

DOI: 10.11779/CJGE201511025

基于汶川地震震害经验的土石坝抗震设计规范修编

刘小生^{1, 2}, 赵剑明^{1, 2}, 杨玉生^{1, 2}, 王钟宁^{1, 2}, 杨正权^{1, 2}, 刘启旺^{1, 2}, 陈 宁^{1, 2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室(中国水利水电科学研究院), 北京, 100048; 2. 水利部水工程抗震与应急支持工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 基于汶川等地震震害、地震响应、震害机理、安全评价等方面的研究成果, 主要从 4 个方面论述了《水工建筑物抗震设计规范》修编中有关地基和土石坝抗震设计的进展。①抗震设防标准及基本原则: 调整了抗震设计标准和设计地震的确定方法; 对特别重要工程按最大可信地震校核不发生库水失控下泄灾变安全裕度; 一定情况下设计地震反应谱的确定需要考虑地震近场效应、上盘效应及频谱不平稳性等; 对抗震甲类工程抗震设计需制定防震减灾应急预案; 规定了土石坝地震反应谱, 取加速度最大反应谱值 $\beta_{\max} = 1.60$, 对应的阻尼比为 20%。②场地与地基: 调整了工程建设场地分类方法, 场地土类型由 4 类调整为 5 类, 场地类别划分更为详细; 对标贯击数判别液化方法中的液化临界标贯击数计算公式进行了调整, 并修订了考虑上覆有效应力影响的标贯击数校正公式。③土石坝抗震计算与安全评价: 扩充了抗震计算的内容要求, 规定抗震计算包括抗震稳定计算、永久变形计算、防渗体安全评价和液化可能性判别等内容; 扩大了要求采用动力法进行地震作用效应分析和安全性评价的范围, 规定对设计烈度Ⅷ度且坝高 150 m 以上, 设计烈度Ⅷ、Ⅸ度且坝高 70 m 以上, 地基中存在可液化土层等 3 种情况, 应同时进行基于有限元法的动力分析, 对覆盖层厚度超过 40 m 的土石坝宜进行动力分析; 补充了对土石坝地震作用效应进行动力分析的原则要求, 包括本构模型选取、计算参数确定、残余变形计算、稳定分析要求等; 补充规定了根据动力法成果对土石坝的抗震安全性进行综合评价的原则要求。④面板堆石坝抗震工程措施: 主要根据紫坪铺大坝设计、建设及震害经验, 增加了针对面板堆石坝的抗震工程措施, 包括坝体地震变形控制、坝顶及其附近坝坡防护、面板及垂直缝抗挤压、水平施工缝抗错台及接缝细部构造设计等。

关键词: 汶川地震; 震害经验; 规范修编; 土石坝; 抗震计算; 抗震措施

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)11-2111-08

作者简介: 刘小生(1962-), 男, 江西信丰人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土石坝与地基抗震理论和试验研究。E-mail: liuxsh@iwhr.com。

Advances in seismic design of earth-rockfill dams and foundations in China and revision of code based on lessons from Wenchuan Earthquake

LIU Xiao-sheng^{1,2}, ZHAO Jian-ming^{1,2}, YANG Yu-sheng^{1,2}, WANG Zhong-ning^{1,2}, YANG Zheng-quan^{1,2},
LIU Qi-wang^{1,2}, CHEN Ning^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, Beijing 100048, China; 2. Engineering Research Center on Anti-Earthquake and Emergency Support Techniques of Hydropower

Projects, Ministry of Water Resources, Beijing 100048, China)

Abstract: The advances in seismic design of earth-rockfill dams and foundations and the revision of code for seismic design of hydraulic structures in China (SL203-97/DL5073-2000) are presented based on research results and lessons from Wenchuan Earthquake disasters. The main revisions and advances focus on four aspects: (1) Seismic fortification criterion and its basic principles, in which the seismic design criterion, design parameters of ground motions and method for determining seismic waves are revised. For especially important projects, the seismic safety margins of the structures under MCE shall be assessed in order to prevent any collapse resulting in reservoir water discharging catastrophically. The near-field effect, hanging wall effect and unsteadiness of the frequency spectrum shall be considered when determining the design earthquake response spectrum. Earthquake prevention and disaster mitigation emergency contingency plans are required for the structures with engineering seismic fortification category of Class A. The seismic response spectrum for earth-rockfill dams is stipulated,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209234); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501035); 国家科技支撑计划项目课题(2013BAB06B02); 国家重点基础研究发展计划("973"计划)课题(2013CB036404); 中国水利水电科学研究院青年专项(GE0145B102014); 中国水利水电科学研究院科研专项项目(岩集1467)

收稿日期: 2014-09-06

and the value of the maximum acceleration response spectrum (β_{\max}) is taken as 1.60, whose corresponding damping ratio is 20%. (2) Site and foundation, in which the criterion for classification of site soils and site itself are revised. Site soils are classified into 5 types instead of 4 types in the old code according to the shear wave velocity of soil layer, and are classified in more detail than before according to the type of site soil and overburden thickness. For the liquefaction potential evaluation method, the formula for determining the critical standard penetration test N-values (SPT N-values) and the formula for correcting the influence of the effective overburden stress on SPT N-values are revised. (3) Seismic calculation and safety evaluation of earth-rockfill dams, in which contents for seismic calculation are supplemented. Seismic calculation should include seismic stability calculation, permanent deformation calculation, safety evaluation of the anti-seepage body and liquefaction potential evaluation. The scope for adopting the dynamic analysis method for the analysis of seismic effect and safety evaluation is supplemented. For the earth-rockfill dams with the following conditions: a) higher than 150 m and with a design intensity of VII; b) higher than 70 m and with a design intensity of VIII or IX; and c) presence of liquefiable soils in the foundation based on finite element method is necessary for dynamic analysis to comprehensively evaluate its seismic stability. For the earth-rockfill dams with deposits thicker than 40 m, finite element dynamic analysis is recommended, and the principles for dynamic analysis of earth-rockfill dams are provided, including selection of constitutive model and determination of model parameters, calculation of the permanent deformation and requirement for stability analysis. The basic principles for evaluating seismic safety of earth-rockfill dams according to the dynamic results are provided. (4) Earthquake resistant measures for earth-rockfill dams and foundations, in which earthquake resistant measures for CFRD are proposed according to the experience of the design, construction and lessons from earthquake damages of Zipingpu Dam in Wenchuan Earthquake, including seismic deformation control, protection of dam crest and nearby slope, anti-squeezing of vertical joints, anti-dislocation of horizontal construction joints and detailed structure design of joints.

Key words: Wenchuan Earthquake; earthquake damage; code revision; seismic calculation; earthquake resistant measure

1 概 述

中国人均水资源极为短缺,且时空分布很不均匀,与土地资源和生产力布局极不匹配。频繁的干旱、洪涝灾害严重制约社会经济发展,建设水库大坝,尽可能调节和利用汛期洪水,具有重大社会和经济意义。同时,水能是可再生的清洁能源,水电开发是中国重要能源战略。中国的水电资源 80%以上分布在西部地区,且西部地区多高山和峻岭峡谷,易于修建调节性能好的高坝大库。这些地区经济落后、交通不便、坝址地形和地质条件复杂,很多坝址区存在有复杂的深厚覆盖层,因此适应性较强的土石坝成为许多水电工程优先采用的坝型。同时,中国地处环太平洋地震带和地中海-喜马拉雅山地震带之间,地质构造规模宏大复杂,地震活动频繁,强度大,震源浅,分布广。近几十年来,已发生多次造成重大灾害的大地震,如 1966 年邢台地震、1970 年通海地震、1975 年海城地震、1976 年唐山地震、1996 年丽江地震、1997 年新疆喀什和阿图什地震、2008 年“5·12”汶川大地震及 2010 年玉树地震等。特别是,西部地区是中国的主要地震区,地震烈度和频度都很高,在这些地区开发水电,坝址选择难以规避地震的影响。这些高坝大库,一旦遭受强震失事,其次生灾害将极端严重,高土石坝抗震设计和安全性评价成为高度关注的焦点^[1-5]。

近十几年来,中国水利水电工程建设、设计及水工抗震学科有很大发展。随着高土石坝,特别是强震区高心墙堆石坝和面板堆石坝的建设发展,在坝基和坝料动力特性研究、测试方法和技术、高土石坝地震反应分析方法和抗震安全评价方法等方面取得了一系列研究成果,极大地促进了土石坝抗震设计水平的提高^[21-22]。中国现行的《水工建筑物抗震设计规范》(SL203—97)(以下简称现行规范)颁行已超过 10 a^[17],需要根据最新大坝抗震设计实践和震害经验,对规范进行修订,以更好地指导地震区高土石坝工程建设。

“5·12”汶川 8.0 级强烈地震,是中国近几十年来震级规模最大、破坏性最强,波及范围最广、抗震救灾难度最大的一次地震,给震区特别是震中附近的广大范围造成重大灾害^[4-16]。全国有 2380 多座水库出现险情,其中绝大部分为库容小于 500 万 m³,坝型为均质土坝的小型水库。而紫坪铺面板堆石坝(坝高 156 m)、碧口土质心墙堆石坝(101.8 m)、沙牌碾压混凝土拱坝(130 m)及宝珠寺混凝土重力坝(132 m)等 4 个不同类型的 100 m 以上高坝,均经受了超过原设计地震烈度至少 1 度的强地震作用,除了发生不同程度的局部破坏,大坝整体稳定性良好。特别是距离震中仅 17 km 的紫坪铺面板堆石坝,原按设计烈度 8 度、地震基岩峰值加速度 0.26g 设防,汶川地震中坝址实际基岩峰值加速度据推测在 0.5g 以上,地震烈度大于

9 度, 大坝仅发生了局部可修复的损坏, 仍保持了整体的结构稳定和正常安全运行功能, 堪称目前世界上唯一遭遇强震的坝高大于 150 m 的高混凝土面板堆石坝^[6-16]。汶川地震经验表明, 只要按照规范要求进行抗震设计和施工, 高坝具有较好的抗震性能, 可以达到规范要求的“如有局部损坏经一般处理后仍可正常运行”的设计功能^[1-3]。这些工程设计和建设经验、震害经验、应急处理经验以及震害机理研究、震后抗震复核、修复加固措施等成果及经验教训, 对《水工建筑物抗震设计规范》的修订在内容和进度上均起了极大促进作用。

本文主要基于汶川地震等震害经验教训、地震响应、震害机理、安全评价等方面的研究成果, 论述了在中国《水工建筑物抗震设计规范》修编中有关地基和土石坝抗震设计的进展。

2 抗震设防标准及基本原则

2.1 抗震设计标准和设计地震确定方法

现行规范对各种水工建筑物统一采用设计烈度(最大设计地震)的一级设防, 其设计功能目标为“如有局部损坏经一般处理后仍可正常运行”。设计烈度(设防标准)根据建筑物工程抗震设防类别(根据建筑物级别及场地烈度确定)确定^[17-18]。

“5·12”汶川 8 级大地震发生在长期以来变形率最低、历史地震活动相对较弱的青藏高原龙门山断裂带, 其历史最大震级为 6.5 级, 人们对该断裂活动频度低、长期积累能量、具有发生超强地震危险的特殊性认识不足。汶川地震的发生显示了目前依据“构造类比、历史重复”原则进行地震危险性评价方法的局限性, 地震预报是未解决的世界性难题, 地震设计水准的确定属于对坝址可能发生地震的中长期预报, 因而也存在较大的不确定性。同时各类高坝的地震响应十分复杂, 对其安全性评价也尚待更深入探讨, 而高坝大库一旦溃决, 次生灾害不堪设想。因此, 为了防止次生灾害的发生, 对重大大坝工程, 不能仅满足目前抗震设计中最大设计地震这单一水准的要求, 还需要对场地地震地质条件下可能发生的极端地震, 即所谓最大可信地震的情况进行考虑^[1]。

为此, 新修编的《水工建筑物抗震设计规范》规定, 对一般水工建筑物仍然采用最大设计地震的一级抗震设计, 其设计功能目标为“如有局部损坏, 经一般修理后仍可正常运行”。但对重要水工建筑物除了采用最大设计地震进行抗震设计外, 还规定需对其在遭受场址最大可信地震时不发生库水失控下泄的灾变安全裕度进行专门论证, 实际上为二级水准抗震设计。

最大设计地震(设防水准)的确定方法也有所改变: ①一般工程水工建筑物依据《中国地震动参数区划图》确定其设防水准, 并确定与之对应的地震基本烈度; 对其中工程抗震设防类别为甲类的水工建筑物, 应在基本烈度基础上提高 1 度作为设计烈度, 水平向设计地震动峰值加速度代表值相应增加 1 倍。②地震基本烈度为 VI 度及 VI 度以上地区的坝高超过 200 m 或库容大于 100 亿 m³ 的大(1)型工程, 和地震基本烈度为 VII 度及 VII 度以上地区的坝高超过 150 m 的大(1)型工程, 应依据专门的场地地震安全性评价成果评定。③对根据专门场地地震安全性评价确定其设防依据的工程, 其建筑物的基岩平坦地表水平向设计地震动峰值加速度代表值的概率水准, 对工程抗震设防类别为甲类的壅水和重要泄水建筑物应取 100 a 内超越概率 P_{100} 为 0.02, 对 1 级非壅水建筑物应取 50 a 内超越概率 P_{50} 为 0.05, 对工程抗震设防类别非甲类的水工建筑物应取 50 a 内超越概率 P_{50} 为 0.10, 但不应低于区划图相应的地震动水平加速度分区值。④对按规范要求作专门场地地震安全性评价的工程抗震设防类别为甲类的水工建筑物, 除按设计地震动峰值加速度进行抗震设计外, 应对其在遭受场址最大可信地震时, 不发生库水失控下泄的灾变安全裕度进行专门论证, 并提出其所依据的抗震安全性专题报告^[19]。

2.2 近场地震效应影响

“5·12”汶川大地震紫坪铺大坝的震害表明, 近震效应和地震波传播方向对大坝地震动力反应和震害有明显影响^[3-4, 15]。汶川地震震中位于紫坪铺大坝以西, 而紫坪铺大坝坝轴线为东西向, 仅相距 17 km。仅有的 3 个坝顶强震监测仪得到的加速度记录表明, 坎顶的坝轴方向和铅垂方向动力反应远大于顺河方向, 表现出明显的近震效应。沿坝轴向主震方向的强烈地震惯性力和堆石体向河床方向的地震变形导致混凝土面板板间垂直结构缝多处发生挤压破坏, 河谷形状较为陡峭的左坝肩面板板间结构缝破坏程度明显大于相对平缓的右坝肩。在 1976 年的唐山地震中, 密云水库的震害也有类似的地震传播方向影响现象发生。研究表明, 汶川地震的发震断层长度超过 300 km, 深度 20 km, 破裂扩展持续时间超过 100 s, 能量释放时空分布极不均衡。这种有较宽断层面、断层距离小的大震, 显然不能再视作一个点源, 这与传统意义上假定地震波经过地球内部传播, 在工程场地下地壳向上传播作用于建筑物的假定完全不同, 震中和震中距已无实际意义^[1]。

新规范规定^[19], 为确保规范要求需要作专门的场地地震安全性评价的工程抗震设防类别为甲类的水工建筑物不发生严重地震灾变, 要求除依据专门的场址

地震危险性分析所提供的场址设计地震动加速度进行抗震设计外, 还应按确定性方法或基准期 100 a 内超越概率 P_{100} 为 0.01 的概率法确定场址“最大可信地震”, 并按与设计地震动峰值加速度相应的“设定地震”确定与场地地震地质条件相关的设计反应谱, 据以生成人工模拟地震动加速度时程; 在对结构地震效应的强非线性分析中, 宜研究地震动的频率非平稳性的影响; 当场址离倾角小于 70° 的发震断层不大于 30 km 时, 宜计入上盘效应的影响; 当其离场址距离小于 10 km、震级大于 7.0 时, 宜研究近场大震中发震断层面破裂过程的影响, 直接生成场址的地震动加速度时程。

2.3 抗震甲类工程防震减灾应急预案

汶川地震中有 2380 多座水库出险, 许多为溃坝险情, 而无一发生溃坝的重要原因是当时为临近汛期, 水库大都放空准备度汛, 水位较低。有的震后反应及时, 发现险情迅速泄水降低水位^[2]。紫坪铺大坝地震中有一定震损, 渗流量有一定的增加, 为减小溃坝风险, 也为上游各种不利情况来水准备库容, 震后需要立刻泄水降低库水位, 但由于排砂洞闸门启闭排架结构及其启闭设备损坏, 正常电源供应常遭中断, 不能开闸泄水, 造成一定紧张, 后经紧急抢修才得以恢复^[6]。汶川地震震害经验表明^[2-3], 大坝地面附属建筑物及其设施设备最容易受到强地震波及地震地质灾害的损坏, 其中泄水建筑物闸门启闭排架结构及其启闭设备的损坏对大坝安全的危害性最大。当壅水建筑物遭受较严重震害时, 降低库水位是重要应急措施, 而强震时, 正常电源供应常遭中断。

因此, 新修编的《水工建筑物抗震设计规范》规定^[19], 工程抗震设防类别为甲类的水工建筑物, 在设计中应提出, 需按《中华人民共和国防震减灾法》规定制定防震减灾应急预案的要求。特别要加强和落实对应急备用电源设备及油料储备的定期检查制度, 以保证在地震发生时若正常电源供应中断, 泄水建筑物启闭设备能快速紧急启动。

2.4 土石坝反应谱

现行《水工建筑物抗震设计规范》没有规定土石坝设计反应谱。同时还考虑到中国地震部门基于地震危险性分析提供的具有包络特性的一致概率反应谱往往使中长周期处的谱值明显偏大, 理论上不尽合理, 难以适应和满足与水工建筑物抗震相配套的工程技术要求, 故也未在规范中规定大坝抗震设计中必须采用场地谱, 也没有要求采用场地地震危险性分析得到的反应谱为目标谱人工生成地震波, 进行地震作用效应的计算分析。因此, 在实际土石坝抗震设计、研究中采用的地震输入反应谱有很大的任意性, 经常引起争议。

在广泛的地震波反应谱统计和土石坝动力反应计算基础上, 新修订的《水工建筑物抗震设计规范》规定, 土石坝地震加速度最大反应谱值 $\beta_{\max} = 1.60$, 相应的阻尼比取 20%。

3 场地和地基

3.1 工程建设场地分类方法

进行工程场地类别划分的目的是为确定场地地震动反应谱, 主要依据地表覆盖层土层等效剪切波速和覆盖层厚度进行划分。本次修编采用了更具物理意义的土层等效剪切波速进行场地类别划分^[19]。

土层等效剪切波速按下式的确定:

$$V_{se} = d_0 / t \quad , \quad (1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_i / v_{si}) \quad . \quad (2)$$

式中 v_{se} 为土层等效剪切波速 (m/s); d_0 为计算深度 (m), 取覆盖层厚度和 20 m 二者的较小值; t 为剪切波在地面至计算深度之间的传播时间; d_i 为计算深度范围内第 i 土层的厚度 (m); v_{si} 为计算深度范围内第 i 土层的剪切波速 (m/s); n 为计算深度范围土层的分层数。

本次修编中^[19], 场地类别的划分根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 和《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015), 由 4 类调整为 5 类, 即把原来的 I 类地基, 调整为剪切波速大于等于 800 m/s 的 I₀ 类和剪切波速小于 800 m/s 且大于等于 500 m/s 的 I₁ 类。对 I₀ 类场地反应谱特征周期 T_g 为 0.20 s。这是因为, 许多实际工程, 特别是混凝土坝坝基基岩剪切波速一般都远大于 800 m/s, 且主要考虑近震影响^[1]。

3.2 液化判别标准贯入击数临界值和标准贯入击数校正公式

原规范规定^[17-18], 地基中液化土层的判别, 可按《水利水电工程地质勘察规范》^[21]中的有关规定进行评价。在采用标准贯入击数法进行液化复判时, 其最大使用深度为 15 m^[21]。

本次修编^[19], 考虑到实际工程需要, 当采用标准贯入击数法进行液化复判时, 埋深 20 m 范围内, 采用式 (3) 计算液化判别标准贯入击数临界值 N_{cr} :

$$N_{cr} = N_0 \left[\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w \right] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad . \quad (3)$$

式中 N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值, 在设计地震动加速度为 0.1g, 0.15g, 0.20g, 0.3g, 0.4g 时分别取 7, 10, 12, 16, 19; d_s 为饱和土标准贯入点深度 (m); d_w 为地下水位 (m); ρ_c 为土的黏粒含量百分比。

分率(%), 当小于 3 或为砂土时, 应采用 3。

在水利水电工程中, 经常出现工程运行时地面高程和地下水位相对于进行标准贯入试验时的地面高程和地下水位发生较大变化的情形, 这时采用标准贯入试验结果对工程运行时地基砂层进行液化判别, 需要对实测标准贯入锤击数 N' 进行考虑上覆有效应力变化的校正, 并以校正后的标准贯入锤击数 N 与工程运行时砂层的液化临界标准贯入锤击数 N_{cr} 进行对比, 判别砂层的液化可能性。

本次修编, 在总结国内外有关上覆有效应力对标准贯入锤击数影响研究成果的基础上, 研究了挖方或填方对砂土液化判别结果的影响, 指出现行《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008) 采用的校正公式存在挖方偏于保守、填方偏于不安全的问题^[26-27]。

新规范规定^[19], 当工程正常运行时标准贯入点深度和地下水位深度与进行标准贯入试时的贯入点深度和地下水位深度不同时, 实测标准贯入击数 N' 应按公式(4)进行校正, 并以校正后的标准贯入击数 N 作为复判依据。

$$N = N' \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right)^{0.5}, \quad (4)$$

式中, σ_v 为工程正常运行时标准贯入点有效上覆垂直应力, 可根据工程正常运行时标准贯入点深度 d_s 和地下水位深度 d_w 算得; σ'_v 为进行标准贯入试验时标准贯入点有效上覆垂直应力, 可根据标准贯入试验时标准贯入点深度 d'_s 和地下水位深度 d'_w 算得。 σ'_v 取值不应小于 35 kPa, 且不大于 300 kPa。

在实际工程中, 填方时砂层原来一般埋藏较浅, 通常处于中密偏松状态。挖方时砂层原来一般埋藏较深, 通常处于中等偏密以上状态。因此采用新的修正公式对实测标准贯入锤击数进行上覆有效应力校正, 其结果一般均是偏于安全的^[26-27]。

4 土石坝抗震计算与安全评价

4.1 抗震计算内容和分析方法

原规范规定, 对土石坝的抗震稳定计算, 采用基于刚体极限平衡法的拟静力法^[17-18]。不能考虑与地震动特性密切相关的土体应力-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。

汶川地震使紫坪铺面板堆石坝产生最大接近 100 cm 的沉降变形, 向下游水平向永久位移最大 20 cm, 均位于最大断面坝顶。两岸向河床中央方向发生坝轴向永久变形, 最大 22.6 cm。坝顶路面与坝体脱空, 右坝端路面与溢洪道有 20 cm 错台。因下游堆石体变

形, 坝顶下游人行道与坝顶路面发生最大达 63 cm 的裂缝。坝顶下游坝坡附近有局部干砌石护坡松动翻滚受损, 有少量砌石滚石现象。并且主要由于大坝地震变形, 引起上部面板脱空, 河床面板及垂直缝挤压破坏, 周边缝张开、错动和止水破坏, 影响防渗系统性能, 进而影响大坝安全性, 因此, 大坝和地基中地震变形、剪切破坏及液化分析成为抗震计算中的核心内容^[6-16]。

同时, 在高烈度区设计及建造高土石坝对工程抗震设计提出了更高要求, 除了进行传统的稳定计算外, 还需要核算坝体和坝基内的动应力分布、地震引起的孔隙水压力变化、地震引起的坝体变形以及防渗体的可靠性、坝体与坝肩结合部位的应力分布、变形状况和开裂等数据, 这些工作都需要通过动力分析才能完成。此外, 1971 年美国圣费尔南多地震中下圣费尔南多坝的液化, 1976 年中国唐山地震中密云水库白河主坝因保护层砂砾料液化而引起的滑坡等震害均表明, 当坝体和坝基中存在可液化土类时, 采用拟静力法不能得出正确的抗震安全评价结论。

近十多年来, 动力分析理论和计算方法的发展较快, 特别是汶川大地震中紫坪铺大坝的震害与动力计算结果有较强的可比性, 证实了动力分析方法的可靠性和先进性, 说明了采用动力分析方法进行抗震计算的必要性和重要工程意义^[22]。

因此, 新规范明确和扩充了土石坝抗震计算的内容要求。规定抗震计算应包括抗震稳定计算、永久变形计算、防渗体安全评价和液化判别等内容, 结合抗震措施, 进行抗震安全性综合评价^[19]。

同时, 鉴于中国的国情, 拟静力法在土石坝抗震设计的长期应用中, 已积累了较多的工程实践经验; 且对量大面广的中小型水库的土石坝, 目前尚无法广泛采用动力分析方法; 加上目前在土石坝动力分析中, 对土体材料的本构关系及工程安全判据的确定, 尚未完全形成共识, 所以新规范仍以拟静力法作为土石坝抗震计算的基本方法。但规定对①设计烈度Ⅶ度, 且坝高 150 m 以上; ②设计烈度Ⅷ、Ⅸ度, 且坝高 70 m 以上; ③地基中存在可液化土层等 3 种情况之一, 应同时进行基于有限元法的动力分析。对覆盖层厚度超过 40 m 的土石坝宜进行动力分析。扩大了要求采用动力法进行分析和评价的范围。

4.2 土石坝地震作用动力分析原则

土石坝的地震动反应分析对其抗震设计具有重要意义。土石坝抗震动力分析常用的主要方法有: 剪切楔法、集中质量法、有限元法等。其中, 有限元法应用最为广泛, 因此规范主要对采用有限元动力法时需满足的基本要求进行了规定。

土石坝地震反应有限元动力法，按土体动力本构模型可分为基于等价黏弹性模型的等效线性分析方法和基于（黏）弹塑性模型的真非线性分析方法；按地震过程中孔隙水压力的影响，又可分为总应力法和有效应力法；而有效应力法又可按考虑孔隙水压力消散和扩散与否，分为排水有效应力法和不排水有效应力法。

对许多修建在峡谷之中的土石坝，具有明显的三维效应，按平面应变进行二维分析会造成较大误差，也难以全面评价面板等防渗体系的抗震安全。因此，对这类土石坝的地震反应分析，应采用三维动力分析方法。

大量震害经验表明^[6-16]，土石坝震害主要表现形式为地震永久变形，地震永久变形计算是土石坝抗震性能和安全性的重要内容。土石坝地震永久变形计算方法主要包括弹塑性模型在内的直接计算残余变形的真非线性分析方法、滑动体位移分析法和整体变形分析法。整体变形分析法中的等效结点力法在工程中得到了广泛应用。研究表明，残余体积变形，尤其是对于堆石坝和砂砾石堆石坝，是不宜忽略的。因此，采用包括残余体应变和残余剪应变影响的残余变形计算方法。

本次修编，对采用有限单元法进行土石坝作用效应的动力分析，提出了具体要求：①按材料的非线性应力-应变关系计算地震前的初始应力状态；②通过材料动力试验测定动力变形、动力残余变形和动强度等动力特性参数，并结合工程类比选用；③按材料的非线性动应力-应变关系进行地震反应分析；④根据地震作用效应计算沿潜在滑裂面的抗震稳定性，以及计算由地震引起的坝体永久变形；⑤根据地震反应分析成果，从稳定、变形、防渗体安全、液化判别等方面，按规范相应条款要求进行抗震安全性综合评价。

4.3 土石坝动力分析计算参数确定原则

动力反应分析的结果合理与否，除了取决于所采用本构模型，很大程度上还取决于本构模型参数确定是否合理。土的动力特性及参数受土性因素、环境因素及动荷载性质等因素影响，需要通过代表性试验测试确定。同时，由于取样的随机性及实际土样性质的分散性，需要参考以往工程经验，进行类比采用。

目前采用的土动力本构模型主要可分为黏弹性模型、真非线性模型及弹塑性模型 3 大类。采用黏弹性模型、真非线性模型和经典弹塑性模型进行动力有效应力分析时，往往还需建立动孔隙水压力发展的模型。为了计算动力残余变形，有时还需要建立包括残余剪应变和残余体积变形影响在内的动力残余变形模型。

等效黏弹线性模型的工程应用最为广泛，为了确

定等效黏弹线性模型所需要的参数，需分别进行动力变形特性试验、动力残余变形特性试验、动强度和液化特性试验。有些真非线性模型所需参数也可以采用这些试验参数换算得到。

新规范规定，动力分析中的计算参数，应对代表性土样，通过能考虑土性因素、环境因素及动荷载性质等因素影响的材料动力试验测定。对于坝基覆盖层土体，由于试验控制密度、级配和原位结构性等的影响，室内试验准确确定覆盖层动力特性参数困难很大，还需要通过室内和现场试验相结合的方法确定。

4.4 土石坝抗震安全性综合评价原则

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。

新规范根据汶川地震中揭示的土石坝动力破损特征、地震灾害机理及目前土石坝抗震研究现状，提出了基于稳定分析、变形分析和防渗体与地基安全评价的土石坝抗震安全性评价方法和评价原则，稳定性评价与变形分析相结合、局部稳定性评价与整体稳定性评价相结合的土石坝抗震安全性评价方法。具体的评价原则包括：①根据滑动面的位置、深度、范围及稳定指标超限持续时间和程度等，综合评判坝坡的抗滑稳定性及其对大坝整体安全性的影响；②给出坝体及地基局部剪切破坏（或液化破坏）的分布范围，评价其引发整体破坏的可能性；③残余变形计算应给出坝体残余变形的量值和分布规律，并根据最大震陷率和变形的不均匀程度等综合评价大坝及防渗体的抗震安全性。

4.5 面板堆石坝抗震工程措施

原按 VIII 度设计的紫坪铺大坝，在汶川地震中，由于坝体堆石的显著地震变形，使面板、坝顶结构、下游护坡、面板混凝土及接缝止水等部位的局部破坏，尤其是发生了面板的挤压破坏和面板水平施工缝的错台，对大坝防渗系统性能产生影响。新修编规范主要根据紫坪铺大坝等工程的震害经验和震害机理研究成果，增加了针对面板堆石坝的抗震工程措施，包括坝体地震变形控制、坝顶及其附近坝坡防护、面板及垂直缝抗挤压、水平施工缝抗错台及接缝细部构造设计等，具体提出了以下针对面板堆石坝抗震的抗震工程措施：①加大垫层区的厚度，加强其与地基及岸坡的连接。当岸坡较陡时，适当延长垫层料与基岩接触的长度，并采用更细的垫层料；②在河床中部面板垂直缝内填塞沥青浸渍木板或其他有一定强度的较柔性的填充材料；③适当增加河床中部面板上部的配筋率，特别是顺坡向的配筋率；④分期面板水平施工缝垂直

于面板, 并在施工缝上下一定范围内布置双层钢筋; ⑤采用变形性能好的止水结构, 并减少其对面板截面面积的削减; ⑥适当增加坝体堆石料的压实密度, 特别重视地形突变处的压实质量; ⑦坝体用砂砾石料填筑时, 要设置内部排水区, 保证排水通畅, 在下游坝坡一定区域内采用堆石填筑。

5 结语

国内外震害经验和机理研究表明, 土石坝溃坝震害机理主要有两种: ①库水漫顶冲刷破坏。主要原因是坝基和坝体地震变形下陷、坝库区断层上下盘错动、库岸滑坡涌浪和地震涌浪等; ②内部集中渗漏和冲刷破坏。产生渗透破坏和集中渗流通道的主要原因包括坝基断层错动、坝体横向裂缝、防渗体破坏失效、坝下输水管道破裂、坝下断层错动裂缝和施工缺陷裂缝等。由于断层错动引起破坏属于抗剪断的范畴, 不在本文讨论的范围。大坝地震变形(包括不均匀变形)计算和控制成为土石坝抗震设计关键问题。由于地震荷载性质有很多不确定性, 土石坝抗震问题极其复杂, 影响因素众多, 试验和计算不确定性和结果分散性还比较大, 因此目前土石坝及地基抗震设计只能是抗震计算加经验判断。抗震设计包括抗震计算和抗震措施, 其中经验基础上的抗震措施是基本保障, 应从坝址选择、地基条件、坝型选择、坝料选择、细部构造设计及施工质量等各环节保证满足抗震要求。

目前, 抗震规范对土石坝抗震计算和安全性评价要求还只能进行原则性规定, 特别是安全性评价的定量指标还有待进一步结合实际土石坝及地基震害资料积累和震害机理研究确定。

参考文献:

- [1] 陈厚群. 水工建筑物抗震设计规范修编的若干问题研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 4–10. (CHEN Hou-qun. Study on some revision issues of seismic design codes of hydraulic structures in China[J]. Journal of Hydrotectic Engineering, 2011, 30(6): 4–10. (in Chinese))
- [2] 陈厚群, 徐泽平, 李敏. 汶川大地震和大坝抗震安全[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1158–1167. (CHEN Hou-qun, XU Ze-ping, LI Min. Wenchuan Earthquake and seismic safety of large dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1158–1167. (in Chinese))
- [3] 陈厚群. 汶川地震后对大坝抗震安全的思考[J]. 中国工程科学, 2009, 11(6): 44–53. (CHEN Hou-qun. Consideration on seismic safety of dams in China after the Wenchuan earthquake[J]. China Academic Journal, 2009, 11(6): 44–53. (in Chinese))
- [4] 陈生水, 方绪顺, 钱亚俊. 高土石坝地震安全评价及抗震设计思考[J]. 水利水运工程学报, 2011(1): 17–21. (CHEN Sheng-shui, FANG Xu-shun, QIAN Ya-jun. Thoughts on safety assessment and earthquake-resistance for high earth-rock dams[J]. Hydro-science and Engineering, 2011(1): 17–21. (in Chinese))
- [5] 朱晟. 土石坝震害与抗震安全[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 40–51. (ZHU Sheng. Earthquake damages and dam safety[J]. Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 40–51. (in Chinese))
- [6] 宋胜武, 蔡德文. 汶川大地震紫坪铺混凝土面板堆石坝震害现象与变形监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 840–849. (SONG Sheng-wu, CAI De-wen. Earthquake damage phenomenon and deformation monitoring analysis for Zipingpu concrete faced rockfill dam during Wenchuan Earthquake[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 840–849. (in Chinese))
- [7] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5·12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 795–801. (CHEN Sheng-shui, HUO Jia-ping, ZHANG Wei-min. Analysis of effects of “5·12” Wenchuan earthquake on Zipingpu concrete face rock-fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 795–801. (in Chinese))
- [8] 高希章, 陆恩施, 杨志宏, 等. 经历“5·12”汶川大地震的紫坪铺面板堆石坝[C]// “5·12”汶川特大地震灾后重建学术交流会. 成都, 2009. (GAO Xi-zhang, LU En-shi, YANG Zhi-hong, et al. The Zipingpu rock fill dam undergone the “5·12” Wenchuan Earthquake[C]// Symposium on Reconstruction after “5·12” Wenchuan Earthquake. Chengdu, 2009. (in Chinese))
- [9] 宋彦刚, 邓良胜, 王昆, 等. 紫坪铺水库大坝震损及应急修复综述[J]. 四川水力发电, 2009, 28(2): 8–13. (SONG Yan-gang, DENG Liang-sheng, WANG Kun, et al. Seismic damages of Dam of Zipingpu Reservoir and emergency repairs[J]. Sichuan Water Power, 2009, 28(2): 8–13. (in Chinese))
- [10] 孔宪京, 周扬, 邹德高, 等. 汶川地震余震记录及紫坪铺面板堆石坝余震反应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 673–678. (KONG Xianjing, ZHOU Yang, ZOU De-gao, et al. Aftershock records of Wenchuan Earthquake and seismic response of Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 673–678. (in Chinese))

- [11] 孔宪京, 邹德高, 周扬, 等. 汶川地震中紫坪铺混凝土面板堆石坝震害分析[J]. 大连理工大学学报, 2009(5): 667 - 674. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao, ZHOU Yang, et al. Earthquake damage analysis of Zipingpu concrete face rock-fill dam during Wenchuan earthquake[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, **49**(5): 667 - 674. (in Chinese))
- [12] 赵剑明, 刘小生, 温彦峰, 等. 紫坪铺大坝汶川地震震害分析及高土石坝抗震减灾研究设想[J]. 水力发电, 2009(5): 11 - 14. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, WEN Yan-feng, et al. Analysis of earthquake damage of the Zipingpu dam in Wenchuan earthquake and the study proposal on the anti-earthquake and disaster reduction of high earth-rock dam[J]. Water Power, 2009, **35**(5): 11 - 14. (in Chinese))
- [13] 赵剑明, 刘小生, 刘启旺, 等. 先期震动对土石坝地震永久变形的影响研究[J]. 世界地震工程, 2011, **27**(1): 28 - 33. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, LIU Qi-wang, et al. Study on the effect of pre-vibration on earthquake-induced permanent deformation of an earth-rock fill dam[J]. World Earthquake Engineering, 2011, **27**(1): 28 - 33. (in Chinese))
- [14] GUAN Z C. Investigation of the 5.12 Wenchuan earthquake damages to the Zipingpu water control project and an assessment of its safety state[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, **52**(4): 820 - 834.
- [15] ZHANG J M, YANG Z Y, GAO X Z, et al. Lessons from damages to high embankment dams in the May 12, 2008 Wenchuan earthquake[J]. ASCE Geotech Special Pub, 2010, **201**: 1 - 31.
- [16] 朱晟, 石高峰, 周建平. 碧口心墙堆石坝抗震复核分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 2954 - 2962. (ZHU Sheng, SHI Gao-feng, ZHOU Jian-ping. Analysis of seismic review of Bikou rockfill dam with earth core[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 2954 - 2962. (in Chinese))
- [17] SL 203—97 水工建筑物抗震设计规范[S]. 1999 (SL 203—97 Specification of for seismic design of hydraulic structures[S]. 1999. (in Chinese))
- [18] DL 5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S]. 2000. (DL 5073—2000 Specification of for seismic design of hydraulic structures[S]. 2000. (in Chinese))
- [19] GB 50×××—××××. 水工建筑物抗震设计规范(送审稿) [S]. (GB 50×××—××××. Specifications for seismic design of hydraulic structures(Draft)[S]. (in Chinese))
- [20] GB 50011—2010. 建筑抗震设计规范(S). (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. (in Chinese))
- [21] GB 50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 2008. (GB 50487 — 2008 Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower[S]. 2008. (in Chinese))
- [22] 刘小生, 赵剑明, 王钟宁, 等. 高土石坝抗震性能及抗震安全研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011. (LIU Xiao-sheng, ZHAO Jian-ming, WANG Zhong-ning, et al. Research on seismic performance and seismic safety of high embankment dams[R]. Beijing: China Institute of Water Resource and Hydraulic Research, 2011. (in Chinese))
- [23] 刘小生, 王钟宁, 汪小刚, 等. 面板坝大型振动台模型试验与动力分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 40 - 41. (LIU Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, WANG Xiao-gang, et al. Large scale table model tests and dynamic analysis of CFRD[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005: 40 - 41. (in Chinese))
- [24] 杨玉生, 刘小生, 赵剑明, 等. 土石坝坝体和地基液化分析方法与评价[J]. 水力发电学报, 2011, **30**(6): 94 - 101. (YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, ZHAO Jian-ming, et al. Methods for liquefaction potential evaluation of embankment and foundation and discussion on these methods[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, **30**(6): 91 - 108. (in Chinese))
- [25] 赵剑明, 刘小生, 陈宁, 等. 高心墙堆石坝的极限抗震能力研究[J]. 水力发电学报, 2009, **28**(5): 97 - 102. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, CHEN Ning, et al. Research on the maximum anti-seismic capability of high earth core rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, **28**(5): 97 - 102. (in Chinese))
- [26] 杨玉生, 刘小生, 赵剑明, 等. 标准贯入击数的挖填方校正方法研究[J]. 水力发电学报, 2014, **33**(1): 171 - 177. (YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, ZHAO Jian-ming, et al. Influence of excavation and filling on seismic liquefaction potential evaluation of foundation soils[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, **33**(1): 171 - 177. (in Chinese))
- [27] 刘启旺, 杨玉生, 刘小生, 等. 标贯击数液化判别方法的比较[J]. 地震工程学报, 2015(已录用). (LIU Qi-wang, YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, et al. Comparison of standard penetration test(SPT) method for evaluating seismic liquefaction potential[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015(Accepted). (in Chinese))