

土石坝心墙水力劈裂的非饱和土固结方法研究

曹雪山¹, 殷宗泽²

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098, 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 针对土石坝心墙土在初次蓄水前为饱和度高于 80% 的非饱和土, 提出了研究心墙水力劈裂问题的非饱和土固结简化计算的有效应力分析方法。该方法不仅可反映孔隙中气体对水压上升的影响, 还可合理分析心墙土的渗透性、初始饱和度和蓄水速度等心墙水力劈裂的影响因素。以糯扎渡堆石坝为例, 研究发现: 填筑竣工时, 尽管心墙中部水压很高, 但心墙仍处于非饱和状态; 初次蓄水时, 上游水压力不能及时渗入心墙内部, 形成了心墙内外的水压力突变, 可导致心墙水力劈裂的发生。同时研究发现: 提高心墙的渗透系数、提高心墙填筑土的初始饱和度、在初次蓄水时, 放慢蓄水速度等均可防止心墙水力劈裂的发生。因此非饱和土固结简化计算的有效应力方法分析水力劈裂问题是合理的, 它可为实际心墙土石坝预防水力劈裂问题提供科学依据, 并可进一步提高土石坝设计水平。

关键词: 心墙土石坝; 水力劈裂; 非饱和土固结; 简化计算; 影响因素

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2009)12 - 1851 - 07

作者简介: 曹雪山(1970 -), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事非饱和土固结、土石坝数值计算研究、地基与基础工程、地基处理、桥梁工程等教学与研究。E-mail: caoxueshan_7712@hhu.edu.cn。

Consolidation method of unsaturated soils for hydraulic fracturing of core walls of rock-fill dams

CAO Xue-shan¹, YIN Zong-ze²

(1. Civil and Traffic College, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A new simplified method of consolidation theory of unsaturated soils is put forward to study the hydraulic fracturing of core walls of rock-fill dams with the degree of saturation of the soils higher than 80%. The method can reflect the interaction between the pore-air pressure and the pore-water pressure, and can also study three influence factors for hydraulic fracturing: the permeability of core soils, the initial degree of saturation of core soils, and the rising speed of reservoir water levels. Conclusions are drawn from the analysis of Ruzadu Rock-fill Dam. First, the core wall is in a state of unsaturated soils after the completion of construction in spite of high pore-water pressure in the core wall. Second, the catastrophe of pore water pressure is formed because the upper water pressure can not infiltrate the core wall in time for the initial impounding, and the hydraulic fracturing of the core wall may occur. Third, hydraulic fracturing in the core wall can be prevented by the improvement of the permeability of core soils, the increase of the initial degree of saturation of core soils, and the slowing down of the rising speed of reservoir water levels. Therefore, the new simplified method of consolidation theory of unsaturated soils is reasonable and can provide scientific suggestions for the design and construction of rock-fill dams and further raise their design level.

Key words: rock-fill dam with core walls; hydraulic fracturing; consolidation of unsaturated soils; simplified method; influence factor

0 引 言

水力劈裂是水利工程界和学术界共同关注的问题。水力劈裂的发生会导致大坝防渗体的破坏从而发生灾难性的后果。因此研究心墙水力劈裂的发生机理和影响因素, 对合理选择工程预防措施, 提高心墙土石坝设计水平具有重要的工程意义。

所谓水力劈裂, 是指水压力超过土中应力而将土

体劈开的现象。土中应力有大主应力、中主应力和小主应力。殷宗泽等^[1]通过定性分析认为: 在实际心墙土石坝中, 小主应力作用方向接近水平, 垂直于坝体轴线, 与蓄水产生的水压力大体平行; 产生水力劈裂

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金项目(50639050)

收稿日期: 2008 - 09 - 01

的裂缝一般在心墙的上游面上,与小主应力作用面大体平行;小主应力对心墙上游面的裂缝发展作用很小,所以不会引起水沿裂缝集中流动而造成心墙防渗作用的丧失,因此应该排除小主应力。中主应力作用方向接近水平,平行于坝体轴线,如果大主应力小于水压力,中主应力自然也小于水压力。因此判别水力劈裂是否发生,决定于心墙前水压力是否大于心墙内靠近上游面位置的土体中主应力。

对于心墙水力劈裂发生条件的研究, Jaworski^[2]根据室内水力劈裂试验发现,发生水力劈裂的水压力与土的含水率、固结压力和试验时间相关; Lo K Y^[3]由室内试验认为水力劈裂与土的饱和度、固结程度相关;朱俊高^[4]等也认为迅速蓄水初期是心墙水力劈裂发生的条件。实际上,蓄水初期心墙土还处于非饱和状态,快速蓄水加剧了心墙内孔隙压力变化的滞后效应,据此殷宗泽等^[1]提出了三个水力劈裂发生条件:①心墙土的渗透性低;②墙前水位上升快;③心墙土的饱和度低。总结工程中所关心的,影响心墙水力劈裂发生的三个主要因素:心墙土的渗透性、初始饱和度和蓄水速度。愈低的心墙土渗透性,愈快的蓄水速度,以及愈低的心墙饱和度均使孔隙中气体对孔隙水压的上升阻碍作用愈大,进而导致心墙内与边界的水压力突变幅度也愈大,愈容易导致水力劈裂的发生。为此有必要对心墙土的渗透性、初始饱和度、以及竣工后蓄水速度等对心墙水力劈裂发生的影响进行定量分析。

1 分析方法

1.1 心墙水力劈裂的分析方法

分析土石坝心墙水力劈裂问题的数值法分总应力法和有效应力法两类。运用总应力法进行计算时,常采用三轴排水剪试验参数。由于蓄水初期实体坝内没有孔隙水压力消散,因此用总应力法计算所得的总应力就小,容易得出小于水压力的结论,从而过高地估计了水力劈裂的可能性。因此殷宗泽^[5]建议用非饱和土不排水剪试验参数进行计算,这是一种比较符合水力劈裂机理的方法。另外,总应力法还存在微观上心墙的具体单元不合理^[6],将边界水压力直接施加于心墙的迎水面上和坝底建基面心墙上,夸大了库水位对坝基的上扬压力作用,也可能导致判断失实^[7]。而饱和土固结的有效应力法,采用Boit固结理论进行固结计算,忽略了孔隙中气体对水压上升的影响,因此也不能合理反映心墙水力劈裂的情况^[5]。

在实际土石坝建造中,心墙黏土上坝碾压时含水

率控制在最优含水率上下,碾压后的心墙土饱和度均达到80%以上,为较高饱和度的非饱和土,司洪洋^[8]根据现场实测资料分析,认为心墙黏土在施工期间一直处于不饱和状态,即使土石坝竣工后2.5 a后,蓄水水位超过测点位置近100 m时,相应的第一个高水位出现以前,心墙土的饱和度仍似乎未达到100%。殷宗泽^[1]通过定性分析,认为蓄水初期,心墙内部各点的水压力,即使很靠近上游心墙面,也并不等于墙上游面的水压力,而且孔隙水压力与墙外水压力之间存在相当大的差异。填筑期,土是非饱和的,由于毛细水作用,在土体表面一定范围内水压力甚至是负值。蓄水虽然使心墙内孔隙水压力上升,但要消除孔隙中的气体影响,使水压力上升到接近上游面水压力是要相当长时间的。陈立宏等^[9]通过在小浪底土石坝施工过程中监测孔隙水压力并进行数值计算,发现实测的超孔隙水压力的消散速率要比数值计算预测的慢得多。而非饱和土固结的一、二维问题研究表明^[10-15],非饱和土的固结速率远慢于饱和土。因此心墙土的固结计算应该用非饱和土固结理论。

总之,总应力法在研究心墙水力劈裂问题时,不需考虑孔隙压力的大小与变化,也就不能反映水力劈裂受心墙土的渗透性、饱和度的影响;饱和土固结计算的有效应力法,忽略了孔隙中气体对孔隙水压上升的影响,也不能合理地反映在初次快速蓄水时低渗透心墙的实际情况;而要反映孔隙中气体对水压上升的影响,合理分析心墙土的渗透性、初始饱和度和蓄水速度等对心墙水力劈裂的影响,就应当用非饱和土固结计算的有效应力法。

本文针对心墙土为饱和度大于80%的较高饱和度的非饱和土,利用新建立的非饱和土固结混合流体简化方法^[15],通过心墙的非饱和固结计算,求得心墙有效应力和孔隙水压力,叠加后获得总应力,然后将总应力与心墙外水压力对比,确定各种影响因素对心墙水力劈裂的影响。

1.2 混合流体简化固结方法^[15]

非饱和土固结混合流体简化方法,最早是由Chang和Duncan^[16]首先提出的,殷宗泽等^[12-15]在其基础上作了进一步的改进,近年来通过新建立水连续方程,已可合理地确定水压、气压和吸力,这是一个重要进展。非饱和土固结的二维问题研究^[15]表明,孔隙气压对孔隙水压的上升具有明显的抑制作用。

(1) 混合流体压力

对于较高饱和度的非饱和土,如 $70\% < S_r < 95\%$,水占据了大孔隙,气的流动主要是跟随水的流动,因

表 1 心墙土石坝的非线性 $E-B$ 模型参数
Table 1 Parameters of $E-B$ model for rock-fill dams

土石料	γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	φ $/(^{\circ})$	R_f	K	n	K_b	m	K_r	$\Delta\varphi$ $/(^{\circ})$
心墙	20	39	0.8	388	0.31	206	0.26	582	9
反滤层	19	52	0.8	1100	0.24	340	0.17	1650	8
细粒	20	50	0.7	1100	0.28	477	0.12	1650	7
石料	20	54	0.7	1491	0.24	683	0.10	2237	10
堆石	20	54	0.7	1491	0.24	683	0.10	2237	10
料									
围堰	20	54	0.7	1491	0.24	683	0.10	2237	10
土石料	$K_{ws}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	e_0	$S_{r0}/\%$	$S_r/\%$	λ	u_{ab}/kPa			
心墙	2.0×10^{-6}	0.7	80	15	1.8	80			

此可将孔隙气、水看作具有可压缩性的混合流体。根据Bishop的有效应力原理:

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} + \{M\}u_m, \quad (1)$$

$$u_m = (1 - \chi)u_a + \chi u_w, \quad (2)$$

式中, u_m 为混合流体压力。式 (1) 表示总应力由骨架应力和混合流体压力分担。式 (2) 中 χ 为有效应力系数, 可用Aitchison^[17]经验公式近似计算:

$$\chi = \frac{S_r}{0.4S_r + 0.6}. \quad (3)$$

(2) 混合流体的固结方程

利用有效应力原理式 (1)、物理方程、几何方程, 考虑混合流体的可压缩性, 建立混合流体的连续性方程。将它与平衡微分方程联立, 可得到非饱和土固结的混合流体简化方程^[15]:

$$\left. \begin{aligned} -[\partial]^T [D][\partial]\{w\} + [\partial]^T \{M\}u_m &= \{f\}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \{M\}^T [\partial]\{w\} - \frac{k_m}{\gamma_m} \nabla^2 u_m + \frac{1}{B_m} \cdot \frac{\partial u_m}{\partial t} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, γ_m 为流体的重度, k_m 为混合流体的渗透系数为常量, B_m 为混合流体的体积压缩模量。

式 (4) 与饱和土的比奥固结理论公式相比, 仅相差一项, 因此可修改现有的饱和土的固结程序, 计算混合流体压力、骨架应力和变形。

(3) 水连续性方程

根据非饱和土中单位土体中水体积的减小等于流出的水量, 考虑饱和度的变化和水与混合流体的关系, 建立水连续方程,

$$k_w \nabla^2 u_w = k_m \nabla^2 u_m. \quad (5)$$

利用已解得的 u_m 和 u_w , 进而求吸力,

$$u_s = \frac{u_m - u_w}{1 - \chi}. \quad (6)$$

2 土石坝心墙水力劈裂机理分析

2.1 算例

糯扎渡土石坝高 261.5 m, 地基为不透水的岩石地基, 坝体中部为心墙, 其饱和度大于 80%, 为较高饱和度的非饱和土, 可以运用新建立的非饱和土固结的混合流体简化方法。图 1 为糯扎渡堆石坝横断面网格图。计算时, 假定心墙两侧排水排气边界, 未浸水前边界吸力为 100 kPa。修改河海大学岩土工程研究所研制的 BCF 平面有限元比奥固结程序进行求解式 (4)~(6), 该计算程序中已经考虑了中主应力 σ_2 的影响, 因此可直接求得中主应力 σ_2 。心墙土石坝的非线性 $E-B$ 模型参数见表 1。

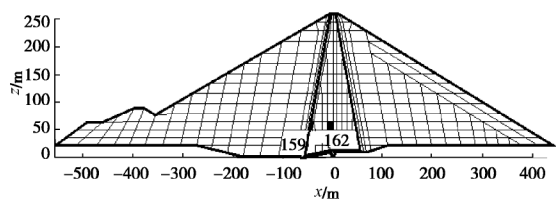


图 1 坝体横断面网格图

Fig. 1 Meshes of a dam

2.2 填筑至竣工时心墙土固结分析

堆石坝填筑结束时, 坝高 261.5 m, 累计填筑时间为 1500 d, 此时心墙的饱和度、水压、气压力、吸力分布如图 2 所示。

图 2 (a) 为竣工时心墙的饱和度 S_r 分布图。图中显示, 在坝体中部饱和度很高, 几乎饱和, 两侧饱和度则较高, 接近边界饱和度, 近边部变化很快; 沿高度方向, 底部饱和度很高, 向上逐渐降低接近边界饱和度, 变化不均匀。图 2 (b) 为竣工时心墙的水压力 u_w 分布图。水压力在底部很高, 向上减小接近边界孔压; 水平向中间高, 两侧接近边界孔压。这种水压力分布与饱和度相应。图 2 (c) 为竣工时心墙的气压力 u_a 分布图。心墙中部饱和度高, 气压力与水压归于同一值, 这是与总应力增加时孔隙气和孔隙水压力都连续增加到相同值的非饱和土试验成果相一致^[18]; 而心

墙顶部及靠近心墙边界处, 仍存在气压力。因此气压力的分布是四周低, 中间高。图 2 (d) 为竣工时心墙的吸力 u_s 分布图。图中显示, 吸力分布于坝体边部及顶部。心墙中部水压力、气压力均大于零, 接近同一值, 吸力为零; 心墙边部、上部水压为负, 吸力正, 这与边界处的吸力条件相应。

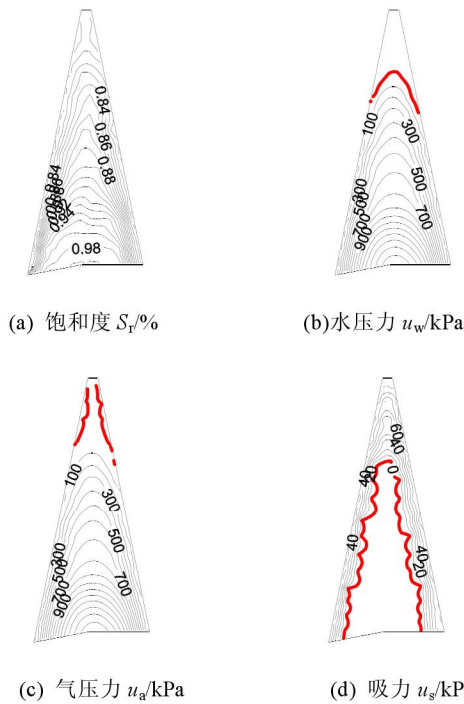


图 2 竣工后心墙的饱和度、孔隙水压、气压力和吸力分布图
Fig. 2 Distribution of S_r , u_w , u_a , u_s in core wall after completion of construction

总之, 处于非饱和状态下的心墙, 在竣工时水压 u_w 、气压 u_a 分布相对应, 心墙边部和顶部饱和度接近边界值, 存在气压力, 水压较小; 心墙内部饱和度高, 气压接近水压, 水压很高。

2.3 蓄水初期心墙固结计算分析

堆石坝填筑结束后, 即蓄水, 蓄水高度 250.0 m, 持续 100 d, 蓄水初期的心墙饱和度、水压、气压力、吸力分布如图 3 所示。

图 3 (a) 为蓄水初期心墙的饱和度 S_r 分布图。图中显示, 水荷载作用于心墙上游面, 使心墙饱和度增加, 但心墙仍未达到饱和, 这与现场测试结果一致^[9]。图 3 (b) 为蓄水初期心墙的水压力 u_w 分布图。图中显示, 水荷载作用于心墙上游面, 心墙上游面及心墙内部单元的水压力均有增加, 这与现场测试心墙内部孔隙水压高的结果^[10]相一致。但在心墙中部与上游面单元之间存在低孔压分布沟, 形成了心墙上游边界单

元附近的水压突变, 这可能是导致水力劈裂发生的原因^[1]。图 3 (c) 为蓄水初期心墙的气压力 u_a 分布图。图中显示, 水荷载作用于心墙上游面, 使心墙上游面单元的饱和度增加, 气压力随水压力一起上升, 至同一值。图 3 (d) 为蓄水初期心墙的吸力 u_s 分布图。图中显示, 蓄水初期的水荷载作用使孔隙水压、孔隙气压上升至同一值, 心墙上游面附近吸力减小, 接近零。

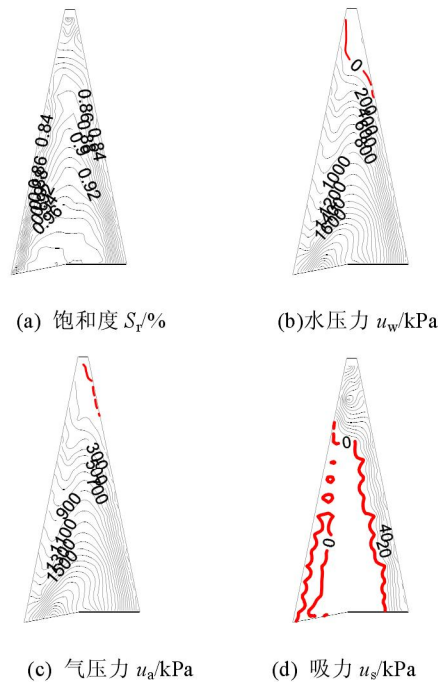


图 3 蓄水初期心墙的饱和度、孔隙水压、吸力和气压分布图
Fig. 3 Distribution of S_r , u_w , u_a , u_s in core wall during initial reservoir impounding

总之, 非饱和状态下的心墙, 蓄水初期水荷载作用于心墙上游面, 水压力 u_w 、气压力 u_a 进一步增大, 形成了心墙内外孔压的突变, 从而可能导致水力劈裂的发生。

3 土石坝心墙水力劈裂因素分析

3.1 土石坝心墙土的渗透性影响

土石坝心墙的渗透性决定了心墙内超孔隙水压力消散速率。评价心墙的渗透性对水力劈裂的影响时, 参考已建的土石坝心墙的渗透系数范围为 $(10^{-5} \sim 10^{-7}) \text{ cm/s}$ ^[19], 计算方案是假定心墙的渗透系数 10^{-5} cm/s , 10^{-6} cm/s , 10^{-7} cm/s , 其他参数同表 1, 计算糯扎渡心墙堆石坝的填筑与蓄水过程。

图 4 为心墙土石坝上游水压与心墙中主应力关系图。心墙渗透系数假定为 10^{-7} cm/s 时, 为低渗透土,

如图 4(a) 所示, 会发生心墙水力劈裂, 水力劈裂位置在坝顶附近, 这与 Sherard 对一些土石坝漏水和破坏实例分析的结论“水力劈裂发生在坝顶附近, 并且均在相对较小的水头作用下产生的结果”相近^[20-21]。图 4(b) 为糯扎渡心墙堆石坝的设计时心墙渗透系数为 10^{-6} cm/s 的计算结果, 不会发生水力劈裂, 这与总应力法计算的结果相一致^[1]。因此该方案设计合理。但为了预防水力劈裂问题, 还宜在坝顶附近适当一些加固措施。图 4(c) 为心墙渗透系数假定为 10^{-5} cm/s 时, 不会发生心墙水力劈裂。图 4(d) 为不同心墙渗透系数时, 最危险区域的比较图。图中显示, 随着心墙的渗透系数增大, 心墙的总应力也增大, 水力劈裂产生的可能性减小。

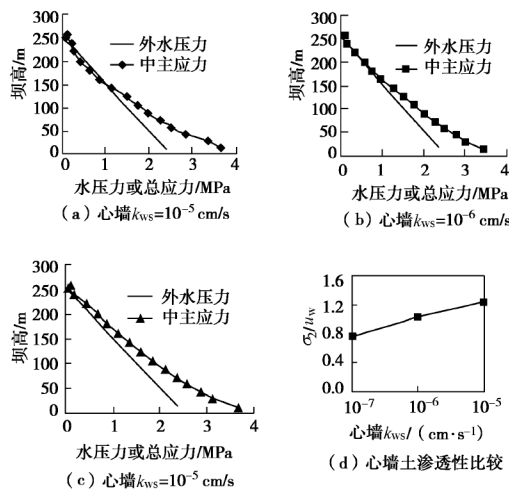


图 4 心墙渗透性不同时, 心墙上游水压与中主应力关系图

Fig. 4 Relationship between upper water pressure and intermediate stress in core wall under different permeabilities of core soils

心墙边界在蓄水前处于负孔压状态, 如果心墙的渗透性较高时, 填筑期心墙内孔隙消散快, 剩余的累计孔隙水压力值相对较小, 因此竣工时心墙内近边界处的孔压梯度相对小; 初次快速蓄水后外水压向心墙内传递速度也快, 于是心墙内水压突变幅度较小, 不容易产生心墙水力劈裂。所以增大心墙土的渗透性, 对预防水力劈裂有利。

3.2 土石坝心墙初始饱和度的影响

在现有的研究方法中, 均将土石坝心墙近似看作饱和度为 100% 的饱和土, 因此无法考虑填筑土的饱和度对心墙水力劈裂的影响。实际上, 心墙填筑过程中主要控制的指标是填筑土的最优含水率和压实度。心墙土碾压后达到设计要求时, 心墙的饱和度约在 80%~93%。因此考察心墙的初始饱和度对水力劈裂

的影响时, 计算方案为初始饱和度 80%、87%、93%。取心墙的渗透系数 10^{-7} cm/s, 其他模型参数参见表 1 所示。

图 5 为心墙土石坝上游水压与心墙中主应力关系图。图 5(a) 表示填筑土初始饱和度 80% 时, 心墙会发生水力劈裂。图 5(b) 表示填筑土初始饱和度为 87% 时, 心墙处于水力劈裂发生临界状态, 心墙顶部附近为水力劈裂发生的危险区, 需要采取加强措施。图 5(c) 表示填筑土初始饱和度为 93% 时, 心墙不会发生水力劈裂。图 5(d) 为不同心墙初始饱和度条件下, 最危险区域的比较图。图中显示, 增大心墙初始饱和度, 对预防水力劈裂有利。

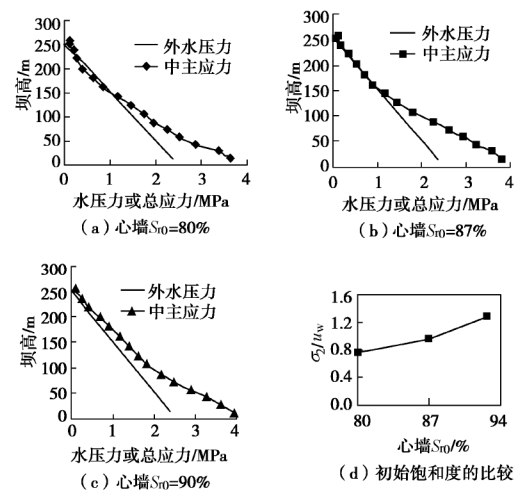


图 5 填土初始饱和度不同时, 心墙上游水压与中主应力关系图

Fig. 5 Relationship between upper water pressure and intermediate stress in core wall under different initial degrees of saturation of core wall

心墙的初始饱和度越高, 孔隙中气相体积越小, 于是孔隙中气相对水压上升的抑制作用也越小。加载后水压上升越快, 边界附近的孔隙水压也越高, 饱和度也越高; 初次蓄水后心墙外的水压力也越容易传递, 因此心墙孔压突变较小, 不容易引起水力劈裂。而当心墙饱和时, 心墙土的水压变化最快, 心墙孔压突变最小, 因此最不易发生水力劈裂。由此提高心墙的初始饱和度, 有利于减小心墙的孔压突变幅度, 从而达到预防心墙水力劈裂的目的。

3.3 水库蓄水速度的影响

心墙堆石坝在施工结束后蓄水。考察蓄水速度对心墙水力劈裂的影响时, 三个计算方案的蓄水速度分别为 2.5, 0.5, 0.25 m/d, 取心墙的渗透系数 10^{-7} cm/s, 其余计算参数见表 1。

图 6 (a) 表示蓄水速度 2.5 m/d 时土石坝会发生心墙水力劈裂。图 6 (b) 表示蓄水速度 0.5 m/d 时, 土石坝的心墙处于水力劈裂发生临界状态, 心墙顶部附近为水力劈裂发生的危险区, 需要采取加强措施。图 6 (c) 蓄水速度 0.25 m/d 时, 心墙基本不会发生水力劈裂。图 6 (d) 为不同蓄水期时, 最危险区域的比较图, 图中显示, 放慢蓄水速度时, 由于心墙上游边界附近的水压均有足够时间的上升, 不会形成心墙内外的水压力突变现象, 从而总应力增加, 可有效地防止水力劈裂的发生。因此放慢蓄水速度对于减小水力劈裂事故的发生是非常有利的。

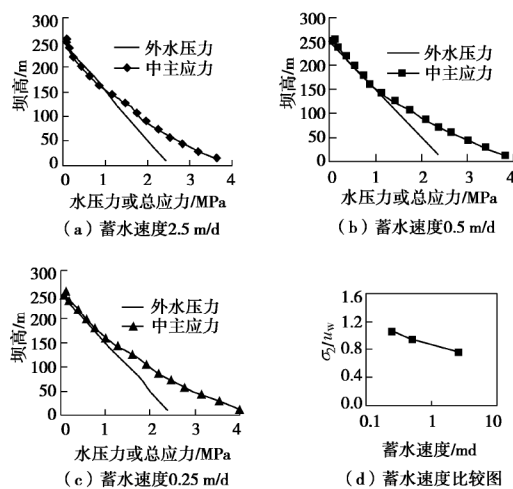


图 6 不同蓄水速度时, 心墙土石坝上游水压与中主应力关系图
Fig. 6 Relationship between upper water pressure and intermediate stress in core wall under different velocities of reservoir impounding

4 结 论

以糯扎渡堆石坝为算例, 针对土石坝心墙土的饱和度在 80% 以上。为较高饱和度的非饱和土, 运用新建立的非饱和土固结简化计算方法对心墙水力劈裂问题展开研究, 可得出如下结论:

(1) 运用非饱和土固结计算的有效应力法研究心墙水力劈裂问题, 不仅可反映孔隙中气体对水压上升的影响, 还可合理分析心墙土的渗透性、初始饱和度和蓄水速度等因素对心墙水力劈裂的影响。

(2) 填筑竣工时心墙内水压力高, 但心墙仍处于非饱和状态; 初次蓄水时上游水压力来不及渗入心墙内部, 形成了心墙内外的水压力突变, 从而可导致心墙水力劈裂的发生。

(3) 影响因素分析表明: 提高心墙的渗透系数、

提高心墙填筑土的初始饱和度、在初次蓄水时, 放慢蓄水速度等均可防止心墙水力劈裂的发生。

根据以上分析结论, 表明非饱和土固结简化计算方法合理反映土石坝心墙水力劈裂发生机理, 可为实际心墙土石坝预防水力劈裂问题提供科学依据, 进一步提高土石坝设计水平。

参考文献:

- [1] 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 Zong-ze, ZHU Jun-gao, YUAN Jun-ping, et al. Hydraulic fracture analysis of rock-fill dam with core wall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1348 - 1353. (in Chinese))
- [2] JAWORSKI G W. An experimental study of hydraulic fracturing[D]. California: University of California, 1979.
- [3] LO K Y, KANIARU K. Hydraulic fracture in earth and rock-fill dams[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(4): 496 - 506.
- [4] 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 Jun-gao, WANG Jun-jie, 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))
- [5] 殷宗泽, 等. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (YIN Zong-ze, Principle of soil engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [6] 卢廷浩, 高贵全, 陈 剑. 蓄水后土石坝应力变形有效应力算法[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 247 - 250. (LU Ting-hao, GAO Gui-quan, CHEN Jian. Effective stress method of stress and deformation for soil-rock fill dam after water impounding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 247 - 250. (in Chinese))
- [7] 颜国卿. 心墙坝有效应力与总应力算法的对比研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (YAN Guo-qing. Comparative study on the total stress method and effective stress method of the core wall dams[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [8] 司洪洋. 土石坝施工期的孔隙压力观测——关于《土石坝安全监测技术规范 SL60—94》的讨论意见[J]. 大坝观测与土工测试, 2000, 24(4): 1 - 4. (SI Hong-yang. Pore-pressure

- observation during construction of earth-rockfill dam[J]. *Dam Observation and Geotechnical Tests*, 2000, **24**(4): 1 - 4. (in Chinese))
- [9] 陈立宏, 陈祖煜, 等. 小浪底大坝心墙中高孔隙水压力的研究[J]. *水利学报*, 2005, **36**(2): 219 - 224. (CHEN Li-hong, CHEN Zu-yu, et al. Study on high pore pressure in clay core wall of earth dam in Xiaolangdi Project[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, **36**(2): 219 - 224. (in Chinese))
- [10] 魏海云, 詹良通, 陈云敏. 高饱和度非饱和土的压缩和固结特性及其运用[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(2): 264 - 269. (WEI Hai-yun, ZHAN Lang-tong, CHEN Yun-min. The compressibility and consolidation of unsaturated soils with high degree of saturation and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(2): 264 - 269. (in Chinese))
- [11] 张庆华, 丁学福, 孙长龙. 非饱和土固结一维半解析解[J]. *水道港口*, 1996(3): 33 - 41. (ZHANG Qing-hua, DING Xue-fu, SUN Chang-long. Semi-analysis solution for the one dimensional consolidation for unsaturated soils[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 1996(3): 33 - 41. (in Chinese))
- [12] YIN Zong-ze, SUN C L, MIAO Ling-chang. Consolidation of unsaturated expansive soils[C]// 2nd International Conference on Unsaturated Soils. Beijing: International Academic Publishers, 1998: 533 - 537.
- [13] CAO Xue-shan, YIN Zong-ze, LING Hua. Study of two-dimensional consolidation and simplified calculation of unsaturated soil[C]// Proceeding of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils. Beijing: Science Press, 2007: 341 - 346.
- [14] 殷宗泽, 凌 华. 非饱和土一维固结简化计算[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(5): 633 - 637. (YIN Zong-ze, LING Hua. Simplified computation of 1D consolidation for partially saturated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(5): 633 - 637. (in Chinese))
- [15] 曹雪山, 殷宗泽. 非饱和土二维固结简化计算的研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(9): 2575 - 2580. (CAO Xue-shan, YIN Zong-ze. Simplified computation of two-dimensional consolidation of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(9): 2575 - 2580 (in Chinese))
- [16] CHANG C S, DUNCAN J M. Consolidation analysis for partly saturated clay by using an elastic-plastic effective stress-stating model[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1983, **17**(7): 39 - 55.
- [17] AITCHISON G D. Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils[C]// Pore Pressure and Suction in Soils Conf, London, Butterworths, 1961: 47 - 52.
- [18] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1993.
- [19] 刘颂尧. 碾压高堆石坝[M]. 北京:中国水利电力出版社, 1987: 45. (LIU Song-yao. High Rolled Rock-fill Dam[M]. Beijing: China Water Power Press, 1987: 45. (in Chinese))
- [20] SHERARD J L. Hydraulic fracturing in embankment dams[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1986, **112**(10): 905 - 927.
- [21] SHERARD J L, DECKER REY S, RYKER NORMAN L. Hydraulic fracturing in low dams of dispersive clay[C]// Geotechnical Special Publication, Conference on Embankment Dams, Berkely, CA, USA, 1992(32): 94 - 131.