

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.04.009

重力坝杂填土地基坝基稳定复核分析

崔竞元, 杨杰, 程琳, 任杰

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要:作为一种来源广泛经济的材料,建筑垃圾杂填土尝试被用于地基置换处理,以解决软基存在的地基承载力不足问题,但建筑垃圾杂填土同样具有变形大、空间分布不均匀、强度易受压实度影响等特点。通过复核建筑垃圾杂填土置换前后坝基的渗流稳定性、整体抗滑稳定性和坝基沉降等内容,研究建筑垃圾杂填土作为小型重力坝地基置换材料的可行性。同时,为考虑由计算参数选取引起的误差,对不同参数下的重力坝复核结果进行敏感性分析。通过分析数值模拟结果得出:在渗流控制方面,需在建筑垃圾杂填土地基底部和坝趾处设置反滤措施;在大坝稳定复核方面,通过控制材料大颗粒占比、碾压质量可以提高地基承载力,满足坝基稳定的要求;对于沉降量,建筑垃圾杂填土有一定的减轻作用,但对于深厚软基的处理需结合其他措施。

关键词:杂填土地基;重力坝;坝基稳定;渗流坡降;等效塑性应变

中图分类号:TV223;TV642.3

文献标志码:A

文章编号:1006-4710(2019)04-0459-08

Stability analysis of gravity dam with miscellaneous foundation

CUI Jingyuan, YANG Jie, CHENG Lin, REN Jie

(School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: As a material with a wide range of economic resources, construction waste mixed with land is tried to be used for foundation replacement treatment to solve the problem of the insufficient foundation bearing capacity of the soft foundation, but the construction waste mixed fill also has large deformation and uneven spatial distribution. The strength is susceptible to the influence of compaction. To study the feasibility of construction waste mixed fill as a small gravity dam foundation treatment replacement material, the seepage stability, overall stability and foundation settlement of the foundation before and after replacement are reviewed. Considering the error of the selected parameters, the parameters are reviewed, with an impact on sensitivity analysis. Through the analysis of the results of numerical simulation, it is concluded that in the seepage analysis, the backfilling of the foundation of the dam toe should be set to reduce the size of the bottom of the dam toe slope. In the stable review, the control of the large particle proportion and the rolling quality of the material is controlled, which can meet the requirements for the foundation bearing capacity and dam foundation stability; it has a certain reduction effect on the settlement amount, but needs to be combined with other measures for deep soft foundation.

Key words: miscellaneous foundation; gravity dam; dam foundation stability; penetration slope; equivalent plastic strain

受国家政策支持与鼓励,小水电工程开发在国内得到了长足的发展,全国各地出现了众多 10 MW 以下、水头低的小水电工程。小水电工程多采用混凝土重力坝为挡水建筑物^[1],挡水建筑物通常坝高较小,坝

基应力水平较低,但这些工程往往存在软基覆盖层,致使地基承载力低,需要对坝基采用换填垫层法^[2]进行置换处理。因此,探索经济合理、施工简单的置换材料,对促进小水电工程高效开发、利用具有十分重要的意义。

收稿日期:2019-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51809212);陕西省自然科学基金基础研究计划重点资助项目(2018JZ5010);陕西省水利科技计划资助项目(2018SLKJ-5)

作者简介:崔竞元,男,硕士生,研究方向为水利工程安全监测。E-mail:cuijy1026746058@126.com

通讯作者:杨杰,男,教授,博导,博士,研究方向为水工结构、水库大坝安全及除险加固。E-mail:yjie9955@126.com

杂填土是人们长期生活和生产活动中形成的地表填土层,主要由大量的生活垃圾、建筑垃圾和工业废料组成^[3],其中建筑垃圾杂填土主要为砖块、混凝土块、钢筋的堆积体,其大颗粒体具有较高的强度可以作为置换材料。常用的建筑垃圾杂填土处理方式有两种:一是作为强度较高的再生混凝土原料,但建筑垃圾预处理工艺复杂、施工不便,对小型水电工程而言成本高、富裕强度大^[4];二是直接对建筑垃圾杂填土进行碾压,对于地基应力小的小型重力坝工程,碾压后的建筑垃圾杂填土地基允许承载力能够满足要求,施工方便,是一种有潜力的地基处理措施^[5]。

建筑垃圾杂填土因变形模量较大,可视为软基^[3]。软基重力坝的地基稳定复核目前尚无相应规范,考虑到其工程特性与水闸类似,参考软基上的水闸规范确定需复核内容,包括:抗渗稳定性、整体稳定性和地基沉降^[2]。考虑到建筑垃圾杂填土的复杂性,渗流稳定性采用有限元法;整体稳定性主要复核基础承载力和抗滑稳定,其中地基允许承载力采用汉森公式^[6];基于有限元的地基沉降分析能够考虑各类复杂条件,全面、准确地分析建筑垃圾杂填土重力坝受力、变形特性。重力坝抗滑稳定分析分为沿坝基面的抗滑稳定及深层抗滑稳定。其中沿坝基面的抗滑稳定计算采用安全系数法。深层抗滑稳定主要针对坝基内存在的不利缓倾角软弱结构面,采用刚体极限平衡法和有限元法。建筑垃圾杂填土土体条件复杂,与土质边坡类似,塑限较低,在坝坡稳定中常采用塑性贯通区判据衡量土体结构的稳定^[7],本文将其应用到软土地基的深层抗滑稳定分析中。

本文结合工程实例,对置换前后地基的抗渗稳定性、整体稳定性和地基沉降进行复核。同时,考虑建筑垃圾杂填土材料参数选取的误差,对结果进行敏感性分析,以期工程中杂填土的利用提供参考。

1 地基稳定分析原理

1) 采用基于达西定律的二维渗流模型(x - z 面),稳定渗流微分方程^[8]为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial H}{\partial z}) = 0 \tag{1}$$

式中: k_x 、 k_z 为 x 水平和 z 竖直向的渗透系数; H 为水头函数; x 、 z 为渗流场内坐标。

2) 地基承载力根据规范^[2],采用汉森公式验算土质允许承载力:

$$[R'] = \frac{1}{K}(0.5\gamma_B BN_\gamma S_\gamma i_\gamma + qN_q S_q d_q i_q + CN_c S_c d_c i_c) \tag{2}$$

式中: $[R']$ 为土质地基允许承载力,kPa; K 为地基承载力安全系数; γ_B 为重度; B 为基底面的宽度; q 为基底面以上有效边荷载; C 为基底土的黏结力,kPa; N_γ 、 N_q 、 N_c 为承载力系数; S_γ 、 S_q 、 S_c 为形状系数; d_q 、 d_c 为深度系数; i_γ 、 i_q 、 i_c 为倾斜系数。

3) 根据刚体极限平衡法,可以采用抗剪强度和抗剪断公式计算坝基面的抗滑稳定安全系数。规范提出抗剪断公式适用于黏结力高的土基,根据冉红玉等^[9]的研究,对于仅碾压处理的建筑垃圾杂填土,其黏结力低,更适用于抗剪强度公式:

$$K_c = \frac{f \sum W}{\sum P} \tag{3}$$

式中: K_c 为抗滑稳定安全系数; f 为坝体混凝土与坝基接触面的抗剪摩擦系数; $\sum W$ 为作用于坝体上的全部荷载(包括扬压力,下同)对滑动平面的法向分力,即铅直正应力在坝基面的积分,kN; $\sum P$ 为作用于坝体上的全部荷载对滑动平面的切向分力,即水平切向力在坝基面的积分,kN。

4) 理想弹塑性模型具有参数数量少,参数获取简单等优势,对于应力水平较低的小水电工程,其计算结果与邓肯张 E-B 等非线性本构模型相差较小,因此,沉降计算与深层抗滑稳定中土体的本构模型采用理想弹塑性模型。在 MSC. Marc 中采用线性 Mohr-Coulomb 屈服准则^[10],假设静水压力是线性函数,则屈服函数计算公式为:

$$F = \sqrt{3}\alpha I_1 + \sqrt{3J_2} - \sigma_y = 0 \tag{4}$$

式中: $\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{9+3\sin^2\varphi}}$; $\sigma_y = \frac{9C\cos\varphi}{\sqrt{9+3\sin^2\varphi}}$; I_1 为第一应力不变量; J_2 为第二应力不变量; C 和 φ 是摩尔应力圆的公切线对应的黏结力和内摩擦角。

线性 Mohr-Coulomb 表面与 π 平面相交线为六边形。坝基沉降为重力地基与全荷载两者竖向位移的差值。深层抗滑稳定主要复核建筑垃圾杂填土范围中的塑性贯通区。

2 算 例

2.1 工程概况

某混凝土重力坝由溢流坝段和非溢流坝段组成,坝高 8.00 m,坝长 100.00 m,溢流坝段坝顶宽 5.20 m,底宽 16.00 m,坝体两端的顶部、底部均为 9.20 m 宽,平面布置图如图 1 所示(单位:m)。上游坝面为直坡,下游坝面两段坡比分别为 1:1.6 和 1:1,正常蓄水位 402.94 m,库容约 30.00 万 m³。地基为较硬的淤泥质土,自表面向下挖 4.00m 后置

换建筑垃圾。建筑垃圾主要为钢筋混凝土与混凝土砖石块体。

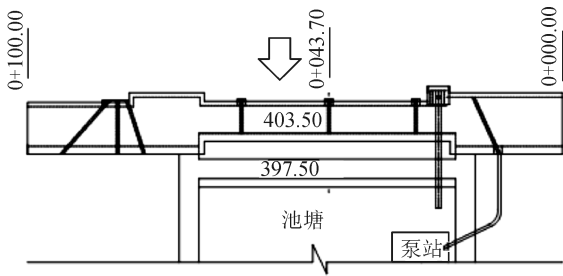


图1 混凝土重力坝平面布置图

Fig. 1 Concrete gravity dam layout plan

2.2 计算条件

根据规范^[2]取最不利工况进行计算(上游水位 403.50 m,下游水位 396.98 m)。

荷载组合为:水荷载+自重+扬压力+其他永久荷载。以 0+043.70 m 处溢流坝段为例建立二维有限元模型,如图 2 所示。计算模型范围:分别以坝趾、坝踵向上、下游延伸 2 倍坝高,底部基础向下延伸 2 倍坝高,不考虑坝体内的埋管。坝体共 544 个单元,上层坝基 690 个单元,下层坝基共 2 354 个单元,共 3 733 个节点。

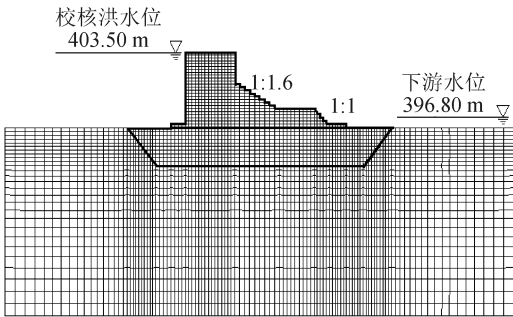


图2 重力坝溢流坝段二维有限元模型

Fig. 2 Two-dimensional finite element model of gravity dam overflow dam section

2.3 模型参数

本文淤积层抗剪强度参数由原淤积层类比下游 2 km 处的小(1)型水利枢纽工程大峪河水库选取,建筑垃圾杂填土层的参数参考文献[11]中所列杂填土的取值范围选取,结合现场建筑垃圾杂填土特性(纯砖石与混凝土类的建筑垃圾杂填土,经过机械碾压,提高了建筑垃圾杂填土的强度并降低了压缩性,建筑垃圾杂填土参数性质良好)选用中值,详细参数如表 1 所示。

参考坝基岩体工程地质分类^[2],建筑垃圾杂填土属 IV 类坝基,抗剪参数取 0.40,原基础的抗剪参数值取 0.25。

表1 有限元模型物理力学参数表

Tab. 1 Finite element model physical mechanics parameter

项目	坝体毛石混凝土	坝基		杂填土取值范围 ^[11]
		建筑垃圾层	淤积层	
杨氏模量/MPa	2.20×10 ⁴	6.65	3.00	[2.10,11.20]
泊松比	0.16	0.43	0.41	[0.35,0.50]
渗透系数/(10 ⁻⁴ cm/s)	1×10 ⁻³	10.10	1.19	[9.20,11.00]
重度/(kN/m ³)	24.00	16.00	17.94	[12.00,25.00]
C/ kPa		15.00	15.00	[5.00,25.00]
φ/(°)		32.50	21.00	[24.00,41.00]

3 计算结果及分析

3.1 渗流结果分析

3.1.1 杂填土置换前后渗流坡降对比

对杂填土置换前后进行渗流场模拟,得到坝体浸润线和渗流坡降等值线图,如图 3 所示。图中原坝基置换范围用虚线标注;因坝基未设防渗帷幕和上游排水孔,坝基扬压力为梯形分布^[2],用线 AB 表示。

由图 3 可知,坝体内渗流坡降在竖直和水平方向上呈边缘小中部大;坝基内越靠近坝体底部的区域,渗流坡降的值越大;坝体较坝基渗流坡降值更大、等值线更密集,坝踵和坝趾区域表现明显。对比图 3(a)、(b),置换后坝体渗流场无明显变化;坝基 0.2、0.3 渗流坡降等值线上、下部分移动规律相反,其中上部向坝体方向靠近,下部向远离坝体方向移动,说明置换后在坝体覆盖范围内的坝基区域,渗流坡降值增加,在坝体覆盖的边缘至上下游区域,渗流坡降减小。

渗流坡降的复核。淤泥土质土多属黏土,其允许渗流坡降较大,为偏安全考虑类比壤土上限取值。由图 3(a)可知,原基础坝趾处渗流坡降为 0.65,高于规范^[2]中壤土地基水闸出口段允许渗流坡降值 0.6,可能发生渗透破坏。由图 3(b)可知,置换建筑垃圾杂填土后坝趾处渗流坡降为 0.56,且碾压后的建筑垃圾杂填土为啮合良好的块石结构,发生渗透破坏的可能性较小;建筑垃圾杂填土层和坝基淤泥层的地表相接处,渗流坡降为 0.09,建筑垃圾杂填土层的底部水平段最大渗流坡降为 0.33,满足规范^[2]对壤土的渗流坡降要求 0.35,不会发生渗透破坏。

综上所述,建筑垃圾杂填土作为置换材料,可以

提高坝基中坝体覆盖区域的渗流坡降,降低坝基上下游的渗流坡降;同时,对于高渗流坡降区,可通过置换防止渗透破坏的发生。但需特别注意的是,渗流坡降场受置换材料和置换范围影响,建筑垃圾杂填土层底部渗流坡降值较大,接近淤积层的允许渗

流坡降,建议将淤积层的最大允许渗流坡降作为置换设计的控制条件之一。此外,建筑垃圾杂填土与淤积层的渗透系数相差较大,可能发生接触流土和接触冲刷,应在建筑垃圾杂填土底部和渗流出口设置反滤层。

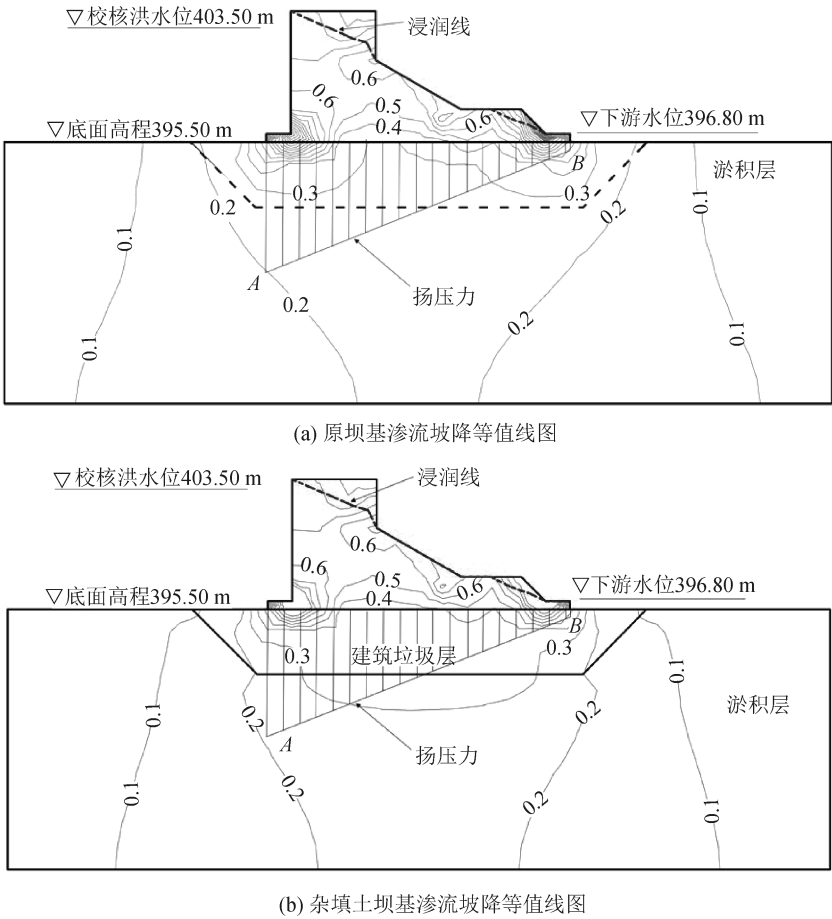


图 3 坝基渗流坡降等值线图

Fig. 3 Contour map of seepage gradient of dam foundation

3.1.2 杂填土置换前后渗流场渗流矢量的对比

渗流场总水头等值线和渗流矢量图如图 4 所示(单位:m),图中细实线为总水头等值线,离散箭头为渗流矢量,矢量的大小和方向表示对应点处渗流的速度大小和方向。双点划线 CD 和 EFG 为预设的流量截面,其中线 EF 为建筑垃圾杂填土层,FG 为淤积层。

由图 4 可知,坝体和坝基中的总水头线越靠近坝基越均匀。渗流矢量为坝基区域较坝体明显,以坝体为中心向远端均匀减小,其中靠近坝踵和坝址处最大,主要原因为渗流矢量与渗透系数成正比。对比图 4(a)、(b),置换后虽然建筑垃圾杂填土与原地基的渗透系数相差 1 个数量级,但总水头等值线大致相同,淤积层渗流矢量变小,建筑垃圾杂填土层为主要渗流通道。在流量截面处原坝基的渗漏量为

$4.573\times10^{-6}\text{ m}^3/\text{s}$;置换后渗漏量为 $1.688\times10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$,淤积层的渗漏量为 $3.642\times10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$,建筑垃圾杂填土层的渗漏量为 $1.324\times10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ 。

置换建筑垃圾杂填土与土石坝中的褥垫排水均提高了坝基部分区域的渗流系数。褥垫排水仅部分伸入坝体,对渗流场影响较大,可以降低坝体渗流场的浸润线高度、出口渗流坡降^[12];建筑垃圾杂填土层与上下游相连接(见图 4),由于渗流矢量主要是沿着分区的边界流动,建筑垃圾杂填土层和原淤积层的渗流无明显交换,所以置换前后的总水头、渗流坡降场差别较小,对浸润线和出口渗流坡降的影响也较小,仅渗流量增大 1 倍,在后期随着淤积的增加,地基内淤堵,渗流量会进一步减小。所以,在工程应用时为了保障兴利目的,应着重复核渗流量。

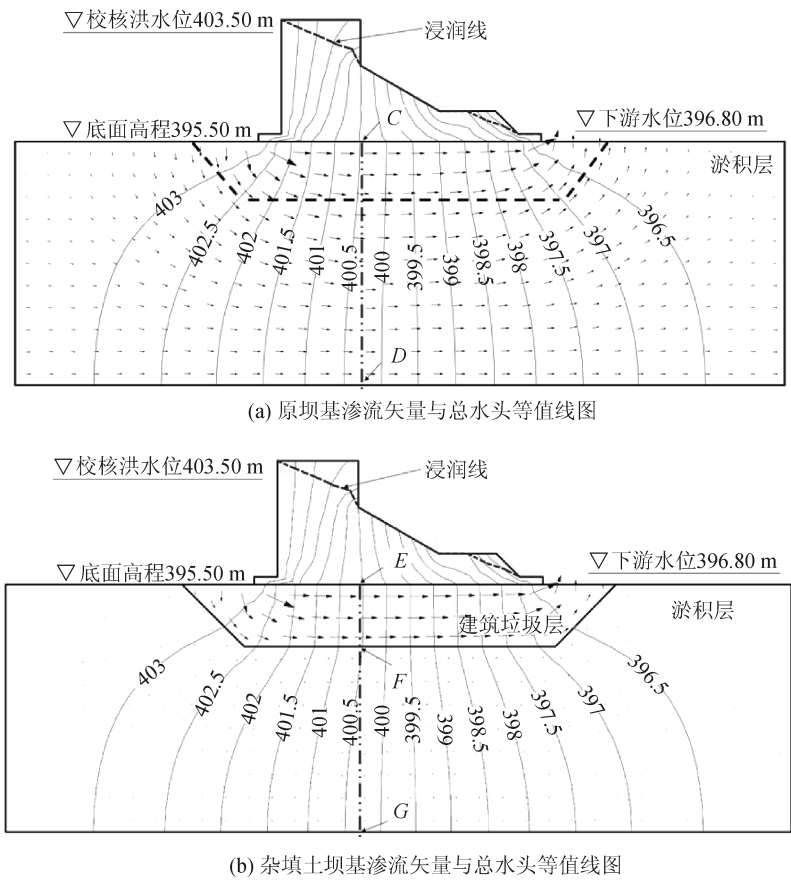


图4 坝基渗流矢量与总水头等值线图

Fig.4 Contour map of seepage vector and total head of dam foundation

3.2 杂填土置换前后整体稳定性和沉降结果分析

计算置换前后坝基整体稳定性和沉降。扬压力为面荷载直接施加于坝体底面,未考虑坝基附近的夹层单元。计算结果如表2所示。

表2 坝基稳定性分析结果表

Tab.2 Foundation stability analysis results table			
工况	原基础	杂填土地基	标准值
地基承载力/kPa	224.06	503.38	291.34(最大) 97.07(平均)
坝体覆盖区最大沉降/cm	27.38	23.37	15.00
杂填土表面最大沉降/cm	27.38	26.63	
沿坝基面的抗滑稳定安全系数	0.77	1.11	1.05
塑性区是否贯通	未	未	未
等效塑性应变最大值/(10 ⁻³)	20.60	8.36	

表2中,地基承载力标准值为不同工况下坝基面有限元计算的最大基底应力和平均基底应力的最大值,不同工况下的地基承载力为基于表1和式(2)

计算出的允许承载力值;地基沉降标准值为水闸规范规定的天然地基下的最大沉降量;抗滑安全系数标准值为规范的规定值。

置换前后的沉降等值线图如图5所示,等效塑性应变如图6所示。

由表2可知,对于原基础,地基允许承载力224.06 kPa大于平均基底应力97.07 kPa,地基允许承载力的1.2倍为268.87 kPa,小于最大基底应力291.34 kPa,不满足规范要求;沿坝基面的抗滑稳定系数为0.77,不符合规范要求。

由图6(a)可知,深层抗滑稳定中无塑性贯通区,等效塑性应变的最大值为 2.06×10^{-2} ;坝体覆盖区最大沉降和建筑垃圾杂填土表面最大沉降均为27.38 cm,均发生在坝踵处(见图5的N点处),不满足规范要求。

地基处理后的地基允许承载力为503.38 kPa,提高了2倍多,大于平均和最大基底应力,满足规范要求;沿坝基面的抗滑稳定系数为1.11,满足规范要求。由图6(b)可知,深层抗滑稳定中无塑性贯通区,等效塑性应变最大值为 8.36×10^{-3} ,减小了1

倍多,降低了深层滑动的可能性;坝体覆盖区最大沉降为 23.37 cm,建筑垃圾杂填土表面的最大沉降为 26.63 cm,发生位置分别在坝踵和建筑垃圾杂填土层上游处(见图 5 中的点 N、M 处),沉降不满足规范要求,其中置换杂填土后,坝体覆盖区最大沉降量减少 4.01 cm,建筑垃圾杂填土表面最大沉降量减少 0.75 cm。由此可知,置换杂填土对建筑垃圾杂填土表面最大沉降量影响较小,对坝体覆盖区最大

沉降量有减小的作用。

由图 5 可知,最大的沉降值发生在坝体上游,主要因为上游静水压强为 78.48 kPa,坝体底部宽度较坝高大,扬压力较大,该工况下平均基底应力为 51.10 kPa,小于静水荷载的压强,所以坝体的沉降上游大、下游小。

置换后,坝基的力学性能指标都能满足规范并有较大改进,但变形仍不满足要求,主要受制于原坝基材料弹性模量过小,根据规范应采用其他措施配合处理。

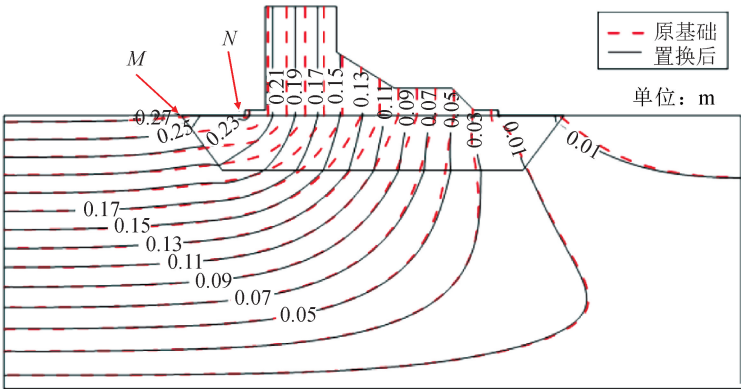
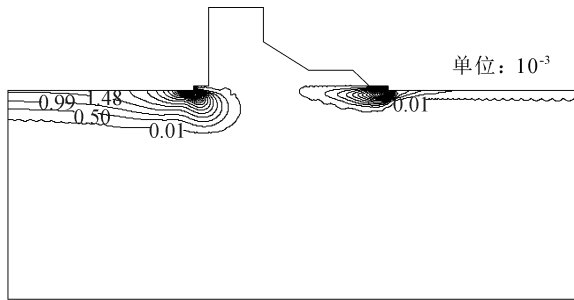
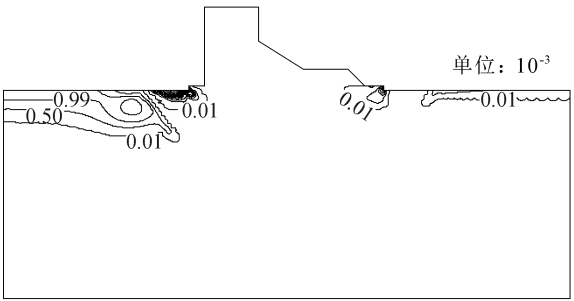


图 5 坝基置换前后位移等值线图

Fig. 5 Displacement contour map before and after dam foundation replacement



(a) 原基础等效塑性应变等值线图



(b) 杂填土坝基等效塑性应变等值线图

图 6 坝基等效塑性应变等值线图

Fig. 6 Equivalent plastic strain contour map of dam foundation

3.3 建筑垃圾层参数敏感性分析

本文的建筑垃圾杂填土参数选取主要参考相关文献取值,其准确性决定了结论的可靠性,为避免人为选取参数对结果的影响,通过敏感性分析讨论计算结果的可靠性。将计算参数分为渗流、强度和变形三组,对各组参

数在表 1 的基础上进行取值范围内的敏感性分析。

3.3.1 渗流场对渗透系数的敏感性分析

当渗透系数存在数量级的差别时,渗流场变化明显^[12]。对渗透系数进行缩放分析,缩放系数分别为 0.01、0.1、1、10、100,计算结果如表 3 所示。分析内容主要为可能发生渗透破坏的建筑垃圾杂填土底部和下游地表相接处(建筑垃圾杂填土层和淤积层)。

表 3 渗透系数对渗流坡降的影响

Tab. 3 Effect of permeation rate on penetration gradient						
渗透	渗透系数/ ($10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.10	1.01	10.10	101.00	1 010.00
渗流	地表相接处	0.30	0.18	0.10	0.09	0.09
坡降	杂填土底部	0.21	0.26	0.32	0.34	0.34
渗漏量/($10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		2.92	4.31	16.90	1.410×10^2	1.38×10^3

由表 3 可知,随着渗透系数的增加,渗流坡降趋于稳定,地表相接处的渗流坡降减小,发生渗透破坏的可能较小,建筑垃圾杂填土底部的渗流坡降增加。此外,当渗透系数为 1.01×10^{-2} 时,地表相接处的渗流坡降接近淤积层的允许渗流坡降 0.35,需要避免接触冲刷与接触流土,建议在底部设置反滤层。

当建筑垃圾杂填土层渗透系数数量级不小于淤积层时,渗漏量与渗透系数的数量级呈正比;当建筑垃圾杂填土层渗透系数数量级小于淤积层时,渗漏量主要由淤积层的渗透系数决定。为保障工程蓄水

任务,建议当建筑垃圾杂填土渗透系数较高时,对渗漏量进行复核。

3.3.2 坝基稳定对土体抗剪强度参数的敏感性分析

参考强度折减法对黏结力和内摩擦角正切值同时折减的方法,根据表 1 给出的取值范围,将黏结力划分为 5 等份进行敏感性分析,复核结果如表 4 所示。

由表 4 可知,折减系数为 1.36 时,地基承载力已不满足规范要求,但随着折减系数差值的增加地

基承载力的差值下降。对于地基承载力,根据已有研究,土体黏结力和内摩擦角越小,对承载力值的影响越大,且内摩擦角取值的变化对地基承载力的影响明显大于黏结力^[13]。

土体强度主要受土料中大尺寸颗粒和细颗粒的比例、压实度的影响^[14]。为了达到合适的承载力值,应该对建筑垃圾杂填土土料的选择以及碾压的质量进行控制。

表 4 土体抗剪强度参数折减的影响
Tab. 4 Influence of reduction of soil shear strength parameters

工况	C/kPa	15.00	13.00	11.00	9.00	7.00	5.00
	$\phi/(^{\circ})$	32.50	28.90	25.04	20.92	16.56	11.99
	折减系数	1	1.15	1.36	1.67	2.14	3
	差值	0	+0.15	+0.21	+0.31	+0.47	+0.83
地基承载力/kPa		503.38	326.34	206.30	125.32	70.91	33.77
差值/kPa		0	-177.04	-120.04	-80.98	-54.41	-37.14
塑性区是否贯通		未	未	未	未	未	未
等效塑性应变最大值/(10^{-3})		8.36	9.57	11.17	13.11	15.46	20.01
差值/(10^{-3})		0	+1.21	+1.60	+1.94	+2.35	+4.55
最大沉降/cm	坝基覆盖范围	23.37	23.33	23.28	23.24	23.16	23.01
	差值	0	-0.04	-0.05	-0.04	-0.08	-0.15
	杂填土表面	26.63	26.64	26.69	26.73	26.78	26.92
	差值	0	+0.01	+0.05	+0.04	+0.05	+0.14

注:差值为该列在前一列基础上的变化量。

随着土体抗剪强度的减小,等效塑性应变最大值增加,但并未形成贯通,说明塑性区在坝基中开展,这主要是因为土体抗剪强度的降低带来屈服极限的降低,坝基更多的区域进入了塑性;对于沉降值,随着土体抗剪强度的折减,变化量较小,其中建筑垃圾杂填土表面的最大沉降值增加,坝基覆盖范围的最大沉降值减小,沉降值包括塑性变形和弹性变形两部分,这可能是坝基弹性变形场调整所致。

3.3.3 坝基稳定对土体变形参数的敏感性分析

对杨氏模量和泊松比进行折减,其他参数不变,参数及复核结果如表 5 所示。根据表 1 给出的取值范围,将参数范围分为 5 等份进行敏感性分析。

由表 5 可知,随着变形参数的衰减,等效塑性应变最大值增大,塑性区开展,但塑性区未贯通,发生深层滑动的可能性小。其塑性开展区主要位于坝趾

和坝踵附近,开展时塑性区的水平和深度范围同时增加,塑性区未贯通主要是因为工程水头低,水平力仅考虑了静水作用,水平滑动力较小。

表 5 土体变形参数折减的影响

Tab. 5 Influence of soil deformation parameters reduction

工况	杨氏模量/ MPa	6.65	5.74	4.83	3.92	3.01	2.10
	泊松比	0.43	0.415	0.4	0.395	0.37	0.36
塑性区是否贯通		未	未	未	未	未	未
等效塑性应变最大值/(10^{-3})		8.36	9.59	10.35	12.92	14.44	19.80
差值/(10^{-3})		0	+1.23	+0.76	+2.57	+1.52	+5.36
坝基覆盖范围最大沉降/cm		23.37	24.03	24.96	26.12	28.62	32.33
差值/cm		0	+0.66	+0.93	+1.16	+2.5	+3.71
杂填土表面最大沉降/cm		26.63	26.79	26.96	27.11	28.62	32.33
差值/cm		0	+0.16	+0.17	+0.15	+1.51	+3.71

注:差值为该列在前一列基础上的变化量。

坝基覆盖范围的最大沉降和建筑垃圾杂填土表面最大沉降随着参数的减小而增加,且增加量逐步提高,最终在第五组参数时二者的沉降值相等,第五组参数与基础的变形参数相近,大于原坝基的沉降值 27.38 cm,所以建筑垃圾杂填土的置换可以起到降低沉降值的作用。建筑垃圾杂填土的杨氏模量变化后,沉降值变化较小,这主要是因为有限元模型中建筑垃圾杂填土厚度较小,仅为地基厚度的 1/4。但对于深厚软基,需要结合其他措施降低沉降值。

4 结 论

建筑垃圾杂填土具有变形大、空间分布不均匀、强度与压实度相关的特点。结合碾压措施,对软基进行置换处理是一种可行的地基处理方法,渗透、坝基稳定均能满足要求,能够减少沉降量,但对于较厚覆盖层,需要结合其他措施。

1) 对于渗流,建筑垃圾杂填土作为坝基可以降低地表处的渗流坡降,但需要在建筑垃圾杂填土层与淤积层相接的底部和下游布置反滤层,防止发生渗透破坏;同时,针对目标需要进行渗漏量复核。

2) 坝基稳定和沉降量主要取决于土体参数,材料大颗粒占比和碾压质量会影响土体的内摩擦角、黏结力、弹性模量和泊松比,需要对其进行控制。

3) 本文的建筑垃圾杂填土参数依文献选取,虽然进行了敏感性分析,但仍会与实际存在差别,需要进行进一步实验研究。

参考文献:

- [1] 李林伟. 装配式小型混凝土重力坝设计方法及应用[D]. 天津:天津大学, 2018.
LI Linwei. Assembly-type design method of small concrete gravity dam and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [2] 中华人民共和国水利部. 水闸设计规范:SL 265-2016[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2016.
- [3] 吴曼真. 杂填土地基的利用[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(6):103-109.
WU Manzhen. Utilization of miscellaneous fill foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15 (6): 103-109.
- [4] SANTOS S, SILVA P R D, BRITO J D. Self-compacting concrete with recycled aggregates-a literature review [J]. Journal of Building Engineering, 2019, 22: 349-371.
- [5] 王国强, 李瑛霞, 吴道祥, 等. 厚层含淤泥新杂填土地基强夯法处理效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1868-1872.
WANG Guoqiang, LI Yingxia, WU Daoxiang, et al. Effect analysis of heavy tamping treatment of foundation of a thick layer of recently deposited miscellaneous fill containing mud[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1868-1872.
- [6] 夏建中. 土力学与工程地质[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2012.
- [7] 石振峰, 何钦象, 田小红. 导流泄洪洞强度计算及边坡稳定分析[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(4): 454-458.
SHI Zhenfeng, HE Qinxian, TIAN Xiaohong. Strength calculation and slope stability analysis of diversion and spillway tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(4): 454-458.
- [8] 张克恭, 刘松玉. 土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- [9] 冉红玉, 李倩, 杜华冬, 等. 重力坝抗滑稳定分析中抗剪公式的适用性及安全控制标准分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(5): 49-53.
RAN Hongyu, LI Qian, DU Huadong, et al. Research on applicability and safety control standards of shear-resistant formula in stability analysis of gravity dam foundation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(5): 49-53.
- [10] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [11] 李世麟, 杨洪誉, 张志强, 等. 城市人工杂填土隧道围岩稳定及支护力学特性分析[J]. 四川建筑, 2018, 38(2): 180-183.
LI Shilin, YANG Hongyu, ZHANG Zhiqiang, et al. Analysis of surrounding rock stability and support mechanical properties of urban artificial mixed-fill tunnel [J]. Sichuan Architecture, 2018, 38(2): 180-183.
- [12] 郭江涛. 深厚覆盖层土石坝三维渗透特性分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
GUO Jiangtao. Three dimensional seepage characteristic analysis about earth-rack dam of deep overburden layer[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [13] 钟岱辉, 马玉梅. 地基极限承载力的参数敏感性分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(S1): 479-481, 460.
ZHONG Daihui, MA Yumei. Parameter sensitivity analysis of the ultimate bearing capacity of the subgrade[J]. Industrial Construction, 2005, 35 (S1): 479-481, 460.
- [14] 朱艳. 碎石土路基抗剪性能影响因素分析[J]. 北方交通, 2016, (7): 117-120.
ZHU Yan. Analysis on the influence factors of the shear strength of the gravel soil subgrade [J]. Northern Communications, 2016, (7): 117-120.

(责任编辑 周 蓓)