直立壁から張り出す水平板と直立壁に作用する陸域遡上津波の波圧特性

Characteristics of Pressure due to Runup Tsunami Flow Acting on a Horizontal Plate Built on Vertical Wall and Wall Itself

木村雄一郎¹・川端樹生²・水谷法美³・平石哲也⁴・間瀬 肇⁵

Yuichiro KIMURA, Tatsuo KAWABATA, Norimi MIZUTANI, Tetsuya HIRAISHI and Hajime MASE

Runup tsunamis generated by Tohoku earthquake caused serious damages to a large number of structures on land. Although characteristics of pressure due to runup tsunamis acting on vertical walls or bridge girders were studied in the past studies, pressures acting on a horizontal plate built on a wall as a pier did not clarified. The present study verifies characteristics of pressure due to runup tsunamis acting on a horizontal plate and wall by hydraulic experiments and numerical simulations. In order to confirm consistency to the past studies, an experiment and a simulation for a simple vertical wall also were carried out. In conclusions, characteristics of pressure acting on above structures can be evaluated using runup tsunami height and velocity.

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では、沿岸構造物のほか、陸域を遡上した津波によって、多くの陸上構造物が甚大な被害を受けた。これまで、陸域に設けられた直立構造物（例えば、朝倉ら、2000）や橋桁に作用する津波による波圧を対象とした研究は多い。他方、栈橋のような、直立壁から水平板が張り出す構造物への津波波圧を対象とした研究の事例は少ない。東北地方太平洋沖地震津波では、写真-1のように、栈橋の被害も多くみられた。本研究は、陸域を遡上する津波が直立壁から張り出す水平板下面に作用する際の波圧特性を評価することを目的とする。

従来の研究では、津波の波圧特性を評価するための指標として、一般的に波高が用いられてきた。しかしながら、陸域を遡上する津波は、波というより流れであり、波高のみを基準とした波圧の評価手法では、こうした現象を十分に捉えているとは考えにくい。そこで、本研究では、津波の流速にも着目することで波圧特性の詳細な評価を行った。水理模型実験では、流速を面的に捉えることは容易ではない。そのため、模型実験と数値流体解析とを併用することで、波圧の評価精度の向上を図った。流体解析には、水平板の長さや高さの調節が容易で、かつ、構造格子でありながら水平板周囲の計算格子の寸法のみを細密に付与できる重合格子法を採用した。また、従来の研究との整合性を検証するため、直立壁を対象とした

写真-1 津波により被災した栈橋

実験も併せて実施した。

2. 水理模型実験

実験では、ストローク2mのピストン式造波装置を備えた、長さ50m、幅1m、高さ1.5mの2次元造波水路を使用した。水路内において、砕波した孤立波が陸上で遡上する様子を再現するため、砂および半透過性マットを用いて、図-1 (a) のように、1/10勾配の傾斜面を7.5m、1/100勾配の傾斜面を6mにわたって作製し、その背後に平坦部を設けた。傾斜面背後の平坦部における水路底面からの高さは81cmである。実際の舗装路面と同程度の表面粗度を模擬するため、半透過性マット上には塩ビ製の平板を敷設した。また、遡上する津波の波高を増大させるため、水路内には、図-1 (b) のように水路幅を絞る鋼製の鉛直壁を設けた。実験模型は、水路幅縮小後の平坦部に設置した。模型設置位置における水路幅は31.5cmであり、模型の寸法もこれに合わせて作製した。実験時の水深は、水路底面からの高さが80cmとなるよう調整した。

本実験で使用する模型の縮尺は1/50とし、表-1のように、模型の寸法を設定した。水平板を設置した実験模型

1 正会員	博(工)	日立造船(株)	技術研究所
2 正会員	修(工)	中部電力(株)	原子力本部
3 正会員	工博	名古屋大学教授	大学院工学研究科
4 正会員	博(工)	京都大学教授	防災研究所
5 正会員	工博	京都大学教授	防災研究所

の写真写真-2に示す。実験模型は、水平板の路面からの高さ H_p を2通りに変えられるよう、写真-2に示すように、水平板を設置する壁面が複数に分割された構造とした。また、水平板は、2cmごとに分割されており、壁面から張り出す長さ L_p が調整できるよう構成されている。

本実験では、水位計、圧力計および流速計の3種類の計測機器を使用した。水位計は、碎波前の孤立波の波高 H_1 、陸上平坦部（模型の前方80cm）における遡上津波の高さ H_2 、および、実験模型直前（模型の前方10cm）における浸水深 H_3 を計測できるよう、図-1 (a) に示す位置にそれぞれ設置した。圧力計は、壁面および水平板下面に作用する波圧計測のため計12台を使用した。圧力計の設置位置を図-2に示す。図-2において、中央の図は、路面から10cmの高さに水平板を設けた模型、右側の図は路面から20cmの高さに水平板を設けた模型を示す。圧力計 P_V は、水平板の長さに応じて、使用する個数が増減する。流速計 V （図-1 (a) 参照）は、入射する遡上津波の水平流速を計測するため、波高計 H_2 と同じ位置に設置した。これらの計測機器からの出力値は、1000Hzのサンプリング周波数のもとで同時計測を行った。

実験では、造波装置の制御パラメータ（造波板のストロークおよび動作速度）を調節することで6ケースの遡上津波を造波した。入射する津波の高さは水位計 H_2 を用いて評価した。実験で使用した模擬津波の時間波形を図-3に示す。これらの波形は、直立壁タイプの模型（図-2の左側の図）を水路内に設置した実験ケースにおいて計測したものであり、波高の低いケースから順に、W1, W2, ..., W6として表示している。図-3より、入射する遡上津波の高さは7~16cm程度であり、流れが壁面に衝突し水面が盛り上がることで、最大浸水深は25~40cmに達して

(a) $H_p = 10 \text{ cm}$ (b) $H_p = 20 \text{ cm}$

写真-2 実験模型の写真

図-2 圧力計の設置位置

図-3 模擬津波の時間波形

(a) 側面図

(b) 平面図

図-1 実験設備の概略図

表-1 実験模型の寸法

	実機スケール	模型スケール
水平板の路面からの高さ H_p	5, 10 m	10, 20 m
水平板の張り出し長さ L_p	1, 2, 3, 4 m	2, 4, 6, 8 m

いる様子が確認できる。各種計測データのばらつきを考慮するため、同じ実験条件のもとで4回ずつの計測を行った。

3. 数値解析モデル

(1) 支配方程式

本研究では、非圧縮性粘性流体を対象としている。また、非圧縮性流体の計算手法として擬似圧縮性法を使用するため、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式に擬似時

間微分項を加えた、擬似圧縮性ナビエ・ストークス方程式を支配方程式として使用した（式（1）～（3）参照）。擬似時間に対する定常解が得られたとき擬似時間微分項は0となり、この方程式の解は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式と等しくなる（丹野ら，2004）。

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + f_y \quad (3)$$

ここで、 p は圧力、 u は x 方向の流速、 v は y 方向の流速、 t は実時間、 τ は擬似時間、 Re はレイノルズ数、 f_x は x 方向に生じる外力、 f_y は y 方向に生じる外力を表す。実時間における計算時間間隔を Δt 、擬似時間における計算時間間隔を $\Delta \tau$ としたとき、両者の間には $\Delta t \geq \Delta \tau$ の関係が満たされている。擬似時間とは、陰的な計算における内部反復の時間スケールを表すものである。

空間微分の離散化には2次精度の風上差分、時間積分の離散化には2次精度の後退差分を用いた。また、本解析で使用した擬似圧縮法では、各時間段階における擬似時間に対する収束解が必要となる。擬似時間に対する数値積分には、LU-SGS法を使用した。

(2) 重合格子法

重合格子法とは、図-4のように、主格子中に補助格子を重ねて配置することで数値解析を行う手法である。前述のように、本手法を用いて水平板を構築することで、その長さや設置高さの調整が容易となり、さらに、構造格子でありながら、水平板周囲の計算格子の寸法のみを細密に付与できるため、計算負荷の軽減と計算精度の向上との両立が期待できる。

主格子では、構造物と重なる格子点およびその近傍の格子点是非計算格子「■」として扱われ、その他の格子点において物理量の計算が行われる。補助格子における最外周部の境界「○」には、圧力等のすべての物理量が主格子から内挿され、補助格子領域における計算が行われた後、主格子における非計算格子周囲の格子点「□」に

図-4 重合格子法概念図

物理量が戻される。非計算格子は、物体から数周目の補助格子における周方向（物体に沿う方向）の曲線を境界としたときに、その内部に含まれる主格子点を指す。内挿には、2次元の線形内挿（bi-linear interpolation）を用いた。

本数値解析では、水理模型実験と同様、表-1の条件に合わせて、補助格子により水平板を構築した。

(3) 界面捕捉法

気液界面の捕捉にはレベルセット法を採用した。レベルセット法とは、相の界面より液相側が正、気相側が負となるような垂直距離関数（レベルセット関数）を用いて界面の位置を捕捉する解析手法であり、界面の曲率や法線方向等の微分量についても比較的精度良く求めることができる。また、レベルセット関数 f は界面に有限な厚さ α を持たせることができ、密度や粘性係数のように界面で急激に変化するものでも、その界面の厚さに応じて値を分布させ、比較的安定した計算を行うことができる。

界面からの垂直距離関数であるレベルセット関数 f を移流させると、距離関数としての性質が徐々に失われる。そこで、各点におけるレベルセット関数の勾配 $|\nabla f|$ が1から外れた分を誤差として修正する。これにより、実際の界面の正確な位置を探し出すことをせずに、界面からの垂直距離関数を再構築できる。

水理模型実験では、孤立波を傾斜面上で碎波させることにより津波を造波したが、数値解析においては、水柱崩壊によって模擬的な遡上津波を作成した。

数値解析モデルの詳細については、フラップゲート式可動防波堤の運動解析を取り扱った、著者らの論文（木村ら，2010）を参考にされたい。

4. 実験結果と解析結果の比較および考察

(1) 直立壁への作用波圧

水理模型実験において、遡上津波が直立壁に作用した際における波圧の時間変化の一例を図-5に示す。本実験ケースは、図-3に示すW6の模擬津波を対象としたケースであり、このとき入射した遡上津波の最大高さ $\eta_{\max}$ は14.98cm、最大水平流速 $u_{\max}$ は317.6cm/sであった。

図-5より、圧力計の設置高さによって、圧力値を示す曲線の傾向に違いがあることがわかる。図中、壁面に遡上津波が衝突した時刻に破線を表示する。圧力計 P_{H-1} ～ P_{H-5-1} においては、遡上津波が衝突したことにより、破線上にピークが確認できるが、 P_{H-6-1} より高い位置では、破線上にピークはみられない。圧力計 P_{H-5-1} は、床面から15cmの高さに設置されている。これは入射する遡上津波の高さとほぼ一致しており、圧力計 P_{H-5-1} より低い位置の圧力計には、水平方向に運動量を持った津波が動圧として直接作用したことで、このようなピーク値が生じたものと推察される。一方、入射する遡上津波より高い位置

に設置されている圧力計には、壁面に衝突した流れがせき上げられたことで水位が上昇し、その際、静水圧として圧力が作用したものと考えられる。

図-6 (a) に、W1～W6のすべてのケースに関して、直立壁に作用した最大波圧の鉛直分布を示す。図中、横軸は流体の密度 ρ 、重力加速度 g および入射する遡上津波の最大高さ $\eta_{\max}$ を用いて無次元化した波圧、縦軸は路面からの高さ z を入射津波の最大高さ $\eta_{\max}$ で除した無次元高さを示している。また、朝倉ら (2000) による壁面への作用波圧の評価式についても、破線および実線として図中に表示した。朝倉らは、顕著にソリトン分裂した段波による最大波圧を式 (4)、非分裂の段波による最大波圧を式 (5) として示している。

$$\frac{p_{\max}(z)}{\rho g \eta_{\max}} = 5.4 \left(1 - \frac{z}{1.35 \eta_{\max}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{p_{\max}(z)}{\rho g \eta_{\max}} = 3 \left(1 - \frac{z}{3 \eta_{\max}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

本実験では段波の分裂性による結果の分類は行っていないが、得られた最大波圧の鉛直分布は、概ね朝倉らの実験結果と一致している。先に述べたように、壁面に作用する波圧は、遡上津波が動圧として直接作用する高さであるかどうかによって、その特性は異なった。図-6 (a) において、動圧として津波が作用する領域は $0 \leq z/\eta_{\max} \leq 1$ である。朝倉らによる実験結果の解釈とは若干異なるが、本実験結果においては、式 (5) で与えられる実線は、壁面に衝突して上方に打ち上げられた水塊による静水圧、式 (4) で与えられる破線は、動圧が卓越する場合

図-5 直立壁に作用する波圧の時間変化

図-6 直立壁に作用する最大作用の鉛直分布

における波圧の割り増し分と理解する方が妥当であると判断される。そこで、運動量を持った遡上津波が壁面に衝突する $0 \leq z/\eta_{\max} \leq 1$ の領域において、動圧成分 $\rho u_{\max}^2/2$ を減算した上で算出した無次元波圧の鉛直分布を図-6 (b) に示す。この図より、動圧成分を除いた波圧の鉛直分布は、静水圧が示す曲線とほぼ一致していることがわかる。これより、 $0 \leq z/\eta_{\max} \leq 1$ の領域では、津波の水平流速によって与えられる動圧と、その流れによって生じる静水圧の和として波圧を捉えることが、合理性の高い波圧の評価手法と考えられ、本研究では下記の評価式を提案する。

$$\frac{p_{\max}(z)}{\rho g \eta_{\max}} = \left(1 - \frac{z}{\eta_{\max}} \right) + \frac{u_{\max}^2}{2 g \eta_{\max}} \quad (0 \leq z/\eta_{\max} \leq 1) \quad (6)$$

$$\frac{p_{\max}(z)}{\rho g \eta_{\max}} = 3 \left(1 - \frac{z}{3 \eta_{\max}} \right) \quad (1 < z/\eta_{\max} \leq 3) \dots\dots\dots (7)$$

(2) 水平板を設置した直立壁への作用波圧

水理模型実験における、水平板を設置した直立壁に作用する最大波圧の鉛直分布を図-7 に示す。ここでは、水平板の設置高さ H_p と張り出し長さ L_p との比をもとにデータを整理し、(a) $L_p/H_p = 0.2$ のケースと (b) $L_p/H_p = 0.4$ のケースについて表示した。図中、横軸および縦軸の表記は、図-6 と同様である。

図-6 (a) および図-7 を比較すると、水平板の設置により、壁面に作用する波圧は増大していることがわかる。これは、水平板によって行き場を失った流れが、上流側に押し返される際に、壁面が受けた力積によるものである。このとき、壁面が受けた最大波圧は以下の式に相当した。

(a) $L_p/H_p = 0.2$

(b) $L_p/H_p = 0.4$

図-7 水平板を設置した直立壁に作用する最大作用の鉛直分布

$$\frac{p_{\max}(z)}{\rho g \eta_{\max}} = 5.4 \left(1 - \frac{z}{5.4 \eta_{\max}} \right) \dots\dots\dots (8)$$

式(8)は、式(4)で与えられる最大波圧 $p_{\max}(z=0)/\rho g \eta_{\max} = 5.4$ を基準とし、高さに応じて静圧成分を減じたものである。

(3) 水平板下面への作用波圧

水平板下面に作用する波圧は、壁面に衝突した流れの鉛直上向き成分に起因する動圧によるものであり、完全に没水した状態を除いて静水圧は生じない。しかし、実験では鉛直流速 v を計測していないため、まず、数値解析結果より作用波圧の評価を行う。数値解析より得られた水平板下面に作用する最大波圧の水平分布を図-8に示す。図中、横軸は水平板の設置高さ H_p で除した壁面からの距離、縦軸は流体の密度 ρ および最大鉛直流速 $v_{\max}$ で無次元化した波圧を示し、(a) $L_p/H_p = 0.4$ のケースと (b) $L_p/H_p = 0.8$ のケースについて表示した。また、鉛直流速は、補助格子直下（水平板より約2cm下方）の主格子上で出力したものである。図-8より、水平板下面に作用する最大波圧は概ね1前後であり、最大鉛直流速に起因する動圧と一致していることがわかる。また、水平板の先端ほど、作用する波圧が若干減少する傾向はみられるものの、本解析の条件の範囲では、ほぼ一様に近い圧力が作用した。

次に、入射する遡上津波の水平流速と壁面に衝突して打ち上げられた鉛直流速との関係について比較する。図-9に、流れが壁面に衝突した直後の流速ベクトルの平面分布の一例、図-10に、入射波高を数通りに変えて行った数値解析による最大水平流速と最大鉛直流速の関係を示す。ここで、数値解析における水平流速とは、模型実験とはほぼ同じ水平位置において出力したものである。また、図-9に表示した各検査断面における水平流速および鉛直流速の時間変化を図-11に示す。図-11より、水平流速の最大値は高さに依存せずほぼ一定であるのに対して、鉛直流速は速度勾配を有しており、壁面に近い位置で流速が速いことがわかる。また、壁面の下端付近では渦が発生している様子が確認できる。図-10の解析結果を累乗曲線により近似すると、 $v_{\max} = 0.399 u_{\max}^{1.98}$ の関係が得られる。この関係式を利用して、模型実験より得られた水平流速を鉛直流速へと変換し、この鉛直流速を用いて無次元化した水平板下面に作用する最大波圧の水平分布を図-12に示す。この図より、実験結果にはばらつきがみられるものの、水平板下面に作用する波圧は、1前後あるいは1以下に分布しているといえる。これらの結果より、壁面に設けられた水平板下面に作用する最大波圧は、概ね $p_{\max}/\rho v_{\max}^2 \leq 1$ であると推測できる。

5. おわりに

陸域を遡上する津波が直立壁および直立壁に設置され

図-8 数値解析より得られた水平板下面への作用最大波圧

図-9 流速分布の一例 図-10 水平および鉛直流速の関係

図-11 水平流速（左）および鉛直流速（右）の時間変化

図-12 最大鉛直流速を用いて整理した水平板下面に作用する最大波圧の水平分布

た水平板におよぼす波圧特性を明らかにするため、水理模型実験および数値流体解析を実施した。これらの結果、遡上津波の高さに加えて流速を用いることで、従来の評価式と比較してより高い合理性のもとに、構造物に作用する波圧を評価できることが確認された。

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・大森政則（2000）：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，Vol. 47，No. 2，pp. 911-915.
- 木村雄一郎・柳 浩敏・森西晃嗣・森 信人・安田誠宏・間瀬肇（2010）：重合格子法を用いた流体-構造物連成モデルによるフラップゲートの波浪応答解析，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.66，No. 2，pp. 811-815.
- 丹野 格・森西晃嗣・松野謙一・西田秀利（2004）：仮想的な流速を用いた直交格子系での任意物体周りの計算，日本機械学会論文集，第70巻，pp.9-16.