

新型低弹模混凝土性能研究

张宇亭^{1,2} 左殿军^{1,2} 陈文亮³

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所岩土工程研究中心,天津 300456;
2. 河海大学岩土工程科学研究所,江苏南京 210098;3. 浙江省水利河口研究院,浙江杭州 310020)

【摘要】 聚丙烯纤维低弹模混凝土以其优良的工作性能和力学性能成为近年来我国水利工程大坝防渗墙采用的主要材料之一。在室内试验的基础上,对聚丙烯低弹模混凝土的强度、塌落度特性进行了研究;开发了一套混凝土耐久性渗透水采集仪,对聚丙烯低弹模混凝土的渗透性和耐久性进行了研究,试验结果表明:与传统低弹模混凝土相比,聚丙烯低弹模混凝土的抗压、弹模变化不大,抗拉强度有提高,抗渗性能明显改善,渗透系数降低了一个数量级左右,耐久性年限可以进一步提高,研究结果为聚丙烯低弹模混凝土大坝防渗墙的工程应用提供了技术支撑。

【关键词】 聚丙烯纤维;低弹模混凝土;渗透性;耐久性

【中图分类号】 TU 528、572

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2014.03.006

Characteristics of New Low Elastic Modulus Concrete

Zhang Yuting^{1,2} Zuo Dianjun^{1,2} Chen Wenliang³

(1. Geotechnical Engineering Research Center, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

【Abstract】 For its excellent performance and mechanical properties, low elastic modulus polypropylene fiber concrete has become one of the materials used in the main cut-off wall of water conservancy projects in recent years. Based on laboratory tests, low elastic modulus for polypropylene concrete strength, slump characteristics were studied; a set of concrete durability permeate collection instrument for polypropylene low elastic modulus of concrete was developed, and permeability and durability were studied. The test results showed that: compared with the traditional low elastic modulus of concrete, compressive strength and elastic modulus of polypropylene low elastic modulus of concrete changed little, but with higher tensile strength, lower permeability and longer durability. These findings of polypropylene low elastic modulus of concrete will provide technical supports for application of cut-off wall dam engineering.

【Key words】 polypropylene fiber; low elastic modulus concrete; permeability; durability

0 引言

混凝土防渗墙是在松散透水地基或土石坝(堰)体中以泥浆固壁连续造孔,在泥浆下浇筑混凝土或回填其他防渗材料筑成的、起防渗作用的地下连续墙,是保证地基稳定和大坝安全的工程措施^[1]。普通混凝土防渗墙弹性模量一般在 10^4 MPa,往往高出周围覆盖地基的弹性模量数百倍乃至近千倍,防渗墙相对为一刚性体。若采用普通混凝土防渗墙作为大坝防渗体,在渗透水压力的作用和大坝自身压缩固结的作用下,防渗墙将承受巨大的拉应力而致使混凝土防渗墙遭受破坏。因此在工程中出现了在常规混凝土中掺加一定数量的膨润土或粘土,并经

过配合比进行合理设计、试验研究,获得低弹模混凝土。低弹模混凝土以其适宜的强度、较低的弹性模量、良好的渗透性能、较好的抗侵蚀性能等特点作为大坝防渗墙墙体材料得到了广泛的应用^[2-7]。

牟儒^[8]以浙江省青山水库主坝防渗墙为工程实例,运用 ADINA 有限元软件对其进行了模拟,分析了在正常水位和校核洪水位两种不同的工况下,土石坝坝体低弹模混凝土防渗墙的应力变形特性。华伟南等^[9]结合已建工程配合比试验,以抗压强度和弹模为控制指标,兼顾渗透系数,针对配合比设计进行了优化研究,并建立了防渗墙适应性评价指标体系^[10]。尉高洋^[11]、黄荣卫^[12]等分别介绍了低弹

模混凝土在土石坝工程的应用,并针对其在施工设计中存在的问题提出了解决方案。

在已有试验成果的基础上,提出了在混凝土中添加纤维材料、掺合料、添加剂等,在不提高或不降级混凝土弹模的条件下进一步提高混凝土材料工作性能,形成新型低弹模混凝土。针对该新型低弹模混凝土进行了一系列的试验,包括强度试验、塌落度试验、渗透试验、耐久性试验等,系统研究了聚丙烯纤维对混凝土各项性能的影响,为混凝土的应用研究提供了较好的技术支持。

1 新型低弹模混凝土材料简介

聚丙烯纤维是一种应用最普遍的合成纤维,密度为 0.91 g/cm^3 ,抗拉强度 $270 \sim 700 \text{ MPa}$,弹性模量为 $3 \sim 10 \text{ GPa}$,极限延伸率 $7\% \sim 15\%$,吸湿性小,化学稳定性好,在混凝土的碱性环境中很稳定,成本低,并且耐热性比较高。可在水泥基体中起到的主要作用是:阻止基体中原有的微裂缝的扩展并延缓新裂缝的出现;提高基体的变形能力从而改善其韧性与抗冲击特性。

聚丙烯纤维增强混凝土具有优良的工作性能和力学性能,其中的纤维可有效限制混凝土收缩裂缝的产生和发展。聚丙烯纤维阻裂效应主要体现在消除或减轻了早期混凝土中原生裂隙的发生和发展,简单地理解可认为是通过聚丙烯纤维提高了早期混凝土的抗拉强度实现,进一步分析是聚丙烯纤维钝化了原生裂隙尖端的应力集中,使介质内的应力场更加连续和均匀所致。掺入聚丙烯纤维后,由于其分布均匀,起到类似筛网的作用,减缓了由于粗粒料的快速失水所产生的裂缝,延缓了第1条塑性裂缝出现的时间。同时,在混凝土开裂后,纤维的抗拉作用阻止了裂缝的进一步发展。

在混凝土中掺入聚丙烯纤维后,均匀分布在混凝土

中彼此相粘连的大量纤维起了“承托”骨料的作用,降低了混凝土表面的析水与集料的沉降,从而使混凝土中直径为 $50 \sim 100 \text{ mm}$ 和大于 100 mm 的空隙含量大大降低,有效提高了混凝土抗渗能力。此外,由于纤维的存在,减少了混凝土的收缩裂缝尤其是连通裂缝的产生,因而减少了渗水通道,提高了混凝土的抗渗性能。为充分研究聚丙烯纤维对混凝土性能的影响,进行了一系列的针对混凝土材料的试验。

2 新型低弹模混凝土材料试验

2.1 强度及弹性模量试验

弹性模量是低弹模混凝土的一项重要力学性能,其反映了混凝土所受应力与产生的应变之间的关系,是进行混凝土配合比设计的重要参考指标。防渗墙在工作时处于三向受力状态,在周围土体的作用下防渗墙不需要具有很高强度即可正常工作。但是其强度又不可过低,否则不利于抵抗变形和防渗作用,甚至会发生强度破坏。而影响低弹模混凝土立方体抗压强度、劈裂强度等的主要因素为原材料的、试件的养护方式等。表1为针对低弹模混凝土添加不同聚丙烯纤维时进行28d抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量测试结果表。主要对水胶比、砂率、外加剂及纤维掺量进行控制,将水胶质量比以0.59、0.65和0.70分为3大类,分别对聚丙烯纤维掺量在 $0, 0.5 \text{ kg/m}^3, 1.0 \text{ kg/m}^3$ 情况下进行比较分析。图1为针对不同试样进行28d混凝土抗压强度结果图,结果曲线看出纤维含量对于混凝土的抗压强度影响微小。图2为对低弹模混凝土进行28d劈裂抗拉试验结果图,在不同水胶比情况下,聚丙烯纤维的增加对材料抗拉强度的增加具有较好的效果。从图3中可以看出聚丙烯纤维对于混凝土弹性模量的影响不大。

表1 不同纤维掺量对混凝土性能影响试验成果

水胶质量比	膨润土/%	砂率/%	外加剂掺量/%	每方混凝土材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)								抗压强度/ MPa	劈裂抗拉/ MPa	弹性模量/ MPa	抗渗等级
				水	水泥	砂	石子	膨润土	外加剂	纤维					
0.59	27	43	1.00	265	328	693	918	121	4.492	0	11.9	1.01	5620	W4	
0.59	27	43	1.05	265	328	693	918	121	4.717	0.5	11.9	1.03	5610	W4	
0.59	27	43	1.10	265	328	693	918	121	4.939	0.9	12.1	1.10	5660	W6	
0.65	27	44	1.00	260	292	733	933	108	4.000	0	10.1	0.88	4980	W4	
0.65	27	44	1.05	260	292	733	933	108	4.200	0.5	10.3	0.92	4910	W6	
0.65	27	44	1.10	260	292	733	933	108	4.400	0.9	9.9	0.95	5010	W6	
0.70	27	45	1.00	255	266	769	939	98	3.640	0	8.2	0.76	4360	W4	
0.70	27	45	1.05	255	266	769	939	98	3.822	0.5	7.9	0.81	4510	W6	
0.70	27	45	1.10	255	266	769	939	98	4.004	0.9	8.1	0.80	4380	W6	

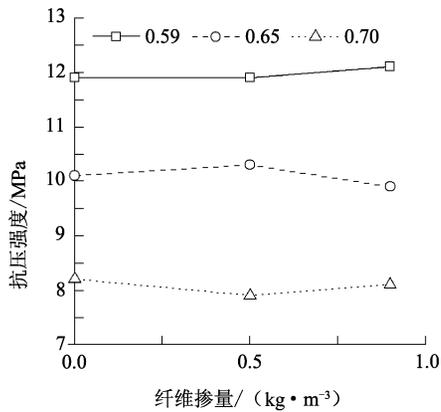


图1 不同纤维含量混凝土抗压强度分布图

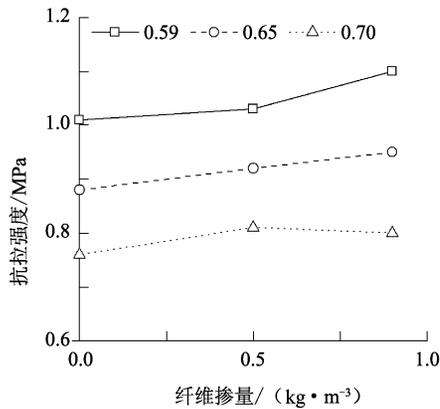


图2 不同纤维含量混凝土抗拉强度分布图

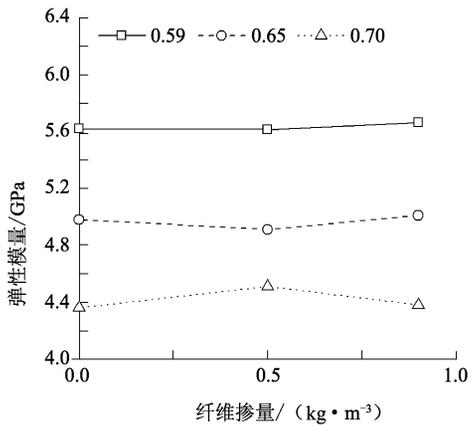


图3 不同纤维含量对混凝土弹性模量的影响

综上所述,通过对不同低弹模混凝土添加聚丙烯纤维进行的弹性模量及强度试验可以看出:聚丙烯纤维掺量主要影响混凝土的劈裂抗拉强度,但是对抗压强度和弹性模量影响并不显著。

2.2 塌落度试验

由表1可以看出,随着纤维掺量的增加,低弹模

混凝土的抗渗等级有提高的趋势,因此,掺聚丙烯纤维对低弹模混凝土防渗墙提高混凝土抗渗性能是有利的。

在坍落度同时满足泵送要求的情况下,相比未掺纤维混凝土,掺纤维混凝土拌合物的粘聚性和保水性有明显改善,见图4和图5。



图4 未掺纤维低弹模混凝土拌合物塌落度试验



图5 掺纤维低弹模混凝土拌合物塌落度试验

2.3 低弹模混凝土抗渗性能测试

2.3.1 抗渗性能测试方法的选择

目前国内外评价混凝土的抗渗性以及渗透试验方法有多种,国际上采用较多的是渗透水量法测定渗透系数或渗透深度法测定相对渗透系数,我国长期以来沿用的是渗透压力法测定抗渗标号。

抗渗标号(等级)法^[13]:试件为圆台体,使用混凝土渗透仪测定抗渗标号。抗渗标号法简单直观,但没有时间和渗透量的定量概念,不能反映混凝土的实际渗透系数,只能相对反映混凝土的抗渗能力,在渗流计算中不能直接采用。

渗透水量法(渗透系数法):试件为圆柱体或立方体,使用混凝土渗透系数测定仪,采用常水头渗透试验法测定混凝土的渗透系数。其渗透系数能反映时间和渗透量的定量概念,能正确反映混凝土的实际抗渗能力,较为精确可靠,便于设计直接采用。

渗透深度法(相对渗透系数法)^[13]:相对渗透系数是利用抗渗仪测定混凝土在 0.8 MPa 恒定水压下的渗透深度后,按经验公式计算得来。相对渗透系数法快速便利,但精度相对较差,在工程要求精度不高的情况下,该方法仍可满足要求,因而一直被沿用至今。

从几种渗透试验方法分析结果来看,渗透水量法能较好地反映混凝土的渗透性能,物理概念清晰,能正确反映混凝土的实际抗渗能力,是较好的试验方法。

2.3.2 低弹模混凝土渗透性试验

防渗墙混凝土的抗渗性能是防渗墙的关键性

能指标,如何选择具有低弹模、高抗渗性的防渗墙混凝土是研究的重点。目前对抗渗性能的试验均采用抗渗等级的试验方法,抗渗等级的试验可以确定混凝土的抗渗能力,但不能准确反映混凝土的渗透性能。为了测定混凝土的渗透系数,利用课题组研制的“混凝土耐久性渗透水采集仪”试验装置,进行渗透系数测定试验。试验选择抗压、抗拉和弹模相近的掺与不掺聚丙烯纤维的 2 组低弹模混凝土进行试验,试验配合比见表 2。

表 2 低弹模混凝土渗透试验配合比

编号	水胶质量比	膨润土 /%	砂率 /%	每方混凝土材料用量/(kg·m ⁻³)							抗压强度 /MPa	劈裂抗拉 /MPa	弹模 /MPa
				水	水泥	砂	石子	膨润土	外加剂	纤维			
S1	0.60	30	43	257	300	671	889	128	4.283	0.5	10.1	1.00	4960
S2	0.65	25	44	238	275	722	919	92	3.662		10.9	1.03	5360

1) 混凝土渗透系数变化规律

经过长达 120 余天的试验,在恒定水压下,S1、S2 两组混凝土渗透系数随时间的变化见图 6。

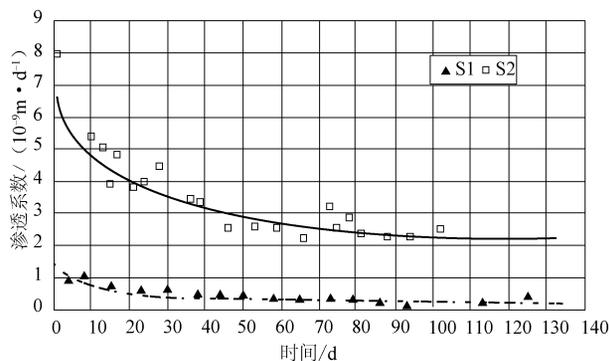


图 6 混凝土渗透系数随时间的变化

从试验结果可见,低弹模混凝土的渗透系数大致在 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ m/d 之间,这与国内一些试验结果基本吻合^[14-15]。在水压作用下,渗透系数早期大,随着龄期延长,渗透系数逐步变小,直至 60 d 左右趋于稳定。

从掺与不掺聚丙烯纤维混凝土对比可见,掺纤维的混凝土(S1)渗透系数要小于不掺纤维的混凝土(S2),由此可见,掺纤维的混凝土不会增加混凝土的渗透系数,对提高混凝土的抗渗性是有利的。

2) 低弹模混凝土钙离子析出试验

混凝土防渗墙的耐久性主要体现在墙体材料的抗溶蚀性能上,它与水质、水力坡降及墙体材料的物质组成、透水性等因素有关。一般是通过测试混凝土中所含 CaO 溶出的速度和比率,评价其耐久性,并据以估算能够正常使用的年限。一般以混凝土中的

CaO 溶出量达到 25%~30%,所需要的时间作为正常使用年限。永久工程一般要求 ≥ 50 a,重要的工程应在 100 a 以上。本次试验利用混凝土渗透性试验所采集的渗透水,对渗透水中的钙离子含量进行测定,分析低弹模混凝土在恒定水压下 CaO 的析出量。

对掺与不掺聚丙烯纤维的两组试样 S1 和 S2 的 CaO 析出量试验结果进行分析,CaO 析出浓度试验结果见表 3。

表 3 CaO 析出浓度及析出量

试验时间 /d	CaO 析出浓度 / (mg · L ⁻¹)		CaO 析出量 /mg			
	S1	S2	S1		S2	
			当日	累计	当日	累计
4	5.29	5.11	0.3470	0.3470	0.8770	0.8770
10	6.1	7.45	0.5600	0.9070	4.1900	5.0670
17	8.1	12.8	0.5580	1.4650	6.1700	11.2370
24	11.3	14.5	0.7130	2.1780	6.4900	17.7270
32	11.2	7.7	0.6430	2.8210	3.0900	20.8170
38	16.5	7.57	0.8520	3.6730	0.5770	21.3940
45	14.1	9.92	0.6470	4.3200	3.5300	24.9240
52	10.3	1.24	0.4140	4.7340	0.4270	25.3510
59	13.7	1.21	0.4720	5.2060	0.3890	25.7400
66	9.46	1.1	0.2710	5.4770	0.3470	26.0870
74	10.3	1.28	0.2360	5.7130	0.3890	26.4760
80	13.6	2.51	0.3120	6.0250	0.7350	27.2110
87	7	0.88	0.1600	6.1850	0.2530	27.4640
94	7.63		0.1750	6.3600	0.2200	27.6840
106	8.31		0.1910	6.5510	0.2110	27.8950
119	3.22		0.0734	6.6244	0.2020	28.0970

图7为渗透水作用下混凝土中CaO析出浓度随时间变化图。在渗透水作用下CaO析出浓度首先不断增大,对于编号S1混凝土作用38d和编号S2混凝土作用24d时CaO析出浓度达到峰值,其后逐渐减小。可针对其进行Gauss函数拟合,拟合函数形式为:

$$y = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \times e^{-2 \times \left(\frac{t-t_0}{w}\right)^2}$$

S1拟合方差为0.7749;S2拟合方差为0.7574。在透水作用初期添加了聚丙烯纤维的混凝土CaO析出浓度大于未添加聚丙烯混凝土,但是一定时间后CaO析出浓度急剧减小,远小于未添加聚丙烯纤维的混凝土。

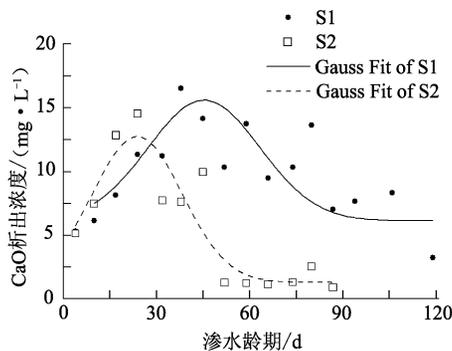


图7 渗透水作用下混凝土中CaO析出浓度随时间的变化

图8为混凝土中CaO每日析出量随时间的变化,与析出浓度类似,其日析出量与时间呈高斯分布函数形式,且拟合程度较高。S1与S2拟合方差分别为0.823和0.879。

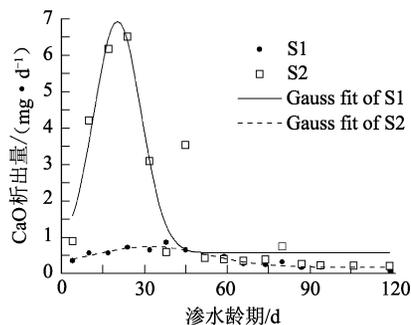


图8 渗透水作用下混凝土中CaO析出量随时间的变化

从试验结果可见,CaO每日析出量在初期有一个高峰,随后随着龄期的延长逐步下降,在90d左右龄期时趋于稳定。CaO的析出量还与混凝土的渗透系数有关,渗透系数大,析出量也大,因此,减小混凝土的渗透系数,提高抗渗能力,是提高混凝土耐

久性的有效措施。

在混凝土中掺入聚丙烯纤维后,均匀分布在混凝土中彼此相粘连的大量纤维起了“承托”骨料的作用,降低了混凝土表面的析水与集料的沉降,使混凝土中直径为50~100mm和大于100mm的空隙含量大大降低,有效提高了混凝土抗渗能力。此外,由于纤维的存在,减少了混凝土的收缩裂缝尤其是连通裂缝的产生,因而减少了渗水通道,提高了混凝土的抗渗性能。

2.4 低弹模混凝土耐久性分析

对混凝土防渗墙而言,其耐久性的评价指标应该是长期防渗效果,而影响长期防渗效果的主要因素是墙体本身的整体性和墙体材料的密实性。如果墙体混凝土能在较长的运行年限里保持良好的密实性,那么就可保证防渗墙的长期抗渗能力,从而具有较好的耐久性。国内外已有的研究成果认为,防渗墙混凝土的密实性,主要决定于是否产生渗漏及溶蚀。防渗墙的安全运行寿命,以水泥中CaO溶出量达25%的时候,混凝土的强度将降低50%,因此,目前在评估指标上,均将CaO溶出量达25%时,作为一个极限指标,并由此来估算防渗墙的安全运行寿命^[16]。

为估算防渗墙的安全运行寿命,我国学者舒士懋提出如下的公式估算^[16]:

$$T = 0.25 \frac{Vca}{Q(M - M_0)}$$

式中: T 为安全使用年限; a ; V 为防渗墙受水面每 m^2 对应的墙体体积, m^3 ; a 为水泥中CaO总含量的百分率; c 为每 m^3 墙体混凝土中的水泥用量, kg/m^3 ; Q 为每 m^2 防渗墙1a内的渗漏量, m^3 ; M 为防渗墙渗漏水中的CaO浓度, kg/m^3 ; M_0 为地下水环境水中的CaO浓度。

根据本课题试验结果,可计算低弹模混凝土的耐久性(见表4)。表中钙的含量根据有关资料的数据按水泥含量的55%计算;墙体厚度按0.8m计算;墙体承受的水头按60m计,则平均水力梯度为37.5;环境水中的CaO浓度不计,其它参数根据试验结果得到。从计算结果可见,掺纤维的配合比,其渗透系数在 10^{-10} m/d的水平,其耐久性年限可达到800a左右;不掺纤维的配合比,其渗透系数在 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ m/d的水平,其耐久性年限也可达到240a,也就是说通常情况下低弹模混凝土耐久性没有问题,完全可以满足工程要求。采用掺纤维等措施提高混凝土的抗渗性能后,可以使耐久性年限进一步提高。

表4 低弹模混凝土耐久性年限计算结果

编号	每 m ² 对应的 墙体体积 /m ³	水泥中 CaO 总含量 的百分率 /%	水泥用量 /(kg·m ⁻³)	每 m ² 防渗墙 1 a 内的渗漏量 /[m ³ ·(m ² a) ⁻¹]	钙离子浓度 /(kg·m ⁻³)	游离钙析出 25 %所需时间 /d
S1	0.8	55	300	4.4043	0.00939	800
S2	0.8	55	275	32.9752	0.00378	240

3 结 论

从试验结果可见,掺聚丙烯纤维后,混凝土的抗压、弹模变化不大,抗拉强度有提高,抗渗性能明显改善,渗透系数降低了一个数量级左右,耐久性年限可以进一步提高,说明掺聚丙烯纤维对防渗墙混凝土有较好的效果,其原因初步分析有以下几方面:

1)掺入聚丙烯纤维能有效提高混凝土的抗渗性能,聚丙烯纤维粗细度约为 30~40 μm。本试验中,S1 组试件的纤维掺入量为 0.5 kg/m³,每 m³混凝土中均匀分布的纤维根数高达 1.5×10⁶ 根。鉴于聚丙烯纤维有着良好的分散性,因此在混凝土全部体积内,单根纤维间的平均间距约为 2.5 mm。纤维在混凝土内呈现三维网络结构,起支撑骨料的作用,阻止了粗细骨料的沉降;同时也降低了混凝土表面的析水现象,有效阻止由于混凝土表面迅速失水造成的较大体积收缩,纤维在塑性状态的混凝土中能承受由于干缩而产生的拉应力,减少与阻止塑性状态下混凝土内部裂缝的产生和发展,并大大减少连通裂缝出现。

2)硬化的混凝土由于干燥收缩、温度收缩及自身体积变形的存在,常会引起混凝土内部产生各种收缩应力,掺纤维的混凝土由于纤维存在阻裂作用,可显著减少初始裂缝的数量,有效抑制裂缝的宽度和长度,并因此大大降低了生成连通裂缝的可能性,即使裂缝的总面积不变,但由于掺入的纤维使裂缝细化也会使混凝土的渗透性大大降低。

3)掺纤维后,由于纤维的凝聚和牵扯作用,使得混凝土的凝聚性增加、坍落度有所降低,为保持设计要求的坍落度,保持水灰比不变,用水量提高,从而水泥用量有所增加。胶凝材料的增加使混凝土的密实性提高,也是使混凝土抗渗能力提高的原因。

由此可见,由于掺聚丙烯纤维,混凝土抗渗性能提高,渗水大为降低,CaO 析出量就减少,使混凝土的耐久性得到进一步提高。因此,掺纤维可以提高防渗墙混凝土的耐久性。

参 考 文 献

- [1] 姚汝方. 防渗墙低弹模混凝土性能试验研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2006.
- [2] 魏海云,刘正国. 杭州市青山水库低弹模混凝土防渗墙应观测资料分析[J]. 浙江水利科技, 2011(3): 40-44.
- [3] 张成军. 土石坝防渗墙粘土混凝土材料研究与工程应用[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
- [4] 来 晟,占文锋. 清溪口水库低弹模混凝土防渗墙应用效果评价[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2012(1): 6-10.
- [5] 罗玉龙,彭 华,罗谷怀. 高频振锤薄壁板墙技术处理砂砾石堤基试验研究[J]. 岩土力学, 2007(S1): 877-881.
- [6] 谢兴华,王国庆. 深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究[J]. 岩土力学, 2009(09): 2708-2712.
- [7] 李景龙,李术才,王 刚,等. 土石坝加固中混凝土防渗墙的应用[J]. 岩土力学, 2006(S1): 75-79.
- [8] 牟 儒. 低弹模混凝土在大坝防渗墙中的应用[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [9] 华伟南,刘成栋. 坝体低弹模混凝土防渗墙最优配合比研究[J]. 水利规划与设计, 2010(6): 58-59.
- [10] 华伟南,马福恒,刘成栋,等. 低弹模混凝土防渗墙适应性评价指标体系研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2010(1): 66-69.
- [11] 尉高洋. 低弹模混凝土防渗墙在某土石坝加固中的应用[J]. 浙江水利科技, 2006(2): 37-39.
- [12] 黄荣卫. 低弹模混凝土防渗墙在土石坝工程中的应用[J]. 大坝与安全, 2006(3): 50-52.
- [13] SL 352—2006 水工混凝土试验规程[S].
- [14] 严 江. 米家寨水库黏土混凝土渗透性能的试验研究[J]. 山西水利科技, 2005(4): 23-25.
- [15] 肖树斌. 塑性混凝土防渗墙的抗渗性和耐久性[J]. 水力发电, 1999(11): 24-27.
- [16] 李金玉,曹建国. 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.

收稿日期:2013-11-16