

# 正交法在注浆材料优化设计中的应用

杨秀竹<sup>1,2</sup>, 王星华<sup>1</sup>, 雷金山<sup>1</sup>

(1. 中南大学铁道校区 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 2. 福建工程学院, 福建 福州 350014)

**摘要:** 应用正交试验设计法, 对粘土固化浆液的配比进行了优化, 得到了最佳配比, 并将其应用于洛湛铁路益娄段岩溶路基的注浆加固, 收到了很好的整治效果。

**关键词:** 正交法; 岩溶路基; 粘土固化浆液

**中图分类号:** TU472.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2004)03-0007-03

**Application of Orthogonal Test to Optimizing the Grouting Material/YANG Xiu-zhu<sup>1,2</sup> WANG Xing-hua<sup>1</sup>, LEI Jin-shan<sup>1</sup>** (1. Civil Architectural Engineering college, Central South University, Changsha Hunan 410075, China; 2. Fujian Engineering University, Fuzhou Fujian 350014, China)

**Abstract:** The orthogonal designs method has been adopted to optimize clay-hardening grouts ratio, and the best one was obtained. It was used to consolidate the part of Luozhan Railway karst bed from Yiyang to Loudi by grouting. The results of treatment were satisfactory.

**Key words:** orthogonal designs method; karst bed; clay-hardening grouts (CHG)

## 1 概述

洛湛铁路益娄段的部分铁路位于岩溶极发育的地表塌陷段, 由于该地段内煤矿采掘抽排地下水, 同时地下水水位季节性变化幅度过大, 引起较大范围内的地表塌陷, 区内岩溶地貌特征为隐伏型, 第四系覆盖层薄, 厚度仅为 1.2~1.5 m, 同时岩溶发育, 顶板过薄, 地下暗河广布, 给铁路施工及未来安全营运带来巨大隐患。为了防止地下水对路基的侵蚀作用, 须在路基底部的土-石界面处进行水平帷幕注浆, 以封堵地下水通道, 隔断地下水活动对路基持力层的影响。注浆的目的主要是封堵地下水, 兼有部分加固作用。为了保证处理效果良好, 经济上可行, 经过方案比选, 决定采用粘土固化浆液钻孔注浆的方法加固路基。

采用粘土固化浆液进行岩溶路基加固在国内外还是首次, 无论是设计计算还是施工工艺均不成熟, 因此需要特别重视对粘土固化浆液的室内试验。岩溶路基注浆加固除了要求浆液结石体抗渗性能好以外, 对强度也有一定的要求。粘土固化浆液由粘土浆、水泥、水玻璃及固化剂组成。因为结石体中粘土占主要成分, 故浆液结石体抗渗性能很好, 渗透系数  $K$  一般在  $10^{-6}$  cm/s 范围内, 易满足工程需要。因此, 建设单位特别强调寻找最优配比, 使结石体强度

达到最大。在粘土浆粘度一定的条件下, 水泥标号一旦确定, 影响粘土固化浆液强度的主要因素有: 水泥、水玻璃、固化剂的含量。为了确定这些因素对浆液结石体强度的影响, 需要进行一系列的试验。经过分析, 最后确定采用正交试验设计。正交设计是根据实验目的和数据的分析来选择试验点, 不仅使每一个试验点获得的数据含有最大的信息量, 而且大大减少试验次数, 从而使得统计分析具有较好的性质。考虑到影响粘土固化浆液强度的主要因素有水泥、水玻璃及固化剂含量, 因此实验设计为三因素三水平正交试验。

## 2 优化过程

### 2.1 影响因素分析

根据洛湛铁路益娄段的具体情况, 并本着就近取材的原则, 选用 425 水泥, 水泥含量的变化范围为 5%~15%, 水泥含量  $\lambda_1$  指每 100 mL 粘土浆中加入水泥的量。按正交设计原理  $\lambda_1$  选用 5、10、15 g/100 mL 三个水平进行试验。

为了防止在加固过程中, 出现地下水流动导致粘土水泥浆的流失而影响加固效果, 选用水玻璃和固化剂(中国专利号: 96117823.X)作为外加剂以改善粘土水泥浆的性能, 使水泥水化速度加快, 提高早

收稿日期: 2003-09-22

基金项目: 湖南省科技厅科技计划项目(No. 02ssy4042)

作者简介: 杨秀竹(1972-), 女(汉族), 山东莱州人, 中南大学铁道校区土建学院博士研究生在读、工程师, 岩土工程专业, 从事软土地基处理与加固方面的研究工作, 湖南省长沙市韶山南路 22 号, (0731)2655007, xzyang@mail.csu.edu.cn。

期强度。水玻璃的掺量  $\lambda_2$  为 1、3、5 mL/100 mL, 固化剂掺量  $\lambda_3$  为 1、3、5 g/1000 mL。

## 2.2 试件的制作和养护

首先配制粘土泥浆, 然后根据拟定的配方分别称量水泥、水玻璃、固化剂, 再按下列顺序制浆: 先向粘土泥浆中加入固化剂, 搅拌均匀; 再加入水泥, 搅拌均匀; 最后加入水玻璃, 搅拌均匀即制成粘土固化浆液。浆液配制好以后, 立即将其浇注到三联装水泥试模中, 并将试件表面刮平, 再用有机玻璃片分隔, 使试块最终成型尺寸为 4 cm×4 cm×8 cm, 然后盖上塑料布以防止水分蒸发过快。待浆液凝固后脱模, 将试块放在水中养护。然后测无侧限抗压强度。

## 2.3 实验数据分析

表 1 列出了泥浆粘度为 30 s、水玻璃稀释为 25 Be' 的无侧限正交试验结果; 表 2 对极差进行了分析。从表 1 中可以看出, 随龄期的增长, 试件 1~9 无侧限抗压强度均有不同程度的增长。表 2 表明: 对 3 天强度影响最大的是水玻璃含量, 其次是水泥含量, 影响最小的是固化剂含量。随着龄期的增加, 对 7、14、28 天强度的影响, 水泥含量逐渐跃居首位, 其次是水玻

璃含量, 影响最小的是固化剂含量。各个龄期的最佳配比均为: 水泥 15 g/100 mL, 水玻璃 3 mL/100 mL, 固化剂 3 g/1000 mL。

令水泥掺量为  $x$ , 水玻璃掺量为  $y$ , 固化剂掺量为  $z$ , 龄期为  $t$ , 对正交试验结果进行归一化, 无侧限抗压强度与上述 4 种因素之间的关系表达式为:

$$f = 37.19x + 26.35y - 25.78z + 4.18t - 56.94 \quad (1)$$

从(1)式可以看出: 水泥含量对强度的影响最大, 水玻璃和固化剂含量在一定范围内对强度有提高的作用, 随龄期增长强度也有不同程度的增加。

表 1 正交试验结果表

试件	A	B	C	不同龄期无侧向抗压强度/kPa			
	水泥含量/[g·(100 mL) <sup>-1</sup> ]	水玻璃含量/[mL·(100 mL) <sup>-1</sup> ]	固化剂含量/[g·(1000 mL) <sup>-1</sup> ]	$f_3$	$f_7$	$f_{14}$	$f_{28}$
1	5	1	1	68.7	101.1	176.5	197.7
2	5	3	3	200.1	284.9	285.1	285.7
3	5	5	5	115.4	166.0	175.5	176.3
4	10	1	3	153.2	221.1	284.4	331.0
5	10	3	5	444.6	545.2	652.8	822.2
6	10	5	1	301.5	373.2	462.8	492.1
7	15	1	5	137.3	261.2	390.1	389.3
8	15	3	1	300.4	538.6	632.7	788.8
9	15	5	3	466.9	636.6	744.7	928.5

表 2 正交试验结果极差分析表

项目	同水平累计			平均值及极差			结论	
	A	B	C	A	B	C		
3 天强度分析/kPa	$k_1$	384.2	359.2	670.6	128.1	119.7	223.5	(1)影响次序
	$k_2$	899.3	945.1	820.2	299.8	315.0	273.4	B→A→C
	$k_3$	904.6	883.8	697.3	301.5	294.6	232.4	(2)最优组合
	$\bar{R}$				173.4	195.3	49.9	B <sub>2</sub> A <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
7 天强度分析/kPa	$k_1$	552.0	583.4	1012.9	184.0	194.5	337.6	(1)影响次序
	$k_2$	1139.5	1368.7	1142.6	379.8	456.2	380.9	A→B→C
	$k_3$	1436.4	1175.8	974.2	478.8	391.9	324.1	(2)最优组合
	$\bar{R}$				294.8	261.7	56.8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
14 天强度分析/kPa	$k_1$	637.1	851.0	1272.0	212.4	283.7	424.0	(1)影响次序
	$k_2$	1400.0	1570.6	1314.2	466.7	523.5	438.1	A→B→C
	$k_3$	1767.5	1383.0	1218.4	589.2	461.0	406.1	(2)最优组合
	$\bar{R}$				376.8	239.8	32.0	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
28 天强度分析/kPa	$k_1$	659.7	918.0	1478.6	219.9	306.0	492.9	(1)影响次序
	$k_2$	1645.3	1896.7	1545.2	548.4	632.2	515.1	A→B→C
	$k_3$	2106.6	1596.9	1387.7	702.2	532.3	462.6	(2)最优组合
	$\bar{R}$				482.3	326.2	52.5	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>

## 3 工程应用

采用最佳配比对洛湛铁路益娄段路基进行了注浆加固。在每段注浆施工结束后, 通过进行钻孔取心检查, 注浆前后物探成果对比, 注水试验的单位长

度吸水量的对比(表 3), 施工现场的观察了解等各种技术手段, 均确认地层的连续性、整体性得到了很大的提高, 注浆堵水效果显著(单位长度吸水率降低 95% 以上), 工后沉降有效地控制在设计范围以内。

表 3 注浆前后注水试验结果对照表

序号	检查孔号	孔位	注浆前代表孔号	单位长度吸水率/[L·(m·m·min) <sup>-1</sup> ]		降低百分比/%
				注浆前	注浆后	
1	Ⅱ—检 1	DIK91+038.0 中心	Ⅱ—2—4	0.18616	0.00311	98.33
2	Ⅲ—检 1	DIK93+202.05 中心	Ⅲ—3—4	0.19272	0.00771	96.00
3	Ⅳ—检 1	DIK93+974.39 右 2.5	Ⅳ—1—3	0.74623	0.01905	97.45
4	V—检 1	m DIK94+335.0 左 2.5 m	V—3—4	0.24960	0.00076	99.62
5	Ⅶ—检 1	DIK95+753.5 中心	Ⅶ—3—2	0.42022	0.00112	99.73

#### 4 结语

(1)影响浆液结石体短期强度的主要因素依次为:水玻璃含量、水泥含量、固化剂含量;随龄期的增长水泥含量的影响开始跃居首位,依次是水玻璃含量和固化剂含量。最佳配比为:水泥含量 15 g/100 mL,水玻璃含量 3 mL/100 mL,固化剂含量 3 g/1000 mL。

(2)采用上述试验结果所得的最佳配比对洛湛铁路益娄段路基进行了注浆加固。注浆检测结果显示地层完整性、连续性明显提高,堵水效果显著,工后沉降得到了有效控制,达到了预期的整治效果。

(3)正交法的运用节约了大量的人力、物力、财力和时间,过去大量的试验所得结果仍不理想,用正

交法安排试验几次就得到了很好的结果,因此在科学实验过程中大力推广应用正交法,让它在工程实践中不断结出硕果,具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] 程晓,张凤祥. 土建注浆施工与效果检测[M]. 上海:同济大学出版社,1998.462.
- [2] 熊厚金,林天健,等. 岩土工程化学[M]. 北京:科学出版社,2001.671—677.
- [3] 陈国亮,等. 岩溶地面塌陷的成因与整治[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.1—10.
- [4] 吴继庚. 实用数值计算方法与程序[M]. 北京:冶金工业出版社,1991.69—71.
- [5] 白利生,等. 正交试验法在 EBM 灭火器参数设计中的应用[J]. 数理统计与管理,2000,20(5):11—13.

(上接第 6 页)

#### 4 结语

勘探所、工艺所、探工所是我国岩土钻掘界的主要研发机构,几十年来为我国地质事业的发展 and 国民经济建设做出了不可磨灭的贡献。目前随着科技体制改革的不断深化,虽然还存在许多困难和问题,但只要采取相应的对策,引进新的管理观念,加强技术创新、制度创新,积极参与国家地质工作并不断拓宽服务领域,在上级部门提供的政策支持、资金支持、研发能力的支持下,就一定能够实现自身的良性发展并为我国的岩土钻掘技术的发展做出新的更大的贡献。

#### 参考文献:

- [1] 张辉旭,陆春榕. 中国矿产地质 50 年来的回顾与展望[J]. 地质力学学报,2002,(2).
- [2] 王达,李明祥,叶建良. 探矿工程要争当地质工作服务于经济建设和社会发展的排头兵[J]. 探矿工程,2002,(1).
- [3] 王泽九,陆春榕. 中国探矿工程技术 50 年来的发展与展望[A]. 中国地质 50 年科技进步[C]. 北京:地质出版社,2001.
- [4] 中国地质调查局. “十五”工作设想[J]. 中国地质,2001,(2).
- [5] 耿瑞伦,李常茂. 世界 21 世纪钻探技术发展回眸[J]. 地质装备,2001,(1).
- [6] 中华人民共和国国土资源部. 国土资源“十五”计划纲要[Z].

- [7] 温家宝. 在第三届全国地层会议上的讲话[J]. 国土资源成人教育,2000,(3).
- [8] 耿瑞伦,冯国强. 中国 20 世纪钻探工程发展回顾[J]. 西部探矿工程,2000,(2).
- [9] 耿瑞伦,张林霞. 探矿工程面临的新形势与新机遇[J]. 探矿工程,2000,(3).
- [10] 中国地质调查局办公室. 中国地质调查局年鉴(1999 年)[Z]. 2000.
- [11] 刘广志. 21 世纪勘探工程(探矿工程)发展提要[J]. 岩土工程界,2000,(1).
- [12] 耿瑞伦. 地质钻探技术的历史回顾与展望[J]. 探矿工程,1999,(增刊).
- [13] 李世忠,屠厚泽. 中国地质大学探矿工程专业的人才培养和科研开发[J]. 探矿工程,1999,(增刊).
- [14] 殷琨,孙友宏,张祖培,等. 长春科技大学探工专业科研开发与人才培养[J]. 探矿工程,1999,(增刊).
- [15] 李振亚,甘行平,刘志方. 勘探技术研究所科研工作 42 年回顾与展望[J]. 探矿工程,1999,(增刊).
- [16] 汤松然,卓国基. 积极开拓 稳步发展——探矿工程研究所向科技型企业过渡的做法[J]. 探矿工程,1999,(增刊).
- [17] 李山. 走过辉煌 挑战未来——探矿工艺研究所建所以来主要科技成果回顾及展望[J]. 探矿工程,1999,(增刊).
- [18] 地矿部科学技术司. 探矿工程科技进步 100 例[M]. 北京:地震出版社,1998.

致谢:本文在编写过程中还参考了张彦英、王凯、李常茂、冉恒谦、宋翔雁、冯国强等同志的报告、资料,特此致谢!