

秦来燕, 自佳春, 苏东院, 等. 三维有限元应力应变动、静力计算在热水河水库中的应用与实践[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 179-188.

QIN Laiyan, ZI Jiachun, SU Dongyuan, et al. Application and practice of three-dimensional finite element stress variation and static calculation in Reshuihe Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 179-188.

三维有限元应力应变动、静力计算在热水河水库中的应用与实践

秦来燕¹, 自佳春¹, 苏东院², 李锡均²

(1. 云南省水利水电勘测设计院有限公司, 云南 昆明 650021;

2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 在基本农田和自然保护区等三大生态红线受限的情况下, 采用沥青混凝土心墙作为防渗来替代粘土心墙的土石坝是水利工程建设的新趋势, 也是一种新的创新之路。通过对筑坝材料进行静、动力试验研究, 为筑坝材料的力学性能的有限元数值分析提供计算参数。对大坝进行三维有限元静、动力计算分析和研究, 为筑坝材料的工程特性、大坝的应力变形特性、稳定性以及抗震安全性和坝体在设计校核工况下的稳定、应力应变特性、坝体结构、筑坝材料参数和控制标准、坝体变形特性、抗震工程设计等方面提出针对性的工程措施。

关键词: 三维有限元; 应力应变; 动静力计算; 应用

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.035

中图分类号: TV315

文献标志码: B

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0179-10

Application and practice of three-dimensional finite element stress variation and static calculation in Reshuihe Reservoir

QIN Laiyan¹, ZI Jiachun¹, SU Dongyuan², LI Xijun²

(1. Yunnan institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design Co., Ltd., Kunming 650021, Yunnan, China;

2. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, Yunnan, China)

Abstract: In cases where the three major ecological red lines such as basic farmland and nature reserves are restricted, the use of asphalt concrete core walls as anti-seepage measures to replace clay core walls in earth-rock DAMS is a new trend in water conservancy engineering construction and also a new innovative path. Through the static and dynamic test research on dam-building materials, the calculation parameters are provided for the finite element numerical analysis of the mechanical properties of dam-building materials. Three-dimensional finite element static and dynamic calculation, analysis and research on the dam are carried out, and targeted engineering measures are proposed for the engineering characteristics of dam construction materials, the stress and deformation characteristics, stability and seismic safety of the dam, the stability of the dam body under design verification conditions, stress and strain characteristics, dam body structure, parameters and control standards of dam

收稿日期: 2024-12-23

作者简介: 秦来燕(1982—), 高级工程师, 学士, 主要从事水利水电工程设计工作。E-mail: 153711141@qq.com

通信作者: 自佳春(1987—), 高级工程师, 学士, 主要从事水利水电工程设计工作。E-mail: 372719377@qq.com

苏东院(1984—), 高级工程师, 学士, 主要从事水利水电工程地质勘察工作。E-mail: 305691904@qq.com

construction materials, deformation characteristics of the dam body, and seismic engineering design.

Keywords: three-dimensional finite element; stress-strain; dynamic and static calculation; apply

0 引言

热水河水库工程拦河坝建在Ⅷ度强地震烈度区、坝高超过 90 m 的沥青混凝土心墙风化料坝,其筑坝材料的工程特性、大坝的应力变形特性、稳定性以及抗震安全性等均值得深入研究。通过对筑坝材料进行静力、动力试验,研究筑坝材料的力学性能并为有限元数值分析提供计算参数,对大坝进行三维有限元计算分析及坝料敏感性分析,研究坝体在各种工况下的稳定、应力应变特性,从而优化坝体结构、筑坝材料参数和控制标准、坝体变形特性、抗震工程设计等方面提出针对性的工程措施。鉴于此,本文对热水河水库工程沥青混凝土心墙坝三维有限元静、动力数值计算,针对沥青混凝土心墙,分析并总结了应力与变形和动剪应变规律^[1],为同类沥青混凝土^[2]心墙风化料坝建设提供参考与借鉴。

1 工程整体概况

1.1 工程概况

热水河水库位于江城县曼老江左岸一级支流热水河上,水库流域面积 22.8 km²,总库容 1 212 万 m³,属于Ⅲ等中型工程。大坝采用沥青混凝土心墙风化料坝,最大坝高 94 m,坝顶轴线长 251 m,宽 10 m,顶高程 1 158.60 m,上游坝坡由上到下分别为 1:2.2、1:2.3、1:2.4;下游坝坡由上到下分别为 1:2.1、1:2.0、1:2.0、1:2.0。沥青混凝土心墙设置在坝轴线上游 2 m 处,宽 0.5~1.1 m,心墙上下游各设水平宽 3 m 的过渡层。度汛坝体采用强风化砂岩填筑,上游坝壳料在高程 1 115.40 m 以上水位变幅区、心墙下游 1 076.00 m 高程以下采用弱风化砂岩填筑,其余区采用强-弱风化砂岩混合料。

1.2 工程地质概况

坝址区出露地层主要为侏罗系中上统坝注路组灰白色粉砂岩及含砾砂岩,河谷及两岸坡大面积分布第四系冲洪积卵砾石夹孤石、漂石、残坡积碎石土、含碎石砂壤土、坡洪积含砾砂壤土夹块石;坝址下游发育有两条小规模断裂 F₁、F₂。

根据勘探结果分析可知,(1)坝址区附近表层覆盖层以碎石土为主,受工程区地层岩性控制,主要为粉砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩等岩性间层分布,

因此黏土亦呈典型的“鸡窝状”产出,分布不集中、不连片,有用层厚薄不均;(2)土料集中多为耕地及茶地,征地补偿费用较高;(3)本阶段共选取四个土料场,总面积 39.39 万 m²,土料场占地面积大,其中基本农田总面积 14.76 万 m²,占土料场总面积的 37.5%,生态红线区面积 0.86 万 m²,占土料场总面积的 2.2%,基本农田和生态红线区占地面积大,料场征地困难;(4)工程区附近雨季开始时间较早,延续时间较长,因此当地黏土料一般含水率较高,有效工期偏短,对黏土心墙施工不利,沥青混凝土所需的碱性骨料及填料用量小,沥青混凝土心墙风化料坝在控制心墙质量上具有一定的优势。因此,综合考虑基本工程地质条件、天然建材、基础处理等方面,选用沥青混凝土心墙风化料坝作为基本坝型。

2 计算方法与模型

2.1 静力计算

采用三维有限元应力应变总应力法。坝体和沥青混凝土心墙的本构模型采用南水双屈服面弹塑性静力计算模型和 Duncan E-B 模型,在防渗结构周边设置薄层接触面单元,模拟其与坝体之间的相互作用。

2.2 动力计算

动力计算采用时程分析方法。计算时,将地震持续时间分成若干时段,对每一时段先动力分析,求出各点的加速度和动应力、动应变,并用经验公式求得残余应变增量,将这些应变增量换算为等效节点力作用于坝体,进行一次静力计算,得出变形的发展,然后转入下一时段的动力计算,如此反复进行直到地震结束。坝壳料和沥青混凝土动力计算模型为等价黏弹性模型。

3 计算参数与计算模拟

3.1 计算参数

(1)静力计算参数:各筑坝材料的静力计算参数如表 1 所列。表中坝壳强风化料、弱风化料:强风化料=6:4,弱风化料参数根据室内静三轴试验成果确定,过渡料、沥青混凝土参数类比确定。

混凝土结构静力计算参数以及强度设计值如表 2 所列。

表 1 坝料静力计算参数

坝料	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	c/kPa	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K	n	R_f	K_b	m	G	F	$-D$
沥青混凝土	2.40	330	21.2	—	257	0.19	0.63	176	0.36	0.49	—	—
过渡料	2.10	—	53.5	10.9	1 100	0.27	0.62	500	0.30	0.36	0.17	9.13
强风化(度汛)	2.09	—	50.5	11.6	676	0.31	0.65	363	0.15	0.32	0.12	6.75
弱:强=6:4	2.09	—	52.7	12.9	847	0.28	0.63	506	0.09	0.34	0.13	8.33
弱风化料	2.10	—	54.2	13.6	1017	0.25	0.64	692	0.05	0.36	0.12	8.75

表 2 混凝土结构静力计算参数和强度设计值

混凝土	$\rho/g \cdot cm^3$	E/GPa	μ	G_d/GPa	λ_{max}	强度设计值	
						压	拉
C20 基座	2.40	25.5	0.167	10.9	0.05	9.6	1.10
C25 防浪墙	2.40	28.0	0.167	12.0	0.05	11.9	1.27

(2) 动力计算参数: 各筑坝材料的动力计算参数如表 3 所列。坝壳弱风化料: 强风化料=6:4, 参数根据动三轴试验成果确定, 动剪模量和阻尼比计算参数取固结比 1.5 和 2.0 试验的归一化参数, 其他坝壳料参数采用工程经验类比确定。

表 3 坝料动力计算参数

坝料	K_2	λ_{max}	K_1	n	$c_1/\%$	c_2	c_3	$c_4/\%$	c_5
沥青混凝土	427.0	0.16	10.0	0.50	1.00	0.75	0	10.00	1.00
过渡料	2 200	0.21	25.9	0.41	0.66	1.20	0	6.21	1.22
强风化(度汛)	1 359	0.24	27.0	0.45	0.85	1.25	0	7.99	1.25
弱:强=6:4	1 740	0.22	26.9	0.40	0.77	1.23	0	7.26	1.24
弱风化料	2 046	0.21	25.9	0.41	0.69	1.22	0	6.53	1.23

3.2 三维建模和分级加载

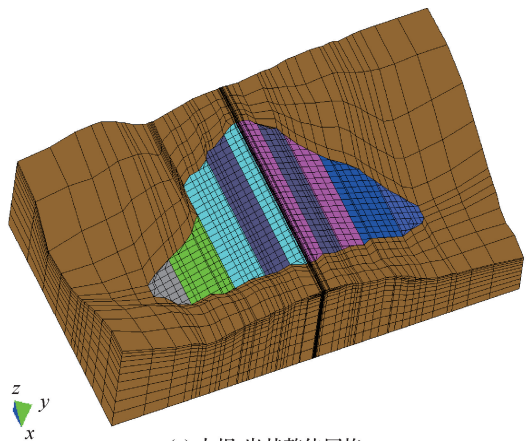
三维坐标系设定为: X 为轴向, 指向右岸为正, 零点位于坝 0+000.00; Y 为顺河向, 指向下游为正, 零点位于坝轴线; Z 为垂直向, 向上为正, 以其高程为垂直向坐标值。

大坝三维有限元网格剖分结果如图 1 所示。单元总数为 34 291, 节点总数为 32 339。有限元网格划分时, 大坝向外延伸岩体宽度取 1 倍坝高, 实体单元采用 8 结点六面体等参单元, 边界条件以及坝料分区的变化, 部分采用三棱体和四面体作为退化的六面体单元处理, 坝体单元根据大坝填筑施工顺序排序。

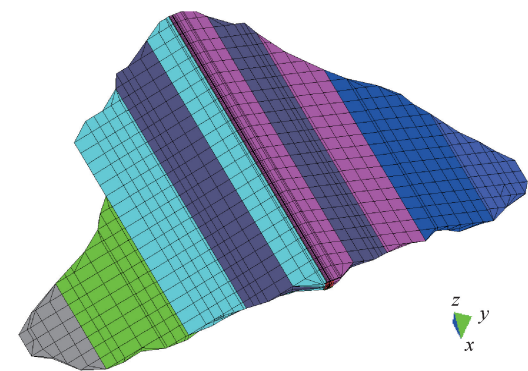
大坝施工、蓄水顺序及相应的分级加载级数为: 上游围堰填筑(5 级)→一期坝体填筑(9 级)→二期坝体填筑, 心墙与坝体同步施工(10 级)→三期坝体填筑, 心墙与坝体同步施工(10 级)→蓄水至正常蓄水位 1 156.13 m(6 级)。

3.3 地震动输入

根据《水工建筑物抗震设计标准》《热水水库工



(a) 大坝-岩基整体网格



(b) 大坝网格

图 1 大坝-岩基整体网络图及河床典型横剖面网格

程场地地震安全性评价报告》, 确定采用 50 a 超越概率 10% 地震设计, 100 a 超越概率 2% 地震校核, 相应的场地基岩地震动参数如表 4 所列。

表 4 场地基岩地震动参数

概率水平	A_m/gal	β_m	T_1	T_g	C
50 a 超越概率 10%	196	2.5	0.1	0.35	0.6
100 a 超越概率 2%	418	2.5	0.1	0.40	0.6

4 静力计算结果与分析

4.1 南水模型计算结果

4.1.1 坝体应力与变形

河床剖面坝体顺河向变形和沉降等值线如图 2 所示。竣工期上、下游位移最大值分别为 4.2 cm、6.6 cm; 最大沉降为 31.8 cm; 蓄水期至正常蓄水位上、下游位移最大值分别为 1.8 cm、10.5 cm, 最大沉降为 30 cm。

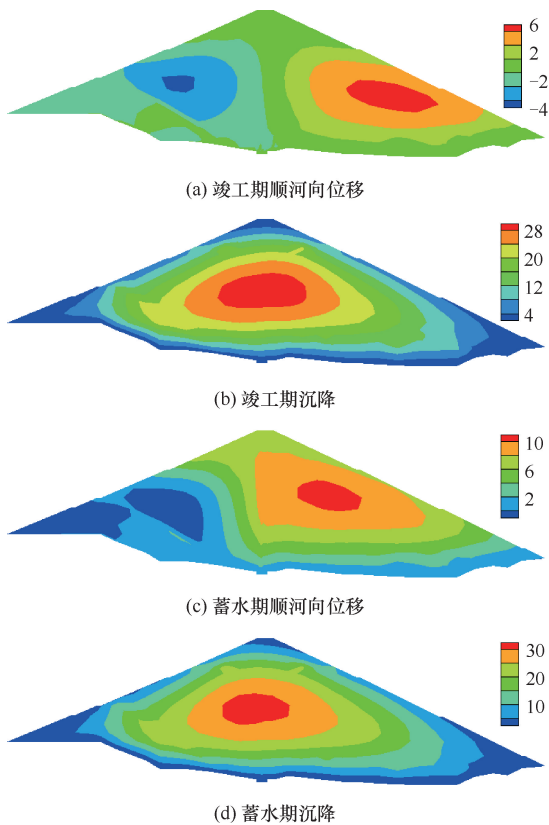


图2 竣工期及蓄水期坝体变形分布(单位: cm)

坝体剖面大、小主应力如图3所示。竣工期坝体大、小主应力最大值分别为 1.65 MPa、0.78 MPa; 蓄水期坝体大、小主应力最大值分别为 1.84 MPa、0.92 MPa。

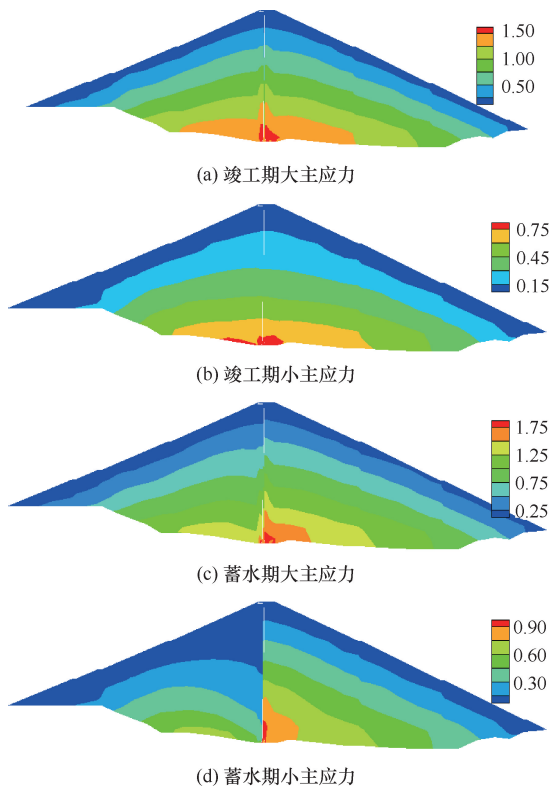


图3 坝体大小主应力(单位: MPa)

坝体最大沉降发生在河床中央 0.5 倍坝高心墙附近坝壳料区, 量值约占坝高的 0.35%, 坝体变形分布规律和量值符合心墙坝变形经验, 坝体应力分布正常, 符合心墙坝的应力规律。

4.1.2 心墙应力应变与变形

竣工期和蓄水期心墙变形等值线如图4所示。竣工期最大变形分别为 4.5 cm、4.3 cm, 蓄水期最大变形分别为 5.2 cm、4.9 cm。竣工期心墙最大沉降为 31.3 cm, 蓄水期略有降低, 为 29.8 cm。

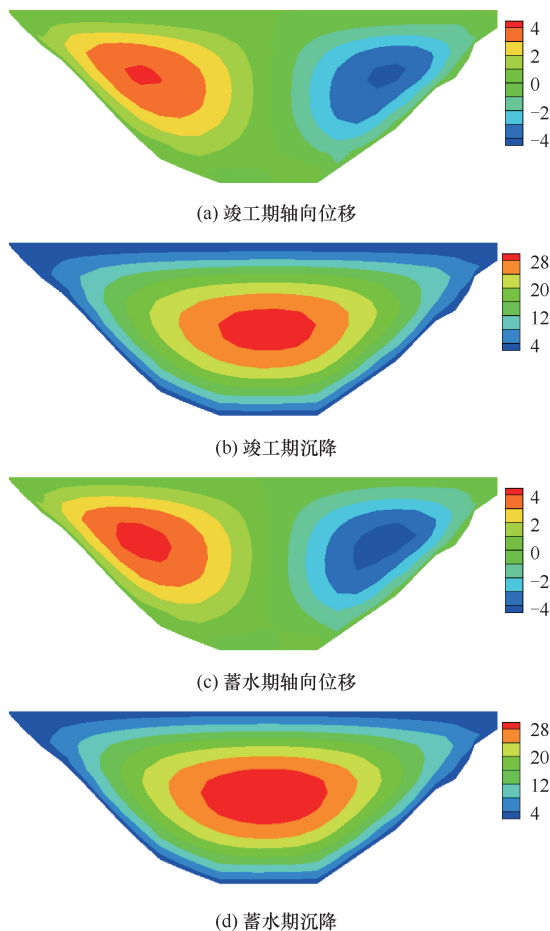


图4 心墙变形分布(单位: cm)

竣工期和蓄水期心墙大、小主应力分布如图5所示。竣工期和蓄水期均未出现拉应力, 竣工期心墙大、小主应力最大值分别为 1.37 MPa、0.82 MPa, 蓄水期大、小主应力最大值分别为 1.69 MPa、0.98 MPa。墙内应力水平不大, 在 0.3 以内, 无剪切破坏区。

竣工期和蓄水期心墙轴向、垂直向应变分布如图6所示。竣工期和蓄水期沥青混凝土心墙垂直向未出现拉应变, 最大压应变分别为 2.61%, 2.58%; 轴向应变总体表现为河谷中央受压, 两岸受拉, 竣工期最大压应变为 0.12%, 最大拉应变为 0.74%, 蓄水期最大压应变为 0.13%, 最大拉应变为 0.77%。

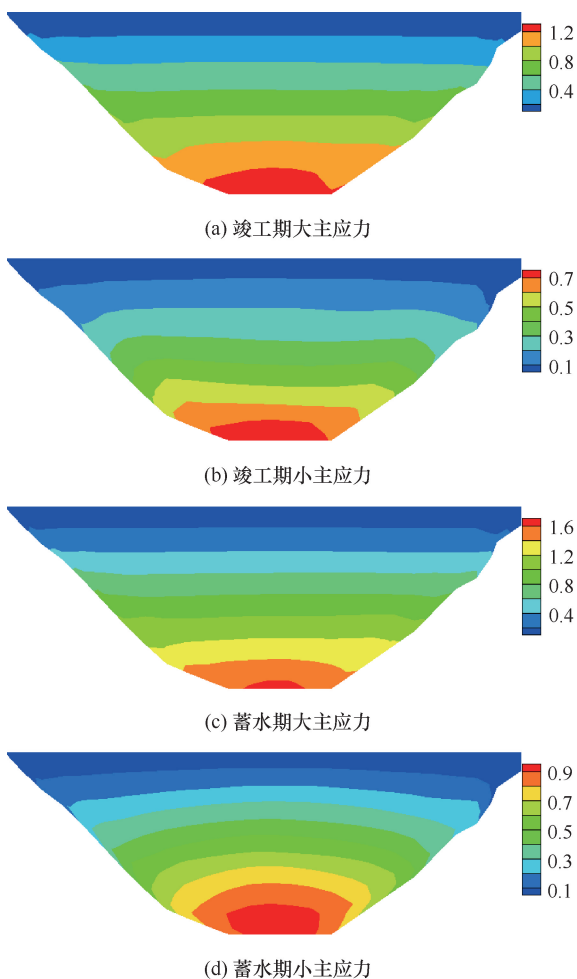


图5 心墙大小主应力和应力水平分(单位: MPa)

心墙压应变低于 3%，拉应变低于 0.8%，均在沥青混凝土允许强度范围内，心墙内无拉应力且应力水平小于 1，心墙安全。

4.1.3 心墙与基座相对位移

经计算心墙与基座处于压紧状态，相对切向变形不大，沿河谷相对位移最大值为 13.0 mm，顺河向相对位移最大值为 9.7 mm，相对位移量值在止水允许变形范围内。

4.2 Duncan E-B 模型计算结果

Duncan E-B 模型和南水模型计算结果对比如表 5 所列。计算结果表明，两模型计算得到的大坝应力变形分布规律大体一致，量值存在一定差异，Duncan E-B 模型计算所得的坝体沉降、水平位移、沥青混凝土心墙的变形和应变值均比南水模型计算结果大。尽管 Duncan 模型计算结果较大，但均在正常范围内，防渗体系安全。

4.3 计算参数敏感性分析

岩土材料的成因、组成等较为复杂，物理力学指标往往存在一定离散性，室内试验取样的代表性、级

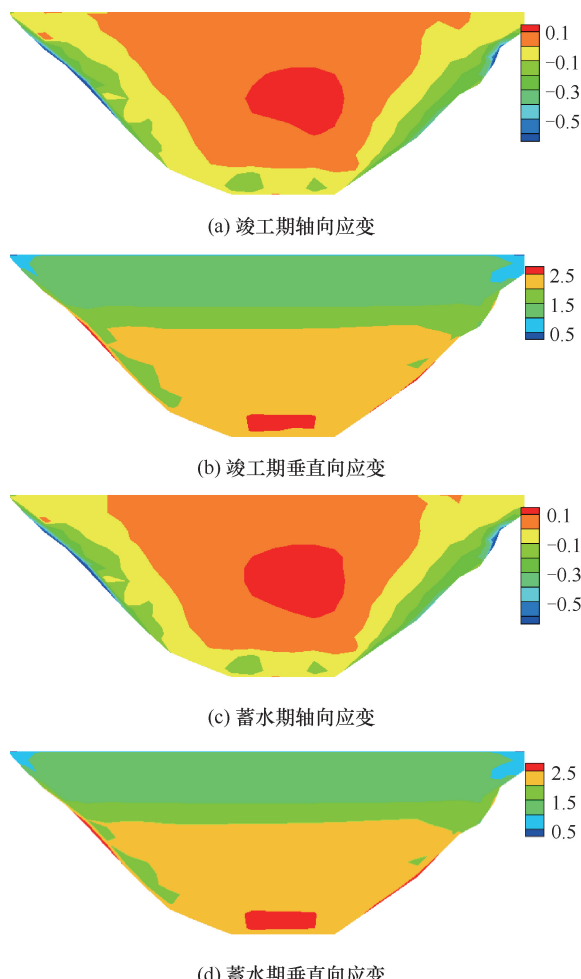


图6 心墙轴向和垂直向应变分布(单位:%)

配缩尺、制样干密度控制等因素都会使试验所得的计算参数存在不确定性。针对南水模型进行参数敏感性分析，选取对应力变形最为敏感的参数—模量系数 K ($K_{ur} = 2K$) 进行敏感性分析。将筑坝材料模量系数分别降低 10% 和 20%，分析不同模量系数时大坝的应力变形。结果表明，坝料模量系数降低后，坝体变形、心墙变形与压、拉应变均有所增大。模量系数变化范围，坝体最大沉降占坝高比值范围为 0.35% ~ 0.43%，心墙压应变极值范围为 2.61% ~ 2.92%，拉应变极值范围为 0.77% ~ 0.89%，心墙与基座相对位移极值范围在 13.0 ~ 15.9 mm，均在设计控制范围内，坝体防渗体均安全(见表 6)。

5 动力计算结果与分析

5.1 设计地震工况计算结果

相同地震工况 3 条地震^[3-4]动时程的反应谱相同，输入不同组合地震波时，大坝动力反应和地震永久变形分布规律基本相同，只是数值上有所差异。6 种地震动组合下的大坝动力反应放大系数如表 7 所列，

表5 坝体不同模型主要计算结果汇总

统计项目		Duncan E-B 模型	南水模型	
坝体	竣工期	沉降/cm	37.9	31.8
		上游向变形/cm	5.1	4.2
		下游向变形/cm	8.4	6.6
		大主应力/MPa	1.66	1.65
		小主应力/MPa	0.66	0.78
	蓄水期	沉降/cm	37.1	30.0
		上游向变形/cm	1.5	1.8
		下游向变形/cm	17.1	10.5
		大主应力/MPa	1.76	1.84
		小主应力/MPa	0.71	0.92
		指向左岸位移/cm	5.8	4.5
		指向右岸位移/cm	6.0	4.3
		上游向变形/cm	1.9	1.0
		下游向变形/cm	0.8	0.7
心墙	竣工期	沉降/cm	37.1	31.3
		大主应力/MPa	1.77	1.37
		小主应力/MPa	0.88	0.82
		轴向压应变/%	0.16	0.12
		轴向拉应变/%	0.82	0.74
		垂直压应变/%	2.90	2.61
		指向左岸位移/cm	6.8	5.2
		指向右岸位移/cm	7.3	4.9
	蓄水期	上游向变形/cm	—	—
		下游向变形/cm	15.5	9.2
		沉降/cm	35.1	29.8
		大主应力/MPa	1.80	1.69
		小主应力/MPa	0.97	0.98
		垂直压应变/%	2.80	2.58
心墙与基座	沿河谷相对位移/mm	17.1	13.0	
	顺河向相对位移/mm	11.5	9.7	

组合2地震动顺河向动力反应最大, 对大坝最为不利, 故选用该组合计算进行详细分析。

5.1.1 大坝动力反应加速度

设计地震工况大坝最大动力反应加速度放大倍数分布如图7所示。动力反应加速度在下游坝坡和坝顶等坝表面附近有明显增大现象, 坝体轴向、顺河向和垂直向动力反应加速度最大值分别为 5.508 m/s^2 、 5.588 m/s^2 、 4.391 m/s^2 , 相应放大倍数分别为 2.81、2.85、3.36。

5.1.2 大坝动位移

设计地震工况大坝最大动位移分布如图8所示, 坝体轴向、顺河向和垂直向动位移最大值分别为 11.7 cm、19.3 cm、7.3 cm。

5.1.3 大坝地震永久变形

设计地震工况永久变形分布如图9所示, 轴向最大值为 5.4 cm; 顺河向最大值为 12.8 cm; 垂直向最

大值为 22.5 cm。设计地震^[5]工况坝体震陷率约为 0.25%, 该量值在土石坝永久变形经验范围内。

表6 筑坝材料不同模量系数时应力变形极值汇总

统计项目		基本参数	降低 10%	降低 20%	
坝体	竣工期	沉降/cm	31.8	35.4	39.7
		上游向变形/cm	4.2	4.6	5.2
		下游向变形/cm	6.6	7.4	8.4
		大主应力/MPa	1.65	1.65	1.65
		小主应力/MPa	0.78	0.78	0.78
	蓄水期	沉降/cm	30.0	33.3	37.4
		上游向变形/cm	1.8	2.0	2.3
		下游向变形/cm	10.5	11.7	13.2
		大主应力/MPa	1.84	1.84	1.84
		小主应力/MPa	0.92	0.92	0.92
		指向左岸位移/cm	4.5	5.0	5.5
		指向右岸位移/cm	4.3	4.8	5.3
		上游向变形/cm	1.0	1.1	1.3
		下游向变形/cm	0.7	0.9	1.0
心墙	竣工期	沉降/cm	31.3	34.9	39.1
		轴向压应变/%	0.12	0.13	0.15
		轴向拉应变/%	0.74	0.82	0.87
		垂直压应变/%	2.61	2.79	2.92
		指向左岸位移/cm	5.2	5.4	6.0
		指向右岸位移/cm	4.9	5.7	6.4
		上游向变形/cm	—	—	—
		下游向变形/cm	9.2	10.3	11.6
	蓄水期	沉降/cm	29.8	33.1	37.1
		轴向压应变/%	0.13	0.14	0.16
		轴向拉应变/%	0.77	0.84	0.89
		垂直压应变/%	2.58	2.73	2.87
		沿河谷相对位移/mm	13.0	14.2	15.9
		顺河向相对位移/mm	9.7	11.5	12.9

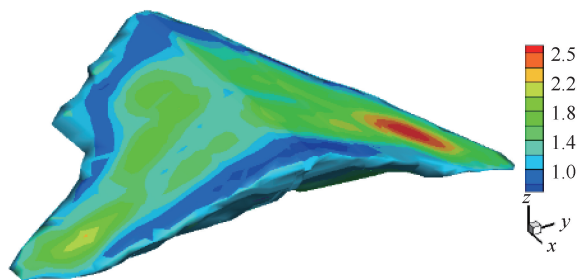
表7 设计地震工况坝体动力反应

统计项目		组合1	组合2	组合3	组合4	组合5	组合6
加速度放大倍数	X向: 样本1	X向: 样本1	X向: 样本2	X向: 样本3	X向: 样本2	X向: 样本3	X向: 样本3
	Y向: 样本2	Y向: 样本3	Y向: 样本1	Y向: 样本1	Y向: 样本3	Y向: 样本2	Y向: 样本2
	Z向: 样本3	Z向: 样本2	Z向: 样本3	Z向: 样本2	Z向: 样本1	Z向: 样本1	Z向: 样本1
	轴向	2.42	2.81	2.34	2.27	3.10	2.05
放大倍数	顺河向	2.75	2.85	2.68	2.72	2.59	2.54
	垂直向	2.60	3.36	2.41	3.39	3.41	3.38

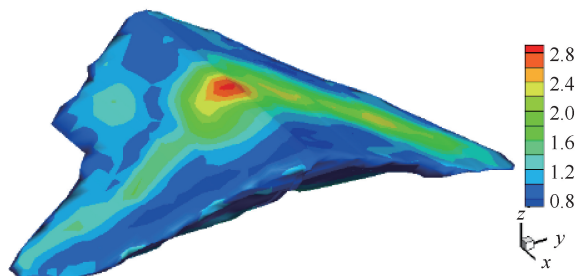
5.1.4 心墙地震期变形和应变

设计地震工况沥青混凝土心墙永久变形和静动累加变形分布如图10所示。心墙轴向最大值为 3.5 cm, 心墙顺河向最大值为 8.4 cm, 垂直向最大值为 20.6 cm。与蓄水期变形累加后, 心墙轴向最大值为 6.0 cm, 顺河向最大值为 17.6 cm, 垂直向最大值为 43.0 cm。

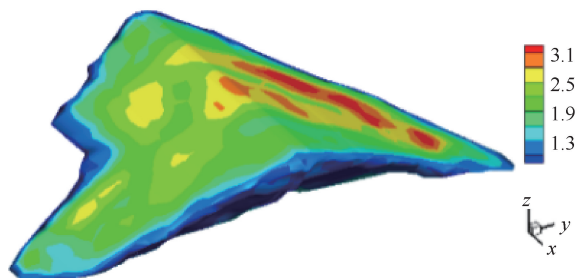
设计地震结束后沥青混凝土心墙应变分布如图11所示。地震结束后心墙垂直向压应变最大值为



(a) 轴向



(b) 顺河向



(c) 垂直向

图7 设计地震工况大坝最大动力反应加速度放大倍数分布

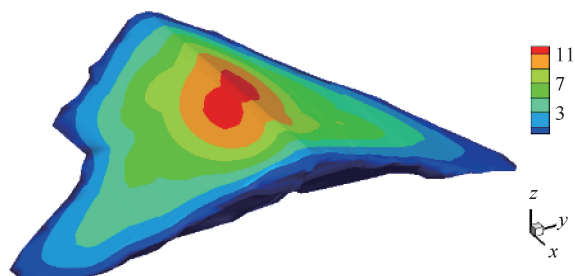
2.79%，轴向压应变最大值为0.37%，拉应变最大值为0.89%，拉、压应变均在心墙材料允许范围内，坝体永久变形不会造成心墙破坏。

设计地震工况沥青混凝土心墙轴向和垂直向最大动应变分布如图12所示。心墙轴向动压应变最大值为0.19%，轴向动拉应变最大值为0.15%，垂直向动压应变最大值为0.11%，垂直向动拉应变最大值为0.12%。

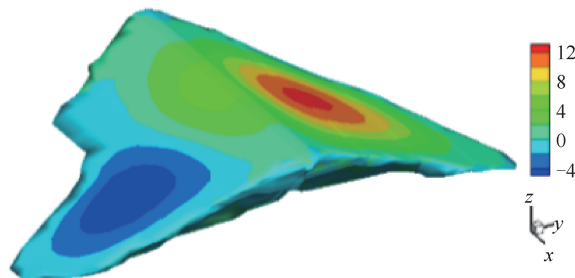
设计地震工况轴向和垂直向静动应变叠加情况如图13所示。和静应变叠加，心墙轴向压应变最大值为0.18%，轴向拉应变最大值为0.90%，垂直向压应变最大值为2.64%，压、拉应变均在材料应变允许范围内，设计地震不会导致心墙^[6]压裂和拉裂破坏。

5.1.5 地震期心墙与基座相对位移

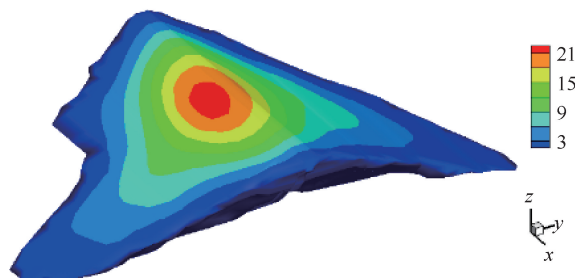
设计地震结束后，心墙与基座之间处于压紧状态，沿河谷以及顺河向相对位移相比震前有所增大，最大相对位移分别为14.8 mm、11.4 mm。



(a) 轴向



(b) 顺河向



(c) 垂直向

图8 设计地震工况大坝最大动位移分布(单位: cm)

5.1.6 坝体单元抗剪安全性

设计地震工况下，上游坡面存在抗剪安全系数小于1.0的区域，但该剪切破坏区位于坝坡浅表，且范围有限，未形成贯通区，不会影响坝体整体安全性。心墙内未出现抗剪安全系数小于1.0，地震不会导致心墙的剪切破坏(见图14、图15)。

5.2 校核地震工况计算结果

正常运行时遇校核地震，大坝动力反应加速度比设计工况有所增大，不过放大倍数有所减小，分别为2.54、2.81和3.32；大坝最大动位移轴向、顺河向和垂直向动位移最大值分别为16.9 cm、30.7 cm、10.3 cm；大坝地震永久变形轴向、顺河向和垂直向动位移最大值分别为8.8 cm、23.2 cm、39.3 cm，坝体震陷率约为0.42%；心墙永久变形轴向、顺河向和垂直向最大值分别为5.7 cm、14.3 cm、35.9 cm，心墙轴向动压应变、动拉应变最大值分别为0.28%、0.23%，垂直向动压应变、动拉应变最大值分别为0.15%、0.17%。与静应变叠加，心墙轴向压应变、拉应变最大值分别为0.20%、1.08%，垂直向压应变

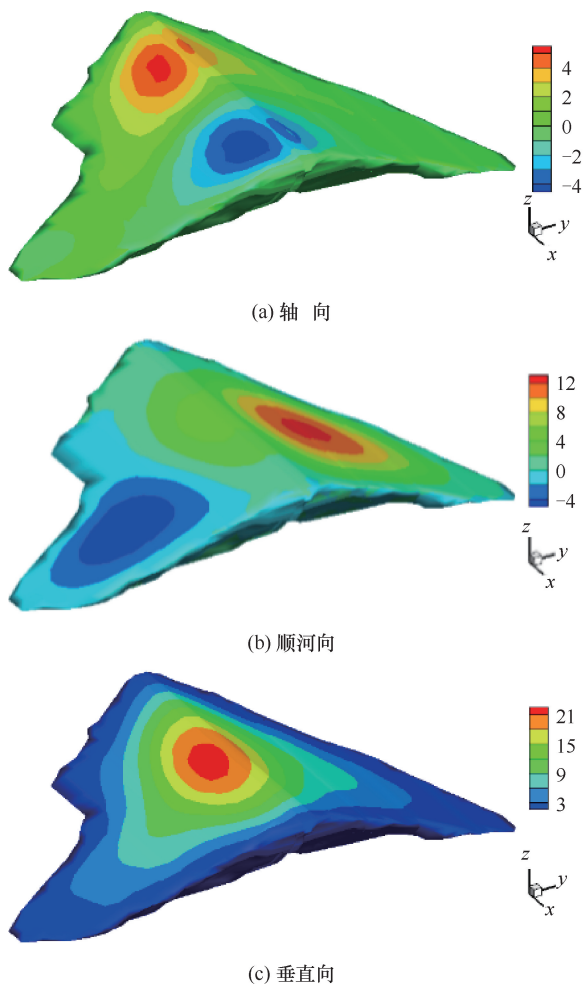


图9 设计地震工况永久变形分布(单位: cm)

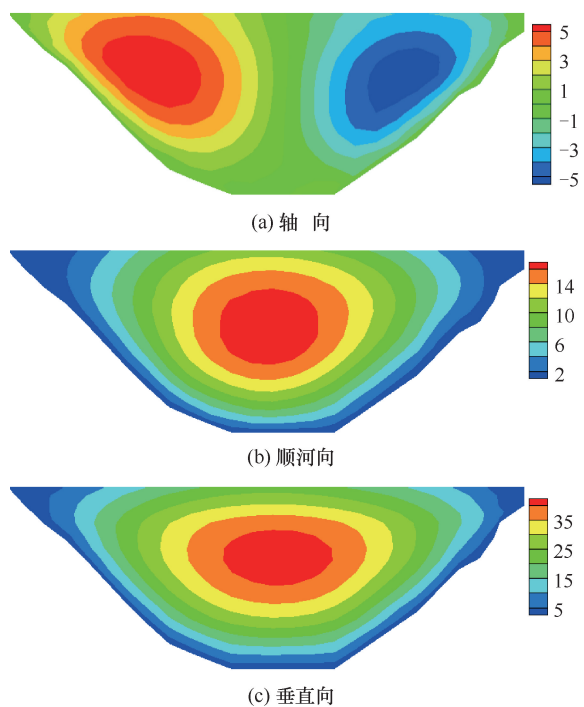


图 10a 地震永久变形

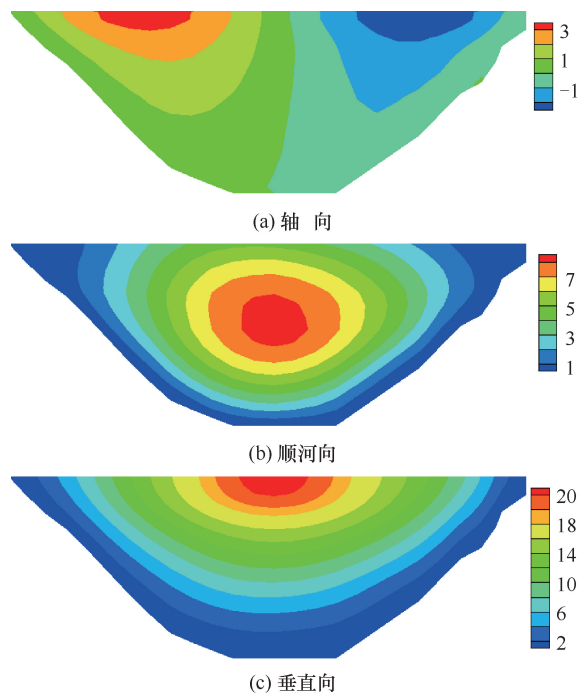


图 10b 静动累加变形

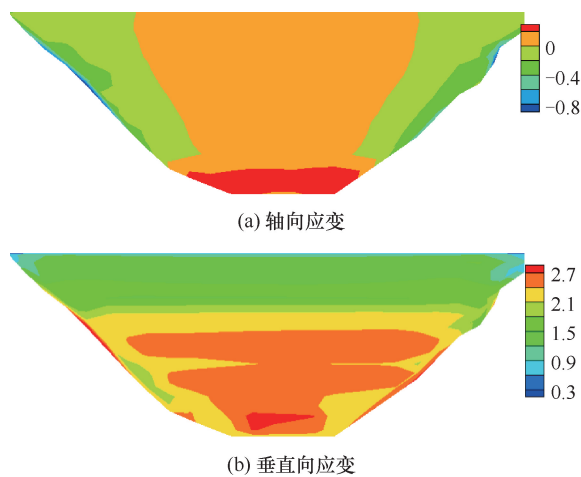


图 11 设计地震工况心墙震后应变分布/%

最大值为 2.69%，心墙震后压应变垂直向、轴向最大值分别为 2.85%、0.46%，拉应变最大值为 1.1%。在校核地震情况下，心墙压、拉应变均满足要求，心墙安全。校核地震结束后，沿河谷及顺河向相对位移相比震前有所增大，最大相对位移分别为 16.9 mm、12.5 mm。校核地震工况，心墙内未出现抗剪安全系数小于 1.0，地震不会导致心墙剪切破坏，上游坝坡坡面抗剪安全系数小于 1.0 区域虽比设计地震情况有所增大，但剪切破坏区位于坝坡浅表，且未形成贯通区，不影响坝体整体安全性。

5.3 设计地震与校核地震对比

设计地震和校核地震情况下大坝的主要动力计算

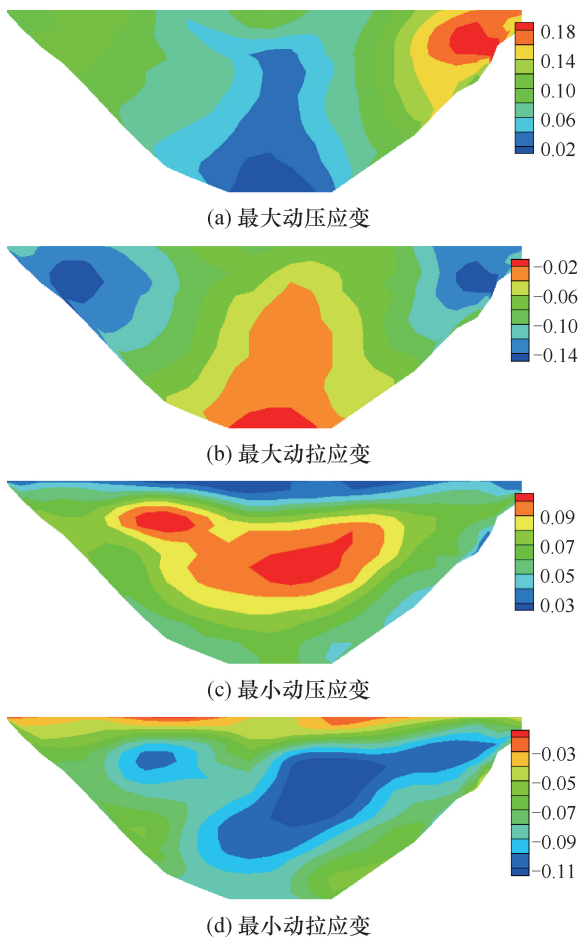


图 12 设计地震工况轴向、垂直向最大动应变

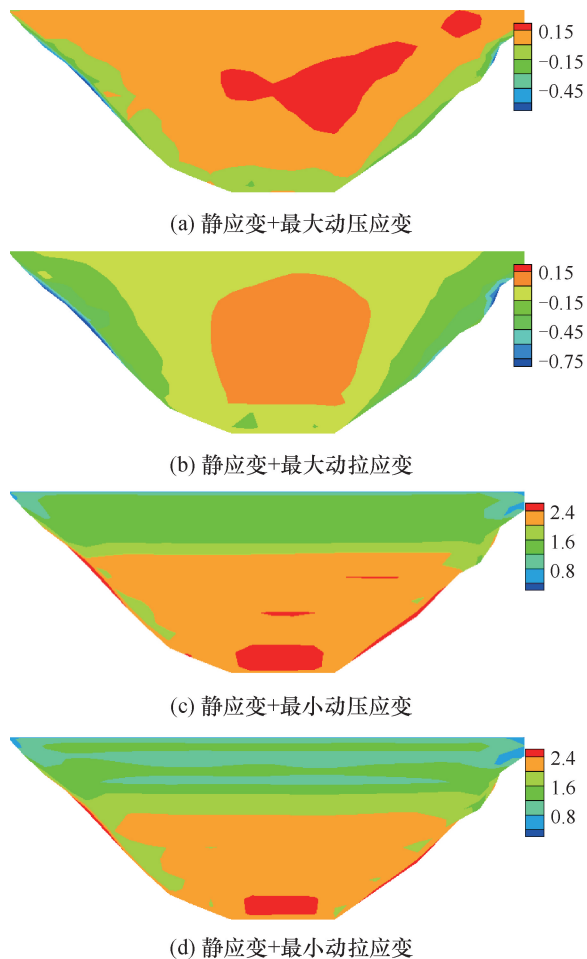


图 13 设计地震工况轴向、垂直向应变

结果如表 8 所列。计算结果显示,校核地震工况大坝动力反应、坝体永久变形及心墙应变的分布规律与设计地震情况大体一致,只是特征值有所增大。

6 成果分析

6.1 静力计算分析

(1) 竣工期和蓄水期坝体最大沉降约占坝高的 0.35%, 坝体变形符合心墙坝变形规律, 量值在心墙坝变形正常范围内。(2) 竣工期和蓄水期坝内应力水平大部分在 0.55 以下, 最大 0.85, 低于 1.00, 未达到塑性破坏的程度, 不会影响坝体整体稳定, 坝体应力符合心墙坝应力规律。(3) 竣工期和蓄水期心墙轴向变形最大值 5.2 cm, 顺河向变形最大值 9.2 cm, 沉降最大值为 31.3 cm, 沥青混凝土心墙变形规律正常。(4) 沥青混凝土心墙应变规律正常, 拉、压应变量值在材料应变允许范围内, 满足要求, 不会发生压裂或拉裂破坏, 心墙安全。(5) 心墙与基座之间的相对位移量不大, 蓄水期沿河谷和顺河向相对位移最大值分别为 13 mm、9.7 mm, 量值在止水允许变形范围内。(6) 坝料参数敏感性分析结果显示, 心墙坝沉降

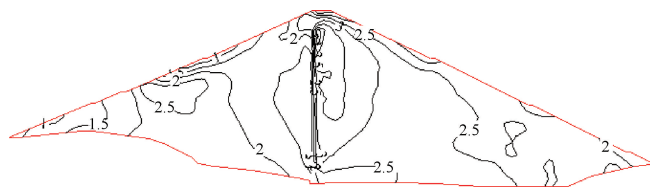


图 14 典型剖面单元抗剪安全系数分布

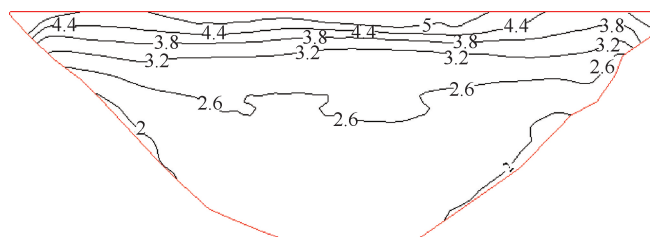


图 15 心墙单元抗剪安全系数分布

率在 0.35%~0.43% 之间, 在土石坝的合理变形范围内, 心墙压、拉应变分别低于 3.0%、0.9%, 均在沥青混凝土材料应变允许范围内, 心墙与基座相对位移在 20 mm 以内, 满足要求。(8) Duncan E-B 模型和南水模型计算得到的大坝应力变形分布规律大体一致,

表8 大坝动力计算结果汇总

统计项目	设计地震	校核地震	统计项目	设计地震	校核地震
坝体轴向加速度放大倍数	2.81	2.54	心墙垂直向永久变形/cm	20.6	35.9
坝体顺河向加速度放大倍数	2.85	2.81	心墙轴向动压应变/%	0.19	0.28
坝体垂直向加速度放大倍数	3.36	3.32	心墙轴向动拉应变/%	0.15	0.23
坝体轴向动位移/cm	11.7	16.9	心墙垂直向动压应变/%	0.11	0.15
坝体顺河向动位移/cm	19.3	30.7	心墙垂直向动拉应变/%	0.12	0.17
坝体垂直向动位移/cm	7.3	10.3	心墙轴向静动累加压应变/%	0.18	0.20
坝体指向右岸永久变形/cm	5.4	8.8	心墙轴向静动累加拉应变/%	0.90	1.08
坝体指向左岸永久变形/cm	4.6	7.6	心墙垂直向静动累加压应变/%	2.64	2.69
坝体上游向永久变形/cm	6.0	10.0	心墙震后轴向压应变/%	0.37	0.46
坝体下游向永久变形/cm	12.8	23.2	心墙震后轴向拉应变/%	0.89	1.10
坝体垂直向永久变形/cm	22.5	39.3	心墙震后垂直向压应变/%	2.79	2.85
心墙指向左岸永久变形/cm	2.7	4.2	心墙与基座沿河谷相对位移/mm	14.8	16.9
心墙指向右岸永久变形/cm	3.5	5.7	心墙与基座顺河向相对位移/mm	11.4	12.5
心墙下游向永久变形/cm	8.4	14.3			

不过量值存在一定差异, Duncan 模型计算出的坝体和防渗体系的变形、应变较大,但均在正常范围内,防渗体系安全。(8)大坝坝坡稳定,坝体和防渗体的应力应变特性较好,特征值均在正常范围内,大坝断面、分区、坝料填筑控制标准、填筑分期、防渗体等设计合理,可满足大坝正常运行和抗震安全要求。

6.2 动力计算分析

(1)正常运行时遇设计地震,下游坝坡和坝顶等坝表面附近动力反应加速度有明显增大现象,坝顶及坝顶附近区域的加速度绝对值较大,坝体存在局部松动、滑落的可能性,在坝顶坝高 1/5 范围上下游坝坡采用一定加筋措施是有必要的;坝体最大震陷 22.5 cm,震陷比约为 0.25%,在土石坝地震永久变形经验范围内;心墙压应变低于 3%,拉应变低于 0.8%,均在沥青混凝土允许强度范围内。(2)正常运行时遇校核地震,大坝动力反应、坝体永久变形及心墙应变的分布规律与设计地震情况大体一致,只是特征值有所增大,不过特征值均在正常范围内,防渗体系安全。(3)大坝坝坡稳定,坝体和防渗体的应力应变特性较好,特征值均在正常范围内,大坝断面、分区、坝料填筑控制标准、填筑分期、防渗体等设计合理,可满足大坝正常运行和抗震安全要求。

7 结论

本文通过对热水河水库工程拦河坝建在Ⅷ度

强地震烈度区、坝高超过 90 m 的沥青混凝土心墙风化料坝,其筑坝材料的工程特性、大坝的应力变形特性、稳定性以及抗震安全性等的研究。通过静力和动力计算分析,得出应力与变形和动剪应变规律,为同类沥青混凝土心墙风化料坝建设提供了一定的理论基础,也是同类工程值得借鉴和参考的工程经验。

参考文献:

- [1] 孔宪京,余翔,邹德高,等. 沥青混凝土心墙坝三维有限元静动力分析[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(2): 197-203.
- [2] 张丙印,李全明,熊焰,等. 三峡茅坪溪沥青混凝土心墙堆石坝应力变形分析[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 18-21.
- [3] 张锐,迟世春,林泉. 高土石坝地震动态分布系数研究[J]. 水力发电, 2005, 31(8): 30-31.
- [4] 李红军,迟世春,钟红,等. 高土石坝地震永久变形研究评述[J]. 水利学报, 2007, 38(S1): 178-183.
- [5] 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.
- [6] 李同春,刘晓青,夏颂佑,等. 冷勒堆石坝沥青混凝土心墙型式及尺寸研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(2): 109-112.

(责任编辑 王 璐)