

高土石坝复合加筋抗震加固技术开发与应用

杨 星¹, 刘汉龙², 余 挺¹, 王晓东¹

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;
2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:针对高土石坝的抗震安全这一我国西部强震区水电开发中的重要问题,在总结以往高土石坝抗震措施优缺点的基础上,同时吸收柔性加筋材料(土工格栅)和刚性加筋材料(钢筋)在高土石坝抗震加固方面的优点,开发了一种高土石坝复合加筋抗震加固技术,并阐明了高土石坝复合加筋抗震加固技术的开发背景、结构形式及技术特点。通过大型振动台模型对比试验验证复合加筋抗震措施的有效性和可靠性,结果表明:与未加筋模型坝比较,复合加筋抗震加固技术能降低坝体地震永久变形,有效抑制坝顶堆石松动,具有一定的减震与隔震作用。该复合加筋抗震加固技术已在坝高295 m高的两河口心墙堆石坝抗震设计中得到应用。

关键词:高土石坝;抗震安全;复合加筋;抗震措施;振动台模型试验

中图分类号:TV641.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0069-06

Technological development of composite reinforcement aseismic measure for high earth rockfill dams and its application//YANG Xing¹, LIU Hanlong², YU Ting¹, WANG Xiaodong¹ (1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The aseismic safety of high earth rockfill dams is one of the key problems in hydropower development in western China, where strong earthquakes often occur. Based on a summary of advantages and disadvantages of previous aseismic measures for high earth rockfill dams, a composite reinforcement aseismic measure (CRAM) and the related construction method were developed. The CRAM also takes advantage of the strong aseismic performances of the flexible material (geogrid) and rigid material (steel bars). The development background, structural form, and technical features of the CRAM are introduced. The effectiveness and reliability of the CRAM were validated through comparative model tests using a large-scale shaking table. The results show that the CRAM can effectively decrease the earthquake-induced permanent deformation and inhibit the loosening of rockfill at the crest, and has certain effects on shock absorption and isolation. Finally, an engineering application of the CRAM in the aseismic design of the Lianghekou Earth Rockfill Dam, 295m in height, is introduced.

Key words: high earth rockfill dam; aseismic safety; composite reinforcement; aseismic measure; shaking table model test

我国80%的水能资源集中在西部地区,随着社会经济的发展和对能源需求的增加,必将在这些地方修建大量高坝以开发利用这些水能资源。土石坝具有选材容易、造价较低、结构简单、地基适应性强、抗震性能好等优点,是全世界水利水电工程建设广泛采用的一种坝型。然而,由于水能资源空间分布的限制,我国高土石坝大多修建在西部强震区,这些高土石坝不可避免地要经受强震考验。大库高坝一旦因地震溃决失事,其后果将是灾难性的。因此,开展高土石坝抗震措施研究,确保大库高坝的抗震安全,显得格外迫切和重要^[1]。

在高土石坝抗震设计中,坝顶是抗震设计的关键部位^[2],这主要基于以下两方面原因:①坝顶部的地震加速度响应最为强烈。高土石坝在地震中的“鞭鞘效应”会导致坝顶部堆石出现松动、滚落、坍塌、甚至局部浅层滑动,这些局部破坏可能会危及大坝的整体抗震安全;②坝顶部的地震沉降是坝体总沉降的主要部分。章为民等^[3,4]利用“5·12”汶川大地震紫坪铺面板堆石坝地震永久变形实测数据,引入分区震陷率的概念,论证了高土石坝震陷主要是由上部坝体地震沉降造成的。过大的地震沉降或不均匀沉降,会使坝体丧失部分超高或导致心墙开

裂,存在库水漫顶和防渗体破坏的风险。

汪闻韶^[5]院士曾明确提出“有效的工程抗震措施比理论计算更为可靠,地震变形分析比稳定分析更有意义”的土石坝抗震设计理论(思想)和原则。地震的不确定性和高土石坝的复杂性,使高土石坝抗震设计很大程度上还依赖于工程类比以及工程师们的经验和判断。目前,除了前苏联修建的努列克(Hypek)心墙堆石坝外,国内外缺乏 300 m 级高土石坝抗震设计经验。我国西部强震区在建、拟建的 300 m 级超高土石坝有多座,由于在国内外鲜有同类工程可资借鉴,这些高土石坝的抗震安全已成为我国西部水电开发最突出的问题,确保这些高土石坝的抗震安全是国家经济发展和社会公共安全的基础保障。因此,亟待开发适合我国西部地区特点的更加安全、可靠、实用、高效的高土石坝抗震加固技术。

1 开发背景

在以往的高土石坝坝顶抗震设计中,一般采取加宽坝顶宽度;在坝坡一定高程设置马道,并放缓马道以上高程坝坡的坡比;坝顶一定高程范围的上、下游坝壳堆石体铺设柔性加筋材料(土工格栅)或刚性加筋材料(混凝土框格梁、钢筋)等措施。加宽坝顶宽度和放缓坝坡毫无疑问会对提高土石坝抗震性能有利,但势必增加坝体填筑体积,增加工程造价。在坝顶一定高程范围内采用加筋结构是一种经济、有效的增强坝体抗震性能的措施,在国内外强震区修建的高土石坝工程中得到了广泛应用,已成为目前高土石坝抗震加固的最主要方法^[6]。

前苏联修建的努列克心墙堆石坝最大坝高 300 m,地处 9 度地震区,为了保证大坝的抗震安全,分别在上游坝壳内的 235 m、256 m、274 m 3 个高程设置抗震梁系,坝顶 292 m 高程再设置一层抗震梁系,连接上、下游坝壳。抗震梁系由长条形钢筋混凝土板和倒“T”形钢筋混凝土梁组成,长条板垂直于坝轴线铺设,板间距(中到中)为 9 m,倒“T”形梁平

行于坝轴线铺设,嵌搁在长条板上,梁间距(中到中)为 9 m,梁高 3 m(图 1^[7])。

我国许多高土石坝修建在西部高海拔的高寒山区,如冶勒沥青混凝土心墙堆石坝,最大坝高 124.5 m,设计地震烈度 9 度,坝址所在地区高寒多雨,气候环境恶劣。冶勒沥青混凝土心墙堆石坝原有抗震设计借鉴了前苏联努列克坝的抗震经验,在坝顶采用多层现浇钢筋混凝土抗震格梁。由于坝址所在地区气候环境恶劣,雨季和寒冷季节都很难进行混凝土浇筑,且钢筋混凝土格梁在浇筑完成后还需要一定时间,待其达到一定强度后才能进行坝料填筑,这将造成大量施工机械、台班和人员的闲置,严重制约大坝的施工进度。不管是现浇钢筋混凝土梁,还是预制钢筋混凝土梁,都存在投资费用高,施工工序复杂等问题,且重型碾压机械不能直接在梁上碾压,对大坝施工带来不利影响。此外,钢筋混凝土梁无法适应大坝建成之后的不均匀自然沉降和地震造成的不均匀永久变形。随着土工格栅加筋土技术在岩土工程和水利工程中的广泛应用,冶勒沥青混凝土心墙堆石坝在实际建造中采取了在坝顶部铺设多层土工格栅的抗震措施,如图 2^[8]所示。土工格栅作为高土石坝抗震体系的主要组成部分,在我国水利水电工程建设中尚属首例。此后,我国许多高土石坝坝顶均采用了铺设土工格栅的抗震措施,如 160 m 高的青峰岭水库主坝加固工程^[9],186 m 高的瀑布沟心墙堆石坝^[10]等工程。

虽然土工格栅在边坡、堤防及土石坝工程中得到广泛应用,但土工格栅属于柔性加筋材料,在土石坝坝顶铺设土工格栅的抗震措施,一般用于 200 m 级及以下的土石坝工程。2014 年 6 月完建的糯扎渡砾石心墙堆石坝,最大坝高 261.5 m,为目前国内已建成的最高土石坝,设计地震烈度 8 度,采取了在坝体 770.0 m 高程至坝顶 821.5 m 高程的上、下游坝壳堆体中埋设直径 20 mm 不锈钢钢筋网,坝面布设扁钢网的抗震措施^[11],糯扎渡心墙堆石坝坝顶抗

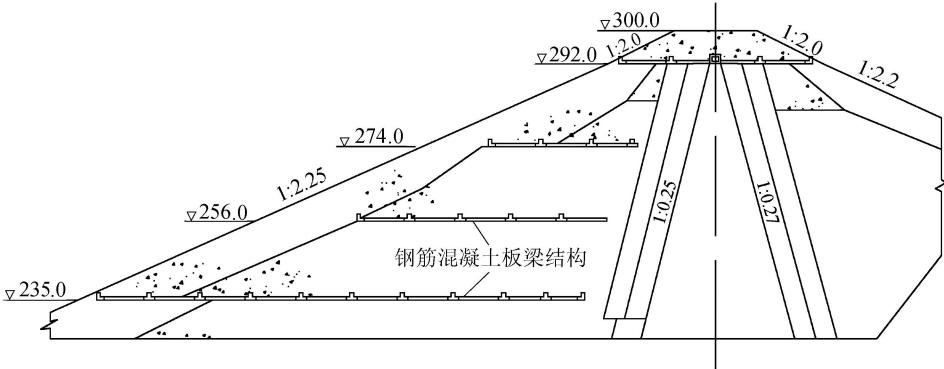


图 1 努列克高心墙堆石坝抗震梁结构(高程单位: m)

震钢筋现场施工情况见图3。

土工格栅和钢筋由于其自身材料性质和结构形式的不同,用于高土石坝抗震加固分别有其各自的优缺点,如表1所示。

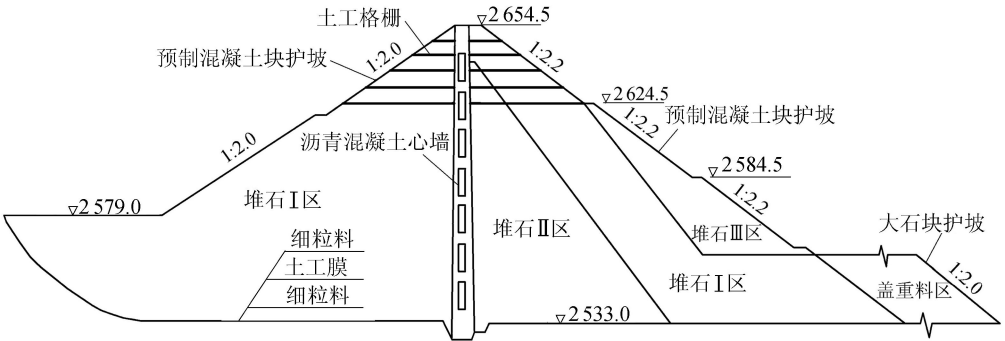


图2 土工格栅在冷沥青混凝土心墙堆石坝中的应用(高程单位: m)



图3 糯扎渡心墙堆石坝抗震钢筋现场施工

表1 土工格栅和钢筋用于高土石坝抗震加固优缺点对比

加筋材料	优 点	缺 点	代表性工程实例
土工格栅	筋材与堆石接触面大,界面摩擦力大;特有的网肋结构,使其与堆石嵌锁、咬合作用力强;施工便利,不受气候环境影响,不影响坝体填筑进度;费用较低	柔性材料,强度和刚度较钢筋低;重型机械碾压可能会造成筋材损伤	冷沥青心墙堆石坝 (坝高124.5 m)
钢 筋	筋材刚度大,强度高;碾压不会造成筋材损坏;施工便利,不受气候环境影响,不影响坝体填筑进度	筋材间距大,与堆石接触面小,摩擦力小;费用较高	糯扎渡心墙堆石坝 (坝高261.5 m)

2 结构形式

在岩土工程和水利工程领域,同时吸收几种工程技术的优点,形成一种新的工程技术不乏先例,例如,近年来在常规土钉墙基础上发展起来的新型基坑支护结构——复合土钉墙技术,该技术于2011年9月由我国住房和城乡建设部发布并列入国内外首部复合土钉墙技术规范^[12]。在同时吸收土工格栅和钢筋在高土石坝抗震加固方面优点的基础上,笔者开发了一种高土石坝复合加筋抗震加固技术及其施工方法,并获得国家发明专利授权^[13]。高土石坝复合加筋抗震加固技术主要构成包括:①钢筋;②土工格栅;③不锈钢扁钢网;④预制混凝土锚固端。高土石坝复合加筋抗震加固技术示意图及结构放大图分别如图4和图5所示(图中 H 为坝高)。

高土石坝复合加筋抗震加固技术主要技术特征在于:在 $3/4H \sim 4/5H$ 以上坝顶区域的上、下游坝壳堆石体中,根据堆石料碾压层数,每隔一定高程沿顺河向铺设一层钢筋,钢筋一端与预制混凝土锚固端

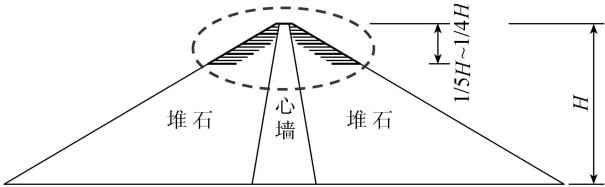


图4 高土石坝复合加筋抗震加固技术示意图

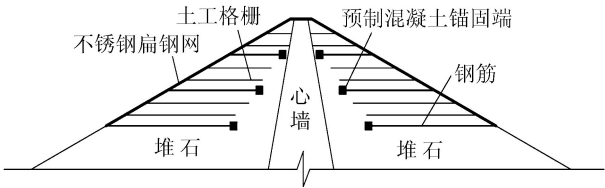


图5 高土石坝复合加筋抗震加固技术局部结构

相连,另一端与坝面不锈钢扁钢网相连;钢筋表面上浇沥青进行防锈处理;在竖向两层钢筋的堆石体中铺设土工格栅;坝面处土工格栅预留一定长度,待土工格栅上的堆石料填筑、碾压完成后,将坝面预留的土工格栅翻卷到碾压后的堆石体上,形成土工格栅包裹段;心墙顶面的钢筋贯穿整个堆石体,将上、下游坝面的不锈钢扁钢网相连。

3 技术特点

高土石坝复合加筋抗震加固技术主要具有以下技术特点:①同时吸收了柔性加筋材料(土工格栅)和刚性加筋材料(钢筋)在高土石坝抗震加固方面的优点,刚柔结合,施工方便,施工不受气候环境影响,不影响坝体填筑进度,不增加坝体尺寸;②坝壳堆石体内沿顺河向铺设的钢筋,通过一端连接坝内预制混凝土锚固端,一端连接坝面不锈钢扁钢网,对散粒体堆石料起到了锚固作用,相比在堆石体内布设钢筋网的抗震措施,工程造价低;③土工格栅通过与堆石料之间的界面摩擦作用,纵、横肋所形成的独特网孔结构与堆石料之间的嵌锁、咬合作用,以及坝面处的包裹段,限制了堆石料的侧向变形,提高了坝体抵抗地震变形的能力;④心墙顶面的钢筋贯穿整个堆石体,将上、下游坝面的不锈钢扁钢网相连,进一步将坝顶部散粒体堆石料约束成为一个整体,增强了坝体的抗震整体性;⑤钢筋表面上浇沥青进行防锈处理,避免了筋材因生锈老化导致抗震能力降低的问题;⑥高土石坝复合加筋抗震加固技术不需要现浇混凝土,尤其适合在我国水能资源分布丰富的西部高寒地区使用。

4 大型振动台模型试验

为了验证高土石坝复合加筋抗震加固技术的有效性和可靠性,开展了不同幅值、不同频率、不同持时的地震波作用下未加筋模型坝和复合加筋模型坝大型振动台对比模型试验。模型坝坝高 100 cm,上、下游坡比 1 : 1.7,坝顶宽 10 cm,级配依据某典型高土石坝的堆石料级配进行选配,最大粒径为 20 mm。模型坝主断面及主要仪器的布置见图 6。在模型坝坝顶 20 cm 范围(1/5 坝高)内采取复合加筋抗震加固技术,分别采用直径 2 mm 的镀锌铁丝、经编聚酯纤维(PET)和 1 mm 厚的铁条网模拟高土石坝复合加筋抗震加固技术中的钢筋、土工格栅和坝面不锈钢扁钢网,在坝顶部上、下游堆石体中共布置 5 层筋材,筋材的竖向间距为 4 cm,镀锌铁丝和经编聚酯纤维(PET)由下向上交替布置,即在 2 层镀锌铁丝之

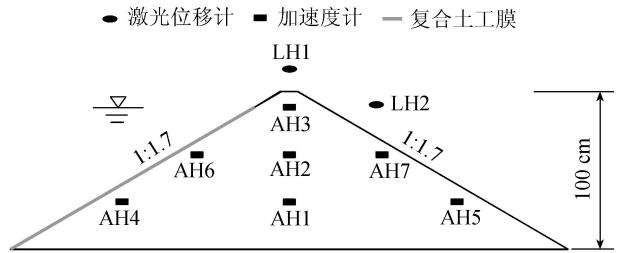


图 6 模型坝主断面及主要仪器布置示意图

间布置 1 层经编聚酯纤维,镀锌铁丝的水平向间距为 5 cm,顺河向最长铺设 20 cm,坝顶镀锌铁丝贯穿上、下游,将坝面铁条网相连。为考虑库水作用,在模型坝上游采用复合土工膜蓄水来模拟库水,蓄水高程为 80 cm。限于篇幅,只给出蓄水工况时,不同峰值的松潘波作用下,未加筋模型坝和复合加筋模型坝的部分试验成果,其中模型试验输入的松潘波如图 7 所示,填筑完成后的未加筋模型坝和复合加筋模型坝如图 8 所示。

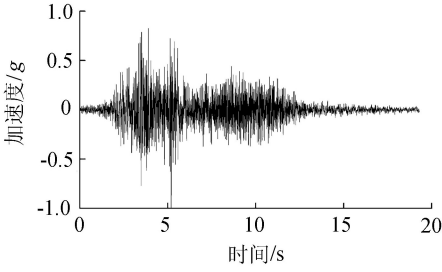


图 7 输入的松潘波加速度时程



(a) 未加筋模型坝 (b) 复合加筋模型坝

图 8 填筑完成后的模型坝

图 9 为 0.5g 松潘波作用下,未加筋模型坝和复合加筋模型坝坝顶激光位移计监测的坝顶竖向永久位移时程曲线,由图 9 的位移时程曲线可知,坝体在振动过程中都产生了不可恢复的竖向永久变形,并在地震波能量主要集中的时间段(约 3 ~ 12 s,见图 7)竖向永久变形迅速增加,随着地震波能量的减弱,永久变形趋于稳定,但复合加筋模型坝的坝顶竖向永久位移明显小于未加筋模型坝。同时还可以看出,未加筋模型坝的坝顶竖向位移时程曲线在振动

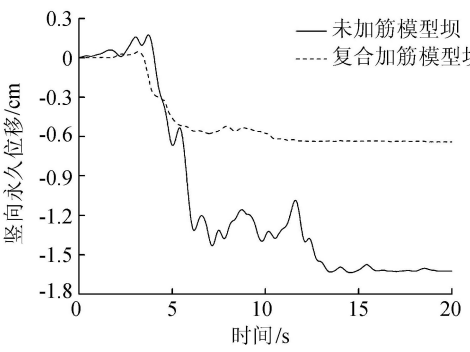


图 9 坝顶竖向永久位移时程曲线

过程中出现了较大的波动,其原因是在较强振动过程中未加筋模型坝坝顶堆石颗粒出现了松动、隆起,但总的变形是产生不可恢复的竖向沉降。

图 10 为不同峰值的松潘波作用下,未加筋模型坝和复合加筋模型坝坝顶累积沉降随输入加速度峰值的变化。由图 10 可以看出,未加筋模型坝和复合加筋模型坝坝顶累积沉降随输入加速度峰值的增加均呈现非线性增大,但复合加筋抗震加固技术较未加筋可有效减小坝顶沉降,且随着输入加速度峰值的增加,复合加筋抗震加固技术对减小坝顶沉降的贡献增大,0.3g 时复合加筋抗震加固技术较未加筋减小 41.7%,0.5g 时复合加筋抗震加固技术较未加筋减小 55.0%,说明复合加筋抗震加固技术非常适合于强震区高土石坝的抗震加固。

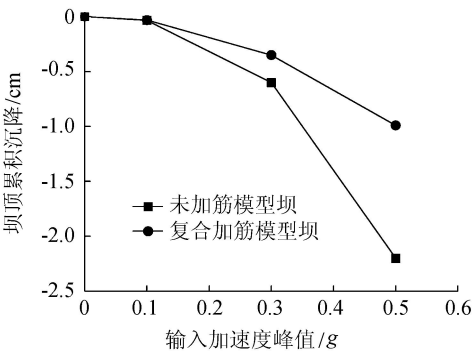


图 10 坝顶累积沉降与输入加速度峰值的关系

图 11 为 0.5g 松潘波作用下,未加筋模型坝和复合加筋模型坝加速度放大系数沿坝高的分布。由图 11 可见,未加筋模型坝和复合加筋模型坝加速度放大系数沿坝高的分布呈现相同的变化规律,均随坝高的增加而增大,并在坝顶部增加迅速,但采取复合加筋抗震措施后,坝顶加速放大系数小于未加筋模型坝坝顶加速度放大系数,这与南京水利科学研究院王年香等^[14-15]采用离心机振动台进行长河坝坝顶土工格栅抗震加固模型试验得出的结论一致。Kim 等^[16]开展的土石坝离心机振动台模型试验发现坝顶堆石振松后加速度放大系数会显著增大,复合加筋抗震加固技术能有效限制坝顶堆石料松动,

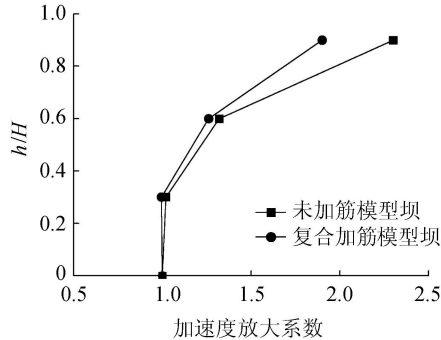


图 11 加速度放大系数沿坝高分布

从而降低了坝顶加速度的放大效应,即复合加筋抗震加固技术具有一定的减震和隔震作用。

5 工程应用

我国在建的两河口水电站位于四川省甘孜州雅江县境内的雅砻江干流上,电站水库为雅砻江中、下游的龙头水库,水库的正常蓄水位为 2865.00 m,相应库容为 101.54 亿 m³,校核洪水位为 2870.34 m,总库容为 107.77 亿 m³,电站装机容量为 3000 MW。拦河大坝采用砾石土心墙堆石坝,最大坝高 295 m,坝顶宽度 16 m,上、下游坝坡坡比分别为 1:2.0 和 1:1.9,防渗心墙顶宽 6 m,心墙上、下游坡比均为 1:0.2。该工程为一等大(1)型工程。根据国家地震局场地安全性评价成果,并经国家地震安全性评定委员会审定,工程场地地震基本烈度为 7 度,100 年超越概率 2% 的基岩水平峰值加速度为 287.8 cm/s²。

两河口心墙堆石坝属于 300 m 级超高土石坝,坝址所处地区为我国西部强震区,因此,其抗震安全问题尤为突出。鉴于工程的重要性,两河口高心墙堆石坝的抗震设计采用了复合加筋抗震加固技术,即在坝体 2820.0 m 高程至坝顶范围的上、下游坝壳堆石料、过渡料及反滤料内铺设水平钢筋和土工格栅,其中钢筋和土工格栅沿顺河向最长铺设长度为 30 m,不足 30 m 的伸至心墙外表面,钢筋直径为 20 mm,竖向层距为 3 m,水平向间距为 1 m,并在钢筋外表面上浇沥青进行防锈处理,竖向 2 层水平钢筋之间铺设 2 层土工格栅,其层距为 1 m,如图 12 所示^[17-18]。

6 结 语

由于我国水能资源空间分布的限制,我国高土石坝大都修建在西部强震区,抗震安全问题是我国高土石坝建设最突出的问题之一。笔者在总结以往高土石坝抗震措施优缺点的基础上,开发了一种高土石坝复合加筋抗震加固技术,通过大型振动台模型对比试验验证了复合加筋抗震加固技术的有效性和可靠性,并应用于 295m 高的两河口砾石土心墙堆石坝抗震设计中,为我国西部强震区在建和拟建的高土石坝的抗震设计提供了借鉴和参考。

高土石坝的抗震设计是一个复杂的岩土工程问题,涉及工程场地未来可能地震活动性评价,坝体及坝基材料静、动力条件下的物理性质和力学性能确定等许多复杂问题,强震区修建的高土石坝除特别重视坝顶的抗震安全外,高土石坝抗震设计涉及坝体结构与材料分区、坝料设计与填筑标准、坝坡坡比与坝面护坡、坝顶超高与坝基处理等诸多方面,高土

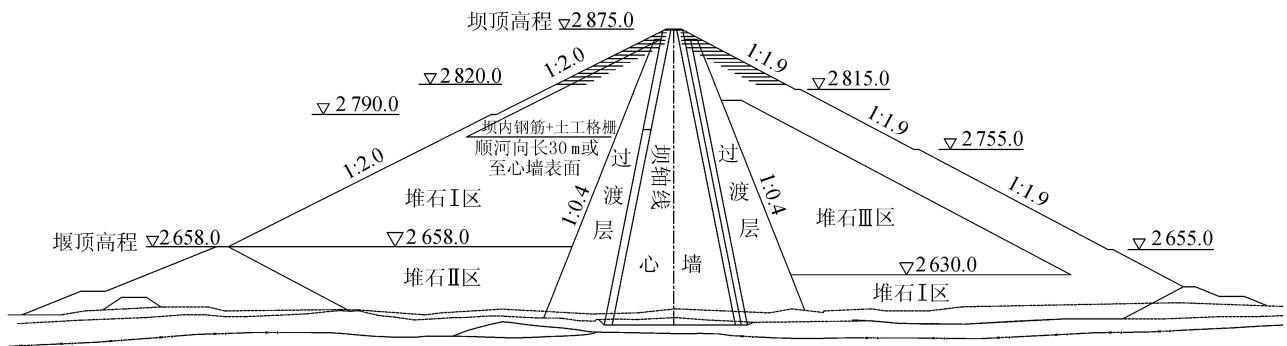


图 12 复合加筋抗震加固技术在两河口高土石坝中的应用(高程单位:m)

石坝复合加筋抗震加固技术应与其他方面的抗震设计相结合,共同保证大坝的抗震安全。

参考文献:

- [1] 杨星,刘汉龙,余挺,等.高土石坝震害与抗震措施评述[J].防灾减灾工程学报,2009,29(5):583-590. (YANG Xing, LIU Hanlong, YU Ting, et al. Review on seismic disasters and aseismatic measures of high earth and rockfill dams[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(5): 583-590. (in Chinese))
- [2] 孔宪京,邹德高,邓学晶,等.高土石坝综合抗震措施及其效果的验算[J].水利学报,2006,37(12):1489-1495. (KONG Xianjing, ZOU Degao, DENG Xuejing, et al. Comprehensive earthquake resistant measure of high earth-rockfill dams and effectiveness verification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1489-1495. (in Chinese))
- [3] 章为民,陈生水.紫坪铺面板堆石坝汶川地震永久变形实测结果分析[J].水力发电,2010,36(8):51-53. (ZHANG Weiming, CHEN Shenshui. Analysis on permanent deformation monitoring date of Zipingpu Concrete Faced Rockfill Dam after Wenchuan earthquake[J]. Water Power, 2010, 36(8): 51-53. (in Chinese))
- [4] 章为民,王年香,顾行文,等.土石坝坝顶加固的永久变形机理及其离心模型试验验证[J].水利水电工程学报,2011(1):22-27. (ZHANG Weiming, WANG Nianxiang, GU Xingwen, et al. Deformation mechanism study of top reinforcement of the earth-rockfill dam and its verification by the centrifuge model test[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(1): 22-27. (in Chinese))
- [5] 汪闻韶.土石填筑坝抗震研究[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [6] 李红军,迟世春,林皋.高心墙堆石坝坝坡加筋抗震稳定分析[J].岩土工程学报,2007,29(12):1881-1887. (LI Hongjun, CHI Shichun, LIN Gao. Aseismic stability analysis for reinforced slopes of high core rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1881-1887. (in Chinese))
- [7] 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.
- [8] 李道山,肖峰.两岸土石坝加固技术及加筋砾石料的应力应变特性研究[D].南京:河海大学,2006.
- [9] 冉从勇,朱先文,卢羽平.瀑布沟水电站砾石土心墙堆石坝的抗震设计[J].水电站设计,2011,27(3):26-30. (RAN Congyong, ZHU Xianwen, LU Yuping. Aseismic design of Pubugou Hydropower Station gravelly soil core rockfill dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2011, 27(3): 26-30. (in Chinese))
- [10] 雷红军,冯业林,刘兴宁.糯扎渡高心墙堆石坝抗震安全研究与设计[J].大坝与安全,2013(1):1-4. (LEI Hongjun, FENG Yelin, LIU Xingning. Research and design of anti-seismic safety of Nuozadu High Core Wall Rock-fill Dam[J]. Dam and Safety, 2013(1): 1-4. (in Chinese))
- [11] GB50739—2011 复合土钉墙基坑支护技术规范[S].
- [12] 杨星,刘汉龙,余挺,等.一种高土石坝抗震结构及其施工方法:ZL201110122191.5[P].2011-11-30.
- [13] 王年香,章为民,顾行文,等.长河坝动力离心模型试验研究[J].水力发电,2009,35(5):67-70. (WANG Nianxiang, ZHANG Weimin, GU Xingwen, et al. Dynamic centrifuge model test for Changhe Dam[J]. Water Power, 2009, 35(5): 67-70. (in Chinese))
- [14] 陈生水.土石坝试验新技术研究与应用[J].岩土工程学报,2015,37(1):1-28. (CHEN Shengshui. Experimental techniques for earth and rockfill dams and their applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 1-28. (in Chinese))
- [15] KIM M K, LEE S H, CHOO Y W, et al. Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(11): 1579-1593.
- [16] 陈云华.两河口水电站特高心墙堆石坝关键技术问题研究[C]//李菊根,贾金生,艾永平,等.中国大坝协会2013学术年会暨第三届堆石坝国际研讨会论文集.郑州:黄河水利出版社,2013:545-554.
- [17] 余挺,胡永胜,余学明,等.四川省雅砻江两河口水电站可行性研究报告(6):工程布置及建筑物(审定稿)[R].成都:中国水电顾问集团成都勘测设计研究院有限公司,2013. (收稿日期:2015-09-25 编辑:郑孝宇)