

VI-1

杭枠式消波構造物

ソーケンコンサル(株) 正員 石倉建治

1 はじめに

これまでの防波堤は、基礎捨石上にケーソンのような単塊堤、またはその前面に消波工をおくという構造が多い。しかし、単塊堤には浮力が確実に作用し、滑動のマサツ係数も小さい。そのうえ施工にも一定の継続した風の期間を必要とする。杭枠式消波構造物は、スリット式であるから、それ自体消波効果もち⁴⁾、復元力がある。施工が容易で安全性も高い。その特長をいかすため、かつての能町²⁾、松岡³⁾らの実験的研究を再度読み返し、稚咲内の激浪時の事象等から、杭枠式消波構造物の外力の分担率について考察してみた。

2 構造の概要

水底地盤上に適当な間隔で杭を打ち込み、囲いを作る。その囲いの中に大割石を入れて杭頭部を鉄筋コンクリートで剛結するものである。ここで大事なことは

- (1) 杭周辺が深く洗堀されないようにすること。
- (2) 杭が引き抜き力によって浮き上がることがないようにすること。

(1)については図-1、3または写真-4にあるように杭枠から約2m離れた位置に網目1.5m×1.5m、大きさ6m×6m程度の薄形鋼等による格子網を設置し、その上に消波ブロックを2層位に乱積みし、ブロックと杭枠の間には300kg以上の大割石を投入する。波浪にもまれ、まもなく1.5m～2m程度点線の位置に沈下する。沈下が大き過ぎるときは、消波ブロックや大割石を補充すればよい。このようにして自動的に杭枠周辺は強固な根固めで囲まれる。

(2)については、もし杭が外力により少しでも浮き上がることがあるとすれば、杭の先端に砂粒が入り込み、力が去った後も完全には元の位置にもどらないかも知れない。そのようなことが波の周期に応じて繰り返されると、杭は少しずつ持ち上がり、構造物が遂には破壊に至る怖れもある。そこで杭は絶対に浮き上がらないという条件を満足させる必要がある。そのために外力が作用する側の杭の水底地盤付近にツバのような突起をつける。このツバの上に中詰め材や根固め材の荷重がかかり、杭の浮き上がりを押さえる。その結果、抵抗モーメントが増大し、地盤は杭に水平及び鉛直方向のバネとして作用し、構造物を支持する。

3 実施例

(1) 稚咲内漁港西防波堤

1978(昭和53)年、ダブル矢板工法に手戻りを生じ、今後の施工が困難との判断から杭枠工法が採用されることとなった。

構造は、 $\phi 500$ 、 $L=11\text{m}$ の鋼管杭を延長方向に3m、横断方向には6mの間隔で打ち込み、さらに 300×300 、 $L=11\text{m}$ のH鋼杭を、外側の延長方向の鋼管杭の間に0.75mの間隔で3本打ち込み、中詰めの大割石が流出しないようにした。横断方向には6mの間隔の鋼管杭の中間にH鋼杭を1本打ち込んだ。中間のH鋼杭の延長方向には、鋼矢板Ⅱ型を打ち込み防砂壁とした。さらに外力が作用する側のH鋼杭の水底地盤付近には図-1のツバ状の突起をとりつけた。その後鋼管杭は、上部コンクリート打設のとき、型枠のとりつけが面倒であるのと、鋼管杭とH鋼杭というように材料が均一でない不便もあり、まもなく全部 400×400 の

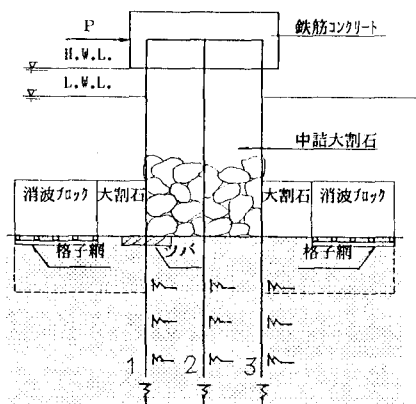


図-1 杭枠式消波構造物の一般図

“Stone filled wave energy dissipating structure framed by piles” by Kenji Ishikura

H鋼杭に変更統一した。そのため当初の図面は省略する。¹⁾ただしH鋼杭は、表面積が大きいので、錆代も大きく、断面不足となるので、干満差のある部分は、H鋼のフランジとウェブの間をコンクリートで詰めることとした。このことにより、H鋼の腐食はフランジの外側表面のみとした。

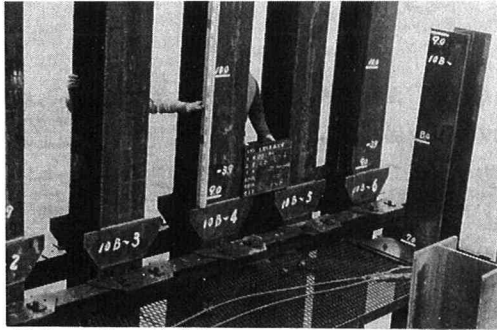


写真-1 杭の打ち込み
H鋼の側面に溶接した台形状のプレートが水底地盤付近まで打ち込まれる。

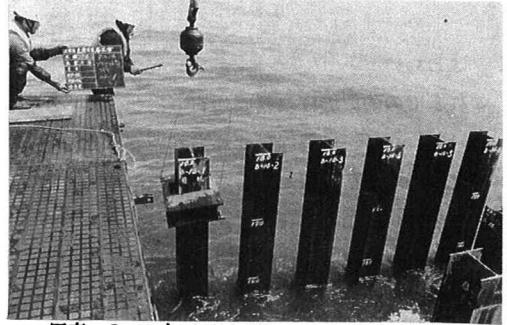


写真-2 ツバのとりつけ
落下している函形状の鋼製部材が、写真-1の台形状のプレート上に係止する。その上に石材や消波ブロックが載荷し、杭の引抜抵抗力が増大する。

(2) 元浦川導流堤

1980(昭和55)年、ダブル矢板工法が不能となり、稚咲内を参考とし、杭枠工法を採用することとなった。導流堤であるから洪水時に堤体の基部が異常に洗掘されることに十分対応する必要がある。他県の漁港では、杭枠構造の基部が大きく洗掘されて数100mに亘り倒壊したとも聞いている。また、かつて湧別漁港(河口)の航路維持のため毎年、大量の消波ブロックを投入して導流堤の補修をしたが、殆ど全部沖に流されてしまったことがある。そこで図-3、写真-4のように150×150のH鋼で格子網を作り、杭枠から2m離して直接砂地盤上に据付け、その上に3tの消波ブロックを2層に乱積みした。格子網の大きさは6m×6mであるから1セットで100t前後の重量となり、しかもこれ自体が消波構造物である。ブロックと杭枠の間には300kg以上の大割石を投入するが、波浪にもまれて沈下し、杭枠構造にとっては、自動的に都合のよい根固めが出来上がったと考えている。実際、1982(昭和57)年3月21日の浦河沖の大地震にも、全く何らの被害もなかった。



写真-3 1スパン(6m)の杭を打ち終わったところ。

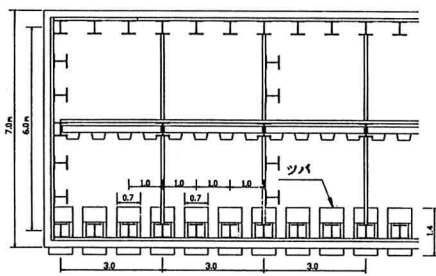


図-2 元浦川導流堤 平面図

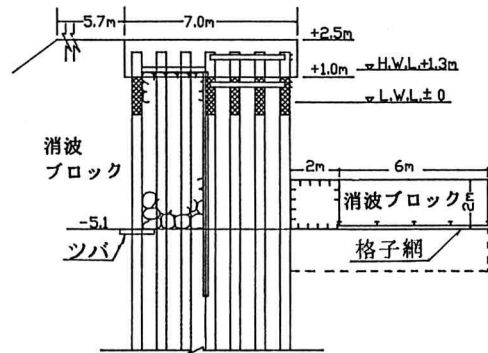


図-3 元浦川導流堤 断面図

(3) 長万部漁港南防波堤

稚咲内、元浦川を参考として施工した。

4 実験的研究

能町²⁾は、アクリル樹脂で杭長40cm、杭枠の堤体幅16cmの模型を作成し、杭の先端を固定しアクリル棒に

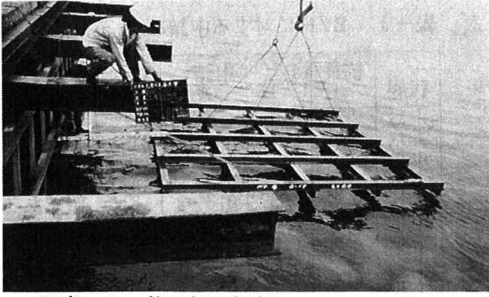


写真-4 格子網の据付

ゲージを張り、中詰の材料を変えながら引張荷重による歪みを測定し、かつダイヤルゲージによる杭枠の変位を測定した。この実験により中詰めの物理的性質によって相当の水平力を分担することが明かになった。実験の荷重-変位の関係は図-4のとおりである。カラとゆるい砂、メタクリルはほぼ直線の変化であるが、密な砂では 2.5kg、砂利では 3.0kgあたりから上がほぼ直線を示す。そこで中詰が砂利とカラのときの杭枠の変位を 荷重3.5kgのときの値を平均とみなし、 $1.78/6.3=0.283$ となるが、これは後説で述べる中詰砂利の杭枠の分担率と考えられる。

松岡ら³⁾は、杭長70cm、根入35cm、杭枠の堤体幅が20cmの模型を作り、前杭2本をピン結合、他の4本を自由端として実際に近づけた。また杭の引き抜き抵抗力を増大させるための水平突起(ツバ)は、2cm×4cmの亚克力板を杭の中間に取付けた。それが丁度水底地盤である。実験では、外側にマウンドのない場合でも中詰材の荷重がツバにかかり、その効果が表れる。荷重と水平変位の関係は、図-5のとおりで、case-3.2の中詰めが鉾津でツバつきの場合に最も小さく、case-1の中詰めがカラのときと比較すると、荷重5kgのときの変位の割合は、 $\text{case-3.2}/\text{case-1} = 0.25$ となる。さらに杭長を40cmとし、根入20cmに10cmの高さのマウンドをつけ、ツバありとツバなしの場合等も測定した。その結果を図-6、図-7に示す。図-7より、マウンドのない場合で、杭長40cmのツバありのとき、荷重 3kg以上で急に変位が大きくなり過ぎており、実験の全体からみて不自然であるから、これを省いてB/Hの中詰/カラの比を表-1に整理した。

5 稚咲内の激浪時の検討

1987(昭和62)年9月1日、台風12号が低気圧に変わり、道北地方一帯を襲い、利尻島の仙法志漁港のケーソンが4個滑動したが、同じ波向で約33km東に位置する稚咲内の防波堤には全く何らの異変も認められなかった。そこで杭枠の内部応力が、降伏点応力、または許容応力以内にあったとして、杭枠の分担率を計算してみた。沖波諸元は 波向 N 210° $H_0=8.4\text{m}$

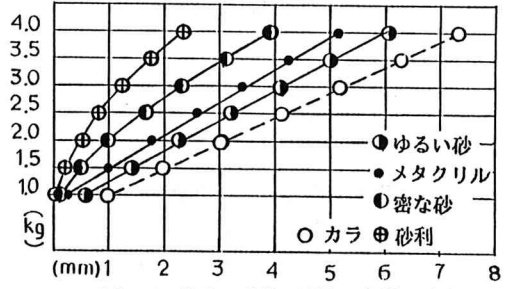


図-4 荷重-変位図(杭の先端固定)

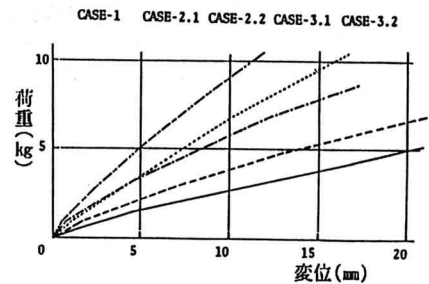


図-5 荷重-変位図(杭の先端ヒンジと自由)

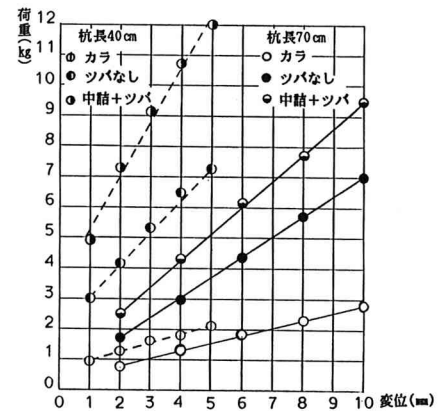


図-6 荷重-変位図(マウンドのある場合)

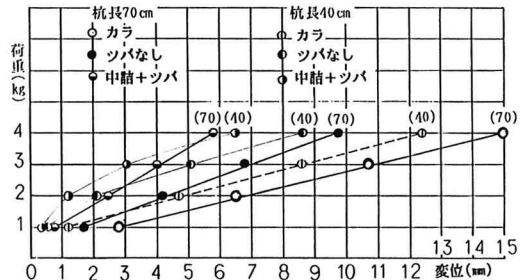


図-7 荷重-変位図(マウンドのない場合)

$T_0=13.3$ 秒である。これから屈折図等により、稚咲内の防波堤には

波高 $H=4.5\text{m}$ が直角に作用するものとして、
 波力は $P=1.0WH=1.0\times1.03\times4.5=4.64\text{t/m}^2$
 杭枠の分担率を a として、 a を 1.0 および $0.7\sim0.3$ まで 0.05 きざみで変化させ、杭を弾性床上の梁として変位法で解折、応力を計算したのが表-2で、真中の杭応力が最大である。杭枠の応力が降伏点応力 $2,300\text{kg/cm}^2$ 以内にあったものとすれば、分担率 a は 0.65 以下となり、許容応力以内にあったとすれば a は 0.4 以下となる。ただし、道の新しい設計基準により波高を計算すると
 $H=4.6\text{m}$ $P=4.74\text{t/m}^2$ となり、
 許容応力以内とすれば $a=0.35$ 以下となる。

6 杭枠の分担率

(1) 仮定

- a 杭は延長方向に間隔 b で入っている。
- b 中詰石は、杭枠によって仕切られるセン断梁である。
- c 天ばでは、杭と中詰石の水平変位は互いに等しい。
- d 水底地盤を固定とする。

(2) 力学モデル

上部工と海底地盤の間の杭 A_1B_1 、 A_2B_2 、 A_3B_3 は、横方向の力に対し、ラーメンとして働く。

(3) 外力 P の杭枠と中詰石の分担率

ア 杭の断面2次モーメントを I とすれば、杭枠の水平変位 δ は、

(i) 集中荷重 P_1 に対して

$$\delta = \frac{P_1 b H^3}{36 E I} \quad (5)$$

$$M_A = \frac{P_1 b H}{6} \quad (6)$$

(ii) 分布荷重 P_1 に対して

$$\delta = \frac{P_1 b H^4}{72 E I} \quad (7)$$

$$M_A = \frac{P_1 b H^3}{4} \quad (8)$$

イ 中詰石の平均セン断弾性係数を G とすれば、

中詰石の水平変位 δ は

(i) 集中荷重 P_2 に対して

$$\delta = \frac{P_2 b H}{G B b} \quad (9)$$

(ii) 分布荷重 P_2 に対して

$$\delta = \frac{P_2 b H^2}{2 G B b} \quad (10)$$

杭枠と中詰石は一体となって変位するので、消波構造物に作用する荷重は

$$P = P_1 + P_2 \quad (11)$$

$$\text{または } P = p_1 + p_2 \quad (12)$$

表-1 B/Hに対する中詰め/カラとG

状態	杭長 cm	B H	中詰め カラ	G kg/cm ²	備 考
マ ウ ン ド	ツバあり 40	1	0.176	41.2	0.25は報告書 ³ の値である。
	70	0.57	(0.25) 0.3	(6.7) 8.6	
ありなし	" 40	1	0.296	20.9	
	70	0.57	0.422	3.9	
"なし	あり 70	0.57	0.353	5.3	B/H=1は省く
	なし 40	1	0.543	7.4	
	70	0.57	0.635	1.7	

表-2 分担率の変化に対応する内部応力

符 号	波力(t/m ²) a × P	σ_c	σ_t	σ_a
MIX-1	1.0×4.64	3,341	-3,356	1,400
" 2	0.7 "	2,326	-2,330	"
" 3	0.65 "	2,172	-2,170	"
" 4	0.6 "	2,015	-2,015	"
" 5	0.55 "	1,858	-1,858	"
" 6	0.5 "	1,702	-1,700	"
" 7	0.45 "	1,545	-1,541	"
" 8	0.4 "	1,391	-1,383	"
" 9	0.35 "	1,233	-1,225	"
" 10	0.3 "	1,077	-1,069	"

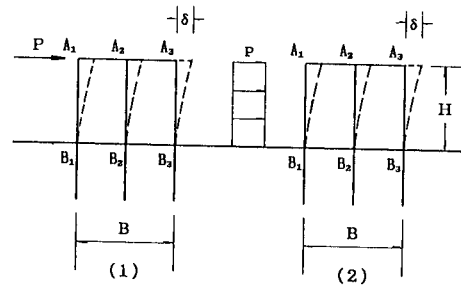


図-8 力学モデルの図

ウ 杭枠の変位と中詰石の変位は等しいから、集中荷重に対して、(5) と(9)から

$$\frac{P_1 b H^3}{36 E I} = \frac{P_2 b H^3}{G B b H^2} \quad (13)$$

$$P_1 = k P_2 \quad (14) \quad \text{ここで} \quad k = \frac{36 E I}{G B b H^2} = \frac{1}{\frac{B}{H}} \times \frac{36 E I}{G b H^3} \quad (15)$$

$$\therefore P_1 = \frac{k P}{1+k} = s \cdot P \quad (16) \quad \text{ここで} \quad s = \frac{k}{1+k} \quad (17)$$

$$P_2 = \frac{P}{1+k} \quad (18)$$

エ 分布荷重

P_1, P_2 に対しても集中荷重の場合と同じ結果が得られる。

能町の0.283 松岡の0.25 稚咲内の0.35 等は (17)の $s = \frac{k}{1+k}$ に相当する。

ここで、Gは実験または実測等により求められるものである。

(5) B/Hと 分担率 s の関係

各実験に対するB/Hは、表-3のとおりである。 実物に対するGの実測値は得られていないが、

(15)より $B \rightarrow 0$ なら $B/H \rightarrow 0$ で $k \rightarrow \infty \therefore s = k/(1+k) \rightarrow 1 \therefore P_1 = P, P_2 = 0$

$B \rightarrow \infty \quad B/H \rightarrow \infty \quad k \rightarrow 0 \therefore s = k/(1+k) \rightarrow 0 \therefore P_1 = 0, P_2 = P$

ゆえに分担率 $s = k/(1+k)$ と B/H の図は、実測値を通り、 $B/H \rightarrow 0$ で1、 $B/H \rightarrow \infty$ で0となる双曲線になるものと見なされる。

また、分担率sは(15)式のGとBを一定とし、Hを大きくするとkもsも小さくなり、Hを小さくすると大きくなる。これは現実と反する。つまりHが大きくなってslender になれば杭枠の分担率は小さくなり、Hが小さくなってずんぐりした形になれば杭枠の分担率が大きくなるというのである。式の上では正しいが、Gが問題である。今は実測値がないが、一般的には、堤体がずんぐりした形になれば、外力の大部分を分担するのは中詰石で、杭枠の分担率は低下するものと考えられる。そこでGはB/Hが小になれば小、大になれば大に変化するものと推定し、sとB/Hの関係を考えてみた。図-9に松岡らの実験値 表-1と能町の実験値および稚咲内の計算値をプロットした。これをみると境界条件が同じでも B/Hが小さいとき、sは大きく、B/Hが大きくなると、sは小さくなる。またマウンドや、ツバのあり、なし、またはそれらの組み合わせによってB/Hとsの変化の様子が表われている。

また、稚咲内の激浪時の検討の結果は、外力、内部応力ともに実測できず、波浪による推算の域を出ないが、仮りに波高 4.6mのとき、許容応力以内にあったものとみなすこととすれば、上限値は稚咲内の最小値を通る双曲線、下限値は能町の実験値を通る双曲線とみなすこともできよう。

図-9から、ツバの効果、マウンドの効果がよく読みとれる。マウンドの効果については、広井⁵⁾は釜山港の災害の例をあげ、防波堤の裏積みの効用を述べている。これは貴重な参考意見である。杭枠構造は、特に根固めが生命であるから、確実な設計、施工が肝要である。

能町らの実験的研究では、中詰石をセン断梁と仮定しているので、B/Hが0.4以下となると、その仮定が成り立たなくなること考えられる。そこで B/Hの最小限界を示す必要があるが、実用的には施工上のこと等も考えると、 $B/H \geq 0.6$ とし、 $s < 0.4$ あたりの範囲でB/Hとsを求めるのが妥当ではなかろうか。

(6) Gの計算

松岡の実験の模型の基本は図-9の2種類である。(15)式で $E = 800,000 \text{ kg/cm}^2$ $I = 0.02445 \text{ cm}^4$

(1) $B = 20 \text{ cm}, b = 10 \text{ cm}, H = 20 \text{ cm}$

(2) $B = 20 \text{ cm}, b = 10 \text{ cm}, H = 35 \text{ cm}$

表-3 実験と実例のB/H

実験者	B cm	H cm	B/H
能 町	16	40	0.4
松 岡	20	35	0.57
"	20	20	1.0
稚咲内	600	720	0.83

$$(15)より \quad G = \frac{36EI}{Bbh^2} \times \frac{1}{k} = \frac{c}{k} \quad (18)$$

$$ここに \quad c = \frac{36EI}{Bbh^2} \quad (19)$$

表-1のGは各ケースについて上式から計算したもので、能町は $G=2,108\text{kg/cm}^2$ 、稚咲内は 184.7kg/cm^2 であった。

7 杭枠の設計

1 水底地盤より上の堤体が、杭の引抜抵抗力を考慮して転倒に対し安全かどうか

2 中詰石の内部土圧に対し、杭枠は安全かどうか

3 図-6よりB/Hに対する分担率を求め

4 前側杭の引抜き力が0になるよう杭の根入または根固めに配慮し、外力および中詰石の内部土圧も考慮し

5 杭枠をラーメンとし

6 地盤中の杭に、水平および鉛直方向の地盤反力が作用し、全体を支持するものとして計算する

8 あとがき

1982(昭和57)年3月21日、浦河沖の地震は $M=7$ 、体感震度6という強震であった。このとき施工中のH鋼杭の頭部を 400×400 のH鋼で仮止めしてあったが、先端部の内側の杭のボルトが3本飛び、杭頭は約4cm河川側に変位していた。上部の石を一部除去し、ジャッキで杭頭を元の位置に戻し、工事を続行した。

杭枠の中詰石が外力の大部分を受けもつこと、引き抜き抵抗力を増すためのツバの効果等については、既に詳述された。

2) 3) 今回はそれについて考察するとともに、杭枠の外力の分担率について試案を述べた。実験には常に細心の注意を払って戴いたが、残念ながら規模が小さい。また実物について実測の資料も得られなかったため、推測の域をでない。しかし分担率についての一端は求められたものと思う。将来よりよい合理的な研究を望みたい。

実験的研究は、道の委託研究費ならびに科学研究費補助によるもので、能町、松岡両先生にお願いをしたが、道のご理解に感謝する。今回、本文のとりまとめにあたり、理論並びに実験資料の整理については、能町、松岡両先生のご指導を戴き、大変お世話になった。また稚咲内の波の計算は、竹田英章先生のお手数を煩わした。記して心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 稚咲内漁港の改修工事をみる 土木施工23巻2号(1982.2) 石倉建治
- 2) 杭打式消波構造物における力学的研究 北海道委託研究費 昭和54年3月 能町純雄
- 3) 杭打式消波構造物の力学特性に関する実験的研究 北海道科学研究費補助 昭和61年3月
松岡健一、大島俊之、澤田知之、石倉建治
- 4) スリット式防波堤に関する研究報告書 大豊建設株式会社 昭和49年3月
1 波力の測定 岸力 2 構造計算 能町純雄
- 5) 築港 前編 P.385 丸善 広井勇

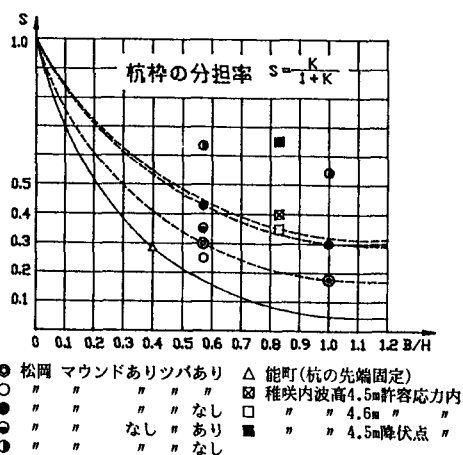


図-9 s と B/H の関係

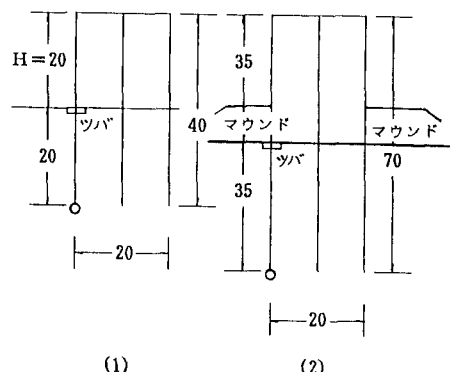


図-10 松岡の実験の模型図