

软土地基砂袋围堰施工技术 及变形失稳影响因素分析

娄中华^{1*}, 拓峰鹏¹, 靳壮壮²

(1.中铁五局集团建筑工程有限公司, 贵州 贵阳 550081;2.贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:在贵阳市南明区河水环境综合整治项目二期工程施工中,针对软土地基砂袋围堰易变形失稳、承载能力差等问题,开展了软土地基砂袋围堰施工技术及变形失稳影响因素分析。本文基于实际施工工况条件,在考虑最不利荷载作用下,采用有限元法对软地基砂袋围堰进行了模拟分析,并以围堰倾角和围堰宽度作为影响因素,获得了相同水位条件下围堰变形情况,提出了最优的砂袋围堰堆砌方案,通过研究提高了砂袋围堰受力性能,降低了变形失稳破坏的风险,并将其理论模拟优化结果应用于实际挡水围堰施工承载力中,加快了施工进度,保证了工程质量,可为后续类似围堰施工提供理论支持。

关键词:砂袋围堰;变形失稳;有限元法;优化

中图分类号:U655.4 **文献标识码:**A

随着当前科学技术的快速发展,国家在交通运输、市政配套设施等方面取得快速的进步,在施工过程中对安全环保施工方面的要求也越来越高。水工结构施工过程中经常采用围堰作为临时挡水措施,在围堰选型上大多采用砂袋形式施工,砂袋围堰具有施工工艺简单、节约工期和成本等特点;但是施工过程中同样面临一些问题,如软地基砂袋围堰变形失稳、承载能力差,容易发生沉降^[1]等,因此开展软土地基砂袋围堰变形失稳影响因素研究具有重要的工程意义。

当前国内外相关学者对工程施工过程中的围堰变形施工开展了大量研究,如陈凌伟等^[2]开展了大砂袋围堰的变形与失稳模式研究,进行离心试验结合模拟分析结果,对围堰的变形及机理进行研究,取得了可观的成果;崔春义等^[3]基于 Mohr-Coulomb 破坏准则的本构模型,考虑土石物的弹塑性性质,对不同水位情况下的钢板围堰进行模拟分析,验算结果有效的指导了实际工程施工;彭飞^[4]则开展了共桩型围堰的力学性能进行分析研究,利

用传统的计算方法对结构进行了验算,再结合模拟分析手段对围堰进行初步静力分析,对比了几个工况条件下的应力情况,获得了最优的设计方案。以上的研究学者都取得了较好的研究成果,为指导工程施工提供可靠的方案,本文基于上述学者的研究方法,对实际工程的软地基砂袋围堰施工技术及变形失稳影响因素进行了分析。

在本项目施工过程中,为避免出现软土地基砂袋围堰变形失稳,加快施工进度,在现有的研究方法的基础上,利用有限元模拟分析的方法对围堰的变形模式及变形因素进行研究,以围堰倾角和围堰宽度作为影响因素,对比分析了相同水位工况下围堰变形情况,为实际的施工提供了优化方案,确保了施工的安全性,降低了施工成本,加快了施工进度,优化了实际施工方案确保了施工安全。

1 工程概况

1.1 项目简介

贵阳市新庄污水处理厂二期工程配套截污沟工程位于贵州省贵阳市东风镇,全长 9.7 km,沿河

收稿日期:2019-12-31

基金项目:贵州省科技计划项目资助(黔科合平台人才[2019]5616号);贵州省科技支撑计划项目资助(黔科合 LH 字支撑[2017]7236)

作者简介:娄中华(1971-),男,高级工程师,研究方向:建筑工程及复杂结构建造,Email:774011278@qq.com.

* 通讯作者:娄中华,Email:774011278@qq.com.

道岸边布置。沿线河道宽 15~58 m, 河水深度丰水期 4~6 m, 枯水期 1~3 m, 两岸大部分为山体, 最大山体高度 38 m, 截污沟的修筑大多需要在河道中修筑施工便道及围堰后开挖沟槽进行截污沟混凝土箱涵施工, 围堰结构示意图如图 1 所示, 箱涵基坑开挖深度约 4~8 m。本文以施工过程中自然环境、施工环境较为复杂的 Z6+640—Z8+060、Z6+690—Z7+040、Z7+715—Z7+770 段截污沟为对象进行研究。

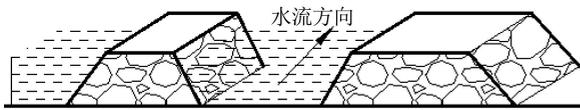


图 1 围堰结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of cofferdam structure

1.2 水文地质

1.2.1 地表水

本段截污沟沿南明河布置, 截污沟施工里程从 Z0+000—Z9+720, 该工程河水实测枯水期水位值在 969.20~989.29 m 之间。截污沟箱涵施工多处于汛期, 汛期水位上涨迅速, 且水位高于箱涵顶面, 据水文资料显示和当地现场踏勘走访了解本区域常年洪水水位将比河道正常水位高出 3 m。为了防止汛期水位上涨给施工带来不利影响, 产生安全隐患, 根据《水利水电工程施工组织设计》与《水利水电工程围堰设计规范》的要求, 拟在箱涵主体靠河道外堆码粘土袋围堰, 围堰顶比河道常年洪水水位高 1.3 m (防渗高度 0.8 m+安全高度 0.5 m)。

1.2.2 地下水

(1) 岩溶水和孔隙水

岩溶水主要赋存于白云岩和灰岩的岩溶以及溶隙中, 包括岩溶裂隙水和岩溶孔隙水, 岩溶水较丰富, 其埋深一般大于 10 m。

(2) 基岩裂隙水

基岩裂隙水主要赋存于节理裂隙和岩层面中, 水量及水文联系受节理裂隙和层面控制, 一般赋存于地表以下 5~8 m 以内的浅部节理裂隙风化带中。

(3) 上层滞水

上层滞水赋存于第四系土体中或岩土接触面附近, 多呈透镜状分布, 特别是受河水水位的影响大, 水量较小且季节性变化较大, 其埋深一般 1~5 m。拟建截污管沟场区地下水水位与河水水位一致, 与沿

线南明河水形成互补, 其水量及水位埋深主要受大气降水和沿河水位的影响, 主要以地下径流方式由地势较高处向较低处径流排泄, 最终流入南明河。

1.3 不良地质

(1) 拟建截污沟施工后在沿线将形成基坑挖方边坡, 边坡应放坡开挖。但 Z6+640—Z6+690 段需要开山开挖, 且临近沪昆高铁南明河大桥桥墩下, 根据《截污沟工程与沪昆高铁交叉施工方案》及其相关会议纪要, 该段基坑开挖严禁爆破作业, 应用机械冷凿开挖, 并需要采取支护措施。

(2) 拟建截污沟沿南明河延伸, 管沟沿线局部地段跨越现有河道 (Z7+715—Z7+770), 河道内残留有一层淤泥质土为主的软土, 该土层工程性能差, 在管道基础施工时, 需要将其清除, 宜采取毛石混凝土换填等基底处理措施。

(3) 拟建截污沟沿南明河右岸延伸, 右岸均为河滩或耕地, 河滩部分 (Z6+690—Z7+040) 土质以淤泥质土为主的软土, 耕地部分为粘质软土, 这两种土层工程性能差, 在截污沟箱涵基础施工时, 需要将其清除, 宜采取毛石混凝土换填等基底处理措施。

2 围堰施工技术

围堰施工前, 为防止河道狭窄水流湍急段将所填筑围堰冲刷走, 先对该区段所需施工围堰区段采用大体积吨袋进行填筑, 根据距离远近采用汽车吊或者挖掘机进行抛填。吨袋内装满符合施工要求的粘土, 并使用铁丝封口。吨袋填至高出正常水位 0.3 m 左右, 顶部宽达到设计坡度需达到的宽度后, 再采用挖掘机配合运输车运输至现场进行围堰填筑, 填筑高度比河道常年洪水水位高 1.3 m, 填筑宽度为车辆行走一侧, 顶宽取 8 m, 非行走车辆一侧, 顶宽取 4 m, 并形成 1:1 的边坡后方可停止填筑。为了加强围堰的防冲刷抗渗挡水能力, 在围堰两侧人工进行土袋围堰堆码, 堆码 1 m 宽时铺设双层彩条布止水, 再进行另外 1 m 土袋围堰堆码作为保护, 土袋围堰堆码要遵循相互搭接, 密实平顺的原则, 增加围堰的整体性和抗冲刷能力, 围堰布置如图 2 所示。

由于吨袋与黏土袋需要大量黏土, 本工程场地内基本为淤泥或泥夹石, 不能满足于挡水围堰的填筑。本工程黏土采用外购的方式, 需现场人工装袋人工堆码。

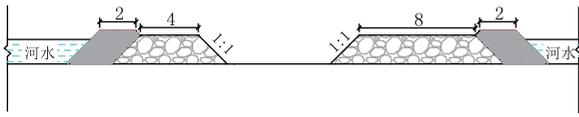


图 2 围堰布置图

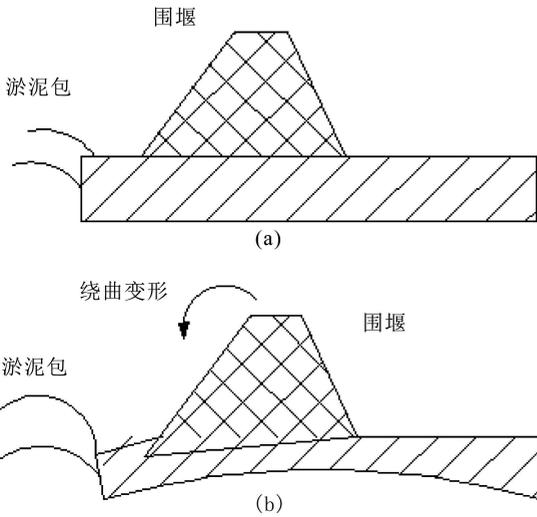
Fig.2 Cofferdam layout

3 围堰变形分析

3.1 变形失稳分析

在施工过程中,将砂袋堆放在围堰外侧,防止渗水及垮塌,对开展围堰施工具有重要作用,如果砂袋施工不准确,造成垮塌失稳,将直接影响施工进度及施工质量,造成大量的成本损失,因此对砂袋围堰进行失稳分析具有重要意义。

在施工过程中由于载荷是随着砂袋的不断增加而不断增加,是一个线性递增过程,导致在围堰及地基的受力不均将会造成部分塌陷失稳,随着砂袋的不断增加,失稳变形也就越剧烈,如图 3 所示,围堰失稳前后的对比图。



(a) 变形前; (b) 变形后。

图 3 围堰变形前后分析

Fig.3 Analysis of cofferdam deformation before and after

通过图 3 可知,围堰失稳将会造成围堰塌陷,给后续的施工带来危害,当围堰不断加重,两侧的淤泥包将会隆起,降低了围堰的稳定性,同时随着河水的压力,围堰将有可能垮塌或者滑移加大后期的工作量^[5-6],因此在本文中把河水压力考虑为极限工况,采用有限元方法模拟分析围堰的变形情况。

3.2 变形因素理论分析

本文分析的围堰结构承载力计算可以采用杨

光华^[7]提出的复杂荷载下地基极限承载力的计算公式,如式(1)所示,而通过上述对围堰破坏形式的破坏分析,可将不同角度下的变形破坏受力 P_c 简化为如图 4 所示。

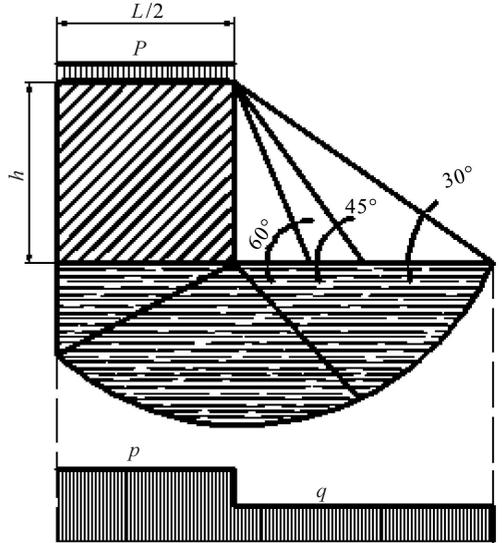


图 4 围堰变形受力简图

Fig.4 Simplified diagram of cofferdam deformation and stress

$$P_c = N_1 \gamma L + CN_2 + qN_q + \bar{q}N_{q_0} \quad (1)$$

式中: γ 为土容重; C 为土的黏聚力; L 为顶部宽度; q 为如图中所示的等效的矩形载荷,文中把载荷施加的范围等效为如图 4 所示的范围; \bar{q} 为复杂荷载的等效附加载荷,具体参数可参考文献[8]和文献[7]; N_q, N_c 是承载力系数,均为关于内摩擦角相关的函数。

$$\begin{cases} N_q = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) e^{\pi \gamma \varphi} \\ N_c = [\tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) e^{\pi \gamma \varphi} - 1] / \tan \varphi \end{cases} \quad (2)$$

参见文献[6]中对填土极限高度的定义,当用来分析围堰时,令 $p_c = \gamma_1 H_{\max}$, $a = \bar{q} / P_c$, γ_1 为围堰的土容重, H_{\max} 为围堰极限高度,结合式(1)式(2),可化解出围堰的高度,如式(3):

$$H_{\max} = \frac{N_1 \gamma L + qN_q + CN_2}{\gamma(1 - aN_q)} \quad (3)$$

结合式(3)及图 4 可知,围堰的填土高度受到坡比及围堰坡顶宽度的限制,也与受到的力密切相关,又由于高度的变化会使围堰的变形随之也发生变化,因此结合规范及实际工况条件,在围堰变形

过程中可将围堰坡度及堰顶宽度作为参考因素。

3.3 围堰结构形式分析

根据《水利水电工程围堰设计规范 SL 645—2013》(在下文中简称“规范”),对围堰结构的要求,堰顶宽度应满足施工和防汛抢险要求,土石围堰宽度一般设置为 4~12 m,对此在本工程项目中设置围堰顶部宽度最小为 4 m。考虑施工机械、材料运输,尤其是钢筋混凝土运输以及装卸需要采用 25 t 吊车,以及人员的行走安全,砂袋围堰两侧需加一定宽度,同时考虑施工人力及材料成本,提出了围堰两边分别加宽 1 m 及 2 m 的方案。而“规范”对于本项目采用的围堰结构坡度没有做出明确限定,因此结合实际工程经验及“规范”中对沙土壤和混泥土坡比要求,设计了 3 种方案分析围堰坡度对变形沉降的影响,分别是 30°、45°及 60°。为了加强围堰的防冲刷抗渗挡水能力,在土袋围堰堆码 1 m 宽时铺设双层彩条布止水,再进行堆码 1 m 宽土袋围堰作为保护。

4 模拟结果与分析

4.1 计算模型及材料参数分析

由于在实际工程中开展多因素试验,会造成成本的浪费及施工进度的延后,因此结合上节对围堰坡度及坡顶宽度的分析和相关学者的研究方法,采用有限元的分析方法对围堰的变形进行分析^[9-14]。砂袋采用 Duncan-Chang 模型进行分析,而堆砌的石块采用 VonMises 模型进行分析,砂袋及堆砌材料模型均采用双线性模型进行分析^[15]。

通过借鉴前人的研究方法,在项目中对砂袋采用 Duncan-Chang 模型,并利用双曲线应力应变曲线原理,通过公式分析弹性模量及泊松比,如式(4)所示:

$$\begin{cases} E_1 = (1-RS)^2 E \\ G = F \log\left(\frac{\sigma}{P}\right) \\ \mu = \frac{G}{(1-A)^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: G, F 为切线模量; R 为破坏比;其中 E, S 和 A 可用式(5)表示:

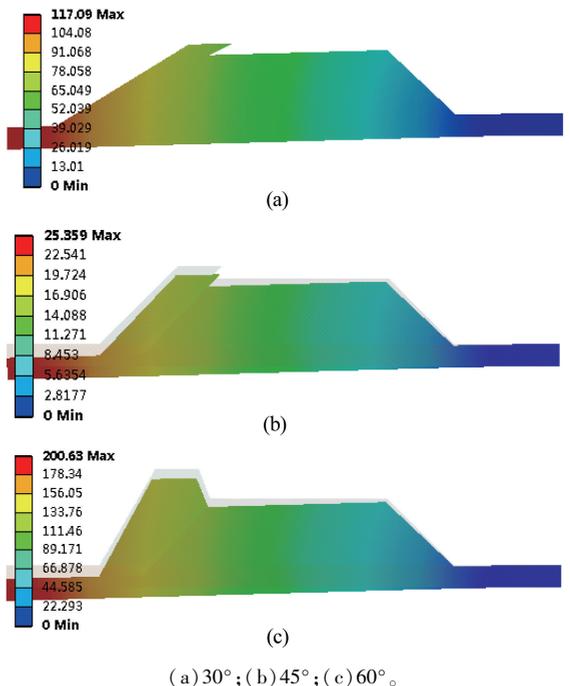
$$\begin{cases} S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_1} \\ A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{E(1-RS)} \\ E = KP[\max(P_1, \sigma_3)/P]N \end{cases} \quad (5)$$

式中: D 为切线模量; P_1 为预固压力; P 为大气压; K, N 分别为模量数与模量指数; S 为应力水平。

在分析过程中,固结应力 σ_3 减小,则 K 模量数可取为原来的 1.2 倍,在接触面上法向刚度取值为常数 10 000 N/cm。其中施工材料的参数通过查阅文献,在本项目的施工砂袋密度设置为 2.7 kN/m³,弹性模量设置为 20 000 kPa,纵向抗拉强度设为 50 kN/m,横向抗拉强度设为 35 kN/m,垂直渗透率为 2×10^{-3} ,砂袋中的含泥量小于 10%,每袋的填充量均大于 80%。

4.2 模拟分析结果讨论

由于围堰模型较大,如果采用三维数值模型,将会增加较大的分析难度及处理时间,因此本文采用二维模型进行分析处理,通过建立三个不同坡度的围堰模型,对相关的材料属性进行加载,实际围堰的工况条件主要是一边受到约束,另一边受到水压及砂袋的自重载荷,为了更好的模拟实际工况,单独设置一边为固定约束,其他部位依据实际工况设定不同的载荷约束,在相同约束条件下,对比分析了不同倾斜角的变形情况,对实际施工的开展提供参考。图 5 为不同倾角情况下,模型的变形云图,从图中可以直观的看到变形的大小及部位。分析求解的结果与图 3 围堰变形前后的分析结论相同,在围堰底部倾角处变形最大。



(a) 30°; (b) 45°; (c) 60°。

图 5 不同倾角下变形

Fig.5 Deformation at different inclination angles

通过图 5 分析可知,在相同约束条件下,模型的变形规律显示出不同的变化,随着角度的加大,变形呈现出先减小后增大的趋势,当角度由 45°增至 60°时变形开始增大。结合图 5 可以得出倾斜角的变化会有一个临界值,当到达临界值时,变形将会达到最小,最大变形量约为到 6%(变形与高度的比值),从一般可接受的工程位移量($\leq 20\%$)分析^[16],上述倾角都能满足要求,但从实际施工成本及施工难度分析,坡度应选择适宜。因为如果坡度过大,会使施工难度增大,坡度过小会使施工成本增加,因此,为了方便施工的顺利开展,本项目在施工中采用 45°进行施工,围堰坡比为 1:1。同时为了验证模拟方案的正确性,在项目中分别选取了小段围堰进行三种不同倾角变形进行监测,监测时主要是对其中一个点的位移进行测量,测量值主要是施工完成后及投入使用前的变形位移值。将测量的值与模拟结果进行比较发现与模拟方案的数值基本保持一致,如图 6 所示,虽然有点误差,可能是由于在模拟分析时采用的材料模型与约束载荷与实际的有点误差,但规律基本一致,因此该模拟分析方法可为后期工程的开展提供参考。

2 个半圆组成,为了简化计算,将荷载有效地加到对应的面上,把轮胎接地形状等效成矩形,同时为了考虑极限工况条件,结合压强公式可知,当面积最小时,压强最大,因此假设重型车单轮胎的着地宽度及长度分别为 0.2 m 和 0.3 m,双轮胎的着地宽度和长度分别为 0.4 m 和 0.3 m,如图 7 所示。

在考虑车载运输过程中的重力问题时,以本工程中最大的混凝土运输车辆满载 15 m³,混凝土总重约取 80 t 作为本文的极限工况条件,对围堰进行变形分析。分别加载到 4 个位置上,每个轮胎下可施加 200 kN 的力。为了加快分析时间,本模型只建立了其中 2 个轮子受力时的简化模型,变形云图如图 8 和 9 所示。

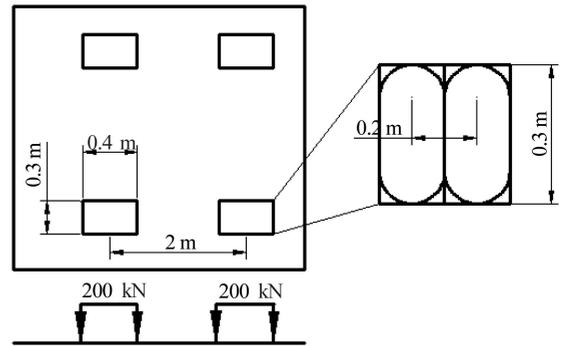


图 7 轮胎受力示意图

Fig.7 Schematic diagram of tire force

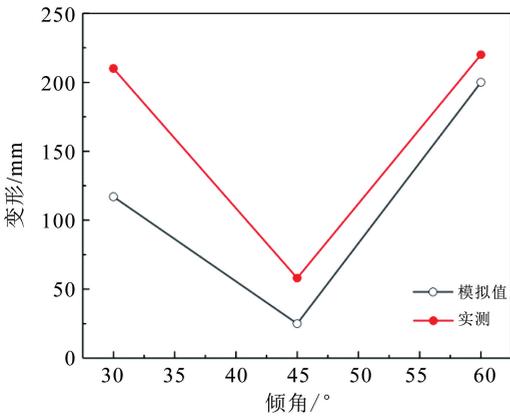


图 6 试验模拟对比

Fig.6 Test simulation comparison

依据上述分析以倾角为 45°的围堰结构进行车载变形分析。根据《公路桥涵设计通用规范》JTG D60—2015 及《水利水电工程围堰设计规范 SL 645—2013》和 3.2 节分析,考虑运输车辆尺寸及施工运输现场实际中重载道路宽一般为 6 m,同时在本项目中为了安全考虑,宽度设置为 6 m 及 8 m 进行极限重载车辆的围堰变形模拟分析。大量文献资料及其实验结果显示,轮胎接地形状由矩形和

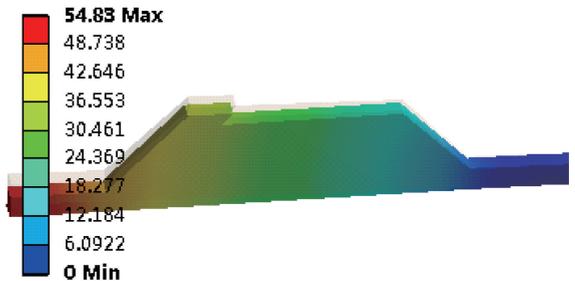


图 8 8 m 宽变形图

Fig.8 Wide deformation of 8 m

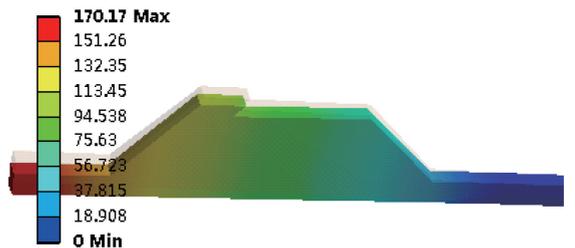


图 9 6 m 宽变形图

Fig.9 Wide deformation of 6 m

图7为重载车辆轮胎受力的简易示意图,将重载车辆的轮胎与路面的接触视为一个矩形形状进行加载,探究分析了围堰宽度分别为6 m和8 m时的变形情况,从图8和图9可以看到,宽度缩短后围堰的变形由54 mm增加到170 mm,都满足可接受的工程位移量($\leq 20\%$)^[16],但考虑到施工成本,因此在围堰施工中可采用围堰宽度为6 m进行施工。

5 结论

通过本项目的实施,可得出以下结论:

(1)结合实际工况条件,通过分析发现在软土地基砂袋砂袋围堰中,当围堰不断加重,两侧的淤泥包将会隆起,降低了围堰的稳定性,同时随着河水的压力,围堰将有可能垮塌或者滑移,加大后期的维护工作量。结合理论分析了影响围堰变形的2个因素,分别为围堰宽度和围堰坡度。

(2)结合围堰设计规范,设计了3种方案分析围堰坡度对变形沉降的影响,分别是30°、45°及60°,并采用有限元法对软土地基砂袋围堰不同坡角进行了变形失稳模拟分析,并提出了最优的砂袋围堰坡角堆砌方案。

(3)在最优坡角围堰结构的基础上,结合围堰设计规范要求,对不同围堰宽度的变形情况进行模拟分析,获得了当围堰宽度分别为6 m和8 m时的变形情况,结果表明均满足可接受的工程位移量,为了降低施工成本可选择6 m宽进行施工。

参考文献:

[1]周辉,方大勇,李川,等.大型土工织物充填袋筑堤时软土地基

变形速率的控制[J].广东水利水电,2004,4(2):20-21.

- [2]陈凌伟.软基上大砂袋围堰的变形与失稳模式研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [3]崔春义,黄建,孙占琦,等.不同水位下钢板桩围堰工作性状有限元分析[J].广西大学学报:自然科学版,2010,35(1):187-192.
- [4]彭飞.共桩型围堰在施工中的力学性能研究[D].武汉:湖北工业大学,2019.
- [5]徐新济,李恒增.结构力学[M].上海:同济大学出版社,2004.
- [6]羊炜.软土地基上模袋围堰稳定分析与方法研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [7]杨光华.路堤及堤坝等复杂荷载作用下软土地基的强度计算[C]//第三届地基处理学术研讨会.杭州:浙江大学出版社,1992:6.
- [8]汪孝炎.南屏大桥引道路堤塌滑原因分析及加固措施[J].中南公路工程,1988(3):1-4.
- [9]念江丽.静水作用下钢板桩围堰数值模拟分析[J].四川水泥,2019(3):258-260.
- [10]孙兵.深水基础锁口钢管桩围堰施工与数值模拟分析[J].西南公路,2018(3):211-214.
- [11]兰德,逯文茹,郭明明.双壁钢围堰受力性能数值模拟分析[J].中国科技信息,2016(19):77-79.
- [12]张德恩.某石化码头干法施工围堰稳定性分析及数值模拟[J].中国水运,2016(7):41-42.
- [13]丁德亮,杨磊,付猛,等.深基坑施工对钢板桩围堰影响的数值模拟分析[J].建筑施工,2014,36(12):1330-1331.
- [14]王朝江,刘国强,杨炳炎.土石围堰饱和和非稳定渗流数值模拟分析[J].水利水电工程设计,2012,31(4):16-18.
- [15]朱国甫,袁建新,刘立胜.三峡工程二期围堰心墙高双墙方案有限元分析[J].岩土力学,1995,16(2):15-23.
- [16]周小文,王晓亮,汪明元,等.膜袋砂围堰荷载下软土地基破坏分区特性研究[J].岩土工程学报,2017,39(S2):45-48.

(责任编辑:于慧梅)

Construction Technology of Sand Bag Cofferdam on Soft Soil and Analysis of Influencing Factors of Deformation and Instability

LOU Zhonghua^{1*}, TUO Fengpeng¹, JIN Zhuangzhuang²

(1.China Railway Fifth Group Construction Engineering Co., Ltd, Guiyang 550009, China;

2.College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025,China)

Abstract: In the construction of the second phase of Nanming river environmental comprehensive improvement project in Guiyang city, the project department carried out an analysis on the construction technology and influencing factors of soft soil sand-bag cofferdam, aiming at the problems of soft soil foundation sand-bag cofferdam's easy deformation and unstable bearing capacity, etc. In this paper, based on the actual working conditions of construction, considering the worst loads, the finite element method was adopted to simulate and analyze soft foundation sandbag cofferdam. With cofferdam angle and width of the cofferdam as influencing factors, the cofferdam deformation under the condition of same water level was obtained, the optimal sandbag cofferdam packing plan was put forward, through the research to improve the sandbag cofferdam mechanical performance, reduce the risk of instability and failure of deformation, and the results of the theoretical simulation optimization are applied to the actual bearing capacity of water retaining cofferdam construction, it can speed up the construction progress, ensure the engineering quality. It provides a theoretical support for the subsequent similar cofferdam construction.

Key words: sand bag cofferdam; deformation and instability; finite element method; optimization

(上接第 97 页)

Probability Prediction of Urban Road Congestion on Rainy Days Considering Correlation

WU Zhong,ZHANG Jinwei,YANG Haifei*,WU Qiong

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098,China)

Abstract: Urban road traffic congestion occurs frequently in rainy days, and the interactive influence of traffic running in each section of the road network is significantly enhanced compared with sunny days. Aiming at the limitation of traditional travel time budget model, this paper improves the calculation method of travel time variance, and proposes a probability prediction model on rainy days congestion considering the correlation between sections. The results of a case study of a path in Nanjing show that compared with the travel time under four conditions and three models, the piecewise combination model considering correlation is closer to the travel time distribution of the global path model, and the prediction precision of congestion probability is more than 90%. The results show that this prediction model can effectively predict urban road congestion on rainy days, which can provide a theoretical basis for road adaptability evaluation and traffic control on rainy days.

Key words: transportation system engineering; congestion probability prediction; rain; travel time; section correlation