

中文引用格式:邓通发,周彤,沈铂坦,等. 基于离散单元动能转换的摇摆刚体碰撞恢复系数分析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(3): 74-80.

英文引用格式:DENG Tongfa, ZHOU Tong, SHEN Botan, et al. Analysis and research on collision restitution coefficient of rocking rigid body based on kinetic energy conversion of discrete elements[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(3): 74-80.

基于离散单元动能转换的摇摆刚体碰撞 恢复系数分析*

邓通发^{1,2}教授, 周彤^{1,2}, 沈铂坦^{1,2}, 毛秋雨^{1,2}

(1 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;

2 江西理工大学 江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室, 江西 赣州 341000)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.1829

基金项目:江西省千人计划项目(JXSQ2022017);江西省自然科学基金资助(20242BAB20236);江西省教育厅项目(GJJ2200858);江西理工大学高层次人才项目(205200100637)。

【摘要】 为解决摇摆刚体经典模型误差较大和无法求解非均质及非规则形状刚体碰撞恢复系数的问题,实现对摇摆结构更精准的动态响应预测、设计、安全评估以及振动控制,首先,在摇摆刚体能量转换分析基础上,离散化非均质及非规则形状刚体,分析离散单元动能转换;然后,将刚体碰撞过程分为3个阶段:第1阶段计算刚体各离散单元竖向动能被耗散后的剩余动能,第2阶段计算刚体各离散单元沿碰撞后转动角点方向动能被耗散后的剩余动能,第3阶段计算各离散单元剩余动能在内力作用下进行的转换,求解出整个过程的碰撞恢复系数;最后,借助高速数字图像相关性(DIC)测量系统开展摇摆响应测试试验,并验证离散单元动能转换方法。结果表明:该方法求得的均质矩形刚体碰撞恢复系数与试验值之间的相对误差小于3%,远小于摇摆刚体经典模型与试验值的相对误差;其求出的非均质及非规则形状刚体的碰撞恢复系数与试验值相对误差同样小于5%。采用该方法能更精准地预测摇摆结构在受到冲击后的动态响应,提供更合理的结构设计和安全评估。

【关键词】 离散单元; 动能转换; 摇摆刚体; 碰撞恢复系数; 动能分布

Analysis and research on collision restitution coefficient of rocking rigid body based on kinetic energy conversion of discrete elements

DENG Tongfa^{1,2}, ZHOU Tong^{1,2}, SHEN Botan^{1,2}, MAO Qiuyu^{1,2}

(1 School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China; 2 Jiangxi Province Key Laboratory of Environmental Geotechnical Engineering and Hazards Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the classical model of rocking rigid body has a large error and cannot solve the collision restitution coefficient of heterogeneous and irregular rigid bodies, realize more accurate dynamic response prediction, design, safety evaluation and vibration control of rocking

structure, based on the energy conversion analysis of mass element, the heterogeneous and irregular rigid bodies were discretized and the kinetic energy conversion analysis of discrete elements was carried out. The collision process of rigid body was divided into three stages. In the first stage, the residual kinetic energy of each discrete unit of rigid body was calculated after the vertical kinetic energy was dissipated. In the second stage, the residual kinetic energy of each discrete element of the rigid body was calculated after the kinetic energy had been dissipated in the direction of the rotation corner after the collision. In the third stage, the residual kinetic energy of each discrete element was converted and calculated under the action of internal force, and the collision recovery coefficient of the whole process was solved. With the help of the Digital Image Correlation (DIC) measurement system, the swing response test was carried out and the method was verified. The results show that the relative error between the collision recovery coefficient of a homogeneous rectangular rigid body obtained by this method and the experimental value is less than 3%, far less than the relative error between the classical model of a rocking rigid body and the experimental value. The relative error between the calculated collision recovery coefficients of heterogeneous and irregular rigid bodies and the experimental values is less than 5%. By this method, the dynamic response of a rocking structure after impact can be predicted more accurately, and a more reasonable structural design and safety evaluation can be provided.

Keywords: discrete elements; kinetic energy conversion; rocking rigid body; collision restitution coefficient; kinetic energy distribution

0 引言

自复位结构和建筑物内无约束的高大器物在地震和冲击等作用下会发生晃动和碰撞,而碰撞过程存在能量损耗,目前的碰撞恢复系数存在较大误差且不适用于非均质非规则形状刚体。因此,更精确且适用性更广的碰撞恢复系数对该类建筑和结构的设计和评估具有重要意义。

HOUSNER^[1]基于加州地震和智利地震的调查结果,提出摇摆结构的概念,并建立摇摆刚体经典模型。该模型与其分析方法从被提出至今得到很大改进与发展^[2]。BECK等^[3-4]将摇摆理念应用于桥梁抗震设计中并进行了相关研究。YIM等^[5]研究发现,刚体的摇摆响应对其尺寸、高宽比以及地面振动参数的变化十分敏感;ASLAM等^[6]分析指出,刚体倾覆受基底的参数、恢复系数及地面振动变化的影响较大。新西兰 South Ran-gitikei 铁路桥将摇摆结构应用于桥梁工程^[7]。随着可恢复功能结构理念兴起,越来越多国内科研人员也投入到摇摆结构的研究中。周颖等^[8]展望了可恢复功能结构的未来;随着摇摆结构逐渐在工程领域得到应用,研究重心投向了如何使摇摆结构的减震思路更好地应用于实际工程上^[9-12]。KALLIONTZIS等^[13]统计结果显示,刚体高宽比较小时,经典摇摆刚体模型的碰撞恢复系数与试验误差相对较大,且试验值均高于经典理

论解,基于此提出一种改进模型,修正模型虽然与试验吻合较好,但转动面长度采取了经验取值。ČEH等^[14]分析了单刚体无滑移和弹跳的自由摇摆试验,支撑了KALLIONTZIS等^[13]的研究。贾传果等^[2]为研究刚体的地震响应对摇摆刚体进行了振动台试验,测得实际碰撞恢复系数为0.901,较摇摆刚体经典模型的理论值0.873偏大。毛秋雨等^[15]提出一种摇摆刚体质元能量转换分析的方法,并借助既有试验数据证实了该模型精确度优于摇摆刚体经典模型。综上所述,摇摆刚体的经典模型及其修正模型均存在局限,前者误差较大且适用性窄,后者的经验取值缺乏理论依据;而质元能量转换分析法虽减小了误差,但其应用目前仍局限于均质矩形刚体。

因此,笔者拟在摇摆刚体质元能量转换分析基础上,对非均质及非规则形状刚体离散化,分析离散单元动能转换;采用该方法计算出的碰撞恢复系数不仅具有较高的精确度,对于非均质及非规则形状刚体同样适用且相对误差较小,以期为摇摆刚体耗能分析及发展提供新思路。

1 离散单元动能转换方法及碰撞恢复系数分析

以简单的非均质矩形刚体组合为例,在笛卡尔坐标系内建立离散单元动能转换模型,如图1所示,并推导出离散单元动能转换模型的动能分布方程。

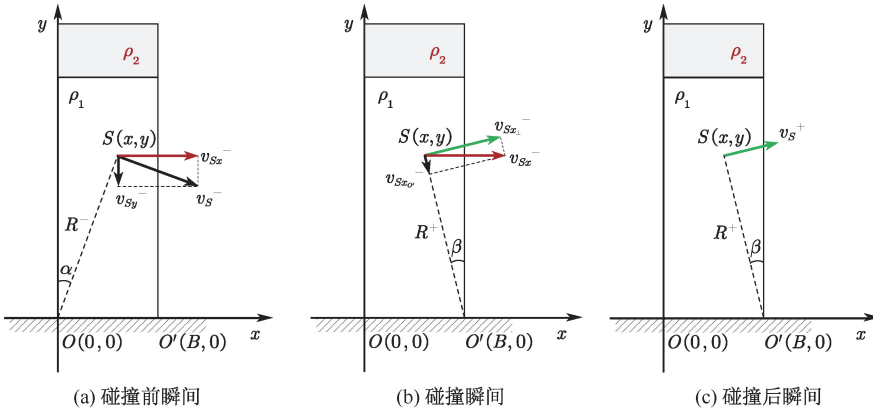


图1 离散单元动能转换模型

Fig. 1 Discrete element kinetic energy conversion model

该模型动能的转换过程一共分为 3 个阶段：
①碰撞前绕 O 点旋转瞬间：刚体 S 点处质元的动能分解为与地面平行的动能 T_{Sx}^- 和与地面垂直的动能 T_{Sy}^- 。②碰撞瞬间：与地面垂直的动能 T_{Sy}^- 被完全耗散，而与地面平行的动能 T_{Sx}^- 分解为沿 $O'S$ 方向的动能和垂直于 $O'S$ 方向的动能，旋转中心由 O 点转移至 O' 点。③碰撞后绕 O' 点旋转瞬间：沿 $O'N$ 方向的动能在地面的垂直向的支持力和地面平行向的摩擦力共同作用下完全耗散，沿垂直 $O'N$ 方向的动能转换为绕 O' 旋转的动能。

将摇摆刚体离散化，结果如图 2 所示，将刚体剖分为沿 x 轴 n_1 列，沿 y 轴 n_2 行的质元，将刚体相同密度部分的质量均分到每个质元处，质元质量矩阵为：

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1j} & \cdots & m_{1n_2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{i1} & \cdots & m_{ij} & \cdots & m_{in_2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{n_11} & \cdots & m_{n_1j} & \cdots & m_{n_1n_2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 m_{ij} 为刚体内坐标 (x_i, y_j) 处质元的质量，其中， $i \in [1, n_1], j \in [1, n_2]$ 。

碰撞前瞬间，刚体 S 点处质元的线速度为：

$$v_s^- = \dot{\theta}^- R^- \quad (2)$$

式中： $\dot{\theta}^-$ 为碰撞前角速度； R^- 为 S 点到 O 点的距离。

该点质元与地面平行的速度为：

$$v_{Sx}^- = \dot{\theta}^- R^- \cos \alpha \quad (3)$$

式中 α 为 OS 与高边的夹角。

在碰撞瞬间，该点在垂直于 $O'S$ 方向的速度为：

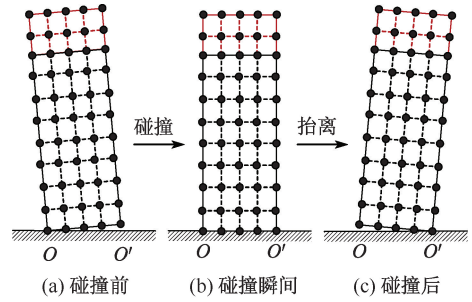


图2 摇摆刚体的离散化模型

Fig. 2 Discrete model of rocking rigid body

$$v_{Sx\perp}^- = \dot{\theta}^- R^- \cos \alpha \cos \beta \quad (4)$$

式中 β 为 SO' 与高边的夹角。

坐标系内， O 点为坐标原点 $(0,0)$ ， O' 点坐标为 $(B,0)$ ， S 点坐标为 (x_i, y_j) ；根据三角函数关系式可将式(4)改为：

$$v_{Sx\perp}^- = \dot{\theta}^- \frac{y_j^2}{\sqrt{y_j^2 + (B - x_i)^2}} \quad (5)$$

此时刚体 S 点处质元的动能为：

$$T_{Sx\perp}^- = \frac{1}{2} m_s (\dot{\theta}^-)^2 \frac{y_j^4}{y_j^2 + (B - x_i)^2} \quad (6)$$

式中 m_s 为刚体 S 点处质元的质量。

此时刚体所具有的总动能为：

$$T^- = \frac{1}{2} (\dot{\theta}^-)^2 \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} m_{ij} \frac{y_j^4}{y_j^2 + (B - x_i)^2} \quad (7)$$

式中： T^- 为刚体动能转换前的总动能； B 为刚体的宽； H 为刚体的高。

碰撞后瞬间，刚体的动能进行转换，使得刚体上任意质元的速度均符合刚体绕 O' 点转动的速度，该瞬间刚体 S 点处质元的线速度为：

$$v_s^+ = \dot{\theta}^+ R^+ \quad (8)$$

式中: $\dot{\theta}^+$ 为碰撞后角速度; R^+ 为 S 点到 O' 点的距离。

根据三角函数关系式可将式(8)改为:

$$v_s^+ = \dot{\theta}^+ \sqrt{y_j^2 + (B - x_i)^2} \tag{9}$$

刚体 S 点处质元的动能为:

$$T_s^+ = \frac{1}{2} m_{ij} (\dot{\theta}^+)^2 [y_j^2 + (B - x_i)^2] \tag{10}$$

刚体所具有的总动能为:

$$T^+ = \frac{1}{2} (\dot{\theta}^+)^2 \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} m_{ij} [y_j^2 + (B - x_i)^2] \tag{11}$$

式中 T^+ 为刚体动能转换后的总动能。

由于动能转换过程只改变了刚体各质元的动能,而刚体所具有的总动能不变,即 $T^- = T^+$,故联立式(7)与式(11)可得摇摆刚体模型的动能转换方程:

$$\left(\frac{\dot{\theta}^+}{\dot{\theta}^-}\right)^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} m_{ij} \frac{y_j^4}{y_j^2 + (B - x_i)^2}}{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} m_{ij} [y_j^2 + (B - x_i)^2]} \tag{12}$$

故摇摆刚体离散单元动能转换模型下的角速度恢复系数即碰撞恢复系数为:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} m_{ij} \frac{y_j^4}{y_j^2 + (B - x_i)^2}}{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} m_{ij} [y_j^2 + (B - x_i)^2]} \tag{13}$$

2 摇摆刚体碰撞试验及分析

2.1 均质规则刚体试验验证

根据 KALLIONTZI 等^[13]的统计,以往摇摆刚体碰撞试验多采用实心木材、钢材及花岗岩材质。考虑到研究目标及所探讨的刚体结构特性,以校准水平的钢平台作为基底,采用实心木材制成的单刚体结构试块进行试验,试块参数见表 1。

表 1 均质规则刚体试验试块参数
Table 1 Parameter table of homogeneous regular rigid body test block

序号	试块名称	质量 m/kg	H/m	高宽比
M ₁	实心木块	0.424 9	0.2	2
M ₂	实心木块	0.644 3	0.3	3
M ₃	实心木块	0.869 5	0.4	4
M ₄	实心木块	1.097 4	0.5	5

ČEH 等^[14]开展铝块摇摆耗能试验时,在试块和基底粘贴胶带以防止产生滑移与弹跳,虽然该方

法可有效减小试块水平向摩擦,但会增大碰撞接触时间,影响试验结果。因此,进行多组试验,选取未发生水平滑移的数据进行分析。为确保试验数据的精确性和可靠性,采用高速数字图像相关性(Digital Image Correlation, DIC)测量系统对上述木块开展摇摆响应测试试验,摇摆响应试验现场如图 3 所示。

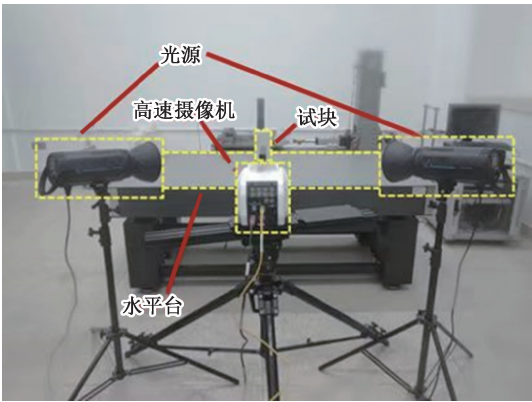


图 3 摇摆响应试验现场
Fig. 3 site of Rocking response testing

将试块以一定初始倾角释放,使试块在刚体工作台面做自由摇摆运动,采用高速 DIC 测量系统采集试块在二维平面内的响应信号;采集离散斑图片后,通过 Correlli^{STC} 软件提取试块表面测点的位移响应信号。将提取出的无量纲位移信号计算转化为无量纲的速度响应,计算出碰撞前后的角速度恢复系数的试验值 r_e ,并将其与经典模型值 r_H 、质点系摇摆刚体动能分布模型值 r_r 和离散单元动能转换模型值 r_d 汇总,结果见表 2。分析显示,当离散化网格划分数量 ≥ 5 时, r_d 精度较好,故在计算离散单元动能转换模型值 r_d 时,选取划分网格数量为 5。

表 2 均质规则刚体试验值与理论值对比
Table 2 Comparison table between experimental values and theoretical values of homogeneous regular rigid body

序号	r_e	r_H	r_r	r_d
M ₁	0.839 7	0.7	0.830 3	0.836 7
M ₂	0.931 7	0.85	0.912 6	0.916 2
M ₃	0.954 3	0.911 8	0.947 4	0.949 8
M ₄	0.985 0	0.942 3	0.965 0	0.966 7

2.2 非均质和非规则形状刚体试验验证

为验证该模型针对非均质及非规则形状刚体的适用情况,进一步采用木块和钢块组合的刚体进行上述试验,简化模型以木块 M₂ 与钢块 G₁、G₂ 的组合为例(图 4),其中,以绕 O 点为旋转起始点,非规则形状刚体又分为布置在 O 侧和 O' 侧。

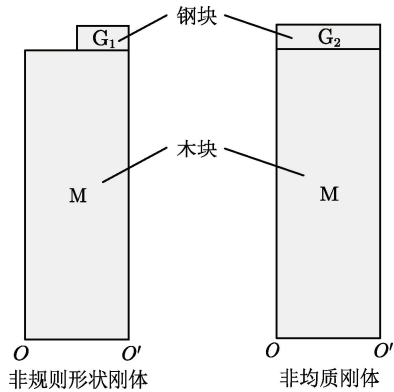


图 4 试验模型

Fig. 4 Schematic diagram of test model

以 M_1+G_1 (O 侧) 为例,通过 Correli^{STC} 精确匹配每一张图中散斑区域的灰度值,通过后一张图的散斑灰度值减去前一张图的散斑灰度值得到无量纲化的散斑线速度,将灰度值导入 Origin,绘制出散斑无量纲化线速度云图,如图 5 所示。根据散斑的无量纲化线速度计算,其中,碰撞前右上角散斑的无量纲化线速度为 1.252,碰撞后左上角散斑的无量纲化线速度为 1.185,将碰撞后左上角散斑的无量纲化线速度除以碰撞前右上角散斑的无量纲化线速度,得到 M_1+G_1 (O 侧) 碰撞过程的碰撞恢复系数为 0.946。

试验采用的 2 个钢块参数见表 3,木块和钢块的行列均按每 0.25 cm 设置一个节点划分网格,计算对应理论值,并与采用上述试验测得的数据对比,结果见表 4。

表 3 钢块参数

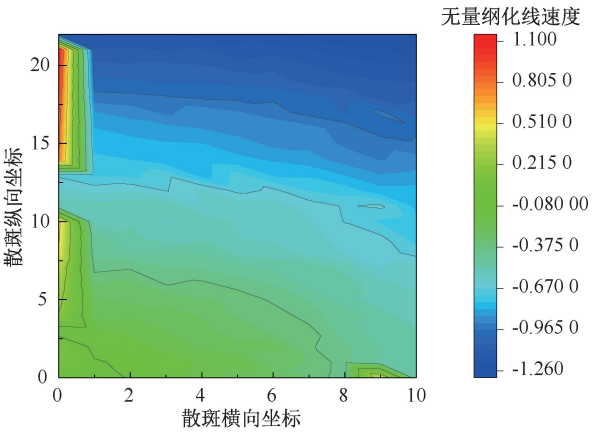
Table 3 Steel block parameters

序号	试块名称	宽/m	高/m	质量/g
G_1	实心钢块	0.05	0.01	190
G_2	实心钢块	0.1	0.01	380.08

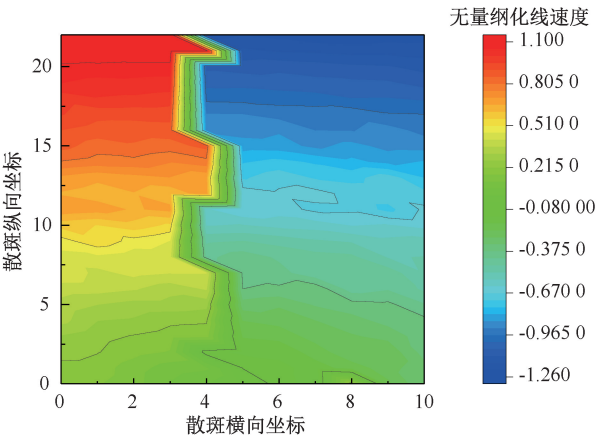
表 4 构件理论及试验值

Table 4 Component theory and test values

编号	构件	理论值	试验值
1	M_1+G_2	0.900 239	0.919 052
2	M_2+G_2	0.946 057	0.942 844
3	M_3+G_2	0.965 72	0.971 819
4	M_4+G_2	0.976 098	0.968 127
5	M_1+G_1 (O 侧)	0.857 682	0.887 779
6	M_1+G_1 (O' 侧)	0.913 204	0.946 139
7	M_2+G_1 (O 侧)	0.925 714	0.946 184
8	M_2+G_1 (O' 侧)	0.948 613	0.947 244
9	M_3+G_1 (O 侧)	0.954 417	0.948 216
10	M_3+G_1 (O' 侧)	0.965 848	0.969 557
11	M_4+G_1 (O 侧)	0.969 153	0.970 975
12	M_4+G_1 (O' 侧)	0.975 633	0.982 756



(a) 碰撞前



(b) 碰撞后

图 5 散斑无量纲化线速度云图

Fig. 5 Cloud diagram of dimensionless speckle line velocity

2.3 误差分析及相关性评价

为验证离散单元动能转换模型的合理性,分别将摇摆刚体经典模型、质点系摇摆刚体动能分布模型以及离散单元动能转换模型的碰撞恢复系数理论值与试验值进行对照,并进行相关性评价及误差分析。其中,采用 Origin 计算相关性系数,相对误差计算式如下:

$$\delta = \frac{|x - \mu|}{\mu} \quad (14)$$

式中: δ 为相对误差; x 为理论值; μ 为试验值。

经分析,离散单元动能转换模型理论值与试验数据的相关性系数为 0.995,且与质点系摇摆刚体动能分布模型理论值的相关性系数为 1。绘制均质规则刚体下 3 种模型理论值与试验数据的对比图及相对误差图,如图 6 及图 7 所示。

从图 6 可以看出,质点系摇摆刚体动能分布模型与离散单元动能转换模型的理论值较摇摆刚体经

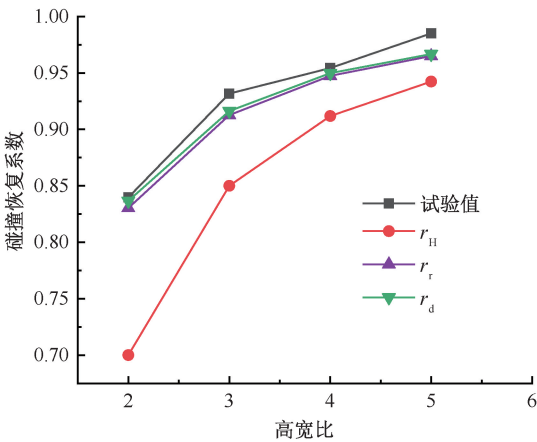


图 6 均质规则刚体试验数据与离散单元动能转换模型理论值对比

Fig. 6 Comparison diagram between homogeneous regular rigid body test data and theoretical value of discrete element kinetic energy conversion model

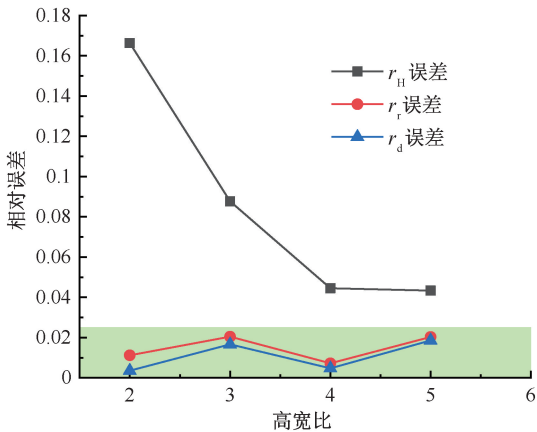


图 7 均质规则刚体试验数据与离散单元动能转换模型理论值相对误差

Fig. 7 Relative error diagram between homogeneous regular rigid body test data and theoretical value of discrete element kinetic energy conversion model

典模型更为贴近试验值,且通过图 7 可以看出,质点系摇摆刚体动能分布模型与离散单元动能转换模型的理论值与试验值的相对误差虽有轻微波动,但均控制在 3% 内,且离散单元动能转换模型的理论值更为接近试验值,相对误差控制在 2% 内;而摇摆刚体经典模型与试验值的相对误差虽随着高宽比的增大逐渐减小,但总体仍在 4%~17% 区间内。绘制网格为 5 的离散单元动能转换模型与质点系摇摆刚体动能分布模型的关系曲线,如图 8 所示,分析可知:网格为 5 的离散单元动能转换模型与质点系摇摆刚体动能分布模型的理论值较为接近,两模型理论值与试验值的相对误差均小于 1%;此外,根据两模型

理论值的误差分析可知:随着高宽比的增大,二者理论值的相对误差逐渐减小。

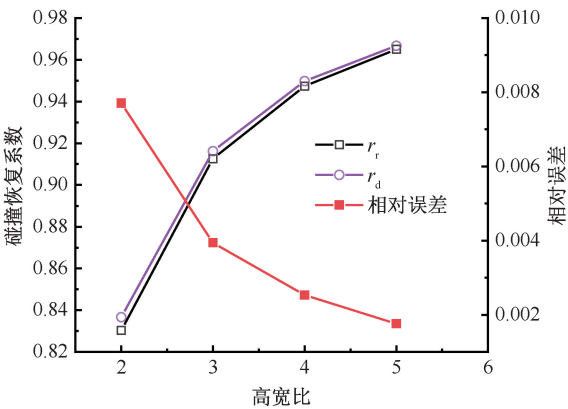


图 8 均质规则刚体下两模型理论值相对误差分析
Fig. 8 Relative error analysis diagram of theoretical values of two models under homogeneous regular rigid body

非均质及非规则形状刚体碰撞恢复系数试验值与离散单元动能转换模型理论值的相对误差图如图 9 所示。

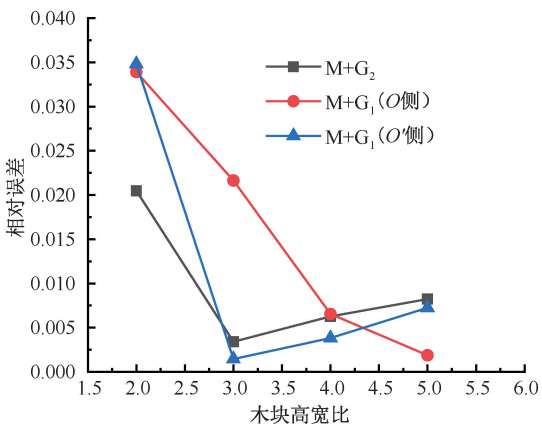


图 9 非均质及非规则形状刚体离散单元动能转换模型与试验相对误差
Fig. 9 Kinetic energy conversion model and experimental relative error diagram of heterogeneous and irregular rigid discrete elements

离散单元动能转换模型求得的非均质及非规则形状刚体的碰撞恢复系数与试验值的相对误差均在 5% 以内,在 $M+G_1(O \text{ 侧})$ 的情况下呈现随木块高宽比增大相对误差减小的趋势,在 $M+G_2$ 和 $M+G_1(O' \text{ 侧})$ 的情况下,当木块高宽比小于 3 时,呈现随木块高宽比增大相对误差减小的趋势,当木块高宽比超过 3 时,呈现随木块高宽比增大相对误差略微增大的趋势。

3 结 论

1) 离散单元动能转换分析方法的理论值与试验值误差小于 3%, 在各种高宽比工况下均呈现出与试验数据的高吻合度, 相对误差远小于摇摆刚体经典模型的相对误差; 非均质和非规则形状刚体的摇摆碰撞试验结果显示该模型理论值与试验值相对误差均控制在 5% 以内, 进一步验证了所提离散单元动能转换分析方法的合理性和可靠性, 通过对摇摆结构更精准的动态响应预测为相关工程设计和安全评估提供一定的参考价值。

2) 文中模型的理论值基于碰撞时间极短和水平动能无损耗的假设, 若能精确计算碰撞时间并计入水平动能损耗, 将有效提升碰撞恢复系数的求解精度。离散单元动能转换法为分析非均质、非规则形状刚体的摇摆行为提供了新途径, 但目前仅局限于二维平面, 三维空间下的适用性仍需深入探究。

3) 虽然该方法在刚体中展现出较小的误差, 但对摇摆碰撞系统中涉及的非刚体及非弹性体适用性较弱, 针对极端条件下的碰撞情况还需要进行进一步分析。

参 考 文 献

- [1] HOUSNER G W. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 403-417.
- [2] 贾传果, 潘家富, 李建广, 等. 考虑侧壁影响的偏心单刚体地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(8): 116-123.
- JIA Chuanguo, PAN Jiafu, LI Jianguang, et al. Seismic analysis of eccentric single-rigid-body considering the influence of colliding-to-wall[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(8): 116-123.
- [3] BECK J L, SKINNER R I. The seismic response of a reinforced concrete bridge pier designed to step[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1973, 2(4): 343-358.
- [4] 杜修力, 周雨龙, 韩强, 等. 摇摆桥墩的研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(5): 1-11.
- DU Xiuli, ZHOU Yulong, HAN Qiang, et al. State-of-the-art on rocking piers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(5): 1-11.
- [5] YIM C, CHOPRA A K, JOSEPH P. Rocking response of rigid blocks to earthquake[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1980, 8(6): 565-587.
- [6] ASLAM M, SCALISE D T, GODDEN W G. Earthquake rocking response of rigid bodies[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(2): 377-392.
- [7] CORMACK L G. The design and construction of the major bridges on the mangaweka rail deviation[J]. Transactions of the Institute of Professional Engineers New Zealand: Civil Engineering Section, 1988, 15(1): 17-23.
- [8] 周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 1-12.
- ZHOU Ying, WU Hao, GU Anqi. Earthquake engineering: From earthquake resistance, energy dissipation and isolation to resilience[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 1-12.
- [9] 孙魁, 郭昌锋, 刘洪宇. 内嵌式框架摇摆墙结构抗震性能研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增 2): 153-159.
- SUN Kui, GUO Changfeng, LIU Hongyu. Research on seismic performance of embedded frame structure with in-filled rocking wall[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S2): 153-159.
- [10] 肖水晶, 冯鹏. 新型装配式自复位 RC 剪力墙设计与性能研究[J]. 工程力学, 2024, 41(11): 116-124.
- XIAO Shuijing, FENG Peng. Design and performance investigation on novel prefabricated self-centering RC shear wall[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(11): 116-124.
- [11] 宋英华, 马建, 张远进. 非平稳随机地震激励下多层框架-摇摆墙结构的响应分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 48-56.
- SONG Yinghua, MA Jian, ZHANG Yuanjin. Response determination of multi-story frame-rocking wall structure under non-stationary random seismic excitation[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 48-56.
- [12] 徐龙河, 杨智博, 谢行思. 自复位复合阻尼耗能支撑滞回性能研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(14): 29-36.
- XU Longhe, YANG Zhibo, XIE Xingsi. Study on the hysteretic performance of a self-centering composite damping energy dissipation brace[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(14): 29-36.
- [13] KALLIONTZIS D, SRITHARAN S, SCHULTZ A. Improved coefficient of restitution estimation for free rocking members[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(12): DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001598.
- [14] ČEH N, JELENIĆ G, BIČANIĆ N. Analysis of restitution in rocking of single rigid blocks[J]. Acta Mechanica, 2018, 229: 4 623-4 642.
- [15] MAO Qiuyu, DENG Tongfa, SHEN Botan, et al. Research on collision restitution coefficient based on the kinetic energy distribution model of the rocking rigid body within the system of mass points[J]. Buildings, 2024, 14(7): DOI: 10.3390/buildings14072119.



作者简介: 邓通发 (1980—), 男, 江西兴国人, 博士, 教授, 主要从事桥梁结构抗震、结构健康监测与损伤诊断、复合材料和组合结构力学行为等方面的研究。E-mail: tfdeng@jxust.edu.cn。