DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2019.05-05

深覆盖层地基混凝土防渗墙弹性模量优化分析

尹伟强, 付光亮

(赣州市水利电力勘测设计研究院, 江西 赣州 341000)

摘 要:深覆盖层透水地基上修建混凝土防渗墙因其受力条件复杂,防渗墙的渗控与稳定是处理此类地基的关键难题, 为此有必要深入了解防渗墙工作性状影响因素.针对某库区防护工程堤基覆盖层深厚且局部下伏岩溶洞隙问题,采用 Goodman 单元模拟防渗墙与泥皮接触,综合考虑实际施工进度及蓄水入渗作用,利用有限元数值计算方法研究混凝土弹性 模量的差异对防渗墙应力变形的影响.研究表明,刚性防渗墙出现明显的拉应力区,塑性墙能保持较好的应力状态;防渗 墙水平位移受弹性模量影响较小,竖向沉降随弹性模量增大有所减小.

关键词:深覆盖层;混凝土防渗墙;弹性模量;应力变形

中图分类号:TV139.1 文献标识码:A 文章编号:1004-4701(2019)05-0335-06

0 引 言

目前,混凝土防渗墙结合墙下帷幕灌浆的防渗技 术已较为成熟并有效地应用于深覆盖层透水地基¹¹, 地基的渗透稳定往往成为在该类复杂地基上修建水工 建筑物的关键技术。覆盖层受上覆土荷载及水压力影 响,透水堤基会产生较大的变形¹²,而防渗墙作为堤 基防渗体深夹于覆盖层中,与周围覆盖层土体弹性模 量差异较大引起变形不协调,容易产生应力集中现象 而导致墙体发生破坏¹³。近五十年来,通过不断改善 防渗墙墙体材料性质及施工工艺,混凝土防渗墙在工 程界得到广泛运用,在常态混凝土中减少水泥用量并 掺入膨润土、粘土等材料形成的流动性混凝土¹⁴能较 好的适应墙体覆盖层的变形协调,极大的改善了墙体 的应力状态,并具有造价低、便于取材等特点被广泛 采纳。

深覆盖层因其结构松散、空间不均匀性较大程度 制约了水利工程的建设,墙体受复杂边界条件及材料 本构影响¹⁹,准确计算防渗墙的应力变形还存在一定的 局限性,如何较真实的计算墙体与覆盖层土体相互作 用成为一大难点。在覆盖层地基中修建防渗墙成槽过 程多采用泥浆固壁,泥浆固结后形成一层泥皮附着在 墙体四周,泥皮的存在会影响墙体与覆盖层接触面的 力学性质。墙体结构和覆盖层地基之间在荷载作用下 产生的错动、滑移或开裂,通常采用 Goodman¹⁶无厚度 单元模拟其接触关系,能较好的考虑防渗墙与覆盖层 接触面切向应力和变形的发展。深覆盖透水地基应力 变形受渗流场与应力场多场耦合相互作用,应力通过 影响土体体积应变而改变渗透系数¹⁷,从而通过沉降变 形与渗透系数将渗流场与应力场联系起来。借助于多 孔介质的 Kozeny-Carman¹⁸方程,能较好反映覆盖层的 渗透系数及孔隙率的变化关系。

当前国内外对塑性混凝土防渗墙试验研究取得了 一定成果,但其应力计算方面仍然薄弱。本文主要着眼 于研究深覆盖层复杂地基中弹性模量的差异对混凝土 防渗墙应力变形影响。为此,依托某库区防护工程,建 立考虑泥皮接触的流固耦合非线性有限元模型,研究 防渗墙不同弹模条件下,防渗墙的工作性状及受力特 性,以期为实际工程中弹性模量的取值提供理论依据。

收稿日期:2019-08-13

作者简介:尹伟强(1991-),男,硕士,助理工程师.

1 工程概况

某库区防护工程是赣江中游某大型控制性水利枢 纽工程减少库区淹没而修建的堤防工程,现已钻探查 明该工程区基岩埋深大、强透水,覆盖层透水堤基最 大厚度达 50m,广泛分布第四系全新统和中更新统早 期、晚期冲积层,普遍具二元结构,上部为粘土、壤 土和砂壤土,厚度约为 1~2m。下部为砂类土和砾卵 石。同时该防护区内岩溶洞隙发育,多为砂砾、圆砾 填充,贯穿性较差。为处理该防护工程复杂地基,拟 对该工程区堤基覆盖层采取液压抓斗修建混凝土防渗 墙,设计墙厚 50cm,墙深 48.00m,墙体设计抗压强 度 *R*≥10MPa。防渗墙已深入灰质灰岩并截断上部溶 洞,防渗墙之下采用帷幕灌浆至白云质灰岩,形成一 套完整的防渗体系。堤防采用粘土填筑,堤高 7.20m, 设计水位(*P*=2%)为 48.27m。

2 计算模型

2.1 模型概况

考虑该防护工程绵延几公里,且堤基覆盖层深厚、 空间差异较大,本文仅选取实际具有代表性的断面。在 流固耦合分析中,模型需要各自设定渗流场及应力场 的边界条件,渗流场应考虑实际工程中蓄水引起的水 位上升及地下水位影响。溶洞灌浆、防渗墙施工、堤防 填筑视为一次性加载,并蓄水至库区设计水位 48.27m, 对部分无关结构进行简化后有限元模型如图 1 所示。

在三维有限元分析中,计算模型临水侧入渗面属 于已知水头边界,背水坡表面及堤基背水侧地下水位 以上边界视为潜在溢出边界,对于水位上升的非稳定



图 1 数值计算模型图

渗流,临水坡为变水头边界。静力分析中,模型四周采 用水平法相约束,底部边界施加全约束。模型加载前引 入不计外界荷载的初始地应力平衡以表示覆盖层天然 状态,按溶洞灌浆、防渗墙浇筑、堤防填筑、蓄水的分析 步骤模拟实际施工顺序。模型基本单元采用8结点6 面体耦合单元(C3D8P)¹⁹,该耦合单元借助耦合方程能 较好将土体应力变形与渗透系数结合起来,从而同时 求解土体平衡方程与渗流方程,能真实、准确地计算防 渗墙应力变形。

2.2 计算参数

根据以往研究经验,防渗墙施工一般采用泥浆护 壁、连续造孔成槽建造^[10],这种工艺会使得防渗墙与覆 盖层土体接触面留有一层泥皮。研究表明,采用无厚度 Goodman 接触单元模拟防渗墙与覆盖层土体接触能较 好的反应泥皮的非线性剪切特性。Goodman 单元不考 虑两个方向的相互耦合,接触面是在受力之间完全吻 合,即单元没有厚度只有长度。接触面参数取值为 K_1 = 1 500、 K_2 =1 500、n=0.46、 R_1 =0.85、界面摩擦角 δ =12.8°。

表 1 防护区覆盖层三轴剪切试验 Duncan-Chang(E-B)模型参数取值

材料	K	n	R_{f}	c∕kPa	$arphi /^{\circ}$	$arphi_0/^\circ$	K_{ur}	K_b	m	ho(干/湿)	k/(cm/s)	孔隙比 e
回填土	550	0.38	0.76	27.0	16.0	0	800	470	0.28	1.52/1.925	2.4×10 ⁻⁵	0.795
原状土	289	0.52	0.72	16.5	19.8	0	434	230	0.22	1.62/1.96	8.1×10 ⁻⁵	0.802
细砂	600	0.33	0.78	8	20	0	925	400	0.16	1.57/1.88	1.0×10 ⁻³	0.714
圆砾	900	0.35	0.79	5	38	5	1350	850	0.15	1.64/1.969	2.5×10 ⁻²	0.691
砂砾	1250	0.417	0.858	3	42	3	1860	1000	0.12	1.68/2.03	2.5×10 ⁻²	0.637

基岩、防渗墙、灌浆帷幕宜采用线弹性模型,灰质灰岩 以上覆盖层、堤防回填土采用 Duncan-Chang 非线性 E-B 模型^[11]。参考工程地质勘查以及试验成果,并且借 鉴类似工程的地质资料,三轴剪切邓肯模型参数取值 如表1所示,线弹性模型参数取值如表2所示。

2.3 计算工况

在结构松散的深覆盖透水地基中修建防渗墙,传 统的刚性混凝土防渗墙与透水覆盖层松散岩体弹性模 量往往相差数万倍,在上覆土堤自重及库区蓄水产生 的渗透水压力作用下,防渗墙易产生过大的集中荷载 而发生破坏。已有研究表明,混凝土防渗墙受力后力学 响应与覆盖层越接近,越能更好适应覆盖层土体的变 形,从而保持较好的工作性状。为了解复杂地基防渗墙 受力状态,研究防渗墙自身弹性模量对防渗墙应力变 形的影响,选取两种刚性混凝土(E取 28.5GPa、18GPa) 及两种塑性混凝土(E取 1 500MPa、500MPa)进行敏感 性计算。

3 计算成果分析

图 1、图 2 为库区蓄水至设计水位时防渗墙不同弹 模条件下大、小主应力分布云图。蓄水后覆盖层受上覆 荷载及渗透水压力作用产生下凹的沉降变形且向背水 侧位移,此时防渗墙主要受墙前静水压力、侧土压力以 及摩擦力作用下向背水侧弯曲,使得墙体临水侧受拉, 背水侧受压,且最大拉、压应力均出现在覆盖层与基岩 交接处,这是因为基岩弹性模量较大,受力后沉降微乎 其微,基岩段防渗墙能较好的适应变形;图 3 为防渗墙 不同弹模条件下大、小主应力随墙体高程变化曲线,竣 工期受覆盖层沉降影响且河床在地壳运动中已基本沉 降稳定,防渗墙主要承受压应力,刚性墙承受的压应力 远超塑性墙,且受弯矩作用主要受力出现在基岩段,拉 应力受墙体自身弹性模型影响微乎其微。蓄水后,墙体 与地基覆盖层应力分配达到新的平衡,塑性墙拉、压

材料	弹性模量/MPa	泊松比 u	孔隙比 e	k/(cm/s)	$ ho/(\mathrm{gxcm}^{-3})$	
灰质灰岩	8 000	0.26	0.597	1.0×10 ⁻⁴	2.00	
白云质灰岩	25 000	0.25	0.562	1.0×10 ⁻⁶	2.20	
防渗墙	28 500	0.26	0.546	1.0×10 ⁻⁶	2.40	
溶洞填充	5	0.32	0.785	5.0×10 ⁻¹	1.65	
溶洞灌浆	800	0.20	0.567	1.0×10^{-6}	2.00	
帷幕灌浆	80 000	0.25	0.585	1.0×10^{-6}	2.20	
S, Max. Principal (平均: 75%) +4.391e+03 +4.021e+03 +3.651e+03 +2.911e+03 +2.911e+03 +2.911e+03 +1.802e+03 +1.432e+03 +1.432e+03 +6.917e+02 -4.815e+01 最大: +4.391e+03 哼范: FSQ-1.23 结点: 24	S, Max. Principal (平均: 75%) +2.948e+0: +2.698e+0: +2.698e+0: +2.199e+0: +1.699e+0: +1.699e+0: +1.499e+0: +1.499e+0: +1.499e+0: +1.499e+0: +2.498e+0: +1.499e+0: +2.005e+0: -4.945e+01 最大: +2.948e+0 单元: FSQ-1.23 增点: 24	Max: +2 948e+003	S, Max. Principal (平均: 75%) +5.256e+02 +4.2775e+02 +3.333e+02 +3.333e+02 +2.372e+02 +3.333e+02 +2.372e+02 +4.411e+02 +3.014e+00 -3.014e+01 • 4.15.256e+02 #£:.5.256e+02 • 4.5.076e+01 • 6.5.256e+02 • 4.5.256e+02 • 4.5.256e+02 • 4.5.256e+02 • 4.5.256e+02 • 5.256e+02 • 5.2	S, Max. Princi (平均: 75%) +4.156e +4.157e +4.161e +4.161e +4.161e +4.161e +4.61e +4.61e +4.61e +4.61e +4.61e +4.61e +4.61e +5000 ***	pal +02 +02 +02 +02 +02 +02 +02 +02 +02 +02	
(a) E=28 500MPa	(b) E=18 0	00 MPa	(c) E=1 500 M	Pa (d)	(d) E=500 MPa	

表 2 防护区覆盖层线弹性模型参数取值





应力变化较小,而刚性墙在基岩面与覆盖层交界处出 现应力峰值,嵌入基岩段急剧减小,主要原因是基岩与 覆盖层弹性模量差异巨大,墙体与基岩相当于刚性连 接,能较好约束防渗墙应力变形。压应力较塑性墙有明显增大,当 E=28 500MPa时,墙体最大拉、压应力为4.39MPa、6.49MPa,均已超出混凝土的最大应力允许





值。当 E=500MPa 时,墙体最大拉、压应力为 0.45MPa、 1.19MPa,应力状态较好。

总体来说,防渗墙在覆盖层中受力状况类似于悬 臂梁,受弯矩作用表现出一侧受拉另一侧则受压。防渗 墙最大拉、压应力在低弹模条件下随弹性模量增加而 缓慢增大,且受库区蓄水影响较小,应力值也较小。而 刚性墙应力受弹性模量影响显著,应力值远超塑性墙, 库区蓄水后在基岩与覆盖层接触面出现应力集中现 象,对墙体稳定极为不利。由此看出,混凝土弹性模量 越高,墙体内应力越大,覆盖层与墙体材料力学参数巨 大的差异会影响两者之间的荷载分配,防渗墙弹性模 量与覆盖层越接近,越能较好适应覆盖层的变形。塑性 混凝土防渗墙性能优越,能有效解决不良地基中渗透 稳定问题,工程中墙体弹模应根据实际情况综合考虑 水位、覆盖层等因素确定。

图 4(a)为库区蓄水至设计水位时防渗墙不同弹模 条件下水平位移随高程分布图。最大水平位移出现在 防渗墙顶部 E=28 500MPa 工况,值为 5.1cm,墙底受基 岩的刚性约束作用水平位移基本为0。蓄水后防渗墙水 平位移值随弹模增大而有所增大,但差值较小,各弹模 下墙体水平位移最大差值仅0.3cm。究其原因,主要是 覆盖层变形受上覆填土荷载及渗透水压力影响所致, 而墙体的变形则取决于覆盖层的承载条件及压力水 头;图4(b)为墙体不同弹模条件下竖向沉降随高程分 布图。受自重及覆盖层沉降引起的摩阻力影响,墙体弹 模越小竖向沉降越大,刚性墙竖向沉降基本不存在,符 合混凝土沉降变形规律,各工况下墙体在基岩与覆盖 层接触面处由于存在一定的拉应力竖向沉降出现不同 大小的波动。

5 结 论

影响防渗墙应力变形因素众多,本文主要研究防 渗墙弹性模量差异对墙体的应力变形,并以实际工程 为例,建立考虑了墙体与覆盖层面-面接触的非线性有 限元模型,得到如下结论:



图 4 不同弹模条件下墙体变形随高程分布曲线

(1)防渗墙最大拉、压应力在低弹模条件下随弹性 模量增加而缓慢增大,且受库区蓄水影响较小,应力值 也较小。而刚性墙应力受弹模影响显著,应力值远超塑 性墙,库区蓄水后在基岩与覆盖层接触面出现应力集 中现象,对墙体稳定极为不利。

(2) 墙体的变形则取决于覆盖层的承载条件及压力水头,蓄水后防渗墙水平位移值随弹模增大而有所 增大,但差值较小;墙体弹模越小竖向沉降越大,刚性 墙竖向沉降基本不存在。

参考文献:

- [1] 沈振中,邱莉婷,周华雷. 深厚覆盖层上土石坝防渗技术研 究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):27~35.
- [2] 李静. 水库土石坝加固工程中防渗墙的设计和施工探讨[J]. 中国水运月刊,2011,11(8):179+183.
- [3] 李景龙. 混凝土防渗墙在土石坝加固中的应用研究 [D]. 山 东大学,2005.

- [4] Li K, Ju Y, Han J, et al. Early-age stress analysis of a concrete diaphragm wall through tensile creep modeling [J]. Materials and Structures, 2009, 42 (7):923~935.
- [5] 温立峰,柴军瑞,王晓,等.考虑渗流作用的深覆盖层地基防 渗墙应力变形分析[J].资源与水工程学报,2014,(02):166~ 171.
- [6] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1968, 94:637~660.
- [7] 尹伟强,傅琼华,高江林,等. 耦合作用下蓄水速度对心墙坝 渗流性态的影响分析 [J]. 南水北调与水利科技,2017,15

(4):168~174.

- [8] 罗元华,孙雄.不同应力状态下地层渗透系数的变化及其对流体运移影响的数值模拟研究 [J]. 地球学报,1998,19(2): 144~149.
- [9] 萧燕子. 基于二次开发的土石坝数值仿真分析及防渗墙优 化研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- [10] 张成军. 土石坝防渗墙粘土混凝土材料研究与工程应用[D]. 西安:西安理工大学,2007.
- [11] 贾善坡,冉小丰,王越之,等.变形多孔介质温度-渗流-应 力完全耦合模型及有限元分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(S2):3547~3556.

编辑:张绍付

Optimum analysis of elastic modulus of concrete cutoff wall on deep overburden foundation

YIN Weiqiang, FU Guangliang

(Ganzhou Municipal Hydraulic and Hydroelectric Survey and Design Institute of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The construction of concrete cutoff wall on deep overburden pervious foundation is a key problem in dealing with this kind of foundation because of its complex stress conditions. Therefore, it is necessary to understand the influencing factors of the working characteristics of the cutoff wall. Aiming at the problem of thick overburden layer and local karst voids in the embankment foundation of a certain project, Goodman element is used to simulate the contact between the cut-off wall and the soil. Considering the actual construction progress and impoundment and infiltration, the influence of the difference of elastic modulus of concrete on the stress and deformation of the cut-off wall is studied by finite element numerical calculation method. The results show that the rigid cut-off wall has obvious tension stress zone, and the plastic wall can maintain a good stress state. The horizontal displacement of the cut-off wall is less affected by the elastic modulus, and the vertical settlement decreases with the increase of the elastic modulus. **Key words**: Deep overburden; Concrete cutoff wall; Modulus of elasticity; Stress and deformation

翻译:尹伟强