

遊水室に上床版のある直立消波ケーソンの現地波圧観測

高橋重雄*・谷本勝利**・宮永清一***

1. まえがき

直立消波ケーソンの遊水室の頂部は、消波機能の面からは開放のままにしておく方がよいけれども、実際には構造上あるいは利用上の理由から蓋を設けることも多い。この蓋を遊水室の上床版と呼んでいる。こうした上床版には潮位や波の条件によっては空気圧縮による力が働くことがある。著者らは既にこの空気圧縮力の発生機構やその大きさの算定法について検討し、その妥当性を模型実験により検証している¹⁾。

神戸市では、昭和54～57年度に垂水処理場埋立地南護岸を、縦スリットケーソンを用いて建設した。この埋立護岸の上は市民に開放する予定であり、このため遊水室には上床版が設けられている。ケーソンの設計において最も重要であったのは空気圧縮による揚圧力であり、港湾技術研究所で先に行った縮尺模型実験に基づいて設計が行われた。すなわち、空気縮尺効果により実験で得られた揚圧力の値をフルードの相似則を適用して現地量に換算したのでは過大になると考え、補正係数 λ ($=2.5$) で除した値を設計に用いている。また、上床版にはその面積の0.5%に相当する面積の空気孔を設け、揚圧力の低減を図った。

この様に新しい考え方が取り入れられているため、神戸市ではこのケーソンに作用する波圧を実際に測定することにし、昭和56年度から現地観測が続けられている。本報告はその観測結果ならびに若干の検討結果を示すものである。

2. 現地護岸および観測の概要

(1) 現地護岸

図1に長さ1.5kmの海岸線を埋め立てて造成された処理場用地とその護岸を示す。南護岸が縦スリットケーソン堤であり、波圧観測を実施したのはこの南護岸中央のNo.75とNo.76のケーソンである。護岸位置での水深は平均的に9mであり、前方に平礎と呼ばれる

-5m~-6mの浅瀬がある。

図2に護岸の標準断面図を示している。上床版には直径15cmの空気孔が設けられており、その総開口面積は上床版の面積の0.5%にあたる。上床版の設計に用いられた揚圧力の値は $2.0w_0H_{\max}$ ($H_{\max}=8.3\text{m}$) である。ここに、 $H_{\max}$ は設計最高波高、 w_0 は水の単位体積重量である。この値は実験結果フルードの相似則により現地量に換算した値を、 $\lambda=2.5$ で除したものである。ただし、やや安全側の値をとっており、空気孔による圧力低減効果も考慮していない。なお、この護岸に入射する波は、通常の時化時に有義波周期 $T_{1/3}$ が4s、有義波

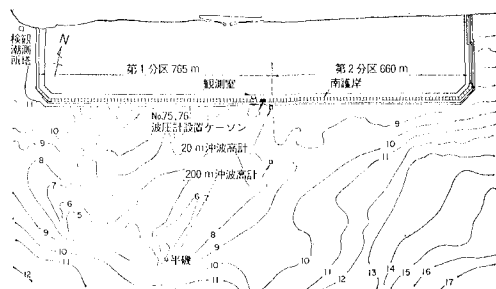


図1 新垂水処理場用地と南護岸

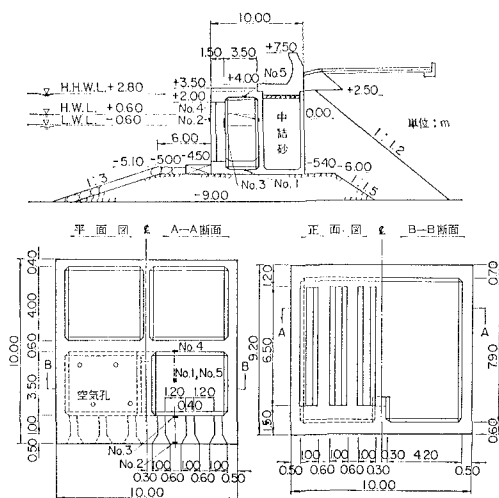


図2 南護岸

* 正会員 M.S. 運輸省港湾技術研究所水工部波エネルギー研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長

*** 神戸市開発局次長

高 $H_{1/3}$ が 1.2m, 極度の暴風雨時には $T_{1/3}=8$ s, $H_{1/3}=4.6$ m と推定されている. 波向はこの護岸にほぼ直角的な SSW~SSE と考えられる. 潮位は L.W.L.=-0.6m T.P., H.W.L.=+0.6m, H.H.W.L.=+2.8m である.

(2) 観測の概要

直径 12.8cm, 許容負荷 2kgf/cm^2 (196kPa). 固有振動数 460 Hz の波圧計 5 台をケーソン No. 75 の前掲図-2 に示す位置にとりつけた. すなわち, 遊水室底面 (1ch), 縦スリット壁前面の静水面 (2ch), 縦スリット壁後面 (3ch), 遊水室後壁 (4ch), そして上床版下面 (5ch) である. さらに, ケーソン No. 76 の上床版下面に 1 台 (6ch) 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. 測定は, 異常波浪が予想される時にタイマーをセットしておいてスタートさせ, 毎正時の 10 分前から 20 分間ずつの計測が行われる. 波高観測は, 前掲図-1 に示しているように, 波圧観測ケーソンの前方 200m と 20m とで常時偶数正時に行っている. ただし, 波圧観測実施時には同時に観測している. 潮位については, 本州四国連絡橋公団垂水観測所の記録による. 風向は同観測所観測塔における 80m 層の値である.

今回解析の対象としたのは, 昭和 57 年 8 月 27 日の 15 ケース (台風 13 号), 9 月 25 日の 12 ケース (台風 19 号) および 11 月 3 日の 3 ケース (低気圧) である. 8 月 27 日の最大時の $H_{1/3}$ は 2.28m, $T_{1/3}=6.1$ s, 風向は S であり, 9 月 25 日の最大時は $H_{1/3}=2.02$ m, $T_{1/3}=6.0$ s, 風向は S であった. 全ケースについてみると, $H_{1/3}$ は 1~2.28m, $T_{1/3}$ は 4.3~9.1s, 風向きは護岸にほぼ直角的な SSW~SSE がほとんどであり, 潮位は 0.29~1.01m であった. なお, 波圧観測ケーソンに入射する波は前面の海底地形により屈折や浅水変形を受ける. しかしながら, 屈折計算等によると波向きが SSW~SSE の場合には入射波は 200m 沖と大差なく, しかも砕波の影響がほとんどない. したがって, ケーソンに入射する波の有義波高は 200m 沖と同じとし, 波高分布はレーリー分布と考えた. 以後の解析では $H_{1/10}=1.27H_{1/3}$ および $H_{\max}=1.75H_{1/3}$ (300 波の波群の $H_{\max}$ の期待値) の関係より, ケーソン位置での $H_{1/10}$, $H_{\max}$ を定義する.

3. 波圧観測結果

(1) 波圧波形

図-3 は $H_{1/3}=2.2$ m, $T_{1/3}=5.8$ s, W.L.=0.84m の場合の波圧記録の一部を示すものである. 模型実験のときと同様, 上床版下面 (5ch) には空気圧縮による圧力

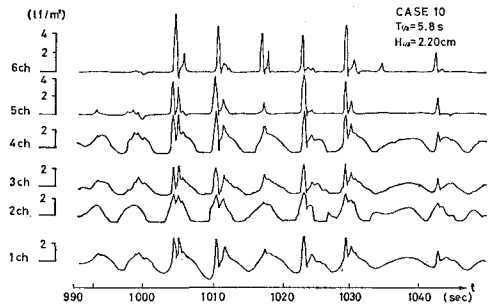


図-3 測定波圧波形の例

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面にもその圧力が現われている. ただし, その大きさは, 上床版からはなれるほど小さい.

波圧記録を解析する際, 以下のようにして波圧波形のゼロ線を決め, 一波一波を定義した. すなわち, 波の作用により空気中に露出することのある波圧計については, 潮位と波圧計の中心位置からゼロ線を決定した. 常に水中にある波圧計については, 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, 各波の波圧の + と - のピーク値の平均値の絶対値が等しくなるようにゼロ線を決めた. 波圧の一波一波は, 遊水室底面の滑らかにした波形のゼロアップクロス点によって定義し, これを全体に適用した.

このようにして得られる波圧の波数は, 200m 沖の波高計での波数に比して少なく, 0.6~0.8 倍である. これは, 遊水室が波の高周波成分をカットするように働くためと考えられる. 一波一波の波圧から, 有義波高や 1/10 最大波高に対応する 1/3 最大波圧 $p_{1/3}$ や 1/10 最大波圧 $p_{1/10}$ を定義するとき, 波の波数と波圧の波数の差に相当する分の波圧はその値が 0 と考え, 波圧の数を波数に一致させている.

(2) 波圧ピーク値と波高の関係

図-4 は, 横軸に波高をとり, 遊水室底面における最大波圧, 1/10 最大波圧, 1/3 最大波圧をプロットしたものである. 横軸には $H_{1/10}$ および $H_{\max}$ も示しておいた. $T_{1/3}=5\sim7$ s の 18 ケースの平均的な波高と波圧の関係を調べると, 図中で直線で示した関係となる. すなわち, $p_{1/3}/w_0H_{1/3}=0.62$, $p_{1/10}/w_0H_{1/10}=0.69$, $p_{\max}/w_0H_{\max}=0.72$ である. このように波圧係数はあまり大きくないが, $H_{1/10}$, $H_{\max}$ と対象とする波高が大きいかほど値が大きくなる傾向にある. これは波高が大きいかほど空気圧縮による圧力の影響が大きくなることを表わしている.

同様にしてその他の各測点での波圧係数を求めてみた. 縦スリット壁の前後面ではやや大きく, 前面で $p_{1/3}/w_0H_{1/3}=0.99$, 後面で $p_{1/3}/w_0H_{1/3}=0.92$ である. $p_{1/10}$, $p_{\max}$ に対しても波圧係数はそれほど変らない.

これらの位置では空気圧縮によらない波圧も大きいため、空気圧縮による圧力が小さいときでも波圧係数がやや大きいからと思われる。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} に対してもほぼ同じ値である。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っていると思われる。上床版下面には波高がある程度以上にならないければ圧力は作用しない。したがって、ここでは $p_{1/3}/w_0H_{1/3}=0.66$ 、 $p_{1/10}/w_0H_{1/10}=1.04$ 、 $p_{max}/w_0H_{max}=1.18$ と波高によって次第に大きくなる。データの傾向からみると、上床版には波高が平均的に1.3m程度から上床版に空気圧縮が作用し始めているようである。

(3) 各位置における波圧ピーク値の比較

図-5 はケース9の $T_{1/3}=6.1$ s、 $H_{1/3}=2.28$ m の例について、上床版下面(5ch)と遊水室底面(1ch)の一波一波の波圧を比較したものである。上床版下面での波圧が小さいときには、遊水室底面では通常の波圧によるピーク値が卓越するため、遊水室底面での波圧の方が大

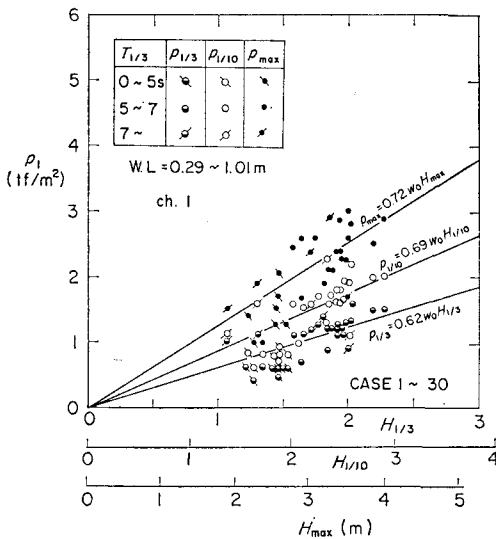


図-4 波高と波圧ピーク値

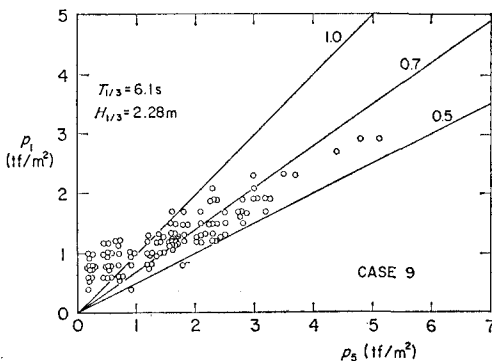


図-5 1ch と 5ch の波圧ピーク値の比較

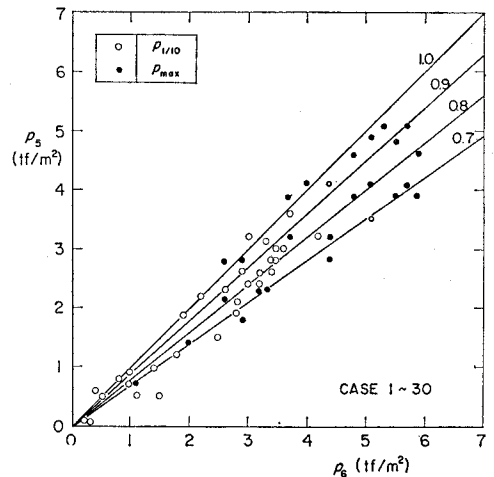


図-6 空気孔の効果

きい。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、全体の傾向からみると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圧力 p_s は約 0.7 tf/m^2 である。このときの波高を 1.3 m とすれば、 p_s/w_0H は約 0.5 となる。一方、上床版下面での波圧が大きい場合には、空気圧縮による圧力が作用した時に遊水室底面の圧力もピーク値となる。しかし、遊水室底面でのピーク値は上床版下面でのピーク値より小さく、その比 α_a は約 0.6 である。

同様な比較を他の測点についても行い、 α_a の値を求めてみると、スリット壁前面で 0.6 、後面で 0.7 、遊水室後壁で 0.9 となり、上床版に近いほど 1.0 に近づく傾向にある。

図-6 は空気孔の効果を調べたもので、横軸に空気孔の無い上床版下面の代表波圧 (6ch)、縦軸に空気孔のある上床版下面の代表波圧 (5ch) をとっている。やはり、空気孔によって圧力は小さくなっており、空気孔が無い場合のほぼ $0.7 \sim 1.0$ 倍、平均的に 0.85 倍程度である。

4. 空気圧縮モデルによる現地波圧観測値の検討

(1) 模型実験結果と現地波圧観測値の比較

空気圧縮圧力は後掲 図-9 のように波面で閉じ込められた厚さ D の空気層が、波面によって上昇速度 u_0 で圧縮されて発生する。このとき遊水室内の厚さ k の水塊が空気を圧縮するのに関係すると考える。もし、スリット壁開口部からの空気もれがないならば、圧力 p は p_0 を大気圧として無次元量 $w_0 k u_0^2 / g p_0 D$ の関数として、図-7 のように一義的に求められる。この無次元量を B_g 数 (Bognold 数) と呼んでいる。

先に行った模型実験では縮尺 ($1/l_s$) が $1/16$ であった。したがって実験で得られた空気圧縮圧力を 16 倍し、補

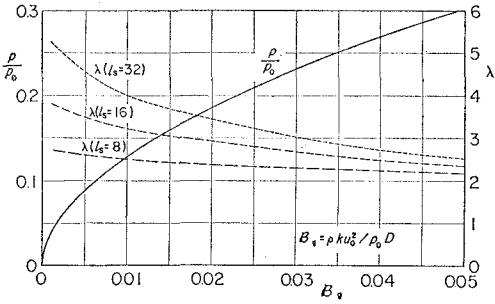
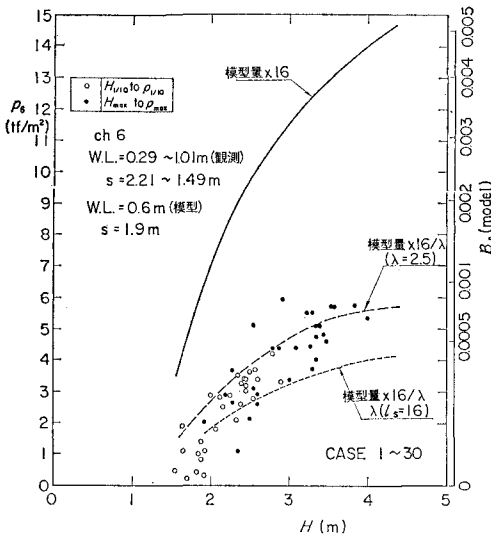
図-7 空気の圧縮圧力と B_0 数および λ 

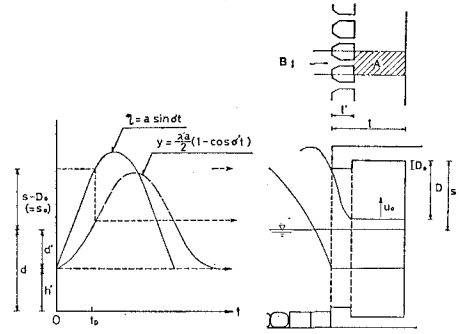
図-8 実験値と観測値の比較

正係数 λ で除して現地量に換算している。これは、空気圧縮圧力を決定する B_0 数が現地では模型の 16 倍となるが、その B_0 数に対応する圧力の値が 16 倍とならず、その値の $1/\lambda$ となるからである。

図-8 は、空気孔のない上床版の揚圧力の観測値と、それに最も近い条件での模型実験の実験値とを比較したものである。○印は $p_{1/10}$ 、●印は $p_{\max}$ の観測値であり、横軸はそれぞれ $H_{1/10}$ と $H_{\max}$ に対応する波高である。実線は模型量を 16 倍して現地量にしたものであり、明らかに観測値より大きすぎる。点線は、実験値が空気もれがない場合の値と考えて、図-7 よりそれぞれの実験値に対応する λ を求め、その λ で 16 倍した値を除したものである。実際には実験値は空気もれによって小さくなっており、 λ の値はやや小さめの値をとると考えられる。したがって、 $\lambda=2.5$ として現地量に換算した値も破線で示した。観測値は点線と破線の間にばらついており、 λ の値を適切に与えれば、その λ を用いて現地量が推定できることを実証している。

(2) 流入量方式を用いた空気圧縮圧力の算定法

伊藤らは津波防波堤の津波減殺効果を算定する方法の

図-9 流入量方式による u_0 と D の算定

一つとして流入量方式と呼ばれるものを提案している²⁾。この方法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 D とその時の波面上昇速度 u_0 を算定する。 D と u_0 が求められれば、光易が Bagnold の式を基に空気もれの効果を取り入れた空気圧縮の方程式³⁾を数値的に解き、空気圧縮力が求められる。

図-9 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、面積 A の部分に外側から幅 B の開口部を通じて水が流入するとする。スリット壁前面での水位を η 遊水室内の水位を y とすると、 η がスリット壁開口部上端に達したとき ($t=t_D$) に空気が閉じ込められ、その時の y から D が、 dy/dt から u_0 が求められる。

伊藤にならい、

$$\eta = a \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y = 0.5 \lambda' a (1 - \cos \sigma' t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

として、遊水室内の水位に関する方程式

$$A dy/dt = C B h' \sqrt{2g} (1 + \eta/h') \sqrt{\eta - y} \quad \dots\dots\dots (3)$$

を近似的に解く。すなわち、

$$\lambda' = \sin(\sigma \pi / \sigma') \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$K_0 = \frac{\sigma A}{2 \pi C B h'} \sqrt{\frac{a}{g}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma'}{\sigma} \pi K_0 \lambda' = \left(1 + \frac{a}{h'} \sin \frac{\sigma}{2 \sigma'} \pi \right) \times \sqrt{\sin \frac{\sigma}{2 \sigma'} \pi - \frac{\lambda'}{2}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

の 3 式より λ' および σ' を求める。ここに、 $a = H + d'$ 、 $d' = H/2$ 、 $h' = d - d'$ 、 $\sigma = 2\pi/T$ とした。また、 C は損失係数であり、流入損失係数 f_e 、流出損失係数 f_o により、 $C = 1/\sqrt{f_e + f_o}$ で表わされる。一般に $f_o = 1$ であり、隅切りをした場合の f_e を 0.25 として、 $C = 0.9$ を計算に用いた。

u_0 および D は結局、 η が開口部上端に達した時刻より、以下になる。

$$u_0 = 0.5 \sigma' \lambda' a \sin \sigma' t_D \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$D = s - 0.5 \lambda' a (1 - \cos \sigma' t_D) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma t_D = \sin^{-1} \{ (s - D_0 + d')/a \} \quad \dots\dots\dots (9)$$

u_0 および D_0 が求められれば B_0 数が求められ、空気もれのない場合の圧力はたとえば図-7より求められる。ただし、上床版に空気孔がない場合にもスリット壁開口部から空気もれる。この空気もれの効果を上床版に仮に空気孔を設けたとしてその空隙率で評価することにし、これを ε_0 で表す。空気もれは空気圧縮の圧力の大きさと圧縮時のスリット壁上端での水圧との比によって影響されると考え、実際結果を再整理して以下の式を得た。ただし、 $p_{\varepsilon=0}$ は空気もれがない時の空気圧縮圧力である。

$$\varepsilon_0 = 0.0003 \frac{w_0(H-s+D_0)}{p_{\varepsilon=0}} \dots\dots\dots(10)$$

流入量方式によって u_0 と D を求め、空気圧縮モデルで ε_0 の効果を含めて空気圧縮力を計算し、先に行った模型実験結果と比較したが、計算値は比較的良好に実験値に一致した。なお、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後壁までの距離を l として $k = \pi l/4$ としている。

(3) 計算値と観測値の比較

図-10 は上床版下面に働く揚圧力の観測値を、前項

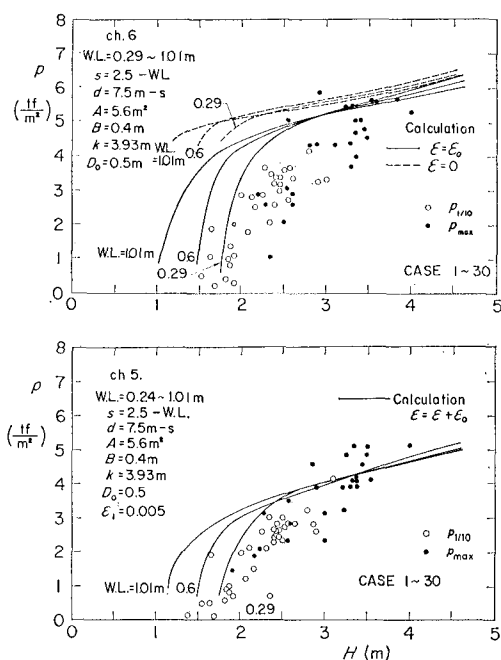


図-10 計算値と観測値の比較

の計算法による計算値と比較するものである。上図は空気孔のない場合 (6 ch) で、 $\varepsilon = \varepsilon_0$ として計算した値を実線で示している。比較のため、 $\varepsilon = 0$ の計算値も点線で示した。ただし計算に用いた周期 T は 6 s であり、潮位は 0.29, 0.6, 1.01 m である。実線の計算値は全体的に観測値よりやや大きい、波高が大きいほど一致している。下図は空気孔のある場合 (5 ch) である。実際の空気孔の空隙率 ε_1 は 0.005 であり、 $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1$ として計算した値を実線で示した。波高が小さいときやや計算値が観測値より大きい、全体的にはよく一致している。

前項の計算法は簡単なものであるが観測値に比較的良好に一致している。この計算法により、波とケーソンの諸元を与えれば揚圧力がある程度推定可能といえる。ただし、 ε_0 の算定法や損失係数 C の値等、今後さらに検討する必要がある。

5. ま と め

神戸市垂水処理場南護岸の縦スリットケーソンに作用する現地波圧データを解析し、現地でも模型と同様に空気圧縮による圧力が発生し、その発生機構がすでに提案している空気圧縮モデルによって説明できることを実証した。さらに、閉じ込められた空気層の厚さや波面の上昇速度の算定法を新たに提案し、これによって波とケーソンの諸元を与えられれば、空気圧縮圧力が一応算定できることになった。

なお、今回の現地観測データは神戸市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取得されたものである。また、本報告のとりまとめにあたっては港湾技術研究所合田良実次長より多くの助言をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・高橋重雄・村永 努: 直立消波ケーソン上床版に働く揚圧力—空気圧縮モデルによる検討—, 港研報告, 第19巻1号, 1980・3, pp. 3~31.
- 2) 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, 1962・3, 47 p.
- 3) Mitsuyasu, H.: Shock Pressure of Breaking Wave, Proc. of 10th Conference on Coastal Engineering, 1966, pp. 265~283.