

膨胀土裂隙特征研究进展

黎 伟,刘观仕,姚 婷

(中国科学院武汉岩土力学研究所,湖北 武汉 430071)

摘要 :从膨胀土裂隙分类方法、裂隙量测方法、裂隙统计分析方法 3 个方面对已有膨胀土裂隙特征的研究方法和成果进行归纳总结,简要分析目前研究中存在的问题和不足。建议开展裂隙深度量测、统计分析方法、裂隙深度与表面特征关系的研究,以及对裂隙图像信息处理方法等方面进行深入研究。

关键词 膨胀土裂隙 量测方法 统计分析 研究进展

中图分类号 :TU443 **文献标志码** :A **文章编号** :1006-7647(2012)04-0078-05

Research progress in crack features of expansive soils//LI Wei, LIU Guan-shi, YAO Ting (*Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*)

Abstract :As a foundation of crack research, crack features of expansive soils have great significance to the stability of expansive soil slopes. In this paper, research methods and achievements of crack features of expansive soils are reviewed, with attention to the aspects of classification methods, measurement methods, and statistical analysis methods. The existing problems and defects are briefly analyzed. The authors suggest performing further studies on the measurement of crack depth, statistical analysis methods, relationships between depths and surface characteristics of cracks, crack image acquisition and information processing methods.

Key words :crack of expansive soils ; measurement method ; statistical analysis ; research progress

膨胀土是一种主要由蒙脱石等亲水性黏土矿物组成、具有明显吸水膨胀和失水收缩特性的高塑性黏土^[1]。与一般黏土相比,膨胀土具有膨胀性、裂隙性和超固结性^[2]这 3 种特性。裂隙性与膨胀性、超固结性关系密切,当含水量降低时,膨胀土发生干缩导致土体开裂,而气候干湿循环等作用导致裂隙进一步扩展。膨胀土在开挖过程中超固结应力的释放也会导致裂隙扩展。裂隙一方面破坏了土体的完整性,另一方面产生渗流,加剧了膨胀土的胀缩和裂隙扩展,因此,裂隙性是影响膨胀土边坡稳定的关键因素^[3]。Terzaghi^[4]最早注意到裂隙发育对土体强度的影响,指出裂隙是超固结黏土的结构特性,并指出裂隙对土体强度有重要影响。Gregory^[5]进一步研究发现,伦敦黏土中存在的节理和裂隙是引起滑动的原因。Skempton^[6]发现裂隙会引起应力集中,当应力超过黏土抗剪强度峰值时会导致土体破坏。在一般黏土裂隙研究的基础上,孙长龙等^[7-11]先后研究了裂隙对膨胀土强度、变形、渗透等的影响,并进一

步研究了裂隙对膨胀土边坡稳定性的影响。正是由于认识到裂隙对膨胀土物理力学性状的重要影响,膨胀土裂隙特性及定性、定量描述方法等越来越多地受到人们的重视,获得了多方面的研究进展。

1 膨胀土裂隙特征研究现状

膨胀土裂隙特征研究主要从裂隙分类方法、裂隙量测方法、裂隙统计分析方法 3 个方面进行。

1.1 膨胀土裂隙分类方法

通常情况下,岩土体中产生的无明显位移的断裂叫做裂隙^[12]。按照不同的标准,裂隙有很多分类方法,如按形成时期可以分为原生裂隙和次生裂隙;按宽度和规模可以分为微细观裂隙和宏观裂隙;按成因可以分为构造裂隙和非构造裂隙,构造裂隙按力学性质又可以分为剪性裂隙、张性裂隙及组合裂隙,非构造裂隙包括卸荷裂隙、胀缩裂隙、淋滤裂隙、风化裂隙、湿陷裂隙、冻融裂隙等^[13]。非饱和膨胀土具有裂隙发育的特点,从成因来看,因黏土矿物含

水量高而容易吸水膨胀和失水收缩,所形成的胀缩裂隙是最主要的裂隙类型^[14];另外,因开挖卸荷或失稳滑动等作用形成的张性裂隙,因不均匀膨胀及沉降形成的剪性裂隙,因水力作用形成的淋滤裂隙,因地震等活动形成的构造裂隙等,也是膨胀土中常见的裂隙形式。由于膨胀土裂隙往往是由上述几种外因共同作用产生,且各种因素作用产生的裂隙差别有时并不明显,所以一般观测到的裂隙是各种类型裂隙的共存,无法具体区别开来^[3]。从膨胀土裂隙作为研究对象的角度而言,还可以分为原状土裂隙和重塑土裂隙,前者如自然裂隙、边坡新鲜开挖面产生的裂隙、原状土室内模拟条件下产生的裂隙等,而重塑土裂隙包括原位条件下压实土产生的裂隙,室内干缩、反复干湿循环、无荷载或有荷载等人工条件下产生的裂隙,或者多种人工条件组合下产生的裂隙。

切内绍夫^[15]最先对一般黏土的裂隙进行了较系统的分类,即根据裂隙定向排列的相互关系将裂隙网络分为系统裂隙网络、多角形裂隙网络和混乱裂隙网络,而根据裂隙末端互相配置的性质和土体受裂隙切割的贯穿程度可以将裂隙网络分为连续的裂隙格局、不连续的裂隙格局和片断的裂隙格局。胡卸文等^[16]通过对具有类似冲积和冰水沉积地质特征的5个地区裂隙性黏土的现场调查,总结出黏土裂隙发育的3种较为常见的模式,即平行斜列式、水平及斜列式和羽形排列式,但这种分类对其他地质成因土的适应性有待验证。一般黏土的裂隙分类方法也能应用于非饱和膨胀土中,但对于非饱和膨胀土的特殊性,还需要针对性更强的裂隙分类方法。袁俊平^[3]参照文献^[15]的分类方法,考虑膨胀土裂隙的复杂性及不确定性,在裂隙网络分类中增加了随机裂隙网络这一新类型。

裂隙分类方法很多,侧重点各有不同,且大部分分类方法以定性为主,缺乏明确的量化手段或指标。由于膨胀土裂隙性与其典型的胀缩性和超固结性密切相关,在研究改进膨胀土裂隙分类方法时,宜结合其典型物理力学特性、应用目的及方法的实用性等方面来进行。

1.2 膨胀土裂隙量测方法

1.2.1 直接量测方法

直接量测方法是通过肉眼发现裂隙,采用钢尺等工具量测其宽度和长度,使用罗盘或量角器等量测其产状,通过素描等记录裂隙分布情况,综合得到对裂隙定性或半定量的记录。如现场量测膨胀土坡面裂隙时,选择大小为20 cm×20 cm的较平整坡面作为观测试样,把已绘制好网格线的透明塑料纸铺在坡面上,用铅笔按1:1的比例绘制裂隙分布素描

图,开挖面裂隙量测时,选择平坦、裂隙自然分布的区域,周围钉上1 m长标尺,采用手工素描结合拍照的方法进行裂隙形态的记录与描述^[3]。随着技术的发展,越来越多的研究者采用数码相机拍照来获得更加清晰的裂隙图像^[17-18],而更多先进的仪器也被应用于裂隙量测,如计算机断面成像技术法(CT法)、远距光学显微镜观测法。

CT法是利用CT机成像获得相应区域的CT数来反映物质分布情况的一种方法^[19],可以动态、定量、无损地量测岩土体微观结构的发展变化。1986年,日本首先研制成功室内受压岩样弹性波CT机,对受压岩样内部裂纹发展过程进行研究并取得丰硕成果,标志着CT法被成功引入岩石力学领域^[20],随后被引入土力学领域。在国内,蒲毅彬^[21]率先使用CT法研究冻土的结构性,卢再华等^[22]则把CT法应用于膨胀土研究,对干湿循环条件下膨胀土胀缩裂隙的演化进行研究,提出了基于CT数的裂隙损伤变量及其随累计干缩体变的变化规律。王军^[23]对干湿循环后的膨胀土样进行多个切面的CT扫描,使用多平面重构技术,形成了三轴试样的裂隙重构图,以期实现裂隙图像的三维可视化显示,这一方法对膨胀土体内部裂隙的研究提供了一个有效的途径。随着对土体裂隙研究的发展,CT法已经逐渐成为了一种主流的裂隙观测方法。然而CT法目前只能用于量测小尺寸室内土样,无法应用于原位膨胀土,且存在设备较昂贵等不足。远距光学显微镜法是另一种较新的量测方法,通过由远距光学显微镜、三轴位移平台、CCD摄像仪和视频监视器组成的图像采集系统进行裂隙试样的观测和图像采集,可非接触地、连续地、系统地观测试样在受荷状态下的微观结构变化情况^[3]。袁俊平等^[24-25]利用远距光学显微镜对膨胀土试样进行观测,定量地对膨胀土表面裂隙进行了描述。该方法能够实时获得膨胀土表面裂隙发展的清晰图像,便于后期图像分析,不过跟现场数码成像存在着相似的不足,即无法观测到膨胀土内部裂隙的发展状况。

1.2.2 间接量测方法

电阻率法和超声波法均属于间接量测方法。电阻率法利用测试电流通过土体时所呈现的电阻大小来间接反映土体的内部结构^[26],应用该方法的前提是裂隙发育程度不一致的岩土体具有电阻率差。Archie^[27]最早提出了仅适用于饱和和无黏性土的电阻率模型,Waxman等^[28]提出了适用于非饱和和黏性土的电阻率模型。电阻率法也被应用于膨胀土,龚永康等^[29]采用电阻率法对室内膨胀土裂隙的发育进行了研究,提出用电导率反映土体裂隙发育有一定

的可行性,但对电极的大小、导线长度、土体类型等影响因素尚需进一步的探讨和完善。Anna 等^[30] 研究认为电阻率是监测一定范围内土体裂隙动态发展的有价值工具。超声波法一般采用超声波脉冲透射法量测岩土体内的超声波声速^[31],利用不同的超声波声速反映岩土体内部裂纹的发展状况。赵明阶等^[32-33] 利用超声波法对岩石裂纹进行了研究,运用超声波声速定义了损伤变量,用其表述了岩石微裂纹的宏观力学效果。超声波法理论上可推广到现场观测,但目前尚处于研究阶段,还未见到超声波法应用于膨胀土裂隙量测的报道。

电阻率法和超声波法有助于了解土体表面和内部的裂隙发育状况,但还是必须结合直接量测方法进行标定或校核,且通过单一的指标如电阻率或者超声波声速等的变化无法对裂隙进行准确描述,将间接量测方法与直接量测方法相结合是一种发展趋势。

1.2.3 裂隙深度量测方法

以上研究针对裂隙的平面量测比较多,对于混凝土中裂隙的深度常用凿出法和钻孔取芯法等量测^[34],但上述方法能否应用于膨胀土尚未见到有关报道。Yesiller 等^[35] 提到使用带刻度的细钢丝来量测黏土裂隙的深度,但可操作性欠佳。可以说暂时还没有较为方便可靠的直接量测和描述方法,目前大多采用间接手段或建立模型对其进行量测和描述。Picornell 等^[36] 开展了现场量测膨胀土收缩裂隙深度的研究,提出根据声波通过土体表面时因裂隙而导致的时间增量来确定裂隙深度的方法。更多的研究从理论方面展开,如 Morris 等^[37] 建立了裂隙深度、土体特性和给定吸力分布之间的理论关系,提出了 3 种预测土体开裂深度的方法;Chertkov^[38] 提出利用表面裂隙平均间距来估算裂隙发育区深度以及裂隙最大深度。姚海林等^[39] 推导出膨胀土裂隙深度的表达式,求得在地下水位趋于无穷大时的裂隙扩展深度的极值。潘宗俊等^[40] 从理论分析着手,采用 Mitchell 公式和裂隙扩展深度方程确定安康地区膨胀土大气影响深度和裂隙开展深度。李培勇等^[41] 得出了同时考虑土体有效黏聚力和有效内摩擦角等参数的非饱和膨胀土裂隙开展深度的线弹性理论关系式。以上通过理论推导得出的裂隙深度预测值往往包含了不少人为假设,与裂隙真实开展深度存在不同程度的差别,直接或间接量测裂隙深度方法的研究亟待深入。

1.3 膨胀土裂隙的统计分析方法

膨胀土裂隙可用影响其工程力学性质走向、倾角、宽度、深度、长度以及间距等主要几何要素来度量。

1.3.1 基于人工量测的统计分析

裂隙的走向、倾向是膨胀土非常重要的裂隙几何特征。在一般岩土体裂隙研究中,王景明等^[42] 和李志辉等^[43] 分别利用玫瑰花图和赤平极射投影法对现场测得的裂隙走向(倾向)进行了统计,清晰地表示了裂隙走向(倾向)的优势方向,但上述方法在膨胀土裂隙统计中未见应用报道。天然情况下膨胀土裂隙分布大多呈混乱型裂隙网络,对裂隙的走向、倾角等方向性要素的量测较为繁杂。为了综合反映裂隙的分布特征和影响,通常采用裂隙率作为裂隙度量分析指标^[3]。裂隙率可以定义为单位面积上的裂隙面积,或单位面积上的裂隙长度,或单位面积上的分块平均面积,以及单位面积上的分块个数等^[44]。以上定义的裂隙率都能通过一定方式来反映裂隙的发育程度,但问题在于如果仅基于人工量测或统计分析,一些微小裂隙往往被忽略,导致裂隙率的计算不够精确。

1.3.2 基于图像处理的统计分析

随着数码摄影和计算机技术的发展与结合,基于图像处理的膨胀土裂隙统计分析方法可能更可靠和方便。研究者将获取于光学显微镜、CT 成像等的光栅图像,采用各种图像处理方法进行统计分析,如袁俊平等^[24-25] 利用灰度熵对裂隙图像进行分析,结果表明裂隙图像的灰度熵能很好地表征裂隙的发育程度,适合作为膨胀土裂隙发育程度的度量指标。尹小涛等^[45] 利用基于形态学的图像处理技术对裂纹进行提取、几何量测及空间描述,对于推动岩土工程 CT 图像的定量化描述具有一定意义。李雄威等^[17-18] 通过室外数码成像,基于 Matlab 软件二值化像素统计方法对膨胀土表面裂隙的发展规律进行了分析;张家俊等^[46] 认为单纯依靠分析裂隙的光栅图像是很难具体计算出与裂隙各几何要素有关的裂隙率的,提出使用矢量图技术提取及分析裂隙的几何要素,该方法具有无极缩放、不失真的优点。

1.3.3 分形几何统计分析

分形几何是另外一种统计分析方法。胡卸文等^[47] 研究了黏土体裂隙效应中存在的分形几何现象,表明裂隙空间展布、极点分布以及土样强度的尺寸效应均具有分形结构。易顺民等^[48] 将分形理论应用于膨胀土裂隙结构的分形特征的研究中,结果表明,膨胀土裂隙网络和裂隙形态特征具有很好的统计自相似性,膨胀土裂隙的力学效应特征同膨胀土的抗剪强度指标有很好的相关性。陈尚星^[13] 利用摄影确定膨胀土裂隙分维数,发现分维数随裂隙密度和裂隙宽度的增大而增大,并用分形插值法很好地模拟了膨胀土裂隙的细部特征,并结合随机网

络理论模拟了土体裂隙网络。包惠明等^[49]进一步研究了干湿循环条件下膨胀土裂隙的分形,计算不同循环次数下试样表面裂隙区的分维数,获得膨胀土试样在整个干湿循环过程中的裂隙分维变化规律。目前,分形理论在岩土工程中的应用越来越广泛,取得了很多的成果,不过大多数的研究仅限于分析岩土体裂隙的分形特征以及分维数与岩土体强度等的相关性,较少涉及基于分形理论的本构关系和强度理论等的研究。

1.3.4 其他分析方法

实际上,裂隙的开展和分布规律非常复杂,具有很强的不确定性,由此袁俊平^[3]提出了一个非饱和膨胀土裂隙概化模型,将膨胀土裂隙分布简化为水平剖面 and 竖直剖面 2 个方向不同裂隙网络的叠加,即对水平剖面上的混乱型裂隙网络进行等效均化处理,对竖直剖面上各向异性系统型裂隙网络使用蒙特卡罗方法进行随机模拟。这一模型为膨胀土裂隙研究开辟了一条有益的新思路。

2 展 望

膨胀土裂隙特征作为裂隙研究的基础,对膨胀土边坡稳定性研究有着重要的作用。综合而言,目前的裂隙特征研究虽然取得了一些进展,但尚未获得广泛认同的关键成果,建议在以下几个方面继续开展研究:①开展裂隙深度量测、统计分析方法及裂隙深度与表面裂隙特征关系的研究;②加强裂隙特征的 CT、数码等图像获取方法及裂隙图像信息处理方法的研究;③由于电阻率和超声波法等裂隙间接量测方法实用方便,具有良好的前景,建议加强电阻率、超声波声速与膨胀土裂隙特征和物理力学性状之间关系的研究。

参考文献:

[1] 谭罗荣,孔令伟.特殊岩土工程土质学[M].北京:科学出版社,2006.

[2] 徐永福,傅德明.非饱和土结构强度的研究[J].工程力学,1999,16(4):73-77.

[3] 袁俊平.非饱和膨胀土裂隙的量化模型与边坡稳定性研究[D].南京:河海大学,2003.

[4] TERZAGHI K. Stability of slopes of natural clay [C]// Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge:Harvard University,1936:161-165.

[5] GREGORY C H. On railway cutting and embankments with an account of some slips in the London clay, on the line of the London and Croydon railway[J]. Minutes of the Proceedings, 1844,3(1):135-145.

[6] SKEMPTON A W. Long-term stability of clay slopes [J]. Geotechnique,1964,14(2):77-102.

[7] 孙长龙,殷宗泽,王福升,等.膨胀土性质研究综述[J].水利水电科技进展,1995,15(6):10-13.

[8] 姚海林,郑少河,陈守义.考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2001,23(5):606-609.

[9] 袁俊平,陈剑.膨胀土单相浸水膨胀时程特性试验与应用研究[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(5):547-551.

[10] 包承纲.非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J].岩土工程学报,2004,26(1):1-15.

[11] 殷宗泽,徐彬.反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2011,33(3):454-459.

[12] 朱志澄.构造地质学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.

[13] 陈尚星.基于分形理论的土体裂隙网络研究[D].南京:河海大学,2006.

[14] 缪林昌,刘松玉.论膨胀土的工程特性及工程措施[J].水利水电科技进展,2001,21(2):37-40.

[15] 切尔内绍夫.水在裂隙网络中的运动[M].盛志诒,田开铭,译.北京:地质出版社,1987.

[16] 胡卸文,李群丰,赵泽三,等.裂隙性黏土的力学特性[J].岩土工程学报,1994,16(4):81-88.

[17] 李雄威,冯欣,张勇.膨胀土裂隙的平面描述分析[J].水文地质工程地质,2009(1):96-99.

[18] 王军,龚壁卫,张家俊,等.膨胀岩裂隙发育的现场观测及描述方法研究[J].长江科学院院报,2010,27(9):74-78.

[19] 陈正汉,方祥位,朱元青,等.膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J].岩土力学,2009,30(1):1-10.

[20] 杨建辉,张志海.岩石力学 CT 技术概述[J].河北煤炭建筑工程学院学报,1995(2):66-69.

[21] 蒲毅彬.CT 用于冻土实验研究中的使用方法介绍[J].冰川冻土,1993,15(1):196-198.

[22] 卢再华,陈正汉,蒲毅彬.原状膨胀土损伤演化的三轴 CT 试验研究[J].水利学报,2002,33(6):106-112.

[23] 王军.膨胀土裂隙特性及其对强度影响的研究[D].广州:华南理工大学,2010.

[24] 袁俊平,殷宗泽,包承纲.膨胀土裂隙的量化手段与度量指标研究[J].长江科学院院报,2003,20(6):27-30.

[25] 袁俊平,殷宗泽.膨胀土裂隙的量化手段与强度性质研究[J].水利学报,2004,35(6):108-112.

[26] 查甫生,刘松玉.土的电阻率理论及其应用探讨[J].工程勘察,2006(5):10-15.

[27] ARCHIE G E. The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Petroleum Technology,1942,146(1):54-61.

[28] WAXMAN M H, SMITS L J M. Electrical conductivity in oil bearing shaly sand [J]. Society of Petroleum Engineers Journal,1968,8(2):1577-1584.

- [29] 龚永康,陈亮,武广繁. 膨胀土裂隙电导特性[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(3):323-326.
- [30] ANNA K G, ACWORTH R I, BRYCE F J K. Detection of subsurface soil cracks by vertical anisotropy profiles of apparent electrical resistivity[J]. Geophysics,2010,75(4):85-93.
- [31] 翟小洁. 岩石在单轴受荷条件下的超声波特性研究[D]. 成都:成都理工大学,2008.
- [32] 赵明阶,吴德伦. 单轴受荷条件下岩石的声学特性模型与实验研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):540-545.
- [33] 赵明阶,徐蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(6):720-722.
- [34] 刘俊岩. 建筑基坑工程监测技术规范实施手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [35] YESILLER N, MILLER C, INCI G, et al. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils[J]. Engineering Geology,2000,57(1):105-121.
- [36] PICORNELL M, LYTTON R L. Field measurement of shrinkage crack depth in expansive soils[J]. Transportation Research Record,1989:121-130.
- [37] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal,1992,29(2):262-277.
- [38] CHERTKOV V Y. Using surface crack spacing to predict crack network geometry in swelling soils[J]. Soil Sci Soc Am,2000,64(6):1918-1921.
- [39] 姚海林,郑少河,葛修润,等. 裂隙膨胀土边坡稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(增刊2):2331-2335.
- [40] 潘宗俊,谢永利,杨晓华,等. 基于吸力量测定膨胀土活动带和裂隙深度[J]. 工程地质学报,2006,14(2):206-211.
- [41] 李培勇,杨庆,栾茂田,等. 非饱和膨胀土裂隙开展深度影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1):2968-2972.
- [42] 王景明,王君. 冀中南黄土潜蚀地貌与黄土构造节理[J]. 地理研究,1994,13(1):90-93.
- [43] 李志辉,龚杰. 露天裂隙发育岩体地质构造调查及评价的研究与应用[J]. 金属矿山,2009(增刊1):637-642.
- [44] 廖济川. 开挖边坡中膨胀土的工程地质特性[C]//非饱和土理论与实践学术讨论会文集. 北京:中国土木工程学会土力学及基础工程学会,1992:102-117.
- [45] 尹小涛,党发宁,丁卫华,等. 岩土CT图像中裂纹的形态学测量[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):539-544.
- [46] 张家俊,龚壁卫,胡波,等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律实验研究[J]. 岩土力学,2011,32(9):2729-2734.
- [47] 胡卸文,王治平. 黏土体裂隙效应中的分形几何现象[J]. 四川水力发电,1998,17(1):22-26.
- [48] 易顺民,黎志恒,张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J]. 岩土工程学报,1999,21(3):294-297.
- [49] 包惠明,魏雪丰. 干湿循环条件下膨胀土裂隙特征分形研究[J]. 工程地质学报,2011,19(4):478-481.

(收稿日期 2011-12-15 编辑 骆超)

(上接第13页)

c. 虹吸破坏后驼峰两侧水体平稳性存在较大差异. 虹吸破坏阶段空气由真空破坏阀进入驼峰后驼峰左侧(反弧段)水体在压力前池水位所在高程附近振荡,需较长时间达到平稳. 驼峰右侧(渐变段和压力管道)水体在压力管道关闭后的较短时间内达到平稳,虹吸破坏时间只需数十秒。

参考文献:

- [1] 李百齐. 虹吸管出水断流装置的流体力学相似分析[J]. 船舶力学,2003,7(5):39-44.
- [2] 袁乃荣. 虹吸现象的新解释[J]. 物理教学探讨,2001,19(5):5-6.
- [3] 陈革强,施俊跃,卢健国,等. 水库虹吸管驼峰真空度机理分析与控制[J]. 水利技术监督,2008(4):50-51,73.
- [4] 董毅,汤正军,田明云. 虹吸式轴流泵站抽真空启动探讨[J]. 水泵技术,2000(1):32-33.
- [5] 黄煌. 虹吸式进水口在三坝水电站技改工程中的应用[J]. 中国农村水利水电,2005(9):78-82.
- [6] 潘正林,程云峰. 中低水头引水式电站采用虹吸式进水技术[J]. 小水电,1996(1):21-25.
- [7] 沈晓燕. 须江水电站虹吸式进水口的设计[J]. 浙江水利科技,2000(4):40-41.
- [8] 韩伯鲤. 水电站虹吸式进水口的设计与分析[J]. 武汉水利电力学院学报,1980(4):35-42.
- [9] 黄智敏,朱红华,陆汉柱,等. 虹吸溢洪道水力特性试验研究[J]. 湖北水力发电,2002(3):30-33.
- [10] 顾谦甫,卞祖铭. 水电站虹吸式进水口试验研究[J]. 浙江水利科技,1985(2):1-4.
- [11] 党媛媛,韩昌海. 进水口漩涡问题研究综述[J]. 水利水电科技进展,2009,29(1):90-94.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:1-17,113-142.
- [13] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. J Comput Phys,1981,39(3):201-225.

(收稿日期 2011-12-15 编辑 骆超)