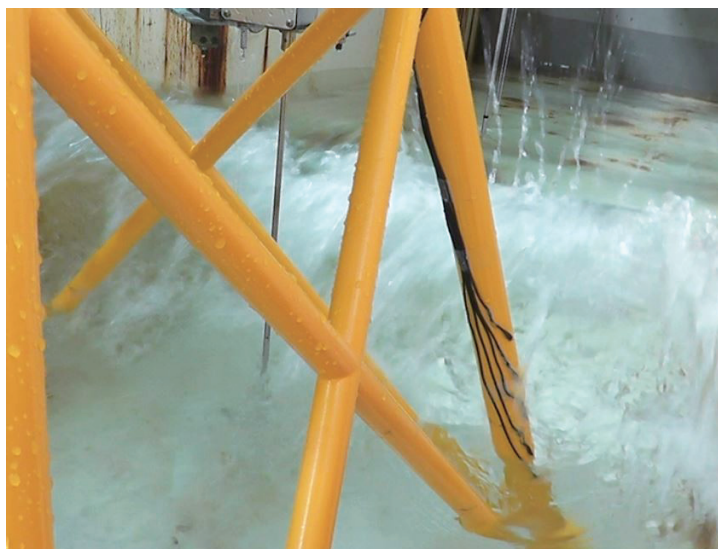


海洋構造物に作用する衝撃砕波圧の実験的研究



田村 大樹 ①
 新里 英幸 ②
 木原 寛明 ①

要旨

海洋構造物の設計においては、台風のような荒天時にも耐え得る構造強度が求められる。荒天時の海象は乱れており、砕波が発生する。直立壁が砕波から受ける衝撃力（以下、衝撃砕波力）は理論式を用いて評価するが、複雑な形状の海洋構造物に対しては適用できない。そこで、海洋構造物が受ける砕波による衝撃圧力（以下、衝撃砕波圧）の作用位置を、模型実験により明らかにした。

巻き波砕波を構造物へ正確に衝突させるためには事前の造波テストは必要不可欠であるが、数値解析により巻き波砕波の衝突位置を確かめたことで、造波テストは不要となった。さらに、水槽内に傾斜板を配置しない方法で巻き波砕波を発生できたことで、低コストかつ短期間で衝撃砕波圧の測定に成功した。実験結果より、巻き波砕波から受ける衝撃砕波圧の最大値発生位置を推定可能な実験式を導出した。この実験式に水深と砕波の最大到達高さを代入することで、模型実験で求めたい衝撃力が発生する位置に適切に圧力センサーを配置することができるようになった。

キーワード

台風、砕波、ジャケット、粒子法

1. 緒言

海に囲まれた島国である日本では、洋上風力発電をはじめとした海洋空間利用の技術開発が必要不可欠である。当社は、これまでに多くの海洋構造物を開発・設計・製造してきた。実績として、洋上風力発電、GPS波浪計ブイ、浮魚礁、沈埋函、鋼板セル、浮棧橋、浮消波堤、鋼製ジャケット、ハイブリッドケーソンなどがあり、海洋空間利用における高度な技術を蓄積している。

海洋構造物の設計においては、台風のような荒天時の外乱の影響に対する構造強度が求められる。このときの海象は非常に乱れており、ほとんどの波の状態は非線形な砕波である。これまで、この砕波に対しては、海洋構造物に関する各種設計指針に準じて評価されてきた。また、地球温暖化の影響により台風の発生頻度が上昇しており、海洋構造物に対する砕波の評価が重要となってきた。このような観点から当社では、台風襲来を想定し、砕波によって海洋構造物が受ける外力、特に衝撃砕

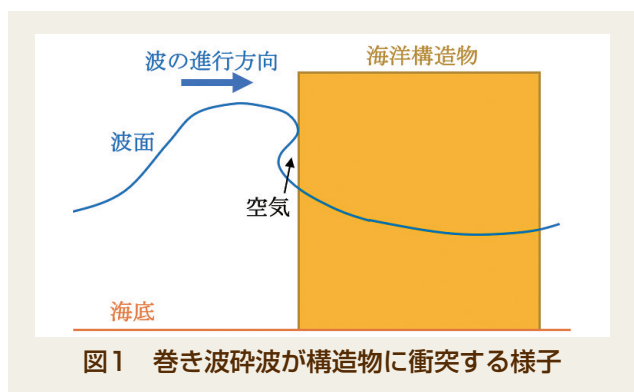


図1 巻き波砕波が構造物に衝突する様子

波力に対して研究を継続している。砕波は巻き波砕波、崩れ波砕波、砕け寄せ波砕波の3種類に大別されるが、中でも巻き波砕波は空気を巻き込みながら波が来襲し、海洋構造物に衝突（図1）するときには圧縮された空気を巻き込んだ波の水塊が破裂するため、構造物に極めて大きな衝撃力を与える。当社は、この巻き波砕波を対象にした実験的研究により、台風時に発生する砕波を表現し、模型の最適な位置に圧力センサーを設置することで衝撃砕波圧を測定する技術を構築した。

本報では、この内容を報告する。

① 機械・インフラ事業本部 開発センター

② 機械・インフラ事業本部 開発センター 博士(工学), 技術士(船舶・海洋部門)

2. 実験対象構造および実験における課題点

直立壁に働く衝撃砕波力については、合田式¹⁾などの理論式（以下、理論式）を用いて評価できる。一方で、**図2**のように鋼管トラス構造のジャケットでは、鋼管が鉛直斜め方向に配置されるため、理論式を適用できない。円柱を直立壁と仮定して理論式より衝撃砕波力を計算することはできるが、過大設計となる。斜めに配置された鋼管に作用する衝撃砕波力を求めるためには、構造物に応じて、都度、模型実験によって圧力を測定し、推定しなければならない。

さらに、巻き波砕波による衝撃砕波力を計測する模型実験には主に以下のような課題がある。

- (1) 巻き波砕波を発生させることが経済的に困難である。従来、水槽内長手方向全面に傾斜板を配置して、水深が徐々に浅くなるようにしていたが、多大なコストと時間を要する。
- (2) 巻き波砕波を正確に模型へ衝突させることが困難である。
- (3) 衝撃砕波圧の最大値が発生する位置が特定できない場合は様々な場所に圧力センサーを設置する必要があり、多大なコストを要する。

これら課題に対して次の対応策を考え、検討することにした。

- (1) 水槽内に傾斜板を設置せずに巻き波砕波を発生させる。
- (2) 数値解析により巻き波砕波を表現し、模型へ正確に衝突させる水槽内長手方向位置を決定する。
- (3) 実験結果から衝撃砕波圧の最大値発生位置を推定する。

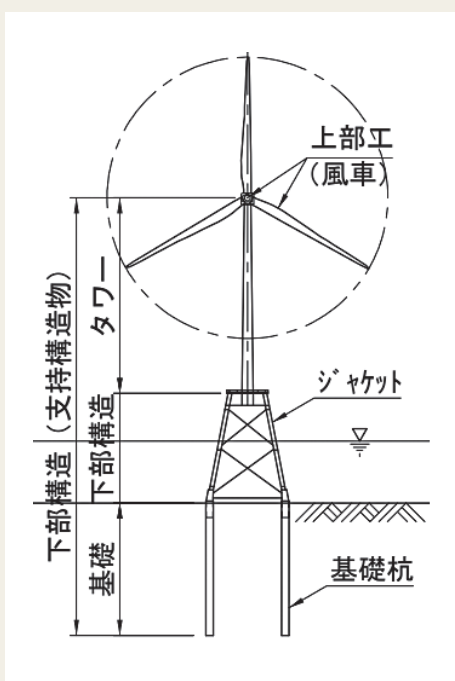


図2 ジャケットを基礎とする着床式洋上風車²⁾

3. 巻き波砕波発生方法と発生位置の予測

3.1 解析方法および解析条件

巻き波砕波発生位置の解析には、複雑な自由表面場の解析を得意とする粒子法のうち非圧縮性流体を扱うMPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用いた。

傾斜板が無くても巻き波砕波が発生できると考え、数値解析を行った。解析モデルの側面図を**図3**に示す。数値解析では、水深300 mmに対して有効な解析結果を得られる水槽長さ（水深の10倍以上）と解析時間の短縮を考慮してモデル化した。解析条件を表1に示す。

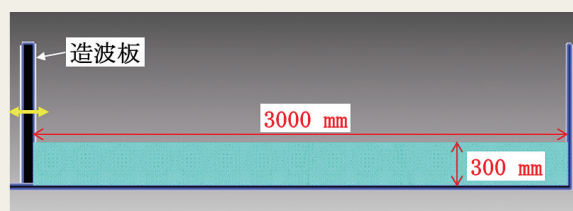


図3 解析モデルの側面図

表1 解析条件

設定項目	値
計算時間刻み [s]	0.001
流体密度 [kg/m ³]	1000
水深 [mm]	300

3.2 解析結果

図3に示す造波板の水平運動の振幅と周期によって、発生波の波高と波周期が決定される。発生波の波周期の目標値を2.0秒とし、造波板をこれと同じく周期2.0秒で水平運動させた。また、巻き波砕波が発生する時の造波板の水平運動の振幅を見出すために、振幅をパラメータとして複数の計算を行った。その結果、両振幅を0.28 mとした場合に、**図4**のように造波板の初期位置から1.7 m離れた位置で巻き波砕波が発生することが分かった。よって本実験においても造波板と模型位置の距離を1.7 mとした。

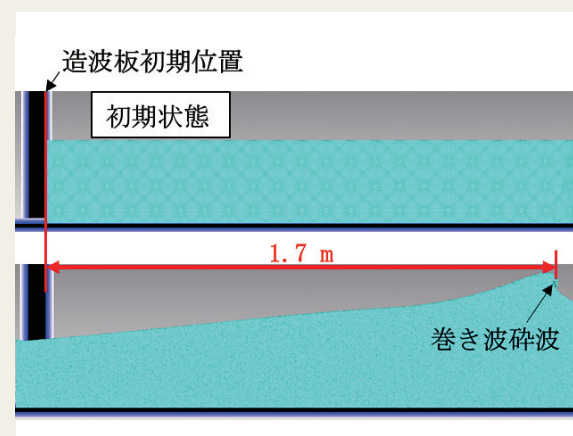


図4 数値解析の結果

4. 模型実験

4.1 供試模型

図5に示す風力発電用基礎構造のジャケット模型を用いて、鉛直斜め方向に傾斜した円柱に働く圧力を評価した。模型の縮尺比は1/40スケールで幾何学的相似則を満足するように設計した。本実験では、風の影響を考慮しないため、風車部は搭載せずにジャケット構造のみを模型化した。



図5 ジャケットを模擬した供試模型

4.2 計測システム

表2に計測項目および使用した計測機器を示す。また、図6に計測システムを示す。碎波の波高および波周期は波高計により計測した。また、碎波の衝突により発生する波圧は圧力センサーにより計測した。

図7に示すように計測箇所は波上側の支柱に5か所、波下側の支柱に3か所の計8か所とした。それぞれの圧力セ

表2 計測項目と計測機器

計測項目	計測機器	メーカー	型式	数量
波高、波周期	波高計	ケネック	CHT6(センサー)	1
			CH-601(アンプ)	1
波圧	圧力センサー	共和電業	PS-C	8

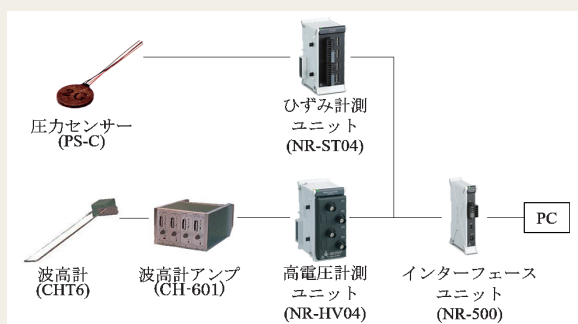


図6 計測システム

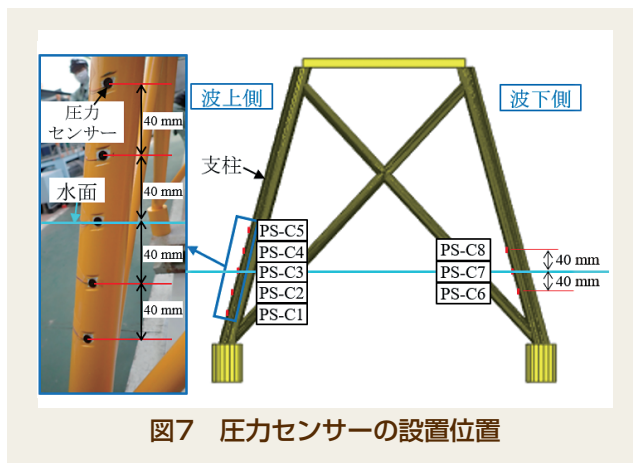


図7 圧力センサーの設置位置

ンサーの名称を波上側の支柱下部から上方へ順にPS-C1～PS-C8とした。また、各位置で計測される波圧を P_i ($i=1\sim 8$) とし、計測時間内における最大波圧を P_{max} とした。設置高さは水面の位置を中心として、その上下に40 mmピッチで配置した。

4.3 実験方法および実験条件

実験概略図を図8に示す。水槽幅を1 mとし、造波板から長手方向に1.7 m離れた位置にジャケット模型を設置した。

図9に示すように、実験では波上側から見て左側の支柱に圧力センサーを取り付け、計測機器および撮影機器を水槽内に配置した。圧力センサーの取り付け高さは表3に示すとおりである。

実験条件を表4に示す。水深は300 mmで一定とし、波周期は台風のような荒天時を想定した条件とした。波のエネルギーは波周期に比例するため、波周期が長い

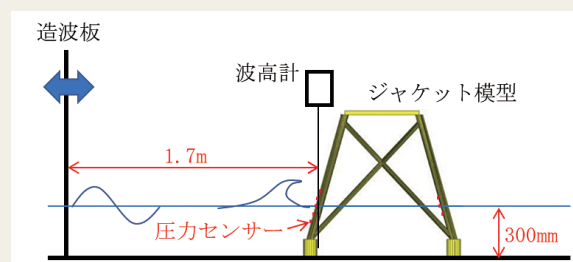


図8 実験概略図



図9 計測機器および撮影機器の配置

ほど危険性が高い。海象が穏やかな時の波周期は概ね10秒以下であるが、台風が襲来した場合には10秒を超える波周期が観測されることがある。近畿地方に甚大な被害をもたらした2018年の台風21号が日本に襲来した時には、20秒を超える波周期が観測された。そこで、波周期の実機換算値が10~20 s程度となるように設定した。また、計測はそれぞれのCaseに対して3回ずつ実施した。

変数名の定義を図10に示す。砕波の波高を H とし、鉛直方向の最大到達高さとして水面の高さを η とした。また水底からの高さを z とした。

表3 圧力センサーの水底からの高さ

波上側支柱		波下側支柱	
圧力センサー名	z [mm]	圧力センサー名	z [mm]
PS-C1	220		
PS-C2	260	PS-C6	260
PS-C3	300	PS-C7	300
PS-C4	340	PS-C8	340
PS-C5	380		

表4 実験条件

Case No.	模型スケール		実機換算値	
	水深 [mm]	波周期 [s]	水深 [m]	波周期 [s]
1	300	1.7	12	10.8
2	300	2.0	12	12.6
3	300	2.3	12	14.5
4	300	3.2	12	20.2

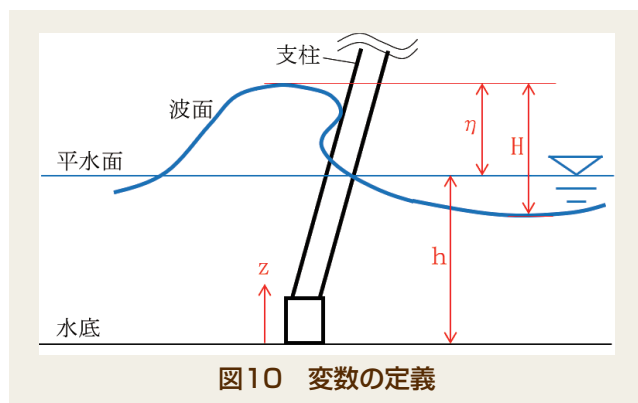


図10 変数の定義

4.4 実験結果 数値解析と同条件で造波板を加振させた結果、巻き波砕波が発生した。巻き波砕波が波上側の支柱に衝突したことから、数値解析結果は妥当であったと言える。実験結果の詳細を以下に示す。

表3に示す4つのCaseのうち、Case No.2における水位変動の時系列を図11に示す。横軸は計測を開始してからの経過時間、縦軸は波高計設置位置における水面の高さである。なお、外乱のない状態である平水面を0 mmとし、水面が鉛直方向に上昇した場合を正とする。造波板により発生させた第2波が6.6 s付近で巻き波砕波とな

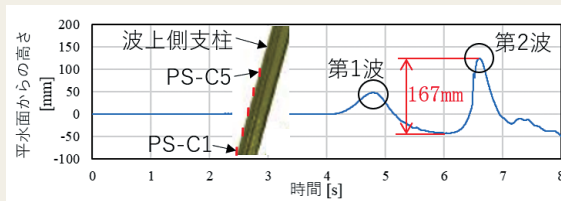


図11 水位変動の時系列

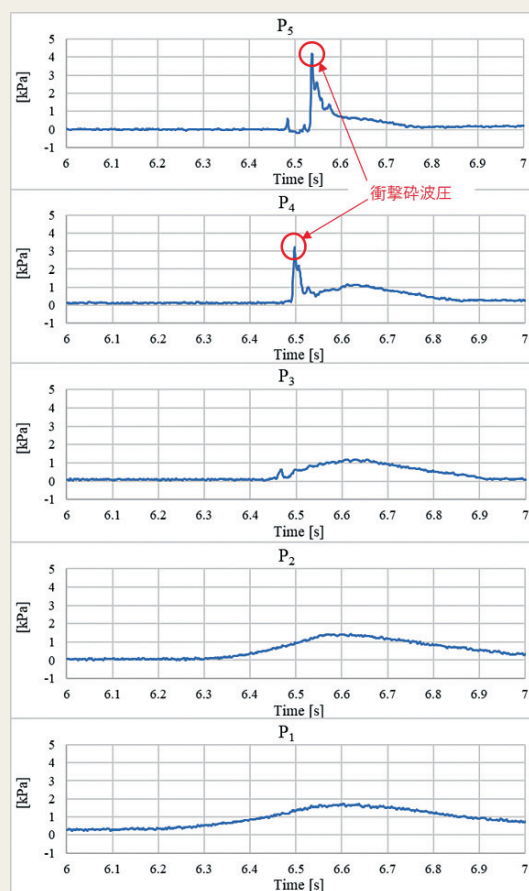


図12 波圧の時系列 (波上側、 $P_1 \sim P_5$)

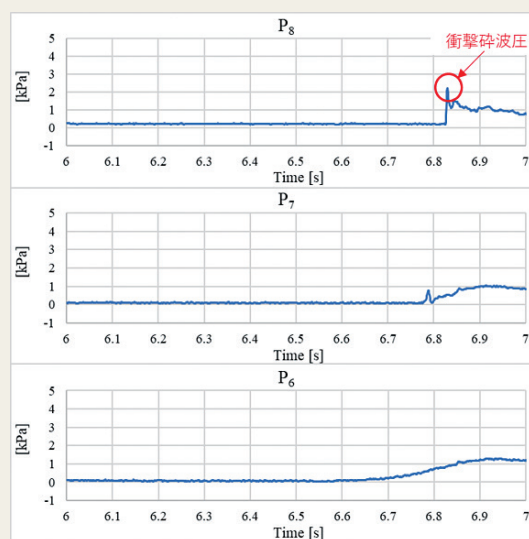


図13 波圧の時系列 (波下側、 $P_6 \sim P_8$)

り、ジャケット模型の波上側の支柱に衝突することが確認された。このとき、碎波の波高 H は167 mmであった。また図11には波上側の支柱および圧力センサー位置を示している。これにより、第2波は圧力センサーの中で最も高い位置のPS-C5（高さ80 mm）よりも高い位置に到達したことがわかる。また、圧力センサーの中で最も低い位置のPS-C1（高さ-80 mm）は常に水面下に位置することを示している。

Case No.2において、第2波が衝突した時刻の前後0.5 s間（時刻6~7 sの間）のPS-C1~PS-C8の位置での波圧 $P_1 \sim P_8$ の時系列を図12、図13に示す。ここで、本報では衝撃碎波圧を「0.01 s間で波圧が1 kPa以上増加したときの最大波圧」と定義すると、図12と図13より、 P_4 、 P_5 、 P_8 では衝撃碎波圧が発生し、それ以外の圧力計測位置では発生しなかった。圧力センサーPS-C1~PS-C5を取り付けた波上側の支柱は高い位置であるほど造波板からの水平距離が遠くなるように傾いているため、最高位置のPS-C5では碎波の衝突がPS-C4に比べて0.04 s遅くなっている。 $P_1 \sim P_3$ では碎波衝突前後で波圧が緩やかに変動しているが、これは水面変動による静水圧の変化と推測される。また圧力センサーPS-C1は常に水面下に位置するため、 P_1 の値は静水圧により常に正の値を示している。また波下側の支柱に取り付けた圧力センサーには碎波は衝突しないが、波上側支柱に衝突して崩れた波が衝突して、PS-C8では衝撃碎波圧が発生した。

波上側支柱に働く最大波圧の鉛直分布を図14に示す。ここで、前述したように計測時間内における最大波圧を P_{max} とした。Case No.2の波圧の時系列を図12に示したが、他の全てのCaseでも同様に、PS-C1~PS-C3では衝撃碎波圧が発生しなかった。またPS-C1~PS-C3の中では低い位置にあるほど波圧が大きい傾向があり、これは静水圧の影響が支配的であるためと考えられる。次にPS-C4では、計測した12 Case（4 Case×3回）のうち波周期が10.8 sと短いCase No.1以外の9 Caseで衝撃碎波圧が発生し、それらの衝撃碎波圧はPS-C5の数値よりも小さい値を示した。最後にPS-C5では、全てのCaseで衝撃碎波圧が発生した。なお、本実験で計測した全てのCaseにおいて、PS-C5ではPS-C1~PS-C4よりも大きな波圧が計測された。

過去に直立円柱および傾斜した円柱を対象とした実験を港湾技術研究所が行い、衝撃碎波圧が最大となるのは平水面より上側であることが報告されている³⁾。また同文献では平水面より下側の位置には衝撃力は発生しない結果が示されている³⁾。本実験でも同文献と同じ傾向が確認された。

図15と図16（図15中のグラフ縦軸 $(z-h)/\eta$ の範囲を0.0~0.8に限定）に波圧の計測結果を示す。図中のグラフの縦軸は碎波の最大到達高さに対する平水面からの高さの比 $(z-h)/\eta$ である。よって、平水面では $(z-h)/\eta=0$ 、碎波の最大到達高さでは $(z-h)/\eta=1$ となる。このようなパラメータで整理することで、波高に対する相対位置を無次元値で評価することができる。

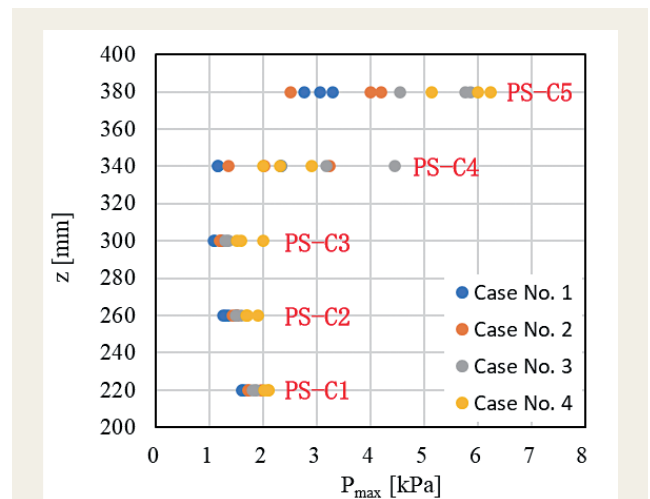


図14 最大波圧の鉛直分布

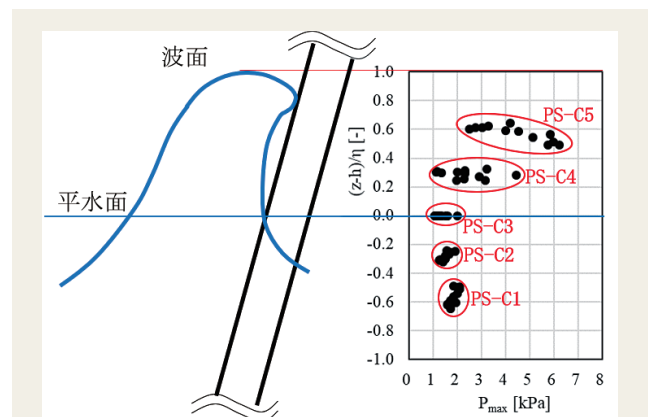


図15 P_{max} と $(z-h)/\eta$ の関係

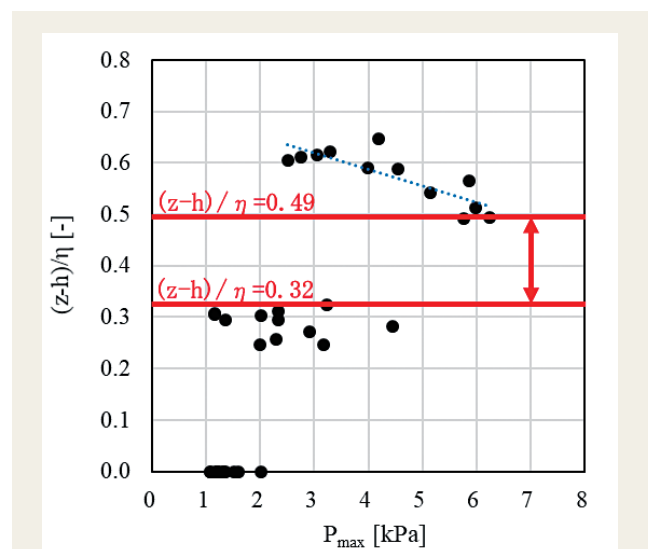


図16 衝撃碎波圧の最大値発生位置の推定

本実験の全てのCaseにおいてPS-C5で計測された P_{max} はPS-C4の方よりも大きい結果であった。PS-C4の計測点における $(z-h)/\eta$ の上限値が0.32であることから、衝撃碎波圧の最大値発生位置は $(z-h)/\eta \geq 0.32$ であると考えられる。また、PS-C5の計測値に対する近似直線（青色の破線）を図16に示している。PS-C5の計測値は右

下がり ($(z-h)/\eta$ が小さいほど P_{\max} が大きい) になっており、それらの中で P_{\max} が最大となった位置は $(z-h)/\eta = 0.49$ であった。よって、衝撃砕波圧の最大値発生位置は $(z-h)/\eta \leq 0.49$ と考えられる。まとめると次式が導かれる。

$$0.32 \leq (z-h)/\eta \leq 0.49$$

$$\Leftrightarrow (h+0.32\eta) \leq z \leq (h+0.49\eta) \quad \text{①}$$

以上より、式①を用いることで実験実施前に h と η を計測すれば、圧力センサーのより最適な設置高さ z を決定できる。

5. 結 言

発生頻度の高い通常の台風 (波周期約10秒前後) から巨大台風 (波周期20秒程度) までを想定し、造波させた波周期の実機換算値を10~20 s程度とした衝撃砕波圧実験結果から得られた成果を以下に記述する。

- 傾斜板を配置しない方法で巻き波砕波を発生可能であることを、数値解析および模型実験で確認した。
- 解析結果通りの巻き波を単純な造波水槽で発生することができ、模型へ正確に衝突させることができた。
- 巻き波砕波から受ける衝撃砕波圧の最大値発生位置を推定可能な実験式を導出した。この実験式に水深と砕波の最大到達高さを代入することで、圧力センサーの最適配置位置を決定できる。解析ならびに実験式の導出により、低コストで衝撃砕波圧の計測が可能となった。

SDGsに貢献する技術

洋上風力発電など、海洋における再生可能エネルギーの技術開発に貢献できる。

参考文献

- 1) 下迫健一郎, 大寄菜々子: 各種混成堤における波力算定法の適用性に関する考察—衝撃砕波力係数など波力算定上の留意点, 港湾空港技術研究所報告, **2005**, 1107, 3-14.
- 2) 浜地克也: 最新国内外の洋上風力発電特集, Journal of JWEA, **2020**, 特集1, 574-578.
- 3) 谷本勝利, 高橋重雄, 金子忠男ほか: 円柱に働く衝撃砕波力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, **1986**, 25(2), 29-87.

文責者

日立造船株式会社 機械・インフラ事業本部
開発センター 海洋環境グループ
田村大樹
E-mail : h_tamura@hitachizosen.co.jp

Experimental Study of Impact Breaking Wave Pressure Acting on Offshore Structures

Abstract

In the design of offshore structures, structural strength is required to withstand stormy weather conditions such as typhoons. During stormy weather, turbulent sea conditions cause waves to break. The impact force received from a breaking wave (hereinafter referred to as "impact breaking wave force") is evaluated using a theoretical formula in the case of an upright wall, but this formula is not applicable to offshore structures with complex shapes. Therefore, we conducted model experiments to clarify the location at which offshore structures are subjected to the impact pressure of a breaking wave (hereafter referred to as "impact breaking wave pressure").

Although prior wave testing had been essential to ensure accurate collision of a plunging breaker with the structure, our numerical analysis confirmed the collision position of the plunging breaker and eliminated the need for wave testing. In addition, we succeeded in measuring impact wave breaking pressure at low cost and in a short period of time because we were able to generate plunging breakers without an inclined plate in the wave tank. From the present experimental results, we derived an experimental equation that can be used to estimate the location of the maximum value of impact wave breaking pressure generated from the plunging breaker. By substituting the water depth and the maximum height reached by the breaking wave into this experimental equation, the pressure sensor can be appropriately placed at the location where the impact force occurs and is to be obtained in the model experiment.

Authors

Hiroki Tamura (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : h_tamura@hitachizosen.co.jp)
Hideyuki Niizato Hiroaki Kihara