

盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究

魏 纲

(浙江大学城市学院土木工程系, 浙江 杭州 310015)

摘 要: 收集了杭州市庆春路过江盾构隧道施工引起的地面沉降实测数据, 提出了施工阶段地面沉降值的取值办法。结合北京、上海、南京、广州、武汉、天津、深圳地区盾构法隧道施工引起的土体损失率实测值, 对 71 个实测数据进行了统计分析。结果表明: 土体损失率分布在 0.20%~3.01%, 其中 95.77% 的实测数据分布在 0.20%~2.0%, 43.66% 的实测数据集中在 0.5%~1.0%; 黏性土地区土体损失率在 0.20%~2.0%。土体损失率主要与施工水平、土质条件和隧道轴线埋深有关。随着隧道轴线埋深增大, 土体损失率基本呈减小趋势, 当埋深大于 25 m 后该趋势比较明显, 两者关系可近似采用幂函数拟合。

关键词: 盾构; 隧道; 地面沉降; 土体损失率

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)09-1354-08

作者简介: 魏 纲(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地下隧道施工对周边环境影响及风险控制方面的研究工作。

E-mail: weig@zucc.edu.cn

Selection and distribution of ground loss ratio induced by shield tunnel construction

WEI Gang

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China)

Abstract: The observed data of surface settlement caused by construction of Qingchun Road River-Crossing Tunnel in Hangzhou are collected, and a method to select surface settlement values during the construction stage is put forward. Based on the data of ground loss ratio induced by shield tunnel construction in Beijing, Shanghai, Nanjing, Guangzhou, Wuhan, Tianjin and Shenzhen, seventy-one groups of data are statistically analyzed. The results show that the ground loss ratio ranges from 0.2% to 3.01%. About 95.77% of the ground loss ratio is 0.20%~2.0%, and about 43.66% of the ground loss ratio is 0.5%~1%. The ground loss ratio is 0.20%~2.0% for the cohesive soil area. The ground loss ratio is dependent on the construction level, soil properties and buried depth of the tunnel. With the increase of the tunnel buried depth, the ground loss ratio overall decreases, especially when the buried depth is more than 25 m. The relationship between the ground loss ratio and the tunnel buried depth can be approximately expressed by power functions.

Key words: shield; tunnel; surface settlement; ground loss ratio

0 引 言

盾构法隧道施工会引起土体变形, 对周边环境产生危害。目前许多学者对该问题进行了研究, 提出了一系列土体变形计算公式, 主要包括经验公式^[1-3]、理论公式^[4-6]和随机介质理论^[7], 这些公式计算时都涉及到土体损失量取值。

土体损失量是指盾构施工中实际开挖土体体积和竣工隧道体积之差, 竣工隧道体积包括隧道外围包裹的压入浆体体积^[8]。土体损失量除了用于预测隧道施工期间土体变形外, 国内外还采用土体损失率 h (单位土体损失量除以土体开挖面积) 来衡量盾构施工对环境影响的程度, 一般认为如果能控制 h 在 5‰之内,

则盾构施工对非特别敏感环境不会产生明显影响^[9]。

另外, h 在一定程度上可以反映盾构施工水平高低, h 越低, 施工水平越高。因此, 对土体损失率的研究具有重要意义。

但目前中国国内对 h 的研究较少, h 的取值主要依赖于地区经验, 且现有方法数据取值范围很大, 不利于实际应用。另外, 研究人员常常将土体损失量与排水固结引起的土体压缩量混在一起, 高估了土体损失量。因此需作进一步研究。

基金项目: 浙江省教育厅科研项目 (20070180)

收稿日期: 2010-04-07

1 现有土体损失率*h*的取值方法

Peck^[1]提出横向地面沉降估算公式为

$$S(x) = S_{\max} \exp[-x^2/(2i^2)] \quad (1)$$
$$S_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{i\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

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, $V_{\text{loss}} = \pi R^2 h$, h 为土体损失率; i 为地面沉降槽宽度系数, $i = kh^{[10]}$, k 为地面沉降槽宽度参数, h 为隧道轴线埋深。

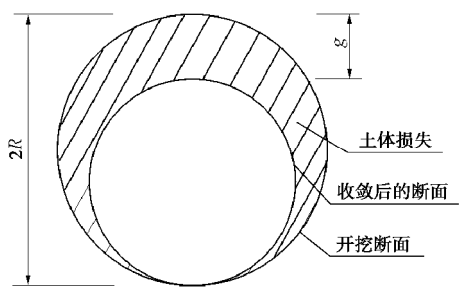


图1 土体损失示意图

Fig. 1 Ground loss induced by tunneling

目前国内外土体损失率*h*常采用的取值方法主要有4种。

(1) 理论方法

采用 Lee 等^[11]提出的等效土体损失参数 g 进行计算, 如图1所示, 图中 R 为隧道开挖半径, 土体损失量为

$$V_{\text{loss}} = \pi(Rg - g^2/4) \quad (3)$$

式中, $g = G'_p + U_{3D} + w$, 其中 $G'_p = aG_p$, G_p 为盾构机与衬砌之间的几何空隙, 考虑到注浆填充应乘以一个折减系数 a 。

文献[12]提出对于砂土, $a = 0.15 \sim 0.3$, 平均值为 0.23, 对于黏土, $a = 0.2 \sim 0.4$, 计算公式为 $a = 0.116(h/2R) - 0.042$, U_{3D} 为盾构机前部土体的三维弹塑性变形, w 为施工因素, 具体计算参见文献[11]。

h 与 g 之间的换算关系为

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

(2) 反分析方法

如有地面沉降实测数据, 由式(1)反分析得到 i 值, 再反分析得到 h 值

$$h = \frac{S_{\max} i \sqrt{2\pi}}{\pi R^2} \quad (5)$$

(3) 经验方法

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。土体损失率*h* 主要与工程地质情况、水文地质情况、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, 因此该参数取值依赖于地区经验^[7]。Attewell^[13]提出, 对于黏土*h* 通常为 0.5%~2.5%。O'Reilly 等^[10]给出了经验取值范围, 见表1。Mair^[14]提出, 根据设备、控制程度和当地经验, 对于均质土, *h* 通常为 0.5%~2.0%, 其中砂土取 0.5%, 软土取 1%~2%。

表1 土体损失率的经验值

Table 1 Empirical values for ground loss ratios	
土类	土体损失率/%
黏性土	0.5~2.5
有裂隙的硬黏土(有或没有盾构)	1~2
冰渍土(无气压)	2~2.5
冰渍土(有气压)	1~1.5
新近沉积的粉质黏土($c_u=10\sim40$ kPa)	2~10
无黏性土(地下水位以上)	2~5
无黏性土(地下水位以下)	2~10
人工填土	>10

注: 上述经验数值适用于中等直径的隧道(3~3.5 m), 当隧道直径很小时(<1.5 m), 应该适当增大。

(4) 现场实测法

王振信^[9]提出: 泥水盾构可测其进、排水量及其密度之差来算出开挖土沙量, 土压平衡盾构可计螺旋输送机的转数或计其渣土车车数, 但这些计量方法的精度过于粗糙; 国外比较精确的办法是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^[9]。

以上方法各有优缺点, 其中理论方法可以事先预测土体损失率, 但是计算比较复杂, 特别是注浆填充折减系数 a 还是凭经验取值。反分析方法精确度最高, 但无法事先预测, 且很难界定“不排水”与“排水”阶段。经验方法简单实用, 目前使用最多, 但缺点是取值范围较大、影响因素较多, 最好有类似工程经验。现场实测法物理概念比较明确, 但是具体操作比较费时、费钱。

2 中国国内实测数据分析

2.1 杭州市庆春路过江盾构隧道江南段

杭州市庆春路过江盾构隧道分东、西线, 东线盾构隧道长 1765.48 m, 西线盾构隧道长 1766.92 m, 其中江底段分别长约 1241 m。隧道管片外径 11.3 m, 内径 10.3 m, 厚度 50 cm, 环宽 2 m。采用通用楔型环, 错缝拼装, 纵环向采用高强螺栓连接。隧道采用两台 $\Phi 11.65$ m 的泥水平衡盾构机掘进, 盾构机长 11.4 m。

盾构机均从江南（萧山侧）盾构工作井始发，需穿越钱塘江大堤，施工顺序为先西线，后东线。盾构始发段纵向坡度为-4%，覆土自上而下：②-1 砂质粉土，②-2 粉土夹淤泥质土，③-1 粉砂夹粉土，③-2 砂质粉土；穿越地层主要包括：③-3 粉砂夹粉土，④淤泥质粉质黏土，⑤-1 粉质黏土；下伏⑤-2 粉质黏土，⑦砂土，⑧圆砾层。

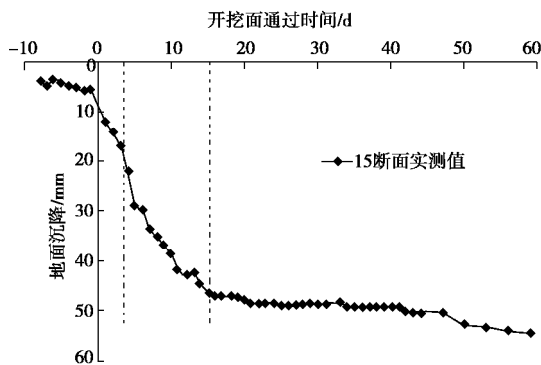


图 2 纵向地面沉降曲线

Fig. 2 Longitudinal surface settlement induced by shield

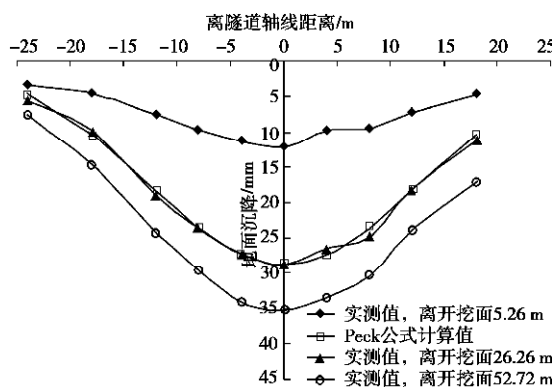


图 3 横向地面沉降曲线

Fig. 3 Transverse surface settlements induced by shield

从西线盾构工作井开始沿线一共布置了 15 组地面沉降监测断面，其中 1~6 断面因为处于加固区，数据失真且部分测点被破坏。11 断面地面沉降曲线呈 W 形，因此不采用。其他 8 组断面数据正常，其中 13，14 和 15 断面设在钱塘江大堤上，采用 Peck 公式对实测数据进行拟合，具体分析结果见图 2，3 和表 2。

图 2，3 分别为第 15 断面的纵向和横向地面沉降曲线。如图 2 所示，随着开挖面通过前后，一直到第 5 天（开挖面通过 26.26 m），由于土体损失，地面迅速沉降；从第 6 天开始，土体开始固结沉降，沉降速率略微变小；开挖面通过监测断面后 16 d，沉降开始稳定，47 d 后又开始沉降。如图 3 所示，Peck 公式计算值与实测值非常吻合。

Fang 等^[15]认为土体在盾尾通过后约 2 d 开始固结，即取盾尾通过后约 2 d 时的实测地面沉降量作为

施工阶段沉降值。本例中由于盾尾通过后几天施工速度较慢，根据图 2 地面沉降的变化规律，文中取切口距离测试断面 26.26 m 时（即盾尾通过后第 3 天）的实测地面沉降来计算土体损失率。

表 2 庆春路过江盾构隧道地面沉降参数

Table 2 Parameters for surface settlement troughs induced by Qingchun road sub-river shield tunnel

断面	穿越土层	h /m	S_{\max} /mm	i /m	h /%	k
7	粉砂夹粉土、砂质粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土	21.01	12.90	8.0	0.24	0.38
8	粉砂夹粉土、砂质粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土	21.26	13.13	6.5	0.20	0.31
9	粉砂夹粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土	21.26	21.44	5.9	0.30	0.28
10	粉砂夹粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土	21.76	23.58	6.9	0.38	0.32
12	淤泥质粉质黏土、粉质黏土	23.11	27.24	8.6	0.55	0.37
13	淤泥质粉质黏土、粉质黏土	30.34	22.78	8.8	0.47	0.29
14	淤泥质粉质黏土、粉质黏土	31.73	29.0	12.1	0.83	0.38
15	淤泥质粉质黏土、粉质黏土	31.24	28.72	12.6	0.85	0.40

如表 2 所示， h 的范围为 0.20%~0.85%，平均值为 0.48%，表明泥水平衡盾构施工产生的 h 较小。分析还表明，7，8 断面土质较好，9，10 断面其次，12~15 断面土质较差， h 则基本呈增大趋势，表明土质条件会对 h 产生影响，相同条件下，土质越好， h 越小。 k 的范围为 0.28~0.40，平均值为 0.34，要小于上海的 0.50^[7]，表明该处土质条件较好。

2.2 国内其他地区实测数据的收集和整理

沈培良等^[16]对上海地铁明珠线浦东南路站—南浦大桥站区间盾构隧道推进引起的 10 组地面沉降实测数据进行统计分析，盾构穿越土层为黏质粉土、淤泥质黏土、粉质黏土、砂质黏土、粉砂，隧道外径 6.2 m，得到沉降槽宽度系数 k 的取值范围为 0.15~0.35，土体损失率 h 的取值范围为 0.35%~0.70%，其中 3 组 <0.5%，7 组 ≥0.5%。但是仅 1480 环有隧道埋深数据， $h=22$ m，对应 $h=0.6\%$ 。

郭军等^[17]对北京某地铁线路 10 组地面沉降实测数据进行统计分析，采用土压平衡盾构，隧道平均覆土厚度约为 15 m，开挖直径 6 m，地层从上往下依次为：杂填土层、黏质粉土素填土层、黏质粉土砂质粉

土层、粉细砂层、圆砾层、中粗砂层、卵石层等。笔者反分析得到土体损失率 h 的取值范围为 0.31%~1.26%，平均值为 0.79%，其中 3 组小于 0.5%，4 组为 0.5%~1.0%，3 组为 1.0%~1.5%。

梁睿^[18]分析了北京地铁 4 号线某标段区间隧道施工引起的地面沉降实测值，采用土压平衡盾构，隧道半径为 3 m，隧道最大覆土厚度为 16.4 m，最小覆土厚度 9.2 m，穿越土层为粉质黏土，笔者反分析得到土体损失率 h 为 0.65%。

韦娇芬等^[19]对广州地铁 2 号线某区间盾构隧道 4 组地面沉降实测数据进行统计分析，采用土压平衡盾构，盾构机刀盘直径 6.28 m，隧道埋深为 8~14 m，穿越土层为较密实、坚硬、含少量砾石的岩石全分化

带，笔者反分析得到 4 组土体损失率 h 分别为 0.68%，0.73%，1.03%，1.62%。

马可栓^[20]分析了武汉长江隧道武昌段泥水平衡盾构施工引起的 8 组实测地面沉降数据，盾构开挖直径 11.38 m，主要穿越粉质黏土和粉细砂，隧道轴线埋深 h 分别为 12.59，17.43，18.36，22.9，35.6，37.6，44.0，46.5 m，对应的土体损失率 h 分别为 1.14%，1.07%，0.45%，1.43%，0.72%，0.46%，0.39%，0.29%。

除以上工程外，本文还收集了国内其他 14 个工程，反分析得到 30 个土体损失率实测数据，见表 3。加上前面的数据，总共得到 71 个实测数据，其中 47 个数据有隧道轴线埋深。

表 3 盾构法隧道施工引起地面沉降的高斯曲线拟合
Table 3 Fitting Gaussian equation parameters for surface settlement troughs from shield tunnels

序号	名称	隧道穿越土层	文献	开挖半径/m	隧道轴线埋深 h /m	土体损失率 /%
1	上海隧道 2 号线	淤泥质黏土	Lee ^[21]	3.17	15.00	0.68
					15.00	0.95
					6.09	2.02
2	上海隧道 2 号线 (龙东路—中央公园)	淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土	易宏伟 ^[22]	3.22	8.37	1.97
					9.78	1.52
					10.37	1.57
3	上海黄浦江行人隧道	砂质粉土、淤泥质粉质砂土、淤泥质黏土	张云 ^[23]	3.74	15.88	1.21
4	南京地铁 1 号线隧道 (玄一新)	淤泥质黏土、粉质黏土、粉细砂	张书丰 ^[24]	3.17	12.00	0.40
					13.30	0.72
					14.50	0.53
					13.80	0.41
					14.50	0.86
					14.50	0.93
					14.20	0.70
5	南京地铁 1 号线隧道(玄一许一南)	粉质黏土、粉细砂	李曙光 ^[25]	3.17	14.00	0.97
					13.00	1.02
6	天津地铁隧道	粉土、粉质黏土	李园 ^[26]	3.20	11.85	1.56
7	北京地铁 10 号线 (三—亮)	粉质黏土	初达夫 ^[27]	3.07	17.20	1.16
					19.70	0.66
					18.60	0.72
8	北京地铁 10 号线 11 标段	粉质黏土、粉土	衡朝阳 ^[28]	3.07	17.34	1.61
			刘纪峰 ^[29]		17.34	1.21
9	北京地铁 10 号线 (北—芍)	粉质黏土、粉土	张飞进 ^[30]	3.07	15.15	1.13
					14.41	1.71
10	北京凉水河南岸污水干线(三—分)	无水砂卵石层	郭玉海 ^[31]	1.67	8.42	0.55
11	广州地铁 3 号线 (客—大)	强、中、微分化粉砂岩、残积土、全风化带	徐俊杰 ^[32]	3.00	14.10	2.45
12	广州地铁 2 号线	黏性土和强风化岩	王占生 ^[33]	3.00	26.00	0.63
13	广州地铁 1 号线	全分化、强分化、中分化地层	卓普周 ^[34]	3.07	13.50	1.58
14	深圳地铁 1 期(福—金)	砂土	季亚平 ^[35]	3.14	18.14	3.01

2.3 实测数据统计分析

(1) 土体损失率分布规律

分析表明,土体损失率在 0%~3%的区间分布比较均匀、连贯,没有出现大量数据相等现象,表明本文收集的数据比较有代表性。

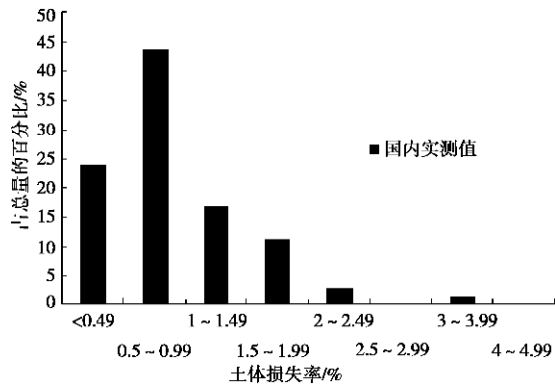


图 4 土体损失率区间分布情况
Fig. 4 Distribution of ground loss ratio

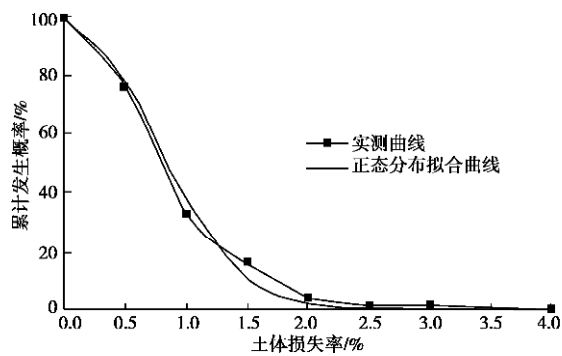


图 5 土体损失率累计发生概率
Fig. 5 Accumulative frequency curves of ground loss ratios

经过统计,在 71 个数据中,土体损失率最小为 0.20%,最大为 3.01%。土体损失率<0.49%的为 17 个,0.5%~0.99%的为 31 个,1.0%~1.49%的为 12 个,1.5%~1.99%为 8 个,2.0%~2.49%的为 2 个,2.5%~2.99%的为 0 个,3.0%~3.99%的为 1 个,4%以上为 0 个。

如图 4 所示,土体损失率主要集中在 0.20%~2.0%之间,占总数的 95.77%,其中 0.5%~1.0%数量最多,占总数的 43.66%。黏性土地区土体损失率均在 0.20%~2.02%,与 Attewell^[13]、O'Reilly 等^[10]、Mair^[14]的结论比较吻合,表明随着施工技术的进步,土体损失率总体上在下降。地下水位以上的无黏性土中的隧道开挖引起的土体损失率明显偏小,如北京凉水河南岸污水干线(三一分), h 仅为 0.55%。土体损失率较大的两个实例 $h=2.45%$ 和 3.01%,由于资料太少,原因不清楚。

土体损失率累计发生概率见图 5,实测曲线与正

态分布拟合曲线吻合较好。

表 4 中国部分地区土体损失率的实测范围

Table 4 Range of observed ground loss ratios in China

地区	基本地层特征	个数	土体损失率范围/%	平均值/%
北京	粉质黏土、粉土、砂土	19	0.31~1.71	0.91
上海	饱和软黏土、粉砂	17	0.35~2.02	0.89
南京	粉质黏土、粉细砂	10	0.40~1.02	0.74
武汉	粉质黏土、粉细砂	8	0.29~1.43	0.74
杭州	粉砂夹粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土	8	0.20~0.85	0.48
广州	黏性土、残积土、风化岩	7	0.63~2.45	1.25
天津	粉土、粉质黏土	1	1.56	1.56
深圳	黏性土、砂土、风化岩	1	3.01	3.01

根据上述实测资料,表 4 归纳提出了中国部分地区土体损失率范围及平均值,供相关人员取值参考。北京和上海地区有较长期的地铁施工经验,也积累了较多的沉降监测资料,结果比较稳定。武汉、杭州、天津和深圳的工程样本数太少,难以正确评价,需要进一步积累资料。

(2) 土体损失率的影响因素分析

图 6 是由 47 个数据得到的 h 与 h 关系曲线。如图所示,数据的离散性较大,表明隧道轴线埋深 h 对土体损失率 h 的单因素影响较弱,其他因素(例如土质条件、施工水平等)对土体损失率的影响较大。由表 2 的分析结果可知,土质条件对 h 的影响要大于隧道轴线埋深的影响。

如图 6 所示,从总体上而言,随着 h 的增长, h 基本呈减少趋势,并且当 $h>25$ m 后该趋势比较明显,两者关系近似可以采用幂函数拟合,拟合公式为 $h=6.574h^{-0.7348}$ 。分析原因:① h 越大,越容易形成土拱效应,减少应力释放,从而减少对周围土体的扰动;②一般而言, h 越大,土质条件越好,开挖时也会减少对周围土体的扰动。

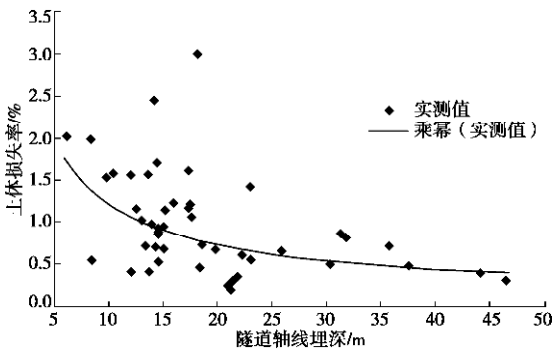


图 6 h 值与 h 值之间的关系

Fig. 6 Relationship between values of h and h

由表 3 可知,大多数隧道开挖半径 R 在 3 m 左右,

但 h 变化很大,表明 R 对 h 的影响较弱。表1中提出当隧道直径很小时(<1.5 m)应该适当增大,该结论还需作进一步验证。

另外,同一个工程相同条件下,土体损失率也会产生较大变化,如北京地铁10号线(三一亮)^[27],这主要是与现场施工控制水平有关,如超挖、开挖面支护力大小不一、盾构推进方向的改变、注浆量和注浆压力大小不一等均会对土体损失率产生影响。综上所述,笔者认为土体损失率主要与土质条件、施工水平和隧道轴线埋深这3个因素有关。

2.4 关于土体“不排水”与“排水”阶段如何界定探讨

根据盾构法隧道施工引起地面沉降的发展规律,考虑到盾构施工速度较快、黏性土渗透性较差,在盾构机开挖通过前后,可假定土体不排水,由于土体损失地面产生瞬时沉降;随着时间增长,土体开始排水,超孔隙水压力消散,土体压缩,地面产生固结沉降。

目前 h 的实测值大都是通过监测得到的地面沉降值采用Peck公式反算得到,而Peck公式假定土体不排水,因此要求 S_{\max} 为土体排水开始前的地面最大沉降值。但是 S_{\max} 是随时间变化的,资料给出的 S_{\max} 大都是某个特定时间的地面最大沉降量,往往包含了由于土体排水固结引起的地面沉降^[36]。且资料大都没有给出 S_{\max} 的测试时间,有可能是离盾尾脱出不久,也有可能是施工结束以后。这样就导致土体损失率 h 离散性较大。

以杭州市庆春路过江隧道第15监测断面为例,如以沉降初步稳定(开挖面通过监测断面后16 d)的数据来计算土体损失率,则 $S_{\max}=47.16$ mm, $h=1.40\%$,要远大于原土体损失率0.85%。可见,不同的选取办法会造成土体损失率离散性较大。

因此,如何准确界定土体“不排水”与“排水”阶段至关重要。但是要将土体损失与排水固结引起的土体压缩严格区分开来(尤其在无黏性土中)是非常困难的,目前关于这方面的研究也非常缺乏。

笔者通过对杭州市庆春路过江隧道地面沉降数据的分析表明,Fang^[15]的方法比较合理,即可以取盾尾通过后约2~3 d时的实测地面沉降量作为施工阶段沉降值。也可以根据地面沉降随时间变化规律进行分析,取沉降速率转折点。

3 结 论

(1)对杭州市庆春路过江隧道江南段8组实测地面沉降数据的分析表明, h 在0.20%~0.85%,平均值为0.48%,表明土体损失率较小。 k 的范围为0.28~

0.40,平均值为0.34。

(2)71个实测数据的统计分析结果表明:土体损失率分布在0.20%~3.01%,其中95.77%的实测数据分布在0.20%~2.0%,43.66%的实测数据集中在0.5%~1.0%;黏性土地区土体损失率在0.20%~2.0%。

(3)土体损失率主要与施工水平、土质条件和隧道轴线埋深有关,隧道开挖半径对 h 的影响较弱,土质条件对 h 的影响要大于隧道轴线埋深。随着隧道轴线埋深增长,土体损失率基本呈减少趋势,当埋深大于25 m后该趋势比较明显,两者关系可近似采用幂函数拟合。

(4)采用Peck公式反算 h 时,离散性较大的原因之一是难以准确界定土体“不排水”与“排水”阶段。建议取盾尾通过后约2~3 d时或者取地面沉降沉降速率转折点的实测地面沉降量作为施工阶段地面沉降值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] ATTEWELL P B, WOODMAN J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil[J]. Ground Engineering, 1982, 15(8): 13 - 20, 36.
- [3] 姜忻良, 赵志民, 李 圆. 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 and subsurface settlement trough profiles due to tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1542 - 1544. (in Chinese))
- [4] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846 - 856.
- [5] 赵志民. 隧道施工引起土体位移与应力的镜像理论研究以及回归方法的应用[D]. 天津: 天津大学, 2004. (ZHAO Zhi-ming. Study of image theory and application of regression method on tunnelling induced soil displacements and stresses[D]. Tianjing: Tianjing University, 2004. (in Chinese))
- [6] 魏 纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 418 - 424. (WEI Gang. Prediction of ground deformation induced by shield tunneling construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2009, **28**(2): 418 - 424. (in Chinese))
- [7] 韩 煊. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006. (HAN Xuan. The analysis and prediction of tunneling-induced building deformation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [8] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. (LIU Jian-hang, HOU Xue-xuan. Shield tunnelling method[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991. (in Chinese))
- [9] 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 Zheng-xin. The environmental impact of shield tunnel construction[C]// Strait Rail Construction and Environmental Engineering Advanced Technology Forum. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] ATTEWELL P B. Ground movements caused by tunnelling in soil[C]// Conference on Large Ground Movements and Structures. London, 1978: 812 - 948.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 沈培良, 张海波, 殷宗泽. 上海地区地铁隧道盾构施工地面沉降分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, **31**(5): 556 - 559. (SHEN Pei-liang, ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze. Ground settlement due to shield construction in Shanghai metro tunnel project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, **31**(5): 556 - 559. (in Chinese))
- [17] 郭 军, 陶连金, 边 金. 盾构法施工地铁区间隧道的地表沉降[J]. 北京工业大学学报, 2005, **31**(6): 589 - 592. (GUO Jun, TAO Lian-jin, BIAN Jin. Ground surface settlement analysis during the subway tunnel excavation by shielding[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, **31**(6): 589 - 592. (in Chinese))
- [18] 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 Rui. Statistical analysis and prediction for ground surface settlement due to tunnel construction in Beijing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [19] 韦娇芬, 黄金林. 地铁隧道盾构施工引起的地面沉降规律分析[J]. 广东水利水电, 2008(2): 23 - 25. (WEI Jiao-fen, HUANG Jin-lin. Analysis on surface settlement due to shield tunnel construction[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2008(2): 23 - 25. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] LEE K M, JI H W, SHEN C K, et al. Ground response to the construction of Shanghai Metro tunnel-line 2[J]. Soils and Foundations, 1999, **39**(3): 113 - 134.
- [22] 易宏伟. 盾构施工对土体扰动与地层移动影响的研究[D]. 上海: 同济大学, 1999. (YI Hong-wei. Research on the disturbance of soil and ground movements induced by shield tunnelling[D]. Shanghai: Tongji University, 1999. (in Chinese))
- [23] 张 云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(3): 388 - 392. (ZHANG Yun, YING Zong-ze, XU Yong-fu. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 388 - 392. (in Chinese))
- [24] 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 Shu-feng. Study on ground settlement monitoring due to shield construction in metro tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [25] 李曙光. EPB 盾构法隧道施工引起的地表沉降分析与数值模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2006. (LI Shu-guang. The ground settlement analysis and numerical simulation by EPB shield tunnelling[D]. Changsha: Central South University, 2006. (in Chinese))
- [26] 李 园. 盾构施工地层变形的三维数值模拟及试验研究

- [D]. 天津: 天津大学, 2004. (LI Yuan. The 3D FEM simulation and experimental research on ground deformation by shield driven[D]. Tianjing: Tianjing University, 2004. (in Chinese))
- [27] 初达夫. 北京地铁十号线三元桥—亮马河站区间盾构旁穿建筑物地表沉降规律研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2007. (CHU Da-fu. Study on land subsidence caused by section of sanyuanqiao—liangmahe station on Beijing metro line 10 running through existent buildings[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007. (in Chinese))
- [28] 衡朝阳, 滕延京, 陈希泉. 地铁盾构隧道周边建筑物地基基础变形控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(8): 1336 - 1340. (HENG Chao-yang, TENG Yan-jing, CHEN Xi-quan. Research of allowable deformation value of the building foundation soils above metro shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(8): 1336 - 1340. (in Chinese))
- [29] 刘纪峰, 刘 波, 陶龙光. 基于弹塑性分析的浅埋盾构隧道地表沉降控制[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(1): 28 - 33. (LIU Ji-feng, LIU Bo, TAO Long-guang. Prediction and control of shallow shield tunneling-induced ground settlement with elasto - plasticity analysis[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, 25(1): 28 - 33. (in Chinese))
- [30] 张飞进. 盾构施工穿越既有线地表沉降规律与施工参数优化[D]. 北京: 北京工业大学, 2006. (ZHANG Fei-jing. Shield-driven construction cross existed line ground settlement regularity & parameter optimization[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [31] 郭玉海. 盾构隧道穿越铁路沉降控制研究[J]. 市政技术, 2004, 22(增刊): 247 - 251. (GUO Yu-hai. Study on settlement control of shield tunnel underrun the railroads[J]. Municipal Engineering Technology, 2004, 22(S): 247 - 251. (in Chinese))
- [32] 徐俊杰. 土压平衡盾构施工引起的地表沉降分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2004. (XU Jun-jie. Analysis of ground surface settlement due to the tunnel construction with EPB Shield[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [33] 王占生, 王梦恕, 张 弥. 盾构隧道施工引起地表下土体变位的分析评估[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1699 - 1704. (WANG Zhan-sheng, WANG Meng-shu, ZHANG Mi. Methods for estimating subsurface ground movements induced by shield tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1699 - 1704. (in Chinese))
- [34] 卓普周. 土压平衡式盾构施工地层沉降控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2000. (ZHUO Pu-zhou. The ground settlement control by EPB shield tunnel construction[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [35] 季亚平. 考虑施工过程的盾构隧道地层位移与土压力研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (JI Ya-ping. Study of stratum displacement and earth pressure considering construction program of shield tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [36] 缪林昌, 王 非, 吕伟华. 城市地铁隧道施工引起的地面沉降[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(2): 293 - 297. (MIAO Lin-chang, WANG Fei, LU Wei-hua. Ground surface settlment due to urban tunnel construction[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(2): 293 - 297. (in Chinese))