

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

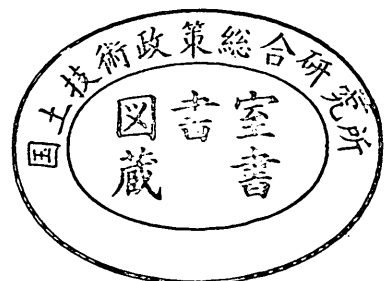
---

VOL. 23

NO. 2

JUNE. 1984

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第23巻 第2号 (Vol. 23, No. 2), 1984年6月 (June 1984)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力 (第2報)  
——現地観測波圧データの解析——……………高橋重雄・谷本勝利…………… 3  
(Uplift Forces on a Ceiling Slab of Wave Dissipating Caisson with  
a Permeable Front Wall (2nd Report)—Field Data Analysis—  
……………Shigeo TAKAHASHI and Katsutoshi TANIMOTO)
2. 三次元の経験的固有関数による深淺図解析法……………加藤一正・吉松 晃……………27  
(A New Method of Three-Dimensional Empirical Eigenfunction Analysis for  
Contour Maps ……………Kazumasa KATOH and Akira YOSHIMATSU)
3. 海域底泥中のリンの挙動モデルについて……………堀江 毅・細川恭史……………49  
(Modelling of the Behaviors of Phosphorus in Sea Mud  
……………Takeshi HORIE and Yasushi HOSOKAWA)
4. 砂地盤における地中杭の横抵抗に関する実験的研究……………荘司喜博……………75  
(Experimental Study on Lateral Resistance of a Pile with Embedded  
Head in Sand ……………Yoshihiro SHOJI)
5. 波の繰返しを受ける防波堤基礎地盤の安定性に関する研究 (第1報)  
——過剰間隙水圧の挙動解析——……………善 功企…………… 181  
(Study on the Stability of Subsoil under Breakwaters Subjected to Cyclic  
Wave Loading (1st Report)  
—Analysis on Wave-Induced Excess Pore Water Pressure—  
…………… Kouki ZEN)
6. 連続水ジェットによる岩盤掘削機構……………岩崎峯夫・秋園純一…………… 207  
(A Consideration of Rock Excavation Mechanism with Water Jets  
…………… Mineo IWASAKI and Junichi AKIZONO)

# 1. 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力 (第2報)

——現地観測波圧データの解析——

高橋重雄\*  
谷本勝利\*\*

## 要 旨

透過壁とその背後に遊水室を有した直立消波ケーソンは、反射波や越波を著しく軽減する機構を具備しており、近年護岸や防波堤にこれらが採用されるようになってきている。直立消波ケーソンの遊水室頂部は開放のままであることが多いが、構造上あるいは利用上の理由からふた(蓋)をしなければならないこともある。この遊水室頂部のふたを上床版と称しており、波と潮位の条件によっては、上床版に空気の圧縮による揚圧力が働く。すなわち、波が作用したとき透過壁の内外で波面上昇に位相差を生じ、遊水室上部に空気層が閉じ込められ、その空気層が波面上昇によって圧縮され揚圧力が発現する。著者らはすでに模型実験によってこの揚圧力の発生機構およびその値の算定法について検討し、報告している。

神戸市垂水地区に建設された新垂水処理場の南護岸は、遊水室に上床版がある縦スリットケーソン堤であり、著者らの実験結果に基づいて設計されている。この南護岸の2つのケーソンに実際に作用する波圧を測定するために、6台の波圧計が取り付けられ、2年間にわたって測定が実施された。

本報告は前回の模型実験に基づいた検討結果の報告に続くものであり、取得された貴重な現地波圧データの解析結果を報告するものである。ここではおもに、模型実験によって得られた結論を現地波圧データで検証することを目的としている。解析の結果以下の点が指摘できる。

- 1) 現地でも模型と同様に空気圧縮による揚圧力が上床版に働き、同時に、遊水室内全体にも伝播する。
- 2) 模型実験結果に基づいて提案された空気の圧縮機構を説明するモデルは、この現地波圧に適用できる。モデルを介して空気の縮尺効果を補正した模型実験結果は、現地観測値とよく一致する。
- 3) 上床版に設けられた空気孔は、空気の圧縮モデルで予想されたように空気圧縮力を低減する効果がある。
- 4) 空気の圧縮モデルのパラメータである閉じ込められた空気の厚さ $D$ や、その時の波面上昇速度 $u_0$ を求める簡単な方法を提案した。したがって、波の条件とケーソンの諸元を与えることによって空気圧縮力が求められる。この方式による計算値は現地観測値に比較的よく一致する。

---

\* 水工部 主任研究官 (耐波工担当)

\*\* 水工部 防波堤研究室長

1. Uplift Forces on a Ceiling Slab of Wave Dissipating  
Caisson with a Permeable Front Wall (2nd Report)  
—Field Data Analysis—

Shigeo TAKAHASHI\*

Katsutoshi TANIMOTO\*\*

Synopsis

Wave reflection and wave overtopping from the conventional caisson-type sea walls are relatively large. Wave dissipating caissons which have permeable walls and wave chambers in front of the ordinary caisson are characterized by the low reflection and the small amount of overtopping, and they are increasingly adopted as seawall structures. From a view point of the wave absorbing capability, it is not necessary to close the top of the wave chamber. However, due to the structural and utilizational reasons the top of the wave chamber is often closed with a ceiling slab.

The ceiling slab may be subjected to uplift pressure by air compression. As high waves act on the caisson, an air layer is entrapped at the upper part of the wave chamber between the water surface and the ceiling slab, and is compressed by the uprising water surface.

In the previous report published in March 1980, the generation mechanism and the estimation method of the uplift pressure was investigated experimentally. Based on the result a seawall structure with the wave dissipating caissons was designed and constructed in the Tarumi District of Kobe City. To measure the acting pressures on the caissons, six pressure transducers were installed in the two of the caissons and the observation was conducted for two years.

In the present paper the obtained data is analysed and compared with the experimental values and with the calculated values by the newly proposed estimation method. Principal conclusions are as follows ;

- 1) As observed in the model experiment, the uplift pressure by the air compression acts not only on the ceiling slab but also on any other part of the caisson simultaneously.
- 2) The values of the air compression pressure on the actual caissons agree with the experimental values if the model scale effect of the air compression is adjusted as suggested in the previous report.
- 3) The values of the uplift pressure are reduced by the air leakage through the air holes in the ceiling as designed.
- 4) An estimation method for the entrapped air thickness,  $D$ , and the upward velocity,  $u_0$ , of the water surface in the wave chamber at the instant of the compression is proposed. The calculated values of the air compression pressure using this method and the air compression model proposed in the previous report agree with the measured values of the pressure on the actual ceiling slab.

---

\* Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

\*\* Chief of the Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

## 目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 現地観測の概要	7
2.1 観測位置と護岸の構造	7
2.2 波圧観測の方法	10
3. 観 測 結 果	11
3.1 波圧観測ケーソンに入射する波	11
3.2 波圧観測結果	12
4. 空気圧縮モデルによる現地波圧観測値の検討	19
4.1 模型実験結果と現地波圧観測値の比較	19
4.2 流入量方式による空気層の厚さと波面上昇速度の算定	20
4.3 計算値と現地波圧観測値の比較	22
5. ま と め	23
参 考 文 献	24
主要記号表	24
付 表	25

## 1. ま え が き

近年、ケーソン式混成堤のケーソン部を改良し、より安定で機能の高い防波堤や護岸の開発が数多く試みられている。通常のケーソンの前面に遊水室と透過性の壁を設けた直立消波ケーソンは、反射波や越波を軽減する構造の一つであり、すでに実際の防波堤や護岸に用いられた例は多い。直立消波ケーソンの遊水室頂部は、消波効果の面からはむしろ開放のままの方が良いが、利用上、あるいは構造上の理由から、上床版を設けたふたをした状態としなければならないこともある。この場合、条件によってはその上床版に強大な揚圧力が働くことになり、設計においてはこれを考慮しなければならない。

神戸市は新垂水処理場用地の護岸にこの遊水室に上床版のある縦スリットケーソン堤を採用した。著者らはこの上床版に働く揚圧力に関する模型実験を、神戸市の依頼を受けて実施した。その結果はすでに報告しているが大略以下の3点であった<sup>1)</sup>。

- 1) ある程度以上大きな波が作用するとき、遊水室内に空気が閉じ込められ、この空気層が波面上昇によって圧縮を受ける。この圧力は上床版のみならず、遊水室内全体に同時に発生する。
- 2) 空気圧縮力はフルードの相似則による模型実験では過大に見積もることになる。提案した空気圧縮モデルによって空気圧縮力の発生を説明することができ、このモデルを介して空気の縮尺効果を補正する必要がある。
- 3) 遊水室の上床版に空気孔を設ければ、空気圧縮力は低減する。ただし、空隙率をあまり大きくすると、水塊が直接衝突するようになり、かえって危険である。

模型実験結果を受け、神戸市では護岸を設計し、昭和54年から57年の4か年にわたって工事を実施した。このように護岸は新しい構造形式であり、かつ、模型実験結果の現地適用において空気の縮尺効果を考慮しているという新しい試みがなされている。このため、神戸市はケーソンに波圧計を取付け、波圧の現地観測を昭和57年度および58年度に実施した。

本報告は、模型実験に基づく検討結果の報告に続くものであり、取得された貴重な現地波圧データの提供を神戸市より受けてデータを解析しその結果を報告するものである。特に、模型実験によって得られた上述の3つの結論を、現地データによって検証することを目的とする。また、新たに遊水室内に閉じ込められた空気層の厚さとその圧縮時の波面上昇速度を算定する方法についても検討する。

## 2. 現地観測の概要

### 2.1 観測位置と護岸の構造

#### (1) 位 置

神戸市垂水地区は、図-1に示すように神戸港の西方明石海峡の東側で、淡路島を南西に望む位置にある。図-2は、長さ約1.5kmの海岸線を埋立てて造成された処理場用地とその護岸を示す。南護岸が対象としている縦スリットケーソン堤であり、その法線は東から北へ13°の方向にあり、SSEからSの方向がこの護岸にほぼ直角となる。波圧観測を実施したのは、この南護岸のほぼ中央にある No. 75 および No. 76 のケーソンである。

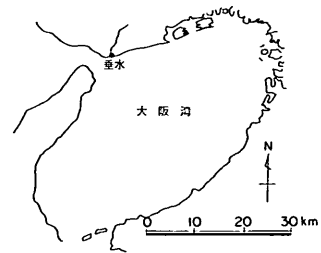


図-1 神戸市垂水地区

南護岸の位置での平均的な水深は約9mである。護岸の前方の海底形状はやや複雑であり、西側の沖400mほどに-5m~-6mの平礎と呼ばれる浅瀬があるのが特徴である。

#### (2) 護岸の構造

南護岸は図-3に示すように、遊水室に上床版のある縦スリットケーソン堤からなる。捨石マウンドの天端は-6m、ケーソンの天端が+3.5m、バラベットの天端が+7.5mとなっている。ケーソンの縦スリット壁は開口率が25%、壁厚が1.5mであり、スリットの上端は+2.0mである。遊水室の幅は3.5m、その上床版の下面は+2.5m、底面が-5.4mである。遊水室の上床版には直径15cmの空気孔が設けられており、その面積は遊水室の上床版の面積の0.5%である。写真-1は南護岸の一部を示している。

図-4は実際の設計に用いられた波圧の大きさを示す。遊水室上床版に  $p_a = 2.0\alpha_w H_{max}$  の空気圧縮による圧力が作用するとし、同時に遊水室内にもその波圧の大きさは小さくなるが伝播するとしている。設計波高  $H_{max}$  は8.3m、周期  $T_{1/3}$  は8sである。この設計波圧は、実験

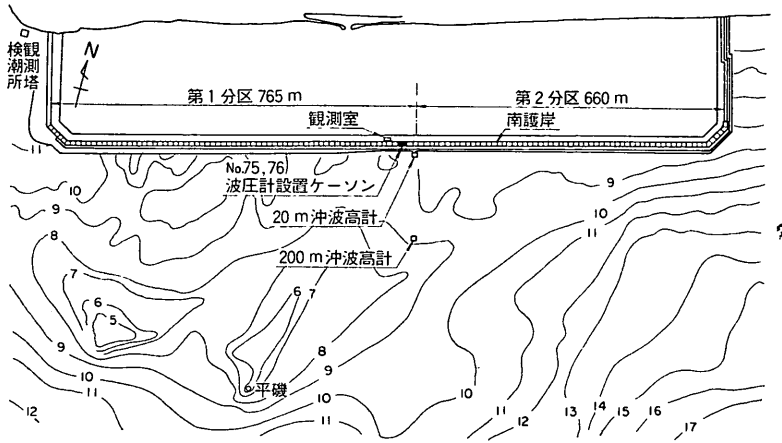


図-2 新垂水処理場用地と護岸

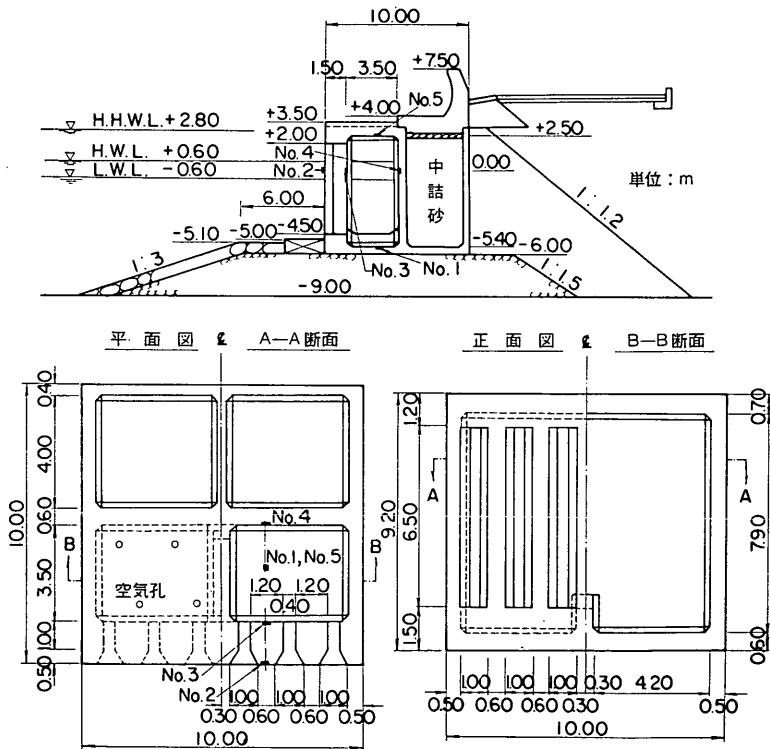


図-3 南護岸

による結果よりやや安全側の値を採用したものであり、さらに、空気孔による圧力低下の効果も取り入れていない。なお、模型実験結果にフルードの相似則を適用して

現地量に換算した値を  $\lambda=2.5$  で除すことにより、模型実験における空気縮尺効果を補正している。

(3) 海象

直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力（第2報）

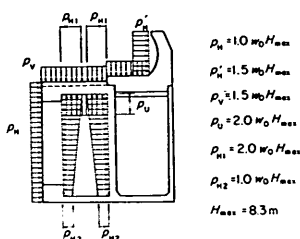


図-4 設計に用いられた波圧分布

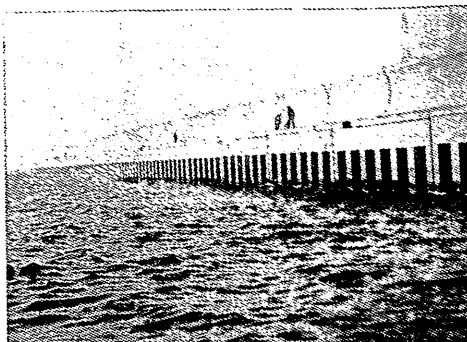


写真-1 南護岸

この地区に対するフェッチは、南護岸の法線にはほぼ直角な方向の友ヶ島水道方面からのものが最も長く、30～40kmの長さである。神戸市の資料によれば、通常の時化時の波として、有義波周期 $T_{1/3} = 4s$ 、有義波高 $H_{1/3} = 1.2m$ と推算されている。また、極度の暴風気象時の波として、 $T_{1/3} = 8s$ 、 $H_{1/3} = 4.6m$ と推算されている<sup>2)</sup>。

南護岸の波圧観測用ケーソンの前面200mには波高計が設置され、昭和56年9月より観測が実施されている。表-1は昭和58年3月までの測定有義波高のピーク値が1mを越えた異常波浪を示すものである<sup>3)</sup>。この19カ月の

間に14回、そうした異常波浪が来襲しており、有義波高の最大値は2.28mであり、有義波周期はほぼ4～6sの間にある。風向きは南護岸にはほぼ直角なSSW～SSEがほとんどである。この風向きは同埋立地の西端にある本州四国連絡橋公団垂水観測所での測定値である。同表には、神戸港における同じ異常波浪のピーク時の値<sup>4)</sup>も示してあるが、高い相関関係が認められる。ただし、神戸港の値は必ずしも同時刻のものでなく、また20kmほど

表-1 異常波浪

ピーク年月日時	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	風向	原因	神戸港		
					$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	風向
1981-10-5-12	1.76	5.6	SSW	低気圧	2.17	5.4	NNW
10-8-20	1.10	4.6	SSW	低気圧	1.45	4.6	WNW
10-22-10	1.08	3.8	E	台風24号	0.73	2.9	NE
11-2-16	1.28	4.5	SSW	低気圧	2.32	5.4	NE
1982-3-5-6	1.45	4.8	SSW	低気圧	—	—	—
3-31-4	1.23	4.2	SSE	気圧の谷	1.12	4.6	S
4-3-4	1.15	4.2	SSW	低気圧	1.39	4.2	SSW
4-9-10	1.00	3.7	W	低気圧	0.97	3.9	W
7-11-20	1.26	4.2	SSW	低気圧	1.81	6.0	S
8-27-18*	2.28	6.1	S	台風13号	1.78	5.2	SSW
9-25-8*	2.02	6.0	S	台風19号	1.87	6.1	SSW
11-30-4*	1.99	9.0	WNW	低気圧	1.42	6.5	WSW
1983-2-18-16	1.22	4.7	W	低気圧	2.18	5.2	W
3-17-16	1.18	4.3	W	低気圧	2.17	6.2	—

注) 神戸港の値は必ずしも同時刻のものでない。また\*印は今回解析したケースである。



はなれているため風向きは異なることもある。

なお、護岸の設計に用いられた潮位は、L.W.L.がT.P.-0.6m、H.W.L.がT.P.+0.6m、H.H.W.L.がT.P.+2.8mである。

2.2 波圧観測の方法

観測に用いられた波圧計は、図-5に示す受圧面の直径が12.8cmのひずみゲージ式波圧計である。その固有振動数は約460Hz、許容負荷は2 kgf/cm<sup>2</sup>である。この波圧計5台をケーソンNo. 75の前掲図-3に示す位置に取付けた。すなわち、No. 1を遊水室底面に、No. 2を縦スリット壁前面、No. 3を縦スリット壁後面、No. 4を遊水室後壁のそれぞれ東京湾中等潮位面に、そしてNo. 5を遊水室上床版下面に取付けた。さらに、ケーソンNo. 76の遊水室上床版下面に1台、No. 6を取付けている。このケーソンは上床版の空気孔を閉じた特別のものであり、空気孔の有無による空気圧縮力の違いをみるものである。波圧計はケーソン設置前にケーソンに取り付けられており、写真-2は、取り付け中の波圧計を示す。

波圧計の信号は、パラペット背後の観測室に送られ、増幅された後に電磁オシログラフに出力される。測定時間はタイマーにより任意に制御できるが、毎正時の10分前から20分間ずつの計測が行われている。観測は常時で

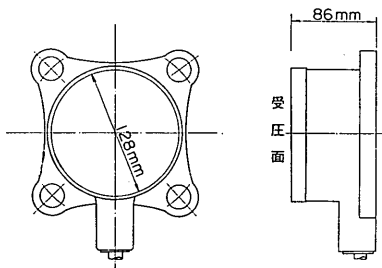


図-5 波圧計受圧部

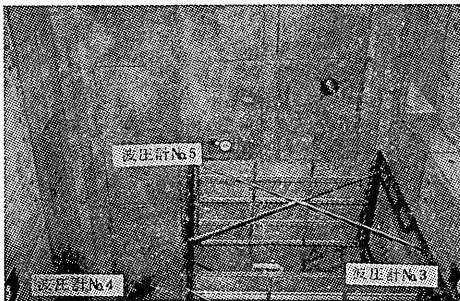


写真-2 波圧計設置状況（遊水室内上床版方向）

表-2 波圧観測ケース

ケース No.	日 時*	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>1/3</sub> (s)	波数	潮位 W.L. (m)	風向
1	8月27日10時	1.09	9.1	185	0.30	E
2	11時	1.71	8.3	193	0.39	
3	12時	1.59	5.9	258	0.42	SSE
4	13時	1.67	5.2	277	0.51	
5	14時	1.92	5.4	257	0.62	SSE
6	15時	1.88	5.3	266	0.80	
7	16時	1.96	5.4	270	0.96	S
8	17時	2.02	5.6	263	1.01	
9	18時	2.28	6.1	235	0.98	S
10	19時	2.20	5.8	242	0.84	
11	20時	1.91	5.5	261	0.75	S
12	21時	1.88	5.5	257	0.69	
13	22時	1.77	5.4	245	0.68	S
14	23時	1.99	5.4	222	0.64	
15	24時	1.84	5.2	253	0.63	SSW
16	9月25日7時	1.34	5.2	274	0.29	
17	8時	2.02	6.0	234	0.30	S
18	9時	1.91	5.8	250	0.37	
19	10時	1.91	5.5	254	0.46	S
20	11時	1.64	5.0	277	0.46	
21	12時	1.47	4.8	283	0.45	S
22	13時	1.43	4.6	287	0.47	
23	14時	1.51	4.7	292	0.50	S
24	15時	1.46	4.6	291	0.56	
25	16時	1.48	4.5	307	0.62	S
26	17時	1.28	4.3	309	0.60	
27	18時	1.24	4.3	323	0.54	S
28	11月30日4時	1.99	9.0	173	0.29	WNW
29	5時	1.84	7.5	199	0.36	
30	6時	1.30	7.5	204	0.34	WNW

\* 1982年

はなく、異常波浪が予想される時のみこのタイマーをセットして実施した。

波高観測は、前述した200m沖とさらに護岸に近い20m沖とで、常時毎偶数正時約10分間観測が超音波式波高計によって行われている。ただし、波圧観測が実施されているときには、波圧観測と同時に波高観測も実施している。潮位については、本州四国連絡橋公団垂水観測所の潮位を護岸位置での潮位としている。風向きは、同観測所観測塔における80m層の偶数正時前10分間の平均値である。

表-2は今回解析の対象としたケースの一覧表である。

昭和57年8月27日の15ケース, 9月25日の12ケース, 11月30日の3ケースの計30ケースである。有義波高は1~2.28m, 有義波周期は4.3~9.1sの範囲で, 有義波高が大きいときの有義波周期は6秒程度である。波向きは, 南護岸にはほぼ直角となるSSWからSSEがほとんどである。

### 3. 観測結果

#### 3.1 波圧観測ケーソンに入射する波

図-6は周期6秒の規則波の屈折図である<sup>2)</sup>。波長に比して水深が深いため比較的屈折の影響は小さい。ただし, SSEの波向きのとくにわかるように, 平礎によって波向線が交差することもある。図中, 黒丸印で示したのが波圧観測ケーソンの位置, 白丸印が200m沖の波高計の位置である。波圧観測ケーソンに入射する波は, 波向きがSSEからSSWの範囲ならば平礎の影響はあまり受けず, 屈折の影響は小さい。入射角は法線に直角に入射する場合を0°にとり, SSEの波で約12°E, Sの波で8°W, SSEの波で20°Wとなる。波圧観測ケーソンに入射する波と200m沖の波高計位置での入射波と比べれば, 屈折による波高の違いは小さいと考えることができる。

図-7は, 合田の砕波帯内の波高算定図<sup>3)</sup>により, 南護岸での有義波高と1/250最大波高の変化を換算沖波波高

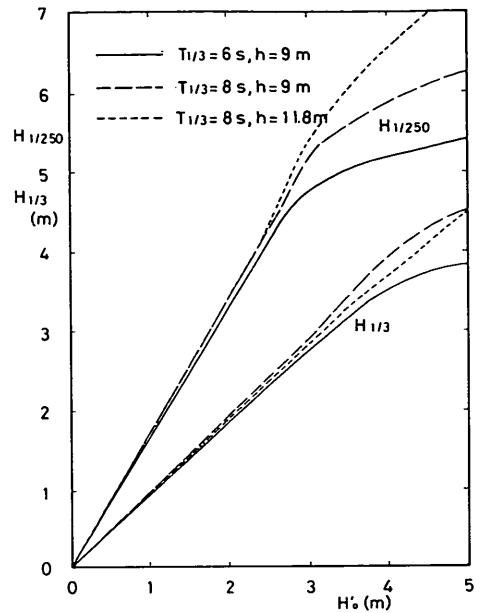


図-7 浅水砕波変形

$H_o'$ を横軸にとってプロットしたものである。この図から  $T_{1/3}=6s$  の場合  $H_o'$  が3m以下ならば, ほとんど砕波の影響を受けないことがわかる。また, 縦軸の  $H_{1/3}$  すなわち護岸位置での有義波高を基準に考えると,  $H_{1/3}$  が2.8m以下では砕波の影響がほとんどないことがわかる。

沖側200mおよび20mの波高計で測定される波高には護岸からの反射波も含まれる。 $T_{1/3}=6s$  の場合, この護岸からの反射率は40~50%程度であり<sup>6)</sup>, 低反射であるのでその影響は小さい。しかしながら, それでも護岸から1波長以内ではその影響は無視できない。沖側20mの波高計の位置では波長のほぼ1/3に近い距離であり, 反射波によって波高の場地的変動が大きい領域となる<sup>7)</sup>。沖側200mでは4波長以上はなれており, 波高は入射波高とほぼ同じ程度であり, やや大きいとしてもその差は小さいと考えられる。図-8は2つの波高計による測定有義波高の相関をみたものであり, 沖側20mの位置での測定有義波高の方が200mの位置での値より小さく90%程度となっている。ただし, ここにプロットしたデータは57年度の観測からSSE~Sの風向きで, 有義波高が30cm以上のものであり, 周期は3秒~6秒程度である。

図-9は200m沖の波高計による測定波高の頻度分布の例である。昭和57年8月27日18時(ケース9)の例である。波高はやや平均波高に近いものが多いが, ほぼレーリー分布をしている。図-10は200m沖で測定された全ケ

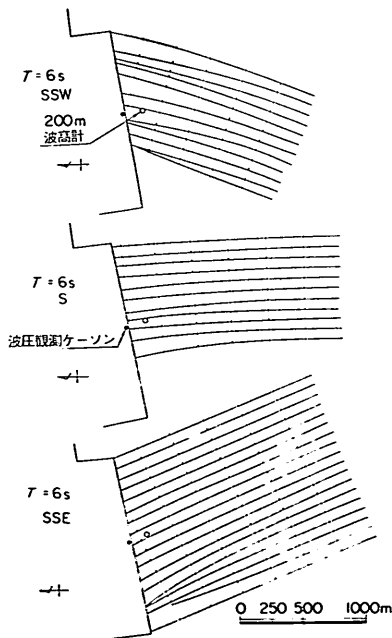


図-6 屈折図

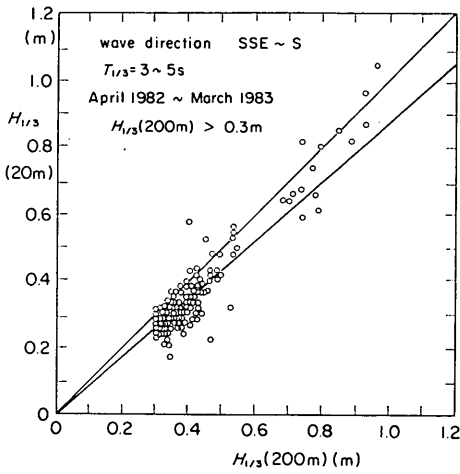


図-8 200m沖と20m沖の2つの波高計の測定波高の相関

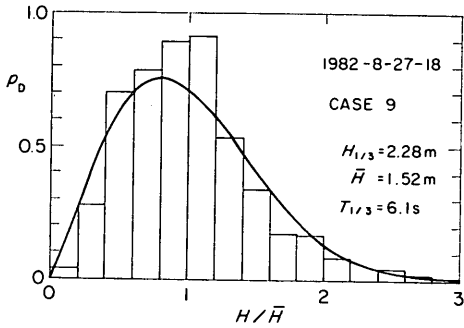


図-9 波高の頻度分布

ースの波について、有義波高と平均波高、1/10最大波高、最高波高の関係を調べたものである。レーリー分布から求められる  $\bar{H}/H_{1/3}=0.625$ ,  $H_{1/10}/H_{1/3}=1.27$ ,  $H_{max}/H_{1/3}=1.75$  (ただし,  $H_{max}$  は300波の波群に対する最高波高の期待値) の関係にはほぼ一致している。

図-11はケース9について200m沖で測定された波から、一波一波の波高と周期の関係をプロットしたものである。この図のように、有義波高以上の波高の波は、有義波周期に近い周期の波がほとんどである。

以上の検討により、200m沖で測定された波が護岸に入射していると考え、以後の波圧解析に用いることにした。その波高の分布をレーリー分布と考えて大差はないようである。また、一波一波の周期、特に大きい波高の

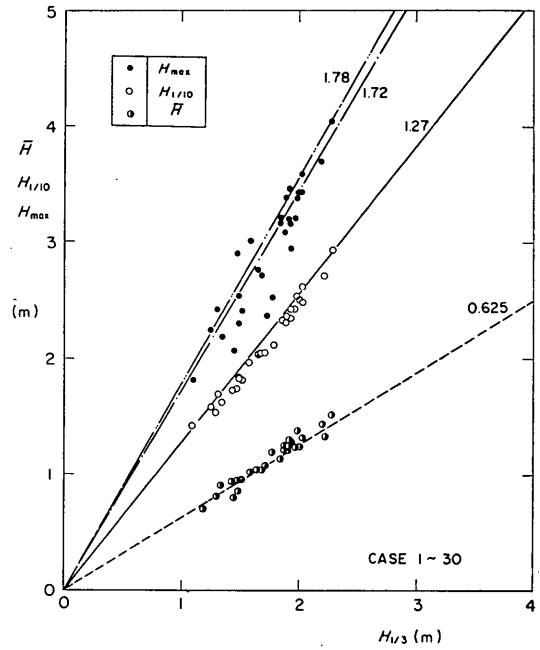


図-10 代表波高間の関係

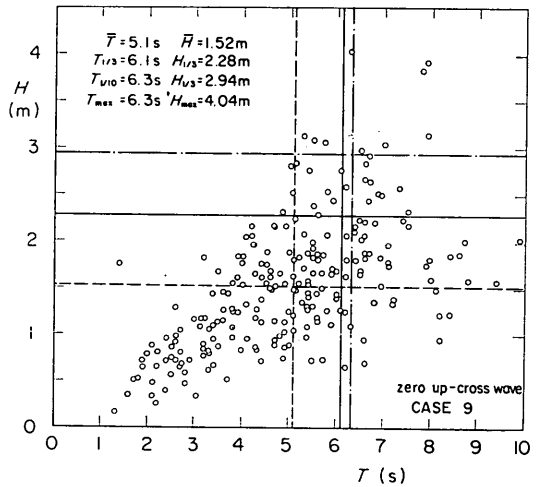


図-11 一波一波の波高と周期(ケース9)

周期は有義波周期に近いといえよう。

### 3.2 波圧観測結果

#### (1) 波圧記録とその解析方法

図-12はケース10の波圧記録の一部を示すものである。このとき、 $H_{1/3}=2.2\text{m}$ ,  $T_{1/3}=5.8\text{s}$ ,  $W.L.=0.84\text{m}$ であった。模型実験のときと同様、遊水室上床版下面(5

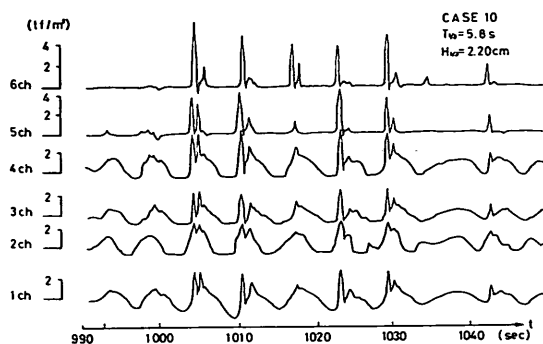


図-12 測定波圧波形の例

ch)には空気圧縮による圧力振動が顕著に認められ、同時に遊水室内にも、さらには縦スリット壁前面(2ch)にもその波圧が発生している。ただしその大きさは遊水室の上床版からはなれているほど小さい。図中の第3波目では、遊水室上床版下面(5ch)で $3.9\text{tf/m}^2$ であるが、遊水室後壁(4ch)で $4.2\text{tf/m}^2$ 、縦スリット壁後面(3ch)で $3.3\text{tf/m}^2$ 、縦スリット壁前面(2ch)で $3.2\text{tf/m}^2$ 、遊水室底面(1ch)で $2.1\text{tf/m}^2$ となっている。ただし、これらの波圧のピーク値のうち、1chから4chまでの波圧のピーク値は、通常の波圧に空気圧縮による圧力が加え合されていることに留意する必要がある。

空気圧縮力が働き、かつその値が大ききときには、一波一波の波圧のピーク値はその空気圧縮時の波圧のピーク値となり、各位置で同時にピーク値となる。しかしながら、空気圧縮力が働かないとき、あるいは働いても小さいときには、通常の波圧がピーク値となる時が一波一波の波圧のピーク値であり、必ずしも各位置で同時にピーク値となるわけではない。なお、6chの波圧は空気孔のない遊水室上床版下面での波圧であり、空気圧縮による圧力が作用しているが、必ずしも5chと同時に作用していない。これは波向きが必ずしも直角方向でないためであろう。

波圧記録を解析する際、以下のようにして波圧のゼロ線(静水時における圧力レベル)を決め、一波一波を定義した。すなわち、波の作用により空気中に出ることのある波圧計の場合(2ch~6ch)、潮位と波圧計の中心位置からゼロ線を決めた。また、常に水中にある波圧計(1ch)については、まず空気圧縮による圧力を取り除いた滑らかな波形を推定した。そして、ゼロ線を仮定し、その仮定したゼロ線に対して各波の波圧の+と-のピーク値を求め、それぞれの平均値の絶対値が等しくな

るようにゼロ線を決め直した。この1chの滑めらかにした波圧波形による一波一波の時間的な区切りを、すべての位置の波圧波形の区切りとして用いることにした。

図-13(1)はケース1~15までの一連のケースについて、遊水室底面における波圧の波数と波の波数を比較するものである。ただし、縦軸は波の平均周期 $\bar{T}$ と波圧の平均周期 $T_{\text{PRES}}$ の比で示し、横軸は観測した時間である。同図には各時間の潮位や有義波高、平均周期もプロットしておいた。波の波数に比べ波圧の波数は少なく、その比は0.6~0.8程度である。この値は図に示したように、時間的に特徴のある変化を示す。すなわち、12時ごろ急に低下し、その後次第に増加し、23時ごろピークとなっている。波の波数に比べ波圧の波数が少ないのは、遊水室が波の高周波成分をカットするように働いているためと考えられる<sup>8)</sup>。12時ごろ急に低下するのは、それまでのうねり性の長い周期の波に風波が加わったため、遊水室内ではその風波による短い周期の変動がカットされたようになったためであろう。23時ごろ波数の比が増大するのは、風波の発達により、比較的周期の帯のせまい波群となったからと思われる。図-13(2)はケース9の場合について、横軸に遊水室底面の波圧の一波一波の周期をとり、縦軸にその振幅 $H_{\text{PRES}}$ (負のピーク値から正のピーク値までの高さ)をとってプロットしたものである。た

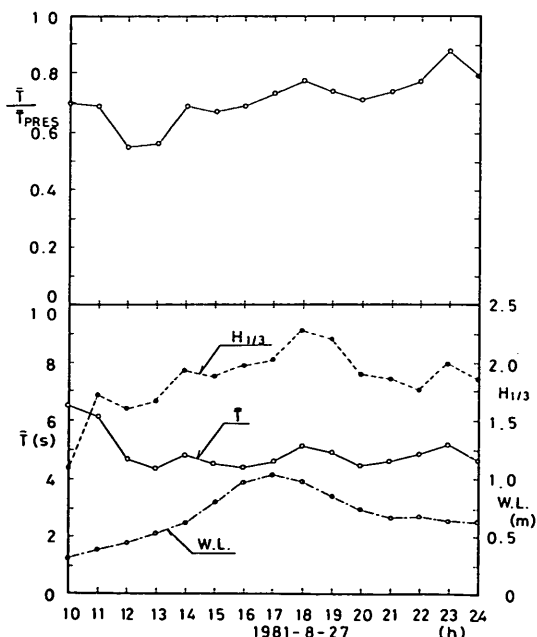


図-13(1) 波圧波数と波の波数の比

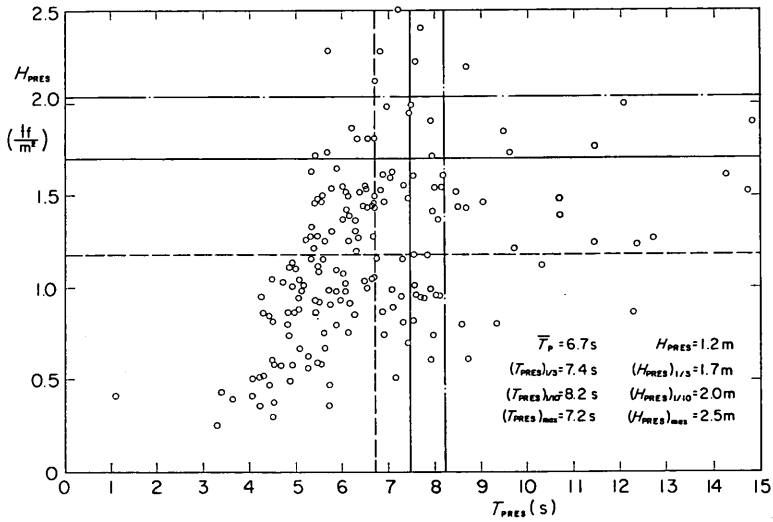


図-13(2) 一波一波の波圧の振幅と周期 (ケース 9)

だし空気圧縮による圧力を除いた波形に対するものである。この図と前掲図-11と比べるとやはり短い周期の波圧が非常に減少している。このため、平均周期が30%ほど、1/3最大周期が20%ほど長くなっている。

波圧の代表値として、波高と同様に最大波圧  $p_{max}$ 、1/10最大波圧  $p_{1/10}$ 、1/3最大波圧  $p_{1/3}$  を定義した。これらの代表波圧を求める際の波数は波圧記録でなく、表面

波の波数を用いた。これは図-13(2)で見られるように、波の波数と波圧の波数の差に相当する数の波圧は実質的に波圧が0と見なされることを考慮したものである。

(2) 波圧ピーク値と波高の関係

図-14(1)~(6)は、最大波圧、1/10最大波圧、および1/3最大波圧を有義波高に対してプロットしたものである。横軸の下方には参考のために、レーリー分布の関係であ

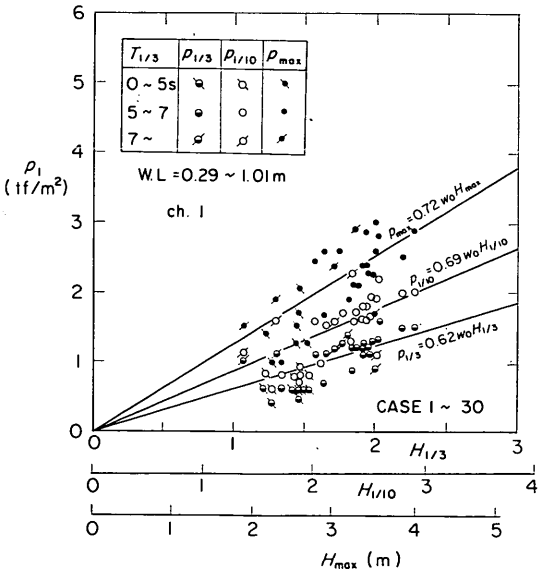


図-14(1) 波高と波圧のピーク値 (1ch)

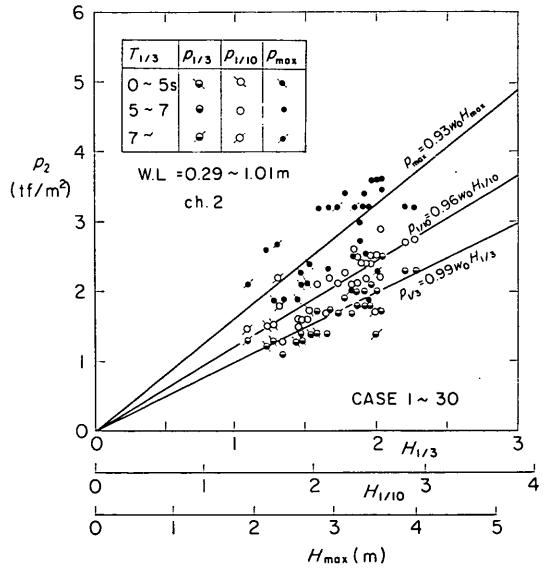


図-14(2) 波高と波圧のピーク値 (2ch)

直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力 (第2報)

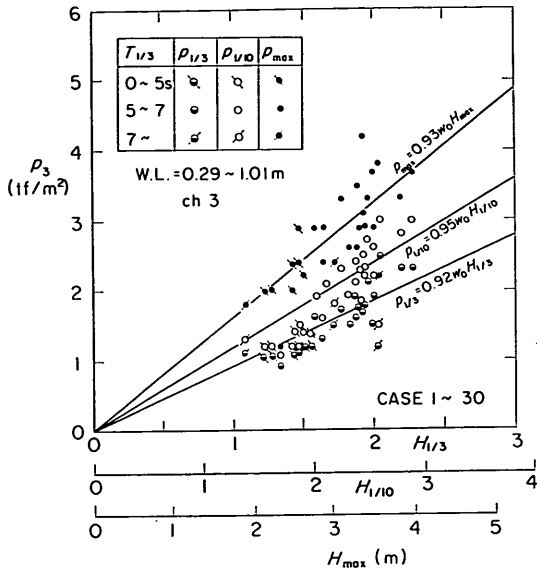


図-14(3) 波高と波圧のピーク値 (3 ch)

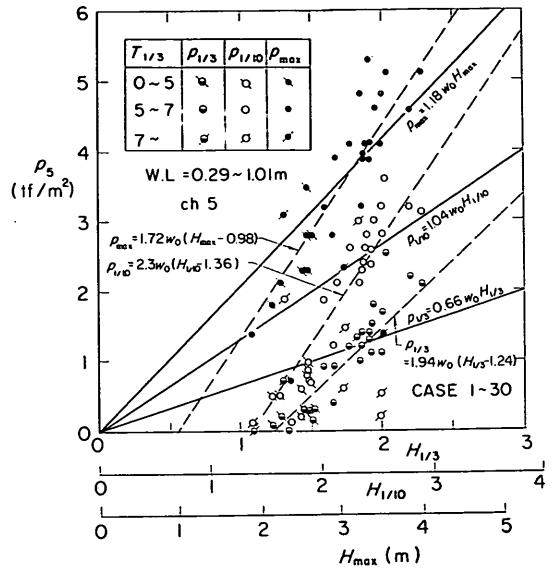


図-14(5) 波高と波圧のピーク値 (5 ch)

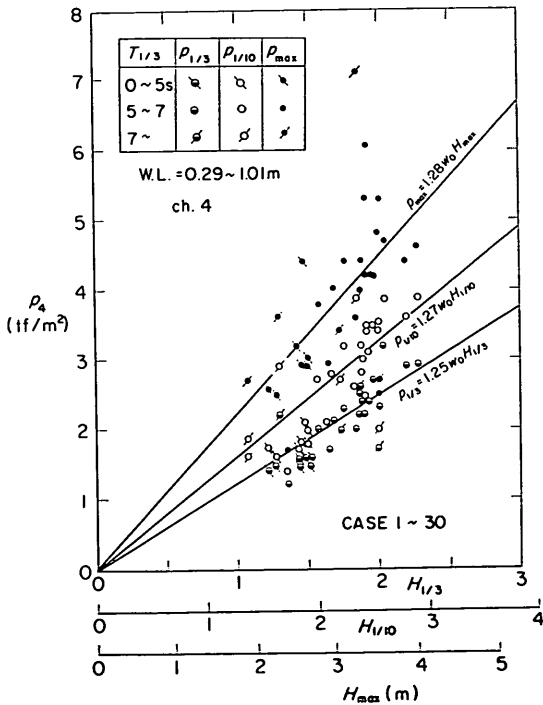


図-14(4) 波高と波圧のピーク値 (4 ch)

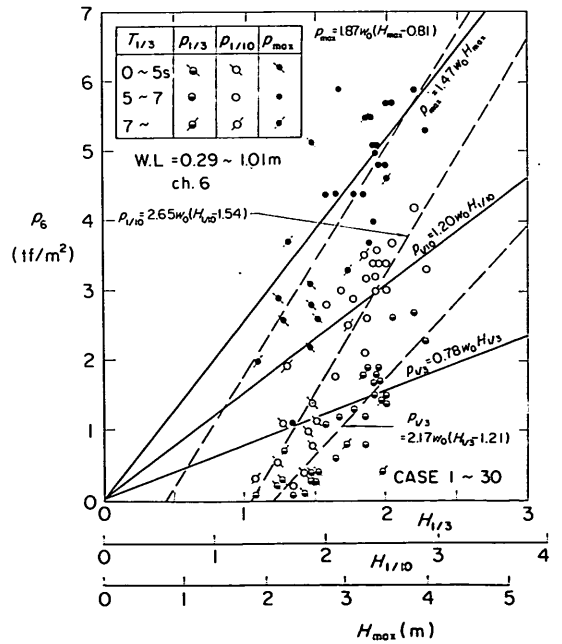


図-14(6) 波高と波圧のピーク値 (6 ch)

表-3 波圧と波高の関係

## (1) 平均値

ch	1 ch	2 ch	3 ch	4 ch	5 ch	6 ch
位置	遊水室底面	スリット壁前面	スリット壁後面	遊水室後壁	遊水室天上	遊水室天上 (空気孔なし)
$p_{1/3}/w_0H_{1/3}$	0.62	0.99	0.92	1.25	0.66	0.78
$p_{1/10}/w_0H_{1/10}$	0.69	0.96	0.95	1.27	1.04	1.20
$p_{max}/w_0H_{max}$	0.72	0.93	0.93	1.28	1.18	1.47

(2) 直線回帰値  $p = \alpha w_0(H - \beta)$ 

ch	5 ch		6 ch	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
$p_{1/3}$	1.93	1.24	2.17	1.21
$p_{1/10}$	2.30	1.36	2.65	1.54
$p_{max}$	1.72	0.98	1.87	0.81

る  $H_{1/10} = 1.27H_{1/3}$ , および,  $H_{max} = 1.75H_{1/3}$  を用いて換算した  $H_{1/10}$  と  $H_{max}$  の座標軸も併示している。各データは潮位 W.L. 有義波周期, あるいは波向きによっても変化するが, ここでは有義波周期のみを識別できるようにした。

全体を通じて, 周期が短いものほど波圧がやや小さいようである。そこで, 有義波周期が 5 ~ 7 秒の 18 ケースの平均的な波高と波圧の関係を調べた。たとえば, (1) の遊水室底面においては, 図中に直線で示した  $p_{1/3} = 0.62 w_0 H_{1/3}$ ,  $p_{1/10} = 0.69 w_0 H_{1/10}$ ,  $p_{max} = 0.72 w_0 H_{max}$  の関係 (波圧係数) が求められる。表-3(1) に各波圧位置での波圧係数を示した。ただし, 遊水室, 上床版下面には波高が小さいときには圧力が作用しない。したがって, 波高と波圧の関係を  $p_1 = \alpha w_0(H - \beta)$  で表したときの ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) の値を同様に表-3(2) に示している。この  $\beta$  は圧力が作用し始める平均的な波高に相当する。たとえば, 5 ch では波高が 1.3m 前後から空気が圧縮され始めると考えてよいであろう。

遊水室底面ではすでに述べたように波圧係数はあまり大きくない値であったが,  $p_{1/10}$ ,  $p_{max}$  と対象とする波高が大きいほど波圧係数はやや大きくなる。これは波高が大きいほど空気圧縮による圧力の影響が大きくなるからである。縦スリットの前面では波圧係数はやや大きく,  $p_{1/3}/w_0H_{1/3} = 0.99$ , 後面では  $p_{1/3}/w_0H_{1/3} = 0.92$  であり, 波圧係数の値は  $p_{1/10}$ ,  $p_{max}$  に対しても大きくは変わらない。これは, これらの位置では空気圧縮によらない波圧

も比較的大きいため, 空気圧縮力が作用しないか, あるいは作用してもその値が小さいときにも, 波圧係数がやや大きいからである。遊水室後壁での波圧係数は比較的大きく  $p_{1/3}/w_0H_{1/3} = 1.25$  であり,  $p_{1/10}$ ,  $p_{max}$  に対してもほぼ同一の値である。ここにはスリット壁で乱された波が作用し, 比較的大きな波圧となるからと思われる。遊水室上床版下面では  $p = \alpha w_0(H - \beta)$  のような波高と波圧の関係にあるため,  $p_{1/3}/w_0H_{1/3} = 0.66$ ,  $p_{1/10}/w_0H_{1/10} = 1.04$ ,  $p_{max}/w_0H_{max} = 1.18$  となる。ただし, 後での検討によって明らかにされるが, この遊水室上床版下面での波圧は実際には  $p = \alpha w_0(H - \beta)$  のように波高の増加に対して直線的に増加するのではない。取得された範囲のデータに対して近似的にこの関係をあてはめてみただけであることに留意すべきである。

なお, 6 ch の空気孔が閉じられた遊水室上床版下面の波圧は, 空気孔がある場合に比べて大きくなっていることがわかるが, 両者の比較等については(4)で述べる。

## (3) 各位置における波圧のピークの比較

前項では波圧のピーク値と波高の関係をみるとともに, 各位置でのピーク値の大きさを比較した。しかしこれは平均的な関係での比較である。図-15(1)~(4) はケース 9 の場合について, 各位置での波圧のピーク値を遊水室上床版下面での波圧と一波一波比較するものである。たとえば(1)は遊水室底面との比較である。遊水室上床版下面での波圧が小さいときには, 通常の波圧によるピーク値が卓越するために遊水室底面での波圧の方が大きい。遊水室上床版下面での波圧が 0 のときについてはプロットしていないが, 全体の傾向から遊水室上床版下面に圧力が作用し始めるときの遊水室底面での波圧  $p_s$  を概略求めると  $p_s = 0.7 \text{ tf/m}^2$  程度である。もし, このときの波高を前掲表-3(2)の  $\beta$  から 1.3m と考えれば  $p_s/w_0H = 0.5$  程度となる。一方, 遊水室上床版下面での波圧が大きい場合は, 遊水室底面でも空気圧縮による圧力が作用したときにピーク値となる。遊水室底面でのピーク値は遊水室上床版下面でのピーク値より小さく, その比

直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力 (第2報)

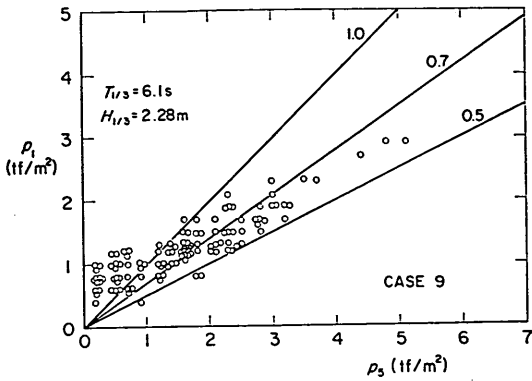


図-15(1) 各位置での波圧のピーク値の比較 (1 ch)

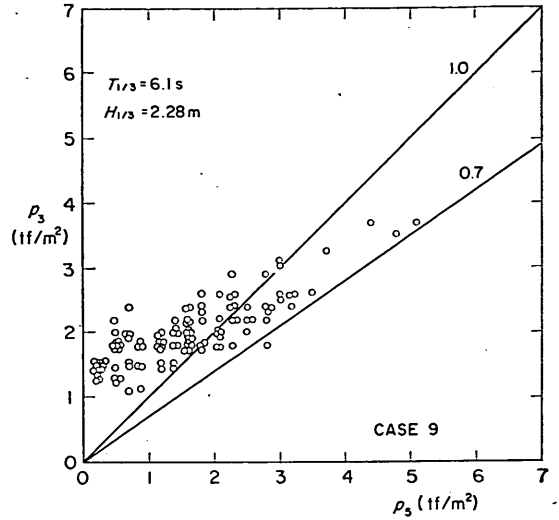


図-15(3) 各位置での波圧のピーク値の比較 (3 ch)

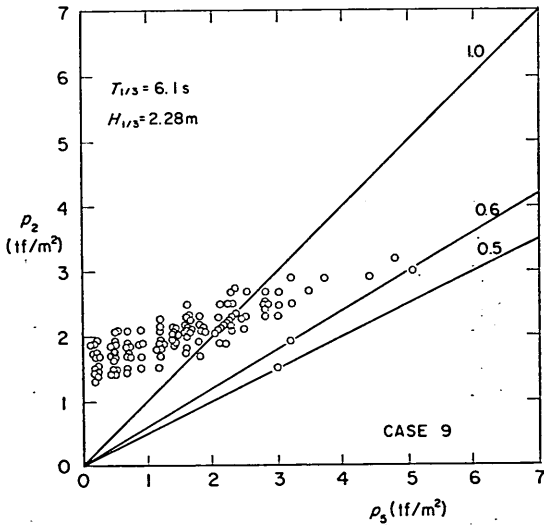


図-15(2) 各位置での波圧のピーク値の比較 (2 ch)

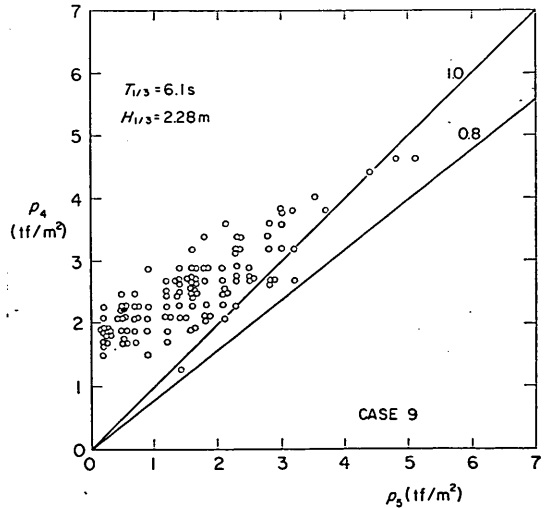


図-15(4) 各位置での波圧のピーク値の比較 (4 ch)

$\alpha_a$  は 0.6 程度であった。

(1)と同様の検討を(2), (3), (4)について行い,  $p_s/w_0H$  および,  $\alpha_a$  を求めて表-4 に示した。縦スリット壁前面では  $p_s/w_0H=1.0$ ,  $\alpha_a=0.6$ , 後面では  $p_s/w_0H=1.0$ ,  $\alpha_a=0.7$ , 遊水室後壁では  $p_s/w_0H=1.3$ ,  $\alpha_a=0.9$  であった。ただし,  $p_s/w_0H$  を遊水室に上床版のない場合の波圧係数と考えると, ややその波圧係数の値は大きいようにも思われる。 $p_s/w_0H$  の計算に用いた  $H=1.3m$  の値は前掲表-3(2)のを考慮して用いた値であるが, 実際には空気圧縮力が作用し始める波高は  $1.3m$  より大きいとも考えられる。

図-16(1)(2)は図-15と同様な比較を全ケースの  $p_{max}$  と

表-4  $\alpha_a$  と  $p_s/w_0H$

	1 ch	2 ch	3 ch	4 ch
位 置	遊水室底面	スリット壁前面	スリット壁後面	遊水室後壁
$\alpha_a$	0.6	0.6	0.7	0.9
$p_s/w_0H$ ( $H=1.3m$ )	0.5	1.0	1.0	1.3



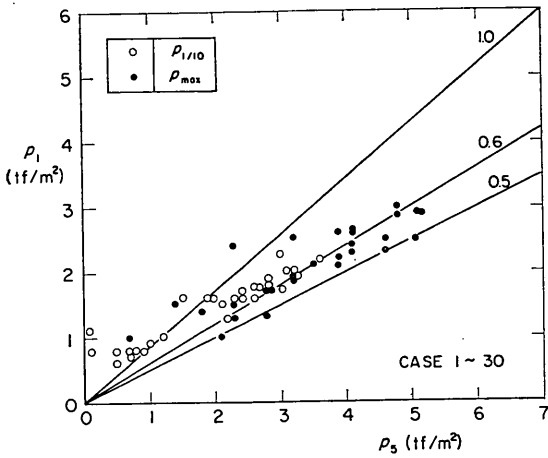


図-16(1) 各位置での波圧のピーク値の比較 (1ch)

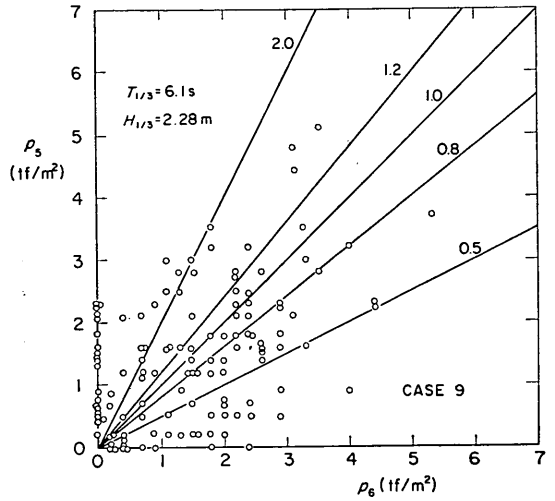


図-17 空気孔の効果 (一波一波の比較)

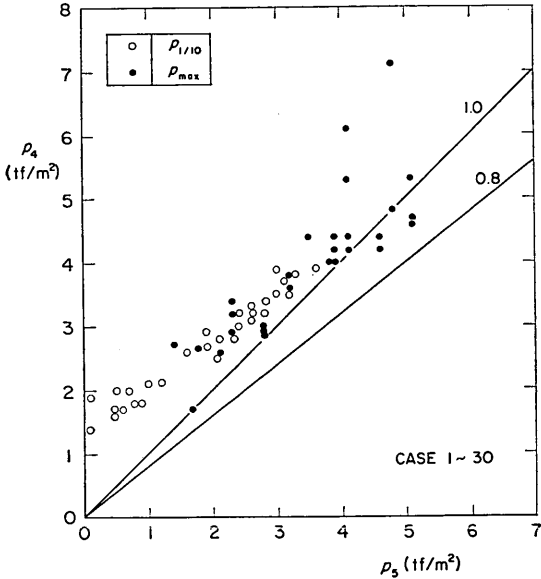


図-16(2) 各位置での波圧のピーク値の比較 (4ch)

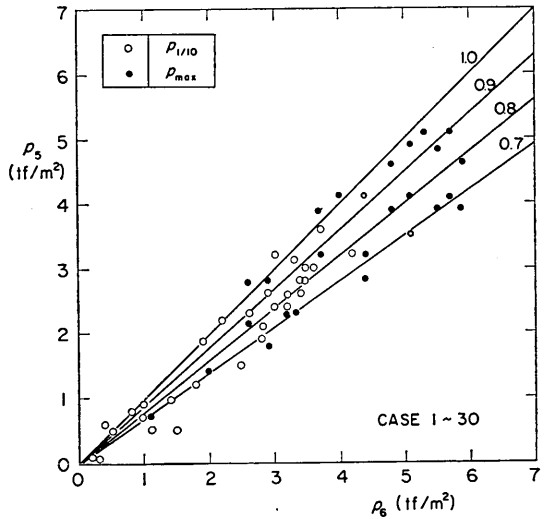


図-18 空気孔の効果 (代表波圧による比較)

$p_{1/10}$ とを用いて行ったものであり,(1)は遊水室底面,(2)は遊水室後壁の比較である。図-15(1)および(4)とそれぞれ比べると、全ケースの  $p_{max}$  や  $p_{1/10}$  とケース9の一波一波の  $p$  とはほぼ同じ傾向を示していることがわかる。

(4) 空気孔の効果

図-17はケース9の場合の遊水室上床版下面(5ch)の波圧のピーク値を、空気孔が閉じられた遊水室上床版下面(6ch)の波圧のピーク値と一波一波比較するものである。二つの波圧計の波圧波形を比べると、隣り合っ

たケーソンにあるため、位相差がやや認められるものの両者の一波一波がほぼ対応しているようである。ただし、図-17のように一波ごとの波圧のピーク値相互の相関関係はあまり高いものではない。

このように一波一波を比較しても、空気孔の効果は明らかにはならない。しかしながら、前掲表-3において同じ波高では平均的に空気孔のある場合の方が波圧のピーク値は小さいことがわかっている。図-18はすべてのケースの  $p_{max}$  と  $p_{1/10}$  を用い、空気孔の効果をみたもの

である。このようにすると、空気孔が有る場合には、無い場合より波圧のピーク値は小さくなって、0.7~1.0倍の範囲にあり、平均的には0.85倍程度であることがわかる。

4. 空気圧縮モデルによる現地波圧観測値の検討

4.1 模型実験結果と現地波圧観測値の比較

(1) 空気圧縮モデルと空気の縮尺効果

模型実験結果は空気圧縮モデルによって空気の縮尺効果を補正して、現地波圧データと比較することができる。この空気圧縮モデルについて、すでに報告しているが、ここで簡単に説明する。

空気圧縮力は図-19のように、波面で閉じ込められた厚さ  $D$  の空気層が波面の上昇速度  $u_0$  で圧縮されて発生する。このとき空気を圧縮するのに関係するのは遊水室内の厚さ  $k$  の水塊としている。また、遊水室の上床版にはその面積に対して  $\epsilon$  の面積比の空気孔があるとする。

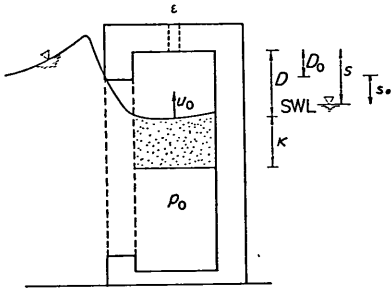


図-19 空気の圧縮モデル

この  $\epsilon$  を空隙率とよぶ。このように仮定したとき、空気の圧縮圧力の時間変化は、水塊の運動方程式を差分化して求めることができ、特に、 $\epsilon=0$  の場合の圧力のピーク値  $p$  は  $w_0 k u_0^2 / g p_0 D$  の関数として、図-20のように表せる。ただし、 $w_0$  は水の単位体積重量、 $p_0$  は大気圧、 $g$  は重力加速度である。 $w_0 k u_0^2 / g p_0 D$  は無次元量であり、これを Bagnold 数  $B_g$  と呼んでいる。圧力のピーク値は  $\epsilon$  が大きくなるにつれて小さくなる。

図-20の横軸の  $B_g$  数は現地量と模型量ではその模型縮尺倍の関係にある。前報の模型実験では、模型縮尺(1/16)が1/16であり、現地量の  $B_g$  数は模型量の16倍となる。しかしながら、空気圧縮力のピーク値  $p$  は、図からわかるように  $B_g$  数に対して線形には変化せず、この場合必ずしも16倍とはならない。たとえば、実験により  $p=116$  gf/cm<sup>2</sup>の空気圧縮力の値が得られたとする。模型縮尺が1/16とするとフルードの相似則を適用すれば、 $p=1856$  gf/cm<sup>2</sup>の圧力が発生することになる。しかしながら、模型量の  $B_g$  数は0.0081であるのに対し現地量の  $B_g$  数はその16倍の0.130となり、これに対応する圧力は、 $p=568$ gf/cm<sup>2</sup>となる。フルード則を用いて求めた現地量と、空気圧縮モデルを用いて求めた現地量の比入はこのとき3.26であり、模型実験から得た圧力を16倍した値をこの補正係数  $\lambda$  で除すことにより、適切な現地量が得られることになる。ただし、これは  $\epsilon=0$  とした場合である。

図-21は図-20の一部を拡大したものであり、通常の模型実験で現われる  $B_g=0\sim 0.05$  の範囲について、圧力のピーク値を示すものである。また同図には、模型縮尺1/16が1/8, 1/16, 1/32の場合についての補正係数  $\lambda$  の値も示している。

なお、 $B_g$  数も見積もる際に必要となる空気層を圧縮する水塊の厚さ  $k$  は、スリット壁前面から遊水室の後壁ま

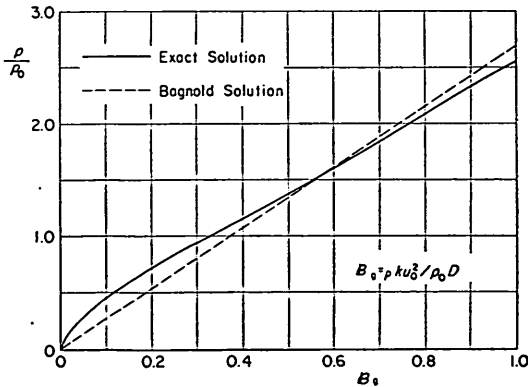


図-20 空気の圧縮圧力と Bagnold 数

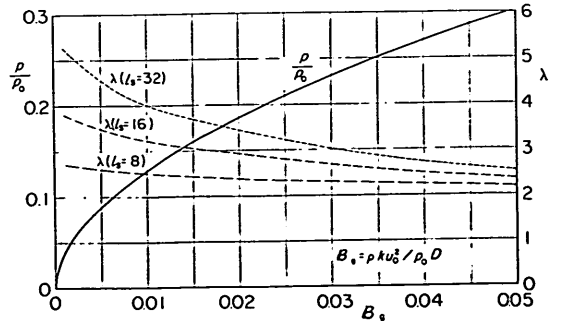


図-21 空気の圧縮圧力と Bagnold 数および補正係数

での距離を  $l$  として、

$$k = \frac{\pi}{4} l \quad (1)$$

とすれば良いと思われる。図-3に示した縦スリットケーソンの場合  $k=3.93m$  である。

(2) 模型実験結果と現地波圧観測値の比較

図-22は、すべてのケースにおける空気孔がない遊水室上床版下面(6ch)の  $p_{1/10}$  と  $p_{max}$  を示すものであり、横軸は  $H_{1/10}(=1.27H_{1/3})$  や  $H_{max}(=1.75H_{1/3})$  に相当する波高である。図中の実線は、現地観測時の平均的な潮位に近い  $W.L.=0.6m$  の場合の模型実験結果による圧力のピーク値を単に16倍して現地量に換算したものである。点線は、前掲図-21を用いてそれぞれの模型実験での圧力のピーク値から  $B_0$  数を介して求めた  $\lambda$  によって補正した現地量である。また、破線は設計に用いた  $\lambda$  の値、すなわち  $\lambda=2.5$  によって補正した現地量である。明らかに、フルード則だけによって模型量を16倍した現地量では大きすぎることがわかる。観測値は破線から点線の間にばらついているが、 $\lambda=2.5$  と一定値を用いて補正した値(破線)に近いようである。図-21の縦軸は空気漏れがない場合の空気圧縮力のピーク値であり、点線の計算に用いた  $\lambda$  は、実際には空気漏れによって値が小さくなってしまっている空気圧縮力の実験値を用いて求めたものである。空気漏れがなければ実験値は大きくなり、その値を用いれば  $\lambda$  は小さくなる。すなわ

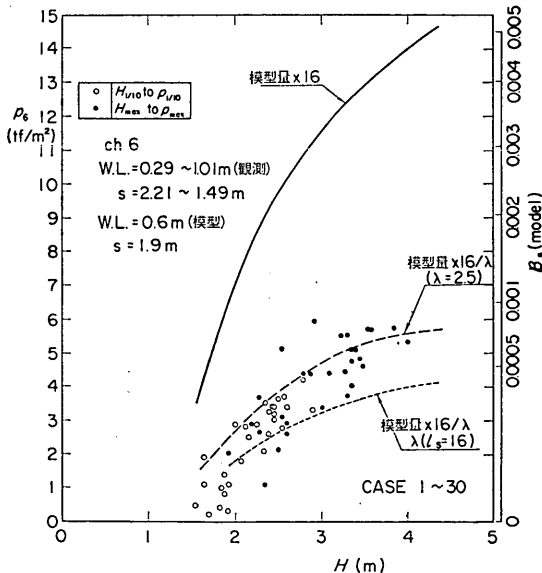


図-22 模型実験結果と現地波圧観測値の比較

ち、点線は破線に近づくと考えられる。

なお、模型実験の波の周期は現地量で8sであり、観測値の平均的な周期よりやや長い。ただし、次節以後に述べるモデルで検討すると、この周期の違いによる圧縮圧力の違いはそれほど大きくないようである。観測値は潮位や波向が必ずしも模型実験と同じ条件でのものでないことにも留意する必要がある。

4.2 流入量方式による空気層の厚さと波面上昇速度の算定

(1) 流入量方式

津波防波堤の津波減殺効果を算定する方法の一つとして、伊藤らが用いた流入量方式<sup>9)</sup>と呼ばれるものがある。この方式を縦スリットケーソンに準用して、閉じ込められた空気層の厚さとその時の波面上昇速度を算定することを考える。

図-23に示すように遊水室およびスリット壁の一部を取り出し、この面積  $A$  の部分に外側からスリット壁の幅  $B$  の開口部を通じて水が流入するとする。この前面の水位  $\eta$  を

$$\eta = a \sin \sigma t \quad (2)$$

とし、スリット内の流速  $u$  は内側での水位を  $y$  として、

$$u = C \sqrt{2g|\eta - y|} \quad (3)$$

となる。ここに  $a$  は前面での水位の半振幅、 $\sigma$  は角周波数、 $C$  は損失係数である。この損失係数は、開口部の入口における流入損失係数  $f_e$ 、開口部内での摩擦損失係数を  $f'$ 、出口における流出損失係数を  $f_o$  とすると、

$$C = \sqrt{\frac{1}{f_e + f' \frac{l'}{R} + f_o}}$$

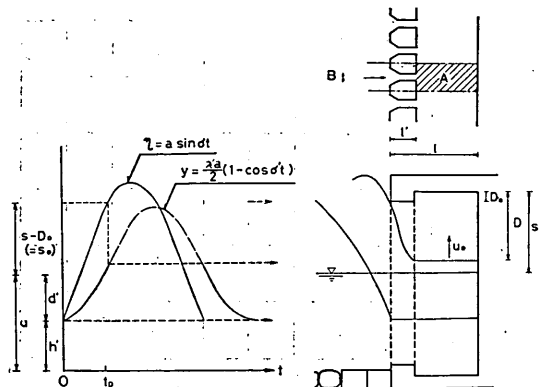


図-23 流入量方式による  $u_0$  と  $D$  の算定

であらわされる。ここに、 $l'$  は開口部の長さで  $R$  は径深である。一般に  $f_0=1$  であり、隅切りをした場合の  $f_0$  を 0.25 と仮定<sup>10)</sup>、 $l'/R$  が小さいとすれば、 $C$  はほぼ 0.9 となる。計算にはこの値を用いることにした。

内側の水位は流入した量に応じて上昇するので、

$$A \frac{dy}{dt} = uBh' \left(1 + \frac{\eta}{h'}\right) \quad (4)$$

となる。したがって流入時には、

$$A \frac{dy}{dt} = CBh' \sqrt{2g} \left(1 + \frac{\eta}{h'}\right) \sqrt{\eta - y} \quad (5)$$

となる。この微分方程式を解けば前面および内側での水位や上昇速度が時間  $t$  の関数として表される。したがって、前面での水位が図に示したスリットの間口部の上端に達したとき ( $t=t_D$ ) の内側の水位により閉じ込められた空気層の厚さ  $D$  が求まり、その水位の上昇速度より波面の上昇速度  $u_0$  が求められる。式(5)は近似的に、

$$y = \frac{\lambda'a}{2} (1 - \cos \sigma't) \quad (6)$$

と置いて、次式から  $\lambda'$  および  $\sigma'$  を求めることによって解くことができる。

$$\lambda' = \sin \frac{\sigma'}{\sigma} \pi \quad (7)$$

$$K_0 = \frac{\sigma A}{2\pi CBh'} \sqrt{\frac{a}{g}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma'}{\sigma} \pi K_0 \lambda' = \left(1 + \frac{a}{h'} \sin \frac{\sigma'}{2\sigma} \pi\right) \times \sqrt{\sin \frac{\sigma'}{2\sigma} \pi - \frac{\lambda'}{2}} \quad (9)$$

ここに、 $\lambda'$  は水位の減衰率、 $\sigma'$  は内側の水位の角周波数である。ただし、遊水室内の水位が静水面より  $d'$  だけ下がったとし、このときの水深  $h'$  から流入が開始すると考える。この  $d'$  の値については次項で検討する。また、 $a$  の値はスリット壁前面での最高水位が静水面上  $H$  まで達すると考える。すなわち、

$$h' = d - d', \quad a = H + d' \quad (10)$$

とした。また、 $\sigma$  についてはスリット壁前面の水位が静水面下  $d'$  の位置から最高水位に達する時間の 4 倍を周期と考えて求めることができる。ただし、 $d'$  が大きいときには、水位変動の時間波形が静水面をゼロ線とした正弦波形と違ったものとなり、特に水位変動の時間微分である波面の上昇速度が小さくなってしまふ。したがって、ここでは簡単に、入射波の周期を  $T$  として、 $\sigma = 2\pi/T$  とした。

結局、 $u_0$  および  $D$  は次式で表される。

$$u_0 = \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=t_D} = \frac{\sigma' \lambda' a}{2} \sin \sigma' t_D \quad (11)$$

$$D = s - y_{t=t_D} = s - \frac{\lambda' a}{2} (1 - \cos \sigma' t_D) \quad (12)$$

$$t_D = \frac{1}{\sigma} \sin^{-1} \frac{s - D_0 + d'}{a} \quad (13)$$

## (2) 模型実験結果との比較

ここでは、著者らがすでに報告している模型実験結果を用いて、流入量方式による  $u_0$  や  $D$  の算定法の妥当性を検討する。図-24は、 $T=2$  s、ケーソン前面の水深  $d=37.5$  cm、静水面から遊水室天井までの距離  $s=11.9$  cm、静水面からスリット壁の開口部の上端までの距離  $s_0=8.8$  m ( $D_0=3.1$  cm)、スリット壁厚を含めた遊水室の幅  $l=31.3$  cm の条件での計算結果を示すものである。この条件に対し波高を変えて  $D$ 、 $u_0$ 、および前掲図-21を用いて空気圧縮力  $p$  を計算した。ただし、遊水室内の初期の水位は、静水面からの距離  $d'$  を  $0 \sim H$  に変えて計算を行った。図からわかるように、 $d'$  を  $0$  から  $H$  まで変えても空気圧縮力はそれほど変わらない。しかも、 $d'$  が  $0.25H \sim H$  までの範囲では空気圧縮力はほぼ計算値の上限値であり、さらに、この範囲では  $u_0$  や  $D$  の変化も小さい。いかえれば、 $0.25H \sim H$  の範囲であれば、 $d'$  の値によって計算結果の差は小さい事になる。計算値の  $u_0$  や  $D$  が最も模型実験で測定された値に近いのは、 $d'$  を  $H/2$  としたときであり、以後  $d'$  は  $H/2$  とする。ただし、遊水室の水深が  $d'$  より小さいときには、 $d'$  をこの水深にとることにする。

図-25(1)(2)(3)は、 $d'=H/2$  として  $u_0$ 、 $D$  および  $p$  の値を流入量方式より計算し、模型実験による測定値と比較した。比較的よく一致しているが、(1)の  $D$  については波

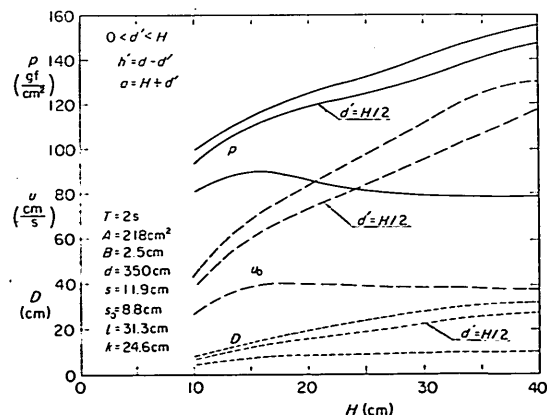


図-24 流入量方式による  $u_0$ 、 $D$  および  $p$  の計算値

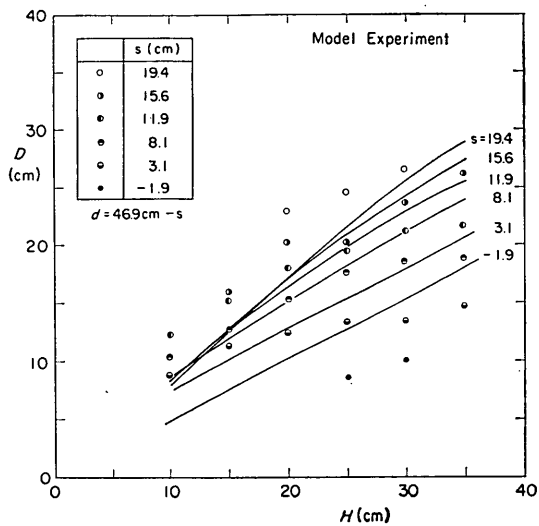


図-25(1) 模型実験との比較 (空気層の深さ  $D$ )

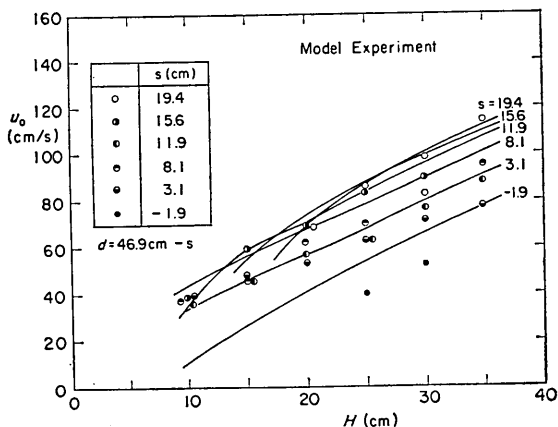


図-25(2) 模型実験との比較 (波面上昇速度  $u_0$ )

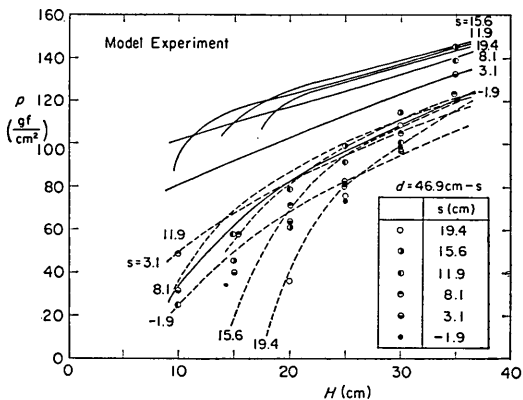


図-25(3) 模型実験との比較 (空気圧縮圧力)

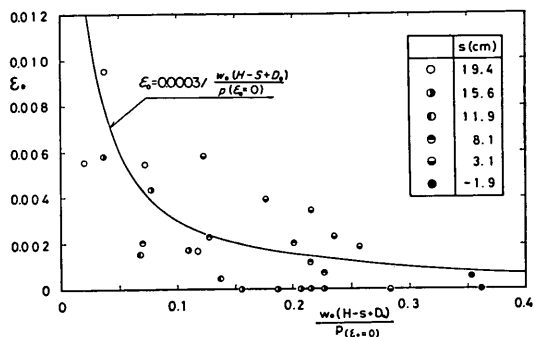


図-26 等価空隙率

高が小さいときにやや計算値の方が大きくなる傾向となっている。(3)の空気圧縮力は全般的に計算値の方が大きく、特に波高が小さいときに計算値の方が大きい。これは実際にはスリット壁の開口部上端から、空気圧縮時に空気が漏れていることによると思われる。

この空気の漏れる量を上床版にあけた空気孔の空隙率に換算し、これを  $\epsilon_0$  で表し、 $\epsilon_0$  を以下の式で算定することにした。

$$\epsilon_0 = 0.0003 / \frac{w_0(H-s+D_0)}{p_{t=0}} \quad (14)$$

図-26は横軸を  $w_0(H-s+D_0)/p_{t=0}$  にとって測定された  $\epsilon_0$  を示すものである。空気漏れは、空気圧縮の圧力の大きさと、空気圧縮時のスリット壁の開口部上端での水圧との比によって影響されると考えられる。 $p_{t=0}$  は空気漏れがないときの空気圧縮圧力であり、横軸はこうした効果を示すパラメータである。 $\epsilon_0$  の算定式はばらつきがあるものの、 $\epsilon_0$  の測定値の平均的な傾向を示している。

前掲図-25(3)に示した破線は、この  $\epsilon_0$  を考慮したときの空気圧縮力を示すもので、 $\epsilon_0$  を考慮しないときの計算値である実線よりも測定値に近くなっている。

### 4.3 計算値と現地波圧観測値の比較

ケーソンの諸元、および水深や波の条件が決まれば、流入量方式により  $u_0$  や  $D$  が求められ、式(14)より  $\epsilon_0$  が、式(1)より  $k$  が計算され、空気の圧縮モデルによって空気圧縮による圧力波形が求められる。図-27(1)(2)は、遊水室上床版の下面に働く揚圧力の現地波圧観測値を計算値と比較するものである。(1)は空気孔のない場合で、 $\epsilon = \epsilon_0$  として計算した計算値を実線で示している。比較のため  $\epsilon = 0$  の計算値も点線で示した。ただし、計算に用いた波の周期は 6 s であり、潮位は W.L. = 0.29, 0.6, 1.01 m の 3 種類である。実線の計算値と観測値を比べると全

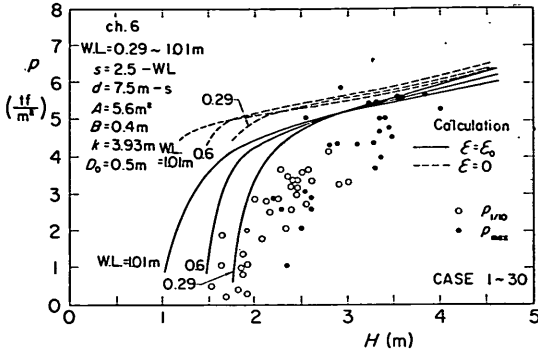


図-27(1) 計算値と現地波圧データの比較 (6ch)

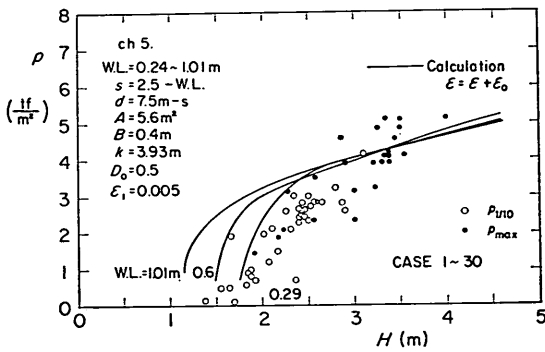


図-27(2) 計算値と現地波圧データの比較 (5ch)

体的にやや計算値が大きい、波高が大きいほど計算値は観測値に近づくようである。図-27(2)は空気孔のある場合である。実際の空気孔の空隙率は  $\epsilon_1=0.005$  であり、 $\epsilon=\epsilon_0+\epsilon_1$  として計算している。波高が小さいときにやや計算値が観測値よりやや大きい、全体的にはよく一致している。

(1)の場合にも(2)の場合にも計算値が観測値を上まわるのは、スリット壁からの空気漏れの効果、すなわち  $\epsilon_0$  の値が実際には式(13)で与えられるより大きいからであろう。それは、(2)の空気孔がある場合で波高の大きいときには  $\epsilon_1$  に比べ  $\epsilon_0$  が小さく  $\epsilon_0$  の影響が無視でき、計算値と観測値がよく一致することからも推測できる。 $\epsilon_0$  の値は多くの要因が関係しており、今後さらに検討が必要である。しかしながら、 $\epsilon_0$  が小さいときや、空気孔のある場合には、 $\epsilon_0$  の値にかかわらず計算値は観測値に比較的良好一致する。

図-28は、空気圧縮力の作用時間  $\tau$  を計算時間と比べたものである。全ケースの最大波圧と1/10最大波圧に対応する作用時間  $\tau$  を示している。観測値の作用時間  $\tau$  は図中の図のように波圧が作用し始めるところからゼロ線

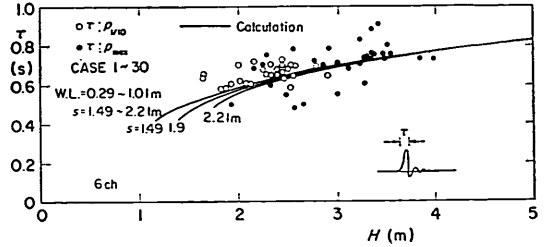


図-28 空気圧縮力の作用時間

にもどるまでの時間を読み取っている。空気圧縮モデルによる圧力波形は観測された圧力波形に比べて立ち上がり急である。このため、図のように観測値が計算値より大きくなっていると思われる。しかしながら、その差は大きくない。

なお、前掲図-27の計算値は周期6秒のものしか示していないが、周期の変化に対しては空気圧縮力の計算値はそれほど大きな変化を示さない。たとえば周期が8秒となるとやや波面上昇速度は小さくなるが、空気層の厚さも小さくなり、空気圧縮力は周期が6秒のときと大差がない。また、空気圧縮力の計算値は、波高がある程度以上では潮位によってあまり変化しない。しかしながら、ケーソン前面の水深  $d$  が深くなれば、空気圧縮力は大きくなる。また、ここでは損失係数  $C$  を0.9にとっているが、この値をさらに大きくすれば、空気圧縮力は大きくなる。 $d$  や  $C$  が大きくなると、遊水室内への流入量が増加し、波面上昇速度が大きくなり、空気層の厚さが小さくなるからである。

## 5. まとめ

遊水室に上床版のある直立消波ケーソンに作用する現地の波圧データを解析し、以下の結論を得た。

- 1) 現地でも模型と同様に空気圧縮による揚圧力が発生し、この圧力は上床版のみならず遊水室内全体にも同時に発生する。
- 2) この空気圧縮力はすでに提案している空気の圧縮モデルで説明できる。また、空気の縮尺効果を補正した模型実験結果は、取得された現地波圧の値にほぼ一致する。
- 3) 空隙率0.5%の空気孔はやはり空気圧縮力を低減させる。その低減率は平均的に15%程度であった。
- 4) 閉じ込められた空気層の厚さ  $D$  やその時の波面上昇速度  $u_0$  を算定する方法を、流入量方式を準用して求めた。この算定法による  $u_0$  や  $D$  の算定値は模型実験結果に比較的良好一致する。
- 5) 流入量方式による  $u_0$  や  $D$  により空気圧縮モデルを

用いて計算した波圧の値は、取得された現地波圧観測値によく一致した。

以上のように、現地波圧データは、模型実験によって得られた結論を実証していると思われる。また、新たに提案した圧縮される空気層の厚さや波面上昇速度の算定法と、すでに提案している空気圧縮モデルとにより、波の条件とケーソンの諸元を与えることによって空気圧縮力が一応算定できることになった。しかし、たとえば遊水室内の初期水位の位置 $d'$ やスリット壁での損失係数 $C$ など、さらに検討が必要な点もあり、今後機会をみて研究を進めてゆきたい。

なお、今回の報告は昭和55年3月に報告したものの続報であり、前回および今回を通じて宮永清一次長をはじめとする神戸市開発局の方々から多大の協力を得た。特に今回は開発局臨海開発事務所の田村健一郎・平石佐義・馬場直樹ら諸氏の御努力によって得られた貴重な現地波圧観測データを提供していただいた。また報告のとりまとめにあたっては合田良実水工部長より多くの助言をいただいている。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。(1984年3月31日受付)

#### 参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・高橋重雄・村永努：直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力、一空気圧縮モデルによる検討一、港湾技術研究所報告，第19巻1号，1980.3，pp.3～31.
- 2) 神戸市開発局：新垂水処理場用地造成埋立に伴う波浪変形予測業務報告書，昭和57年3月，121p.
- 3) 神戸市開発局：垂水海岸における波浪記録整理業務委託報告書，昭和58年5月，189p.
- 4) 運輸省港湾局，港湾技術研究所：沿岸波浪観測，波浪観測台帳（神戸港），昭和57年度および58年度
- 5) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第14巻3号，1975，pp.59～106.
- 6) 細川恭史・三好英一・菊地治：直立消波護岸の水利特性および曝気能実験，港湾技研資料，No.312，1979.3，23p.
- 7) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治：不規則波実験における入反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248，1976，24p.
- 8) 谷本勝利・高橋重雄・鈴木諭司：鹿島港北海浜直立消波護岸の波圧観測データ解析，港湾技研資料，No.350，1980.6，30p.
- 9) 運輸省港湾局調査設計室：長周期波に対する防波堤の効果に関する計算，昭和37年3月，47p.
- 10) 土木学会：水理公式集，発電編，昭和47年，pp.241～362.

#### 主 要 記 号 表

$A$ ：スリット壁背後の面積（流入量方式の計算）  
 $a$ ：スリット壁前面の水位の半振幅（流入量方式の計算）

$B$ ：スリット壁開口部の幅（流入量方式の計算）  
 $C$ ：損失係数（流入量方式）  
 $D$ ：閉じ込められた空気層の厚さ  
 $D_0$ ：縦スリット壁上部にある不透過壁の上床版下面から測った張り出し深さ  
 $d$ ：縦スリットケーソンの前面の水深  
 $d'$ ：遊水室内における静水面から測った水位の低下量（流入量方式の計算）  
 $g$ ：重力加速度  
 $H$ ：波高  
 $H_{1/3}$ ：有義波高  
 $H_{1/10}$ ：1/10最大波高  
 $H_{max}$ ：最大波高  
 $H_{PRES}$ ：遊水室底面における波圧の正のピーク値の負のピーク値から測った値  
 $k$ ：上床版の揚圧力に影響を及ぼす水塊の厚さ（ $=\pi l/4$ ）  
 $l$ ：縦スリット壁を含めた遊水室の幅  
 $l'$ ：縦スリット壁の厚さ  
 $p$ ：波圧，通常は波圧のピーク値，大気圧を0とする。  
 $p_0$ ：大気圧  $1033\text{gf/cm}^2 (=1012340\text{g}\cdot\text{cm/s}^2/\text{cm}^2)$   
 $p_{1/3}$ ：1/3最大波圧  
 $p_{1/10}$ ：1/10最大波圧  
 $p_{max}$ ：最大波圧  
 $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ ：各測点での波圧  
 $s$ ：静水面と上床版下面（遊水室天上）とのクリアランス  
 $s_0$ ：静水面とスリット壁開口部上端までのクリアランス（ $s_0 = s - D_0$ ）  
 $T$ ：波の周期  
 $\bar{T}$ ：波の平均周期  
 $T_{1/3}$ ：有義波周期  
 $T_{1/10}$ ：1/10最大波周期  
 $T_{max}$ ：最大波周期  
 $T_{PRES}$ ：波圧の平均周期  
 $t$ ：時間  
 $u$ ：スリット壁開口部における流速（流入量方式の計算）  
 $u_0$ ：空気を閉じ込めたときの波面の上昇速度  
 $w_0$ ：水の単位体積重量（ $\rho g$ ）  
 $y$ ：遊水室内での水位（流入量方式の計算）  
 $W.L.$ ：潮位  
 $\varepsilon$ ：空気圧縮モデルにおいて計算に用いる空隙率  
 $\varepsilon_1$ ：上床版の空気孔による空げき率  
 $\varepsilon_0$ ：スリット壁からの空気漏れの効果を表わす等価空げき率  
 $\alpha_a$ ：空気圧縮力が卓越した場合の各位置における波圧のピーク値と遊水室上床版下面でのピーク値との比  
 $\eta$ ：スリット壁前面の水位（流入量方式の計算）  
 $\lambda$ ：空気の縮尺効果を補正する係数  
 $\lambda'$ ：遊水室内の水位の低減率（流入量方式の計算）  
 $\sigma$ ：スリット壁前面の水位の角周波数（ $''$ ）  
 $\sigma'$ ：遊水室内の水位の角周波数（ $''$ ）

付表 代表波圧一覽表 (tf/m<sup>2</sup>)

CASE	1 ch			2 ch			3 ch			4 ch			5 ch			6 ch							
	max	1/10	1/3	max	1/10	1/3	max	1/10	1/3	max	1/10	1/3	max	1/10	1/3	max	1/10	1/3	max	1/10	1/3	mean	
	1	1.5	1.1	1.0	0.5	0.7	1.3	1.8	1.3	1.1	0.6	2.7	1.9	1.6	0.9	1.4	0.1	0	0.3	0.1	2.0	0.3	0.1
2	2.4	1.6	1.2	0.6	0.9	2.1	2.4	1.8	1.5	0.8	3.4	2.6	2.1	1.1	2.3	1.5	0.6	2.5	1.0	3.3	2.5	1.0	0.4
3	2.5	1.6	1.1	0.4	0.7	2.1	2.9	1.9	1.5	0.6	3.8	2.7	2.0	0.8	3.2	1.9	0.7	2.8	1.1	4.4	2.8	1.1	0.4
4	2.6	1.5	1.1	0.4	0.7	2.2	2.9	2.1	1.6	0.6	4.0	2.8	2.1	0.8	3.9	2.1	0.9	2.8	1.2	5.9	2.8	1.2	0.4
5	2.4	1.6	1.2	0.6	1.0	2.4	3.1	2.3	1.8	0.9	4.2	3.1	2.4	1.2	3.9	2.6	1.5	3.2	1.7	4.8	3.2	1.7	0.6
6	2.1	1.7	1.2	0.5	1.0	2.5	3.5	2.4	1.9	0.9	4.4	3.2	2.5	1.2	3.9	2.4	1.4	3.2	1.9	5.5	3.2	1.9	0.7
7	2.3	1.7	1.2	0.6	0.9	2.5	3.3	2.7	2.1	0.9	4.2	3.5	2.7	1.2	4.6	3.0	1.8	3.6	1.9	4.8	3.6	1.9	0.7
8	2.8	2.2	1.6	0.7	1.1	3.0	3.4	3.1	2.5	1.0	4.7	3.9	3.2	1.4	5.1	3.6	2.5	3.7	2.6	5.7	3.7	2.6	0.9
9	2.9	2.0	1.5	0.8	1.2	2.7	3.7	2.8	2.3	1.2	4.6	3.7	2.9	1.5	5.1	3.1	2.1	3.3	2.3	5.3	3.3	2.3	0.8
10	2.5	2.0	1.5	0.8	1.2	2.7	3.3	2.8	2.3	1.2	4.4	3.6	2.9	1.5	4.6	3.2	2.2	3.7	2.6	5.9	4.2	2.7	1.0
11	2.3	1.6	1.1	0.5	1.0	2.2	2.9	2.2	1.7	0.9	4.2	3.0	2.2	1.2	4.1	2.4	1.1	3.0	1.5	4.0	3.0	1.5	0.5
12	2.1	1.6	1.2	0.6	1.0	2.1	2.6	2.1	1.6	0.9	4.0	2.8	2.2	1.2	3.9	2.3	1.2	2.6	1.2	3.7	2.6	1.2	0.4
13	2.7	1.8	1.3	0.7	1.1	3.2	3.3	2.3	1.7	1.0	4.4	3.2	2.3	1.3	4.1	2.6	1.2	2.9	1.3	4.4	2.9	1.3	0.4
14	3.1	1.9	1.2	0.6	1.2	3.6	3.7	2.6	1.9	1.1	4.8	3.5	2.5	1.4	4.8	3.2	1.7	3.2	1.7	4.8	3.0	1.5	0.5
15	1.9	1.3	0.9	0.5	1.7	2.5	2.6	1.9	1.5	0.9	3.6	2.6	2.0	1.2	3.2	2.1	0.8	2.1	0.8	4.4	2.1	0.8	0.3
16	1.0	0.8	0.6	0.3	1.1	1.9	1.1	1.0	0.9	0.4	1.7	1.4	1.2	0.6	0.7	0.1	0	0.2	0.1	1.1	0.2	0.1	0
17	2.6	1.9	1.3	0.7	1.7	3.6	2.9	2.2	1.5	0.8	5.3	3.4	2.3	1.2	4.1	2.8	1.1	3.4	1.4	5.7	3.4	1.4	0.5
18	2.4	1.8	1.2	0.6	1.8	3.4	2.9	2.3	1.7	0.8	6.1	3.3	2.4	1.1	4.1	2.6	1.4	3.4	1.8	5.1	3.4	1.8	0.6
19	2.9	1.8	1.2	0.6	1.8	3.4	4.2	2.5	1.8	0.9	5.3	3.4	2.4	1.2	5.1	2.8	1.3	3.4	1.7	5.1	3.4	1.7	0.6
20	1.7	1.0	0.7	0.3	1.7	2.3	2.4	1.6	1.3	0.6	2.9	2.1	1.7	0.8	2.8	1.2	0.4	1.8	0.6	4.4	1.8	0.6	0.2
21	2.1	0.9	0.6	0.3	1.6	2.3	2.9	1.5	1.2	0.6	4.4	2.1	1.6	0.8	3.5	1.0	0.3	1.4	0.4	5.1	1.4	0.4	0.1
22	1.3	0.7	0.5	0.2	1.5	1.9	2.0	1.2	1.1	0.6	3.2	1.7	1.5	0.7	2.3	0.6	0.2	0.4	0.1	2.2	0.4	0.1	0
23	1.3	0.8	0.6	0.3	1.7	2.4	2.2	1.4	1.2	0.7	3.0	2.0	1.6	0.9	2.8	0.7	0.2	1.0	0.4	2.2	1.0	0.4	0.1
24	1.5	0.8	0.6	0.3	1.6	2.1	2.4	1.4	1.2	0.6	2.9	1.8	1.5	0.8	2.3	0.9	0.3	1.1	0.3	3.1	1.0	0.3	0.1
25	1.7	0.8	0.6	0.3	1.6	2.1	2.4	1.4	1.2	0.6	2.9	1.8	1.5	0.8	2.8	0.8	0.3	1.1	0.3	2.9	0.8	0.3	0.1
26	1.0	0.6	0.4	0.2	1.5	1.9	2.0	1.2	1.1	0.5	2.5	1.6	1.5	0.7	2.1	0.5	0.2	1.1	0.3	2.6	1.1	0.3	0.1
27	1.4	0.8	0.6	0.3	1.5	2.6	2.0	1.2	1.1	0.6	2.6	1.7	1.4	0.8	1.8	0.5	0.1	0.5	0.2	2.9	0.5	0.2	0.1
28	1.7	1.1	0.9	0.5	1.7	2.3	2.2	1.5	1.2	0.7	2.7	2.0	1.7	1.0	1.4	0.5	0.2	1.5	0.4	4.6	1.5	0.4	0.1
29	2.9	2.3	1.4	0.7	3.2	2.6	3.5	2.8	1.9	1.0	7.1	3.9	2.6	1.4	4.8	3.0	1.2	3.5	1.8	5.5	3.5	1.8	0.6
30	1.9	1.6	1.1	0.6	2.5	2.2	2.9	2.3	1.7	0.9	3.6	2.9	2.2	1.2	3.2	1.9	0.7	3.7	1.9	3.7	1.9	0.7	0.3