

岩土体注浆技术初探及展望

徐 华, 李天斌

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要:从我国注浆技术的发展入手,详细地分析和评述了岩土体注浆技术的关键问题:注浆材料及浆液、注浆参数确定、注浆方法、注浆工艺、注浆监控与检测等的研究方法和现状,结合具体的工程实例,对涉及的技术难题进行了归纳和总结;同时,针对目前岩土体注浆技术存在的一些不足之处,提出了研究思路和展望。

关键词:岩土体;注浆;注浆材料;注浆工艺;注浆参数;注浆检测

中图分类号:TD265.4;TV543;U455.49 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)01-0038-05

Primary Discussion on Technology of Grouting in Rock and Soil and the Future Prospect/XU Hua, LI Tian-bin
(National Specialty Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: According to the development history of injection grouting technology, the paper analyzed and commented the key problems of grouting in rock and soil masses, including the current research means and state of grouting material and slurry, grouting parameter determination, grouting method and technology, grouting monitoring and test; and summed up the technical difficulties with field cases. And what's more, some deficiencies of grouting technology were pointed out with future development direction.

Key words: rock and soil mass; grouting; grouting material; grouting technology; grouting parameter; grouting detection

注浆(Injection Grout)^[1],又称为灌浆(Grouting),是将一定材料配制浆液,用压送设备将其注入地层或缝隙内使其扩散、凝胶或固化,以达到加固地层或防渗堵漏的目的。我国注浆技术的研究和应用较晚,20世纪50年代初才开始起步,但经过50多年的发展,已在注浆技术方面取得了较大进展,特别是在水泥注浆材料的研制方面已处于世界先进行列,注浆应用的领域也逐渐扩大,已遍及水利、建筑、铁路、矿业和公路等多个领域。尤其近20年来,在注浆的许多方面,包括材料品种、施工技术、设备器材、自动控制、检测手段以及在处理第四系黄土层注浆堵水等方面,都获得了较大发展。

1 注浆材料及浆液

随着注浆技术的广泛应用,注浆材料得到了较快的发展,从最早的石灰、粘土和水泥发展到今天的混合浆液和各种化学浆液。通常说的注浆材料是指浆液中的主剂,习惯上把注浆原材料分为粒状材料和化学材料两个系统。而浆液则是由主剂、固化剂、溶剂等经混合后所配成的液体,对于浆液较准确的分类为“颗粒浆液”和“溶液浆液”^[2]。

1.1 颗粒浆液

颗粒浆液是指固体颗粒悬浮在水中的注浆材料,是由水泥、粘土、粉煤灰、膨润土、火山灰等颗粒材料配置而成,主要包括纯水泥浆、水泥粘土浆液、水泥粉煤灰浆液水泥-水玻璃浆液及等。本文利用正交试验的方法,选择了3种不同的注浆材料,并配制成36种不同的浆液进行对比试验,对浆液的密度、粘度、流动度、泌水率、结石率、流变参数、稳定性及抗压强度等进行测试,为注浆材料及浆液配比的选择提供参考。

1.1.1 注浆材料及浆液配比

注浆材料:32.5R普通硅酸盐水泥,水玻璃(波美度为35~40 Be',稀释至20 Be'使用,模数为2.4~2.8),粘土粉及水。

浆液组成及配比:

纯水泥浆液:水灰比为0.6、0.8、1和1.5。

水泥-水玻璃浆液:水灰比为0.6、0.8、1和1.5;水玻璃与水泥浆的体积比为0.6、0.8、1和1.2。

水泥粘土浆液:配制水泥粘土浆液使用粘土粉干料制浆,粘土与水泥的质量比为:0.4、0.6、1和1.5;水与干料(水泥+粘土)的质量比为:3、2、1和0.8。

收稿日期:2008-08-29; 改回日期:2008-12-20

作者简介:徐华(1979-),男(汉族),四川乐山人,成都理工大学博士研究生,地质工程专业,主要从事地质工程设计及科研工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号成都理工大学环境与土木工程学院,xuhua8318@163.com。

1.1.2 浆液试验成果及分析

1.1.2.1 纯水泥浆液

随着水灰比减小,水泥浆液的流动性和泌水率减小,而密度、漏斗粘度和表观粘度增大,当水灰比为 1 时,浆液的密度为 1.532 g/cm^3 ,流动度为 38.0 cm ,泌水率为 24.25% ,漏斗粘度为 17.86 s ,初凝时间为 $14 \text{ h } 52 \text{ min}$,终凝时间为 $24 \text{ h } 45 \text{ min}$,较适宜进行灌注;结石率为 89% ,且结石强度很高,7 天抗压强度为 2.38 MPa ,28 天抗压强度为 8.86 MPa 。

1.1.2.2 水泥-水玻璃浆液

当水灰比为 1,水泥浆液与水玻璃体积比为 $1 \sim 1:0.6$ 时,浆液的密度为 $1.383 \sim 1.405 \text{ g/cm}^3$,流动度为 $44.8 \sim 41.8 \text{ cm}$,初凝时间为 $9 \sim 25 \text{ s}$,终凝时间为 $21 \sim 65 \text{ s}$,并且结石强度也较高,7 天抗压强度为 $1.16 \sim 3.84 \text{ MPa}$,28 天抗压强度为 $4.94 \sim 5.71 \text{ MPa}$,所以适宜于地下水较丰富的岩溶地区的注浆工程。

1.1.2.3 水泥-粘土浆液

随着粘土-水泥质量比增大和水固比减小,浆液相对密度、漏斗粘度和表观粘度增大,流动性和泌水率减小;但由于水泥-粘土浆液流动性较差,胶凝时间较长(基本在 20 h 以上),结石强度较低,28 天抗压强度为 $0.74 \sim 2.13 \text{ MPa}$,故不适合于地下水流动性较强的地区进行注浆。

1.2 溶液浆液

溶液浆液亦称化学浆液,是以溶液中 2 种或 2 种以上的化学物质产生化学反应来形成凝胶体,按照化学浆液所用的原材料可分为无机化合物和有机化合物两类。化学浆液的凝结时间易控制,从几秒到几十小时均可调节,能使浆液在适宜的时间到达适宜的地点。其粘度比水泥浆液的要低,所需的灌浆压力更小,而且浆液中没有颗粒材料,理论上化学浆液可渗透进任何具有合理宽度和大小的裂隙或孔隙的岩土介质中。固结体可以是适用于补强用的塑性体、应变形的橡胶体或止水用的凝胶体,因而可满足工程的多种要求。但大多化学浆液具有一定的毒性,价格较高、强度较低,浆液配置比较麻烦,应用范围受到限制。

2 注浆参数确定

2.1 注浆压力

注浆压力是给予浆液在岩土层中渗透、扩散及劈裂、压实的能量来源,其大小决定着注浆效果的好坏及费用的高低。一般注浆压力小于或等于地层容

许注浆压力。重要工程地层容许注浆压力的确定多由注浆试验获得,一般情况下可参照类似工程的经验和有关公式初步拟出,再在工程实施中的前期逐步调整确定。

(1) 砂砾石地基注浆容许压力公式^[3]:

$$P = \beta\gamma H + CK\lambda h \quad (1)$$

$$P = C(0.75H + K\lambda h) \quad (2)$$

式中: P ——容许注浆压力, 10^5 Pa ; C ——与孔序有关的系数, I、II、III 序孔分别选择 1、1.25、1.5; H ——地基覆盖层厚度, m ; K ——与注浆方式有关的系数,自上而下注浆时取 0.8,自下而上注浆时取 0.6; λ ——与地层性质有关的系数; h ——注浆段至地表的深度, m ; β ——系数,在 $1 \sim 3$ 之间选取; γ ——上覆地层的重度。

(2) 岩石地基上容许压力经验公式^[3]:

$$P = P_0 + m_1 m_2 D \quad (3)$$

式中: P_0 ——容许注浆压力初值, 10^5 Pa ; m_1 ——注浆方法系数, 10^5 Pa ; m_2 ——注浆次序系数, 10^5 Pa , I、II、III 序孔分别选择 1、1~1.25、1~1.5; D ——注浆段埋深, m 。

P_0 和 m_1 可根据相关地质勘察资料查得。

2.2 浆液扩散半径

浆液扩散半径是在一定注浆工艺条件下,浆液在地层中扩散的数学描述统计值,是确定注浆孔布置的一个重要依据。计算注浆扩散半径的公式方法较多,适用条件也各不相同,主要介绍以下几种理论公式。

(1) 浆液为牛顿流体作匀速运动的渗透理论,主要适用于砂土地层^[4]。

Maag 球形渗透理论公式(地下水为静压力):

$$r_1 = \sqrt[3]{3kh_1 r_0 t / (\beta n)} \quad (4)$$

Karol 球形渗透理论公式:

$$r_1 = \sqrt{3kh_1 t / (\beta n)} \quad (5)$$

Raffle 球形渗透理论公式(地下水与浆液同时运动):

$$t = \frac{nr_0^2}{kh_1} \left[\frac{\beta}{3} \left(\frac{r_1^3}{r_0^3} - 1 \right) - \frac{\beta-1}{2} \left(\frac{r_1^2}{r_0^2} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

浆液柱型扩散理论公式:

$$r_1 = \sqrt{2kh_1 t / [\beta n \ln(r_1/r_0)]} \quad (7)$$

(2) 岩石地层中浆液扩散半径的经验公式:

$$R = \sqrt{2Kt} \sqrt{hr / (\beta n)} \quad (8)$$

式(4)~(8)中: t ——注浆时间, s ; R, r_1 ——浆液扩散半径, cm ; β ——浆液粘度对水的粘度比; n ——被

注载体孔隙率; k ——被注载体的渗透系数,cm/s; h, h_1 ——注浆压力(厘米水头),cm; r_0, r ——注浆管半径,cm。

通常,浆液的实际扩散半径都小于各种理论值。这是由于水泥浆液在进入细小裂隙的过程中,注浆压力使浆液中水分被渗滤出来,浆液逐渐变稠,流动的距离就会变小。其次,计算所用的某些参数在注浆过程中为一变量,从而导致了计算值与实际值的差别^[5],当地基条件复杂或计算参数不易准确选定时,应通过现场注浆试验来确定。

2.3 单孔注浆量

单孔注浆量采用充填注浆计算公式计算:

$$Q = \pi R^2 L \beta \alpha n$$

式中: Q ——单孔注浆量, m^3 ; r ——浆液有效扩散半径,m; n ——岩体孔隙率, $n < 1$; L ——注浆孔总长度,m; α ——有效充填系数, $\alpha < 1$; β ——浆液耗散系数, $\beta > 1$ 。

一般浆液扩散半径和岩体孔隙率很难准确获得,在前期设计中可以参考同类工程项目或进行现场试验测定。注浆总量应以现场实际记录量为准,并通过反算 r 和 n 来检验注浆效果。

3 注浆方法与施工控制

3.1 注浆方法

目前,关于注浆方法的分类尚没有一个统一的准则,按照注浆压力的大小可分为静压注浆和高压喷射注浆 2 大类。根据地质条件、注浆压力、浆液对土体的作用机理、浆液的运动形式和替代方式的不同,静压注浆又分为渗透注浆、劈裂注浆、压密注浆、充填注浆和电动化学注浆等;根据施工工艺的不同又可分为“孔内卡塞”、“孔口封闭”2 大注浆方法,即后退式和前进式注浆,其注浆工艺为“段顶堵塞、自下而上、分段注浆”和“孔口封闭、孔内循环、自上而下、分段注浆”。

3.2 施工控制

由于岩土体结构的复杂性,在特殊地质条件下的注浆施工方法和施工控制就成了注浆效果好坏的关键。在粉细砂层及粘土层注浆时,由于该地层渗透性较低,孔隙率较小、裂隙较细,普通颗粒浆液难以注入地层,常采用化学注浆方法,其施工控制主要包括:凝胶时间、注浆压力及注浆量等。在砂砾卵石层注浆时,由于该地层渗透性较高,孔隙率较大、裂隙较多且成孔困难,其施工控制主要包括:钻孔工艺、注浆方法、注浆压力及注浆材料等。而在岩溶地

层注浆时,由于地质条件复杂,施工问题较多,注浆材料用量大等,所以详细介绍其施工工艺控制措施。

(1) 注浆施工平面顺序应遵循逐渐加密法,分次序进行。岩溶地层的注浆方法最好采用自上而下分段的循环注浆法。但若在公路隧道地表注浆中,为了加固隧道周边围岩,可结合跟管钻进一次成孔,顶堵塞、自下而上、分段注浆以加固深层围岩。

(2) 注浆段长不宜过长,一般在岩石完整地段,仍以 5~6 m 为宜。在岩石破碎、裂隙发育、渗流量大的地区,段长应适当缩短。对大的溶洞及岩溶裂隙段则应单独处理。

(3) 注浆压力,在岩溶地层注浆时,很多时候裂隙或溶洞内的充填物是无法清除的,为了使浆液与充填结合紧密,并压密充填物,确保注浆质量,一般在不导致岩石破坏和地面抬动的条件下,尽可能地采用高的注浆压力。

4 注浆监控与检测

4.1 注浆监控方法

在美国,计算机辅助注浆评价系统(CAGES)已开始应用于注浆工程,它可以以实时图形显示浆液流量、注浆压力、注浆时间、浆液扩散半径等的趋势,监视注浆作业过程,根据显示结果可以评价初始浆液的适宜性和注浆岩层的实时吸浆量。目前国内主要采用 GJY 系列注浆自动记录仪和 LJ 系列注浆水压水测控系统等,可以做到对注浆流量和压力的自动记录,但要根据其流量和压力的变化情况来调节注浆参数和施工工艺较困难,需要进行深入的研究并加强注浆施工监控。

4.2 注浆效果检测

注浆效果检测的方法很多,主要集中在对注浆载体的完整性、连续性和坚固性进行检测及评价。对于以堵水为目的的注浆,可以检测注浆前后岩土体渗透性的变化,并进行比较和判定,如压水(气)试验、抽水试验、孔内摄影等;对于以加固为目的的注浆,则可通过测定注浆前后受注岩土体的强度变化来判断注浆效果,如标准贯入试验、载荷试验、利用弹性波、电阻等方法。此外,扫描电镜、透反射偏光显微镜、X 射线衍射仪和能谱仪等理化分析检测手段,能定量分析判断浆材在裂隙中的充填程度。

近年来发展的一些检测方法,如电探及声波探测法、地质雷达检测法、瞬变电磁法、弹性波 CT 技术等也能较好地反映注浆效果。声波探测法和弹性波 CT 技术是通过检测注浆前后岩土体的波速变化

来进行判定的,需要在注浆岩土体上进行钻孔,对注浆效果有一定的影响;地质雷达检测法和瞬变电磁法,主要是对注浆载体的完整性和连续性进行检测,通过浆液对孔隙的充填情况来反映注浆效果属于无损检测,但图形存在多解性,解译人员不同结果也可能不同,检测以定性分析为主,缺少定量的数据结果。

5 工程实例及体会

针对上述的岩土体注浆技术的关键问题,笔者以铜锣山隧道岩溶浅埋段 K33 + 940 ~ K34 + 035 地表注浆现场试验^[6]为例,主要归纳和总结了一些岩溶区公路隧道地表注浆的认识和体会。

5.1 注浆材料及浆液配比选择

根据本文对 3 种注浆材料(普通 32.5R 硅酸盐水泥、水玻璃和粘土粉)及不同的 36 种浆液配比进行的室内浆液试验成果得出:在岩溶地层或地下水较丰富的地区,推荐使用浆液为纯水泥浆液和水泥-水玻璃浆液。纯水泥浆液的水灰比推荐使用 1,结合实际注浆过程中流量和压力,水灰比可按 1.5、1.0.8 和 0.6 四个比级变换。水泥-水玻璃浆液的配比推荐为:水泥浆液水灰比 1,水泥浆液与水玻璃体积比分三级 1: 0.8 和 1: 0.6,根据不同的地下水情况进行选用。

5.2 注浆参数

由于工程地质条件的复杂性,理论计算的注浆参数一般作为参考,在注浆施工过程中应根据实际情况,进行动态设计,及时变更设计参数。

5.2.1 注浆压力试验

在试验设计阶段,根据岩石地基上容许压力经验公式 $P = P_0 + m_1 m_2 D$,初步确定地表注浆压力在 1.0 ~ 2.0 MPa。在注浆试验过程中,采用了注浆临界压力试验法,选择了 2 个注浆孔,分为 6 段,分别进行压水试验,逐步提高压水压力,求出注水压力和注入水量的关系曲线;曲线在初期基本呈直线上升,斜率较大,当压力升到一定值以后,压水量突然增大,说明岩体的裂隙被扩展或破坏,此时的压力值为注浆临界压力值,可作为注浆压力参考值。根据试验结果,在钻孔上部地表段的注浆临界压力值为 1.0 MPa,下部围岩段压力值在 1.5 ~ 2.0 MPa 时,斜率明显减小,压入水量增大,注浆临界压力值为 2.0 MPa。所以笔者认为在同一钻孔中的注浆压力也可以不同,上部小、下部大。

5.2.2 浆液扩散半径

由于地层的不均匀性,浆液扩散往往是不规则的,浆液扩散半径较难计算准确。一般浆液扩散半径与地层渗透系数、孔隙率、注浆压力、浆液注入能力等因素有关。本试验根据 Raffle 球形渗透理论公式:

$$t = \frac{nr_0^2}{kh_1} \left[\frac{\beta}{3} \left(\frac{r_1^3}{r_0^3} - 1 \right) - \frac{\beta-1}{2} \left(\frac{r_1^2}{r_0^2} - 1 \right) \right]$$

利用注浆时间、注浆压力、岩体孔隙率、浆液粘度比等参数,进行反算得出注浆试验的浆液扩散半径为 1.0 ~ 1.5 m,最大为 1.95 m。在开挖竖井检查时,也证实了计算结果。所以在实际注浆的过程中,可根据以上参数计算浆液扩散半径,以确保注浆效果。

5.3 注浆施工工艺对比

为了进一步了解“孔内卡塞”、“孔口封闭”2 大类注浆技术的适用条件、施工工艺及方法的差异,此次注浆试验选择了 2 个不同的试验区进行对比研究,得出如下结果。

(1)“前进式”注浆的主要优点是:上部岩层得到优先灌浆,堵塞了上串裂隙,增大了强度,不但减少了“卡不住栓塞”、“绕浆埋塞”等事故,而且有利于逐段提高压力,增强注浆效果。不足之处在于:增大了重复钻孔、起下栓塞等的工作量,钻机使用效率不高,进度较慢。一般在软岩、破碎、竖向裂隙发育、容易串冒浆的岩层中多采用前进式注浆,尤其当要求采用较高压力注浆时。

(2)“后退式”注浆的主要优点是:有利于深层围岩的注浆加固,把钻孔和注浆 2 个工序分开,避免了重复钻孔和工序交叉,段与段之间注浆后一般不需要待凝,提高了工作效率。不足之处在于:由于需要下入套管和止浆塞,可能出现套管堵塞及止浆塞脱落等问题,对施工工艺和工人熟练程度有较高的要求。因此,建议对工人进行技术培训或雇用熟练工人。一般在岩体质量较好、不会发生掉块卡钻或绕浆埋塞的地区采用,但在结合跟管钻进技术后,完全避免了塌孔,适用于结构破碎、强度低的软弱地层的成孔注浆。

5.4 注浆施工中特殊情况处理

5.4.1 冒浆

在施工过程中,由于挖掘机进入试验场地中提拔套管将地表混凝土盖压裂,导致了 S4 孔 2.0 ~ 9.0 m 段和 S13 孔 2.0 ~ 9.0 m 段出现地面冒浆情况,最终采取限流、低压、灌注浓浆、间歇灌注等措施,至正常注浆结束。

5.4.2 注浆中断

S2孔9.0~15.0 m段和S5孔15.0~22.0 m段在注浆过程中因故中断,立即进行了钻孔冲洗,其后又扫孔,并使用开注比级的水泥浆灌注,按试验的浆液变换灌注至正常结束。

5.4.3 吸浆量大

S4孔的7.0~13.0 m段吸浆量特别大,灌注水泥量达到500 kg/m,采用了低压、浓浆灌注,但效果不太好。因此,采用待凝间歇注浆,待凝20 min后,灌注水泥-水玻璃液浆,吸浆量明显减小,直至正常注浆结束。

5.4.4 回浆返浓

注浆过程中,随时测量进浆和回浆密度,当回浆变浓时,换用与进浆相同比级的新浆进行灌注,若效果不明显,延续灌注30 min,即可停止灌注,也不再进行复灌。

5.5 注浆效果检测

对于注浆效果检查的标准,目前国内尚未有一个统一的标准规范。此次地表注浆试验,主要参照水利水电规范,以注浆载体的完整性检测为主,并结合连续性和坚固性检测,对岩土体注浆前后的特性进行对比分析,以评价其注浆效果。完整性检测主要采用压水试验、声波测试和地质雷达;连续性利用单位水泥注入量递减分析判断前序注浆孔的规律性和有效性;并通过岩心抗压强度、开挖竖井和电镜扫描检测岩土体的坚固性。

根据五点法压水试验,注后岩体的平均透水率降为2.43 Lu,其中 $q \leq 1$ Lu者占13%, $q = 1 \sim 5$ Lu者占80%,达到或接近相对不透水状态。声波测试表明,岩体波速注后较注前提高了10%~20%;地质雷达检测表明,注后岩体完整性和密实性明显提高;水泥结石抗压强度为5.2~7.8 MPa达到设计要求。模糊综合判别表明,此次地表注浆试验效果较好,达到了试验要求,检测方法简单可靠,能够综合反应其注浆效果,同类注浆工程可借鉴使用。

6 注浆技术展望

(1)在注浆材料研究方面,应该充分发挥颗粒

浆液的低成本、无毒性等优点,并采用添加外加剂或几种浆材配合使用的方法,以克服单一颗粒浆液的不足。同时,开发绿色环保无污染、可注性好、固结强度高、凝结时间易于控制、施工方便和价格便宜的化学浆液将成为浆液研究的一个重要研究方向。

(2)注浆设计包括了注浆工程的各个方面,如注浆方案及标准的确定、注浆材料的选择、注浆参数的选取等,既关系到注浆效果和工程安全,也考虑到节约成本。当地质条件较复杂或计算参数不易准确选定时,建议采用先进行现场试验后设计,并在注浆施工中,根据实际注浆情况调整注浆参数,进行动态设计。

(3)在注浆工艺方面,研制施工效率高的钻孔设备、大型浆液制备系统、注浆的自动记录和监测反馈控制系统。电子信息和自动化技术在注浆中的应用必然是今后注浆工程中的一个重要发展方向。

(4)由于岩土体结构的复杂性,对于在特殊地质条件下的注浆施工方法的选择和施工工艺控制就成了注浆效果好坏的关键,尤其对于长大裂隙和岩溶孔洞的注浆施工控制,值得深入进行分类专项研究。

(5)目前注浆效果检测技术方法还不够成熟,多以单一检测手段为主,各种检测方法之间的相关性不强。今后注浆效果的检测应该向着定量化和无损化方向发展,建议采用模糊综合判别方法,建立起明确的判别标准和综合的评价体系。

参考文献:

- [1] 协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [2] 郝哲,王来贵,等. 岩体注浆理论与应用[M]. 北京:地质出版社, 2006. 20-23.
- [3] 中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [4] 熊进,祝红,董建军. 长江三峡工程灌浆技术研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [5] Sung - Yul Ahn, Kyung - Chul Ahn etc. A study on the grouting design method in tunnel under ground water[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(2-3): 21-22.
- [6] 徐华,李天斌,等. 铜锣山隧道岩溶浅埋段地表注浆试验研究[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(5): 44-49.

祝广大读者、编者新春快乐! 牛年吉祥!