DOI：10.16285/j.rsm.2017.04.030

不均匀土体位移引起地下管线弯曲变形研究

史江伟[1]，陈 丽[2]

（1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室，江苏 南京 210098；2. 镇江新区建设工程质量中心试验室，江苏 镇江 212132）

摘 要：隧道开挖和管线置换引起的应力变化将不可避免地导致土体位移，进而对上覆既有管线产生诸多的不利影响。国内外学者对管-土相互作用开展了大量的研究，但用于预估隧道开挖和管线置换引起既有管线弯曲变形的简单并且有效的设计图表尚未提出。采用 ABAQUS 商业软件，对隧道-土-管线、管线置换-土-管线间的相互作用开展系统的有限元仿真模拟。通过采用管线不同运动方向下的等效管-土相对刚度，提出了隧道开挖和管线置换引起的管线弯曲变形的设计图表，并采用现场实测数据和离心模型试验结果验证此设计图表的合理性。设计图表中的管线最大弯曲曲率与土体最大曲率的比值和管-土相对刚度具有非常好的相关性。工程师一旦得到隧道开挖或管线置换引起的土体位移、管线尺寸、管线参数和土体参数，此设计图表可用来预测隧道开挖或管线置换引起既有管线的最大弯曲曲率。

关 键 词：不均匀土体位移；地下管线；弯曲变形；设计图表

中图分类号：TU 433 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017)04－1164－07

Investigation of bending deformation of underground pipelines induced by differential ground movements

SHI Jiang-wei[1], CHEN Li[2]

（1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Laboratory of Quality Control of Engineering Projects in Zhenjiang New District, Zhenjiang, Jiangsu 212132, China）

Abstract: Stress changes induced by tunnel excavation and static pipe bursting inevitably lead to soil movements, and cause adverse effects on existing pipelines. Although the pipe-soil interaction has attracted increasing research attention worldwide, a simplified design code has not been developed to directly estimate bending strains of existing pipelines due to tunnel excavation and static pipe bursting. In this study, we use the commercial software of ABAQUS to systemically simulate the tunnel-soil-pipeline and pipe bursting-soil-pipeline interactions, and develop a single dimensionless plot for calculating bending strains of existing pipelines due to static pipe bursting and tunneling by using equivalent soil-pipe stiffness. Results of field monitoring and centrifuge tests are adopted to verify the proposed dimensionless plot. The ratio of the maximum pipeline curvature to the maximum ground curvature correlates well with the proposed equivalent subgrade soil stiffness. By given the ground displacement profile, pipe dimension, pipe material properties, and soil properties, engineers can apply the proposed dimensionless plot to directly estimate maximum pipeline curvature and/or strains due to tunneling and pipe bursting.

Keywords: differential ground movements; underground pipelines; bending deformation; calculation chart

1 引 言

盾构隧道施工引起的土体应力变化将不可避免地导致土体沉降。沉降主要包括：盾构机外壳与周围土体剪切造成土体扰动产生的沉降、盾尾间隙沉降和后续沉降等[1]。为减少土体扰动，工程中往往采用无开挖法对既有破裂管线进行置换。在新管线端部安装锋利的牵引头，将旧管线破碎并扩孔，较大尺寸的新管线沿旧管线内部穿过[2]。因此，管线置换将不可避免地导致土体应力增加，从而引起

收稿日期：2016-07-07
基金项目：国家自然科学基金(No. 51608170)；江苏省自然科学基金(No. BK20160863)；中国博士后科学基金(No. 2016M601709)；江苏博士后科研资助计划(No. 1601074C)；中央高校基本科研业务费项目(No. 2015B29414)。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51608170), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20160863), the China Postdoctoral Science Foundation (2016M601709), the Jiangsu Provincial Postdoctoral Science Foundation (1601074C) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015B29414).
第一作者简介：史江伟，男，1984 年生，博士研究生，主要从事土-结构相互作用方面的研究工作。E-mail: ceshijiangwei@163.com

地表隆起。隧道开挖或者管线置换引起上覆既有管线产生较大变形时，不仅会破坏水、电运输，更有甚者威胁到居民的生命安全。例如：2007 年 2 月 5 日，南京地铁隧道施工导致汉中路地面塌陷，造成天然气管道断裂爆燃，路面被炸出大坑，附近大厦被爆燃的火苗袭击[3]。

假设隧道开挖引起的土体沉降槽采用高斯曲线拟合，Attewell[4]、Klar[5−7]、张坤勇[8]等采用 Winkler 弹性地基梁理论，提出了均质地基中隧道开挖引起上覆连续管线变形的解答。另有一些学者[9−11]利用位移控制边界元、有限元耦合分析法和能量方法建立变分控制方程，提出了隧道穿越地下连续管线的解答。然而，上述理论分析大都假定：管线隆起、下沉时管−土相互作用完全一致。通过开展隧道开挖引起上覆管线变形的室内模型和离心模型试验研究[12−15]，发现受管−土刚度差异的影响，管线相对于土体位移形成上拱区（隆起）和下拉区（下沉）。另有一些学者开展了有限元仿真模拟，研究隧道开挖引起既有管线的变形[16−18]。相比于隧道−管线相互作用，管线置换引起既有管线变形的研究相对较少。通过开展大尺寸的物理模型试验和有限元仿真模拟，发现管线置换引起的地表隆起也可采用高斯曲线拟合[19−21]。虽然管线置换引起的最大地表隆起只有 6 mm，但引起的管线最大弯曲应变高达 880×10^{-6} [19−20]。由此可见，隧道开挖和管线置换对既有地下管线均造成很大的不利影响。然而，用于预测隧道开挖和管线置换引起既有管线变形的设计图表尚未提出。本文将通过开展系统的有限元参数分析，结合文献报道的实测数据，提出隧道开挖和管线置换引起既有管线弯曲变形的设计图表。

2　不均匀土体位移

图 1 显示了隧道开挖和管线置换引起的土体位移。隧道开挖引起土体沉降，而管线置换导致地表隆起。隧道开挖[4−8, 12−15]和管线置换[19−21]引起的土体位移可采用高斯曲线拟合。拟合不均匀土体位移的高斯曲线为

$$S(x)=S_{\max}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2i^2}} \tag{1}$$

式中：$S(x)$为土体位移；$S_{\max}$为隧道开挖和管线置换引起的最大沉降或最大隆起；x 为距离隧道或管线置换中心线的距离；i 为高斯曲线拐点到中心线距离。高斯曲线的最大位移处对应曲线的最大曲率。

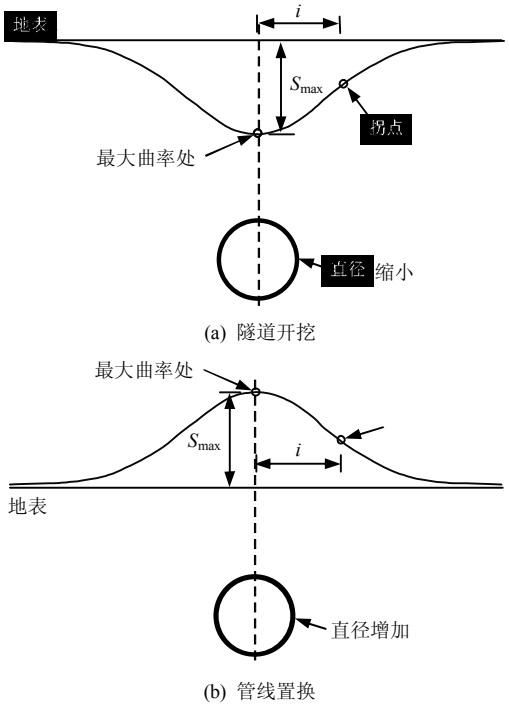


图 1　隧道开挖和管线置换引起的不均匀土体位移

Fig.1　Differential ground movements due to tunneling and pipe bursting

3　管−土相互作用

图 2 为管线向上、向下运动时土阻力与管−土相对位移曲线。管−土相互作用的力−位移曲线为弹塑性（实线所示）。工程中，往往将管−土相互作用的力−位移曲线简化为双线性模型（虚线所示）。管−土相互作用力−位移曲线由最大土体阻力（q_{u}、q_{d}）和最大土体阻力对应的管−土相对位移（δ_{ru}、δ_{rd}）控制。

条形地基的承载力常用于计算管线下沉时的最大土阻力：

$$q_{\mathrm{d}}=\gamma HN_{\mathrm{q}}D+\frac{1}{2}\gamma D^2N_{\mathrm{r}} \tag{2}$$

式中：N_{q}和N_{r}为条形地基的承载力系数；γ 为土体重度；H 为管线埋深；D 为管线外径。常用于计算管线隆起时最大土阻力[22−24]的公式为

$$q_{\mathrm{u}}=N_{\mathrm{v}}\gamma HD \tag{3}$$

式中：N_{v}为无量纲参数，此参数与土体内摩擦角及管线埋深比紧密相关[22]。δ_{rd}和δ_{ru}分别为管线下沉、隆起时最大土阻力对应的管−土相对位移。δ_{rd}和δ_{ru}分别与管线直径 D 和埋深 H 呈线性关系。当土体从松砂过渡到密砂时，δ_{rd}和δ_{ru}的变化范围分别为 $0.10\sim0.15D$ 和 $0.010\sim0.015H$ [22]。

对于管−土相互作用，土阻力与位移关系曲线

的斜率定义为土体刚度模量。管线隆起和下沉时的土体刚度模量分别为 K_u 和 K_d：

$$K_u = \frac{q_u}{\delta_{ru}} \text{ 和 } K_d = \frac{q_d}{\delta_{rd}} \quad (4)$$

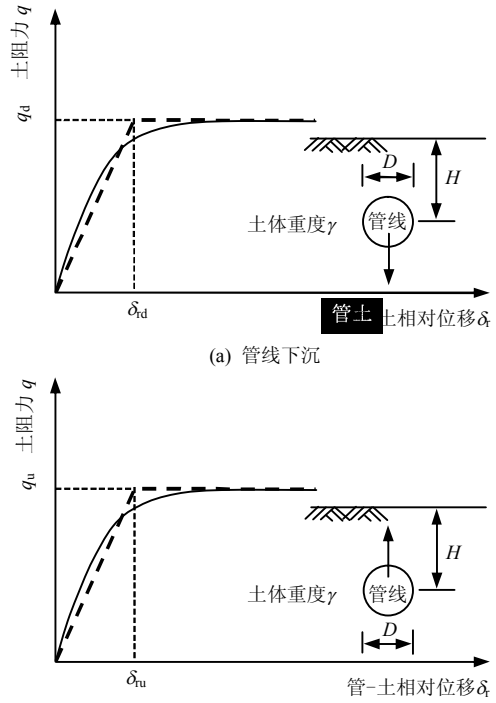


图 2 管-土相互作用的力-位移曲线

Fig.2 Force-displacement curves of pipe-soil interaction

4 有限元模型及其验证

4.1 有限元模型

本文采用 ABAQUS 商业软件开展有限元仿真模拟，研究隧道开挖及其管线置换引起的不均匀土体位移对上覆既有管线的影响。图 3 为隧道开挖引起的不均匀土体位移对既有管线影响的有限元模型。为简化，管线置换的有限元图暂不给出。有限元中，管线采用梁单元进行模拟，并赋予管线的截面属性。管-土相互作用采用 ABAQUS 商业软件提供的 PSI 单元进行模拟。管-土不同方向的力-位移曲线采用图 2 定义的关系曲线模拟。隧道开挖引起的土体位移作为边界条件直接施加在 PSI 单元上。

4.2 模型验证

Takagi 等[1]监测了隧道开挖引起既有连续铁管的弯曲变形。铁管长度、直径、壁厚和埋深分别为 13.5 m、0.165 m、10 mm 和 1.58 m。隧道半径和埋深分别为 2.42 m 和 8.35 m。既有管线与隧道开挖方向正交。土体重度和内摩擦角分别为 20 kN/m^3 和 40°。铁管的弹性模量和泊松比分别为 210 GPa 和 0.3。根据式（2）、（3），管线隆起和下沉的最大土阻力分别为 38.7 kN/m 和 361.7 kN/m，对应的管-土相对位移分别为 15.8 mm （0.01 H）和 16.5 mm （0.1 D）。Cholewa 等[20]开展了管线置换引起上覆既有管线变形的室内模型试验研究。外径为 168 mm 的聚乙烯管（PVC）用来置换内径为 153 mm 的混凝土管。置换管线的中心线到地表距离为 1.5 m。既有 PVC 管与置换管线正交，其长度、直径、壁厚和埋深分别为 4.0 m、0.122 m、7 mm 和 0.88 m。土体重度和摩擦角分别为 20.9 kN/m^3 和 40°。PVC 管弹性模量和泊松比分别为 3.3 GPa 和 0.2。管线隆起和下沉时的最大土阻力分别为 12.5 kN/m 和 158.2 kN/m，对应的管-土相对位移为 8.8 mm （0.01 H）和 12.2 mm（0.1 D）。采用高斯曲线对隧道开挖和管线置换引起的土体位移进行拟合。对于隧道开挖，S_{max} 和 i 分别为-45.0 mm 和 2.51 m；对于地表隆起，S_{max} 和 i 分别为 6.7 mm 和 0.35 m。

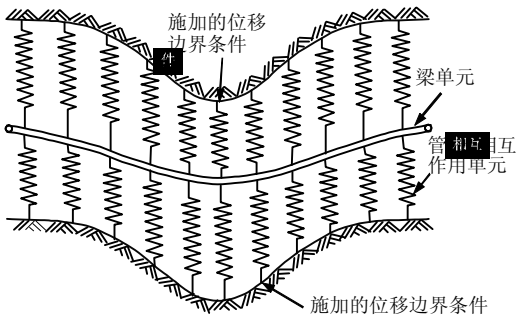


图 3 不均匀地表沉降引起管线变形的有限元简图

Fig.3 Illustration of finite element model of pipeline deformation caused by differential ground settlement

图 4 为隧道开挖和管线置换引起既有地下管线弯曲应变的实测值和计算值。发现，本文建立的有限元模型可以很好地反映隧道开挖引起管线的弯曲应变，尤其是管线的最大弯曲应变。对于管线置换，计算的最大弯曲应变略大于实测值。因此，一旦确定不均匀土体位移、管线尺寸、管线埋深、管线材料属性及其土体参数，本文提出的有限元数值模拟方法可很好地模拟管-土间的相互作用。

5 有限元参数分析

5.1 计算工况

表 1 汇总了有限元参数分析中不均匀土体位移。对于隧道开挖，最大土体沉降 S_{max} 介于 0.025～0.300 m 之间，土体沉降槽宽度 i 位于 2.0～6.0 m 之间。对于管线置换，最大土体隆起 S_{max} 介于 0.005～

0.200 m 之间，土体隆起曲线的宽度 i 位于 0.2～5.0 m 之间。

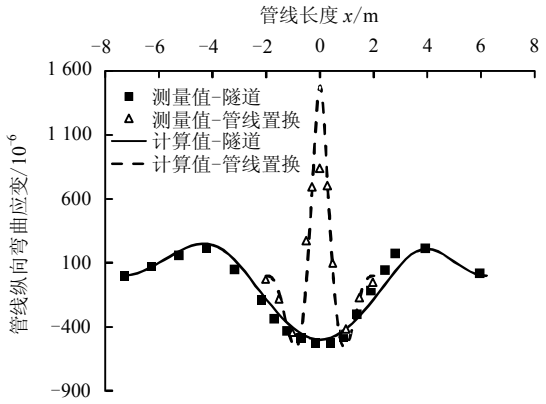


图 4　不均匀土体位移引起管线弯曲应变的计算值和实测值

Fig.4　Comparison of measured and computed bending strains of pipelines due to differential soil movements

表 1　有限元参数分析考虑的不均匀土体位移

Table 1　Differential soil movements considered in the numerical parametric study

工况	最大位移 S_{max}/m	土体位移槽宽度 i/m
隧道开挖	0.025～0.300	2.0～6.0
管线置换	0.005～0.200	0.2～5.0

表 2 为有限元参数分析考虑的管线尺寸。管线的直径和壁厚分别介于 0.14～1.02 m 和 6～26 mm。管线的材料为铁管、铸铁管和 PVC 管，此 3 种材料的弹性模量分别为 210、84、3.3 GPa。

表 2　有限元参数分析考虑的管线尺寸

Table 2　Pipeline dimensions considered in the numerical parametric study

直径 D/m	壁厚 T/mm	直径 D/m	壁厚 T/mm
0.14	6	0.61	10
0.27	6	0.81	13
0.51	10	1.02	26

表 3 为有限元参数分析考虑的不同土体参数。土体为松砂、中密砂和密砂，对应的土体内摩擦角为 30°～40°，土体重度为 16～20 kN/m^3。

表 3　有限元参数分析考虑的土体参数

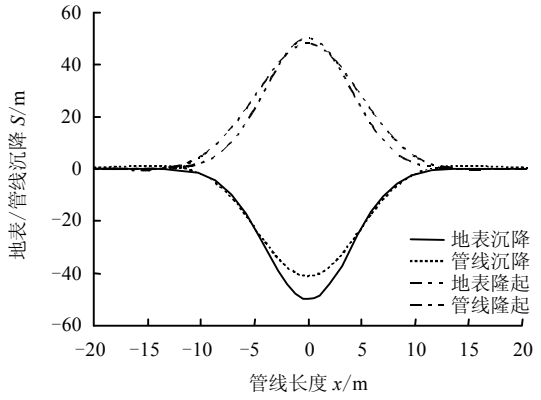
Table 3　Soil properties considered in numerical parametric study

土体	摩擦角 φ'/(°)	重度 γ/(kN/m^3)
松砂	30	16.0
中密砂	35	18.0
密砂	40	20.0

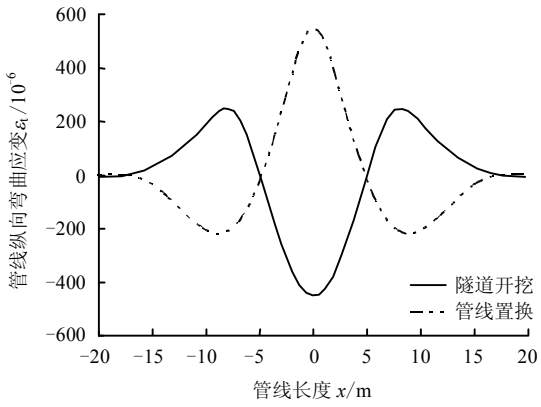
5.2　不同土体位移方向对管-土相互作用的影响

根据国内外学者的研究成果[12−15]：受管-土刚度差异的影响，管线变形与周围土体位移并不一致。

图 5(a)显示了不同方向土体位移对管线位移的影响。隧道开挖和管线置换引起的土体位移为 S_{max}= 0.05 m，i = 4 m。管线的外径、厚度和埋深分别为 0.51、0.01、1.155 m。土体的内摩擦角和重度分别为 40°和 20 kN/m^3。在新建隧道中心线上方，既有管线相对于土体往上运动；而对于管线置换，既有管线相对于土体是向下运动的。相比于隧道开挖，管线置换时管-土的位移差明显较小。图 5(b)显示了不同方向土体位移对管线弯曲应变的影响。管线置换引起的弯曲应变明显大于隧道开挖引起的弯曲应变。这是因为管线下沉（管线置换）的土阻力明显大于隆起（隧道开挖）的土阻力。



(a) 地表位移和管线变形



(b) 管线弯曲应变

图 5　不同管线运动方向对管线变形的影响

Fig.5　Influences of different pipe-soil relative movements on pipeline deformation

5.3　不均匀土体位移引起管线弯曲变形设计图表

图 6 显示了隧道开挖和管线置换引起既有管线弯曲应变的有限元结果。通过采用管-土相对刚度 $[E_pI_p/(K_{eq}i^4)](S_{max}/i)^{0.5}$ 和管线与地表最大曲率比值

（$\kappa_{\mathrm{pmax}}/\kappa_{\mathrm{gmax}}$），隧道开挖和管线置换引起的管线弯曲变形（共计 1 660 个点）呈现出很好的相关性。管线的最大曲率 κ_{pmax} 为

$$\kappa_{\mathrm{pmax}}=\frac{M_{\max}}{E_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{p}}} \tag{5}$$

式中：$M_{\max}$ 为管线最大弯矩；E_{p} 为管线弹性模量；I_{p} 为管线惯性距。

κ_{gmax} 为最大地表曲率，发生在最大土体沉降或隆起处。对地表位移即式（1）取二次偏导数，可得最大地表曲率为

$$\kappa_{\mathrm{gmax}}=\frac{S_{\max}}{i^2} \tag{6}$$

$[E_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{p}}/(K_{\mathrm{eq}}i^4)](S_{\max}/i)^{0.5}$ 为管−土相对刚度。K_{eq} 为等效刚度，由向上、向下管−土相对运动时的土体模量组成（K_{u} 和 K_{d}）。根据图 5 显示的结果，在土体最大位移处，隧道开挖引起的管线相对于土体往上运动，但管线置换引起的管线相对于土体往下运动。因此，K_{u} 和 K_{d} 分别是隧道开挖和管线置换引起管线弯矩的主要影响因素。对于隧道开挖和管线置换，等效刚度 K_{eq} 为

$$K_{\mathrm{eq}}=\begin{cases}K_{\mathrm{u}}^{0.9}K_{\mathrm{d}}^{0.1} & \text{隧道开挖}\\ K_{\mathrm{u}}^{0.1}K_{\mathrm{d}}^{0.9} & \text{管线置换}\end{cases} \tag{7}$$

对于隧道开挖，管线往上和往下运动时的土体刚度的指数分别为 0.9 和 0.1；而对于管线置换，管线往上和往下运动时的土体刚度的系数为 0.1 和 0.9。

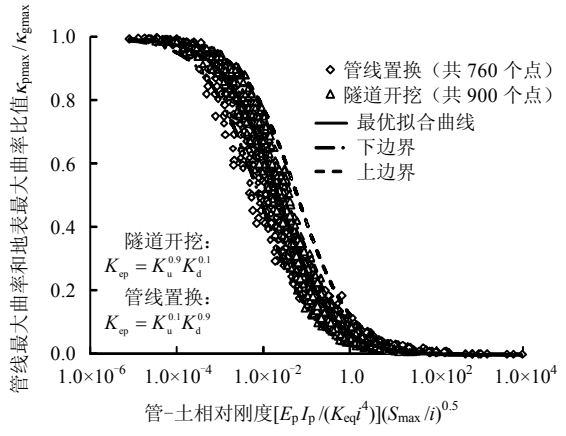


图 6 不均匀土体位移引起管线弯曲应变的设计图表

Fig.6 Dimensionless plot of pipeline bending strain due to differential ground movements

图 6 结果显示：管线和地表最大曲率的比值随着管线相对刚度的增加而逐步递减。当管−土相对刚度从 1.0×10^{-5} 增加到 1.0×10^{4} 时，管线的曲率比从 1 降低到 0。当管线相对刚度小于 1.0×10^{-4} 时，管线的曲率比接近于 1。这说明，此时管线相对于周围土体几乎柔性，与周围土体一起运动。当管线相对刚度大于 100 时，管线的曲率比接近于 0。此时管线相对于周围土体几乎刚性，不与周围土体一起运动。对于此种情况，若仍假设管线和周围土体一起运动，便会过大地估计不均匀土体位移产生的管线弯曲变形。这也说明考虑土体刚度对预测管线弯曲曲率的重要性。

为直接使用该设计图表，对图 6 的有限元结果给出最优拟合曲线方程：

$$y=\frac{1}{13.7x^{0.69}+1} \tag{8}$$

式中：y 为曲率比 $\kappa_{\mathrm{pmax}}/\kappa_{\mathrm{gmax}}$；$x$ 为管−土相对刚度 $(E_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{p}}/K_{\mathrm{eq}})(S_{\max}/i)^{0.5}$。有限元结果的上、下限拟合曲线分别为

$$y_{\text{上限}}=\frac{1}{6.8x^{0.69}+1} \tag{9}$$

$$y_{\text{下限}}=\frac{1}{27.6x^{0.69}+1} \tag{10}$$

5.4 设计图表的验证

根据文献报道的隧道开挖引起管线弯曲变形的离心试验结果用于验证新提出的设计图表。Vorster 等[14]研究了不同管线刚度对隧道−管线相互作用的影响。管线材料为铝和有机玻璃，此两种材料的弹性模量分别为 70、2.93 GPa。铝管外径 D、管壁厚度 T、惯性距 I_{p} 和埋深 H 分别为 1.19 m、90 mm、4.7×10^{-2} m^4 和 4.17 m。隧道在松砂中开挖，对应的砂土重度 γ 和内摩擦角 φ' 分别为 15.6 kN/m^3 和 32°。基于式（2）、（3），管线隆起 q_{u} 和下沉 q_{d} 的最大土阻力分别为 164.5、2 065.2 kN/m。最大土阻力对应的向上 δ_{ru} 和向下 δ_{rd} 的管−土相对位移分别为 63 mm（0.015 H）和 179 mm（0.15 D）。因此，管线隆起 K_{u} 和下沉 K_{d} 时的土体刚度分别为 2.6×10^{3}、1.2×10^{4} kPa。当隧道开挖引起的地层损失为 1%和 2%时，拟合的 i 分别为 5.17 和 4.16 m，对应的 $S_{\max}$ 分别为 0.021 和 0.043 m。此两个土层损失对应的管−土相对刚度 $(E_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{p}}/(K_{\mathrm{u}}^{0.9}K_{\mathrm{d}}^{0.1}i^4))(S_{\max}/i)^{0.5}$ 为 9.7×10^{-2} 和 3.7×10^{-1}，管线最大曲率和地表最大曲率的比值（$\kappa_{\mathrm{pmax}}/\kappa_{\mathrm{gmax}}$）分别为 0.31、0.12[14]。

在相同土层中，Vorster 等[14]研究了隧道开挖对有机玻璃管线的影响。有机玻璃管的 D、T、I_{p} 和 H 的原型尺寸为 1.20 m、150 mm、7.0×10^{-2} m^4 和 4.2 m。当地层损失为 1%和 2%时，i 分别为 5.02 与 4.28 m，$S_{\max}$ 分别为 0.018、0.036 m。采用上述方法，管−土

相对刚度为 6.2×10^{-3} 和 1.8×10^{-2}；管线曲率比为 0.75 和 0.32。

图 7 比较了本文提出的设计图表和现场实测、离心模型试验结果。由图可知，现场实测和离心模型试验结果与设计图表十分吻合。工程中一旦获取不均匀土体位移、管线尺寸、管线参数和土体参数，图 6、7 和式（8）～（10）便可直接用于计算不均匀土体位移引起的管线弯曲变形。

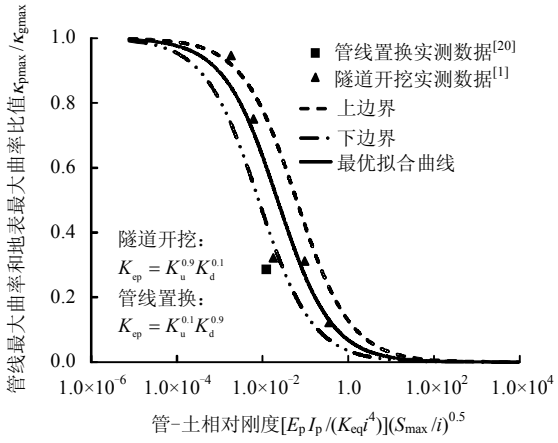


图 7　管线弯曲应变设计图表的验证
Fig.7　Validation of dimensionless plot of pipeline bending strain

6　结　论

（1）在隧道开挖引起的最大土体沉降处，管线相对于土体往上运动；而管线置换引起的最大土体隆起处，管线相对于土体往下运动。隧道开挖和管线置换引起的管线最大弯曲曲率分别由管线向上和向下运动时的土体刚度决定。

（2）通过采用管线不同运动方向下的等效管−土相对刚度，隧道开挖和管−线置换引起的管线变形均可采用管线曲率比和等效管土相对刚度进行汇总。本文提出的管线与土体最大曲率的比值和管−土相对刚度具有非常好的相关性。

（3）当管−土相对刚度从 1.0×10^{-5} 增加到 1.0×10^{4} 时，管线的曲率比从 1 降低到 0。当管线相对刚度小于 1.0×10^{-4} 时，管线的曲率比接近于 1。这说明，此时管线相对于周围土体几乎柔性。当管线相对刚度大于 100 时，管线的曲率比接近于 0。此时管线相对于周围土体几乎刚性，不与周围土体一起运动。

（4）对管线曲率比和管−土相对刚度的关系进行曲线拟合，得到了最优、上限和下限的拟合曲线。工程中一旦得到隧道开挖或管线置换引起的土体位移、管线尺寸、管线参数和土体参数，本文提出的设计图表或拟合曲线便可以用来预测隧道开挖和管线置换引起既有管线的弯曲变形。

本文所提方法对于砂土地层中隧道开挖和管线置换引起的上覆连续管线变形的评价较为适用。

参 考 文 献

[1] TAKAGI N, SHIMAMURA K, NISHIO N. Buried pipe responses to adjacent ground movements associated with tunneling and excavations[C]//GEDDES J D, CARDIFF U K. Proceedings of the 3rd International Conference on Ground Movements and Structures: [S. l.]: [s. n.], 1984: 97－113.

[2] CHAPMAN D N, NG P C F, KARRI R. Research needs for on-line pipeline replacement techniques[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2007, 22(5－6): 503－514.

[3] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 303－309.
ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, WANG Meng-su, et al. Catastrophe mechanism and control technology of ground collapse induced by urban tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp. 1): 303－309.

[4] 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.

[5] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Soil-pipe-tunnel interaction: Comparison between Winkler and elastic continuum solutions[J]. **Géotechnique**, 2005, 55(6): 461－466.

[6] KLAR A, ELKAYAM I, MARSHALL A. Design oriented linear-equivalent approach for evaluating the effect of tunneling on pipelines[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2016, 142(1): 04015062.

[7] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Elastoplastic solution for soil-pipe-tunnel interaction[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(7): 782－792.

[8] 张坤勇, 王宇, 艾英波. 任意荷载下管土相互作用解答[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1189－1193.
ZHANG Kun-yong, WANG Yu, AI Ying-bo. Analytical solution of interaction between pipelines and soils under arbitrary loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical**

Engineering, 2010, 32(8): 1189－1193.

[9] 赵智涛, 刘军, 王霆, 等. 地铁暗挖施工引起的管线与地层沉降关系研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1159－1166.
ZHAO Zhi-tao, LIU Jun, WANG Ting, et al. Relationship between the surface subsidence and the pipeline displacement induced by metro tunnel construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 1159－1166.

[10] ZHANG Z G, HUANG M S. Boundary element model for analysis of the mechanical behavior of existing pipelines subjected to tunneling-induced deformations[J]. **Computers and Geotechnics**, 2012, 46: 93－103.

[11] 刘晓强, 梁发云, 张浩, 等. 隧道穿越引起地下管线竖向位移的能量变分分析方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 217－222.
LIU Xiao-qiang, LIANG Fa-yun, ZHANG Hao, et al. Energy variational solution for settlement of buried pipeline induced by tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp. 2): 217－222.

[12] 王正兴, 缪林昌, 王冉冉, 等. 砂土隧道施工对下卧管线影响的试验和数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 182－188.
WANG Zheng-xing, MIAO Lin-chang, WANG Ran-ran, et al. Physical model tests and PFC^{3D} modeling of soil-pipe interaction in sand during tunneling[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(1): 182－188.

[13] 王正兴, 缪林昌, 王冉冉, 等. 砂土中隧道施工对相邻垂直连续管线位移影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 143－149.
WANG Zheng-xing, MIAO Lin-chang, WANG Ran-ran, et al. Model test study of vertical buried continuous pipelines displacements affected by tunnelling in sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp. 2): 143－149.

[14] VORSTER T E B, 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.

[15] 朱叶艇, 张桓, 张子新, 等. 盾构隧道推进对邻近地下管线影响的物理模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 151－160.
ZHU Ye-ting, ZHANG Huan, ZHANG Zi-xin, et al. Physical model test study of influence of advance of shield tunnel on adjacent underground pipelines[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp. 2): 151－160.

[16] 吴波, 高波, 索晓明, 等. 城市地铁隧道施工对管线的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 657－662.
WU Bo, GAO Bo, SUO Xiao-ming, et al. Study on influence of metro tunnel excavation on buried pipelines[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 657－662.

[17] 毕继红, 刘伟, 江志峰. 隧道开挖对地下管线的影响分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1317－1321.
BI Ji-hong, LIU Wei, JIANG Zhi-feng. Analysis of effects of tunnel excavation on underground pipeline[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1317－1321.

[18] 魏纲, 朱奎. 顶管施工对邻近地下管线的影响预测分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 825－831.
WEI Gang, ZHU Kui. Prediction for response of adjacent pipelines induced by pipe jacking construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 825－831.

[19] CHOLEWA J A, BRACHMAN R W I, MOORE I D, et al. Ground displacements from a pipe-bursting experiment in well-graded sand and gravel[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 135(11): 1713－1721.

[20] CHOLEWA J A, BRACHMAN R WI, MOORE I D. Response of a polyvinyl chloride water pipe when transverse to an underlying pipe replaced by pipe bursting[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2009, 46(11): 1258－1266.

[21] RAHMAN K, MOORE I, BRACHMAN R. Numerical analysis of the response of adjacent pipelines during static pipe bursting[C]//North American Society for Trenchless Technology. [S. l.]: [s. n.], 2011.

[22] Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems[M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1984.

[23] TRAUTMANN C H, O'ROURKE T D, KULHAWY F H. Uplift force-displacement response of buried pipe[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1986, 111(9): 1061－1076.

[24] HONEGGER D, NYMAN D J. Guidelines for the seismic design and assessment of natural gas and liquid hydrocarbon pipelines[M]. Houston: Pipeline Research Council International, 2004.