

# 切槽式钢套管混凝土柱的承载性能研究

韩金生, 王立一, 王雪雯

(山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**提出一种切槽式钢套管混凝土柱。通过多道切槽来削弱钢套管的纵向抗压能力,以提高其横向抗拉能力,从而增强对内部混凝土柱的横向约束并提高其承载能力和变形能力。完成了 4 个短柱试件轴心受压的试验,试验结果表明:切槽式钢套管混凝土柱的轴压极限承载能力略高于普通的钢管混凝土柱,弹性阶段的刚度和塑性阶段的变形能力也与普通钢管混凝土柱接近;切槽并没有降低钢套管混凝土柱整体的承载能力和变形能力,钢套管横向约束产生的有利影响超过了自身纵向抗压能力降低产生的不利影响。切槽式钢套管混凝土柱可以用于既有结构的加固,也可以用作现浇结构的基本构件,在工程中的应用相比普通的钢套管混凝土柱更加方便灵活。

**关键词:**钢套管混凝土柱;切槽;约束;试验研究;承载能力

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)04-0080-06

## The Load-carrying Property of Concrete Column Confined by Grooved Steel Sleeve

Han Jinsheng, Wang Liyi, Wang Xuewen

(College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology,  
Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** The concrete column confined by grooved steel sleeve is introduced in this paper. Multiple grooves are used to weaken the longitudinal compressive ability and enhance the transverse tensile ability of steel sleeve. Therefore, the confinement on the inner concrete column and its bearing capacity and deformation performance accordingly increase. Four test specimens of short columns were experimented under axial compressive load. The experimental results show that the ultimate bearing capacity under axial compression of concrete column confined by grooved steel sleeve is slightly larger than that of ordinary concrete filled steel tubular column. Moreover, the stiffness at elastic stage and the deformability at plastic stage are similar. The grooves do not cause the decrease of the integral bearing capacity and deformation ability of concrete column confined by steel sleeve. The positive effects of the increase of transverse constraint exceed the negative effects of the decrease of longitudinal compressive ability of the grooved steel sleeve. The concrete column confined by grooved steel sleeve can be used both in the reinforcement of existing structures and in cast-in-place structures. The concrete column confined by grooved steel sleeve is more convenient and flexible than that confined by common steel sleeve in civil engineering application.

**Key words:** concrete column confined by steel sleeve; groove; confinement; experimental study; bearing capacity

## 1 钢套管混凝土柱研究概况

钢套管混凝土柱是在混凝土柱的外部利用钢套管施加横向约束的一种约束混凝土结构。钢套管混凝土

收稿日期:2013-04-25

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51108256);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2010SF022)

作者简介:韩金生(1978—),男,山东潍坊人,副教授,博士,主要从事工程结构防灾减灾研究。

E-mail:hisheng2008@163.com

柱是钢管混凝土柱的一种改进,两者虽然形式类似但是受力机理存在显著差别。钢管混凝土柱的钢管除了对内部混凝土柱施加一定的横向约束外,还要承受相当大的竖向荷载作用,如图 1(a)所示。钢套管混凝土柱的钢套管则尽可能地避免承受很大的纵向压力,主要起到约束混凝土柱横向变形的作用。图 1(b)所示为截断式钢套管混凝土柱,钢管在柱端截断并裁短一段,因此钢套管并不直接承受纵向荷载。界面的粘结力和摩擦力使钢套管承受一定的纵向压力,但是该纵向压力相比钢管混凝土柱的钢管受力显著偏小,这是钢套管混凝土柱与钢管混凝土柱的主要区别。日本的 Sato 等<sup>[7]</sup>提出了穿孔式的钢套管混凝土柱,即在柱端附近的钢管上加工一排穿孔,穿孔处钢管受压后提前屈服,同样可以减小钢管承受的纵向压力。

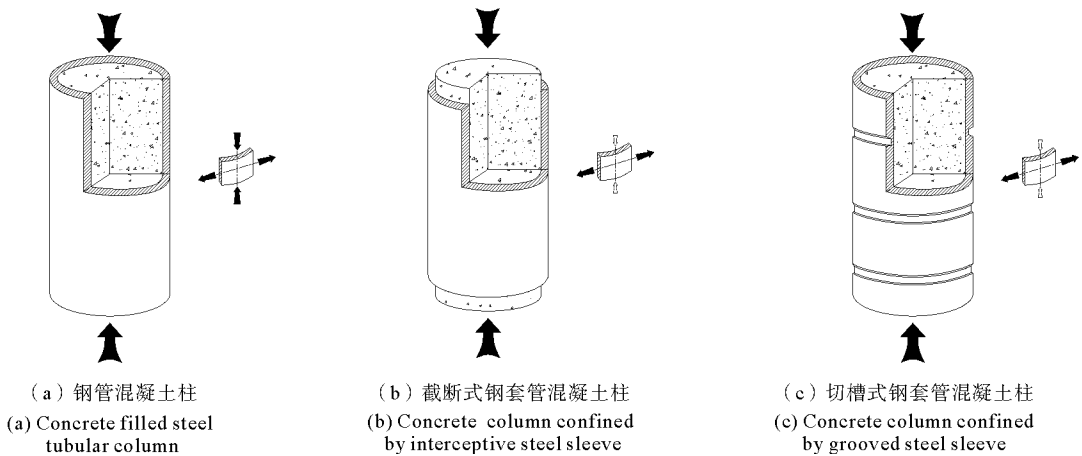


图 1 钢管混凝土柱与钢套管混凝土柱示意图

Fig. 1 Concrete filled steel tubular column and concrete column confined by steel sleeve

套管柱的概念最早是由日本九州大学的 Tomii, Sakino 和湖南大学的肖岩等学者于 1985 年提出的<sup>[2]</sup>,最初的形式为外部包裹钢管的套管钢筋混凝土柱。钢套管在纵向不受力,而是作为柱的横向增强,起约束和抗剪的作用<sup>[3]</sup>,这是与钢管混凝土柱的重要区别。当前套管柱的概念已经扩大化,所有具有外部横向约束的柱子都可以认为是套管柱,包括外包 FRP(fiber reinforced polymer, 纤维强化塑料)等材料的结构柱。

虽然提出套管柱的概念已有很长时间,而且针对 FRP 约束或加固构件的研究也是一个热点<sup>[4-6]</sup>,但是针对钢套管混凝土柱所进行的研究相对很少<sup>[7-8]</sup>,研究范围比较有限。钢套管混凝土柱的研究成果少,也存在一些问题和不足之处,因此限制了它在实际工程中的应用,目前只有在国外的个别工程中才有试验性的应用<sup>[3]</sup>。例如:日本大林组建筑公司在位于大阪的一幢高层钢筋混凝土结构的施工中首次采用了套管柱<sup>[9]</sup>;美国阿拉斯加州交通局在 1999 年进行了一个桥柱结构的足尺试验<sup>[10]</sup>,首次尝试将套管柱应用于桥柱结构设计;从 20 世纪 80 年代末期开始, Priestley 等<sup>[11]</sup>对钢套管混凝土柱在加固设计当中的应用进行了研究,并指导了加利福尼亚等地区的大量桥梁加固工程。

## 2 切槽式钢套管混凝土柱的承载机理与特点

### 2.1 钢套管混凝土柱的承载机理

普通钢管混凝土柱在竖向荷载作用下,钢管近似处于纵向受压和横向受拉的平面应力状态。根据双向应力状态下的 Mises 屈服准则,存在纵向压应力的情况下,横向拉应力没有达到单轴抗拉屈服强度时钢管即已进入屈服状态,也就是纵向压应力的存在减小了钢管的横向抗拉能力。因此钢管混凝土柱的钢管承受竖向压力后,对内部混凝土柱的约束能力降低了,纵向压应力越大,横向约束能力越低。

为了提高钢管对混凝土柱的约束能力,可以将钢管端部裁短或者穿孔削弱,即形成钢套管混凝土柱。钢套管混凝土柱的主要目的是减小钢套管承受的纵向压力而提高钢套管对混凝土的横向约束能力。钢套管混凝土柱受到纵向荷载作用后,钢套管不直接承受纵向压力,或者钢套管的薄弱截面在很小的荷载下即受压屈

服,因此钢套管仅承受较小的纵向压力。由于钢套管承受的纵向压力较小,因此对混凝土柱的横向约束也就强于钢管混凝土柱的钢管。钢套管内部的混凝土柱承受纵向压力和钢套管的横向约束,处于三向受压状态,横向约束越强,混凝土柱的抗压能力和变形能力越好。

## 2.2 切槽式钢套管混凝土柱的特点

钢套管混凝土柱可以提高内部混凝土柱的抗压能力和变形性能,并且钢套管可以通过后期施工包裹在混凝土柱上,因此特别适用于既有结构的加固,具有较高的工程实践价值。但是,传统的截断式或穿孔式钢套管混凝土柱也存在一些明显的缺点:首先,钢套管端部的削弱可以减小纵向荷载的传递,但是其余部位存在的粘结力和摩擦力仍然使得钢套管承受相对较大且沿高度分布不均的纵向压力;其次,钢套管被截断或穿孔后容易漏浆,在截断的情况下钢套管也不能像普通钢管那样作为施工时的承重骨架,增加了施工的难度。

为了克服这些问题,本研究提出了一种切槽式钢套管混凝土柱,如图 1(c)所示。切槽式钢套管混凝土柱利用多道铣削出的圆形或螺旋形切槽来削弱截面,受压后削弱截面提前屈服,从而减小荷载向钢套管的传递。这种方法相比传统的钢套管混凝土柱有许多优点:

①由于有多道切槽,钢套管的削弱更充分,钢套管的纵向压应力进一步减小并且分布更均匀,增强了对混凝土的约束能力。

②钢套管的切槽处如果不断开,可以作为混凝土的浇筑模板。

③切槽处的剩余承载能力使得钢套管仍然可以作为施工中的支撑体系,因此在现浇结构中的施工方法与钢管混凝土柱类似,没有额外增加施工难度和费用。

④截断式的钢套管混凝土柱主要应用在已有钢筋混凝土柱的加固工程中,虽然也已应用在个别新建建筑的现浇柱中,但是由于施工上存在的问题,难以代替钢管混凝土柱得到大范围的应用;而切槽式钢套管混凝土柱能够克服施工上的困难,因此更便于在现浇工程中得到应用。

此外,切槽式钢套管混凝土柱具有更好的工程实用价值。切槽式钢套管混凝土柱的钢套管可以在工厂加工完成,也可以根据实际需要在工地现场由小的板肋拼接而成,而切槽处可以是连续的也可以是断开的,因此在工程应用中具有极大的优势:

①用于既有结构的加固。截断式钢套管混凝土柱也可以用于工程加固,但是利用整体的钢套管来包裹混凝土柱难度很大,不现实;而切槽式钢套管混凝土柱可以利用在切槽处断开的小的板肋来包裹混凝土柱,容易实现。

②在现浇结构中代替普通的钢管混凝土柱。钢管混凝土结构中的钢管通常都是由钢板卷制后焊接而成的,通常要求对接焊缝且与钢材等强,加工难度大、费用高。如果考虑采用切槽式钢套管混凝土柱,钢板卷制后只需要简单焊接,焊缝处的薄弱位置即相应于切槽位置。如果钢套管混凝土柱的承载性能与钢管混凝土柱相当,则该种情况下的应用无疑具有极大的实用价值和经济价值。

总之,切槽式钢套管混凝土柱形式新颖,施工便利,可以更好地实现套管约束的目的,具有更好的应用前景。但是其受力机理与钢管混凝土柱存在明显差异,目前的相关研究还十分匮乏。钢套管截面削弱后虽然提高了对混凝土柱的横向约束能力,但是减小了钢套管纵向的承载能力,因此出现两个问题:①切槽处是混凝土柱的薄弱截面,在受力初期是否会被迅速压坏;②切槽削弱了钢管的纵向承载能力,钢套管混凝土柱整体的承载能力和变形能力是否会显著小于钢管混凝土柱。

加强切槽式钢套管混凝土柱承载性能的相关研究,可以为实际应用提供理论依据和实用计算方法,扩大其应用前景,并能促进组合结构理论的发展,是十分有价值的。

## 3 切槽式钢套管混凝土柱轴压性能试验研究

### 3.1 试验内容

为了研究切槽式钢套管混凝土柱的抗压性能,制作了 4 个短柱试件进行轴心受压的对比试验研究。4 个试件的尺寸和材料完全相同,其中试件 A1 为普通的钢管混凝土柱,A2,A3,A4 为具有不同切槽间距的切

槽式钢套管混凝土柱,均采用直槽形式。各试件的参数详见表 1。试验利用液压伺服试验机完成,在接近极限荷载之前和之后分别采用荷载控制和位移控制,因此可以得到试件的整个压缩破坏过程。试验装置如图 2 所示。

表 1 试件参数表

Tab.1 Parameters of test specimens

序号	直径 $D/\text{mm}$	高度 $H/\text{mm}$	套管厚 $t/\text{mm}$	砼标号	切槽形式	槽距 $S/\text{mm}$	槽宽 $w/\text{mm}$	槽深 $d/\text{mm}$	极限承载能力 $N_u/\text{kN}$
A1	150	450	4	C60	无	—	—	—	1 816
A2	150	450	4	C60	直槽	30	5	3	1 922
A3	150	450	4	C60	直槽	50	5	3	1 858
A4	150	450	4	C60	直槽	80	5	3	1 983

### 3.2 主要试验结果

#### 1) 受压破坏全过程

切槽式钢套管混凝土柱在达到轴压极限荷载之前,整体外观没有明显的变化,切槽处的截面也没有提前发生显著的压缩变形和破坏。在超过极限荷载之后的某个时刻,某个切槽间的板肋突然出现鼓曲或者某个切槽处突然出现压缩,此后鼓曲和压缩继续发展,但是承载能力并没有显著降低。在加载的后期阶段,个别板肋的鼓曲程度明显大于其他板肋,个别切槽处逐渐趋于闭合。最终鼓曲最大的板肋被拉断,试件破坏。钢管混凝土柱和切槽式钢套管混凝土柱的破坏形态如图 3 所示。

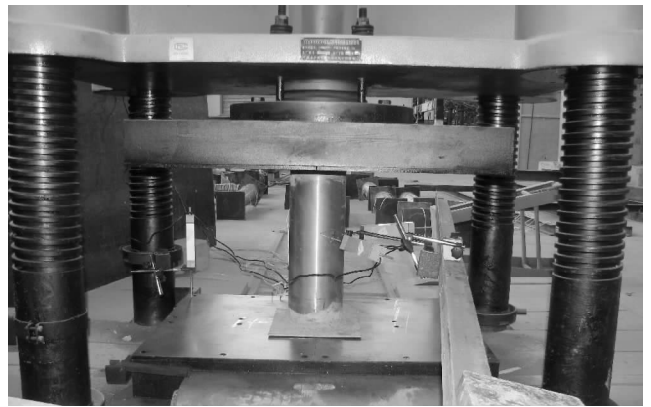


图 2 试验装置图

Fig.2 Experimental setup



(a) 钢管混凝土柱

(a) Concrete filled steel tubular column



(b) 切槽式钢套管混凝土柱

(b) Concrete column confined by grooved steel sleeve

图 3 试件的破坏形态图

Fig.3 Failure models of the specimens

#### 2) 极限承载能力

各试件的极限承载能力见表 1。通过对比可以看出,切槽式钢套管混凝土柱的极限承载能力均大于普通的

钢管混凝土柱,平均提高幅度超过 5%。可见,切槽虽然削弱了钢套管的纵向承载能力,但是柱子整体的极限承载能力非但没有减小反而略有提高。这是由于切槽的钢套管对混凝土的约束作用更强,内部混凝土柱的纵向承载能力得到提高,这不但弥补了钢套管纵向承载能力降低的部分,甚至提高了整体的承载能力。

### 3) 轴力-变形曲线

各试件的轴力-变形曲线如图 4 所示。从图中可以看出,切槽式钢套管混凝土柱的极限抗压能力略高,但达到峰值后的下降程度更明显。除此以外,切槽式钢套管混凝土柱与钢管混凝土柱的受压变形过程比较近似,上升阶段和峰值后的维持阶段都没有明显的差别。

通过试验结果的对比可以看出,切槽式钢套管混凝土柱的极限承载能力有所提高,平均提高幅度超过 5%;在达到极限承载能力之前的近似弹性阶段,变形曲线的斜率即抗压刚度与钢管混凝土柱基本相同;在达到极限承载能力之后的塑性阶段,变形曲线的形状和变化规律也与钢管混凝土柱相当。这是由于切槽虽然会削弱钢套管自身的竖向承载能力,但会提高钢套管对混凝土的约束能力,从而提高混凝土的承载性能,所以,从总体上来看,切槽并没有对柱的承载能力、刚度和塑性变形能力造成不利影响,切槽式钢套管混凝土柱同样具有优异的轴心受力性能。因此,切槽式钢套管混凝土柱用于结构加固和用于现浇结构代替钢管混凝土柱都是可行的。

## 4 结论

1) 相比普通的钢套管混凝土柱,切槽式钢套管混凝土柱可以进一步减小钢套管承受的纵向压力,因此能够显著提高钢套管对内部混凝土柱的约束能力,获得更好的套管约束效果。

2) 切槽式钢套管混凝土柱在轴心荷载作用下的极限承载能力略高于钢管混凝土柱,弹性阶段的刚度和塑性阶段的变形能力与钢管混凝土柱接近。可见,切槽处的削弱并没有降低钢套管混凝土柱整体的轴压承载能力和变形能力,钢套管的约束作用产生的有利影响超过了自身纵向抗压能力降低产生的不利影响。

3) 切槽式钢套管混凝土柱的切槽处可以断开,也可以不断开,工程应用比较方便灵活,可以用于既有结构的加固,也可以用作现浇结构的基本构件。由于切槽式钢套管混凝土柱的轴压承载性能并不低于钢管混凝土柱,因此在实际工程中利用钢板卷制后简单焊接而成的钢套管混凝土柱代替普通的钢管混凝土柱是可行的。

4) 切槽式钢套管混凝土柱在复杂受力条件下的承载性能需要进一步研究。

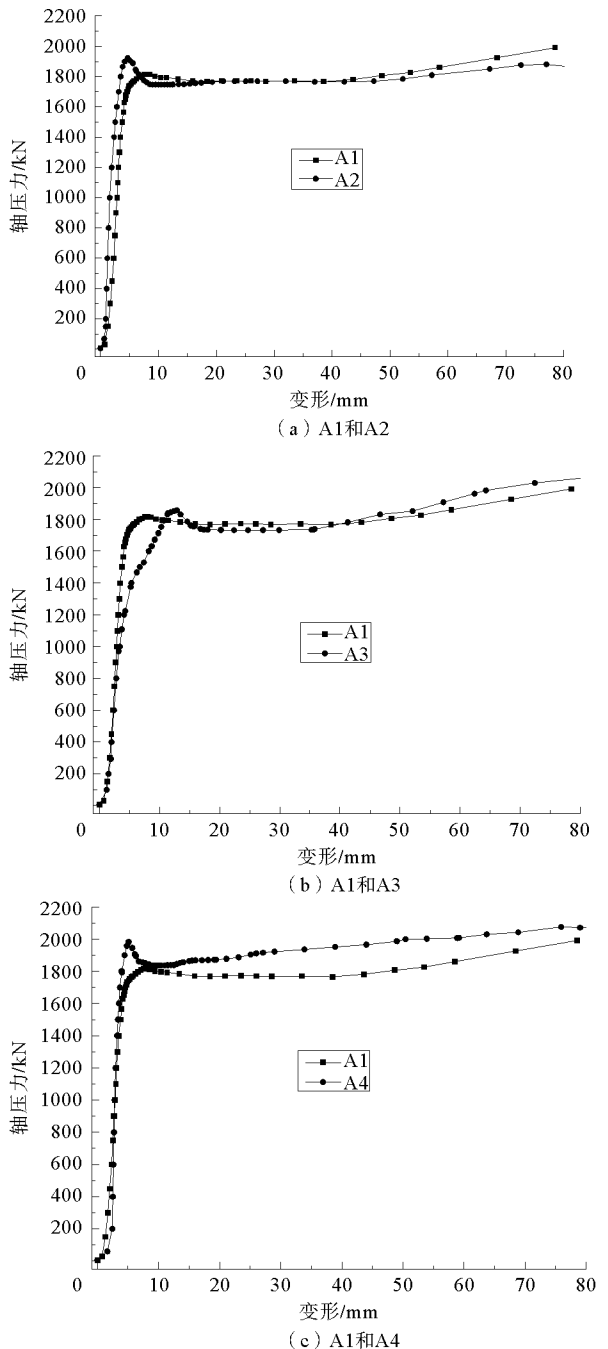


图 4 轴力-变形曲线对比图

Fig. 4 Comparisons of axial load-deformation curves

## 参考文献:

- [1] Sato T. Studies on un-bond concrete filled steel tubular structures [C]//JCI Annual Conference. Aug., 1986:1417-1424.
- [2] Tomii M, Sakino K, Xiao Y, Watanabe K. Earthquake resisting hysteretic behavior of reinforced concrete short columns confined by steel tube [C]//The International Specialty Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin, Aug., 1985:119-125.
- [3] 肖岩. 套管钢筋混凝土柱结构的发展和展望[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4):8-12.  
Xiao Yan. Development and prospects of tubed reinforced concrete column structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4):8-12, 69.
- [4] Lam L, Teng J G. Stress-strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression[J]. Engineering Structures, 2009, 31(2):308-321.
- [5] Vintzileou E, Panagiotidou E. An empirical model for predicting the mechanical properties of FRP-confined concrete[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(5):841-854.
- [6] Jiang T, Teng J G. Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete[J]. Engineering Structures, 2007, 29(11):2968-2986.
- [7] Xiao Y, Tomii M, Sakino K. Experimental study on design method to prevent shear failure of reinforced concrete short circular columns by confining in steel tube[J]. Transactions of Japan Concrete Institute, 1986, 8:535-542.
- [8] Aboutaha R S, Machado R I. Seismic resistance of steel tubed high strength reinforced concrete columns[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1999, 125(5):458-494.
- [9] Takeda K. Experimental studies on square steel tube and concrete filled steel tubular columns under high axial load [C]//JCI Annual Conference. Oct., 1987:1285-1286.
- [10] Silva P, Sritharan S, Seible F, et al. Fullscale test of the Alaska cast-in-place steel shell three column bridge bent[R]. Research Report of Charles Lee Powell Structural Research Laboratories, No SSRP 98P13. Feb., 1999:157.
- [11] Priestley M J N, Seible F, Calvi M. Seismic Design and Retrofit of Bridges[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996:686.

(责任编辑:吕文红)

## (上接第 79 页)

- [4] 何真, 祝雯, 张丽君, 等. 粉煤灰对水泥砂浆早期电学行为与开裂敏感性影响研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(2):43-46.  
He Zhen, Zhu Wen, Zhang Lijun. Investigation on effects of fly ash on electrical behavior and cracking sensitivity of composite cement mortar materials[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(2):43-46.
- [5] Kolluru V S, Roman G. Influence of ultrafine fly ash on the early age response and the shrinkage cracking potential of concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(1):45-53.
- [6] Lee H K, Lee K M, Kim Y B G. Autogenous shrinkage of high-performance concrete containing fly ash[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 55(6):507-515.
- [7] 李懿卿, 牛荻涛. 复合矿物掺合料混凝土力学性能的试验研究[J]. 混凝土, 2009(3):47-49.  
Li Yiqing, Niu Ditao. Effect of multi-mineral admixtures on mechanics properties of concrete[J]. Concrete, 2009(3):47-49.
- [8] 金南国, 金贤玉. 受约束早龄期混凝土收缩开裂的理论预测和试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(9):1499-1507.  
Jin Nanguo, Jin Xianyu. Analytical prediction and experimental research on shrinkage cracking of restrained early-age concrete[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(9):1400-1507.
- [9] 王玲玲. 多组分掺合料混凝土力学性能研究[M]. 青岛: 山东科技大学, 2011:51-57.
- [10] 李世华. 外加剂对混凝土收缩开裂性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2012:40-45.
- [11] 郭钟群, 赵奎. 矿物掺合料混凝土的力学性能试验研究[J]. 矿业工程, 2011, 9(3):75-77.  
Guo Zhongqun, Zhao Kui. Experimental study on the mechanical properties of concrete with compound mineral admixture [J]. Mining Engineering, 2011, 9(3):75-77.
- [12] 周世华, 董芸, 杨华全. 混凝土收缩开裂测试技术的研究现状与评述[J]. 水利发电, 2008, 34(3):40-43.  
Zhou Shihua, Dong Yun. A research review on the test technique in Shrinkage cracking of concrete[J]. Water Power, 2008, 34(3):40-43.

(责任编辑:高丽华)