

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.008

相变黏土心墙堆石坝结构性态与水力劈裂分析

刘东海,常周梅,杨家琦,陈 辉

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室,天津 300350)

摘要:为研究相变黏土心墙的应力、位移、渗流及水力劈裂等结构性态,采用有限差分法构建了相变黏土心墙堆石坝渗流-应力耦合分析模型,分析了相变黏土和纯黏土心墙在竣工期和蓄水期的应力、位移、渗流场分布规律及水力劈裂性态等,同时分析了相变黏土和纯黏土混合填筑心墙的可行性。结果表明:竣工期和蓄水期,相变黏土心墙堆石坝的位移、应力分布与纯黏土心墙堆石坝分布规律基本一致,但最大竖向位移略高于纯黏土心墙;相变黏土心墙的渗透系数分布与纯黏土心墙相似,但整体上大于纯黏土心墙;不同工况下,相变黏土心墙堆石坝的最小安全系数满足规范要求,但多数低于纯黏土心墙堆石坝;正常施工运行状态下,相变黏土和纯黏土心墙堆石坝均不会发生水力劈裂。在冬季负温时段采用相变黏土而非负温时段采用常规土料的混合填筑心墙方案是可行的,该方案可进一步控制相变材料用量,并解决全部采用相变黏土填筑心墙竖向位移略大的问题。

关键词:心墙堆石坝;相变黏土;应力变形;渗流分析;水力劈裂;有限差分法

中图分类号:TV641.41

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)01-0062-09

Analysis on structural behaviors and hydraulic fracturing of phase change material-mixed clay core wall rockfill dam

LIU Donghai, CHANG Zhoumei, YANG Jiaqi, CHEN Hui

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To study the structural behaviors of the paraffin-based phase-change material (PPCM)-mixed clay core wall, including the stress, deformation, seepage and hydraulic fracturing, this work constructed a seepage-stress coupled analysis model for a core-wall dam filled with PPCM-mixed clay (PPCM-Clay) based on finite difference method. Then, the distributions of stress, deformation, seepage fields and hydraulic fracturing behaviors are analyzed for the core wall filled with PPCM-Clay and conventional clay under two conditions (right after construction completed and after impoundment), following with analyzing the feasibility of mixed filling with PPCM-Clay and conventional clay. Results under both conditions show that: the distributions of stress and deformation for PPCM-Clay core wall are basically consistent with conventional clay core wall, with a slightly higher maximum vertical displacement than conventional clay core wall; the distributions of permeability coefficient for the PPCM-Clay core wall is similar to conventional clay core wall, but with a higher level; the minimum safety coefficients meet the requirement of specifications, but most of which are lower than conventional clay core wall; the hydraulic fracturing will not occur in both PPCM-Clay core wall and conventional clay core wall. It's feasible to fill core wall with PPCM-Clay below 0 °C and fill core wall with conventional clay above 0 °C, which can reduce the total PPCM content and address the issue that the core wall filled with PPCM-Clay would perform a higher maximum vertical displacement.

Key words: core wall rockfill dam; phase change material-mixed clay; stress and strain; seepage analysis; hydraulic fracturing; finite difference method

在高海拔寒区建设黏土心墙堆石坝时,冬季施工会面临严寒天气的挑战——心墙土料在严寒环境下会因短时冻结引起压实性能降低^[1-2]。常规防冻方法(如摊铺保温材料或低温时段停工)会干扰施工、缩短有效填筑时间。掺混石蜡基相变材料(paraffin-based phase-change material, PPCM)的相变黏土可解决上述问

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51979189, 52279136)

作者简介:刘东海(1974—),男,教授,博士,主要从事大型工程仿真与优化、土石坝数字化施工与服役性态研究。E-mail:liudh@tju.edu.cn

引用本文:刘东海,常周梅,杨家琦,等.相变黏土心墙堆石坝结构性态与水力劈裂分析[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):62-70.

LIU Donghai, CHANG Zhoumei, YANG Jiaqi, et al. Analysis on structural behaviors and hydraulic fracturing of phase change material-mixed clay core wall rockfill dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(1): 62-70.

题,延长心墙在寒区冬季施工的有效施工时间^[3-4];通过将 PPCM 与黏土混合,利用相变材料在固态和液态之间转换时吸收和释放热量的特性,可有效控制土体温度;当环境温度下降时,相变材料开始凝固并释放热量,这个过程提高了周围土体的温度,从而实现防冻控温。目前,相变黏土用于寒区心墙冬季施工防冻控温的可行性和适用性已得到了初步论证^[3-6]。然而,PPCM 的掺入会对土体的热学特性、抗渗性能及物理力学特性带来显著影响。王友乐等^[4,7-8]通过室内试验研究了不同 PPCM 掺量对相变黏土热学特性的影响及控温机理,并论证了在较低 PPCM 掺量下(一般小于或等于 8%)可保证心墙在负温下施工不会冻结;刘东海等^[5-6]研究了不同 PPCM 掺量下心墙相变黏土的表层温度及温度剖面的变化历程,从控温效果探讨了用相变黏土解决防渗心墙土冬季施工中冻结问题的可行性;Liu 等^[8]通过试验证明了 PPCM 的掺入能显著增强心墙黏土和砾质土的抗渗性,由于 PPCM 的包裹使土颗粒具有疏水性,从而使得土体渗透系数降低;杨家琦等^[9]通过三轴渗透-压缩试验,研究了相变黏土的力学和渗透特性。相变黏土作为一种新型筑坝材料,深入分析和评估其筑坝后的应力变形、渗流场分布以及水力劈裂发生风险等,是其实际筑坝应用的重要前提。

土石坝心墙渗漏及渗透破坏是造成大坝损坏乃至溃坝的主要原因^[10-12]。而心墙的渗透破坏等问题往往与大坝的应力变形密切相关:一方面,心墙的抗渗性能会受到应力变形状态和孔隙比的影响^[13-14];另一方面,由心墙与坝壳料变形模量差异导致的拱效应不利于心墙的渗透稳定^[15-17]。因而,对于抗渗和抗裂性能发生变化的相变黏土心墙,应重点分析其在应力变形影响下的渗流场分布以及其在不利工况下发生水力劈裂的可能性。

本文采用有限差分方法(finite difference method, FDM)构建大坝渗流-应力耦合分析模型,考虑应力变形状态对相变黏土渗流-力学参数的影响,分析相变黏土心墙堆石坝的变形协调及渗流稳定性,并在此基础上,验证相变黏土与常规心墙料混合交替填筑心墙的可行性,探究相变黏土心墙在不利工况下发生水力劈裂的可能性,进而论证心墙相变黏土筑坝的安全性与可靠性。

1 研究方法

1.1 邓肯-张模型的二次开发与验证

邓肯-张模型能较好地反映土体的非线性,能较好地反映相变黏土的应力应变特性^[9,18-19]。因此,本文采用邓肯-张 $E-B$ 模型分析相变黏土心墙堆石坝的应力变形。

FLAC3D 是基于显式有限差分方法的数值计算软件,系统开放程度高,可通过 C++和 Python 等语言实现如定义新的本构关系、进行软件内外部数据交互、相关程序算法调用等功能^[20]。因此,本文基于显式有限差分方法的相关计算和二次开发工作将在该软件上进行。尽管 FLAC3D 提供了包括弹性模型、摩尔库伦模型、修正剑桥模型以及双屈服模型等在内的 15 种常用本构模型,但并未提供土石坝应力变形分析常用的邓肯-张模型。因此,本文参考马春景等^[21-22]的研究,按照 FLAC3D 对本构模型格式的要求,利用 C++对邓肯-张模型进行了二次开发,并生成了相应的 DLL 文件。

为验证本文二次开发模型的有效性,构建 1×1 的单元体模型,在单元的顶部节点上施加向下的速度,记录其产生的偏应力与轴向应变。取相变黏土(PPCM 初始掺量为 8%)在 0.98 压实度条件下的邓肯-张 $E-B$ 模型参数对二次开发模型进行测试^[9],FLAC3D 计算值与邓肯-张模型理论计算值(以下简称 DC)吻合得很好(图 1),验证了二次开发的邓肯-张 $E-B$ 模型程序的有效性。

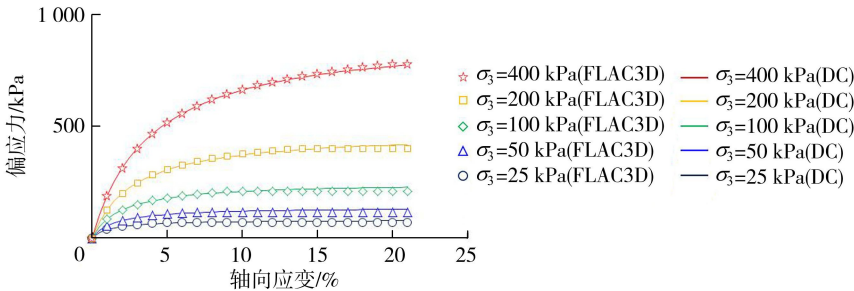


图 1 邓肯-张 $E-B$ 模型的有效性验证

Fig. 1 Validation of Duncan-Chang $E-B$ model

1.2 基于有限差分法的渗流-应力耦合分析方法

相变黏土作为挡水建筑物的填筑料,运行期势必会受到渗流场和应力场的共同作用^[23],如果进行完全的渗流-应力耦合计算,即对渗流场和应力场进行同步求解,通常极为耗时。因而,常常会对渗流-应力耦合分析问题进行简化,以降低渗流场与应力场的交互迭代频率,使其能够以尽可能少的时间和计算量完成相应的问题分析。在不考虑极端荷载的条件下,相变黏土心墙堆石坝除自重外的主要扰动为水位变化带来的渗流场边界条件的改变^[24],即渗流场边界条件的变化带来的扰动是主动的,而应力场的调节是被动的。此外,在相变黏土心墙堆石坝中,由于心墙渗透系数比坝壳料低 3~4 个数量级,故而相对于渗流场流体扩散和孔隙压力的重新分布,应力场更容易达到平衡状态。因此,本文对相变黏土心墙堆石坝在水位变动下的渗流-应力耦合分析,以渗流场计算作为主计算,以应力场计算为隶属计算,每计算一定渗流时间的渗流场,就引入应力场计算平衡,一般当渗流场变动不大时,应力场也将很快平衡。

每次计算完应力场,即根据当前的应力变形状态对心墙的孔隙率(n)和渗透系数(k)^[9]进行更新:

$$n_1 = e/(1 + e)$$

(1)

$$k = \exp(Ae^2 + BS_1^2 + CeS_1 + De + ES_1 + F)$$

(2)

其中 $e = e_0 + \varepsilon_v(1 + e_0)$ $S_1 = (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)/[2(ccos\varphi + \sigma_3\sin\varphi)]$
式中: e 为孔隙比; e_0 为初始孔隙比; ε_v 为体积应变; S_1 为应力水平; A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 为经验系数; c 和 φ 分别为单元的黏聚力和内摩擦角; σ_1 和 σ_3 分别为单元的大主应力和小主应力。

由式(2)计算得到的 k 是国内岩土工程领域常用的以速度为单位的水力传导系数,FLAC3D 中计算用的渗透系数 k_{FLAC} 则是以 $\text{m}^2/(\text{Pa}/\text{s})$ 为单位的渗透率,其与 k 的关系为

$$k_{\text{FLAC}} = k/\rho_f g = \alpha_f k$$

(3)

式中: ρ_f 为流体密度; g 为重力加速度; α_f 为转换系数。

对于 20℃ 的水,当 k 的单位为 cm/s 时,可取 $k_{\text{FLAC}} = 1.02 \times 10^{-6} k$ 。基于有限差分法的渗流-应力耦合计算流程如图 2 所示。

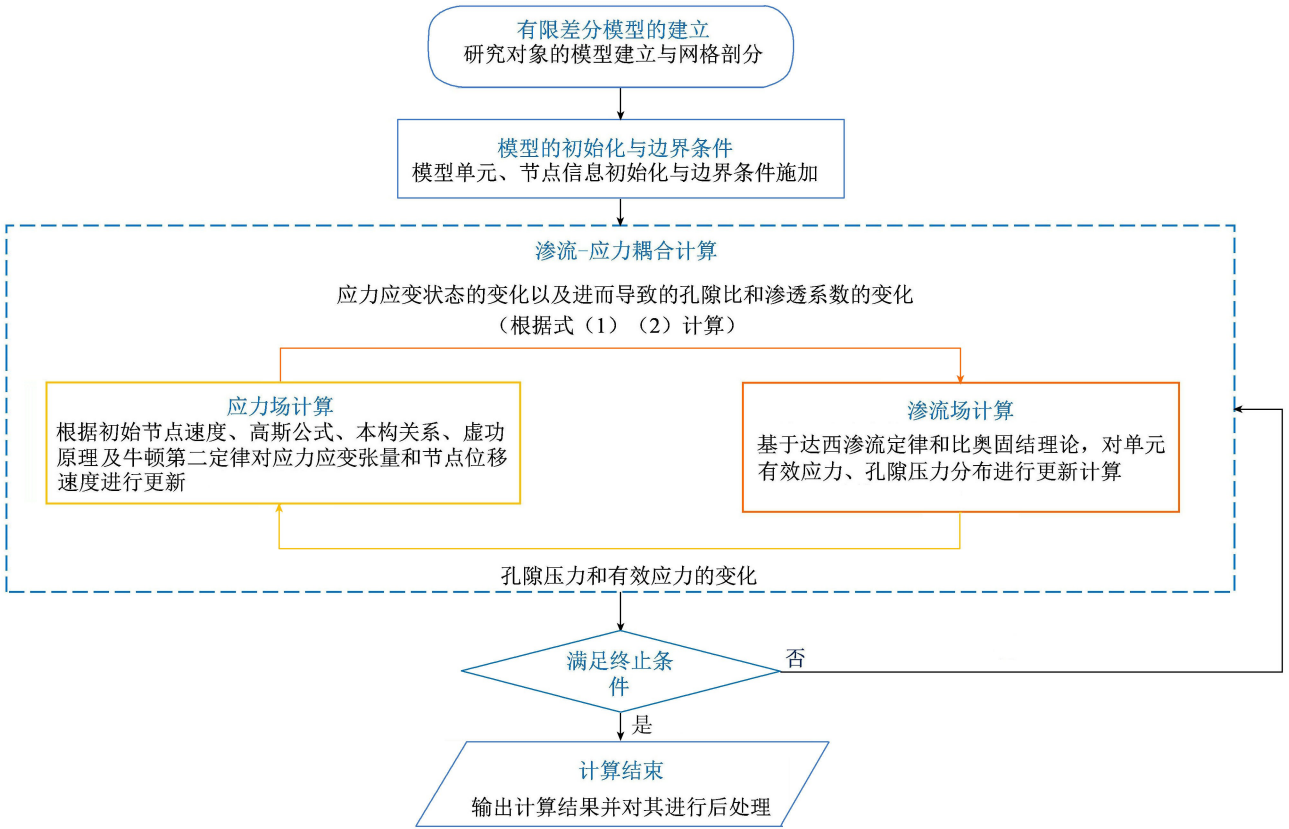


图 2 渗流-应力耦合计算流程

Fig. 2 Flow chart of seepage-stress coupling calculation

2 结果与分析

2.1 工程概况与建模

某寒区建设的土质防渗体心墙堆石坝坝高 44 m,坝顶宽 10.0 m,上下游坝坡坡比分别为 1 : 2.75 和 1 : 2.25,坝壳为砂砾料,心墙上游侧设置一层混合过渡砂砾料,下游侧则设置一层反滤层和一层过渡层。水库正常蓄水位为 1 149.00 m,下游水位为 1 115.00 m。为了分析相变黏土心墙堆石坝的结构性态,心墙分别采用纯黏土心墙和相变黏土心墙(PPCM 初始掺量为 8%)两种工况,坝体的三维建模如图 3 所示。

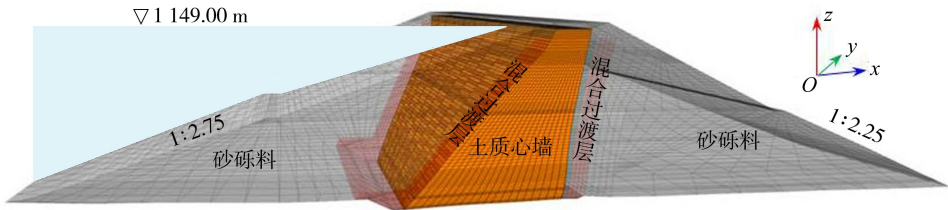


图 3 大坝三维建模
Fig.3 3D modeling of the dam

模拟大坝填筑和蓄水过程,蓄水过程进行渗流-应力的耦合迭代计算,实时更新心墙单元的渗透系数与孔隙率^[9]。作为参照,对纯黏土心墙堆石坝也进行相同计算分析。在大坝三维 FDM 计算中,各类填筑材料均采用邓肯-张 $E-B$ 模型,所用材料参数见表 1。纯黏土和相变黏土的渗透系数按照式(2)进行计算,式(2)中各经验系数求解结果见表 2。由表 2 可知,各公式的 R^2 均在 0.95 及以上,说明公式能较好地计算土样的渗透系数。

表 1 大坝各分区的材料参数

Table 1 Material parameters of each partition of the dam

材料	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	c/kPa	$\varphi/^\circ$	$\Delta\varphi/^\circ$	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}
PS-0	1.80	11.92	30.48	0.0	141.90	0.41	0.86	55.20	0.21	576.6
PS-8	1.71	6.40	29.14	0.0	125.85	0.45	0.85	33.53	0.20	503.4
反滤料	1.91	0.0	40.40	5.81	342.00	0.33	0.91	151.0	0.24	587.0
过渡料	2.01	0.0	44.51	4.74	443.00	0.34	0.82	251.0	0.22	623.0
坝壳料	2.17	0.0	45.42	6.66	754.00	0.31	0.74	236.0	0.11	961.0

注:PS-0 为纯黏土,PS-8 为初始 PPCM 掺量为 8%的相变黏土, ρ 为密度, K 、 K_{ur} 、 K_b 、 n 、 m 为邓肯-张 $E-B$ 模型材料参数, R_f 为破坏强度比。

表 2 渗透系数预测曲面待定系数求解结果

Table 2 Simulated results of undetermined coefficients for the prediction surface of permeability coefficient

土样类型	A	B	C	D	E	F	R^2
PS-0	205.396	-2.131	-11.205	-147.765	5.453	8.794	0.95
PS-8	87.742	-1.876	3.246	-75.164	-0.267	-2.258	0.98
PS-0-1.71	59.756	-0.326	-17.182	-27.662	5.932	-15.431	0.99

注:PS-0-1.71 为密度为 1.71 g/cm³ 的纯黏土。

2.2 结构性态

2.2.1 竣工期的结构性态

相变黏土心墙堆石坝沿坝轴线和坝体中心线方向切片的竖向位移云图表明,剖面面积越大,竖向位移越大。由图 4 可知,竣工期相变黏土心墙堆石坝最大竖向位移为-24.6 cm(与坐标轴方向相同为正,相反为负,下同),发生在心墙中部(1/2~2/3 坝高);纯黏土心墙堆石坝的竖向位移分布与相变黏土分布规律基本一致,最大竖向位移为-22.5 cm,略低于相变黏土心墙堆石坝。相变黏土心墙堆石坝指向上游方向的最大水平位移为 2.1 cm,指向下游方向的最大水平位移则为 2.7 cm。纯黏土心墙堆石坝水平位移的计算结果(指向上、下游方向的最大水平位移分别为 1.9 cm 和 2.8 cm)与相变黏土心墙堆石坝相差较小。

由图 5(a)可知,横断面上大主应力为压应力,最大值为 1.16 MPa(压应力为正,拉应力为负,下同),出现在心墙与上下游坝壳相交的基岩处;心墙处存在一定的拱效应,这是由心墙料比坝壳料软造成的。对比图 5(a)(b)可知,相变黏土心墙堆石坝与纯黏土心墙堆石坝(大主应力最大值为 1.15 MPa)的大主应力分布

较一致。大坝应力统计表明,相变黏土、纯黏土心墙堆石坝的小主应力最大值分别为 0.39、0.39 MPa,因此相变黏土心墙堆石坝与纯黏土心墙堆石坝的大、小主应力分布几乎一致。

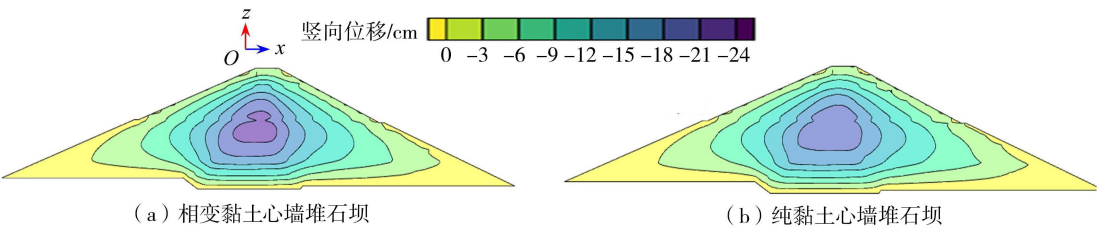


图 4 最大坝高断面竣工期的竖向位移分布

Fig. 4 Vertical displacement distribution of maximum dam high section during the completion stage

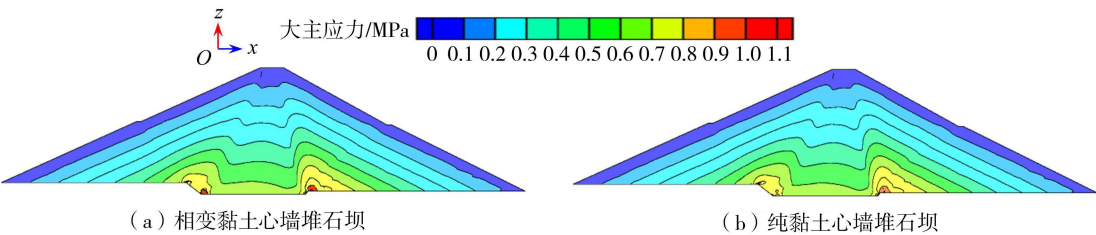


图 5 最大坝高断面竣工期的大主应力分布

Fig. 5 Maximum principal stress distribution of maximum dam high section during the completion stage

摩根斯顿法计算的相变黏土心墙堆石坝、纯黏土心墙堆石坝的最小安全系数分别为 2.006、2.085,简布法计算的最小安全系数分别为 1.852、1.897,均满足 SL 274—2020《碾压式土石坝设计规范》要求,且相变黏土心墙堆石坝的最小安全系数低于纯黏土心墙堆石坝,主要是由于相变黏土中 PPCM 的加入使得其黏聚力下降,从而降低了相变黏土心墙堆石坝的抗剪强度。

2.2.2 蓄水期的结构性态

由图 6 可知,大坝竣工期,相变黏土心墙的渗透系数与心墙高程呈正相关关系,这是由心墙的应力变形分布决定的;而在蓄水期,由于心墙上游侧大、小主应力减小,渗透系数随之增大。相变黏土心墙的渗透系数整体大于纯黏土心墙,但二者渗透系数在不同工况下的分布规律相似。由图 7 可知,相变黏土心墙与纯黏土心墙的孔隙压力分布基本相同,这是由于相对于坝壳料与心墙料间渗透系数的差异(3~4 个数量级),相变黏土与纯黏土间的差异相对较小,因而相变黏土与纯黏土心墙堆石坝渗流场孔隙压分布相差不大。

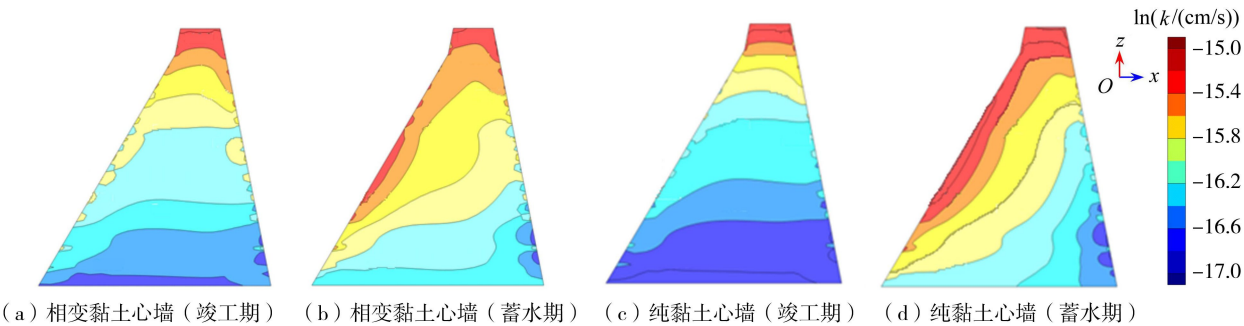


图 6 相变黏土和纯黏土心墙不同工况下的渗透系数分布

Fig. 6 Distribution of permeability coefficients for phase-change clay and pure clay core walls under different working conditions

由图 8、图 9、表 3 可知,相较于竣工期,蓄水期相变黏土心墙堆石坝的最大竖向位移增加至 31.7 cm,指向下游方向的最大水平位移则增加至 5.7 cm。由于渗流场的作用,蓄水期大坝的应力分布也发生了较为显著的变化:坝壳和心墙上游侧的大主应力和小主应力均显著减小。纯黏土心墙堆石坝在蓄水期的应力变形分布与相变黏土心墙堆石坝的分布大体一致,相变黏土心墙堆石坝的最大竖向沉降量略大于纯黏土心墙堆石坝,最大水平向位移以及最大主应力值相差不大。综合前述分析可知,相变黏土心墙堆石坝与纯黏土心墙堆

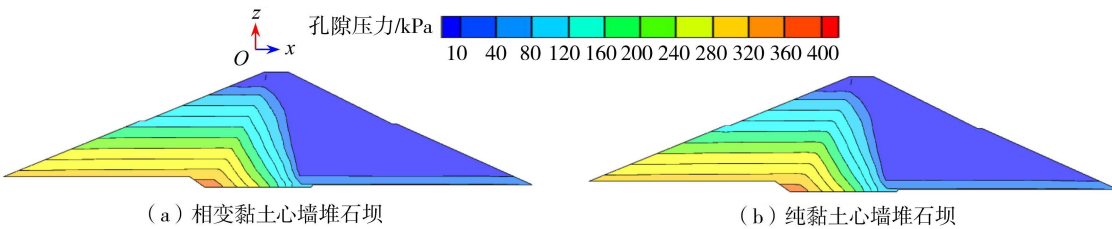


图 7 最大坝高断面蓄水期的孔隙压力分布

Fig. 7 Pore pressure distribution of maximum dam high section during impoundment period

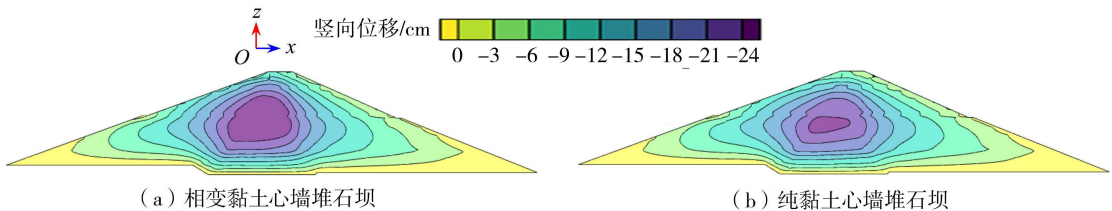


图 8 最大坝高断面蓄水期的竖向位移分布

Fig. 8 Vertical displacement distribution of maximum dam high section during impoundment period

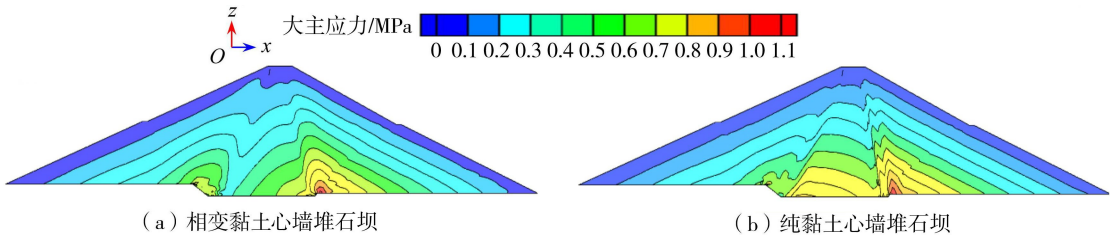


图 9 最大坝高断面坝蓄水期大主应力分布

Fig. 9 Distribution of maximum principal stress of maximum dam high section during impoundment period

石坝在不同工况下的应力变形分布与孔隙压力分布相差不大,仅在竖向沉降位移略大于纯黏土心墙堆石坝。

由表 4 可知,不同心墙堆石坝在各工况的抗滑安全系数均满足 SL 274—2020《碾压式土石坝设计规范》要求,且有一定安全裕度;蓄水期的安全系数小于竣工期,主要原因是蓄水期水的渗透作用导致坝体内部土石坝料饱和度增加,孔隙水压力增大,有效应力减小,进而降低土石坝料的抗剪强度,影响坝坡的稳定性,降低了安全系数。

表 3 大坝蓄水期应力、变形最大值

Table 3 Statistics of maximum values of dam stresses and deformations during impoundment period

心墙 填筑料	水平向位移/cm		竖向 位移/cm	小主应 力/MPa	大主应 力/MPa
	上游方向	下游方向			
相变黏土	-2.6	5.7	-31.7	0.37	1.15
纯黏土	-2.4	5.6	-29.1	0.36	1.13

表 4 不同工况下心墙堆石坝的抗滑安全系数

Table 4 Safety factor of core wall rookfill dam under different working conditions

计算工况	相变黏土心墙堆石坝		黏土心墙堆石坝		规范规定值
	摩根斯顿法	简布法	摩根斯顿法	简布法	
竣工期	2.006	1.852	2.085	1.897	1.250
正常蓄水位(上游坝坡)	1.970	1.725	2.013	1.760	1.350
正常蓄水位(下游坝坡)	1.889	1.726	1.999	1.670	1.350

2.3 相变黏土和纯黏土的混合填筑心墙方案

实际施工中,若仅在冬季负温条件下的心墙填筑中使用相变黏土,其他时段采用常规心墙黏土填筑,则可进一步控制 PPCM 用量。通过对相变黏土和纯黏土心墙混合填筑的不同方案进行计算分析,探讨不同分层填筑方案对大坝应力、变形分布的影响,论证相变黏土与纯黏土交替混合填筑心墙的可行性。

该坝所在地存在负温的时段约从 10 月中下旬持续到翌年 2 月下旬,考虑填筑进度、相变黏土应用方式,确定 4 种混合填筑方案(表 5 和图 10):方案 1 ~ 3 为在冬季全时段使用相变黏土施工填筑(施工进度不同);方案 4 为仅在冬季必要时段(施工中出现负温)使用相变黏土施工填筑。

表 5 相变黏土与纯黏土混合填筑方案

Table 5 Mixed filling schemes of phase-change clay and pure clay

混合填筑方案编号	相变黏土填筑高程/m	相变黏土填筑总厚度/m	相变黏土填筑厚度占比/%
1	1 134.0~1 136.8	2.8	7.2
2	1 130.7~1 139.6	8.9	22.8
3	1 127.4~1 142.5	15.1	38.5
4	1 127.4~1 130.7	9.0	23.1
	1 134.0~1 136.8		
	1 139.6~1 142.5		

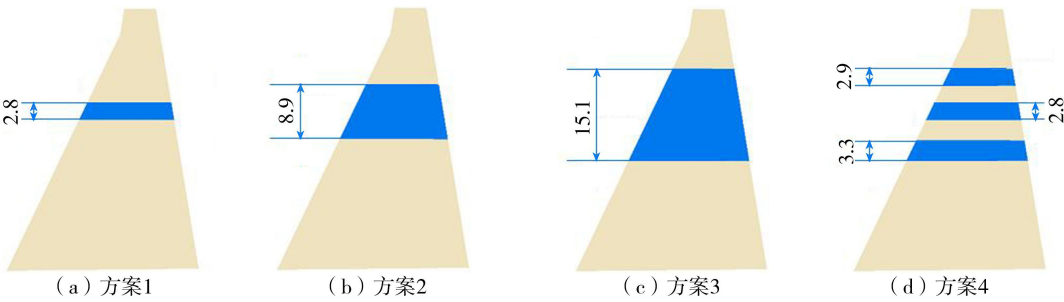


图 10 相变黏土与纯黏土混合填筑心墙方案示意图(单位:m)

Fig. 10 Schematic diagram of mixed core wall filling schemes with phase-change clay and pure clay (unit: m)

由表 6 可知,除最大竖向位移外,不同填筑方案下最大位移与最大主应力的计算结果差异不大;最大竖向位移则会随着相变黏土填筑高度的增加而小幅增加。对比方案 2 与方案 4 的计算结果可知(表 6 和图 11),当相变黏土填筑厚度相近时,不同填筑方案对位移场和应力场分布、最大位移和最大主应力等计算结果几乎没有影响。

表 6 不同混合填筑方案下竣工期大坝的最大位移和应力

心墙填筑方案	最大水平向位移/cm		最大竖向位移/cm	最大小主应力/MPa	最大中主应力/MPa	最大大主应力/MPa
	上游方向	下游方向				
方案 1	-1.9	2.7	-22.4	0.39	0.40	1.15
方案 2	-2.0	2.7	-22.8	0.39	0.40	1.15
方案 3	-2.0	2.8	-23.2	0.39	0.40	1.15
方案 4	-2.0	2.8	-22.8	0.39	0.40	1.15
相变黏土	-2.1	2.7	-24.6	0.39	0.40	1.16
纯黏土	-1.9	2.8	-22.5	0.39	0.40	1.15

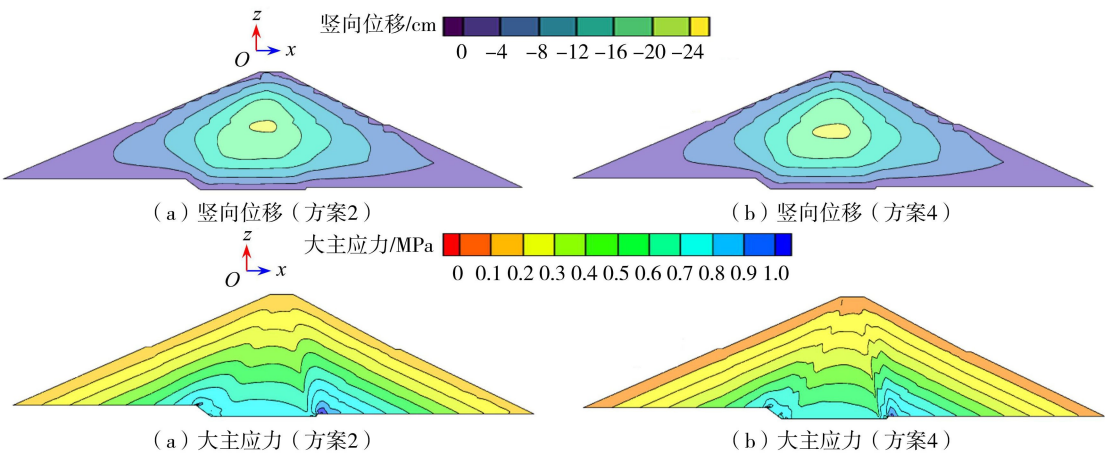


图 11 不同混合填筑方案下最大坝高断面的竖向位移与大主应力分布

Fig. 11 Distribution of vertical displacement and maximum principal stress of maximum dam high section under different mixed filling schemes

由图 12 可知,不同填筑方案下心墙轴线上的竖向位移分布基本相同,混合填筑心墙的沉降曲线随着相变黏土填筑厚度的增加而小幅增加。相比于全断面采用相变黏土,采用混合填筑方案不仅能减少 PPCM 用量,还能减弱相变黏土心墙堆石坝竖向沉降略大的问题。

综上,相变黏土与常规心墙料混合填筑心墙是可行的;仅在必要施工时段(负温下)填筑一定厚度的相变黏土,既可以满足现场连续施工的需求,又能够进一步控制 PPCM 用量,减轻相变黏土心墙竖向沉降略大的问题;相变黏土可作为大坝心墙冬季负温时段填筑施工过程中心墙的替代填筑料。

2.4 相变黏土心墙堆石坝水力劈裂的发生风险

采用总应力法对相变黏土和纯黏土心墙发生水力劈裂的可能性进行判别^[10,25]。由图 13 可知,无论是相变黏土心墙堆石坝还是纯黏土心墙堆石坝,其心墙上游面任意高程处的大主应力和小主应力均大于对应位置处的水压力,所以正常施工运行状态下两种材料的心墙堆石坝均不会发生水力劈裂。

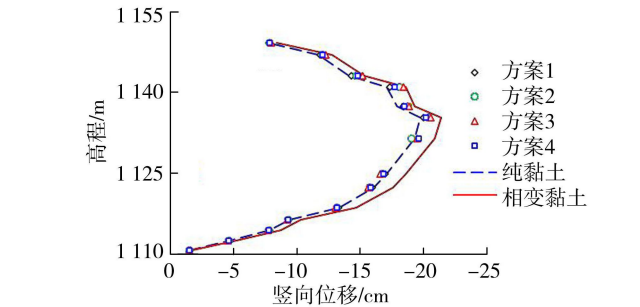


图 12 不同填筑方案心墙轴线竖向位移沿高程的分布
Fig. 12 Distribution of vertical displacements of core wall along elevation in different mixed filling schemes

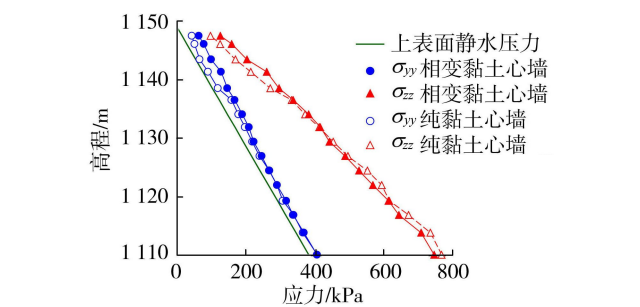


图 13 水位骤升条件下孔隙压力与应力分布
Fig. 13 Pore pressures and stress distributions under the condition of sudden rise of water level

3 结 论

- a. 相变黏土心墙堆石坝在应力变形分布、渗流性态以及坝坡稳定特征等方面与纯黏土心墙堆石坝基本一致,但由于心墙相变黏土的变形模量较小,其筑坝后的沉降量会略大于纯黏土。
- b. 在冬季负温时段采用相变黏土而非负温时段采用常规土料混合填筑心墙的方案,可进一步控制 PPCM 用量,减轻全部采用相变黏土填筑心墙竖向位移略大的问题。
- c. 在正常施工运行条件下的相变黏土心墙堆石坝中,基本不具备发生水力劈裂的物质和力学条件。

参考文献:

[1] 苏安双,王宇,石北啸,等. 冻融循环条件下粗粒料变形特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):61-66. (SU Anshuang,WANG Yu,SHI Beixiao,et al. Experimental study on deformation characteristics of coarse aggregates under freeze-thaw cycling conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):61-66. (in Chinese))

[2] 丰土根,杨贵,花剑岚,等. 高土石坝建设关键技术问题述评[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(4):392-401. (FENG Tugen,YANG Gui,HUA Jianlan,et al. Review of key technical problems in construction of high earth-rockfill dams[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(4):392-401. (in Chinese))

[3] LIU Donghai,WANG Youle,LIANG Jianyu. Potential applications of phase change materials to extend the winter construction time of earth-rock dam in cold regions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2021,33(8):04021194.

[4] 王友乐,刘东海,梁健羽. 用于寒区心墙冬季施工的相变黏土热学性能研究[J]. 水力发电学报,2021,40(7):105-117. (WANG Youle,LIU Donghai,LIANG Jianyu. Investigation on thermal properties of core-wall clay incorporated with phase change material for winter construction in cold regions[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(7):105-117. (in Chinese))

[5] 刘东海,郑涵,杨家琦. 松铺覆盖下心墙相变土防冻控温性能试验研究[J]. 水力发电学报,2022,41(7):38-46. (LIU Donghai,ZHENG Han,YANG Jiaqi. Investigation on anti-freezing performance of core wall phase change material-incorporated clay with an upper loose-covering layer[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2022,41(7):38-46. (in Chinese))

[6] 刘东海,戴怀建,郑涵. 心墙相变砾质土工程特性及寒区冬季施工防冻控温研究[J]. 水利学报,2022,53(8):914-925. (LIU Donghai,DAI Huajian,ZHENG Han. Engineering characteristics and temperature control of phase change material and gravel mixed soil for core wall anti-freezing[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(8):914-925. (in Chinese))

[7] LIU Donghai,LIANG Jianyu,WANG Youle. Numerical simulation on anti-freezing performance of PCM-Clay in core wall during winter construction[J]. Applied Thermal Engineering,2022,215:118951.

[8] LIU Donghai,YANG Jiaqi. Influences of paraffin-based phase change material on soil engineering properties[J]. International Journal of Geomechanics,2023,23(7):04023090.

[9] 杨家琦,刘东海,王泽帆. 相变黏土在三轴压缩下的渗透和应力应变特性研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(12):2584-

2593. (YANG Jiaqi,LIU Donghai,WANG Zefan. Permeability and strain-stress characteristics of phase-change clay under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(12):2584-2593. (in Chinese))

[10] 殷宗泽,朱俊高,袁俊平,等. 心墙堆石坝的水力劈裂分析[J]. 水利学报,2006,37(11):1348-1353. (YIN Zongze,ZHU Jungao,YUAN Junping,et al. Hydraulic fracture analysis of rock-fill dam with core wall[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(11):1348-1353. (in Chinese))

[11] 王俊杰,朱俊高,张辉. 关于土石坝心墙水力劈裂研究的一些思考[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(增刊2):5664-5668. (WANG Junjie,ZHU Jungao,ZHANG Hui. Some ideas of study on hydraulic fracturing of core of earth-rockfill dam[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(Sup2):5664-5668. (in Chinese))

[12] 朱俊高,王俊杰,张辉. 土石坝心墙水力劈裂机制研究[J]. 岩土力学,2007,28(3):487-492. (ZHU Jungao,WANG Junjie,ZHANG Hui. Study on mechanism of hydraulic fracturing in core of earth-rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(3):487-492. (in Chinese))

[13] 张有天. 从岩石水力学观点看几个重大工程事故[J]. 水利学报,2003,34(5):1-10. (ZHANG Youtian. Analysis on several catastrophic failures of hydraulic projects in view of rock hydraulics[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(5):1-10. (in Chinese))

[14] 汪小刚. 高土石坝几个问题探讨[J]. 岩土工程学报,2018,40(2):203-222. (WANG Xiaogang. Discussion on some problems observed in high earth-rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(2):203-222. (in Chinese))

[15] 丁艳辉,袁会娜,张丙印,等. 超高心墙堆石坝应力变形特点分析[J]. 水力发电学报,2013,32(4):153-158. (DING Yanhui,YUAN Huina,ZHANG Bingyin,et al. Stress-deformation characteristics of super-high central core rock-fill dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(4):153-158. (in Chinese))

[16] 刘东海,王静静. 胶结砾质土心墙坝应力变形及裂缝扩展研究[J]. 天津大学学报,2022,55(8):783-791. (LIU Donghai,WANG Jingjing. Study on stress deformation and crack propagation of rock-fill dam with cemented gravel soil core[J]. Journal of Tianjin University,2022,55(8):783-791. (in Chinese))

[17] 陈向浩,邓建辉,李鹏,等. 瀑布沟大坝砾石土心墙施工期拱效应监测分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(增刊2):3763-3770. (CHEN Xianghao,DENG Jianhui,LI Peng,et al. Arching monitoring and analysis of gravelly soil corewall in pubugou dam during construction period[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(Sup2):3763-3770. (in Chinese))

[18] 吴中如,顾冲时,苏怀智,等. 水工结构工程分析计算方法回眸与发展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):395-405. (WU Zhongru,GU Chongshi,SU Huaizhi,et al. Review and prospect of calculation analysis methods in hydro-structure engineering[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(5):395-405. (in Chinese))

[19] 刘东海,张钊,陈辉. 填筑形象对土石坝结构性态影响的精细有限元分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):514-522. (LIU Donghai,ZHANG Zhao,CHEN Hui. Precise finite element analysis on influence of construction appearances to earth-rock dam structural behaviors[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(6):514-522. (in Chinese))

[20] 冷先伦,盛谦,朱泽奇,等. 邓肯-张模型在FLAC^{3D}中的实现及工程应用[J]. 建筑科学,2009,25(1):100-105. (LENG Xianlun,SHENG Qian,ZHU Zeqi,et al. Duncan-Chang model's realization and engineering application in FIAC^{3D}[J]. Building Science,2009,25(1):100-105. (in Chinese))

[21] 马春景,姜谔男,白冰,等. 三轴试验确定邓肯-张模型参数及其在FLAC^{3D}中的应用[J]. 大连海事大学学报,2014,40(4):113-118. (MA Chunjing,JIANG Annan,BAI Bing,et al. Method of determining parameters of Duncan-Chang model based on triaxial test and its application in FLAC^{3D}[J]. Journal of Dalian Maritime University,2014,40(4):113-118. (in Chinese))

[22] 陈育民,刘汉龙. 邓肯-张本构模型在FLAC^{3D}中的开发与实现[J]. 岩土力学,2007,28(10):2123-2126. (CHEN Yumin,LIU Hanlong. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(10):2123-2126. (in Chinese))

[23] 顾水涛,钟胜,李珂,等. 基于本构均一化理论的多层复合材料流固耦合等效分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):82-89. (GU Shuitao,ZHONG Sheng,LI Ke,et al. Equivalent analysis method of fluid-structure coupling for multilayer composites based on constitutive homogenization theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):82-89. (in Chinese))

[24] 吴永康,王翔南,董威信,等. 考虑流固耦合作用的高土石坝动力分析[J]. 岩土工程学报,2015,37(11):2007-2013. (WU Yongkang,WANG Xiangnan,DONG Weixin,et al. Dynamic analyses of a high earth-rockfill dam considering effects of solid-fluid coupling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(11):2007-2013. (in Chinese))

[25] 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 Hailin,PENG Yunfeng,DU Xiaofan,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))