

钢渣高性能混凝土抗冲耐磨性能试验

信玉良,侍克斌,努尔开力·依孜特罗甫,吴福飞

(新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为有效利用大宗废料钢渣,设计制作了15组掺钢渣粉混凝土试件,试验研究钢渣粉掺量对混凝土的工作性能、力学性能及抗冲耐磨性能的影响极其作用机理。结果表明:钢渣粉可以改善混凝土的工作性能;在不同水胶比下,掺钢渣粉混凝土的早期强度均小于基准混凝土,钢渣掺量在10%~30%以内时,混凝土的后期强度与基准混凝土基本持平,且略有提高,钢渣掺量大于30%时混凝土的后期强度下降较大;采用水下钢球法测试混凝土28d抗冲磨强度,得出钢渣掺量在10%以内时混凝土的抗冲磨强度比基准混凝土略有提高,当钢渣粉掺量大于20%时,混凝土的抗冲磨强度呈下降趋势。因此,钢渣粉作为混凝土掺合料时其掺量应控制在20%以内为宜。

关键词:钢渣粉;高性能混凝土;工作性能;力学性能;抗冲耐磨强度

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)06-0040-05

Study on the abrasion resistant properties of high performance concrete with steel slag powder//XIN Yuliang, SHI Kebin, YIZITELUOPU Nuerkaili, WU Fufei (The College of Civil and Hydraulic Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to use a large amount of industrial waste more efficiently, 15 groups of concrete specimens with different contents of steel slag powder (SSP) were designed and produced. An experimental study with a special emphasizes on the influence of SSP contents on the workability, mechanical properties, and abrasion resistance of concrete was carried out. The test results showed that the workability of concrete could be improved by steel slag powder, and in the different water glue ratio, the early strength of concrete with steel slag powder is less than the reference concrete. When the dosage of steel slag is within 10%-30%, the late strength of concrete with steel slag powder is approximately equal or slightly higher than the reference concrete. While the dosage of steel slag is greater than 30%, the late strength of concrete decreased greatly. In this experiment, the concrete's anti-abrasion strength of 28 day is tested by high-speed under water method. The results show that anti abrasion strength of concrete with steel slag powder increases slightly than the benchmark concrete when the steel slag content within 10%. When the steel slag is greater than 20%, the anti-abrasion strength of concrete decreased. Therefore, when the steel slag poses as admixture of concrete, the volume should be controlled within 20%.

Key words: steel slag powder; high performance concrete; workability; mechanical properties; abrasion resistant properties

高速含沙水流对混凝土的冲刷磨损严重影响水工建筑物的服役寿命以及运行可靠度,是泄水建筑物出现损坏的主要因素之一^[1-2]。随着中国西南部一系列大坝的兴建,如何提高严酷条件下水工混凝土的抗冲磨性能已经成为中国水电行业可持续发展的焦点问题之一^[3],特别是在新疆这种河流泥沙含量较高的地区,对混凝土抗冲耐磨性能的研究就有更高的学术价值和经济效益。

钢渣是炼钢过程中产生的废渣,其产量是粗钢产量的10%~15%^[4-5]。随着我国经济的发展,对粗钢的需求量不断增加,我国钢渣的排放量已经十分庞大。据统计,2009年钢渣产生量为7950万t,利用量为1749万t,利用率仅为22%。钢渣的堆存,不仅占用大量耕地,而且造成环境污染。目前,我国钢渣应用主要是用于路基回填、钢渣水泥、筑路材料等,与欧美等发达国家相比仍处于低附加值的

基金项目:高等学校博士点专项科研基金(20106504110005);新疆科技支撑计划(201233132);新疆水利水电工程重点学科基金(XJzdxk-2010-02-12)

作者简介:信玉良(1987—),男,河南许昌人,硕士研究生,从事水工材料应用研究。E-mail:xinjianghenan@126.com
通信作者:侍克斌(1957—),男,新疆石河子人,教授,博士,主要从事水利水电工程施工研究。E-mail:xndsg@sina.com

利用模式,经济效益和社会效益较低^[6-9]。钢渣中含有 C₂S、C₃S 等具有胶凝性能的成分,这与水泥的主要矿物成分相似,将钢渣充当水泥混凝土掺合料不仅可以提高钢渣的附加利用值,而且还使混凝土的传统性能得到改善。

目前国内外使用的抗冲磨混凝土主要有纤维增强混凝土、铁钢砂混凝土、硅粉混凝土等,但纤维增强混凝土施工较困难,铁钢砂混凝土价格昂贵,硅粉价格高,大面积使用仍有困难^[10],因而具有良好的施工性能、强度高、体积稳定性好、廉价的高性能混凝土成为当前国内外混凝土领域中的研究热点。由于钢渣廉价、耐磨的性质,本文对掺钢渣粉混凝土进行试验研究,以探究其工作性能、抗压强度及抗冲耐磨性能方面的优劣。

1 原材料与试验方案

1.1 原材料

a. 水泥:天山水泥厂生产的 P. O42.5R 普通硅酸盐水泥,化学成分见表 1。

表 1 水泥和钢渣粉的化学成分 %

材 料	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(CaO)	w(K ₂ O)	w(Na ₂ O)
水 泥	21.35	4.46	4.93	61.71	0.42	0.27
钢渣粉	13.15	3.78	23.11	44.97	0.06	0.12

材 料	w(R ₂ O)	w(SO ₃)	w(MgO)	w(MnO)	烧失量
水 泥	0.55	2.51	1.15		2.43
钢渣粉	0.16	0.24	8.62	4.00	0.98

b. 细集料:细集料选用乌拉泊水库上游乌鲁木齐河中的水洗砂,为细度模数 2.8(Ⅱ区)的中砂,含泥量 0.3%,表观密度为 2 610 kg/m³。

c. 粗集料:粗集料采用乌拉泊水库上游乌鲁木齐河中的河卵石,粒径 5~20 mm 连续级配,含泥量 1.6%。

d. 钢渣粉:钢渣粉是产自宝钢集团新疆八一钢铁有限公司的钢渣,先经过 DM-Ⅱ 型数显洛杉矶磨耗试验机粗磨 120 min,然后用 ND7-10L 球磨机细磨 30 min 所得粒径小于 0.63 mm 部分,细度为 425 m²/kg。磨细钢渣粉的主要化学成分见表 1。

e. 减水剂:减水剂是新疆格辉科技有限公司生产的 FDN 高效减水剂。

f. 水:符合 GJG63—2006《混凝土用水标准》要求的自来水。

1.2 试验方案

a. 将钢渣微粉掺入混凝土,测试钢渣混凝土的工作性能和力学性能及抗冲耐磨性能。水胶比取 0.27、0.31、0.35,磨细钢渣微粉以等质量取代水泥,取代量为水泥质量的 0%、10%、20%、30%、40%。

b. 高性能混凝土配合比参照相关规范^[11]中的体积法来设计,坍落度取值范围为 16~21 cm,具体配合比见表 2。

表 2 混凝土配合比

试验 编号	水胶比	1 m ³ 混凝土中各组分质量/kg					
		水	水泥	钢渣微粉	砂	石	减水剂
GF1	0.27	135	500	0	722	1 083	1.3
GF2	0.27	135	450	50	724	1 086	1.3
GF3	0.27	135	400	100	726	1 088	1.3
GF4	0.27	135	350	150	727	1 091	1.3
GF5	0.27	135	300	200	729	1 094	1.3
GF6	0.31	139.5	450	0	752	1 083	1.2
GF7	0.31	139.5	405	45	754	1 085	1.2
GF8	0.31	139.5	360	90	756	1 088	1.2
GF9	0.31	139.5	315	135	757	1 090	1.2
GF10	0.31	139.5	270	180	759	1 092	1.2
GF11	0.35	140	400	0	788	1 088	1.0
GF12	0.35	140	360	40	789	1 090	1.0
GF13	0.35	140	320	80	791	1 092	1.0
GF14	0.35	140	280	120	79	1 094	1.0
GF15	0.35	140	240	160	794	1 097	1.0

c. 混凝土工作性能及力学性能参照相关试验规程^[12-13]进行试验。

d. 混凝土的抗冲耐磨性能按照 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》中具体规定进行。试验仪器为南京水利科学研究院研制的 HKS-Ⅱ 型混凝土抗冲磨试验机,该仪器应用搅拌叶在水中高速旋转带动水下不同直径的钢球,将荷载施加于钢球上,对混凝土进行冲磨,磨掉的材料被循环水带走,不断暴露出新的表面,以此模拟高速流动具有推移质的河道;进而测定混凝土表面受水下高速流动介质磨损的相对抗力,用于评价混凝土表面的相对抗磨性能。

混凝土抗冲磨试件规格为直径 300 mm、高 100 mm 的圆柱体,成型后将试块移入养护室,在标准养护条件下养护 28 d。试验前需将试块移入水中浸泡 48 h,擦去表面水分,称取质量 m₁,然后将试块放入抗冲磨试验机。确定轴转速 1 200 r/min,累计冲磨 72 h,清洗干净,擦去表面水分,称取质量 m₂。混凝土抗冲磨指标以抗冲磨强度表示。抗冲磨强度计算式为

$$R_n = \frac{TA}{m_1 - m_2}$$

(1)

式中:R_n 为抗冲磨强度,(h·m²)/kg; T 为试验累计时间,h;A 为试验受冲磨面积,m²;m₁、m₂ 分别为试验前、后的质量,kg。

磨损率按下式计算:

$$L = \frac{m_1 - m_2}{m_2}$$

(2)

式中 L 为磨损率。

2 试验结果与分析

2.1 工作性能

钢渣微粉的掺入对混凝土的工作性能有较大的影响,通过试验得出:钢渣以磨细微粉掺入混凝土时其保水性和黏滞性比基准混凝土有较大改善,坍落度和流动性也高于基准混凝土。从表 3 可以看出:钢渣掺量大于或等于 20% 时,对混凝土的坍落度影响较大。这主要是磨细钢渣微粉的活性比水泥低,达到可塑性所需的水量较小,用钢渣替代部分水泥后,使单位胶凝材料的需水量降低。在用水量不变的情况下,掺入钢渣可以增加混凝土的流动性;由于成分不同,钢渣的水化机理与水泥不一样,水化速度较水泥慢,也降低了混凝土前期水化的需水量;掺加钢渣微粉的比例越大,坍落度和扩散度越大。另外,钢渣粉的加入改变了水化基体的孔道大小与分布,对浆体的流动性能起到积极作用^[14]。所以掺入钢渣的混凝土可以提高其填充性、自流平性和均匀性,有利于混凝土的生产和施工走向全盘机械化、自动化控制。

表 3 混凝土的坍落度及各龄期的抗压强度

试验 编号	抗压强度/MPa						塌落度/ mm
	1 d	3 d	7 d	28 d	60 d	90 d	
GF1	40.8	49.1	55.5	59.2	62.8	64.9	161.0
GF2	34.1	47.0	55.7	60.1	64.3	67.3	167.0
GF3	27.1	44.9	47.1	59.7	63.5	67.1	178.0
GF4	9.1	28.9	37.6	57.6	60.7	63.6	189.0
GF5	5.1	22.0	27.1	52.7	58.6	61.0	200.0
GF6	33.3	44.1	48.9	57.4	58.6	62.5	170.0
GF7	20.5	42.0	48.1	57.9	59.2	62.7	180.0
GF8	14.5	33.1	36.3	56.8	59.1	61.9	190.0
GF9	8.4	27.0	31.2	54.4	57.6	59.2	185.0
GF10	3.1	21.4	29.7	48.6	51.3	56.8	210.0
GF11	21.7	36.8	42.0	56.4	59.4	61.0	165.0
GF12	16.5	33.3	37.8	57.3	60.1	62.4	172.0
GF13	11.2	29.9	35.1	56.9	59.5	61.0	180.0
GF14	6.8	23.6	31.0	52.8	53.7	54.8	193.0
GF15	2.0	19.0	24.2	44.8	47.1	47.8	208.0

2.2 力学性能

对不同配合比混凝土各龄期的抗压强度进行测试,试验结果如表 3 所示。由表 3 可见,在不同水胶比下单掺钢渣粉时,混凝土的早期抗压强度随着钢渣掺量的增加逐渐减小,且均小于基准混凝土的抗压强度。钢渣混凝土的后期强度增长较快,当钢渣掺量为 10% 时混凝土后期强度最大。钢渣掺量大于 10% 时随着掺量的增加其后期强度逐渐减小,且钢渣掺量为 20% 时后期强度与基准混凝土基本持平,当钢渣掺量大于 30% 时混凝土的后期强度较基准混凝土下降较快,这与胶凝材料本身的化学成分

及水化特点密切相关。钢渣主要化学成分为 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF 以及 RO 等^[15],其中具有水硬性的 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF 含量较少,其水化反应从大到小次序为: C_3A 、 C_3S 、 C_4AF 、 C_2S ^[16],且钢渣中所含 C_3A 、 C_3S 活性比水泥中的要小,而 C_4AF 、 C_2S 却较水泥熟料高。早期水化较快的 C_3A 、 C_3S 与水迅速反应生成 $C-S-H$ 、 $Ca(OH)_2$ 和 $Al_2O_3 \cdot H_2O$ 等。其中 $C-S-H$ 为水化硅酸盐胶凝相,对硬化水泥浆体的性质起决定作用。所以掺钢渣微粉的混凝土早期强度(1 d、3 d、7 d)均小于基准混凝土,且随着钢渣掺量的增加混凝土的早期强度下降越大。反应物中的 $Ca(OH)_2$ 可以激化钢渣粉水化并与其发生二次水化,一方面减小了 $Ca(OH)_2$ 晶体的含量,同时又生成了水化铝硅酸钙,与水泥浆硬化体晶格坚固地结合起来,对混凝土后期(28 d、60 d、90 d)强度的发展有利。然而当钢渣掺量过大时,水化产物 $C-S-H$ 却减小,使得混凝土的后期强度降低。故钢渣掺量在一定范围时混凝土后期强度略有提高,当钢渣掺量大于 30% 时混凝土的后期强度出现下降趋势,所以钢渣掺量应控制在 10% ~ 30% 以内。

2.3 抗冲磨试验分析

图 1 是水胶比为 0.27 时,钢渣掺量为 10% 和 30% 混凝土试件抗冲磨前后照片。由图 1 可见,在相同水胶比下钢渣粉的掺量对混凝土的抗冲磨性能有较大影响。表 4 是不同配合比混凝土 28 d 抗冲磨结果,图 2 为抗冲磨强度与钢渣掺量的关系。由表 4、图 2 可知,混凝土的抗冲磨强度主要与水胶比和钢渣掺量有关。无论掺钢渣与否,混凝土 28 d 的抗冲磨强度均随水胶比的增大而降低。在相同水胶比下,随着钢渣掺量的增加混凝土抗冲磨强度下降较

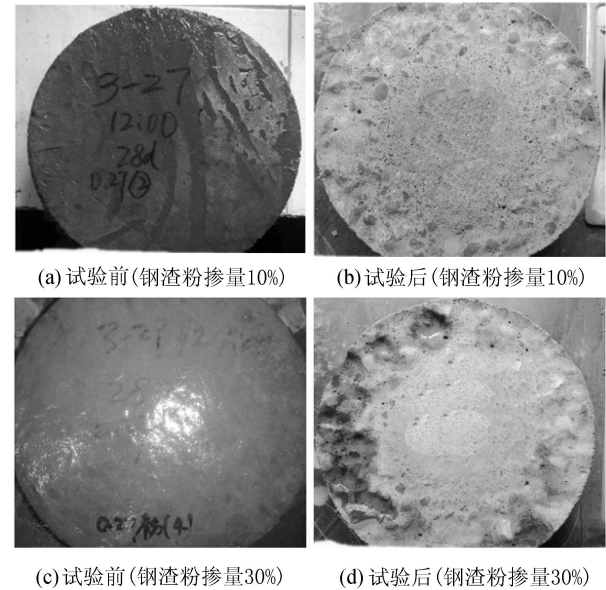


图 1 部分试验抗冲磨前后对比(水胶比为 0.27)

试验编号	抗冲磨强度/ ($\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	抗冲磨强度 相对比值/%	磨损率/%
GF1	5.19	100	5.32
GF2	5.30	102	5.13
GF3	4.71	91	5.71
GF4	3.91	75	6.80
GF5	3.22	62	8.20
GF6	4.99	100	5.54
GF7	5.14	103	5.37
GF8	4.54	91	6.00
GF9	3.46	69	7.95
GF10	3.02	61	8.81
GF11	4.62	100	5.99
GF12	4.67	101	5.85
GF13	4.14	90	6.53
GF14	3.32	72	8.09
GF15	2.68	58	10.01

注:抗冲磨强度相对比值为同水胶比下不同钢渣粉掺量与基准配合比(不掺钢渣粉)混凝土抗冲磨强度的比值。

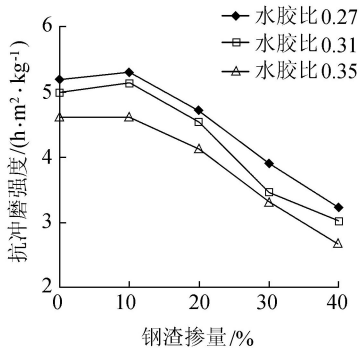


图2 抗冲磨强度与钢渣掺量的关系

快,在钢渣掺量小于或等于10%时,混凝土的抗冲磨强度会略有提高,但与基准混凝土的抗冲磨强度基本持平。当钢渣掺量大于20%时,混凝土的28 d抗冲磨强度随钢渣粉掺量的增加逐渐下降。钢渣粉掺量对混凝土28 d的抗冲磨强度的影响大于水胶比。其原因是:①钢渣粉比表面积不大,产生的水化产物不能很好地填充水泥石间的微空隙结构使其足够密实;②钢渣掺量在20%以内时混凝土的抗压强度与基准混凝土大致持平,但掺量大于30%时较基准混凝土低,没有强度优势;③根据相同稠度的单矿物浆体水泥石及单矿物水泥砂浆的磨损试验得出结论: C₃S 抗磨蚀能力最好, C₂S 最差, C₃A 和 C₄AF 两者的抗磨蚀能力较接近^[17]。由于钢渣粉与水泥化学成分的差异,使掺钢渣粉混凝土形成水泥石的抗磨蚀能力比基准混凝土差。这样就造成掺钢渣粉掺量在小于或等于10%时,混凝土的抗冲磨强度较基准混凝土没有明显优势,在掺量大于20%时随着钢渣掺量的增加,其抗冲磨强度下降。

3 结 论

a. 掺入钢渣粉可以改善混凝土的工作性能,其

保水性和黏滞性较基准混凝土有很大改善,坍落度和流动性亦能满足泵送要求,有利于混凝土生产和施工。

b. 不同钢渣粉掺量的混凝土抗压强度随水胶比的减小而增大,随混凝土龄期的增大而增大,且28 d 以前混凝土的抗压强度增长较快,90 d 以后增幅不明显。这与普通混凝土抗压强度的发展规律相同。但掺钢渣粉混凝土和基准混凝土的抗压强度随龄期的变化有差异,掺钢渣粉混凝土的前期强度(1 d、3 d、7 d)较基准混凝土增长慢,后期强度(28 d、60 d、90 d)却比基准混凝土增长快。

c. 掺入钢渣粉使混凝土的早期强度降低,并且钢渣粉掺量越大早期强度下降越大;掺钢渣粉混凝土的后期强度增长较快。同水胶比、同龄期下,当钢渣粉掺量小于或等于20%时,混凝土的后期强度比基准混凝土略有提高,但幅度不大。当钢渣掺量大于30%时混凝土的后期强度较基准混凝土小,且随着钢渣粉掺量的增加,混凝土的后期强度较基准混凝土减小幅度变大。

d. 掺入钢渣粉对混凝土的抗冲磨强度影响较大,当钢渣掺量小于10%时,混凝土28d 抗冲磨强度比基准混凝土会略有提高,掺量大于20%时混凝土的抗冲磨强度小于基准混凝土,且随着钢渣粉掺量的增加而下降。这与同龄期混凝土抗压强度随水胶比的变化规律相似。

参考文献:

[1] 杨华全,李文伟. 水工混凝土耐久性的研究和应用 [M]. 北京:中国电力出版社,2004.

[2] 李光伟. 水工特细砂混凝土性能试验 [J]. 水利水电科技进展,2006,26(4):18-20. (LI Guangwei. Experimental study on characteristics of hydraulic super-fine sand concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2006,26(4):18-20. (in Chinese))

[3] 王磊,何真,杨华全,等. 硅粉增强混凝土抗冲磨性能的微观机理 [J]. 水利学报,2013,44(1):111-118. (WANG Lei, HE Zhen, YANG Huaquan et al. Study on the microstructural mechanism to improve the abrasion resistance of concrete by adding silica fume [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1):111-118. (in Chinese))

[4] 陈德玉,谭克锋. 低碱度磨细钢渣混凝土的性能研究 [J]. 西南科技大学学报:自然科学版,2006,21(3):23-26. (CHEN Deyu, TAN Kefeng. Study on the roperties of concrete incorporating ground steel slag [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology: Natural Science,2006,21(3):23-26. (in Chinese))

[5] 廖洪强,何冬林,郭占成,等. 钢渣掺量对泡沫混凝土砌块性能的影响 [J]. 环境工程学报,2013,7(10):4044-

4048. (LIAO Hongqiang, HE Donglin, GUO Zhancheng, et al. Influence of steel slag powder with different contents on properties of foam concrete [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7 (10): 4044-4048. (in Chinese))
- [6] TSAKIRIDIS E P, TSIVILIS S. Utilization of steel slag for portland cement clinker production [J]. Journal of Hazardous Material, 2008, 152 (2): 805-811.
- [7] WANG Qiang, YAN Peiyu. Characteristics of hydration products of steel slag [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38 (9): 1731-1734.
- [8] 胡曙光, 王红喜, 丁庆军. 钢渣基高活性微膨胀掺合料的制备与性能研究 [J]. 混凝土, 2006, 28 (8): 47-49. (HU Shuguang, WANG Hongxi, DING Qingjun. The preparation of a high activated and slight expansive admixture base on steel slag and the study on its performance [J]. Concrete, 2006, 28 (8): 47-49. (in Chinese))
- [9] 黄辉. 钢渣的活性激发及其应用现状 [J]. 粉煤灰综合利用, 2012, 26 (2): 51-54. (HUANG Hui. The excitation and application of the activity for steel slag [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2012, 26 (2): 51-54. (in Chinese))
- [10] 白忠. 水工混凝土冲磨破坏研究进展 [J]. 科技信息, 2007, 14 (36): 463-464. (BAI Zhong. Hydraulic concrete abrasion research progress [J]. Science & Technology Information, 2007, 14 (36): 463-464. (in Chinese))
- [11] JGJ 55—2000 普通混凝土配合比设计规程 [S].
- [12] GBT 50080—2002 普通混凝土拌合物性能试验方法标准 [S].
- [13] GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].
- [14] 吴伟伟, 杨钱荣. 钢渣水硬活性及在水泥混凝土中的应用研究进展 [J]. 粉煤灰综合利用, 2009, 23 (6): 51-54. (WU Weiwei, YANG Qianrong. Research progress on hydraulic activity of steel slag and its application in cement and concrete [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2009, 23 (6): 51-54. (in Chinese))
- [15] SHI C J. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production [J]. Cem Concr Res, 2002, 32 (3): 459-462.
- [16] 冯乃谦. 新实用混凝土大全 [M]. 北京: 中国科学出版社, 2005.
- [17] 韩素芳. 混凝土工程病害与修补加固 [M]. 北京: 中国海洋出版社, 1996: 203-205.
- (收稿日期: 2013-09-05 编辑: 徐娟)
- +++++
- (上接第 39 页)
- [12] GUINEA G V, PASTOR J Y, PLANAS J, et al. Stress intensity factor, compliance and CMOD for a general three-point-bend beam [J]. International Journal of Fracture, 1998, 89 (2): 103-116.
- [13] XU Shilang, ZHU Yu. Experimental determination of fracture parameters for crack propagation in hardening cement paste and mortar [J]. International Journal of Fracture, 2009, 157 (1): 33-43.
- [14] JENQ Y S, SHAH S P. A fracture toughness criterion for concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21 (5): 1055-1069.
- [15] 何敏, 张东焕, 王利民, 等. 混凝土断裂过程区拉伸软化的本构关系 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 30 (4): 8-12. (HE Min, ZHANG Donghuan, WANG Limin, et al. Constitutive relation for tension softening of concrete in fracture process zone [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30 (4): 8-12. (in Chinese))
- [16] REINHARDT H W, CORNELISSEN H A W, HORDIJK D A. Tensile tests and failure analysis of concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112 (11): 2462-2477.
- [17] JENQ Y S, SHAH S P. Two parameter fracture model for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111 (10): 1227-1241.
- [18] 吴熙, 付腾飞, 吴智敏. 自密实轻骨料混凝土的双 K 断裂参数和断裂能试验研究 [J]. 工程力学, 2010, 27 (增刊 2): 249-254. (WU Xi, FU Tengfei, WU Zhimin. Experimental study on double-K fracture parameters and fracture energy of self-consolidating lightweight concrete [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (Sup2): 249-254. (in Chinese))
- [19] MOREL S, LESPINE C, COUREAU J L, et al. Bilinear softening parameters and equivalent LEFM R-curve in quasibrittle failure [J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47 (6): 837-850.
- [20] WITTMANN F, HU X. Fracture process zone in cementitious materials [J]. International Journal of Fracture, 1991, 51 (1): 3-18.
- [21] WU Zhimin, RONG Hua, ZHENG Jianjun, et al. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78 (17): 2978-2990.
- [22] XU S L, REINHARDT H W. Crack extension resistance and fracture properties of quasi-brittle softening materials like concrete based on the complete process of fracture [J]. International Journal of Fracture, 1998, 92 (1): 71-99.
- (收稿日期: 2013-08-15 编辑: 熊水斌)