

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.001

充填管袋堤坝结构断面优化设计

蔡新^{1,2}, 严伟^{2,3}, 朱杰¹, 郭兴文¹, 江泉¹

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 嘉兴市水利水电勘察设计研究院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: 采用现代设计理论研究充填管袋堤坝结构断面的优化设计问题。构建以充填管袋堤坝结构断面关键几何尺寸为设计变量, 堤坝工程造价最低为目标函数, 设计高水位、设计低水位以及水位骤降 3 种工况下的边坡稳定安全系数等为主要约束条件的结构优化设计数学模型, 借助 FLAC^{3D} 软件进行结构分析并验证其边坡稳定性, 优化模型求解采用复合形法。实例计算结果显示: 优化设计方案与原设计方案相比, 堤坝结构工程造价降低 22.7%, 土工管袋抗拉强度达到临界约束, 堤坝结构的受力和变形状态有所改善, 优化调整效果明显且经济效益显著。

关键词: 充填管袋堤坝; 断面优化设计; 复合形法; 条子泥 I 期匡围工程

中图分类号: TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)01-0001-05

Optimal design of structural section of geotextile tube dam

CAI Xin^{1, 2}, YAN Wei^{2, 3}, ZHU Jie¹, GUO Xingwen¹, JIANG Quan¹

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Water Resources and Hydroelectric Prospecting, Design and Research Institute of Jiaxing City, Jiaxing 314001, China)

Abstract: This paper is concerned with the optimal design of the structural section of the geotextile tube dam via application of modern design theories. To realize this objective, a mathematical model for optimal design is proposed, with the key geometric sizes of dam section taken as the design variables, the minimum construction cost as the objective function, and the safety coefficient of slope stability under the working conditions of high and low design water levels and rapid reduction of water level as the main constraint condition. FLAC^{3D} is used for structural analysis and verification of slope stability where the complex method is used to solve the optimal model. The obtained numerical results show that, compared with the original design scheme, the optimal design scheme can reduce the construction cost by 22.7%, the tensile strength of the geotextile tube reaches the critical constraint value, and the performance of the dam structure with stress and deformation is improved, which indicates the helpful effect of section optimization and high economic benefits.

Key words: geotextile tube dam; optimal design of structural section; complex method; first phase of Tiaozini Reclamation Project

江苏沿海滩涂围垦建设是推动沿海经济快速发展的重要举措之一, 对缓解江苏人多地少的矛盾、补充耕地资源的不足、拓展长三角产业发展空间具有重要作用^[1]。但该地区适宜的建筑材料少, 黏土、石料难觅, 土工织物充填管袋堤坝因其具有就地取材、施工简单、周期短、费用低和对环境污染小等优点, 被广泛应用于海堤建设中^[2-7]。

目前, 国内学者针对堤坝结构的优化设计开展了不少研究, 并取得一定的成果。例如谢清海^[8]通过对

路堤堤型、堤身填筑材料、外坡防护方案、交通道路设置及路堤基础设置等方案的比较与选择,总结了堤防的最优断面形式;李学宁^[9]在数据采集基础上进行了堤防的优化设计;黄井武^[10]根据软土计算模型和有限元技术对软土上的海堤结构进行优化分析,得到提高海堤整体稳定性并节约投资成本的设计方案;邹世平^[11]研究并提出了一种基于单位工程投资最省的堤型结构优化数学模型,结合标准海堤工程实例分析了堤型结构优化的经济效益。但这些研究往往是通过给定的几个典型方案进行比较来优选断面,只是得到较满意的可行方案。笔者结合条子泥 I 期匡围工程实例,采用现代设计理论及方法,对南堤典型段充填管袋堤坝结构进行断面优化设计研究,提出堤坝结构的最优断面形式。

1 充填管袋堤坝结构断面优化设计数学模型

充填管袋筑坝就是利用高压水枪将滩地上的细粉砂射水冲起,然后用泥浆泵经管路将砂水混合物充灌入袋内,由于管袋材料的弹性回复力和砂粒自身的重力作用,同时由于管袋的透水性,大部分水体迅速通过袋布过滤排出,而细砂颗粒则沉淀在管袋中,脱水固结后成为具有一定抗剪强度的土体,由管袋堆叠成坝芯,外面再构筑防护层而形成堤坝。

根据条子泥 I 期匡围工程充填管袋堤坝结构设计断面的特点,结合规范规程及安全经济的设计要求,建立其断面优化设计数学模型。

1.1 设计变量

设计变量是优化设计中某些待定参数,一般包括可变设计变量和不变设计变量(即预定参数)。充填管袋堤坝结构的断面参数包含坝顶宽、坝高、上下游坡比、管袋口径、平台宽及平台高程。如图 1 所示, H 为坝高, H_1 、 H_2 、 H_3 为上下游平台高, B 为坝顶宽, B_1 、 B_2 、 B_3 为平台宽, m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 分别为临水侧下部坡比、临水侧上部坡比、背水侧上部坡比、背水侧下部坡比。在这些参数中,坝顶宽、坝高、管袋宽、平台宽及平台位置都是根据实际工程规划确定的,是给定参数。所以,本文选取决定断面形状的关键几何尺寸——上下游坡比作为设计变量,即设计变量为 $\mathbf{M} = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4]^T$ 。预定参数按原设计值,定为: $B=8$, $B_1=5$, $B_2=3$, $B_3=3$, $H=7$, $H_1=4$, $H_2=3.5$, $H_3=2$ 。

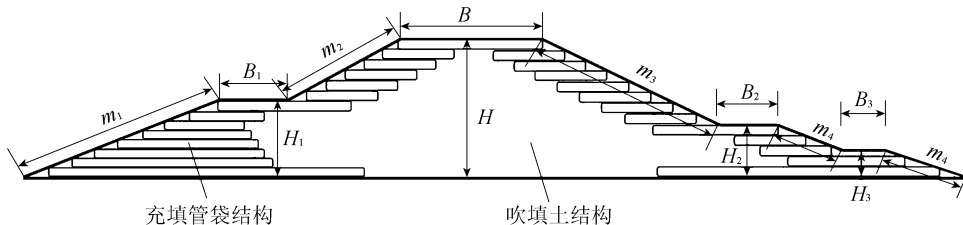


图 1 充填管袋堤坝结构断面几何尺寸示意图(单位:m)

Fig. 1 Geometric size of structural section of geotextile tube dam (units: m)

1.2 目标函数

目标函数是判别设计方案优劣的数学表达式,是设计变量的函数。工程结构优化问题一般选取造价最低、断面面积最小等作为优化目标。对于充填管袋堤坝,工程造价与堤坝断面面积、管袋口径、管袋价格、施工工艺等有关,但主要还是由断面面积和管袋用量决定。本文选取堤坝结构单位宽度的工程造价最低作为目标函数,按目前市场价,充填砂土的单价为 9.81 元/ m^3 ,管袋的价格为 10.52 元/ m^2 ,据初步估算管袋面积可按充填砂土体积的 1/100 计算,目标函数为

$$F(m) = (8m_1 + 16.5m_2 + 18.375m_3 + 6.125m_4 + 92.5) \times 9.81 + (8m_1 + 16.5m_2 + 18.375m_3 + 6.125m_4 + 92.5) \times 1\% \times 10.52 \quad (1)$$

1.3 约束条件

约束条件是有关规范、规程及施工、构造等方面的限制条件,一般包括几何和性态等方面的要求。

a. 几何约束条件。几何约束条件是指堤坝在修建过程中应该遵循的尺寸限制条件。按工程实际情况,本文在优化过程中将上下游坡比放宽搜索范围为 1 : 1.0 ~ 1 : 4.0,即 $1.0 \leq m_1 \leq 4.0$, $1.0 \leq m_2 \leq 4.0$, $1.0 \leq m_3 \leq 4.0$, $1.0 \leq m_4 \leq 4.0$ 。

b. 性态约束条件。该条件主要反映充填管袋堤坝结构有关强度、刚度及稳定性方面的要求。在管袋正

常工作时,管袋堤坝的结构安全主要取决于其边坡稳定性,选取设计高水位、设计低水位以及水位骤降 3 种工况下的边坡稳定安全系数作为优化的约束条件。本文参照 GB 50286—98《堤防工程设计规范》^[12] 确定堤坝水位骤降工况下的边坡稳定安全系数不应小于 1.30,以保证足够的稳定性。

c. 管袋强度。充填管袋堤坝主要依靠管袋的包裹束缚作用和袋体的抗拉性能来维持坝体的稳定性,因此,在对断面进行优化设计研究时必须检验管袋袋体强度条件,即其工作的拉应力是否小于它的抗拉强度 10 kN/m。

2 结构分析计算模型

结构分析借助大型岩土软件 FLAC^{3D}^[13],参数化建模,具体结构断面的计算模型如图 2 所示。水平方向为 x 方向(向右为正);竖直方向为 z 方向(向上为正),顶部高程为 9.0 m,底部高程为-40.0 m; y 方向取单位长度。模型底部采用固端约束, x 、 y 方向两侧边界为法向约束,顶部自由。模型共有 2 696 个节点,12 250 个单元。

管袋下地基土层大致为 6 层,土体材料采用摩尔-库伦本构模型。土工管袋由一种典型的韧性材料制成,只能抗拉,不能受压。与传统的黏土、堆石堤坝相比,管袋中的砂土黏聚力小,土工管袋堤坝主要依靠管袋的抗拉强度和管袋的包裹作用来维持坝体稳定。因此,在对管袋堤坝进行结构分析时,选择与之结构受力特点相对应的土工格栅单元模拟^[14]。土体及土工管袋材料参数如下:厚度为 0.5 mm,泊松比为 0.3,弹性模量为 500 MPa,切向刚度为 100 kPa/m,抗拉强度为 15 kN/m,内摩擦角为 18°,黏聚力为 10 kPa。土体材料参数如表 1 所示。

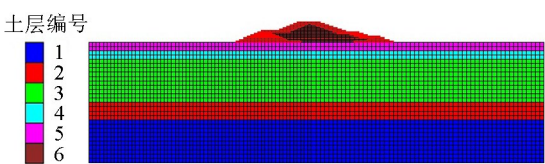


图 2 充填管袋堤坝结构分析计算模型
Fig. 2 Numerical model for structural section analysis of geotextile tube dam

表 1 土体材料参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层	土层名称	密度/(g · cm ⁻³)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	粉 砂	1.85	30.0	11.3	8	29.9
2	粉质黏土夹粉质壤土	1.91	20.8	9.6	10	16.1
3	粉 砂	1.86	30.0	11.3	11	16.5
4	粉砂夹轻粉质砂壤土	1.85	20.8	9.6	7	26.5
5	轻粉质砂壤土	1.82	20.8	9.6	9	16.1
6	堤 身 土	1.82	30.0	11.3	10	14.0

设计高水位、设计低水位及水位骤降 3 种工况的上下游水位如表 2 所示。

表 2 南堤计算工况

Table 2 Working condition for calculation of south bank

工况	堤外水位高程/m	堤内水位高程/m
1	7.10	匡河常水位 1.80
2	2.00	匡河高水位 2.50
3	7.10 降到 2.00	匡河高水位 2.50

3 优化设计方法及流程

适合于工程结构优化的方法较多,复合形法^[15]是常用的有效、快速收敛的方法,其基本思路是:首先在可行域内构造一个初始复合形,然后逐一比较各顶点的函数值,并用可行域内能使目标函数值有所改善且满足约束条件的新点代替函数值最劣的顶点,构成新的复合形。如此反复,复合形不断变形、转移与缩小,逐步逼近最优点。复合形法在迭代过程中不仅要求目标函数值有所改善,还要求新顶点满足约束条件,因此其比单纯形法更可靠、收敛更快,能有效解决不等式约束的问题。

复合形法优化的一般步骤如下:

- a. 生成初始复合形顶点。
- b. 计算中心点 M_c ,并检查可行性。

$$M_c = \frac{1}{2n-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq H}}^{2n} M_k$$

(2)

式中: M_c ——中心点; n ——设计变量个数; k ——复合形顶点个数; H ——目标函数最大值的点序号; M_k ——复合形顶点。

c. 求反射点 M_R , 检验其可行性。

$$M_R = M_c + \alpha(M_c - M_H)$$

(3)

式中: M_R ——反射点; α ——反射系数; M_H ——目标函数最大值点。

d. 计算并比较反射点与最坏点的函数值。

e. 终止搜索, 得到最优解。反复执行以上过程, 当复合形各顶点处的目标函数值满足式(4)时可终止搜索, 认为得到了最优解。

$$\left\{ \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k [F(M_c) - F(M_i)]^2 \right\}^{1/2} \leq \varepsilon$$

(4)

式中: $F(M_c)$ ——中心点函数值; $F(M_i)$ ——复合形顶点函数值; ε ——预先给定的正数, 根据目标函数值的大小而定, 一般可取 $1/100 \sim 1/1\,000$ 。

本文结合复合形法与有限元法, 对充填管袋堤坝结构断面形式进行寻优搜索。算法首先生成初始设计变量值(初始复合形顶点), 然后根据设计变量值生成参数化建模文本文件, 并调用 FLAC^{3D} 软件建立堤坝结构有限元模型, 模型用于堤坝结构分析以判断是否满足约束条件。之后对各可行点计算目标函数值, 并根据目标函数值对设计变量进行调整, 生成新的堤坝结构有限元模型。如此不断迭代寻优, 直到满足终止条件、求得最优结果。

4 优化设计结果及分析

根据所建立的优化设计模型, 利用 FLAC^{3D} 软件进行结构分析, 通过复合形法寻优搜索, 得到最优设计方案。原设计方案: $M = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4]^T = [2.5 \ 2.5 \ 3.0 \ 3.0]^T$ 。优化设计计算结果列于表 3 中。

表 3 充填管袋堤坝结构断面优化设计结果

Table 3 Results of optimal design of structural section of geotextile tube dam

方案	单位宽度 工程造价/ 元	坝体最大 压应力/ MPa	管袋最大 拉应力/ MPa	竖向 位移/cm	水平 位移/cm	边坡稳定 安全系数	m_1	m_2	m_3	m_4
原设计	2 253	1.096	1.082	12.96	3.01	1.57	2.50	2.50	3.00	3.00
优化设计	1 742	1.082	1.993	12.04	2.75	1.38	1.83	1.56	1.80	1.59

由表 3 可知: 优化设计方案与原设计方案相比, m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 均有明显减小, 单位宽度工程造价由 2 253 元降为 1 742 元, 减小约 22.7%, 优化效果显著; 坝体最大压应力由 1.096 MPa 变为 1.082 MPa, 减少约 1.2%; 土工管袋所受最大拉应力由 1.082 MPa 变为 1.993 MPa, 换算成单位厚度的抗拉强度, 即 9.97 kN/m, 已接近土工管袋抗拉强度 10 kN/m; 竖向位移由 12.96 cm 降为 12.14 cm, 减小约 6.3%; 水平位移由 3.01 cm 降为 2.84 cm, 减小约 5.6%; 水位骤降工况下的边坡稳定安全系数由 1.57 降为 1.38。经过优化设计后, 堤坝结构的受力和变形状态有所改善, 强度、刚度、稳定性均满足规范要求, 表明充填管袋堤坝结构断面优化设计方案是安全可靠、经济合理的, 可为围垦堤防设计提供参考。

5 结 论

- a. 运用现代设计理论, 在满足几何、性态以及抗拉强度约束的条件下, 对充填管袋堤坝结构断面进行优化设计是可行、有效的。
- b. 优化设计方案的充填管袋堤坝工程造价比原设计方案有较大幅度的减小, 经济效益显著。
- c. 优化设计方案的充填管袋堤坝断面结构应力及位移状况有所改善, 边坡稳定及管袋强度均满足规范要求, 表明优化设计方案安全可靠、经济合理。

参考文献:

[1] 中国水利学会围涂开发专业委员会. 中国围海工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

[2] 蓝蓉. 滇池环保疏浚工程中的新型土工管袋围埝: 国内首次土工管袋围埝生产性试验工程设计[J]. 云南环境科学,

- 2002,21(1):39-42. (LAN Rong. New pipe-type geotech-bag for box dam in Dianchi Lake dredging project[J]. Yunnan Environment Science,2002,21(1):39-42. (in Chinese))
- [3] 王松. 环保疏浚联合土工管袋用于湖库底泥的脱水减容[J]. 中国给水排水,2011,27(8):47-51. (WANG Song. Environment-friendly dredging with geotextile tube for dewatering and volume reduction of sediments in lake and reservoir[J]. China Water & Wastewater,2011,27(8):47-51. (in Chinese))
- [4] 张文斌,谭家华. 土工织物充填管状袋的设计研究[J]. 中国海湾建设,2004(5):25-29. (ZHANG Wenbin,TAN Jiahua. Research on designs of geotextile tubes[J]. China Harbour Engineering,2004(5):25-29. (in Chinese))
- [5] 束一鸣,杨威,武良金,等. 河口筑堤土料的工程现场试验[J]. 水利水电科技进展,2005,24(5):34-36. (SHU Yiming, YANG Wei, WU Liangjin, et al. Field experiment on soil material for banking at estuaries[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 24(5): 34-36. (in Chinese))
- [6] 林刚,束一鸣. 充填管袋填筑的原理与实践[J]. 人民长江,2005,36(2):25-27. (LIN Gang,SHU Yiming. Principal of mud-filled bag embankment and practice[J]. Yangtze River,2005,36(2):25-27. (in Chinese))
- [7] 束一鸣,吴海民. 围垦堤防施工技术研究[J]. 水利经济,2012,30(3):31-34. (SHU Yiming, WU Haimin. Construction techniques for reclamation dikes in coastal areas[J]. Journal of Economics of Water Resources,2012,30(3):31-34. (in Chinese))
- [8] 谢清海. 开敞式深港软基堤防工程断面优化设计[J]. 中国农村水利水电,2008(5):86-87. (XIE Qinghai. Section optimization design of deep soft soil embankment engineering[J]. China Rural Water and Hydropower,2008(5):86-87. (in Chinese))
- [9] 李学宁. 堤身的数据采集及断面设计的几点建议[J]. 江西水利科技,2002,28(3):144-156. (LI Xuening. Some suggestions of collecting the data of dyke body and its cross-section design[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology,2002, 28(3):144-156. (in Chinese))
- [10] 黄井武. 软基上海堤结构优化研究[J]. 黑龙江水专学报,2008,35(2):6-9. (HUANG Jingwu. Optimized study of section pattern of the coastal levee[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering,2008,35(2):6-9. (in Chinese))
- [11] 邹世平. 广西海堤堤型结构优化研究[J]. 广西水利水电,2009(3):88-92. (ZOU Shiping. Optimization of sea dike structure in Guangxi[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering,2009(3):88-92. (in Chinese))
- [12] GB 50286—1998 堤防工程设计规范[S].
- [13] 陈育明,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [14] 赵晓光,束一鸣,杨丽洁. 储淤管袋作为固废库坝的稳定分析[J]. 水利与建筑工程学报,2007,5(1):93-95. (ZHAO Xiaoguang,SHU Yiming,YANG Lijie. Stability analysis of embankment for blocking solid reject by using geotubes[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2007, 5(1):93-95. (in Chinese))
- [15] 蔡新,郭兴文,张旭明. 工程结构优化设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.