

覆盖层深度对高面板堆石坝静动力变形影响研究

张亚楠 聂章博 李远程 肖卓尔

(工程设计院)

[摘要] 在高地震烈度区深厚覆盖层上修建高面板堆石坝面临许多新问题,例如大坝的动力稳定、震陷沉降问题等。针对不同厚度覆盖层,应用大型通用有限元分析程序对高面板堆石坝进行静力和动力分析,研究深厚覆盖层上的高面板堆石坝的应力变形问题。计算结果表明:覆盖层厚度对填筑期和蓄水期高面板堆石坝的变形影响较大,结合原型观测资料分析,数值计算结果与观测结果吻合较好;地震作用下,覆盖层厚度增加,覆盖层材料阻尼对地震能量吸收作用增强,坝体加速度幅值和动位移均减小。

[关键词] 覆盖层 高面板堆石坝 应力变形分析 地震动力反应

面板堆石坝因其安全性、经济型、适应地质条件强等优点受到国内外坝工届的普遍重视^[1-2]。目前我国西部地区相当多的面板堆石坝位于强震区,部分坝址处存在深厚覆盖层,使得深厚覆盖层上面板堆石坝沉降变形和抗震问题研究的重要性和迫切性越来越突出^[3-7]。温立峰等研究分析了覆盖层上面板坝分期填筑和筑坝速度对坝体和防渗结构应力变形的影响^[8]。李媛媛等研究覆盖层厚度对反应谱峰值的影响,发现覆盖层厚度大于40 m,放大倍数随覆盖层厚度增大而逐渐减小^[9]。彭雪峰等研究了覆盖层厚度对高面板堆石坝动力反应的影响,提出了临界厚度的概念^[10]。本文针对不同厚度覆盖层上高面板堆石坝,应用大型有限元软件模拟大坝的施工和蓄水过程以及在强震作用下动力响应,探索深厚覆盖层高面板坝的应力变形与动力反应的一些规律。

1 工程概况

阿尔塔什水利枢纽工程是新疆叶尔羌河干流山区下游河段的控制性工程,工程规模为I等大(1)型,水库总库容为22.49亿m³。工程承担灌溉、防洪、发电综合任务。该枢纽挡水建筑为面板堆石坝,坝高164.8 m。面板坝坝址区河床第四系的松散堆积物砂卵石层覆盖层最大深度达94 m,坝址区基本设计震烈度为Ⅷ度,大坝抗震设防烈度Ⅸ度,100

年超越概率2%的设计地震动峰值加速度为375gal。阿尔塔什面板堆石坝工程规模为覆盖层上已建最高的面板堆石坝,建设难度极大,其变形控制问题尤为突出。因此,研究深厚覆盖层面板坝分期填筑和蓄水过程,以及设计地震工况的坝体变形分析十分必要。

2 计算原理

2.1 堆石体的静、动力本构模型

堆石体静力计算采用邓肯张E-B本构模型来描述堆石料的应力-应变关系。模型以切线弹性模量 E_t 和切线体积模量 B_t 作为计算参数,其中切线弹性模量表达式为:

$$E_t = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n (1 - R_f S)^2 \quad (1)$$

式中: P_a 为单位大气压力; R_f 是破坏应力比, σ_3 是围压, K 和 n 是试验拟合参数,由常规三轴试验得到。 S 为剪应力水平,反映材料强度的发挥程度,表达式为:

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (2)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏时的偏应力,由摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)破坏准则得:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

作者简介:张亚楠(1994—),女,河南省邓州人,助理工程师,硕士研究生,从事高坝结构数值仿真研究工作。

式中, c 是黏聚力, φ 是内摩擦角, 堆石料的强度在一定程度上表现为非线性, 考虑粗粒料内摩擦角 φ 随围压 σ_3 的变化

$$\varphi = \varphi_0 - \varphi \lg \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right) \quad (4)$$

式中 φ_0 和 φ 是内摩擦角与围压在对数坐标系的截距与斜率

切线体积变形模量 B_t :

$$B_t = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (5)$$

式中, K_b 、 m 是体积模量与围压在双对数坐标系的截距和斜率, 由三轴卸载试验得到

对于卸荷或再加荷情况, 采用回弹模量 E_{ur} 进行计算:

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{n_{ur}} \quad (6)$$

式中, K_{ur} 为 $\lg \left(\frac{K_{ur}}{n_{ur}} \right) \sim \lg \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)$ 直线的截距, n_{ur} 为其斜率, 由常规三轴压缩试验的卸载再加载曲线得到。

等效线性粘弹性明显因其具有概念明确, 应用方便的优点, 在土石坝有限元计算中得到了广泛应用。堆石体动力计算分析采用等效线性粘弹性模型, 即假定坝体土石料和地基覆盖层土为粘弹性体,

采用等效剪切模量比与动剪应变的衰减曲线 ($\frac{G_d}{G_{dmax}} \sim \gamma_d$) 以及等效阻尼比随动剪应变的增长曲线 ($\lambda_d \sim \gamma_d$) 来反映土的动应力应变关系的两个基本特征: 非线性和滞后性。相应的计算公式如下:

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma_d}{\gamma_r}} \quad (7) \quad \lambda_d = \lambda_{dmax} \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_r} \right)^{m'} \quad (8)$$

式中: G_d 是动剪切模量, γ_d 是动剪应变, G_{dmax} 是最大剪切模量, λ_{dmax} 是最大阻尼比; m' 是等效阻尼比指数; γ_r 是参考剪应变。

最大动剪切模量 G_{dmax} 与平均有效应力 σ'_m 的关系用下式表示:

$$G_{dmax} = K' P_a \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{n'} \quad (9)$$

式中, K' 为动剪模量系数, n' 为动剪模量指数。参数 K' 和 n' 均由动三轴试验确定。

2.2 动水压力

地震期间, 库水的动水压力采用附加质量法进行计算, 即将动水压力对坝体地震反应的影响用等效附加质量考虑, 将其与坝体质量叠加来进行动力分析:

$$M_{wi} = \frac{\psi}{90} \frac{7}{8} \rho \sqrt{H_{0i} z_i A_i} \quad (10)$$

式中: M_{wi} 为等效附加质量; ψ 为上游坝体倾斜角; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; H_{0i} 为计算节点 i 所属断面的坝前水深, m ; z_i 为计算节点到水面的水深, m ; A_i 为节点 i 的有效面积, m^2 。

3 有限元计算分析

3.1 计算模型

静力与动力计算采用的有限元网格相同, 单元总数 5072, 节点数 10020, 坝前坝后及坝基均延伸 1.5 倍坝高。由于坝体覆盖层底部坐落于基岩表面, 基岩变形量较小, 因此将基岩底部所有节点自由度全部约束, 模型整体法向约束。有限元计算模型和材料分区见图 1。

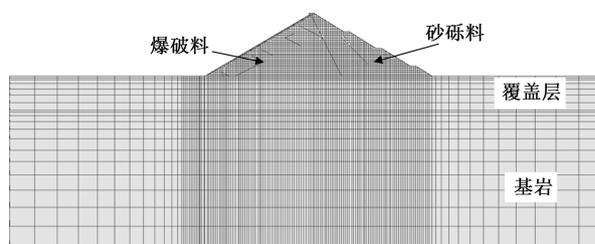


图 1 有限元计算模型大坝材料分区示意图

3.2 计算参数

计算分析所采用的材料参数取自室内大型三轴试验的成果^[11], 表 1 是砂砾石料、爆破料和坝基料的主要静力计算参数, 表 2 是筑坝料动剪切模量系数和指数, 表 3 是筑坝料归一化的动剪切模量和等效阻尼比与动剪应变的关系。

表 1 筑坝料邓肯 E-B 模型参数

材料类型	ρ_d (kg/m^3)	K	n	K_b	m	R_t	φ ($^\circ$)	$\Delta\varphi$ ($^\circ$)	K_{ur}	n_{ur}
砂砾石料	2302	1750	0.55	950	0.25	0.85	52.9	9.0	3500	0.28
爆破料	2155	1080	0.36	420	0.16	0.74	50.2	6.5	2160	0.26
坝基料	2200	1380	0.53	690	0.52	0.87	52.5	8.0	2760	0.26

表2 筑坝料动剪切模量系数和指数

试样名称	K'	n'
砂砾料	3878	0.38
爆破料	3456	0.58
坝基料	2400	0.46

3.3 坝体填筑和蓄水过程模拟

坝体施工期填筑按照分期填筑模拟加载过程分

为54级,填筑完成后逐渐蓄水至正常蓄水位(高程1820 m),蓄水加载过程分为16级。地震动水力采用附加质量法进行模拟。

3.4 输入地震波

计算采用的地震动输入时程曲线如下图所示,水平向加速度峰值为375gal,竖向加速度峰值取水平的2/3倍,如图2所示。

表3 筑坝料归一化的动剪切模量 $G_d/G_{d\max}$ 和等效阻尼比 λ

试料名称	参数	动剪应变幅值 γ_d							
		5×10^{-6}	1×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}
砂砾料	$G_d/G_{d\max}$	0.988	0.970	0.889	0.833	0.623	0.497	0.195	0.106
	$\lambda/\%$	2.14	2.35	3.09	3.61	6.22	8.98	16.48	17.08
爆破料	$G_d/G_{d\max}$	0.981	0.964	0.877	0.807	0.551	0.418	0.168	0.106
	$\lambda/\%$	1.99	2.00	2.01	3.19	11.7	15.97	23.24	26.32
坝基料	$G_d/G_{d\max}$	0.996	0.992	0.966	0.937	0.770	0.644	0.332	0.239
	$\lambda/\%$	1.88	1.90	1.91	1.92	4.11	7.63	16.39	20.06

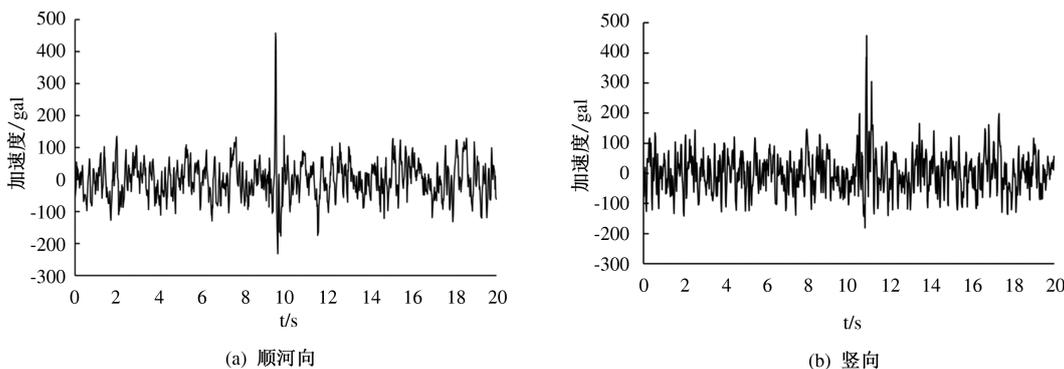


图2 加速度时程曲线

4 结果分析

4.1 静力结果

图3和图4为竣工期大坝小、大主应力等值线图,图5和图6为蓄水期大坝小、大主应力等值线图。可以看出,坝体和坝基覆盖层中应力分布符合常规土石坝的应力变形规律,坝体和坝基内应力水平不高,不具备整体剪切破坏应力条件。覆盖层深度越厚,坝体应力越大。相比于竣工期,由于上游水压力的作用,蓄水期大、小主应力等值线在上游部位出现上抬,且与上游坝坡相交。

坝体变形主要有堆石体的调整和颗粒破碎引起,受堆石颗粒强度、粒径分布及大坝施工方法等因素影响,使得大坝变形性状难以精准预测。图7和图8是竣工期大坝顺河向位移和竖向沉降等值线图,图9是大坝0+475断面(覆盖层厚55 m)填筑期

竖向位移监测图^[12]。图中可见,顺河向位移基本以坝轴线为界向上游、下游位移,55 m厚覆盖层上坝体最大位移27.76 cm,发生在大坝1/2坝高处,而95 m厚覆盖层坝体最大位移36.29 cm,发生在上游坝体与覆盖层交界处。竣工期覆盖层55 m大坝最大沉降量为78.08 cm,占坝体与覆盖层之和219.8 m(最大坝高断面)的0.35%。监测数据显示,坝体(0+475断面)及坝基最大沉降量60.58 cm,沉降量占坝体与覆盖层之和216.3 m的0.28%,其中坝体实际沉降量为23.68 cm,占计算填筑坝高(151.3 m)的0.16%。坝基最大沉降测点在坝轴线位置,总沉降量54 cm,沉降量占覆盖层厚度55 m的0.98%。考虑到坝体实际填筑质量控制严格,施工水平较高,与实测相比,计算的55 m厚覆盖层上坝体沉降分布相符。

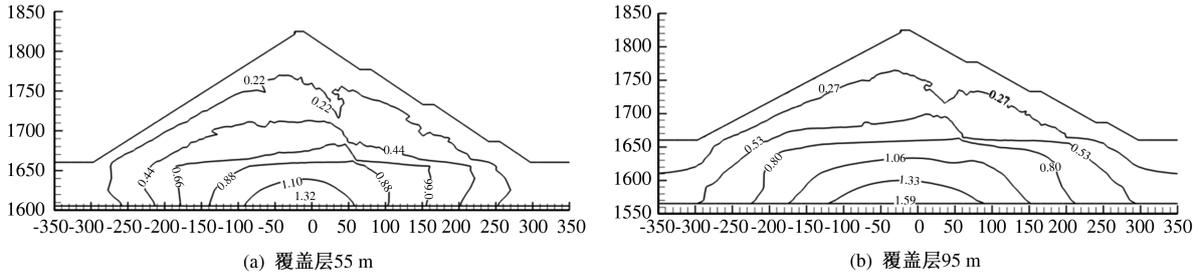


图3 竣工期小主应力等值线图

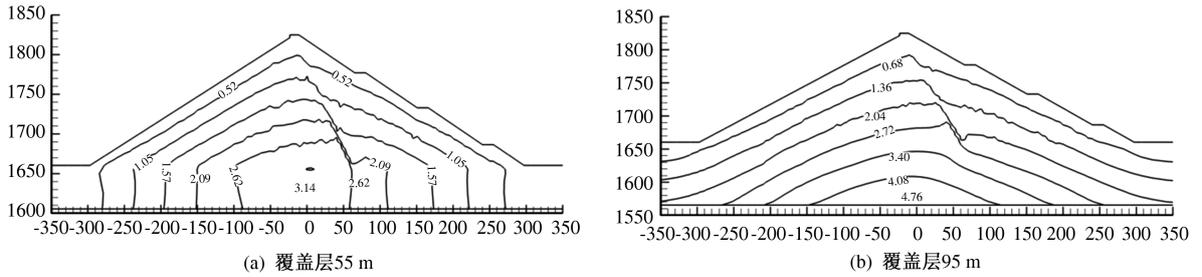


图4 竣工期大主应力等值线图

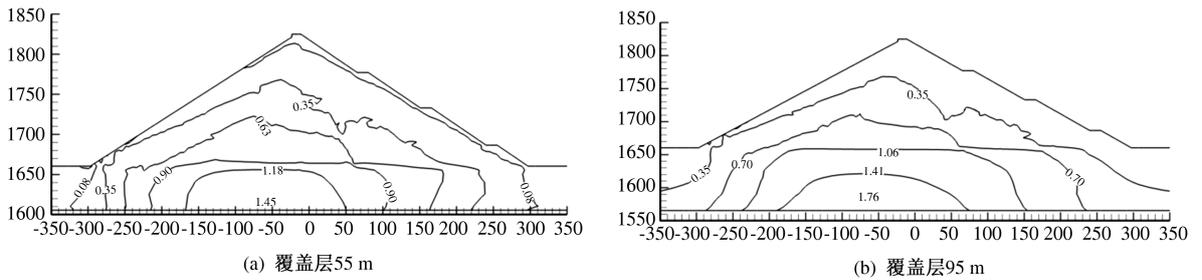


图5 蓄水期最小主应力等值线图

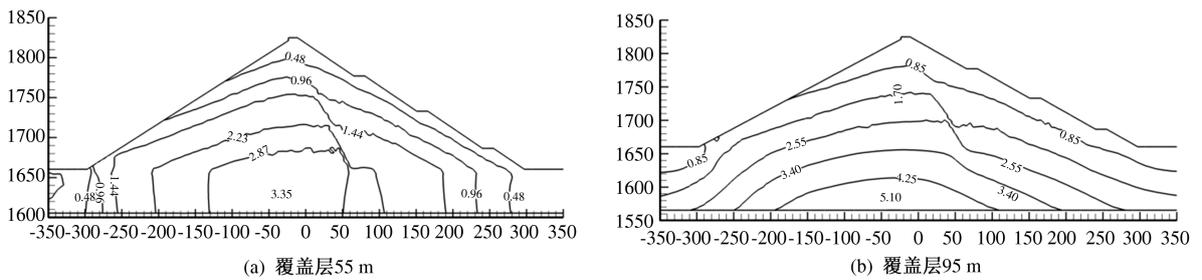


图6 蓄水期最大主应力等值线图

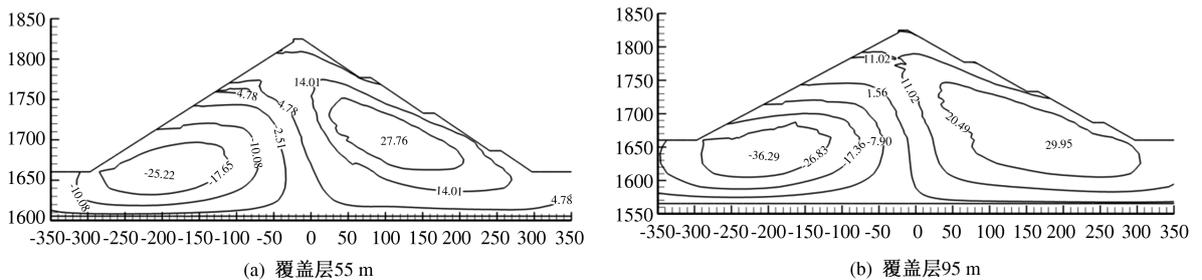


图7 竣工期顺河向位移图

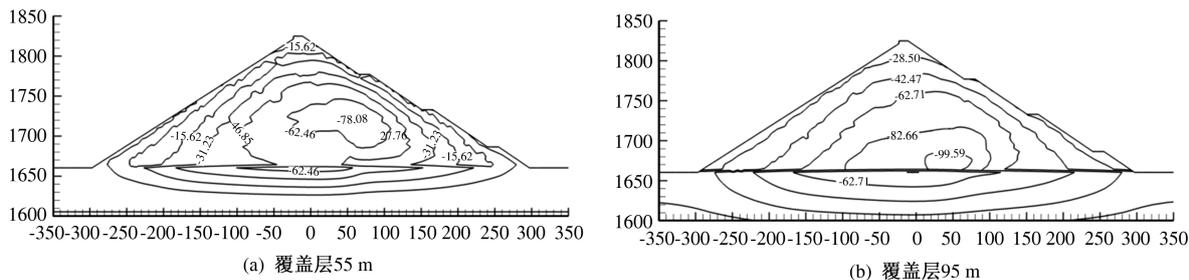


图8 竣工期竖向位移图

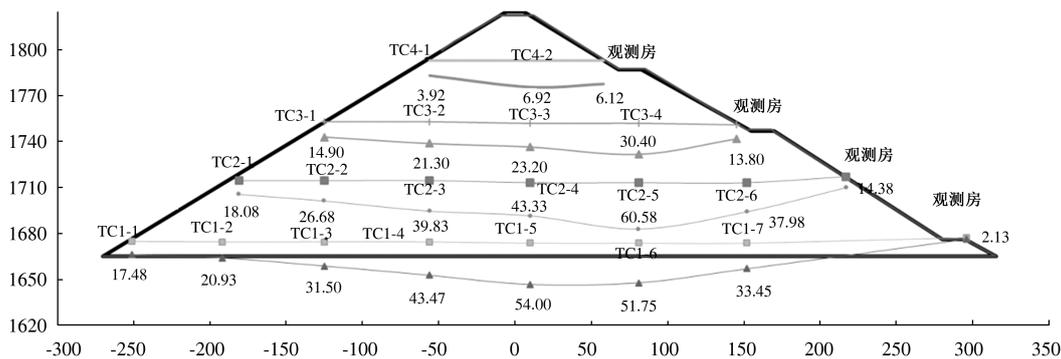


图9 填筑期竖向位移监测图(0+475断面)

图10和图11为蓄水期顺河向位移和竖向沉降等值线图。与竣工期相比,蓄水时在水压力的作用下,坝体大部分区域水平位移均向下游位移,上游位移减小而下游位移增大。覆盖层厚度增加,竖向沉降最大值向下偏移,95m覆盖层坝体沉降最大值发

生在坝轴线靠近覆盖层处。55m和95m覆盖层上大坝最大水平位移向上游分别为10.43cm和22.18cm,向下游分别为35.93cm和40.26cm。蓄水期坝体竖向沉降增加较小,由此可见坝体在填筑过程中已完成大部分沉降。

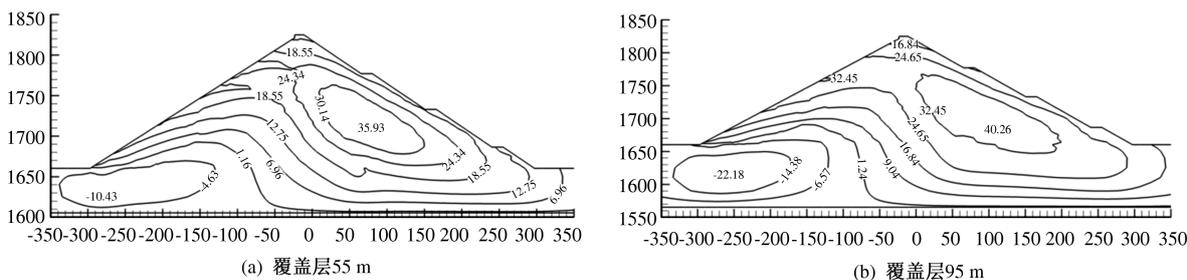


图10 蓄水期顺河向位移图

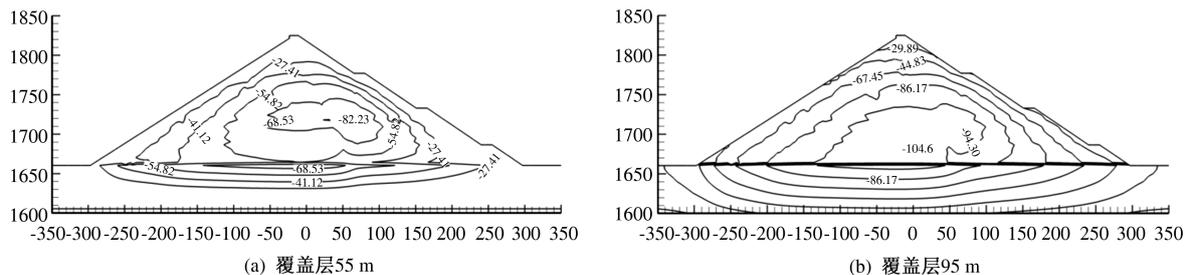


图11 蓄水期竖向位移图

4.2 动力结果

图 12 和图 13 为地震过程中大坝顺河向和竖向最大加速度等值线图。图中可以看出,在地震期间,坝体内部加速度基本随坝高增加而增大,并在坝顶达到最大值,表现出明显的鞭梢效应。顺河向绝对

加速度峰值大于竖向绝对加速度峰值,符合土石坝动力反应的一般规律。覆盖层深度增加,坝体最大加速度减小,这主要是因为随覆盖层厚度的增大,覆盖层土体的材料阻尼对地震能量的吸收作用增强,造成加速度幅值减小。

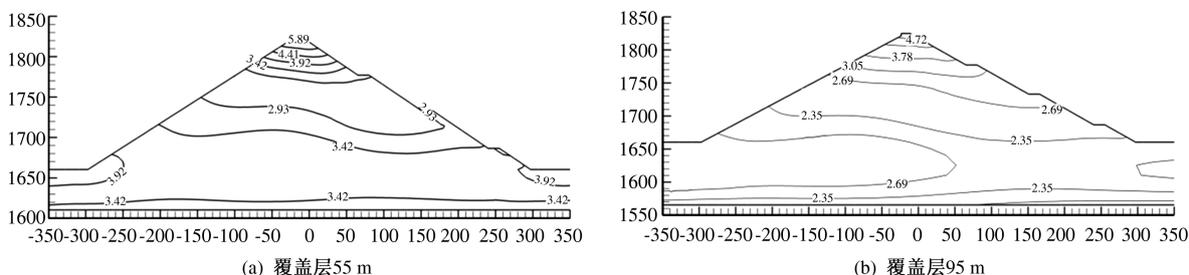


图 12 坝体最大加速度等值线图(顺河向)

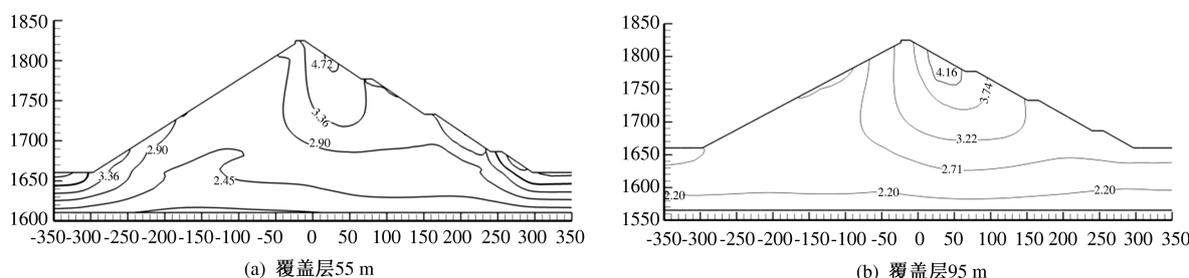


图 13 坝体最大加速度等值线图(竖向)

图 14 和图 15 为地震过程中大坝顺河向和竖向动位移等值线图。图中可以看出,坝体动位移的极值在地震期间不大,对坝体的影响较小。随着覆盖层深度增加,坝体动位移略有减小,55 m 和 95 m 覆

盖层上坝体顺河向动位移最大值分别为 24.14 cm 和 23.71 cm,均发生在坝顶处;55 m 和 95 m 覆盖层上坝体竖向动位移最大值分别为 7.59 cm 和 7.28 cm,均发生在坝顶靠下游位置。

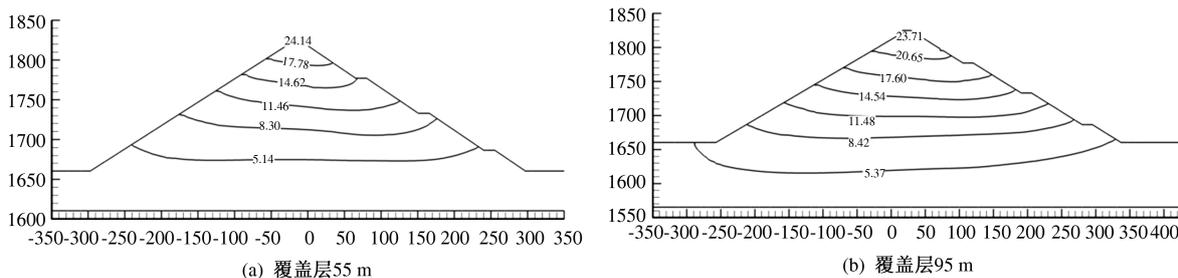


图 14 坝体动位移等值线图(顺河向)

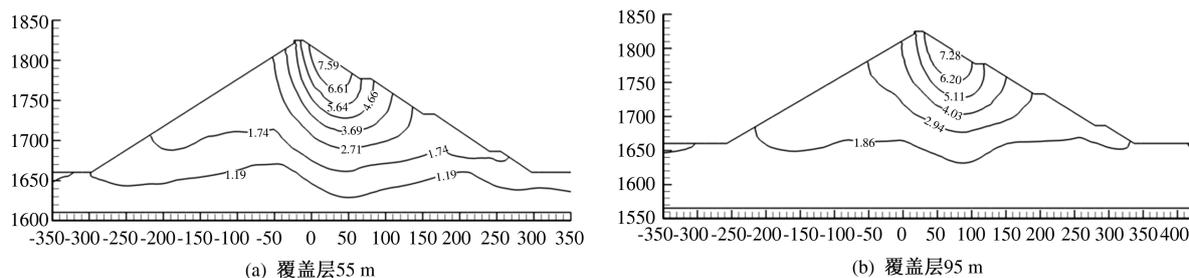


图 15 坝体动位移等值线图(竖向)

5 结论

(1) 本文研究不同覆盖层深度对蓄水期和竣工期堆石坝应力变形的影响,并与实测资料进行对比,研究发现覆盖层厚度增加,坝体位移最大值发生部位向下偏移。与实测相比,计算的覆盖层上坝体沉降分布相符。

(2) 在设计地震作用下,坝体的应力比较小,堆石体的决定加速度和位移的最大地震反应位于坝顶局部位置,存在明显的鞭梢效应。

(3) 覆盖层厚度增加,覆盖层材料阻尼对地震能量吸收作用增强,造成加速度幅值和动位移减小。

参考文献

- [1] 徐泽平,邓刚.高面板堆石坝的技术进展及超高面板堆石坝关键技术问题探讨[J].水利学报,2008,39(10).
- [2] 徐泽平.混凝土面板堆石坝关键技术与研究进展[J].水利学报,2019,050(001):62-74.
- [3] 朱晟,顾淦臣.深覆盖层上混凝土面板堆石坝地震反应分析[J].河海大学学报:自然科学版,1997.
- [4] 邹德高,余翔,余挺,等.深厚覆盖层上高土石坝动力稳定分析[J].水电与抽水蓄能,2020,006(001):P.22-27.
- [5] 张艳峰.深覆盖层上堆石坝地震响应分析[J].水利与建筑工程学报,2008,6(003):37-38.
- [6] 余挺,邵磊.特厚覆盖层动力反应分析的瑞利阻尼系数确定方法与应用[J].水电与抽水蓄能,2020,006(001):P.33-39,73.
- [7] 郇能惠,李国英,赵魁芝,等.强震区高面板堆石坝静力和动力应力变形性状[J].岩土工程学报,2004,26(2):183-188.
- [8] 温立峰,柴军瑞,王晓.深覆盖层上面板堆石坝应力变形特性研究[J].岩土力学,2015,36(008):2386-2394.
- [9] 李媛媛,徐扬,吴东.覆盖层厚度对反应谱峰值的影响[J].地震地磁观测与研究,2006,027(004):33-38.
- [10] 彭雪峰,朱亚林,马驰.覆盖层厚度对面板堆石坝的动力反应的影响分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,043(001):98-102.
- [11] 吴俊杰.阿尔塔什水利枢纽工程混凝土面板堆石坝抗震工程措施及静、动力有限元计算分析[J].水利水电技术,2019,50(12):130-137.
- [12] 关志诚,王志坚,范金勇.阿尔塔什工程高砼面板堆石坝大坝填筑变形控制[R].第七届全国水工抗震防灾学术交流会议.北京:2019.

河南黄河渠村分洪闸除险加固工程

河南黄河渠村分洪闸为黄河上的第一大闸,56孔,宽749m,是承担黄河向北金堤蓄滞洪区分洪的唯一水闸,北金堤蓄滞洪区为保留滞洪区,作为处理超标准特大洪水的临时分洪措施,是防御黄河下游超标准洪水的重要工程措施之一,渠村分洪闸对保障下游河道两岸的安全起着重要的作用。

渠村分洪闸除险加固工程主要包括:(1)闸室段缺陷处理;(2)启闭机室及两侧楼梯间拆除重建;(3)机架桥拆除重建;(4)公路桥拆除重建;(5)废弃的铁路桥拆除;(6)观测设施恢复;(7)消力池土方清理;(8)更换启闭机和闸门;(9)更新电气设备;(10)发电厂房拆除重建。

工程特点:渠村分洪闸属于软基上的水闸,下部基础维持原状,仅对部分构件进行改建、维修和更换等,本次除险加固工程在进行布置时,拆除新建的结构构件,在闸墩上重新布设时尽量均衡布置,在满足结构强度的前提下,尽量减小上部荷重。

渠村分洪闸除险加固工程结合工程特点,在满足分洪功能的前提下,提出绿色发展,兼顾生态自然景观,促进生态环境可持续发展的设计理念。

功能方面:通过除险加固工程建设,使渠村分洪闸工程全部达到设计标准,解决该闸现有的病险问题,恢复该闸使用功能,保证结构的安全、稳定,确保向北金堤蓄滞洪区分洪时闸门的正常启闭。

以人为本方面:满足人类活动的需要,建立人水和谐的环境,建筑景观与周围环境相结合,打造一分水闸为中心的人文景观,为周边提供观摩实习、娱乐休闲的场所。