

高土石坝宏观细观坝水动力流固耦合理论研究进展

岑威钧, 孙 辉, 陈亚南

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:高土石坝遭遇强烈地震时会与坝面库水及坝内孔隙水发生动力流固耦合相互作用,分别从宏观坝水耦合系统和细观水土耦合系统两个角度对高土石坝坝水动力流固耦合理论的研究历史、主要研究成果和研究趋势进行了阐述评价。对宏观尺度的大坝与坝面库水流固耦合作用,主要从早期坝水相互作用模型、库水运动精细分析方法以及流固耦合系统坐标描述等方面做出评述;对细观尺度的坝内水土耦合作用,主要从早期解耦或拟耦合的水土动力分析方法、基于 Boit 动力固结理论的细观水土动力流固耦合,以及基于混合物理论的细观水土动力流固耦合等方面做出评述。综合两个尺度的流固耦合作用研究现状,建议对高土石坝建立水库-土石坝-孔隙水的宏观细观整体动力流固耦合系统进行综合研究,并指出了当前高土石坝宏观细观坝水动力流固耦合理论尚待继续深入研究的若干相关问题。

关键词:高土石坝;库水;孔隙水;宏观坝水动力流固耦合;细观水土动力流固耦合;动力分析

中图分类号:TV641.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)06-0010-07

Recent advances on macro-scale and micro-scale dynamic interaction between high earth-rock dams and water//
CEN Weijun, SUN Hui, CHEN Yanan (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The dynamic interaction will happen among high earth-rock dams, reservoir and pore water under a strong earthquake. This paper introduces the main research history, research results and research trends of water-soil coupling system for earth-rock dams from the macro-scale and micro-scale aspects. On the macro-scale dynamic coupling system, the early dam-water interaction model, sophisticated analytical methods of reservoir water and FSI coordinate system description are summarized, and on the micro-scale dynamic coupling system, mainly from the early water-soil decoupled dynamic analysis method, and the water-soil coupling analysis system based on the Boit's theory and the water-soil mixture theory, ect. Combining the above two research aspects of soil-water coupling system, a macro-scale and micro-scale coupling system of reservoir-dam-pore water is proposed to study the dynamic behavior of high earth-rock dams comprehensively. Finally, the main problems on the macro-scale and micro-scale water-soil coupling theory and further research topics are put forward.

Key words: high earth-rock dams; reservoir water; pore water; macro-scale dam and water interaction; micro-scale soil skeleton and pore water interaction; dynamic analysis

近年来我国高土石坝的数量和高度均有大幅度提升。据不完全统计,国内已建、在建及拟建(规划)的坝高 200 m 以上的高土石坝就有 10 余座,个别坝高直逼或超过 300 m,如大渡河双江口(坝高 312 m)、雅砻江两河口(坝高 305 m)、怒江松塔(坝高 307 m)、澜沧江如美(坝高 315 m)等。我国是一个多地震国家,地震活动频度高、强度大、震源浅、分布广,震灾严重,而高土石坝所在的西部地区又是主要的强地震区。2008 年的“5·12”汶川大地震中有

两座高土石坝受到了地震影响,其中,105.3 m 高的碧口心墙土石坝地震损坏轻微,156 m 高的紫坪铺面板堆石坝出现了面板压碎错位、坝顶较大震陷等较严重的地震损伤。紫坪铺面板堆石坝也是目前世界上遭遇最强烈地震考验的最高土石坝。相对高混凝土坝而言,国内外对高土石坝抗震试验和抗震理论等方面的研究相对偏少,尤其对那些拟建的 300 m 级超高土石坝,由于坝高、水库规模和设计地震加速度又创新高,强震作用下大坝和水体(库水和孔隙水)

的动力相互作用可能非常强烈,对大坝抗震安全性影响重大,需进行深入系统的专项研究。

高土石坝遭遇强烈地震时会和水体(库水和孔隙水)发生动力相互作用,即坝水动力流固耦合,可分为两种类型:第一类是坝水动力流固耦合发生在库水与大坝(含地基,下同)的交界面上,两者在宏观上是相互分离的,比如岩基上的面板堆石坝;另一类是水与坝体土石料无法宏观分开,即坝内孔隙水和土骨架之间发生细观水土动力耦合作用。地震时,库水与坝面土体发生宏观水土相互作用后,库水进一步入渗到土石坝中或孔隙水流出坝体进入水库,形成动力非稳定渗流场,此时坝体内孔隙水与土骨架之间进行细观水土动力耦合作用,两者间进行应力(孔压)的传递以及变形的协调变化。在排水条件下,由于孔隙水的动力渗流作用,土体中所含的孔隙水量要发生变化,振动超静孔隙水压力还要进一步扩散和消散,最终趋于零,土体变形至动力固结稳定。(斜)心墙土石坝遭遇地震时与孔隙水的动力相互作用就是属于这类细观水土动力流固耦合。

强震作用下,高土石坝自身变形较大,尤其在坝顶附近,地震反应明显。高坝往往形成大水库,在地震时库水会发生激荡,在水库表面尤为激烈。此时,坝库两者间可能会引发相互激振,坝体、库水和孔隙水会发生宏细观动力相互作用,进而可能引发心墙动水劈裂、面板动力破损、坝基液化和动孔压引起的坝坡动力失稳、土骨架的动力渗透破坏等一系列大坝安全问题,涉及水工结构、岩土力学、振动力学、流体力学等多门学科。目前,国内外学者对土石坝与水体的动力流固耦合理论以及分析方法开展了较为广泛的研究,取得了一些成果。本文从宏观和细观两方面对土石坝与水体的动力流固耦合研究历史、主要理论研究进展和成果进行阐述和评价,主要涉及坝库宏观流固耦合、水库运动分析方法、坝水细观流固耦合等内容,最后指出尚待深入研究的相关问题。

1 土石坝-水库宏观动力流固耦合

1.1 早期基本的坝水相互作用模型

对于混凝土面板堆石坝,面板与水库之间存在宏观坝水交界面,坝水相互作用机理比较明确,其动力耦合分析理论和方法主要参照混凝土坝。目前最为简单实用的分析方法依旧是 Westergaard 动水压力附加质量法。自 1933 年 Westergaard^[1]率先发表了关于动水压力的论文以后,许多研究者针对 Westergaard 模型的一些限制条件进行了讨论分析并不断完善,现常被引入到面板坝坝水动力作用的分析中。Westergaard 附加质量法将宏观坝水相互

作用简化为仅水库对大坝的单向作用,忽略大坝变形引起水域形状的改变,从而省却了流体计算域的建模求解问题。事实上,Westergaard 法需要满足坝体和地基为刚性等假定以及用一些近似方法来模拟水体对坝体的单向动力作用,这与实际土石坝库水相互作用情况有较大差异。另外,对于高面板坝和强烈地震,只有考虑水库运动特性才能真正体现土石坝-水库的双向动力流固耦合作用。早期对库水运动建模主要采用考虑水体压缩性的波动方程和忽略水体压缩性的 Laplace 方程,这两类方程均假定水体是无黏性的理想流体。张振国^[2]最早开展面板堆石坝坝水相互作用的相关研究,将水体视为不可压缩流体,采用 Laplace 方程,对上游面不同坡度的面板坝受动水压力的作用效应进行了计算分析,当坝坡较陡时(坡度 1 : 1.3),动水压力将使面板动应力增大 40% 左右;即使较缓坝坡(坡度 1 : 2.0),也能使面板动应力增大 10% 左右。这种对地震中水库运动特性的考虑依旧采用将库水对坝体的作用转化成附加质量的形式。迟世春等^[3]在此基础上考虑了水体压缩性的影响,用几种不同的库水模型(不可压缩的 Laplace 方程、可压缩的波动方程)对面板坝自振频率的影响进行对比分析,并对水体计算域长度的选取等方面进行了细致的分析研究,得到一些有益的结论。随后,迟世春等^[4]进一步分析了不同动水压力模型对面板坝动力反应的影响,得到的结论是不可压缩水体模型与 Westergaard 模型动力反应接近,而可压缩水体模型与不考虑动水压力情况接近。此外,迟世春等^[5]还详细研究了不同形式的动水压力附加质量矩阵,讨论了采用集中阵或分布阵对百米高面板堆石坝地震动力反应以及幅频反应的影响。邓海峰^[6]以董箐混凝土面板堆石坝为例,用附加质量法分析了 150 m 级的高面板堆石坝的动力反应,结果显示动水压力使得坝体地震响应减小,但是对面板的动应力以及残余应力影响较大。

1.2 更为精细水体模型的建立

上述宏观坝水动力流固耦合中,水体建模较为简单,没有考虑水库表面重力波等影响,对于地震烈度和坝高不大的面板坝,基本能体现“土石坝-库水”双向动力相互作用。对于 300 m 级的高土石坝,强震作用下坝顶部位的变形达数十厘米甚至 1 m 以上,且上游坝坡面加速度明显增大,对水库运动和局部边界影响显著,因此需要更精确地考虑地震时水库的运动特性,以合理反映水库与坝体之间动力耦合效应。此时需将水库连同大坝一起进行细致建模和耦合求解,普通的 Laplace 方程与波动方程对水

库运动描述就显得过于简单,需引入更为严格的水体运动数学模型,即 Navier-Stokes 方程(N-S 方程)。由于 N-S 方程由非线性偏微分方程耦合而成,求解析解是非常困难的,结合水库运动特点可做适当简化^[7]。目前在分析结构与水体相互作用中应用较为广泛的水体模型是基于势的亚音速流体模型^[8-10]与 N-S 流体模型。势流体模型需要流体符合无旋、无黏、无热转化的假定^[11]。基于速度势的方程相对于 N-S 方程具有更少的未知量,在实际工程计算中显得简单快捷,因此更适合于土石坝-库水动力流固耦合分析。Sussman 等^[12]首先将基于势的亚音速公式应用于流固耦合分析;王伟华等^[13]以重力坝为例,对比了传统附加质量模型与势流体模型下坝体的动力反应,指出传统附加质量模型结果偏大,进行地震反应分析时偏于保守;N-S 方程由于其本身的复杂性,目前在以求解结构反应为主的土石坝坝水动力分析中应用不多,主要应用在溃坝以及溢洪道水流数值模拟中^[14];刘金云等^[15]以二维坝水相互作用为例,对势流体模型与 N-S 流体模型进行了比较研究,结果显示在满足基于势的亚音速公式假定情况下,两者的计算结果较为相似,且选择基于势的亚音速公式具有更少的自由度,相对于基于 N-S 方程的模型更为快捷有效。

1.3 耦合系统的坐标描述及先进分析方法的选择

大坝与水库耦合求解时,大坝固体域采用 Lagrange 坐标系,而流体域采用 Lagrange 坐标系或 Euler 坐标系。但是由于流体自身特性,对于水库的建模无论是 Lagrange 坐标系还是 Euler 坐标系均有明显不足。ALE 方法综合了 Euler 坐标系和 Lagrange 坐标系的优点,可用于水库带自由表面和上游坝面边界变化较大的水库运动,克服了 Lagrange 方法常见的网格畸变等问题。20 世纪 80 年代发展起来的迎风格式有限元与分步格式有限元能够很好地解决水库流体数值解的失真震荡现象,使基于 ALE 描述的迎风有限元法和分步有限元法应运而生;它采用 ALE 描述从而可以精确确定流体边界的位置,且不会引起网格纠缠,同时引入迎风格式或分步方法来消除对流效应引起的非物理振荡,目前其已在流体结构相互作用方面得到应用,但在大坝-库水相互作用方面的应用目前还不多见。Ramaswamy 等^[16]运用 ALE 分步有限元来解决不可压缩黏性流体自由表面的运动问题。Souli 等^[17]将 ALE 技术和 GLS 迎风有限元法相结合应用到求解带有自由液面流体的大幅晃动问题。Takase 等^[18]将瞬变理论同 SUPG 迎风有限元结合起来,利用 SUPG 瞬变有限元方法来计算海岸的浅水波问题。岳宝增^[19-20]等利用

ALE 分步有限元算法来解决三维液体的大幅度晃动问题。华蕾娜^[21]对水池中的自由表面波利用 ALE 分步有限元进行了模拟。陈文元等^[22]运用 ALE 描述将流体域的网格节点按照自由液面的运动和耦合面的移动不断更新,模拟了坝体在地震作用下的动力特性、库水自由表面重力波影响以及库水域有效影响范围的问题。上述研究成果可以很好地借鉴应用到强震下高土石坝与水库的动力流固耦合中,以精细反映水库的激振和库面运动等特性。

坝水动力相互作用涉及固体域和流体域的联合求解,边界条件非线性程度高,目前只能采用数值解法,如有限差分法、有限体积法、边界元法和有限元法等。王国辉等^[23]详细分析了各数值方法的利弊,其中有限元法相对于其他方法而言能比较容易处理各种复杂的几何边界条件,在很多情况下能得到较高的精度,因此被 ADINA、ABAQUS 等大型通用有限元软件在求解流固耦合问题时广泛采用。有限元法依旧是目前求解“大坝-水库”动力耦合问题的首选数值解法。

2 土石坝土骨架-孔隙水细观动力流固耦合

2.1 早期基本的细观水土动力流固耦合

筑坝土石料属于典型的多孔介质,由土骨架、孔隙水和孔隙气组成。蓄水后浸润线以下的坝体完全被孔隙水充满,在地震作用下会产生振动孔隙水压力。为了模拟地震过程中孔隙水压力的变化,Seed 等最早建议了一个用于计算动孔压增长的解耦模型,适用于在地震历时较短且假设坝体不对外排水的情况。这种解耦的动孔压模型初步实现了孔隙水对土骨架的细观动力作用。其后徐志英等^[24-25]在此基础上结合 Biot 静力固结方程来考虑动孔压的扩散和消散,发展了土石坝排水有效应力动力分析方法。这类方法将单独的动孔压增长、土石坝运动与土体静力固结方程联系起来,在小时段内仿照静力固结耦合问题来处理动孔压的扩散与消散,通过与大坝动力反应分时段交替计算来考虑两者相互作用,近似实现孔隙水压力的增长、扩散和消散及与土骨架间的动力相互作用,但未从本质上描述土骨架与孔隙水两者间真正的细观动力流固耦合过程。为了更好地解决这一问题,Biot 动力固结理论和基于连续介质力学的混合物理论便应运而生。

2.2 基于 Boit 动力固结理论的细观水土动力流固耦合

Biot 等^[26-29]对水土两相介质的相互作用机理(完全耦合)进行了开创性的研究,率先建立了饱和土体线弹性多孔介质平衡方程,后又给出了系统动

能和介质衰减函数表达式,建立了通过惯性项和黏性项耦合起来的系统动力方程,发展了含有可压缩黏性流体的多孔弹性固体应力波传播理论,后又将其推广至各向异性、黏弹性以及包含固相热量耗散的饱和两相多孔介质中。Ghaboussi 等^[30-31]在 Biot 动力方程的基础上依据变分原理建立了有限元方程,分析了动荷载作用下饱和多孔半空间土体的瞬态反应和土石坝在平面应变情况下的地震瞬态反应。

Biot 波动理论可以正确考虑饱和土体中土骨架与孔隙水之间的相互作用,但是 Biot 动力方程中的弹性常数与惯性耦合系数难以测定,限制了该理论的推广应用。为此,门福录^[32]在假定孔隙水为不可压缩、固相骨架为弹性的条件下,依据 Biot 准静力情形下的方程再附加以惯性项建立了动力学方程组。盛虞等^[33]根据有效应力原理推导出土体二维动力固结方程,将其与孔隙水压力计算结合,对土坝进行考虑孔隙水压力产生、扩散与消散的有效应力动力反应分析。林本海^[34]在文献^[33]的基础上将其理论推广到三维问题,分析中以动力固结方程为基础,在震动过程中全程跟踪孔隙水压力产生、扩散和消散的发展变化,将动力渗流与土体动力反应分析相耦合,较好地反映了土体震动过程中的实际状态。但是由于林本海采用的动本构模型的限制,在动力微分方程中动孔压仍然沿用过去动力反应与动力固结分离计算时的方法,使得由动孔压模型计算出的动孔压与动力渗流固结引起的孔压出现了矛盾。为此,需寻求真正耦合且实用性强的多孔介质动力流固耦合理论。Zienkiewicz^[35]对 Biot 多孔介质模型的波动问题进行了进一步的研究,考虑了孔隙度以及各相密度的变化,并增加了固体和流体的惯性项,能合理反映地震过程土石坝中土骨架与动孔隙水的动力相互作用。Zienkiewicz 等^[36-39]对饱和多孔介质建立了用不同未知量表示的几种有限元方程形式,即以固相位移 u 和液相相对位移 w 为基本未知量的“ $u-w$ ”形式,以及固相位移 u 和孔隙水压力 p 为基本未知量的“ $u-p$ ”形式;由于“ $u-p$ ”形式计算结果的精度略逊于“ $u-w$ ”形式,又进一步给出了以“ $u-w$ ”形式波动方程为基础的高阶有限元法、以“ $u-w-p$ ”为基本未知量和以“ $u-w-p-\sigma$ ”为基本未知量的混合有限元法及基于“ $u-w$ ”形式波动方程的 Hermitean 方法的有限元方程式。李宏儒^[40]在林本海研究成果基础上采用有效应力物态动本构关系,利用瞬态理论,舍去了孔压模型的引入,对动力渗流和动力固结相耦合的土体有效应力计算方法进行了进一步的分析和改进。刘凯欣等^[41]将饱和多孔介质的固相和液相处理成完全独立的两相,通过二者

交界面处的流固耦合作用相互联系,给出了固相和液相的基本方程以及二者界面耦合关系方程,开发了三维流固混合显式动力有限元计算程序,对饱和多孔介质中应力波的传播进行了数值模拟,并详细讨论了孔隙率和孔隙形状等因素对应力波传播主导波形的影响。上述理论和方法为研究强震作用下高土石坝与孔隙水的动力耦合效应分析开辟了崭新途径,势必会不断得到应用和验证提高。

2.3 基于混合物理论的细观水土动力流固耦合

在众多学者研究土骨架与孔隙水相互作用的 Biot 动力固结理论的同时,解决土体与孔隙水耦合问题的另一种理论——混合物理论也逐步得到了深入研究。混合物理论以热力学理论为基础,对单一物质连续系统理论进行了拓展,具有良好的自适性和系统性。Truesdell^[42]提出了任意组分混合物的质量、动量和能量的局部平衡方程,标志着现代混合物多孔介质理论(PMT)研究的开始。Prevost^[43-44]提出了一种饱和多孔介质波动理论的有限元数值解法,其中,土骨架可以采用非线性或弹塑性本构模型,也可以考虑大变形问题,液相可以假定为可压缩或不可压缩。为了去掉由于刚性流体的存在而产生的对时间步长的限制,采用隐-显式积分算法。Yiagos 等^[45]建立了一种可用于土坝弹塑性地震反应分析的简单而有效的二维有限元计算方法,其中,坝剖面近似为对称的三角形,土层为饱和多孔介质且水平分层,并考虑了水的存在,将土骨架按照非线性滞变体进行处理。严波等^[46]采用基于混合物理论的两相多孔介质模型,建立了黏性流体饱和两相多孔介质非线性动力问题的控制方程,利用 Galerkin 加权残值法推导了有限元方程组,并采用隐式 Newmark 法进行求解。秦小军等^[47]根据流固两相混合物的连续介质力学理论,采用 Galerkin 加权残值法,选取固相位移、液相位移和孔压作为场变量,对固液两相耦合方程组进行有限元离散,得到解耦的方程组,然后在时域上采用 Wilson- θ 法进行逐步积分,得到一种分析二维饱和多孔介质地震反应的三场有限元法。

基于连续介质力学的混合物理论将运动学、动力学、热力学及本构理论融为一体,包含了各种复杂的因素,可以更加全面地反映地震过程中土骨架、孔隙水甚至是孔隙气之间的动力耦合作用。基于混合物理论的多孔介质模型能够蜕化为经典的 Biot 模型^[48]。两种理论在物理和数学上均有很好的一致性^[49],能满足理论上的精确性。相信两种理论会在强震下土石坝与孔隙水的细观动力耦合问题中不断得到深入研究和应用。

3 水库-土石坝-孔隙水宏观动力流固耦合

由于目前尚不能在实验室或现场对土石坝和水库这一耦合系统进行整体动力研究,因此理论分析和数值仿真模拟依然是当前主要研究手段。尤其对于强震区高土石坝,应建立库水-高土石坝-地基-孔隙水宏观水土动力耦合系统,对其进行整体分析、数学建模和耦合求解,着重研究水的动态演变过程及与土骨架之间动态作用关系,即从库水运动和入渗到超孔隙水的形成,再到超孔隙水的扩散和耗散(孔隙水的重分布和流入水库),更精确地考察孔隙水可能造成的土体失稳、渗透破坏、液化、心墙动水劈裂等震害问题。

随着有限元等数值求解技术的飞速发展,将高土石坝库水宏观流固耦合与土骨架孔隙水微观流固耦合完整意义上结合的坝水动力流固耦合成为可能。已有研究人员对一些实际土石坝工程开展相关动力反应分析,如 Wang 等^[50]利用大型商业有限元软件 ADINA,分别建立了坝体与库水网格,对于流体域分别利用亚音速势流体模型与 N-S 流体模型进行模拟,对于坝体采用基于广义 Biot 动力固结的多孔介质理论,分析了 Sanfernando 坝在地震作用下坝体、库水以及孔隙水系统动力耦合的全过程,初步证明了该理论应用于土石坝的可行性与合理性。Wang 等^[51]对新奥尔良 17 街运河大堤的破坏进行了分析,同时采用有效应力法和总应力法进行了对比,重点考虑了堤坝系统中堤坝填充物和防洪墙所形成的空隙对堤防性能的影响。牛志伟^[52]在研究高坝-库水-淤沙系统的动力相互作用中,将广义 Biot 动力固结理论应用于库底淤沙,采用 P-Z 弹塑性本构模型,对库水采用简化欧拉方程,分析了整个系统的坝水动力响应以及淤沙层的液化。李蔚^[53]在此基础上,将该坝水动力耦合理论进一步应用到高土石坝的地震动力反应分析中,对双江口心墙堆石坝进行了三维有限元动力分析。卞锋^[54]分别采用等价黏弹性模型与基于广义 Biot 动力固结理论的 P-Z 弹塑性模型对 300 m 级的其宗心墙坝进行了动力分析,实现了这一新理论在高土石坝动力分析中的应用。上述研究为强震作用下库水-高土石坝-地基-孔隙水宏观水土动力耦合系统研究提供了基础,通过进一步的完善研究,能为科学合理地建立高土石坝地震反应安全评价标准及抗震加固措施提供理论依据。

4 尚待研究的问题

高土石坝与水体(库水和孔隙水)的动力流固

耦合分析目前尚处于理论发展阶段,还有许多问题有待细致深入研究,如:

- a. 对强震下的高土石坝和大水库,库水运动需建立更为精细的控制方程,以反映与坝体运动之间的双向动力作用。
- b. 虽然对水体采用 ALE 迎风有限元法和 ALE 分步有限元法已广泛应用于许多流固耦合领域,但将其引入到土石坝库水运动分析中还有待进一步的应用和验证。
- c. 广义 Biot 动力固结理论已在海床动力特性和混凝土坝坝前库底淤沙动力特性等方面得到应用,但在土石坝地震反应分析中应用还很少,其中多孔介质动力本构模型以及合理的动参数对坝水动力耦合系统影响很大,还需不断深入研究。
- d. 混合物多孔介质模型作为一种较为先进的多孔介质理论已崭露头角,目前多限于静力渗流固结等领域,在高土石坝动力流固耦合分析中的应用还有待深入研究。
- e. 土石坝动力反应分析中坝水宏观流固耦合与多孔介质水土微观流固耦合虽已实现结合,但库水与孔隙水在地震中的交换过程,即库水的动力入渗和孔隙水的消散回流至水库,并未得到全面考虑,也值得进一步探索研究。
- f. 应大力加强高土石坝宏观坝水动力耦合效应的监测和震后分析等工程应用研究,从实际工程中来验证和评价各种研究理论和分析方法的可行性、重要性和准确性,以达到理论与实践相互促进的目的。

参考文献:

[1] WESTERGAARD H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Trans, ASCE, 1933, 98: 418-433.

[2] 张振国. 考虑坝水相互作用的钢筋混凝土面板堆石坝三维非线性有限元分析[D]. 南京: 河海大学, 1987.

[3] 迟世春, 顾淦臣. 面板堆石坝坝水系统自振特性研究[J]. 河海大学学报, 1995, 23 (6): 104-107. (CHI Shichun, GU Ganchen. Faced rockfill dam vibration characteristics of water systems [J]. Journal of Hohai University, 1995, 23 (6): 104-107. (in Chinese))

[4] 迟世春, 林皋. 混凝土面板堆石坝与库水动力相互作用研究[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38 (6): 718-723. (CHI Shichun, LIN Gao. Research on hydrodynamic interaction of concrete face rockfill dams and water system [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998, 38 (6): 718-723. (in Chinese))

[5] 迟世春, 林皋. 不同动水压力质量阵对面板堆石坝动力特性的影响[J]. 水电站设计, 1999, 15 (1): 46-52.

- (CHI Shichun, LIN Gao. Influence of different hydrodynamic pressure mass matrix on dynamic characters of concrete facing rockfill dams[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1999, 15(1): 46-52. (in Chinese))
- [6] 邓海峰. 高面板堆石坝地震三维动力反应分析[D]. 宜昌: 三峡大学, 2010.
- [7] JOHN D A. Computational fluid dynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [8] HIRSCH C. Numerical computation of internal and external flows[J]. Chrchester: John Wiley, 1988.
- [9] LASKARIS T E. Finite-element analysis of three-dimensional potential flow in turbomachines[J]. AIAA J, 1978(16): 717.
- [10] OLSIN L G, BATHE K J. Analysis of fluid-structure interactions: a direct symmetric coupled formulation based on the fluid velocity potential [J]. Computer and Structure, 1985, 21(1/2): 21-32.
- [11] BATCHELOR G K. An introduction to fluid dynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.
- [12] SUSSMAN T, SUNDQVIST J. Fluid-structure interaction analysis with a subsonic potential-based fluid formulation [J]. Computer and Structure, 2003, 81: 949-962.
- [13] 王伟华, 张燎军. 基于 Adina 的重力坝地震响应分析[J]. 水电能源科学, 2008, 26(1): 97-99 (WANG Weihua, ZHANG Liaojun. Application of ADINA to analysis of earthquake response of gravity dam[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2008, 26(1): 97-99. (in Chinese))
- [14] 刘学炎. 溃坝水流数值模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [15] 刘金云, 陈建云. 势流体与 N-S 流体的应用及比较研究[J]. 人民长江, 2009, 40(20): 27-31. (LIU Jinyun, CHEN Jianyun. The comparison between potential fluid and N-S fluid[J]. Yangtze River, 2009, 40(20): 27-31. (in Chinese))
- [16] RAMASWAMY B, KWAAHARA M. Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for unsteady, convective, incompressible viscous free surface fluid flow [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1987(7): 1053-1075.
- [17] SOULI M, ZELESIO J P. Arbitrary Lagrangian-Eulerian and free surface methods in fluid mechanics [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 191: 451-466.
- [18] TAKASE S, KASHIYAMA K, TANAKA S. Space-time SUPG finite element computation of shallow-water flows with moving shorelines [J]. Computational Mechanics, 2011, 48(3): 293-306.
- [19] 岳宝增, 刘延柱, 王照林. 三维液体大幅晃动及其抑制的数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(8): 1036-1039. (YUE Baozen, LIU Yanzhu, WANG Zhaolin. Numerical simulation and suppression of three dimension large amplitude liquid sloshing[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(8): 1036-1039. (in Chinese))
- [20] 岳宝增, 刘延柱, 王照林. 三维液体非线性晃动动力学特性的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2001, 18(1): 110-115. (YUE Baozen, LIU Yanzhu, WANG Zhaolin. ALE finite element method for three-dimensional large amplitude liquid sloshing using fractional step method [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(1): 110-115. (in Chinese))
- [21] 华蕾娜. ALE 分步有限元法研究及其在自由表面水波问题中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [22] 陈文元, 赵雷. 坝体考虑流固耦合的动力特性分析[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(1): 126-129. (CHENG Wenyuan, ZHAO Lei. Analysis dynamic characteristics of the dam considering fluid-structure coupling[J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(1): 126-129. (in Chinese))
- [23] 王国辉, 柴军瑞, 杜成伟. 坝库系统流固耦合数值分析方法简述[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(4): 89-94. (WANG Guohui, CHAI Junrui, DU Chengwei. Review of numerical analysis method for fluid-solid interaction of dam-reservoir system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(4): 89-94. (in Chinese))
- [24] 徐志英, 沈珠江. 地震液化的有效应力二维动力分析方法[J]. 华东水利学院学报, 1981, 9(3): 1-14. (XU Zhiying, SHENG Zhujiang. Two dimensional analysis methods of effective stress liquefaction[J]. Journal of East China Institute of Water Conservancy, 1981, 9(3): 1-14. (in Chinese))
- [25] 周健, 徐志英. 土(尾矿)坝的三维有效应力的动力反应分析[J]. 地震工程和工程震动, 1984, 4(3): 60-70. (ZHOU Jian, XU Zhiyi. Three dimensional dynamic analysis of effective stress in soil (tailings) dams [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, 4(3): 60-70. (in Chinese))
- [26] BIOT M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid [J]. Appl Phys, 1955, 26: 182-185.
- [27] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid [J]. Acoust Soc Am, 1956, 28: 168-191.
- [28] BIOT M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media [J]. Appl Phys, 1962, 33(4): 1482-1498.
- [29] BIOT M A, WILLIS P G. The elastic coefficients of the theory consolidation [J]. Appl Phys, 1957, 24: 594-601.
- [30] GHABOUSSI J, WILSON E L. Variational formulation of dynamics of fluid-saturated porous elastic solids [J]. Engng Mech Div, ASCE, 1972, 98(4): 947-963.

- [31] GHABOUSSI J, WILSON E L. Seismic analysis of earth dam-reservoir system [J]. Soil Mech Found Div, ASCE, 1973, 99(10): 849-862.
- [32] 门福录. 波在饱和孔隙弹性介质中的传播[J]. 地球物理学报, 1965, 14(2): 107-114. (MEN Fulu. Waves propagation in saturated porous elastic medium [J]. Geophysics, 1965, 14(2): 107-114. (in Chinese))
- [33] 盛虞, 卢盛松, 姜朴. 土工建筑物动力固结的耦合振动分析[J]. 水利学报, 1989(12): 31-42. (SHEN Yu, LU Shengsong, JIANG Pu. Earth structure coupled vibration analysis of dynamic consolidation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(12): 31-42. (in Chinese))
- [34] 林本海. 砂土-碎石桩复合地基的液化检验理论和数值分析方法的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 1997.
- [35] ZIENKIEWICZ O C. Basic formulation of static and dynamic behaviour of soil and other porous media [J]. Numerical Methods in Geomechanics, 1982, 92: 39-55.
- [36] ZIENKIEWICZ O C, SHIOMI T. Dynamic behavior of saturated porous media: the generalized Biot formulation and its numerical solution [J]. Int Numer Anal Methods and Geometry, 1984(8): 71-96.
- [37] SIMON B R, ZIENKIEWICZ O C, PAUL D K. An analytical solution for the transient response of saturated porous elastic solids [J]. Int Numer Anal Methods and Geometry, 1984(8): 381-398.
- [38] SIMON B R, WU J S, ZIENKIEWICZ O C, PAUL D K. Evaluation of $u-w$ and $u-\pi$ finite element methods for the dynamic response of saturated porous media using one-dimensional models [J]. Int Methods and Geometry, 1986(10): 461-482.
- [39] SIMON B R, WU J S, ZIENKIEWICZ O C. Evaluation of higher order, mixed and Hermitian finite element procedures for the dynamic response of saturated porous media using one-dimensional models [J]. Int Numer Anal Methods and Geometry, 1986(10): 483-499.
- [40] 李宏儒. 土体动力反应分析方法的分析与改进[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [41] 刘凯欣, 刘颖. 横观各向同性含液饱和多孔介质中瑞利波的特性分析[J]. 力学学报, 2003, 35(1): 100-104. (LIU Kaixin, LIU Ying. Characteristic of Rayleigh waves in transversely isotropic fluid saturated porous media [J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(1): 100-104. (in Chinese))
- [42] TRUESDELL C. Exact theory of stress and strain in rods and shells [J]. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1982, 1(1): 295-323.
- [43] PREVOST J H. Non-linear transient phenomena in saturated porous media [J]. Comput Methods Appl Mech Engrg, 1982, 30: 3-18.
- [44] PREVOST J H. Wave propagation in fluid-saturated porous media: an efficient finite element procedure [J]. Int Soil Dyn Earthquake Engrg, 1985, 4(4): 183-202.
- [45] YIAGOS A N, PREVOST J H. Two-phase elasto-plastic seismic response of earth dams: applications [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1991, 10(7): 371-381.
- [46] 严波, 张汝清. 黏性流体两相多孔介质非线性动力问题的罚有限元法[J]. 应用力学和数学, 2000, 21(12): 1247-1253. (YAN Bo, ZHANG Ruqing. Penalty finite element method for nonlinear dynamic response of viscous fluid-saturated biphasic porous media [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 21(12): 1247-1253. (in Chinese))
- [47] 秦小军, 陈少林, 曾心传. 二维饱和孔隙介质的三场有限元方法[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19(2): 60-69. (QING Xiaojun, CHEN Shaolin, ZENG Xinchuan. A three-field finite element procedure for two dimensional fluid-saturated porous media [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1999, 19(2): 60-69. (in Chinese))
- [48] BOWEN R M. Plane progressive waves in a heat conducting fluid saturated porous material with relaxing porosity [J]. Acta Mechanica, 1983, 46: 189-200.
- [49] de BOER R. 多孔介质理论发展史上的重要成果[M]. 刘占芳, 严波, 译. 重庆: 重庆大学出版社, 1995.
- [50] WANG X, WANG L B. Dynamic analysis of a water-soil-pore water coupling system [J]. Computers & Structures, 2007, 85: 1020-1031.
- [51] WANG X, CASTAY M. Failure analysis of the breached levee at the 17th Street Canal in New Orleans during Hurricane Katrina [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(7): 812-834.
- [52] 牛志伟. 库底淤沙对混凝土坝地震响应影响分析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [53] 李蔚. 考虑坝体-水体-地基相互作用的高土石坝地震动力反应分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [54] 卞锋. 高土石坝地震动力响应特征弹塑性有限元分析[D]. 北京: 清华大学, 2010.

(收稿日期: 2013-04-12 编辑: 熊水斌)

