



中国期刊方阵双效期刊
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源刊
中国科学引文数据库源刊

ISSN 1000-811X
CN61-1097/P
CODEN ZAIHE2

灾害学

Journal of Catastrophology
ZAIHAIXUE

2009 第24卷 第2期
Vol. 24 No.2

ISSN 1000-811X



9 771000 811002

陕西省地震局主办

协办单位：中国灾害防御协会 民政部国家减灾中心 陕西省减灾协会
南京工业大学 长安大学 江苏省地震工程研究院

灾害学

(季刊)

2009-06-20

第24卷

第2期(总第91期)

目次

[理论·思路与争鸣]

- 地质灾害危险性区划的多态系统可靠性分析方法.....
.....李秀珍,孔纪名,王成华,等(1)
- 灾害风险理论与风险管理方法研究.....
.....殷杰,尹占斌,许世远,等(7)
- 基于 Level Set 方法的风暴追踪.....
.....傅圣雷,岳秀明,王敏(12)
- 上海虹桥综合交通枢纽工程的灾害识别与评估.....
.....周红波,高文杰,刘成清(16)
- 基于层次分析法的区域泥石流防治决策模型.....
.....马威,林建南,汤连生,等(21)
- 大地震诱发滑坡的分布特点及危险性区划研究.....
.....乔建平,唐晓红,王萌,等(25)

[预测·防治与对策]

- 多目标决策方法在防台风中的应用.....
.....许同生,刘茂,关惠兴,等(30)
- 天津市的突发性大气污染事故预警应急系统研究.....
.....韩素芹,李培彦,金陶胜,等(34)
- 框架预应力锚索在滑坡加固中的现场试验研究.....
.....杨雪莲,周永江,何思明(37)
- 甬江流域河网水利计算模型研究及应用.....
.....方国华,金德刚,刘俊,等(41)
- 广西强对流天气的天气形势分析与雷达临近预警.....
.....李向红,唐伍斌,李垂军,等(46)
- 基于 GIS 技术的河北省洪涝灾害风险区划与分析.....
.....张婧,郝立生,许晓光(51)
- 模糊综合评价高速公路建设工程地质灾害危险性.....
.....袁素凤(57)

[灾例·经验与教训]

- 东北地区重大暴雨过程评估方法研究.....
.....袁祝香,孙力,刘实(61)
- 秦岭山区某路基沉降成因及对策.....
.....李凯玲,张平印,门玉明(65)

- 印尼苏门答腊海域强震与广东地下水位响应特征研究.....
.....万永芳,李健梅(69)
- 低温雨雪冰冻灾害给农业气象工作的启示.....
.....郭建平(75)
- 基于 RS 和 GIS 的黄山花岗岩砂化与地形因子的关系研究.....
.....程先富,赵萍,黄成林(78)
- 2008 年云南滇东北电线覆冰的气象条件.....
.....陶云,吴星霖,段旭,等(82)
- 注浆法治理公路黄土暗穴病害的试验研究.....
.....刘妮娜,门玉明,陈志新,等(87)

[人文灾害研究]

- 层次分析法在商场火灾风险评估中的应用研究.....
.....田玉敏,蔡晶菁(91)
- 三次突发事件对中国旅游影响的对比分析研究.....
.....李锋(95)
- 基于圈层结构的绿洲生态安全问题研究.....
.....张军民(101)
- 内蒙古草原畜牧业在自然灾害中的“脆弱性”问题研究
——以内蒙古锡林郭勒盟牧区为例.....
.....海山,乌云达赖,孟克巴特尔(105)

[综述·资料与信息]

- 风险管理标准化述评.....
.....李宁,胡爱军,崔维佳,等(110)
- 中国近 300 年来 3 次大旱灾的灾情及原因比较.....
.....曾早早,方修璋,叶瑜,等(116)
- 下期要目.....(144)

[救援·应急与管理]

- 3S 支持下的锡林郭勒盟旱灾救助区划研究.....
.....袁亚丽,张红方,肖楠(123)
- 海洋灾害影响下的社会综合稳定性结构.....
.....赵祺,李莉(128)
- 当前突发事件应急管理宣传教育的思考.....
.....姚迪(134)
- 对灾害与移民问题的初步探讨.....
.....陈勇(138)

注浆法治理公路黄土暗穴病害的试验研究*

刘妮娜, 门玉明, 陈志新, 彭建兵

(长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 注浆法是公路工程中治理暗穴的一种新方法。针对湿陷性黄土地区公路工程中大量发育的暗穴病害, 通过室内浆液材料物理力学性能试验与工程现场模拟注浆效果试验, 分析了以水泥为主剂的注浆材料在不同配合比情况下治理公路工程中暗穴的效果。室内外试验结果分析表明: 浆液水灰比在 2.5:1~1.5:1 之间较为适宜; 在不影响路基路面的正常压力下有效的加固半径是 1.0 m~1.5 m; 在特殊情况下为了使浆液快速凝结可以加入一定量的水玻璃作为速凝剂; 可以采用二次注浆加强治理的效果。

关键词: 公路工程; 暗穴治理; 注浆法; 湿陷性黄土

中图分类号: P642.13⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)02-0087-04

0 前言

黄土的湿陷性使黄土地区的公路普遍发育暗穴, 对公路路基、路面、路堤、路堑边坡、桥涵、以及公路排水措施均有破坏作用, 对公路的危害比较严重。注浆法是近年来公路工程中治理暗穴的一种新方法, 相应的规范中对其都有所提及, 但均为原则性的, 缺乏相应的技术指导^[1,2]。相关的科研单位和科研人员也进行了一系列的研究工作, 对于注浆法的加固机理和相关的参数均有一定的研究^[3-10]。本文在相关文献资料的基础上, 对于注浆法治理湿陷性黄土地区公路路基中发育的暗穴病害进行了试验研究, 目的在于确定合适的浆液材料组成及配比、注浆压力和有效的浆液加固半径等设计和施工参数。这些主要参数的确定可以有效的指导这一方法在工程实际中的应用。

1 注浆法的加固机理

在湿陷性黄土地区, 用注浆法治理公路暗穴病害, 是通过钻孔并将注浆材料以一定压力注入暗穴及周围裂隙中, 形成固化的结石来充填和加固暗穴, 以消除路基中暗穴塌陷所造成的危害; 当暗穴较大时, 可以先通过钻孔灌入一定的砂土

料, 再由注浆孔注入一定配比的浆液, 使浆液与充填材料共同充填加固暗穴^[5,8,9,10]。

常用的注浆材料一般采用水泥为主剂。水泥浆注入暗穴后发生一系列复杂的物理化学反应(表 1 中式 1~式 5)^[4,5]而凝结硬化。水泥的水化作用包括两个方面: 一是水泥的组成成份溶解于水中或悬于水中; 二是水泥吸收水份后其颗粒的表层与水进行化合。由水泥水化反应后各种成份所生成的胶凝薄膜逐渐连接起来成为胶凝体, 此时就表现为水泥的初凝状态, 水泥开始有胶粘性。此后水泥各成份在不缺水、不干涸的情况下不断地按照上述水化程序继续发生水化反应而凝结硬化。

表 1 浆液化学反应方程式

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{H}_2\text{O}$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	(1)
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + n\text{H}_2\text{O}$	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	(2)
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O}$	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (n-1)\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	(3)
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + n\text{H}_2\text{O}$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + x$	(4)
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O}) + \text{Ca}(\text{OH})_2$	(5)
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaO} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$	(6)

水泥水化过程中生成的氢氧化钙溶解度不高, 很快就达到饱和, 限制浆体后继反应。为了加快水泥的水化反应, 在浆液中可以加入一定量的水玻璃。水玻璃能够消耗浆体中的氢氧化钙(表 1 中式 6), 使其含量达不到饱和状态, 从而加快水泥

* 收稿日期: 2008-12-25

基金项目: 交通部西部重点交通建设科技项目(200131881213); 长安大学自然科学基金(0305-1001)

作者简介: 刘妮娜(1975-), 女, 陕西兴平人, 讲师, 博士研究生, 从事岩土工程教学与科学研究工作。

E-mail: dcdgx16@chd.edu.cn

的水化作用，宏观上就表现出水泥浆液初凝加快，结石体早期强度增长较快。

2 注浆材料的室内试验

室内试验的目的是确定适合湿陷性黄土地区暗穴病害治理的浆材，同时分析各种注浆材料的物理力学参数，为工程应用提供切实可行的依据。

2.1 室内试验方法

按照黄土地区公路中暗穴病害注浆法治理的要求，室内进行了 8 组不同成份，不同配比的浆材试样试验，砂浆试块标准 70 mm × 70 mm × 70 mm，在标准条件下养护，在 3 d，7 d，28 d 龄期分别测

定各试块的抗压强度、密度、浆液的凝结时间等参数(表 2)。同时进行了 3 组浆液析水性试验(图 1)，以针对在湿陷性黄土地区采用该方法时是否会导致施工区域黄土遇水湿陷问题。

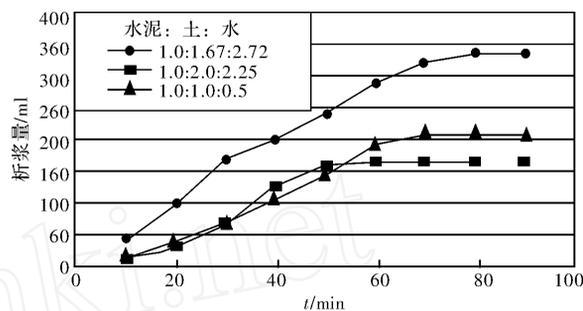


图 1 浆液析水量随时间变化

表 2

不同配比浆液的物理力学性能参数统计

试样 编号	试样 件数	水:水泥:黄土 (重量比)	水玻璃含量 /%	密度 /kg/m ³	浆液凝结时间/h		抗压强度 /MPa		
					初凝时间	终凝时间	3 d	7 d	28 d
1	22	2.25 1 2	-	1 490	>10	24	-	2.98	7.58
2	22	2.7 1 1.7	1	1 390	9.25	-	-	1.77	9.75
3	22	1.5 1 1	-	1 480	>10	24	-	3.78	7.92
4	19	0.75 1 0.15	-	1 690	4.3	7.25	10.2	13.9	16.23
5	19	1 1 0.15	-	1 610	4.5	9.2	4.47	6.6	10.24
6	19	1 1 0.5	10	1 600	3.2	7.1	2.98	4.13	5.08
7	19	1 1 0.5	20	1 610	0.7	3.8	3.0	4.08	5.35
8	19	1 1 0.8	-	1 690	4	8	4.13	5.6	7.18

注: 1. 水玻璃含量为水泥含量的重量百分数。2. 水泥标号 32.5R。

2.2 室内试验分析

分析表 2 的试验结果可以看出:

(1) 浆液凝结时间与浆液成份、浆液配合比有密切的关系。加入水玻璃可以明显地缩短浆液凝结时间。在浆液中水灰比不变的情况下，随着黄土成份增加，浆液凝结时间随之缩短。

(2) 浆液密度与浆液配比有一定关系。水泥含量增加，浆液密度增大；浆液中水的含量越大，浆液密度越小；但浆液中加入少量的水玻璃对浆液密度影响不大。

(3) 浆体强度与浆液成份、各成份所占比例有一定关系。浆液中水泥含量越大，浆体强度越高；水泥含量一定时，增加浆液中黄土含量会使浆体强度增强；水玻璃加入之后浆体强度有一定的提高，但受制浆过程搅拌时间制约，相同条件下搅拌时间越短，浆体强度提高越多。

(4) 浆液析水率曲线显示，浆液中含水量越大，其析水量越大，同时浆液达到稳定状态所需的时间越长(图 1)。

3 公路工程现场试验

为确定注浆法在施工时浆液的有效扩散半径、注浆压力及施工后路基的强度等物理力学参数，为注浆法的应用提供依据，本文作者进行了公路工程注浆法治理暗穴现场模拟试验。

3.1 试验概况

所选试验路段位于湿陷性黄土地区，试验时在路基底部开挖 3 个洞穴以模拟路基中发育的暗穴，3 个暗穴分别标记为 1#、2#和 3#(图 2、图 3)。暗穴为洞高 1.5 m，直径 1.5 m 的拱形，拱顶距路面高差为 4.5 m，延伸长度 12 m。为了防止注浆时由于浆液在压力作用下从洞口处外漏，在洞口两端均用黄土夯实。

注浆施工前先用钻机钻成注浆孔，在其中插入注浆管和排气管，注浆管的下方分布梅花形的注浆孔。注浆时将表 2 中 1、2 及 3 号配比的浆液分别注入 1#、2#和 3#的模拟暗穴之中。在 2#模拟

暗穴中进行二次注浆试验, 以便将二次注浆效果与一次注浆结果进行对比。待注浆材料终凝之后, 从距注浆孔不同距离处钻孔取样, 以确定浆液的加固半径, 同时对所取的试样测定物理力学参数。

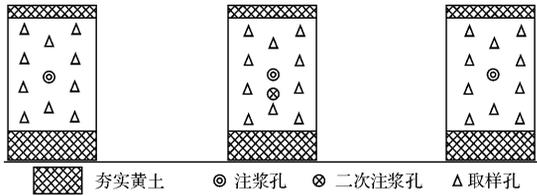


图2 模拟暗穴平面图

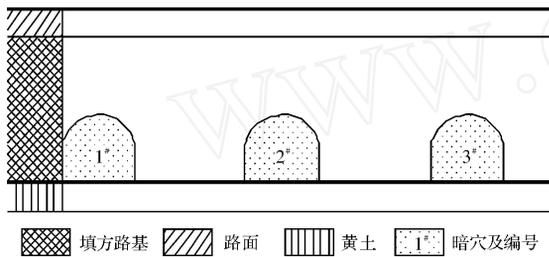


图3 模拟暗穴剖面图

3.2 注浆法的现场试验及数据分析

3.2.1 注浆压力

在路基暗穴病害治理中应用注浆法时, 必须考虑到不影响路基和路面的安全。注浆压力影响浆液的扩散半径、上覆土体及路基和路面的稳定性, 可以根据浆液浓度、暗穴深度、上覆路面厚度等条件确定其合理值。在此次试验中, 注浆压力的确定采用以下公式^[5]。

$$[Pe] = C(0.75T + K h), \quad (1)$$

式中: $[Pe]$ 为容许注浆压力 (10^5 Pa); C 为与注浆期次有关的系数, 第一期注浆孔 $C = 1$, 第二期注浆孔 $C = 1.25$; T 为地基覆盖层厚度 (m); K 为与注浆方式有关的系数, 自上而下注浆时, $K = 0.6$, 自下而上注浆时 $K = 0.8$; 为与地层性能有关的系数, 可在 $0.5 \sim 1.5$ 之间选择, 结构疏松、渗透性强的地层取低值, 结构紧密、渗透性弱的地层取高值; h 为地面到注浆位置的深度 (m)。

分析试验过程, 在注浆时如能正确的确定公式中的各个参数, 式 (1) 能够反映注浆时的压力。试验过程同时反映出在暗穴注浆时, 由于暗穴的不规则, 虽经回填但其中仍存在一部分空洞, 注浆初期, 浆液首先充填此空洞。所以在注浆初开始时, 注浆的压力一直保持为零, 直至空洞充填满后, 注浆的压力才开始上升, 浆液在压力的作用下充填于暗穴中的黄土和回填料之中, 形成浆土结合体。

3.2.2 浆液加固半径的确定

确定浆液的加固半径是通过分析土样中浆液和路基土及回填土的结合情况来进行的。试验中用钻机在距注浆孔不同距离处钻孔取样, 如果土样中浆液和周围土体结合良好, 则在距此取样孔较远处再次钻孔并取样分析, 直至钻孔中所取的试样中未含有水泥浆液。距注浆孔最远处取样中含水泥浆液的钻孔距注浆孔的距离, 即为浆液的加固半径。

经现场取样分析, 1#暗穴之中加固半径为 1.0 m。2#暗穴由于经过二次注浆, 其中浆液与土的结合要明显的好于一次注浆, 3#暗穴之中浆液的加固半径可以达到 1.5 m。

3.2.3 注浆后土样强度统计及分析

注浆后对各个暗穴钻孔取样 (见图 2), 分析土样的强度等参数指标, 确定注浆效果。注浆后, 暗穴中所取的土样分为两部分, 一部分是暗穴中回填土与浆液结合形成的浆土结合体 (表 3), 另一部分为暗穴中的空洞被浆液充填后形成的素浆体 (表 4)。

表 3 注浆前后土样物理参数统计

编号	岩性	平均含水量 / %	平均密度 / (kg/m^3)	平均孔隙比 e	备注
1	回填土	7.9	1.01	1.82	注浆前回填料
2	浆土结合体	20.4	1.86	0.74	暗穴中取样
3	浆土结合体	22.5	1.73	0.92	暗穴中取样
4	浆土结合体	20.1	1.74	0.85	暗穴中取样

表 4 浆体抗压强度试验结果统计

编号	浆液配比			平均抗压强度 / MPa	弹性模量 / MPa	泊松比
	水	水泥	黄土			
1	2.25	1.2	0	6.3	2.6×10^3	0.18
2	2.7	1.7	0.01	8.4	3.0×10^3	0.20
3	1.5	1.1	0	16.7	6.2×10^3	0.25

注浆后暗穴中形成的浆土结合体的密度比注浆前所采土样明显增大, 孔隙比比注浆前回填土的有了较大的缩小, 增加了暗穴中的回填土的密实性; 素浆部分在三种不同配比时的强度都高于 6 MPa, 弹性模量也较大, 能够满足路基的强度要求^[10]。

3.2.4 注浆量及直接费用分析

根据对试验过程的分析和试验数据的统计可以得出, 注浆量受到诸多因素的影响, 如暗穴发育的范围、暗穴发育程度、暗穴出口位置、施工过程中是否漏浆以及暗穴回填所选用的材料、回填料的颗粒及孔隙比等。在试验中对不同配合比

浆液在各个模拟暗穴中的注浆量进行了统计,并根据定额及相关规定计算出每立方浆液的材料费用(表5)。

表5 注浆量统计

暗穴 编号	浆液配比(水:水 泥:黄土:水玻璃)	浆体密度 /(kg/m ³)	材料直接费 /(元/m ³)	水泥用量 /kg	浆液方量 /m ³
1	2.25 1 2 0	1 490	87.86	2 600	9.16
2	2.7 1 1.7 0.01	1 390	79.6	2 400	9.32
3	1.5 1 1 0	1 480	120.6	3 350	10.29

用注浆法治理公路工程中的暗穴病害时,不同配比的情况下,浆材的直接费是不相同的,对浆材直接费产生较大影响的是水泥的含量。在工程实际之中,为了获得较好的经济效益,可以通过综合考虑工程的治理效果以及工程治理时的费用,选定合适的浆液配合比。

4 结论

注浆法治理湿陷性黄土地区路基中发育的暗穴是可行的,在采用注浆法时水灰比在 2.5 1 ~ 1.5 1 之间较为适宜;注浆的压力可以采用文中介绍的公式(1);注浆法在不影响路基路面的正常压力下有效的加固半径是 1.0 ~ 1.5 m;在特殊情况下为了快速的使浆液凝结可以加入一定量的水玻

璃作为速凝剂,加入的水玻璃量越多凝结所需的时间越少;为了加强治理的效果可以采用二次注浆。

参考文献:

- [1] TB10202 - 2002, J161 - 2002 中华人民共和国铁道部. 铁路路基施工规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2002
- [2] JTJ033 - 95. 中华人民共和国交通部. 公路路基施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1996
- [3] 李萍, 薛振年, 王治军, 等. 陇东地区黄土工程地质特征[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 59 - 62
- [4] 贺茉莉. 高速公路路基加固施工技术[J]. 探矿工程, 2001, (3): 9 - 10.
- [5] 李治平. 压浆法加固黄土地区公路路基的应用[J]. 内蒙古公路与运输, 2000, (3): 9 - 11.
- [6] 刘妮娜. 注浆法在湿陷性黄土路基暗穴处理中的应用研究[D]. 西安:长安大学, 2003.
- [7] 彭建兵, 李庆春, 陈志新, 等. 探测湿陷性黄土暗穴技术研究报告[R]. 西安:长安大学, 2004.
- [8] 刘妮娜, 刘维亮. 注浆法治理黄土地区公路中暗穴的研究[C]//中国建筑学会工程勘察分会. 全国岩土与工程学术大会论文集. 北京:人民交通出版社, 2003: 1133 ~ 1138.
- [9] 李寻昌, 门玉明, 刘妮娜, 等. 注浆法在黄土地区公路路基洞穴处理中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 38 - 40.
- [10] 刘之葵, 谢永雄. 岩溶地基土洞塌陷评价及处理[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 77 - 80.

A Study on Grouting Treatment of Highway Loess Hidden Cavity

Liu Nina, Men Yuming, Chen Zhixin and Peng Jianbin

(School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The grouting is a new way in treating the highway hidden cavity. As a large number of hidden cavities exist in the loess area, on the basis of indoor test on physical and mechanical performance of grouting materials and field test on efficacy of simulating grouting, the effectiveness of cement as the main material with the others in different ratios in highway hidden cavity treatment is analyzed. The result shows that the proper ration of water and cement is between 2.5 1 and 1.5 1. Under the normal pressure with no influence on roadbed and road surface, the effective radius is 1.0 m to 1.5 m. The soluble water is good for congealing in special conditions. Twice grouting has better effectiveness than that of one grouting.

Key words: highway engineering; treatment to hidden cavity; grouting; collapsible loess