

津波氾濫による桁橋被災過程の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Washed Process of Girder Bridge by Tsunami Run-up

五十里洋行¹・後藤仁志²

Hiroyuki IKARI and Hitoshi GOTOH

The earthquake off the west coast of Northern Sumatra and the resultant giant tsunami in the Indian Ocean in 2004 caused enormous damages in countries around the Indian Ocean. As one of them, it was reported that a girder bridge crossing a river was washed away. In this study, numerical simulations by the particle method, which is suitable to treat a moving object and track a water surface, were carried out to examine the relation of a tsunami velocity and motion of a girder bridge. The calculated results showed good agreement with ones in a previous hydraulic experiment. In addition, in the case of a tsunami with drift woods and a bridge with handrail, the washed process of a girder bridge was simulated.

1. はじめに

2004 年に発生したインド洋大津波では、海岸構造物の破壊や家屋の浸水などの他に、津波の河川遡上と氾濫に伴う橋梁の破壊・消失の被害に関する報告もなされている。その被害例の一つとして、川幅 10 m 程度の河川の横断に利用されていた桁橋（両岸の基礎の上に載せただけの単純な構造）の流失が確認されている（インド洋大津波スリランカ被害調査団, 2005）。庄司・森（2006）は、このような桁橋の被災に関する系統的な水理実験（模型縮尺 1/100）を実施しており、津波速度と桁橋の諸元の関係についてまとめている。しかし、現地スケールの水理実験は困難であるので、一連の現象を詳細に把握するためにも数値解析技術の開発は必須である。

桁橋のような移動物体の扱いについては粒子法が有効である。特に近年では、計算機の発達や並列計算技術の開発に伴い、3-D シミュレーションの実施も可能になってきており、流木や礫などの流下を伴う急変流解析が行われている（後藤ら, 2006；五十里ら, 2006）。そこで本稿では、粒子法による津波の遡上と氾濫に伴う桁橋の被災過程のシミュレーションを実施する。庄司・森による水理実験では、平板で表された桁橋の津波に対する被災状況を検討しているが、本稿ではそれに加えて、流木群および欄干の有無に関する影響も検討した。

2. 数値解析の概要

(1) DEM-MPS 法の概要

本研究で扱う桁橋および流木は、複数の粒子を剛体連結モデル（Koshizuka ら, 1998）によって連結させて表現する。この場合、MPS 法による反発力の計算では反

発係数が過小に与えられるため、剛体の跳ね返りを適切に評価するためには付加的な外力を別途与える必要がある（五十里ら, 2006）。本稿では、そのような特別な処理を避けるため、剛体構成粒子間および剛体構成粒子-壁粒子間に働く力の計算に個別要素法の枠組みを導入する DEM-MPS 法（後藤ら, 2003）を適用した。

液相および固相の運動方程式は、

$$\rho_l \frac{Du_l}{Dt} = -\nabla p_l + \mu_l \nabla^2 u_l + f_{isp} + \rho_l g \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\rho_s \frac{Du_s}{Dt} = -\nabla p_s + \mu_s \nabla^2 u_s - f_{isp} + \rho_s g + f_{colp} \quad (2)$$

である。ここに、 u_l , u_s : 流速ベクトル, p_l , p_s : 圧力, ρ_l , ρ_s : 密度, g : 重力加速度, μ_l , μ_s : 粘性係数, f_{isp} : 単一粒子に作用する固相・液相間相互作用力ベクトル, f_{colp} : 単一粒子に作用する固相粒子間衝突力ベクトルである。添字 l , s は液相および固相を示している。

粒子 i の圧力項および粘性項は、以下のように近傍に存在する粒子との相互作用としてモデル化される（越塚, 2005）。

$$-\frac{1}{\rho} \langle \nabla p \rangle_i = -\frac{1}{\rho} \frac{D_0}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{p_j - p_i}{|r_{ij}|^2} (r_{ij}) \cdot w(|r_{ij}|) \right] \quad (3)$$

$$\nu \langle \nabla^2 u \rangle_i = \frac{2\nu D_0}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (u_j - u_i) w(|r_{ij}|) \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\lambda = \sum_{j \neq i} w(|r_{ij}|) |r_{ij}|^2 / \sum_{j \neq i} w(|r_{ij}|) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$r_{ij} = r_j - r_i \quad \cdots \cdots (6)$$

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & \text{for } r \leq r_e \\ 0 & \text{for } r > r_e \end{cases} \quad \cdots \cdots (7)$$

ここに、 D_0 : 次元数, r_i : 粒子 i の位置ベクトル, $w(r)$: 重み関数（相互作用の影響範囲）である。

固相粒子間の衝突力ベクトル f_{colp} は、スプリング-ダッシュポットによって以下のようにモデル化する。

1 正会員 博(工) (株)ニュージェック

2 正会員 博(工) 京都大学准教授 工学研究科都市環境工学専攻

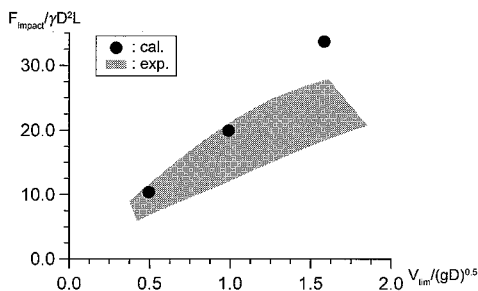


図-1 木材の衝突力

$$f_{colp} = \sum_j \{f_n(t) + f_s(t)\}_j \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} f_n(t) &= -e_n(t) \frac{\Delta \xi_n}{|\Delta \xi_n|} + d_n(t) \\ f_s(t) &= -e_s(t) \frac{\Delta \xi_s}{|\Delta \xi_s|} + d_s(t) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} e_n(t) &= -e_n(t - \Delta t) + k_n \cdot |\Delta \xi_n| \\ e_s(t) &= -e_s(t - \Delta t) + k_s \cdot |\Delta \xi_s| \\ d_n(t) &= \eta_n \cdot \Delta \xi_n / \Delta t \\ d_s(t) &= \eta_s \cdot \Delta \xi_s / \Delta t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \xi_n &= \left(\Delta \xi \cdot \frac{r_{ij}}{|r_{ij}|} \right) \frac{r_{ij}}{|r_{ij}|} \\ \Delta \xi_s &= \Delta \xi - \Delta \xi_n \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 f_n 、 f_s ：固相粒子 i 、 j 間の法線（添字 n ）および接線（添字 s ）方向の作用力ベクトル、 k_n 、 k_s ：弾性スプリング定数、 η_n 、 η_s ：粘性ダッシュポット定数、 e_n 、 e_s ：バネによる抗力、 d_n 、 d_s ：ダッシュポットによる抗力ベクトル、 $\Delta \xi$ 、 $\Delta \xi_n$ 、 $\Delta \xi_s$ ：時間 Δt 間の変位ベクトルである。

(2) モデル定数

個別要素法のモデル定数の設定については、弾性接触理論を準用して推定する方法が知られているが（木山・藤村，1983），本稿で扱う DEM 粒子はすべて剛体連結されているため、同様の計算を行った田中ら（2007）の方法を参考に決定した。以下に、弾性スプリング定数および粘性ダッシュポット定数を示す。

$$k_n = \alpha_{kn} \frac{m}{\Delta t^2} ; k_s = \alpha_{ks} \frac{m}{\Delta t^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$c_n = \alpha_{cn} \frac{m}{\Delta t} ; c_s = \alpha_{cs} \frac{m}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 m ：質量、 α_{kn} 、 α_{cn} 、 α_{ks} 、 α_{cs} ：チューニングパラメータである。各パラメータのチューニングは、以下に示す基礎的な計算によって行った。

まず、法線方向のパラメータ α_{kn} および α_{cn} については、木材を剛体壁に衝突させた際の衝突力について測定した松富ら（1999）の実験結果を参考に決定した。図-1

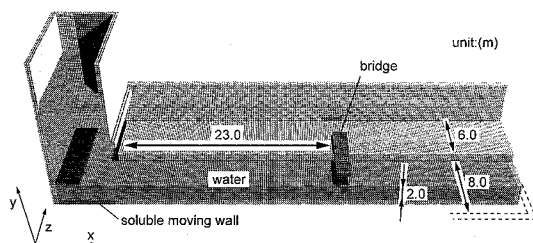


図-2 計算領域

に、4章で用いる流木モデルと同様の諸元である流木長 $L=5.0$ m、流木径 $D=0.4$ m、流木の単位体積重量 $\gamma=6.86 \times 10^3$ N/m³、 $\alpha_{kn}=9.0$ 、 $\alpha_{cn}=5.0$ の場合の計算結果を松富らの実験結果と併せて示す。実験結果は試行回数が多く、読み取りが困難なため、プロットされた領域を示した。計算では、衝突角は 0° とし、流木の諸元も実験で用いられたものより大きく設定したため、実験結果よりも大きめの値を取るよう調節した。

次に、接線方向のパラメータ α_{ks} および α_{cs} に関しては、斜面上の物体の運動を基に決定した。斜面上で静止している物体が移動を始める限界の斜面傾斜角は以下の式で与えられる。

$$\theta_{lim} = \tan^{-1} \mu_f \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 θ ：斜面傾斜角、 μ_f ：静止摩擦係数である。静止摩擦係数を次章以降で用いる値と同様の 0.71 とすれば、限界斜面傾斜角は約 35 度となる。 $\alpha_{ks}=6.0$ 、 $\alpha_{cs}=5.0$ とし、傾斜角を変えて斜面上の物体の移動を計算すると、限界角は 31 度であったので、以下の計算では上記のパラメータを採用した。

なお、(12) 式および (13) 式に基づいて各定数を設定したため、粒子の質量によって定数が異なる。そこで、異種材料間の衝突の際には、(15) 式のような両者の定数を直列連結するモデル（徳永ら，2005）を導入した。

$$k_n = k_{ni} k_{nj} / (k_{ni} + k_{nj}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

3. 津波による桁橋の被災過程

(1) 計算領域

図-2 に計算領域を示す。最上流側に設置された長さ 6.0 m、幅 20.0 m の流入部に、長さ約 43.0 m、幅 8.0 m、深さ 3.0 m の河川を模擬した矩形断面水路を接続し、下流端は高さ 2.0 m の堰を設け、自由流出とした。河川の両岸には幅 6.0 m の水平床を設置した。初期水深は 2.0 m である。流入部の最下端に設置された可溶性移動壁（Gotoh ら，2001）から水を供給し、津波を模擬した。桁橋は、流入部最下流端から 23.0 m 下流側に設置した。桁橋の諸元が既往の水理実験で用いられた桁橋

表-1 桁橋の諸元

	桁長 L_b (m)	幅員 B (m)	桁厚 H (m)	細長比 $\alpha=L_b/(I/A)^{0.5}$
case1	14.2	1.6	0.6	82.0
case2	12.6	4.0	0.6	72.7

I: 断面二次モーメント, A: 橋軸方向の断面積

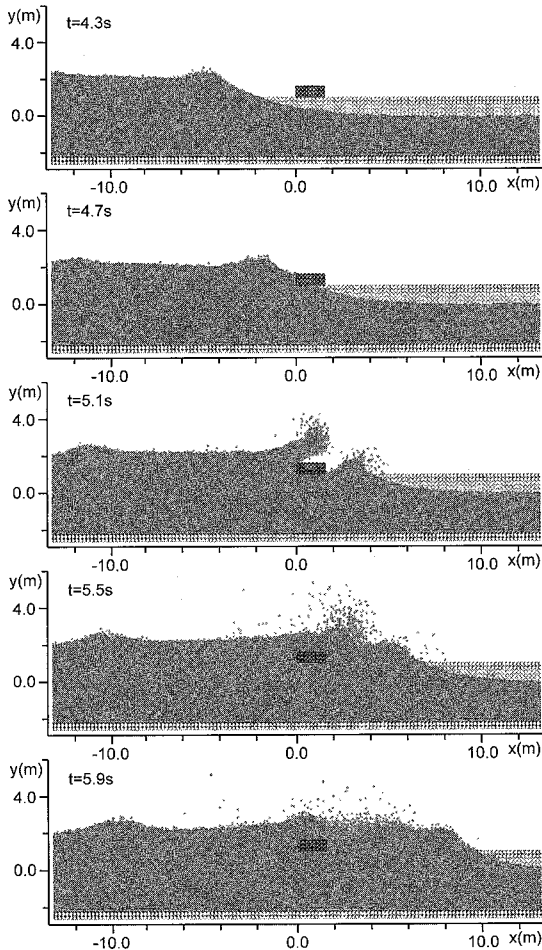


図-3 桁橋被災過程 (case1)

の諸元とはほぼ同一となるように表-1の通り設定した。既往の水理実験では、すべての桁橋に対して2種類の静止摩擦係数を用いて実験を行っているが、本研究では、case1では $\mu_f=0.71$ 、case2では $\mu_f=0.8$ とした。桁橋の密度は $\rho_{sb}/\rho_l=2.45$ とした。粒子径は均一で0.2mである。津波流速の定義について、水理実験では、ゲート開放から5秒間の平均流速値（桁橋の上流側で計測）と定義しているが、本稿で用いた数値水路におけるゲートから桁橋までの距離は実験装置と異なるため、同様に定義できない。そこで本稿では、桁橋の上流端から10.0m上流側で計測した流速値の収束値を津波流速と定義した。

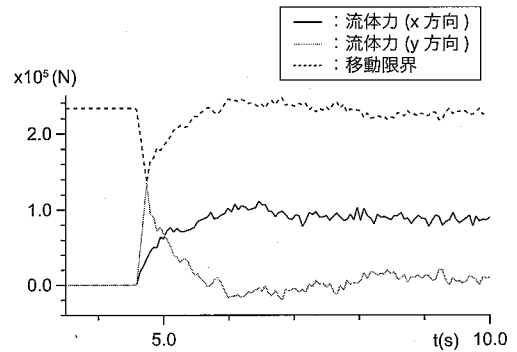


図-4 桁橋に作用した流体力 (case1)

(2) 水理実験との比較

図-3に、case1の計算結果（津波流速 $V_{tsu}=5.4$ m/s）の一例を示す。桁橋を見易くするために手前側の水粒子は表示していない。このケースでは桁橋の移動は見られず、流れは桁橋を乗り越えて橋を包むように流下する。図-4に、桁橋に作用した流体力（0.05s間のアンサンブル平均値）を時系列で示す。移動限界値 F_{lim} は、

$$F_{lim} = \mu_s(mg - F_y) \dots\dots\dots (16)$$

で定義した（ F_y : 桁橋に作用する y 方向の流体力）。津波の先端の衝突時、まず y 方向正の向き（上方）に流体力が大きく作用する（ $t=4.7 \sim 5.0$ s）。 y 方向の流体力はピーク値に達した後は速やかに減少し、ゼロ近傍を推移する。これは、図-3からも明らかなように、桁橋が流れに完全に水没するからである。 x 方向の流体力は衝突時から速やかに増加し、 $t=6.0$ s付近からはほぼ一定に推移する。 x 方向の流体力は移動限界値を超えないため、桁橋は移動しない。図-5に、case2の計算結果（津波流速 $V_{tsu}=8.1$ m/s）の一例を示す。図-6に、流体力時系列および桁橋の移動量を示す。このケースでは、津波の先端が図-3と比べて直立しているため、ピークに至るまでの流体力の立ち上がりは x 方向および y 方向で同程度に速やかである。衝突後に y 方向に作用する流体力は相当に大きく、それに伴って移動限界値が顕著に減少し、 $t=4.3$ sで x 方向の流体力とほぼ同値を示す。桁橋の移動はこの時刻を境に発生している。図-7に、津波流速と桁橋の移動に関する水理実験との比較を示す（ h_{sz} : 水路床から桁橋までの高さ）。両ケースともに実験結果との対応は良好である。

4 流木および欄干を考慮した場合

前章では、既往の水理実験と比較するために桁橋を平板として扱ったが、実際に使用されている桁橋は大抵欄干を有しており、被害調査報告書（2005）に掲載されている被災した桁橋にも欄干がある。また、来襲津波に関

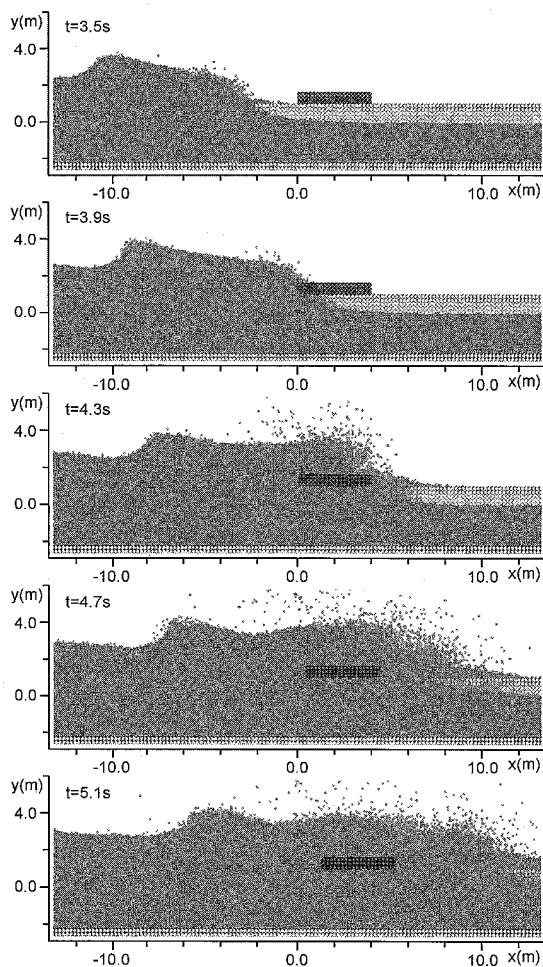


図-5 桁橋被災過程 (case2)

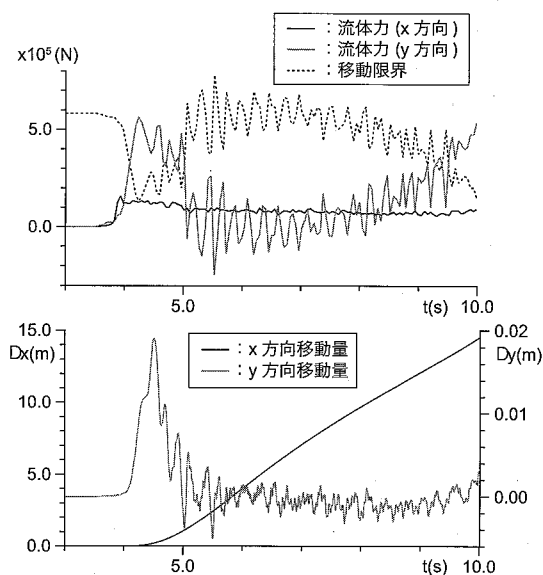


図-6 流体力および桁橋の重心の移動量 (case2)

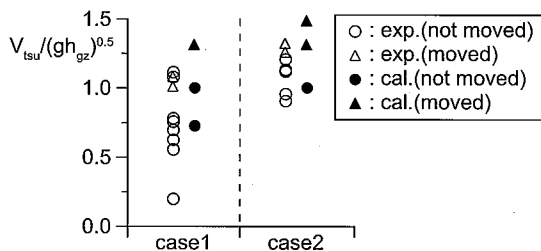


図-7 津波流速と桁橋の移動

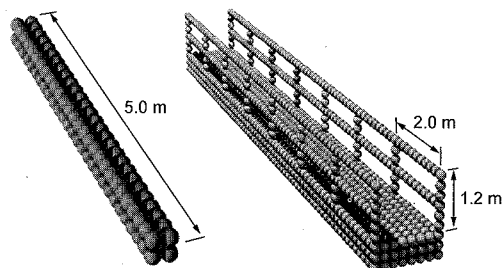


図-8 流木 (左) および欄干付き桁橋 (右)

しても、場合によっては津波が桁橋に到達する前に流木などの浮遊物を巻き込むことも考えられる。そこで本章では、そのような状況を想定して、津波に流木が含まれ、かつ、桁橋が欄干を有するケースにおけるシミュレーションを実施した。図-8に、流木および欄干を有する桁橋の諸元を示す。流木 ($\rho_{sl}/\rho_l=0.7$) は $5.0\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ の角柱で表され、桁橋の上流側にランダムに7本配置される。欄干は、 2.0 m 間隔で配置された高さ 1.2 m の柱と 0.6 m 間隔で配置された2本の水平部材によって構成され、橋の側面に設置される。欄干の部材は、いずれも粒子一列 (太さ 0.2 m 相当) で構成された。欄干の密度は桁部と同値に設定した。流入条件は、桁橋の移動の生じない図-3のケースと同様に設定した。

図-9に、瞬間像を示す (水粒子は小さく表示している)。津波の先端に集中して運ばれた流木との衝突によって桁橋は移動を始める。流木は次々と桁橋に衝突するが、桁部と衝突するのは下流側に位置していた流木のみであり、後続の流木群は桁橋の欄干に衝突する。桁橋の欄干に捕捉されて、流木の長軸方向を桁橋の橋軸方向と平行にしながら桁橋とともに流下する流木も存在する。図-10に、桁橋に作用した流体力および流木から受けた衝突力のx方向成分 (0.05 s 間のアンサンブル平均値) を示す。津波の来襲時において、流木による衝突力に明瞭なピークが現れており、そのピーク値は、流体力 (x方向成分) のピーク値の約5倍に達する。

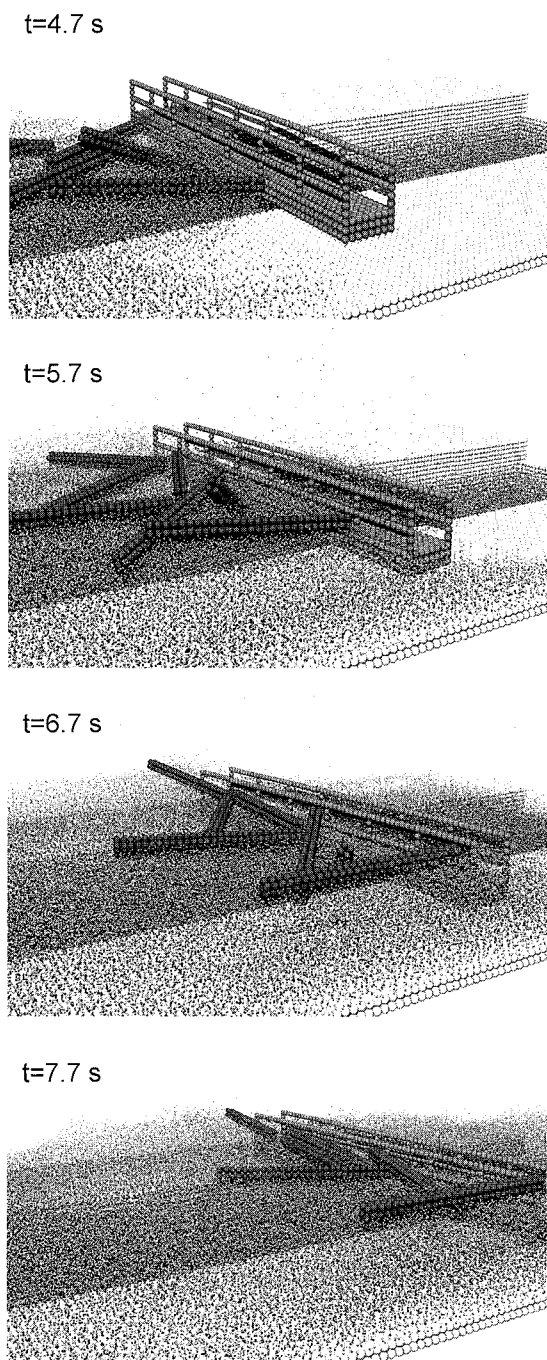


図-9 桁橋被災過程（流木および欄干有り）

5 おわりに

本稿では、遡上津波による桁橋の被災過程について粒子法によるシミュレーションを実施した。津波流速と桁橋の移動の関係について既往の水理実験結果と比較したところ、両者の良好な対応が見られた。さらに、流木お

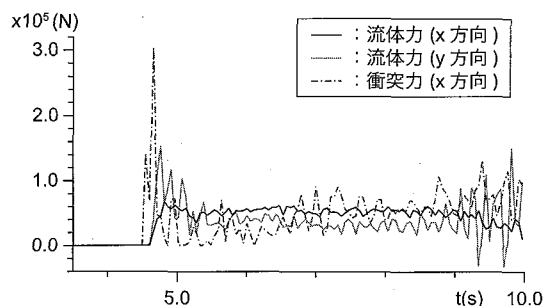


図-10 流体力および流木の衝突力

よび欄干の影響について別途検討したところ、流木の衝突力は流体力よりも遥かに大きく、桁橋の移動に多大な影響を及ぼすことがわかった。また、欄干のある場合においては、流木との衝突域が広がり、さらに被災可能性が高まることが示唆された。

以上より、津波による橋梁被災の機構解明に対する数値力学的なツールとして、粒子法の有効性が示された。本稿では、比較的単純な構造の桁橋を対象としたが、今後、様々な構造の桁橋に関する検討を重ね、この種の解析ツールとして確立し、津波被災を軽減できる桁橋の構造設計に役立てたい。

参考文献

- 五十里洋行・後藤仁志・酒井哲郎(2006): 固液混相流型粒子法による排砂水路底面の摩擦過程のシミュレーション, 水工学論文集, 第51巻, pp. 853-858.
- インド洋大津波スリランカ被害調査団(2005): 2004年12月インド洋大津波スリランカ被害調査報告書, p132.
- 木山英郎・藤村 尚(1983): カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文集, 第333号, pp. 137-146.
- 越塚誠一(2005): 粒子法, 丸善, 144p.
- 後藤仁志・林 稔・安藤 怜・鷺見 崇・酒井哲郎(2003): 砂礫混合層を伴う混相流解析のためのDEM-MPS法マルチスケールリンクの開発, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 26-30.
- 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎(2006): 山地橋梁の流木閉塞過程の3次元シミュレーション, 水工学論文集, 第51巻, pp. 835-840.
- 庄司 学・森洋一郎(2006): 桁橋の津波被害再現実験, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 801-805.
- 田中正幸・酒井幹夫・越塚誠一(2007): 粒子ベース剛体シミュレーションと流体との連成, Transactions of JSCES.
- 徳永仁夫・梅津浩一・池田清彦・小堀修身(2005): 拡張個別要素法による熱強化ガラスの衝撃破壊解析, 日本機械学会論文集 (A編), 第71巻, 第711号, pp. 140-146.
- 松富英夫(1999): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 111-127.
- Gotoh, H., T. Shibahara and T. Sakai(2001): Sub-particle-scale turbulence model for the MPS method -Lagrangian flow model for hydraulic engineering-, Comp. Fluid Dyn. J., 9-4, pp. 339-347.
- Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka(1998): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Mech. Fluids, Vol.26, pp. 751-769.