DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.008

杨超, 党发宁, 薛海斌, 等. 河谷形状对沥青混凝土心墙坝变形特性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 54-62. (YANG Chao, DANG Fa-ning, XUE Hai-bin, et al. Influences of valley topography on deformation properties of asphalt concrete core wall dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 54-62.)

河谷形状对沥青混凝土心墙坝变形特性的影响

杨 超, 党发宁, 薛海斌, 任 劼

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:将河谷形状与堆石材料的力学特性联系起来,定义了河谷宽度系数、河谷边坡陡缓系数和河谷非对称系数等3个动态参数来描述河谷形状。利用新定义的河谷形状参数研究其对沥青混凝土心墙坝变形特性的影响,结果表明:河谷宽度直接影响沥青混凝土心墙底部应力拱效应的强弱,河谷宽度系数越小,狭窄河谷地形导致的应力拱效应越明显,从而可能诱发心墙水力劈裂;河谷边坡的陡缓影响沥青混凝土心墙两侧拉应力的分布规律和量值大小,河谷边坡陡缓系数增大,沥青混凝土心墙左右两侧的拉应力区范围变小但量值增大;沥青混凝土心墙两侧的沉降差随河谷非对称系数的增大而明显增加,据此初步给出了区分河谷对称性的界限值;河谷形状对沥青混凝土心墙坝的三向位移均会产生一定约束作用,河谷宽度对坝体位移的影响最为显著。

关键词:河谷形状参数;沥青混凝土心墙坝;变形特性;应力拱效应

中图分类号: TV641.4 文献标志码: A 文章编号:1009-640X(2016)04-0054-09

随着我国水利水电建设事业的发展,在复杂地形条件下高山峡谷地区筑坝的关键技术,已经成为坝工建设中亟待研究的课题^[1]。沥青混凝土心墙坝是一种新兴的坝体结构,被国际大坝委员会认为是未来最高坝适宜的坝型^[2-3]。我国已建成的沥青混凝土心墙坝表现出了较好的运行效果,但它们都建在宽阔河谷中,在狭窄河谷地区修筑沥青混凝土心墙坝的工程经验相对较少^[4-5]。峡谷地区已建混凝土面板堆石坝的运行情况表明,河谷形状对混凝土面板堆石坝的应力变形特性影响明显^[6-7]。于玉贞等在原有河谷宽高比定义的基础上,研究了大坝几何特性对其力学特性的影响,认为河谷形态对大坝的受力特性影响显著^[8]。沥青混凝土心墙坝与混凝土面板堆石坝都是以堆石体为主要支撑结构的土石坝,堆石体的受力变形对沥青混凝土心墙的变形特性影响明显,且沥青混凝土心墙墙体单薄并深埋于坝体内,出现问题时很难及时发现^[9-10],沥青混凝土心墙对陡窄复杂河谷地形的适应性能目前尚无相关研究与报道。因此有必要对狭窄河谷、非对称河谷以及陡边坡条件下沥青混凝土心墙坝心墙的应力变形特性展开深入研究,促进特殊河谷地区高沥青混凝土心墙坝筑坝关键技术的研究和发展。

1 河谷形状量化参数

研究河谷形状对沥青混凝土心墙坝受力变形特性的影响,首先应该对河谷形状进行分类。目前国内的相关文献和资料中对河谷形状的描述多采用拱坝设计中的宽高比^[11]。但河谷宽高比的定义只是一个模糊的概念,对于宽高比多大的河谷可以称为陡窄河谷,现有的宽高比定义不能进行量化描述。党发宁等从修建

收稿日期: 2015-07-17

基金项目: 水利部公益性行业科研专项基金资助项目(201501034-04); 陕西省科技统筹创新工程重点实验室项目 (2014SZS15-Z01)

作者简介: 杨 超(1987—),男,宁夏中卫人,博士研究生,主要从事岩土工程数值计算方面的研究。 E-mail;yckevin5.163.com 在陡、窄、非对称河谷中面板堆石坝的受力变形特点出发,给出了新的河谷形状量化参数[12-13],现简述如下。

1.1 河谷宽度系数

当坝体在横河方向上没有发生平面应变时,堆石体内部容易形成应力拱效应;反之,则堆石体内部不易 形成应力拱效应。河谷的宽窄与其绝对宽度数值关系不大,将堆石体在横河方向上是否发生平面应变时的 坝轴线长度定义为临界河谷宽度 K,由图 1 可知,临界河谷宽度 $K = (\cot \varphi_1 + \cot \varphi_2) H$,当河谷边坡平均坡角 小于堆石体外摩擦角时, φ 为堆石体内摩擦角;当河谷边坡平均坡角大于堆石体外摩擦角时, φ 为河谷边坡 平均坡角, H 为坝高。

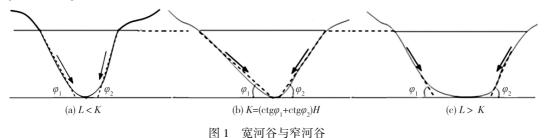


Fig. 1 Wide valley and narrow valley

定义坝轴线实际长度 L 与 K 的比值为河谷宽度系数 μ :

$$\mu = \frac{L}{K} = L(\cot \varphi_1 + \cot \varphi_2)H \tag{1}$$

当河谷宽度系数 $\mu > 1$ 时,为宽河谷;当 $\mu < 1$ 时,为窄河谷。

1.2 河谷边坡陡缓系数

河谷边坡的陡缓不能仅以坡度大小来定义,一般而言,河谷边坡的平均坡角大于堆石体内摩擦角时,堆 石体容易沿着河谷边坡产生滑移变形,河谷边坡的平均坡角小于堆石体内摩擦角时,在堆石体内部容易产生 第二滑动面。因此用河谷边坡的平均坡角 α 与堆石体内摩擦角 φ 之间的相对大小关系来表征河谷边坡的陡 缓更具合理性。

定义河谷边坡陡缓系数 δ 为河谷边坡坡角与堆石体内摩擦角的正切之比,即:

$$\delta = \tan\alpha/\tan\varphi \tag{2}$$

当河谷边坡陡缓系数 $\delta > 1$ 时,为陡边坡河谷;当 $\delta < 1$ 时,则为缓边坡河谷。

1.3 河谷非对称系数

河谷的非对称性是导致坝体产生不均匀沉降的主要原因,为了描述这一特性,定义河谷非对称系数γ为 河谷两岸边坡的平均坡角之比:

$$\gamma = \alpha_{\text{max}} / \alpha_{\text{min}} \tag{3}$$

γ取值越大,河谷的非对称性越高,坝体不均匀沉降越明显。

新的河谷形状参数为动态参数,是相对力学量而非绝对量。从堆石体受力变形特性出发,物理意义明 确,相比已有的河谷宽高比定义,对土石坝的设计与施工更具有实际意义。

研究方案及有限元模型

2.1 研究方案

复杂河谷地形对沥青心墙受力变形的影响,主要是河谷宽度、河谷岸坡坡角和河谷的对称性对其产生的 影响。因此在新给出的河谷形状参数基础上,共设计3种计算方案,通过改变河谷宽度系数μ,研究沥青心 墙内部形成应力拱效应的原因;通过改变河谷边坡陡缓系数 δ ,研究沥青心墙产生张拉变形的原因;通过改 变河谷非对称系数γ,分析大坝不均匀沉降变形产生的位置,研究沥青心墙产生不均匀变形的原因。具体计 算方案见表1。

表 1 计算方案

Tab. 1 Model cases for calculation

河	谷形状参数	计算方案	坝轴线实际长度 L/m	临界宽度 K/m	左岸坡角/(°)	右岸坡角/(°)
μ	$\mu = 0.5$	1-1	126	252	50	50
	$\mu = 1.0$	1-2	252	252	50	50
	$\mu = 1.5$	1-3	378	252	50	50
	$\mu = 2.0$	1-4	504	252	50	50
δ	$\delta = 0.5$	2-1	640	252	30	30
	$\delta = 1.0$	2-2	378	252	50	50
	$\delta = 1.5$	2-3	299	252	60	60
	$\delta = 2.0$	2-4	253	252	67	67
γ	$\gamma = 1.0$	3-1	235	252	70	70
	$\gamma = 1.4$	3-2	306	252	70	50
	$\gamma = 2.0$	3-3	395	252	70	35
	$\gamma = 2.5$	3-4	463	252	70	28

2.2 有限元模型

计算模型参考某沥青混凝土心墙坝建立,最大坝高 150 m,坝顶宽 10 m,上游坝面坡比 1:2.4,下游坝面坡比 1:2.2,沥青混凝土心墙厚 1.2 m,过渡层水平宽度 3 m。考虑到计算时间与计算效率的限制,计算中简化了荷载分析步的数目,堆石体自重荷载的施加参考施工过程中坝体的填筑顺序,主要参数见表 2。堆石体过渡层与沥青心墙之间的接触特性采用 Abaqus 中自带的接触面模型模拟:在接触面法线方向上采用硬接触,即两接触面脱开时不传递法向压力,两接触面不脱开时正常传递接触压力;在接触面切向上采用Coulomb 理想弹塑性模拟摩擦模型。

表 2 计算模型参数

Tab. 2 Model parameters for calculation

	$P_{\rm d}/({\rm g\cdot cm^{-3}})$	E/MPa	μ	c/kPa	φ/(°)
上游堆石	2. 20	80	0. 35	0	50
下游堆石	2. 15	70	0.35	0	50
过渡料	2. 10	90	0. 35	0	50
沥青混凝土心墙	2. 40	100	0.30	500	28
覆盖层	2. 25	50	0.40	100	30

给出的河谷边坡陡缓系数需要研究堆石体的内摩擦角与两岸山坡平均坡脚之间的关系,弹塑性模型由于计算参数少,物理意义更加明确,因此在计算中采用 Abaqus 软件中自带的塑性模型,其屈服面函数为:

$$F = R_{\text{mc}}q - p\tan\varphi - c = 0 \tag{4}$$

式中: φ 为堆石体摩擦角; c 为堆石体黏聚力; $R_{\text{me}} = \frac{1}{\sqrt{3}\cos\varphi}\sin(\theta + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{3}\cos(\theta + \frac{\pi}{3})\tan\varphi$, θ 为极偏角,定义 $\cos(3\theta) = r^3/q^3$, r 为第三偏应力不变量 J_{3} 。

采用笛卡尔直角坐标系,以顺河方向指向下游为正 X 轴;以坝轴线方向指向左岸为正 Y 轴;以垂直向上为正 Z 轴。模型采用位移边界约束,模型四周采用法向约束,底部采用全约束。

3 研究结果

3.1 河谷宽度系数对沥青混凝土心墙应力拱效应特性的影响

根据方案 1 共建立 4 个有限元计算模型,河谷宽度系数 μ 分别取 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0。图 2 给出了不同河谷宽度系数下沥青混凝土心墙竖向应力等值线。当河谷宽度系数较小时,竖向应力最大值出现在沥青混凝土心墙的中下部,在沥青混凝土心墙底部,竖向应力呈现了拱形分布,与同高度沥青混凝土心墙自重应力相比,底部竖向应力明显减小。随着河谷宽度系数的增大,沥青混凝土心墙底部竖向应力减小的区域下移,且范围逐渐减小。当河谷宽度系数较大时,从心墙顶部到心墙底部随着堆石体的自重荷载增加而增大,心墙底部的竖向应力呈现水平带状分布。河谷宽度系数不同,沥青混凝土心墙底部竖向应力的大小和分布规律出现了明显变化。

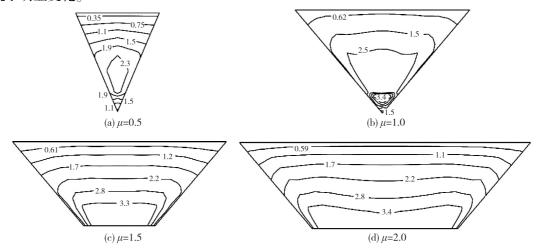


图 2 不同河谷宽度系数下蓄水期沥青混凝土心墙竖向应力等值线(单位:MPa)

Fig. 2 Vertical stresses of asphalt concrete core with different valley width coefficients (unit: MPa)

由于沥青混凝土心墙的弹性模量大于两侧坝壳的弹性模量,因此沥青混凝土心墙内部不会像黏土心墙那样产生顺河向的应力拱效应。造成沥青混凝土心墙底部竖向应力降低的原因是窄河谷形状对沥青混凝土心墙的变形产生了限制作用,而非材料性质对其影响。河谷边坡与沥青混凝土心墙交界处产生的剪应力会阻止沥青混凝土心墙变形,在沥青混凝土心墙底部形成应力拱效应,使两岸山体受力增大,沥青混凝土心墙底部的受力减小。

进一步将沥青混凝土心墙的自重应力 γh 与竖向应力 σ_z 的比值 $n = \gamma h/\sigma_z$ 作为描述沥青混凝土心墙内部拱效应强弱的标准,称其为拱效应系数。拱效应系数的大小可以作为反映沥青混凝土心墙内部应力拱效应强弱的标准。图 3 给出了河谷宽度系数与拱效应系数的关系曲线,可见河谷宽度系数越小,拱效应系数越大,沥青混凝土心墙内部拱效应越明显;河谷宽度系数增大,拱效应系数减小,沥青混凝土心墙内部拱效应减弱。图 3 给出的曲线表明,当河谷宽度系数 $\mu = 1.5$ 时,曲线才出现了明显拐点。这是因为在本文计算中考虑了软弱的河床覆盖层对大坝沉降的影响,导致河谷宽度系数 μ 在(1.0,1.5)区间内仍产生了较强的应力拱效应,研究表明坝体与河

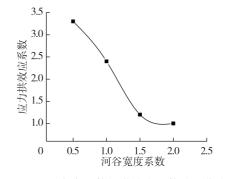


图 3 河谷宽度系数与拱效应系数关系曲线 Fig. 3 Relationship between valley width coefficients and arch effect coefficients of asphalt concrete core

床覆盖层存在着明显的相互作用关系。故将厚覆盖层上的临界河谷宽度 K 更正为 $K = (\cot\alpha_1 + \cot\alpha_2 + \xi)H$,其中 ξ 为覆盖层影响系数,本算例中将河谷宽度系数 $\mu = 1.5$ 定为区分宽窄河谷的临界值。

图 4 给出蓄水期沥青混凝土心墙三向位移最大值随 河谷宽度系数的变化曲线。由图可知,沥青混凝土心墙 产生的三向位移均随河谷宽度系数的增大而增加。当河谷宽度系数 $\mu < 1.5$ 时,沥青混凝土心墙 3 个方向产生的位移值较小,但增加趋势明显;当河谷宽度系数 $\mu > 1.5$ 时,则位移值增加均逐渐趋于平缓。其中河谷宽度系数 对竖向沉降的影响最明显,对顺河向位移的影响次之,横河向位移的影响最小。三向位移变化规律再次说明本算例中将河谷宽度系数 $\mu = 1.5$ 定为区分宽窄河谷临界值的正确性。

当河谷宽度系数较小时,狭窄河谷形状对坝体三向位移会产生明显限制作用,并且会在沥青混凝土心墙内

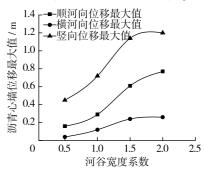


图 4 不同河谷宽度系数下沥青心墙最大位移

Fig. 4 Maximum displacements of asphalt concrete core with different valley widths

部产生较强的应力拱效应,从而导致坝体蓄水期位移变小,工后后期沉降变形变大,持续的工后沉降变形将加剧沥青混凝土心墙的应力变化。因此在狭窄河谷中修筑沥青混凝土心墙坝,应采取更严格的碾压控制技术指标,提高碾压参数,防止沥青混凝土心墙局部出现拉伸破坏裂缝,从而诱发水力劈裂。

3.2 河谷边坡陡缓系数对沥青混凝土心墙张拉变形特性的影响

在计算方案 2 中,河谷边坡陡缓系数 δ 分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0。图 5 给出了沥青混凝土心墙坝的轴向应力分布。

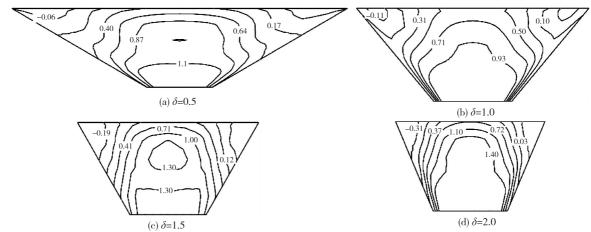


图 5 不同河谷边坡陡缓系数下沥青混凝土心墙横河向应力等值线(单位: MPa)

Fig. 5 Horizontal stresses of asphalt concrete core with different valley slope coefficients (unit: MPa)

由图 5 可知,在不同河谷边坡陡缓系数下,两岸坝肩处心墙均会承受拉应力,但拉应力分布范围与数值大小随河谷边坡陡缓系数的变化呈不同变化规律。河谷边坡陡缓系数 δ = 0.5 时,拉应力区出现在心墙上部两侧,约占其总面积的 10.4%,最大拉应力数值为 0.06 MPa。随着河谷边坡陡缓系数的增大,沥青混凝土心墙两侧拉应力区范围减小,并逐渐下移且向两岸山体靠近。当河谷边坡陡缓系数 δ = 2.0 时,拉应力区出现在坝肩与两岸山体交界处,约占心墙总面积的 8.4%,最大拉应力数值为 0.31 MPa。也就是说,随着河谷边坡陡缓系数的增大,横河向拉应力区范围在减小,但拉应力值在增大。拉应力增大的原因是随着河谷边坡变陡,两种材料接触面处由不均匀变形引起的剪应力增加。

图 6 给出了拉应力区范围占心墙总面积的百分比与河谷边坡陡缓系数的关系曲线。由图可知:河谷边

坡陡缓系数 δ <1.0 时,心墙拉应力区分布范围较大,随河谷边坡陡缓系数的变化趋势较缓;河谷边坡陡缓系数 δ > 1.0 时,心墙拉应力区分布范围较小,但随河谷边坡陡缓系数的变化趋势明显。曲线在河谷边坡陡缓系数 δ = 1.0 时产生了明显的拐点,进一步证实了新定义的河谷边坡陡缓系数的合理性。

图 7 给出蓄水期沥青混凝土心墙位移最大值随河谷边坡陡缓系数的变化曲线,由图可知,沥青混凝土心墙产生的三向位移的最大值均随河谷边坡陡缓系数的增大而减小,但减小趋势不明显。当河谷边坡陡缓系数从 0.5 增加到 2.0 时,沥青混凝土心墙竖向最大位移仅减小 0.15 m,横河向最大位移仅减小 0.03 m,顺河向最大位移仅减小 0.18 m,三向位移的减小幅度均不大。研究表明河谷边坡陡缓系数对沥青混凝土心墙的三向位移会产生影响,但没有河谷宽度系数那么明显。

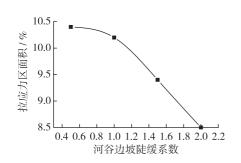


图 6 河谷边坡陡缓系数与心墙拉应力区面积关系曲线

Fig. 6 Relationship between valley slope coefficients and tensile stress area of core wall

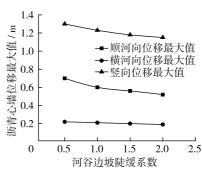


图 7 不同河谷边坡陡缓系数下沥青心墙最大位移

Fig. 7 Maximum displacements of asphalt concrete core with different valley slope coefficients

3.3 河谷非对称系数对沥青混凝土心墙不均匀变形特性的影响

计算方案 3 中河谷非对称系数 γ 分别为 1.0,1.4,2.0 和 2.5。图 8 为不同河谷非对称系数下沥青混凝土心墙竖向位移等值线。当河谷非对称系数 γ = 1.0 时,沥青混凝土心墙沉降相对于河谷中心对称分布,最大沉降值为 1.14 m,出现在河谷中心坝高一半处。随着河谷非对称系数增大,坝体沿坝轴线方向产生的不均匀沉降逐渐明显。当河谷非对称系数 γ = 2.5 时,心墙左右两侧的竖向沉降分布规律相对于河谷中心明显不对称,不均匀沉降明显。

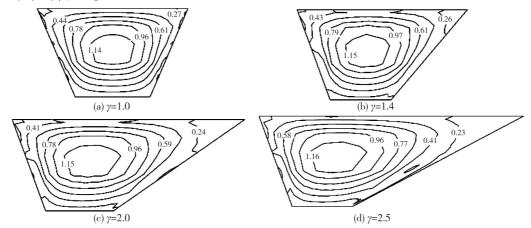


图 8 不同河谷非对称系数下蓄水期沥青混凝土心墙竖向位移等值线(单位: m)

Fig. 8 Vertical displacement of asphalt concrete core with different valley asymmetry coefficients (unit: m)

实际工程中 γ = 1.0 的河谷基本上不存在,但随着河谷非对称系数的增大,河谷非对称性的增强会直接导致堆石体产生明显的不均匀沉降,从而影响沥青心墙的受力变形。因此本文将引起沥青心墙竖向沉降规

律分布严重不对称时的河谷非对称系数作为区分对称河谷与非对称河谷的界限值。为了量化研究河谷非对称系数对沥青混凝土心墙不均匀沉降影响的程度大小,将沥青混凝土心墙左右两侧坝肩处竖向沉降的比值定义为不均匀沉降系数。图 9 给出了沥青混凝土心墙不均匀沉降系数随河谷非对称系数的关系曲线,由图可知不均匀沉降系数随河谷非对称系数总体上呈递增趋势。当河谷非对称系数 $\gamma < 1.4$ 时,不均匀沉降系数较小,曲线变化趋势平缓,表明心墙会产生较小的不均匀沉降;当河谷非对称系数 $\gamma > 1.4$ 时,曲线变化梯度明显增大,心墙产生的不均匀沉降随河谷非对称系数的增加而急剧增强。曲线在河谷非对称系数 $\gamma = 1.4$ 时出现拐点,根据这一特点,将河谷非对称系数 $\gamma = 1.4$ 确定为区分对称河谷与非对称河谷的界限值。将河谷非对称系数 $\gamma < 1.4$ 时的河谷定义为对称河谷, $\gamma > 1.4$ 时的河谷定义为非对称河谷。

图 10 给出了蓄水期沥青混凝土心墙位移最大值随河谷非对称系数的变化曲线。由图可知,沥青混凝土心墙产生的三向位移均随河谷边坡陡缓系数的增大而增大,但增大幅度均不大。研究表明河谷非对称系数对沥青混凝土心墙的三向位移会产生影响,但没有河谷宽度系数明显。

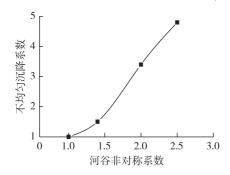


图 9 河谷非对称系数与不均匀沉降系数关系曲线

Fig. 9 Relationship between valley asymmetry coefficients and uneven settlements

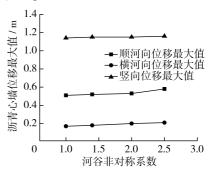


图 10 不同河谷非对称系数下沥青心墙最大位移 Fig. 10 Maximum displacements of asphalt concrete core with different valley asymmetry coefficients

4 河谷形状参数概念图

由本文研究结果可知,河谷地形不同,大坝变形特性不同,如在陡河谷边坡下修筑大坝,应该重点防护河谷边坡与堆石体交界处发生滑移危害;而缓河谷边坡对大坝坝肩处堆石体的影响则不明显,但堆石体内部易产生开裂面。因此大坝的设计与施工应随河谷地形的不同而不同,以减少大坝因河谷地形而导致的灾害。本文初步给出了河谷形状参数的概念图(如图 11),将河谷地形按照河谷宽度、河谷边坡、河谷对称性 3 个方面进行划分,初步划分为宽陡对称河谷、宽陡非对称河谷、宽缓对称河谷、宽缓非对称河谷、窄陡对称河谷、窄陡非对称河谷、窄缓对称河谷、窄缓非对称河谷、宽大类。不同河谷地形条件下,大坝在设计与施工时采取的重点防护措施应该不同:如在宽陡对称河谷修筑大坝,应通过在堆石体与岸坡处设置特殊垫层区,增加两岸坝肩处堆石体的碾压密实度,以减小此处堆石体的滑移变形,此外,宽河谷地形条件下坝体的三向变形比窄河谷地形条件下大,通过工程措施控制坝体的三向变形,以保证大坝防渗体系的安全运行;如对于窄缓对称河谷,由于河谷边坡对大坝坝肩处的影响较弱,在坝肩处可以不设置特殊垫层区,以节约工程造价,但对于窄河谷地形导致大坝底部出现的应力拱效应,则应重点防护与处理,如在河床底部设置填塘混凝土、预留足够的沉降期等工程措施,均可达到减弱堆石体内部应力拱效应的目的。

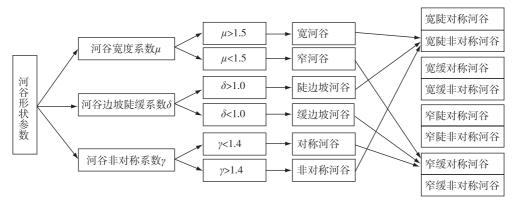


图 11 河谷形状参数概念

Fig. 11 Concept diagram of valley topography parameters

5 结 语

将沥青心墙内部能否形成应力拱效应作为区分宽窄河谷的标准,用堆石体内摩擦角与岸坡坡角的相对关系来区分河谷边坡的陡缓,由引起堆石体应力与位移分布严重不对称的界限值来讨论河谷对称性,基于此给出了新的河谷形状参数,并研究了其对沥青混凝土心墙的受力与变形特性的影响。研究结果表明:窄河谷地形条件下,沥青混凝土心墙底部会产生应力拱效应,导致心墙底部竖向应力明显低于其自重应力,心墙底部容易形成软弱薄层导致心墙产生纵向裂缝;窄河谷地形对心墙坝体产生明显的限制作用,并因此而导致坝体产生较大的工后沉降变形;河谷边坡的陡缓对心墙左右两侧拉应力区的分布规律和大小影响明显。缓河谷边坡条件下,心墙拉应力区的范围较大,但量值较小,陡河谷边坡条件下,心墙拉应力区的范围相对较小,但量值较大;河谷非对称系数对沥青混凝土心墙的不均匀沉降影响显著,根据沥青心墙左右两侧产生不均匀沉降的明显程度初步给出了区分对称河谷与非对称河谷的界限值。

参考文献:

- [1] 张宗亮. 200 m 级以上高心墙堆石坝关键技术研究及工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.(ZHANG Zongliang. Key technologies research and application for core-wall dams higher than 200 m[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011.(in Chinese))
- [2] ICOLD. Bituminous cores for fill dam[M]. Bulletin 84, Paris, 1992.
- [3] PIRCHER W, SCHWAB H. Design, construction and behavior of the asphaltic concrete core wall of the finstertal dam [C] // Commission International Des Grands Barrages, Q.61, R49, San Francisco, 1988: 901-923.
- [4] 王为标, 申继红. 中国土石坝沥青混凝土心墙简述[J]. 石油沥青, 2002, 16(4): 27-31. (WANG Wei-biao, SHEN Ji-hong. Asphalt concrete cores for embankment dams in China[J]. Petroleum Asphalt, 2002, 16(4): 27-31. (in Chinese))
- [5] 钱亚俊, 陈生水. 心墙坝应力变形数值模拟结果验证[J]. 水利水运工程学报, 2005(4): 11-18. (QIAN Ya-jun, CHEN Sheng-shui. Verification of numerical simulation results of stress and deformation of core-wall dams[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(4): 11-18. (in Chinese))
- [6] 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, 27(4): 94-100. (SONG Wen-jing, WANG Peng-xu. Influence of valley topography on the safety of CFRD anti-seepage systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 94-100. (in Chinese))
- [7] 陈飘,邓成发,刘正国. 中厚覆盖层上中低面板堆石坝应力变形分析[J]. 水利水运工程学报, 2014(5): 75-81. (CHEN Piao, DENG Cheng-fa, LIU Zheng-guo. Finite element analysis of stress and deformation characteristics of low-faced rockfill dam on mid-thick overburden[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(5): 75-81. (in Chinese))
- [8] YU Yu-zhen, XIE Li-quan, ZHANG Bing-yin. Stability of earth-rockfill dams; influence of geometry on the three-dimensional

- effect[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(5): 326-339.
- [9] 王为标. 土石坝沥青防渗技术的应用和发展[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 70-74. (WANG Wei-biao. Development and applications of impervious asphalt concrete for embankment dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(6): 70-74. (in Chinese))
- [10] 朱晟, 魏匡民, 饶锡保. 土石坝沥青混凝土心墙水力劈裂研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 218-222. (ZHU Sheng, WEI Kuang-min, RAO Xi-bao. Study on hydraulic fracturing of asphalt concrete core in earth-rock dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 218-222. (in Chinese))
- [11] 华东水利学院. 水工建筑物[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982. (East China Engineering School of Water Resources. Hydraulic structures[M]. Beijing: Water Power Press, 1982. (in Chinese))
- [12] 党发宁, 王学武, 田威, 等. 非对称高面板堆石坝应力变形特点及改善对策[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 602-608. (DANG Fa-ning, WANG Xue-wu, TIAN-Wei, et al. Deformation and stress characteristics of high asymmetric CFRD and for measures[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 43(5): 602-608. (in Chinese))
- [13] 党发宁, 杨超, 薛海斌, 等. 河谷形状对面板堆石坝变形特性的影响研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 435-442. (DANG Fa-ning, YANG Chao, XUE Hai-bin, et al. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 435-442. (in Chinese))

Influences of valley topography on deformation properties of asphalt concrete core wall dam

YANG Chao, DANG Fa-ning, XUE Hai-bin, REN Jie (Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: According to the relationships between the valley shape and the mechanical properties of rock-fills, the new valley topography parameters which are described by using a valley width coefficient μ , a valley slope coefficient δ and a valley asymmetry coefficient γ have been given in this paper. And then the new parameters for valley topography are used to study the influences of the valley topography on the deformation and stress characteristics of an asphalt concrete core wall dam. The results of this study show that the valley width coefficients have direct influences on the degree of the arch effect caused by stresses taking place at the bottom of the asphalt concrete core-wall. The smaller the valley width coefficients, the stronger the arch effect caused by the deep narrow valley becomes, and the hydraulic fracturing may be taken under such conditions in practical engineering. When the valley slope coefficients increase, the tensile stress area in the asphalt concrete core wall becomes smaller and the values of tensile stress become larger. The differential settlements on the dam increase obviously with the adding of a valley asymmetry coefficient. A critical value of the asymmetrical valley is proposed according to the differential settlements between left and right sides of the dam. The foundation topography can restrain the deformation of the dam and the valley widths have the most obvious impacts upon the displacement of the asphalt concrete core wall dam.

Key words: valley topography parameter; asphalt concrete core wall dam; deformation properties; stress-induced arch effect