

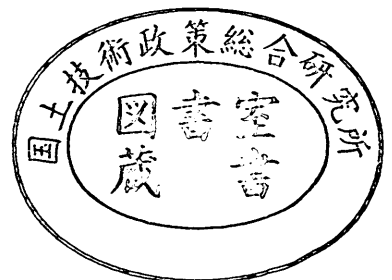
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 27 NO. 2 JUNE 1988

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第27巻 第2号 (Vol. 27, No. 2), 1988年6月 (June 1988)

目 次 (CONTENTS)

1. Stability Analysis of Geotechnical Structures by Adaptive Finite Element Procedure
..... Masaki KOBAYASHI 3
(適応有限要素法による地盤の安定解析.....小林正樹)
2. 改良型波力発電ケーソン防波堤の特性
——波エネルギーに関する研究, 第7報—— ...高橋重雄・安達 崇・田中 智..... 23
(Stability and Function of Improved-type Wave Power Extracting Caisson Breakwater
——A Study on Development of Wave Power, 7th Rept.——
.....Shigeo TAKAHASHI, Takashi ADACHI and Satoru TANAKA)
3. 現地観測データを用いた方向スペクトル推定法に関する検討
..... 橋本典明・小舟浩治・亀山 豊..... 59
(Examination of the Various Directional Spectral Estimation Methods for
Field Wave Data.....Noriaki HASHIMOTO, Koji KOBUNE and Yutaka KAMEYAMA)
4. 海象観測用船型ブイの運動特性に関する模型実験と現地観測
..... 高山智司・平石哲也・高山 優・甲斐源太郎・中埜岩男・古賀道明..... 95
(Model Tests and Field Observation on Motions of a Ship-shaped Buoy for
Marine ObservationTomotsuka TAKAYAMA, Tetsuya HIRAISHI, Masaru
TAKAYAMA, Gentaro KAI, Iwao NAKANO and Michiaki KOGA)
5. 深層混合処理工法による改良体に作用する外力
..... 寺師昌明・北誥昌樹・中村 健.....147
(External Forces Acting on a Stiff Soil Mass Impoved by DMM
.....Masaaki TERASHI, Masaki KITAZUME and Takeshi NAKAMURA)
6. アスファルトコンクリートの老化性状..... 佐藤勝久・八谷好高・阿部洋.....185
(Changes in Properties of Asphalt Concretes due to Aging
.....Katsuhisa SATO, Yoshitaka HACHIYA and Yoichi ABE)
7. 剛基礎上の重力式係船岸の地震時滑動量推定手法の実験的研究
..... 上部達生・守屋正平・工藤勝己.....211
(An Experimental Study on Estimation Procedures of Seismic Sliding Displacements
for the Gravity Type Quaywall on the Rigid Base
..... Tatsuo UWABE, Masahira MORIYA and Katsumi KUDO)
8. CFRP ロッドを緊張材としたアンボンド PC 梁の曲げ性状
..... 大即信明・山本邦夫・浜田秀則.....241
(Bending Behavior of Unbonded Prestressed Concrete Beams Prestressed with
CFRP Rods Nobuaki OTSUKI, Kunio YAMAMOTO and Hidenori HAMADA)

2. 改良型波力発電ケーソン防波堤の特性 —波エネルギーに関する研究, 第7報—

高橋 重雄*・安達 崇**・田中 智**

要 旨

港湾技術研究所では、波エネルギー変換装置の機能を持つ波力発電ケーソンの開発を行っている。波力発電ケーソンは、空気室と呼ばれる特殊な前室をもつケーソンであり、防波堤や護岸に用いることができる。

本報告は、副題で示した研究シリーズの第7報である。ここでは、波力発電ケーソン防波堤の、防波堤としての特性について実験的に検討した。すなわち、その耐波特性、反射・伝達波特性等を明らかにしている。特に、空気室前壁が鉛直な基本型の波力発電ケーソンに対し、前壁が斜面となる改良型波力発電ケーソンを考案し、その特性を検討している。本報告で得られた主たる結論は以下のとおりである。

- 1) 波力発電ケーソンには、空気室のカーテンウォール下端より波面が下がる場合、衝撃的な空気圧縮力が作用する。この圧力について、若干の理論的検討を行い、相似則を考慮すると、現地では模型実験結果から推定されるほど大きくないことを示した。
- 2) 改良型波力発電ケーソンの空気室の設計圧力分布を提案した。また、ケーソンの安定性に対する設計波圧の算定法を提案し、滑動試験によってその妥当性を確かめた。改良型波力発電ケーソンの設計波圧の算定法は、合田式を拡張したものであり、直立消波ケーソンと上部斜面ケーソンの設計波圧の考え方に基いている。
- 3) 滑動試験を基本型波力発電ケーソンや上部斜面ケーソン、消波ブロック被覆ケーソンについても行った。改良型波力発電ケーソンは、基本型波力発電ケーソンや上部斜面ケーソンより耐波安定性が高い。
- 4) 改良型波力発電ケーソンは、基本型波力発電ケーソンより空気出力効率がやや高く、反射率も低い。
- 5) 改良型波力発電ケーソンの空気室内の水位上昇高さは、最高波高の0.5倍以上となることがある。しかしながら、その高さでの水塊の上昇速度は小さい。
- 6) 改良型波力発電ケーソンの反射率は、波高が比較的小さいとき約0.45であり、波高が大きくなっても0.55程度で全体的に低い。改良型波力発電ケーソンの波高伝達率は、上部斜面ケーソンより小さい。

キーワード：防波堤，波力発電，異形ケーソン，波力，特殊防波堤

* 水工部 波エネルギー研究室長

** 水工部 波エネルギー研究室

2. Stability and Function of Improved-type Wave Power Extracting Caisson Breakwater — A Study on Development of Wave Power, 7th Rept. —

Shigeo TAKAHASHI*

Takashi ADACHI**

Satoru TANAKA**

Synopsis

A wave power conversion system is under development at the Port and Harbour Research Institute. The converter is a concrete caisson to be used as a vertical breakwater. The caisson has a special front room named the air chamber where wave power is converted into air power. The air power is converted into electric power by a turbine and generator.

This is the seventh report of this serial study. This report aims at establishing the design method of the system as a breakwater. That is, the wave power extracting caisson breakwater is investigated experimentally with some theoretical considerations. The wave power extracting caisson discussed in this report is mainly the one with a sloped front wall and is named the S-type caisson. The S-type caisson is an improved one of the fundamental wave power extracting caisson named as the V-type caisson. Major conclusions are as follows:

- 1) Impact air compression pressure acts on the walls in the air chamber of the wave power extracting caisson. The impact pressure appears when the water surface goes below the front curtain wall edge and the air in the air chamber is compressed impulsively by the uprizing water surface. The theory on the impact air pressure is presented, which predicts that the air pressure in the prototype air chamber is not large as in the model air chamber. The scale effect of the air compression should be taken into account.
- 2) A pressure distribution is given to design the air chamber walls. The design method for the caisson stability against waves is also proposed. The validity of the method is confirmed by the experiments.
- 3) The stability of the S-type caisson is compared with other caissons experimentally. The stability of the S-type caisson is higher than the V-type caisson and the caisson with a sloping superstructure.
- 4) The conversion efficiency from wave power to air power of the S-type caisson is higher than the V-type caisson.
- 5) The reflection coefficient of the S-type caisson is about 0.45 when the wave height is relatively low. The reflection coefficient is still about 0.55 when the wave height is large.
- 6) The wave transmission coefficient of the S-type caisson is smaller than the caisson with a sloping superstructure.

Key Words: Breakwater, Wave Power Converter, Special Caisson, Wave Force, Special Breakwater

* Chief of Wave Power Lab., Hydraulic Engineering Div.

** Member of Wave Power Lab., Hydraulic Engineering Div.

目 次

要 旨	23
1. ま え が き	27
2. 実 験 方 法	27
2.1 実験水路と模型	27
2.2 測定と解析	30
2.3 模型の検定	31
2.4 実 験 波	32
3. 波力発電ケーソンの空気室の空気圧	34
3.1 実 験 結 果	34
3.2 衝撃空気圧の計算	40
4. 空気圧および波圧に対するケーソンの設計法	43
4.1 空気室内および前壁に作用する圧力	43
4.2 ケーソンの耐波安定性	46
5. 防波堤としての機能	49
5.1 空気出力効率	49
5.2 反 射 率	51
5.3 空気室内と前面の水位変動	51
5.4 波高伝達率と越波量	52
5.5 ノズル開口率が小さい場合	53
6. 結 論	55
参 考 文 献	55
主 要 記 号 表	56

1. まえがき

波力発電ケーソン防波堤は、波のエネルギーを電気等の利用し易いエネルギーに変換することができる防波堤である。写真-1に示す防波堤は波力発電ケーソンと呼ぶ特殊なケーソンからなる。このケーソンの空気室において、波エネルギーは空気のエネルギーに変換される。ケーソンの機械室に設置されたタービン・発電機により、空気のエネルギーを電気のエネルギーに変換することができる。

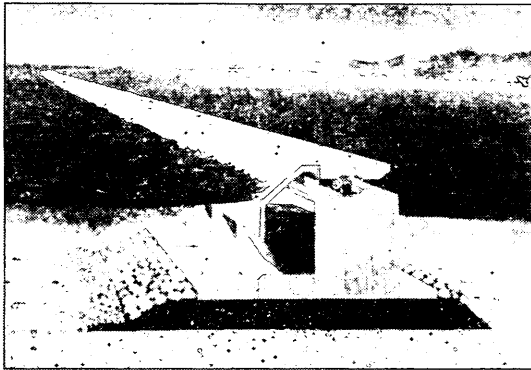


写真-1 波力発電ケーソン防波堤概念図

港湾技術研究所では、昭和57年度より波力発電ケーソンの開発を行っており、すでに6編の研究報告^{1)~6)}が発表されている。すなわち、第1報、第3報および第5報では、空気室における波エネルギーから空気エネルギーへの変換過程を理論的・実験的に検討した。また、第4報では、タービンに関する検討を行っている。さらに第6報において、発電機を含めた波エネルギーの変換に関する総合的な実験を行っている。したがって、タービン・発電機を含めた波力発電ケーソンの波エネルギー変換

装置としての設計は、ほぼ可能である。なお、第2報では、ケーソンに作用する波力の測定を行い、耐波設計法を提案している。

これまで検討を行った波力発電ケーソンは、空気室の前壁が鉛直なものである。しかしながら、本報告で主に対象とする波力発電ケーソンは、写真-1に示すような前壁が傾斜したものである。後者は、前者の機能等の向上を目的として改良されたものであり、ここでは前者を基本型、後者を改良型と呼ぶことにする。改良型波力発電ケーソンは、上部工が傾斜した上部斜面ケーソンともみなすことができる。通常の上部斜面ケーソンの施工例は古くからあり、最近では、水深や設計波が大きい大規模防波堤のケーソンとして用いられることが多くなっている。上部斜面ケーソンは、斜面に鉛直に波力が働くため、耐波安定性が高い。しかしながら、越波し易く、通常の直立堤に比して高い天端高を必要とする。改良型波力発電ケーソンは、こうした上部斜面ケーソンと同様な耐波安定性を有していると考えられる。また、越波対策上天端を高くするため、空気室を高くすることができ、ノズルから機械室に海水が侵入する危険性も少ない。

本報告は、主として改良型波力発電ケーソンの耐波安定性および機能について、実験的に検討したものである。比較のため、基本型波力発電ケーソンや上部斜面ケーソン等についても実験を行っている。

2. 実験方法

2.1 実験水路と模型

実験は、当所大型造波水路で行った。水路は、図-1に示すように、仮設の隔壁で0.8mの主水路と2.1mの副水路に分けられている。模型は主水路に設置した。海底勾配は1/100で、水深は模型設置位置で97.5cmである。模型ケーソンは、厚さ17.5cmの捨石マウンド上におか

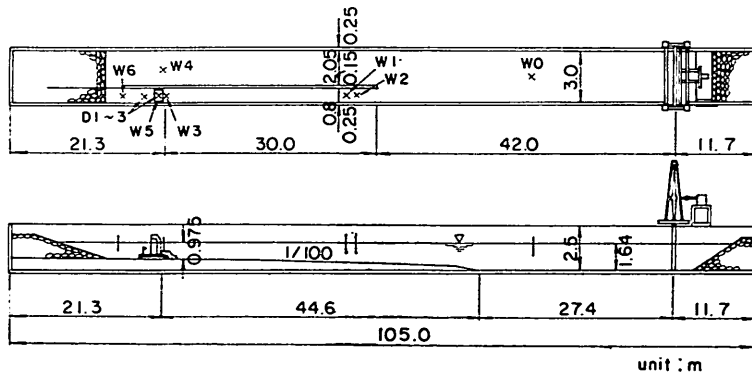


図-1 実験水路と模型位置

れている。

図-2(a), (b), (c)は、実験に用いたケーソン防波堤の断面図である。図-2(a)は、改良型波力発電ケーソン防波堤(WPEC-S)である。ケーソンの全幅 B_c は 135 cm, 天端高 h_c が 55 cm, 基面水深 h' が 80 cm である。また空気室の幅 B は 35 cm であり, 空気室前壁は静水面上 2.5 cm の位置から角度 45° で傾斜している。空気室前壁カーテンウォールの没水水深 d_c は 20 cm である。ただし, 実験ではこれを 15 と 25 cm にも変えている。空気室ほどの高さでもできるだけ同じ水平面積となるよう, 機械室を後方に移している。また空気室後壁の一部にも 45° の傾斜を設けている。空気室上部には, タービンの負荷に相当する直径 4.70 cm (開口率 0.0075, 1/133), 長さ 5.7 cm の空気ノズルがある。また, 開口率の違いによる影響を調べるため, 直径 3.84 cm, 長さ 5.7 cm のノズル

(開口率 0.005, 1/200) も用いている。ただし, ノズル開口率 ϵ は, 空気室の静水面における水平面積とノズルの断面積の比である。

なお, ケーソンや空気室の諸元は以下の基準によって決めている。

- ① 空気室の幅は, 周期 1.34 s の波の長さの 13% としている。空気室の幅とノズルの開口率は, できるだけその値が小さくて空気出力効率の高いものを一応選択している。
- ② カーテンウォールの没水水深は, 大きな衝撃的な空気圧縮圧力をできるだけ受けないように $0.25 H_{max}$ とした。この衝撃的な空気圧縮圧力は, 波面がカーテンウォール下端より下がった後, 上昇して空気室の空気を衝撃的に閉込め圧縮するときが発生する。
- ③ 機械室の上部デッキの高さは, ノズルから水が機械室に侵入しないように $0.5 H_{max}$ とした。
- ④ ケーソンの天端高さは, 通常のカンソン防波堤と同程度かそれ以下の越波伝達波となるよう, $1.0 H_{1/3}$ としている。

ただし, H_{max} は最高波高, $H_{1/3}$ は有義波高で, 設計波として一応考えている H_{max} と $H_{1/3}$ の値は, 75 cm と 55 cm である。これらの基準はこれまでの実験結果等から仮に決めたものであり, その妥当性について本報告で検討する。これらは, 波エネルギー変換装置および防波堤としての安定性と経済性を考慮して決められるべきであることにも留意する必要がある。

図-2(a)の改良型波力発電ケーソンのカーテンウォールの下端がケーソンの基面水深に達すれば, 空気室は閉じられ, このケーソンは通常の上部斜面ケーソン(SFWC)となる。また, 図-2(b)は上部斜面ケーソンの反射波や伝達波を減少させるため, 前面に消波ブロックを設けた消波ブロック被覆ケーソン(SFWC-B)である。ただし, 消波ブロックの天端は静水面上 2.5 cm であり, 斜面部を被覆していないため, 通常消波ブロック被覆ケーソンの場合より低い。ブロックの重量は 1.91 kgf/個 と設計対象波高に対しては小さい。これは, 実験時に適切な重量のブロックを用意できなかったためである。図-2(c)は, 空気室前壁が鉛直な基本型波力発電ケーソン(WPEC-V)である。ケーソンの天端高やカーテンウォールの没水水深等は改良型波力発電ケーソンと同じである。表-1に, 実験に用いたケーソン名とその略記号を示している。

図-3(a)は, 改良型波力発電ケーソンの模型を示している。模型は, 厚さ 20 mm のアクリル合成樹脂版からなる。ただし, ケーソンの底板は 45 mm 厚の鉄筋コンクリ

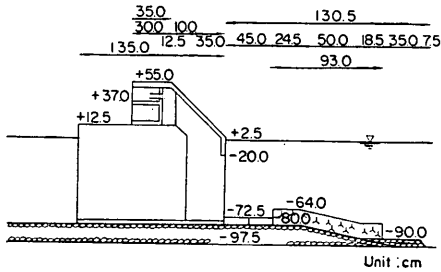


図-2(a) 改良型波力発電ケーソン (WPEC-S)

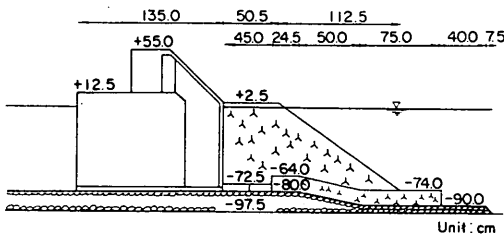


図-2(b) 消波ブロック被覆ケーソン (SFWC-B)

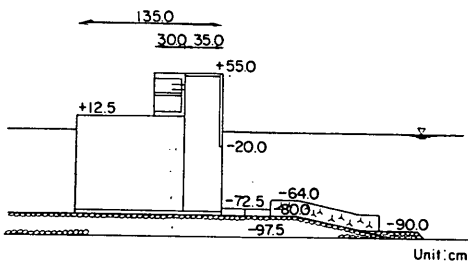


図-2(c) 基本型波力発電ケーソン (WPEC-V)

改良型波力発電ケーソン防波堤の特性

表-1 実験に用いたケーソン

I	WPEC-S	Wave-Power-Extracting Caisson with Sloped Front Wall
II	SFWC	Sloped Front Wall Caisson
III	SFWC-B	Sloped Front Wall Caisson with Wave Dissipating Blocks
IV	WPEC-V	Wave-Power-Extracting Caisson (with Vertical Front Wall)

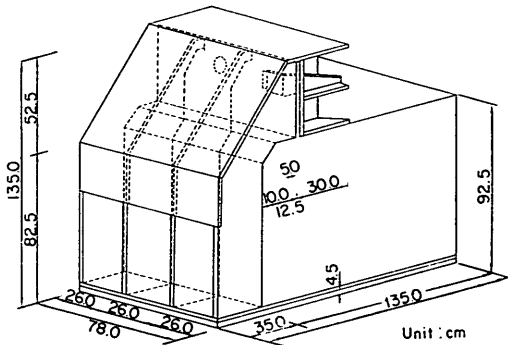


図-3(a) 改良型波力発電ケーソン模型

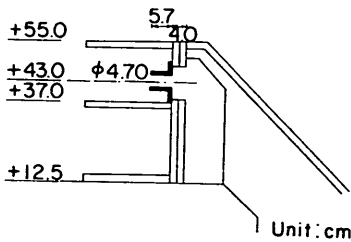


図-3(b) 模型の機械室と空気ノズル

ート床版である。模型の波峯線方向の長さは、78 cm であり、2 枚の隔壁で空気室を3つの区画に分けている。しかし、各区画間の空気の移動が抵抗無くできるように、隔壁には大きな開口部が設けてある。図-3(b)は、機械室の断面図である。図のように空気ノズルは、直径が4.70 cm であり、その中心が静水面から43cm の位置に取付られている。空気ノズルは直径が3.84 cm のものと取り替えることができる。模型の重量は、空気中で382 kgf、静水中で261kgfであり、実験時の重量は、鉛の重錘によって調整した。表-2 は、改良型波力発電ケーソン模型の諸元一覧表である。なお、基本型波力発電ケーソン模型も同様に製作している。

波力発電ケーソンには、衝撃的な空気圧縮圧力が働く

表-2 改良型波力発電ケーソン模型の諸元

Air Chamber Width (Wave crest direction)	B (cm)	35
Air Chamber Length (Wave direction)	IB (cm)	78
Air Chamber Area	Aw(cm ²)	2730
Air Chamber Effective Area	A'w(cm ²)	2450
Curtain Wall depth	d _c (cm)	15, 20, 25
Air Chamber Height (above the still water level)	D ₀ (cm)	53
Caisson Height (above the still water level)	h _c (cm)	55
Caisson Depth	h' (cm)	80
Caisson Width	B _t (cm)	135
Caisson Weight (in the water)	W(kgf)	261

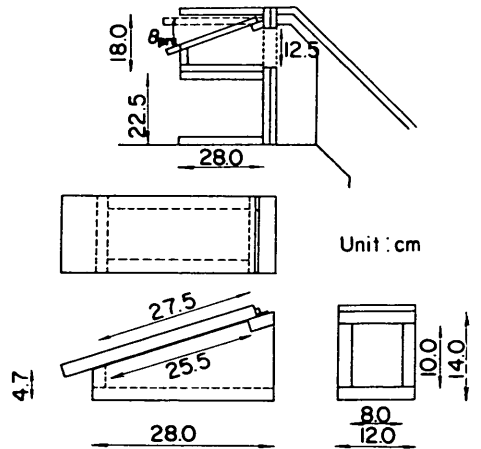


図-4 圧抜弁

危険性がある。この衝撃的な空気圧縮圧力を低減させることを目的として、正圧用圧抜弁を改良型波力発電ケーソン模型に取付けた。図-4 は、その圧抜弁を示す。圧抜弁は空気圧が圧抜弁の作動限界圧力以上となると、図-4 の上図の様に上方に開く。作動限界圧力 p_{prv} は、蓋の重さによって調整できる。蓋が開くと、空気は上部3側方から吹き出す。このときの弁の開口面積 A_{prv} は蓋の開口角 θ_{prv} の関数として、以下のように表わせる。すなわち、

$$A_{prv} = 325 \sin 2\theta_{prv} + 204 \sin \theta_{prv} \quad (1)$$

上式では A_{prv} は cm² の単位である。蓋が水平とな

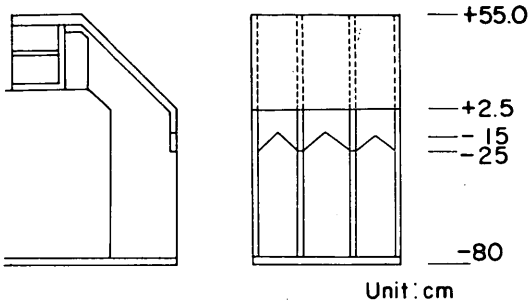


図-5 変形カーテンウォール

ると θ_{prv} は 18.4° となり、 A_{prv} は 295cm^2 となる。しかしながら、空気室から圧抜弁への開口部面積は 80cm^2 しかなく、弁の開口面積は実質的にこの値が上限値となる。すなわち、 θ_{prv} が 5° のときに上限値となる。このとき、弁の開口率は 0.032 である。

波面が衝撃的に空気圧を閉込めるときには、カーテンウォールから空気が漏れる。この空気漏れによって空気圧力は低下すると考えられる。この効果を大きくすることを目的として、図-5 に示すような変形カーテンウォールも用いている。この場合、没水水深は 25cm から 15cm まで連続的に変化する。

2.2 測定と解析

実験では、6台の波高計を用い、入射波・反射波(W1とW2)、空気室前面の波高(W3)、副水路での通過波高(W4)、空気室内の水位変化(W5)、そして伝達波高(W6)を測定した。各波高計の位置を図-1 に示している。空気室内のW5の波高計は、模型が改良型波力発電ケーソンのときには図-6 に示しているように 23° 傾けて固定している。各波高計は、 1m まで測定できる。ただし、空気室内の波高計は短く、静水面下 -21cm までしか測定できない。

図-6 には、圧力センサー(波圧計)の位置も示している。波圧計は合計6個(P1~P6)用い、1個(P1)を空気室の外側の斜面壁上に固定し、他の5個を空気室内に設置した。波圧計の受圧部の直径は 10mm である。P2とP3の波圧計は、通常は空気圧のみを測定し、P4、P5、P6の波圧計は空気圧と波圧の合圧力を測定する。

ケーソンの変位を測定するために、超音波式変位計を3台(D1~D3)設置した。これらは、新しく開発された測定器で、 1m までの変位を 0.1mm の精度で、 100Hz のサンプリング周波数で測定できるものである。この変位計は、超音波の発信部と受信部からなり、発信部がケーソンの背面に取付られ、受信部がケーソン背後 1m におかれたステンレス棒に取付られる。したがって、非接触で変位の測定が可能である。ただし、超音波波高計のように、気泡によって超音波の伝播が乱される。このため、越波によってケーソン背後の水中に気泡が入り込むのを防ぐ、ゴムのシートを水面上に設置した。そのため、変位の測定時には越波伝達波を測定することはできない。

ケーソンの空気室前壁に発生するひずみをひずみゲージで測定した。ひずみゲージは、図-7 に示すように改良型波力発電ケーソン模型の空気室前壁(斜面壁とカーテンウォール)の両面中央に貼っている。ゲージは防水型のクロスゲージであり、二方向のひずみが測定できる。

以上のセンサーのアナログデータを、データレコーダに記録し、ミニコンピュータで解析した。それぞれのケースでは、 400 波以上の波の作用によるデータを解析の対象とした。一波に対するアナログデータを 40 個程度のデジタルデータに変換している。圧力等のデータが、急激な時間的変化を示すときには、さらにサンプリング個数を増加させている。表-3 に、実験に用いたセンサー

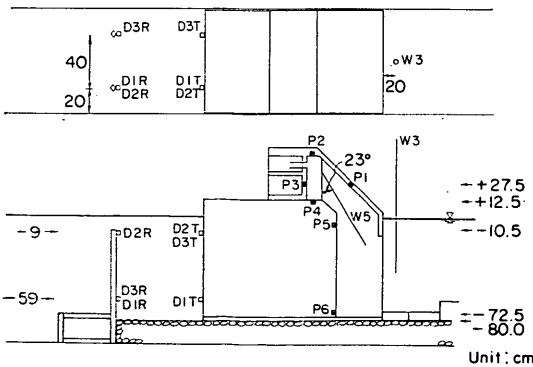


図-6 測定器の設置位置

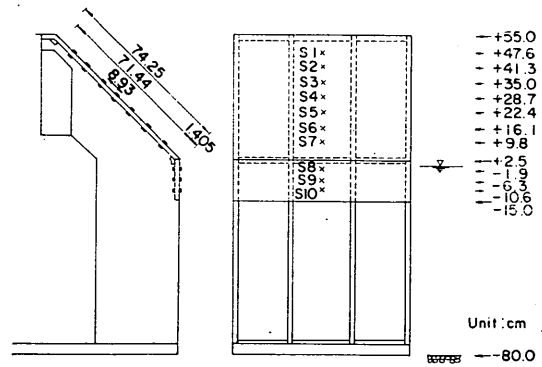


図-7 ひずみゲージの位置

表-3 測定器

Transducers	Object
Wave Gauge W. 1 W. 2 W. 3 W. 4 W. 5 W. 6	Incident and Reflected Waves
	Incident and Reflected Waves
	Water Elevation in front of Caisson
	Passing Waves (side channel)
	Water Elevation inside Caisson
	Transmitted Waves
Pressure Transducers P. 1 P. 2 P. 3 P. 4 P. 5 P. 6	Wave Pressure on Front Wall
	Air Pressure in Air Chamber
	Air+Wave Pressure in Air Chamber
	Air+Wave Pressure in Air Chamber
	Air+Wave Pressure in Air Chamber
	Air+Wave Pressure in Air Chamber
Displacement Meter D. 1 D. 2 D. 3	Horizontal Displacement
	Horizontal Displacement
	Vertical Displacement
Strain Gauges S1~S7 (WPEC-S) S8~S10	Strain on Sloped Plate
	Strain on Curtain Wall

をまとめている。なお、そのほかに越波量ますによる越波量の測定も行っている。

2.3 模型の検定

捨石マウンド上のケーソンの摩擦係数を測定する水平載荷試験（摩擦検定試験）を行った。図-8 に載荷試験の概要を示す。水平力は、ケーソン底面付近 ($Z_F = -75$ cm), あるいは静水面付近 ($Z_F = -4$ cm) の位置に、重錘によって作用させている。ケーソンの変位は、静水

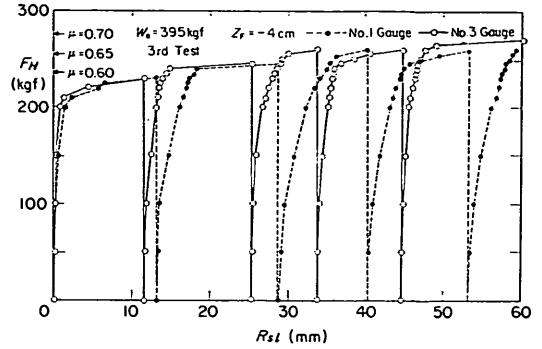


図-9 水平載荷重に対するケーソンの変位

面位置から 0, -32.2, -69.4 cm の位置でダイヤルゲージによって測定した。ケーソンの重量は 395kgf であり、ケーソンの底面と捨石マウンドは湿潤状態である。

図-9 は実験データの例である。横軸は、水平方向のケーソン変位 R_{st} 、縦軸は、水平載荷荷重 F_H である。荷重がある値以上となるとケーソンは滑動する。しかしながら、載荷荷重の下に設けられたストッパーによって滑動距離は制限される。一度滑動が生じたら、荷重を 0 の状態まで戻し、再び載荷を行う。一回の試験でケーソンが約 1 cm ほど滑動できるようにしており、総滑動量が約 5 cm となったとき、ケーソンの据え直しを行った。この図は、静水面付近に水平力を載荷した場合で、据付け直した後 5 回の試験を行った結果である。図に見られるように、据え直しの最初の位置から載荷し始める位置 (0 載荷位置) までの距離 R_{s0} が、大きくなるほど滑動するときの載荷重量が大きくなる、すなわち摩擦係数 μ が大きくなる傾向が認められた。図-10 は、横軸に 0 載荷位置までの距離 R_{s0} をとり、摩擦係数の試験結果を示すものである。摩擦係数は、0.57から 0.7 の間でばらついているが、やはり R_{s0} が大きいほど大きい傾向となっている。

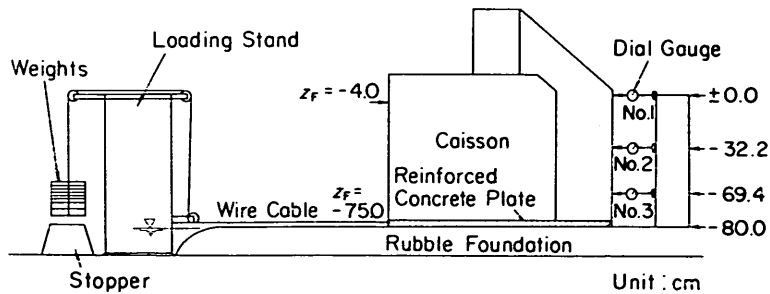


図-8 ケーソンの水平載荷試験概要

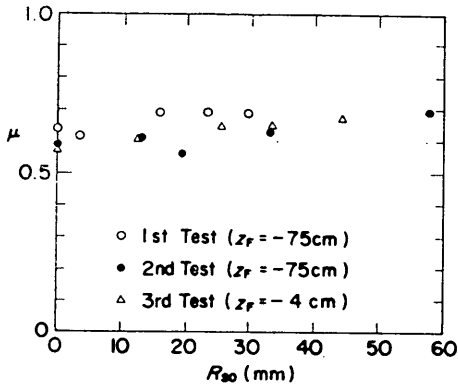


図-10 摩擦係数

アクリル合成樹脂版の弾性係数を測定するために、版の小片を用いた載荷試験を行った。得られた弾性係数の値は、気温 24℃ で $3.67 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ である。谷本ら⁷⁾は、ケーソン壁の破壊に関する研究の中で、アクリル合成樹脂版の弾性係数を求めている。その値は $2.9 \sim 3.85 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ の範囲であり、今回の結果はその範囲に含まれる。谷本らが解析で用いたポアソン比は 0.37 であった。

ひずみに関する実験結果は、4、で FEM (ISAP) による計算結果と比較している。その計算は、空気室の斜面壁やカーテンウォールのみならず、隔壁や側壁も含む薄板要素による三次元解析である。計算に用いた弾性係数とポアソン比は、 $3.67 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ と 0.37 である。

2.4 実験波

実験波は、主として不規則波である。その造波目標スペクトルは、ブレットシュナイダー・光易スペクトル¹³⁾である。目標有義波周期 $T^*_{1/3}$ は、3.35, 2.24, 1.79, 1.57 そして 1.34 s である。5つの波群(A, B, C, D, E)がそれぞれの目標有義波周期に対して用意された。各波群は、それぞれ 400 波以上の波を含む。ケーソン設置位置での水深は、97.5 cm であり、比水深は 0.10 から 0.356

となる。また、空気室の幅と波長の比は、0.036 から 0.128 である。表-4 に実験波の条件をまとめている。なお、規則波も実験に用いている。その周期 T は、3.35, 2.24, そして 1.34 s である。

本実験にさきだち、模型を置かないで波を測定する通過波検定試験を行った。波高計の位置は、図-1 に示した W2, W3, W4 のほかに W0 (造波板から 25m の位置)、W3 F (W3 の 1/8 波長前)、W3 B (W3 の 1/8 波長後) の 6 点である。図-11(a) に測定結果の例を示している。目標有義波周期 $T^*_{1/3}$ が 2.24 s の場合の W3 地点における最高波高と有義波高が示してある。横軸は、造波信号の増幅率 e である。増幅率が 950 のとき碎波す

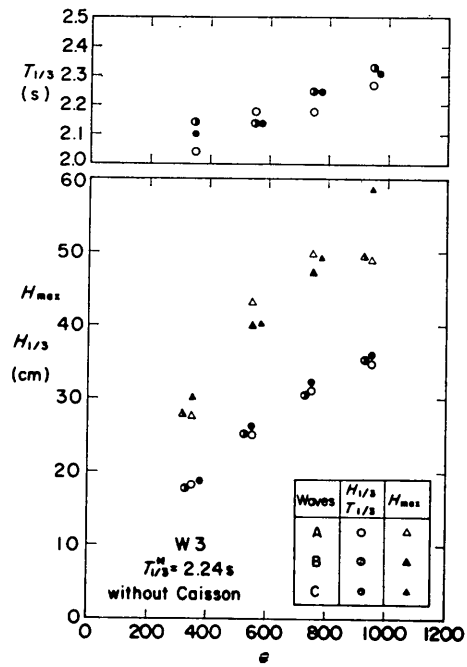


図-11(a) 造波信号の増幅率に対する波の変化 (通過波)

表-4 実験波

Significant Wave Period T (s)	3.35, 2.24, (1.79), (1.57), 1.34					
Significant Wave Height H (cm)	0~52					
Wave Group	A, B, C, (D), (E)					
Number of Waves	400					
Wavelength and Relative Water Depth	L (cm)	975	602	441	360	274
	(h/L)	(0.100)	(0.162)	(0.221)	(0.271)	(0.356)
	(B/L)	(0.036)	(0.058)	(0.079)	(0.097)	(0.128)

る波が現われ、したがってこのときの最高波高は砕波であり、3つの波群の最高波高の平均値は53.6cmである。この値は、砕波波高としてはやや小さい。たとえば、合田の砕波指標¹³⁾によれば、 $T=2.24$ sの規則波の砕波波高は61.5cmである。もし増幅率 e を増大させることができれば、有義波高が増大し、最高波高も大きくなることが期待される。しかしながら、造波機の能力によりこの周期ではこれ以上増幅率を大きくすることはできない。

同様な結果が目標有義波周期 $T^*_{1/3}=3.35$ sの場合にも得られている。この周期における増幅率 e の最大値は、1200であり、そのときの有義波高と最高波高の平均値は、46.7cmと67.9cmであった。やはり最高波高の値は、砕波波高としては小さく、模型の設計に用いた最高波高より小さい。

図-11(a)には、測定された有義波周期も示している。有義波周期は、有義波高が小さいときには目標値より小さいが、有義波高が大きいたときには目標値より大きい。この傾向は、他の目標有義波周期の場合にも認められた。

図-11(b)は、 $T^*_{1/3}=2.24$ sの場合において、測点の違いによる有義波高と周期および最高波高の違いを見たものである。測点W0の少し岸側には、ろ波装置が設置さ

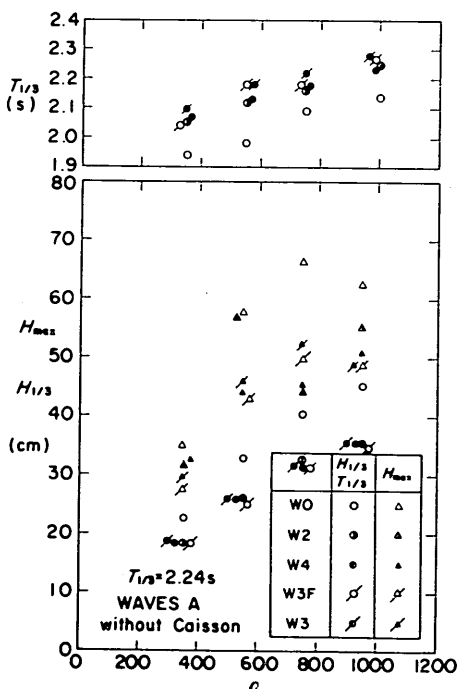


図-11(b) 水路内の位置による波の変化 (通過波)

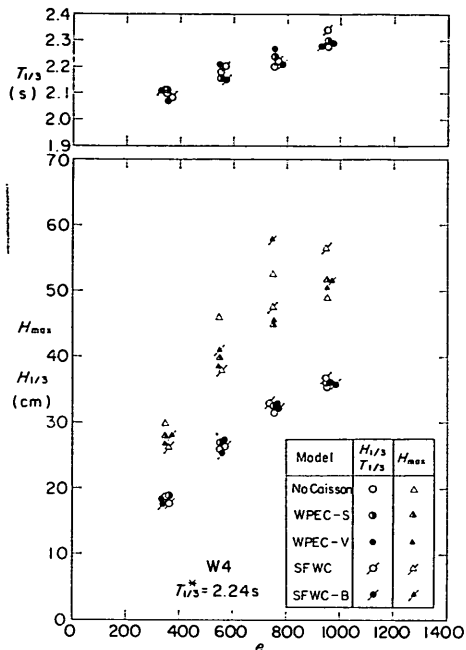


図-12 模型ケーソンの設置による波の変化

れており、また水深も大きいため、測点W0での波高は他の測点の波高より高い。副水路のW4の測点の波高や周期は、主水路のW3の測点の波高や周期とはほぼ同じである。同様の結果が、他の目標有義波周期の場合についても得られている。

図-12は、模型ケーソンを設置した場合のW4測点での有義波高と周期および最高波高を示すものである。図には、模型がない通過波の測定結果も比較のためプロットしている。波力発電ケーソンや消波ブロック被覆ケーソンの場合は、模型の反射率が小さいため通過波との差が小さい。上部斜面ケーソンの場合は、反射率が比較的大きいにもかかわらずその差は小さい。これは、副水路の存在による。したがって、測点W4で得られた有義波高や波パワーを、それぞれの模型ケーソンに入射する波の有義波高やパワーとみなすことにした。ただし、最高波高については、通過波の最高波高を用いて実験結果の解析を行うこととした。これは、解析上最高波高の値を固定したほうが都合がよいことによる。たとえば、 $e=1200$ 、 $T^*_{1/3}=3.35$ sの場合には、最高波高の値は67.9cmである。

図-13(a)は、 $T^*_{1/3}=2.24$ s、 $e=350$ の場合の波の周波数スペクトルを示す。模型がない場合のW3とW4測点のスペクトル、改良型波力発電ケーソン模型がある場

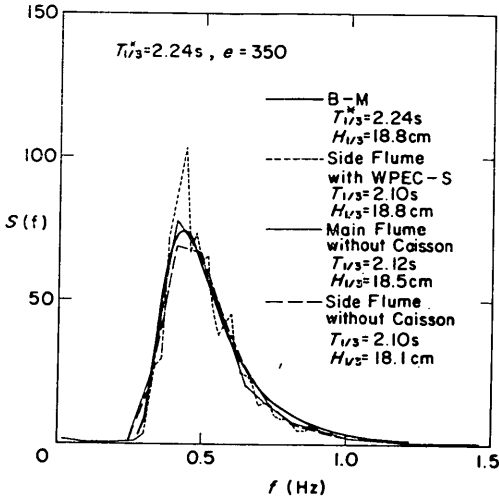


図-13(a) 波の周波数スペクトル ($T^*_{1/3} = 2.24$ s, $e = 350$)

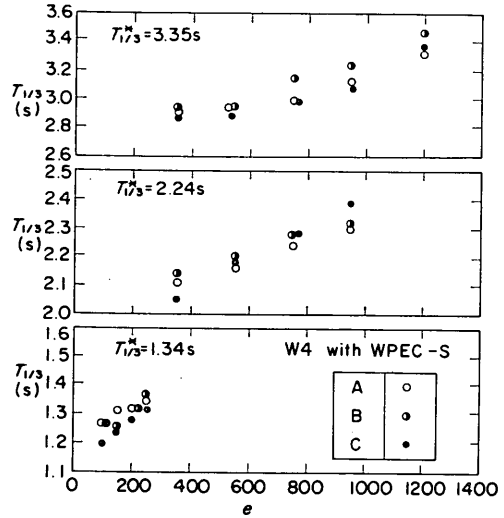


図-14 波の周期の変化

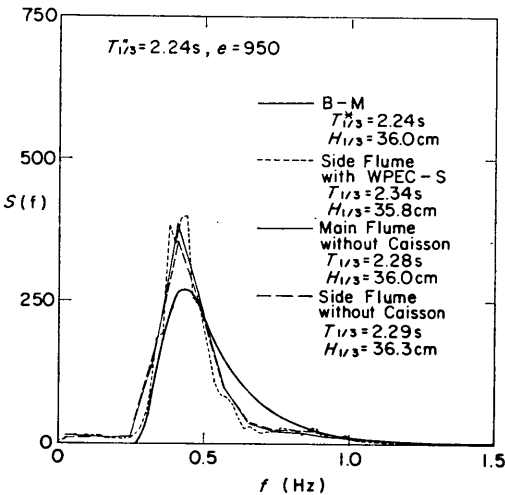


図-13(b) 波の周波数スペクトル ($T^*_{1/3} = 2.24$ s, $e = 950$)

合のW4測点のスペクトル、そして目標スペクトルがプロットしてある。模型がない場合のスペクトルは、ほぼ目標スペクトルに近い。模型がある場合のスペクトルは、ピーク付近のエネルギーがやや大きいようである。図-13(b)は、 $T^*_{1/3} = 2.24$ s, $e = 950$ の場合のスペクトルを示している。図-13(a)の場合に比べ低い周波数領域でエネルギーが大きいようである。これは、碎波の影響である。

図-14は、造波信号増幅率に対する測定有義波周期の変化を調べたものである。すでに図-11(a)でみたように、

増幅率の増加に対して周期は増加している。この変化は、図-13(a), (b)に示した増幅率の増加に対するスペクトルの変化に対応している。ここに示した周期は改良型波力発電ケーソン模型を設置した場合の値であり、 $T^*_{1/3} = 2.24$ sについてみると、図-11(a)の模型がない場合の結果とよく一致していることが分かる。有義波周期は、このように造波機増幅率によって変化するが、これ以降、便宜上目標有義波周期によってその波群の有義波周期を表すこととする。

3. 波力発電ケーソンの空気室の空気圧

3.1 実験結果

(1) アナログデータの例

図-15(a)は、 $T^*_{1/3} = 3.35$ s, $H_{1/3} = 47.8$ cmの不規則波が改良型波力発電ケーソンに作用したときのアナログデータの例である。空気室前面の水位 η_F , 副水路の通過波 η_{pass} , 空気室内の水位 η , 斜面壁上面の波圧 p_1 , 空気室内の空気圧 p_2 , そしてケーソンの水平変位 R_s が示されている。入射波の変動に対応して水位・圧力が変動しているのが分かる。時間 t が30秒あたりで空気室の圧力が非常に大きくなっている。この部分を特に拡大したのが図-15(b)である。空気室前面の水位がカーテンウォール下端以下に下がって、空気室の空気圧が大気圧となった後、上昇する波面で空気を再び閉込め衝撃的に圧縮して、衝撃空気圧が発生する。このときの空気圧の大きさは 103 gf/cm^2 であり、波面上昇速度は、前面の水位の変化率から、約 190 cm/s と推定される。この図にお

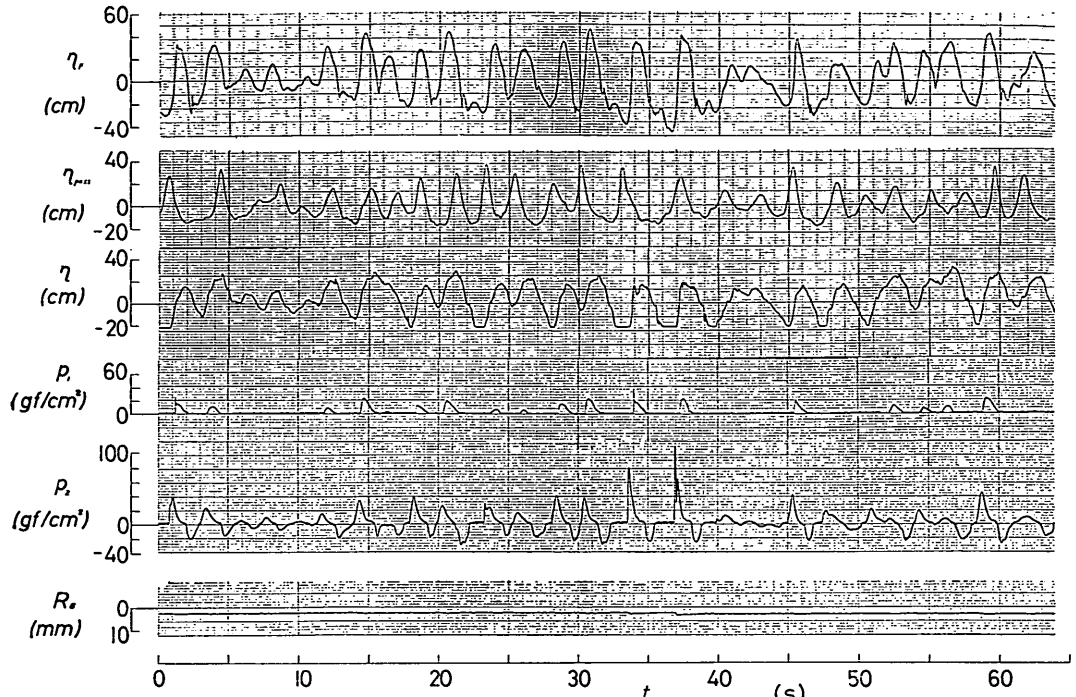


図-15(a) データの記録例 ($T^*_{1/3}=3.35s$, $H_{1/3}=47.8cm$)

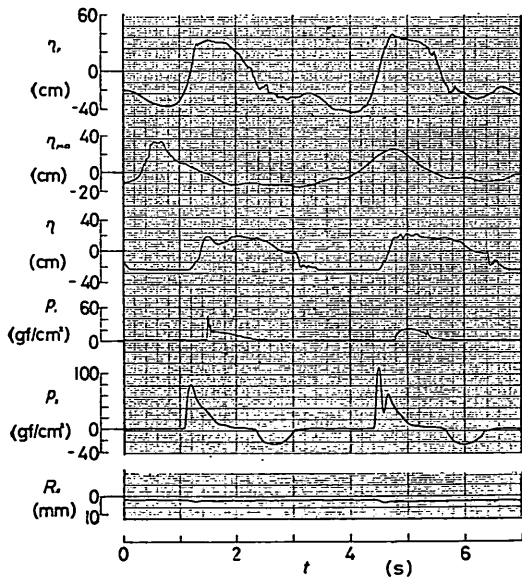


図-15(b) 衝撃空気圧の記録例

いて、斜面壁にも衝撃的な圧力が認められる。この圧力は、波面の直接的な衝突によって生ずる圧力であり、非常に立上がり之急で継続時間が短い圧力である。高橋・谷本⁹⁾は、空気圧縮圧を Bagnold 型の圧力、直接的

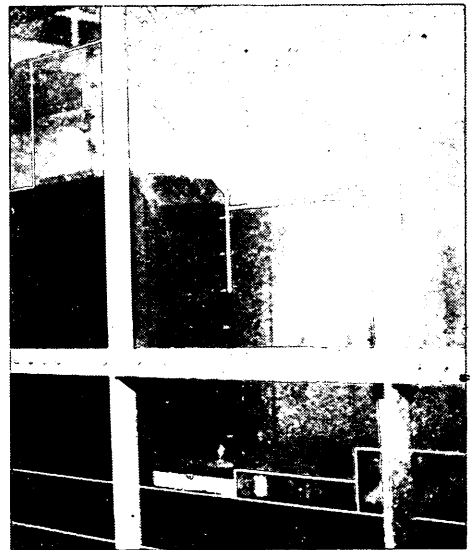


写真-2 波力発電ケーソンへの波の作用状況

な衝突圧力を Wagner 型の圧力と呼んでいる。Bagnold と Wagner はそれぞれの圧力の理論を最初に示している。こうした圧力が大きいとき、ケーソンは滑動するが、その距離は短い。これは、圧力の継続時間が短いからである。なお、写真-2 に改良型波力発電ケーソンに

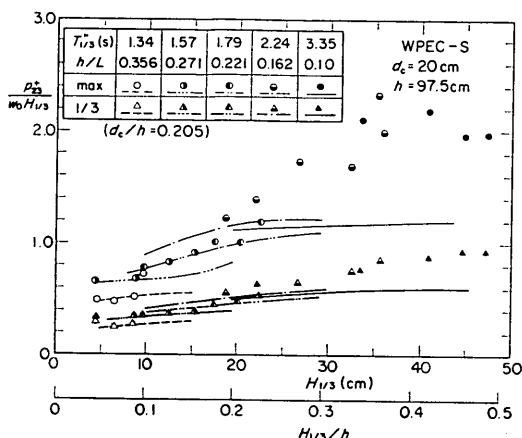


図-16 空気圧の正のピーク値

作用する波の状況を示す。

(2) 改良型波力発電ケーソンの空気圧力の正・負のピーク値

図-16 は、空気室の空気圧の正のピーク値を示すものである。図の縦軸の p^+_{23} は、2つの波圧計 P2 と P3 による空気圧力のピーク値の平均値である。図には、 p^+_{23} の1/3最大値と最大値を、 $w_0 H_{1/3}$ で無次元化した値をプロットしている。1/3最大値と最大値の無次元量は、有義波高とともに増大する。しかしながら、最大値の無次元量は有義波高が40 cm 以上では逆に減少する。これは、最高波高が碎波のために制限され p^+_{23} の値がほぼ上限となるためである。この図に示したのは、ABCDEの波群に対する実験結果の平均値であり、各波群の p^+_{23} の最大値は非常にばらついている。 $T^*_{1/3} = 3.35$ s で $H_{1/3}$ が40 cm 以上の p^+_{23} のすべての最大値の平均値は、 92 gf/cm^2 であり、標準偏差は 10.4 gf/cm^2 である。最高波高を67.9 cm とすると、 $1.35 w_0 H_{\text{max}}$ となる。図には、第6報までに示した計算法による計算値が示してある。計算値は、衝撃的な空気圧縮圧力が働く条件では実験値よりかなり小さい。なお、この図のように、実験結果を各波群の結果の平均値で示すことを標準とする。また、特に断わらない限り、改良型波力発電ケーソンに対する実験結果を示している。

図-17 は、空気圧の負のピーク値 p^-_{23} の実験結果である。図には、 $p^-_{23} / w_0 H_{1/3}$ の1/3最大値と最大値がプロットしてある。これらの絶対値は、有義波高が20 cm 以上では一定か、あるいは減少している。これは、空気室前面の水位がカーテンウォール下端より下がると、空気圧は大気圧に等しくなるため、波高の増大に伴う圧力の絶対値の増大率が小さいからである。 p^-_{23} の絶対値の最

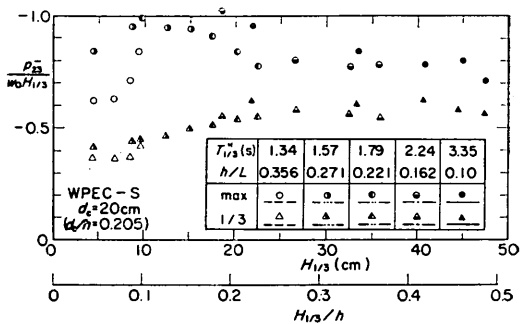


図-17 空気圧の負のピーク値

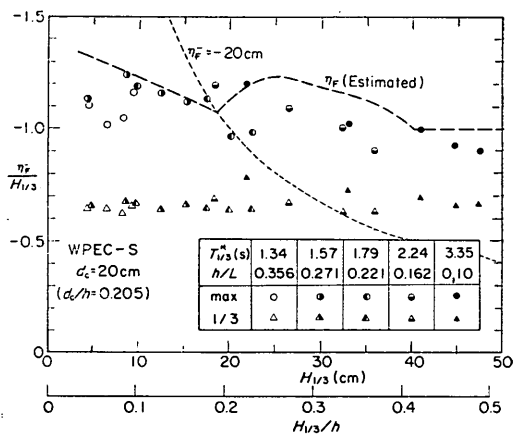


図-18 空気室前面の水位の負のピーク値

大値は、最高波高を67.9 cm として、 $0.5 w_0 H_{\text{max}}$ 以下である。

(3) 空気室の前面の水位の負のピーク値

衝撃空気圧の大きさは、空気室前面の水位の負のピーク値 η^-_F に大きく依存する。図-18 は、空気室前面の水位の負のピーク値の1/3最大値および最大値を、 $H_{1/3}$ で無次元量にしてプロットしたものである。 $\eta^-_F / H_{1/3}$ の絶対値の1/3最大値は、0.6 から 0.7 である。またその絶対値の最大値は、有義波高が20 cm 以下では1.0 から 1.2 程度であり、有義波高がそれ以上では、1.0 以下となる。図中の点線は、カーテンウォール下端の位置 -20 cm を示す。 η^-_F の絶対値の最大値は、有義波高が20 cm 以上で20 cm 以下となり、絶対値の1/3最大値は有義波高が約30 cm 以上で20 cm 以下となることが分かる。図-16 の p^+_{23} の1/3最大値と最大値は、有義波高がそれぞれ20 cm と30 cm 以上で衝撃空気圧の影響で大きくなっていると認められる。すなわち、図-18 の $\eta^-_F = -20$ cm ($= d_0$) の線によって、衝撃空気圧の影響がある程度判断できる。図-19

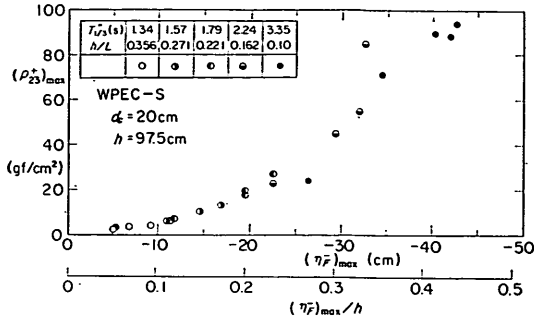


図-19 空気室前面の水位の負のピーク値に対する空気圧の正のピーク値の関係

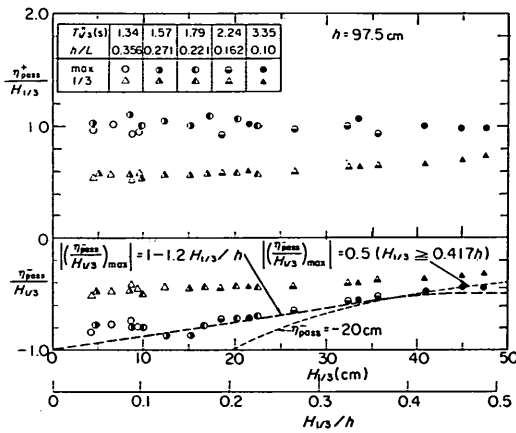


図-20 通過波の波の峰と谷

は、 η^-_F の絶対値の最大値に対して、 p^+_{23} の最大値をプロットしたものである。 η^-_F の絶対値が、20 cm を超えると p^+_{23} の最大値は急激に大きくなり、40 cm 以上では 80gf/cm² を超える。

空気室前面の水位変化は、入射波の波形に依存する。図-20 は、副水路の通過波について、波峰高さ η^+_{pass} と谷の深さ η^-_{pass} の最大値と1/3最大値を調べたものである。 η^+_{pass} の1/3最大値は、有義波高の増大とともに0.5 $H_{1/3}$ から0.7 $H_{1/3}$ の範囲で増大する。一方、 η^-_{pass} の絶対値の1/3最大値は、0.5 から0.3へ減少する。 η^+_{pass} の最大値は、ほぼ1.0 $H_{1/3}$ で一定であるが、 η^-_{pass} の絶対値の最大値は、0.8 $H_{1/3}$ から0.4 $H_{1/3}$ へ減少する。この η^-_{pass} の変化が特徴的であり、重要である。図中の破線は、 $\eta^-_{pass}/H_{1/3}$ の絶対値の最大値と $H_{1/3}$ との関係に近似したものである。すなわち、

$$\left| \frac{\eta^-_{pass}}{H_{1/3}} \right|_{\max} = -1.2 \frac{H_{1/3}}{h} + 1 : H_{1/3} < 0.417h \quad \dots\dots(2)$$

$$= 0.5 : H_{1/3} \geq 0.417h$$

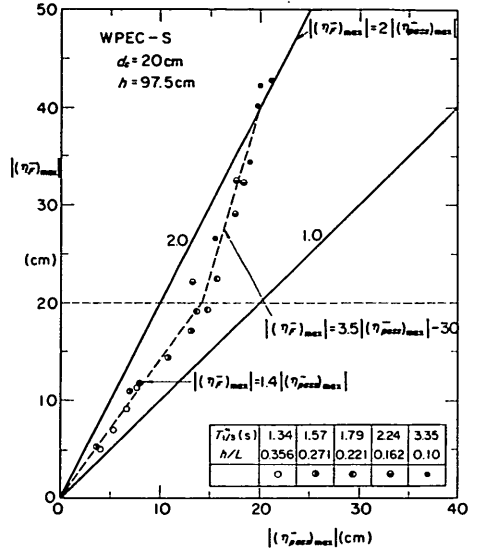


図-21 通過波の波の谷の深さに対する空気室前面の水位

なお図中の点線は、 $\eta^-_{pass} = -20$ cm の位置を示すものであり、実験結果は、その線より上にプロットされる。

図-21 は、 η^-_F の絶対値の最大値 $(\eta^-_F)_{\max}$ に対して η^-_{pass} の絶対値の最大値 $(\eta^-_{pass})_{\max}$ を示したものである。 $(\eta^-_F)_{\max}$ と $(\eta^-_{pass})_{\max}$ の比は、おおよそ1.4であるが、 $(\eta^-_F)_{\max}$ がカーテンウォールの没水水深を超えると大きくなる。そして、 $(\eta^-_{pass})_{\max}$ が没水水深を超えると、おおよそ2.0となる。この関係は、以下のよう表すことができる。

$$\begin{aligned} |(\eta^-_F)|_{\max} &= 1.4 |(\eta^-_{pass})|_{\max} \\ &: |(\eta^-_{pass})|_{\max} < d_c/1.4 \\ &= 3.5 |(\eta^-_{pass})|_{\max} - 30 \\ &: d_c/1.4 \leq |(\eta^-_{pass})|_{\max} < d_c \\ &= 2.0 |(\eta^-_{pass})|_{\max} \\ &: |(\eta^-_{pass})|_{\max} \geq d_c \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

式(2)および(3)によって、入射有義高 $H_{1/3}$ から $(\eta^-_{pass})_{\max}$ を介して $(\eta^-_F)_{\max}$ の値が概略計算できる。図-18 の破線は、式(2)と(3)から求めた推定値であり、比較的実験値と一致している。空気室前面の水位の負のピーク値を知ることは、衝撃的空気圧縮圧力の発生の可能性を知る上から重要である。また、カーテンウォール下端からの空気漏れの可能性を知る上からも重要である。ただしこの方法は、便宜的なものであり、実験条件の $h/L_{1/3}$ の範囲に限って有効と考えられる

(4) 規則波実験の結果

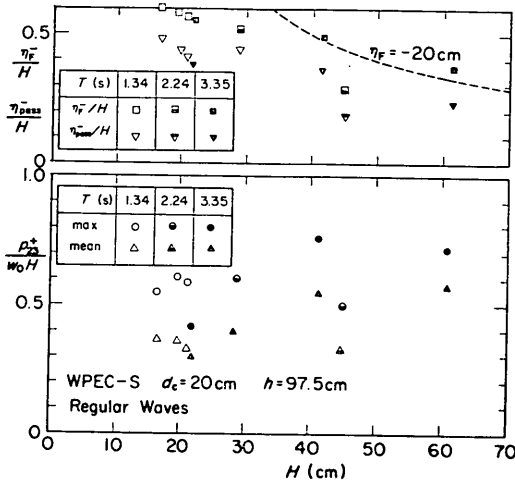


図-22 規則波における空気圧の正のピーク値

実験は、規則波でも行っている。規則波の改良型波力発電ケーソン模型への作用は、砕波であっても比較的穏やかである。したがって、空気圧力も小さい。図-22は、空気圧の最大値と平均値を示す。規則波実験であるので、一波一波の圧力のピーク値はほぼ一定となると考えられるが、衝撃的な空気圧縮圧力は波面のわずかな変動によって大きく変動する。したがって、ここにはその平均値と最大値を示す。波高が61cmで周期が3.35sのとき、空気圧 p_{23}^+ の最大値は $0.72w_0H$ (44gf/cm^2) である。空気室前面の水位のピーク値 η_F^- と副水路の通過波の谷の深さ η_{pass}^- も図に示している。波高が61cm、周期が3.35sのとき、 η_F^- と η_{pass}^- の絶対値は $0.37H$ と $0.23H$ である。これらの値は、不規則波の場合より小さい。 H_{max} を67.9cmとして図-18と20から不規則波の場合の値を求めると、 $0.69H_{\text{max}}$ と $0.33H_{\text{max}}$ になる。この差が、圧力の規則波と不規則波の差の理由と考えられる。また、空気室前面の水位の上昇速度も、規則波の場合不規則波の場合より小さいようであり、これも理由の一つである。実際の海の波は不規則波であり、空気室の設計では不規則性を考慮しなければならない。

(5) カーテンウォールの没水水深の影響と圧抜弁の効果

衝撃空気圧は、カーテンウォールの没水水深によって大きく変る。この没水水深は、20cmを標準としているが、15cmと25cmの場合についても実験を行った。

図-23は、それぞれの没水水深における空気圧の最大値と1/3最大値をプロットしたものである。没水水深が浅くなるほど、空気圧が大きくなることが明瞭に認めら

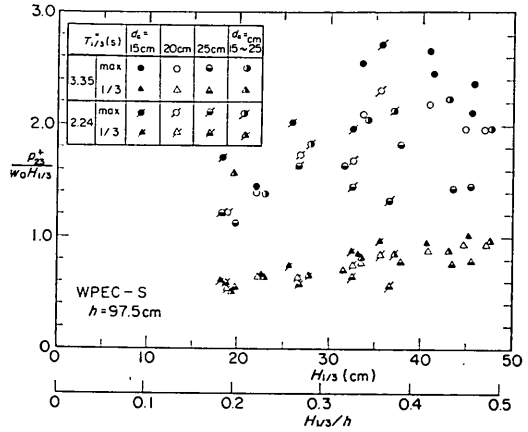


図-23 カーテンウォール没水水深による空気圧の変化

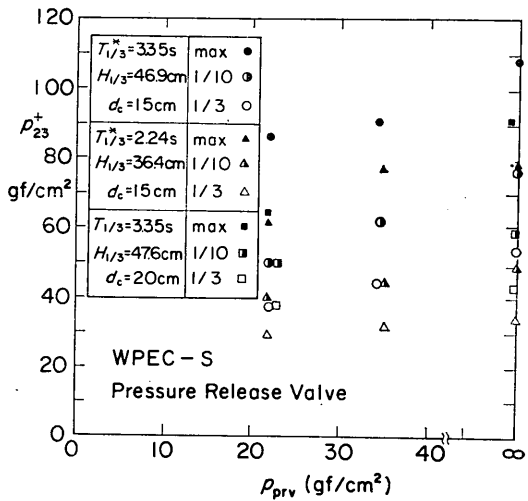


図-24 圧抜弁による空気圧の変化

れる。図には、変形カーテンウォールの実験結果も示している。図中の $d_0=15\sim 25\text{cm}$ として区別してあるのがその結果である。実際没水水深が15cmから25cmまで変化するにもかかわらず、空気圧力は15cmの場合とあまり変わらない。すなわち、変形カーテンウォールによる圧力減少の効果は認められない。

衝撃的な空気圧は、圧抜弁で減じることができる。図-24は、横軸を圧抜弁の作動限界圧力にとり、空気圧の正のピーク値の最大値、1/10最大値、1/3最大値を示すものである。空気圧は、作動限界圧力が小さくなるほど小さくなっている。しかしながら、最大値は、作動限界圧力に比してかなり大きい。

(6) 基本型波力発電ケーソンの空気圧

基本型波力発電ケーソンについても実験を行ってい

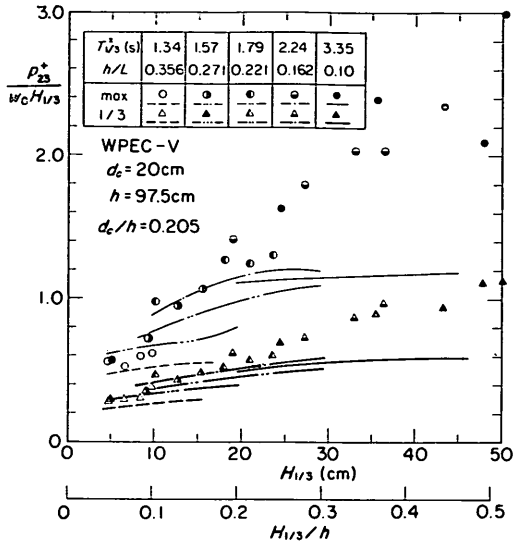


図-25 基本型波力発電ケーソンにおける空気圧の正のピーク値

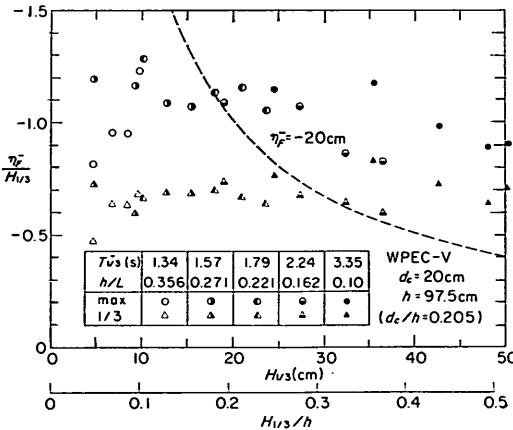


図-26 基本型波力発電ケーソンにおける空気室前面水位の負のピーク値

る。図-25 は、基本型波力発電ケーソンの空気室における、空気圧の正のピーク値 p^*_{23} の最大値と1/3最大値を示すものである。全体的に図-16 に示した改良型波力発電ケーソンの場合とはほぼ等しい。図-26 に基本型波力発電ケーソンにおける η^-_F の最大値、1/3最大値をプロットしている。図-18 の改良型波力発電ケーソンの場合とはほぼ同じでこれが空気圧のほぼ等しい理由と考えられる。

- (7) ノズル開口率が小さい場合の空気圧
 ノズル開口率が 0.005 (1/200) と小さくなると、空気

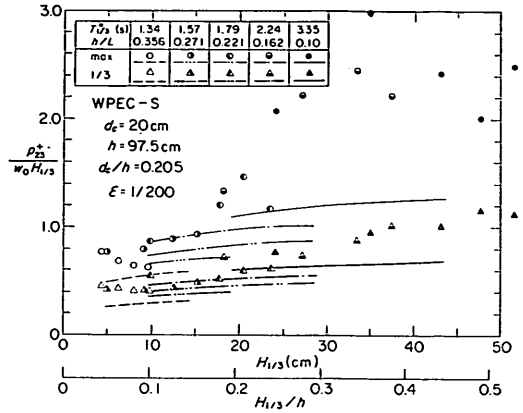


図-27(a) 改良型波力発電ケーソンにおける空気圧の正のピーク値 ($\epsilon = 1/200$)

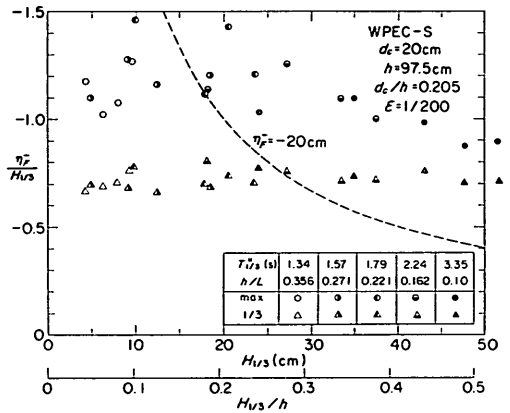


図-27(b) 改良型波力発電ケーソンにおける空気室前面水位の負のピーク値 ($\epsilon = 1/200$)

圧は大きくなる。図-27(a)は、ノズル開口率 $\epsilon = 0.005$ の改良型波力発電ケーソンについて、空気室における空気圧の正のピーク値をプロットしたものである。やはり、図-16 に示した $\epsilon = 0.0075$ (1/133) の場合より、空気圧は全体的に大きいことがわかる。 $T_{1/3} = 3.35$ s で、 $H_{1/3}$ が 40 cm 以上の p^*_{23} のすべての最大値の平均値は 115 gf/cm^2 、標準偏差は 17.2 gf/cm^2 である。最高波高を 67.9 cm とすると、1.69 $w_0 H_{\text{max}}$ となる。図-27(b)は η^-_F の最大値と1/3最大値をプロットしたもので、図-18 に示した $\epsilon = 0.0075$ の場合より、前面での水位の下降量が大きいことがわかる。図-28(a)は基本型波力発電ケーソンの場合の p^*_{23} の最大値と1/3最大値を示す。また、図-28(b)は η^-_F の最大値と1/3最大値を示す。ノズル開口率の違いによる傾向は、基本型波力発電ケーソンにも同様に認められる。

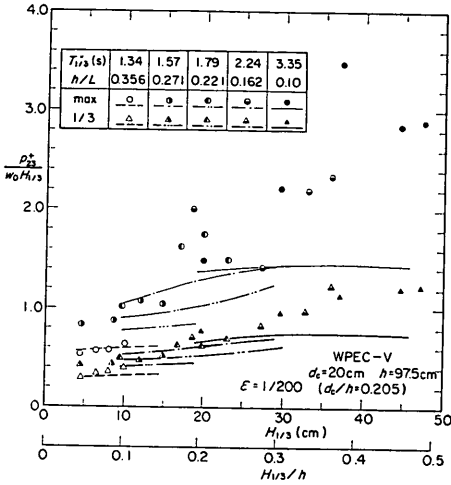


図-28(a) 基本型波力発電ケーソンにおける空気圧の正のピーク値 ($\epsilon=1/200$)

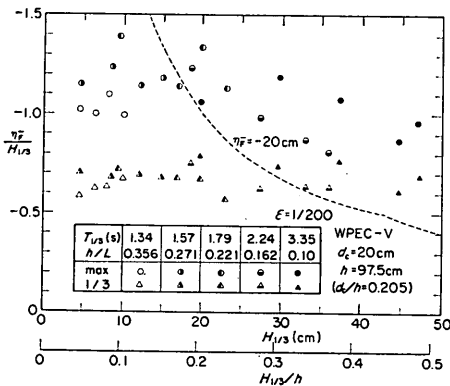


図-28(b) 基本型波力発電ケーソンにおける空気室前面水位の負のピーク値 ($\epsilon=1/200$)

3.2 衝撃空気圧の計算

(1) 衝撃空気圧の理論

前報までに示した波力発電ケーソンの空気室における波パワーの変換の理論、「熱力・波動法」^{1),2),6)}によって、カーテンウォール下端からの空気漏れの効果を含む計算もできる。しかしながら、衝撃的な空気圧を表すことはできない。以下に、衝撃的空気圧の計算法を示す。

直立消波ケーソンの遊水室の上床版には、上昇する波面によって空気が閉込められ衝撃的な空気圧縮圧力による揚圧力が働く。この現象は、空気室における衝撃的な空気圧縮圧力の発生と類似している。高橋・谷本¹²⁾は、光易¹⁰⁾によって拡張された Bagnold の理論⁹⁾にもとづいて、この上床版の揚圧力を検討している。その理論は、

空気を圧縮する水塊の運動方程式と、空気圧と空気の体積に関する方程式からなり、空気室の空気圧縮圧力に対しても適用できる。

Bagnold による空気圧と空気の体積に関する方程式は、空気の断熱圧縮を仮定したものである。しかしながら、熱力・波動法における空気圧縮に関する方程式は、断熱変化を仮定するの必要がない式である。すなわち、以下に示す空気室内のエネルギーの保存式と質量の保存式である。ここでは、これらのより一般的な式を空気の圧縮に関する式として用いることとする。

$$\frac{dp^*}{dt} = \gamma \frac{p^* + p_0}{D_0 - \eta} \left\{ \frac{d\eta}{dt} - c_d \epsilon w_p \right\} \quad \dots\dots(4)$$

$$\frac{dT^*}{dt} = \frac{T^* + T_0}{D_0 - \eta} \left\{ -\frac{d\eta}{dt} + \frac{D_0 - \eta}{p^* + p_0} \frac{dp^*}{dt} + c_d \epsilon w_p \right\} \quad \dots\dots(5)$$

ここに、

- p^* : 空気室内の圧力の変動分
- p_0 : 大気圧 (絶対圧力)
- γ : 比熱比 (1.4)
- D_0 : 静水面上の空気室の高さ
- c_d : ノズルの縮流係数 (1.0とする)
- ϵ : ノズルの開口率
- w_p : ノズル内の空気流速 ($= \varphi \sqrt{2p^*/\rho_a}$)
- T^* : 空気の温度の変動分
- T_0 : 大気温 (絶対温度)
- φ : ノズルの速度係数 (1.0とする)
- ρ_a : 空気の密度 (1.225kgf/m³)

水塊の運動方程式は、次式で表される。

$$\rho_w k_e \frac{d^2 \eta}{dt^2} = -p^* \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 k_e は圧縮に有効な水塊の平均厚さであり、

$$k_e = 0.25 \pi B \quad \dots\dots(7)$$

で表される。ただし、 η は水塊の上面の位置であり、空気室内の水位に一致する。水位の初期条件は、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\eta}{dt} &= u_0 \\ \eta &= -d_c \end{aligned} \right\} t = 0 \quad \dots\dots(8)$$

ここに、 u_0 は時間 $t = 0$ における水塊の上昇速度であり、 $t = 0$ において水面がカーテンウォール下端の位置にあるとしている。また、 $t = 0$ においては、当然 $p^* = p_0$ 、 $T^* = T_0$ である。なお、圧縮される空気の厚さは、空気室の高さ D_0 とカーテンウォール没水深 d_0 とを加えたものである。式(4)、(5)そして(6)は、初期条件のもと時間ステップ毎に数値的に解くことができる。

(2) 計算例と縮尺効果

改良型波力発電ケーソン模型を対象とし、衝撃空気圧の計算を行った。表-5に計算結果の一例を示す。計算では、空気室の平均の高さを45cm、カーテンウォール没水深を20cm、水塊の有効平均厚さを27.5cmとし、水塊の上昇速度 u_0 とノズルの開口率 ϵ を変えている。たとえば、 u_0 が194.4cm/s、 ϵ が0.0075のとき、空気圧力のピーク値 p_c は95.8gf/cm²である。また、圧力が作用し始めてからピークに達するまでの時間 t_p は、0.0457sである。空気圧力のピーク値は、 u_0 にほぼ比例するように増加し、 ϵ が大きいほど小さくなる。これに対し、 t_p は、 u_0 にほとんど影響されず、 ϵ の増加とともにわずかに減少する。

図-15(b)に示した衝撃的な空気圧縮圧力のピーク値は、103gf/cm²でそのときの水位の上昇速度は、約190cm/sである。また、ピークまでの時間は、約0.05sである。これらの実験値は表-5の計算値と良く一致している。

表-5 衝撃空気圧の計算結果

u (cm/s)	ϵ	Model		Prototype	
		p_c (gf/cm ²)	t_p (s)	p_c (gf/cm ²)	t_p (s)
64.8 (289)*	0	52.2	0.0536	258 (4.05)**	1.000
	0.005	27.9	0.0457	191 (2.92)	0.959
	0.0075	20.5	0.0412	164 (2.50)	0.915
	0.01	15.3	0.0368	141 (2.17)	0.890
125.6 (562)*	0	103.9	0.0576	568 (3.66)	0.937
	0.005	66.1	0.0480	458 (2.85)	0.915
	0.0075	52.7	0.0446	410 (2.57)	0.893
	0.01	42.2	0.0412	366 (2.31)	0.870
157 (702)*	0	131.8	0.0522	759 (3.47)	0.893
	0.005	87.8	0.0469	626 (2.8)	0.893
	0.0075	71.6	0.0446	567 (2.53)	0.870
	0.01	58.5	0.0431	514 (2.27)	0.870
194.4 (869)*	0	166	0.0522	1020 (3.25)	0.848
	0.005	115	0.0479	860 (2.67)	0.845
	0.0075	95.8	0.0457	787 (2.43)	0.845
	0.01	80	0.0435	718 (2.23)	0.825

* Prototype

** $\lambda = (p_c)_{model} \times 20 / (p_c)_{prototype}$

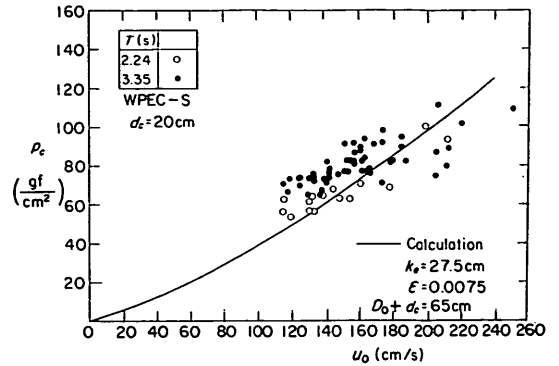


図-29(a) 水塊の上昇速度と衝撃空気圧

図-29(a)は、実験から得られた水面の上昇速度 u_0 と衝撃的な空気圧のピーク値 p_c の関係を示すものである。ただし、各ケースの空気圧が大きい5波について調べた結果である。水位の上昇速度は、前面の水位の記録から読取ったものであり、誤差が大きいと思われる。図中の実線は計算結果であり、実験結果とはほぼ一致している。

表-5には、縮尺を1/20と仮定した現地量の計算結果も示している。たとえば、 u_0 が8.69m/sで ϵ が0.0075のとき、空気圧力のピーク値 p_0 は787gf/cm²である。すなわち、現地における空気圧のピーク値は、1/20模型の8.21倍でしかない。いいかえれば、模型実験結果を単純に20倍して求められる値の1/2.43である。実験結果の修正係数を λ とすると、 λ はこの場合2.43となる。表-5の全条件に対する λ は2から4の範囲となる。

こうした縮尺効果は、高橋・谷本らによってすでに述べられているように、空気の圧縮性によるものである。この縮尺効果は、直立消波ケーソン上床版の空気圧縮揚圧力の現地観測データ¹²⁾によってすでに確められている。

なお、表-5に示した計算結果は、高橋・谷本らが用いた方法による計算結果と一致する。すなわち、空気室の衝撃的な空気圧縮は、断熱圧縮過程であるといえる。また、 $\epsilon = 0$ の場合の p_c の値は Bagnold 数 $Bg = w_0 k u_0^2 / g p_0 D$ の関数として一義的に求められる(参考文献12, p. 19)。

(3) 衝撃空気圧の推定

模型および現地の空気室に発生する衝撃空気圧縮圧力は、前節で述べた方法で計算できる。衝突する水塊の有効平均厚さ k_e 、空気の初期厚さ等は、空気室の諸元から決められる。しかしながら、水塊の上昇速度を与えることが難しい。もし、模型実験を行うことができれば、得られた空気圧力のピーク値から、逆に水塊の上昇速度を

求めることができる。また、直接的に上昇速度を測ることも可能である。上昇速度が得られれば、空気圧力は求められる。

水塊の上昇速度を理論的に求めることは簡単ではない。たとえば、図-15(b)の衝撃空気圧の場合の上昇速度は、190cm/sである。この値は、規則波の有振幅重複波理論によっても算定される値よりかなり大きく、不規則性を考慮した有振幅重複波理論が必要となる。ただし、実験結果をもとに簡単な仮定に基づいて推定することは可能である。たとえば、波面が重力加速度 g と同じ一定加速度で波の谷から静水面まで上昇したとすると、静水面での速度は $\sqrt{2g|\eta^-_F|}$ である。また、この加速度が波の谷で g 、静水面で0となるように直線的に変化したならば、静水面での速度は $\sqrt{g|\eta^-_F|}$ である。いずれにしても、水の波の運動は重力による運動であり、波面の上昇速度の最大値は $\sqrt{g|\eta^-_F|}$ に比例すると考えられる。実際、図-15(b)に例示した $T_{1/3}=3.35$ sの場合や、 $T_{1/3}=2.24$ sの場合には、静水面での波面の上昇速度の最大値は、 $\sqrt{g|\eta^-_F|}$ に近い値である。したがって、波の谷から静水面までの各位置における波面の上昇速度 u_0 を次式で表すことにする。

$$u_0 = \sqrt{g|\eta^-_F|} \{1 - (d_c/|\eta^-_F|)^2\}^{1/2} \quad \dots\dots(9)$$

図-29(b)は、実験データの有義波高と周期を用いて、式(2)、(3)および(9)より空気圧縮圧力のピーク値の最大値 $p_{c \max}$ の計算値を求め、実験値と比較したものである。図には $\epsilon=1/200$ で $d_c=20$ cm、および $\epsilon=1/133$ で $d_0=20$ cmと15cmの場合で、波の条件が $T_{1/3}=3.35$ sと2.24sで $H_{1/3}$ が40cm以上のケースについて示している。

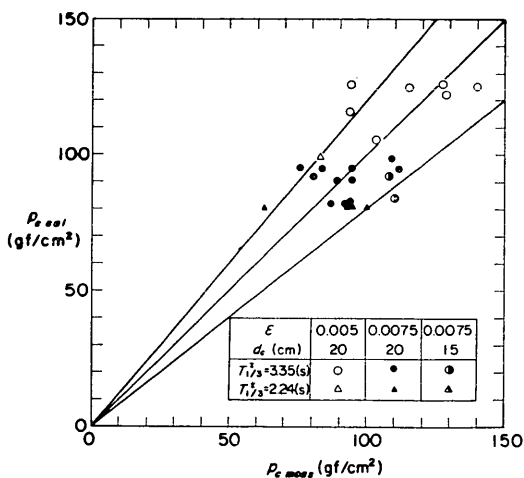


図-29(b) 衝撃空気圧の計算値と実験値

る。計算値と実験値との比が1.0となる付近にデータは分布しており、上述した計算法がほぼ妥当であることを示している。

図-30(a)~(d)は、現地における衝撃空気圧を試算したものである。図-30(a)には、沖波有義波高 H_0 と有義波周期 $T_{1/3}$ が12mと15sの場合と、5.5mと10sの場合について、各水深における有義波高、最高波高、水塊の上昇速度 u_0 を示している。計算では、前面の水位の負のピーク値の最大値 $(\eta^-_F)_{\max}$ は、式(2)と式(3)から求めた。ただし、 $d_0=0$ としているので、式(3)の第三式を用いる。また、水塊の上昇速度 u_0 は、式(9)から求めた。

図-30(b)には、 $T_{1/3}=15$ sで $H_0=12$ mと5.5m、および $T_{1/3}=10$ sで $H_0=7$ mで5.5mの4ケースの波の条件について、空気層の厚さ $D_0+d_0=13, 10, 7, 4$ m、 $h=5\sim 25$ mの各場合に対して、空気圧縮圧力を計算したものである。ただし、 $d_c=0$ として u_0 を求め、空気室の幅 B が7m($k=5.5$ m)の場合を計算したもので、

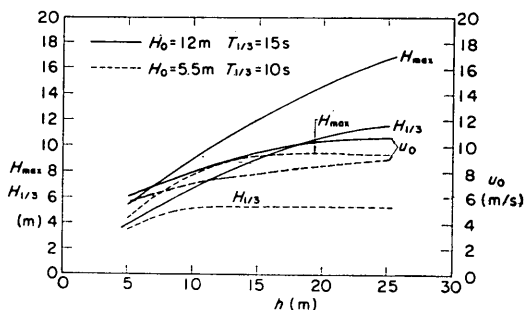


図-30(a) 衝撃空気圧の現地計算例 (波高と上昇速度)

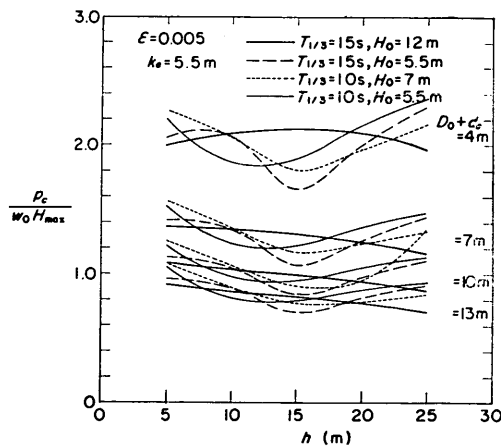


図-30(b) 衝撃空気圧の現地計算例 ($k=5.5$ m, $\epsilon=1/200$)

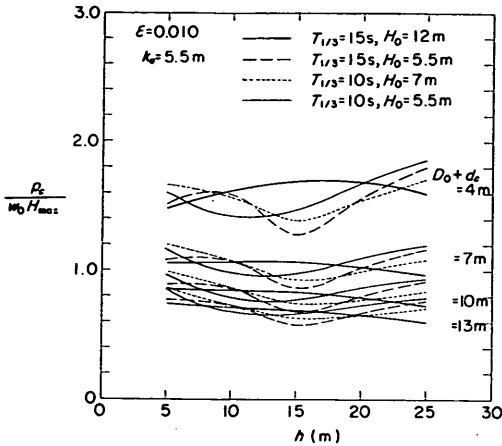


図-30(c) 衝撃空気圧の現地計算例 ($k=5.5\text{m}$, $\epsilon=1/100$)

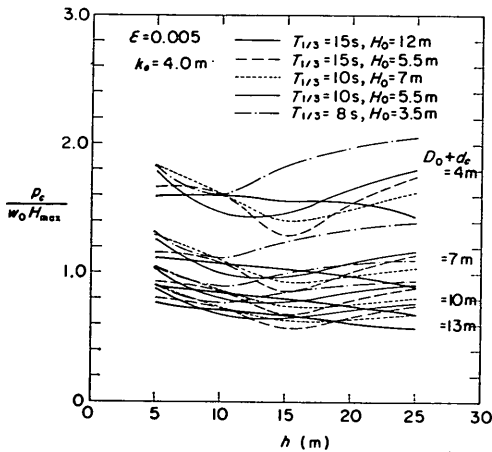


図-30(d) 衝撃空気圧の現地計算例 ($k=4\text{m}$, $\epsilon=1/200$)

圧力のピーク値の最大値を無次元量 (p_c/w_0H_{max}) で示している。 p_c/w_0H_{max} の値は、 D_0+d_c が小さいほど大きくはば $1/(D_0+d_c)$ に比例している。また、波の条件による差が比較的少ないが、全体的にはやや波高が小さいほど大きい。水深による差も比較的小さいが、水深が 10m 以下の浅いところではやや大きくなる傾向がある。

図-30(c)は、 $B=7\text{m}$ ($k=5.5\text{m}$) で $\epsilon=1/100$ の場合である。 ϵ が $1/200$ の場合より小さく、平均的にその約 80% の値となっている。図-30(d)は、 $B=5\text{m}$ ($k=4\text{m}$) で $\epsilon=1/200$ の場合である。 $B=7\text{m}$ の場合の 80% 程度の値となっている。

これらの図から、設計に用いる p_c/w_0H_{max} の値を説

取することができる。ただし、 $H_0=5.5\text{m}$ 以上の波の条件で、 p_c/w_0H_{max} が 1.0 以下となる空気室の条件をまとめると以下ようになる。

- ① k が 5.5m 以下で ϵ が $1/200$ 以上の場合
 D_0+d_c が 13m 以上でかつ h が 5~25m あるいは、
 D_0+d_c が 10m 以上でかつ h が 10~20m
- ② k が 5.5m 以下で ϵ が $1/100$ 以上の場合
 D_0+d_c が 10m 以上でかつ h が 5~25m
- ③ k が 4.0m 以下で ϵ が $1/200$ 以上の場合
 D_0+d_c が 10m 以上でかつ h が 5~25m

図-30(b)(c)(d)に示した計算値は、 $d_c=0\text{m}$ で計算された u_0 を用いたものであり、実際より大きいと考えられる。また激浪時には、一般に圧抜弁などによって ϵ の値が大きくなっていると思われる。したがって一般的には、 $H_{1/3}$ が 5.5m 以上で D_0+d_c が 10m 以上のときには、 p_c/w_0H_{max} は 1.0 以下と考えてもよいと思われる。ただし、水深が浅いところでは、有義波高も小さくなり、 D_0+d_c を 10m 以上とすることが不合理となることに留意する必要がある。なお、図-30(d)には、 $T_{1/3}=8\text{s}$, $H_0=3\text{m}$ の場合の計算値も示している。この場合のように、有義波高が小さいときには p_c/w_0H_{max} の値が大きくなることにも留意すべきである。また今回の実験条件の範囲外における、 u_0 等の算定式の妥当性についてはさらに検討する必要がある。

4. 空気圧および波圧に対するケーソンの設計法

4.1 空気室内および前壁に作用する圧力

(1) ひずみのアナログデータの例

波圧および波によって生じる空気圧は、空気室の各壁にひずみを発生させる。図-31 は、斜面壁や前壁の鉛直部（カーテンウォール）のひずみの記録の例である。 ϵ の添字のたとえば h5A は、図-7 に示した S5 の外側の面（前面）における水平方向のひずみを示し、v5B であれば内側の面（後面）における鉛直方向のひずみを表す。図には斜面壁に作用する波圧 p_1 、空気室の空気圧 p_2 も合わせて示している。斜面壁のひずみは、空気室の空気圧力によって変化する。空気室の空気圧力が正であれば、斜面壁の前面のひずみは正となり（伸び）、後面のひずみは負となる（縮む）。空気圧が負であれば、ひずみの符号は、逆となる。水平ひずみ ϵ_h は、鉛直ひずみ ϵ_v より常に大きい。

空気圧に加え、斜面壁には波圧が作用する。波高が大きい場合この波圧は、図に見られるように立ち上がり急な Wagner 型¹¹⁾の波圧である。Wagner 型圧力は、水面に落下する楔型の物体に作用する水圧として特徴的

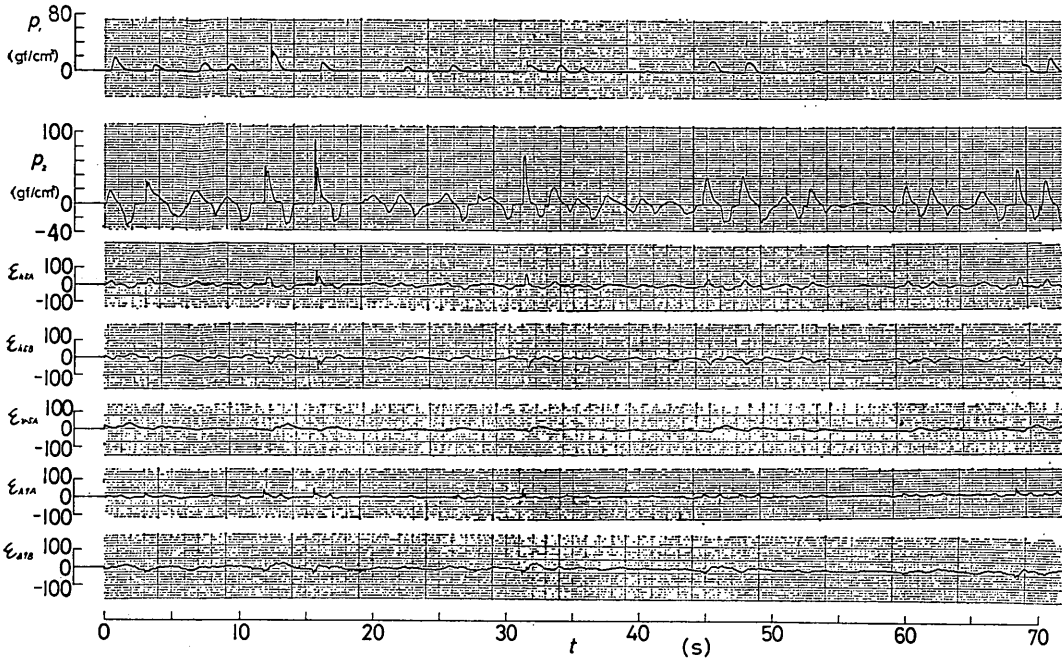


図-31 ひずみの記録例

なものである。この圧力は、空気を閉じ込めないで水面と物体の面が直接衝突する時に発生する圧力であり、大きな圧力が衝突位置の局所的な範囲に発生し、それが衝突面の移動とともに早い速度で移動する。たとえば図-31の ϵ_{h9A} の $t=12$ s 付近のように、Wagner 型の波圧が斜面壁に発生した時には、空気室の空気圧はまだ正圧であり、この圧力によって斜面壁前面のひずみは、正から急激にはぼ 0 に、場合によっては負に変わる。このひずみの変化量が衝撃波圧によるひずみである。衝撃波圧に続き、比較的静的に変化する波圧が現われるが、この波圧は、ほとんど空気室の空気圧に等しい。また、衝撃波圧による斜面壁のひずみの絶対値は、負の空気圧によるひずみの絶対値より小さい。

鉛直部（カーテンウォール）にも空気圧と波圧によりひずみが生じる。しかしながら、カーテンウォールには衝撃的な波圧はほとんど作用しない。ただし、比較的静的な波圧が作用し、この波圧は、負の空気圧とほぼ同じ程度の大きさである。したがって、カーテンウォール前面のひずみには、図-31 の ϵ_{h9A} の $t=13$ s 付近のように静的な波圧によるピーク値と負の空気圧によるピーク値との2つの負のピーク値が現われる。

(2) 斜面壁に作用する波圧

波圧計 P1 は、斜面壁の静水面上 27.5 cm の位置に固

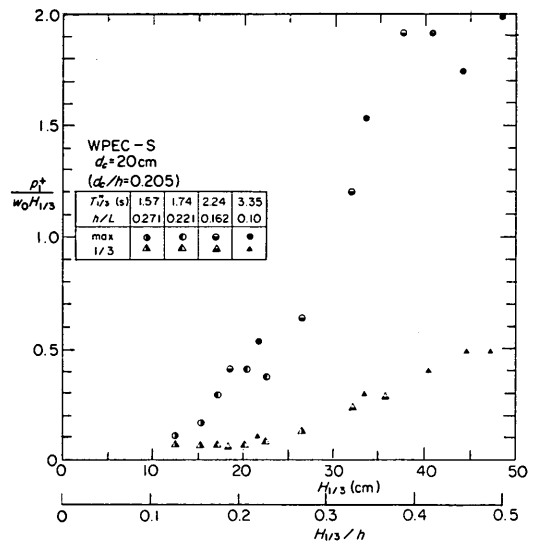


図-32 斜面壁の波圧

定してあり、波圧は、このセンサーの位置より上に波面が上昇したときに現われる。特に衝撃的な波圧は、波面が斜面壁に衝突したとき現われる。図-32 は、波圧の無次元量 $p_1^+ / w_0 H_{1/3}$ の最大値と1/3最大値をプロットしたものである。無次元量の最大値は波高とともに増大し、

変動も大きくなる。有義波高が 40 cm 以上の場合の最大値の平均は 91gf/cm² であり、標準偏差は 16.5gf/cm² である。最高波高 H_{max} を 67.9cm とすると、 $1.34w_0H_{max}$ となる。

波圧センサーの直径は 1 cm と小さく、したがって衝撃波圧の継続時間は非常に短い。データ解析において、衝撃波圧が発生する時にはサンプリング周波数を 100Hz 程度にしているが、それでもピーク値を捉えるには十分でないおそれがある。しかしながら、衝撃波圧は局所的

であり、斜面壁全体に対する有効な圧力はそのピーク値ほどには大きくないと考えられる。

(3) 斜面壁とカーテンウォールのひずみ

図-33(a)は、 $T_{1/3}^* = 3.35$ s, $H_{1/3} = 47.5$ cm の場合の、正の空気圧が働いたときの斜面壁のひずみの分布を示すものであり、ひずみのピーク値の最大値と 1/3 最大値をプロットしている。図の横軸 z_s/l_{sw} は、斜面壁上の鉛直方向の位置を示す。ただし、 l_{sw} は斜面壁の鉛直方向の長さであり、 z_s は最上部から測った斜面壁上の距離である。空気圧が正のとき、前面のひずみは正で後面のひずみは負である。水平ひずみ ϵ_h は、鉛直ひずみ ϵ_v より大きい。図中の曲線は FEM による計算値であり、空気圧の正のピーク値の最大値と 1/3 最大値を等分布荷重として斜面壁に作用させている。計算値は実験値に良く一致している。図-33(b)は、空気圧が負の場合である。正の場合よりひずみは小さい。計算結果は、実験結果と良く一致している。

斜面に働く衝撃的な波圧によって、ひずみに急激な変化が生じる。 $T_{1/3}^* = 3.35$ s, $H_{1/3} = 47.5$ cm の場合の S5 測点におけるこのひずみの変化量(衝撃波圧によるひずみ)は、その最大値が 43×10^{-6} 、1/3 最大値が 27×10^{-6} である。このひずみの値は、それぞれ 44, 29gf/cm² の等分布圧力が作用したときのひずみに等しい。44gf/cm² の圧力は、 H_{max} を 67.9cm とすると、 $0.65w_0H_{max}$ である。

図-34(a)は、正の空気圧が働いた場合のカーテンウォール部のひずみ分布を示す。空気圧を用いた FEM の計

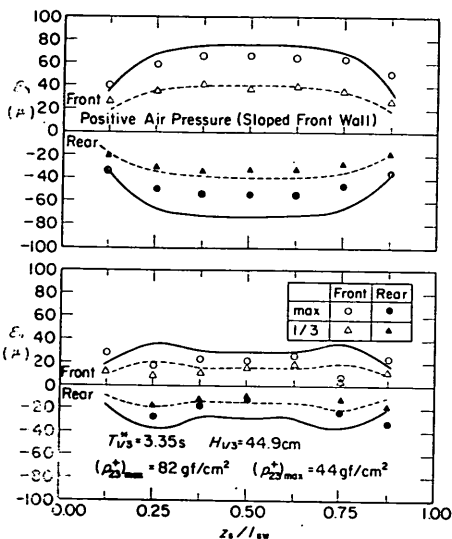


図-33(a) 斜面壁のひずみ (正の空気圧)

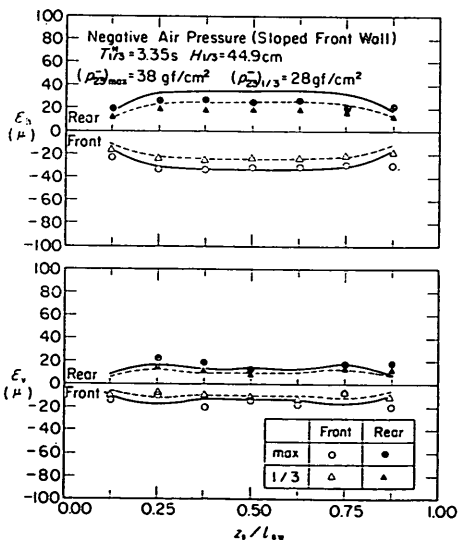


図-33(b) 斜面壁のひずみ (負の空気圧)

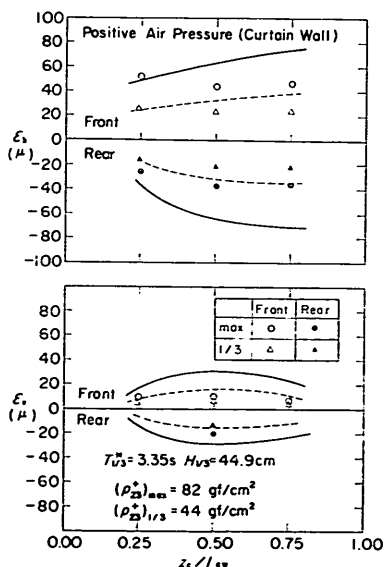


図-34(a) カーテンウォールのひずみ (正の空気圧)

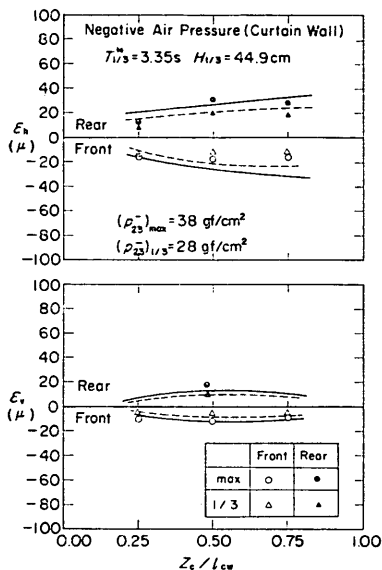


図-34(b) カーテンウォールのひずみ (負の空気圧)

算結果は、実験結果より大きい。これは、空気室の外側から波圧が働くためである。図-34(b)は、負の空気圧が働いた場合である。空気圧を用いた計算結果と実験結果は良く一致している。

(4) 空気室の壁の設計圧力分布

カーテンウォール没水水深が比較的小さくても、通常の比較的大きい現地の空気室に対しては、衝撃空気圧はそれほど大きくない。したがって、没水水深は主に空気出力効率を考慮して決めることができる。没水水深は、小さい方が空気出力効率が良い。しかし、カーテンウォール下端からの空気漏れがあると出力は低下する。

空気室の斜面壁やカーテンウォール等の壁は、波圧や空気圧に対して設計されなければならない。図-35はその壁の設計圧力分布を示す。これは、実験結果や計算結果にもとづいて与えたものである。また、第2報²⁾で小島らが規則波実験の結果から基本型波力発電ケーソンについて設計波圧分布を提案しており、これも考慮している。すなわち、設計では次の3つの場合を考えなければならない。

① 空気圧の正のピーク時

衝撃空気圧は3.2(3)に示した方法で計算できる。ただし、通常の空気室では現地における値は、模型実験から直接的に得られる値より小さい。もし衝撃空気圧が小さいならば、比較的静的に変化する空気圧が重要になる。図に示した $1.0w_0H_{max}$ は、沖波有義波高が5.5m以上で空気室の高さ D_0 とカーテンウォールの深さの和が

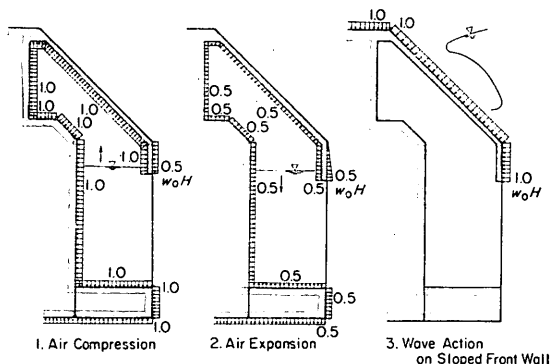


図-35 空気室の壁の設計圧力分布

10m以上の空気室に対して概略適用できる値である。ただし、波高が小さい場合や、比較的小さい(特に空気室高さの低い)空気室等の場合には、計算値を用いるべきである。

② 空気圧の負のピーク時

通常の空気室では、 $0.5H_{max}$ の空気圧を考える。

③ 前壁に作用する波圧のピーク時

衝撃的な波圧が斜面壁に作用するときは、空気室の空気圧は正である。しかしながら、現地の空気室ではその空気圧は比較的小さい。したがって、空気圧を0と考え、 $1.0w_0H_{max}$ の波圧が働くとする。

4.2 ケーソンの耐波安定性

(1) 合田の波圧公式の適用

合田は、混成防波堤ケーソンに作用する波圧の公式を1973年に発表しており¹³⁾、これがケーソンの波圧公式の標準式となっている。ここでは、合田公式を一部拡張し、改良型波力発電ケーソンに適用することを提案する。合田式を拡張する方法は、種々の異形ケーソンに対して用いられており、小島らも基本型波力発電ケーソンに対する方法を第2報で示している。以下に、改良型および基本型波力発電ケーソンだけでなく、上部斜面ケーソン等に対しても適用できる拡張された合田式を示す。

図-36は、防波堤のケーソンに作用する設計波圧分布を示す。すなわち、波圧分布は次式によって表される。

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\beta)\lambda_1 H_{max} \quad \dots\dots(10)$$

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)(\alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2\beta) \times \lambda_1 w_0 H_{max} \quad \dots\dots(11)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad \dots\dots(12)$$

$$p_u = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)\lambda_1 \alpha_1 \alpha_3 w_0 H_{max} \quad \dots\dots(13)$$

ここに、

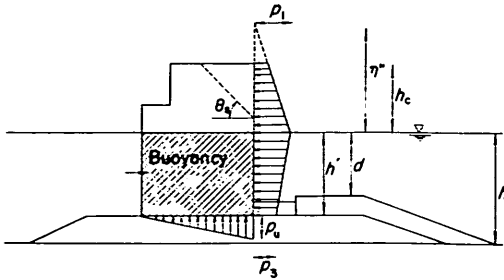


図-36 混成式防波堤のケーソンに対する設計波圧分布(合田式)

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad \dots\dots(14)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{max}} \right\} \quad \dots\dots(15)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right] \quad \dots\dots(16)$$

- η^* : 静水面上波圧強度が0となる高さ
- p_1 : 静水面における波圧強度
- p_3 : ケーソン下端における波圧強度
- p_u : 前趾揚圧力
- h : ケーソン前面壁における海底面水深
- h_b : ケーソン前面壁から沖側に有義波高の5倍だけ離れた地点での水深
- h' : ケーソン基面水深
- d : 根固め工またはマウンド被覆工のどちらか小さい方の水深
- H_{max} : 設計計算に用いる最高波高
- L : 設計計算に用いる水深 h における波長
- β : 阪波堤法線の垂線と、波の主方向から $\pm 15^\circ$ の範囲で最も危険な方向となす角
- λ_1, λ_2 : 波圧の修正係数

通常のケーソンの場合、両修正係数は1.0である。消波ブロック被覆堤では、 λ_2 が0で λ_1 が0.8から1.0の値となる。前面壁が傾斜していれば、そこに働く力 P_s は壁面に垂直であり、ケーソンに作用する力としては水平方向成分 P_{sh} と鉛直方向成分の力 P_{sv} に分けられる。この鉛直力はケーソンを下向きに押し、ケーソンの耐波安定性を増す。ただし、 P_s は前述した波圧分布から求められる斜面の開始点より上の波圧合力である。斜面壁が水平面となす角を θ_s とすると P_{sh} と P_{sv} は森平らによる次式で表される¹⁴⁾。

$$P_{sh} = F_s \sin^2 \theta_s$$

$$P_{sv} = 0.5 P_s \sin^2 \theta_s \quad \dots\dots(17)$$

波力発電ケーソンに対しては、修正係数を $\lambda_1 = 1.0$,

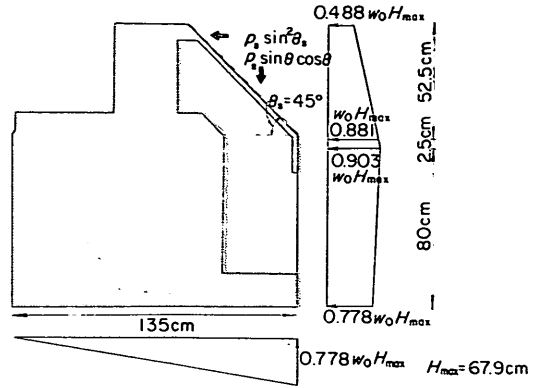


図-37 改良型波力発電ケーソンの設計波圧の計算例

$\lambda_2 = 0$ とすることを提案する。波力発電ケーソンは、消波ケーソンであり、第2報で述べているように λ_2 を0とすることができると考えられる。改良型波力発電ケーソンの場合は、斜面壁があり、これに作用する波力の水平・鉛直成分を考慮しなくてはならない。図-37は、 $H_{max} = 67.9$ cm として改良型波力発電ケーソン模型に作用する波圧分布を計算した例である。ケーソンに作用する水平波力の合力は、462kgf であり、鉛直方向波力の合力は上向きで183kgf である。鉛直波力合力は、揚圧力と斜面壁の鉛直波力成分の差である。摩擦係数 μ を0.6とすると、滑動に対する安全率 S.F. を1.0とするためには953kgf のケーソン重量が必要となる。

衝撃空気圧は通常の諸元の現地の空気室においては模型実験から直接推定される値ほど大きくない。ただし、模型や比較的小さい現地の空気室においては、衝撃空気圧によって滑動が生じる。図-38は、衝撃空気圧が発生したときのケーソンの安定性を検討するための波圧分布を示している。 p_c は衝撃空気圧力のピーク値で、3.2に示した計算法等で与えられる。

(2) ケーソンの滑動試験結果

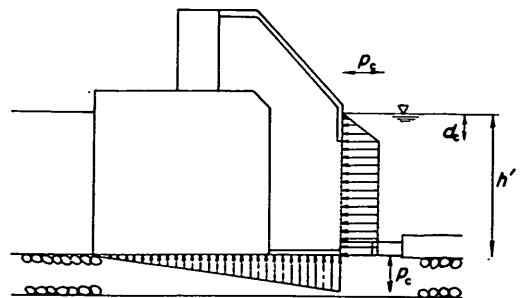


図-38 衝撃空気圧に対するケーソンの設計波圧分布

図-39(a)は、改良型波力発電ケーソンの滑動試験結果を示す。横軸にケーソン重量をとり、400波の波による滑動距離 R_s と滑動回数 N_s がプロットしてある。図には、2~3種類の有義波高に対する実験結果が示してあるが、ここでは特に最も大きい有義波高に対する結果について検討する。ケーソン重量が1022kgf のとき、滑動量は1 mm 以上であるが、1204kgf ではごく小さくなる。この模型ケーソンは、衝撃空気圧が働くときに滑動している。滑動安全率 S.F.=1.0 で摩擦係数 $\mu=0.6$ として、各重量に対応する空気圧力 p_c を図の上部に示している。重量が1022kgf と1204kgf の場合には空気圧力 p_c が71gf/cm² と84gf/cm² に対応する。図-16の実験結果では衝撃空気圧の最大値は約90gf/cm² であり、実験結果は図-38のケーソン安定性に対する衝撃空気圧分布の妥当性を示している。

図-39(a)には、作動限界圧力を30gf/cm²として圧抜弁を用いた場合の試験結果も示している。圧抜弁により空気圧が低下し、1022kgfの重量でもほとんど滑動量が0となる。現地の空気圧は相対的にもっと小さくなるので、一般には滑動は衝撃空気圧の作用時ではなく、通常の波圧のピーク時に生じると考えられる。横軸の下には、図-36の波圧分布に対する各重量の $H_{max}=67.9$ cm

に対する滑動安全率 S.F.を示した。重量が1022kgf のとき滑動安全率は、1.09である。現地のケーソンが滑動安全率1.0でも滑動しないことを確めるには、さらに空気圧を圧抜弁で小さくした試験を行う必要がある。しかしながら、400波の波の作用の中には、衝撃空気圧は小さくても大きな通常の波圧が作用していると考えられるものがある。重量が891kgfのケースにおいて、通常の波圧が大きいと考えられる波で滑動していないことを考えあわせれば図-36の合田式に基づくケーソンの安定性に対する波圧分布は妥当であると考えられる。

図-39(b)は、基本型波力発電ケーソンの滑動試験結果である。たとえば、重量が1335kgfでも10mmを超える滑動を生じている。このときは、 p_c は94gf/cm²である。また、通常の波圧に対する滑動安全率 S.F.は0.73であり、通常の波圧によっても滑動を生じている。重量が1705kgfのときには、滑動はほとんど止まっている。このとき、 $p_c=119$ gf/cm²、S.F.=0.99である。基本型波力発電ケーソンは、改良型波力発電ケーソンに比べかなり大きな重量が必要なことは明らかである。

図-39(c)は、上部斜面ケーソンの滑動試験結果を示す。重量が1204kgfのときでも、滑動距離は十分小さくはな

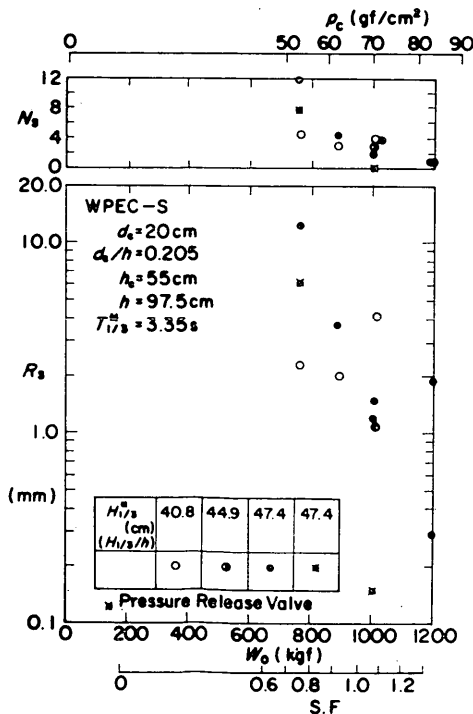


図-39(a) 改良型波力発電ケーソンの滑動試験結果

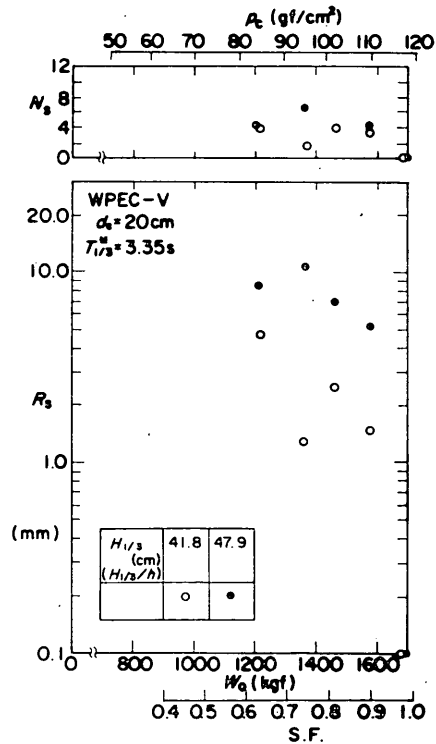


図-39(b) 基本型波力発電ケーソンの滑動試験結果

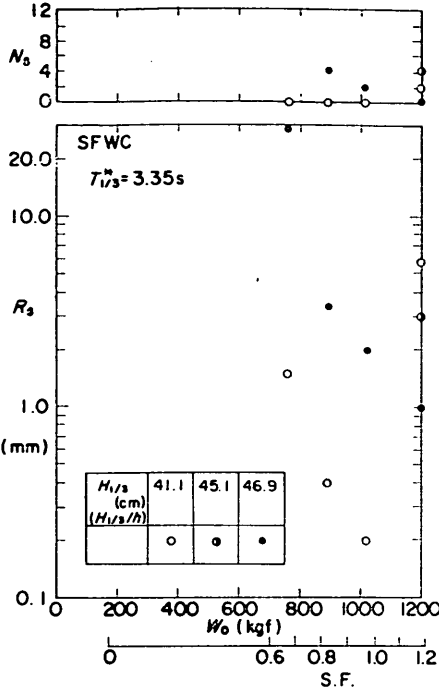


図-39(c) 上部斜面ケーソンの滑動試験結果

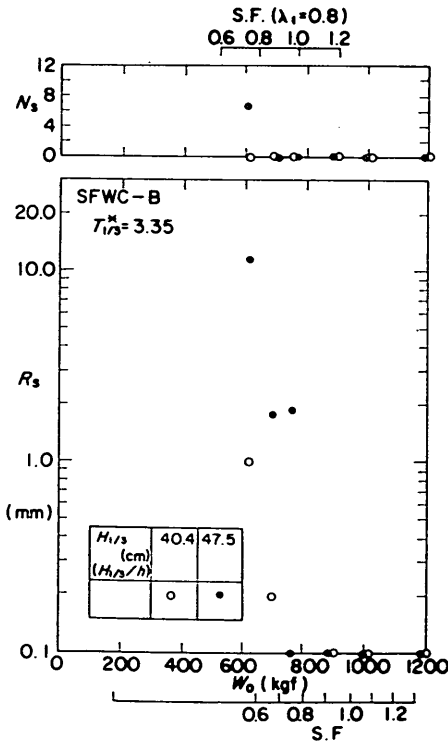


図-39(d) 消波ブロック被覆ケーソンの滑動試験結果

い。しかしながら、これはケーソンをマウンド上に設置した直後であり摩擦係数がやや小さく、滑動距離にその影響が現われている。また、重量が1204kgfの時は、滑動回数が図中に0としてあるように、明瞭な滑動が認められず400波の作用によって結果的に1mmの移動が認められたにすぎない。したがって、その安全率が1.2以下の重量では、滑動量をほとんど0とみなすことができる。上部斜面ケーソンの滑動量は全体的に圧抜弁がある改良型波力発電ケーソンの滑動量より大きい。すなわち、改良型波力発電ケーソンは、その消波能力のため波圧が減じていると考えられる。

図-39(d)は、消波ブロック被覆ケーソンの滑動試験結果である。滑動は、重量が760kgfのときほとんど0となる。この重量は滑動安全率 S.F. が0.75に相当する。ただし修正係数 λ_1 を1.0とした場合であり、 λ_1 を0.8とする安全率を上部に示した。重量760kgfは、この安全率ではほぼ1.0に対応する。消波ブロック被覆ケーソンの滑動量は、同じ重量の改良型波力発電ケーソンよりも小さい。

以上の滑動試験の結果、合田式にもとづく波圧が妥当であることがほぼ示された。ただし、修正係数を適切に与えることが必要である。また、比較的小型（特に空気室の高さが低い）の改良型波力発電ケーソンの場合には、衝撃空気圧による滑動も検討しなくてはならない。なお、滑動試験によってケーソンの形状により必要な重量が大きく異なることがわかった。特に、改良型波力発電ケーソンは、基本型波力発電ケーソンより重量が少なくとも安定であり、有利であることがわかった。

5. 防波堤としての機能

5.1 空気出力効率

(1) 空気出力効率の実験結果

波のパワーは、空気室とノズルによって空気のパワーに変換される。図-40(a)は、基本型波力発電ケーソンの空気出力効率の実験結果である。ノズル開口率が0.0075 (1/133) の場合である。有義波高が15cm以下のとき効率は0.55から0.70である。効率は、この範囲でもやや小さい。これは、比水深が大きいため波のエネルギーが水面付近に集中し、カーテンウォールによって反射されやすいからである。有義波高が20cmより大きいところでは効率は0.5以下となる。これは、その有義波高の範囲では実験波の波長が長いことと、カーテンウォール下端からの空気漏れによる。図中の曲線は、前報までに示した理論による計算結果である。

図-40(b)は、改良型波力発電ケーソンの空気出力効率

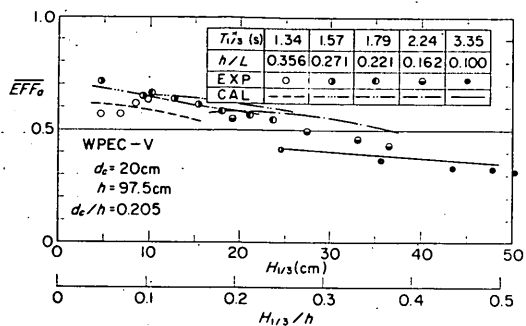


図-40(a) 基本型波力発電ケーソンの空気出力効率

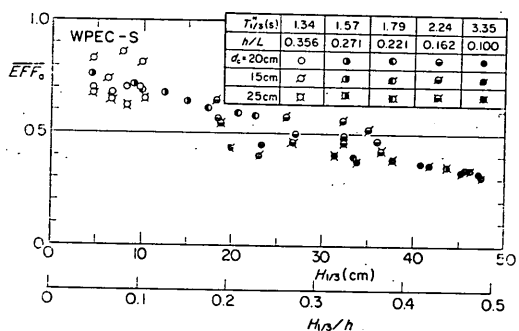


図-40(b) 改良型波力発電ケーソンの空気出力効率

をプロットしたものである。カーテンウォール没水水深 d_c が 20cm の場合の他に、15cm、25cm の場合も示している。 d_c が小さいほど効率が大きいことが明瞭に認められる。 $d_c=20\text{cm}$ の場合の改良型波力発電ケーソンの効率は、有義波高が15cm以下のとき0.7程度である。これは、図-40(a)の基本型波力発電ケーソンの効率よりやや大きい。後出の図-42(a)(b)で示されるように、改良型波力発電ケーソンの場合は、基本型波力発電ケーソンに比べ、空気室内の圧力変動はほぼ同じであるが、水位変動はやや大きい。これが効率の違いの理由と考えられる。

(2) 改良型波力発電ケーソンの空気出力効率の計算

改良型波力発電ケーソンの場合の空気出力効率が、基本型波力発電ケーソンと異なる基本的な理由には、次の二つが考えられ、それぞれの理由に基づいた空気出力効率の計算法が考えられる。

① 空気室上部の形状によるノズルの負荷の減少

空気室の幅が上部にいくほど狭くなっており、ノズルに空気が流れ易くなっている。すなわち、ノズルとしての負荷が小さくなり、見かけ上ノズルの開口率が大きくなっている可能性がある。しかしながら、ノズルの開口

率はもともとごく小さく、空気室の形状の違いが、空気の流れに大きく影響するとは考えにくい。

② 空気室前面壁と空気室内の後壁の斜面の効果

壁面が斜面であると、鉛直面の場合と波の運動が異なってくる。たとえば、空気室の波の開口部で空気室内の重複波の圧力と水平水粒子速度との位相差は、鉛直面のときは90度であるが、斜面壁のときには必ずしもこの関係が満たされているとはいえない。加藤・服部¹⁵⁾は、斜面に働く波圧の研究において、斜面壁上の圧力に位相のずれがあることを指摘している。熱力・波動法の理論において、たとえばこの位相差がさらに δ だけずれたとしたとき、空気室開口部における波の流速と圧力の連続式は、次のようになる*)。

$$2\eta_I = \frac{\nu_1}{\rho_w g} f(kh, kd_c)p^* + \frac{\nu_2 k B}{\tan k B} \eta + \frac{\nu_3 k B}{\sigma} \frac{d\eta}{dt} \dots\dots(18)$$

ここに、 $\nu_1 = 1.0$

$$\nu_2 = \cos \delta$$

$$\nu_3 = (1 - \sin \delta / \tan k B) \dots\dots(19)$$

であり、 $\sin \delta = 0.5 \tan k B$ として式(18)を用いて $T_{1/3}^* = 1.34\text{ s}$ の場合について計算すると、比較的实验値に近い値となる。ただし、これは B/L が 0.13 のとき $\delta = 20^\circ$ を意味し、 $\nu_2 = 0.94$ 、 $\nu_3 = 0.5$ である。しかしながら、こうした取扱いが適切であるかどうか、また適切であったとしても δ の値をどうとれば良いかについてはさらに理論的検討が必要である。

いずれにしても、空気室内においては、式(18)に示されている η_I 、 p^* 、 η 、 $d\eta/dt$ が相互に影響を及ぼしており、それぞれの影響の程度は、 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 によって変わる。すなわち、空気室の形状の影響を、これらの補正係数によってある程度反映することができると考えられる。もちろん、 $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = 1.0$ とすれば、鉛直面の場合となり、従来の式と一致する。ここで示した方法は、簡便な方法であり、さらに検討する必要がある。

なお、 $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = 1.0$ とした基本型波力発電ケーソンに対する計算でも、改良型の場合の空気出力を比較的良く表すことができる。

*) 第1報¹⁾の規則波に対する流速と圧力の連続式により、

$$2a_I \sin(\sigma t - \phi_I) = \frac{1}{\rho_w g} f(kh, kd_c)p^* + a_T (\cos k B \sin(\sigma t - \delta) + \sin k B \cos \sigma t)$$

となる。この式では、圧力の位相が δ だけずれている。この式を第2報²⁾に示した方法を用い不規則波に適用すると式(18)となる。

5.2 反射率

図-41(a)は、改良型波力発電ケーソンの反射率をプロットしたものである。反射率は、没水水深 d_c が小さいほど小さくなる。 d_c が 20 cm のとき、有義波高が 15 cm 以下の範囲では、反射率は、0.45 から 0.50 である。また、 d_c が 15 cm のとき、その有義波高の範囲では効率は 0.4 から 0.50 である。有義波高が 20 cm 以上の範囲でも、反射率は 0.55 付近の値をとっている。すなわち、空気室における波パワーの吸収によって反射率が低くなっている。

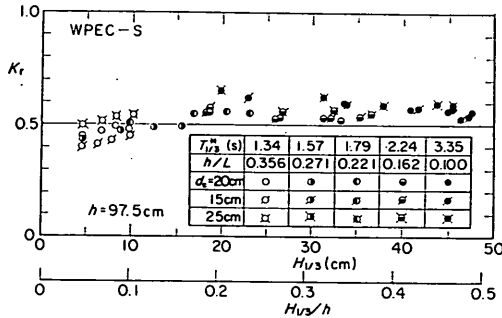


図-41(a) 改良型波力発電ケーソンの反射率

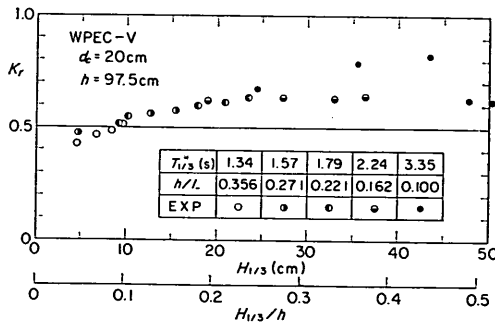


図-41(b) 基本型波力発電ケーソンの反射率

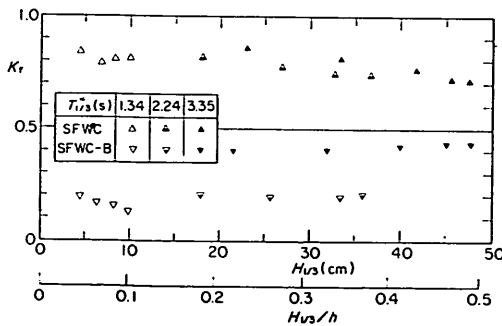


図-41(c) 上部斜面ケーソンと消波ブロック被覆ケーソンの反射率

る。また、波のエネルギーは、斜面壁を上った波が逆に落下した時にも渦となって消費されていると思われる。

基本型波力発電ケーソンの反射率を、図-41(b)に示している。反射率は、改良型波力発電ケーソンよりやや大きいようである。図-41(c)は、上部斜面ケーソンと消波ブロック被覆ケーソンの反射率を示すものである。上部斜面ケーソンの反射率はケーソンがエネルギーを吸収しないため、ほとんど 0.8 以上である。一方、消波ブロック被覆ケーソンは、波のエネルギーを消散させる。有義波高が 30 cm より小さいときには、反射率は 0.2 以下である。波高が大きいと反射率は大きくなるがそれでも 0.5 以下である。なお、実験では波高が大きいい条件では周期も長く、反射率が大きくなるのは周期が長くなるためと考えられる。

改良型波力発電ケーソンは、消波ブロック被覆ケーソンほど反射率を低くすることはできないが、0.5 以下にすることができる。すなわち、反射されるエネルギーは 25% 以下である。

5.3 空気室内と前面の水位変動

図-42(a)は、改良型波力発電ケーソンの空気室内の水位変動における正のピーク値 η^+ について、その 1/3 最大値と最大値の無次元量 ($\eta^+/H_{1/3}$) をプロットしたものである。 $\eta^+/H_{1/3}$ の最大値と 1/3 最大値は、有義波周期が同じなら有義波高が大きいかほど小さくなり、また有義波周期が大きいかほど大きくなる。最大値は、0.6 から 1.0 $H_{1/3}$ の範囲にあり、有義波周期が 3.35 s で、有義波高が 40 cm 以上するとき、37 cm 以上となる。模型の機械室の床面は、静水面上 37 cm であり、空気室内の水面が、この高さ以上になると、タービンのノズルから水塊が機械室に侵入する危険性がある。ただし、この高さまで達するのはごく限られた数の波であり、この高さでの水塊の上昇速度は極めて小さい。機械室の高さは、一応 0.5 H_{max}

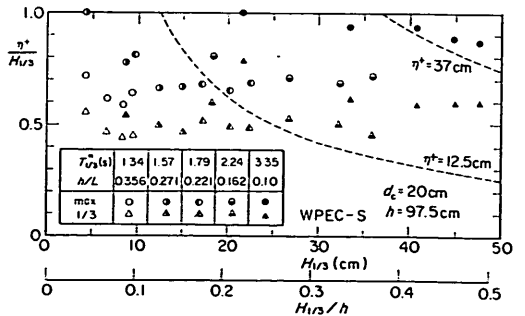


図-42(a) 改良型波力発電ケーソンにおける空気室内の水位の上昇量

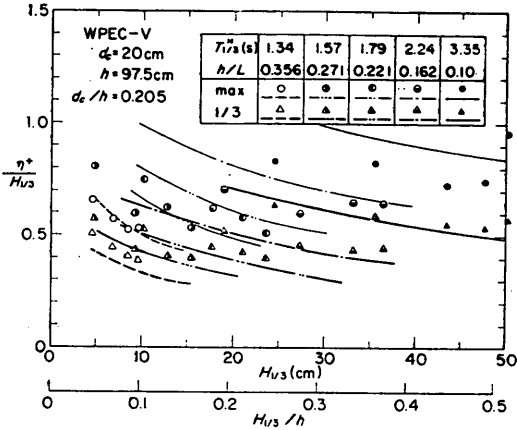


図-42(b) 基本型波力発電ケーソンにおける空気室内の水位の上昇量

の基準を用いて決めている。 H_{max} の値は、実験では設計の値の約90%の67.9cmであり、 η^+ の最大値をこの値で除くと、 $\eta^+_{max}/H_{max}=0.6$ となる。なお、1/3最大値は0.45から0.6 $H_{1/3}$ の範囲にある。有義波高が20cm以下では、12.5cm以下である。模型空気室には、静水面上12.5cmのところに水平な小段がある。

図-42(b)は、基本型波力発電ケーソンの空気室内における水位変動の正のピーク値 η^+ の実験値を示す。図-42(a)に認められる傾向がこの場合にも認められる。しかしながら、改良型に比べ全体にその大きさがやや小さい。これが、5.1(1)で述べた空気出力効率の差の理由である。図中の曲線は、計算結果を示す。計算結果は、実験結果よりやや小さいがその傾向は良く一致している。

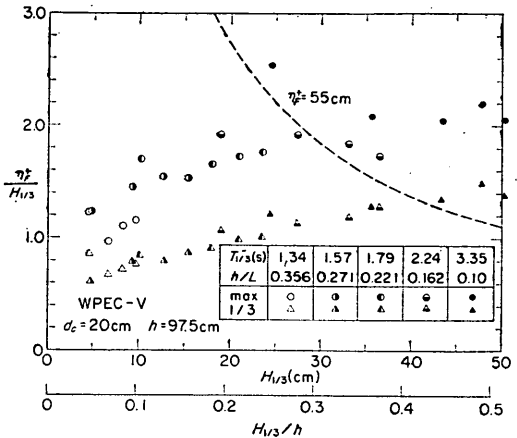


図-43(b) 基本型波力発電ケーソンにおける空気室前面の水位上昇量

図-43(a)は、改良型波力発電ケーソンの空気室前面における水位変動の正のピーク値 η^+_F について、その最大値と1/3最大値を示したものである。1/3最大値は、0.6から1.0 $H_{1/3}$ の範囲にあり、有義波高とともに大きくなる。最大値は、有義波高が大きいくところでは逆にやや小さくなる。これは、越波の影響である。

図-43(b)は、基本型波力発電ケーソンの空気室前面における水位変動の正のピーク値 η^+_F を示す。図-43(a)の場合とほぼ同様の傾向が認められる。ただし、この図の値の方が全体的に大きい。これは、基本型波力発電ケーソンの前面が鉛直壁であり、改良型波力発電ケーソンの前面壁が斜面であることによる。

5.4 波高伝達率と越波量

4つのケーソンの波高伝達率 K_t を、図-44に比較している。たとえば、改良型波力発電ケーソンの伝達率は、有義波高が45cm付近で0.15である。基本型波力発電ケーソンの伝達率は、その有義波高で0.13である。こ

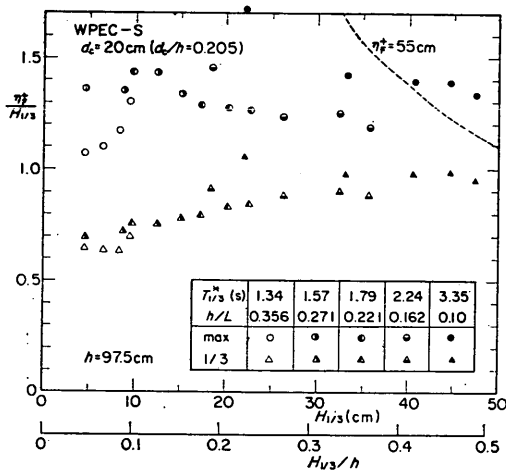


図-43(a) 改良型波力発電ケーソンにおける空気室前面の水位の上昇量

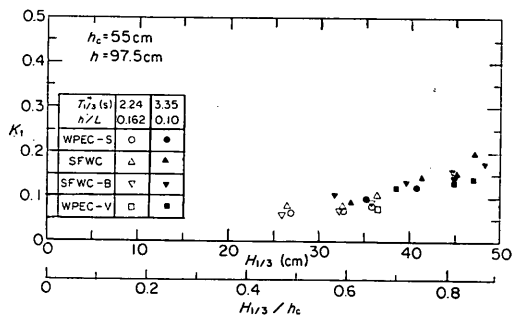


図-44 波高伝達率

のように、改良型波力発電ケーソンの伝達率は、基本型波力発電ケーソンの伝達率よりやや大きい。ただし、改良型波力発電ケーソンの伝達率は、上部斜面ケーソンや消波ブロック被覆ケーソンよりも小さい。ここで用いた消波ブロック被覆ケーソンのモデルは、消波ブロックが静水面よりやや上までしか被覆されていない。したがって、波高が大きいと消波ブロックを乗り越えて越波するため、伝達率がやや大きい。実験における伝達率は、越波だけでなくケーソンと側壁の透き間からの透過波、マウンドからの透過波を含むものであることに留意する必要がある。特に、側壁との透き間が2 cmとやや大きく、伝達率を大きくしていると思われる。

通常の混成堤の天端は、 $0.6H_{1/3}$ で設計されることが多い。このときの伝達率と同程度の伝達率とするためには、上部斜面ケーソンの天端は $1.0 H_{1/3}$ 必要といわれている¹⁴⁾。実験結果から判断すると改良型波力発電ケーソンの天端は、 $1.0 H_{1/3}$ よりやや低くすることができる。

4つのケーソンの越波量についても、図-45 で比較している。たとえば、有義波高が45 cm のとき、改良型波力発電ケーソンの無次元越波量 $q/\sqrt{2gH_{1/3}^3}$ は、 2×10^{-3} であり、基本型波力発電ケーソンの無次元越波量は、 8×10^{-4} である。改良型波力発電ケーソンの越波量は、基本型波力発電ケーソンより大きい、上部斜面ケーソン

より小さい。また、有義波高が大きいときには、消波ブロック被覆ケーソンよりも小さい。これらの傾向は、伝達率の傾向に一致している。

5.5 ノズル開口率が小さい場合

図-46(a), (b), (c), (d)は、ノズル開口率 ϵ が0.005(1/200) の場合の改良型波力発電ケーソンの実験結果を示すものである。図-46(a)は、空気出力効率を示すものであり、図-40(b)の $\epsilon=0.0075(1/133)$ の場合に比して小さくなっている。すなわち、 $\epsilon=0.005$ ではノズルの開口率が最適値より小さいことがわかる。ただし、それでも $H_{1/3}$ が15 cm以下では空気出力効率は0.5以上である。

図-46(b)は反射率を示すもので、図-41(a)の $\epsilon=0.0075$ の場合に比してやや大きい。これは空気出力効率が小さいためである。図-46(c)は空気室内における水位の正のピーク値 η^+ を示すもので、図-42(a)の $\epsilon=0.0075$ の場合に比べ、かなり小さくなるのがわかる。ノズルの開口率がやや小さいため圧力が上がり、水位の上昇が抑えられている状態となっていることがわかる。 $H_{max}=67.9$ cm で η^+_{max} を除すと $\eta^+_{max}/H_{max}=0.45$ であり、0.5

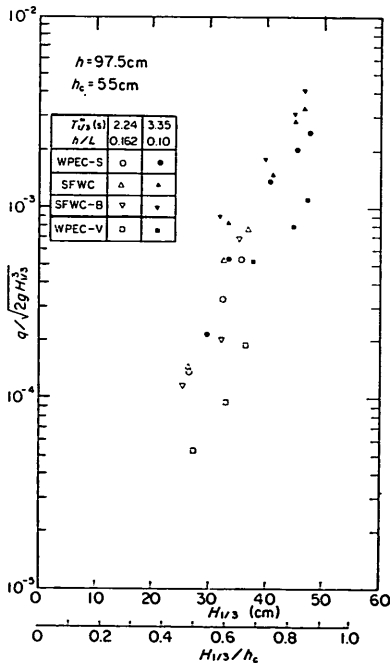


図-45 無次元越波量

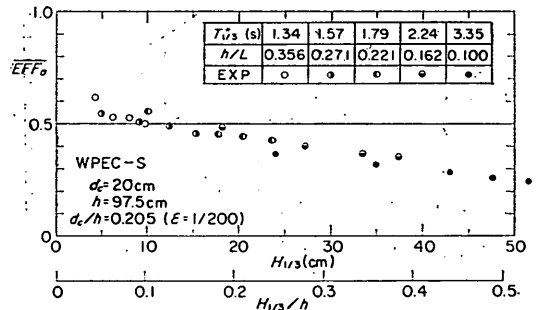


図-46(a) 改良型波力発電ケーソンの空気出力効率 ($\epsilon=1/200$)

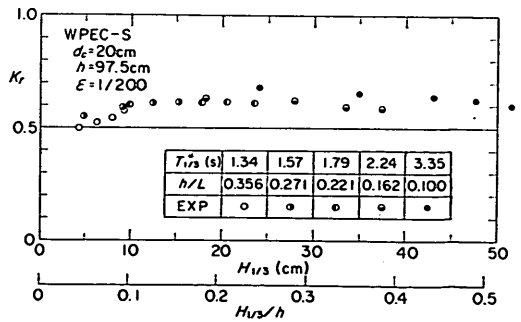


図-46(b) 改良型波力発電ケーソンの反射率 ($\epsilon=1/200$)

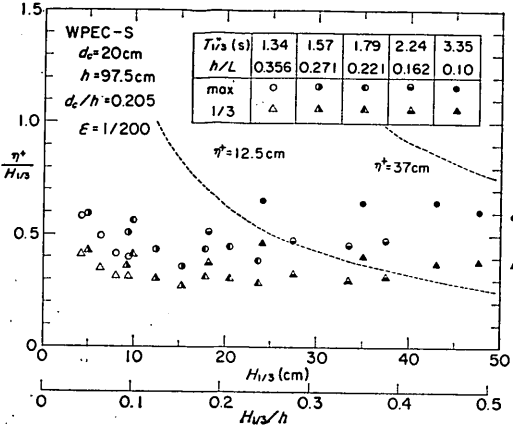


図-46(c) 改良型波力発電ケーソンの空気室内の水位の上昇量 ($\epsilon=1/200$)

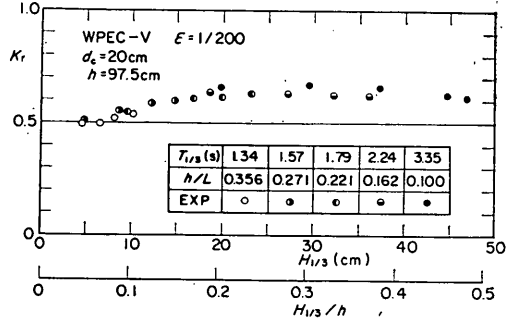


図-47(b) 基本型波力発電ケーソンの反射率 ($\epsilon=1/200$)

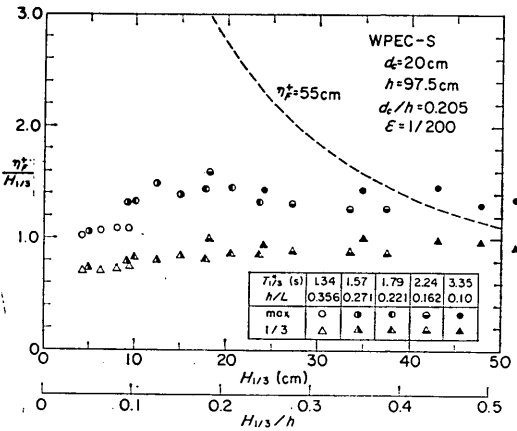


図-46(d) 改良型波力発電ケーソンにおける空気室前面の水位の上昇量 ($\epsilon=1/200$)

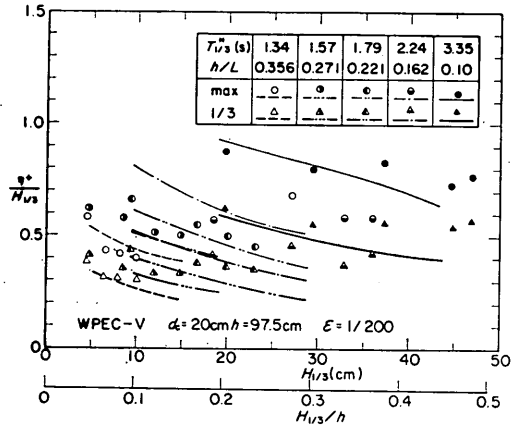


図-47(c) 基本型波力発電ケーソンの空気室内の水位の上昇量 ($\epsilon=1/200$)

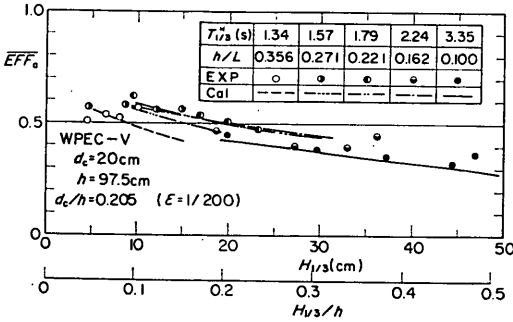


図-47(a) 基本型波力発電ケーソンの空気出力効率 ($\epsilon=1/200$)

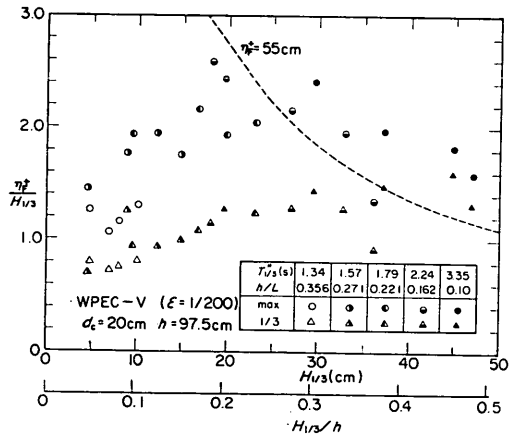


図-47(d) 基本型波力発電ケーソンにおける空気室前面の水位の上昇量 ($\epsilon=1/200$)

以下となる。図-46(d)は空気室前面における水位の正のピーク値であり、 $\epsilon=0.0075$ の場合よりやや大きい。これは、反射率がやや大きいことによると思われる。図-47(a), (b), (c), (d)は、ノズル開口率が0.005の場合の基本型波力発電ケーソンの実験結果を示すものである。図-47(a)は空気出力効率、図-47(b)は反射率、図-47(c)は空気室内における水位の正のピーク値、図-47(d)は空気室前面における水位の正のピーク値を示す。同じ基本型波力発電ケーソンの $\epsilon=0.0075$ の場合と比較すると、やはりノズルの開口率が小さいために空気出力効率が小さくなるなど、上述した改良型波力発電ケーソンの $\epsilon=0.0075$ と0.005の違いと同様な違いが認められる。また、図-46(a)~(d)と図-47(a)~(d)によって $\epsilon=0.005$ の場合の改良型と基本型を比較することができる。すでに改良型と基本型との比較は $\epsilon=0.0075$ の場合について行っているが、 $\epsilon=0.005$ の場合にもほぼ同様のことがいえる。ただし、空気出力効率や反射率については、改良型と基本型の差がより小さくなっている。

6. 結論

改良型波力発電ケーソンの耐波設計法について、実験的・理論的に検討した。改良型波力発電ケーソンの機能についても検討を行った。比較のため、基本型の波力発電ケーソン、上部斜面ケーソン、そして消波ブロック被覆ケーソンについても実験を行っている。得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- 1) 模型の波力発電ケーソンには、衝撃的な空気圧縮圧力が働く。この圧力は、ケーソン前面の波面の下降量が大きいほど、カーテンウォール壁の没水水深が浅いほど、大きくなる。
- 2) この衝撃空気圧の計算法を提案した。その計算によれば、現地のケーソンに対しては、模型実験から予想されるような大きな圧力は発生しないと考えられる。これは、空気の圧縮性の縮尺効果による。そのため、衝撃的な空気圧縮圧力は比較的大きい空気室を持つ波力発電ケーソンにおいては、それほど重要ではない。したがって、カーテンウォール壁の没水水深は、主に空気出力効率の観点から決めることができる。
- 3) 空気室の壁面の設計のための波圧分布を提案した。この分布は、模型縮尺効果を考慮して、実験結果等から決めている。
- 4) 改良型波力発電ケーソンの滑動・転倒に対する設計波圧の算定法を提案した。設計波圧の算定法は基本的には合田公式であり、二つの修正係数で修正したものである。その式の妥当性は、滑動実験によって確認

している。

- 5) 他の形式のケーソンについても滑動実験を行った。改良型波力発電ケーソンの滑動安定性は、基本型よりかなり高く、上部斜面ケーソンよりやや高い。ただし、消波ブロック被覆ケーソンより低い。
- 6) 改良型波力発電ケーソンの空気出力効率は、基本型よりやや高い。これは、改良型波力発電ケーソンにおいては、基本型より空気室内の水位変動が大きいからである。
- 7) 改良型波力発電ケーソンの反射率は、波高が小さいところでは、約0.45であり、波高が大きいところでも0.55付近の値となる。これらの反射率の値は、基本型の反射率の値よりやや小さい。また、当然上部斜面ケーソンの反射率よりかなり小さい。ただし、消波ブロック被覆ケーソンよりはやや大きい。
- 8) 波力発電ケーソンの空気室内の水位は、静水面上0.5 H_{max} 以上(約0.6 H_{max} まで)に上がることがある。ただし、それは最高波高に近い波高の波に限られる。また水面の上昇速度は、その高さではごく小さく、その位置に空気ノズルがあったとしても、空気ノズルから排出される水の速度は小さいと考えられる。なお、空気室内の水位の上昇量は、空気ノズルの開口率を小さくすれば小さくなる。
- 9) 改良型波力発電ケーソンの越波・伝達波は、基本型より大きい。しかしながら、上部斜面ケーソンより小さく、さらに消波ブロック被覆ケーソンよりも小さい。

運輸省第一港湾建設局では、酒田港において改良型波力発電ケーソン防波堤に関する現地実証実験を行う予定である。ここで得られた結果は、そのケーソンの設計等に直接的に利用されるであろう。本研究に関連して、第一港湾建設局新潟調査設計事務所の岩谷文方前所長、辻垣武彦所長、酒田港工事事務所の林直樹前所長、島田知明所長ら、多くの方々から助言を得ている。ここに深甚なる感謝の意を表します。

まえがきでも述べたように、本報告は波エネルギーに関する研究の第7報である。本報告をとりまとめるにあたり、港湾技術研究所の合田良実所長、浅田忠則前水工部長、谷本勝利水工部長、清宮 理沈埋構造研究室長、横田 弘主任研究官らに貴重な助言を得ている。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

(1988年2月26日受付)

参考文献

- 1) 小島朗史・合田良実・鈴木諭司：波力発電ケーソン

- の空気出力効率の解析, 一波エネルギーに関する研究, 第1報一, 港湾技術研究所報告, 第22巻, 第3号, 1983. 9, pp. 125~158.
- 2) 小島朗史・鈴木諭司: 波力発電ケーソンに働く波力特性に関する実験, 一波エネルギーに関する研究, 第2報一, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, 1984. 3, pp. 53~81.
 - 3) 高橋重雄・小島朗史・鈴木諭司: Air power of pneumatic-type wave power extractors due to irregular wave actions, 一波エネルギーに関する研究, 第3報一, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第1号, 1985. 3, pp. 3~41.
 - 4) 高橋重雄・鈴木諭司: 波力発電ケーソンに設置されたウエルズタービンの出力計算法, 一波エネルギーに関する研究, 第4報一, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第2号, 1985. 6, pp. 205~238.
 - 5) 高橋重雄・明瀬一行・吉本靖俊・田中 智: Variation of wave power extraction due incident wave angle and directional spreading, 一波エネルギーに関する研究, 第5報一, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第1号, 1987. 3, pp. 3~39.
 - 6) 高橋重雄・安達 崇・田中 智: 大型模型による波力発電実験, 一波エネルギーに関する研究, 第6報一, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第3号, 1987. 9, pp. 3~35.
 - 7) 谷本勝利・小舟浩治・大里陸男: ケーソン壁に作用する波力と応力計算, 港湾技研資料, No. 224, 1980. 5, 39p.
 - 8) 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司: 直立壁に作用する衝撃波圧の発生に関する一考察, 港湾技術研究所報告, 第22巻, 第4号, 1983. 12, pp. 3~31.
 - 9) Bagnold, M.R.A.: Interim report on wave pressure research, *Journal of Institute of Civil Engineers*, Vol. 12, 1939, pp. 201~226.
 - 10) Mitsuyasu, H.: Shock pressure of breaking wave, *Proc. of 10th Conference on Coastal Engineering*. 1966, pp. 268~283.
 - 11) Wagner, H.: Über Stoss- und Gleitvorgänge und der Oberfläche von Flüssigkeiten, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Band 12, Heft 4, 1932, pp. 193~215.
 - 12) 高橋重雄・谷本勝利: 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力, 一現地観測波圧データの解析一, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第2号, 1984. 6, pp. 3~25.
 - 13) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会1982. 5, p. 237.
 - 14) 森平倫生・国田 治: 斜面壁堤の水理特性に関する標型実験, 第26回海岸工学講演会論文集, 1989. 11, pp. 295~298.
 - 15) 加藤教吉・服部昌太郎: 斜面に働く重複波の波圧, 第26回海岸工学講演会論文集, 1979. 11, pp. 391~395.

主要記号表

A_n	: ノズルの開口面積
A_w	: 空気室の水平面積
A_{arv}	: 圧抜弁の開口面積
B	: 空気室の幅
B_c	: ケーソンの幅
D_0	: 空気室の高さ
d_c	: カーテンウォール没水水深
\overline{EFF}_a	: 空気出力効率
g	: 重力加速度
H	: 波高
$H_{1/3}$: 有義波高
H_{max}	: 最高波高
h	: 水深
h_c	: ケーソンの天端高さ
h'	: ケーソンの基面水深
K_r	: 反射率
K_t	: 伝達率
k	: 波数
k_e	: 上昇する水塊の厚さ
$k_{1/3}$: 波数 (有義波周期に対する)
L	: 波長
$L_{1/3}$: 波長 (有義波周期に対する)
l_B	: 空気室の波峯線方向の長さ
N_s	: 滑動回数
P_s	: 斜面に働く波力
P_{sh}	: 斜面に働く波力の水平方向成分
P_{sv}	: 斜面に働く波力の鉛直方向成分
p_0	: 大気圧 (絶対圧力)
p^*	: 空気室の空気圧の変動成分
p_{23}	: 空気室の空気圧 (測点2と3の平均値)
p_{23}^+	: p_{23} の正のピーク値
p_e	: 空気室の空気圧のピーク値
R_s	: 滑動距離
S.F.	: 滑動安全率 (特に通常の波圧に対する)
T	: 波の周期
$T_{1/3}$: 有義波周期
T_0	: 大気温 (絶対温度)
T^*	: 空気室の温度の変動成分
t	: 時間
u_0	: 水塊の上昇速度
w_0	: 水の単位体積重量
W_0	: ケーソンの重量
W_a	: 空気出力

改良型波力発電ケーソン防波堤の特性

W_I : 波の入射パワー	η_F^- : η_F の負のピーク値 (水位の下降量)
w_p : ノズル内の空気流速	η_{pass} : 通過波 (の水位変動)
ε : ノズルの開口率	μ : 摩擦係数
ε_{arv} : 圧抜弁の開口率	θ_{arv} : 圧抜弁の開放角
ε_h : 水平方向ひずみ	θ_s : 斜面壁の水平面からの傾斜角
ε_v : 鉛直方向ひずみ	ρ_a : 空気の密度
η : 空気室内の水位変動	ρ_w : 水の密度
η^+ : η の正のピーク値	λ : 衝撃空気圧の縮尺補正係数
$(\eta^+)_{max}$: η の正のピーク値の最大値	λ_1 : 合田式の修正係数
$(\eta^+)_{1/3}$: η の正のピーク値の1/3最大値	λ_2 : 合田式の修正係数
η_F : 空気室前面の水位変動	φ : ノズルの速度係数
η_F^+ : η_F の正のピーク値 (水位の上昇量)	