

垂下版式低反射工の潮位による反射波低減効果 の変動特性とその対策法について

VARIATIONS OF EFFECTIVENESS OF A VERTICAL-BARRIER-TYPE
REFLECTION WAVE DISSIPATER WITH TIDAL LEVEL AND
POSSIBLE COUNTER MEASURES

中村孝幸¹・佐伯信哉²・中山哲巖³・大村智宏³

Takayuki NAKAMURA, Shinya SAEKI, Akiyoshi NAKAYAMA and Tomohiro OHMURA

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町三番)

²正会員 (株)荒谷建設コンサルタント (〒790-0045 松山市余戸中二丁目1番2号)

³正会員 工修 (独法)水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部
(〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

We have already presented a new type of reflection wave dissipater, which has a curtain wall in front of the vertical seawall. The mechanism of the dissipater is to enhance vortex flows around the lower edge of curtain wall by the use of piston mode wave resonance in the water chamber. In order to expand the usage of the dissipater to the sea with comparatively large tidal difference, performance of the dissipater for various water levels is examined extensively. As a countermeasure to the variation of performance with tidal difference, we propose two different types of dissipaters, i.e., a vertically inclined wall unit and a combination of different draft wall units along the shore. Effectiveness of such dissipaters is examined experimentally and theoretically for various water levels.

Key Words : reflection wave dissipater, tidal difference, combination of different draft units, inclined wall unit, piston-mode wave resonance, damping wave theory

1. 序論

既に著者ら¹⁾は、直立堤などの不透過堤の前面に水面付近のみを遮断する鉛直版を設けることにより、反射波の低減を可能とする垂下版式の反射波低減工を提案した。しかしながら、このような垂下版式低減工は、水面付近のみを遮断する構造であるため、潮位に伴いその効果が変動する欠点がある。また、消波機構として遊水室内のピストンモード波浪共振を利用するため、反射波低減に有効な周期帯が比較的狭いことも指摘されている。これら問題点の対処方法として、垂下版を二重にする方法も提案されているが、構造が複雑になることや水域・背後地が狭い区域では適用しにくい面もある。

そこで本研究では、潮位変化に対しても反射波低減効果の変動を最小にする方法として、平面および断面的な2タイプの潮位差対策工法を提案する。平面的な潮位差対策工法は、図-1に示すように垂下版の吃水深が異なる2種類または3種類の低減工のユニットを交互配列する方法を採用し、その有効性を

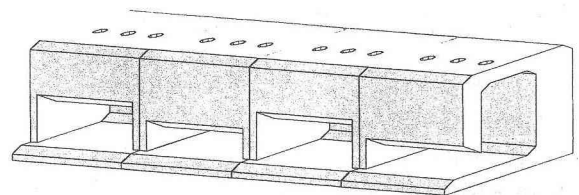


図-1 異吃水ユニットの組み合わせ模式図

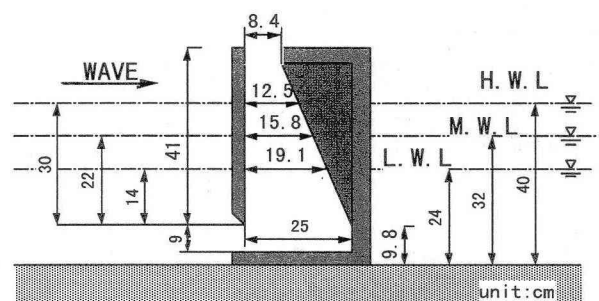


図-2 傾斜型遊水室ユニット断面図

実験と理論により明らかにする。断面的な潮位差対策工法は、図-2に示すように潮位により遊水室水線幅が変化する傾斜型遊水室ユニットを提案し、その有効性を同様に検討する。

2. 平面的な潮位差対策工法

3m程度の潮位差がある瀬戸内海での施工を想定し、潮位変化に対する反射波低減効果に着目した。具体的には、潮位が変化しても消波対象波に対して同様な反射波低減効果を得られるような異吃水ユニットの組み合わせについて検討する。また、異吃水ユニットの平面配置状況は左右非対称であるため、反射波の斜波成分の特性についても検討する。

(1) 実験装置および実験方法

a) 模型堤体

実験は、図-3に示すように垂下版の長さが37cm、41cm、45cmと異なる3種類の単一式垂下版モデルS、M、Dを使用した。垂下版モデルの設計は、式(1)に示す簡易設定法¹⁾に基づき決定した。

$$s = \frac{\sqrt{Bd}}{L} \approx 0.1 \tag{1}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \tag{2}$$

ここに、 s ：簡易設定法による算定値、 B ：遊水室幅、 d ：吃水深、 L ：波長、 T ：周期、 h ：水深、 g ：重力加速度である。

本実験では、上式で周期 $T=1.5\text{s}$ （現地周期換算で 6.7s ）に設定し、3潮位（H.W.L.時、M.W.L.時、L.W.L.時）に対して最適となるような3種類の垂下版モデルを設計した。このとき、遊水室幅 B は、安定性および施工性を勘案して、 $B=25\text{cm}$ で一定とした。そして、図-4に示すように、吃水深の異なる垂下版式低減工を3種類、または2種類を平面的に組み合わせた。なお、これら想定した模型堤体の縮尺は、現地の約 $1/20$ である。

b) 実験水槽および測定装置

実験は、（独法）水産総合研究センター水産工学研究所の幅 10m 、長さ 30m の平面水槽を用いた。測定装置は、模型堤体の沖側に入射波測定用、入・反射波の分離推定用²⁾1台と反射波の平面分布解析用³⁾に堤体法線平行方向に 25cm 間隔で11台、計13台の容量式波高計を設置した。その設置状況を図-5に示す。

c) 実験条件

堤体に作用させた入射波は、入射波高 $H=7.5\text{cm}$ 、周期 $T=0.80\text{s}\sim 2.10\text{s}$ の範囲の規則波である。水深 h は、現地の潮位変化を想定して、 $h=24\text{cm}$ （L.W.L.時）、 $h=32\text{cm}$ （M.W.L.時）、 $h=40\text{cm}$ （H.W.L.時）の3種類で実験を行った。実験条件を表-1に示す。

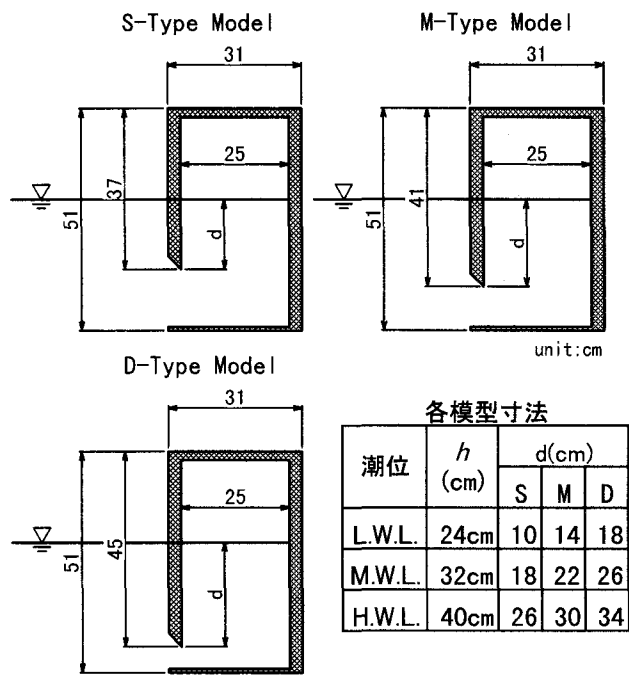


図-3 垂下版模型（S、M、D）-Typeの詳細図

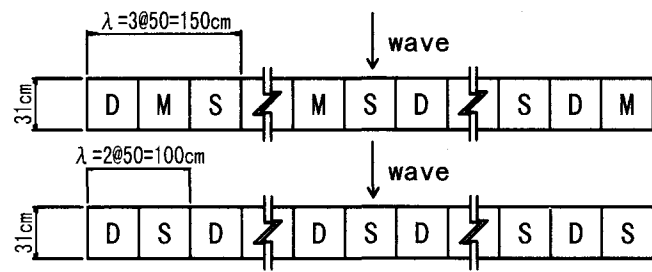


図-4 模型配置図（上段：3種類，下段：2種類）

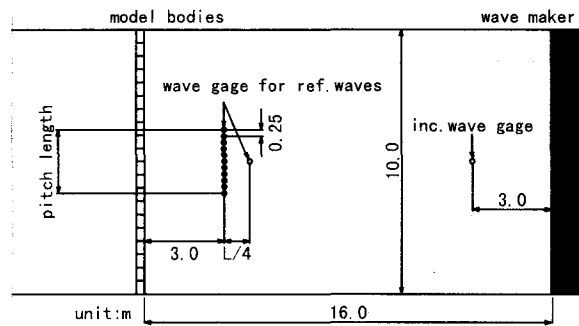


図-5 実験水槽および計測装置設置位置

表-1 実験条件

潮位	水深 h(cm)	模型種類	ピッチ長 λ (cm)	遊水室幅 B(cm)	周期 T(s)	入射波高 H(cm)	縮尺
L.W.L.	24	3種類	150	25	0.80 ～ 2.10	7.5	1/20
M.W.L.	32						
H.W.L.	40						
M.W.L.	32	2種類	100				

(2) 異吃水ユニット群による効果とその特徴

a) 潮位差対策の必要性

図-6は、中村ら¹⁾による単一式垂下版に対する反射率 Cr の実験結果および減衰波理論⁴⁾による算定結果を各潮位別に再整理したものである。図中には、横軸に現地周期 T を用い、H.W.L. 時 ($h=9.6\text{m}$)、M.W.L. 時 (同 7.8m)、L.W.L. 時 (同 4.8m) の3条件について併せ示してある。この図より、有効周期帯が比較的狭いこと、潮位変化により有効周期帯が有意に変化することが確認できる。たとえば、周期 4.7 秒の波に対してL.W.L. 時は反射率が約 0.2 であるのに対して、H.W.L. 時は 0.6 を超える。そのため、潮位にかかわらず安定した反射波低減効果を発揮するためには、潮位差対策が必要になるといえる。

b) 異吃水ユニット群による効果

図-7は、異吃水ユニット3種類の組み合わせによる各潮位における反射率 Cr の実験結果と算定結果を、 L/B (L : 入射波長、 B : 遊水室幅) による変化で示している。なお、算定には従来の研究¹⁾と同様に線形抵抗係数 $f_c=0.20$ を用いた。また、異吃水ユニットの反射率 Cr の算定は、式(3)に示すような各ユニットの反射波エネルギーフラックスを合成する方法により算定した。

$$Cr = \sqrt{\sum Cr_i^2 \cdot l_{Bi} / \sum l_{Bi}} \quad (3)$$

ここに、 l_B : 各吃水ユニットの堤長である。

この図より異吃水ユニット群では $L/B=6\sim9$ の範囲では潮位変化の影響を受けるものの、 $L/B=9\sim12$ の範囲では潮位変化にかかわらず同様な反射波低減効果が認められる。反射波低減効果が認められる周期帯は、異吃水ユニット群による有効周期帯の拡大の効果をjける周期帯であるといえる。一方、潮位変化の影響を受ける周期帯の反射波低減効果は、潮位によって反射率の極小値が異なるため不安定であるといえる。

図-8は、M.W.L. 時における3種類または2種類の垂下版からなる異吃水ユニット群の反射率 Cr の実験結果と、垂下版前面の鉛直板の吃水深が異なる3種類の単一式垂下版における反射率 Cr の算定結果を、 L/B による変化で示してある。この図より、単一式垂下版と比べて異吃水ユニット群は反射波低減効果の有効周期帯（ここでは、反射率 $Cr=0.5$ 以下と設定した）が拡大されていることが確認できる。また、3種類と2種類の異吃水ユニットとも有効周期帯は拡大しているが、組み合わせ法の違いによる反射波低減効果と有効周期帯の差はほとんど見られない。この結果はM.W.L. 時のみのものであり、H.W.L. 時、L.W.L. 時の条件に対しても実験を試みる必要はあるが、現地を想定すると2種類の異吃水ユニット群の方が施工も容易であり有効であると考えている。

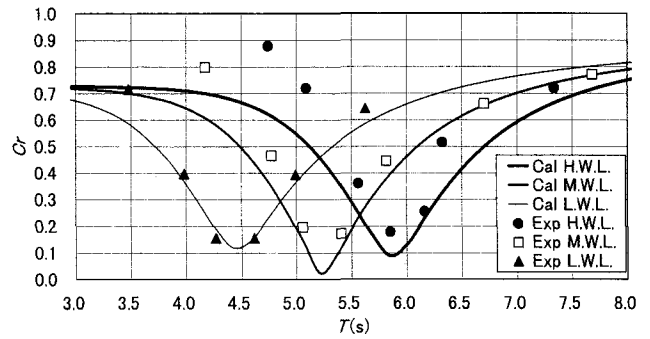


図-6 単一垂下版の潮位による反射率の変化

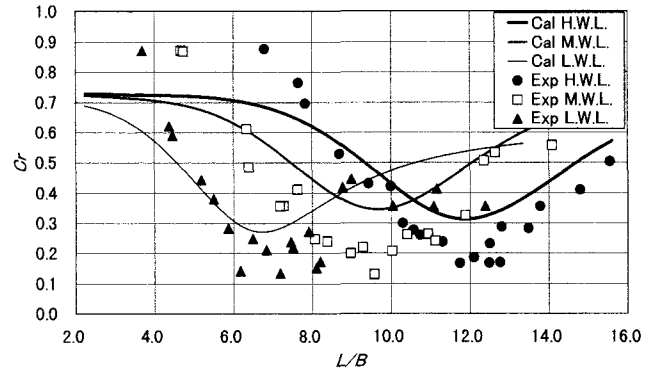


図-7 異吃水ユニット群の潮位による反射率の変化
(異吃水ユニット3種類組み合わせ)

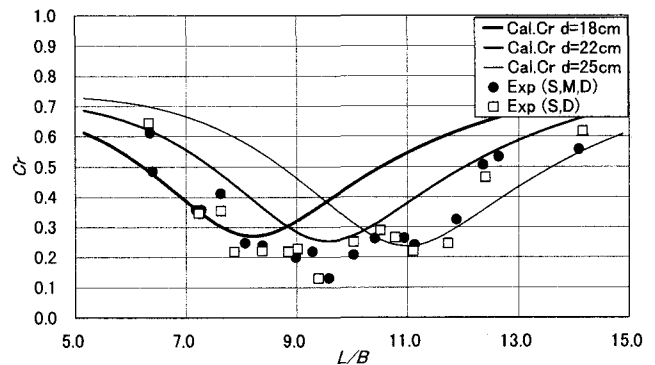


図-8 異吃水ユニット組み合わせ効果の比較
(M.W.L. 時)

c) 反射波の平面的な特徴

図-9～11は、L.W.L. 時、M.W.L. 時、H.W.L. 時における3種類の垂下版を用いた異吃水ユニットに対する反射波エネルギーの方向分布を示したものである。図中の縦軸は、各方向成分の反射波エネルギーの総和 E に対する方向別の成分 e との比 e/E を、横軸は配列ピッチ長 λ と入射波長 L との比 λ/L で示す。ここに λ は、異吃水ユニットの繰り返し長であり、配列ピッチ長は、 $\lambda=150\text{cm}$ である。

中村ら³⁾は、規則的に配列された堤体群まわりの波高分布に着目して、式(4)により横波共振の発生条件を明らかにしている。

$$\lambda/L \geq n/(1 \pm \sin \theta) = n \quad (4)$$

ここに、 θ ：入射角（本実験では $\theta=0^\circ$ ）である。中村らによると、 $1 < n < 2$ の条件下で反射波の斜波成分が発生するとされている。これらの図より、有意な大きさではないものの、 $0.6 < n < 1$ の条件下でも斜波成分は発生しており、低潮位時にその傾向が現れている。低潮位時は、垂下版からの反射波に加えて、遊水室内からの位相の異なる反射波が発生することに起因しているためと考えている。

(3) 異吃水ユニット群の設計法

前面垂下版の吃水深の異なる2種類、または3種類の垂下版式反射波低減工を平面的に組み合わせる異吃水ユニットは、潮位に関係なくほぼ同様な反射波低減効果を維持でき、しかも有効周期帯を拡大できることがわかった。すなわち、簡易設定法を用いて設計することにより、潮位に関係なくほぼ消波対象周期の反射率の低減が行える。異吃水ユニット群の特徴は、消波対象周期より長周期側で反射率の低減効果が見られることである。そこで、有効周期帯の拡大幅を考慮した、効果的な異吃水ユニットの設計法について検討する。

図-12は、各潮位における L/B に対する簡易設定法による算定値 s の変化を示したものである。ここで、簡易設定法による算定値 s は、各潮位に対してユニット別に算定した算定値 s を算術平均したものである。図中には、異吃水ユニット3種類の組み合わせによる各潮位における反射率 Cr の実験結果も併せ示してある。この図より、簡易設定法による設計を行った場合、 $s \approx 0.1$ の範囲は、潮位変化の影響により $7(L.W.L.) < L/B < 11(H.W.L.)$ となることがわかる。実験結果からみれば、M.W.L.時～H.W.L.時における波長 L を用いて、 $10 < L/B < 11$ となるような遊水室幅 B を仮定し、簡易設定法により吃水 d を決定すれば合理的に設計できる。

3. 断面的な潮位差対策工法

断面的な潮位差対策法として、傾斜型遊水室構造を採用した。この原理は、反射率が極小となる波長（周期）条件が遊水室水線幅と吃水深の積の平方根で定義される遊水室特性長と密接に関係することを利用している。すなわち、潮位が下がるとこの水線幅が広がることで吃水深の減少を補完する方法である。

(1) 実験装置および実験方法

a) 模型堤体

実験に使用した模型堤体は、図-2に示すように鉛直板の長さ41cmの垂下版模型を使用し、堤体内部に斜板を設置した。本実験では、周期 $T=1.2s$ （現地周期に換算すると5.35s）に設定し、各潮位での水際線における遊水室幅 B_s が、式(1)を概ね満足するように設計した。式(1)を考えると、水深 h と遊水室幅 B_s の関係は曲線になるが、施工性を勘案し直線一

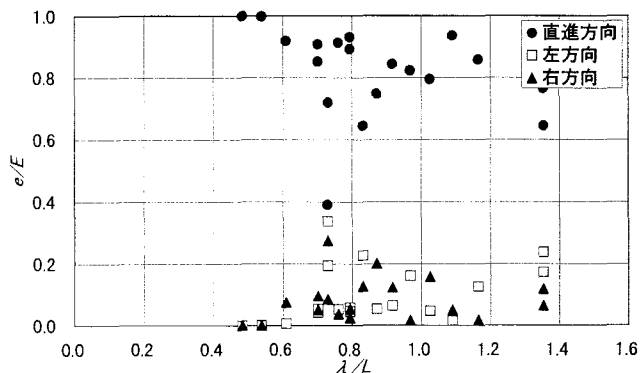


図-9 L.W.L.時の反射波エネルギーの方向分布

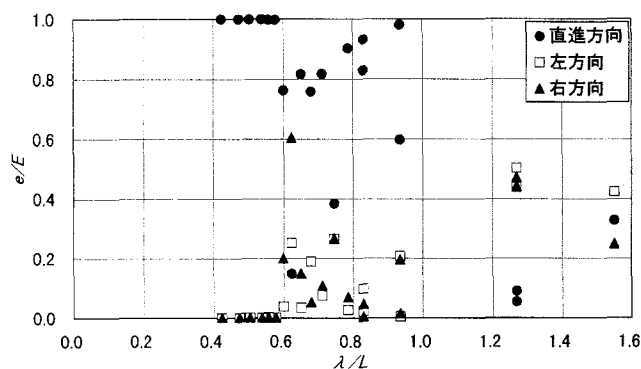


図-10 M.W.L.時の反射波エネルギーの方向分布

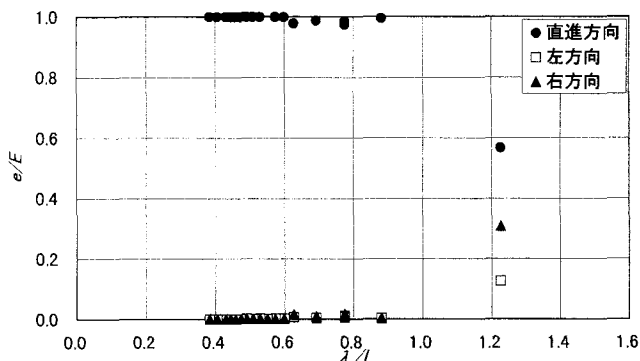


図-11 H.W.L.時の反射波エネルギーの方向分布

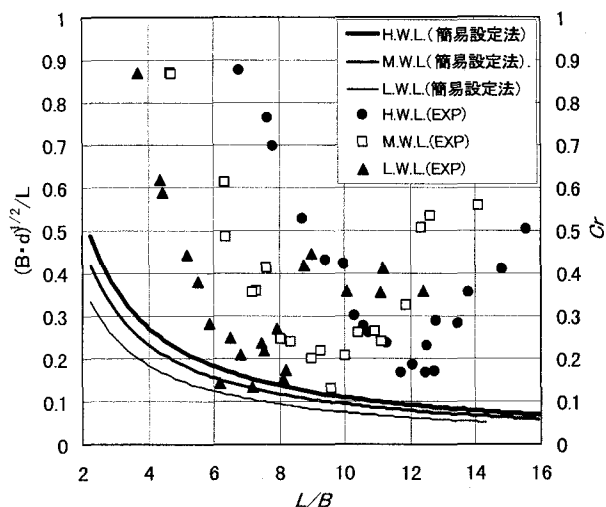


図-12 簡易設定法による算定値 s の潮位と波長による変動幅と反射率 Cr の実験結果

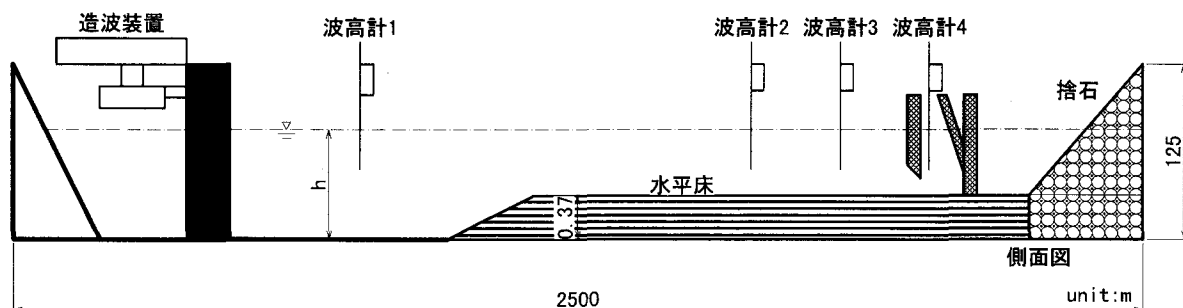


図-13 実験水槽および計測装置設置位置

様勾配とした。模型堤体の縮尺は、異吃水ユニットと同様に、現地の約1/20とした。

b) 実験水槽および測定装置

実験は、愛媛大学工学部環境建設工学科の長さ25m、幅1m、高さ1.25mの2次元水槽を用いて行った。この水槽の一端には、サーボ式モータを動力源とする反射波吸収方式のピストン型造波装置が、他端には端部からの再反射を防ぐために砕石からなる消波工が設けてある。また水槽には、造波装置から12.8m～23.8m、合計11mの区間には、高さ37cmの水平床が設けてある。測定装置は、模型堤体の沖側に、入射波測定用に1台、入・反射波分離用に2台、遊水室内の振幅測定用に1台、計4台の容量式波高計を設置した。その設置状況を図-13に示す。

c) 実験条件

堤体模型に作用させた入射波は、入射波高 $H=7.5\text{cm}$ で、周期 $T=0.80\text{s} \sim 2.0\text{s}$ の範囲内で複数の実験条件を採用した。水深 h は、 $h=24\text{cm}$ (L.W.L. 時)、 $h=32\text{cm}$ (M.W.L. 時)、 $h=40\text{cm}$ (H.W.L. 時) の3種類で実験を行った。

(2) 傾斜型遊水室ユニットの効果とその特徴

a) 潮位差対策としての効果

図-14は、各潮位に対する傾斜型遊水室ユニットの反射率 Cr の実験結果と算定結果を、 L/B_b (B_b : 遊水室底面幅) による変化で示している。

この図より、潮位にかかわらず $L/B_b=8$ 付近で反射率 Cr は極小値を示すことが確認できる。

この傾斜型遊水室ユニットでは、反射波低減効果のピーク時の周期は水深にかかわらず同等なものになるが、有効周期帯の幅は水深が深くなるにつれて狭くなる傾向が見られる。図-15は、H.W.L. 時における傾斜遊水室ユニットに対する反射率 Cr の実験結果と算定結果を示す。図中には、比較のため遊水室幅 $B=12.5\text{cm}$ 、吃水深 $d=30\text{cm}$ の矩形遊水室の場合における反射率 Cr の算定結果を示す。この図より、H.W.L. 時における傾斜型遊水室ユニットは遊水室幅 $B=12.5\text{cm}$ 、吃水深 $d=30\text{cm}$ の矩形遊水室ユニットとほぼ同様な反射波低減効果であることが分かる。このことから、有効周期帯の幅が狭くなるの

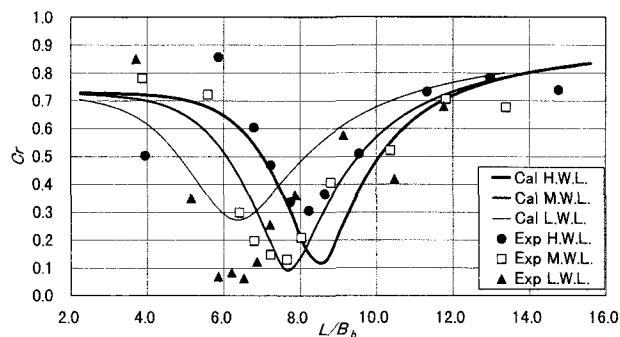


図-14 傾斜型遊水室ユニットの反射率の変化

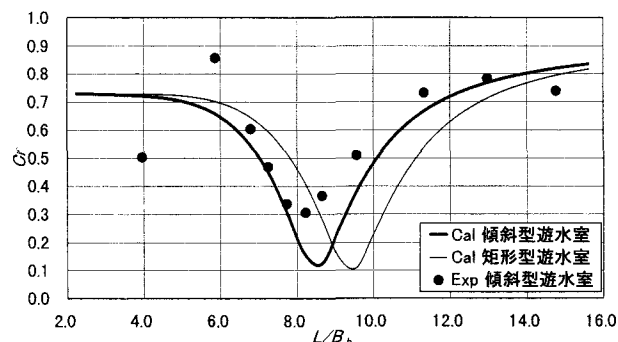


図-15 遊水室構造の違いによる反射率の比較
(H.W.L. 時, $B_s = B = 12.5\text{cm}$, $d = 30\text{cm}$)

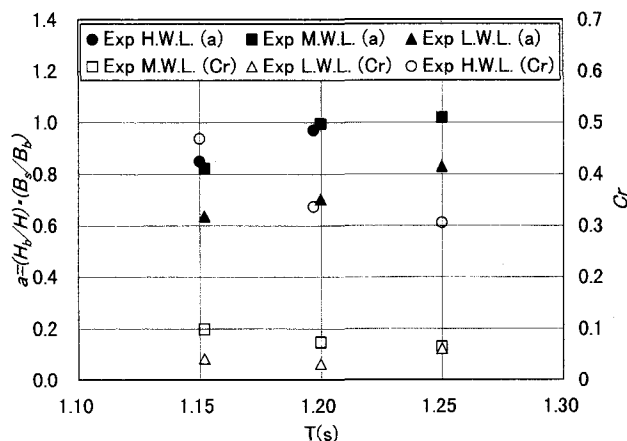


図-16 遊水室内の波高増幅度と反射率の関係

は、遊水室幅が影響しているといえる。

b) 傾斜遊水室内の波高変動

図-16は、 $T=1.2\text{s}$ 付近の周期条件で、H.W.L. 時、M.W.L. 時、L.W.L. 時の反射率 Cr と入射波高 H と遊

水室内の波高 H_b による波高増幅度 $a = (H_b/H) \cdot (B_s/B_b)$ の周期 T による変化を示す。波高増幅度は、遊水室水際線幅 B_s が潮位により変化するため、遊水室底面幅 B_b との比 B_s/B_b を乗じた。この図より、潮位が低いときに波高増幅度が低いことが確認できる。一般的には、遊水室内の波高増幅度が大きいと反射率は小さくなると考えられているが、傾斜型遊水室ユニットでは遊水室内の波高増幅度が小さなL.W.L.時がH.W.L.時よりも反射率が小さくなっている。この原因は、傾斜型遊水室ユニットでは遊水室内での波高増幅度が小さいため、渦流れへのエネルギー転換による反射波エネルギー逸散に比べ、垂下版吃水深による反射波の影響が大きいものと考えている。

4. 結語

(1) 前面垂下版の吃水深の異なる2種類または3種類の垂下版式反射波低減工を平面的に組み合わせる異吃水ユニットは、潮位に関係なくほぼ同様な反射波低減効果を維持でき、しかも有効周期帯を拡大できる

ため潮位差対策法として有効である。

(2) 異吃水ユニット群の設計法は、単一垂下版の場合と同様に、簡易設定法により合理的に設計できる。

(3) 遊水室の鉛直断面が台形状である傾斜型遊水室ユニットは、潮位に関係なく同一周期条件下で反射率が極小になるなど、潮位差対策法として有効である。ただし、有効周期帯の拡大は期待できないため、消波対象波が明らかな場合に限定される。

参考文献

- 1) 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野塚孝: 渦流れの増大現象を利用した垂下版式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 797-800, 1999.
- 2) 合田良実, 鈴木康生, 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, pp. 199-245, 1976.
- 3) 中村孝幸, 小野正順: 波向きを考慮した堤体列まわりの平面的な波変形の評価法について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 534-538, 1990.
- 4) 中村孝幸, 高木伸雄, 中山哲蔵, 河野徹, 菊池一郎: 減衰波理論に基づく斜波中の波浪境界値問題の解析法とその適用性について, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 781-785, 2001.