

落锤作用下 RC 梁动力响应分析

沈 凌

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘 要: 钢筋混凝土梁在动力作用下的响应与在静力作用下的响应明显不同。文中首先利用 LS-DYNA 对试验梁进行分析, 并与试验结果进行对比分析, 验证了文中有限元模型的可靠性。利用所建立的有限元模型分析了荷载组合以及支座刚度对钢筋混凝土梁抗冲击性能的影响。结果表明: 冲击能量相同时, 随着冲击质量增加, 梁跨中挠度逐渐增加; 对于有均布荷载作用的简支梁则估算挠度偏小; 随着支座刚度的增加, 跨中挠度减小, 混凝土吸收能量增大, 钢筋吸收能量减小, 冲击持时减小。

关键词: 钢筋混凝土梁; 动力响应; 落锤冲击; 数值模拟

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0131-03

引言

近些年来国内外学者主要通过落锤试验机对钢筋混凝土梁的抗冲击性能进行研究。Suaris 等^[1]对普通钢筋混凝土梁和纤维混凝土梁进行了落锤试验, 试验表明加入纤维的梁体能够吸收更多的冲击能; Bentur 等^[2]通过对混凝土梁进行落锤试验分析得出最大冲击力主要由惯性力抵抗, 在冲击荷载作用下钢筋与混凝土之间没有足够的时间产生较大滑移, 这也是与静力试验不同之处; Banthia 等^[3]通过对混凝土梁的落锤试验分析了冲击作用下梁体中产生的裂缝不能有足够时间充分发展而使得强度增大; Ksishi 等^[4-6]通过试验研究了锤头曲率对钢筋混凝土梁抗冲击行为的影响, 提出了利用最大支反力估算梁的抗冲击能力比用最大冲击力更合适, 弯曲破坏型钢筋混凝土梁在冲击荷载作用下的极限承载力可以用最大支反力估算; Tachibana 等^[7]建立了钢筋混凝土梁在冲击荷载作用下基于性能的设计方法, 提出钢筋混凝土梁最大挠度与冲击能量成正比。

实际钢筋混凝土梁的受力情况。此外, 对一组支座刚度不同的梁进行了数值模拟, 分析了支座刚度对钢筋混凝土梁抗冲击性能的影响。

一、有限元模型及模型验证

1. 试验有限元模型

赵德博等^[8]利用落锤试验机对四根钢筋混凝土梁进行了冲击试验, 试验梁的尺寸及配筋如图 1 所示。

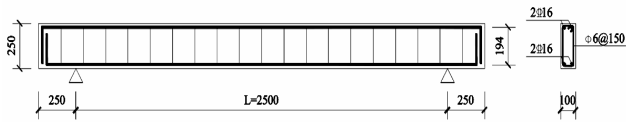


图 1 梁尺寸及配筋图 (单位: mm)

采用四分之一建模的方式对试验梁体进行建模并在对称面上施加对称约束。钢筋与混凝土单元之间采用共节点建模, 通过关键字 *LOAD_BODY_Y 为模型施加重力加速度。

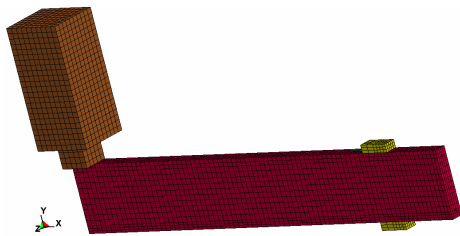


图 2 有限元模型

模型中混凝土采用 *MAT_CSCM_CONCRETE 模型, 取侵蚀应变为设置为 0.1, 钢筋模型采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型。有限元模型中采用的材料参数如表 1 所示, 钢筋和混凝土材料参数采用文献^[8]中的试验实测值。

表 1 材料参数

部件	材料模型	材料参数
落锤和支座垫板	*MAT_ELASTIC	$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3, E = 200 \text{ GPa}, \nu = 0.27$
混凝土	*MAT_CSCM_CONCRETE	$\rho = 2400 \text{ kg/m}^3, f_c = 30 \text{ MPa}, d_a = 20 \text{ mm}$
	E	
纵筋	*MAT_PLASTIC_KINEMA TIC	$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3, E = 200 \text{ GPa}, \nu = 0.27,$ $f_y = 490 \text{ MPa}, f_u = 656 \text{ MPa}, E_t = 1.1 \text{ GPa}$
箍筋	*MAT_PLASTIC_KINEMA TIC	$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3, E = 210 \text{ GPa}, \nu = 0.27,$ $f_y = 432 \text{ MPa}, f_u = 580 \text{ MPa}, E_t = 0.74 \text{ GPa}$

2. 模型验证

表 2、图 3 与图 4 给出了四根钢筋混凝土梁跨中最大挠度试验值与模拟值的对比, 通过对比可知, 其相对误差均在 10% 以内。

表 2 梁跨中最大挠度比较

试件编号	锤重/kg	下落高度/m	实测值/mm	模拟值/mm	相对误差
A-1	968	0.6	81	81.5	0.62%
A-2	587	1	74	73.2	-1.10%
A-3	392	1.8	83.6	88.2	5.50%
A-4	197	4	89.5	87.3	-2.46%

收稿日期: 2022-07-21

作者简介: 沈 凌 (1986-), 男, 上海人, 中交上海航道勘察设计研究院有限公司。

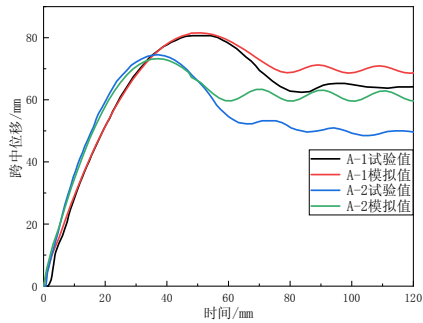


图 3 梁跨中位移时程曲线比较

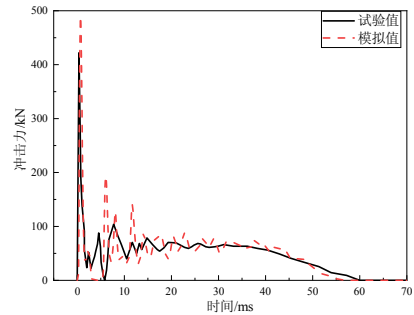


图 4 梁 A-2 冲击力时程曲线对比

通过以上的对比可以看出，建立的有限元模型能够较好的模拟出钢筋混凝土梁在落锤冲击作用下的响应，说明了文中有限元建模的准确性，可以用于后续分析。

3. 数值分析有限元模型

文中对承受竖向均布荷载的钢筋混凝土梁进行了落锤冲击模拟。在进行建模时通过对梁顶面施加均布荷载而使得梁体能够处于不同的荷载组合下。荷载简图如图 5 所示，其中 q 为梁体两支座之间的均布线荷载， Q 为支座外悬臂端的均布线荷载， $l=2,500\text{mm}$ 、 $L=250\text{mm}$ 。不同的荷载组合见表 3。

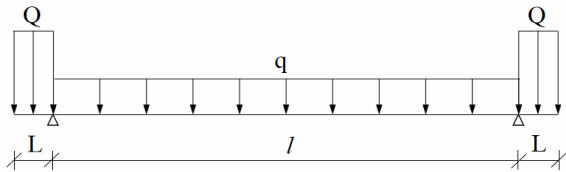


图 5 钢筋混凝土梁荷载布置图

表 3 荷载组合

荷载组合	$q/(kN \cdot m^{-1})$	$Q/(kN \cdot m^{-1})$
1	0	0
2	4	0
3	4	66.7
4	4	57.1

文中中为了通过数值模拟分析钢筋混凝土梁在落锤冲击荷载作用下的响应，共进行了 28 个模型的计算，前 24 个模型的编号由 4 个部分组成，第一部分用 A、B、C 三个字母分别表示 1.61%、1.23%和 2.04%三种配筋率；第二部分用 1、2、3、4 四个数字分别代表四种荷载组合；第三部分用 1、2、3 三个字母分别表示 300、600 和 900kg 三种锤

重；第四部分用 1、2、3 三个字母分别表示 2,000、4,000 和 6,000J 三种冲击能量。例如：A-1-2-3 表示配筋率为 1.61%的梁在荷载组合 2 时，用 600kg 的落锤施加 6,000J 冲击能量。

对四种不同刚度支座支撑下的钢筋混凝土梁进行了数值模拟。通过调整不同的弹性模量表示不同刚度的支座，梁体自由搭在弹性体支座之上。四种支座的梁编号为 D-1、D-2、D-3 和 D-4，对应支座的弹性模量分别为 3E7、3E8、3E9 和 3E10。

二、动力响应分析

通过表 4 可以看出相同冲击质量时，随着冲击能量的增加，跨中最大挠度和跨中残余挠度均增加，钢筋和混凝土吸收的能量均增加，钢筋吸收能量百分比增加；相同冲击能量作用下，随着冲击质量的增加，跨中最大挠度和跨中残余挠度均增加，混凝土吸收能量逐渐减小，钢筋吸收能量逐渐增加，钢筋吸收能量百分比逐渐增加。

表 4 模拟数据汇总

构件编号	跨中最大挠度 /mm	跨中残余挠度 /mm	混凝土总能量 /J	钢筋总能量 /J	钢筋能量 百分比
A-1-1-1	31.8	21.9	338	1,372	80.2%
A-1-1-2	57.3	45.1	680	2,966	81.3%
A-1-1-3	81.3	68.2	972	4,448	82.1%
A-1-2-1	35.5	25.6	260	1,569	85.8%
A-1-2-2	64.6	52.8	468	3,424	88.0%
A-1-2-3	92.7	80.0	616	5,253	89.5%
A-1-3-1	38.1	28.7	261	1,720	86.8%
A-1-3-2	69.5	58.1	371	3,723	90.9%
A-1-3-3	99.3	86.8	484	5,723	92.2%
A-2-2-1	39.03	30.3	—	—	—
A-2-2-2	70.7	60.1	—	—	—
A-2-2-3	101.2	89.3	—	—	—
A-3-2-1	36.0	24.9	—	—	—
A-3-2-2	65.6	54.2	—	—	—
A-3-2-3	94.4	81.8	—	—	—
A-4-2-1	36.4	27.0	—	—	—
A-4-2-2	66.2	54.9	—	—	—
A-4-2-3	95.1	82.5	—	—	—
B-1-2-1	44.6	35.5	239	1,726	87.8%
B-1-2-2	82.6	71.5	392	3,642	90.3%
B-1-2-3	119.1	107.0	540	5,526	91.1%
C-1-2-1	29.5	19.2	340	1,432	80.8%
C-1-2-2	52.4	40.5	536	3,228	85.8%
C-1-2-3	74.5	61.5	736	4,982	87.1%

1. 荷载的影响

图 6 给出了不同荷载组合作用下钢筋混凝土梁跨中挠度的对比。

通过以上可以看出，只在支座之间布置均布荷载作用时

的跨中位移最大，梁上无均布荷载时的跨中位移最小，随着支座负弯矩的增大，跨中挠度逐渐接近于不施加荷载的梁跨中挠度。以上说明了通过不施加竖向荷载的简支梁的冲击试验所得到的跨中挠度能够近似代表有此两种支座负弯矩的情况。在实际结构中的简支梁跨，由于在正常使用情况下会有荷载作用，因此更符合荷载组合 2 的情况，因此利用简支梁试验去估算实际结构中简支梁的跨中挠度时会使得估算结果偏小，在图 8 的三种情况下，峰值位移误差分别为 10.0%、9.4%和 9.2%。

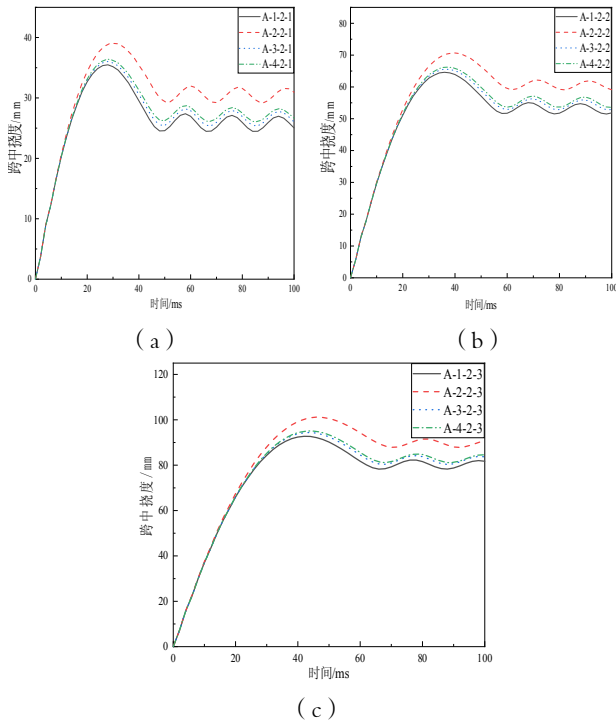


图 6 不同荷载组合时梁跨中挠度比较

2. 支座刚度的影响

提取 D-1 至 D-4 四根梁模拟得到的数据进行汇总如表 5 所示。表中括号内的数值代表的是采取相应数值时所对应的时间，混凝土能量和钢筋能量为跨中挠度最大时对应的混凝土和钢筋吸收的内能。

表 5 模拟数据汇总

编号	跨中最大挠度/mm	残余挠度/mm	混凝土吸收能量	钢筋吸收能量	冲击持时/ms
			/J	/J	
D-1	60.0 (41)	48.7	534	3,459	63.4
D-2	57.1 (33)	45.1	562	3,223	51.6
D-3	45.6 (23)	33.0	740	2,351	35.2
D-4	31.9 (17)	19.7	2,060	1,480	29.1

由表中数据可知，随着支座刚度的增大，梁体跨中最大挠度和残余挠度均减小，混凝土能量逐渐增加，钢筋能量逐

渐减小，冲击作用时间逐渐减小。

随着支座刚度的增大，冲击作用持续时间由 D-1 的 63.4ms 降至 D-4 的 29.1ms，钢筋吸收能量逐渐变小。而钢筋主要依靠自身的变形耗能，钢筋吸收能量减小说明了钢筋变形量减小，所以跨中挠度减小。

三、结论

文中通过数值计算方法研究了梁上均布荷载和支座刚度对结构响应的影响，结论如下：

(1) 在不同的梁顶均布荷载作用下，钢筋混凝土梁的响应有区别，可利用梁顶无均布荷载的简支梁的位移响应近似模拟有一定支座负弯矩的情况；对于实际结构中的简支梁，利用简支梁试验所得的位移数值偏小。

(2) 随着支座刚度的增大，在同样冲击作用下梁体跨中挠度逐渐减小，混凝土耗能逐渐增大，钢筋耗能逐渐减小，冲击作用时间逐渐减小。

参考文献

[1] Suaris W, Shah S P. Properties of Concrete Subjected to Impact[J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(7): 1727-1741.

[2] Bentur A, Mindess S, Bantia N. The behaviour of concrete under impact loading: Experimental procedures and method of analysis. Materials & Structures, 1986, 19(5): 371-378.

[3] Bantia N P, Mindess S, Bentur A. Impact behaviour of concrete beams[J]. Materials & Structures, 1987, 20(4): 293-302.

[4] Kishi N., Ikeda K., Mikami H., et al. Dynamic Behavior of RC Beams Under Steel Weight Impact Loading Effects of Nose Shape of Steel Weight[J]. International conference on concrete under severe conditions; environment and loading: 3rd, 2001, 660-67.

[5] Kishi N, Mikami H, Matsuoka K G, et al. Impact behavior of shearfailure-type RC beams without shear rebar[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(9): 955-68.

[6] Kishi N, Nakano O, Matsuoka K G, et al. Experimental study on ultimate strength of flexural-failure-type RC beams under impact loading. In : Transactions of the 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT) . Washington DC, 2001, 1-7.

[7] Tachibana S, Masuya H, Nakamura S. Performance based design of reinforced concrete beams under impact[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2010, 10(6): 1069-1078.

[8] 赵德博. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁响应特征及设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.