

现代
灌浆
技术
译文
集

防林北志生
委会第10次
技术交流会

S910246-10

SI

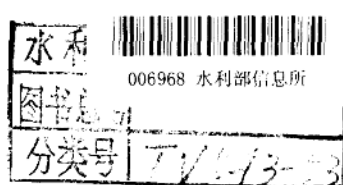
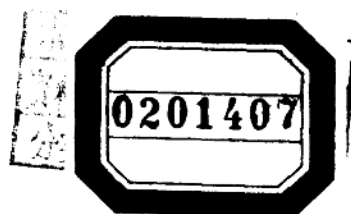
01

现代 灌浆技术 译文集

1407

《现代灌浆技术译文集》编译组

水利电力出版社



现代灌浆技术译文集

《现代灌浆技术译文集》 编译组

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

21164/01

现代灌浆技术译文集
《现代灌浆技术译文集》编译组

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号)

各地新华书店经售

中国标准出版社北京印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 15.25印张 342千字

1991年8月第一版 1991年8月北京第一次印刷

印数 0001 1700册

ISBN 7-120-01151-0/TV·394

定价 7.10 元

编 译 说 明

为了推动我国灌浆技术的发展,及时引进国际上的先进技术,把我国灌浆技术提高到新的水平,上海隧道工程公司施工技术研究所、水利部、能源部上海勘测设计院科研所、水利水电科学研究院岩土所和能源部、水利部水利电力情报研究所共同编译了《现代灌浆技术译文集》。主要包括:超细水泥灌浆材料,湿磨水泥,稠水泥浆灌浆技术,压密灌浆,电子技术在灌浆中的自动控制、自动监测和自动记录等方面的应用,群孔灌浆,灌浆标准的研究,灌浆设备,水泥浆新掺合料,结构化学灌浆等。此译文集为水工大坝地基处理、隧道和其他建设工程的防渗加固提供了国外新的技术信息。可供从事水利水电、铁道、矿山、市政和地下工程的科研、设计、施工和教学工作者参考。

全书由程骁、郭玉花、冯善彪、肖田元和白云等同志组成的编译组负责编译,由郭玉花、冯善彪统稿、李茂芳同志审阅。

为了便于图表的绘制,书中各篇译文都保留了原文中的计量单位制。书后附有书中涉及的计量单位及其有关换算关系。

由于水平有限,书中如有不当之处,欢迎读者指正。

《现代灌浆技术译文集》编译组

1990年

序

采用灌浆技术以解决土建工程中的有关技术难题,已有将近一个世纪的历史。特别在近几十年内,随着工程建设的实践和新技术的开发,无论在灌浆材料、专用设备、施工工艺、计算机应用和效果检测等方面,国内外都取得重大的进展,并在水电、铁道、矿井、市政、地下工程等建设方面得到广泛应用,取得显著效益。

我国在这一科技领域中也取得可喜的成果,例如:高160m的乌江渡水电站拱坝,修建于岩溶十分发育的地区,为了形成防渗帷幕,灌浆工程量达数十万米,采用了4~6 MPa的灌浆压力和一系列新措施,灌浆后基岩单位吸水率小于 $0.001\text{L}/(\text{m}\cdot\text{m}\cdot\text{min})$,水泥结石干容重达 $2.0\sim 2.2\text{g}/\text{cm}^3$,取得了一般压力下灌注所不能得到的效果,保证了水电站的安全运行;龙羊峡水电站坝址的地质条件复杂,为处理坝肩的G₄伟晶岩劈理密集带,在高压水泥灌浆的基础上进行了环氧体系和水溶性聚氨酯两种化学浆液的灌注,刚柔相济,对岩基进行改性、加固,保证了大坝及坝肩围岩的稳定;又如在上海黄浦江延安东路越江隧道工程中,在盾构施工进入建筑群和地下管线密集地区时,经用灌浆方法加固软土地层,减少了地面沉降,保证了地下通讯电缆及水、煤气等管线的畅通和建筑物的安全。总之,目前灌浆已成为工程建设中的一个重要手段,而且随着灌浆技术的发展,它将起到愈来愈重要的作用,一些传统的费时费钱的基础处理手段将被取代,而且将对改进工程设计和施工工艺起到重大影响。

我国在灌浆技术上虽已取得可喜进展,但与国际先进水平相比,仍有差距,尤其是施工工艺和电子技术的应用等方面还较落后。1982年以来,国际上已举行了三次有关灌浆技术方面的专题学术会议,足以说明各国工程界对这一课题的重视和灌浆技术发展的速度。他山之石,可以攻玉,向国内从事这方面工作的专业技术人员及时介绍国外的先进经验、学术动态和提供技术信息,无疑是有重要意义的。感谢上海隧道工程公司施工技术研究所,水利部、能源部上海勘测设计院科研所,水利水电科学研究院岩土所和能源部、水利部水利电力情报研究所的领导和有心同志,做了一件有意义的事,将80年代国际上有关学术会议或技术期刊上发表的论文,进行分析、选取并翻译出版,这是国内第一本介绍当代国际灌浆技术方面的译文集,内容涉及灌浆工程的各个部分:综合介绍,理论探讨,灌浆材料,施工工艺和工程实践等等。编译这样一本书完全符合改革开放的方向,也是广大从事灌浆技术人员长期来的企望,是我国科技出版园地中的一朵香花。我深信它一定会得到读者的赞赏,并希望通过消化吸收,我国的灌浆界同志会创造出具有中国特色和国际水平的灌浆技术,在伟大的祖国四化建设大业中作出应有的贡献。

潘家铮

1990年于能源部

目 录

编译说明

序

80年代灌浆现状.....	1
结构化学注浆的设计和施工.....	8
超细水泥灌浆材料.....	23
日本大坝灌浆新技术(湿磨水泥).....	31
超细水泥浆灌注细砂试验研究.....	35
超细水泥灌浆的新发展.....	46
采用膏状稠水泥浆灌浆新技术.....	48
内聚力在岩石水泥灌浆中的作用.....	59
水泥灌浆浆液是稠好还是稀好?.....	76
岩石水泥灌浆浆液的最佳水灰比.....	82
水泥灌浆耐久性的研究.....	94
三个晶质岩基大坝灌浆帷幕渗溶监测.....	99
压密灌浆30年.....	108
以压密灌浆加固已建土石坝坝基.....	117
压密灌浆用于控制隧道掘进所引起的地层位移.....	127
软土地层中盾构法隧道的盾尾低坍塌度压密灌浆.....	137
膨润土水泥对压密灌浆泵送能力的影响.....	143
计算机在灌浆中的应用.....	151
电子计算机控制灌浆.....	157
计算机辅助灌浆评估系统.....	162
灌浆的电子仪器监测.....	173
声波无损测试在灌浆监测方面的应用.....	179
群孔灌浆法.....	188
弗兰哈斯(Fronhas)拱坝接缝灌浆.....	197
灌浆站及其设备.....	205
关于岩石透水性灌浆标准的研究.....	213
硅粉在灌浆浆液中的应用.....	220
粉煤灰、下水污泥焚烧灰等用于深层拌和处理软弱地基的适用性.....	227
译文集中涉及的计量单位及其有关换算关系.....	235

80年代灌浆现状

D.C. CARON

提 要

用灌浆方法进行土体加固和防渗处理,早在19世纪初期就已应用,只是到本世纪初期才有重大进展。

除了无覆盖层的地层条件外,大都在高压下进行灌浆。劈裂和地面抬动是常有的事,经常可看到某处地面抬动几英寸[●]高。这种条件下,在城区是不可能进行大规模灌浆的。

60年代化学灌浆技术的发展为灌浆工作者提供了一种理想的手段,可能解决城区灌浆这个特殊问题又不至于引起劈裂和抬动。

鉴于这种新浆材的适用范围很宽,把灌浆当作一种通用的施工方法是可能的。因而,灌浆已被用到越来越大和越来越重要的工程项目。这些新的可能性又促使灌浆工作者对所有的灌浆技术进行优选,以便创造出更有竞争性的方法。

60年代取得的重要进展为灌浆技术开辟了新的前景。这些进展涉及到新的钻孔方式、灌浆方法(更快,更合理,常常更经济)和主要来自有机化学领域的新型溶液型浆材,如硬凝胶(硅酸盐加有机固化剂),水溶性树脂(丙烯酰胺,酚醛塑料,氨基塑料)。由于这些新浆材与水有同样的低粘度,所以没有不可灌入的土体。

20年前,在伦敦国际土力学专题讨论会上(1963年)描绘出了灌浆技术的状况,全面地讨论了新的灌浆技术(方法和材料)。大约同一时期,在建筑和公共工程技术研究所的会上,再次引用《圣经》中的一段话“聪明的人把房子盖在岩基上,风浪来了安然无恙”(第六章25节)。作者补加了一句:“但是,聪明的人,只要把灌浆工程师请来,他可以在任何地基上盖楼房”。

近20年(1963~1982年),灌浆方面有成绩也有缺点。成绩是灌浆的应用领域大大地扩展了;缺点是现在的灌浆承包人不但处于与灌浆同行的竞争之中,而且还要面对着与其他一般的承包人的竞争。例如,截水墙可以设想采用灌浆方法,或采用板桩帷幕;隧道施工可以在预注浆(保护性灌浆)之后开挖,也可以应用盾构技术等等。这些竞争的可能性迫使承包人去发展先进的灌浆技术,以便提出最有竞争性的方案。

灌浆效果和造价优选方面牵涉的问题有:钻孔和注浆方法,浆材优选,注浆技术。

● 本译文集使用了英制单位,如英寸(in),ft,lb等,是应废除的单位。他们与法定计量单位的换算关系为:1in=2.54×10⁻²m;1ft=0.3048m;1lb=0.453592kg。

一、钻孔和注浆方法

1. 钻孔

灌浆承包人配备了适合于各种地层（疏松的砂土，岩石……等）的高效钻机，这些钻机一般都装有钻孔参数记录器。

多年来，系统应用钻孔泥浆起到了减少钻孔时间的作用。近年来旋喷灌浆的应用（开始于日本），构成多种情况下的出色处理方法（例如防水底层的形成）。应用这种方法时，以喷射水流进行钻孔，紧跟着用同一设备进行灌浆。在压力作用下钻孔，然后将开关由底部方向的喷射转为水平方向的喷射，提升钻杆并慢速旋转，同时实现灌浆（图1）。

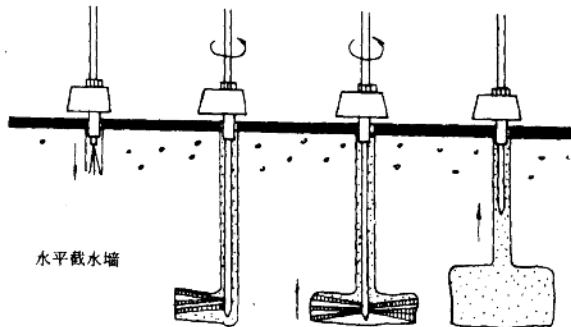


图1 旋喷灌浆法

2. 灌浆

浆液的制备和注浆工序越来越多地采用自动设备系统操纵。它们具有如下的功能：储存和稀释浆液组分；配比，混合，计量，泵送浆液；监测浆液的泵入压力和流量。这种自动化系统既缩短制浆时间，同时又计量精确。

计量精度对广泛采用的化学灌浆是很重要的。20%~30%水泥成分的误差对于水泥灌浆无关紧要，而对于化学灌浆很小的误差都是不允许的。

对液体浆液的计量精度和注浆材料的数量测定是通过比例泵或带有量测电极的浆罐来确定的。粉状材料则用自动秤称量。

二、浆材优选

按照不同的地层条件和希望达到的效果来选择浆材。它们必须有效地渗入土层，同时能达到预期的防渗和加固效果。

1. 浆液在土中的渗入方式

浆液渗入土层有三种型式：劈裂灌入；渗透渗入；劈裂浸透渗入。

(1) 劈裂灌入。劈裂灌入仅用于特殊的工程。如建筑物需水平抬高，需要造成一个防渗底层等。劈裂灌浆一般都用水泥浆液。

(2) 渗透渗入。以渗透渗入形式灌浆时浆液的选择是较广泛的。只是为了渗入土壤

孔隙,浆材必须要与孔隙大小相适应。

1) 龟裂粘性土壤,在灌浆压力作用下裂隙张开,水泥浆液可以灌入。最高上限到5刘容($K = 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$)。因此,仅在特殊需要时才使用非粒状化学浆液。

2) 另一方面,粒状土壤颗粒变小时对水泥浆液有过滤作用。由于水泥为颗粒性灌浆材料即使加入胶体颗粒的粘土到水泥浆中,仍然很难灌入渗透系数小于 10^{-1}cm/s 的土体。当土粒越来越细时必须灌注粘度很低的非粒状浆液。

利用颗粒级配标准,渗透系数和土壤比表面积大小,太沙基、里德尔、格洛索普、斯肯普顿、阿斯卡洛霍夫、肯别福特、迈凯等人给出了一个适于各种类型粒状土壤的系列灌浆材料类型:①宾汉体粒状浆材(粘土—水泥浆,膨润土—水泥浆)适用于粗颗粒土体,其特征参数为: $d_{10} > 0.5 \text{mm}$, $K > 10^{-1} \text{cm/s}$, $S > 10 \text{cm}^{-1}$;②胶体溶液或聚合物预聚体(硅胶或铬木素、鞣酸,有机或矿物胶体,聚氨酯)适用于中等粒径土体,特征参数为: $0.02 \text{mm} < d_{10} < 0.5 \text{mm}$, $10^{-1} > K > 10^{-3} \text{cm/s}$, $100 > S > 1000 \text{cm}^{-1}$;③纯溶液(丙烯酸胺,酚醛树脂,氨基树脂)适用于很细的土壤,特征参数为: $d_{10} < 0.02 \text{mm}$, $K < 10^{-3} \text{cm/s}$, $S < 1000 \text{cm}^{-1}$ 。

水泥浆与化学浆的界线是清楚的,当土的粒径太小时水泥灌浆只能劈裂灌入。从许多工地的经验,人们已观察到这个界线的准确性。特别要提到的是密西西比河上的26号闸坝的系统检测,如某地层 $K = 0.05 \times 10^{-1} \text{cm/s}$,接近膨润土—水泥浆的理论界线。在进行注浆试验后,从开挖中观察到这种浆液仅仅劈裂灌入。

另一方面,凝胶与树脂之间的界线是不明显的,因为两个化学浆的差别仅仅为粘度大小不同。它可以通过调整泵入速度来补偿。因此,可以用硅凝胶处理 $K = 10^{-4} \text{cm/s}$ 的细砂,其条件是泵入速度低于 100L/h 。

(3) 劈裂渗透渗入。上述土体以较高速注入硅溶胶(必然增加压力),浆液不以浸透渗入形式渗入土体,而是以劈裂和浸透渗入两种形式进入土体。在灌浆压力作用下灌浆孔周围产生一系列的圆盘形劈裂面,化学浆从这些劈裂面进入土壤(图2)。

根据利弗兰氏—门德尔斯定律(Lefranc-mandel's)可知每经过 33cm 段长有2~3个直径 $50 \sim 60 \text{cm}$ 的圆形劈裂面可以得到高的

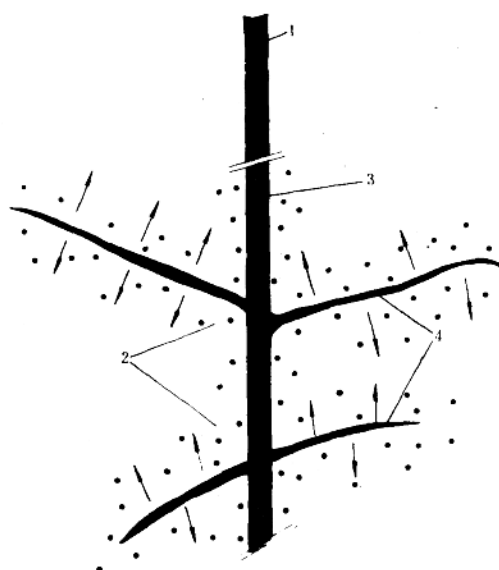


图2 劈裂渗透渗入灌浆

1—化学浆; 2—渗透渗入的化学浆(通过劈裂面和钻孔边缘);
3—灌浆孔; 4—灌浆劈裂面

注入率 ($0.5\text{m}^3/\text{h}$)。

假如灌浆的目的仅仅是防水, 这样的处理是足够的。但是, 若灌浆的目的是为了加固, 有凝胶体的劈裂面在土体中形成一个弱的滑动面。这种情况用水溶性树脂较好。

表 1 概括了渗入方式和土层类型两种参数的影响。

表 1 渗入方式和土层类型对灌浆的影响

地层类型 灌浆类型	粘性龟裂土体		松软土体	
	大到中等龟裂 $K > 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$	细小龟裂 $K < 10^{-5} \text{ cm/s}$	粗到中等粒径 $K > 10^{-1} \text{ cm/s}$	细粒 $K < 10^{-1} \text{ cm/s}$
劈裂灌入	C	C	A	A
渗透灌入	A	B	A	B
劈裂渗透灌入	C	C	C	B

注 A—水泥浆液; B—化学浆; C—无灌浆实例。

2. 预期结果

灌浆的目的是土体的加固和防渗。不要求防渗的加固是个别的。这种情况讲起来似乎有道理, 但是很少进行这方面的研究。

为了有效的防渗和加固, 必不可少的条件是所有孔隙都要被浆液所充填。这就要求很好地选择浆材, 特别是它要有渗入土体的能力。

当上述条件实现后, 则不透水性以及必要时加固作用都可达到。但同样需要的是能长期地保持处理效果。

(1) 不透水性。水在灌浆处理过的土层中运行时能溶解浆液中的可溶成分, 还可能对浆液产生一定的化学或物理化学变化。

这两个作用都可导致不透水性能的不同程度的损失。每一种浆材经受渗透水的溶滤后都有各自不同的表现。

除了浆材性能这个参数外还有外部因素, 如水的性能、土壤粒子的成分……等均产生影响。

面对这些复杂的情况, 很难给出一个通用性的规则, 慎重的办法是考虑到土层和水的各自特性对每一具体工程的适用情况进行专门的研究。

我们可以定性的指出:

- 1) 水泥浆液和水溶性树脂的老化性能一般讲是好的。
- 2) 硅酸盐凝胶的性能是有问题的, 除脱水收缩作用外(凝胶体本身的收缩使处理过的土体易于渗漏), 还可能发生凝胶变成溶液的可逆反应。
- 3) 固化剂的含量较高, 稳定性较好, 也很可能与固化剂的性能有很大的影响, 这个问题还未进行系统地研究。

(2) 加固作用。就防水性而论, 水泥浆材和水溶性树脂的老化性能都是相当好的, 而硅凝胶是有问题的。由于浸出不稳定的硅凝胶将导致强度降低。总之硅胶的蠕变影响也

是明显的。

硅凝胶由于蠕变而产生强度降低的有关参数仍未进行基础研究。这仍是一个有实际意义的大问题。因为设计一种浆材并不采用它与土体的早期强度,比如抗压 10.5kgf/cm^2 ①,而在一、二个月内由于蠕变其强度仅为 3.5kgf/cm^2 。纳伦伯格(Nuremberg)事故是一次深刻的教训。灌浆承包人选加固凝胶时必须考虑随着时间的推移而产生的强度损失。

按照本人的经验硅凝胶的老化性能变化相当大。其趋势是:被灌土体颗粒越细,老化性能越好;固化剂含量越高老化性能越好。

目前通常以快速标准破坏试验测定强度,对于硅凝胶来说,这个标准是不可靠的。对于一个给定的浆液,当我们用传统的方法来进行试验,在几分钟内试件破坏。其强度(R_c)关系式为 $R_c = f(D)$,如图3中曲线AB。但是当我们调整压缩仪,在使试件破坏时间延长至几周时,我们测得的数值与原来的数值大不相同(如曲线AC)。

我们已清楚地看出:一方面慢速试验的数值比较可靠,它比快速试验结果普遍偏低。另一方面最大抗压强度值出现在较高的固化剂用量的试件。

对所有用凝胶处理的土体的强度公式都应考虑到蠕变影响而重新计算。大家趋向于多加固化剂,但是对于传统的固化剂又常常导致凝胶时间缩短。

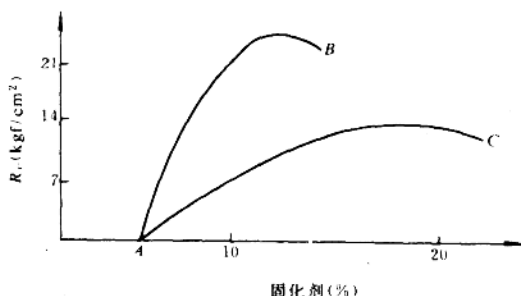


图3 应变速度的影响

B—快速试验; C—慢速试验

三、灌浆技术

为了得到好的灌浆结果,灌浆工作者必须根据粘度、凝胶时间、强度选择相适应的浆材,而且还必须清楚如何把它们注入土体之中。因此,必须对下述问题作出正确的选择:

①孔内装置; ②孔距; ③灌浆段长; ④灌浆孔分序; ⑤灌浆压力和注浆量。

对这5个参数作出最佳选择,灌浆工作者不用多花钱即可取得最好的结果。对于每一种参数已得出一些经验关系,使我们可以按照土壤的性能和要达到的目标作出最佳的选择,不会有危险,而且得到最佳质量/价格比值。因为不可能在这篇文章中对5个参数都进行讨论,我们将只讨论第一个参数。

几十年以来有两种传统的方法被用于孔内装置上:底孔管法和套阀管法。这两种方法是众所周知的方法,不在此赘述。

在致密地层(譬如裂隙岩石)最通常采用的灌浆方法是通过灌浆管的底部开口灌浆。而对于松软地层(砂土或砾石层),在美国和日本仍普遍使用底孔管,而在欧洲则普遍应用套阀管。

事实上不管哪种方法都没有在各国取得优势,这是因为它们两者都各有优缺点,见表2。

① kgf/cm^2 为压力的惯用单位,应废除。它与法定计量单位的换算关系为: $1\text{kgf/cm}^2 = 9.8 \times 10^4\text{Pa}$ 。下同。

透彻分析这 5 项标准将可作出有用的选择以便发展一种新的方法。它们具有两种传统方法的优点而无缺点。

1. 把钻孔和灌浆操作分开的可能性

在松软地层使用底孔管法, 很明显灌浆紧跟着钻孔, 在灌浆的整个过程中钻机不能移动。而使用套阀管法, 所有的钻孔可以一次钻完。套阀管被封埋在土层中, 然后进行灌浆。这样做有很大的实际好处。把灌浆和钻孔分开, 承包人可以很容易地撤走钻孔设备。

2. 在同一个孔内灌注几种浆材的能力

仅套阀管法灌浆提供了这种可能性, 这在非均上层中特别有意义。

3. 沿钻孔冒浆的危险

在套阀管法中, 套管外的填料凝结在整个孔的周围, 因此阻止了冒浆。

统计表明, 用底孔管法很难作到不冒浆。通常的方法是使用止浆塞。

对于粘滞性地层(裂隙岩层)止浆塞

很容易牢固地安装在地层里。效果是好的。但在松软的土层中灌浆塞的固定是不牢靠的。即使用很长的止浆塞也不行。

按照日本最近使用的方法。沿钻孔不冒浆是利用短凝胶时间而自动获得的。实际上这类结果虽好, 但有两个缺点: 一是产生劈裂, 一是作用半径比用传统方法要小。

4. 调节灌浆段长的能力

用底孔管法根据土层的情况灌浆段长可以选择, 用套阀管法灌浆段长是不可能选择的, 灌浆段的段长要与灌浆管上的橡皮套距离(一般为33cm)相一致, 不引起劈裂的灌浆流量 Q 由方程式确定。

$$Q = \frac{2\pi L P K}{\eta \ln \frac{L}{r}}$$

式中 K 决定于土壤的性能, r (钻孔半径) 实际上是常数, η 是浆液粘度, 其依被处理土层渗透系数的大小而定。

因此, 灌浆工作者仅有灌浆压力和灌浆段长两个参数可以改变, 以便达到相应经济的操作流量(例如最低150L/h)。假如 L 是常数(套阀管法灌浆即是如此), 承包人仅能改变压力, 这是很不如愿的事。最好是限制压力, 根据渗透性的大小调整长度。

5. 灌浆过程探测地层的能力

压力—流量曲线的测定是极重要的, 因为它可以跟踪处理过程的进程, 同时可以确定需要进一步处理的区段。

当使用底孔管法时, 可以清晰自动地连续测定上述项目。所以灌浆工作者对地层情况可以清楚地掌握。同时可以通过慎重地选定浆液系数(粘度、凝胶时间)和最好的灌浆方

表 2 两种灌浆方法的比较

判 别 标 准	底孔管法	套阀管法
可将钻孔和灌浆两步操作分开	不 可 以	可 以
在同一孔内连续灌注不同的浆液	不 可 以	可 以
沿钻孔有冒浆危险	有	没 有
调整灌浆段长	可 以	不 可 以
灌浆过程中探测地层情况	可 以	不 可 能

法来指导灌浆工作。

当用套阀管法灌浆时，应用类似测量结果是比较成问题的。因为测得的压力通过套阀填料层的劈裂作用造成了压头损失的影响作用。

通过对现有通用钻孔特性的分析，已明显看出，这两种传统方法，不管哪一种，可以相互借鉴。每一种都各有优缺点。另外，应用短凝胶浆液解决冒浆问题也带来新的问题。为了能采用最适于特殊地层的灌浆方法，必须全面掌握传统的方法。很明显，新型的灌浆孔内装置是有发展余地的。如上所述现在我们正处于寻找解决上述孔内装置缺点的研究阶段。

四、结 语

过去仅仅当传统方法不可行时才使用灌浆方法。由于这种原因，常常是一筹莫展。无法顾及寻求最优价格的问题。

但是，最近越来越多地把灌浆当成一种施工方法，而不仅是只作修补。在每一个地下建筑工程，具有竞争性的各种方法的造价分析中常常包含灌浆方法。因此灌浆承包人必须寻求越来越有竞争力的方法。

灌浆的总价格由三方面的因素构成：①钻孔；②浆材；③灌浆方法。为了达到具有竞争性的方案，灌浆承包人必须注意每一个因素。例如：最大的孔距（因素①），灌浆材料不能浪费（因素②）与地层条件相适应的最大的灌浆量（因素③）。

最优化常常不是那么容易达到的。因为上述三种因素之间是相互影响的。例如，增加注浆速度（满足因素③），可能造成地层劈裂，引起浆液损失（增加了因素②）等等。

对灌浆工作者难办的事情是他必须处理不同性能特征的土层。为了获得较好的结果，因此他必须不断地适应这些变化。目前灌浆工作者具有的方法多种多样。常常可以找到最好的方法。

为了识清这一点，我们依靠欧洲的经验，同时也依靠对美、日等国工程的调研总结。近几年来对这一问题的认识已取得和正在取得进展。

我们面临的问题即这次会议的目的是必须发展改善灌浆过程的新方法。我们认为要特别着重如下问题：

- 1) 钻孔和灌浆过程中分析地层渗透性的有效方法。
- 2) 新型的孔内装置。
- 3) 较好地掌握浆材的老化性能。

译者 肖田元

校者 郭玉花

结构化学注浆的设计和施工

Wallace Hayward Baker

提 要

结构化学注浆已发展成为用来现场改良砂性土的合理的土工施工技术。本文论述了结构化学注浆的设计和施工技术的概念。这些概念是在地下快速交通施工中实施许多大型化学注浆的基础上产生的。本文以设计者的观点进行讨论,对结构化学注浆的对象、重要的土工参数、设计程序自身、注浆计划的细节和监控以及效果的评估给予了重视。

一、引 言

结构化学注浆是在粒状土体中用压力注入可凝固的液态浆液,该液态浆液与土体凝结而成类似砂石状材料。结构化学注浆的目的是提高砂土的强度和刚度。本文主要以设计者的观点总结了结构化学注浆设计和施工技术的基本概念。本文所表达的概念来自无数化学注浆项目,并被这些项目所检验。这些项目包括十多个在开挖地铁隧道和车站方面的主要应用实践,这些概念还经联邦公路局的研究得到了澄清。联邦公路局的Tallard和Caron(1977)以及Herndon和Ienhen(1976)对注浆材料的化学性能和注浆的机械体系作了研究。

化学注浆的步骤:①建立注浆的特殊目标;②明确待加固区和控制区的土工条件;③对注浆方案进行合适的设计并与规范相符;④注浆计划的设计及实施;⑤注浆的监控和评估。

二、注 浆 目 的

“结构化学注浆”这个术语是用于表达改善可灌性土体的强度或刚度的化学灌浆,注浆目的是防止土体坍落,或者减少施工期间的土体位移和改善承载能力等。“防水注浆”这个术语用来解释以止水为主要目的的化学注浆,否则会发生水流导致土体位移或大量无法承受的地下水流入施工区域或二者均有发生的情况。尽管许多浆液领认为是永久性的,例如在正常情况下有超过20年的使用寿命,但是绝大多数的结构化学注浆仅需要几天或几个月的使用寿命。

设计的目的经常是使非粘聚性土(在无侧限条件下强度为零的土体)获得足够的凝聚力,以防止坍落或土体流入开挖面、隧道和竖井。结构化学注浆的另一种应用是托换基础,使基础下方的粒状承载土得到加固,以允许临建基础的开挖。在这些情况下,由于侧限约束应力的减少而导致的土体强度损失,可由增加土体粘聚力的注浆来补偿。几种不同的结构注浆应用见图1所示。

大多数的施工合同注重甲方—承包商—工程师三者之间的法律、商务、责任方面，对施工项目本身的技术上的考虑并不注重。这就导致了这样一句话：“承包商必须用化学注浆来防止由于相邻开挖时保护结构物所造成的任何破坏”。这句话遮盖了设计者这样的意图，即注浆仅仅是提供临时结构支撑，以防止建筑物产生结构上或主要表面的破坏，而不是将沉降减少至“零”。在这种情况下，不用通过规范，设计人员可估计沉降量会达到15mm。这样，设计者应该用工程术语表达他的目标，例如：承包商应将邻近结构物基础的垂直沉降限制在15mm以内，图纸上的化学灌浆方案是达到这一目的的典型方案，承包商应证明：“设计者的注浆方案将取得上述建筑物沉降减少的目的”。

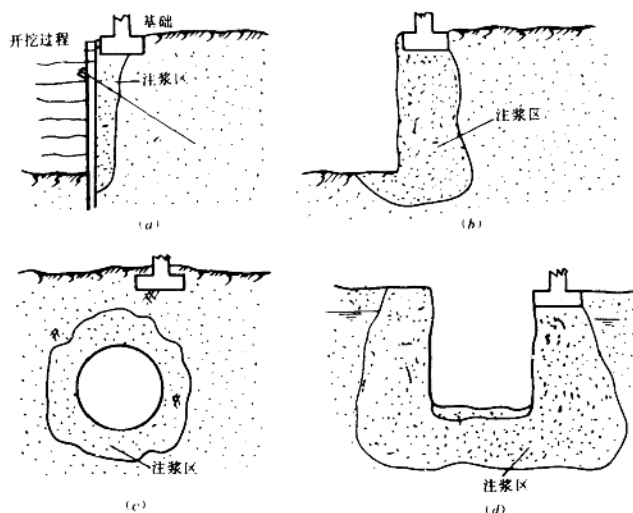


图 1 结构化学注浆的应用

(a) 作为挡土；(b) 支撑基础；(c) 隧道注浆支撑；(d) 用作水位下基础开挖

下列三种情况为不能达到注浆目的的三种不同后果，试比较之：

1) 化学注浆法托换基础用以减少邻近地铁隧道的二层建筑物的沉降。该地铁隧道埋深7m，处于密实粒状土层中。隧道的建段表明：沉降量可达3cm。

2) 软土中某大直径隧道在一具有地下室的五层公寓的边角柱正下方3.5m处穿越。

3) 某地铁隧道从一条不能分流的已活动的下水道下方1.5m处通过，该管道是一条直径为1.5m的旧管道。

在第一个例子中，化学注浆量减少因结构和表面产生破坏和造成相应的商业活动中断而必须承担的商业责任。在第二个例子中，假如化学注浆不成功，结构上的破坏将会产生，但是也不致于快得发生人命事故。在第三个例子中，化学注浆若没能达到目的，下水道将是灾祸。

在化学注浆方案中，预先提出一个明确、定量的目标是一个完善设计和满意的经济措施的基本必要条件。

三、关心重要的土质条件

化学注浆与其说是整个施工过程中的一部分，不如说是用来解决特殊施工问题的一种典型方法。它的使用经常与土质异常或特殊情况有关。这就要求有附加的土质资料。而这些资料在常规的土工勘测中是得不到的。钻取一些附加的半连续土样、对土样做更仔细的分类、做一些特殊的室内试验以仔细地解说特殊的土质情况，对于要用化学注浆来解决的问题是必要的。至少，必须对所有能获得的土层条件做一个分类的说明。

1. 可灌性

当考虑采用注浆时，基本问题之一是地层是否能灌入？所谓“可灌”的土体是指在实用压力范围内能接受足够流量的化学浆液，在经济上又是可行的土体。可灌砂的渗透性可在3~4个数量级上变化，从1cm/s的纯砂到 10^{-4} cm/s的含有20%粉粒和粘粒（通过200号筛）的粉质砂土。

实用的浆液流量是从2~20L/min，但有时低到只有1L/min或高达40L/min。流量超过40L/min就难以控制，可作为水泥注浆的流量。流量低于1L/min就不实用，因为每天的注浆量在小于这个流量时，即使用群孔注浆方法也会非常少。此外，还需要胶凝时间很长的浆液，使在土中具有足够的流动时间来达到实用的浆液流动范围。

在地层产生不可控制的劈裂之前，注浆流量的增加与注浆压力的增加大致成正比。当未注浆土体劈裂伸展至离注浆点不太近时，相邻的土层将不适宜注浆。其后果是注浆的失控和无规律性。注浆土体的劈裂是另外一种现象，为完善邻近未注浆区加固，初次注浆后的劈裂是必要的。

对于一定压力下的水力劈裂主要由局部有效应力、强度和渗透性来控制。这样，在非均质原状土体中，劈裂会在低有效应力或低渗透性的点开始并要达到一个较高的有效应力或强度和渗透性区域才波及整个区域。这样，就阻碍了劈裂的无限发展。最小主应力决定产生水力劈裂的压力值。初始的水力劈裂一般沿着垂直面发生。加固土体能在压力低到只有覆土压力一半时发生劈裂，或者在压力达到3~4倍的覆土压力的时候也不发生。因此在加固地层中用压力控制劈裂不是一个可靠的方法。

土体的原始渗透性是可灌性的主要指标。土体渗透性在 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ cm/s范围内是很容易灌浆的。渗透性在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s的土体是适度可灌的，当土体渗透性在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/s范围内时，土体仅仅是处于可灌的边缘。在实际上可能是不可灌的。渗透性小于 10^{-5} cm/s的土体被认为是不可灌的。有一条经验规则：细粒含量小于12%的土体是易灌的，细粒含量在12%~20%之间的土体是适度可灌的，而细粒含量在20%~25%之间的土体仅仅是处于可灌的边缘。图2表示出可灌性土体的典型分布范围。

2. 地下水

假若重视地下水的化学和水力效应，不论在地下水的上方还是下方进行化学注浆均可获得同样好的效果。为了选用合适的化学浆液，必须对地下水进行取样测试。例如，pH值高的地下水会对水玻璃浆液产生破坏作用，缓慢初凝和促使浆液随时间而分解。pH值低的地下水能加速水玻璃浆液的凝固，但能延缓丙烯酸酯和丙烯酸盐类浆液的凝固。地层中的

有机物质或地下水也可以对化学浆液的质量和凝结时间有很大影响。了解地下水流的方向和流量也是很重要的，以便于区分地表水和地潜水，了解涌水压力和预估在地下水位上注浆的可能效果。

3. 孔隙率

为了计算一定土体中注入化学浆液的体积，相当仔细预估被灌土体的孔隙率是必要的。典型的土体孔隙率是0.25~0.45。如果孔隙率为0.35，每一立方土体需要350L化学浆液。由于化学注浆的主要费用是在化学浆液的耗费上，因此孔隙率对费用有重要的影响。多余的化学浆液会导致地表隆起，所以有必要正确计算孔隙率。由于更精确的数据通常不易得到，常用标准贯入度“N”值来大致地换算土体孔隙率。

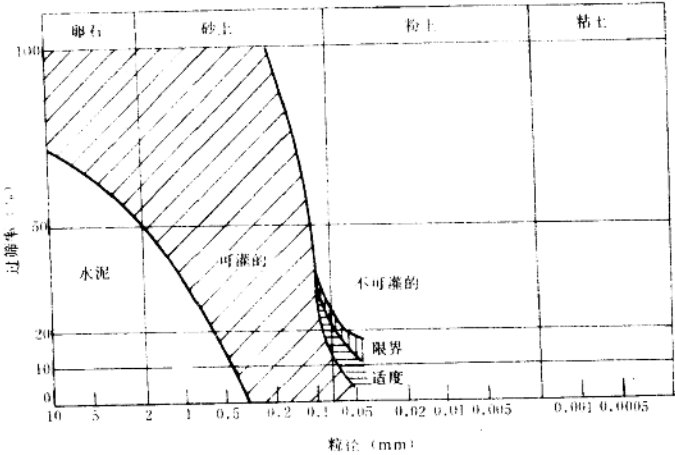


图 2 适用化学注浆土体的颗粒尺寸分布

4. 环境历史

尽量准确地了解地下土层的情况，获得加固范围内先前施工的历史是重要的。旧竖井、井、贮水池等的存在能使浆液迁移至远离而不是邻近注浆加固区。原计划的注浆加固区将因此而减少。钻探工和注浆技术员应记下钻进和注浆过程中每一个异常现象。这些异常现象包括埋钻、钻孔正常速度的突然增加和减少、注浆压力的突然波动（特别是注浆经过一段时间后达到一定注浆量时）以及注浆压力和流量的进展不协调。这些异常应得到解释，并在注浆前予以考虑其重要性。

四、工 序 设 计

结构化学注浆的设计常常包括土与结构相互作用的问题。砂石状浆液的结构作用是设计的基础。化学浆液的选择部分地取决于所需的加固体性能，这反过来也影响到加固区的形状和尺寸，所有这些将在适当的注浆设计分析中考虑。

1. 化学浆液

自从50年代初的第一批产品问世以来，无数“单液”浆材得到开发。它们使用催化剂