

減衰波理論に基づく数値解析法のジャケット式 遊水室型防波堤への適用性

APPLICABILITY OF THE NUMERICAL ANALYSIS BASED ON THE DAMPING WAVE MODEL TO JACKET TYPE WATER CHAMBER BREAKWATERS

中村孝幸¹・河野徹²

Takayuki NAKAMURA and Tohru KOUNO

¹ 正会員 工博 愛媛大学大学院准教授 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

² 正会員 (財)災害科学研究所 研究員 (〒530-0005 大阪市北区中之島3丁目2-4)

A jacket type breakwater with a water chamber is useful and multi-functional. For instance, it can reduce both reflected and transmitted waves and also wave forces. However, there are some disadvantages too, such as difficulties of predicting breakwater performances and wave loading characteristics because of mainly complex structure of the breakwater. In order to establish the prediction method of wave transformations and wave forces about a jacket type breakwater with a water chamber, the conventional damping wave model has been revised to account for wave dissipation phenomena more accurately, typically, the setting of the damping wave domain and also the identification of the linear damping coefficient.

Key Words : Jacket type breakwater, wave transformation, wave loading, damping wave model, damping domain, linear damping coefficient

1. まえがき

ジャケット式遊水室型防波堤は、上部工の吃水深が浅くても、透過波の遮断効果に優れることや、結果的に作用波力が低減できることおよび海水交換促進機能も期待できることなどを利点としている。ただし、上部工が箱形であるため、部材間での位相差など作用波力の推定が複雑になりやすいことや、原理的に強い渦の発生を促す構造であるため、波エネルギーの逸散現象を考慮できる波変形の算定が必要になるなど、数理的な取り扱いが難しい欠点がある。

本研究は、従来において提案されている減衰波理論に基づく数値解析法¹⁾を対象にして、ジャケット式遊水室型防波堤への適用性を反射・透過率などの波変形および作用波力に着目して検討する。比較の対象とする実証結果は、既に著者ら^{2),3)}が現地での防波堤の建設を想定して実施した模型実験の結果を使用する。また、従来の減衰波理論に基づく数値解析法¹⁾では、減衰波領域の設定や線形抵抗係数の設定などに問題があるものと推定されるが、実験結果との一致度が十分でない場合も報告されている。本項は減衰波領域の設定法など比較的簡単に改良できる点を中心に算定モデルの修正を行い、その妥当性についても検討する。

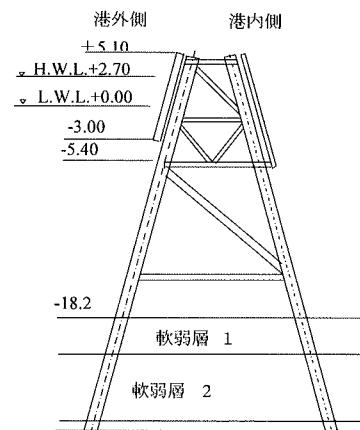


図-1 ジャケット式遊水室型防波堤

2. 従来の成果^{2),3)}

(1) 検討項目及び模型堤体

ここでは、実際の現場適用の事例がある図-1に示すジャケット式遊水室型防波堤による波変形および作用波力の成果を対象にして検討する。

模型実験は図-2に示すような遊水室部分を約

1/32の縮尺で模型化したものである。波変形は、計5台の波高計を用いて、入射波、反射波、透過波、遊水室内の波高などが測定している。また、堤体の底板と水底間には計3台の超音波流速計が設置しており、海水交換量も測定している。

一方、作用波力の測定は、図中に示すように波圧計を前壁5ヶ所、後壁5ヶ所、没水平版4箇所の計14ヶ所について表裏に合計28台を配置して実施している。これらの詳細は、参考文献2), 3)を参照して頂きたい。

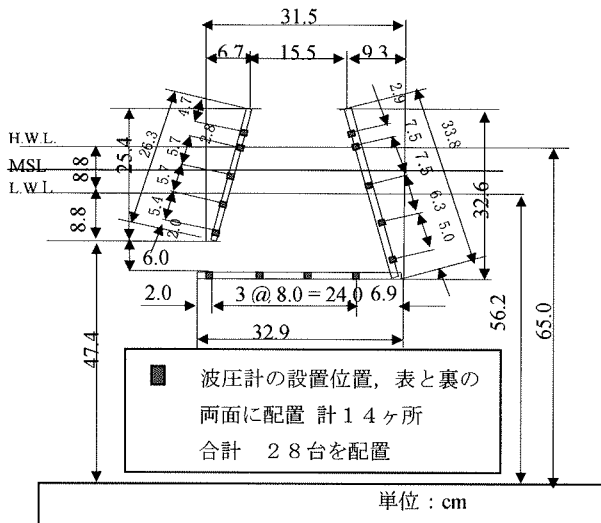


図-2 台形遊水室の模型及び波圧計配置図³⁾

(2) 波浪制御効果

図中では実験結果(EXP.)と減衰波理論¹⁾による算定結果(CAL.)を併せて示す。ここで従来と同様に理論算定に用いる減衰波領域の大きさは $L/8$ 、線形抵抗係数は $fc=0.2$ を用いた。また周期を表す無次元パラメータには、波長 L と遊水室水面幅 Bw の比 L/Bw を用いた。模型実験では H.W.L, L.W.L とその中間水位である M.S.L で実施している。以降の大略比較はその代表値として M.S.L での検討を記載する。

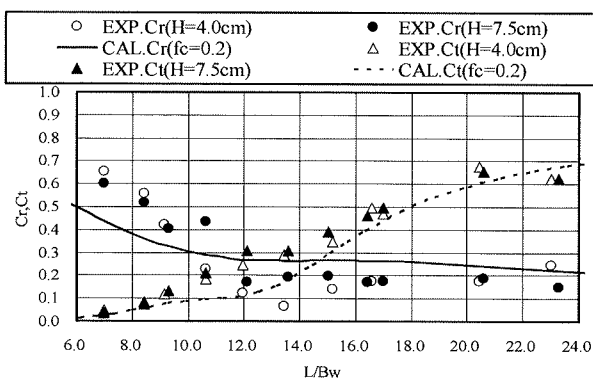


図-3 反射率、透過率 (減衰波領域 $L/8$, $fc=0.2$, M.S.L)

図-3の反射率については、短周期側で実験結果が

算定結果を上回る結果となった。これは理論算定において、短周期側で遊水室内に起こる波浪共振を過大評価したためと考えられる。次に透過率については、中周期帯にて実験値が算定結果を上回る傾向がある。実験波高の差異に着目すると、差異はほとんど確認されない。一方、反射率では波高条件が低いほど、短周期側では波高条件が高いときよりも高く、中周期帯では低い傾向を示す。このように波高条件によってもわずかながら違いが現れ、特に短周期側の反射率の予測などが不十分と考えられる。

図-4は、遊水室内の波高増幅度 H_c/H (遊水室内波高 H_c と入射波波高 H の比)の実験結果と理論算定結果を示す。また実験結果は平均潮位(M.S.L)での規則波で波高 $H=7.5\text{cm}$ の条件である。結果に着目すると、理論算定結果が実験結果を大きく上回り過大評価する傾向が見られる。

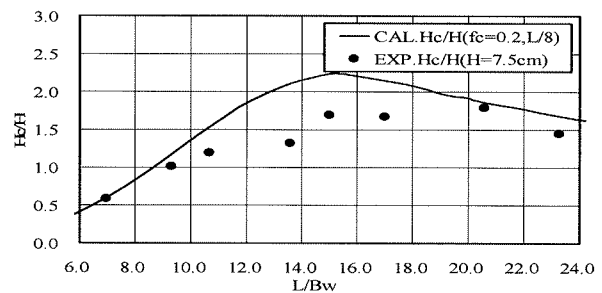


図-4 遊水室内の波高増幅度 H_c/H (減衰波領域 $L/8$, $fc=0.2$, M.S.L)

このように理論算定結果と実験結果との不整合性の原因は、遊水室開口部よりのジェット流に伴う渦流れの影響が適切に評価されていないことが考えられる。そのため、ジェット流の強さの要因となる遊水室内の波高増幅度が理論的に評価できれば、実験結果との整合性が改善されるものと予測される。

3. 減衰理論の算定モデルの改良

(1) 減衰波領域および線形抵抗係数の検討

減衰波理論の減衰波領域は流れの剥離やその発達した渦流れの影響する領域とされており、その範囲は図-5に示す模型の前後に波長 L の $1/8$ 、水面方向には水面より水底までと仮定されている。しかし、この減衰波領域の範囲が実際現象よりも過大に評価されているため、理論算定結果が実験結果よりも高い波浪制御効果を示すものと考えられる。線形抵抗係数を従来の推奨値 $fc=0.2$ と固定して、減衰波領域の範囲を変化させたときの遊水室内の波高増幅度 H_c/H (図-6)、反射率 Cr (図-7)、透過率 Ct (図-8)の算定結果を示すものである。

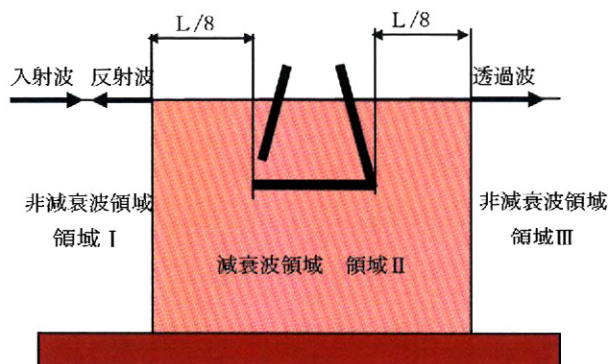


図-5 入射波に対する解析モデル (3領域分割法)

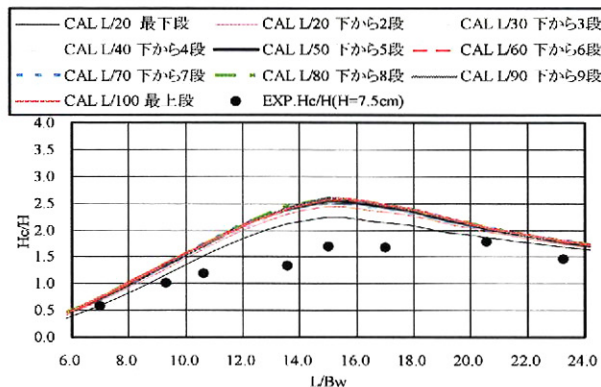


図-6 H_c/H への減衰波領域の影響 ($f_c=0.2$, MSL)

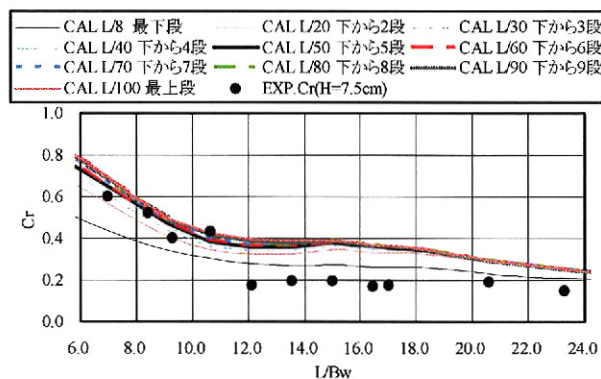


図-7 C_r への減衰波領域の影響 ($f_c=0.2$, MSL)

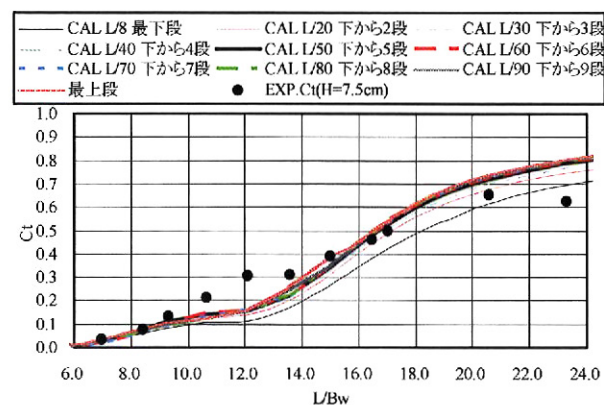


図-8 C_t への減衰波領域の影響 ($f_c=0.2$, MSL)

この結果に着目すると、減衰波領域の範囲を狭くすると波高増幅度、反射率、透過率ともに高くなる

傾向にあるが、それほど有意でなく減衰波領域を $L/40$ 以下に狭くするとほぼ一定の値となることが分かる。また実験結果と比較すると、反射率は短周期側、透過率は長周期側で減衰波領域を狭くする方が実験結果との整合性が改善されることが認められる。これらの結果より、従来の減衰波領域の大きさは波長に対して大きすぎと考えられ、実際に生成される渦領域は従来の範囲よりも小さいものと判定される。

以上より減衰波領域は波高増幅度、反射率、透過率の算定結果で大きな差異が見られなくなる $L/40 \sim L/70$ が適すると判断される。

(2) 線形抵抗係数の影響

減衰波領域を従来の波長 L の $1/8$ に固定して、線形抵抗係数 f_c を変化させたときの遊水室内の波高増幅度 H_c/H (図-9)、反射率 C_r 、透過率 C_t の影響を検討した。

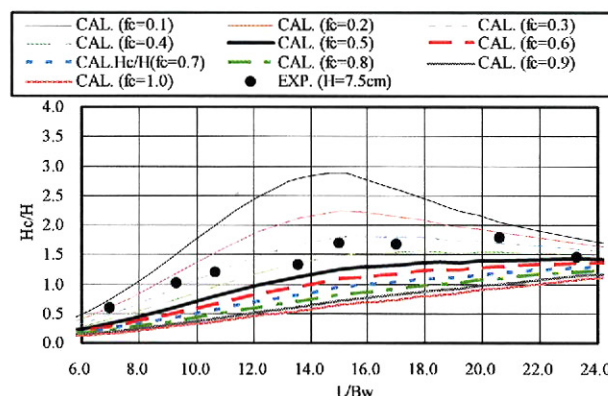


図-9 H_c/H への線形抵抗係数の影響 ($L/8$, MSL)

その結果、線形抵抗係数を増加させるほど波高増幅度、反射率、透過率ともに減少する傾向にあることが判った。中村¹⁾らの提案による運動方程式で減衰波領域では渦流れによるエネルギー逸散を近似的に考慮するため、流速に比例する抵抗が作用する仮想的な流体を想定するため、渦流れによる減衰の評価が高くなったことによると考えられる。波高増幅度の結果に着目すると線形抵抗係数 $f_c=0.3 \sim 0.6$ の範囲内で一致度が向上している。これは従来の線形抵抗係数 $f_c=0.2$ より高い値であり、実際の渦流れによる減衰効果は従来よりも大きいことが考えられる。

以上の検討より、線形抵抗係数 f_c は波高増幅度の実験結果より C_r 、 C_t との整合性が比較的良好なる様に $f_c > 0.3$ の範囲が適切なものと判断される。

(2) 減衰波領域および線形抵抗係数の検討

前述した実験結果との適合性がよいと判断される減衰波領域 $L/40 \sim 70$ 、線形抵抗係数 $f_c=0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ を用いて、波高増幅度 H_c/H 、反射率 C_r 、透過率

Ctの実験結果との比較をした。図-10はそのうちHc/Hを $f_c=0.3$, $f_c=0.6$ の場合を示す。

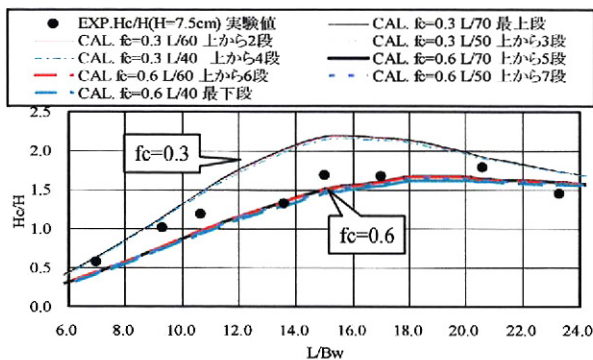


図-10 減衰波領域 ($L/40 \sim L/70$) による H_c/H の変化 ($f_c=0.3$, $f_c=0.6$, MSL)

これら結果に着目すると、まず減衰波領域の変化の影響がほとんど確認されない $f_c=0.5 \sim 0.6$ においては実験結果との対応も比較的良好、特に波高増幅度の整合性がよいと考えられる。したがって、従来のジャケット式台形遊水室型防波堤には、減衰波領域は $L/40 \sim L/70$ 、線形抵抗係数には $f_c=0.6$ 程度が適すると考えられる。

4. 減衰波領域設定法の検討

想定する解析モデルは、図-5 に示すように非減衰波領域を領域Ⅰ、Ⅲ、減衰波領域を領域Ⅱとして解析領域を3分割に設定している。しかし、遊水室開口部に伴うジェット流は堤体前方に放出されるため、堤体下部の水塊には比較的影響が少ないと予測される。このため、図-11 は、模型堤体を囲むように減衰波領域を設定し、堤体下部の領域を非減衰波領域に変更したものである。以下では、図-11 のように解析領域を2分割に設定したものを2領域分割法、従来の解析モデルを3領域分割法と称し、これら減衰波領域の設定法の有効性の検討を行う。

図-12, 13 は、2領域分割法(2rgns)と3領域分割法(3rgns)における、それぞれ反射率 Cr と透過率 Ct およびエネルギー逸散率 EL の理論算定結果と実験結果を示す。また3領域分割法は減衰波領域の大きさを $L/60$ 、線形抵抗係数 $f_c=0.6$ を用いた。ここにエネルギー逸散率 $EL=1-Cr^2-Ct^2$ と定義した。

この結果に着目すると、実験結果と2領域分割法と3領域分割法の理論算定結果との差異は、 Cr と EL においてはほとんど見られず、透過率においても比較的整合性は良好と確認される。そして、これらの結果を総合比較すると2領域分割法と3領域分割法との理論算定結果の差異は比較的少なく、線形抵抗係数の変化が最も影響を与えることが分かる。これより、2領域分割法と3領域分割法の違いは線形抵

抗係数を変更させることで比較的表现が可能であると言える。また同時に模型堤体を囲むように設定を行う2領域分割法では、想定する模型が複雑になるほど減衰波領域の設定が困難になるとも考えられ、実際の計算では取り扱いが容易な、3領域分割法が2領域分割法よりも有用性に優れると考えられる。

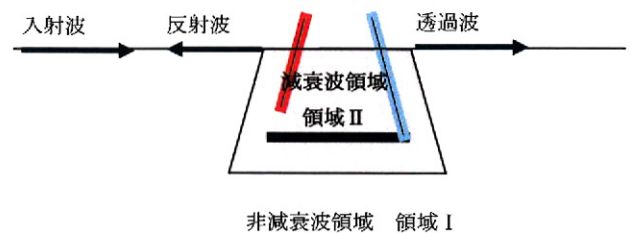


図-11 入射波に対する解析モデル (2領域分割法)

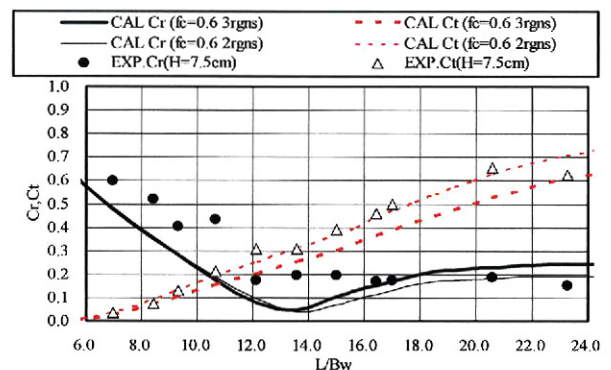


図-12 減衰波領域の分割法の Cr , Ct への影響の検討 ($L/60$ $f_c=0.6$, MSL)

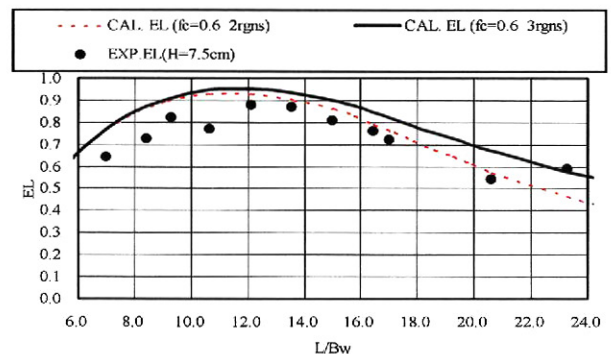


図-13 減衰波領域の分割法の EL への影響の検討 ($L/60$ $f_c=0.6$, MSL)

5. 改良モデルの適用性

(1) 波浪制御効果

図-14 は、従来の波浪制御効果および理論算定結果と3領域分割で減衰波領域、線形抵抗係数を変更したモデル改良後の理論算定結果を比較したもので

ある。また従来の減衰波領域の大きさは $L/8$ ，線形抵抗係数は $f_c=0.2$ を，またモデル改良後はそれぞれ $L/60$ ， $f_c=0.6$ を用いた。

この結果に着目すると，反射率では従来の理論算定結果では対応が不十分な短周期帯で実験結果との整合性が改善され，中周期帯でも極小値を比較的精度よく表すことが可能になっている。また透過率については，中周期帯に現れていた凹みがなくなり，作用波周期が増大するにつれて随時増加するといった傾向が見られ，実験結果との対応も改善されることが認められる。

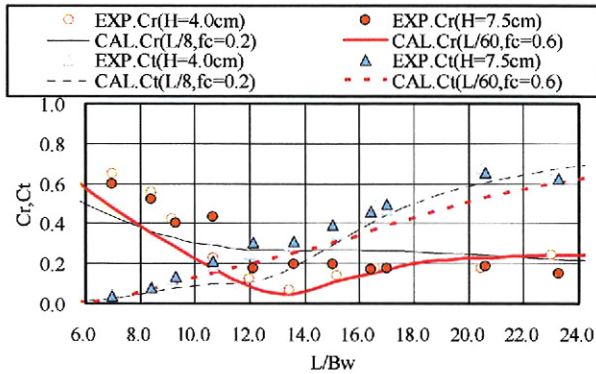


図-14 モデル改良後の従来結果との比較 (MSL)

(2) 各部材に作用する波力および全体波力

図-15～20 は，中村ら³⁾により測定されたジャケット式台形遊水室型堤体の各部材または遊水室全体に作用する全体波力の実験結果と従来の理論算定結果およびモデル改良後の理論算定結果を示す。潮位条件は，高潮位 (HWL) と低潮位 (LWL)，また波高 $H=7.5, 13.5\text{cm}$ の 2 種類を用いた。現地の設計波の条件は有義波高 $H_{1/3}=2.4\text{m}$ ，有義波周期 $T_{1/3}=9.4\text{s}$ ，因みに最高波 $H_{\max}=4.3\text{m}$ である。図中では，周期の無次元パラメータは波長 L と遊水室水面幅 Bw の L/Bw 比を用いた。

各部材に作用する波力あるいは全体波力を以下の式に示すように，波力の極大値を波高に相当する動水圧分 ($\rho g H$) と波圧の作用する部材長で除した無次元波力強度で表し，その波力強度は正負に区別できるようにして検討した。

$$\text{前面版の水平波力強度} \quad F_f^* = F_f \cos \theta / w_0 H S_f \quad (1)$$

$$\text{後面壁の水平波力強度} \quad F_r^* = F_r \cos \theta / w_0 H S_r \quad (2)$$

$$\text{没水平板の鉛直波力強度} \quad F_b^* = F_b / w_0 H B_b \quad (3)$$

$$\text{全水平波力強度} \quad F_x^* = F_x / w_0 H S \quad (4)$$

$$\text{全鉛直波力強度} \quad F_z^* = F_z / w_0 H B_b \quad (5)$$

ここで， w_0 ：流体の単位体積重量， H ：入射波高， S_f, S_r, S は波圧の作用する部材長に比例する量で，

越波が生じるか否かを区別して定義している。

HWL における各部材に作用する波力の結果に着目すると，前壁の長周期帯では計算値は実験値より低い。これは遊水室内の波浪共振による渦流れが非線形な現象で理論算定ではエネルギー逸散を大きく見積もっている事が考えられる。

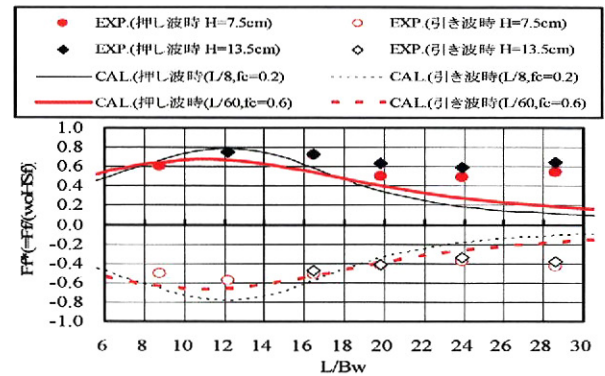


図-15 前壁に作用する波力強度の比較 (HWL)

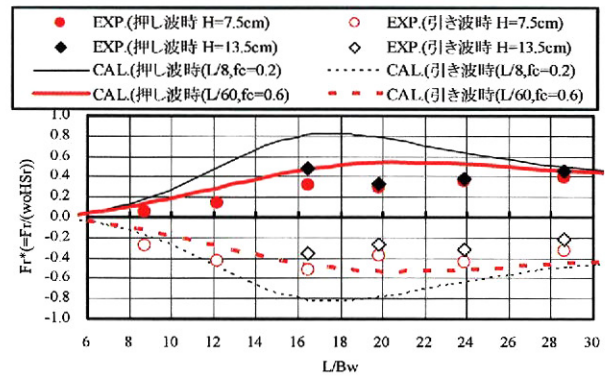


図-16 後壁に作用する波力強度の比較 (HWL)

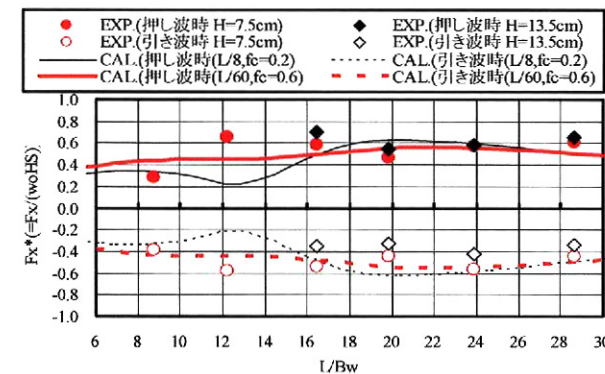


図-17 全体水平波力の強度の比較 (HWL)

後面壁に作用する水平波力 F_r^* は従来の理論算定結果よりもモデル改良後の理論算定結果の方が実験結果との整合性が改善されている。また全体波力 F_x^* について着目すると，従来の理論算定結果よりモデル改良後の理論算定結果の方が実験結果との整合性よいと判断される。

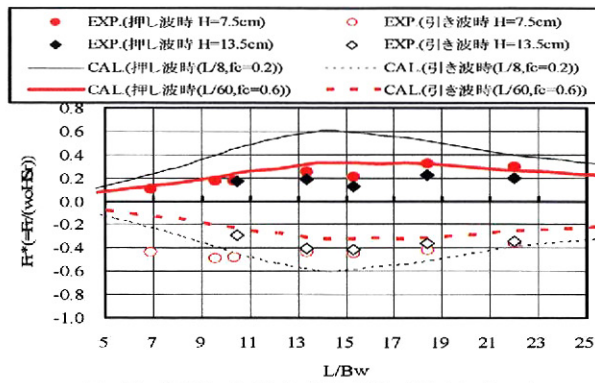


図-18 後壁に作用する波力強度比較 (LWL)

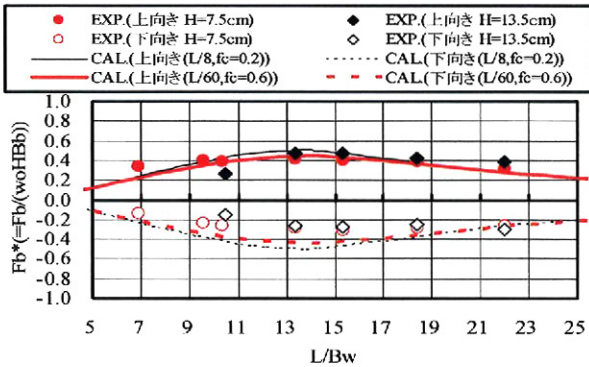


図-19 没水平板に作用する波力強度の比較 (LWL)

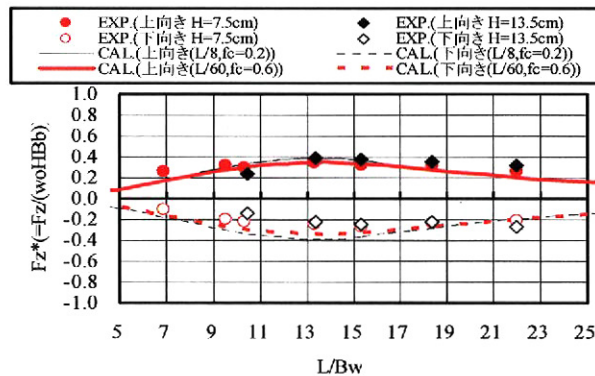


図-20 全鉛直力の波力強度の比較 (LWL)

特に短周期帯での整合性が従来の理論算定よりも改善されていることが分かる。

LWL の各部材に作用する波力の結果に着目すると、HWL のときと同様に後面壁に作用する水平波力 F_x^* と没水平板に作用する波力 F_b^* は、実験結果との整合性が向上していると言えよう。

以上の結果より、モデル改良後の理論算定は実験結果と比較すると多少差異が確認されるものの、従来の理論算定よりも実験結果を比較的再現できると考えられる。そして、そのモデル改良に伴い減衰波領域の大きさを $L/40 \sim 70$ 、線形抵抗係数の大きさを $fc=0.6$ 程度、減衰波領域の設定を 3 領域分割法で設

定することが解析上の煩雑を考慮すると望ましいといえる。

6. 結論

(1) 遊水室構造の反射率 C_r 、透過率 C_t などの消波機能については従来から用いられている、減衰領域を遊水室前背面に $L/8$ の幅として 3 分割し、線形抵抗係数 $fc=0.2 \sim 0.35$ 程度を想定して計算していたが、領域を $L/40 \sim L/70$ と狭くすれば実験値と整合性が向上する。

(2) 減衰波領域を $L/8$ とした場合、反射率 C_r 、透過率 C_t の実験結果は傾向的には合致しているが全周期にわたる細かい部分で差がある。また遊水室構造の各部材に作用する波力は実験値と比べて大きな差異がある。理論計算において精度良く波力算定をするには正確に反射率 C_r 、透過率 C_t 、波高増幅度 H_c/H を算定する事である。

(3) 数値解析により簡単に遊水室構造の機能、波力などを算定するには減衰波理論のモデル改良をすることが可能である。減衰波領域を従来の設定より大幅に狭め、波長 L の $1/60$ 程度の 3 分割に設定して算定を行うと、ジャケット式防波堤の波浪制御効果に関する実験結果との整合性が向上する。ただし、このとき採用すべき線形抵抗係数は、従来の研究による推奨値より大きくする必要があり、ほぼ $fc=0.6$ 程度である。

謝辞：実験データは沿岸新技術研究会が開発した遊水室型海水交換防波堤に関する機能実験の成果の一部であります。本検討に当たり、長崎県、(財)漁港漁場漁村技術研究所、その他の多数の関係者に資料の提供など大変お世話になりました。ここに記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 中村孝幸, 井手善彦: 波の逸散現象を利用した隅角物体周りの波変形と作用波力の算定法, 海洋開発論文集, 第 13 巻, pp. 177-182, 1997
- 2) 中村孝幸, 河野徹, 浅川典敬, 大川大一, 高見慶一: 傾斜杭を想定した台形遊水室型防波堤の消波機能と海水交換機能について, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp. 579-584, 2008
- 3) 河野徹, 中村孝幸: 実海域での遊水室型防波堤の耐波設計, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp. 713-718, 2009.