

挖孔桩双液注浆截水帷幕原位试验及施工

In situ test and construction of two-shot grouting for waterproof of man-hole pile

高俊合^{1,2}, 刘国楠²

(1. 深圳市天健集团博士后工作站, 广东 深圳 518034; 2. 铁道部科学研究院深圳研究设计院, 广东 深圳 518034)

摘要: 百货广场桩基托换工程是深圳地铁一期工程关键工点之一, 其托换轴力大, 施工环境复杂。托换新桩采用挖孔桩, 桩长 20 m。由于地层渗透系数大、承压水头高, 截水帷幕的施筑是挖孔桩施工的关键。原位试验表明, 以水玻璃为主材的双液注浆工法对本工点不同地层均取得了增加强度、明显减少渗透性的工程效果, 经注浆处理后土层帷幕水力劈裂压力大于 0.3 MPa, 可以满足本工点 20 m 深挖孔桩截水要求。采用双组份聚氨酯堵漏注浆技术较好地解决了高承压水头下钻孔涌水问题。该工法机具体积小, 操作简便, 基本无废浆液产生, 成功解决了本工点施作空间狭小的问题。实际施工表明, 采用该工法及试验确定的注浆配方、参数和工艺施筑的截水帷幕截水效果明显, 保证了挖孔桩顺利施工。

关键词: 桩基托换; 人工挖孔桩; 双液注浆工法; 截水帷幕; 原位试验; 施工

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0479-04

作者简介: 高俊合(1970-), 男, 江苏徐州人, 博士, 高级工程师, 深圳市天健集团博士后工作站和铁道部科学研究院在站博士后。主要从事岩土工程、隧道及地下工程的设计、施工及研究工作。

GAO Junhe^{1,2}, LIU Guonan²

(1. Postdoctoral Research Station in Shenzhen Tongge Group, Shenzhen 518034, China; 2. Shenzhen Branch of China Academy of Railway Science, Shenzhen 518034, China)

Abstract: Pile underpinning of Baihuo Plaza with great underpinning force and complex construction environment is one of the important parts of Shenzhen Metro project. The new underpinning piles are man-hole piles. Because of high permeability and high confined water head in substrata, the cut-off grouting is very important to construction of man-hole pile. In situ test demonstrates that two-shot grouting method with water glass as main material can increase strength and decrease permeability of soil. The soil treated by this method can resist 0.3 MPa hydraulic fracture pressure and satisfy form a cut-off for the 20 m long pile. The seepage prevention technology with two-component polymer can prevent ground from swelling. This technology has some merits, such as simple, convenient, small volume of machines and no waste liquid, and is applicable to the construction spot with small space. The practice demonstrates that the grouting constructed by the technology can prevent water very well when man-holes are dug.

Key words: pile underpinning; man-hole pile; two-shot grouting method; cut-off grouting; in situ test; construction

0 前言

深圳地铁一期工程百货广场桩基托换工程因其托换轴力大(最大轴力约 15000 kN, 文献检索表明其为世界之最^[1])、施工环境复杂而成为深圳地铁一期工程关键工点之一。其托换方案是: 将结构转换层设在负三层地下室, 采用梁式托换结构柱的托换形式, 即先在被托换桩两侧施工两根新桩, 在负三层地下室地面施工托换大梁(同时将大梁与其上旧柱连接)将柱托起, 再从梁以下一定深度将桩截断。^{*}

根据现场条件及承载力的要求, 百货广场托换新桩只能采用人工挖孔桩(长达 20 m)。挖孔桩穿过的主要岩土层为中、砾砂层、全风化和强风化花岗片麻岩, 均为相对较强的透水层, 渗透系数达到 1~30 (m/d)。地下水为承压水, 水头高达 8 m。因此, 人工挖孔桩的施作时, 井内可能出现大量涌水(涌水量估计超过 100 m³/d)、流泥和坍塌现象, 使得孔桩开挖施工困难。

此外, 孔桩内大量抽水还会引起周边地下水大幅下降, 引起地面沉降, 直接影响百货广场本身及其周边的道路、地下管线和其它建构物的安全。而且实际经验表明, 桩孔内大量涌水极易影响人工挖孔桩桩身混凝土的灌注质量, 直接影响托换工程的成败。

基于上述原因, 有必要在挖孔桩桩位的外围设置封闭的截水帷幕, 切断人工挖孔桩孔内外透水层的水力联系, 改善孔桩的施工条件, 减少对周边环境的影响。因此施筑托换新桩止水帷幕, 是保证挖孔桩顺利施工的关键, 也是桩基托换能否成功的关键因素之一。为此, 进行了帷幕注浆原位试验。

1 地质条件

百货广场桩基托换场地地层条件自负三层地下室而下依次为: 钢筋混凝土底板, 厚 1.0 m; 中、砾砂层,

厚 5 m, $k = (5.79 \sim 34.72)$ cm/s; 粉质砂质黏性土(残积层), 厚 10~15 m, $k = (0.11 \sim 5.79)$ cm/s; 强风化花岗岩片麻岩, 裂隙发育, 层厚约 6.0 m, $k = (2.89 \sim 11.5)$ cm/s; 中风化基岩, 层厚约 2.5 m, $k = (1.16 \sim 5.79)$ cm/s; 其下为微风化基岩。其中砂层和强风化基岩层透水性较强, 为主要含水层, 承压水头达 10 m。

2 孔桩帷幕方案比选与技术要求

2.1 方案比选

由于挖孔桩的工作面在地下室内, 作业空间高度不足 3.0 m, 常用的高压喷射注浆帷幕和深层水泥搅拌桩帷幕均不具备施工作业空间条件, 而且在风化基岩中旋喷和搅拌均有困难。因此, 经比选拟采用双液注浆帷幕工法和旋喷桩帷幕(设备经改进)+基岩超细水泥单液袖阀管注浆联合工法进行现场试验。但实际试验表明后者施工中产生大量废浆液, 几乎将整个地下室充满, 污染严重, 且处理成本太高, 不得不终止试验。这样双液注浆帷幕工法成为唯一待选方案。

2.2 双液注浆工法原理

该工法的基本原理^[2]是以水玻璃(A液)为主材, 高效固化剂, (B液: 磷酸、乙二醛)为辅材分别由两路注入地层(在喷头端部混合), 在较高压力作用下渗入土体孔隙中, 将其中的孔隙水强行排出, 两种液体混合后在较短的时间内固化凝结并填充土颗粒之间的空隙, 从而降低土体渗透性, 并提高土体强度。通过改变配方, 添加不同的固化材料, 能够控制不同的浆液凝结时间、填充性能和黏结后的强度。此外, 以水玻璃为主材的浆液具有很好的可灌性, 适用于多种地层的防渗工程。该方案在本工程应用具有以下优点: ①施工机具不受地下室高度的限制; ②无大量返浆、废液需要处理; ③在砂层和微风化基岩层均可取得较好的截水效果, 在砂层和黏性土层可取得加固土体的作用; ④对地下水及环境无污染。

2.3 技术要求

根据本工程挖孔桩施工实际需要, 帷幕注浆应满足如下技术要求: ①帷幕深度总长约 22 m, 即超过挖孔桩长度(20 m), 进入中风化基岩 1.0 m。②帷幕有效厚度为 1.5 m, 宜采用双排布孔。③经注浆改良后的土层渗透系数达 10^{-5} cm/s 量级。④改良土的强度明显增大, 黏聚力 $c \geq 30$ kPa。

3 帷幕注浆原位试验

3.1 试验目的及内容

为了验证双液注浆工法的工程效果和掌握适合本工程的工艺和配方, 在正式实施本方案前, 必须进行现

场原位试验。2001 年 4 月 26 日至 6 月 7 日在百货广场地下三层托换工作面进行了原位帷幕注浆试验施工。注浆施工时, 根据本工程实际特点对注浆工艺、注浆参数等进行了调整完善。在试验前后对土层进行钻探取样, 并进行了标贯原位试验、室内物理力学性质试验、压水试验等对比试验。

3.2 注浆孔设计

设计注浆钻孔直径 100 mm, 浆液的有效扩散半径 $R = 0.5$ m; 注浆孔按梅花形布置, 孔距为 800 mm, 排距 693 mm。试验注浆孔为 3 排, 共 11 个孔, 见图 1。图中 A 为注浆前取样孔兼注浆后分层压水孔; D 为注浆后取样孔兼注浆后分层压水孔; F 为注浆前标贯点; G、H 为注浆后孔口压水、取土样点。

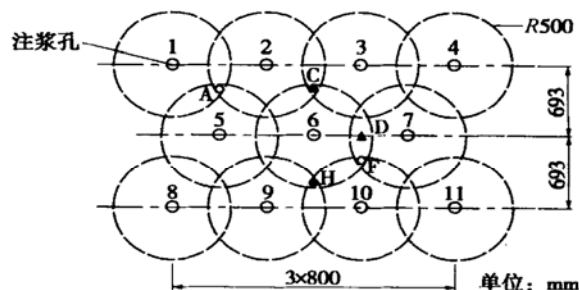


图 1 注浆孔平面布置图

Fig. 1 Arrangement of grout holes

3.3 施工设备

主要施工设备有: ①注浆电动钻机 DG-2 型, 1 台; ②双液注浆泵 BGW-3 型, 2 台; ③双液搅拌槽 MS-60 型, 1 台; ④自动流量压力记录仪 CRM-60K 型, 1 台; ⑤双重注浆钻杆 25 m(钻孔、注浆两用); ⑥φ91 金刚石及合金钻头, 若干个。

3.4 注浆施工工艺

(1) 帷幕注浆的施工步骤和工艺流程

钻孔和注浆设备就位 → 用金刚石钻头钻透钢筋砼底板 → 钻孔到设计深度, 并记录地层层位 → 注入双组份聚氨酯封堵承压水 → 开始注浆 → 按注浆喷头所在位置确定所用的浆液配比及注浆时间 → 注浆段回抽提升一段, 每一回抽提升高度 0.5 m, 直到注浆到底板底位置 → 注浆 7 d 后进行取芯, 并进行后续试验。

(2) 双组份聚氨酯堵漏技术

由于高达 10 m 的承压水头压力, 地下室底板钻穿后, 地下水喷涌而出, 为后续的钻孔、注浆造成施工困难和不利影响。故采用双组份聚氨酯堵漏注浆技术进行堵水。即在钻穿底板后采用双液注浆技术注入聚氨酯和发泡剂, 两者混合遇水后在 30~60 s 内迅速凝固并发泡(体积增大 3~7 倍)。因此能迅速充填底板和基底地面之间的空隙, 从而达到堵漏止水的目的, 为后

续的钻孔和注浆创造有利条件。

3.5 浆液配方及注浆参数

A 液: 水玻璃(波美度 45°); B 液: 固化剂, 以酸剂和乙二醛为主材。A、B 液注入比例为 0.7~1.0, 具体根据地层的情况, 控制双液混合后凝结时间(控制在 2~10 min), 由此调节 A、B 液的注入比例。注浆参数如下: 分段注浆时间, 10 min/段(0.5 m); 注浆压力, 0.8~2.5 MPa; 注浆速度, 10~20 L/min; 注浆量, 0.1 m³/0.45 m³。

3.6 注浆工作量

本次试验完成双液注浆 11 孔, 每一注浆钻孔深度 22 m(至中风化基岩顶板面), 每孔注浆 21 m, 共注浆 231 延 m。

4 现场、室内测试 results 分析

4.1 注浆压力与注浆量的关系

对 11 个注浆孔的注浆压力、注入浆量统计分析表明, 在给定的每段注浆时间(10 min)和流量情况下(控制在 10~20 L/min), 随地层岩土性质不同, 注浆压力和注浆量的关系也不同。其基本规律是在土层中注浆压力小, 随着深度的增加, 进入以强风化花岗片麻岩为主的岩层中, 注浆压力增大, 且注入浆量减少, 在中风化基岩层中压力超过 2.0 MPa, 注入量仅为土层的 1/3(见图 2)。

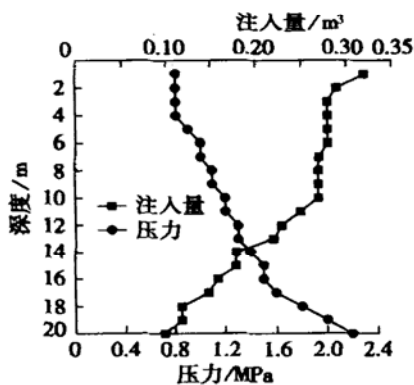


图 2 注浆深度—注浆压力—注入量的统计关系
Fig. 2 Relationship between depth, pressure and liquid volume during grouting

4.2 现场标贯测试成果对比

注浆前后, 在注浆工点原位各进行了一个钻孔的标贯测试, 即 F 孔(注浆前)和 H 孔(注浆后), 见表 1。

表 1 注浆前后标贯击数对比					
Table 1 Comparison of $N_{63.5}$ before and after grouting					
贯入深度/m		注浆前	注浆后	地层	
起始	终止	$N_{63.5}$	$N_{63.5}$	名称	状态
1.0		27	43	砂	中密
2.0	2.3	17	46	砂质土	可塑
3.0	3.3	24	49	砂质土	可塑
4.0	4.3	750	750	强风化	硬塑

从表 1 可见, 对于砂层和砂质黏土层, 注浆前后标贯击数有较大的提高, 这说明双液注浆可明显改善土体的强度。

4.3 室内对比试验结果

注浆前后分别钻孔取样进行了多项可能影响或改进的物理力学性质指标室内试验, 见表 2。注浆后的取样表明, 固结体成型很好。

表 2 注浆前后土的物理力学性质平均值
Table 2 Comparison of mechanical and physical parameters of soil before and after grouting

钻孔编号	统计深度范围	含水率 $w / \%$	渗透系数 $k_{20} / (10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 c / kPa
A	< 17 m	21.31	2.55	27.90	21.93
	≥ 17 m	22.15	0.91	18.33	28.00
	全部	21.55	2.14	23.80	24.53
D	< 17 m	21.22	2.32	26.65	35.00
	≥ 17 m	20.13	0.81	22.83	31.28
	全部	21.11	1.46	24.10	32.52
G	< 17 m	20.03	2.37	17.10	33.60
	≥ 17 m	19.65	0.30	23.90	49.00
	全部	19.72	1.34	20.50	41.30

注: A 为注浆前取样孔, D、G 为注浆后的取样孔。
根据试验结果的统计, 注浆后土的物理力学性质有以下明显的变化和改善: ①土体含水率减少; ②土样的渗透性减弱, 表现在渗透系数试验值减小, 减小的幅度在 40%~50%; ③土体的强度增大效果明显, 主要表现在土的黏聚力指标的变化上, 增加的幅度在 30%~50%。

4.4 压水试验及结果分析

压水试验在注浆完成后一周内进行。压水试验分孔口压水和孔内分层压水两种, 前者试验目的是求出地层的综合渗透系数, 后者则可以求出各土层的渗透系数。试验采用吕荣试验方法和计算公式^[3]求岩土层的渗透系数。水压控制标准: 孔口压水为 300 kPa; 孔内分层压水时, 在中风化和强风化基岩为 600 kPa, 在其它土层中为 300 kPa。

(1) 孔口压水试验及结果分析
共进行 2 个钻孔的孔口压水试验, G、H 孔压水试验 $P-Q$ 曲线分别如图 3(a), (b) 所示, 图中表明, 两个孔的 $P-Q$ 曲线基本都为 A 型(层流), 只是 H 孔在水压力大于 0.3 MPa 时出现劈裂现象。这说明注浆效果好, 岩土裂隙、孔隙闭合好, 渗透性小。从试验结果可以得出以下规律: ①在正常的压力状态下, 地层的综合渗透系数在 10^{-6} cm/s 数量级; ②在水压力大于 0.3 MPa 情况下帷幕可能会出现水力劈裂现象, 导致渗透系数增大, 见表 3。

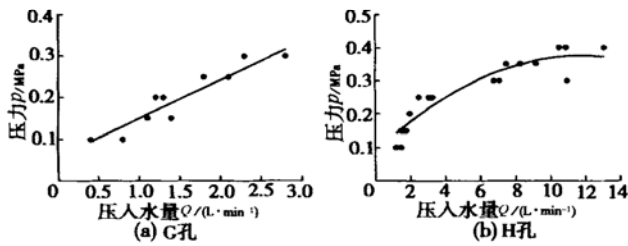


图3 G孔和H孔孔口压水试验 $p-Q$ 曲线

Fig. 3 $p-Q$ curves of hole G and H obtained by pump in test

表3 孔口压水试验地层综合渗透系数

Table 3 Seepage coefficients obtained by pump in test

p /MPa	$k/(10^{-6}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1})$	
	G 孔	H 孔
0.10	4.14	9.43
0.15	5.75	7.51
0.20	4.31	6.90
0.25	5.38	8.19
0.30	6.06	19.1
0.35		16.4
0.40		19.8

(2) 分层压水试验及结果分析

分层压水试验采用钻孔埋设袖阀管,采用类似定位注浆的方式进行定位压水。袖阀管的封壳料为膨润土水泥浆,破壳压力约100 kPa。

共进行15个点的层位压水试验。钻孔位分别为A孔和D孔(见图1)。其中A孔在注浆之前钻孔取样,并进行了埋管封孔,作为注浆后分层压水试验孔,D孔在注浆7 d后钻孔取样并进行埋管封孔作为注浆后分层压水试验孔。

注浆后不同土层压水试验渗透系数都在 10^{-5} cm/s 量级,见表4。

表4 分层压水不同层位试验结果统计

Table 4 Pump in test results of different layers

土层名称	试验点数	渗透系数均值/ $(10^{-5}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1})$
砂混黏土层	4	3.42
残积层	11	2.78
强风化层	4	3.78

注:压力为0.3 MPa。

5 实际孔桩帷幕施工

5.1 施工方法

采用前述试验确定的双液注浆帷幕方案、施工工艺、注浆配方、注浆参数。

5.2 注浆孔布置

注浆孔沿桩周布置,设计形成的固结体有效半径 $R=0.5\text{ m}$,以挖孔桩桩心为圆心环形布置两圈,孔距为0.8 m,搭接20 cm,孔深22 m,见图4。

5.3 孔桩施工及截水效果

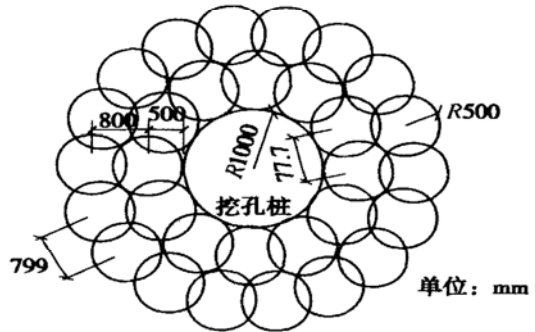


图4 挖孔桩双液注浆帷幕平面布置图

Fig. 4 Arrangement of two-shot grout hole for manhole pile

2001年7~9月对12根挖孔桩进行周边双液注浆截水帷幕施工,10~12月施工挖孔桩。

(1) 孔桩渗水量。挖孔过程表明截水帷幕止水效果非常好,孔内只有少量渗水($\leq 0.8\text{ m}^3/\text{d}$)。

(2) 建筑物沉降、地下水位监测结果。为监测挖孔桩施工对周边建(构)筑物的影响,布置了沉降、倾斜、地下水位观测点。监测结果表明,挖孔桩施工期间建筑物结构柱沉降最大2 mm,建筑物未发生倾斜,周边地面沉降小于3 cm,地下水位最大降幅1.3 m。这说明由于帷幕良好的截水效果,挖孔桩施工对周边环境影响不大。

6 结 论

(1) 以水玻璃为主材的双液注浆工法对本工点不同地层均取得了明显减少渗透性(渗透系数小于 $10^{-6}\sim 10^{-5}\text{ cm/s}$)、增加强度的工程效果。

(2) 经注浆处理后土层帷幕的水力劈裂压力大于0.3 MPa,满足了本工程20 m深挖孔桩截水要求。

(3) 双液注浆机具体积小,操作简便,能够满足本工点作业空间狭小的要求。

(4) 注浆作业时,仅钻孔有少量废水排放,基本无废浆液处理问题,应用于本工点更具明显优势。

(5) 采用双组份聚氨酯堵漏注浆技术较好地解决了高承压水头下钻孔涌水而导致地下水大量流失及后续施工困难等问题。

总之,实际工程应用表明,双液注浆工法和试验确定的浆液配方、注浆参数、施工工艺对本工点是成功的。

参考文献:

- [1] 高俊合. 桩基托换技术研究综述[A]. 2000年中国博士后学术大会论文集[R]. 北京: 科学出版社, 2000. 197~201.
- [2] 叶书麟, 韩 杰, 叶观宝. 地基处理与托换技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [3] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994.