

引文格式: 郭泽, 顾福霖, 付艳斌. 采用压密注浆定量纠偏运营地铁盾构隧道技术研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(2): 185-193.
WU Ze, GU Fulin, FU Yanbin. Quantitative Deviation Correction Technologies for Subway Shield Tunnels in Operation through Compaction Grouting[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(2): 185-193.

采用压密注浆定量纠偏运营地铁盾构隧道技术研究

郭泽¹ 顾福霖² 付艳斌³

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司城市轨道交通设计研究院, 北京 100055;
2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308; 3. 深圳大学土木与交通工程学院, 深圳 518060)

摘要:为解决运营地铁盾构隧道受周边建设项目施工影响发生偏移的问题,提出一种可量化回调量的注浆纠偏方法。通过对压密注浆过程的理论研究和有限元分析,重点研究压密注浆对盾构隧道的纠偏机理,提炼出关键参数,建立注浆作用下盾构隧道竖向位移和水平位移的理论模型和计算公式。分析结果表明,地层压密注浆可有效回调运营地铁盾构隧道发生的位移和变形,可采用体积应变法进行压密注浆模拟,隧道位移可通过分层总和法进行计算,纠偏效果主要控制因素为注浆距离、注浆压力和注浆范围。通过对比现场试验及计算公式结果,验证了该理论模型的合理性和结论的可信性。

关键词:运营地铁; 盾构隧道; 压密注浆; 体积应变法; 定量纠偏

中图分类号: U231+.94; U457+.2 **文献标识码:** A

1 引言

隧道周边大范围地下工程开挖卸载施工,是引起已建隧道发生偏移的主要原因^[1,2]。在软弱地层中刚度较柔的盾构隧道极易受到周边后续建(构)筑物施工的影响而发生位移变形。地铁作为城市地下交通的大动脉,与其他地下建筑相比,地铁隧道的变形要求更加严格,发生变形后如何及时控制及复原显得尤为重要。

针对隧道偏移,目前最主要的纠偏方式是工程注浆。注浆纠偏工程主要是利用注浆压力实时作用在被纠偏物周围土层,并通过土层进行扩散,进而改变周围土层的应力状态,使得土体发生压缩变形,最终挤压被纠偏物朝预期方向进行偏移^[3~11]。

目前国内外对运营地铁隧道注浆纠偏工程的研究不多,周彩荣^[12]总结武汉某地铁盾构隧道运营期常见病害原因及治理技术,提出采用注浆技术回调地铁盾构隧道的沉降变形,并给出了应用过程中的相关经验。王群敏等^[13]研究了微扰动注浆技术对某运营期地铁盾构隧道管片变形的影响。工程实际结

果表明,注浆技术能起到减小盾构隧道收敛的作用,使盾构隧道断面形状由压扁状向原状态变化,但会造成隧道的位移。

目前国内外对于注浆纠偏方面的研究多集中于有限元模拟和实验研究方面,而理论研究方面多集中于压密注浆的机理研究,对注浆作用下隧道的回调位移量计算方法缺乏研究。本文在以上研究基础上,依托实际纠偏工程,进一步深入研究软弱地层中对盾构隧道进行注浆纠偏的变形受力机理,结合现场试验,印证本文纠偏方案的可行性,为同类盾构隧道修复提供理论和技术支持。

2 依托项目概况

深圳西部填海区某运营地铁盾构隧道,受周边建筑基坑施工影响,约260 m长度范围内出现了较大的偏移。偏移段隧道为双洞单线隧道,埋深12~15 m,位于黏土、砂质黏土和全、强风化花岗岩中,隧道拱顶上方分布着深厚的淤泥,如图1所示。

隧道南侧为某在建建筑基坑,基坑长约360 m,宽约160 m,深21~27 m,基坑与盾构隧道最近距离

收稿日期:2022-10-09

修回日期:2023-01-25

基金项目:国家自然科学基金项目(52078304)。

作者简介:郭泽(1981-),男,硕士研究生,高级工程师,主要从事隧道与地下结构设计和研究工作,E-mail:309851057@qq.com。

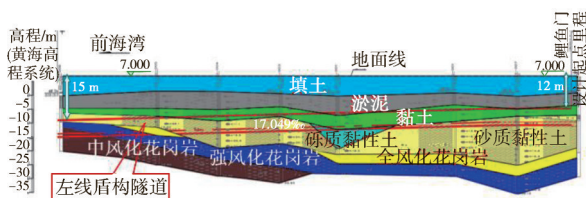


图1 隧道地质纵断面

Fig.1 Geological longitudinal section of tunnel

约为 37.5 m,其平面及剖面关系见图2和图3。基坑采用钻孔灌注桩+内支撑和锚索支护方式,围护桩间采用三管旋喷桩止水。

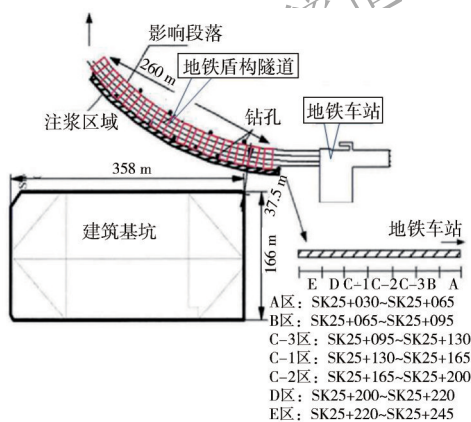


图2 建筑基坑和地铁区间隧道平面位置关系示意

Fig.2 Planar location relationship between building foundation pit and subway running tunnel

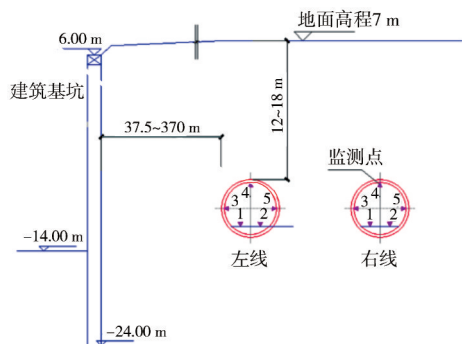


图3 建筑基坑和地铁区间隧道剖面位置关系

Fig.3 Sectional location relationship between building foundation pit and subway running tunnel

基坑施工过程中,盾构隧道按 15 m 间距布设了自动化监测断面,监测点断面布置如图3所示。以位移量最大的拱顶位移数据(监测点4)作为分析对象,根据自动化监测结果,基坑开挖至 11.7 m 深时,

靠近基坑的左线隧道最大沉降累计达 78 mm,朝基坑侧(南侧)的水平位移达 35 mm,沿隧道长度范围的偏移呈中段大、两侧小的规律。右线隧道的位移变形规律同左线隧道一致,但数值较小。为便于分析论述,本文只分析靠近基坑侧的左线隧道位移变形。

为保证地铁运营安全,本区段地铁列车限速通过,同时停止基坑的开挖及降水施工,于隧道和基坑之间设置 $\phi 650@450$ 的三轴搅拌桩截水帷幕并设置有压回灌井,挖除隧道上方 2.5 m 厚的覆土,减小管片环荷载。基坑停工并采取措施后,隧道位移变形趋于稳定,管片环极限应力状态解除^[14]。

为恢复地铁的正常运行,防止地铁隧道继续偏移引起结构安全问题,需对隧道进行位移回调处理。为确保注浆纠偏过程地铁运营的安全,纠偏回调量和回调速率必须精确控制。因此,本文通过对压密注浆过程的理论研究和有限元分析,旨在寻求一种可量化回调量的设计方法。

3 注浆纠偏机理分析

3.1 注浆纠偏方法选择

注浆纠偏方法可分为洞内注浆和地面注浆两种。本隧道是运营地铁隧道且纠偏范围达 260 m,洞内注浆方法可实施性差。而本隧道位于填海待开发区,隧道上方地面空旷,采用地面注浆方法,既不受地铁运营的影响,又有利于大范围布置设备,全面开展纠偏工作。因此本隧道采用地面注浆方法,于隧道和基坑间设置竖向袖阀管进行水平纠偏,如图4所示;于隧道两侧布置斜向袖阀管进行竖向纠偏,如图5所示。

3.2 压密注浆机理

注浆按作用机理可分为四种^[9,15-17]:(1)填充注浆;(2)渗透注浆;(3)压密注浆;(4)劈裂注浆。其

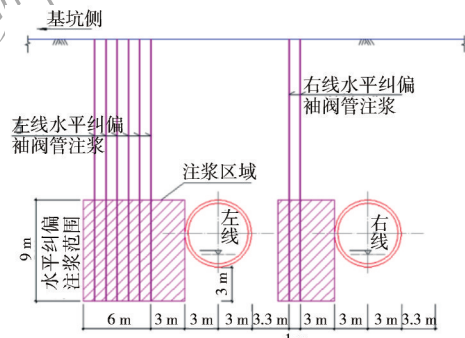


图4 水平纠偏示意

Fig.4 Schematic diagram of horizontal deviation correction

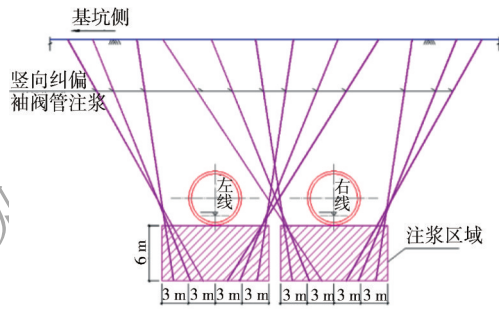


图5 竖向纠偏示意

Fig.5 Schematic diagram of vertical deviation correction

中,压密注浆的作用机理与注浆纠偏过程最为贴合。压密注浆系将黏稠且流动性差的惰性浆液在一定压力下注入地层,挤压介质而形成不规则的“浆泡”,随注入压力不断增大,“浆泡”体积不断增加,起到挤密介质作用,可采用体积应变法模拟分析压密注浆过程。

3.3 注浆纠偏参数定义

注浆纠偏过程中,盾构隧道发生了变形和整体位移,此变形位移是由隧道背后土体压缩引起的。为了直观、简单地分析注浆纠偏作用机理,定量分析压密注浆作用下的隧道位移情况,选取注浆距离、注浆压力、注浆范围3个主要控制因素,以注浆压力合力与盾构隧道水平轴线重合的纯水平纠偏模型为初始分析对象,对注浆作用机理进行分析。

设水平注浆管注浆合力点与盾构隧道圆心的距离为 L (以下简称“注浆距离”),水平注浆压力为 P_h ,注浆范围为 Q ,竖向注浆压力为 P_v ,隧道埋深为 H ,隧道外径为 D 。隧道在注浆作用下的水平向位移为 S_h ,竖向位移为 S_v 。具体关系如图6所示。

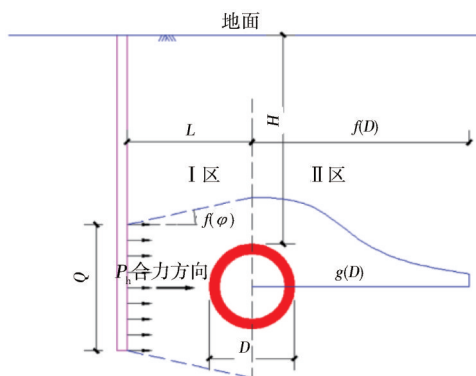


图6 参数关系

Fig.6 Parameter relationship

3.4 盾构隧道在压密注浆作用下的位移变化假设

为定量分析盾构隧道在压密注浆作用下的位移变化,本文推导纠偏位移公式,采用以下几点假设:

(1) 由于注浆纠偏过程中隧道自身变形引起的位移很小,只考虑由盾构隧道背后土体压缩产生的位移。

(2) 注浆压力在土中扩散和衰减。由于注浆距离盾构隧道较近,为简化计算,假设在注浆影响范围内注浆压力按线性衰减,假设注浆压力在土层中的扩散角度为土层内摩擦角 φ 的函数 $f(\varphi)$ 。

(3) 盾构隧道背后土层受注浆压力挤压发生变形,但变形仅发生在一定范围内,超出该范围变形可忽略不计,因此假设影响范围是盾构隧道直径 D 的函数 $f(D)$ 。

(4) 由于盾构隧道背后土体应力衰减无法用公式表示,可以增加参数 α ,为影响范围内平均附加应力系数,假设此参数也是和 D 有关系的函数 $g(D)$ 。

(5) 土体的压缩模量 E_s 可以一定程度反映土的应力-应变关系,因此本文假设土的水平压缩模量等于 E_s 。

(6) 竖向纠偏的假设同水平纠偏假设。鉴于竖向纠偏采用对称布置的斜向注浆管,纠偏效果与作用到隧道垂直向上压力有关,注浆距离取安全控制距离3 m,注浆管布置可调性较小,在一定注浆距离和隧道尺寸的情况下,注浆范围和注浆距离为非主控因素,竖向纠偏效果主要与注浆压力和隧道埋深有关。

3.5 压密注浆作用下盾构隧道纠偏机理分析

土体承受荷载后发生变形,其变形的规律和大小受施加荷载的大小、性质(静荷载或动荷载)和持续时间的影响,同时也受土的性质、初始固结情况和应力历史等因素的影响。考虑注浆纠偏的特性,参考土体的竖向沉降变形计算方法,可近似计算注浆压力作用在土体侧面时引起的局部土体侧移。如图6所示,将盾构隧道沿着竖向对称轴切割为两个区域,竖向对称轴与注浆管之间区域定义为I区,竖向对称轴另一侧区域定义为II区,竖向对称轴所在的隧道中轴线定义为荷载作用面。水平注浆合力 $P_h \times Q$ 从注浆管传递到荷载作用面会衰减,由于注浆距离与注浆范围比值小于1.5,可认为在I区土体的附加应力是线性扩散^[18];按土压力理论,扩散角度与土层的摩擦角正相关,则附加应力传递到荷载作用面的范围为 $2L \cdot \tan(\varphi) + Q$ 。在II区,影响范围内的土层附加应力扩散是非线性的,参考单向压缩沉降

法^[19]和《建筑地基基础设计规范》中地基变形公式,定义土层水平向平均附加应力系数 $\bar{\alpha}_h$,以此计算影响范围内土层的附加应力面积,进而求得影响范围内的土层变形。

通过上文分析的土层水平变形机理,可以推导土层水平向变形的公式:

$$S_h = \psi_{sh} \times \frac{P_h \times Q}{(2 \times L \times \tan \varphi + Q)} \times \frac{f(D)}{E_s} \times \bar{\alpha}_h \quad (1)$$

式中: S_h 为水平纠偏位移(m); ψ_{sh} 为修正系数,暂取1,考虑有限元计算的理想性,此系数应小于1,通过当地现场试验数据调整; P_h 为水平注浆压力(Pa); Q 为注浆范围(m); D 为盾构隧道外径(m); L 为注浆距离(m); φ 为土体内摩擦角($^{\circ}$); E_s 为土体压缩模量(Pa); $\bar{\alpha}_h$ 为土层水平向平均附加应力系数。

同理可以推导竖向纠偏公式,鉴于竖向纠偏采用对称布置的斜向注浆管,且注浆距离和隧道尺寸是定值,注浆范围和注浆距离为非主控因素,竖向纠偏效果与注浆压力和隧道埋深关系最大,得出竖向位移纠偏公式:

$$S_v = \psi_{sv} \times P_v \times \frac{H}{E_s} \times \bar{\alpha}_v \quad (2)$$

式中: S_v 为竖向纠偏位移(m); ψ_{sv} 为修正系数,暂取1,考虑有限元计算的理想性,此系数应小于1,通过当地现场试验数据调整; P_v 为垂直注浆压力(Pa); H 为隧道埋深(m); E_s 为土体压缩模量(Pa); $\bar{\alpha}_v$ 为土层竖向平均附加应力系数。

公式(1)中 $f(\varphi)$ 、 $f(D)$ 和 $\bar{\alpha}_h$ 为未知量,公式(2)中 $\bar{\alpha}_v$ 为未知量。为实现定量回调,采用有限元模型计算不同参数下的回调值,反算上述未知量。

4 注浆纠偏有限元分析

4.1 有限元模型

本文建立地层-结构模型,采用体积应变法模拟压密注浆纠偏过程,采用真三维流固耦合岩土工程有限元软件ZSOIL进行计算。有限元模型包含整个建筑基坑和地铁区间隧道,模型 X 方向取200 m, Y 方向取200 m, Z 方向取55 m。模型底部约束水平和竖向位移,侧面约束水平位移。实体单元采用六面体单元,锚杆采用anchor单元,锚固段为带interface的anchor单元,内支撑采用beam单元,地层、灌注桩及止水帷幕采用实体单元,隧道采用无厚度shell单元,注浆体采用实体单元。模型共划分单元69 875个,节点110 684个。有限元模型及注浆模型如图7和图8所示,地层参数取值见表1。

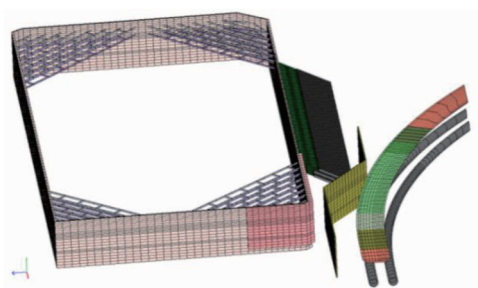


图7 有限元整体模型

Fig.7 Overall finite element model

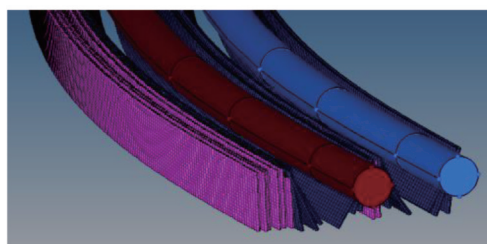


图8 注浆纠偏模型

Fig.8 Grouting correction model

表1 土层参数

Table 1 Soil stratum parameters

地层编号	岩土名称	天然重度 $\gamma_0/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	压缩模量 E_s/MPa	泊松比
① ₁	素填土	19.0	10.0	12.0	5.0	0.3
① ₂	杂填土	20.3	10.0	25.0	5.0	0.3
②	淤泥	14.3	8.0	2.0	1.8	0.28
③ _s	粉质黏土	19.6	25.0	12.0	5.19	0.36
⑥ ₁	砾质黏性土	18.4	29.0	18.0	4.55	0.26
⑥ ₂	砂质黏性土	18.9	25.0	22.0	3.78	0.26
⑦ ₁	全风化花岗岩	18.8	33.0	22.5	4.19	0.28
⑦ ₂	强风化花岗岩	18.7	36.0	25.0	5.14	0.28

HSS模型(Hardening soil small-strain model)是在HS模型基础上考虑了土体在小应变范围内其自身剪切刚度与应变的非线性关系的修正模型,可以更好地模拟土体剪切硬化、压缩硬化、小应变等特性。本文采用HSS模型进行注浆纠偏模拟计算。

HSS模型的计算参数均可通过室内试验确定。HSS模型可通过三轴剪切(加卸载)试验确定 E_{50} 模量、 E_{ur} 模量、黏聚力 c' 、内摩擦角 φ' ,可通过标准固结试验确定 E_s 模量和初始固结压力 P_{c0} , E_0 可通过动三轴试验获得。

当进行有效应力分析(或者流固耦合分析)时,Plaxis手册建议各变形模量之间存在如下相互关系: $E_{50} \approx E_s$, $E_{ur} = 3E_s \sim 5E_s$, $E_0 = 3E \sim 5E$, 土层 HSS 模型参数取值见表2, 其中 H 为水平应力, M 为应力比。

表2 HSS模型参数

Table 2 Parameters of soil HSS model

地层编号	岩土名称	E_s /MPa	E_{50} /MPa	E_{ur} /MPa	E_0 /MPa	H /MPa	M
① ₁	素填土	5.0	7.5	25	25	12.938	1.108
① ₂	杂填土	5.0	7.5	25	25	12.938	1.108
②	淤泥	1.8	2.7	9	9	10.555	0.953
③ _s	粉质黏土	5.19	7.785	25.95	25.95	31.477	1.061
⑥ ₁	砾质黏性土	4.55	6.825	22.75	22.75	37.460	1.137
⑥ ₂	砂质黏性土	3.78	5.67	18.9	18.9	21.776	1.061

4.2 有限元材料设定

(1) 本文土体设为连续各向同性弹塑性材料, 本构模型采用小应变土硬化 HSS 模型, 能更准确地模拟岩土体的应力应变特征;

(2) 不考虑土体固结和蠕变的影响, 即不考虑时间因素对变形的影响;

(3) 盾构隧道管片环按等效刚度原理等效成各向异性弹性材料;

(4) 假设隧道管片与土体紧密接触, 两者变形协调, 围护结构与土体接触耦合;

(5) 围护结构和内支撑结构等均可认为是线弹性材料。

4.3 有限元分析假定

(1) 根据监测数据分析, 造成本工程隧道变形的主要原因是周边基坑内人工挖孔桩开挖降水导致坑外水位下降, 隧道周边软弱地层发生固结沉降。模拟人工挖孔桩降水, 基坑开挖至 11.7 m 时, 坑外地铁隧道处地下水位下降 4 m;

(2) 对于袖阀管注浆, 计算中仅考虑注浆段的作用, 不考虑空管段的作用;

(3) 注浆采用体积应变等代法模拟, 通过施加体积应变实现压密注浆的模拟。根据每根注浆管实际注浆量并考虑浆液的随机扩散损失, 反算体积应变。通过试算最终本模型的体积应变 Δ 取 5%。

4.4 有限元计算工况

有限元计算根据现场纠偏的实际情况, 分 5 个阶段进行:

(1) 首先是进行初始自重应力平衡, 此时隧道

存在于场地内;

(2) 考虑基坑钻孔灌注桩支护、止水帷幕、分层降水、支护(角撑+锚杆)施工、土方开挖施工, 通过反复试算, 得出基坑开挖至 11.7 m 深度时, 隧道位移变形及地下水位变化接近现场实测情况, 隧道变形趋势符合现场实际情况;

(3) 隧道纠偏前施工措施的模拟, 于基坑和隧道之间增设一道止水帷幕, 并挖去隧道上方 2.5 m 深的覆土;

(4) 进行水平注浆纠偏施工模拟;

(5) 进行竖向注浆纠偏施工模拟。

4.5 有限元分析

4.5.1 纠偏前隧道初始变形状态分析

通过有限元试算, 基坑开挖至 11.7 m 深度, 坑外地铁隧道地下水位下降 4 m; 且在完成止水帷幕和覆土卸载时, 隧道最大水平位移为 38.5 mm, 最大竖向沉降为 63.8 mm, 与现场实测最大水平位移 35 mm、最大竖向沉降 78 mm 位移趋势相同, 位移量接近。因此, 以此模型作为隧道纠偏前的初始状态模型。

4.5.2 水平、竖向纠偏隧道位移分析

注浆管与周边土体通过软件自带的特殊 Link 方法, 将注浆管的节点与周边土体实体相连接, 实现了变形的耦合。注浆纠偏示意图如图 9 所示。

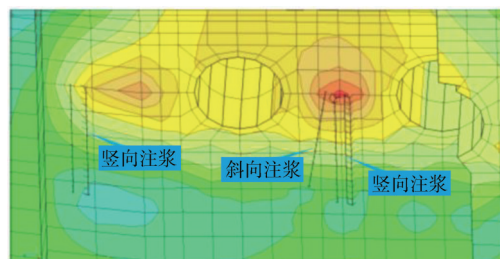


图9 注浆纠偏示意

Fig.9 Schematic diagram of grouting correction

(1) 水平纠偏计算

为计算水平纠偏公式(1)中未知量 $f(\varphi)$, $f(D)$ 和 $\bar{\alpha}_h$, 采用有限元分析不同注浆距离、注浆压力和注浆范围时隧道的水平位移, 利用参数分析数据, 通过最小二乘法回归公式(1)中的位置系数, 最终确定注浆纠偏公式:

$$S_h = \psi_{sh} \times \frac{P_h \times Q \times 0.546 \times D}{(11.327 \times L \times \tan \varphi + Q) \times E_s} \quad (3)$$

修正系数 ψ_{sh} 暂取 1, 公式回归结果如图 10 所示, 图 10 中曲面为公式(3)的拟合图形, 表示 S_h 在 3 个变

量影响下的三维函数图形,9个离散点表示各个工况下的 S_h 值,各个工况的值与曲面的距离即为模拟结果和公式结果的误差。各个参数分析点的残差见表3。

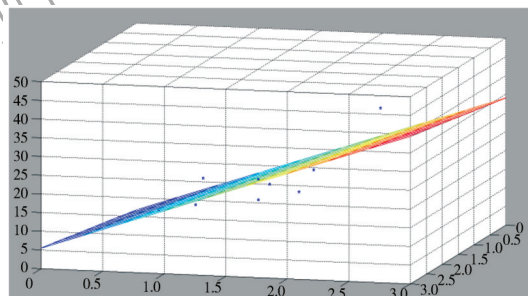


图10 拟合曲面

Fig.10 Curve surface of fitting

表3 数据点拟合结果残差

Table 3 Residual error of data point fitting results

工况	注浆管距 隧道距离/m	注浆压力 /kPa	注浆范围 /m	水平位移 /m	残差 R
1	3	450	6	0.066	4.207 7
2	4.5	450	6	0.059	-0.599 9
3	6	450	6	0.049	-2.532 9
4	4.5	300	6	0.022	9.772
5	4.5	450	6	0.059	-6.839 2
6	4.5	600	6	0.085	-6.076 5
7	3	300	6	0.042	-1.673 5
8	3	300	9	0.057	-1.139 4
9	3	300	12	0.065	0.101 1

(2) 竖向纠偏计算

为计算竖向纠偏公式(2)中未知量 $\bar{\alpha}_v$,采用有限元分析不同注浆压力时隧道的竖向位移,利用参数分析数据,最终确定注浆纠偏公式为:

$$S_v = \psi_{sv} \times 0.013 \times P_v \times \frac{H}{E_s} \quad (4)$$

修正系数 ψ_{sv} 暂取1,公式回归结果如图11所示,不同压力下计算出的竖向位移见表4。

4.5.3 纠偏过程隧道自身变形情况分析

通过有限元计算,纠偏过程隧道自身变形分为径向变形和旋转变形,注浆纠偏过程隧道旋转角度很小,可以忽略,隧道径向变形从最大13 cm回调至7 cm,纠偏过程隧道断面向真圆变化,注浆过程对隧道结构是有利的。

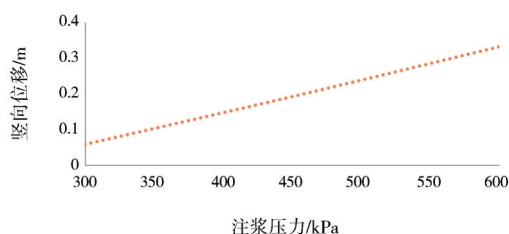


图11 注浆压力与竖向位移关系

Fig.11 Relationship between grouting pressure and vertical displacement

表4 竖向纠偏计算结果

Table 4 Calculation results of vertical deviation correction

工况	注浆压力/kPa	竖向位移/m
1	300	0.056
2	450	0.19
3	600	0.33

5 现场试验

5.1 现场纠偏试验方案

以隧道最大沉降位置两侧各15 m范围作为试验段,先实施水平纠偏,再实施竖向纠偏。

(1) 水平纠偏:于隧道和基坑间设置竖向袖阀管进行水平纠偏。袖阀管在距离隧道3~8 m范围内梅花形布置6排,排距和布孔间距为1 m,注浆管钻孔至隧道下3 m,注浆压力控制在0.3~0.8 MPa,靠近隧道处采用低压力,远离隧道处采用高压力。

(2) 竖向纠偏:于隧道两侧布置斜向袖阀管进行竖向纠偏。袖阀管距离隧道最近距离控制在3 m,沿隧道纵向1 m间距布置,横向布置3排,排距根据注浆深度对应调整,注浆管钻孔至隧道下6 m,注浆工艺和压力与水平纠偏阶段相同。

5.2 根据现场试验数据修正理论公式

根据现场试验,水平纠偏阶段离隧道最远的2排注浆管注浆主要起止浆墙作用,对隧道位移无影响,修正公式不考虑此工况数据。注浆压力超过0.5 MPa后,浆液对土体产生劈裂作用,地面冒浆,回调效果较差,修正公式只对注浆压力在0.3~0.5 MPa范围的压密注浆工况的试验数据进行对比分析。

通过对现场试验值与公式计算值的比值分析,计算出水平纠偏公式(3)中修正系数 $\psi_{sh} = 0.13$,竖向纠偏公式(4)中修正系数 $\psi_{sv} = 0.70$ 。

5.3 纠偏效果分析

按注浆压力为0.3 MPa, L 为3 m, Q 为9 m, E_s 为5.19 MPa, φ 为12°, H 为14 m, 代入公式(3), 得到水平纠偏位移为22.8 mm; 代入公式(4), 得到竖向纠偏位移为12.3 mm。采用修正公式指导后续的注浆纠偏工作, 目标是隧道最大偏移位置回调量约为20 mm, 其他位置按平顺回调原则制定回调量。

对注浆作用产生的盾构隧道纠偏位移进行自动化监测, 对比纠偏前的位移数据, 隧道水平位移最大回调量为21.91 mm, 水平纠偏效果如图12所示。隧道竖向位移最大回调量为17.25 mm, 竖向纠偏效果如图13所示。

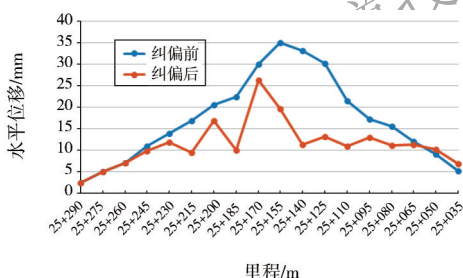


图12 纠偏施工前后水平位移对比

Fig.12 Comparison of horizontal displacement before and after correction

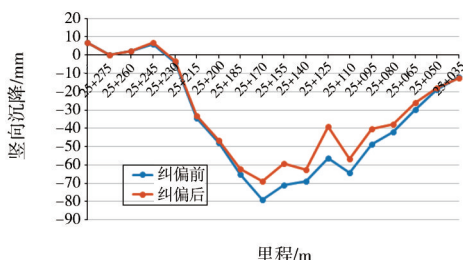


图13 纠偏施工前后竖向位移对比

Fig.13 Comparison of vertical displacement before and after correction

由于注浆过程控制每天回调量不大于2 mm, 地铁运营没有受到影响, 盾构隧道从扁平圆状重新趋于真圆, 隧道结构在回调过程中未出现损伤病害。

实践证明, 采用理论推导并通过试验数据修正后的公式, 能较准确地计算注浆方案的回调量, 指导现场施工。

5.4 纠偏方案优化建议

根据纠偏工程现场实施效果, 注浆管布置宜为4排, 其中外侧两排主要起止浆墙作用, 内侧两排主

要起纠偏作用。外侧止浆墙止浆效果好坏直接影响注浆纠偏效果; 内侧注浆管建议实施2排即可, 但要保证每根注浆管能重复注浆。随着注浆的实施, 注浆管与隧道间土体逐渐挤密, 后施作的注浆管注浆压力逐渐增大, 直至浆液对土体产生劈裂作用, 地面冒浆, 纠偏工程无法继续进行。因此, 增加注浆管排数意义不大, 纠偏回调效果最显著阶段是内侧第1、2排注浆管注浆阶段, 纠偏工作应在此阶段完成预计回调量。

6 结论与讨论

6.1 结论

(1) 地层压密注浆可有效恢复运营地铁盾构隧道发生的位移变形, 从而还原结构和线路原始状态。竖向注浆和斜向注浆分别对水平纠偏和竖向纠偏起到较好的作用, 注浆纠偏过程中盾构隧道从扁平圆状重新趋于真圆。

(2) 采用体积应变法能较好地模拟压密注浆对隧道纠偏作用。注浆压力通过土体扩散至隧道结构上, 并通过隧道结构挤压其背后土体压缩移动, 隧道背后土体压缩位移可采用类似土层分层总和法进行计算。

(3) 水平纠偏效果主要受注浆距离、注浆压力、注浆范围3个主要因素控制, 竖向纠偏效果在注浆管布置方式可调性小的情况下主要受注浆压力控制。根据公式分析, 上述参数对纠偏结果影响程度有所不同, 水平纠偏结果影响程度依次为注浆压力 > 注浆距离 > 注浆范围, 竖向纠偏程度则与注浆压力正相关。可根据水平纠偏、竖向纠偏公式, 制定总回调量和日回调量, 确定注浆压力、注浆范围、钻孔布置, 达到定量回调效果。

6.2 讨论

本文以深圳西部填海区软弱地层中盾构隧道偏移变形为研究对象进行扩展论述, 所得理论公式得到该片区工程验证, 对该片区地层具有较好的适用性。但理论公式对其他地区地层是否适用仍需进一步论证。

针对上述问题, 建议后续研究可收集全国不同地区不同土层中类似案例进行梳理总结, 有条件的可针对代表性地层进行现场和室内试验, 通过科学方法对本文公式进行修正, 提出针对不同地区不同地层条件下的盾构隧道位移纠偏修正公式。

参考文献

References

- [1] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭, 等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1109-1116+1140.
ZHENG Gang, LIU Qingchen, DENG Xu, et al. Field Measurement and Analysis of Effect of Excavation on Existing Tunnel Boxes of Underlying Metro Tunnel in Operating[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1109-1116+1140.
- [2] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
QIU Wenge. The Study on Mechanics Principle and Countermeasure of Approaching Excavation in Underground Works[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [3] 郑卓. 基于悬浊液流动特性的注浆扩散及加固规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
ZHENG Zhuo. Study on Grouting Diffusion and Reinforcement Mechanism Based on Flowing Regularity of Suspension[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [4] 李术才, 张庆松. 隧道及地下工程突涌水机理与治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
LI Shucai, ZHANG Qingsong. Mechanism and Treatment of Water Inrush for Tunnelling and Underground Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [5] BEZUIJEN A. Compensation Grouting in Sand: Experiments, Field Experiences and Mechanisms[D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [6] 黄德发, 王宗敏, 杨彬, 等. 地层注浆堵水与加固施工技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
HUANG Defa, WANG Zongmin, YANG Bin, et al. Grouting Construction Technology for Water-blocking and Reinforcement[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [7] 农维勒. 灌浆的理论与实践[M]. 顾柏林, 译. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.
NONVEILLER E. Grouting Theory and Practice[M]. GU Bolin, translated, Shenyang: Northeast Institute of Technology Press, 1991.
- [8] 《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.
Cooperation Group of Theory and Engineering Examples of Geotechnical Grouting. Theory and Engineering Examples of Geotechnical Grouting[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [9] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
WANG Mengshu. Tunnelling and Underground Engineering Technology in China[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [10] 朱旻. 已建盾构隧道注浆纠偏机理及工程应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
ZHU Min. Studies on the Mechanism and Engineering Application for the Remediation of Existing Shield Tunnel Using Grouting Technique[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [11] 杜一鸣. 基坑开挖对邻近既有隧道变形影响及保护研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
DU Yiming. Mechanism and Countermeasures of the Tunnel Deformation Induced by Adjacent Excavation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [12] 周彩荣. 武汉某地铁盾构隧道运营期常见病害原因分析及治理措施[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(12): 153-157.
ZHOU Cairong. Analysis of Common Diseases in Metro Shield Tunnel during Operation Period and the Control Measures[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(12): 153-157.
- [13] 王群敏, 吴勇, 王烨晟, 等. 运营期地铁盾构隧道管片收敛整治过程变形特征分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(12): 131-134.
WANG Qunmin, WU Yong, WANG Yesheng, et al. Deformation Features Analysis in the Renovation Process of Subway Tunnel Segment Convergence[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(12): 131-134.
- [14] 邬泽. 填海区软弱地层地铁盾构隧道注浆纠偏技术研究[J]. 工程技术研究, 2022, 7(1): 9-12.
WU Ze. Study on Grouting Correction Technology of Metro Shield Tunnel in Soft Stratum in Reclamation Area[J]. Engineering and Technological Research, 2022, 7(1): 9-12.
- [15] 杜嘉鸿. 地下建筑注浆工程简明手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
DU Jiahong. Concise Manual for Grouting Construction in Underground Engineering[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [16] 何修仁. 注浆加固与堵水[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1990.
HE Xiuren. Grouting for Reinforcement and Water Blocking[M]. Shenyang: Northeast Institute of Technology Press, 1990.

- [17] 张农. 巷道滞后注浆围岩控制理论与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
ZHANG Nong. Theory and Practice of Delayed Grouting in Roadway[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2004.
- [18] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 高等土力学[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 111.
LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 111.
- [19] 李广信. 高等土力学[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2016: 303-305.
LI Guangxin. Advanced Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 303-305.

Quantitative Deviation Correction Technologies for Subway Shield Tunnels in Operation through Compaction Grouting

WU Ze¹ GU Fulin² FU Yanbin³

(1. Urban Rail Transit Design and Research Institute, China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055; 2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308; 3. School of Civil and Traffic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract: To address the problem of deviations in subway shield tunnels in operation caused by surrounding construction projects, this paper puts forward a quantitative grouting correction method. Through the theoretical study and finite element analysis of the compaction grouting process, the study focuses on the deviation correction mechanism of compaction grouting on the shield tunnel, obtains the key parameters, and establishes the theoretical model and calculation formulae for the vertical and horizontal displacements of the shield tunnel under the action of grouting. The analysis results show that the compaction grouting in the strata can effectively correct the displacement and deformation that have occurred in subway shield tunnels in operation, which can be simulated by using the volume strain method for compaction grouting. The tunnel displacement can be calculated by the layered summation method, and the main control factors of the correction effect are the grouting distance, grouting pressure, and grouting range. By comparing the results of field tests and calculation formulae, the theoretical model put forward by this paper is proved reasonable with credible conclusions.

Keywords: Subway operation; Shield tunnel; Compaction grouting; Volume strain method; Quantitative deviation correction

全球首台可变径斜井掘进机长沙下线

4月20日,一台可实现50°超大倾角爬坡、6.53 m和8 m可变径开挖的隧道掘进机在长沙下线。这是全球首台可变径斜井岩石隧道掘进机。

该台设备取名“天岳号”,总长87 m、总重约900 t,由中国铁建重工集团、国网新源湖南平江抽水蓄能公司、中国水电八局联合打造,将用于湖南平江抽水蓄能电站的建设。在施工中,设备可灵活变身,实现开挖直径6.53 m和8 m的自由切换,并且兼具水平平洞与50°超大倾角斜井连续作业能力。

(摘自 中国新闻网)