

石灰岩溶大突泥化学灌浆

熊厚金 林进和 蒋开贵

(中国科学院广州化学研究所)

一、前言

在岩溶地区,由于地下水的长期溶蚀,以及地下水流对岩溶碎屑的搬运,使得岩层裂隙和溶洞多被泥质物以不同程度充填。另外,由于岩溶地层的渗流通道发达,岩层中大都存在丰富的地下承压水,这些为地下开掘中的突水突泥提供了发生条件。大量的突水突泥给矿藏开采和隧道开掘造成了困难和极为恶劣的施工条件,在许多情况下,甚至成为工程进展难以逾越的障碍。

在防治地下开掘突水突泥的方法中,化学灌浆法显示了特别优异的功能。特别在处理岩溶地区的流塑粘土突泥中,使用割裂灌浆是一种新的有效措施。割裂灌浆通常用于大坝基础和堤坝的防渗,而作为地下开掘大突泥的防治却还是新的尝试。它与单纯地用作防渗处理在工艺及其作用等方面都有所不同。本文将在这方面作一些理论解释,并以工程实例说明。

二、割裂灌浆法处理大突泥的原理

割裂灌浆法处理流塑粘土大突泥的原理按其加固原理、工艺过程、力学分析和材料特性分述如下。

(一) 割裂灌浆的加固原理

割裂灌浆与一般渗透灌浆不同的是它并不依赖被灌土体中的裂隙或颗粒间的空隙,而是借助灌浆压力,使土体产生“液压开裂”,破坏土体原有结构,浆液沿割裂面进入土体,并迅速凝固。同时,随着灌浆的连续进行,浆液对凝固体(通称浆脉)周围的土体进行压缩,土颗粒产生移动,重新排列,进而脱水密实。由于浆液的迅速凝固及高强度的浆脉不断“生长”,浆脉与土体间产生新的接触界面,这种接触界面在压力下最易进浆。割裂→充填→挤压→固结→割裂循环往复,最后实现了地层的防渗和加固的目的。关于割裂灌浆加固土体的机理,笔者提出了“楔型模式”予以描述。如图1所示,浆液沿水平方面割裂地层,在灌浆管周围形成一圈圈的锥形浆脉,类似于“楔”打入木樨内使樨头固牢。

当然,作为防治地下开挖中大突泥的措施,上述的割裂灌浆需通过一些特殊的工艺才能遏止具有压力的水流和泥流。这些工艺包括微形灌注桩、管棚法以及浆液的快速凝固以及先后后内(先灌外排孔后灌内排孔)、外密内疏(布孔外排密中间疏)、先少后多(每次灌入量分

阶段逐渐增多)、先低后高(灌浆压力因灌浆质量的提高而增高)等系统灌浆工艺。微形灌注桩由灌浆钢管、钢管内起增强作用的钢筋以及灌浆加固体三部分组成。通过灌浆将灌浆管、钢筋与灌浆管周围的土体一起固结而成的小型桩柱——微形灌注桩(见图2)。由许多根平行的微形灌注桩组成了一道能起支撑作用的管棚拱顶(见图3)或排管式的堵截墙。详细操作见实例。

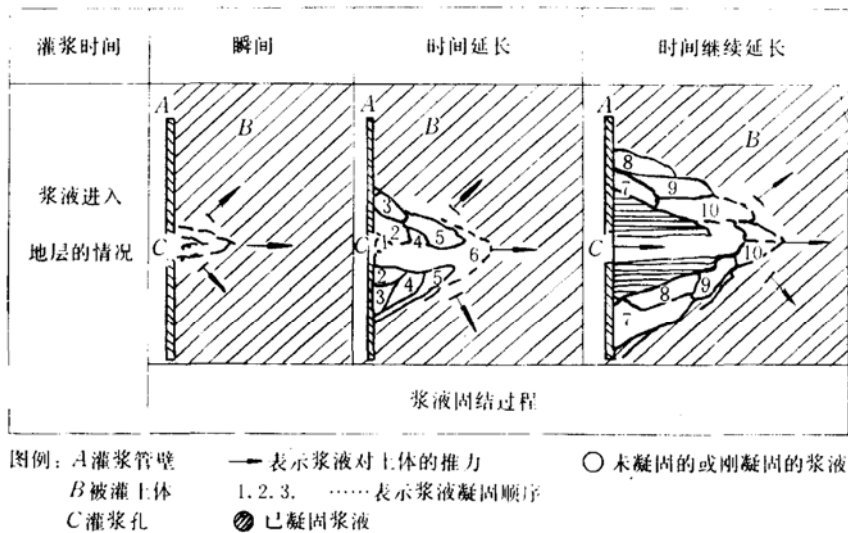


图1

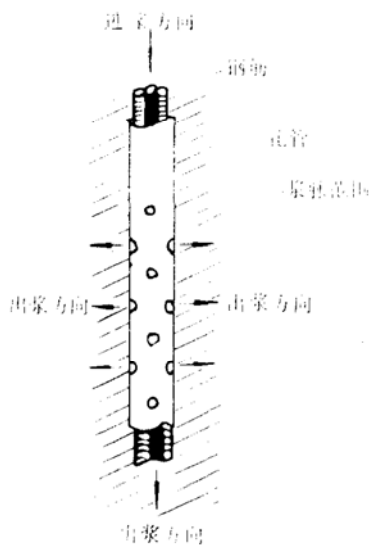


图2

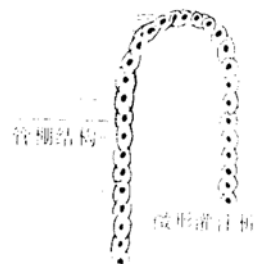


图3

(二) 割裂灌浆的工艺过程

1. 在压力(大于土体割裂的临界压力)灌浆的条件下,岩溶裂隙中的流塑粘土被浆液驱动,浆液把土体局部割开并充填。
2. 浆液进一步割裂土体,并形成作为网络骨架结构的具有较高强度的浆液固结体。
3. 在灌浆过程中,土体的物理性质发生变化,含水率大幅度下降,流塑泥转变成硬土,

强度增大。

4. 浆液本身发生化学变化, 生成浆液固结复合体。

5. 土体位移留下的空隙被浆液所填充。

6. 利用足够数量的微形灌注桩和灌浆固结复合体形成对突泥的堵截墙。

岩溶裂隙中的流塑粘土在使用含水泥颗粒的化学浆液进行灌浆的情况下, 其物理、化学变化极其复杂, 上述作用交替进行或同时进行。并且循环往复, 直至将突泥遏止。

(三) 割裂灌浆的力学分析

对土体水力劈裂的力学机理, 我国的丁金粟等作了分析^[1]; 对粘土层的灌浆压力、灌浆状态, 日本的坪井直道也进行了分析^[2], 现对割裂灌浆规律的力学分析简述如下:

1. 分析割裂灌浆的力学机理, 可以认为在割裂灌浆过程中有三种割裂作用存在: ①受压浆液对土体产生的割裂——液压致裂; ②瞬间固结的“楔型浆脉”对土体产生的割裂(劈裂); ③渗入地层而未凝固的浆液向地层临空方向产生的张裂抬动——张性割裂。这三种割裂作用的存在使得被灌土体即使在较低的灌浆压力下也要产生局部抬动, 并产生应力集中。由于应力释放要有一个过程, 因此, 抬动现象发生于灌浆后的一段时间内, 似乎是浆材具有膨胀性。

2. 灌浆时土体裂缝发展的方向取决于地层天然应力场中主应力的方向和大小, 以及土体的原有裂隙状态。

众所周知, 在不考虑初始应力场以及钻孔附近土体裂隙形态的情况下, 受灌浆压力作用的灌浆孔壁类似于承受内压力 p 的无限原壁圆筒, 径向变化 δ 与方向 θ 无关, 而是 p 的函数, 可用下式表达:

$$\delta = \frac{rp}{E}(1 + \mu) \quad (1)$$

式中 r 为钻孔半径; E, μ 分别为弹性模量和泊松比。但初始应力场和土体中裂缝的发育形态以及灌浆时的高压完全改变了上述公式所表述的弹性关系。此时, 若考虑二维情况下的钻孔应力条件, 可以看出, 与割裂灌浆有关的因素为: ①由于灌浆造孔时的卸荷作用, 在灌浆孔周围形成了一个松动圈, 出现卸荷裂隙, 其一般环绕钻孔壁开裂, 并在钻孔轴线方向上扩展和延伸, 这有利于遏制突泥的堵截墙的形成; ②灌浆压力使灌浆孔周围土体产生的环向应力 σ_θ 是拉应力, 当这个拉应力很大, 抵消了围岩(土)原来的压应力, 并超过岩体的抗拉强度时, 则土体就要开裂。而且显然沿最小主应力 σ_3 作用方向的围岩(土)的原有压应力要小于它。有限元分析和光弹试验表明: 最小主应力方向与钻孔周边正交, 即最小主应力作用面垂直钻孔直径。这可以用常见的与钻孔应力情况类似的隧洞分析资料来说明(图4), 因此裂隙的开展总是沿着某一小主应力作用面进行。

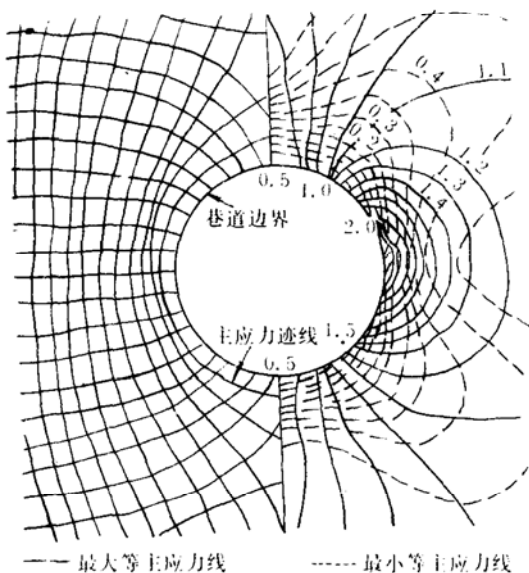


图4

(等主应力线上所标数值指主应力
与双轴应力场中较大应力的比值)

灌浆就其本质而言, 就是如何正确控制灌浆压力, 将有限的灌浆材料能够灌到预定的范

围内发挥最大的作用,除了经验和实践摸索外,还需要从力学角度来探讨它的本质,由于篇幅关系,仅作此小论。

(四)割裂灌浆的材料特性

在割裂灌浆过程中,除了力学作用外,还伴随有化学作用,兹简述如下:

以硅酸钠(水玻璃)——水泥为主的灌浆材料具有以下特点,适于对流塑状粘土进行灌浆加固:①浆材本身的早期强度大,固结体强度高。灌入1小时后浆材固结体的强度可达0.05—0.1MPa,3—7天后强度可达5MPa,28天后可达10MPa。②凝固时间快,在室温条件下,凝固时间为0.5—2.0min。避免了浆液的流失和扩散到很远的地方。同时,由于浆液凝固快,体积收缩小,有效充填高,灌1m³的浆液可充填约1m³的空隙。③浆液含有能破坏粘土表面胶体膜的化学物质,有利于浆液的渗透与粘土的离子交换反应。同时,灌入的大量浆液经化学反应释放出相当数量的热,这些条件都有利于粘土脱水、固化和硬化。④被迅速凝固而固定位置的水泥颗粒,将会慢慢水化而吸收周围的水分,使邻近的粘土进一步失水变硬,且基本不透水。

从以上力学和化学过程的分析,再考虑到岩溶地区存在着坚实的岩洞包围土体的环境,加上微形灌注桩、管棚法,以及从外排逐渐灌入内排的系统灌浆工艺的设计都有利于灌浆压力的提高,从而确保了灌浆质量。因此,使用割裂灌浆来防治岩溶地区的突泥是十分适宜的。

三、工程实例

(一)工程概述

南岭隧道是衡广复线的控制工程之一,全长6058m,系浅埋有溶洞群的双线隧道。该隧道位于五盖山和骑田岭的夹持地带,属南岭构造带,构造运动强烈,普遍发育下石灰系灰岩地层,溶蚀洼地发育,岩隙以裂隙为主,裂隙大多为砂粘土和粘土充填。

隧道开挖过程中,发生突水突泥,致使附近井泉枯竭,地表坍塌数十处,有的坍塌发生在京广线地基下,导致路基下沉,铁轨悬空,引起两次行车事故。当隧道出口端下导坑于1984年6月11日掘进至DK1935+745时,从导坑掌子面发生突泥超过3000m³。后在导坑内进行灌浆整治,至11月22日导坑恢复掘进,但4天后又再次发生突泥超过8000m³,将177m巷道塞满。同时,山顶突然下陷,最深处达15.29m,受影响的面积1587m²,估计已松动的泥土约两万多m³,迫使工程中断(图5)。

对DK1935+745溶洞突泥,铁道部基建总局于1985年1,3,6月份分别在现场和北京召开会议,研究整治措施,并提出了灌浆、冻结和旋喷等方案。几经研究讨论,认为采用化学灌浆有设备简单,材料来源广泛,方法简便适用,技术可行,加固地层不留后患,工期短,总造价低以及可采用多工序多作业面同时施工等优点,最后选定了化学灌浆方案。

(二)流塑粘土的工程性质

隧道覆盖层较厚,达92m,发生突泥处的溶洞水平长度85m,成45°角倾斜与隧道斜交穿过,相交长度约50m,溶洞内充填物为黄色的流塑状粘土,其性质列于表1。该流塑粘土经分析确认是一种高岭土,其矿物含量见表2。

流塑粘土的其它特性简述如下:①系沉积形成的软粘土,以粘粒和粉粒为主,细而腻滑,

结构基本如絮团状, 孔隙大, 压缩性大, 强度低; ②粘土周围结合水膜及水中化学成分, 产生了颗粒间的胶结作用, 使流塑粘土呈胶体状, 表面有一保护膜, 水中浸泡不易扩散; ③能与过剩的水结合而膨胀; ④具有触变性, 在边搅拌边振动或拍打下能变成稀泥状, 但静置后则重新呈胶体状。

考虑到流塑粘土的这些特性, 认为采用割裂灌浆的方法是比较适宜的。

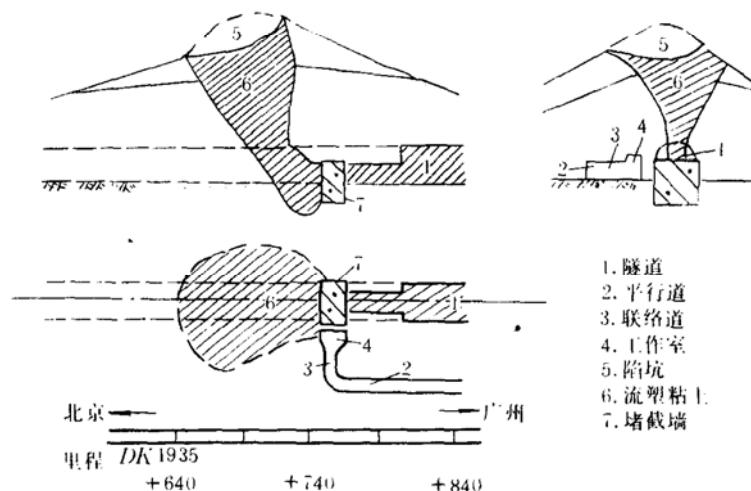


图5

表1

南岭隧道流塑粘土的性质

性质指标		土 样 编 号			
		I	II	III	IV
含水量 w (%)		43.7	44.1	60.0	55.0
天然稠度				>0.1	
湿容重 γ_m (g/cm^3)		1.595	1.780		1.595
干容重 γ_d (g/cm^3)		1.240	1.107		1.107
孔隙比 e		1.26	1.26		1.39
孔隙率 n (%)		55.7	55.7		
饱和度 S_r (%)		97	97		
液限 w_L (%)		53.7	53.7	52	53.7
塑性指数 I_p (%)		28.9	28.9	24.5	24.8
塑限 w_p (%)		28.9	28.9	27.5	
膨胀量 (%)		0.3			0.8
自由膨胀率 (%)		43.0			
颗 粒 组 成 (%)	2.0—0.25	1.5			
	0.25—0.1	0.5		0.5	
	0.1—0.05	3.5	9.3	4.0	9.3
	0.05—0.005	49.0	84.5	40.0	84.3
	<0.005	45.0	6.4	55.5	6.4

表2

灌浆前后土壤化学成分

氧化物	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	其他
灌浆前(%)	50.43	16.89	13.71	4.2	0.50	
灌浆后(%)	60.52	8.48	20.75	0.50	1.07	6.55

(二) 灌浆施工技术

1. 首先在突泥口(DK1935+745)用微形灌注桩灌筑一道堵截墙,以挡住溶洞突泥的涌出,以便清除被淹没的巷道。实践证明,微形灌注桩发挥了很好的作用。因为粘土又稀又滑,堵截墙两端的灌浆孔很难灌筑成一个较长的圆柱状固结体,在邻近孔灌浆时,很容易将已形成的固结体推走,因此这些孔又会继续涌泥。借助微形灌注桩有效地阻止了这种现象的发生。方法是通过多次灌浆多次扫孔逐步将流塑粘土固结,当固结到一定深度后,再把被堵塞的灌浆孔进行扫孔,插入带有 $\phi 5-6\text{mm}$ 孔眼的花管($\phi 108\text{mm}$ 钢管),以花管为套管再进行灌浆。为增加柱体的刚度,在花管内扫孔后,放入三根 $\phi 25\text{mm}$ 的钢筋,然后再灌入浆液,使之形成一根微形的灌注桩。数根微形灌注桩平行排列组成一个固结面——排管桩,数列排管桩则平行排列成一堵固结墙体。由于灌浆采用了上述的微形灌注桩、管棚法以及快速凝固的系统灌浆工艺,随着灌浆的继续进行,灌浆压力不断增高,最后墙体两端能承受4 MPa的灌浆压力,则标志着堵截墙的质量已达到要求,堵截墙的建筑为遏制泥流以及随后的灌浆固结泥流创造了有利条件。

2. 灌浆工艺采用双液单系统灌浆、管口混合工艺。

3. 因为系在大突泥的条件下灌浆,为加速浆液硬化,灌浆材料如前所述,以水玻璃和水泥为主,其配合比视具体情况而定。

4. 灌浆孔采用水平钻孔,共钻孔91个,分11排布孔。其中有15个孔为确定溶洞泥的边界范围,打在溶洞的岩石上,称为盲孔。由于溶洞形状极不规则,因此钻孔有深有浅。但都应钻至对面岩石0.5m。钻孔深12—25m,其中包含8—21m的溶洞泥层。灌浆分三序孔灌浆。第Ⅰ序灌浆孔主要分布在堵截墙两端,采用密孔、定量灌浆。灌浆孔逐渐加密,灌浆压力逐渐提高。灌浆历时23天,灌浆压力一般为0.2—0.4 MPa,最高压力2.5 MPa。第Ⅱ序灌浆历时14天,灌浆压力一般为1.5 MPa,最高压力为3 MPa,采用定量灌浆和定压灌浆相结合,即灌浆未达到灌浆压力时采用定量灌浆,未灌完预定的灌浆量而达到灌浆压力时而停止灌浆。第Ⅲ序灌浆则采用定压灌浆,历时9天,压力为2.5 MPa,最后灌浆压力达到4 MPa。

(四) 灌浆效果

1. 灌浆结束立即取样。共钻检查孔6个,进尺67.5m。从所取得的岩芯外表来看,一般较完整,在土体中浆脉与粘土互层经过无数次的挤压褶皱相互掺杂。岩芯中的浆脉含量约为30%,土层经过压缩、脱水,稀泥状的粘土已变成硬土。从1—7天后的取样测试结果来看,抗压强度达0.2 MPa以上,有的高达4.5 MPa,土体极不均匀。根据21组试件的平均结果,平均抗压强度达0.9 MPa。

2. 形成了预计的堵截墙。在清理隧道内的流泥时,在距堵截墙10m处已发现有大量浆脉,

稀泥已固结成块, 干燥无水, 泥层坚硬, 用风镐已难开凿, 用爆破法开凿后, 土体像岩石一样呈大块崩出, 土体自稳性好, 成洞性好, 各项力学参数达到Ⅱ类围岩的标准。

3. 管棚法的设计和施工给隧道的顺利开凿创造了极为有利条件。由于灌浆效果好, 取消了边墙和拱部共34条灌注桩, 使原计划的2063m管减至602.8m, 节约投资20万元以上。总的来说, 该方法较冻结法和旋喷法节省700—800万元的投资, 而工期则分别缩短6—10个月。

4. 隧道贯通后, 无任何突泥突水现象, 经喷射混凝土5—10cm后可以不用支护。上面采用蘑菇形开挖, 开挖悬空宽度达13.20m, 土体稳定, 并经受了放炮振动, 衬砌较为顺利。

5. 由于灌浆加固土体强度高, 隧道不需要再进行地基加固, 起到了永久性的地基加固作用。

6. 灌浆前后粘土工程性质和化学成分的变化分别如表3和表2所示。

表3 粘性土的含水率与抗压强度

试 件 状 态	灌 浆 前		灌 浆 后		
	洞外自然 状态粘土	洞内突泥	15个检查孔 45个土样	下导坑 土 样	上导坑 土 样
含水率(%)	26.5—27.5	65.0—80.0	41.4	35.4	27.2
抗压强度(MPa)	0.18	≤0.05	0.22	0.71	2.34

注: 由于取样部位不同, 数据仅供参考。

实践证明, 灌浆效果良好。有效地解决了施工中的突泥问题, 不仅起到临时防渗加固的作用, 而且能作永久地基加固。

四、结 语

在南岭隧道整治大突泥的施工中, 成功地应用了割裂灌浆和微形灌注桩, 形成隧道拱顶或堵截墙的微形灌注桩管棚施工法, 这项工艺在铁路隧道施工方面是一个开创性的尝试。

国营七一一矿的唐明逢、铁道部五局一处的谭毓俊参加了部分工作, 并提供了部分数据, 铁道部吴成三总工程师给予了必要的帮助和支持, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 丁金粟、孙亚平, 土体水力劈裂力学机理剖析, 全国第五届土力学基础工程学术研讨会, 1987年5月。
- [2] 坪井直道著, 化学注浆法的实际应用, 吴永宽译, 第1版, 煤炭工业出版社, 1980, pp.124—133。