても、杭の挙動を評価し検討することが可能である。
- (4) 捨石地盤中の杭の曲げ剛性  $EI$  の影響は、砂地盤中での  $EI$  の影響と同様である。
- (5) 最大粒径  $D_{max}$  の影響として、鋼管杭の場合、杭径  $B/D_{max}$  が小さくなるほど横抵抗定数は大きくなった。
- (6) 繰り返し荷重の影響は、杭頭変位に関しては、砂地盤の場合と同様であり、処女載荷時に生じる杭頭変位の1.4倍以内に収まった。また、曲げモーメント分布は、捨石地盤の場合には砂地盤と同じであるが、二層地盤では最大値が小さくなり、分布が下になる傾向が認められた。
- (7) 現地実験の結果からは、捨石層の横抵抗が小さいといえる。またその地盤は、室内実験における緩い地盤に相当しC型地盤として評価できた。

キーワード：岸壁，杭，横抵抗，水平荷重，捨石マウンド，室内試験，土圧

\* 土質部 基礎工研究室長

\*\* 土質部 基礎工研究室

## Lateral Resistance of a Pile in Rubble Mound

Kunio TAKAHASHI\*  
Yukifumi IKKI\*\*

### Synopsis

Foundation piles of piers are always surrounded by rubble mounds. Although the rubble must restrict lateral movement of piles, its mechanism is not clear, and the restriction is not taken into consideration in the design of the piles. In order to evaluate the restriction, a series of model tests have been carried out, where a lateral load is applied to model piles with various bending stiffness, breadth and shape (plate and cylinder) in model grounds various in density consisted of rubble with various maximum grain size.

Main conclusions can be summarized as follows :

- 1) PHRI method of analyzing lateral resistance of a pile is valid for a pile in rubble.
- 2) The influence of bending stiffness of a pile and of repeated loading on lateral resistance characteristics of a pile in rubble is similar to that in sandy grounds.
- 3) The results of a field tests shows that the lateral resistance of a pile in rubble mounds is small and can be evaluated as C-type ground of PHRI method.

**Key Words** : Pier, Pile, Lateral Resistance, Horizontal Load, Rubble Mound, Laboratory Test, Earth Pressure

---

\* Chief of Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division  
\*\* Member of Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division

## 目 次

要 旨 .....	229
1. ま え が き .....	233
2. 実 験 方 法 .....	233
2. 1 実 験 概 要 .....	233
2. 2 実験に用いた材料 .....	234
2. 3 模型杭の設置および地盤の作製 .....	236
2. 4 載荷装置および載荷方法 .....	237
2. 5 測定項目および測定方法 .....	237
2. 6 模 型 杭 .....	237
2. 7 実 験 ケ ー ス .....	239
3. 実 験 結 果 .....	242
3. 1 概 要 .....	242
3. 2 処女載荷における杭の挙動 .....	243
3. 3 繰返し載荷における杭の挙動 .....	247
3. 4 横 抵 抗 定 数 .....	250
3. 5 地盤反力および地盤反力係数 .....	255
3. 6 土槽壁の影響 .....	258
4. 考 察 .....	259
4. 1 地盤の定数と杭の横抵抗の関係 .....	259
4. 2 港研方式による解析値と実験結果の比較 .....	261
4. 3 現地実験結果の検討 .....	262
5. 結 論 .....	265
6. あ と が き .....	266
参 考 文 献 .....	266
記 号 表 .....	266
付 録 .....	268

## 1. ま え が き

港湾構造物に杭を使用する場合、その横抵抗については、運輸省港湾技術研究所において久保<sup>1)~4)</sup>らにより、多数の模型実験および現地実験の結果から得られた港研方式杭の横抵抗計算法を用いて、設計を行うことが標準とされている。このいわゆる港研方式については、久保ら以後も多くの研究者によって研究されており、その結果今日では、構造物建設地点のある深さまでの  $N$  値（標準貫入試験結果）が求められれば、すでに作製されている図表を用いて、制度良くその地盤での杭の横抵抗などを計算することができる一連のシステムが整備されており、これによって最も経済的と思われる杭の選択を容易に行うことができる。<sup>5)~10)</sup>

ところで、一般的な港湾構造物の基礎と、他の陸上の構造物の基礎とを比較した場合、重要な相異点の一つとして、港湾構造物の基礎に見られる“捨石層”の存在が挙げられる。石材によって形成されているこの層は、ケーソンなどの支持地盤として用いられている捨石層と、波力などにより洗掘されるのを防ぐことを目的とした被覆石層とからなっている。これまで、砂や粘土のみの土質材料で形成されている基礎については、その支持力などに関して多数の研究があり、その成果が設計に導入されているのに対して、この捨石および捨石層についてはほとんど研究されておらず、設計法としても確立されたものがなく、過去の実績から経験的判断によってきた。しかし、これからの港湾構造物の多くは、大水深地点に建設されることが予測されるため、これまでよりも大型の基礎を建設する必要がある。その結果捨石層厚が大きくなると、これまでの経験的判断を主体とした設計法では、合理的な対応ができなくなる。このため、捨石層についての設計上不明な点を明らかにすべく、捨石および捨石層の力学特性、支持力などについての研究が最近盛んに行われてきている。<sup>11)~14)</sup>

杭を用いた港湾構造物の基礎についても同様なことがいえる。いままでのように水深が比較的浅い場合や地盤条件がよい場合には、捨石層というよりも均し材や被覆石としてのもので、その厚さは1~2m程度であり、杭の根入れ長全体にしめる捨石層の厚さの割合も小さかったし、前述の港研方式を用いて杭の横抵抗の計算を行う場合、設計条件として必要な  $N$  値が捨石層では測定不可能であり、捨石の地盤材料としての力学特性も明らかでなかった。このため、これまで実際の設計において捨石層での杭の横抵抗は、考慮されないことが一般的であった。また、杭の横抵抗を考える場合に捨石層の抵抗

が非常に小さいということもいわれてきた。しかし、これからは基礎の大型化に伴い、栈橋背後に大型ケーソンなどが用いられることが多くなり捨石層の厚さも4~7mと大きくなる傾向にあるとともに、捨石についての不明な事項が最近の研究によって徐々に明らかになってきている。建設費用についても、大水深化に伴って、今までよりも多額なものとなるため、少しでも経済的な設計が望まれる。以上のことから、杭の地表面付近に位置する捨石層が、杭の横抵抗に与える影響を定量的に把握し、それを設計上考慮することは、大水深地点に杭を用いた港湾構造物を建設するうえで、重要なことと思われる。

本研究は、その第一段階として、捨石地盤中での杭の横抵抗について、室内で最大粒径40mmと80mmの砕石を用いて杭の水平載荷試験を行い、次に砂地盤の上に捨石層がある二層地盤の条件でも同じく水平載荷試験を行い、捨石地盤および二層地盤中の杭の横抵抗特性について、杭の曲げ剛性 ( $EI$ )、杭幅、杭形状（鋼板と鋼管）などを変化させ、実験的に検討したものである。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験概要

本実験は、運輸省港湾技術研究所土質部基礎工研究室の鉄筋コンクリート製の実験槽において実施した。実験槽の大きさは図-1に示すように、内りて幅1.8m×長さ2.0m×深さ1.1mである。

実験は、この実験槽内に一様な捨石地盤、捨石層を想定した捨石マウンド（基礎地盤は砂）または砂地盤を作成し、その中に設置した模型杭の頭部に水平荷重を作用させ、杭体に発生する曲げひずみと杭頭変位量を測定す

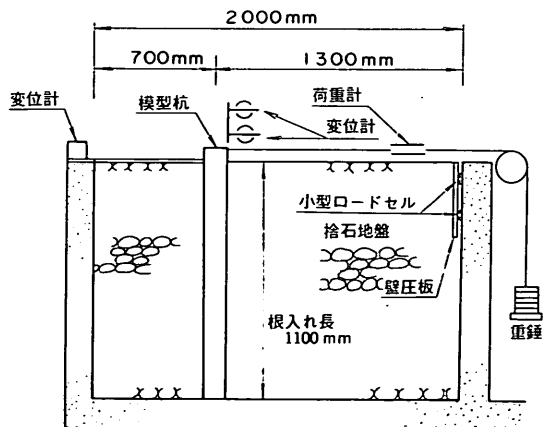


図-1 杭の実験土槽

るものである。載荷方法は、杭頭から鋼製ワイヤーでロードセル、滑車を介して、重錘による荷重制御によった。また、杭前面の土槽壁には、これに加わる地盤の圧力を測定するために、アクリルの板と小型ロードセル3個(壁圧板と以下称する)が取り付けられている。

実験の条件として、地盤に関しては、捨石地盤と砂地盤の比較、それらの締固め度合いによる影響、捨石の最大粒径 ( $D_{max} = 40\text{mm}, 80\text{mm}$ ) の影響、現場を想定した捨石マウンド(二層地盤)およびマウンド形状(層厚、法肩幅)の影響を把握できるように設定した。また、模型杭に関しては、杭幅、剛性 ( $EI$ ) および杭形状(板と管)については検討を加えられるようにした。

## 2.2 実験に用いた材料

実験には以下に説明する碎石、および砂を用いた。

### 1) 碎石

実験に用いた捨石のモデルは、福島県いわき市産の花崗岩の碎石から、ふるい分けにより、最小粒径10mm、最大粒径40mmのもの、最小粒径20mm、最大粒径80mmの2種類ものを調整して使用した。それらの粒径加積曲線は図-2に示すとおりで、均等係数はそれぞれ  $U_c = 1.9, 1.8$  となっている。母岩の物理・力学特性は、表-1に示すとおりである。また、積置体積測定方法による気中密度は、 $1.42\text{tf/m}^3$  となっている。

なお、この碎石の物理特性などについては大型三軸圧縮試験(直径120cm×高さ240cm)を行った荘司<sup>5)</sup>および高橋<sup>7)</sup>の研究において詳細に調べられている。ここに関係の深い結果を簡単に挙げると次のとおりである。

荘司による試験結果からは、

- ① 締固めや等方圧縮による体積変化は粒子破碎による影響が大きい。そして、粒度の悪いほど、粒子破碎しやすいので、同一等方圧縮のもとで圧縮しやすい。

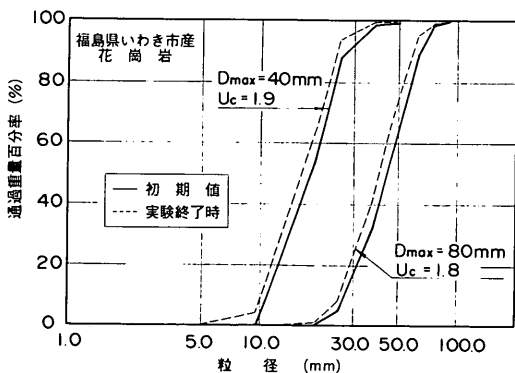


図-2 碎石の粒径加積曲線

表-1 実験に用いた捨石母岩の物理・力学特性

表乾比重 $D_s$ (JIS-A-1110)	2.609
見掛け比重 (JIS-A-5006)	2.605
計算真比重 $D_o$ (JIS-A-1110)	2.615
吸水率 $Q$ (JIS-A-1110 or JIS-A-5006)	0.141%
一軸圧縮強度	1,458kgf/cm <sup>2</sup>

- ② 試験碎石よりも粒度の良いフィルダム材料では軸差応力、体積の減少はみられないこと、また、それらのせん断中の破壊率は、試験碎石よりも少ないことから、それらの減少は粒度の悪いことに起因するせん断中の粒子破碎の起きやすさによるものと考えられる。

高橋らによる試験結果からは、

- ① 捨石は  $D_{max}$  が大きくなるほど、堆積するときとりうる密度の範囲 ( $\Delta e = e_{max} - e_{min}$ ) は小さくなる。
- ② 捨石の最大粒径の違いによってせん断強度はほとんど影響を受けない。
- ③ 捨石の強度・変形特性は  $U_c$  により異なる。 $U_c$  が大きいほどより大きな強度を示す。しかしせん断中の堆積変化は拘束圧、せん断変形が同一であれば  $U_c$  に関係なくほぼ同一である。
- ④ 捨石の三軸圧縮中に発生する粒子破碎量は相似粒度であれば  $D_{max}$  に関係なく、 $U_c$ 、拘束圧に関係している。

また、本実験の模型地盤に相当する条件下での要素試験を行った。すなわち、最大粒径の影響、密度の小さい場合や拘束圧が低い場合について中型三軸試験機(直径30cm×高さ60cm、動土質研究室)を用い圧密排水(CD)圧縮試験を行った。試料は、模型実験に用いたいわき市産の碎石を4種類のふるい(38.1と25.4, 19.1と4.76mm)を用いて作製した最大粒径の異なる2種類である。供試体の作製は、模型地盤のゆる締め(後述の“緩い”)と同じようにした。ゴムスリーブは、厚さ1mmのものを2枚用いた。写真-1は、セルに入る前の供試体の状態である。三軸圧縮試験の軸方向変位速度は、1mm/min(約0.15%/min)で一定とした。

実験条件および結果を表-2に示す。これらの結果から、次のことがいえる。

- ① 拘束圧が低い場合の強度は、 $D_{max}$  および  $\gamma$  にあまり関係ない。
- ② 捨石の内部摩擦角  $\phi_{cd}$  と  $c_{cd}$  は、それぞれ  $D_{max} 40\text{mm}$  で  $32^\circ$  と  $0.275\text{kgf/cm}^2$ 、 $D_{max} 80\text{mm}$  で  $36.1^\circ$  と  $0.175\text{kgf/cm}^2$  であった。



杭の横抵抗における捨石層の評価

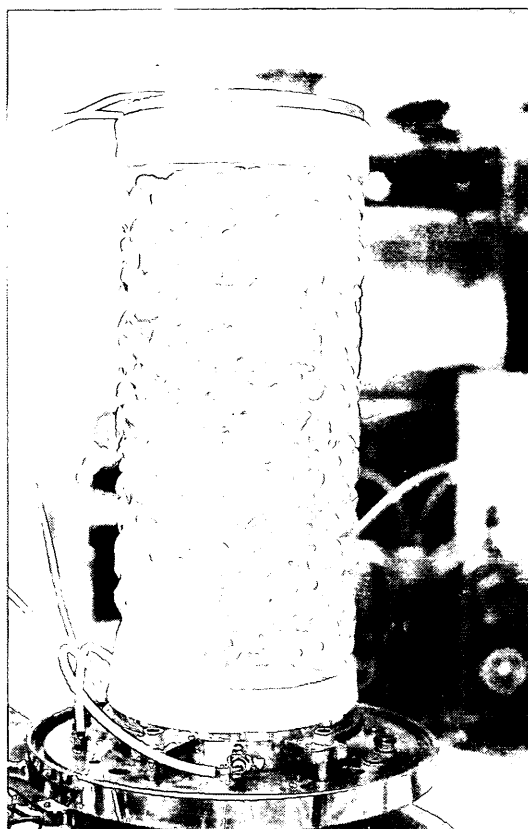


写真-1 供試体の状態

表-2 碎石の三軸圧縮試験の実験条件および結果

ケース名	試料	粒径 (mm)		側圧	初期状態		$\phi_o$ (°)
		max	min		$\gamma_o$	$e$	
G 40-1	碎石	40	25	0.5	1.384	0.885	43.3
G 40-2	"	"	"	1.0	1.393	0.823	37.0
G 40-3	"	"	"	"	1.389	0.878	35.5
G 40-4	"	"	"	"	1.354	0.927	37.1
G 40-5	"	"	"	1.5	1.384	0.885	36.7
G 40-6	"	"	"	1.0	1.426	0.830	37.9
G 40-7	"	"	"	1.5	1.425	0.831	36.7
G 20-1	碎石	20	5	0.5	1.418	0.840	43.0
G 20-2	"	"	"	"	1.405	0.857	42.2
G 20-3	"	"	"	1.0	1.404	0.858	39.8
G 20-4	"	"	"	1.5	1.402	0.861	35.9
G 20-5	"	"	"	"	1.422	0.835	38.8

2) 砂

実験に用いた砂は、茨城県高萩海岸産の海砂を用いた。粒径加積曲線は、図-3に示すとおりであり、有効径 $D_{10} = 0.39\text{mm}$ 、均等係数 $U_c = 2.03$ 、曲率係数 $U_c' = 1.13$ である。また、最大および最小の間隙比および単位体積重量については、土質工学会基準案によって作製された最大密度試験装置および最小密度試験装置を用いて試験した結果、 $e_{\min} = 0.639$  ( $\gamma_{d\max} = 1.620\text{gf/cm}^3$ )、 $e_{\max} = 0.986$  ( $\gamma_{d\min} = 1.337\text{gf/cm}^3$ )となっており、また、比重 $G_s$ は2.655である。なお、実験には気乾状態のものを用いた。

また、砂試験についても模型実験の地盤条件と一致した密度による圧密排水 (CD) 圧縮試験を行った。比較のため中型三軸試験機を用いて1ケースおよび標準三軸試験機を用いて9ケース行った。実験条件および結果を表-3に示す。

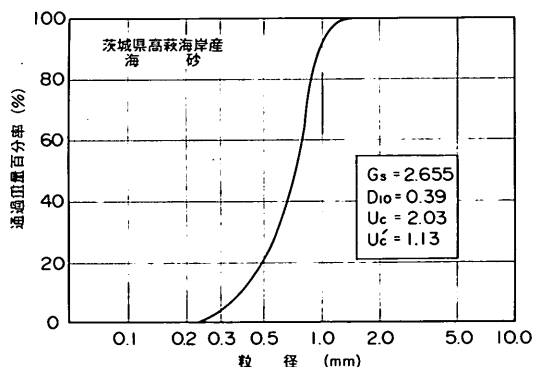


図-3 砂の粒径加積曲線

表-3 砂の三軸圧縮試験の実験条件および結果

ケース名	試料	側圧	初期状態		$\phi_o$ (°)	備考
			$\gamma_o$	$e$		
S02-1	砂	1.0	1.498	0.722	39.3	中型
S01-1	砂	0.5	1.488	0.784	37.8	標準
S01-2	"	0.5	1.531	0.734	39.3	"
S01-3	"	1.0	1.467	0.810	36.6	"
S01-4	"	0.7	1.457	0.822	37.1	"
S01-5	"	1.5	1.464	0.813	35.8	"
S01-6	"	0.35	1.469	0.807	38.8	"
S01-7	"	0.35	1.518	0.749	39.9	"
S01-8	"	0.2	1.455	0.825	41.4	"
S01-9	"	0.2	1.516	0.751	42.6	"

## 2.3 模型杭の設置および地盤の作製

実験槽内において模型杭を設置したあと、地盤の作製を行った。一連の作業手順のフローを図-4に示す。この作業は、実験の精度に大きく影響してくる重要なことであるため、実験条件を満足するようにていねいに行った。

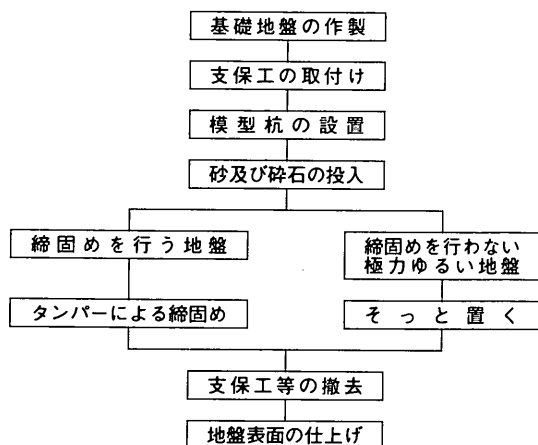


図-4 模型杭の設置および地盤の作成フロー

### 1) 模型杭の設置

杭を設置する順序は下記のa)～c)のとおりである。なお、ケース7, 8については実験工程上、同一の地盤上で実験を行ったが、それ以外については一地盤について1ケースの実験を行った。

a) 滑車との高さや杭頭に取り付けてあるベアリング中心の高さが等しくなるように杭下端の基礎地盤を作製する。なお、この基礎地盤については実験終了後、毎回、バイブレーターなどを用いてできるだけ密詰め状態にし、沈下などが生じないようにした。これによって地盤の単位体積重量 $\gamma$ の値を精度の高い値とした。

b) 杭を設置する際に、沈下や傾きが生じないように、設置途中、支保工として利用できる鋼棒を土槽中央に載荷方向と平行に上下2本取り付ける。その際、下げ振りなどで土槽深さ方向に左右の誤差がないように注意しながら取り付けた。

c) 鋼棒を取り付けたあと、鋼棒を支保工として杭を設置した。杭を設置する際には、杭の中心に、杭平面方向に対して直角に水平荷重が作用するよう、また、杭体にねじれなどが生じないように設置を行った。また、杭を鋼棒に取り付ける際には、しゃこ万力や硬質ゴムなどの留め金具と緩衝材を用いて、杭が実験を行う前に地盤の作製などの作業により移動したりするのを防いだ。なお、留め金具は、杭に貼りつけてあるひずみゲージに

曲げひずみが生じない程度かつ杭が動かない程度の力で鋼棒に取り付けた。

### 2) 地盤の作製

実験地盤として、地盤強度の違いによる影響をみるため、十分に締固めたもの、中程度に締固めたものおよびまったく締固めを行わない極力ゆるいものの三種類の地盤を作製した。(以降これらの地盤を順に“密な”、“中”、“緩い”と称する。)

まず最初に、砂または碎石を投入する。投入の方法は、極力一様な地盤を作製することを主眼に試料に応じて次のように行った。砂の場合には、ホッパーの先端を常時、地盤より100cmの高さに維持して投入するよう心掛けた。碎石の場合には、碎石が割れるのを防ぐため、ホッパーの先端を地盤より30cmの高さまで下げて投入した。

締固めを行う地盤については、一様な地盤を作製するために、30cm×30cm(重量8.67kgf)の鋼板からなるタンパーを用い、砂または碎石を約20cmの厚さまで投入するごとにそのタンパーを1箇所に対して数回、自然落下させることによって締固め、実験地盤を作製した。なお、タンパーを用いる場合についても締固めエネルギーを一定にするため、落下高さが常時20cmの高さとなるよう心掛けた。また、捨石地盤については過度な衝撃を与えると石が割れる恐れがあるため、前述のタンパーの下面に衝撃を柔げることを目的として、厚さ1cm程度の硬質ゴムを取り付けて地盤を作製した。

まったく締固めを行わない極力ゆるい実験地盤は、実際のマウンド地盤の初期状態を仮定している。そのため、現場におけるマウンド築造と同じ条件にするような作製方法を用いた。

これは、実際の捨石の水中落下速度に相当するように一度バケツに入れた捨石をそっと置くように入れ、締固めを行わないという方法で、これにより極力緩い地盤を作製していくことができた。

杭の設置のために用いた支保工などは、地盤の作製中に埋まってしまうようになる時点で取り外した。なお、地盤作製途中において、鋼棒を取り外すことによる杭の沈下などは見られなかった。

最後に、地盤表面の仕上げを行った。砂においては問題なく平らにできるが、碎石の場合には、表面を荒均し程度に整地し、設定地盤高さを越えないように仕上げた。

地盤の単位体積重量は、ホッパーから投入する碎石、および砂の重量をホイスト秤により測定して算定した。

#### 2.4 荷重装置および荷重方法

荷重装置は、Y型鋼棒、ワイヤー、滑車、重錘かんを用いて作製したものである。この装置は、滑車を介することによって、重錘かんに載せた重錘の重量を、杭頭に水平荷重として作用させることができる。また、杭頭に作用する水平荷重を測定するためロードセルは、Y型鋼棒と滑車の途中に取り付けてあり、これによって滑車とワイヤーの摩擦の影響を受けない値として杭頭にかかる水平荷重を測定することができる。

実験は、荷重制御方式で静的荷重により行った。荷重に先立ち、前述の方法で設置した杭が所定の位置にあるか、また、地盤が杭に対して必要な高さを有しているかを確認し、杭頭に荷重装置を取り付ける。荷重は、測定される杭頭変位量に、3分間で0.1mmの変化がみられなくなるまで荷重を保持し、次の段階に移った。なお、荷重は、測定される曲げモーメントの最大値  $M_{max}$  の値が、模型杭の許容応力の範囲内で行った。また、実験は、繰返しの影響を把握するために、後述の実験ケース12、16、22においては9回、それ以外のケースは3回程度、最大荷重  $T_{max}$  までの繰返し荷重を行った。

#### 2.5 測定項目および測定方法

測定項目は、杭体のひずみ、杭頭変位量、荷重荷重である。杭体のひずみについては、杭体に貼り付けてあるひずみゲージにより、杭頭変位量については杭頭部に2個取り付けられている変位計により、また、荷重荷重についてはロードセルにより各ステップごとに測定した。

また、杭前面の土槽壁には、これに加わる地盤の圧力を測定するための壁圧板を取り付けた。後述の実験ケース21～27、ケース51～56においては、粒径が80mmと比較的大きな粒径の砕石を用いるため、土槽壁の影響が懸念され、そこで土槽にかかる水平力を測定する目的

で、横50cm×縦40cmと横50cm×縦20cmの2種類の大きさで厚さ1cmの亚克力板を準備し、3個の小型ロードセルを用いて、図-5に示すように土槽壁にとりつけそれにかかる水平力を測定した。

#### 2.6 模型杭

##### (1) 模型杭の仕様

写真-2は、実験に使用した模型杭である。模型杭は、鋼板(SS50)により製作したもので、杭頭には、荷重のためのボールベアリングが取り付けられており、これによって頭部がヒンジ構造となっている。模型杭には、ひずみゲージが、5～10cm間隔で貼り付けてあり、これによ

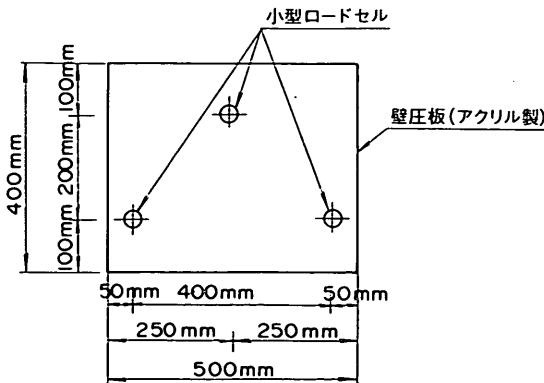


図-5 壁 圧 板

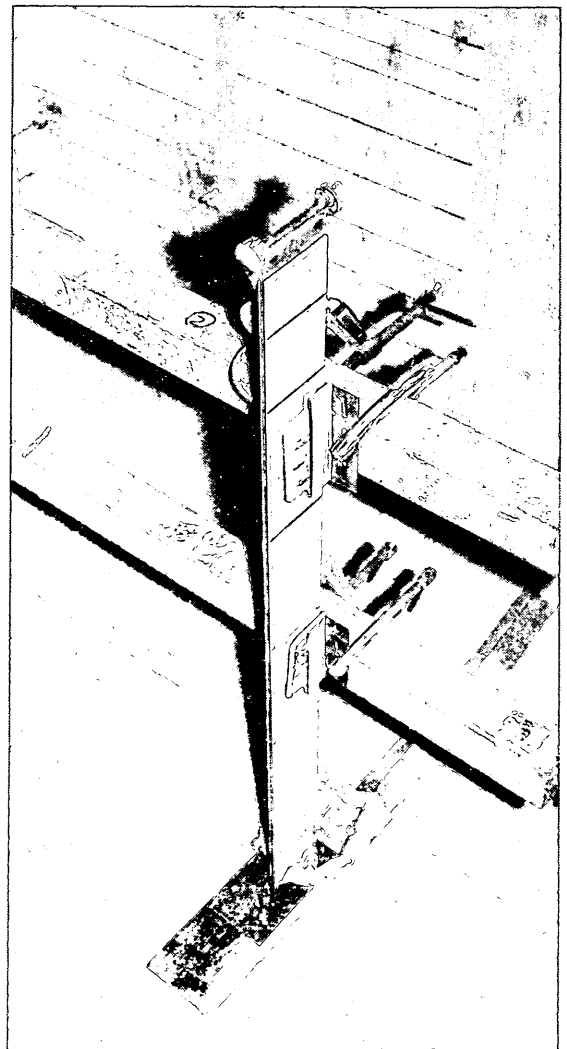


写真-2 模型杭（板杭）

て荷重が杭に作用した場合の曲げひずみ分布の測定を行うことができる。また、ひずみゲージは、同一深さにつき4枚貼り付けてあり、4アクティブゲージ法で精度よくひずみを測定することができる。ひずみゲージおよびリード線は、エポキシ系樹脂によって杭体に堅固にコーティングされている。また、リード線は、杭下端より結集されて杭の外に出され、スイッチボックスを介して測定器に接続されている。

また、前記した模型杭は、剛性を小さくするためにプレート状のものを用いているが、捨石材のような粒径の大きな場合での杭形状効果についても検討を加えるために、写真-3のような鋼管杭も使用した。なお、鋼管杭には、ひずみゲージを貼っていない。

実験に使用した杭の諸元を表-4に示す。

#### (2) 模型杭の検定

実験に先立ち模型杭の検定試験を行い、測定されるひずみより曲げモーメントを算出するのに必要な較正係数および模型杭の曲げ剛性 ( $EI$ ) を求めた。検定試験では、鋼板の許容応力を考慮して定めた最大荷重に至るまで杭中心部付近に鉛直に段階載荷し、それによって発生したひずみおよびたわみを測定した。なお、模型杭は、杭両端付近に設けた支点（片方は移動可能）の上に水平に置いた。検定試験は表裏両面について2回ずつ行い、試験結果は、較正係数については測定されたひずみとそのゲージ貼り付け位置での計算される曲げモーメントとの関係、また、曲げ剛性 ( $EI$ ) については載荷荷重とたわみの関係を考え、最小二乗法を用いて整理した。図-6は、本実験において最も多く用いた、杭幅  $B=10\text{cm}$ ,

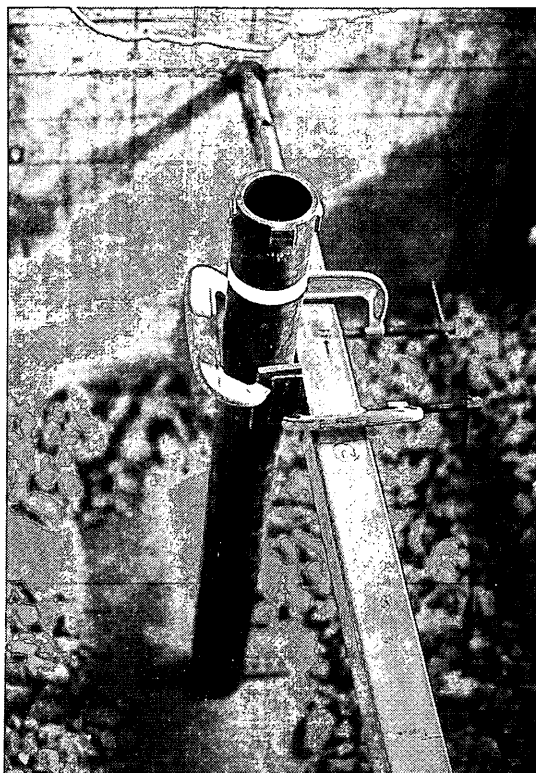


写真-3 模型杭（鋼管杭）

$t=9\text{mm}$  の杭の検定の最大荷重時におけるひずみ分布であるが、各ひずみゲージが良好な値を示していることがわかる。なお、この他の杭についても同様な結果であった。

表-4 実験に使用した杭の諸元

杭 No.	杭長 $L$ (cm)	杭幅 $B$ (cm)	杭厚 $t$ (cm)	$EI$ ( $\text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ )	ゲージ数	備考
1	121	10	1.2	$2.614 \cdot 10^6$	17	鋼板 (SS 50)
2	"	"	0.9	$1.208 \cdot 10^6$	"	"
3	"	"	1.6	$6.571 \cdot 10^6$	"	"
4	"	20	1.2	$5.832 \cdot 10^6$	"	"
5	"	10	0.6	$0.311 \cdot 10^6$	23	"
6	"	20	"	$0.662 \cdot 10^6$	"	"
7	"	"	0.9	$2.306 \cdot 10^6$	"	"
11	"	10.16	8.1	$5.501 \cdot 10^8$	0	鋼管 (STPG 38)
12	"	21.63	8.2	$6.104 \cdot 10^9$	0	"

杭の横抵抗における捨石層の評価

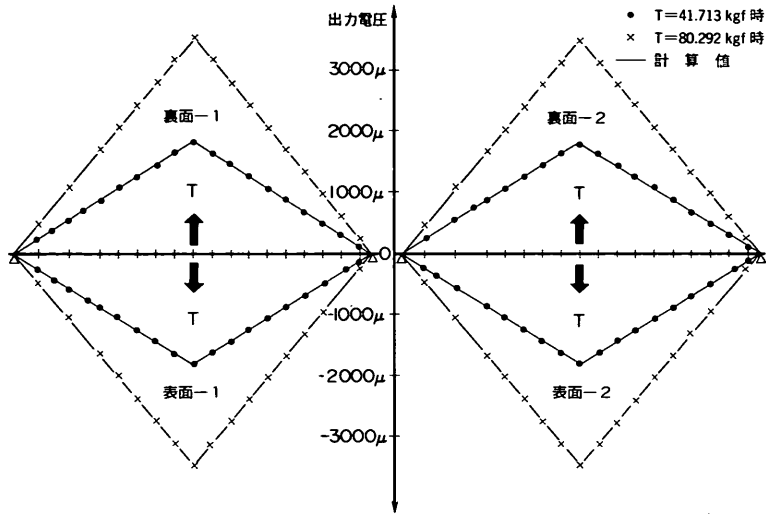


図-6 杭検定時のひずみ分布

2.7 実験ケース

実験ケースは、地盤について、捨石地盤と砂地盤、それらの締固め度合い、最大粒径 ( $D_{max} = 40 \text{ mm}, 80 \text{ mm}$ )、捨石マウンド(二層地盤)およびマウンド形状(層厚、法肩幅)の影響を把握できるように条件を設定した。また、模型杭に関しては、杭幅、剛性 ( $EI$ )、および、杭形状(板と管)について検討を加えられるようにした。

実験数は、プレート状の模型杭について、砂地盤中で行った5ケース、碎石のみの一様地盤中で行った20ケース、現場における断面である二層系の地盤条件で、単純な捨石と砂の二層地盤としたもの5ケースと、法面を有したマウンド形状の断面にしたもの7ケースで、計37ケースであり、鋼管杭については、6ケースである。

各実験における実験条件および地盤状態などを一様、二層地盤および鋼管杭とに分け、それぞれ表-5, 6, 7に示す。

表-5 一様地盤の実験条件および地盤条件

Case名	杭 No.	$T_{\max}$ (kgf)	$h$ (cm)	地 盤 条 件		
				$\gamma$	$e$	地盤の種類, 形状 ( $D_{\max}$ )
S100-1	2	58.84	20	1.405	0.89	砂“緩い”一様
S105-2	2	83.28	11	1.499	0.77	砂“密な”一様
S101-3	2	79.08	11	1.477	0.80	砂“中”一様
S100-26	2	193.86	11	1.489	0.78	砂“密な”一様
S100-27	2	175.52	11	1.489	0.78	“
G100-4	2	87.66	11	1.418	0.84	碎石“緩い”一様 (40mm)
G105-5	2	98.95	11	1.481	0.76	碎石“密な”一様 ( “ )
G100-6	3	193.89	11	1.429	0.83	碎石“緩い”一様 ( “ )
G105-7	3	225.60	11	1.490	0.75	碎石“密な”一様 ( “ )
G105-8	1	142.87	11	1.490	0.75	“ ( “ )
G205-9	4	293.00	11	1.472	0.77	“ ( “ )
G205-10	7	201.50	11	1.495	0.75	“ ( “ )
G105-11	5	57.65	11	1.492	0.75	“ ( “ )
G103-12	2	104.17	11	1.514	0.72	“ ( “ )
G205-13	7	176.30	11	1.503	0.74	“ ( “ )
G205-14	6	107.20	11	1.499	0.74	“ ( “ )
G105-15	5	51.33	11	1.467	0.78	碎石“密な”一様 (80mm)
G105-16	2	113.40	11	1.506	0.73	“ ( “ )
G100-17	2	82.33	11	1.390	0.88	碎石“緩い”一様 (40mm)
G100-18	2	88.48	11	1.371	0.90	“ (80mm)
G100-19	1	125.97	11	1.346	0.94	“ ( “ )
G200-20	6	98.53	11	1.348	0.94	“ ( “ )
G200-21	4	292.44	11	1.678	0.89	“ ( “ )
G200-22	4	303.28	11	1.304	1.00	“ (40mm)
G100-23	3	195.31	11	1.365	0.91	“ (80mm)

注) ケース21~23, 26, 27においては壁圧測定を行っている。

杭の横抵抗における捨石層の評価

表-6 二層地盤の実験条件および地盤条件

Case名	杭 No.	$T_{max}$ (kgf)	$h$ (cm)	地 盤 条 件		
				$\gamma$	$e$	地盤の種類, 形状 ( $D_{max}$ )
G100-24	2	156.42	11	1.491	0.78	砂 層 90cm
				1.280	1.04	捨石層 20cm (40mm)
G100-25	2	194.21	11	1.490	0.78	砂 層 80cm
				1.424	0.83	捨石層 30cm (40mm)
G100-28	2	195.86	11	1.527	0.74	砂 層 90cm
				1.379	0.89	捨石マウンド 20cm (80mm)
G100-29	2	194.41	11	1.527	0.74	砂 層 90cm
				1.476	0.77	捨石マウンド 20cm (40mm)
G100-30	2	195.86	11	1.527	0.74	砂 層 90cm
				1.173	1.26	砂マウンド 20cm
G100-31	2	195.41	11	1.537	0.73	砂 層 90cm
				1.326	0.97	捨石マウンド 20cm (80mm)
G100-32	2	196.41	11	1.493	0.78	砂 層 100cm
				1.653	0.58	捨石マウンド 10cm (80mm)
G100-33	4	292.44	11	1.475	0.80	砂 層 100cm
				1.482	0.76	捨石層 10cm (80mm)
G100-34	4	292.69	11	1.475	0.80	砂 層 90cm
				1.410	0.85	捨石層 20cm (80mm)
G100-35	4	292.44	11	1.475	0.80	砂 層 80cm
				1.360	0.92	捨石層 30cm (80mm)
G100-36	4	293.43	11	1.475	0.80	砂 層 90cm
				1.503	0.74	捨石マウンド 20cm (80mm)
G100-37	4	293.43	11	1.475	0.80	砂 層 90cm
				1.522	0.72	捨石マウンド 20cm (40mm)

注) ケース24, 25においては壁圧測定を行った。

表-7 鋼管杭の実験条件および地盤条件

Case名	杭 No.	$T_{max}$ (kgf)	$h$ (cm)	地 盤 条 件		
				$\gamma$	$e$	地盤の種類, 形状 ( $D_{max}$ )
G100-51	11	387.26	11	1.390	0.88	碎石“緩い”一様 (80mm)
G200-52	12	583.88	11	1.390	0.88	“ ( ” )
G200-53	12	584.87	11	1.387	0.88	“ (40mm)
G100-54	11	391.74	11	1.405	0.86	“ ( ” )
G100-55	11	587.74	11	1.479	0.80	砂 “密な”一様
G200-56	12	587.86	11	1.490	0.78	“

注) ケース51~56においては壁圧測定を行った。

3. 実験結果

3.1 概要

実験ケースは、前章で述べたとおりであるが、ここではケースの条件を整理し、ケースごとの地盤条件などの比較が簡単に行えるように分類し、一覧表にした。一様な地盤中のもを表-8に、捨石層を有した二層地盤のもを表-9に、鋼管杭を用いたものを表-10にそれぞれ示す。

表-10 鋼管を用いた杭における  
実験ケース分類表

杭の諸元			地盤条件		
No.	肉厚 (mm)	外径 (cm)	砂 (密な)	砕石 (緩い)	
				$D_{max}=40mm$	$D_{max}=80mm$
11	8.1	10.16	55	54	51
12	8.2	21.63	56	53	52

表-8 一様地盤における実験ケース分類表

杭の諸元			地盤条件						
No.	厚さ (cm)	幅 (cm)	砂			砕石 ( $D_{max}=40mm$ )		砕石 ( $D_{max}=80mm$ )	
			緩い	中	密な	緩い	密な	緩い	密な
5	0.6	10					11		15
2	0.9		1	3	2, 26 27	4, 17	5, 12	18	16
1	1.2						8	19	
3	1.6					6	7	23	
6	0.6	20					14	20	
7	0.9						10, 13		
4	1.2					22	9	21	

注) 表中の緩いは締固めを行わない地盤、密なは20cm毎にタンパーで5回締固めた地盤を示す。

表-9 二様地盤における実験ケース分類表

杭の諸元			マウンド形状		地盤条件		
No.	厚さ (cm)	幅 (cm)	層厚 (cm)	肩幅 (cm)	砂 (密な)	砕石 (緩い)	
						$D_{max}=40mm$	$D_{max}=80mm$
2	0.9	10	10	80			32
			20	40			31
				80	30	29	28
				130		24	
			30	130		25	
4	0.6	20	10	130			33
			20	40		37	36
				130			34
			30	130			35

模型実験を行う場合には、地盤と杭の条件を現地と相似になるように設定するのが基本であるが、どうしても土槽の大きさからの制約がある。それは、砂地盤の場合と異なり、砕石一個一個の粒径が大きいことのため、杭と土槽壁の間の距離が砕石の粒径に比べて小さいこと、砕石の個々の重さによる影響が現地と異なることなどの

問題がある。したがって、今回の結果は、さまざまなケースの実験により、各種の項目の影響を相対的な関係の中でとらえることを主眼にしたものと考えなくてはならない。

ここでは、まず、実験により得られたデータから、杭頭変位量と杭頭荷重の関係および曲げモーメント分布の



グラフを作図し検討した。その大きな項目としては、プレート状の杭および鋼管杭の、捨石地盤および二層地盤中における挙動、そして、実験上の問題である土槽壁の影響である。

### 3.2 処女載荷における杭の挙動

#### (1) 一様な砂地盤中の挙動

一様な砂地盤中での実験は、杭2について“緩い”，“中”，“密な”という3通りの地盤条件により、5ケース行った。各地盤の単位体積重量は、1.42, 1.48, 1.50 tf/m<sup>3</sup>である。自由長は、ケース1についてのみ20cmとし、それ以外は11cmで行った。写真-4は、砂地盤中の実験状況である。

杭頭変位量と杭頭荷重の関係は、図-7に示されるように処女荷重に対しては非線形であり、繰返し荷重に対しては線形性を持つようになる。上記5ケースの処女載荷での杭頭変位量と杭頭荷重の関係を図-8に示す。また、曲げモーメント分布の一例として、ケース26を図化したものが図-9である。荷重が増加するにつれて、最大曲げモーメントの生ずる位置が下がり、その分布は深いところまで広がることになる。

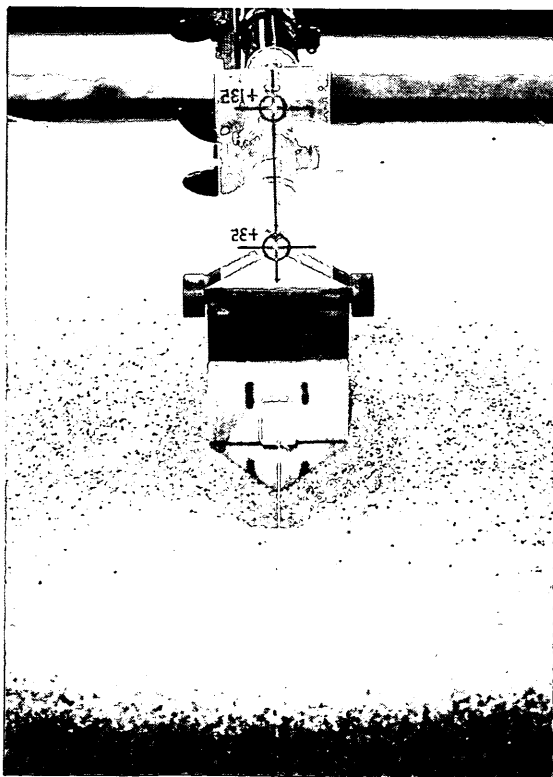


写真-4 砂地盤実験状態

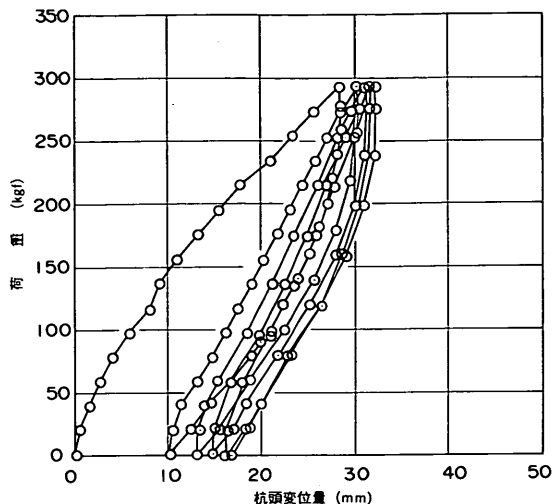


図-7 杭頭変位量と杭頭荷重の関係

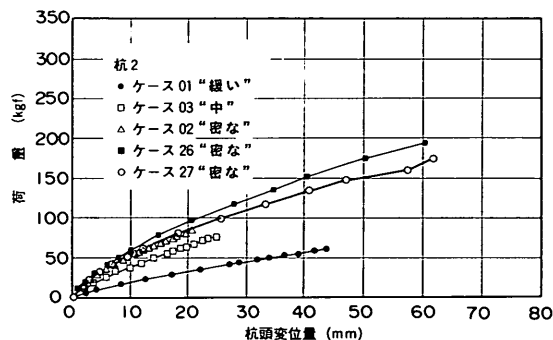


図-8 杭頭変位量と杭頭荷重の関係 (砂地盤)

#### (2) 一様な捨石地盤中の挙動

一様な捨石地盤中での実験は、7種類の杭を用いて20ケース行った。写真-5は、実験状況である。

杭1, 3, 4, 6については、地盤条件を変えて杭の挙動の違いについて調べた。その条件は、“緩い”場合の $\gamma=1.30\sim 38\text{tf/m}^3$ 程度のもので、“密な” $\gamma=1.47\sim 50\text{tf/m}^3$ 程度のもので2通りとした。杭4を例にとってみると、図-10から、“緩い”地盤のほうが杭頭変位量が大きいことがわかる。また、図-11から曲げモーメント分布は、一般的に言われている砂地盤の場合と同じように“緩い”地盤になるにつれて、曲げモーメント値が大きくなり、 $M_{\max}$ の生ずる位置が下がり、その分布は深いところまで広がる。

杭幅に関しては、 $EI$ がほぼ等しい杭3と4についてみると、図-12に示すように、捨石の最大粒径 $D_{\max} =$

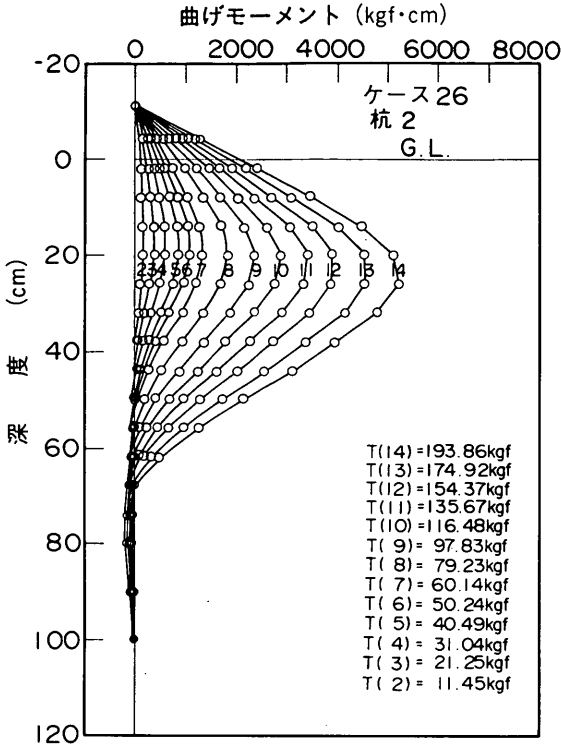


図-9 曲げモーメントと深度の関係 (“密な”砂地盤)

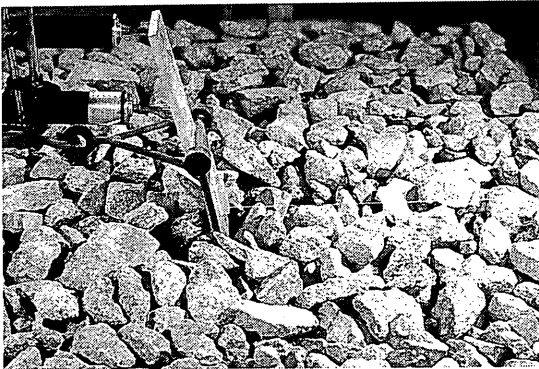


写真-5 捨石地盤実験状態

40mmの“密な”地盤の場合のケース7と9, “緩い”地盤の場合のケース6と22, 捨石の最大粒径  $D_{max} = 80\text{mm}$  の“緩い”地盤の場合のケース23と21などのように, 地盤条件が異なっても明らかに杭幅が大きいほうが変位量が小さいといえる。

次に, 捨石の最大粒径  $D_{max}$  による影響は, 図-12のケース21と22での比較でも大差ないように, 杭幅  $B =$

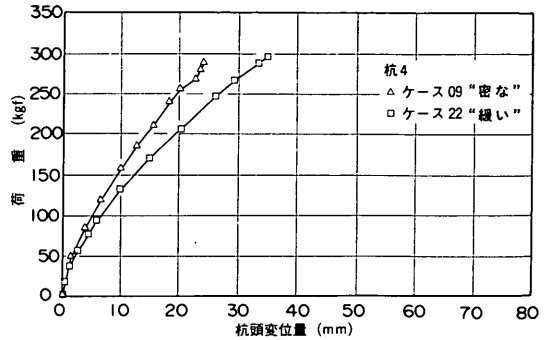


図-10 杭頭変位量と杭頭荷重の関係 (捨石地盤)

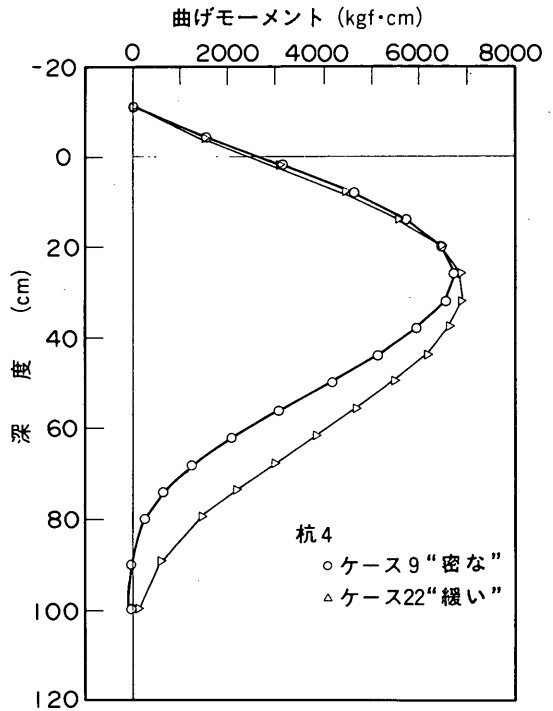


図-11 曲げモーメントと深度の関係 (捨石地盤)

10cmで“緩い”地盤の場合(ケース17と18)や, “密な”地盤の場合(ケース11と15)でも, ほとんど変化がなかった。

### (3) 二層地盤中の挙動

二層地盤中の実験は, 杭2(杭幅10cm), 4(杭幅20cm)においては検討を行った。捨石層は, 図-13に示したように無限の広がり考えた地盤を想定した場合と, 図-14のように法面を有したマウンド形状の断面の地盤を作製した。マウンドの大きさは標準的な断面を1/

杭の横抵抗における捨石層の評価

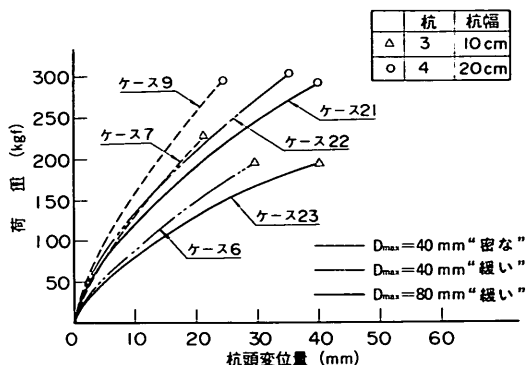


図-12  $EI$  がほぼ等しい杭の杭頭変位量と杭頭荷重の関係 (捨石地盤)

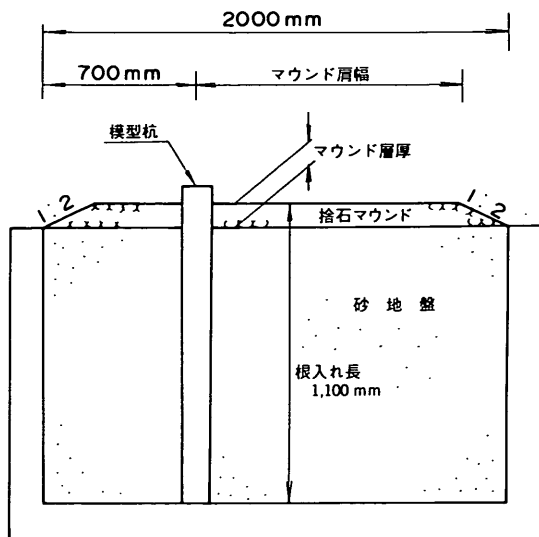


図-14 二層地盤状態 (捨石マウンド)

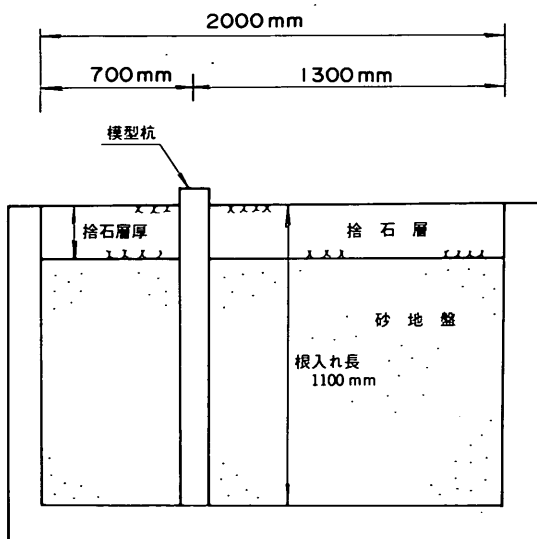


図-13 二層地盤状態



写真-6 捨石マウンド実験状態

10に縮尺したものを想定し、捨石層厚を10, 20, 30cm, 肩幅を40cmと80cmのもので行った。マウンド材料は、碎石  $D_{max} = 40\text{mm}$ , 80mm および砂の3種類を使用し、砂層は“密な”地盤、捨石層は“緩い”地盤とした。写真-6は、二層地盤中 (マウンド形状) の実験状況である。

これらの実験結果から、まず最初に捨石層厚20cmにおけるマウンド材の違いについて見てみると、図-15のケース28~30の比較および図-16のケース36と37の比較により、一樣地盤の場合と同じように碎石の最大粒径の影響はなく、マウンド材に砂を用いて行ったケース30においても碎石とあまり変わらないといえる。こ

れは、砂の $\gamma$ として“密な”に相当する地盤作製をしたにもかかわらず  $1.173\text{tf/m}^3$  しかなく、締固め効果が現れず砂の強度がでていないことが原因であると思われる。このことから、捨石層は、“緩い”地盤の砂とほとんど同程度の抵抗力を示すこと、粒径の影響はみられないことなどがいえる。

次に、捨石層厚の違いによる影響は、図-15より、杭幅10cmの杭2についてはケース24 (捨石層厚20cm) と25 (捨石層厚30cm) より捨石層の厚いほうが1~2割程度杭頭変位量が小さくなるが、杭幅20cmの杭4におけるケース33~35 (それぞれ捨石層厚10cm, 20cm, 30cm) からは反対に捨石が厚いほど変位量が大きくなっ

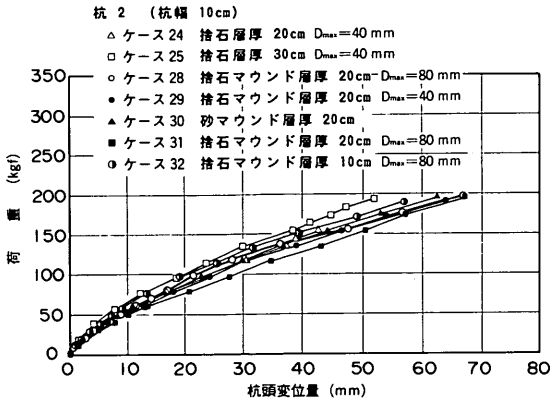


図-15 杭頭変位量と杭頭荷重の関係 (二層地盤, 杭幅10cm)

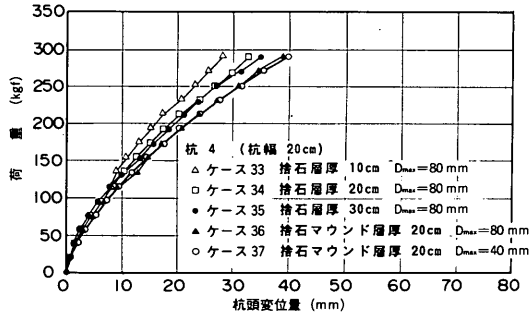


図-16 杭頭変位量と杭頭荷重の関係 (二層地盤, 杭幅20cm)

ている。また、砂層部分の地盤作製方法及び $\gamma$ がほぼ等しい一様な砂地盤 ( $\gamma = 1.49 \text{ tf/m}^3$  程度) のケース 2, 26, 27 の結果 (図-8 参照) と比較してみると、ケース 24 の捨石層厚 20cm のものとほとんど一致している。曲げモーメント分布結果からは、捨石層厚 20cm と 30cm のケース 24 と 25 を例にとった図-17 より、捨石層厚の大きいほうが  $M_{\text{max}}$  が小さく、その発生深度は 4~8 cm 程度浅いところにある。また、砂部分の地盤作製方法及び $\gamma$ がほぼ等しいケース 2, 26, 27 の  $\gamma = 1.49 \text{ tf/m}^3$  程度の一様な地盤の結果 (図-9 参照) と比較してみると、ケース 24 の捨石層厚 20cm のものがほぼ一致する。一方、杭幅 20cm の杭 4 においては、ケース 33~35 の比較により、層厚の影響はないといえる。

(4) 鋼管杭の挙動

鋼管を用いた実験は、2種類の杭を用い、砂と最大粒径の異なる2種類の砕石の二層地盤で、計6ケース行った。

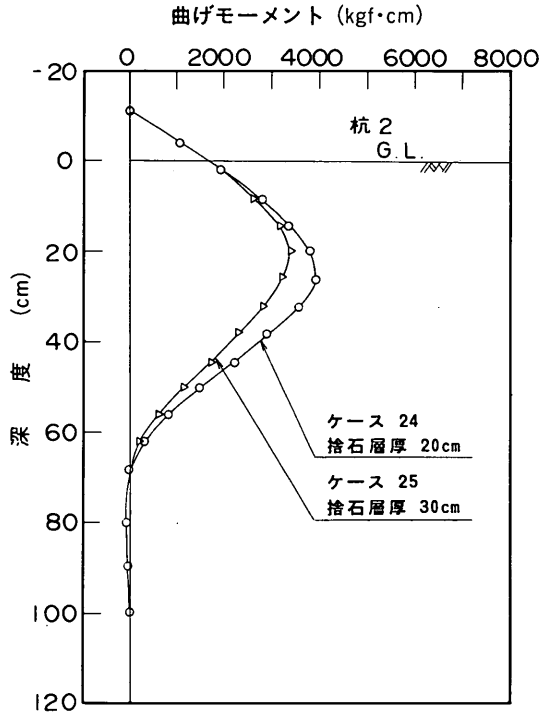


図-17 曲げモーメントと深度の関係 (二層地盤)

上記6ケースの杭頭荷重と杭頭変位量の結果を図-18に示す。これらの結果から、地盤条件による杭の挙動の違いは、 $D_{\text{max}} = 40 \text{ cm}$  の“緩い”捨石地盤、 $D_{\text{max}} = 80 \text{ cm}$  の“緩い”捨石地盤、“密な”砂地盤の順に同じ荷重時の杭頭変位量が小さくなっていることがわかる。杭幅に関しては、 $EI$ がどちらも非常に大きく剛であるとする、杭幅の大きいほうが杭頭変位量が小さいことがわかる。しかしながら、処女載荷時の10cm幅あたりの荷重  $T/(B/10)$  と杭頭変位量  $y_{\text{top}}$  の関係を調べた図-

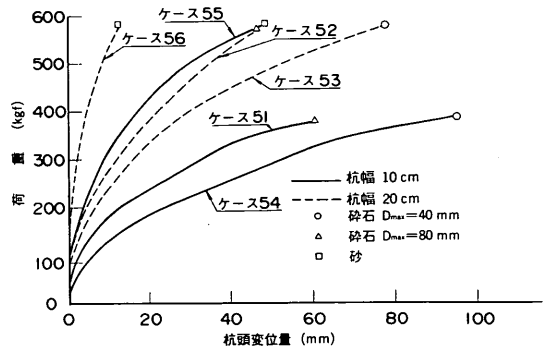


図-18 杭頭変位量と杭頭荷重の関係 (鋼管杭)

## 杭の横抵抗における捨石層の評価

19からは、ある一定荷重に対する  $y_{top}$  はいずれも杭幅 20cm の杭のほうが杭幅 10cm の杭よりも大きくなっている。このことから、捨石地盤においても、一般的な砂地盤の場合のように、地盤の横方向反力に対する杭幅の影響が表れているといえる。

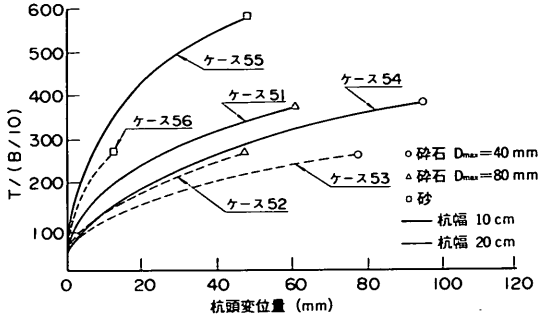


図-19 杭頭変位量値  $T/(B/10)$  の関係 (鋼管杭)

### (5) まとめ

実験結果から、一般的には、“密な”捨石、“密な”砂、“緩い”砂の順に同じ荷重時における杭頭変位量が大きくなり、同程度の単位体積重量  $\gamma$  を有する捨石地盤および砂地盤中の杭について比較した場合には、捨石地盤の杭頭変位量のほうが砂地盤より小さくなること、捨石の最大粒径  $D_{max}$  による影響は、微小変位ではほとんど変化のないことなどがわかった。

曲げモーメントに関しては、いずれの結果においても、地盤の作製方法が異なることによる分布形状の違いは特にみられなかった。しかし、地盤が緩いほうは、 $M_{max}$  が大きく、その発生する深さ  $l_{m,max}$  が深くなっていた。また、捨石地盤においても、砂地盤の場合と同様に、水平力が大きくなるにしたがって、 $l_{m,max}$  が少しずつ深くなっていた。

また、二層地盤においては、 $M_{max}$  の発生する深さ  $l_{m,max}$  は砂地盤の場合と同様水平力が大きくなるにしたがって少しずつ深くなっていくこと、層厚が異なることによる曲げモーメントの分布形状の相違は特別みられないこと、地盤の  $\gamma$  が小さいほうが  $M_{max}$  が大きく、その発生する深さ  $l_{m,max}$  が深くなること、杭への抵抗力は砕石を用いても砂とほぼ変わらないことなどがわかる。

### 3.3 繰返し載荷における杭の挙動

本実験における繰返し載荷の回数は、ケース 12, 16 については 9 回行っているが、それ以外のケース 20 までのケースについては、繰返しの回数はすべて 3 回である。また、ケース 21 からは、最大荷重における収束変

位量を求めるため、杭頭変位量がある程度落ちつくまで繰返し載荷を行った。

#### (1) 一様な地盤中の挙動

捨石地盤中の杭についても、砂地盤中の挙動と同様に、処女荷重における杭頭変位量 — 杭頭荷重関係は直線とならず非線形であるのに対して、繰返し載荷の回数が増すにつれて直線性を示すようになる。

図-20 は、幅 10cm の杭を用いて実験を行ったケースについて、各サイクルでの最大荷重時における杭頭変位量を示したものである。ほとんどの実験ケースについて、繰返しが進むにしたがって杭頭変位量が大きくなっていくのがわかる。しかし、繰返し載荷を 9 回行ったケース 12, 16 では、繰返し回数が 7 回以降は杭頭変位量がほとんど一定になっている。

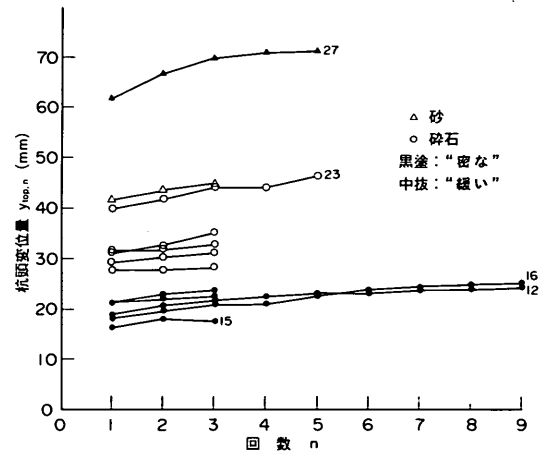


図-20 繰返し回数と  $y_{top, n}$  の関係 (砂, 捨石地盤)

図-21 は、各繰返し荷重における最大変位をその荷重で除した値と処女最大荷重時のその値との比  $r_n$  と繰返し回数  $n$  の関係を示したものである。これにより、捨石、砂のどちらの地盤とも、久保らが砂層地盤で行った実験結果<sup>1)</sup>と同様に、処女載荷時の変位の 1.4 倍程度を越えない結果となっている。また、“緩い”地盤より“密な”地盤のほうが  $r_n$  の値が大きくなる傾向がある。

図-22 は、各サイクルごとの杭頭変位量と残留変位量の比  $S_n$  と、繰返し回数  $n$  の関係を示したものであるが、1 サイクルと 2 サイクル目の間で残留変位が急激に減少し、2 サイクル目以降は徐々に収束する傾向がみられる。すなわち、砂地盤と同じように非常に弾性的な挙動を示すようになる。

次に、曲げモーメントについて、処女載荷と最終繰返し載荷時における途中の杭頭荷重  $T$  と最大荷重  $T_{max}$

での分布を重ね合わせ図示した。図-23, 24は、それぞれ杭4の“密な”地盤と“緩い”地盤の分布である。これにより、 $T_{max}$ に至らない途中の荷重においては、繰返し載荷でのモーメント分布は、処女載荷時の形状とは異なり、 $M_{max}$ 発生深さ、 $l_{m,max}$ が下方に移っている。 $T_{max}$ 時の分布は、 $M_{max}$ 以深で繰返し回数の増加によってモーメントの値が大きくなっている。また、“緩い”地盤においては、繰返し回数が増すにしたがって、 $M_{max}$ が減少し、 $M_{max}$ 以深における曲げモーメントが増加す

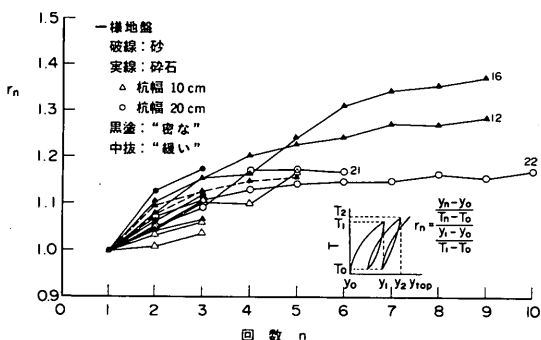


図-21 繰返し回数と  $r_n$  の関係 (砂, 捨石地盤)

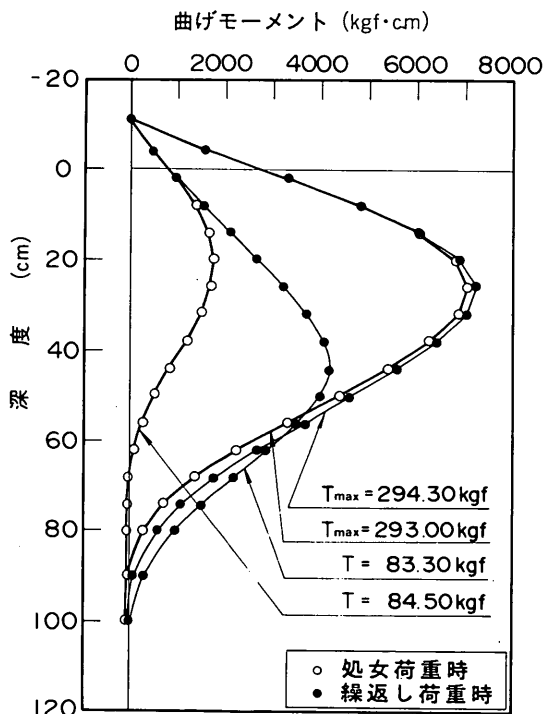


図-23 曲げモーメント分布への繰返し載荷の影響 (“密な” 捨石地盤, ケース9)

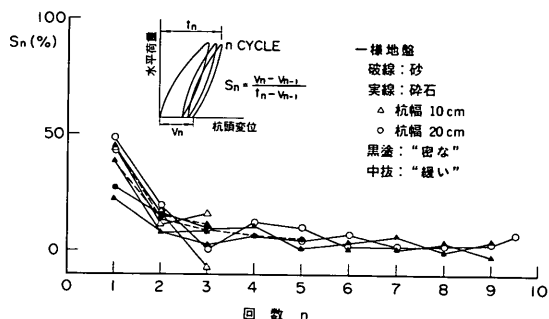


図-22 繰返し回数と  $S_n$  の関係 (砂, 捨石地盤)

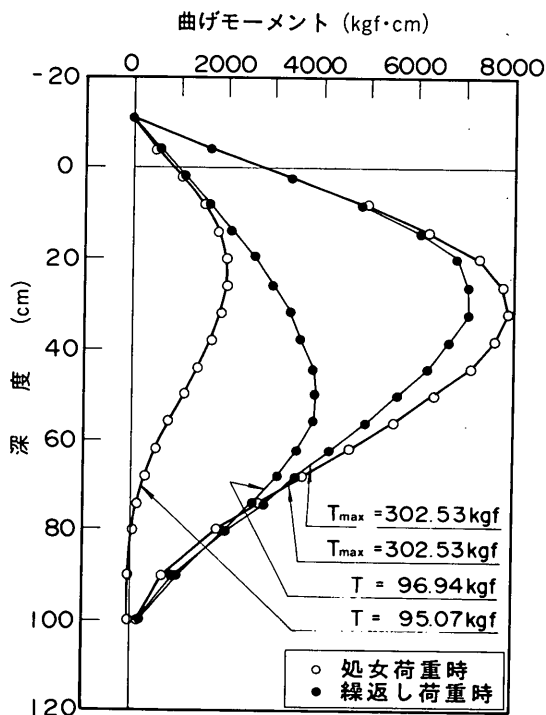


図-24 曲げモーメント分布への繰返し載荷の影響 (“緩い” 捨石地盤, ケース22)

する傾向がみられる。

また、結果は示していないが、粒径や杭幅の違いによる分布形状の違いはみられなかった。

(2) 二層地盤中の挙動

杭頭荷重と杭頭変位量関係は、一様な地盤と同じく、繰返し回数が増すにつれて弾性的な挙動を示す。

$n$  と  $r_n$  との関係を示した図-25についても、一様な地盤と同様な傾向がみられるが、杭幅が小さいほうが  $r_n$  の値が全体的に大きい。このような傾向は一様な地盤の場合には現れなかった。また、図-26の  $n$  と  $S_n$  の関係は、

杭の横抵抗における捨石層の評価

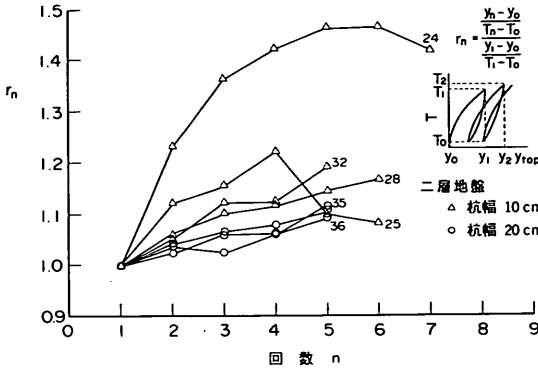


図-25 繰返し回数と  $r_n$  の関係 (二層地盤)

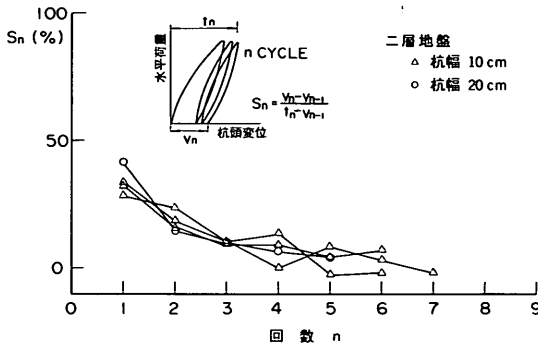


図-26 繰返し回数と  $S_n$  の関係 (二層地盤)

一様地盤のように急激な減少はみられず徐々に収束しており、その傾向は、杭幅の小さいほうが強く現れている。

次に、曲げモーメント分布について、ケース34を図-27に示すと、一様な“緩い”地盤と同様に、繰返し回数の増加によって  $M_{max}$  値が減少し、 $M_{max}$  以深のふくらみが大きくなるが、二層の場合にはその傾向が非常に強く現れている。

(3) 鋼管杭の挙動

杭頭荷重と杭頭変位量関係は、荷重を除荷にしても杭頭変位量は元には戻らず、載荷を繰返すことによって、また新たに変位が生ずる。一様な地盤のように何回か繰返すにしたがって杭頭変位量が一定になるような傾向はみられない。これは、杭の剛性が杭の根入れ深さに対して非常に大きい短杭であるために、杭先端が変位し、転倒現象を起こしていることを示している。

$n$  と  $r_n$  との関係を示した図-28から、捨石地盤では、砂地盤よりも処女載荷に対する変位量は大きい、繰返

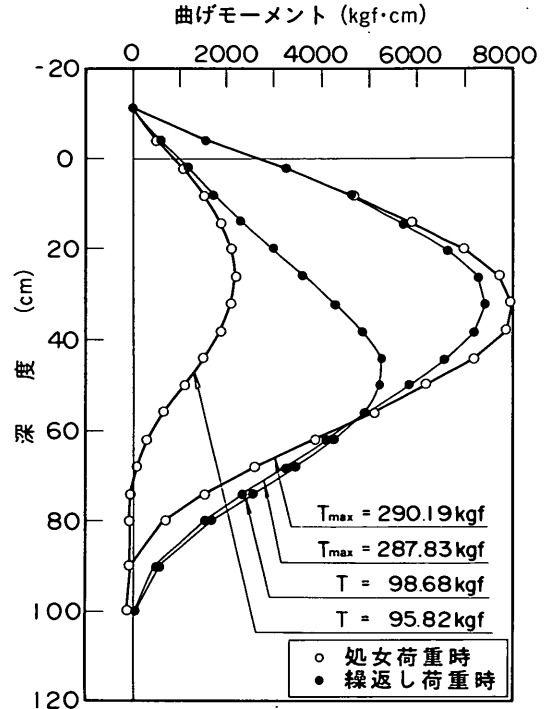


図-27 曲げモーメント分布への繰返し載荷の影響 (二層地盤, ケース34)

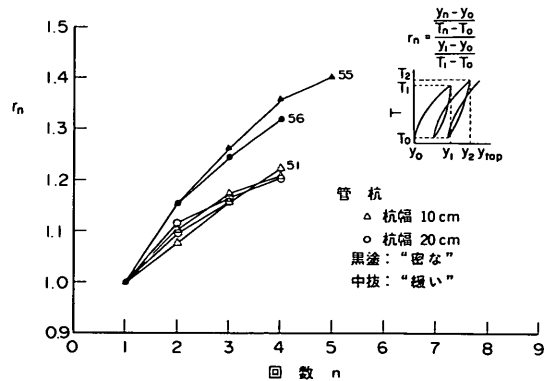


図-28 繰返し回数と  $r_n$  の関係 (鋼管杭)

しによる変位量が小さい。また、図-29の  $n$  と  $S_n$  の関係では、杭が転倒現象を生じているため収束には至らない。

(4) まとめ

杭の挙動は、捨石地盤においても、久保らが砂地盤中で行った実験結果とよく合うことがわかったが、若干、データにばらつきがみられる。これは、繰返し載荷の回

数が増すにしたがって、初めは締固まっていた杭前面の地盤の碎石に破碎が生じること、繰返し荷重が作用した場合の杭周辺の碎石および砂の移動を考えたときに、碎石一個の移動のほうが砂一粒の移動より、杭の横抵抗に及ぼす影響はるかに大きいこと、また杭と碎石および碎石と碎石相互の接触点数が非常に少なく、その反面一接触点数当たりの力は非常に大きいことなどのためと考えられる。

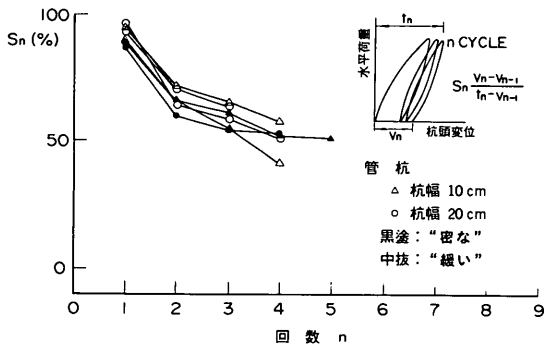


図-29 繰返し回数と  $S_n$  の関係(鋼管杭)

### 3.4 横抵抗定数

#### (1) 横抵抗定数の算定

図-30～33は、“密な”砂，“緩い”捨石，“密な”捨石、二層の各地盤における処女載荷の最大荷重に至るまでの全ステップを両対数の図上にプロットしたものである。図中の実線は、港湾構造物の設計において一般的に用いられている港研方式のS型またはC型地盤の理論曲線を、横抵抗定数  $k_s$  または  $k_c$  の値を変化させて示

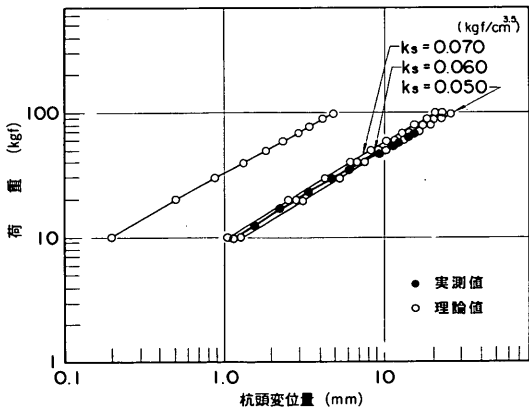


図-30 杭頭変位量と杭頭荷重の関係 (“密な”砂地盤)

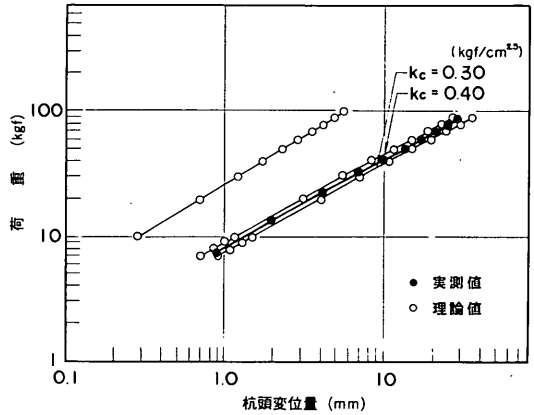


図-31 杭頭変位量と杭頭荷重の関係 (“緩い”捨石地盤)

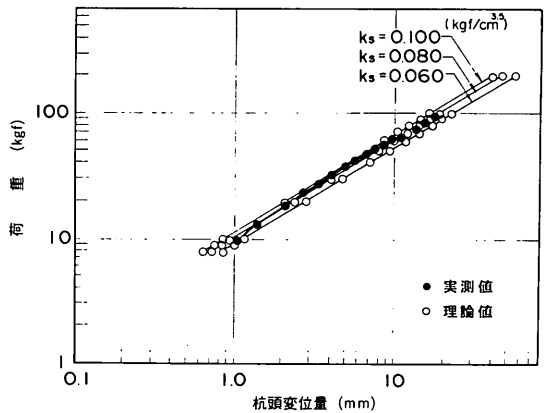


図-32 杭頭変位量と杭頭荷重の関係 (“密な”捨石地盤)

したものである。これらの図において、実験結果を港研方式の曲線と比較してみると、砂地盤および“密な”捨石地盤においては、どのケースの傾きもほぼ港研方式のS型地盤と等しい傾きを持ち、“緩い”捨石地盤および二層地盤においてはほとんどのケースにおいてC型地盤に相当する傾きを持つ。表-11, 12に一樣地盤と二層地盤の実験値より求めた  $k_s$  値を表にしてみた。“緩い”地盤においては  $k_s$  値を求め、( ) 内に示した。S型かC型か決めかねる場合にはどちらも求めた。

また、鋼管杭については  $EI$  が大きく根入れ比  $E_r$  (根入れ長  $l_{m1}$ ) が0.6よりも小さく、久保の分類による短杭の剛性杭の領域に入る。その挙動は回転運動に近いので、港研方式を適用した久保らによる短杭の計算



杭の横抵抗における捨石層の評価

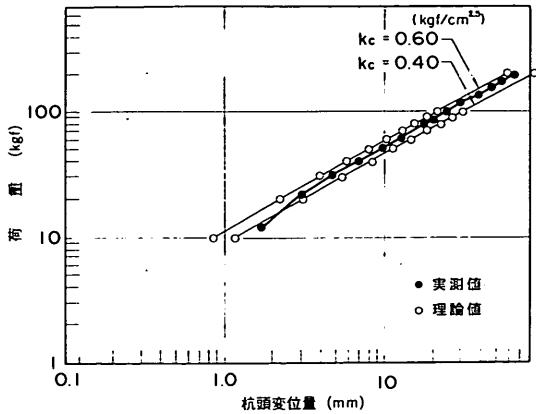


図-33 杭頭変位量と杭頭荷重の関係（二層地盤）

式<sup>15)</sup>を用いて解析した。図-34, 35は、杭幅の異なる杭について、杭頭荷重  $T$  と  $y_{top}$  の関係を両対数の図上にプロットしたものである。図中の実線および破線は、短杭のC型およびS型地盤の理論曲線を、横抵抗定数  $k_c$  または  $k_s$  の値を変化させて示したものである。これによると、いずれのケースにおいても  $k_c$  地盤の挙動を示し、その値は、碎石の場合  $0.85 \sim 1.10 \text{ kgf/m}^2.5$  となり板杭を用いて行った結果と比べて2倍程度大きな値となった。また、ウエルのような深い剛体基礎の挙動を林宮島の式を応用して解いた方法<sup>16)</sup>を用いて解析すると、碎石の場合  $0.48 \sim 0.87 \text{ kgf/cm}^2.5$  になり、傾向はよく一致しているが短杭の解析値と比べて小さな値をとる結果が得られた。これは、どの変位量のかによって、特に後者の場合に定数が変化するためと考えられる。ここでは短杭の計算結果を表-13に示す。

表-11 実験値より求めた  $k$  値一覧表（一様地盤、板杭）

杭の諸元			$k_s$ 値 ( )内は $k_c$ 値						
No.	厚さ (cm)	幅 (cm)	砂			碎石 ( $D_{max} = 40 \text{ mm}$ )		碎石 ( $D_{max} = 80 \text{ mm}$ )	
			緩い	中	密な	緩い	密な	緩い	密な
5	0.6	10					0.150		0.120
2	0.9		0.017	0.030	0.050 0.075 0.060	0.032 (0.33) 0.028 (0.30)	0.078 0.900	0.027 (0.29)	0.120
1	1.2						0.062	0.025 (0.34)	
3	1.6					0.030 (0.43)	0.060	0.025 (0.39)	
6	0.6	20					0.130	0.030 (0.30)	
7	0.9						0.070 0.080		
4	1.2					0.030 (0.42)	0.045	0.040 (0.35)	

表-12 実験値より求めた  $k$  値一覧表（二層地盤、板杭）

杭の諸元			マウンド形状		$k_s$ 値 ( )内は $k_c$ 値		
No.	厚さ (cm)	幅 (cm)	層厚 (cm)	肩幅 (cm)	砂 (密な)	碎石 (緩い)	
						$D_{max} = 40 \text{ mm}$	$D_{max} = 80 \text{ mm}$
2	0.9	10	10	80			0.095 (0.65)
				40			0.045 (0.45)
			20	80	0.060 (0.53)	0.058 (0.50)	0.065 (0.53)
				130		0.050 (0.51)	
4	0.6	20	10	130			0.040 (0.48)
				40		0.025 (0.36)	0.025 (0.35)
			20	130			0.030 (0.40)
				30	130		

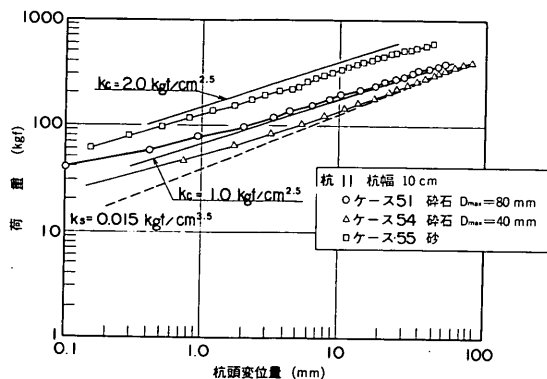


図-34 杭頭変位量と杭頭荷重の関係  
(鋼管杭, 杭幅10cm)

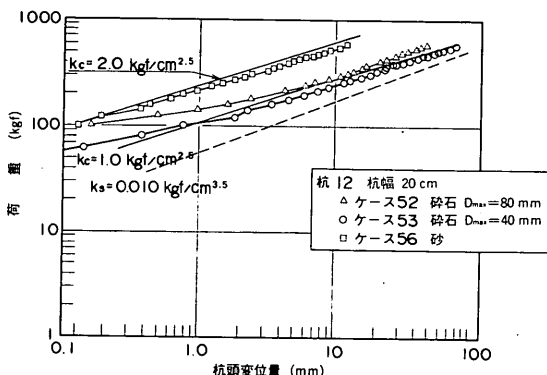


図-35 杭頭変位量と杭頭荷重の関係  
(鋼管杭, 杭幅20cm)

(2) 杭の剛性の影響

図-36, 37は, “密な” 捨石地盤と “緩い” 捨石地盤の場合について, 曲げモーメント分布を比較したものである。図からは,  $EI$  の大きい杭ほど曲げモーメント分布は杭先端部にまで及び, また,  $M_{max}$  の値は大きくなる

ており, その発生深さ  $l_{m,max}$  もしだいに下方に移っていくことがわかる。図-38, 39は, 同様な地盤の場合について, 杭の変位量の分布を比較したものである。 $EI$  が小さいほど地表面付近の変位量が大きくなることわかる。また,  $EI$  が大きいほど変位量の第1ゼロ点が

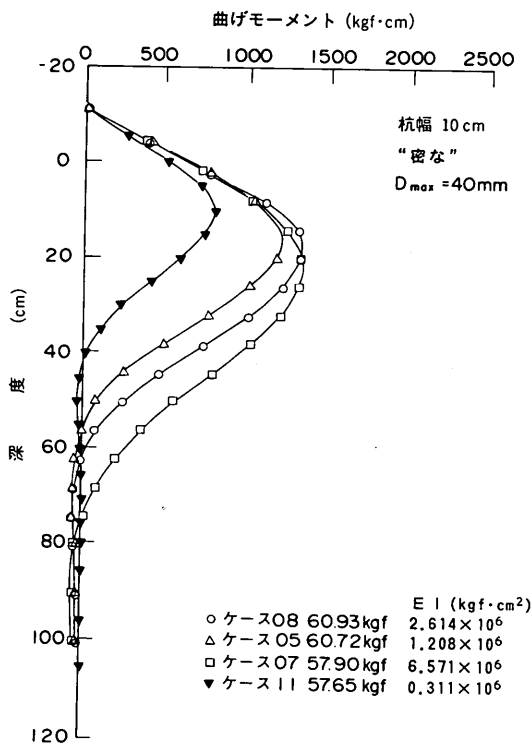


図-36 曲げモーメントと深度の関係  
(“密な” 捨石地盤)

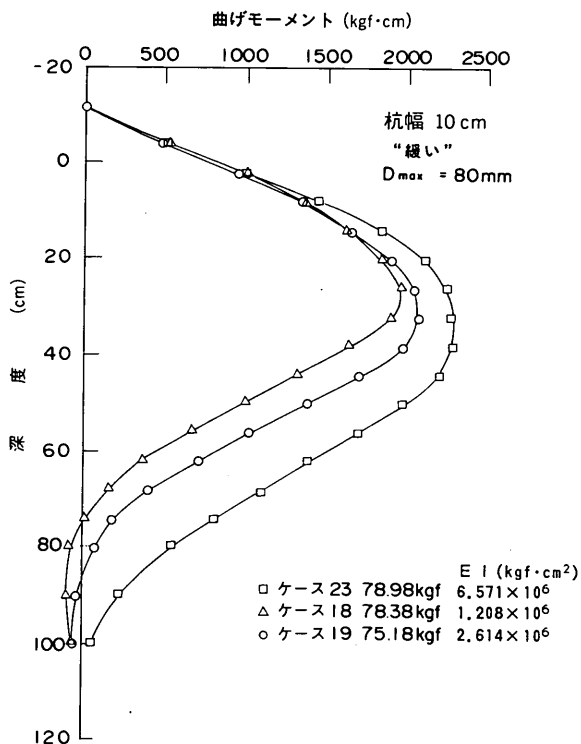


図-37 曲げモーメントと深度の関係  
(“緩い” 捨石地盤)

杭の横抵抗における捨石層の評価

表-13 計算値より求めた  $k_s$  値一覧表 (一様地盤, 鋼管杭)

No.	杭の諸元		$k_s$ 値 ( ) 内は $k_s$ 値		
	肉厚 (mm)	外径 (cm)	砂 (密 な)	碎石 (緩い)	
				$D_{max} = 40\text{mm}$	$D_{max} = 80\text{mm}$
11	8.1	10.16	0.036 (1.65)	0.015 (0.85)	0.020 (1.10)
12	8.2	21.63	0.031 (1.70)	0.012 (0.90)	0.015 (1.05)

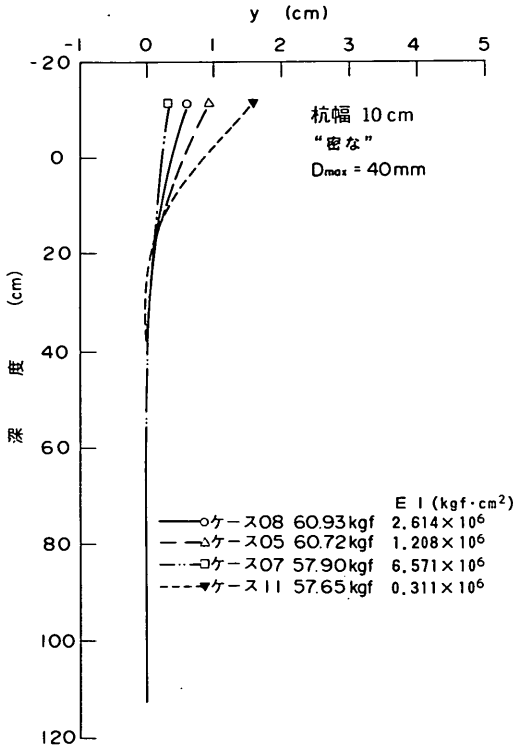


図-38 変位量と深度の関係  
("密な" 捨石地盤)

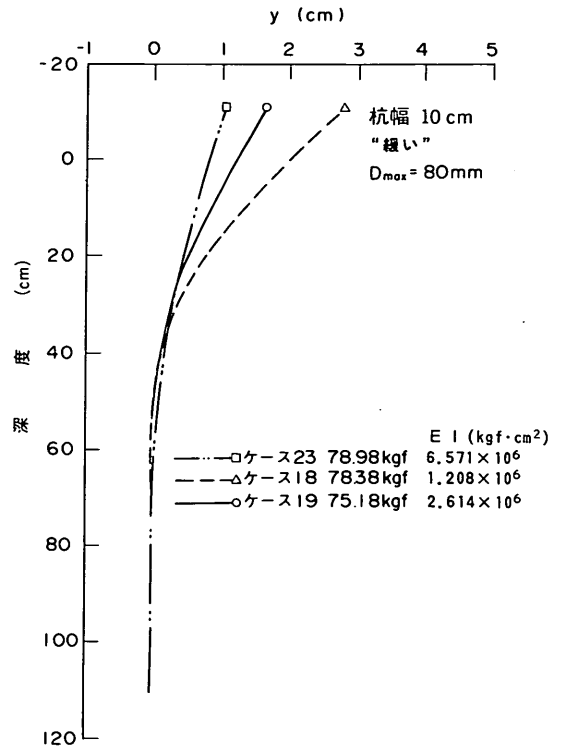


図-39 変位量と深度の関係  
("緩い" 捨石地盤)

下方に移って行くことがわかる。これらのことは、過去に久保らが、砂地盤で行った実験での杭の挙動<sup>1)</sup>と同じである。

以上のことから、捨石地盤中の杭において、 $EI$ の違いが杭の横抵抗に与える影響は砂地盤中でのものとほぼ同様と思われる。

(3) 杭幅の影響

図-40, 41は、杭幅と港研方式の横抵抗定数  $k_s$ ,  $k_c$  の値をプロットしたものである。全体的な傾向としては、杭幅が大きくなると  $k_s$  の値は小さくなっている。しかしながら、地盤条件がほとんど同じで杭幅のみ異なるケー

ス19と21にみられるように、 $k_s$ あるいは $k_c$ で評価してもまったく逆の現象が生じていることがある。この原因としては、杭幅が杭の横抵抗に与える影響として、碎石のような粗粒材と板杭との位置関係がどうであるかにより碎石と杭の間の力のやりとりが大きくなればつきがあり、それが杭の挙動に現れるのではないかと考えられる。そして、最大粒径が大きく杭幅が小さいほどこのような現象が現れる可能性が高いと思われる。

また、鋼管杭で行ったケース51~56に対して、 $k_s$ と杭幅の関係を示した図-42からは、杭幅が大きくなると杭の横抵抗力が小さくなっており、それは沢口ら<sup>10)</sup>が

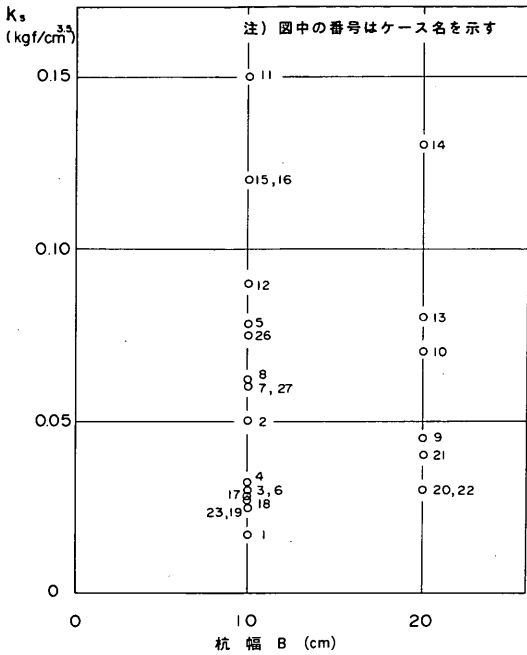


図-40 杭幅と  $k_s$  の関係

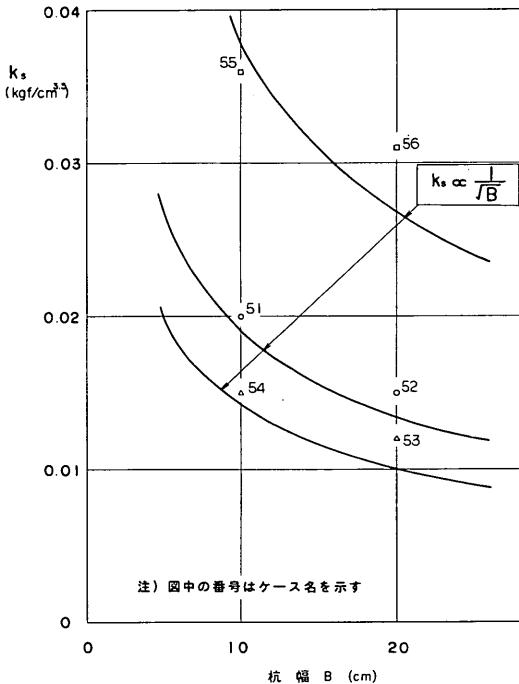


図-42 鋼管杭における杭幅と  $k_s$  の関係

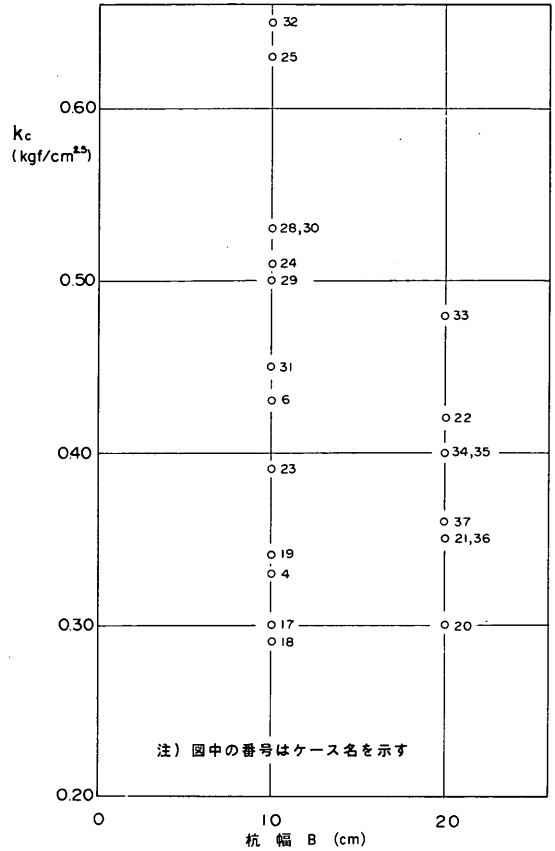


図-41 杭幅と  $k_c$  の関係

提案している  $1/B^{0.5}$  の曲線にほぼそう傾向にある。

(4) 最大粒径と杭幅の関係

杭幅  $B$  を最大粒径  $D_{\max}$  で除した値と  $k_s$  あるいは  $k_c$  の関係を図-43, 44 に示した。

$k_s$  で表される“密な”一様な捨石地盤で、杭幅 20 cm のケース 5, 12 と 16 を比較してみると、 $B/D_{\max}$  の値が大きいほど  $k_s$  の値が小さくなるような傾向にあると思われる。また、極端に  $EI$  の小さい杭 5 (杭幅 10 cm), 6 (杭幅 20 cm) のケース 11, 14, 15 を除くと全体的に右下がりの傾向にある。 $k_c$  で表される“緩い”一様捨石地盤 10 cm のケース 6 と 23, 杭幅 20 cm の 22 と 36, あるいは、鋼管杭のケース 51~54 からも“密な”一様捨石地盤のケースと同じように  $B/D_{\max}$  の値が大きいほど  $k_c$  の値が小さくなるような傾向にあると思われる。

(5) 捨石層厚の影響

捨石層厚の影響について、杭頭荷重と杭頭変位量関係および曲げモーメント分布からはあまり有為な差がみられなかった。

杭の横抵抗における捨石層の評価

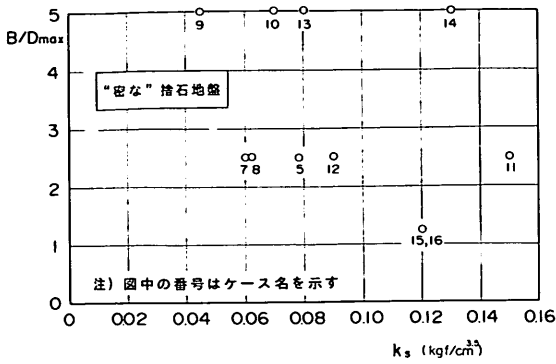


図-43  $k_s$  と  $B/D_{max}$  の関係 (“密な” 捨石地盤)

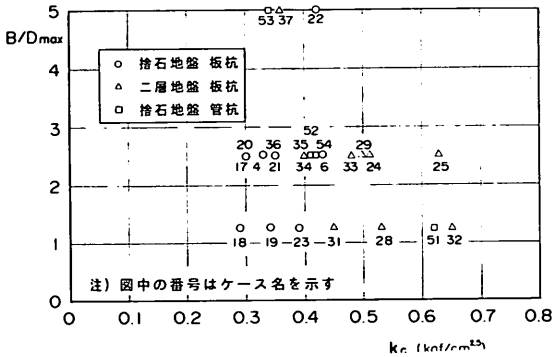


図-44  $k_c$  と  $B/D_{max}$  の関係 (“緩い” 捨石地盤)

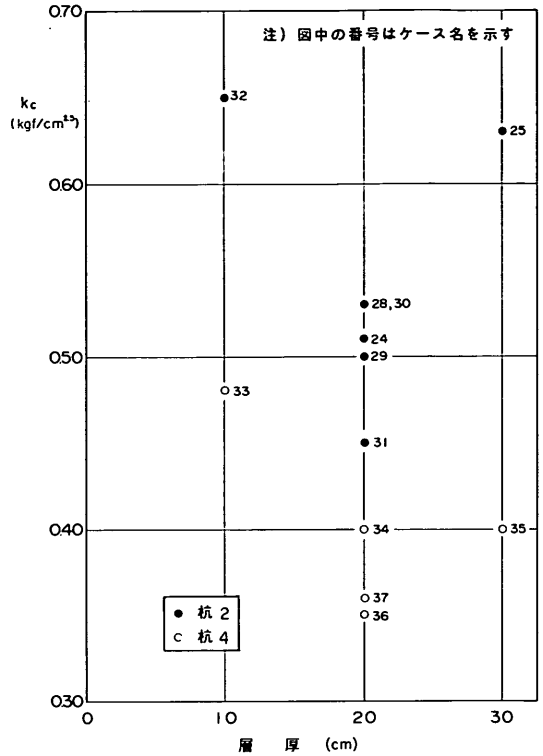


図-45 捨石層厚と  $k_c$  の関係

そこで、図-45に二層地盤における  $k_c$  値と捨石層厚の関係を示して検討してみた。全体的にみると、層厚が小さいほど  $k_c$  値が大きくなる傾向にある。特に層厚が10cmの場合には他と比較して大きく、下層の砂地盤の影響が強く現れているものと考えられる。これは、杭の横抵抗に支配的な範囲が  $(0.5 \sim 1) l_{m1}$  であることからいえることで、 $EI$  が小さく  $l_{m1}$  が短い場合には捨石層の影響が支配的でC型地盤の傾向を示し、 $EI$  が大きく  $l_{m1}$  が長い場合は杭頭変位量が大きくなるにつれてS型地盤の挙動に近づき、捨石層の影響を受けなくなるのである。

一様地盤の結果と比較してみると、 $EI$  の小さい杭2の場合、捨石地盤の  $k_c$  値は  $0.29 \sim 0.33 \text{ kgf/cm}^{2.5}$  であるのに対し二層地盤でのそれは  $0.50 \sim 0.65 \text{ kgf/cm}^{2.5}$  と2倍近く大きくなっている。これは、下層の砂地盤の  $k_c$  値が大きくなることによると思われる。また、杭2よりも下層の砂地盤の影響を受けやすいと思われる  $EI$  の大きな杭4の場合のそれは、 $0.35 \sim 0.42 \text{ kgf/cm}^{2.5}$  に対し  $0.35 \sim 0.48 \text{ kgf/cm}^{2.5}$  とほとんど変わらない。

(6) 法肩幅の影響

この影響については、図-15のケース24と29から、130cmと80cmでは差がなく、ケース28と31の80cmと40cmからは、杭頭変位量が10cm程度まではあまり差はないが変位量が大きくなるとマウンド肩幅40cmのほうが多少抵抗力が小さくなり、その後ある程度変位が増してくると、また同じような抵抗力を示すようになっていく。また、実験中においても100kgfを越えたあたりから法肩あたりの碎石が動いているのが見られた。また、杭4についてのケース33～37においても(図-16参照)、法肩幅40cmの場合に変位量が大きくなるが、80cmと130cmの場合にはあまり大きな差はないことがいえる。また、 $k_c$  値から見ても(図-44, 45参照)、ケース31, 36, 37のように法肩幅が40cmの場合、80cmや130cmと比べて小さい値となった。

3.5 地盤反力および地盤反力係数

(1) 変位量と地盤反力関係

測定された曲げモーメントの値から、地盤反力と変位量の関係について考察するため、地盤反力および変位量

を以下の式により計算した。

図-46のように、一部が地中にある杭に杭頭荷重  $T$  が作用した場合、杭を弾性梁と仮定すると次式が成り立つ。

$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$EI$  : 杭の曲げ剛性 (kgf・cm<sup>2</sup>)

$x$  : 地表面からの深さ (cm)

$y$  : 深さ  $x$  における杭の変位量 (cm)

そして、式(1)を1回微分、2回微分することによって、以下の式(2), (3)が求まる。

$$S = \frac{dM}{dx} = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} \dots\dots\dots (2)$$

$$P = pB = \frac{dS}{dx} = -EI \frac{d^4 y}{dx^4} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$S$  : 深さ  $x$  における杭のせん断力 (kgf)

$P$  : 深さ  $x$  における杭の単位長さあたりの地盤反力 (kgf/cm)

$p$  : 深さ  $x$  における単位面積あたりの地盤反力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$B$  : 杭幅 (cm)

また、式(1)を1回積分、2回積分することによって、以下の式(4), (5)が求まる。

$$y' = i = \frac{dy}{dx} = \int \left( -\frac{M}{EI} \right) dx \dots\dots\dots (4)$$

$$y = \iint \left( -\frac{M}{EI} \right) dx dx \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$y'$  : 深さ  $x$  における杭の撓み角 (ラジアン)

$y$  : 深さ  $x$  における杭の水平変位量 (cm)

以上の式に測定された曲げモーメント  $M$  を代入することにより、地盤反力および変位量を計算した。

図-47～50は、“密な”砂，“緩い”捨石，“密な”捨石，二層の各地盤における杭の横抵抗に大きな影響を与える地表面付近における各ゲージ深さの地盤反力と変位量  $y$  の関係を処女載荷の最大荷重に至るまでのステップについて、ゲージ取り付け位置において両対数の図上で検討したものである。ただし、縦軸は、 $P$  を杭幅  $B$  と地表面からの深さ  $x$  で除した値である。 $P$  の値として他項式で2回微分したものをを用いているため、グラフ

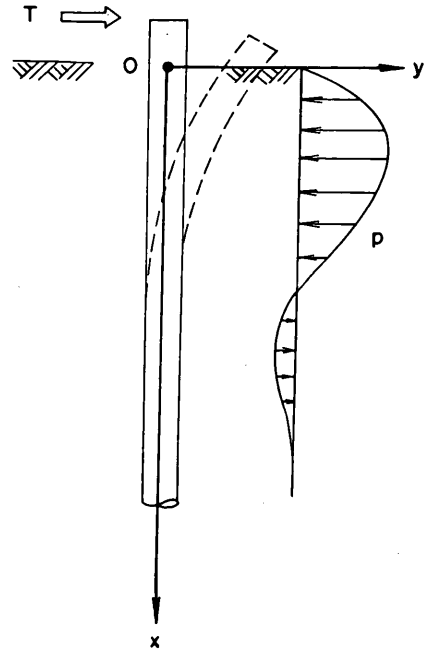


図-46 座標系

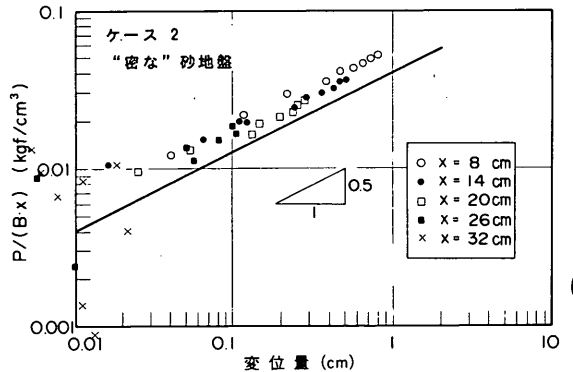


図-47 変位量と地盤反力の関係 (“密な”砂地盤)

に若干のばらつきはみられるものの、捨石中で行ったいずれのケースのどのゲージ位置についても  $P/(B \cdot x) - y$  関係の傾きがほぼ0.5となっていることがわかる。これは港研方式の特徴であり、 $P/(B \cdot x) - y$  関係から本実験結果が港研方式で表されることがわかる。

しかしながら、本来  $P/(B \cdot x) - y^{0.5}$  関係が正しく成立する場合には、この関係図から  $k$  値が定まるべく一直線上に集まらなければならないのであるが、これらの図はそれらを十分満たしているとはいいがたい。この

杭の横抵抗における捨石層の評価

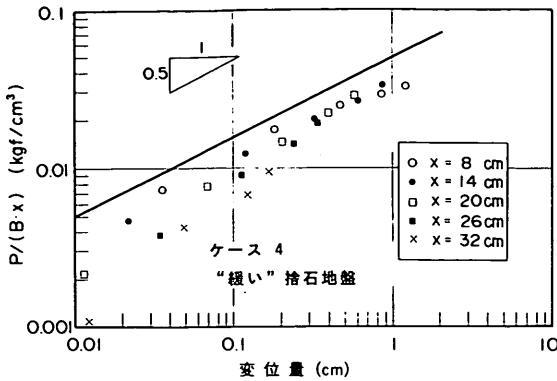


図-48 変位量と地盤反力の関係 (“緩い” 捨石地盤)

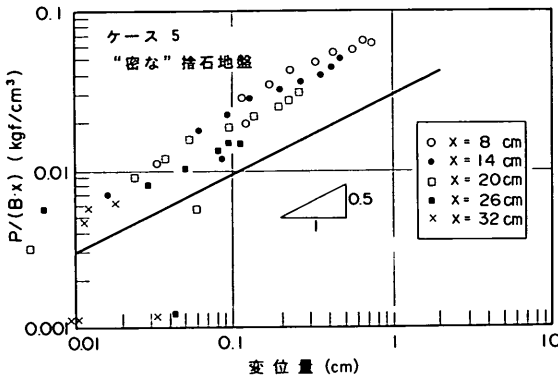


図-49 変位量と地盤反力の関係 (“緩い” 捨石地盤)

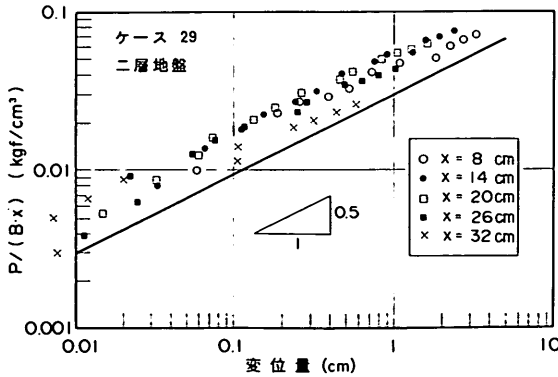


図-50 変位量と地盤反力の関係 (二層地盤)

原因として、 $x$  方向（深度方向）の地盤反力分布が一次的に増加する傾向にないのではないかと考えられる。これについては、次に詳しく述べることにする。

(2) 地盤反力および地盤反力係数の深さ方向の分布  
ここでは、横方向地盤反力係数  $k$  値の深さ方向の分布について検討した。前項において本実験の  $p-y$  関係が対数図上では  $0.5$  の傾きを有することが判明していることから、今回の実験結果について少なくとも次式が成立すると思われる。

$$p = K(x) y^{0.5} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$K(x)$  : 深さ  $x$  における杭の変位量と地盤反力の関係を表す係数

図-51~53は、一様地盤の砂地盤、捨石地盤の杭幅の異なるケースについて、上記の式中の  $K(x)$  の値を、地表面付近のゲージ取り付け位置の深さにおいて求めプロットしたものである。図中の実線および破線は、表-11で記してある処女載荷時の  $T-y_{top}$  関係から求めた港研方式の横抵抗定数  $k_s$  および  $k_c$  の値を示したものである。この分布は、“密な”地盤においては図中の港研

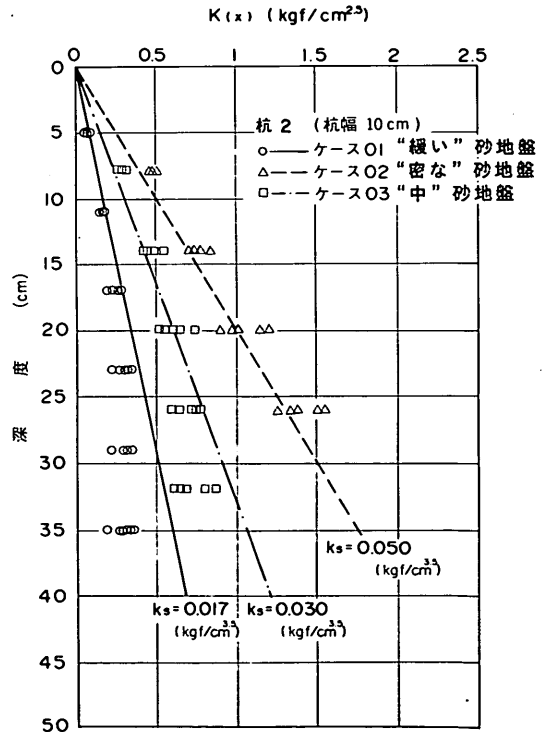


図-51  $K(x)$  と深度の関係 (砂地盤)

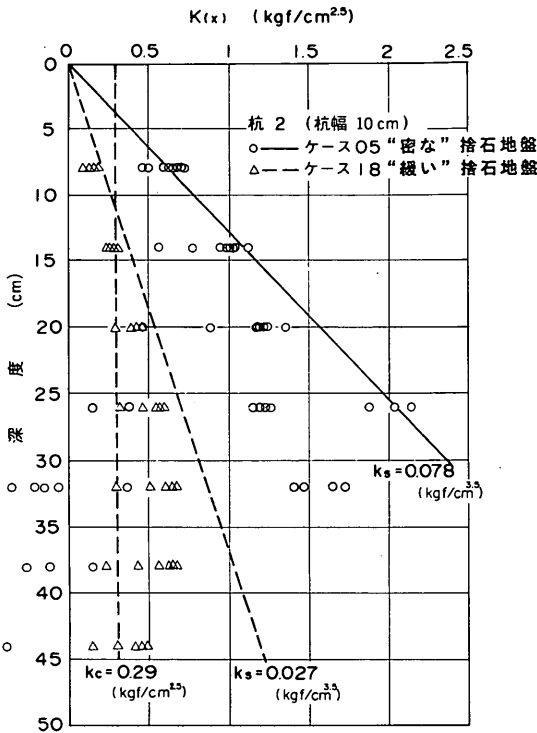


図-52  $K(x)$  と深度の関係 (捨石地盤, 杭幅10cm)

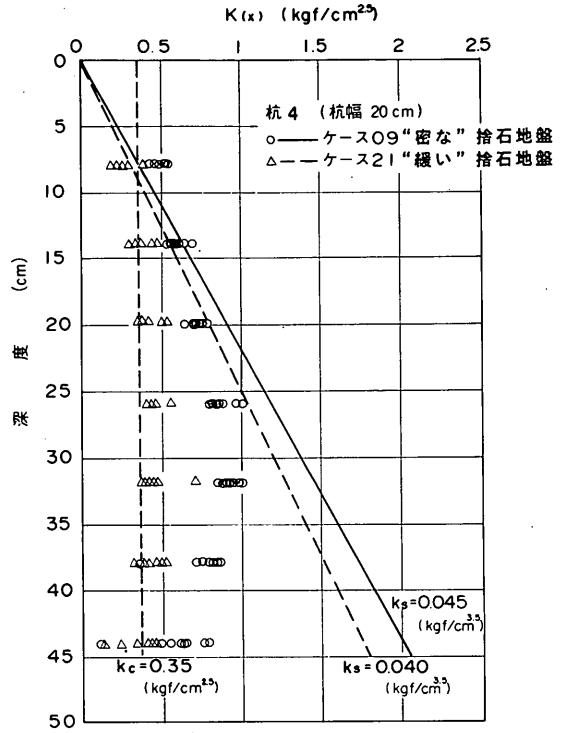


図-53  $K(x)$  と深度の関係 (捨石地盤, 杭幅20 cm)

方式の横抵抗定数  $k_c$  が、 $K(x)$  分布のほぼ中間に位置しており、 $T-y_{top}$  関係から求めた港研方式の  $k_c$  が妥当な値であったことがわかる。“緩い”地盤においては  $k_c$  の分布のようにあまり深度に影響することはなく、地表面付近の  $K(x)$  に近くなる傾向にある。また、これらの図の中には、 $k_c$  か  $k_s$  が決めかねるような分布形状を示す場合がある。その分布は、 $K(x) \propto x^{0.5}$  の関係に近似が可能なものではないかと思われるものもあるので、3.4で求めた  $k_c$  か  $k_s$  値を用いて、 $P/(B \cdot x^{0.5}) - y$  関係を見てみるとほぼ一直線上に集まるようになる。これは、 $p = k \cdot x^{0.5} \cdot y^{0.5}$  の関係を表すものであり、三軸試験の結果においても拘束圧の増加にともない  $\phi_c$  が小さくなることからみても妥当な結果である。

また、結果は示していないが、ケース11と15(杭5)、4と18(杭2)、6と23(杭3)、22と21(杭4)の比較(各前者  $D_{max} = 40\text{mm}$ 、後者  $D_{max} = 80\text{mm}$ )などから最大粒径が異なる場合においても  $p-y$  が約0.5の傾きをもつことや、 $K(x)$  の深さ方向の分布に違いないことがわかった。

### 3.6 土槽壁の影響

砕石を用いた実験においては、砂地盤の場合と異なり、

砕石一個一個の粒径が大きいことのため、杭と土槽壁の間の距離が砕石の粒径に比べて小さいこと、砕石の個々の重さによる影響が現地と異なることなどの問題が懸念された。そこで、その影響が杭の挙動にどれだけ影響を及ぼすかについて、土槽の壁に作用する水平力(壁水平作用力と以下称する)を測定した。

杭幅20cmの板杭と管杭について、杭頭荷重と壁水平作用力をそれぞれ図-54、55に、また、ケース22の杭頭変位量と壁水平作用力関係について図-56に示す。

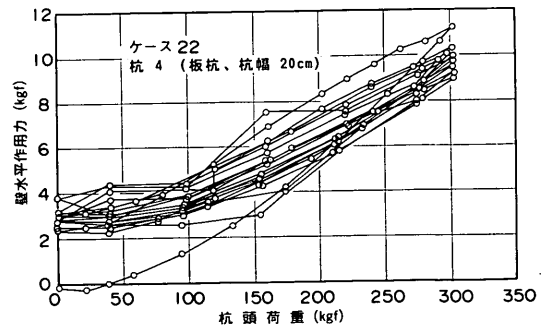


図-54 杭頭荷重と壁水平作用力の関係 (板状杭)



杭の横抵抗における捨石層の評価

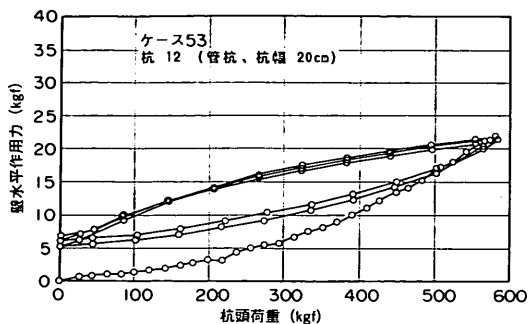


図-55 杭頭荷重と壁水平作用力の関係 (管杭)

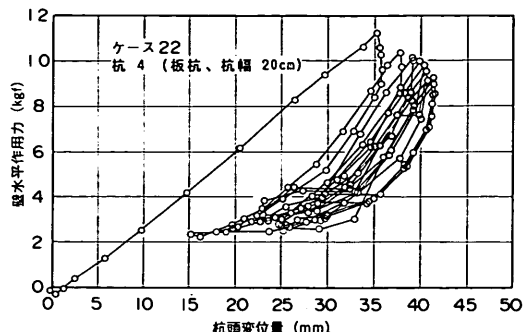


図-56 杭頭荷重と壁水平作用力の関係 (板状杭)

これらから、繰返し載荷時に杭がたわみ性の場合 (板杭) には、載荷時および除荷時においていずれも凹な挙動を示すのに対し、剛性の場合 (管杭) には、載荷時において凹な、除荷時においては凸な挙動を示すといった違いがみられるが、この関係はいずれも杭と壁の間にある地盤の弾性的な挙動を示している。また、図-56からは、杭頭変位量と壁水平作用力との関係が一次的であることがわかる。

ケース21~27およびケース51~56において測定された壁圧を表-14に示す。碎石の場合のケース21と23を見てみると、杭頭変位量が約2cmのときに、杭幅20cmでは最大粒径に関係なく約3gf/cm<sup>2</sup>、杭幅が10cmでは約2.3gf/cm<sup>2</sup>弱の力が作用している。しかし、こ

の壁圧の大きさは、杭に作用する杭頭荷重からみて非常に小さいものである。また、壁水平作用力は、碎石の粒径の違いに関係なく、杭頭変位量にほぼ比例しており、杭幅が大きいほど壁に作用する力が大きいことがいえる。

4. 考 察

4.1 地盤の定数と杭の横抵抗の関係

図-57は、3.4において求めた、各実験値の港研方式の横抵抗定数 $k_s$ と各実験における単位体積重量 $\gamma$ の値の関係について示したものである。莊司<sup>5)</sup>および高橋<sup>7)</sup>らは、内部摩擦角 $\phi_d$ と間隙比 $e_0$ の関係について、碎石を用いて行った大型三軸試験の結果に、最上の式<sup>10)</sup>

表-14 壁 圧 実 験 結 果

ケース名	杭幅 (cm)	厚さ (cm)	地 盤	強 さ	壁板幅 (cm)	壁板高 (cm)	壁 圧 (gf/cm <sup>2</sup> )			
							y=10mm	y=20mm	y=30mm	最大値 (y <sub>max</sub> )
G200-21	20	1.2	碎石80mm	緩い	50	40	0.904	3.054	4.383	4.383 (29.1)
G200-22	20	1.2	碎石40mm	"	50	40	1.272	3.084	4.472	5.631 (35.3)
G100-23	10	1.6	碎石80mm	"	50	40	0.737	2.292	0.000	2.292 (19.9)
G100-24	10	0.9	2層40mm	"	50	20	1.014	2.091	2.366	8.015 (66.9)
G100-25	10	0.9	"	"	50	40	0.578	1.342	1.740	3.100 (52.2)
S100-26	10	0.9	砂	密な	50	40	0.113	0.227	0.312	0.595 (60.9)
S100-27	10	0.9	"	"	50	40	0.423	0.846	1.155	2.931 (61.7)
G100-51	10.16	8.1	碎石80mm	緩い	50	40	1.319	2.015	2.745	5.607 (60.6)
G200-52	21.63	8.2	"	"	50	40	1.989	3.674	5.691	8.273 (47.4)
G200-53	21.63	8.2	碎石40mm	"	50	40	2.525	3.787	5.553	10.968 (77.3)
G100-54	10.16	8.1	"	"	50	40	0.898	1.795	2.384	5.695 (94.6)
S100-55	10.16	8.1	砂	密な	50	40	4.800	9.826	13.300	18.613 (48.3)
S200-56	21.63	8.2	"	"	50	40	13.299	0.000	0.000	14.570 (12.2)

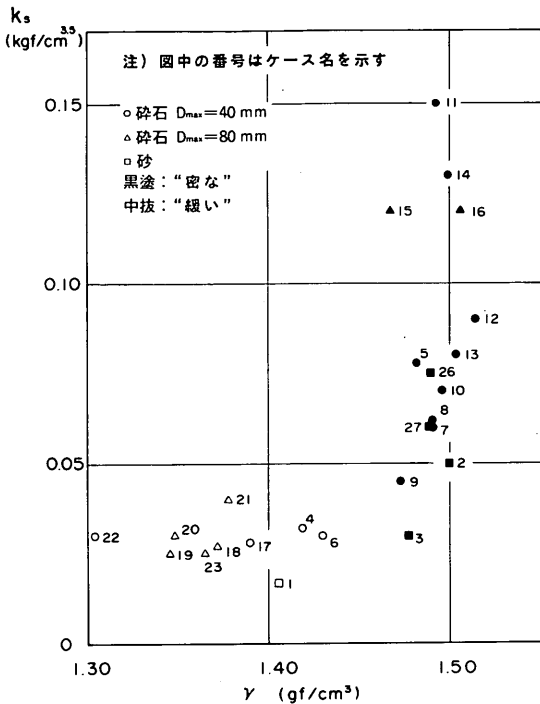


図-57 単位体積重量  $\gamma$  と  $k_s$  の関係

が適用可能であることを述べている。その中では本実験で用いた碎石と同じいわき市産の碎石に対して  $\phi_d$  と  $e_0$  の関係について、 $k_i = 0.74$  を求めている。

$$\sin \phi_d = \frac{3k_i}{2(1+e_0) + k_i} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$k_i$  : 最上の定数 ( $k_i = 0.74$ )

$e_0$  : 間隙比

そこで、図-58は模型地盤に対して得られている  $e_0$  の値と、高橋らが提案している上記の数値を使って求まる  $\phi_d$  と  $k_s$  の関係について示したものである。両図からは、捨石地盤、砂地盤の双方について、 $\gamma - k_s$  関係、 $\phi_d - k_s$  関係はあまりよい相関をもっているとはいえない。また、同様な  $\gamma$  を有する捨石地盤と砂地盤では、捨石地盤の横抵抗定数  $k_s$  のほうが、砂地盤の  $k_s$  の値より大きめの値となる傾向を示している。

砂地盤中で、 $\gamma$  や  $\phi_d$  の地盤の定数と  $k_s$  の関係がよい相関をもつことは久保や沢口らによって報告されており、また、沢口は受働土圧係数  $K_p$  と単位体積重量  $\gamma$  を乗じた値  $K_p \gamma$  と  $k_s$  について、式(8)を提案している。

$$k_s = 2K_p \gamma \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

$K_p$  : Caquot-Kérisel による受働土圧係数

$\gamma$  : 地盤の単位体積重量 ( $gf/cm^3$ )

図-59は、沢口の提案している上式が捨石地盤につ

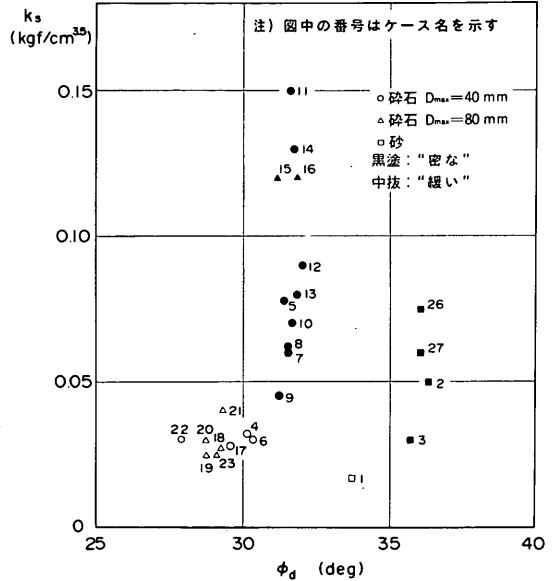


図-58  $\phi_d$  と  $k_s$  の関係

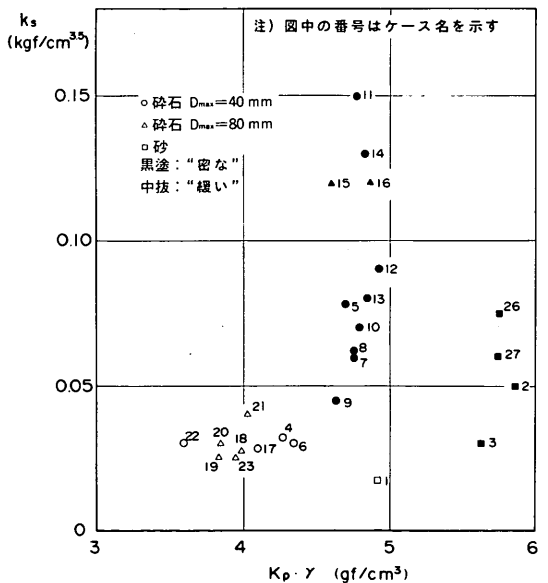


図-59  $K_p \cdot \gamma$  と  $k_s$  の関係

## 杭の横抵抗における捨石層の評価

いて成り立つかどうか、一様地盤の実験を行ったケースについて検討したものである。なお、図中の  $K_p$  の値については、クーロン土圧から、壁面摩擦角  $\delta = 15^\circ$  として求めたものを用いた。なお、沢口は  $K_p$  の値を *Caquot-Kérisel*<sup>10)</sup> の受働土圧係数を用いているが、 $K_p$  を求める際の図表の精度から、クーロン土圧の値を用いても実験結果を大局的に検討するには、特別支障がないものと思われる。

$D_{max} = 40\text{ mm}$  を用いたケースについて、図からは、捨石地盤についても一般的な砂地盤の場合と同様に  $k_s$  と  $K_p$ 、 $\gamma$  の関係があまりよい相関をもっているとはいえない。捨石地盤中での実験結果は沢口が提案する式(8)が示す直線のかなり上方に位置していることがわかる。これは、 $\gamma$ 、 $\phi_d$  のとりうる範囲が砂地盤よりも狭いために、捨石地盤のほうが、砂地盤に比べて  $k_s$  の値に与える影響が大きく、また、 $k_s$  の絶対値も捨石地盤の  $k_s$  の値のほうが砂地盤の値に比べて大きくなる。これらの影響が合わさって、このような結果が得られたものと思われる。 $D_{max} = 80\text{ mm}$  を用いたケースについても同様に  $k_s - \gamma$ 、 $k_s - \phi_d$  および  $k_s - K_p$ 、 $\gamma$  関係について検討を行った。しかしながら、 $k_s$ 、 $K_p$ 、 $\gamma$  などに中間的な値がないため相関関係について明確に述べることはできなかった。

### 4.2 港研方式による解析値と実験結果の比較

これまで、捨石地盤中の杭頭荷重  $T$  と杭頭変位量  $y_{top}$  の関係は、港研方式の理論曲線とほぼ等しい傾き

を有していること、また、地盤反力  $p$  が変位量  $y$  の 0.5 乗に比例し、その分布が地表面付近において、“密な”地盤では直線的に増加し、“緩い”地盤ではあまり変化しないことが実験結果より示された。以上のことから、捨石地盤中での杭の横抵抗についても、港湾構造物に用いる杭の横抵抗を計算する際に、もっとも一般的な算定法として挙げられる港研方式の適用が可能であると推測される。ここでは、3.4において求めた港研方式の S 型および C 型地盤での横抵抗定数  $k_s$ 、 $k_c$  を用いて、港研方式により本実験を解析した。解析に当っては、計算機を用いて数値計算を行った。

まず一様地盤の場合であるが、図-60は、“密な”砂地盤のケース2について、処女載荷の最大荷重が作用するステップにおいて、実測値と港研方式の解析結果を変位量（撓み量） $y$ 、撓み角  $y'$ 、曲げモーメント  $M$ 、せん断力  $S$ 、地盤反力  $p$  の値について比較したものである。これにより、荷重～杭頭変位量関係から得られた  $k_s$  値を用いて求められた地盤反力分布とよく合うことがわかる。また、捨石地盤で行ったケース5（“密な”）、17（“緩い”）について図-61、62に示した。この結果からも“密な”地盤においては  $k_s$  値、“緩い”地盤においては  $k_c$  値を用いて解析することによって、荷重～杭頭変位量関係から求められた結果との整合性がよいといえる。しかしながら、両者を比べると、S 型と C 型の中間的な位置に実験結果はあるように思われる。

二層地盤の場合には、捨石層は荷重と杭頭変位量関係

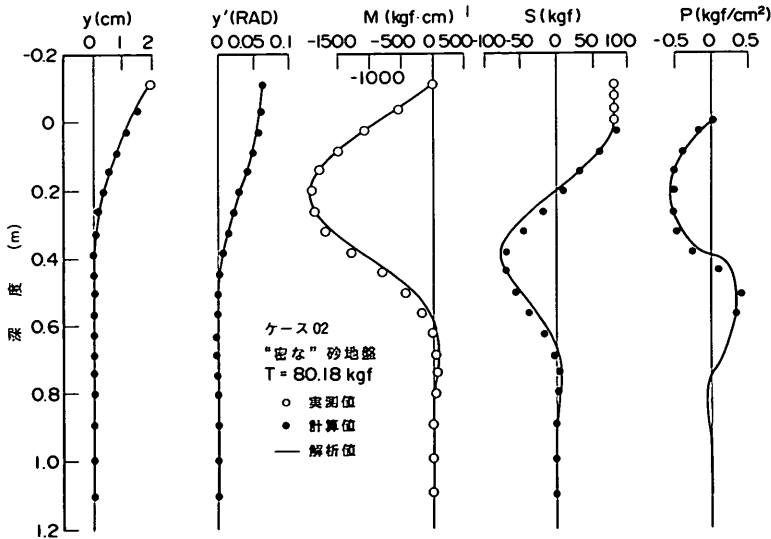


図-60 実験値と計算値の比較（砂地盤）

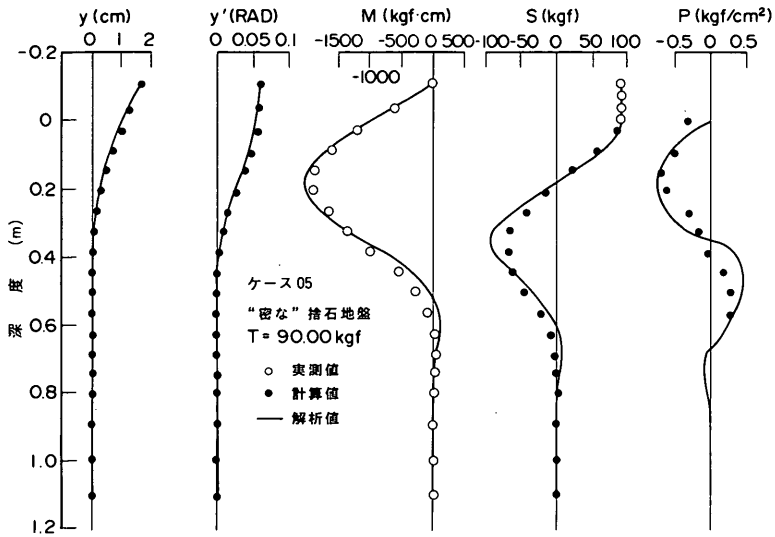


図-61 実験値と計算値の比較 (“密な”捨石地盤)

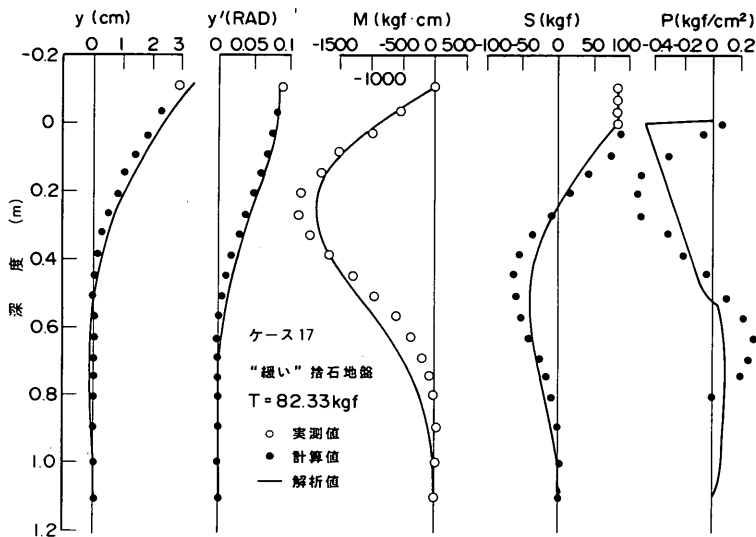


図-62 実験値と計算値の比較 (“緩い”捨石地盤)

から求められた $k_s$ 値を、砂層については一様地盤のケース2などから求められた $k_s$ 値を用いて解析を行った。捨石層厚を10, 20, 30cmと変化させたケース32, 24, 25の結果を図-63~65に示す。表層近くの地盤反力分布は一致していないにもかかわらず、モーメント分布やその特異点の位置、捨石層部のせん断力の分布などよく対応していることがわかる。

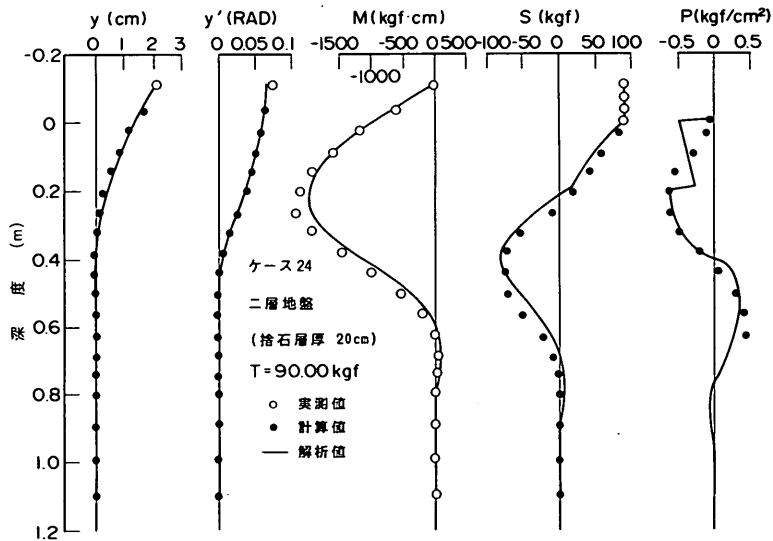
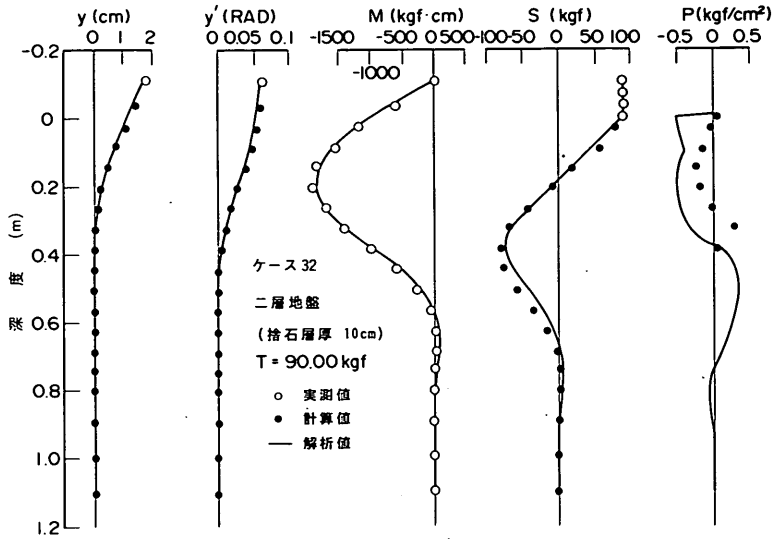
#### 4.3 現地実験結果の検討

##### (1) 試験概要

Y港において、-14mの大水深栈橋が建設されることになり、鋼管杭について総合的な試験が行われた<sup>19)</sup>。そのうちの水平載荷試験についてここで取り上げてみる。

水平載荷試験は、図-66に示されるように、No.1 ( $\phi 600$ mm), No.2 ( $\phi 1,117.6$ mm), No.3 ( $\phi 1,117.6$

杭の横抵抗における捨石層の評価



mm) の3本の杭について、捨石マウンド施工前と施工後に行われた。ここでは、No. 3の杭の一方荷重試験について述べていくことにする。周辺の地盤条件は図-67に示されるとおりである。

(2) 試験結果

まず、杭頭変位に関しては、杭の頭部変位および地表面変位と杭頭荷重の関係を両対数上にプロットすると図-68のように表される。図中の実線は港研方式のC型地

盤について求めたものである。これにより、 $N$  値の深さ方向分布が一定であることや実験値の傾きからC型地盤として評価できる。そして、 $k_s$  値は捨石層の施工前では  $1.9 \text{ kgf/cm}^{2.5}$  であるのに対し、捨石層施工後においては  $0.7 \text{ kgf/cm}^{2.5}$  程度であり、 $N$  値で評価すると、それぞれ8と1~2程度の地盤であるといえる。

また、曲げモーメントに関しては、図-69に、No. 3の杭における水平荷重24tf 載荷時の、実測値と解析結

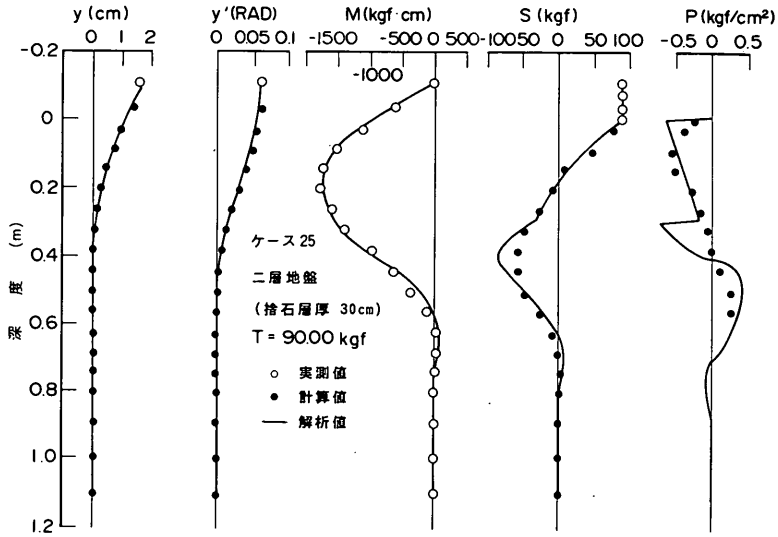


図-65 実験値と計算値の比較 (二層地盤, 捨石層厚 30 cm)

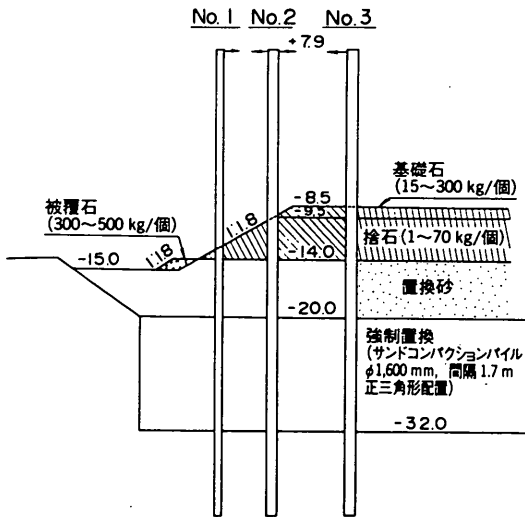


図-66 現地実験の杭条件

果の曲げモーメント分布を、捨石マウンド施工前後について示した。この実験結果の解析には港研方式の杭の横抵抗計算法を用いて検討した。はじめに捨石マウンド施工前において、置換砂層と強制置換層の二層地盤と考え計算を行った。置換砂層は杭頭変位関係から  $k_s$  値  $1.9 \text{ kgf/cm}^2$ 、強制置換層については  $N$  値が 20 程度であることから  $k_s$  値  $0.006 \text{ kgf/cm}^3$  と推定し行った計算結果は、地盤を強く評価したものとなり実測値の曲げモー

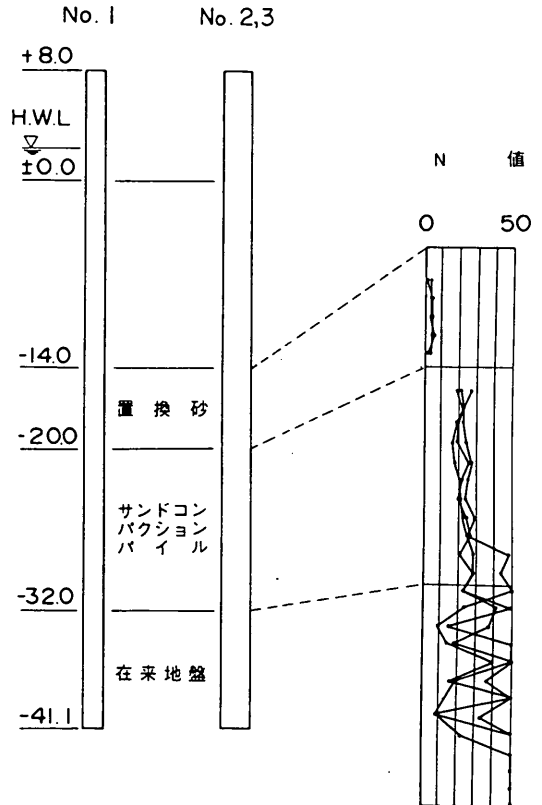


図-67 周辺の地盤状態

杭の横抵抗における捨石層の評価

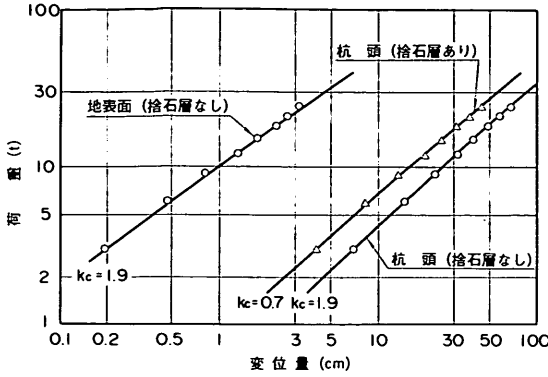


図-68 杭頭および地表面変位量と杭頭荷重の関係

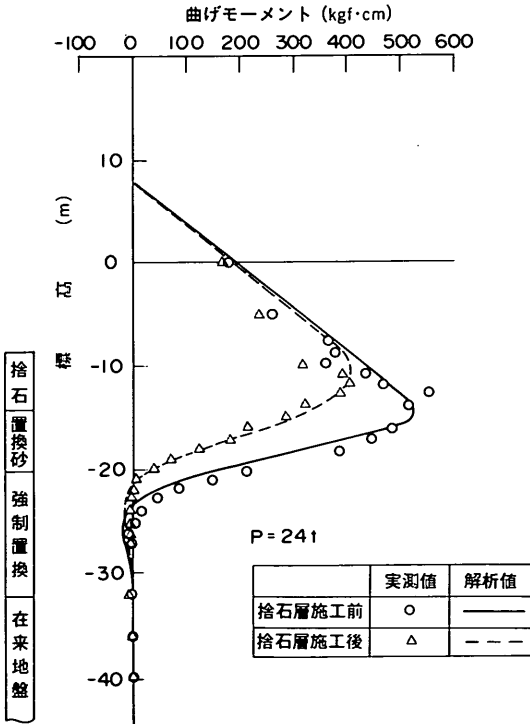


図-69 曲げモーメント分布の実測値と解析値との比較

メント分布とはかなり異なるものとなった。そこで強制置換層においては実測値のモーメント分布からC型地盤と評価して $k_c$ 値を $3 \text{ kgf/cm}^2$ 、置換砂層の $k_c$ 値を $0.07 \text{ kgf/cm}^2$ として検討すると実測値のモーメント分布と最も一致する結果となった。次に捨石マウンド施工後の場合について、捨石マウンド施工前の二層の上に捨石層がある三層地盤と考えると計算を行った。置換砂層と強制置換層は、捨石マウンド施工前において実測値と最

も一致した値を用いて検討すると、捨石層についてはC型地盤とし $k_c$ 値を $0.1 \text{ kgf/cm}^2$ 程度としたとき最も実測値のモーメント分布と一致する結果となった。

以上のことから、捨石層の $k_c$ 値は非常に小さく、 $N$ 値で評価すると1程度の地盤であること、しかしながら、捨石層の存在により杭の自由長が短くなることにより、杭頭変位の減少、最大曲げモーメントの減少などの効果が期待できることが示された。

5. 結論

捨石地盤中の杭の横抵抗に関する挙動を明らかにするため、最大粒径 $D_{max} = 40 \text{ mm}$ と $80 \text{ mm}$ の碎石を用いて作成した一様地盤、および、実際の状況を想定した二層地盤中において、杭の静的な水平載荷実験を行った。捨石材については、最大粒径や単位体積重量などの影響を調べるため、中型三軸圧縮試験機を用いて低拘束圧下でのせん断特性を調べた。模型杭に関しては、杭幅、剛性 $(EI)$ 、杭形状(板と管)などの影響について板杭を7本、管杭を2本用いて調べた。これら捨石材のような粗粒材料に関する一連の室内模型実験により、次の事項が明らかになった。

(1) 地盤反力 $p$ と変位 $y$ の関係は、両対数図面上でほぼ0.5の傾きを持ち、港研方式杭の横抵抗計算法が成り立っている。

(2) 捨石地盤の締めめ地盤( $\gamma = 1.5 \text{ tf/m}^3$ 程度)と緩い地盤( $\gamma = 1.35 \text{ tf/m}^3$ 程度)とでは、 $T - y_{top}$ 関係に違いがみられ、それぞれ港研方式のS型とC型地盤と評価できた。また、二層地盤はC型地盤で近似できた。

(3)  $T - y_{top}$ 関係から求めた港研方式の横抵抗定数を用いることによって、捨石地盤や二層地盤においても、杭の挙動を評価し検討することが可能である。

(4) 捨石地盤中の杭の曲げ剛性 $EI$ の影響は、砂地盤中での $EI$ の影響と同様である。

(5) 最大粒径 $D_{max}$ の影響として、鋼管杭の場合、杭径 $B/D_{max}$ が小さくなるほど横抵抗定数が大きくなった。

(6) 繰返し荷重の影響は、杭頭変位に関しては、砂地盤の場合と同様であり、処女載荷時に生じる杭頭変位の1.4倍以内に収まった。また、曲げモーメント分布は、捨石地盤の場合には砂と同じであるが、二層地盤では最大値が小さくなり、分布が下に下がる傾向が認められた。

(7) 現地実験の結果からは、捨石層の横抵抗が小さいといえる。またその地盤は、室内実験における緩い地盤

に相当しC型地盤として評価できた。

## 6. あとがき

大水深の構造物の重要性がますます大きくなったので、難しい実験であることは予想できていたが、このような実験にとりかかった。案の定困難な実験で、結果のばらつきも非常に大きく、解析および考察は、極めて困難であった。

模型実験の結果としては、本論に記述したような横抵抗定数を用いて、港研方式により検討できることがわかった。したがって、現場においても、港研方式により捨石地盤中の杭の横抵抗を検討すること自体には、問題がないと思われる。しかし、その際の定数の選定においては、この模型実験から数値を示すことは残念ながら難しい。実際の設計に当たっては、地盤条件、構造条件、構造物の重要度などを考慮して、十分な検討の後に、数値を決定するように望まれる。その際、4.2に記した例は参考になると思う。

また、そのような検討における精度を高めるためにも、実物の測定によるデータの集積は最も重要であることは、もちろんである。(1991年3月31日受付)

## 謝 辞

本実験の初期における実験計画および実験にあたっては、元基礎工研究室の春日井康夫研究官(現計画設計基準部)、針金誠悦研究員(現第一港湾建設局)の努力によるところが大きい。中型三軸圧縮試験においては、動土質研究室にたいへんお世話になった。そして、結果の解析、図面整理などの作業には、現基礎工研究室の朝木祐次研究員の手をわずらわせた。また、佐藤勝久土質部長には、広い視野から丁寧に検討していただき、適切な助言を数多く頂いた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献 一 覧

- 1) 篠原登美雄, 久保浩一: 杭の横抵抗に関する実験的研究(その1), -垂直自由端単杭の横抵抗-, 運輸技術研究所報告書, Vol. 11, No. 6, 1961年7月, pp. 169~242.
- 2) 久保浩一: 杭の横抵抗に関する実験的研究(その2), -地盤条件と杭の横抵抗について-, 運輸技術研究所報告書, Vol. 11, No. 12, 1962年2月, pp. 533~559.
- 3) 久保浩一: 杭の横抵抗に関する実験的研究(その3), -斜杭および杭頭固定杭-, 運輸技術研究所報告書, Vol. 12, No. 2, 1962年3月(再版), pp. 181~205.
- 4) 久保浩一: 杭の横抵抗の新しい計算法(附図表), 運輸技術研究所報告書, Vol. 2, No. 3, 1964年3月.
- 5) 荘司喜博: 大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察, 港湾技術研究所報告, Vol. 22, No. 4, 1983年12月, pp. 59~120.
- 6) 高橋邦夫, 富田幸晴: 捨石マウンドの支持力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 24, No. 1, 1985年3月, pp. 133~181.
- 7) 高橋邦夫, 春日井康夫: 捨石材の強度特性における粒度組成と最大粒径の影響, 粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集, 1986年10月, pp. 41~48.
- 8) 小林正樹, 寺師昌明, 高橋邦夫, 中島謙二郎他: 捨石マウンドの支持力の新しい計算法, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2, 1987年6月, pp. 371~411.
- 9) 社団法人 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版(上巻), 1989年2月, pp. 375~397.
- 10) 沢口正俊: くい横抵抗における地盤定数に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 7, No. 2, 1968年6月, pp. 65~94.
- 11) 高橋邦夫, 春日井康夫: 砂地盤の横方向反力に対する杭幅の影響, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2, 1987年6月, pp. 437~464.
- 12) 山下生比古, 稲富隆昌: 港研方式杭の横抵抗理論に基づく新しい図式計算法, 港湾技研資料, No. 104, 1970年6月.
- 13) 山下生比古: 港研方式杭の横抵抗理論に基づく仮想固定点, 港湾技研資料, No. 105, 1970年6月.
- 14) 山下生比古, 稲富隆昌, 小蔵絃一朗, 奥山育英: 数値解による杭の横抵抗の基準曲線の作成, 港湾技術研究所報告, Vol. 10, No. 1, 1971年3月, pp. 107~168.
- 15) 久保浩一: 短杭の横抵抗, 港湾技術研究所報告書, Vol. 5, No. 13, 1966年9月. 38p.
- 16) 高橋邦夫, 沢口正俊: ウェルの横抵抗に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 16, No. 4, 1977年12月, pp. 3~34.
- 17) 最上武雄編著: 土質力学, 技報堂, 1979年8月, p. 897.
- 18) 赤井浩一: 基礎工学ハンドブック(村山朗明, 大崎順彦編)第2章, 土の力学, 朝倉書店, 1964年11月, pp. 94~101.
- 19) 高橋邦夫: 大口径鋼管杭に関する試験と解析, 港湾技研資料, No. 660, 1989年12月, 14p.

## 記 号 表

$B$	: 杭 幅	cm
$B_{\text{SHEAR}}$	: 三軸圧縮試験中の粒子破砕量	
$B_0$	: Marsal の破砕率	
$c$	: 粘着力	
$c_{cd}$	: 排水条件での粘着力	
$c_u$	: 粘土の非排水せん断強さ	kgf/cm <sup>2</sup>



杭の横抵抗における捨石層の評価

$D_{max}$	: 最大粒径	mm	$\gamma_{dmax}$	: 最大乾燥単位体積重量	gf/cm <sup>3</sup>
$D_{10}$	: 有効径	mm	$\gamma_{dmax}$	: 最小乾燥単位体積重量	gf/cm <sup>3</sup>
$EI$	: 杭の曲げ剛性	kgf/cm <sup>2</sup>	$\delta$	: 壁面摩擦角	
$Er$	: 根入れ比 (短杭の根入れ長) / (長杭の 曲げモーメント第1零点の深さ)		$\epsilon_{50}$	: 粘土の非排水せん断強さの50% におけるひずみ	
$e_{max}$	: 最大間隙比		$\zeta_a$	: 主働崩壊角	
$e_{min}$	: 最小間隙比		$\zeta_p$	: 受働崩壊角	
$e_0$	: 間隙比		$\phi_{cd}$	: 排水条件での内部摩擦角	
$\Delta e$	: 最大間隙比と最小間隙比の差		$\phi_{cu}$	: 非排水条件での内部摩擦角	
$G_s$	: 比重		$\phi_d$	: 排水条件での内部摩擦角	
$K_0$	: 主働土圧係数		$\phi_{d0}$	: 排水状態で粘着力を零としたとき の内部摩擦角	
$T_{max}$	: 最大荷重	kgf	$\phi_0$	: 粘着力を零としたときの内部摩擦角	
$K_p$	: 受働土圧係数				
$K_0$	: 静止土圧係数				
$K(x)$	: 深さ $x$ における杭の変位量と地 盤反力の関係を表わす係数				
$k_c$	: C型地盤における横抵抗定数	kgf/cm <sup>2.5</sup>			
$k_s$	: S型地盤における横抵抗定数	kgf/cm <sup>3.5</sup>			
$k_t$	: 最上の常数				
$l_{m1}$	: 曲げモーメント第一零点の深さ	cm			
$l_{m,max}$	: 最大曲げモーメントの発生深さ	cm			
$M$	: 深さ $x$ における杭の曲げモーメント	kgf · cm			
$M_{max}$	: 最大曲げモーメント	kgf · cm			
$n$	: 繰り返し回数				
$P$	: 深さ $x$ における杭の単位長さ当 りの地盤反力	kgf/cm			
$p$	: 深さ $x$ における単位面積当りの 地盤反力	kgf/cm <sup>2</sup>			
$r_n$	: 各繰り返し荷重における最大変位 をその荷重で除した値と初期最大 荷重時でのその値との比				
$S$	: 深さ $x$ における杭のせん断力	kgf			
$S_n$	: 各サイクルごとの杭頭変位量と残 留変位量の比				
$T$	: 杭頭荷重	kgf			
$T_{max}$	: 最大荷重	kgf			
$t$	: 杭厚	mm			
$U_c$	: 均等係数				
$x$	: 地表面からの距離	cm			
$y$	: 深さ $x$ における杭の変位量	cm			
$y_{top}$	: 杭頭変位量	cm			
$y_0$	: 地表面変位量	cm			
$y'$	: 深さ $x$ における杭の撓み角				
$\alpha$	: $c_u$ の深さ方向の増加率	kgf/cm <sup>3</sup>			
$\gamma$	: 地盤の単位体積重量	gf/cm <sup>3</sup>			