

DOI: 10.11779/CJGE201812013

不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究

吴昌胜^{1, 2}, 朱志铎^{*1, 2}

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室(东南大学), 江苏 南京 210096)

摘 要: 地层损失率是引起地面沉降最主要的因素之一。因此, 收集了国内盾构隧道地面最大沉降实测数据, 利用 Peck 公式反推得到地层损失率的取值, 研究大直径($D>10$ m)与中小直径盾构隧道地层损失率的分布规律及主要影响因素。结果表明: ①中小直径、大直径盾构隧道施工引起的地层损失率分别有 93.19% 在 0%~2.0%、近 70% 在 0%~0.5% 之间, 大直径盾构隧道施工引起的地层损失率数值更小, 分布更集中; ②中小直径、大直径盾构隧道引起的地层损失率分别随着地层条件变好、地层渗透性的变小而减小; ③两种直径盾构隧道的地面最大沉降与地层损失率均具有一定的线性相关性; ④隧道覆土深度比与地层损失率的相关性较弱; ⑤中小直径盾构隧道引起的地层损失率随着地层黏聚力、内摩擦角以及弹性模量的增大而逐渐减小。研究成果可为今后相关地区类似隧道工程施工诱发的地面沉降预测和施工控制提供科学参考。

关键词: 盾构隧道; 直径; 地面沉降; 地层损失率; 影响因素

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)12-2257-09

作者简介: 吴昌胜(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程等方面的研究工作。E-mail: shengchangwu@126.com。

Comparative study on ground loss ratio due to shield tunnel with different diameters

WU Chang-sheng^{1, 2}, ZHU Zhi-duo^{1, 2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Nanjing 210096, China)

Abstract: The ground loss ratio is one of the main factors causing ground surface settlements. The measured data of the maximum ground settlement from some areas of China are collected. The ground loss ratios are obtained through back analysis of Peck formulas. The distribution and influence factors of the ground loss ratio due to large- and small-diameter shield tunnels are studied, respectively. The results show that: (1) About 93.19% of the ground loss ratio caused by small-diameter shield tunnel ranges from 0% to 2.0%, while about 70% of the ground loss ratio due to large-diameter ($D>10$ m) shield tunnel is 0%~0.50%. The ground loss ratio owing to large-diameter shield tunnel is smaller, and the distribution is more concentrated compared with that of the small-diameter shield tunnel. (2) The ground loss ratio induced by small-diameter shield tunnel decreases as the soil conditions get better, while the ground loss ratio induced by large-diameter shield tunnel decreases with the decrease of permeability coefficient. (3) There is a certain correlation between the maximum ground settlement and the ground loss ratio, and the control of ground loss ratio resulting from small-diameter shield tunnel in soft soils is the most difficult. (4) The ground loss ratio has no obvious connection with the ratio of cover depth to diameter. (5) The ground loss ratio induced by small-diameter shield tunnel decreases with the increase of the cohesion, internal friction angle and modulus of elasticity. The results can provide scientific references for the prediction and control of ground settlement induced by similar tunnel construction in the future.

Key words: shield tunnel; diameter; ground settlement; ground loss ratio; influence factor

0 引 言

目前, 中国盾构隧道建设正处于快速发展阶段, 尤其是跨江越海的长距离大直径盾构隧道的建设规模不断扩大。盾构法修建隧道具有施工安全、机械化程

度高和对周围环境影响小等优点, 但是仍然无法避免

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB057803)

收稿日期: 2017-11-15

*通讯作者(E-mail: zhuzhiduo@seu.edu.cn)

地面的沉降变形,进而影响地面建筑物、路面以及地下管线的正常使用和结构安全。因此,如何准确预测和控制盾构隧道的地面沉降一直是研究的重点与难点。地层损失是引起地面沉降最主要的因素之一,工程上常用地层损失率表示^[1]。地层损失率是指单位土体损失体积与实际开挖土体体积的比值,它可以综合反映施工方法、地层条件、支护时间、施工管理质量和技术水平对地面沉降的影响。马险峰等^[2]离心模型试验结果显示地层损失率越大,施工期和工后地面沉降越大,可以通过控制地层损失率将地面沉降控制在所需标准之内。因此,对地层损失率的研究具有重要的工程意义。

Peck^[3]首次提出地层损失的概念,在不排水条件下,利用 Peck 公式反分析可以得到地层损失率与最大沉降、地面沉降槽宽度系数以及开挖半径之间的关系。此后,国内外学者对地层损失进行了进一步研究。Mair 等^[4]、Loganathan^[5]研究了地层损失的组成,Klar 等^[6]、Vu 等^[7]提出了开挖面地层损失的计算方法,Palmer 等^[8]基于倒易定理推到了地层损失的计算公式。姜忻良等^[9]分析了地层损失的主要影响因素,魏纲^[10]给出了地层损失率取值的 4 种方法。以上理论分析方法都存在特定的适用条件,且其中的某些参数取值仍然依赖于经验值。因此,基于实测数据的 Peck 反分析推得地层损失率经验值是比较精确和广泛应用的方法^[11]。O'Reilly 等^[12]统计分析了英国地区地层损失率取值范围为 0.5%~2.5%,砂土可取 0.5%,软土可取 1%~2.5%。McCabe 等^[13]反分析得到冰碛土的地层损失率为 0.21%~1.66%。Zhang 等^[14]同样通过对实测沉降数据的反分析得到了成都地铁砂卵石地层的地层损失率为 0.87%~0.96%。国内相关学者^[15-17]收集了国内隧道施工过程中的实测数据,研究了不同施工方法下隧道施工诱发的地面沉降的变化趋势,并分析了施工参数的分布规律以及变化特征。

通过已有研究成果可以看出,地层损失率对于控制盾构隧道施工引起的地面沉降具有非常重要的意义。但是,地层损失率的解析法应用有一定的局限性,利用 Peck 公式的反分析方法推得地层损失率已经得到了广泛的认可和应用,成为了目前研究地层损失率最有效的手段。此外,国内外对于地层损失率取值的研究主要是基于直径为 6 m 左右的中小直径盾构隧道施工的基础上,而对建设规模越来越大的大直径($D>10$ m)盾构隧道施工引起的地层损失率的研究成果相对较少。本文在前人研究的基础上,对中小直径盾构隧道实测数据进行了大量扩充,并收集了国内公开发表的大直径盾构隧道施工引起的地面沉降实测数据,利用 Peck 公式反分析的方法获得地层损失率的取

值,并考虑不同地层条件,统计对比分析大直径与中小直径盾构隧道施工引起的地层损失率,主要研究:①盾构隧道施工引起的地层损失率的取值及分布规律;②大直径和中小直径盾构隧道施工引起的地层损失率的异同;③地层损失率的影响因素。

1 盾构隧道地层损失率统计分析

1.1 实测数据

此次搜集的大直径盾构隧道工程主要为上海、南京、武汉、杭州等越江隧道,北京地下直径线、扬州瘦西湖隧道和广州狮子洋隧道,对中小直径盾构隧道实测数据进行了大量扩充。本文选取符合 Peck 公式的数值,利用反分析的方法获得地层损失率的取值。由于 Peck 公式的条件是不排水,即不考虑土体的排水固结,根据文献[10, 18]的研究结果作为区分施工沉降和固结沉降的依据:取地面沉降随时间变化的沉降速率转折点或盾尾通过后 4~8 d 作为界限。具体所收集的数据和反分析结果见表 1,表中数据未包含土体固结引起的地层损失率。

1.2 实测数据的统计分析

经过对上述地区实测数据的统计,直径 6 m 左右的中小直径盾构隧道施工引起的地层损失率平均值为 0.998%,最大值为 3.79%,最小值为 0.03%,都位于软土地层中,分别出现在杭州和宁波地区;地面沉降槽宽度系数 k 均小于 1.0,在 0.13~0.97 之间,平均值为 0.506。大直径($D>10$ m)盾构隧道施工引起的地层损失率平均值为 0.53%,最大值为 3.36%,最小值为 0.02%;地面沉降槽宽度系数 k 同样均小于 1.0,分布在 0.13~0.74 之间,平均值为 0.38。可以看出,大直径($D>10$ m)盾构隧道施工引起的地层损失率和沉降槽宽度系数整体上均小于中小直径盾构隧道的地层损失率和沉降槽宽度系数。

表 1 给出了各地区中小直径与大直径($D>10$ m)盾构隧道施工引起的地层损失率和沉降槽宽度系数的范围及平均值,可为各地区即将建设的盾构隧道的设计与预测提供参考。从表 1 中可以看出,杭州和郑州地区地层损失率很大,合肥、苏州、西安、武汉、深圳等地区地层损失率均大于 1.0%。从地层条件看,这些地区大多处于软土、膨胀土、黄土地层。而北京、上海、广州、南京等地区由于经验丰富、盾构施工水平较高,引起的地层损失率相对较小。各地区的大直径盾构隧道地层损失率均小于 1.0%,其中南京、武汉地区地层损失率最大,上海地区引起的地层损失率较小。表 1 中其他地区由于样本数较少,难以准确反映当地的地层损失率,需要进一步积累相关资料。另外,分析表中沉降槽宽度系数,绝大部分在 0.3~0.5 之间,

表 1 国内实测数据反分析结果

Table 1 Back analysis results of measured data from some areas of China

	文献	地区	地层特征	样本数	H/D	$S_{\max}$ /mm	V_1 /%	V_{lav} /%	k	k_{av}
中小直径盾构隧道	[16, 17]	长沙	粉质黏土、细砂、强风化、中风化泥质粉砂岩、板岩、砾岩	110	1.76~4.34	3.14~26.43	0.15~3.18	0.86	0.26~0.82	0.48
	[19, 20]	合肥	粉土、粉细砂、粉质黏土、强风化、中风化泥质砂岩	103	1.68~3.16	5.4~23.13	0.33~2.13	1.12	0.43~0.74	0.59
	[15~17, 21]	南京	淤泥质黏土、粉质黏土、粉细砂、强风化、中风化泥质砂岩	43	1.89~2.37	1.41~48.03	0.08~3.07	0.87	0.32~0.80	0.55
	[16, 17]	苏州	黏土、粉质黏土、粉土、粉砂	36	1.25~3.10	3.54~29.31	0.32~2.67	1.06	0.33~0.88	0.59
	[16, 17, 22]	宁波	淤泥质黏土、粉质黏土、粉砂	33	1.96~3.24	1.1~49.76	0.03~2.41	0.89	0.30~0.92	0.49
	[16, 17, 23]	上海	粉质黏土、淤泥质黏土、粉土	27	0.93~3.15	2.22~65.41	0.06~2.02	0.54	0.18~0.64	0.34
	[24, 25]	成都	粉土、卵石土	27	1.86~3.39	9.02~22.4	0.32~2.13	0.66	0.13~0.57	0.39
	[26~28]	杭州	粉土、粉砂、淤泥质粉质黏土、粉质黏土	24	2.48~3.03	3.47~77.13	0.34~3.79	2.11	0.30~0.77	0.46
	[15~17]	广州	全风化、强风化、中风化砂岩	24	1.59~4.14	3.71~22.6	0.20~2.45	0.95	0.32~0.68	0.49
	[15~17]	北京	粉质黏土、粉土、粉细砂、中粗砂、卵石	23	2.15~3.23	3.16~15.94	0.27~1.71	0.83	0.27~0.84	0.46
	[16, 17, 29]	西安	新黄土、老黄土	20	2.48~3.65	4.19~30.54	0.32~1.81	1.09	0.42~0.55	0.45
	[15, 16]	深圳	砂层、粉质黏土、全风化花岗岩	16	1.59~3.18	7.36~34.24	0.41~3.01	1.18	0.15~0.93	0.46
	[15, 16]	武汉	粉细砂、粉质黏土、粉砂质泥岩	15	2.14~4.00	4.35~49.95	0.34~2.19	1.25	0.31~0.38	0.35
	[30, 31]	南宁	黏土、粉质黏土、粉土、砂砾石、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩	11	1.07~2.87	7.03~32.2	0.46~1.48	0.77	0.47~0.97	0.63
	[15, 16]	沈阳	中粗砂、砾砂	10	1.84~2.63	2.48~16.36	0.07~1.09	0.51	0.15~0.72	0.38
	[32, 33]	长春	粉质黏土、黏土、砾砂、中粗砂、全风化、强风化泥岩	7	2.01~2.85	8.77~21.22	0.50~1.60	0.97	0.42~0.74	0.54
	[15, 16]	郑州	粉土、粉质黏土	7	2.72~2.88	12.02~25.5	1.00~3.15	2.09	0.60~0.88	0.74
	[16, 17]	昆明	粉质黏土、圆砾、黏土	6	1.84~2.44	23.01~29.11	0.91~0.99	0.95	0.29~0.39	0.34
	[15~17]	天津	粉土、粉质黏土	2	1.66~1.85	28.6~36.2	1.3~1.56	1.43	0.47~0.55	0.51
	[16, 17]	无锡	黏土、粉质黏土、粉土	1	2.35	10.77	0.83	0.83	0.65	0.65
大直径盾构隧道	[34~36]	北京	粉质黏土、粉土、粉细砂、中粗砂	34	1.03~2.34	6.6~36.4	0.08~1.04	0.40	0.13~0.74	0.41
	[10, 37]	杭州	粉砂夹粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉细砂、圆砾	25	1.80~2.74	7.5~34.32	0.10~1.02	0.39	0.25~0.40	0.31
	[38~41]	上海	粉质黏土、淤泥质黏土、粉土	22	1.17~3.17	2.5~52.9	0.02~0.72	0.21	0.15~0.6	0.27
	[42~44]	武汉	黏土、粉土、粉质黏土、粉细砂、中粗砂	14	1.05~4.09	5.1~77	0.29~3.36	1.28	0.25~0.64	0.53
	[45~47]	南京	淤泥质粉质黏土、粉土	9	1.13~3.50	21.9~92.2	0.22~3.30	0.96	0.20~0.30	0.37
	[48, 49]	扬州	粉砂、黏土	5	1.51	5.4~10.63	0.06~0.27	0.14	0.46~0.60	0.51
	[50]	广州	淤泥质土、粉细砂、粗砂	1	1.87	38.4	0.67	0.67	0.33	0.33

注: H 为隧道轴线埋深 (m); D 为隧道开挖直径 (m); $S_{\max}$ 为地面最大沉降量 (mm); V_1 为地层损失率 (%); V_{lav} 为地层损失率平均值 (%); k 为沉降槽宽度系数; k_{av} 为沉降槽宽度系数平均值。

在样本数大于 10 的地区中, 仅有合肥、苏州和南宁的沉降槽宽度系数在 0.6 附近。同样可以发现, 大直径盾构隧道的沉降槽宽度系数要小于相应地区中小直径盾构隧道的沉降槽宽度系数。

图 1 为中小直径盾构隧道与大直径盾构隧道施工引起的地层损失率的统计分布图。

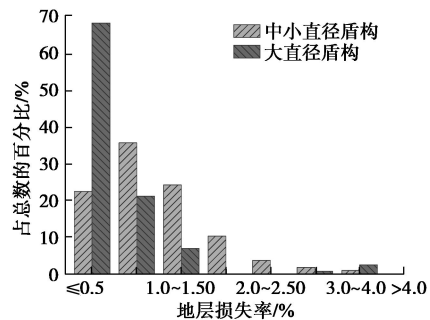


图 1 地层损失率统计分布图

Fig. 1 Statistical distribution of ground loss ratio

如图 1 所示, 中小直径盾构隧道施工引起的地层损失率 93.19% 分布于 0~2.0% 之间, 与之相比, 大直径盾构隧道施工引起的地层损失率大多集中于 0~0.50% 之间, 占总数的近 70%, 其次集中于 0.5%~1.0% 之间, 占总数的 21.24%。大直径盾构隧道地层损失率较大的实例, $V_1=2.51\%$ 和 $V_1=3.30\%$ 的实例主要原因是先施工隧道与后施工隧道间隔较短, 受到后施工隧道的影响较大。 $V_1=3.36\%$ 和 $V_1=3.12\%$ 的两个实例主要原因是盾构隧道下穿武九铁路, 列车频繁通过, 对土体施加循环动荷载的影响较大。由于此 4 个实例地层损失率明显较大, 文后分析时均未考虑。

与中小直径盾构隧道相比, 大直径 ($D>10\text{ m}$) 盾构隧道引起的地层损失率更小, 分布更集中。从地层损失率累计发生概率图 (图 2) 更能明显的看出此现象。分析认为有以下 4 种原因可能造成此现象: ①在盾构隧道施工过程中要对地面隆沉进行严格监测, 在相同地面沉降控制值时, 大直径盾构隧道的开挖面积要远远大于中小直径盾构隧道的开挖面积, 大直径盾构隧道的地层损失率必然更小。②大直径盾构直径增大而盾构长度变化不大, 盾构机的灵敏度得到了较大的提高, 有利于盾构机掘进姿态的控制。③Peck 公式的实质是将隧道开挖引起的所有地层损失视为一个位于隧道中心点的地层损失, 即认为隧道开挖后周围土体均向隧道中心点收敛。这种假定在开挖半径较小时是合适的, 当开挖半径较大时就不可避免的受到隧道实际收敛情况的影响, 再使用 Peck 公式会产生误差。④大直径盾构机生产中在电气和机械等方面进行了针对性设计和改进^[51]。

2 地层损失率影响因素分析

为了进一步研究地层损失率的影响因素, 将收集

到的数据按照盾构穿越土层的不同划分为软土层、砂土层、砂卵石层、膨胀土层、黄土层、岩层以及复合土层, 研究不同地层条件下大直径盾构与中小直径盾构隧道不同因素与地层损失率的相关性。

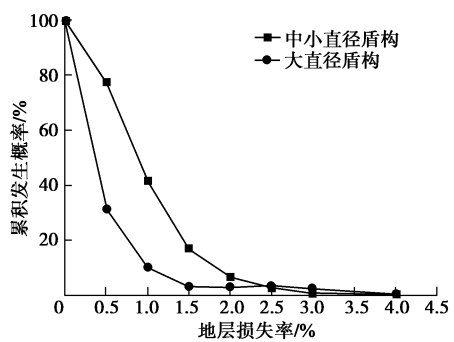


图 2 地层损失率累计发生概率

Fig. 2 Curves of accumulative frequency of ground loss ratio

2.1 地层条件与地层损失率的相关性

表 2 为不同地层条件下实测数据的统计结果。从表 2 可以看出, 中小直径盾构隧道引起的地层损失率大体上随着地层条件变好而减小, 大直径盾构引起的地层损失率随着地层渗透性的变小而减小。此外, 在同一土层条件下, 绝大多数都符合大直径盾构隧道的地层损失率小于中小直径盾构隧道的地层损失率。

表 2 不同地层条件下实测数据统计结果

Table 2 Results of measured data under different soils

穿越土层		样本数	$S_{\max}$ /mm	H/D	V_1 /%	V_{lav} /%
软土层	中小直径	175	1.1~77.13	1.25~3.24	0.03~3.79	1.12
	大直径	55	2.50~52.9	1.13~3.17	0.02~2.72	0.35
砂土层	中小直径	34	2.48~49.95	1.84~3.17	0.07~2.19	0.96
	大直径	43	5.10~77.0	1.03~4.09	0.08~1.43	0.52
砂卵石层	中小直径	28	6.0~22.40	1.86~3.39	0.32~2.13	0.65
	大直径	8	15.80~43.5	1.88~3.02	0.55~2.55	0.94
复合土层	中小直径	53	1.41~34.24	1.59~4.14	0.08~1.99	0.85
岩层	中小直径	121	3.14~22.45	1.76~4.34	0.15~2.17	0.82
黄土	中小直径	20	4.19~30.54	2.48~3.65	0.32~1.81	1.09
膨胀土层	中小直径	114	5.40~23.13	1.07~3.16	0.33~2.01	1.08

2.2 地面最大沉降与地层损失率的相关性

图 3 所示为不同地层条件下地面最大沉降随地层损失率的变化情况。从图中可以看出: ①地面最大沉降随着地层损失率的增大而增大, 两者之间具有一定的线性相关性, 确定系数 R^2 相对不高的原因可能是搜集到的数据来源于不同工程, 外部环境、管理水平、施工经验等存在差异造成。②中小直径盾构隧道在软土层中引起的地面最大沉降较在其他土层中离散性更

大, 数值上总体也较大, 有部分甚至超过规定的控制值。表明软土层中地层损失率的控制难度相对于其他土层要稍大。③在软土层、砂土层、砂卵石层中, 大直径盾构均要大于中小直径盾构的地面最大沉降, 但地层损失率却要小于中小直径盾构隧道。

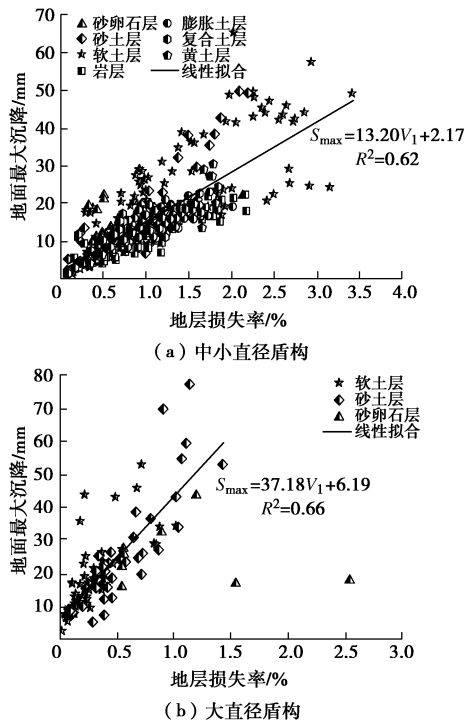


图 3 地面最大沉降与地层损失率的关系

Fig. 3 Relationship between maximum ground settlement and ground loss ratio

2.3 覆土深度比与地层损失率的相关性

覆土深度比 (C/D) 是指隧道上覆土厚度 (C) 与隧道开挖直径 (D) 的比值。图 4 所示为覆土深度比与地层损失率的相关性。从图中可以得出, 中小直径和大直径盾构隧道的地层损失率离散性均较大, 难以用一个有效的函数关系式进行拟合, 表明隧道覆土深度比对地层损失率虽具有一定影响, 但此单因素影响较弱。

图 4 (a) 所示, 中小直径盾构隧道随着 C/D 的增加, 地层损失率整体上呈现先增大后减小的趋势。很少出现超浅埋 ($C/D \leq 1.1$) 的情况, 浅埋 ($1.1 < C/D \leq 2.0$) 与深埋 ($2.0 \leq C/D$) 情况下地层损失率差别不大, 但当 $C/D > 2.5$ 之后整体上还是呈现出减小的趋势。图 4 (b) 所示, 大直径盾构隧道地层损失率与 C/D 相关性不明显, 在超浅埋、浅埋和深埋情况下地层损失率没有可比性, 但同样可以发现, 当 $C/D > 2.5$ 之后整体上开始呈现出减小的趋势。因此可以认为当 $C/D < 2.5$ 时, 地层损失率对施工时引起的土体扰动更敏感, 更多的受到施工水平的影响。当 $C/D > 2.5$ 之后,

盾构隧道地层损失率随着隧道覆土深度比的增大而减小。中小直径盾构隧道的 C/D 主要在 1.0~3.0 之间, 地层损失率主要 $< 3.0\%$, 相比而言, 大直径盾构隧道的 C/D 主要在 0.5~3.0 之间, 但地层损失率绝大部分都 $< 1.5\%$, 表明随着开挖直径的增大, 地层损失率变化范围减小, 开挖直径的影响逐渐增强。

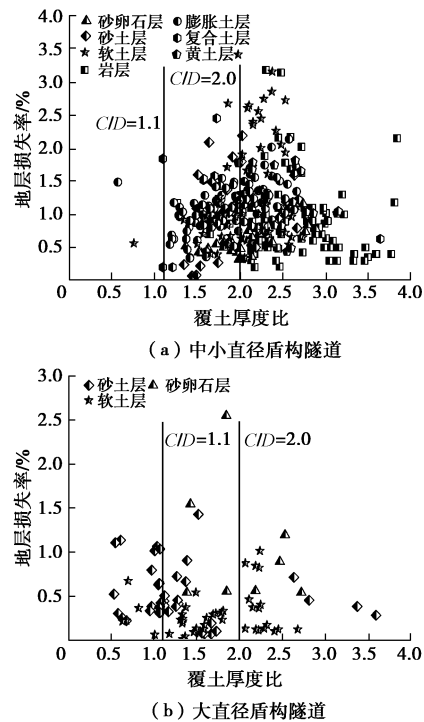


图 4 覆土深度比与地层损失率的关系

Fig. 4 Relationship between ratio of cover depth to diameter and ground loss ratio

2.4 黏聚力与地层损失率的相关性

图 5 所示为地层黏聚力与地层损失率的相关性。图中大直径盾构隧道的黏聚力一般较小, 地层损失率大部分小于 1.0%, 可能是由于大直径盾构隧道多是来自富水地层中。但由于大直径盾构隧道样本数较少, 仅对中小直径盾构的数据进行分析。从图中分段平均值可以得出, 中小直径盾构隧道引起的地层损失率随着地层黏聚力的增大而逐渐减小。当地层黏聚力大于 40 kPa 时, 地层损失率绝大部分都小于 1.0%, 主要来源于板岩和砾岩地层; 当地层黏聚力小于 40 kPa 时, 地层损失率分布相对离散, 主要来源于粉土、黏土和黄土地层。

2.5 内摩擦角与地层损失率的相关性

图 6 所示为地层内摩擦角与地层损失率的相关性。图中大直径盾构隧道的样本数较少, 仅对中小直径盾构的数据进行分析。从图中分段平均值可以得出, 中小直径盾构隧道引起的地层损失率随着地层内摩擦角的升高而逐渐降低, 降幅越来越小, 说明内摩擦角对地层损失率的影响逐渐减弱。因此当地层内摩擦角

大于 35° 以后,受到其他因素的影响,地层损失率会出现变大的情况。

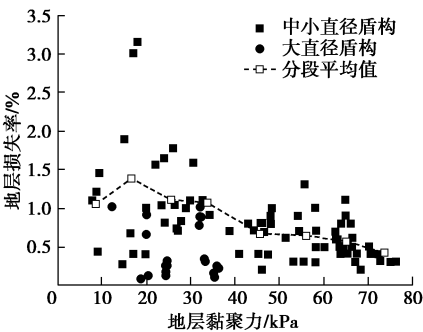


图 5 黏聚力与地层损失率的关系

Fig. 5 Relationship between cohesion and ground loss ratio

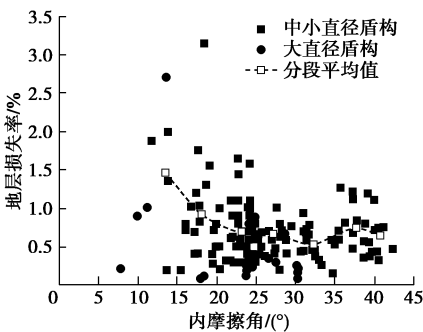


图 6 内摩擦角与地层损失率的关系

Fig. 6 Relationship between internal friction angle and ground loss ratio

2.6 地层弹性模量与地层损失率的相关性

图 7 所示为地层弹性模量与地层损失率的关系。图中大直径盾构隧道的样本数仍然较少,仍仅对中小直径盾构的数据进行分析。从图中分段平均值可以看出,地层损失率随着弹性模量的增大同样逐渐减小,降幅也越来越小,说明弹性模量对地层损失率的影响逐渐减弱。因此当地层弹性模量超过 30 MPa 以后,受到其他因素的影响,地层损失率的值会出现波动。

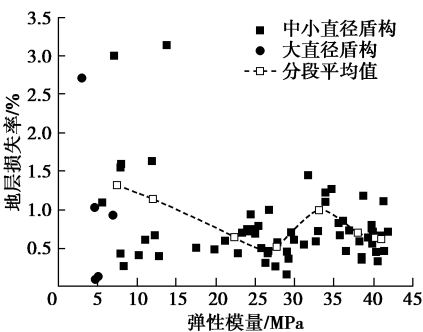


图 7 弹性模量与地层损失率的关系

Fig. 7 Relationship between modulus of elasticity and ground loss ratio

3 结 论

(1) 中小直径盾构隧道施工引起的地层损失率

93.19%分布于 0~2.0%之间,平均值为 0.998%,地面沉降槽宽度系数在 0.13~0.97 之间,平均值为 0.506。大直径盾构隧道施工引起的地层损失率近 70%分布于 0~0.5%之间,平均值为 0.53%,地面沉降槽宽度系数分布在 0.13~0.74 之间,平均值为 0.38。大直径盾构隧道施工引起的地层损失率和沉降槽宽度系数整体上均小于中小直径盾构隧道的地层损失率和沉降槽宽度系数。

(2) 中小直径和大直径盾构隧道引起的地层损失率分别随着地层条件变好、地层渗透性变小而减小。

(3) 两种直径盾构隧道的地面最大沉降与地层损失率之间均具有一定的线性相关性,中小直径盾构隧道地层损失率的控制难度在软土层中较其他土层中要稍大。

(4) 隧道覆土深度比与地层损失率的相关性较弱;中小直径盾构引起的地层损失率随着地层抗剪强度(黏聚力、内摩擦角)和弹性模量的增大逐渐减小。

(5) 文中所得结论需要进一步积累相关资料进行验证,可以进一步研究隧道直线段和曲线段、双线隧道开挖、土仓压力、注浆压力、注浆率、掘进速度、地下水位变化对地层损失率的影响。另外,本文所利用的 Peck 公式反分析得到地层损失率的方法虽然已在盾构隧道设计施工中被认可并广泛使用,但此方法还需经过土体实际开挖体积与建成隧道体积计算出的实际地层损失率的验证。

参考文献:

[1] HE C, FENG K, FANG Y, et al. Surface settlement caused by twin-parallel shield tunnelling in sandy cobble strata[J]. Journal of Zhejiang University (Science A), 2012, 13(11): 858 - 869.

[2] 马险峰, 王俊淞, 李削云, 等. 盾构隧道引起地层损失和地表沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 942 - 947. (MA Xian-feng, WANG Jun-song, LI Xiao-yun, et al. Centrifuge modeling of ground loss and settlement caused by shield tunnelling in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 942 - 947. (in Chinese))

[3] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 1969: 225 - 290.

[4] MAIR R, TAYLOR R, Theme lecture: bored tunnel in the urban environment[C]// Proceeding of the Fourteenth International Conference on Soil mechanics and Foundation

- Engineering. Hamburg: Balkema, 1997: 2353 - 238.
- [5] LOGANATHAN N, An innovative method for assessing tunnelling-induced risks to adjacent structures[C]// PB 2009 William Barclay Parsons Fellowship Monograph 25. New York: Parsons Brinckerhoff Inc, 2011: 92.
- [6] KLAR A, KLEIN B. Energy-based volume loss prediction for tunnel face advancement[J]. *Géotechnique*, 2014, **64**(10): 776 - 786.
- [7] VU M N, BROERE W, BOSCH J W. Volume loss in shallow tunneling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, **59**(10): 77 - 90.
- [8] PALMER A C, MAIR R J. Ground movements above tunnels: a method for calculating volume loss[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(3): 451 - 457.
- [9] 姜忻良, 赵志民, 李 园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(10): 1542 - 1544. (JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min, LI Yuan. Analysis and calculation of surface settlement trough profiles due to tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(10): 1542 - 1544. (in Chinese))
- [10] 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 Gang. 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))
- [11] 王振信. 盾构施工对环境的影响[J]. *地下工程与隧道*, 2008, **22**(4): 1 - 4. (WANG Zhen-xin. The environmental impact of shield tunnel construction[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2008, **22**(4): 1 - 4. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] MCCABE B A, ORR T L, REILLY C C. Settlement trough parameters for tunnels in Irish glacial tills[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, **27**(1): 1 - 12.
- [14] ZHANG Z X, ZHANG H, YAN J Y. A case study on the behavior of shield tunneling in sandy cobble ground[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(6): 1891 - 1900.
- [15] 韩 焯, 李 宁, STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(1): 23 - 28. (HAN Xuan, LI Ning, STANDING J R. An adaptability study of Peck equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(1): 23 - 28. (in Chinese))
- [16] 朱才辉, 李 宁. 地铁施工诱发地表最大沉降量估算及规律分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(增刊 1): 3543 - 3560. (ZHU Cai-hui, LI Ning. Estimation and regularity analysis of maximal surface settlement induced by subway construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(S1): 3543 - 3560. (in Chinese))
- [17] 朱才辉, 李 宁. 隧道施工诱发地表沉降估算方法及其规律分析[J]. *岩土力学*, 2016, **38**(增刊 2): 533 - 542. (ZHU Cai-hui, LI Ning. Estimation method and laws analysis of surface settlement due to tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **38**(S2): 533 - 542. (in Chinese))
- [18] 张忠苗, 林存刚, 吴世明, 等. 泥水盾构施工引起的地面固结沉降实例研究[J]. *浙江大学学报*, 2012, **46**(3): 431 - 440. (ZHANG Zhong-miao, LIN Cun-gang, WU Shi-ming, et al. Case study of ground surface consolidation settlements induced by slurry shield tunneling[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2012, **46**(3): 431 - 440. (in Chinese))
- [19] 徐小马. Peck 公式在合肥地区的适用性分析及临近既有深基础盾构施工地面沉降研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. (XU Xiao-ma. Applicability analysis of Gauss formula in Hefei area and study on the ground subsidence of shield construction near the deep foundation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [20] 代朋飞. 合肥地铁盾构法施工引起地表沉降的分析与数值模拟[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2016. (DAI Peng-fei. Analysis and numerical simulation on ground settlements caused by shield driven method construction in Hefei Metro[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2016. (in Chinese))
- [21] 卢昌龙. 南京地铁隧道盾构法施工地表沉降数值模拟研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2014. (LU Chang-long. Numerical simulation analysis of surface settlement caused by Nanjing subway construction[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2014. (in Chinese))
- [22] 杨 芬. 宁波轨道交通盾构施工引起的长期沉降特性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2015. (YANG Fen. Study on the long term settlement characteristics caused by shield construction in Ningbo Rail Transit[D]. Ningbo: Ningbo University, 2015. (in Chinese))
- [23] 陈 枫. 隧道开挖引起地表沉降的解析研究[D]. 上海: 同济大学, 2004. (CHEN Feng. Analytical study of ground settlement induced by shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese))

- [24] 王 庆. 成都地铁盾构施工对周边环境的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (WANG Qing. Study on the influence applied to surrounding environment induced by the construction of tunnel of Chengdu metro[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [25] 杨期祥. 成都地铁砂卵石层盾构开挖引起的地表沉降规律分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. (YANG Qi-xiang. Study on the regularity of surface settlement caused by shield tunnel in Chengdu sandy pebble stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [26] 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 Hai-wei, SONG Shou-xin, WANG Jian-chen. An adaptability study of Peck formula applied to predicting ground settlements induced by double shield tunneling[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, **39**(3): 30 - 34. (in Chinese))
- [27] 渠开胜. 软土地层中盾构施工引起地表沉降规律研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014. (QU Kai-sheng. Research on the law of ground settlement by shield construction of metro tunnel in soft soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [28] 唐晓武, 朱 季, 刘 维, 等. 盾构施工过程中的土体变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 417 - 422. (TANG Xiao-wu, ZHU Ji, LIU Wei, et al. Research on soil deformation during shield construction process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 417 - 422. (in Chinese))
- [29] 颜治国. 西安地铁黄土地层中盾构隧道地表沉降控制理论与技术[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012. (YAN Zhi-guo. Research on the controlling theory and technology of excavation in loess stratigraphy in Xi'an Metro[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012. (in Chinese))
- [30] 李弈杉. 南宁地铁盾构隧道施工引起的地表沉降规律研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016. (LI Yi-shan. Study on the law of ground settlement caused by shield tunnel construction in Nanning[D]. Nanning: Guangxi University, 2016. (in Chinese))
- [31] 徐明辉. 膨胀岩土条件下盾构施工沉降研究[D]. 广州: 暨南大学, 2016. (XU Ming-hui. Research on settlement of shield construction in expansion rock and soil[D]. Guangzhou: Jinan University, 2016. (in Chinese))
- [32] 郑 馨, 麻凤海. 长春地层地铁隧道施工的 Peck 公式改进[J]. 地下空间与工程学报, 2017, **13**(3): 732 - 736. (ZHENG Xin, MA Feng-hai. Improvement of Peck Formula in subway construction in Changchun[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, **13**(3): 732 - 736. (in Chinese))
- [33] 雷国光, 韩 飞, 徐丽娜. 富水砾砂层盾构隧道地表沉降及控制措施分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2016, **33**(1): 39 - 42. (LEI Guo-guang, HAN Fei, XU Li-na. Control measures and settlement of the soil surface caused by shield tunnel in water-rich gravelly sand[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2016, **33**(1): 39 - 42. (in Chinese))
- [34] 杨三资, 张顶立, 王剑晨, 等. 北京黏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**(增刊 1): 297 - 301. (YANG San-zi, ZHANG Ding-li, WANG Jian-chen, et al. Ground deformation characteristic due to large diameter slurry shield construction in clay in Beijing[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(S1): 297 - 301. (in Chinese))
- [35] 郭玉海. 大直径土压平衡盾构引起的地表变形及掘进控制技术[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. (GUO Yu-hai. Study on big diameter earth pressure balance shield tunneling induced ground surface movements and corresponding driving control technologies[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [36] 秦世朋. 大直径泥水盾构隧道施工地层响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015. (QIN Shi-peng. Analysis of ground response induced by large slurry shield tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [37] LIN C G, ZHANG Z M, WU S M, et al. Key techniques and important issues for slurry shield under-passing embankments: a case study of Hangzhou Qiantang River Tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, **38**(9): 306 - 325.
- [38] 侯永茂, 郑宜枫, 杨国祥, 等. 超大直径土压平衡盾构施工对环境影响的现场测研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 235 - 242. (HOU Yong-mao, ZHENG Yi-feng, YANG Guo-xiang, et al. Measurement and analysis of ground settlement due to EPB shield construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 235 - 242. (in Chinese))
- [39] 李庭平. 影响泥水平衡盾构施工中变形的因素分析及其对既有隧道影响的分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. (LI Ting-ping. Analysis of deformation factors during construction of slurry type shield tunnels with the effects on existing metro tunnel[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong

- University, 2008. (in Chinese))
- [40] 伍振志, 杨国祥, 杨林德, 等. 上海长江隧道过民房段地表变位预测及控制研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 582 - 587. (WU Zhen-zhi, YANG Guo-xiang, YANG Lin-de, et al. Prediction and control of ground movement of Shanghai Yangtze River tunneling across building areas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(2): 582 - 587. (in Chinese))
- [41] 程磊标, 陈有亮, 王苏然, 等. 超大直径盾构施工地表沉降分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, **28**(1): 226 - 229. (CHENG Lei-biao, CHEN You-liang, WANG Su-ran et al. Analysis of ground surface settlement induced by the super diameter shield construction[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, **28**(1): 226 - 229. (in Chinese))
- [42] 马可栓. 盾构施工引起地基移动与近邻建筑保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. (MA Ke-shuan. Research on the ground settlement caused by the shield construction and protection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))
- [43] 季大雪. 武汉长江隧道盾构下穿武九铁路沉降影响分析[J]. 铁道工程学报, 2009, **26**(10): 59 - 63. (JI Da-xue. Analysis of the influence of underpass shield of Wuhan Yangtze River tunnel on settlement of Wuhan-Jiujiang railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, **26**(10): 59 - 63. (in Chinese))
- [44] 李国成, 丁烈云. 武汉长江隧道盾构施工引起的地表沉降预测[J]. 铁道工程学报, 2008, **25**(5): 59 - 62. (LI Guo-cheng, DING Lie-yun. Ground Settlement Induced by Shield Construction of Wuhan Yangtze River Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, **25**(5): 59 - 62. (in Chinese))
- [45] 肖 衡. 大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009. (XIAO Heng. Study on soil disturbance caused by large diameter slurry shield tunneling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [46] 梅逸飞. 盾构法施工隧道监测监控技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013. (MEI Yi-fei. Research on monitoring technology in shield tunnel construction[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [47] 房 倩, 王剑晨, 刘 翔, 等. 超大直径泥水式盾构施工地层变形规律研究[J]. 现代隧道技术, 2017, **54**(3): 120 - 125. (FANG Qian, WANG Jian-chen, LIU Xiang, et al. Characteristics of ground deformation induced by large-diameter slurry shield construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, **54**(3): 120 - 125. (in Chinese))
- [48] 戴洪伟. 瘦西湖超大直径盾构隧道施工对周边环境影响分析[J]. 隧道建设, 2015, **35**(4): 316 - 321. (DAI Hong-wei. Influence of super-large diameter shield tunneling on surrounding environment: case study on Slender West Lake crossing tunnel in Yangzhou, China[J]. Tunnel Construction, 2015, **35**(4): 316 - 321. (in Chinese))
- [49] 陈 健. 扬州瘦西湖盾构隧道施工关键技术与实测分析[J]. 建筑施工, 2015, **37**(3): 361 - 364. (CHEN Jian. Key technology and actual measurement analysis of shield tunnel Construction of Yangzhou Slender West Lake[J]. Building Construction, 2015, **37**(3): 361 - 364. (in Chinese))
- [50] 杨延栋, 陈 馈, 李凤远, 等. 狮子洋隧道陆地段盾构施工横向地表沉降研究[J]. 隧道建设, 2014, **34**(12): 1143 - 1147. (YANG Yan-dong, CHEN Kui, LI Feng-yuan, et al. Case study on transverse ground surface settlement of land section of shiziyang tunnel bored by shield[J]. Tunnel Construction, 2014, **34**(12): 1143 - 1147. (in Chinese))
- [51] 羌 培. 超大直径土压平衡盾构最佳施工参数匹配研究[D]. 上海: 上海大学, 2015. (QIANG Pei. The research of perfect matching of tunneling parameter for super large diameter earth pressure balance machine[D]. Shanghai: Shanghai University, 2015. (in Chinese))