

鋼管矢板井筒護岸に適用した スリット式消波構造

SLIT-TYPE WAVE ABSORBING STRUCTURE APPLIED ON STEEL PIPE SHEET-PILE CELLULAR SEAWALL

稲垣聡¹・向原健¹・池谷毅²・新原雄二³・宮田正史⁴・野口孝俊⁵

Satoshi INAGAKI, Takeshi MUKOHARA, Tsuyoshi IKEYA, Yuji NIHARA,
Masafumi MIYATA and Takatoshi NOGUCHI

¹正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

²フェロー会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 東京土木支店 (〒135-0064 東京都江東区青海二丁目地先)

⁴正会員 工修 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三丁目1-1)

⁵正会員 国土交通省 東京空港整備事務所 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港三丁目3-1)

In the Tokyo International Airport (Haneda Airport) expansion project, the D runway will be constructed as a hybrid type structure with the piled-elevated platform and the reclaimed island. In the connecting area of the both part, a wave absorbing structure is planned to construct on the steel pipe sheet-pile cellular seawall to avoid the occurrence of uplift pressure under the platform and the high reflection waves. The hydraulic model tests for the slit-type wave absorbing structures have been performed to measure the wave reflection ratio and wave pressure distribution on the structure. This experiment showed the most suitable settings of the wave absorbing structure for the project.

Key Words : wave absorbing structure, steel pipe sheet pile, wave reflection, wave force, model experiment, Haneda Airport

1. はじめに

東京国際空港（羽田空港）再拡張事業において、図-1に示すように、D滑走路建設工事の南西側は多摩川河口域に位置するため、この部分は栈橋構造を採用し、残りを埋立部として建設される。栈橋部と埋立部は鋼管矢板井筒護岸により接続される。鋼管矢板井筒護岸の上部構造としてケーソンを用いた場合、ケーソンは直立壁であるため、反射波の航行船舶や周辺水域環境への影響、波の打上がりによる渡り桁や栈橋上部工への揚圧力の発生が懸念された。そこで、その対策として、鋼管矢板井筒護岸上部工にスリット式消波構造を採用した（図-2参照）。

本研究では、鋼管矢板井筒護岸上部工の断面2次元水理模型実験を実施し、直立護岸との消波性能の比較検討、局所的な波浪変形状の把握と作用波力の計測を行い、この場所に最適なスリット式消波構造の検討を行った。

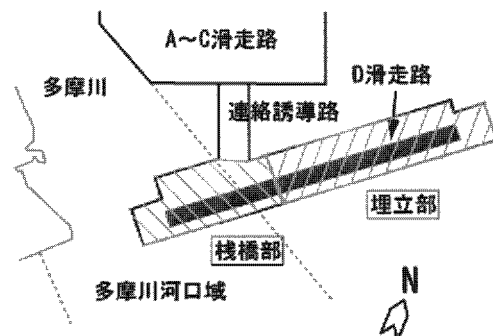


図-1 東京国際空港 D滑走路位置図

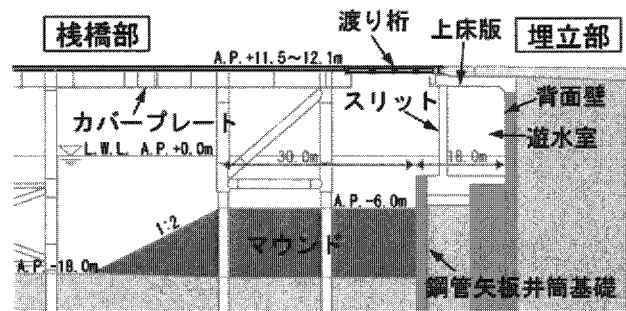


図-2 東京国際空港 埋立／栈橋接続部護岸

2. 水理実験方法

(1) 実験方法

水理実験は、鋼管矢板井筒護岸上部工に作用する波圧、波力および護岸前面での波反射率の計測を目的として、図-3 に示す造波水路（長さ60m、幅0.7m、深さ1.5m）を用いて行った。造波水路内に1/150勾配の海底面を模擬する斜面を設置し、水深45.0cmの位置に鋼管矢板井筒護岸上部工および碎石を盛ったマウンドの模型を設置した。模型縮尺は、フルード則に従い現地条件の1/40縮尺とした。

構造条件としては、表-1 に示すように、直立護岸1ケースと、スリット柱の断面形状、開口率、背面壁のハンチの有無をパラメータとするスリット式護岸6ケースの全7ケースで実施した。なお、上下ハンチ（図-4 参照）は、背面壁における波の跳ね返りをスムーズにし、護岸の波反射率低減に寄与できる可能性があるかを確認するために検討したものである。ここで、開口率 ε は式(1)に示すように定義する。

$$\varepsilon = \frac{S}{D+S} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 D （円柱の場合 Φ ）：部材幅、 S ：開口幅である（図-4）。

実験は一方不規則波で行った。実験で用いた波浪条件を表-2 に示す。Wave I、Wave II は暴風時、Wave III は供用時の条件である。なお、実験に先立ち、通過波検定を行って模型設置位置での波高を計測し、所定の波高および周期の波が入射していることを確認している。

a) 波反射率の計測

消波性能の比較検討は、池谷ら¹⁾の示した方法に従い、波高計を護岸前面に3箇所設置し、その出力を用いて入反射分離を行い、波反射率による比較を行った（図-3 参照）。なお、ここで計測される波反射率は、護岸上部工と前面マウンド全体からの反射率となる。

b) 波圧・波力の計測

護岸全体に作用する波力の計測は、護岸模型を下方から支持した水中6分力計を用いて計測した。また、波圧については、図-4 に示すとおり、護岸模型各断面に設置した波圧計により計測した。

表-1 構造条件

	形式	ハンチ		部材幅 (mm)	開口幅 (mm)	開口率
		上	下			
case 1	直立壁	—	—	—	—	—
case 2	スリット (角柱)	—	—	D=30	30	0.50
case 3		○	—			
case 4		○	○			
case 5	スリット (円柱)	—	—	$\phi=30$	30	0.50
case 6		○	—			
case 7		—	—		15	0.33

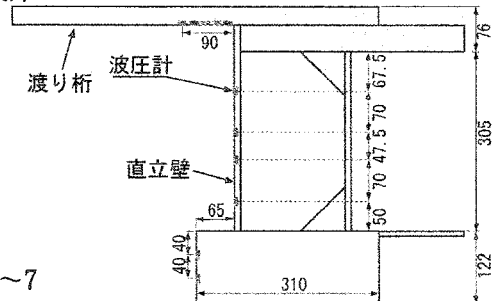
表-2 波浪条件

	波浪条件		マウンド 前面水深 (cm)	参考 (現地条件)
	有義波高 (cm)	有義波 周期(s)		
wave I	10.3 (4.15m)	1.31 (8.3s)	55.0 (22.0m)	暴風時 H.H.W.L. A.P.+4.0m
wave II			45.0 (18.0m)	暴風時 L.W.L. A.P.±0.0m
wave III	4.9 (1.96m)	0.93 (5.9s)	48.0 (19.2m)	供用時 M.W.L. A.P.+1.2m

※ () 内は現地スケール

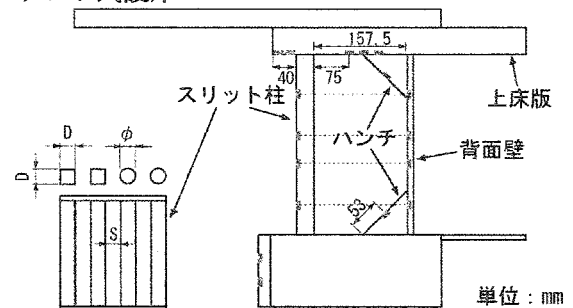
Case1

直立護岸



Case2~7

スリット式護岸



単位：mm

図-4 護岸模型

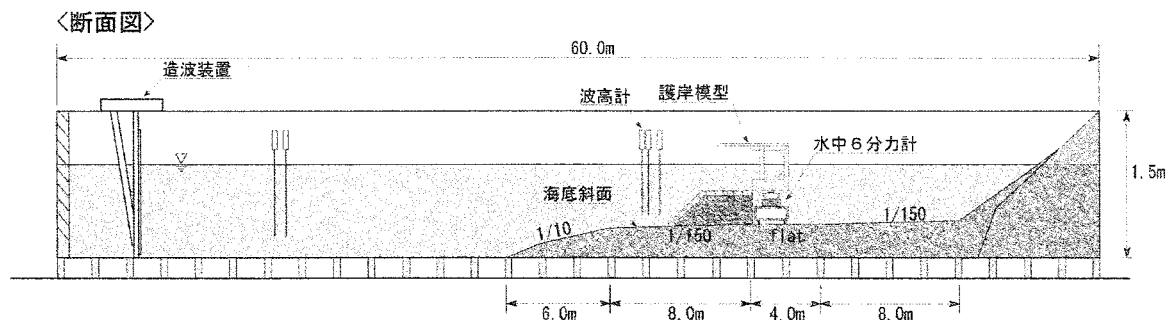


図-3 造波水路

直立護岸の Case1 では全ての波圧計を横断方向中央の位置に設置している。また、護岸部の波圧計は、潮位を考慮し静水位付近に寄った配置とし、渡り桁の波圧計は揚圧力計測のため直立壁付近に密に配置している。Case2～7 では遊水室後壁中央位置に波圧計があるため、中央部分をスリットとなるよう部材を配置とした。

(2) 実験結果

a) 直立護岸との消波性能の比較検討

各ケースの波反射率の計測結果を図-5 に示す。波反射率は、直立式護岸の Case1 が最も大きくなった。スリット柱の断面形状について開口率の同じ角柱 (Case2) と円柱 (Case5) で比較すると、角柱の方が円柱に比べ波反射率は小さくなった。ハンチの有無 (Case2・3・4) による波反射率への影響はなかった。また、開口率 ε については円柱の $\varepsilon=0.50$ (Case5) と 0.33 (Case7) で比較すると、 $\varepsilon=0.33$ のケースの方が波反射率が小さくなった。これは、開口率が大きいと消波性能が下がり、背面壁の影響によって波反射率が大きくなるためと考えられる。円柱の $\varepsilon=0.33$ と角柱の $\varepsilon=0.50$ は同程度の波反射率になった。

b) 局所的な波浪変形性状の把握と作用波力の計測

Case1 の実験状況を写真-1 に、Case7 の実験状況を写真-2 に示す。

護岸の設計においては護岸全体への最大波力および各構造部材 (スリット部・背面壁・上床版) への最大波力を知ることが重要である。図-6 に Case1～7 における護岸全体への最大波力を示す。また、各構造部材に作用する最大波圧分布の計測結果を図-7 に示す。ここで、図中の点線は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾ で示されている直立消波ケースンの部材設計波力分布例 (図-8 参照) である。

直立護岸では、波の打ち上げによって護岸上部付近の渡り桁に非常に大きな揚圧力が作用したのに対し、スリット式護岸では渡り桁及び上部工の上床版への揚圧力が大きく低減されることが確認された (図-7 参照)。

スリット柱の断面形状については、角柱スリット (Case2) と円柱スリット (Case5) を比較すると、角柱スリットではスリット部材上部付近の波圧が大きくなることが分かる。これは円柱では波が遊水室内に流れ込みやすいが、角柱の場合では、波が角柱前面の直立面に沿って上がってしまう為であると考えられる。一般に消波護岸では上空に波が打ち上がることは問題とならないケースが多いが、この接続部護岸には上部に滑走路があり、特にスリット上部の上床版近くには重要構造物の渡り桁があるため、揚圧力発生は小さければ小さい程望ましい。このことから円柱スリットの方が望ましいと考えられる。

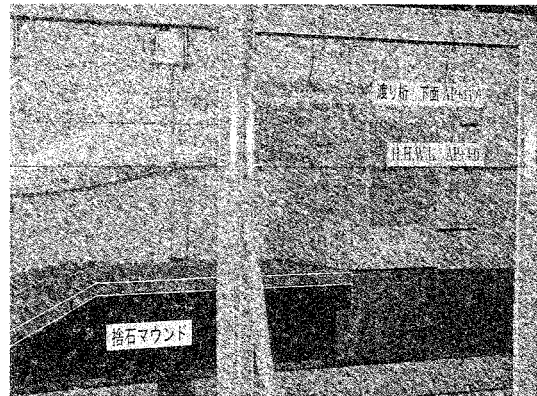


写真-1 実験状況 (Case1・Wave I)



写真-2 実験状況 (Case7・Wave I)

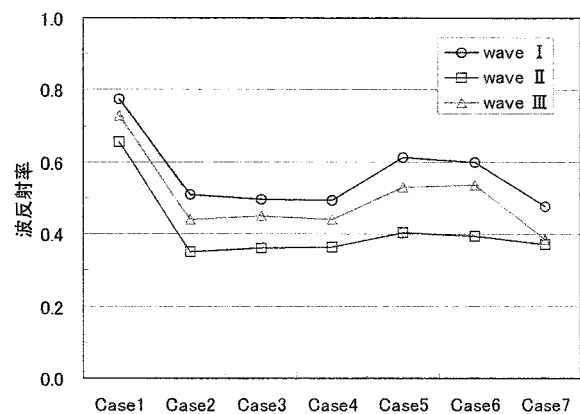


図-5 波反射率計測結果

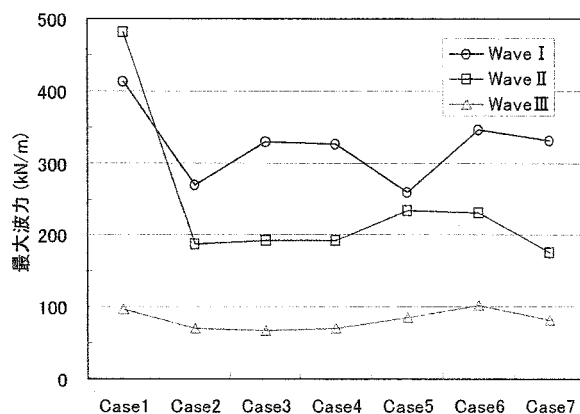


図-6 最大波力計測結果

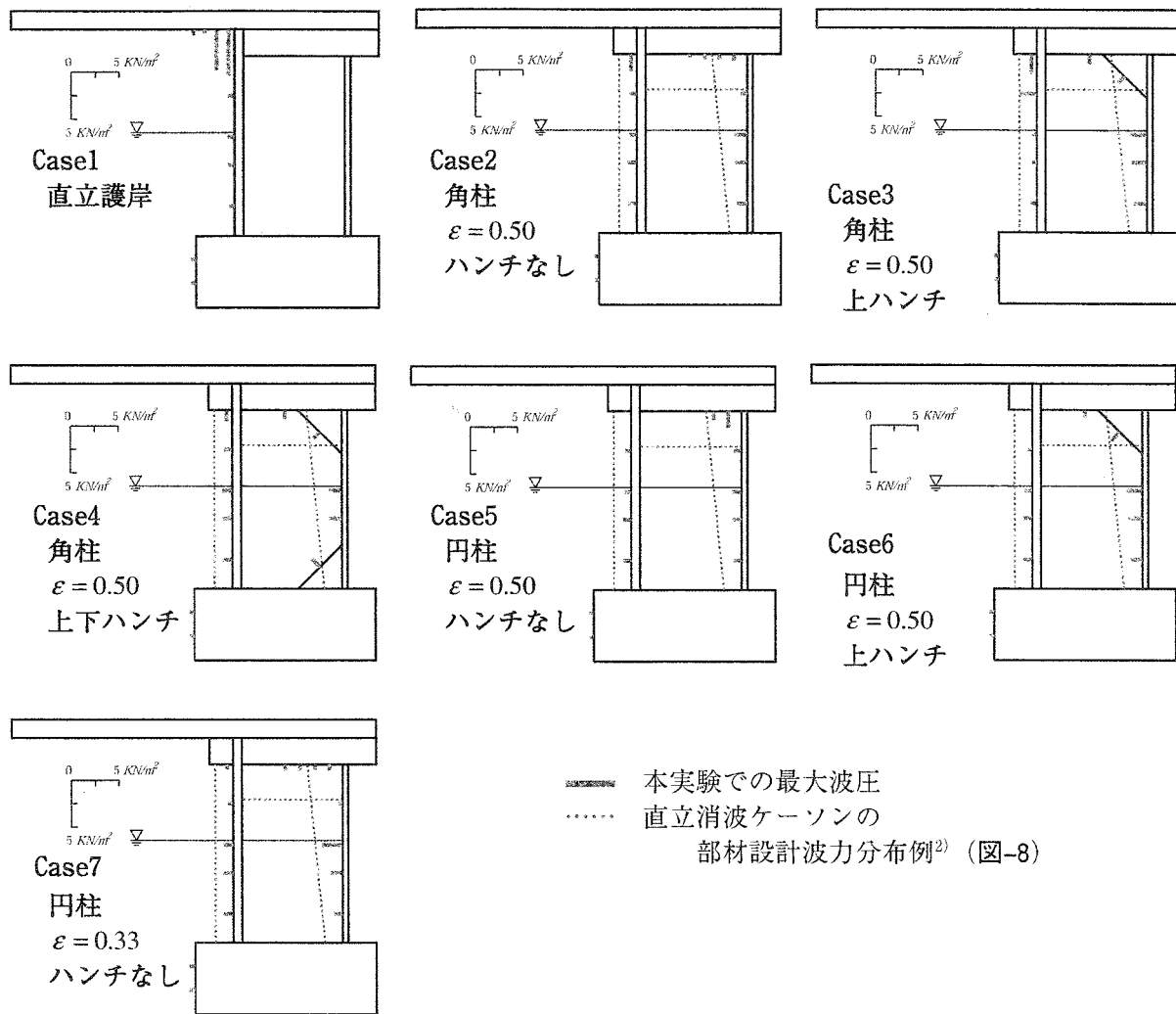
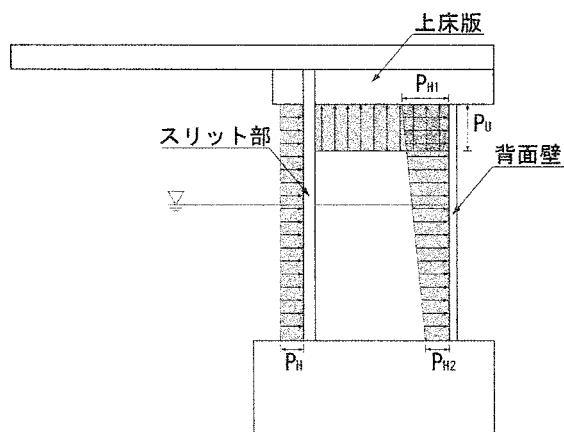


図-7 最大波圧分布 (Wave I)



- ・スリット部: $P_H = 1.0w_0H_{\max}$ (kN/m^2)
 - ・背面壁上部: $P_{H1} = 2.0w_0H_{\max}$ (kN/m^2)
 - ・背面壁下部: $P_{H2} = 1.0w_0H_{\max}$ (kN/m^2)
 - ・上床版: $P_U = 2.0w_0H_{\max}$ (kN/m^2)
- w_0 : 海水の単位体積重量 (kN/m^3)
 $H_{\max}$ ($=1.8 \times H_{1/3}$): 最高波高 (m)

図-8 直立消波ケーソンの部材設計波力分布例²⁾

下ハンチの効果について角柱スリットの Case3 と Case4 で比較すると、背面壁および上床版に作用する波圧には大きな差はなかった。このため、今回の条件下では、下ハンチには波力低減効果は認められなかった。

上ハンチの効果について Case2 と Case3, Case5 と Case6 で比較すると、上ハンチが波返しとしての役割を果たしていることは目視による観察で確認できたが、波圧分布に有意な差は見られなかった。上ハンチを設けることで揚圧力が最も大きくなる背面壁上部付近の上床版の波圧は小さくなると考えられるが、大きなサイズの上ハンチを設置することによる工費・工期の増大を考えるとハンチの存在は必須ではないと考えられる。

3. 消波構造の最適化検討

(1) 最適なスリット開口率と遊水室幅

直立のスリットを用いた消波構造の波反射率低減について谷本ら³⁾は、スリット壁の波反射率を支配

する要素として表-3に示す4つを挙げている（表中記号については図-9参照）。

今回の接続部護岸について、表-3に示した各項目の検討を行うにあたって、①は設定の入射波と護岸前の地形（マウンド）で決まる量である。また、③を決める遊水室内水深は、鋼管矢板井筒内の頂版コンクリートの高さで定まるが、これは鋼管矢板井筒の構造の安定から決まるものである。よって、①および③は与条件と考え、②開口率および④の遊水室幅について以下に検討を行う。波条件はWave I（暴風時）を対象とする。

a) スリット開口率

護岸前面水深 $h=30.0\text{cm}$ ，遊水室内水深 $h_2=17.5\text{cm}$ ，入射波波長 $L=2.0\text{m}$ より， $h/L=0.15$ となる。図-10 に開口率幅による波反射率の変化を示すが、波反射率 K_R が最小となる ε は $\varepsilon=0.3\sim0.4$ である。よって今回の接続部護岸断面では $\varepsilon=0.33$ 程度が適切であるといえる。これは、2. (2) a) で述べた実験結果を裏付けるものである。

b) 遊水室幅

図-11に谷本ら³⁾の示した、遊水室幅による波反射率の変化を示す。 $h/L=0.15$ のとき、 K_R が最小となる l_2/L_2 は $l_2/L_2 \approx 0.2$ である。遊水室内水深における波長 L_2 は $L_2=1.60\text{m}$ となることから、最適な遊水室幅は 32.1cm （現地： 12.8m ）であると考えられる。実構造物では、施工できる遊水室幅は鋼管矢板井筒幅に制限されるが、施工できる制限内で最大の幅を取ることが望ましいと考えられる。

表-3 縦スリットケーソンを支配する主要因

波の条件	① 相対水深（水深と波長の比） h/L
構造条件	②スリット壁の開口率 ε
	③前面水深に対する遊水室内水深の比 $q=h_2/h$
	④前面水深に対する遊水室幅の比 l_2/h

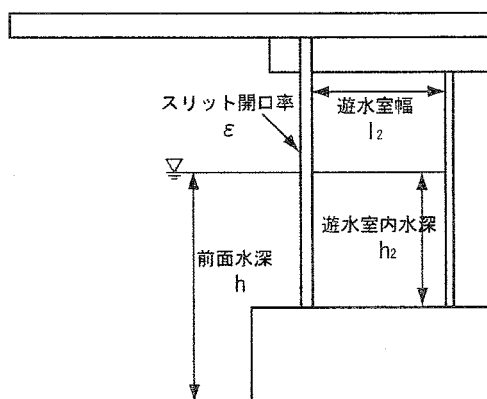


図-9 記号説明

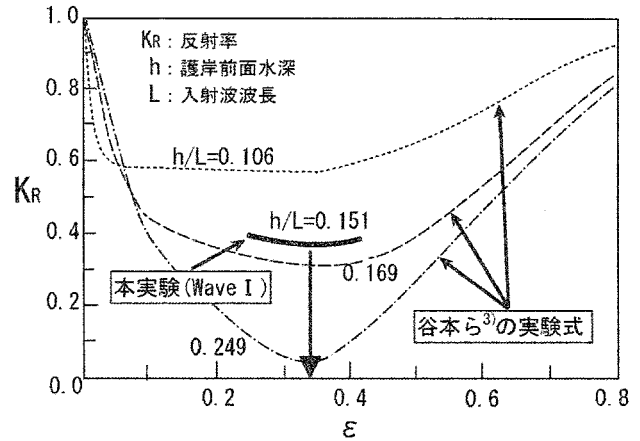


図-10 開口率による波反射率の変化

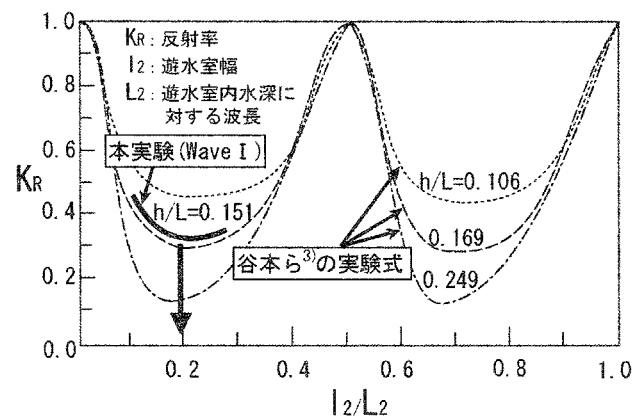


図-11 遊水室幅による波反射率の変化

(2) 斜め入射波による影響

本実験は断面二次元で実施しており、波は護岸に直角に入射させている。しかしながら今回の接続部護岸においては、実際には暴風時波浪は直角から約 40° の角度を持った斜め入射波となる。

消波スリット壁に対し平面的に斜めから入射する波の反射率については、谷本ら⁴⁾は「スリットケーソンの反射率は波の入射方向からみた見掛けの消波部幅によってほぼ決まり、スリット壁厚も含めた見掛けのケーソン消波部幅が波長の $10\sim25\%$ のとき反射率は極小となる」と述べている。

消波部幅は図-12に示すようにスリット壁前面から背面壁までの距離である。斜め入射波の場合、入射方向からみた見掛けの距離は直角入射波よりも長くなる。本検討においては、入射波 40° の見掛けの遊水室幅は最適遊水室幅 32.1cm に近づく結果となった。従って、波反射率については直角入射の実験結果よりも、斜め入射波では低減されることが期待でき、実験は安全側の評価となっていると考えられる。

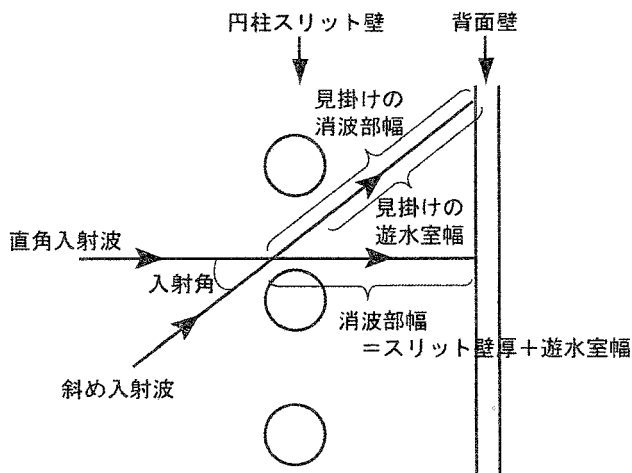


図-12 消波護岸と消波部幅の模式図

(3) スリット部材の断面形状

2. (2)で述べたように、同じ開口率で比較すると、角柱スリットは円柱スリットに比べ、波反射率は小さくなる一方で、波がスリットに沿って上がってしまい、スリット上部の上床版に作用する揚圧力は大きくなる。

また、波が斜め入射する場合には、角柱スリットでは波向き方向に対する投影面積が大きくなり、また直立面における波反射が大きいため、遊水室への波の進入は少なくなる。一方で、「円」は形状の方向性による違いが無いいため、円柱スリットはどのような角度から入射した波も直角入射と同様に円柱部材に沿って遊水室に入射し、直角入射波による本実験で得られた消波性能を安定して発揮することが期待できる。

以上より、波反射率の観点からも、円柱スリットは角柱スリットより優れていると考えられる。

4. おわりに

東京国際空港再拡張事業における埋立部と栈橋部が接続する鋼管矢板井筒護岸上部工について断面2次元水理模型実験を実施し、スリット式消波構造と直立護岸との消波性能の比較検討、局所的な波浪変形性状の把握及び作用波力の計測を行った。その結果、今回の実験状況下において以下の知見を得た。

- ・スリット式護岸では、直立護岸と比較して波反射率及び作用波力は小さくなり、波の打上げによる揚圧力が低減されることが確認された。
- ・スリット柱の断面形状については、開口率の同じ角柱と円柱で比較すると、角柱の方が円柱に比べ

波反射率は小さくなった。しかし、角柱スリットは波が角柱前面の直立面に沿って上がってしまい、スリット上部付近の波圧が大きくなる。さらに、斜め入射に対しては円柱スリットの方が優れている。

- ・開口率については、大きすぎると消波性能は下がり、波反射率が大きくなった。今回の接続部護岸断面では実験結果と谷本らの示した結果を合わせ、開口率0.33程度が適切であるといえる。
- ・遊水室内の上下ハンチについては、上下ハンチの有無による波反射率への影響はなかった。下ハンチの有無による背面壁および上床版への波圧には大きな差はなかった。このため、今回の条件下では、下ハンチには波力低減効果は認められなかった。上ハンチは波返しとしての役割は果たしていることは確認できたが、上ハンチの有無による波圧分布の違いは小さいことが確認された。このことからハンチを設けることで揚圧力が最も大きくなる背面壁上部付近の上床版の波圧は小さくなると考えられるが、施工性を考えるとハンチの存在は必須ではない。
- ・遊水室幅は、谷本らの示した最適遊水室幅にするのが望ましいと考えられるが、実構造物では施工できる幅が鋼管矢板井筒幅に制限されるので、この制限内で最大の幅を取ることが望ましいと考えられる。

以上より、消波性能や作用波力、施工条件の観点から、接続部護岸における最適な構造は「開口率0.33の円柱スリット、ハンチなし、遊水室幅は鋼管矢板井筒幅範囲内で最大の幅」と考えられる。

なお、本研究は東京国際空港D滑走路建設工事の設計業務の一環として実施した成果の一部である。

謝辞：本実験の計画及び結果評価に関して、(独)港湾空港技術研究所海洋・水工部の平石哲也波浪研究室長と下迫健一郎耐波研究室長に貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 池谷毅、稲垣聡：二次元不規則波実験における入射波・反射波の高精度分離法、鹿島技術研究所年報、第54号、2006。
- 2) 運輸省港湾局監修：「港湾の施設の技術上の基準・同解説」、上巻、日本港湾協会、pp.407,1999。
- 3) 谷本勝利、吉本靖俊：直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究、港湾技術研究所報告、第21巻、第3号、pp.43-77,1982。
- 4) 谷本勝利、吉本靖俊：斜め入射波に対する曲面スリットケーソンの反射および部材波力特性に関する実験的研究、港湾技研資料、No.493,1984。