

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.001



土压平衡盾构隧道施工引起的地层损失及影响因素

刘金慧¹, 丁万涛², 戴尊勇³, 王焕³, 贾开民³

(1. 山东交通学院 交通土建工程学院; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061;
3. 中铁十四局集团有限公司, 济南 250014)

摘要: 收集中国已有地表沉降监测数据及土体损失率统计分析数据, 结合长株潭城际高铁 II 标树木岭盾构隧道进口-树木林车站区间 16 个监测断面数据及其详细地层信息, 分析土压平衡盾构隧道施工引起的地层损失规律影响因素。分析表明, 土压平衡盾构隧道施工引起的土体损失率的累积概率较好的服从对数正态分布; 土体损失率随着埋深或深径比的增大, 呈现逐渐减小并趋于稳定的趋势, 且两者关系可近似采用幂函数拟合; 当 H 大于 20 m 或 H/D 大于 3.25 时, 土体损失率基本稳定在 0.75% 附近, 且对应地层信息表明盾构隧道施工时其上覆岩层呈现拱效应, 说明盾构隧道施工中其顶部土层成拱效应可较好的控制土体损失; 土体损失率或名义土体损失率随着盾构开挖通过时间的增加而逐渐增大, 且趋于稳定, 说明固结变形对名义土体损失率的影响较大, 最大可达瞬时沉降所引起土体损失率的 4.58 倍。

关键词: 盾构隧道; 土体损失率; 固结变形; 瞬时沉降

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)05-0001-08

Analysis of ground loss and its factors induced by EPB shield tunnel construction

Liu Jinhui¹, Ding Wantao², Dai Zunyong³, Wang Huan³, Jia Kaimin³

(1. School of traffic and civil engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, P. R. China;
2. Geotechnical & Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China;
3. China Railway Fourteen Bureau Group Co. Ltd., Jinan 250014, P. R. China)

Abstract: The observed data of surface settlement and the statistical analysis data of ground loss ratio caused by EPB shield tunnel construction are collected. Combining with the monitoring data and stratigraphic information of the sixteen sections in the interval from tunnel import to Shumuling station of the Chang-Zhu-Tan intercity high-speed rail II standard, the ground loss and its factors induced by EPB shield tunnel construction are analyzed. The results show that the cumulative probability of ground loss ratio caused by

收稿日期: 2017-03-09

基金项目: 国家自然科学基金 (41572275、51478213、51278237); 山东省自然科学基金项目 (ZR2012EEM006、ZR2012EEM010)

作者简介: 刘金慧 (1976-), 女, 副教授, 主要从事土木工程稳定性研究, (E-mail) Liumengdi1996@163.com。

丁万涛 (通信作者), 男, 副教授, 博士, (E-mail) dingwantao@sdu.edu.cn。

Received: 2017-03-09

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41572275, 51478213, 51278237); Natural Science Foundation of Shan Dong province (No. ZR2012EEM006, ZR2012EEM010)

Author brief: Liu Jinhui (1976-), associate professor, main research interest: civil engineering stability, (E-mail) Liumengdi1996@163.com.

Ding Wantao (corresponding author), associate professor, PhD, (E-mail) dingwantao@sdu.edu.cn.

EPB shield tunnel construction better obeys lognormal distribution; with the buried depth and the depth to diameter ratio increasing, the ground loss ratio decreases and tends to be stable, and the relationship between the ground loss ratio and the tunnel buried depth & the depth to diameter ratio can be approximately expressed by power functions; when H greater than 20m or H/D greater than 3.25, the ground loss ratio is basically stable near 0.75%, and the corresponding stratigraphic information indicates that the overlying strata in the shield tunnel is in the arch effect when constructing. So, it shows that the arch effect of the upper soil layer in the shield tunnel construction can be better control the ground loss ratio. With the increase of the time of shield tunneling through face, loss rate and nominal loss rate of the soil mass gradually increase and tend to be stable. It indicates that the consolidation deformation has great influence on the nominal ground loss ratio, and the maximum value is 4.58 times of the ground loss ratio caused by instantaneous settlement.

Keywords: shield tunnel; ground loss ratio; consolidation deformation; instantaneous settlement

盾构法隧道施工会打破地层原有的应力平衡,引起周围土体变形,对周边环境产生危害,盾构施工引起的地层变形成为学者们一直关注的热点问题^[1-3]。在施工过程中,经常采用监控量测实时掌握开挖所引起的地表动态变形,并通过绘制变形-时间(距离)关系曲线评估和预判开挖面的稳定状态。变形-时间(距离)关系曲线主要包括沿横断面和纵断面两种曲线,其中沿横断面的地表沉降曲线一般习惯称之为“沉降槽”。沉降槽作为预测隧道开挖引起的地表位移的关键曲线,引起了许多学者的关注,提出了一系列的土体变形公式,主要包括经验公式^[4-10]、随机介质理论^[11]、有限单元法^[12-14]、模型试验法^[15]、解析法^[16]等,这些公式计算时涉及到土体损失及地面沉降槽宽度等关键参数。

在目前众多预测地表沉降变形的经验方法中,Peck^[4]基于有限地区的实测资料提出一种简便经验公式,虽然当时只是一个权宜之计,但直到今天仍然在世界范围内广泛应用,成为预估沉降槽曲线的经典公式;Vu等^[5]通过研究浅埋盾构隧道开挖引起的土体体积损失与覆盖层厚度与隧道直径比之间关系,并参考已有文献研究经验,提出盾壳和盾尾通过掌子面时土体损失,考虑土体固结估算盾构施工后长期土体损失;Vu等^[6]分析了浅埋盾构隧道开挖时覆盖层厚度对地层移动的影响;Qian等^[7]等结合新建双线隧洞对已有盾构双线隧洞及地表的变形影响监测数据,分析了同一监测断面上地表及已有隧洞处的地层损失;Ma^[8]等通过扩展 Peck 公式提出一种新的预测双线隧洞的土体损失率非线性曲线拟合方法。近年来,随着中国地铁建设热潮的兴起,各地逐渐积累了一些实测资料,其中,公开发表的主要有北京、上海、广州、南京、武汉、长沙、天津、深圳、柳

州、西北、香港、台湾等地区的实测地表横向沉降数据。利用这些数据,韩焯等^[17]分析了 Peck 公式在中国隧道施工地面变形预测中的适用性,并采用 Peck 公式对不同地区进行评价,对相关计算参数提出初步建议值;白海卫等^[18]通过收集盾构施工地层变形实测数据,研究了 Peck 公式在双线盾构隧道施工地层变形中的适应性分析;魏纲^[19]提出了施工阶段地面沉降值的取值办法,对盾构法隧道施工引起的土体损失率实测值进行了统计分析。晁峰等^[20]、蒋彪等^[21]结合长沙地铁二号线地层特征、盾构(直径 6.25 m)施工状况及地表沉降实测数据,对长沙地铁典型地层盾构施工地表沉降进行分析与预测,总结了很多有益的经验。研究表明,沉降槽的关键参数主要与工程地质、水文地质、隧道施工方法、施工技术水平及工程管理经验等因素相关。因此,这些参数的取值依赖于地区经验。

尽管土体损失率取值依赖于地区经验,但大量数据的统计分析表明,土体损失率与其影响因素之间呈现一定的规律性,且随着数据样本的增多,所呈现的规律性越强。结合长株潭城际高铁 II 标树木岭隧道盾构(直径 9.33 m)施工进-树区间的地表沉降监测数据及收集中国已有监测数据,对不同地区土压平衡盾构施工工法所引起的土体损失规律进行分析,同时综合考虑长株潭城铁树木岭盾构隧道监测中各种影响因素及时间效应,分析土体的固结对土体损失相关参数的变化影响及其与施工的相关性,为相类似地层大直径盾构施工中地表沉降变形预估提供可借鉴的经验资料。

1 沉降槽关键参数计算

沉降槽关键参数主要考虑土层损失率 η 和地面

沉降槽宽度参数 K , 这两个参数反映了地表的位移情况, 前者决定了沉降的大小, 后者则决定了沉降槽曲线的性状(例如宽而浅或窄而深)。

1.1 土体损失率 η

土体损失率 η 是单位长度的地表沉降槽的体积占隧道开挖的名义面积的百分比。目前, 土体损失率 η 常用取值方法主要有 4 种: 反分析方法、理论方法、经验方法和现场实测方法。

1.1.1 反分析方法 基于 Peck 提出用高斯分布拟合隧道引起的地表横向沉降槽方法, Attewell^[22]、Rankin^[23] 等总结当时广泛的经验方法, 提出横向地面沉降估算公式

$$S(x) = S_{\max} \exp[-x^2/(2i^2)] \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{i \sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

式中: x 为距隧道轴线横向水平距离; $S(x)$ 为 x 位置处的地面沉降量; S_{\max} 为隧道轴线上方最大地面沉降量; V_{loss} 为单位长度土体损失量, $V_{\text{loss}} = \pi R^2 \eta$, η 为土体损失率; i 为地面沉降槽宽度系数, $i = Kh$, K 为地面沉降槽宽度参数, h 为隧道轴线埋深。

当地面沉降实测数据确定后, 由式(1)反分析得到 i 值, 从而得到 η 的计算公式

$$\eta = \frac{S_{\max} i \sqrt{2\pi}}{\pi R^2} \quad (3)$$

1.1.2 理论方法 Chi 等^[24]、Lee 等^[25] 提出等效土体损失参数 g 计算方法, 通过式(4)换算得到土体损失率 η 。

$$\eta = \frac{g}{R} - \frac{g^2}{4R^2} \quad (4)$$

式中: R 为隧道开挖半径。

1.1.3 经验方法 因该参数取值依赖于地区经验。根据以往的施工经验选择一个合适的土体损失率来估算土体损失的大小, 从而来评估施工中地表变形。主要有 Attewell^[22]、O'Reilly 等^[26]、Mair^[27] 等根据实际设备、控制程度、当地经验等因素, 对不同类型土给出土体损失率的经验取值范围。其中, O'Reilly 所给出的经验取值范围统计的开挖隧道直径较小, 对于目前直径越来越大的盾构隧道适用性弱。

1.1.4 现场实测方法 王振信^[28] 提出土压平衡盾构可计螺旋输送机的转数或计其渣土车车数; 国外资料提出在皮带运输机上安装电子称来计重, 或在皮带运输机上安装激光扫描机来计量。

以上方法各有优缺点, 其中, 理论分析方法主要

考虑黏性土地层, 而本文盾构主要处于粉砂岩及圆砾土地层中; 现场实测方法数据不足; 经验方法主要适用于小直径隧道, 对本文大直径隧道不适用。因此, 主要选用反分析方法对土体损失率进行计算。反分析方法具有精度高的优点, 同样存在无法事先预测和难以界定“不排水”与“排水”阶段的缺点。借鉴 Lee 等^[25] 提出的方法, 结合盾构施工过程中纵向地面沉降曲线, 获取“不排水”阶段地表的实际沉降量, 消除“排水”阶段固结引起的土体压缩量对土体损失量的影响, 从而获得较准确的土体损失率。同时, 考虑盾构通过监测横断面的时间, 分析名义土体损失率的时空效应及固结对土体损失量的影响。

1.2 地面沉降槽宽度参数 K

根据 O'Reilly 等^[22] 在伦敦地区的经验, 认为地面沉降槽宽度系数 i 和隧道轴线埋深 h 之间存在简单的线性关系

$$i = Kh \quad (5)$$

故, 地面沉降槽宽度参数为

$$K = i/h \quad (6)$$

式中: i 为地面沉降槽宽度系数, 为从横向沉降曲线对称中心到曲线拐点的距离。

2 树木岭盾构隧道实测数据分析

长株潭城际高铁 II 标树木岭隧道进口工作井—树木岭站(盾构进—树区间)里程 DK1+800~DK4+360, 全长 2 560 m。隧道于里程 DK2+230~DK2+600 斜穿京广铁路线, 下穿段隧道埋深约 20 m。盾构区间为左右双线, 采用两台 $\Phi 9.33$ m 的土压平衡盾构施工。盾构机从进口盾构工作井始发, 穿越既有铁路线、长重社区及劳动路立交桥等重要风险区。施工顺序为先右线(始发靠近京广铁路), 后左线, 盾构始发段纵向坡度为 -2.5% 。根据现场监测数据情况, 选取 16 个监测断面数据分析, 监测断面地面沉降参数见表 1。

表 1 树木岭盾构隧道进—树区间地面沉降参数

Table 1 Surface settlement parameters in the interval between import and Shumuling station of Shumuling shield tunnel

断面	里程	埋深 H/m	开挖通过 时间/d	$S_{\max} /$ mm	i/m	$\eta/\%$	k
1	DK1+895	8.82	5	3.53	3.95	0.51	0.45
			15	8.39	4.89	1.51	0.55
2	DK1+917	9.16	5	4.1	5.38	0.81	0.59
			15	9.65	6.43	2.27	0.70

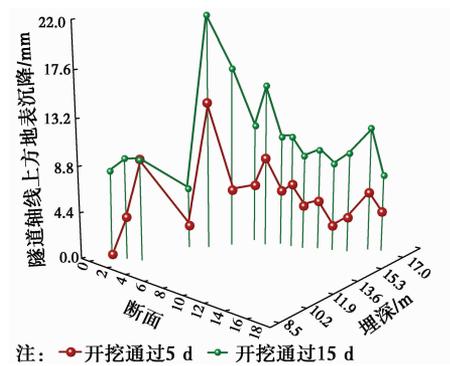
续表 1

断面	里程	埋深 H/m	开挖通过 时间/d	$S_{max}/$ mm	i/m	$\eta/\%$	k
3	DK1+937	9.5	5	9.59	7.59	2.67	0.80
			15	9.55	6.59	2.31	0.69
4	DK2+037	11.83	5	2.26	4.89	0.40	0.41
			15	5.86	5.98	1.28	0.51
5	DK2+050	12.44	5	14	4.27	2.19	0.34
			15	21.94	5.88	4.73	0.47
6	DK2+063	13.45	5	5.41	4.74	0.94	0.35
			15	16.99	5.67	3.53	0.42
7	DK2+107	14.32	5	5.69	4.77	1.00	0.33
			15	11.37	5.84	2.43	0.41
8	DK2+117	14.37	5	8.48	2.98	0.93	0.21
			15	15.45	3.67	2.08	0.26
9	DK2+129	14.82	5	5.29	2.70	0.52	0.18
			15	10.55	4.77	1.85	0.32
10	DK2+136	14.85	5	6.17	7.72	1.75	0.52
			15	10.72	8.19	3.22	0.55
11	DK2+149	14.97	5	4.32	5.39	0.85	0.36
			15	9.09	6.21	2.07	0.41
12	DK2+160	15.32	5	4.8	4.65	0.82	0.30
			15	9.72	5.52	1.97	0.36
13	DK2+166	15.64	5	2.51	4.32	0.40	0.28
			15	8.45	5.97	1.85	0.38
14	DK2+179	15.96	5	1.37	2.83	0.14	0.18
			15	9.57	4.31	1.51	0.27
15	DK2+199	16.75	5	5.67	2.25	0.47	0.13
			15	11.86	5.10	2.22	0.30
16	DK2+205	16.99	5	3.9	1.78	0.25	0.10
			15	7.4	4.06	1.10	0.24

2.1 地面沉降槽宽度参数 K

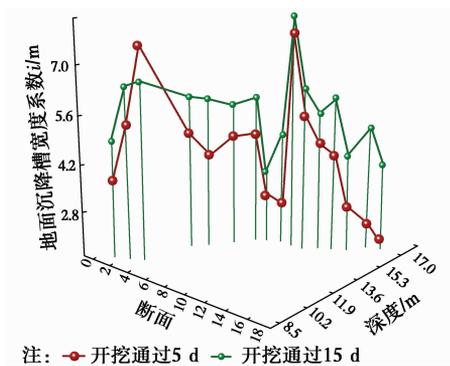
综合分析所有监测断面纵向沉降曲线变化趋势,分别选取盾构机通过开挖面 5、15 d 时对应地表沉降数据(图 1),采用高斯曲线拟合方法,获得地面沉降槽宽度系数 i (图 2),从而得到不同断面不同开挖通过时间对应的地面沉降槽宽度参数 K (图 3)。

从图 1 可知,随着开挖通过时间的增加,不同断面隧道轴线上方地表沉降增大,且变化趋势相同,说明随着开挖通过时间的增加,隧道上方土体产生固结变形;其中断面 5 的地表沉降值最大,这与其所处地层相对应;断面 3 开挖通过 5 d 和 15 d 时地表沉降数据几乎相同,这可能是由于在盾构开挖通过 15 d 内开展了二次补注浆,从而造成土体固结引起的



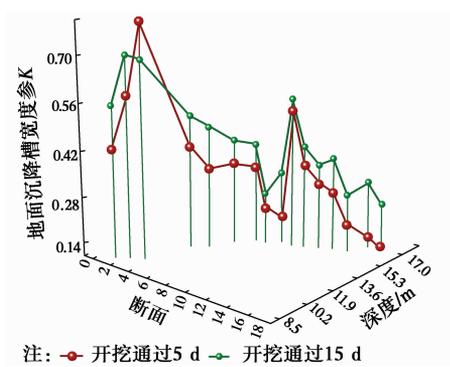
注: —●— 开挖通过5 d —●— 开挖通过15 d
图 1 不同断面不同开挖通过时间隧道轴线上方地表沉降曲线

Fig. 1 Surface subsidence curve above the tunnel axis under different section and time through excavation face



注: —●— 开挖通过5 d —●— 开挖通过15 d
图 2 不同断面不同开挖通过时间地面沉降宽度系数变化曲线

Fig. 2 Ground settlement width coefficient curve above the tunnel axis under different section and time through excavation face



注: —●— 开挖通过5 d —●— 开挖通过15 d
图 3 不同断面不同开挖通过时间地面沉降宽度参数变化曲线

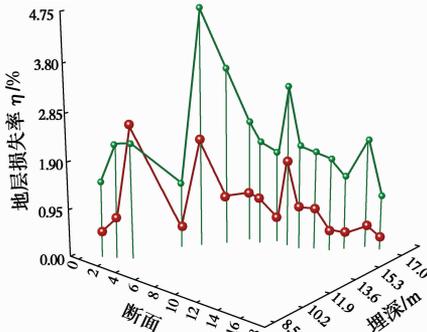
Fig. 3 Ground settlement width parameter curve above the tunnel axis under different section and time through excavation face

变形未显现,且瞬时沉降变形部分恢复。从图 2、图 3 可知,随着开挖通过时间的增加,由于土层固结的影响,地面沉降槽宽度系数和参数基本呈现增大的趋势,增大的幅度由于不同断面隧道上方土层的性质不同而不同,其中,断面 3 呈现相反的趋势,这可能与该断面进行二次补注浆有关。

图 3 表明,分析断面的沉降槽宽度参数 0.10~0.80 之间,参照伦敦经验分析断面中涵盖了无黏 0.2~0.3、硬黏土 0.4~0.5 和软的粉质黏土 0.7;结合表 1 分析,沉降槽宽度参数因盾构顶部所处岩层不同而变化,基本符合:处于强风化泥质粉砂岩层中为 0.1~0.55,此时地下水位影响可忽略;处于地下水位下硬塑粉质粘土层中为 0.41~0.8;处于地下水位上硬塑粉质粘土层为 0.34~0.47;处于地下水位下粉质黏土为 0.45~0.55。对比伦敦经验,该地层沉降槽宽度参数分布规律基本吻合;由于地下水位及其上覆岩层影响而又有所差异。

2.2 不同断面地层损失率 η

根据高斯曲线拟合得到的地面沉降槽宽度系数,利用式(3)计算得到不同断面不同开挖通过时间(5、15 d)时的地层损失率(图 4),其中,对应开挖通过 15 d 时计算得到的地层损失率称为名义地层损失率。



注: ● 开挖通过 5 d ● 开挖通过 15 d(名义地层损失率)

图 4 不同断面不同开挖通过时间地层损失率变化曲线
Fig. 4 Ground loss ratio curve above the tunnel axis under different section and time through excavation face

从图 4 可知,除断面 3(埋深 9.5 m)外,其余断面的(名义)地层损失率随着盾构开挖通过时间的增大而增加,增加的部分是由于土体固结变形而产生的,固结变形引起的部分是瞬时沉降(开挖通过 5 d)引起的地层损失率的 0.84~4.58 倍,这说明在对隧道开挖过程中地表变形评估中,仅仅利用瞬时沉降而得到的地层损失率会带来较大的误差,还必须考虑土体的固结产生的变形。断面 3 可能是由于盾构开挖后 15 d 内开展了二次补注浆施工,从而土体固结造成的变形部分由于注浆的作用而没有显现,且由于补注浆而引起瞬时沉降变形部分恢复。图 4 中对应断面 5(埋深 12.44 m)时地层损失率和名义地层损失率最大分别为 2.19%(开挖通过 5 d 对应瞬时沉降变形)和 4.73%(开挖通过 15 d 时考虑土体固结变形),这主要是因为该断面盾构机顶部正好穿越松散、富含承压水的圆砾土地层,开挖后土体的瞬

时沉降和固结沉降变形迅速。从埋深与地层损失率关系发现,基本呈现先增大而后逐渐降低的趋势,这主要是与盾构机穿越各断面时所处的地层有关,当盾构机通过断面 5 后继续向前掘进时,由于埋深的增加,盾构开挖面顶部进入粉砂岩地层,由于粉砂岩的成拱效应作用减少上覆土体的变形,从而地层损失率逐渐降低。

3 中国不同地区实测数据分析

3.1 土体损失率概率分布规律

搜集中国不同地区已有土压平衡盾构施工的土体损失率统计数据 77 组^[3,17,19-21,30-31],统计数据 16 组,共 93 组数据,选用常用的概率分布模型(对数正态分布、正态分布、指数分布及韦伯分布)对数据进行统计分析,表明所搜集的土压平衡盾构施工方法引起的土体损失率数据较好的服从对数正态分布(见图 5)。

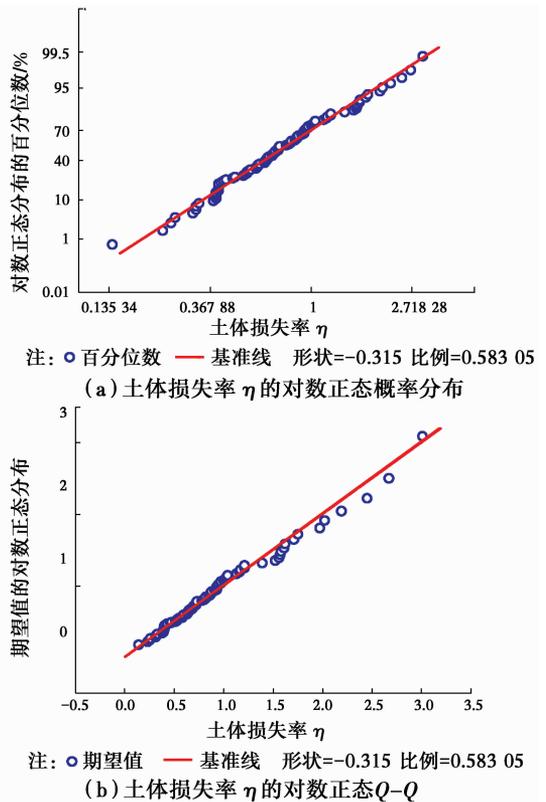


图 5 对数正态分布统计分析图

Fig. 5 Lognormal distribution statistical analysis

3.2 土体损失率的影响因素分析

已有文献研究认为,土体损失率主要与工程地质、水文地质、隧道施工方法、施工技术水平以及工程管理经验等因素有关。考虑大多文献,未有详细记录施工技术水平、工程管理经验等因素,主要从反映工程地质、水文地质、隧道施工方法等相关因素分析。针对土压平衡盾构施工方法的统计数据分析,

考虑隧道埋深及埋深与开挖直径比等相关因素,并参考相关统计数据的工程地质和水文地质情况,分析土体损失率的影响规律,见图 6、图 7。

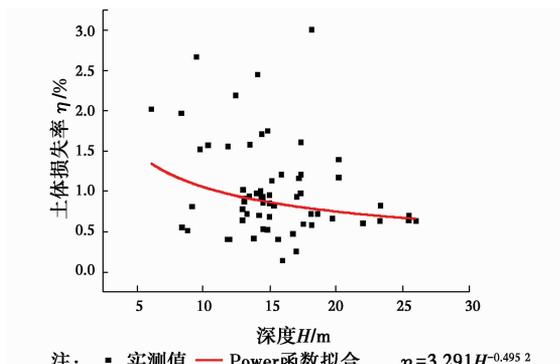


图 6 土体损失率与深度关系

Fig. 6 Relationship between values of η and H

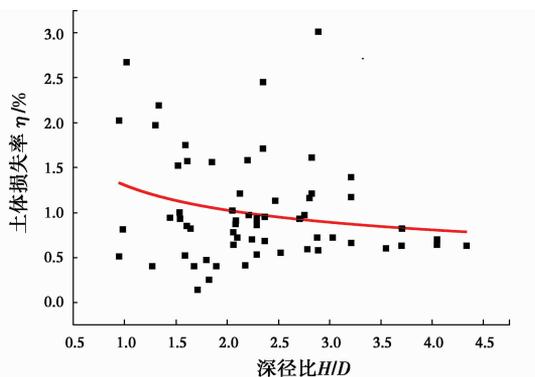


图 7 土体损失率与深径比关系

Fig. 7 Relationship between values of η and H/D

图 6、图 7 可知,土体损失率与深度、深径比可用幂函数近似拟合,基本呈现土体损失率随深度、深径比的增大而减少的趋势;在 $H > 20$ m 或 $H/D > 3.25$ 后,土体损失率基本趋于稳定在 0.75% 附近。分析原因可能是: H 或 H/D 越大,盾构穿越地层条件越好,当深度或深径比足以使盾构顶部土层成拱时,开挖对上覆土体的扰动降低,土体损失率也将趋于稳定。当 H 或 H/D 较小时,数据离散性较大,说明地质条件对土体损失率的影响要比隧道轴线埋深或深径比的影响要大;当 H 或 H/D 大到能够使盾构开挖顶部土层成拱时,上覆土层条件和隧道轴线埋深或深径比的影响都减弱,控制土体损失率的关键因素将主要是施工技术水平和工程管理经验。

4 长沙地层损失与地层性质相关性分析

为研究地层损失与地层性质的相关性,现将盾构切削土层各参数的加权平均值与地层损失率 η 、

沉降槽宽度参数 K 绘制成图,考虑到地层损失率 η 与隧道埋深 h 具有较强的相关性,在绘图时以 η/h 作为纵坐标(如图 8)。

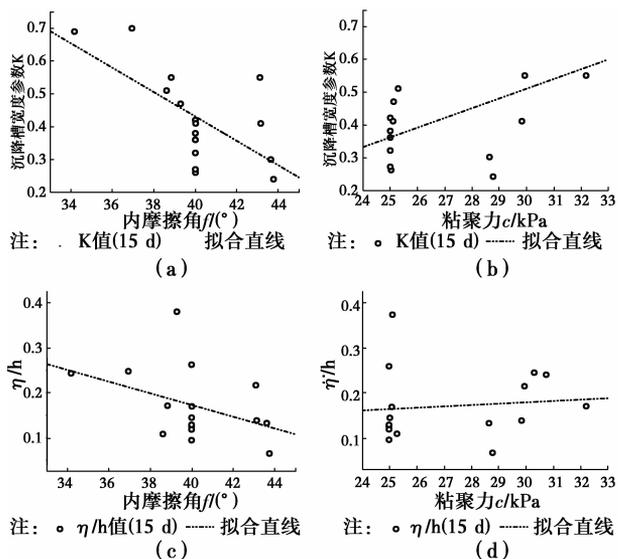


图 8 长沙地层损失与土层性质关系图

Fig. 8 Relation between ground loss and soil property of Changsha

受勘探条件限制,各探孔所采集泥质粉砂岩性状差异较大,所测得的压缩模量差异较大,故此处暂不做压缩模量与地层损失的相关性研究。由图 8 可以看出,沉降槽宽度参数 K 、地层损失率 η 与盾构切削土体的内摩擦角 f 具有较强的线性关系,二者均随着 f 的增大而减小,且 K 值的线性相关性更为明显。而在图(b)、(d)中,二者与粘聚力的相关性不是非常明显,这也有可能是受分析样本数量过少的影响,希望今后的工程项目做进一步分析。

5 结论

1) 统计分析中国已有土压平衡盾构施工土体损失率数据,其累积概率分布与对数正态分布比较吻合。

2) 从深度和深径比两种影响因素分析了所统计的土体损失率,基本呈现随着深度或深径比的增大而逐渐减小并趋于稳定的趋势。分析表明,当盾构隧道顶部土层在施工中能够成拱,发挥拱效应时,土体损失率受到隧道埋深、深径比及上覆土层地质条件的影响变弱,主要受到施工技术方法及工程管理经验的控制;当盾构隧道施工中顶部无法成拱发挥拱效应时,土体损失率受上覆土层地质条件、水文条件的影响大,隧道埋深、深径比的影响相对较弱。

3) 分析长沙地层不同开挖通过时间的土体损失率与名义土体损失率,发现在没有二次补注浆工艺

的影响下,盾构上覆土体固结所造成的地面沉降变形是显著的,最大可达瞬时沉降所引起土体损失率的4.58倍,因此,在对土体沉降变形评估过程中,仅仅采用瞬时沉降所引起的土体损失率是不够的,还需考虑土体固结变形的影响。

4)通过收集已有土体损失率的统计数据所进行的分析,可能会由于统计数据样本的数量的影响而降低准度。因此,还需后续在更多统计数据的情况下深入研究,从而揭示土体损失率影响因素的相关性。另外,在后续数据的统计中,望能更多的收集到相关土体地质条件、水文条件、施工工序等资料,将会更好的对数据进行统计分析。

5)分析长沙地层损失与土层性质关系图得出沉降槽宽度参数 K 和地层损失率 η 与盾构切削地层内摩擦角、粘聚力的关系: K 和 η 均随内摩擦角的增大而减小,而对于二者与粘聚力的关系本文数据尚不能定论。希望今后工程能做进一步探究。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.
WANG M S. Tunneling by TBM/shield in China: state-of-art, problems and proposals [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 179-187. (in Chinese)
- [2] 杨三资, 张顶立, 王剑晨, 等. 北京粘性土地层大直径土压平衡盾构施工地层变形规律研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(Sup1): 297-301.
YANG S Z, ZHANG D L, WANG J C, et al. Ground deformation characteristic due to large diameter slurry shield construction in clay in Beijing [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Sup1): 297-301. (in Chinese)
- [3] 郭玉海. 大直径土压平衡盾构引起的地表变形规律研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 128-137.
GUO Y H. Study on ground surface movement induced by large-diameter earth pressure balance shield tunneling [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 128-137. (in Chinese)
- [4] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1969: 225-290.
- [5] VU M N, BROERE W, BOSCH J. Volume loss in shallow tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 59: 77-90.
- [6] VU N N, BROERE W, BOSCH J W. Effects of cover depth on ground movements induced by shallow tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 499-560.
- [7] FANG Q, ZHANG D L, LI Q Q, et al. Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 45: 128-137.
- [8] MA L, DING L Y, LUO H B. Non-linear description of ground settlement over twin tunnels in soil [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42 (5): 144-151.
- [9] 严键, 何川, 吴海彬, 等. 基于 Peck 公式的藏区公路隧道施工地面沉降预测[J]. 公路交通科技, 2015, 32(1): 110-115, 139.
YANG J, HE C, WU H B, et al. Prediction of ground settlement for highway tunnel construction in Tibet based on Peck formula [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(1): 110-115, 139. (in Chinese)
- [10] 顾其波, 郑荣跃, 杨芬, 等. 宁波软土盾构隧道施工地表沉降分析[J]. 水位地质工程地质, 2016, 43(1): 85-93.
GU Q B, ZHENG R Y, YANG F, et al. An analysis of the surface settlement in the shield construction on the Ningbo urban rail transit [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 85-93. (in Chinese)
- [11] 胡斌, 刘永林, 唐辉明, 等. 武汉地铁虎泉-名都区间隧道开挖引起的地表沉降研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 908-913.
HU B, LIU Y L, TANG H M, et al. Research on ground subsidence due to tunnel excavation in Huquan-Mingdu section of Wuhan subway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (5): 908-913. (in Chinese)
- [12] 邱明明, 杨果林, 姜安龙, 等. 地铁盾构施工地层变形预测及数值分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2016, 33(4): 377-386.
QIU M M, YANG G L, JIANG A L, et al. Numerical analysis of stratum deformation induced by tunnel boring machine construction for metro [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2016, 33(4): 377-386. (in Chinese)
- [13] 梁荣柱, 夏唐代, 林存刚, 等. 盾构推进引起地表变形及深层土体水平位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 583-593.
LIANG R Z, XIA T D, LIN C G, et al. Analysis of ground surface displacement and horizontal movement of deep soils induced by shield advancing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (3): 583-593. (in Chinese)
- [14] 于德海, 张涛, 姜谔男. 考虑施工过程的地铁盾构仿真模拟及沉降分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 7: 88-93.
YU D H, ZHANG T, JIANG A N. Numerical analysis of shield tunnel settlement considering construction process

- [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 7: 88-93. (in Chinese)
- [15] 孙兵, 仇文革. 双孔盾构隧道地表位移离心机模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2010(2): 38-41.
SUN B, QIU W G. Study on surface displacement induced by parallel twin shield tunnel with centrifuge model test [J]. Railway Engineering, 2010(2): 38-41. (in Chinese)
- [16] 魏纲, 庞思远. 双线平行盾构隧道施工引起的三维土体变形研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2562-2568.
WEI G, PANG S Y. Study of three-dimensional soil deformation caused by double-line parallel shield tunnel construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2562-2568. (in Chinese)
- [17] 韩焯, 李宁, J. R. Standing. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 2007, 28(1): 23-29.
HAN X, LI N, STANDING J R. An adaptability study of gaussian equation applied to Predicting ground settlements induced by tunneling in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 23-29. (in Chinese)
- [18] 白海卫, 宋守信, 王剑晨. Peck 公式在双线盾构隧道施工地层变形中的适应性分析[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(3): 30-34.
BAI H W, SONG S X, WANG J C. An adaptability study of Peck formula applied to predicting ground settlements induced by double shield tunneling [J]. Journal of Beijing Jiatong University, 2015, 39(3): 30-34. (in Chinese)
- [19] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1354-1361.
WEI G. Selection and distribution of ground loss ratio induced by shield tunnel construction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1354-1361. (in Chinese)
- [20] 晁峰, 王明年, 刘大刚, 等. 长沙起伏板岩地层盾构施工地表沉降预测研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(1): 125-130.
CHAO F, WANG M N, LIU D G, et al. A study on predicting the surface settlement caused by shield tunneling in slate-based fluctuated strata in Changsha [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(1): 125-130. (in Chinese)
- [21] 蒋彪, 皮圣, 阳军生, 等. 长沙地铁典型地层盾构施工地表沉降分析与预测[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 181-187.
JIANG B, PI S, YANG J S, et al. Analysis and prediction of ground surface settlements due to EPB shield tunneling of Changsha metro [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 181-187. (in Chinese)
- [22] ATTEWELL P B. Ground movements caused by tunneling in soil [C]// Conference on Large Ground Movements and Structures, London, 1978: 812-948.
- [23] RANKIN W J. Ground movement resulting from urban tunneling: predictions and effects [C]// Bell eds. Engineering Geology of Underground Movements. Proc. of the 23rd Annual Conf of the Eng. [S. l.]: [s. n.], 1988: 79-92.
- [24] CHI S Y, CHERN J C, LIN C C. Optimized back-analysis for tunneling-induced ground movement using equivalent ground loss model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 159-165.
- [25] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunneling. I: Estimating the gap parameter [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6): 929-940.
- [26] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom—their magnitude and prediction [C]// Proc Tunnelling 82, Institution of Mining and Metallurgy, London, 1982: 173-181.
- [27] MAIR R J. Settlement effects of bored tunnels [C]// Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, 1996: 43-53.
- [28] 王振信. 盾构施工对环境的影响 [C]// 海峡两岸轨道交通建设与环境工程高级技术论坛. 北京: 人民交通出版社, 2008.
WANG Z X. The environmental impact of shield tunnel construction [C]// Strait Rail Construction and Environmental Engineering Advanced Technology Forum, Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [29] FANG Y S, LIN S J, LIN J S. Time and settlement in EPB shield tunneling [J]. Tunnels and Tunnelling, 1993, 25(11): 27-28.
- [30] 梁睿. 北京地铁隧道施工引起的地表沉降统计分析与预测 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
LIANG R. Statistical analysis and prediction for ground surface settlement due to tunnel construction in Beijing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [31] 张书丰. 地铁盾构隧道施工期地表沉降监测研究 [D]. 南京: 河海大学, 2004.
ZHANG S F. Study on ground settlement monitoring due to shield construction in metro tunnel [D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese)