陸上構造物に働く津波波力の時系列評価に関する研究

Study on Time Series Evaluation of Tsunami Force Acting on Land Structures

織田幸伸¹・本田隆英²・高島知行³

Yukinobu ODA, Takahide HONDA and Tomoyuki TAKABATAKE

The tsunami force acting on a land structure generated by the run-up tsunami was generally evaluated from the maximum inundation depth of the passing run-up tsunami, which is estimated on the supposition that the structure does not exist. However, the maximum depth does not always accompany the maximum tsunami force, e.g., in the case that the inundation depth gradually increase. Therefore the time series evaluation of the tsunami force not with the maximum depth is required. In this study, the physical model experiment to examine the tsunami forces acting on a wall structure in time series was conducted. It is found that the time series of the tsunami force was expressed with the inundation depth and the velocity of the passing tsunami at the same moment.

1. はじめに

護岸を越流した遡上津波による、陸上の壁状構造物に働く津波波力は、朝倉ら（2000）による通過波の浸水深を用いた評価式が適用されることが現状では一般的である（例えば内閣府，2005）。ただし、朝倉らの評価式は、水深係数と呼ばれる、通過波浸水深に対する静水圧分布を仮定する評価水深を表す係数を3.0としているが、安全側（過大評価）となる場合があるため、これを低減する提案もされている（国土交通省，2011）。一方で、入射津波の条件や構造物の護岸からの距離によっては、過小評価になる実験結果も示されている（池野ら，2005）。また、ハザードマップに示される浸水深等は、陸上地形の影響を受けており、押し波から引き波への変化点付近で最大浸水深が現れることも多く、通過波の浸水深とした入力としては不適切な場合がある。以上のようなことから、Asakuraら（2002）や榊山（2012）は、水深係数をフルード数の関数として評価する手法を提案している。この手法によれば、遡上津波の浸水深に加えて、流速を波力評価のための入力とすることにより、評価に際し通過波成分を入力するという留意が不要となる利点を持つ。

一方上述の評価式は、浸水深のピーク値 $\eta_{\max}$ および同時刻の流速を入力としているが、実際の津波遡上では徐々に浸水深が大きくなり、明確なピークが現れない場合が多い。比較的地形勾配が緩やかで、遡上の初期の段階に波力の最大値が発生することが明確な場合を除き、津波の遡上解析の結果から、最大波力の生じる通過波の最大浸水深を設定することは通常困難である。本研究では、津波波力を時系列で評価することを目的に、様々な

津波波形について水理実験により波力の時系列変化を確認し、その特性について論ずる。また、フルード数と水深係数の関係を時系列で検討する。

2. 水理実験

(1) 実験諸元

図-1に水理実験の概要を示す。実験は、二次元長水槽（幅80cm）で実施した。造波はチャンバー式の津波造波装置を用いた。チャンバーには複数の空気供給バルブが設置されており、この開放タイミングをずらすことにより造波波形を変更することが出来る。水路には1/14.8勾配の斜面と陸上架台を設置し、壁状構造物を護岸から0.5、2.0、3.5mの位置（P1～P3）に設置した。壁状構造物は、水路幅全幅のアルミニウム製（ $t=10\text{mm}$ ）の板とし、これを2本のワイヤーで吊下げた。背面3点にロードセルを設置し、背面側にワイヤーを介してウェイトを吊下げて初期荷重を与え、波力を3つのロードセルの合計として計測した。（図-2）。また前面には小型の圧力計を32mmピッチで10個設置した。計測項目は、水位を沖側でH1～H5の5点、陸上部で構造物設置位置の3点とした。通過波については流速を電磁流速計によって計測したが、後述するように水深に対し流速が大きすぎるため、欠測が多く採用していない。入射波は、波形3種類、波高3種類の9ケースについて実施した。H1における入射波の波形を、図-3に示す。W11、21、31は緩やかに水位が上昇する波形（Type1）、W12、22、32は顕著な分裂が生じている波形（Type2）、W13、23、33は碎波を伴う段波状の波形（Type3）であり、それぞれこの順に波高が小さくなっている。

(2) 通過波水位

実験に先立ち、構造物を設置しない状態で通過波水位を計測した。計測結果の例を図-4に示す。Type1の波形の場合、護岸を越流するように遡上し、ほぼ同形状の波形

1 正会員 博(工) 大成建設(株) 技術センター
2 正会員 博(工) 大成建設(株) 技術センター
3 正会員 修(工) 大成建設(株) 技術センター

図-1 水理実験水槽諸元

図-2 壁状構造物と計測装置

図-3 入射波の時系列(H1)

で浸水深が小さくなりながら進行する。Type2の波形の場合、陸域でも短周期（1s程度）の波動成分が生じ、階段状に浸水深が大きくなる。Type3の場合、水しぶきを上げながら護岸を超えるためP3では波形が激しく乱れるが、P2、P1では比較的一様な射流状の流れとなっている。

全てのケースにおいて、護岸側の観測点P3であれば水位のピーク $\eta_{\max}$ を確定できるが、P2、P3においては水位のピークが確定できないことが分かる。

(3) 実験結果

図-5は、圧力計の計測結果から算出した波力とロードセルで計測した波力（ともに単位水路幅あたり）を比較

図-4 通過波時系列の例

図-5 圧力計とロードセルによる計測結果の比較

したものである。なお以降は、P3を遡上波の先端が通過する時間を0とした時間軸で示す。図-5によると、両者はよく一致しており計測結果の妥当性が検証される。先頭部分で圧力計による計測結果が乱れているが、この時、壁面に沿って水塊が跳ね上がっており、鉛直方向の圧力分布が乱れるために圧力計では正しく計測できていないものと考えられる。以降は、主に波力としてロードセルによる計測結果を示す。

図-6に実験結果の例を示す。図中には、通過水位、構造物前面水位、津波波力と水深係数の時系列を示した。水深係数 α は、以下の式により求めた。

$$\alpha = \sqrt{F / \frac{1}{2} \rho g \eta_1^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F は単位幅波力、 η_1 は通過波の浸水深である。

図-6 (a) は、緩やかに水位が上昇するType1の波形のケースである。通過波水位の最大は5s以降に発生するが、波力の最大は2s付近で発生しており、前述したように $\eta_{\max}$ では波力の最大値が評価できない。(b) は分裂波状態で入射するType2の波形で、連続的に波が入射するケースで

(a) 設置位置 P1, 入射波 W11

(b) 設置位置 P2, 入射波 W12

(c) 設置位置 P2, 入射波 W13

図-6 津波波力の計測結果

図-7 壁面圧力分布(設置位置P2, 入射波W12)

あるが、もっとも水位の低い1波目で最大波力生じている。また、1波目の波力が二山に分裂している特徴が確認できる。(c)は、段波状態で入射するType3のケースである。ここではP2に構造物を設置したケースを示すが、P3に設置した場合は、護岸で跳ね上がった水塊が直接構造物前面に落下するように衝突しているため、他のケースとは特性が異なる。これは構造物が護岸に近接して設置されている特異な場合と考え、本論では対象としない。P1, P2に設置した場合には、Type2と同様の傾向を示す。

図-6によると、全てのケースにおいて、1波目の前面水位のピークに対して波力が追従していないことが分かる。図-7に、前面の圧力分布を示す。図中の破線は、水圧計測結果から静水圧分布を仮定した時の圧力である。

(a) 設置位置 P1, 入射波 W11 (b) 設置位置 P2, 入射波 W12

写真-1 構造物への衝突状況

図-8 津波波力の計測結果(設置位置P2, 入射波W12を補正)

これによると、水位がピークとなる時の壁面圧力(図-7(b))は底面付近にしか作用しておらず、壁面沿いに跳ね上がった水塊により水位が高くなっていることが分かる。

これらの実験結果における最大波力の発生特性は、大きく2つに分けることができる。1つは通過波の水位変動と同様の傾向で波力が変動しているもの(図-6(a))、もう1つは通過波水位のピーク付近で波力時系列が二山に分裂しているケースである(例えば図-6(b)の $t=0.5\sim 1.2s$)。写真-1は、両者の最大波力発生時の構造物前面の状況を示したものである。前者(写真-1(a))は、連続的な流入により、壁前面をせり上がった水塊が沖側に巻き込むように落下しているが、後者(写真-1(b))は流量が一旦低下するため、壁沿いに打ち上がった水塊が壁沿いに落下している。二山目のピークは、この落下水塊によって発生したものである。

図-6(b)の水深係数において、2s付近で一旦値が小さくなっている。これは、進行波に対し構造物からの反射の影響で2波目の位相がずれたためと考えられる。進行波の2波目の位相を、波力のピークに一致するように時間をずらしたものを図-8に示す。水深係数の時系列を見ると、遡上波の先端部分で最大値を示し、波力のピークを除き、その後徐々に小さくなる傾向にある。波力のピークにおいては、5以上の大きな値となっている。

圧力分布の特性(図-7)は、遡上波の先端部分(a)において底面付近の圧力が大きくなっており、既往の研究において分裂波の場合の圧力分布として示されている特徴と類似する。一方、その他の圧力ピーク(c)(d)においては、水塊の打ち上りによる見掛けの水位が高い場合でも、静水圧形状の一樣勾配の圧力分布となっている。

3. 津波波力の評価

(1) 通過波の数値解析による流速の評価

本実験では、電磁流速計による流速の計測も実施した

表-1 OpenFOAMによる解析条件

計算格子間隔	計算時間間隔	動粘性係数	密度	境界条件	乱流モデル
m		m ² /s	kg/m ³		
Δx	0.01 ~ 0.05	空気 1.48×10 ⁻⁵	空気 1	壁面 slip条件	
Δz	0.01 自動調整	水 1.00×10 ⁻⁶	水 1000	上端 開放条件	Smagorinsky

図-9 数値解析結果と実験結果の比較

(a) 設置位置 P1, 入射波 W11

(b) 設置位置 P2, 入射波 W12

図-10 波力と通過波のフルード数

が、水深に比して流速が大きいいためブローブ背後の剥離の影響が大きく正しく計測できなかった。これを補完する目的で、数値解析による通過波の再現計算を実施した。解析には、OpenFOAMを使用した。解析条件を表-1に、計算結果を図-9に示す。図-9は図-3に対応するが、段波状態で護岸に入射するType3の波形については再現性が確保できなかったため、ここでは対象としない。これによると、W12の2波目以降に位相のずれがあるものの、解析結果は実験結果をよく再現している。以後では、この数値解析による流速を、位相が一致するように時間軸を調整して波力の評価に適用する。

(2) 津波波力の評価

図-10に、通過波水位、流速とフルード数の時系列を示す。流速、フルード数は先頭部分で最大となり以降徐々に減少し、水位の時間変化が明確には表れていない。図-6と比較すると、フルード数の変化は水深係数 α の時間変

(a) 設置位置 P1, 入射波 W11 (b) 設置位置 P2, 入射波 W12

図-11 フルード数と水深係数の関係

化と類似することが分かる。図-11にフルード数と α の関係を示す。図-11 (b) の丸で示した部分(図-10 (b) の $t = 1.1 \sim 1.2$ s)は、前述した水塊の落下時に作用する波力ピークを示している。この部分を除けば、 α とフルード数の関係はある幅をもった同一線上にあることが期待される。図中の直線は、楢山の式($\alpha = 1 + 1.4Fr$)を示している。本式は、津波波力の最大値を示すもので入力 η_{max} であり、また適用範囲を $Fr \leq 2$ としているものの、時系列に適用した場合にはフルード数の適用範囲を超えて、ほぼその上側を包絡している。このことから、実務において津波の最大波力を求めることを目的とした場合、その適合性が確認される。

(3) 理論的アプローチ

以上のような波力の時系列特性に対し、池谷ら(2013)を参考に理論的なアプローチを試みる。なお、池谷らは準定常状態を仮定しており、図-10 (b) のような時間変化の大きな場合にはその適用性に課題が残る。

モデル図を図-12に示す。構造物近傍は、鉛直方向流速が発生しており、また渦の発生など乱れた状態である。断面②は、この乱れた領域の前面で、一様水平流速と見なせる断面とする。連続方程式と運動方程式は、

$$V_1\eta_1 - V_2\eta_2 = -c(\eta_2 - \eta_1) \quad (2a)$$

$$g(\eta_2^2 - \eta_1^2)/2 + \eta_2(V_2 - c)(V_2 - V_1) = 0 \quad (2b)$$

となり、 V_2 を消去すると次式が導かれる。

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8 \left(\frac{c}{\sqrt{g\eta_1}} - Fr_1 \right)^2} \quad (3)$$

ここで、 c は構造物から反射する段波状成分の波速であり、添え字の1, 2はそれぞれ、構造物がない場合(通過波)とある場合の成分を示している。ここで、池谷らは水深係数 α を η_2/η_1 として求めているが、時間変動を考慮した場合 V_2 は0とならないため、 α を次式で定義する。

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \rho g \eta_1^2 + \rho \eta_2 V_2^2 \right) / \left(\frac{1}{2} \rho g \eta_1^2 \right)} = \sqrt{\frac{g \eta_2^2 + 2 V_2^2 \eta_2}{g \eta_1^2}} \quad (4)$$

まず、上式で $c=0$ の場合を考える。式(2a)より $V_1\eta_1 = V_2\eta_2$ であり、これと式(3)を式(4)に代入して整理すると、

$$\alpha = \sqrt{1 + 2 Fr_1^2} : c = 0 \quad (5)$$

図-12 波力評価のモデル図

が得られる。また、 $c = -(g\eta_1)^{1/2}$ として式(3)(4)より α を求めると、

$$\alpha = \left(2F_1^2 + \sqrt{1 + 8(1 + F_1^2)^2} - 2 \right)^{1/2} : c = -\sqrt{g\eta_1} \cdots (6)$$

となる。

式(5)、(6)の関係を図-11に示した。これによると、図-11(b)では一部で実験結果が式(5)を下回るものの、式(5)はほぼ実験結果の下限値を示している。また、式(6)は榊山の式にほぼ一致し、上述したように水塊の跳ね上がりの落下時を除けば、ほぼ実験結果の上限値を示していることが分かる。

ここで $c=0$ は構造物の反射が沖側に進行出来ない状態を示しており、護岸前面に水位の上昇としてエネルギーが留まっていることを意味する。この時式(5)は、式(4)で $\eta_1 = \eta_2$ 、 $V_1 = V_2$ とした場合に等しく、これは進行波成分による圧力と運動量の流入を意味する。構造物に働く波力は、流入する運動量と沖側に反射する運動量の和で表される。そのため、反射が進行しない $c=0$ の条件が、反射分が0となり、波力の下限値となっていると考えられる。

図-13に、式(5)、(6)により進行波から求めた波力を示す。上述したように、波力は式(5)、(6)の間でほぼ変動していることが分かる。図-13(a)では、式(5)に沿って波力が上がり続けた後、式(6)で示される波力に遷移して波力のピークが発生している。その後一旦、式(5)の値に戻るが、以降は式(6)に沿って波力が生じている。図-13(b)では、遡上波の先端部分で波力のピークが発生するため、式(6)相当の波力が生じた後、式(6)に沿って波力が一旦低下し、2波目以降は式(5)に沿って波力が変動している。

図-13(b)では、水塊の跳ね上がりの落下時には、上述の評価式より大きな波力が生じている。これを評価するには、流れの場から気中に一旦切り離された水塊の持つエネルギーを評価する必要があるため、上述の議論とは別に考える必要がある。水位上昇の鉛直加速度などの別の指標が必要と考えられるが、これについては今後の検討とする。

5. おわりに

本論では、陸上構造物に働く波力の評価を目的に実験を実施しその特性を明らかにするとともに、理論的な考

(a) 設置位置 P1, 入射波 W11

(b) 設置位置 P2, 入射波 W12

図-13 波力の評価結果

察を加えた。本論によって得られた結果を以下に示す。

- ・波力の発生時間を最大浸水深によって定義することは一般に困難であり、波力を時系列で評価する必要がある。
- ・波力は、適切な水深係数を設定することにより、通過波の浸水深により評価することが可能である。
- ・本論で適用した解析手法により水深係数をフルード数の関数として評価可能であるが、実務への適用においては、榊山の式は時系列評価についても良い一致を示す。
- ・ただし、遡上波の水位が短時間に上昇する場合、打ち上がった水塊の落下により大きな波力が働く場合がある。

本論は鉛直二次元問題を対象としているため、構造物背面の地形による反射などを含んだ実際の津波浸水解析に適用するには、三次元(平面二次元)での検討が必要である。今後は、三次元構造物に対する実験等を実施し、平面場での津波評価に対する検討を進める予定である。

参 考 文 献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森正則(2000):護岸を越流した津波に作用する波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.911-915.
- 池野正明・松山昌史・榊山 勉・柳沢 賢(2005):ソリトン分裂と碎波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.751-755, 2005.
- 池谷 毅・秋山義信・岩前伸幸(2013):陸上構造物に作用する津波持続波圧に関する水理学的考察, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.L816-L820.
- 国土交通省(2011):津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について。
- 榊山 勉(2012):陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.L777-L775.
- 内閣府(2005):津波避難ビル等に係るガイドライン, 68p.
- Asakura, R, K. Iwase, T. Ikeya, M. Takao, T. Kaneto, N. Fujii and M. Ohmori (2002): The tsunami wave force acting on land structure, Proc. of 28th ICCE, ASCE, pp.1191-1202.