阿尔塔什面板堆石坝抗震安全研究

吕小龙 丛 苹 徐宏亮 张彩双

(工程设计院)

[摘要] 阿尔塔什面板堆石坝最大坝高为 164.8 m,坝基覆盖层最大厚度 95 m,大坝抗震设计烈度达 IX 度,大坝的动力反应和抗震安全性是工程的关键技术问题之一。本文建立包含覆盖层和坝体的有限元模型,开展大坝的静动力分析,取得了坝体位移、加速度、永久变形等系列成果。在校核地震工况下,坝顶震陷率为 0.21%,小于面板堆石坝的地震变形控制标准。设计采用了 3 排阻滑钢筋网、40 cm 浆砌石护坡等坝顶综合防护措施,可有效消除坝坡的整体和局部剪切破坏隐患。综上,阿尔塔什面板坝结构和分区设计合理,采取适当抗震措施后,能够保证工程抗震安全。

[关键词] 阿尔塔什 面板堆石坝 覆盖层 砂砾石 抗震分析

1 引言

近年来,随着国家"一带一路"战略的推进,新 疆水利水电工程的规划、建设进行快速发展期。阿 尔塔什水利枢纽工程被誉为"新疆三峡",是国家 "十三五"规划的重点工程,也是目前新疆在建的最 大水利枢纽工程项目^[1-3]。其挡水建筑物采用混凝 土面板堆石坝,工程具有坝址地震烈度高、覆盖层深 厚等特点。根据《水工建筑物抗震设计标准》 (GB51247-2018)^[4]规定:对于设计烈度为MI度,且 坝高 150 m以上的土石坝,应采用有限元法判断其 抗震稳定性;覆盖层厚度超过40 m的土石坝宜进行 动力分析。本文对阿尔塔什面板坝进行了静动力有 限元分析,并结合类似工程案例^[5-7],对大坝的抗震 安全进行了评价。

2 工程概况

阿尔塔什水利枢纽是塔里木河主要源流之一的 叶尔羌河流域内最大的控制性山区水库工程,位于 喀什地区莎车县霍什排甫乡和克孜勒苏柯尔克孜自 治州阿克陶县的库斯拉甫乡交界处。工程任务为在 保证向塔里木河干流生态供水目标的前提下,承担 防洪、灌溉、发电等综合利用。水库总库容 22.49 亿 m³,正常蓄水位 1820 m,最大坝高 164.8 m,电站装 机容量 755 MW。

阿尔塔什面板堆石坝最大坝高 164.8 m,坝顶 宽 12 m,坝顶全长 795 m。上游坝面坡度 1:1.7,下 游坝坡 1:1.6。为解决施工及运行期的交通问题, 在下游坡设 15 m 宽的"之"字形上坝公路。坝体材 料从上游到下游依次为盖重、铺盖、垫层料、过渡料、 砂砾料和爆破料。坝址区河谷呈"U"型,坝基覆盖 层最大厚度 95 m,主要以单一的冲积砂卵砾石为 主,不存在大的不均匀沉陷问题,无地震液化问题。 典型剖面见图 1。



图 1 阿尔塔什典型剖面

3 有限元模型及荷载条件

根据阿尔塔什面板坝的设计资料,建立大坝二 维有限元模型。参考大坝分区和施工过程线进行剖

作者简介:吕小龙(1989—),男,河南省洛阳人,工程师,博士后,主要从事高土石坝抗震研究。

分,有限元模型如图 2 所示,填筑过程见图 3。其 中,第1~7步进行基岩和覆盖层的地应力平衡;第 8~19步进行 I -1~ I -3 期坝体填筑,第 20步进行 I 期面板浇筑;第 21~34步进行 II -1~II -3 期坝 体填筑,第 35步进行 II 期面板浇筑;第 36~46步进 行 III -1~II -2 期坝体和上游铺盖填筑,第 47步进 行 III 期面板填筑。三期面板浇筑完成后,分 16步逐 级蓄水,直至达到正常蓄水位。



4 本构模型及参数

4.1 静力本构及参数

堆石体静力计算采用邓肯 E-B 本构模型^[8],公 式如下:

$$\begin{cases} E_{t} = Kp_{a} \left(\frac{\sigma_{3}}{p_{a}}\right)^{n} \left(1 - \frac{R_{f}(\sigma_{1} - \sigma_{3}) (1 - \sin\varphi)}{2c\cos\varphi + 2\sigma_{3}\sin\varphi}\right)^{2} \\ B_{t} = K_{b}p_{a} \left(\frac{\sigma_{3}}{p_{a}}\right)^{m} \end{cases}$$
(1)

式中: E_i 为弹性模量;K为切线模量系数;n为切线 模量指数; p_a 为单位大气压; R_f 为破坏比;c为凝聚 力,对于堆石料,c = 0; φ 为内摩擦角, $\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi$ lg (σ_3/p_a); σ_1 和 σ_3 分别为大小主应力。 B_i 为体积模 量; K_b 为体积模量系数;m为体积模量系数。模型 参数见表 1。

A 1 MAT D A 2 9 X	表 1	表	1 筑坝	料 E-B	模型	参数	9
-------------------	-----	---	------	-------	----	----	---

坝 料	k	n	R_{f}	Φ_0	$\Delta \phi$	K	m	K _{ur}
砂砾料	1094	0.46	0.73	42.11	2.27	842	0.15	1641
爆破料	1808	0.21	0.84	52.55	8.77	940	0.08	2712
坝基料	1657	0.28	0.60	41.22	0.96	373	0.46	2486

图 3 阿尔塔什填筑蓄水过程

根据《新疆阿尔塔什水利枢纽工程场地地震安 全性评价报告》和《水工建筑物抗震设计标准》 (GB51247-2018)^[4],按100年超越概率2%设防, 基岩峰值加速度为375 gal,大坝抗震设计烈度为WT 度;大坝抗震校核工况按100年超越概率1%复核, 基岩峰值加速度为450 gal。地震动时程曲线见图 4,调整地震波幅值后,作为动力分析的输入。

4.2 动力本构及参数

筑坝料动力计算采用等效线性粘弹性模型。模型采用等效剪切模量 *G* 和等效阻尼比 λ 两个参数,反映堆石料动应力—应变关系的非线性和滞后性^[9]。本文直接采用室内大型动力三轴试验获得的筑坝材料归一化动剪切模量 *C*/*G*_{max}、阻尼比 λ 与

动剪应变 γ_{d} 的关系曲线。最大动剪切模量 $G_{max} = kp_{a}(\sigma'_{0}/p_{a})^{n}$,式中: σ'_{0} 为平均有效应力; p_{a} 为单位 大气压;k 和 n 为试验参数。其中:砂砾石 k = 3878, n = 0.38;爆破料 k = 3456, n = 0.58; 坝基料 k = 2400, n = 0.46。归一化的动剪切模量、等效阻尼比和动剪 应变 γ_{d} 的关系见表 2。

计拟反称	参数	动剪应变幅值 γ _d						
风枓石协		5×10 ⁻⁶	1×10^{-5}	5×10 ⁻⁵	1×10^{-4}	5×10 ⁻⁴	1×10^{-3}	5×10 ⁻³
砂砾料	$G_{\rm d}/G_{\rm dmax}$	0.988	0.970	0.889	0.833	0.623	0.497	0.195
	$\lambda/\%$	2.14	2.35	3.09	3.61	6.22	8.98	16.48
爆破料	$G_{\rm d}/G_{\rm dmax}$	0.981	0.964	0.877	0.807	0.551	0.418	0.168
	λ / %	1.99	2.00	2.01	3.19	11.7	15.97	23.24
坝基料	$G_{\rm d}/G_{\rm dmax}$	0.996	0.992	0.966	0.937	0.770	0.644	0.332
	λ / %	1.88	1.90	1.91	1.92	4.11	7.63	16.39

4.3 残余变形本构及参数

地震永久变形的计算采用等效节点力法。邹德 高模型^[10]同时考虑了剪切变形和体积变形,且只需 要一套参数就可以求得不同振次、不同动剪应变、不 同应力水平下的残余应变,概念清楚,使用方便,已 积累了大量工程经验。残余体应变和残余剪应变的 增量形式表示为

$$\Delta \varepsilon_{vr} = c_1 \gamma_d^{c_2} \exp(-c_3 S_l^2) \frac{\Delta N}{1+N}$$
(2)

$$\Delta \gamma_r = c_4 \gamma_d^{c_5} S_l \frac{\Delta N}{1+N}$$
(3)

式中: $\Delta \varepsilon_{vr}$ 、 $\Delta \gamma_r$ 为残余体应变、残余剪应变增量; γ_d 为动剪应变幅值; S_l 为应力水平;N、 ΔN 为振动次数 及其增量; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 为试验参数。模型假定 S_l 对 ε_{vr} 无影响,即 $c_3 = 0$ 。筑坝料残余变形参数见 表 3。

表 3 筑坝料残余变形参数

坝 料	c_1	c_2	c_4	c_5
砂砾料	0.125	2.35	0.811	1.60
爆破料	0.072	1.97	3.00	1.80
坝基料	0.128	2.46	4.313	2.23



(a) 顺河向位移/cm

5 计算结果

5.1 静力计算结果

图 5 和图 6 为竣工期变形和应力图。如图所 示,竣工期顺河向位移基本沿坝轴线对称分布,向上 下游方向变形最大值均为 20 cm。最大沉降量为 95 cm,发生在坝体中部。由于坝体填筑过程中,覆盖 层也产生一定变形,因此坝体变形规律与基岩上面 板坝略有不同,坝体变形极值整体向覆盖层方向移 动。大主应力最大值为 4.5 MPa,小主应力最大值 为 1.9 MPa。和的最大值均发生在覆盖层底部,等 值线分布基本与坝坡方向平行,符合面板堆石坝应 力分布一般规律^[11-12]。

如图 7 所示,正常运行期,在库水推力作用下, 坝体和覆盖层发生整体向下游的变形。顺河向水平 位移最大值为 32 cm,发生在下游爆破料中。最大 沉降为 1.06 m,发生在坝体中部。满蓄期坝体主应 力分布规律与竣工期基本一致,大主应力最大值为 4.7 MPa,小主应力最大值为 2.0 MPa,均发生在 底部。



(b) 竖向位移/cm

图 5 竣工期位移



图 7 满蓄期位移

5.2 动力计算结果

图 8 为设计地震工况下,坝体加速度分布情况。 如图所示,顺河向加速度最大值发生在坝顶,最大值 为 4.12 m/s²。竖向最大加速度发生在坝顶和两侧



(a) 顺河向加速度/(m/s²)

坝坡附近,坝顶最大加速度为2.91 m/s²。坝顶及坝 顶附近坝坡区域的加速度反应较大,存在堆石松动 和滑落的可能性。



(b) 竖向加速度/(m/s²)

图 8 设计工况加速度分布

表 4 筑坝料渗透系数

材料	砂砾料	爆破料	坝基料	基岩	防渗帷幕
渗透系数(cm/s)	1×10^{-2}	5×10^{-2}	5. 0×10^{-1}	1×10^{-4}	1×10^{-7}

采用 GeoStudio 计算正常运用条件下遭遇地震 的下游坝坡抗震安全。其中,筑坝料的抗剪强度参 数见表 1,渗透系数见表 4。图 9 为地震工况下游坝 坡最危险滑裂面,如图所示,最危险滑裂面靠近坝 顶,与"坝顶及坝顶附近坝坡区域的加速度反应较 大,存在堆石松动和滑落的可能性"相一致,最小安 全系数为 1.319。根据《碾压式土石坝设计规范》, 对于非常运用条件 II (地震工况),采用拟静力法 计算的坝坡抗滑稳定最小安全系数为 1.20。综 上,阿尔塔什面板坝下游坡能满足整体抗滑稳定 要求。



图 9 地震工况下游坝坡最危险滑裂面

本工程在上、下游坝坡 1793 m、1803 m、1813 m 高程布置 3 层阻滑钢筋网,以增强坝体顶部的抗震 能力。且 1790 m 高程以上采用 0.4 m 厚浆砌石块 石护坡,以下采用垂直厚 0.4 m 的混凝土网格梁干 砌石护坡。考虑到工程采用上述综合防护措施,可

有效消除坝坡局部剪切破坏的隐患。



(a) 顺河向加速度/(m/s²)

(b) 竖向加速度/(m/s²)



1840

图 10 是校核工况下坝体加速度分布,如图所示,校核工况和设计工况下,坝体加速度分布规律基本一致,仅量值有所增大。图 11 示出了校核工况下,大坝中轴线最大加速度沿坝高分布。如图所示,坝体顺河向加速度明显强于竖向地震反应,顺河向放大倍数为 3.04,竖向放大倍数为 1.65。坝体顺河向和竖向最大加速度均发生在坝顶,顺河向和竖向加速度放大倍数符合一般规律^[13]。

5.3 永久变形计算结果

图 12 是校核工况下,大坝永久变形等值线图。 如图所示,地震引起的水平位移整体指向下游,最大 值为 22 cm,发生在靠近坝顶的下游坝坡附近。地 震引起的最大沉降为 35 cm,发生在坝顶。



(a) 顺河向位移/m



1840

(b) 竖向位移/m

陈生水等^[14]统计分析了国内外 125 座土石坝 的坝顶震陷率,建议以坝顶震陷率小于 0.6% 作为 面板堆石坝的地震变形控制标准。另外,2008 年, 汶川地震造成紫坪铺面板坝(坝高 156 m)产生超过 90 cm 的震陷量,坝顶震陷率达到 0.64%,震后坝体 和面板出现局部损伤,但大坝保持整体稳定,修复后 已回复正常运行^[15-18]。综上,阿尔塔什面板坝在校 核地震工况下,坝体最大震陷率为 0.21%,表明坝 体在地震作用下永久变形较小,从变形安全考虑,坝 体具有足够的安全储备。类比紫坪铺震况,可认为 本工程能够满足《水工建筑物抗震设计标准》^[4]中, "水工建筑物应能抵御设计烈度的地震作用;如有 局部损坏,经修复后仍可正常运行"的要求。

6 结论

图 12 校核工况永久变形

(1)施工期和满蓄期,坝体应力符合土石坝应 力分布一般规律。由于阿尔塔什面板坝覆盖层深 厚,坝体填筑过程中,覆盖层也会产生一定变形,导 致坝体变形规律与基岩上的面板坝略有不同,坝体 变形极值整体向下移动。

(2)设计地震工况和校核地震工况下,坝体加 速度分布规律基本一致。坝体顺河向加速度明显强 于竖向地震反应,坝顶和坝坡区域地震反应较大,对 坝坡稳定不利。计算结果表明,下游坝坡能够满足 整体抗滑稳定要求,由于本工程已采取阻滑钢筋网、 浆砌石护坡等综合防护措施,可有效消除坝坡的整 体和局部剪切破坏隐患。 (3)校核地震工况下,坝顶震陷率为0.21%,表明从变形安全考虑,坝体具有足够的安全储备。类比紫坪铺面板坝在汶川地震中的震害现象,认为阿尔塔什面板坝的工程设计能够满足"设计地震下,局部损伤可修复"的要求。

参考文献

- [1] 邓铭江,吴六一,汪洋,等.阿尔塔什水利枢纽坝基深 厚覆盖层防渗及坝体结构设计[J].水利与建筑工程 学报,2014(2):149-155.
- [2] 汪洋,曲苓.阿尔塔什水利枢纽混凝土面板砂砾石堆石坝设计及主要工程特点[J].水利水电技术,2018,49(S1):4-9.
- [3] 范金勇.阿尔塔什深厚覆盖层上高面板砂砾石堆石坝 坝体变形控制设计[J].水利水电技术,2016,47(3): 29-32.
- [4] GB 51247-2018,水工建筑物抗震设计标准[S].北京: 中国计划出版社, 2018.
- [5] 邢建营,关志诚,吕小龙.面板堆石坝深覆盖层处理技术研究及在河口村水库工程中的应用[J].岩土工程学报,2020,42(7):1368-1376.
- [6] 吕小龙,迟世春,贾宇峰. 堆石料动力变形特性试验研究. 岩土工程学报,2018,40(9):1729-1735.
- [7] 吕小龙,迟世春.基于变形控制标准的高土石坝地震 可靠度分析.岩土工程学报,2019,41(3):519-525.
- [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.
- [9] 沈珠江,徐 刚. 堆石坝的动力变形特性[J]. 水利水运

(上接第4页)

(3)穿黄工程束窄河道河段模拟流场与河段内 水流方向基本一致,河段较窄区域水流速度急剧增 大,整个河段总体流向平稳,基本无涡旋、环流。

工程建设后, 東窄河段流速变化趋势与自然状况下一致, 但流速增大。穿黄工程断面较自然状况流速增大 0.49 m/s, 孤柏嘴断面增大 0.6 m/s。

束窄后水体停留时间变短,水体交换能力变强。 河段水体滞留时间变化趋势与自然状况一致,水体 滞留时间由上游到下游逐渐增加。

(4)由结果可知,工程建设前后黄河干流河段 水质均满足 III 类水质要求。水质受来水水质影响 较大。

工程建设后,由于评价河段流速增加,水体交换 能力变强。在来水水质一致情况下,水体 COD、 NH₃N浓度较工程建设前均有所减少,减少幅度分 别为 0.3%、1.9%。工程建设对水体 COD、NH₃N 浓 度影响较小。

参考文献

[1] 樊乔铭,丁志斌. EFDC 模型在港湾水环境中的应用及 进展[J]. 人民珠江,2016,37(2):92-96.

科学研究,1996,6(2):143-150.

- [10] 邹德高,孟凡伟,孔宪京,等. 堆石料残余变形特性研 究[J]. 岩土工程学报,2008,30(6):807-812.
- [11] 迟世春,林皋.堆石料残余体应变对计算面板堆石坝 永久变形的影响[J].水力发电学报,1998(1):59-67.
- [12] 沈 婷,李国英. 超高面板堆石坝混凝土面板应力状态 影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2010,28(9): 1345-1349.
- [13] 赵剑明,汪闻韶,常亚屏,等.高面板坝三维真非线性 地震反应分析方法及模型试验验证[J].水利学报, 2003,9:12-18.
- [14] 陈生水,李国英,傅中志.高土石坝地震安全控制标准 与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报,2013,35 (1):59-65.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 赵剑明,刘小生,温彦锋,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, 2009,35(5):11-14.
- [18] 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,
- Kyeong Park, Hoon-Shin Jung, Hong-Sun Kim. Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D) [J]. Marine Environmental Research, 2005, 60, 171-193.
- [3] 范一鸣.基于 EFDC 模拟的污水泄露事件对松花江哈 尔滨段水质影响研究 [D].哈尔滨:哈尔滨师范大 学,2017.
- [4] 张文时.基于 EFDC 模型的山地河流水动力水质模拟 ——以重庆市赵家溪为例[D].重庆:重庆大学,2014.
- [5] 马方凯,江春波,李凯.三峡水库近坝区三维流场及温度场的数值模拟[J].水利水电科技进展,2007,27
 (3):17-20.
- [6] 余明辉,范北林,余蔚卿. 穿黄隧洞束窄河道对河段水 沙特性的影响分析[J]. 水科学进展,2003,14(5): 583-587.
- [7] 李国权. 三峡库区排污口下游污染物降解规律的研究》[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
- [8] 陈沛云.《黄河干流河南段水环境容量与水污染防治 对策研究》[D].开封:河南大学,2005.
- [9] 张世坤,张建军,田依林等.黄河花园口典型污染物自 净降解规律研究[J].人民黄河,2006,28(4):46-47.
- [10] 胡国华,赵沛伦.黄河孟津-花园口河段水环境容量研 究[J].水资源保护,2002,1:26-28.

• 13 •