

有限区域盾构隧道土体位移解析计算

杨 潇^{1,2}, 李明宇³

(1. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430030; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074;
3. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对既有地下结构形成的有限区域, 研究盾构隧道施工引起土体位移的解析计算方法. 根据有限区域盾构隧道施工引起土体位移的分布特征, 从有限区域土体位移分布基本特征出发, 基于半无限空间盾构隧道土体位移解析解, 通过引入广义土体损失和应力边界条件, 推导得到一种可以计算有限区域盾构隧道土体位移的解析计算方法, 并通过一则工程实例对该方法的有效性进行验证. 计算结果表明, 有限区域盾构隧道土体位移小于半无限空间盾构隧道土体位移, 但两种情况下的土体位移分布形状基本相同. 对于有限区域盾构隧道土体位移, 和半无限空间解析解相比, 本文解析计算方法得出的结果更接近工程实测数据, 对计算有限区域盾构隧道土体位移问题更有效.

关键词: 有限区域; 盾构隧道; 土体位移; 解析解

中图分类号: TU433; U452

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0227-06

Analytical calculation of soil displacement induced by shield tunneling in finite soil

YANG Xiao^{1,2}, LI Mingyu³

(1. Wuhan Metro Group Co. Ltd., Wuhan 430030, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper presents an analytic solution for calculating soil displacement induced by shield tunneling in finite soil which is limited by underground structures. Given the basic characteristics of soil displacement around shield tunnel in finite soils, an analytic calculation method for soil displacement in finite soil is obtained based on the analytic solution in semi-infinite soil, considering generalized ground loss and stress boundary condition. Then the effectiveness of the proposed method is evaluated by a realistic project. It proves that the soil displacement in finite soil is smaller than that in semi-infinite soil, while the distribution law of soil displacement in the two conditions is similar. The calculation results show that the outcome of the suggested method is closer to monitoring data compared with that of the method for semi-infinite soil. The proposed method in this paper has the advantages to calculate soil displacement induced by shield tunneling in finite soil.

Key words: finite soil; shield tunnel; soil displacement; analytic solution

在城市地下空间蓬勃发展的新形势下, 城市轨道交通建设中出现了越来越多的盾构近接工程, 即盾构隧道邻近既有地下建筑结构施工. 当盾构隧道与既有地下建筑结构长距离平行交叠时, 既有地下建筑结构对盾构隧道的作用不再局限于部分节点位置, 而是分布在相当长的地下空间中. 在这种情况下, 隧道周边环境不再是传统意义上的半无限空间土体, 而是面临着由地下建筑结构包围形成的有限区域土体. 例如, 在一些城市轨道交通建设中出现了盾构隧道长距离(数千米)叠

置下穿既有地下道路的工程. 这种工程中地下道路底板和两侧围护侧墙对盾构隧道形成了三面围合的土体环境, 这是在有限区域进行盾构隧道施工的典型示例, 如图 1 所示.

为保证盾构隧道结构的安全性, 清楚认识隧道周围土体移动规律并及时掌握土体位移情况很有必要. 目前, 国内外对隧道开挖引起土体位移的理论研究方法主要集中于经验法和解析法. 在经验法中, 相关学者基于海量的工程实测数据, 通过分析隧道开挖引起的土体位移分布规律, 提

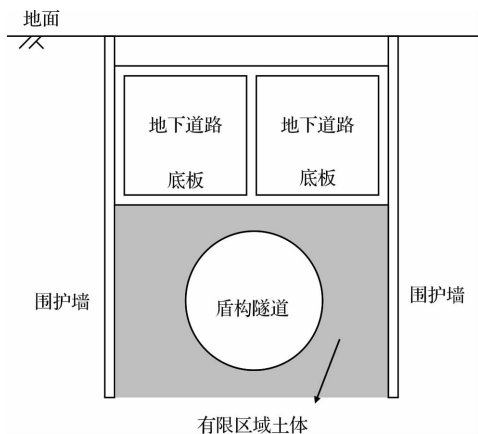


图1 有限区域盾构隧道

Fig.1 Shield tunnel in finite soil

出了一系列土体位移的经验计算公式^[1-5]。在解析法中,应用较多的是复变函数法^[6-7],弹性力学 Mindlin 解法^[8-9]、镜像法^[10-11],极坐标系下的应力函数法^[12-13]和随机介质理论^[14-15]。对于盾构开挖引起的土体位移,经验法计算简便,容易被工程师掌握,常用于隧道建设初期对土体位移的大致估算和定性判断,缺乏确切的理论依据。而解析法是从力学和数学的基础理论出发,其计算过程遵循严格的数学推演,相比经验法可以更加准确地计算隧道开挖引起的土体变形。关于盾构隧道土体位移的解析计算方法大都是在半无限空间土体条件下推导而得,这些方法对于计算半无限空间盾构隧道土体位移是有效的,但在处理有限区域盾构隧道土体位移问题时则有所不足。杨潇等^[16]利用三维有限差分方法对盾构隧道叠置下穿地下道路进行了数值计算研究,揭示了有限区域盾构施工引起土体位移的基本特征。基于这些基本特征,笔者通过引入广义土体损失和应力边界条件,对半无限空间盾构隧道土体位移解析解进行修正,推得一种可以计算有限区域盾构隧道土体位移的解析解。最后,通过工程实例验证提出的解析解的有效性。

1 有限区域盾构隧道土体位移基本特征

1.1 有限区域土体位移分布规律

杨潇等^[16]的计算结果表明,盾构施工只引起有限区域内部土体发生位移,而在有限区域外部土体位移基本为零。有限区域内部土体沉降分布形状和半无限空间中盾构施工引起的土体沉降分布形状相似,只是在沉降量值上有所减小。在盾构掘进方向上,盾构施工主要引起掌子面后方的

隧道上部土体和地下道路底板下沉,由于底板和土体力学参数的差异,底板和下方土体的接触发生松弛,情况严重时会产生脱空。在地下道路两侧围护墙处,由于侧向土压力的存在,围护墙和土体一直保持紧密接触。

1.2 有限区域土体位移计算思路

据前所述,有限区域盾构隧道施工引起的土体位移分布和半无限空间相似,地下道路底板和下方土体可能发生接触松弛乃至脱空,因此可从半无限空间中的土体位移解析解出发,考虑底板脱空的影响,通过引入力学边界条件做出相应修正,从而建立起有限区域盾构隧道土体位移的解析解。

2 有限区域土体位移解析解

2.1 广义土体损失

盾构施工引起土体位移的因素有两类:一是土体损失,二是施工参数(掌子面附加推力、盾壳与土体摩擦力、盾尾注浆压力等)。两类因素均引起了隧道周围土体体积的变化,由此引起了土体的移动。其中,盾构施工引起的土体损失,指的是沿盾构掘进方向单位长度引起的土体体积的减小量,土体损失率指的是土体体积的减小量占隧道开挖断面面积的百分比。笔者把这种传统意义上的土体损失称为狭义土体损失,把施工参数引起的土体体积变化也看成是一种土体损失,只不过这种土体损失可能造成土体体积的减小,也可能造成土体体积的增大。从这个角度讲,上述两类因素引起土体体积的变化,可称为广义土体损失,表达如式(1)。

$$V_{l2} = V_{l1} + V_c \quad (1)$$

式中, V_{l2} 为广义土体损失, V_{l1} 为狭义土体损失, V_c 为施工参数引起的土体损失。

2.2 有限区域盾构施工的土体损失

Vorster 等^[17]在通过离心模型试验研究隧道开挖对既有地下管线的力学机理时,提到了在隧道中轴线上方地下管线有发生与下方土体脱空的可能性。前文也提到地下道路底板可能会与下方土体发生脱空,这将直接影响到有限区域土体位移的计算。在有限区域中,盾构施工引起的土体体积的变化主要包括两个部分:①地表沉降槽的体积;②底板下方土体的相对沉降槽体积,如图2,图2中 h_1 表示地下道路顶部覆土厚度, h_2 表示地下道路结构高度, b 表示围护墙在底板以下深度, a 表示地下道路结构宽度, Δv 表示地下道路整体下沉量。

因此,有限区域盾构施工时的广义土体损失可用式(2)表达,式中, V_{sur} 为地表沉降槽的体积;

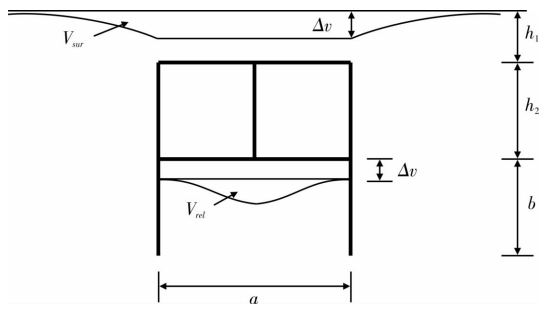


图2 有限区域盾构施工引起的土体体积变化

Fig. 2 Soil volume change induced by shield tunnel in finite soil
 V_{rel} 为底板下土体相对沉降槽的体积.

$$V_{l2} = V_{sur} + V_{rel} \quad (2)$$

2.3 有限区域土体位移的解析计算

考虑到地下道路底板与下方土体的脱空, 假设脱空宽度为 d_{sep} , 则有限区域内部土体沉降形状

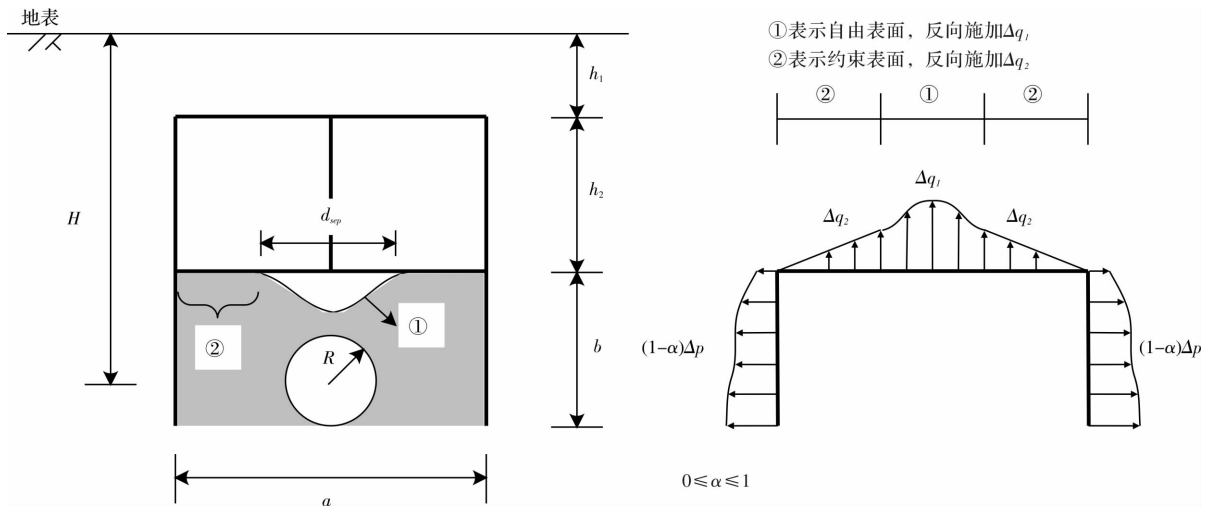


图3 有限区域盾构施工土体位移计算

Fig. 3 Calculation of soil displacement in finite soil

在地下道路围护墙处, 由于围护墙一般采用弹性模量远大于周围土体的混凝土材料, 这使得围护墙两侧土体的位移明显小于半无限空间中相同位置的土体位移. 因此可通过减小半无限空间盾构施工引起的围护墙处的土体附加应力来考虑围护墙产生的边界条件问题. 假设半无限空间盾构施工在围护墙处引起附加应力 Δp , 则有限区域盾构施工在围护墙处引起附加应力 $\alpha \Delta p$, 其中 α 为考虑围护墙应力边界条件的折减系数, 满足 $0 \leq \alpha \leq 1$. 于是在围护墙处应施加反向附加应力 $-(1-\alpha)\Delta p$, 如图3所示.

具体计算过程如下: (1) 计算出半无限空间中盾构施工引起的在地下道路下方的土体位移 w_1 ; (2) 计算出半无限空间中盾构施工引起的在脱空区段的竖向附加应力 Δq_1 以及在围护墙处的水平向附

如图3.

借鉴 Sagaseta 镜像法^[10]的研究思路, 在底板与土体脱空区段, 底板下侧土体为自由表面, 由盾构施工引起的竖向附加应力为 0. 在半无限空间中, 盾构施工会在脱空区段的土体自由表面处产生附加的竖向应力 Δq_1 , 因此要在自由表面处施加反向等值的作用力 $-\Delta q_1$. 在底板与土体接触区段, 底板下侧土体为约束表面, 考虑到盾构施工引起底板边缘处(围护墙处)的变形可以忽略不计^[7], 认为此处盾构施工引起的竖向附加应力与半无限土体中一致. 因此, 从底板边缘到底板开始与土体脱离点, 盾构施工引起的竖向附加应力应逐渐减小至 0, 这里假定为线性减小, 故而在约束表面应施加反向等值的附加应力 $-\Delta q_2$, 如图3所示.

加应力 Δp ; (3) 取等值反向力 $-\Delta q_1$ 作用于自由表面, 按线性变化规律计算出接触区段的等值反向力 $-\Delta q_2$ 并作用于约束表面, 同时在围护墙处的土体作用 $-(1-\alpha)\Delta p$; (4) 根据 Mindlin 解计算底板下方土体位移 w_2 ; (5) 把 w_1 和 w_2 叠加, 得到三面围合下底板下方土体沉降 w_b . 在求得底板下方土体沉降分布之后, 则可求出底板下土体相对沉降槽的体积 V_{rel} .

有限区域盾构施工引起的地表沉降计算模型如图4. 地下道路整体下沉位移应与底板下方土体沉降在底板与围护墙交点处的沉降值一致, 记为 Δ_v . 地下道路整体下沉将引起上部土体发生沉降. 在地下道路顶板正上方, 由于覆土厚度较浅, 土体会发生与地下道路等量的沉降 Δ_v . 同时, 地下道路相对两侧土体向下移动, 围护墙对两侧土体

会产生向下的侧摩阻力,引起两侧土体发生沉降.因此,由地下道路整体下沉引起的地表沉降是上述两部分沉降之和.其中,侧摩阻力 f_{out} 引起的土体下沉可以通过 Mindlin 位移解计算求得,侧摩阻力按照围护墙所受静止土压力乘以侧摩阻力系数求得.通过对地表沉降槽积分,可得地表沉降槽体积 V_{sur} .

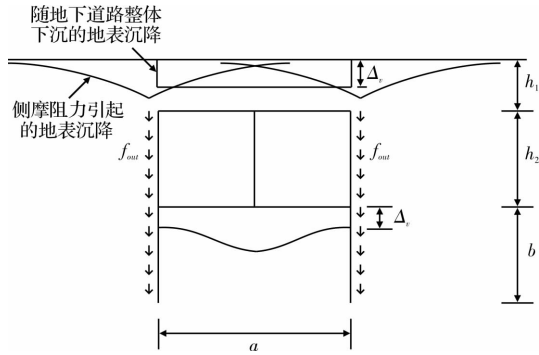


图 4 地下道路整体下沉引起的地表沉降

Fig. 4 Ground surface settlement induced by underground road subsidence

在计算底板下方土体沉降分布时,需要已知底板与土体脱空区段的宽度 d_{sep} .根据不同的 d_{sep} 值,可以计算出不同的底板下方土体沉降,进而得到不同的底板下土体相对沉降槽体积 V_{rel} .在隧

道空间尺寸、土体特性和盾构施工参数等条件相同时,无论是半无限空间还是有限区域,由盾构施工引起的广义土体损失是相等的.据此可通过迭代计算确定底板脱空宽度 d_{sep} ,进而通过计算推得有限区域盾构施工引起的土体位移解析解.

3 算例分析

3.1 工程概况

某地铁区间隧道采用双圆盾构叠置下穿既有下立交工程,结构横断面如图 5 所示.工程影响范围内的土层参数见表 1.

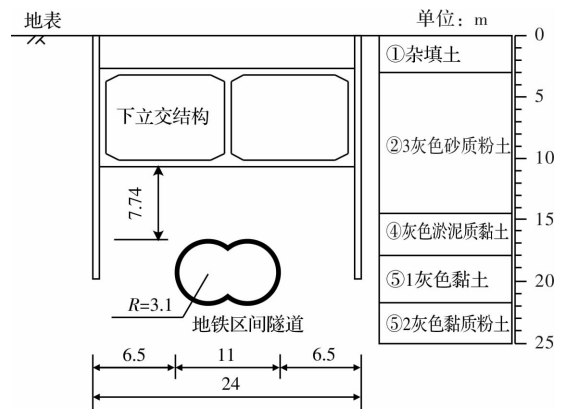


图 5 工程结构横断面

Fig. 5 Cross section of the project structure

表 1 土层特性参数

Tab. 1 Soil parameters

土层	名称	厚度/m	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	压缩模量 $E_{s0.1\sim 0.2}/\text{MPa}$
①层	填土	1.4~4.2			
② ₃ 层	砂质粉土	5.9~9.6	5	30.5	7.018
④层	淤泥质黏土	2~9	11	11	2.25
⑤ ₁ 层	黏土	1.5~5.7	16	14.5	3.14
⑤ ₂ 层	黏质粉土	未贯穿	15	18	5.32

3.2 计算结果分析

为方便计算,以相同开挖面积的等效单圆隧道进行简化,得到等效的隧道开挖半径 $R=4.25\text{ m}$.由于地下道路围护墙处的应力条件未知,分别取图 3 中 $\alpha=0、0.25、0.5、0.75、1.0$ 进行计算分析.

图 6 给出了距离掌子面后方 50 m 处横断面的地下道路底板下方土体沉降分布曲线.观察发现,有限区域土体沉降比半无限空间中的土体沉降较小,但两种情况下土体沉降分布曲线形状基本一致.虽然 α 取值不同,但对土体沉降影响不大.这是由于围护墙与盾构隧道的水平间距(本例为

6.5 m)较大所致,一般认为当距离隧道超过 1 倍洞径(本例为 8.5 m)时既有地下结构对盾构施工的影响很小.总的看来,采用有限区域解析解计算得到的土体沉降比采用半无限空间解析解的计算结果更接近实测数据,同时也更接近采用 FLAC3D 有限差分软件计算得到的数值解.值得说明的是,有限区域解析解关于土体沉降的计算结果比实测土体沉降要小,是由于在解析计算中没有考虑底板下方注浆加固的工程实际.

图 7 描绘了底板下方土体沉降沿隧道中轴线的分布曲线.可以看出,与半无限空间的情况相比,三面围合下的土体沉降计算结果更贴近实测数据,

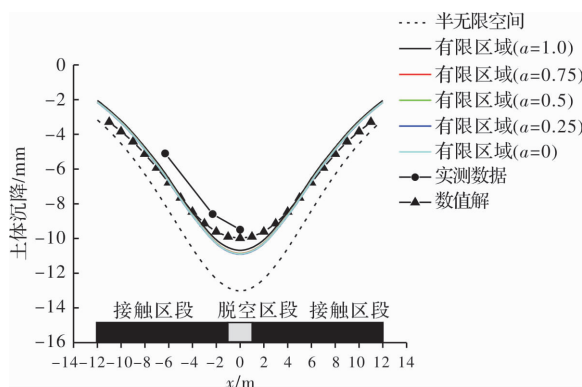


图6 土体沉降水平向分布

Fig. 6 Horizontal distribution of soil settlement

随着深度 z 的增加, 沉降计算值与实测值误差逐渐减小。此外, 底板下方土体沉降沿深度方向的分布规律与实际情况一致。同时, 利用 FLAC3D 有限差分软件计算得到的数值解与三面围合下的解析解虽有些许出入但相差不大, 二者表达出的土体沉降变化规律相同, 这也验证了本文解析计算方法的可靠性。

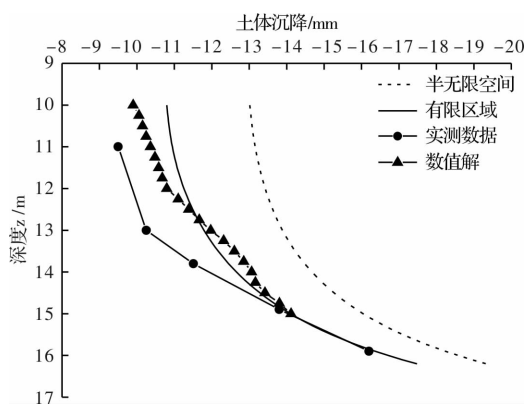


图7 土体沉降竖向分布

Fig. 7 Vertical distribution of soil settlement

4 结论

(1) 有限区域盾构隧道土体位移和半无限空间盾构隧道土体位移在分布形状上大致相同, 但在土体位移量值上, 前者较小。

(2) 与半无限空间相比, 有限区域盾构隧道土体位移解析解可以考虑既有地下建筑结构对土体位移的影响, 特别是当盾构隧道施工长距离邻近既有地下建筑结构时, 采用有限区域解析解计算得到的土体位移更贴近实际情况。

参考文献 References

[1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineer-

ing. Mexico: [s. n.], 1969. 225-290.

- [2] CLOUGH G W, SCHMIDT B, BRAND E W, et al. Design and Performance of excavations and tunnels in soft clay engineering[M]. New York: Elsevier Science Publishing Company, 1981.
- [3] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom: their magnitude and prediction[C]//Proceedings of Tunneling 82 symposium. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1982, 173-181.
- [4] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Sub-surface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 315-320.
- [5] CELESTINO T B, GOMES R, BORTOLUCCI A A. Errors in ground distortions due to settlement trough adjustment[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(1): 97-100.
- [6] VERRUIJT A. Complex variable solution for a deforming circular tunnel in an elastic half plane[J]. Geotechnique, 1997, 21(4): 77-89.
- [7] 韩凯航, 张成平, 王梦恕. 浅埋隧道围岩应力及位移的显式解析解[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2253-2259.
- HAN Kaihang, ZHANG Chengping, WANG Mengshu. Explicit analytical solutions for stress and displacement of surrounding rock in shallow tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2253-2259.
- [8] 魏纲, 张世民, 齐静静, 等. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3317-3323.
- WEI Gang, ZHANG Shimin, QI Jingjing, et al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3317-3323.
- [9] 唐晓武, 朱季, 刘维. 盾构施工过程中的土体变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 206-211.
- TANG Xiaowu, ZHU Ji, LIU Wei. Research on soil deformation during shield construction process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 206-211.
- [10] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [11] 林存刚, 夏唐代, 梁荣柱, 等. 盾构掘进地面沉降虚拟镜像算法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1438-1446.
- LIN Cungang, XIA Tangdai, LIANG Rongzhu, et al.

- Estimation of shield tunneling-induced ground surface settlements by virtual image technique [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (8): 1438-1446.
- [12] PARK K H. Elastic solution for tunneling induced ground movement in clays[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4): 310-318.
- [13] PARK K H. Analytical solution for tunneling induced ground movement in clays[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(3): 249-261.
- [14] YANG J S, LIU B C, WANG M C. Modeling of tunneling induced ground surface movements using stochastic medium theory [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(2): 113-123.
- [15] YANG X L, WANG J M. Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26 (3): 462-471.
- [16] 杨潇, 李明宇. 盾构隧道叠置下穿地下道路的施工变形规律研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(3): 49-53.
- YANG Xiao, LI Mingyu. Research on the construction deformation induced by shield tunneling with an underground road overlapped on it[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2018, 35(3): 49-53.
- [17] VORSTER T E B., MAIR R J, SOGA K, et al. Centrifuge modelling of the effect of tunneling on buried pipelines: mechanisms observed [C]//Proceedings of the 5th Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Boca Raton: CRC Press, 2013: 327-333.
- (编辑 桂智刚)

(上接第 199 页)

- [8] 朱德春, 蔡小华, 何竞飞, 等. 承插型盘扣式脚手架盘扣节点结构改进分析[J]. 建筑安全, 2016, 31(10): 21-25.
- ZHU dechun, CAI xiaohua, HE jingfei, et al. Structural improvement analysis of the disk-pin joint node of disk lock steel tubular scaffold [J]. Construction Safety, 2016, 31 (10): 21-25.
- [9] 王晓光, 段亚辉, 尹汝琨. 盘扣式脚手架盘扣节点半刚性试验研究 [J]. 建筑结构, 2015, 45 (增刊): 1079-1082.
- WANG Xiaoguang, DUAN Yahui, YIN Rukun. Experiment on socket plate fastener type scaffold characteristics of Semi-rigid node [J]. Building Structure, 2015, 45 (S): 1079-1082.
- [10] 王洲春. 承插型钢管脚手架实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- WANG zhouchun. The experimental investigation of socket type steel pipe scaffold [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [11] 肖毅. 新型盘式钢管脚手架的应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012
- XIAO YI. Application research of new type ring scaffolding [D]. Kunming; Kunming University of Science & Technology, 2012.
- [12] 袁雪霞, 金伟良, 鲁征, 等. 扣件式钢管支模架稳定承载能力研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 43-50.
- YUAN xuexiao, JIN weiliang, LU zheng, et al. A study on the stability bearing capacity of fastener-style tubular steel formwork-supports [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (5): 43-50.
- (编辑 桂智刚)