

地面堆载对变截面地埋管线影响分析

蔡忠祥^{1,2}, 张陈蓉^{1,2}, 黄茂松^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 地埋管线在市政建设中容易损坏, 基于 Winkler 地基模型, 将地埋管线简化为变刚度 Euler-Bernoulli 梁, 根据梁单元微分方程, 采用传递矩阵法求解梁截面处位移、转角、弯矩及剪力, 给出变刚度梁的一般分析方法。通过算例验证方法的合理性和适用性, 分析了接头刚度变化对管线位移、内力的影响, 为市政建设中地埋管线保护提供理论指导。

关 键 词: 地埋管线; 传递矩阵法; 接头刚度; Winkler 地基模型

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Analysis of influence of surcharge loads on buried pipelines with variable cross-sections

CAI Zhong-xiang^{1,2}, ZHANG Chen-rong^{1,2}, HUANG Mao-song^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Municipal construction causes damage to nearby pipelines. Based on the Winkler foundation model, which simplified the pipeline as Euler-Bernoulli beams of variable stiffness, the transfer matrix method is proposed to analyze the performance of the pipeline according to the beam's element differential equation. This method is verified by comparing with analytic solutions for beam with constant stiffness section. Then it shows the influence of joint stiffness on the deflection and internal force of the pipelines. It's hoped that the work above can supply technical support and guidance to the design and construction of pipelines.

Key words: buried pipeline; transfer matrix method; joint stiffness; Winkler foundation model

1 引 言

作为城市生命线项目, 地埋管线是城市给排水工程、燃气工程等地下市政网络的直接载体, 在维系现代城市功能方面有着举足轻重的作用, 而地铁隧道更是现代化大都市交通体系的重要组成部分。在市政工程建设中, 由于施工堆载或者地下工程开挖引起管线破坏事故屡见不鲜。市政工程建筑活动对地埋管线的影响成为在城市建设中非常值得关注的问题。

地埋管线因市政工程的影响而产生受力和变形的过程中, 土体与管线的相互作用是一个复杂的三维空间问题。目前常用的理论简化分析方法是将地埋管线简化为一维的弹性地基梁。对于均质地基中沿纵向截面没有变化的等刚度梁^[1]问题, 理论上基

于弹性理论法已经有了均布荷载和集中荷载情况下的解析解。李顺群等^[2]基于梁的弯曲微分方程、有限元理论和最小势能原理给出了集中力、集中力偶和任意形式的分布荷载共同作用时等截面弹性地基梁的解析解。张土乔等^[3]结合 Winkler 弹性地基梁解析解, 分析了平面地基上刚性圆管基底压力的分布规律。刘全林等^[4-5]依据现场实测和模型试验得到了地埋管道的受力特征, 在此基础上, 采用传递矩阵法考虑不同的管线埋设条件、不同的管周充填介质影响, 分析管线与土体相互作用及管线周围的土压力分布。Klar 等^[6]将地埋管线接头视为转动弹簧, 采用有限元方法计算隧道开挖引起的管线相应变形, 分析了接头转动刚度的影响。张陈蓉等^[7]采用位移控制两阶段法研究了开挖对附近地埋管线的影响。然而, 上述研究大多将管线视作等刚度的地

基梁, 没有考虑管线的接口刚度因为构造关系的弱化, 且着重于分析基坑开挖条件。

本文采用传递矩阵法分析地面堆载对埋地管线的影响。根据荷载作用位置以及管线接头刚度变化将管线沿着管线长度方向分段, 由材料力学基本方程推导单元两端状态向量的传递矩阵, 由位移协调条件和力的平衡条件将传递矩阵沿着管线的纵向进行传递, 得到适用于变刚度埋地管线的简化理论分析方法。并进一步结合工程实例分析因接头刚度存在对埋地管线变形内力分布规律的影响。通过本文的工作, 希望可以为城市区域在进行建筑施工活动需要对埋地管线进行保护的情况, 提供相应的理论依据。

2 理论模型

2.1 计算模型概述

将埋地管线简化为弹性地基上 Euler-Bernoulli 梁, 受地面堆载作用, 如图 1 所示。假设管线在整个受力变形过程中, 与土体紧密接触没有分离。地基模型采用 Winkler 地基, 埋地管线外径为 D , 管线材料弹性模量为 E , 管线截面惯性矩为 I_p , 管线接头处截面惯性矩为 I_j 。

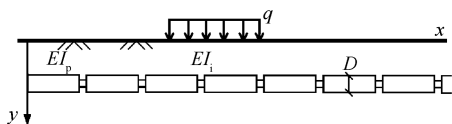


图 1 埋地管线受荷示意图
Fig.1 Sketch of buried pipelines

2.2 传递矩阵推导

地基梁单元模型如图 2 所示。由图可见, 单元受均布荷载 q 和集中力 P 作用, 土体泊松比为 ν , 杨氏模量为 E_s 。

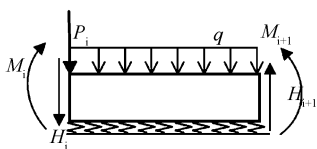


图 2 地基梁单元
Fig.2 Element of foundation beams

弹性地基梁的挠曲微分方程为

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = q \quad (1)$$

式中: k 为地基基床模量。本文采用 Vesic^[8]所提出的地基基床模量公式为

$$k = \frac{0.65 E_s}{1 - \nu^2} \sqrt{\frac{E_s D^4}{EI}} \quad (2)$$

令 $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$, λ 为地基梁的柔度指数。微分

方程式 (1) 可写为

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + 4\lambda^4 y = \frac{q}{EI} \quad (3)$$

解析解为

$$y(x) = C_1 D(\lambda x) + C_2 B(\lambda x) + C_3 A(\lambda x) + C_4 C(\lambda x) + \frac{q}{k} \quad (4)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} A(\lambda x) &= \sinh(\lambda x) \cos(\lambda x) \\ B(\lambda x) &= \cosh(\lambda x) \sin(\lambda x) \\ C(\lambda x) &= \sinh(\lambda x) \sin(\lambda x) \\ D(\lambda x) &= \cosh(\lambda x) \cos(\lambda x) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

C_1 、 C_2 、 C_3 及 C_4 为边界条件确定的积分常数。

单元左端, 局部坐标系中 $x = 0$, $y(x) = y_i$, $\theta(x) = \theta_i$, $M(x) = M_i$, $H(x) = H_i$, 由此确定积分常数分别为

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= y_i - q/k; \quad C_2 = -(\theta_i / 2\lambda + H_i / 4EI\lambda^3) \\ C_3 &= -(\theta_i / 2\lambda - H_i / 4EI\lambda^3); \quad C_4 = -M_i / 2EI\lambda^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

定义转角逆时针为正, 由材料力学得到梁的挠曲微分关系:

$$\left. \begin{aligned} \theta(x) &= -\frac{dy}{dx}; \quad M(x) = EI \frac{d\theta}{dx} = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \\ H(x) &= \frac{dM}{dx} = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 代入式 (4)、(5), 得到单元两端位移和力的传递关系:

$$\begin{Bmatrix} y \\ \theta \\ M \\ H \end{Bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & -\frac{1}{2\lambda} \varphi_2 & -\frac{2\lambda^2}{k} \varphi_3 & -\frac{\lambda}{k} \varphi_4 \frac{q}{k} (1 - \varphi_1) \\ \lambda \varphi_4 & \varphi_1 & \frac{2\lambda^3}{k} \varphi_2 & \frac{2\lambda^2}{k} \varphi_3 - \frac{\lambda q}{k} \varphi_4 \\ \frac{k}{2\lambda^2} \varphi_3 & -\frac{k}{2\lambda^3} \varphi_4 & \varphi_1 & \frac{1}{2\lambda} \varphi_2 - \frac{q}{2\lambda^2} \varphi_3 \\ \frac{k}{2\lambda} \varphi_2 & -\frac{k}{2\lambda^2} \varphi_3 & -\lambda \varphi_4 & \varphi_1 - \frac{q}{2\lambda} \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ \theta \\ M \\ H \end{Bmatrix}_i \quad (8)$$

式中: $\varphi_1 = D$; $\varphi_2 = B + A$; $\varphi_3 = C$; $\varphi_4 = B - A$ 。

为得到沿着纵向管线的整体受力变形, 如图 3 所示, 以集中力作用点、分布荷载起始位置、梁单元刚度变化以及基床系数变化处为节点, 将梁分为 n 个单元。将单元节点处的挠度、转角、弯矩和剪力表示为节点处状态向量 $Z_i = [y_i, \theta_i, M_i, H_i]^T$ 。

模型中受集中荷载作用处的节点, 由于剪力的不连续需对传递矩阵进行修正, $H_{i+1} = H_i - P_i$ 。为便于节点的状态向量间矩阵连乘运算, 将节点上的

状态向量增广为 $\mathbf{Z}_i = [y_i, \theta_i, M_i, H_i, 1]^T$ 。

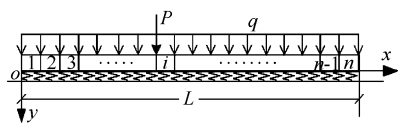


图3 计算模型示意图

Fig.3 Calculating model of beams

对式(8)改写得到, $\mathbf{Z}_{i+1} = \mathbf{T}_i \mathbf{Z}_i$, 其中 $\mathbf{T}_i$ 为节点状态向量间的传递矩阵。

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \varphi_1 & -\frac{1}{2\lambda}\varphi_2 & -\frac{2\lambda^2}{k}\varphi_3 & -\frac{\lambda}{k}\varphi_4 & \frac{q}{k}(1-\varphi_1) \\ \lambda\varphi_4 & \varphi_1 & \frac{2\lambda^3}{k}\varphi_2 & \frac{2\lambda^2}{k}\varphi_3 & -\frac{\lambda q}{k}\varphi_4 \\ \frac{k}{2\lambda^2}\varphi_3 & -\frac{k}{2\lambda^3}\varphi_4 & \varphi_1 & \frac{1}{2\lambda}\varphi_2 & -\frac{q}{2\lambda^2}\varphi_3 \\ \frac{k}{2\lambda}\varphi_2 & -\frac{k}{2\lambda^2}\varphi_3 & -\lambda\varphi_4 & \varphi_1 & -\frac{q}{2\lambda}\varphi_2 - P_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.3 边界条件确定及求解

堆载影响范围有限, 埋地管线受堆载作用影响长度在荷载纵向长度3倍之外较小^[9], 假定管线端点处的弯矩与剪力均为0, 即 $\mathbf{Z}_1 = [y_1, \theta_1, 0, 0, 1]^T$, $\mathbf{Z}_{n+1} = [y_{n+1}, \theta_{n+1}, 0, 0, 1]^T$ 。由各单元平衡条件和位移连续性可得到管线两端状态向量传递关系为

$$\mathbf{Z}_{n+1} = \mathbf{T} \mathbf{Z}_1 \quad (10)$$

$$\text{式中: } \mathbf{T} = \prod_{i=1}^n \mathbf{T}_i \quad (11)$$

从而得到关于初始状态 $\mathbf{Z}_1$ 的线性方程组:

$$\begin{cases} T_{31}y_1 + T_{31}\theta_1 + T_{35} = 0 \\ T_{41}y_1 + T_{41}\theta_1 + T_{45} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

求解上述方程组确定初始状态向量 $\mathbf{Z}_1$ 中各未知量, 依次递推可得到各截面的状态向量:

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{T}_i \mathbf{T}_{i-1} \cdots \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_1 \mathbf{Z}_1 \quad (13)$$

3 算例分析

3.1 等刚度管线验证

对均布以及集中荷载作用下的等截面刚度梁的受力反应已有公认的基于弹性理论的解析解^[1]。为验证本文方法的正确性, 将采用本文计算得到的结果与理论解析解进行对比。具体计算模型: 两端自由的 Winkler 地基上梁, 长 20 m, 宽 1 m, 高 0.3 m, $E = 20 \text{ GPa}$, 跨中作用集中力 $P = 100 \text{ kN}$; 地基基床系数 $k = 1.8 \times 10^7 \text{ kN/m}^3$ 。根据弹性地基梁解析解推导中的相关定义, 按照柔度系数划分, 本文计算模型中 $\lambda L = 11.2 > \pi$, 可以视为无限长梁。

均质地基中无限长弹性地基梁受集中荷载的变形以及受力分布如图4所示, 图中曲线沿 x 轴方向即梁的纵向长度进行了归一化。由图中对比可见, 采用本文传递矩阵法求解得到的管线变形受力沿纵向的分布图与无限长梁的弹性理论解析解完全吻合, 说明本文方法的准确性。

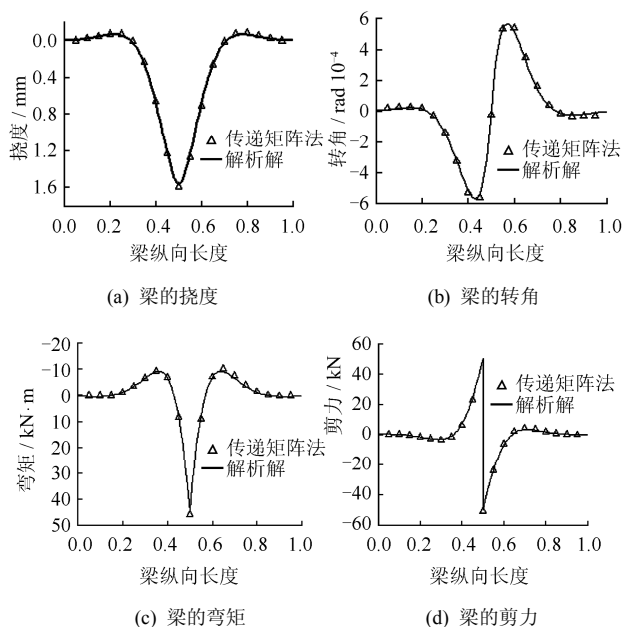


图4 梁的变形和内力

Fig.4 Deformation and internal forces of the beam

3.2 接头刚度变化对管线变形内力的影响

选取市政工程中给排水网络经常采用的承插式铸铁管作为分析模型, 具体参数为: 直径为 600 mm, 外径为 635 mm, 壁厚 9.9 mm, 弹性模量 $E = 150 \text{ GPa}$, 泊松比为 0.2, 管线截面惯性矩为 I_p , 管线接头处截面惯性矩为 I_j 。每节管长 5 m, 接头长 0.1 m; 土体杨氏模量 4.133 MPa, 泊松比为 0.4。埋地管线上覆土压力 $q = 10 \text{ kN/m}^2$, 地表局部堆载简化为均布荷载 100 kN/m^2 作用于管线上, 作用范围为 10.1 m。取 8 节管线作为分析对象, 管线总长 40.7 m, 由于堆载作用下管线局部变形影响范围有限, 埋地管线纵向依据弹性梁理论柔度的划分, $\lambda L = 9.67 > \pi$, 可以视为无限长梁, 根据模型边界条件假设, 两端为自由边界, 示意图如图5所示。管线内力变形计算结果如图6所示。随着接头刚度减小, 管线的竖向位移最大值(位于荷载作用中心点)呈现增长趋势; 当 $EI_j/EI_p = 0.01$, 接头近似为铰接, 管线沿纵向的变形曲线在接头处有尖角, 管段位移近似为直线, 说明管线连接处转角有突变, 各个管段几乎没有挠曲, 近似只有刚体位移。 EI_j/EI_p 为 1.0、0.1 条件下竖向位移比较接近, 由于接头刚

度削弱不明显, 曲线比较平缓光滑。

管线弯矩随着接头刚度减小呈减小趋势, 由于接口刚度削弱, 接头处转动变形增加, 释放了管线的部分内力, 使得弯矩分布沿管线长度方向趋于平均化, EI_j/EI_p 为 0.01 条件下的柔性接头管线的弯矩最大值显著小于刚性接头管线。

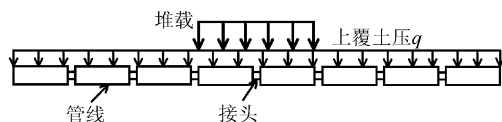
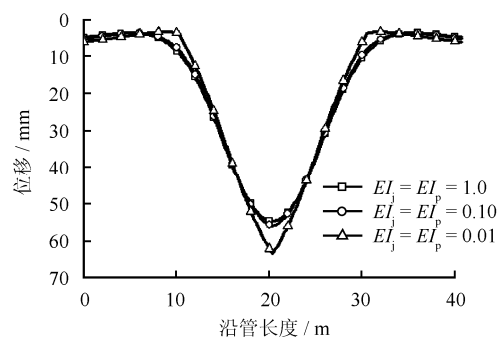
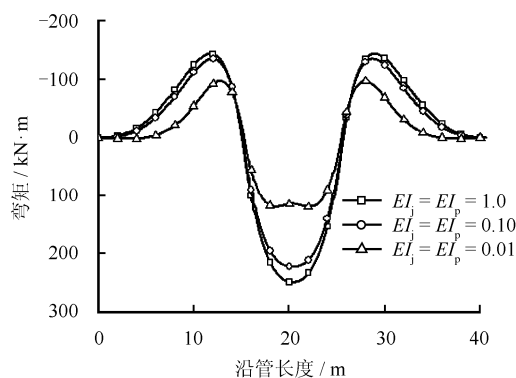


图 5 接头管线示意图
Fig.5 Sketch of buried pipelines



(a) 纵向变形



(b) 弯矩

图 6 管线接头刚度对管线的影响

Fig.6 Influence of joint stiffness on pipelines

3.3 工程算例

根据文献[10]中相关算例的分析, 上海地铁 2 号线盾构区间隧道局部 (100 m) 存在施工堆载, 分析均布荷载 $q = 1\,000$ 、 $1\,200$ 、 $1\,500$ kN/m 下隧道相应的变形内力分布。荷载纵向影响长度取 200 m, 视端部自由。隧道直径 $D = 6.2$ m, 计算单元中, 隧道管片每环长 1 m, 管片等强部分长 0.8 m, 纵向等效刚度 $EI_1 = 9.53 \times 10^8$ kN·m², 管片接头弱化部位为 0.2 m, 接头刚度 $EI_2 = 6.68 \times 10^7$ kN·m², 地基基床模量 $k = 6.2 \times 10^4$ kN·m²。

沿纵向隧道的位移分布如图 7 所示, 均布荷载 $q = 1\,000$ 、 $1\,200$ 、 $1\,500$ kN/m 情况下隧道的竖向位移最大值为 16、20、24 mm。根据上海市地铁的相关保护要求^[9], 地铁隧道的绝对位移应小于 20 mm。对应本文中算例, 相对应的均布荷载为 1 200 kN/m, 地铁隧道的变形达到位移控制临界值。

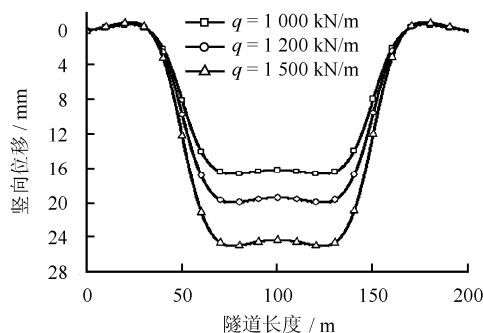


图 7 隧道位移图

Fig.7 Deflections of the tunnel

堆载作用下隧道整体变形曲线连续光滑。尽管隧道管片间的螺栓连接处截面的抗弯刚度相对于管片段有所削弱, 但相比近乎铰接的柔性接头管线, 抗弯刚度仍然较大, 且由上文针对管线的算例分析可知, 相对刚度比值在 0.1~1.0 范围内时, 管线的受力变形曲线变化相比完全柔性接头, 变化不是非常明显, 隧道没有出现柔性接口管线受荷下的位移曲线不连续的情况。

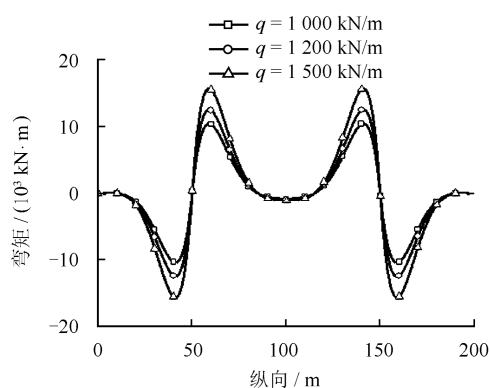


图 8 隧道弯矩图

Fig.8 Bending moment diagrams of the tunnel

沿隧道纵向弯矩分布如图 8 所示, 均布荷载 $q = 1\,000$ 、 $1\,200$ 、 $1\,500$ kN/m 作用下弯矩最大值分别为 10 467、12 562、15 072 kN·m, 均未达到设计强度控制标准。堆载作用下弯矩分布呈马鞍形分布。不同荷载条件下荷载作用中心区域弯矩均较小, 趋向于 0。

结合位移和弯矩变化曲线, 当位移达到 20 mm 时弯矩未达到设计破坏的要求, 因此算例中堆载作

用,主要针对隧道变形控制,当 $q < 1\,200\text{ kN/m}$ 时,满足变形控制标准。

4 结 语

基于 Winkler 地基模型,本文将地埋管线简化为弹性地基梁,采用传递矩阵法,得到地面堆载作用下地埋管线受力变形的简化理论分析方法。首先通过与等截面梁解析解的对比验证了本文方法的正确与否。其次采用上述方法得到了不同接头刚度情况下地埋管线的变形受力曲线,通过对比分析认为:相比刚性接头管线而言,同样荷载条件下柔性接头管线的变形峰值较大,在接头处转角不连续。由于柔性接头的存在,沿管线的纵向弯矩的峰值明显小于刚性接头的管线。

结合工程实例,考虑了地铁盾构隧道由于管片接口构造条件而导致的截面刚度弱化,采用适用于地铁隧道的变截面刚度弹性地基梁模型,以上海市地铁保护要求所规定的参考值为控制条件,讨论了地面堆载作用下隧道相应的变形和受力,分析了隧道在地面堆载作用下的承受能力。本文的工作可以为施工区域存在待保护地埋管线的情况提供相应的理论指导。

参 考 文 献

- [1] 黄义,何芳社. 弹性地基上的梁、板、壳[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 李顺群, 郑刚. 复杂条件下 Winkler 地基梁的解析解[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 873—879.
LI Shun-qun, ZHENG Gang. Analytic solution of beams on Winkler foundation under complex conditions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 873—879.
- [3] 吴为义, 张土乔, 孙宇坤. 平面土基刚性圆管基底压力分布的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 137—140.
WU Wei-yi, ZHANG Tu-qiao, SUN Yu-kun. Test study on distribution of base pressure of rigid pipe on flat soil foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 137—140.
- [4] 刘全林, 杨敏. 地埋管与土相互作用分析模型及其参数确定[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 728—731.
LIU Quan-lin, YANG Ming. Analytical model and parameters determination of interaction between buried pipe and soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 728—731.
- [5] 刘全林. 地埋管道与土相互作用平面分析与计算方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 83—88.
LIU Quan-lin. Calculating method and analysis of plane strain question of interaction between buried pipe and soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 83—88.
- [6] KLAR A, MARSHALL A M, SOGA K, et al. Tunneling effects on jointed pipelines[J]. **Canadian Geotechnical Journal**. 2008, 45(1): 131—139.
- [7] 张陈蓉, 蔡建鹏, 黄茂松. 基坑开挖对邻近地埋管线的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊2): 154—157.
ZHANG Chen-rong, CAI Jian-peng, HUANG Mao-song. Influence of deep excavation on adjacent underground pipelines[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp.2): 154—157.
- [8] VESIC A B. Bending of beam resting on isotropic elastic solid[J]. **Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE**, 1961, 87(2): 35—53.
- [9] 戴宏伟, 陈仁朋, 陈云敏. 地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 312—316.
DAI Hong-wei, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-ming. Study on effect of construction loads on longitudinal deformation of adjacent metro tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 312—316.
- [10] 余占奎. 软土盾构隧道纵向设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.