

混凝土防渗墙墙体材料发展探讨

燕 乔 王立彬

(三峡大学土木水电学院 湖北 宜昌 443002)

摘要 介绍目前墙体材料分类情况及存在的争议 , 提出墙体材料正在朝着 2 个截然不同的方向发展 , 一是高强低弹高抗渗混凝土 , 一是低强低弹高抗渗混凝土。阐述高强低弹混凝土的产生背景、研究进展及工程应用 ; 介绍低强低弹混凝土的发展及工程应用情况 , 分析总结了塑性混凝土的性能特点。

关键词 墙体材料 高强低弹混凝土 低强低弹混凝土 综述

中图分类号 :TV543⁺.82 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2009)S1-0174-04

自 1958 年湖北明山水库首次引进连锁管柱防渗墙 , 近 50 年来 , 我国的防渗墙技术不断向前发展 , 在各项水利水电工程中建造的混凝土防渗墙已不计其数 , 许多工程的难度在世界上都是罕见的。我国的防渗墙施工技术整体上已接近国际先进水平 , 有的工程已达到国际先进水平。

从国内外混凝土防渗墙的发展过程看 , 防渗墙的规模越来越大 , 施工技术水平越来越先进 , 防渗墙的应用范围逐渐扩大 , 墙体材料的种类也呈现出多样化。目前 , 墙体材料有普通混凝土、黏土混凝土、粉煤灰混凝土、高强混凝土、塑性混凝土、自凝灰浆和固化灰浆等。在文献 [1] 中根据其抗压强度和弹性模量 , 把防渗墙墙体材料分为刚性材料和柔性材料。刚性材料的抗压强度一般大于 5 MPa , 弹性模量大于 1 000 MPa , 包括普通混凝土 (或钢筋混凝土) 、黏土混凝土和粉煤灰混凝土等 ; 柔性材料的抗压强度一般小于 5 MPa , 弹性模量小于 1 000 MPa , 包括塑性混凝土、自凝灰浆和固化灰浆等。而在文献 [2] 中又根据墙体材料的技术性能和施工方法的差别 , 把防渗墙墙体材料分成刚性材料、塑性材料和柔性材料 3 类。作为防渗墙材料 , 不管如何划分 , 其实并无明显界限。因为对防渗墙材料及应力特性研究都不够深入 , 对其适应性及工作性的规律仍不能达到全面和准确地掌握 , 因此还不能对墙体材料进行科学划分。高强低弹混凝土作为一种新型的墙体材料 , 其性能介于普通混凝土和塑性混凝土之间 , 目前根本无法将其用刚性和柔性进行划分 , 但其墙体材料对混凝土拌合

物有许多最根本的要求却是完全相同的。

目前 , 混凝土防渗墙墙体材料正在朝着 2 个截然不同的方向发展 , 一是适用于承受高水头、高应力条件的高坝深基础防渗的高强低弹高抗渗混凝土 (一般 28 d 抗压强度大于 25 MPa) , 另一种是适用于中低水头大坝和临时围堰的低强低弹高抗渗混凝土。

1 高强低弹混凝土

1.1 高强低弹混凝土产生背景

目前 , 深厚覆盖层建造防渗墙进行垂直防渗的工程越来越多 , 深度越来越深 , 规模越来越大 , 其地层以及墙体运行条件复杂。防渗墙在深厚覆盖层中受力十分复杂 , 因为防渗墙的刚度比覆盖层大许多 , 覆盖层的压缩沉降要比防渗墙大得多 , 防渗墙与覆盖层在垂直方向上的变形差别必将在防渗墙侧面产生较大的摩擦力 , 离心模型试验表明 , 墙体 80% 的应力是由这种拖曳力引起的^[3]。防渗墙的应力状态和墙体材料有关 , 特别是与墙体材料的变形模量有关。当墙体与围土的变形不相适应、并产生较大差异时 , 会引起墙体内部极为不利的应力状态 , 导致混凝土防渗墙或者因压力过大而压碎 , 或者因拉应力和剪应力过大而拉裂或剪坏 , 进而降低防渗墙的防渗效果及其耐久性。若用与围土变形模量较为接近的混凝土材料会使防渗墙的应力状态有本质的改变^[4]。

混凝土的弹性模量是控制其应变性能的一个重要力学参数 , 在强度不变的情况下 , 弹性模量越低 , 其应变就越大。因此 , 对相同强度的高强混凝土而

言,要提高其应变性能,就要解决其弹性模量的控制问题。既要高强度又要低弹性模量,这就是深厚覆盖层防渗墙墙体材料的性能要求。深厚覆盖层防渗墙应力变形特性研究表明:在深厚覆盖层中,防渗墙的拉压应力均已超出混凝土的允许范围,应该采用高强低弹的高流态混凝土配方,以降低混凝土防渗墙的拉压应力^[5]。

1.2 高强低弹混凝土的研究进展

由抗压强度 $R_{28} \geq C35$ 、而弹性模量比普通混凝土的弹性模量小很多的混凝土浇筑而成的防渗墙,可称为高强低弹混凝土^[6]。以往的混凝土防渗墙,强度高、弹性模量也高,弹强比比较大,强度低,弹性模量也低,但弹强比不低。随着现代新材料和水利建设的发展,建造高强低弹混凝土防渗墙不但需要而且可能。

混凝土的高强和低弹本身是一对难以协调的矛盾,如何协调这一矛盾一直是设计人员想解决的问题。目前,对于高强低弹混凝土的研究还不成熟,还处于摸索阶段。一般情况下,在没有取得成熟可靠的试验成果前,防渗墙混凝土仍以强度为控制指标,弹性模量指标仅作为参考。在治勒工程中,为了降低混凝土的弹性模量,用粉煤灰取代混凝土中的部分水泥,以减少水泥水化热,延缓胶凝材料的水化过程,改善混凝土防渗墙的变形性能。试验表明,掺40%粉煤灰的混凝土弹性模量比掺30%粉煤灰的低。因此,为了使防渗墙混凝土满足高强低弹的要求,在配合比设计时应尽量选择高粉煤灰掺量,但是粉煤灰掺量的高低对混凝土早期强度有一定程度的影响。对于高粉煤灰掺量的混凝土,为了保证必要的早期强度,必须选择低水胶比,而混凝土的高流动性与低水胶比,从施工工艺角度上讲本身就是相互矛盾的。综合考虑治勒工程拌和系统的生产水平,以及现场防渗墙混凝土浇筑的条件限制,不宜选择低水胶比的施工配合比,故对于C30(90d)混凝土配合比,最终选择了30%的粉煤灰掺量^[7]。

随着混凝土强度的提高,其应变性能会明显下降,对于高强与超高强混凝土而言,如何降低脆性和提高其应变性能是一个技术关键,也是目前的重要研究课题之一。国内外的研究表明,合理改善孔隙结构不仅不会降低混凝土的强度,反而能够改善其应变性能。试验表明,通过选定外掺料的合理掺量来改善孔

隙结构,可以配制出高强低弹混凝土,而且其各项物理力学性能也均能满足高强混凝土的要求^[8]。

1.3 高强低弹混凝土的工程应用

目前,深厚覆盖层防渗墙普遍采用高强低弹混凝土墙体材料,如四川瀑布沟和冶勒等防渗墙工程,由于防渗墙规模过大、过深,为便于墙体的施工,要求墙体材料早期强度低,后期强度高。瀑布沟大坝防渗墙墙体混凝土设计为:90d强度45MPa,90d弹性模量3.3万MPa,抗渗等级W12,通过室内多次配制均无法实现。通过对混凝土强度发展规律分析,发现水泥的水化热是决定混凝土强度发展的关键,要想降低水泥的水化热,就必须降低水泥早期水化热的速度,而水泥的水化热本身很大部分取决于水泥的细度(或比表面积),水泥颗粒越大,比表面积越小则水泥的水化热就越慢。基于此思路,研制了一种特制低热普通硅酸盐水泥P.LH42.5(非国标),通过室内试验,研究出了早期7d强度在12MPa左右,后期强度满足设计要求的混凝土,这种混凝土不仅后期强度满足45MPa,而且90d之后还有很大的富余增长,且弹性模量比P.O42.5配制的混凝土还要低,二者的混凝土配比及性能对比情况见表1,其配合比强度发展规律对比情况见图1。通过施工使用,效果良好。

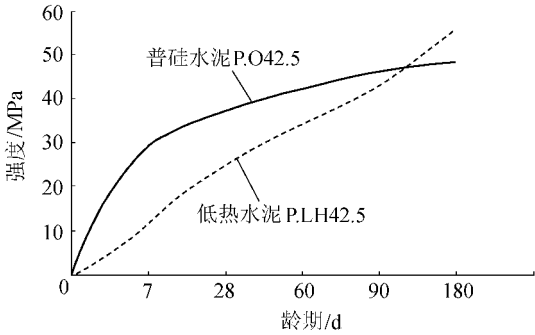


图1 2种混凝土配合比强度发展规律对比

冶勒防渗墙工程采用水溶性高分子材料,活性混合材料及高效缓凝减水剂的选优和组合,开发出了50MPa,45MPa,40MPa,35MPa,30MPa 5个等级的高强低弹性模量复合混凝土墙体材料^[9]。这种复合混凝土墙体材料具有良好的流动性和黏聚性,坍落度大于20cm,扩散度大于34cm,而且具有明显的缓凝效果,能很好地适应深度较大的防渗墙施工。该种墙体材料抗压强度 R_{28} 最高可达到51.4MPa,弹性

表1 P.O42.5硅酸盐水泥与P.LH42.5低热特制水泥配比及性能对比

水泥 标号	设计 标号	级配	水胶 比	粉煤灰 掺量/%	砂率/ %	减水剂 掺量/%	引气剂 掺量/万	材料用量/(kg·m ⁻²)						强度/MPa			
								水	水泥	粉煤灰	人工砂	人工碎石/ (5~20mm)	人工碎石/ (20~40mm)	7d	28d	90d	150d
P.O42.5	C ₉₀ 45	二级	0.35	25	42.5	0.5	1	160	343	114	700	540	441	30.3	42	55	58
P.LH42.5	C ₉₀ 45	二级	0.34	40	45	0.6	1	143	252	168	815	598	398	12.5	32.1	46.2	59.7

模量 E_{28} 为 21.5×10^3 MPa, 弹强比为 418, $S_{28} > 2.5$ MPa, 具有良好的高强低弹特性。该种墙体材料还具有较好的耐久性, 经试验和评估, 其安全运行寿命将比普通混凝土防渗墙提高 22%^[10]。

2 低强低弹混凝土

早在 20 世纪 80 年代初期, 我国就开始对防渗墙墙体材料进行系统的研究, 并陆续研制成功了适用于低水头闸坝或临时围堰的固化灰浆、自凝灰浆材料以及适用于中低水头大坝、临时围堰的塑性混凝土。固化灰浆、自凝灰浆和塑性混凝土都属于低强低弹混凝土。

2.1 低强低弹混凝土的发展

对于固化灰浆, 由于它的强度和弹性模量均较小, 限制了应用范围。到目前为止, 我国仅有四川铜街子、湖北王甫州等少数防渗墙工程是采用固化灰浆作墙体材料的。

自凝灰浆在我国发展一直很缓慢, 直到 1985 年, 在深圳大亚湾核电站, 由法国地基公司施工做成了我国第一道自凝灰浆防渗墙。2002 年由 中国水利水电基础工程局和长江水利科学研究院共同研发的拥有自主知识产权的自凝灰浆墙体材料, 成功地应用于三峡三期围堰防渗工程中^[11]。

目前, 在中低水头大坝和临时围堰中使用最多的低强低弹墙体材料就是塑性混凝土。自 1990 年福建省水口水电站首次采用塑性混凝土建造防渗墙以来, 我国的塑性混凝土防渗墙技术得到了很大发展, 尤其在土石坝除险加固工程中得到普遍应用。据不完全统计, 2000 年至今, 我国建成混凝土防渗墙 50 余座, 近半数均为塑性混凝土防渗墙, 标志着塑性混凝土防渗墙在我国已经得到广泛的推广应用, 也是国内防渗墙墙体材料的发展趋势^[12]。

塑性混凝土之所以发展如此之快, 主要是由于它具有弹性模量低、极限变形大、弹强比小、变形性能好的特点, 能有效地改善墙体应力状态。通过原材料和配合比选择, 可以使塑性混凝土的弹性模量接近地基的弹性模量, 而弹强比只有 100~300, 在满足抗压强度要求的同时不出现拉应力, 从而能够避免墙体的开裂, 这对防渗墙的整体抗渗性是有利的。

2.2 塑性混凝土的性能特点

塑性混凝土拌和物和易性很好, 流动性、黏聚性良好, 不易离析, 易于泵送且不需振捣, 能自流平、自密实, 拌和物的坍落度损失较慢, 但配合比设计不当, 易产生较多的泌水。

塑性混凝土强度较低, 一般设计强度 $R_{28} = 2 \sim 5$ MPa, 塑性混凝土必须保证一定的强度, 以抵抗外

力的破坏。

塑性混凝土弹性模量较低, 硬化后的塑性混凝土有良好的变形性能, 是塑性混凝土的重要特征之一。通过配合比的调整, 塑性混凝土弹性模量可保持在 400~1500 MPa 的范围内。塑性混凝土的弹性模量能否满足设计要求, 造价是否经济, 其配合比的设计是关键。

塑性混凝土具有良好的抗渗性能, 渗透系数小。塑性混凝土的渗透系数很容易达到 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ cm/s 的范围。塑性混凝土低弹性模量、低渗透性及良好的变形能力是其在防渗工程中得到广泛应用的根本原因。

2.3 塑性混凝土的工程应用

目前, 塑性混凝土施工技术已趋见成熟。在文献 [12] 中, 对塑性混凝土防渗墙进行了全面的研究, 包括塑性混凝土的力学性能(动力学、静力学)、防渗性能以及耐久性能, 还编制了适合防渗墙应力变形计算的非线性有限元程序。

长江三峡二期上游围堰防渗墙是采用塑性混凝土墙体材料比较典型的例子。根据二期深水围堰防渗墙高度大、挡高水位及水下抛填风化砂料中成墙等特点。通过进行大量、多组合的围堰防渗墙应力应变计算分析和墙体材料大量试验研究工作, 为适应二期围堰特定的运行条件, 特采用塑性混凝土防渗墙墙体材料。该墙深 73.5 m, 墙厚 1 m, 在巨大的土水压力作用下, 墙体最大变位虽然达 59.8 cm, 但塑性混凝土仍表现出良好的适应变形能力, 墙体挠度变形曲线平滑, 工作状态正常, 防渗墙效果良好, 截水面积积达 4 万 m^2 , 渗流量为 26 L/s, 仅为设计值的 1/23。

3 结 语

不同种类的墙体材料有着不同的性能, 适用范围也不同, 其材料组成、施工方法及造价也各不相同, 应根据具体用途和工程条件选择墙体材料。墙体材料各项性能指标的匹配应合理可行, 否则在施工中难以兼顾各项性能要求, 既造成资源浪费, 又难以保证工程质量。

参考文献:

[1] 高钟璞. 大坝基础防渗墙[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
[2] 从霭森. 地下连续墙的设计施工与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
[3] 刘麟德, 唐剑虹. 瀑布沟土石坝体及防渗墙的离心模型试验和数值分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 38-47.

[4]姚汝方. 防渗墙低弹性模量混凝土性能试验研究[D]. 西安:西北农林科技大学,2006.

[5]邱祖林,陈杰. 深厚覆盖层上混凝土防渗墙的应力变形特性[J]. 水文地质工程地质,2006(3):72-76.

[6]白永年. 中国堤坝防渗加固新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.

[7]卢剑虹. 冶勒水电站坝基防渗墙的混凝土配合比研究及应用[J]. 水电站设计,2006,22(1):26-30.

[8]许丛强. 高强低弹混凝土的试验研究[J]. 广东土木与建筑,2001(10):44-46.

[9]李金玉,徐文雨,曹建国,等. 100m 深地下防渗墙高强低弹性模量墙体材料的开发及生产性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2002(1):39-41.

[10]肖白云. 混凝土防渗墙墙体材料及接头型式的研究[J]. 水力发电,1998(3):29-31.

[11]代国忠,殷琨. 水利工程防渗墙柔性墙体材料的性能与应用研究[J]. 长江科学院院报,2007,24(3):46-49.

[12]王清友,孙万功,熊欢. 塑性混凝土防渗墙[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

(收稿日期:2008-10-20 编辑:方宇彤)

(上接第 167 页)

[6]郭荣文. 大洪河水电站分期洪水分期防洪发电研究[J]. 水利水电科技进展,1997,17(6):21-25.

[7]翟家瑞,刘红珍,王玉峰. 黄河洪水的分期调度与分级调度[J]. 人民黄河,2003,25(5):6-7.

[8]眭汝安,曹升乐. 水库分期汛限水位动态控制研究[J]. 山东大学学报(工学版),2004,34(5):81-84.

[9]刘攀,郭生练,肖义,等. 水库分期汛限水位的优化设计研究[J]. 水力发电学报,2007,26(3):5-10.

[10]孙金辉,魏加华,陈继东. 水库预报调度分期分级模型系统的研究与应用[J]. 应用基础与工程科学学报,2005,10(5):15-23.

[11]高波,刘克琳,王银堂,等. 系统聚类法在水库汛期分期中的应用[J]. 水利水电技术,2005,36(6):1-5.

[12]国家防汛抗旱总指挥部. 水库汛限水位动态控制试点工作意见[R]. 北京:国家防汛抗旱总指挥部,2005.

[13]王本德,周惠成. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[14]曹永强. 汛限水位动态控制方法研究及其风险分析[D]. 大连:大连理工大学,2003.

[15]周建军,林秉南,张仁. 三峡水库减淤增容调度方式研究——双汛限水位调度方案[J]. 水利学报,2000,31(10):1-11.

[16]周建军,林秉南,张仁. 三峡水库减淤增容调度方式研究——多汛限水位调度方案[J]. 水利学报,2002,33(3):12-19.

[17]高波,吴永祥,沈福新,等. 水库汛限水位动态控制的实

现途径[J]. 水科学进展,2005,16(3):406-411.

[18]张改红. 基于防洪预报调度的水库汛限水位设计与控制研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.

[19]陈守煜,王淑英,郭瑜,等. 水库设计汛限水位动态模糊控制分析[J]. 大连理工大学学报,2005,45(5):735-739.

[20]王才君,郭生练,刘攀,等. 三峡水库动态汛限水位洪水调度风险指标及综合评价模型研究[J]. 水科学进展,2004,15(3):376-381.

[21]刘攀,郭生练,王才君,等. 三峡水库动态汛限水位与蓄水时机选定的优化设计[J]. 水利学报,2004,35(7):86-91.

[22]冯平,韩松,李健. 水库调整汛限水位的风险效益综合分析[J]. 水利学报,2006,37(6):451-456.

[23]彭杨,李义天,张红武. 三峡水库汛末蓄水时间与目标决策研究[J]. 水科学进展,2003,14(6):682-689.

[24]殷峻暹,曹永强. 基于供水风险分析的汛限水位控制范围研究[J]. 水科学进展,2005,16(3):401-405.

[25]李玮,郭生练,刘攀,等. 梯级水库汛限水位动态控制模型研究及运用[J]. 水力发电学报,2008,27(2):22-28.

[26]李继清,姚志宗,贾怀森,等. 刘家峡水库汛期动态防洪限制水位论证研究[J]. 水力发电学报,2007,26(5):1-6.

[27]郑德凤. 雨洪资源与地下水资源联合调控理论及应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.

[28]杜丽惠,曹亮,廖松,等. 密云水库动态汛限水位分析[J]. 水力发电学报,2005,24(4):42-46.

[29]李旭光. 水库汛限水位控制若干重要问题研究及应用[D]. 大连:大连理工大学,2008.

(收稿日期:2009-05-08 编辑:高建群)

(上接第 173 页)

[39]ZENKIEWICZ O C. Analysis of nonlinear problems with particular reference to jointed rock systems[A]. Proceedings of 2nd conference society of rock mechanics[C]. Europe-US Workshop, Springe, Belgrade,1970,3:501-509.

[40]DEASAI C S,ZAMAN M M. thin-layer element for interfaces and joint[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanic,1984,8(1):19-43.

[41]ZAMAN M M,DESAI C S,DRUMM E C. Interface model for dynamic soil-structure interaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering,ASCE,1984,110(9):1257-1273.

[42]HOHBERG J M. A review of joint constitutive model[C]. In Proc 2nd Czechoslovak Conf on Num Method in Geomech. Europe-US Workshop, Springer,Berli,1992:103-108.

[43]张冬霖,卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及应用[J]. 岩土工程学报,1998,20(6):62-66.

(收稿日期:2009-02-23 编辑:高建群)