

关于土石坝心墙水力劈裂研究的一些思考

王俊杰, 朱俊高, 张 辉

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 从发生条件、力学机理、试验研究和数值模拟等方面对土石坝心墙的水力劈裂问题进行了初步探讨。研究表明: (1) 其发生条件至少包括物质条件和受力条件两个方面; (2) 力学机理可以从断裂力学的角度进行揭示, 判别准则可以基于断裂力学的理论建立; (3) 试验研究中试样的边界条件和受力状态能够近似模拟心墙上游面的实际情况; (4) 在弄清水力劈裂的发生条件、力学机理的基础上, 通过试验研究建立合理的水力劈裂判别准则, 对水力劈裂的发生发展过程进行数值模拟, 是研究水力劈裂问题的有效途径。

关键词: 水工结构; 土石坝; 水力劈裂; 断裂力学

中图分类号: TV 641

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5664 - 05

SOME IDEAS OF STUDY ON HYDRAULIC FRACTURING OF CORE OF EARTH-ROCKFILL DAM

WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao, ZHANG Hui

(*Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Hydraulic fracturing of core of earth-rockfill dam is an important issue related to the safety of the dam, and it attracts much attention. In this paper, the achieved results show as follows: (1) the conditions of hydraulic fracturing should include at least two conditions—physical one that includes fissures existing in core and low permeability of core material, and the mechanical one that is enough larger “water wedging” action; (2) the mechanical mechanism of hydraulic fracturing can be explained with the theory and method of fracture mechanics; (3) the boundary and stress conditions of laboratory, field or model tests should be similar to those in up-stream face of core of the dam, for instance, some fissures should be included in sample, and the water pressure should be forced from the surface of the sample; and (4) the numerical simulation to the development course of hydraulic fracturing is deformed and the effective way to study the hydraulic fracturing in core of earth-rockfill dam is to reveal the induced condition and mechanical mechanism, to develop reasonable criterion and to estimate and simulate by using numerical analyses.

Key words: hydraulic structure; earth-rockfill dam; hydraulic fracturing; fracture mechanics

1 引 言

水力劈裂是指在高水压力下, 岩体或土体中引起裂缝发生与扩展的过程, 是土石坝建成后导致坝

体破坏的重要原因之一^[1], 因而是土石坝工程中人们最为关注、且是最有争议的问题之一。论证心墙是否发生水力劈裂的可能性是当前各种土石坝设计中急需解决的问题^[2]。由于水力劈裂的发生、发展过程很难可视化, 长期以来人们只能通过推理的

收稿日期: 2004 - 06 - 07; **修回日期:** 2004 - 07 - 18

作者简介: 王俊杰(1973 -), 男, 1995年毕业于兰州大学水文地质与工程地质专业, 现为博士研究生、讲师, 主要从事土石坝设计和岩土工程数值模拟等方面的研究工作。E-mail: wangjunjiehu@163.com.

方法从工程和试验现象对其进行研究。为了弄清水力劈裂发生的机理及发展过程,人们进行了大量的现场及室内试验。但由于对水力劈裂发生机理的认识不同,以及在试验中模拟土石坝心墙水力劈裂发生条件的难度很大等多种原因,目前已取得的研究成果很难可靠地应用于土石坝的设计、建设中。

由于问题的复杂性,时至今日,尚无很好的方法对心墙水力劈裂的发生进行预测和计算模拟,对其发生条件并不十分清楚,判定准则也是初步的,很不成熟。本文发生条件、力学机理、试验研究和数值模拟等方面对这一问题进行了初步探讨。

2 心墙水力劈裂的发生条件

心墙水力劈裂的发生条件至少包括物质条件和受力条件 2 个方面,物质条件是心墙中裂缝或缺陷的存在和心墙材料的低透水性,而足够大的所谓“水楔”作用是其发生的力学条件。

2.1 土石坝心墙中的裂缝及缺陷

在心墙坝中,人们常把心墙裂缝的产生归因于心墙的应力“拱效应”,但许多工程的数值分析及现场实测结果表明,除了心墙狭窄且直立的情况外,土石坝中的拱效应并不足以使心墙中的竖向应力为 0 或负值(即出现拉应力)。另外,许多均质坝也存在水力劈裂问题,甚至是相对矮小的土石坝^[3]。这说明水力劈裂是土石坝工程中普遍存在的问题,只不过是在高土石坝中的危害更大而被关注。

如图 1 所示的均质心墙,无论上游面是光滑面还是粗糙面,无论库水位是高水位还是低水位,作用于上游面的水压力总是垂直于心墙上游面,并不存在使心墙发生与上游面垂直或斜交裂缝的水压力分量,因而也就不可能发生水力劈裂。这一点对蓄水初期和水库正常运行期均是成立的,因此,可

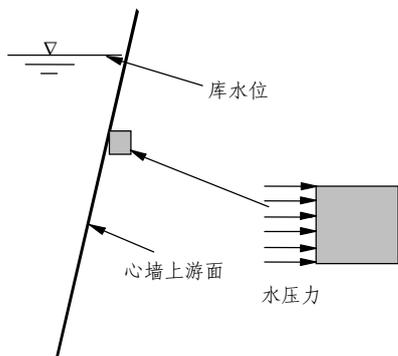


图 1 均质心墙

Fig.1 Homogeneous central core

以认为土石坝心墙发生水力劈裂的本质原因是心墙本身存在的非均质性,即存在局部的裂缝或缺陷。

文[4]指出,裂缝在土石坝中是普遍存在的。就其生成的原因,最可能的有两种,其一为施工原因,其二是不均匀沉降。施工中各碾压层之间及同层的不同施工段之间均是易形成裂缝或缺陷的部位,施工进度及施工环境(如环境温度、湿度等)的变化也有一定影响,这些裂缝在施工中应是闭合的。不均匀沉降及其引起的应力重分布是产生新的裂缝和使施工期产生闭合裂缝张开的主要原因,即便是在不均匀沉降较小的情况下也可能形成这种裂缝^[5]。通常这种裂缝应该是局部的,这里的缺陷是施工中因局部碾压不实所致的高渗透性高压缩性区域。

心墙中存在的裂缝或缺陷使“水楔”作用成为可能,从而可能导致水力劈裂的发生。因此,心墙中已有的裂缝为水力劈裂的发生提供了物质条件。

2.2 心墙的低渗透性

发生水力劈裂的另一物质条件是心墙材料的低透水性。心墙材料的低透水性与心墙裂缝或缺陷的高透水性使得“水楔”作用容易形成,而“水楔”作用正是心墙发生水力劈裂的力学原因所在。

2.3 “水楔”作用

心墙材料与裂缝或缺陷的透水性差异较大,如果心墙存在裂缝或缺陷,也就具备形成“水楔”的条件,水力劈裂是否就一定发生必须从“水楔”作用的形成机理回答。

首先假定心墙材料为完全不透水材料,然后再讨论具有一定透水性的实际心墙。

图 2 是存在水平裂缝(其他具有与心墙上游面相交裂缝的情况与此类似)的完全不透水材料心墙的水力劈裂情况。当库水位达到或高于裂缝时,水体进入裂缝,裂缝表面作用水压力,这一水压力随库水位的升高而增大,当其大到足以克服裂缝扩展阻力时,裂缝就扩展,水体随即进入新的裂缝,水压力也作用于新的裂缝面,如果该水压力仍大于当前裂缝的扩展阻力,裂缝继续扩展,直到水压力不再大于当前裂缝扩展阻力为止。如果库水位继续上升,作用于裂缝面使裂缝扩展的水压力增大,裂缝将进一步扩展,最终可能形成贯穿心墙的裂缝,导致心墙发生集中渗漏,进一步可能导致溃坝事故。

实际的心墙材料不可能是完全不透水的,而是渗透系数相对堆石区而言小几个数量级的具有一定透水性的材料。当库水位急剧上升时,“水楔”作用的形成与上述心墙为完全不透水材料的情况类似,

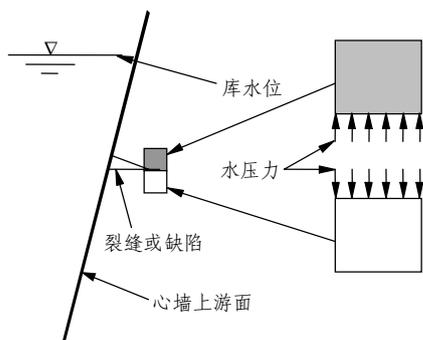


图2 完全不透水材料心墙的水力劈裂情况
Fig.2 Hydraulic fracturing in impervious material core

但当库水位缓慢上升时情况则不同。假定库水位的上升速率足够小，如图3所示，使得进入裂缝中的水体有足够的时间向裂缝两边的土体渗透，并形成稳定渗流，那么所谓的“水楔”作用将无法形成。另外，由于裂缝两侧土体可能会遇水膨胀，使裂缝封闭，即发生所谓的“湿封”现象，“水楔”作用无法形成，水力劈裂也就不会发生。但若是库水位的上升速率并不是足够小的话，稳定渗流无法形成，由于裂缝面为渗透系数突变面，则“水楔”作用仍可形成，如图4所示。这时裂缝是否扩展将取决于

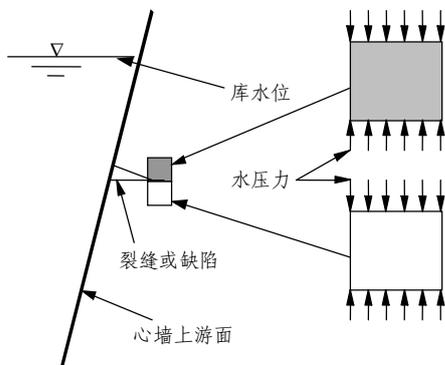


图3 实际心墙的缓慢蓄水情况
Fig.3 Hydraulic fracturing when filling is slow enough

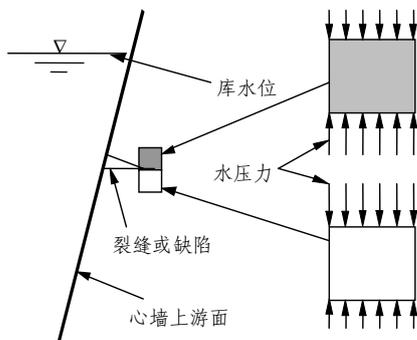


图4 实际心墙的快速蓄水情况
Fig.4 Hydraulic fracturing when filling is fast

“水楔”作用与裂缝抗扩展能力的关系。

因此，土石坝要发生水力劈裂，除了具备上述2个物质条件外，足够快的蓄水条件也是必需的。

3 水力劈裂的力学机理

从力学上讲，使土中产生裂缝，或使裂缝扩展，需要垂直于裂缝面的拉力作用。水力劈裂发生的力学原因，主要有2种观点，即拉裂破坏和剪切破坏。剪切破坏的判别准则是莫尔-库仑强度理论。从土体发生剪切破坏时的莫尔圆与莫尔-库仑强度线相切的位置关系可知，当小主应力大于0(即为压应力)时，土中任何面上均不存在负的正应力(即拉应力)，利用弹性力学的理论，很难解释此时裂缝的产生。而认为水力劈裂是拉裂破坏的观点却可以很好地解释裂缝的产生与扩展，因此得到许多人的认可。

从前节中对水力劈裂的发生条件的讨论可知，水力劈裂的发生需要裂缝的存在，水力劈裂过程实际上是已有局部裂缝的扩展和贯通过程，这其实就是断裂力学的主要研究内容。因此，水力劈裂的力学机理应该可以从断裂力学的角度进行揭示，其判别准则也应该可以基于断裂力学的理论建立。

4 水力劈裂试验研究

为了弄清水力劈裂的发生条件及发展过程，人们进行了大量的现场、室内试验。但由于水力劈裂的发生条件尚未完全弄清，导致试验研究成果直接用于工程实践尚有一段距离。笔者认为，在水力劈裂的试验研究(包括室内、现场和模型试验)中，目前仍以弄清水力劈裂的发生条件和力学机理为主要目的，试样的边界条件和受力状态应能够近似模拟心墙上游面的实际情况，试样中应预制一定的裂缝或缺陷，而且水压力应是从试样的外表面施加的，不是从预制于试样中心的孔洞或裂缝中施加。

4.1 室内试验

室内试验是研究水力劈裂最主要、最直接，也是最有效的手段。试验中试样的应力状态清楚，可根据研究目的选取不同物质组成和固结状态的试样，在不同条件下进行试验。从已发表的文献分析，人们已经进行过的室内试验研究可综述如下：

从试样角度讲：少量为取自心墙的原状样^[6]，大部分是室内击实粘土样^[7]；少量为非饱和试样^[6]，大部分为饱和试样^[7]；少量为方形(包括长方体和正

方体)试样^[7],大部分为圆筒形试样^[8];有的仅以试样中部小范围作为试验段^[6],而有的以整个试样中心孔作为试验段^[7];试样的固结状态分为不固结^[9]、正常固结和超固结^[10]3种;少量在试样内部预制了裂缝或缺陷^[11],大部分则是完整的均质试样^[7]。

从试验角度讲:试验过程的排水条件有排水^[8]和不排水^[9]2种;应力状态有常规三轴应力状态^[8]和真三轴应力状态^[12]之分;水压力均是从预制于试样内部的圆孔或裂缝内部施加,施加方式分为等压力增量和等流量2种,圆孔或裂缝内水压力的突然减小和流量的突然增大分别为2种方式水力劈裂发生的判据;孔内压力通常是水压力,但也有用粘度较大的流体^[13](如水泥浆)代替水进行的。

通过大量的室内试验,人们研究了试样的物质组成、含水量、密实度、固结比、应力状态、排水条件、水压力加荷速率、试样尺寸及液体粘度等多种因素对水力劈裂压力的影响。许多试验结果都表明了水力劈裂的破裂面与小主应力方向垂直的关系,但许多研究者认为这一结论并不能直接用于土石坝的设计,或者说用其评价土石坝心墙水力劈裂的可能性将过于保守。事实上,大多数土石坝心墙的小主应力是垂直于坝轴向的,即便是发生了与小主应力方向垂直的裂缝,裂缝的方向也只能是与坝轴向平行或近乎平行,不会导致集中渗漏问题。

因此,在室内试验中如何真实或近似地模拟土石坝心墙水力劈裂的实际将是今后的研究重点。采用包含一定裂缝或缺陷的试样,从试样表面施加水压力的方式进行水力劈裂试验,可能能够比较真实地揭示水力劈裂的发生条件。如果实现了这样的室内试验,对水力劈裂的发生条件及其力学机理可以进行深入研究,但对水力劈裂的发展过程仍是一个“黑匣子”,如何使水力劈裂的发展过程可视化将是又一研究重点。高密度电阻率成像技术在监测大气降雨渗入包气带土壤过程^[14]中获得成功,若用于研究水力劈裂问题,也可能取得可喜的成果。

4.2 现场试验

现场的水力劈裂试验^[15]基本上都是在钻孔中进行的,试验中常采用常流量的方式增加孔内水压力,把流量突然增大的现象作为水力劈裂发生的判据,并据此分析水力劈裂的发生条件。常用的分析方法是弹塑性力学中的圆孔或球孔扩张理论,由于试验过程中土体的应力状态很难弄清,试验所得结论也很难用于土石坝的设计与建设。

实际上,钻孔中水力劈裂的机理与土石坝心墙中的不同。比较合理的方法仍是在包含裂缝或缺陷的土体表面施加水压力,当然,在试验中如何监测水力劈裂裂缝的发展同样是值得深入研究的。

4.3 离心模型试验

土工离心模型试验技术是用原型材料制作模型,在原型应力状态下,对研究对象的变形状况和破坏过程进行直观研究的试验方法,在岩土工程的许多领域都得到应用。文[16]用离心模型试验方法研究了土石坝心墙的水力劈裂问题,对相当于原型坝高55.5m的深截水槽心墙砂壳坝进行了模拟Teton坝破坏过程的离心模型试验,所用心墙土料为粘性较大的小浪底坝重粉质壤土。试验结果表明心墙没有发生水力劈裂,这与文[17]中对1976年美国Teton坝在蓄水初期突然失事的原因分析完全不同。

在模型设计中,作者在截水槽两侧的混凝土基座内设有水管,以模拟Teton坝基岩体内裂隙的作用,但模型的心墙是均质的,并不包含预制的裂缝或缺陷,即水力劈裂发生所需的物质条件并不完全具备,“水楔”作用无法形成,水力劈裂现象也就不可能发生。换言之,若模型的心墙中包含裂缝或缺陷,离心模型试验也许可以反映水力劈裂的发生。

5 水力劈裂的数值模拟

总体而言,在土石坝的设计与建设中,人们通过数值方法认识坝体中不同位置应力、应变状态的能力已经超过了人们对诸如气候、坝址等对大坝安全的影响等许多方面的认识能力^[18]。但是对心墙水力劈裂问题,由于对机理认识尚不十分清楚,导致模拟中有些问题的处理可能不太恰当,从而使得计算模拟结果与实际或经验有较大出入。目前的处理方法也都局限在用有限元法确定心墙应力场,进而利用有关水力劈裂发生的判定准则来判断,还未见到对水力劈裂发展过程进行模拟的相关文献。考虑到裂缝或缺陷在心墙中存在的普遍性,文[19]在有限元数值分析中,用具有一定透水能力的节理单元模拟裂缝。由于该方法实际上是把仅有局部裂缝或缺陷的心墙用具有许多贯穿裂缝的心墙模拟,而且节理单元的透水性也缺乏试验支撑,因而不能很好地模拟心墙的水力劈裂问题,但该方法与传统的不考虑裂缝的有限元方法相比,无疑是一大进步。

弄清水力劈裂的发生条件,从力学机理出发建

立水力劈裂的数值判定准则,在此基础上,用数值方法评价水力劈裂的可能性,并模拟水力劈裂的发生发展过程,是研究水力劈裂问题的有效途径。

6 结 语

土石坝心墙水力劈裂问题是一个非常重要、且极其复杂的问题,长期以来倍受工程界关注,许多学者和工程师致力于该问题的研究。但由于问题的复杂性,目前尚无很好的解决方法,使其成为土石坝设计中急需解决、且最具争议性的问题之一。本文仅是笔者对该问题的拙见,在许多方面尚不成熟,尚需进行深入研究。

参考文献(References):

- [1] Ohne Y. Failure causes of embankment dams[A]. In: Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Bangkok, Thailand: [s. n.], 1991. 420 - 422.
- [2] 张丙印, 于玉贞, 张建民. 高土石坝的若干关键技术问题[A]. 见: 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[C]. 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[A]. In: Proceedings of the 9th Chinese Civil Engineering Academy Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 163 - 186.(in Chinese))
- [3] Sherard J L. Hydraulic fracturing in embankment dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1986, 112(10): 905 - 927.
- [4] Sherard J L. Embankment dam cracking[A]. In: Hirschfeld R C, Poulos S J ed. Embankment-dam Engineering, Casagrande Volume[C]. New York: Wiley-interscience, 1973. 271 - 353.
- [5] Dounias G T, Potts D M, Vaughan P R. Analysis of progressive failure and cracking in old British dams[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 621 - 640.
- [6] Jaworski G W, Duncan J M, Seed H B. Laboratory study of hydraulic fracturing[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, 107 (GT6): 713 - 732.
- [7] 丁金栗, 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 Jinli, Yang Bin. Study on hydraulic fracturing of compacted cohesive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(3): 1 - 15.(in Chinese))
- [8] 孙亚平. 水力劈裂机理研究[博士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 1985.(Sun Yaping. Study on mechanism of hydraulic fracturing[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 1985.(in Chinese))
- [9] Panah A K, Yanagisawa E. Laboratory studies on hydraulic fracturing criteria in soil[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(4): 14 - 22.(in Chinese))
- [10] Atkinson J H, Charles J A, Mhach H K. Undrained hydraulic fracture in cavity expansion tests[A]. In: Proceedings of the 13rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. [s. l.]: [s. n.], 1994. 1 009 - 1 012.
- [11] Murdoch L C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments part 1: methods and observations[J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 255 - 265.
- [12] 曾开华. 土质心墙坝水力劈裂机理及影响因素的研究[博士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2001.(Zeng Kaihua. Study on mechanism and influence factors of hydraulic fracturing of earth core dam[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2001.(in Chinese))
- [13] Mori A, Tamura M, Fukui Y. Fracturing pressure of soil ground by viscous materials[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(3): 129 - 136.
- [14] Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography[J]. Water Resources Research, 2001, 37(2): 273 - 285.
- [15] 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.
- [16] 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, (9): 67 - 78.(Shen Zhujiang, Yi Jindong, Zuo Yuanming. Centrifuge model test of hydraulic fracture of earth dam and its analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, (9): 67 - 78.(in Chinese))
- [17] Seed H B, Duncan J M. The Teton dam failure—a retrospective review[A]. In: the 10th Int. Conf. SMFE[C]. [s. l.]: [s. n.], 1981. 219 - 239.
- [18] Milligan V. Some uncertainties in embankment dam engineering[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(9): 785 - 797.
- [19] Ng A K L, Small J C. A case study of hydraulic fracturing using finite element methods[J]. Canada Geotechnical Journal, 1999, 36: 861 - 875.