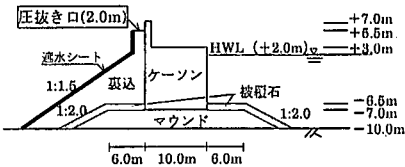


混成堤式管理型護岸遮水シートに作用する波圧特性および 波圧算定法に関する研究

藤井 敦* ・高橋重雄** ・小 椋 進***
宇野 健司*** ・杉山直子*** ・五月女 洋****
伊野 同***** ・鵜飼 亮行***** ・熊谷隆宏*****

遮水シートによる遮水構造を有する混成堤式の管理型護岸では、マウンド、裏込めおよび海底地盤内を伝播した波圧が、遮水シートに絶えず作用している。これらの波圧によって遮水シートが持ち上げられ破損する事を防止するため、遮水シートの上には上載荷重としての押さえ材が設置される。押さえ材断面を設計する場合、外力として遮水シートに作用する波圧を適切に評価する必要があるが、その波圧特性については研究成果も少なく不明な部分が多い。そこで、本研究では、水理模型実験および数値波動水路による数値解析を実施し、遮水シートに作用する波圧特性を明らかにするとともに、簡略式による波圧算定法の提案を行った。



図一 混成堤式管理型護岸（標準断面：開口幅 2.0 m）

1. はじめに

海面に管理型廃棄物最終処分場を建設する場合、廃棄物に含有する汚染物質が外海に浸出することを防止するため、遮水機能を有する護岸、いわゆる管理型護岸が設置される。混成堤式の管理型護岸では、遮水工として裏込め法面に遮水シートを敷設する方法が広く用いられるが、遮水シートには、マウンドおよび裏込めを伝播した波圧が絶えず作用する。これより、埋立完了までの期間中に、波圧により遮水シートが持ち上がり破損する事を防止するため、遮水シートの上にはシート押さえ材が設置される。高橋ら（1995）によると、ケースン背後の裏込め内には大きな波圧が伝播し、ここに圧抜き口を設置することで、裏込め内の圧力を低減できる。これは、押さえ材の断面を小さくでき、廃棄物の埋立容量を確保する点で有利となる他、遮水シートへの負担が軽減し、摩擦等に対するシートの安定性向上に繋がることを示唆する。

圧抜き口の効果を含めて、遮水シートに作用する波圧特性をあらかじめ把握することは、遮水シート押さえ材の断面を適切に設計する上で極めて重要といえる。藤井ら（2002）は、これまでに混成堤式管理型護岸を対象とした水理模型実験を実施し、遮水シートに作用する波圧の基本特性について検討を行っている。本検討では、これらの水理模型実験結果と、数値波動水路による数値解析の結果を基礎データとして、遮水シートに作用する波圧の算定手法を確立することを目的とする。

2. 水理模型実験の概要

藤井ら（2002）は、遮水シートに作用する波圧の基本特性を把握する事を目的として、水理模型実験を実施し

表一 実験条件（現地スケール）

Case	護岸断面	水路床	波浪	波高(m)	周期(s)
1	開口幅 2.0 m	不透過	規則波	2.0	6.0
2					8.0
3					10.0
4				3.0	7.0
5					9.0
6					11.0
7					8.0
8			4.0	10.0	
9				12.0	
10				6.0	
11			不規則波	2.0	8.0
12					10.0
13					6.5
14				2.5	8.5
15					10.5
16	開口幅 0.5 m	不透過	規則波	3.0	7.0
17					11.0
18				5.0	9.0
19			13.0		
20			不規則波		2.5
21				10.5	
22	7.0				
23	圧抜き口なし	不透過	規則波	3.0	11.0
24					9.0
25			5.0	13.0	
26				開口幅 2.0 m	不透過
27	11.0				
28	5.0	9.0			
29		13.0			
30		不規則波	2.5		
31	10.5				
32	開口幅 2.0 m			砂地盤 (透過)	規則波
33		9.0			
34		11.0			
35		5.0	9.0		
36			11.0		
37	13.0				

* 正会員 名古屋港湾空港技術調査事務所長
** 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部長
*** 名古屋港湾空港技術調査事務所
**** 正会員 (財) 港湾空間高度化環境研究センター
***** 正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所

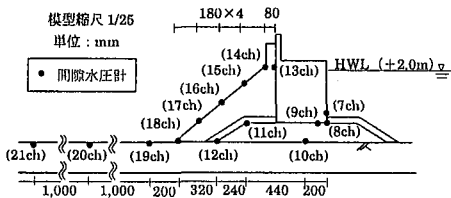


図-2 護岸断面および間隙水圧計設置位置

た。図-1は圧抜き口の開口幅が2.0mの標準断面であり、開口幅が0.5m、圧抜き口なしの計3タイプの護岸を対象としており、その実験条件を表-1に示す。なお、本実験は断面水槽(L50.0×W0.6×H1.2m)内に縮尺1/25の護岸模型を設置し、図-2に示す測定点において、波浪作用時における間隙水圧の計測を行った。

3. 裏込め法面部の遮水シート作用波圧特性

3.1 水理模型実験結果

図-3は、波高3.0m、周期7.0および11.0s、HWL、規則波のケースに関して、圧抜き口の開口幅が異なる各護岸断面の裏込め法面に敷設した遮水シートに作用するピーク波圧である。図中の波圧は、各測定点でのピーク波圧 P_{peak} をケーソン前趾に作用するピーク波圧 P'_{peak} で無次元化している。図-3より、圧抜き口なしの断面では、ケーソン前趾とほぼ同等の波圧が裏込め内全体に伝播し、遮水シートには、ほぼ同じ圧力が作用している。圧抜き口を設けると、遮水シートに作用する波圧は大幅に低減し、開口幅が0.5mのケースはケーソン前趾圧の40%、開口幅が2.0mのケースでは30%程度と、開口幅が大きい程より高い波圧の低減効果が得られた。

3.2 数値波動水路による数値解析手法の再現性検証

水理模型実験の規則波の代表ケースを対象として、数値波動水路(磯部ら, 1999)による数値解析を実施し、本解析手法の実験再現性について検証した。計算は、造波境界を流れ関数法より水位と流速を与え、計算領域にはケーソン前面に約5波長の一様水深部を設けた。マウンド、裏込めといった透過構造物は、ポアスモデル(榊山, 1990)として取り扱った。慣性力係数 C_M 、抗力係数 C_D 、空隙率 n が重要なパラメータとなるが、実験結果の再現性を考慮し $C_M=1.2$ 、 $C_D=3.0$ とした。空隙率 n は、実験に用いた捨石と一致させ0.5とした。

図-4に、数値波動水路による数値解析と水理模型実験に関し、マウンドおよび裏込めの間隙水圧測定点におけるピーク波圧値を比較する。数値解析結果は、マウンド、裏込め内全体で実験結果と良く一致しており、実験の波圧の伝播過程を良く再現しているといえる。これより、後述する波圧算定式の精度確認にあたって、数値波動水路を用いた数値解析による遮水シートへの作用波圧

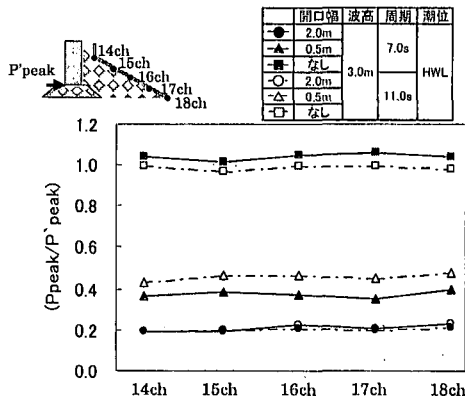


図-3 裏込め部の遮水シートに作用する波圧

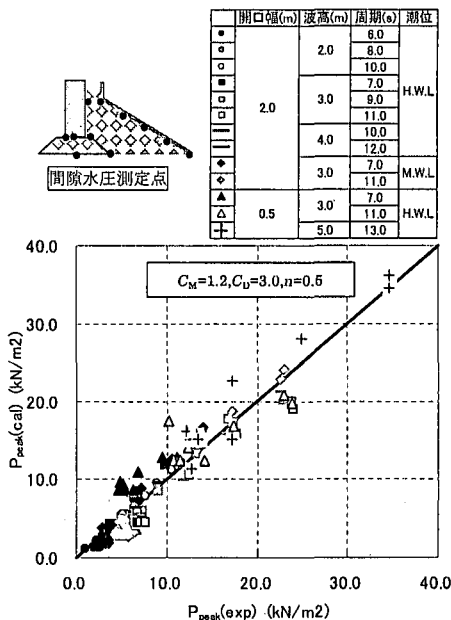


図-4 解析結果と実験結果の比較

特性の結果を、水理実験結果と同等の検証データとして取り扱うことの妥当性が確認された。

3.3 裏込め法面の遮水シートに作用する波圧算定式

水理模型実験より、圧抜き口のない護岸では、ケーソン前趾部とほぼ同等の波圧が裏込め法面に敷設した遮水シートに作用することが分かった。このような護岸形状では、押さえ材断面の設計において遮水シートに作用する波圧を合田波圧式で算出されるケーソン前趾圧として評価できる。一方、圧抜き口を有する護岸では、遮水シートに作用する波圧の低減効果は確認されたが、定量的かつ簡便に算出する方法がない。そこで、圧抜き口を有する管理型護岸の裏込め部に敷設した遮水シートへの作用波圧に関する波圧算定式の構築を試みた。

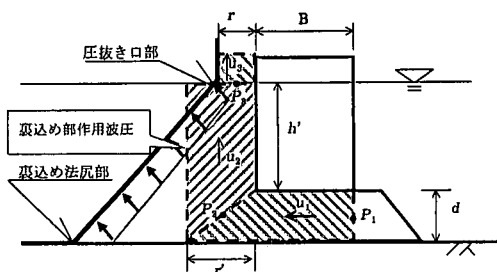


図-5 圧抜き口を有する混成定式管理型護岸モデル

(1) 波圧算定式の誘導

圧抜き口を有する管理型護岸断面を図-5に示すようにマウンド、裏込め、および圧抜き開口部の3領域にモデル化した。図中の h' はマウンド天端水深、 B はケーソン幅、 d はマウンド厚、 r は圧抜き口の開口幅(裏込め内に存在する自由水面の幅)、 r' はモデル化を行う際の裏込め部の有効幅、 P_{1-3} および u_{1-3} は、それぞれマウンド・裏込め・圧抜き開口部での波圧と流速値である。

図-5の護岸モデルのマウンド、裏込め部の流速 u_1 , u_2 がダルシー式に従うとし、以下の基礎式を設定した。

運動方程式 (ダルシー式)

$$0 = -\frac{1}{\rho g} \frac{P_2 - P_1}{B} - \frac{u_1}{k_1} \quad (\text{マウンド部}) \quad (1)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho g} \frac{P_3 - P_2}{h'} - \frac{u_2}{k_2} \quad (\text{裏込め部}) \quad (2)$$

連続式

$$u_1 \cdot d = u_2 \cdot r' = u_3 \cdot r \quad (3)$$

式中の k_1 および k_2 は、それぞれマウンドと裏込め部の透水係数、 ρ は海水の比重、 g は重力加速度である。

ここで、ケーソン前趾および圧抜き開口部の波圧 P_1 , P_3 および圧抜き開口部の流速 u_3 を角周波数 ω 、時間 t を用いて次式で与える。

$$P_1 = \bar{P}_1 \cdot e^{-i\omega t}, \quad P_3 = \bar{P}_3 \cdot e^{-i\omega t} \quad (4, 5)$$

$$u_3 = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial \bar{P}_3}{\partial t} = -i\omega \frac{1}{\rho g} \bar{P}_3 \cdot e^{-i\omega t} \quad (6)$$

上式中の $\bar{P}_1$, $\bar{P}_3$ は、それぞれ P_1 , P_3 の振幅を表しており、 $\bar{P}_1$ は実数であり、 $\bar{P}_3$ は P_1 を基準とした位相の情報をもつ複素数である。さらに式(5)の $\bar{P}_3$ は振幅 $\bar{P}_3$ (実数)と、 P_1 との位相差 Δt を用いて次式に変形される。

$$\bar{P}_3 = \frac{1}{\rho g} \bar{P}_3 \cdot e^{-i\omega \Delta t} \quad (7)$$

以上の式(1)~(7)より次式が得られる。

$$\frac{\bar{P}_3}{\bar{P}_1} = \left(1 + \left\{ \frac{B}{k_1} \left(\frac{r}{d} \right) + \frac{h'}{k_2} \left(\frac{r'}{r} \right) \right\}^2 \omega^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

ここで、式(8)中のマウンドおよび裏込め部の透水係数 k_1 , k_2 は、乱流場における透水係数の評価式である

デュブイ・フォルヒハイマー式(9)より評価した。

$$k_j = \frac{1}{a_j + b_j |u_j|}, \quad (j=1, 2) \quad (9)$$

$$a_j = \alpha_0 \{ (1 - n_j)^3 / n_j^3 \} \{ \nu / g D_{15j}^2 \} \quad (10)$$

$$b_j = \beta_0 \{ (1 - n_j) / n_j \} \{ 1 / g D_{15j} \} \quad (11)$$

なお、式(10), (11)に含まれる n は空隙率、 D_{15} は15%粒径、下付の j は1の時はマウンド部、2の時は裏込め部の値を示す。また、 ν は水の動粘性係数、 α_0 および β_0 は定数で石の場合には1500, 1.8を用いる。

ここで、式(9)に含まれる流速の絶対値については、次式に示すように1周期の平均流速を仮定して与えた。

$$|u_3| = \frac{1}{\rho g} \frac{4}{T} \bar{P}_3, \quad |u_2| = \frac{r'}{r} |u_3|, \quad |u_1| = \frac{r}{d} |u_2| \quad (12)$$

式(9)~(12)を式(8)に代入し、式(2)の関係から、次式の裏込め部に敷設した遮水シートに作用する波圧に関する算定式(13)~(18)が得られる。なお、式中の $\bar{P}_1$, $\bar{P}_2$, $\bar{P}_3$ は、それぞれケーソン前趾、マウンドと裏込めの境界、圧抜き開口部のピーク波圧に対応する。

$$\frac{\bar{P}_3}{\bar{P}_1} = \left(1 + \omega^2 \left\{ F_1 + F_2 \frac{\bar{P}_3}{\bar{P}_1} \right\}^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$F_1 = \left\{ \frac{r}{d} B a_1 + \frac{r'}{r} h' a_2 \right\} \quad (14)$$

$$F_2 = \left\{ \left(\frac{r}{d} \right)^2 B b_1 + \left(\frac{r'}{r} \right)^2 h' b_2 \right\} \frac{4}{T} \frac{\bar{P}_1}{\rho g} \quad (15)$$

$$\bar{P}_2 = \sqrt{1 + \omega^2 \{ F_3 + F_4 \}^2} \cdot \bar{P}_3 \quad (16)$$

$$F_3 = \frac{r'}{r} h' a_2, \quad F_4 = \frac{4}{T} \left(\frac{r'}{r} \right)^2 h' b_2 \frac{\bar{P}_3}{\rho g} \quad (17, 18)$$

ここで、波圧算定式(13)~(18)に含まれる裏込め部の有効幅 r' は、図-6に示す護岸断面のモデル化を行った際の裏込め部の領域におけるの入口および出口の幅となる d および r' に対して、透水係数、すなわち u_1 (裏込め入口部の流速)および u_3 (裏込め出口部の流速)の2乗により重みづけをした次式で評価することとした。

$$r' = \frac{|u_1|^2 d + |u_3|^2 r}{\left(\frac{1}{d} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \right)^2} \quad (19)$$

波圧算定式(13)に含まれるケーソン前趾圧 $\bar{P}_1$ は合田波圧のケーソン前趾圧の値を用いて与える事ができる。これより、式(13)から $\bar{P}_3/\bar{P}_1$ を算出し、圧抜き開口部の波圧 $\bar{P}_3$ が得られる。この $\bar{P}_3$ を式(16)に代入すると、マウンドおよび裏込め境界部の波圧 $\bar{P}_2$ が得られる。

(2) 波圧算定式の精度と遮水シート作用波圧特性
水理模型実験および数値解析より得られた遮水シートへの作用波圧値を検証データとし、波圧算定式(13), (16)の精度について検証した。なお、数値解析は、実験で実

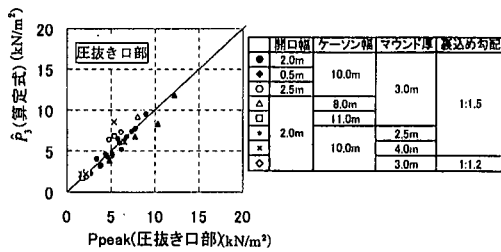


図-6 波圧算定式の精度 (規則波)

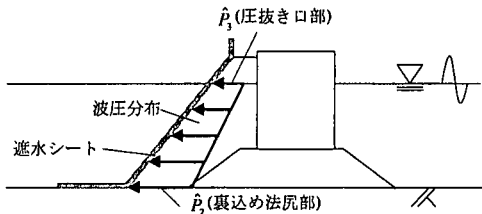


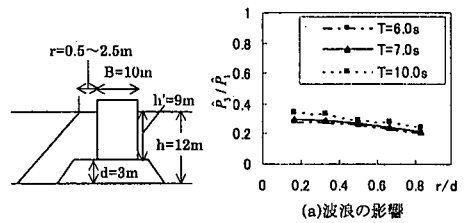
図-7 遮水シートに作用する波圧分布

施した標準断面 (図-1) に対し、圧抜き口の開口幅、裏込めの法面勾配、ケーソン幅およびマウンド高さを変えた断面を対象に実施した。解析に用いたパラメータは、先に述べた本解析手法の再現性確認時と同様、慣性力係数 $C_M=1.2$ 、抗力係数 $C_D=3.0$ 、空隙率 $n=0.5$ とした。

実験および数値波動水路による検証データと、波圧算定式 (13) より得た圧抜き口部の算定値 $\bar{P}_3$ の比較図を図-6 に示す。算定式 (13) の計算には、空隙率 $n=0.5$ 、15% 粒径 $D_{15}=17.5$ mm、水の動粘性係数 ν は $0.0115(\text{cm}^2/\text{s})$ 、 α_0 、 β_0 は 1500 と 1.8 を用いた。なお、ケーソン前趾圧には合田波圧による値ではなく、実験および数値波動水路により得た波圧のピーク値を用いた。

図-6 より、圧抜き口部において波圧算定値 $\bar{P}_3$ は、検証データと良く一致している。一方、裏込め法尻部の波圧に関しては、図-5 の護岸モデルにおける $\bar{P}_3$ 、 $\bar{P}_2$ の位置関係より $\bar{P}_3 < P_{\text{peak}}(\text{裏込め法尻部}) < \bar{P}_2$ と考えられる。本実験および解析結果では、遮水シートに作用する波圧は、深さ方向にほぼ一様であったため、裏込め法尻部の波圧は圧抜き口部の算定値 $\bar{P}_3$ と良く一致し、マウンドと裏込めの境界での算定値 $\bar{P}_2$ で評価すると過大に見積もる傾向がみられた。しかしながら、高橋ら (2002) が行った圧抜き口を有する護岸に関する FEM 解析では、裏込め法尻から圧抜き口に向かい波圧が小さくなる現象が確認されていることから、設計で波圧算定式 (13)、(16) を用いる場合、安全側の評価として裏込め法尻部の波圧値は $\bar{P}_2$ とし、遮水シート作用波圧を図-7 に示す台形分布で与えれば良いと思われる。

藤井ら (2002) の実験は、規則波のみを対象としていたので、不規則波に関する実験を実施した。その結果、有義値により算出した波圧値 $\bar{P}_3$ 、 $\bar{P}_2$ を 1.8 倍して最大波



(a) 波浪の影響

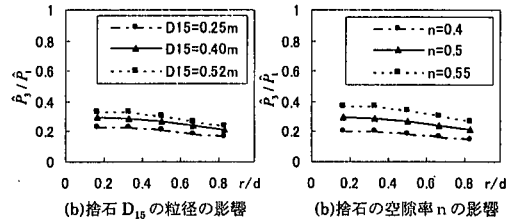
(b) 捨石の粒径 D_{15} の影響 (b) 捨石の空隙率 n の影響

図-8 遮水シート作用波圧の低減効果

圧に換算することで、波圧算定式 (13)、(16) により不規則波でも規則波と同様に評価できることを確認した。

ただし、算定式 (13)、(16) は、開口率 r/d が $0.17 \sim 1.17$ の断面を対象にした検証データにより精度を確認したが、極端に r/d の小さな断面では、圧抜き口部の波圧値は過小に評価される可能性があるため注意が必要である。

図-8 に、開口率 r/d 、周期 T 、捨石の粒径 D_{15} および空隙率 n が、波圧の低減効果に与える影響について示す。これらは波圧算定式 (13)、(16) より現地スケールを対象として計算した値であり、標準条件を、波高 $H=3.0$ m、周期 $T=7.0$ s、図-1 に示す護岸断面を対象として、15% 有効粒径 $D_{15}=0.4$ m、空隙率 $n=0.4$ を用いた。図-8 より、いずれのケースも開口率 (r/d) が大きくなるに従って、波圧がより低減されている。また、図-8(a) より、周期の長い波浪条件下の方が、波圧は低減されにくく、(b)、(c) からは、マウンドおよび裏込めに粒径の小さな石を含む捨石を用い、かつ空隙率を小さくすることで、より高い波圧低減効果が得られることがわかる。

以上より、開口幅の設計は、波圧の低減効果をより高めるため、マウンドおよび裏込めには粒径の小さな石を含む捨石を用いることが望ましく、護岸の安全性および経済性を考慮し総合的な判断のもとに決定する必要がある。ただし、圧抜き開口部の捨石が間詰めされたり、圧抜き開口部から大量の越波水流入がある場合は、十分な圧抜き効果が得られないことがあり注意が必要である。

4. 水平底面部の遮水シート作用波圧特性

遮水シートには、裏込め部だけでなく護岸背後に敷設した水平底面部にも、海底地盤内を伝播した波圧が作用する。水理模型実験より得られた護岸背後の水平底面部に敷設した遮水シートに作用する波圧のピーク値を図-9 に示す。なお、 x 軸は裏込め法尻からの距離 x を波長

L で無次元化し、また y 軸は各測定点のピーク波圧 P_{peak} を裏込め法尻部に作用するピーク波圧 P'_{peak} で無次元化している。波圧は砂層内を急激な減衰を伴って伝播し、本実験では $1/10$ 波長程度の距離でほぼ消散した。

ここで、高橋ら (1995) の無限深さの海底地盤上に波が進行する場合における、地盤内の間隙水圧伝播に関する式を適用し、波圧 P'_{peak} が裏込め法尻部に作用した時に、水平底面部に敷設した遮水シートに沿って法尻部からの距離 x における波圧値 P_{peak} を次式で評価した。

$$\frac{P_{\text{peak}}}{P'_{\text{peak}}} = \exp(-k_{w2}x) \dots\dots\dots (20)$$

式中の k_{w2} は線形減衰係数で、周期 T 、波長 L 、透水係数 k 、水の圧縮率 β をパラメータとして Biot の二層弾性体理論より計算される値である。 k_{w2} を決定するにあたり、水の圧縮率 β が重要なパラメータとなるが、酒井ら (1991) によると、新潟県の大潟波浪観測所で行った現地観測を基に、地盤内間隙水圧に関する近似解により水の圧縮率 β について評価した結果、 $\beta = 1.0 \times 10^{-8} \text{ N/m}$ の時に最も観測結果との対応が良好であったとしている。

図-9 に示す実線および破線は、周期 7.0 s 、 13.0 s 、HWL のケースを対象に、式 (20) より算出した波圧値である。なお、線形減衰率 k_{w2} は、実験結果との比較から水の圧縮率 β を $2.0 \times 10^{-7} \text{ N/m}$ として算出した値を用いた。実験の砂層に含まれる空気量が現地と比較し一般に多いことから、この β 値は妥当な値と思われ、式 (20) よりシートへの作用波圧を適切に評価できるといえる。

設計時には、裏込め法尻部の波圧 P'_{peak} は圧抜き口のない護岸では、合田波圧のケーソン前趾圧の値を、圧抜き口がある場合には波圧算定式 (16) の $\bar{P}_2$ より評価できる。また、線形減衰率 k_{w2} は、あらかじめ Biot の二層弾性体理論より計算した算定図から、対象とする地盤の透水係数に対応した値を読みとることができる。水の圧縮率 β が 1.0×10^{-8} とした時の算定図を図-10 に示す。

5. ま と め

本研究で明らかになった事を以下に示す。

- (1) 圧抜き口のない護岸では、裏込め部の遮水シートに、ケーソン前趾に作用する波圧とほぼ同等の波圧が作用し、これらは合田波圧を用いて評価することができる。
- (2) 護岸背後に圧抜き口を有する護岸を対象として、裏込め部に敷設した遮水シートに作用する波圧算定式を提案し、その妥当性を明らかにした。
- (3) 護岸背後に圧抜き口を設置することで、遮水シートに作用する波圧は大幅に低減し、圧抜き口が大きいほどその効果も高くなる。また、マウンドおよび裏込めに、粒径の小さな石を含み、かつ空隙の小さな捨石を用いる

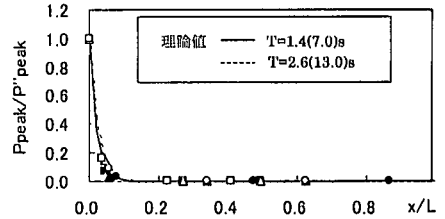
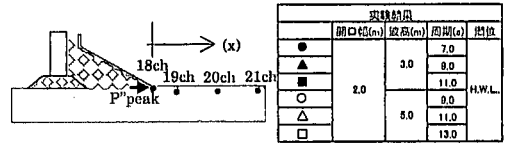


図-9 水平底面部の遮水シートに作用する波圧

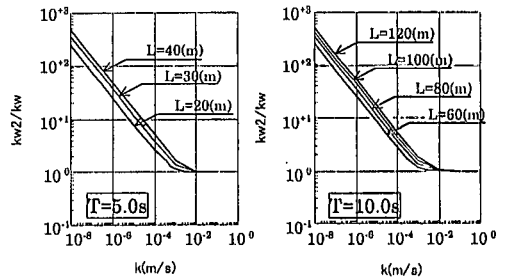


図-10 線形減衰率 k_{w2} 算定図 ($\beta = 1.0 \times 10^{-8} \text{ N/m}$)

ことで、より効果的に波圧を低減することができる。

(4) 水平底面部に敷設した遮水シートに作用する波圧の評価式を提案し、その妥当性を明らかにした。

最後に、本研究を行うにあたって元(財)港湾空間高度化環境研究センターの小笹常務理事をはじめ、廃棄物理立護岸補修工法検討調査の委員の方々より、貴重な御助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・神山 勉・藤間功司・川崎浩二・蔭 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF 法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 321-326.
- 酒井哲朗・間瀬 肇・D. T. Cox・上田康浩 (1991): 波浪による海底地盤内間隙水圧変動の現地観測, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 816-820.
- 神山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 554-558.
- 高橋重雄・鈴木高二郎・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・菅 功企・山崎浩之 (1995): 護岸の吸い出しに関する水理模型実験, 港湾技術研究所報告, 第 35 巻 2 号, pp. 3-63.
- 高橋重雄・鈴木高二郎・朴 佑善 (2002): 護岸裏込め部の波圧伝播に関する数値計算, 海洋開発論文集, 第 27 巻, (投稿中)
- 藤井 敦・宇野健司・北澤社介・土田 孝・五月女洋・伊野 同 (2002): 混成堤式管理型護岸の遮水シート作用波圧特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第 27 巻, (投稿中)