

# 港湾技術資料

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

No. 650      June 1989

トラス式鋼製岸壁の振動性状

稲	富	隆	昌
豊	田	奉	節
風	間	基	樹
大	塚	幸	治

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	3
2. 模型実験 .....	6
2.1 模 型 .....	6
2.2 実験方法 .....	8
3. 実験結果 .....	9
3.1 水平載荷試験結果 .....	9
3.2 自由振動実験結果 .....	11
3.3 裏埋め地盤完成時のトラス模型の挙動 .....	11
3.4 正弦波加振実験結果 .....	12
3.5 地震波加振実験結果 .....	16
4. 数値解析法の適用性と検証 .....	17
4.1 解 析 法 .....	17
4.2 水平載荷試験の解析結果 .....	22
4.3 裏埋め地盤完成時のトラス模型の挙動解析結果 .....	23
4.4 正弦波加振実験の解析結果 .....	25
4.5 地震波加振実験の解析結果 .....	25
5. 結 論 .....	25
6. あとがき .....	29
参考文献 .....	30

# Vibration Characteristics of Truss Type Steel Quay Wall

Takamasa Inatomi\*  
Tomotoki Toyoda\*\*  
Motoki Kazama\*\*\*  
Kohji Ohtsuka\*\*\*

## Synopsis

The vibration characteristics of truss type quay wall with inclined steel piles is studied by model vibration tests and dynamic analyses. The structural merits of the quay wall discussed here are (a) decrease of the earth pressure by an inclined wall and (b) strong resistance in the axial direction of the inclined piles against seismic load.

The results obtained by this study are summarized as follows:

- (1) The static external force acting on the superstructure is supported by piles in the axial direction.
- (2) The resultant force of backfill earth pressure acts at the crossing point of the inclined piles and transmits in the axial direction.
- (3) The dynamic response of truss type quay wall is dominant near by resonant frequency of ground and structure.
- (4) The dynamic external force is also supported in the axial direction of the inclined piles. But ground vibration sometimes took place bending strain in piles.
- (5) The quantitative results obtained by the FEM analysis using equivalent linear method well agree with that of the experiment. If we can identify the material properties used in the dynamic analysis accurately, the dynamic analysis used here is effective for estimation of the dynamic pile behavior.
- (6) It is necessary for seismic design of truss type quay wall to consider the dynamic characteristics of ground and structure.

**Key Words** : Quay Wall, Pile Structure, Model, Vibration Test

---

\* Chief of Structural Dynamics Laboratory, Structures Division.

\*\* Ex. Director General, Yokohama Investigation and Design Office, the Second Port District Construction Bureau.

\*\*\* Members of Structural Dynamics Laboratory, Structures Division.

# トラス式鋼製岸壁の振動性状

稲 富 隆 昌\*  
豊 田 奉 節\*\*  
風 間 基 樹\*\*\*  
大 塚 幸 治\*\*\*

## 要 旨

経済的で耐震的な岸壁を建設するには土圧の軽減と支持機構の工夫が重要である。本報告はこの二つを考慮して提案された斜杭を有するトラス式鋼製岸壁の動的特性を模型振動実験および動的解析で検討したものである。同岸壁の主な構造的特徴は以下のとおりである。

- (a) 土圧は岸壁の土留壁に傾斜角を付けて軽減させる。
- (b) 地震外力は杭の横抵抗力ではなく、軸方向の支持力で抵抗させる。

本研究の結論は以下のとおりである。

- (1) トラス式鋼製岸壁の上部工に作用する静的外力は、杭の軸方向力で支持されることを確認した。
- (2) 裏埋め地盤による土圧合力は、斜杭の交点に作用し、その力は杭の軸方向に伝達される。
- (3) トラス式鋼製岸壁の動的応答は、地震動の卓越振動数が地盤あるいは岸壁の固有振動数に近くなると卓越する。
- (4) 動的外力に対しても、トラス式鋼製岸壁は杭の軸方向力で支持される。しかし、杭には地盤の応答による曲げひずみも生じる。
- (5) 動的解析結果は実験結果を定性的には捉えていたが、模型実験結果を定量的に議論するには入力物質定数等を精度良く算定する必要がある。
- (6) トラス式鋼製岸壁の耐震設計は、地震動の卓越振動数、および地盤ならびに岸壁の固有振動数の大きさを考慮して検討する必要がある。

キーワード：岸壁，杭式構造物，模型，振動実験

## 1. まえがき

わが国の地震は海洋に震源を有することが多く、その規模は極めて大きい。海洋に面する港湾施設は、地震によって常に大きな力を受け、時には被害が生じてきた。しかしながら、地震により大災害が発生した場合、港湾は、被災後の緊急物資等の海上輸送拠点の機能を有する必要がある。港湾が大地震時に海上輸送の拠点として機能するためには、港湾施設、特に岸壁の耐震性が確保されねばならない。

岸壁を耐震設計する場合、地震外力である土圧と慣性力は、設計震度に応じて設定すればよい。しかし、地震

時土圧は、震度に対して2次関数的に大きくなり、慣性力も岸壁の重量に比例して増大する。したがって、耐震性を有し、かつ経済的な岸壁を建設するには、岸壁に作用する土圧を減少させ、かつ慣性力、すなわち岸壁の重量をできるだけ小さくすることが望まれる。

一方、構造物の安定性は、外力と構造物の支持機構の関係でも決定される。したがって、岸壁の場合も、その支持機構を工夫することによって経済性を追求できると考えられる。

このように経済的で耐震的な岸壁を建設するには、土圧および慣性力の軽減と支持機構の工夫が重要である。以下に、土圧の軽減策と支持機構について検討したので

\* 構造部 構造振動研究室長

\*\* (前)第二港湾建設局 横浜調査設計事務所長

\*\*\* 構造部 構造振動研究室

紹介する。

(1) 土圧の軽減策

a) 斜面の利用

一般に、施工上の制約等から構造物の土圧を受ける面は鉛直であるが、岸壁の土留壁に傾斜角を付けることによって土圧の軽減を図ることが可能である。

b) 軽量骨材の利用

土圧は内部摩擦角が大きいほど、また単位体積重量が小さいほど小さくなるので、軽量骨材の利用が考えられる。ただし、軽量骨材は単位体積重量が小さいので、設計震度が大きくなると水中の見掛けの震度が大きくなり、普通の砂の土圧より大きくなる場合がある。しかし、軽量骨材を残留水位以上に用いる場合は、設計震度が大きくなっても土圧軽減効果はあると考えられる。

c) 土圧分散の利用

土圧をひとつの構造物ではなく、段階的に複数の構造物で受け、個々の構造物に働く土圧を小さくするとともに、全体としての土圧合力を小さくする方法である。図-1は、背後地盤を二段盛土にした場合の土留壁に作用する土圧を示したものである<sup>1)</sup>。二段盛土にすることによって、土留壁に作用する土圧は減少することが分かる。

d) 新工法の利用

陸上工事で実績があるジオテキスタイル工法、テール

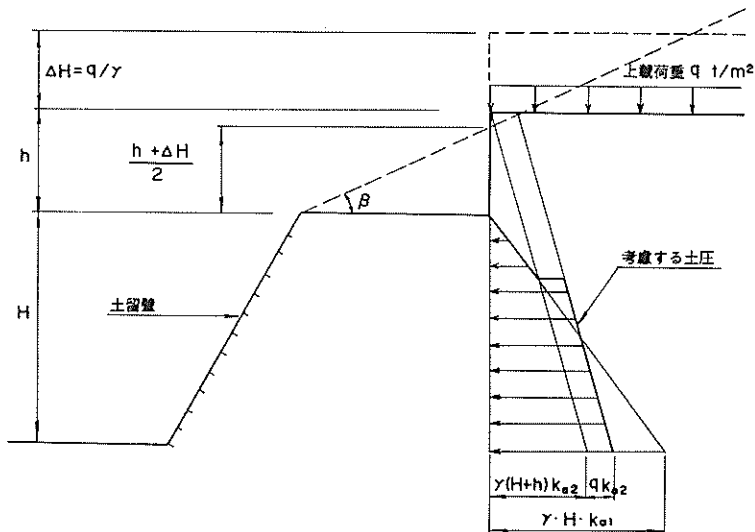
アルメ工法等の利用がある。陸上工事と海上工事の施工条件の差はあるが、工法の改良工夫によっては適用可能と考えられる。

(2) 支持機構の工夫

重力式岸壁は、岸壁本体と基礎の摩擦力および基礎の支持力によって地震外力に抵抗するが、地震の規模によっては、岸壁の変形は一方に進行する可能性がある。矢板式岸壁の場合は、矢板根入れ部の受働土圧と控え工によって外力に抵抗するが、これも抵抗力の低下とともに残留変形は進むと考えられる。

一方、直杭式栈橋に対する地震外力は、慣性力が主で土圧はほとんどない。栈橋は、外力に対して、主に杭の横抵抗力によって抵抗している。栈橋は杭が弾性体であることから残留変形も少なく、地震による被害も皆無に近い。このように直杭式栈橋は比較的耐震性に優れているが、地震時の動的変形量が大きいので、その値を小さくする必要がある。そこで、外力を杭の横抵抗力ではなく、軸方向の力で抵抗させることが考えられる。

そこで、地震外力を杭の軸方向力で支持させる斜杭を有するトラス式構造の岸壁を提案した。トラス式構造の概念は図-2に示す組み杭構造である。これら組み杭は岸壁の法線方向に一定間隔に設置され、頭部は床板によって結合されている。岸壁に作用する地震外力は、これ



ここで

$k_{a1}$  : 背面高  $H$  で斜面角  $\beta$  のときの主動土圧係数

$k_{a2}$  : 仮想背面高  $H+h$  で斜面角  $\beta=0$  のときの主動土圧係数

図-1 二段盛土の土圧算出法

ら組み杭の軸力で抵抗させる。床板の慣性力は杭1と杭3の軸力で抵抗させる。また、背後地盤は一定間隔に建込まれた斜杭(杭1)間に取り付けた土留壁で支持させる。この土圧合力の作用点を杭1と杭2の交点に一致させることによって、杭1の押込み力と杭2の引抜き力の軸方向力で抵抗させる。このような支持機構を有する構造物は変形量も小さく耐震的と考える。

図-3は以上のような特性を有するとして設計されたトラス式鋼製岸壁の標準断面図の例である。また、図-4は土留壁部分の鳥瞰(ちょうかん)図である。海底面からはジャケット構造となっている。

本報告は図-3に例として示したトラス式鋼製岸壁の振動特性を模型実験および動的解析によって検討した結果を述べるものである。なお、前述(1)のb), d)は今後の

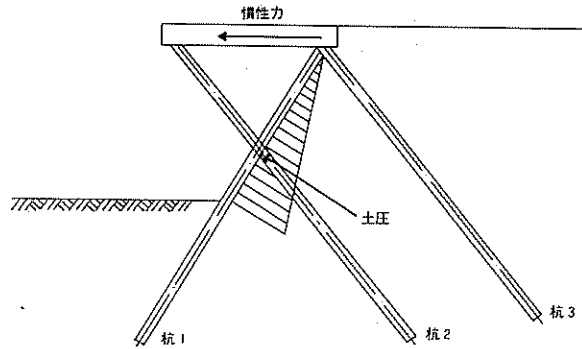


図-2 トラス式鋼製岸壁の構造概念図

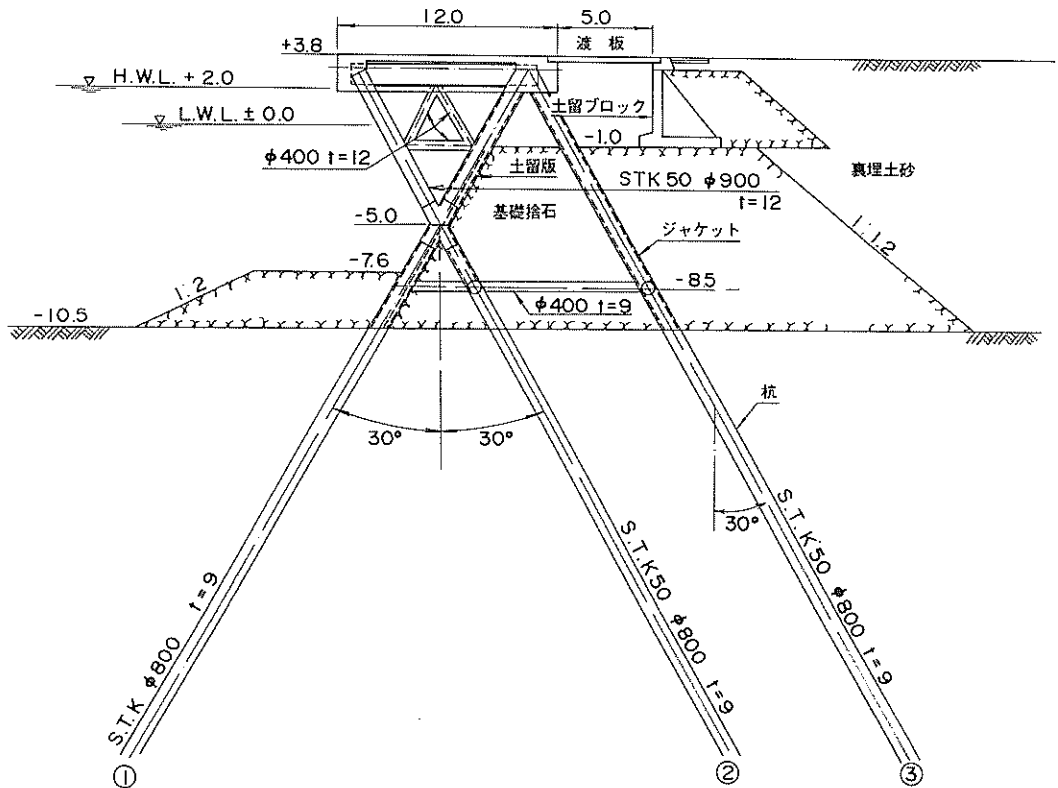


図-3 トラス式鋼製岸壁の標準断面図

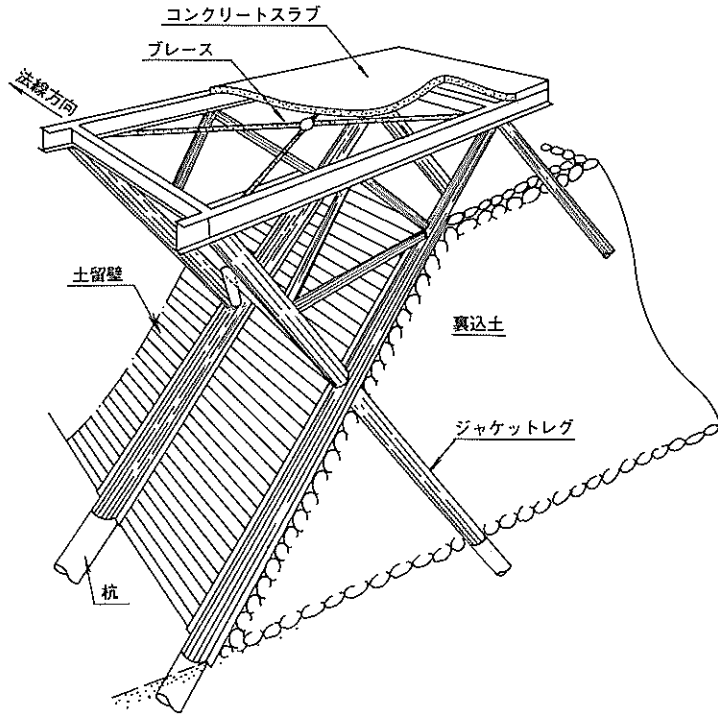


図-4 トラス式鋼製岸壁のちょうかん図

研究課題として本報告では取り扱わなかった。

表-1 模型縮尺

## 2. 模型実験

### 2.1 模型

実物の土を使用した模型振動実験を1Gの重力場で行う場合に適用する相似則については、未だ不明な点がある。これは土の動的非線形性や低拘束圧下の模型地盤の物性等によるもので、現在、模型実験結果は実物の定性的な現象把握等にとどまっている。いわゆる模型は小さな実物として取り扱い、実験結果を実物の物理量に変換することは多くない。しかしながら、近年、地盤の非線形性を考慮した新しい1Gの場での相似則が提案されてきた<sup>2)~4)</sup>。

模型実験は、図-3に示した岸壁をモデル化して実施した。模型の長さの縮尺は、振動実験装置の規模等を考慮して1/20とした。表-1は、文献4)を参考に求めた長さ、動的変位、時間、ひずみ等の縮尺を示したものである。新しい1Gの場での相似則の特長はひずみに対して縮尺を認めていることである。なお、実物では海水があり、地盤は飽和地盤である。模型ではトラス模型の基本的な振動特性を把握することに主眼を置いたため、地盤は乾燥砂で製作した。したがって、今回の模型実験結果

	相似則	縮尺
長さ	$1/\lambda$	$1/20 = 0.05$
質量密度	1	1
ひずみ	$1/\lambda^{1/2}$	$1\sqrt{20} = 0.224$
加速度	1	1
時間	$1/\lambda^{3/4}$	$1/20^{3/4} = 0.106$
振動数	$\lambda^{3/4}$	$20^{3/4} = 9.46$
動的変位	$1/\lambda^{3/2}$	$1/20^{3/2} = 0.0112$
応力	$1/\lambda$	$1/20 = 0.05$
弾性係数	$1/\lambda$	$1/20 = 0.05$
断面積	$1/\lambda^2$	$1/20^2 = 0.0025$

も直接実物の現象に変換することに難点がある。

図-5、6は縮尺1/20を目標に製作した地盤を含む模型を示したものである。模型は図-7に示すように幅1.5m、長さ3m、高さ1.2mの振動箱に製作した。

#### (1) トラス模型

##### a) 模型材の設定

杭材の寸法は図-3からわかるようにジャケット材より小さいが、模型製作の都合から杭材の寸法はジャケットと同じとした。相似則によって、杭材を縮尺すると直

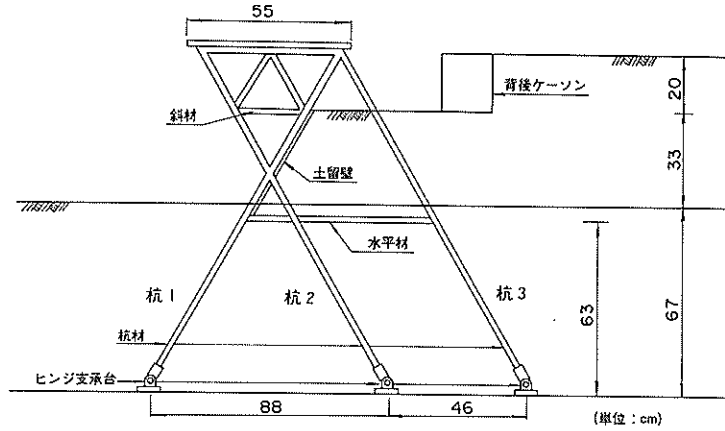


図-5 トラス模型 (側面図)

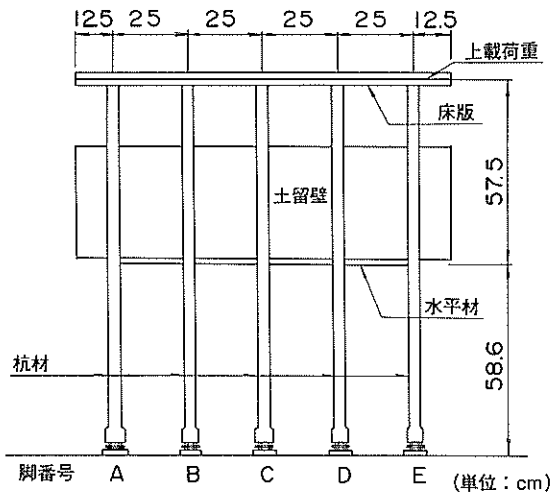


図-6 トラス模型 (正面図)

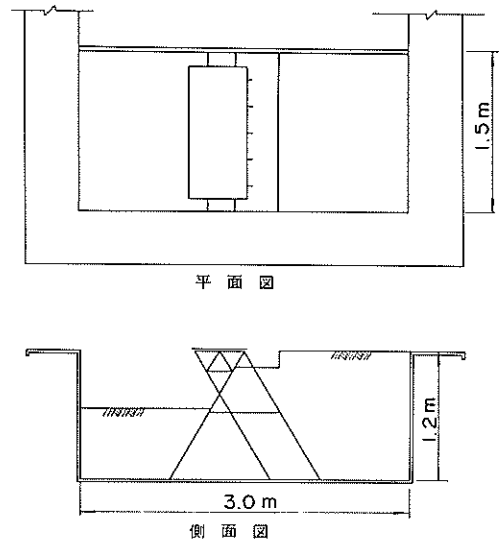


図-7 振動箱のトラス模型

径 45 mm × 肉圧 0.45 mm の鋼管となる。しかし、このような材料はなく、また製作するにも溶接が困難である。そこで他の部材も含め表-1 に示した縮尺目標値に近い材料を市販のアルミ角材から選択した。その結果を図-8 に示す。図から模型部材の材料定数を相似則に従って精度よく再現できるものもあれば、そうでないものもあり、模型製作の材料選定の難しさがあつた。トラス模型の床板には上載荷重 (1.0 tf/m<sup>2</sup>) に相当する鉄板を載荷した。

トラス模型は図-5 に示すように、杭の下端はヒンジ構造にして振動箱の底面に設置した。このように杭下端をヒンジにして振動箱底面に結合した理由は、杭の根入れ長を十分に確保した状況を再現するためである。なお、杭の長さは直杭式栈橋による仮想固定点の  $1/\beta$  以上を

十分に確保していた。

#### b) 模型材の特性

実験に使用した杭材の引張りおよび曲げ試験を実施し、アルミ材の弾性係数とポアソン比を求めた。その結果、弾性係数は平均  $0.68 \times 10^6$  (kgf/cm<sup>2</sup>)、ポアソン比は 0.35 であつた。

#### (2) 模型地盤

模型地盤は前述のように実験条件を簡単化するため、乾燥砂で製作した。砂は秋田港で採取されたもので、最大粒径は 4.76 mm、均等係数は 1.98、土粒子の比重は 2.77 であつた。また内部摩擦角は 40.3~42.5 度であつた。地盤は 20 cm 層厚毎にランマーを自由落下させて製作した。



(注) ●:満足 ○:やや満足 △:やや不満

原形	構造部材									土留部材			
	部材 A (杭材): φ 900×9			部材 B (水平材): φ 500×9			部材 C (斜材): φ 400×9			U Ⅲ 型 (矢振)			
	目標	数値	サイズ	目標	数値	サイズ	目標	数値	サイズ	目標	数値	サイズ	
模 型	I cm <sup>4</sup>	1.56	1.43	○	0.27	0.25	○	0.13	0.25	△	0.11	0.13	○
	A cm <sup>2</sup>	0.63	2.24	△	0.35	0.81	△	0.28	0.81	△	0.48	25	△
	Z cm <sup>3</sup>	0.69	1.43		0.21	0.33		0.13	0.33		0.17	1.04	
	E kg/cm <sup>2</sup>	0.47	0.7	○	0.46	0.7	○	0.47	0.7	○	0.47	0.7	○
	W kg/m	0.49	0.61	○	0.27	0.22	○	0.22	0.22	○	0.38	6.78	△
			2.0 x 2.0 x 4.0			1.5 x 1.5 x 1.5			1.5 x 1.5 x 1.5			2.5 0.001	

(単位: mm)

図-8 トラス模型の部材一覧

地盤の単位体積重量は実験ケースによって若干の差はあったが、平均で  $1.6 \text{ tf/m}^3$  であった。

模型地盤の深さ方向の強度特性を把握するため、土研型動的円錐貫入試験機によって1打毎の貫入量を測定した。試験結果の一例を図-9に示す。深くなるにしたがって1打当たりの貫入量が小さくなり、砂地盤の強度は深さ方向に大きくなっていった。

次に、砂地盤の動的特性と関連するせん断波速度 ( $V_s$ ) を板たたき法によって求めた。その結果、海側砂地盤の  $V_s$  の平均値は  $81.7 \text{ m/s}$ 、埋土側の場合は  $106.5 \text{ m/s}$  であった。

## 2.2 実験方法

### (1) 実験項目

トラス模型の静的特性および動的特性を把握し、更に後述4.で示す解析手法の適用性を検討するため、次の実験を実施した。

#### a) トラス模型の水平載荷試験

トラス模型の基本的な支持機構を明らかにする目的で、地盤を製作する前にトラス模型の上部工(床板)に水平力を与え、模型の変位、軸力、曲げモーメントを求めた。載荷方向は海側、陸側の両方向で、荷重は  $250 \text{ kgf}$  までを  $50 \text{ kgf}$  ピッチに与えた。

#### b) トラス模型の自由振動実験

トラス模型の固有振動数ならびに減衰定数を明らかにする目的で、トラス模型の自由振動実験を実施した。自由振動はトラス模型の上部工に加えた水平力を瞬時に解放することによって発生させた。実験は支持地盤が無い場合と有る場合について行った。載荷荷重は、 $250 \text{ kgf}$  とした。

#### c) 裏埋め地盤完成時の静的土圧および杭ひずみの測定

裏埋め地盤完成時におけるトラス模型の挙動を土圧、

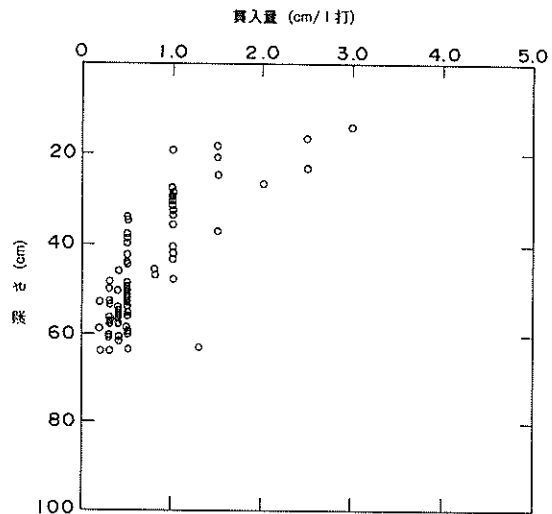


図-9 土研式動的コーン貫入試験結果

軸力および曲げモーメントで明らかにした。

#### d) 正弦波加振実験

トラス模型の動的応答の振動数特性を正弦波加振実験によって検討した。加振振動数の範囲は地盤およびトラス模型の一次固有振動数を含む  $70 \text{ Hz}$  までとし、 $1 \text{ Hz}$  ごとに  $5 \text{ Hz}$  から与えた。振動台加加速度は  $50, 100, 200 \text{ Gal}$  である。実験に使用した振動実験装置は当所所有の動電型振動台である。

#### e) 地震波加振実験

トラス模型の動的特性を地震波加振実験によって検討した。相似則によると、時間の縮尺は実物の約  $1/10$  である。入力地震波は、1968年十勝沖地震の際、八戸港の地表で観測され、基盤の地震波に引き戻された地震波(図-10)を使用した。また、地震波の卓越振動数とトラス模型の固有振動数の関係を検討するため、

時間の縮尺を1/5にした実験も実施した。入力地震波の最大加速度は250Galである。

(2) 計測内容

トラス模型の応答は変位、土圧、ひずみおよび加速度で検討し、砂地盤は加速度で検討した。図-11は振動実験で使用した計測器とひずみゲージの位置を示したもので、これら計測器等は図-6に示す5脚の内の中央部のC脚に取り付けた。

加速度計は全て水平方向の感震成分を有しているが、トラス床板の海側と陸側には鉛直方向計測用の加速度計も取り付けた。ひずみゲージは杭材の両面に張り付け、測定は軸力と曲げモーメントを同時に測定するため、1枚ゲージ法で行った。土圧は裏埋め時の土圧測定のみで動的土圧の測定はできなかった。

3. 実験結果

3.1 水平載荷試験結果

(1) 軸力

載荷試験では、床板に水平外力を漸次増やして行ったが、図-12は陸側に最終荷重である256.9kgfの水平外力を作用させたときの軸力である。同様に、図-13は海側に261.9kgfの水平外力を作用させたときの結果である。これら図から、水平外力の向きに係わり無く、外力に対し、トラス模型は杭1と杭3の軸力で抵抗し、杭2の分担割合は小さいことがわかる。この結果は当初想定していた結果と一致していた。なお、杭1の土留壁付近の軸力が小さくなっている。これは、土留壁が杭1の軸力を一部分担したためと考えられる。模型製作の際、土留

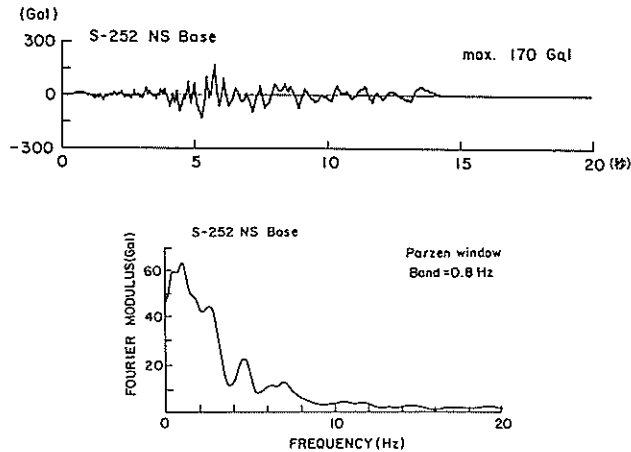


図-10 入力地震波の原波形とフーリエスペクトル

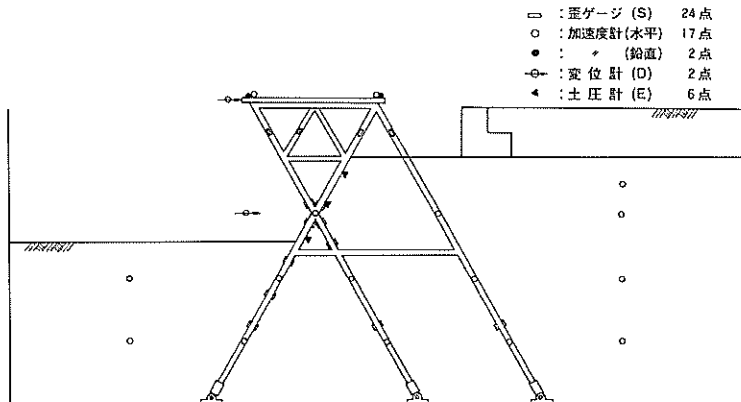


図-11 振動実験時の計測位置図

壁に軸力を分担させないよう工夫したが、実際には、土留壁は杭1に部分的に固定されたと考えられる。そこで、土留壁を外して水平載荷試験を行った。図-14は、海側に水平荷重を作用させた場合の軸力を示したものである。杭1の軸力は杭軸線に沿って同じであることがわかる。

図-14に示した水平外力を1脚当りに換算すると、 $258.5/5 = 51.7$  (kgf)となる。杭1と杭3の軸力はこの外力とほぼ同じで、水平外力のほとんどが杭1と杭3の軸力に変換されたことがわかる。

(2) 曲げモーメント

トラス模型の軸力が図-12, 13で示される時の曲げモーメントはそれぞれ図-15, 16のとおりである。曲げモーメントは杭1と杭2の交点付近において大きくなるものの全体的に小さいことがわかる。これは水平外力が杭1と杭3の軸方向力で支持されているためである。

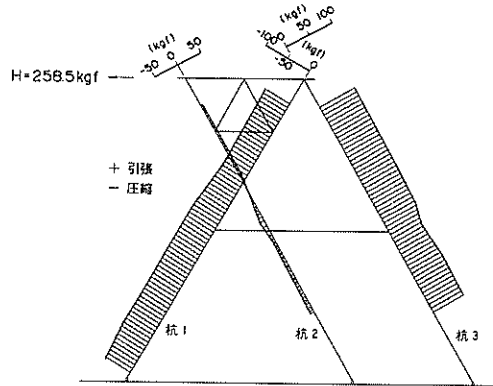


図-14 土留板が無い場合の海側引っ張り水平載荷試験結果 (軸力)

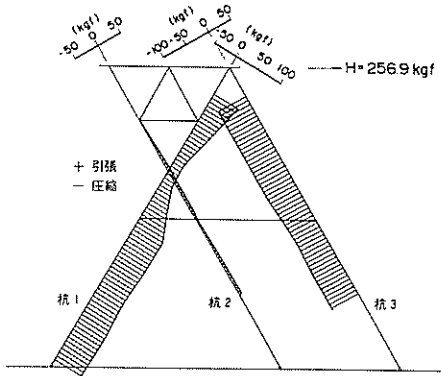


図-12 陸側引っ張り水平載荷試験結果 (軸力)

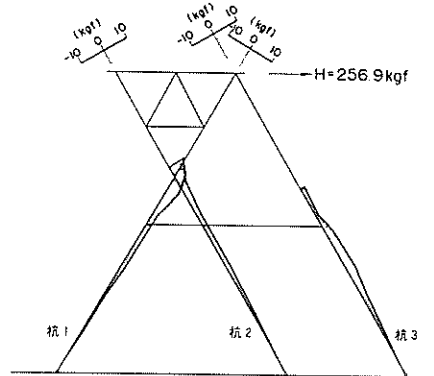


図-15 陸側引っ張り水平載荷試験結果 (曲げモーメント)

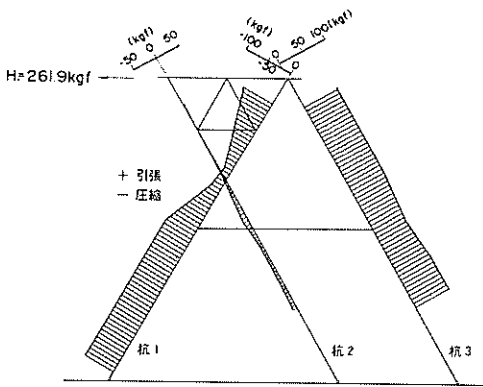


図-13 海側引っ張り水平載荷試験結果 (軸力)

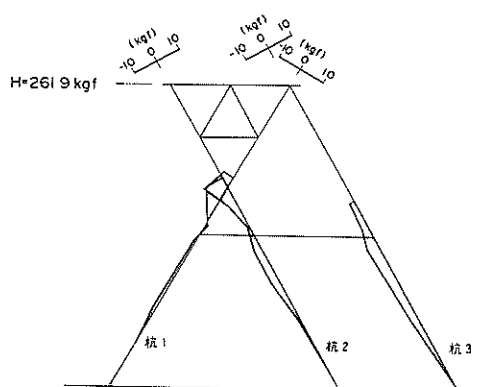


図-16 海側引っ張り水平載荷試験結果 (曲げモーメント)

以上の結果から、トラス模型の上部工に作用する水平外力は、杭の軸方向力で支持されることが明らかとなった。

### 3.2 自由振動実験結果

#### (1) 固有振動数と減衰定数

トラス模型天端の加速度の自由振動波形から固有振動数と減衰定数を求めた。支持地盤が有ることによって、トラス模型の固有振動数(59.4 Hz)は若干大きくなる。一方、減衰定数(3.1%)も支持地盤があることによって大きくなり、支持地盤がトラス模型の応答を拘束していることがわかった。

#### (2) 加速度特性

自由振動中のトラス模型の加速度分布を検討した。図一17, 18は支持地盤が無い場合と、有る場合の第1波目の加速度を示したものであるが、支持地盤が有ることによって地中部の杭の加速度は小さくなり、地盤が杭の応答を拘束していることがわかる。また、トラス模型の海側天端の鉛直方向の加速度が比較的大きいことも特徴である。

#### (3) 軸力分布

図一19, 20は、自由振動中の杭の軸力をそれぞれ図一17, 18に対応させて示したものである。自由振動中も、水平載荷試験結果と同様に、杭1と杭3で外力に抵抗し

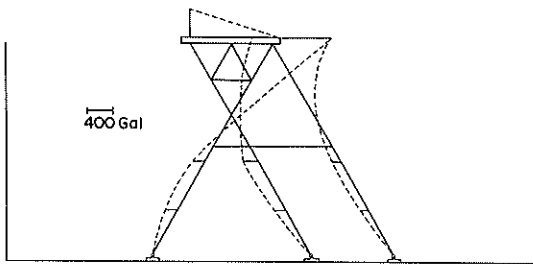
ている。また、杭1の軸力分布から、土留壁が杭1の軸力を分担していることがわかる。自由振動実験に使用した載荷重は、支持地盤の有無に係わらず同じ荷重(約250 kgf)であったが、支持地盤が有る場合の軸力は無い場合より小さい。これは支持地盤によってトラス模型の挙動が拘束されたためと考えられる。

### 3.3 裏埋め地盤完成時のトラス模型の挙動

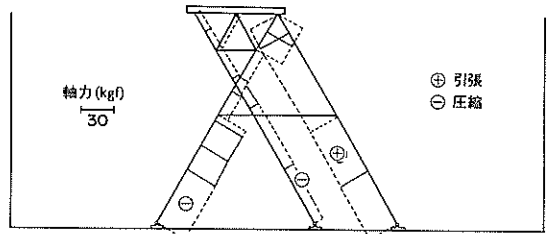
トラス模型背後の埋立てが完成したときのトラス模型の軸力および曲げモーメントを求めた。しかし、トラス模型背後の砂層の製作は、杭1, すなわち土留壁が傾斜しているため難しい。また、裏埋め地盤からトラス模型に作用する外力は低拘束であるため小さい。したがって、トラス模型の挙動が裏埋め完成時の挙動を定量的に捉えているかどうかは検討の余地がある。しかしながら、1.まえがき で予想したように土圧合力が杭1と杭2の交点に作用し、土圧が杭の軸力で支持されるかを、定性的にでも検討することはできると考える。なお、杭に作用する外力としては、土留壁に作用する土圧の他に、地盤の自重による鉛直荷重もある。

#### (1) 軸力

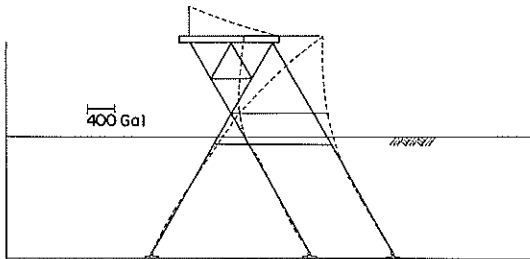
図一21は図中に示す地盤が完成したときの軸力分布を示したものである。図中の数字は後述4.3の解析を考慮して、トラス模型の4脚分(奥行き1.0 m)に相当す



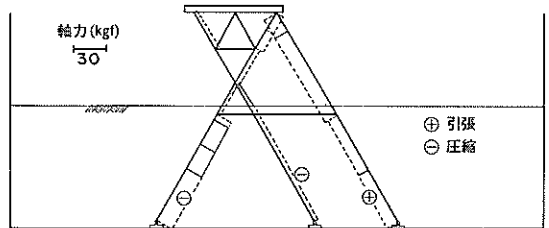
図一17 支持地盤が無い場合の自由振動実験の加速度分布(第1波)



図一19 支持地盤が無い場合の自由振動実験の軸力分布(第1波)



図一18 支持地盤が有る場合の自由振動実験の加速度分布(第1波)



図一20 支持地盤が有る場合の自由振動実験の軸力分布(第1波)

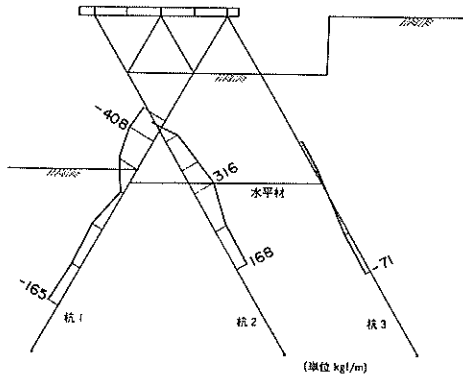


図-21 裏埋め土圧による軸力分布  
(地震波加振実験用地盤)

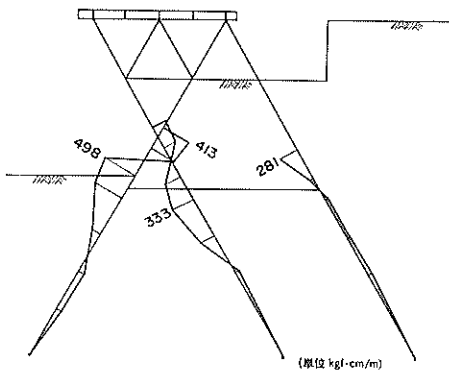


図-22 裏埋め土圧による曲げモーメント  
分布 (地震波加振実験用地盤)

る数値を示している。トラス模型の背後地盤からの外力(土圧)は杭1と杭2で支持され、杭3の分担割合は相対的に小さい。この実験結果は当初予想した結果と一致する。

## (2) 曲げモーメント

図-22は曲げモーメント分布を示したものである。図中の数値も図-21に示した軸力と同様に、トラス模型の奥行き1.0m(4脚分)に相当する。杭1と杭2が、杭3より多く外力を分担していることがわかる。杭3の曲げモーメントは裏埋め地盤の自重により発生したと考えられる。

## 3.4 正弦波加振実験結果

トラス模型の振動数応答特性を加速度、軸ひずみ、曲げひずみから検討した。

### (1) 加速度の振動数特性

図-23は、入力加速度が50Galの場合のトラス模型の

上部工天端と周辺地盤の加速度応答倍率を示したものである。実線がトラス模型、点線が海側の支持地盤、一点鎖線が裏埋め地盤の結果である。同様に、図-24, 25は、入力加速度がそれぞれ100Gal, 200Galの場合の結果である。図-23から、トラス模型の上部工(実線)には二つの卓越振動数があり、一つは33Hz前後、もう一つは63Hz前後である。後者の振動数はトラス模型の自由振動実験結果からトラス模型の固有振動数に対応する。前者の振動数は裏埋め地盤の共振曲線(一点鎖線)および地盤のせん断波速度(106.5m/s)を考慮すると裏埋め地盤の固有振動数に相当すると考えられる。したがって、トラス模型の応答は、周辺地盤の応答が卓越すると増大する。そのときのトラス模型の応答は周辺地盤とほぼ同じである。トラス模型の応答は外力の振動数とその固有振動数に近づくとき再度大きくなる。なお、海側地盤の加速度応答曲線の傾向は裏埋め地盤側とほぼ同じであるが、裏埋め地盤側に比較して応答倍率は小さかった。

地盤の応答は入力加速度が増大すると非線形性が生じてくる。入力加速度が100Galの場合は、それほど顕著でないが、入力加速度が200Galになると、図-25に示すように、裏埋め地盤の共振振動数およびそのときの応答倍率は、図-23のそれと比較して低下している。それに応じてトラス模型の応答も低下している。なお、加振振動数がトラス模型の固有振動数より低い場合、トラス模型の応答は裏埋め地盤とほぼ同じであると考える。これはトラス模型の杭の質量(0.76gf/cm<sup>3</sup>)が地盤(1.6gf/cm<sup>3</sup>)に比較して小さく、杭が自励的な挙動をしなかったためである。

次に、トラス模型天端の鉛直方向の加速度特性を検討した。図-26は海側の共振曲線(実線)と陸側のそれ(一点鎖線)を示したものである。鉛直方向の加速度はトラス模型の断面から予想されるように、海側の応答倍率が陸側より大きい。応答倍率はトラス模型の共振振動数まで次第に大きくなる。したがって、鉛直方向の応答は高振動数ほど卓越することが予想される。しかしながら、トラス模型の水平応答が卓越するときの鉛直加速度を、200Gal実験で求めると、水平加速度の1/5~1/6で、鉛直加速度は水平加速度より小さいことがわかった。

### (2) 加速度分布

トラス模型の応答は、外力の卓越振動数が周辺地盤あるいはトラス模型の固有振動数に近いと卓越する。本項では加振振動数がこれら振動数と一致するときの模型全体の挙動を検討した。結果は入力加速度が200Galの場合を示した。

図-27, 28は地盤の応答が卓越する28Hzのときの結

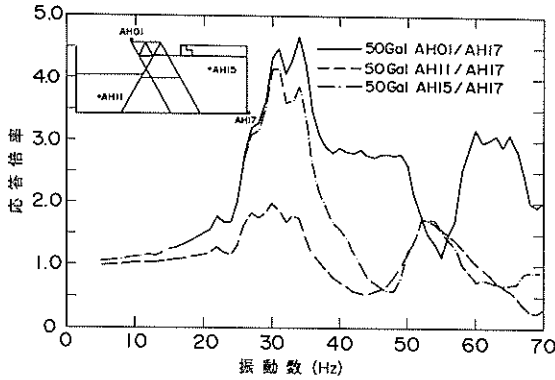


図-23 トラス模型の加速度応答曲線  
(50Gal正弦波加振実験)

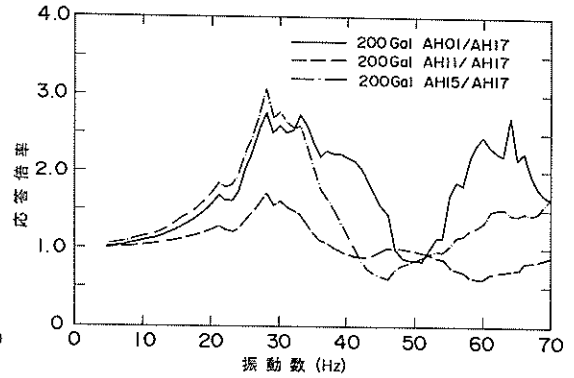


図-25 トラス模型の加速度応答曲線  
(200Gal正弦波加振実験)

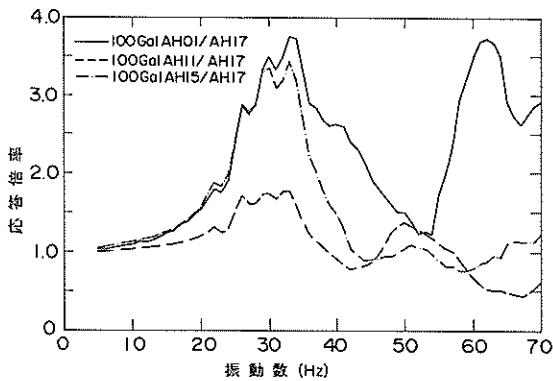


図-24 トラス模型の加速度応答曲線  
(100Gal正弦波加振実験)

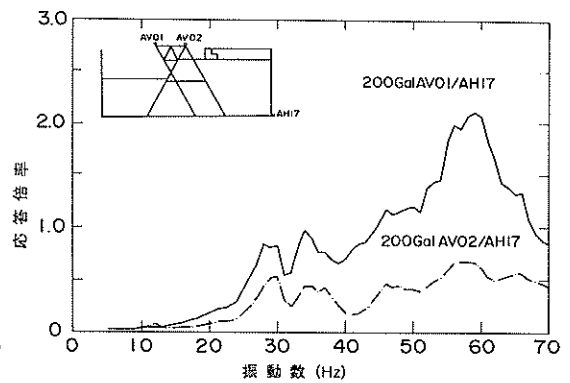


図-26 トラス模型上部工の上下方向の加速度応答曲線  
(200Gal正弦波加振実験)

果である。図-27は埋土地盤の加速度が正の最大値(300 Gal)を示すときの加速度分布、図-28は同様に加速度が負の最大値(-308 Gal)を示すときの結果である。加速度の向きに係わらず地盤の加速度分布は一次振動形に近い振動形を示す。杭の応答加速度はトラス模型天端に近づくほど大きい。地盤とトラス模型の加速度の大きさを比較すると、トラス天端の加速度は周辺地盤より大きい。これはトラス模型天端の質量効果、すなわち慣性力の影響と考えられる。

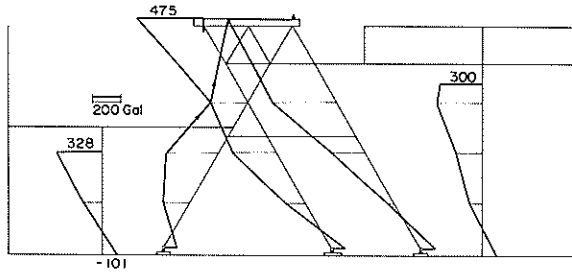
図-29, 30はトラス模型の一次固有振動数付近(64Hz)における加速度分布を示したものである。図-29はトラス模型の天端の加速度が正の最大値、図-30は負の最大値を示すときの結果である。外力の卓越振動数とトラス模型の固有振動数が一致すると、地盤が無い場合のトラス模型の振動形は一次振動形を示すはずである。しかしながら、地盤が有るため、杭の振動形は極めて複雑であ

る。一方、砂地盤は、二次振動形に近い応答を示している。トラス模型の杭の応答は、周辺地盤の振動形に依存していることがわかる。このように杭の応答が周辺地盤に影響されるのは、前述のように杭の質量が地盤に比較して小さいためと考えられる。

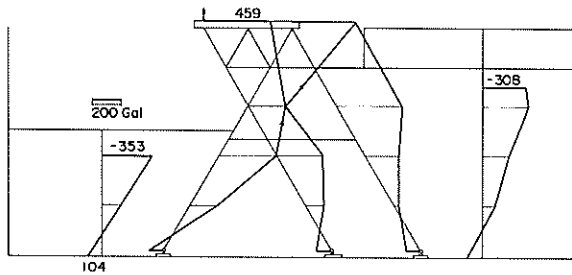
### (3) 軸力分布

図-31は、外力の振動数と地盤の固有振動数が一致したときの軸力を示したものである。図中の網掛け部分は図-27、網無し部分は図-28に示す加速度が生じたときの軸力である。点線は実験結果から想定した軸力である。図-31から、トラス模型は、水平外力に対して、杭1と杭3で支持され、杭2の分担する割合は小さいことがわかる。

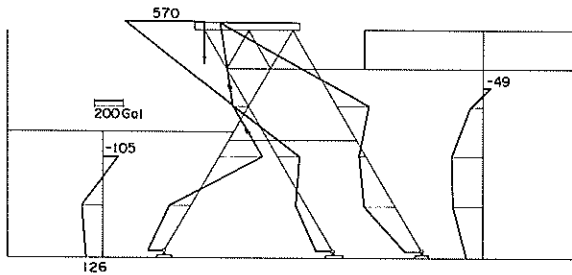
図-32はトラス模型の共振時の軸力である。図中の網掛け、網無し部分はそれぞれ図-29, 30に示す加速度が生じるときの結果である。図-32からわかるように、ト



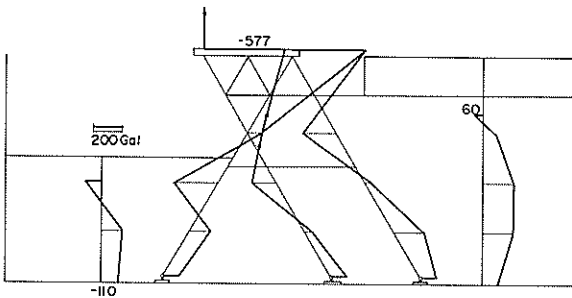
図一27 200 Gal正弦波加振実験の 28 Hz のときの加速度分布  
(地盤の共振振動数)



図一28 200 Gal正弦波加振実験の 28 Hz のときの加速度分布  
(地盤の共振振動数)



図一29 200 Gal正弦波加振実験の 64 Hz のときの加速度分布  
(トラス模型の共振振動数)



図一30 200 Gal正弦波加振実験の 64 Hz のときの加速度分布  
(トラス模型の共振振動数)

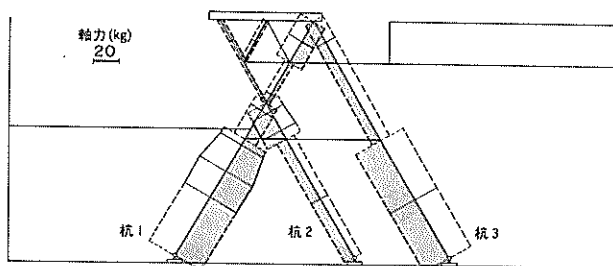


図-31 200 Gal正弦波加振実験の 28 Hz のときの軸ひずみ分布 (地盤の共振振動数)

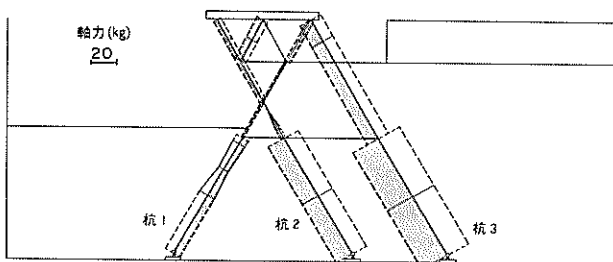


図-32 200 Gal正弦波加振実験の 64 Hz のときの軸ひずみ分布 (地盤の共振振動数)

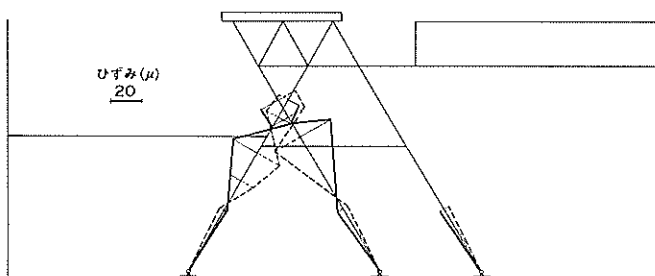


図-33 200 Gal正弦波加振実験の 28 Hz のときの曲げひずみ分布 (地盤の共振振動数)

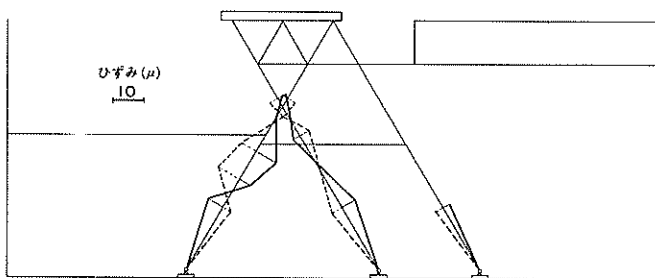


図-34 200 Gal正弦波加振実験の 64 Hz のときの曲げひずみ分布 (地盤の共振振動数)



ラス模型の共振時においては、杭2が外力に対して応分の支持力を分担する。この結果は図-31の軸力分布、あるいは水平載荷試験結果、自由振動実験結果と異なる。これは杭に対する外力として、当初予想したトラス模型の上部工の慣性力および杭1と杭2の交点への土圧の他に、周辺地盤からの動的外力が生じたためと考えられる。したがって、トラス式鋼製岸壁の耐震設計は、岸壁と周辺地盤の動的相互作用を考慮して検討する必要があることを示している。

#### (4) 曲げひずみ分布

図-33は、砂地盤の応答が卓越する28 Hzのときの曲げひずみを示したもので、実線は図-27、点線は図-28の加速度が生じたときの結果である。図-34はトラス模型の固有振動数に相当する64 Hzの時の結果で、実線、点線はそれぞれ図-29、30の加速度が生じたときの曲げひずみである。

杭の曲げひずみは、全般に地盤の応答が卓越する28 Hzの方が64 Hzの時より大きい。なお、64 Hzの時の地盤中の杭のひずみをみると、28 Hzのときより大きくなる場合がある。これは地盤の加速度分布でわかるように、地盤の振動形に影響されていると考えられる。

### 3.5 地震波加振実験結果

トラス模型は実物の1/20を想定して製作した。相似則によると時間の縮尺は、表-1から約1/10である。なお、地震波加振実験では、相似則による時間縮尺(1/10)の他に、地震波の卓越振動数とトラス模型の固有振動数の関係を検討するため、時間縮尺を1/5にした実験も実施した。入力地震波の最大加速度は、250 Galである。

#### (1) 加速度分布

図-35、36は、時間縮尺が1/5の時の応答加速度で、トラス模型の上部工の天端の加速度がそれぞれ正および負の最大値を示すときの結果である。トラス模型の加速度は天端に近づくほど大きくなっている。その値は周辺地盤とほぼ同じである。また、加速度の分布形は、前述3.4(2)で示したように地盤の振動が卓越したときに似ている。1 Hzから3 Hzの卓越振動数を持つ実物の地震波は、模型上では $5 \times (1 \sim 3) = 5 \sim 15$  (Hz)の卓越振動数を持つ地震波となる。この振動数は、例えば図-23から分かるように地盤の固有振動より低く、従ってトラス模型の杭の応答加速度は地盤のそれに近い。

図-37、38は時間の縮尺を1/10にして行った時の実験結果で、トラス模型天端の加速度が最大となるときの

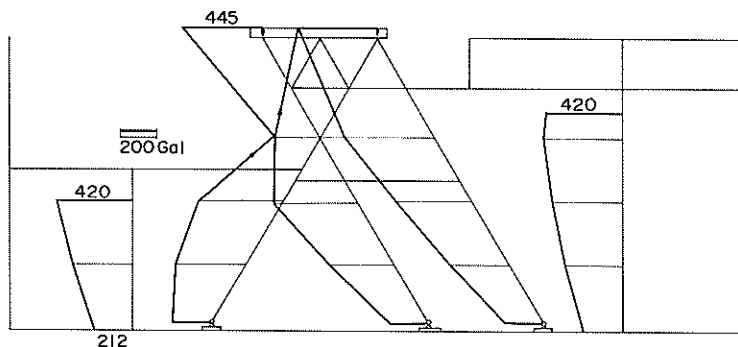


図-35 250 Gal地震波加振実験の加速度分布 (時間縮尺 1/5)

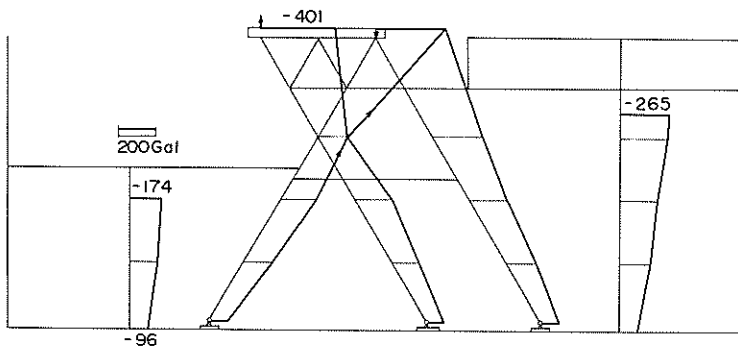


図-36 250 Gal地震波加振実験の加速度分布 (時間縮尺 1/5)

加速度分布である。加速度分布は図-35, 36に示した結果と似ている。ただし、本実験の加速度値は1/5の時間縮尺の実験結果より大きい。このように応答加速度が大きくなった理由は、 $10 \times (1 \sim 3) = 10 \sim 30$  (Hz)で示される入力地震波の卓越振動数が、より地盤の固有振動数に近くなったためと考えられる。

地震波加振実験からも、トラス模型の応答は周辺地盤の振動形に強く影響を受けることがわかる。

#### (2) 軸力分布

図-39は時間縮尺が1/10のときの軸力で、トラス模型天端の加速度が負の最大値(図-38参照)を示したときの結果を示したものである。図中の点線は、測定結果から推定した軸力である。地震外力に対し、杭は杭1と杭3の軸力で抵抗している。この結果は、正弦波加振実験で地盤の振動が卓越するときの結果(図-31参照)と対応している。しかしながら、杭2が分担する軸力の割合は水平載荷試験結果より大きくなっている。これは地盤が振動することによる影響であり、杭の軸力を算定する場合、地盤の動的応答を考慮する必要があることを示している。

#### (3) 曲げひずみ分布

図-40は軸力が図-39を示すときの曲げひずみを示したものである。曲げひずみも正弦波加振実験で明らかにされたように、地盤の振動が卓越するときの曲げひずみ(図-33参照)と同様な傾向を示している。本実験結果は、図-33の点線で示された曲げひずみと対応する。砂地盤の応答が卓越する28 Hzの正弦波加振実験と同様に、杭2の曲げひずみは、杭1と杭2が交わる場所より若干下で大きくなっている。これは次のように考えられる。図-37, 38から分かるように、杭1と杭2の応答変位は杭の下端から上方に向かって次第に大きくなるが、杭1と杭2の交点では、構造上、抑制される。したがって、杭下端と交点の間の杭1と杭2の応答は、弓なり状になる。その結果、交点より下側の曲げひずみが大きくなった。また、交点より上側の曲げひずみの符号が変化する理由は、杭1と杭2の交点を支点に質量の大きいトラス模型上部が変形し、交点の上下で杭の変形の曲率が変わったためと考えられる。

杭の軸力を含め、この様な現象は静的な載荷試験結果にはなかった。したがって、トラス式鋼製岸壁の耐震設計は、地盤との動的相互作用を考慮して行う必要があることを示している。

#### (4) 加速度の伝達関数

トラス模型の加速度応答の振動数特性については、前述3.4の正弦波加振実験結果で検討し、その特性を明ら

かにした。本項では、入力波が地震波の場合の実験結果で検討した。図-41は時間の縮尺を1/10、最大加速度を250 Galとした時の実験結果である。図の左上、左下、右上、右下は入力地震波とトラス模型のパワースペクトル、トラス模型の入力波に対する伝達関数と位相差を示したものである。同様に図-42, 43は海側地盤、陸側地盤に対する結果である。入力波の最大加速度は異なるが、伝達関数の結果は正弦波加振実験結果の図-23~25に対応することがわかる。

図-41の伝達関数には正弦波加振実験結果と同様に、30 Hzと60 Hz付近にピークがある。トラス模型の30 Hzの応答は、図-42, 43の地盤の伝達関数からわかるように、地盤の応答の影響が強い。60 Hz付近の振動数は位相差から判断し、トラス模型の固有振動数であることが分かる。このようなトラス模型の応答特性は、正弦波加振実験結果と同じである。

## 4. 数値解析法の適用性と検証

トラス式鋼製岸壁の耐震性は、模型実験の他に、数値解析で検討できる。数値解析を実施する場合は解析法の適用性を明らかにしておく必要がある。ここでは、実験結果を静的および動的解析法で解析し、解析法の適用性等を検討した。

### 4.1 解析法

#### (1) 複合構造解析法

##### a) 解析法

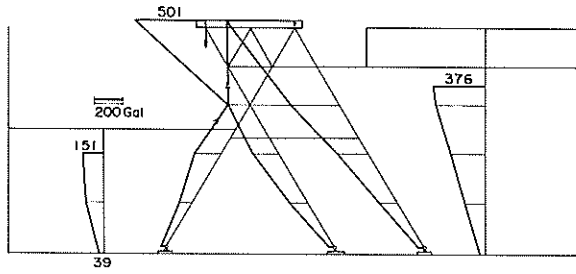
本解析法は当研究所所有のISAPである。ISAPは構造物の静的・動的挙動を弾性領域で解析する汎用構造解析プログラムである。ISAPでは、各種の三次元、二次元要素等、10種類の要素が使える。

本プログラムによって、トラス模型の水平載荷試験および裏埋め地盤完成時のトラス模型のひずみに関する実験結果を解析した。

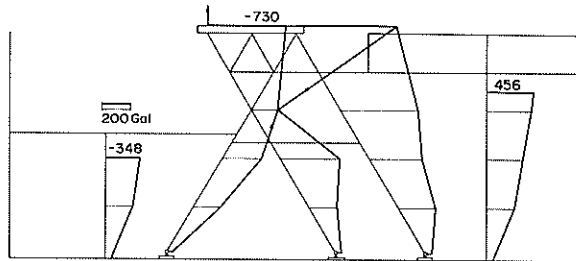
##### b) 解析モデル

トラス模型は、図-44に示すように梁でモデル化した。地盤中の杭材は、弾性床上の梁として取り扱い、杭と周辺地盤は、ばねで結合し、ばねの地盤反力係数は、Changの公式で求めた。斜杭間の土留壁に作用する土圧は、図中に示すように三角形分布で与えた。トラス模型の部材の断面定数は、上載荷重を含め図-8に示した材料を基に表-2のように与えた。表中の値は解析プログラムの関係で部材の断面定数を1本分の4倍、すなわち奥行き1 m当りの値で示した。

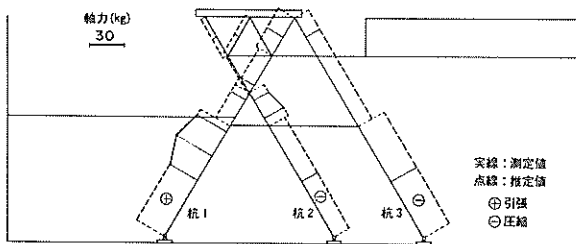
アルミ材は溶接等で加熱されると、その弾性係数は減少する傾向がある。ASME (The American Society



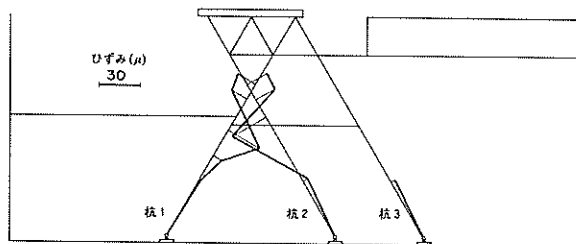
図一37 250 Gal地震波加振実験の加速度分布 (時間縮尺 1/10)



図一38 250 Gal地震波加振実験の加速度分布 (時間縮尺 1/10)



図一39 250 Gal地震波加振実験の軸ひずみ分布 (時間縮尺 1/10)



図一40 250 Gal地震波加振実験の曲げひずみ分布 (時間縮尺 1/10)

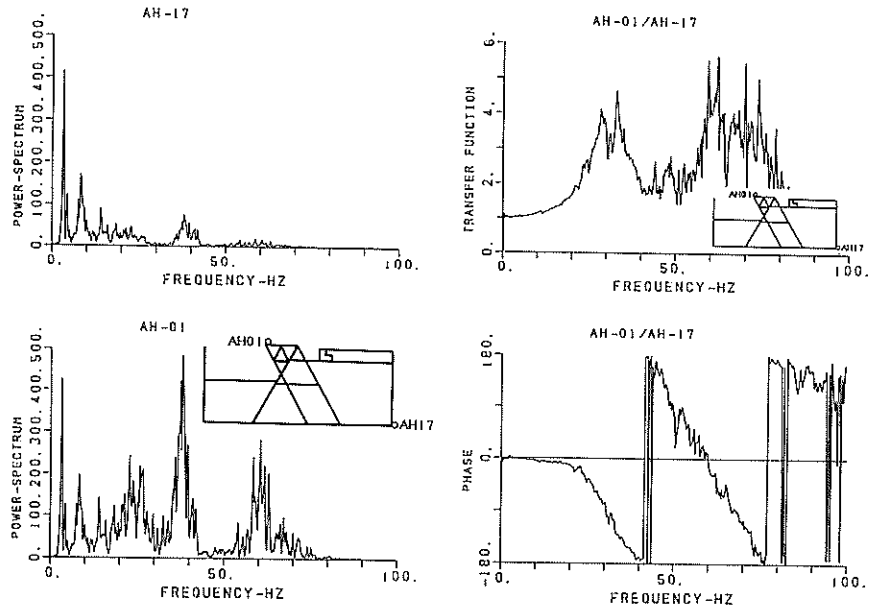


図-41 250 Gal地震波加振実験のトラス模型の加速度伝達関数  
(時間縮尺 1/10)

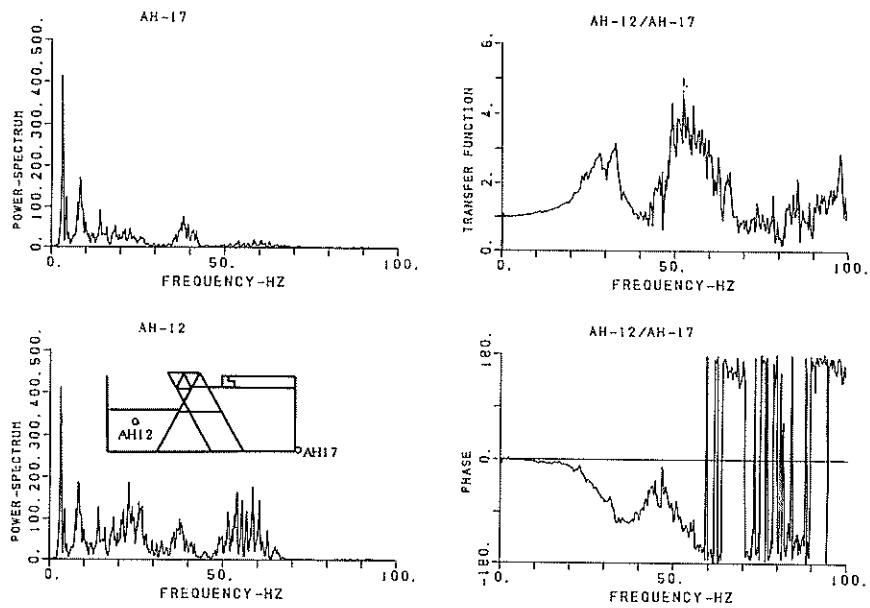


図-42 250 Gal地震波加振実験の海側地盤の加速度伝達関数  
(時間縮尺 1/10)

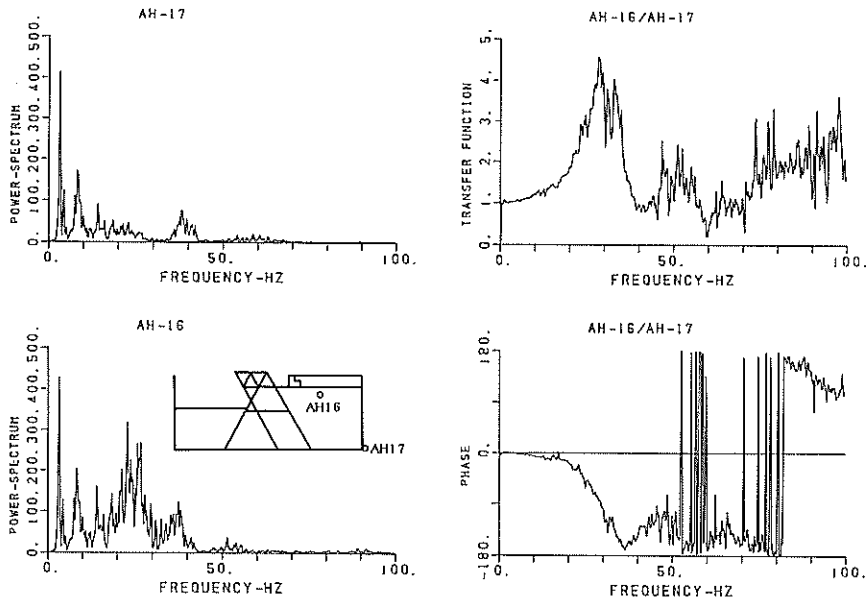


図-43 250Gal地震波加振実験の埋土側地盤の加速度伝達関数  
(時間縮尺 1/10)

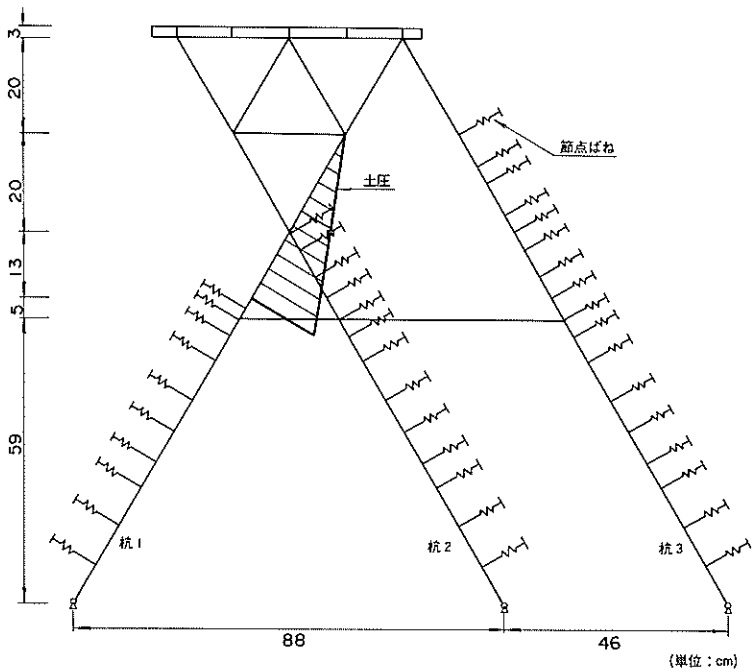


図-44 構造解析モデル

表一 2 トラス模型の物性定数

名 称	形状・寸法 (mm)	材 質	断 面 積 A (m <sup>2</sup> )	剪断用 断面積 As	断面二次 モーメント I (m <sup>4</sup> )	せん断 弾性定数 G (tf/m <sup>2</sup> )	ポアソン 比 ν	単 位 体積重量 γ (tf/m <sup>3</sup> )
杭 材	2.0×20×40 ×4本	6063S -T5	8.68×10 <sup>-4</sup>	0.31	5.6×10 <sup>-8</sup>	2.08×10 <sup>6</sup>	0.35	2.72
斜 材	1.5×15×15 ×4本	〃	3.24×10 <sup>-4</sup>	0.45	1.0×10 <sup>-8</sup>	〃	〃	〃
水 平 材	〃 〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
上 弦 材	2.0×20×40 ×4本	〃	8.68×10 <sup>-4</sup>	0.31	5.6×10 <sup>-8</sup>	〃	〃	〃
土留板と杭 の合成材	合成・セグメント式 ×4本	〃	2.47×10 <sup>-3</sup>	0.24	1.17×10 <sup>-7</sup>	〃	〃	〃
上 載 材	21×550×10000	-	2.1×10 <sup>-2</sup>	-	-	8.08×10 <sup>6</sup>	0.30	5.50
支持地盤	-	乾燥砂	-	-	-	1875	0.48	1.62
裏埋地盤	-	〃	-	-	-	1817	0.48	1.57
土留ケーソン	-	-	-	-	-	8.6×10 <sup>5</sup>	0.48	1.57

of Mechanical Engineers) 規格によると、温度が 38 °C 以下のアルミ材の弾性係数 (7,030 kgf/mm<sup>2</sup>) は、温度が 205 °C に達すると、5,800 kgf/mm<sup>2</sup> に減少する。トラス模型製作に際し、溶接による部材温度は、過少評価しても 205 °C には達している。そこで、熱によるアルミ材の弾性係数の減少を考慮した。減少率は、5,800/7,030 = 0.825 とした。

c) 横方向地盤反力係数

杭の横方向地盤反力係数 ( $K_H$ ) は、トラス模型の杭材と同じ寸法の直杭の水平載荷試験結果から逆算して求めた。図-45の縦軸は、海側地盤に建て込んだ杭の天端 (地盤面から 10 cm) および地表面の実測変位を Chang の公式で求めたときの横方向地盤反力係数である。図から、地盤反力係数  $K_H$  は基準変位の取り方によって、その数値が変化することがわかる。変位によって地盤反力係数が変化することは、いわゆる杭の挙動が非線形的であることを示している。したがって、基準変位の値によって地盤反力係数は変化するが、本報告では、実物の地表面の杭の 1 cm の動の変位を基準変位とした。相似則を考慮すると、この基準変位は 0.11mm となり、図-45 に示すように模型上の地盤反力係数は 10 kgf/cm<sup>2</sup> となる。

鉛直杭の地盤反力係数は、前述のように設定することができるが、トラス模型の杭は傾斜している。傾斜した杭 (斜杭) の横地盤反力係数については、久保<sup>5)</sup> の研究がある。久保は、杭の横地盤反力を杭の変位の 0.5 乗に

比例させて求めている (港研方式)。したがって、地盤反力係数は Chang の公式のそれと異なる。しかしながら、港研方式によって求めた鉛直杭と斜杭の地盤反力係数の関係は Chang の公式にも適用できると考え、久保の研究

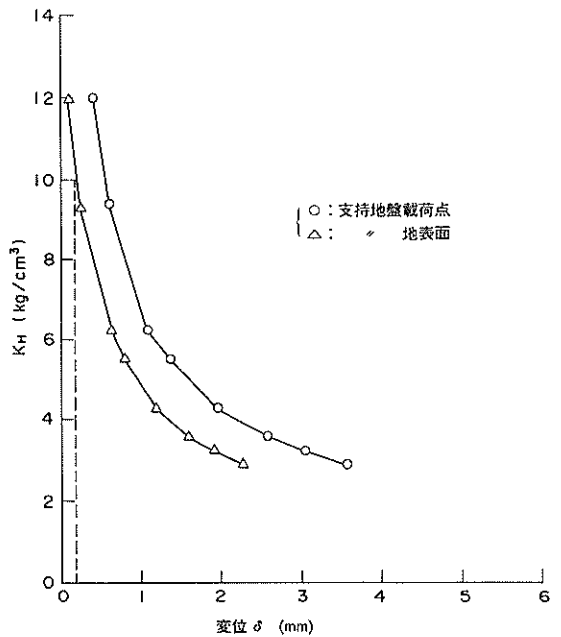


図-45 Changの方法で推定した  $K_H$  と杭の変位の関係

成果を準用して、斜杭の地盤反力係数を求めた。その結果、図-44に示したトラス模型の天端に海側向きの力が作用した場合、杭1の反力係数は鉛直杭の33%、杭2、杭3は2.24倍となった。

(2) 等価線形振動解析法

a) 解析法および解析モデル

トラス模型の動的挙動を2次元有限要素法プログラム FLUSH<sup>6)</sup>で解析した。FLUSHプログラムは土の動的非線形性をせん断ひずみの関数として取り扱い、かつ複素剛性を用いて振動数領域で解析する複素応答等価線形解析プログラムである。

図-46はトラス模型の解析モデルで、地盤は平面ひずみ要素、トラス模型は梁要素で表した。

b) 物質定数

杭材、水平材、土留材等の定数は試験結果を使用した。アルミ材の弾性係数は、前述(1)で示したように溶接の熱

による低減を考慮している。解析モデルが2次元モデルであるため、トラス模型の杭材等の断面定数は奥行き1mの換算値で入力した。物性定数は、表-2に示したとおりである。地盤のせん断弾性定数は、板たたき法で求めたS波速度から求めた。

なお、実験に使用した地盤のせん断弾性定数および減衰係数のひずみ依存性データは、実測値が無いので既往の研究成果<sup>7)</sup>を利用した(図-47、48)。相似則によると動的ひずみも縮尺されることになっているが、今回は厳密な相似模型ではなく、かつ時間縮尺も変化させているため、模型を小さな実物として考え、図-47、48に示したひずみは特に変化させなかった。トラス模型のアルミ材、鉄材は線形材料とした。

4.2 水平載荷試験の解析結果

3.1で示したトラス模型の水平載荷試験結果を4.1(1)で述べた複合構造解析プログラム ISAPで解析した。解

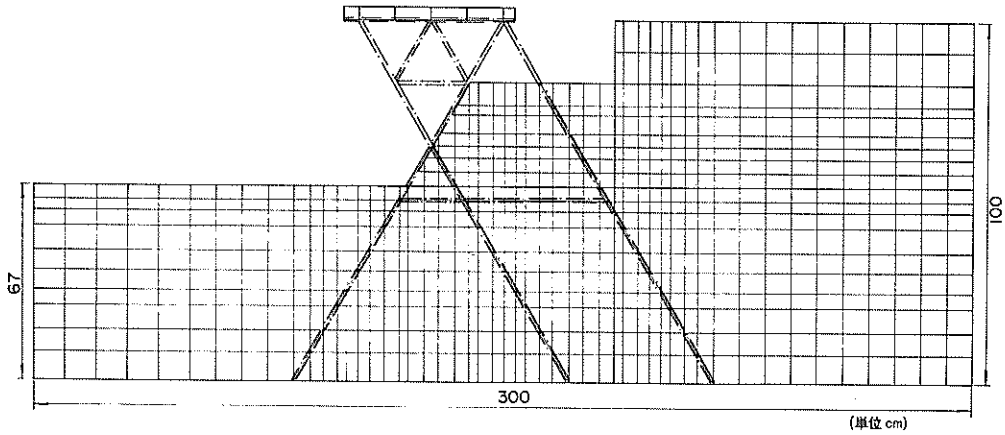


図-46 有限要素モデル

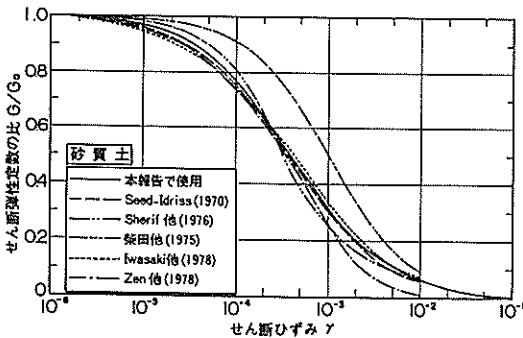


図-47 解析に使用した砂の  $G/G_0$  と  $\gamma$  の関係

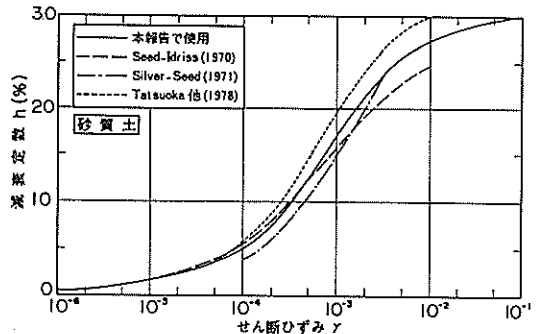


図-48 解析に使用した  $h$  と  $\gamma$  の関係

析は、土留板の無いトラス模型に対して行った。土留板は斜杭に作用する軸力を分担しないように設計して製作したが、実際には土留板が軸力を一部分担した。しかし、その分担割合ははっきりしていない。そこで解析条件をはっきりさせるため、ここでは土留板の無いトラス模型を対象に解析した。

図一49は、208.2 kgfの水平荷重を海側から陸側へ作用させたときのトラス模型の変形を示したものである。実験結果からも明らかにされたように、トラス模型は水平外力に対して軸力で抵抗するため、変形は極めて小さい。計算結果も実測結果と大きく異なるものでないことがわかる。

図一50は軸力の解析結果を実測結果と比較したものである。解析結果でも、杭1と杭3が、水平外力に対して抵抗し、杭2の抵抗割合は小さいことがわかる。また、軸力は杭1と杭2の交点付近で解析結果が若干大きくなるものの、解析結果は概ね実測結果を再現している。

図一51は曲げモーメントの解析結果を実測結果と比較したものである。曲げモーメントは、杭1と杭2の交点あるいは水平材と杭材の交点付近で大きい。この解析結果は実測結果をよく表している。

以上から、水平荷重が作用するトラス模型単体の挙動は本解析法で検討できることがわかった。

4.3 裏埋め地盤完成時のトラス模型の挙動解析結果  
解析は、4.2と同様にISAPで行った。トラス模型に作用する土圧外力は土留壁に作用する実測土圧を用いるべきであったが、良好な土圧データが得られなかったので、以下の2方法で推定した。

a) 港湾の施設の技術基準による方法

トラス模型に作用する外力は土留壁に作用する土圧のみとし、その土圧は以下の方法で推定した。

i) 盛土土圧の換算

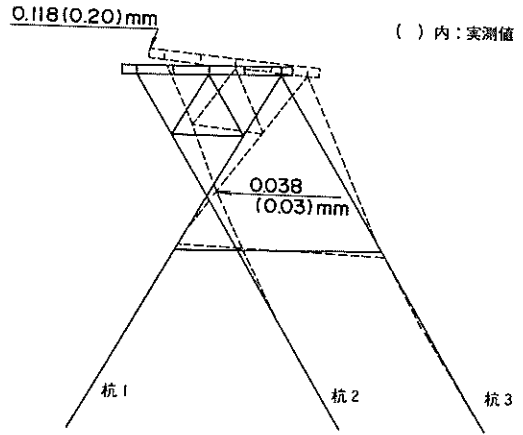
2段盛土の土圧は、図一1に示す方法で推定した<sup>1)</sup>。なお、本解析ではトラス模型の背後地盤の土留部は、等価な斜面に置き換えた。

ii) 土圧の算定

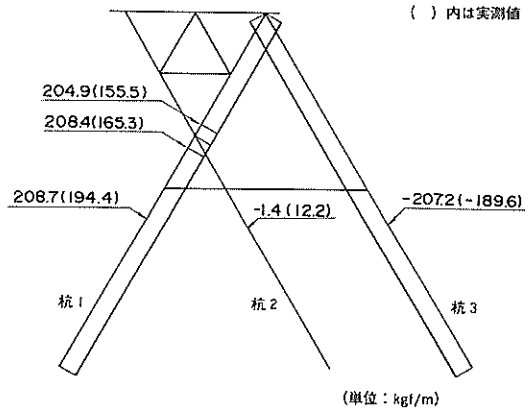
土留壁に作用する土圧は、港湾の施設の技術基準<sup>6)</sup>に従って算定した。図一52は地震波加振実験のために作製された地盤の物性定数を用いて求めた土留壁に作用する土圧分布である。

b) 杭材に盛土荷重を作用させて解析する方法

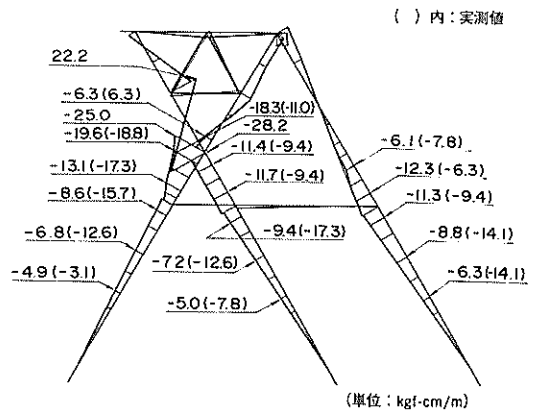
土留壁に作用する盛土は静止状態にあると仮定し、土留壁には0.5の静止土圧を作用させた。一方、海底面より上の斜材には盛土地盤による荷重を考慮した。ジャケツ式鋼製護岸設計指針(案)<sup>9)</sup>では、土中の斜材に作用



図一49 陸側引っ張り水平載荷試験の変位に関する解析結果(土留板無し)



図一50 陸側引っ張り水平載荷試験の軸力に関する解析結果(土留板無し)



図一51 陸側引っ張り水平載荷試験の曲げモーメントに関する解析結果(土留板無し)



する荷重は Spangler の方法<sup>10)</sup>で計算してよいことが示されている。そこで、本解析でも、その研究成果を準用して、斜杭に作用する荷重を推定した。図-53は、土留壁に作用する土圧と斜杭に作用する荷重分布を示したものである。

c) 実験結果と解析結果の比較

図-54, 55 は前述 a) の港湾の施設の技術基準の方法、図-56, 57 は b) の静止土圧ならびに盛土荷重を外力とする方法で求めた軸力と曲げモーメントを示したものである。a) の方法による軸力、曲げモーメントは、b) の方法で求めた値より一桁ほど小さい。しかしながら、分布はよく似ている。外力に対する斜杭の抵抗特性を検討すると、杭1と杭2の軸力で抵抗し、杭3の抵抗割合は極めて小さい。一方、曲げモーメントは、軸力の場合と比較して、杭3の割合が大きいくことがわかる。このように杭1と杭2の軸力が大きいことは、地盤からの土圧合力が

杭1と杭2の交点に集中しているためと考えられる。これら解析結果を図-21, 22 で示した実測結果と比較すると、絶対値は実測結果の方が大きい。a), b) の両者の方法による結果は実測結果より小さいが、定性的には土留壁に常時土圧、あるいは土留壁に静止土圧、杭2と杭3に Spangler の方法による土荷重を作用させて解析すると、比較的トラス模型の挙動が実測値に類似した結果を示す。

なお、実測結果が解析結果より極めて大きくなった理由は、地盤の締固め時の衝撃荷重あるいは地盤製作時の人の自重で杭材に大きな残留ひずみが生じたためと考えられる。なお、定性的には a) と b) の解析結果に大きな差はなかったが、解析結果が実測データに比較して小さかったため、定量的な議論として常時土圧が適切か、静止土圧が適切か、また Spangler の方法による土荷重を作用させるか否か等については、今後の重要な検討課題

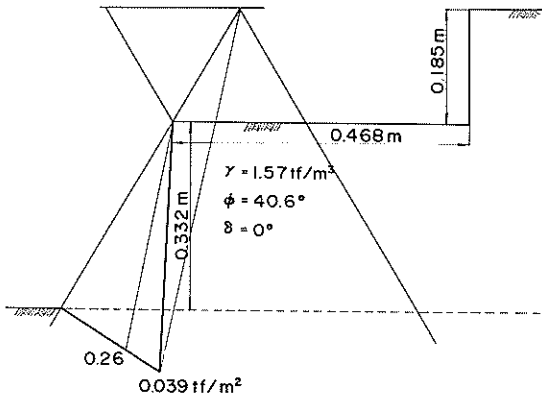


図-52 傾斜した土留壁に作用する常時土圧 (計算値)

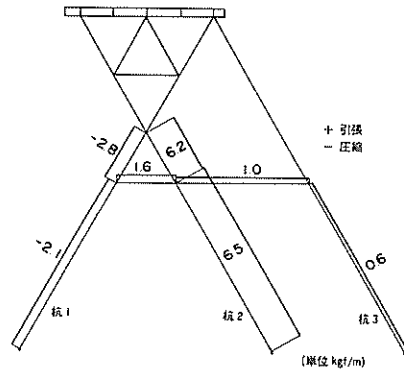


図-54 常時土圧を作用させた場合の軸力分布

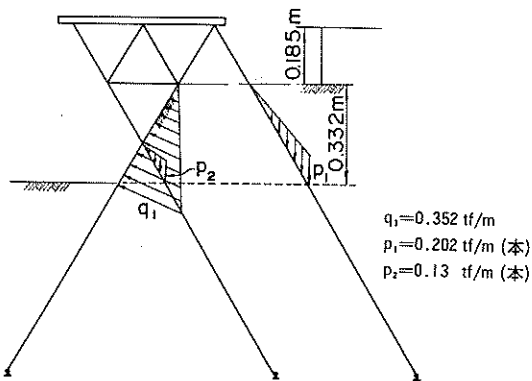


図-53 土留壁に作用する静止土圧と杭に作用する Spangler 荷重 (計算値)

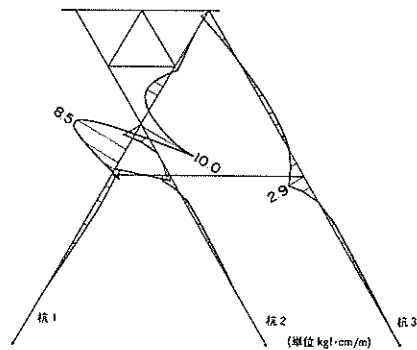


図-55 常時土圧を作用させた場合の曲げモーメント分布

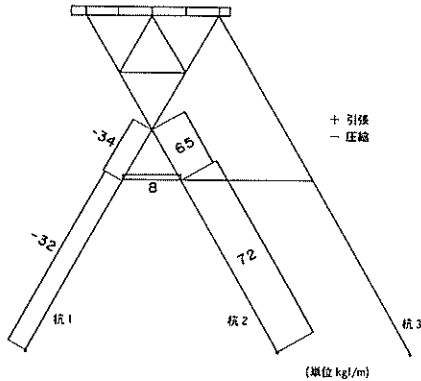


図-56 静止土圧と Spangler 荷重を作用させた場合の軸力分布

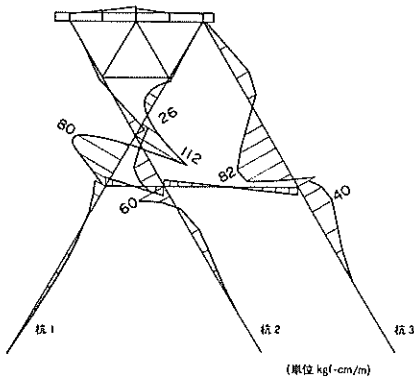


図-57 静止土圧と Spangler 荷重を作用させた場合の曲げモーメント分布

である。

#### 4.4 正弦波加振実験の解析結果

入力振動数は 5 Hz ~ 70 Hz であったが、解析振動数はトラス模型の応答が最も卓越する地盤の固有振動数 (28 Hz) とした。最大加速度は 200 Gal である。図-58~60 は最大加速度、最大軸力、最大曲げモーメントの解析結果を実験結果と比較したもので、図中の○印は実験結果、その値は ( ) 内の数値で表した。また、点線は解析結果、その値は ( ) 外の数値で示した。

図-58 に示すようにトラス模型天端あるいは地盤表面に近づくにしたがって増加する加速度分布の傾向は、解析結果と実験結果で比較的良好一致していることが分かる。しかしながら、増加の割合は実験値の方が大きい。これは解析に用いた地盤の動的変形特性に及ぼす拘束圧効果あるいはせん断ひずみ特性の影響等と考えられる。

解析では、地盤の深さ方向の初期せん断変形係数を同一とし、更に動的変形特性のひずみ依存性は既往の研究成果を用いた。今後、実験結果を解析する場合、低拘束圧下の地盤の動的変形特性を解析の中に導入する必要がある。

図-59 から、動的解析による深さ方向の杭の軸力分布と実験結果は、比較的良好に対応していることが分かる。

実験によると、外力に対するトラス模型の抵抗は軸力で受け持たれるため、曲げモーメントは小さかったが、図-60 に示す解析結果でも小さいことがわかる。しかしながら、最大曲げモーメントが交点に集中する傾向はよく再現されている。

#### 4.5 地震波加振実験の解析結果

動的解析は、実物の地震波 (八戸波、図-10) の時間軸を実験と同様に、1/10 と 1/5 に縮小して実施した。最大加速度は 250 Gal である。

図-61~63 は、地震波の時間軸を 1/10 にしたときの解析結果 (最大加速度、最大軸力、最大曲げモーメント) を実験結果と比較したものである。また、図-64~66 は、時間軸を 1/5 にしたときの結果である。図中の○印は実験結果で、その値は ( ) 内の数値で表している。また、点線は解析結果で、その値は ( ) 外の数値で示した。

時間軸を 1/10 とした場合、解析による加速度、軸力、曲げモーメントの分布は実験結果と対応しているが、その絶対値は解析結果の方が大きい。一方、時間軸を 1/5 とした場合の解析結果は実験結果をよく再現している。このように時間軸の縮尺によって解析結果が実験結果を説明できない理由は、前述 4.4 でも述べたように地盤の動的変形特性のひずみ依存性データ等が十分な精度を有していなかったことが考えられる。

しかしながら、本解析法によると、トラス模型の地震時挙動を図-64~66 のような精度で解析できる可能性も示していたことから、本解析法の適用性は比較的高いと考える。

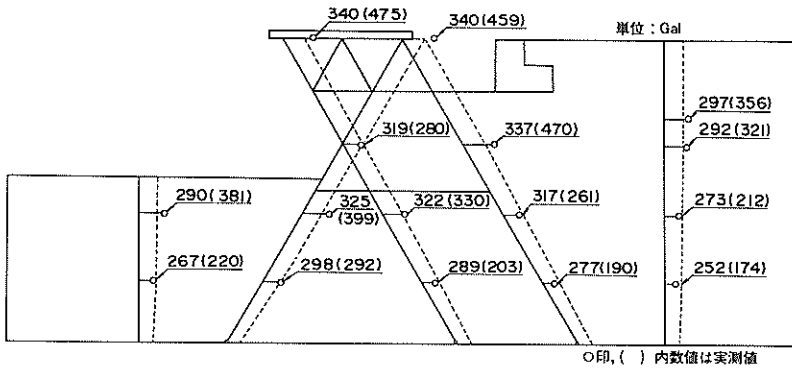
## 5. 結 論

トラス式鋼製岸壁の振動性状を振動実験および動的解析によって検討した。その結果を以下に示す。

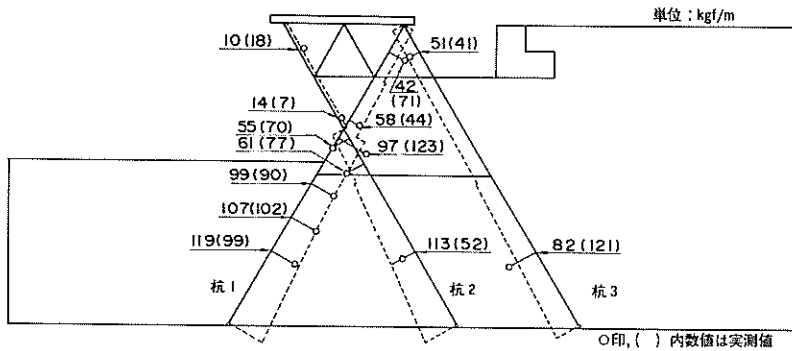
### (1) 実験結果

#### a) 水平載荷試験結果

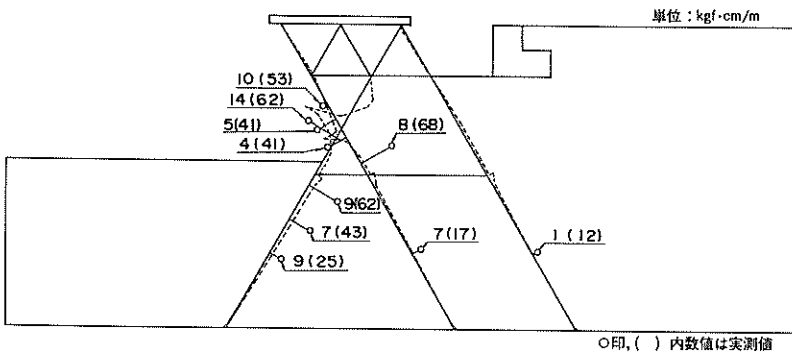
水平外力の向きに係わり無く、トラス模型は外力に対して、外側の杭 (杭1 と 杭3) の軸力で抵抗し、杭2 の分担割合は小さい。この結果は当初想定していた結果と一致している。図-14 は、杭1、3 および 2 を説明している。



図一58 200 Gal正弦波加振実験の加速度分布に対応する解析結果 (28 Hz)



図一59 200 Gal正弦波加振実験の軸力分布に対応する解析結果 (28 Hz)



図一60 200 Gal正弦波加振実験の曲げモーメント分布に対応する解析結果 (28 Hz)

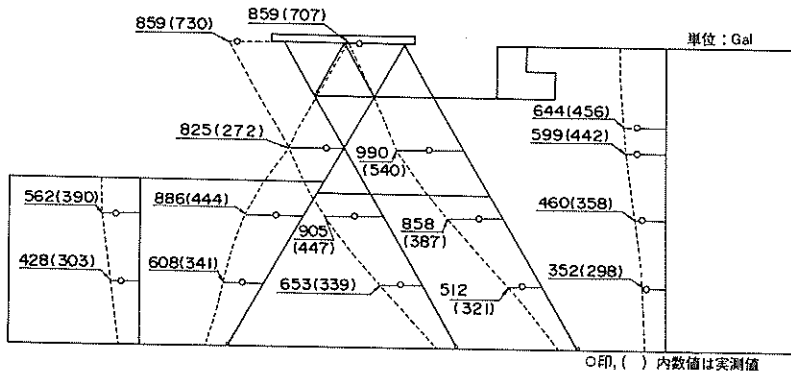


図-61 250 Gal地震波加振実験の最大加速度に対応する解析結果（時間縮尺 1/10）

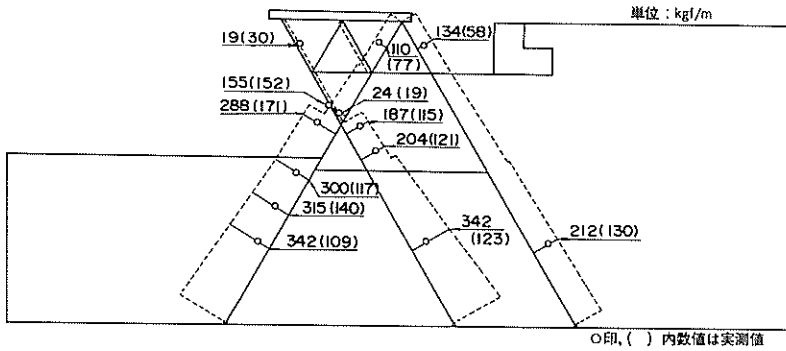


図-62 250 Gal地震波加振実験の最大軸力に対応する解析結果（時間縮尺 1/10）

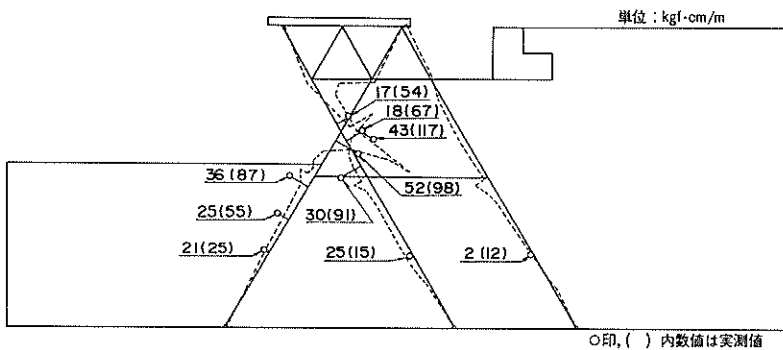


図-63 250 Gal地震波加振実験の最大曲げモーメントに対応する解析結果（時間縮尺 1/10）

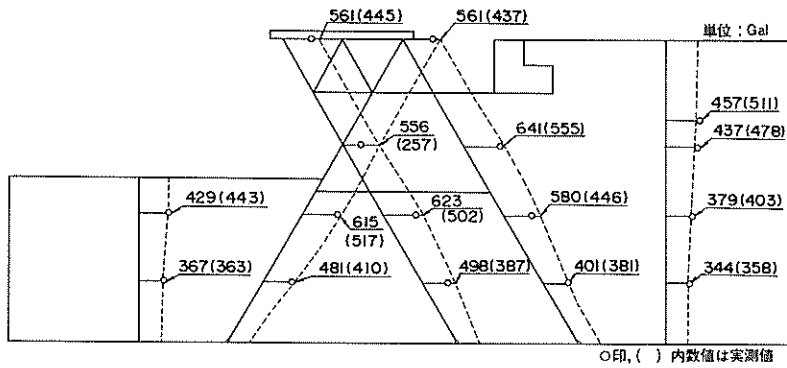


図-64 250 Gal地震波加振実験の最大加速度に対応する解析結果 (時間縮尺 1/5)

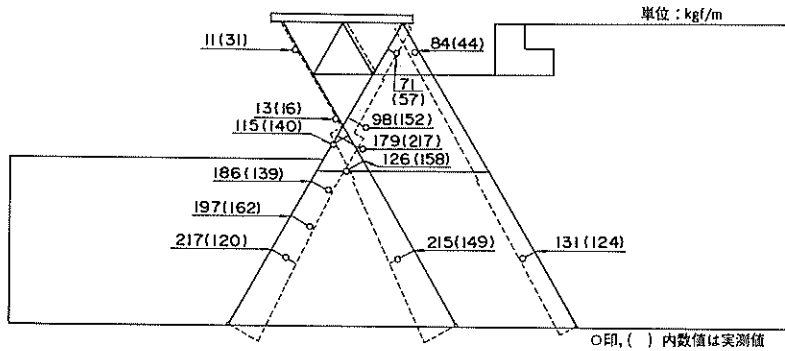


図-65 250 Gal地震波加振実験の最大軸力に対応する解析結果 (時間縮尺 1/5)

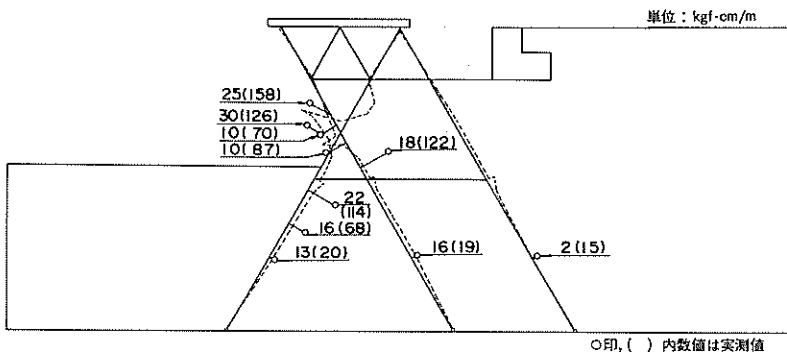


図-66 250 Gal地震波加振実験の最大曲げモーメントに対応する解析結果 (時間縮尺 1/5)

#### b) 自由振動実験結果

トラス模型本体の固有振動数は59.4 Hz、減衰定数は3.1%であった。自由振動時の外力も、水平載荷試験結果と同じく杭1と杭3で支持されていた。

#### c) 裏埋め地盤完成時のトラス模型の挙動

杭1の斜杭間に設置された土留壁に作用する土圧合力は、杭1と杭2の交点に作用するよう設計した。実験結果によると、土圧は杭1と杭2の軸力で支持され、杭3の分担割合は小さく、設計の考え方が適切であったことを確認した。

#### d) 正弦波加振実験結果

トラス模型の応答は、加振振動数が地盤あるいはトラス模型の固有振動数に近くなると卓越する。加振振動数がトラス模型の固有振動数より低い場合、トラス模型の応答は、埋土地盤とはほぼ同じである。これはトラス模型の杭の質量が地盤に比較して小さく、杭が自励的な挙動をしなかったためである。加振振動数が地盤の一次固有振動数に近づくと、トラス模型杭の応答加速度はトラス天端に近づくとほど大きく、トラス模型天端の質量効果、すなわち慣性力の影響が現れていた。加振振動数がトラス模型の一次固有振動数に近づくと、トラス模型の振動形は地盤の振動の影響を受け、その振動形は極めて複雑になる。このように杭の応答が周辺地盤に影響される理由は、杭の質量が地盤に比較して小さいためである。

トラス模型に作用する外力は水平載荷試験結果と同様に、杭1と杭3で支持され、杭2の分担割合は小さいことがわかった。

しかし、水平載荷試験あるいは自由振動実験の結果と比較すると、周辺地盤があるトラス模型の杭の曲げひずみは、若干大きくなる。これは杭への外力が当初予想したトラス模型天端の慣性力と杭1と杭2の交点への土圧合力の他に、周辺地盤からの外力が生じたためである。

#### e) 地震波加振実験結果

加速度分布形は、正弦波加振実験の場合の地盤の振動が卓越したときに似ていた。入力地震波の卓越振動数が地盤の固有振動に近づくと、トラス模型の応答は周辺地盤よりも大きくなる。トラス模型は、外力に対して、主に杭1と杭3の支持力で抵抗するが、杭2の分担割合も大きかった。これは地盤が振動することによる影響である。曲げひずみも正弦波加振実験で明らかにされたように、地盤の振動が卓越するとき卓越する。杭の軸力を含め、このような現象は静的な水平載荷試験結果には見られなかった。

以上の実験結果は、トラス式鋼製岸壁の耐震設計は地震動の卓越振動数、および地盤、トラス式鋼製岸壁の固

有振動数の大きさを考慮して検討する必要があることを示している。

#### (2) 数値解析結果

静的および動的解析法で実験結果を解析し、解析法の適用性等を検討した。静的解析は複合構造解析プログラムISAP、動的解析は二次元等価線形有限要素法プログラムFLUSHを使用して行った。

#### a) 水平載荷試験の解析結果

トラス模型の水平載荷試験に対する解析結果でも、杭1と杭3が、水平外力に対して、抵抗し、杭2が抵抗する割合は極めて小さいことが明らかにされた。

#### b) 裏埋め完成時の静的外力によるトラスの挙動解析

裏埋め地盤完成時のトラス模型の挙動を、土留壁に常時土圧あるいは静止土圧を作用させ、杭2と杭3の斜杭にSpanglerによる土荷重を作用させて解析した。絶対値は実測結果の方が大きかったが、定性的には実測値に類似した結果を示した。

#### c) 正弦波加振実験の解析結果

地盤の振動が卓越した時のトラス模型あるいは地盤の加速度分布は、解析結果と実験結果で比較的良好一致していた。

解析による杭の深さ方向の軸力分布と実験結果は、よく対応していた。トラス模型の外力の大部分は軸力で支持されるため、曲げモーメントは小さかったが、最大曲げモーメントが斜杭の交点に集中する傾向はよく再現されていた。

#### d) 地震波加振実験の解析結果

時間軸を1/5とした場合の加速度、軸力、曲げモーメントの解析結果は、実験結果をよく再現したが、1/10の場合の解析結果は実験結果より大きかった。時間軸の縮尺によって解析結果が実験結果を説明できない理由は、地盤の動的変形特性のひずみ依存性データが十分な精度を有していなかったこと等が考えられる。実験結果を解析する場合、低拘束圧下の地盤の動的変形特性を解析の中に導入する必要がある。

以上の解析結果から、今回使用した解析プログラムは入力データが精度良く推定できる場合は実用的な解析プログラムと考えられる。

## 6. あとがき

岸壁を耐震設計する場合には、地震外力としての地震時土圧あるいは慣性力を設計震度に応じて設定すればよい。しかしながら、設計震度に比例して、地震時土圧あるいは慣性力は増大し、建設費もそれに応じて増大する。したがって、耐震性を有し、かつ経済的な岸壁を建設す

るには、岸壁に作用する土圧を減少させ、かつ慣性力をできるだけ小さく、すなわち岸壁の重量を小さくする必要がある。一方、構造物の安定性は、更に外力と構造物の支持機構の関係でも決定されるため、支持機構を工夫することによっても経済性を追求できる。

本研究の対象としたトラス式鋼製岸壁は、このような点を考慮して提案されたものである。今回の実験および数値解析結果は、本岸壁が耐震的であることを示唆している。本研究で得られたトラス模型の動的特性は、同形式の構造物を設計する際の基礎的な資料となる。今後のトラス式鋼製岸壁の発展性を考えると、同岸壁はその重量が既往の構造物と比較し軽量であるため、軟弱な地盤に建設することも可能である。このような場合、砂地盤と異なり斜杭に作用する軟弱地盤からのネガティブフリクションあるいは圧密沈下等の影響を考慮する必要がある。

最後に本報告を取りまとめるにあたって、著者らは故益田卓明氏に深甚の感謝の意を表します。本研究は氏が運輸省第二港湾建設局に在職中に著者らと立案し、実施したものであります。本報告書は著者らによって取りまとめられましたが、実験、解析は、氏の卓越した計画力、実行力、洞察力によるところが極めて大と考えております。氏が元気な時に報告書を取りまとめることができなかったことを残念に思っています。本報告書が発刊できたことに対し、再度、氏に感謝の意を表します。

(1989年3月31日受付)

## 参考文献

- 1) 日本国有鉄道編：建設物設計標準解説 基礎構造物及び杭土圧構造物，日本鉄道施設協会，1974年6月，pp. 197～201.
- 2) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文集，第275号，1978年7月，pp. 69～77.
- 3) 国生剛治：低拘束圧下の砂の動的物性と模型実験に適用される相似則，第15回地震工学研究発表会講演概要，1979年7月，pp. 265～268.
- 4) 井合 進：1 G場での地盤・構造系の模型振動実験の相似則について，第19回地震工学研究発表会講演概要，1987年7月，pp. 341～344.
- 5) 久保浩一：くいの横抵抗に関する実験的研究（その3）—斜ぐいおよび頭部固定ぐい—，運輸技術研究所報告，Vol. 12, No. 2, 1962, pp. 181～205.
- 6) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C-F, and Seed, H. B.: FLUSH—A Computer Program of Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Report No. EERC 75-30, Univ. of Calif., Berkeley, 1975.
- 7) 北澤社介，楡垣典弘，野田節男：沖繩県および奄美大島の大地震時における地盤加速度，港湾技研資料，No. 396, 1981, 113 p.
- 8) 港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，第2編，第12章，1979, pp. 2-172～2-174.
- 9) ジャケット式鋼製護岸設計指針(案)：日本港湾協会，1977, pp. 22～23.
- 10) Spangler, M. G.: Underground Conduits—Appraisal of Modern Research—, Trans. A. S. C. E., 1948.

港湾技研資料 No.650

1989.6

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 日青工業株式会社

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