

李全明 著

土石坝 水力劈裂的 物理机制及数值仿真



气象出版社
China Meteorological Press

土石坝水力劈裂的 物理机制及数值仿真

李全明 著

 气象出版社
China Meteorological Press

图书在版编目(CIP)数据

土石坝水力劈裂的物理机制及数值仿真 / 李全明著. —北京:
气象出版社, 2011. 12

ISBN 978-7-5029-5403-1

I. ①土… II. ①李… III. ①高坝:土石坝—水力学 IV. ①TV641.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 257425 号

Tushiba Shuili Pilie de Wuli Jizhi ji Shuzhi Fangzhen

土石坝水力劈裂的物理机制及数值仿真

李全明 著

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室: 010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑: 彭淑凡 张盼娟

封面设计: 燕 彤

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 196 千字

版 次: 2012 年 1 月第 1 版

定 价: 28.00 元

邮政编码: 100081

发 行 部: 010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审: 章澄昌

责任技编: 吴庭芳

印 张: 10

印 次: 2012 年 1 月第 1 次印刷

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等, 请与本社发行部联系调换

前 言

高土石坝的水力劈裂问题是目前工程界普遍关注又亟待解决的关键问题之一。但有关水力劈裂的发生机理、影响因素以及发生和扩展过程的描述方法等问题至今仍未得到很好的解决。本书在前人研究成果的基础上,深入地分析了水力劈裂发生的物理机制,研究了压实黏土的拉伸应力应变特性及断裂机理,提出和建立了描述水力劈裂发生和扩展过程的数值仿真方法,从而将以往针对一点的土石坝水力劈裂判别方法发展为针对整体结构安全性的评价方法。本书取得的主要新成果有以下五个方面。

(1) 对土石坝水力劈裂发生的物理机制进行了深入的分析,提出了在心墙中可能存在的渗水弱面以及在快速蓄水过程中所产生的渗透弱面“水压楔劈效应”为水力劈裂发生重要条件的论点。利用数值试验、室内模型试验以及土工离心模型试验等手段验证了所提出的渗透弱面水压楔劈作用模型的正确性。

(2) 利用研制的位移控制式单轴拉伸仪,对糯扎渡心墙土料进行了系列的单轴拉伸试验,系统地分析了压实黏土拉伸应力应变特性及断裂机理,建立了拉伸条件下压实黏土的应力应变模型,认为断裂区的大小和断裂能是描述其裂缝扩展行为的重要指标。

(3) 建立了压实黏土的二维脆性断裂模型和钝断裂带模型,分别推导了两种模型全量关系和增量关系的应力应变关系矩阵,并构造了两种数学模型的有限元计算模式。对两种模型裂缝弥散的网格尺寸效应问题进行了深入的研究,提出了脆性断裂模型的网格划分准则。

(4) 将弥散裂缝理论引入水力劈裂问题的研究中,扩展了弥散裂缝的概念。并与比奥固结理论相结合,推导和建立了用于描述水力劈

裂发生和扩展过程的有限元数值仿真模型和算法。

(5) 对已发生水力劈裂破坏的挪威 Hyttejuvet 坝水力劈裂的发生和扩展过程进行了仿真模拟,验证了本书有关水力劈裂发生机理分析及所建立的有限元数值仿真模型的适用性和正确性。利用所建立的水力劈裂评价方法,对糯扎渡高心墙堆石坝蓄水期发生水力劈裂的可能性进行了分析和评价。

目 录

前 言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 问题的提出	(1)
1.2 水力劈裂问题研究综述	(2)
1.3 压实黏土拉伸特性研究综述	(14)
1.4 本书主要内容	(19)
第 2 章 高土石坝水力劈裂发生的物理机制研究	(21)
2.1 渗透弱面水压楔劈作用模型	(21)
2.2 渗透弱面水压楔劈作用模型的验证——数值试验	(23)
2.3 渗透弱面水压楔劈作用模型的验证——室内模型试验	(25)
2.4 渗透弱面水压楔劈作用模型的验证——土工离心模型试验	(27)
2.5 本章小结	(40)
第 3 章 压实黏土拉伸特性试验研究及数学描述	(41)
3.1 位移控制式单轴拉伸仪的研制	(41)
3.2 试验概况	(43)
3.3 糯扎渡心墙土料单轴拉伸试验成果及分析	(44)
3.4 压实黏土拉伸变形特性及断裂机理分析	(50)
3.5 压实黏土受拉应力应变全过程曲线的数学描述	(55)
3.6 本章小结	(62)
第 4 章 压实黏土张拉破坏的脆性断裂模型及数值计算方法	(63)
4.1 有限元法中裂缝的考虑方法	(63)
4.2 压实黏土的脆性断裂模型及裂缝的弥散	(65)

4.3	计算算例	(70)
4.4	本章小结	(78)
第5章	压实黏土张拉破坏的钝断裂带模型及数值计算方法	(79)
5.1	Bažant 钝断裂带模型简介	(79)
5.2	压实黏土钝断裂带模型的全量关系	(80)
5.3	压实黏土二维钝断裂带模型的增量关系	(83)
5.4	压实黏土钝断裂带模型有限元算法的构建	(87)
5.5	钝断裂带模型计算算例: 软弱带楔劈效应数值试验	(92)
5.6	裂缝弥散的计算网格尺寸效应分析	(94)
5.7	本章小结	(100)
第6章	水力劈裂的数值仿真算法及有限元程序系统的开发	(101)
6.1	水力劈裂发生及扩展过程的数值仿真算法	(101)
6.2	有限元程序系统 FEMA2005 开发	(105)
6.3	本章小结	(118)
第7章	高土石坝水力劈裂计算实例	(119)
7.1	挪威 Hyttejuvet 坝水力劈裂破坏过程的仿真模拟	(119)
7.2	糯扎渡高心墙堆石坝蓄水期水力劈裂安全性评价	(130)
7.3	本章小结	(137)
第8章	结论	(138)
参考文献		(140)
致谢		(151)
作者简介		(153)

第1章 绪论

1.1 问题的提出

在水利工程的诸多坝型中,土石坝具有可利用当地材料筑坝、对地形地质条件适应性较好、造价较低、施工方法简单以及抗震性能好等优点,其在国内外水利水电资源开发过程中占有重要的地位。在国外,坝高 250 m 以上的水坝有 9 座,其中 5 座为土石坝,高度超过 300 m 的 2 座水坝均为土石坝,分别为前苏联的罗贡坝^[1]和努列克坝^[2]。在我国,据 1989 年统计^[3],土石坝约占已建成水坝总数的 93%。其中,我国已建成百米以上高心墙堆石坝多座,例如 101.8 m 高的碧口壤土心墙坝^[4]、114 m 高的石头河黏土心墙坝^[5]和 154 m 高的小浪底黏土斜心墙堆石坝^[6]等。目前,一系列大型土石坝工程正在规划、设计和建设过程之中,例如 136 m 高的狮子坪砾石土心墙堆石坝^[7]、125 m 高的冶勒沥青混凝土心墙堆石坝^[8]、186 m 高的瀑布沟直心墙堆石坝^[9]和 261.5 m 高的糯扎渡心墙堆石坝^[10]等。对于这些重大水利工程,充分保证其安全性是进行工程可行性研究的核心问题。土质心墙坝中心墙防渗体是否发生水力劈裂破坏,将直接关系到大坝的安全与稳定,故土石坝设计规范中明确规定要对土质防渗体是否发生水力劈裂进行判断^[11]。

“水力劈裂”概念源于石油开采业,作为一种提高油井产量的方法,是 20 世纪 40 年代石油开采业的重大发展。Clark(1984)^[12]介绍了水力劈裂法在石油开采中的作用。时至今日,水力劈裂在众多领域诸如岩土工程、环境工程、建筑工程和水利工程中都得以广泛的应用。然而,在土石坝工程中,由水力劈裂所产生的大坝事故常常会导致大坝防渗体的破坏,从而导致灾难性的后果。

水力劈裂问题,由于其对工程安全的重要影响而得到众多学者的重视。Seed(1976)^[13]、黄文熙(1982)^[14]和 Wilson(1984)^[15]均指出水力劈裂现象为裂缝在土体中产生和发展的行为。其中,黄文熙^[14]从本质上给出了水力劈裂的定义:水力劈裂是指由于水压力的抬高在岩体或土体中引起裂缝发生与扩展的一种物理现象。

水力劈裂的定义表明了水力劈裂为裂缝在土体中产生和发展的行为,然而有关土体中裂缝发生和扩展机理的分析和研究较少。长期以来,在土工数值计

算分析中很少关注土体的拉伸及裂缝问题,主要原因之一是绝大多数的土工建筑物在一般条件下多处于受压的工作状态。另外,由于土体裂缝会造成土体材料的几何不连续以及力学性质上的各向异性,使得在土工数值计算分析中难以处理。然而,土工建筑物的破坏却常常与结构中局部的拉伸破坏及裂缝的发生和扩展过程(例如水力劈裂破坏)有直接关联,因此,对土体抗拉特性和裂缝开展过程模拟方法的研究具有重要的意义^[16~19]。

截至目前,对水力劈裂问题的研究均针对的是一点或局部产生水力劈裂的条件,然而一点或局部水力劈裂的产生并不一定会导致整体结构(心墙)产生水力劈裂,因此不能笼统地运用某一经验公式来对水力劈裂发生与否做出判断。现有的总应力法和有效应力法都无法计算和分析水力劈裂裂缝的扩展过程。可见,目前对水力劈裂的认识和分析尚缺乏可靠和令人信服的计算理论和方法^[20]。因此,有必要对土石坝的水力劈裂问题开展进一步的研究工作。本书在已有有关心墙堆石坝水力劈裂研究成果的基础上,进一步探讨和论证了心墙水力劈裂的发生条件和发生机理,开展了水力劈裂发展过程模拟方法的研究,建立和发展了可以描述土石坝心墙水力劈裂裂缝发生和扩展过程的有限元数值计算方程和计算程序。

1.2 水力劈裂问题研究综述

1.2.1 发生水力劈裂的工程实例

水力劈裂是土石坝工程中人们最为关注,同时也是最有争议的问题之一。首先,水力劈裂在土石坝工程中之所以最为关注,是因为由水力劈裂所产生的大坝事故常常会导致大坝防渗体的破坏,从而导致灾难性的后果。其次,能否由水库的蓄水压力在土石坝心墙的上游表面造成裂缝,并在水压力的作用下将心墙劈裂,形成集中渗水的通道,产生冲刷并导致大坝的破坏,时至今日在工程和学术界仍有疑问和争论。即使是在接受水力劈裂现象的专家中,对水力劈裂发生的条件以及可能发生的频率等问题也有不同的看法。

值得说明的是,分析造成土石坝是否发生了水力劈裂是件非常困难的工作。由水力劈裂所产生的裂缝通常仅在水库蓄水也即缝内存在水压力的情况下才是张开可见的,因此人们无法通过直接的观察证实在坝体内确有水力劈裂现象的发生。另外,伴随坝体冲蚀的发生,能够证实水力劈裂发生的现场间接证据也通常会遭到破坏。因而,在被认定是由水力劈裂造成的土石坝工程破坏的例子中,几乎都是通过分析和推定得出的结论。

据统计,从1900年至1975年之间有38%的堤坝失事被归因于堤坝的渗漏与

管涌^[21],在通常情况下,管涌会导致灾难性的破坏。导致初始渗漏的触发原因,许多人认为水力劈裂是最大可能的机制。被学者们归因为由水力劈裂造成的工程事故有很多,例如:挪威的 Viddalsuatu 坝^[22]和 Hyttejuvet 坝^[23,24]、英国的 Balderhead 坝^[25,26]、美国的 Wister 坝、Yard's Creek 坝^[27]和 Teton 坝^[28~31]、加拿大的 Manicouagan 坝^[32]和印度尼西亚的 Djatiluhur 坝^[33]等。

位于英格兰的 Balderhead 坝是一座具有狭窄土质心墙的堆石坝,建成于 1965 年。由于心墙的拱作用,压力盒测出心墙内的垂直压力小于上覆土重。1966 年初水库达最高水位时测得渗漏量突然增加,1967 年发现坝顶上游边缘塌陷,坑探发现,心墙内存在较大范围的冲蚀破坏区。Sherard^[27]认为第一次渗漏可能是在穿过心墙的水平裂缝中发生的,而在水库蓄水前它们并不存在,裂缝为作用于心墙上游面的水压所打开,这可能是由于拱的作用使心墙内水平面上的总应力变低的缘故。

挪威的 Hyttejuvet 坝为一高 90 m 的垂直薄心墙堆石坝,心墙用砾石、黏质砂土建造。1965 年建成后心墙中压力盒测出垂直压力小于水压力 $\gamma_w h_w$ 。在 1966 年蓄水达到高水位后,下游坡脚的渗漏量骤然增加并引起心墙冲刷。钻孔勘探时孔中水量流失,调查结论认为渗漏穿过心墙中的水平裂缝发生。Sherard^[27]将裂缝的发生归于与 Balderhead 坝相同的原因。

特别引起各国工程界重视的是美国爱达荷州的 Teton 坝的失事(图 1.1),该坝位于第顿河上,为心墙式土坝,坝高从坝基最低点算起为 123.4 m,岩基裂隙发育,透水性强。心墙土料为风积粉土。大坝建成于 1975 年 11 月,在蓄水过程中于 1976 年 6 月发生垮坝事故。事后组织了专门委员会进行了多次调

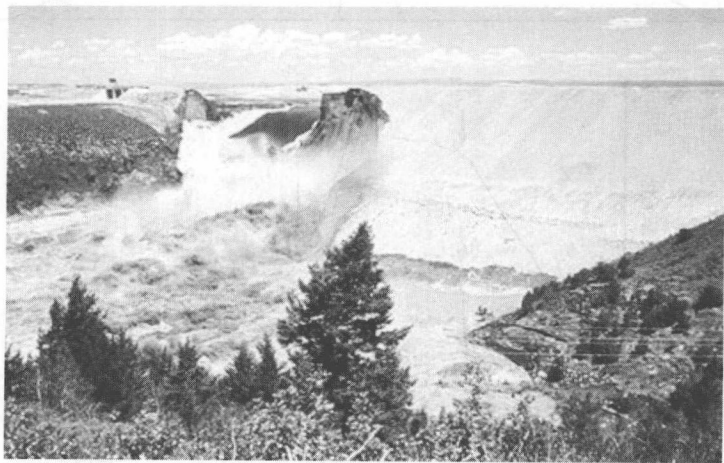


图 1.1 由水力劈裂引起的 Teton 坝的失事

查,取土进行各种试验,结果认为心墙所用粉土极易冲蚀,而沿裂缝发生的冲蚀可能有两个起因:其一是岩基表面的张开裂缝未加妥善处理,粉土沿基岩流失;其二是截水墙嵌入基岩深达 20 m,槽壁坡度较陡达 $60^{\circ} \sim 65^{\circ}$,填土的拱作用减小了槽内土体中的垂直压力,在水压作用下产生水力劈裂裂缝。在 Teton 坝失事以后,关于如何正确估计坝体发生水力劈裂的可能性,在建造高土石坝时如何采取适当的措施预防这类恶性事故的发生,日益成为世界各国所关注的课题。

Lo 和 Kaniaru(1990)^[34] 给出了典型和理想化的水力劈裂现象的特征,如图 1.2 所示。对所示的薄心墙坝,存在一可能的劈裂破坏区,当库水位达到某一高程时,坝体的渗水量会突然增加(可增加数倍),该现象可作为水力劈裂发生的信号。此时由破坏区到库水位的水头即为发生水力劈裂的劈裂水头 H_f 。当库水位降低时,在某一水位渗水量会突然减小,重新回到劈裂发生前的水平,此现象对应着劈裂裂缝的重新闭合,此时由破坏区到库水位的水头为劈裂裂缝的闭合水头 H_{cc} 。采用上述方法,Lo 和 Kaniaru 分析了包括 Balderhead、Hyttejuvet、Viddalsuatu、Teton 和 Yard's Creek 等 5 座坝发生水力劈裂现象的特征,如表 1.1 所示。

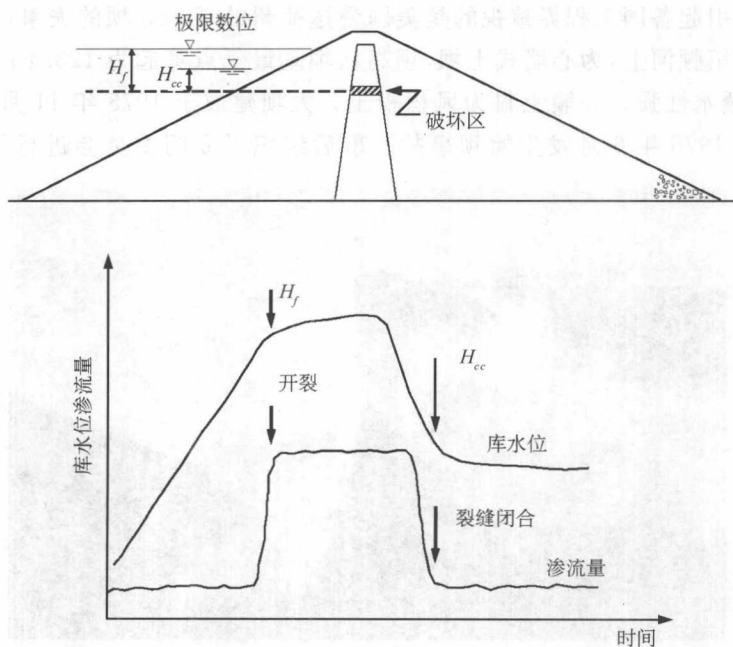


图 1.2 土石坝水力劈裂的典型特征

表 1.1 土石坝典型的水力劈裂破坏现象实例(单位:m)

坝	坝高	破坏区 心墙宽	坝顶高程	最高水位	渗流量 突增水位	破坏区高程
Balderhead	48	6	334.7	332.3	332.3	305~315
Hyttejuvet	90	4	749	746	738~740	718~740
Viddalsuatu	70	≈10	935	930	929.4	923~925
Teton	93	9	1625.5	1622.7	1607	1568~1573
					1615.4	1579
Yard's Creek	24	4	475.9	474	469.1	457.2~464.8

续表 1.1 土石坝典型的水力劈裂破坏现象实例

坝	渗量突减 水位(m)	劈裂水头 H_f (m)	闭合水头 H_{α} (m)	填筑年限 (年)	蓄水速度 (m/月)
Balderhead	323	17.3~27.3	8~18	4	2
Hyttejuvet	717	10~12	8.3	1	20
Viddalsuatu	925.7	4.4~6.4	0.7~2.7	1	11
Teton	1604.6	34~39	31.6~36.6	3	27
		36.4	29		
Yard's Creek	465	4.3~11.9	0.2~7.8	2	7

Sherard(1986)^[35]分析了众多被认为发生了水力劈裂的土石坝工程实例,认为能够证实水力劈裂现象发生的证据有以下6方面。①在均质土石坝的下游表面出现湿斑并逐步扩大,且通常在蓄水位高于湿斑高程不久出现,也即湿斑不可能由通常的渗流过程产生。②对于采用不同材料分区的心墙坝,除了不均匀沉降外,坝壳料对心墙通常还存在明显的拱作用,因而产生水力劈裂的可能性高于均质坝。③一些心墙坝心墙孔隙水压力的观测结果表明,埋设在心墙下游侧的测管水头同水库的库水位有直接的瞬时相关关系,测管水头仅稍低于有时甚至等于水库的库水位,且随着库水位的变化快速地变化。该现象只能通过认为在心墙中产生了充满水的裂缝才能加以解释。④在水库蓄水与重新放空后,在勘察沟槽内观察到心墙墙体上存在水平状的湿软薄层(Wet seams)。Sherard认为这些湿软薄层为水力劈裂发生后由缝面的张开和重新闭合过程所产生。⑤即使是在小水头时,在心墙和岸坡岩石的接触面处仍有较大的渗流量。⑥数值计算的结果表明,在坝内常存在应力较小的区域。Sherard认为,在绝大多数的土石坝内,即使是较小的不均匀沉降也会产生可导致水力劈裂过程

产生的初始裂缝,而在实践中之所以未普遍发生水力劈裂事故应归功于坝体排水和反滤层的成功设计。在 Sherard 使用和分析的例子中,绝大多数的裂缝是水平方向的,发生在坝顶附近,并且均在较小的水头作用下产生。

Sherard 上述有关水力劈裂在土石坝工程中会普遍发生的观点虽然在研究学者中间具有一定的影响,但并未得到最新的研究结果的支持,也并未被普遍接受。根据近年来学者们对有关水力劈裂发生机理和发生条件的研究成果,一般认为,土体水力劈裂是土体的应力状态在内部孔隙压力和表面压力作用下达到抗拉强度极限时发生开裂并在土体内扩展的现象。水力劈裂现象的发生是有条件的。

1.2.2 水力劈裂试验及发生机理研究

总体上讲,长期以来针对水力劈裂的发生条件和判别的问题,众多学者分别采用室内和野外试验、计算及理论分析等方法进行了较为广泛的研究。但由于问题的复杂性以及学者们进行研究时所采用的方法、手段及条件的不同,所得到的研究结论并不具有可比性,得到公认的基本性的研究工作不多。许多试验应力条件过于复杂且不明确,使得难以进行深入的理论分析,以揭示水力劈裂发生的机理。

水力劈裂的理论和破坏机理的研究是在水力劈裂试验的基础上发展起来的。现场试验基本上是在钻孔中进行的。而在实验室内则多数是利用中空的圆柱体试件(厚壁筒)或者钻孔试件来探讨水力劈裂的规律,而早期的实验室试验主要用于模拟现场的钻孔试验。

Morgenstern 和 Vaughan(1963)^[36]提出了用于研究水力劈裂破坏机理的分析理论。水力劈裂产生前,土层中存在某一状态的有效应力,当孔压上升时,有效应力圆向左移动,直到与有效 Mohr-Coulomb 破坏包线相切时,水力劈裂发生。破坏时的有效应力可以是压缩的,也可以是张拉的,取决于土的强度与初始总应力大小。

挪威土工所 Bjerrum 等(1966—1968)^[37]对以色列死海边上一蓄水池围堤的天然黏土心墙进行了 1000 多次渗透试验。试验发现,当水压力超过上覆土重的 0.4~0.5 倍时,渗透系数突然由 10^{-9} m/s 增至 10^{-6} m/s,相差上千倍。以后又在挪威做了系统试验,发现产生水力劈裂时的水压力与侧压力有关。而且发现水头减小后渗透性减小,裂缝重新闭合。

美国的 Haimson(1968)^[38]致力于现场钻孔水力劈裂技术确定岩层应力。他用热弹性力学的方法,比拟液体深入岩体介质,把岩体作为一种脆性的、均质的、各向同性的、线性有孔介质,认为钻孔壁切向应力达到岩石的抗拉强度时发生开裂。对一个无限中空圆柱体,他推导出发生沿垂直方向裂缝的起始水压力为:

$$\Delta u_f = \frac{\sigma_t + 3\sigma_3' - \sigma_2'}{2 - \alpha \times \frac{1-2\mu}{1-\mu}} \quad (1-1)$$

其中: σ_2' 和 σ_3' 分别是水平方向的大小有效主应力; σ_t 为岩石抗拉强度; μ 为泊松比; α 为岩石材料系数。

若岩石不透水, 无裂隙, B. Haimson 认为上式可以简化为:

$$\Delta u_f = \sigma_t + 3\sigma_3' - \sigma_2' \quad (1-2)$$

英国的 Vaughan(1971)^[39] 通过水力劈裂现场试验建议的水力劈裂判别式为:

$$u_{if} = m\sigma_{\min} + |\sigma_t| \quad (1-3)$$

式中, m 取决于钻孔周围的应力分布与应力路径, $m=1\sim 2$ 。

Bjerrum 等(1972)^[40] 利用钻孔水力劈裂方法来测定底层中的初始应力和侧应力系数, 钻孔发生水力劈裂的起裂水压力为:

$$u_{if} > \sigma_z + |\sigma_t| \quad (1-4)$$

式中, σ_z 为地层的垂直应力。

根据 Bjerrum 等的研究成果, Penman(1976)^[41] 在 Scammonden 坝和 Llyn Brianne 坝的黏土心墙中进行了水力劈裂试验。土压力盒和测压管在坝体施工时被一起埋设在坝的不同高程处。水力劈裂试验分别在施工期和竣工后 3 年进行。试验通过提高测压管中的水压力产生水力劈裂, 然后逐渐减小水压力, 测量流量并确定闭合压力。试验中发现闭合压力随着试验次数的增加而增大, 而且最低的闭合压力值介于有效大、小主应力之间。他们还注意到施工结束时有效压力低, 闭合压力此时接近于土压力盒测得的大主应力, 由于竣工后孔隙水压力的消散, 有效应力提高后, 闭合压力更接近于小主应力, 但总大于小主应力。Penman 解释这些闭合压力较高的原因是水力劈裂趋向于发生在由于填筑或压实形成的黏土心墙水平特征面的方向上, 在此方向, 闭合压力更接近于大主应力, 而当有效应力较高时, 这些水平特征面对劈裂产生的方向影响较小。

Bjerrum 和 Andersen(1972)^[42] 在三轴试验装置中模拟现场试验进行了水力劈裂试验, 在插入试样的测压管中增加和降低水压力进行劈裂试验(图 1.3)。试验结果表明, 闭

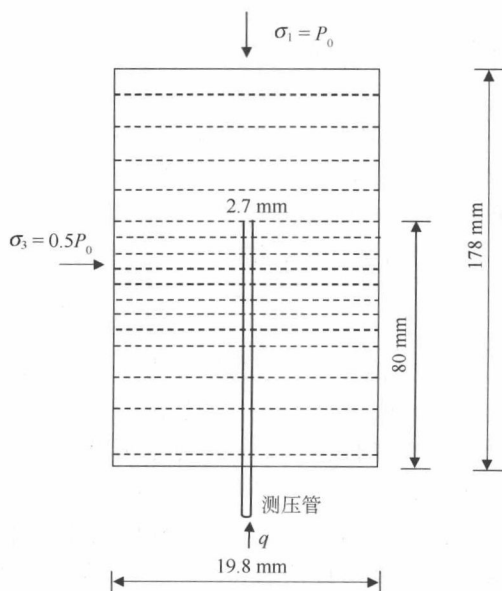


图 1.3 Bjerrum 水力劈裂试验

合压力等于围压(水平应力),劈裂面为垂直面,并且延伸至试样边缘。

Nobari 等(1973)^[43]利用中空圆柱体试件进行水力劈裂试验,试验用土料为匹兹堡砂质黏土,此外还用巴德黑德坝(Balderhead Dam)与海堤尤维特坝(Hyttejuvet Dam)心墙的砂质黏土做了对比试验。试验中控制不同的轴向应力 σ_1 及外周压力 σ_3 ,试件中心孔内填砂,外周用砂或滤纸做成透水带,分别施加内水压力 u_i 及外水压力 u_o 。试验结果表明:水力劈裂是发生在小主应力面上的拉伸破坏。裂缝可以是垂直的也可以是水平的,它取决于试件的受力状态。Nobari 的试验能控制较多的应力与渗流状态,试验分析对比了不同条件下的水力劈裂现象,并指出了水力劈裂的发展过程。Nobari 认为水力劈裂的发生属于拉伸破坏,它从有效小主应力最先达到抗拉强度的地方首先产生而后扩展到整个断面;土的抗拉强度有阻碍劈裂发生的作用,但由于土的抗拉强度一般不大,其影响不是主要的,在不均匀应力状态下,水力劈裂是逐渐发生的,而不是突然贯穿整个心墙;其发生的最危险位置是心墙的上游面。

Decker 和 Clemence(1981)^[44]对压实低塑性黏土进行了常规三轴试验,试验通过一根插入试样中注射器针头施加内水压力,试样破坏时注入的水流量突然增加。试验结果表明,试样的破坏形式近似满足莫尔-库伦破坏准则。

Jaworski 和 Duncan 等(1981)^[45~47]在 Teton 坝失事后用该坝的原状土和重塑土制成尺寸为 203 mm 的立方体试件,在三个方向分别施加应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 ,在垂直于击实层面的钻孔内施加水压力进行水力劈裂试验,研究了土的组成、密度、含水量、抗拉强度、试验历时等因素对水力劈裂的影响,以及在试件劈裂后降低钻孔中水压力然后重新升压的渗流变化。他们认为造成水力劈裂的水压力 u_{if} 可以表示为侧向小主应力 σ_H 的线性函数:

$$u_{if} = m \cdot \sigma_H + \sigma_m \quad (1-5)$$

式中, m 为试验点回归线的斜率,它取决于钻孔周围的应力分布和土的总应力路线,在 1~2 之间取值,在他们的试验中 $m = 1.5 \sim 1.8$; σ_m 为截距,它与土体的抗拉强度 σ_t 和试验条件如加荷速率及钻孔尺寸等有关。关于土体的抗拉强度 σ_t 的影响, Jaworski 给出了一较为简明的形式:

$$u_{if} = \sigma_H + \frac{1}{2} |\sigma_t| \quad (1-6)$$

上式表明破坏压力与初始应力水平之间的差值为土体抗拉强度的一半。

Jaworski 和 Duncan 还用 Teton 坝的原状土和重塑土模拟心墙坝心墙上游面的水力条件进行了立方体水力劈裂试验(图 1.4)。结果表明,当黏土试样表面的水压力小于直到等于 σ_3 时,试样不发生水力劈裂。当水压力达到稍大于 σ_3 的某一值时,在 σ_3 向发生了橡皮膜和试样的脱离,但此时土样中仍未出现劈裂裂缝。据此可以认为,在土体与其他材料的边界处发生“水力分离”的可能性更大,水力劈裂发生在土体最薄弱处,为一个同“软弱带”相联系(weak strata)的

现象。水力劈裂可发生在存在有非连续现象的地方,进一步讲它的发生可能必须要有非连续现象的存在,如:钻孔、接近岩石裂隙的较松的土体、事先已经存在的初始裂缝等。已经发生的水力劈裂的实例均由上述的非连续现象所导致。水力劈裂发生需要土体中的最小有效主应力达到土体的抗拉强度。在均匀连续的土体内,单一的孔隙水压力增长不能在土体中产生负的有效应力,因而不会导致水力劈裂现象的

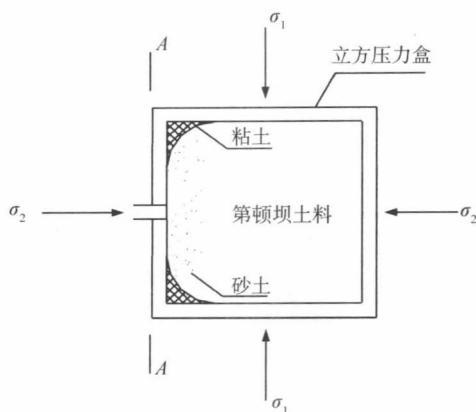


图 1.4 立方体水力劈裂试验的试件结构图

发生。土体中的有效应力只能在总应力或者孔隙水压力发生非均匀变化时才可能变为负值,而这种情况最可能发生在土体中的非连续带上,由于“楔劈作用”(wedging action)使得水压力有将土体劈开的作用。当水压力增加缓慢时,由于渗透作用,非连续带附近的水压力会得到均化,从而降低楔劈作用的影响。所以,较大的渗透系数和较慢的水库蓄水速度会降低水力劈裂发生的可能性。在坝体的心墙里,均匀的孔隙水压力的增加,不会产生楔劈作用而导致裂缝的发生。

Atkinson 等(1994)^[48]进行了室内三轴不排水水力劈裂的试验研究。试样选用两种直径:38 mm 和 100 mm,试样的孔径有三种:6 mm、16 mm 和 38 mm,孔长 25 mm,通过在孔内快速提升液体压力使试样产生水力劈裂。试验结果表明,劈裂压力与围压、土的不排水剪强度以及孔径与试样直径的比率有关,另外也与所加液体的类型、土的超固结比、初始应力比以及液体抬升速度等有关。

在我国,黄文熙先生针对土石坝水力劈裂问题提出过许多精辟和具指导性的意见,倡导、推动和指导了我国在该方面的研究工作。他指出^[14]:“心墙中任何一点处的孔隙水压力如果使该点处的最小主应力的有效值降低至心墙土料的抗拉强度,心墙就会沿着这个最小主应力面产生水力劈裂”。

朱建华等(1985)^[49]利用中心钻孔的圆柱试件,研究了试件尺寸、水压上升速率、试件透水性、含水量与固结历时等因素对水力劈裂特性的影响。通过对不同端部进水口形状的实心试件的水力劈裂试验,研究具有不同流场的试件的水力劈裂问题。他们认为水力劈裂既不是一点破坏导致整体破坏,也不是整体达到强度极限后出现的破坏形式,而是介于两者之间,并认为在渗流力的作用下,只有流线间存在一定的夹角时才会导致水力劈裂。

清华大学岩土工程研究所(丁金粟、孙亚平、杨斌和黄良辉等)曾对水力劈

裂现象进行过多方面深入系统的研究,得到了有关水力劈裂发生机理方面许多重要的认识。

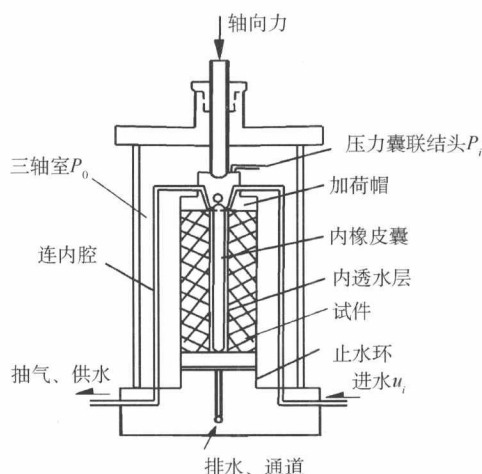


图 1.5 孙亚平的水力劈裂试验仪

孙亚平(1985)^[50]利用改装的普通三轴仪进行了中空圆柱试样的室内水力劈裂试验(图 1.5)。通过对水力劈裂试验及其力学机理的研究,说明水力劈裂发生是由于土体中某处的最小有效主应力 $\sigma_{\min}$ 达到土的抗拉强度极限 σ_t 所致,也即:

$$\sigma_{\min} = \sigma_t \quad (1-7)$$

同时,还证实,上述条件只是一个必要条件而不是充分条件,因为试件既可能在内壁处切向应力 σ_θ 达到 σ_t 之后马上破坏,也可能需在全断面上均达到该条件后才发生破坏。因此认为,坝体或心墙水力劈裂问题,应该采

用有效应力分析法,以分析其应力分布状况。分析时应考虑产生稳定渗流状态时渗流体积力的作用。在进行有限单元计算时以 $\sigma'_{\min} = \sigma_t$ 条件进行判断,而不能用水压力 u_i 值是否超过起始条件下最小主应力与土体抗拉强度之和来判断水力劈裂是不是会产生。这个 $\sigma'_{\min} = \sigma_t$ 条件,可能不是一个充分条件,但用它来判断是否发生水力劈裂是偏于安全的。

杨斌(1985)^[51]和黄良辉(1989)^[52]先后利用三轴压缩、拉伸、扭剪仪以及三轴压缩仪等进行了不同周压、不同应力比以及不同渗水条件等复杂应力条件下的水力劈裂试验,同时还对存在初始扭转剪切破坏面的试件进行了水力劈裂试验。通过对上述试验成果的分析认为渗水作用既可导致由于 $\sigma_{\min}$ 达到抗拉强度 σ_t 的拉伸破坏形式,也可导致由莫尔-库伦理论所控制的剪切塑性破坏,破坏的形式视试件的大小主应力比 σ_1/σ_3 而定。试验结果表明,水力劈裂的发生面总是沿着试样的最小主应力面发生;当轴向应力为最小主应力时,水力劈裂面为水平面;当切向应力 σ_θ 为最小主应力时水力劈裂面为径向劈裂面;而在有扭矩作用下的复杂应力条件下,水力劈裂面也相应为一倾斜螺旋面,同相应的最小主应力面一致(图 1.6)。他们认为,渗透力作为一种体积力在土体中引起应力的

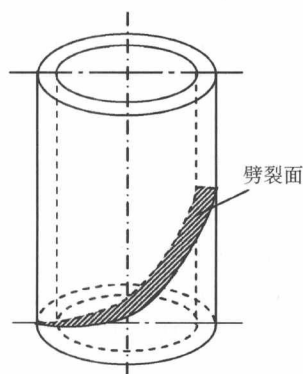


图 1.6 复杂应力状态下的劈裂面