

文章编号: 1005-0930(2018)01-0132-013 中图分类号: TU443; TV641 文献标识码: A  
doi: 10.16058/j.issn.1005-0930.2018.01.012

# 土质心墙坝水力劈裂试验研究进展

王军玺<sup>1</sup>, 陈金淑<sup>2</sup>, 陶虎<sup>1</sup>, 石喜<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 综述了国内外关于土质心墙水力劈裂问题的典型试验及其研究成果, 并进行了相应的分析和讨论. 研究表明: 试验研究在土质心墙水力劈裂研究方面具有不可替代的作用; 许多研究者根据试验结果提出了土质心墙水力劈裂破坏的力学机理和相应的水力劈裂发生判断准则, 但尚无一套有效的试验方法、手段能够对土质心墙水力劈裂的发生条件和破坏过程进行模拟; 将土工离心模型试验技术应用于初次蓄水土质心墙坝的水力劈裂问题研究是可行的; 可采用平面模型离心试验模拟坝体水力劈裂破坏断面, 验证土质心墙水力劈裂的张拉破坏机理的合理性及其综合判断准则的有效性; 心墙内外水压力的分布与变化, 应力拱效应, 以及应力诱导各向异性是土质心墙水力劈裂试验研究的主要内容, 试验中应重点关注库水位上升过程中心墙上游面中上部的应力状态. 研究结论也为今后的土质心墙水力劈裂问题的试验研究提供了有益的方向.

**关键词:** 水力劈裂; 室内试验; 现场试验; 模型试验; 土质心墙坝

水力劈裂系指由于水压力的作用在岩体或土体中引起裂缝的发生与扩展的一种物理现象<sup>[1]</sup>. 土质心墙坝工程中, 如果发生水力劈裂, 则心墙内产生贯穿性的裂缝, 形成隐秘的集中渗漏通道, 导致心墙的破坏, 甚至整个大坝的溃决, 其后果往往是灾难性的.

1976年, Teton心墙坝在初次蓄水初期失事, 并被事故调查组认定为水力劈裂破坏以后, 土质心墙坝的水力劈裂问题日益受到坝工界的重视. 近年来, 随着高坝建设的发展, 土质心墙的水力劈裂问题尤为突出, 已成为亟待解决的关键技术问题之一. 弄清土质心墙水力劈裂破坏的力学机理, 建立其合理的、有说服力的发生判断准则迫在眉睫.

针对土质心墙的水力劈裂问题, 国内外学者采用试验研究、数值模拟、理论分析等方法、手段进行了较为广泛的研究. 其中, 试验研究是心墙水力劈裂问题研究的最重要且最直接的途径, 具有不可替代的地位. 本文从土质心墙坝水力劈裂问题试验研究的几个热点问题着手, 介绍了当前土质心墙坝水力劈裂问题试验研究的进展, 并结合其中存在的问题与不足, 指出了今后试验研究工作的主要趋势.

## 1 典型土质心墙水力劈裂试验回顾

长期以来, 众多学者对土质心墙水力劈裂问题进行了大量的室内试验、现场试验、模

收稿日期: 2016-01-13; 修订日期: 2016-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469012); 长江学者和创新团队发展计划滚动资助(IRT\_15R29)

作者简介: 王军玺(1974—2017), 男, 博士, 副教授. E-mail: wangjunxi080101@126.com

型试验研究,取得许多有价值的研究成果.

### 1.1 室内试验

早在 1973 年, Nobari 等<sup>[2]</sup>首次对中空圆柱体试样进行了三轴水力劈裂试验,试验研究表明:水力劈裂是发生在试样小主应力面上的张拉破坏;劈裂面可能是竖直面也可能是水平面,取决于试样的渗流状态和应力状态;裂缝在试样有效小主应力最先达到土体抗拉强度的位置产生,并逐渐扩展到整个断面. Alfaro 等<sup>[3]</sup>应用三轴仪和固结仪,对预设竖直或水平裂缝的厚壁圆筒试样进行了水力劈裂试验,再次证明水力劈裂属张拉破坏,并认为预设裂缝会降低劈裂压力,但不影响裂缝的扩展方向. 与之相反, Mori 等<sup>[4]</sup>同样采用黏性土厚壁圆筒试样进行了水力劈裂试验,他们则认为水力劈裂属剪切破坏,而且只要水压力加载速率足够大,试样的大小及圆孔周边的局部裂缝、圆孔内液体的黏度等,对劈裂压力的影响就可以忽略不计. 然而,丁金粟等<sup>[5]</sup>应用多功能滚压三轴仪,严格控制中空圆柱体试样的应力边界条件,在竖直方向对试样施加拉力(或压力),进行了渗流力作用下压实黏性土的水力劈裂试验,研究表明,在不同初始主应力比条件下,试样既可表现为应力达到土体抗拉强度之后的张拉破坏,也可表现为由摩尔-库伦理论所控制的塑性剪切破坏.

此外, Lo 等<sup>[6-7]</sup>采用压实含砂粉质黏土圆柱体试样进行了三轴水力劈裂试验. 试验分饱和固结试验(SC)、饱和不固结试验(SU)、非饱和不固结试验(UU) 3 类进行. 通过以上 3 类试验,研究了固结度和饱和度对劈裂压力的影响. 试验研究表明:相同围压条件下,劈裂压力试验值饱和固结试验(SC)最大、非饱和不固结试验(UU)次之、饱和不固结试验(SU)最小,但试验实测劈裂压力均大于小主应力. Au 等<sup>[8]</sup>应用改进的固结仪,在不同固结状态下,对底部中心插管的高岭土圆柱体试样进行了水力劈裂试验,分析了边界条件、超固结比等因素对劈裂压力的影响. Hassani 等<sup>[9]</sup>应用三轴仪对粘性土厚壁圆筒试样进行了水力劈裂试验,试验结果表明:劈裂压力与围压之间成线性关系;饱和试样的劈裂压力小于非饱和试样的劈裂压力;随饱和试样的制备含水量、试验历时的增加,劈裂压力均减小.

与此同时, Yanagisawa 等<sup>[10]</sup>对中空方形试样进行了真三轴应力状态下的水力劈裂试验,研究表明:劈裂压力是试样大、小主应力以及不固结不排水剪切强度指标的函数,并随大主应力的增大而减小;劈裂面与大主应力面正交. 曾开华<sup>[11]</sup>在真三轴仪中对中空圆孔长方体试样进行了水力劈裂试验,揭示了水力劈裂的渐进张拉破坏力学机理,得到了小主应力和中主应力对劈裂压力的影响规律. Jaworski 等<sup>[12]</sup>采用 Teton 坝心墙料的重塑土和原状土立方体试样,进行了试样内钻孔和“岩石节理”(预设裂缝)等一系列真三轴水力劈裂试验,试验结果表明,当孔内注水量突然增加时,试样发生水力劈裂破坏,并且绝大多数劈裂面都与小主应力面平行.

### 1.2 现场试验

Teton 坝失事后,事故调查组在该坝上钻孔,将水注入内套管,进行了现场水力劈裂试验<sup>[13]</sup>. 通过观察内套管内水的回落率来确定渗水速度,回落率显著增大则认为发生了水力劈裂. 试验结束后,开挖显示大多数劈裂面与坝轴线正交,仅有少数裂缝是水平的. 通过现场试验,该调查组认为水力劈裂破坏发生在小主应力与土体抗拉强度之和小于库水压

力的区域. Morgenstern 等<sup>[14]</sup>通过现场钻孔灌浆试验,探讨了水力劈裂破坏的力学机理.他们认为:水力劈裂发生前,土体中存在某一应力状态(初始应力);当孔隙水压力上升,相应地有效应力圆左移,并与有效摩尔-库伦强度线相切时,水力劈裂发生;此时的有效应力可能是拉应力,也可能是压应力,这取决于土体的抗剪强度和初始主应力的的大小. Wong 等<sup>[15]</sup>在加拿大西南部 Battle 湖附近的冰碛土竖直钻孔中进行了水力劈裂试验,试验结果表明,劈裂压力不仅与劈裂产生位置的上覆土压力有关,还与土体的强度、既有的裂缝或缺陷等有关.

### 1.3 模型试验

Bjerrum 等<sup>[16]</sup>在模型槽内进行了压实粉质软黏土水力劈裂试验,试验中,将测压管插入土体,通过测压管施加水压力,并观测流量变化,试验结果显示测压管底部以上 10cm 处土体产生了水平裂缝,降压后裂缝愈合. Schober 等<sup>[17]</sup>进行了模拟深切河谷中土石坝应力状态的常重力模型试验,试验结果显示,因为拱效应,坝体下部竖向应力明显减小. 张丙印等<sup>[18]</sup>研发了用以研究水体沿渗透弱面渗入土体,形成水压楔劈效应,诱发水力劈裂的新型试验装置;采用糯扎渡土石坝心墙的混合土料,模拟心墙上游面的应力和变形条件,再现了水力劈裂现象;认为心墙中可能存在的渗透弱面,以及库水位快速上升过程中所产生的渗透弱面水压楔劈效应是心墙水力劈裂发生的重要条件. 冯晓莹等<sup>[19]</sup>采用直立土柱模型进行离心试验,模拟心墙水力劈裂的产生条件和发展过程,试验结果表明,当外水压力大于竖向土压力时,土柱产生了水力劈裂,并最终发生渗透破坏. 据此,他们认为:拱效应所导致的心墙土压力小于库水压力是心墙水力劈裂破坏产生的根本原因;水力劈裂始于土体的张拉破坏,而水力劈裂的进一步发展,则取决于土体的渗透特性、水力梯度、应力状态、局部缺陷等诸多因素.

## 2 存在问题及进一步研究方向

从当前土质心墙坝水力劈裂破坏试验研究的方法、手段及其研究成果来看,存在以下几方面的问题.

### 2.1 试验方法和手段

**2.1.1 室内试验** 室内试验的试验条件容易控制、边界条件明确、应力状态清楚、可重复性强、费用相对较低,因此,室内试验是土质心墙坝水力劈裂研究最主要的手段. 早期的试验研究工作主要集中在室内试验.

室内水力劈裂试验大多数是应用常规三轴仪对圆筒形或圆柱体试样进行的,也有少数是在真三轴应力状态下对方形(包括长方体和正方体)试样进行的. 但劈裂压力都是通过预设圆孔或裂缝施加的,施加的方式分为等压力增量和等流量 2 种. 以圆孔或裂缝内水压力的突然减小和流量的突然增大分别作为 2 种加压方式水力劈裂现象产生的判据. Atkinson 等<sup>[20]</sup>采用中空圆柱体试样的三轴不排水试验研究了土体的水力劈裂特性,研究表明,心墙与试样的水力劈裂之间存在差异,主要在于边界条件(水压力的作用方式)和应力状态的不同,水压力应该施加在试样的外表面,而不是预设于试样中心的孔洞或裂缝. 因此,室内试验的研究成果很难用于心墙水力劈裂产生机理的判断. 此外,坝体填筑和水库蓄水过程(加载过程)中,心墙土体的应力路径比较复杂,根据三轴试验中试样

的变形特性概化实际心墙土体的复杂特性,误差较大,难以准确确定心墙土体的应力状态.孙亚平认为<sup>[21]</sup>,心墙土体在库水压力作用下,会经历复杂的应力重分布,水力劈裂破坏发生与否应该由调整后的应力状态决定.因此,用于研究土质心墙水力劈裂试验的试样其边界条件、应力路径、应力状态应能够近似模拟蓄水前后心墙的实际情况.

室内水力劈裂试验的试样少数在其内部预设了裂缝或缺陷<sup>[22]</sup>,大多数则是完整的均质的<sup>[5]</sup>.黄文熙从理论的角度给出了水力劈裂的定义<sup>[1]</sup>,即水力劈裂是由于水压力的抬高在岩土体中引起裂缝的发生与扩展的物理现象;目前,这一定义已经得到公认.因此,水力劈裂是水压力作用下,土体裂缝的起裂、扩展、贯通的过程.从土体的特性来看,其裂缝的起裂,必然存在剪切破坏或张拉破坏,而裂缝的扩展,应该有作用于裂缝表面的扩张力,即水压楔劈效应.试样内部预设裂缝或缺陷的水力劈裂试验是为了验证渗透弱面水压楔劈效应.张丙印等<sup>[18]</sup>认为,渗透弱面是施工过程中,由于偶然掺入的堆石料、未充分压实的局部土层、或者细小裂缝等所造成的心墙上游面渗透系数相对较大的区域.其实,所谓渗透弱面本质上也就是心墙上游面的表面裂缝,在坝体填筑过程中,心墙表面裂缝经施工机械碾压自然消失,贯穿裂缝是工程所不容许的.事实上,两侧的坝壳对居中部位的心墙作用有较大的土压力.此外,造成心墙土体开裂的因素有很多:比如,由于岸坡坡度的突变所产生的不均匀沉降是导致坝体横向裂缝产生的主要因素之一<sup>[23-24]</sup>,而只有在水压力的作用下所产生的贯穿裂缝才能称之为水力劈裂.

室内水力劈裂试验的试样少数为非饱和的<sup>[12]</sup>,大部分为饱和的<sup>[5]</sup>.土石坝工程中,土质防渗体的填筑标准以压实度和最优含水率作为设计控制指标.现场实测资料分析表明:土质心墙在填筑及初次蓄水过程中处于非饱和状态<sup>[25]</sup>,而心墙坝工程的水力劈裂破坏都发生在初次蓄水初期<sup>[26-27]</sup>,并且只有当心墙土体为非饱和状态时,水体进入裂缝后水压楔劈效应才容易形成,裂缝才有可能扩展、贯通,水力劈裂破坏才有可能发生<sup>[26,28]</sup>,所以心墙土体的低饱和度是影响其水力劈裂发生的重要因素之一.为真实模拟施工期和初次蓄水初期土质心墙的非饱和状态,水力劈裂试验应该采用非饱和心墙土样.

室内水力劈裂试验的试样其固结状态有不固结<sup>[29]</sup>、正常固结、超固结<sup>[20]</sup>3种,排水条件有排水<sup>[21]</sup>、不排水<sup>[29]</sup>2种.土石坝填筑过程中,心墙孔隙水压力难以有效消散;蓄水之初,库水荷载引起的心墙超静孔隙水压力也来不及消散.实际上,在施工期甚至蓄水后相当长的时间心墙内仍存在较大的孔隙压力,但是,不论是施工期还是初次蓄水初期,心墙孔隙水压力还是有一定程度的消散,心墙有一定的固结程度.坝体填筑和水库蓄水过程是心墙流(孔隙水和孔隙气体)固(土骨架)耦合固结过程.如果忽略施工机械的碾压过程,心墙土层在自重、上部土压力、库水压力作用下的固结属正常固结;但是,心墙的排水条件与自身土体的渗透性和饱和度、坝体的施工工序和施工历时、以及水库的蓄水过程等因素有关.因此,采用三轴排水或不排水条件对心墙施工期和初次蓄水初期的应力变形状态进行简单的概化是欠合理的.

**2.1.2 现场试验** 现场水力劈裂试验大多是在堤坝钻孔中进行的,通常采用等流量的方式增加孔内水压力,并把流量显著增大的现象作为水力劈裂发生的判据.据此分析水力劈裂发生的条件.由于现场水力劈裂试验的费用较高,且水力劈裂试验是破坏性试验,会对堤坝产生破坏性的影响,所以目前这方面的研究并不多见.此外,由于试验过程中堤坝

的应力状态并不清楚,现场水力劈裂试验的研究成果也不能用以指导实践<sup>[27]</sup>。

**2.1.3 模型试验** 模型试验包括常重力模型试验和超重力离心模型试验。由于心墙坝工程中坝体自重应力通常为主导因子,占支配地位,而常重力模型试验无法真实再现原型坝体的应力应变状态,试验结果和原型心墙的应力应变存在较大差别。超重力离心模型试验应用离心力场和重力场等价的原理,采用与原型相同材料的小比尺模型,通过超重力来复原原型的自重应力场,在较短的时间内再现原型特性。因此,与常重力模型相比,离心模型试验是研究岩土工程问题的较理想的试验手段。正如黄文熙先生所言<sup>[30]</sup>：“土工离心模型试验已成为验证计算方法和解决土工问题的一种强有力手段,是土工模型发展的里程碑。”

近30年,土工离心模型试验技术在岩土工程领域得到了较为广泛的应用。李邵军等<sup>[31]</sup>针对三峡库区典型滑坡的工程地质特征,进行了相应的土质边坡离心模型试验,模拟水库蓄水和库水位循环升降条件下失稳边坡的抗滑桩加固机制,实现了对库水位循环升降的控制。詹良通等<sup>[32]</sup>应用自行研制的离心机机载降雨模拟装置,模拟和再现了不同降雨强度条件下非饱和粉土边坡的失稳破坏过程。漆泰岳等<sup>[33]</sup>对富水软土地层地铁隧道开挖引起的地表沉降进行了离心模型试验,研究了流固耦合、时间、施工3种作用的综合效应。Geraldo等<sup>[34]</sup>对土拱效应进行了离心模型试验研究。依据相似理论,章为民等<sup>[35]</sup>提出采用加速度的增加过程来模拟坝体施工填筑过程。张延亿等<sup>[36]</sup>采用小比尺模型进行离心试验,研究了糯扎渡心墙堆石坝(高261.5m)施工期和运行期的应力和变形性状,论证了采用小比尺离心模型研究超高坝变形和应力性状的可行性。王年香等<sup>[37]</sup>对长河心墙坝渗流特性进行了离心模型试验研究,模拟了施工期和运行期心墙孔隙水压力的产生和消散规律。国内外不少学者针对土体裂缝问题进行了离心模型试验研究<sup>[38-39]</sup>,证明了土工离心模型试验模拟土体裂缝问题的适用性。其中,牛起飞等<sup>[23-24]</sup>进行了模拟岸坡突变所导致的心墙横向裂缝的土工离心模型试验。王年香等<sup>[40]</sup>应用土工离心模型试验技术,模拟了高堆石坝心墙中存在裂缝和库水位上升速率,研究了不同初次蓄水速率对心墙裂缝附近孔隙水压力的影响。

可见,离心模型试验可以在模型中再现原型坝体的边界条件、应力变形、破坏机制等;能够模拟原型坝体的施工过程及库水位的升降过程;能够反映原型坝体施工及初次蓄水过程心墙应力(土压力、孔隙压力)的时空分布及变化规律、渗流与变形的耦合作用,以及心墙土体的非饱和状态。

但是,专门针对土质心墙水力劈裂现象所进行的离心模型试验研究工作则很少。冯晓莹等<sup>[19]</sup>采用直立土柱心墙模型进行离心试验,对心墙水力劈裂现象的发生条件和破坏过程进行了研究,但直立土柱模型与实际心墙并不满足几何相似,且心墙拱效应并不明显。

综上所述,目前,尚无一套有效的试验方法和手段能够对土质心墙水力劈裂现象的发生条件和破坏过程进行模拟,将土工离心模型试验技术应用于初次蓄水心墙坝的水力劈裂问题研究是可行的。

## 2.2 试验研究成果

**2.2.1 水力劈裂破坏机理** 目前,对土质心墙水力劈裂破坏机理的认识仍有争议,存在两种不同的观点,一是认为水力劈裂是由摩尔-库伦理论所控制的塑性剪切破坏<sup>[2-3, 11, 13]</sup>;二是认为水力劈裂是心墙土体应力达到其抗拉强度后的张拉破坏<sup>[4, 14]</sup>。也有

学者认为心墙水力劈裂是拉剪两种机理的共同作用<sup>[5]</sup>。

水力劈裂是由于水压力的抬高在岩土体中所引起的裂缝发生与扩展的物理现象<sup>[1]</sup>, 因此, 水力劈裂可以看做是裂缝在水压力作用下的起裂、扩展、贯通过程。从土体的特性来看, 裂缝的起裂, 必然存在剪切破坏或张拉破坏; 而裂缝的扩展, 应该有作用于裂缝表面的扩张力。

从材料力学的角度来看, 剪切破坏和张拉破坏本质上是一致的。然而, 由于剪切破坏机理不能解释土体内裂缝的扩展, 因此被很多学者所置疑; 相反, 张拉破坏机理可以克服这一缺陷, 能够很好地解释裂缝的产生和扩展, 因此得到更多人的认可。孙亚平<sup>[21]</sup> 针对水力劈裂问题, 进行了系统的试验研究, 证明了土体最小有效主应力达到其抗拉强度是水力劈裂破坏发生的必要条件。因此, 可以初步认定为水力劈裂的产生(起裂)始于土体的张拉破坏。

根据水力劈裂的定义<sup>[1]</sup>, 作用于裂缝表面的扩张力只有水压力, 也就是说, 裂缝的扩展必然是渗透弱面水压楔劈效应的结果。因此, 水力劈裂的进一步的扩展过程, 取决于水压楔劈效应。

传统的观点认为<sup>[1,41]</sup>, 当心墙内孔隙水压力升高, 或拱效应显著, 导致土体有效应力为拉应力时, 心墙就会发生水力劈裂; 但是, 最小有效主应力达到土体的抗拉强度是水力劈裂破坏发生的必要条件而非充分条件<sup>[21]</sup>。仅仅由于心墙内部孔隙水压力的升高或拱效应显著而产生的张拉裂缝并不会造成心墙水力劈裂破坏, 该裂缝的扩展缺少必要的扩张力, 即水压力, 因为水压楔劈效首先取决于外部水体与初始裂缝连通与否; 相反, 水库蓄水后心墙内部裂缝会发生湿封现象而自行愈合<sup>[42]</sup>。

心墙坝工程中, 坝壳是不挡水的, 库水直接作用于心墙上游面, 与裂缝联通的外部水体只有库水, 相应的扩张力只能是库水压力, 即裂缝必须与库水相连通, 而与库水相连通的裂缝只能产生于心墙上游面。库水压力既是心墙水力劈裂裂缝起裂的条件, 也是其进一步扩展、最终贯通的动力; 因此, 心墙水力劈裂是库水压力作用下心墙心墙上游表面裂缝的产生、扩展, 最终形成贯穿裂缝的过程; 所以, 用以心墙水力劈裂试验研究的试样其边界条件、受力状态应重点模拟心墙上游面的实际情况。

破坏机理是心墙水力劈裂理论研究的根本, 也是正确、有效解决问题的前提。可以初步认定为土质心墙水力劈裂破坏始于土体的张拉破坏, 水力劈裂的进一步扩展、最终贯通过程则取决于水压楔劈效应; 但还没有充分的证据来证明其合理性, 所以对水力劈裂的破坏机理还需做进一步的研究。

**2.2.2 水力劈裂发生判断准则** 实际心墙坝工程中, 人们关心的是水力劈裂的劈裂压力, 也就是引起水力劈裂的最小水压力, 即水力劈裂的发生判断准则<sup>[43-44]</sup>。由于目前水力劈裂的破坏机理还不明确, 与之相应的水力劈裂发生判断准则尚不统一, 与剪切破坏机理相应的判断准则摩尔-库伦强度理论, 依据弹塑性力学理论, 很难解释裂缝的扩展。参照室内试验研究成果, 与张拉破坏机理相应的水力劈裂判断准则分为总应力准则和有效应力准则<sup>[45-46]</sup>, 可分别表示为

$$\sigma \leq p_w \quad (1)$$

$$\sigma' = \sigma - u_w \leq 0 \quad (2)$$

式中:  $\sigma$ 、 $\sigma'$ 、 $p_w$ 、 $u_w$  分别为总应力、有效应力、库水压力、孔隙水压力。

依据张拉破坏机理及其判断准则式(1)和式(2),心墙水力劈裂可表述为水压力超过土中应力而将土体劈开的现象<sup>[26]</sup>。因此,心墙水力劈裂的判断准则也就是水压力与土中应力的对比,但是,水压力是心墙内孔隙水压力  $u_w$  还是心墙前库水压力  $p_w$  呢?所谓土中应力,这里指总应力  $\sigma$ ;但是,总应力  $\sigma$  有3个分量,式(1)和式(2)中到底是主应力  $\sigma_1$ 、中主应力  $\sigma_2$  还是小主应力  $\sigma_3$  呢?不同的应力与不同的水压力的组合,便是不同的水力劈裂发生判断准则。

总应力准则和有效应力准则两者在概念上是一致的,然而,针对 Teton 坝,Seed 等<sup>[47]</sup>采用总应力准则与沈珠江等<sup>[48]</sup>采用有效应力准则得出了截然相反的结论。沈珠江等<sup>[48]</sup>采用深截水槽黏土心墙砂壳坝模型离心试验模拟 Teton 坝的水力劈裂破坏过程,研究结果表明,模型坝体应力变形试验实测值与有效应力有限元法数值模拟结果两者的基本趋势一致,但未能再现水力劈裂现象,研究结论认为总应力判断准则高估计了心墙水力劈裂发生的可能性;其实,与总应力判断准则相应的总应力分析法忽略了坝体施工期的长短和水库蓄水速度的快慢,而大量的工程实践经验<sup>[49]</sup>及室内试验研究<sup>[4]</sup>均表明上述两因素对水力劈裂发生与否具有重要的影响。有效应力准则符合土力学的基本原理,但很多心墙坝的有效应力有限元法计算分析结果表明,无论如何改变计算参数,心墙从未出现过有效应力,即便是有效小主应力小于0的情况,心墙内并不存在这种裂缝产生和扩展所需要的拉应力<sup>[26-27]</sup>;因此,采用有效应力准则判断水力劈裂发生的可能性是偏危险的。

总应力准则用的是库水压力  $p_w$  和总应力  $\sigma$ ,有效应力准则中指的却是墙内孔隙水压力  $u_w$  和有效应力  $\sigma'$ 。总应力  $\sigma$  是有效应力  $\sigma'$  与孔隙水压力  $u_w$  之和,事实上,水力劈裂现象发生在水库初次蓄水初期,心墙稳定渗流形成之前。由于心墙土体的非饱和、低渗透性、以及库水位的快速上升,此时心墙内外的水压力是不相等的<sup>[26]</sup>,心墙上游侧存在较大的水压力梯度<sup>[27]</sup>。由此可见,两种准则所采用的水压力实际上是不相等的,这是造成两种准则判断结果产生很大差异的根本原因。

顾名思义,水压力是心墙水力劈裂破坏发生的直接的外部因素,此水压力是库水压力;但是劈裂压力是心墙内孔隙水压力还是心墙前库水压力呢?合理评估劈裂压力是心墙水力劈裂研究的重要内容之一。在施工期,心墙土体处于非饱和状态,由施工填筑引起的孔隙水压力难以有效消散。蓄水后,心墙从非稳定渗流状态到稳定渗流状态,渗流特性异常复杂。目前,国内外通常采用有限元方法进行渗流计算分析,探讨渗流场的分布情况,但不能考虑施工期的孔隙水压力,因而不能完全了解心墙坝的渗流特性。水力劈裂离心模型试验应能模拟坝体施工和水库蓄水过程,并关注施工填筑期和库水位上升过程中心墙内外水压力的分布与变化规律。

冯晓莹等<sup>[19]</sup>采用直立土柱心墙模型进行了离心试验,人为制造了高于土柱竖向压力的外水压力,观察到了土柱水力劈裂现象。一般地,这样的应力关系不会出现,因为土的容重大于水的容重。心墙坝中,只有当心墙土体与坝壳堆石体两个区的变形模量相差较大,心墙土体的变形受到坝壳堆石体一定程度的约束,从而产生拱效应,才有可能出现水压力大于土压力的情况。工程实践表明,拱效应可使心墙竖向应力  $\gamma_s h$  ( $\gamma_s$  为填土容重,  $h$  为填土深度)减小很多,甚至达到60%,且在3/4坝高比较显著<sup>[50]</sup>;施工期,伴随填筑高程的

增加和固结的发展,拱效应越明显,以心墙和坝壳两种介质接触面附近拱效应表现尤为突出<sup>[51]</sup>。

然而,冯晓莹等<sup>[19]</sup>所采用的模拟心墙的直立土柱模型在离心试验中所产生的拱效应并不明显,拱效应所导致的心墙竖向应力小于库水压力只是通过土柱水力劈裂现象进行分析、推理所得出的结论;但是,心墙拱效应可显著减小心墙中的竖向压应力,对非饱和心墙在快速蓄水条件下的水力劈裂破坏有着直接的影响,被公认为是导致心墙发生水力劈裂的重要内部因素<sup>[41]</sup>,所以合理评估应力拱效应是心墙水力劈裂研究的又一个重要内容。目前,人们对心墙坝拱效应的研究主要集中于以下2个方面:一是以施工期心墙应力监测资料为基础,结合坝体实际变形监测资料,分析施工期心墙拱效应特征<sup>[51]</sup>;二是采用数值模拟方法研究心墙的拱效应<sup>[52]</sup>,并分析其影响因素<sup>[52-53]</sup>;尚未见到专门针对心墙坝拱效应的室内试验或模型试验研究的相关报道。

2006年,殷宗泽等<sup>[26]</sup>提出采用有效中主应力 $\sigma'_2$ 、孔隙水压力 $u_w$ 之和与相应位置的库水压力 $p_w$ 进行比较来判断水力劈裂是否发生,即

$$\sigma'_2 + u_w \leq p_w \quad (3)$$

现有的心墙坝已发生水力劈裂破坏的工程实例尚无法从水力劈裂发生的力学机理上得到合理的解释,主要矛盾表现为工程实例中水力劈裂多发生在水平面上<sup>[49]</sup>,而传统的观点却通常认为该面是大主应力的作用面<sup>[26-27]</sup>。

在施工期,心墙坝一般只受重力作用,心墙中心部位的应力状态为竖直方向为大主应力,水平方向为小主应力;但是,受两侧坝壳约束的影响,心墙两侧边缘的主应力矢量方向会发生偏转<sup>[54]</sup>。施工期的加载方式都是大致在大主应力方向施加,蓄水过程中,水荷载直接作用于低渗透性心墙上游表面;此时的加载方式与施工期有很大差异,水荷载是大致在心墙小主应力方向施加的(心墙上游面不是主应力面),故水荷载作用对小主应力的数值大小及分布的影响较大<sup>[26,55]</sup>。在水荷载的作用下,心墙上游侧的主应力方向会发生进一步的偏转,加之拱效应的影响,可能会在局部出现大主应力水平,小主应力竖直的情况<sup>[56]</sup>;所以合理评估应力诱导各向异性对复杂应力状态下心墙土体的应力应变规律的影响是心墙水力劈裂研究的第三个重要内容。

竣工时,心墙上游面上的小主应力自坝基向上逐渐变小<sup>[41]</sup>;蓄水过程中,由于上游坝壳浸水增加的浮托力所引起的卸载作用,以及心墙上游面受水压力作用的综合影响,心墙上游面上的小主应力最小值的位置较竣工时会向上移<sup>[57]</sup>;也就是说水力劈裂可能发生的位置在心墙的中上部,而不是水压力较大的心墙下部。事实上,水力劈裂通常发生在坝顶附近,并且在相对较小的水头作用下产生<sup>[58]</sup>。可见,越接近坝顶,心墙上游面上的小主应力分布与库水压力越接近。

因此,水力劈裂可进一步表述为库水压力超过了心墙上游表面的土压力而将土体劈开的现象;可以初步认定为水力劈裂发生在小主应力面(近似为水平面)上,并以有效小主应力 $\sigma'_3$ 、孔隙水压力 $u_w$ 之和与相应位置的库水压力 $p_w$ 进行比较来判断水力劈裂是否发生;本文称之为土质心墙水力劈裂判断的综合准则,即

$$\sigma'_3 + u_w \leq p_w \quad (4)$$

研究土质心墙水力劈裂破坏的离心试验可采用平面模型模拟坝体水力劈裂破坏断



面 模拟心墙上游面主应力方向的偏转及大小的变化,以及心墙内外水压力的分布与变化. 试验中应重点关注库水位上升过程中心墙上游面中上部的应力状态.

### 3 结论与展望

试验研究是土质心墙水力劈裂问题研究的一个最重要且最直接的途径,具有不可替代的作用. 许多学者根据试验研究结果提出了心墙水力劈裂破坏的力学机理和相应的水力劈裂发生判断准则. 通过对已有的心墙水力劈裂试验研究成果分析,笔者认为尚需在以下几个方面作进一步的研究.

(1) 尚无一套有效的试验方法和手段能够对土质心墙水力劈裂的发生条件和破坏过程进行模拟,将土工离心模型试验技术应用于初次蓄水心墙坝的水力劈裂问题研究是可行的,可采用平面模型模拟坝体水力劈裂破坏断面;

(2) 可以初步认定为水力劈裂的产生始于土体的张拉破坏,而水力劈裂的进一步扩展过程则取决于水压楔劈效应,但还没有充分的证据来证明其合理性;

(3) 水力劈裂可进一步表述为库水压力超过了心墙上游表面的土压力而将土体劈开的现象,以综合准则来判断水力劈裂的发生与否或许是可行的,但其有效性还有待于验证;

(4) 心墙内外水压力的分布与变化,应力拱效应,以及应力诱导各向异性是心墙水力劈裂试验研究的主要内容,试验中应重点关注库水位上升过程中心墙上游面中上部的应力状态.

### 参考文献

- [1] 黄文熙. 对土石坝科研工作的几点看法[J]. 水利水电技术, 1982, (4): 23-27  
Huang Wenxi. Several views on research of embankment dams [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1982, (4): 23-27
- [2] Nobari E S, Lee K L, Duncan J M. Hydraulic fracturing in zoned earth and rockfill dam [R]. Berkeley: University of California, 1973
- [3] Alfaro M C, Wong C K. Laboratory studies on fracturing of low-permeability soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38: 303-315
- [4] Mori A, Tmura M. Hydrofracturing pressure of cohesive soils [J]. Soils and Foundations, 1987, 27(2): 14-22
- [5] 丁金粟, 杨斌. 击实粘性土水力劈裂性能研究 [J]. 岩土工程学报, 1987, 9(3): 1-15  
Ding Jinsu, Yang Bin. The Study of hydraulic fracturing on compacted cohesive soil [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 9(3): 1-15
- [6] Lo K Y, Kiny K. Hydraulic fracture in earth and rock-fill dams [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 5: 496-506
- [7] Ogawa T, Lo K Y. Effects of dilatancy and yield criteria on displacements around tunnels [J]. Canada Geotechnical Journal, 1987, 24(4): 100-113
- [8] Au S K A, Soga K, Jafari M R, et al. Factors affecting long-term efficiency of compensation grouting in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(3): 254-262
- [9] Hassani A W, Singh B, Saini S S, et al. Laboratory simulation of hydraulic fracturing [C]. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1985, (2): 1081-1084
- [10] Yanagisawa E, Panah A K. Two dimensional study of hydraulic fracturing criteria in cohesive soils [J]. Soils and Foundations, 1994, 34(1): 1-9
- [11] 曾开华. 土质心墙坝水力劈裂机制及影响因素的研究 [D]. 南京: 河海大学, 2001

- Zeng Kaihua. Study on mechanism and influence factors of hydraulic fracturing of earth core dam [D]. Nanjing: Hohai University, 2001
- [12] Jaworski G W, Duncan J M, Seed H B. Laboratory study of hydraulic fracturing [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, 107(6): 713-732
- [13] U S Department of the Interior Teton Dam Failure Review Group. Failure of Teton dam: A report of findings [R]. Washington D C, 1977
- [14] Morgenstern N R, Vaughan P R. Some observations on allowable grout pressures [C]. Proceeding of Conference Grouts and Drill. London: Muds Institute of Civil Engineering, 1963: 36-42
- [15] Wong R C K, Alfaro M C. Fracturing in low-permeability soils for remediation of contaminated ground [J]. Canada Geotechnical Journal, 2001, 38: 316-327
- [16] Bjerrum L, Nash J K T L, Kennard R M, et al. Hydraulic fracturing in field permeability testing [J]. Geotechnique, 1972, 22(2): 319-332
- [17] Schober W, Hammer H, Hupfauf B. Load transfer in embankment dams model testing [C]. Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 1989, (2): 973-976
- [18] 张丙印, 李娜, 李全明, 等. 土石坝水力劈裂发生机理及模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1277-1281  
Zhang Bingyin, Li Na, Li Quanming, et al. Mechanism analysis and model test of hydraulic fracturing in embankment dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1277-1281
- [19] 冯晓莹, 徐泽平. 心墙水力劈裂机理的离心模型试验研究 [J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1259-1263, 1273  
Feng Xiaoying, Xu Zeping. Centrifugal model study on mechanism of hydraulic fracturing of clay core-wall in rockfill dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1259-1263, 1273
- [20] Atkinson J H, Charles J A, Mhach H K. Undrained hydraulic fracture in cavity expansion tests [C]. Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, 1994, (2): 1009-1012
- [21] 孙亚平. 水力劈裂机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 1985  
Sun Yaping. Study on mechanism of hydraulic fracturing [D]. Beijing: Tsinghua University, 1985
- [22] Murdoch L C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments, part 1: Methods and observations [J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 255-265
- [23] 张丙印, 张美聪, 孙逊. 土石坝横向裂缝的土工离心机模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1254-1258  
Zhang Bingyin, Zhang Meicong, Sun Xun. Centrifugal modeling of transverse cracking in earth core dams [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1254-1258
- [24] 牛起飞, 侯瑜京, 梁建辉, 等. 坝肩变坡引起心墙裂缝和水力劈裂的离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1935-1941  
Niu Qifei, Hou Yujing, Liang Jianhui, et al. Centrifuge modeling of cracking and hydraulic fracturing in core dams induced by abrupt change of bank slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1935-1941
- [25] 司洪洋. 土石坝施工期的孔隙压力观测——关于《土石坝安全监测技术规范 SL60—94》的讨论意见 [J]. 大坝观测与土工测试, 2000, 24(4): 1-4  
Si Hongyang. Pore-pressure observation during construction of earth-rockfill dam [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2000, 24(4): 1-4
- [26] 殷宗泽, 朱俊高, 袁俊平, 等. 心墙堆石坝的水力劈裂分析 [J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1348-1353  
Yin Zongze, Zhu Jungao, Yuan Junping, et al. Hydraulic fracture analysis of rockfill dam with core wall [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1348-1353
- [27] 朱俊高, 王俊杰, 张辉. 土石坝心墙水力劈裂机制研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 487-492  
Zhu Jungao, Wang Junjie, Zhang Hui. Study on mechanism of hydraulic fracturing in core of earth-rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 487-492
- [28] 王俊杰. 基于断裂力学的土石坝心墙水力劈裂研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005  
Wang Junjie. Study on hydraulic fracturing in core of earth-rockfill dam based on fracture mechanics [D]. Nanjing: Hohai University, 2005
- [29] Panah A K, Yanagisawa E. Laboratory studies on hydraulic fracturing criteria in soil [J]. Soils and Foundations, 1989, 29(4): 14-22

- [30] 杨春宝,朱斌,孔令刚,等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1261-1271  
Yang Chunbao, Zhu Bin, Kong Linggang, et al. Centrifuge model tests on failure of silty slopes induced by change of water level[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1261-1271
- [31] 李邵军,Knappett J A,冯夏庭,等. 模拟库水位变化的抗滑桩加固边坡离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 939-946  
Li Shaojun, Knappett J A, Feng Xiating, et al. Centrifugal tests on slope reinforcement by anti-sliding piles modeling change of reservoir water level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 939-946
- [32] 詹良通,刘小川,泰培,等. 降雨诱发粉土边坡失稳的离心模型试验及雨强-历时警戒曲线的验证[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1874-1790  
Zhan Liangtong, Liu Xiaochuan, Tai Pei, et al. Centrifuge modelling of rainfall-induced slope failure in silty soils and validation of intensity-duration curves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1874-1790
- [33] 漆泰岳,高波,马亮. 富水软土地层地铁开挖地表沉降离心模型试验[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(5): 184-189  
Qi Taiyue, Gao Bo, Ma Liang. Centrifugal model test for ground surface subsidence caused by metro tunneling in saturated soft clay strata[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(2): 184-189
- [34] Geraldo R I, Herbert H E, Robert V W. Investigation of soil arching with centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 140(2): 1-3
- [35] 章为民,徐光明. 土石坝填筑过程的离心模拟方法[J]. 水利学报, 1997, 28(2): 8-18  
Zhang Weimin, Xu Guangming. Study on modeling the construction process of embankment dams in centrifugal test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(2): 8-18
- [36] 张延亿,徐泽平,温彦锋,等. 糯扎渡高心墙堆石坝离心模拟试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(2): 86-92  
Zhang Yanyi, Xu Zeping, Wen Yanfeng, et al. Centrifugal modeling test on the Nuozhadu high central core earth-rockfill dam[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2008, 6(2): 86-92
- [37] 王年香,章为民,顾行文,等. 高堆石坝心墙渗流特性离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2769-2774  
Wang Nianxiang, Zhang Weimin, Gu Xingwen. Centrifugal model test on seepage characteristics of high core rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2769-2774
- [38] Shehebina V I, Olympiev D N. Numerical and centrifugal modeling of cracking in an earth-and-rockfill dam core [C]. Francis G McLean. Centrifuge 91. Nether-lands: Balkema A A, 1991: 67-72
- [39] 朱维新. 用离心模型研究土石坝心墙裂缝[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 82-95  
Zhu Weixin. Application of centrifuge to model cracking of earth-rockfill dam core[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(6): 82-95
- [40] 王年香,章为民,张丹,等. 高心墙堆石坝初次蓄水速率影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(5): 72-76  
Wang Nianxiang, Zhang Weimin, Zhang Dan, et al. Effect of initial impounding speed on high core rock-fill dam[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(5): 72-76
- [41] 丁艳辉,袁会娜,张丙印,等. 超高心墙堆石坝应力变形特点分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 153-158  
Ding Yanhui, Yuan Huina, Zhang Bingyin, et al. Stress-deformation characteristics of super-high central core rock-fill dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 153-158
- [42] 陈向浩,邓建辉,陈科文,等. 高堆石坝砾石土心墙施工期应力监测与分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1083-1088, 1094  
Chen Xianghao, Deng Jianhui, Chen Kewen, et al. Stress monitoring and analysis of gravelly soil corewall in high rockfill dam during construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1083-1088, 1094
- [43] Mori A, Tamura M. Discussion on laboratory studies of hydraulic fracturing criteria in soil[J]. Soils and Foundations, 1991, 31(2): 199-201
- [44] Ghanbari A, Shams Ran S. Development of an empirical criterion for predicting the hydraulic fracturing in the core of earth dams[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10: 243-254

- [45] 曹雪山. 土石坝心墙水力劈裂的数值研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3146-3149  
Cao Xueshan. Recent development in numerical simulation of hydraulic fracturing on core wall of earth-rock fill dam [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3146-3149
- [46] 陈五一, 赵颜辉. 土石坝心墙水力劈裂计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1380-1386  
Chen Wuyi, Zhao Yanhui. Study of calculation method of hydraulic fracturing for core of earth-rockfill dam [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1380-1386
- [47] Seed H B, Duncan J M. The Teton dam failure—a retrospective review [C]. Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, 1981, 4(4): 219-238
- [48] 沈珠江, 易进栋, 左元明. 土坝水力劈裂的离心模型试验及其分析[J]. 水利学报, 1994, 4(9): 67-77  
Shen Zhujiang, Yi Jindong, Zuo Yuanming. Centrifuge model test of hydraulic fracture of earth dam and its analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 4(9): 67-78
- [49] 张丙印, 于玉贞, 张建民. 高土石坝的若干关键技术问题 [C]. 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003: 163-186  
Zhang Bingyin, Yu Yuzhen, Zhang Jianmin. Several key technical problems of high earth-rockfill dams [C]. Proceedings of the 9th Chinese Civil Engineering Academy Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 163-186
- [50] 林继镛. 水工建筑物(第五版) [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2008: 251-252  
Lin Jiyong. Hydraulic structures (Fifth edition) [M]. Beijing: China Water Conservancy and Water Power Press, 2008: 251-252
- [51] 陈向浩, 邓建辉, 李鹏, 等. 瀑布沟大坝砾石土心墙施工期拱效应监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增2): 3763-3770  
Chen Xianghao, Deng Jianhui, Li Peng, et al. Arching monitoring and analysis of gravelly soil corewall in Pubugou dam during construction period [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3763-3770
- [52] 杨荣. 瀑布沟高土石坝三维非线性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, 3(3): 260-267  
Yang Rong. The 3D nonlinear stress-strain analysis of Pubugou High Rockfill Dam [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1995, 3(3): 260-267
- [53] 林江, 胡万雨, 孟凡理, 等. 瀑布沟大坝心墙拱效应分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2031-2035  
Lin Jiang, Hu Wanyu, Meng Fanli, et al. Arching effect analysis of core wall in Pubugou dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2031-2035
- [54] 沈珠江, 王剑平. 土质心墙坝填筑及蓄水变形的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 1988, 4: 47-64  
Shen Zhujiang, Wang Jianping. Numerical simulation of construction behaviour of clay core dam and its movement due to reservoir impounding [J]. Journal of Hydro-Science and Engineering, 1988, 4: 47-64
- [55] 张坤勇, 殷宗泽, 朱俊高. 各向异性对土质心墙坝水力劈裂的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 243-246  
Zhang Kunyong, Yin Zongze, Zhu Jungao. Influence of anisotropy on hydraulic fracturing of earth core dams [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 243-246
- [56] 冯晓莹, 徐泽平, 栾茂田. 黏土心墙水力劈裂机理的离心模型试验及数值分析[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 109-115  
Feng Xiaoying, Xu Zeping, Luan Maotian. Centrifugal model test and numerical analysis on mechanism of hydraulic fracturing of clay core wall in rockfill dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 109-115
- [57] Ng K L A, Small J C. A case study of hydraulic fracturing using finite element methods [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(5): 861-875
- [58] Sherard J L. Hydraulic fracturing in embankment dams [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(10): 905-92

## Advances in Experimental Research on Hydraulic Fracturing in Earth-and-rockfill Dam with Central Soil Core

WANG Junxi<sup>1</sup>, CHEN Jinshu<sup>2</sup>, TAO Hu<sup>1</sup>, SHI Xi<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

### Abstract

Typical experimental researches on hydraulic fracturing in the earth-and-rockfill dam with central soil core are reviewed, with corresponding analysis and discussion provided. It is shown that: (1) Experimental methods are necessary in the research on hydraulic fracturing in central soil core. (2) Based on the experimental results, several failure mechanisms and corresponding initiation judgment criteria for hydraulic fracturing have been put forward. However, there has been no effective experimental method to simulate the formation conditions and failure process of hydraulic fracturing. (3) It is feasible to apply centrifuge modeling technique to the research on hydraulic fracturing of earth-and-rockfill dams with central soil core in the initial impounding. (4) A plane-strain centrifuge test can be used to simulate the failure section in hydraulic fracturing to validate the tensile failure mechanism and its synthetic judgment criterion. (5) The major work of experimental research is to simulate the distribution and variation of water pressure inside and outside the central soil core, the stress arching effect and the stress-induced anisotropy. And much attention should be paid to the stress state in middle and above upstream face of central core in the water level rising. The results present references for similar researches on hydraulic fracturing in central soil core.

**Keywords:** hydraulic fracturing; indoor test; site test; centrifuge model test; earth-and-rockfill dam with central soil core