

岩体流变力学特性研究

费大军, 詹候全, 戴祺云

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司 监测及试验研究所, 四川 成都 610072)

摘要:岩体属于非均质、不连续、各向异性的地质介质,在长期荷载作用下,工程岩体的应力应变状态、变形破坏特征均随时间而不断发生变化,具有显著的时效特性,岩体表现出的流变特性对工程安全影响重大。当认识不到位、处理不及时时施工、运行期的工程可能会出现事故或留下安全隐患。因此,深入、系统地开展高拱坝基岩体的流变力学特性与工程稳定性研究十分必要。浅谈了对岩体流变特性研究的认识,总结了目前的研究成果,以期为其它工程提供借鉴与参考。

关键词:流变;松弛;蠕变;弹性后效;模型

中图分类号:TV7; TU192; [TV221.2]; TV522

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2017)01-0004-04

1 概述

众所周知,岩石(体)力学是一门既富理论内涵、实践性又很强的应用学科。岩体被广泛作为建筑物的基础以及边坡和围岩的介质,其自然属性及工程稳定性直接影响到建筑物的运行与安全。虽然高拱坝要求建基于坚硬、较完整的岩体上,但其坝基岩体往往存在一些地质缺陷,如断层、挤压错动带、软弱夹层、蚀变岩带等软弱岩带,以及坚硬、性脆、隐微裂隙发育的“硬、脆、碎”岩体,对坝基岩体稳定不利。同时,坝基岩体在开挖卸荷、大坝荷载及高渗透水压的长期作用下将呈现出与时间有关的力学特性,主要表现为:时效强度和流变损伤断裂等。这些时效性的应力降低与变形在很大程度上与坝基软弱岩带和“硬、脆、碎”岩体在开挖卸荷和长期荷载作用下产生的应力松弛和流变变形密切相关。不连续性、非均质性和随时间的变化是工程岩体的基本特点,由此带来了岩体力学性质的复杂性、多变性和独特性,因而认识岩体力学性质最直接、最可靠的途径只能是对岩体(包括岩块和结构面)进行力学特性试验研究和变形监测,特别是与时间有关的岩体流变力学特性及其机理的研究。

2 研究意义

我国水电资源的总量位居世界第一,其中西部水电资源占81%,但其开发率较低。因此,大力开发西部水电,实施“西电东送”是我国西部大开发战略的重要组成部分,也符合我国开发清洁、

收稿日期:2016-12-24

可再生能源的可持续发展国策。在西部大开发过程中,我国西部地区涌现出了一大批已建、在建和筹建的高拱坝,如已建成的雅砻江二滩拱坝(坝高240 m)、黄河李家峡拱坝(坝高160 m)、乌江构皮滩拱坝(232.5 m)、黄河拉西瓦拱坝(坝高250 m)、澜沧江小湾拱坝(坝高294.5 m),金沙江溪洛渡拱坝(坝高285.5 m)、雅砻江锦屏一级拱坝(坝高305 m)、大渡河大岗山拱坝(坝高210 m);在建的乌东德拱坝(坝高265 m)、金沙江叶巴滩拱坝;筹建的金沙江白鹤滩拱坝(坝高289 m)。此外,正在勘测设计的、坝高200 m以上的拱坝有雅砻江孟底沟、旭龙、怒江同卡、怒江桥、罗拉、松塔、马吉等。这些高拱坝工程规模巨大,均要求建基于坚硬、较完整的岩体上,但其坝基往往存在一些地质缺陷,如断层、挤压错动带、软弱夹层、蚀变岩带等软弱岩带,以及坚硬、性脆、隐微裂隙发育的“硬、脆、碎”岩体,对坝基稳定不利。同时,坝基岩体在开挖卸荷、坝体荷载及高渗透水压的长期作用下,将可能呈现出与时间有关的变形特性,主要表现为松弛、蠕变、弹性后效、时效强度和流变损伤断裂等,对高拱坝的施工安全及长期运行稳定产生不利影响,因此,需要对其加深勘察设计论证力度,并采取有针对性的基础处理措施。当认识不到位、处理不当时,施工、运行期的工程可能会出现事故或留下安全隐患。如法国马尔帕赛拱坝坝高66.5 m,其右岸上部发育平行坝基的断层,大坝于1959年12月2日突然溃决,造成400余人死亡^[1];我国安徽省梅山连拱坝坝高88

m,1962年11月6日其右岸坝基突然出现大量渗漏水,坝体出现几十条裂缝而处于危险状态,被迫放空水库进行加固^[2];陈村重力拱坝坝高76.3 m,1977~1979年低水位运行时,发现大坝下游面105 m高程处水平向大裂缝明显扩展,拱冠部位裂缝扩展1.39 mm,河床10个坝段的缝深超过5 m,坝体出现严重缺陷^[3];佛子岭连拱坝坝高75.9 m,1993年11月下旬河床13个垛墙顶向下游的位移量均超过历史最大值,被迫控制水位运行^[4]。这些拱坝出现的较大变形与破坏在很大程度上均与坝基岩体软弱带等在荷载长期作用下产生的流变变形密切相关。因此,深入、系统地开展高拱坝坝基岩体流变力学特性与工程稳定性研究是十分必要的,其研究成果不仅对高拱坝设计具有直接的应用和推广价值,而且对高拱坝施工开挖安全、运行长期稳定具有重大的工程意义和社会意义;同时,其极大地丰富了岩体流变力学特性研究的理论与实践,具有重大的理论意义。

3 研究现状

国外自20世纪30年代以来开始对岩石流变特性及其本构关系开展了试验与理论研究。1939年,Griggs根据对砂岩、泥岩、粉砂岩等进行的蠕变试验,提出了采用对数型经验公式来描述岩石流变本构关系。

我国的岩石流变力学研究始于20世纪50年代末期,岩石力学界的先驱者陈宗基先生对砂岩进行过8 400 h的蠕变试验,研究了岩石的封闭应力、蠕变和扩容现象,建立了岩石流变扩容方程^[5]。

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司早在20世纪80年代即在二滩水电站对坝基蚀变玄武岩进行了现场柔性承压板(直径1 000 mm)岩体压缩蠕变试验;2000年在溪洛渡水电站对坝基层间层内错动带开展了现场柔性承压板(直径1 000 mm)岩体压缩蠕变试验^[6];2003年在锦屏一级水电站对坝基绿片岩、层间挤压带进行了现场柔性承压板(直径1 000 mm)岩体压缩蠕变和室内中型剪切流变试验;2006年在大岗山水电站对坝基辉绿岩脉及断层破碎带进行了现场中心孔刚性承压板(直径1 000 mm)岩体压缩蠕变试验^[7];2010年在锦屏一级水电站对坝址左岸f42

-9断层开展了现场刚性承压板(直径500 mm)岩体压缩蠕变和室内中型剪切流变试验。2009年,中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司在白鹤滩水电站对坝基柱状节理玄武岩进行了现场柔性双枕法(30 cm×50 cm)岩体压缩蠕变和层内错动带剪切流变试验。通过上述一系列现场原位岩体压缩蠕变试验、室内岩石流变力学试验、理论分析、数值仿真和现场监测等,取得了一批具有较高价值的成果,在对高拱坝坝基岩体流变力学特性与工程稳定性的研究中进行了有益的探索,并将其初步应用于工程设计。

目前,国内外学者对软岩、软弱岩带进行了不同加载条件下的单、三轴压缩蠕变试验。但针对坚硬、性脆、隐微裂隙发育的“硬、脆、碎”岩体尚未开展其在不同应力路径下的室内三轴压缩蠕变试验;对岩石流变力学特性的试验研究也主要集中在室内试验方面,而由于现场流变试验耗资、费时、难度较大,仅开展了少量现场岩体压缩蠕变试验及现场岩体剪切流变试验,尤其针对“硬、脆、碎”岩体的研究更是处于空白状态^[8]。

岩石(体)流变力学特性的研究现状具有以下显著特点:

(1)研究对象。

①流变试验的研究对象仍以岩石为主,仅在少数工程进行过岩体压缩蠕变试验,其试验结果不能全面反映岩体流变的实际特性。工程岩体由结构面分割并形成一定的结构类型,其蠕变变形和长期强度受结构面和结构体两方面流变特性的影响。因此,有必要进行结构面和含结构面岩体的流变试验。

②流变试验主要集中在软岩流变力学特性研究方面,而对于坚硬岩石(花岗岩、灰岩、辉绿岩)流变力学特性的研究相对较少。这主要是人们对软岩和软弱岩带具有明显的流变特性认识较深,而对坚硬岩石流变特性的认识还有待深化。

(2)研究内容。

①对变形进行的研究较多,对强度进行的研究少。已有的岩体流变试验研究以压缩蠕变试验为主,剪切流变试验开展的较少。

②尚无人开展“硬、脆、碎”岩体的流变力学试验,包括岩石室内三轴压缩蠕变试验、岩体现场

压缩蠕变试验及剪切流变试验。

③对岩体卸荷松弛时间效应研究的少。

通过大量加载试验的进行及理论分析,目前已建立起反映岩体在加载条件下发生变形破坏的、较为完整的理论。然而,由于卸荷松弛与连续加载具有完全不同的应力路径,两者所引起的岩体变形和破坏特性无论在力学机理还是力学响应上都有很大差异,故沿用连续加载强度理论来预测工程岩体在开挖卸荷作用下的力学特性及其稳定性显然会产生明显的误差。

在工程界,对岩体松弛及时效变形测试的主要方法有:地震声波法、超声波测井法、探地雷达、微地震监测、钻孔全景图像测试及多点位移计监测等。国内利用长观孔声波及钻孔全景图像测试对坝基岩体的松弛情况进行监测是最近几年才发展起来的。

(3)研究设备与方法、手段。

①早期的流变力学试验设备与方法较落后,试验条件仅能在一定程度上还原岩体原始赋存环境,其随科技水平的发展正在逐渐改进。

②研究方法和手段的不足主要体现在:

a. 仅开展了少量现场岩体压缩蠕变试验,未开展现场岩体剪切流变试验。由于现场岩体流变试验人力物力投入大、技术难度大、试验周期长;而室内岩石流变试验条件易控制、成本较低,故对室内岩石流变力学试验研究开展的较多。

b. 宏观研究多,微观研究少。由于目前测试技术的制约及研究方法的不完善,在微观上对岩石流变特性大多进行的是定性的研究,而定量化的研究成果较为少见。

c. 岩体流变力学特性与其内在的地质机理研究结合的少。坝基岩体作为地质体的一部分,其地质本质应包括物质组成、结构构造、赋存环境(地应力、地下水、温度)等。如在高地应力条件下,岩石自然埋藏中挤压紧密,岩石结构效应淡化,其物理力学性能强于低应力条件下的岩石。当岩石从高应力向低应力状态转化时,聚集的应变能释放,伴随着体积膨胀、结构松弛、结构效应显化,同时其物理力学性能下降,甚至比长期低地应力条件下的岩石更差。

通过宏观岩石流变试验,得到了各种岩石的

流变力学特性,但由于缺少对岩石所处宏观地质环境及流变微观物质、结构变化的研究,对岩石流变机理无法解释清楚。因此,既要对岩石流变的力学现象进行深入的认识,还要对岩石流变的本质进行深入研究,才能从岩石赋存环境及微观结构变化的角度把握岩石流变力学特性及其规律。

(4)理论水平尚未成熟。

国内对岩石流变力学特性的研究随着葛洲坝、二滩、三峡等大型水电工程的兴建而成为岩石力学研究的热点,但至今其理论水平尚不成熟。国内外流变研究重视岩石流变力学试验的设计与研究及在此基础上的流变本构模型的建立与参数选取,而相对忽视从地质科学的角度作出流变力学行为的解释,其研究理论缺少地质机理的分析。

(5)工程应用。

岩石流变的本构模型研究是岩石流变力学理论研究中最基本、也是最重要的组成部分,同时也是将试验研究成果用于工程实践的必经环节。经过数十年的研究,岩石力学与工程界已经积累了许多关于岩石流变本构模型的理论研究成果。

但是,现有的岩石流变模型主要是通过对流变试验结果进行分析、建立符合试验曲线的元件组合模型或经验模型,而元件组合模型和经验模型是无法描述加速流变阶段的,尽管有些学者也提出了一些可以描述岩石加速流变阶段的非线性流变元件模型,但由于这些模型方程复杂,模型参数多,目前多停留在理论研究阶段,离实际应用尚远,与工程应用结合甚微。

4 结语

(1)岩石流变特性的研究必须由外及内、从现象到本质、将宏观与微观相结合才能将岩石流变特性研究透彻,掌握其内在规律,提高理论水平,从而对其进行有效地控制和利用,更好地为工程建设服务。

(2)高拱坝工程规模巨大,且其均要求建基于坚硬、较完整的岩体上,但其坝基往往存在一些地质缺陷,如断层、挤压错动带、软弱夹层、蚀变岩带等软弱岩带,以及坚硬、性脆、隐微裂隙发育的“硬、脆、碎”岩体,对坝基稳定不利。为揭示岩体流变力学特性,根据笔者多年的工作体会,总结出

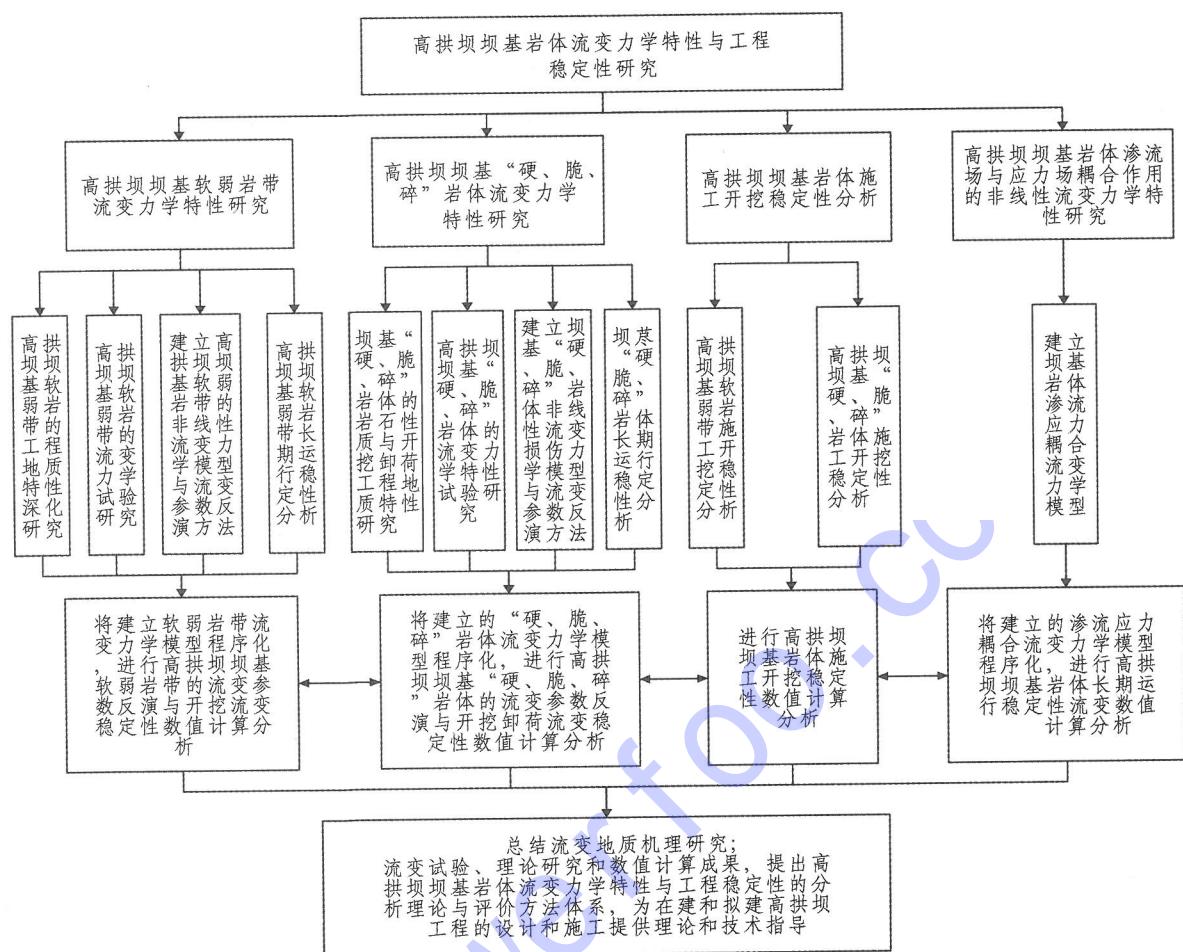


图1 研究技术路线图

以下岩体流变力学研究的技术路线(图1)。

(3)根据岩体流变力学试验研究成果,优化设计方案,指导施工。不仅能够丰富和拓宽岩石力学学科研究领域的内容,而且可以为实际岩体工程提供有价值的成果,具有重要的理论意义,为其它工程类似问题的处理提供重要的借鉴与参考。

参考文献:

- [1] 汝乃华,姜忠胜. 大坝事故与安全·拱坝[M]. 北京:中国水利水电出版社,1995.
- [2] 顾冲时,李雪红,吴中如,等. 梅山连拱坝1962年事故部位性态的跟踪分析[J]. 水电能源科学,1999,17(3):5-8.
- [3] 邢林生. 佛子岭连拱坝耐久性分析[J]. 水力发电,2006,32(10):98-101.
- [4] 陈宗基,康文法,黄杰藩. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报,1991,10(4):299-312.

[5] 徐平,丁秀丽,全海,等. 溪洛渡水电站坝址区岩体蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(S1):220-222.

[6] 贺如平,张强勇,王建洪,等. 大岗山水电站坝区辉绿岩脉压缩蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(12):2495-2503.

[7] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(6):1081-1106.

[8] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.

作者简介:

费大军(1974-),男,四川仁寿人,高级工程师,学士,从事岩土工程方面的试验研究工作;

詹候全(1984-),男,四川眉山人,高级工程师,学士,从事水工混凝土试验研究及试验室管理工作;

戴祺云(1984-),男,四川成都人,工程师,学士,从事岩土工程试验研究工作。

(责任编辑:李燕辉)