開口影響を考慮した陸上構造物に作用する津波持続荷重の評価方法

Hydraulic Model of Sustained Tsunami Wave Pressure Acting on Land Structures Considering Openings in Walls

池谷 毅¹・岩前伸幸²・秋山義信³・福山貴子³

末長清也³・鈴木紀雄⁴・館野公一⁵

Tsuyoshi IKEYA, Nobuyuki IWAMAE, Yoshinobu AKIYAMA, Takako FUKUYAMA
Seiya SUENAGA, Norio SUZUKI and Tomokazu TATENÔ

Evaluation method of tsunami wave pressure acting on land structures and buildings has been reviewed after the Tohoku earthquake. In this study, a new mathematical model which evaluates tsunami wave pressure acting on land structures considering hydraulic effects of the over flow and the flow through openings in walls is proposed. By comparing wave pressure computed by mathematical model with those measured by hydraulic model tests and numerical experiments, it was found out that the present model gives rough order of estimate of tsunami sustained wave pressure. In order to make more accurate evaluation, hydraulic resistance of the flow through the openings should be modeled considering the shape and distribution of openings and resistive elements.

1. はじめに

東日本大震災を受け、陸上構造物に作用する津波荷重の評価方法の見直しが行われている。池谷ら (2013) は、陸上構造物に作用する津波持続波圧について、簡便な理論モデルを提案し、提案したモデルにより従来の水理実験や数値解析の結果を良好に再現できることを示した。しかしながら、池谷ら (2013) では構造物内部を通過する流れはモデル化されておらず、開口を有する構造物に対して直接適用することはできない。

本研究では、越流と開口影響を適切に評価することを目的とし、池谷ら (2013) の理論モデルを拡張する。また、開口を有する無限幅構造物を対象とした数値解析・水理実験の結果との比較により、拡張された理論モデルを検証する。

2. 構造物に作用する津波持続荷重評価モデルの拡張

(1) 連続式と運動量保存則

池谷ら (2013) では、図-1に示すように水平陸地上の構造物に作用する津波の持続波力を対象として、解析的な検討をしている。津波の陸上構造物への作用を段波としてモデル化して、圧力が静水圧分布に従うことを仮定して、入射波条件に相当する断面①と構造物からの反射波を含む断面②との間の連続式と運動量保存則を基礎方

程式としている。

$$V_1 h_1 - V_2 h_2 = -c(h_2 - h_1) \dots \dots \dots (1)$$

$$(g/2)(h_2^2 - h_1^2) + h_2(V_2 - c)(V_2 - V_1) = 0 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 h_1 、 h_2 ：断面①、断面②における浸水深、 V_1 、 V_2 ：断面①、断面②における断面平均流速、 c ：段波の波速である。式 (1)、式 (2) より、断面①、断面②の水深の比 h_2/h_1 を求める式と段波の波速 c を求める式を得る。

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3 - \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 - \left(\frac{h_2}{h_1}\right) \left[1 + 2Fr_1^2 \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right)^2\right] + 1 = 0 \dots \dots \dots (3)$$

$$c = V_1 \pm \sqrt{gh_1 \left[\frac{1}{2} \frac{h_2}{h_1} \left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right) \right]^2} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 Fr_1 ：断面①におけるフルード数である。

池谷ら (2013) では、2次元壁状構造物に対しては、 $V_2=0$ 、3次元構造物に対しては $c=0$ が表すとして解を求めた。ここでは、透過構造を扱うことから、流量の観点からこの条件を再考する。入射波の単位幅流量として

図-1 記号の定義

1 フェロー	工博	鹿島建設(株)技術研究所主席研究員
2 正会員	理博	鹿島建設(株)技術研究所土木構造Gr
3 正会員	工修	鹿島建設(株)技術研究所土木構造Gr
4	工博	鹿島建設(株)技術研究所副所長
5	工修	鹿島建設(株)建築設計本部

$q_1=V_1h_1$ 、断面②における流量（通過流量と呼ぶ）を $q_2=V_2h_2$ とすれば、 $V_2=0$ の条件は、 $q_2=0$ と考えられる。これは、入射波の流量は全量反射されていることを示す。また、 $c=0$ の条件は、式 (1) より、 $q_2=q_1$ と考えられる。これは、入射波の流量の全量が通過することを意味する。

(2) 不通過の場合の解

$q_2=0$ に対する h_2/h_1 の解は、式 (3) において $V_2/V_1=0$ とし、池谷ら (2013) から、次式となる。

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{3} + \frac{4}{3} \sqrt{1 + \frac{3}{2} Fr_1^2} \cos\left(\frac{\alpha}{3} - \frac{\pi}{3}\right) \quad \dots\dots\dots (5.a)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{1 - Fr_1^2/8}{(1 + 3Fr_1^2/2)^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (5.b)$$

この関数の勾配は、 $Fr_1 \rightarrow \infty$ において $\sqrt{2}$ になることから、式 (5) は、次式にて安全側に近似される。

$$h_2/h_1 = 1 + \sqrt{2} Fr_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

(3) 全通過の場合の解

一方、全通過の場合は、 $V_1h_1 = V_2h_2$ となるので、

$$V_2/V_1 = h_1/h_2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

式 (7) を式 (3) に代入して整理すれば、次式を得る。

$$\left(\frac{h_2}{h_1} - 1\right)^2 \left[\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 + \frac{h_2}{h_1} - 2Fr_1^2 \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

これより、 $h_2/h_1 \geq 1$ の解として、次式を得る。

$$\frac{h_2}{h_1} = \begin{cases} 1 & Fr_1 < 1 \\ -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8Fr_1^2} & 1 \leq Fr_1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式 (5)、(6)、(9) の関係を図-2 に示す。構造物を通過する流量が存在する場合は、式 (5) と式 (9) の間に分布することになると考えられる。構造物を通過する際のメカニズムを考慮して透過流量をモデル化することにより、 h_2/h_1 を正しく評価することが可能となる。

図-2 全反射と全通過の場合の h_2/h_1 と Fr_1 との関係

(4) 通過流量のモデル化

通過流の発生メカニズムとしては、有限幅の構造物の側方を水が流下する場合に加えて、構造物の上方を通過する越流、構造物の内部を通過する透過流、越流と透過流の同時発生が考えられる。

a) 越流のモデル化

越流の場合（図-3参照）、池谷ら (2013) と同様に完全越流の場合を考え、越流流速 $v(z)$ として、次式を仮定する。

$$v(z) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z < h_w \\ C_{OF} \sqrt{2g(h_2 - z)} & h_w \leq z < h_2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 h_w ：構造物の高さ、 C_{OF} ：越流係数である。越流係数としては、簡便のため、林 (1996) の提示した次式を用いる。

$$C_{OF} = 0.611 + 0.075 \left(\frac{h_2 - h_w}{h_w} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

断面②における断面平均流速 V_2 は、定義式

$$V_2 = \frac{1}{h_2} \int_0^{h_2} v(z) dz \quad \dots\dots\dots (12)$$

より、次式の通り求まる。

$$\frac{V_2}{V_1} = \begin{cases} 0 & h_2/h_w < 1 \\ \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{C_{OF}}{Fr_1} \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h_w}{h_1} \right)^{3/2} & 1 \leq h_2/h_w \end{cases} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式 (13) を式 (3) に代入して、数値解を求めれば、越流を考慮した h_2/h_1 を求めることができる。

b) 透過流のモデル化

構造物の内部を通過する透過流の場合、構造物の前面と背面の水位差が流水抵抗と釣り合うと考える。開口や透過流路の大きさ、形状、分布により大きく変化することが予想される。ここでは、最も単純に開口率 λ のような直線管が多数重なったモデル（図-4参照）を考え、抵抗を入口の損失と抗力型の抵抗の和と仮定した。このとき、通過流速 $v(z)$ は、

$$v(z) = \begin{cases} \sqrt{2g(h_2 - h_o)} / \sqrt{K_e + K_D} & 0 \leq z < h_o \\ \sqrt{2g(h_2 - z)} / \sqrt{K_e + K_D} & h_o \leq z < h_2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (14)$$

図-3 越流を含む流れの模式図

図-4 透過流を含む流れの模式図

図-5 越流と透過流を含む流れの模式図

ただし、 K_e : 入口の損失係数、 K_D : 抵抗係数である。なお、 h_o : 背面での浸水深であり、ここでの算出方法は後述する。入口の損失係数は、次式で求めた。

$$K_e = 1 - C_c^2 \lambda^2 \quad (15)$$

ただし、 C_c : 縮流係数、 λ : 面積開口率 (開口面積/壁面積) である。縮流係数については、フォン・ミーゼスの係数 (例えば、林, 1996) を用いることとした。

断面②における平均流速 V_2 は面積透過率 λ を考慮して

$$V_2 = \frac{\lambda}{h_2} \int_0^{h_2} v(z) dz \quad (16)$$

となるので、 V_2/V_1 は以下の式となる。

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\sqrt{2}\lambda}{Fr_1 \sqrt{K_e + K_D}} \frac{h_1}{h_2} \left[\frac{h_o}{h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h_o}{h_1} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3} \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h_o}{h_1} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (17)$$

式 (17) を式 (3) に代入して、 h_2/h_1 を得る。

c) 越流と透過が同時に生ずる場合のモデル化

越流と透過が同時に発生する場合 (図-5参照) の流量は、上記の2ケースを組み合わせる以下の通りとする。

$$v(z) = \begin{cases} \sqrt{2g(h_2 - h_o)} / \sqrt{K_e + K_D} & 0 \leq z < h_o \\ \sqrt{2g(h_2 - z)} / \sqrt{K_e + K_D} & h_o \leq z < h_w \\ C_{OF} \sqrt{2g(h_2 - z)} & h_w \leq z < h_2 \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{2\sqrt{2} C_{OF} h_1}{3 Fr_1 h_2} \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h_w}{h_1} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{\sqrt{2}\lambda}{Fr_1 \sqrt{K_e + K_D}} \frac{h_1}{h_2} \left[\frac{h_o}{h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h_o}{h_1} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3} \left\{ \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h_o}{h_1} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h_w}{h_1} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \right] \quad (19)$$

(5) 構造物背面の水深の設定

構造物を水流が通過する場合、構造物背面の水深 h_o が流動に影響を及ぼす場合がある。この水深は、背面の地形、構造物の条件により大きく変化するため、入射波条件だけでは決められるものではない。本論文では、主に通過流の影響を水理実験結果や数値波動水路の解析結果を通じて確認するので、下流側に自由越流の条件を想定して、

$$Fr_o = v_o / \sqrt{gh_o} = q_2 / \sqrt{gh_o^3} = 1 \quad (20)$$

を与えた。すなわち、

$$\frac{h_o}{h_1} = \sqrt[3]{\frac{q_2^2}{gh_1^3}} = \sqrt[3]{Fr_1^2 \left(\frac{V_2 h_2}{V_1 h_1} \right)^2} = Fr_1^{\frac{2}{3}} \left(\frac{V_2 h_2}{V_1 h_1} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (21)$$

(6) 構造物に作用する波力

構造物を水流が透過する場合に構造物に作用する波力は、構造外壁に作用する圧力と構造内部の抵抗力 F_D の和として以下の通り仮定する。

$$F_x = \begin{cases} \frac{1-\lambda}{2} \rho g B [h_3^2 - h_o^2] + F_D & h_2 < h_w \\ \frac{1-\lambda}{2} \rho g B [h_3^2 - (h_3 - h_w)^2 - h_o^2] + F_D & h_w \leq h_2 \end{cases} \quad (22)$$

$$h_3 = h_2 + V_2^2 / (2g) \quad (23)$$

$$F_D = (1/2) \rho K_D V_2^2 A_w \quad (24)$$

ここに、 h_3 : 地表から計った淀み点における圧力水頭、 B : 構造物の幅、 A_w : 流水断面積である。この方法では、構造物前面では、全面で淀み点における圧力が作用している点で安全側となる。

3. モデルと実験解析との比較

(1) 直立堤体を越流する場合の検証

越流モデルを確認するために、陸上の防油堤に作用する波圧に関する数値解析結果 (総務省消防庁, 2009) と本モデルを比較する。総務省消防庁 (2009) では、防油堤に作用する最大波圧 (防油堤底面での波圧) $P_{\max}$ を、最大浸水深 $\eta_{\max}$ を用いて次式で示されたとした。

$$P_{\max} = (1 + \alpha_d) \rho g \eta_{\max} \quad (25)$$

ここに、 α_d : 動圧係数であり、最大浸水深 $\eta_{\max}$ と防油堤の高さ h_c の関数である。防油堤高さが ∞ の (越流しない) ときの動圧係数を $\alpha_d(\infty)$ として、越流に伴う動圧係数の低減率 $\alpha_d / \alpha_d(\infty)$ を、数値波動水路による解析結果をもとに、次の実験式で与えている。

$$\frac{\alpha_d}{\alpha_d(\infty)} = \begin{cases} -0.346 \left(\frac{h_c}{\eta_{\max}} \right)^2 + 1.176 \left(\frac{h_c}{\eta_{\max}} \right) & \left(\frac{h_c}{\eta_{\max}} \leq 1.7 \right) \\ 1.0 & \left(\frac{h_c}{\eta_{\max}} > 1.7 \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (26)$$

本論文の記号でかけば、

$$\alpha_d = h_2/h_1 - 1, \quad h_c/\eta_{\max} = h_w/h_2$$

図-6 越流する防油堤に作用する波圧

図-7 無限幅建物に対する透過流の影響

図-8 有限幅建物に対する透過流の影響

となる。図-6に本モデルで解析された低減率、提案式(26)、数値実験結果を示す。本モデルの解析結果と、数値実験結果との対応は良好であり、津波が堤体を越流することにより堤体前面の水深が低下し、作用波力が頭打ちになることを示している。

(2) 開口を有する構造物に対する検証

透過流量に関するモデルを検証するために、陸上構造物に作用する津波波力の水理模型実験結果(岩前ら, 2014a)と比較する。この実験では、無限幅(壁体)の開口有(λ=0.468)、開口無、有限幅(柱体)の開口有、開口無の4種類の6階建ての建物を模した模型に対して、波圧・波力を計測している。

図-7に、無限幅の開口無しの建物を想定した通過流量 $q_2=0$ 、及び開口率λ=0.468、 $K_D=0$ として算出した h_2/h_1 、 h_3/h_1 を、実験データとともに示す。これを見ると開口無しの実験データは、無透過を示す実線に、開口有の実験データは、λ=0.468として計算した h_3/h_1 と良く一致する。すなわち、開口が存在することにより、水深係数 h_3/h_1 が低減することがわかる。

一方、図-8に有限幅の建物を対象として、全通過の場合の h_2/h_1 、 h_3/h_1 を示す。有限幅の場合では、開口無しの場合と開口有の水深係数には差がほとんどみられない。有限幅の場合には、開口が無くても通過流量が入射流量に近く、開口の存在が通過流量に影響を与えないため、 h_2/h_1 、 h_3/h_1 がほとんど変化しないと思われる。

図-9 解析の対象とした無限幅の建物

表-1 解析対象の建築物の開口率

名称	A	面積開口率λ
Open15	0.450m	11.8%
Open30	0.900m	23.7%
Open45	1.350m	35.5%

図-10 越流と透過流を含む場合の波圧低減

図-11 通過流の存在する場合の波力と遮蔽率との関係

ただし、開口を有する構造部に作用する波力は、作用面積が $1-\lambda$ 倍に小さくなるので、開口が無い場合に比べ小さくなる。

(3) 越流と透過がともにある場合の検証

越流と透過がともにある場合としては、図-9に示すパターンが繰り返し連続している無限幅建物モデルに対して、数値波動水槽CADMAS-SURF/3D (有川ら, 2007)により3次元数値解を求め、この結果と本モデルとを比較した。解析対象は、表-1に示す開口率を有する3種の開口有建物と無開口建物の4種類である。建物を、垂直護岸から150m後方に配置し、解析に用いたメッシュは Δx :護岸付近で2.5m, 建築物周辺0.5m, Δy :0.25m (一律), Δz :0.216m~0.25mとなっている。水路内の全幅にわたり建物を設置し無限幅構造物としている。入射波の津波高は沖合で10m, 継続時間は600秒とした。入射波の条件作成は岩前ら (2014b) に従った。

図-10に、3次元数値解析結果とモデル解析から得られた h_3/h_1 と Fr_1 との関係を比較して示す。解析ケース数が限定されているため、全体的な傾向を論ずことはできない

が、越流及び透過流の存在による水深係数 h_3/h_1 の低減状況を再現している。また、図-11に幅3mにかかる水平波力 F_x と遮蔽率 $(=1-\lambda)$ との関係を求めた。解析結果とモデル解析値ともに、開口率にほぼ比例して低下する傾向を示している。しかしながら、点数が限定されており、本モデルの適用性を考察するにはデータ不足である。特に、開口の形状、配置、建物内部の遮蔽物の抵抗が、波力に与える影響の解明などは、今後の検討課題である。

4. おわりに

本論文では、陸上構造物作用する津波持続波圧を評価する水理モデル (池谷ら, 2013) を越流や透過流による通過流量がある場合にも適用できるよう拡張した。拡張されたモデルによる解析結果を、水理模型実験結果、数値解析結果と比較し、有効性を確認した。しかし、透過流のモデルについては、開口、抵抗体の形状により波圧が影響を受けるため、今後より汎用性のあるモデル化が必要である。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省平成25年度建築基準法整備促進事業「S-3津波避難ビルの構造基準の合理化に資する検討 (研究代表者：中埜良昭)」において、(独) 建築研究所との共同研究として実施したものである。研究の遂行にあたっては、「津波避難ビルの構造基準の合理化検討委員会」東京大学生産技術研究所・中埜良昭所長、防衛大学校・藤間功司教授、港湾空港技術研究所・有川太郎上席研究官、国土交通省国土技術政策総合研究所・奥田泰雄建築災害対策研究官をはじめとした各位より貴重な意見をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 有川太郎・山野貴司・秋山 実 (2007)：数値波動水槽における碎波変形計算の高度化，海岸工学論文集，第54巻，pp.71-75.
- 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.1.816-1.820.
- 岩前伸幸・秋山義信・池谷 毅・鈴木紀雄・館野公一 (2014a)：開口を有する建築物に作用する津波荷重，土木学会論文集B2 (海岸工学)，投稿中。
- 岩前伸幸・池谷 毅・秋山義信・末長清也・鈴木紀雄・館野公一 (2014b)：開口を有する建築物のポーラスメディアによるモデル化，土木学会論文集B2 (海岸工学)，投稿中。
- 総務省消防庁 (2009)：危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書，pp. 300-301.
- 林 泰造 (1996)：基礎水理学，鹿島出版会，pp. 98-111.