

国家自然科学基金项目 (40972178, 50639090, 50579088) 资助

和谐地球上的水工岩石力学

——第三届全国水工岩石力学学术会议论文集



中国岩石力学与工程学会 主办



同济大学 承办

2010年8月28-29日上海

主 编 夏才初

副主编 朱合华 沈明荣



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金项目(40972178,50639090,50579088)资助

和谐地球上的水工岩石力学

——第三届全国水工岩石力学学术会议论文集

主 编 夏才初

副主编 朱合华 沈明荣



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

和谐地球上的水工岩石力学:第三届全国水工岩石力学学术会议论文集/夏才初主编.--上海:同济大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5608-4362-9

I. ①和… II. ①夏… III. ①水利工程—岩石力学—文集 IV. ①TU45-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 124073 号

和谐地球上的水工岩石力学

——第三届全国水工岩石力学学术会议论文集

主编 夏才初 副主编 朱合华 沈明荣

责任编辑 高晓辉 马继兰 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 889mm×1194mm 1/16

印 张 32

印 数 1—1100

字 数 1024000

版 次 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4362-9

定 价 110.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

序 言

水工岩石力学在我国从传统水利走向现代水利发展过程中具有非常重要的意义。当前,我国面临的几项巨大水利建设如:水电开发、黄河治理、长江防洪、生态环境改善、水资源合理配置等,无不与岩石力学有关,其中关系最为密切、最具有挑战性的是水电开发。

我国水力资源丰富,居世界首位。为实现国民经济可持续发展,在国家制定的能源发展政策中把“大力发展水电”放在第一位,开发水电是中国的必然选择。

但是,在水电开发过程中也面临许多制约因素。从岩石力学的角度讲,主要在于中国大陆处于太平洋板块、欧亚板块和印度洋板块丁字型交接部位。中国地块本身又是在不同地质年代由若干小板块拼合而成,板块之间的交接地带都是构造活动比较活跃的地区。上述种种都决定了在我国、尤其是在水电资源比较集中的西南地区,新构造活动比较强烈,地质灾害、尤其是地震灾害比较严重。此外,我国的生态环境也十分脆弱。因此,在水工建设中,我们需要付出更多的努力去攻克一系列举世罕见的难关。

可喜的是,经过几代人的艰苦奋斗,我国在水电建设领域已经取得举世瞩目的成就。世界上最大的三峡水电站已经发电,金沙江、大渡河、雅砻江、乌江、红水河、澜沧江、黄河等十二大基地正在全面开发建设,其中,已建及在建的三峡、葛洲坝、二滩、龙滩、小浪底、小湾、锦屏一、二级、溪洛渡、白鹤滩等工程都是世界级的。

自第六个国民经济发展五年计划实施以来,我国充分发挥社会主义制度的优越性,对水工岩石力学中的一些前沿课题,在全国范围内组织力量进行科技攻关。涉及的主要内容有:300m级高拱坝坝基稳定研究、深埋长大引水隧洞和洞室群围岩稳定及快速施工技术研究、高边坡稳定及处理技术研究等。上述成果已经取得显著的社会、经济、环境效益,通过了国家组织的鉴定和验收,有力地提高了我国水工岩石力学发展水平。目前,从总体上看,我国水工岩石力学的理论探索和工程实践已走在世界前列,若干项目居国际领先地位。

但是,我们也应该清醒地认识到,现阶段我国在科技创新方面,与国际先进水平相比还有一定的差距。要实现从水工岩石力学大国到强国的转变,还要不断奋斗。

在今后新长征的道路上,为促进学科发展,我们将一如既往地倡导自由探索,鼓励学术争鸣,促进原始创新。为达到上述目的,定期或不定期召开学术会议无疑是一个重要途径。因此,第三届全国水工岩石力学学术会议于2010年8月在同济大学召开是我国水工岩石力学与工程界的一件盛事,同时出版论文集更是锦上添花。

这次出版的论文集《和谐地球上的水工岩石力学》包括103篇论文,是从投稿的419篇论文中择优录用的。研究内容涉及岩石力学基本理论、工程测试与监测、物理与数值模拟等;研究对象包括大坝地基、自然边坡和工程边坡、隧道和地下洞室等,既有理论研究,又有工程实践。作者除来自水工领域的科研院所、大专院校、设计、施工和运营单位以外,还有一些来自铁路、公路、采矿等工程领域的科研和技术人员,对学科综合、交叉研究大有裨益。

衷心祝愿本届水工岩石力学学术会议取得圆满成功,为促进学科发展和科技进步续谱华章,再创辉煌!

潘家铮

前言

经中国岩石力学与工程学会岩体物理与数学模拟、岩石力学测试和地面岩石工程三个专业委员会、青年工作委员会和《岩石力学与工程学报》等共同发起,由中国岩石力学与工程学会主办,同济大学承办,武汉大学、中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、长春市朝阳试验仪器有限公司、长春机械科学研究院有限公司、杭州邦威机电控制工程有限公司协办的“第三届全国水工岩石力学学术会议”于2010年8月28—29日在上海市召开,会议主题:“和谐地球上的水工岩石力学”。同时,《岩石力学与工程学报》七届四次编委会扩大会议、测试专业委员会、岩体物理与数值模拟专业委员会年会也同时召开。会议秘书处共收到投稿的学术论文419篇,本论文集收录其中的学术论文103篇,内容包括岩石基本性质和理论、岩体工程测试与监测、物理与数值模拟、地下岩石工程、坝基、滑坡和边坡工程等方面,涉及数十个当今国内大型水利水电工程和其他重大岩石工程。本届会议将为我国岩石力学与工程界的专家、学者和工程技术人员的水工岩石力学学术成果和工程经验提供良好的交流和展示机会。

因上海地处软土地区,同济大学有关岩石力学与工程的研究与土力学和软土工程相比有所减弱,而实际上研究岩石工程和致力于该领域基础研究的老师还是大有人在(约20名正、副教授)。同济大学于2010年4月成立了岩石力学与工程研究中心,该中心隶属于同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室,是同济大学从事岩石力学与工程研究的教师的科研和学术交流平台,其主要目的是加强与国内外的学术交流,促进同济大学岩石力学学科的发展,提升同济大学岩石力学与工程专业在国内外的学术地位。第三届全国水工岩石力学学术会议由同济大学承办并在同济大学召开,这是全国岩石力学与工程界的专家、学者和工程技术人员对同济大学岩石力学与工程学科发展的大力支持和鼓励,我们对此诚挚地表示感谢。

本次会议及论文集得到国家自然科学基金项目(编号:40972178, 50639090, 50579088)的资助。

编者

2010年7月5日

目 录

1. 基本性质和理论

试件形状对塑性混凝土单轴压缩性能影响的试验研究	王四巍 王 飞 程守金等(3)
单裂隙岩体渗流-传热解析解及参数敏感度分析	路 威 项彦勇(7)
岩石的多相本构方程及其物性参数与几何形态的演化	肖建华(12)
边坡岩体水岩软化作用的试验研究	张 衡 余凤先 许 模等(16)
有自由面渗流的流量控制全域迭代法	李 根 李连崇 唐春安(21)
多尺度岩体结构面直剪试验仪的研制与应用	杜时贵 罗战友 黄 曼等(26)
抚顺矿区花岗岩特性研究	周建军 边智华 郑天涯等(31)
两河口心墙堆石坝的堆石体本构特性研究	徐连民 金 伟 吴海林等(36)
Goodman 接触面单元切向刚度系数确定方法的研究	张茂会 王观琪 潘家军等(41)
对直剪试验内摩擦角的评述	杨雪强 刘文治 杨桂丽(46)
基于三剪强度准则的球形孔扩张问题的弹塑性解	陈秋南 吴多云 李 松等(50)
具有分形表面三维粗糙裂隙的渗流特性研究	吴金花 李守巨 刘迎曦(53)
模拟岩石结构面孔隙率影响因素的试验研究	黄 曼 杜时贵 罗战友等(59)
裂隙迹长与三维延展性之间的统计关系研究	马 明 于青春(63)
基于热线法的岩土试样温度场模拟研究	巩立亮 房后国 于立新等(67)
层状复合盐岩体中的细观应力场和位移场	王安明 黄志全 潘继顺等(70)
官地水电站地下水化学特征分析	尚新生(74)

2. 工程测试与监测

微震监测系统信号传输模式与网络建构	刘 超 唐春安 薛俊华等(81)
特大型复杂采空区条件下岩石力学与地压监控技术研究	王贻明 吴爱祥 沈慧明等(85)
基于数字摄像测量法岩体开挖过程空间模型及其应用	王述红 张靖杰 杨 勇等(90)
浅埋连拱隧道施工过程变形监测及控制措施	石 湛 蔡永昌 陈 峰等(94)
凉水井滑坡监测预警技术研究	陆 新 王 凯(98)
TBM 掘进隧洞岩爆实时监测系统的构建	唐烈先 唐春安 黄满斌等(102)
测定岩体变形特性的钻孔弹模计法	李光煜 高 峰(106)
OziExplorer 导航系统在工程地质测绘中的应用研究	杨家凯 李茂华 方发吉等(111)
堆场工程监测信息自动预警管理系统及应用	刘文白 关秀光 邓益兵(115)
光纤布拉格光栅应变计在 TBM 掘进中的监测研究	张纪周 张 晨 由 静(120)
梧桐庄煤矿水情预测的微震监测技术研究	白 越 王 屹(124)
以 CCD 技术为核心的地面沉降自动化监测系统及其应用	喻建军 李 宏 范良龙等(129)
“一线总线”监测系统在大体量混凝土水化热监测中的应用	胡向东 周 斌 李福清等(133)
南水北调西线工程隧洞液压枕径向加压试验研究	李志敬 房后国 袁兆华等(137)
光纤岩体裂缝计研究	吴定洪 张军民 谢全敏等(141)
300m 级高堆石坝长期变形预测	花俊杰 周 伟 常晓林等(145)
TBM 掘进隧洞微震监测中的噪音识别与剔除	周济芳 唐烈先 黄满斌等(150)

3. 物理与数值模拟

斜入射 SV 波作用下水电站地下洞室群地震反应特点	张运良 马艳晶(157)
乌江银盘水电站左岸高边坡稳定性分析	王 颂 蒋 波(163)
干河大桥岩质岸坡稳定性数值分析	廖 昕 万 川 唐 宇(167)
亭子口大坝深层抗滑稳定物理模型试验研究	姜小兰 孙绍文 朱杰兵等(172)
地质缺陷对响洪甸拱坝结构性态演变机理影响的数值模拟研究	赖道平 顾冲时 徐建军(177)
上保护层开采卸压释放作用数值模拟研究	王家臣 邵太升 赵洪宝等(182)
基于岩层产状的地下洞室围岩变形研究	汪 洋 尹健民 肖国强(187)
大型地下厂房岩锚吊车梁施工期及运行期稳定性研究	谢红强 何江达 肖明砾等(191)
重力坝坝基破碎带影响及其开挖方法研究	唐军峰 徐国元 朱自强等(196)
深埋隧洞陡倾砂板互层围岩稳定性研究	赵大洲(202)
高坝地基整体稳定地质力学模型综合法试验研究	张 林 杨宝全 陈建叶等(207)
地震条件下隧道扩大交叉断面的动力响应分析	梁 波 王志勇(212)
溶洞存在对隧道的地震动力响应的影响分析	梁 波 王志勇 刘德功(217)
基于反演参数的大断面洞室稳定性研究	耿大新 杨林德 方 焘(222)
富水厚砾石层斜井围岩破坏特征模型试验研究	杨仁树 孙中辉 岳中文等(227)
露天坑排尾对地下开采应力场影响分析研究	张电吉 陈清运 周春梅等(231)
大型调压井围岩稳定性及结构特性研究	陈子海 何江达 何姜江等(235)
水工隧洞近接施工相互影响与方案优化分析	冀建伍 雷学文(241)
安徽芜湖龙山连拱隧道钻爆法施工的动力空间效应分析	吴祥松 金锡兰 阳选堂(245)
宁夏某区地下水开采数值模拟研究	路瑞利 王红雨 方树星(250)
两种方法模拟波浪荷载对岩质边坡作用的比较	郭代培(255)

4. 地下岩石工程

浅议卡斯特纳公式的问题	王志杰(263)
小净距隧道中间土柱施工效应分析	杨会军(269)
瀑布沟高压混凝土管道群衬砌计算方法探讨	张清琼 张 团 唐碧华(273)
基于硬岩损伤劣化模型的锦屏电站工程岩爆新认识	雷升祥 高 波 肖清华(277)
大伙房输水隧洞变形特性及地应力反分析	宋 冶 唐 与 王 刚等(283)
变温及偏载耦合作用下公路隧道二次衬砌开裂机理分析	王金昌 李云飞 黄志义等(288)
基于 GA 和 v-SVR 算法的巷道围岩松动圈预测方法研究与应用	王大通 张文杰 钟天杰(292)
隧道衬砌外水压力确定与排水系统优化	祝 末 尚岳全 伍琪琳(295)
岩溶地区矿区水文地质评价与施工巷道突发性涌水预测预报	李志成 李勇刚 伍锡举等(300)
双护盾掘进机施工的长大水工隧洞关键技术应用研究	章跃林 范以田 王彦峡等(304)
龙溪隧道典型震害分析	陈贵红 李海清(308)
强余震条件下的酒家垭隧道修建技术	孙 振 李海清(313)
特大断面Ⅳ类围岩 TBM 拆卸洞室设计与施工技术研究	范以田 章跃林 王彦峡等(319)
渗流-应力耦合问题的多参数优化反演研究	刘成学 杨林德 李 鹏(323)

5. 滑坡和边坡工程

某污水坝动态稳定性分析	金福喜 何 文 张可能(331)
高边坡锚固失效效应与稳定性预警判据研究	张宏博 宋修广 李英勇等(336)
湖北核电厂岩质高边坡稳定性研究与工程设计方案	高倚山 朱海骏 吴 建等(342)
三峡库区滑坡灾害形成机制与防治措施	王尚庆 陆付民 罗 勉(348)
拱坝极限承载力影响因素及安全评价体系研究	周秋景 张国新 张 敬等(353)
考虑开挖效应的边坡稳定性评价方法研究	张新敏 蒋中明 樊 火等(357)

基于混沌时间序列的边坡变形预测方法·····	黄志全	刘汉东	王安明(361)
三峡库区万州缓倾角红层基岩滑坡启滑机制·····	简文星	王志俭	殷坤龙(365)
小秦岭金矿区采矿岩体破坏对山体稳定性的影响·····	郭新华	郭雨非	(371)
矮寨悬索桥吉首岸直立边坡块体切割与支护分析·····	张奇华	胡惠华	彭建国等(375)
锦屏一级水电站进水口引渠边坡设计研究·····	游湘	杨涛	钟卫等(380)
彭水水电站开挖边坡地质缺陷处理设计·····			卢金龙(385)
溪洛渡进水口高边坡设计与研究·····	邱云	杨怀德	郑维(390)
拉贡路山体大滑坡治理工程稳定性分析·····	高峰	格桑	胡文亮(395)
“锦屏深裂缝”现象及其工程地质意义·····	祁生文	伍法权	宋胜武等(399)
人工黏弹性边界与透射边界数值处理稳定性分析·····	王立涛	马怀发	陈厚群(405)

6. 其他

金沙江虎跳峡河段塔城水电站河床深厚覆盖层工程特性与筑坝地质问题·····	孙云志(413)
沥青路面车辙形成机理的数值模拟研究·····	叶楠 魏水平 范厚彬(416)
某地区埋深 400m 以内地温特征及其工程意义 ·····	邓争荣 曹道宁 吴树良等(420)
PRP 原位试验的 THM 耦合二维有限元分析 ·····	张玉军 张维庆(425)
基于 ALE 法的掏槽爆破三维数值模拟研究 ·····	沈才华 牛兴伟 苏静波(431)
ECAP 对止水铜片原材料的强度和韧性的影响·····	刘曙光 李文翔(436)
软土地区已通车高速公路桥头路堤沉降处理方法新设想·····	高金康 陈建 范厚彬(441)
锦屏水电站送电线路西昌至向家坝段工程地质条件遥感评价·····	牛宝茹 王俊峰 苟甲有(446)
大通河源区多年冻土冻胀特性评价研究·····	张波 盛煜 陈继(450)
软岩水土保持及植被护坡机理研究·····	熊孝波 赵其华(455)
基于相似准则的深基坑爆破参数确定·····	裴进 罗晓辉 赵行立等(462)
锦屏一级电站左岸深部裂缝对拱肩槽开挖边坡稳定性影响研究·····	张文杰 周创兵 陈益峰等(467)
长江三峡工程混凝土质量无损检测模型试验研究与应用·····	张建清 刘方文 况碧波(471)
基于信息更新和残差修正的深基坑变形灰色预测研究·····	颜敬 曾亚武 高睿(477)
无偏等维新息模型在拓宽路基沉降预测中的应用·····	叶楠 高金康 范厚彬(482)
西安市抬高护城河景观水位的探讨·····	姜规模 吴群昌(486)
拒绝水利工程不规范性的招投标活动·····	罗福海 张保军 尤迎春等(490)
水下抛石基床重锤夯实及夯锤工作性能数值分析·····	谢立全 戚健文 盛旭圆等(493)

1

基本性质 和理论

试件形状对塑性混凝土单轴压缩性能影响的试验研究

王四巍^{1,2} 王 飞³ 程守金⁴ 王勤学⁴

(1. 华北水利水电学院岩土工程与水工结构研究所, 郑州 450045; 2. 郑州大学土木工程学院, 郑州 4350002;
3. 中煤国际工程集团北京华宇工程有限公司, 北京 100120; 4. 山东省临沂市水利勘测设计院, 临沂 276000)

摘 要 分别利用立方体、棱柱体和圆柱体试件进行塑性混凝土单轴压缩试验。试件形状不同对塑性混凝土力学性能影响不同。塑性混凝土单轴压缩强度和试件形状存在很大的正相关性, 棱柱体强度和圆柱体强度分别为立方体强度的 0.89 倍和 0.91 倍。试件形状不影响塑性混凝土单轴压缩应力-应变曲线总体分布特征, 但影响曲线上关键特征点的大小, 影响曲线的饱满程度; 同样配合比, 立方体试件的曲线最为饱满, 圆柱体的次之, 棱柱体的最小, 相应的立方体上关键特征点对应的应力、应变值最大; 强度越高, 曲线上对应几何点的值越大。利用棱柱体试件求得塑性混凝土的弹性模量最为稳定, 值最大, 圆柱体次之, 立方体测试弹性模量离散性最大。试件形状对破坏形态影响较大, 棱柱体破坏出现一主斜裂面, 圆柱体出现正倒相连的圆锥体, 立方体出现正倒相连的四角锥。

关键词 形状效应, 塑性混凝土, 单轴压缩, 强度, 应力应变

1 引言

塑性混凝土是一种介于土和混凝土之间的柔性工程材料, 由膨润土、黏土、水泥、砂、石和水经搅拌、凝固而成, 具有强度高、弹性模量小、极限变形大和渗透性能小等优点, 在防渗墙工程中应用广泛。但塑性混凝土基本理论不完善、不系统, 没有试验规程和设计标准, 采用试件形状不同, 其力学性能相差较大。目前, 塑性混凝土的形状效应没有公开的文献报道, 本文参考岩石和钢纤维混凝土、碾压混凝土和全级配混凝土的形状效应文献^[1-9], 开展试件形状对塑性混凝土单轴压缩强度、变形和破坏特征的影响研究, 为今后塑性混凝土试验方法和规范的制订提供参考。

2 试验安排及试验材料

2.1 试验安排

试验采用立方体、棱柱体和圆柱体试件进行塑性混凝土单轴压缩试验, 其尺寸分别为 150mm×150mm×150mm, 150mm×150mm×300mm 和 100mm×200mm。共完成 5 组塑性混凝土配合比

试验, 每组试验立方体试件 6 个, 棱柱体试验 9 个, 圆柱体试验 3~5 个。5 组配合比其设计立方体强度为 2MPa, 3MPa, 4MPa, 5MPa 和 6MPa。每组试件浇筑养护龄期为 28d。塑性混凝土配合比编号及用料见表 1。

表 1 塑性混凝土配合比用料

编号	水胶比	1m ³ 各材料用量/kg						
		水	水泥	膨润土	黏土	砂	石子	减水剂
P2-1	1.07	300	100	80	100	770	770	
P3-1	0.80	320	150	60	190	690	690	3
P4-1	0.75	320	160	80	185	680	680	3.2
P5-1	0.75	360	220	110	150	630	630	4.4
P6-1	0.70	360	240	100	175	615	615	4.8

2.2 试验材料

塑性混凝土制作时, 采用郑州市龙岗水泥厂生产的强度等级为 42.5 的袋装普通硅酸盐水泥; 黏土由三门峡窄口水库除险加固工程料场取得, 磨细至 300 目; 砂子为河砂, 细度模数为 2.9, 属中砂; 粗骨料为 5~20mm 连续级配的碎石; 膨润土为信阳市广润膨润土有限公司生产的钠基膨润土; 外加剂选

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目资助(2009A570003)。

作者简介: 王四巍(1978—), 男, 博士生, 2000 年毕业于华北水利水电学院水文地质与工程地质专业, 讲师, 主要从事岩土力学的教学科研工作。

用河南建苑混凝土外加剂有限公司生产的建 4 减水剂。

3 强度研究

塑性混凝土单轴压缩试验采用统一加载速率,得到 28d 的单轴强度,结果见表 2(表中强度为均值)。同样配合比,试件形状不同,塑性混凝土单轴压缩强度不同,一般来说,立方体强度最大,圆柱体次之,棱柱体最小。塑性混凝土棱柱体强度、圆柱体强度和立方体强度相关关系如下:

$$\left. \begin{aligned} f_c &= 0.89 f_{cu} \\ f'_c &= 0.91 f_{cu} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 f_c ——棱柱体单轴抗压强度,MPa;
 f'_c ——圆柱体单轴抗压强度,MPa;
 f_{cu} ——立方体单轴抗压强度,MPa。

根据式(1)分别计算塑性混凝土棱柱体抗压强度和圆柱体抗压强度(表 2)。塑性混凝土棱柱体抗压强度实测值与其计算值之比的均值为 0.95、标准差为 0.10、变异系数 0.10,塑性混凝土圆柱体抗压强度实测值与其计算值之比的均值为 0.98、标准差为 0.11、变异系数 0.11。

表 2 单轴抗压强度实测值与计算值对比

编号		P2-1	P3-1	P4-1	P5-1	P6-1
强度/MPa						
f_{cu}	实测值	2.55	3.50	4.85	5.83	6.73
	计算值	1.85	2.78	4.54	5.29	6.08
f_c	实测值	2.27	3.12	4.32	5.19	5.99
	计算值	0.82	0.90	1.06	1.03	1.03
f'_c	实测值	2.05	3.23	4.00	4.75	7.00
	计算值	2.32	3.19	4.41	5.31	6.12
实测值/计算值		0.88	1.01	0.91	0.90	1.14

4 变形性能研究

4.1 应力-应变曲线研究

三种不同形状试件的单轴受压应力-应变曲线呈现类似分布特征,存在初始段反弯点、比例极限点、屈服点、峰值应力和峰值应变、极限应变、下降段反弯点等特征,见图 1—图 5。塑性混凝土受压应力-应变曲线上升段初期一般出现反弯点,尤其不预压时,从数显加载设备显示的荷载值变化情况也可以证实了这一点,2~3kN 时荷载变化缓慢,之后增加

较快,应力-应变曲线直线上升,进入屈服段后,弯曲上升,很快达到峰值,进入下降段不久,随着荷载继续增加,试件的应力快速下降,而应变则继续增加,之后应变匀速增加。

塑性混凝土单轴受压应力-应变曲线的总体分布特征不受试件尺寸形状影响,但影响到曲线的饱满程度和反弯点、比例极限点、屈服点、峰值强度、峰值应变、极限应变的值等。同一塑性混凝土配合比下,立方体试件应力-应变曲线的关键特征点(如比例极限、峰值应力和峰值应变、极限压应变等)最大,圆柱体的次之,棱柱体的最小;立方体试件的应力-应变曲线形态最为饱满,圆柱体次之,棱柱体最窄。不同配合比下,塑性混凝土强度越高,相应的立方体、圆柱体、棱柱体试件应力-应变曲线关键特征点的应力-应变值也越高。塑性混凝土配合比 P3-1 曲线最为典型,见图 1,以其为例详细说明。试验结果表明三种曲线均表现初始段弯曲压缩段、直线上升段、弯曲上升段、峰值强度、下降段等典型塑性混凝土的单轴受压应力-应变曲线特征。初始压缩弯曲段,立方体曲线最长,应变从 0 到 4×10^{-3} ,圆柱体次之,应变从 0 到 2.5×10^{-3} ,棱柱体最短,应变从 0 到 0.55×10^{-3} ;直线段长度立方体曲线的最长,圆柱体的次之,棱柱体的最短,对应的比例极限点分别为(9.1×10^{-3} , 2.9MPa)、(4.7×10^{-3} , 2.6MPa)和(1.8×10^{-3} , 2.3MPa);在比例极限点后,进入屈服阶段,曲线弯曲快速上升,很快达到峰值强度,峰值强度和峰值应变立方体试件最大,分别为 3.44MPa 和 14.21×10^{-3} ,峰值位移 2.13mm,圆柱体试件的次之,分别为 3.16MPa 和 6.15×10^{-3} ,峰值位移 1.23mm,棱柱体试件的值最小,分别为 2.72MPa 和 3.30×10^{-3} ,峰值位移 0.99mm。曲线出现峰值后,强度降低,应变继续增大,立方体试件极限应变的值最大,可达 40×10^{-3} ,圆柱体次之,棱柱体最小。

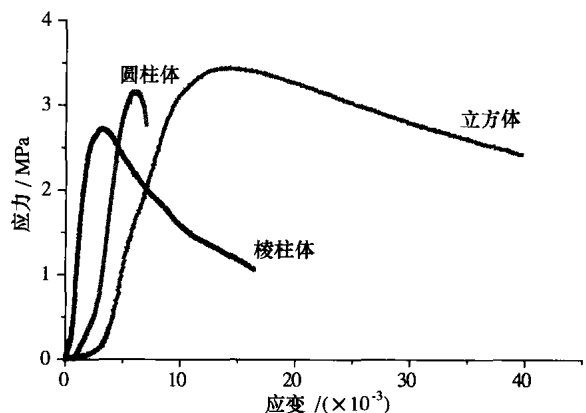


图 1 配合比 P3-1 的三种形状试件的应力-应变曲线

同样的规律也适合塑性混凝土配合比 P2-1, P4-1, P5-1 和 P6-1, 见图 2—图 5, 由于塑性混凝土试验的离散性, 出现一点误差, 基本规律和配合比 P3-1 一致。

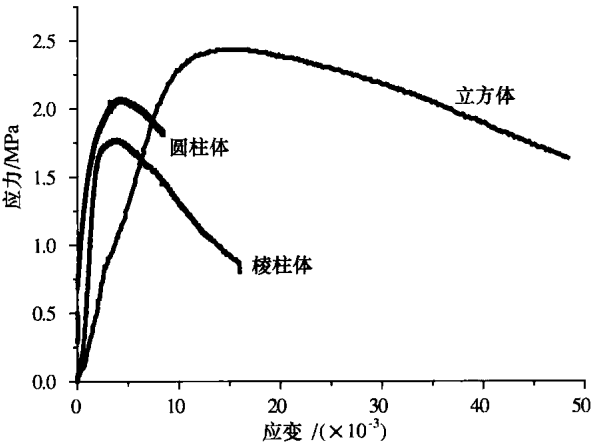


图 2 配合比 P2-1 的三种形状试件的应力-应变曲线

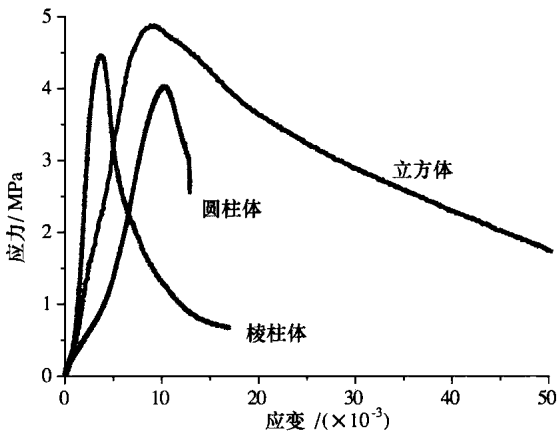


图 3 配合比 P4-1 的三种形状试件的应力-应变曲线

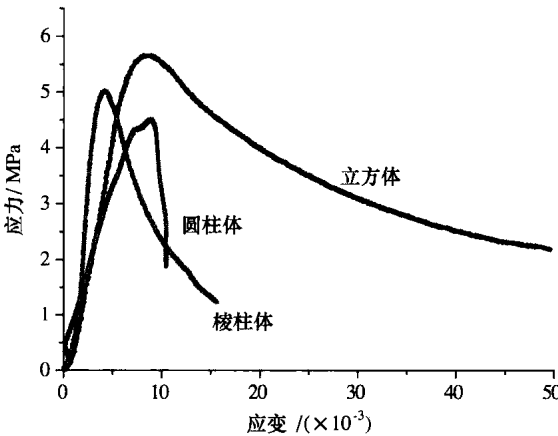


图 4 配合比 P5-1 的三种形状试件的应力-应变曲线

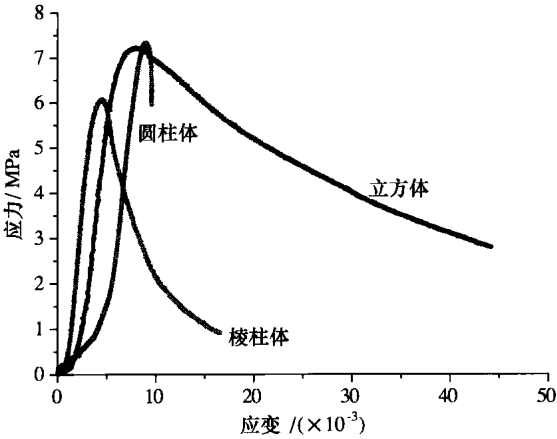


图 5 配合比 P6-1 的三种形状试件的应力-应变曲线

4.2 弹性模量研究

塑性混凝土试件形状不同, 对弹性模量值影响显著。一般而言, 棱柱体试件测试弹性模量值最大, 圆柱体的弹性模量次之, 立方体的弹性模量最小。弹性模量是单轴压缩应力-应变曲线的上升直线段斜率数值反映, 从图 1—图 5 可直接分析不同塑性混凝土配合比弹性模量的大小, 弹性模量计算方法采用峰值强度的 0.3 倍和 0.7 倍应力下对应坐标点计算, 计算结果见表 3 (表中值为均值)。棱柱体的计算值最稳定, 圆柱体次之, 立方体试件计算弹性模量稳定性最低。主要原因是立方体受承压板影响较大, 按圣维南原理, 试件加承压端面的不均布垂直应力合力为零的水平约束力只对端面附近、试件高度约为宽度的范围内应力状态产生显著影响, 试件中间部分接近的单轴受压应力状态。由于原有普通混凝土的弹性模量测试主要采用棱柱体, 相应试验方法、试验器具比较统一, 所以采用棱柱体试件测试塑性混凝土弹性模量方便实用。

表 3 不同形状试件的弹性模量

编号	E_{pr}	E_{cy}	E_{cu}
P2-1	1120	610	260
P3-1	1700	1500	510
P4-1	2200	630	1730
P5-1	2450	640	960
P6-1	3340	14200	1780

注: E_{pr} , E_{cy} , E_{cu} 分别表示采用棱柱体、圆柱体和立方体试件所得到的弹性模量。

5 破坏特征分析

5.1 立方体试件破坏特征

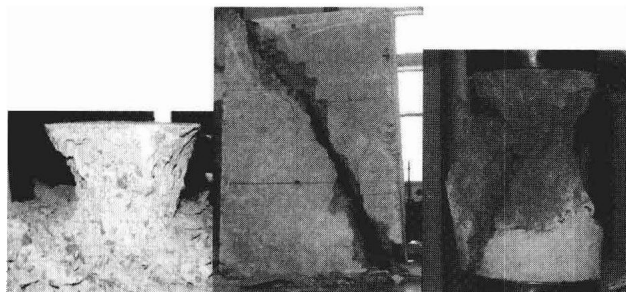
塑性混凝土立方体单轴受压破坏过程类似于普通

混凝土立方体。开始加载后,随着荷载增加,试件内应力逐渐增加,试件竖直方向压缩,水平方向膨胀。由于加载面上试件受钢压板的摩阻力约束,膨胀变形小,试件高度的中央膨胀变形最大。当试件的水平拉伸超过塑性混凝土的迹象拉应变,试件内部出现裂缝。

起初出现的裂缝靠近试件的表层,在试件高度中央为垂直方向,沿斜向往上、下端发展,至加载面处转向试件角部,形成倒相连的“八”字形。继续加载,新的裂缝逐渐往里发展,表层混凝土开始外鼓,剥落。最终的破坏形式为正倒相连的四角锥。破坏最严重的部分在试件高度的中央,上加载面因有钢板的约束而少有破坏的症状。立方体单轴破坏见图 6(a)。

5.2 棱柱体试件破坏特征

塑性混凝土棱柱体破坏过程也类似于普通混凝土棱柱体。随着压应力均匀增大,试件竖直方向缓慢压缩,水平方向不断膨胀。当塑性混凝土的压缩变形达到极限,体积不再继续减小,试件内部的微裂缝有较大发展,但试件表面尚无肉眼可看见的宏观裂缝。随后,塑性混凝土内部的非稳定裂缝开始发展,纵向应变很快增加,而体积应变开始恢复。达到棱柱体强度后不久,试件表面上出现第一条可见裂缝,此裂缝细而短,平行于受拉方向。继续试验,表面相继形成多条不连续的纵向裂缝,残余承载力下降较快,在相邻纵向裂缝间形成斜向裂缝,继续加力,斜裂缝迅速发展以至贯通整个截面,形成主斜裂缝。主斜裂缝不断发展加宽,形成一条破裂带,而试件其他部位的裂缝一般不再发展。塑性混凝土的破坏都发生在粗骨料的表面和细料(水泥、膨润土、黏土等)的交接部位,粗骨料本身没有破坏,见图 6(b)。



(a) 立方体 (b) 棱柱体 (c) 圆柱体

图 6 单轴加载破坏形态

5.3 圆柱体试件破坏特征

塑性混凝土圆柱体单轴受压破坏过程及结果类似于立方体的破坏。加载面上试件受钢压板的摩阻力约束,膨胀变形小,试件高度中央膨胀最大,初开

始裂缝靠近试件的表层,在试件高度中央为垂直方向,沿斜向往上下端发展,至加载面处向试件四周发展,形成圆锥面,继续加载,新的裂缝逐渐向里发展,表层混凝土开始外鼓、剥落,最终破坏形式为正倒相连的圆锥,结果见图 6(c)。

6 结论

试件形状对塑性混凝土单轴抗压强度、变形及破坏形状存在一定的影响:

(1) 试件形状对混凝土单轴抗压强度有一定的影响,棱柱体强度和圆柱体强度分别为立方体强度 0.89 倍和 0.91 倍。

(2) 试件形状对塑性混凝土单轴抗压应力-应变曲线分布特征影响不大,曲线一般存在初始段反弯点、比例极限、屈服点、峰值强度及峰值应变和极限应变等。但影响到曲线的饱满程度,立方体试件曲线最为饱满,圆柱体次之,棱柱体曲线最为单薄。

(3) 试件形状对塑性混凝土的弹性模量影响显著。棱柱体试件的弹性模量离散性最小,最稳定,其值最大,棱柱体次之,立方体最差。建议使用棱柱体试件测试塑性混凝土的弹性模量。

(4) 试件形状影响塑性混凝土破坏特征,立方体破坏形态未成正倒相连的四角锥,圆柱体的破坏形态为正倒相连圆锥,棱柱体的破坏形态为主斜裂面。

参考文献

- [1] 苏承东. 大理岩颗粒及试件尺寸对冲击倾向影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3750-3753.
- [2] 潘鹏志, 周辉, 冯夏庭. 加载条件对不同尺寸岩石单轴压缩破裂过程的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 2): 3636-3642.
- [3] 吕兆兴, 冯增朝, 赵阳升. 岩石的非均质性对其材料强度形状效应的影响[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 917-920.
- [4] 赵顺波, 钱晓军, 杜辉. 钢纤维混凝土基本力学性能的形状效应试验研究[J]. 港工技术, 2007(6): 34-37.
- [5] 屈彦玲. 碾压混凝土单轴抗拉强度形状效应的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(4): 45-47.
- [6] 杨忠义. 全级配混凝土强度的形状效应研究[J]. 水电站设计, 2008, 24(3): 11-14.
- [7] 冷发光, 丁威, 张仁瑜, 等. 尺寸效应对混凝土耐久性影响研究[J]. 水泥与混凝土, 2008(6): 16-19.
- [8] 王利民, 孙明远, 代祥俊, 等. 混凝土断裂工程及形状效应分析[J]. 实验力学, 2008, 23(1): 52-60.
- [9] 田瑞俊, 杜修力, 彭一江. 混凝土压缩断裂过程及形状效应的数值模拟[J]. 工业建筑, 38(4): 5-10.

单裂隙岩体渗流-传热解析解及参数敏感度分析

路 威 项彦勇

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要 基于裂隙岩体渗流-传热理论,以高放废物处置库设计概念模型为背景,考虑核废料长期放热的影响,建立了单裂隙岩体渗流-传热耦合的控制方程,采用 Laplace 变化法给出解答,并通过计算分析裂隙水及岩体的温度分布特征和参数的敏感度。结果表明,随着核废物放热时间的持续,裂隙水的温度最终会达到稳定状态,而岩石内温度场的影响范围则会不断增加;相对而言,裂隙宽度、裂隙水流流速是影响裂隙水温度的高敏感度因素,而岩石的热导率、比热和密度则为低敏感度因素。

关键词 裂隙岩体,渗流-传热耦合,解析解,参数敏感度

1 引言

从 20 世纪 50 年代人类开始和平利用核能以来,对核能发电产生的高放废物进行安全处置就一直是一项重大且难于解决的问题,并引起了国际社会的广泛关注。目前,对于核废物的处置方式,国际上公认的最合适方法是建造地下处置库,利用深部岩石(花岗岩、凝灰岩、岩盐等)洞室将其永久储存^[1-4]。但是,核废物中含有的毒性大、发热量大的核素,可能在地表水、地下水的流动以及人类活动下产生迁移,进而危害到人类的生存环境。由于核废物处置库周围岩体本身一般都存在一定数量的裂隙,而由开挖、爆破等施工过程产生的影响以及运营关闭期间核废料衰变发热和地质活动等还会使岩体产生新的较大开度裂隙。岩体节理和裂隙的渗透率远高于完整岩石的渗透率,因而岩体裂隙水的形态和运动规律将是影响处置库阻滞行为的关键。因此,开展核废物处置库裂隙岩体内渗流-传热耦合作用的研究,对分析评价处置库的阻滞行为具有重要意义。

本文根据裂隙岩体渗流-传热耦合理论,以核废物处置库设计概念模型为背景,建立单裂隙岩体渗流-传热耦合的控制方程,并采用我国核废物处置库的预选场址——甘肃北山地区岩石的基本物理参数,研究核废料放热过程中裂隙水及围岩的温度场变化特征和参数的敏感度。

2 裂隙岩体渗流-传热模型

2.1 高放废物处置库概念模型

高放核废物地下处置库是核废物处置工程的核心,也是地质处置安全和性能评价的基础,因此对于处置库结构形式的设计贯穿于处置库研发的各个阶段。但是,目前世界上尚无建成投入使用的处置库,甚至没有完成施工图设计,因此世界各国的处置库仍是一种概念设计,并且同一国家的处置库概念设计也在不断的调整和优化中。图 1 为日本所设计的处置库概念模型,国际合作项目 DECOVALEX 计划的第三期相关研究也都以此模型为基础^[1,3,4]。

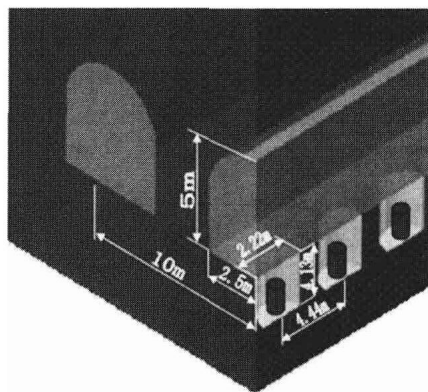


图 1 日本高放废物处置库概念模型^[1,3,4]

同时,作为处置库的载体,围岩将会对处置库的安全性起到至关重要的作用。除了受开挖和运营期间的扰动影响外,处置库围岩还将长时间受放射性

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50778014)。

作者简介:路威(1984—),男,博士,现就读于北京交通大学土木建筑工程学院,从事岩土工程方向的研究,E-mail:luw1984@2008.sina.com.cn。

辐射和衰变热的作用,因此热量的迁移和温度场的分布将成为一个重要因素。图2为日本所测定的单个乏燃料储存罐放热功率时间变化过程曲线^[4]。

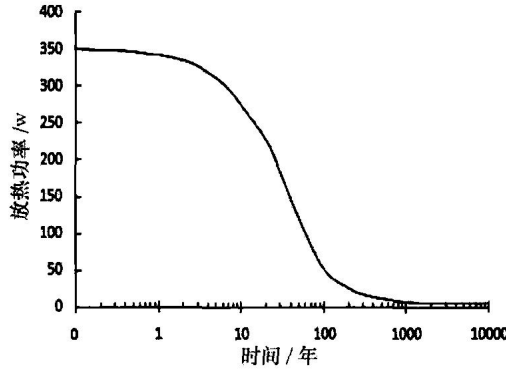


图2 日本废物罐放热时程曲线^[4]

图中可以看出,核废物储存罐的初始放热功率达到了350W,并在10年内基本维持不变;10年以后呈显著下降趋势,整个放热持续时间在几百年以上。

2.2 计算模型及解答

受地质条件、施工难度和成本的影响,各国考虑的处置库埋置深度也不尽相同,但总体上均在地下300~1000m的范围之内。在如此深度范围内,不可避免的会遇到构造破碎带、基岩裂隙等不良地质条件,而这些地层都不同程度赋存地下水。以我国高放废物处置库预选场址——甘肃北山地区为例,变质岩、岩浆岩、碎屑岩、碳酸盐岩的节理和裂隙中均赋存有基岩裂隙水^[5-8]。

基于此,结合图1所示的高放废物处置库概念模型,并假定其上方近场范围存在沿 x 坐标轴无限延伸的含水层,两侧隔水岩石无限大,相应的几何模型如图3所示。

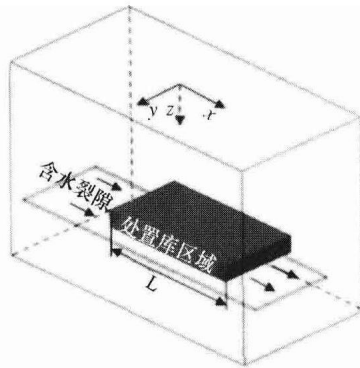


图3 处置库区域与简化裂隙岩体概念模型

假定基岩为无限大连续介质,顶部和底部绝缘,并忽略其渗透性;裂隙饱和,厚度均匀,且位于处置库近场范围。处置库核废料以恒定功率释热,考虑

含水层中沿 x 坐标轴的热对流和热传导(裂隙内沿开度方向的温度梯度为零)以及两侧隔水岩石中的纵向(沿 z 坐标轴)热传导。则上述问题可以简化为如图4所示的二维模型。

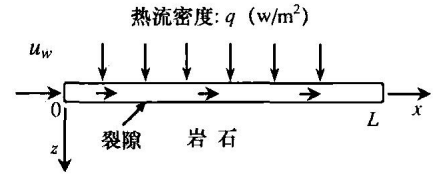


图4 二维解析模型

裂隙与岩石中渗流-传热的控制微分方程分为

$$\frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial t} + u_w \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial x} - D \frac{\partial^2 T(x, 0, t)}{\partial x^2} = \frac{K_r}{b\rho_w c_w} \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial z} \bigg|_{z=0} + \frac{q}{b\rho_w c_w} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial z^2} = \frac{\rho_r c_r}{K_r} \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

式中 $T(x, z, t)$ ——任意时刻岩体和裂隙中任意点的温度;

ρ_w, ρ_r ——水和岩石的密度;

C_w, C_r ——水和岩石的比热;

K_w, K_r ——水和岩石的热导率;

b ——裂隙宽度;

u_w 为裂隙内水流速度;

q ——核废料单位面积放热功率;

D ——水的热扩散系数;

L ——处置库长度。

对于岩体中的热传导,考虑以沿 z 方向的一维热传导为主,则方程式(2)可以简单的表示为

$$\frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial z^2} = \frac{\rho_r c_r}{K_r} \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial t} \quad (3)$$

假定围岩和裂隙水的初始温度均为 T_0 ,通过Laplace变换,可以获得方程式(1)和式(3)的解:

$$\begin{aligned} \tilde{T}(x, 0, t) &= \frac{T_0}{s} + \\ &\frac{q}{b\rho_w c_w s \left(s + \sqrt{\frac{K_r \rho_r c_r s}{b\rho_w c_w}} \right)} \left(1 - \frac{\lambda_1 e^{\lambda_1 + \lambda_2 x} - \lambda_2 e^{\lambda_2 + \lambda_1 x}}{\lambda_1 e^{\lambda_1} - \lambda_2 e^{\lambda_2}} \right) \\ \lambda_{1,2} &= \frac{u_w}{2D_t} \left[1 \pm \sqrt{1 + \frac{4D}{u_w^2} \left(s + \sqrt{\frac{K_r \rho_r c_r s}{b\rho_w c_w}} \right)} \right] \quad (0 \leq x \leq L) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{T}(x, z, t) &= \left(\tilde{T}(x, z, t) - \frac{T_0}{s} \right) \exp \left(-\sqrt{\frac{\rho_r c_r s}{K_r}} z \right) + \\ &\frac{T_0}{s} \quad (0 \leq x \leq L) \end{aligned} \quad (5)$$

计算表明,当水的温度处于10℃~190℃之间

时,其热扩散系数 D 为 $(1.37 \sim 1.72) \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^{[9]}$, 因此,如果忽略掉热扩散的影响,则解答(4)可变为

$$\tilde{T}(x, 0, t) = \frac{T_0}{s} + \frac{q}{b\rho_w c_w s \left(s + \sqrt{\frac{K_r \rho_r c_r s}{b\rho_w c_w}} \right)} \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{x}{u_w} \left(s + \sqrt{\frac{K_r \rho_r c_r s}{b\rho_w c_w}} \right) \right] \right\} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (6)$$

对式(6)和式(7)进行 Laplace 逆变换,可以得到裂隙水的温度-时间函数如下:

$$T(x, 0, t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2b\rho_w c_w \sqrt{t}}{\sqrt{\pi K_r \rho_r c_r}} \frac{b^2 \rho_w^2 c_w^2}{K_r \rho_r c_r} \text{erf} \left(\frac{\sqrt{K_r \rho_r c_r} u_w}{2b u_w \rho_w c_w \sqrt{u_w t - x}} \right) \\ - \frac{2b\rho_w c_w \sqrt{t-x/u_w}}{\sqrt{\pi K_r \rho_r c_r}} \bullet \\ \exp \left(-\frac{K_r \rho_r c_r x^2}{4b^2 \rho_w^2 c_w^2 u_w (u_w t - x)} \right) \\ + \frac{x}{u_w} \text{erfd} \left(\frac{\sqrt{K_r \rho_r c_r} u_w}{2b u_w \rho_w c_w \sqrt{u_w t - x}} \right) \\ + T_0 \quad (0 \leq x \leq u_w t) \\ T_0 \quad (x > u_w t) \end{array} \right\} \quad (7)$$

相应的,围岩的温度-时间函数如下:

$$T(x, z, t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2b\rho_w c_w \sqrt{t}}{\sqrt{\pi K_r \rho_r c_r}} \exp \left(-\frac{\rho_r c_r z^2}{4K_r t} \right) \\ + \left(\frac{b^2 \rho_w^2 c_w^2}{K_r \rho_r c_r} - \frac{b\rho_w c_w z}{K_r} \right) \text{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\frac{\rho_r c_r}{K_r t}}} \right) \\ - \frac{2b\rho_w c_w \sqrt{t-x/u_w}}{\sqrt{\pi K_r \rho_r c_r}} \\ \exp \left[\frac{-\rho_r c_r (K_r x + b\rho_w c_w u_w z)^2}{4K_r b^2 \rho_w^2 c_w^2 u_w (u_w t - x)} \right] \\ + \frac{b^2 \rho_w^2 c_w^2}{K_r \rho_r c_r} \text{erf} \left(\frac{\sqrt{\rho_r c_r} u_w (K_r x + b\rho_w c_w u_w z)}{2b u_w \rho_w c_w \sqrt{K_r (u_w t - x)}} \right) \\ + T_0 \quad (0 \leq x \leq u_w t) \\ T_0 \quad (x > u_w t) \end{array} \right\} \quad (8)$$

2.3 算例分析

采用表 1 所示的我国核废物处置库预选场址-甘肃北山地区的岩石基本参数^[10], 带入式(7)和式(8)进行计算。设 $L=100\text{m}$, $b=1\text{mm}$, $u_w=5\text{mm/s}$, $q=25\text{W/m}^2$, $T_0=25^\circ\text{C}$ 。

表 1 计算参数

$\rho_w/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$C_w/[(\text{KJ}\cdot$ ($\text{Kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1})]$	$K_w/[\text{W}\cdot$ ($\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1})]$	$\rho_r/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$C_r/[(\text{KJ}\cdot$ ($\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1})]$	$K_r/[\text{W}\cdot$ ($\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1})]$
1	4.2	0.6	2.7	0.82	3.1

图 5 为计算所得的裂隙水不同时间沿程温度变化情况。结果表明,裂隙水温度随着核废料放热时间的持续而逐渐增长,在前 10m 范围内裂隙水的温度在 0.1 年后基本达到稳定,距离 0 点越远,水温达

到稳定所需的时间越长,在 $x=100$ 处,水温的稳定时间大概需要 100 年。分析可知,式(7)的最末项决定了裂隙水所能达到的最高温度和达到稳定时所需的时间。

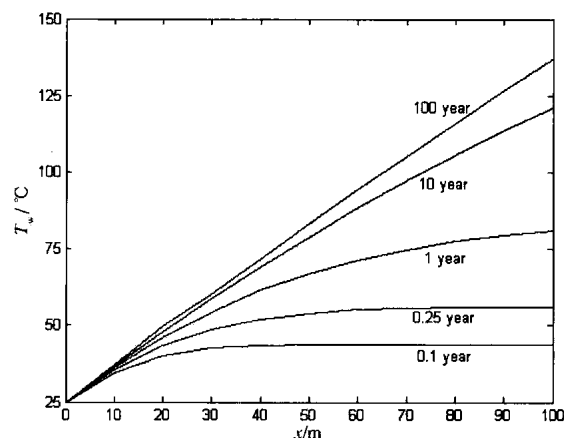


图 5 裂隙水温度分布

图 6 和图 7 分别为高放废物处置库运行 1 年和 10 年时的围岩温度场分布情况。为了便于说明,把围岩温度变化 1% 作为废物放热的扰动信号是否已经到达该处的标志,那么就可以认为 $T(x, z, t)$ 中的 z 为 t 时刻裂隙中某点温度的穿透深度,相应的 t 则可以认为是滞后时间或者惰性时间。计算结果表明,随着时间的延长,温度的穿透深度显著增加,由第 1 年的 25m 达到了第 10 年的 100m。

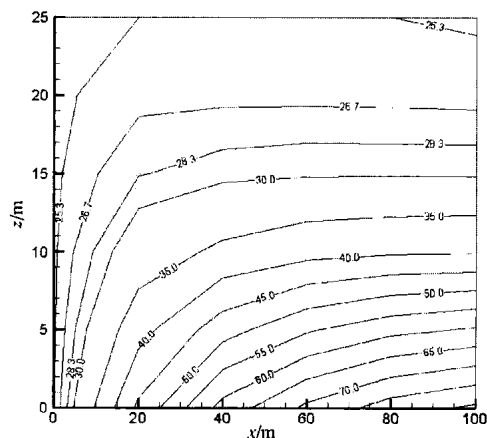


图 6 处置库运行 1 年时围岩温度场分布(单位: $^\circ\text{C}$)

3 参数敏感度分析

通过参数敏感度分析,可以得出单裂隙岩体渗流-传热模型的参数对裂隙水温度和岩石温度的影响方式和影响水平,指导有关的实验设计和理论评估。根据上面给出的解析解表达式,可以把裂隙水温度或岩石温度表示为有关参数的函数:

$$T = T(b, u_w, \lambda_A, n, \rho_w c_w, \lambda_r, \rho_r c_r) \quad (9)$$

用 $\{a\}$ 代表模型参数向量,则温度对 $\{a\}$ 的绝对