

流木を伴う橋梁部における洪水現象の数値シミュレーション

九州大学 正会員 ◦木村 延明
九州大学 正会員 田井 明

1. はじめに

IPCC¹⁾によれば、過去10年では世界的な気候変動により頻繁に発生する異常気象が報告され、将来的には、近年の状況よりも厳しい異常気象が起こる可能性が指摘されている。



図1 橋梁付近洪水被害(大分県竹田市)平成24年7月九州北部豪雨被害調査団報告書より

近年日本でも、スーパー台風による集中豪雨や雨季に亜熱帯型の非常に強い豪雨が起きている。実際に過去10年間で大雨や台風による顕著な災害をもたらした8例もの気象災害が発生している²⁾。例えば、平成24年7月九州北部豪雨(国土交通省報告)では、短時間(豪雨降り始めから3~6時間)内に集中的な豪雨に見舞われ、突発的で破壊的な出水が発生した。これは、亜熱帯地域(例えば台湾)で見られるような洪水現象³⁾に類似するものである。このような出水形態は、多くの流木を含んだ濁流を河道にもたらし、橋梁の欄干部分や橋脚間の河道を塞ぐことにより、橋梁自身の崩壊や橋梁付近やその上流域で家屋浸水等の被害が発生した(図1)。この亜熱帯型に類似するような出水に起因した流木と橋梁が関係する洪水被害の軽減策を検討するための第一段階として、流木集積時の水理現象の基礎的な解明を目指し、粒子法を用いた数値シミュレーションを実施した。

2. 方法

橋梁や堤防を乗り越えるような越流現象では不連続な流れや自由表面流が出現するので、計算領域を微細な粒子的空間情報で、かつその粒子運動をLagrange的に解く必要がある。そのために本研究では、Lucy⁴⁾が開発した非計算格子系で構造物の大幅な変形現象や碎

波流の複雑現象を粒子のように離散化して現象を表現できる粒子法を採用した。粒子法の一つであるSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法⁵⁾に基づいて開発された数値計算ソフトウェアSPHysics(<https://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/>)を使用した。このSPH法の原理的な近似式は次のように定義される。

$$A(r) = \int A(r')W(r-r',h)dr' \tag{1}$$

$$h = C\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \tag{2}$$

ここで、A=任意関数、C=係数、W=kernel関数、Δ=微小距離、r=位置である。kernel関数は、離散化された粒子間の結び付きを重み付けで表現する関数で、コンパクトで常に正の値をとる5次曲線⁶⁾を使用した。その関数は、以下の式で与えられる。

$$W(q) = \alpha_D(1-q/2)^4(2q+1) \quad 0 \leq q \leq 2 \tag{3}$$

ここで、q=r/h、α_D=定数である。この粒子法における支配方程式は、

$$\frac{d\vec{v}_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} - \Pi_{ab} \right) \vec{\nabla}_a W_{ab} + \vec{g} \tag{4}$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \vec{v}_{ab} \cdot \vec{\nabla}_a W_{ab} \tag{5}$$

ここで、a,b=粒子番号、m=質量、v=流速、g=重力加速度、p=圧力、ρ=密度、Π=粘性項である。

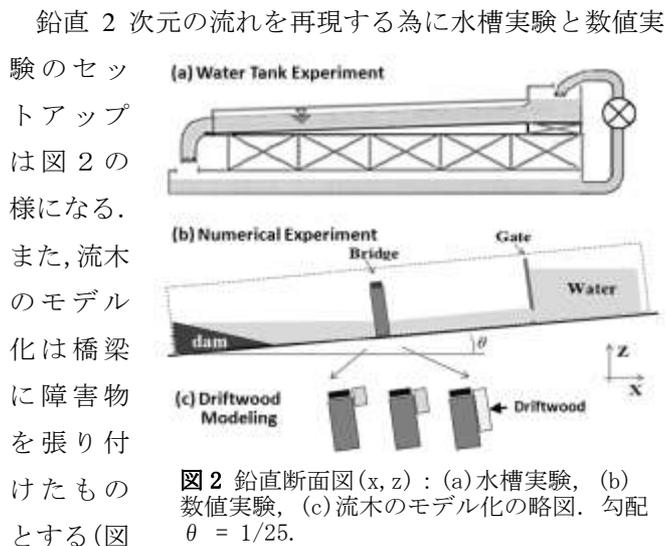


図2 鉛直断面図(x, z) : (a)水槽実験, (b)数値実験, (c)流木のモデル化の略図. 勾配θ = 1/25.

槽実験ではポンプを用い上流から下流へ常時水が流れるが、数値実験では上流に水量タンクを設定し、ゲート高の調整を行って流量を保つことにした。また、現地調査から下流域にはダムが存在するので、その水位上昇の効果を考慮した。流木のモデル化は、図 2c のように橋桁の上流面に流木に見立てた板を張り付けるものとする（高さ：0.02, 0.04, 0.08 m）。以下、これを流木板高さと言う。なお、0.08 m の流木板高さは、橋桁下が全て流木で埋まったことを意味する。格子間隔（ $\Delta x = \Delta z$ ）は、0.02 m である。

3. 結果と検討

本研究では、事前のテスト計算で得られた知見に基づき、計算条件（格子間隔、時間ステップ、粘性など）を設定した。図 3 は計算開始 5 sec 後のスナップショットの粒子分布鉛直断面図を示し、上流側から流れてくる粒子群が橋梁の前方で堰き上がる現象を示している。橋梁の下流部（橋脚の左側）では、水位が一時的に下がる効果を示している。この流木を考慮しないケース (CS0) では、堰き上げ効果による水位の高さは、底面から約 0.14 m であった。一方、水槽実験では約 0.11 m であった。このことから、数値計算の結果は、水槽実験の結果よりもやや過大に水位上昇を予測したものの、妥当な結果と考えられる。

次に、モデル化された流木を使用した場合のテスト計算を示す。表 1 に示される様に、流木板の高さ（図 2c）の違いにより 3 ケースの数値計算を行った。

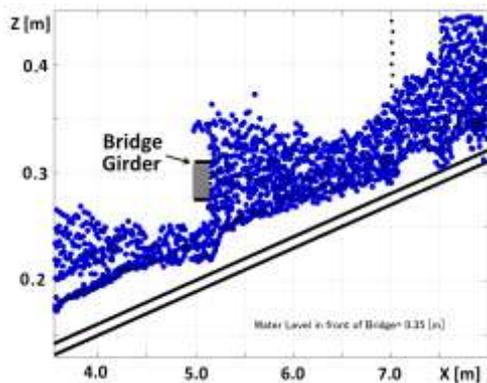


図 3 粒子分布の鉛直断面図 (x, z)。青いマーカー=粒子、右側が上流域。

表 1 流木板(モデル化)高さの違いによる計算ケース一覧 [m]

ケース名	流木板高さ	堰き上げ水位
CS0	-	0.14
CS1	0.02	0.16
CS3	0.04	0.17
CS4	0.08	0.17

図 4 は、流木の影響（流木板高さ）を考慮した上での、堰き上げ現象の 3 ケース間の比較を示した粒子分布図である。流木板高さを変化させれば、13-20%の水位上昇が見られた（表 1）。従って、流木板高さが低い場合（0.02 m）でも、流木による影響は無視できないことを示唆している。

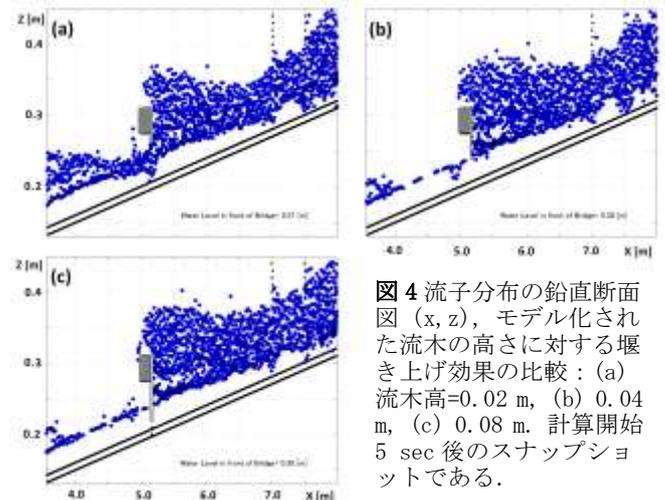


図 4 流子分布の鉛直断面図 (x, z)、モデル化された流木の高さに対する堰き上げ効果の比較：(a) 流木高=0.02 m, (b) 0.04 m, (c) 0.08 m. 計算開始 5 sec 後のスナップショットである。

4. まとめ

本研究では、モデル化された流木を使用して洪水の数値シミュレーションを行った。流木板高さの変化に伴い、橋梁前部（上流側）の堰き上げによる水位上昇が確認できた。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C. B., Barros V., Stocker T. F., Qin D., Dokken D. J., Ebi K. L., Mastrandrea M. D., Mach K. J., Plattner G. K., Allen S. K., Tignor M. and Midgley P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 582 pp., 2012.
- 2) 気象庁災害をもたらした気象事例平成元年-現在まで http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/saigai_link.html
- 3) Hsu M.H., Fu J.C. and Liu W.C. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan. *Journal of Hydrology*, **283**(1-4), 267-280, 2003.
- 4) Lucy, L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astronomical Journal*, **82**, 1013-1024, 1977.
- 5) Monaghan, J. J. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Reports on progress in physics*, **68**, 1703-1759, 2005.
- 6) Wendland, H. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in computational Mathematics*, **4**(1): 389-396, 1995.