

DOI: 10.11779/CJGE2015S2014

高填方对分层地基地理管线影响的三维分析方法

李俊昱^{1, 2}, 钱建固^{1, 2}, 茹治敏³, 高洁³, 黄利军³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中国石油天然气管道工程有限公司上海分公司, 上海 200127)

摘要: 首先根据层状弹性半空间理论计算出由高填方引起的地理管线所在位置处的土体自由位移场, 之后将得到的土体自由位移场作为外界条件施加于地理管线上, 基于改进的Winkler地基模型, 建立高填方与邻近的软土地基地理管线相互作用的弹性地基梁微分方程, 并运用有限差分法求解该微分方程, 进而提出计算地理管线在高填方条件下响应的三维简化理论分析方法。最后, 通过与有限元算例对比, 表明该方法合理可行, 能够有效的分析软土区域高填方对邻近地理管线的影响。

关键词: 填方; 地理管线; 层状弹性半空间; Winkler地基模型; 三维简化分析方法

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)S2-0065-05

作者简介: 李俊昱(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的学习和研究工作。E-mail: lijun_yu@yeah.net。

Three-dimensional method for response of embedded pipelines to earthfill load

LI Jun-yu^{1, 2}, QIAN Jian-gu^{1, 2}, RU Zhi-min³, GAO Jie³, HUANG Li-jun³

(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; 3. China Petroleum Pipeline Engineering
Corporation Shanghai Branch, Shanghai 200127, China)

Abstract: The earthfill load causes soil motion and further produces additional deformation and stress on the embedded pipelines in the ground. The deformation and stress may damage the pipelines. To avoid the drawbacks of three-dimensional numerical analysis, such as complex modeling and time consuming, a two-stage method (TSM) is proposed for determining the behavior of the adjacent pipelines caused by the earthfill load. Firstly, the additional deformation of soil mass due to the adjacent high fill is calculated by the layered elastic half-space theory. Secondly, the governing differential equations are established based on the Winkler subgrade model and the finite difference method is used to solve the equations, and then the simplified method is derived. Finally, three-dimensional numerical analysis show that the calculated results of analytical solution are reasonable, and the proposed three-dimensional simplified method is able to analyze the influence of earthfill load on the adjacent pipeline buried in layered soils.

Key words: earthfill; embedded pipeline; layered elastic half-space; Winkler subgrade model; 3-D simplified method

0 引言

众所周知, 天然气管线等地理管线广泛分布在地基浅层。然而, 地理运输管线发生过大的变形将易发生爆炸, 将严重危害周边人类和建筑物的安全。

针对填方对地理管线的影响, 分析方法主要有两类: 一类是借助商业有限元软件对地理管线和填方进行三维建模以考虑二者的相互作用; 第二类是得到填方对管道产生的附加分布荷载, 然后基于弹性地基梁模型, 求解管道的应力和位移。如Merling等^[1]根据极限平衡理论, 提出了著名的管道垂直土压力理论。之后, 大量的研究都基于此理论计算管道所受土压力。Chiou等^[2]采用数值模拟的方法对管道在压缩性软土上

的力学性状进行了计算和分析。黄崇伟^[3]通过三维有限元分析模型, 对管土相互作用应力进行计算, 研究表明: 经典马斯顿理论并不能真实的表征管土相互作用模式, 管顶土压力及管周土压力的有限元计算值与实测值更相近。张陈蓉等^[4]应用位移控制有限元法分析了隧道开挖对周围管线的影响。目前的研究一方面大多将土层考虑为均质土层, 没有考虑软土层的影响; 一方面很少考虑引起的土体侧向位移对管道应力的影响, 在假设时, 大多数直接将管道置于荷载区域正下方。鉴于现有理论方法未考虑土体分层性和填方位置

的不确定性, 本文进行了相应的探讨。

本文将高填方引起的周围软土地基竖向和侧向移动作为外部位移条件直接施加到地埋管线上, 将地埋管线简化为弹性地基梁。基于被动受荷条件下地基反力系数的计算公式, 建立了高填方对软土地基地埋管道影响的理论分析方法。借助有限差分的数学手段, 引入虚拟节点, 使计算过程得到简化。通过与有限元计算结果的对比验证了本文方法的合理性及适用性。

填方作用下管道变形模式示意图图 1。

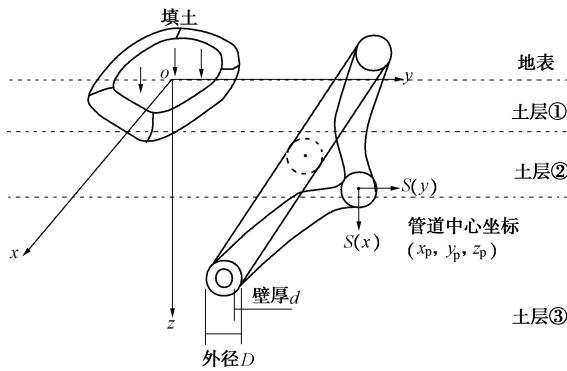


图 1 填方作用下管道变形模式示意图

Fig. 1 Schematic representation of deformation of pipeline induced by earthfill

1 层状弹性半空间理论

1.1 位移控制方程的建立

目前天然气管道的设计建造中, 大部分都在接口处进行加强, 使接口处刚度与管身一致, 因此本文将针对刚度连续管线进行分析。管线接口截面抗弯能力与管身相同, 接口两端转角连续。

将刚度连续地埋管线视为弹性地基梁, 在整个受力变形过程中, 不考虑土体与管线的分离, 即令土体与管线紧密接触且协调变形, 则管线的挠曲线微分方程可以表达为

$$EI \frac{d^2 s(x)}{dx^2} + M = 0 \quad , \quad (1)$$

式中, $s(x)$ 为管线的位移, EI 为管线的等效抗弯刚度, M 为相应截面的弯矩。

利用有限差分法求解式 (1)^[4]。将管线沿着长度方向均分为 n 段, 每段长 h , 各段端点处的节点号 $i=1, 2, \dots, n, n+1$ 。把管线在 i 点处截开, 受力示意图如图 2 所示, 根据左边隔离体的平衡条件得到

$$\begin{aligned} M_i &= -[(i-1)hP_1 + (i-2)hP_2 + \dots + hP_{i-1}] \\ &= -h \sum_{j=1}^{i-1} (i-j)P_j \quad . \end{aligned} \quad (2)$$

由于刚度连续, 所以对于管段节点 i 差分格式如下

$$E_i I_i \frac{s_{i-1} - 2s_i + s_{i+1}}{h^2} + M_i = 0 \quad . \quad (3)$$

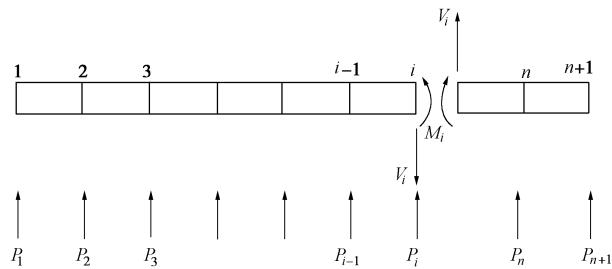


图 2 管线有限差分法示意图

Fig. 2 Sketch of pipeline for finite difference method

将式 (2) 代入式 (3) 就得到了地埋管线微分方程点 i 的差分格式为

$$E_i I_i \frac{s_{i-1} - 2s_i + s_{i+1}}{h^2} - h \sum_{j=1}^{i-1} (i-j)P_j = 0 \quad . \quad (4)$$

以静力平衡条件来补足相应的边界节点微分方程, 分别为管线所受土体抗力对节点 $n+1$ 力矩为 0 及土体抗力之和为 0, 表示为

$$h \sum_{j=1}^n (n+1-j)P_j = 0 \quad , \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} P_j = 0 \quad , \quad (6)$$

联立式 (4) ~ (6), 得到接口管线的平衡方程为

$$[K_p] \{s\} - [H] \{P\} = 0 \quad , \quad (7)$$

式中, $\{s\}$ 为 $n+1$ 阶管线位移列向量, 具体形式依据矩阵而定, $[H]$ 为反力系数矩阵。

$$[H] = h^3 \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 2 & 1 & & & & \\ \dots & \dots & 1 & & & \\ n-1 & \dots & \dots & 1 & & \\ \frac{n}{h^2} & \frac{n-1}{h^2} & \dots & \frac{2}{h^2} & \frac{1}{h^2} & \\ \frac{1}{h^3} & \frac{1}{h^3} & \dots & \dots & \frac{1}{h^3} & \frac{1}{h^3} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)},$$

$$[K_p] = \begin{bmatrix} k_{p_2} & -2k_{p_2} & k_{p_2} & & & \\ \dots & \dots & \dots & & & \\ k_{p_i} & -2k_{p_i} & k_{p_i} & & & \\ \dots & \dots & \dots & & & \\ & & & k_{p_n} & -2k_{p_n} & k_{p_n} \\ 0 & \dots & & & & 0 \\ 0 & \dots & & & & 0 \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)},$$

$[K_p]$ 为管线刚度矩阵, 对于标准节点 $i=2, \dots, n$, $k_{p_i} = E_i I_i$ 。上式中, 位移只针对标准节点而言, 为了求解两端端点处位移, 在建立管线自身平衡方程的基

础上, 进一步假定: 管土之间保持接触, 即在土体位移较小时管土之间不分离。于是, 引入管土变形协调条件:

$$\{s\} = \{u^{\text{free}}\} - [\lambda]\{f\} \quad . \quad (8)$$

式中 $\{u^{\text{free}}\}$ 是 $n+1$ 阶列向量, 表示管线所在位置土体在高填方作用下的自由位移; $[\lambda]$ 为 $n+1$ 阶方阵, 其元素 λ_{ij} 表示 j 点作用单位力时在 i 点引起的位移, 其计算方法与所选择的地基模型有关, 在后文中有详细交代; $\{f\}$ 为 $n+1$ 阶列向量, 表示管线对土体的作用力。

将式(7)和式(8)联立得到管线在高填方作用下的位移控制方程:

$$([K_p] + [K_s])\{s\} = [K_s]\{u^{\text{free}}\} \quad , \quad (9)$$

式中, $[K_s] = [H][\lambda]^{-1}$ 。

1.2 层状弹性半空间地基模型

在软土地基中, 管道有可能处于软夹层或者硬夹层中, 为了考虑软土地基的成层性, 需要引入层状弹性半空间模型, 该模型依赖于 Burmister 解。该解给出了层状弹性半空间表面作用集中力 P 引起周围弹性体位移及内力的解答, 如图 3 所示。

现考虑弹性半空间内作用有任意斜向轴对称荷载, 设其轴对称垂直荷载分量为 $p(r)$, 轴对称水平分量为 $q(r)$, 如图 3 所示。对于地基中任意一点 $A(r, z)$, 其在荷载作用下的自由位移 $\{u^{\text{free}}\}$ 包含两部分: 竖向位移 u 和侧向位移 w 。利用 Burmister 解中通过 Hankel 积分变换所得位移表达式可以得到:

$$u(r, z) = \int_0^\infty \xi \bar{u}(\xi, z) J_1(\xi r) d\xi \quad , \quad (10)$$

$$w(r, z) = \int_0^\infty \xi \bar{w}(\xi, z) J_0(\xi r) d\xi \quad , \quad (11)$$

式中, $J_1(\xi r)$, $J_0(\xi r)$ 分别一阶和零阶贝塞尔函数。

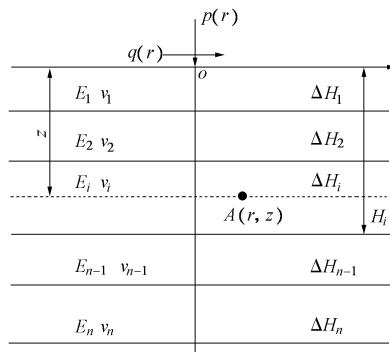


图 3 层状土体示意图

Fig. 3 Schematic representation of layered soils

$\bar{u}(\xi, z)$, $\bar{w}(\xi, z)$ 由如下传递矩阵确定:

$$\{\bar{G}(\xi, z)\} = [D]\{\bar{G}(\xi, H_n^-)\} \quad , \quad (12)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} \{\bar{G}(\xi, z)\} &= \{\bar{u}(\xi, z), \bar{w}(\xi, z), \bar{\tau}(\xi, z), \bar{\sigma}(\xi, z)\}^T, \\ \{\bar{G}(\xi, H_n^-)\} &= \{\bar{u}(\xi, H_n^-), \bar{w}(\xi, H_n^-), \bar{\tau}(\xi, H_n^-), \bar{\sigma}(\xi, H_n^-)\}^T, \\ [D] &= [\Phi(\xi, z - H_i)][\Phi(\xi, -\Delta H_{i+1})] \cdots [\Phi(\xi, -\Delta H_n)] \end{aligned} \right\}$$

其中, ΔH_i 和 H_i 分别为第 i 层土的厚度及层底深度, 传递矩阵 $[\Phi]$ 为 4 阶方阵, 具体形式可参考文献[5]。为了得到式(12)中的 $\{\bar{G}(\xi, H_n^-)\}$, 需要引入边界条件, 层底 $z = H_n$, $\bar{w} = \bar{u} = 0$; 那么 $\{\bar{G}(\xi, H_n^-)\}$ 根据下式求得:

$$\{\bar{G}(\xi, H_n^-)\} = [f]\{\bar{G}(\xi, 0)\} \quad , \quad (13)$$

其中, $[f] = [\Phi(\xi, \Delta H_n)][\Phi(\xi, \Delta H_{n-1})] \cdots [\Phi(\xi, \Delta H_1)]$, $\{\bar{G}(\xi, 0)\} = \{\bar{u}(\xi, 0), \bar{w}(\xi, 0), \bar{\tau}(\xi, 0), \bar{\sigma}(\xi, 0)\}^T$, $\bar{\tau}(\xi, 0)$, $\bar{\sigma}(\xi, 0)$ 根据 $q(r)$, $p(r)$ 利用 Hankel 变换得到。当每层土体参数相同时, Burmister 解便退化为 Boussinesq 解, 因此该地基模型同样适用于均质土体。

1.3 地基反力系数

尽管应用层状弹性理论法可以得到更为合理的结果, 但其理论及编程的较为复杂, 导致其难以推广。与之相反, Winkler 地基模型概念明确, 计算简单, 实际工程中应用更广。对于弹性地基梁理论, 得到一个可靠实用的地基反力系数 k 是关键。俞剑等^[6]给出了土体位移作用下刚度连续地埋管线的地基反力系数计算公式。采用 Winkler 地基弹簧模型来模拟管线与土体的相互作用关系, 其本质上是将土体连续弹性体的特性用一系列相互独立的弹簧来表达。此时, $[\lambda]$ 从满阵退化为对角阵, 主元 $\lambda_{ii} = 1/kh$ 。

Vesic^[7]在 Biot^[8]弹性理论分析基础上提出了在外力荷载条件下地基梁置于半弹性空间地表的地基模量公式为

$$k = 0.65 \frac{E_s}{(1 - \nu_s)^2} \sqrt{\frac{E_s B^4}{EI}} \quad , \quad (14)$$

式中, E_s 和 ν_s 分别为土体变形模量和泊松比, EI 为梁的截面抗弯刚度, B 为梁宽。但是 Vesic 地基变形模量公式针对地基置于地表受外力荷载的情况, 与高填方对地理管线响应分析中管线埋置于土体中受土体位移作用的情况不符合。俞剑等^[6]针对该问题基于弹性半空间模型开展了理论分析, 得到了土体位移作用下刚度连续地埋管线地基反力系数为

$$\left. \begin{aligned} k_h &= \frac{3.08}{\eta} \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} \sqrt{\frac{E_s B^4}{EI}} \quad , \\ \eta &= \begin{cases} 2.18 & (h_m/B \leq 0.5) \\ \left(1 + \frac{1}{1.7h/B}\right) & (h_m/B > 0.5) \end{cases} \quad , \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中, h_m 为管线埋置深度。式(15)表明, 对于埋置

深度趋向无限时, 地基模量是地表时的2.18倍。

2 计算方法验证

为了验证本文方法的正确性, 将采用本文方法计算得到的结果与模型试验及ABAQUS三维有限元结果进行对比。

2.1 模型试验对比

目前针对地表堆载作用下管道变形特性的现场实测匮乏, 特别是对管道侧向影响的可用实测资料几乎没有。为了验证本文理论方法, 考虑管道位于堆载区域正下方的情况进行计算, 并与既有模型试验结果进行对比。

余古奎^[9]采用室内相似模型试验, 得到了软土盾构隧道在局部堆载条件下的竖向变形值。这里, 采用试验原型管道, 管道外径6.2 m, 内径5.5 m, 管道刚度34.5 MPa, 管道中心处在地表下15 m。模型土压缩模量4.23 MPa, 荷载作用范围约为10 m×40 m, 均布荷载值约为11 kPa。可以按照本文方法计算管道差异沉降, 模拟文献[9]中原型隧道的差异沉降, 并与模型试验结果进行对比。结果如图4所示。

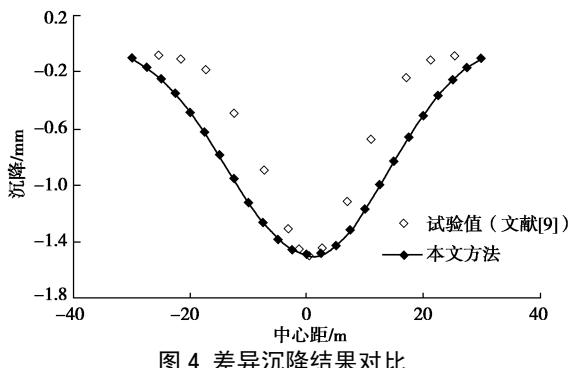


图4 差异沉降结果对比

Fig. 4 Comparison of differential settlements

由图4能看出, 本文计算结果比模型试验结果偏大, 但最大值基本相同, 并且各个点相差不大, 曲线形态比较吻合。文献[9]中理论方法计算结果也比模型实验值偏大, 这也说明了本文方法的可靠性。

2.2 有限元结果对比

为了证明本文方法的有效性, 采用ABAQUS三维有限元算例与本文方法计算结果进行对比。算例模型见图5。具体模型参数: 两端简支的地理管道, 长160 m, 外径1 m, 壁厚10 mm。把多层地基简化为三层, 第一层土的变形模量为16 MPa, 泊松比为0.3; 第二层土为软土层, 变形模量为4 MPa, 泊松比0.4; 第三层土的变形模量为40 MPa, 泊松比0.4。第一层土的厚度取4 m; 第二层, 即软土层的厚度取4 m; 第三层土厚度取无限。管道埋置于软土层中, 埋置深度为6 m, 管道中心距离填土中心12 m。地表面存在高填方引起的超载, 作用范围为长40 m, 宽20 m,

超载值 p 取200 kPa。

以上基于分层地基假定的管道受高填方引起地的变形及内力分布如图6, 7所示, 图中曲线沿 x 方向, 即管道的纵向长度方向分布。由图中对比可见, 管道变形和内力沿管长的分布规律与有限元非常一致, 说明了本文方法的准确性。另一方面, 由图6可以看出, 本文简化分析方法计算的管道变形要大于有限元数值模拟结果, 这与既有文献[3]的研究结论相一致。注意到, 纵向大尺寸的天然气地理管线, 受填方影响区域在纵向上约束边界并不清晰, 理论上需要将管道纵向的几何尺寸设置足够大才能有效地消除边界效应。而实际三维有限元数值模拟时, 难以将数值模型的几何尺寸设置足够大, 使得模型边界对土体和管道往往产生过大的约束效应, 使得变形计算值偏小, 且填土外区域地表隆起, 这与实际并不吻合。相比较有限元计算结果, 无疑简化的弹性半空间分层地基模型计算结果与实际更为吻合。

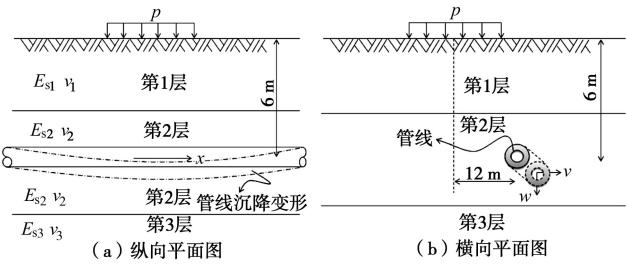


图5 分层及计算参数示意图

Fig. 5 Schematic representation of soil stratification and pipeline for parametric study

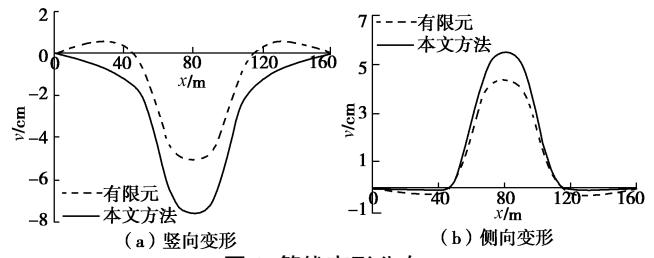


图6 管线变形分布

Fig. 6 Displacements for pipelines

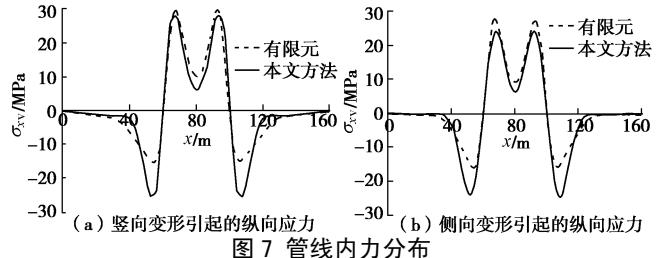


图7 管线内力分布

Fig. 7 Calculated stresses for pipeline

3 影响规律分析

实际工程中, 高填方区域所在位置是不固定的, 管道不一定处于填方区域的正下方。当管道中心偏离

高填方区域中心一定距离(下文的偏移距 D_p)时, 按照以往方法只计算竖向位移引起的管道纵向应力, 而忽略侧向位移引起的管道纵向应力, 必然会使得计算结果偏小, 对评估管道的安全状态产生不利影响。下文对这种不利情况进行计算。

算例模型与 2.2 节算例相同, 土性参数取相同值, 第一层土厚度取 2 m, 软土层厚度取 7 m。图 8 给出了管道处于不同埋深条件下, 偏移距 D_p 与纵向应力比 $\sigma_{xv}/\sigma_{x\max}$ 、最大纵向应力 $\sigma_{x\max}$ 的关系。纵向应力比表达 $\sigma_{xv}/\sigma_{x\max}$ 的是侧向位移引起的管道纵向应力与管道最大纵向应力的比值, 从一定程度上反映出侧向位移对管道最大纵向应力的影响程度。

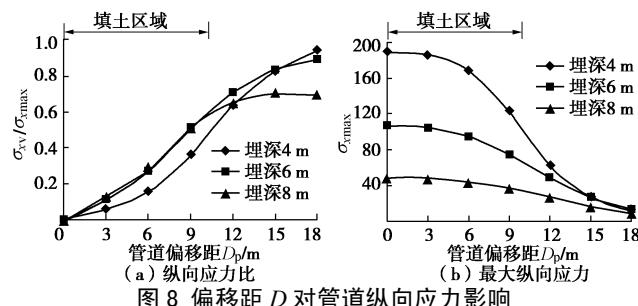


Fig. 8 Effects of offset distance on longitudinal stress

由图 8 可见, 随着偏移距的增大, 即随着地埋管道逐渐远离填方, 侧向变形引起的管道纵向应力占管道最大纵向应力的比重增大, 这说明侧向变形对管道的纵向应力影响逐渐显著。一方面, 管道位于填方正下方时, 管道的纵向应力主要决定于填方引起的管道竖向变形; 而当管道中心位于 15 m 处时, 管道的纵向应力就主要取决于填方引起的管道侧向变形。另一方面, 虽然随着偏移距的增大, 管道的最大纵向应力减小, 弱化了不计侧向变形对管道安全性判别的影响。如偏移距为 18 m 时, 填方引起管道纵向应力的已经很小, 此时, 即使侧向变形对管道纵向应力起主要作用, 也可以不考虑侧向变形的影响。但在一定偏移范围内, 考虑侧向变形的影响是必须的。如图 7 中, 当偏移距离为 9 m 时, 对于埋置深度为 4 m 的管道, 高填方引起的管道最大纵向应力为 123.4 MPa, 而其中侧向变形引起的纵向最大应力为 44.9 MPa, 应力比接近 0.4。此时如果只考虑竖向位移的影响是显然不合适的, 会使得计算结果严重偏小。

4 结语

高填方引起的地埋管道不均匀变形是影响管线正常使用的主要因素之一。本文将根据弹性地基梁理论, 提出了计算地埋管线在高填方条件下响应的三维简化分析方法, 并考虑了土的分层性。通过与室内模型试验及有限元算例的对比, 表明该方法合理可行, 能够

有效分析软土区域高填方对地埋管线的影响。

结合本文的计算方法, 通过不同的算例, 表明了高填方引起的地埋管道侧向位移也会对管道响应产生一定影响。本文的工作能够为高填方附近区域存在待保护地埋管线的情况提供相应的参考。

参考文献:

- [1] MERLING Spangler, RICHARD Handy. Soil mechanics[M]. London: Intext Press, 1973.
- [2] CHIOU Y J, CHI S Y. Numerical modeling for buckling of buried pipelines induced by compressive ground failure[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 1996, **19**(3): 321 – 332.
- [3] 黄崇伟. 沟埋式输油管道管土相互作用分析[J]. 公路工程 ISTIC, 2011, **36**(2): 164 – 168. (HUANG Chong-wei. Theories on Mechanics and Pipe-soil Interaction Model of Channel-buried Pile[J]. Highway Engineering ISTIC, 2011, **36**(2): 164 – 168. (in Chinese))
- [4] 张陈蓉, 俞 剑, 黄茂松. 隧道开挖对邻近非连续接口地埋管线的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1018 – 1026. (ZHANG Chen-rong, YU Jian, HUANG Mao-song. Responses of adjacent underground jointed pipelines induced by tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1018 – 1026. (in Chinese))
- [5] AI Z-Y, YUE Z-Q, RHAM L-G, et al. Extended sneddon and muki solutions for multilayered elastic materials[J]. International Journal of Engineering Science, 2002, **20**: 1453 – 1483.
- [6] 俞 剑, 张陈蓉, 黄茂松. 被动状态下地埋管线的地基模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(1): 123 – 132. (YU Jian, ZHANG Chen-rong, HUANG Mao-song. Subgrade modulus of underground pipelines subjected to soil movements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(1): 123 – 132. (in Chinese))
- [7] VESIC A B. Bending of beam resting on isotropic elasticsolid[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1961, **87**(2): 35 – 53.
- [8] BIOT M A. Bending of an infinite beam on an elastic foundation[J]. Journal of Applied Mechanics, ASME, 1937, **59**: A1 – A7.
- [9] 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. (YU Zhan-kui. Study on the longitudinal design method of shield tunnel in soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))