

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

王正兴, 缪林昌, 王冉冉, 潘 浩

(东南大学 交通学院岩土工程研究所, 南京 210096)

摘 要: 隧道施工会对邻近管线造成危害, 但目前对土体位移与管线位移两者之间的关系还没有清晰的认识。针对这一问题, 设计砂土中考虑不同管线管径、埋深及抗弯刚度的 3 组隧道施工模型试验, 分析垂直下穿隧道施工过程中砂土和管线位移规律。研究表明, Vorster 修正高斯公式能较好地拟合砂土沉降分布, 其控制参数 α 值在 0.2~1.0 之间变化, 且与地层埋深成正比; 土体沉降槽宽度系数 i 对管线变形有较大影响, 埋深相同的条件下管线抗弯刚度与沉降值成反比; 深埋管线的变形主要受上拱效应支配, 且管径越大上拱效应越明显, 而下拉效应主要支配着浅埋管线的位移; $S_{\max}/i$ 为影响管土相对位移一个关键参数, 在此基础上提出了修正的管土相对刚度计算公式。

关 键 词: 管线; 隧道施工; 模型试验; 位移

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Model test study of vertical buried continuous pipelines displacements affected by tunnelling in sand

WANG Zheng-xing, MIAO Lin-chang, WANG Ran-ran, PAN Hao

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The vertical buried pipelines will be damaged by soil movements around pipe induced by tunnelling, but the relationship between soil movement and pipeline displacement has not been understood deeply. Three sets of model tests are established to simulate the effects of tunnel excavation on buried pipeline, in which different embodiments, caliber and bending rigidity are considered, the research is carried out about the displacement of soil and vertical pipelines during tunnelling. The results show that the modified Gaussian curves can describe accurately the Greenfield settlement trough due to tunnelling in sand, and the parameter α varies between 0.2 and 1.0, which is proportional to the depth of soil in sand; The width coefficient of Greenfield soil has great influence on pipeline displacement, and the displacement of pipeline varies inversely to its bending rigidity for the same buried depth; The bigger the caliber is, the more obvious positive downdrag which dominates the behaviour of deep pipelines, however, negative downdrag greatly affect the displacement of pipelines for shallow case; $S_{\max}/i$ is one of the key influence factors for relative pipe-soil settlement, on this basis, a modified formula to calculate the relative pipe-soil rigidity is presented in this paper.

Key words: pipeline; tunnelling; model test; displacement

1 引 言

21 世纪面临一个重要课题是如何维护城市中日益老化的基础设施, 尤其是被誉为城市生命线的地下管线。近年来, 城市交通建设的发展促进了城市地铁隧道的大量修建, 而地铁隧道施工中导致的管线受损, 进而影响管线正常工作的情况时有发生, 如何保护隧道施工中邻近地下管线的安全, 已成为地铁建造过程中亟待解决的一个重要课题。

国内外学者在这方面开展了不少研究, 主要研究方法和手段包括经验控制标准方法^[1-2]、数值模拟^[3-5]和解析方法^[6-9], 而隧道施工引起的邻近地下管线位移方面的模型试验研究成果相对较少。经验控制标准方法由于地区适用性的局限性, 难以准确分析出隧道施工引起的管线的变形特性。数值模拟方法受限于边界条件的确定以及参数选取的影响, 使得分析结果与实际情况有较大出入。解析方法主要以 Winkler 计算模型为基础, 通过假定管道与土

共同变形(管土不分离),高估了实际管线的位移与内力。离心模型试验由于颗粒粒径效应的影响,难以合理评估隧道施工过程中管土相互作用特性。足尺模型试验由于具有操作程序简单、力学概念明确等优点,逐渐受到重视。

目前砂土中隧道施工对邻近地下管线位移影响的研究主要存在以下问题:(1)砂土中沉降槽的确定,其准确性是研究管线变形特性的基础;(2)管线周围土体位移传递规律的研究;(3)管土相对刚度参数的选取,合理的管土相对刚度参数对于评估管道变形特性具有关键意义。

综上,有必要对隧道施工引起的土体及管线位移规律进一步深入研究,本次设计了3组室内大型模型试验,以江砂为填料,选取高密度聚乙烯(HDPE)管道为实验对象,针对连续管线垂直于隧道轴线工况进行了模型试验研究,模拟了隧道施工条件下管线及管周土层位移变形,研究了砂土中隧道施工引起的土体沉降槽特性、管线位移随管线管径、埋深的变化特征及管土相对刚度的评估方法,试验结果可为地铁隧道施工过程中控制地层位移及邻近管线的维护提供依据。

2 室内模型试验

2.1 模型试验箱和试验试样制备

模型试验箱尺寸(宽×长×高)为200 cm×200 cm×150 cm,周边三边厚20 mm铁板,另外一边为透明厚20 mm的有机玻璃,底板采用8块(宽×长×厚)25 cm×200 cm×40 mm铁块拼凑而成,通过调节模型箱底部控制阀可控制每块铁块竖向位移。管线选用高密度聚乙烯(HDPE)管,管长196 cm,用法兰盘固定于模型箱内壁。模型试验共3组,由于所采用的壁厚和材质一样,故而本次试验中小管径管道对应的抗弯刚度也较小,管道参数见表1。

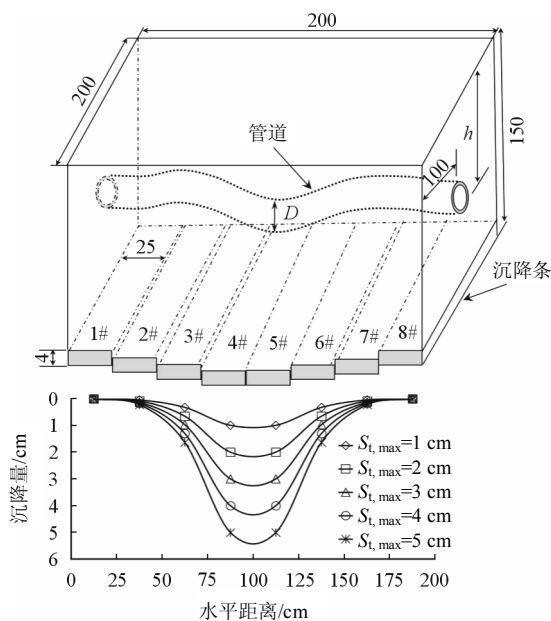
表1 试验管道参数

Table 1 Parameters of tests on pipes

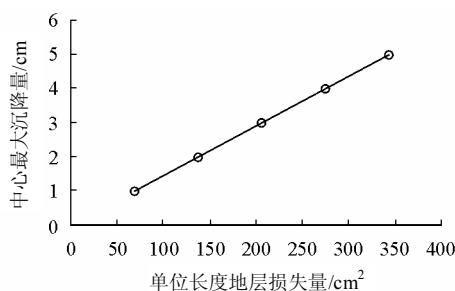
试验 编号	管径(外径) /mm	壁厚 /mm	埋深 /cm	弹性模量 /MPa	抗弯刚度 /(N·m)
1	300	2	105	2 300	41 968
2	300	2	75	2 300	41 968
3	200	2	75	2 300	12 373

已有的研究表明,砂土中隧道施工引起的地层竖向沉降规律服从或接近服从高斯分布曲线^[10-12],故可假定隧道拱顶上方某一深度处土层沉降槽服从高斯分布曲线。基于该原理,笔者设计了模型箱底部铁块(沉降条)竖向沉降量服从高斯分布,忽略

施工方法的影响,通过沉降条沉降模式的变换模拟隧道施工过程中不同地层损失量,研究不同埋深的土层与管线沉降规律。每组试验设计了5种沉降模式,沉降条中心最大沉降量 $S_{t,max}$ 分别为1、2、3、4、5 cm,表示5种不同的沉降模式。为消除边界条件的影响,整个试验过程中固定了1#、8#沉降条,如图1所示。本次试验土样采用长江砂,经过烘干、筛分后备用,江砂的颗粒相对高度为 $\rho_s = 2.643 \text{ g/cm}^3$,最大和最小干密度分别为 $\rho_{d,max} = 1.73 \text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_{d,min} = 1.45 \text{ g/cm}^3$,颗粒级配曲线如图2所示。



(a) 模型试验示意图(单位: cm)



(b) 中心最大沉降量与单位长度地层损失量的关系

图1 模型试验原理

Fig.1 Principles of the physical model test

2.2 模型箱填筑与管道安置

模型箱内江砂的填筑采用传送带进行输送,为控制3组试验中江砂同一深度相同或相近的密实度,本次试验土体的密度利用砂雨试验进行控制。为此,模型试验前期进行了落砂试验研究,得到落距与密度的关系如图3所示。

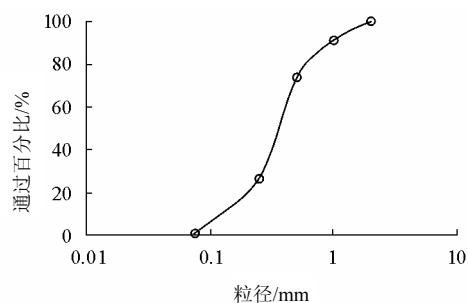


图2 江砂颗粒级配曲线

Fig.2 Particle size distribution curve of river sand

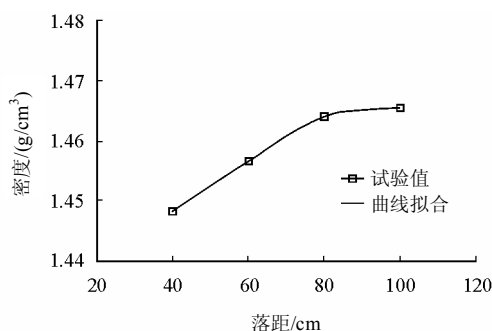


图3 落砂试验结果

Fig.3 Results of sand pluviation test

试验时, 通过调整传送带支架距填筑面的高度进行分层填筑, 至管道设计埋深时安置管道。管道安置角为 0° , 安置完成后静置 12 h 以上, 使江砂在自重作用下压密, 直至填筑面达到设计高度为 130 cm。每组试验共完成 5 种沉降模式, 每组沉降模式完成后均静止 24 h, 以保持每组试验的均一性。

2.3 管道应变片的黏贴与沉降板的布置

本次试验第 2 组试验 ($D=300$ mm, $h=75$ cm) 采用电阻应变片测试管道轴向弯矩。电阻应变片共计 40 片, 黏贴于管道顶部和底部的内壁, 沿管道轴线间隔 10 cm 黏贴 1 片应变片。测试导线为有屏蔽套的聚乙烯塑料多股屏蔽线, 测试前后用万用表对所有应变片的绝缘度及阻值进行检查, 结果表明电阻应变片质量稳定可靠。试验过程中底部沉降条沉降完成后, 静止 24 h, 再读取应变片读数。

模型箱内江砂的竖向沉降采用自制沉降板进行监测, 沉降板用有机玻璃材料制成, 通过变换沉降杆和 PVC 套管的长度量测不同深度土体的沉降。沉降杆的布置目的量测管道管顶沉降和 Greenfield 状态下 (未受管线影响) 土体的沉降。Yeates^[13]认为埋地管线水平向影响范围大概为 5 倍的管道直径, 但隧道施工条件显然与普通埋地管线条件有较大差异。Attewell^[2]基于现场监测数据得到了隧道施工条件下管线水平向影响范围大概为 1.25 倍的管道直

径。本次试验中分别在管道顶部和水平向距管道轴线 0.8 m 不同埋深处布置了沉降板, 如图 4 所示。试验过程中忽略了管道径向变形的影响, 通过将沉降杆底部与管道顶部用橡皮圈进行绑定, 以此来监测管道沉降值, 如图 5 所示。

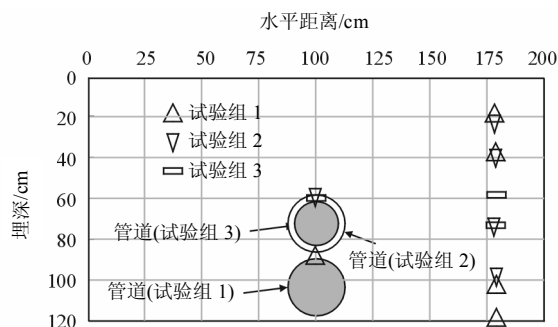


图4 沉降板布置示意图 (单位: cm)

Fig.4 Sketch of settlement plates position(unit: cm)

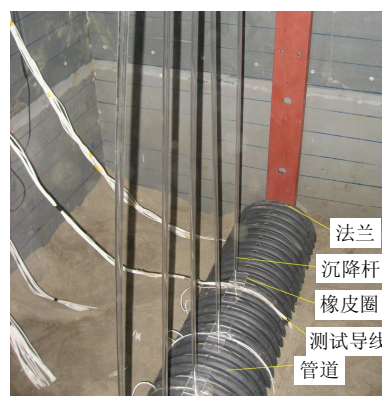


图5 试验过程照片

Fig.5 The process of test

3 试验结果分析

3.1 Greenfield 沉降槽形态

尽管 Peck 公式在研究隧道施工引起地面沉降方面取得了较多的成果, 但预测砂土中沉降的精确性显然不够^[14-15], 这将影响准确评估管土相互作用。在此基础上, Vorster^[10]提出了拟合砂土中隧道施工引起土体沉降的修正高斯公式:

$$\left. \begin{aligned} S_v &= \frac{n}{n-1 + \exp\left(\alpha \left(\frac{x}{i}\right)^2\right)} S_{\max} \\ n &= 1 + \frac{e^\alpha (2\alpha - 1)}{2\alpha + 1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: α 为沉降槽形态控制参数, 当 $n=1$, $\alpha=0.5$ 时即为 Peck 公式。通过对试验数据的分析整理, 得到 Greenfield 状态下沉降槽分布特征, 如图 6 所示。

从图中可以看出, 砂土沉降槽形态与埋深有直接关系, 且用式 (1) 拟合砂土沉降槽形态较为合适。通过调整控制参数 α 值能拟合不同埋深土体沉降槽形态, 并得到了不同埋深条件下参数的变化值, 可见随着埋深的增加, α 值逐渐增大, 变化幅度在 0.2~1.0 之间, 因此, 在利用修正高斯公式拟合砂性土隧道施工引起土体沉降过程中, 对于埋深较大、密实度较高的土体应选用较大的控制参数 α 值, 这样能有效地减小误差。

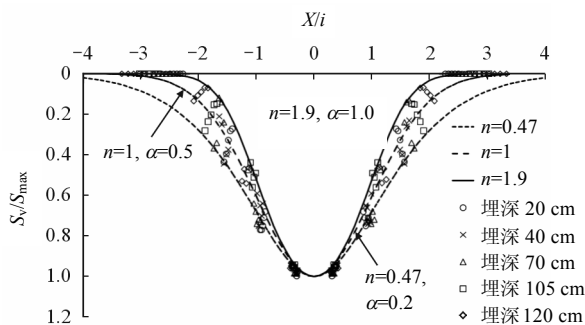


图 6 不同深度处土体沉降槽分布规律

Fig.6 Variation settlements of sand for different depths

3.2 管线位移规律

图 7、8 为管径 $D=300$ 、 200 cm 在埋深为 75 cm 时竖向位移分布图。图中, L 为管道长度; $S_{\max}$ 为管道轴线同一水平面对应 Greenfield 状态下沉降槽中心最大沉降量。从图中可以看出, 总体上管道竖向沉降不服从高斯或者修正高斯分布, 地层损失量较小时两种管径管道竖向沉降量相近, 随着地层损失量的进一步增加, 其差值有增大趋势。由此可见较大的地层损失量条件下, 小管径 (抗弯刚度小) 对管线位移的影响更为显著。对比图 8 可知, 小管径管道 (抗弯刚度小) 沉降过程中表现出与土体相对较好的共同变形特性, 而地层损失量大小对大直径管道 (抗弯刚度大) 位移变化幅度的影响更为显著。

图 9 为 $D=300$ mm 管道埋深分别为 75 、 105 cm 时管线竖向位移分布图, 其中 i 为水平向管线轴线对应 Greenfield 状态下沉降槽宽度系数。从图中可以看出, 相同地层损失量条件下, 埋深为 75 cm 的管道竖向沉降量比管道埋深为 105 cm 时沉降量大, 且随着地层损失量的增加, 两者差值逐渐增大。对比图 7 与图 9 可以看出, 相比于埋深的变化, 管径的改变对位移的影响不是很明显, 这可能由于两侧抗弯刚度比较接近。理论上, 相同材质与壁厚的管线管径越小, 抗弯刚度越小, 抵抗管周土体位移能力差, 而作用于管线上的附加荷载也相应减小。将

两种埋深不同管道沉降量用对应深度处 Greenfield 状态下沉降槽宽度系数归一化后, 可得图 10。对比图 9 和图 10 可看出, 管道的竖向沉降量受邻近土体沉降槽宽度系数影响, 且随着地层损失量的增加, 该影响越来越显著, 表明隧道施工过程中管线埋深大沉降不一定大, 管线的位移受土体沉降槽宽度系数的控制, 显然, 分析管线性状受隧道施工影响时并不能仅仅局限于管线埋深或管隧间距其中一个因素进行分析, 需要综合这两个因素来进行分析。

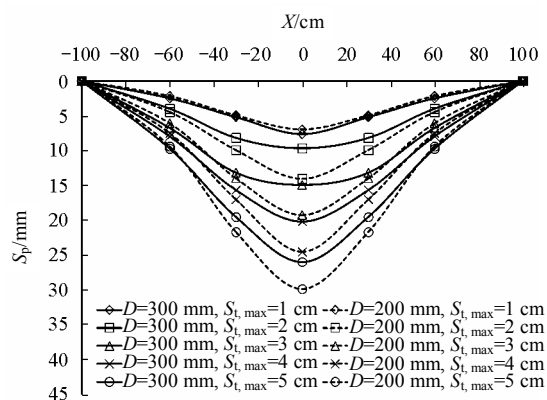


图 7 不同管径管道位移分布图 ($h=75$ cm)

Fig.7 Displacements of pipe with different diameters ($h=75$ cm)

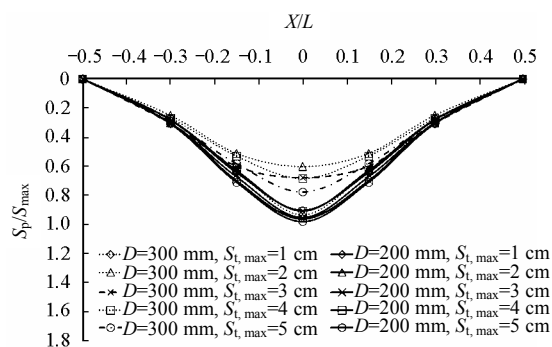


图 8 归一化后的管道竖向位移分布图

Fig.8 Normalised vertical settlement for pipes

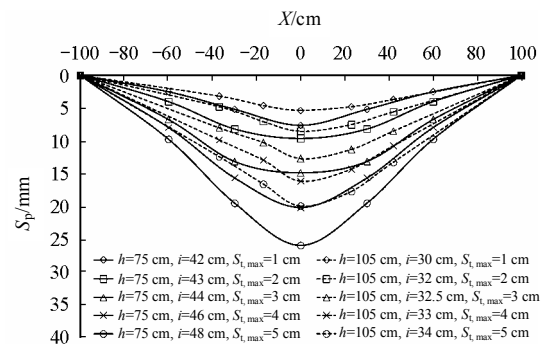


图 9 不同埋深管线竖向位移分布图 ($D=300$ mm)

Fig.9 Displacements of pipes for different burial depths ($D=300$ mm)

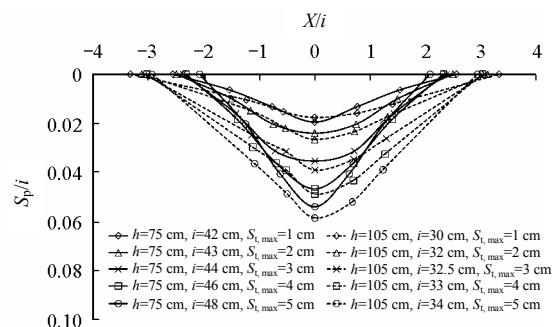


图 10 无量纲化不同埋深管道位移分布图($D=300$ mm)
Fig.10 Normalised displacements of pipe with different depths($D=300$ mm)

3.3 管土相对位移

管土相对位移是一个评估管线位移及管周土体应变的关键参数, 定义管土相对位移量^[10]:

$$S_{rel} = S_v - S_p \quad (2)$$

式中: S_p 为管道竖向位移; S_v 为对应管道轴线水平向 Greenfield 状态下土体位移。管线下拉时, $S_{rel} > 0$; 管线上拱时, $S_{rel} < 0$, 如图 11 所示。

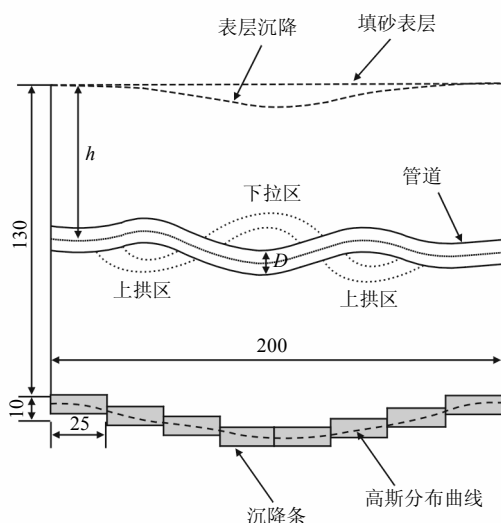
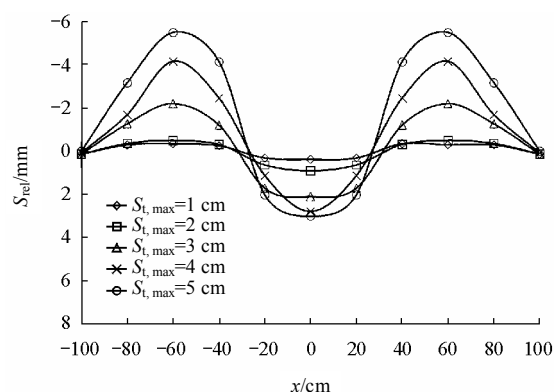


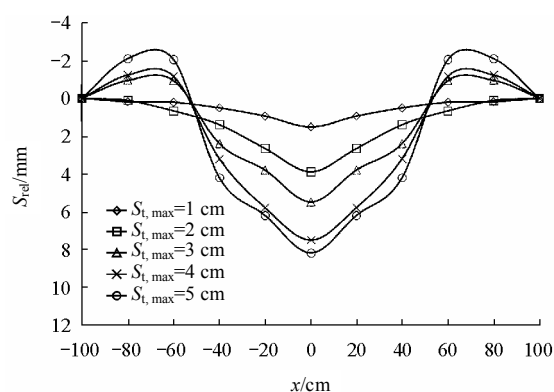
图 11 管道变形分析 (单位: cm)
Fig.11 Analysis of displacement acting on pipeline(unit: cm)

图 12 为 3 组管道试验管土相对位移分布图。从图中可以看出, 埋深为 105 cm 的管道中心下拉效应较弱, 两侧上拱效应明显, 埋深为 75 cm 时则相反。同一埋深, 直径较大的管道沉降过程中两侧上拱效应越明显, 中心下拉效应基本相近。由此可知, 埋深较大的管道受隧道施工影响变形时管道的上拱效应起主导作用, 下拉效应支配着浅埋管道的变形, 随着地层损失量的增加, 相应的支配效应影响越来越显著, 这就要求地铁施工沿线针对管线不

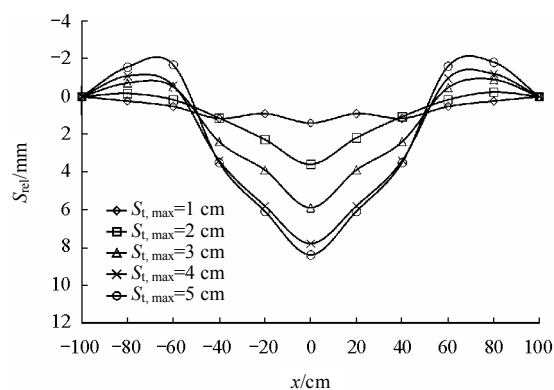
同的埋深采取相应的加固和保护措施。



(a) $D=300$ mm, $h=105$ cm



(b) $D=300$ mm, $h=75$ cm



(c) $D=200$ mm, $h=75$ cm

图 12 管土相对位移分布图
Fig.12 Relative displacements between pipes and soil

3.4 管土相对刚度及管线刚度

隧道施工过程中管土相对刚度参数控制着管线与管周土体的变形^[10]。以弹性地基梁理论为基础建立的评估管线变形的管土相对刚度参数^[2,16-17], 由于假定了管线与土体共同变形即管土不分离, 计算结果往往与实际情况有较大出入。Klar 提出了考虑管线与土体分析状态的简便管土相对刚度计算公式 (见式(3)), 认为隧道施工过程中管土没有接触, 或者完全接触且某一地层损失率条件下管土之间始

终保持同一相对刚度^[18],但忽略了土体中心最大沉降量 $S_{\max}$ 的影响,难以综合反映地层损失程度对管土相对刚度的影响。

$$R' = \frac{E_p I_p}{E_s D_p i^3} \quad (3)$$

式中: E_s 为未开挖状态下土体弹性模量,通过室内压缩试验得 25 MPa; E_p 为管线弹性模量,假定管线变形过程中管线处于弹性变形状态; I_p 为管线横截面惯性矩; D_p 为管线外径; i 为开挖状态下沉降槽宽度系数。

图 13 为不同埋深管土相对位移随 $S_{\max}/i$ 的变化。从图中可以看出,随着 $S_{\max}/i$ 逐渐增大,管土相对位移也相应增加,且浅埋管道受土体 $S_{\max}/i$ 值影响更为明显;同一埋深不同管径管道的 S_{rel} 与 $S_{\max}/i$ 曲线斜率相近,表明本次试验中相比于管径(抗弯刚度)的不同,管线埋深是影响管线变形的主要因素。 $S_{\max}/i$ 参数简便,可用于评估连续管线或刚性接口的柔性管损坏程度^[19],因此,计算管土相对刚度时有必要考虑该参数的影响,笔者在对室内模型试验数据进行分析整理基础上,对式(3)进行了修正:

$$R = R'(i / S_{\max}) = \left[\frac{E_p I_p}{E_s D_p i^3} \right] (i / S_{\max}) = \frac{E_p I_p}{E_s D_p S_{\max} i^2} \quad (4)$$

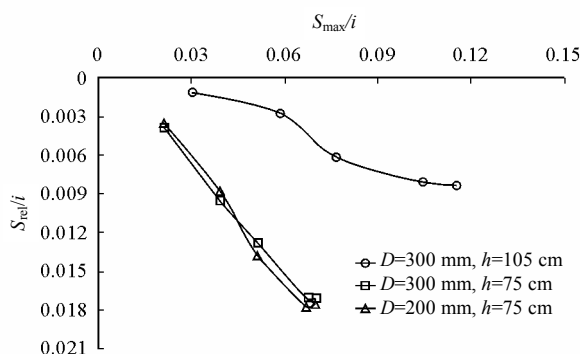


图 13 $S_{\max}/i$ 与 S_{rel}/i 的关系
Fig.13 Relationships between $S_{\max}/i$ and S_{rel}/i

图 14 为修正的管土相对刚度与底部沉降条中心最大沉降量的关系。从图中可以看出,随着地层损失量的增加、管周土体沉降的发展管土相对刚度逐渐减小。结合图 14、7、9,可知式(5)能较好地反映地层损失程度对管土相对刚度的影响。

图 15 为不同管土相对刚度条件下归一化后的弯矩随管土相对刚度变化图。从图中可以看出,管土相对刚度对管身弯矩有较大的影响,表现为随着

管土相对刚度减小管线弯矩逐渐增大,管线下拉效应和上拱效应越来越明显。试验结果进一步验证了修正的管土相对刚度计算公式的可行性与合理性。

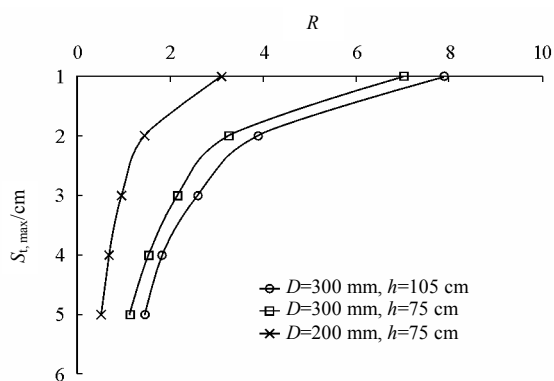


图 14 R 与 $S_{t,\max}$ 的关系
图 14 Relationships between R and $S_{t,\max}$

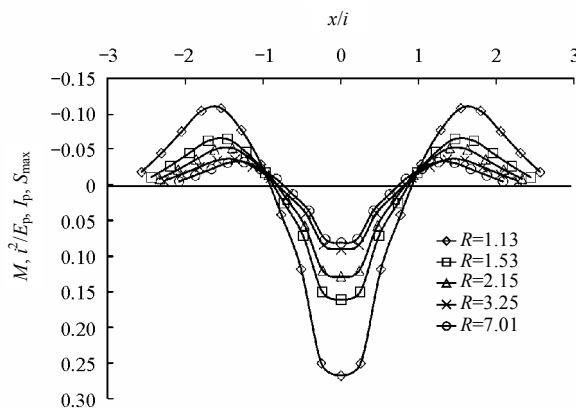


图 15 归一化后的管线弯矩分布($D=300$ mm, $h=75$ cm)
Fig.15 Normalised pipeline bending moment ($D=300$ mm, $h=75$ cm)

4 结 论

(1) Vorster 修正高斯公式对砂土中隧道施工土体沉降拟合较好,其控制参数 α 值在 0.2~1.0 之间,且与土层埋深成正比。

(2) 管线的埋深对管线变形有较大影响。相同材质、管径及壁厚时,而受邻近土体沉降槽宽度系数的影响,深埋管线位移值不一定比浅埋管线大。下拉效应和上拱效应共同作用着管线的变形,相同条件下埋深越大,管线变形受上拱效应影响越显著,而下拉效应则支配者浅埋管线的变形,并且随着地层损失量的增加,相应的支配效应也越来越明显。

(3) 管径与抗弯刚度的不同引起的位移值不同,相同材质和壁厚时管径越大(抗弯刚度越大)、管线变形越小;沉降的发展程度(地层损失量大小)对管线变形有较大的影响,相同条件下地层损失量越大,管线位移越大。

(4) 管土相对位移受地层损失量影响, 且随土体的 $S_{\max}/i$ 增大而增大, 特别是浅埋管道对这一规律更为明显。在此基础上, 本文提出了修正的管土相对刚度计算公式, 并通过试验数据验证了公式的合理性。

参考文献

- [1] 王霆, 刘维宁, 李兴高, 等. 地铁施工影响邻近管线的研究现状与展望[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 117—123.
WANG Ting, LIU Wei-ning, LI Xing-gao, et al. Current situation and prospect of studies on tunneling-induced effect of adjacent pipelines[J]. **China Railway Science**, 2006, 27(6): 117—123.
- [2] ATTWELL 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.
- [3] 吴波, 高波. 地铁区间隧道施工队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(增刊 2): 2451—2456.
WU Bo, GAO Bo. 3D numerical simulation on effect on tunnel construction on adjacent pipeline[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp.2): 2451—2456.
- [4] 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.
- [5] TAN W L, RANJITH P G. Numerical analysis of pipe roof reinforcement in soft ground tunneling[C]//Proc. of the 16th International Conference on Engineering Mechanics, ASCE. Seattle, USA: [s.n.], 2003.
- [6] YU Jian, ZHANG Chen-rong, HUANG Mao-song. Soil-pipe interaction due to tunnlling: Assessment of Winkler modulus for underground pipelines[J]. **Computers and Geotechnics**, 2013, 50: 17—28.
- [7] KLARR A, VORSTER T E B, SOGA K, MAIR R J. Soil-pipe interaction due to tunneling: Comparison between Winkler and elastic continuum solutions[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(6): 461—466.
- [8] VORSTER T E B, KLAR A, SOGA K, MAIR R J. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines[J]. **Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE**, 131(11): 1399—1410.
- [9] TAKAGIN, SHIMAMURA K, NISHION. Buried pipe response to adjacent ground movements associated with tunneling and excavations[C]//Ground Movements and Structures Proceedings of the 3rd International Conference. London: Pentech Press, 1985.
- [10] VORSTER T E B. The effects of tunneling on buried pipes[Ph.D D]. England: Cambridge University, 2005.
- [11] RANKINE W J. Ground movements resulting from urban tunneling: predictions and effects[C]//Conference of Engineering Geology of Underground Movements. Nottingham: [s.n.], 1988: 79—92.
- [12] MAIR R J, TAYLOR R N. Theme lecture: Bored tunnelling in the urban environment[C]//Proc. Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Hamburg: [s.n.], 1997: 2353—2385.
- [13] YEATES J. The response of buried pipelines to ground movements caused by tunnelling in soil. Ground Movements and Structures[C]//Proc. 3rd International Conference held at the University of Wales Institute of Science and Technology. Cardiff: [s.n.], 1984: 129—144.
- [14] MAIR R J, TAYLOR R N, BURLAND J B. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling[C]//Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema: [s.n.], 1996: 713—718.
- [15] CELESTINO T B, GOMES R A M, BORTOLUCCI A A. Eorors in ground distortions due to settlement trough adjustment[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2000, 15(1): 97—100.
- [16] JACOBSZ S W. The effects of tunneling on piled foundations. [Ph.D D]. England: Cambridge University, 2002.
- [17] VESIC A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solids[J]. **Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE**, 1961, 87: 35—53.
- [18] HETENYI M. Beams on elastic foundation[M]. Michigan: University of Michigan Press, 1946.
- [19] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, MARI R J. Soil-pipe-tunnel interaction: Comparison between Winkler and elastic continuum solutions[R]. UK: University of Cambridge, 2004.
- [20] O'ROURKE T D, TRAUTMANN C H. Buried pipeline response to tunnel ground movements[C]//Europipe'82 Conference. Basel: [s.n.], 1982: 9—15.