

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.04.008

高土石坝 Hardfill 新型抗震加固措施

曹学兴^{1,2},何蕴龙²,迟福东¹,余记远¹,熊 堃³

- (1. 华能澜沧江水电股份有限公司,云南 昆明 650214;
2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;
3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司,湖北 武汉 430010)

摘要:针对现有土石坝坝顶抗震加固措施存在的一些问题,提出一种利用 Hardfill 材料对高土石坝进行抗震加固的新措施,并采用极限平衡法和动力有限元时程法,对这种抗震加固措施在高土石坝抗震工程中应用的效果与可行性进行研究。分析该措施对坝体抗滑稳定性、永久变形与材料动强度安全性的改善效果;通过分析大坝的加速度、应力和变形状况,研究 Hardfill 加固措施是否对大坝存在不利影响。结果表明:Hardfill 抗震加固措施对增强坝体的整体稳定性、抑制坝体永久变形有较明显的效果,提高了反滤料和心墙料的动强度安全系数,不会对大坝的运行带来不利影响。
关键词:高土石坝;抗震加固措施;Hardfill 材料;坝坡稳定;永久变形;动强度安全系数
中图分类号:TV641.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2020)04-0340-07

A new type aseismic reinforcement measures of high earth and rockfill dam using Hardfill

CAO Xuexing^{1,2}, HE Yunlong², CHI Fudong¹, YU Jiyuan¹, XIONG Kun³
(1. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650214, China;
2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Changjiang Survey Planning Design and Research LLC., Wuhan 430010, China)

Abstract: In allusion to the problems in anti-seismic measures for the crest of earth and rockfill dam, a new kind of seismic strengthening measure has been put forward with the Hardfill materials. The rigid-body limit equilibrium method and dynamic finite element method were used to calculate and analyze the effect of Hardfill seismic strengthening measure in high rockfill dam. Improvements on the stability of dam against sliding, permanent deformation and dynamic strength of materials had been discussed using the Hardfill aseismatic reinforcement. In addition, adverse effects of Hardfill were studied by calculating the acceleration, stress and deformation of the dam. The results indicate that the Hardfill reinforcement will enhance the overall stability, inhibit permanent deformation significantly, and improve the dynamic strength safety coefficient, without adverse effect to the operation of the dam.
Key words: high earth and rockfill dam; seismic strengthening measure; Hardfill materials; slope stability; permanent deformation; dynamic strength safety coefficient

模型试验与实际工程震害都显示,由于坝体结构对地震波的放大效应,土石坝坝顶加速度反应往往较大,大坝震害破坏多从坝顶部开始^[1-4],震害主要表现为:永久变形与裂缝、滑坡以及液化等形式^[5-7]。高 156 m 的紫坪铺大坝在经历“5.12”汶川地震后^[8-9],大坝最大断面坝顶附近产生了约 100 cm 的震陷,坝顶路面和坝顶下游人行道产生了最大宽度为 63 cm 的开裂,防浪墙与坝顶路面出现宽度达 3 cm 的开裂,坝顶路面

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407105,2018YFC0407003);云南省创新团队项目(2016HC001)
作者简介: 曹学兴(1984—),男,高级工程师,博士,主要从事高坝结构抗震研究。E-mail:caoxxxing@163.com
引用本文: 曹学兴,何蕴龙,迟福东,等. 高土石坝 Hardfill 新型抗震加固措施[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):340-346.
CAO Xuexing, HE Yunlong, CHI Fudong, et al. A new type aseismic reinforcement measures of high earth and rockfill dam using Hardfill [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(4): 340-346.

与两岸坡出现最大 20 cm 的不均匀沉降。针对土石坝坝顶出现的震害,高地震烈度区的土石坝一般采取一些抗震措施以加强坝顶结构的安全性,如坝顶超高、加宽坝顶及对坝顶局部进行加固等。尤其是对于高土石坝,在地震反应中高阶振型参与量增大,坝顶更容易发生破坏,在坝顶局部采取加固措施是十分必要且比较经济。目前实际工程中应用较多的抗震措施有土工格栅加筋材料、混凝土护面板或混凝土框格梁联合坝内钢筋等加固方式。这 2 种措施都可以提高局部土体强度,增强坝体整体稳定性^[1,10-12],但应用过程中仍存在问题。土工格栅主要应用于路堤、边坡、堤坝等工程中,在土石坝的堆石体中铺设土工格栅,经大型振动机械碾压后,容易造成格栅断裂,同时土工格栅属于柔性抗震体系,一般多用于 200 m 以下的土石坝中,此外,土工格栅的老化和耐酸碱腐蚀等也是需要研究的问题^[5,13]。对于混凝土护面板或混凝土框格梁联合坝内钢筋加固措施,由于深入坝体的钢筋表面没有保护层,首先存在的问题就是钢筋的锈蚀,此外施工过程中混凝土浇筑后要有一个龄期,待其达到一定强度后方能进行坝料填筑,这在很大程度上制约了筑坝的施工进度^[6],并且这种抗震加固方式在坝体发生变形后修复困难。

沈珠江等^[14]曾对放缓坝坡、加拉条和 1/5 坝高以上用碾压混凝土 3 种抗震加固措施进行研究,得出在坝顶使用碾压混凝土加固方案效果最明显。Hardfill 材料本质是一种超贫碾压混凝土,但跟常规碾压混凝土相比,具有施工工艺简单、造价低廉、加固方案对大坝填筑的正常施工干扰小等优点。本文提出利用 Hardfill 材料对土石坝坝顶进行抗震加固,并对这种新型措施进行了论证分析。

1 Hardfil 材料

Hardfill 材料为在坝址附近易于得到的河床砂砾石或开挖弃渣等材料中加入水和少量水泥,经简单拌合而获得的一种新型筑坝材料,在国际上被普遍称为 Hardfill 材料^[15]。

1.1 Hardfill 材料的基本特点^[16-17]

- a. 它是由胶凝材料将粗细骨料胶结而成的人造石材,采用碾压的施工方式。
- b. 胶凝材料用量很少,一般水泥用量在 50 kg/m³,还可掺入粉煤灰替代部分水泥,仅仅要求能达到基本的胶结。
- c. 骨料主要来自坝址附近的天然河床砂砾石和开挖弃料等廉价易得的石料,除水溶性岩石外,其余石材均可,一般直接使用统货骨料,无需调整级配,仅限制最大骨料粒径,以单价最低为设计目标。
- d. 在胶凝材料用量一定的前提下,以最大压实密度为质量控制的目标。
- e. 由于胶凝材料用量少,为获得拌和物的可碾压性,需要加大用水量,故水胶比较大,一般为 0.95 ~ 1.50。
- f. 胶凝材料不足以填满骨料的空隙,空隙较多,为获得更大的压实密度和提高拌和物的可碾压性,在不调整级配的前提下,一般通过掺入细骨料来实现。少量的胶凝材料和大量的细骨料微粒组成富裕的浆体,使 Hardfill 材料具有足够的和易性和抗分离的能力,同时也能达到足够的压实密度。

1.2 Hardfill 材料的力学特性

试验得出的 Hardfill 材料的力学性质有一定差异,这与骨料的质量、水泥用量、试件的大小均有一定关系,但各组试验所得出的材料应力-应变关系具有共性,与混凝土类似,应力-应变关系可分为 3 个阶段:线弹性阶段、非线性阶段、软化阶段。但与混凝土相比,Hardfill 材料峰值强度对应的应变较大、软化段较长,反映了其延性较混凝土显著。在循环荷载作用下,当荷载小于材料的弹性极限强度时,Hardfill 材料的应力-应变关系明显为线性,一旦荷载超过弹性极限强度,材料进入非线性阶段,并且表现出明显的残余变形。

根据试验结果,Hardfill 材料 90 d 龄期抗压强度为 4 ~ 6 MPa,抗拉强度一般为抗压强度的 1/7 ~ 1/10,抗剪断凝聚力一般为 0.4 ~ 1.0 MPa,抗剪断摩擦系数 0.8 ~ 1.1,各项指标均低于 C10 标号混凝土的强度标准。

1.3 Hardfill 材料的施工工艺

Hardfill 材料的生产工序如图 1 所示,其施工碾压工艺与 RCC 坝碾压工艺类似,平仓分层碾压。相比于混凝土,Hardfill 材料的生产取消了采石场和昂贵的骨料级配调整工序,拌合也采用简易的无动力连续拌合设备。便利的施工工艺使 Hardfill 材料应用于土石坝抗震工程中具有明显优势。

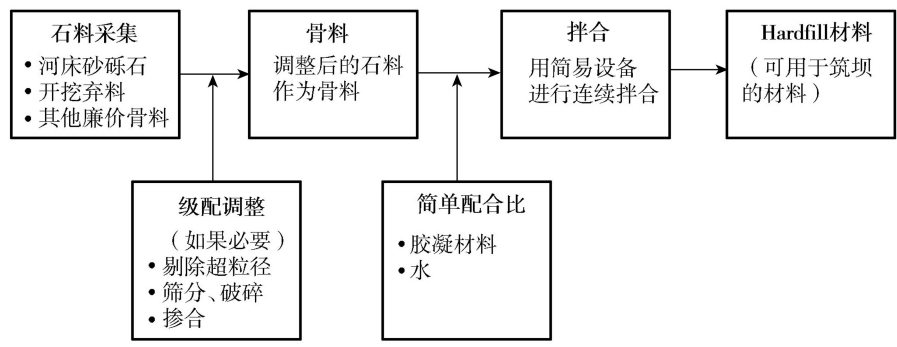


图1 Hardfill 材料的生产工序

Fig.1 Producing process of Hardfill materials

2 Hardfill 材料抗震措施

2.1 设想提出

在强震的作用下,高土石坝坝顶的堆石最容易失去平衡而发生松动、滑落甚至会坍塌,因此高土石坝的坝顶部位是抗震设计的关键部位。国内外有较多将水泥土及碾压混凝土成功应用于土石坝工程中的实例。1951 年美国首先在 Bonny 坝试验段坝面铺设了 1.2 m 厚的水泥土作大坝护坡,经 10 a 严密观测,证明效果良好。1963 年初竣工的厄特坝,成为用水泥土代替块石进行上游护坡的第一座大坝。Brownwood Country Club 坝是美国第一座用碾压混凝土把土坝改造成可以溢洪的过水土坝,自 1984 年修复完成后,工程经过 6 次洪水漫顶考验,坝顶最大水深约 0.3 m,仍安全无恙。1984 年对有溃坝危险的 Kerrville Ponding 坝利用碾压混凝土进行了加固,加固后大坝承受住了 50 年一遇和百年一遇洪水的考验,坝体未出任何事故。同时,美国也使用水泥土及碾压混凝土进行高危土石坝的加高中,以提高大坝的防洪能力,如建于 1951 年的沃茨大坝。日本东京附近 1927 年建成的 Murayama-Shimo 坝,坝高 32.6 m,在坝顶及附近还铺设了 2.0~2.5 m 厚的混凝土防护层以保护心墙和土坝不被空袭炸坏^[10]。作为一种与水泥土及贫碾压混凝土类似的材料,Hardfill 材料应当也可以应用于土石坝抗震工程,以减小地震过程中坝体永久变形、提高坝坡的抗滑能力。本文提出坝顶 Hardfill 材料加固措施,其既具有较好抗震效果,又最大程度降低了对坝体防渗体系的影响(图 2)。

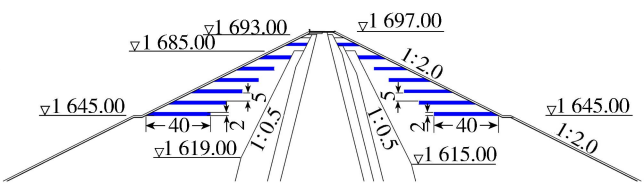


图2 坝顶 Hardfill 材料加固措施示意图(单位:m)

Fig.2 Reinforcement measures with Hardfill materials for dam crest (units: m)

2.2 加固机理分析

从宏观角度,将 Hardfill 材料和土石体看作各向异性的复合材料。从该角度分析,在没有加固时,土石体的侧向变形主要靠周围土石体的约束,而土石体中加入了高弹性模量的 Hardfill 材料后,其侧向变形的约束被加大,从而为周围土石体提供了一个附加的围压,有效地降低了其承受的偏应力,此时,Hardfill 材料与土石体之间的相互作用可以等效为土石体抗剪强度的提高。

从微观角度,在用 Hardfill 材料加固的土石体中,当加固的复合体结构发生滑动破坏时,在复合体中将出现滑动区和稳定区。如图 3 所示,滑动区内土石体自重产生的水平推力 T 和地震惯性力将在 Hardfill 材料区域内形成拉力,有将 Hardfill 材料从土石体内拔出的趋势,而稳定区的 Hardfill 材料受土石体的摩阻力阻止其被拔出,当拉力和摩阻力平衡时整个复合体的稳定性将得到保证。

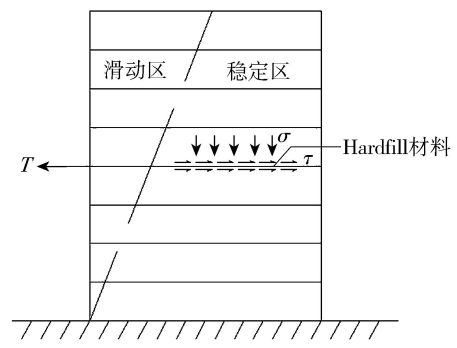


图3 Hardfill 材料加固机理示意图

Fig.3 Illustrative diagram of reinforcement mechanism with Hardfill materials

Hardfill 材料加固土石体的效果应表现为宏观和微观加固的综合效果,在复合体稳定分析中,同时存在由 Hardfill 材料与堆石体之间的摩阻力引起的抗拉力和 Hardfill 材料引起的复合材料强度提高的综合影响。

2.3 Hardfill 材料加固措施的优点

Hardfill 材料取消了骨料的级配调整,生产工序大大简化,施工工艺粗放,可采用大型土石方施工工艺实现机械化快速施工;与土石坝采用相同施工机械不但保证了施工速度,也降低了工程造价。Hardfill 材料放宽了骨料的选择范围,可以充分利用河床开挖冲积料,或附近石料场的软岩,而对胶凝材料的要求大大降低,因此材料单价一般为碾压混凝土单价的一半甚至更低,具有较好的经济指标。所以 Hardfill 抗震措施不仅能够起到加强坝顶结构、增强大坝整体性与稳定性的作用,而且可以充分发挥其施工简便快速、造价低廉、与土石坝施工无干扰、耐久性更好等优点,不仅能够增强工程的安全性,也能带来较为显著的经济效益,实现高土石坝坝顶抗震加固技术的革新。

3 工程实例

采用极限平衡法和动力有限元时程法,研究 Hardfill 抗震加固措施在某高土石坝抗震工程中应用效果。建立大坝及坝基有限元模型,进行静力分析,模拟坝体分层填筑过程与水库蓄水过程,将坝体和坝基静力分析结果作为时程法地震动力分析的初始状态,采用等效线性法进行大坝和地基的地震动力分析。根据大坝动力分析成果,考虑地震过程中坝体应力的瞬时变化,分析每一时刻大坝坝坡抗滑稳定安全系数,利用 Newmark 法计算在地震作用下坝体永久变形发展状况。

3.1 工程概况与有限元模型

某高砾石土心墙堆石坝,最大坝高 240 m,大坝上游、下游坝坡均为 1 : 2.0。大坝建于深厚覆盖层地基上,覆盖层厚 65 ~ 70 m,采用混凝土防渗墙防渗。坝址区地震基本烈度为 8 度 ,大坝设防烈度为 9 度。根据 Hardfill 材料布设的形式建立有限元模型,如图 4 所示。有限元模型中模拟了坝体材料分区,具体包含:坝顶 Hardfill 材料、堆石料、过渡料、反滤料、心墙料、覆盖层及部分基岩。

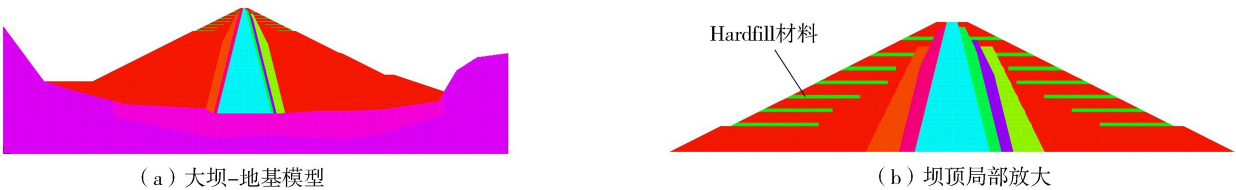


图 4 有限元模型
Fig.4 Finite element model

3.2 材料参数与输入地震波

土石材料在静力计算中采用邓肯 E-B 双曲线模型,动力计算中土石材料采用 Hardin 模型,材料静动力学参数见文献[18]。Hardfill 材料暂按线弹性模型模拟,在静力计算中 Hardfill 材料弹模取 8 GPa,泊松比为 0.2,密度为 2.3 g/cm³。动力计算中,动弹模在静弹模的基础上提高 30%,阻尼比取 0.1。坝址区基岩水平峰值加速度取 100 a 超越概率 2% 的值即 0.359g。本文利用安全性评价场地谱拟合的时程地震波进行动力反应分析,通过 SHAKE91 程序反演后进行地震动输入。计算地震时长 30 s,时间步为 0.02 s。各方向地震波时程如图 5 所示。

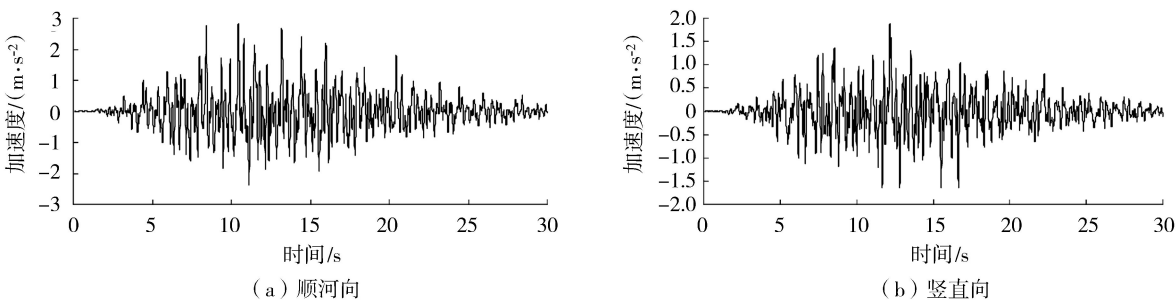


图 5 安全性评价场地谱地震波加速度时程曲线
Fig.5 Accelerograms in transverse and vertical direction of field spectrum for seismic safety evaluation

3.3 Hardfill 加固措施抗震效果验算

3.3.1 坝坡抗滑稳定性分析

3.3.1.1 拟静力法

采用拟静力法计算坝体在地震作用下采取 Hardfill 抗震措施前后上游、下游坝坡的稳定安全性,各个最危险的滑裂面位置如图 6 所示。

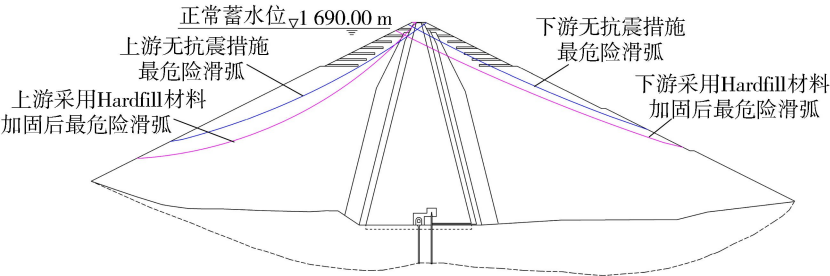


图 6 坝体采用 Hardfill 抗震措施前后最危险滑裂面位置

Fig. 6 Most dangerous sliding-surface position with and without Hardfill aseismic reinforcement measures

从图 6 得到:未采取抗震措施时坝体最危险滑动面较浅,而采用 Hardfill 抗震措施后,最危险滑动面位置向坝体内部移动,上游、下游最危险滑动面都没有穿过布置抗震措施区域,说明 Hardfill 抗震措施可以有效抑制坝坡的浅层滑动。未采取抗震措施时,坝体上游、下游坝坡最危险滑动面的最小安全系数分别为 1.275 和 1.322;采用 Hardfill 抗震措施后上游、下游坝坡最危险滑动面的最小安全系数为 1.322 和 1.344,分别提高了 4.0% 和 1.66%。

3.3.1.2 动力有限元时程法

动力有限元时程法可考虑地震过程中坝体应力的瞬时变化,计算出每一时刻坝坡抗滑稳定安全系数^[19]。图 7 为利用动力有限元时程法计算得到的有 Hardfill 材料或无 Hardfill 材料抗震措施情况下,上游、下游坝坡稳定安全系数随时间变化的时程曲线(上限值取 5)。未采取抗震措施时,上游、下游坝坡稳定安全系数小于 1 的累积时刻分别为 2.56 s 和 2.76 s,小于 1.2 的累积时刻分别为 4.80 s 和 4.16 s。采用 Hardfill 抗震措施后,上游、下游坝坡稳定安全系数小于 1 的累积时刻分别为 1.65 s 和 1.79 s,小于 1.2 的累积时刻分别为 3.15 s 和 2.73 s,较无抗震措施情况下小于 1 的累积时刻分别减少了 35.5% 和 35.1%,小于 1.2 的累积时刻分别减少了 34.4% 和 34.4%。

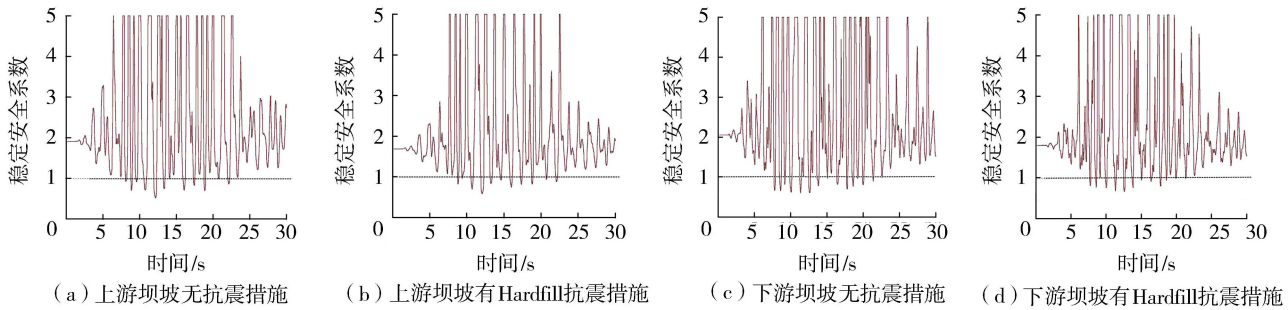


图 7 上游、下游坝坡稳定安全系数时程曲线

Fig. 7 History curves of stability safety coefficient in upstream and downstream

3.3.2 大坝地震永久变形分析

图 8 给出了在地震过程中,坝体上下游永久变形的发展过程。未采取抗震措施时上游、下游最危险滑动体的累积滑动位移分别为 1.484 m 和 1.165 m,采用 Hardfill 抗震措施后累积滑动位移上下游分别为 0.915 m 和 0.442 m,分别减少了 38.3% 和 62.1%。可见采用 Hardfill 抗震措施可明显地降低坝体的地震永久变形。

3.3.3 坝体动强度分析

为分析 Hardfill 抗震措施对坝体动强度的影响,绘制上游反滤层和心墙动强度安全系数 k 沿坝高的分布情况,见图 9。由图 9 可以看出,采用 Hardfill 抗震措施后,上游反滤料和心墙的动强度安全系数都有所增大,尤其是心墙动强度安全系数得到较大幅度的提高,最大提高 39.2%。对反滤料动强度安全系数影响较小。

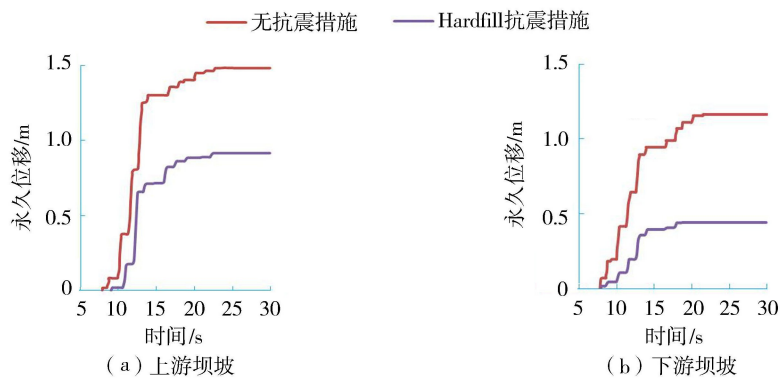


图 8 地震过程中坝体的永久变形

Fig. 8 Permanent deformation curves of dam during earthquake

3.4 Hardfill 加固措施对坝体动力反应的影响

3.4.1 对坝体加速度及动位移反应的影响

有限元计算显示,未布置抗震措施时坝体最大顺河向加速度为 10.61 m/s^2 ,放大倍数为 3.02;采用 Hardfill 抗震措施后坝体最大顺河向加速度为 8.03 m/s^2 ,放大倍数为 2.28。未布置抗震措施时坝体最大顺河向动位移为 26.9 cm,布置 Hardfill 抗震措施后坝体最大顺河向动位移为 24.57 cm。由于 Hardfill 材料布置于坝顶局部,使坝顶局部区域的刚度变大,降低了坝体顶部的动力反应,而对坝体整体质量和刚度影响较小,对布置抗震措施以外坝体动力反应影响较小。

3.4.2 对动应力反应的影响

针对 Hardfill 材料和坝体土石料刚柔结合,能否适应坝体变形、是否会导致坝体在静力及地震中出现裂缝,以及材料本身是否会出现断裂等疑问,通过有限元计算分析了坝体动静叠加后顺河向和竖直向最大正应力状况,计算结果表明:采用 Hardfill 抗震措施,对加固范围外的应力影响很小,对加固范围内的应力分布有一定的影响。较没有加固措施时的坝体应力分布,采用 Hardfill 抗震措施后,坝体上游、下游 Hardfill 材料区域内产生了一定的应力集中。在上游、下游 Hardfill 材料条块内,顺河向和竖直向都产生了拉应力,但拉应力值与拉应力区均较小,其中顺河向最大拉应力值为 0.46 MPa ,竖直向最大拉应力为 0.11 MPa ,均小于 Hardfill 材料的抗拉强度。

4 结 论

- a. Hardfill 抗震加固措施可使坝坡最危险滑裂面向坝体内部深入转移,有效的抑制坝坡的浅层滑动和坝坡滚石,可使上游、下游坝坡稳定安全系数小于 1 的持时分别减少 35.5% 和 35.1%。
- b. Hardfill 抗震加固措施可以显著的抑制坝体的永久变形,使坝坡上游、下游永久变形分别减少了 38.3% 和 62.1%。
- c. Hardfill 抗震加固措施可以提高坝顶附近材料动强度安全系数,使心墙动强度安全系数最大可以提高 39.2%。
- d. Hardfill 加固措施对增强坝体的整体稳定性、抑制坝体永久变形有较明显的效果,对坝体整体的应力变形并没有明显的不利影响,由于 Hardfill 材料施工工艺简单、造价低廉,加固方案的实施对大坝填筑的正常施工干扰很小,施工便利,因此 Hardfill 抗震加固措施在高土石坝抗震工程中具有较大应用价值。

参考文献:

[1] 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

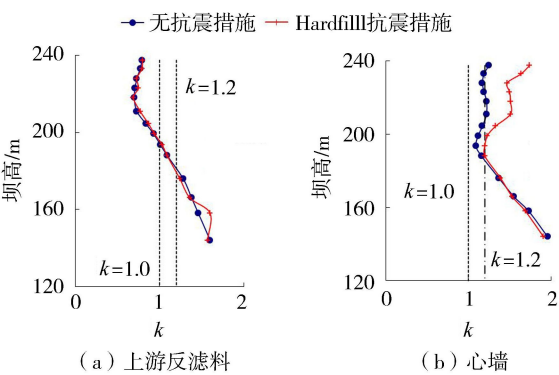


图 9 动强度安全系数沿坝高的分布

Fig. 9 Dynamic strength safety factor along the height of dam

- 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)
- [2] WANG Renkun, CHEN Lin, ZHANG Chong. Seismic design of Xiluodu ultra-high arch dam[J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(4): 288-301.
- [3] ZOU Degao, LIU Jingmao, KONG Xianjing, et al. A simple permanent deformation model of rockfill materials[J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(4): 302-309.
- [4] 杨鸽, GRIFFITHS D V, 朱晟. 考虑堆石料空间变异性的土石坝坝坡地震稳定性随机有限元分析[J]. 地震工程学报, 2019, 41(4): 939-948. (YANG Ge, GRIFFITHS D V, ZHU Sheng. Seismic slope stability analysis of earth-rockfill dams considering spatial variability of rockfill materials via Randor finite element method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 939-948. (in Chinese))
- [5] 米占宽, 李国英. 强震区土坝抗震措施研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 193-196. (MI Zhankuan, LI Guoying. Study on aseismic measures of earth dams in meizoseismic area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 193-196. (in Chinese))
- [6] 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): 583-589. (YANG Xing, LIU Hanlong, YU Ting, et al. Review on seismic disasters and aseismic measures of high earth and rockfill dams[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(5): 583-590. (in Chinese))
- [7] 刘汉龙, 费康, 杨贵, 等. 高聚物胶凝堆石料技术及其抗震性能[J]. 水利水电科学进展, 2016, 36(1): 60-65, 70. (LIU Hanlong, FEI Kang, YANG Gui, et al. Use of polyurethane foam adhesive-reinforced rockfill material to improve seismic behavior of earth-rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 60-65, 70. (in Chinese))
- [8] 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 Shengshui, HUO Jiaping, ZHANG Weimin. 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))
- [9] 岑威钧, 张自齐, 周涛, 等. 覆盖层上高面板堆石坝的极限抗震能力[J]. 水利水电科学进展, 2016, 36(2): 1-5, 58. (CEN Weijun, ZHANG Ziqi, ZHOU Tao, et al. Maximum seismic capacity of a high concrete-face rockfill dam on alluvium deposit [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 1-5, 58. (in Chinese))
- [10] 胡军. 高土石坝动力稳定分析及加固措施研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [11] 曹学兴. 深厚覆盖层地基高土质心墙堆石坝抗震安全性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [12] 张童, 雷真, 朱争光, 等. 地震作用下纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(1): 57-62, 72. (ZHANG Tong, LEI Zhen, ZHU Zhengguang, et al. Seismic behavior of the textile reinforced concrete columns under earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 57-62, 72. (in Chinese))
- [13] 杨星, 刘汉龙, 余挺, 等. 高土石坝复合加筋抗震加固技术开发与应用[J]. 水利水电科学进展, 2016, 36(6): 69-74. (YANG Xing, LIU Hanlong, YU Ting, et al. Technological development of composite reinforcement aseismic measure for high earth rockfill dams and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 69-74. (in Chinese))
- [14] 沈珠江, 邝能慧, 孔宪京, 等. 高土石坝动力分析及抗震工程措施研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1993.
- [15] LONDE P, LINO M. The faced symmetrical Hardfill dam: a new concept for RCC[J]. International Water Power & Dam Construction, 1992, 44(2): 19-24.
- [16] BATMAZ S. Cindere dam -107 m high roller compacted Hardfill dam (RCHD) in Turkey[C]//Proceedings 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Madrid: Spanish National Committee on Large Dams-SPANCOLD, 2003: 121-126.
- [17] 熊堃. Hardfill 坝破坏模式与破坏机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [18] 虞一鸣, 何蕴龙, 伍小玉. 高堆石坝土工格栅抗震加固效果分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1425-1433. (YU Yiming, HE Yunlong, WU Xiaoyu. Aseismic strengthening effect of geogrid in high rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1425-1433. (in Chinese))
- [19] 邹德高, 徐斌, 孔宪京. 钉结护面板对高土石坝坝坡地震稳定性影响研究[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 675-679. (ZOU Degao, XU Bin, KONG Xianjing. Study of effects of nail-tied panel on stability of high earth-rockfill dam slop[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 675-679. (in Chinese))