

盾构施工参数对地表沉降的因素敏感性分析

王 法¹ 周宏磊¹ 雷崇红² 韩 煊¹

(1. 北京市勘察设计研究院有限公司 北京 100038;

2. 北京市轨道交通建设管理有限公司 北京 100037)

摘 要 依托北京地铁8号线某区间盾构隧道工程,首先从盾构施工参数的关联性进行分析,选取4个相对独立的施工参数。之后采用灰色关联分析方法,对盾构施工条件下引起的地表沉降进行因素敏感性分析。分析结果表明,各施工参数对地表沉降的敏感性从大到小依次为土仓压力、同步注浆量、刀盘扭矩、同步注浆压力。可为类似工程盾构施工参数优化和沉降控制研究提供借鉴。

关键词 城市轨道交通;地表沉降;盾构施工参数;敏感性分析;灰色关联分析

中图分类号 U455.43 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2013)06-0063-05

1 盾构施工参数与地表沉降关系概述

目前,盾构法施工已被广泛应用于城市地下铁路和地下管线等隧道工程的施工中,并取得了巨大的成功。但在盾构隧道掘进过程中,施工不可避免地会引起地层损失,过大的地层损失可导致较大的地面沉降,对地面建筑物、地下管线等设施产生不利影响,甚至导致其破坏,造成较大的经济损失,因此近年来在城市盾构隧道施工中产生的地表沉降及环境保护问题已受到越来越多的关注^[1-3]。盾构施工引起的地表沉降量大小一般与施工技术、盾构机的类型、盾构机的姿态以及土的类型有关,其中盾构施工参数与地表沉降有着密切的关系。

近年来,国内外许多学者都对此问题做了很多工

作,得出许多有意义的结论。例如,金明^[4]、司翔宇^[5]等人通过对现场监测结果进行分析,认为注浆量是对土体变形影响最大的因素,通过提高注浆量,可以很好地控制盾构施工造成的土体变形,而在盾构推进过程中,盾构总推进力和刀盘扭矩对土体变形的影响较小;周海群^[6]通过研究认为土仓压力的设定是土压平衡式盾构施工的关键,维持和调整压力值是盾构推进操作中的重要环节,包含对推力、推进速度和出土量三者的调整,对盾构施工轴线和地层变形量的控制起到主导作用;张恒^[7]等人采用数值模拟技术,分析得出适当加大注浆压力能有效控制地表沉降,注浆压力增大50 kPa,地表沉降减少1 mm左右,同时,土仓压力与土体原始侧向压力接近时地表沉降量最少。依据国内外现有研究成果得知,影响地表沉降的盾构施工参数很多,但各因素对沉降的影响程度不同,也就是说,各个因素对地表沉降的敏感性不同,所以通过研究各盾构施工参数对地表沉降的敏感性,可以定量地分析地表沉降量与各盾构施工参数之间的相关性,找出地表沉降的主导因素。

本文基于“复杂环境条件下盾构长距离下穿古旧平房群综合技术研究”这一课题,以北京地铁8号线某区间盾构隧道工程为研究对象,通过灰色关联分析方法,对盾构施工影响下的地表沉降进行敏感性分析,以寻求影响地表沉降的主要施工参数,对未来类似盾构施工参数优化和沉降控制的研究具有重要意义和借鉴作用。

2 盾构施工参数的关联性分析

根据已有研究成果,盾构影响土体移动和地表沉

收稿日期:2013-04-19 修回日期:2013-05-13

作者简介:王法,男,硕士,主要研究方向为地下结构工程,

wangfa1982@163.com

降的原因^[6]主要可以归纳为:

1) 开挖面土体的应力状态变化;2) 开挖面前方土体与盾构可接触的周围土体受到挤压而向前和四周移动;3) 盾壳半径小于刀盘半径,盾构壳周围有间隙,周围土体向空隙处移动,导致地表沉降变化;4) 土体与衬砌的相互作用;5) 纠偏过程中出现超挖现象;6) 盾尾注浆不适当引起的土体挤压导致沉降;7) 土体次固结即盾构隧道周围土体施工扰动后,软黏土土体进一步产生蠕变,形成持续次固结沉降。

在上述影响因素中,1)和2)可归结为掘削面稳定控制问题,3)和6)可归结为盾构注浆质量控制问题,施工中主要通过土压力设定、盾构掘进速度、注浆、掘进操作、监控等方面进行控制。另外,4)、5)、7)等因素为客观存在的因素。

盾构施工较重要的施工参数包括土仓压力、掘进速度、盾构总推力、刀盘扭矩、刀盘转速、同步注浆压力、同步注浆量、二次补浆参数、盾构姿态偏移量等。为研究地层变形对盾构施工参数的因素敏感性,首先应从掘削面稳定控制和盾构注浆质量控制两个方面分析盾构施工过程中参数之间的关联性。

2.1 影响掘削面稳定的施工控制参数

地表变形与盾构掘削面的稳定关系直接而密切,盾构施工中对掘削面稳定最关键的两个参数即为土仓压力和出土量。由于出土量尚不能够进行信息化、系统化的管理,所以在更大程度上依赖于土仓压力的设定。

土仓压力值的调整可根据掘进过程中地质条件、隧道埋深及地表沉降监测值,通过维持开挖土量与排土量的平衡来实现,即通过设定掘进速度、调整排土量或设定排土量、调整掘进速度等途径来达到,因此土仓压力的设定与盾构掘进速度直接相关。掘进速度为贯入度与刀盘转速的乘积,贯入度体现的是刀具向前贯入地层切削土体的能力,盾构刀具分层次布置,前后两层刀具的高度差决定了贯入度大小,在刀具布置形式一定的前提下,盾构掘进速度与刀盘转速直接相关。

盾构总推力由周围土层对盾构外壳的摩擦阻力、盾构刀盘正面水土压力、盾尾与管片间的摩擦阻力、切口环贯入地层的贯入阻力、转向阻力、后配套台车的牵引阻力等构成。因此,可认为土压力是盾构总推力的的重要组成部分。刀盘扭矩包括刀盘切削扭矩、刀盘自重形成的轴承扭矩、刀盘轴向推力荷载形成的旋转扭矩、密封装置摩擦力矩、刀盘正面和背面的摩擦力矩、

刀盘圆周面的摩擦反力矩、刀盘开口槽的剪切力矩和土舱内的搅动力矩等。

2.2 影响注浆质量的施工控制参数

1) 同步注浆压力。同步注浆时要求压入口的压力大于该点的水土压力之和,做到尽量填补而不是劈裂。压力根据隧道的埋深来确定,例如埋深处水土压力为 p ,同步注浆压力应控制在 $(1.2 \sim 2.0)p$ 之间,但不宜超过 0.45 MPa 。若注浆压力过大,最先承受压力的管片难以负荷从而被压坏,引发管片的抗渗性能降低;而注浆压力过小,浆液填充速度过慢,填充不充足,也会使地表变形增大^[7]。

2) 同步注浆量。根据盾构外径与管片内径之间空隙的体积 V 来确定。每环同步注浆量一般控制在 $(1.2 \sim 1.8)V$,对于砂层、卵石层,砂、卵石复合地层,以及沉降控制较严格的组段应对注浆量适当增加。

3) 二次补浆控制。根据监测地表沉降、周围建筑物沉降和隧道变形情况,如沉降和变形接近或超过预警值时,则说明同步注浆可能有不足的地方,应及时进行二次注浆,可通过管片中部预留的注浆孔进行,补充体积减少部分和同步注浆未填充部分,提高抗渗透能力,更重要的是减少盾构机通过后土体的后期沉降,以保证建筑物的安全。

通过对盾构施工参数间的相互关联性分析,选取土仓压力、刀盘扭矩、同步注浆压力、同步注浆量4个相对独立的盾构施工参数,分析地表沉降的因素敏感性。

3 灰色关联分析方法

灰色关联分析^[8]是指对一个系统发展变化态势的定量描述和比较的方法,其基本思想是通过确定参考数据列和若干个比较数据列的几何形状相似程度来判断其联系是否紧密,反映了曲线间的关联程度,通过这种方法可以从中分析出主要因素,其分析步骤如下所述。

3.1 对数据的无量纲化处理

首先,将被影响数据建立一个参考数列 x_0^* ,同时将 m 种影响因素建立成因素数列 x_i^* ,即

$$\begin{aligned} x_0^* &= [x_0^*(1), x_0^*(2), \dots, x_0^*(n)] \\ x_i^* &= [x_i^*(1), x_i^*(2), \dots, x_i^*(n)] \quad (1) \\ (i &= 1, 2, \dots, m) \end{aligned}$$

参考数列和因素数列的无量纲化处理方法为

$$x_0(k) = x_0^*(k) / \bar{x}_0^*$$
$$x_i(k) = x_i^*(k) / \bar{x}_i^* \quad (2)$$
$$(k = 1, 2, \cdots, n)$$

式中, \bar{x}_0^* 、 \bar{x}_i^* 分别为参考数列 x_0^* 、因素数列 x_i^* 的平均值。

3.2 关联系数的计算

参考数列与因素数列之间的关联系数为

$$\xi_i[x_0(k), x_i(k)] =$$
$$\left| \frac{\min_{i=1, m} \min_{k=1, n} \Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)} \right| \quad (3)$$

式中: $\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$; ρ 称为分辨系数, ρ 越小分辨力越大, 一般 ρ 的取值区间为 $(0, 1)$, 具体取值可视情况而定, 当 $\rho \leq 0.5463$ 时, 分辨力最好, 通常取 $\rho = 0.5$ 。

3.3 关联度的计算

因为关联系数是因素数列与参考数列在各个时刻(即曲线中的各点)的关联程度值, 所以它的数不止一个, 而信息过于分散不便于进行整体性比较。因此, 有必要将各个时刻(即曲线中的各点)的关联系数集为一个值, 即求其平均值, 作为因素数列与参考数列间关联程度的数量表示, 关联度 r_i 为

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi[x_0(k), x_i(k)] \quad (4)$$

3.4 关联度排序

关联度按大小排序, 如果 $r_1 < r_2$, 则参考数列 x_0^* 与因素数列 x_2^* 更相似。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

北京地铁 8 号线某区间盾构隧道工程位于北京中心城区的北部, 地貌单元上属于永定河冲洪积扇中部, 受全新世以来古金沟河变迁的影响, 地质条件非常复杂。根据区间设计条件, 该区间隧道全长为 882.722 m, 覆土厚度为 15.8 ~ 18.4 m。盾构穿越的地层主要为⑤₈ 卵石圆砾层、⑥粉质黏土层、⑥₁ 黏土层、⑥₂ 粉土层、⑧₄ 细砂层、⑧₉ 卵石层。

该区间工程周边环境较为复杂, 途中正穿或旁穿大量平瓦房, 下穿及旁穿平瓦房段长度约占区间总长

度的 70%, 盾构施工引起的环境影响风险极大, 地表沉降的控制工作至关重要。

通过针对区间地层条件的分析及沿线古旧平房区特点的调研, 得出该区间所选盾构设备主要技术参数如表 1 所示。

表 1 北京地区某区间盾构设备及主要参数

名称	参数
刀盘形式	面板式
刀盘开口率/%	45
刀盘直径/mm	6 270
前盾直径/mm	6 250
中盾直径/mm	6 250
盾尾直径/mm	6 240
盾构主机长/mm	9 055
最大推力/kN	38 000
脱困扭矩/(kN·m)	6 000
最大扭矩/(kN·m)	4 800
螺旋机形式	轴式
螺旋机直径/mm	800
螺旋机最大通过粒径/(mm×mm)	300×500
刀具布置	中心刀 1 把 刮刀 35 把 先行刀 60 把 仿形刀 2 把

4.2 地表沉降的施工因素敏感性分析

以该区间盾构隧道工程为依托, 选取隧道轴线正上方对应的一系列地表沉降监测点, 对盾构施工引起的地表沉降进行监测。依据灰色关联分析方法, 比较土仓压力、刀盘扭矩、同步注浆压力、同步注浆量 4 个施工参数对盾构施工引起地表沉降影响的敏感性。

分析中以地表沉降监测点所测变形影响稳定后的沉降值 x_0^* 为参考数列, 以不同的影响因素土仓压力、刀盘扭矩、同步注浆压力、同步注浆量依次作为影响数列 x_1^* 、 x_2^* 、 x_3^* 、 x_4^* , 得到灰色关联分析的原始数列(见表 2)。按照式(2)对表 2 进行处理, 生成无量纲化数列; 按照式(3)计算出变形稳定后地表沉降量与各影响因素的关联系数 ξ_i ; 最后根据式(4)计算得到关联度 r_i , 如表 3 所示。

表 2 灰色关联分析原始序列

数据 编号	对应隧 道环号	最终沉降/mm	土仓压力/MPa	刀盘扭矩/kN·m	同步注浆压力/MPa	同步注浆量/m ³
		x_0^*	x_1^*	x_2^*	x_3^*	x_4^*
1	11	15.85	0.135 0	3 312	0.045 0	9.564
2	14	17.19	0.140 0	3 597	0.187 5	6.972
3	18	21.24	0.150 0	3 217	0.180 0	7.396
4	30	23.58	0.172 5	3 509	0.217 5	7.235
5	34	19.26	0.172 5	4 658	1.212 5	7.017
6	49	10.01	0.195 0	4 482	0.267 5	11.512
7	79	3.73	0.237 5	4 308	0.372 5	7.345
8	81	7.37	0.197 5	5 085	0.237 5	6.880
9	120	8.09	0.222 5	5 155	0.312 5	7.751
10	134	7.53	0.215 0	3 839	0.297 5	7.349
11	142	7.30	0.210 0	3 354	0.327 5	8.314
12	152	4.83	0.227 5	3 238	0.317 5	6.987
13	170	8.70	0.210 0	3 128	0.382 5	6.854
14	186	7.55	0.202 5	5 137	0.227 5	6.624
15	203	7.38	0.230 0	4 011	0.310 0	9.586
16	220	3.73	0.222 5	4 378	0.280 0	9.486
17	236	2.54	0.212 5	4 487	0.327 5	7.787
18	253	1.14	0.202 5	5 080	0.335 0	7.970
19	270	1.67	0.215 0	4 445	0.275 0	10.381
20	303	4.79	0.170 0	5 004	0.330 0	8.022
21	314	6.44	0.122 5	4 226	0.287 5	8.036
22	336	2.36	0.107 5	4 988	0.307 5	7.978
23	352	3.14	0.152 5	4 897	0.285 0	9.573
24	369	4.25	0.160 0	5 200	0.282 5	7.294
25	385	4.64	0.205 0	5 267	0.252 5	8.556
26	402	4.51	0.182 5	4 931	0.310 0	7.931
27	426	3.79	0.172 5	5 400	0.352 5	7.714
28	436	3.89	0.172 5	5 192	0.257 5	9.601
29	452	5.07	0.182 5	4 593	0.277 5	7.668
30	535	7.02	0.187 5	4 725	0.102 5	13.980
31	570	6.38	0.202 5	4 950	0.107 5	8.800
32	573	8.06	0.202 5	4 350	0.162 5	13.190
33	600	5.99	0.187 5	4 875	0.152 5	8.800
34	656	7.19	0.185 0	4 875	0.425 0	7.650

表 3 灰色关联度 r_i

影响因素	土仓压力	刀盘扭矩	同步注浆压力	同步注浆量
关联度	r_1	r_2	r_3	r_4
关联度数值	0.750 0	0.725 7	0.711 9	0.740 3
排序	1	3	4	2

由表 3 得灰色关联序列为： $r_1 > r_4 > r_2 > r_3$ ，即各因素对变形稳定后地表沉降的敏感性从大到小依次为：土仓压力、同步注浆量、刀盘扭矩、同步注浆压力，分析可知：

1) 在盾构隧道施工条件下，影响地表沉降的最主要因素为土仓压力。因此，在盾构掘进中，保持土仓压力与掌子面压力平衡是减小地表沉降、保证建筑物安全的一个重要因素。

2) 同步注浆量也是影响变形稳定后地表沉降的主要因素。本文依托工程盾构穿越地层特点，说明在砂卵石地层条件下，适当增加注浆量，可有效减少后期沉降。

3) 地表沉降对盾构刀盘扭矩和同步注浆压力的敏感性，相对土仓压力和同步注浆量较小。

5 结语

1) 设置合理的盾构施工参数，是控制地层损失、减小地表沉降的有效手段。目前盾构施工较重要的施工参数包括土仓压力、掘进速度、盾构总推力、刀盘扭矩、刀盘转速、同步注浆压力、同步注浆量、二次补浆参数、盾构姿态偏移量等。各项施工参数的设定应在不同地层、隧道埋深及现场沉降监测数据分析反馈的基础上确定。

2) 采用灰色关联分析方法，可以很好地对盾构施工条件下引起的地表沉降影响因素进行敏感性分析，并实现分析结果的定量化，得到各个影响因素对变形稳定后地表沉降的影响程度，从而为盾构施工参数优

化和沉降控制提供理论依据。

3) 研究结果表明：土仓压力对盾构施工条件下地表沉降的影响最大，同步注浆量也是影响地表沉降的主要因素，刀盘扭矩和同步注浆压力对地表沉降的影响较小，但也不容忽视。

参考文献

[1] 韩焯. 地铁建设引起的地层位移及结构变形预测的实用方法研究[R]. 北京: 北京市勘察设计研究院有限公司, 2008.

[2] 王法, 陶连金, 赵艳. 盾构隧道近接下穿既有地铁车站的数值模拟[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2009, 27(2): 206 - 209.

[3] 王法. 隧道施工引起周边建筑物变形影响的数值模拟[C]// 第 2 届全国工程安全与防护学术会议论文集: 566 - 572.

[4] 金明, 司翔宇, 杨平. 地铁隧道盾构施工参数对地表沉降影响的试验研究[J]. 现代城市轨道交通, 2009(5): 32 - 34.

[5] 司翔宇, 杨平, 邵光辉, 等. 隧道盾构施工参数对地表沉降影响的实测研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(11): 167 - 170.

[6] 周海群. 软土地层盾构施工中掘进速度对地面沉降的影响分析[J]. 铁道建筑, 2012(3): 45 - 48.

[7] 张恒, 陈寿根, 邓稀肥. 盾构掘进参数对地表沉降的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(5): 48 - 53.

[8] 作者不详. 灰色关联分析[EB/OL]. (2013 - 04 - 10). <http://wenku.baidu.com/view/ec3bc123482fb4daa58d4b64.html>.

(编辑: 郝京红)

Sensitivity Analysis of Shield Tunneling Parameters on Ground Surface Settlements

Wang Fa¹ Zhou Honglei¹ Lei Chonghong² Han Xuan¹

(1. Beijing Exploration, Surveying, Design and Research Institute, Co., Ltd., Beijing 100038;
2. Beijing MRT Construction Administration Corporation, Beijing 100037)

Abstract: With shield tunneling along Beijing metro Line 8 as the background, shield tunneling parameters' correlation was analyzed and 4 effective parameters were determined. Adopting grey relational method, the author analyzed various factors' sensitivity of the ground surface settlements during shield tunneling. Results showed that the ground surface settlements were influenced successively by chamber pressure, synchronous grouting volume, cutter head torque and synchronous grouting pressure. The research findings will play an important role in the study of shield tunneling parameters optimization and ground surface settlement control for the similar projects in the future.

Key words: urban rail transit; ground surface settlement; shield tunneling parameters; sensitivity analysis; grey relational analysis