

## 梁受到球碰撞时的弹性冲击荷载初探

剧锦三 张云鹏 蒋秀根

(中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要** 使用数值方法模拟考虑接触变形的梁受到球横向弹性碰撞的全过程。通过计算分析了球和梁的刚度、撞击速度、质量比等因素对梁所受到的冲击荷载的影响,发现:考虑接触变形后,冲击荷载有合理的升压段;球体的弹性模量越小,冲击荷载的峰值越小,每次接触的时间越长;在质量比不变的情况下,冲击荷载的峰值与初速度成正比;初速度越小,每次接触的升压和卸压时间越长,相邻2次接触的时间间隔越小,相邻的卸压和升压段间距越小;速度相同时,质量比越大,荷载峰值越小,且撞击物脱离接触的过程越明显,升压段和卸压段持续时间越短。

**关键词** 梁;球;横向冲击荷载;数值方法;接触变形

**中图分类号** TU 311.01; TU 323.3

**文章编号** 1007-4333(2007)03-0093-03

**文献标识码** A

### A probe into elastic impact load of beam subjected to lateral impact of ball

Ju Jinsan, Zhang Yunpeng, Jiang Xiugen

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The elastic impact procedure of a beam under lateral impact of ball was simulated by using numerical method in which the contact deformation was considered. From calculation results, the effects of rigidity of ball and beam, velocities and mass ratios on the impact load were analyzed. The impact load results show that there is reasonable ascending part in the numerical results when the contact deformation is considered. The smaller the elastic modulus of the ball, the smaller the peak value of impact load and the longer the contact time. When mass ratio is constant, the peak value of impact load is proportional to the velocity. The smaller the velocity of the ball, the longer the ascending and descending part of one contact and the shorter the interval between neighboring contacts and neighboring descending and ascending parts. When the velocity is constant, the bigger the mass ratio, the smaller the peak value of impact load and the longer the duration of no contact of moving ball, the shorter the ascending and descending part.

**Key words** beam; ball; lateral impact load; numerical solution; contact deformation

结构的弹性碰撞问题是一个经典问题。Timoshenko 曾使用模态叠加法研究梁的横向碰撞<sup>[1]</sup>;诸德超、段誉峰等把弹性碰撞问题简化为一个振动系统,认为二者接触区之间总有作用力且二者一起运动<sup>[2-8]</sup>。这些方法都是对弹性碰撞系统的解析解。还有多种数值方法可以解决碰撞问题<sup>[9-12]</sup>,但对于梁结构受到侧向冲击时的弹性冲击荷载至今还没有公认的解<sup>[3,5]</sup>,主要问题集中在接触问题的求解上。对于这一问题的求解,前人的研究多采用梁单元受到刚性质点的侧向撞击来模拟,忽略了接触变形对

于冲击的影响<sup>[7]</sup>。虽然 Euler-Benoulli 梁、Timoshenko 梁单元可以考虑截面的翘曲变形,但是由于梁单元本身的局限性,截面的横向变形被假设为常数,忽略了厚度方向的应变。把这个假设应用于接触问题,就不能准确地考虑梁受到刚体横向冲击时的接触变形。近年的研究中虽然通过一些变通方法,比如用在梁和刚体间添加弹簧来考虑接触变形<sup>[2]</sup>,或使用可以考虑剪切变形的弹性力学平面应力梁的模型来考虑受到刚体碰撞时的接触变形<sup>[8]</sup>,但是仍然没有系统研究在考虑接触变形影响的情况

收稿日期: 2006-09-20

基金项目: 中国农业大学科研启动基金

作者简介: 剧锦三,副教授,博士,主要从事防灾减灾研究, E-mail: jujinsan@tsinghua.org.cn; 蒋秀根,教授,通讯作者,主要从事结构工程研究, E-mail: jiangxiugen@tsinghua.org.cn

下梁受到刚性撞击体撞击时的冲击荷载,更未见同时考虑弹性体与梁撞击时的接触变形和冲击荷载的研究。

笔者拟使用数值方法中的显式计算方法,利用实体单元模拟弹性球撞击弹性梁的碰撞过程(图1),并证明本文中冲击荷载计算方法的合理性;然后采用实体单元着重研究接触力即冲击荷载,分别计算梁的中部受到不同质量、速度的球体冲击时的冲击荷载。

## 1 基本理论

冲击是高速动力和接触同时存在的复杂力学问题。本文中使用时中心差分方法对运动方程进行显式的时间积分,接触作为一种约束被引入。采用表面与表面之间的接触,使用动力学接触公式,应用预测/修正的方法获得接触条件下的精确柔度。在增量步开始时假设没有发生接触,如果在增量步结束时产生了过盈,则修改加速度的值,以获得正确的、增强了接触约束后的构形,从而得到每一增量步的接触力,而接触力就是冲击荷载。

为了更好地考虑接触变形,必须使用可以描述接触变形的单元来分析。本文中使用球体作为撞击物,接触面在碰撞过程中由小到大,可以真实反映接触过程,而且对于梁和球体而言,需要考虑碰撞过程的三维应力波传递;因此梁和球体都使用实体单元进行分析。

## 2 弹性碰撞计算结果及分析

碰撞有限元模型见图1。弹性钢梁截面积  $A = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ,弹性模量  $E = 2.07 \times 10^{11} \text{ MPa}$ ,密度  $= 7800 \text{ kg/m}^3$ ,长  $l_b = 10.0 \text{ m}$ ,两端铰接,质量为  $m$ 。半径为  $r$  的球以  $v = 20 \text{ m/s}$  的速度下落,  $= Al_b/m$  为梁与撞击物的质量比,接触点在顶面的中点。

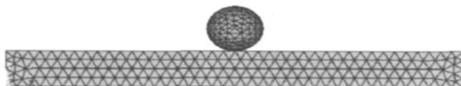


图1 球与梁的单元模型

Fig. 1 Element model of ball and beam

图2示出用实体单元模型模拟球与梁碰撞过程中碰撞过程某时刻的应力波在模型中的三维分布图形。可以看出,应力波从中心部位同时向纵向、横向传递,这是梁单元模型不能够实现的。比较文献[2]梁单元的冲击荷载结果可以看出,该解析解的升压

段是零,冲击荷载笔直上升<sup>[2]</sup>;而本文中考虑接触变形的冲击荷载的峰值小且有明显的升压段,更加符合冲击时的实际情况。这与文献[8]中使用弹性梁理论方法得到的结果类似,但本文结果中的荷载峰值更小,且分布图形有所不同,2个升压段间的时间,也就是应力波从撞击点到简支端来回一次的时间,比文献[8]中数值解的结果大。这是由于本文中的方法不仅考虑目标体的接触变形,也考虑了撞击物的接触变形和三维应力波在目标体中的传播对冲击荷载的峰值和分布形式的影响,而文献[2]和[8]中的方法只考虑撞击过程中碰撞物或目标体的单侧接触变形,因此接触力会大一些。

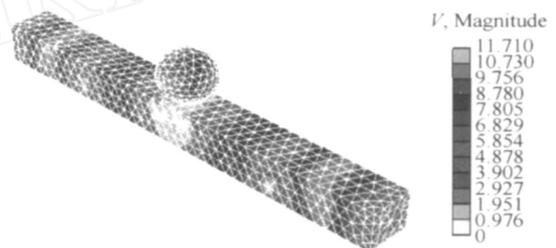


图2 实体单元模型中的应力波图形

Fig. 2 Stress wave of the model of solid element

从图2可见,应力波在模型中沿纵向和横向的传递是相似的,本研究亦对具有不同网格密度的模型进行计算,结果非常相近。另外从图3可以看到,伪应变能与总能量的比值很小,说明单元网格密度较好。由以上计算结果可知,本文中使用实体单元研究考虑接触变形时的冲击荷载的计算方法是合理的。

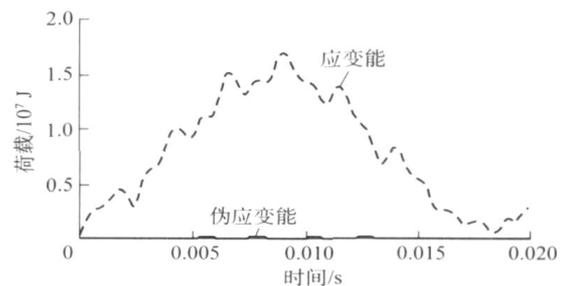


图3 弹性冲击时的能量图

Fig. 3 Energy of elastic impact

### 2.1 刚度的影响

图4示出球的弹性模量分别为  $207 \times 10^{10}$ 、 $207 \times 10^9$  和  $207 \times 10^8 \text{ MPa}$  时的冲击荷载计算结果,此时撞击速度为  $20 \text{ m/s}$ 。计算结果表明:1) 撞击物球体的弹性模量越小,即撞击物越软,冲击荷载

的峰值就越小。由于弹性模量越小的撞击物撞击时变形越大,所以每次撞击时两物体接触时间就越长,即图 4 中接触力非零部分就越长。2) 相同时间段内,相对刚度越小,接触次数越多。由此可以看出,在冲击速度相同时,撞击物与梁间的相对刚度对冲击荷载的分布形式和峰值的大小有影响。图 5 示出梁的弹性模量发生变化时的冲击荷载,可以得到与图 4 相似的结论。

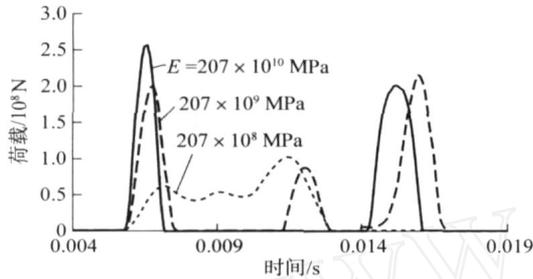


图 4 不同刚度球体的冲击荷载

Fig. 4 Impact load of moving body with different rigidities

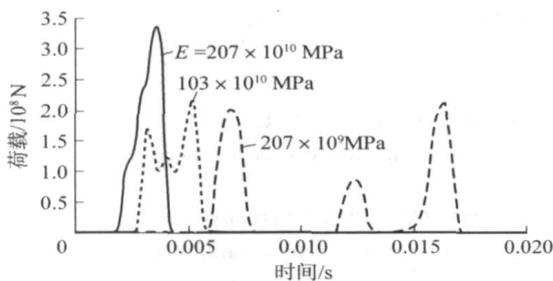


图 5 不同刚度梁受到的冲击荷载

Fig. 5 Impact load of moving body with different rigidities

## 2.2 撞击速度的影响

图 6 示出质量比等于 10 时球以不同速度撞击梁时的冲击荷载。从改变撞击速度之后的计算结果可以看出,球体的初始速度对冲击荷载的影响很大。在质量比不变的情况下,冲击荷载的峰值与初速度成正比。因为速度大动量就大,所以冲击荷载峰值就大。初速度越小,每次接触的升压和卸压时间越长,相邻 2 次接触的时间间隔越短,相邻的卸压和升压段间距越小。这是因为速度小动量就小,前一次接触时引起的梁的变形就小,梁回弹需要的时间短,所以与后续接触的时间间隔就短。

## 2.3 质量比的影响

保持梁的质量不变,通过改变球体撞击物的体积来改变撞击物模型的质量,可以得到相同撞击速度(20 m/s)而不同质量比时的冲击荷载结果(图 7)。从图 7 可以看出,梁球质量比 越大荷载峰值

越小,且球与梁脱离接触的过程越明显,也就是 2 个升压段间的接触力为零的时间越长; 越小系统动量越大,冲击荷载的峰值越大,撞击物与梁脱离接触的过程越短,升压段和卸压段持续时间越长。

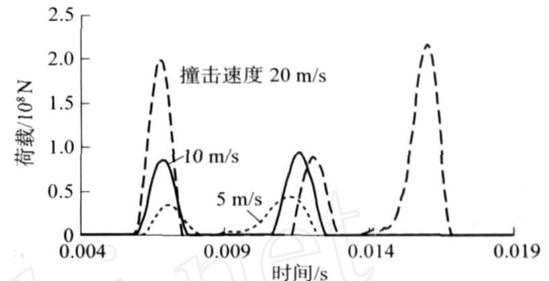


图 6 不同撞击速度下梁受到的冲击荷载

Fig. 6 Impact load of the beam under different impact velocities of ball

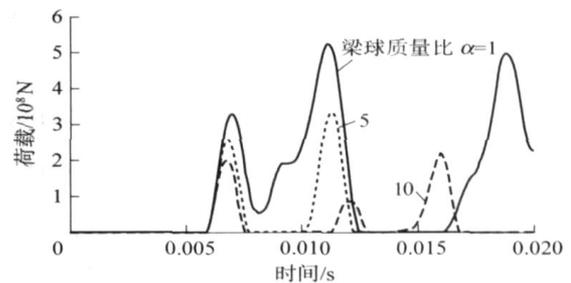


图 7 不同质量比时梁受到的冲击荷载

Fig. 7 Impact load of beam with different mass ratios

## 3 结 论

- 1) 使用实体单元模拟球体对梁的侧向撞击过程,得到了合理的考虑接触变形时的冲击荷载,其具有明显合理的升压段。
- 2) 球体的弹性模量越小,冲击荷载的峰值越小,球体与梁接触的时间越长。
- 3) 在质量比不变的情况下,冲击荷载的峰值和初速度成正比。初速度越小,每次接触的升压和卸压时间越长,相邻 2 次接触的时间间隔越短,相邻的卸压和升压段间距越小。
- 4) 速度相同时,质量比越大荷载峰值越小,且撞击物脱离接触的过程越明显,升压段和卸压段持续时间越短。

## 参 考 文 献

- [1] Timoshenko S P, Goodier J N. Theory of Elasticity[M]. New York: MacGraw- Hill, 1970

(下转第 99 页)

此,混凝土失去的水分中自由水所占比率增大,而自由水的失去并不会引起混凝土体积的收缩。本试验结果表现为:相对于 OC, LHFRC 在干缩率减小的同时失水率增大;另外,对比图 1 和 2,尤其在 3~7 d 失水速率很高而干缩速率却很低,它们不呈正比关系。其原因在于这段龄期失去的水分大都是自由水。

层布式钢纤维对混凝土干缩率影响极小,但其质量损失率有所降低。分析原因,分布在上、下表层的钢纤维对混凝土基体的影响很小,试验结果表明,LSFRC 与 OC 的失水量基本相同;而计算质量损失率时,由于钢纤维使 LSFRC 试件的基准质量增加,因此得到的质量损失率减小。

### 3 结论

层布式混杂纤维混凝土(LHFRC)的干缩率明显低于普通混凝土(OC)和层布式钢纤维混凝土(LSFRC),掺入粉煤灰和磨细矿渣后其干缩率进一步降低。LHFRC 的失水率大于 OC,掺入粉煤灰和磨细矿渣后其失水率与 OC 基本一致;LSFRC 由于基准质量增加,计算得到的失水率小于 OC。

本研究得到的混凝土干缩率与失水率之间的非线性关系,与经典的混凝土干缩机理之劈张力理

论<sup>[9]</sup>是一致的;另外,LHFRC 可以有效降低干缩应力,从而可避免出现或减少、减小路面裂缝,使这种新型复合材料路面具有优良的长期性能。

### 参 考 文 献

- [1] 上下层布式钢纤维混凝土抗折强度及增强机理研究[J]. 武汉理工大学学报,2001,23(1):56-59
- [2] 袁海庆,陈景涛,朱继东. 层布式钢纤维-聚丙烯腈纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2003,25(4):31-34
- [3] 马一平,李昊,谈慕华. 陶瓷-尼龙纤维水泥复合材料力学性能研究[J]. 建筑材料学报,1998,1(1):43-48
- [4] 肖瑞敏,张雄,乐嘉麟. 胶凝材料对混凝土干缩影响的研究[J]. 混凝土与水泥制品,2002(5):11-13
- [5] 郭赞. 层布式钢纤维混杂纤维混凝土的增强机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006
- [6] JTGD40-2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S]
- [7] JTJ 053-94 公路工程水泥混凝土试验规程[S]
- [8] Bazant Z P, Xi Y. Drying creep of concrete: constitutive model and experiments separating its mechanisms[J]. Materials and Structure,1994,27:3-14
- [9] Gardner N J, Zhao J W. Creep and shrinkage revisited[J]. ACI Materials Journal,1993,90(3):236-246
- [9] Melo F J Q, Carneiro J A O, Camanho P P, et al. The simulation of impact loads on beam-type structures using a pseudo-dynamic procedure[J]. Strain, 2004,40(1):13-23
- [10] Huang Dongzhou. Dynamic and impact behavior of half-through arch bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2): 133-141
- [11] So W, Francis F C. Dynamic finite element analysis of solid propellant impact test[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1991,28(6):658-662
- [12] Cui Shijie, Hao Hong, Cheong Hee Kiat. Numerical analysis of dynamic buckling of rectangular plates subjected to intermediate-velocity impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,25(2):147-167

(上接第 95 页)

- [2] 邢誉峰. 梁结构线弹性碰撞的解析解[J]. 北京航空航天大学学报,1998,24(6):633-637
- [3] 张继业,曾京,舒仲周. 杆的纵向冲击振动[J]. 振动与冲击,1999,18(3):57-61
- [4] 吴家强,王宏志. 杆的纵向冲击问题全过程分析[J]. 振动与冲击,2004,23(1):101-107
- [5] 邢誉峰,诸德超. 两杆纵向非线性弹性碰撞的瞬间响应[J]. 北京航空航天大学学报,1998,24(1):39-42
- [6] 李敏,诸德超. 球杆碰撞问题的数值分析和实验研究[J]. 北京航空航天大学学报,2001,27(1):62-65
- [7] 邢誉峰,诸德超. 用模态法识别结构弹性碰撞载荷的可行性[J]. 力学学报,1995,27(5):560-566
- [8] 诸德超,邢誉峰. 厚度效应对梁冲击响应的影响[J]. 力学学报,2004,36(2):184-190