

津波造波装置の活用と津波波力評価

大成建設（株） 正会員 織田幸伸
大成建設（株） 正会員 本田隆英
大成建設（株） フェロー 伊藤一教

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震以降、巨大津波への対策の必要性が高まっており、沿岸域構造物に働く波圧や津波の挙動をより正確に把握することが求められている。近年、飛躍的なコンピューター性能の向上に伴い数値解析の役割が大きくなっているものの、沿岸域での複雑な津波の挙動を検討する上で、水理実験の果たす役割は大きい。津波の造波方法としては、ピストン式（フラップ式）、ポンプ式、チャンバー式（ダムブレーク式）が一般的であるが、ピストン式の場合、波高を大きくするためにはロングストロークの造波機が必要であり、またポンプ式の場合、急激に立ち上がる波形を造波することが難しく、大容量のポンプが必要となる。一方、水塊の落下を利用したチャンバー式は、比較的簡易に長周期・大波高の大規模津波を再現できるが、波形や波高がチャンバー形状により限定され、任意波形の造波ができない。そこで著者らは、チャンバー式により任意の津波波形を造波する手法を考案し^{1),2)}、水理実験に適用した。ここでは、新たに開発した津波造波装置の概要と、これを適用した種々の構造物に働く津波波力評価のための実験結果について報告する。

2. 津波造波装置

本装置の造波の仕組みを図-1に示す。本装置は、前面の水中部分に開口を有した箱（チャンバー）の天井部分に、複数の給気バルブが設置されている。造波準備として、チャンバー内の空気を吸引して水を吸上げ、水位を水槽水位よりも高い位置で保持する。造波時は、給気バルブの開放により空気が供給され、水柱が落下することにより開口部から水が吐き出されて津波を造波する。開放する給気バルブの数や開放タイミングを制御することで吐き出す水の量を調整し、多様な波形の津波を再現することが出来る。これにより、図-2の造波例に示すような、多様な波形を造波することが可能となる。また本装置は、構造が単純なため既存の水槽への導入が比較的容易である。ここでは平面水槽（幅12m）と二次元長水槽（幅0.8m）の両者に導入して、同じ波形を造波した結果を図-3に示す。対象とする構造物によって水槽を適切に使い分けることにより、効率的な実験が可能となる。

本装置は、大波高の津波を造波出来ることにより大きな縮尺で水理実験が可能になること、また、任意波形を造波出来ることにより波形の効果を考慮出来ることが特徴として挙げられる。

図-4は、同じ二次元長水槽において、フラップ式と

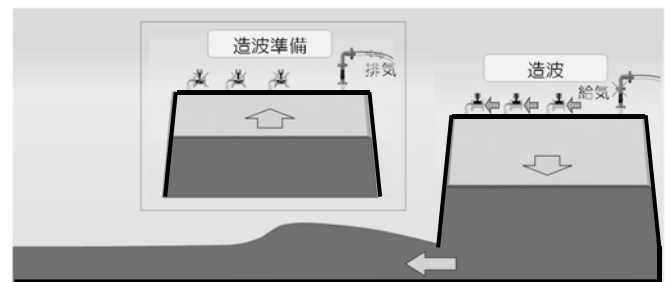


図-1 造波の仕組み

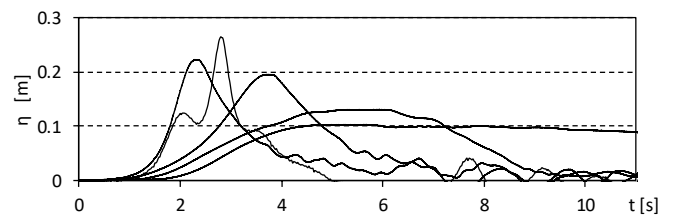


図-2 多様な造波波形

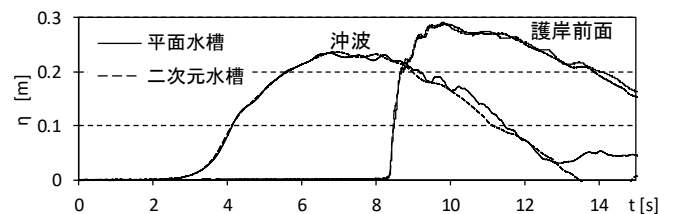


図-3 平面水槽と二次元長水槽での造波波形

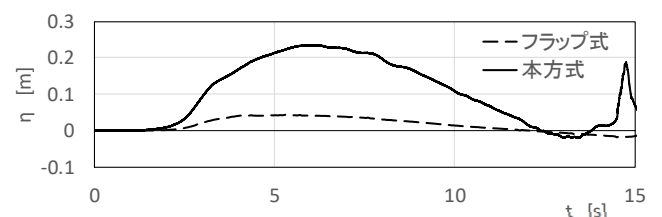


図-4 造波津波高の比較

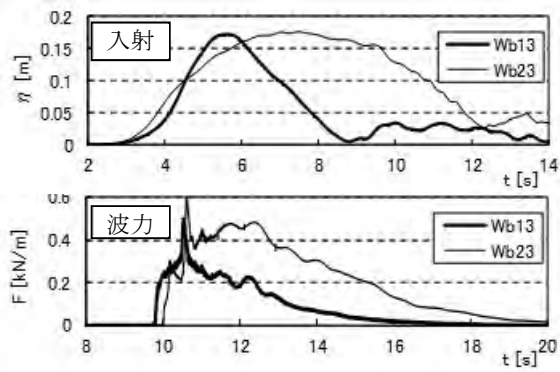


図-5 防潮堤に働く津波波力の計測例

本装置により造波した津波波形を比較したものである。なおここで、フラップ式は風波を対象とした一般的な水理実験用のものを用いている。実験施設規模によっても異なるが、本装置によりおよそ5倍の津波高の造波が可能となっており、仮に10mの津波高を再現する場合、前者では1/200縮尺、後者では1/40縮尺の実験となる。例えば波圧を計測する場合、直径1cm程度の圧力計による計測は、実機に換算すると前者は直径2mの面積の平均圧力を計測していることになり、後者では40cmである。加えて計測ノイズも前者は後者の5倍となることから、大波高の津波を造波出来ることの、実験精度向上への効果は大きいことが分かる。

図-5は、後述する防潮堤に働く津波波力計測実験結果の一例である。津波高がほぼ同じで周期特性が異なる2種類の入射津波に対する波力の計測結果を示している。周期特性が長くなると、特に11s以降に生じている重複波力が大きくなっており、入射波の津波高は同じでも、津波波力が大きく異なることが分かる。このように津波の特性は、津波高に加えてその周期特性や波形に影響されるため、水理実験において任意波形を造波することの重要性が確認できる。

3. 津波波力の評価実験（二次元水理実験）

本装置を活用した水理実験として、鉛直構造物に働く津波波力特性を検討した二次元水理実験の結果を示す³⁾。幅80cmの二次元長水槽に、図-6に示す1/20勾配の一樣斜面および陸上地形と、汀線より0.625mの位置に構造物模型を設置した。小型圧力計を構造物模型前面に8個（下からP1~P8）、床面に6個（模型側からPf1~Pf6）、それぞれ5cm間隔に配置し、津波作用時の圧力を計測した。結果を図-7に示す。図中には、沖波の入射津波波形 η 、圧力計の積分によって求めた波力 F 、波圧計の計測結果をそれぞれ示した。波力の時系列によると、 $t=11.2, 11.8, 13.1s$ （図中の破線）に波力のピークが生じている。既往研究⁴⁾を参考に、ここではこれらを衝撃波圧、段波波圧、重複波圧とする。また $t=11.35s$ には、波力が一時的に小さくなっていることが分かる。図-8に

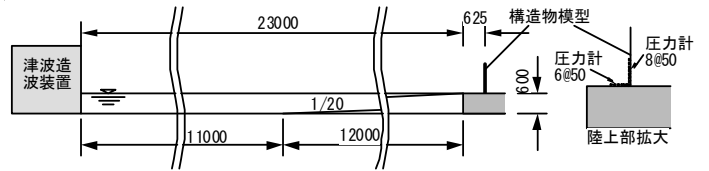


図-6 二次元津波波力実験

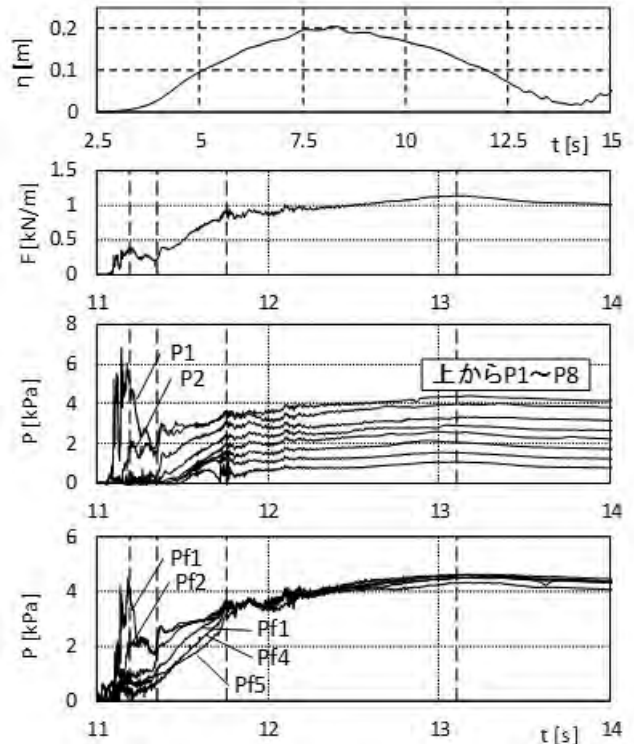
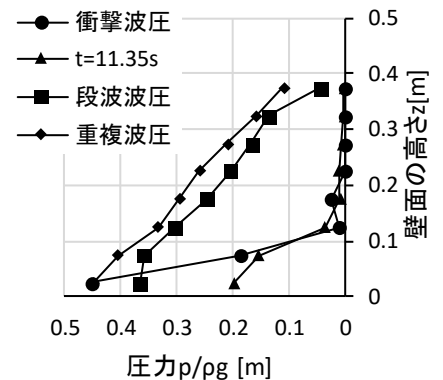
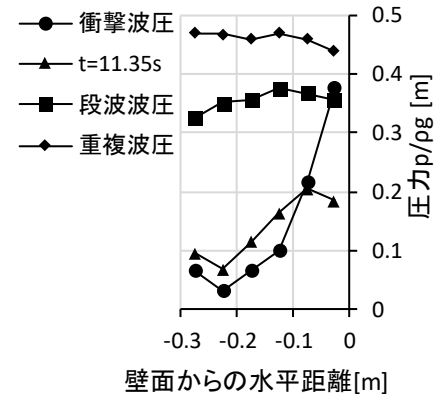


図-7 計測時系列結果の例



(a)壁面に作用する圧力分布



(b)底面に作用する圧力分布

図-8 計測時系列結果の例

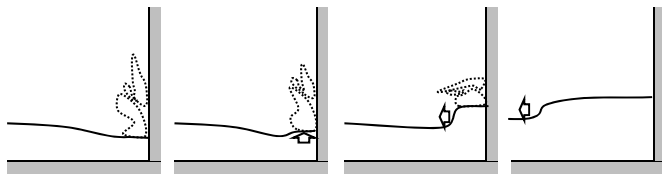


図-9 波圧特性のイメージ図

は、それぞれの時間における圧力分布を示した。

壁面に働く波圧は、衝撃波圧発生時は下端の P1, P2 のみに圧力が生じており、11.35 s を過ぎると、P3 から順に上方に圧力が大きくなっている。この時水塊は上向きに打ち上がっているが、壁には圧力が生じておらず、11.35 s を過ぎると水圧の生じる有効な水位が上昇していると考えられる。11.35 s から 11.8 s までは、P1 ~ P8 は不等間隔であるが、11.8 s 以降は圧力が等間隔となっており、静水圧分布になっていることが分かる。

床面圧力については、津波が到達以降、常時水圧が作用するという違いがあるものの、圧力変動については壁面と同様の特徴を示す。また、11.8 s を過ぎると各圧力計が同じ値となっていることが分かる。これは、段波状の反射波が沖に向かって進行していることを示しており、このことから段波波圧は、反射波が沖向きに進行し始める際に生じていることが分かる。

以上の結果から、各波圧発生時の特性を以下にまとめる(図-9)。津波が侵入して構造物に衝突すると、衝撃波圧が発生し、上方に打ち上がった水塊には圧力が生じていない。その後、沖からの流れに対し反射波が伝播できないため、構造物前面で局所的に水位が上昇する(11.35s 以降)。前面水位が上昇すると反射波が伝播し始めるが、この際に段波波圧による波力ピークが生じる。その後、反射波が沖に伝播し、前面水位に応じた静水圧分布の重複波圧が生じる。

4. 津波波力の評価実験(平面水理実験)

図-10 は、構造物の幅の影響を検討した平面水理実験の概要である⁵⁾。鉛直構造物の幅は、水槽全幅及び、1, 3, 5 m の 4 種類とし、構造物前面に鉛直方向 5cm ピッチで設置した小型圧力計の計測結果を積分することにより、波力を時系列で計測した。作用させた津波は、図-11 に示す 6 種類とした。図-12 に、波力の計測結果の一例を示す。本ケースでは衝撃波圧は明確でないが、前述した衝撃波圧、段波波圧、重複波圧の 3 つのピーク値を波力時系列から読み取ることが出来る。図-13 に、各ケースにおける持続波圧のピーク値をまとめた。図-13 によると、重複波圧は全てのケースにおいて、Case O から B, C と幅が狭くなるにしたがい、波力が低減していることが分かる。一方ここには示していないが、衝撃波圧は、構造物の幅によらず同程度の値となり、また段波波圧は、重複波圧と同様に幅が狭くなると波力が低減する傾向にある。

図-14 は、図-10 と同様の実験により、津波入射角の影響を検討した平面水理実験の概要である⁶⁾。幅 5 m の

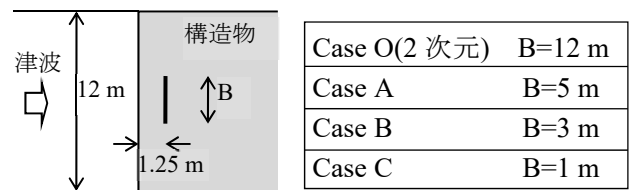
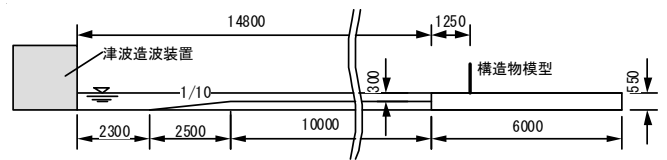


図-10 構造物幅の影響確認実験

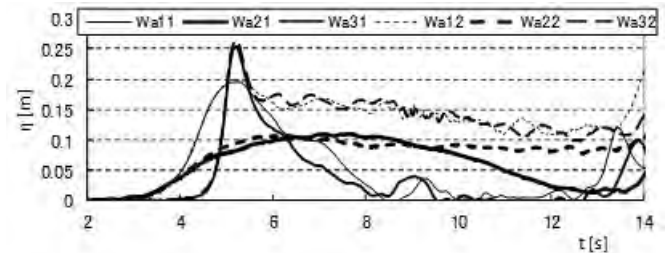


図-11 入射津波の沖波波形

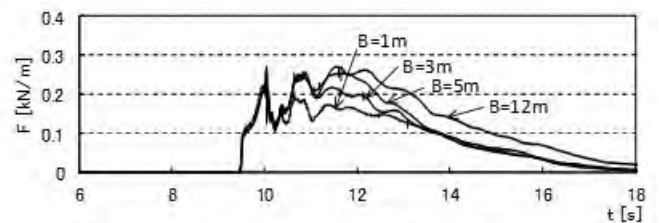


図-12 波力の時系列 (Wa21)

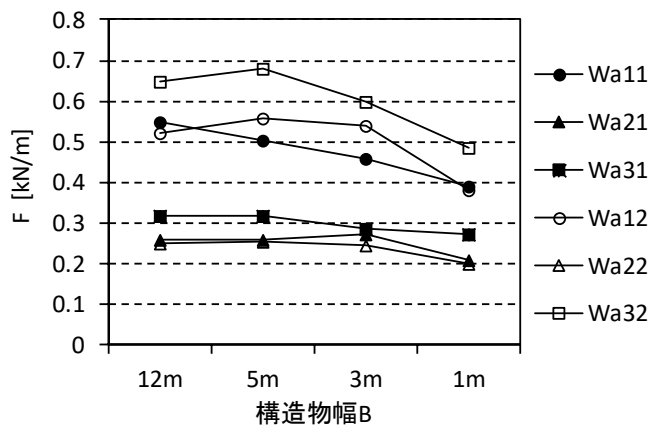


図-13 計測結果

壁模型を、護岸から壁中心までの距離を 2.5 m として、 $\theta = 0, 15, 30, 45$ 度に傾けて設置した場合の、壁中心に働く波力を時系列で計測した。入射波は、2 種類の周期特性に対し、波高を変えた 7 種類とした。図-15 に入射波の一部を示す。波力の計測結果例を図-16 に示すが、設置角度 0 度と 15 度の波力の違いは小さいものの、設置角度が大きくなると波力が低減する傾向にあることが分かる。ただし、津波到達時に働く衝撃波圧については、設置角に対しほとんど変化しておらず、入射角による低減効果は小さい。また、設置角度 0, 15 度には段波波圧が明瞭に現れているが、設置角度 30, 45 度では不明瞭になっている。これは、入射角が浅くなると、上述の段波状の反射波が生じないためと考えられる。各ケースにおける最大持続波力と設置角度の関係を、図-17 に示す。設置角 0 と 15 度が同程度の値で、30, 45 度と大きくなるにつれて波力は低減している。

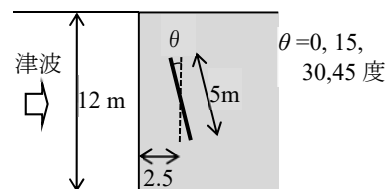


図-14 津波の入射角影響確認実験

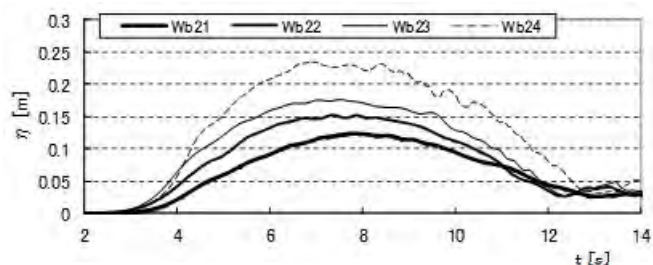


図-15 入射津波の沖波波形

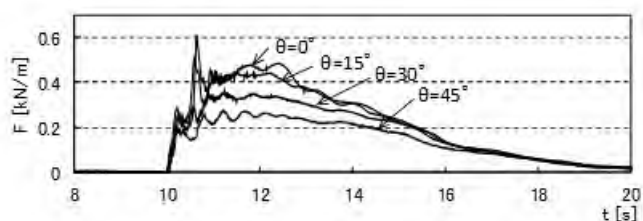


図-16 波力の時系列 (Wb23)

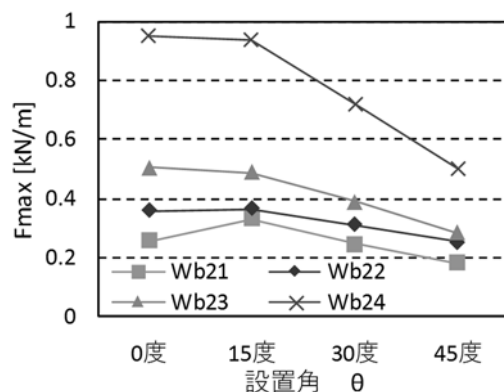


図-17 設置角度と段波波力の関係

5. おわりに

ここでは、新たな津波造波装置を開発・導入し、これを利用した水理実験による津波波力評価の結果を示した。二次元水理実験により示した津波波力の特徴は、大きな縮尺模型を用いた実験による、詳細な圧力分布の計測結果から明らかとなったものである。また平面水理実験では、水槽側壁の影響を受けない幅の広い平面水槽で、二次元水理実験と同規模の条件で実施することにより、有意な結果を得ることが出来た。これらの実験から、津波特性評価のための水理実験において本津波造波装置を適用することの優位性が示された。

参考文献

- 1) 織田幸伸, 伊藤一教: 津波を対象とした水理実験のための造波装置の検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集, 第 II 部門, pp.381-382, 2012.
- 2) 織田幸伸, 高島知行: 平面水槽における津波水理実験のための造波装置の導入, 大成建設技術センター報, 第 47 号, 33, 2014.
- 3) 織田幸伸, 本田隆英, 小俣哲平: 陸上構造物の前面地盤に働く津波波圧に関する水理実験, 土木学会第 73 回年次学術講演会梗概集, II-205, 2020.
- 4) 木原直人, 甲斐田秀樹: 直立壁に作用する段波波圧の推定方法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, I_973-I_978, 2016.
- 5) 織田幸伸, 本田隆英, 小俣哲平: 遡上津波の流体力に対する構造物幅の影響に関する水理実験, 土木学会第 71 回年次学術講演会梗概集, II-172, 2016.
- 6) 織田幸伸, 本田隆英, 小俣哲平: 斜め入射時の陸上構造物に働く津波波力に関する水理実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会梗概集, II-187, 2017.