

河谷地形对高土石坝动力反应特性影响的分析

朱亚林¹, 孔宪京², 邹德高², 朱寿义³

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024;
3. 鄂尔多斯市鄂前旗蒙迪建筑劳务有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016200)

摘要: 应用三维完全非线性动力弹塑性分析方法, 研究了狭窄河谷中高土石坝的动力反应特性, 通过计算分析, 给出了不同河谷形状特性下高土石坝的剪应变和永久位移分布规律。结果表明: 狭窄河谷地形导致大坝动力反应表现出较强的空间三维效应, 河谷形状对坝体的剪应变和位移有显著影响; 对称河谷时坝体的剪应变呈椭圆形往外延伸, 最大值出现在坝顶心墙处; 当河谷宽高比相对较小时, 河谷形状对坝体的约束作用较强, 位移增大的趋势相对较为明显; 在同样河谷形状特性的情况下, 宽河谷情况下的位移较缓岸坡情况下坝顶沉降要大些。本文结论可为狭窄地形强震地区的大坝设计提供依据。

关键词: 高土石坝; 河谷形状; 永久变形; 剪应变

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)09-1590-08

作者简介: 朱亚林(1979-), 女, 安徽庐江人, 副教授, 从事高土石坝抗震、边坡支护方面研究。E-mail: zhuyalin@hfut.edu.cn。

Effect of valley topography on dynamic response properties of high earth-rockfill dams

ZHU Ya-lin¹, KONG Xian-jing², ZOU De-gao², ZHU Shou-yi³

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. E Pre Mundie Building Services Co., Ltd., Erdos 016200, China)

Abstract: Three-dimensional nonlinear dynamic elasto-plastic analysis method is employed to study the seismic response characteristics of a high earth-rockfill dam in a narrow valley. The distribution rules of shear strain and permanent displacement are given with different topographies of valley. The results show that the dynamic response of the dam exhibits strong spatial three-dimensional effect of valley topography and that the shear strain and displacement of the dam has significant effects. For the symmetrical valley, the distribution of shear strain is extending out in an oval shape, and the maximum value appears at the crest of the core wall. When the shape factor of the ratio (L/H) is smaller, the constraint to the dam is stronger, and the displacement increases more obviously. Under the same ratio, the settlement of dam crest under a wider valley is larger than that under a gentler slope. The results are valuable for the design of high earth-rockfill dams with a narrow valley in meizoseismal areas.

Key words: high earth-rockfill dam; valley topography; permanent deformation; shear strain

0 引言

中国 80% 的水能资源在西部, 随着经济建设的迅速发展和西部大开发战略的实施, 在中国西部水利工程的建设必将得到快速发展, 高坝大库的建设也越来越多, 在这些高坝大库中, 高土石坝占了相当比例。西部地区地质条件复杂, 地震频繁、强度大, 在西部建设的这些高土石坝多位于强震区, 这些高坝大库能

否抗御强震袭击, 它们在地震作用下的安全性如何, 怎样进行抗震设计, 是人们十分关心的重大问题。这些高坝如果遭受地震破坏, 会产生一系列严重后果, 一旦因地震而溃决, 将造成生命财产的重大损失, 因而, 高土石坝抗震研究工作的迫切性和重要性越来越突出^[1-3]。

以往高土石坝多修建于宽阔河谷之上, 对施工、蓄水、地震等荷载作用下的应力应变特性研究也主要针对该类型土石坝进行。随着高土石坝设计和施工技术等的快速发展, 在河谷宽高比(坝顶长与坝高之比)小于2的较狭窄河谷上修建高土石坝逐渐受到重视。尽管已经在狭窄河谷上修建了一些高土石坝, 并针对其应力应变规律以及河谷宽高比对位移和应力的影响进行一些研究, 但并未系统研究强震作用下不同河谷形状对高土石坝的动力反应特性。河谷的宽窄、岸坡的陡缓、两岸岸坡的对称性以及坝肩是否存在台地等均可直接影响坝体的动力反应特性^[4-8]。本文通过采用三维高土石坝动力弹塑性分析方法, 对不同河谷形状下高土石坝的动力反应进行深入研究, 揭示了河谷形状对高土石坝动力变形规律和破坏机理的影响, 从而为狭窄地形强震地区的大坝设计、施工提供理论指导。

1 计算方法

高土石坝地震反应的二维分析已有了较多的计算方法和相应程序, 但由于高土石坝多修建在峡谷之中, 具有明显的三维效应, 仅做二维分析是不够的, 因此本文采用高土石坝的三维地震反应分析。

目前, 地震反应分析主要采用有限元分析方法, 是基于等价黏弹性模型的等效线性分析, 该方法采用的等价黏弹性模型概念明确, 使用方便, 在参数的确定和应用方面积累了较丰富的试验资料和工程经验, 在工程中应用较广。然而, 该方法的缺陷是: 在加荷和卸荷时模量相同, 不能直接计算土体在周期荷载连续作用下发生的残余变形或位移; 等效线性方法所采用的割线模量在小应变时与非线性的切线模量很相近, 但在大应变时误差很大, 偏于不安全; 塑性屈服模拟不合理以及不能考虑大变形。

近年来, 拉格朗日法由于能解决大变形问题和弹塑性动力分析而倍受青睐。FLAC^{3D} 是一种基于显式有限差分法的快速拉格朗日数值分析方法, 它可以模拟岩土或其他材料的力学行为。在动力分析中, 考虑到结构材料的力学性质和大变形影响, 采用非线性振动分析方法, 能够真实地模拟土体的应力-应变关系, 由于采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型, 可以直接分析地震作用下坝体的永久变形^[9-11]。

2 计算模型

2.1 几何模型

为研究不同地形条件对高土石坝动力反应特性的影响, 需建立典型的三维大坝分析模型, 通过改变岸坡坡度、河谷宽度、岸坡对称性等外部条件, 进而研究河谷地形特性的改变对坝体的动力反应特性的影响。

基本模型采用上、下游对称的心墙坝, 坝高为 200 m, 坝坡为 1:1.8, 坝顶宽 16 m, 心墙 1:0.2, 心墙顶宽 6 m, 河谷底宽为 36 m, 左、右岸河谷坡度为 1:1, 坝体采用堆石料。坝体几何模型如图 1 所示。采用位移边界约束条件, 模型底面和侧面均被约束, 底面标高为零。

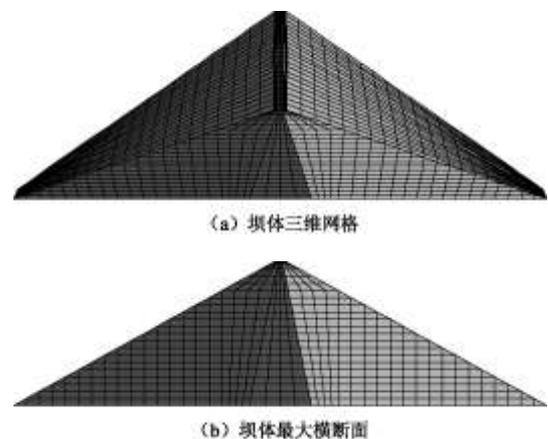


图 1 坝体几何模型

Fig. 1 Geometric model

2.2 材料参数

由于地震作用下的坝体破坏主要是剪切破坏, 本文将堆石料视为弹塑性体, 采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。剪切屈服函数 f_s 为

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (1)$$

式中 σ_1 , σ_3 分别为大, 小主应力, $N_\phi = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$, ϕ 为内摩擦角, c 为黏聚力。当 $f_s < 0$ 时, 则表明出现了剪切屈服。

该模型比较容易模拟坝体地震时发生的塑性剪切变形, 对分析过程中材料剪切模量的变化按公式 (2), 具体在 FLAC 程序中通过加入 FISH 语句来实现的, 计算结果见图 2。

$$G = C \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma'_0}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

式中 G , σ'_0 采用同一量纲; p_a 为大气压, σ'_0 为平均应力; C 为系数, n 为指数, 其值可由试验结果确定^[12]。

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90815024); 国家自然科学基金面上项目(51179043); 合肥工业大学发展基金项目(2010HGZ0014); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2012HGBZ0199)

收稿日期: 2012-05-23

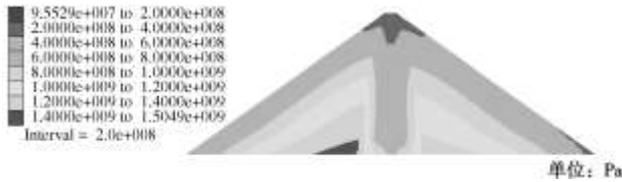


图2 坝体最大横断面初始剪切模量分布

Fig. 2 Distribution of initial shear modulus

泊松比 ν 取 0.3, 则体积弹性模量 $K = 13 \times G / 6$; 黏聚力 c 、摩擦角 φ 、剪胀角 ψ 、拉伸强度 σ^t 按表 1 取值。

表 1 堆石体的计算参数

Table 1 Parameters of rockfill

参数	c	n	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	ψ	σ^t
上游堆石料	2455	0.619	3	36	12	0
下游堆石料	2216	0.609	3	36	10	0
心墙料	1864	0.467	2.5	26	14	0

2.3 输入地震动

模型计算采用人工地震波, 选用拟合某坝址区 100 a 超越概率为 2% 的基岩期望反应谱曲线得到的人造波, 峰值加速度为 2.83 m/s^2 , 时程曲线如图 3 所示, 计算中均考虑顺河向地震输入。

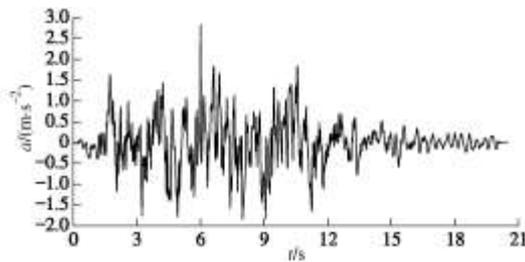


图3 地震输入加速度时程

Fig. 3 Acceleration-time history

2.4 计算方案

为研究不同的岸坡坡度、河谷宽度、河谷对称性等地形条件对坝体的动力变形特性的影响, 进行了 3 组不同方案的分析, 具体见表 2, 图 4 为各组方案的河谷形状示意图^[13]。

表 2 计算方案

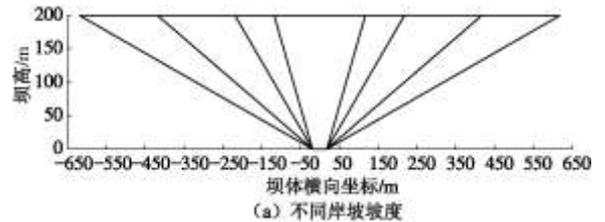
Table 2 Model cases

组别	方案	左岸坡度	右岸坡度	河谷底宽
岸坡坡度变化	1-1	1 : 0.5	1 : 0.5	36 m
	1-2	1 : 1.0	1 : 1.0	36 m
	1-3	1 : 2.0	1 : 2.0	36 m
	1-4	1 : 3.0	1 : 3.0	36 m

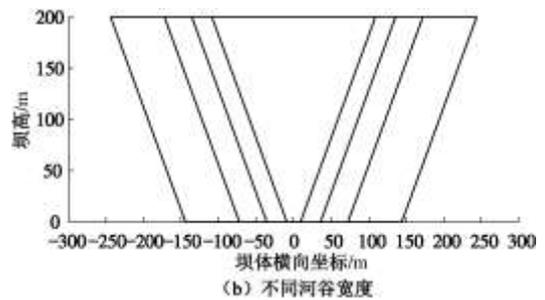
河谷底宽变化	2-1	1 : 0.5	1 : 0.5	18 m
	2-2	1 : 0.5	1 : 0.5	72 m
	2-3	1 : 0.5	1 : 0.5	144 m
	2-4	1 : 0.5	1 : 0.5	288 m
不对称岸坡坡度变化	3-1	1 : 1.0	1 : 0.5	36 m
	3-2	1 : 1.0	1 : 2.0	36 m
	3-3	1 : 1.0	1 : 3.0	36 m
	3-4	1 : 1.0	1 : 4.0	36 m

3 计算结果分析

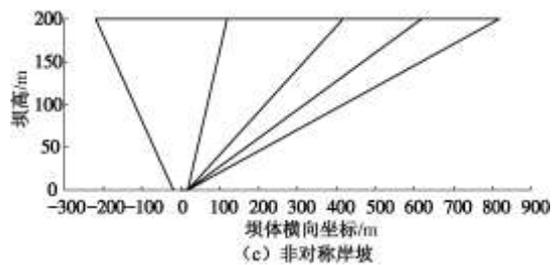
运用 FLAC^{3D} 软件, 采用 M-C 弹塑性模型和拉格朗日更新坐标系, 对各计算方案进行了弹塑性变形分析, 主要从坝体的塑性剪应变分布和永久变形的变化规律来研究河谷形状特性变化对高土石坝动力反应特性的影响。



(a) 不同岸坡坡度



(b) 不同河谷宽度



(c) 非对称岸坡

图4 河谷形状示意图

Fig. 4 Diagram of valley shape

3.1 岸坡坡度的影响

(1) 剪应变分布

振动台试验表明, 地震作用下, 虽然高土石坝宏观破坏性态表现为坝顶上部范围内沿坝坡浅层的滑落、坍塌, 其位置靠近坝顶区附近, 但这一破坏形式往往是由于坝体内部累积了较大的塑性变形引起的,

因此分析坝体塑性变形的分布很有意义。

由于加速度反应较大区域对应的剪应变较大, 参考有限元计算结果, 坝体加速度放大倍数在坝顶部成椭圆状分布, 并且坝体加速度放大倍数在沿坝高 4/5 以上放大较为明显, 坝顶部的加速度放大倍数在沿坝轴线方向以坝顶中心点为中心 3/10 以内放大较为明显^[4], 通过计算比较此范围对应的剪应变大小为 0.08, 故选取剪应变 0.08 作为基准进行结果分析。

图 5 显示了岸坡坡度变化时坝体的塑性剪应变分布的俯视图。由图可知, 大坝的剪应变等值线分布以坝轴线中心为原点, 成椭圆形往外延伸, 最大值出现在坝顶心墙处; 随着岸坡坡度变缓, 河谷宽高比变大, 最大剪应变先增大后变小, 这主要是由于河谷变宽阔, 河谷两岸对坝体的约束力变小, 剪应变先增大, 但当河谷底宽继续增大(大坝河谷宽高比超过 2 时), 由于坝体体积增加较大, 所以剪应变后减小; 各方案最大剪应变在坝顶的分布范围逐渐变广。

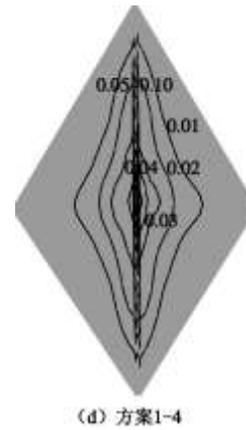
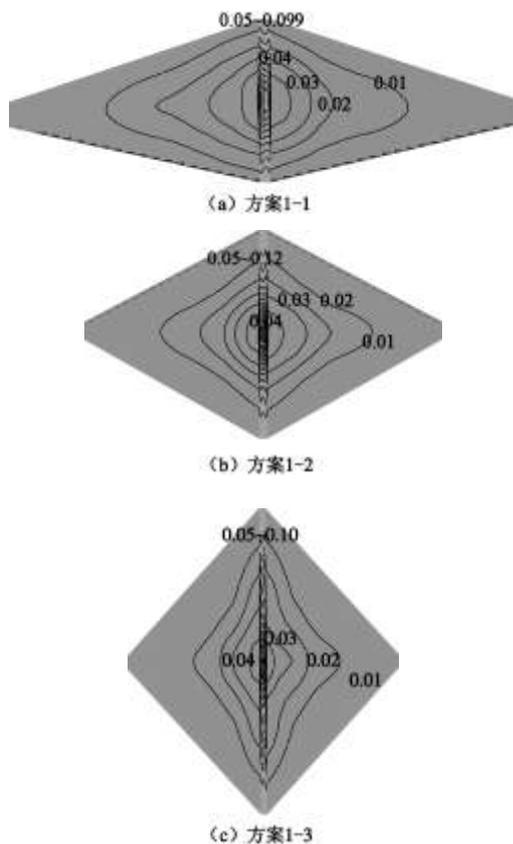


图 5 坝体塑性剪应变等值线图

Fig. 5 Contours of top view of plastic shear strain

图 6 给出了最大横断面的坝体剪应变分布图。由图可知, 随着岸坡坡度增大, 河谷变宽阔, 坝体的剪应变分布的影响深度也有变化, 和最大剪应变变化趋势一致, 先增加后减小, 具体数值大小见表 3。

(2) 永久位移分布

坝体特定位置永久位移能够在一定程度上反映坝体最终的变形, 可用以判断边坡的稳定状态, 坝体内永久变形积累到一定程度, 坝体将可能发生失稳破坏。因此, 高土石坝动力反应计算时应重视对永久变形的分析, 特别关注靠近坝顶局部区域的地震永久变形。

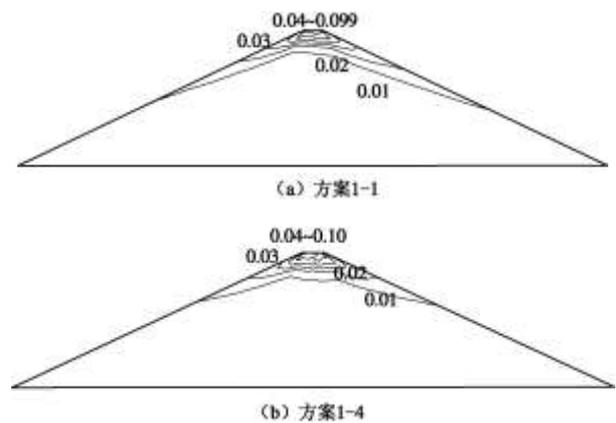


图 6 坝体最大横断面塑性剪应变等值线图

Fig. 6 Contours of plastic shear strain with largest cross section

表 3 岸坡坡度变化的剪应变大小

Table 3 Values of shear strain with slope inclination

方案	河谷宽高比	最大剪应变/%	分布长度/m	分布深度/m
1-1	1.18	9.9	17	10
1-2	2.18	11.7	43	13
1-3	4.18	10.4	31	12
1-4	6.18	10.0	26	11

图 7 给出了各方案坝顶轴向最大沉降分布图, 从图可知, 各计算方案的最大沉降分布规律基本相同,

以河谷中心线对称分布, 两边小, 中间大; 随着岸坡坡度的变缓, 坝顶轴向最大沉降呈递增趋势, 变化梯度明显。

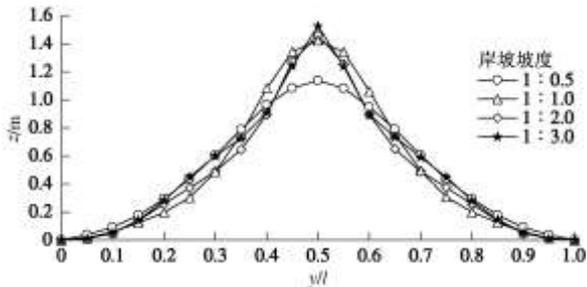


图7 坝顶轴向最大沉降分布

Fig. 7 Distribution of maximum axial settlement

图8给出了下游中轴线的水平和竖向永久位移随坝高的变化趋势。由图可以看出, 水平位移在坝顶上部出现转折点, 最大值发生在约90%坝高处, 竖向位移最大值发生在坝顶处; 随着岸坡坡度变缓, 水平和竖向位移逐渐增长; 当岸坡坡度超过1:2时, 位移增长不是很明显。永久位移的变化规律进一步说明了岸坡变缓, 河谷宽高比变大, 河谷变宽阔, 河谷的形状对坝体的动力反应的影响减弱。

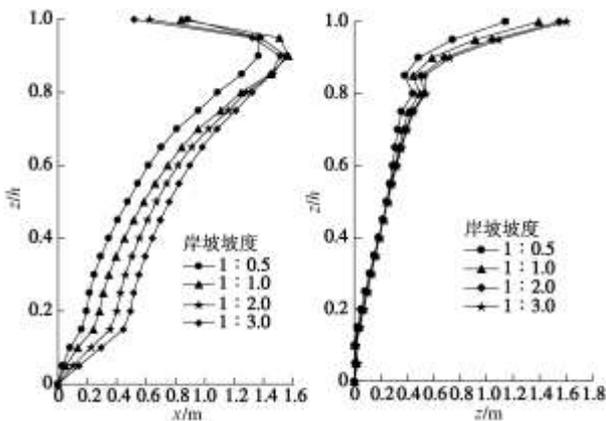


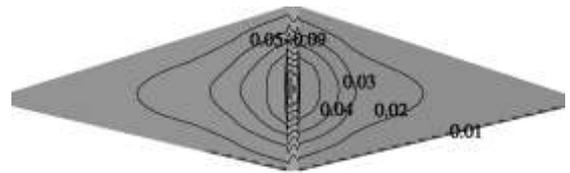
图8 坝体下游中轴线沿坝高的水平和竖向位移分布

Fig. 8 Distribution of horizontal and vertical displacements of downstream along height of dam axis

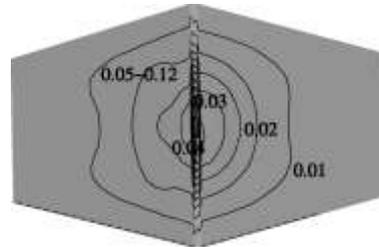
3.2 河谷底宽的影响

(1) 剪应变分布

图9显示了河谷底宽变化时坝体的塑性剪应变分布的俯视图。由图可知, 大坝的剪应变等值线分布以坝轴线中心为原点, 成椭圆形往外延伸; 各方案的剪应变最大值均发生在坝顶心墙处; 随着河谷变宽, 最大剪应变增大, 在坝顶的分布范围变广, 这主要是由于河谷加宽, 河谷两岸对坝体的约束力变小, 所以剪应变增大, 范围变广; 但当河谷宽高比超过2时, 由于坝体体积增加较大, 所以剪应变减小, 如方案2-4。



(a) 方案2-1

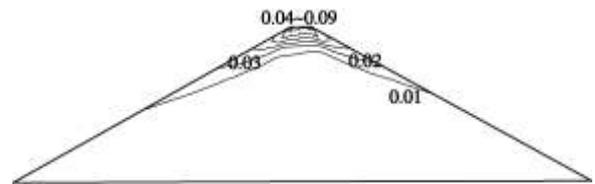


(b) 方案2-4

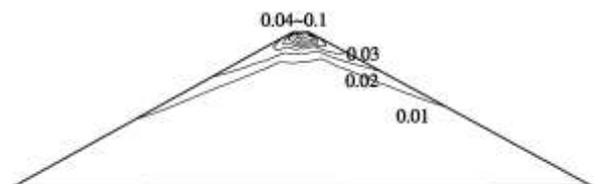
图9 坝体塑性剪应变分布等值线图

Fig. 9 Contours of top view of plastic shear strain

图10给出了最大横断面的坝体剪应变分布图。从图可知, 随着岸坡坡度增大, 河谷变宽, 坝体的剪应变分布不仅范围扩大, 并且影响深度加深, 具体数值大小见表4。河谷底宽的变化对坝体剪应变的大小和范围影响比较明显, 大坝设计时应予以考虑。



(a) 方案2-1



(b) 方案2-4

图10 坝体最大横断面塑性剪应变等值线分布

Fig. 10 Contours of plastic shear strain with largest cross section

表4 河谷底宽变化的剪应变大小

Table 4 Values of shear strain with valley width

方案	河谷宽高比	最大剪应变/%	分布长度/m	分布深度/m
2-1	1.09	9.3	18	9
2-2	1.36	11.0	32	12
2-3	1.72	12.1	36	16
2-4	2.44	11.9	28	13

(2) 永久位移变化

图11给出了各方案坝顶轴向最大沉降分布图。从图可知, 各计算方案的最大沉降分布曲线规律基本相同, 以河谷中心线对称分布, 两边小, 中间大; 随着

河谷变宽, 坝顶轴向最大沉降呈递增趋势, 变化梯度明显。

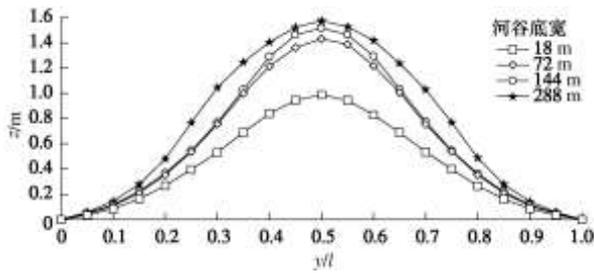


图 11 坝顶轴向最大沉降分布

Fig. 11 Distribution of maximum axial settlement

图 12 给出了下游中轴线的水平和竖向永久位移随坝高的变化趋势。由图可以看出, 水平位移曲线在坝顶上部出现转折点, 最大值发生在约 90% 坝高处, 竖向位移最大值发生在坝顶处; 随着河谷底宽变宽, 水平和竖向位移成增长趋势; 河谷越宽, 位移变化越明显。在高土石坝设计过程中应考虑强震作用下坝体中上部及坝顶的变形稳定性。

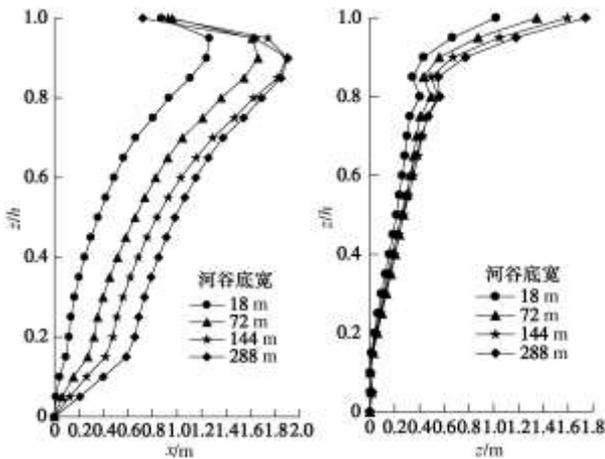


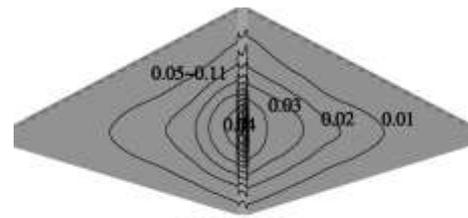
图 12 坝体下游中轴线沿坝高的水平和竖向位移分布

Fig. 12 Distribution of horizontal and vertical displacements of downstream along height of dam axis

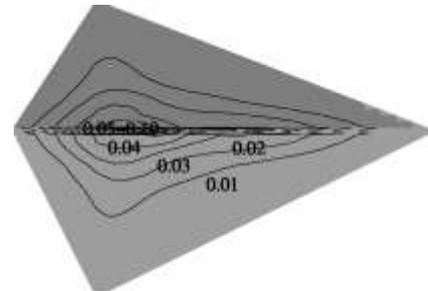
3.3 不对称岸坡的影响

(1) 剪应变分布

图 13 显示了不对称岸坡时坝体的塑性剪应变分布的俯视图。由图可知, 大坝的剪应变等值线分布不同于对称河谷的分布, 由于岸坡不对称, 剪应变等值线呈不对称的椭圆形往外延伸; 各方案的剪应变最大值均发生在坝顶心墙处, 但偏向较缓岸坡一侧; 随着右岸坡度变缓, 最大剪应变减小, 在坝顶的分布范围变广, 这主要是由于右岸河谷变宽, 右岸对坝体的约束力变小, 但河谷高比大于 2 时, 由于坝体体积增加较大, 所以剪应变变小, 范围向右岸延伸。



(a) 方案3-1

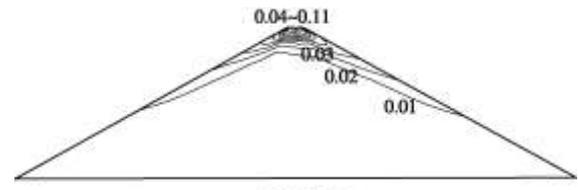


(b) 方案3-4

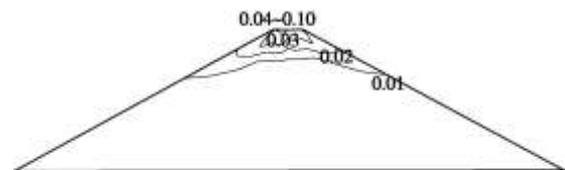
图 13 坝体塑性剪应变等值线分布图

Fig. 13 Contours of top view of plastic shear strain

图 14 给出最大横断面的坝体剪应变分布图。从图可知, 随着右岸坡度变缓, 右岸河谷变宽, 坝体的剪应变分布的影响深度也有变化, 呈递减趋势, 具体数值大小见表 5。



(a) 方案3-1



(b) 方案3-4

图 14 坝体最大横断面的塑性剪应变等值线分布

Fig. 14 Contours of plastic shear strain with largest cross section

表 5 不对称岸坡变化的剪应变大小

Table 5 Values of shear strain with asymmetric slope inclination

方案	河谷宽高比	最大剪应变/%	分布长度	分布深度
3-1	1.68	11.1	42m	13m
3-2	3.18	11.0	37m	12m
3-3	4.18	10.4	34m	11m
3-4	5.18	10.0	32m	9m

(2) 永久位移变化

图 15 给出了各方案坝顶轴向最大沉降分布图, 从图可知, 各计算方案的最大沉降分布规律基本相似, 由于岸坡不对称, 所以沉降呈不对称分布, 两边小,

中间大,最大值偏向岸坡缓一侧;随着右岸坡度变缓,坝顶轴向最大沉降呈递增趋势,变化梯度明显。

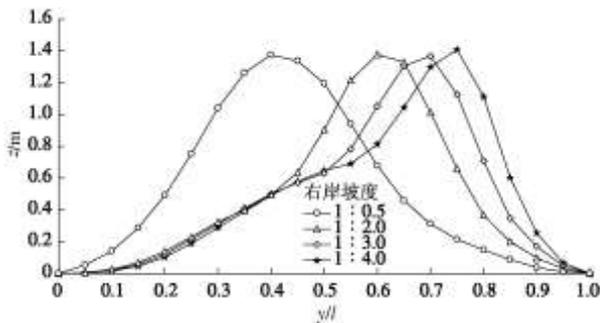


图 15 坝顶轴向最大沉降分布

Fig. 15 Distribution of maximum axial settlement

图 16 给出了下游中轴线的水平和竖向永久位移随坝高的变化趋势。由图可以看出:水平位移曲线在坝顶上部出现转折点,最大值发生在约 90%坝高处,竖向位移最大值发生在坝顶处;当右岸坡度超过 1:2.0 时,不对称河谷对下游坝坡的位移影响不是很明显。

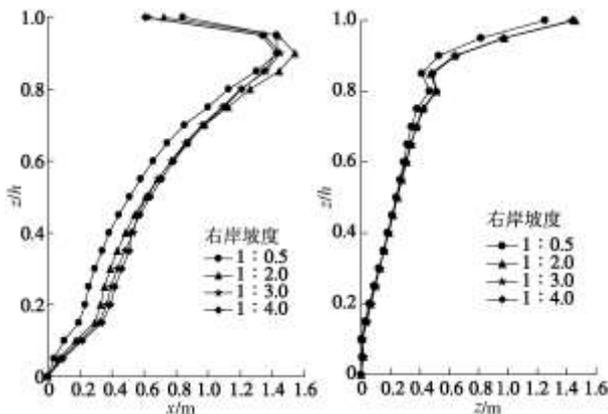
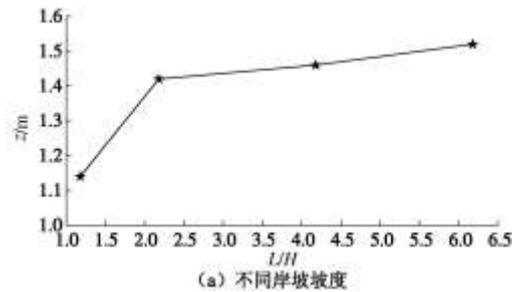


图 16 坝体下游沿坝高的最大水平和竖向位移分布

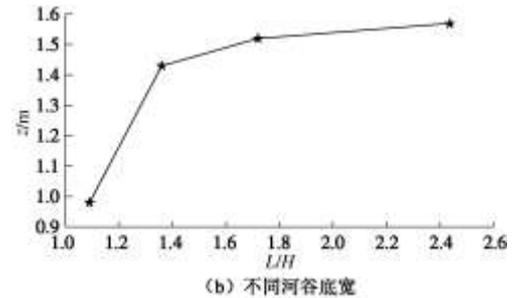
Fig. 16 Distribution of horizontal and vertical displacements of downstream along height of dam axis

3.4 岸坡坡度与河谷底宽对大坝沉降的影响

为统一起见,对于不同岸坡坡度和不同河谷宽度均采用河谷宽高比 (L/H) 作为河谷的形状参数。图 17 给出了不同岸坡坡度和不同河谷底宽情况下坝体的最大沉降。由图可以看出,随着岸坡坡度的趋缓或河谷宽度的增加,岸坡对坝体的约束作用减弱,坝体位移逐渐增大,当河谷宽高比相对较小时,这种位移增大的趋势相对较为明显,而当河谷宽高比增至一定程度,坝体位移的变化趋势逐渐变缓,显示出岸坡地形对坝体变形影响的减弱。对比两图的结果可以发现,同样宽高比时,宽河谷情况下的位移较缓岸坡情况下坝体位移要大些。



(a) 不同岸坡坡度



(b) 不同河谷底宽

图 17 河谷宽高比与坝体的最大沉降关系

Fig. 17 Relationship between maximum settlement and length-height ratio

4 结 论

通过运用 $FLAC^{3D}$ 软件,构建具有特定地形特征数值分析模型的方法,就岸坡地形、河谷底宽等河谷形状参数对高土石坝动力反应特性进行了研究,得出以下结论:

(1)河谷地形导致大坝动力反应表现出较强的空间三维效应,河谷的形状对坝体的剪应变和永久变形有显著的影响,可以初步认为河谷宽高比 2 是一临界值。

(2)大坝的最大剪应变发生在坝顶心墙处,对于对称岸坡,坝体的剪应变呈椭圆形往外延伸;而对于不对称岸坡,则以不对称的椭圆形往外延伸,且偏向岸坡缓的一侧。

(3)岸坡坡度越缓或河谷宽度越宽,坝体的剪应变越大,分布的范围越大,河谷宽度的影响较岸坡坡度影响明显;但当河谷宽高比超过 2 时,由于坝体体积增加较大,所以剪应变减小。

(4)当河谷宽高比相对较小时,河谷对坝体的约束作用较强,位移增大的趋势相对较为明显,而当河谷宽高比增至一定程度,坝体位移的变化趋势逐渐变缓,显示出岸坡地形对坝体变形的影响减弱。

参考文献:

[1] 赵剑明,汪闻韶. 关于水利工程震害及抗震研究的几点思考[J]. 清华大学学报, 2000, 40(增刊 1): 91 - 95. (ZHAO

- Jian-ming, WANG Wen-shao. Some reflections on earthquake disaster and earthquake resistance study of hydraulic projects[J]. Journal of Tsinghua University 2000, **40**(S1): 91 - 95. (in Chinese))
- [2] 赵剑明, 常亚屏, 陈 宁. 加强高土石坝抗震研究的现实意义及工作展望[J]. 世界地震工程, 2004(1): 95 - 99. (ZHAO Jian-ming, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Significance and prospects about earthquake Resistant studies of high earth-rockfill dams[J]. Journal of World Earthquake Engineering, 2004(1): 95 - 99. (in Chinese))
- [3] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. (GUO Gan-chen. Earth dam earthquake engineering[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1989. (in Chinese))
- [4] 朱 晟, 欧红光, 殷彦高. 狭窄河谷地形对 200 m 级高面板坝变形和应力的影响研究[J]. 水力发电学报, 2005(4): 73 - 77. (ZHU Sheng, OU Hong-guang, YIN Yan-gao. Influence of narrow-valley formation on the mechanics property of the 200m high CFRD[J]. Journal of Hydro Electric Engineering, 2005, **24**(4): 73 - 77. (in Chinese))
- [5] 徐泽平, 邵 宇, 胡本雄, 等. 狭窄河谷中高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 水利水电技术, 2005, **36**(5): 30 - 33. (XU Ze-ping, SHAO Yu, HU Ben-xiong, et al. Study on stress and deformation properties of high concrete face rock-fill dam in narrow valley[J]. Journal of Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, **36**(5): 30 - 33. (in Chinese))
- [6] 程 嵩, 张 嘎, 张建民, 等. 河谷地形对面板堆石坝应力位移影响的分析[J]. 水力发电学报, 2008(5): 53 - 58. (CHENG Song, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, et al. Effect of foundation topography on the stress-displacement response of concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydro Electric Engineering, 2008, **27**(5): 53 - 58. (in chinese))
- [7] 宋文晶, 王彭煦. 河谷地形对面板坝防渗体系安全性的影响[J]. 水力发电学报, 2008(4): 94 - 100. (SONG Wen-jing, WANG Peng-xu. Influence of valley topography on the safety of CFRD anti-seepage systems[J]. Journal of Hydro Electric Engineering, 2008, **27**(4): 94 - 100. (in Chinese))
- [8] 朱 晟, 王继敏. 建造在狭窄河谷上的高混凝土面板堆石坝[J]. 红水河, 2004, **23**(4): 81 - 88. (ZHU Sheng, WANG Ji-min. High CFRDs built in narrow valley[J]. Journal of Red River, 2004, **23**(4): 81 - 88. (in Chinese))
- [9] 彭文斌. FLAC^{3D} 实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008. (PENG Wen-bin. FLAC^{3D} practical guide[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [10] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (CHEN Yu-min, XU Ding-ping. Foundation and examples of FLAC/FLAC^{3D}[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 黄润秋, 许 强. 显示拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报 1995, **14**(4): 346 - 354. (HUANG Run-qiu, XU Qiang. Application of explicit lagrangian finite-difference method in rock slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, **14**(4): 346 - 354. (in Chinese))
- [12] 朱亚林. 地震时高土石坝的弹塑性分析和抗震措施研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (ZHU Ya-lin. Study on elasto-plastic method and aseismic measures of high earth-rockfill dam during earthquake[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [13] 徐泽平. 混凝土面板堆石坝应力应变特性研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005. (XU Ze-ping. Stress and deformation properties of CFRD [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2005. (in Chinese))
- [14] 毛文娟. 强震区高土石坝三维动力反应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (MAO Wen-juan. 3-D dynamic analysis of high rockfill dam in meizoseismal area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))