

柱体碎片撞击事件的解析与数值模拟

唐文娟

福州大学土木工程学院, 福州 350025, 福建, 中国

摘要: 海啸灾后调查一再表明, 深入认识碎片荷载十分必要。迄今为止, 用于估算碎片撞击荷载的经验公式都建立在单自由度 (SDOF) 模型之上, 然而这类 SDOF 模型估算碎片撞击荷载的有效性一直缺乏充分研究。本文把 SDOF 模型给出的力响应与试验数据以及所建立的多自由度 (MDOF) 模型相比较, 考察以 SDOF 模型预测碎片撞击力的有效性; 并就 ASCE 7-22 第 6 章有关碎片撞击荷载的规定与上述替代方法作了对比分析。结果表明, MDOF 方法能够准确刻画试验的力响应数据, 而其余各种估算碎片撞击荷载的方法在幅值与频率两方面都高估了力响应; 此外, MDOF 模型给出的撞击荷载比 SDOF 模型与 ASCE 7-22 第 6 章给出的持时更长、幅值更小。本文还建立了一个高效的数值模型, 用以模拟单碎片与多碎片在柱体上的输移与撞击荷载。该动力数值模型建立在通用有限元程序 LS-DYNA 之中, 采用任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 方法模拟溃坝波所致的碎片撞击荷载。模型准确复现了 Stolle 等 (2019) 与 Stolle 等 (2020b) 给出的水面高程、水动力荷载、碎片输移与碎片撞击力。模型模拟碎片撞击事件的能力表明, 它有望成为设计与评估关键基础设施抵御海啸等极端海岸淹没事件韧性的有力工具。

关键词: 碎片撞击; 溃坝波; 撞击力估算; 极端事件; 结构响应; 数值模拟

Analytical and Numerical Modelling of Debris Impact Events on Columns

WenJuan Tang

School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350025, Fujian, China

Abstract: Post-disaster surveys of tsunamis have emphasized the need for an in-depth understanding of debris loading. Until now, empirical formulas used to estimate debris impact loads are based on single-degree-of-freedom (SDOF) models. However, the validity of these SDOF models to estimate debris impact loads has not been studied extensively. This study investigates the validity of using a SDOF model to predict debris impact forces by comparing its force response to experimental data and a multiple-degree-of-freedom (MDOF) model developed. Additionally, a comparative analysis was conducted to assess the provisions on debris impact loads in Chapter 6 of ASCE 7-22 against these alternative methods. The MDOF method was shown to model accurately the experimental force response data, while all other methods for estimating debris impact loads overestimated the force response in both magnitude and frequency. Furthermore, the impact loads generated by the MDOF model proved to be longer in duration but smaller in

magnitude than loads generated using the SDOF model and Chapter 6 of ASCE 7-22. In addition, a performant numerical model was developed to simulate single and multi-debris transport and impact loads on a column. The dynamic numerical model was developed within the general-purpose finite element program LS-DYNA. Inside this modelling framework, the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method was used to simulate dam-break wave generated debris impact loads onto the column. The model accurately replicated the water surface elevations, hydrodynamic forces, debris transport, and debris impact forces presented in Stolle et al. (2019) and Stolle et al. (2020b). The model's ability to simulate debris impact events demonstrates its potential as a valuable tool for designing and evaluating critical infrastructure's resilience against extreme coastal inundation events, such as tsunamis.

Keywords: Debris-impact; Dam break wave; Impact force estimation; Extreme events; Structural response; Numerical modelling

一、引言

近年来极端海岸淹没事件所造成的破坏——如 2010 年智利海啸、2011 年日本东北海啸与 2018 年印度尼西亚海啸——使人们愈发关注：现行设计规范用于估算此类极端事件所生荷载的方法是否有效。ASCE/SEI 7-22 第 6 章把海啸荷载分为以下三类：

静水荷载——由静止水体作用于结构上的荷载。

水动力荷载——由水流冲击结构或绕流结构而作用于结构上的荷载。

撞击荷载——由设计海啸所输移的碎片或其他物体撞击结构而作用于结构上的荷载。

由海啸灾后调查可见，上述每一类荷载都曾对沿海社区造成大范围破坏[1-2]。特别是在 2018 年印度尼西亚海啸中，碎片撞击造成的破坏出现在绝大多数受淹区域[2]，凸显了在结构设计中认识这类荷载的重要性。Palermo 等[3]给出了 2010 年智利海啸与 2011 年日本东北海啸中结构受损的若干具体实例，破坏程度从局部构件失效直至结构整体损毁，如图 1 所示。



Figure 1 Global (Left) and Local (Right) Structural Damage

图 1 结构的整体破坏（左）与局部破坏（右）

Stolle 等[4]进一步给出了 2018 年印度尼西亚海啸中各类碎片撞击所致结构破坏的实例，表明碎片撞击可源自种类极为广泛的碎片，如图 2 与图 3 所示的混凝土碎块与船只。但须注意，碎片来源可以是海啸所输移的任何物体。此外，碎片撞击造成的破坏差异也很大：Stolle 等[4]表明，结构破坏可以从混凝土剥落一直到外柱的完全失效，同样见图 2 与图 3。



Figure 2 Concrete Debris Impacts

图 2 混凝土碎片撞击



Figure 3 Vessel Impacts

图 3 船只撞击

由海啸灾后现场研究可见，碎片撞击荷载显然是海啸韧性基础设施的一项重要设计考虑。这类荷载近年来受到了更多关注，但其所涉过程的复杂性要求采用新的途径并开展更为细致的研究。

二、文献综述与研究目标

（一）碎片撞击模型的文献综述

碎片撞击荷载可由碎片堵塞、单碎片撞击与多碎片撞击产生；多碎片撞击又可分为同步撞击与异步撞击两类[5]。本文聚焦于以下两个方面：

1. 单碎片撞击的解析分析。针对这一问题已有若干设计导则，如 ASCE 7-22 第 6 章与 FEMA P-646[6-7]。
2. 采用完全三维流固耦合的单碎片与多碎片撞击事件数值模拟。

解析表达单碎片撞击荷载的公式已有多种，分别建立在一维波动方程的解析解[8-9]、二自由度（2DOF）模型或赫兹接触力学之上。ASCE 7-22 所采用的途径源自 Haehnel 与 Daly，二人研究了大型木质碎片对结构的撞击。Haehnel 与 Daly 通过试验分析确定：洪水事件中的最大撞击力可用一个采用接触刚度途径的单自由度（SDOF）模型来估算。他们把最大撞击力 F 表达为撞击速度 u 、碎片质量 m_d 与碎片刚度 k_d 的函数[10-11]：

$$F = u\sqrt{m_d k_d} \quad (1)$$

在 Haehnel 与 Daly 的研究中，被撞结构被假定为完全刚性，碎片被假定保持在弹性范围内，阻尼对响应

的影响被视为可以忽略。结构在撞击过程中完全刚性这一假定意味着结构不发生变形，而由海啸灾后现场调查可知这并不现实[1][4]。为此，Hachnel 与 Daly 对公式(1)作了修正，以计入碎片与结构之间的接触刚度。碰撞的有效刚度 k 是结构刚度 k_s 与碎片刚度的函数，如下式所示：

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_d} \quad (2)$$

ASCE 7-22 第 6 章第 6.11.2 条计算木桩、木杆与集装箱撞击力所采用的途径与公式(1)相同，但其中的刚度项定义为撞击碎片的有效刚度与被撞结构构件因撞击而变形的侧向刚度二者中的较小值。此外，该标准还对撞击力施加两个比例系数，分别与建筑物的重要性系数 I_{tsu} 和朝向系数 C_o 有关。朝向系数呼应了 Hachnel 与 Daly 的结论——撞击的几何关系对撞击力有影响。ASCE 7-22 第 6.11.2 条把木桩与木杆的撞击持时 t_d 表达为碎片质量、最大流速 u_{max} 与撞击力的函数：

$$t_d = \frac{2m_d u_{max}}{F} \quad (3)$$

Matsutomi 给出了一个估算淹没水流所挟带漂木碰撞力的公式。作者通过试验研究了小尺度漂木撞击刚性结构时的水中撞击力，指出漂木所排开流体的附加质量必须计入力的公式，因为撞击发生时这部分水体与漂木一同减速。他所提出的力公式是碎片重度 γ_d 、漂木直径 D_w 、漂木长度 L_w 、碎片碰撞速度 v_{A0} 、漂木屈服应力 σ_{df} 、重力加速度 g 与附加质量系数 C_{MA} 的函数：

$$F = 1.6C_{MA} \left(\frac{v_{A0}}{\sqrt{gD_w}} \right)^{1.2} \left(\frac{\sigma_{df}}{\gamma_d L_w} \right)^{0.4} (\gamma_d D_w^2 L_w) \quad (4)$$

Ikeno 等也给出了一个基于赫兹接触力学、用于估算木质碎片碰撞力的公式，并以空气中与水中的物理试验加以验证：

$$F = \kappa (C_{MA} m)^{0.6} V_H^{1.2} D^{0.2} \tilde{E}^{0.4} \quad (5)$$

式中 κ 为量纲一系数，取 0.243； C_{MA} 为流体的附加质量； V_H 为碎片的碰撞速度； D 为碎片直径； $\tilde{E}$ 为有效弹性模量。Ikeno 等又对 Ikeno 等所列的碎片撞击公式作了修正，以计入碎片碰撞角的影响。

（二）研究目标、方法与意义

上述估算碎片撞击荷载的研究，大多是在「撞击事件可按 SDOF 体系处理」这一假定之下建立碎片撞击力公式的。本文的第一个目标，是就不同方法如何估算碎片撞击荷载、以及这些方法如何影响柱体的力响应作对比分析。所考察的三种方法分别为 SDOF 方法、MDOF 方法与 ASCE 7-22 第 6 章。这一对比分析可以揭示 ASCE 7-22 相对于其他碎片撞击荷载估算方法的表现。

本文的第二个目标，是在通用有限元程序 LS-DYNA 中采用完全三维流固耦合（FSI）数值模拟溃坝波所致的碎片撞击事件。已有文献或者通过缩尺试验研究来量化海啸所致碎片撞击荷载（见 Matsutomi、Ko 等、Stolle 等），或者开展了不含海啸碎片撞击相关水动力过程的足尺试验与数值研究（见 Aghl 等[8][9]）。本文旨在通过把模型与试验数据相比较，认识数值模型模拟溃坝波所致碎片撞击事件的能力。

三、碎片撞击力时程的估算方法

（一）试验数据说明

本文所分析的试验数据取自 Stolle 等，其试验在渥太华大学水力学实验室完成。该实验室建有一座溃坝波水槽，长 30 m、宽 1.5 m，最大蓄水深度可达 0.7 m。蓄水区长 21.55 m，试验中以摆动闸门在不同淹没水深下蓄水。图 4 给出了渥太华大学溃坝波水槽的示意图。

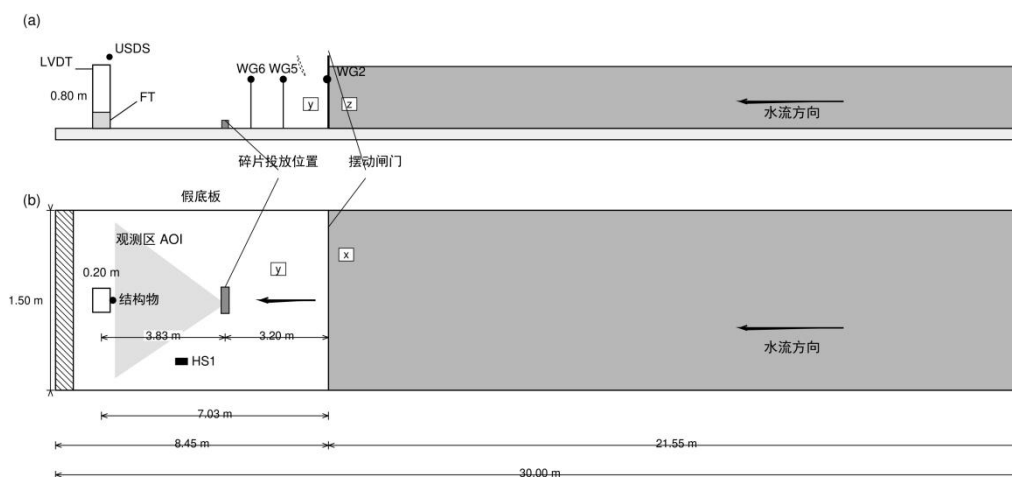


Figure 4 Dam-Break Flume at the University of Ottawa

图4 渥太华大学溃坝波水槽

试验方案为一根结构柱承受溃坝波所致的碎片撞击。试验所用碎片为 1:40 几何缩尺的 20 英尺集装箱，由正浮力聚乙烯制成，尺寸 $0.06\text{ m} \times 0.06\text{ m} \times 0.15\text{ m}$ ，壁厚 0.005 m ，质量 0.236 kg 。试验所用结构为亚克力制方形空心截面，尺寸 $0.20\text{ m} \times 0.20\text{ m} \times 0.80\text{ m}$ ，壁厚 0.005 m 。由试验测定，结构的弹性模量为 2.50 GPa 。数值模拟结构所需的其他参数取自 ANSYS GRANTA 材料选择器：亚克力结构的质量密度取 1200 kg/m^3 、泊松比取 0.375 ；薄壁空心截面的剪切系数取 0.50 。试验记录了溃坝波的水面高程、结构在波浪与碎片撞击共同作用下的力响应，以及碎片的撞击速度。

Stolle 等用集合经验模态分解 (EEMD) 方法对结构的力响应数据信号作了处理，剔除了与仪器噪声和水动力荷载相关的分量。滤波后的信号只代表由碎片撞击荷载引起的结构响应。试验方案的更多信息见 Stolle 等。

本文从该试验数据集中选取了 22 次试验。选取时首先剔除数据不良的试验，即力响应信号中看不出任何明显撞击事件（信号无峰值）的试验；其次剔除短时间内发生多次撞击的试验，因为本文的目标是提取初次撞击力，而非高频连续敲击所致的撞击力；最后，只考虑蓄水深度 0.40 m 条件下产生的单碎片撞击事件。

（二）解析模型

1. 单自由度 (SDOF) 模型

采用杜哈梅积分求解 SDOF 体系在任意激励函数作用下的力响应时程 $R(t)$ 。杜哈梅积分是结构刚度 k 、结构质量 m_s 、阻尼系数 ξ 、结构有阻尼与无阻尼固有圆频率 ω_d 与 ω_n 、自撞击起经历的时间 τ 、时间 t 以及撞击荷载时程 $p(\tau)$ 的函数：

$$R(t) = \frac{k}{m_s \omega_d} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi \omega_n (t-\tau)} \sin \omega_d (t-\tau) d\tau \quad (6)$$

求解遵循迭代流程，积分按 Navaratnam 等所述以时间上的增量求和来计算。通过最小化实测数据与模型数据之差，把力响应拟合到试验力响应数据上；这一步是通过迭代估计撞击幅值、撞击持时、阻尼系数、结构刚度与结构固有频率实现的，拟合过程的更多信息见 Joynt 等。撞击荷载时程取半正弦脉冲的形式，因为足尺集装箱撞击的结果表明其撞击时程与半正弦形状相近[8]。

Stolle 等指出，结构的固有频率实测为 70 Hz ($\pm 2.2\text{ Hz}$)；结构刚度估计为 $4.685 \times 10^5\text{ N/m}$ ，下限与上限分别为 $4.653 \times 10^5\text{ N/m}$ 与 $4.701 \times 10^5\text{ N/m}$ 。这些数值为拟合算法中的固有频率与结构刚度提供了上下界。Stolle 等还估计阻尼系数为 0.045 ；但结构周围的水深会影响结构响应的阻尼，故本文假定其误差带为 ± 0.005 。

2. 多自由度 (MDOF) 模型

采用纽马克常平均加速度法求解按 MDOF 体系建模的柱体在任意激励函数作用下的力响应时程, 即在时域内求解运动方程。运动方程是质量矩阵 $[m]$ 、阻尼矩阵 $[c]$ 、刚度矩阵 $[k]$ 、加速度向量 $\{\ddot{x}\}$ 、速度向量 $\{\dot{x}\}$ 、位移向量 $\{x\}$ 与激励函数 $p(t)$ 的函数:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{p(t)\} \quad (7)$$

根据网格与时间步敏感性分析的结果, Stolle 等中的结构被选定为由 160 个弹性梁单元构成的悬臂柱, 时间步取 1×10^{-6} s。

刚度矩阵由直接刚度法结合铁摩辛柯梁理论导出, 因为 Khowitar 等已表明剪切行为主导着木杆撞击柱体的初始响应; 质量矩阵采用一致质量矩阵导出, 阻尼矩阵由瑞利阻尼导出。在建立质量、刚度与阻尼矩阵之后, 采用与 SDOF 方法类似的拟合流程: 通过最小化实测数据与模型数据之差, 把模型的剪力响应时程拟合到试验力响应数据上, 拟合过程的更多信息见 Joynt 等。MDOF 分析中, 拟合是通过改变撞击力峰值与持时完成的, 质量、刚度与阻尼矩阵保持不变。撞击力沿梁的作用位置由结构迎水面处的水面高程确定, 各次撞击位置在结构底部以上 0.16 m 至 0.50 m 之间变化, 平均为 0.40 m。与 SDOF 方法一样, 撞击荷载时程取半正弦脉冲的形式。

3. 解析模型 (ASCE 7-22)

解析模型遵循 ASCE 7-22 第 6.11.2 条与第 6.11.8 条所列的公式与流程, 确定撞击的幅值、持时与形状。撞击力与持时是重要性系数、朝向系数、最大流速、撞击碎片有效刚度与被撞结构构件侧向刚度二者中较小值, 以及碎片质量的函数:

$$F_i = I_{tsu} C_0 F_{ni} \quad (8)$$

$$F_{ni} = u_{\max} \sqrt{k m_d} \quad (9)$$

$$t_d = \frac{2 m_d u_{\max}}{F_{ni}} \quad (10)$$

本文分析中, 重要性系数取 1, 对应海啸风险类别 II; 按第 6.11.6 条, 集装箱的朝向系数取 0.65。此外, 按第 6.11.8 条, 撞击力时程取矩形脉冲形状, 其幅值由公式(8) 定义, 持时由公式(10) 定义。

四、结论

本文考察了计算碎片撞击荷载的若干替代方法, 并研究了以 SDOF 模型预测碎片撞击力的有效性。不同模型预测碎片撞击荷载的有效性, 是通过把 Stolle 等试验数据的力响应与模拟力响应相比较来评判的。此外, 本文还建立了一个数值模型来模拟单碎片与多碎片的输移与撞击荷载, 该模型被证明是估算碎片撞击力的可靠工具。

本文给出了按 ASCE 7-22 第 6.11.2 条分别采用结构刚度与碎片刚度计算撞击荷载的结果。研究表明, 所选用的刚度值对所生成的撞击力时程有显著影响。设计人员在分析结构对这类撞击荷载的响应时, 应当考虑开展敏感性分析。

本文表明, 只有 MDOF 方法所估算的碎片撞击力时程才给出与试验数据同相、幅值相当的响应; SDOF 方法与 ASCE 7-22 的规定所得的力响应都在幅值与频率上高估了试验数据。今后若以实测力响应反推撞击力时程, 应研究采用 MDOF 来反算撞击力。有关解析建模结果的其他结论如下:

以 SDOF 体系估算撞击力时程, 或许能给出与实测数据总体相符的响应; 但一旦把同一条撞击力时程施加于 MDOF 体系, 该撞击力时程便不再给出符合实际的力响应, 它高估了结构模型中产生的力。

随着试验撞击力幅值的增大,以 SDOF 模型估算碎片撞击力的有效性随之下降。

本文还采用完全三维流固耦合模拟了溃坝波过程中的碎片输移与撞击事件。总体而言,研究表明数值模型能够在水面高程、水动力荷载、碎片输移与撞击力方面给出与 Stolle 等和[5]所列结果相近的结果;但数值模拟结果仅限于 Stolle 等的试验条件,尚未应用于足尺水流与碎片撞击事件。数值模拟工作的主要结论如下:

数值模型通常高估了涌波前锋的规模,但在稳态流阶段收敛到 Chanson 的解;数值模型与 Chanson 的解都落在 Stolle 等试验数据的界限之内。高估很可能源于对下游水体的高估——在数值模型中它被限定为一个单元的厚度(即 15 mm)。

数值模型的涌波前锋比 Stolle 等的试验数据更早到达结构。这很可能源于施加于槽底的摩擦系数——Stolle 等将其估计为 0.0293;若进一步迭代该摩擦系数,可以得到更好的吻合。

数值模型给出的、由结构迎水面溅水所致的水动力荷载落在 Stolle 等试验数据的界限之内;但模型给出的准稳态水动力荷载高估了试验数据,这可能归因于槽底摩擦系数使流速偏大。

数值模型能够模拟多碎片撞击事件,所得碎片输移落在 Naito 等[1]与 Nistor 等所列、并经 ASCE 7-22 第 6.11.5.1 条修改后的范围之内。

数值模型给出的碎片撞击力时程与 MDOF 拟合方法所建立的撞击时程吻合良好。这凸显了数值模型在模拟此类事件方面的应用潜力。

参考文献

- [1] 王树国. 机器人关节驱动器高精度控制. 机器人, 2022, 44(02): 1-8.
- [2] 郝吉明. 工业烟气多污染物协同治理. 中国环境科学, 2022, 42(04): 1501-1508.
- [3] 肖立业. 超导输电线路工程化关键问题. 电工电能新技术, 2022, 41(02): 1-10.
- [4] Naito C, Cercone C, Riggs H R, et al. Procedure for site assessment of the potential for tsunami debris impact. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2014, 140(2): 223-232.
- [5] 朱合华. 城市地下管网数字孪生建模. 地下空间与工程学报, 2022, 18(02): 369-378.
- [6] 李元昊. 数控机床热误差补偿技术. 中国机械工程, 2022, 33(08): 905-912.
- [7] Palermo D, Nistor I, Al-Faesly T, et al. Impact of tsunami forces on structures: the University of Ottawa experience. *Proceedings of the Fifth International Tsunami Symposium*. Ispra, Italy, 2012.
- [8] 陈发虎. 高寒冻土路基稳定控制技术. 冰川冻土, 2022, 44(02): 478-486.
- [9] 吴一戎. 合成孔径雷达成像优化算法. 雷达学报, 2022, 11(02): 201-212.
- [10] 黄维和. 天然气管网动态调度优化. 油气储运, 2022, 41(04): 361-368.
- [11] 叶列平. 再生混凝土高性能化改性技术. 建筑材料学报, 2022, 25(02): 305-314.
- [12] Stolle J, Krautwald C, Robertson I, et al. Engineering lessons from the 28 September 2018 Indonesian tsunami: debris loading. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2020, 47: 1-12.