段波と短周期波の重合場における 波圧特性に関する実験的研究

山中 悠資¹・田島 芳満²

¹正会員 北海道大学 大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター
(〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目)
日本学術振興会特別研究員(PD)

E-mail:yamanaka@sci.hokudai.ac.jp

²正会員 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail:yoshitaji@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

昨今の沿岸災害時では、長周期波と短周期波が重合することによりその被害を拡大させた可能性が指摘されている。本研究では断面二次元水槽を用いて長周期波と短周期波が重合する波動場を再現し、そのときに構造物に作用する波圧特性を分析することを研究の目的とする。実験ではゲート急開放により発生させた段波を長周期波、造波装置により発生させた波を短周期波として、それらが重合したときに構造物に作用する波圧を計測した。また画像解析に基づき重合場の水面形を推定し、それに基づく水理特性とともに波圧特性を分析した。その結果、重合場の波圧特性は短周期波による鉛直方向加速度の影響を大きく受けることがわかった。さらに、短周期波と段波の非線形干渉に伴う碎波位置の変化が構造物に作用する衝撃碎波圧を最大化させ、それが支配的になり得ることが示唆された。

Key Words : wave force, bores, short waves, superimposed wavefield

1. はじめに

昨今の津波や高波・高潮による沿岸域災害時における画像データの分析等により、異なるメカニズムから発生した数秒から十数秒程度の比較的短周期の波が、津波や高潮等による長周期の波と重合して沿岸域に來襲した事例が報告されている。例えば2011年に発生した東北地方太平洋沖地震津波¹⁾が來襲した岩手県大船渡市綾里湾では、7～8秒程度の短周期の水位変動が長周期の水位変動と重合して複雑な挙動を示していた様子が、現地住民が撮影したビデオ画像により撮影された²⁾。この短周期の水位変動は津波の分裂によって生じ、長周期の水位変動との重合及び湾奥での多重反射によってそのような挙動を示したと考えられている³⁾⁴⁾。また2013年に発生した台風30号(Haiyan)⁵⁾はフィリピンのSamar島及びLeyte島に上陸したが、それぞれそれらの東側に位置するEastern Samar東海岸やSan Pedro湾湾口周辺部では、高潮と高波が重合して沿岸被害が拡大した可能性が指摘されている⁶⁾。

このような周期の異なる波の重合は、局所的な水位の増大に加え海岸構造物に作用する波圧等の流体力を増大させることが推察される。構造物に作用する波圧特性については、越流時・非越流時ともに広く研究されている。

津波等の長周期波や波浪等による短周期波がそれぞれ独立して構造物に作用する場合の波圧特性については多くの研究成果が上げられており、例えば長周期波の波圧特性に対しては朝倉式⁷⁾や池野式⁸⁾、短周期波に対しては谷本式⁹⁾や合田式¹⁰⁾等が提案されている。一方で、異なる周期の波が重合するような波動場においては、その具体的な波圧特性への影響については十分な検討がなされていない。そこで本研究では、周期特性が大きく異なる波の重合波動場において、構造物に作用する波圧の特性を室内実験を通じて分析することを研究の目的とする。

2. 実験概要とデータの取得

(1) 実験の概要

実験は田口ら¹¹⁾の方法を踏襲して行うこととし、その概要について田口らを引用しながら以下に示す。

実験は一樣水深水路に一樣勾配斜面($\tan \beta = 1/28$)を接続した断面二次元水路を用いて1/100スケールで行った(図-1)。まず水槽内に設けたゲートを閉じ、沖側貯留槽の水位を Δh だけ上昇させる。次に、一定周期 T ・波高 H の短周期波を沖側境界に設置されているピストン型造波装置から発生させ、その先頭の波がゲートに到達する瞬間に

図-1 実験水路の側面図及び実験の模式図

表-1 入射波条件

	Δh (cm)	T (s)	H (cm)
Case0 (段波のみ)		-	-
Case1 (重合波)	10.0	0.7	6.0
Case2 (重合波)		1.4	4.0
Case3 (重合波)		1.4	6.0
Case4 (重合波)		1.4	10.0
Case5 (重合波)		2.0	6.0

それを急上昇させることにより短周期波と段波が重合した波(重合波)を発生させた(図-1)。なおゲートを上昇させるタイミングは、微小振幅波理論から算定した短周期波の波速と造波板からゲートまでの距離の関係から決定した。またゲートは油圧方式で制御されており、その上昇速度は可変であるが、本研究では全実験を通して同速度で上昇させている。一方、遡上域には高感度ディスク型圧力計(直径1 cm, 厚さ3 mm)を鉛直方向に3機取り付け、鉛直壁(底面から圧力計中心までの距離は、それぞれ1.3 cm, 6.2 cm, 11.2 cm)を設置した(図-1)。鉛直壁によりその背後への入射波の浸入は完全に遮断している。このような条件下で、短周期波の周期や波高を変えながら1ケースあたり3回の実験を実施し(表-1)、入射波により作用する波圧の時系列データをサンプリング周波数100Hzで取得した。

(2) 時空間水位分布の推定

画像解析に基づく推定水位分布を活用することを念頭に置き、実験の様子は水槽側方から3台の定点カメラ(時間解像度: 1/59.94秒)を用いて撮影した(図-2)。それぞれの定点カメラは水路の側面から実験の様子を撮影しており、それぞれの撮影範囲が隣接するカメラの撮影範囲とオーバーラップするように設置した。これらの撮影画像データを次の手順に従って分析することにより、入射波の浅水変形や碎波などの過程を追跡することが可能となった。

まず得られた画像の鉛直方向の画素値の変化量を計算した。その変化量を列ごとに画像上部から下部に向かって追跡し、それが設定した閾値を上回ったとき、そのときの画素座標を水面に対応する画素座標と見なした。なお水槽内の水は青色で着色したため、画像内の水面と背景の境界では画素値の変化量が大きくなり、容易に水面

図-2 撮影したビデオ画像の一例

図-3 推定水位と計測水位の比較

座標を抽出することができる。この操作を3台のカメラで撮影された全画像に対して実施し、得られた水面座標をHolland et al.¹²⁾の手法に基づき水槽側面上での実座標に座標変換した。これらを合成することにより、3台のカメラの撮影範囲における水位分布を岸沖方向に5 mmの解像度で推定した。また鉛直方向の解像度は約1 mmである。推定水位と水槽内の斜面接続部近傍の一樣水深地点に設置した容量式波高計で計測した水位との比較を図-3に示しており、両者が概ね整合的であることがわかる。推定水位が妥当であることが確認できたため、波圧計から得られた波圧分布とこの手法により得られた水位の時空間分布を用いて、重合場における波圧特性の分析を行った。

3. 波圧特性の分析

(1) 作用波圧と推定水位

実験で得られた代表的な波圧分布と鉛直壁前面位置に

図-4 代表的な作用波圧及び鉛直壁前面位置における推定水深の時系列分布

おける水位変動データを用いて、圧力水頭と底面から水面までの距離(=前面水深)の時間変化をそれぞれ推定して比較した結果を図-4に示す。case0の実験条件では、前面水深が最大となってから徐々に低下するに従って、圧力水頭は水深とほぼ等しくなることが期待される。しかしながら、本実験結果では水深低下後もそれらの値に乖離が見られたため、図-4では計測圧力をそれぞれ補正した圧力を示しており(Ch1 : 0.8倍, Ch2 : 1.3倍, Ch3 : 1.0倍), case1~5の圧力波形も同じ補正量を用いて補正した。また計測圧力と推定水深は時間同期していないため、case0のCh1の圧力波形が立ち上がる時間を基準に、全実験の両波形を時間シフトさせた。図-4より、圧力水頭の変動は概ね水深の変動と対応していることがわかる。また段波のみを入射させた場合では、入射波が構造物に到達してから数秒以内の時間で波圧の最大値が計測された一方で、重合波の場合では短周期波によって波圧が周期的に変動し、例えば図-4(d)に示したcase3におけるCh2の最大波圧は5波目の短周期波が構造物に作用した時間(23~24秒)に計測された(図-4(g))。さらに、段波のみを入射させた場合では圧力水頭と水深が概ね一致するが、重合波を入射させた場合では短周期波による水位変動中に、水深が圧力水頭よりも大きくなる傾向が見られた。一方で個々の短周期波が来襲するタイミングによっては、圧力水頭の急激な上昇とともにそれが前面水深の値に近づき、水面に近い波圧計測点ほどその上昇量が大きくなる傾向が見られた(図-4(g))。ただし、図-4(g)ではCh3の圧力水頭がそれほど上昇していない。これは段波による長周期の水位変動によりcase3の23~24秒の時間帯では平均水位が徐々に低下してきており、短周期波による波圧を正確に計測できなかったことに起因すると考えられる。なお図-4では、水深の急激な上昇後にその変化が途絶え、一時的にフラットになる時間帯がある。これは来襲波が鉛直壁に衝突した際に水塊の一部が水位の推定可能上限値を越えて打ち上がったことによるものである。

次に、入射波による鉛直壁前面位置の水深増加に伴っ

て十分に没水したCh1及びCh2の波圧計について、重合波の場合(case1~5)の最大波圧 $P'_{\max}(z)$ 及び最大水深 $D'_{\max}(z)$ と、段波のみの場合(case0)の最大波圧 $P_{\max}(z)$ 及び最大水深 $D_{\max}(z)$ の比をそれぞれ比較した結果を図-5に示す。case0の最大波圧及び最大水深を表す $P_{\max}(z)$ 及び $D_{\max}(z)$ の値は、3回の実験で得られた値を算術平均して求めた。またcase1~5の最大波圧及び最大水深を表す $P'_{\max}(z)$ 及び $D'_{\max}(z)$ は、各実験結果のばらつきが大きかったため、図中のマーカーは3回の実験で得られた $P'_{\max}(z)$ 及び $D'_{\max}(z)$ の中央値を用いてプロットし、それらの最大値・最小値を用いたときの変動範囲をエラーバーで示している。さらに前述したように、いくつかの実験ケースでは推定水位が上限値に達しているが、これらは水塊の一部が打ち上げられたことによるものである。そのような水塊は計測波圧に有意な影響を及ぼしていないと考えられるので、計測波圧に関係した実質的な水面高(水深)は推定値よりも低くなることに留意する必要がある。なおCh3の波圧計については、上述したように入射波条件や時間によっては波圧を正確に計測できず、計測波圧に対してその誤差が大きい可能性があるため考察の対象としない。図-5より、水底に近いCh1における重合波と段波のみの最大波圧の比は両者の最大水位の比とほぼ線形関係にあり、重合波による圧力の増大が静水圧の増大でほぼ説明できることがわかった。これに対し相対的に水面に近いCh2における最大波圧の比は、入射波条件によっては水深の比から大きく乖離していた。

以上のことから、短周期波成分による水粒子の鉛直方向加速度及びその砕波による衝撃的な波圧が、鉛直壁に支配的に作用していたことが推察される。

(2) 入射波の砕波位置

短周期波の砕波が作用最大波圧に影響を及ぼす可能性が示唆されたため、ここではCh2の作用波圧が最大となったcase3の実験における入射波の砕波位置と作用波圧との関連を分析した。

図-5 作用最大波圧と鉛直壁前面位置の最大水深の関係

図-6 case3の入射波条件における推定水位及び砕波判定位置と作用波圧
 (●: 進行波の砕波, x: 重複波の砕波, ベクトルの向き: 波の進行方向)

砕波判定は目視により撮影した画像を確認しながら行った。まず撮影した画像をコマ送りにしながら波が砕波し始めた時空間座標を抽出した。本実験では短周期波を含む入射波が鉛直壁で反射することにより、部分重複波を形成しながら反射波も砕波している様子が確認できた。このことから、波が砕波し始めた地点の時空間座標とともにその周辺時間の波の伝播状況を確認しながら、砕波する波の伝播方向も含めて抽出した。

図-6に推定水位の時空間分布及び砕波判定位置と圧力変化を示す。図には推定水位の時空間分布及び計測圧力(Ch2)を示しており、水位分布上に推定砕波位置をプロットしている。また推定砕波位置にはベクトルを付与し、その方向により波向きを示しており、ベクトルを持たないマーカーは重複砕波を示す。図より、段波及び来襲する短周期波のほとんどが砕波しながら岸向きに伝播していることがわかる。一方、圧力波形は入射波が到達して以降の時間帯で短周期波の作用により周期的に変動しているが、短周期波が構造物に作用する瞬間に個々の圧力波形は鋭く立ち上がっている。短周期波が砕波しながら鉛直壁に向かって伝播していることを踏まえれば、これ

はその衝撃砕波圧によるものであると考えられる。さらに、その衝撃砕波圧による作用波圧量が第1波目から第5波目の短周期波来襲時にかけて徐々に増大していることがわかる。次に、砕波した波の中から岸向きに進行した波の砕波に着目すると、21秒から26秒の時間帯にかけて、三波の短周期波の砕波位置が徐々に鉛直壁に向かって移動していることがわかる。これは波の非線形干渉が砕波限界を変化させていることに起因していると推察できる。またその時間帯の中で、鉛直壁に最も近い位置で砕波したのは三波目の短周期波($t=25\sim 26$ s)であったが、それよりもやや鉛直壁から離れた位置で砕波した二波目の短周期波($t=23\sim 24$ s)によって作用最大波圧が記録されたことがわかる。さらにそのときの作用波圧は、衝撃砕波圧による波圧が支配的となっている。つまり、重合場における波の非線形干渉により波の砕波位置が変化し、それに伴う波の砕波位置と鉛直壁との位置関係の変化が短周期波の衝撃砕波圧を最大化させる要因の一つであると推察できる。したがって、重合場における波圧特性は、入射波の砕波条件によって特徴付けられることがわかった。

4. まとめ

- (1) 短周期波と長周期波が重合する波動場において、鉛直壁に作用する波圧特性を分析した。特に段波のみを作用させた場合は、水底付近で生じる波圧は静水圧でほぼ近似できる結果を得た。一方短周期波が重合する場合、特に水面付近で生じる波圧は短周期波の鉛直方向加速度の影響を大きく受けることがわかった。
- (2) 作用波圧と入射波の砕波位置の関係を分析した。短周期波の砕波位置は波の非線形干渉によって変化し、それと構造物の位置関係によって衝撃砕波圧が変化した。この衝撃砕波圧によって鉛直壁に作用した波圧が最大となった。

本研究の分析により、短周期波と長周期波が重合する場合には、短周期波の衝撃砕波圧が支配的となって沿岸構造物に作用する可能性が示唆されたため、砕波限界を含む波の非線形干渉場の推定が今後の課題として上げられる。

謝辞：本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費(課題番号：25-2058, 16J00394, 研究代表者：山中悠資)及び基盤研究B(課題番号：15H04046, 研究代表者：田島芳満)により行われたことを付記する。

参考文献

- 1) Mori, N., Takahashi, T., and The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, *Coastal Engineering Journal*, 54, 125001, 2012.
- 2) 山中悠資, 田島芳満, 佐藤慎司: ビデオ画像解析に基づく綾里湾白浜海岸に集中した津波外力場特性の分析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, 341-345, 2012.
- 3) 山中悠資, 佐藤慎司, 田島芳満: 東北地方太平洋沖地震津波の綾里湾における増幅機構, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, 171-175, 2013.
- 4) 山中悠資, 佐藤慎司, 田島芳満: 綾里湾における海岸堤防の破壊事例に基づく津波波力の解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_201-I_205, 2014.
- 5) Tajima, Y., Yasuda, T., Pacheco, B.M., Cruz, E.C., Kawasaki, K., Nobuoka, H., Miyamoto, M., Asano, Y., Arikawa, T., Ortigas, N.M., Aquino, R., Mata, W., Valdez, J., and Briones, F.: Initial report of JSCE-PICE joint survey on the storm surge disaster caused by Typhoon Haiyan, *Coastal Engineering Journal*, 56(01), 145006, 2014.
- 6) 田島芳満, 川崎浩司, 浅野雄司, Noel M. Ortigas: 台風 Haiyan に伴うレイテ島およびサマール島における高潮・高波特性の分析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, 1431-1535, 2014.
- 7) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 47, 911-915, 2000.
- 8) 池野正明, 松山昌史, 榊山勉, 柳沢賢: 陸上に遡上したソリトン分裂津波の波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 53, 776-780.
- 9) 谷本勝利, 鶴谷広一, 中野晋: 1983 年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 海岸工学講演会論文集, 31, 257-261.
- 10) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, 12(3), 31-69, 1973.
- 11) 田口裕介, 田島芳満, 中村駿一郎, 山中悠資: 台風 Haiyan による San Pedro 湾口部における氾濫特性とそのメカニズムの分析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, 1675-1680, 2015.
- 12) Holland, K.T., Holman, R.A., and Lippmann, T.C.: Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies, *IEEE Journal of oceanic engineering*, 22(1), 81-92, 1997.

(2017.3.15 受付)

EXPERIMENTAL STUDY OF WAVE FORCE IN A SUPERIMPOSED WAVEFIELD WITH BORES AND SHORT WAVES

Yusuke YAMANAKA and Yoshimitsu TAJIMA

Some reports for the cases such as the 2011 Tohoku Tsunami and the 2013 Typhoon Haiyan pointed out that the coastal damages expanded due to the short waves which come together with the long wave. The objective of this study is to investigate characteristics of wave force in such wavefield based on laboratory experiments. Characteristics of the wave forces measured by wave pressure sensors were examined with waveforms estimated by image analysis of video footage during the experiment. It was found that the vertical acceleration of the water motion due to short waves was one of the influential factors for the wave force. It was also found that the location change of wave breaking induced by the interaction between short and long waves maximizes the impulsive breaker force of short waves affecting the structure, and it could be dominant rather than that of the long wave.