

文章编号: 1000-0887(2005) 11-1323-05

无约束平面框架结构冲击响应分析(II) ——数值算例分析*

陈 蓉^{1,2}, 郑海涛¹, 薛松涛^{1,2,3}, 唐和生^{1,2}

- (1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092;
2. 同济大学 空天技术中心, 上海 200092;
3. 日本近畿大学 理工学部建筑学科, 日本大阪 577-8502)

(我刊原编委何福保推荐)

摘要: 利用第(I)部分推得的公式,对一无约束平面框架结构受运动刚体冲击时的瞬态响应进行了数值计算分析。计算了结构与运动刚体之间的冲击力时程曲线、梁中的剪力及弯矩分布、轴力杆件中的轴力分布。分析了杆中的纵波、Timoshenko 梁中弯曲波及剪切波的传播现象。数值分析表明:冲击力的延续时间主要是由挠曲波及纵波控制的;在结构的冲击响应分析中,梁的剪切效应不容忽视。

关键词: 无约束平面框架结构; 冲击响应; 冲击力; 波的传播
中图分类号: O347.1 **文献标识码:** A

这里利用第 I 部分所推导的公式,对一具体的无约束平面框架结构在运动刚体冲击时的响应进行了数值计算,计算了结构上的冲击力、梁的弯矩、剪力、轴力杆的轴力响应。并分析了构件中的波传播现象,得到了一些有用的结论。

1 计算模型

算例模型如第 I 部分中的图 1 所示为无约束平面框架结构与运动刚体组成的冲击系统,利用对称性,只对第 I 部分中图 2 所示的等效冲击系统进行计算和分析。

平面框架结构的长为 $L = 36.576 \text{ cm}$,长宽比为 2,因而构件 1、2、3、4 的长均为 $L/2$,取构件 AC 与运动刚体的质量比 $\lambda = 1$ 。假设所有构件的截面性质均相同:截面积 $A = 6.452 \text{ cm}^2$;弹性模量 $E = 2.067 \times 10^5 \text{ MPa}$;截面形状系数 $k = 2/3$;弹性、剪切模量比 $E/G = 8/3$;质量密度 $\rho = 7.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;由第 I 部分中的 α_i 、 β_i 、 b_i 等的式子可得 $s = 2r$,取 $r = 0.02$,则 $s = 0.04$ 。杆件中纵波波速与剪切波波速分别为 $c = \sqrt{E/\rho}$ 和 $c_s = \sqrt{kG/\rho}$,二者之比为 $c/c_s = 2^{1/2}$ 。

* 收稿日期: 2003-05-19; 修订日期: 2005-07-01

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(59925820)

作者简介: 陈蓉(1944—),男,江苏人,教授,博士(联系人, Tel: +86-21-65982390; E-mail: chenrong@mail.tongji.edu.cn)。

2 冲击力

由第 I 部分中节点 B 的边界条件(12) 可以知道, 无约束平面框架结构所受冲击力, 等于运动刚体所受框架结构的反作用力, 即运动刚体所受惯性力, 且等于梁 AB 作用于节点 B 的剪力与杆 BE 作用于节点 B 的轴力的合力。当冲击力变号时, 表明结构与刚体开始分离, 冲击过程结束。

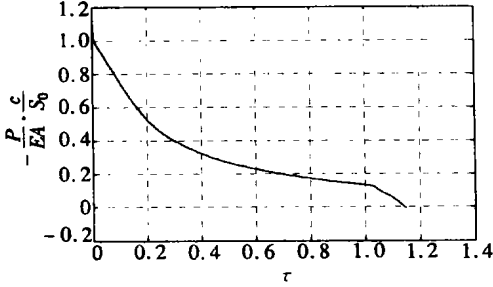


图 1 冲击力响应

图 1 为冲击力-时间关系曲线图。由图可以看出: 从无量纲时间 $\tau = tc/L = 1$ 时开始, 也就是挠曲波传播到节点 A ($\xi_1 = 0$) 经一次反射后回传到冲击端 ($\xi_1 = 1/2$) 同时也是杆 4 中纵波由 B 点 ($\xi_4 = 1/2$) 传到 E 点 ($\xi_4 = 0$) 经一次反射回到 B 点的时间, 冲击力响应急剧减小; 在大约 $\tau = 1.14$ 时冲击力变为 0, 表明冲击过程结束。由此可见, 冲击力的延续时间主要是挠曲波及纵波控制的。

3 剪力分布

图 2、图 3 分别表示梁 1、梁 2 在不同时刻的

剪力分布情况。

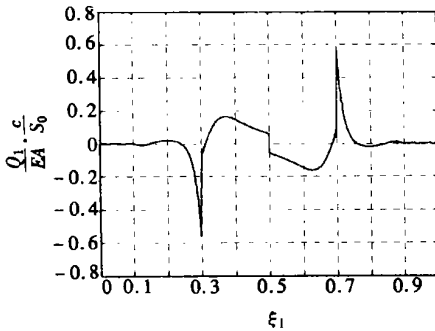


图 2 梁 1 剪力分布 ($\tau = 0.4$)

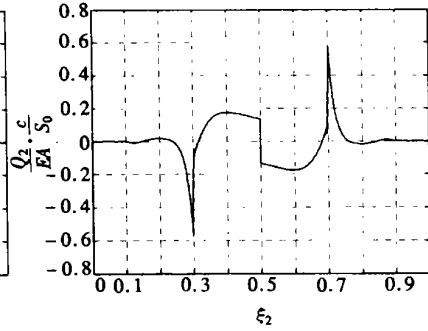


图 3 梁 2 剪力分布 ($\tau = 0.9$)

图 2 为 $\tau = 0.4$ 时梁 1 的无量纲剪力分布图。可以看出: 当 $\tau = 0.4$ 时, 挠曲波未传播到梁段 $\xi_1 = 0 \sim 0.1$ 和 $\xi_1 = 0.9 \sim 1$ 中, 因此在此区段内没有出现剪力响应; 而剪切波在此时传播到达处 ($\xi_1 = 0.3$ 和 $\xi_1 = 0.7$) 出现剪力的阶跃; 由于剪力响应呈反对称分布, 所以梁冲击端处 ($\xi_1 = 1/2$) 也出现剪力的阶跃。

图 3 为 $\tau = 0.9$ 时梁 2 的无量纲剪力分布图。因为冲击扰动从撞击点 (节点 B) 传播到梁 2 (节点 E) 需要 0.5 个单位时间, 此时, 由 A 节点处通过杆 AD 的纵波尚未到达 D 节点, 梁 2 尚未受到该纵波的影响。因此, 梁 2 的剪力响应比梁 1 滞后 0.5 个单位时间。比较图 2 与图 3 可以看出: 当 $\tau = 0.9$ 时, 梁 2 的剪力分布情况与梁 1 在 $\tau = 0.4$ 时的剪力分布情况是完全相似的。

4 轴力分布

图4和图5分别表示杆3在 $\tau = 0.9$ 、 $\tau = 1.1$ 时的轴力分布情况。

由图4可以看出:纵波在 $\tau = 0.9$ 时传播到杆3的 $\xi_3 = 0.1$ 处,杆3的 $\xi_3 = 0 \sim 0.1$ 杆段内因为扰动未传播到而没有响应。由图5可以看出:剪切波由冲击端处传播到节点A需要1个单位时间;经节点A透射后一部分转换为纵波在杆3中传播,在 $\tau = 1.1$ 时纵波传播到杆3的 $\xi_3 = 0.4$ 处,因此产生轴力的突变。

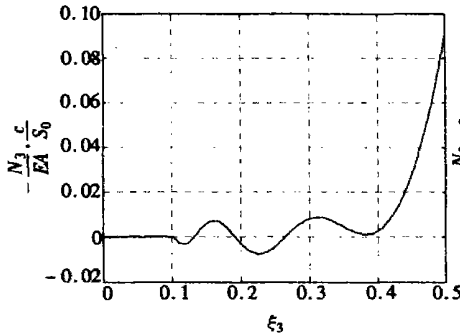


图4 杆3轴力分布($\tau = 0.9$)

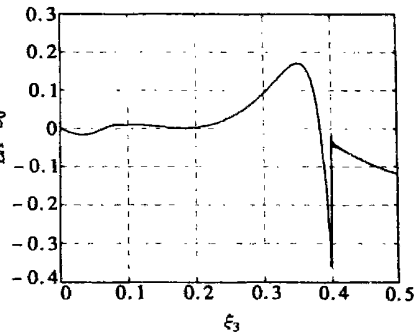


图5 杆3轴力分布($\tau = 1.1$)

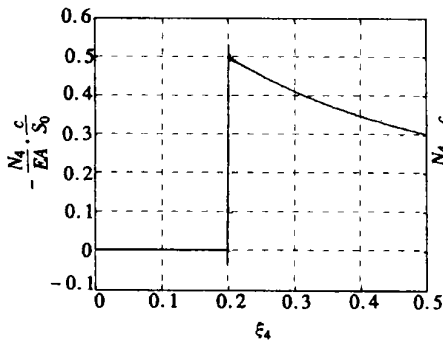


图6 杆4轴力分布($\tau = 0.3$)

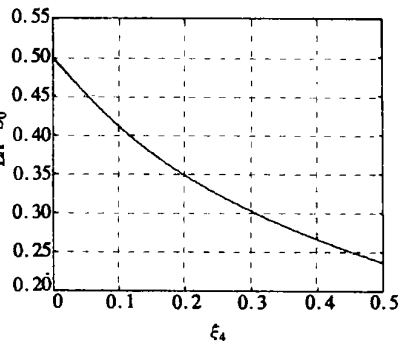


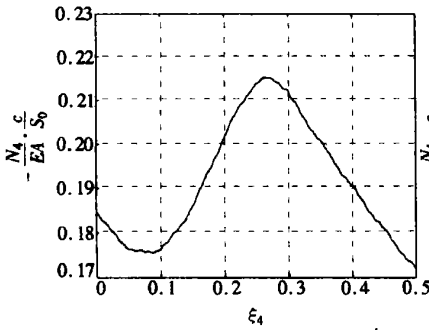
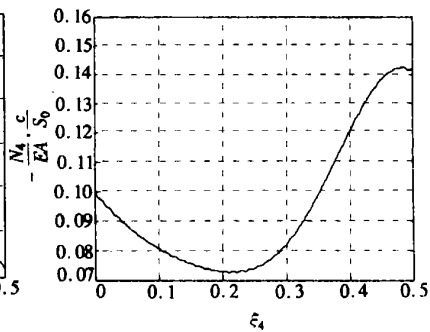
图7 杆4轴力分布($\tau = 0.5$)

图6和图7分别表示杆4在 $\tau = 0.3$ 、 $\tau = 0.5$ 时的轴力分布情况。

由图6可以看出: $\tau = 0.3$ 时纵波未传播到的 $\xi_4 = 0 \sim 0.2$ 杆段内没有响应, $\xi_4 = 0.2 \sim 0.5$ 杆段内轴力呈指数型分布;由图7可看到 $\tau = 0.5$ 时纵波刚刚传播到节点E($\xi_4 = 0$),整根杆4内轴力呈指数型分布。这一结果与文献[2]中的相关结果相似。

图8、图9分别表示杆4在 $\tau = 0.8$ 、 $\tau = 1.0$ 时的轴力分布情况。在纵波传播到节点E($\xi_4 = 0$)后,一部分经节点E反射后向节点B沿杆4回传,另一部分则经节点E透射后以挠曲波及剪切波的形式在梁2中传播。

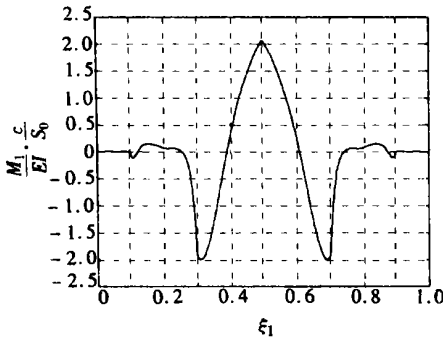
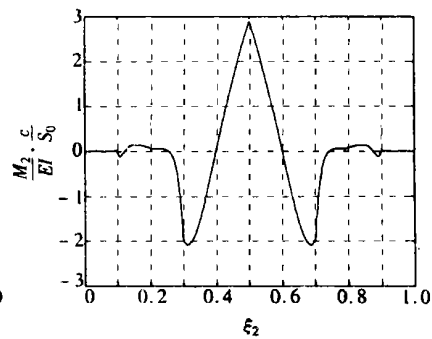
从图中可以看出:由于有反射波的存在,杆中轴力呈波动型分布;在反射纵波传播到达处如图8中 $\xi_4 = 0.3$ 和图9中 $\xi_4 = 0.5$ 处附近轴力响应达到最大值,波峰均出现在反射纵波传播到达处之前约 $0.03L$ 处;而在轴力响应产生波动之前如图8中 $\xi_4 = 0 \sim 0.05$ 和图9中 $\xi_4 = 0 \sim 0.2$ 的杆段内仍然呈指数型分布。

图8 杆4轴力分布 ($\tau = 0.8$)图9 杆4轴力分布 ($\tau = 1.0$)

5 弯矩分布

图10、图11分别表示梁1在 $\tau = 0.4$ 时和梁2在 $\tau = 0.9$ 时的弯矩分布情况。

可以看出:弯矩响应呈正对称分布;图10中,当 $\tau = 0.4$ 时,挠曲波未传播到 $\xi_1 = 0 \sim 0.1$ 和 $\xi_1 = 0.9 \sim 1$ 梁段,因此在此梁段内没有出现弯矩响应;而剪切波在此时传播到达处($\xi_1 = 0.3$ 和 $\xi_1 = 0.7$)出现弯矩的大幅振荡。由此可见剪切波对弯矩响应的影响是很大的。比较图10与图11可以看出:梁1和梁2的弯矩,二者的分布特征是完全相似的,区别只是在于梁2的弯矩响应比梁1的弯矩响应滞后0.5个单位时间,这恰是冲击波在杆4内由节点A传播至节点E所需时间。

图10 梁1弯矩分布 ($\tau = 0.4$)图11 梁2弯矩分布 ($\tau = 0.9$)

6 小 结

通过数值算例,可以知道:

1) 挠曲波传播到节点A($\xi_1 = 0$)经一次反射后回传到冲击端($\xi_1 = 1/2$),同时杆4中的纵波也从B点($\xi_4 = 1/2$)传到E点($\xi_4 = 0$)经一次反射后回到冲击端B点。从此时(即无量纲时间 $\tau = tc/L = 1$ 时)开始,冲击力响应急剧减小;在大约 $\tau = 1.14$ 时冲击力变为0,此时冲击结束,可见冲击力的延续时间主要是由挠曲波及纵波控制的;

2) Timoshenko 梁中剪切波对剪力和弯矩响应的影响非常明显;剪切波对轴力杆件中的轴力响应也有明显的影响;

3) 在冲击响应分析中,梁中的剪切效应不容忽视。

[参 考 文 献]

- [1] 郑海涛. 无约束结构的冲击瞬态响应和应力波传播[D]. 硕士学位论文. 上海: 同济大学, 2002, 6—33.
- [2] 褚德超, 邢誉峰. 点弹性碰撞问题之解析解[J]. 力学学报, 1996, 28(1): 99—103.

Analysis on Impact Responses of an Unrestrained Planar Frame Structure (II)— Numerical Example Analysis

CHEN Rong^{1,2}, ZHENG Hai-tao¹, XUE Song-tao^{1,2,3}, TANG He-sheng^{1,2}

(1. *Research Institution of Structural Engineering and Disaster Reduction,*

Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

2. *Center for Aerospace Technology, Tongji University,*

Shanghai 200092, P. R. China;

3. *Department of Architecture, School of Science and Engineering,*

Kinki University, Osaka 577-8502, Japan)

Abstract: By using the formula derived in Part (I), the instant response of an unrestrained planar frame structure subjected to the impact of a moving rigid-body are evaluated and analysed. The impact force-time history between the structure and the moving rigid-body, shear force and bending moment distribution along the beams, axial force distribution along the bars were calculated. The wave propagation phenomena of the longitudinal wave in the bars, the flexural and shear waves in the beams were also analysed. The numerical results show that the time duration of impact force is controlled by the flexural wave and the longitudinal wave, the shear effect in beams should not be neglected in the impact response analysis of structures.

Key words: unrestrained planar frame structure; impact; impact force; wave propagation