

文章编号:1671-6833(2012)05-0096-04

黄河下游预应力管桩丁坝结构优化设计研究

张宝森^{1,2}, 王忠福³, 田治宗^{1,2}, 谢志刚^{1,2}

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450000; 2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450000; 3. 华北水利水电学院 岩土工程与土工结构研究院, 河南 郑州 450011)

摘要: 在分析传统堆石丁坝特点的基础上, 提出了新型预应力管桩丁坝. 以花园口为例, 结合正交试验原理对丁坝结构进行设计, 采用 FLAC3D 有限差分程序对其进行数值模拟, 分析预应力管桩丁坝结构参数变化对丁坝整体位移的影响规律. 数值计算结果表明, 对丁坝水平位移的贡献主次顺序为: 冲刷深度 > 桩长 > 流速 > 桩间距 > 桩径 > 联系梁尺寸; 在洪水流量为 4 000 m³, 水流速度为 3 m/s, 冲刷深度为 16 m 的工况下, 桩长为 25 m, 桩间距为 0.6 m, 桩径为 600 mm, 联系梁尺寸为 0.6 m × 0.6 m 的丁坝结构方案最优, 强度折减法计算丁坝安全系数为 1.32.

关键词: 丁坝; 正交设计; FLAC3D; 预应力管桩; 冲刷深度

中图分类号: TV85 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.05.021

0 引言

丁坝作为河道整治、护岸工程中的常用建筑物, 在挑流促淤、保滩护岸中的作用已得到了广泛的认同. 传统散石丁坝在绕坝水流作用下, 险情往往从枯水位以下部位开始, 早期难以发现, 始终存在着保护困难、屡修屡坏的顽疾, 年运行维护费用非常高. 为了彻底改变这种被动局面, 工程技术人员提出了一种可生根的桩式丁坝结构型式, 即以排桩为主体并通过联系梁加以连接形成的排桩式直立丁坝. 排桩式丁坝的基础很深, 基本不依赖堆石防护, 有效地解决了丁坝的稳定性问题. 和传统的堆石丁坝相比, 不易损毁, 运行期维修工程量小, 并且避免了频繁抢修的弊端^[1-7].

预应力管桩丁坝的出现则完全改变了堆石丁坝大量块石流失、护面板因复杂的流场作用而遭到破坏的弊病, 同时结构简单、施工机械化程度高, 运用安全可靠. 与堆石丁坝相比, 预应力管桩丁坝能有效地避免水流冲刷导致块石大量流失, 提高工程效率, 节省工程造价. 为了研究适合黄河下游河道整治的丁坝结构, 笔者以花园口为例, 考虑不同洪水流量、流速、桩长、桩径、桩间距、联系梁尺寸及冲刷深度等因素, 利用 FLAC3D 程序, 采

用正交试验的方法对丁坝结构进行优化设计研究. 提出适合黄河河道特点的河道整治工程的坝体结构, 为河道整治工程试点方案坝型设计和节点工程的坝型设计提供依据, 也为现有工程抢险提供技术支撑.

1 预应力管桩丁坝结构正交试验设计

正交试验设计可以在不影响全面了解对象中诸多因素对其性能指标影响的条件下, 大大减少试验次数, 同时它又可以通过“极差分析法”或者“因子的变差平方和”分析试验结果, 找出主次因子, 分辨出主次因子对指标性能的影响程度, 从而找出最佳的生产条件.

在 X_{ij} 下进行试验得到因素 j 第 i 水平的试验结果指标 Y_{ij} , Y_{ij} 是服从正态分布的随机变量, 在 X_{ij} 下进行 n 次试验可以得到 n 个试验结果 Y_{ijk} ($k = 1, 2, \dots, n$). 有关计算参数如下:

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^n Y_{ijk} \quad (1)$$

评价因素显著性的参数为极差 R_j , 公式为

$$R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{nj}\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{nj}\} \quad (2)$$

极差越大说明该因素的水平改变对试验结果

收稿日期:2012-04-01; 修订日期:2012-06-20

基金项目: 农业科技成果转化资金项目(2011GB23320003)

作者简介: 张宝森(1965-), 男, 黄河水利科学研究院高级工程师, 主要从事防汛抢险技术, 水利工程管理等方面的研究, E-mail: zbsnzz@163.com.

影响也越大,极差最大的因素也就是最主要的因素. 极差越小的因素虽然不能说是不重要的因素,但至少可以肯定当该因素在所选用的范围内变化时,对该指标影响不大^[8-9].

丁坝是黄河下游河道整治工程的重要组成,对于丁坝的结构设计,目前国内外均无标准和规范,也没有明确的设计参数指标. 根据桩式丁坝受力特性研究,在设计时主要以洪水水位及流量、最大冲坑深度、桩参数及联系梁尺寸为设计参数指标. 归纳起来主要有以下几种:①洪水流量、流速;②桩长、桩径、桩间距;③联系梁尺寸;④冲刷深度. 在考虑上述参数的基础上,对丁坝的变形进行了正交分析设计. 试验共 6 个因素,考虑到生产时间的可能和模拟设计的可行性,每种因素取三个水平,试验参数水平见表 1.

表 1 试验参数水平表
Tab. 1 Level of test parameters

| 因素 | 参数水平 | | |
|-----------------------------|------|-----|-----|
| 流速 / (m · s ⁻¹) | 2.5 | 2.8 | 3.0 |
| 桩长 / m | 20 | 25 | 30 |
| 桩径 / m | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
| 桩间距 / m | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
| 联系梁尺寸 / m | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| 冲刷深度 / m | 8 | 12 | 16 |

假设各因素间无交互作用,对所选择的 6 个因素按正交分析表安排试验. 3 水平 7 因素的正交试验最少试验次数为 18 次,即为 L₁₈(3⁷). 按表 1 确定的 3 水平参数,各水平正交因素如表 2 所示. 以丁坝水平位移为评价对象的单指标多因素的分析中,其单指标多因素的显著性分析可采用线性模型为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_i X_i + e, \tag{3}$$

式中:β₀ 为常数项;β_i 为自变量;X_i 为回归系数;e 为随即误差,服从标准正态分布.

如果在模型中令某些因素的主效应或交互效应为零. 而其余效应的最小二乘估计不受影响,即与在假定上述效应不为零时所得的估计一致. 保证对每个效应的估计不受到其他效应的影响,则设计矩阵 X 必须满足如下条件

$$S = X^T X = \begin{bmatrix} S_{11} & & & 0 \\ & S_{22} & & \\ & & \cdots & \\ 0 & & & S_{rr} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

式中:S₁₁, S₂₂, ⋯, S_{rr} 是方阵,每块相当一组效应. 对于某个因素变量 X_i 对指标 γ 的显著性次序

分析,不要求做定量结论,只要求辨明 X_i 对因变量的显著性影响次序. 因此无须求解式(3) 中的回归系数,只需按式(4) 设计试验. 此时,正交试验可满足模型要求,极差 R_i 可按式(2) 求得.

表 2 正交设计表
Tab. 2 Orthogonal design

| 方案 | 冲刷深度 / m | 流速 / (m · s ⁻¹) | 桩长 / m | 桩径 / m | 桩间距 / m | 联系梁尺寸 / m |
|----|----------|-----------------------------|--------|--------|---------|-----------|
| 1 | 8 | 2.5 | 20 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 2 | 8 | 2.8 | 25 | 0.6 | 0.6 | 0.5 |
| 3 | 8 | 3.0 | 30 | 0.8 | 0.8 | 0.6 |
| 4 | 12 | 2.5 | 20 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| 5 | 12 | 2.8 | 25 | 0.8 | 0.8 | 0.4 |
| 6 | 12 | 3.0 | 30 | 0.4 | 0.4 | 0.5 |
| 7 | 16 | 2.5 | 25 | 0.4 | 0.8 | 0.5 |
| 8 | 16 | 2.8 | 30 | 0.6 | 0.4 | 0.6 |
| 9 | 16 | 3.0 | 20 | 0.8 | 0.6 | 0.4 |
| 10 | 8 | 2.5 | 30 | 0.8 | 0.6 | 0.5 |
| 11 | 8 | 2.8 | 20 | 0.4 | 0.8 | 0.6 |
| 12 | 8 | 3.0 | 25 | 0.6 | 0.4 | 0.4 |
| 13 | 12 | 2.5 | 25 | 0.8 | 0.4 | 0.6 |
| 14 | 12 | 2.8 | 30 | 0.4 | 0.6 | 0.4 |
| 15 | 12 | 3.0 | 20 | 0.6 | 0.8 | 0.5 |
| 16 | 16 | 2.5 | 30 | 0.6 | 0.8 | 0.4 |
| 17 | 16 | 2.8 | 20 | 0.8 | 0.4 | 0.5 |
| 18 | 16 | 3.0 | 25 | 0.4 | 0.6 | 0.6 |

2 预应力管桩丁坝位移数值分析

计算软件采用美国 Itasca 公司开发的有限差分计算软件 FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua). 它可以模拟岩土或其他材料的三维力学行为,能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为,特别适用于模拟大变形.

2.1 本构模型

FLAC3D 中有很多适用于岩土工程的材料模型,而合理选取材料的本构模型是正确解决问题的前提条件,桩周围的土体以剪切破坏或张拉破坏为主,根据经典的土力学理论,作者选用了 Mohr-Coulomb 破坏准则(图 1 所示),该模型屈服

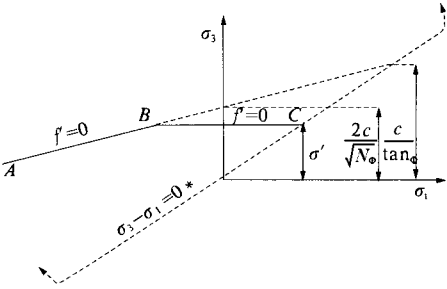


图 1 Mohr-coulomb 破坏准则
Fig. 1 Mohr-coulomb Failure Criterion

函数的表达式为

$$f = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi}, \quad (5)$$

式中: $N_\phi = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$; c 为黏聚力; ϕ 为内摩擦角;

σ_1, σ_3 分别为最大和最小主应力。

预应力管桩及联系梁的模拟采用程序内置的

pile 和 beam 结构单元。

2.2 计算参数

根据黄河下游河道整治工程实际情况,以花园口为例,数值计算参数见表 3 所示。

表 3 花园口地层岩土物理力学性质表

| Tab.3 Stratigraphic geotechnical physical and mechanical properties of HuaYuanKou | | | | | | | |
|---|-----------|--------------------------------|-----------|------------------------------------|------------|-----------|------------|
| 岩土名称 | 天然含水量 / % | 质量密度 / (g · cm ⁻³) | 天然孔隙比 e | 压缩系数 | 压缩模量 / MPa | 直剪(快剪) | |
| | | | | | | 黏聚力 / kPa | 内摩擦角 / (°) |
| 砂壤土 | 24.9 | 1.85 | 0.781 | 0.099 | 17.19 | 10 | 15 |
| 细砂 | 19.6 | 1.88 | 0.664 | 0.081 | 22.21 | 7.5 | 28 |
| 粉质黏土 | 23 | 2.02 | 0.643 | 8.5 | 28.4 | 22.4 | 18.2 |
| 管桩 | | 2.5 | | $E = 36 \text{ GPa}, \mu = 0.18$ | | | |
| 梁 | | 2.5 | | $E = 32.5 \text{ GPa}, \mu = 0.25$ | | | |

2.3 边界条件及加载方式

根据地质资料,对其进行概化建立数值计算模型如图 2 所示. 地层岩性主要为砂壤土、细砂及粉质黏土,上部为丁坝及连坝. 边界条件为:在 X 方向上,即模型左右边为位移边界条件,限定 X 方向位移;在 Y 方向上限定上下游位移;在 Z 方向上,模型底部为固定边界条件,顶部为自由边界条件. 施加初始重力荷载,在丁坝上游及桩侧施加动静水压力。

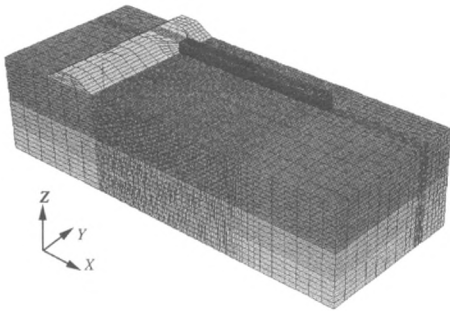


图 2 计算模型图
Fig.2 Computational model

3 预应力管桩丁坝变形数值模拟及结果分析

根据正交试验表,利用 FLAC3D 程序进行数值计算,得出丁坝坝头最大变形点的顺河方向位移值,计算结果见表 4。

极差分析中,极差的大小顺序代表了各因子对指标影响大小的相应顺序. 丁坝坝头最大顺河方向位移极差值见表 5 和图 3。

从表 5 和图 3 中可以看出,对丁坝顺河方向位移影响因子的主次顺序为:ACBEDF,即顺序为冲刷深度、桩长、流速、桩间距、桩径及联系梁尺寸。

由于丁坝的变形大小与稳定性直接相关,变形越小,丁坝相对越稳定. 综合安全性及经济造价,最终选定方案为桩长为 25 m,桩间距为 0.6 m,桩径为 600 mm,联系梁尺寸为 0.6m × 0.6m。

表 4 正交设计计算结果表

| Tab.4 Orthogonal design calculations mm | | | |
|---|---------|------|---------|
| 计算工况 | 坝头最大位移值 | 计算工况 | 坝头最大位移值 |
| 1 | 15.0 | 10 | 8.0 |
| 2 | 16.0 | 11 | 21.0 |
| 3 | 13.0 | 12 | 14.0 |
| 4 | 24.0 | 13 | 20.0 |
| 5 | 22.0 | 14 | 18.0 |
| 6 | 18.0 | 15 | 27.0 |
| 7 | 27.0 | 16 | 24.0 |
| 8 | 23.0 | 17 | 32.0 |
| 9 | 35.0 | 18 | 28.0 |

表 5 坝头最大水平位移极差表

| Tab.5 The top position of dammaximum horizontal displacement of the poor | | | | | | |
|--|------|-----|-----|-----|-----|-------|
| | A | B | C | D | E | F |
| | 冲刷深度 | 流速 | 桩长 | 桩径 | 桩间距 | 联系梁尺寸 |
| K _{1j} | 87 | 118 | 154 | 130 | 123 | 128 |
| K _{2j} | 129 | 132 | 127 | 128 | 129 | 128 |
| K _{3j} | 169 | 135 | 104 | 127 | 134 | 129 |
| R _j | 82 | 17 | 50 | 4 | 11 | 1 |

4 丁坝结构优化方案计算结果

采用上述优化方案对花园口丁坝变形情况进行分析,计算工况为洪水流量 4 000 m³,水流速度 3 m/s,冲刷深度为 16 m,桩及结构参数如上述。

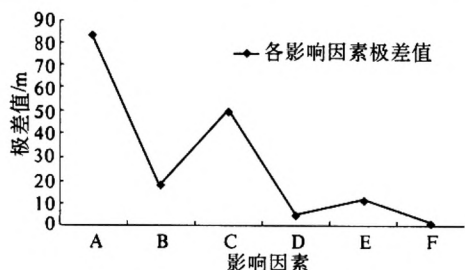


图3 各因素极差曲线图

Fig. 3 Factor to poor curve

图4为丁坝顺河方向位移变化等值云图,从图中可以看出,丁坝整体顺河方向变形值在0.5~2.8 cm之间,丁坝迎水面位移值明显大于丁坝背水面,丁坝迎水面最大变形值约2.8 cm,位于丁坝坝头附近。图5和图6分别为预应力管桩剪力及弯矩分布图。从图中可以看出,预应力管桩所受最大剪应力值约为11.7 kN,整个坝体管桩最大弯矩值约为203.4 kN·m。

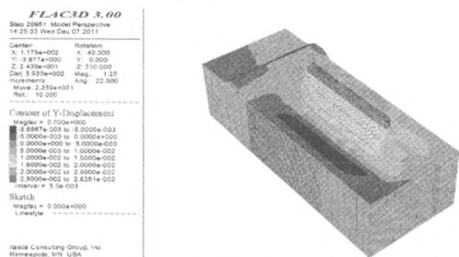


图4 丁坝整体变形顺河方向(Y方向)位移等值云图

Fig. 4 The groin overall deformation along the river direction (y direction) displacement of the equivalent of cloud images

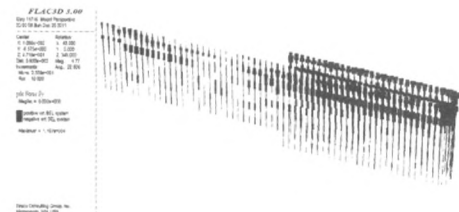


图5 预应力管桩剪力分布图

Fig. 5 Prestressed piles shear distribution

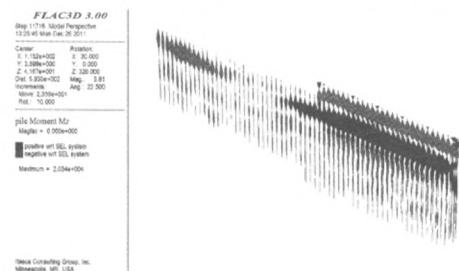


图6 预应力管桩弯矩分布图

Fig. 6 Prestressed pile moment distribution

采用强度折减法对丁坝的整体稳定性进行了分析^[10],强度折减法所得安全系数为1.32。

5 结论

(1)以花园口为例,采用正交设计的方法,对丁坝管桩结构进行优化,计算结果表明,对丁坝顺河方向位移影响因子的主次顺序为冲刷深度、桩长、流速、桩间距、桩径及联系梁尺寸。由于丁坝的变形大小与稳定性直接相关,变形越小,丁坝相对越稳定。综合安全性及经济造价,最终选定方案为桩长为25 m,桩间距为0.6 m,桩径为600 mm,联系梁尺寸为0.6 m×0.6 m。

(2)采用强度折减法对预应力管桩丁坝进行了稳定性分析,计算结果表明,采用优化方案,在设计洪水流量4 000 m³/s时,流速3.0 m/s,冲刷深度16 m工况下,丁坝的稳定性系数为1.32,满足设计要求。

(3)预应力混凝土管桩无论是在设计理论、施工技术还是应用范围等方面,近年来都已经得到了较大发展,在工程质量、工期、造价及环境保护等方面,比其它桩型有着明显的优势。随着桩式结构丁坝水上施工技术的研究和日趋完善,必将会在黄河下游河道整治工程上,特别是在防汛抢险方面发挥越来越重要的作用。预应力混凝土管桩基础的应用将会给水利工程建设带来更大的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 胡一三,张红武,刘贵芝,等.黄河下游游荡性河道整治[M].郑州:黄河水利出版社,1998.
- [2] 罗庆君.防汛抢险技术[M].郑州:黄河水利出版社,2000.
- [3] 张宝森,朱太顺,陈银太,等.黄河治河工程现代抢险技术研究[M].郑州:黄河水利出版社,2004.
- [4] 张宝森,郭全明.黄河河道整治工程险情分析[J].地质灾害与环境保护,2002(3):1-5.
- [5] 张宝森.不抢险PHC管桩丁坝研究[J].人民黄河,2008(10):22-23.
- [6] 徐新跃.预应力管桩应用中的若干问题[J].建筑技术,2003(3):187-189.
- [7] 江恩惠,梁跃平,张原锋,等.新形势下黄河下游游荡性河道整治工程设计有关问题探讨[J].泥沙研究,1999(4):28-33.
- [8] 姜同川.正交试验设计[M].济南:山东科学技术出版社,1995.
- [9] 项可风,吴启光.试验设计与数据分析[M].上海:上海科学技术出版社,1989.
- [10] 栾茂田,武亚军,年廷凯.强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J].防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.

(下转第129页)

- [J]. 微计算机信息, 2009, 25(3): 218 - 219.
- [6] THOMAS H, CORMEN CHARLES E, LEISERSON, et al. 算法导论[M]. 潘金贵译. 北京: 机械工业出版社, 2006. 9: 366.
- [7] 许光汉. 用广度优先搜索求割点和块的算法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1991(2): 87 - 94.
- [8] 王海英, 黄强. 图论算法及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [9] LI Wing-ning. An efficient algorithm for computing a minimum node cutset from a vertex-disjoint path set for timing optimization[C]//ACM symposium on Applied Computing, Nashville, Tennessee, USA, Feb, 1995: 56 - 60.
- [10] 李克清, 黄瑜岳. 基于右手法则的网格割点判定算法[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(7): 6 - 8.
- [11] TAN Zhi-bin. Minimal cut sets of s-t networks with k-out-of-nodes[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 82(1): 49 - 54.

Parallel Shortest Path Algorithm Based on Vertex Cut-set

ZHANG Qing-hua^{1,2}, LI Hong¹, SHEN Wen¹

(1. Institute of Computer Science & Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. College of Mathematics & Physics, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In this paper, research and analysis on the basis of the Dijkstra algorithm, the Dijkstra algorithm by introducing the vertex of cut sets and cut the vertex of idea to improve the Dijkstra algorithm, this method first vertex cut-set or cut vertex to the original problem is decomposed into multiple sub-graph, then the shortest path on each sub-graph parallel to the shortest path of the original problem, and finally obtained by the vertex cut-set or cut vertex, which reduces the time complexity of the algorithm and improves the efficiency of the algorithm.

Key words: cut vertex; shortest path algorithm; Dijkstra algorithm; parallel computing; granular computing

(上接第 99 页)

The Optimization Design Study Based the Lower Yellow River Prestressed Pipe Pile Spur Dikes Structure

ZHANG Bao-sen^{1,2}, WANG Zhong -Fu³, TIAN Zhi-zong^{1,2}, XIE Zhi-gang^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research Zhengzhou 450000, China; 2. Research Center on Levee Safety & Disaster Prevention Ministry of Water Resources Zhengzhou 450000, China; 3. North China University of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Institute of Geotechnical and Hydraulic Engineering, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: New prestressed pipe pile is presented on the basis of analysis of the characteristics of traditional rockfill groins. Take Huayuankou for example, the combination of the orthogonal experiment principle of the spur dikes structure design, the overall displacement law with the parameters change of spur dikes is analyzed by FLAC3D finite difference code. The numerical results show that spur dikes of the horizontal displacement of the contribution of primary and secondary order as follows: the scour depth of pile length > flow rate > pile spacing and pile diameter > contacts beam size; under the operation conditions of flood flow 4 000 m³, water velocity of 3 m/s, the scour depth is 16m operating conditions, the spur dikes structure program of the pile length 25m 0.6m pile spacing, pile diameter is 600 mm, contact beam size is 0.6 m × 0.6 m is optimal, to the safety factor of strength reduction method is 1.32.

Key words: spur dike; orthogonal design; FLAC3D; prestressed pipe pile; scour depth