

港 湾 技 研 資 料

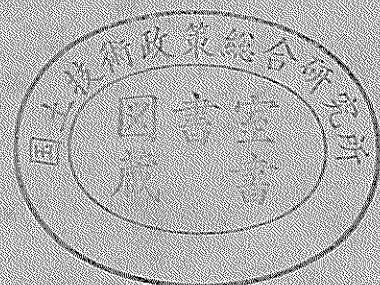
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.679 June 1990

着底式くし形構造物模型の静的載荷実験

菊	池	喜	昭
高	橋	邦	夫
中	村	竜	一

運輸省港湾技術研究所



Horizontal Loading Tests on Models of Soft Landing Comb-Shaped Structures

Yoshiaki KIKUCHI*
Kunio TAKAHASHI**
Ryuichi NAKAMURA***

Synopsis

Comb-shaped structures are breakwaters which resist lateral forces by both lateral resistance of piles and cohesion between its plate and grounds. This lateral resistance mechanism is complex. To investigate the mechanism, laboratory experiments are conducted and the numerical models are made and calculated.

The results of the study are summarized as follows:

- 1) Strengths of grounds and rigidities of piles affect the deformation behavior of Comb-shaped structures.
- 2) In case that rigidities of piles are large, the structures behave rotational movement. In case that rigidities of piles are small, the structures move horizontally at first and according to large horizontally movement, they behave rather rotationally.
- 3) The larger the displacement of the structure is, the greater the ratio of laterally resistance of piles to whole laterally resistance become.
- 4) When embedment ratio $E_r (=1/1_{ml})$ is smaller than 0.7, lateral resistance of one pile at yielding the structure is more than 0.5 to the ultimate resistance of a pile which is estimated by Broms under the condition of short and fixed pile head.

Key Words: Soft Ground, Pile, Laboratory Test, Horizontal Load

* Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division

** Chief of Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division

*** Member of Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division

着底式くし形構造物模型の静的載荷実験

菊池喜昭*
高橋邦夫**
中村竜一***

要 旨

軟弱地盤上に重量の軽い堤体を設置し、杭を地盤に差し込んだ軟弱地盤着底式くし形構造物が提案されている。この構造物は底面と地盤の間の付着力と杭の横抵抗力によって水平荷重に抵抗しようとするものである。このような複合的な水平抵抗メカニズムを検討するために室内実験を行い、さらに簡単な力学モデルを作成し数値計算を行った。

その結果、以下のようなことがわかった。

- 1) 地盤強度や杭の剛性の違いはくし形構造物の挙動に影響し、どちらも高いほど変位しにくくなる傾向にある。
- 2) 杭の剛性が高い場合には、くし形構造物は、変位の初期から回転挙動を示し、剛性の低いときには、初期には杭のないひら形同様の水平変位を示すが、少しずつ回転挙動が顕著になる。
- 3) 杭が受け持つ水平抵抗力の比率は変位が進むにつれて大きくなり、今回の実験レベル（模型幅 50 cm）では 0.5 cm ほど変位すると水平抵抗力のほとんどを杭が受け持つようになる。
- 4) 根入れ比 E_r が 0.7 以下であれば、堤体の降伏荷重より求めた杭一本あたりの抵抗力は、Broms の式で与えられる極限抵抗力の 0.5 倍以上である。

キーワード： 軟弱地盤，杭，室内実験；水平荷重

1. まえがき

軟弱層厚の厚い地盤上に重力式防波堤を建設する場合、地盤改良によって基礎の安定を図るには多大な費用を要することになる。特に、湾奥部の比較的波浪が小さくしかも軟弱な地盤上に防波堤を建設する際には、地盤改良に費やす費用の比率が極めて高くなる。そこで、地盤改良を必要としない、経済的な新しいタイプの防波堤構造が望まれており、写真-1に示すような軟弱地盤着底式防波堤が考案された。

この構造物は、重量の軽い堤体を軟弱地盤上に着底させ、底面と地盤（特に粘土地盤）の間の付着力や杭の横抵抗力によって水平力に抵抗しようとするものであって、水平力に抵抗する能力は比較的小さいが、軟弱層厚が厚い場合でも地盤改良の必要がないため、波浪が比較的小さい海域で有利となるような構造である。

軟弱地盤着底式構造物は、底面と粘土の付着力のみによって水平力に抵抗する「ひら形」とよばれるタイプと、

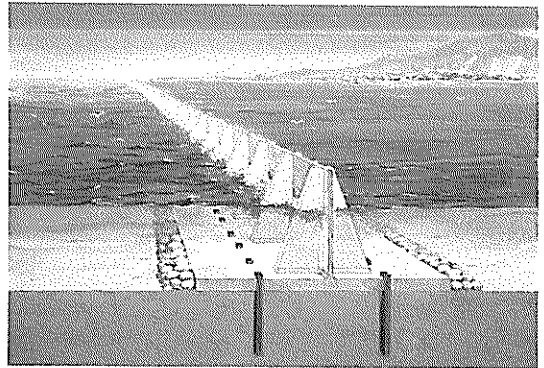


写真-1 軟弱地盤着底式防波堤

「ひら形」に杭を取り付けた「くし形」と呼ばれるタイプの2種類が考案されている。

「ひら形」の場合の破壊機構は、水平力が卓越した偏心傾斜荷重による支持力として検討できる。一方、「く

* 土質部 主任研究官（海洋基礎担当）

** 土質部 基礎工研究室長

*** 土質部 基礎工研究室

し形」は付着力による抵抗と、杭の横抵抗力による抵抗の複合的な抵抗メカニズムであり、その挙動は複雑である。

本研究は、熊本港で用いられる防波堤を幾何学的に縮尺したシリーズ（12本杭シリーズ）とその約6分の1の幅の模型を用いたシリーズ（2本杭シリーズ）の2つのシリーズで実験を行い、版が地面に接した「着底式」の「くし形」構造物についてその水平力に対する抵抗メカニズムを実験的に解明しようとするものである。

2. 既往の研究

2.1 現地実物模型による実験

現地における実物模型実験が、第四港湾建設局によって熊本県八代市の日奈久港内で行われた。この実験では「ひら形」と「くし形」の2種類の構造について行われた。¹⁾

この結果、「ひら形」の破壊は図-1に示すようにVaughan 他が提案した偏心傾斜荷重を受ける基礎の支持力の式で計算される破壊とよくあうことがわかった。ここで、縦軸には鉛直荷重を底版面積で除した鉛直荷重強度 V^* を地表面強度 s_{u0} で正規化した V^*/s_{u0} をとっており、横軸には水平荷重を底版面積で除した水平荷重強度 H^* を地表面強度 s_{u0} で正規化した H^*/s_{u0} をとっている。「くし形」については、杭に発生した曲げモーメントを測定しており、その測定結果から杭に働いているせん断力 ΣT を推定し、杭と底版のそれぞれが受け持つせん断力 ΣT 、 p_u について水平変位 d_h との関係で整理し、図-2のような結果を得ている。²⁾ この結果によると、ある程度の荷重までは堤体はほとんど水平変位せず、その間は底版が抵抗力のほとんどを受け持ち（領域I）、変位が進むようになると杭が抵抗力を多く受け

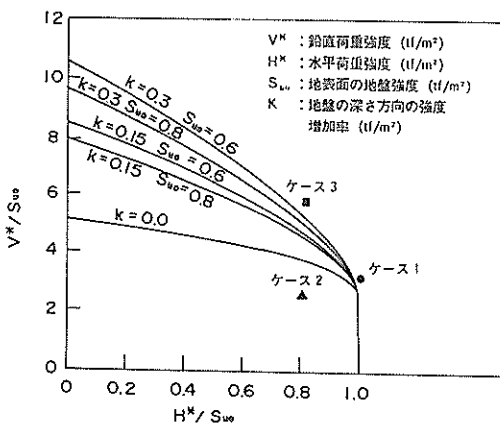


図-1 現地実験での模型の破壊強度(田口ら¹⁾による)

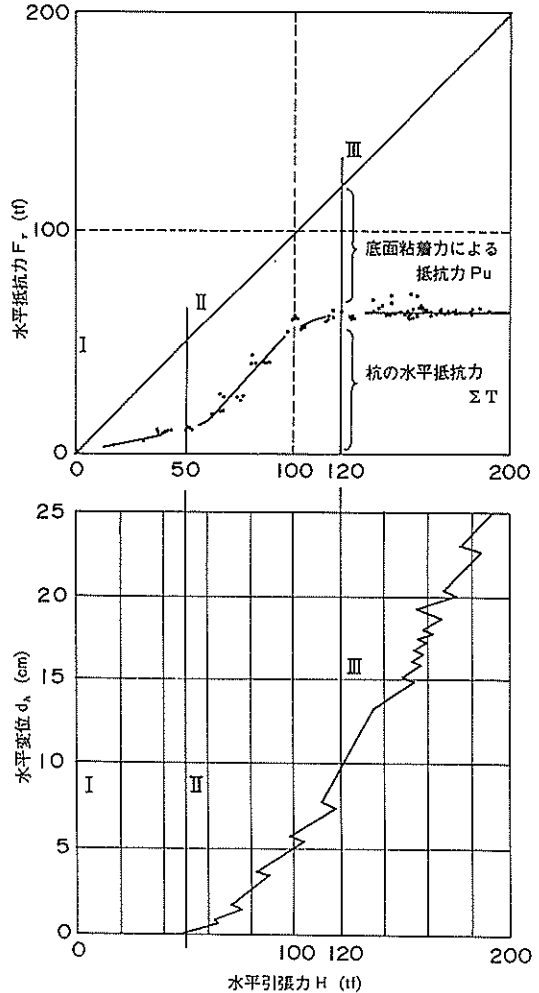


図-2 現地実験での模型の挙動²⁾

持つようになる（領域II）。さらに変位が進むと杭の抵抗力が飽和し、再び底版による抵抗力が増加する傾向となっている（領域III）。しかし、領域IIIのような現象にはわかには信じ難いところがある。領域IIIの真の解釈には、杭群全体としての抵抗力を考慮に入れる必要がある。すなわち、この実験では曲げモーメントはいくつかの杭についてのみしか測定されておらず、曲げモーメントを測定した杭から求めた杭の抵抗力のみがグラフに表れているのである。実際の現象としては、杭の横抵抗力が飽和し底版の抵抗力が増加するとは考えにくく、曲げモーメントを測定していない杭の抵抗の増大が隠れていると考えるのが自然である。そのように考えると領域IIIにおいても領域IIの直線部分そのまま伸びる傾向にあると想像される。

2.2 遠心場における「ひら形」の実験

北詰ら³⁾は遠心力載荷装置を用いて、「ひら形」について偏心率 e と鉛直荷重強度 V^* を変化させた水平載荷実験を行い、鉛直荷重成分 V^*/s_{uo} と水平荷重成分 H^*/s_{uo} 、偏心率 e/B からなる三次元空間での破壊包絡面を図-3に示すように求めた。ただし、ここでは底版の幅を B としている。この結果、「ひら形」の破壊は、支持力破壊で地盤が壊れるときには Vaughan 他 の提案した式で破壊が説明できるが、底面の付着力不足で破壊するときには、破壊強度は鉛直荷重に比例するような傾向にあり、通常考えられるような鉛直荷重によらない破壊とはならなかった。特に鉛直荷重強度が地盤強度の 0.4 以下になると、図-4に示すように破壊荷重が鉛直荷重に比例する傾向にあった。

このように、付着力の不足による滑動破壊モードは、通常鉛直荷重によらず、地表面強度と基礎底面積との積で破壊強度が決まると考えられているが、北詰らの結果

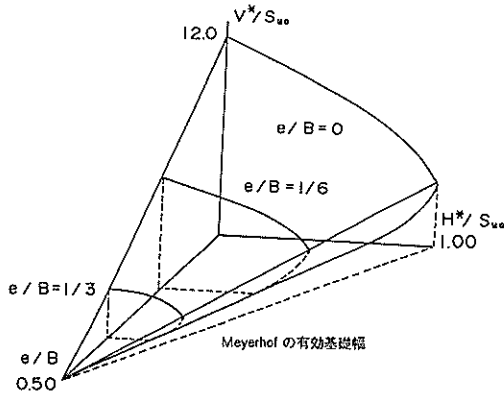


図-3 三次元荷重空間での破壊包絡面（ひら形）
（北詰ら³⁾による）

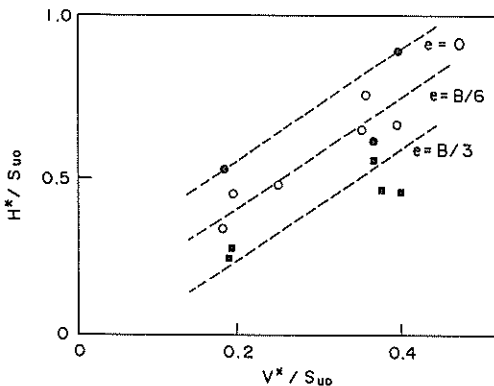


図-4 最大水平荷重と鉛直荷重レベルの関係
（北詰ら³⁾による）

はそのようにはなっていない。この理由として、北詰らは、あまりにも小さい鉛直荷重の下では、十分に地盤の付着力が発揮しない可能性があるためとしている。

3. 着底式くし形構造物模型静的載荷実験

3.1 実験装置および試料

実験は、熊本港で用いられている防波堤の 1/24 の縮尺の模型を用いて実施した。熊本港で採用されている構造物の一基は 12 本の杭を用いており、前列、後列それぞれ 6 本ずつが用いられている。この一基分をモデル化したのが 12 本杭のシリーズであり、その約 6 分の 1 の部分のみをモデル化し、前列、後列とも杭 1 本ずつ用いているのが 2 本杭のシリーズである。

図-5に示すように 12 本杭のシリーズに用いた模型の底版は、幅 49 cm × 長さ 50 cm で、厚さは 1.5 cm と 2 cm の 2 種類を用いている。この底版には、杭を取り付けるための穴が前後 2 列各 6 箇所計 12 箇所開いており、中央部には、模型重量を変化させるために用いるベアリングを入れる容器が取り付けられている。

2 本杭のシリーズに用いた模型の底版は、幅 6 cm × 長さ 48 cm である（図-6）。この底版には杭を取り付けるための穴が 4 箇所を開いており、前列と後列の杭の間

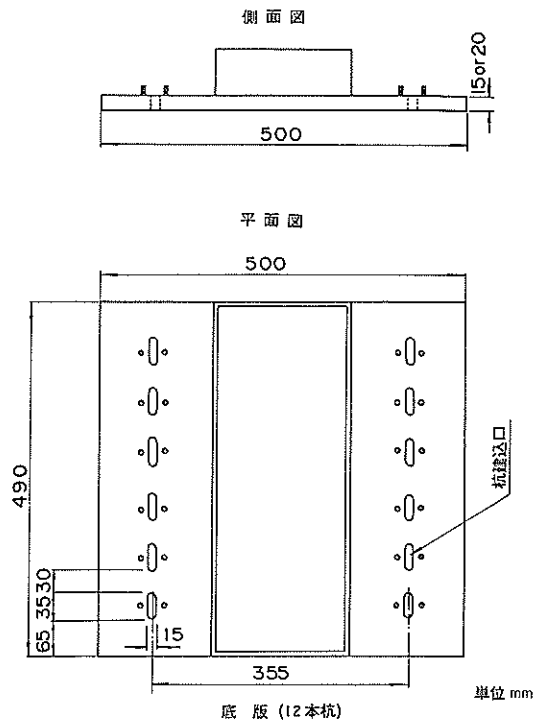


図-5 実験に用いた底版（12本杭）

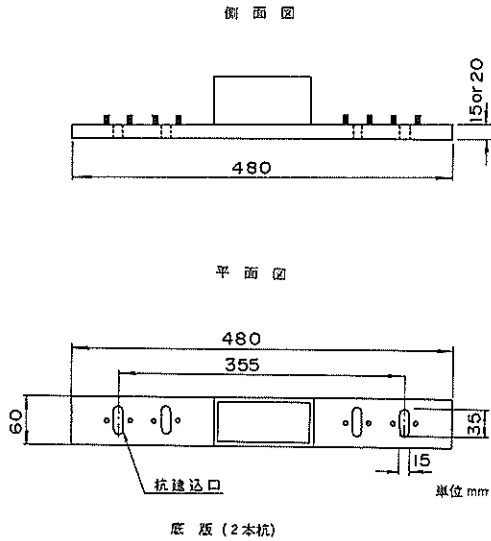


図-6 実験に用いた底版(2本杭)

隔を変えられるようにしてあるが、今回の実験では前後列の杭の間隔は変化させていない。また、中央部には重量を変化させるための容器が取り付けられている。

杭の模型には、板状のものを用いている。杭の全長は25.5 cmで、上から1 cmのところを底版に固定させるための取り付け穴がついている。杭幅はすべて2 cmで、厚みは2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 7 mmの5種類である。それぞれの杭には図-7に示すように曲げひずみを測定するために歪みゲージを取り付けてある。それぞれの厚みの杭に張りつけたゲージの枚数は表-1に示すとおりである。

底版、杭ともそれぞれステンレス製である。

杭に働く曲げモーメントは杭に発生する曲げひずみに杭材のヤング率 E と断面係数 Z をかけて求めているが、この断面係数 Z は検定により求めている。検定試験は、模型杭を杭両端付近を支点として水平に設置し、杭中央部に模型杭の許容応力を考慮して定めた最大荷重に至る

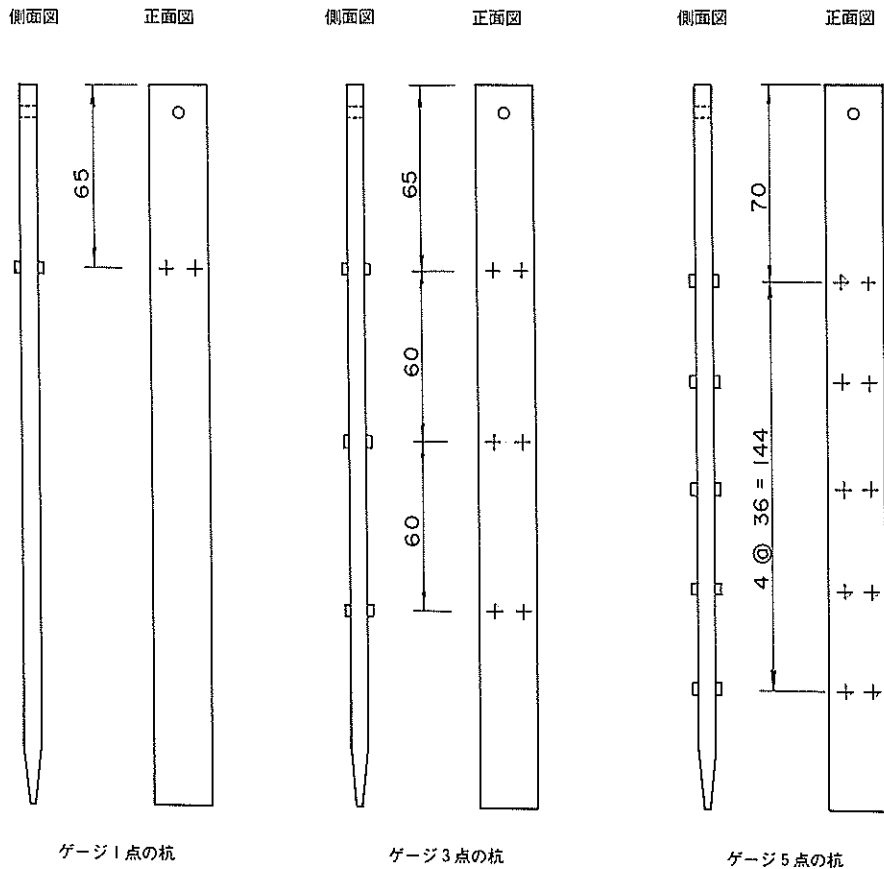


図-7 ゲージの添付位置

[単位 mm]

表-1 使用した杭の厚さとゲージ点数の関係

ゲージ点数	杭の板厚 (mm)				
	2	3	4	5	7
1	○			○	
3	○			○	
5		○	○		○

表-2 杭の断面性能

杭板厚 (mm)	ゲージ点数	検定より求めた EZ (kgf cm)	EZより仮定した EI (kgf cm ²)
2	1	23,900	2,390
	3	27,050	2,700
3	5	44,900	6,740
4	5	87,600	17,500
5	1	128,000	32,000
	3	135,600	33,900
7	5	310,600	108,700

まで鉛直に段階載荷し、曲げひずみを測定することにより実施した。測定された曲げひずみを理論曲げモーメントと比較することにより断面係数 Z を求めている。断面二次係数 I については、杭模型の大きさが小さいことから検定で求めても精度が不十分であると考えられたので、上記の検定試験で求められた断面係数 Z と杭の板厚とにより推定した。これらの結果は表-2 に示す。

実験には図-8、図-9 に示すような2つの土槽を用いている。大型土槽は直径252 cm × 高さ170 cm の円筒形をしている。小型土槽は、縦150 cm × 横50 cm × 高さ100 cm の直方体をしている。小型土槽の場合、12本杭のシリーズでは土槽の横の幅と模型の横幅がほぼ同じであるため実験結果に側面の影響がでる恐れがある。しかし、大型土槽では実験の回数が十分に確保できないので、両者を併用して用いた。なお、12本杭のシリーズでは、土槽の違いが実験結果に及ぼす影響は次章で述べているようにわずかながらあり、小型土槽の方が強度が大きめにでる傾向にあった。

実験に用いた粘土試料は川崎粘土である。12本杭のシリーズと2本杭のシリーズで異なる粒度組成の川崎粘土を用いている。これは、実験の都合上同じ試料が確保できなかったためである。ここでは12本杭のシリーズで用いた試料を川崎粘土A、2本杭のシリーズで用いた試料を川崎粘土Bと呼ぶことにする。それぞれの川崎粘土の分類特性は表-3 に示すとおりである。なお、12本杭のシリーズの一部のケースについては、粘土の違いが実験結果に及ぼす影響をチェックするために、2本杭の

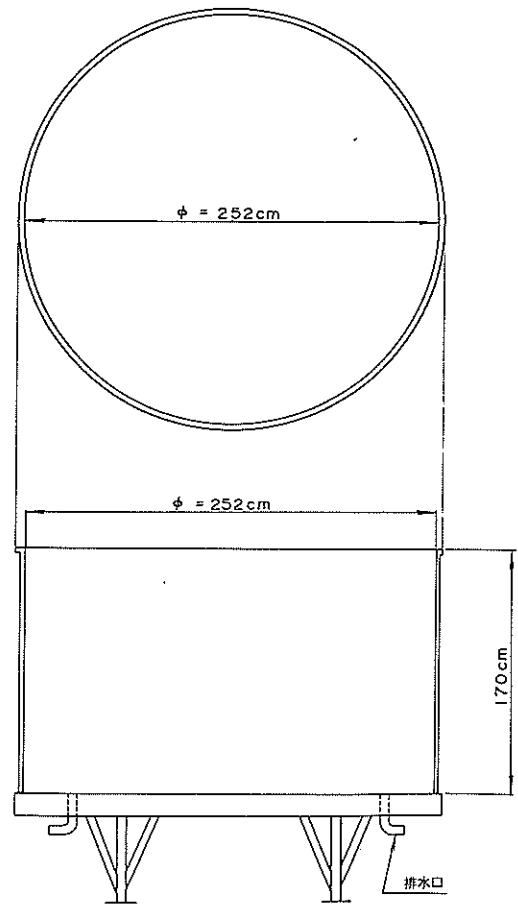


図-8 大型粘土槽

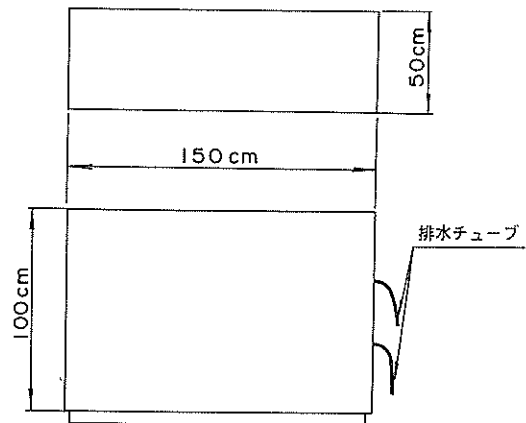


図-9 小型粘土槽

表-3 用いた粘土の分類特性

	川崎 A	川崎 B
比重	2.695	2.718
液性限界	81.7	52.5
塑性限界	38.4	30.2
砂分(%)	4.5	19.2
シルト分(%)	41.0	44.6
粘土分(%)	54.5	35.7

シリーズで用いた川崎粘土Bを用いた実験を行っている。結果は示していないが、地盤の強度が同じであれば実験結果は粘土の種類に影響されないと判断できた。

3.2 実験方法

実験は以下の手順で実施した。

- ① 土槽の壁面摩擦を低減するため、土槽内を清掃し、壁面全体にグリースを塗布し、厚さ0.05mmのビニールシートをたるみのないよう張る。
- ② 下部に、排水層として、20cm厚で砂を敷き、その上に透水性の高いガラス繊維の布を敷く。そこへ液性限界のおよそ1.5倍の含水比で練り返した粘土を入れ、その上に、ガラス繊維の布、排水用砂の順で入れた。
- ③ この上に厚さ3mm程度の鉄板を置き、その上に重錘を乗せ、圧密上載荷重とする。小型土槽の場合の圧密時間曲線の例を図-10に示す。

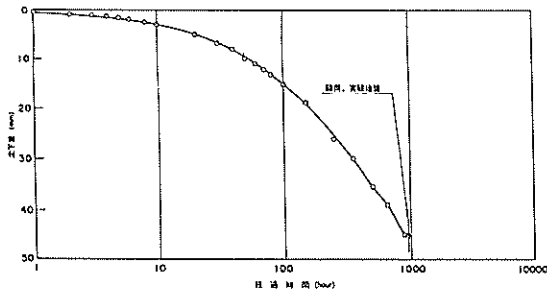


図-10 圧密沈下曲線

- ④ 圧密が完了したら、重錘、鉄板、上部排水砂、ガラス繊維を取り除き、粘土表面を平らにするため、地盤を乱さないように注意しながら、ストレートエッジで地盤表面を2から3cm削り取る。仕上がり状態での粘土層厚は小型槽で35cm、大型槽で50cm程度である。
- ⑤ 平らとなった粘土地盤の表面に底版を静かに設置し、杭を地盤に垂直に建て込み、図-11に示すように杭の頭部を底版にボルトで固定する。このとき

杭頭部に曲げモーメントが発生しないように注意した。地盤と模型のなじみをよくするため、図-12のような状態で一晩放置する。この間、地盤表面が乾燥しないように注意した。

- ⑥ 変位量測定用のダイヤルゲージ、および荷重測定用のロードセルを取り付け実験を開始する(図-13)。ほとんどの実験は重錘による荷重制御実験であるが、大型土槽の一部の実験についてはひずみ制御実験も

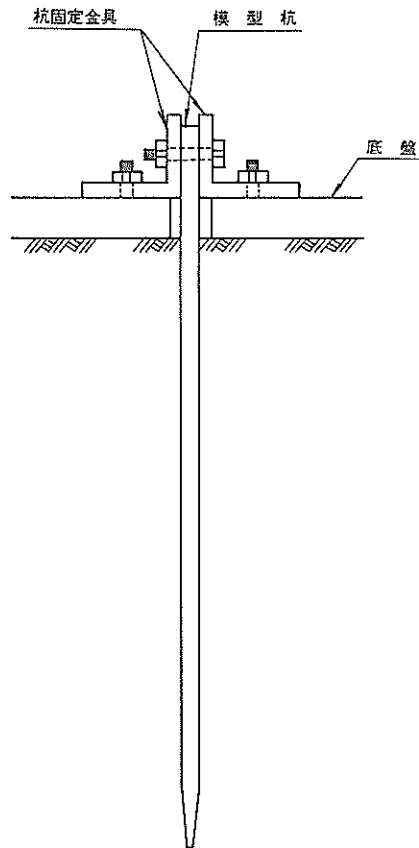


図-11 杭の固定状況

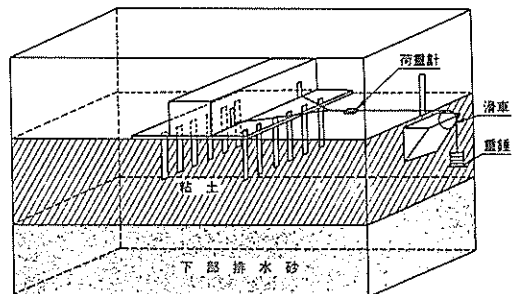


図-12 実験状況

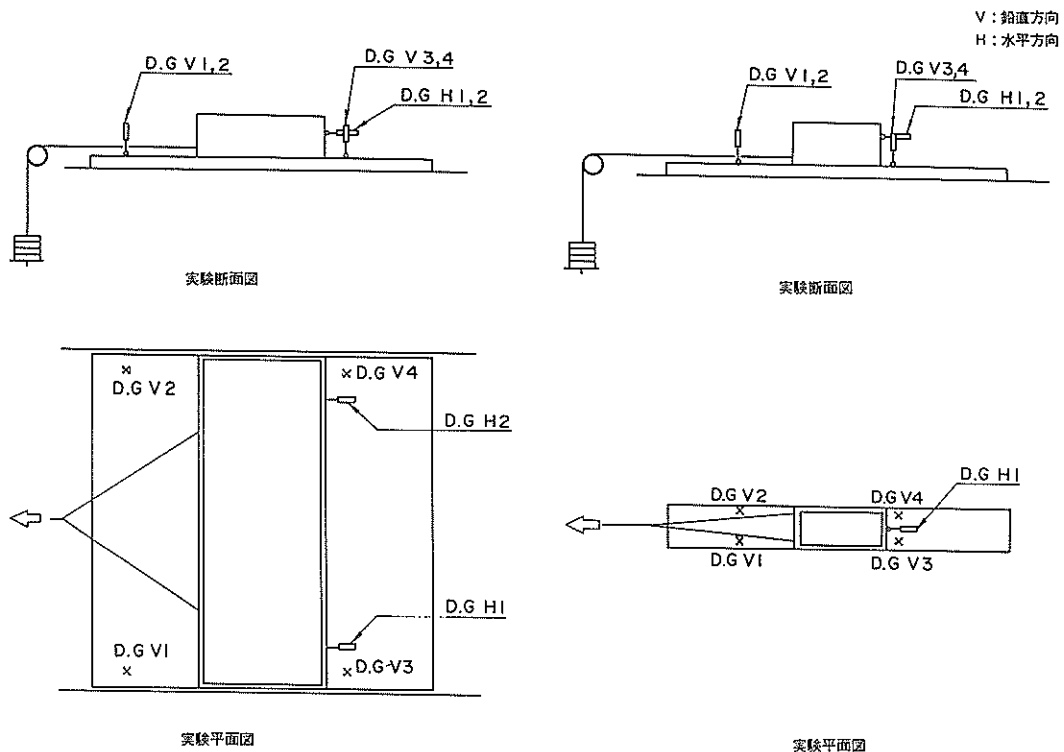


図-13 変位の測定位置

行っている。

- ⑦ 実験終了後土槽の模型を設置したあたりを中心に、手動ペーン試験機による地盤の強度の測定と含水比の分布を測定している。

4. 模型実験結果

今回の実験では、地盤の強度、杭の剛性、模型の重量、くしの有無について特に重点的に検討している。実験ケースの一覧を表-4に示す。

このような構造物では、杭間隔の違いや、杭一本あたりの底版面積の大きさなどの違いが挙動に複雑に効いてくることが考えられるが、ここでは、そのような構造物の幾何学的形状の違いによる挙動の変化については検討の対象としていない。したがって、今後様々な幾何学的形状の「くし形」構造物を建設する際には、今回の結果は定性的な傾向を示すものと考えなくてはならない。

なお、2本杭のシリーズは主に5mm杭と7mm杭を用いた実験であったので、以下の実験結果については12本杭のシリーズの結果を中心に述べる。

表-4 (a) 実験ケース (12本杭)

番号	杭の厚さ (mm)	本数	ゲージ点 数	地盤強度 (kgf/cm ²)	重量 (kgf)	土 槽
1	2	12	1	0.012	52	小型槽
2	2	12	1	0.014	52	小型槽
3	2	12	1	0.014	52	小型槽
4	2	12	1	0.022	52	小型槽
5	2	12	3	0.016	52	小型槽
6	2	12	3	0.046	52	大型槽
7	2	12	3	0.049	52	大型槽
8	2	12	3	0.053	52	大型槽
9	3	12	5	0.080	36	大型槽
10	4	12	5	0.066	36	大型槽
11	4	12	5	0.079	52	大型槽
12	5	12	1	0.008	52	小型槽
13	5	12	1	0.011	52	小型槽
14	5	12	1	0.015	52	小型槽
15	5	12	1	0.015	52	小型槽
16	5	12	3	0.020	36	小型槽
17	5	12	3	0.030	36	小型槽
18	5	12	3	0.032	52	小型槽
19	5	12	3	0.044	52	大型槽
20	5	12	3	0.047	52	大型槽
21	5	12	3	0.049	52	大型槽
22	5	12	3	0.061	52	大型槽
23	5	12	3	0.065	36	大型槽
24	7	12	5	0.010	36	小型槽
25	7	12	5	0.014	36	小型槽
26	7	12	5	0.037	36	小型槽
27	7	12	5	0.040	52	大型槽
28	7	12	5	0.048	36	大型槽
29	7	12	5	0.052	36	大型槽
30	7	12	5	0.057	52	大型槽

表-4 (b) 実験ケース(杭なし)

番号	地盤強度 (kgf/cm ²)	重量 (kgf)	土槽
31	0.010	36	小型槽
32	0.014	36	小型槽
33	0.030	36	小型槽
34	0.037	36	小型槽
35	0.048	36	大型槽
36	0.052	36	大型槽
37	0.065	36	大型槽
38	0.066	36	大型槽
39	0.080	36	大型槽
40	0.008	52	小型槽
41	0.011	52	小型槽
42	0.014	52	小型槽
43	0.014	52	小型槽
44	0.015	52	小型槽
45	0.015	52	小型槽
46	0.016	52	小型槽
47	0.032	52	小型槽
48	0.046	52	大型槽
49	0.049	52	大型槽
50	0.049	52	大型槽
51	0.053	52	大型槽
52	0.057	52	大型槽
53	0.061	52	大型槽
54	0.065	52	大型槽
55	0.066	52	大型槽
56	0.079	52	大型槽

4.1 堤体の挙動特性

ここでは主にケース16(表-4(a)参照)の実験をもとに堤体の挙動特性を概観する。

図-14には水平荷重Hと水平変位d_hの関係を示す。変位が増えるにつれて、水平抵抗力も増大し、一定値に収束しない傾向にある。

図-15には底版の回転角tanθと水平変位d_hの関係を示す。ここで、底版の回転角tanθは図-13に示すように、堤体の前後で計った鉛直変位(D.G.V)の差を前後の鉛直変位測定点の水平距離で割ったものをとっている。図-15に示すように、一般的に水平に変位す

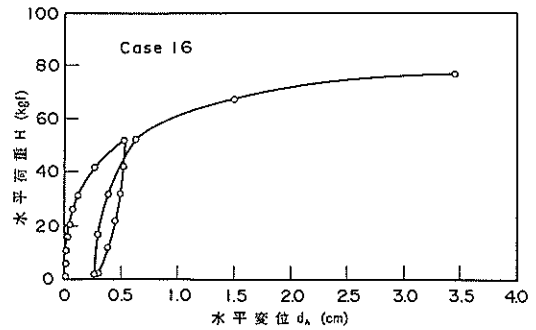


図-14 水平荷重と水平変位の関係

表-4 (c) 実験ケース(2本杭)

番号	杭の厚さ (mm)	本数	ゲージ 点数	地盤強度 (kgf/cm ²)	重量 (kgf)	土槽
57	2	2	1	0.030	5	小型槽
58	3	2	5	0.036	5	大型槽
59	3	2	5	0.042	8	大型槽
60	5	2	3	0.012	5	小型槽
61	5	2	3	0.016	5	小型槽
62	5	2	3	0.021	5	小型槽
63	5	2	3	0.022	8	小型槽
64	5	2	3	0.027	5	小型槽
65	5	2	3	0.046	5	小型槽
66	5	2	3	0.046	5	大型槽
67	5	2	3	0.078	5	大型槽
68	7	2	5	0.009	5	小型槽
69	7	2	5	0.029	5	小型槽
70	7	2	5	0.037	5	大型槽
71	7	2	5	0.039	5	大型槽
72	7	2	5	0.062	5	大型槽
73	7	2	5	0.075	8	大型槽

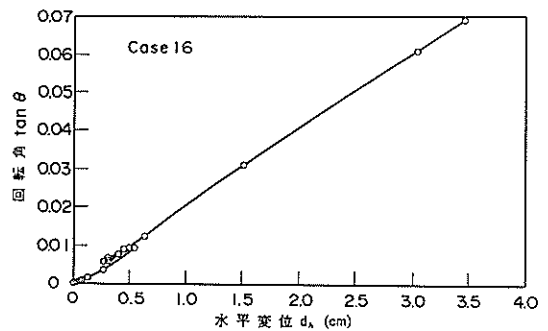


図-15 回転角 tanθ と水平変位の関係

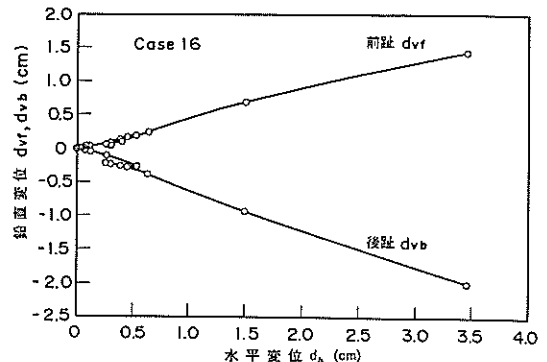


図-16 前趾、後趾の鉛直変位と水平変位の関係

るにしたがって回転角が大きくなる傾向にある。また、図-16には、堤体の前趾と後趾の鉛直変位 d_{vf} , d_{vb} の様子を示す。堤体はほぼ堤体の中央部を軸に回転する挙動を示している。

図-17には各荷重ごとに前列と後列の杭に働く平均的な曲げモーメントの深度分布を示している。これらの結果から、杭に働く曲げモーメントは杭頭で最も大きくなり、杭を堤体に固定したことによる杭頭固定の効果が現れていることがわかる。

図-18は、5点ずつ曲げモーメントを測定したケース27の実験結果について、杭頭部に最も近い曲げモーメント M_1 と堤体の水平変位 d_k の関係を示したもので

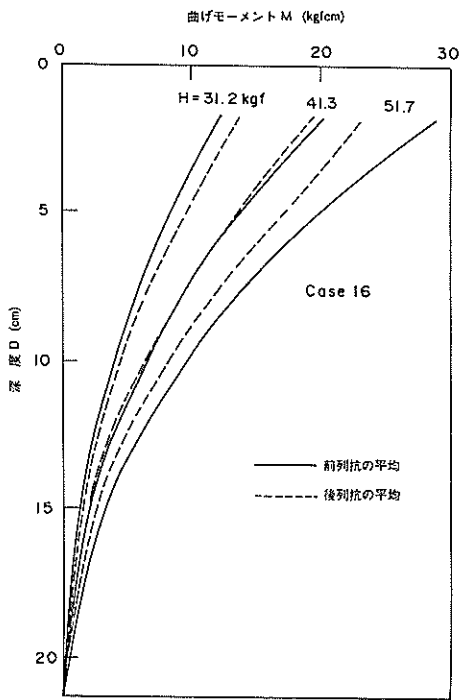


図-17 曲げモーメントの深度分布

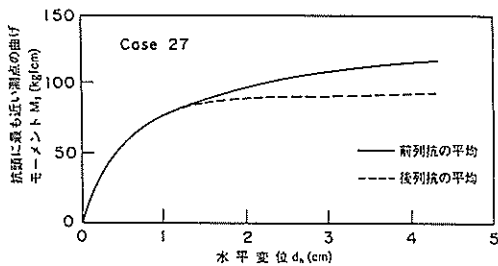


図-18 曲げモーメントと水平変位の関係

ある。この結果のように、杭の剛性が高く、大きく水平変位した場合には、後列杭に比べて前列杭の方が大きな曲げモーメントを発生する例が多かった。

4.2 模型地盤の特性

できあがった地盤の強度 τ_{vf} と含水比 w の関係は図-19に示すようになっている。図よりわかるように、深度方向に比較的均一な地盤となっている。

本実験に先立ち、地盤の特性を調べるために、単杭の水平載荷実験を行った。実験に用いたのは3mm杭である。図-20、図-21に実験結果と港研方式⁴⁾によるあ

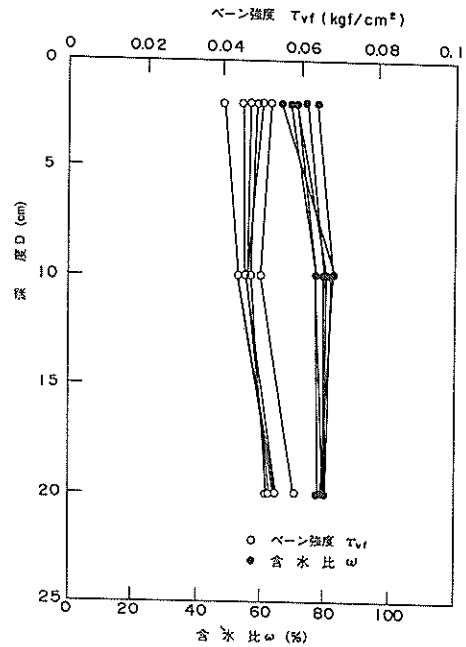


図-19 地盤の強度、含水比の深度分布

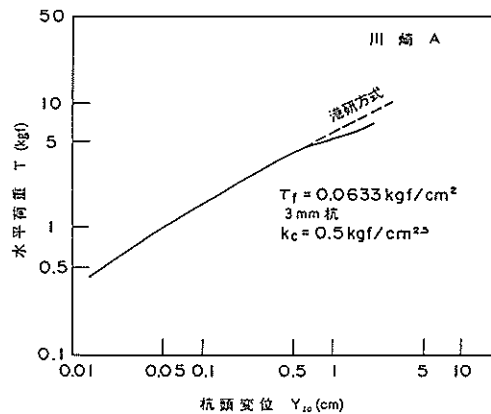


図-20 水平荷重と杭頭変位の関係

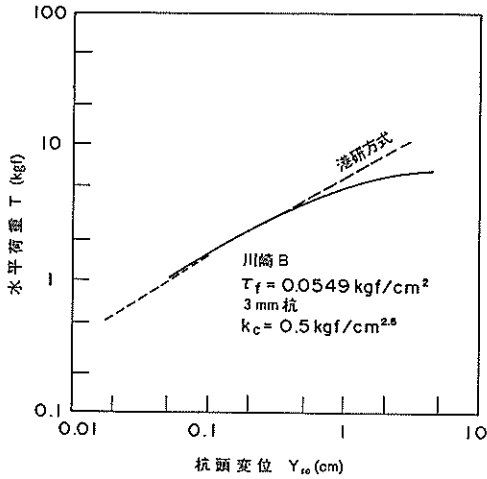


図-21 水平荷重と杭頭変位の関係

てはめの結果を示す。港研方式によるあてはめの結果は、有限要素法による地盤汎用解析プログラム⁵⁾によって計算したもので、杭の長さが有限であることを考慮してある。図よりわかるように、どの場合でも、この地盤は港研方式でいうC型地盤⁴⁾と想定される。

4.3 境界条件の影響

小型槽の実験は大型槽の実験を補完する目的で行ったが、圧密期間の相違からか、全般的に大型槽の地盤は小型槽の地盤に比べて強度が大きめである。このためますます大型槽を補完する必要性が高くなっている。図-22には、他の条件がまったく同じで小型土槽の方が大型土槽よりも地盤強度がやや小さいときの実験結果を示す。地盤の強度は小型土槽の方が2割ほど小さいが、水平変

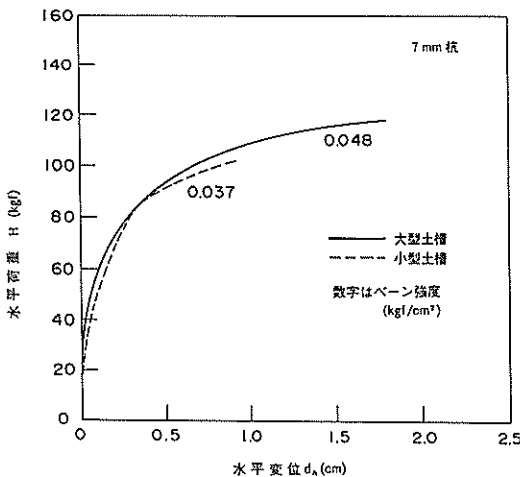


図-22 水平荷重と水平変位の関係

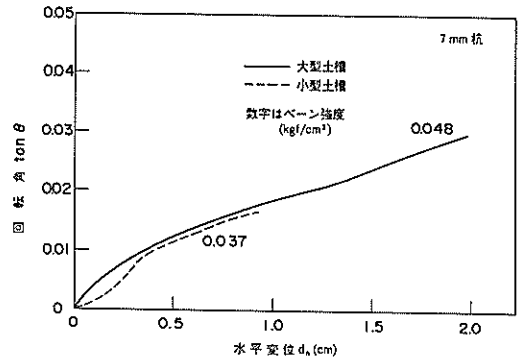


図-23 回転角 $\tan \theta$ と水平変位の関係

位と水平荷重の関係はほぼ同じとなっている。このときの回転角 $\tan \theta$ と水平荷重 H の関係は図-23に示すようになっており、これについても二つの実験結果はほぼ同じになっていることがわかる。このように小型土槽の方が地盤強度が小さいにもかかわらず堤体の変位挙動がほぼ同じであることから、地盤強度が同じであれば小型土槽の方が変位に対する剛性が高くなると推察される。つまり、小型槽は境界の影響を受けて変位に対する剛性がやや大きめにでる傾向にあった。一方、2本杭のシリーズでは図-24に示すように土槽の相違が堤体の変位挙動に及ぼす影響はほとんどない。

このように12本杭のシリーズでのみ小型土槽の方が堤体の抵抗がやや大きめである。以下ではこのことを念頭において結果を見ていくこととする。

なお以下では、地盤強度 τ_{vf} が 0.04 kgf/cm^2 より大きいときは特に示さない限り大型土槽の結果であり、それより小さいときは小型土槽の結果である。

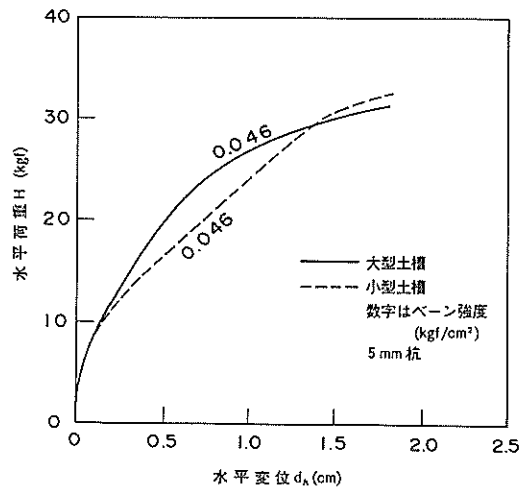


図-24 水平荷重と水平変位の関係 (2本杭)

4.4 杭の剛性の影響

軟弱地盤着底式くし型防波堤では、ある程度の水平変位は許し、変位が累積して機能に影響が起きる場合には、堤体ごと持ち上げ、再度据直すことを考えている。このため、杭は剛性の高いものを用い、短杭として働くものを考えている。したがって、ここで用いている杭は、比較的剛性の高いものばかりである。

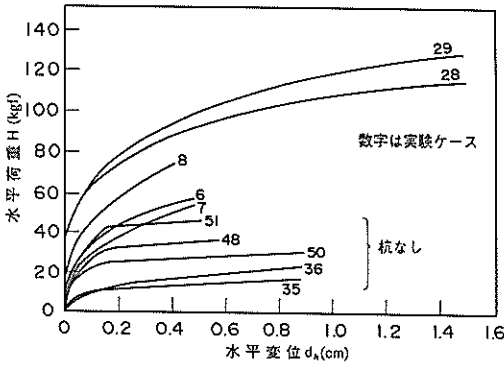


図-25 水平荷重と水平変位の関係

図-25にはほぼ同じ地盤強度 ($\tau_{vf} = 0.046 \sim 0.053 \text{ kgf/cm}^2$) における水平荷重 H と水平変位 d_h の関係を示す。図中で、実験ケース 6, 7, 8 は 2 mm 杭の実験結果であり、実験ケース 28, 29 は 7 mm 杭の実験結果である。図よりわかるように、杭の剛性の違いによって、発揮される水平抵抗力は大きく変化する。同じ図に杭を用いていない場合の例 (実験ケース 35, 36, 48, 50, 51) も示してある。杭を用いていない場合には、比較的小さい変位で水平抵抗力が飽和する傾向にある。一方、杭を用いた場合には抵抗力がなかなか飽和しない傾向にある。このように、杭を用いることによって、水平抵抗力の増加の仕方はかなり異なってくる。また、図では杭なしの場合の結果が少しばらついていて、これはデータの整理を地盤の平均強度で整理したためであり、地表面強度は多少異なる例があったためである。

図-26には、堤体の回転角 $\tan \theta$ と水平変位 d_h の関係を示す。図は、今回行った 12 本杭のシリーズの全データをもとに整理したものである。図より、杭の剛性が低い場合には、堤体は変位の初期にはあまり回転せず、変位がある程度大きくなると回転する挙動を示すことがよくわかる。一方、剛性の高い杭を用いた場合には、変位の初期から顕著な回転挙動を示すことがわかる。

今回の地盤について、単杭杭頭固定条件で、港研方式により曲げモーメント第二ゼロ点の深さ l_{m1} を計算し、久保⁶⁾の示した短杭の遷移点 (表-5) と比べると、最

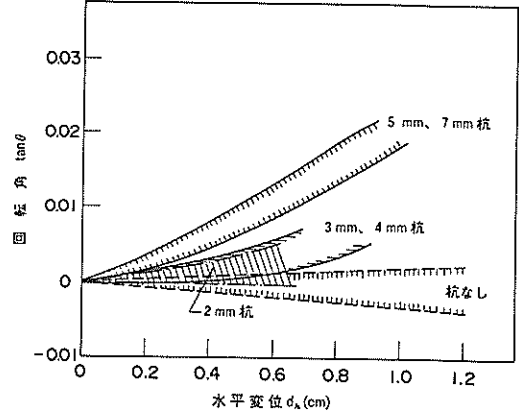


図-26 回転角 $\tan \theta$ と水平変位の関係 (12 本杭)

表-5 短杭の遷移点 (久保⁶⁾による)

L	$0.6 l_{m1}$	$1.0 l_{m1}$	$1.5 l_{m1}$
剛性杭	第2過渡領域	第1過渡領域	長杭
	短杭		
	↓ 有効長		
長杭	杭の下端部が地盤中に固定された状態となり、杭の挙動に対し、根入れ長の大小は無関係。		
第1過渡領域	杭の下端における固定状態は不十分であるが、杭の挙動は長杭の場合と変わらない。		
第2過渡領域	変位や傾斜が長杭よりも著しく大きくなる。杭の曲がりはかなり大きい。		
剛性杭	杭の曲がりが無視できる程度で杭の動きは回転運動に近い。		

も剛性の低い 2 mm 杭 1 ゲージ付の場合、平均的な地盤強度 $\tau_{vf} = 0.04 \text{ kgf/cm}^2$ のときに、長杭と短杭の境界点である $1.5 l_{m1}$ と杭の地中長が一致するときの杭 1 本あたりの水平荷重はおよそ 0.15 kgf であり、第一過渡領域と第二過渡領域の遷移点である $1.0 l_{m1}$ と一致するときで 1 kgf、剛性杭と第 2 過渡領域の遷移点である $0.6 l_{m1}$ と一致するときで 11.6 kgf となる。一方最も剛性の高い 7 mm 杭 5 ゲージ付の場合には、同じ強度の地盤で、それぞれ $1.5 l_{m1}$ 、 $1.0 l_{m1}$ 、 $0.6 l_{m1}$ が杭の地中長と一致するときの杭 1 本あたりの水平荷重は、0.004、0.02、0.25 kgf となる。

このように、剛性の高い杭はきわめて小さい荷重条件下でも剛体杭として挙動し、地中部深くまで地盤反力が発揮され、堤体に偶力が発生する。このため、堤体は変位の初期から回転変位をするのである。一方、剛性の低い杭では、荷重が小さいときには長杭的に挙動するため、

変位の初期には杭頭の回転挙動は示さないが、水平荷重が増加すると短杭的な挙動を示すようになり、回転挙動を示すようになる。

4.5 地盤強度の影響

図-27に、5mm杭の場合の様々な地盤強度での水平荷重 H と水平変位 d_h の関係を示す。図より明らかなように、地盤強度が増加することによって堤体の水平抵抗も増大する。水平変位が0.4cmのときの水平荷重 H を地盤の強度 τ_{vf} に対してプロットしたのが図-28である。地盤の強度と直線的な関係で、水平荷重が増加している。この条件で水平荷重を12本の杭ですべて受け持っているとして、単杭として l_{m1} を計算し、杭の根入れ長と比較してみると、この荷重条件ではいずれも杭長は $0.5 l_{m1}$ 以下となっている。したがってここでは、杭

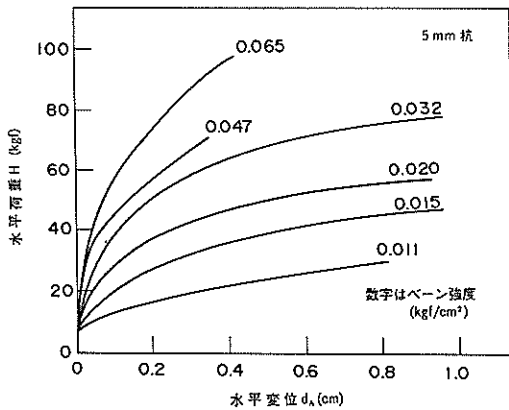


図-27 水平荷重と水平変位の関係 (5mm杭)

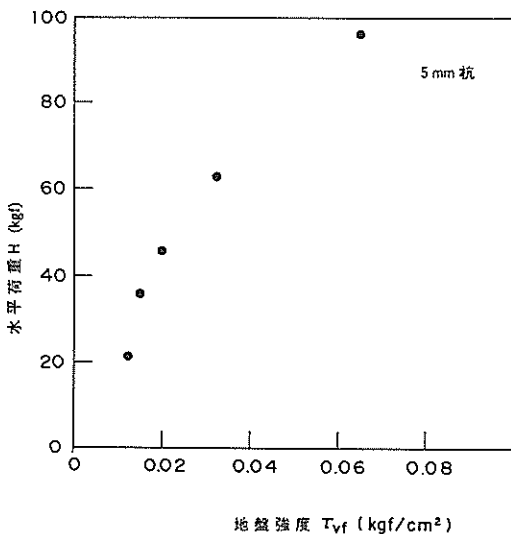


図-28 水平変位が0.4cmのときの水平荷重と地盤強度の関係 (5mm杭)

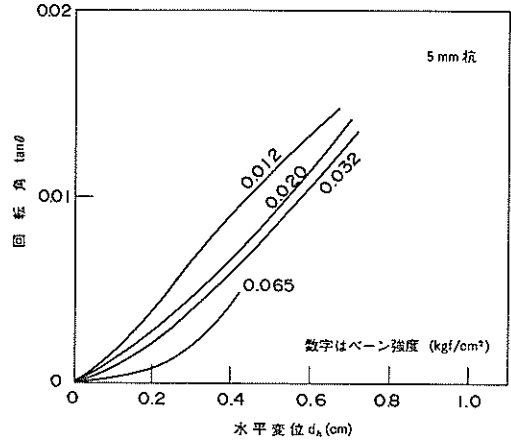


図-29 回転角 $\tan \theta$ と水平変位の関係

はすべて剛体杭として挙動していると考えてよい。

図-29に、回転角 $\tan \theta$ と水平変位 d_h の関係を示す。図よりわかるように、同じ水平変位での回転角は地盤強度が小さいほど大きく出る傾向にある。地盤強度が小さいほど杭が剛な性質を示すためであり、4.4で述べた結果と傾向が一致する。

4.6 模型重量の影響

図-30に、模型重量の条件のみ変えて行った実験の例を示す。このように、模型の重量は堤体の変位に影響を与えている。この実験では、堤体の重量に対し、地盤強度が比較的大きく、この堤体がひら型であったとしても、地盤の深部まで破壊するような支持力破壊とはならず、滑動破壊となる。このような条件下では、ひら型の破壊は模型重量によらない破壊となるか、北詰ら³⁾の示

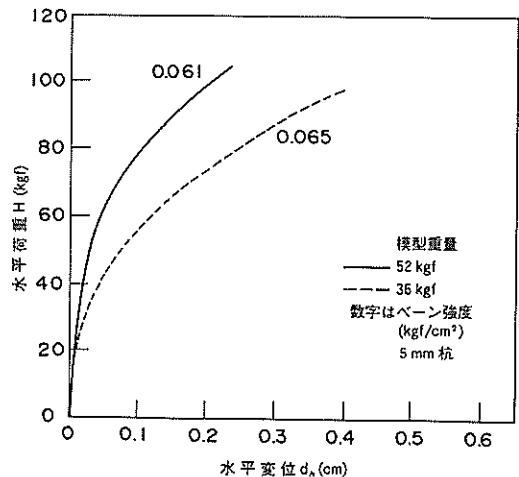


図-30 水平荷重と水平変位の関係

したように、模型重量に比例するような破壊となると考えられる。くし形についても今回の結果は堤体重量の影響を受ける結果となっており、底版の抵抗力の差がそのまま構造物の挙動の差となっている。

4.7 ひら型の変位特性

すでに述べたように現地実験の結果では支持力不足による破壊と表面付近の滑動破壊とがみられ、Vaughanらの式に良くあった破壊強度を示した。図-31には、今回の実験結果を図-1に示したのと同じようにして整理し、模型重量 V^*/s_{u0} と地盤強度 H^*/s_{u0} の関係を示

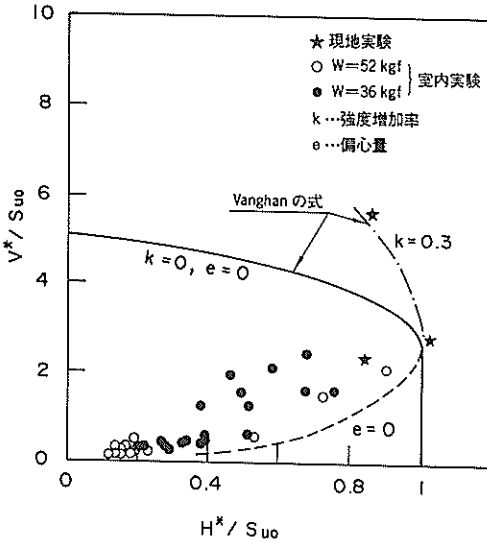


図-31 ひら形模型の破壊強度

している。図中、 W は底版の重量であり、底版にとりつけてある箱に入れるベアリングの数を変えることにより重量を調節してある。ここで s_{u0} としては、地表面に最も近いところで測定したベアレンせん断強度 τ_{vf} を用いている。今回の室内実験では強度増加率 $k=0$ 、偏心量 $e=0$ の条件になっている。この実験は現地実験との対比も考慮しており、現地と同様に支持力破壊のモードについても検討する予定であったが、結果的に地盤強度が大きすぎたため、今回の結果ではすべて滑動破壊をしている。また、北詰ら³⁾がすでに遠心荷重装置で行った実験と同じように、模型重量と地盤強度の比が小さくなると滑動破壊強度も小さくなる傾向にあった。

これらの結果はくし形の変位挙動にも影響を及ぼしていると考えられる。今回の実験では、模型重量による鉛直荷重強度と地盤強度との比 V^*/s_{u0} が現地実験の場合より小さく、このため、 H^*/s_{u0} が小さめになっている。今回の地盤でより重い模型を用いた場合には、水平抵抗

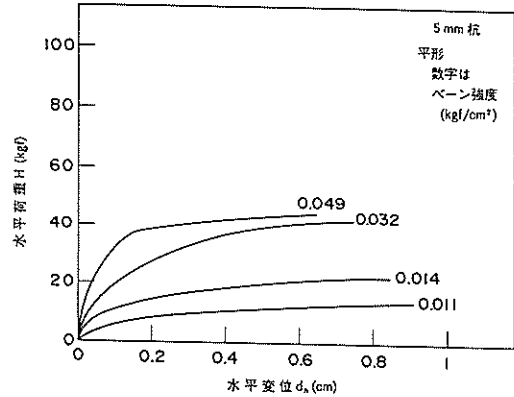


図-32 水平荷重と水平変位の関係(ひら形)

力に対する底版の寄与が大きくなるだろうと考えられる。

図-32には、ひら型の水平荷重 H と水平変位 d_h の関係を示している。図よりわかるように、ひら形の場合は、比較的小さな変位で水平抵抗力がピークに達し、変位ともに強度が増加する傾向はない。前に示したくし形の変位挙動に比べてその傾向には明かな差がある。

4.8 12本杭のシリーズと2本杭のシリーズの比較

この構造物は荷重の荷重方向に対して直角方向の杭の間隔は杭幅の約3倍に取っており、隣同士の杭が互いに影響しないように考えられているが、現実に着底式くし形構造物が設置される場合には、何基もの構造物が一列に並ぶことになり、構造物は二次的に挙動する。構造物の側面にある地盤の影響を受けない小型土槽の実験が現実の構造物を一列に並べている条件に近い。しかし、小型土槽では土槽側面の摩擦の影響を受け、結果として、二次元的挙動の効果を十分には再現していない。そこで、より三次元的な2本杭のシリーズとやや二次元的な12本杭のシリーズとを比較することにより、二次元挙動をする際の隣あった杭の相互作用の影響を予測する。

図-33、図-34に、水平荷重 H と水平変位 d_h の関係について2本杭シリーズと12本杭シリーズで比較した。2本杭シリーズは12本杭シリーズに比べて杭の本数が6分の1の模型であることを考慮して、図に示してある2本杭シリーズの水平荷重は実際に荷重を6倍したものである。図よりわかるように、地盤強度が同じであれば2本杭の方が変位に対する剛性が高い挙動を示している。

図-35、図-36には回転角 $\tan \theta$ と水平変位 d_h の関係を示した。2本杭のデータはばらついているため、やや判然としないが、この関係については2本杭と12本

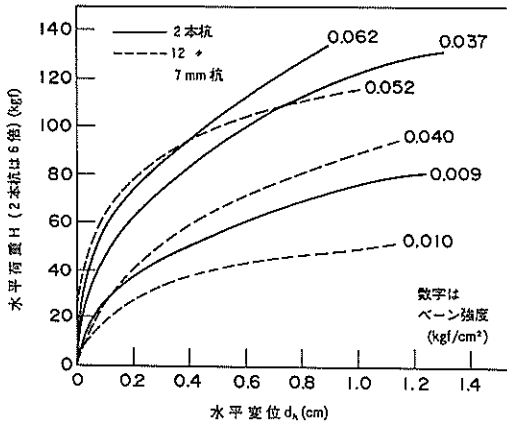


図-33 水平荷重と水平変位の関係 (7 mm 杭)

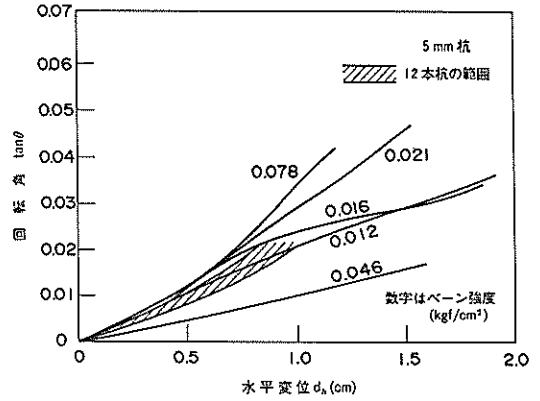


図-36 回転角 $\tan \theta$ と水平変位の関係 (5 mm 杭)

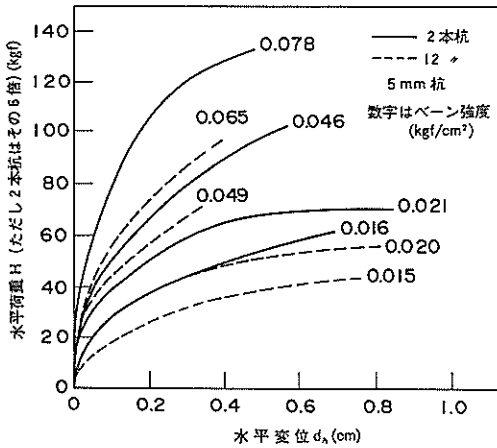


図-34 水平荷重と水平変位の関係 (5 mm 杭)

杭で傾向に顕著な差がない。

図-37, 図-38には7 mm 杭の場合について、杭頭部に近い点で測定した曲げモーメント M_i と水平荷重 H の関係を示した。データにばらつきはあるが、2本杭の方が同じ荷重条件下で曲げモーメントが小さく出る傾向にある。ある荷重条件下での曲げモーメントの深度分布について、2本杭と12本杭で比較したのが図-39である。比較した図では、2本杭の方が、1堤体あたりの水

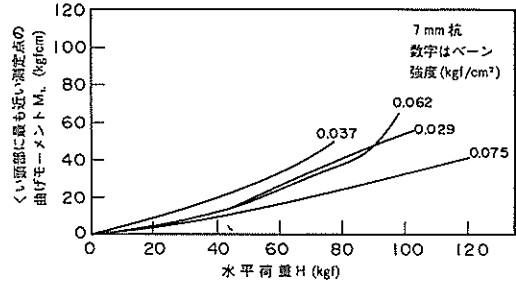


図-37 曲げモーメントと水平荷重の関係 (12本杭)

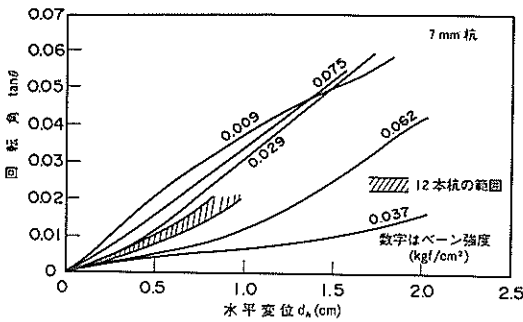


図-35 回転角 $\tan \theta$ と水平変位の関係 (7 mm 杭)

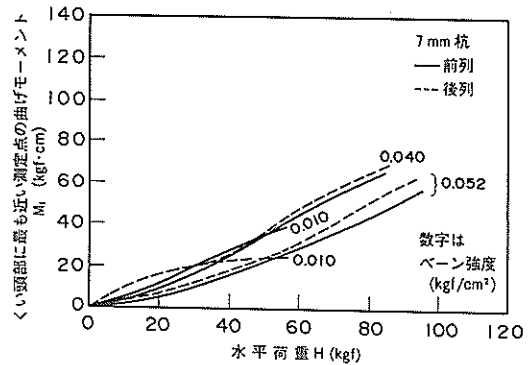


図-38 曲げモーメントと水平荷重の関係 (2本杭)

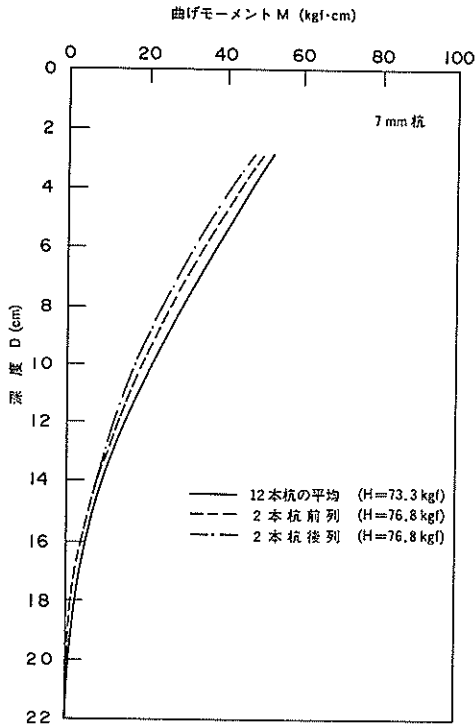


図-39 曲げモーメントの深度分布

平荷重は大きい。この曲げモーメントの深度分布の形状は2本杭と12本杭で同じである。

以上の結果より次のことがいえる。2本杭の場合には、12本杭よりも堤体の水平方向への変位剛性は高くなる傾向にある。しかし、水平変位と回転角、荷重と曲げモーメントの関係についてはほとんど両者に差がない。したがって、今回の構造物では2本杭の場合でも多くの構造物が1列に並んだ場合でもほぼ同じ挙動を示すと予想され、隣あった杭が相互に及ぼしている影響はほとんどなかったと考えてよい。

5. 考 察

5.1 変位が小さいときの水平抵抗力の分担特性

比較的水平変位が小さいときには堤体はあまり回転しない傾向にある。そこで、①杭が杭頭固定単杭として挙動するものと仮定して、杭が受け持つ水平抵抗力 ΣT を計算し、②水平荷重 H と計算によって得られた杭が受け持つ水平抵抗力の差を底版が受け持つ水平抵抗力であるとして、③杭の水平抵抗力分担率 $\Sigma T/H$ を求めた。したがって、ここでは $1-\Sigma T/H$ を底版の水平抵抗力分担率であると考えている。なお、杭に働く水平荷重は、堤体の水平変位（杭頭部の水平変位）と杭に働く曲げモ

表-6 地盤強度と地盤反力係数の関係

地盤強度 τ_{vf} (kgf/cm ²)	地盤反力係数 k_c (kgf/cm ^{2.5})	試料
0.0651	0.5	川崎 A
0.0633	0.5	川崎 A
0.0549	0.5	川崎 B

ーメント分布の2つのデータから推定している。

まず、地盤の反力係数を以下のようにして求めた。

すでに述べたように、単杭の水平載荷実験を行っており、この結果、地盤強度 τ_{vf} と地盤反力係数 k_c は表-6に示すような関係にあった。ここで、地盤反力係数 k_c が地盤強度 τ_{vf} （手動ベーン）と比例関係にあると仮定し、その係数を調べると、次式の関係になる。

$$k_c = 8.2 \tau_{vf} \quad (1)$$

ここに、 k_c ：地盤反力係数 (kgf/cm^{2.5})

τ_{vf} ：ベーン強度 (kgf/cm²)

個々の実験では地盤反力係数を測定していないので、表-6の結果をもとにして地盤の強度から地盤反力係数を予測することにする。

沢口⁷⁾によれば、一軸圧縮強度 c_u と k_c 値の関係については、次式のようになる。

$$k_c = c_u \sqrt{\frac{2\pi}{\epsilon_{50} \cdot B}} \quad (2)$$

ここに、

k_c ：地盤反力係数 (kgf/cm^{2.5})

c_u ：非排水せん断強度 (kgf/cm²)

ϵ_{50} ： $c_u/2$ のときの圧縮ひずみ

B ：杭幅 (cm)

実験の結果、 ϵ_{50} はおおよそ0.02、 B は2cmであったので、この結果を沢口の式に代入すると、次式のようになる。

$$k_c = 12.5 c_u \quad (3)$$

一方、ここで測定している地盤の強度は手動ベーン試験機によるものであるので、手動ベーン試験結果と一軸圧縮試験結果をいくつかの地盤について比較してみた。図-40がその結果であり、一軸圧縮試験結果と手動ベーン試験結果とはほぼ比例($c_u = 0.7 \tau_{vf}$)することが明かとなった。

そこで式(1)を c_u について書き直すと、次式のような関係になり式(3)とよく一致している。

$$k_c = 11.7 c_u \quad (4)$$

以下の解析では、地盤反力係数 k_c の推定に(1)式を用いている。

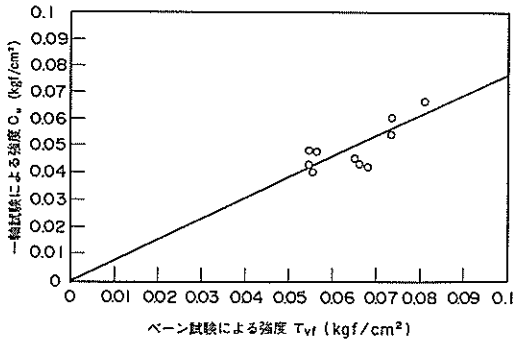


図-40 一軸圧縮強度とベーンせん断強度の関係

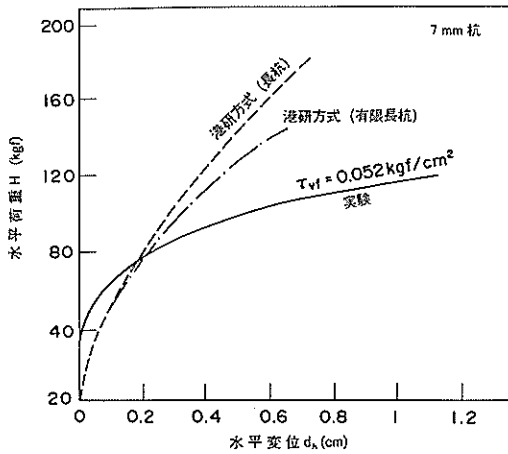


図-41 (a) 水平荷重と水平変位の関係 (7 mm 杭)

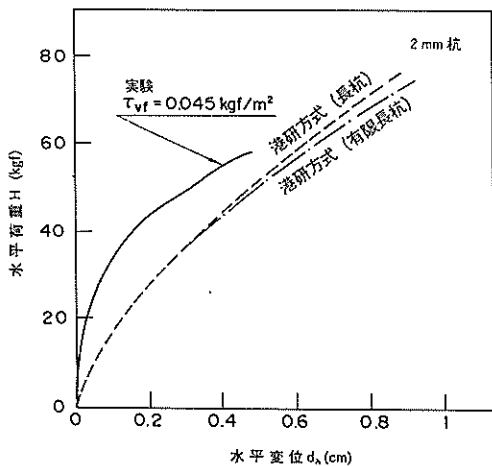


図-41 (b) 水平荷重と水平変位の関係 (2 mm 杭)

図-41には、水平荷重 H と水平変位 d_h の関係を堤体と単杭の比較で示している。ここで杭については単杭で計算した値の1.2倍を縦軸に荷重としてとっている。ここで、同じ変位でみた場合の両者の荷重の差が底版による水平抵抗であると考えてみる。このように考えると大変位の場合には、同じ変位で計算上の杭の抵抗力が堤体の抵抗力を越えてしまうが、このようなことは実際問題としては起きないはずである。このように、堤体にかかる水平荷重の100%以上を杭が受け持つような計算になってしまう原因には二つの理由が考えられる。第一には、水平変位が大きくなると堤体が回転するため、杭頭が回転し、杭頭固定の条件の場合より変位しやすくなるのである。第二には、港研方式の仮定が成り立たなくな

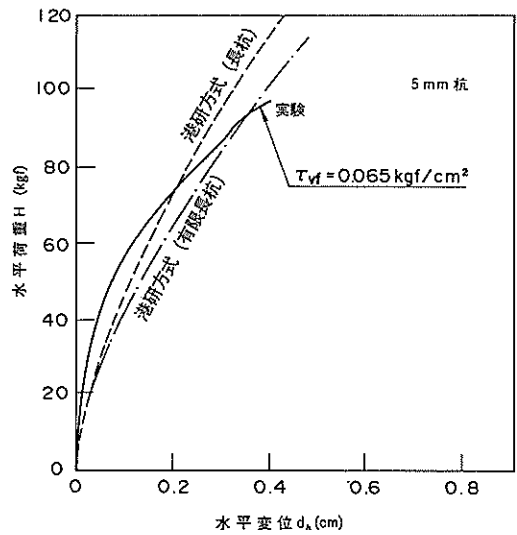


図-41 (c) 水平荷重と水平変位の関係 (5 mm 杭)

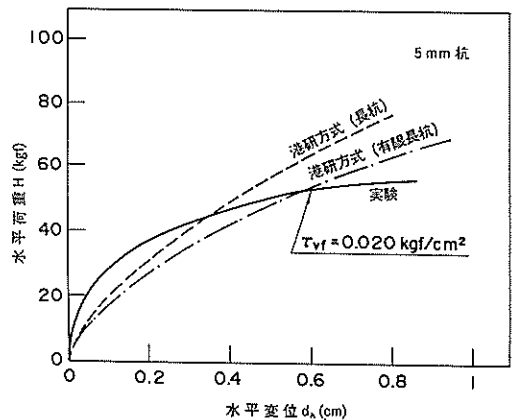


図-41 (d) 水平荷重と水平変位の関係 (5 mm 杭)

ることである。図-20、図-21で示したように、この地盤では、高さ3 cmのところの水平変位が0.5 cm程度になると、港研方式との差が現れてくる。篠原ら⁸⁾が砂地盤で計測した場合に比べてやや小さな変位で港研方式は合いにくくなるのである。したがってこの仮定では変位が大きくなるにつれて、特に剛性の高い杭では比較的初期の段階から、また地盤強度が弱いほど、杭の分担率が過大評価する傾向にある。

曲げモーメントから求める場合には、杭全体の曲げモーメント分布から杭にかかる水平荷重を求めるが、杭の固定条件などの関係から必ずしも単杭の場合のモーメント分布と実験の結果現れたモーメント分布とが全体で一致することはない。そこで、比較的杭頭に近いところでの曲げモーメントを中心に杭にかかる荷重を推定した。単杭の計算では杭頭は回転しないものとして計算しているが、実験上は回転の挙動が入る。杭頭が回転することによって同じ荷重条件下での杭の比較的頭部に近い点に働く曲げモーメントは小さくなる。したがって、変位が大きくなり回転の効果が無視できなくなってくると、杭頭固定条件の曲げモーメントとの対比によって求めた杭の水平抵抗力分担率の推定はやや過小評価になると考えられる。

この両推定方法はいずれも決して精度の高いものではないが、実際の現象は両者の間にあると考えてよいと思われる。

以上の結果をまとめたのが図-42、図-43である。図-42には、杭の剛性が高いほど杭の水平荷重分担率 $\Sigma T/H$ が高いことが示されている。また、図-43では、地盤強度 τ_{vf} が高いほど分担率が大きいことが示されている。また、これら4つのケースとも比較の変位の小さい範囲から杭による水平荷重分担率が大きいことがわかる。変位が進むにつれて堤体の回転挙動は顕著にな

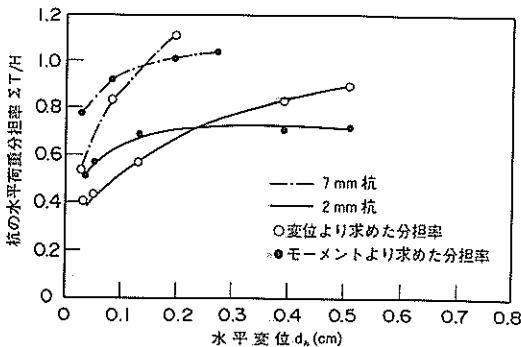


図-42 杭の水平荷重分担率と水平変位の関係 (杭剛性の違い)

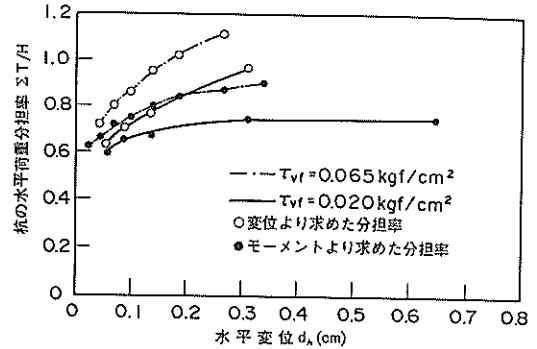


図-43 杭の水平荷重分担率と水平変位の関係 (地盤強度の違い)

り、底版の後部が浮き上がり、版が水平力に抵抗しなくなる傾向になるため、杭による水平荷重分担率 $\Sigma T/H$ はますます大きくなると考えられる。

5.2 堤体の極限抵抗力

これまでの実験結果では、どの実験においてもピーク荷重は得られなかった。しかし、荷重の増加とともに変位の増加率は大きくなり、比較的大変位を起こさせている実験ケースでは、「降伏荷重」が得られていると考えられる。そこで、ここでは大変位を起こさせた実験結果について降伏荷重 p_y を決定し、Bromsの極限荷重 p_{cr} と比較する。

Broms⁹⁾は水平力を受ける杭と地盤系の破壊状態を考察し、杭を曲げ剛性、根入れ長、地盤の剛性によって分類し、粘性土と砂質土の場合の杭の極限水平抵抗を求める方法を提案している。ここでは、この構造物で用いられている杭の特性を考慮し、Bromsの提唱している設計用極限水平抵抗力のうち、粘土地盤、杭頭固定短杭の条件と実験結果を比較する。今回の実験条件の中では5 mm杭と7 mm杭の場合には、杭の条件がここで考える短杭の条件に一致しているが、4 mm杭以下の杭では短杭の条件に一致していないと考えられる。

粘土地盤、杭頭固定短杭条件においてBromsの式では、地盤反力は地表面より1.5Bの深さまでは0で、それより深い点では $9c_u B$ で一定と仮定されており、極限抵抗力は次式で表わせる。

$$p_{cr} = 9c_u B (l - 1.5B) \quad (5)$$

ここに、 p_{cr} : 極限荷重 (kgf)

c_u : 地盤の強度 (kgf/cm²)

B : 杭幅 (cm)

l : 杭長 (cm)

ここでは、載荷初期の荷重変位曲線が比較的直線とな

る部分と載荷終期に再び荷重変位曲線が直線的になるところに注目して、両区間で接線を引き、その交点を降伏点として求め、その点の荷重を降伏荷重 p_y と定義する（図-44）。実験結果からみると、降伏点と、降伏荷重になるときの変位とに大きく差があるが、ここでは特に荷重に注目しており、この点の荷重が降伏荷重であると考えるのは必ずしも不適當ではないと考えられる。

図-45 に、12本杭の模型の降伏荷重 p_y と Broms の式による極限荷重 p_{cr} の関係を示す。Broms の式からもわかるように極限荷重は地盤強度に比例するので、図中で極限荷重が大きいかほど地盤強度が大きくなる。この結果からもわかるように、地盤強度が大きくなると Broms の式による極限荷重と降伏荷重の差が大きくなる。

同様に、図-46 に、2本杭の模型の例を示す。地盤強度の低いところでは Broms の極限荷重を越える降伏荷重を示す場合もあるが、全体的には12本杭と同様の傾向がみられる。

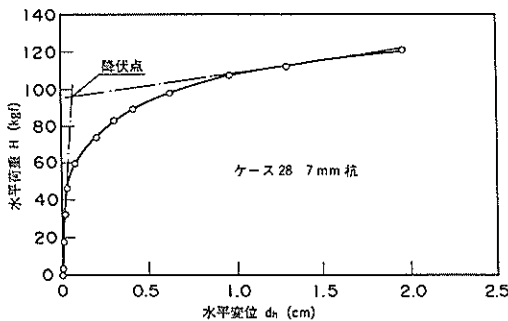


図-44 降伏点

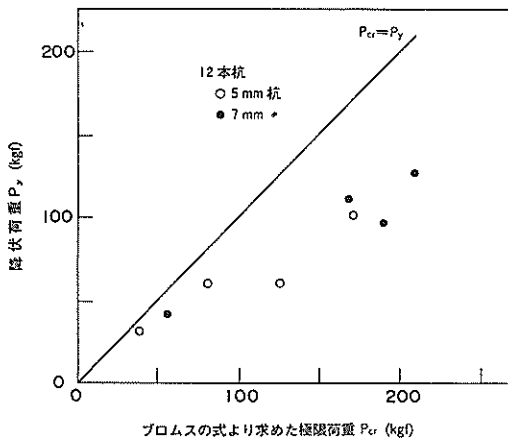


図-45 降伏荷重と Broms の式より求めた極限荷重の関係（12本杭）

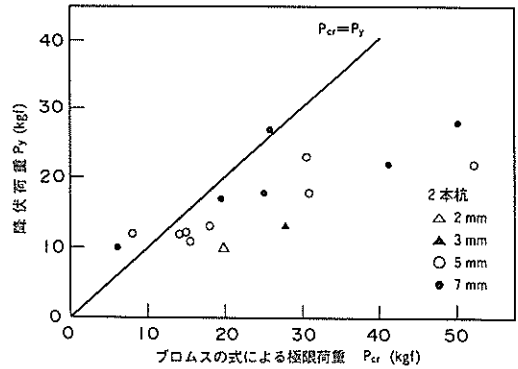


図-46 降伏荷重と Broms の式より求めた極限荷重の関係（2本杭）

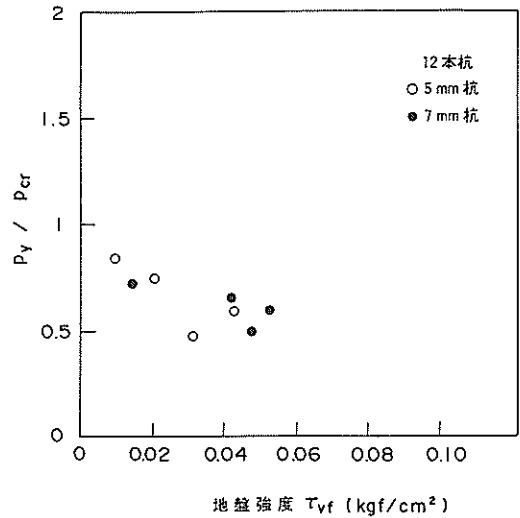


図-47 降伏荷重比と地盤強度の関係（12本杭）

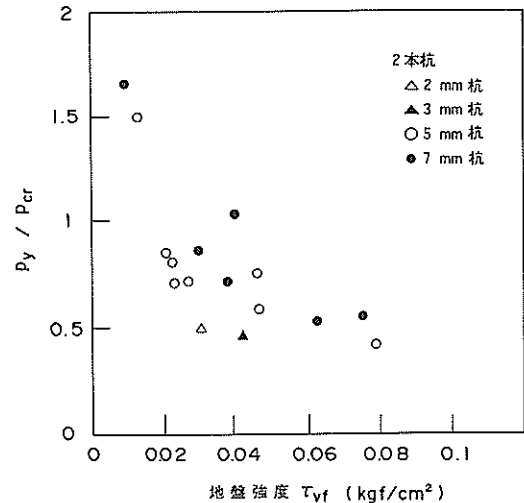


図-48 降伏荷重比と地盤強度の関係（2本杭）

図-47, 図-48に, Bromsの式による極限荷重と降伏荷重の比 p_y/p_{cr} と地盤強度 τ_{vf} の関係を示す。

図よりわかるように, 地盤の強度が大きくなると比 p_y/p_{cr} が小さくなり, 特に 0.04 kgf/cm^2 を越えると降伏荷重は Broms の極限荷重の約半分の荷重しか示さなくなる。

さらに, Broms の式による極限荷重と降伏荷重の比 p_y/p_{cr} と杭の根入れ比 E_r とモーメントの第二ゼロ点の深さ l_{m1} の比である根入れ比 $E_r (= l/l_{m1})^{(6)}$ の関係を図-49に示す。根入れ比が0.3より小さいときには, E_r が小さくなるにつれて p_y/p_{cr} が大きくなるが, 根入れ比が0.3より大きいときは, p_y/p_{cr} はほぼ0.5と一定している。

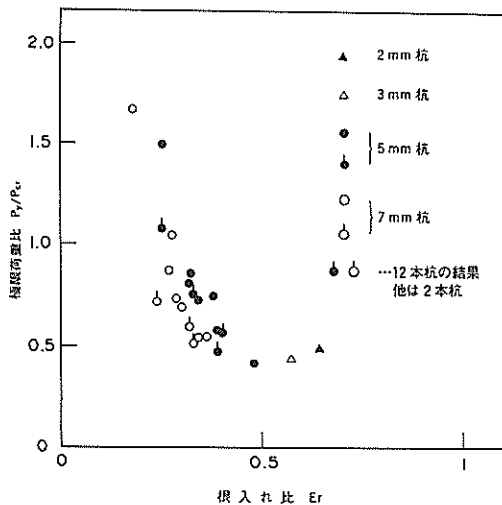


図-49 降伏荷重比と杭長比の関係

根入れ比が大きいときは短杭の条件が満足されなくなるため, 今考えている Broms の仮定と条件が大幅に異なる。このため p_y/p_{cr} が小さくなるのは当然だが, $0.3 \leq E_r \leq 0.7$ 程度では $p_y/p_{cr} \geq 0.5$ という傾向にあった。

すでに述べてきたように, この模型では杭の頭部は, 堤体の回転とともに, 回転をする。そのため, 水平変位は杭の上部で大きい, 下部では小さい。変位の小さい下部では十分に地盤反力が発揮されていないと考えられ, このため, Broms の仮定と今回の杭の変位の条件は一致していない。また, 降伏荷重 p_y と Broms の極限荷重 p_{cr} の関係は必ずしも明瞭ではないので, p_y/p_{cr} が1と等しくなるかどうかはここではあまり意味をもたない。しかし, 杭の条件が短杭と認められるときには, 降伏荷重 p_y が Broms の極限荷重 p_{cr} に近づく傾向にあることがわかる。

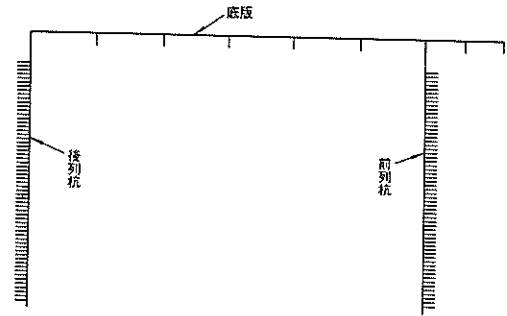


図-50 計算に用いたモデル

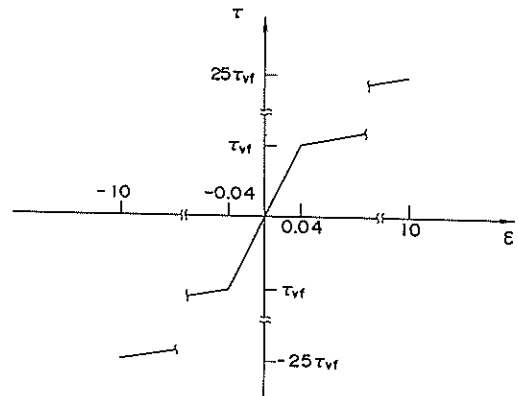


図-51 計算に用いたバネの応力ひずみ関係

5.3 バネモデルによる堤体の変位挙動の予測

堤体の回転挙動の効果をより詳しくみるために, 図-50に示すようなバネモデルを用いて数値計算をした。

杭に該当する鉛直部材には, 水平方向には港研方式を表すバネをつけており, 鉛直方向には杭と地盤との付着力を表すために, 図-51に示すような応力ひずみ関係をもつバネをつけている。この応力ひずみ関係は一軸圧縮試験の結果を参考に決定している。また, 底板を表す水平部材には, 水平方向には地盤と底板の付着力を表すバネをつけており, 鉛直方向には地盤を圧縮するのに抵抗するバネをつけている。いずれのバネも図-51と同じ応力ひずみ関係を持っている。ただし, 底板の鉛直方向のバネは, 底板が地面から離れるような変位をしたときにはバネの力がゼロになるようにしてある。なお, それぞれの部材には自重がないものとして計算している。

ここでは, 杭の剛性の違いと, 地盤強度の違いについて計算結果と実験結果とを比較してみる。計算結果との比較に用いた実験は, 杭の剛性の違いについては, ほぼ地盤強度が同じ2mm杭のケース6(地盤強度 $\tau_{vf} =$

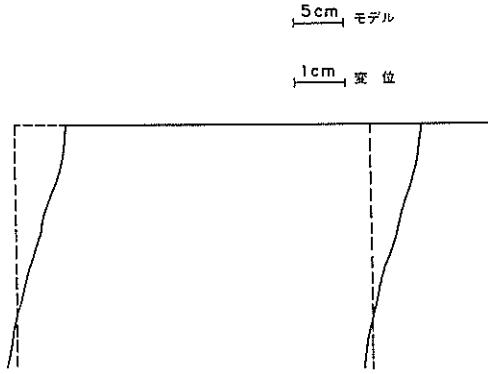


図-52 モデルの変位状況(2mm杭)

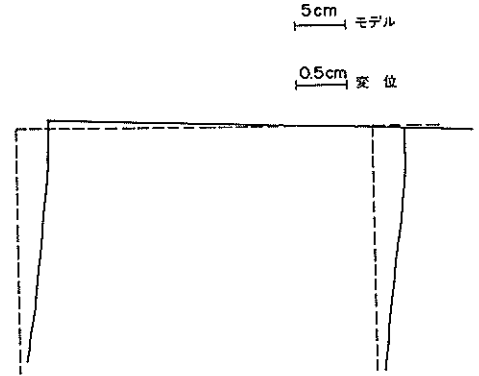


図-54 モデルの変位状況(5mm杭, 地盤強度小)

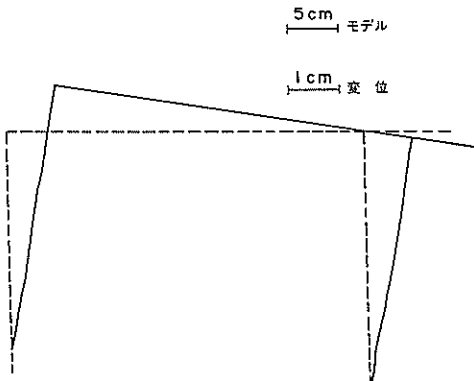


図-53 モデルの変位状況(7mm杭)

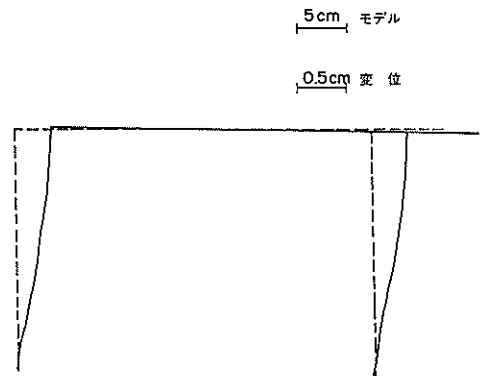


図-55 モデルの変位状況(5mm杭, 地盤強度大)

0.046 kgf/cm²)と7mm杭のケース29(地盤強度 $\tau_{vf} = 0.052$ kgf/cm²)であり、地盤強度の違いについては、5mm杭のケース16とケース23である。

まず、計算結果による全体強度について述べる。

図-52と図-53に、2mm杭と7mm杭の場合について杭頭部の水平変位がほぼ同じときのモデルの変位状況を示す。ここで変位のスケールは、モデルのスケールの5倍に拡大している。このとき、2mm杭のモデルの方は12本杭の模型としては90kgfを載荷している状態であり、一方の7mm杭の方は160kgfを載荷している状態であり、両者の載荷重は異なったものである。両者には3つの点で挙動に差がある。第一に2mm杭の場合にはほとんど回転挙動を示さないのに対し、7mm杭の方は大きく回転している。第二に2mm杭のモデルでは杭がかなり曲げを受けているのに対し、7mm杭のモデルでは杭はほとんど曲がらず回転している。第三に、杭の下端部が、7mm杭の場合にはやや前に出ているのに対し、2mm杭では逆方向に変位している。このように下端部が後方に変位するのは、Bromsの示した杭頭固定の中

間的な長さの杭の挙動にみられるものである。一方7mm杭の場合でも、Bromsの極限抵抗で仮定されているように杭は変位しておらず、下端部はほとんど水平変位をしていないことがわかる。

図-54と図-55に地盤強度が異なる例について同じように変位状態を示した。ここで図-54が地盤強度 $\tau_{vf} = 0.020$ kgf/cm²の場合であり、図-55が地盤強度 $\tau_{vf} = 0.065$ kgf/cm²の場合である。両図では杭頭部の水平変位は約0.5cmであり、変位のスケールはモデルに比べて10倍になっている。模型の回転の状況、杭下端の変位状況などは2mm杭、7mm杭の挙動と同じように差が出ており、地盤強度が小さい方がより短杭的に挙動することがわかる。

次に計算結果と実験結果を比較する。

図-56に2mm杭と7mm杭の水平変位 d_h と水平荷重 H の関係について計算結果と実験結果の比較を示す。図-57には5mm杭の場合を示す。これらの結果を見てわかるように、このモデルは比較的よく実験結果を再現している。ただし、変位がある程度大きくなると、単

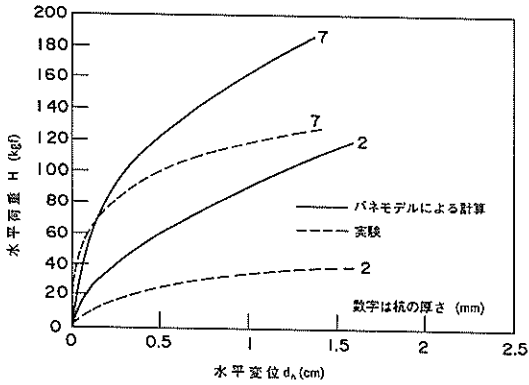


図-56 水平荷重と水平変位の関係(杭剛性の違い)

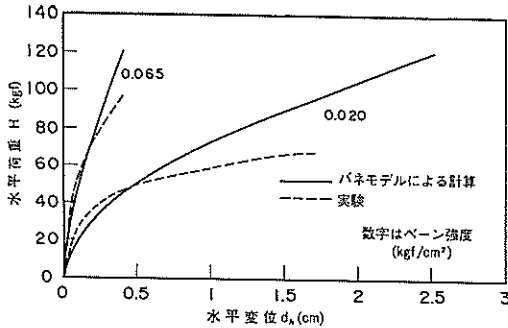


図-57 水平荷重と水平変位の関係(地盤強度の違い)

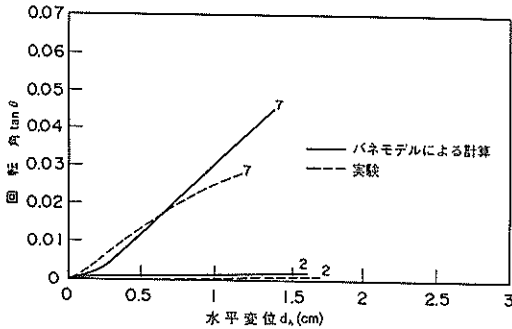


図-58 回転角 $\tan \theta$ と水平変位の関係(杭剛性の違い)

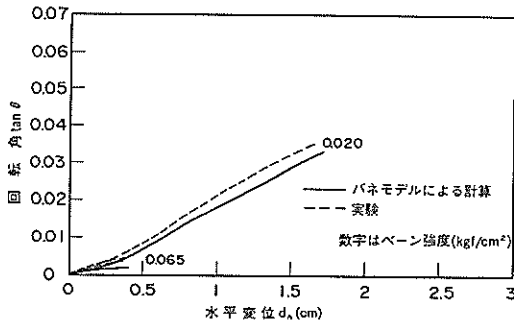


図-59 回転角 $\tan \theta$ と水平変位の関係(地盤強度の違い)

杭の載荷試験結果と同様に、地盤反力が港研方式の仮定と異なり、飽和してくるため、全体として、実験結果の方が水平変位量が大きくなる。

図-58、図-59に回転角 $\tan \theta$ と水平変位 d_h の関係を示す。それぞれ杭の剛性の違いによって回転量に差があることがここでも表されており、実験結果を良く説明している。

図-60から図-63に、比較的的水平変位の小さな領域でのある荷重における杭に働くモーメント分布を示した。実験結果はいずれも平均的な値を示している。これらの結果からわかるように、モーメントの値や分布形状が実験と計算とでよく一致している。

さらに、杭の水平抵抗力分担率について計算した結果を図-64、図-65に示す。杭の剛性が高い方が、杭の水平抵抗力分担率 $\Sigma T/H$ は、初期から大きく、また水平変位が大きくなって最終的な値に差があることがわかる。地盤強度 τ_{vf} の差は計算結果では顕著に現れなかった。

また、大変位をしたときに図-18に示したように、一部の試験結果では、後列杭の曲げモーメントが前列杭の曲げモーメントより小さくなる傾向がみられた。結果は示していないが、今回のモデルで計算する限りにおいては、前列と後列とで杭に発生する曲げモーメントに差

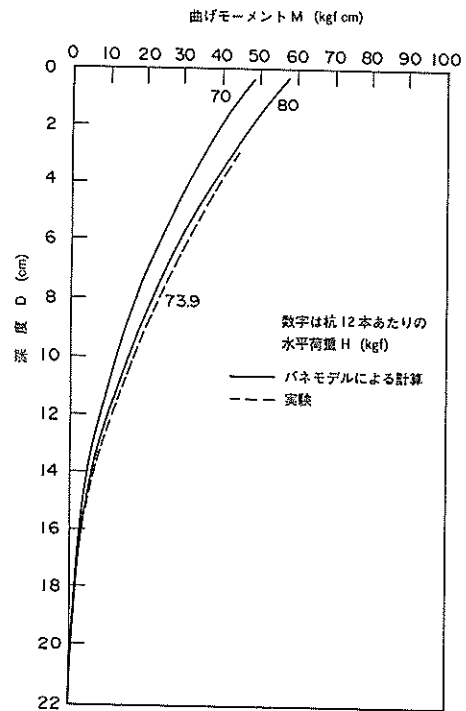


図-60 曲げモーメントの深度分布(2mm杭)

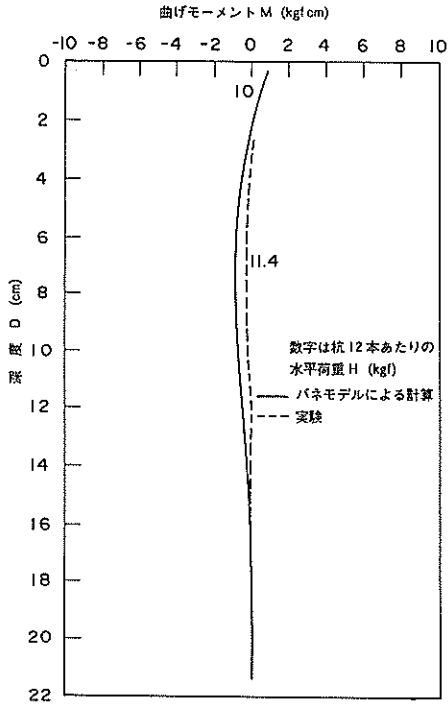


図-61 曲げモーメントの深度分布 (7 mm 杭)

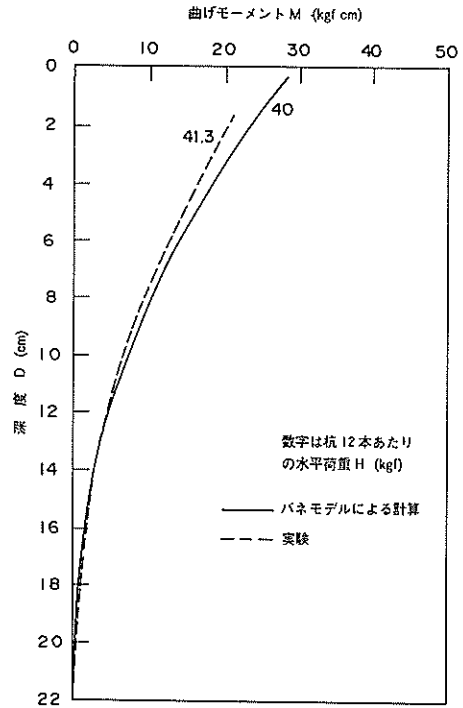


図-63 曲げモーメントの深度分布 (5 mm 杭, 地盤強度大)

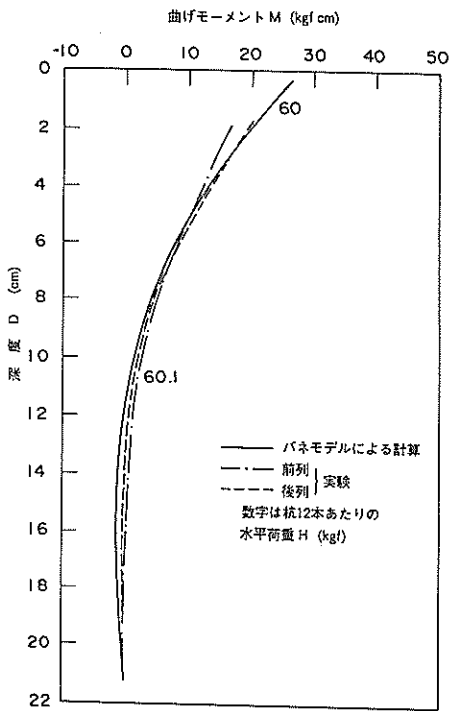


図-62 曲げモーメントの深度分布 (5 mm 杭, 地盤強度小)

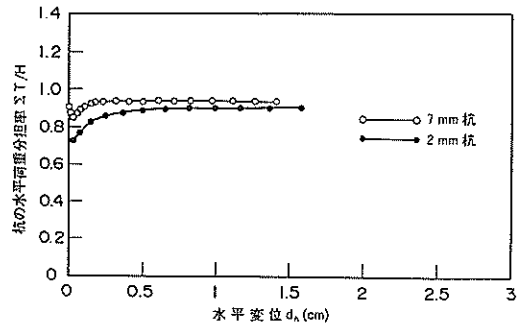


図-64 杭の水平荷重分担率と水平変位の関係 (杭剛性の違い)

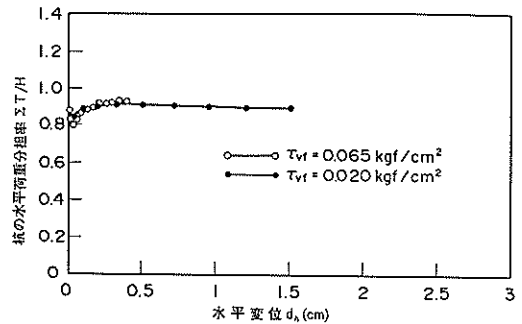


図-65 杭の水平荷重分担率と水平変位の関係 (地盤強度の違い)

はみられなかった。また、抜け上りを考慮して、地盤反力の発生する地点を下げたモデルにおいても、計算結果では前列杭と後列杭で曲げモーメントに大きな差はなかった。

この違いについては以下のようなことが考えられる。第一に、実験では、地盤に引っ張り力によるクラックが入ることは避けられず、このため、変位が進むにつれて後列杭前面の地盤反力が前列杭前面の地盤反力よりも小さくなった。第二としては、後列杭は変位とともに抜け上がり、周辺地盤の拘束が弱くなったため、跳ね返るような挙動をし、曲げモーメントが解放された。

以上のような効果は今回の計算モデルでは考慮できないため、計算と実験とで差が出ている。

6. 結 論

本研究では着底式くし形構造物の水平力に対する抵抗メカニズムについて実験的に検討した。その結果以下のことがわかった。

1) 地盤強度や杭の剛性の違いはくし形構造物の挙動に影響し、どちらも高いほど変位しにくくなる傾向にある。

2) 杭の剛性が高いときには、くし形構造物は、変位の初期から回転挙動を示し、剛性の低いときには、初期にはひら形同様の水平変位を示すが、少しずつ回転挙動が顕著になる。

3) 杭が受け持つ水平抵抗力の比率は変位が進むにつれて大きくなり、今回の実験レベル(模型幅 50 cm)では 0.5 cm ほど変位すると水平抵抗力のほとんどを杭が受け持つようになる。

4) 1 本杭と 2 本杭による実験で 3 次元的効果の影響による実験結果の違いは顕著ではなく、堤体を帯状に並べたときの挙動は 2 本杭の模型によっても把握できる。

5) 堤体の荷重変位関係より得られた降伏荷重より求めた抵抗力は、Broms の式で与えられる極限抵抗力の 0.5 倍以上である。堤体は変位が進むにつれて抵抗力を増すため、Broms の式で与えられる抵抗力の 0.5 倍以上の外力に抵抗できる。

7. あとがき

今回の実験では、相似則を考慮すると比較的地盤の強度が高く、現地実験の結果と比較すると底版による抵抗力をやや過小評価している可能性がある。従って今回の実験で用いた地盤より相似則を考慮した地盤強度が低い地盤では、杭による水平抵抗力分担率は今回の結果よりも小さくなり、底版による抵抗力の比率が大きくなる可

能性がある。

着底式くし形構造物の室内実験は、第四港湾建設局熊本港に建設中の軟弱地盤着底式くし形構造物の設計の基礎資料とするために実施したものである。

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)の努力によるところが大きい。有限要素法による計算にあたっては、土性研究室小林正樹室長にご指導いただいた。さらに、本研究の報告をまとめるにあたって、佐藤勝久土質部長には貴重なご意見をいただいた。

末筆ながらこれら関係者の方々に心からの謝意を表します。

(1990年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 口田登・小蔵紘一郎・細川泰廣・中野俊彦(1986) : 軟弱地盤着底式防波堤の開発に関する現地試験(水平載荷試験結果及び考察), 土木学会第 41 回 年次講演会概要集第 3 部, pp.137 - 138.
- 2) 木原力・中井修・成瀬進・吉本靖俊・池田薫(1987) : 軟弱地盤着底式防波堤の現地実証実験について, 海洋開発論文集 Vol.3, pp.125 - 130.
- 3) 北詰昌樹・遠藤敏雄・寺師昌明(1988) : 正規圧密地盤上の浅い基礎の支持力, 港湾技術研究所報告第 27 巻第 3 号, pp.185 - 203.
- 4) 運輸省港湾局監修(1989) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説第 5 編基礎, pp.376 - 397.
- 5) 小林正樹(1984) : 有限要素法による地盤の安定解析, 港湾技術研究所報告第 23 巻第 1 号, pp.83 - 101.
- 6) 久保浩一(1966) : 短杭の横抵抗, 港湾技術研究所報告第 5 巻 13 号, pp.1 - 38.
- 7) 沢口正俊(1968) : くしの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第 7 巻第 2 号, pp.65 - 94.
- 8) 篠原登美雄・久保浩一(1961) : 杭の横抵抗に関する実験的研究(その 1), 運輸技術研究所報告第 11 巻第 6 号, pp.169 - 242.
- 9) Broms Bengt B. (1965) : DESIGN OF LATERALLY LOADED PILES, *Proc. of A.S.C.E. Vol.91, No.SM3*, pp.79 - 99.

記号表

c_u : 非排水せん断強度 (kgf/cm²)
 D : 深度 (cm)
 d_k : 底版の純水平変位 (cm)
 d_{vb} : 底版後趾の鉛直変位 (cm)
 d_{vf} : 底版前趾の鉛直変位 (cm)
 e : 偏心量
 E : 杭材のヤング率 (kgf/cm²)
 E_r : 根入れ比 (= l/l_{m1})
 F_r : 模型の水平抵抗力 (kgf)
 H : 水平荷重 (kgf)
 H^* : 水平荷重強度 (tf/m²)
 I : 断面二次モーメント (cm⁴)
 k : 地盤の深さ方向の強度増加率 (tf/m²)
 k_c : 地盤反力係数 (kgf/cm^{2.5})
 l : 杭の地中部の長さ (cm)
 l_{m1} : 曲げモーメント第1ゼロ点の深さ (cm) (杭頭固定の場合は第2ゼロ点の深さ)
 M : 杭の曲げモーメント (kgf cm)
 M_1 : 杭頭部に最も近い測定点の曲げモーメント (kgf cm)
 p_{cr} : Broms の式による極限荷重 (kgf)
 p_v : 降伏荷重 (kgf)
 p_u : 底面粘着力による抵抗力 (kgf)
 s_{u0} : 地表面の地盤強度 (tf/m²)
 T : 杭頭に作用する水平力 (kgf)
 V : 鉛直荷重 (kgf)
 V^* : 鉛直荷重強度 (tf/m²)
 Z : 断面係数 (cm³)
 θ : 模型底版の回転角 (rad)
 τ_{vf} : ベーセンせん断強度 (kgf/cm²)

港湾技研資料 No. 679

1990・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.