

斜面上の建築物位置における津波遡上時と遡下時の水深，流速と抗力

秋田大学 学生員○梅野元輝 正員 松富英夫

1. はじめに 2011 年の東日本大震災では建築物の甚大な津波被害が発生し，2015 年 2 月出版の建築物荷重指針に津波荷重の章が追加された．指針によると，津波氾濫時の建築物に作用する流れ方向の力は，先端部衝突時を除けば抗力が支配的であるとされている．抗力は流れ方向に作用する力であり，入射津波の流速と浸水深に依存する．

本研究は津波が一様勾配斜面上を段波として汀線まで伝播し，遡上・遡下する場合の建築物への入射水深，流速と抗力の評価例を非線形長波理論解の一つである Peregrine らの式¹⁾を用いて示す．

2. 各数値の算出方法 抗力は構造物に作用する流れ方向の力であり，圧力と摩擦力からなる．構造物に作用する流れ方向の力は抗力が支配的であると指摘されている²⁾．一様勾配斜面上（水平面となす角 θ ）を段波として汀線まで伝播し，遡上する場合に建築物へ作用する抗力 F_D (kN) は，式(1)で評価される³⁾．

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 h_i B \quad (1)$$

ここで， C_D ：抗力係数（本研究では 2.1 を用いる） v ：津波の流速 (m/s)， h_i ：入射津波の水深 (m)， B ：建築物幅 (m)， ρ ：海水の密度 (t/m^3) である．本研究においては海水の密度を $\rho=1.03 \text{ t/m}^3$ とし，一般性を考えて建築物幅を $B=1 \text{ m}$ として評価する．

式(1)を用いて抗力を計算するために必要となる流速と水深を求める Peregrine らの式を以下に示す．

$$h_i = \frac{1}{36gt^2 \cos \theta} (2t\sqrt{2gR} - gt^2 \sin \theta - 2x)^2 \quad (2)$$

$$v = \frac{1}{3t} (t\sqrt{2gR} - 2gt^2 \sin \theta + 2x) \quad (3)$$

上式から，時刻 t (s) をパラメータとして，陸域の任意点 x (m) における浸水深 h_i (m) とそのときの流速 v (m/s) が評価できる．ここで， x 軸は一様勾配斜面に沿い，汀線が原点，陸側が正で， $0 \leq x \leq R/\sin \theta$ ， R は遡上高 (m)， θ は斜面勾配 ($^\circ$)， g は重力加速度 (m/s^2) である．

式(4)は，式(2)が最大水深 h_{im} (m) となるときの時刻 t' (s) を示す新たに導出した式である．

$$t' = \sqrt{\frac{2x}{g \sin \theta}} \quad (4)$$

ハザードマップなどから斜面勾配 θ ，最大水深 h_{im} (m) とその陸域位置 x (m) が与えられると，式(2)と(4)より遡上高 R (m) が評価でき，式(3)と(4)より遡上高 R から流速 v (m/s) が算定できる．

本研究では，津波条件として斜面勾配 θ ，遡上高 R を設定し，遡上域を 200 分割し，それぞれ測点 1, 2, ..., 200 として各測点 x での水深 h_i とそのときの流速 v を求め，各点での抗力 F_D を評価する (図-1 参照)．Peregrine らの式は，汀線に到達した津波の水面には傾斜（斜面に平行）があるとした場合に対するものである⁴⁾．斜面は一様勾配で，斜面における摩擦は考慮していない．

式(2)を $h_i=0$ となる場合の時刻 t について解くと 2 つの解が得られる．この 2 つの解を値の小さい順に浸水開始時刻 t_1 (s)，浸水終了時刻 t_2 (s) とし， t_1 と t_2 の間にその測点が浸水しているとして計算を行った．

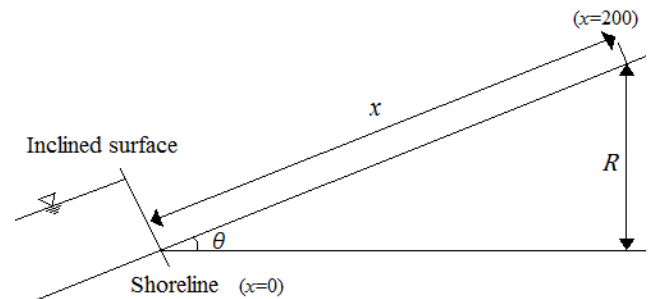


図-1 津波氾濫条件のイメージ図

3. 結果と考察 斜面勾配 $\theta=5^\circ$ ，遡上高 $R=20 \text{ m}$ という条件を設定して式(1)～(4)に適用したところ，表-1 に示すような結果が得られた．

次に式(2)を用いて描いた各測点での水深 h_i の時間変化を図-2 に示す．図から，汀線に近いほど最大水深は大きくなり，浸水開始時刻から浸水終了時刻の間の前半までに最大水深 h_{im} となる時刻 t' が存在することが読み取れる．

式(3)を用いて描いた各測点での流速 v の時間変化を図-3 に示す．各測点での浸水開始時と浸水終了時の流速は，向きは逆であるが絶対値は等しい値となることが読み取れる．

式(3)では $t \geq 0$ の範囲において $v=0$ となる時刻 t の解が 1 つ得られ，その時刻を境に流速は正から負の値に変化する．これは津波が押し波から引き波に変化する瞬間の時刻であることを表す．

表-1 津波設定条件に対する計算結果

測点	1	50	100	150
浸水開始時刻 t_1 (s)	0.058	3.11	6.79	11.59
浸水終了時刻 t_2 (s)	46.3	43.3	39.6	34.8
最大水深 h_{im} (m)	3.85	1.115	0.383	0.08
最大水深時の流速 v' (m/s)	6.13	3.17	1.933	0.884
最大水深時の時刻 t' (s)	1.639	11.59	16.39	20.07
最大水深時の抗力 F_D (kN/m)	156.7	12.15	1.547	0.068
押し波時の最大抗力 F_{D1} (kN/m)	250.4	66.5	14.89	1.479
引き波時の最大抗力 F_{D2} (kN/m)	-65.4	-27.7	-7.81	-0.977

※引き波時の抗力は流速の向きが押し波時と逆となるため，負の値で示した

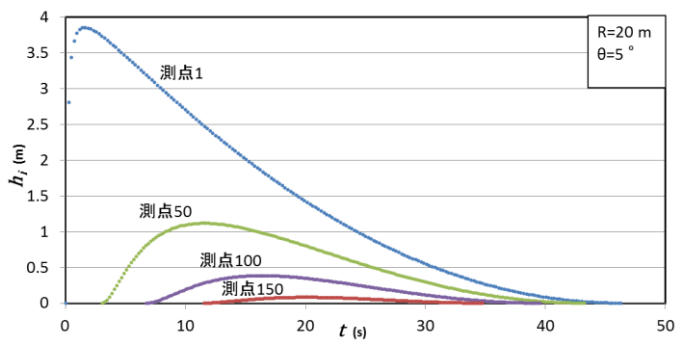


図-2 各測点での水深 h_i の時間変化

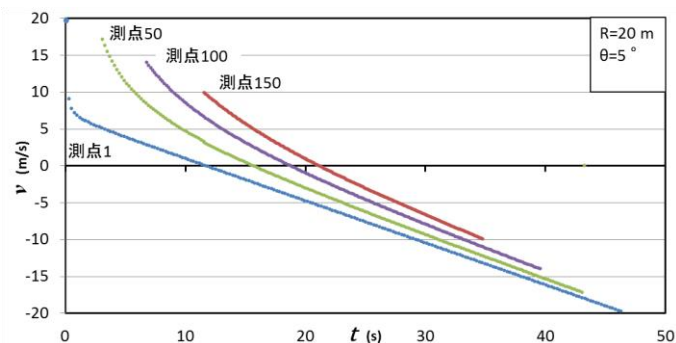


図-3 各測点での流速 v の時間変化

表-2 $v=0$ となる時刻とその時の津波先端位置

測点	1	50	100	150
押し波から引き波に変化する時刻 (s)	11.7	15.83	18.75	21.13
この時刻での津波先端部位置 (測点)	150	179	192	199

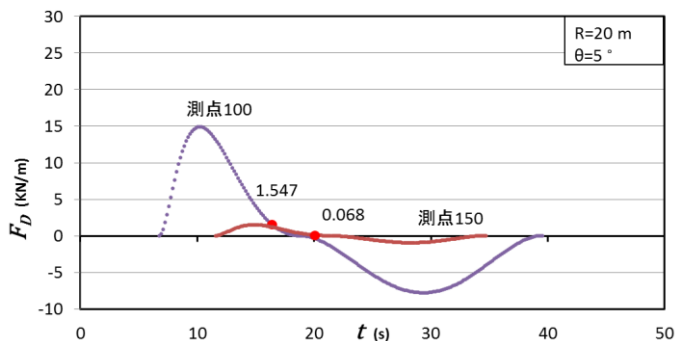
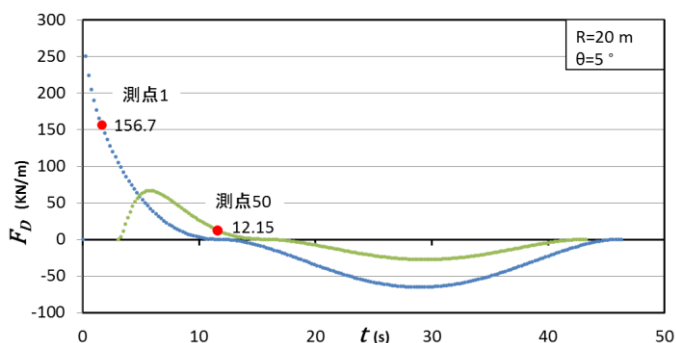


図-4 各測点での抗力 F_D の時間変化

表-3 押し波時の最大抗力値に対する引き波時の最大抗力値の比

測点	1	50	100	150
引き波時の抗力最大値/押し波時の抗力最大値	0.261	0.417	0.525	0.661

各測点で押し波から引き波に変化する時刻と、その時刻での津波先端位置の関係を表-2 に示す。津波が斜面を遡上し始めてある程度時間が経過すると、津波先端部は遡上を続けるにも関わらず汀線側から津波が引き始めることが確認できる。

さらに、式(2)と(3)から得られた水深 h_i と流速 v の値を式(4)に代入して描いた各測点での抗力 F_D の時間変化を図-4 に示す(大きめの点は最大水深時の抗力を表す)。押し波時と引き波時では流速の正負が逆転するため、押し波時は上に凸、引き波時は下に凸の形状となる。図-4 から、押し波時の抗力は引き波時の抗力より大きな値となることが読み取れる。表-1 や図-4 に示されるように最大水深時に抗力が最大値とならないのは、抗力 F_D を求める式(4)が流速 v の2乗に依存していることが大きな要因である。また、汀線側ほど、引き波時の抗力に比べて押し波時の抗力が大きな値をとり、表-3 に示すように汀線から遠ざかるほど引き波時と押し波時の抗力の比が大きな値となっている。

また、フルード数 F_r を式(5)によって求めてみる。

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh_i}} \quad (5)$$

式(2)～(4)より、各測点で最大水深 h_{im} をとる時のフルード数として式(6)が導かれる。

$$F_r = \sqrt{\cos \theta} \quad (6)$$

式(5)と(6)から次に示すような最大水深 h_{im} の時の流速 v' の関係式として式(7)が導かれる。

$$v' = \sqrt{gh_{im} \cos \theta} \quad (7)$$

最大水深時の流速 v' は、最大水深 h_{im} と斜面勾配 θ の値を与えれば式(7)から計算できることになる。

4. おわりに 摩擦を考慮しない一様勾配斜面という条件下で Peregrine らの式を用いて津波遡上時と遡下時の水深、流速と抗力について評価例を示した。最大水深となるときに抗力も最大値となるとは限らないことを示した。また、Peregrine らの式とフルード数の定義式から、最大水深時の流速を求める式を導いた。

建築物荷重指針第10章「津波荷重」では、「押し波状況下で最大浸水深が形成される範囲は汀線から遡上域の45%程度までで、これより奥域部では引き波状況下で最大浸水深が形成される」と記述されているが、本研究で再計算したところ、最大浸水深が形成される領域は遡上域の全範囲に及ぶことが確認された。

参考文献

- 1) D. H. Peregrine and S. M. Williams: Swash overtopping a truncated plane beach, JFM, Vol.440, pp.391-399, 2001.
- 2) 松富英夫：砕波段波衝突時の圧力分布と全波力，海岸工学論文集，第38巻，pp.626-630, 1991.
- 3) 日本建築学会：建築物荷重指針 10章「津波荷重」，pp.563-581, 2015.
- 4) H. Matsutomi: Dam-break flow over a uniformly sloping bottom, J. Hydraul., Coast. Environ. Eng., JSCE, No.726, II-62, pp.151-156, 2003.