

水工建筑物抗震设计探讨

蔡为武

(水利部松辽水利委员会 长春 130021)

摘要 针对我国水工建筑物抗震设计只限于高坝,对更具实际意义的坝体结构布置、细部构造很少研究的现状,定性地探讨更具普遍意义的水工建筑物抗震设计要点,认为:抗震设计的着重点不是动力分析,而应在枢纽布置方面须能防御和减缓震灾的发生和扩大;在结构选型方面使抗震要求和一般结构要求有机结合,避免过多地增加造价;在细部构造上满足抗震的局部特性要求,以避免结构整体失事。

关键词 水工建筑物;抗震设计;动力分析;地震灾害;防震减灾

1 抗震要求

多年来,我国仅对国家地震部门进行烈度鉴定地区的建筑物进行抗震设计。但是实践表明,1949年以后的几次大地震(如邢台、唐山以及新丰江地震),震前都曾认为是6度或低于6度地区,相应建筑物都未按抗震要求进行设计,以致损失惨重。今后难免仍有疏漏之处。因此,不仅在地震多发区应按国家规定进行抗震分析和设计,对震灾后果重大的水工建筑物,即使位于6度或6度以下地区,也应在枢纽布置、结构设计中像防火设计一样列专门章节探讨地震危害及其防治,以期用最少费用,获得一般性的抗震减灾保证。不仅是高坝大库需要设防,某些失事后果严重的建筑物也应设防。例如,1975年海城地震,辽河、浑河、太子河大堤和许多泵站、涵闸,大多遭受严重破坏,致使辽宁省许多灌区在震后三五年内均未能正常灌溉,3条江河大堤,直到1985年仍在恢复加固,幸亏这一期间未发生大洪水,否则后果不堪设想。如果堤防建筑物设计中很难进行抗震设计,那么选线时就应尽量避免地质不利堤段,以减少震灾危险性。对于荆江大堤,黄河下游大堤,设计中对重点段进行抗震核算还是必要的。灌区一般不必考虑抗震,但四川的都江堰灌区,宁夏、内蒙的河套灌区等特大灌区,一旦受震破坏,往往就等于所在省区的近半数作物绝收,显然也应重视其抗震安全度。近年来,不少大中城市主要水源大多转而依赖长距离输水,相应的渠道、管线和建筑物一旦失事,必将影响几十万乃至几百万人民生活 and 几十乃至几百

亿元工业产值,故相应的渠道、管线的建筑物也应进行抗震校核。

因此,建议水利部尽快进行各种建筑物抗震设计规范的编制和修订工作。

2 抗震和减震设计标准

全国各行业的抗震设防目标是:小震不坏,大震不倒。笔者理解为:对于小震要立足于抗震,对于大震要立足于减少震灾。由此可认为,水工建筑物抗震要求是:小震应能维持正常运行,不产生必须中断运行的破坏。

密云水库白河主坝,在1976年唐山地震时,上游护坡发生大面积滑塌,以后经过放空检修,二三年后才恢复正常蓄水运行。可以认为:当年的大坝设计满足了70年代“大震不倒”的要求。但是,目前密云水库供水要求日益提高,二三年才能恢复正常蓄水,就显得有些不足。因此,上述标准的内涵并非固定不变,而是随着国民经济发展与人民生活水平提高,“小震不坏,大震不倒”的具体内涵也须日益提高。

笔者理解:小震不坏,即在建筑物结构设计中,小震荷载是一种常规的校核荷载,但由于其作用时间短暂,只须校核强度,不必校核其开裂与变位。至于大震,目前的计算理论尚难精确计算其破坏情况。因为,一则目前的理论只是静态较长时段(例如几分钟乃至几小时),而不是动态的一二十秒时段反复荷载。二则,动力法弹性理论,与极限荷载的破损状态或不倒塌都还有很大出入。三则,目前并无足够的水工建筑物地震倒塌的实例。因此,只能根据动力法成

果综合判断震后状态是否不致倒塌。

伊朗高 204 m 的德兹拱坝,建于强地震区,60 年代建成。90 年代初,瑞士专家为复核其地震安全,校核地震加速度为 $0.43 g$ 左右。计算成果表明:坝顶拱冠附近的三角形区域内,应力很高,估计会出现严重破裂,但认为该坝顶部向下游倒悬,破碎区仍受嵌固作用而不致倒塌,从而认为仍能满足安全要求。

一个尚待研究的课题是:余震时的结构安全。地震实例表明,大震后几个月内,常有若干次较小的余震。虽然其烈度常较主震烈度小 $1.5 \sim 2$ 度,但已受主震破坏的结构能否承受,以及是否可以降低荷载(如降低水位或放空),从而维持公众安全。这些都宜在各自的具体情况下进行研究。不能简单地认为只要主震不倒,余震时必然安全。

3 继发灾害

实践表明,震灾并不限于建筑物是否倒塌,往往还由此而导致继发灾害。1923 年东京大地震,死亡人数大多数是由于震后引发的火灾。1995 年阪神大地震,由于高架桥倒塌,使抢救人员和车辆不能及时进入灾区,从而使灾情扩大。

普通灌溉渠道,通常不必满足抗震要求,允许个别渠段完全破坏。但如果渠道下方有较大居民点,倾泻而下的渠水会冲毁居民点,这时就需要适当注意抗震。例如,选线时设法避开居民点,局部渠段适当加固,在居民点外设置挡水导墙,或在渠首设置自动关闸装置等等,以减免灾害的扩大。

地震是一个地区的系统性破坏,因此,抗震减灾设计是一个系统设计。例如,一个大灌区的抗震减灾设计,除校核主要建筑物是否安全外,还应注意灌区各部位通行车辆的可能性,特别是过河渠的可能性,闸门能否及时启闭等等,以便将震灾损失减至最小。

4 竖向地震

日本抗震界早期认为,建筑物通常按竖向荷载设计,因此竖向承载力有较大余裕,抗震计算只须校核结构的水平向往复荷载安全度。因此,目前国内外抗震规范大体规定:一段只须校核水平地震,强震区可在水平地震同时计入烈度仅为水平地震 $1/2 \sim 2/3$ 的竖向地震组合荷载。

笔者建议,对强震区还应考虑在最大竖向地震时相应较小的水平地震荷载组合。

地震是一种与水面波动相似的表面波。在震波向外扩展时,地基质点的运动轨迹是圆形,质点的水平位移是质点运动半径的余弦,而竖向位移则是其正弦。很难说竖向加速度必然小于水平加速度。

唐山地震时,许多桥梁呈八字形破坏。即两桥墩相向倾斜,而桥梁搁置于两个桥墩之上,原因是地震时,桥梁被震上抛,随即两桥墩相向倾斜,又被桥梁压在其上,许多工厂的屋架和吊车梁被震跌落,甚至变压器跌落脱轨,最特殊的是一个烟囱被震成三段,中段跌落他处,顶段上抛后重又插入尚在原位的下段中。

这些都表明:虽然地基加速度小于 $1.0 g$,但建筑物顶端由于震波集中或竖向撞击作用,其质点加速度远远大于 $1.0 g$,从而使物体上抛跌落。

在设防烈度为 8 度或更高时,吊车梁、屋架、桥梁等,必须用螺栓或拉筋等将它们与下部相连接,机械设备如桥吊、变压器等,也宜设法锚着于其下的轨道上。

国外早年做过一次室内爆炸试验,在圆锥体底部置放少量炸药使之爆炸,炸后圆锥体断成三段,顶段为小圆锥体,中段为极薄的圆饼状,两者均飞落他处,下段为较大的圆锥台体,仍留在原处,底部有炸坑。其破坏与前述唐山地震的烟囱相似。破裂方式是,由于爆炸冲击波向上传播,其向上压缩波因圆锥体截面愈来愈小,从而使加速度愈来愈大,传至顶端再向下反射,形成拉伸波向下传播,因而使锥体上端出现 2 个破裂面而断成 3 段,以后再由底部向上反射压缩波时,由于撞击作用,使上段和中段飞落远处。

朱伯芳院士早在 60 年代曾用被动理论计算过新丰江大坝在竖向地震作用下的反应。计算成果表明:三角形剖面的重力式坝,同样也会在坝顶附近由于向下反射的拉伸波而使之破裂。因此,坝顶附近上下游面宜适当配置钢筋。

密云白河主坝破坏,通常认为是斜墙外侧的砂卵石体压实密度不足,因而产生液化破坏。笔者却认为,主要原因是该层砂卵石体呈薄片状坐落在压实的粘土斜墙上,两者动弹性特征相差悬殊,地震波产生的反射拉伸波使两者脱开,其后第二次压缩波即将砂卵石层薄片抛离坝面至水库内。因而其坍塌物分布与一般滑坡颇为不同。然而,剖面形状相同、碾压质量也相近的潮河主坝,距离震中更近,却并未破坏。造成这种差异的原因,用波动理论就能较好地进行解释,只是两座坝轴线方向不同,因而坝面质点加速度方向不同所致。当然,坝轴线选择时无法考虑地震波方向,但可以认为,两种不同动弹性的土料与砂卵石料接触面不宜距上下游坝面过近,斜墙宜改为更深埋的斜心墙。

与此类似,顾淦臣教授对混凝土面板堆石坝进行抗震分析后的结论之一是:面板与堆石体动力特性迥异,两者接触面在强震时必然开裂,面板会产生脱落错位等破坏,建议采用锚固于堆石体内的措施。

以防止面板破坏。

5 地基与基础

现行地震加速度是按一般城市工业民用建筑物大多建于软基上作出的,在岩基上可以降低。小湾拱坝的设防烈度是9度,地震危险性分析成果却是 $0.306g$,小于规范的 $0.40g$ 。不少人颇有些担心。在一次抗震规范讨论会上,地震部门专家却认为是合理的,即认为岩基上可降低0.5度,故可取9度 $0.40g$ 与8度 $0.20g$ 的中间值,即 $0.30g$ 。这一点虽然抗震设计规范早有规定,却常被忽视,有必要给予提醒。当然特别软弱的土基,加速度还应增加。

现行规范认为砂砾地基的相对紧密度须达到0.75,才不致产生液化破坏。通常天然冲积层的相对紧密度只是 $0.60 \sim 0.65$ 。因此,常被划为易液化地基。笔者认为这一规定尚须探讨。

如前所述,密云白河主坝上游护坡的破坏,并非液化,也不是滑坡,不存在碾压相对紧密度不够的问题。唐山、海城、邢台等地震时,平原河道普遍出现大面积沉陷、开裂、喷沙等液化迹象,但附近山区河道则无此现象。这一情况表明,细沙和粉沙易液化,而中粗沙和砂砾则不易液化。在区分液化潜在危险时,粒径常比相对密度更重要。建议适当放宽这一限制。土石料和松散地基在强烈地震作用下,摩擦角常会减少,这是公认的事实,但这种减少只是一种数量的变化。液化则是摩擦角近于零的质变,与上述动摩擦角减少是完全不同的,不能把上述动态抗剪强度降低都列为液化现象。

地形和地质对地震破坏有很大影响,平坦的地面,沉陷、开裂和喷沙常限于7度以上地区,但河岸则在6度地区即普遍出现坍塌、沉陷。其原因当在于后者有动土压力和地下水动水压力作用,并且松软粉沙易于向河床方向流动,与平坦地面只有沉陷而无侧向位移的情况有很大差别。建议对地基进行计算分析。

软基的沉陷是地震破坏的一个重要方面。即使不出现液化,通常也会由于地震前后孔隙率降低而产生沉陷。建议事先对地基取样作孔隙率震动试验,从而估算其沉陷。对中小型工程,也可在地质勘探基础上,绘出地基表面以下15m深度内的土层厚度,根据经验判断其各层沉陷百分比和总沉陷量。例如,表层壤土均匀沉陷大致取为 $3\% \sim 5\%$,不均匀沉陷则可达 $5\% \sim 15\%$,下层中粗沙可分别取 $2\% \sim 4\%$ 和 $5\% \sim 10\%$,下层如为粉细沙,则可分别取 $5\% \sim 10\%$ 和 $20\% \sim 40\%$ 。虽然这种估算缺乏足够依据,但总比不加估算为好。

输水渠道与渡槽、倒虹吸、隧洞等的连接处还必须防止地震破裂漏水破坏,特别是填方岸坡的接头漏水,常会很快被冲刷破坏。其防止设施尚须专门研究。

6 抗震结构与材料

地下结构的抗震性能最好,但洞口部位应特别注意混凝土与岩石的连接,洞脸部位岩体也应注意其稳定性。

地面抗震结构宜为刚度大而惯性小。例如进水塔宜为薄壁筒状结构,渡槽支墩宜为变向排架结构,不宜采用高墩结构。结构刚度与质量分布宜自下向上递减,避免突变,更忌头重脚轻。阪神地震时高速公路高架桥倒塌者多为单肢T型桥墩,显然是最不利的结构。如果用双肢II型结构,就不会发生严重倒塌情况。

采用抗震性能高的材料,许多抗震难题常易迎刃而解。伊朗、阿尔及利亚、突尼斯等国的国家抗震规范,规定三层及以上民用建筑,必须采用钢筋混凝土结构或钢结构,就是一个范例。由于国家供应水泥和钢材,群众仿照典型梁柱楼板图样自行施工,费用似乎并不太贵。

唐山地震时,砖烟囱全部倒塌,钢筋混凝土烟囱却无一倒塌,素混凝土烟囱则有的破坏,有的完好。素混凝土水闸有裂缝而不倒塌,砌石闸墩则多半倒塌。因此,有较高抗震要求的结构宜为钢筋混凝土结构,有一般要求者可用素混凝土结构,避免采用浆砌石结构。从施工方便、保证防渗与耐久等方面看来,上述要求也是技术与经济上合理的。

水工建筑物受抗渗、稳定等控制,大多是比较厚实的大体积混凝土。结构的承载能力通常不需要钢筋。在此情况下,不必按钢筋混凝土构件配置钢筋,也不需要按最小含钢率配筋。因为最小含钢率的规定是防止钢筋混凝土构件的配筋率过小,反而不如按素混凝土构件计算的承载能力。如果硬要满足最小含钢率要求,就会出现构件断面愈大,配筋愈多的不合理现象。为此现行水工混凝土结构规范中在最小含钢率条款中,列出了一些灵活调整的规定。但条文叙述不透彻,不易执行。规范另有一些构造钢筋的规定,可以参照配筋。美国陆军工程师团规范的构造钢筋规定为 $\phi 19$ 间距300mm。在一般情况下,这一配筋足以应付温度荷载,也能在中等强度地震下开裂而不致倒塌。唐山地震表明,通常构件系统在常规配筋量 $20 \sim 50 \text{ kg/m}^3$ 时,已能承受极强地震,只是个别结点尚需局部加强。

根据我国目前的技术水平,软基上建筑物基础已能采用桩基施工,诸如传统的预制桩、灌注桩等

等.因此,对有地震液化危险的基础,宜采用桩群以承担竖向与水平向荷载.

7 抗震加固

改建和加固是一门系统性极强的技术,既需要对结构及抗震有透彻理解,又需要对结构实际情况和施工有透彻理解.新建工程设计之初,适当满足抗震要求极易办到.所需额外费用很少.建成后再进行加固就很困难.加固资金常与原始建设费用相近.震后加固则更困难,所需费用常高于原始建设费用很多.

尽量采用优质材料和优良的结构,采用较先进工艺,加快施工进度,以求不中断工程运行,完成加固工程,是各种加固(包括抗震加固)的关键.

例如,混凝土低坝可用坝顶预应力锚索、坝后扶垛.高坝则常须坝面加钢筋混凝土面层,以及岩基灌浆排水和局部不稳定岩体锚固;土石坝常须适当地在坝下游侧加高培厚,对坝基液化潜在危险部位用压重、排水等处理.

对墩式基础宜加扶垛或侧向支撑,不易稳定的梁柱框架加设斜拉筋等.

浆砌式干砌石结构,可在外表加设钢筋混凝土围梁、框架或护面.

渠道表面需要时可加筑混凝土护面,减少渗漏,降低地下水位,以提高抗震安全度.

易液化的粉细沙地基上的建筑物,一般宜采用水泥—水玻璃灌浆加固,较板桩围护更简易可行.当然,如果可行时,改变地形坡度和地下水坡降则是更简易的办法.

一般城市堤防基础加固的最佳办法是设置定喷或摆喷防渗墙,但如果堤基有易液化层时,常需设上下游防渗墙各一道,以阻止液化层的水平移动.农村堤防则常是改线,加筑副堤,或适当加高培厚.

城市供水和灌溉供水渠线、管道,最重要的是在渠首或沿线适当部位设置自动(或人力)关闸装置.

8 结 语

本文讨论了水工建筑物抗震设计的一些问题,认为:

a. 随着国民经济发展和人民生活水平提高,作为安全保障的抗震设计范围,无论在地区或在建筑物类型上,都宜适当提高.

b. 抗震要求不必过高,小震立足于“抗”,大震立足于“减”.在设计上注意与常规结构措施有机结合,可以做到不化钱或少化钱,即可大幅度提高抗震能力.

c. 继发灾害常是震灾损失扩大的重要因素,如

何安全地降低水库水位,及时迅速地关闭或减少输水渠道、管线流量,是水工建筑抗震减灾设计的重要方面.

d. 竖向地震是大震的主要成灾原因,需要在理论上进一步探索,特别是地震波竖向传输中的集中和拉压反复变化,以及竖向撞击破坏.

e. 软基上水工建筑物灾害研究不够.在烈度预测、地基强度参数、液化判别准则、沉陷开裂与变形、动土压力地下水动水压力方面,还须更深入研究.设计上宜审慎处理,以减免对人烟稠密地区的危害.

f. 结构设计和材料选择是抗震设计的主要内容.超静定结构、足够的横向支撑、沿高度方向的质点和刚度递变分布,是抗震结构的关键.采用能适应温度沉陷变形而又能防止构件和设备向上抛出的螺栓等连接方式,避免简单地依靠重力搁置的方式.

采用具有足够抗拉强度和适应变形能力的材料往往容易满足复杂的抗震要求.避免使用圬工材料.

g. 已成建筑物的抗震加固更为复杂,关键是如何不中断或减少对运行的影响,紧急抢修时还必须重视利用当地易取得的材料,以防止余震和继发灾害.

抗震实际上是一种意外灾害的“保险”.建设之初即有一定准备,所需的“保险”费用很少,常常是成功所必需的费用.缺少准备,临时抢修是不可靠的.

(收稿日期:1998-11-24 编辑:马敏峰)

·新书介绍·

《农业世界水与气候图》简介

水是农业领域不可缺少的资源,现在越来越多的国家认识到地球正面临严重的水资源危机,那么现今地球上的水情况到底怎么样呢?来自美国和其他一些国家的科学家利用30年来搜集的有关水、温度和气候条件的大量信息制作了一个新的电脑数据库,详细记载了地球上每 1km^2 的水资源和气候等方面的情况,这个大型数据库就叫做《农业世界水与气候图》,它将成为世界各国决策者、科学家和农业工作者的得力工具.

《农业世界水与气候图》可以在电脑屏幕上展现地球上任何地方30年来的降雨温度等数据的图表,具体的范围可以缩小到 1km^2 之内.

国际灌溉管理研究院在制作数据库的时候向美国犹他州立大学求助,犹他州立大学在灌溉和气候领域方面的研究具有世界公认的先进水平,气候中心生物气象学家詹森教授说,数据库里输入了世界各地56000多所气象站30多年以来的资料.

(摘自1998年7月20日《水信息》)