

洋上風力発電施設に作用する 波力評価に関する研究

STUDY ON EVALUATION OF WAVE FORCES ACTING ON WIND POWER STATION INSTALLED ON COMPOSITE BREAKWATER

栗原 明夫¹・五明 美智男²・青野 利夫³・堀沢 真人⁴
Akio KURIHARA, Michio GOMYO, Toshio AONO, Masato HORISAWA

¹正会員 工修 東亜建設工業(株) 技術研究所 (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

²正会員 工博 東亜建設工業(株) 技術研究所 (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

³正会員 工博 東亜建設工業(株) 技術研究所 (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

⁴正会員 東亜建設工業(株) 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

This paper investigates the applicability of a few methods to evaluate wave forces acting on a tower of wind power station installed on a composite breakwater. One method adopted here is to estimate that as the drag force, using both velocity and elevation of overtopping waves calculated by Sugawara et. al.(1992). A comparison of wave forces by this method with physical model shows that the accuracy depends on the relative position between the tower and the horizontal surface hit by overtopping waves. It can indicate suitable positions for installing a tower. Furthermore, Goda's experimental formula is applied for a test as well as a numerical wave tank model with VOF function.

Key Words : wave force, overtopping waves, wind power station

1. はじめに

近年各地で風力発電施設が建設されているが、今後は風況等の点で優位性が指摘されている港湾・沿岸域への展開が予想される(例えば長井ら, 1999¹⁾)。しかし洋上風力発電についての国内実績はなく、風力発電施設に作用する波力の評価法は確立されていないのが現状である。

そこで本研究では風力発電タワーを防波堤上あるいは防波堤直背後に設置することを想定し、越波水によってタワーに作用する波力の評価方法を検討する。

2. 研究の方法

(1) 既往の研究

本研究で対象とする風力発電タワーに類似した条件の構造物として、灯標、灯台などの円柱構造物や防波堤上親水施設の一部である手すりなどがある。

合田ら(1972)²⁾は岩礁上に建設される灯標などの円柱構造物に作用する波力を検討し、(1)式に示す波力算定式を提案している。この算定式は、円柱の

波の方向に対する投影面積に対し、岩礁頂面から波頂まで一様な波圧が作用するものとして波力を評価するものである。

$$p = 0.5w_0H_{\max} \quad (1)$$

また波頂高は次の様に定めている。

$$\begin{aligned} \eta_{\max} &= \max\{0.75H_{\max}, [0.55H_{\max} + 0.7(h_c - h)]\} : h_c > h \\ \eta_{\max} &= 0.75H_{\max} : h_c \leq h \end{aligned} \quad (2)$$

h : 水深, h_c : 海底面から岩礁頂面までの高さ
 $\max\{a, b\}$: a または b のいずれか大きい値

次に、直立堤上の越波水の挙動と手すりに作用する波力については、高橋ら(1992)³⁾、菅原ら(1992)⁴⁾、高橋ら(1994)⁵⁾の一連の研究がある。高橋ら(1992)³⁾は、越波水の運動を「打ち込み時」と「越流時」に分けた運動モデルを構築し(ここではこのモデルを高橋ら(1994)⁵⁾と同様にOWMと呼ぶ)、防波堤上における最大水位、最大流速の一般的な算定法を示した。また菅原ら(1992)⁴⁾は、OWMを高波浪域まで拡張し、手すりなどの比較的細い柱状構造物に作用する波力を以下に示す抗力の式で算定している。

$$F = C_D \frac{w_0}{2g} A U_{\max}^2 \quad (3)$$

$$U_{\max} = \max\{U_i, U_s\}$$

A : 流れ中の柱状部材の水平投影面積

U_i : OWMによる打ち込み時の最大流速

U_s : OWMによる越流時の最大流速

C_D : 抗力係数

g : 重力加速度

w_0 : 水の単位体積重量

さらに、高橋ら(1994)⁵⁾は現地での手すりの耐波安定実験を行い、波向きの影響を考慮したOWMの結果と比較し、ばらつきは大きいもののほぼ妥当な結果を得ている。

(2) 本研究での取り扱い

本研究においては、防波堤天端上の越流時の流速が比較的一様で抗力が卓越する状況および防波堤の安定検討に用いられるような設計波相当の高波浪が作用する状況を想定し、まず菅原ら(1992)⁴⁾の方法の適用性について水理実験によって検討する。また、設計時の簡便性を考慮し合田ら(1972)²⁾の方法について実験値との比較を行うとともに、数値計算による波力評価の試みとして、耐波設計の一手法として開発されたVOF法を用いた数値波動水路⁶⁾を適用し、その計算結果についても考察を加える。

(3) 実験方法

実験は2次元造波水路(長さ47.0m, 幅1.0m, 深さ1.2m)を用い、1/50の斜面上に図-1に示す防波堤模型を設置した。水深及び天端高は $h=37.0\text{cm}$, $h_c=8.0\text{cm}$ とした。防波堤内に3分力計を設置し、その上にアクリル製のタワー模型(径10cm, 長さ55cm)を固定し、水平波力及びモーメントを測定した。またタワー前面に波圧計を2.5cm間隔で16個設置して前面波圧の測定も行った。実験は規則波を用い、タワーを港外側から10, 20, 30cmの位置(タワー中心位置)に変化させて波力を測定した。また、タワーのない状態での流速、水面形をそれぞれプロペラ流速計、ビデオ画像を用いて測定した。

3. 実験結果

(1) 波力データの特性と処理

波力は、波高が安定してから分力計出力の5波を対象とし、それぞれの最大値を平均したものを用いた。

波力測定においては波の条件により、3分力計から検出される時系列波形に測定系の固有振動成分が顕著に現れる場合があった。そこで波力データは、元のデータに対しFFTを行い固有振動数以上の高周波数成分を除去したものを用いた。図-2にデータ処理前後の比較を示す。

表-1 実験条件

項目	実験条件
水深(h)	37.0cm
天端高(h_c)	8.0cm
波高(H)	16, 18, 21, 23cm
周期(T)	1.7, 2.0, 2.3s
タワー位置(X)	10, 20, 30cm

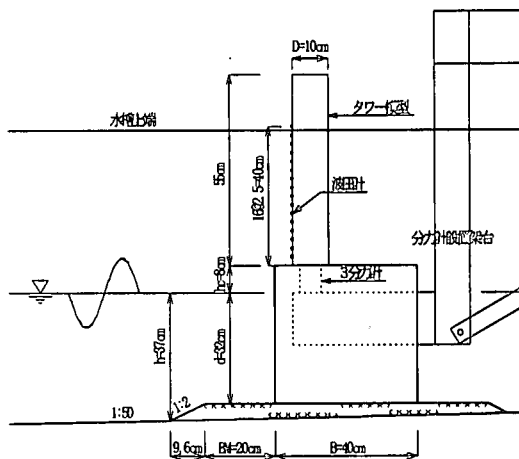


図-1 実験模型概略図

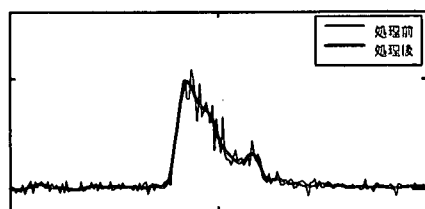


図-2 波力波形処理の例

(2) 水平波力の比較

図-3は水平波力のOWMによる計算値と実験値の比較を示したものであり、波力を計算する際の抗力係数は $C_D=1.0$ とした。縦軸は、水の単位体積重量 w_0 とタワー径 D および波高の2乗で無次元化した波力、横軸は波高を換算水深 h_m で無次元化したものである。換算水深 h_m は、高橋ら(1992)³⁾におけるマウンドの影響を考慮した計算上の水深であり、(4)式で定められる。また、 X/B は堤体天端上での港外側からの距離 X を堤体幅 B で除したものである。

$$h_m = \begin{cases} d & : B_M/L \geq 0.16 \\ d + (h-d) \frac{0.16 - B_M/L}{0.05} & : 0.11 \leq B_M/L \leq 0.16 \\ h & : B_M/L \leq 0.11 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 B_M : マウンド肩幅, h_m : 換算水深

h : 堤体前面の水深, d : マウンド上の水深

L : 堤体前面水深での波長

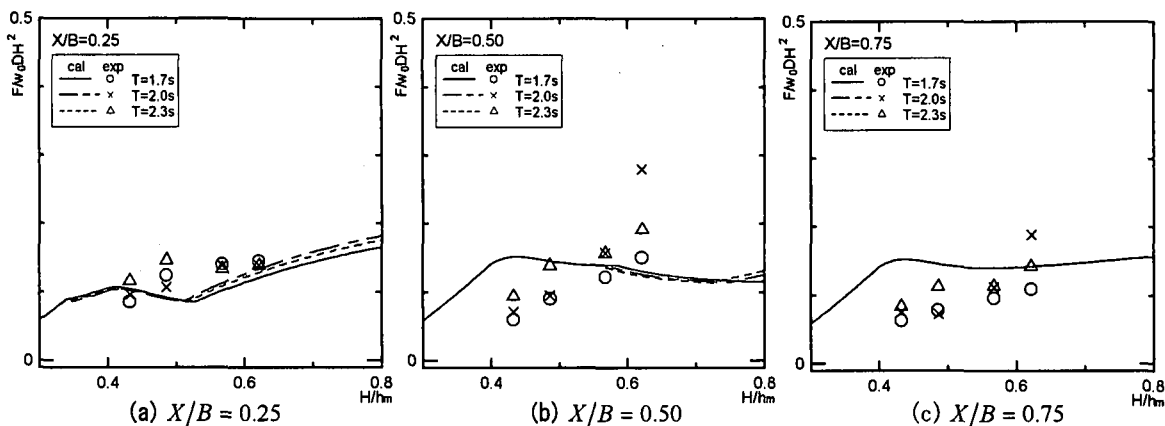


図-3 最大水平波力の実験値と計算値

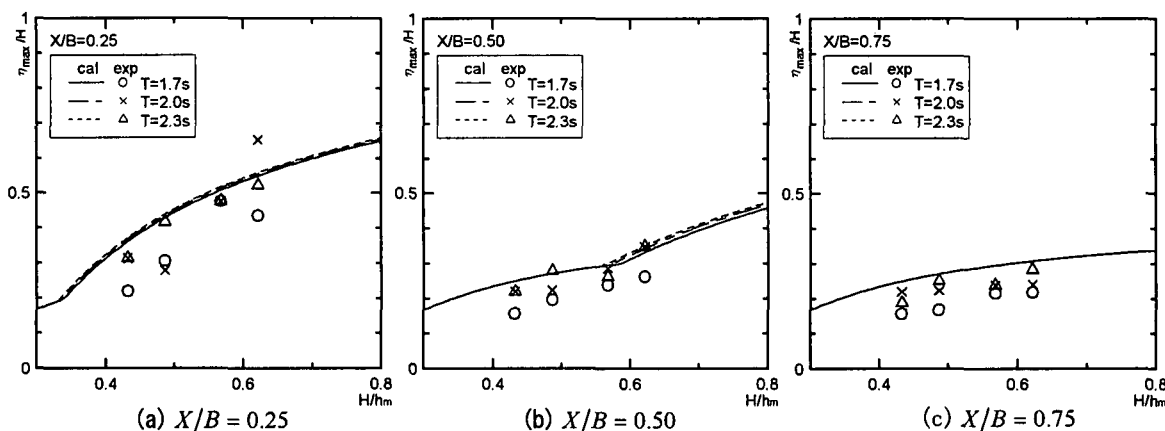


図-4 最大水位の実験値と計算値

図-3の $X/B = 0.25$ において、 $H/h_m = 0.5$ 付近で見られる計算値の極小値は、波高の増大に伴い越流流速から打ち込み流速が卓越する領域への計算上の変化点である。この付近では計算値が実験値を下回る。 $X/B = 0.50, 0.75$ では、OWMにおいて越流流速が卓越する領域に入っており、波高が小さい時は計算値が大きく、波高の増大とともに実験値は増加して計算値に近づいていく。しかしながら $H/h_m = 0.6$ を越えると実験値が計算値を上回るようになる。また、 $X/B = 0.75$ においては $X/B = 0.50$ よりも緩やかな増加となっている。

このように計算結果と実験結果の整合性は波高条件によって異なる。またタワー位置の違いで波力特性に違いがあるようである。この違いを明らかにするために、以下ではOWMによる流速及び水位の算定結果の検証を行う。

(3) 最大水位および最大流速の比較

図-4に無次元最大水位 $\eta_{\max}/H$ と波高の関係を示す。計算結果は波高の増大に伴う $\eta_{\max}/H$ の変動の傾向をよく再現しているが全体的に計算値がやや大きい。また、図-5に周期 $T = 2.3$ (s) の堤体天端上における最大水位の実験値と計算値の比 $\eta_{\exp}/\eta_{\text{cal}}$ の分布を示す。この図から X/B の値が大きくなるにつれて $\eta_{\exp}/\eta_{\text{cal}}$ の値が小さくなる傾向がある。OWMでの最大水位分布は港内側で一様水深になるものとしてい

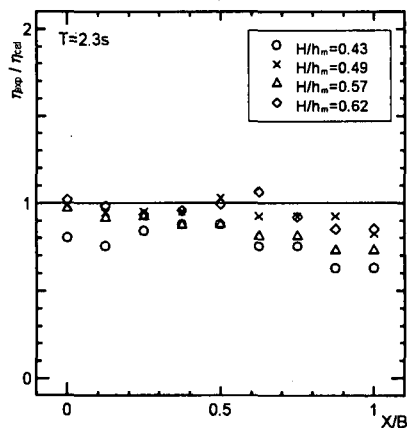


図-5 最大水位の実験値と計算値の比 ($T = 2.3$ s)

るが、実験では港内側でやや水位が低下していくようである。図-3において港内側 ($X/B = 0.75$) の波力の計算値が過大になっているのはこのことが一つの要因であると考えられる。

図-6は、無次元最大流速 $U_{\max}/\sqrt{gH}$ と波高の関係を示したものである。 $X/B = 0.25$ では $H/h_m > 0.6$ になると計算値がやや大きいが、全体的にはよく一致している。 $X/B = 0.50, 0.75$ では波高が大きくなると計算値は実験値に近づくが、 $H/h_m = 0.4$ 付近では計算値が大きい。菅原ら (1992)⁴⁾ の実験結果においても今回と同様に、 $H/h_m = 0.4 \sim 0.5$ 付近で流速の実

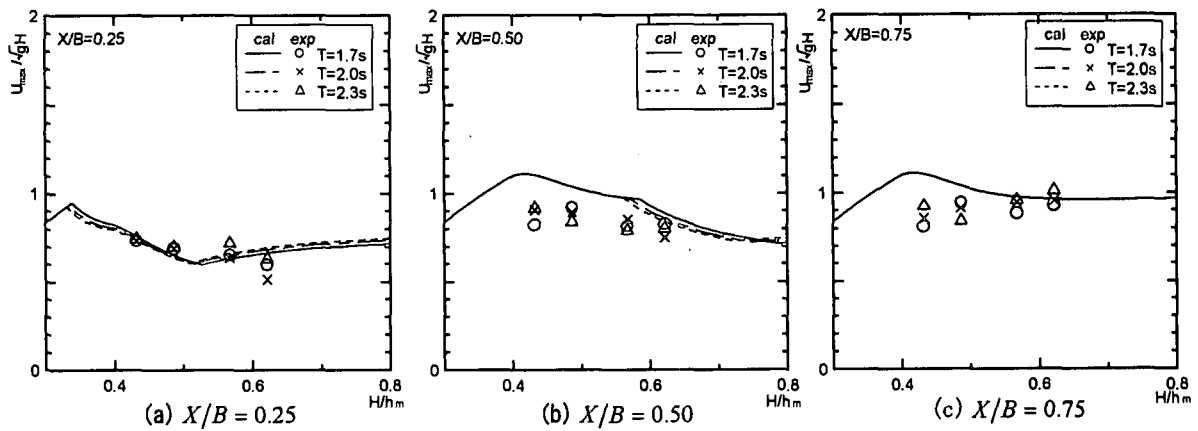


図-6 最大水平流速の実験値と計算値

験値よりも計算値が大きくなる傾向がある。このため図-3における $X/B=0.5, 0.75$ の $H/h_m=0.4\sim0.5$ 付近で波力の計算値が大きくなるのは流速の過大評価によるものと考えられる。

しかしながら、図-3における $X/B=0.50$ の $H/h_m=0.6$ 付近のように波力の実験値が計算値を大きく上回るケースについては、最大水位および最大流速の実験値と計算値は概ね一致しており、流速や水位の過大評価では説明できない。

4. 菅原ら(1992)⁴⁾の式の適用性

(1) 抗力による評価の限界について

OWMから算定される最大水位及び最大流速は、概ね実験値の傾向をよく再現しており、安全側の値が計算されることがわかった。しかし、波力の実験値が計算値よりも大きくなる場合があるため、波力を抗力のみで評価するのが難しい領域があると考えられる。

そこで抗力式による波力評価の検証として、図-7に波力の実験値 F_{exp} と、流速と水位の実験値から式(3)を用いて算定した波力 $F_{(\eta,u)}$ の比較を示す。ここで抗力係数は $C_D=1.0$ とした。結果はばらつきが大きいですが、少なくとも $H/h_m < 0.6$ の $X/B=0.75$ の場合は $F_{exp}/F_{(\eta,u)}$ の値は1を中心に分布している。この場合、波力は抗力の式で評価でき、抗力係数 C_D の値も1で妥当であるといえる。一方、 $X/B=0.25, 0.50$ では越波水が堤体上に打ち込んでくる範囲であり、今回の実験ではピーク値は捉えられないが、衝撃性の大きな波力が作用していると考えられる。この場合、波力は式(3)の抗力の式では評価できないことがわかる。

(2) 衝撃性の波力が作用する範囲について

ここでは堤体天端上で衝撃性の波力が作用する範囲について考察する。

図-8に、タワー位置 X とOWMで計算される越波水が堤体前面から打ち上がり天端面に落下するまでの

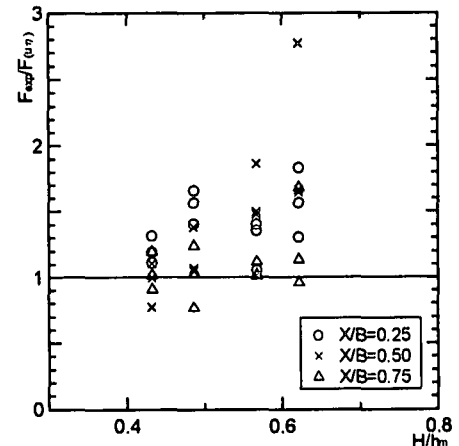


図-7 波力の実験値と流速、水位から算定した波力の比較

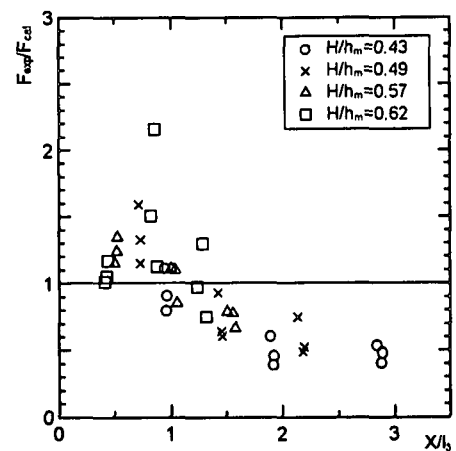


図-8 打ち込み距離 l_3 と波力の関係

水平距離 l_3 の比 X/l_3 と、波力の実験値とOWMによる計算値の比 F_{exp}/F_{cal} の関係を示す。図-8において横軸が1より小さい場合は、タワー中心が打ち込み範囲内にあることを表す。この図を見ると F_{exp}/F_{cal} の値は $X/l_3=0.5\sim1.0$ 付近で1を越えており、特に $X/l_3=0.8$ 付近で大きい波力が作用していると考えられる。つまり打ち込み距離 l_3 の中では大きな波力が作用し、特に越波水が打ち上がってから天端上に衝突する直前が最も強い波力が作用するものと考えられる。

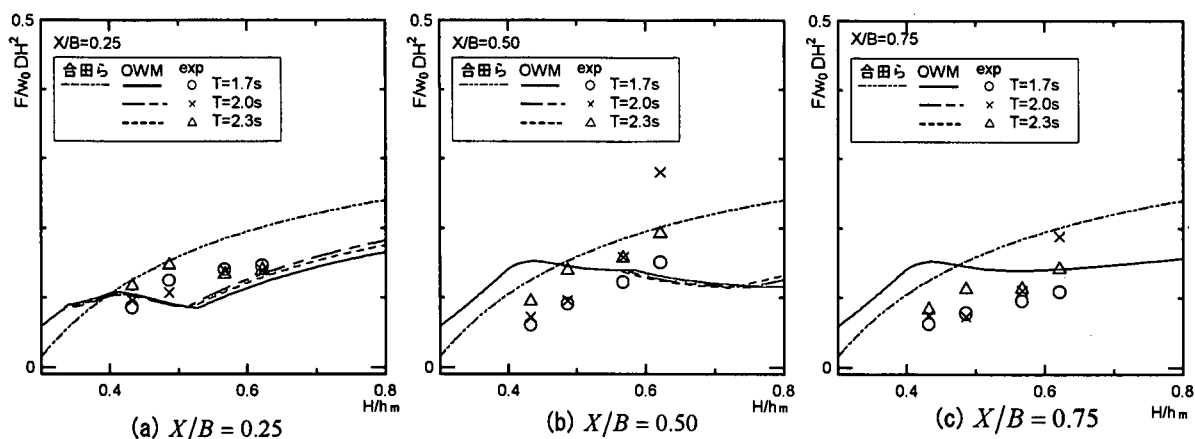


図-9 合田ら(1972)²⁾の波力算定式と実験値

(3) タワー設置位置の提案

作用波力の観点から有利なタワーの設置位置について考察する。まず、前節で述べた打ち込み時の衝撃性の波力が働く $X/l_3 = 0.5 \sim 1.0$ の範囲を避け、この範囲よりも港外側か港内側に設置することが望ましい。しかし $X/l_3 < 0.5$ では $X/l_3 > 1.0$ にくらべ比較的大きい波力が作用することに加え、越波水位が高いためモーメントが大きくなることが考えられる。このためタワーの設置位置は $X/l_3 > 1.0$ の港内側のほうが有利である。また、高橋ら(1992)³⁾が指摘した打ち込み時における衝撃性波力の発生範囲もふまれば、 l_3 の算定誤差も考慮して港外側から $1.2l_3$ 以上の離れた位置にすることが望ましい。

また、防波堤の背後に隣接する形でタワーのケーソン基礎を設置するような構造形式に対しては、港外側からの距離は十分確保できるため衝撃性の波力は作用せず、菅原ら(1992)⁴⁾の評価式は安全側の値を与えるものと考えられる。

5. 他の波力推定法について

(1) 合田ら(1972)²⁾の方法

合田ら(1972)²⁾により提案された岩礁上に建設される灯標などの円柱構造物に対する波力算定式を検証する。この方法を今回のような直立堤上の円柱構造物に適用するのは多少無理があるが直立堤を一種の岩礁と見なし、この方法で算定された波力と実験値の比較を試みた。図-9に合田ら(1972)²⁾の方法による計算値、OWMによる計算値、および実験値を示す。合田ら(1972)²⁾の方法による計算値は実験値に比べて全体的に大きな値となっているが、波高に伴う波力の傾向は実験値と一致している。このような簡便な方法でもおおまかな安全側の値を推定できることがわかる。

(2) 数値波動水路の適用性について

次に、試みとしてVOF法を用いた数値波動水路の適用を検討した。計算格子間隔は水路方向を4cm、高さ方向を2cmとし、数値計算法の詳細については文献⁶⁾に準じた。また、実験と同様に堤体位置での

通過波検定を行い波高を定めた。

最大波力の算定は菅原ら(1992)⁴⁾に従い式(3)の抗力式を用いた。まず数値波動水路から越波水の水位と各深度における流速を算定し、その流速を鉛直方向に積分することにより求めた断面平均流速および水位から式(3)により作用波力の時系列を求め、その最大値の5波分を平均したものを最大波力とした。

図-10に $T = 2.3s$, $X/B = 0.25$ における数値波動水路による計算値、合田ら(1972)²⁾の方法による計算値、OWMによる計算値および実験値を示す。数値波動水路による計算値は $H/h_m = 0.5$ 付近で実験値よりも小さいが全体的に実験値とほぼ一致している。また数値波動水路による計算値はOWMによる計算値ともほぼ一致しており、波高に伴う波力の変動も同じ傾向である。

今回は限られた条件の下での数値波動水路の適用であったが比較的良好な結果を得た。数値波動水路の適用にあたり、格子間隔や各種パラメーターの設定が計算結果に及ぼす影響などを様々な条件に対して検討する必要があるが、今回のような越波水による波力の評価に対する数値波動水路の適用可能性が示唆される。

また、タワーの設置場所が複雑な断面を有するなど作用波力の推定が困難な場合に対しては数値波動水路による波力評価は有効な手法になるものと考えられる。

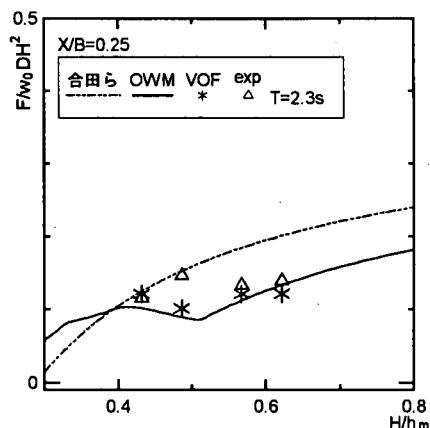


図-10 数値波動水路による波力の計算値と実験値

6. おわりに

本研究において、防波堤上あるいは防波堤直背後に設置された風力発電タワーを対象とし、水理実験により作用波力を明らかにし、既往の波力評価法の適用性を検討した。以下にその結果を示す。

- (1) OWMから越波水の最大水位及び最大流速を算定し、抗力式で波力を評価する場合、越波水が打ち込んでくる範囲内、特に越波水が天端上に衝突する場所付近では衝撃性の波力が作用するため、波力の計算値は過小評価となる。しかし打ち込み範囲よりも港内側では、波高が小さいときはやや過大評価となる傾向があるがおおむね妥当な結果を得た。
- (2) 防波堤上に風力発電施設を建設する場合、衝撃性の波力の作用を避けるためには、OWMから算定される打ち込み距離 l_3 の1.2倍以上港外側から離れた位置にタワーを設置することが望ましい。
また、防波堤の背後に隣接する形でタワーのケーソン基礎を設置するような構造形式では港外側からの距離が十分確保されるため作用波力の観点から有利な構造である。
- (3) 合田ら(1972)²⁾の波力算定式は全体的に大きな値となるが、おおまかな波力を簡便に推定できる。しかし、岩礁上と直立堤では波の作用状況が異なるため、その適用に当たってはさらなる検討が必要であると考えられる。

(4) 数値計算法を波力評価に適用する試みとして数値波動水路を検討した。限られた条件であるが数値波動水路による計算値は実験値と比較して良好な結果となった。数値波動水路の適用に当たっては検討すべき課題も多いが、越波水による波力の評価に対して数値波動水路を適用できるものと考えられる。

最後に、本研究を進めるに際して港湾空港技術研究所の高橋重雄海洋・水工部長の有益な御助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長井 弘, 牛山 泉, 長倉のり子, 前田金作: 秋田湾における風力発電の可能性, 第21回国際風力エネルギー利用シンポジウム, 1999.
- 2) 合田良実, 池田龍彦, 笹田 正, 岸良安治: 岩礁上の円柱の設計波力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第4号, pp. 45-81, 1972.
- 3) 高橋重雄, 遠藤仁彦, 室善一郎: 混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第31巻, 第1号, pp. 3-50, 1992.
- 4) 菅原邦彦, 遠藤秀則, 高橋重雄, 遠藤仁彦, 高野聖三: 親水性防波堤上の手すりの耐波設計法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 501-506, 1992.
- 5) 高橋重雄, 遠藤仁彦, 船越晴世, 津田修一, 斎藤辰三: 高波浪実海域での防波堤上の手すりの耐波安定試験, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 686-690, 1994.
- 6) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会, 財団法人 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究開発, 2001, 印刷中.