

上海地区地铁隧道盾构施工地面沉降分析

沈培良¹ 张海波² 殷宗泽²

(1. 上海隧道工程股份有限公司 , 上海 200032 ; 2. 河海大学岩土工程研究所 , 江苏 南京 210098)

摘要 根据上海地铁明珠线浦东南路站—南浦大桥站区间隧道盾构推进引起的地面沉降的实际观测数据 , 分析常用的地面沉降槽计算经验公式对于上海地区软土中修建的地铁盾构隧道的适应性 , 提出了地铁盾构隧道横断面上地表沉降预测公式参数确定方法以及纵断面上地表沉降分布修正计算公式及其参数确定方法 . 应用结果表明 , 该计算公式能较好地预测盾构施工引起的地面沉降分布 .

关键词 地铁 ; 盾构 ; 隧道 ; 沉降

中图分类号 : U452

文献标识码 : A

文章编号 : 1000-198X(2003)05-0556-04

盾构法隧道由于具有不影响地面交通、对周围建(构)筑物影响较小、适应软弱地质条件、施工速度快等优点 , 在地铁工程中得到广泛应用 . 盾构推进不可避免地会对周围土层产生扰动 , 从而引起地面沉降(或隆起) . 究竟会发生多大的沉降或隆起 , 会不会影响相邻建筑物的安全 , 是地铁隧道盾构施工中最关键的问题 .

许多学者^[1~3]对隧道施工引起的地面沉降进行了深入研究 , 并提出了一些预测地面沉降沿纵向(隧道推进方向)和横向(垂直于推进方向)分布的经验计算公式 . 在计算隧道施工引起的地面沉降时 , 必须根据工程的具体情况 , 选择合适的经验公式及计算参数才能取得满意的结果 . 上述经验公式是否能反映上海地区特殊的地质条件及目前的盾构隧道施工工艺 , 如何合理确定公式的参数 , 则需要用上海地铁施工中的实测资料进行深入研究才能做出正确回答 . 上海地区土层水平分布比较均匀 , 某一局部地区的工程情况可以较好地代表整个上海地区 , 这为将一个局部的分析结果推广到全上海地区提供了有利条件 . 本文从这点出发 , 通过对一局部地区盾构隧道施工的实测沉降的分析研究 , 寻求适合上海地区盾构隧道工程应用的合理沉降计算公式及参数确定方法 .

1 常用沉降计算方法

1.1 横向地面沉降分布计算公式

Peck^[1]对大量隧道施工引起的地面沉降实测数据进行了分析 , 并认为隧道开挖后引起的地面沉降是在不排水条件下发生的 , 沉降槽体积等于地层损失的体积 . 地面沉降的横向分布可用正态分布曲线来描述 :

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

$$S_{\max} = V_s / (i \sqrt{2\pi}) \quad (2)$$

式中 : $S(x)$ ——距离隧道中心线 x 处的地表沉降 , mm ; $S_{\max}$ ——隧道中心线处最大地面沉降 , mm ; x ——距隧道中心线的距离 , mm ; i ——沉降槽半宽度 , mm ; V_s ——盾构隧道单位长度地层损失 , mm^3/m .

Peck 公式有 V_s (地层损失) 和 i (沉降槽半宽度) 2 个参数 . 合理确定这 2 个参数对于正确预测地面沉降的量值和分布情况起着至关重要的作用 . 地层损失 V_s 通常表示为

$$V_s = V_l \pi r_0^2 \quad (3)$$

式中 : V_l ——地层体积损失率 , 即单位长度地层损失占单位长度盾构体积的百分比 ; r_0 ——盾构机外径 , mm . V_l 的取值与地质条件和施工条件密切相关 , 现有文献资料中对于粘性土中的土压平衡盾构隧道 , V_l 的取值范

围一般为 0.5% ~ 2.0% .

O'Reilly 等^[2]提出, i 的取值与隧道轴线埋深 Z 近似呈线性关系, 即 $i = kZ$ (Z 为隧道轴线的埋深, k 为沉降槽宽度系数). O'Reilly 和 New 通过对一些隧道的实测数据的整理, 建议粘性土 k 取 0.4 ~ 0.6, 砂土 k 取 0.25 ~ 0.45.

1.2 纵向地面沉降分布计算公式

对于地面沉降沿隧道纵向的分布, 常用的计算公式为 Attewell 等^[3]提出的累积概率曲线公式. 其表达式为

$$S(y) = S_{\max} \left[G \left(\frac{y - y_i}{i} \right) - G \left(\frac{y - y_f}{i} \right) \right]$$
$$G(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\alpha} \exp(-\beta^2/2) d\beta$$

(4)

式中: $S(y)$ ——沿隧道掘进方向坐标为 y 处地表点的沉降, mm; y ——地表面点沿隧道掘进方向的坐标, mm; y_i ——隧道开挖面推进起始点, mm; y_f ——当前隧道开挖面的位置, mm.

$G(\alpha)$ 可通过标准概率表得到, $G(0) = 0.5$, $G(\infty) = 1.0$. 由式(4)可知, 隧道开挖面上方地表处的地面沉降等于开挖面后方最大地面沉降的 0.5 倍.

2 实测数据分析

2.1 工程概况

浦东南路站—南浦大桥站区间隧道工程是上海市轨道交通明珠线二期工程的一个重要组成部分, 是上海市的重大工程项目. 工程起始于浦东南路站西端头井, 终止于南浦大桥站东端头井, 上行线全长 1 997.48 m, 下行线全长 1 981.96 m, 隧道外径 6.2 m、内径 5.5 m, 盾构外径 6.34 m, 隧道衬砌环宽 1 m.

根据地质资料, 盾构主要穿越的土层为灰色粘质粉土层、灰色淤泥质粘土层、灰色粘土层、灰色粉质粘土层、暗绿-草黄色粉质粘土层、草黄色砂质粘土层、灰黄色粉砂层. 隧道穿越地基土层的基本物理力学指标见表 1. 盾构推进速度为 2.0 cm/min, 千斤顶总推力为 14 MN; 盾尾注浆压力为 0.3 MPa, 浆液为缓凝浆液, 浆液 1 d 的强度大于或等于周围加固土体的强度, 盾尾压浆量为 2.0 m³/m. 部分横断面和纵断面的沉降观测结果如图 1、图 2 所示.

表 1 地基土层基本物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层名称	天然含水量/ %	密度 (kg·m ⁻³)	孔隙比 e_0	液性指数 L	压缩系数 α /MPa ⁻¹	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)
粘质粉土	36.2	1 840	1.415	0.93	0.19	6.0	30.0
淤泥质粘土	52.5	1 690	1.468	1.28	0.79	14.0	9.0
粉质粘土	36.7	1 770	1.060	1.27	0.50	14.0	20.5
砂质粘土	28.0	1 920	0.770		0.10	3.0	35.0
粉砂	27.2	1 970	0.670		0.10	3.0	36.0

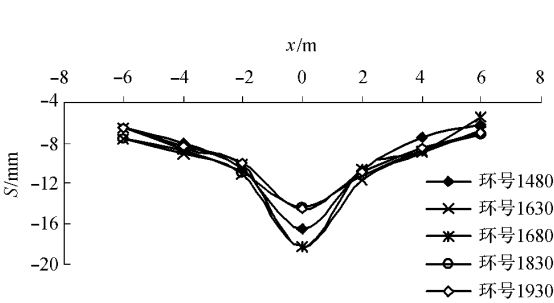


图 1 部分横断面实测地面沉降
Fig.1 Measured ground settlement
along transversal profile

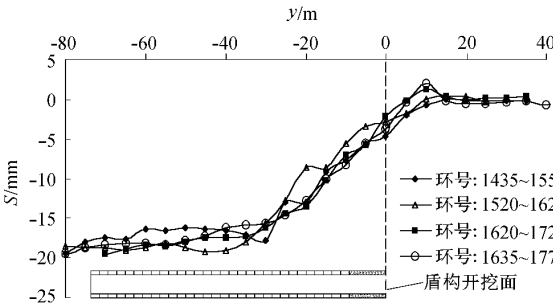


图 2 沿隧道纵向各段的实测地面沉降
Fig.2 Measured ground settlement along
longitudinal profile of the tunnel

2.2 经验公式的验证

为了验证上述经验公式的适用性, 分别用上述经验公式计算第 1480 环管片处横断面稳定后的沉降槽和第 1685 ~ 1805 环隧道轴线上方地表在盾构推进到第 1775 环时的沉降.

第 1480 环管片处隧道中心线埋深为 22 m,上覆土层厚 19 m,依次为杂填土(0~2 m)、粉质粘土(2~14 m)、淤泥质粘土(14~19 m)。假定体积损失率 V_l 为 1.0%,则单位长度地层损失 $V_s = V_l \pi r_0^2 = 1.0\% \times 3.14 \times 3.17^2 = 0.3157 \text{ m}^3/\text{m}$ 。根据 O'Reilly 和 New 提出的确定 i 值的方法,由于上覆土层主要是粘性土,取沉降槽宽度系数 $k = 0.5$,则 $i = kZ = 0.5 \times 22 = 11.0 \text{ m}$, $S_{\max} = V_s / (i \sqrt{2\pi}) = 11.5 \text{ mm}$ 。计算结果与实测数据的比较如图 3 所示。从图中可以看出,计算结果与实测沉降不论是在量值上还是在沉降槽分布上,都存在较大差异。图 4 显示了用累积概率曲线预测隧道纵向第 1685~1805 环在盾构推进到第 1775 环时的地面沉降。由此可以看出,虽然累积概率曲线与实测沉降在分布形式上比较接近,但盾构开挖面上方的实测地面沉降并不等于 $0.5S_{\max}$,而只在 $0.2S_{\max}$ 左右。这说明,用累积概率曲线来预测盾构隧道纵向地面沉降分布将带来较大误差。

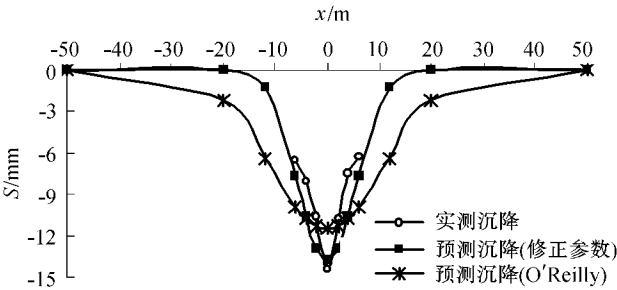


图 3 横断面计算与实测地面沉降比较

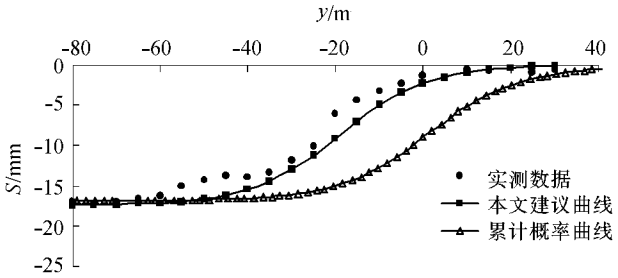


图 4 纵向计算与实测地面沉降比较

Fig.3 Comparison of measured and calculated ground surface settlements along transversal profile

Fig.4 Comparison of measured and calculated ground settlements along longitudinal profile

3 公式改进

上面的验证结果说明,将这些公式直接应用于上海地区的地铁盾构隧道将会产生较大误差,因此需要通过实测资料对公式进行改进。

3.1 横向地面沉降分布计算公式

许多学者通过对实测资料的分析,发现运用 Peck 公式描述地面沉降在隧道横断面上的分布是适宜的。上面之所以与实测数据存在很大差异,是因为公式参数的取值不合理,即不能反映上海地区的实际情况。

为了更合理地确定适合上海地区盾构隧道应用的 Peck 公式参数,笔者对横断面的实测沉降曲线进行拟合,由拟合曲线得到沉降槽半宽度 i ,并根据(2)(3)两式反算出不同观测断面上的体积损失率 V_l 。不同观测断面沉降槽半宽度 i 及体积损失率 V_l 的统计情况如图 5 所示。从图中可以看出,沉降槽宽度系数 k 的取值范围为 0.15~0.35,体积损失率 V_l 的取值范围为 0.35%~0.70%。

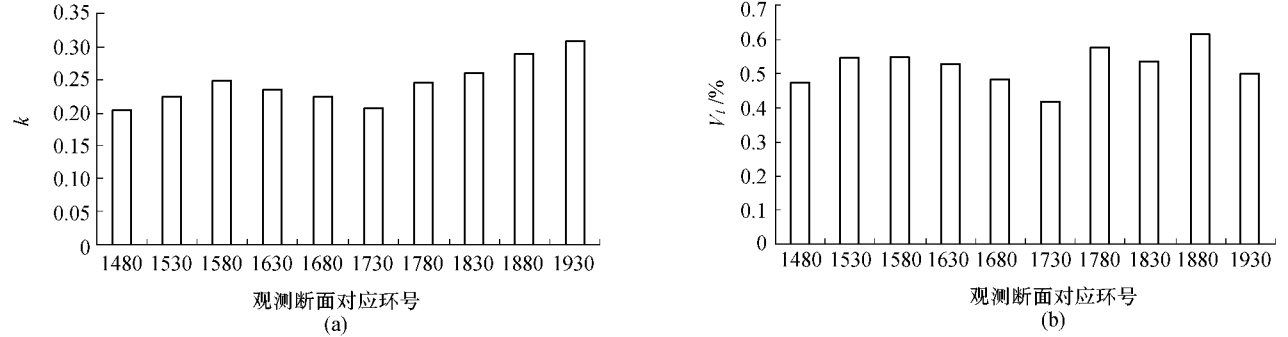


图 5 不同观测断面处 k 及 V_l 的统计

Fig.5 Statistical values of the width coefficient of settlement trough and ratio of volumetric losses for different sections

应用上面得到的 Peck 公式参数取值范围再次计算隧道在第 1480 环管片横断面上的沉降,沉降槽宽度系数 k 取 0.25,体积损失率 V_l 取 0.60%。计算结果与实测数据的比较如图 3 所示。从图中可以看出,应用修正后的参数可以较好地预测横断面地面沉降分布。

3.2 纵向地面沉降分布计算公式

由于累积概率曲线存在难以克服的缺点,即开挖面上方地表处的沉降值总等于开挖面后方地面最大沉降的 50%,而盾构法隧道开挖面上方地表处的沉降值一般只有开挖面后方最大地面沉降的 20% 左右,这种差异难以通过调整参数的方法来减少,因而有必要寻找一种更为合理的曲线形式来描述地面沉降沿隧道纵向的分布.通过对大量曲线形式的尝试,发现用下面的曲线来拟合盾构隧道纵向地面沉降是适宜的.

$$S(y) = S_{\max} \frac{\exp[n(y_c - y)]}{1 + \exp[n(y_c - y)]} \tag{5}$$

式中: y_c ——沉降值等于 $0.5 S_{\max}$ 的点离开挖面的距离, m, 可通过公式 $y_c = -\alpha D$ 近似确定(D 为盾构外径, m; α 取值在 2.5 ~ 3.5 之间); n ——曲线形状参数,据对实测资料的统计, n 取值在 0.05 ~ 0.15 之间.

用此曲线再次计算隧道第 1685 ~ 1805 环轴线上方地面在盾构推进到第 1775 环时的沉降,按上述确定范围, n 取 0.10, α 取 3.0.计算结果与实测沉降比较情况如图 4 所示.可以看出,用本文建议的曲线可以较好地预测盾构隧道纵向地面沉降分布.

综上所述,对于上海地区来讲,隧道盾构施工引起的地面沉降,横断面上可按 Peck 公式计算,但参数 V_t 需由 0.5% ~ 2.0% 改为 0.35% ~ 0.70%,参数 k 需由 0.4 ~ 0.6 改为 0.15 ~ 0.35,而纵断面上宜改用式(5).

4 结 论

盾构隧道施工引起的地面沉降与隧道所处的地质条件盾构隧道施工工艺密切相关,运用已有地面沉降计算经验公式时,参数的取值需要通过对相似地质条件下相似工程的实测资料的分析研究来获得.本文通过对地铁盾构隧道实测地面沉降的分析,提出了 Peck 公式参数新的取值范围,以及一种描述盾构隧道纵向地面沉降分布的新的曲线形式及其参数取值范围.结果表明,上述修改建议对于预测上海地区盾构隧道引起的地面沉降槽是适宜的.

参考文献:

[1] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[A]. In : Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Mexico City :Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos ,A. C. ,1969.225—290.
[2] O'REILLY M P,NEW B M. Settlement above tunnels in the United Kingdom—their magnitude and prediction[A]. In :JONES M J ,eds. Proc Tunneling '82 Symposium[C]. London :Institution of Mining and Metallurgy ,1982.173—181.
[3] 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.

Ground settlement due to shield construction in Shanghai metro tunnel project

SHEN Pei-liang¹ , ZHANG Hai-bo² , YIN Zong-ze²

(1. Shanghai Tunnel Engineering Co. Ltd. , Shanghai 200032 , China ;

2. Geotechnical Research Institute of Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Based on the measured data of ground settlement due to the shield driving in the construction of the Pearl line of the Shanghai metro from the South Pudong station to the Nanpu Bridge station , the applicability of the empirical formula for settlement trough calculation to the shield construction of the Shanghai metro in soft clay is analyzed. A method is proposed for determination of parameters for the predicting formula of ground settlement along the transversal section of shield-driven tunnels. Furthermore , a modified formula is presented for calculation of the ground settlement distribution over the longitudinal section , and the method for its parameter determination is also given. Practice shows that the formula can well predict the ground settlement distribution induced by shield construction.

Key words :metro ; shield ; tunnel ; settlement