

# 大型渠道混凝土裂缝成因分析及预防措施

胡智农<sup>1,2,3</sup>, 韦华<sup>1,2,3</sup>, 单国良<sup>1,2,3</sup>, 余熠<sup>1,2,3</sup>, 杨黎<sup>1,2,3</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;  
3. 水利部 水工新材料工程技术研究中心, 南京 210029)

**摘要:** 根据大型渠道衬砌混凝土的结构特点和所处的环境, 通过试验研究了水泥种类、粉煤灰、纤维对衬砌混凝土收缩(塑性收缩、干缩、自收缩)性能的影响规律。试验结果表明: 在配合比中掺入优质粉煤灰, 可有效降低混凝土的收缩; 在配合比中掺入纤维, 混凝土的抗收缩能力进一步提高; 与 P·C32.5 水泥相比, P·O42.5 水泥具有更好的抗收缩性能; 在配合比中掺入优质粉煤灰、纤维、使用 P·O42.5 水泥, 可使相同强度等级的混凝土具有更好的抗裂性。最后根据各类收缩裂缝特征及影响因素, 提出了预防渠道衬砌混凝土裂缝的措施。

**关键词:** 渠道混凝土; 抗收缩性; 配合比

**中图分类号:** TV53; TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2013) 06-0086-04

## Causes and Prevention of Cracks in Large Channel Concrete

HU Zhinong<sup>1,2,3</sup>, WEI Hua<sup>1,2,3</sup>, SHAN Guoliang<sup>1,2,3</sup>, YU Yi<sup>1,2,3</sup>, YANG Li<sup>1,2,3</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Research Center on New Materials in Hydraulic Structures, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** We analyzed the impacts of cement type, fly ash, and fiber on the shrinkage of lining concrete according to the structural features and situation of large channel lining concrete, and the shrinkage included plastic shrinkage, drying shrinkage, and autogenous shrinkage. The results showed that (1) the concrete shrinkage reduces effectively with high quality fly ash adding into the concrete mixture; (2) the shrinkage resistance of concrete improves with fiber adding into the concrete mixture; (3) P·O42.5 cement has higher shrinkage resistance than P·C32.5 cement; and (4) the concrete has high crack resistance with high quality fly ash and fiber adding into concrete and the usage of P·O42.5 cement. In order to prevent the channel concrete cracks, several recommendations were proposed according to the characteristics and impact factors of different cracks.

**Key words:** channel concrete; shrinkage resistance; concrete mixture

## 1 研究背景

引水渠道是调输水工程的主要建筑物, 通常采用混凝土衬砌进行渠道防渗, 提高输水流量、渠水利用率、渠道耐久性, 并且外形美观。与其他建筑物混凝土相比较, 大型渠道工程衬砌混凝土具有以下特点<sup>[1-2]</sup>: (1) 大多为机械化衬砌施工, 超薄壁, 裸露表面积特别大; (2) 使用素混凝土, 脆性大(无钢筋拉结); 混凝土下部铺设土工膜、保温板, 为柔性基础; (3) 人工切缝与填缝纵横交叉, 止水防渗要求高; 衬砌混凝土表面平整度、光洁度要求高。

以南水北调工程渠道为例, 主体设计基本参数为<sup>[3-4]</sup>: 渠

道坡比为 1: 2 或 1: 2.5, 渠底宽为 21.5 m 或 23 m; 保温材料为 4 cm、5 cm 的聚苯乙烯保温板或 31 cm 的砂砾料, 防渗材料为复合土工膜, 渠坡衬砌混凝土板厚度为 10 cm, 渠底衬砌混凝土板厚 8 cm; 渠坡分缝为每 12 m 一条通缝, 12 m 之间每 4 m 一条半缝, 通缝缝宽 2 cm, 半缝缝宽 1 cm; 渠底分缝为左右坡脚和渠底中心位置设一条通缝, 其余纵缝均为半缝, 是典型的大面积裸露的薄壁结构。此种结构再加上输水线路长、基础条件复杂、环境气候各异等因素, 致使大型渠道的混凝土特别容易开裂。从工程实践看, 裂缝问题始终贯穿渠道混凝土整个施工过程和运行过程。

渠道混凝土衬砌裂缝的出现将导致渠道力学性能、抗渗

收稿日期: 2013-06-06 修回日期: 2013-09-16 网络出版时间: 2013-10-10  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1027.014.html>  
基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(Y412001; Y412005)  
作者简介: 胡智农(1964), 男, 安徽歙县人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事混凝土耐久性研究。E-mail: znhu@nhri.cn

性能及其它耐久性能下降,造成渠道的输水损失,使用寿命缩短,对混凝土结构物的安全性构成威胁。因此,为保证渠道衬砌混凝土的工程质量,需要对大型渠道衬砌混凝土主要开裂原因开展研究,防止或减少渠道衬砌混凝土裂缝的发生。从大型渠道工程的结构特点看,混凝土的塑性收缩、自身收缩、干燥收缩是引起渠道衬砌混凝土开裂最主要的3个因素。本文通过试验对以上引起渠道衬砌裂缝的主要因素进行分析,同时针对不同类型裂缝成因,提出相应的预防措施。

## 2 试验材料和配合比

### 2.1 试验材料

试验研究采用淮安沂州水泥有限公司 P·C32.5 和 P·O42.5 水泥;粉煤灰为连云港电厂 N 级粉煤灰;江苏丹阳合成纤维厂的 G·X 系列“丹强丝”;细骨料为骆马湖砂,细度模数为 2.60;粗骨料为盱眙产的玄武岩碎石;外加剂采用 SN-10 高效减水剂和 JM-2000 引气剂。表 1 为水泥化学成分分析结果,表 2 为粉煤灰化学成分分析结果。上述材料质量符合标准要求。

表 3 混凝土配合比

Table 3 The mixing proportion of concrete

试验编号	粉煤灰 (%)	水胶比	砂率 (%)	原材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )						SN-10 (%)	JM-2000 (%)
				水	水泥	粉煤灰	纤维	砂	石		
A1	0	0.45	36	153	340	0	0	708	1 258	0.8	0.01
A2	15	0.42	36	153	309	55	0	694	1 234	0.8	0.01
A3	15	0.42	36	153	309	55	0.9	704	1 250	0.8	0.01
B1	0	0.48	37	144	300	0	0	750	1 276	0.7	0.01
B2	10	0.45	36	144	288	32	0	720	1 280	0.7	0.01
B3	10	0.45	36	144	288	32	0.9	720	1 280	0.7	0.01

## 3 试验结果和分析

### 3.1 抗塑性收缩能力

#### 3.1.1 试验方法

研究渠道混凝土早期抗塑性收缩能力时,采用的平板试验方法主要参考《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(2005 年修订版)(CCES 01-2004)中附录 A 中 A2《混凝土抗裂性试验—平板试件》方法进行。平板试验试件尺寸 600 mm×600 mm×63 mm。试件浇注后立即用塑料薄膜覆盖,保持环境温度 20℃±2℃,相对湿度 60%±5%。2 h 后将塑料薄膜取下,用电风扇吹混凝土表面,风速 4.2 m/s。记录试件开裂时间、裂缝数量、裂缝长度和宽度。从浇注开始,记录至 24 h。

#### 3.1.2 抗裂性等级标准

根据裂缝形态、平均开裂面积、单位面积裂缝数目、单位面积上的总开裂面积等参数划分抗裂性等级,其中:裂缝的平均开裂面积  $a = (\frac{1}{2N}) \sum W_i \cdot L_i$  (mm<sup>2</sup>/条);单位面积的开裂裂缝数目  $b = N/A$  (条/m<sup>2</sup>);单位面积上的总开裂面积  $C = a \cdot b$  (mm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>),各式中  $W_i$  为第  $i$  条裂缝的最大宽度 (mm),  $L_i$  为第  $i$  条裂缝的长度 (mm);  $N$  为总裂缝数目 (条);  $A$  为平板的面积,取 0.36 m<sup>2</sup>。

综合上述参数,将试件早期抗裂性评价标准定为 4 条:

表 1 水泥主要化学成分

Table 1 The main chemical component of cement (%)

品种	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	碱含量	烧失量
P·C32.5	21.36	3.21	4.92	62.33	3.41	1.92	0.90	2.12
P·O42.5	24.98	3.36	5.99	58.33	1.25	1.93	0.71	3.14

表 2 粉煤灰主要化学成分

Table 2 The main chemical component of fly ash (%)

品种	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	碱含量
粉煤灰	47.75	2.31	45.01	2.68	0.46	0.28

### 2.2 试验配合比

根据衬砌混凝土常用的设计等级要求,选用 C25W4F150 混凝土进行试验。实验过程中分别采用两种水泥进行配合比设计:一种是利用 P·C32.5 水泥,选择掺 0%、15% 粉煤灰、15% 粉煤灰+纤维(0.9 kg/m<sup>3</sup>) 3 种方案进行对比试验,试验编号分别为 A1、A2、A3;另一种是 P·O42.5 水泥,选择掺 0%、10% 粉煤灰、10% 粉煤灰+纤维(0.9 kg/m<sup>3</sup>) 3 种方案进行对比试验,试验编号分别为 B1、B2、B3。各实验方案的具体配比见表 3。

仅有非常细的裂纹;平均开裂面积 < 10 mm<sup>2</sup>/条;单位面积开裂裂缝数目 < 10 条/m<sup>2</sup>;单位面积上的总开裂面积 < 100 mm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>。据此将试件抗裂性划分为 5 个等级:Ⅴ级,全部满足上述 4 个条件;Ⅳ级,满足其中的 3 条;Ⅲ级,满足其中的 2 条;Ⅱ级,满足其中的 1 条;Ⅰ级,1 条也不满足。

#### 3.1.3 试验结果与分析

根据表 3 配合比拌制混凝土的拌和物性能和力学性能见表 4。

表 4 混凝土拌和物性能和力学性能

Table 4 The mixture and mechanical performance of concrete

组号	坍落度 / mm	凝结时间/(h:min)		抗压强度/MPa		
		初凝	终凝	7 d	28 d	90 d
A1	53	11:25	13:15	17.8	31.9	40.2
A2	63	12:50	14:30	19.1	32.5	41.2
A3	60	12:05	13:40	19.3	32.7	42.2
B1	52	09:30	11:25	22.6	34.6	43.5
B2	60	11:15	13:15	23.8	35.0	43.9
B3	50	10:45	12:20	24.1	36.8	44.2

对比编号 A1 与 A2、B1 与 B2 两组混凝土试验结果(表 5)发现,A2 单位面积上的总开裂面积仅占 A1 的 35%,而 B2 单位面积上的总开裂面积占 B1 的 80%,可见在配合比中加入 I 级粉煤灰后,相同强度等级的混凝土抗塑性开裂能力有

表 5 混凝土塑性开裂试验结果

Table 5 Test results of plastic cracking of concrete

编号	裂缝出现时间/h	最大裂缝宽度/mm	平均开裂面积/(mm <sup>2</sup> ·条 <sup>-1</sup> )	单位面积的开裂裂缝数目/(条·m <sup>-2</sup> )	单位面积上的总开裂面积/(mm <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )	抗裂性评价等级
A1	3.2	1.0	28.6	14.7	420.4	0
A2	3.6	0.7	15.3	9.6	146.9	0
A3	5.0	0.3	1.1	8.3	9.0	I
B1	4.3	1.2	14.7	8.7	127.9	0
B2	4.9	0.6	11.6	8.9	103.2	0
B3	5.4	0.2	0.65	2.8	1.8	I

了很大改善。分析认为,其主要原因是:(1) 优质粉煤灰的掺入,使混凝土的孔结构变细,孔隙率大大降低,避免了毛细孔连通,减少混凝土表面水分的蒸发,从而减小了水分蒸发形成的毛细管压力;(2) 粉煤灰的球形玻璃体可吸附水膜(且吸附水量随比表面积增大而增大),提高拌和物的保水性,降低泌水率,因此球形玻璃体越多,直径越小,对混凝土早期防开裂贡献越大<sup>[5]</sup>;(3) 粉煤灰的掺入降低了水泥用量,且粉煤灰与水泥的水化产物 Ca(OH)<sub>2</sub> 进行二次水化所生成凝胶体的速度较慢,使混凝土的早期强度降低,早期收缩值和弹性模量也减小,有利于减小早期开裂的风险<sup>[6]</sup>。

对比编号 A2 与 A3、B2 与 B3 两组混凝土塑性开裂参数(表 5)发现,无论使用何种水泥,在混凝土中掺入纤维后,混凝土最大裂缝宽度和总开裂面积都显著降低,因此纤维对抑制混凝土期开裂具有突出贡献。聚丙烯纤维抑制抗塑性开裂的机理为:(1) 纤维的加入,增加了水泥浆体混合物中固相的内表面积,减少了泌水,相应地降低了毛细孔张力,减少了裂缝及其宽度<sup>[7]</sup>;(2) 杂乱分布的纤维在混凝土中形成三维支撑体系,可阻止骨料下沉<sup>[8]</sup>,提高混凝土的均质性等特性;(3) 纤维可减少混凝土的原始微缺陷,阻止微裂缝的形成;(4) 可降低混凝土早期弹性模量,从而降低混凝土中的拉应力,使混凝土的变形能力增强,提高混凝土极限拉伸应变和断裂能<sup>[9]</sup>。

对比编号 A1 与 B1、A2 与 B2 四组混凝土塑性开裂参数(表 5)发现,对于相同强度等级混凝土,使用 P·O42.5 水泥时其抗塑性开裂能力较 P·C32.5 水泥优越。同时从表 4 可以看出,使用 P·O42.5 水泥拌制的混凝土初凝时间和终凝时间较 P·C32.5 水泥提前 1.5 h 左右。因此在相同养护时间条件下,B1 比 A1、B2 比 A2 同时期抗拉强度高,可见 P·O42.5 水泥抗塑性收缩能力较 P·C32.5 水泥优越。

### 3.2 自身体积变形

测定混凝土在恒温绝湿的条件下,由胶凝材料的水化作用引起的体积变形,即自生体积变形。试验对 A1、A2、B1、B2 四组混凝土进行了自生体积变形测试,结果见表 6。

表 6 混凝土自生体积变形试验结果

Table 6 Test results of autogenous volume deformation of concrete

编号	各个龄期混凝土自身体积变形(×10 <sup>6</sup> )						
	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d	60 d	90 d
A1	-7.7	-9.8	-14.3	-21.9	-24.8	-25.5	-26.4
A2	-5.8	-9.1	-12.4	-19.2	-22.1	-23.9	-25.6
B1	-6.0	-8.4	-11.8	-20.1	-21.8	-22.3	-24.3
B2	-5.3	-7.8	-12.2	-17.1	-19.3	-20.4	-20.9

从表 6 可以看出,在相同强度等级条件下,在混凝土中掺入粉煤灰后,混凝土自身体积变形早期和后期均略有减少。自身体积变形早期略有降低主要原因是<sup>[10]</sup>:粉煤灰早期基本上不参加水化反应,增加粉煤灰的掺量相当于减少了早期参加水化反应的胶凝材料量。粉煤灰替代部分水泥后,胶凝材料早期的水化程度降低,水化产物对内部结构的填充作用减弱,因此粉煤灰掺量增加,水泥石内部结构变得疏松,粗毛细孔含量提高,细毛细孔含量降低,毛细孔内的自由水含量增多,临界半径增大,毛细管负压降低,从而自生收缩减小。在后期,自身体积变形降低主要原因是:粉煤灰的“二次水化”消耗了混凝土内部的 Ca(OH)<sub>2</sub>,导致混凝土更加致密<sup>[11]</sup>,从而自收缩降低;粉煤灰反应导致实际固相体积增大<sup>[12]</sup>,增大的体积将补偿由于水化反应引起的自收缩,因此自收缩减少。

对比 A1 与 B1、A2 与 B2 结果可知,对于相同强度等级的混凝土,使用 P·O42.5 水泥时自身体积变形较 P·C32.5 水泥略低。这是由于 P·C32.5 水泥强度较低,为了达到相同强度等级混凝土,其胶凝材料用量比使用 P·O42.5 水泥多,且水胶比也较低,混凝土自收缩自然稍大。

### 3.3 干燥收缩

混凝土干缩试验依据《水工混凝土试验规程》(SL352-2006)中试验方法进行。混凝土试件尺寸为 100 mm×100 mm×515 mm,干缩室温度 20℃±2℃,相对湿度 60%±5%。试件成型 48 h 后拆模,拆模后送往干缩室测基长,分别测 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d、60 d、90 d 混凝土试件的长度。试验结果见表 7。

表 7 混凝土的干缩变形性能测试结果

Table 7 Test results of dry shrinkage of concrete

组号	在标准干缩室的轴向变形率(×10 <sup>6</sup> )						
	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d	60 d	90 d
A1	56	84	186	236	364	397	432
A2	42	77	162	221	362	384	426
A3	39	72	136	204	330	379	411
B1	48	74	179	233	352	385	430
B2	36	68	133	218	348	374	422
B3	33	60	122	196	322	366	401

对比 A1 与 A2、B1 与 B2 两组混凝土试验结果(表 7)发现,对于相同强度等级的混凝土,在配合比中加入 I 级粉煤灰后,其抗干缩性能明显降低,而加入优质粉煤灰后,其抗干缩性能提高。这一方面是由于优质粉煤灰需水量比小于 1.0,拌和物的黏聚性增强,同时 A2 水胶比比 A1 低,B2 水胶

比比 B1 低,因此配合比 A2 与 B2 中连通孔减少,在干缩室内水分蒸发较少,造成干缩较低;另一方面,粉煤灰的“二次水化”<sup>[11]</sup>消耗了混凝土内部的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,减少了碳化收缩,使混凝土更加致密,从而减少混凝土后期干燥收缩<sup>[13]</sup>。也有研究认为<sup>[14]</sup>,粉煤灰颗粒的弹性模量高于水泥颗粒,在水泥浆体内起着限制浆体收缩的作用,促成了粉煤灰减少混凝土的干缩。

对比 A2 与 A3、B2 与 B3 四组混凝土试验结果(表 7)发现,在混凝土中掺入纤维后,90 d 混凝土的干缩值减少了 10 到 20 个微应变。研究认为<sup>[15]</sup>纤维改善干缩的原因在于:纤维缩小了混凝土的失水面积和水分迁移通道,减少了水分蒸发;纤维的存在提高了混凝土均匀性,缓解了毛细管压力形成的应力集中,从而降低了整体收缩值。

对比表 7 中 A1 与 B1、A2 与 B2 四组混凝土塑性开裂参数,发现对于相同强度等级的混凝土,使用 P·O42.5 水泥时其抗干缩能力较 P·C32.5 水泥优越。原因是复合硅酸盐水泥中的掺和料种类多、掺量大,致使 P·C32.5 水泥配制出的混凝土同龄期强度较 P·O42.5 水泥低(表 4),因此水化程度较低,内部连通孔和大孔相对较多,因而在干燥条件下水分蒸发较大,引起的毛细孔压力大,从而混凝土产生的收缩值也较大。

## 4 裂缝预防措施

根据以上试验结果分析,考虑裂缝形成机理和工程施工中的相关因素,可以从减少混凝土塑性收缩、自身收缩和干燥收缩等方面采取裂缝预防的针对性措施。

### 4.1 预防塑性收缩

(1) 选用干缩值较小、早期强度高的硅酸盐或普通硅酸盐水泥。(2) 严格控制水灰比,掺加高效减水剂来增加混凝土的坍落度和和易性,减少水泥及水的用量。(3) 浇筑混凝土之前,将基层和模板浇水均匀湿透。(4) 混凝土浇筑时不要堆积,铺设要均匀,浇筑后要振实、初凝前要完成抹平,终凝前要完成表面压光工作。(5) 及时覆盖塑料薄膜或者用水浇湿的草帘、麻片等,保持混凝土终凝前表面湿润,或者在混凝土表面涂刷养护剂进行养护。(6) 高温和大风天气要设置遮阳和挡风设施,及时养护。(7) 加入引气剂,切断毛细管的通路,减少水分的挥发。(8) 采用中粗砂,减少用水。(9) 掺加一定量的纤维,如钢纤维、聚丙烯纤维等。

### 4.2 预防干燥收缩

(1) 选用收缩量较小的水泥。一般采用中、低热水泥和粉煤灰水泥,同时在满足强度要求的情况下,尽量降低水泥用量。(2) 降低用水量。用水量越少,混凝土的密实度越高,其干缩收缩值越小。(3) 加强混凝土的早期养护,并适当延长养护时间。根据情况及早覆盖、适时洒水养护,保持混凝土表面的湿润。(4) 使用级配优良、含泥量小于 1% 的粗骨料。除大体积外,一般粒径 5~30 mm 为宜,最大粒径不能超过 40 mm,以提高混凝土的和易性、黏聚性,增加混凝土的密实度。(5) 控制好砂率。砂率过大,混凝土的抗裂性能降低,干缩收缩加大,易产生干缩收缩裂缝。(6) 在混凝土板结构中设置合适的收缩缝。(7) 掺适量质地优良、含有大量球

形颗粒的 N 级粉煤灰。

### 4.3 预防自收缩

(1) 选用收缩量较小的水泥品种,在满足强度要求的情况下,尽量降低水泥用量,提高集料体积量。(2) 掺加优良的高效减水剂来降低用水量。(3) 掺加 N 级粉煤灰。

## 5 结论

大型渠道工程衬砌为素混凝土,脆性较大,具有薄壁、裸露面大等结构特征,而收缩作用(自收缩、塑性收缩、干燥收缩)是衬砌混凝土产生裂缝主要作用。为了降低衬砌混凝土收缩,提高其抗裂能力,在混凝土配合比设计时应采取以下预防措施:(1) 相同强度等级的混凝土,尽量使用 P·O42.5 水泥。(2) 满足强度和耐久性条件下,在混凝土中掺入适当的优质粉煤灰。(3) 条件许可时,混凝土中掺入适量的纤维,可显著改善衬砌混凝土抗裂性。

### 参考文献(References):

- [1] 李典基,罗辉,韩其华,等.大型渠道机械化衬砌混凝土研究[J].施工技术,2009,38(6):56-59.(LI Dianji, LUO Hui, Han Qihua, et al. Research of Mechanized Lining Concrete on Large scale Canal[J]. Construction Technology, 2009, 38(6): 56-59. (in Chinese))
- [2] 杨谢芸,简兴昌,李静.南水北调中线工程大型渠道混凝土施工方案选择[J].人民长江,2010,41(16):75-77.(YANG Xieyun, JIANG Xingchang, LI Jing. Concrete Construction Scheme Selection of Large Canal in Middle Route Project of South to North Water Diversion[J]. Yangtze River, 2010, 41(16): 75-77. (in Chinese))
- [3] 田小路.渠道衬砌混凝土防裂施工技术[J].水利建设与管理,2012,(1):22-25.(TIAN Xiaolu. The Prevent Cracks Technology of Lining Concrete of Canal[J]. Hydraulic Construction and Manage, 2012, (1): 22-25. (in Chinese))
- [4] 吴剑疆,邵剑南.南水北调中线工程总干渠渠道设计关键问题[J].水利规划与设计,2011,(5):66-68.(WU Jianjiang, SHAO Jiannan. The Key Design Technology of Main Canal for Project of South to North Water Diversion[J]. Water Resource Planing and Design, 2011, (5): 66-68. (in Chinese))
- [5] 王海阳,杨长辉.粉煤灰掺量和细度对高强混凝土塑性开裂的影响[J].粉煤灰综合利用,2005,(2):20-24.(WANG Haiyang, YANG Changhui. Effect of Content and Finess of fly on Plastic Cracking on High Strength Concrete[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2005, (2): 20-24. (in Chinese))
- [6] 史延田.粉煤灰对混凝土塑性收缩开裂性能的影响[J].低温建筑技术,2010,(5):12-14.(SHI Yangtian. The Effect of Fly Ash to Plastic Cracking of Concrete[J]. The Technology of Low Temperature Construction, 2010, (5): 12-14. (in Chinese))
- [7] Paul J. Plastic Shrinkage Cracking and Evaporation Formuls [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(4): 365-375.
- [8] C. Qi, J. Weiss and J. Characterization of Plastic Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete Using Image Analysis and a Modified Weibull Function[J]. Materials and Structures, 2003, (36): 386-395.

(下转第 101 页)

- Hong. Multiple Attribute Decision Making Method Based on Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2010, 24(3): 114-118. (in Chinese)
- [6] 熊雁晖, 漆文刚, 王衷静. 南水北调中线运行风险研究(一)—南水北调中线工程风险识别[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 1-5. (XIONG Yanhui, QI Weirgang, WANG Zhongjing. Operation Risk Study on the Middle Route of the South to North Water Diversion Project (Part I)—Risk Identification in the Middle Route of the South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 1-5. (in Chinese))
- [7] Xu Z S, Yager R R. Some Geometric Aggregation Operators Based on Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. International Journal of General Systems, 2006, 35(4): 417-433.
- [8] 杜霞, 耿雷华. 南水北调中线工程运行风险分析[J]. 水利水电技术, 2011, 42(3): 85-88. (DU Xia, GENG Leihua. Risk analysis on operation of Mid-route of South to North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(3): 85-88. (in Chinese))
- [9] 耿雷华, 刘恒, 姜蓓蕾, 等. 南水北调东线工程运行风险分析[J]. 水利水运工程学报, 2010, (1): 17-22. (GENG Leihua, LIU Heng, JIANG Beilei, Operating Risk Analysis on the East Route of South North Water Diversion Project[J]. Hydro Science and Engineering, 2010, (1): 17-22. (in Chinese))
- [10] 聂相田, 郭春辉, 张湛. 南水北调中线工程风险管理研究[J]. 中国水利, 2011, (22): 37-39. (NIE Xiangtian, GUO Chunhui, ZHANG Zhan. Study on the Risk Management of Middle Route Project of the South to North Water Diversion[J]. China Water Resources, 2011, (22): 37-39. (in Chinese))
- [11] 贺海挺, 吴剑国, 张爱晖. 跨流域调水工程失效概率的模糊事件树分析方法[J]. 中国农村水利水电, 2005, (3): 40-45. (HE Haiting, WU Jianguo, ZHANG Aihui. Fuzzy Event Tree Failure Probability Analysis Method for Inter-basin Water Transfer Project[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005, (3): 40-45. (in Chinese))
- [12] 刘恒, 耿雷华. 南水北调运行风险管理研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(4): 1-6. (LIU Heng, SENG Leihua. Risk Management of the South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 1-6. (in Chinese))
- [13] 耿雷华, 姜蓓蕾, 刘恒. 南水北调东中线运行工程风险管理研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. (GENG Leihua, JIANG Beilei, LIU Heng. Research on Risk Management in Middle Route Project of South North Water Diversion[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010. (in Chinese))
- [14] 王本德, 徐玉英. 水库洪水标准的风险分析[J]. 水文, 2001, 21(6): 8-10. (WANG Bendei, XU Yuying. Analysis of Risk for Reservoir Flood Standard[J]. Journal of China Hydrology, 2001, 21(6): 8-10. (in Chinese))
- [15] 罗云, 樊运晓, 马晓春. 风险分析与安全评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 89-112. (LUO Yun, FAN Yunxiao, MA Xiaochun. Risk Analysis and Safety Evaluation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 89-112. (in Chinese))

(上接第 89 页)

- [9] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (DENG Zongcai. High Performance Synthetic Fiber Concrete[M]. Beijing: Press of Science, 2003. (in Chinese))
- [10] 王强, 阎培渝, 陈志诚. 粉煤灰掺量对高强混凝土自生收缩的影响[J]. 商品混凝土, 2007, (5): 47-50. (WANG Qiang, YAN Peiyu, CHEN Zhicheng. The Influence of Fly Ash Addition on the Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete[J]. Ready mixed Concrete, 2007, (5): 47-50. (in Chinese))
- [11] 魏凤艳, 吕忆农, 兰祥辉, 等. 粉煤灰水泥基材料的水化产物[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(1): 25-29. (WEI Fengyan, LY Yinong, LAN Xianghui, et al. Hydration Products of Fly Ash Cement-based Material[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2005, 33(1): 25-29. (in Chinese))
- [12] Sidney Mindess, J. Francis Young, David Darwin. 混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (Sidney Mindess, J. Francis Young, David Darwin. Concrete[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [13] 林秀华. 粉煤灰对混凝土收缩性能的影响与控制[J]. 福建建筑, 2009, (5): 50-52. (LIN Xiuhua. The Influence and Control of Fly Ash to Concrete Shrinkage[J]. Fujian Construction, 2009, (5): 50-52. (in Chinese))
- [14] 刘建忠, 孙伟, 缪昌文, 等. 矿物掺合料对低水胶比混凝土干缩和自收缩的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 580-587. (LIU Jianzhong, SUN Wei, MIAO Changwen et al. Effect of Mineral Admixtures on of Concrete with Low Drying and Autogenous Shrinkage Water to binder Ratio[J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2009, 39(3): 580-587. (in Chinese))
- [15] 林晖. 掺 PVA 纤维混凝土的力学及变形性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006. (LIN Hui. Mechanics and Deformation Behavior of PVA Fiber Concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese))