

超深部土体地面高压射孔注浆现场实测研究

Field measurement study on ground perforation grouting for ultradeep soil

黄 诚¹, 杨维好¹, 王宗胜^{2,3}, 冯向东^{3,4}

(1. 中国矿业大学 建工学院, 江苏 徐州 221008; 2. 兖矿集团公司鲍店煤矿, 山东 邹城 273512;

3. 兖矿集团公司地质公司, 山东 邹城 273512; 4. 枣庄矿业集团公司工程五处, 山东 枣庄 273512)

摘 要: 根据鲍店煤矿井壁破裂灾害治理注浆工程的实践, 对适合于超深部土体(超过 100 m)的钻孔上行式聚能射孔注浆施工工艺进行了完整的描述, 指出实际工程中容易发生的工程事故, 并提出改进措施和注意事项; 对整个注浆期间的压力变化情况进行了现场实测研究, 并引入“水压致裂理论”对裸孔段注浆进行了理论对比分析; 运用“裂隙扩展的能量分析原理”阐述了劈裂注浆的流量调节法。最后根据钻探取芯资料 and 实际工程中观察到的现象, 从侧面对单孔注浆时浆液在深部地层的扩散方式与范围进行了推断。得出的实测数据与结论对今后类似超深部土体注浆工程的设计与施工有重要参考价值。

关键词: 上行式射孔注浆; 注浆压力; 水压致裂理论; 浆液扩散方式与范围

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)04-0442-06

作者简介: 黄 诚(1977-), 男, 湖北荆门人, 硕士, 助教, 主要从事冻结法与注浆法特殊凿井的信息化施工研究工作。

HUANG Cheng¹, YANG Wei-hao¹, WANG Zong-sheng^{2,3}, FENG Xiang-dong^{3,4}

(1. China University of Mine and Technology, College of Civil Engineering, Xuzhou 221008, China; 2. YanKuang Co. Baodian mine, Zoucheng 273512, China;

3. YanKuang Co. Geology Engineering Company, Zoucheng 273512, China; 4. ZaoZhuang Mine Co. The fifth Engineering Company, Zaozhuang 273512, China)

Abstract: According to the practice of grouting engineering of BaoDian mineshaft lining fracture treatment, the construction technology of bottom-up perforation grouting suitable for ultradeep (not less than 100 meters) soil ground grouting is described in detail, the most commonly-encountered engineering accident is pointed out and the accident prevention method is proposed. The grouting pressure is studied by field measurement; then “the hydraulic fracturing theory” and “the energy analysis principle for fracturing” are used to analyze gymnostomous grouting and the flux control method is applied for fracturing grouting and range. At last, diffusing way of the single bore grouting are deduced by drilling-core and some engineering phenomenon. The data and conclusion presented in this paper are valuable as a reference for design and construction of similar grouting projects.

Key words: bottom-up perforation grouting; grouting pressure; hydraulic fracturing; slurry diffusing way and range

0 引 言

在矿建工程中, 要涉及到深度超过 100 m 的超深部土体的地面高压注浆, 即通过钻孔和一定的施工工艺将浆液从地面注入深部地层。由于上覆地层压力较大, 超过 2.5 MPa, 往往要使用较高的注浆压力。其机理与施工工艺也不同于一般的浅部土体注浆和深部岩石注浆, 这种注浆常常用于加固深部地层、矿井防止水、抬升地层等方面, 用途广泛。但由于其涉及到浆液与地层的相互作用, 是一个流体力学与岩土力学相耦合的十分复杂的模糊的工程问题, 要对其进行解析理论研究和室内模拟试验研究都有较大的难度。事实上目前关于深部注浆理论研究的水平也是相当有限的, 大大落后于注浆工程实践的发展^[1,2], 所以积极开展深部岩土注浆理论的现场实测研究是十分必要的, 也是有重大工程应用价值的。

本文拟结合兖矿集团所属鲍店煤矿井壁破裂灾害治理的注浆工程实践, 对适合于超深部土体的钻孔

上行式聚能射孔注浆施工工艺进行研究, 指出实际工程中容易发生的工程事故, 并提出改进措施和注意事项; 由于注浆压力关系到地层能否顺利进浆、注浆泵的合理选购、浆液的扩散方式与范围、注浆期间浆液扩散范围内的地下结构物的安全性等问题, 是一个十分关键的设计参数, 所以本文对注浆期间的泵压变化情况进行了现场实测研究, 最后引入“水压致裂”理论对注浆压力进行了理论研究的尝试, 并与实测值进行了对比; 单孔注浆时浆液的扩散方式与扩散范围关系到整个注浆工程的效果和经济性, 但如何确定和控制浆液的扩散范围却是一个十分困难的问题, 因为目前还没有较好的方法可以计算或测试, 再加上深部注浆工程的隐蔽性极强, 使得我们较准确地确定浆液的扩散方式与范围有困难。所以本文拟通过钻探取芯资料和在实践中观察到的一些现象, 从侧面推断浆液的扩散方式与范围, 从而得出浆液在一定泵压, 一定流

量和一定上覆地层压力下扩散的大致规律, 为今后类似的注浆工程设计与施工提供参考。

1 工程概况

本次注浆工程的目的是通过注入一定配合比的水泥和粉煤灰加速凝剂的复合浆液加固深度为 120~150 m 的表土层, 同时附带起抬升地层和井筒止水的作用, 其原理见图 1 说明。

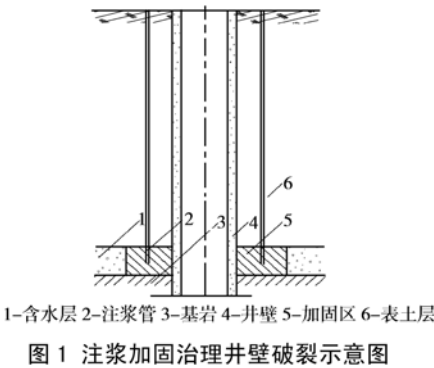


Fig.1 Schematic diagram of grouting reinforcement for mineshaft lining fracture treatment

1.1 地质资料

根据注浆段高划分的地质柱状如表 1 所示,
表 1 注浆段高范围内的地层描述

Table 1 Description of stratum			
序号	深度范围/m	岩性描述	注浆方式
1	120~122	粗砂 2.0 m	射孔
2	122~124	粗砂 2.0 m	射孔
3	124~126	粗砂 1.55 m, 粗砂砾 0.45 m	射孔
4	126~128	粗砂砾 1.65 m, 粘土 0.35 m	射孔
5	131~133	粘土 0.12 m, 粘质粗砂 1.50 m, 粘土 0.38 m	射孔
6	135~137	粘土 0.7 m, 粘土质中砂 0.8 m, 粘土 0.5 m	射孔
7	138~140	粘土 2.0 m	射孔
8	141~143	粘土质粗砂 2.0 m	射孔
9	143~145	粘土 0.65 m, 粘土质粗砂 1.35 m	射孔
10	145~147	粘土质中砂 0.85 m, 粘土 1.15 m	射孔
11	147~150	风化基岩 1.31 m, 粘土质中砂 1.69 m	裸孔

1.2 注浆孔布置情况

注浆孔的平面布置如图 2 所示。孔位布置原则为根据单孔浆液扩散范围, 尽量使各孔的浆液扩散很好的交圈, 形成较完整的具有一定宽度的加固体。

1.3 注浆孔的结构

按照开孔坐标, 在经探测确认下方无地下管线的条件下, 开孔采用 $\phi 91$ mm 无芯钻头钻进 10 m 小径探孔后, 换用 $\phi 220$ mm 钻头钻进至井口管深度, 下入 $\phi 195$ mm 井口管并固管。随后用 $\phi 150$ mm 钻头无芯钻进至 119 m 深, 再用取芯钻头取芯钻进至 150 m 深度, 最后在 0~146 m 段下入 $\phi 127$ mm $\times$ 4.5 mm 内平套管, 在套管外圈用水泥固管, 见图 3 所示。

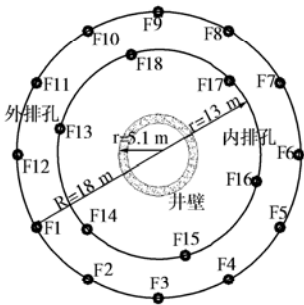


图 2 注浆孔平面圈径示意图
Fig.2 Plane layout of grouting bore

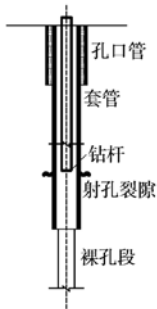


图 3 注浆钻孔结构图
Fig.3 The structure of drilled grouting bore

1.4 止浆方式与聚能式射孔工艺

不用止浆塞, 在孔口止浆, 钻杆口以上的环形空间充满清水, 浆液通过钻杆经套管射孔处或裸孔段注入地层, 称之为“钻杆定位注浆”。

聚能式射孔的实质是利用聚能式爆炸射穿地层内的护壁套管, 并进一步射入地层, 使地层产生裂隙, 然后通过被射穿的孔道对一定深度的地层实施定位注浆。

1.5 注浆工序^[3]

(1)注浆站技术员通知射孔施工方对某一段高进行射孔, 同时进行跟班监理。

(2)通知钻机施工方进行扫孔, 扫孔采用 $\phi 91$ mm 钻头、 $\phi 89$ mm 岩芯管大泵量冲洗循环, 并保证投孔

到位,孔底冲洗干净,以保证注浆顺利进行。

(3)然后仔细检查管路联接是否正确、完好;准备就绪,启动注浆泵;按设计注入定量(1 m^3)清水,其间,先打开联接于套管壁上的高压阀门,一旦发现从钻杆与套管间的环形空间向上返水,即:从高压阀门返水,立即关闭高压阀门,以确保钻杆与套管间的环形空间为水所充满。随后将泥浆泵(与钻机配套的泵)与阀门相联。

(4)压水结束且无问题时,开始注浆。注浆时注浆泵要有专人操作,密切注意泵压变化。每次注浆结束后,用注浆泵吸清水通过钻杆向下压水 1.0 m^3 。压水结束后,紧闭阀门养护 8 h ,然后拆去钻杆上的注浆管,接上废水排泄管,然后用泥浆泵吸清水通过套管与钻杆间的环形空间向下压水,当从钻杆中返清水时停止压水。

(5)卸开套管上端的法兰,用钻机起落钻杆 $3\sim 4$ 个来回,然后将法兰恢复原状,即可等候下次注浆。

1.6 常见工程事故分析与处理

经过实践,现对此种工艺注浆常见工程事故的发生与处理总结如下:

(1)埋钻,埋钻是因为注完浆压完水后,由于某种原因,套管环形空间中仍然有浆液存在,浆液凝固后,造成不能拔起钻杆。造成浆液仍然留在环形空间的原因主要有,一是注浆时井口阀门未关闭严实,有漏水现象,造成浆液沿环形空间向上运动,从而留在环形空间中凝固埋钻;二是在未返清水前就提前关闭阀门,使得环形空间未被清水充满,从而造成浆液向上运动;三是注浆结束后,在关闭阀门养护期间,地层超孔隙压力未消散,而井口阀门漏水,使得注入地层的浆液又沿射孔通道返回钻孔,从而造成埋钻。从以上的分析可以发现,井口阀门的密封性是非常关键的,在注浆期间一定要派专人巡视检查,及时发现,及时处理。

(2)钻孔间串浆。当一孔注浆,而另一孔从孔口返浆,就是串浆。串浆是因为高压浆液在地层中劈裂运动,到达某一钻孔射孔裂隙处,如果该钻孔口未封闭,钻孔内的液柱压力小于地层中的浆液压力,则浆液就会从射孔处流入钻孔内,如果发现不及时会造成浆液大量浪费。所以在一孔注浆时,其它各孔皆应注满清水,并封闭孔口。

(3)地层在较高压力下仍不能进浆,这可能是因为射孔质量不好,或者地层强度本身很高,浆液难以在其中劈裂运动,此时应多压水或重新射孔。

(4)地面冒浆,为了保证射孔注浆的质量,一般应使浆液沿水平向运动,但在工程实践也发现过地面冒

浆的现象,这说明浆液通过竖向劈裂运动到达了地面或者套管中间某处接缝不严漏浆。出现这种情况,在以后的注浆中应减小注浆流量、压力,同时延长养护时间,让竖向裂隙充分闭合;还要提高钻孔施工质量,加强监理。

(5)井筒跑浆,井筒跑浆危及井筒安全,通过井壁变形实时监测系统对出浆进行了超前预报,然后及时降低泵量和注浆压力保证了井筒的安全。

2 注浆压力实测及理论计算研究

2.1 裸孔段注浆压力的实测与理论计算对比研究

由于本次注入浆液为普通水泥与粉煤灰的混合浆液,其粒径较大,无法对致密的深部土层实现渗透注入,浆液的运动方式以劈裂为主^[1,2],附带压密作用。所以可以引入“水压致裂”理论对裸孔段的注浆压力进行理论计算。

从弹性力学理论可知,当一个位于无限体中的钻孔受到无穷远处二维应力场 (σ_1, σ_2) 的作用时,离开钻孔端部一定距离的部位处于平面应变状态,见图4。在这些部位,钻孔周边的应力为^[4]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \sigma_1 + \sigma_2 - 2(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \\ \sigma_r &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 σ_{θ} 和 σ_r 分别为钻孔周边的切向应力和径向应力; θ 为周边一点与 σ_1 轴的夹角。

由上式可知,当 $\theta = 0^\circ$ 时, σ_{θ} 取得极小值,此时

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_2 - \sigma_1, \quad (2)$$

当注浆压力超过 $3\sigma_2 - \sigma_1$ 和土层抗拉强度 T 之和后,在 $\theta = 0^\circ$ 处,也即 σ_1 所在方位将发生孔壁开裂,地层开始进浆,此时注浆压力 $P_i = 3\sigma_2 - \sigma_1 + T$,随着注浆的进行,使裂隙进一步扩展,当裂隙深度达到三倍钻孔直径时,此处已接近原始地应力状态,此时的注浆压力 $P_s = \sigma_2$ 。

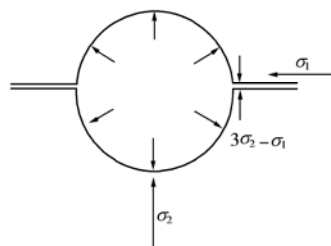


图4 水压致裂示意图

Fig.4 Diagrammatic sketch of hydraulic fracturing

为了验证这个计算方法,对注浆压力进行了现场实测,作用于地层的浆液压力应该等于注浆泵压力 P_1

加上钻孔浆液柱的压力 P_2 , 本次鲍店裸孔段深度为 150~147 m, 取地层重度 $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, 则上覆地层压力为 2.85~2.79 MPa, 取浆液重度为 $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, 则浆液柱压力为 $P_2 = 2.25 \sim 2.2 \text{ MPa}$, 由于在深部地层, 其水平地应力趋向于与竖直地应力相等, 可取 $\sigma_1 = \sigma_2 = 2.85 \sim 2.79 \text{ MPa}$, 则

$$\begin{aligned} P_i &= P_1 + P_2 = 3\sigma_2 - \sigma_1 + T \\ &= (5.7 \sim 5.58) \text{ MPa} + T, \text{ 则泵压} \\ P_1 &= 3\sigma_2 - \sigma_1 + T - p_2 \\ &= (5.7 \sim 5.58) \text{ MPa} + T - p_2 \\ &\approx 3.5 \text{ MPa} + T. \end{aligned} \quad (3)$$

如果忽略土层的抗拉强度 T , 但要算上泵压沿管路的沿程损失和活塞式注浆泵的“水力锤击”效应, 另外由于平面应变条件的假设未考虑端部约束, 则泵压应大于 3.5 MPa。而通过我们对裸孔段注浆压力的实测, 其值见图 5 中段高为 148.5 m 所对应的测值, 以上测值都是在正常注浆 3 档下测定的。从统计规律上看, 其平均值 3.53 MPa 符合计算值, 从一定程度上验证了公式计算的准确性。

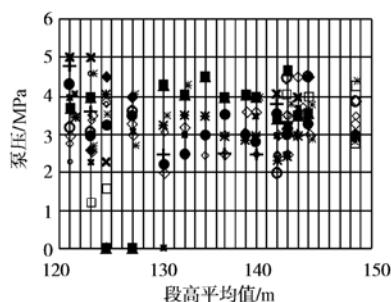


图 5 实测泵压沿段高的分布

Fig.5 Measured pump pressure at various compartment

2.2 射孔段注浆压力的实测

射孔深度、孔径与管材、岩性有关, 一般入口孔径大, 随后逐渐减小。钢材入口孔径可在 15 mm 以上, 完全可以满足浆液通过的要求。射孔穿透深度一般为 200~300 mm。射出的孔径一般为 8~12 mm。在射孔段, 浆液是通过射孔裂隙注入地层的, 通过我们对射孔段注浆泵压的实测, 其值见图 5, 其中出现一些泵压接近于零的现象, 说明在浆液柱的压力下地层就可以进浆, 所以泵压力接近于零, 其它的值集中在 3.5 MPa 左右。数据统计还表明有些孔的注浆泵压普通高于其它孔的, 说明加固效果不均一。

2.3 泵压与流量的实测关系

以上只是从静力学的角度分析了注浆压力, 而实际上浆液是运动的, 它与注浆泵的流量有很大的关系, 我们所使用的注浆泵型号为 NBB-250/6 卧式单作

用活塞式泥浆泵, 可以通过换档调节流量, 根据现场的换档试验数据显示(见图 6), 注清水时泵压与流量成较好的线性关系; 但在注浆时换档试验却发现了不同的规律, 从高档换低档并不总是能降低泵压, 这可能是因为注清水时是以渗透为主, 所以流量大则注浆压力大; 而注浆时浆液以劈裂运动为主, 附带压密和渗透, 所以与流量与泵压的相关关系不明显, 在注浆换档时, 注浆泵的工作会稍有停顿, 浆液压力下降, 地层裂隙闭合, 再次升压注浆要重新打开裂隙, 有可能需要更大的压力。所以在注浆时, 最好保持连续注入, 一般不要中途换档。

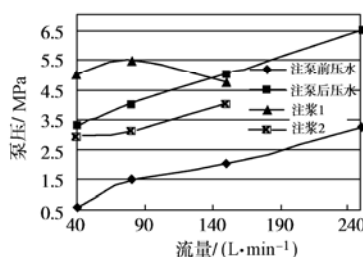


图 6 流量与泵压的实测关系

Fig.6 Measured flux-pump pressure curves

2.4 从注浆压力变化看注浆效果

另外纵观整个注浆工程期间的压力变化趋势, 如图 6 所示。发现, 随着注浆量的逐渐增大, 注浆平均压力也逐步提高, 其提高幅值大约为 2~3 MPa, 根据 3 式可以判断地层主应力水平得到提高, 地层更加密实, 抗拉强度也增大, 总之, 注浆压力的增大, 显示出了良好的加固效果。所以, 可以把注浆压力定为注浆工程结束的控制指标之一。

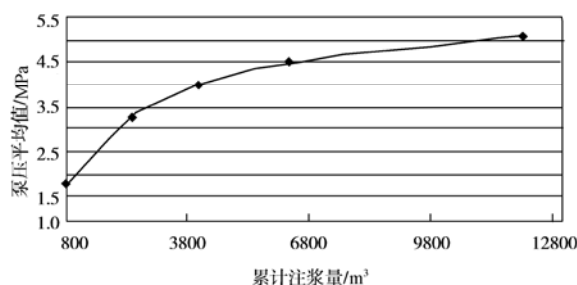


图 7 累计注浆量与泵压的实测关系

Fig.7 Measured pump pressure-slurry quantity curves

3 劈裂注浆施工的流量调节法

采用活塞式注浆泵注浆时, 活塞以一定的压力推动浆液向前运动, 是典型的物理做功过程, 其功率为, $W = P \cdot V$, 式中 W 为活塞对浆液做功的功率, P 为泵压, V 为注浆泵的流量。但泵压难以直接控制, 而

通过操纵机械却可以方便地调节流量。

为了更加深刻地分析劈裂、压密型注浆的流量调节法,有必要引入断裂力学里以能量分析为基础的裂纹扩展力的相关概念与思想方法^[5]。首先可以把充满高压浆液的地层裂隙看作为带内部裂纹的封闭承压体系,如果忽略浆液粘性摩擦生热,则

$$P_i dv_i - dU - \Gamma dA = 0, \quad (4)$$

式中 P_i 为封闭承压体系的内压,等于泵压加浆液柱的压力也就是注浆压力; V_i 为裂隙总体积; U 为整个的土体能量,包括弹性应变能和重力势能; Γ 是断裂力学里的材料特性参数,一般称为裂纹扩展阻力,等于裂纹扩展单位面积时土体由于裂纹尖端面的卸载效应所释放的弹性应变能,而土层劈裂面薄层发生塑性形变所消耗的塑性功决定其大小。下面在式(4)两边同除以 dt , 则

$$P_i \frac{dV_i}{dt} - \frac{dU}{dt} - \Gamma \frac{dA}{dt} = 0, \text{ 进一步可以得到}$$

$$P_i V - \frac{dU}{dt} - \Gamma \frac{dA}{dt} = 0. \quad (5)$$

式中 V 等于注浆泵的流量, $\frac{dU}{dt}$ 包括地层抬升导致的重力势能增加率和地层弹性应变能增加率,其中后者决定于裂隙尖端面上的地应力, $\frac{dA}{dt}$ 为裂隙面积的扩

展速率。结合图8分析,式(5)的启示为,加大注浆流量将有利于强度较高地层的劈裂进浆,而减小流量可以减小裂隙扩展速率将有利于控制浆液扩散范围。为此,当施工遇到难进浆地层时,常采用加大流量的办法冲开裂隙;而当需要控制浆液扩散时可以减小流量。

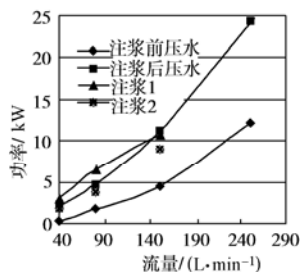


图8 流量与功率的实测关系

Fig.8 Measured relationship between flux and power

4 关于浆液扩散方式与范围的调研

4.1 关于钻探取芯资料的分析

根据单孔设计要求,新施工的注浆孔进行了取芯,以检测邻近孔的注浆效果。从岩芯情况分析来看,在粘土层与砂层接触面处发现了大量的呈层状分布的水泥充填迹象,这是典型的劈裂注浆现象;在 F6[#] 注浆孔施工至 127.16~137.94 m(连续 4.78 m)取上呈块状水泥凝固体,胶结致密、坚硬;在 Z1[#] 注浆孔施工至 122.70~132.31 m(连续 9.61 m)均为水泥凝固体,呈长柱状,胶结致密、完整且坚硬。大量完整结石体的存在表明了典型的压密注浆形式。通过对主、副井注浆孔取芯情况总体分析,所有地层均有明显的水泥充填迹象,特别是在粘土层的接触面处微薄注浆层较发育,这也是深厚表土注浆发现的一个新现象。其它层段肉眼无法验收,但岩性的胶结程度明显致密,说明劈裂、压密型注浆对地层的挤密作用十分明显。同时根据地层沉降监测资料显示,注浆后地层都有不同程度的抬升。

4.2 关于浆液主要运动方向的推断

对于上行式射孔注浆来说,为了达到特定的注浆效果,要求浆液的主要运动方向为水平向。我们在注浆过程中观察到的三个现象都可以在一定程度上说明浆液的运动方向,一是当某一段高的射孔段注浆,并筒某个层位有时会出现跑浆,这说明浆液水平劈裂运动到达了并筒所在部位,并且保持了相当大的压力穿过双层井壁的不密封处进入并筒;二是一孔某一段高注浆时,有时在其它孔出现冒浆现象,由于钻孔只在射孔处有孔隙,这也说明浆液水平向劈裂运动到达其它钻孔射孔处并且保持了相当大的压力,不然不足以从孔口冒出;三是当一孔某一段高注浆时,与其方向和层位相对的井壁变形传感器所测变形明显大于其它方位的传感器的测值,从以上三个方面可以推断在射孔注浆中浆液在地层中以水平向劈裂运动为主。

另外我们还观察到过少数几次地面冒浆的现象,如果排除钻孔施工的密封质量问题,说明在极少数的情况下,注浆时也出现了浆液以竖向劈裂运动为主的情况,此时一般应立即停止注浆,否则将造成浆液的大量浪费,而且还达不到预定的效果。

4.3 关于浆液扩散范围的推断

本次注浆工程单孔注浆浆液的水平扩散范围,在单次注浆量小于 10 m^3 的前提下,是按小于 10 m 设计的,所以确定实际的浆液水平扩散范围对于评价注浆效果有重要意义。但深厚表土注浆工程的隐蔽性极强,无法确切的知道浆液的扩散范围,但通过实际工程中观察到的一些现象,可以从侧面对浆液的大致扩散范围进行推断,一是某一孔注浆时出现并筒跑浆现

象, 根据设计外排孔距井壁有 13 m, 浆液扩散 13 m 到达井壁时仍然保持有相当大的压力, 因为它还可以穿透双层井壁的裂隙进入井筒, 并引起井壁变形传感器测得应变的突增, 这说明单孔注浆时浆液的扩散范围已大于 13 m 了; 另外一个现象是孔间串浆, 曾经观察到 F5 号孔注浆时浆液从 F9 号孔翻出, 其间距离 30.6 m, 浆液能从孔口冒出说明其压力大于 2.0 MPa, 这充分说明单孔注浆时浆液的扩散范围已大于 30.6 m, 由于在 30.6 m 远处浆液压力仍达 2.0 MPa, 仍有进一步劈裂扩散的能量, 所以可以预计浆液会扩散更远。

5 结 论

(1) 本文对超深部土体射孔注浆的施工工艺进行了完整的描述, 对施工中的常见事故进行了分析并提出了应对措施, 值得今后类似的工程借鉴, 为提高注浆效率, 建议今后应加强注浆施工工艺的研究。

(2) 引入“水压致裂”理论对裸孔段注浆压力进行了计算, 并与实测值进行了对比, 说明理论计算值有一定的参考价值; 对射孔段注浆压力进行了大量的实测, 数据统计表明, 对于平均深度为 135 m 的表土层射孔注浆, 泵压平均值约为 3.5 MPa。

(3) 通过实测, 对压水和注浆时, 泵压与流量的关系进行了研究, 结论表明在压水时泵压随流量增大而线性增大, 而在注浆过程中最好保持连续注浆, 因为换档容易导致压力突增。另外, 随着地层进浆量的逐步增大, 注浆压力也随之有大幅增长, 显示出良好的注浆效果。所以, 可把注浆压力定为深厚土层注浆工程结束的控制性指标之一。

(4) 运用裂隙扩展的能量分析原理阐述了劈裂注

浆施工的流量调节法, 结果表明运用流量调节可以有效地提高注浆效率。

(5) 在注浆之初, 担心深厚表土注浆由于上覆地层压力很大, 地层难以进浆或扩散范围较小。可工程实践表明在 0~5 MPa 泵压的作用下, 可以较容易地对 140 m 左右深度的土层实现注浆, 并且从一些侧面现象可以推断, 单孔注浆浆液的扩散范围已大于 30.6 m 甚至更大, 所以在实际工程中应采取各种措施控制浆液的扩散范围, 确保浆液落在目标区域之内。另外, 经实际观测推断, 射孔注浆时, 浆液以水平向劈裂运动为主。

(6) 根据钻探取芯资料所显示的浆液结石体的存在形式, 说明对深厚表土层注入普通水泥粉煤灰浆液, 浆液主要以劈裂、压密的形式运动, 有完整的大块浆液结石体存在, 其强度较高, 并且对地层有强烈的挤密作用。同时根据监测资料显示, 注浆后地层都有不同程度的抬升。

参考文献:

- [1] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 陈愈炯. 压密和劈裂灌浆加固地基的原理和方法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 22 - 28.
- [3] 余 力, 崔广心, 翁家杰. 特殊凿井[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [4] 蔡美峰, 何满朝, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 陈 虎, 蔡其巩, 王仁智. 工程断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.