

# 高土石坝抗震性态分析与灾害对策研究<sup>\*</sup>

丰土根, 杨 贵

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 首先介绍了中国目前高土石坝建设现状, 然后回顾了循环加荷动三轴测试技术、堆石料动力性质的研究、高土石坝动力反应分析方法和土石坝地震永久变形的研究进展, 最后讨论了高土石坝抗震措施和土石坝地震安全评价及防灾对策专家系统的基本思路。

**关键词:** 高土石坝; 堆石料动力性质, 动力反应分析; 抗震措施; 土石坝地震安全评价; 防灾对策专家系统

**中图分类号:** TU352.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2010)03-0042-07

土石坝工程由于施工简便, 地质条件要求低, 造价相对较低, 并可就地取材且料源丰富, 因此是水利水电工程中极为重要的一种坝型。土石坝工程的建设历史久远, 并经久不衰。随着我国社会经济的发展, 水利水电工程建设突飞猛进, 近年来, 我国许多土料防渗土石坝坝高达到 200 m 甚至 300 m 以上。已建成的黄河小浪底工程, 为斜心墙土石坝, 坝高达到 167 m, 并建在 70 多 m 深的覆盖层上, 可以说是我国当前在土料防渗土石坝建设中最具代表性的工程。1980 年代我国开始建设面板堆石坝, 起点较高, 发展非常快。如西北口、沟后、成屏一级和株树桥等坝, 坝高都在 70 m 以上, 有的超过百米级。目前, 我国坝高达百米级的混凝土面板堆石坝已很多, 一部分已接近 200 m 级, 甚至超过 200 m。如已建浙江珊溪工程利用开挖料石筑坝, 坝高 132.5 m; 云南茄子山工程坝体填料为花岗岩石料, 坝高 107 m; 黄河公伯峡面板堆石坝, 设计抗地震烈度为Ⅷ度, 最大坝高达 133 m; 已建成的天生桥一级电站面板堆石坝, 坝高 178 m<sup>[1]</sup>。随着国家西部大开发计划实施, 一批高土石坝正在兴建, 大多数都处于中国西南高地震活动区, 土石坝坝高开始向 300 m 级高度研发和建设。如 315 m 高的双江口、293 m 高的两河口、261.5 m 高的糯扎渡、225 m 高的江坪河、232 m 高的水布垭以及 240 m 高的长河坝等。由于

坝高库大, 坝址所在地区地形地质条件复杂, 环境恶劣, 地震烈度高, 一旦失事, 将产生灾难性的后果。因此强震环境下筑坝堆石料的动力特性与高土石坝动力反应分析是必须研究的课题。本文简要回顾了高土石坝筑坝料动力特性与抗震分析研究进展。

## 1 高土石坝抗震性态试验研究

### 1.1 动力测试技术

粗粒土动力特性的研究进展, 在很大程度上取决于测试技术的提高。室内研究粗粒土动力变形特性主要有 3 种途径: ①以波动理论为基础(超声波与脉冲技术), 测得土中波的传播速度、衰减特性; ②以振动理论为基础(共振柱试验), 测试土的刚度和阻尼特性; ③循环载荷试验, 直接得到土的应力-应变关系, 主要有循环三轴试验、中空扭剪试验、单剪试验、扭单剪试验等。循环载荷试验具有易于控制初始应力条件、动应力条件、排水条件等优点, 因此得到了广泛应用和发展, 在过去的几年里, 国内外在这方面的研究取得了一些新的进展。

进行粗粒土动力变形特性测试的室内试验加载路径应能够合理反映现场应力条件。常规的循环三轴试验主应力方向固定, 且为轴对称的变形条件,

\* 收稿日期: 2010-01-15

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(109077); 国家杰出青年科学基金“高土石坝静、动力学特性与应力变形分析”(50825901); 水利部公益性行业专项经费项目“高土石坝地震灾变模拟及安全控制技术研究”(200801014)

作者简介: 丰土根(1975-), 男, 浙江金华人, 副教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事土动力学与工程抗震、道路堤坝与软土地基处理等方面的教学与研究。E-mail: tgfeng75@yahoo.com.cn

与现场的实际应力条件有相当的差异。而室内循环扭单剪仪可以模拟土体中主应力轴的旋转、循环单剪变形、剪应变在垂直方向上均匀分布等应力条件, 能够较好地反映现场的加载条件, 因此近期得到应用。郭庆国曾对粗粒土的抗剪强度采用真三轴试验进行了尝试性的研究<sup>[2]</sup>, 但它是今后粗粒土力学发展的基础和趋势。可见, 复杂加载条件下粗粒土的动力特性的试验研究仍有待开展。

不同试验方法的应变水平和测定的指标不同, 对所得到的试验结果无法进行综合的对比分析<sup>[3]</sup>。引入高精度微观位移传感器, 可以测量较宽应变幅值下, 尤其是微应变条件下的动力特性, 从而将用一个堆石料试样对不同应变水平下动力特性进行连续测试推进到了一个实质性阶段。这不仅简化了特性参数的测试方法, 降低了测试成本, 而且明显提高了测试精度。

土石料作为一种散体材料, 土颗粒间相互位置排列和粒间作用力对于土石料的力学性质有重要的影响, 许多问题都涉及到土石料组构问题。目前用于组构测试的方法通常有 X-射线、扫描电镜、透射电镜等。对于土石料, 要监测受力变形过程中试样内部结构的动态变化, 计算机断层 X-射线技术(简称 CT)是最为合适有效的方法。近年来, CT 技术在岩土试验中得到了较为广泛的应用, 长江科学院较早地开展了 CT 三轴仪上进行探讨性试验, CT 图像非常清晰可靠, 能够准确地反映颗粒的位置和形态。

## 1.2 堆石料的动力变形特性

各种动荷载作用下, 粗粒土的动力变形性状主要受到应变水平、应力条件、测试手段、颗粒特性及排水条件等因素的影响。现有的有关粗粒土的动力变形特性的研究多是围绕测取等价线性化计算所需要的剪切模量与阻尼比随着应变幅值的非线性变化规律而展开。下面分别结合动剪切模量和动阻尼比的经验表述形式及影响因素进行总结。

### 1.2.1 堆石料的动剪切模量

影响堆石料动剪切模量的因素除剪应变幅以外, 孔隙比或相对密度和围压也是重要影响因素, 其次是颗粒大小(尤其是最大颗粒尺寸)、岩性、沉积历史以及循环应力的周数等。依应变幅值的大小, 通常分为: 微应变幅值下的动剪切模量和中等应变条件下的动剪切模量。

#### (1) 微应变幅值下的动剪切模量及其影响因素

微应变幅值下的动剪切模量是描述堆石料动力特性的一个重要参数, 通常也称为初始剪切模

量( $G_{\max}$ ), 在微小应变水平下( $\leq 10^{-4}\%$ ), 它基本上为常数。通常用室内共振柱试验或者现场波速试验来确定。近年来, 微幅应变传感测试仪器的使用, 使得室内循环加载试验也开始应用于初始模量的测定。

围压和试样的密实度是影响堆石料微幅应变下剪切模量的主要因素, 大量室内动力试验的测试结果表明: 随着围压的增加, 模量呈递增趋势; 而随孔隙比的增加, 模量逐步下降。考虑这些主要因素, 提出了初始剪切模量的各种形式的经验关系, 典型的有 Seed 等人<sup>[4]</sup>结合现场测试结果给出的经验公式和 Hardin 等人<sup>[5]</sup>结合砂土的室内试验结果给出的经验公式。

除了经验公式中反映的两种主要因素外, 研究者还探讨了颗粒特性(岩性、颗粒大小等)、取样方法和试验手段等的影响。一些学者对相同密度下不同粗粒含量的堆石料的测试表明<sup>[6]</sup>, 随着粗粒含量的增加, 初始模量明显增加。孔宪京等<sup>[7]</sup>利用室内振动台上的大型模型坝, 从另一种角度研究了堆石料粒径对初始剪切模量的影响, 并指出当剪应变一定时, 模量随平均粒径的增大而增加, 但粒径增大到一定值时, 其增长率趋于平缓。梁永霞<sup>[6]</sup>指出, 在相同密度下, 随试验用料粒径变小初始剪切模量下降, 并建议将室内模拟堆石料的试验结果用于工程时, 应乘以(1.0 ~ 1.5)的修正系数。贾革续在高精度大型液压伺服三轴仪上的静动试验结果表明<sup>[8]</sup>: 在微应变条件(小于  $10^{-3}\%$ )下各种试验手段得到的堆石料的弹性模量是很接近的。

#### (2) 中等应变条件下的动剪切模量及其影响因素

对于土工动力问题, 必须考虑较宽应变幅值范围内剪切模量的变化规律。为描述动剪切模量随应变幅值增加而衰减的特性, 通常将某一应变幅值下的剪切模量  $G$  用微幅应变条件下的最大剪切模量  $G_{\max}$  进行归一化处理, 将此剪切模量比记为  $\delta = G/G_{\max}$ 。土工试验通常给出动力变形测试的散布数据点, 使得在计算中模型参数的收集与整理相当困难。但若在前述初始剪切模量经验公式的基础上, 将模量参数  $K$  和指数  $m$  取为变量, 便可以表述较宽应变幅值范围内的剪切模量。吴兴征等<sup>[9]</sup>考虑到半对数坐标系中模量比与剪应变之间的曲线变化趋势与 Fredlund 等人提出的非饱和土土水特征曲线的形式极为相似, 提出了经验关系式。

试验结果表明<sup>[6]</sup>, 堆石料饱和试样和干试样

的模量递减曲线没有明显的差异,可能是孔隙水压力的变化对由大粒径坚硬颗粒组成的试样影响不大所致。研究表明,主应力比的变化对模量的归一化曲线影响不大。因此,现场的剪切模量  $G$  可以由各向异性固结的室内实验得到,只需调整平均主应力的值。

对于循环三轴试验和扭单剪试验的剪切模量归一化曲线,有些试验结果表明二者基本一致,而 Iida 等<sup>[10]</sup>得出的扭单剪试验的剪切模量归一化曲线低于动三轴试验的曲线。更为确切的结论有待于深入的试验研究。

此外,试样的岩性和沉积历史也对堆石料的剪切模量有一定的影响。关于堆石料在排水循环荷载下的积累残余变形特性,也进行了试验研究。

### 1.2.2 堆石料的动阻尼特性

土的阻尼主要是滞回阻尼,相应的等效粘性阻尼比  $\xi$  描述了一个周期内土体损失的能量和最大弹性剪切应变能量之比。由于试验设备的摩阻力往往较大且不易准确考虑,所得试验数据的离散性较大。一些高精度微小位移测试仪器的开发,使得对堆石料的动阻尼特性的认识逐步深入。

通常建立下面两种形式的经验关系来表述粗粒土的动阻尼特性。一是直接建立动模量与阻尼比之间的关系<sup>[5]</sup>。二是考虑动阻尼特性的各种影响因素直接建立经验关系。

影响堆石料阻尼比的主要因素有剪应变、孔隙比或相对密度及围压等。

## 1.3 堆石料的动力强度特性

Hatanaka 等<sup>[11]</sup>首次进行了堆石料循环不排水试验研究了其动力强度。Yasuda 等<sup>[12]</sup>也对堆石料的动力强度特性进行了系统的研究,并首次采用了大型扭单剪试验仪。

### 1.3.1 堆石料动强度特性的特点

不排水循环加载测试结果表明,随时拉等粗粒土的动强度特性与砂土相比具有以下两个不同点:(1)孔隙水压力的增长模式与密砂的明显不同。堆石料在循环测试的早期阶段,随着循环加载次数的增加,在压缩荷载方向超孔隙水压力快速增至几乎 100% 的围压,有效应力为接近零值,而在拉伸荷载方向超孔隙水压力迅速地下降。此外,堆石料在等向与非等向固结条件下,孔隙水压力比的最大值达到 0.9 或更大。(2)对应堆石料,随着循环次数的增加,应变逐渐增加,即使循环次数达到 100 次,也不会出现饱和和松砂液化时应变突然增加的现象。研究表明,堆石料具有较

强的循环变形特性,但累积变形随循环次数的增加而加大。这对于以变形控制为主的堆石料构筑物的抗震稳定性的影响是不容忽视的。

饱和堆石料的孔隙水压力快速增加对其动力变形和强度特性的影响及其合理的描述是值得深入研究的问题。

### 1.3.2 堆石料动强度特性的描述方法

对于粗粒土的强度特性,通常将循环剪应力比、动应变幅值和振动次数三者之一作为指定标准,考虑其余二者的关系得到不同的描述形式。比如:(1)一定应变幅值下循环剪应力比和相应振次之间的关系;(2)一定振次下发到某一指定应变幅值所需的循环剪应力比;(3)一定循环剪应力比下达到某一指定应变幅值所需要的振动次数等。

### 1.3.3 堆石料动强度的影响因素

动强度的影响因素主要包括相对密度、围压、初始剪应力、试验方法、取样方式和岩性等。

不同相对密度的堆石料的不排水循环试验结果表明,相对密度越大,循环剪应力比越大。在较高的相对密度下,循环剪应力比依赖于围压,随着平均正应力的下降,循环剪应力比增加。这与 Yunoki 等<sup>[13]</sup>关于密砂所得到的循环剪应力比依赖于围压的结论是相符的。但当相对密度较低时,堆石料的循环剪应力比并不依赖于初始围压。较高相对密度的堆石料,随着初始剪应力的增加,循环剪应力比增加。由扭单剪试验得到的循环剪应力比总是小于三轴试验得到的结果,而与平均主应力和初始剪应力大小无关。同样的相对密度下,重塑样的循环应力比仅为原状样的 50%。

对不同含砾量的砂砾石进行的振动台试验<sup>[3]</sup>所得结果表明,只有当含砾量大于某一界限含砾量时,砂砾石才具有较好的抗震性能。并指出,当含砾量小于界限含砾量时粒料不能形成骨架,砂砾石的渗透性主要由其中的砂料决定,液化性能也与所含砂料接近。

此外,试样岩石的沉积历史、岩性也显著地影响粗粒土的动强度。

高土石坝抗震关键技术研究“八五”攻关专题是结合瀑布沟、小浪底、吉林台、紫坪铺、大柳树等 5 座 200 m 级高土石坝工程进行的。对 3 种堆石料、1 种垫层料、2 种过渡料和坝基砂砾料进行了动应力应变关系试验,在循环加荷动三轴测试装置和测试技术及粗粒土动力性质的研究方面,取得了一些主要成果<sup>[14]</sup>。

## 2 高土石坝抗震分析理论

### 2.1 土石坝非线性计算分析

地震反应分析方法基于本构模型可分为两大类,一类是基于等价粘弹性模型的等效线性分析方法,另一类是基于弹塑性模型的真非线性分析方法。前者模型应用方便,而且在参数的确定和应用方面积累了较丰富的试验资料和工程经验,能为工程界所接受;后者能够较好地接近土体的实际反应,并能够直接计算坝体的残余变形,在理论上更为合理<sup>[15-18]</sup>。

从是否考虑地震过程中孔隙水压力影响的角度出发,地震反应分析方法又可分为总应力法和有效应力法。有效应力分析方法中又有不考虑孔隙水压力消散和扩散与考虑孔隙水压力消散和扩散两种<sup>[19-23]</sup>。而与之密切相关的动孔压特性、动强度和液化特性的研究工作也取得了重要进展,已建立了土体液化机理理论,土的液化、破坏及极限平衡间的关系和区别也得到了深入认识<sup>[22-28]</sup>。这些都为土石坝地震灾害机理的研究奠定了基础。

从国内外的研究现状来看,土石坝动力反应分析方法逐渐由二维的、等效线性的、总应力分析方法向三维的、真非线性的、考虑孔压扩散和消散的有效应力分析方法发展,而在库水、坝体、地基等的耦合非线性分析、复杂应力条件下的非线性本构模型、孔压计算模式、地震残余变形计算方法、接触面模拟及边界条件处理、地震动输入、高精度数值模拟和非线性计算方法等方面还需要进行深入的研究工作。工程上惯用拟静力法进行抗滑稳定分析来进行土石坝及地基的抗震安全评价<sup>[29-30]</sup>,然而,传统的拟静力法不能很好地考虑与地震动特性密切相关的土体的内部应力——应变关系和实际工作状态,求出的安全系数只是所假定的潜在滑裂面上的所谓安全度,无法得到实际内力分布和确定土体变形,也就无法预测土体失稳的发生和发展过程,更不能考虑局部变形对坝体稳定的影响。所以,近年来,逐步发展了进行土石坝及地基的地震安全评价的动力法。在动力法中,为了进行抗震安全评价,首先对土石坝及地基进行地震反应分析,求出在地震作用下土体内部的应力和变形分布等,然后按照相应的破坏标准来评价大坝的安全性。动力法中的关键问题包括:土石料动力特性的确定、土石坝及地基地震反应的分析、安全评价标准和理论方法等。

在非线性地震反应分析的基础上,联合室内试

验和现场测试等手段,研究高土石坝地震作用下的灾害机理、抗震安全性及防灾对策是高土石坝抗震研究中的关键问题。而研究地震破坏机理必须深入研究地震作用下结构的非线性问题,包括非线性材料性质、非线性破坏参数、非线性地震反应特征、非线性求解理论和实验方法。这方面的研究目前还很不完善,更需要创新性的研究工作。根据结构的破坏特征和工程的破坏机理提出合理的高土石坝抗震设计方法和抗震措施,并研究相应措施的作用机理,以解除地震灾害之虞,这是抗震研究的重点和目标,在研究中应重视它们的针对性、可靠性、实用性和经济性。

高土石坝抗震关键技术研究“八五”攻关专题,在高土石坝动力反应分析方法和计算技术的发展方面,取得了如下一些主要成果<sup>[14]</sup>。

(1)中国水利水电科学研究院提出了结构非线性粘弹塑性分析方法或者称增量线性粘弹性动力反应分析方法,其最大特点是:采用增量法和全量法交替进行,可控制增量法的误差积累,使分析结果更为合理。

(2)大连理工大学对面板与垫层间接触面的动力模型,采用了河海大学在振动拖板装置和改装的动单剪仪上对垫层料与混凝土接触面进行周期剪切试验所得的结果;比较了单元形态对计算结果的影响,认为在面板坝计算中,面板用平面单元是可行的。对 Goodman 单元和薄单元进行的比较说明,当薄单元的厚度在 10 cm 左右时,两种单元的计算结果的最大相对误差都不超过 1%,故建议用一定厚度的各向异性的薄单元取代 Goodman 单元,以简化计算。

(3)土石坝地震永久变形分析方法的发展。水科院提出的结构非线性粘弹塑性动力分析方法,将土视为粘弹塑性变形材料,认为土体在动荷载作用下的弹塑性变形规律的数学模式,由初始加荷曲线、骨干曲线和滞回圈构成。建立了土体非线性弹塑性剪应变模型,并据此计算土体的切线剪切模量。利用土体的非线性弹性模型,计算土体的割线剪切模量和(割线与切线)阻尼比,并假定泊松比为常数,计算割线杨氏模量。结构非线性粘弹塑性动力分析方法可求出土体的永久变形。这次攻关,对分析土体永久变形的半经验方法,如整体变形分析法(主要是节点力法)和刚体滑动法等,也做了一些重要改进。

(4)动水压力计算方法的进展。河海大学研究了动水压力与混凝土面板堆石坝的相互作用,计算

动水压力时,分别考虑了水体不可压缩、水体可压缩及用 Westergaard 公式计算动水压力 3 种情况。认为用不可压缩水体数学模型进行坝水耦合系统动力分析是妥当的。Westergaard 动水压力作为附加质量进行坝与动水压力耦合的动力分析,计算工作量小,可用于较低的坝。用可压缩水体数学模型进行坝水耦合系统动力分析工作量大,不宜采用。

(5)行波输入对土石坝反应的影响。四川联大研究了行波输入对土石坝反应的影响。研究表明,这种影响主要表现在地震作用的方向性和强化区的出现。认为行波的波速和方向对地震反应有重大影响;当行波沿坝轴线输入时,会产生较大的垂直加速度,较大的位移差动和较大的水平应力。对瀑布沟土石坝,其行波反应在多数情况下有所增强,增幅约为 30%。

(6)计算机程序的研制。南科院研制了土石坝总应力三维静、动力分析通用程序 TOSSD3 和土石坝有效应力法三维静、动力分析程序 EFESD3。河海大学研制了 WWCC2D 和 WWCC3D 动力有限元分析程序。四川联大开发了具有行波输入功能的土石坝三维非线性动力分析程序。

## 2.2 土石坝随机地震反应分析

土是一种典型的非线性材料,土工结构的地震破坏又具有累积损伤的特性,因此,即使按目前控制输入地震波三要素的方法来选择若干条具有相同的最大加速度,卓越周期和地震持续时间的不同波形地震波,计算同一土工结构的动力响应,其结果也是相当离散的。吴再光等利用人造地震波技术,产生 5 条符合同一功率谱的人工地震波,利用 QUAD4 程序计算了同一土石坝的地震反应,结果发现最大反应加速度相差近一倍<sup>[31]</sup>。Franklin 等将 9 条真实地震记录的加速度进行归一化,都调态到具有相同的最大加速度、卓越周期和地震持续时间,利用 Newmark 滑动模型计算某边坡滑块的永久位移,大小之差超过 4 倍。Makdisi 和 Seed 采用类似的方法对真实土石坝地震永久变形进行了计算,结果离散性更大,同一震级不同波形的地震波引起的土石坝永久位移相差可达 10 倍以上<sup>[32]</sup>。大量的计算分析也表明,对相同控制参数的地震液化计算得出的结论也完全不同。由此可知,在土动力学中对土工结构进行抗震设计时,仅靠最大加速度、卓越周期、地震持续时间等基本要素来选择某一条或几条确定性地震波是不够的,合理的途径应当是考虑地震动过程的随机性,在随机振动理论的基础上,经过场地危

险性分析,从统计概率的角度对土工结构的抗震性能进行评价。

随机地震反应分析首先确定基岩运动平稳模型或非平稳模型,引用随机地震反应虚拟激励法在频域内求解动力平衡运动方程。通过非线性迭代,求出反应量的各阶谱矩等统计量,并根据各变量的统计量计算动力响应的统计特性如最大值、均值、均方差等进行岩土结构可靠度或风险性分析<sup>[33]</sup>。

## 2.3 土石坝地震永久变形

目前,我国水工建筑物抗震设计规范规定:堆石坝坝体抗震稳定性分析仍然采用表面滑动法,但实际震害和研究表明,抗滑稳定安全系数并不能准确地反映堆石坝在地震后是否破坏或失效。在较强的地震作用下,堆石坝可能发生瞬时失稳或瞬时处于极限平衡状态,但这种瞬时失稳并不一定导致工程的破坏或失效。只要瞬时失稳引起的坝体变形不影响工程的正常使用,从工程观点考虑还是允许的。由此可见,验算坝坡在地震作用下的稳定安全系数并不是判断大坝安全的直接指标。于是各国学者开始寻找更为合理的稳定判别方法。对于面板堆石坝而言,其安全标准和设计依据更多地取决于坝体的变形,按土石坝在地震中发生的永久变形来评估其安全性是普遍认为可行的途径。多年来,学者们一直致力于这方面的研究,并基于数值分析方法给出的坝体动力反应分析结果提出了多种简化分析方法。关于土石坝地震引起的永久变形计算包括确定性和随机性两个方面。所谓确定性地震永久变形分析,就是对某一条或几条已知的地震波谱进行确定性数值积分,求得动应力和动位移,进而求得地震永久变形的的方法。它又包括滑动体变形和整体变形分析两部分。

滑动体变形计算分析方法。该方法是 1965 年 Newmark<sup>[34]</sup>基于极限平衡理论提出来的,其基本出发点是:假设永久变形是由于滑动土体沿着最危险的滑动面在地震荷载作用下发生瞬态失稳时的滑动位移所产生的。当土体内某一点加速度超过材料的屈服加速度时,沿破坏面就会发生滑动,加速度减去屈服加速度积分两次就得到永久位移。在 Newmark 法的基础上,许多学者做了改进。如 Markdisi 和 Seed<sup>[32]</sup>、陈生水 and 沈珠江<sup>[35]</sup>等。

整体变形计算分析方法。整体变形方法的基本假定是将土体的变形作为连续介质处理,土的本构关系采用通常的粘弹性模型,采用有限单元法进行计算,再结合实验研究而发展起来的一类方法。从永久变形产生机理来看,这类方法包括

以下两种: (1) 软化模量法。这种方法认为永久变形是由于地震应力作用下静剪切模量降低而引起的。采用两次有限元计算, 地震永久变形等于按降低的剪切模量所算得的静应变与地震前静应变之差。这种方法是由 Lee 提出来的, 后来 Serff 等<sup>[36]</sup>又提出了初步近似估算法、线性修正模量法、非线性修正模量法。(2) 等效结点力法。这种方法认为地震力对变形的影响可用一组作用于单元结点上的静结点力(即等效结点力)代替, 按照试验确定的动应力与残余变形关系曲线, 用有限元法在等效结点力作用下产生的附加变形就是地震永久变形。代表方法有 Taniguchi、Whitman 提出的方法<sup>[37]</sup>、张克绪<sup>[38]</sup>、刘汉龙<sup>[39]</sup>等效结点力法等。

永久变形随机性分析也包括滑体变形分析和整体变形分析。(1) 滑体变形随机性分析。1984 年, Lin 首次提出了土石坝地震永久变形分析方法; 1986 年 Lin 进一步对他的方法用于理想滑块永久变形计算的各个细节作了具体介绍; 1991 年, 吴再光等<sup>[40]</sup>参照 Lin 的研究, 对土石坝地震永久变形进行了更深入的分析。(2) 整体变形随机性分析。目前有关该方面的研究较少, 只有吴再光等做了一些初步工作。他把液化分析的累积损伤模型引入土体随机地震作用下软化模量分析中。刘汉龙基于等价结点力模型, 考虑地震的随机性, 建立了一种地基土石坝随机地震永久变形分析方法<sup>[33]</sup>。

### 3 高土石坝抗震措施与防灾减灾对策研究

#### 3.1 土石坝抗震措施研究

一般土石坝为满足抗震要求, 除基础浅层有细砂透晶体需作振冲加碎石桩处理外, 一般采用较缓坝坡坡度, 如新疆吉林台工程混凝土面板砂砾石坝, 设计抗震烈度为Ⅷ度, 坡度比为 1:1.7 ~ 11:1.9; 也可将靠坝坡外侧的一部分填筑料选用抗滑能力较强的堆石, 坡度可选用 11:1.4 或稍缓。大多数面板堆石坝抗震性能好, 与其堆石填料有关。此外, 为减少坝体填筑料, 并满足抗震要求, 有的工程采用坝体内加设混凝土框格, 有的工程在坝体内加设钢筋网, 以增强其抗滑能力<sup>[1]</sup>。

(1) 心墙堆石坝防渗体顶部开裂是常见的震害现象, 采取选用优质筑坝土料, 注意填筑质量和优化断面设计等措施, 积极防止地震引起的开裂, 无疑是很重要的, 但是更为重要的是, 要精心设计好防渗体上下游的“自愈”式反滤层和过渡层,

特别是下游面, 一定要做得更为可靠<sup>[14]</sup>。

(2) 对于面板堆石坝, 地震引起的震害, 估计主要发生在坝的上部, 如面板开裂、坝体变形、下游坡浅层滑坡等, 另外周边缝及周边缝止水结构的局部破坏可能也难以避免。可根据坝高及其地震反应情况, 通过方案比较、分别采取: 放缓上部边坡、在适当高程处增设马道、坝顶上部的上下游边坡及坝顶均设面板和钉筋、坝顶上部一定部位加设拉条、加筋, 甚至改用碾压混凝土填筑等措施。必要时, 也可考虑在适当高程处, 对上游面板加设水平缝; 在难以避免开裂的部位, 应增强垫层的挡水能力<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 土石坝地震安全评价及防灾对策专家系统研究

主要以震害资料和土石坝坝料动力特性数据库为知识库, 以土石坝地震反应分析中的本构数值模型、地震反应分析方法等为模型库, 以地震安全评价准则及方法为基础建成评价标准库, 以土石坝抗震加固措施研究系统为对策库, 利用人工智能的理论和专家系统的工具, 建立起一套土石坝地震安全评价及防灾对策专家系统, 基本思路如图 1 所示<sup>[41]</sup>。应用这套专家系统, 只要给定适当的初始条件, 即可对已建的、在建的和拟建的土石坝进行抗震安全性评价, 并给出相应的抗震加固措施和进一步工作的建议。并且尽可能利用人工智能的思想和技术, 使该系统能够对新知识进行学习, 在土石坝工程建设的决策、科研、设计与施工的实际应用中不断自我完善和发展。

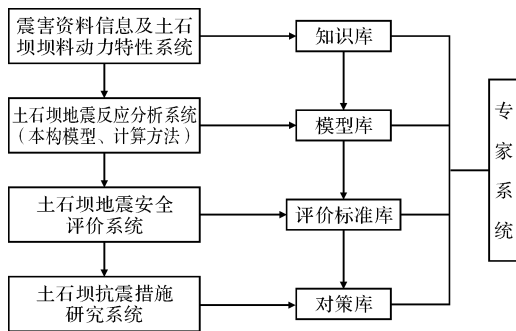


图1 土石坝地震安全评价及防灾对策专家系统

### 4 结论与展望

由于经济建设和水利资源开发的需要, 在强震区建设高坝大库是难以避免的。而对于强震区高土石坝的建设, 抗震问题往往是控制因素。高土石坝一旦出事将是极度灾难性的, 另一方面,

到目前为止我们没有任何高坝地震破坏的实例及实测资料。因此必须做好高土石坝抗震研究工作,建议进一步开展以下问题研究。

(1)高土石坝的地震灾害机理研究。要有效地防灾减灾,必须要搞清结构在地震作用下是如何破坏的。

(2)高土石坝坝料动力特性研究和土石坝震害资料的获取与整理工作。可靠的土石料动力特性和震害资料是地震灾害机理研究的基础。

(3)由于弹塑性方法可以直接求解动孔压和动残余位移,因此需要开展高土石坝三维弹塑性地震反应分析方法研究。

(4)高土石坝的非线性问题,包括非线性材料性质(本构关系)、非线性破坏参数、非线性地震反应特征、非线性求解理论和实验方法等。

(5)根据结构的破坏特征和工程的破坏机理建立高土石坝抗震安全性评价理论与方法。

(6)高土石坝抗御地震破坏的工程措施及其作用机理研究。

## 参考文献:

- [1] 王柏乐, 刘瑛珍, 吴鹤鹤. 中国土石坝工程建设新进展[J]. 水利发电, 2005, 31(1): 63-65.
- [2] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [3] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [4] Seed H B, Idriss I M. Soil module and damping factors for dynamic response analyses [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1970.
- [5] Hardin B O, Richart F E Jr. Elastic wave velocities in granular soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 98(7): 667-692.
- [6] 梁永霞. 模拟堆石料的动力变形测试及其应用[C]//第三届全国土动力学学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 1990: 121-124.
- [7] 孔宪京, 韩国城, 林皋. 粒径对洞剪切模量的影响[J]. 东北水利发电学报, 1988, 4(4): 9-15.
- [8] 贾革续. 土工三轴试验新技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1998.
- [9] 吴兴征. 堆石料的静动力本构模型及其在混凝土面板堆石坝中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2001.
- [10] Iida R, Matsumoto N, Yasuda N, et al. Large-scale tests for measuring dynamic shear moduli and damping ratios of rockfill materials [C]//Sixteenth Joint Meeting, U. S. - Japan Panel on Wind and Seismic Effects. Washington D. C, 1984.
- [11] Hatanaka M, Suzuki Y, Kawasaki T, et al. Cyclic undrained shear properties of high quality undisturbed Tokyo gravel [J]. Soils and Foundations, 1988, 28(4): 57-68.
- [12] Yasuda Y, Matsumoto N, Yoshioka R, Takahashi M. Undrained monotonic and cyclic strength of compacted rockfill material from triaxial and torsional simple shear tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(3): 357-367.
- [13] Yunoki Y, Ishihara K, Seki M, et al. Effect of initial effective confining pressure on the behavior of cyclic triaxial shear of dense sand [C]// Proc. of the 17th Japan National Conference on Soil

Mechanics and Foundations Engineering. Japanese, 1982: 1649-1652.

- [14] 常亚屏. 高土石坝抗震关键技术研究[J]. 水力发电, 1998(3): 36-40.
- [15] 汪闻韶, 金崇磐, 王克成. 土石坝的抗震计算和模型试验及原型观测[J]. 水利学报, 1987(12): 1-16.
- [16] 李万红, 汪闻韶. 无粘性土动力剪应变模型[J]. 水利学报, 1993(9): 11-17.
- [17] 赵剑明, 常亚屏, 陈宁. 加强高土石坝抗震研究的现实意义及工作展望[J]. 世界地震工程, 2004, 20(1): 95-99.
- [18] 赵剑明, 汪闻韶, 常亚屏, 等. 面板坝三维真非线性地震反应分析方法及模型试验验证[J]. 水利学报, 2003(9): 12-18.
- [19] Finn W D L, Lee K W, Martin G R. An effective stress model for liquefaction [J]. Proc. ASCE, 1977, 103 (GT6): 517-533.
- [20] Prevost J H, Abdel-Ghaffar A M, Lacy S J. Nonlinear dynamic analyses of an earth dam [J]. Proc. ASCE, JGED, 1985, 111(7): 882-897.
- [21] 徐志英, 沈珠江. 土坝地震孔隙水压力产生、扩散和消散的有限单元法动力分析[J]. 华东水利学院学报, 1981(4): 1-16.
- [22] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [23] 赵剑明, 汪闻韶, 张崇文. 土石坝振动孔压影响因素的研究[J]. 水利学报, 2000(5): 54-59.
- [24] 《汪闻韶院士土工问题论文选集》编委会. 汪闻韶院士土工问题论文选集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [25] 汪闻韶. 土的动力强度及液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [26] 刘颖, 谢君斐. 砂土震动液化[M]. 北京: 地震出版社, 1984.
- [27] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [28] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力理论与应用研究进展[J]. 力学进展, 1993, 23(2): 166-180.
- [29] 中华人民共和国水利部. SL203-97 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [30] 中华人民共和国水利部. SL274-2001 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [31] 韩国成, 吴再光. 土石坝地震加速度反应的统计分析[J]. 水力发电学报, 1988, 7(2): 38-45.
- [32] Makdisi F I, Seed H B. Simplified procedure for estimation dam and embankment earthquake induced deformation [J]. Proc ASCE, JGED, 1978, 104(GT7): 849-867.
- [33] 刘汉龙. 随机地震作用下地基及土石坝永久变形分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 19-27.
- [34] Newmark N M. Effects of earthquakes on dams and embankments [J]. Geotechnique, 1965, 15(2): 139-160.
- [35] 陈生水, 沈珠江. 强震区域堆石坝的地震永久变形分析方法[J]. 河海大学学报, 1990, 20(2): 117-120.
- [36] Serff N, Seed H B, Markdisi F I, et al. Earthquake induced deformation of earth dams [C]//Report No. EERC76-4, University of California. Berkeley, 1976.
- [37] Taniguchi E, Whitman R V, Marr W A. Prediction of earthquake induced deformation of earth dams [J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 126-132.
- [38] 张克绪, 李明宰, 常向前. 地震引起的土坝永久变形分析[J]. 地震工程与工程振动, 1989, 9(1): 91-100.
- [39] 刘汉龙, 陆兆溱, 钱家欢. 土石坝地震永久变形分析[J]. 河海大学学报, 1996, 24(1): 91-96.
- [40] 吴再光, 韩国城, 林皋. 土石坝地震永久变形的危险性分析[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(2): 13-20.
- [41] 赵剑明, 常亚屏, 陈宁. 加强高土石坝抗震研究的现实意义及工作展望[J]. 世界地震工程, 2004, 20(1): 95-99.

(下转第 56 页)