

緩斜面消波型ケーソンの開発による大水深部防波堤建設費の低減

田中寛好*・阿部宣行**・斎藤昭三**

1. ま え が き

臨海型火力・原子力発電所の立地は、海象条件の厳しい外海に面したものが増加し、その外郭施設は大水深型のものが出現する傾向にあるが、近年の海域利用の多目的化や環境保全への配慮などによって、反射の低減等新しい機能が要求される場合が多い。反射による波高増大と波力を軽減する目的で、わが国で一般的な消波ブロック被覆式ケーソン混成堤を大水深部に建設する場合、設計波高が大きいため大きな消波ブロックを必要とし、なおかつ被覆断面形状が台形を呈することから水深の増加とともに必要なブロック数が飛躍的に増大する。このため、被覆堤は、大水深部では消波ブロックに大きな工事費を要し、経済性の面ではあまり有利とは言えない。

上記の観点から、潮位差の大きくない外海を対象とし、高波浪に対して十分安定性を保ち、長周期の波浪に対しても低反射かつ十分な防波機能を有し、しかも水深の増加に伴う経済性の急激な低下を招かないような新しい防波堤構造型式を開発し、発電所外郭施設の建設工事費の低減化に寄与することを目的として本研究を実施した。

本研究においては、大型造波水路を用いた大縮尺模型実験を実施し、開発した新型防波堤の水理特性を現地の実態に近い形で把握するとともに、その結果に基づき詳細設計をして工事費を算定した。そして、消波ブロックの安定性に関する縮尺効果¹⁾を考慮し、 K_D 値を従来の平均値 11.5 から 28.8 に変更した条件で経済設計した被覆堤の工事費と比較して、新型防波堤を大水深部に設置した場合どの程度経済的に有利になるかを検討した。

2. 実験内容

まず、堤体が小さくとも十分安定性が確保できること、施工が複雑でないこと、また波が斜めに入射した際にはよりすぐれた性能を発揮する可能性があること等、多々有利な面を有する斜面堤の水理特性を縮尺 1/100 の小型模型を用いた実験²⁾によって検討した。次に、検討結果

を念頭に置き、斜面堤を基本として、反射率の低減、根固め工の安定化、端趾圧の軽減、越波・伝達波の低減、衝撃波圧の軽減等実用化に向けての改良方策を考え、縮尺 1/50 模型を用いて新しい消波型ケーソンを開発した²⁾。すなわち、縮尺 1/50 の模型実験においては、沖波有義波高 15 m、周期 16 s、潮位差 1.5 m、海底勾配 1/50、設置水深 L.W.L. 時 20 m を条件に、従来の消波ブロック被覆堤と同程度の安定性、防波機能ならびに消波機能を有するように新型ケーソン模型断面を決定した。さらに、小型模型実験結果をそのまま現地の詳細設計に適用すると、水理特性に関するスケール効果の存在により危険側に評価してしまう可能性もあるため、図-1 に示すように、長さ 205 m、深さ 6 m、幅 3.4 m の大型造波水路内に設置された縮尺 1/10 の大型模型を用いて、縮尺 1/50 の実験と同条件で実験を実施し、防波堤としての安定性、消波、ならびに防波機能を確認した。

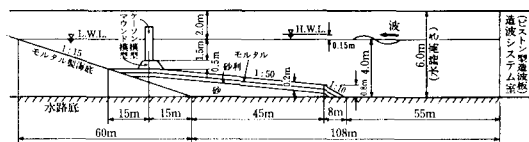


図-1 大型造波水路内での縮尺 1/10 模型設置状況

開発した緩斜面消波型ケーソンの詳細設計の一例を図-2 に示すが、構造上の特徴は、波の来襲方向と交差する複数本の小突条を面上に有する緩斜面、緩斜面を延長させて港外側前端に設けたひさし部、二段構えの波返し、波返し間の排水室、前側波返し下面の短いスリットにある。大型実験に用いた新型ケーソンは、詳細設計過程の前段階の 1/50 模型実験で概略設計したものであり、図-2 に示す寸法とは細かい箇所若干相違はある。

ケーソン模型は鉄筋コンクリート製で水路幅方向の 3 ユニットの構成されており、長さ 1.5 m の中央ユニットを測定用としている。水平、鉛直方向波力測定は、測定ユニット底面 4 点に 2 方向 3 t 用荷重交換器を取付けさらにそれを鋼製架台に固定して行なった。波圧測定は、測定ユニットの 29 点に厳密防水の拡散型半導体小型圧

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 企画部

** 正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所
水理部構造水理研究室

設計条件

沖波有義波高: 15m, 周期: 16s
 L.W.L.: 0m, H.W.L.: 1.5m
 海底勾配: 1/100
 設置水深: L.W.L.時20m

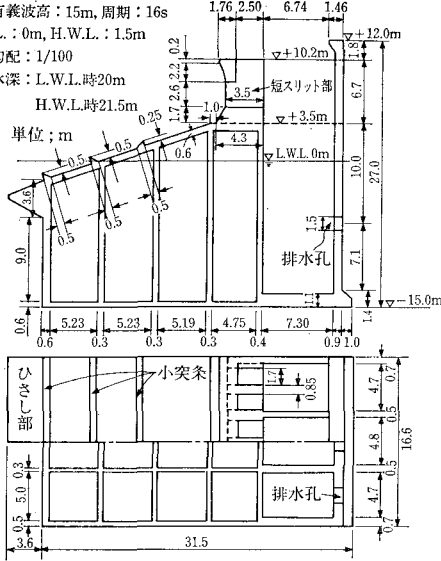


図-2 緩斜面消波型ケーソンの詳細設計一例

力変換器を貼り付けて実施した。反射率と波高伝達率の測定には、容量式波高計を用い、越波量は、幅 1.5m, 長さ 5m, 深さ 1m の貯水槽を測定ユニットのすぐ背後に設置し、越波体積と入射波の波数とから求めた。

大型模型実験では、緩斜面消波型ケーソン、消波ブロック被覆堤いずれも断面 1 種類しか採用していないため、潮位と設置水深の条件は一定であるが、波浪条件は、安定性、防波機能の実験では、模型設置位置での波高 6 ~ 17.6m, 周期 8 ~ 21.7s, 消波機能関係では、波高 1 ~ 2m, 周期 7 ~ 16s の規則波を対象とした。特に安定性の評価や部材設計には、波の不規則性の影響も重要であると考え、有義波高 11.6m, 周期 15.4s の不規則波を水路内で再反射が生じない程度に短い時系列に分割して作用させ、等価規則波実験結果と比較した。

3. 緩斜面消波型ケーソンの水理特性

3.1 波力特性

以下の実験結果はすべて原型換算値で論ずる。設計不規則波の最高波相当の規則波が作用した場合の水平および鉛直波力を図-3 に示す。緩斜面を有することと 2 段構えの波返しのため水平波力と鉛直波力の最大値の生起時刻がかなりずれていること、水平波力最大値は天端が 2.5m も低い被覆堤ケーソンのそれと同程度であること、鉛直下向波力作用時間が極めて長いこと等安定性の高さを推察させる特徴を有する。また、波の不規則性を考慮すると規則波で算定した波力を最大で 15% 割増して考える必要があること、1/50 模型を用いた実験結果との有意な差は無いことが明らかとなった。

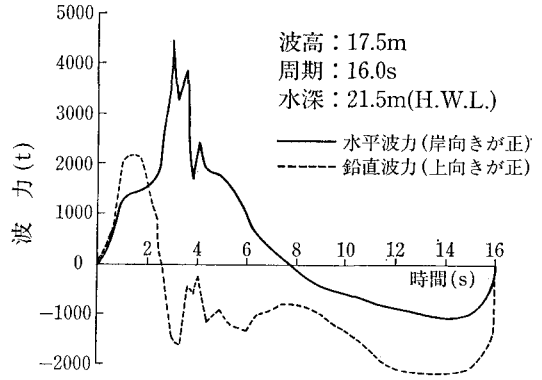


図-3 緩斜面消波型ケーソンに作用する波力の特性

3.2 波圧特性

図-3 に示す波力と同条件の規則波が作用した場合のケーソン各点に生ずる最大波圧を波圧特性の一例として図-4 に示す。これら波圧は各点同時ではなく時間差をもって生ずる。衝撃波圧の生じないケーソン前面と斜面部には、合田波圧³⁾よりは小さいがそれとほぼ相似な分布で部材面に直角に最大波圧が作用する。前後両波返し部やひさし部には衝撃波圧が作用するため、合田式ではかなり過小評価となる。また、衝撃的な波圧が作用しない場所では模型縮尺の違いによる波圧の相違は顕著でないが、衝撃的な波圧が生ずる場所では、気泡で白濁した砕波の衝突が見られる大型模型での瞬間最大波圧の方が若干大きく評価されることが判明した。さらに、前面、ひさし部、斜面、前側波返し等港外側各部では、不規則波を用いて安全評価する必要があることが認められた。

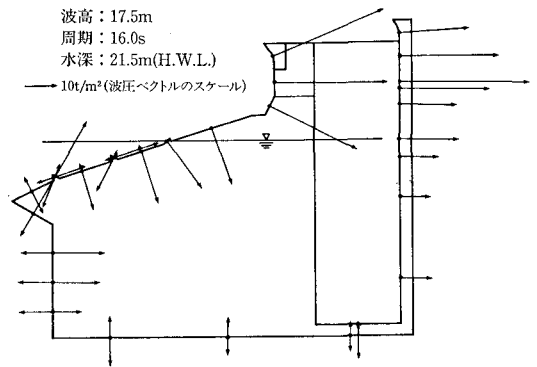


図-4 ケーソン各位置に作用する最大波圧の分布

3.3 反射特性

入反射波分離法⁴⁾によって得られる反射率を消波機能の指標とするが、消波型ケーソンの開発において最も苦心するのは、波形勾配の小さな平常波近辺の波の反射率をいかに小さくするかである。図-5 には、緩斜面消波型ケーソンと消波ブロック被覆堤との反射率を比較した

結果を示すが、両タイプの消波機能はほぼ同程度であることが認められる。両タイプの反射率とも波形勾配の増加とともに低減する傾向にあるが、プロットのばらつきは大きく他のパラメータの関与を暗示している。被覆堤の反射率が無次元被覆幅に大きく依存するように、緩斜面消波型ケーソンの反射率も図-6に示すように無次元斜面遊水長 B/L に依存することが判明した。 B/L が 0.08 近辺で反射率は最小になる。つまり、実験条件では、L.W.L. の時 8~10 s, H.W.L. の時 13 s 近辺の反射率が小さく、外海で頻度の高い周期の波の消波機能がすぐれていることがわかる。また、大型模型の方が反射率は若干大きくなることも見出された。

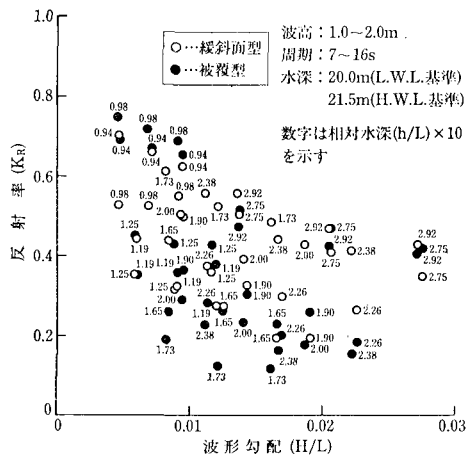


図-5 緩斜面型ケーソンと被覆堤との反射率の比較

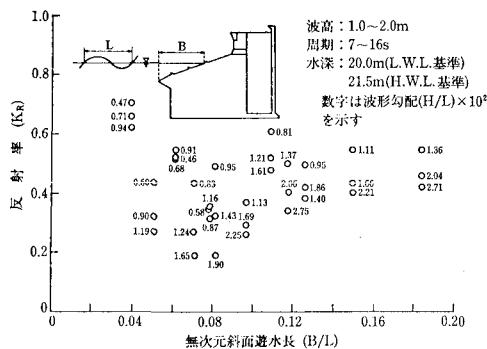


図-6 無次元斜面遊水長の変化に伴う反射率の変化

3.4 被覆堤と同程度の防波機能の確保

消波ブロック被覆堤の天端高は、通常 H.W.L. 上設置位置有義波高の 6 割を目安として決定され、所定の防波機能を確保する。緩斜面消波型ケーソンは防波堤としての適用を考えているため、越波量よりは港内波高伝達率の方が適切な防波機能の指標となる。新型ケーソンの港内波高伝達率を被覆堤のそれ以下におさえるには、図-7 中の破線の過程で天端高を決定する必要がある。つま

り、被覆堤と新型ケーソンを対象として種々の規則波条件下で、無次元越波流量を介して波高伝達率と無次元天端高との関係を実験的に把握し、設計波の最高波の伝達率が被覆堤のそれと同じになる無次元天端高を求める。越波・伝達波特性に関しては模型の大小によるスケール効果は認められなかったため、縮尺 1/50 模型を用いた再反射が顕著でない不規則波実験で、上記のようにして天端高を決定した新型ケーソンの最高波相当の波高伝達率を被覆堤のそれと比較したところ、図-7 の上図中に示すように被覆堤より若干小さくなり、所定の防波機能の確保が確認できた。新型ケーソンの天端は、H.W.L. より上設置位置最高波高の 62% 高い位置とする必要がある。この時、無次元越波流量は被覆堤の場合に比べて相当小さくなる。

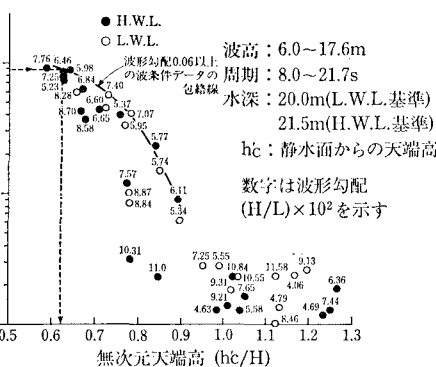
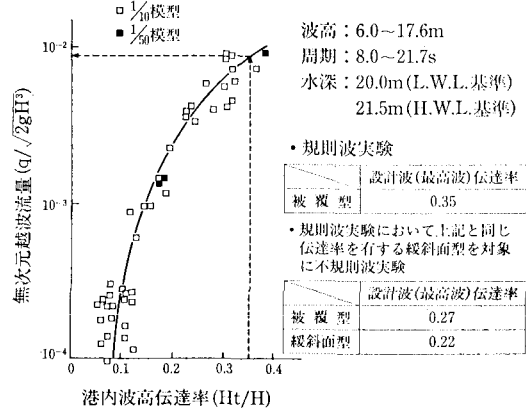


図-7 緩斜面消波型ケーソンの防波機能

4. 任意波浪条件下におけるケーソンの断面設計法

4.1 ケーソン堤体幅と天端高の決定

ケーソン模型断面は一つの波浪条件に対し決定されたが、実験で開発したケーソンを現地に適用するには、任意波浪条件に対して断面設計を可能とする必要がある。

実験で得た反射率を確保するには、斜面遊水長と波長

との比を一定に保つ必要がある。それゆえ、設置水深と設計波が決まれば波長が定まるため斜面長は求まる。

防波機能を確保するためには、越波の状況を模型実験と相似にする必要があると考え、排水池幅波長比を模型での条件と同一にしかつ天端高を3.4で述べたように決定した。なお、斜面上端より上部の構造に関しては、鉛直寸法は天端高に応じて模型と相似になるよう、水平寸法は波長との比を模型条件と同一にするよう設計した。

4.2 部材設計

鉄筋コンクリートで製作されるケーソンの各部材の厚さと鉄筋量を決定するためには、外力となる設計波圧分布を評価する必要がある。3.2で述べた特性を踏まえ、波の不規則性による効果も十分考慮して図-8に示す波圧分布を与えた。これによれば、ケーソン前面と斜面部は合田式を適用し、その他の部材は、設置位置最高波高と水の単位体積重量の積に比例する広井式と類似の表示法を採った。ただし、必ずしも部材に図に示す波圧が同時ににかかるわけではないので、安全側の設計になる。

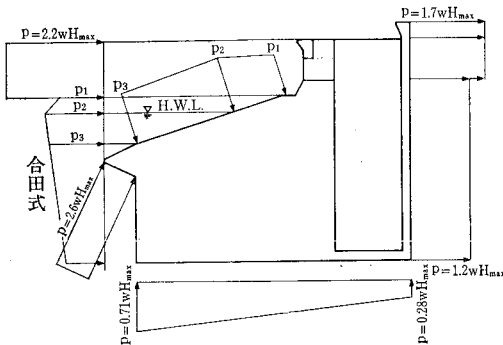


図-8 ケーソン部材設計のための波圧分布

4.3 安定性の評価

4.1と4.2で述べた方法に基づいてケーソンの詳細設計が可能になれば、ケーソンの自重が算定でき、設計水平、鉛直両波力が与えられると滑動安全率が評価できることになる。転倒安全率については、転倒モーメントの算定が必要であるため、端趾圧と同時に評価を行なった。実験によれば、滑動安全率最小時の位相は岸向水平波力最大時の位相と一致する。図-9に示す無次元堤体幅は実際に0.14近辺で設計されることになるため、この図を基に水平波力は合田波力の62%、鉛直波力は下向きで合田波力絶対値の30%と評価すれば安全評価が可能であると考えられる。さらに、波の不規則性を考慮し、この規則波による実験結果から算出された安全率値の87%をもって最終的な滑動安全率として評価した。

4.4 端趾圧の評価

大水深部のケーソン幅は許容端趾圧の制約から決まる

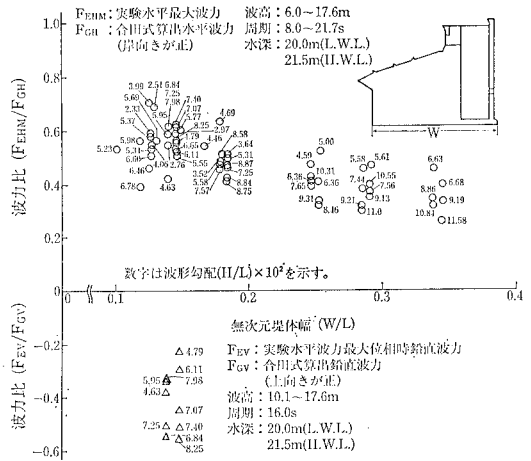


図-9 滑動安全率最小時の水平および鉛直波力特性

H.W.L.時: ()なし

L.W.L.時: ()内

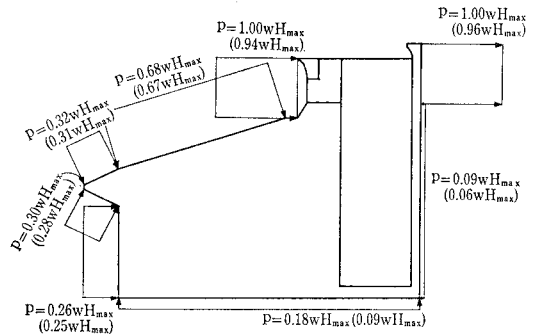


図-10 端趾圧算定のための設計波圧分布

ケースが多く、端趾圧評価は重要である。本実験においては、ケーソン各点の波圧時系列を基に、転倒モーメント、端趾圧、転倒安全率の時系列を求め、後2者それぞれの最大、最小値に着目した。図-10は、規則波実験結果を基に、端趾圧最大時の波圧分布をモデル化したものである。この波圧分布を用いれば、任意の波浪条件での端趾圧の算定が可能となる。ただし、実験結果を基に波の不規則性を考慮すると、H.W.L.時には最大18%、L.W.L.時には39%割増して端趾圧を考える必要がある。こうして最終的に求めた端趾圧が許容値を越す場合、通常はフーチング付加により対処可能である。

5. 経済性の評価

5.1 ケーソン設計の基本となる主な条件

設置水深は、L.W.L.で10m、20m、25mとした。設計波は現在採用されている最大級のものを考えて、太平洋側の代表値として沖波有義波高15m、周期16s、潮位差1.5m、日本海側の代表値として沖波有義波高12

m, 周期 13 s, 潮位差 0.5 m を条件とした。施工時波高は 10 年確率波とし, 設計波高の 2/3, 周期は太平洋側 12 s, 日本海側 11 s とした。海底勾配は, 実験条件と同じく, 1/50 を採用した。

ケーソンの許容滑動安全率は 1.2 (施工時は 1.1), 許容端趾圧については, 設置水深 10 m では 50 t/m², 20 m では 75 t/m², 25 m では 90 t/m² とした。また, 施工性の面から, ケーソン 1 函の波峰線方向の長さや波進行方向の幅との比は 1/2 以上になるようにし, ケーソン製作用フローティングドックの規模は, 設置水深が 20 m 以下で 6000 t 級, 25 m で 1,2000 t 級とした。さらに, 基礎マウンド高は, 設置水深 10 m, 20 m, 25 m に対して, それぞれ -8 m, -15 m, -17.5 m とし, ケーソンの斜面上端より上部の構造については現場施工を考えた。経済性比較の基準となる消波ブロック被覆堤の設計は, 従来の設計法を基準にしたが, ハドソン式には $K_D = 28.8^{1)}$ を適用した。

5.2 消波ブロック被覆堤との経済性比較

上述の条件を考慮して緩斜面消波型ケーソンと消波ブロック被覆堤の詳細設計を実施した。緩斜面消波型ケーソンの詳細設計一例は図-2 に示す通りである。

工事費算定に当たっては, 設定した材料単価表および施工数量を用いて, 詳細設計の結果から防波堤 1 m 当たりの直接工事費を算定した。算定結果例として, 20 m

設置水深条件下で太平洋側代表設計波および日本海側代表設計波の場合それぞれ 2170 万円/m, 1790 万円/m を得た。さらに, 同程度の水理機能をもつ消波ブロック被覆堤と経済性を比較した結果を図-11 に示す。この図より, 水深 10 m では被覆堤の方が 1~3% 安価だが, 水深 12 m 以上では新型防波堤の方が経済的に有利となり, 水深 20 m では 8~15%, さらに水深が増大するとそれ以上の工事費の低減が図れることが判明した。

6. 結 論

本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 消波ブロックや前壁スリットを用いなくとも消波機能を有する緩斜面消波型ケーソンを開発し, 縮尺 1/10 の大型模型を用いた実験により消波ブロック被覆堤と同程度の消波機能と防波機能が得られることを確認した。
- 2) 大型模型実験で得られた水理特性を基に, 開発した新型ケーソンの任意波浪条件下における基本的な断面設計法を提案した。
- 3) 太平洋側および日本海側の海岸を念頭に置いた最大級の設計波と現段階で妥当と考えられる設計条件を基にケーソンの詳細設計を実施し, 防波堤単位長さ当たりの直接工事費を算定した。その結果, 設置水深 12 m 以上では, 機能を同程度に設計した消波ブロック被覆堤に比べて経済的に有利になること, また, 設置水深が深いほど, 波高が大きく周期の長めの設計波であるほど, 従来防波堤工事費からの低減率が大きいことが判明した。

おわりに, 本研究の実施にあたり, ケーソン材料の単価や施工数量等工事費算定に関しては, 五洋建設㈱に御協力頂いたことを記し, 誌上を借りて深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 島田真行・藤本稔美・斎藤昭三・榊山 勉・平沼博丸: 消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果について, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 442~445, 1986。
- 2) 田中寛好・阿部宣行・広瀬 学・加藤正進: 大水深用消波型ケーソンの開発—緩斜面消波型ケーソン—, 電力中央研究所研究報告 385036, 46 p., 1986。
- 3) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技研報告, 第 12 巻第 3 号, pp. 31~69, 1973。
- 4) 合田良実・鈴木康正・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, 24 p., 1976。

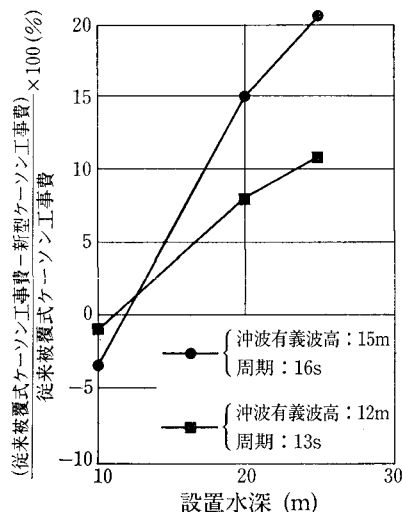


図-11 緩斜面消波型ケーソンの経済性