钢筋混凝土梁冲击响应及其影响因素分析

魏德敏1,2, 刘德源2

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室,广东,广州 510640;2. 华南理工大学 土木与交通学院,广东,广州 510640)

摘 要:为研究钢筋混凝土梁在集中冲击荷载作用下的动力响应,考虑梁截面高度、梁配筋率、接触面积、初始冲击 速度和落锤质量等因素的影响,运用 ABAQUS 有限元分析软件对某固支梁进行非线性动力响应分析,并考虑了材 料的应变率效应.结果表明,冲击力峰值和梁的跨中最大位移受接触面积和初始冲击速度影响较大,一定程度上受 到梁截面高度和配筋率的影响,而落锤质量对冲击力峰值的影响很小.

关键词:钢筋混凝土梁;冲击响应;应变率效应;有限元分析

中图分类号: TU 375.1 **文献标志码:** A **文章编号:**1001-0645(2014)增刊 1-0119-04

Analysis of Impact Response of RC Beams and Influencing Factors

WEI De-min^{1,2}, LIU De-yuan²

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: To more accurately investigate the dynamic response of RC beams under concentrated impacts, the nonlinear dynamic response characteristics of a clamped beam were numerically simulated by the finite element analysis software ABAQUS with the consideration of the strain rate effects of concrete and steel bar and the influence factors such as the height of the beam section, the reinforcement ratio, the contact area, the impact velocity and mass of the hammer. The results show that the contact area and the impact velocity have evident influence on the impact load and the structural displacement, the height of the beam section and the reinforcement ratio have limited influence on the response, and the mass of the hammer has little influence on the impact loads.

Key words: RC beam; impact response; strain rate effect; finite element analysis

结构发生连续倒塌时,将引起结构质量和刚度 的重分布,造成结构或构件之间接触碰撞.目前的 研究大多集中在剩余结构的抗连续倒塌能力上^[1]. 侯健^[2]对无筋混凝土试块进行了冲击试验, Fujikake Kazunori等^[3]对简支钢筋混凝土梁的冲 击动力响应进行了试验研究,给出跨中最大位移和 最大冲击力的估算方法,N. Kishi等^[4]对简支钢筋 混凝土梁在落锤连续冲击下的动力响应进行有限元分析,给出梁斜截面承载力的估算公式. Mokhatar^[5]进行了钢筋混凝土板的冲击试验和有限元分析.

本文对钢筋混凝土固支梁在集中冲击下的非线 性动力响应进行了有限元分析,并考虑了多个因素 对冲击力和跨中位移响应的影响.

收稿日期: 2014-03-28

作者简介:魏德敏(1955-),女,教授,博士生导师,E-mail:dmwei@scut.edu.cn.

1 计算模型

本文算例中钢筋混凝土梁的截面为矩形,混凝 土等级为 C30,材料弹性模量 E = 30 GPa, 泊松比 $\mu = 0.2$,梁的几何尺寸和配筋如图 1 所示.有限元 分析中,混凝土采用八节点实体单元,钢筋采用杆单 元.假设钢筋骨架内嵌入混凝土内,钢筋与混凝土 之间无相对滑移.刚性落锤质量为 400 kg 以一定的 初始速度垂直冲击梁的跨中,落锤与梁的接触为硬 接触,接触面积为 200 mm×200 mm.



图 1 梁的几何尺寸及配筋(单位:mm) Fig. 1 Rebar arrangement and geometric parameters of beam

冲击过程中,混凝土和钢材的力学性能受应变 率的影响,本文假设材料的应变率范围为 10⁻¹~ 10² s⁻¹.钢材为理想弹塑性材料,其动态屈服强度 随应变率的增大而提高,而峰值应变和弹性模量基 本不变.钢材静动态特征强度之间的关系为^[6]

$$\frac{f_{\rm yd}}{f_{\rm ys}} = 1 + 0.061 \lg \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}, \qquad (1)$$

式中: f_{ys} , f_{yd} 分别为钢材静态和动态的屈服强度; ϵ_0 , ϵ 分别为准静态和动态的应变率,本文取 $\epsilon_0 = 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.不同应变率下,钢材的屈服强度取值见表 1.

表1 钢筋的动态屈服强度

 Tab. 1
 Dynamic yield strength of steel for different strain rates

应变率 ϵ/s^{-1}	$f_{ m yd}/{ m MPa}$			
	HPB300 级	HRB335 级	HRB400 级	
10^{-1}	412	442	486	
1	433	460	498	
10	453	478	509	
10^{2}	474	497	521	

混凝土的抗压强度随着应变率的增大而增大, 当准静态应变率为 $\hat{\epsilon}_{0c} = 1.0 \times 10^{-5} \, \mathrm{s}^{-1}$ 时,其抗压强 度的平均值 f_{em} 为

$$f_{\rm cm} = f_{\rm ck} / (1 - 1.645 \delta_{\rm c}),$$
 (2)

式中: f_{ck} 为混凝土抗压强度的标准值; $\delta_{c} = 0.14$ 为 实验得到的强度变异系数. 在不同应变率下混凝土材料的动态抗压强度和 临界应变与应变率之间的关系为^[7-8]

$$\frac{f_{\rm cd}}{f_{\rm cs}} = 1.008 + 0.087 \lg \frac{\dot{\epsilon}_{\rm c}}{\dot{\epsilon}_{\rm 0c}}, \qquad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_{\rm cd}}{\varepsilon_{\rm cs}} = 1.0 - 0.028 8 \lg \frac{\varepsilon_{\rm c}}{\varepsilon_{\rm 0c}}.$$
 (4)

式中: f_{cd} 和 f_{cs} 分别为动态抗压极限强度和准静态 抗压强度; ϵ_{cd} 和 ϵ_{cs} 分别为动态抗压临界应变和准静 态抗压临界应变; ϵ_{c} 和 ϵ_{oc} 分别为受压动态应变率和 准静态应变率.

准静态时,混凝土轴心抗拉强度的平均值为[9]

$$f_{\rm tm} = 0.395 f_{\rm cm}^{0.55}$$
. (5)

其动态抗拉强度和临界应变随着应变率的增加 而增大^[10]

$$\frac{f_{\rm td}}{f_{\rm ts}} = 1.0 + 0.057 \lg \frac{\dot{\epsilon}_{\rm t}}{\epsilon_{\rm 0t}}, \qquad (6)$$

$$\frac{\varepsilon_{td}}{\varepsilon_{ts}} = 1.0 + 0.095 \ 7 \lg \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{0t}}. \tag{7}$$

式中: f_{td} 和 f_{ts} 分别为动态抗拉极限强度和准静态 抗拉强度; ϵ_{td} 和 ϵ_{ts} 分别为动态抗拉临界应变和准静 态抗拉临界应变; ϵ_t 和 ϵ_{0t} 分别为受拉动态应变率和 准静态应变率.不同应变率下的混凝土轴心抗压、 抗拉强度及其临界应变取值见表 2.

表 2 混凝土的动态强度和临界应变

Tab. 2 Dynamic strength and critical strain of concrete for different strain rates

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	$f_{\rm cd}/{ m MPa}$	$f_{\rm td}/{ m MPa}$	$\epsilon_{cd}/\!\times\!10^{-6}$	$\epsilon_{td}/\! imes\!10^{-6}$
10^{-1}	33.3	2.92	1 394	144
1	37.5	3.06	1 349	154
10	39.8	3.19	1 304	164
10^{2}	42.2	3.33	1 258	174

2 影响因素分析

当落锤质量 *m* = 400 kg,初始冲击速度 *v* = 3 m/s,梁高 *H* 在 400~650 mm 变化时,得到的响应分析结果如表 3 及图 2 和图 3 所示.

表 3 梁的冲击力峰值和跨中最大位移

Tab. 3 Maximum impact load and maximum displacement of beam for different beam heights

编号	梁高 H/mm	配筋率 ρ/%	冲击力峰值 F _{max} /kN	跨中最大位移 $U_{\rm max}/{ m mm}$
H_1	400	0.68	1 440	9.3
H_2	450	0.65	1 406	7.3
H_3	500	0.66	1 446	5.4
H_4	550	0.68	1 422	4.8
H_5	600	0.66	1 420	4.8
${H}_6$	650	0.71	1 482	4.7

从这些计算结果可以看出:撞击力在 3 ms 时达 到最大值,在 5 ms 降到最低,之后小幅振荡. 当 m 和 v 保持不变时,H 对冲击力峰值影响不大,但跨 中最大位移和达到位移峰值的时间随着 H 的增加 而有所减小.



图 2 不同 H 时梁的冲击力时程曲线 Fig. 2 Time-history of impact load for different beam heights



图 3 不同 H 时梁的跨中位移时程曲线

Fig. 3 Time-history of mid-span displacement for different beam heights

当 $H=400 \text{ mm}, m=400 \text{ kg}, v=3 \text{ m/s}, 梁底纵 筋配筋率 <math>\rho$ 变化时,梁的响应计算结果如表 4 所示.

表 4 梁的冲击力峰值和跨中最大位移

Tab. 4 Maximum impact load and maximum displacement of beam for different reinforcement ratios

编号	梁底纵 筋/mm	配筋率 ρ/ %	冲击力峰值 F _{max} /kN	跨中最大位 移 U _{max} /mm
R_1	2ø18	0.68	1 440	9.3
R_2	2 \$ 20	0.84	1 435	7.2
R_3	2\$\phi18\$+1\$\phi16\$	0.95	1 406	7.0
${oldsymbol{R}}_4$	2 ¢ 22	1.01	1 446	6.8
R_5	2 ¢ 25	1.31	1 468	6.8
R_6	3622	1.52	1 444	6.9

由表 4 可以看出:冲击力在 3.5 ms 时达到最大 值,在 5.5 ms 降至 0,之后进入小幅振荡. ρ 的变 化,对冲击力峰值影响不大,随着 ρ 的提高,跨中位 移的峰值和达到峰值的时间有所减小.当 ρ 大于 1%时,跨中最大位移的值基本不变.因此,增加 ρ 对梁抗冲击能力的提高作用有限.

假设落锤与梁的接触面沿梁宽方向不变,沿梁 长方向的尺寸 a 增大,而 $m=400 \text{ kg}, v=3 \text{ m/s}, \rho=$ 0.68%时,得到的响应分析结果如表 5 所示.由表 5 可以看出:随着碰撞接触面积的增大,冲击力峰值 增大,跨中最大位移的值减小,且位移峰值点出现的 时间提前.冲击力在 3.5 ms 时达到最大值,在 4 ms 时降为 0,有效作用时间减少.

表 5 梁的冲击力峰值和跨中最大位移

Tab. 5 Maximum impact load and maximum displacement of beam for different contact areas

编号	a/m	接触面积 A/m ²	冲击力峰值 F _{max} /kN	跨中最大位移 $U_{ m max}/ m mm$
A_1	0.2	0.04	1 440	9.3
A_2	0.4	0.08	1 981	7.4
A_3	0.6	0.12	2 313	7.3
A_4	0.8	0.16	2 448	7.3
A_5	1.0	0.20	2 602	7.3

图 4 和图 5 给出 v 变化时结构的冲击响应时程 曲线.由此看出:冲击力峰值和跨中最大位移随着 v 的提高而增大,冲击力在 3.5 ms 时达到最大值,在 4 ms 时降为 0,之后小幅振荡.



图 4 不同 v 时梁的冲击力时程曲线

Fig. 4 Time-history of impact load of beam for different impact velocities





表 6 给出 v 和 m 变化时结构的响应计算结果. 由表 6 看出:m 的变化对冲击力峰值没有太大影响, 但梁的跨中位移随着 m 的增大而增大.对比相同冲 量下结构的响应发现,v 对冲击力峰值和跨中最大 位移的影响较大,当 $I = 400 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 时, $F_{v_i,\text{max}}/F_{m_i,\text{max}} = 0.895, U_{v_i,\text{max}}/U_{m_i,\text{max}} = 0.741$, 而 当 I = 1 200 kg・m/s 时, $F_{v_i,\max}/F_{v_i,\max} = 1.95$, $U_{v_i,\max}/U_{m_i,\max} = 1.295$.

表 6 梁的冲击力峰值和跨中最大位移(I相同)

Tab. 6 Maximum impact load and maximum displacement of beam for same impulse

冲量 I/	绾早	$F_{ m max}/$	$F_{v_i,\max}/$	$U_{\rm max}/$	$U_{v_i,\max}/$
$(kg \cdot m \cdot s^{-1})$	うまして	kN	$F_{m_i,\max}$	mm	U_{m_i} , max
400	v_1	543	0.89	2.0	0.74
	m_1	607		2.7	0.74
800	v_2	719	1.00	4.8	1.17
	m_2	719		4.1	
1 200	v_3	$1\ 440$	1.95	7.9	1.30
	m_3	739		6.1	
1 600	v_4	$1 \ 574$	1.84	11.9	1.57
	m_4	856		7.6	
2 000	v_5	$1 \ 622$	1.86	18.8	2 16
	m_5	870		8.7	2.10
2 400	v_6	1 837	2.07	21.4	1 74
	m_6	887		12.3	1.74

3 结 论

本文对钢筋混凝土固支梁在落锤冲击下的非线 性响应及其影响因素进行了有限元分析,得出以下 主要结论:接触面积、初始冲击速度对梁的冲击力和 跨中位移的影响较大,增大接触面积有利于梁的抗 冲击性能;增大梁的纵筋配筋率和截面高度对梁的 冲击力峰值影响不大,对梁的跨中最大位移影响有 限. 当梁的高厚比大于 2.5 或纵筋配筋率大于 1% 时,跨中最大位移基本保持不变;冲量相同的情况 下,初始撞击速度变化对冲击力峰值和跨中最大位 移的影响明显大于落锤质量对两者的影响.

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50010-2010,混 凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版 社,2010.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. GB50010—2010, Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture &. Building Press, 2010. (in Chinese)

[2] 侯健.考虑块体间碰撞作用的钢筋混凝土框架结构倒塌 反应分析[D].上海:同济大学,2008.

Hou Jian. Collapse analysis of reinforced concrete frame structures considering impact action between concrete blocks[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)

- [3] Fujikake Kazunori, Li Bing, Seoun S. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation
 [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135: 938-950.
- [4] Kishi N, Mikami H, Matsuoka K G. Impact behavior of shear-failure-type RC beams without shear rebar[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 955 - 968.
- [5] Mokhatar S N, Abdullah R. Computational analysis of reinforced concrete slabs subjected to impact loads[J]. International Journal of Integrated Engineering, 2012, 4(2):70-76.
- [6] 李敏,李宏男.建筑钢筋动态试验及本构模型[J].土木 工程学报,2010,43(4):70-75.

Li Min, Li Hongnan. Dynamic test and constitutive model for reinforcing steel[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(4):70-75. (in Chinese)

[7] 孟顺意. 混凝土双轴动态试验研究[D]. 大连: 大连理工 大学, 2010.

Meng Shunyi. Experiment study on concrete under biaxial dynamic stress [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)

- [8]肖诗云,张剑.不同应变率下混凝土受压损伤试验研究
 [J].土木工程学报,2010,43(3):40-45.
 Xiao Shiyun, Zhang Jian. Compressive damage experiment of concrete at different strain rates [J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(4):40-45. (in Chinese)
- [9]肖诗云,林皋,王哲.应变率对混凝土抗拉特性影响[J]. 大连理工大学学报,2001,41(6):721-725.
 Xiao Shiyun, Lin Gao, Wang Zhe. Effects of strain rates on dynamic behavior of concrete in tension[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001,41 (6):721-725. (in Chinese)
- [10]肖诗云,田子坤. 混凝土单轴动态受拉损伤试验研究
 [J]. 土木工程学报,2008,41(7):14-20.
 Xiao Shiyun, Tian Zikun. Experimental study on the uniaxial dynamic tensile damage of concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2008,41(7):14-20. (in Chinese)

(责任编辑:刘雨)