

注浆效果检查评定技术与应用实例

张民庆^{1, 2}, 张文强², 孙国庆²

(1. 宜万铁路建设总指挥部, 湖北 恩施 445000; 2. 中铁隧道集团科研所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 注浆技术已成为地下工程施工中重要的辅助工法, 它对于软岩加固、注浆堵水、沉降控制、渗漏整治等工程处理都有着极好的效果, 但由于目前注浆施工效果评定技术不太规范, 尚无完善的标准可以借鉴, 继而导致这项工作完成后无法进行正确的评价, 从而使许多注浆工程难以取得良好的效果。结合大量工程实践, 将注浆效果检查方法按分析法、检查孔法、开挖取样法、变位推测法和物探法进行了 5 类 14 种比较系统的分类, 并对每一种检查方法进行了技术说明。最后, 结合国内重点工程实例, 对各种检查方法进行了应用效果的探讨, 并提出了各种注浆技术的检查方法和标准, 以期对今后类似工程的注浆施工提供借鉴价值。

关键词: 岩土力学; 注浆; 效果评定

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3909 - 10

EVALUATION TECHNIQUE OF GROUTING EFFECT AND ITS APPLICATION TO ENGINEERING

ZHANG Mingqing^{1, 2}, ZHANG Wenqiang², SUN Guoqing²

(1. Yiwang Construction Headquarters of Managing of Works, Ministry of Railway, Enshi, Hubei 445000, China;

2. Science and Technology Research Institute, China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract: Grouting technology is an important and accessorial method to underground works for it has a good effect on reinforcement of soft rock, water blockage, subsidence control, leakage treatment, etc.. But, the grouting work can not be properly evaluated because the evaluation technology of grouting result is not canonical and no standard can be employed directly. Based on a lot of engineering cases, the grouting effect evaluation technique is catalogued as 5 kinds: analytical method, check-up hole method, construction sampling method, change guess method, and geophysical prospecting method. At last, the effects of each evaluation technique are discussed with a key project; and the evaluation technique and standard of every grouting project are presented. The achieved results can provide references to the future grouting works.

Key words: rock and soil mechanics; grouting; evaluation technique

1 引言

自 1802 年法国人别鲁尼发明注浆技术以来, 注浆技术应用于封堵涌水和改良地层已有两百余年的历史。目前, 注浆技术已普及市政、铁路、公路、

煤炭、地矿、水电、军工等各部委、行业, 已渗透到地下工程的各个角落, 在地下工程的基础加固、注浆堵水、回填防沉、下沉控制、房屋纠偏、滑坡防治、变形控制、坍方处理、截水帷幕、渗漏整治、坝基防渗、瓦斯防溢、古建(构)筑物保护、裂缝修复等各方面, 注浆技术起到了很好的作用。但由于

收稿日期: 2005 - 10 - 03; **修回日期:** 2006 - 01 - 27

作者简介: 张民庆(1970 -), 男, 硕士, 2003 年毕业于石家庄铁道学院土木工程专业, 现为高级工程师, 主要从事隧道及地下工程结构监测、注浆堵水、地基加固、结构防排水等方面的科研、设计与施工工作。E-mail: zskzmq888@163.com

目前注浆施工效果评定技术并不太规范，尚无完善的标准可以借鉴，继而导致了一些注浆工作完成后无法正确评价，从而影响了注浆工程取得良好的效果。本文主要结合笔者大量的工程实践，比较系统地介绍了地下工程注浆施工效果的主要评定方法和技术标准，以期对今后类似工程的注浆施工提供借鉴价值。

2 注浆效果检查方法

对注浆效果进行合理的评价是保证安全施工，确保注浆质量的关键。目前，采用的注浆效果评价方法可划分为五大类，如图 1 所示。

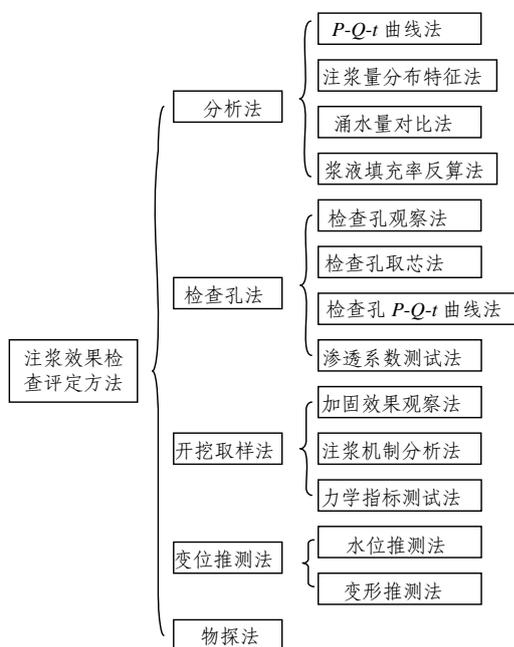


图 1 注浆效果检查评定方法分类

Fig.1 Classification for evaluation technique of grouting effect

2.1 分析法

分析法是通过对注浆施工中所收集的参数信息进行合理的整合，采取分析、比对等方式，对注浆效果进行定性、定量化评价。分析法具有快速、直接的特点，通过分析法可以较为可靠地进行注浆效果评价。

(1) P-Q-t 曲线法

P-Q-t 曲线法是通过注浆施工中所记录的注浆压力 P、注浆速度 Q 进行 P-t、Q-t 曲线绘制，根据地质特征、注浆机制、设备性能、注浆参数等对 P-Q-t 曲线进行分析，从而对注浆效果进行评判。对

于一般注浆工程，不必采取钻孔取芯，基本上都可以采用 P-Q-t 曲线法对注浆效果进行十分有效的评判。

(2) 注浆量分布特征法

注浆量分布特征法分为注浆量分布时间效应法和注浆量分布空间效应法两种，即注浆量分布时空效应法。注浆量分布特征法简单易行，施工中不必采集过多的注浆信息，只需要统计、分析注浆量这一个参数就可以达到对注浆效果的合理评价。

注浆量分布时间效应法是通过将各注浆孔注浆量按注浆顺序进行排列，绘制注浆量分布时间效应直方图，根据注浆量分布时间效应图，对注浆效果进行宏观评价。

注浆量分布空间效应法是通过将各注浆孔注浆量按注浆孔位置绘制注浆量分布空间效应图，根据注浆量分布空间效应图，对注浆效果进行宏观评价。

(3) 涌水量对比法

涌水量对比法是通过注浆过程中各钻孔涌水量变化规律进行对比，或对注浆前后涌水量进行对比，从而对注浆堵水效果进行评价。

(4) 浆液填充率反算法

通过统计总注浆量，可采用下式反算出浆液填充率，根据浆液填充率评定注浆效果，即

$$\sum Q = Vn\alpha(1 + \beta) \tag{1}$$

式中： $\sum Q$ 为总注浆量(m³)，V 为加固体体积(m³)，n 为地层孔隙率或裂隙度， α 为浆液填充率， β 为浆液损失率。

2.2 检查孔法

检查孔法是针对注浆要求较高的工程所采用的一种方法，该方法也是目前公认的最为可靠的方法。检查孔法是在注浆结束后，根据注浆量分布特征，以及注浆过程中所揭示的工程地质及水文地质特点，并结合对注浆 P-Q-t 曲线分析，对可能存在的注浆薄弱环节设置检查孔，通过对检查孔观察、取芯、注浆试验、渗透系数测定，从而对注浆效果进行评价。一般来说，检查孔数量宜为钻孔数量的 3%~5%，且不少于 3 个。注浆要求越高，检查孔数量应越多。

(1) 检查孔观察法

检查孔观察法是通过检查孔进行观察，察看检查孔成孔是否完整，是否涌水、涌砂、涌泥，检查孔放置一段时间后是否坍孔，是否产生涌水、涌砂、涌泥，通过观察，定性评定注浆效果。

(2) 检查孔取芯法

对检查孔进行取芯,通过对检查孔取芯率、岩芯的完整性、岩芯强度试验等进行综合分析,判定注浆效果。

(3) 检查孔 $P-Q-t$ 曲线法

对检查孔进行注浆试验,根据检查孔 $P-Q-t$ 曲线特征判断注浆效果。

(4) 渗透系数测试法

对于注浆堵水工程,特别是注浆截水帷幕,注浆后测试地层渗透系数是评定注浆堵水效果的最主要、最可靠的方法。测试注浆后地层渗透系数的方法常采用注水试验。可采用下式计算地层注浆后渗透系数^[1]:

$$k = \frac{0.366Q}{ls} \lg \frac{2l}{r} \quad (2)$$

式中: k 为渗透系数(m/d), Q 为稳定注水量(m³), l 为试验段长(m), s 为孔中水头高度(m), r 为钻孔半径(m)。

2.3 开挖取样法

开挖取样法是在隧道开挖过程中,通过观察注浆加固效果、对注浆机制进行分析、测试浆液固结体力学指标,从而对注浆效果进行有效评定,同时,开挖取样法也为下一阶段注浆设计与施工提供重要的价值。

(1) 加固效果观察法

加固效果观察法是通过观察开挖面进行观察,宏观评定注浆加固效果。

(2) 注浆机制分析法

通过对掌子面注浆效果观察,分析注浆机制,定性判定注浆效果。

(3) 力学指标测试法

对掌子面进行取样,对试件进行力学指标测试,通过分析力学指标,确定注浆效果。

2.4 变位推测法

变位推测法是通过监测注浆前后,以及施工过程中地下水位变化、地表沉降量变化等,分析评判注浆效果。

(1) 水位推测法

水位推测法是通过监测帷幕注浆圈外水位监测孔的水位变化,分析评判帷幕注浆效果。

(2) 变形推测法

变形推测法是通过监测注浆前后,以及施工过程中被保护体的沉降变形,分析评判注浆加固效果。

2.5 物探法

目前,采取物探法检查评定注浆效果应用不多,技术也不太成熟,在此不做详细介绍。但物探法应用于注浆效果检查,可以宏观地评定注浆效果,特别是对于帷幕注浆的纵向连续性检测,目前尚无可靠的方法,物探法对检查帷幕的连续性有着较大的研究空间,希同仁在此方面加以研究。

3 工程应用实例

3.1 $P-Q-t$ 曲线法等方法在工程中的应用

3.1.1 工程概况

2002年1月31日,渝怀铁路圆梁山隧道平导开挖到PDK354+255时,通过采取超前地质深孔钻探表明,隧道前方PDK354+255~PDK354+275段发育一贯通性强的的大型充填性溶洞,溶洞内充填大量淤泥、砾石。经筛分,黏土、中砂、砾石分别占23%,26%,28%。超前探水孔涌水量为35 m³/h^[2]。

3.1.2 施工方案

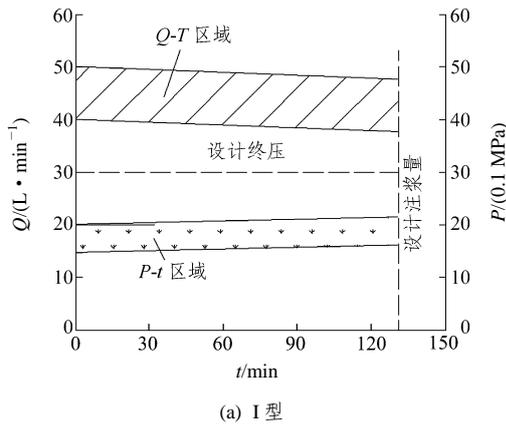
针对该溶洞充填淤泥、富含水特征,隧道开挖不能自稳,因此,采取“后部加强、超前全断面预注浆加固、超前长管棚支护、小导管注浆加强”综合方案处理该溶洞,以达到“安全稳妥、防止突泥”的目的。

注浆材料采用普通水泥-水玻璃双液浆。注浆施工参数为:扩散半径2 m;浆液凝胶时间0.5~3.0 min;注浆终压3~4 MPa;注浆分段长度5 m;注浆速度10~80 L/min;单孔单段注浆量12~24 m³。

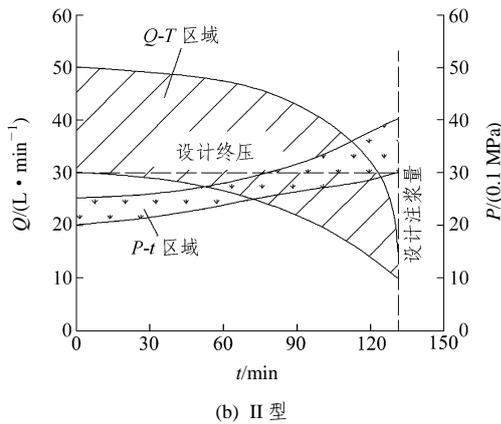
3.1.3 注浆效果检查评定

(1) $P-Q-t$ 曲线法

如图2所示,在注浆施工过程中主要表现出两种 $P-Q-t$ 曲线。I型曲线主要是内圈和外圈注浆孔注浆时所表现,特别是底部注浆孔。其注浆压力较小,一般为1.5~2.0 MPa,注浆速度为40~50 L/min,随着注浆的进行,注浆压力稍有升高,注浆速度略有降低,但表现不明显,当达到设计注浆量时,注浆终压不能达到设计终压值,而此时注浆速度仍表现为较大。经分析,认为主要是溶洞区存在一定空隙(洞),浆液流动的阻力较小,浆液主要表现为填充扩散方式进行加固。II型曲线主要是上部注浆孔和中部注浆孔所表现,这和注浆设计意图所采取的约束型注浆措施一致,达到了挤压密实的目的。在注浆过程中,开始时注浆压力为2.0~2.5 MPa,注浆速度为30~50 L/min,随着注浆的进行,注浆压力呈曲线上升,注浆速度呈曲线明显下降,



(a) I型



(b) II型

图2 注浆孔 P-Q-t 曲线

Fig.2 P-Q-t curves of grouting holes

当达到设计注浆量时，注浆终压达到或超过设计终压值 3~4 MPa，此时注浆速度降至 10~15 L/min，可见该类型注浆方式主要表现为挤压 - 劈裂再挤压。

(2) 涌水量对比法

该溶洞超前地质探孔涌水量为 50~70 m³/h，注浆施工中涌水量超过 10 000 m³/d。注浆后，该溶洞段涌水量只有 5~10 m³/h，注浆堵水率达到 90% 以上，注浆堵水效果是很明显的。

(3) 检查孔 P-Q-t 曲线法

注浆结束后，钻设检查孔进行检查，同时对检查孔进行注浆试验，绘制检查孔注浆 P-Q-t 曲线 (图 3)。由图 3 可知，开始时，注浆初压为 2 MPa，注浆速度为 15 L/min，随着注浆进行，注浆压力和注浆速度基本保持不变，这主要是起到了补充注浆作用，并进一步劈裂强化注浆效果。维持 5 min 后，注浆压力突然上升，超过设计注浆终压 3 MPa，同时注浆速度急剧下降，当注浆压力达到 4 MPa 时，地层基本注不进浆，而此时注浆量远小于设计注浆量，可见检查孔区域已饱和和密实，达到了注浆设计

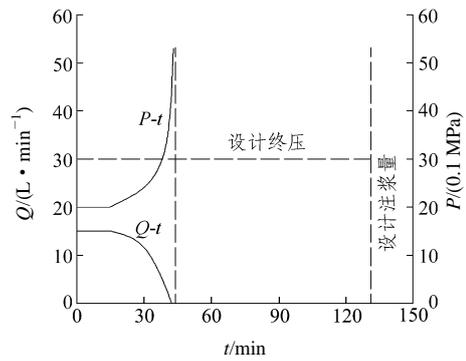


图3 检查孔 P-Q-t 曲线

Fig.3 P-Q-t curves of check-up hole

要求，满足注浆设计的填充、挤压、劈裂再挤压的堵水固泥目的。

(4) 开挖取样法

① 加固效果观察法

对掌子面注浆加固效果进行观察，见图 4，注浆后，掌子面淤泥质黏土被有效加固，无水，开挖过程中，掌子面自稳性好，无任何坍塌。



图4 注浆加固效果图片

Fig.4 Photo of grouting effect

② 注浆机制分析法

在开挖过程中，观察浆液对地层的加固状况。如图 5 所示，浆液加固溶洞地层，主要表现为填充挤压和剪切劈裂两种方式。填充挤压方式主要是当地层孔隙(洞)较大时，浆液直接填充空隙(洞)，以达到固结目的，该加固方式主要发生在破碎围岩和黏土的交界面以及由于涌泥造成的部分孔隙率较大的部位。剪切劈裂方式主要是在未扰动的黏土地层，浆液在较高压力条件下形成劈裂脉，以脉状扩散方式形成网状加固结构，以达到固泥堵水的目的。

③ 力学指标测试法

在开挖过程中对固结体现场取样，测试其物理力学指标，如表 1 所示。由测试结果可知：

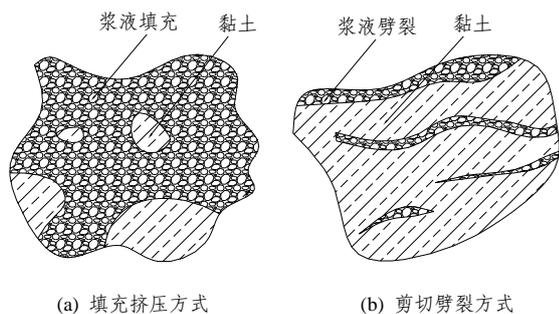


图5 浆液加固机制图

Fig.5 Principle of grouting mechanism

浆液的强度较高，但由于浆液的固结机制主要表现为挤压填充和剪切劈裂作用，因而浆液固结体测试抗压强度时，首先固结体内的黏土体被破坏，而此时浆液仍表现为固结强度，经多次取样测试，其单轴抗压强度均在 0.2 MPa 左右，这是固结体内压密黏土的抗压强度反映。注浆前地层为软塑状黏土，不能自稳，注浆后地层抗压强度得到了改善，达到了固泥目的。

注浆前地层含水量为 120.3%，地层孔隙率为 82.8%，注浆后地层含水量降低到 15.7%~29.1%，地层孔隙率降低到 18.3%~44.2%。注浆后地层的含水量和孔隙率均较注浆前有较大幅度降低，这主要是浆液通过填充、挤压、劈裂作用，挤走地层中的一部分游离水份，取而代之，使地层的结构产生了变化，达到了固泥堵水目的。

3.2 注浆量分布特征法等方法在工程中的应用

3.2.1 工程概况

2002 年 4 月 21 日，渝怀铁路圆梁山隧道正洞下导坑开挖到 DK354+460 采用风钻钻孔时，由钻孔内射出高压水和大量粉细砂，射程约 30 m，于是停止施工，随后采用地质钻机进行深孔超前探测，表明正洞 DK354+460~DK354+490 为深埋充填型溶洞，溶洞内充填粉细砂层^[3]。

3.2.2 施工方案

DK354+460~DK354+490 溶洞具有高压、动水、充填粉细砂的特征，施工难度大，施工中主要采取以“泄水洞泄水降压和全断面帷幕注浆”为主的“排堵相结合”方案对该溶洞进行处理。

注浆材料采用普通水泥单液浆、普通水泥-水玻璃双液浆、超细水泥单液浆、超细水泥-水玻璃双液浆、HSC 浆和 TGRM 浆 6 种，现场施工中，应根据情况及时进行浆液种类和配比的选择及调整。

注浆施工参数为：扩散半径 2 m；浆液凝胶时间 10 s~3 min；注浆终压 6~9 MPa；注浆分段长度 1~2 m(粉细砂层)，2~4 m(其他地层)；注浆速度 5~110 L/min。注浆施工中以定压控制为主。

3.2.3 注浆效果检查评定

(1) 注浆量分布时间效应特征法

绘制注浆量分布时间效应图见图 6。由图 6 可知：可以将注浆量分布时间效应图总体分成两部分，即前期单序孔部分和后期双序孔部分，明显单序孔注浆量要比双序孔注浆量大，这和预期的挤压填充注浆设计原则相一致，注浆后地层得到了较好的加固。前期单序孔阶段，注浆量呈明显的离散性，这主要是由于岩溶分布的不均一性特征所引起。结合现场注浆情况来看，主要是上部孔注浆量特别大，而下部孔涌砂严重，浆液注入困难，对此，后期对下部孔施工方案进行了调整。

(2) 注浆量分布空间效应特征法

绘制注浆量分布空间效应图(见图 7)。由图 7(a) 上半断面注浆量分布空间效应图可知：开挖轮廓线外三圈孔注浆量总体是均布的，上部拱顶处较大，这主要是由于上部存在较大的空腔所致，这和水压测试时所分析的溶洞体形态一致。由注浆量分布情况来看，两侧拱腰处明显存在着薄弱区，对此，这

表 1 物理力学指标对照表

Table 1 Physico-mechanical parameters for comparison

物理力学指标	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		含水量/%	相对密度	密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%	饱和度/%
	1 d	3 d	1 d	3 d						
浆液	0.5	2.1	0.0	0.5						
原状地层			软塑不成型		120.3	4.00	1.52	0.69	82.8	100.00
现场取样浆液固结体	挤压填充体	0.2	0.2		15.7	1.35	1.27	1.09	18.3	94.42
	剪切劈裂体	0.2	0.2		29.1	2.70	1.94	1.50	44.2	99.18

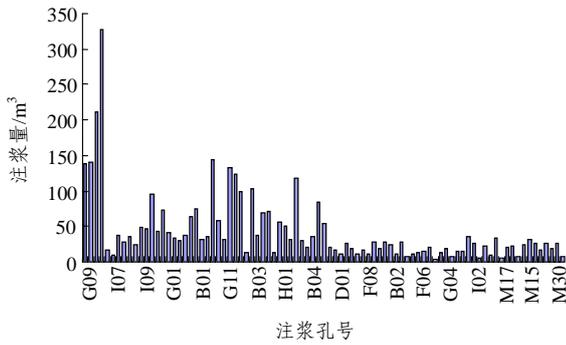
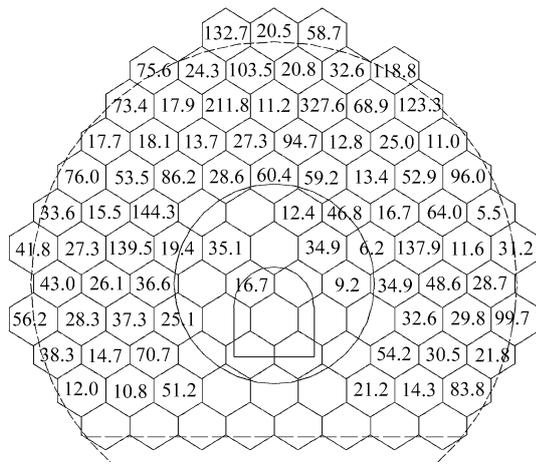
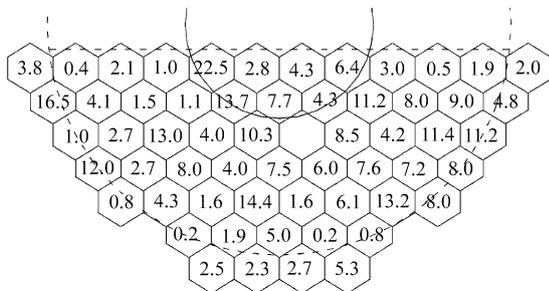


图6 注浆量分布时间效应图

Fig.6 Time effect of grouting quantity distribution



(a) 上半断面注浆量分布空间效应图



(b) 下半断面注浆量分布空间效应图

图7 注浆量分布空间效应图(单位: m³)

Fig.7 Spatial effects of grouting quantity distribution(unit: m³)

应在补孔注浆及检查孔施工时重点强化处理。

由图 7(b)下半断面注浆量分布图来看: 注浆量分布比较均匀, 注浆量大的孔和注浆量小的孔基本呈间隔状, 这是由于注浆方式采取了跳孔注浆原则, 这和预期的挤压填充注浆设计原则相一致, 注浆后地层得到了较好的加固。下排孔注浆量明显较小, 这主要是由于下部砂层为原状地层, 受扰动小, 含砂量比较大, 浆液主要通过紊流注入地层, 填充粉

细砂层空隙。右侧孔较左侧孔注浆量大, 这与钻孔过程所揭示的地质情况相吻合, 右侧溶洞发育范围大, 较左侧先进入砂层地段, 并且地层含水、含砂量也比左侧大, 对此, 这应在补充注浆与开挖过程中引起重视。

(3) 涌水量对比法

绘制该溶洞钻孔注浆过程中的钻孔涌水量分布时间效应图(见图 8)。由图 8 可知: 随着注浆进行, 钻孔涌水量总体呈减少趋势, 由此来看, 总体注浆效果明显, 是随着注浆进行不断提高。钻孔中的涌水量表现出明显的离散性, 这和 2#溶洞地质条件复杂有关。

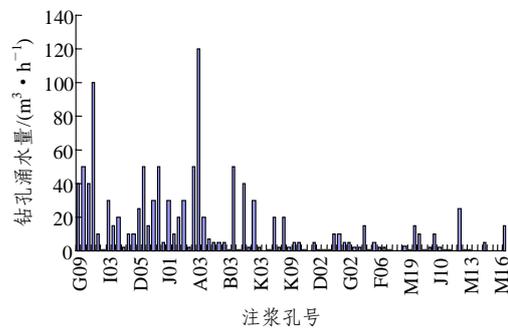


图8 钻孔涌水量分布时间效应图

Fig.8 Time effect of the boring water burst quantity distributing

(4) 检查孔观察法

注浆结束后, 根据注浆 P-Q-t 曲线分析, 结合注浆量分布特征, 在注浆薄弱环节钻设检查孔。由图 9 可知, 检查孔无涌水、涌砂, 且成孔好。检查孔放置 1 h 后, 仍无坍孔、无涌水、无涌砂, 因此, 可以判定注浆效果是良好的, 能满足安全开挖要



图9 检查孔观察图片

Fig.9 Photo of check-up hole

求。

3.3 浆液填充率反算法在工程中的应用

3.3.1 工程概况

深圳市向西路人行地道工程由主通道和4个梯道组成。主通道设计净宽6.0 m, 净高2.5 m, 长49.34 m, 最大覆土厚约5.3 m。该工程主要穿越第四纪冲积淤泥粉质黏土层、粉质黏土层和含水中粗细砂层^[4]。

3.3.2 施工方案

根据工程地质及水文地质特点, 工程竖井注浆采取TSS管垂直注浆技术, 主通道注浆采取TSS管水平注浆技术, 注浆工艺采用后退式分段注浆工艺, 注浆材料采用超细水泥-水玻璃双液浆。

注浆施工参数为: 扩散半径0.5~0.8 m; 浆液凝胶时间30~60 s; 注浆速度5~30 L/min; 注浆终压0.5~1.2 MPa(管线处采取低压, 其他采取中、高压); 注浆分段长度0.6 m; 单孔单段注浆量0.1~0.3 m³。

3.3.3 注浆效果检查评定——浆液填充率反算法

注浆结束后, 统计注浆总量 ΣQ , 利用式(1)反算出浆液填充率 $\alpha = 83.6\%$, 满足注浆加固堵水要求。在随后施工中, 工程安全顺利。

3.4 检查孔取芯法在工程中的应用

3.4.1 工程概况

广州地铁杨体区间隧道位于中山路东端南侧, Y(Z)DK13+969.1~Y(Z)DK14+020(030)段长111.8 m通过饱和动态含水砂层。经勘测, 该段地下水水位为地表以下2.03~2.84 m, 水流自东向西, 地层渗透系数为 $2.5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ^[5]。

3.4.2 施工方案

针对饱和动态含水中细砂层, 采取洞内全断面超前预注浆和地表采取垂直注浆综合法, 采用袖阀管后退式分段注浆工艺, 注浆材料采用超细水泥-水玻璃双液浆。

注浆施工参数为: 扩散半径0.8 m; 浆液凝胶时间30~60 s; 注浆速度40 L/min; 注浆终压1.2 MPa; 注浆分段长度0.6 m; 单孔单段注浆量0.425 m³。

3.4.3 注浆效果评定——检查孔取芯法

注浆结束后, 针对注浆薄弱环节进行取芯试验。取芯表明, 岩芯呈柱状, 完整性好, 岩芯提取率在60%以上, 岩芯加固优良率为71.5%~96.6%。对岩芯进行抗压强度测试, 在灰色细砂中

为0.295~0.428 MPa, 在黄色中粗砂中为1.15~3.29 MPa。

3.5 渗透系数测试法在工程中的应用

3.5.1 工程概况

深圳地铁益田站为二层三跨框架式结构。基坑中部、顶部为冲积黏性土、砂层及人工堆积层, 底部为残积土层。场地地下水为动水, 水流自东向西, 地下水埋深3~5.7 m, 水位变幅1~1.5 m。该工程围护结构为圆形和椭圆形人工挖孔咬合桩, 为保证围护结构的施工, 经方案论比, 在围护结构外侧施作注浆截水帷幕, 然后通过基坑内降水, 以满足围护结构的安全施工^[6]。

3.5.2 施工方案

帷幕采用桩外三排地表垂直闭合式帷幕结构, 帷幕厚度1.5 m, 帷幕深度以进入相对不透水层2.5 m, 注浆孔梅花型布置, 间距1.15 m, 排距0.58 m。注浆采取袖阀管后退式分段注浆工艺, 注浆材料采用普通水泥-水玻璃双液浆。

注浆施工参数为: 浆液扩散半径0.6 m; 注浆终压1.0~1.2 MPa; 浆液凝胶时间50~90 s; 注浆速度20~30 L/min; 注浆分段长度0.4 m; 单孔单段注浆量根据地质条件分别取100 L(砾质黏性土), 150 L(砾砂层)及120 L(粉质黏性土)。

3.5.3 注浆效果评定——渗透系数测试法

注浆截水帷幕施工结束后, 测试地层渗透系数为 $1.8 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 满足工程安全施工要求, 达到了注浆截水帷幕的目的。在随后桩基开挖中, 仅有少量渗水, 工程得以安全施工。

3.6 水位推测法在工程中的应用

3.6.1 工程概况

以太广场为外商在广州投资修建主管的一中高级商业写字楼, 位于广州地铁越秀公园站东侧。越秀公园站施工期间, 以太广场产生了较大沉降, 致使以太广场内部大堂地板砖和广场前地坪开裂^[7]。

3.6.2 施工方案

为确保以太广场稳定, 需在以太广场和越秀公园站之间施作一道截水帷幕, 切断以太广场和越秀公园站之间水力联系, 避免或减少越秀公园站施工期间对以太广场产生失水沉降影响。通过对各种方案比选, 确定采用“注浆(两排)+摆喷(一排)”复合式截水帷幕。

摆喷采用水泥浆, 注浆参数为: 高压水压力 \geq

35 MPa; 高压水流量 75 L/min; 压缩空气压力 0.6~0.8 MPa; 压缩空气气量 2.5 m³/min; 注水泥浆压力 0.5~0.8 MPa; 注水泥浆流量 40 L/min; 提升速度 8~10 cm/min; 摆角 15°~20°; 摆速 12 r/min。

注浆采用普通水泥浆和普通水泥 - 水玻璃双液浆。注浆参数为: 扩散半径 0.6 m; 浆液凝胶时间 30~180 s; 注浆速度 20~40 L/min; 注浆终压 1.2~2 MPa; 注浆分段长度 0.4 m; 单孔单段注浆量 0.1~0.15 m³。

3.6.3 注浆效果评定——水位推测法

如图 10 所示, 在截水帷幕施工前越秀公园站施工中, 地下水位变化异常, 伴随着施工的进行与暂停, 水位随之变化, 因而无法保证以太广场的安全稳定。通过实施截水帷幕, 在 2001 年 3 月 10 日以后的越秀公园站施工中, 以太广场内侧水位稳定, 这充分证明了复合式截水帷幕施工效果是好的。

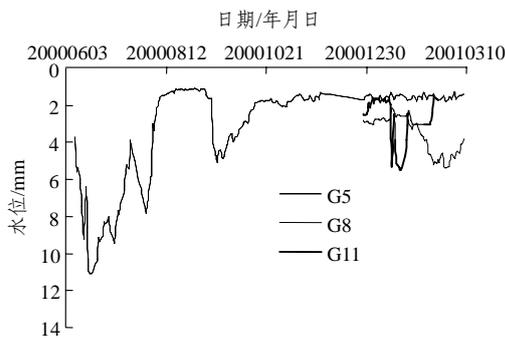


图 10 地表水位变化曲线
Fig.10 Variation curves of ground water

3.7 变形推测法在工程中的应用

3.7.1 工程概况

广州地铁越秀公园站北基坑穿越素填土、淤泥质土层、残积层、断裂破碎带, 地下赋存第四系孔隙水和基岩裂隙水, 流动性强, 水位位于地表以下 1.0~2.5 m。北基坑围护结构外设计为旋喷桩止水帷幕。帷幕完成后, 在北基坑开挖时, 发现帷幕效果不佳, 开挖中水量较大, 地表急剧下沉, 最大沉降速率 6.9 mm/d, 最大沉降值 32 mm, 同时, 周边建筑广州体育馆东侧端墙开裂, 馆内多处出现裂缝, 从而无法继续施工^[8]。

3.7.2 施工方案

经分析, 认为失水是造成广州体育馆下沉的主要原因, 因而立即停止施工, 在桩外补做注浆截水帷幕。截水帷幕采取 3 排悬挂式注浆截水帷幕, 帷

幕深度 29 m, 深入桩基下 3 m, 帷幕注浆采用普通水泥 - 水玻璃双液浆, 采取袖阀管后退式分段注浆工艺。

注浆施工参数为: 浆液扩散半径 0.6 m; 注浆终压 1~1.5 MPa; 浆液凝胶时间 90~150 s; 注浆速度 20~30 L/min; 注浆分段长度 0.4 m; 单孔单段注浆量根据地质条件分别取 80 L(黏性土)及 120 L(断层破碎带)。

3.7.3 注浆效果评定——变形推测法

注浆截水帷幕施工结束后, 于 2000 年 7 月 17 日开始挖桩, 至 2000 年 8 月 28 日挖桩结束在此期间, 广州体育馆比较稳定。如图 11 所示, 在挖桩至成桩阶段, 地表下沉速率明显低于前期的挖桩阶段和回灌阶段, 地表下沉速率最大值为 1.3 mm/d, 这一阶段累计下沉最大值为 7.2 mm, 由此可见围护桩外注浆截水帷幕的施作是十分成功的, 有效地保证了桩体的正常开挖及挖桩期间广州体育馆的稳定。

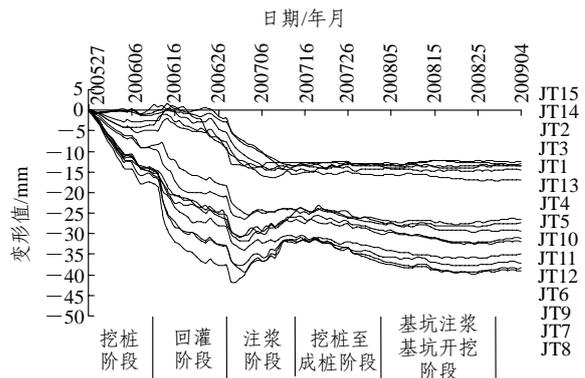


图 11 广州体育馆测点变形曲线
Fig.11 Variation curves of the ground Guangzhou Gymnasium's measuring point

4 结 论

注浆效果检查评定技术是对注浆施工好坏的有效评价, 在实际注浆施工中, 一定要根据注浆要求高低、现场条件和注浆目的等综合选择合理的注浆评定方法和技术评判标准。

(1) 注浆效果检查评定方法选择

常见注浆工程注浆效果检查评定方法建议按表 2 进行选择。

(2) 注浆效果检查评定标准

结合以往工程实例, 推荐按表 3 制定注浆效果检查评定标准。

表2 注浆效果检查评定方法选择表

Table 2 Choice of evaluation techniques of grouting effect

工程分类	注浆方式	分析法			检查孔法			开挖取样法			变位推测法		物探法
		P-Q-t曲线法	注浆量分布特征法	涌水量对比法	浆液填充率反算法	检查孔观察法	检查孔取芯法	检查孔P-Q-t曲线法	渗透系数测试法	加固效果观察法	注浆机制分析法	力学指标测试法	
隧道工程	超前预注浆	必测	选测	必测		必测	必测	选测	选测	必测	必测	必测	必测
	径向注浆	必测	选测	必测									
	基底加固	必测	选测		必测	必测	必测	选测	必测				
	回填注浆	必测	选测										
	管棚注浆	必测											必测
	渗漏水治理	必测	选测	必测									
	变形处理	必测											必测
	坍方处理	必测	选测		选测	必测	必测	选测		必测	必测	必测	必测
	滑坡整治	必测			选测								必测
基坑工程	桩外截水帷幕	必测				必测	必测	选测	必测			必测	必测
	基底截水帷幕	必测	选测	必测	必测	必测	必测	选测	必测			必测	必测
	渗漏水治理	必测		必测	选测								
	工程抢险注浆	必测		必测		必测	必测	选测	必测			必测	必测
市政工程	下沉控制	必测			必测								必测
	房屋纠偏	必测			必测								必测
	古建筑保护	必测			必测								必测
	裂缝修复	必测			必测								

表3 注浆效果检查评定标准表

Table 3 Standard of evaluation techniques of grouting effect

评定方法	评定标准	
分析法	P-Q-t曲线法	注浆施工中 P-t 曲线呈上升趋势, Q-t 曲线呈下降趋势, 注浆结束时, 注浆压力达到设计终压(常取 1~4 MPa), 注浆速度达到设计速度(常取 5~10 L/min)
	注浆量分布特征法	(1) 注浆量分布时间效应直方图应呈降趋势, 结束时, 后序注浆孔基本应达到吸不进浆的状态, 即 Q→0; (2) 注浆量空间效应图表现特征为周边注浆孔注浆量大于中部注浆孔注浆量, 后序孔注浆量小于前序孔注浆量
	涌水量对比法	(1) 随着注浆进行, 钻孔涌水量不断减少; (2) 注浆后开挖过程中涌水量 ≤ 10 m ³ /h, 注浆堵水率应达到 80% 以上
	浆液填充率反算法	当地层中含水量不大时, 浆液填充率应达到 70% 以上; 当地层富含水时, 浆液填充率应达到 80% 以上
检查孔法	检查孔观察法	经过注浆后, 检查孔应成孔完整, 不得有涌砂、涌泥现象, 流量 < 0.1 L/(m · min)。检查孔放置 1 h 后, 也不得发生上述现象; 否则, 应进行补孔注浆或重新设计
	检查孔取芯法	检查孔取芯率应达到 70% 以上, 岩芯强度应达到 0.2 MPa 以上
	检查孔 P-Q-t 曲线法	检查孔 P-Q-t 曲线应较正常注浆时曲线型态要陡, 注浆 5~10 min 后, P, Q 值均应达到设计值; 否则, 应进行补孔注浆或重新设计
开挖取样法	渗透系数测试法	对于截水帷幕, 地层的渗透系数应 < 10 ⁻⁵ cm/s, 否则, 应进行补孔注浆或重新设计
	加固效果观察法	开挖面浆液填充饱满, 能自稳, 掌子面无水
变位推测法	注浆机制分析法	开挖观察注浆加固方式达到预期的设计目的
	力学指标测试法	注浆固结体抗压强度应达到 0.2 MPa 以上, 注浆后地层含水率应低于 30%
物探法	水位推测法	在注浆结束后工程开挖过程中, 帷幕注浆圈外水位应保持不变
	变形推测法	注浆过程中, 被保护体应保持为限量隆起变形; 注浆后施工过程中, 被保护体应处于缓慢下沉变形阶段, 总变形量应满足设计沉降允许要求。否则应进行跟踪补充注浆
物探法	应进一步研究, 确定技术指标	

参考文献(References):

- [1] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(Compilation Committee of Engineering Geology Handbook. Engineering Geology Handbook(Third Edition)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))
- [2] 张民庆, 韩占波, 孙国庆, 等. 圆梁山隧道 PDK354+255~PDK354+275 溶洞段施工技术[J]. 铁道工程学报, 2002, (4): 71 - 78.(Zhang Mingqing, Han Zhanbo, Sun Guoqing, et al. Construction technology of cavity section PDK354+255~PDK354+275 in parallel heading at intake portal of Yuanliangshan Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002, (4): 71 - 78.(in Chinese))
- [3] 张民庆, 孙国庆, 邹冲, 等. 圆梁山隧道 2#溶洞正洞施工技术[J]. 铁道工程学报, 2004, (4): 68 - 76.(Zhang Mingqing, Sun Guoqing, Zou Chong, et al. Construction technique for main cave of karst cave No.2 of Yuanliangshan Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, (4): 68 - 76.(in Chinese))
- [4] 张民庆. TSS 型注浆管及其注浆技术研究与应用[J]. 铁道工程学报, 2000, (2): 50 - 57.(Zhang Mingqing. Study and application of the TSS type grouting pipe and grouting technique[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000, (2): 50 - 57.(in Chinese))
- [5] 张民庆. 饱和含水砂层施工技术[A]. 见: 第十届隧道年会论文集[C]. [s. l.]: [s. n.], 1998. 543 - 547.(Zhang Mingqing. Engineering technique of saturation and containing water sand[A]. In: Proceedings of the 10th Tunnel Academic Conference Symposium[C]. [s. l.]: [s. n.], 1998. 543 - 547.(in Chinese))
- [6] 张民庆, 张文强, 范国文, 等. 基坑工程注浆截水帷幕施工技术研究[A]. 见: 第十届防排水会议论文集[C]. [s. l.]: [s. n.], 2001. 129 - 139.(Zhang Mingqing, Zhang Wenqiang, Fan Guowen, et al. Study on grouting stop-water purdah of excavation engineering[A]. In: Proceedings of the 10th Waterproof and Drainage Conference[C]. [s. l.]: [s. n.], 2001. 129 - 139.(in Chinese))
- [7] 张民庆, 汪玉华, 郭小华. 以太广场沉降分析与复合式截水帷幕施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 647 - 2 651. (Zhang Mingqing, Wang Yuhua, Guo Xiaohua. Subsidence analysis and construction technique of complex cut water curtain construction of Yitai plaza[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 647 - 2 651.(in Chinese))
- [8] 张民庆, 汪玉华, 郭小华. 广州地铁越秀公园站注浆截水帷幕施工技术[J]. 施工技术, 2002, (1): 31 - 32.(Zhang Mingqing, Wang Yuhua, Guo Xiaohua. Construction method of grouting water-seal curtain of Yuexiu Park station of Guangzhou Subway[J]. Construction Technology, 2002, (1): 31 - 32.(in Chinese))
- [9] 朱新华, 石雷, 马义庆. 中深孔注浆技术在饱和富水砂层浅埋暗挖地道中的应用[J]. 铁道标准设计, 2005, (4): 56 - 58.(Zhu Xinhua, Shi Lei, Ma Yiqing. Application of the medium-depth bore grouting technology in subsurface-excavation shallow tunneling in water-rich saturate sand stratum[J]. Railway Standard Design, 2005, (4): 56 - 58.(in Chinese))
- [10] 郑永来, 李美利, 王明洋, 等. 软土隧道渗漏对隧道及地面沉降影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 243 - 247.(Zheng Yonglai, Li Meili, Wang Mingyang, et al. Study on influence of seepage of metro tunnels in soft soil on the settlements of tunnels and ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 243 - 247.(in Chinese))