

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

DYNAMIC PRESSURE TO WATERPROOF SHEET PLACED IN THE BACKFILL SPACE OF A CAISSON-TYPE BULKHEAD FOR WASTE DISPOSAL

藤井敦¹・宇野健司²・北澤壮介³・土田孝⁴・五月女洋⁵・伊野同⁶

Atsushi FUJII, Kenji UNO, Sosuke KITAZAWA, Takashi TSUCHIDA,
Hiroshi SAOTOME, Hitoshi INO

- 1正会員 国土交通省中部地方整備局 (〒457-0833 愛知県名古屋市中区東又兵衛町1丁目57-2)
2非会員 国土交通省中部地方整備局 (〒457-0833 愛知県名古屋市中区東又兵衛町1丁目57-2)
3正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号)
4正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号)
5正会員 (財) 港湾空間高度化環境研究センター (〒108-0022 東京都港区海岸三丁目26-1 6F)
6正会員 五洋建設(株)技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

In case where the bulkheads, which surround a reclamation area for waste disposal, are required to prevent substances contained in waste leaking out to the sea, they are constructed as waterproof structures.

For a caisson-type bulkhead, waterproof sheets are mostly placed in the backfill space for this purpose. Because wave-driven pressure, which propagates through rubbles mound and backfill, acts on the sheet, weight is placed on it to prevent its movement and failure.

In this study, we conducted a laboratory experiment and numerical analysis to clarify the characteristics of the dynamic pressure, which leads to the development of the design method for this kind of structure.

Key Words : dynamic pressure, waterproof sheet, bulkhead

1. はじめに

近年、廃棄物最終処分場の残余年数は逼迫した状態にあり、特に産業廃棄物に関しては、厚生省推計で平成11年度末に残余年数が1.6年といわれている。リデュース・リユース・リサイクルといった廃棄物量そのものを減らすソフト面の対応にあわせて、廃棄物最終処分場の新設が急務とされている。しかし、陸上における新設は、立地場所確保の観点より困難な状況にある。これより、立地場所として海面が注目を集め、廃棄物埋立護岸の建設が最終処分場不足の問題解決に向けて大きな役割を担うこととなった。

管理型廃棄物最終処分場を海面に建設する場合、廃棄物中に含まれる汚染物質の海域への流出を防止するため、遮水機能を有する護岸いわゆる管理型護岸の設置が不可欠となる。ケーソン・マウンドより構成される混成堤式の管理型護岸では、遮水材として遮水シートが広く用いられるが、遮水シートにはマウンド部及び海底地盤内の伝達波の影響により絶えず波圧が作用する。高橋ら¹⁾によるとケーソン背後に圧抜き口を設置すると、遮水シートに作用する

波圧を大幅に抑制することができる。このことは遮水シート押さえ材の断面を小さくできることを示唆している。これらの波圧を定量的に把握することは、遮水シートの押さえ材断面を適切に設計する上で、また波圧による遮水シートの破損を未然に防止する観点からも極めて重要であるといえる。

そこで本研究では、圧抜き口を有する管理型護岸の遮水シートに作用する波圧の基本特性を明らかにする事を目的として、水理模型実験を実施した。また、数値波動水路による数値解析を行い、実験結果との比較から、その妥当性についての検証を行った。さらに、実験で実施できなかった護岸形状に関して数値シミュレーションによる検討を実施した。

2. 実験の目的と方法

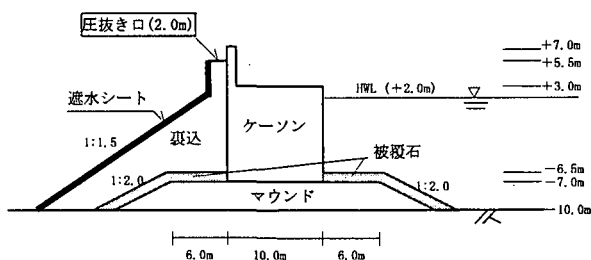
実験では、図-1(a)~(c)に示す圧抜き口の開口幅がそれぞれ2.0m(C-1)、0.5m(C-2)および0.0m(C-3)の護岸断面を設定した。なお、これらは現在供用中の護岸をモデルとしており、模型縮尺は1/25とした。実験における間隙水圧計の設置位置を図-1(d)に

示す。なお、護岸背後の水平底面部に設置した間隙水圧計19~21chについては、後述する護岸の基礎地盤に砂地盤を用いたケースのみで計測を行っている。

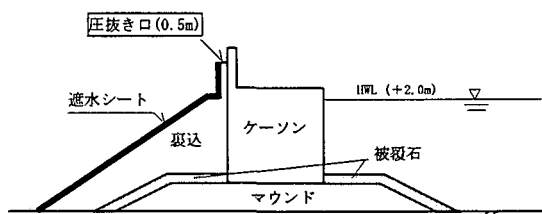
表-1に実験条件を示す。ケース1~9, ケース10~13, およびケース14~17は、海底面を不透過の条件下で、圧抜き口の開口幅をそれぞれ2.0m(図-1(a) : C-1), 0.5m(図-1(b) : C-2), 0.0m(図-1(c) : C-3)とした護岸形状を対象としており、裏込法面部の遮水シートに作用する波圧に関して、開口幅の影響について調べた。ケース18~27は、開口幅2.0m(C-1)の断面を対象としており、ケース18~21は潮位を変化させたケースである。ケース22~27は、基礎地盤を不透過でなく相馬桂砂7号を用いて透過性にしたケースで、裏込法面部の遮水シート作用波圧に及ぼす砂地盤の透過性の影響、および水平底面部に敷設した遮水シートに作用する波圧特性について調べた。

表-1 実験条件(現地スケール) ※規則波を対象とする

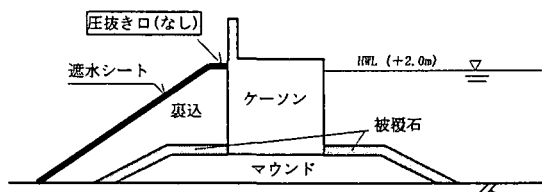
Case	護岸断面	水路床	波高(m)	周期(s)	潮位
1	C-1 開口幅2.0m	不透過	2.0	8.0	H.W.L.
2				9.0	
3				10.0	
4			3.0	7.0	
5				9.0	
6				11.0	
7			4.0	8.0	
8				10.0	
9				12.0	
10	C-2 開口幅0.5m	不透過	3.0	7.0	H.W.L.
11				11.0	
12				9.0	
13	C-3 圧抜き口なし	不透過	3.0	7.0	H.W.L.
14				11.0	
15				9.0	
16	C-1 開口幅2.0m	不透過	3.0	7.0	M.W.L.
17				11.0	
18				9.0	
19	C-1 開口幅2.0m	不透過	5.0	13.0	H.W.L.
20				7.0	
21				9.0	
22	C-1 開口幅2.0m	砂地盤 (透過)	3.0	7.0	H.W.L.
23				9.0	
24				11.0	
25			3.0	9.0	
26			5.0	11.0	
27			13.0		



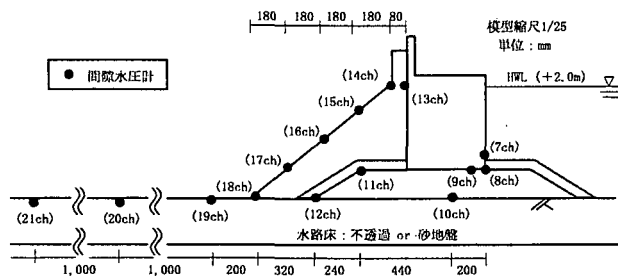
(a) 護岸断面C-1 : 圧抜き口の開口幅2.0m



(b) 護岸断面C-2 : 圧抜き口の開口幅0.5m



(c) 護岸断面C-3 : 圧抜き口なし



(d) 間隙水圧計設置位置

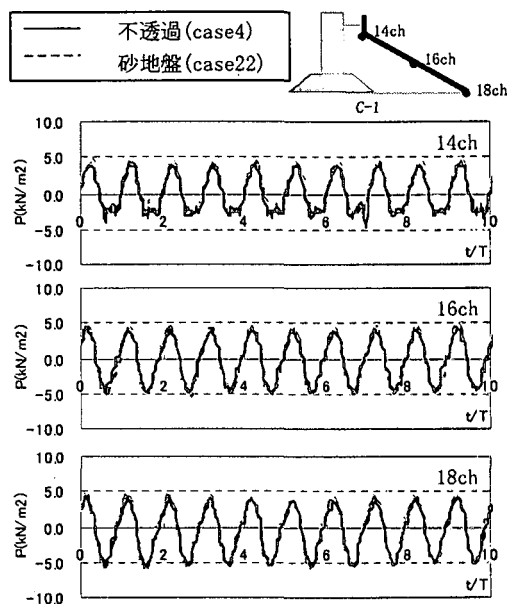
図-1 護岸断面および間隙水圧計設置位置

3. 実験結果

(1) 砂地盤の透過性の影響

波浪および護岸断面が同じ条件下において基礎地盤に不透過水平床(case4~6)と砂地盤(case22~24)を用いたケースを比較し、裏込部における遮水シート作用波圧に関する、砂地盤の透過性の影響について検討した。なお、実験の砂地盤には相馬桂砂7号($D_{50}=0.13\text{mm}$)を用いており、砂層厚は20cmとした。

図-2に、護岸断面C-1(開口幅2.0m)において、波高3.0m・周期9.0s・H.W.L.の波浪条件下で、基礎地盤に不透過水平床および砂地盤を用いたケースについて、裏込部の遮水シートに作用する時系列波形の比較図を示す。両ケースの波形はほぼ一致し、砂地盤の透過性の影響はみられなかった。他のケースも同様であり、実験スケールにおいては砂地盤の透過性の影響は有意な差として確認されなかった。



(C-1 : $H=3.0\text{m}$, $T=7.0\text{s}$ ・H.W.L.)

図-2 砂地盤の透過性の影響

高橋ら¹⁾の方法により実験および現地スケールにおける間隙水圧の線形減衰率 k_{w2} を比較し、砂地盤の透過性に関するスケール効果について考察する。

無限深さの海底砂地盤上に波が進行する場合の深さ z での地盤内間隙水圧 p は、初期圧力 p_0 、線形減衰率 k_{w2} を用いて次式で表される。

$$p = p_0 \text{EXP}(-k_{w2}z) \quad (1)$$

図-3に周期7.0sの波浪を対象とした時の、地盤の透水係数 k と、Biotの二層弾性体の理論により計算した線形減衰率 k_{w2} を波数 k_w で除した値の関係を示す。なお、これらの計算では水の圧縮率 β の値に、酒井ら²⁾が波浪による海底地盤内の間隙水圧変動に関する現地観測結果との比較から、最も対応が良いとしている $1.0 \times 10^8 \text{N/m}^2$ を用いた。

実験で用いた砂の透水係数は、 $3.4 \times 10^{-5} \text{(m/s)}$ であり、この時の k_{w2}/k_w は図-3より実験スケールで3.6、現地スケールで8.0となる。これより、実験スケールでは、減衰が現地と比較して約1/2程度と少なく、より透過性の良い条件下と考えて良い。

したがって、現地スケールにおいても裏込部の遮水シートへの作用波圧に関する砂地盤の透過性の影響は小さいと考えられる。

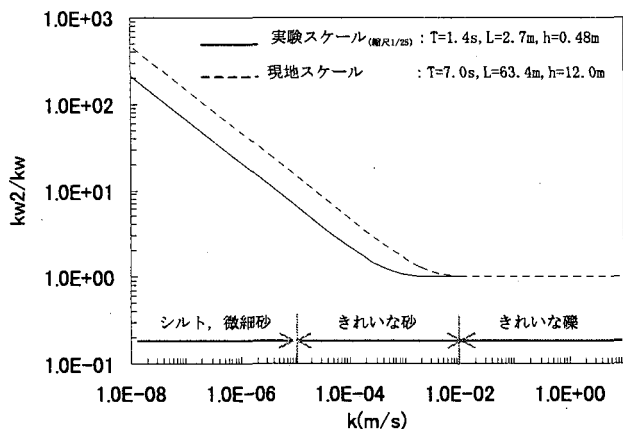


図-3 砂地盤内の透過性の影響

(2) 裏込法面部の遮水シートに作用する波圧特性

a) 開口幅2.0m(C-1)断面の遮水シートへの作用波圧

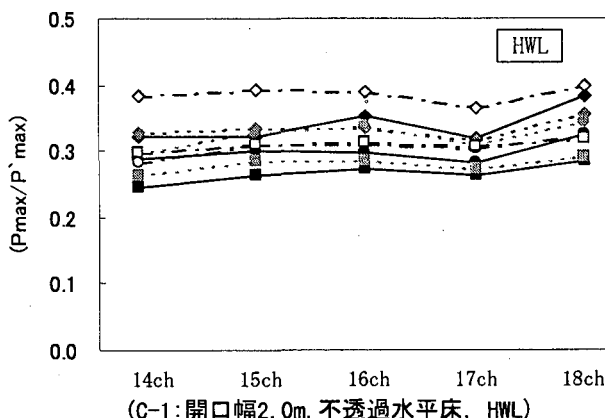
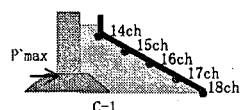
図-4は、圧抜き口の開口幅2.0m(C-1)の護岸断面を対象とし、潮位がHWL(+2.0m)のケース(case1~9)について、遮水シートに作用する波圧のピーク値を示したものである。なお、各測定点の波圧 P_{max} は、ケーソン前趾部に作用したピーク波圧 P'_{max} により無次元化している。実験に用いた捨石の透水係数に大きく依存するものと思われるが、本実験では遮水シートに深さ方向にほぼ一様の波圧が作用する結果となった。また、ケーソン前趾におけるピーク波圧と比較すると、波圧の低減率は25~40%程度であった。さらに、波高が大きく、周期が短い波浪条件のケースほど、遮水シートに作用する波圧

の低減効果は、大きくなる傾向が確認された。

図-5は、開口幅2.0mの護岸断面(C-1)を対象とし、潮位をMWL(+1.0m)としたケース(case18~21)について、遮水シートの各測定点に作用する無次元ピーク波圧を示したものである。裏込部の遮水シートに作用するピーク波圧は、ケーソン前趾圧の20%程度にまで低減されており、HWLのケース図-4と比較すると、波圧の低減効果はさらに高くなっているのがわかる。これは、裏込め法面が勾配を有するため、MWLと水位が下がることで裏込内に存在する自由水面の幅がHWL時より広くなり、実質的な圧抜き口の開口幅も広くなったためと考えられる。

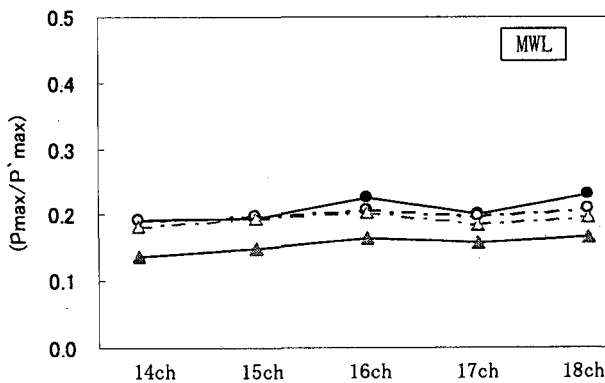
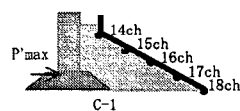
このことから、実質的な圧抜き口の開口幅は、裏込内に存在する自由水面の幅に対応すると考えられ、開口幅の大きさに関しては、潮位の影響を十分に考慮して設計する必要があるといえる。

	H(m)	T(s)	潮位
●	2.0	6.0	H.W.L
○	2.0	8.0	H.W.L
◇	2.0	10.0	H.W.L
●	3.0	7.0	H.W.L
○	3.0	9.0	H.W.L
◇	3.0	11.0	H.W.L
■	4.0	8.0	H.W.L
□	4.0	10.0	H.W.L
○	4.0	12.0	H.W.L



(C-1: 開口幅2.0m, 不透水水平床, HWL)
図-4 遮水シートへの作用波圧

	H(m)	T(s)	潮位
●	3.0	7.0	M.W.L
○	3.0	11.0	M.W.L
▲	5.0	9.0	M.W.L
△	5.0	13.0	M.W.L



(C-1: 開口幅2.0m, 不透水水平床, MWL)
図-5 遮水シートへの作用波圧

b) 開口幅0.5m(C-2)断面の遮水シートへの作用波圧

図-6は、開口幅0.5mの護岸断面(C-2)を対象としたケース(case10~13)について、遮水シートの各測定点におけるピーク波圧を示したものである。これより、裏込部の遮水シートには、ケーソン前趾ピーク波圧の40~50%程度ではぼ一様な圧が作用している。また、開口幅2.0mのケース図-4と比較すると、遮水シートにはより大きな波圧が作用していることがわかる。このことから、圧抜き口の開口幅は、波圧の低減効果に大きく影響するといえる。

なお、図中の実線および波線は、周期7.0sの波浪を対象として、式(1)により算出した実験および現地スケールにおける間隙水圧の減衰特性である。実験スケールでの理論値と比較して、実験結果はやや減衰が大きい結果であるが、これは実験の地盤に用いた砂に含まれる空気量が多く空隙内の水の圧縮率 β 値が小さめであったためと考えられる。水の圧縮率 β を適切に選べば、両者の対応は比較的良いものと思われる。実験スケールと現地スケールの理論値を比較すると、前述のように実験スケールの理論値のほうがより減衰が少ないことがわかる。

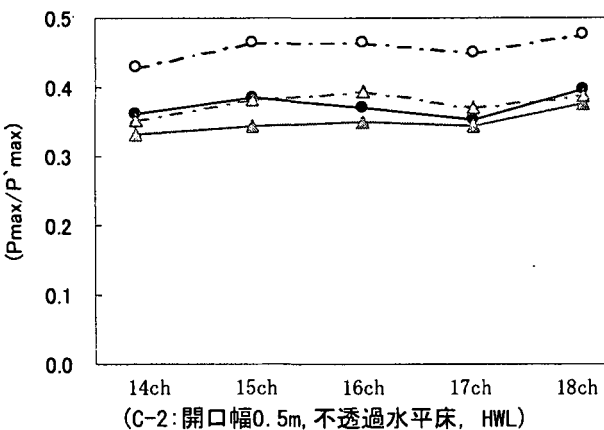
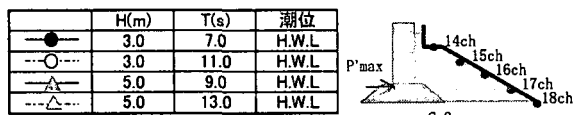


図-6 遮水シートへの作用波圧

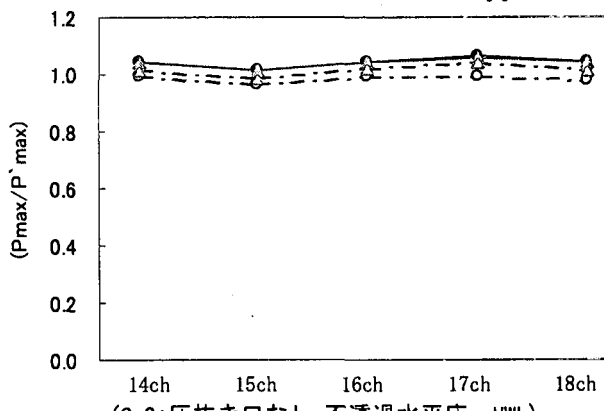
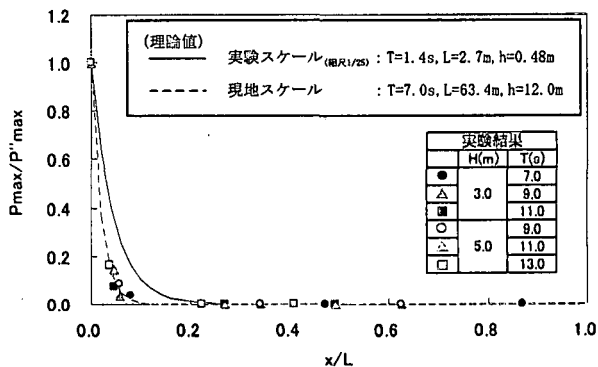
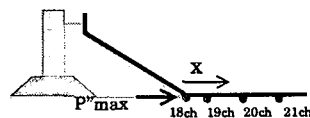


図-7 遮水シートへの作用波圧

c) 圧抜き口のない断面(C-3)の遮水シートへの作用波圧

圧抜き口なしの護岸断面(C-3)を対象としたケース(case14~17)について、遮水シートの各測定点におけるピーク波圧を図-7に示す。裏込め部の遮水シートに作用する無次元波圧 P_{max}/P'_{max} は、深さ方向にほぼ1.0となり、圧抜き口を設けないとケーソン前趾部とほぼ同等の波圧が遮水シートに作用することがわかる。これより、圧抜き口のない管理型護岸の遮水シート押さえ材断面を設計する場合、ケーソン前趾圧を遮水シート作用波圧として取り扱った、これまでの設計法³⁾の妥当性が確認された。ただし、今回の実験は、裏込内が完全に飽和され、空気層のない条件での実験であったが、現地において裏込の天端付近に空気層が含まれるような断面である場合には、これがクッションとしての役割を果たし、若干の波圧低減はみられるものと思われる。



(C-1: 開口幅2.0m, 砂地盤, H.W.L)

図-8 水平底面部の遮水シートに作用する波圧

(3) 水平底面部の遮水シートに作用する波圧特性

図-8は、圧抜き口の開口幅2.0m(C-1)の護岸断面を対象として、基礎地盤に砂を用いたケース(case22~27)における、水平底面部の遮水シートに設置した間隙水圧測定点でのピーク波圧を示したものである。いずれのケースも約1/10波長程度で波圧が消散し、ほぼ0となっているのがわかる。

4. 数値波動水路による数値シミュレーション

(1) 数値波動水路による数値解析法の妥当性検証

本節では、遮水シート作用波圧に関する水理模型実験の代表ケースに関して、榊山ら⁴⁾のポーラスモデルに基づき、磯部ら⁵⁾によって開発された数値波動水路を用いて解析シミュレーションを実施し、そ

の再現性について検証した。なお、造波境界では流れ関数法により水位と流速を与えており、ケーソン前面には図-9に示すように約5波長の一樣水深部を設けた。マウンドおよび裏込といった透過構造物の物性値としては、慣性力係数 C_M 、抗力係数 C_D 、空隙率 n が必要となるが、慣性力係数 C_M および抗力係数 C_D は、実験結果との比較からパラメタスタディーによりそれぞれ1.2, 3.0を与えた。空隙率 n には、実験に用いた捨石と一致させて0.5を用いた。なお、本解析は模型スケールで実施し、実験の測定点と一致する節点の波圧を出力した。また、解析結果としては、造波境界からの反射波の影響が現れない時間帯のデータのみを使用した。

図-10に波圧に関する解析結果と実験結果との比較図を示す。圧抜き開口幅が0.5mとなるケースに関しては、僅かに数値波動水路による結果のほうが大きくなる傾向がみられるが、これは開口部において幅が狭く、十分な数の計算メッシュを設定出来なかったことが原因と考えられる。しかしながら、解析結果は実験結果と良く一致しており、慣性力係数 C_M ・抗力係数 C_D 、空隙率 n を適切に与えることで、遮水シート作用波圧は、数値波動水路による解析シミュレーションにより精度良く評価できるといえる。

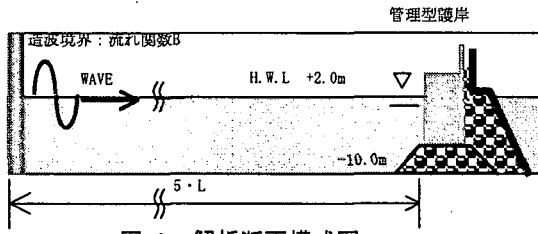


図-9 解析断面模式図

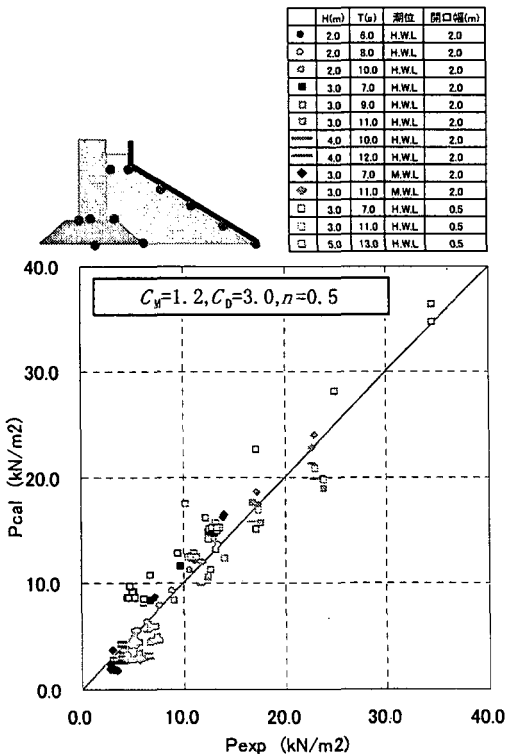


図-10 解析結果と実験結果の比較

(2) ケーソン幅および裏込勾配の影響の検討

実験では実施できなかった、ケーソンの幅、及び裏込の法面勾配を変えたケースについて、数値波動水路による解析シミュレーションを実施し、遮水シート作用波圧に与える影響について調べた。

水理模型実験で用いた圧抜き口の開口幅2.0mの護岸(C-1: 図1)を標準断面とし、ケーソンの幅を8.0~14.0mと変化させたときの、遮水シートの開口部および法尻部に作用するピーク波圧をケーソン前趾に作用するピーク波圧で除した無次元波圧について図-11に示す。これより、ケーソン幅が大きくなるに従い波圧低減効果が増していることがわかる。

図-12は、標準断面(C-1)において裏込勾配が1:1.5であるのに対して、勾配を1:1.2に変化させたときの遮水シートに作用する無次元波圧を示したものである。これより、現実的な範囲内においては、裏込勾配は遮水シート作用波圧にそれ程影響を与えないといえる。

	位置	波高	周期
●	開口部	2.0	6.0
○		4.0	12.0
○	法尻部	2.0	6.0
◇		4.0	12.0

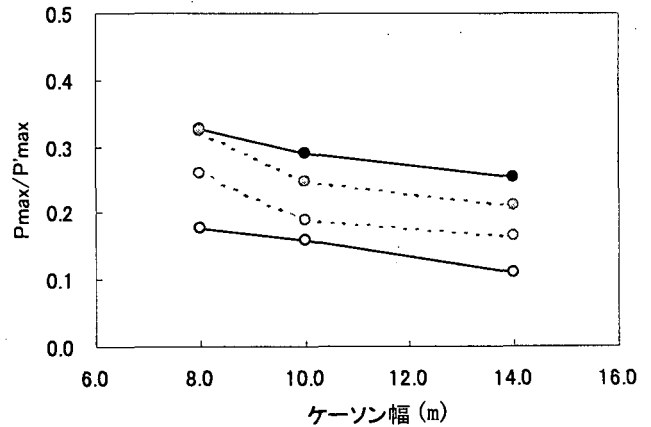


図-11 ケーソン幅の影響

	位置	波高	周期
●	開口部	2.0	6.0
○		4.0	12.0
○	法尻部	2.0	6.0
◇		4.0	12.0

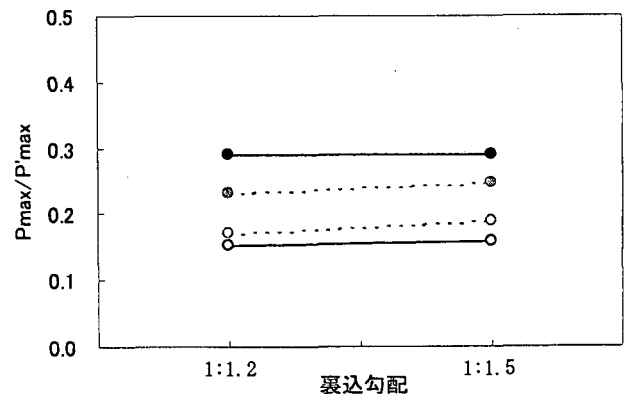


図-12 裏込勾配の影響

5. 結論

- 1) 裏込め部に圧抜き口のない護岸では、ケーソン前趾圧とほぼ同等の波圧が遮水シートに作用する。
- 2) 裏込部に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され、開口幅が大きい程より効果的となる。
- 3) 潮位変動により、裏込部が斜面を有するため裏込内に存在する自由水面の幅が変化する。潮位が下がると実質的な圧抜き口の開口幅が大きくなると考えられ、遮水シート作用波圧はより軽減される結果が得られた。
- 4) 数値波動水路による解析シミュレーションは、慣性力係数 C_M ・抗力係数 C_D 、空隙率 n を適切に与えることで、精度良く実験値を再現できた。
- 5) ケーソン幅が大きくなると遮水シートに作用する波圧は抑えられる傾向がある。
- 6) 現実的な範囲内で裏込勾配が変化しても、遮水シート作用波圧にあまり影響を与えない。

参考文献

- 1) 高橋重雄・鈴木高二郎・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善功企・山崎浩之, 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, 1995
- 2) 酒井哲朗・間瀬肇・D. T. Cox・上田康浩, 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, 1991
- 3) (財)港湾空間高度化センター, 管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル, 2000. 11
- 4) 榊山勉・阿部宜行・鹿島遼一: 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, 1990
- 5) 磯部雅彦・高橋重雄・余錫平・榊山勉・藤間功司・川崎浩二・蔣勤・秋山実・大山洋志, 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, 1999