

多场耦合作用下高混凝土坝水力劈裂研究综述

甘磊^{1,2}, 沈振中^{1,2}, 徐力群^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 阐述了混凝土结构水力劈裂的研究现状, 结合多场耦合作用下高混凝土坝水力劈裂研究中存在的问题, 从水工混凝土结构水力劈裂理论、试验技术、数值模拟和不同耦合条件下裂缝扩展研究等方面归纳了国内外的研究成果, 提出了多场耦合作用下高混凝土坝水力劈裂试验仪器设备研制、试验测试技术、多场耦合作用下裂缝扩展机理及耦合机理、考虑结构裂缝任意性的数值模拟技术等尚待进一步研究的问题。

关键词: 高混凝土坝; 水力劈裂; 多场耦合; 裂缝扩展; 综述

中图分类号: TV642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2013)02-0087-08

Review on hydraulic fracture in high concrete dam under multi-field coupling conditions//GAN Lei^{1,2}, SHEN Zhenzhong^{1,2}, XU Liqun^{1,2} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The research status of hydraulic fractures in concrete structures is reviewed. With regard to the existing problems in the research on hydraulic fractures in high concrete dams under multi-field coupling conditions, the worldwide results of hydraulic fractures in concrete structures are summarized from the perspectives of hydraulic fracturing theories, test techniques, numerical simulation methods, and crack propagation studies under different coupling conditions. Several prospects are proposed: test equipment and techniques for hydraulic fractures in high concrete dams under multi-field coupling conditions, crack propagation and coupling mechanisms for different coupling conditions, and numerical techniques considering arbitrary structural cracks.

Key words: high concrete dam; hydraulic fracture; multi-field coupling; crack propagation; review

随着大型水利水电工程建设的不断建成和投入运行,大型水工混凝土结构越来越多,受设计和施工以及养护等方面因素的影响,混凝土出现裂缝及裂缝扩展几乎是不可避免的,有的甚至在施工期就出现了各种各样的裂缝,影响了结构的安全性、实用性和耐久性^[1]。混凝土坝的失效和破坏总是由坝体混凝土的裂缝萌生和扩展引起^[2],随着筑坝技术的快速发展,许多坝高200 m以上甚至300 m级的混凝土高坝已在建设,而高坝都是在深水压力和温度变化作用下运行,因此坝身存在的裂缝引起的水力劈裂问题尤为突出^[3],坝身存在的损伤裂缝在深水压力和温度变化作用下有可能进一步扩展,特别在坝踵这样的要害部位,如果裂缝延伸较长,就有可能破坏坝体的整体性,发展成为渗漏通道,威胁坝体的

安全,造成巨大的经济以及生命财产损失^[4]。因此,水工混凝土结构水力劈裂问题已成为目前迫切需要研究解决的热点问题。

水工混凝土内部存在着随机分布的初始微观裂纹,当混凝土结构受力时,这些缺陷极易产生应力集中并迅速起裂、扩展、汇聚形成宏观裂缝,诱发混凝土结构的宏观开裂或破坏^[5]。同时,混凝土中的裂纹通常不是单一的,而是由多种裂纹共同扩展形成。对于水工混凝土水力劈裂问题,由于水压力和温度荷载作用下的混凝土裂缝扩展试验难度大,装置复杂,导致目前的相关试验研究还不多。

水工混凝土水力劈裂问题的实质就是具有高势能的水对混凝土的破坏,由于混凝土内孔隙水的渗流过程及孔隙水压力的存在,使得对渗流与应力耦

合作用下的混凝土水力劈裂机理过程的描述更为复杂和困难。同时,混凝土的温度改变将引起混凝土应力发生变化,当约束拉应变超过混凝土的极限拉伸值时,混凝土结构发生开裂破坏。温度变化引起热应力和热应变使得应力场和位移场发生改变,从而引起水工混凝土裂缝特性发生改变,甚至引起裂缝的进一步扩展。渗流-应力-温度等多场耦合作用下高混凝土坝裂缝产生、发展的机理以及模拟分析方法的研究,具有重要的理论意义和应用价值,研究成果可广泛应用于水工混凝土结构的设计、施工和安全评价。

1 混凝土裂缝扩展理论研究

材料的破坏过程是两大力学难题之一。传统的力学强度计算理论以材料力学和结构力学为基础,通常假定材料为均匀连续体,而且认为材料各向同性,避开了材料客观存在的缺陷、裂缝等,无法解释理论强度远高于实际强度的原因,也不能描述裂缝尖端存在应力集中严重的现象。

断裂力学主要研究对象为裂纹,通过考虑裂纹尖端的应力场和位移场,计算裂纹尖端的应力强度因子,从而分析荷载作用下裂纹的扩展规律^[6-7]。1913 年 Inglis 采用应力集中观点解释了由于材料存在缺陷使得材料的实际强度远低于理论强度。1921 年,Griffith 提出了脆性材料裂纹扩展的能量准则,用弹性体能量平衡的观点研究了玻璃、陶瓷等脆性材料中的裂纹扩展问题。1957 年 Irwin 提出了应力场强度观点及应力强度因子断裂准则。应力强度因子断裂准则与裂缝扩展的能量准则构成了线弹性断裂力学的核心内容。弹塑性断裂研究的发展起步于 20 世纪 60 年代,英国科学家认为弹塑性断裂过程聚集于裂缝前方的条状屈服区,并建立了 BCS 连续位错模型、Cottrell 断裂过程区模型、Dugdale 简化条状塑性区模型、Barenblatt 内聚断裂模型等弹塑性断裂模型。1965 年 Wells 根据上述模型提出以裂缝尖端张开位移 COD (crack opening displacement) 作为表征断裂的参量,建立了裂缝的断裂准则。

从应力强度因子出发,1968 年美国科学家提出以 J 积分和 HRR 理论作为断裂力学参量。1991 年美国电力研究院以 J 积分为断裂判据,推出了较完整的延性断裂手册,标志着弹塑性断裂力学的完善。1961 年 Kaplan^[8]将断裂力学的概念引入到混凝土中。Lajtai^[9]建立了压剪断裂的强变理论,指出在受压剪作用下,裂缝端部形成不均匀应力场,存在拉应力和压应力集中现象,产生垂直受力方向的正剪切裂缝。在国内,徐道远等^[10]在分析大体积混凝土

破坏机理并进行大量试验的基础上,提出了一种损伤-断裂耦合模型,该模型能反映如混凝土坝这样的大体积混凝土结构开裂至破坏过程的实际情况。张镜剑等^[11]提出了一种适用于分析含压剪裂缝结构的非线性断裂力学数值分析模型——压剪钝裂缝带模型;杨延毅^[12]运用损伤力学理论,从微裂缝损伤演化发展的角度研究混凝土裂缝的形成与扩展机理,提出了相应的理论判据。混凝土结构中不可避免地存在缺陷和裂缝,用连续介质来反映混凝土材料的力学性能不符合实际情况。现今,许多学者将混凝土断裂力学和损伤力学引入到混凝土裂缝的扩展研究工作中。

2 混凝土水力劈裂试验研究

从 20 世纪末开始,我国进入了水利建设的黄金时期,一大批处于高水头、大埋深等恶劣水文地质条件下的高坝、深埋隧洞相继开工建设。相对于复杂多样的工程建设背景,岩体和混凝土水力劈裂的研究却还处于初始阶段,工程实践缺少理论支持,急需深入开展水力劈裂的试验以及计算方法研究。水力劈裂实验是揭示水力劈裂机理的最佳方法,有关研究岩体单裂纹渗流特性与周围应力之间关系和裂纹水力劈裂机理的试验较多^[13-21],但研究混凝土材料断裂细观物理机制方面的试验以及裂纹水力劈裂机理的试验却较少。由于混凝土的力学性能与试件尺寸有关,要确切描述混凝土的力学性能就必须研究混凝土的尺寸效应。很多实际的混凝土结构尺寸均比较大,难以进行实际结构的系统试验,仅能在实验室进行小尺寸试件的模拟,据此得到的结果对实际结构的指导意义和实用性有限,成为目前研究的难题之一。吴智敏等^[22-23]的试验表明,混凝土的断裂韧度随试件尺寸的增加而增加,但当试件尺寸增加到一定值时,断裂韧度趋于恒定,即混凝土断裂韧度只在一定范围内存在尺寸效应。同时,徐世烺等^[24]采用体积、跨度、厚度和高度四系列的三点弯曲梁试件研究了混凝土断裂韧度的尺寸效应规律,发现试件高度是影响混凝土断裂韧度的主要原因。

在混凝土水力劈裂机理研究方面,Brühwiler 等^[25-27]采用混凝土楔形劈裂试件对混凝土裂缝进行了试验研究和数值模拟,研究了裂缝中静水压力对混凝土表观断裂能和表观断裂韧度的影响,测试了裂纹内水压力分布,结果表明,裂纹内水压力会导致裂纹尖端损伤,降低裂尖部位的断裂韧度。贾金生等^[3]采用预设裂缝的全级配混凝土大试件进行试验,在裂缝面上直接施加水压力,直至混凝土被高压水击穿。由于混凝土的力学行为与岩石材料有许

多相似之处,故可以将有关岩石水力劈裂方面的试验方法引入混凝土水力劈裂试验研究工作中,李宗利等^[28]针对岩体混凝土类材料从单裂纹的水力劈裂模型、试验技术、数值方法、裂纹内水压力分布等方面介绍了国内外的理论研究成果。

3 混凝土水力劈裂数值方法研究

3.1 连续介质力学分析法

有限元法是当今应用最为广泛的数值方法。为了解决裂缝的扩展问题,Benzley^[29]提出采用奇异单元法,Atluri等^[30-31]提出采用增强单元法和动态奇异单元法。Swenson等^[32]采用节点释放技术模拟裂缝沿单元边界扩展,Bittencourt等^[33]通过调整局部网格以实现对接弹性材料裂缝扩展的模拟;Lim等^[34]应用上述相近方法实现对弹塑性材料的复合型断裂的模拟;杨庆生等^[35]提出采用自适应有限元法对裂缝扩展进行模拟分析;Poston等^[36]通过引入接触单元实现裂缝扩展模拟,该方法在可能产生裂缝的区域布置厚度为零的接触面单元,通过接触面单元的应力判断裂缝的开裂情况及路径。

Belyschko等^[37-38]等采用扩展有限元法(extended finite element method, XFEM)解决了网格不断调整的问题,将裂缝和有限元网格分开考虑,通过在位移函数中加入增强项以解决裂缝面的不连续性和裂尖的奇异性,从而解决裂缝扩展问题。目前国内有学者将 XFEM 应用于混凝土重力坝的开裂分析^[39-40],方修君等^[41]还利用 XFEM 对裂隙水压作用下混凝土试件的开裂过程进行了模拟,首次将 XFEM 应用于混凝土水力劈裂研究。可以看出, XFEM 的应用已经由最初的梁、板等构件拓宽到了大型水工结构的开裂破坏研究,并且可以用于研究混凝土的水力劈裂破坏。董玉文等^[42]研究了采用 XFEM 进行重力坝水力劈裂数值模拟的方法。

边界元法^[43]可以分别通过直接法和间接法建立边界方程。为了处理裂缝扩展问题,Sladek^[44]采用拉普拉斯变化法分析了在冲击荷载作用下,无限弹性内含圆片裂缝的动态应力强度因子;Portela^[45]采用双重边界元法研究二维和三维的裂缝扩展问题;Shou等^[46]采用位移不连续法求解裂缝的不连续位移场和应力场;Dwyer等^[47]采用边函数法,通过不同的势函数考虑不同的边界,如内部空洞、裂缝等边界;程玉民等^[48-49]分别采用相似边界元法和无限相似边界元法,对瞬态载荷作用下的动态应力强度因子进行了分析计算。尽管边界元法的研究已经开展了很多年,但是边界元法还是不适合用来处理非线性材料、多介质等复杂问题。

3.2 非连续介质力学分析法

数值流形方法(numerical manifold method, NMM)以拓扑流形和微分流形为基础,采用数学覆盖和物理网格两套独立网格,将有限元网格作为数学覆盖,边界条件、裂缝、交界面等作为物理网格,通过物理网格对数学覆盖的再剖分,形成覆盖材料全域的物理覆盖系统。此方法可以较好地模拟裂缝扩展问题,Tsay等^[50]采用数值流形方法和断裂力学相结合的方法研究裂缝扩展及尖端应力场;王水林等^[51]利用这种将连续变形与非连续变形分析相结合的数值流形法对裂缝扩展进行了数值模拟;Chiou等^[52]用虚位移扩展法和数值流形方法相结合来研究混合裂缝扩展问题。

无单元法(EFM)是一种较为新颖的数值方法,它只需计算域的几何边界及计算点,不需要单元信息,因此具有边界元法的优点,且可以在开裂点附近布置可移动的加密节点以方便地跟踪裂缝的扩展过程,同时无单元法基本方程的数学基础与有限元法类似,所以无单元法也具有有限元法的优点,又比边界元法具有更广泛的应用范围。应用无单元法追踪裂纹扩展,目前还存在着不少难题有待解决,在工程中的应用也很少,国内外许多学者都在进行着这方面的研究;Belytschko等^[53]提出了无单元伽辽金法(EFGM),这种方法在计算形函数导数时保留了被Nayroles等^[54]忽略的所有项,并利用拉格朗日乘子法引入本质边界条件;在国内,清华大学张雄等^[55]提出了基于子域法的紧支函数加权残量法的无网格格式和最小二乘配点的无网格法,避免采用背景网格形式以消除其对数值积分的限制,并将此法应用于求解弹塑性及波传动等问题;栾茂田等^[56-57]提出了采用有限覆盖无单元法解决连续与非连续问题,并将此法应用于裂缝扩展追踪问题、岩土类弱拉型材料摩擦接触问题和脆性材料损伤断裂演化行为问题等方面的研究;刘欣等^[58]提出了流形覆盖思想的无单元法,该法在边界奇异性半解析无单元法研究的基础上,采用四象限法以确定覆盖范围大小;周维垣等^[59]对无单元伽辽金法进行了详细介绍,提出了一种拱坝开裂分析的近似方法(代表体积法),随后又将无单元伽辽金法用于三维断裂力学^[60],并应用于拱坝三维开裂分析中^[61]。但是无单元法计算中系数矩阵带宽比较大,致使计算量也相当大,从计算精度及方便性来说,无单元法优于有限元法,但就计算效率而言,无单元法不及有限元法,因此,将无单元法与有限元法耦合起来处理问题效果更好、更为方便,为解决高混凝土坝水力劈裂问题提供了全新的途径。

4 混凝土多场耦合模型研究

4.1 渗流-应力耦合模型

渗流-应力耦合模型主要包括渗流场和应力场的数值模拟及裂缝特性的模拟两个方面的内容,其中耦合模型中的关键问题就是如何反映渗流过程中裂缝的扩展和萌生。一直以来,关于混凝土水力劈裂方面的研究都只考虑裂缝的内水压力或者整体渗流场对结构应力、变形状态的作用以及对裂缝扩展的影响。混凝土结构的应力状态和裂缝位置、长度、宽度以及形状的变化也都会改变结构的渗流场和裂缝的内水压力,因此渗流场与应力场之间的相互作用在研究高混凝土坝水力劈裂时是不容忽视的。高压水致使混凝土裂纹张开、扩展、贯通的同时,伴随着水流在裂纹中运动。裂纹内水力特性及压力直接影响混凝土的应力应变状态,尤其是对于在深水压力下运行的高混凝土坝而言,建立其流固耦合模型存在一定的困难:①裂纹的失稳扩展也并非稳定的发展,而是跳跃式前进,水流也并非恒定流。裂纹流体运动方程的求解边界条件注入流量和外部水头是恒定的,这样的边界条件不符合深埋地下结构、高坝结构等结构中水流所产生的水力劈裂问题。②流固耦合分析时,涉及裂纹的张开宽度、张开速率及加速度、裂纹的渗透系数等参数,实际应用较为困难。

目前渗流场与应力场的耦合研究多半都以岩体,尤其是含裂隙的岩体作为研究对象。鉴于混凝土与岩体同为多孔介质,它们的内部结构在很多方面具有类似的特征,将岩体的渗流场与应力场耦合模型应用到混凝土结构上也不失为一种有效的解决办法。沈振中等^[62-63]将无单元伽辽金法引入渗流场计算,运用无单元法求解重力坝以及岩体的渗流场与应力场。将无单元法引入渗流-应力耦合分析模型,研究耦合条件下高坝的水力劈裂问题是一种比较可行的方法。

4.2 渗流-温度耦合模型

温度荷载是混凝土坝的主要荷载之一,当混凝土的温度发生改变时,例如冷却水的侵入、水泥水化热以及环境温度的改变,都将引起混凝土的应力改变,当约束拉应变超过混凝土的极限拉伸值时,混凝土结构发生开裂破坏。温度变化引起热应力和热应变使得应力场和位移场发生改变,同时随着温度的变化,材料的自身物理力学性质也会发生改变,从而引起水工混凝土裂缝的特性发生改变,甚至引起裂缝的进一步扩展。在温度场分析中,由于水等渗透介质在渗流场中的运移过程中,必然存在与坝体的热量传递与交换,导致水工结构内的温度场分布发

生一定的改变,因此渗流场对温度场的作用是不可忽视的。当前渗流-温度耦合作用大多都是针对地下岩体进行研究的,Harlan^[64]考虑渗流场和温度场的耦合作用,提出了冻结过程中的热质迁移数学模型;柴军瑞等^[65]采用等效连续介质法,提出渗流和温度耦合模型,并给出了有限元法计算方法;黄涛等^[66]通过将裂隙围岩体渗透性能与热物理性能的等效连续化处理,建立了围岩体温度场与渗流场耦合作用数学模型,计算了某隧洞的温度和渗流场;赖远明等^[67]应用伽辽金法导出相变温度场和渗流场的有限元方程,并计算了寒区大坝和挡土墙的渗流场和温度场;周志芳等^[68]建立了考虑热对流、热传导、热机械弥散及含水介质骨架与水之间的热量交换的地下水热量运移数学模型,运用 BEM-FAM 耦合法求解热量运移的水流-传热耦合模型,具有较好的计算精度;张树光^[69]提出渗流改变了温度场的对称分布,热交换随着渗流速度的增加而向顺渗流方向移动;张玉军^[70]采用裂隙岩体的渗透性能和热学性能等效连续处理方法,指出由于裂隙中的渗流通过与岩体的热量传递使得温度场的分布发生改变。到目前为止,关于混凝土裂缝的渗流-温度耦合分析研究的报道还很少。

4.3 温度-渗流-应力耦合模型

目前温度-渗流-应力三场耦合大多应用于核能、地热以及核废料填埋等方面,三场耦合理论的发展过程中,国内外研究人员提出了多种形式的三场耦合数学模型,大致可分为两类:饱和介质三场耦合数学模型与非饱和-饱和介质三场耦合数学模型。Noorishad 等^[71]在扩展的 Biot 固结理论基础上,提出了饱和孔隙介质的三场耦合控制方程组;Hart 等^[72]基于混合物理论,推导了饱和孔隙介质的热-力-水流完全耦合方程组;Gatmiri 等^[73]提出了饱和土的热-液-力耦合微分方程组;Bower 等^[74]提出了饱和双重介质的三场耦合数学模型;Neaupane 等^[75]推导了各向异性非饱和-饱和孔隙介质的三场耦合控制方程;赖远明等^[76]根据冻土力学、渗流理论和传热学提出了带相变的三场耦合数学力学模型;黄涛等^[77]通过等效性能场之间耦合作用的研究建立了岩体地下水渗流场、应力场与温度场耦合作用的简单数学模型;刘亚晨等^[78]根据不可逆热力学基本理论,推导了核废料贮库裂隙岩体介质热-液-力耗散过程的定解方程;梁冰等^[79]在块裂介质理论的基础上,导出了三维裂隙网络的块裂介质高温岩体热-流-固耦合方程;Rutqvist 等^[80]导出了对于饱和-非饱和介质三场耦合控制方程的一般形式。

三场耦合模型的数值模拟由于能更好地体现结

构的运行工作状态,已经成为很多研究者的重要研究方向,但是有关水工混凝土结构裂缝扩展方面的研究却很少。水工混凝土结构大多都是在水压力作用和温度变化条件下运行的,而温度场、渗流场和应力场的分布是评价水工混凝土结构工程运行状况的重要方面,同时三者之间并非是孤立存在的,它们之间是相互作用、相互影响和相互制约的,当某一场发生扰动变化时,另外两场也将受到一定程度的影响。要想准确、客观和全面评价水工混凝土结构的裂缝萌生、扩展以及可能的失稳状况,应当考虑温度、渗流和应力之间的相互作用关系,即考虑温度场、渗流场、应力场三场间的耦合作用。因此,需要研究多场耦合条件下的高混凝土坝水力劈裂问题就必须建立合理的混凝土裂缝温度-渗流-应力多场耦合模型。

5 尚待研究的问题

目前,多场耦合作用下水工混凝土结构水力劈裂试验、发生机理以及高压水力劈裂数值模拟等方面的研究不多,尚有许多有待进一步研究的问题:

a. 研究水工混凝土裂缝在外荷载和水压力的双重影响下,水工混凝土在非恒定水头和流量时裂缝扩展与流体的耦合机理,研究渗流-应力耦合条件下裂缝的萌生、发展以及失稳机理和特性。

b. 在温度-渗流-应力耦合作用条件下,其耦合机理复杂,需要深入研究水工混凝土结构裂缝开度、扩展长度、裂缝内的内水压力、起裂韧度、裂缝在不同水压情况下的起裂宽度、外部水温等对混凝土结构裂缝扩展的影响。

c. 采用数值模拟方法研究多场耦合作用下水工混凝土裂缝产生和发展过程,需要重点解决多裂缝、交叉裂缝以及任意裂缝开展的计算技术,同时其断裂准则也有待进一步深入研究。

d. 针对高混凝土坝水力劈裂问题,需要研制先进的测试技术和试验设备,以及研发混凝土裂缝起裂判断和扩展过程的相关计算程序,注重多场耦合作用和结构裂缝的任意性,研究高混凝土坝水力劈裂的萌生、发展和失稳破坏的演化规律。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1424-1432. (ZHU Bofang. Current situation and prospect of temperature control and cracking prevention technology for concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1424-1432. (in Chinese))

[2] 徐道远,王向东,朱为玄,等. 混凝土坝的损伤及损伤仿真计算[J]. 河海大学学报:自然科学版,2002,30(4):

14-17. (XU Daoyuan, WANG Xiangdong, ZHU Weixuan. Damage to concrete dams and its simulation calculation [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30(4): 14-17. (in Chinese))

[3] 贾金生,李新宇,郑瑾莹. 特高重力坝考虑高压水劈裂影响的初步研究[J]. 水利学报,2006,37(12): 1509-1515. (JIA Jinsheng, LI Xinyu, ZHENG Cuiying. Studies on safety problem of high gravity dams higher than 200 m with consideration of hydraulic fracturing under water pressure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1509-1515. (in Chinese))

[4] 李雪红. 重大水工混凝土结构裂缝演变规律及转异诊断方法研究[D]. 南京:河海大学,2003.

[5] 朱万成,赵启林,唐春安,等. 混凝土断裂过程的力学模型与数值模拟[J]. 力学进展,2002,32(4): 579-598. (ZHU Wancheng, ZHAO Qilin, TANG Chun'an, et al. Mechanical model and numerical simulation of fracture process of concrete[J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(4): 579-598. (in Chinese))

[6] 尹双增. 断裂判据与在混凝土工程中的应用[M]. 北京:科学出版社,1996:15-18.

[7] 蔡四维,蔡敏. 混凝土的损伤断裂[M]. 北京:人民交通出版社,2000:55-65.

[8] KAPLAN M F. Crack propagation and the fracture of concrete[J]. ACI Journal, 1961, 58(11): 591-610.

[9] LAJTAL E Z. Brittle fracture in compression [J]. International Journal of Fracture, 1977, 10(4): 195-208.

[10] 徐道远,符晓陵,朱为玄,等. 坝体混凝土损伤-断裂模型[J]. 大连理工大学学报,1997,37(增刊1): 1-6. (XU Daoyuan, WANG FU Xiaoling, ZHU Weixuan, et al. Damage-fracture model for concrete of dam[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997, 37(Sup1): 1-6. (in Chinese))

[11] 张镜剑,涂金良,翟奇愚,等. 龙滩碾压混凝土重力坝水平层面稳定安全的断裂分析[J]. 华北水利水电学院学报,1996,17(4): 2-7. (ZHANG Jingjian, TU Jinliang, ZHAI Qiyu, et al. Fracture analysis of the stability safety of the horizontal construction joint in longtan rollcrete gravity dam[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1996, 17(4): 2-7. (in Chinese))

[12] 杨延毅. 混凝土损伤断裂过程研究[J]. 浙江大学学报:自然科学版,1993,27(5): 654-661. (YANG Yanyi. The research of progressive cracking in concrete structure with damage theory[J]. Journal of Zhejiang University: Natural Science, 1993, 27(5): 654-661. (in Chinese))

[13] BARTON N, BANDI S, BAKHTUR K. Strength deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. Int J Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics, 1985, 22: 121-140.

[14] 耿克勤,陈凤翔,刘光廷,等. 岩体裂隙渗流水力特性的实验研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,1996,36

- (1): 102-106. (GENG Keqin, CHEN Fengxiang, LIU Guangting, et al. Experimental research of hydraulic properties of seepage flow in fracture [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1996, 36 (1):102-106. (in Chinese))
- [15] ESAKI T, DU S, MITANI Y, et al. Development of a shear flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint [J]. Int J Rock Mechanics and Mining Science, 1999, 36:641-650.
- [16] LEE H S, CHO T F. Characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load [J]. Int J Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(4):299-318.
- [17] 速宝玉, 詹美礼, 王媛. 裂隙渗流与应力耦合特性的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4):1-3. (SU Baoyu, ZHAN Meili, WANG Yuan. Experimental research of coupling properties of seepage and stress in fracture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4):1-3. (in Chinese))
- [18] 朱珍德, 徐卫亚, 张爱军. 脆性岩石损伤断裂机理分析与试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9):1411-1416. (ZHU Zhende, XU Weiya, ZHANG Aijun. Mechanism analysis and testing study on damage and fracture of brittle rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9):1411-1416. (in Chinese))
- [19] 谢兴华. 岩体水力劈裂机理试验及数值模拟研究 [D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [20] 王国庆. 岩体水力劈裂试验及裂纹扩展的无单元法计算 [D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [21] 陈卫忠, 朱维申, 罗超文. 万家寨引黄工程总干一、二级泵站水力劈裂试验研究 [J]. 岩土力学, 2001, 22(1):26-28. (CHEN Weizhong, ZHU Weishen, LUO Chaowen. Hydraulic jacking tests at GMPS1 and GMPS2 of Shanxi Yellow River diversion project [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1):26-28. (in Chinese))
- [22] 吴智敏, 赵国藩, 徐世烺. 大尺寸混凝土试件的断裂韧度 [J]. 水利学报, 1997(6):67-76. (WU Zhimin, ZHAO Guofan, XU Shilang. Fracture toughness of large concrete specimen [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(6):67-76. (in Chinese))
- [23] 吴智敏, 赵国藩. 混凝土断裂韧度的尺寸效应研究 [J]. 工业建筑, 1995, 25(4):20-22. (WU Zhimin, ZHAO Guofan. Studies on size effect of fracture toughness of concrete [J]. Industrial Construction, 1995, 25(4):20-22. (in Chinese))
- [24] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土断裂力学研究 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1991.
- [25] BRUHWILER E, SAOUMA V. Water fracture interaction in concrete: part I: fracture properties [J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(3):296-303.
- [26] BRUHWILER E, SAOUMA V. Water fracture interaction in concrete: part II: hydrostatic pressure cracks [J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(4):383-390.
- [27] VOLKER V, SAOUMA V. Water pressure in propagating concrete cracks [J]. Journal of Structure Engineering, 2000, 126(2):235-242.
- [28] 李宗利, 任青文. 岩石混凝土类材料单裂纹水力劈裂研究述评 [J]. 水利水运工程学报, 2005(1):67-74. (LI Zongli, REN Qingwen. Review of hydraulic fracturing on a single fracture of rock and concrete materials [J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(1):67-74. (in Chinese))
- [29] BENZLEY S E. Representation of singularities with isoperimetric finite elements [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1974(8):537-545.
- [30] ATLURI S N. An assumed displacement hybrid finite element model for linear fracture mechanics [J]. International Journal of Fracture, 1975, 11(2):257-271.
- [31] NISHIOKA T, ATLURI S N. Path-independent integral and moving isoperimetric elements for dynamics crack propagation [J]. AIAA Journal, 1984, 22(3):409-414.
- [32] SWENSON D V, INGRAFFEA A R. Modeling mixed-mode dynamic crack propagation using finite element: theory and applications [J]. Computational Mechanics, 1988(3):381-397.
- [33] BITTENCOURT T U, WAWRZYNEK P A, INGRAFFEA A R. Quasi-automatic simulation of crack propagation for 2D LEFM problems [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 55(2):321-334.
- [34] LIM I L, JOHNSTON I W, CHOI S K. A finite element code for fracture propagation analysis within elasto-plastic continuum [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 53(2):193-211.
- [35] 杨庆生, 杨卫. 断裂过程的有限元模拟 [J]. 计算力学学报, 1997, 14(4):79-88. (YANG Qingsheng, YANG Wei. Finite element simulation of fracture process [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1997, 14(4):79-88. (in Chinese))
- [36] POSTON T, STEWART I. Catastrophe theory and its applications [M]. New York: Pitman, 1978.
- [37] BELYSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45:601-620.
- [38] BELYSCHKO T, MOES N, USUI S. Arbitrary discontinuities in finite elements [J]. Numer Methods Engrg, 2001, 50:993-1013.
- [39] 杜效鹄, 段云岭, 王光纶. 重力坝断裂数值分析研究 [J]. 水利学报, 2005, 36(9):1035-1042. (DU Xiaohu, DUAN Yunling, WANG Guanglun. Numerical analysis of fracture in gravity dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9):1035-1042. (in Chinese))
- [40] 方修君, 金峰, 王进廷. 基于扩展有限元法的 Koyna 重力坝地震开裂过程模拟 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(12):2065-2069. (FANG Xiujun, JIN Feng, WANG Jinting. Seismic fracture simulation of the Koyna

- gravity dam using an extended finite element method[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(12): 2065-2069. (in Chinese))
- [41] 方修君, 金峰. 裂隙水流与混凝土开裂相互作用的耦合模型[J]. 水利学报, 2007, 38(12): 1466-1474. (FANG Xiujun, JIN Feng. Coupling model for interaction between fissure water and cracking in concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(12): 1466-1474. (in Chinese))
- [42] 董玉文, 任青文. 重力坝水力劈裂分析的扩展有限元法[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1361-1367. (DONG Yuwen, REN Qingwen. An extended finite element method for modeling hydraulic fracturing in gravity dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1361-1367. (in Chinese))
- [43] 姚振汉, 杜庆华. 边界元法应用的若干近期研究及国际新进展[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(4/5): 89-93. (YAO Zhenhan, DU Qinghua. Some recent investigations and new progresses in the application of boundary element methods [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2001, 41(4/5): 89-93. (in Chinese))
- [44] SLADEK J. Dynamics stress intensity fractures studied by boundary integro-differential equations [J]. International Journal Numerical Methods in Engineering, 1986, 23(5): 919-928
- [45] PORTELA A. The dual BEM: effective implementation for crack problem[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1992, 33: 269-287.
- [46] SHOU K J, CROUCH S L. A higher order displacement discontinuity method for analysis of crack problems [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(1): 49-55.
- [47] DWYER J F, AMADAI B. Application of the edge function method to rock mechanics problems [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1995, 28(4): 185-209.
- [48] 程玉民, 彭妙娟. 弹性动力学的相似边界元法[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(6): 1-4. (CHENG Yumin, PENG Miaojuan. Similar boundary element method in elastodynamics [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(6): 1-4. (in Chinese))
- [49] 程玉民, 嵇醒, 贺鹏飞. 动态断裂力学的无限相似边界元法 [J]. 力学学报, 2004, 36(1): 43-48. (CHENG Yumin, JI Xing, HE Pengfei. Infinite similar boundary element method for dynamic fracture mechanics [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2004, 36(1): 43-48. (in Chinese))
- [50] TSAY R J, CHIOU Y J, CHUANG W L. Crack growth prediction by manifold method [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(8): 884-890.
- [51] 王水林, 葛修润. 流形元方法在模拟裂纹扩展中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 405-410. (WANG Shuilin, GE Xiurun. Application of manifold method in simulating crack propagation [J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 405-410. (in Chinese))
- [52] CHIOU Y J, LEE Y M, TSAY R J. Mixed mode fracture propagation by manifold method [J]. International Journal of Fracture, 2002, 114: 327-347.
- [53] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Element free Galerkin methods [J]. Int J Num Meth Engng, 1994, 37: 229-256.
- [54] NAYROLES B, TOUZOT G, VILLON P. Generalizing the finite element method: diffuse approximation and diffuse elements [J]. Computational Mechanics, 1992, 10(5): 307-318.
- [55] 张雄, 宋康祖, 陆明万. 紧支试函数加权残值法 [J]. 力学学报, 2003, 35(1): 43-49. (ZHANG Xiong, SONG Kangzu, LU Mingwan. Weighted residual method with compactly supported trial functions [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2003, 35(1): 43-49. (in Chinese))
- [56] 栾茂田, 田荣, 杨庆, 等. 有限覆盖无单元法在岩土类弱拉型材料摩擦接触问题中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 137-141. (LUAN Maotian, TIAN Rong, YANG Qing, et al. Applications of the finite-cover element-free method in friction contact problems of tension-weak geomaterials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 137-141. (in Chinese))
- [57] 田荣. 连续与非连续变形分析的有限覆盖无单元方法及其应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
- [58] 刘欣, 朱德懋, 陆明万, 等. 平面裂纹问题的 h, p, hp 型自适应无网格方法的研究 [J]. 力学学报, 2000, 32(3): 308-318. (LIU Xin, ZHU Demao, LU Mingwan, et al. h, p, hp adaptive meshless method for plane crack problem [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 32(3): 308-318. (in Chinese))
- [59] 周维垣, 寇晓东. 无单元法及其工程应用 [J]. 力学学报, 1998, 30(2): 193-202. (ZHOU Weiyuan, KOU Xiaodong. Element free method and its application in engineering [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1998, 30(2): 193-202. (in Chinese))
- [60] 胡云进, 周维垣, 林鹏. 无单元法在三维断裂力学中的应用 [J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊1): 21-24. (HU Yunjin, ZHOU Weiyuan, LIN Peng. Application of EFG method to three-dimensional fracture mechanics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Sup1): 21-24. (in Chinese))
- [61] 周维垣, 黄岩松, 林鹏. 三维无单元伽辽金法及其在拱坝分析中的应用 [J]. 水利学报, 2005, 36(6): 645-649. (ZHOU Weiyuan, HUANG Yansong, LIN Peng. Three-dimensional element-free Galerkin method and its application in analysis of arch dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 645-649. (in Chinese))

- Chinese))
- [62] 沈振中,陈小虎,徐力群. 重力坝应力-渗流相互作用的无单元耦合分析[J]. 岩土力学,2008,29(增刊1):74-78. (SHEN Zhenzhong, CHEN Xiaohu, XU Liqun. Coupled analysis of stress-seepage interaction for gravity dam by element-free method [J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(Sup1):74-78. (in Chinese))
- [63] 沈振中,张鑫,孙粤琳. 岩体力学劈裂的应力-渗流-损伤耦合模型研究[J]. 计算力学学报,2009,26(4):523-528. (SHEN Zhenzhong, ZHANG Xin, SUN Yuelin. Research on stress-seepage-damage coupling model of hydraulic fracturing for rock mass[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(4): 523-528. (in Chinese))
- [64] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partial frozen soil[J]. Water Resources Research,1973,9(5):1314-1323.
- [65] 柴军瑞,韩群柱. 岩体渗流场与温度场耦合的连续介质模型[J]. 地下水,1997,19(2):59-62. (CHAI Junrui, HAN Qunzhu. Continuous medium model for the coupled problem of temperature and seepage fields for rock mass [J]. Groundwater,1997,19(2):59-62. (in Chinese))
- [66] 黄涛,杨立中. 隧道裂隙岩体温度-渗流耦合数学模型研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):554-558. (HUANG Tao, YANG Lizhong. A study of mathematical model on coupling between temperature-seepage in fractured rock mass surrounding tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 554-558. (in Chinese))
- [67] 赖远明,刘松玉,邓华钧. 寒区大坝温度场和渗流场耦合问题的非线性数值模拟[J]. 水利学报,2001(8):26-31. (LAI Yuanming, LIU Songyu, DENG Xuejun. Numerical simulation for the coupled problem of temperature and seepage fields in dams located in cold area[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2001(8):26-31. (in Chinese))
- [68] 周志芳,王锦国. 裂隙介质水动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [69] 张树光. 深埋巷道围岩温度场的数值模拟分析[J]. 科学技术与工程,2006,6(14):2194-2196. (ZHANG Shuguang. Numerical simulation analysis of temperature field in surrounding rock of deeply buried roadways[J]. Science Technology and Engineering,2006,6(14):2194-2196. (in Chinese))
- [70] 张玉军. 核废料地质处置近场热-水-应力-迁移耦合二维有限元分析[J]. 岩土工程学报,2007,29(10):1553-1557. (ZHANG Yujun. 2D FEM analysis for coupled thermo-hydro-mechanical-migratory process in near field of geological disposal of nuclear waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1553-1557. (in Chinese))
- [71] NOORISHAD J, TSANG C F, WITHERSPOON P A. Coupled thermal-hydraulic-mechanical phenomena in saturated fractured porous rocks: numerical approach[J]. J Geophysical Res,1984,89(B12):10365-10373.
- [72] HART R D, JOHN C M. Formulation of a fully-coupled thermal-mechanical-fluid model for non-linear geologic systems[J]. Int J Rock Mech Min Sic & Geomech Abstr, 1986,23(3):213-224.
- [73] GATMIRI B, DELAGE P. A formulation of fully coupled thermal-hydro-mechanical behavior of saturated porous media-numerical approach[J]. Int J Num & Anal Methods in Geomech,1997,21(3):199-225.
- [74] BOWER K M, ZYVOLOSKI G. A numerical model for thermo-hydro-mechanical coupling in fractured rock[J]. Int J Rock Mech Min Sic,1997,34(8):1201-1211.
- [75] NEAUPANE K M, YAMABE T, YOSHINAKA R. Simulation of a fully coupled thermo-hydro-mechanical system in freezing and thawing rock [J]. Int J Rock Mech Min Sic,1999,36(5):563-580.
- [76] 赖远明,吴紫汪,朱元林,等. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):529-533. (LAI Yuanming, WU Ziwan, ZHU Yuanlin, et al. Nonlinear analyses for the couple problem of temperature, seepage and stress fields in cold region tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1999,21(5):529-533. (in Chinese))
- [77] 黄涛,杨立中,陈一立. 工程岩体地下水渗流-应力-温度耦合作用数学模型的研究[J]. 西南交通大学学报,1999,34(1):11-15. (HUANG Tao, YANG Lizhong, CHEN Yili. A mathematical model for the coupling among groundwater seepage stress temperature in engineering rock mass[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999,34(1):11-15. (in Chinese))
- [78] 刘亚晨,刘泉声,吴玉山,等. 核废料贮库围岩介质不可逆过程热力学和热弹性[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(3):361-365. (LIU Yachen, LIU Quansheng, WU Yushan, et al. Irreversible thermodynamics and thermoelasticity of fractured rock mass surrounding nuclear waste repositories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(3):361-365. (in Chinese))
- [79] 梁冰,孙可明,薛强. 地下工程中的流-固耦合问题的探讨[J]. 辽宁工程技术大学学报. 2001,20(2):129-34. (LIANG Bing, SUN Keming, XUE Qiang. The research of fluid-solid coupling in the ground engineering[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2001,20(2):129-34. (in Chinese))
- [80] RUTQVIST J, BIRGESSON L, CHIJIMATSU M, et al. Thermo-hydro-mechanics of partially saturated geological media: governing equations and formulation of four finite element models[J]. Int J Rock Mech Min Sic,2001,38(1):105-127.

(收稿日期:2012-06-14 编辑:熊水斌)