

土石坝震损机理及震害影响因素研究^{*}

张桂荣¹, 董正兴², 郭永彬¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210026)

摘 要: 汶川 8.0 级地震造成主震区四川省境内 1 997 座水库的坝体、溢洪道、输水管、管理房等水利设施不同程度的损毁, 不仅无法实现水利功能, 而且面临洪水威胁。汶川地震中土石坝典型震害包括裂缝、滑坡、渗漏以及坝体沉陷等。在调查主震区土石坝地震损毁特点的基础上, 分析了均质土坝、面板堆石坝、心墙坝等坝型主要震害产生的原因, 阐述了影响土石坝震害程度的诸多因素及其作用方式, 控制性因素主要有外部因素如场地类别、地震动参数, 坝体内部因素如坝料特性、坝型及坝高、坝坡坡率等。

关键词: 土石坝; 地震反应; 裂缝; 渗流; 破坏机理; 影响因素

中图分类号: P315.9; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2012)03-0025-06

0 引言

汶川 8.0 级地震使震区内水利工程遭受到了严重的破坏, 造成了巨大的损失, 同时也给我们留下了宝贵的第一手震害资料, 为今后防震、抗震工作提供了宝贵经验。而汶川地震中如此面广量大的震损水库出现, 反映坝工界迄今尚未完全科学认知和掌控水库大坝震损机理和其影响因素, 需要对其开展深入研究。

1 水库震损情况

汶川地震中四川震损水库按损害情况可归结为 6 类, 分别为: ①坝体裂缝。震损水库的裂缝纵横交错, 最宽的缝宽达到 60~80 cm、深达 5~6 m 以下; ②坝顶和边坡塌陷, 溢洪道裂缝、垮塌; ③放水设施损坏, 部分涵卧管震裂漏水, 渗水量突增; ④坝体滑坡; ⑤起闭设施损坏; ⑥其他放水设施损坏、易位, 管理设施损坏等。

对 1 997 座震损水库震害情况逐座分析, 其中大坝裂缝有 1 425 座, 大坝塌陷 687 座, 渗漏 428 座, 滑坡 354 座, 起闭设施损坏 161 座, 其它放水设施、溢洪道、管理房等不同程度震损有 422 座, 50% 以上的水库同时出现多种险情。

2 土石坝的震损特征分析

2.1 震损主要表现为坝体裂缝和渗漏

379 座高危以上险情水库中, 几乎所有的水库坝体都出现不同程度的坝体裂缝, 尤以坝顶和坝坡纵向

裂缝为主。50% 以上的水库出现不同程度的渗漏现象, 且水库渗漏具有形式多样化和区域范围大的特点。坝体裂缝和渗漏对水库土石坝整体稳定性及震后安全度汛造成了巨大的威胁。

2.2 土石坝震害与土石坝设计有关

坝体纵向裂缝主要由地震惯性力的拉裂作用产生。坝体地震裂缝与坝顶宽度、坝高以及上下游坝坡坡度等设计参数有很大关系。此外, 坝体渗漏同样与土石坝设计参数, 尤其是坝基底部放水涵管的设计和施工有很大关系。因此, 应对中小型水库土石坝地震灾害机制开展深入的研究, 以指导今后该类水库的土石坝抗震设计, 提高中小型水库土石坝抗震性能。

2.3 土石坝震害与建设年代的关系

将汶川地震四川灾区 1 997 座震损水库的建设年代分为 1957 年以前、1958-1966 年、1967-1978 年、1979-1992 和 1993 年以后几个阶段。

从震损比例来看, 各历史时期的土石坝震损比例相差不大, 分布区间为 25%~35%。但从震损严重程度来看, 1957 年以前建设的水库溃坝险情比例最高, 占该时期已建水库的 1.7%, 59 座出现了高危险情; 而 1993 年以后建设的水库未出现溃坝险情, 有 8 座水库出现了高危险情。

2.4 土石坝震害与坝地质条件有关

汶川地震中受损水库多为 20 世纪 50-80 年代兴建的中小型水库, 坝地质条件有详细记载的不多, 清基很不严格, 因盆地边缘红层较多, 土质粘性大, 地震中出现液化的物质不多见。

一般情况下, 高烈度区水库大坝震损数量多且震损严重; 低烈度区震损数量少且震损一般较轻。但在个别地方, 烈度虽然较低, 但水库大坝破坏却较严

^{*} 收稿日期: 2011-11-01 修回日期: 2012-12-14

基金项目: 国家科技支撑计划(2009BAK56B04); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)资助项目(BK2009054)

作者简介: 张桂荣(1979-), 女, 湖北钟祥人, 博士, 高级工程师, 从事地质灾害稳定性预测预报研究。E-mail: grzhang@nhri.cn

重,这与当地的地质地形条件有关。因而,土石坝建设中工程类比决不能只比较坝的类型和高度,更重要的是要比较坝址的地质和地形等条件。

2.5 土石坝震害与水库震前运行状况有关

379座高危以上险情水库大多建于20世纪50年代到80年代间,受建坝当时技术、经济和环境条件的限制,大多没有经过抗震设计;加之许多土石坝已运行数十年,土石坝的老化不可避免。另外,一些土石坝的建造条件十分复杂,有的在设计施工中就已遗留下某些缺陷,导致这些水利工程不同程度地存在一些隐患,大都处于带“病”运行状态,本身就有一定的失事风险,因而,从这个层面来讲,汶川地震仅加剧了病险土石坝的失事概率^[1]。

另外,汶川地震中水利工程虽然震损严重,但无一溃坝事件发生,这与当时正是用水高峰期,水库水位低、天气未进入雨季有密切关系^[2]。

3 汶川地震水库震害机理分析

土石坝是用天然建筑材料堆筑而成,除了材料的密实度有所改变外,作为建筑物的主体,没有从根本上改变松散体的性质。坝体的松散性使其在地震作用下表现出裂缝、渗漏、滑坡、塌陷等较普遍的震害形态。而均质土坝、面板堆石坝和心墙坝等几种主要土石坝由于土料在坝身内的配置和防渗体所用的材料种类不同,其震害形态及震害机理也存在差异。

3.1 均质土坝震害机理

均质土坝是指用一种筑坝材料筑成的土石坝,一般用粘性土料。粘性土坝在强震振动下具有良好稳定性。而碾压不够密实的无粘性土坝在饱和状态下遭遇强烈地震,容易发生破坏或失事,主要是由于坝体孔隙水压力增高,从而丧失大部分强度,发生较大位移所致。

均质土坝在地震时的稳定性和土的动力特性密切相关。土的动力特性和静力特性相似,受到诸如围压、密实度、含水率以及受力条件、应力状态等因素的影响,同时和加载历史、颗粒结构和级配、时间效应等因素密切相关。地震时土的动力特性主要受应变幅度、应变速率和循环加载等几种因素的影响^[3]。

(1) 应变幅度的影响

土是具有非线性特性的材料,表征土的动力特征的主要参数如剪切模量 G 和阻尼比 D 等都是应变幅度 Y 的函数。和工程有关的土的动应变值约在 $10^{-6} \sim 10^{-1}$ 或更广的范围内变化。应变幅度小于 10^{-5} 时,土表现为弹性性质,此时土的动力和静力特性基本上没有差别,应变速率的影响不显著。强震时,土坝中土的应变幅度可在 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ (或 $10^{-4} \sim 10^{-1}$)范围内变化。在振动外力作用下,土坝将产生永久变形,表现为出现裂缝、不均匀沉降等现象。应变幅度超过 10^{-2} 或 10^{-1} 以后,土坝将不能保持原形而发生破坏。

(2) 应变速率和循环加载的影响

土的剪切模量 G 和阻尼比 D 随应变幅度变化的规律还受到应变速率和循环加载的影响。在地震循环荷载作用下,土的强度也发生变化。饱和砂土由于循环荷载作用可导致孔隙水压力上升,而使抗剪强度下降,并随着振动强度的加大和循环周数的增长,可能发生液化破坏。软弱粘土由于地震产生的循环剪切作用也可使强度降低。

不论是砂性土还是粘性土筑成的坝,在地震作用下产生裂缝是常见的震害。强震可使坝体发生坝顶沉陷和水平位移等永久变形,只有将变形控制在一定的范围内,才不致对坝的安全造成较大的影响。

3.2 面板堆石坝震害机理

对于面板堆石坝,地震引起的震害特征主要表现在2个方面:①地震作用下坝体的永久变形,因为坝体的变形直接影响面板的变形。面板坝的基本变位是堆石体的变位,它对面板、周边缝、伸缩缝、止水等其他构件的变位有重大的影响;②面板部位的破坏,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。与面板破坏部位相关的因素有V型河谷、U型河谷、宽高比、地震波的传播方向等。

面板堆石坝的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增大,这对以变形控制为主的堆石坝的抗震稳定性的影响不容忽视。

(1) 永久位移变化

水库土石坝出现坝顶震陷、坝坡滑裂、坝坡滑落等严重震损现象,是土石坝地震稳定性不足或丧失的表现,与水平向和竖向地震永久变形有关。因此,土石坝的地震永久变形大小是土石坝地震稳定性的一个很好的度量。以往振动台试验表明^[4],地震作用下堆石坝主要破坏性态是:坝体遭遇强烈振动后,靠近坝顶的坝坡表面块石最先出现松动,随着地震波作用时间延长,坝坡浅层块石会发生滑动、最后导致坝顶坍塌。从连续体的角度考虑,这主要是由于坝体发生了较大的永久变形引起的。大量震害调查、研究及经验表明,由于坝体横向永久位移和竖向沉陷引起的震害占有相当的比例。

堆石体的变形对防渗体系的应力、变形性态起着主导作用。而采用密实的粘性土、堆石等土石料填筑的土石坝,在地震作用下不会产生或仅产生很低的振动孔隙水压力。为了防止防渗体破坏,在高土石坝建设中,应提高土料的压实标准,控制堆石体的变形,并使大坝防渗系统能够适应坝体变形。堆石体的变形越小,防渗系统就越可靠。

(2) 面板开裂、脱空

面板堆石坝的面板是坝体结构最重要部分,地震中面板的破坏形态主要为面板裂缝和面板脱空。大量的面板堆石坝模型动力破坏试验表明,强震时,坝顶

附近下游坡面块石将最先失去平衡发生滑动,坝顶区土体随之松动、滑塌,从而对面板的支托作用减弱,导致面板上部出现裂缝或断裂。

汶川地震中紫坪铺大坝混凝土面板震损严重,特别在上部有较大部分脱空。面板局部挤压破坏、开裂和隆起,施工缝合纵缝错位。如5#~23#、35#~38#混凝土面板845.0 m高程以上二、三期施工缝错抬,最大错台达17 cm;845 m高程以上面板大面积脱空,5#~6#、23#~24#等面板垂直缝挤压破坏,23#~24#板间缝挤压破坏至790 m高程;面板周边缝及止水损毁严重^[5]。

由上述分析可以看出,面板堆石坝的抗震性能很大程度上取决于混凝土面板的受力条件以及周边缝和结构缝的工作条件。从面板的抗震安全性来看,只要地基良好,坝坡是足够稳定的。面板开裂和周边缝的错动虽然对坝的整体安全一般不构成严重的威胁,但对大坝功能的发挥仍有较大影响。所以在面板坝的抗震设计中需要注意减小大坝的地震变形,并保障面板的良好受力条件,以及控制周边缝和结构缝的变形。

3.3 心墙土石坝震害形态及机理

心墙土石坝是指用透水性较好的砂或砂砾石做坝壳,以防渗性较好的粘性土作为防渗体设在坝的剖面中心位置,心墙材料可用粘土也可用沥青混凝土和钢筋混凝土。

心墙土石坝的震损情况不同于均质土坝,主要表现在心墙坝防渗体的破坏。心墙坝防渗体顶部开裂是常见的震害现象。大坝在建成后的长期运行过程中和遭遇地震的时候,由于防渗心墙与坝体变形不协调,会使防渗心墙产生破坏。

心墙土石坝的工作条件与面板堆石坝也有较大的不同。对心墙坝来说,地震变形对坝体的正常工作及防渗系统的安全性有重要影响。地震变形引起的心墙和坝坡裂缝是心墙土石坝比较典型的震害。汶川地震中碧口水心墙土石混合坝经受了9度强震作用,但震害较轻,产生的最大沉降为24 cm,坝体无明显裂缝。水牛家碎石土心墙堆石坝坝高108 m,相距主震震中210 km。大坝设计地震加速度0.2 g,地震时影响烈度7度,接近8度区边缘。大坝震损轻微,坝顶防浪墙发生十余处拉裂,裂缝宽度1~20 mm,坝体无明显裂缝。

从上述分析可以认为,提高填筑和压实质量,减小地震变形,采取工程措施,控制坝上部的地震变形,限制裂缝发展,使防渗系统不受到损害,心墙堆石坝的抗震安全性就可以得到保障。

4 土石坝震害影响因素研究

土石坝震害受诸多因素影响,影响土石坝震害程度的控制性因素主要有外界因素如场地类别、地震动参数;自身因素如坝料特性、坝型、坝高及坝坡坡

率等。

4.1 场地条件(场地地震效应)

地震区场地条件对地震动特性影响的研究是源于对地震现象的分析与认识。地震是造成地面破坏的外因,而场地条件是保持场地稳定的内因。当地震作用超过场地岩性、土质条件的稳定能力时,就会出现场地失稳和地面破坏现象。诸多震区场地破坏或地面永久变形,是包括地震动和场地条件这两个重要因素相互作用、相互转化的最终结果。地震破坏对场地土有选择效应,不同的场地土对地震动有不同的放大或缩小作用,因而不同场地条件下土石坝工程表现出程度明显不同的震害。

强震区场地土条件对地震动特性的影响可导致地基土的卓越周期与土石坝的自振周期产生共振,这一效应使自振周期较长的工程结构在地震力的作用下破坏并导致建筑物彻底毁坏。地震破坏对场地土有选择性,地震引起的振动是以波的形式从震源向各个方向传播的,在土层内部传播的体波中,纵波引起地面的上下颠簸,剪切波引起地面的左右摇晃,岩土中剪切波速反应了地基土的动力特性^[5]。

汶川地震中土石坝大量震害表明,不同的场地工程地质条件,对地震作用的影响非常显著。坝址区场地条件对于土石坝,特别是拱坝,强震时坝基的稳定是保证其抗震安全的首要关键因素。

4.2 地震动参数

地震动的卓越周期、地震持时、建筑物的自振周期及结构性质等决定了震灾程度。如果地震波所具有的卓越周期与土石坝的固有周期一致,振动时间长,场地地基土放大地震波作用,则大坝会由于共振作用产生较大振动,最终使结构遭到严重破坏。

地震动参数表征地震引起的地面运动的物理参数,是工程抗震设计的依据,不同工程对工程场地地震安全性评价的深度以及提供的参数的要求不同,这取决于工程的类型,工程的安全性,危险性以及社会影响等因素。对大坝这一特殊性工程,地震动的重要工程特性至少应包括地动峰值(加速度或速度峰值),反应谱及强震持时这三项参数,通常以幅值、频率特性和持续时间三个参数来表达地震的特点。

(1)地震动峰值加速度

地震动峰值的大小反应了地震过程中某一时刻地震动的最大强度,它直接反映了地震力及其产生的振动能量和引起结构地震变形的大小,是地震对结构影响大小的尺度,是抗震设计的动力依据。已有的强震观测结果表明,地震动幅值和频谱随地形高度而变化。大量的观测资料也表明,土石坝在地震时坝顶的加速度要明显高于坝基。孤立突出的地形,如山丘、山梁等位置的烈度和震害普遍高于连续延展的梁岗和规则平坦地形地貌区的震害和烈度。

根据国内外对土石坝地震反应实测工作的经验总结^[6-7],在小地震作用下,土石坝顶部加速度反应值

比坝基约大 5 倍,而在大地震作用下,坝顶加速度反应值比坝基约大 2 倍,坝体对坝基运动有抑制反馈作用。根据新丰江大坝坝基与其附近地面强度仪记录的最大水平加速度比较结果,坝基加速度要比附近地面减少 37%。

(2) 反应谱

反应谱是建筑物发生的最大位移或最大加速度,地震动频谱特性就是强震地面运动对具有不同自振周期的结构的响应。震害经验表明:小震近震近坚硬场地上的地震动容易使刚性结构产生震害,而大震软厚场地上的地震动容易使高柔结构产生震害。这一规律从地震动的频谱特性去理解就很容易解释,前一种地震动的高频比较丰富,由于共振效应,易使高频结构受到破坏;而远震、大震,软厚场地土的地震动反应谱峰值在低频部分,即低频成分较强,往往产生共振,易使低频结构受损。

(3) 持续时间

强地震动的持续时间在震害及对结构的影响,主要发生在结构反应进入非线性化之后,持时的增加使出现较大永久变形的概率提高,持时愈长,则反应愈大,产生震害的积累效应。

根据我国陈运泰院士按照世界上许多地震记录反演分析的震源破裂机制,汶川地震中的破裂主要是向东北方向拓展,破裂过程长达 120 s,其时间函数显示了多个震源连续破裂产生的波群叠加,破裂长度约 300 km;而且破裂不规则,对地面造成的破坏大。在地震持续时间造成的震害方面,如唐山地震的断层错动时间是 12.9 s,汶川地震断层错断时间为 22.2 s。断层错动时间越长,人们感受到强震的时间越长,也就是说汶川地震建筑物的摆幅持续时间比唐山地震要强。这就是为什么唐山地震虽然死亡人数多,但是实际上灾害造成的影响不如汶川地震大的主要原因。

4.3 坝料特性

坝料特性包括填筑料的质量、填筑密实度等几个方面。坝料特性决定着坝体的变形和应力,考虑堆石料非线性强度准则后,随着坝料强度的增加,土石坝安全系数增大。

(1) 填筑料的质量

土石料作用一种散体材料,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影响。各种动荷载作用下,粗粒土的动力变形特性主要受到应力水平、应力条件、测试手段、颗粒特性及排水条件等因素的影响。坝料粒径对坡面临界加速度的有重要影响。国内外学者在这方面做了较多研究^[4]。如对相同的边坡(1:1.4)选用了三种不同粒径堆石料堆筑成三种不同坝高的均质坝(坝高分别为 80、100、140 cm),在振动台上进行破坏试验,测定坝体发生初始滑动时的坡面临界加速度(即坝顶颗粒滑动部位的加速度反应)。试验结果表明,在坝坡一定的条件下,筑坝材料平均粒径增大,坡面临界加速度相应地也有

所提高。

(2) 填筑密实度

土石料的压实是土石坝施工质量的关键。维持土石坝本身稳定的土料内部阻力(粘结力和摩擦力)、土料的防渗性能等,都是随土料密实度的增加而提高。

在强烈振动作用下,当松散土层的应变加大时,其阻尼比增加变缓,从而使地面振动加剧,振动持续时间加长,震害随之加重。图 1 所示为某堆石坝不同干密度下坝体沉降的变化。

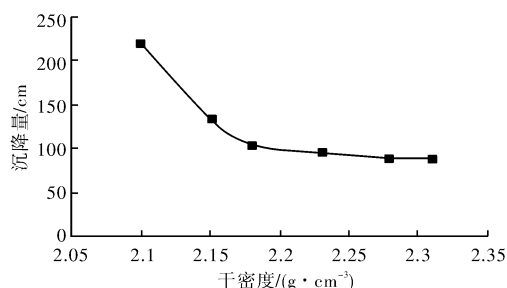


图 1 某堆石坝不同干密度下坝体沉降的变化

例如,四川省三台县印盒山水库在 1979 年建成,基本烈度为 VI 度,该水库土坝设计时按照规范不设防。土坝在本次地震中震害相当严重,发生 160 m 长的纵向裂缝 6 条,横向裂缝 56 条,坝顶竖向沉降 30 cm,上游坝面向水库滑移,下限隆起,呈滑坡状;坝顶出现波状扭曲。坝的下游坡面坡脚多出严重渗水,有溃坝危险。此坝震害严重的原因是填筑土料含水量远高于最优含水量,土料碾压压实度未达到规范要求。本次地震中还有很多类似中小型水库均为均质土坝,坝坡多数为 1:1.5 ~ 1:2.0,都未考虑地震设防,施工压实度较低,都小于 0.96。受本次地震影响,多数土坝在坝顶附近上下游侧发生纵向裂缝,有的几乎贯穿全坝,缝宽 5 ~ 30 cm。碧口水电站的心墙土石坝在施工中,采取各种开挖料分别填筑在不同的最适宜部位,在加速度反应最大的坝体上部,填筑了抗震性能强的堆石。施工中各种土石料都压实到规范规定的孔隙比、相对密度或干容重,甚至略超过一些。因此,其抗震性能都很好,虽然坝坡坡率是按 $7\frac{3}{4}$ 的烈度用拟静力法计算确定的,但却抵御了 IX 度地震,损伤轻微^[8]。

因而,土石坝施工中坝顶要用压实良好的砂砾混合料填筑,混合料应级配良好。在坝顶区选用抗剪强度较高的筑坝材料,并尽可能提高压实度及变形模量可以大大减少坝的变形和不均匀沉降。

4.4 坝型

四川省 1 997 座震损水库中,发生震损的均质土坝为 1 569 座,占震损土石坝 75% 以上、占已建均质土坝的 30.1%;斜墙石坝和心墙石坝震损比例分别达到了 50% 和 50.6%。溃坝险情水库震损比例最高的是混合型土坝。

以江油市的震损水库为例分析坝型对震害的影响。江油市中小型水库根据填筑材料可分为均质土坝、砂砾石坝、浆砌石重力坝、浆砌石拱坝与均质土坝结合的坝型^[3]。从震损情况看,浆砌石重力坝的抗震性能较好,在此次地震中震害较轻,未出现大的险情;浆砌拱坝在地震中局部出现裂缝和渗漏,抗震性不如浆砌石重力坝,多数坝体出现裂缝和渗漏;砂砾石坝抗震性能较差,多数出现渗漏和滑坡。均质土坝的震损情况复杂,和地质条件及场地土是否液化及坝体的选型布置等因素有关,有的均质土坝破坏严重,有的未见震损。

4.5 坝高

坝高影响着坝体的动力反应和永久变形。在地震波作用下,对模型土石坝而言,坝体的动力反应随坝高的增加而激烈,坝高越高破坏越明显,坍塌越深,永久变形越大,下游变形大于上游变形,最大值均发生在坝顶附近;坝体顶部的塑性剪应变变化明显,随着坝高增加而增大。

四川省已建坝高在 0 ~ 15 m、15 ~ 30 m、30 ~ 60 m 和大于 60 m 的水库大坝分别为 4 374 座、2 107 座、228 座和 7 座。各坝高范围内震损比例相差不大,均约占相应已建大坝的 29%。从震损严重性来看,坝高在 30 ~ 60 m 之间出现溃坝险情和高危险情的比例相对最高,分别为 1.3% 和 6.6%。

由图 2 可知,坝体填筑高度与坝体最大垂直变形量有关^[9],统计发现填筑坝高在 65 m 以上垂直变形量为 300 mm,并随坝高增加而增加,坝高在 45 m 以下时垂直变形量小于并随坝高递减而降低;在高烈度区,最低坝高 5.6 m 的最大垂直变形为 120 mm。

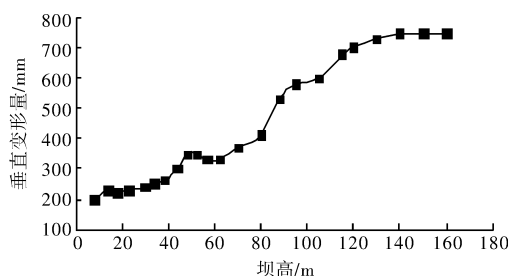


图2 坝体垂直变形量与填筑坝高统计分析图

4.6 坝坡坡率

地震区的坝坡要比非地震区平缓些。从减少坝顶的地震加速度反应的观点考虑,坝顶宽度应当窄一些,坝坡上部应该平缓些,下部可陡一些,因为上部加速度反应大于下部,上部坝坡平缓有助于坝坡抗震稳定。

坝坡坡率影响着坝体各相对高度处的最大地震加速度。随着坝坡率的增大,总体而言,沿坝高各相对高度处最大地震加速度有所增大。对于 150.0 m 以下的土石坝而言,大坝各相对高度处的最大地震加速度

随之增大,且低坝增加的幅度比高坝相对明显。对于 150 m 以上高土石坝而言,从坝顶至 0.2 倍相对坝高处,坝体的最大地震加速度有所增大,在 0.2 倍相对坝高以下,坝体各相对高度处的最大地震加速度变化很小。

5 结语

在分析主震区土石坝地震损毁特点的基础上,针对均质土坝、面板堆石坝、心墙坝等 3 种坝型的主要震害产生机理及影响土石坝震害程度的影响因素进行了阐述,得到如下几个结论:

(1) 均质土坝地震时的稳定性和土的动力特性密切相关,主要受应变幅度、应变速率和循环加载等几种因素的影响。需将均质土坝的变形控制在一定的范围内,才不致对土坝的安全造成较大影响。

(2) 面板堆石坝地震引起的震害特征主要表现为地震作用下坝体的永久变形和面板的破坏。面板坝的抗震设计中需要注意减小大坝的地震变形,并保障面板的良好受力条件,以及控制周边缝和结构缝的变形。

(3) 心墙坝的震损情况主要表现为防渗体的破坏。提高填筑和压实质量,减小地震变形,限制裂缝发展,使防渗系统不受到损害,心墙堆石坝的抗震安全性即可得到保障。

(4) 土石坝震害受诸多因素影响,影响土石坝震害程度的控制性因素主要有场地类别、地震动参数、坝料特性、坝型、坝高及坝坡坡率等。这一研究结论将为土石坝的设计、安全评价和抗震措施研究提供理论基础。

参考文献:

- [1] 陈国兴,景立平,王志华,等.汶川地震中绵阳市梓潼县水库土石坝震害调查与分析[J].地震工程与工程震动,2009,29(5):102-111.
- [2] 陈国兴,景立平,周新贵,等.汶川 8.0 级地震后中江县水库震害调查与分析[J].灾害学,2009,24(3):69-74.
- [3] 孙少楠,张先起,田林钢.“5·12”地震中小型水库震损机理分析研究[J].人民长江,2009,40(7):58-61.
- [4] 李湛.土石坝地震永久变形及抗震数值分析方法研究[D].大连:大连理工大学,2005:10-13.
- [5] 牟林,蔡德文.紫坪铺混凝土面板堆石坝震损特性分析[J].吉林水利,2010(3):8-11.
- [6] 袁丽侠.场地土对地震波的放大效应[J].世界地震工程,2003,19(1):113-120.
- [7] 乔世军,郭智勇.在地震工况时土石坝坝体的力学探究[J].水利科技与经济,2010,16(9):1033-1034.
- [8] 顾淦臣,沈长松,岑威钧.土石坝地震工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2009:306-309.
- [9] 吴世泽,满作武,梅应堂.汶川地震水利水电工程震损特征及规律分析[J].长江科学院院报,2010,27(5):64-66.

Research on Earthquake-damaged Mechanisms and Influencing Factors for Earth-rock Dam

Zhang Guirong¹, Dong Zhengxing² and Guo Yongbin¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;*

2. *Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210024, China*)

Abstract: Wenchuan earthquake caused different degrees of damage to water conservancy facilities as dams, spillways, water pipes and office buildings of 1997 reservoirs in the main earthquake zone in Sichuan province. These damages not only caused failure of water conservancy function but also resulted in risk of flood. Typical earthquake damages of the Wenchuan earthquake include fissures, landslide, seepage and dam subsidence. On the basis of investigation of characteristics of seismic damaged earth-rock dams, the causes of main earthquake damages of homogeneous earth dams, concrete faced rock-fill dams and core wall dams are analyzed and the factors that affect degrees of seismic damages of earth-rock dams and mode of action of seismic damages are illustrated. The results show that controlling factors mainly include external factors as types of dam sites and ground motion parameters and internal factors include property of dam materials, dam types, dam height and slope rate of dam slope.

Key words: earth-rock dam; earthquake response; fissure; seepage; failure mechanism; influencing factor

+++++

(上接第 24 页)

Study on Speed Model of Fording Rock Landslide Moving along the Planar Slip Surface

Wang Yang^{1,2} and Liu Yiliang¹

(1. *Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;* 2. *Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, Wuhan 430074, China*)

Abstract: There are a great number of fording landslides in Three-gorge reservoir. Water resistance is one of the most important factors which affect landslide velocity, and water resistance of the moving block in water is divided into calm water resistance and moving resistance. Based on experiments of moving block in water, the effect of moving block's velocity and water depth on water resistance of attaining surface is discussed, and the calculating model is solved to the resistance of water attaining surface when block moves at a certain speed in water or when it moves at a certain water depth. Taking the plane slide model of fording rock landslide as an example, the sliding mass in water is selected to analyze the hydrostatic pressure. Kinetics equation and kinematics equation are used to calculate the movement of sliding mass both in water and above water. At last, the speed model of fording rock landslide is put forward when it moves along the planar slip surface.

Key words: fording landslide; velocity; water resistance; water attaining surface