

文章编号: 1001-1455(2010)02-0138-07

钝圆头质量块对简支梁的多次弹塑性撞击*

刘中华, 尹晓春

(南京理工大学力学与工程科学系, 江苏 南京 210094)

摘要: 考虑多次局部弹塑性接触变形行为、多次撞击和多次分离过程, 提出了1种采用有限差分方法研究柔性结构多次弹塑性撞击问题的 MCIS 方法, 研究了钝圆柱头刚性质量块水平撞击简支梁的过程。研究表明, 该撞击过程实际上是1个复杂的多次弹塑性撞击过程, 一般存在2个以上的明显撞击区, 每个撞击区包含了形式多样的复杂的次生撞击过程。其他撞击区的冲量值与第1个撞击区的冲量值相当, 其他撞击过程中损失的撞击动能的总和与首次撞击过程中损失的撞击动能相当, 因此, 多个撞击区和多次撞击过程将对梁的撞击物理行为产生重要影响。研究还发现, 小质量块刚性体撞击时, 首次撞击过程的撞击动能损失明显。在大质量刚性体撞击时, 后续的多次撞击过程的撞击动能损失明显。

关键词: 固体力学; 多次碰撞; 有限差分方法; 梁; 弹塑性变形; 撞击接触力

中图分类号: O347.4; O313.4 **国标学科代码:** 130.3520 **文献标志码:** A

1 引言

柔性结构发生撞击时, 撞击部位将产生局部弹塑性变形, 同时产生幅值高、变化快的撞击接触力, 激发弹塑性瞬态波, 引起复杂的弹塑性动态变形响应, 并可能导致结构刚度的迅速劣化和结构的失效。弹塑性撞击问题的研究, 对于诸如车辆碰撞的安全性能^[1]、航空发动机的耐撞性^[2]、在轨航天飞机受到空间碎片撞击后的结构完整性^[3]、机器人终端受动器受撞运行的可靠性^[4]、磁头与硬盘碰撞接触后数据的安全性^[5]、阵列碳纳米管膜对噪声和冲击波吸收能力的分析^[6]、泡沫复合夹层结构防护性能的评定^[7]和核电站结构撞击安全性设计^[8]等都是必要的。近年来, 弹塑性撞击现象的复杂性引起了关注。D. Stoianovici 等^[9]采用高速光电记录设备, 记录到了1次常规斜杆坠落实验中产生的间隔约为0.2 ms的19次次生撞击过程, 而且各次撞击的恢复系数不尽相同。该实验预示着多次弹塑性撞击现象可能是1个普遍的物理现象。H. H. Ruan 等^[10]采用理想刚塑性模型, 针对柔性梁-梁撞击问题, 计算出了间隔约1 ms的6次次生塑性撞击过程。罗冠炜等^[11]采用牛顿恢复系数模拟塑性撞击的物理效应, 并运用撞击-弹簧振子模型, 研究了重复塑性撞击引发的非线性现象。但是, 迄今为止, 针对柔性结构多次弹塑性撞击问题的研究却不多见。对于多次弹塑性撞击问题, 撞击和分离过程交替出现, 相邻撞击的时间间隔很短。一系列的撞击加载和分离卸载依次激发的瞬态弹性波和瞬态塑性波, 在柔性结构内传播、反射和相互干涉, 产生了复杂的弹塑性变形响应, 理论分析非常困难, 只能借助于数值手段进行分析。

本文中通过计算分析撞击接触力、撞击冲量和撞击动能损失等, 研究在钝圆柱头刚性质量块水平撞击简支梁的过程中所出现的多次弹塑性撞击现象, 探索柔性结构系统多次弹塑性撞击现象的规律。

2 MCIS 方法

考虑发生在柔性结构撞击系统中的多次 (multiple) 局部弹塑性接触 (contact) 变形、多次撞击 (impact) 和多次分离 (separation) 过程, 提出采用有限差分方法计算多次弹塑性撞击过程的 MCIS 方法。图1为钝圆柱头刚性质量块水平撞击细长简支梁中端的结构模型, 刚性质量块的撞击初速度为 v_0 , 质

* 收稿日期: 2008-12-10; 修回日期: 2009-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872095); 国防基础研究基金项目(a2620060249)

作者简介: 刘中华(1981—), 男, 博士研究生。

量为 m ,半径为 R ,宽度与梁相同。简支梁的结构参数如图 1 所示 ,材料为理想弹塑性材料 ,弹性模量为 E ,屈服极限为 Y 。简支梁在轴向无约束 ,撞击开始前处于静止状态。为重点研究可能发生的多次弹塑性撞击 ,避免因重力势能引起的弹跳 ,将撞击系统水平安置。

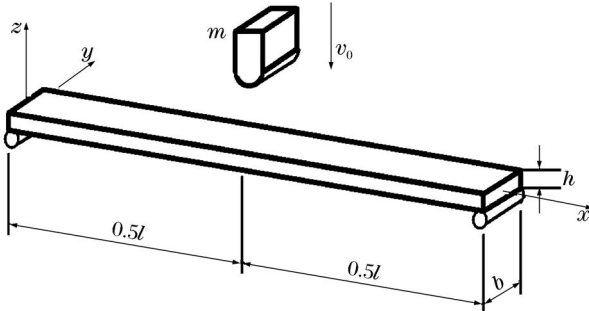


图 1 结构模型

Fig. 1 Structure model

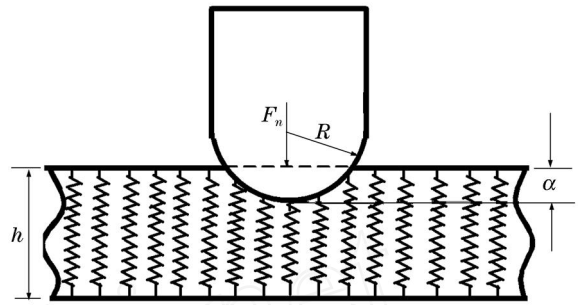


图 2 局部弹塑性接触模型

Fig. 2 Local elastic-plastic contact model

2.1 多次局部弹塑性接触模型

采用图 2 所示的 Winkler 地基模型^[12]描述撞击形成的局部接触压下过程。按接触载荷和接触区变形形式的不同 ,压下过程可分为弹性压下、塑性压下和弹性卸载 3 个阶段。与单次撞击不同 ,在分析多次撞击引起的多次局部接触压下过程中 ,需要考虑残余压痕的影响。再次压下时 ,只有当压下量超过残余压痕深度后 ,才可能出现新的撞击接触力。

第 1 次塑性压下阶段出现在压下量 超过临界值 $s = Yh/E$ 后 ,设弹性卸载前的压下量为最大压下量 $s_{1,m}$,卸载结束后将出现残余塑性压痕深度 $s_{1,r}$ 。第 n 次压下过程中 ,当压下量超过上次撞击产生的最大压下量 $s_{n-1,m}$ 后才出现新的塑性压下。各次撞击接触力 F_n 与压下量 的关系为 :

(1) 弹性压下阶段

$$\begin{cases} F_1 = \frac{4\sqrt{2REb}}{3h} s^{3/2} & s \\ F_n = \frac{4\sqrt{2REb}}{3h} [s^{3/2} - (s_{n-1,m} - s)^{3/2}] & s_{n-1,m}, n > 1 \end{cases} \quad (1)$$

(2) 塑性压下阶段

$$F_n = \frac{4\sqrt{2REb}}{3h} [s^{3/2} - (s_{n-1,m} - s)^{3/2}] \quad > s (n = 1), > s_{n-1,m} (n > 1) \quad (2)$$

(3) 弹性卸载阶段

$$\begin{cases} F_1 = \frac{4\sqrt{2REb}}{3h} [s^{3/2} - (s_{1,m} - s)^{3/2}] \\ F_n = \begin{cases} \frac{4\sqrt{2REb}}{3h} [s^{3/2} - (s_{n-1,m} - s)^{3/2}] & s_{n,m} = s_{n-1,m} (n > 1), \text{卸载后,令 } s_{n,m} = s_{n-1,m} \\ \frac{4\sqrt{2REb}}{3h} [s^{3/2} - (s_{n,m} - s)^{3/2}] & s_{n,m} > s_{n-1,m} (n > 1) \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

残余压痕深度为

$$s_{n,r} = s_{n,m} - s \quad (4)$$

其中 ,撞击接触力和压下量都是时间的函数。

2.2 动力学方程

考虑梁变形过程中的转动惯性效应 ,若梁发生小变形 ,且横截面在梁挠曲变形过程中不发生畸变 ,则梁的动力学方程为

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + J \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} + q(x, t) = A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (5)$$

式中: M 为横截面弯矩, ρ 为线密度, J 为单位梁长的转动惯量, w 为横向位移, A 为横截面积。分布外载荷 $q(x, t)$ 为撞击接触压力分布, 合力为撞击接触力 $F(t)$, 分离过程中 $q(x, t) = 0$ 。梁的边界条件为两端位移和弯矩为零。由于梁在初始时候处于静止状态, 故梁的初始条件为位移和速度都为零。撞击过程中刚性质量块受撞击接触力的作用, 减速运动。分离过程中, 刚性质量块不受外力作用, 匀速运动。

对于理想弹塑性材料梁, 本构关系为

$$\sigma = \begin{cases} E \epsilon & / / \leq s \\ Y \operatorname{sgn} \epsilon & / / > s, d > 0 \\ \sigma^* + d \epsilon & d = E d, / / > s, d < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: (z, t) 为横截面上距中性轴距离为 z 的轴向应力, $s = Y/E$ 为屈服应变, σ^* 为前一时刻的应力。横截面上距中性轴距离为 z 处的线应变为

$$\epsilon = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (7)$$

刚性质量块与简支梁的第 n 次撞击和分离条件为

$$F_n(w_M - w(0.5l) + \dot{w}_{n-1,r}) = 0 \quad (8)$$

式中: w_M 为刚性质量块的位移。在撞击过程中, 刚性质量块与梁的位移连续性条件亦表示于式(8)中。由上式和撞击接触力公式(1)~(4)可建立梁的位移与撞击接触力的关系式。

方程(1)~(8)构成了求解多次撞击问题的封闭方程组。

2.3 有限差分求解方法

对梁作 2 维结构离散, 如图 3 所示, 沿梁的轴向等分为 k 个微段, 共 $k+1$ 个节点, $x = l/k$ 。沿截面高度方向等分为 p 层, $z = h/p$, 则

$$x_i = i x, \quad z_j = j z \quad (9)$$

式中: $i = 0, 1, \dots, k; j = -p/2, \dots, p/2$ 。

低速撞击情况下, 撞击形成的接触变形区很窄, 可以将撞击接触分布压力按集中力 F 放在第 $k/2$ 微段。利用中心差分公式, 第 $k/2$ 微段的动力学方程的离散形式为

$$M_{k/2+1} - 2M_{k/2} + M_{k/2-1} + J(\ddot{w}_{k/2+1} - 2\ddot{w}_{k/2} + \ddot{w}_{k/2-1}) + F/x = A\ddot{w}_{k/2}(x)^2 \quad (10)$$

其余微段的动力学方程的离散形式为

$$M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1} + J(\ddot{w}_{i+1} - 2\ddot{w}_i + \ddot{w}_{i-1}) = A\ddot{w}_i(x)^2 \quad (11)$$

式中: $i = 1, \dots, k/2 - 1, k/2 + 1, \dots, k - 1$ 。

采用离散求积方法求解 x_i 位置截面的弯矩

$$M_i = \frac{A}{p} \sum_{j=-p/2}^{p/2} \sigma_{ij} z_j \quad (12)$$

为求出弯矩 M_i , 需先按应变表达式(7)的位移离散形式计算出应变, 再对时间离散(时间步长设为 t), 求出 t_{q+1} 时刻的应变增量

$$\epsilon_{ij,q+1} = \epsilon_{ij,q+1} - \epsilon_{ij,q} \quad (13)$$

最后根据材料本构关系(6)的离散形式, 求出应力并代入(12)式求出弯矩 M_i 。

结合动力学方程(10)和(11), 可求出的 t_{q+1} 时刻刚性质量块和梁的位移和速度为

$$\begin{cases} w_{M,q+1} = \ddot{w}_{M,q}(t)^2 + 2w_{M,q} - w_{M,q-1} \\ \dot{w}_{M,q+1} = 2\dot{w}_{M,q}(t) + \dot{w}_{M,q-1} \\ w_{i,q+1} = \ddot{w}_{i,q}(t)^2 + 2w_{i,q} - w_{i,q-1} \\ \dot{w}_{i,q+1} = 2\dot{w}_{i,q}(t) + \dot{w}_{i,q-1} \end{cases} \quad (14)$$

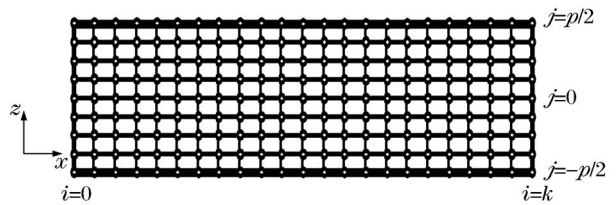


图 3 梁离散模型

Fig. 3 A discrete model for the beam

3 数值计算结果与分析

3.1 多次弹塑性撞击现象

钝圆柱头刚性质量块的参数为： $v_0 = 12.9 \text{ m/s}$ ， $m = 0.219 \text{ kg}$ ， $R = 10 \text{ mm}$ 。简支梁的结构和材料参数为： $l = 711.2 \text{ mm}$ ， $b = 16.3 \text{ mm}$ ， $h = 4.5 \text{ mm}$ ， $\rho = 0.5758 \text{ kg/m}$ ， $E = 206.9 \text{ GPa}$ ， $Y = 200 \text{ MPa}$ 。

由于整个水平撞击过程短暂，刚性质量块与梁结构的撞击通常会被看成是 1 次撞击过程^[13]。然而，图 4~9 中的数值计算结果显示，实际的撞击过程远比想象的复杂。

图 4 和图 5 的计算结果显示，在钝圆柱头刚性质量块水平撞击简支梁过程中，与 D. Stoianovici 等^[9]的实验观察结果类似，也出现了多次的次生撞击过程。如图 5 所示，第 1 次撞击过程发生在 $0 \sim 0.411 \text{ ms}$ ，第 1 次分离过程发生在 $0.411 \sim 0.428 \text{ ms}$ ，第 2 次撞击过程发生在 $0.428 \sim 0.469 \text{ ms}$ ，……。在撞击后期，还产生了 1 个长达 22.2 ms 的密集撞击群。

图 6 的计算结果表明，在第 1 次撞击过程中，梁局部区域已经出现了塑性屈服。仔细验算此后的各次撞击过程，发现梁上均有部分区域出现了塑性屈服。综合图 4~6 的计算结果可以得出，钝圆柱头刚性质量块水平撞击简支梁的过程是 1 个多次弹塑性撞击过程。

由图 4 还可以看出整个水平撞击过程中，共出现了 2 个撞击区。第 1 个撞击区出现在 $0 \sim 4.5 \text{ ms}$ ，第 2 个撞击区出现在 $17.7 \sim 50.3 \text{ ms}$ ，中间出现了 1 个长达 13.2 ms 的分离区。第 2 个撞击区撞击接触力峰值为 8.39 kN ，是第 1 个撞击区撞击接触力峰值 9.35 kN 的 89.7% 。另外，第 2 个撞击区的撞击冲量值 $I_2 = 1.570 \text{ N} \cdot \text{s}$ ，与第 1 个撞击区的撞击冲量值 $I_1 = 1.564 \text{ N} \cdot \text{s}$ 相当。由于梁的撞击动态响应与撞击接触力和撞击冲量直接相关，所以不应该忽略第 2 个撞击区的作用。

表 1 和图 7 给出了第 n 次撞击过程的撞击动能损失 E_n 与初始撞击动能 E_0 的比值

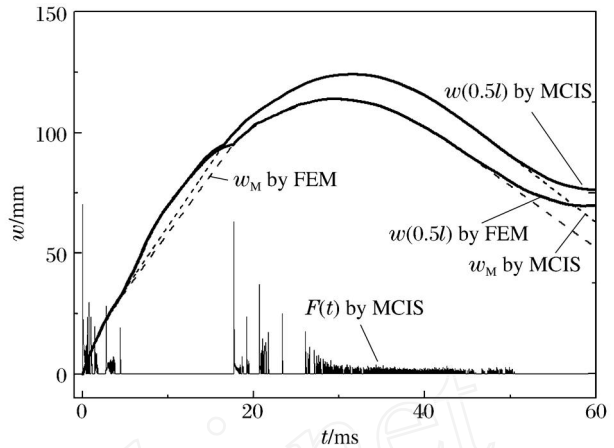


图 4 撞击接触力和位移响应

Fig. 4 Impact contact force and displacement responses

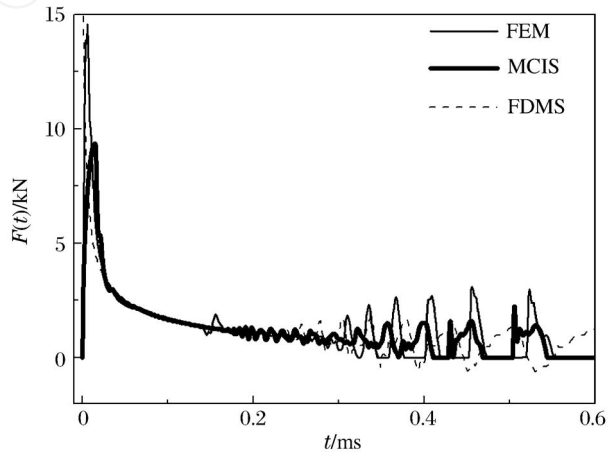


图 5 初期撞击接触力响应

Fig. 5 Initial impact contact force response

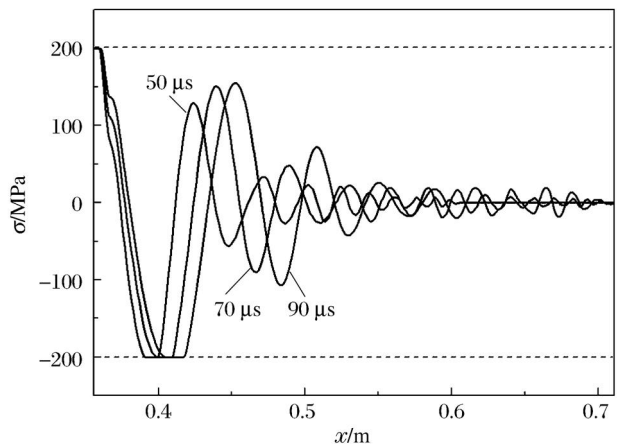


图 6 梁后表面弹塑性弯曲应力波的传播

Fig. 6 Elastic-plastic bending stress wave propagation on the back surface of the beam

E_n/E_0 和量纲一化的单位冲量的撞击动能损失 $E_n/(I_n v_0)$ 。计算结果表明,2 个撞击区的首次撞击造成的撞击动能损失分别为该撞击区的最大值,但 E_n/E_0 并非逐渐减小,而是高幅值稀疏撞击过程对应较大的撞击动能损失,低幅值密集撞击过程对应较小的撞击动能损失。相对而言,单位冲量撞击动能损失随着撞击次数的增加,呈现出有规律地单调下降。但在第 2 个撞击区,单位冲量撞击动能损失降入了负值区,表明梁在撞击后期将向刚性质量块回传能量,出现“能量反哺”现象。

表 1 和图 7 的计算结果还表明,由于其他各次撞击过程的撞击动能损失的累加值为 47.9%,高于首次撞击过程的撞击动能损失 45.0%,所以仅考虑首次撞击过程,将会造成撞击动能损失估计不足。

采用其他计算方法,如依据粘附性假设^[14]的 FDMS 方法,虽然能够模拟首次撞击过程,但是由于在后续过程中,计算出了不合理的负撞击接触力(见图 5),因此不能够模拟多次撞击过程。采用 3 维有限元软件(FEM 方法),虽然能够模拟多次撞击过程(见图 4~5),但是,为了得到相应的计算精度,需要划分足够数量的单元。在相同的计算条件下,用 FEM 方法计算需要 129.7 h,而用 MCIS 方法计算只需要 20 min,因此,MCIS 方法效率高,适合于大量、系统性的研究。图 8 表明,用 MCIS 和 FEM 等 2 种方法计算得到的梁中端挠度值相差不大,残余弹性振荡周期非常吻合,都约 46.8 ms。

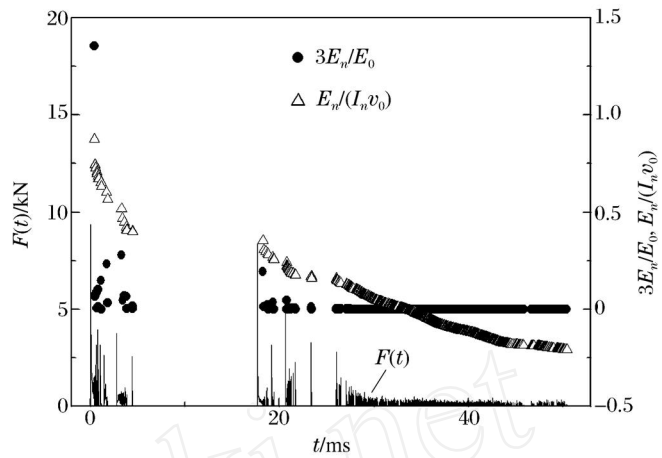


图 7 撞击动能损失和单位冲量撞击动能损失
Fig. 7 Impact kinetic energy dissipation and that of unit impulse

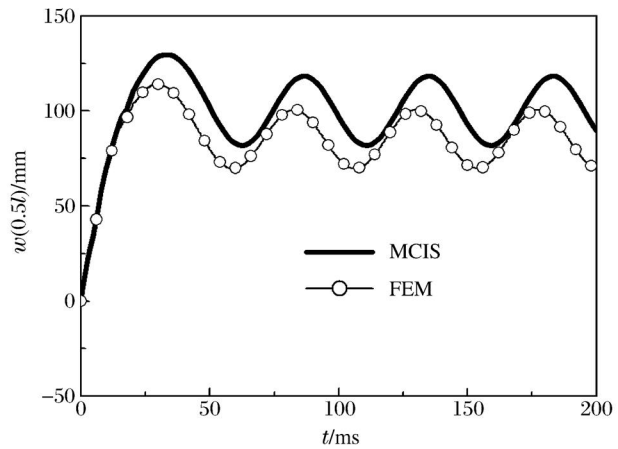


图 8 简支梁中端挠度响应

Fig. 8 Deflection response of the simply supported beam's middle point

表 1 主要的单次撞击动能损失

Table 1 Impact kinetic energy dissipation of main single impacts

撞击区	n	$(E_n/E_0)/\%$	撞击区	n	$(E_n/E_0)/\%$
第 1 撞击区	1	45.0	第 2 撞击区	1	6.4
	3	2.5		4	0.7
	4	2.9		7	1.2
	6	3.3		18	1.8
	9	4.9		23	0.4
	11	7.8		25	0.6
	13	9.3		27	0.7
15	2.3	32	1.3		

3.2 刚性质量对撞击能量的影响

图 9 给出了首次撞击过程和剩余撞击过程的撞击动能损失比 E_1/E_0 和 E^*/E_0 随刚性质量 m 的变化, 其中 E_1 和 E^* 为首次撞击过程和剩余撞击过程的撞击动能损失, E_0 为初始撞击动能。通过计算发现, 整个撞击过程的撞击动能损失 $E = E_1 + E^*$ 始终超过 E_0 的 90%, 即初始撞击动能在整个撞击过程中基本被消耗掉。随着刚性质量 m 的线性增加, E_1/E_0 单调减小, E^*/E_0 单调增加。这说明在小质量刚性体的撞击下, 首次撞击过程消耗了更多的撞击动能; 在大质量刚性体的撞击下, 后续撞击过程消耗了更多的撞击动能。因此, 在大质量物体撞击梁时, 更应考虑多次撞击过程。

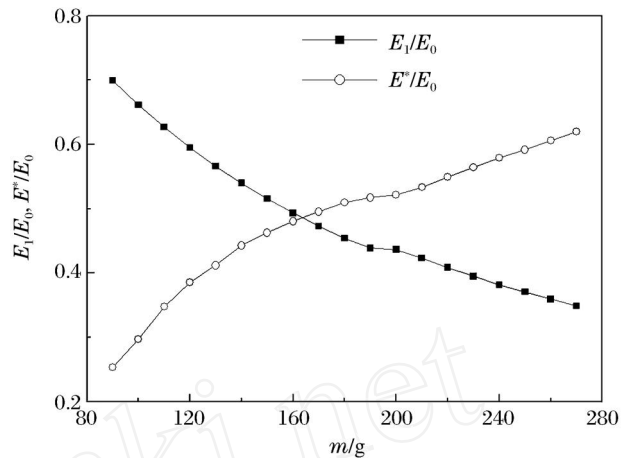


图 9 撞击动能损失

Fig. 9 Impact kinetic energy dissipation

4 结 论

提出并采用 MCIS 方法, 研究了钝圆柱头刚性质量块对简支梁的水平撞击, 得到了以下结论:

- (1) 水平撞击过程是 1 个复杂的多次弹塑性撞击过程, 一般存在 2 个以上的明显撞击区, 每个撞击区包含了形式多样的复杂的次生撞击过程。
- (2) 其他撞击区的冲量值与第 1 个撞击区的冲量值相当, 其他撞击过程中损失的撞击动能的总和与首次撞击过程中损失的撞击动能相当, 因此, 多个撞击区和多次撞击过程将对梁的撞击物理行为产生重要影响。
- (3) 在小质量刚性体撞击时, 首次撞击过程的撞击动能损失明显。在大质量刚性体撞击时, 后续的多次撞击过程的撞击动能损失明显。

参考文献:

- [1] 胡平, 鲍益东, 胡斯博, 等. 引入工艺因素的汽车车身部件碰撞仿真分析[J]. 固体力学学报, 2006, 27(2): 148-158.
HU Ping, BAO Yi-dong, HU Si-bo, et al. Crashworthiness simulation of automobile body part considering the effects of the part sheet metal[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 27(2): 148-158.
- [2] 孙苏亚, 杨嘉陵, 李松年, 等. 变截面叶片受飞射物强烈撞击的塑性动力响应[J]. 机械工程学报, 1999, 35(1): 99-102.
SUN Su-ya, YANG Jia-ling, LI Song-nian, et al. Plastic dynamic response of turbo-blade rotating in high speed under impact by flying object[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(1): 99-102.
- [3] Fahrenthold E P, Hernandez R J. Simulation of orbital debris impact on the space shuttle wing leading edge[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1-12): 231-243.
- [4] Mu X, Wu Q. On perfectly plastic impact dynamics of planar multi-link robotic systems contact with the environment[C]. Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications. Toronto, Canada, 2005: 1182-1187.
- [5] Tao Q, Lee H P, Lim S P. Contact analysis of impact in magnetic head disk interfaces[J]. Tribology International, 2003, 36(1): 49-56.
- [6] Daraio C, Nesterenko V F, Jin S. Highly nonlinear contact interaction and dynamic energy dissipation by forest of carbon nanotubes[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(23): 5724-5726.
- [7] Rizov V I. Low velocity localized impact study of cellular foams[J]. Materials and Design, 2007, 28(10): 2632-2640.

- [8] Teng T L , Chu Y A , Chang F A , et al. The dynamic analysis of nuclear waste cask under impact loading[J]. *Annals of Nuclear Energy* , 2003 ,30(14) :1473-1485.
- [9] Stoianovici D , Hurmuzlu Y. A critical study of the applicability of rigid-body collision theory[J]. *Journal of Applied Mechanics* , 1996 ,63(2) :307-316.
- [10] Ruan H H , Yu T X. Local deformation models in analyzing beam-on-beam collisions[J]. *International Journal of Mechanical Sciences* , 2003 ,45(3) :397-423.
- [11] Luo G W , L Ü X H , Ma L. Periodic-impact motions and bifurcations in dynamics of a plastic impact oscillator with a frictional slider[J]. *European Journal of Mechanics: A/ Solids* , 2008 ,27(6) :1088-1107.
- [12] Johnson K L. *Contact Mechanics*[M]. Cambridge , UK: Cambridge University Press , 1985 :104-106.
- [13] 聂子锋 ,杨桂通. 在质量块冲击作用下刚架大挠度响应的实验研究[J]. *固体力学学报* ,1991 ,12(1) :44-54.
NIE Zi-feng , YANG Gui-tong. Experimental investigation on large deflection response of a frame impacted by a moving body[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica* , 1991 ,12(1) :44-54.
- [14] Yu T X , Yang J L , Reid S R. Dynamic behavior of elastic-plastic free-free beams subjected to impulsive loading [J]. *International Journal of Solids Structures* , 1996 ,33(18) :2659-2680.

Multiple elastic-plastic impacts of a simply supported beam struck by a round-nosed mass *

LIU Zhong-hua , YIN Xiao-chun

*(Department of Mechanics and Engineering Science, Nanjing University
of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)*

Abstract : By considering the elastic-plastic deformation behavior of multiple contacts and the conditions of multiple impacts and multiple separations and by using the finite difference method , the MCIS method was presented to investigate the impact problem of a simply supported beam struck horizontally by a round-nosed rigid mass. The numerical simulations show that such a horizontal strike is indeed a complicated process of multiple elastic-plastic impacts. There are usually more than two impact zones in which each of them consists of complicated multiple sub-impacts. It is found that the other impact zones might occupy considerable impact impulse or even more than ones of the first impact zone. Hence , the other impact zones have significant influence on the impact responses of the beam. It is found as well that the other impacts might have considerable impact kinetic energy dissipation totally or even more than ones of the first impact. It implies that the multiple impacts are of an important role upon the impact physical behavior of the beam. The numerical investigations also show that for the light rigid mass , the first impact course will cause more kinetic energy dissipation , and for the weight rigid mass , the following multiple impact courses will cause more kinetic energy dissipation.

Key words : solid mechanics ; multiple impacts ; finite difference method ; beam ; elastic-plastic deformation ; impact contact force

* Received 10 December 2008 ; Revised 31 March 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10872095)

Corresponding author : YIN Xiao-chun , yinxiaochun2000 @yahoo.com.cn

(责任编辑 张凌云)