

文章编号: 1000-7598-(2008)07-1861-05

柔性管线安全评价的简便方法

李兴高, 王 霆

(北京交通大学 土建学院, 北京 100044)

摘 要: 随着我国地铁建设的快速发展, 地铁施工中邻近管线的安全评价是一项急待解决的关键技术问题。在地层移动基本规律认识基础上, 提出了一种经验或半经验的基于变形控制的柔性管线的安全评价方法。该方法可应用于快速评估柔性管线的潜在损害, 具体的管线细节一般不予考虑, 涉及的参数少, 更易于工程应用。该方法尤其适用于没有足够资料或者特殊敏感的情况下, 需要对管线的接头单独考虑, 需要采用保守估计的情况。

关 键 词: 柔性管线; 安全评价; 地铁施工; 简便方法

中图分类号: TU 990.3

文献标识码: A

Simple method for evaluating safety of flexible pipelines

LI Xing-gao, WANG Ting

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With rapid developments of metro construction in China, the safety evaluation of pipelines near tunneling is one of the key technical problems urgent to solve. On the basis of understanding basic laws of ground movements, an empirical or semi-empirical method to evaluate the safeties of flexible pipelines is put forward; and it takes the deformation as the control index. Generally the details of pipelines are not necessary to know, and only a few parameters are involved; so the method is more easy to use in engineering; and it can be used to evaluate the latent damages of flexible pipelines rapidly. The method is particularly fit for the case of no sufficient data or especially sensitive pipelines, where the joints must be treated separately and the conservative estimations are needed.

Key words: flexible pipeline; safety evaluation; metro construction; simple method

1 引 言

地铁线路一般结合城市道路网和客流流向, 沿城市主干道方向布设。因而, 地铁建设对于城市道路路面下埋设的各种管线的影响也就不可避免。地下空间开挖会使周围的地层和地面产生变形, 严重者会影响到管线的正常使用。因变形过大造成煤气泄露爆炸、水管爆裂形成水患、电缆断裂造成停电或通讯中断的情况, 国外均有报道。在国内, 北京地铁复-八线的建设过程中也曾发生过由于管线破裂而引起大面积塌陷的事故。1999 年, 广州一个矿山法施工的工地上, 也曾发生过混凝土供水管突然爆裂的事故。当前, 随着我国地铁工程建设的大规模开展, 其施工引发的管线事故已不是少数。以北京地铁 10 号线为例, 2005 年 11 月 30 日下午地铁

10 号线熊猫环岛基坑倒塌, 工地内多根污水、自来水管等管线断裂或弯曲; 2005 年 11 月 3 日上午农展桥附近地铁 10 号线施工附近一根直径 300 mm 的地下自来水管爆裂造成农展桥辅路塌陷; 2006 年 1 月 3 日凌晨地铁 10 号线工程正上方京东三环京广桥东南角辅路污水管线发生漏水事故, 导致三环南向北方向部分主辅路塌陷, 京广桥附近主辅路出现了 200 m² 左右的深坑。因此, 建立科学合理的管线安全评价方法, 从而保证地铁施工, 尤其是暗挖法(矿山法和盾构法)施工中邻近管线的正常运行是一项急待解决的关键技术难题。

目前虽然对于管线受地铁施工影响安全问题采用有限元数值方法已有较多的研究^[1,2], 但由于参数选择和地下管线信息的不确定性, 及管线、土体作用的复杂多样性, 此种方法在实际工程中的应用受

收稿日期: 2006-09-14

基金项目: 北京市科技计划重点项目 (No.D0604003000011)。

作者简介: 李兴高, 男, 1971 年生, 工学博士, 主要从事地铁施工环境影响方面的研究。E-mail: lxx_njtu@163.com

到了限制。为此,本文在对地层移动基本规律认识基础上,提出了一种基于变形控制的地下管线受地铁施工影响的经验或半经验的安全评价方法,该方法尤其适用于没有足够资料或者特殊敏感的管线条件下,需要对管线的接头单独考虑、需要采用保守估计的情况。本文提出的方法可应用于快速评估管线的潜在损害,而对管线的具体细节一般不予考虑,涉及的参数少,更易于工程应用。

2 柔性管线的安全评价方法

地下管线可分为刚性管和柔性管。管线接头可允许转动的管线称为柔性管,否则为刚性管。本文仅研究柔性管与隧道垂直和平行两种情况下的安全评价方法。具体来说,以管线接头转角为控制指标,若管线接头受地铁施工影响的附加转角小于管线接头的转角控制标准,即 $\theta < [\theta]$, 则管线是安全的,反之是不安全的。 θ 为管线接头受地铁施工影响的附加转角; $[\theta]$ 为管线接头的转角控制标准。管线接头的转角控制标准因管线埋于地下,且与管线新旧、埋设情况、材料结构、管节长度和接头构造等多种因素有关,在实际工程中是一项很难准确确定的指标。因而对管线的现状必须事先调查清楚,且需要充分借鉴国内外已有的成功做法和经验。对于实际工程中确实难以查清的管线,可以参照相关规范和标准中的做法^[3,4]。在下文中主要讨论管线接头受地铁施工影响附加转角的计算。

3 管线接头附加转角的确定

对于管线接头的附加转角,Attewell 等^[5](1986 年)提出的计算方法需要确定管线接头的具体位置,这在实际工程中往往难以做到。Bracegirdle 等^[6](1996 年)提出的简化方法,考虑最不利的情况,计算管线接头处的转角,但没有考虑管线在地层中位置的影响,计算结果过于保守。本研究将在 Bracegirdle 等研究成果的基础上,考虑管线在地层中位置的影响,对管线接头转角的计算提出更符合实际情况的计算公式。

3.1 基本假定

管线接头附加转角计算时的基本假定如下:

(1) 施工中没有出现坍塌,隧道周围地表任一点的垂向位移和水平位移可利用以下公式计算^[5]:

$$w(s) = \frac{V_s}{i(s)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{y^2}{2[i(s)]^2}\right\} \cdot \left[G\left(\frac{x-x_i}{i(s)}\right) - G\left(\frac{x-x_f}{i(s)}\right)\right] \quad (1)$$

$$v(s) = \frac{-1}{z_t - z} y w(s) \quad (2)$$

$$u(s) = \frac{V_s}{2\pi(z_0 - z)} \exp\left\{-\frac{y^2}{2[i(s)]^2}\right\} \cdot \left\{\exp\left[\frac{-(x-x_i)^2}{2[i(s)]^2}\right] - \exp\left[\frac{-(x-x_f)^2}{2[i(s)]^2}\right]\right\} \quad (3)$$

$$G(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\alpha} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta \quad (4)$$

式中: V_s 为隧道推方向上单位距离的沉降槽的体积; X 、 Y 、 Z 为计算中采用的三维直角坐标系; x 、 y 、 z 为计算点的 X 、 Y 、 Z 坐标; $w(s)$ 、 $v(s)$ 、 $u(s)$ 分别为地表点在 Z 、 Y 、 X 方向上的位移; $i(s)$ 为地表沉降槽宽度系数; x_i 、 x_f 分别为沿隧道轴线($y=0$)隧道的起点和工作面的最终位置; z_t 为隧道中心的埋深; (s) 表示参数为地表沉降相关参数。

(2) 假定管线与周围土体自始至终是紧密接触的,即在变形过程中,管线与土体之间没有相对滑动产生或发生脱离。

(3) 地下管线为等直径、等壁厚,管段及接口材料按照线弹性材料处理。

(4) 管线与隧道间的位置关系,按最危险情况考虑,假定接头在最不利的位置。

3.2 不考虑埋深的管线接头附加转角计算公式

如图 1、图 2 所示,Bracegirdle 等提出最不利的条件下平行、垂直于隧道掘进方向的管线接头处的转角 $\theta_x(s)$ 、 $\theta_y(s)$ 的过于保守的计算公式如下。

(1) 当管线与隧道横交时,管线接头的转角为

$$\theta_y(s) = 2 \tan^{-1} \left\{ w_{\max}(s) / [i(s)\sqrt{2\pi}] \right\} \quad (5)$$

(2) 当管线与隧道平行且在隧道轴线的正上方时,管线接头的转角为

$$\theta_x(s) = \tan^{-1} [0.4 w_{\max}(s) / i(s)] \quad (6)$$

$$V_s = i(s)\sqrt{2\pi} w_{\max}(s) \quad (7)$$

式中: $\theta_x(s)$ 为管线与隧道平行且在隧道轴线的正上方时,管线接头的转角; $\theta_y(s)$ 为管线与隧道横交时,管线接头的转角; $w_{\max}(s)$ 为地表最大沉降值; 其余符号意义同上。式(5)适用于垂直于隧道轴线方向的管线。式(6)适用于平行于隧道轴线方向并且在隧道轴线的正上方,即 $y=0$ 。对于平行于隧道轴线方向,但偏离隧道轴线的管线 $y=y_p$, 隧道施工对其

$$\theta_x(p) = \tan^{-1} \left(0.4 \frac{V_p}{[i(p)]^2 \sqrt{2\pi}} \right) \quad (17)$$

与上面的推理过程类似, 代入式 (14) 和式 (15), 式 (17) 可以改写为

$$\theta_x(p) = \tan^{-1} \left\{ 0.4 \frac{V(1-z_p/z_t)^{2A} \phi}{[i(s)]^2 \sqrt{2\pi}} \right\} \quad (18)$$

式 (18) 适用于平行于隧道轴线方向并且在隧道轴线的正上方, 即 $y=0$ 。对于平行于隧道轴线方向, 但偏离隧道轴线的管线 $y=y_p$, 隧道施工对其影响与前者相同, 只是影响程度降低, 管线的移动变小。施工引起管线弯曲的地层运动为竖向位移 w 和横向位移 v 的矢量和, 即式 (22)。在 $y=y_p$ 的位置, 由于偏离的影响, 给出一个偏离系数 $RF(\theta_{px})$, 即式 (23)。

$$\begin{aligned} \sum(\bar{w}(p) + \bar{v}(p))_{y=y_p} = \\ \sqrt{1 + \left(\frac{y_p}{z_t - z_p} \right)^2} \exp \left[\frac{-y_p^2}{2[i(p)]^2} \right] w_{\max}(p) \end{aligned} \quad (19)$$

由式 (14)、式 (15) 可得

$$w_{\max}(p) = (1 - z_p/z_t)^A w_{\max}(s) \quad (20)$$

$$i(p) = i(s) / \left[(1 - z_p/z_t)^A \right] \quad (21)$$

代入式 (20) 和式 (21), 式 (19) 可以改写为

$$\sum(\bar{w}(p) + \bar{v}(p))_{y=y_p} = RF(\theta_{px}) w_{\max}(s) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} RF(\theta_{px}) = \sqrt{1 + \left(\frac{y_p}{z_t - z_p} \right)^2} \left(1 - \frac{z_p}{z_t} \right)^A \cdot \\ \exp \left[\frac{-y_p^2 (1 - z_p/z_t)^{2A}}{2[i(s)]^2} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

于是, 对于偏离隧道轴线 $y=y_p$ 的管线, 接头的转角 $\theta_x(p)$ 为

$$\theta_x(p) = \tan^{-1} \left\{ \frac{0.4 \phi (1 - z_p/z_t)^{2A} V}{[i(s)]^2 \sqrt{2\pi}} RF(\theta_{px}) \right\} \quad (24)$$

显然, 当 $z_p=0$ 时, 式 (24) 就等同于式 (10); 与式 (10) 相比, 式 (24) 考虑了管线埋深 z_p 对管线接头转角的影响。

4 算 例

某工程为一圆形隧道, 隧道的开挖半径为 3 m, 在隧道的上方有一污水管线和一自来水管线。二者皆为承插式接头的铸铁管。污水管线的内径为 1 200 mm, 自来水管线的内径为 800 mm, 自来水管与隧道的走向垂直, 污水管线与隧道的走向平行, 且偏离隧道轴线的管线的距离为 3 m, 隧道的埋深为 8 m, 自来水管的埋深为 2 m, 污水管线的埋深为 3 m。根据已往监控量测的结果分析可知, 施工中的地层损失率大约为 5%, 地表沉降槽的宽度系数约为 4.2 m。采用文中的方法对地铁施工过程中两个管线的安全状况做出简要评价。

对于污水管线, 根据论述, 可得相关计算参数如下: $V = \pi r^2 \times 1 = \pi \times 3 \times 3 \times 1 = 28.27 \text{ m}^3$, $\phi = 5\%$, $z_t = 8 \text{ m}$, $z_p = 3 \text{ m}$, $y_p = 3 \text{ m}$, $i(s) = 4.2 \text{ m}$, $A = -0.3$; 另外参照上海市标准《基坑工程设计规程》DBJ08-61-97, 污水管线接头转角的控制标准 $[\theta] = 1.15^\circ$ 。将以上参数代入式 (24), 得 $\theta_x(p) = 0.951^\circ < [\theta] = 1.15^\circ$, 于是可以初步确定, 在地铁施工过程中邻近的污水管线是安全的。

对于自来水管线, 根据论述, 可得相关计算参数如下: $V = \pi r^2 \times 1 = \pi \times 3 \times 3 \times 1 = 28.27 \text{ m}^3$, $z_p = 2 \text{ m}$, $i(s) = 4.2 \text{ m}$, $A = -0.3$; 另外, 参照上海市标准《基坑工程设计规程》DBJ08-61-97, 自来水管接头转角的控制标准 $[\theta] = 1.483^\circ$ 。将以上参数代入式 (16), 可得 $\theta_y(p) = 1.719^\circ > [\theta] = 1.483^\circ$, 于是可以初步确定, 在施工过程邻近的自来水管线有可能是**不安全的。针对该管线, 需要进一步了解其目前的状况, 并采用更加复杂的方法, 如有限元方法, 评价其安全状况并采用相应的工程控制措施, 确保其在施工过程中的安全。

5 结 语

本文提出了一种基于变形控制的地下管线受地铁施工影响的经验或半经验的安全评价方法, 其显著特点是具体的管线的细节一般不予考虑, 涉及的参数少, 计算快捷, 更易于工程应用。该方法尤其适用于没有足够资料或者特殊敏感的管线条件下, 需要对管线的接头单独考虑, 需要采用保守估计的情况。以某工程实例说明了该方法的具体应用, 可以为当前我国地铁建设中邻近管线施工问题提供一定的技术支持。

参 考 文 献

- [1] 李大勇, 龚晓南. 软土地基深基坑工程邻近柔性接口地下管线的性状分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 77—80.
LI Da-yong, GONG Xiao-nan. Response of jointed ductile pipeline to deep excavation in soft soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2003, 36(2): 77—80.
- [2] 吴波, 高波. 地铁区间隧道施工对近邻管线影响的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 2 451—2 456.
WU Bo, GAO Bo. 3D numerical simulation on effect of tunnel construction on adjacent pipelines[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 2 451—2 456.
- [3] GJB02—98 广州地区建筑基坑支护技术规定[S].
- [4] DBJ08-61—97 上海市基坑工程设计规程[S].
- [5] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil Movements Induced by Tunnelling and their Effects on Pipelines and Structures[M]. London: Blackie and Son Ltd., 1986.
- [6] BRACEGIRDLE A, MAIR R J, NYREN R J, et al. A methodology for evaluating potential damage to cast iron pipes induced by tunneling[C]//Proc. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London: Balkema, 1996: 659—664.
- [7] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnel in clays[J]. **Geotechnique**, 1993, 43(2): 315—320.
- [8] MOH Z C, JU D H, HWABG R N. Ground movements around tunnels in soft ground[C]//Proc. Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Constructions in Soft Ground. London: Balkema, 1996: 725—730.
- [9] DYER M R, HUTCHINSON M T, EVANS N. Sudden Valley Sewer: a case history[C]//Proc. Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Constructions in Soft Ground. London: Balkema, 1996: 671—676.
- [10] 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): 1 542—1 544.
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): 1 542—1 544.