

膜式カーテンウォールに作用する 波力に関する実験的研究

Experimental study on wave force acting on a membrane curtain wall

大島香織¹・鶴飼克臣²・森屋陽一³・泉雄士⁴・松蔭茂男⁵

Kaori OHSHIMA, Katsumi UKAI, Yoichi MORIYA, Takeshi IZUMI and Shigeo MATSUKAGE

¹正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

²工修 五洋建設(株) 中国支店 (〒730-8542 広島県広島市中区上八丁堀 4-1 アーバンビュウグランドタワー)

³正会員 工博 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

⁴正会員 工修 五洋建設(株) 中国支店 島根工事事務所 (〒690-0324 島根県八束郡鹿島町大字片句 654-1)

⁵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)

Many thermal power plants and nuclear plants apply curtain wall intake method that utilizes the deeper, i.e. the colder sea water to efficiently cool down the power plant system. In general, the curtain wall structure consists of rigid PC shielding wall and steel pipe piles that supports the PC wall. In order to retain the structural resistance to large waves and various subsurface conditions, the curtain wall structure tends to become large and therefore increase the construction costs.

We thus propose a membrane curtain wall which is expected to reduce the construction costs. Since the membrane curtain wall itself is light and flexible, it also reduces the wave force acting on the wall and therefore enables us to apply relatively simple structures to support the curtain wall.

In this study, we conducted the hydraulic model tests to explore the characteristics of wave force acting on the membrane curtain wall. Through the experiments, we tested several membrane curtain walls with different structures and examined their structural effects on reduction of the wave force.

Key word: curtain wall intake, deep-sea water intake, membrane curtain wall, wave force

1. はじめに

臨海部の火力・原子力発電所では、発電効率を上げるために冷却水の深層取水方式としてカーテンウォール方式が用いられることが多い。カーテンウォールの構造は、PC 遮水版を鋼管杭で支持する構造が一般的であり、この様な剛構造は設置地点の波浪や地盤特性により、施設が大型化し建設費用が高額になる場合がある。既存の研究では、コストダウンが可能なカーテンウォールとして浮体式カーテンウォールが提案されている。中野ら(2000)は、平板構造のタンクに2本の脚を設け、海底面に設置したアンカーとヒンジ部で連結した浮体構造を提案している。この構造は、ヒンジ部を中心とした回転振幅運動を行うものである。また、中村ら(2003)は、浮体

式構造物を海底に設置したアンカーに係留する方式のカーテンウォールを提案している。しかしながら、これらの形式は波浪条件により浮体の動揺量が増大することや、動揺量や動揺周期により係留力が大きくなることが問題である。

そこで建設コストダウン可能な合理的構造形式として膜式カーテンウォールを考案した(図-1)。本構造は、浮体構造に比べ波浪に対し柔軟であるため波力の低減が可能であり、係留のための構造が簡素化できる。また、膜構造は軽量で施工も比較的容易であるという利点が考えられる。膜構造物として一般的な汚濁防止膜に関してはいくつか研究例(青木ら, 1998)があるものの、今回提案したカーテンウォールの様な構造についての検討はされていない。

本研究は、考案した膜式カーテンウォールの基本的な波力特性を把握することを目的に2次元水理模

型実験を実施し、波浪条件の違いによるヒンジ作用力を評価するとともに、波力を低減させる膜式の構造形式についての検討も行った。

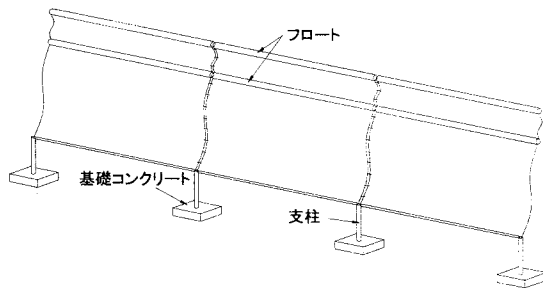


図-1 膜式カーテンウォール概略図

2. カーテンウォールの構造

本研究で提案する膜式カーテンウォールは、基礎コンクリート上に支柱を設け、膜を接合するとともに2つのフロートにより膜を自立させる構造である。2つのフロートは、対象とする海域の H.W.L.の水面高さより 1m 上と L.W.L.の水面高さに設置した。H.W.L.より 1m 上にフロートを設置することで、波高 2m 程度までの水位変動にフロートが追従し、越波により躍層を乱すことなく低層の冷水を取水することが可能になると考えた。図-2 に膜式カーテンウォールの構造図(断面)を示す。この構造を基本形として実験を行った。

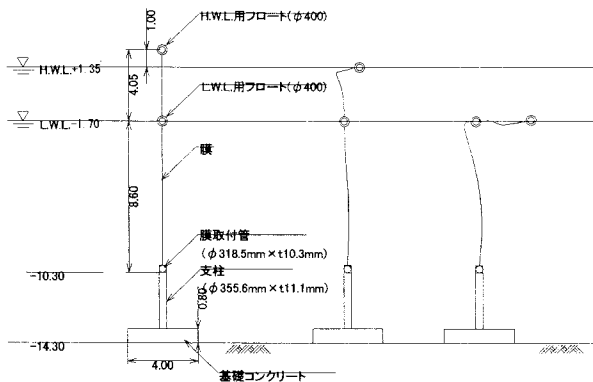


図-2 膜式カーテンウォール構造図(基本形)

3. 実験装置および実験条件

(1) 実験装置

実験は、長さ 50m、幅 0.6m、深さ 1.2m の二次元造波水路(不規則波造波機能付)を用いた。水路には造波装置とともに反射吸収装置が設定されており、水路内での多重反射の影響を最小限にとどめた実験が可能である。また、水路には環流装置も設置されており、流れの影響を考慮した実験も行うことが可能である。

図-3 に示すように、現地に合わせ水路の岸側に 1:3 勾配斜面と水平床を設け、傾斜の手前に模型を設置した。また、水平床上に取水口として下端に開口部を有する反射壁を設置した。

波高の測定には、容量式波高計を用い、沖側に 2 台、構造物前面に 3 台、背面に 3 台の計 8 台設置した。

膜に作用する荷重をヒンジ部で計測するために、水平力計測に 2 台、鉛直力計測に 2 台のロードセルを用いた。本実験では、このロードセルで計測した水平方向と鉛直方向の波力の合成力を求め、解析を行った。模型の遮水膜部には軟質ポリエチレンシート、膜取付管には SUS 管、フロート部には発泡スチロールの丸棒を用いた。ヒンジ部にはロッドエンドベアリングを使用し、基礎部はヒンジ作用力を測定するためのロードセルを用いて、模型を水路床部に固定した。サンプリング周波数 1,000Hz で、規則波は 3 分間、不規則波は 11 分間実験を行いデータを収集した。

(2) 実験模型形状

カーテンウォールの構造形式による波力の違いの検討を行うために、前述の基本形の模型の他に 5 種類の模型を用いて実験を行った。図-4 に示すように、①基本形の L.W.L.位置のフロートを下げる。②基本形の L.W.L.位置のフロート下にもう 1 つフロートをつける。③膜の材質を変える(軟質塩化ビニルシート:比重大)。比重を大きくしたのは、膜に貝などが付着した場合を想定したためである。④短いフロートを用いる。⑤フロートが H.W.L.位置のみ 1 つ。⑤の模型はフロートの径を変化させ、一様水深での実験を行った。写真-1 に実験模型の写真を示す。

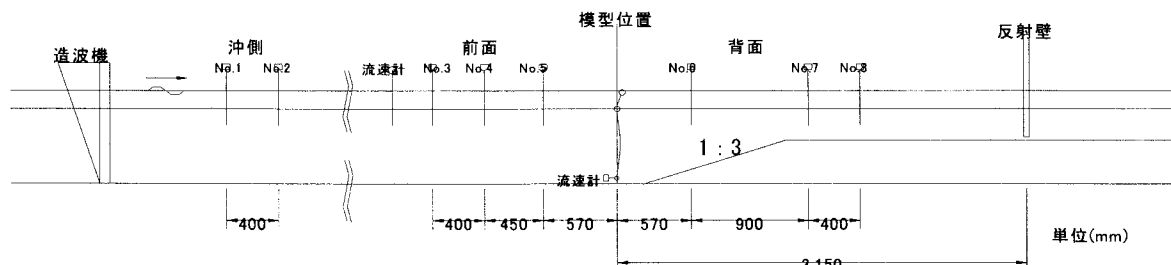


図-3 模型、波高計設置位置図(実験スケール)

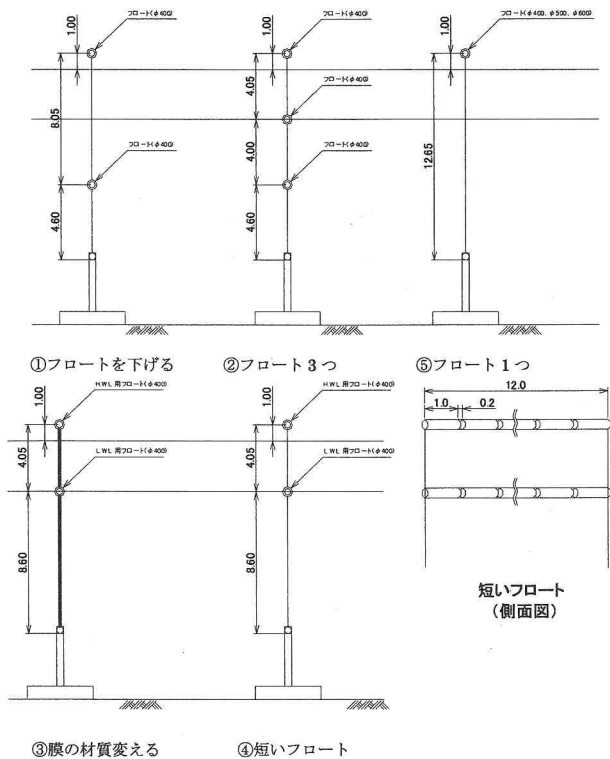


図-4 実験模型（基本形以外）

(3) 実験条件

実験は、現地水深 15.65m (H.W.L.) と 12.60m (L.W.L.) の 2 種類の水深条件において、波高 2m では周期特性を把握するため周期 4s から 10s まで周期を変え、波高 3m, 4m では周期 6.5s, 8s, 10s の組み合わせで行った。

また、取水による流速の影響を反映するため、カーテンウォール下部で現地流速 0.2m/s に設定し、1/20 の縮尺でフルードの相似則に従い実験を行った。

(4) 反射壁前面の反射率

模型を設置しない状態で波を作用させた場合の、反射壁前面での反射率を合田ら (1976) の方法に従い測定した。規則波、不規則波とも、波高 2m で周期 4~10s, 波高 3m, 4m は周期 6.5s について測定を行った。測定結果を図-5 に示す。取水口を模擬して反射壁の下部に開口部を設けているため、周期が大きくなると反射率が小さくなっている。本実験は、周期により反射率が大きく異なる条件で行っている。

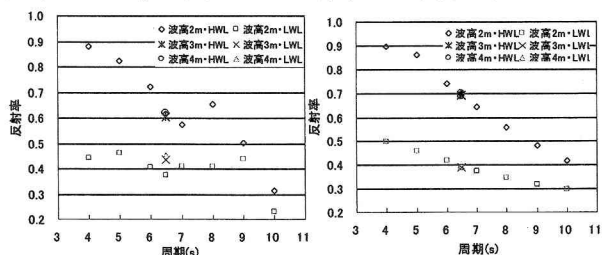
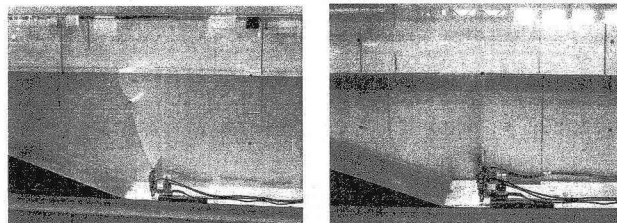
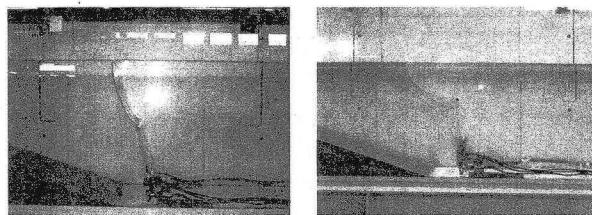


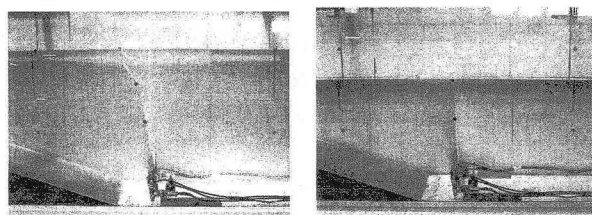
図-5 周期と反射率の関係（左：規則波，右：不規則波）



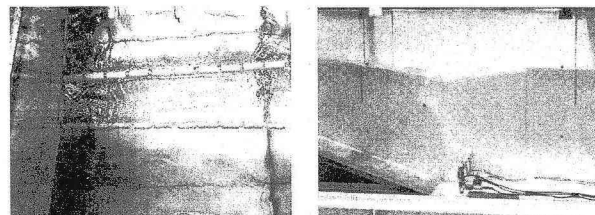
基本形（左：H.W.L., 右：L.W.L.）



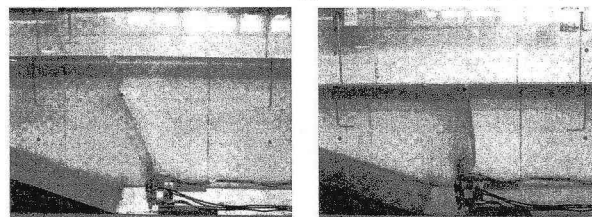
①フロートを下げる（左：H.W.L., 右：L.W.L.）



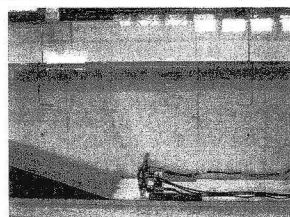
②フロートを3つ（左：H.W.L., 右：L.W.L.）



③短いフロート（左：水槽上から，右：波作用時）



④膜の材質変える（左：H.W.L., 右：L.W.L.）



⑤フロート1つ（H.W.L.）

写真-1 実験模型

4. 測定結果

(1) 膜に作用する波力

図-6 は、基本形の模型を用い実験を行った際の、膜に作用する波力の合成力最大時付近の時系列図を示したものである。規則波、波高 4m、周期 6.5s、H.W.L.の結果である。上から、ヒンジ部に作用する水平方向と鉛直方向の波力の合成力、鉛直方向の波力、水平方向の波力、前面水位、背面水位を示している。波力と水位に位相差があるように見えるのは、模型が移動し波高計と接触することを防ぐため、図-3 に示したように模型と波高計を実験スケールで 57cm 離しているためである。また、図-6 の時系列より波による緩やかな波力の他に衝撃的な力が作用していることがわかる。最大波力発生時のビデオ解析を行った結果、衝撃力は水面が上昇しフロートが水面下に没水する瞬間に発生することが明らかになった。写真-2 に、衝撃力発生時のビデオ画像を示す。図-7 に衝撃力が発生している付近の波力の時系列図を示す。この図より、衝撃力が振動していることが確認できる。これは、フロートが水面下に没水する瞬間に膜が緊張することにより生じていると考えられる。

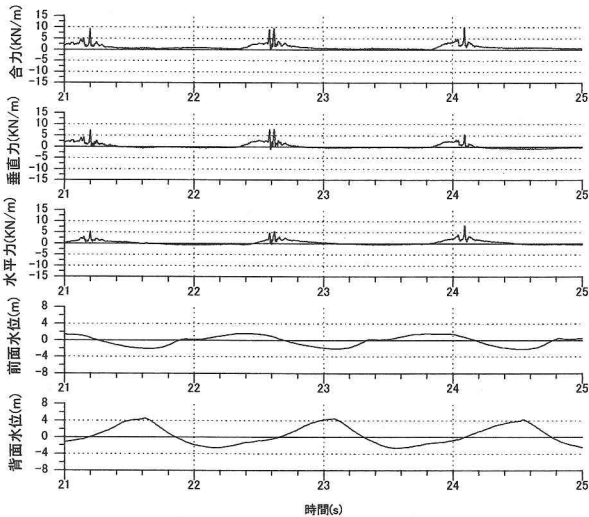


図-6 最大合成力発生時付近の時系列図
(規則波・波高 4m・周期 6.5s・H.W.L.)

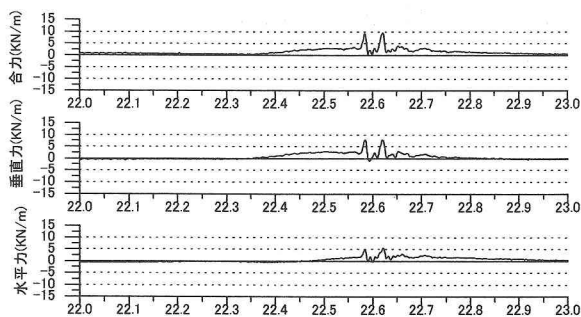


図-7 衝撃力発生付近の時系列図

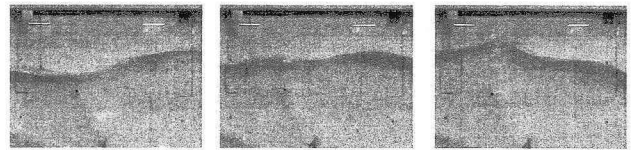


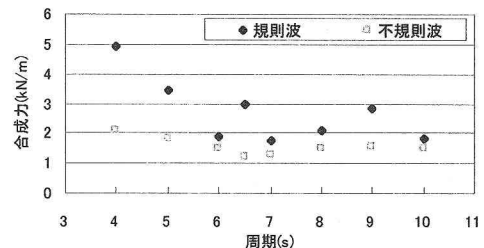
写真-2 最大波力発生時のビデオ画像

(2) 周期と波力の関係

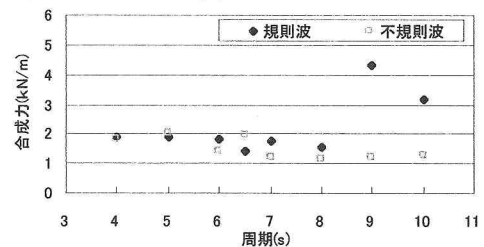
図-8 は、周期と膜に作用する波力の合成力の関係を示したものである。波高 2m で周期を 4s~10s で実験を行った結果である。

規則波の H.W.L.はばらつきが大きいものの、全体的に周期が大きくなると合成力は小さくなる傾向がみられた。H.W.L.は反射率が大きく部分重複波が形成され、その腹節と膜の設置位置の関係により、合成力にばらつきが生じると考えられる。L.W.L.では周期 9s、10s で合成力が大きな値を示している。ビデオ解析の結果、模型背後の傾斜部で反射波が生じていることが影響していると考えられる。

不規則波についても、周期が大きくなるにつれ、ヒンジ部にかかる合成力は低減していく傾向がみられた。



(a) H.W.L.



(b) L.W.L.

図-8 周期と合成力の関係 (波高 2m)

(3) 波高と波力の関係

図-9~11 は波高と膜に作用する波力の合成力の関係を示したものである。波高 4m、周期 6.5s のみ 3 回ずつ実験を行っている。また、規則波の H.W.L.、波高 4m、周期 8s のケースでは、波長の 1/2 が水路幅とほぼ等しくなったため、水路幅方向に大きな水面変動が発生しデータの取得ができなかった。

図より、周期にかかわらず波高が大きくなるに従い、膜に作用する波力の合成力が増大する結果が得られた。

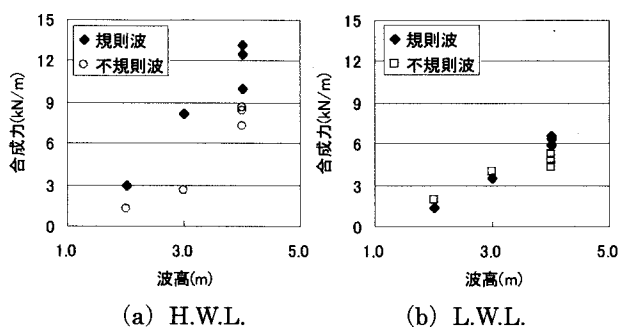


図-9 波高と合成力の関係 (周期 6.5s)

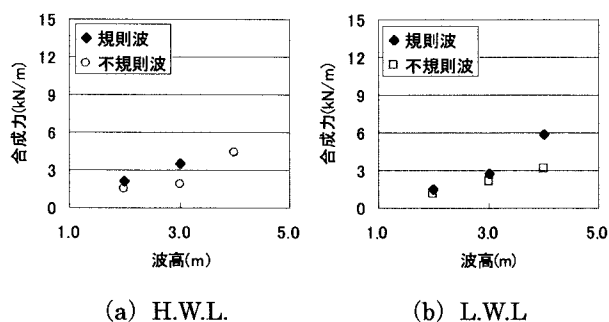


図-10 波高と合成力の関係 (周期 8.0s)

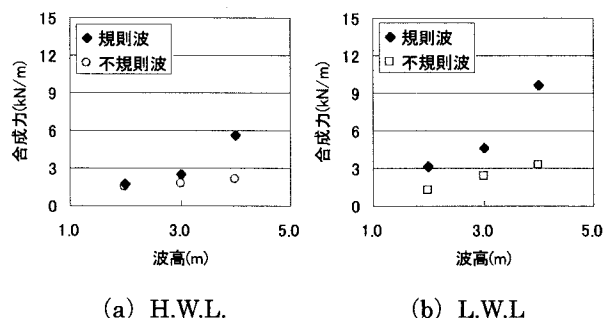


図-11 波高と合成力の関係 (周期 10.0s)

(4) 模型の形状による波力の違い

図-12 は、模型形状と膜に作用する波力の合成力の関係図を示したものである。基本形と①～④の模型で、波高 4m、周期 6.5s、H.W.L.の条件における結果である。

基本形の模型に対して、模型①の L.W.L.のフロート位置を下げたケースの合成力が大きく減少している。ビデオ解析を行った結果、H.W.L.と L.W.L.のフロートとの間隔が広くなり H.W.L.のフロートの自由度が増し、水面変化にフロートが追従しやすくなった。そのため、衝撃力を受けにくくなったと考えられる。また、模型⑤のフロートが 1 つのケースは、規則波、H.W.L.の条件のみ基本形と同じ条件で実験を行った。模型⑤においても合成力が減少する結果が得られた。この場合も、水面変動にフロートが追従しやすくなったためであると考えられる。他の構造の模型については、基本形のものと同合成力に明らかな差は見られなかった。

(5) フロート 1 つ場合の波力

フロートが 1 個の模型を用い、模型背後の傾斜と

反射壁のない一様水深の条件で実験を行った。これは、背後の地形形状や反射壁からの反射の影響がない条件で、膜構造物の基本的波力特性を明らかにするためである。

図-13 はフロート径と膜に作用する波力の合成力の関係、図-14 はフロート径 400mm における周期と合成力の関係をしたものである。全て波高 4m、周期 6.5s、H.W.L.、流速 0m/s での実験結果を示している。本解析では、合成力の最大値のみの比較を行っているため、希有な状態のデータが最大値として解析されていることも考えられる。そこで、規則波についてのみ、合成力の上位 5 位の平均値での比較を行った。

フロート径と合成力の関係図を見ると、規則波でフロート径 500mm のケースで 600mm より合成力が大きな値を示しているが、上位 5 位の平均値で比べると、フロート径が大きくなると合成力も大きくなる傾向が確認できる。

フロート径 400mm と 600mm では最大値と上位 5 位平均値にはほとんど差がないが、500mm は最大値が平均値より大きな値を示している。これより、膜構造物の基本的な波力特性を明らかにするには、平均値を用いたほうが希有な事例を省くことができると考えられる。

周期と合成力の関係は、規則波は周期が大きくなると合成力が大きくなっているが、不規則波では周期による合成力の違いは認められなかった。

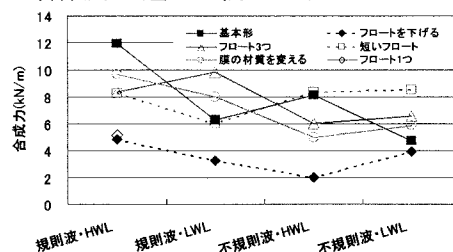


図-12 模型形状による合成力の違い

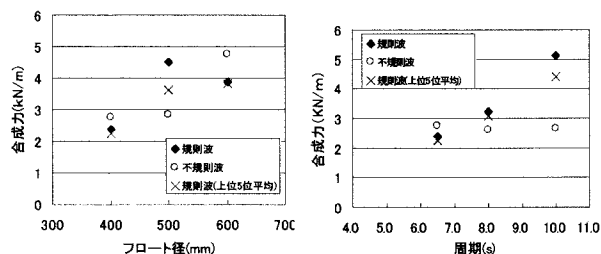


図-13 フロート径と合成力

(6) 規則波実験の波力の分布

膜式カーテンウォールは柔構造のため、フロートや膜の位置が一定とならない。そのため、規則波の条件でも膜に作用する波力にばらつきが生じると考えられる。規則波の膜に作用する波力の合成力の分布図を図-15 に示す。これは、周期 6.5s で波高 2m、3m、4m の結果を示している。これより、波高が大きくなると変動係数も大きくなり、ばらつきが大き

くなっていることがわかる。合成力の向きの度数分布を図-16に示す。合成力の向きは、鉛直上向きを 0° 、岸側をプラス、沖側をマイナスとした。波高2mでは $+10^\circ \sim 180^\circ$ に広く分布している。波高が3m, 4mと大きくなると $+60^\circ$ を中心とする正規分布に近い分布形状を示している。

この合成力やその向きの分布は、周期が変わると模型と部分重複波の腹節の位置が変わり、その傾向も変化すると考えられる。

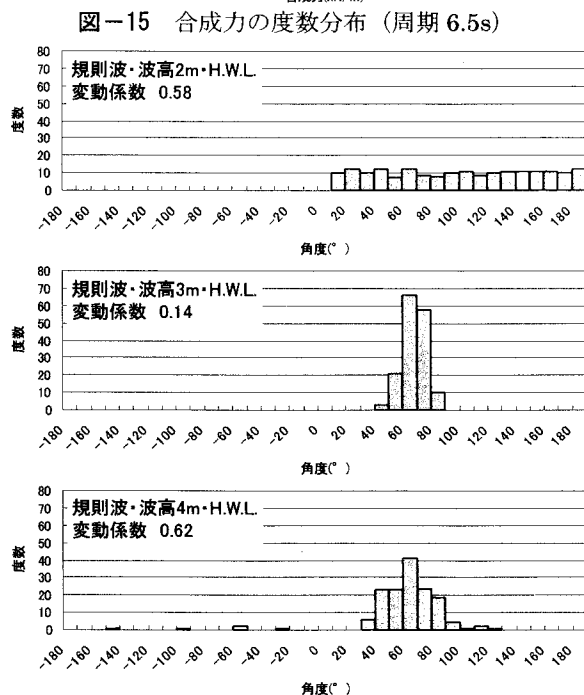
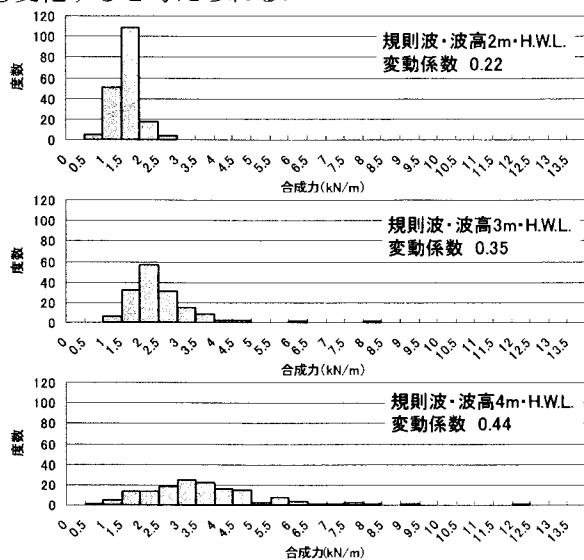


図-16 合成力の向きの度数分布 (周期 6.5s)

5. おわりに

本研究は、一般的な剛構造のカーテンウォールに対し、建設コストの低減が可能であると考えられる

膜式カーテンウォールを提案し、その基本的な波力特性を明らかにした。主な結論は以下のとおりである。

- ①膜に作用する波力には、波によるゆるやかな波力の他に衝撃的な力が存在した。この衝撃力は、フロートが水面下に没水する際に生じていることが明らかになった。
- ②不規則波では、周期が大きくなると膜に作用する波力が小さくなる結果が得られた。しかし、規則波では反射波による部分重複波の影響で、ばらつきが大きな結果となった。
- ③波高が大きくなると、膜に作用する波力が大きくなる結果が得られた。
- ④模型の形状を変え実験を行った結果、L.W.L.位置のフロートを下げた形状で最も波力が小さくなることを確認した。
- ⑤フロート径が大きくなると、膜に作用する波力が大きくなる結果が得られた。
- ⑥膜式カーテンウォールは柔構造で、膜やフロートの位置が一定に保たれないため、波力の大きさや向きにばらつきが生じることが明らかになった。

今後、さらに解析を進め膜式カーテンウォールに作用する波力の算定モデルの開発を行う予定である。また、膜式カーテンウォールを実用化するには、膜材料の強度などが、今後大きな課題となると考えられる。

謝辞: 本研究を行うにあたり、豊橋技術科学大学 青木教授、愛媛大学の中村助教授、電力中央研究所の方々に有益なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

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) 青木伸一・岡野聡・榎木亨: 自立式汚濁防止膜の有効高さ・係留力の算定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 796-800, 1998
- 4) 合田・鈴木・岸良・菊池: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港研技研資料, No. 248, 1976年, 24p