

第六届中国水利水电岩土力学与工程讨论会论文集

张建海 陈群 著



四川大学出版社



责任编辑:唐 飞 段悟吾
责任校对:蒋姗姗
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

内容摘要

本书为第六届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集,收集了岩土材料工程性质、水利水电工程安全与灾害防治、深厚覆盖层筑坝技术、库岸边坡工程安全及风险控制、复杂环境下的地下洞室安全、水利水电工程建设与环境协调、水工物理与数值模拟技术、水利水电工程监测与测试、水工新材料与新技术等方面的最新研究成果和进展,内容涵盖水利水电岩土力学与工程的基础理论、试验测试方法、现场监测及工程的设计与施工等各个方面。

图书在版编目(CIP)数据

第六届水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集 / 张建海, 陈群编. — 成都: 四川大学出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5614-9757-9

I. ①第… II. ①张… ②陈… III. ①水利水电工程—岩土力学—文集 ②岩土工程—文集 IV. ①TV-53
②TU4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 176298 号

书名 第六届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集

主 编	张建海 陈 群
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行	四川大学出版社
书 号	ISBN 978-7-5614-9757-9
印 刷	四川永先数码印刷有限公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	27
字 数	655 千字
版 次	2016 年 8 月第 1 版
印 次	2016 年 8 月第 1 次印刷
定 价	80.00 元

◆ 读者邮购本书,请与本社发行科联系。
电话:(028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码:610065
◆ 本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。
◆ 网址: <http://www.scupress.net>

版权所有◆侵权必究

前 摇 言

由中国水利学会岩土力学专业委员会主办，四川大学、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司、成都理工大学等 9 家单位联合承办的第六届中国水利水电岩土力学与工程学术研讨会于 2016 年 8 月 19 日至 22 日在四川省成都市召开，会议以“西南水利水电开发中的岩土力学问题与灾害防治”为主题，主要议题包括西南地区特殊土成因与工程性质、水利水电工程安全与灾害防治、深厚覆盖层筑坝技术、库岸边坡工程安全及风险控制、“三高（高烈度、高地应力、高渗压）”环境下的地下洞室安全、水利水电工程建设与环境协调、水利水电工程监测与测试、水工新材料与新技术等。会议对我国近年来水利水电岩土力学与工程领域的最新研究进展进行了广泛的学术交流。

本次会议得到了水利水电科研院所科技人员和相关高校师生的积极响应，共收到论文 260 篇，内容涵盖水利水电岩土力学与工程技术的各个方面。会议收到的论文经专家初审共推荐 156 篇到《岩土工程学报》《岩土力学》《水利学报》《四川大学学报（工程科学版）》《中国水利水电科学研究院学报》等期刊，经编辑部审稿后由正刊或增刊录用 83 篇。其余论文经专家评审后共有 45 篇被收入本次会议论文集并正式出版。这些论文反映了水利水电和岩土力学与工程领域的最新研究成果和发展动态，可为科研和技术人员提供指导和参考。

主办单位、承办单位和协办单位在人力、物力、财力等方面给予本次会议极大的支持与帮助，从事岩土工作的各位专家、学者及科研部门积极投稿并参会。在此，向所有关心和支持本次会议的领导、专家、学者及工作人员表示诚挚的谢意。

由于时间仓促，书中存在疏漏或差错之处在所难免，敬请读者批评指正。

编委会
2016 年 7 月

目 录

基于监测资料的深厚覆盖层上面板坝应力变形分析	任强	李国英	(1)					
渗透结晶型防水材料防渗堵漏效果试验研究								
摇	杨玉川	杨兴国	邢会歌	刘信	涂园	(10)		
卡基娃电站水库诱发地震预测分析	马行东	张世殊	(18)					
心墙沥青混凝土动力性能试验研究	谭凡	饶锡保	(26)					
基于监测数据的湿热环境下滑体变形机制分析								
摇	向锐	颜荣涛	韦昌富	吕海波	(35)			
地震波对高面板坝动力响应影响规律研究	姚虞	王睿	刘天云	张建民	(47)			
南水北调中线深挖方渠道抬升变形离心模型试验研究								
摇	顾行文	章为民	任国峰	(58)				
碎砾石和砂渗透变形类型差异性研究								
摇	齐俊修	赵晓菊	刘艳	张中炎	张广禹	(67)		
深覆盖层上高面板堆石坝应力应变研究								
摇	刘	忠	何鲜峰	高玉琴	李娜	汪自力	(75)	
水利水电工程边坡风险控制水平研究	吴浩	李斌	孙庚	(87)				
覆盖层地基和筑坝土石料本构模型参数反分析研究进展								
摇	杨玉生	刘小生	汪小刚	赵剑明	翟亦民	李红军	杨正权	(94)
强夯作用下地表的变形特征研究	王威	王建华	(103)					
覆盖层的原位力学特性研究	凌华	傅华	武颖利	韩华强	(112)			
深厚粉细砂河床上的汉江兴隆枢纽泄水闸设计	郭红亮	朱世洪	龚春蕾	(120)				
覆盖层上沥青混凝土心墙坝防渗结构连接型式的研究								
摇	杨昕光	陈云	饶锡保	张伟	左永振	(129)		
随机噪声对电成像影响分析及修正技术研究								
摇	江晓益	谭磊	李红文	陈星	岑洋	余斐	(138)	
碱渣及其改良土工程特性的试验研究	王芳	曹培	严丽雪	(148)				
南水北调中线叶县段膨胀土渠坡稳定性研究	崔学臣	齐俊修	(156)					
泥灰岩作为石质、土质建筑修复材料的可行性研究	杜文凤	谌文武	刘炯	(165)				
冰水堆积岸坡塌岸预测研究	郑晓晶	甘东科	姚林林	(175)				
土中水形态对胀缩性土力学性质的影响试验								
摇	曾召田	吕海波	赵艳林	刘华贵	(183)			

基于 ABAQUS 的新型桩基与地下连续墙组合码头结构受力特性研究	
摇	王琰摇谭慧明摇周喆 193)
基于准平面模型的格形地下连续墙参数敏感性分析	
摇	潘健摇孔维美摇马勇 205)
基于损伤理论的高桩码头地震灾害安全性评价方法	
摇	陈晓峰摇沈才华摇王文武摇许海波 219)
卸荷效应下隧道原位 2 扩 4CD 工法围岩稳定性研究	
摇	林从谋摇张在晨摇杨宾摇李明 226)
基于附加孔隙比的结构性表示及其本构模拟	张浩摇王建华 241)
既有深坑边坡模型材料试验研究	张菊连 248)
输水隧洞围岩应力释放规律及初期支护时机研究	
摇	黄康鑫摇王静摇杨兴国摇周家文 259)
群夯作用下土体加固效果的研究	窦锦钟摇王威摇王建华摇陈锦剑 268)
尾矿砂动强度和动力残余变形特性的动三轴试验研究	
摇	杨玉生摇刘启旺摇刘小生摇王龙摇杨正权 277)
两河口水电站开关站边坡稳定性分析及治理效果评价	
摇	廖少波摇崔长武摇覃云飞 287)
桶型吸力式沉箱基础局部剪切破坏下的抗拔承载力研究	
摇	范俊涛摇皮孝建摇冯士伦摇边晨 296)
CCS 岩锚梁在支护不完备情况下进行桥机试验的可行性计算分析	
摇	宋志宇摇赵钊摇艾文凯 304)
人工冻土抗折试验方法及其抗折特性研究	
摇	刘彬摇任宇晓摇李康摇陈国锋摇陶琳 315)
黄土增湿特性的研究方法综述与进展	王亚林摇李荣建摇张真摇骆晗摇孙萍 323)
斜坡降雨入渗模型——修正的 M-L 入渗模型	王进摇付晓东 332)
振冲碎石桩在水电工程含砂土层坝基处理中的应用	黄春摇吴章群摇柯善军 339)
河谷形状对 200 m 级混凝土面板堆石坝应力变形特性的影响研究	
摇	沈婷摇李国英 349)
锦屏一级水电站水库蓄水对近坝爬滑坡稳定影响研究	陈长江摇苏建德 356)
板裂结构边坡倾倒-拉裂模式及计算方法对比分析	刘云鹏 364)
基于输变电工程场地的区域构造稳定性评价研究	赵小平摇张世殊 377)
川藏联网输变电路工程地质灾害发育规律与特征研究	
摇	李廷友摇张世殊摇陈满摇赵小平 386)
大岗山水库诱发地震初步分析	徐敬武摇邓忠文摇吴灌州 396)
砂土相对密度的二维离散元数值模拟	常利营摇陈群摇叶发明 405)
我国混凝土面板堆石坝建设与思考	谭界雄摇王秘学摇田金章摇周晓明 415)

基于监测资料的深厚覆盖层上面板坝应力变形分析

任强 李国英

(南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 建于深厚覆盖层上的某面板堆石坝已蓄水运行, 施工期与运行初期的原型观测资料为分析评价大坝的安全特性提供了条件。结合监测资料和有限元计算结果分析了该深厚覆盖层上的面板堆石坝应力变形特性。数值计算采用“南水”双屈服面弹塑性模型模拟覆盖层与坝体应力变形, 采用 goodman 单元模拟刚度差异较大的单元接触特性。根据坝体施工填筑与蓄水期实测变形发展, 反馈了坝料及覆盖层模型计算参数, 将实测资料与数值计算结果进行对比分析, 重点评价了坝体和防渗结构的安全性。比较分析表明, 实测值与数值计算结果吻合较好, 说明了计算参数的合理性与计算结果的有效性。

关键词: 监测资料; 面板堆石坝; 深厚覆盖层; 有限元分析

1 引言

在深厚覆盖层地基上直接建面板坝, 可以简化施工导流、缩短工期, 节省工程投资, 因此覆盖层上建面板坝技术近年来得到了较为深入的研究并取得了快速发展^[1-3]。随着工程经验的积累和技术研究的发展, 21 世纪以来, 我国相继建成了那兰、察汗乌苏、九甸峡、老渡口等多座百米级趾板建在覆盖层上的高面板堆石坝^[4]。

深厚覆盖层上面板坝的安全主要依赖于坝体与坝基防渗系统的可靠性。坝体与坝基的应力变形特性一方面与覆盖层厚度、覆盖层组成、坝高、覆盖层本身的力学性质等因素相关, 另一方面与防渗系统的设计相关。覆盖层的工程特性是开展覆盖层地基上建坝方案研究的前提, 对于覆盖层料来说, 其密实度、颗粒级配难以准确掌握。在覆盖层上部一定深度内挖坑测定的干密度、级配曲线往往不能代表整个覆盖层的情况, 因此覆盖层室内试验成果存在着更大的不确定性。对于取得一定观测资料的大坝来说, 通过变形观测资料反馈分析, 研究坝料模型参数是一种常用的方法。

本文结合实测资料和数值计算,分析深厚覆盖层上高面板堆石坝在施工期、蓄水期和运行期的应力、变形特性,讨论深厚覆盖层对坝体和防渗结构的影响,为覆盖层上修建面板坝施工与设计提供必要的分析理论和计算方法。

2 工程概况

某面板堆石砂砾石坝坝高 110 m,趾板基础覆盖层最大厚度 46.7 m,覆盖层划分为上部、中部、下部 3 个大层,其中上、下部为含漂石砂卵砾石层,中部为含砾中粗砂层。上部含漂石砂卵砾石层平均厚度 19.24 m,具有较高的密度及较低的孔隙比,呈中至中密状态。中部含砾中粗砂层平均厚度 5.9 m,结构紧密,属中等密实至密实状态。下部含漂石砂卵砾石层平均厚度 11.18 m,结构紧密,物理状态与上部砂卵砾石层相近。河床趾板和堆石体基础在表层清除 1~2 m 杂物后即作为基础,直接坐落在上部含漂石砂卵砾石层上。大坝典型剖面示意如图 1 所示。

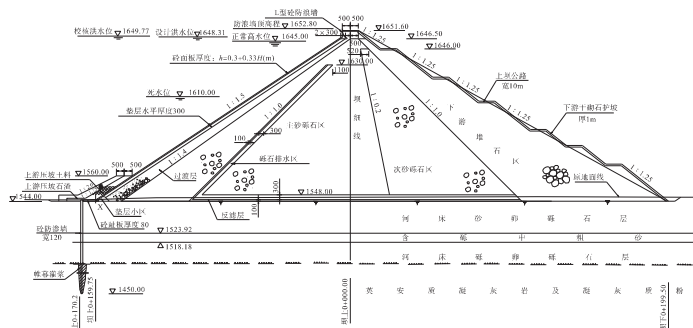


图 1 大坝典型剖面示意

河床覆盖层采用厚度 1.2 m 的防渗墙进行防渗,墙底进行帷幕灌浆,最大墙深 46.8 m,墙底嵌入基岩 1 m。防渗墙、连接板、趾板与面板组成大坝的防渗系统。

大坝填筑与蓄水顺序如图 2 所示,图上日期为大坝相应部位施工和蓄水的实际日期。首先河床覆盖层开挖,进行趾板浇筑和防渗墙施工,然后坝体全断面浇筑到 1625 m,浇筑一期面板高程至 1622.0 m,接着开始二期坝体填筑,待填筑到防浪墙高程 1650.233 m 处,下闸蓄水,半年后开始二期面板浇筑,最终浇筑坝顶防浪墙。

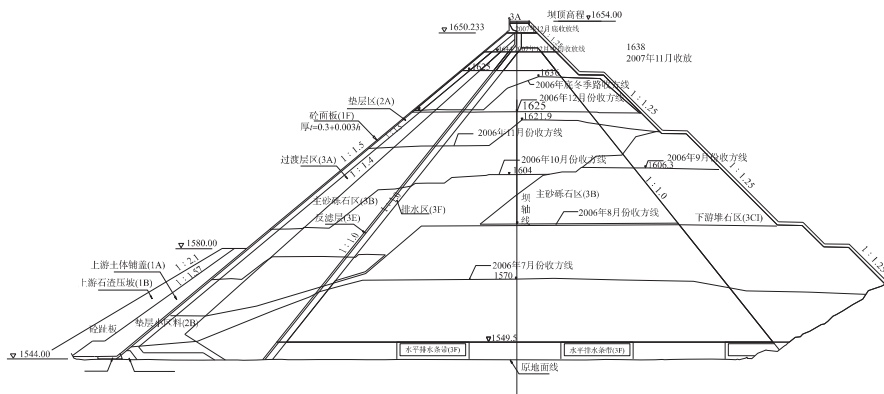


图 2 大坝填筑与蓄水顺序

3 监测系统布置

该面板坝坝内变形观测内容包括水平位移与沉降。水平位移通过水平位移计进行观测，沉降采用电磁式沉降管和水管式沉降仪观测，电磁式沉降管埋设桩号分别为该断面的坝上 0—040.00 m、坝下 0+040.00 m 和坝轴线处，编号依次为 DTC2、DTC3 和 DTC1。水管式沉降仪的测线布置和测点分布与水平位移监测测点基本一致。水平位移计安装位置信息统计见表 1，具体监测布置如图 3 所示。

表 1 水平位移计安装位置信息统计

高程（m）	测点数	仪器编号	埋设日期	始测日期
1599.00	5	EX6—1~5	2006.10.18	2006.11.28
1625.00	3	EX7—1~3	2007.01.01	2007.10.27

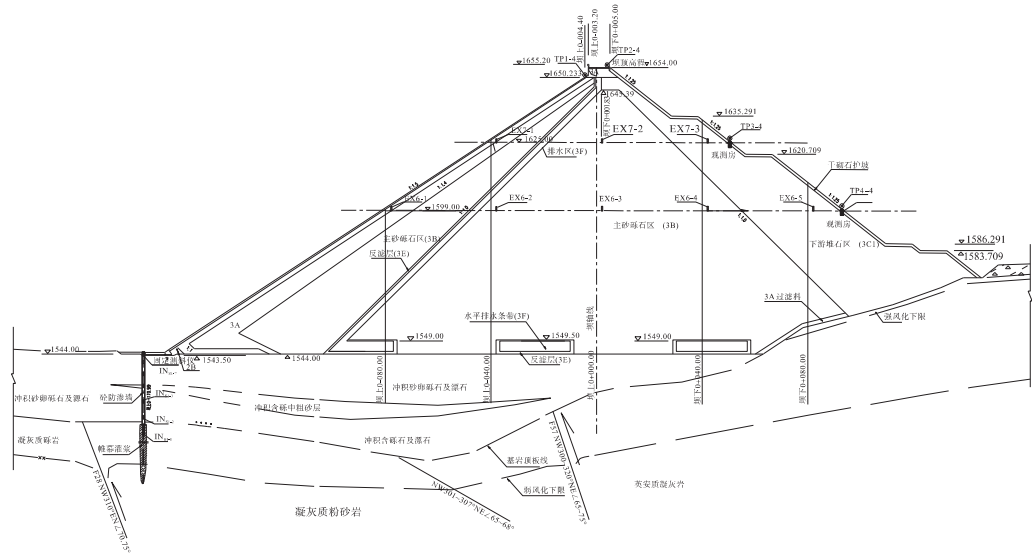


图 3 面板堆石坝坝体水平位移计监测布置

由于在 DTC1 和 DTC2 沉降管管口引测的过程中，管口测点与施工控制网点“察坝Ⅳ01”不通视，在引入中间过渡点时，产生了较大的误差，导致管口高程测量不准确；DTC3 沉降管测量较为准确，其测值基本反映了坝体的沉降情况，DTC3 电磁沉降管位于坝左 0+159.909 m，坝下 0+040.00 m 处；共 13 个测点，编号由下至上依次为 DTC3—0~12，各点位置见表 2，具体布置如图 4 所示。

表 2 电磁式沉降管测点安装高程统计

测点号	始测高程 (m)	备注
0 (孔底)	1502.182	测管堵塞
1	1515.194	测管堵塞
2	1529.178	测管堵塞
3	1543.124	测管堵塞
4	1559.255	坝内测点
5	1568.832	坝内测点
6	1578.088	坝内测点
7	1588.214	坝内测点
8	1598.851	坝内测点
9	1608.973	坝内测点
10	1619.374	坝内测点
11	1630.592	坝内测点
12	1631.378	坝内测点

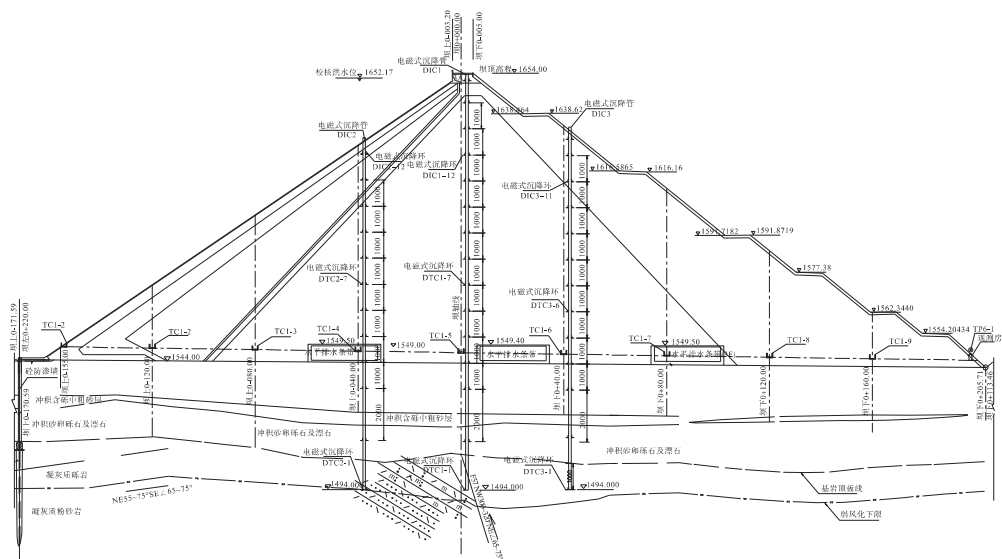


图 4 电磁式沉降管测点安装布置

4 数值模拟计算

4.1 基本方程

堆石体作为混凝土面板堆石坝的主体，其应力应变关系的合理模拟对提高混凝土面

板堆石坝应力变形计算结果的合理性非常重要。常用的堆石体本构模型大体上可以分为非线性弹性模型和弹塑性模型两大类。非线性弹性模型以 Duncan $E-\mu$ 模型、Duncan $E-B$ 模型为代表；弹塑性模型以双屈服面模型为代表。

Duncan $E-B$ 模型计算结果基本能够反映坝体的应力变形性状，虽然该模型不能反映堆石体的剪缩特性，其计算所得的水平位移仍然偏大，但人们在模型应用和参数确定方面已经积累了较为丰富的经验，所以 Duncan $E-B$ 模型至今仍被广泛采用。双屈服面弹塑性模型与非线性弹性模型相比，可以考虑堆石体的剪胀和剪缩特性，能够较为真实地反映坝体的应力应变性状。

本文分析堆石料与覆盖层的本构模型均采用“南水”双屈服面弹塑性模型。各材料的模型计算参数见表 3。混凝土面板、趾板、连接板、防渗墙均采用线弹性模型模拟，混凝土结构的线弹性模型参数根据混凝土强度等级选取如下：钢筋混凝土面板， $E=28\text{ GPa}$ ， $\mu=0.167$ ， $\rho=2.45\text{ g/cm}^3$ ；趾（连接）板， $E=28\text{ GPa}$ ， $\mu=0.167$ ， $\rho=2.40\text{ g/cm}^3$ ；防渗墙， $E=28\text{ GPa}$ ， $\mu=0.167$ ， $\rho=2.45\text{ g/cm}^3$ 。混凝土结构与垫层和覆盖层之间因刚度差异较大，两者接触面因变形不协调会发生相对位移。本文分析采用无厚度 Goodman 接触面单元来模拟两者之间的接触特性，Goodman 接触面单元参数见文献 [5—6]。

表 3 “南水”双屈服面模型参数

坝料名称	ρ (g/cm^3)	R_f	c	φ	$\Delta\varphi$	K	K_{ur}	n	n_d	C_d	R_d
泥皮	1.76	0.5	3	10	0.5	50	75	0.45	0.9	0.022	0.8
过渡层	2.32	0.86	0	49.7	8.6	820	1230	0.5	0.650	0.0089	0.77
主砂砾石	2.34	0.85	0	51.9	8.9	1250	1875	0.49	0.9	0.015	0.79
下游堆石	2.16	0.79	0	51.9	10.40	760	1140	0.3	0.766	0.013	0.73
砾石排水区	1.74	0.83	0	53.2	10	600	900	0.24	0.624	0.0099	0.74
坝基中粗砂	2.16	0.75	0	46.45	3.15	600	900	0.33	1	0.0015	0.65
坝基砂砾石	2.37	0.84	0	48.5	7.2	800	1200	0.44	0.91	0.005	0.81
基岩	2.70	0	0	0	0	29700	29700	0	0	0	0
沉渣	2.26	0.68	6	36	1.7	400	800	0.5	0.9	0.018	0.62

4.2 基本方程

最大断面及整个坝体的三维有限元网格如图 5 所示。模型共形成三维实体单元 14465 个，节点 16323 个。所有实体单元均采用 8 结点六面体等参数单元模拟。面板周

边缝及趾板与防渗墙间分缝采用分离缝模型模拟^[5]。数值计算仿真模拟施工过程和分期蓄水过程,其中前22级模拟至坝料填筑▽1625.0 m以下断面,第23级模拟一期面板浇筑至▽1622.00 m,第24~30级模拟填筑至1650.23 m高程坝体,第31~33级模拟水库蓄水从▽1544.00 m到水位▽1620.00 m,第34级模拟二期面板浇筑至▽1650.23 m,第34~37级模拟高程▽1650.23 m至1654 m高程间坝体填筑,第38~43级模拟水库蓄水从▽1620.00 m到水位▽1649.00 m。

模型底部边界施加固定约束,侧面边界施加相应的法向约束。

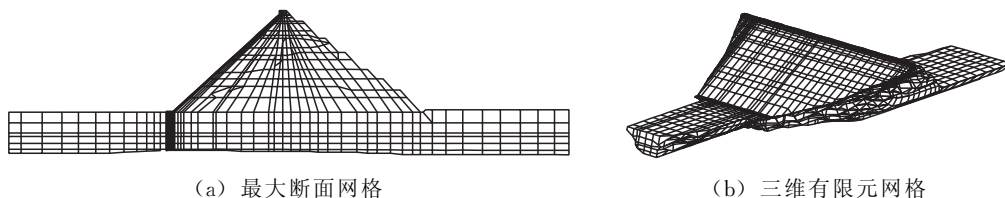


图5 有限元网格

5 计算结果分析

由有限元计算得到的0+195断面2007年10月29日、2008年6月25日和2009年6月17日的水平位移及沉降分布如图6所示。从图上看,坝体填筑过程中,坝轴线上游测点向上游变位,坝轴线下游测点向下游变位,水库蓄水和水位抬升过程中,坝轴线上游测点有向下游位移的趋势;高程越低,越靠近上游面变形变化越大,测点变化也越明显;坝轴线及下游测点受水库蓄水影响不明显。数值计算结果显示面板堆石坝应力变形在合理范围内。

坝体代表测点变形的的主要计算结果与实测值汇总于表4。

表4 坝体代表测点的沉降变形

测点	高程 (m)	2007.10.29 沉降 (cm)		2008.6.25 沉降 (cm)		2009.6.17 沉降 (cm)	
		实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
DTC3-4	1545.996	34.7	33.1	37.4	33.9	37.6	34.8
DTC3-5	1559.365	40.4	34.2	42.4	35.4	42.9	36.8
DTC3-6	1568.989	40.1	44.6	42.4	46.1	42.7	47.4
DTC3-7	1578.322	44.7	44.6	47.0	46.3	47.3	48.8
DTC3-8	1588.48	50.0	42.7	53.4	44.9	53.8	47.0
DTC3-9	1599.183	48.9	38.8	52.8	41.3	53.1	43.5
DTC3-10	1609.362	47.8	30.7	52.1	33.6	52.7	36.0
DTC3-11	1619.888	40.1	19.7	45.0	22.4	45.3	24.7
DTC3-12	1631.378	13.8	8.78	23.2	11.8	23.5	14.2

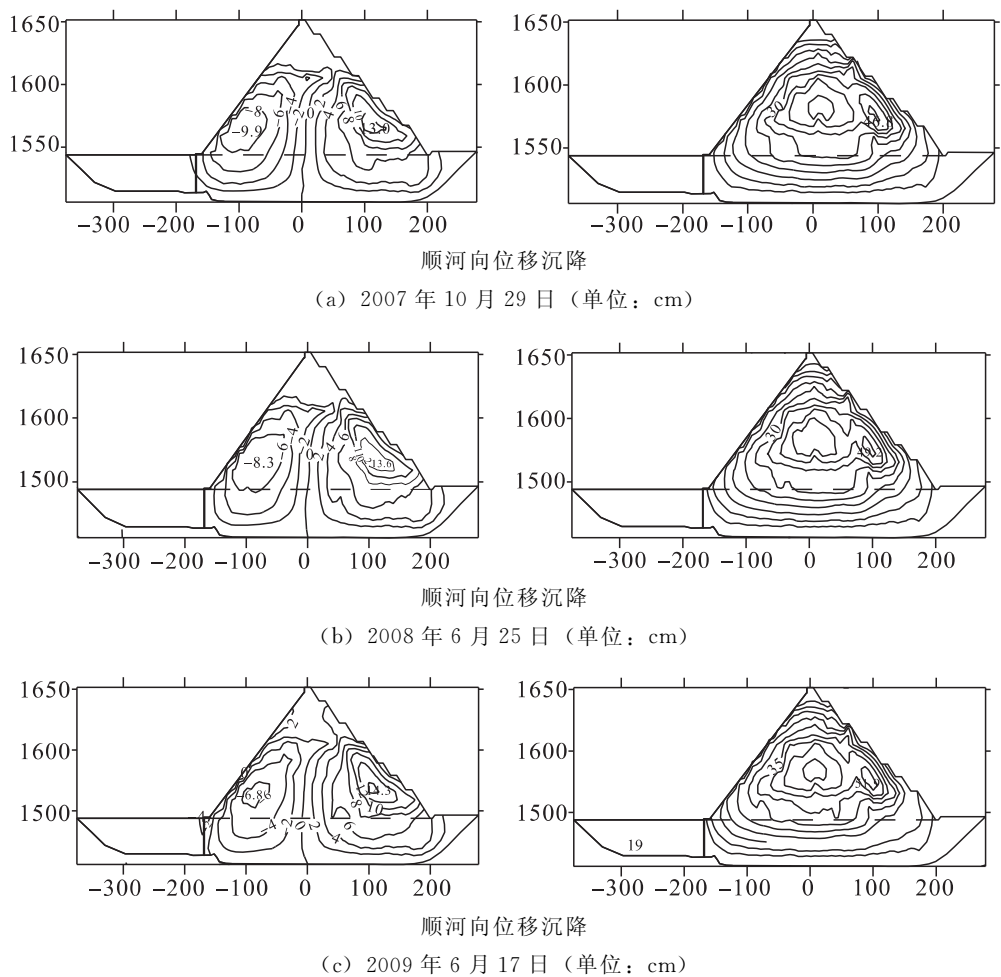


图6 监测剖面变形分布

水管式沉降仪无法监测其安装以前坝体沉降量，而且该项目埋设后未能及时观测，因此其沉降实测值明显偏小，DTC1 和 DTC2 沉降管在管口引测过程中存在较大的误差，无法准确得到坝体的沉降量，因此以 DTC3 沉降管资料作为反馈依据。监测值与计算值均显示随着坝体的填筑，各测点沉降逐渐增大。坝体沉降大部分发生在 1632 m 高程以下坝体填筑期。初期蓄水阶段，在水库蓄水和 1632.00 m 高程以上坝体填筑的影响下，各沉降测点沉降均有增大趋势。2008 年 4 月后各测点沉降基本趋于稳定。后期水位抬升和坝顶 1650.5 m 高程以上的填筑对观测点实测值影响不大。

截至 2009 年 10 月 24 日，DTC3 沉降管测点，蓄水前最大沉降值为 50.0 cm，发生在高程 1588.48 m 的 DTC3—8 测点；覆盖层顶面沉降量为 34.7 cm。蓄水后截至 2008 年 6 月，库水位高程 1620.00 m 左右，测点最大沉降值为 53.4 cm，发生在高程 1588.48 m 的 DTC3—8 测点；覆盖层顶面沉降量为 31.3 cm。蓄水后截至 2009 年 10 月，库水位 1645.00 m 高程左右，测点最大沉降值为 53.8 cm，发生在高程 1588.48 m

的 DTC3—8 测点；覆盖层顶面沉降量为 37.6 cm。

计算结果与监测结果显示，沉降管测点沉降率和压缩率都不大。坝体填筑状况良好。计算得到覆盖层压缩率为 0.83%，与监测值压缩率 0.90% 相差不大。

坝体填筑引起覆盖层的沉降，增加了防渗墙的水平荷载，是影响坝基防渗墙应力变形性状的主要因素，同时上、下游面均承受向下的摩擦阻力作用，会引起防渗墙复杂的应力、变形特性。

图 7 给出了 2007 年 10 月 29 日（坝体填筑至▽1632 m 高程）、2008 年 6 月 25 日（库水位 1620 m）和 2009 年 6 月 17 日（库水位 1645 m）防渗墙的顺河向变形计算结果。在坝体填筑过程中，防渗墙向上游变形，最大变形量为 -4.6 cm。水库蓄水后，在库水压力作用下，防渗墙向下游变形，2008 年 6 月 25 日库水位 1620 m 时，防渗墙最大下游变形量为 4.12 cm，位于墙顶部；2009 年 6 月 17 日库水位 1645 m 时，防渗墙最大下游变形量为 5.88 cm，仍位于墙顶部。

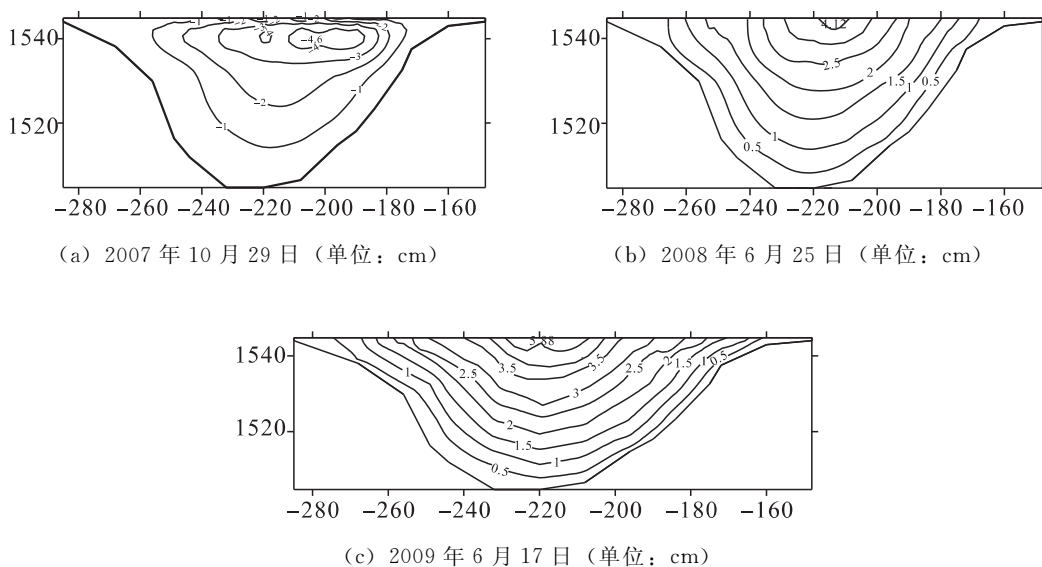


图 7 防渗墙顺河向变形分布

监测结果显示，在水库蓄水后防渗墙向下游位移；后期水位抬升过程中，有向下游位移的趋势。2008 年 6 月库水位 1620 m 高程左右，坝左 0+200.00 m 断面防渗墙最大挠度变形为 7.10 cm，发生在防渗墙顶部；坝左 0+244.00 m 断面防渗墙最大挠度变形为 6.91 cm，发生在防渗墙上部。截至 2010 年 5 月 28 日库水位 1627.39 m 高程，坝左 0+200.00 m 断面防渗墙最大挠度变形为 12.9 cm，发生在防渗墙上部；坝左 0+244.00 m 断面防渗墙最大挠度变形为 7.1 cm，发生在防渗墙中上部。

通过三维有限元对防渗墙挠度变形进行了分析计算，计算工况为▽1625.00 m 以下

断面填筑后开始建造混凝土防渗墙，由此计算得到：在坝体填筑过程中，防渗墙向上游变形，最大挠度变形为 4.6 cm；蓄水期防渗墙向下游位移，最大挠度变形为 5.88 cm。由此对比可知，坝左 0+200.00 m 断面、坝左 0+244.00 m 断面蓄水后防渗墙挠度变形计算结果均小于监测结果。

6 结论与建议

(1) 覆盖层对面板堆石坝的应力、变形特性具有明显影响，深厚覆盖层将会引起较大的坝体沉降、面板挠度以及防渗墙顺河向变形^[7]。

(2) 数值计算与实测资料吻合较好。本文采用的数值模型可用于覆盖层上面板堆石坝应力变形计算分析。

(3) 对于深厚覆盖层上的面板坝来说，准确把握覆盖层的工程特性对坝体应力变形计算结果的合理性至为关键。因此，建议对于深厚覆盖层上的高面板坝，最好能结合室内试验和现场试验共同确定覆盖层参数。

参考文献：

- [1] Anguita P, Alvarez L, Vidal L. Two chilean CFRDs designed on riverbed alluviums [C] //Proceedings of International Symposium on High Earth-Rockfill Dams. Beijing, 1993.
- [2] 李国英. 覆盖层上面板坝的应力变形性状及其影响因素 [J]. 水利水运科学研究, 1997 (4): 348—356.
- [3] 李国英, 沈珠江, 吴威. 覆盖层上混凝土面板堆石坝离心模型试验研究 [J]. 水利水电技术, 1997 (9): 51—54.
- [4] 李国英, 苗喆, 米占宽. 深厚覆盖上高面板坝建基条件及防渗设计综述 [J]. 水利水运工程学报, 2014 (8): 1—6.
- [5] 邴能惠, 米占宽, 李国英, 等. 冶勒水电站超深覆盖层防渗墙应力变形性状的数值分析 [J]. 水利水运工程学报, 2004 (1): 18—23.
- [6] 李为, 苗喆. 察汗乌苏面板坝监测资料分析 [J]. 水利水运工程学报, 2012 (5): 30—35.
- [7] 温立峰, 柴军瑞, 王晓. 深覆盖层上面板堆石坝应力变形特性研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (8): 2386—2396.

渗透结晶型防水材料防渗堵漏效果试验研究^①

杨玉川^{1,2} 杨兴国² 邢会歌³ 刘信² 涂园²

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065;

3. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 由于混凝土结构自身缺陷, 在承受有压水时经常出现渗水或漏水现象, 严重影响建筑物的美观, 甚至引发工程安全事故。针对此情况采取合理的防水措施进行处理十分必要, 本文利用自行设计的混凝土结构模型试验槽模拟渗水和漏水情况, 并使用水泥基渗透结晶型防水材料澎内传快凝堵漏剂 PNC602 用于填充混凝土结构漏水孔洞, 同时采用防水涂料 PNC401 用于处理模型槽的渗水通道, 根据试验结果检验此两种材料防渗堵漏效果。通过电镜扫描 (SEM) 技术揭示混凝土内部晶体的生长形态以及其防渗堵漏机制。试验结果表明: 对于不同大小的漏水通道和渗水压力, 由于混凝土内部遇水发生循环络合反应生成致密结晶网状结构, 该类材料均可较好地填充混凝土结构的孔洞和渗水通道。

关键词: 混凝土结构; 渗透结晶型防水材料; 模型试验槽; 防渗堵漏; 电镜扫描

1 引言

混凝土作为世界上最常用的建筑材料, 目前几乎在每一种类型的建设项目中都会被采用。自从 19 世纪出现波特兰水泥之后, 水泥基材料取得了飞跃性的发展, 水泥混凝土已经发展成为近代土木工程领域使用最广泛的建筑材料。尤其是大量的混凝土结构运用于水利水电工程当中, 极大地加快了施工进度, 但由于混凝土结构在固化过程中会留下很多的孔洞和裂缝, 往往导致内部相连的孔洞和裂缝出现漏水或渗水情况^[1]。因此, 如何防止水溶性污染物进入混凝土内部及防渗堵漏成为当今研究的关键问题。

传统防水材料包含由沥青基、塑料以及其他高分子材料制成的卷材、片材或涂料等, 适用于混凝土结构的外部, 通常需要做额外的防水层和保护层。例如: 用于水工防渗的沥青混凝土因其良好的防渗和变形性能被广泛应用于大坝面板、大坝心墙、渠道衬

^① 作者简介: 杨玉川 (1990—), 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事水利土木系工程研究。E-mail: 1258848639@qq.com

砌、垃圾填埋场防渗等^[1-2]。此种防渗措施的思路是在需要防渗的结构表面另外设置一道阻水屏障层，从而达到防水的目的。这种情况下，防水层需要依靠混凝土结构维持其自身的稳定与安全，因此其必须位于结构的迎水面^[3]。

目前的研究思路是：通过降低混凝土本身的渗透性，使水难以进入，从而提高混凝土的防水性能。澎内传产品 PNC602 和 PNC401 的防水机理与传统防水材料不同，其是以原混凝土结构为基础，通过自身与混凝土结构中部分未经水化反应的水泥发生催化与化学反应，以水为载体渗入到混凝土结构中的微细孔洞及其他裂缝等可能的渗水通道中，并形成相应的结晶体^[4]，可以很好地与混凝土结构固结在一起，最终实现堵塞混凝土中的微细孔洞及其他裂缝等渗水通道的目的，从而使原来透水的混凝土结构体变成不透水的结构体。水泥基渗透型结晶防水材料通过渗入来充填混凝土结构的孔隙，因此其并不影响混凝土结构的强度、抗氯离子腐蚀、抗冻等指标，反而经过试验测试上述各种指标还有所增强^[5-6]。

澎内传产品 PNC602 和 PNC401 产生的结晶体与原来的混凝土结构可以成为一体，因此利用该产品的这种性质可以进行混凝土试验槽的堵漏和防渗试验。利用自行设计的混凝土试验槽，预先在槽的不同高度开大小不一的孔洞，并预留一些渗水通道，试验中，通过在槽内注水，引起不同水压条件的孔洞及裂缝发生漏水或渗水现象。针对孔洞的漏水现象采用 PNC602 进行填充堵漏，而采用 PNC401 来涂抹渗水通道进行防渗处理，最终根据试验结果验证这两种材料的防渗堵漏效果。由于其无须增加额外的防水层和排水设施，因此，与传统防水材料相比具有明显的优势。同时，电镜扫描结果进一步揭示了该类材料结晶形态与防渗机制，即通过形成的针状结晶体堵塞混凝土结构本身的渗水通道，最终实现防渗堵漏的目的。

2 试验装置和方案

美国 PENETRON 国际有限公司生产的水泥基渗透结晶型防水材料 PNC602 和 PNC401 如图 1 所示，它们是由硅酸盐水泥、特别选制的石英砂和多种特殊的活性物质配制而成的。

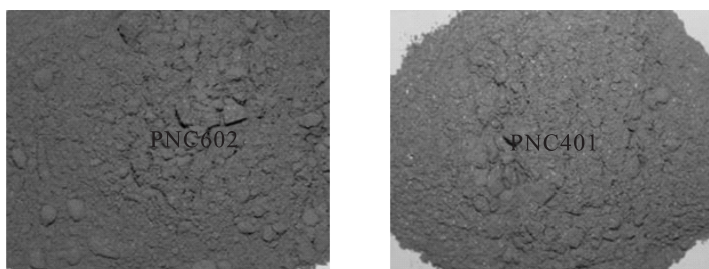


图 1 水泥基渗透结晶型防水材料 PNC602 和 PNC401

澎内传快凝堵漏剂 PNC602 具有快速凝固的特性，而澎内传防水涂料 PNC401 是一种用于混凝土表面的防水材料，当其被涂刷到混凝土表面后，由于生成的结晶体可以堵塞空隙，从而达到防水的目的。而澎内传快凝堵漏剂 PNC602 用于渗漏部位的堵漏止水，另外其经常与 PENETRON 公司的澎内传防水涂料 PNC401 一起使用，即使在很高的静水压力下也能够一劳永逸，永久止漏，其堵漏过程如图 2 所示。

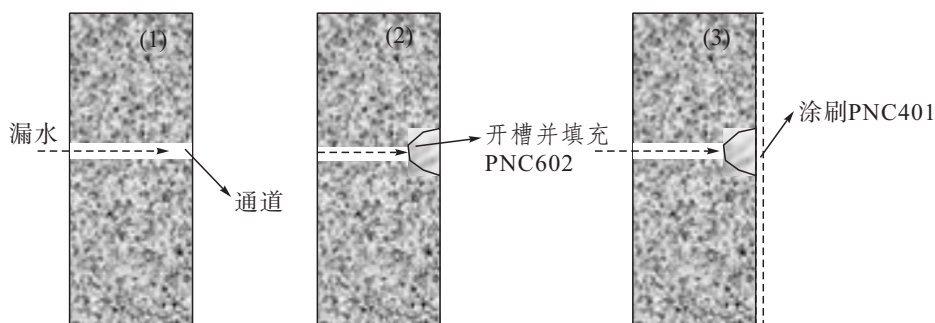


图 2 混凝土结构渗水通道修补过程

另外, 经澎内传防水涂料 PNC401 处理的混凝土, PNC401 中的活性物质渗透进混凝土, 并一直保留在混凝土结构中。根据上述两种防水材料的防水机理, PNC602 由于固化快速主要被用于恶性渗漏的快速封堵和修补, 而 PNC401 可以作为永久且深层渗透结晶的混凝土表面防水处理系统。针对其防水特点, 设计了带孔洞和渗水通道的混凝土模型试验槽。

2.1 试验装置

试验选用 42.5 等级的复合硅酸盐水泥, 以天然河砂作为细骨料, 小石粒径 5~20 mm 和中石粒径 20~40 mm 的连续两级配碎石作为粗骨料, 配置需要的混凝土。采用上述混凝土浇筑 1000 mm×1000 mm×1000 mm 水槽, 其底部厚 100 mm, 四面侧壁厚为 50 mm, 并且选择其中的三面分别布置孔径为 20 mm、25 mm、32 mm 的 PVC 管, 每面 3 排共 9 个, 每排高度相距 250 mm, 如图 3 所示。

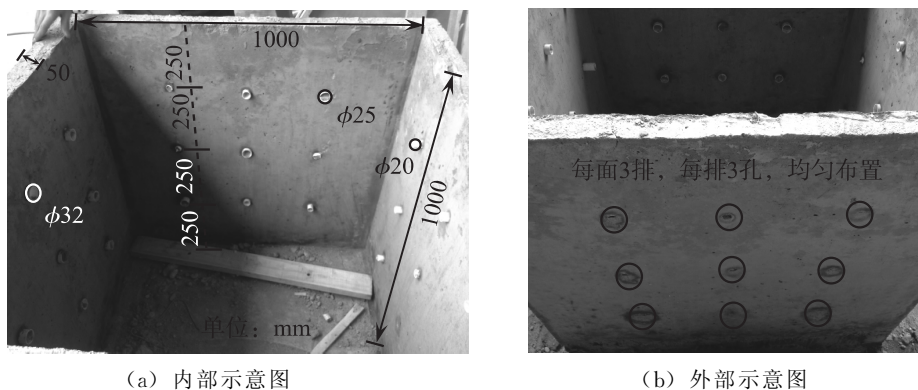


图 3 混凝土结构模型试验槽

由图 3 可知, 通过预埋不同管径的 PVC 管来模拟混凝土结构上大小不一的渗水通道, 而采用不同高度布置来模拟不同水压条件; 另外, 混凝土在浇筑过程中自然会出现一些渗水情况, 通过对这些渗水通道的处理, 来检验 PNC401 的防渗效果。

2.2 试验方案

试验时, 首先通过进水管向模型试验槽 (图 3) 内部注水, 当水位高于预埋的 PVC 管时, 水槽开始出现漏水现象, 如图 4 所示。当出现该现象后, 立即采用澎内传快凝堵