

文章编号: 1673-5196(2016)03-0128-05

粘钢加固损伤钢筋混凝土柱的抗震性能

张贵文, 张 纳, 赵 磊

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 采用 ABAQUS 软件, 模拟 6 根钢筋混凝土柱(其中 5 根用粘钢加固)受水平反复荷载作用, 分析比较粘钢加固前后钢筋混凝土柱的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线和刚度退化曲线等。模拟结果表明: 粘钢加固损伤钢筋混凝土柱是一种有效的抗震加固方式, 加固后钢筋混凝土柱的抗震性能得到明显改善。

关键词: 钢筋混凝土柱; 粘钢加固; 有限元模拟; 抗震性能; 初始损伤

中图分类号: TU312; TU398 **文献标志码:** A

Investigation of anti-seismic performance of injured concrete column with reinforcement of steel plate covering

ZHANG Gui-wen, ZHANG Na, ZHAO Lei

(College of Civil Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: By using software ABAQUS, 6 reinforced concrete columns (including 5 pieces reinforced with steel plate covering) under the action of cyclic horizontal load were simulated and the failure pattern, hysteretic curve, skeleton curve and stiffness degradation curve of the reinforced concrete column before and after with steel plate covering reinforcement was analyzed. The result shows that the steel plate covering reinforcement for injured reinforced concrete column will be an effective means of anti-seismic reinforcement. After such reinforcement, the anti-seismic performance of reinforced concrete column will be obviously improved.

Key words: reinforced concrete column; strengthening with steel plates adhering; finite element simulation; anti-seismic performance; initial damage

粘钢加固法由于其方便、快捷、经济、可靠的特点, 近年来被广泛地应用于钢筋混凝土结构的加固中, 并且主要用于钢筋混凝土构件的抗震加固。钢筋混凝土柱是钢筋混凝土框架结构的主要抗侧力构件, 研究其抗震性能对于把握框架结构在地震作用下的工作性能具有重要的意义^[1]。

迄今为止, 很多研究人员^[2]已经对粘钢加固钢筋混凝土构件的力学性能与加固效果进行了大量的研究, 但更多研究^[3-4]主要集中于其它复合材料对钢筋混凝土构件的加固。目前国内对粘钢加固钢筋混凝土柱抗震性能的研究较少。本文研究运用有限元软件 ABAQUS 建立粘钢加固后钢筋混凝土柱的有限元模型, 通过模拟比较分析在水平反复荷载作用

下粘钢加固前后钢筋混凝土柱的抗震性能。通过有限元分析方法, 可以深入了解粘钢加固构件的抗震性能, 同时也可以减轻试验工作量, 降低劳动投入, 提高效率, 并为粘钢加固钢筋混凝土柱的试验研究和实际工程提供参考。

1 模型建立

1.1 模型相关参数

1.1.1 构件和材料参数

钢筋混凝土构件采用了对称配筋截面设计。柱尺寸为 200 mm×200 mm×1 000 mm。混凝土选用 C30, 保护层厚度取 25 mm, 纵筋采用 4 根直径为 12 mm 的 HRB335 钢筋; 箍筋采用直径为 8 mm 的 HPB300 钢筋, 间距为 100 mm。构件柱的截面尺寸及配筋见图 1。根据以上参数, 共设计模拟了 6 个构件, 并依据研究的目的对其中 5 根柱预设了不同的

收稿日期: 2014-12-30

基金项目: 甘肃省教育厅研究生导师基金(1004ZTC083)

作者简介: 张贵文(1967-), 女, 甘肃兰州人, 副教授。

损伤程度. 具体参数见表 1, 表中 ZB-1、ZB-3、ZB-5 分别表示轻度损伤、中度损伤、严重损伤. 钢筋混凝土柱采用钢板四面包裹的方式进行加固, 钢板取厚度 3 mm 的 Q235 钢材, 加固的高度为整个柱高.

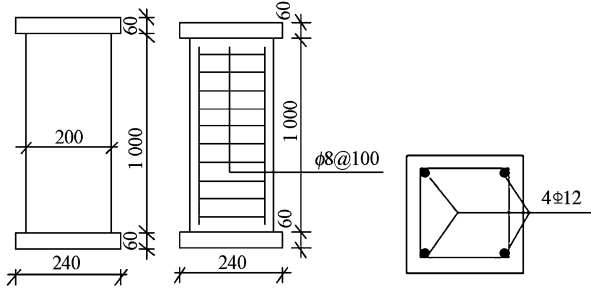


图 1 模型构件柱截面尺寸和配筋(mm)

Fig. 1 Sectional dimension and reinforcement drawing of model component column (mm)

表 1 模型构件的主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of model components

构件分组	构件编号	模型构件参数	
		轴压比	初始损伤程度系数
原始构件	ZA-1	0.5	0
加固 损伤 构件	ZB-1	0.5	0.02
	ZB-2	0.5	0.30
	ZB-3	0.5	0.48
	ZB-4	0.5	0.74
	ZB-5	0.5	0.91

注: 初始损伤程度系数按照发生的位移转角 r 与钢筋混凝土柱极限位移转角 R 的比值来确定. 例如: ZB-1 构件在加固前施加水平反复荷载作用, 使构件在 $R=1/500$ 循环 1 周时产生损伤后再进行粘钢加固, 然后再按照加载制度施加水平反复荷载, 从而研究其加固后的抗震性能. 其中极限位移转角 $R=23/250$.

选用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[5]所提供的材料参数. 具体的混凝土和钢材的材料参数如表 2 和表 3 所示.

表 2 混凝土的材料参数

Tab. 2 Parameter of concrete material

等级	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/ ($N \cdot mm^{-2}$)	泊松比	$f_{ck}/(N \cdot mm^{-2})$	$f_t/(N \cdot mm^{-2})$
C30	2.4	22 901.36	0.2	20.1	1.43

注: f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; f_t 为混凝土轴心抗拉强度标准值.

表 3 钢材的材料参数

Tab. 3 Parameter of steel material

材料 种类	型号	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/ ($kN \cdot mm^{-2}$)	泊松比	$f_{yk}/(N \cdot mm^{-2})$
纵筋	HRB335	7.8	200	0.3	335
箍筋	HPB300	7.8	210	0.3	300
钢板	Q235	7.8	206	0.3	235
钢垫片		7.8	200	0.3	

注: f_{yk} 为普通钢筋屈服强度标准值.

混凝土损伤弹塑性基本选项^[6-7]如表 4 所示.

表 4 混凝土弹塑性参数

Tab. 4 Elastic and plastic parameter of concrete

膨胀角/(°)	偏心率	f_{bo}/f_{co}	K	黏性参数
30	0.1	1.16	0.666 7	0~0.005

注: 膨胀角的取值一般在 $15^\circ \sim 56.3^\circ$ 之间; 偏心率缺省值为 0.1; f_{bo} 为双轴极限抗压强度; f_{co} 为单轴极限抗压强度; f_{bo}/f_{co} 的缺省值为 1.16; K 为拉伸子午面上和压缩子午面上的第二应力不变量之比, 其缺省值为 2/3; 只有黏性参数有很大的参考依据, 影响计算的收敛性, 本次研究取值 5.0×10^{-4} .

1.1.2 损伤因子

混凝土损伤因子的确定有多种方法^[8-9], 本次研究采用秦浩^[9]提到的基于高斯积分求解的经典损伤理论法, 他们认为经典损伤理论法基于连续介质损伤力学, 对简化后的混凝土单轴应力应变关系式进行高斯积分求解, 通过能量面积比即可得到能应用于 ABAQUS 损伤塑性模型的拉压损伤因子, 具有充分理论依据, 且精确度较高, 具有较好的通用性.

1.2 本构关系和单元类型的选取

1) 混凝土的本构关系

采用 ABAQUS 提供的混凝土塑性损伤模型. 该模型是基于《混凝土结构设计规范》^[5]规定的混凝土本构关系, 并且进行了适当地简化, 同时将混凝土拉压损伤因子引入 ABAQUS 混凝土损伤塑性模型中. 此模型是公认的在反复荷载作用下对混凝土非弹性行为模拟最为有效的模型, 并被广泛地应用于抗震分析计算中, 尤其适用于构件的弹塑性分析.

2) 钢筋和钢板的本构关系

采用理想的弹塑性模型, 该模型最为简单, 构件破坏时钢筋的应变尚未进入强化段, 屈服后的应力-应变关系简化为一条水平直线.

3) 钢垫片的本构关系

采用弹性模型. 因钢垫片用作钢筋混凝土柱底的固端和施加水平反复荷载的加载板, 而模拟是针对钢筋混凝土柱而言, 所以不考虑钢垫片的塑性.

4) 单元类型的选取

考虑到粘钢加固钢筋混凝土柱各种材料(混凝土、钢筋和钢板)的布置特点及力学性能, 选用分离式模型, 在建立有限元模型时, 各自选择不同的单元形式进行模拟.

混凝土和钢垫片均采用三维实体单元 C3D8R, 即用八节点六面体减缩积分单元来模拟. 该单元虽然计算精度略低, 但可以减少很多自由度, 能大大节省计算时间. 钢板采用壳单元 S4R, 即四节点减缩积分壳单元来模拟. 钢筋骨架采用 T3D2 即两结点线性三维桁架单元来模拟.

1.3 基本假定

采用分离式模型,先将混凝土、钢筋骨架、外包钢板分别建立有限元模型,见图 2.假定钢筋与混凝土、混凝土与钢板完全咬合,不考虑钢筋和混凝土、混凝土和钢板之间的相对滑移.采用 ABAQUS 软件中 Embedded 技术将钢筋骨架嵌入混凝土中来模拟钢筋与混凝土之间的黏结,同时采用 Tie 技术将混凝土和外包钢板绑定在一起来模拟混凝土与外包钢板之间的黏结,从而确保钢筋与混凝土、混凝土与钢板完全咬合,共同受力,位移协调.粘钢加固钢筋混凝土柱的有限元模型网格划分如图 3 所示.

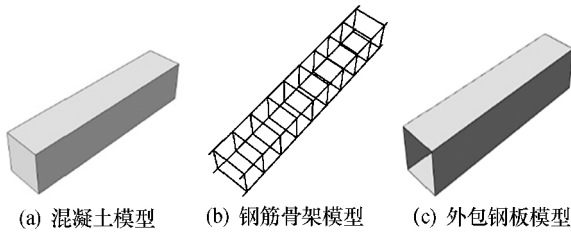


图 2 混凝土、钢筋骨架和外包钢板的模型

Fig. 2 Concrete, reinforcement cage and steel plate covering model

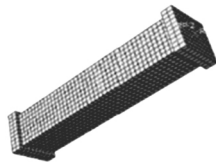


图 3 有限元模型的网格划分

Fig. 3 Meshing of finite element model

1.4 加载方法

构件加载示意图如图 4 所示.首先在柱顶施加轴力 $N=547.87\text{ kN}$ (轴压比为 0.5),并在模拟过程中保持稳定;然后在柱顶加载钢垫片上施加水平反复荷载,采用位移控制法,以柱顶端位移作为控制参数,分级施加往复水平力.加载制度按位移转角 R 控制,先分别在 $R=1/500$ 和 $1/250$ 时各循环加载 1 次;再在 $R=1/125$ 时视受力情况循环加载 1 次或 3 次,此时构件约达到屈服状态;此后按照位移转角增量 $\Delta R=1/250$ 加载,每级增量各循环 3 次;若加载

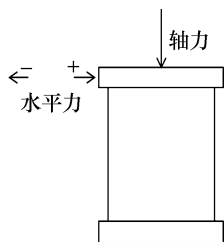


图 4 加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading

至 $R=1/50$ 时构件未破坏,则此后按转角增量 $\Delta R=1/125$ 加载,每级增量各循环 3 次.循环加载历程如图 5 所示.

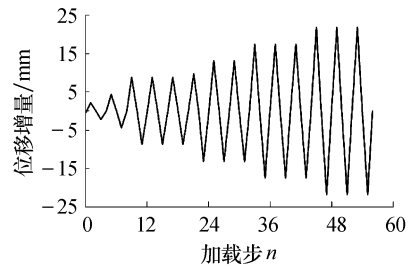


图 5 循环加载历程

Fig. 5 Cyclic loading process

1.5 损伤的实现

在粘钢加固构件时,原构件已经承受了一定的荷载,使其出现一定的损伤,加固的钢板与原构件之间存在着应力应变滞后或超前的现象.要解决此现象必须利用 ABAQUS 特有的单元生死功能.利用有限元求解分析之前,首先把构件模型建立好,在分析加固前原构件时,不考虑加固材料(钢板)对整个构件的作用,使其刚度失效,即钢板死;再开始计算原构件单独工作的应力应变,使其产生一定的损伤;然后在分析加固后构件继续受力时再考虑加固材料(钢板)对整个构件的作用,使其刚度复原,即钢板生.

2 分析结果

2.1 滞回曲线

结构在水平反复荷载作用下的荷载-位移滞回曲线能够较综合地反映构件受力性能的变化,而且可以反映强度、刚度和延性等方面的力学特征.模拟各构件在加载点的滞回曲线如图 6 所示.对比各构件可发现,加固后构件的单个滞回环面积比加固前单个滞回环面积大,表明加固后构件耗能能力优于加固前,即粘钢加固可以提高构件的变形能力和耗能能力,使构件的刚度衰减较为缓慢.可以看出加固后的构件其滞回曲线最为饱满,说明其更有利于构件的抗震.

2.2 骨架曲线

骨架曲线反映了每级加载时荷载-位移曲线达到最大峰值点的轨迹,可以用来定性地比较和衡量结构或构件的抗震性能.骨架曲线上的特征点见表 5.模拟各构件的骨架曲线如图 7 所示.

由表 5 可知,当水平位移循环 1 周时,加固前 ZA-1 的水平荷载为 18.6 kN(取正反加载时水平荷载的平均值);ZB-1 的水平荷载为 47.6 kN,提高了

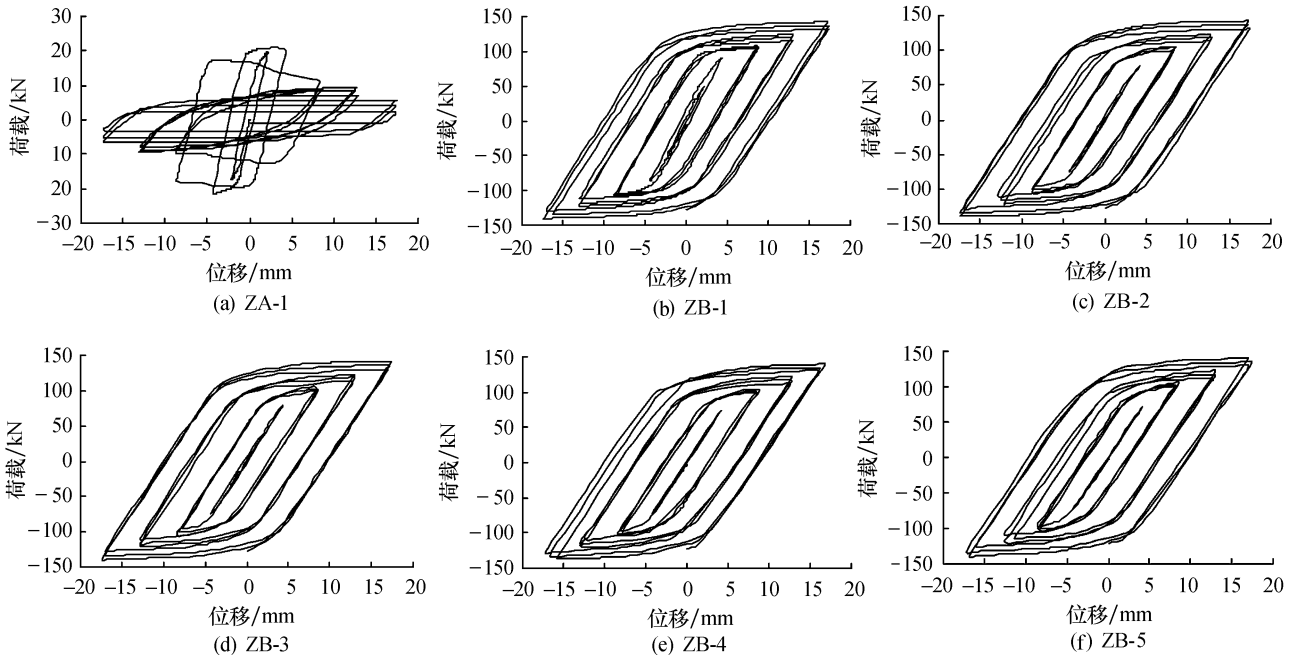


图 6 模型构件的滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curve of model components

表 5 荷载-位移骨架曲线的特征点

Tab. 5 Characteristic points of load-displacement skeleton curves

构件编号	水平荷载循环周数					
	1	2	5	8	11	
ZA-1	位移 /mm	-2.15	-4.36	-8.63	-12.14	
		2.14	2.99	8.25	11.11	
	荷载 /kN	-17.5	-21.6	-8.9	-7.8	
		19.6	20.9	8.9	7.2	
ZB-1	位移 /mm	-2.13	-4.34	-8.70	-13.02	-17.36
		2.11	4.32	8.55	12.93	17.21
	荷载 /kN	-46.9	-86.5	-107.1	-122.4	-140.1
		48.3	90.6	107.8	124.5	142.4
ZB-2	位移 /mm	-2.13	-4.17	-8.69	-12.20	-17.35
		2.01	4.14	8.58	12.68	17.31
	荷载 /kN	-39.1	-74.6	-104.0	-120.6	-139.7
		38.7	77.7	105.4	122.7	142.2
ZB-3	位移 /mm	-1.85	-4.23	-8.29	-12.72	-17.43
		1.96	4.31	8.33	12.97	17.40
	荷载 /kN	-34.0	-74.3	-103.3	-120.3	-139.0
		36.3	78.6	104.4	122.6	141.7
ZB-4	位移 /mm	-1.85	-4.23	-8.07	-12.78	-15.87
		1.88	4.13	8.72	12.84	16.80
	荷载 /kN	-33.5	-73.0	-103.0	-119.9	-137.2
		32.7	73.3	104.4	122.1	139.7
ZB-5	位移 /mm	-1.85	-4.25	-8.41	-12.61	-16.76
		2.10	4.16	8.57	12.87	17.08
	荷载 /kN	-33.3	-72.7	-103.2	-119.9	-137.8
		35.1	71.8	104.6	21.9	140.3

1.6倍; ZB-2 的水平荷载为 38.9 kN, 提高了 1.1 倍; ZB-3 的水平荷载为 35.2 kN, 提高了 0.9 倍; ZB-4 的水平荷载为 33.1 kN, 提高了 0.8 倍; ZB-5

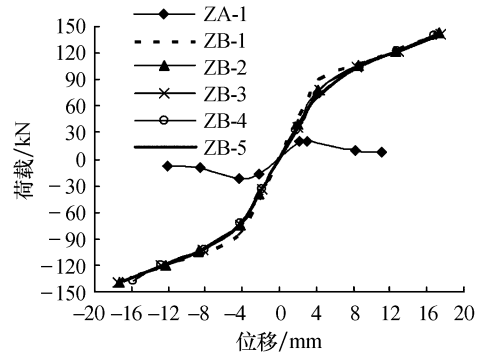


图 7 骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curve

的水平荷载为 34.2 kN, 提高了 0.8 倍. 可见加固后构件的承载力均有不同程度提高.

由图 7 可知, 当初初始损伤程度为轻度或中度损伤时, 对加固构件的骨架曲线影响较小; 当为重度损伤时影响较大. 表明损伤程度越大对粘钢加固损伤钢筋混凝土柱的承载能力和变形能力的影响越显著; 同时表明有损伤的钢筋混凝土柱经过粘钢加固是可以有效恢复其抗震性能的.

2.3 刚度退化曲线

刚度退化是反映构件抗震性能的一个重要指标. 构件的刚度可用割线刚度表示, 其割线刚度 K_i 可表示为

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (1)$$

式中: $\pm F_i$ 分别为第 i 次循环正反加载时对应的峰值点荷载; $\pm \Delta_i$ 分别为第 i 次循环正反加载时对应

的峰值点位移。

根据式(1)可计算出各构件的割线刚度 K_i ，见表 6。模拟中各构件的刚度退化曲线如图 8 所示。

表 6 构件的割线刚度

Tab. 6 Secant stiffness of components kN/mm

构件 编号	水平荷载循环周数				
	1	2	5	8	11
ZA-1	8.6	5.8	1.1	0.6	
ZB-1	22.5	20.5	12.5	9.5	8.2
ZB-2	18.8	18.3	12.1	9.8	8.1
ZB-3	18.5	17.9	12.5	9.5	8.1
ZB-4	17.7	17.5	12.4	9.4	8.5
ZB-5	17.3	17.2	12.2	9.5	8.2

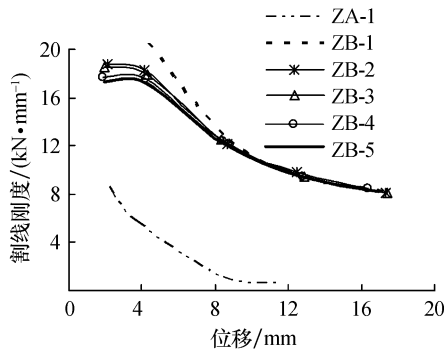


图 8 刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness degradation curve

由表 6 可知，随着水平位移循环周数的增加，构件柱的刚度逐渐下降，即有明显的刚度退化现象。随着水平位移的逐渐增大，刚度衰减趋于平缓，变化不大；与未加固构件相比，加固后的构件其刚度退化较为缓慢。这说明用粘钢加固能减缓刚度的退化。由图 8 可知，随着初始损伤程度的增大，加固构件的刚度衰减较快。结果表明初始损伤程度严重会对粘钢加固损伤钢筋混凝土柱的刚度退化有明显的影

3 结论

采用有限元软件 ABAQUS 对 6 根构件柱(5 根

加固)进行水平反复荷载作用下的模拟研究,对各个构件的应力云图、滞回曲线、骨架曲线和刚度退化曲线等进行了对比分析,得到如下结论。

1) 与未加固构件相比,加固后的构件其承载能力、变形能力都得到提高,刚度退化趋势变缓。模拟结果表明粘钢加固可以提高构件的延性,尤其对损伤程度轻的构件加固提高的更大,更有利于抗震;同时表明粘钢加固是一种可行的抗震加固方法。

2) 当初始损伤程度为轻度或中度时,其对粘钢加固损伤钢筋混凝土柱的滞回曲线、骨架曲线影响较小;随着损伤程度的增大,即出现严重损伤时,其对加固构件的骨架曲线和刚度退化曲线有显著地影响。因此,出现不同损伤程度的钢筋混凝土柱,只要在可修复的范围都可以通过粘钢加固有效恢复其抗震性能。

参考文献:

- [1] 顾祥林,黄庆华,吴周德. 钢筋混凝土柱考虑损伤累积的反复荷载-位移关系分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 68-74.
- [2] 谢颖川. 粘钢加固钢筋混凝土梁受力性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [3] 郭永昌,李丽娟,刘 锋. 纤维布加固混凝土梁粘剥离破坏分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(4): 118-120.
- [4] 郭光玲. 玻璃纤维布加固钢筋混凝土偏心受压柱的试验研究 [J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(4): 123-126.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] 关志贤. 湿式外包钢加固钢筋混凝土柱非线性有限元分析研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [7] 刘劲松,刘红军. ABAQUS 钢筋混凝土有限元分析 [J]. 装备制造技术, 2009(6): 69-70, 107.
- [8] 曹 明. ABAQUS 损伤塑性模型损伤因子计算方法研究 [J]. 交通标准化, 2012(2): 51-54.
- [9] 秦 浩,赵宪忠. ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究 [J]. 结构工程师, 2013, 29(6): 27-32.