

DOI: 10.11779/CJGE201907012

# 高沥青混凝土心墙受拉特性的简化力学分析方法

高俊, 党发宁, 杨超, 任劼

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 目前, 沥青混凝土心墙受力变形特性研究尚缺乏简化的分析方法。针对高沥青混凝土心墙存在严重的受拉现象, 探讨了心墙产生拉应力的机理, 结合拱结构的特殊传力机制, 提出了减小心墙拉应力的构想, 即将直线型心墙堆石坝设计成曲线型心墙堆石坝; 基于 Winkler 弹性地基直梁和曲梁理论, 构建了直线型心墙和曲线型心墙的简化力学分析模型; 借助该模型分析了坝高和堆石料模量对直线型心墙的挠曲变形和拉应力(弯矩)的影响, 考察了曲线型心墙减小其内部拉应力的效果。研究表明, 建立的简化力学分析模型能够较好地反映心墙的受力变形特性; 直线型心墙端部存在较大的拉应力, 坝高越高和堆石料模量越小, 心墙端部的拉应力越大, 心墙产生拉破坏的风险越大; 曲线型心墙借助挠曲变形使其轴线缩短和将横向荷载部分转化成轴向压荷载以减小弯矩以及增大轴向压力达到减小其端部拉应力的目的, 曲线型心墙相较于直线型心墙拉应力减小约 42.7%, 显著改善了心墙的受拉特性, 增强了心墙的安全性。

**关键词:** 沥青混凝土心墙堆石坝; 直线型心墙; 曲线型心墙; 弹性地基梁

中图分类号: TV641.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)07-1279-09

作者简介: 高俊(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土及水利工程数值仿真分析的研究工作。E-mail: 409938403@qq.com。

## Simplified mechanical analysis method for tensile characteristics of high asphalt concrete core

GAO Jun, DANG Fa-ning, YANG Chao, REN Jie

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** At present, there is no simplified method to study the mechanical and deformation characteristics of asphalt concrete core. Aiming at the serious tensile phenomenon of high asphalt concrete core, the mechanism of the core producing tensile stress is analyzed. The concept of reducing the tensile stress of the core is proposed. The rockfill dam with straight core is designed to be the rockfill dam with curved core combining with the special transmission mechanism of the arch structure. Based on the theory of Winkler elastic foundation straight beam and curved beam, the simplified mechanical analysis model for the straight core and curved core is established. The influences of the dam height and rockfill modulus on the deflection and tensile stress (bending moment) of the straight core are investigated. The effect of the curved core to reduce tensile stress is also investigated. The results show that the simplified mechanical analysis model can reflect the force and deformation characteristics of the core. And there exists large tensile stress at the end of the straight core. The higher the dam height and the smaller the rockfill modulus, the greater the tensile stress at the end of the core and the greater the risk of the core-producing tensile failure. The curved core shortens the axis with the help of deflection and transforms the lateral load into axial compression load to reduce the bending moment and increases the axial force to reduce the tensile stress at its end. Compared with the straight core, the curved core can reduce the tensile stress about 42.5% at its end, which can greatly improve the mechanical characteristics and increase the security of the core.

**Key words:** rockfill dam with asphalt concrete core; straight core; curved core; elastic foundation

## 0 引言

自德国于 1962 年建成世界上第一座碾压式沥青混凝土心墙堆石坝以来, 该坝因良好的防渗性、抗震性、经济性、耐久性以及适应变形能力等优点, 已成为一种极具竞争力的坝型<sup>[1]</sup>, 被第 16 届国际大坝委员

会认定为未来高坝的适宜坝型。国际大坝委员会

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679199); 水利部公益性行业科研专项基金项目(201501034-04); 陕西省科技统筹创新工程重点实验室项目(2014SZS15-Z01)

收稿日期: 2018-08-15

(ICOLD)<sup>[2]</sup>、Höeg<sup>[3]</sup>和 Wang<sup>[4]</sup>总结了沥青混凝土心墙堆石坝在设计、施工和运行性能等方面的经验, 随着对沥青混凝土心墙受力变形特性研究的深入, 发现心墙内部不可避免地存在拉应力<sup>[5-7]</sup>, 这种现象在高或超高沥青混凝土心墙堆石坝中尤为突出, 而沥青混凝土心墙的材料性质和工作性质决定其不能承受较大的拉应力, 若心墙内部拉应力超过其抗拉强度, 势必会导致其产生拉裂破坏, 后果不堪设想, 故亟待研究减小心墙拉应力的措施。目前, 沥青混凝土心墙受力变形特性研究多采用数值模拟<sup>[8-10]</sup>、现场监测<sup>[11-12]</sup>、模型试验<sup>[13]</sup>法, 这些研究方法对沥青混凝土心墙堆石坝的建设和发展发挥了举足轻重的作用, 同时也存在些许不足。诸如数值模拟建模过程、本构模型以及材料参数选取等方面较复杂, 不便工程师直接使用; 现场监测通常滞后于设计施工, 发现问题后补救难度较大; 而模型试验也存在选择恰当比尺的困难。因此, 探索降低心墙拉应力的措施和寻求研究沥青混凝土心墙受力变形特性的简便方法, 具有重要的理论价值和工程应用前景。

针对高或超高沥青混凝土心墙存在严重的受拉现象, 探讨心墙产生拉应力的机理, 结合拱结构的特殊传力机制, 提出减小心墙拉应力的构想(将直线型心墙堆石坝设计成曲线型心墙堆石坝), 构建基于 Winkler 弹性地基直梁和曲梁理论的直线型心墙和曲线型心墙的简化力学分析模型, 借助该模型分析坝高和堆石料模量对直线型心墙的挠曲变形和弯矩(拉应力)的影响, 考察曲线型心墙减小其内部拉应力的效果。

## 1 直线型心墙产生拉应力的机理及改善措施

### 1.1 直线型心墙产生拉应力的机理

沥青混凝土心墙堆石坝不同于混凝土面板堆石坝<sup>[14]</sup>和黏土心墙堆石坝<sup>[15]</sup>, 心墙作为仅有的防渗屏障而不能划分变形缝, 心墙模量较大、厚度较小, 而且河谷宽度为定值, 故运行期在上游水平荷载(主动土压力和水压力)推动作用下, 心墙不可避免地产生指向下游的挠曲变形, 心墙轴线伸长而使其端部处于受拉状态, 即心墙内部必然存在拉应力。心墙挠曲变形越大意味着轴线被拉伸愈严重, 其内部的拉应力越大, 心墙发生拉破坏的机率就愈大, 这对以心墙作为防渗体的沥青混凝土心墙堆石坝而言, 是十分危险的, 因此很有必要研究减小心墙内部拉应力的措施。现将传统沥青混凝土心墙堆石坝(直线型心墙堆石坝)中的心墙简称为直线型心墙, 直线型心墙的受力示意图,

如图 1 所示。

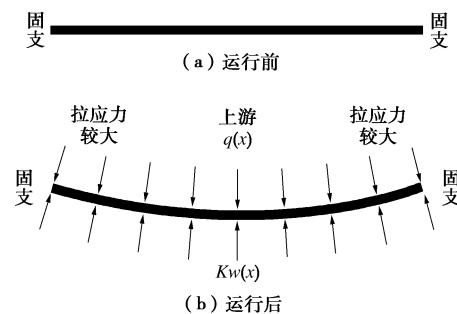


图 1 直线型心墙受力示意图(运行期前后)

Fig. 1 Mechanical diagram of straight core (before and after operation period)

### 1.2 曲线型心墙的提出

针对直线型心墙在运行期存在端部发生拉裂破坏可能的现象, 结合拱结构<sup>[16]</sup>的特殊传力机制, 提出将直线型心墙堆石坝设计成曲线型心墙堆石坝(区别于直线型心墙, 将曲线型心墙堆石坝中的心墙称为曲线型心墙)的构想, 曲线型心墙的设计意图是减小心墙在运行期其端部的拉应力, 从而降低心墙端部发生拉裂破坏的可能, 提高心墙安全性。

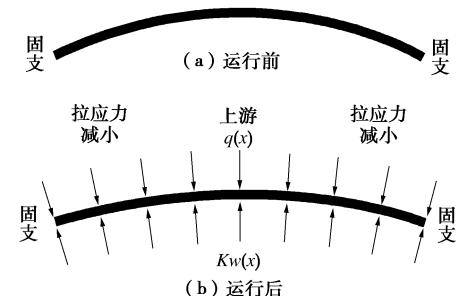


图 2 曲线型心墙受力示意图(运行期前后)

Fig. 2 Mechanical diagram of curved core (before and after operation period)

曲线型心墙受力示意图, 如图 2 所示。类似于直线型心墙, 曲线型心墙运行期也产生指向下游的挠曲变形, 但因心墙向上游起拱, 心墙挠曲变形的后果是其轴线缩短, 心墙沿轴线方向产生压缩变形, 能够部分抵消心墙内部拉应力; 此外, 曲线型心墙可将横向荷载部分转化为轴向压荷载而降低轴向拉荷载的作用。这是将直线型心墙设计成曲线型心墙以减小其内部拉应力的初衷。

## 2 基于弹性地基直梁和曲梁的心墙简化力学分析模型

沥青混凝土心墙相较于堆石料很薄, 运行期心墙的挠曲变形主要受下游堆石料控制, 且下游堆石料对心墙的反作用力与心墙的挠曲变形成正比关系, 沿高

程方向取微元高度的沥青混凝土心墙坝体作为研究对象, 假设心墙背水面的堆石料厚度不变, 认为心墙满足 Winkler 弹性地基梁的基本假定, 因而将其简化看作是置于 Winkler 弹性地基上的梁。

## 2.1 基于弹性地基直梁的心墙简化力学分析模型

根据 Winkler 弹性地基梁理论, 若  $\lambda \cdot l \geq \pi$ , 则属于弹性地基长梁,  $\lambda = Kb/(4EI)^{1/4}$  为梁的柔度特征值,  $l$  为梁沿轴线的长度; 否则, 则属于弹性地基短梁。考虑到水利工程中河谷宽度较大的特点, 故对于 U 型河谷或者 V 型河谷中上部, 将心墙简化看作是置于 Winkler 弹性地基上的两端固支长梁; 对于 V 型河谷底部的特殊情况, 类似可将心墙简化看作是置于 Winkler 弹性地基上的两端固支短梁, 不在此文研究范围内。两端固支的典型 Winkler 弹性地基梁模型, 如图 3 所示。

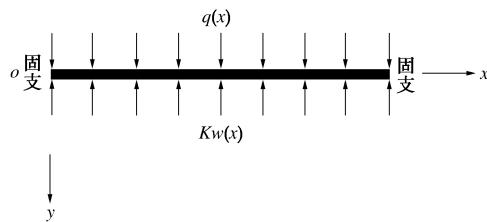


图 3 弹性地基直梁模型

Fig. 3 Model of beam elastic foundation

直梁的纯弯曲挠曲微分方程式:

$$EI \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = -M(x) \quad , \quad (1)$$

式中,  $w(x)$  为挠度,  $E$  为弹性模量,  $I$  为截面惯性矩,  $M(x)$  为弯矩。根据静力平衡和变形协调条件, 得置于 Winkler 弹性地基上直梁的挠曲微分方程<sup>[17]</sup>:

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + Kw(x) = bq(x) \quad . \quad (2)$$

式中  $K$  为地基的弹性抗力系数;  $b$  为梁的宽度;  $Kw(x)$  为地基反力,  $q(x)$  为梁上的分布荷载。令  $\lambda^4 = Kb/(4EI)$ ,  $\lambda$  为梁的柔度特征值, 其倒数  $1/\lambda$  为梁的特征长度, 并将柔度特征值代入式 (2) 中, 得

$$\frac{d^4 w(x)}{dx^4} + 4\lambda^4 w(x) = \frac{bq(x)}{EI} \quad . \quad (3)$$

令  $q(x)=0$ , 得四阶齐次微分方程的通解:

$$w_0(x) = e^{\lambda x} (F_1 \cos \lambda x + F_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (F_3 \cos \lambda x + F_4 \sin \lambda x) \quad , \quad (4)$$

式中,  $F_1 \sim F_4$  为积分常数。挠曲微分方程的通解等于齐次微分方程的通解  $w_0(x)$  加非齐次微分方程的特解  $w^*(x)$ :

$$w(x) = e^{\lambda x} (F_1 \cos \lambda x + F_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} \cdot (F_3 \cos \lambda x + F_4 \sin \lambda x) + w^*(x) \quad . \quad (5)$$

根据梁任意截面转角  $\theta(x)$ 、弯矩  $M(x)$  以及剪力  $Q(x)$  与挠度  $w(x)$  的关系  $\theta(x)=w'(x)$ ,  $M(x)=-EIw''(x)$  以及  $Q(x)=-EIw'''(x)$ , 则有

$$\theta(x) = \lambda e^{\lambda x} [F_1 (\cos \lambda x - \sin \lambda x) + F_2 (\cos \lambda x) + \sin \lambda x] - \lambda e^{-\lambda x} [(F_3 (\cos \lambda x + \sin \lambda x) - F_4 (\cos \lambda x - \sin \lambda x))] + w^*(x) \quad , \quad (6)$$

$$M(x) = EI [2\lambda^2 e^{\lambda x} (F_1 \sin \lambda x - F_2 \cos \lambda x) - 2\lambda^2 e^{-\lambda x} (F_3 \sin \lambda x - F_4 \cos \lambda x) - w^*(x)] \quad , \quad (7)$$

$$Q(x) = EI \{2\lambda^3 e^{\lambda x} [F_1 (\cos \lambda x + \sin \lambda x) - F_2 (\cos \lambda x - \sin \lambda x)] - 2\lambda^3 e^{-\lambda x} [F_3 (\cos \lambda x - \sin \lambda x) + F_4 (\cos \lambda x + \sin \lambda x)] - w^*(x)\} \quad . \quad (8)$$

将  $w_0(x)$  代入两端固支梁边界条件  $w(x=0)=0$ ,  $\theta(x=0)=0$ ;  $w(x=l)=0$ ,  $\theta(x=l)=0$ , 即可求得  $F_1 \sim F_4$  四个积分常数, 再将其代入式 (5) 中, 解得置于文克尔弹性地基上长梁的挠度  $w(x)$ , 进而得到梁的转角  $\theta(x)$ 、弯矩  $M(x)$  以及剪力  $Q(x)$ 。

## 2.2 基于弹性地基曲梁的心墙简化力学分析模型

同理将曲线型心墙简化看作是置于 Winkler 弹性地基上的固支曲梁, 两端固支弹性地基曲梁在均布外荷载以及弹性抗力作用下的模型, 如图 4 所示。内力正负定义为: 弯矩  $M$  以曲梁凹面受拉为正; 轴力  $N$  以受拉为正; 剪力  $Q$  以使微段顺时针旋转为正。

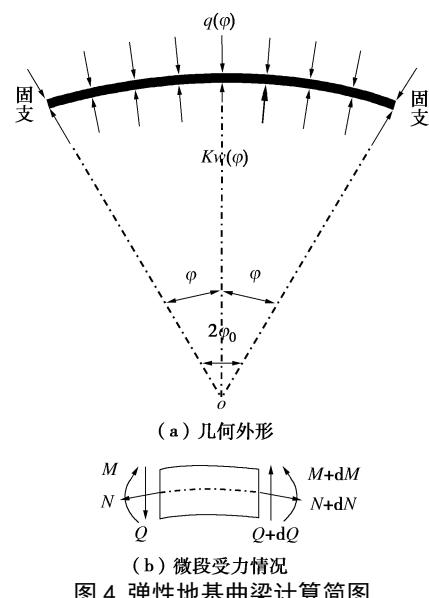


图 4 Calculation of circular beam on elastic foundation

考虑到弯矩  $M(\varphi)$  和轴力  $N(\varphi)$  对径向位移  $w(\varphi)$  的影响, 获得变形后的径向位移  $w(\varphi)$  与弯矩  $M(\varphi)$  和轴力  $N(\varphi)$  的关系<sup>[18]</sup>:

$$\frac{d^2 w(\varphi)}{d\varphi^2} + \omega(\varphi) = -\left( \frac{M(\varphi)r^2}{EI} + \frac{N(\varphi)r}{EA} \right) \quad . \quad (9)$$

取弹性地基曲梁任意微段, 根据静力平衡条件, 并略去高阶微量, 则有

$$M(\varphi) - N(\varphi)r = C_0, \quad (10)$$

式中,  $C_0$  为常数, 也就是说弹性地基曲梁中任意截面  $M(\varphi) - N(\varphi)r$  相等。

弹性地基曲梁的基本微分方程:

$$\frac{d^4w(\varphi)}{d\varphi^4} + 2\frac{d^2w(\varphi)}{d\varphi^2} + m^2w(\varphi) = -\frac{r^2}{EI}C_0 + \left(\frac{r^2}{EA} + \frac{r^4}{EI}\right)q(\varphi). \quad (11)$$

式中  $m^2 = 1 + Kr^2/(EA) + Kr^4/(EI)$ ;  $K$  为地基的弹性抗力系数;  $E$  为曲梁弹性模量;  $A$  为曲梁截面积;  $I$  为曲梁惯性矩;  $r$  为曲梁曲率半径。

取分布荷载  $q(\varphi) = q_0$  为常数, 故弹性地基曲梁基本微分方程的特解:

$$w^*(\varphi) = -\frac{r^2}{m^2EI}(M_0 - N_0r) + \frac{q_0}{m^2}\left(\frac{r^2}{EA} + \frac{r^4}{EI}\right). \quad (12)$$

因弹性地基曲梁中任意截面  $M(\varphi) - N(\varphi)r = C_0$  为常数, 并引入双曲函数, 得到弹性地基曲梁基本微分方程的通解:

$$w(\varphi) = \psi_1C_1 + \psi_2C_2 + \psi_3C_3 + \psi_4C_4 - \frac{r^2}{m^2EI}C_0 + \frac{q_0}{m^2}\left(\frac{r^2}{EA} + \frac{r^4}{EI}\right). \quad (13)$$

式中  $\psi_1 = \text{ch}\alpha\varphi \cdot \cos\beta\varphi$ ;  $\psi_2 = \text{ch}\alpha\varphi \cdot \sin\beta\varphi$ ;  $\psi_3 = \text{sh}\alpha\varphi \cdot \cos\beta\varphi$ ;  $\psi_4 = \text{sh}\alpha\varphi \cdot \sin\beta\varphi$ ;  $\alpha = [(m-1)/2]^{1/2}$ ;  $\beta = [(m+1)/2]^{1/2}$ ;  $C_1 \sim C_4$  为积分常数。根据式(9)和式(10), 则有

$$M(\varphi) = \frac{-1}{\frac{1}{EA} + \frac{r^2}{EI}} \left[ \frac{d^2w(\varphi)}{d\varphi^2} + w(\varphi) - \frac{C_0}{EA} \right], \quad (14)$$

$$N(\varphi) = \frac{-1}{\frac{r}{EA} + \frac{r^3}{EI}} \left[ \frac{d^2w(\varphi)}{d\varphi^2} + w(\varphi) + \frac{r^2C_0}{EI} \right]. \quad (15)$$

将径向位移  $w(\varphi)$  的二阶导数代入式(14), (15)中, 得到弯矩  $M(\varphi)$  和轴力  $N(\varphi)$ :

$$M(\varphi) = -\frac{Kr^2}{2\alpha\beta}(-\psi_4C_1 + \psi_3C_2 - \psi_2C_3 + \psi_1C_4) + \frac{1}{m^2}\left(1 + \frac{Kr^2}{EA}\right)C_0 - \frac{q_0r^2}{m^2}, \quad (16)$$

$$N(\varphi) = -\frac{Kr}{2\alpha\beta}(-\psi_4C_1 + \psi_3C_2 - \psi_2C_3 + \psi_1C_4) - \frac{Kr^3}{m^2EI}C_0 - \frac{q_0r}{m^2}. \quad (17)$$

根据  $Q(\varphi) = dM(\varphi)/(rd\varphi)$ , 得到剪力  $Q(\varphi)$ :

$$Q(\varphi) = -\frac{Kr}{2\alpha\beta}[(-\alpha\psi_2 - \beta\psi_3)C_1 + (\alpha\psi_1 - \beta\psi_4)C_2 + (-\alpha\psi_4 - \beta\psi_1)C_3 + (\alpha\psi_3 - \beta\psi_2)C_4]. \quad (18)$$

根据径向位移  $w(\varphi)$  与转角  $\theta(\varphi)$  的关系  $\theta(\varphi) = dw(\varphi)/(rd\varphi)$ , 得到  $\theta(\varphi)$ :

$$\theta(\varphi) = \frac{Kr^3}{2\alpha\beta mEI} [(-\alpha\psi_2 + \beta\psi_3)C_1 + (\alpha\psi_1 + \beta\psi_4 - \alpha)C_2 + (-\alpha\psi_4 + \beta\psi_1 - \beta)C_3 + (\alpha\psi_3 + \beta\psi_2)C_4] - \frac{r}{m^2EI}\left(1 + \frac{Kr^2}{EA}\right)C_0\varphi + \frac{EAR}{m^2(EI + EAR^2)} \cdot \left(\frac{r^2}{EA} + \frac{r^4}{EI}\right)q_0\varphi. \quad (19)$$

再根据弹性地基曲梁径向位移  $w(\varphi)$ 、转角  $\theta(\varphi)$  以及切向位移  $u(\varphi)$  的关系  $u(\varphi) = dw(\varphi)/d\varphi - r\theta(\varphi)$ , 得到切向位移  $u(\varphi)$ :

$$u(\varphi) = (-\beta\psi_2 + \alpha\psi_3)C_1 + (\beta\psi_1 + \alpha\psi_4 + \beta - \beta_1)C_2 + (\alpha_1\psi_1 - \beta_1\psi_4 + \alpha - \alpha_1)C_3 + (\alpha_1\psi_2 + \beta_1\psi_3)C_4 + \frac{r^2}{m^2EI}\left(1 + \frac{Kr^2}{EI}\right)C_0\varphi - \frac{EAR^2}{m^2(EI + EAR^2)} \cdot \left(\frac{r^2}{EA} + \frac{r^4}{EI}\right)q_0\varphi, \quad (20)$$

式中,  $\alpha_1 = \alpha - Kr^4/(2\alpha mEI)$ ;  $\beta_1 = \beta - Kr^4/(2\beta mEI)$ 。

考虑到弹性地基曲梁的对称性<sup>[19]</sup>, 即  $w(\varphi) = w(-\varphi)$  和  $N(\varphi) = N(-\varphi)$ , 则有积分常数  $C_2 = C_3 = 0$ 。因此, 还剩  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_4$  三个积分常数未知, 利用曲梁端部固支约束边界条件  $w(\varphi_0) = 0$  和  $\theta(\varphi_0) = 0$ , 再加假定边界条件  $Q(\varphi_0) = [Iq(\varphi_0) \varphi_0 m^2 \cdot Kr^3/2 \alpha\beta mEI] / A[Kr^3/2 \alpha\beta mEI - \beta(1 + Kr^2/EA)\varphi_0/r]r^{[20]}$ , 即可获得  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_4$  三个积分常数, 进而得弹性地基曲梁在迎水面荷载作用下的径向位移  $w(\varphi)$ 、切向位移  $u(\varphi)$ 、转角  $\theta(\varphi)$ 、弯矩  $M(\varphi)$ 、轴力  $N(\varphi)$  以及剪力  $Q(\varphi)$ 。

利用构建的直线型心墙和曲线型心墙简化力学分析模型求解心墙变形和内力时, 需要确定弹性抗力系数  $K$  (基床系数) 和荷载  $q(x)$  或  $q(\varphi)$ 。基床系数  $K$  的求取方法很多, 推荐采用经典的 Terzaghi 法<sup>[21]</sup>, Terzaghi 认为堆石料的基床系数为

$$K = K_{30} \cdot \left[ \frac{B + 0.305}{2B} \right]^2. \quad (21)$$

式中,  $K_{30}$  是宽度为 0.305 m 的方形荷载板的标准基床系数, 其值近似取下游堆石料的弹性模量  $E_r$ ,  $B$  为荷载板宽度。观察式(21)不难发现, 基床系数  $K$  值不小于 0.25 倍的下游堆石料弹性模量  $E_r$ , 近似取其值的 0.25 倍。鉴于沥青混凝土心墙堆石坝下游堆石料呈梯形状, 建议基床系数自底部到顶部也呈梯形分布:

$$K = \alpha K_{30} \cdot \left[ \frac{B + 0.305}{2B} \right]^2, \quad (22)$$

式中,  $\alpha = d/D$  为分布系数,  $d$  和  $D$  分别为下游堆石料不同坝高处厚度和底部厚度。

作用于心墙迎水面的荷载  $q(x)$  或  $q(\varphi)$  由上游堆石料的主动土压力和水压力两部分构成:

$$q(x) = K_a \gamma'_r h + \gamma_w h \quad (23)$$

式中  $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi_r/2)$  为主动土压力系数;  $\varphi_r$  为堆石料的内摩擦角;  $\gamma'_r$  为堆石料的浮重度;  $\gamma_w$  为水的重度。

### 3 直线型心墙的受拉特性及其改善效果

基于前文构建的直线型心墙和曲线型心墙的简化力学分析模型, 首先分析坝高和堆石料模量对直线型心墙的挠曲变形和弯矩(拉应力)的影响, 然后考察曲线型心墙减小其内部拉应力的效果。

#### 3.1 直线型心墙的受拉特性

假设直线型心墙堆石坝上游坡比 1:2.2, 下游坡比 1:2, 河谷左岸坡比 1:1, 右岸坡比 2:1, 坝顶宽 10 m, 心墙厚 1.5 m。现基于直线型心墙简化力学分析模型, 探究运行期坝高  $h$  (如图 5 所示) 和堆石料模量  $E_r$  (取 35, 52.5, 70, 87.5, 105 MPa) 对引起心墙内部拉应力的挠曲变形和弯矩的影响。在 0.5 倍坝高处, 取 3 m 高的心墙作为研究对象。沥青混凝土心墙和堆石料的基准材料参数, 如表 1 所示。

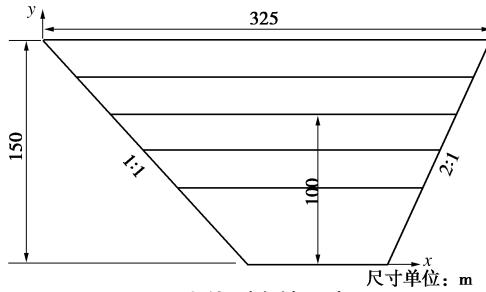


图 5 直线型心墙示意图

Fig. 5 Schematic diagram of straight core

表 1 模型计算参数

Table 1 Parameters for calculation

材料	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
沥青混凝土心墙	25	0.35	0.225	28.0	2.45
堆石料	70	0.32	—	44.5	2.35

图 6 为堆石料模量  $E_r=70 \text{ MPa}$  时, 直线型心墙挠曲变形沿坝轴线坐标分布图, 可知心墙在上游横向荷载推动力作用下产生指向下游的挠曲变形, 因两岸河谷的约束限制作用, 且心墙较软即模量较小, 心墙端部挠曲变形变化率较大, 中部变化率很小, 即沿坝轴线呈先增大再维持基本不变再减小分布。坝高分别为 50, 75, 100, 125, 150 m 时, 对应的挠曲变形极值分别为 3.44, 5.28, 7.13, 8.88, 10.81 cm, 心墙的挠曲变形随坝高的增高(横向荷载的增大)近似呈线性增大变化。

图 7 为坝高  $h=100 \text{ m}$  时, 直线型心墙挠曲变形沿坝轴线坐标分布图, 可知堆石料模量分别为 35, 52.5, 70, 87.5, 105 MPa 时, 对应的心墙挠曲变形极值分

别为 14.25, 9.51, 7.13, 5.71, 5.14 cm, 即心墙挠曲变形随堆石料模量增大而逐渐减小, 且变化幅值也逐渐减小。

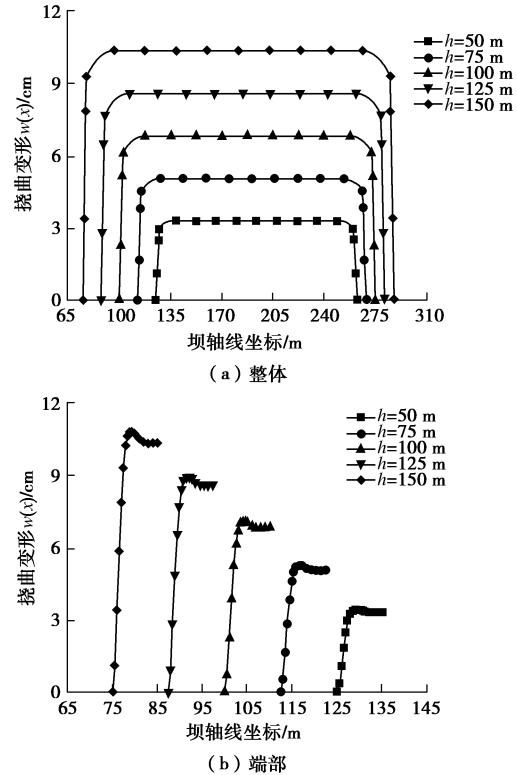


图 6 心墙挠曲变形沿坝轴线坐标分布图( $E_r=70 \text{ MPa}$ )

Fig. 6 Distribution of deflection of core along dam axis coordinate

( $E_r=70 \text{ MPa}$ )

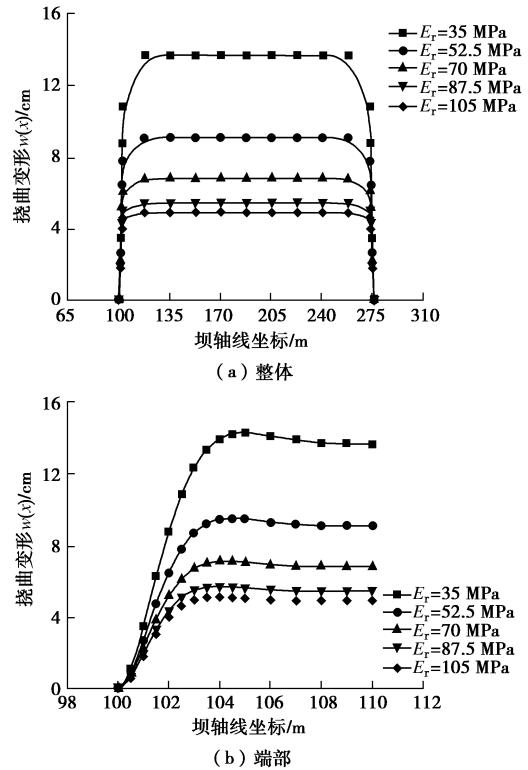


图 7 心墙挠曲变形沿坝轴线坐标分布图( $h=100 \text{ m}$ )

Fig. 7 Distribution of deflection of core along dam axis coordinate  
( $h=100 \text{ m}$ )

图 8 为堆石料模量  $E_r=70$  MPa 时, 直线型心墙弯矩沿坝轴线坐标分布图, 可知心墙弯矩沿坝轴线近似呈驼峰状分布, 最大值位于心墙端部。说明心墙端部是拉应力最大区域, 设计中应重点解决这一区域的拉应力超标问题。坝高分别为 50, 75, 100, 125, 150 m 时, 对应的弯矩极值分别为  $-0.78, -1.19, -1.61, -2.02$  和  $-2.44$  MN·m/m, 进而根据应力与弯矩的关系:  $\sigma_t = M_{\max}/W$  ( $W=b\delta^2/6$  为心墙弯曲截面系数) 解得心墙拉应力极值分别为  $0.69, 1.05, 1.43, 1.80, 2.17$  MPa, 即心墙弯矩 (拉应力) 随坝高增高而逐渐增大。

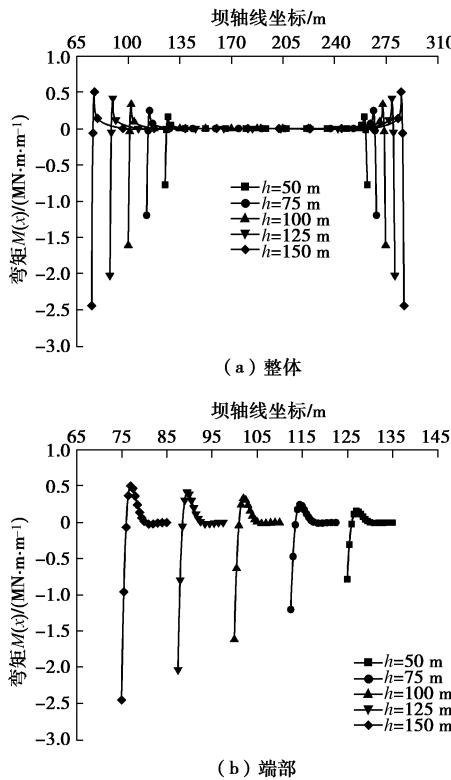


图 8 心墙弯矩沿坝轴线坐标分布图( $E_r=70$  MPa)

Fig. 8 Distribution of bending moment of core along dam axis coordinate ( $E_r=70$  MPa)

图 9 为坝高  $h=100$  m 时, 直线型心墙弯矩沿坝轴线坐标分布图, 可知堆石料模量分别为 35, 52.5, 70, 87.5, 105 MPa 时, 对应的心墙弯矩极值分别为  $-2.28, -1.85, -1.61, -1.44, -1.37$  MN·m/m, 获得心墙拉应力极值分别为  $2.03, 1.64, 1.43, 1.38, 1.22$  MPa, 即心墙弯矩 (拉应力) 随堆石料模量增大而逐渐减小, 且变化幅值也逐渐减小。

图 10 为坝高  $h=100$  m 和堆石料模量  $E_r=70$  MPa 时, 直线型心墙弯矩沿坝高分布图, 可知在 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 倍坝高  $h$  处, 心墙端部弯矩极值分别为  $-2.19, -1.92, -1.61, -1.22, -0.62$  MN·m/m (对应的拉应力极值为  $1.95, 1.71, 1.43, 1.08, 0.55$  MPa), 即心墙端部弯矩 (拉应力) 均从坝底部到顶部逐渐减小。

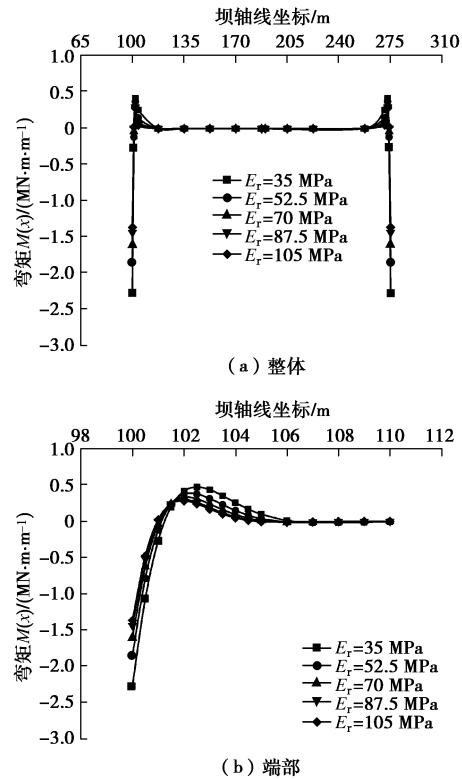


图 9 心墙弯矩沿坝轴线坐标分布图( $h=100$  m)

Fig. 9 Distribution of bending moment of core along dam axis coordinate ( $h=100$  m)

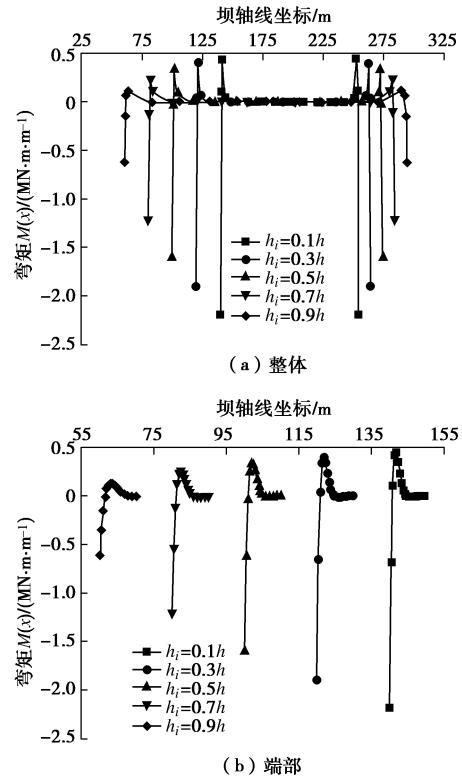


图 10 心墙端部弯矩沿坝高分布图( $h=100$  m,  $E_r=70$  MPa)

Fig. 10 Distribution of bending moment of core along dam axis coordinate at different dam heights ( $h=100$  m,  $E_r=70$  MPa)

综上所述, 构建的直线型心墙简化力学分析模型能够较好地反映直线型心墙的受力变形特性, 沥青混凝土心墙堆石坝的坝高越高和堆石料模量越小, 心墙

端部的拉应力越大, 心墙产生拉破坏的可能性也就越大, 这对沥青混凝土心墙堆石坝而言, 是十分危险的, 这也恰恰说明减小高或超高沥青混凝土心墙堆石坝心墙拉应力的迫切性。

### 3.2 曲线型心墙的改善效果

针对高或超高沥青混凝土心墙端部存在较大拉应力的工程现象, 现基于前文提出的曲线型心墙堆石坝和建立的曲线型心墙简化力学分析模型, 考察坝高  $h=100$  m 的曲线型心墙堆石坝在不同心墙曲率下减小心墙端部拉应力的效果, 河谷特征、坝坡和坝壳料材料参数与直线型心墙堆石坝保持一致。同样在 0.5 倍坝高处, 取 3 m 高的心墙作为研究对象。

图 11 为不同心墙曲率的曲线型心墙挠曲变形沿坝轴线坐标分布图, 类似于直线型心墙, 心墙挠曲变形沿坝轴线呈先增大再维持基本不变再减小分布。心墙曲率  $k=1.27 \times 10^{-3}$  时, 心墙挠曲变形极值为 7.11 cm, 当心墙曲率  $k$  增大到  $5.52 \times 10^{-3}$  时, 心墙挠曲变形极值减小至 7.08 cm, 心墙挠曲变形随心墙曲率增大而减小。因作用于心墙迎水面的横向荷载和堆石料模量不变, 故较直线型心墙的挠曲变形极值 7.13 cm, 变化幅值较小。但不同于直线型心墙, 曲线型心墙的设计是凸向上游, 心墙挠曲变形的后果是轴线缩短, 故曲线型心墙能够部分抵消因迎水面荷载引起的拉应力。并且曲线心墙端部的挠曲变形较直线型心墙更加平滑, 其受力也将更加合理。

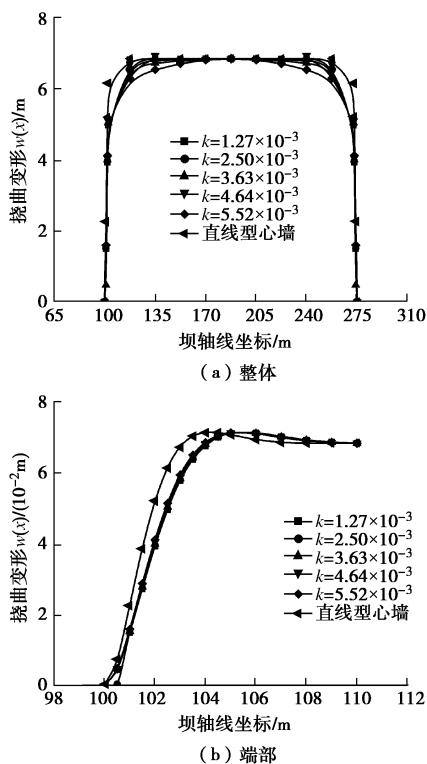


图 11 心墙挠曲变形沿坝轴线坐标分布图

Fig. 11 Distribution of deflection of core along dam axis coordinate

图 12 为不同心墙曲率的曲线型心墙弯矩沿坝轴线坐标分布图, 同样类似于直线型心墙, 心墙弯矩沿坝轴线近似呈驼峰状分布, 最大值位于端部。心墙曲率  $k=1.27 \times 10^{-3}$  时, 心墙弯矩极值为  $-0.93 \text{ MN}\cdot\text{m}/\text{m}$ , 对应拉应力极值为  $0.83 \text{ MPa}$ ; 当心墙曲率  $k$  增大到  $5.52 \times 10^{-3}$  时, 心墙弯矩极值减小至  $-0.92 \text{ MN}\cdot\text{m}/\text{m}$ , 对应拉应力极值为  $0.82 \text{ MPa}$ , 心墙端部弯矩(拉应力)随心墙曲率增大而减小。相较于直线型心墙弯矩极值  $1.61 \text{ MN}\cdot\text{m}/\text{m}$  (拉应力极值  $1.43 \text{ MPa}$ ), 曲线型心墙弯矩极值(拉应力极值)减小了约  $42.7\%$ , 有效地降低了心墙产生拉破坏的风险, 进而验证了将传统直线型心墙设计成曲线型心墙的合理性。曲线型心墙能够显著减小其内部拉应力, 主要得益于拱结构的特殊传力机制: 可将横向荷载部分或全部地转化成轴向压荷载, 而使得横向荷载作用产生的弯矩减小, 这是曲线型心墙端部弯矩(拉应力)小于直线型心墙端部弯矩(拉应力)的根本原因, 也是曲线型心墙受力的优越性所在之处。

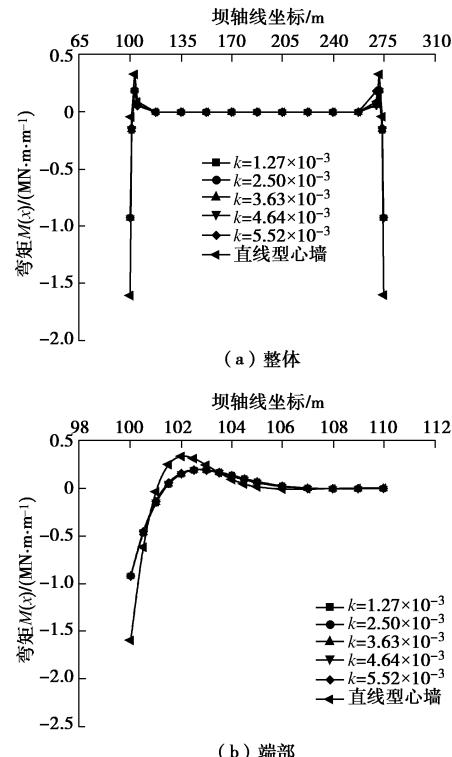


图 12 心墙弯矩沿坝轴线坐标分布图

Fig. 12 Distribution of bending moment of core along dam axis coordinate

图 13 为心墙曲率  $k=3.63 \times 10^{-3}$  时, 曲线型心墙弯矩沿坝高分布图, 可知在  $0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$  倍坝高  $h$  处, 心墙端部弯矩极值分别为  $-1.27, -1.10, -0.93, -0.70, -0.42 \text{ MN}\cdot\text{m}/\text{m}$  (对应的拉应力极值为  $1.13, 0.98, 0.83, 0.62, 0.27 \text{ MPa}$ ), 即曲线型心墙端部弯矩(拉应力)均从坝底部到顶部逐渐减小, 较直线型心墙端部弯矩极值  $-2.19, -1.92, -1.61, -1.22, -0.62 \text{ MN}\cdot\text{m}/\text{m}$  (对应的拉应力极值为  $1.95, 1.71, 1.43, 1.08, 0.55 \text{ MPa}$ ) 显著减小。

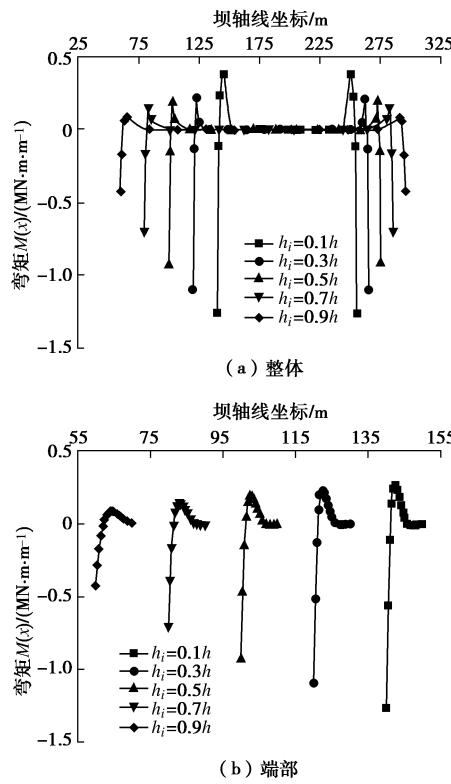
图 13 心墙端部弯矩沿坝高分布图( $k=3.63 \times 10^{-3}$ )

Fig. 13 Distribution of bending moment of core along dam axis coordinate at different dam heights ( $k=3.63 \times 10^{-3}$ )

图 14 为不同心墙曲率的曲线型心墙轴力沿坝轴线坐标分布图, 曲线型心墙的轴力沿坝轴线也近似呈驼峰状分布, 最大值位于端部。心墙曲率  $k=1.27 \times 10^{-3}$  时, 心墙轴力极值为  $-10.75 \text{ kN/m}$ ; 当心墙曲率  $k$  增大到  $5.52 \times 10^{-3}$  时, 心墙轴力极值增大至  $-46.71 \text{ kN/m}$ , 即心墙轴力随其曲率增大而增大。曲线型心墙积极地发挥了拱作用, 将部分横向荷载通过拱作用转化成轴向压荷载, 也能达到削弱心墙端部拉应力的效果, 这是曲线型心墙受力优越性之二。

综上所述, 构建的曲线型心墙简化力学分析模型也能够较好地反映曲线型心墙的受力变形特性, 曲线型心墙通过挠曲变形的后果是轴线缩短和减小端部弯矩以及增大轴向压力而达到降低其端部拉应力之目的, 充分体现了曲线型心墙在受力变形特性上的巨大优势。

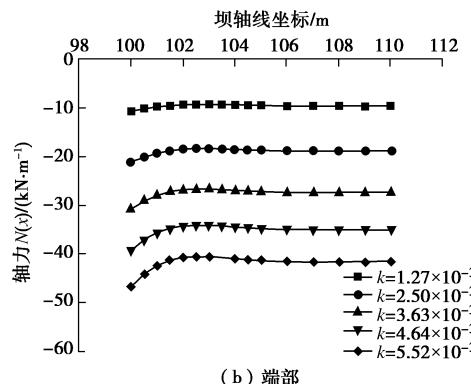
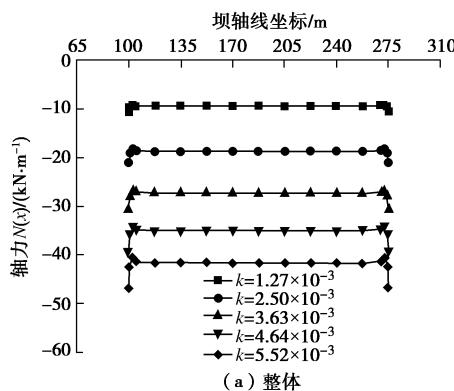


图 14 心墙轴力沿坝轴线坐标分布图

Fig. 14 Distribution of axial force of core along dam axis coordinate

## 4 结 论

(1) 探讨了传统沥青混凝土心墙堆石坝(直线型心墙堆石坝)运行期心墙产生拉应力的机理, 提出了将直线型心墙堆石坝设计成曲线型心墙堆石坝的构想, 构建了基于 Winkler 弹性地基直梁和曲梁理论的直线型心墙和曲线型心墙的简化力学分析模型, 该模型能够较好地反映心墙的受力变形特性。

(2) 直线型心墙堆石坝运行期心墙端部存在较大的拉应力, 坝高越高和堆石料模量愈小, 心墙端部拉应力愈大, 心墙产生拉破坏的可能性愈大, 因此对堆石料较软的高或超高沥青混凝土心墙堆石坝(心墙所受拉应力接近或超过其抗拉强度的特殊情况), 尤其需要采取改善措施降低心墙拉应力。

(3) 区别于直线型心墙, 曲线型心墙运行期挠曲变形的后果是轴线缩短, 加之利用拱作用将部分横向荷载转换成轴向压荷载而削弱横向荷载产生的弯矩, 再通过增大心墙曲率而增大轴向压力共同达到降低其端部拉应力的目的, 曲线型心墙较直线型心墙拉应力能够减小约 42.7%, 因此, 对心墙所受拉应力接近或超过其抗拉强度的特殊情况, 推荐采用曲线型心墙堆石坝型。

## 参 考 文 献:

- [1] WANG W B, HOEG K. the asphalt core embankment dam: a very competitive alternative[C]// Modern Rockfill Dams-2009. Beijing, 2009.
- [2] ICOLD. Bituminous cores for fill dams[C]// International Commission on Large Dams, Bulletin 84. Paris, 1992.
- [3] HÖEG K. Asphaltic concrete cores for embankment dams[R]. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute of Technology, Norway, 1993.
- [4] WANG W B. Research on the suitability of asphalt concrete as water barrier in dams and dikes[D]. Oslo: University of Oslo,

- 2008.
- [5] 李守义, 马成成, 李炎隆, 等. 沥青混凝土心墙堆石坝的地震反应特性分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 198 - 202. (LI Shou-yi, MA Cheng-cheng, LI Yan-long, et al. Seismic response analysis of rockfill dam with asphaltic concrete core wall[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 198 - 202. (in Chinese))
- [6] 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. (in Chinese))
- [7] 吴海林, 彭云枫, 杜晓帆, 等. 沥青混凝土心墙坝应力变形及水力劈裂研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(4): 119 - 127. (WU Hai-lin, PENG Yun-feng, DU Xiao-fan, et al. Study on stress-deformation and hydraulic fracturing of rockfill dam with asphalt concrete core[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(4): 119 - 127. (in Chinese))
- [8] NG A K L, SMALL J C. A case study of hydraulic fracturing using finite element methods[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(5): 861 - 875.
- [9] 王为标, 张应波, 朱悦, 等. 沥青混凝土心墙石渣坝的有限元计算分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 173 - 178. (WANG Wei-biao, ZHANG Ying-bo, ZHU Yue. Finite element analysis of asphalt concrete core rock-debris dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 173 - 178. (in Chinese))
- [10] 陈惠远, 施群, 唐仁杰. 沥青混凝土心墙土石坝的应力-应变分析[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 146 - 158. (CHEN Hui-yuan, SHI Qun, TANG Ren-jie. Stress-strain analysis of earth-rock dams with asphalt concrete core[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(4): 146 - 158. (in Chinese))
- [11] 荣冠, 朱焕春. 茅坪溪土石坝沥青混凝土心墙施工期变形分析[J]. 水利学报, 2003(7): 115 - 119. (RONG Guan, ZHU Huan-chun. Deformation of asphalt concrete core wall of Maopingxi earth-rock dam in the stage of construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(7): 115 - 119. (in Chinese))
- [12] 汪明元, 周欣华, 包承纲, 等. 三峡茅坪溪高沥青混凝土心墙堆石坝运行状态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1470 - 1477. (WANG Ming-yuan, ZHOU Xin-hua, BAO Cheng-gang, et al. Study on behaviors of Maopingxi high rockfill dam with asphalt concrete core of Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1470 - 1477. (in Chinese))
- [13] 孔宪京, 许诏君, 邹德高, 等. 沥青混凝土心墙坝心墙与基座模型抗震试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(4): 559 - 564. (KONG Xian-jing, XU Zhao-jun, ZOU De-gao, et al. Seismic test study of core wall and base model of asphalt concrete core wall dam[J]. Journal of Dalian university of Technology, 2013, 53(4): 559 - 564. (in Chinese))
- [14] 郎能惠, 杨泽艳. 中国混凝土面板堆石坝的技术进步[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1361 - 1368. (LI Neng-hui, YANG Ze-yan. Technical advances in concrete face rockfill dams in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1361 - 1368. (in Chinese))
- [15] 李国英, 王禄仕, 米占宽. 土质心墙堆石坝应力和变形研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 23(8): 1363 - 1369. (LI Guo-ying, WANG Lu-shi, MI Zhan-kuan. Research on stress-strain behavior of soil core rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 23(8): 1363 - 1369. (in Chinese))
- [16] 郭彦林, 窦超. 我国拱形钢结构设计理论研究现状与展望[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 1 - 17, 26. (GUO Yan-lin, DOU Chao. Research status and expectation of design theory of steel arch structure in China[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 1 - 17, 26. (in Chinese))
- [17] 文竟舟, 张永兴, 王成, 等. 钢拱架应力反分析隧道初期支护力学性能的研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 170 - 175. (WEN Jing-zhou, ZHANG Yong-xing, WANG Cheng, et al. Back analysis for the mechanical properties of initial tunnel support based on steel arch stresses[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 170 - 175. (in Chinese))
- [18] 蔡晓鸿, 蔡勇平. 水工压力隧洞结构应力计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (CAI Xiao-hong, CAI Yong-ping. Structural stress calculation for hydraulic pressure tunnel[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [19] 杨高中. 对“弹性地基上圆拱的计算”的讨论[J]. 土木工程学报, 1964, 10(5): 75 - 88. (YANG Gao-zhong. Discussion on “Computation of circular arch on elastic foundation”[J]. China Civil Engineering Journal, 1964, 10(5): 75 - 88. (in Chinese))
- [20] 杨蓓. 水轮机钢蜗壳及引水钢管垫层施工法受力解析[D]. 西安: 西安理工大学, 2012. (YANG Bei. The stress analysis of the cushion construction method of turbine spiral case and intake steel pipes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [21] TERZAGHI K. Evaluation of coefficients of subgrade reaction[J]. Géotechnique, 1955, 5(4): 297 - 326.