

高性能混凝土泵送施工在博斯腾湖东泵站工程中的应用

袁 峡

(塔里木河流域管理局 新疆 库尔勒 841000)

摘要 介绍新疆博斯腾湖东泵站工程为了抵抗环境水侵蚀、提高混凝土耐久性,对厂房地面以下建筑物水工混凝土采用掺矿渣微粉的高性能混凝土作为工程结构材料的选择、设计及应用情况;从配合比、坍落度、施工工艺、泵送设备选型等方面,阐述了泵送高性能混凝土在施工中的应用。应用情况表明,该工程选择的抗侵蚀高性能混凝土泵送施工工艺解决了施工场地狭窄、混凝土浇筑困难等问题,取得了成功经验。建议类似工程严格进行温控设计,采取正确的保温保湿措施,从而有效控制裂缝产生,增强建筑物的耐久性。

关键词 高性能混凝土;泵送施工;博斯腾湖东泵站工程

中图分类号:TV675;TU528.57 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2009)02-0040-04

Application of high performance concrete pumping construction in east pumping station project in Bostan Lake//YUAN Xia (*Management Bureau of Tarim River, Korla 841000, China*)

Abstract : In order to resist the environmental water corrosion and enhance the concrete durability , the high performance concrete mixed with fine scoria powder is used as the hydraulic concrete below the workshop of the east pumping station project at Xinjiang Bostan Lake. The high performance concrete is selected for the design and application of engineering structure materials. From the mix proportion , slump , construction technology , pumping equipment selection , and other aspects , the application of high performance concrete in construction are described. The applications show that the erosion resistance of high performance concrete solves problems such as the construction site being narrow and the difficulty of concrete casting. The successful use of the concrete has been achieved. It is suggested that similar projects carry out strict temperature control and design , and adopt the correct heat-insulating humid-holding measurement techniques , thus controlling the crack production effectively and enhancing the durability of the building.

Key words : high performance concrete ; pumping construction ; east pump station engineering at Bostan Lake

高性能混凝土(HPC)是一种新型高技术混凝土,是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代化技术制作的混凝土,以耐久性作为设计的主要指标。针对不同用途要求,高性能混凝土对下列性能重点予以保证:耐久性、工作性、适用性、强度、体积稳定性、经济性。为此,高性能混凝土在配制上的特点是低水胶比,选用优质原料,除水泥外还必须掺加足够数量的矿物细掺料和高效外加剂^[1]。东泵站场址地下水 SO_4^{2-} 质量浓度最大值为 12 728 mg/L,对普通混凝土和抗硫酸盐水泥的混凝土都会产生强侵蚀,高抗硫水泥仅能抵抗的 SO_4^{2-} 质量浓度为 8 000 mg/L。为此,建设单位委托新疆农业大学水利水电设计研究所进行东泵站工程混凝土抗侵蚀专题试验研究,泵站建筑物地面以下混凝土采用掺加不低于 40% 矿渣微粉和高效外加剂的高性能混凝土,

解决了混凝土的侵蚀问题。泵送混凝土在水利工程中应用广泛,但在过去相当长的一段时间内主要泵送普通混凝土,对高性能混凝土泵送特性研究较少,因其泵送特性与普通混凝土有所不同,还处在探索阶段,掌握其泵送特性有助于施工企业根据工程特点选择合适的泵送设备,提高施工效率。

1 工程水文地质条件

博斯腾湖东泵站为大(2)型Ⅱ等工程,设计抽水量为 45 m³/s,单泵流量为 11.25 m³/s。站址区 35 m 深度内地下水类型为第四系孔隙潜水,按其分布层位依次为表部潜水、中部潜水和下部层间水。由于场址区地下水埋深一般为 0.5 ~ 1.0 m,工程运行后基础均在地下水位以下,实测侵蚀离子质量浓度见表 1。

表 1 东泵站工程场址部分水质指标测试结果			mg/L
水 层	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	
洼地地表水	12 391.7	1 378.6	
潜水(浅部 0.2~0.8 m)	4 803.8	427.0	
潜水(中部 3.6~9.8 m)	12 728.0	780.8	
潜水(深部 13 m 以下)	3 650.3	474.8	

2 抗侵蚀高性能混凝土及其泵送施工工艺选择

根据 GB 50287—99《水利水电工程地质勘察规范》^[2]中“环境水对混凝土腐蚀判定标准”和东泵站工程场址水质测试结果,结合新疆农业大学水利水电设计研究所提交的《新疆巴州博湖东泵站工程混凝土抗侵蚀试验研究报告》,建设单位决定采用矿渣微粉高性能混凝土作为东泵站水下工程结构的混凝土材料。

由于东泵站工程混凝土的主要浇筑仓都为大体积混凝土,浇筑仓面积大、钢筋密集、施工技术要求高、施工强度大,施工单位决定混凝土输送方式采用泵送。泵送混凝土工艺采用混凝土泵等泵送设备将混凝土沿管道直接推送到浇筑地点,是一种高效的混凝土运输方法。普通混凝土泵送已有比较成熟的施工工艺,通常粗骨料粒径在 40 mm 以下、坍落度在 18~22 cm 范围、含砂率在 40% 左右、水泥质量浓度在 300 kg/m³ 时混凝土的可泵性好。与普通混凝土相比,东泵站高性能混凝土拌合物有很大的坍落度,一般在 20 cm 以上,当要求自流时其坍落度甚至可以达到 26 cm 以上。高性能混凝土具有高流动性和可泵性,拌合物体积稳定、不离析、不泌水,适宜泵送施工。对于传统的混凝土,提高流动性一般通过加大用水量来实现,而用水量大的混凝土泌水、离析的倾向大。对于高性能混凝土,由于水胶比很低,使用高效减水剂来实现高流动性,掺入高效减水剂后拌合物的流动性增大,容易泵送。在东泵站进水流道泵送浇筑混凝土时,因减水剂性能不符合要求、混

凝土泵操作手操作不规范、输送管道布设不合理等原因,造成吸入效率低、泵送阻力大,致使频繁堵管,现场测量的混凝土坍落度和扩散度始终达不到规范要求。后经新疆农业大学水利水电设计研究所的专家在现场反复调试,最终将原设计配合比中的 KDNOF-A 型减水剂改为 KDNOF-1 型减水剂,混凝土坍落度和扩散度才满足规范要求。此外,还改进了混凝土泵操作手的操作方法,重新调整了混凝土泵送管道的布设,尽量减少泵送混凝土输送过程中的阻塞压力。通过上述改进,泵送效果得到很大改善。在出水流道和副厂房混凝土泵送时,施工单位重新选用 HBT-A40 型混凝土输送泵,仍然使用 KDNOF-1 型减水剂,合理布设混凝土泵送管道,正确操作混凝土泵的输送过程,使泵送系统运行稳定可靠,满足于施工强度要求。

3 高性能泵送混凝土配合比设计

3.1 配合比选择

东泵站高性能泵送混凝土配合比设计由新疆农业大学水电设计研究所和新疆巴州水利试验室联合完成。根据对混凝土抗硫酸盐和镁盐侵蚀的设计要求,建设单位委托新疆天山水泥厂塔什店分厂生产东泵站高性能专用水泥,巴州水利试验室在东泵站常态混凝土配合比的基础上结合混凝土可泵性要求,设计出东泵站高性能泵送混凝土配合比见表 2。

3.2 高性能混凝土掺合料

该工程掺入的矿渣微粉掺合料是泵送高性能混凝土中必不可少的重要成分,可提高混凝土拌合物的稳定性和抗侵蚀能力,同时,由于其粒径小、圆度好,可减少浆体与骨料界面的摩擦和对管壁的摩擦力,改善水泥浆的流动性,使混凝土的可泵性增强。

该工程掺用矿渣微粉的化学成分及技术指标如表 3、表 4 所示。

表 2 东泵站高性能泵送混凝土配合比

编号	水泥品种	水胶比	矿渣微粉掺量/%	砂率/%	组成混凝土中各项材料用量							
					水泥/ (kg·m ⁻³)	矿粉/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	小石/ (kg·m ⁻³)	中石/ (kg·m ⁻³)	KDNOF-1/ %	KDSF/ %
T-1	天山 32.5	0.30	45	40	244	199	133	740	721	388	1.0	0.006
T-2	普通硅酸盐水泥	0.30	40	40	266	177	133	740	721	388	1.0	0.006

注:T-1 和 T-2 均为地下部分混凝土配合比。

表 3 矿渣微粉化学成分

成 分	loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO ₂	SO ₃	M ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O
质量分数/%	1.38	36.87	10.25	1.48	39.02	9.23	2.23	0.24	0.63	1.14

表 4 矿渣微粉技术指标与检验结果

项目名称	密度/ (g·cm ⁻³)	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	活性指数/%		流动度比/ %	含水率/ %	$\mu(\text{SO}_2)$ / %	烧失量/ %
			7 d	28 d				
GB/T 8046—2000	≥2.8	≥350	≥55	≥75	≥95	≤1.0	≤4.0	≤3.0
新疆八钢矿渣微粉	2.93	430	59	95	108	0.5	0.22	0.3

4 混凝土试验及质量评价

4.1 耐久性试验

4.1.1 抗冻试验

混凝土的耐久性 是笔者研究的一个重点 ,混凝土抵抗冰冻破坏的能力是判定混凝土耐久性的重要指标之一。该工程所处地区为寒冷地区 ,设计抗冻等级为 F300。为满足混凝土的抗冻要求 ,必须在混凝土中掺加减水剂和引气剂。该次混凝土抗冻试验使用标准为 DL/T5150—2001 ,试验以 n 次循环后的质量损失 $\Delta m < 5\%$ 和相对动弹性模量 $R_{Es} > 60\%$ 为合格。不同等级的混凝土抗冻试验结果见表 5 ,试验结果说明混凝土抗冻能力满足设计要求。

4.1.2 抗渗试验

东泵站工程混凝土设计抗渗等级为 W6 ,试验方法按 DL/T 5150—2001 规定进行。当压力加至 1.2 MPa 时 ,6 个试件均未出现渗水现象 ,说明混凝土抗渗性能很好。

4.1.3 抗侵蚀试验

东泵站环境水中 SO_4^{2-} 质量浓度最大值为 12 728 mg/L , Mg^{2+} 质量浓度最大值为 1 378.6 mg/L ,具有强腐蚀性。本次试验按 GB 2420—81 进行 ,采用淡水与 SO_4^{2-} 及 Mg^{2+} 侵蚀溶液($\rho(\text{SO}_4^{2-}) = 13\,000\text{ mg/L}$, $\rho(\text{Mg}^{2+}) = 1\,400\text{ mg/L}$)进行比较 ,试验

中 2 种混凝土的配合比如表 6 所示。试验以抗侵蚀系数 $K \geq 0.80$ 为合格(K 为侵蚀溶液试件抗折强度与淡水同龄试件抗折强度之比)。试验结果见表 7。

从试验结果可知 ,掺 45% 矿渣微粉和外加剂配置的高性能混凝土完全可以抵抗东泵站环境水的侵蚀。

4.2 质量评价

4.2.1 混凝土强度

根据不同部位、不同设计强度要求所配置的混凝土 ,其试验结果见表 8。

B_1 配合比为东泵站地下结构二级配混凝土强度指标 , B_2 配合比为东泵站地上结构二级配混凝土强度指标。以上 2 组配合比试验以及以后钻孔取芯结果表明 ,混凝土的强度及密实度均高于普通的同级配、同强度等级混凝土。东泵站工程混凝土强度试验结果满足 C30 最大设计强度指标要求。

4.2.2 混凝土耐久性

国内外大量工程实践证明 ,因混凝土强度设计不足导致工程破坏的实例甚为少见 ,而因混凝土处于严酷环境中由于耐久性不足导致其内部结构破坏的实例颇为多见。因此 ,混凝土耐久性是决定其使用年限的关键。

高性能混凝土是以高耐久性为主要目标进行设计的混凝土。矿物细掺料和高效减水剂为混凝土耐久性的提高起到了决定性的作用。

表 5 混凝土抗冻试验结果 %

序号	F50		F100		F150		F200		F250		F300	
	R_{Es}	Δm	R_{Es}	Δm	R_{Es}	Δm	R_{Es}	Δm	R_{Es}	Δm	R_{Es}	Δm
A-2	92.0	0.10	89.8	0.47	95.0	0.67	94.6	0.74	95.3	0.86	94.3	0.93
A-4	81.2	0.35	86.8	0.54	81.1	1.06	82.3	0.48	83.6	1.08	75.3	2.10
B-2	93.6	0.14	90.6	0.30	87.6	0.35	95.8	0.35	87.8	0.40	88.0	0.41
B-4	93.0	0.20	87.3	0.52	83.2	0.78	89.7	0.87	87.6	0.92	85.4	1.00

表 6 试验用混凝土配合比

序号	掺合量/%				水胶比	灰砂比
	水泥	矿粉	减水剂	引气剂		
1	55	45	0.6	0.001	0.35	1:2.1
2	55	45	0.6	0.001	0.30	1:1.48

注 水胶比和灰水比均为质量比。

表 7 混凝土抗侵蚀试验结果

28 d			2 个月			4 个月			6 个月		
F_s/MPa		K	F_s/MPa		K	F_s/MPa		K	F_s/MPa		K
W_1	W_2		W_1	W_2		W_1	W_2		W_1	W_2	
12.4	13.8	1.11	12.4	12.9	1.04	13.3	14.1	1.06	12.8	13.2	1.03
14.7	15.9	1.08	15.7	15.4	0.98	15.5	16.2	1.04	15.3	16.4	1.07

注 : F_s 表示抗折强度 , W_1 表示淡水 , W_2 表示 SO_4^{2-} 及 Mg^{2+} 侵蚀液。

表 8 东泵站工程混凝土强度试验结果

编号	拌和物技术性质指标					抗压强度/MPa				劈裂强度/MPa	抗渗等级
	坍落度/cm	黏聚性	析水性	含气量/%	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^3$)	3 d	7 d	28 d	90 d		
B_1	7.0	好	无	4.6	2346	25.1	50.0	57.0	54.0	2.94	> W12
B_2	5.8	好	无	3.9	2368	23.5	35.6	53.0	61.3	3.65	

该工程在混凝土中掺入 45% 的矿渣微粉作为胶凝材料,一方面减少了水泥用量,水泥水化总热量也随之减少,降低了混凝土的温升,混凝土的后期强度显著增长;另一方面矿渣微粉的细微颗粒均匀填充到水泥石孔隙中,提高了混凝土的密实度,阻碍了侵蚀性介质的浸入。此外,矿渣微粉对混凝土的碱骨料反应具有抑制作用。矿渣微粉掺入混凝土后,不仅可以稀释水泥中的碱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,还可以在碱-集料反应之前和碱反应生成分散的碱-钙-硅凝胶,缓解水泥浆体与集料的反应。从经济角度进行比较,天山(和静)水泥厂生产的 32.5 普通硅酸盐水泥出厂价格为 300 元/t,而新疆八一钢铁厂生产的“互力牌”粒化高炉矿渣微粉出厂价格为 200 元/t,比水泥价格低廉,用其等量替代水泥,节约了工程投资,具有一定的经济效益。

高效减水剂是高性能混凝土必不可少的组成部分。正是因为掺加了高效减水剂,混凝土的拌和用水量显著降低,加上矿渣微粉的填充效应,混凝土的孔隙明显减少,密实性增加,抗冻、抗渗等耐久性大幅度提高,高耐久性的混凝土才得以实现。

以上各项结果表明,东泵站工程采用高效减水剂、矿物掺合料,通过对配合比的优化、优选配置出的高性能混凝土,在大幅度提高混凝土强度的同时又实现了对混凝土工作性能及耐久性的改善和提高。

5 施工控制

5.1 原材料的质量控制

对进入工地现场的水泥、外加剂及粗细骨料进行检测和验证试验,保证施工所用材料合格。拌和混凝土之前,对粗细骨料进行含水率检测,将试验室配合比调整为施工配合比,以保证各掺配料按施工配合比准确加入。各项材料计量误差应符合规范要求,拌和混凝土前对电子秤进行零校核,并按周期进行检定。

5.2 外加剂

泵送高性能混凝土必须掺入高效外加剂,以改善混凝土的和易性,提高混凝土的流动性,增加可泵性,提高混凝土早期或后期强度等。泵送高性能混凝土外加剂的选用原则:视混凝土强度等级、施工要求、施工时间等不同而掺入。常温施工选可泵性强、早强型的外加剂;夏季高温施工选缓凝型、坍落度损失小的外加剂;冬季选防冻、早强、减水、引气型的外加剂。大体积混凝土选缓凝、抗裂型的外加剂。外加剂的掺入方法一般分为先掺法、同掺法和后掺法,东泵站高性能混凝土外加剂的掺入方法为同掺法。

5.3 施工强度控制

东泵站副厂房基础混凝土浇筑总量为 $1\,100\text{ m}^3$,按照 20 cm 浇筑层厚控制,本仓共计 5 层。按阶梯式每 8 m 浇筑 1 层,每层最大浇筑量均为 57.5 m^3 ,考虑混凝土初凝时间按 3 h 控制,浇筑强度为 $20\text{ m}^3/\text{h}$,最大浇筑需要强度为 $25\text{ m}^3/\text{h}$ 。按照 $60\text{ m}^3/\text{h}$ 的自动化混凝土拌和站生产能力和 3 台 8 m^3 的混凝土运输罐车及 HBT-A40 型混凝土泵的输送能力,浇筑强度可达到 $30\text{ m}^3/\text{h}$,完全可以满足最大浇筑强度要求。按上述分析,每层浇筑时间按 3 h 计,合计浇筑时间可以控制在 60 h 内。考虑拆卸安装泵管时间,本仓实际浇筑时间为 64 h。

进、出水流动道浇筑面积随高程变化,浇筑强度计算与副厂房底板相同,关键是计算出单层最大浇筑面积和体积,按照浇筑层的浇筑强度配备设备和人员。

在浇筑混凝土之前,操作人员要进行技术交底。对参与施工的所有人员进行分组及排班定岗,责任落实到每一个人,以保证施工顺利进行。泵送混凝土入仓后定人、定范围迅速平仓、振捣,防止漏振。

5.4 混凝土拌和物检测

由于目前还没有一个完全针对高性能混凝土泵送的指导性技术规定,根据长期实践表明,在实际泵送高性能混凝土时,可以采用 GB/T 50080—2002《普通混凝土拌和物性能试验方法》^[3]中的坍落度与扩散度检测方法。该方法既直观又简便,适用于现场施工质量控制。稳定性可以用坍落度(S_L)结合扩散度(S_F)进行估计和评价。当 S_L/S_F 大,接近或大于 1 时,说明泵送高性能混凝土拌和物黏稠,应调整外加剂掺量、胶凝材料掺量与组成或砂的粗细等;当 S_L/S_F 接近 0.4 时,表明工作性良好,适宜泵送;当 S_L/S_F 较小,即扩散度大于坍落度时,表明拌和物中心有粗骨料堆积,发生离析和泌水严重的情况,此时应调整泵送高性能混凝土配合比及外加剂的掺量甚至组分。东泵站泵送高性能混凝土现场检测的坍落度为 16~22 cm,扩散度为 45~55 cm,质检人员不定期地对混凝土机口及入仓前的坍落度和扩散度进行检测,严格控制不合格拌和物入仓,确保了拌和物的和易性满足高性能混凝土泵送要求。

5.5 泵送设备的选型和操作注意事项^[4-7]

为适应高性能混凝土的泵送要求,混凝土泵送设备制造商在提高高性能混凝土的吸入效率和泵送效率方面进行了深入研究,研制出适合高性能混凝土的泵送设备。这样做主要提高了泵的吸料能力和泵送性能,但作为施工单位要正确选型,避免选型失误,造成经济损失。

(下转第 47 页)

下游的整治线宽度计算公式(式(11)),该式概括了4种碍航浅滩的情况,对于天然河流,简化后的式(11)与规范所推荐的公式一致。

采用汉江资料对式(11)进行了初步验证,由于实测资料取得比较困难,且影响整治线宽度的因素较为复杂,故公式的正确性还有待进一步验证。

参考文献:

[1]王秀英,李义天,孙昭华.长江中下游整治线宽度确定方法研究[J].泥沙研究,2005(6):13-20.
[2]程武.汉江航道整治技术分析研究[D].武汉:华中科技大学,2004.
[3]雷燕,唐洪武,周宜林,等.韩江三角洲河网航道整治水动力数学模型[J].水利水电科技进展,2007,27(6):53-56.
[4]刘春晶,曲兆松,李丹勋,等.明渠非恒定流推移质输沙试验研究[J].水力发电学报,2006,25(2):31-37.
[5]应强.枢纽下游河段航道设计水位、整治水位和整治线

宽度的确定方法[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
[6]张幸农,孙波.冲积河流航道整治线宽度的研究[J].泥沙研究,2002(5):48-53.
[7]张沛文.论冲积性浅滩航道整治线宽度的确定[J].水运工程,1979(2):24-35.
[8]刘建民.冲积性河流浅滩整治水位与整治线宽度确定[J].水道港口,2005,26(2):83-86.
[9]JTJ312—2003.航道整治工程技术规范[S].
[10]黄才安.水流泥沙运动基本规律[M].北京:海洋出版社,2004.
[11]李昌华,孔祥柏,方佳岱,等.汉江典型河段航道整治模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院;天津:交通部天津水运工程科学研究所;南京:河海大学,1990.
[12]董松年.汉江丹江口水库坝下河床演变及其对航道的影响[C]//交通部水运司.内河航道整治工程技术交流大会文集.北京:人民交通出版社,1998:259-275.
[13]董奇峰,张雨耕,陈岚.汉江丹江口至襄樊段整治线宽度计算公式率定[J].交通科技,2007(5):110-112.

(收稿日期:2008-08-05 编辑:高建群)

(上接第43页)

高性能混凝土泵送设备选型时应注意以下3个方面:①常C60以上,坍落度在16~20cm的高性能混凝土,其泵送距离或高度只有普通混凝土的1/3~1/2,如泵送距离较长,应选择泵送压力较大的混凝土泵。②应注意所选设备混凝土泵的吸料能力,吸入混凝土能力差时易吸入空气,造成泵送效率低,甚至堵管。③如果混凝土坍落度小,流动性就差,还必须注意搅拌能力,一旦搅不动则泵送能力也会下降,必要时可向制造商提出要求。

东泵站2004年6月进水流道混凝土泵送时堵管频繁,后来施工单位重新选泵,操作手规范操作后就很少再出现堵泵现象。因此,泵送设备的合理选型和规范操作也是成功泵送的关键。

6 结 语

东泵站工程应用高性能混凝土泵送技术,充分利用高性能混凝土的泵送特性,解决了施工场地狭窄、混凝土浇筑困难等问题,取得了成功的经验。

高性能混凝土的水灰比很低,自由水分少,矿物细掺料对水有更高的敏感性,在工程中容易发生塑性收缩而引起表面开裂^[1]。东泵站工程初期由于对高性能混凝土特性认识不足,混凝土养护没有得到重视,造成了局部混凝土温度裂缝的质量缺陷。在

后来的施工过程中不断摸索,并从设计角度提出保温保湿措施。施工单位在高性能混凝土终凝(开始常规养护)前保持混凝土表面的湿润,覆盖塑料薄膜和保温被,使东泵站的混凝土质量有了很大的提高。建议以后类似工程要严格进行温控设计,采取正确的保温保湿措施,从而有效控制裂缝产生,增强建筑物的耐久性。

参考文献:

[1]吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.
[2]GB50287—99.水利水电工程地质勘察规范[S].
[3]GB/T50080—2002.普通混凝土拌合物性能试验方法[S].
[4]林军,李克亮,黄国泓,等.曹娥江大闸高性能混凝土抗氯离子渗透性能[J].水利水电科技进展,2007,27(4):71-73.
[5]梅明荣,任青文.混凝土结构的干缩应力研究综述[J].水利水电科技进展,2002,22(3):59-62.
[6]曹恒祥,殷保合.超细水泥修补与加固混凝土裂缝技术的应用与开发[J].水利水电科技进展,2000,20(6):45-49.
[7]林琳.大掺量矿渣粉煤灰混凝土试验研究——一种低热、高强、大流动性混凝土[J].水利水电科技进展,1997,17(4):28-32.

(收稿日期:2008-06-12 编辑:高建群)