

1. はじめに 2004 年インド洋津波のとき、漂流物を伴う氾濫流とその衝突力が話題となった¹⁾。町中を氾濫する津波は多かれ少なかれ雑多な漂流物を伴い、その中で大きな流木や船、車、コンテナ等が建物などに大被害を与えることになる。

これまでの研究成果により、衝突速度が判れば、単体の流木^{2),3)}やコンテナ⁴⁾の衝突力 F_m は評価可能である。漂流物の衝突力問題では、衝突速度はもちろんのこと、衝突確率や衝突力立ち上がり時間 Δt_p 、衝突力継続時間 Δt 、衝突力確率などの検討も必要である。これらについては個別に検討が行われてきており、互いを関連づけて論じたものはない。

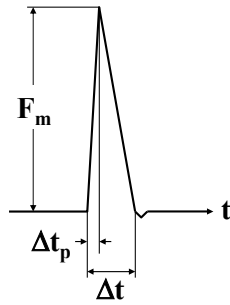


図-1 衝突力波形

そこで、本研究はこれらの項目を互に関連づけて漂流物の衝突力評価を総合的に試論するとともに、各項目における検討課題も論じることとする。

2. 試論 **2.1 衝突速度** 衝突力 F_m は衝突速度に依存する²⁾。漂流物の衝突速度として、式(1)と(2)の漂流物を伴う氾濫流の流速 u_2 を採用する⁵⁾。町中の津波氾濫流は漂流物を伴う場合が一般的で、初期の漂流物群間の空隙率 e が現実的な値であれば、これらの式は有用であることが確認されている⁶⁾。

$$u_2 = \frac{\left[\left\{ \left(\frac{\rho}{\rho_0} - \frac{\rho_f}{\rho_0} \right) e + \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{h_2}{h_0} - 1 \right) \right\} \omega + \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_f}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} u_0 \right]}{\left[\left\{ 1 + \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} + \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{h_2}{h_0} - 1 \right) \right]} \quad (1)$$

$$\omega = u_0 + \sqrt{\frac{g \left[\left\{ \frac{\rho_0}{\rho} + \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) e \right\} h_0 + h_2 - h_0 \right]}{\left\{ 1 + \left(\frac{\rho_f}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} \left\{ \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho} \right) e + \frac{h_2}{h_0} - 1 \right\}}} \times \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{h_2}{h_0} - 1 \right)^2 + \left\{ 1 + \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} \frac{h_2}{h_0}} - \frac{1}{2} \left\{ 2(1-e) + \left(\frac{\rho}{\rho_0} + \frac{\rho_f}{\rho_0} \right) e \right\} - \mu \frac{\rho_a}{\rho_0} \frac{L}{h_0} \frac{h_2}{h_0}} \quad (2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 ρ_0 は漂流物の密度、 ρ_f は

氾濫流下流域の漂流物群空隙部の密度（空気の場合は零）、 h_2 は氾濫流上流域の水深（氾濫水深）、 h_0 は氾濫流上・下流域の漂流物層の厚さ、 ω は氾濫伝播速度、 u_0 は氾濫流下流域の流速（一般に零）、 g は重力加速度、 μ は合成摩擦係数、 ρ_a ($=\rho_0 \sim \rho$) と L は各々氾濫流先端部の漂流物層の密度と長さである。この氾濫流速 u_2 の評価では、個々の μ 、 ρ_a 、 L の評価も重要な課題であるが、総合抵抗係数 $\mu \rho_a L / \rho_0 h_0$ の評価がより重要な課題である。

漂流物が氾濫流に影響を及ぼさないときは、次式を用いて評価することも考えられる⁷⁾。

$$u_2 = 1.1 \sqrt{gh_f} \quad (3)$$

$$u_2 = 2.0 \sqrt{gh_r} \quad (4)$$

ここで、 h_f と h_r は氾濫域の建物などに流れが作用する面（前面）とその背面での氾濫浸水深で、式(3)と(4)の氾濫流速は危険側を考えたときのものである。

2.2 衝突確率 漂流物の衝突では、単体の衝突ばかりでなく、複数が同時やほぼ同時衝突するときも考えておく必要がある。複数が同時やほぼ同時衝突するときは、より大きな衝突力が働き（図-3）、衝突力ばかりでなく、衝突確率の検討も欠かせない。

流木であるが、衝突確率の研究例として松富ら⁸⁾の実験的なものがある。その実験結果によれば、流れ横断方向（ y 方向）への流木の拡散位置に関する頻度分布 $f(x, y)$ は次の正規分布で近似でき、

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \bar{\delta}_y} \exp \left[-\frac{(y - \bar{y})^2}{2 \bar{\delta}_y^2} \right] \quad (5)$$

分散 $\bar{\delta}_y^2(x)$ は単調増加で、次式で近似できる（図-2）。

$$\bar{\delta}_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = ax^b \quad (6)$$

ここで、 x は流れ方向に取った流木の流下距離座標（流木投入地点が原点）、 y と $\bar{y}$ は x 地点での流木の流れ横断方向位置座標とその平均位置座標、 n はデータ数である。 a と b の値は今後の検討課題で、漂流物やフルード数などの水理量に依存しよう。

流木投入地点 $(0, 0)$ から (x, y) までの漂流時間を t 、その平均時間を $\bar{t}(x, y)$ とすると、この漂流時間

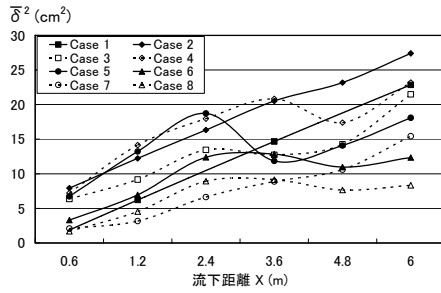


図-2 漂流距離による横拡散の分散の変化⁸⁾

の時間軸に対する分布 $F(x, y, t)$ も正規分布し⁸⁾,

$$F(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\bar{\sigma}_t} \exp\left[-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\bar{\sigma}_t^2}\right] \quad (7)$$

分散 $\bar{\sigma}_t^2(x, y)$ は単調増加で、次式で近似できる。

$$\bar{\sigma}_t^2 = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^n (t - \bar{t})^2 = cx^k + my^r \quad (8)$$

ここで、 n_t は (x, y) を通過した流木の本数、 c と k , m , r の値は今後の検討課題で、やはり漂流物やフルード数などの水理量に依存しよう。 $t - \bar{t}$ の値域としては $0 \sim \Delta t$ 程度を考えておけば十分であろう。

よって、流木 1 本が (x, y, t) で衝突する確率 p_1 は、

$$p_1(x, y, t) = f(x, y)F(x, y, t) \quad (9)$$

流木 2 本が同時やほぼ同時に衝突する確率 p_2 は、

$$p_2(x, y, t) = p_1(x, y, t)p_1(x, y, t_1) \quad (10)$$

ただし、 $|t - t_1| < \Delta t$ で (図-3)、両流木は同諸元で、完全に隣り合っていて、互いに影響を及ぼし合わないとしている。3 本以上のときも同様に議論できる。

2.3 衝突力継続時間 漂流物の衝突力継続時間 Δt を検討した研究例として松富⁹⁾の実験的なものがある。段波に伴う流木のときのもので、これを利用するには式(1)と(2)に示された漂流物を伴うときの u_2 , h_2 , ω と松富の段波実験でのそれらを一致させ、漂流物を伴う氾濫流の場合の段波下流側水深 h_0 を松富の段波実験での下流側水深 h_0' に換算する必要がある。その換算式は段波の質量保存則から次式となる。

$$\frac{h_0'}{h_2} = 1 - \frac{u_2}{\omega} \quad (11)$$

建物などの障害物がない開度 100 % のときを考えれば、衝突力継続時間 Δt として次式を得る⁹⁾。

$$\Delta t = 0.476 \left(\frac{h_2}{h_0'} - 1 \right)^{-0.054} \left(\frac{L_w}{D_w} \right)^{0.244} \left(\frac{u_2}{\sqrt{gD_w}} \right)^{0.415} \sqrt{\frac{D_w}{g}} \quad (12)$$

式(12)における相対段波波高のべき指数が非常に小さいので、衝突力継続時間は次式で評価してもよい。

$$\Delta t = 0.476 \left(\frac{L_w}{D_w} \right)^{0.244} \left(\frac{u_2}{\sqrt{gD_w}} \right)^{0.415} \sqrt{\frac{D_w}{g}} \quad (13)$$

ここで、 L_w は流木長、 D_w は流木径である。衝突力継続時間は流木の諸元と衝突速度で決まることが判る。実際は流木の単位体積重量、降伏応力、見かけの質量係数、被衝突物の剛性にも依存する。

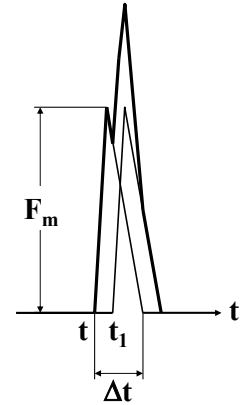
衝突力立ち上がり時間 Δt_p も情報として必要である (図-1)。衝突力の経時変化は三角形で近似できるので⁹⁾, それは次式で簡単に評価することにする。

$$\Delta t_p = \alpha \Delta t \quad (14)$$

松富⁹⁾の実験結果によれば、 $\alpha = 0.2 \sim 0.25$ 程度である。

例えば、流木 2 本がほぼ同時衝突するときの衝突力は図-3の太実線のようにになる。

衝突力や衝突力立ち上がり時間、衝突力継続時間は漂流物、被衝突物、計測器等に依存するので、一層の検討が必要である。



2.4 衝突力確率 単体漂流物の衝突力評価式として、流木

に関しては松富²⁾や池野ら³⁾の (図-3 衝突力波形もの、コンテナに関しては水谷ら⁴⁾のものなどを採用すればよい。これらに上述した衝突確率と衝突力立ち上がり時間、衝突力継続時間を組み合わせれば、研究目的の衝突力確率が議論できる。衝突力確率の評価のフローチャートを図-4 に示す。

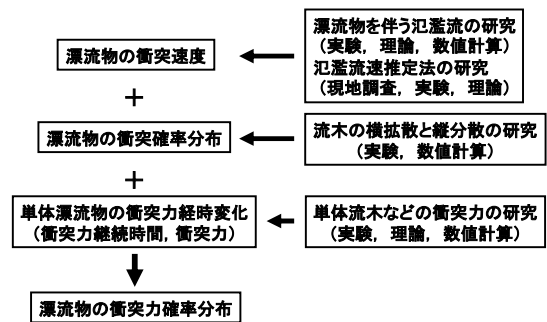


図-4 氾濫流に伴う漂流物の衝突力確率の評価手順

3. おわりに 氾濫流に伴う漂流物の衝突力確率の一評価法を提示した。残された課題は非常に多い。

参考文献 1) Matsutomi et al.: CEJ, Vol.48, No.2, pp.167-95, 2006. 2) 松富: 土論集, No.621/II-47, pp.111-27, 1999. 3) 池野ら: 海岸論文集, No.50, pp.721-5, 2003. 4) 水谷ら: 海岸論文集, No.52, pp.741-5, 2005. 5) 松富ら: 海岸論文集, No.54, pp.226-30, 2007. 6) 松富ら: 海岸論文集, No.55, pp.356-60, 2008. 7) 松富ら: 水工論文集, No.52, pp.673-8, 2008. 8) 松富ら: 海岸論文集, No.53, pp.186-90, 2006. 9) 松富: 土論集, No.467/II-23, pp.19-28, 1993.