

隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算

姜忻良, 赵志民, 李 园

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 假定由于隧道开挖在地表以下土层所形成的沉降槽的体积等于地层损失以及各土层沉降槽曲线仍可用正态分布函数表示。在此假定下, 首次提出可以通过对隧道中心线以上土体的沉降值的分析, 研究不同深度土层沉降槽曲线宽度系数, 并且通过回归分析, 提出用于计算不同深度土层沉降槽曲线宽度系数的公式, 为计算隧道开挖引起的地表以下土体任一点的竖向沉降提供了一种有效方法, 通过工程实例的计算证明了该方法的适用性。

关 键 词: 沉降槽; 地层损失; 宽度系数; 正态分布

中图分类号: TU433

文献标识码: A

Analysis and calculation of surface and subsurface settlement trough profiles due to tunneling

JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min, LI Yuan

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper assumes that the volume of the subsurface settlement troughs due to tunneling is equal to the ground loss and the shape of the troughs can still be represented by a Gaussian distribution. It is firstly presented by this paper that researchers can study the width parameters of the settlement troughs with different depths through analyzing the settlements above the center line of the tunnel, and then a regression equation used to calculate the width parameters of the settlement troughs with different depths can be derived; as a result, the settlement of every point above the tunnel due to tunneling can be attained. The applicability of this method has been demonstrated by the calculation of actual projects.

Key words: settlement trough; ground loss; width parameter; Gaussian distribution

1 引 言

为了解决城市日益紧张的交通问题, 许多大城市已经或即将修建城市地下铁道, 而在地下开挖隧道, 必然会引起隧道周围土体的变形, 过大的土体变形, 尤其是竖向变形, 会对隧道周围已有建筑物基础和地下市政管网造成危害, 所以, 有必要对隧道开挖引起的土体沉降进行较为准确地分析与计算。目前大多研究集中于地表沉降, 对地表以下土层沉降研究甚少, 本文将对地表以下土层的竖向沉降进行初步探讨与研究。

2 地表沉降槽断面

隧道施工时沿与隧道纵向轴线垂直的方向上会出现沉降槽。1969 年在当时大量隧道开挖施工引起

的地表沉降实测资料的基础上, Peck 系统地提出了地层损失的概念和估算隧道开挖地表下沉的实用方法^[1], 即 Peck 公式, 它已成为目前应用最为广泛地预计隧道施工地表沉降的方法。所谓地层损失, 是指隧道施工中实际开挖的土体的体积与竣工体积之差。Peck 认为, 在不排水情况下隧道开挖所形成的地表沉降槽的体积应等于地层损失。Peck 公式如下:

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中 $S(x)$ 为距离隧道中心线为 x 处的地表沉降值; $S_{\max}$ 为隧道中心线处地表最大沉降值; x 为距隧道中心线的水平距离; i 为地表沉降槽宽度系数, 即沉降槽曲线反弯点至隧道中心线的水平距离。

地表沉降横向分布近似为一正态分布曲线, 如图 1 所示。公式需要确定 $S_{\max}$ 和 i 两个参数。因为地表沉降槽的体积应等于地层损失 V_i 的体积, 地表沉降槽的体积可以通过对式 (1) 积分得到:

$$V_i = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) dx = i\sqrt{2\pi} S_{\max} \quad (2)$$

$$\text{所以} \quad S_{\max} = \frac{V_i}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{V_i}{2.5i} \quad (3)$$

对于地表沉降槽宽度系数 i , 国内外研究的较多, 一般的可以表示为^[3]

$$\frac{i}{D} = 0.575 \left(\frac{z_0}{D} \right)^{0.9} \quad (4)$$

即 $i = 0.575 z_0^{0.9} D^{0.1}$ 。式中, D 为隧道直径; z_0 为隧道中心至地表深度。

求得 i 后, 就可以由式 (3) 得到 $S_{\max}$, 然后通过式 (1) 得到地表任一点的竖向沉降值。

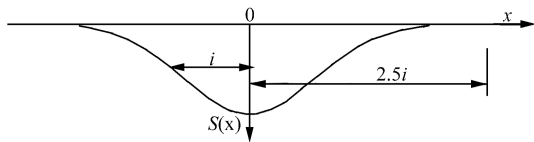


图 1 地表沉降横向分布曲线

Fig.1 The transverse distribution curve of the surface settlement profile

3 地表以下土层沉降槽断面

对于地表以下至隧道以上土层, 地层损失的体积假设依然成立^[2], 就是说地表以下任一土层的沉降槽的体积等于地层损失, 而且, 沉降槽仍为一正态分布曲线, 随着土层深度 z 的增大, 该土层距隧道顶部的垂直距离减小, 土层的沉降槽曲线宽度系数将会减小 (图 2), 于是, $S_{\max}$ 和 i 两个参数的取值会随深度变化而不同, 它们均可表示为深度 z 的函数, 式(1)和式 (3) 可改写为

$$S_z(x) = S_{\max}(z) \exp\left(-\frac{x^2}{2i(z)^2}\right) \quad (5)$$

$$S_{\max}(z) = \frac{V_i}{2.5i(z)} \quad (6)$$

若要分析地表以下土层沉降槽曲线, 首先需要了解沉降槽宽度系数 $i(z)$ 沿深度变化的规律, 这是分析地表以下土体沉降的关键。由于测量地表以下土层沉降槽曲线宽度系数 $i(z)$ 的试验较为繁琐, 所以实测数据很少, 而对于 $S_{\max}(z)$ 的测量较为简单, 其实测数据相对较多, 根据式 (6) 可知, $S_{\max}(z)$ 和

$i(z)$ 成反比, 所以可以通过 $S_{\max}(z)$ 的数值来研究 $i(z)$ 沿深度变化的规律。本文根据搜集的国外一些工程的 $S_{\max}(z)$ 数据来推导计算 $i(z)$ 的实用公式, 从而可以求得地表及以下土体中任一点的竖向沉降值。

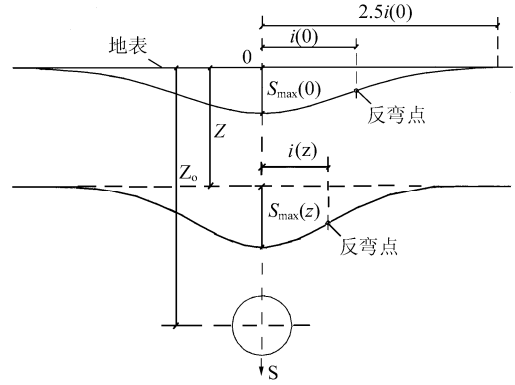


图 2 隧道以上土体沉降槽形状

Fig.2 Settlement profiles above the tunnel

根据 Heathrow 通信隧道、雷湾隧道、格林公园隧道及 Manuel Gonzalez 隧道的工程实测数据, 绘制出 $(1-z/z_0) - S_{\max}(z)/S_{\max}(0)$ 图, 如图 3 所示。

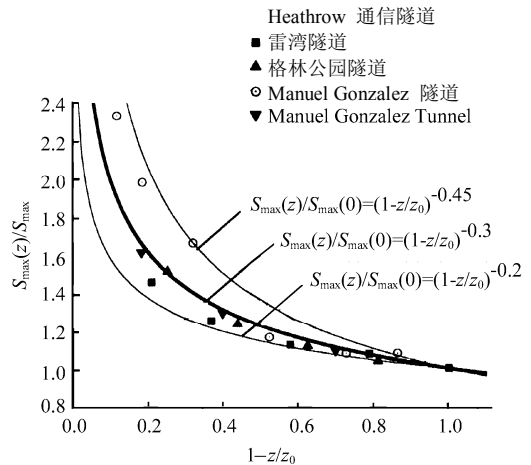


图 3 隧道中心线以上土体沉降值与深度关系图

Fig.3 Variation of $\frac{S_{\max}(z)}{S_{\max}(0)}$ with $1-z/z_0$

从图中可以发现, $S_{\max}(z)/S_{\max}(0)$ 与 $(1-z/z_0)$ 呈现为幂函数关系, 而且基本分布于曲线 $y = x^{-0.2}$ 和 $y = x^{-0.45}$ 间, 所以可以采用幂函数进行拟合。经过拟合计算, 本文最终采用 $y = x^{-0.3}$ 来描述 $\frac{S_{\max}(z)}{S_{\max}(0)}$ 与 $(1-z/z_0)$ 间的关系, 即

$$\frac{S_{\max}(z)}{S_{\max}(0)} = (1-z/z_0)^{-0.3} \quad (7)$$

从图中可以看出, 实测数据点基本都分布在其附近, 离散程度很好。如前所述, $S_{\max}(z)$ 和 $i(z)$ 成反比, 故可以得出:

$$i(z) = i(0)(1 - z/z_0)^{-0.3} \quad (8)$$

这样就得到了地表以下土层沉降槽宽度系数沿深度的变化规律。

以上讨论了地表及地表以下土层沉降槽宽度系数的计算方法, 求得 $i(z)$ 后, 隧道上方任一土层的沉降槽曲线就可以根据式 (5) 求得, 进而得到该土层任一点的竖向沉降。

4 地层损失

地层损失可通过参数孔隙厚度 g 来表示(图 4):

$$g = U_{3D}^* + \omega + 2\Delta + \delta \quad (9)$$

式中 U_{3D}^* 为因开挖面荷载释放使开挖面前方土体进入开挖面导致的超开挖孔隙厚度; ω 为施工条件及操作技术影响因素; Δ 为盾尾壳体的厚度; δ 为安装衬砌所需的孔隙厚度。

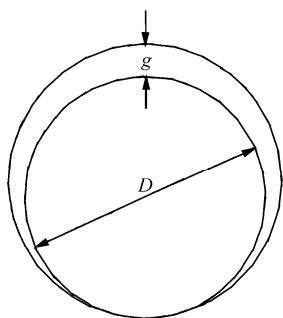


图 4 孔隙厚度示意图
Fig.4 Definition of gap

对于孔隙厚度 g 的 4 个组成的计算与确定, 目前, 较为全面的可见 Lee K. M. 等^[4, 5]的论述。

地层损失 V_i 可表示为

$$V_i = \frac{\pi[(D+g)^2 - D^2]}{4} \quad (10)$$

5 算例

Mair 曾做过模拟隧道开挖的离心试验^[2], 该离心试验所模拟的实际隧道直径 $D = 4.5 \text{ m}$, 隧道埋深 $z_0 = 9.8 \text{ m}$ 。应用本文的方法求得 $i(0) = 5.2 \text{ m}$, 又根据式 (8) 即可求得 $i(z)$ 与 z 的关系, 计算值与试验测得不同深度的沉降槽宽度系数的对比见图 5 所示, 二者符合的较好, 说明本文采用的方法较为合理。

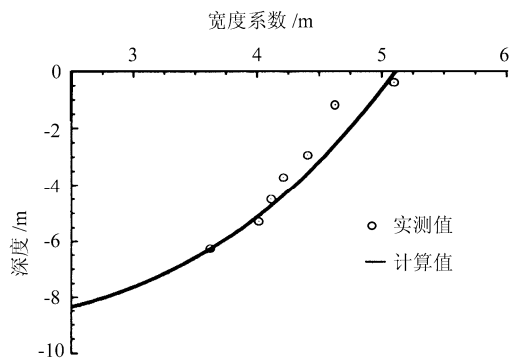


图 5 宽度系数计算值与实测值对比
Fig.5 Comparison between calculated values and observed values of the width parameter

6 结 语

通过分析与计算, 可得出以下结论:

(1) 隧道开挖引起上方土体沉降的计算中, 关于各土层沉降槽的体积等于地层损失的假设比较符合实际情况;

(2) 在关于各土层沉降槽的体积等于地层损失的假设前提下, $S_{\max}(z)$ 和 $i(z)$ 成反比, 所以, 可以通过 $S_{\max}(z)$ 的数值就可以间接得到 $i(z)$ 沿深度变化的规律;

(3) 地表及以下土层沉降槽的宽度系数 $i(z)$ 可以认为同 $(1 - z/z_0)$ 呈幂函数关系。

本文提出的方法可以得到由于隧道开挖引起的不同深度土层沉降槽宽度系数 $i(z)$ 随深度变化的规律, 较真实地描绘地表以下任意土层的沉降槽曲线, 进而可以比较准确地计算土体竖向沉降, 为计算隧道开挖引起周围土体的竖向沉降提供了一种适用的方法。

参 考 文 献

- [1] Peck R B, Deep excavations and tunneling in soft ground[A]. *Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*[C]. Mexico City: State of the Art Report, 1969. 225—290.
- [2] Mair R J, Taylor R. N., Bracegirdle A., Subsurface settlement profiles above tunnel in clays[J]. *Geotechnique*, 1993, 43 (2): 315—320.
- [3] Loganathan N, Poulos H G, Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, (9): 846—856.
- [4] Lee K M, Kerry R, Lo K Y, Subsidence owing to tunnelling. I: Estimating the gap parameter[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29: 929—940.
- [5] Kerry R., Rowe, Lee K. M., Subsidence owing to tunnelling. II: Evaluation of a prediction technique[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29: 941—954.