

上ヒンジ式カーテンウォールに関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ABOUT UPPER HINJI TYPE CURTAIN WALL

河内友一¹・高田英明²・大村剛³

Yuichi KOUCHI, Hideaki TAKADA and Tsuyoshi OHMURA

¹ 正会員 工修 中国電力(株) 技術研究センター (〒739-0046 広島県東広島市鏡山3-9-1)

² 正会員 中国電力(株) 土木部 (〒730-8701 広島県広島市中区小町4-33)

³ 正会員 中国電力(株) 技術研究センター (〒739-0046 広島県東広島市鏡山3-9-1)

The curtain wall type intake is often used in the intake of the thermal power plant and the nuclear power plant. Because wave force acting on the steel pile which supports the water interception board is large, the cost of construction of this structure is high. Therefore, we designed the curtain wall that has the hinge in the upper part of the water interception board. The water interception board of this curtain wall synchronizes with the wave and wave force acting on the steel pile can be greatly decreased.

In this research, we executed the hydraulic model test intended for this upper hinge type curtain wall. As a result, we understood a basic character of this curtain wall, such as the power to act on the hinge and the dynamics of a water interception board. And we executed the outline design of this curtain wall from the experimental result, and compared the life cycle cost with a past curtain wall. The reduction in about 17% can be expected of the life cycle cost of this curtain wall compared with a past one.

Key Words : Curtain wall, Hydraulic model test

1. はじめに

火力・原子力発電所では復水器冷却用水として大量の海水を取水するが、プラント熱効率の観点からできるだけ低温の水を取水することが望ましい。海洋における低温の深層水を取水する深層取水方式としては、カーテンウォール式、水平取水管および鉛直取水管などの形式があるが、比較的静穏な海域ではカーテンウォール式取水口が用いられることが多い。

従来のカーテンウォール式取水口は、波力を構造部材の耐力や地盤支持力で負担する剛構造となることから、建設地点によっては経済性が影響される構

造形式となっている。そこで、取水水深の確保という必要機能に着目して透過波を許容し、波力に対して柔構造^{1), 2)}とすることで構造の合理化を図る上ヒンジ式カーテンウォールを考案した。

この型式は上部工からヒンジを介して遮水板を吊り下げる構造である(図-1)。この型式のカーテンウォールは、到達した波浪に対し遮水板がヒンジを中心として回転運動することで従来の剛構造と比較して鋼管杭への作用力が低減し、必要な鋼管杭本数の低減が期待できる。さらに、構造上重要な部分であるヒンジ部を海面よりも上に設置しているため、ヒンジ部の点検・交換などの運用開始後の維持管理が容易であるといった利点がある。

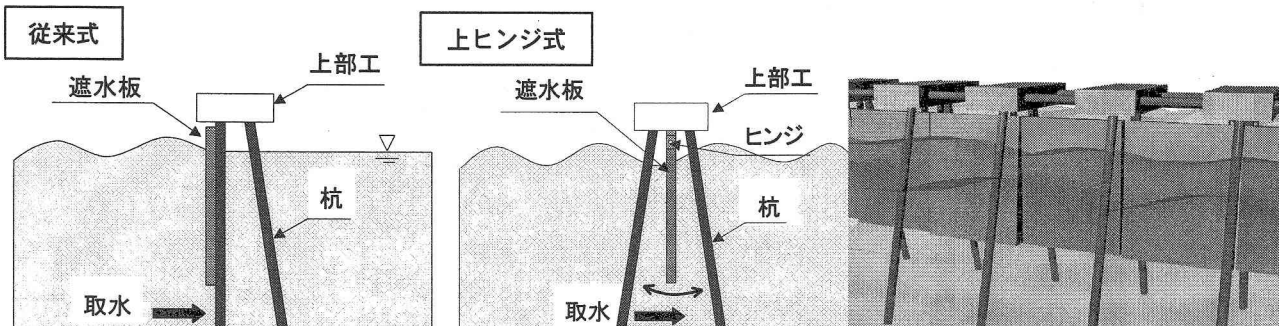


図-1 上ヒンジ式カーテンウォール概要図

そこで、本研究では、この上ヒンジ式カーテンウォール式取水口について2次元造波装置を用いた水理実験を実施し、ヒンジ部への作用力や遮水板の振角などの基本的性質を把握した。さらに、実用化の検討を実施するために、得られた実験結果を基にモデル地点の概略設計を実施し、従来のカーテンウォール式取水口とコスト比較を実施した。

2. 実験方法および実験条件

(1) 実験方法

水理模型実験は中国電力技術研究センターにおける2次元水路（幅1.0m×長さ40m×高さ1.4m）において実施した。当水路には吸収制御可能2次元造波装置が設置されている。

模型スケールは1/20とし、相似則はフルード相似則とした。遮水板は塩化ビニールで、上部工はアクリルでそれぞれ製作した。なお、実構造物の遮水板はコンクリート構造の箱の中に発泡スチロールを入れた構造を計画しており、この実構造の密度を再現するために、模型の遮水板内に錘を入れて調整した。ヒンジは鋼製のピンタイプのものを使用した。実構造物では鋼管杭を上部工で剛結するが、実験においては鋼管杭を省略した。模型の諸元は表-1のとおりである。なお、諸元はすべて現地スケールで表記している。

表-1 上ヒンジ式カーテンウォール模型諸元

遮水板厚	1.0m
遮水板延長（1枚あたり）	10.0m
遮水板高さ	12.3m
没水深（HWL時）	11.65m
質量（1枚あたり）	2,142kN

水理実験においては、地形による浅水変形などの影響を考慮するために、カーテンウォールから護岸までの地形を模型に再現した。さらに、護岸からの反射波の影響を再現するために、護岸側に鋼製の反射壁を設置した。この反射壁は、下部を透過できる構造となっており、事前に下部透過幅を変えて護岸反射率（以下反射率）を調整した。また、取水を再現するために、反射壁の下流側から取水するポンプを設置して、水路内に循環流を発生させた。

水理実験では、ヒンジに作用する力（水平方向、鉛直方向）を2分力計で計測した。遮水板の振角については、遮水板前後の水中にレーザー変位計を2台設置し、変位から振角に換算して求めた。また、遮水板の前後および上部工に超小型波圧計を16点（前面7点、背面7点、上面1点、底面1点）設置して構造物に作用する波力を計測した。また、カーテンウォール前後には、入射波検定および遮水板の反射

率を把握するために、容量式波高計を合計8本設置した。

実験概要図を図-2に、計測項目および計測間隔等を表-2に示す。

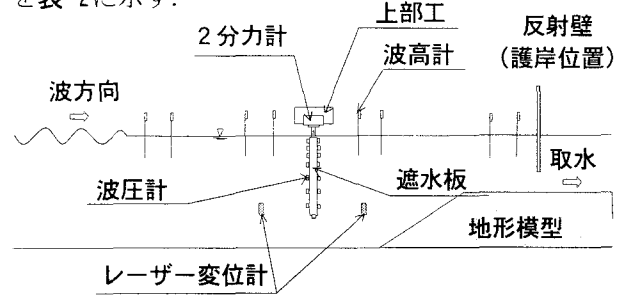


図-2 実験概要図

表-2 計測項目

計測項目	計測方法	計測間隔	計測箇所
水位	容量式波高計	20Hz	8箇所
波圧	圧力計	100Hz	遮水板16箇所 上部工19箇所
振角	レーザー変位計	100Hz	2箇所
ヒンジ作用力	2分力計	100Hz	2箇所 (左右ヒンジ部)

(2) 実験ケース

水理実験における波浪条件については、波高は2m～4m、周期は5.0～10.0secとし、規則波および不規則波（Bretschneider-光易型）とした。なお、規則波は有効測定時間（現地スケールで約5分）の間計測し、不規則波は250波を計測した。潮位の影響を把握するために、HWL（T.P.+1.35m）とLWL（T.P.-1.70m）の二種類を設定した。また、反射率を小（0.0～0.2）、中（0.4～0.6）、大（0.8～1.0）の3種類で変化させた。さらに、取水の影響を把握するために、カーテンウォール下部からの取水流速が0.2m/sとなるように取水した場合と取水しない場合の2種類を実施した。以上の実験条件を組み合わせる実験ケースは規則波・不規則波の合計86ケースを実施した。

3. 実験結果

(1) 時系列計測結果

実験結果の一例として、規則波、HWL、周期6秒、波高4m、反射率大の水平方向ヒンジ作用力、鉛直方向ヒンジ作用力および振角時系列結果を図-3に示す。また、遮水板の動揺状況を図-4に示す。なお、水平方向のヒンジ作用力と振角は岸方向を正、鉛直方向は下方向を正としている。

規則波実験では、到達した波浪と遮水板が規則正しく連動し、波浪周期と遮水板の動揺周期はほぼ一

致する結果となった。なお、波高が大きい条件では遮水板の上部から越波が発生し、その影響で振角が岸沖非対称となる場合があった。波浪時には海面付近の温度躍層は形成されていないと考えられるので、波高の大きな条件下での遮水板上部からの越波は許容することとした。

以下に、ヒンジ作用力、振角など計測項目ごとにその詳細を述べる。

(2) ヒンジ作用力

ヒンジ作用力はカーテンウォールの支持杭設計等に必要設計条件である。このヒンジ作用力の計測結果および基本的な性質について述べる。

a) 反射率・波高の影響

規則波・波高4m、周期6～8secの条件下で反射率を変化させた場合の水平方向ヒンジ作用力最大値（岸沖平均）の周期特性を図-5に示す。反射率大の場合は反射率小の場合と比較して、水平方向ヒンジ作用力が最大2倍程度になり、反射率はこの型式のカーテンウォールの設計上重要な条件となることが

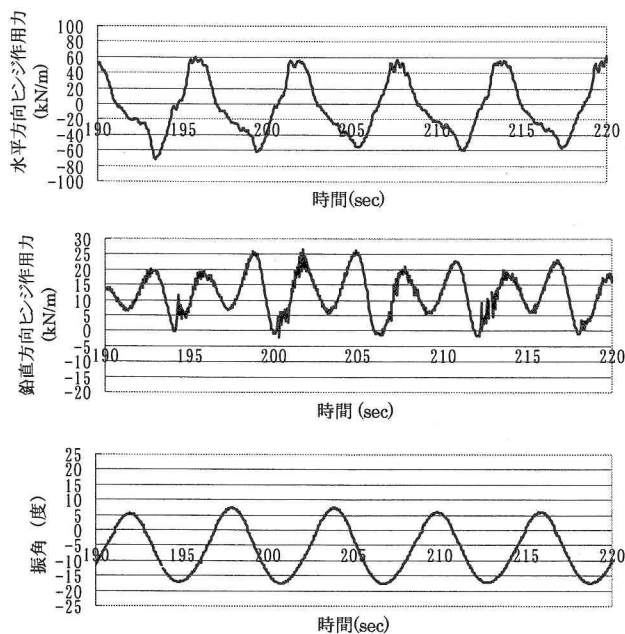


図-3 時系列計測結果（上から水平方向ヒンジ作用力、鉛直方向ヒンジ作用力、振角）

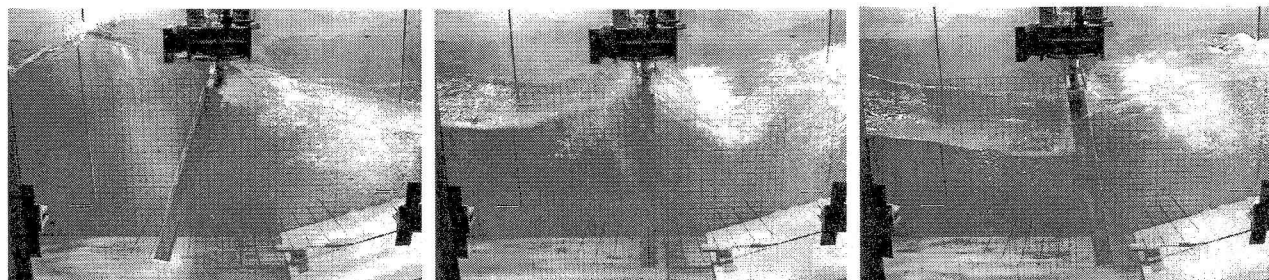


図-4 遮水板の動揺状況

明らかとなった。なお、鉛直方向のヒンジ作用力も同様に反射率の大きいと作用力が大きくなる結果となっている。

反射率中で、波高を2～4mで変化させた場合の波高と最大水平方向ヒンジ作用力の比較を示すと図-6のとおりとなり、波高が大きくなるとヒンジ作用力が大きくなる結果となった。

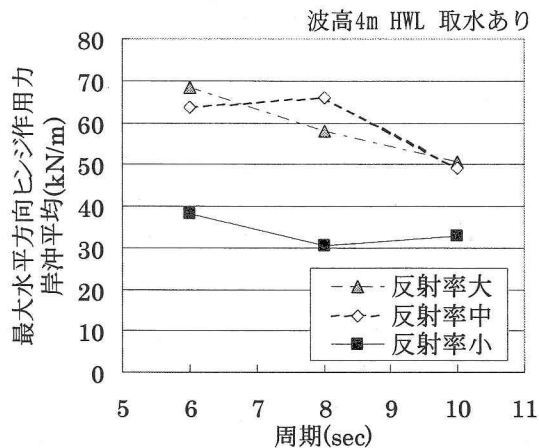


図-5 反射率と最大水平方向ヒンジ作用力（岸沖平均）の関係

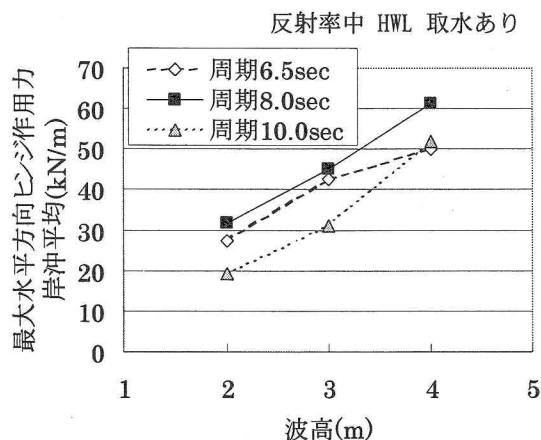


図-6 波高と最大水平方向ヒンジ作用力（岸沖平均）の関係

b) 規則波・不規則波比較および潮位の影響

反射率中（消波護岸を想定）で、周期を小幅に変化させて実験を実施した。越波の影響を最小限とするために波高は2mとした。規則波および不規則波の水平方向ヒンジ作用力の周期特性を図-7に示す。

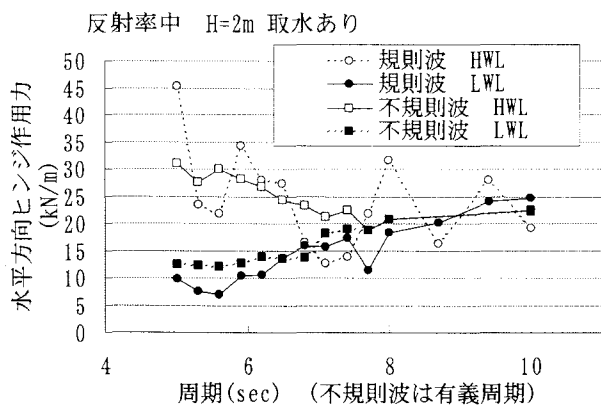


図-7 水平方向ヒンジ作用力周期特性
(規則波・不規則波, HWL, LWL)

規則波の場合、とくにHWLではピークが数箇所生じる凹凸のある周期特性となった。これは護岸反射により部分重複波が形成され、その腹節位置とカーテンウォール遮水板の位置関係でこのような周期特性になると考えられる。

不規則波の場合はHWL, LWLとも規則波よりもなだらかな周期特性となっているが、全体的な傾向は規則波と同様である。

HWLとLWLの不規則波では周期とヒンジ作用力の相関関係が逆になっている。今回の実験は、5～10secと比較的狭い周期範囲のデータであるため、この現象の説明には、さらに短、長周期の条件を追加して、その性質を把握する必要があるが、これはHWLとLWLで固有振動周期の相違に起因する動揺時波力の特性の変化によるものと推測される。

c) ヒンジ作用力と合田式との比較

H=4m, HWLにおいて反射率を変化させた場合の前面波力最大時に計測された前背面の波圧計測結果と合田式による波圧を比較すると図-8のとおりとなる。前面波力は合田式の値よりも小さい結果となった。さらに、このカーテンウォールは透過率が高いため、背後の水位が前面水位に追従して背面波力が大きくなり、前背面の波力差は合田式と比較すると大幅に低減される結果となる。

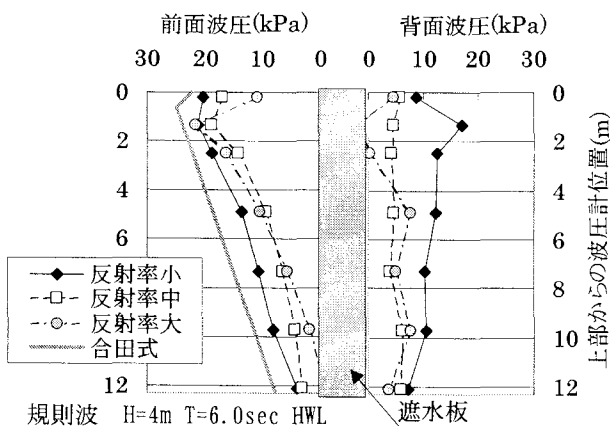


図-8 遮水板前背面波圧分布図と合田式の比較

水平方向のヒンジ作用力の最大値を合田式による波圧を積分した波力で除したものと周期の関係を図-9に示す。ヒンジ作用力は前背面波力以外にも遮水板の慣性力、遠心力等が含まれた値であるため、厳密には両者を同列に評価することはできないが、上ヒンジ式における従来の固定型式に対する波力低減指標として用いることとした。

周期が大きくなるにしたがって、カーテンウォール下部からの透過率が上がり、前背面波力差が小さくなる傾向にあり、周期7秒以上では水平方向ヒンジ作用力は合田波力のおよそ20%以下の値となっている。

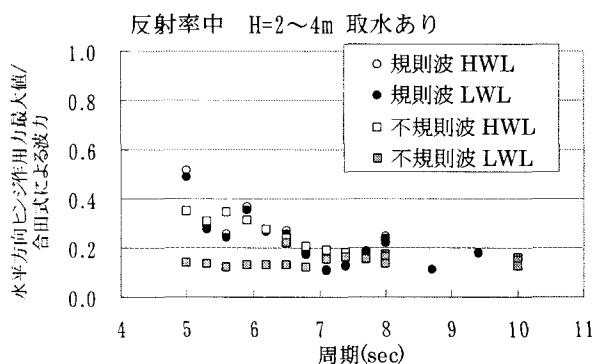


図-9 水平方向ヒンジ作用力の合田式による波力の比率の周期特性

(2) 遮水板振角

上ヒンジ式カーテンウォールは上部工を杭で支持する形式であるため、構造物の安全上、遮水板が大きく動揺して支持杭に衝突する事態は避けなければならない。このため、遮水板の最大振角は重要な設計条件のひとつである。

a) 反射率・波高による影響

規則波(波高4m, HWL)における反射率大, 中, 小における遮水板振角最大値(岸沖平均値)を比較すると図-10のとおりとなる。振角最大値は反射率および周期と正の相関関係にある。

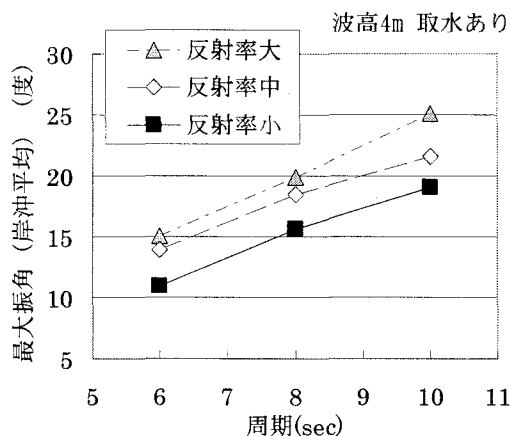


図-10 振角と反射率の関係

振角最大値と波高の関係を図-11に示す。反射率と同様に波高が大きくなると振角が大きくなる。

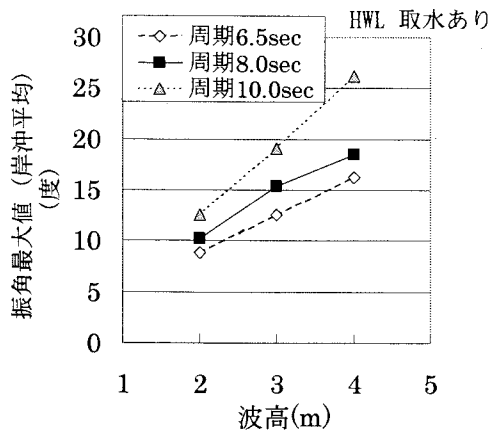


図-11 振角と波高の関係

b) 規則波・不規則波比較および潮位の影響

波高2m, 取水あり, 反射率中の条件において規則波および不規則波の周期に対する最大振角特性を比較すると図-12のとおりとなる。

規則波の場合には, 遮水板と部分重複波の腹と節の位置関係により, 非常に大きく振れる周期と振れない周期が存在し, 数箇所のピークが生じている。

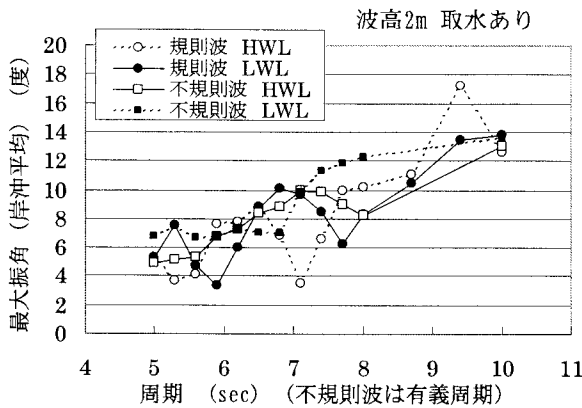


図-12 遮水板振角周期特性 (規則波・不規則波, HWL, LWL)

一方, 不規則波では規則波ほど明確に部分重複波が形成されないため, 規則波で生じたようなピークは存在しないが, 全体的に周期が大きくなると振角が大きくなる傾向は同じである。

規則波では, 水深により波長の長さが異なるので, HWLとLWLでは部分重複波の腹節位置がずれて振角ピーク位置が異なる。護岸から遮水板までの距離を波長の1/2で除した値と規則波波高2mの振角最大値 (岸沖平均) の関係を図-13に示す。

この図から, HWL, LWLの両者とも腹節の位置 (横軸が2, 3, 4の整数の値) のときに振角が小さくなり, その中間である1.5, 2.5の付近で振角のピークが生じていることがわかる。

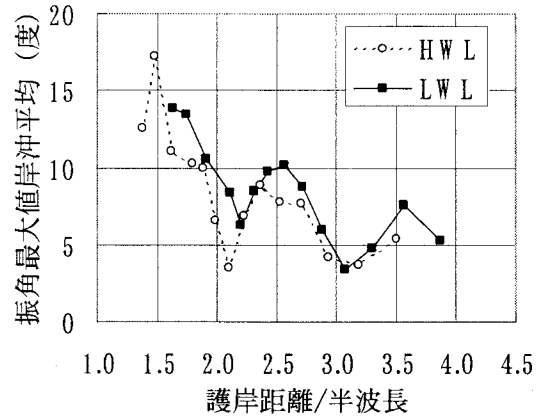


図-13 振角と護岸距離/半波長の関係 (規則波)

c) ヒンジ作用力と振角の関係

規則波における振角最大値と水平方向ヒンジ作用力最大値の関係を図-14に示す。HWLの場合は部分重複波の影響で数箇所ピークが生じているため, 明確な相関が得られなかったが, 包絡的には振角が大きくなるとヒンジ作用力は小さくなる傾向であった。逆にLWLでは振角と作用力に正の相関関係がみられた。波高2m, 反射率中の不規則波における振角最大値とヒンジ作用力最大値の関係を図-15に示す。規則波同様HWL, LWLで相関関係は逆になったが, これはヒンジ作用力の項で述べたように, HWLとLWLの遮水板の固有振動周期の相違に起因する動揺時波力の変化によるものと推測される。

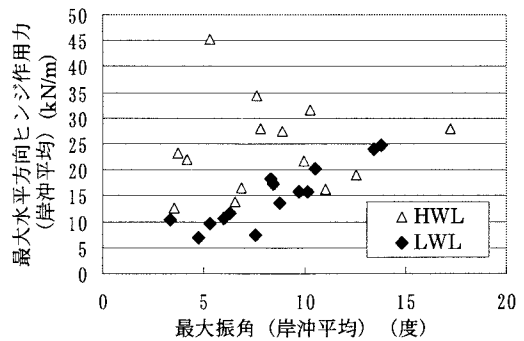


図-14 振角と水平方向ヒンジ作用力の関係 (規則波)

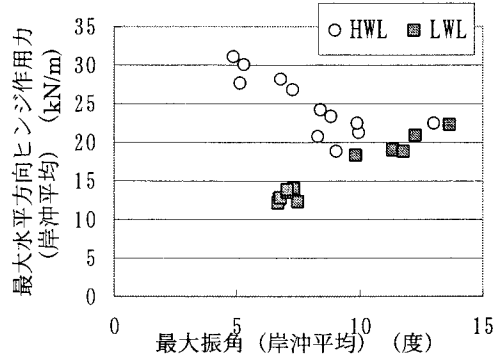


図-15 振角と水平方向ヒンジ作用力の関係 (不規則波)

4. 実用化の検討

上ヒンジ式カーテンウォールの実用化を検討するために、実験結果を基に設計条件を決定して、モデル地点における構造物の概略設計を実施した。さらに、その結果から従来構造とのコスト比較を実施した。

(1) 設計条件の決定

現地でのヒンジ部に生じる摩擦力を、模型実験において正確に再現するのは非常に困難である。このため、実験上のヒンジ摩擦力が実験結果に与える影響を把握した上で、上ヒンジ式カーテンウォールの設計外力を決定する必要がある。そこで、水の無い状態で遮水板を30度傾けた後に自由振動させた場合のヒンジ作用力および振角を計測し、計測結果と理論解を比較した。その結果を図-16に示す。計測では、遮水板の振動は徐々に減衰している。この減衰はヒンジ摩擦力および空気抵抗によって生じているが、両者を正確に分離して評価することは困難であるため、設計上安全側となるように、この減衰はヒンジ摩擦力だけによるものと仮定し、振角においては一周後の減衰である8%程度の変動を考慮して設計条件を決定した。

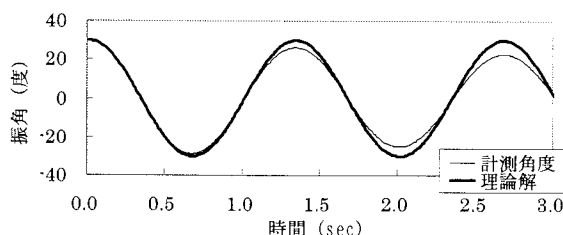


図-16 空中における自由振動時の遮水板振角の計測結果と理論解の比較

ヒンジ作用力や遮水板振角は、基本的に不規則波の実験結果を設計条件として採用し、規則波（不規則波最高波を連続作用）の結果をその検証として用い、上記ヒンジ摩擦力等の影響を考慮して決定した。

実験では上部工に衝撃的な波力が作用することがわかったが、この作用時間の極めて短い衝撃力は、実際の杭では弾性変形によりある程度吸収されると考えられる。そこで、波力の時系列を入力した動的応答解析³⁾により応答変位を求め、この最大変位に対応する静的荷重を逆算し、その荷重を杭に作用する実効波力（設計外力）とした。

以上のとおり設計条件を決定し、モデル地点における概略設計を実施した。

(2) 概略設計とコスト比較

実験結果から上ヒンジ式は、水平方向のヒンジ作用力が合田式と比較して大幅に低減されることから、杭に作用する力が小さくなり、結果的に杭の本数を従来式の半分に低減できることが明らかとなった。

剛構造である従来式のカーテンウォールと上ヒンジ式のカーテンウォールのコスト比較を実施した。

その結果、従来式に比べてヒンジ部の点検および交換等のメンテナンスコストが若干増加するが、杭本数が減少したことによりイニシャルコストが大幅に低減するために、約17%のライフサイクルコストの低減が期待できる結果となった。

5. おわりに

本実験的研究の成果を以下に示す。

(1) 上ヒンジ式カーテンウォールの主要な設計条件であるヒンジ作用力と遮水板振角の以下の基本的な性質を把握した。

- a) 護岸反射率および入射波高が大きくなるとヒンジ作用力および最大振角は大きくなる傾向にある。
- b) 水平方向ヒンジ作用力は合田波力と比較して大きく低減された。とくに周期7s以上では合田波力の20%程度の値となった。また、潮位によってヒンジ作用力の周期特性は異なる結果となった。
- c) 振角は周期とともに大きくなる傾向にある。なお規則波では護岸反射による部分重複波の腹節位置と遮水板の位置関係により振角は大きく変化する。

(2) 得られた実験結果から上ヒンジ式カーテンウォールの概略設計を実施した結果、実用化した場合ライフサイクルコストで約17%低減することが期待できることがあきらかとなった。

なお、本論文では実験結果および実用化の検討を中心に述べたが、今後、得られた実験結果からその現象のメカニズムを検討するとともに、多方向不規則波造波装置を用いた平面実験を実施して2次元実験では把握できない3方向作用力および入射波角度による影響を把握し、実用化に向けてさらに詳細な研究を実施する予定である。

謝辞：本研究を行うに当たって、電力中央研究所 田中研究参事、榊山上席研究員、森主任研究員（現大阪市立大学講師）、愛媛大学中村助教授、豊橋技術科学大学青木教授に貴重なご指導、ご意見を賜りました。また、五洋建設株式会社の関係者の方々には本構造物の設計・施工に関する検討に際し、多大なるご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中野修、田中伸和、榊山勉、興野俊也・大熊義夫：ALE法による2次元動揺量数値解析を用いた浮体式カーテンウォールの動揺・波力特性評価、海岸工学論文集、第47巻、pp. 851-855, 2000.
- 2) 中村孝幸、金度三、平岡順次、泉雄士、浅井威人：浮体式低層取水施設の波浪動揺の低減法に関する研究、海岸工学論文集、第50巻、pp. 821-825, 2003.
- 3) 土木学会編：動的解析と耐震設計 第4巻 ライフライン施設、技報堂出版、1989.