

柔性地下管线受隧道开挖影响的安全性评价

孙吉主¹, 邓莉¹, 王勇²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430070)

摘要: 在城市隧道建设中, 开挖可能导致邻近地下管线的变形, 甚至破坏, 但现行规范尚未提出具体评价方法。基于普遍认可的隧道开挖引起的地层位移公式, 提出了柔性接头管线受隧道施工影响的安全性评价方法, 并给出了算例。该方法考虑了管线变形后的正态曲线形态及管线与隧道的位置关系, 涉及的参数较少, 易于工程应用; 适用于地层和管线资料不够详细的情况或在精细化计算前, 对柔性接头管线安全性的预估, 对于科学地提出具体隧道施工的环境监测报警值有一定的参考价值。

关键词: 地下管线; 隧道施工; 柔性接头; 环境监测; 安全评价

中图分类号: TU433 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5485(2018)01-0073-03

1 研究背景

城市隧道建设常常需要穿越大量的地下管线, 尤其是人行地下通道几乎不可避免。与地铁隧道相比, 人行隧道在空间上通常距离地下管线更近, 如果对施工引起地下管线的变形认识不足或采取的工程措施不到位, 可能会导致管线破坏而无法使用, 影响城市的生产和居民的日常生活, 甚至造成重大的灾难性后果。因隧道施工引起的煤气泄漏、上水管爆裂、下水管渗漏、电缆断裂等事故常见于国内外报端。据统计, 我国每年发生管线和电缆破坏事故平均逾万起, 造成直接经济损失年均 7 亿多元。但目前相关规范均没有提供评价方法。

因隧道施工对地下管线影响的分析, 常常采用数值模拟方法或弹性地基梁解析法进行研究^[1-2], 而影响计算结果的主观因素或参数较多, 二者不便于实际应用。李兴高等^[3](2008)在 Bracegirdle 等研究成果的基础上, 提出了考虑埋深的管线接头附加转角计算公式, 易于工程应用, 但该方法管线变形曲线与沉降槽的正态分布形态不同。刘建航等^[4](1997)将管道变形的曲率半径作为判断标准, 但假设接头与管线曲率相同, 不符合柔性接头管线的实际变形情况。本文基于 Attewell 等^[5](1986)提出的沉降槽数学描述, 提出了地下管线受隧道施工影响的安全性评价方法。

2 柔性接头管线的安全评价方法

按接头的刚性强弱, 地下管线一般可分为刚性管和柔性管。管线接头允许小量转动的管线称为柔性管, 如承插式混凝土污水管、铸铁管等, 否则为刚性管, 如焊接钢管、燃气管等。本文研究柔性管与隧道垂直和平行 2 种情况下的安全评价方法。对于这类管道在地层下沉时的安全评价, 可以从管节接缝张口值等方面分析每节管道可能承受的管道地基差异沉降量或沉降曲线斜率。本文以允许接头转角 $[\theta]$ 为安全判别标准, 当 $\theta \leq [\theta]$ 时, 管线是安全的; 反之则管线不安全。 θ 是隧道施工引起的管线接头最大转角。

3 管线接头转角的确定

3.1 地层位移规律

沿引文献[5]的研究, 隧道开挖引起的地表垂直位移 W 和横向水平位移 V 可表示为:

$$W = W_{\max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) G\left(\frac{-x}{i}\right) \quad ; \quad (1)$$

$$V = \frac{y}{z_i - z} W \quad 。 \quad (2)$$

其中,

$$G(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt \quad 。 \quad (3)$$

式中: 隧道轴向为 x 方向, 隧道开挖面处 $x=0$; 隧道

收稿日期: 2016-09-21; 修回日期: 2016-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579237)

作者简介: 孙吉主(1970-), 男, 湖北监利人, 教授, 博士, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。E-mail: sunjizhu1@163.com

横向为 y 轴,隧道中心处 $y=0$; z 轴自地表垂直向下; W_{\max} 为地表垂直方向最大位移; i 为地表沉降槽宽度系数; z_i 为隧道轴线埋深; $G(s)$ 可查正态分布函数表求得。

据 Mair 等^[6](1993) 研究,地表以下任一土层沉降曲线仍为正态分布,沉降槽体积等于地层损失。据此可以得到地下最大沉降量 $W_{z_{\max}}$ 与地表最大沉降量的关系为

$$W_{z_{\max}} = W_{\max} \frac{i}{i_z} \quad (4)$$

随着土层深度 z 的增大,土层沉降槽曲线宽度系数将会减少。根据姜忻良等^[7](2004) 研究,可以得到地下沉降槽宽度系数 i_z ,即

$$i_z = i (1 - z/z_i)^n \quad (5)$$

式中 $n = [-0.45, -0.2]$,一般可取 -0.3 。

柔性接头管道的接头均设有可适应一定接缝张开的接缝填料,可以适应地层的小变形,本文假定管线与周围土体的竖向位移同步,即用管线所在地层变形曲线代替管线变形曲线。

3.2 与隧道垂直的管线接头转角

当隧道横向地层沉降曲线为正态分布函数时,在隧道轴线处曲率达到最大,管线变形也最大。按最危险情况考虑管线与隧道间的位置关系:假定管节长度相等,接头在最不利的位置,即位于隧道轴线正上方,变形后的管线与地层位移关系如图 1 所示。图 1 中 R 为管线处地层弯曲半径。

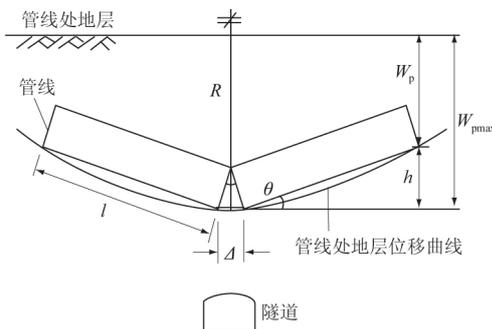


图 1 隧道横向地层与管线变形关系示意图

Fig.1 Strata and pipeline deformation in the cross section of the tunnel

设管节长度为 l ,直径为 D ,埋深为 z ,忽略接缝张开处圆弧的矢高,根据图 1 中几何关系有:

$$W_p = W_{p_{\max}} - h = W_{p_{\max}} e^{-\frac{(\Delta/2 + l \cos \theta)^2}{2i_p^2}}; \quad (6)$$

$$h = l \sin(\theta/2) = \frac{\Delta}{2D} l \quad (7)$$

式中: W_p 为管节端部的位移; $W_{p_{\max}}$, i_p 分别为管线处地层最大位移和沉降槽宽度系数; h 为管节两端的位移差; Δ 为接缝张开值; θ 为管线接头转角。

根据实际管节长度与接缝张开值的大小关系,近似取 $\Delta/2 + l \cos(\theta/2) \approx l$,可得接缝张开值为

$$\Delta = 2 \frac{W_{p_{\max}} D}{l} (1 - e^{-\frac{l^2}{2i_p^2}}) \quad (8)$$

将式(8)代入式(4)和式(5),考虑 $\Delta \approx \theta D$,可得用地表沉降槽参数表示的管线接头转角为

$$\theta = \frac{2W_{p_{\max}}}{l(1 - z_p/z_i)^{0.3}} \cdot \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{l^2}{2i^2(1 - z_p/z_i)^{0.6}}\right] \right\} \quad (9)$$

式中 z_p 为管线埋深。显然,如果知道了接头允许转角,通过式(9)也可求得管线安全时允许地表最大沉降量,从而为实际工程监测报警值的确定提供依据。

3.3 与隧道平行的管线接头转角

管线与隧道轴线的水平距离为 y_p ,其变形曲线可用式(1)描述。在开挖面前、后方水平距离为沉降槽宽度系数处 ($x=i_p, x=-i_p$) 曲率达到最大,管线变形也最大。假定管节长度相同,按最危险情况计算,即隧道推进到与接头距离为 i_p 的位置,此时变形后的管线与地层位移关系如图 2 所示。

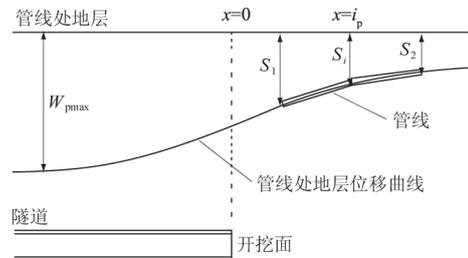


图 2 隧道纵向地层与管线变形关系示意图

Fig.2 Strata and pipeline deformation in the longitudinal section of the tunnel

设管线危险接头与邻近接头的位移分别为 S_i, S_1, S_2 ,考虑实际接头允许转角很小,则隧道开挖引起的危险接头转角为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{S_1 - S_i}{l}\right) - \arcsin\left(\frac{S_i - S_2}{l}\right) \approx \frac{S_1 - 2S_i + S_2}{l} \quad (10)$$

由式(10)也可计算接缝张开值 $\Delta \approx \theta D$ 。

进一步考虑横向水平位移对管线接头的影响,管线处地层变形为垂直位移 W 与横向水平位移 V 的矢量和,即

$$S = \sqrt{1 + [y_p/(z_i - z_p)]^2} W_p \quad (11)$$

取 $x=i_p-1, i_p, i_p+1, y=y_p$ 可分别求得 S_1, S_i, S_2 。同理代入式(4)和式(5),也可得到用地表沉降槽参数表示的管线接头变形。

4 算 例

某人行地下通道轴线埋深 8 m、开挖半径 3 m，隧道上方有一与其轴线垂直的承插式自来水管通过，管道直径 0.6 m、管节长度 5 m、埋深 3 m，土体内摩擦角 30° 。分析该地区地质条件、隧道规模和施工方法等类似工程的地表沉降实测数据，可知地层损失率约为 5%。取 Attewell 等^[5]给出的供水铸铁管在地层移动作用下接头转角允许值 $[\theta] = 1.5^\circ$ 为安全评价标准。

按前述方法对隧道施工引起的管线接头变形计算如下。

地层损失 $V = \pi r^2 \times 5\% = 1.41 \text{ m}^3$ ，地表沉降宽度系数 $i = z_i / [\sqrt{2\pi} \text{tg}(45^\circ - \varphi/2)] = 5.54 \text{ m}$ ，地表沉降最大值 $W_{\max} = V / (\sqrt{2\pi} \times i) = 0.10 \text{ m}$ 。取 $z = 3 \text{ m}$ ， $z_i = 8 \text{ m}$ ， $D = 0.6 \text{ m}$ ， $l = 5 \text{ m}$ ，得 $i_p = 4.8 \text{ m}$ ， $W_{p\max} = 0.115 \text{ m}$ ，计算管线接头最大张开值和转角为： $\Delta = 0.0115 \text{ m}$ ， $\theta = 1.10^\circ < [\theta] = 1.5^\circ$ 。因此，可以初步确定隧道施工过程中管线是安全的。

若上述管线与隧道轴线平行，两者水平距离为 2 m，其他条件不变。下面按前述方法计算管线转角。 $S = \sqrt{1 + [2 / (8 - 3)]^2} W$ ，取 $x = 4.8$ ， -0.2 ， 9.8 m 和 x 分别为 -4.8 ， -9.8 ， 0.2 m 代入式(1)、式(4)、式(5)，结合查正态分布函数表，可以计算管线转角的最大值 $\theta = 0.28^\circ < [\theta] = 1.5^\circ$ ，可以初步判定这种情况下管线是安全的。

5 结 语

本文根据广泛认可的隧道开挖引起的地层位移

公式，提出了柔性管线受隧道施工影响的安全性评价方法，考虑了管线变形后的正态曲线形态及管线与隧道的相对位置，该法参数较少，易于工程应用，适用于地层和管线资料不够详细的情况，或在精细化计算前，对柔性接头管线安全性的预估。目前某些地下工程相关的监测规范给出了沉降变形报警值，很多工程表明过于保守^[8]，本文方法科学地提出具体隧道工程的环境监测报警值，有一定的参考价值。进一步的研究可以考虑管线对地层位移规律的影响。

参考文献:

- [1] VORSTER T E, KLAR A, SOGA K, *et al.* Estimating the Effects of Tunneling on Existing Pipelines [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(11): 1399-1410.
- [2] 吴为义, 孙宇坤, 张士乔. 盾构隧道施工对邻近地下管线影响分析 [J]. *中国铁道科学*, 2008, 29(3): 58-62.
- [3] 李兴高, 王 霆. 柔性管线安全评价的简便方法 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(7): 1861-1864.
- [4] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [5] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil Movements Induced by Tunneling and Their Effects on Pipelines and Structures [M]. London: Blackie and Son Ltd., 1986.
- [6] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface Settlement Profiles above Tunnel in Clays [J]. *Geotechnique*, 1993, 43(2): 315-320.
- [7] 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.

(编辑: 赵卫兵)

Safety Assessment of Underground Flexible Pipes Affected by Tunneling

SUN Ji-zhu¹, DENG Li¹, WANG Yong²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430070, China)

Abstract: Urban tunneling could cause deformation or even damage of underground pipeline. But there is no method in existing specifications to evaluate the damage. In this article, we propose a safety assessment method for the deformation of flexible pipeline joint induced by tunneling based on the popular soil displacement formula, and give a calculation example in details. This method is easily applicable to engineering by taking into consideration the position relation between pipeline and tunnel and the normal curve shape of deformed pipeline, with few parameters required. It is suitable for cases with no sufficient strata and pipeline data or before fine computation when safety estimation is needed. It could also offer reference for the warning value of environmental monitoring around the tunnel.

Key words: underground pipeline; safety evaluation; tunneling; flexible joint; environmental monitoring