土石坝工程研究新进展

郇能惠 沈珠江

(南京水利科学研究所 南京 210029)

TV641
TV688.1

②
6-9

摘要 在国家科技攻关项目研究及相关的研究工作基础上,概要地综述土石坝工程几个重要方面的研究新进展.介绍土石坝的原型观测仪器、原型观测资料分析方法、动力分析与地震破坏准则、软基上筑坝,以及土工合成材料在土石坝中应用等一些重要关键技术.

关键词 土石坝;原型观测;动力分析;破坏准则;软土;土工合成材料

国民经济持续稳定快速的增长,特别是水利水电建设事业的飞速发展,如长江三峡和黄河小浪底水利水电枢纽工程顺利截流等,大大促进了土石坝工程研究进展.本文选取土石坝原型监测、土石坝抗震、软土坝基和土工合成材料在土石坝中应用等 4 个专题,简要地介绍这些方面的新进展.

1 土石坝原型监测

50 年代后期,大坝原型监测开始受到国内外水利水电界的关注,从原型观测仪器和原型观测资料分析两个方面着手进行开发研究,1958 年第 6 届国际大坝会议开始,几乎每届都有与大坝原型监测有关的议题,1982 年以第 41 号会刊发表了《大坝安全控制的自动化观测》,1987 年以第 59 号会刊发表了《大坝安全准则》,1988 年以第 60 号会刊发表了《大坝监测基本要求》,1989 年以第 68 号会刊发表了《大坝及其地基监测技术发展水平》等重要文件,在 1980 年召开的第 48 次执委会上,成立了“大坝安全委员会”,在 1982 年召开的第 50 次执委会上,又成立了“大坝及其地基监测委员会”.

目前,世界各国建坝数量逐年增多,坝高和体积不断增大,而坝址、地基的条件却更加复杂,一些经过长期运用的大坝已经明显老化,在筑坝兴利的同时,发生事故危及安全,乃至溃坝失事造成灾害的事件屡有发生,因此,如何提高坝的安全性和经济性已成为迫切需要解决的实际问题,从而对大坝安全监测及资料分析提出了更高的要求,也促进了监测技术和资料分析方法更快的发展.

我国对大坝安全监测十分重视,原水利电力部

于 1985 年设立了“水电站大坝安全监察中心”,1987 年颁发了《水电站大坝安全管理暂行办法》,水利部于 1988 年设立了“水利大坝安全监测中心”,国务院 1991 年发布了《水库大坝安全管理条例》,水利部和原电力工业部于 1994 年共同发布了《土石坝安全监测技术规范》.

从 1985 年开始,“六五”、“七五”、“八五”和“九五”国家重点科技攻关项目一直把土石坝原型观测列入攻关内容,“八五”国家科技攻关项目“高堆石坝原位观测和反馈分析研究”研究成果获 1997 年电力工业部科技进步二等奖.通过攻关项目与国内大中型工程土石坝(包括面板堆石坝)的原型观测工程的实施,使我国土石坝原型观测技术进入了世界前列^①.

我国已研制成功量测范围 400 m 的水平垂直位移计,英国 Penman 公司为巴西 Segredo 面板堆石坝建置的水平位移计(horizontal plate gauges),最大量测范围只有 280 m.并且我国近年来研制成功一系列高精度、大量程、满足 200 m 级高堆石坝原型观测需要的仪器,包括分辨率达 1×10^{-4} F.S.R 的孔隙水压力计与土压力计,分辨率达 1×10^{-6} 的混凝土应变计及分辨率为 0.01 Hz 的智能接收仪,达到国外同类仪器先进水平^①.

与此同时,在原型观测资料分析技术方面也有了较显著的进展.在统计分析方法上,从土石坝变形的机理、即填筑压力对流变变形有耦合影响这一新观点出发,摒弃以往对填筑期土石坝进行变形分析时将填筑分量和流变分量分别进行考虑的做法,提出考虑填筑分量对流变分量耦合影响的新的统计模型^①:

第一作者简介:郇能惠,男,教授级高级工程师,博士生导师,从事岩土力学与工程研究.

①郇能惠.高堆石坝原位观测和反馈分析研究.南京:南京水利科学研究所,1995.

$$s = s_0 + aH_d^2(b - e^{-\beta}) \quad (1)$$

式中: s 为沉降; s_0 为漏测沉降, mm; H_d 为测点以上坝体填筑高度, m; t 为时间; $a, s_0, \alpha, b, \alpha, \beta$ 为统计参数。

从土石坝渗流的机理(即库水位和库水位升降速率是影响土石坝孔隙水压力的两个因素)出发, 摒弃以往只考虑库水位对孔隙水压力影响的做法, 建立土石坝渗流新的统计模型^①:

$$h = aH + b \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: h 为测点孔隙水压力; H 为水库水头; $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ 为 Δt 时段内水库水头的平均升降速率; a, b 为统计参数。

运用关联度分析技术进行土石坝统计分析^[1]。

在反馈分析方法方面, 提出应考虑高堆石坝流变影响的观点, 在反馈分析中进行了流变分析, 采用 Merchant 衰减型流变模型, 用初应变法进行流变分析, 提出了确定计算参数的新观点: 应考虑细颗粒土孔隙比对渗透系数的影响, 提出了计算公式^②:

$$k = k_0 \exp\left(\frac{\beta \epsilon_v}{n_0 - 1}\right) \quad (3)$$

式中: k 为渗透系数; ϵ_v 为体应变; n_0 为初始孔隙率; k_0 为初始孔隙率 n_0 时的渗透系数; β 为计算参数。

应考虑缩尺效应对模量参数的影响, 蓄水期分析宜采用初始卸荷时的回弹模量, 并通过反馈分析证实了双屈服面弹塑性模型的合理性^③。提出在反馈分析中用交集域优选法来反演筑坝材料参数。在应用灰色理论进行原型观测资料分析方面, 通过关联度分析和模型群优选, 运用数学方法检验, 根据模型的合理性, 提出最佳的灰色模型^[2]。在土石坝沉降的灰色状态模型建立过程中, 发现增加因子个数对提高模型效果的作用并不显著, 数据个数在某一区间内, 灰色状态模型可以取得较好的建模效果, 静态模型与动态模型各自存在着最佳数据区间, 在数据较少时, 灰色状态模型比回归统计模型更能反映客观规律, 随着数据的增多, 状态模型效果改进程度较小, 而回归统计模型效果逐渐趋佳^[2]。

2 土石坝抗震^④

土石坝地震反应的分析方法可以分为两类: 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(粘)弹塑性模型的真非线性分析方法。

到目前为止, 国内较常用的方法是等效线性分析方法, 并且大多数把整个地震历时从头到尾一次计算的方法修改成分段计算, 以考虑地震过程中动应力水平的变化及残余变形和振动孔隙水压力的积累。真非线性分析方法理论上比较完善, 但由于缺乏合理的计算模型和计算时间长而较少实际应用。近年通过“八五”国家科技攻关, 对真非线性分析方法和计算模型作了改进, 其特点是采用增量法和全量法交替进行的方法以控制增量法的误差积累。但是考虑土石料的剪胀剪缩特性, 采用理论上更严密的耦合解法还需进一步研究。

动力反应分析应用于土石坝的抗震分析, 还需要解决一系列的实际问题, 包括土石料的本构模型、土石料与防渗墙或面板接触面的模拟、地震波的输入方法及坝体与库水共同作用等。

关于动力作用下土石料的本构模型, 严格说来, 土石料的实际变形特性接近于弹塑性体, 应采用切线模量进行真非线性分析, 通过分析可自然得出残余应变 $\Delta\gamma$ 。由于这一分析方法工作量大, 大多数分析工作仍用等价粘弹性模型。此模型用平均剪切模量 G_d 和等价阻尼比 λ 所构成的弹簧和粘壶把非线性应力应变关系线性化。为了让这一模型也能算出永久变位, 必须补充残余应变 $\Delta\gamma$ 的计算式。但是, 对于土石料来说, 由于剪切引起的棱角破损和颗粒结构改变而引起的体积变形是一个不容忽视的因素, 因此必须再补充一个残余体应变 $\Delta\epsilon_v$ 的计算式, 或者在不排水条件下补充一个振动孔隙水压力 ΔP_g 的计算式。这就是说, 一个完整的等价粘弹性模型应当包括 $G_d, \lambda, \Delta\gamma, \Delta\epsilon_v$ (或 ΔP_g) 4 个参数。20 年来对这 4 个参数曾经提出过很多经验公式, 这里不再赘述。

对土石料与混凝土构件之间的接触, 大多采用无厚度的 Goodman 单元模拟, 但动模量的表达式可能与静模量的表达式不同。近年来在接触面的动力试验的基础上, 提出了动力切向模量和阻尼比的表达式。接触面单元也可以采用有厚度的薄单元。在静力计算中曾对不同的单元形态作过比较, 得出的结论是影响不大。近年来又比较了单元形态对动力反应计算结果的影响, 建议用各向异性的薄单元取代 Goodman 单元, 以方便计算。

地震中坝体与库水相互作用问题也有过长期的研究, 曾经采用过的分析方法有简化的附加质量法、有限元半耦合分析方法、有限元全耦合分析方法、边界元或无限元(水体)与有限元(坝体)相结合的分析

① 郦能惠, 高堆石坝原位观测的反馈分析研究, 南京: 南京水利科学研究院, 1995。

② 沈珠江, 郦能惠, 高土石坝动力分析及抗震工程措施研究, 南京: 南京水利科学研究院, 1995。

方法等.与上游面直立的混凝土坝不同,一般认为在较平缓的土石坝坝坡上动水压力的影响不大,但各种分析方法的详细比较尚无人做过.近年来应用可压缩流体模型、不可压缩流体模型与简化 Westergaard 动水压力模型,研究了坝体与库水的动力相互作用,得出结论认为:考虑动水压力的坝—水相互作用,满库时大坝自振频率比空库增高 10%,面板动应力比空库增大 47%,但满库时动水压力总值占静水压力总值的 10%,不同的考虑动水压力的方法对面板动应力计算结果影响不大.

地震波的输入一般采用均匀输入,即假定基岩为绝对刚体,坝体与基岩接触面上的加速度都一样.但实际观测表明,河谷两岸的基岩运动往往有明显差别.因此需要研究考虑地震波传播方式的输入法.这一点对混凝土坝更重要,因为混凝土与基岩的刚度相当.已经提出的输入法有行波法和无穷元法.关于土石坝的行波输入法,曾用此法分析过密云水库白河主坝与潮河主坝在唐山地震中的不同反应,认为地震波传播方向的不同可能是一个重要原因.近年来,对地震波的不同传播速度和不同传播方向作了比较,得出结论是:行波输入的动力反应具有方向性,某些区域的反应增强,另一些区域则弱化,在行波输入时,多数反应量有所增强,平均增幅 30% 左右,特别是当振动方向沿坝轴方向时,坝轴向的水平应力可能增大较多.

用拟静力法进行滑坡稳定分析是历来惯用的评价地震危险性的方法,应继续作为评定地震破坏标准保留下来,但也应当利用动力分析的成果作一些合理的改进.近年来提出利用各时刻的动应力和加速度分布进行瞬时稳定分析,得出各滑动面安全系数随时间的变化规律,并用数学规划法取其极小值,以其是否小于某一标准来评价滑动破坏安全度,即

$$(F_s)_{\min} > [F_s] \quad (4)$$

式中: $(F_s)_{\min}$ 为安全系数最小值; $[F_s]$ 为安全系数的允许值.可以把这种方法称为动力稳定分析法以区别拟静力法^[3].

在滑动破坏准则、永久变位破坏准则、液化破坏准则和断裂破坏准则的研究基础上,提出了地震危害度的概念,建议按破坏区所占体积或面积的比例把地震危害度划分成严重、中等和轻度三级(表 1),从而建立一个包括抗滑安全系数、液化度、断裂破坏区和震陷量在内的比较全面的土石坝抗震破坏准则.

3 软土坝基

最近,国内对软土取样扰动问题进行了比较系统的研究,研究的主要结果可归纳成以下几点^[4]:

表 1 地震危害度 %

地震破坏类型	滑动破坏	液化破坏	断裂破坏	震陷量
破坏程度	安全系数小于 1 的滑动体的比例	液化度大于 90% 的区域占坝体和坝基总体的比例	拉裂或压渗区占面积的比例	坝顶永久沉降量占坝高的比例
地震危害度	严重 > 10 中等 2~10 轻度 < 2	> 10 2~10 < 2	> 5 1~5 < 1	> 1.5 0.3~1.5 < 0.3

a. 引起取样扰动的原因有以下两个:一是卸荷作用,即土样由原位取到地面上后引起的总应力和孔隙压力的一系列变化;二是机械扰动作用,包括取土器的压入及切样扰动等.

b. 取样扰动的主要影响表现为:①压缩曲线趋于平缓,低压力下压缩性增大,固结系数降低,高压下压缩性变小, σ_{pc} 值也相应降低;②无侧限压缩曲线的峰值显著降低,变形模量随之降低,峰值应变则相应增大;③不排水剪切试验中的孔隙压力系数和排水剪切试验中的剪缩性均有所降低.

由于取样扰动引起试验曲线失真,许多人提出了校正办法.应当指出,已有的各种校正方法都是经验性的,而且只限于压缩曲线.更合理的研究途径应当是先建立能反映结构性的本构模型,在此基础上再现原位应力应变曲线^[5].

软土坝基沉降计算目前常用的仍是基于经典理论的半经验方法,在沉降计算方面,已经建立了考虑侧向变形的三维沉降计算方法,而且所用计算参数可用单向压缩试验测定.许多人主张把瞬时沉降和固结沉降分别计算,计算前者时不考虑体积压缩($\nu = 0.5$),后者则用单向压缩理论计算.近年来提出了用实测资料计算瞬时沉降的经验公式,式中的初始杨氏模量可由三轴固结不排水剪切试验测定.考虑天然压缩曲线在 σ_{pc} 附近发生明显的转折,因而又提出分两段计算沉降的方法,以考虑软土的结构性,第一段用回弹指数,第二段用压缩指数,应通过现场原位试验来测定 σ_{pc} 和回弹指数.

近年来的工程实践证明用有效固结应力法来计算软土坝基强度增长比较合理,即只考虑压缩引起的强度增长,而忽略剪缩引起的强度增长,相应地在强度增长公式中只考虑压缩过程中的孔隙压力,而不计及剪切引起的孔隙压力.相对来说,压应力引起的孔隙压力比较容易预测,已有计算方法并积累了相当多的实践经验.

4 土工合成材料在土石坝中应用

1958 年美国佛罗里达州护岸工程首次用土工

织物代替天然砂砾反滤层. 1959年意大利 Contrada Subetta 堆石坝首先用土工薄膜作上游坝面防渗. 这两个工程开创了土工合成材料在水利工程应用的先例. 40年来全世界数以千计的工程应用土工合成材料代替天然建筑材料, 发挥反滤、防渗、隔离、排水与加筋等作用^[6].

用土工织物作土石坝的反滤层时应同时满足保砂性与透水性两方面的要求, 各国学者都基于自己的室内试验结果, 提出了土工织物滤层设计准则. 保砂性标准是用土工织物的有效孔径 O_{95} , O_{90} , O_{98} 与被保护土的特征粒径 d_{85} , d_{90} , d_{50} 之间关系来表示, 透水性是用土工织物渗透系数 k_g 与被保护土渗透系数 k_s 之间关系来表示. 近几年来, 我国对这些标准以法国 Valeros 坝作为研究对象进行了对比分析, 发现各国学者提出的土工织物滤层设计准则相差很大, 保砂性要求 O_{95} 从 0.167 mm 到 18 mm, 透水性要求 k_g 从 10^{-1} cm/s 到 10^{-3} cm/s, 都相差 100 倍以上, 这说明, 在土工织物用作土石坝反滤层时, 宜通过渗透变形试验来选定土工织物. 法国 Valeros 坝选土工织物平均孔径 O_{50} 为 0.1 mm, 渗透系数 k_s 为 10^{-2} cm/s, 经多年运行, 下游排水体与上游坝坡第一区与第三区完好无损, 反滤效果良好. 但是上游坝坡第二区出现坍塌现象, 估计是水位变动区的波浪淘蚀作用所引起.

用土工薄膜作土石坝的防渗体时应注意对土工薄膜强度要求的确定, 各国学者都认为土工薄膜的抗拉强度与土工薄膜所受法向应力 p 和被保护土的颗粒粒径 d 有关, 提出了一些计算公式. 近几年来, 我国研究人员对这些计算公式作了分析比较, 发现计算值相差很大, 可达 5.5 倍. 因而, 选取土工薄膜时, 应根据工程经验与施工工艺, 参照计算与模型

试验结果来选取, 并应留有一定的安全富裕度.

我国竹寿水库心墙堆石坝选用土工薄膜置于砾质粘土心墙上游侧组成复合防渗体, 该坝高 60 m, 土工薄膜选用两布一膜, 即一层 200 g/m^2 土工织物加一层厚 0.55 mm 的 PVC 膜再加一层 300 g/m^2 土工织物. 在土工薄膜选用与设计时, 考虑了应力场与渗流场的耦合作用, 复合土工薄膜分别用线单元和接触单元两种单元形态来模拟, 考虑了复合土工薄膜存在对坝体变形的影响, 同时又考虑坝体不均匀沉降对复合土工薄膜强度发挥的影响, 进行了应力应变与渗流耦合计算, 较真实地反映了土工薄膜在土石坝中的作用机理, 该堆石坝已建成, 至今运行良好^[7].

参考文献

- 1 蔡飞, 郇能惠. 土石坝心墙孔隙水压力统计分析方法. 水利水运科学研究, 1996(2): 151~157
- 2 徐竹青, 郇能惠. 土石坝沉降的状态灰色模型. 水利水运科学研究, 1997(3): 260~271
- 3 郇能惠, 沈珠江, 陈生水. 高心墙堆石坝地震裂缝分析及抗裂工程措施. 见: 第五届全国土动力学学术会议论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 1998. 240~247
- 4 杨守华, 魏汝龙. 土样扰动对正常固结粘土强度及压缩特性的影响. 水利水运科学研究, 1992(1): 73~84
- 5 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100~111
- 6 Cazzuffi D. The use of geomembranes in Italian Dams. Water Power & Dam Construction, 1987
- 7 Tao T K, Li D F, Yan J. Calculation of coupled stress and seepage for dams with a geotextile/geomembrane composite liner. Geosynthetics International, 1995, 2(4)

(收稿日期: 1998-05-26 编辑: 马敏峰)

·简讯·

地下水国际学术讨论会将在日本举行

地下水国际学术讨论会将于 2000 年 5 月 8~10 日在日本举行. 会议由 IAHR 协会组织和 IAHS 协会共同赞助. 大会主题是“可持续地下水环境的新科技”, 主要议题有: ①流域环境的地下水资源; ②地下水污染与环境改善技术; ③地下水开发与地下水技术; ④地表水与地下水的关系; ⑤数值计算方法与地下水文学尺度分析. 会议联系:

E-mail: iaahr@hgl.saitama-u.ac.jp;

web site: <http://www.hgl.saitama-u.ac.jp/iahr-saitama/>

(粟晓玲摘自 Hydrological Science Journal Vol.43 No.6)