

地铁车站中柱弹塑性地震时程分析 精细化仿真

李夕兵,王泽伟,彭康,刘志祥

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

摘要 为了研究地铁车站中柱在地震作用下的响应,运用先进截面整体分析,从中获取位移响应施加于构建精细构件模型思路,实现了地铁车站中柱在地震作用下的三维弹塑性时程分析。首先对地铁车站进行截面弹塑性时程分析,获取中柱两端的相对位移时程响应,施加于中柱的精细模型两端,以达到模拟中柱在地震作用下的时程反应的目的。结果显示,在施加的罕遇地震作用下,3.94s 时中柱产生大规模的塑性区,在 4.60s 和 5.00s 时,中柱端部的混凝土相继失效甚至脱落,完全形成塑性铰。中柱的精细模拟与地铁车站截面模拟的结果吻合,并且与实际震害非常相似。

关键词 地铁车站;中柱;弹塑性时程分析;精细仿真

中图分类号 TU93^{·2}

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.12.011

Refinement Simulation Study on the Elastoplastic Seismic Time History Analysis of Subway Station Interior Column

LI Xibing, WANG Zewei, PENG Kang, LIU Zhixiang

College of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The paper has analyzed the mid-column section and come up with the idea of displacement response which was applied on rigorous component model. Three-dimensional elastic-plastic time history analysis of subway station mid-column under earthquake action was achieved. The subway station was submitted to sectional elastic-plastic time history analysis, and relative displacement time history response of both ends of the mid-column was obtained. Then relative displacement time history response was applied to the both ends of elaborate model of mid-column to achieve the time history response in the earthquake action. The results showed that mid-column generated a large-scale plastic zone when rare earthquake was applied at 3.94s. In addition, the concrete of the end portion of mid-column failed, even fell off, and the plastic hinge fully formed at 4.60s and 5.00s. The results of refinement simulation of mid-column was in accordance with that of section simulation of subway station. Moreover it was very similar to the actual earthquake damage.

Keywords subway station; mid-column; elastic-plastic time history analysis; elaborate simulation

0 引言

地震结构分析方法中弹塑性时程分析法作为一种地震结构计算的直接算法早在半个世纪前就被提出,也被广泛认为是一种值得推荐的分析方法^[1]。但是由于该方法计算量巨大,受到计算机能力的限制。地下结构抗震分析方法主要有原型观测、模型试验和理论分析 3 种^[2],尽管一些很有意义的模型试验被研究^[3-5],但是理论分析能够以更少的代价提供更多的信息而受到广泛青睐,尤其是地下结构的地震时程分

析法。

目前采用时程分析法对地下结构进行分析已有一些成果,文献[6]~[8]对不同的地铁车站进行了二维的截面建模,结果都指出地铁车站的中柱为地震中的薄弱环节,需要特别重视;一些三维的模拟也被研究^[9,10],但是由于计算量过大,没有进行精细的建模。一些简化的三维构件模型被提出可以有效地克服时程分析中三维分析的困难,比如 Fiber 模型^[11],MS 模型^[12]等,但是这些模型仍然不能解决时程分析中对构件精细

收稿日期:2013-02-26;修回日期:2013-03-27

基金项目:国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助项目(51074177);湖南省研究生学位论文创新工程项目(CX2012B070);2012 年教育部博士生学术新人奖项目(1343-7614000024);2012 年拔尖创新博士生奖学金;中南大学 2012 年国家级大学生创业实践项目

作者简介:李夕兵,教授,研究方向为岩石动力学与采矿工程,电子信箱:xbli@mail.csu.edu.cn

建模的问题。本文尝试将二维弹塑性时程分析记录的中柱两端的相对位移响应施加在三维精细建模的中柱两端的思路,实现中柱的钢筋与混凝土分离建模,进行弹塑性时程分析精细仿真。

1 结构整体分析

1.1 模型与边界

地铁站中柱的精细模拟的第一步是找到中柱两端在地震作用下的相对位移时程,因此要对地铁站进行整体模拟以获得位移响应时程。

某地铁站为一两层两跨车站,埋深 2.7m,外层有 800mm 厚地下连续墙围护,上下层中柱尺寸均为 1100mm×700mm,其中上层中柱高 3.9m,下层中柱高 4.6m,为特别需要关注的构件。车站主体采用 C30 混凝土浇筑,底层有一 20cm 厚的 C20 素混凝土垫层,模型见图 1。该车站所在位置抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 0.10g,设计地震分组为第 2 组,第 4 类场地。

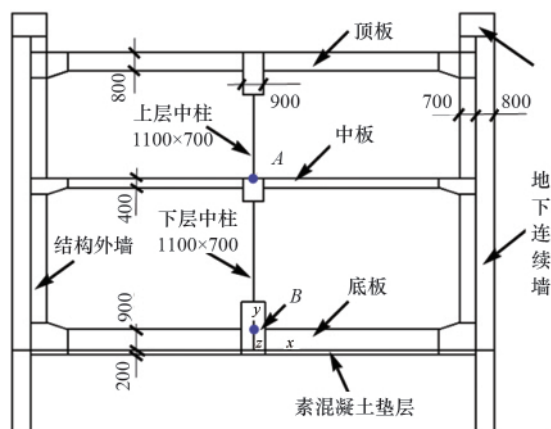


图 1 地铁站主体结构(单位:mm)

Fig. 1 Main structure of subway station (unit: mm)

建立二维有限元模型见图 2,模型两侧采用无限单元边界,底部水平方向采用黏性边界。中柱采用梁单元模拟,中柱与顶底板和中板的连接采用多点约束,以模拟真实状态下的刚域效果。连续墙和地铁站的主体结构采用平面应变单元模拟。

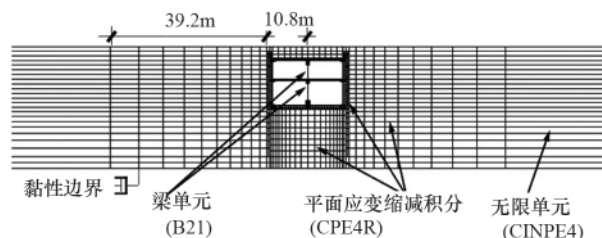


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 FEM calculation model

1.2 混凝土结构本构

在动力学分析中,地铁车站的本构定义对结果影响很大。本文采用的混凝土本构为混凝土损伤塑性模型。混凝土结构 2010 年设计规范^[13]中对混凝土的本构有详细规定,根据规范,本文采用的混凝土单轴受压行为如图 3 所示。考虑到在受拉状态下混凝土可以通过与钢筋的黏结滑移作用将力传递到钢筋上,这里采用的拉伸行为曲线:在混凝土拉伸开裂之前,应力-应变曲线为规范规定的混凝土单轴拉伸曲线,而一旦混凝土发生开裂,应力-应变曲线线性减小到 0,如图 4 中虚线所示。

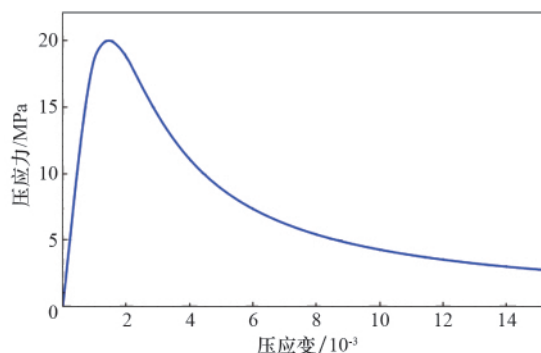


图 3 混凝土单轴受压应力-应变曲线

Fig. 3 Uniaxial press stress-strain curve of concrete

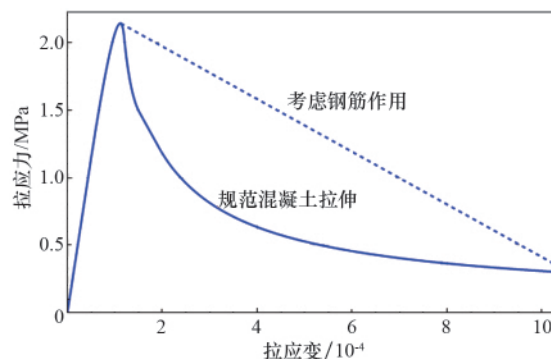


图 4 混凝土单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Uniaxial tension stress-strain curve of concrete

混凝土损伤塑性模型中一个重要的参数为损伤因子,记拉伸损伤因子为 d_t ,压缩损伤因子为 d_c ,由于拉伸状态时主要由钢筋受力而非混凝土,不需要定义拉伸损伤因子,因而只需考虑压缩损伤因子。压缩损伤因子的定义如下:

$$d_c = 1 - \frac{E_c}{E_0}$$

其中, E_c 为压缩状态下卸载路径的弹性模量, E_0 为初始弹性模量。

规范中对混凝土的卸载行为有明确的定义,并定义了 d_c 的计算公式,因此可以从规范中直接获得标准混凝土压缩损伤因子的定义。根据规范,C30 混凝土的压缩损伤因子与非弹

性应变的关系如图 5 所示。

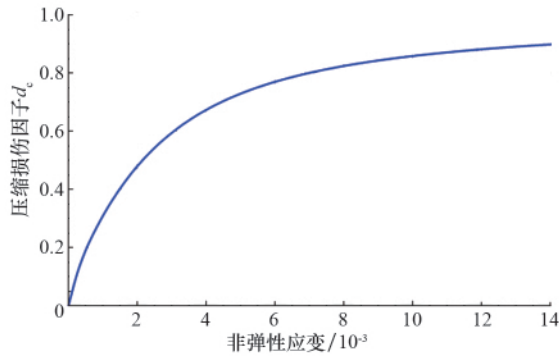


图 5 压缩损伤因子曲线

Fig. 5 Compression damage factor curve

1.3 地震荷载

本文根据国内抗震规范^[1]给出的目标反应谱(地震影响曲线),采用小波包变换调整 Koyna 波的方法获得了适用于 7 度罕遇地震,地震分组第 2 组,第 4 类场地的加速度时程见图 6,该地震波拟合目标谱误差 < 3%,完全符合规范要求(图 7)。

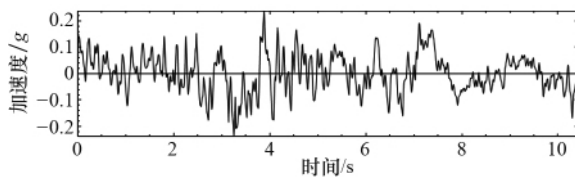


图 6 地震加速度时程

Fig. 6 Earthquake acceleration time history

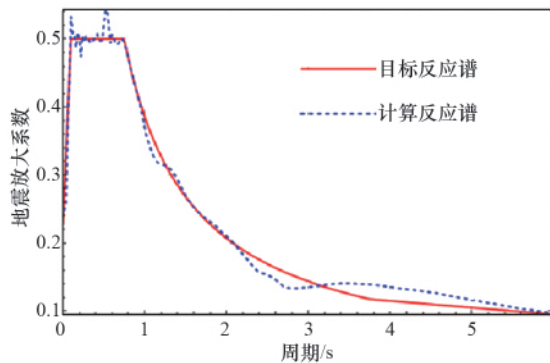


图 7 地震荷载的反应谱

Fig. 7 Response spectrum of the earthquake load

1.4 中柱端部位移响应

地震加速度时程以水平荷载的方式施加在图 2 所示模型的底部。利用有限元程序 ABAQUS 计算,记录图 1 中 A 和 B 两点间的相对位移时程,如图 8 所示。

从图 8 可以看到,在 0~4.00s 期间,A 和 B 两点的相对位移处于不稳定状态,4.00s 以后,A、B 两点作相对稳定的往复运动,这种运动周期和振幅都比较稳定,因此可以认为 A、B

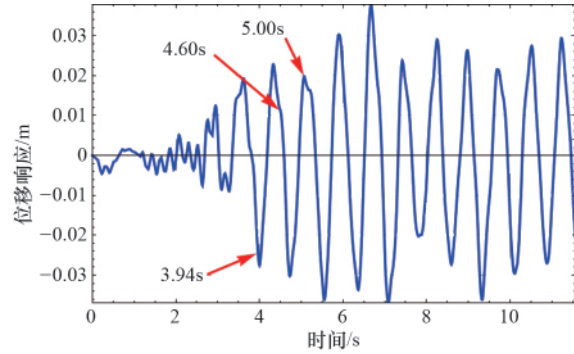


图 8 中柱两端相对位移响应

Fig. 8 Relative displacement response between two ends of the mid-column

之间出现了一个活动的铰。图 8 所示的位移响应将作为荷载重新作用于精细建模的中柱。

2 中柱精细仿真

地铁站为大跨度结构,中柱的稳固与否直接关系到车站整体的安全性,而中柱又是整个车站的薄弱环节,因此,中柱在地震中的表现是地铁站抗震性能的至关重要的一个因素。

本文取图 1 中下层中柱作为研究对象进行精细化仿真模拟。下层中柱的截面纵向受力钢筋分布见图 9,中柱截面四周共分布 24 条直径为 28mm 的三级钢筋。建模过程中钢筋的模拟只考虑这 24 条纵向受力筋,箍筋和构造钢筋通过定义混凝土材料的拉伸硬化考虑。对图 1 中 A、B 之间的部分进行精细化建模,模型分为 3 个部分,中柱主体、中柱内的纵向受力钢筋和中柱两端连接的梁(图 10)。中柱主体混凝土沿用第 1.2 节中混凝土损伤塑性模型,中柱内的纵向受力钢筋采用弹性模型,弹性模量为 200GPa,泊松比 0.3,两端连接的梁部分主要起到传递位移荷载作用,因此采用线弹性模型,弹性模量与中柱主体混凝土的弹性模量一致,保证混凝土结构的刚度即可。

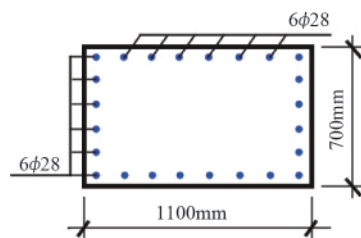


图 9 下层中柱截面纵向钢筋分布

Fig. 9 Longitudinal distribution of reinforcement on lower mid-column section

如图 10 所示,固定模型底端(B),在模型顶端(A)施加整体模拟中记录的 A、B 两点的相对位移响应,即图 8 所示的位移时程,计算结果如图 11~图 13 所示。(a)为屈服区,当某点

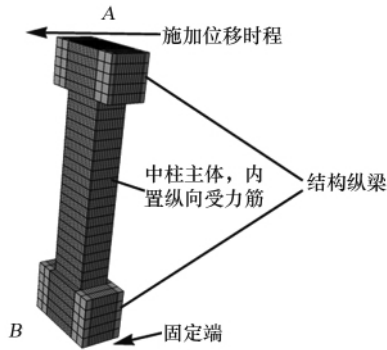


图 10 中柱有限元模型

Fig. 10 FEM of the mid-column

出现塑性应变时为 1, 否则为 0, (b) 为位移云图, 为了更好地看清变形后的状态, 变形放大 50 倍显示。

A 端施加位移时程前 3.00s 内中柱没有发生屈服现象; 3.00~3.94s 只有中柱底部发生小范围的屈服; 在 3.94s 中柱首

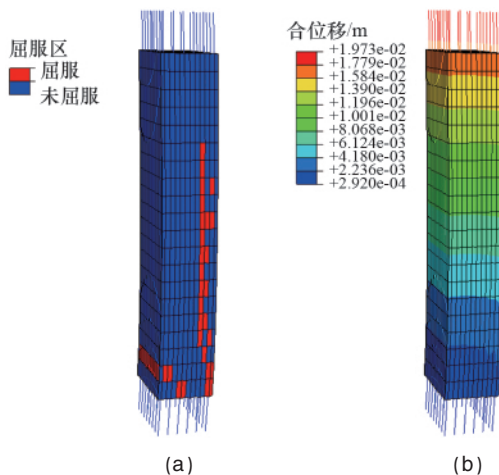


图 11 第 3.94 s 屈服区 (a) 和位移 (b)

Fig. 11 Yield region (a) and displacement (b) in 3.94s

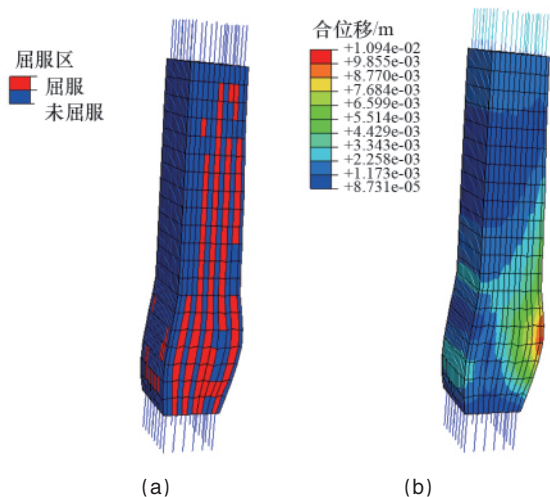


图 12 第 4.60s 屈服区 (a) 和位移 (b)

Fig. 12 Yield region (a) and displacement (b) in 4.60s

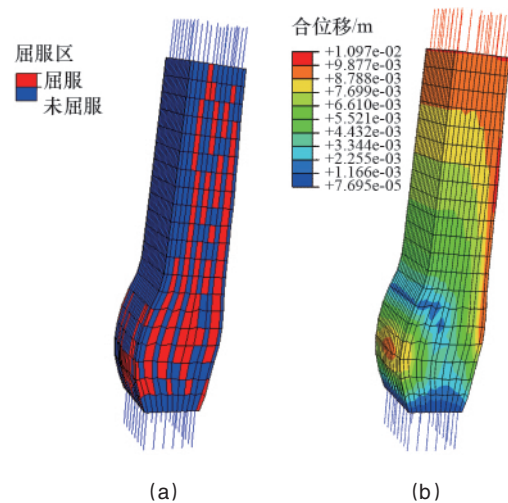


图 13 第 5.00s 屈服区 (a) 和位移 (b)

Fig. 13 Yield region (a) and displacement (b) in 5.00s

次出现大范围屈服区此时沿中柱纵向出现了大规模的开裂, 中柱开始迅速加剧变形; 4.60s 时中柱底部出现了一个变形的峰值, 此时底部右侧的混凝土严重变形, 甚至出现从中柱脱落的情况; 5.00s 时中柱底部左侧出现变形峰值, 底部左侧混凝土严重变形, 从中柱上脱落, 此时中柱的底部全断面混凝土基本失效, 中柱底部形成塑性铰。

这个过程与整体分析时的结果完全吻合: 中柱精细模拟中首次出现大规模塑性区的时刻 (3.94s) 与整体分析中 A、B 两点开始作稳定的往复运动的时刻 (4.00s) 非常接近, 精细模拟中的两个变形峰值时刻 (4.60s 和 5.00s) 相对于整体分析中 A、B 两点相对位移的两个峰值时刻。比较震后中柱的钢筋弯曲情况 (图 14 (a)) 与 1995 年阪神地震中震坏的中柱 (图 14 (b)), 可以看到模拟的中柱与阪神地震中震坏的中柱极其相似, 因此可以认为, 在罕遇大震来临时, 该车站很有可能出现如 1995 年阪神地震中的大开车站那样的震害。

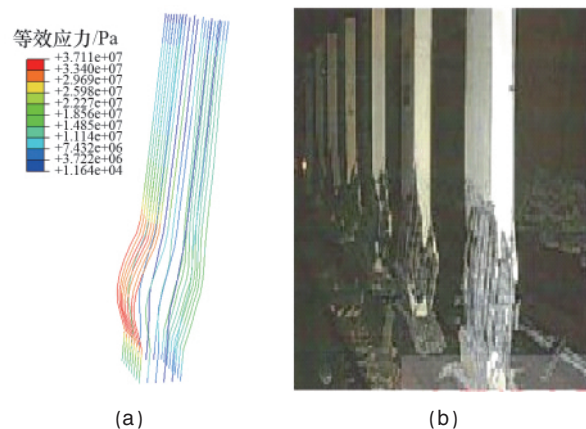


图 14 模拟中柱震后的钢筋 (a) 和阪神地震中震坏中柱 (b)

Fig. 14 Reinforcement after earthquake by simulation (a) and real damage of mid-column in Hanshin earthquake (b)

3 结论

(1) 运用一种先结构整体分析,再将整体分析的位移响应施加到精细构件模型的方法实现了弹塑性时程分析对构件的精细模拟,这种思想很好地解决了弹塑性时程分析计算量与模拟精细度的矛盾。

(2) 地铁车站的模拟结果显示,该站在罕遇地震作用下,中柱底部及沿着中柱方向都会出现大规模的屈服变形,产生大量裂缝,最终在中柱底部形成塑性铰。结构的整体分析和中柱的精细模拟都显示,在大震持续 4.00s 左右中柱会迅速失效,5.00s 后中柱底端的混凝土将全部脱落。该地铁车站在大震作用下的震害与 1995 年阪神地震时破坏的地铁车站非常类似。

(3) 地铁车站中柱的设计要注意环向钢筋的布置和中柱底端加固,防止过早形成塑性铰。

(4) 在精细模拟中只施加了对中柱影响最大的水平位移时程,而忽略了竖向位移的影响,因此在下一步工作中会进一步考虑水平位移和竖向位移的耦合作用下的精细仿真,以求更接近实际情况。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, The State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [2] 郑永来,杨林德,李文艺,等. 地下结构抗震 [M]. 上海:同济大学出版社,2005.
Zheng Yonglai, Yang Linde, Li Wenyi, et al. Anti-seismic of underground structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2005.
- [3] 杨林德,杨超,季倩倩,等. 地铁车站的振动台试验与地震响应的计算方法[J]. 同济大学学报,2003,31(10): 1135-1140.
Yang Linde, Yang Chao, Ji Qianqian, et al. Journal of Tongji University, 2003, 31(10): 1135-1140.

- [4] 杨林德,王国波,郑永来,等. 地铁车站接头结构振动台模型试验及地震响应的三维数值模拟[J]. 岩土工程学报,2007,29(12): 1892-1898.
Yang Linde, Wang Guobo, Zheng Yonglai, et al. Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1892-1898.
- [5] 左熹,陈国兴,王志华,等. 近远场地震动作用下地铁车站结构地基液化效应的振动台试验[J]. 岩土力学,2010,31(12): 3733-3740.
Zuo Xi, Chen Guoxing, Wang Zhihua, et al. Journal of Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3733-3740.
- [6] 庄海洋,程绍革,陈国兴. 阪神地震中大开地铁车站震害机制数值仿真分析[J]. 岩土力学,2008,29(1): 245-250.
Zhuang Haiyang, Chen Shaoge, Chen Guoxing. Journal of Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 245-250.
- [7] 左熹,杨树才,陈国兴. 地铁车站结构非线性地震损伤演化规律分析[J]. 工程抗震与加固改造,2010,32(1): 110-116.
Zuo Xi, Yang Shucai, Chen Guoxing. Journal of Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(1): 110-116.
- [8] 庄海洋,陈国兴,胡晓明. 两层双柱岛式地铁车站结构水平向非线性地震反应分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1): 3074-3079.
Zhuang Haiyang, Chen Guoxing, Hu Xiaoming. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 3074-3079.
- [9] 赵伯明,蒋英礼,陈靖. 软土地铁车站结构在三维强地震动作用下的响应分析[J]. 中国铁道科学,2009,30(3): 45-50.
Zhao Boming, Jiang Yingli, Chen Jing. Journal of China Railway Science, 2009, 30(3): 45-50.
- [10] 还毅,方秦,柳锦春,等. 提高地铁车站结构抗震能力的理论及数值分析[J]. 振动与冲击,2011,30(3): 253-257.
Huan Yi, Fang Qin, Liu Jinchun, et al. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 253-257.
- [11] Kaba S A, Mahin S A. Interactive computer analysis method for predicting the inelastic behavior of structural sections, UCB/EERC-83/18[R]. Berkeley: University of California, 1983.
- [12] Lai S S, Will G T, Otani S. Model for inelastic biaxial bending of concrete members [J]. Journal of the Structure Division, 1984, 110(11): 2563-2584.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·

国内外测得震级为何不同

4月20日,中国地震台网公布芦山地震为7.0级,而美国地质勘探局公布芦山震级为6.6级。中国地震局地质研究所研究员周本刚解释,2个数字的差异是由于地震震级计算标度不同造成的,美国地质勘探局主要使用矩震级,而中国使用面波震级,对同一场地震就有不同的震级数字,但矩震级的6.6级与面波震级7.0级等同(<http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2013/4/277026.shtml>)。