

圆形基坑开挖引起下卧隧道三维变形机理研究*

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, 南京 2100981;
2.镇江新区建设工程质量中心试验室, 江苏 镇江, 212132)

摘 要:深基坑开挖引起的应力变化将不可避免地导致土体位移,进而对邻近隧道产生诸多的不利影响。然而,圆形基坑开挖引起下卧隧道三维变形机理的研究甚少。采用 ABAQUS 商业软件,开展系统的有限元仿真模拟研究了不同基坑开挖尺寸和隧道埋深比下卧隧道三维变形机理的影响。研究表明:深基坑开挖引起的隧道横向弯曲应变最大值始终发生在隧道顶部,隧道上拱处的最大纵向弯曲应变是下拱处应变的2倍左右,隧道最大纵向弯曲应变明显小于最大横向弯曲应变。当基坑开挖直径达到7倍开挖深度时,基坑中心线下的隧道隆起和横向弯曲应变达到最大值。若忽视小直径基坑开挖的三维效应,隧道隆起和横向弯曲应变被大大高估。

关键词:圆形基坑;隧道;三维变形;数值模拟

中图分类号:TU441

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)04-1083-08

Investigation on Three-dimensional Deformation Mechanisms of Metro Tunnels Due to Overlying Circular Basement Excavation

Shi Jiangwei¹, Chen Li²

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

Abstract: Deep basement excavation inevitably induces stress changes in the ground leading to soil movements, which may cause adverse effects on existing tunnels. Currently, circular basement excavation induced three-dimensional tunnel deformation mechanisms are rarely investigated. Using the software of ABAQUS, a systematic numerical parametric study is conducted to investigate the influence of excavation geometry and cover-to-tunnel diameter on three-dimensional deformation mechanisms of underlying tunnels. It is found that the maximum transverse tensile strain always occurs at the tunnel crown. The maximum longitudinal tensile strains of tunnel at the hogging regions are about twice of those at the sagging regions. The tunnel heave and transverse tensile strain at basement centerline reach a maximum value when the excavation diameter reaches seven times of the final excavation depth. If the three-dimensional effect of the basement excavation with a small diameter is ignored, excavation-induced heave and transverse tensile strain in the existing tunnels are grossly overestimated.

Keywords: circular basement; metro tunnel; three-dimensional; numerical modelling

* 收稿日期:2017-07-23(修改稿)

作者简介:史江伟(1984-),男,江苏句容人,博士,副教授,主要从事土-结构相互作用研究。E-mail:ceshijiangwei@163.com

基金项目:国家自然科学基金(51608170);江苏省自然科学基金(BK20160863);中国博士后科学基金(2017T100324,2016M601709)

0 引言

为使居民生活便利,大型商场的地下室建造在已建地铁隧道邻近或者上方的工程案例屡见不鲜。然而,地下室深基坑开挖引起的应力释放将不可避免地导致土体的位移,进而对邻近地铁隧道产生诸多的不利影响^[1-5]。例如,Burford^[1]报道了伦敦黏土中基坑开挖导致下卧隧道的隆起高达 60 mm; Chang 等^[2]报道了基坑开挖导致邻近隧道混凝土衬砌产生了裂缝,隧道底部混凝土板产生错动。因此,基坑开挖时既有地铁隧道的安全性是岩土工作者迫切需要解决的技术难题。

通过开展现场实测^[6-8]、离心模型试验^[9-11]和有限元数值模拟^[12-19],国内外学者广泛地研究了方形深基坑开挖引起的地表位移及其对邻近隧道的的影响。工程中,三角形^[20]和圆形^[21]深基坑开挖也时有报道。Tan 等^[21]报道了上海世博 500 kV 地下变电站深基坑开挖的实例。此基坑为圆形基坑,基坑开挖的直径和深度分别为 130 m 和 34 m。相比于方形和三角形基坑,圆形基坑的拱效应导致地下连续墙的水平挤土作用急剧减弱,因此,圆形基坑下的隧道变形主要由竖向应力释放控制。迄今为止,对圆形基坑引起下卧隧道变形的研究甚少。

简单弹塑性模型(如摩尔-库伦强度破坏准则)的参数易于确定,因此,此类模型被众多学者用来研究基坑开挖对隧道的的影响^[13-16]。Atkinson 等^[22]将土的应变分为 3 个范围:小于等于 0.001% 为极小应变(弹性区),0.001%~1% 之间为小应变,大于 1% 为大应变。Mair^[23]发现:隧道等周围土体的剪应变主要介于 0.01%~1% 之间。因此,本构模型能否反映土体在小应变条件下的刚度特性,对预测基坑开挖引起既有隧道的变形至关重要。

首先,开展无量纲分析,确立影响基坑-土-隧道相互作用的无量纲组;然后,开展三维有限元参数分析,系统研究圆形基坑开挖引起的隧道三维变形机理。采用考虑土体小应变的亚塑性砂土模型模拟土体应力应变关系。

1 基坑-隧道相互作用的量纲分析

1.1 影响基坑-隧道相互作用的参数

图 1 显示了基坑与隧道相对位置简图,共包括 17 个参数。

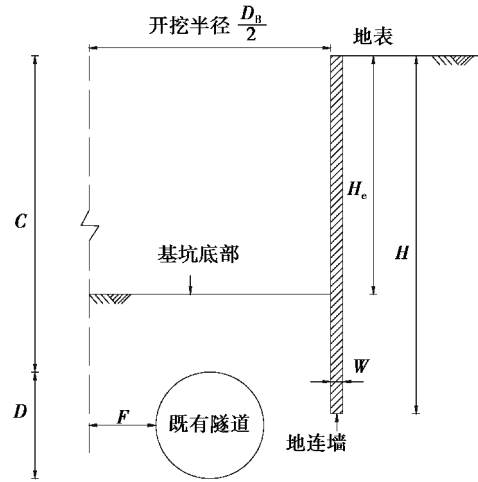


图 1 基坑-隧道相对位置

Fig. 1 Relative position between basement and tunnel

几何尺寸主要包括圆形基坑开挖直径(D_B),开挖深度(H_e),地下连续墙深度(H),地下连续墙厚度(w)。基坑与隧道相对位置的参数包括隧道埋深(C),隧道直径(D)和隧道与基坑间的距离(F)。基坑-土-隧道的刚度参数包括隧道抗弯刚度($E_T I_T$),隧道抗拉刚度($E_T A_T$),地连墙抗弯刚度($E_w I_w$)和土体刚度(E_s)。另外,土体参数包括土体密度(ρ),孔隙比(e),极限状态下摩擦角(φ'),剪胀角(ψ)和有效粘聚力(c')。重力加速度(g)也是需要考虑的一个参数。

1.2 无量纲组

通过开展量纲分析,研究基坑-隧道相互作用的关键影响参数。基坑开挖引起隧道的变形主要包括横向、纵向弯曲应变(ε)和位移(u)。隧道变形可以通过以下公式进行表示:

$$(\varepsilon, u) = f \left\{ \frac{D_B, H_e, H, w, F, C, D}{E_w I_w, E_T I_T, E_T A_T, E_s, \rho, e, \varphi', \psi, c', g} \right\} \quad (1)$$

发现:式(1)中的参数为大都具有长度(L)、时间(T)和质量(M)等量纲。 e, φ' 和 ψ 是无量纲的。 D_B, L, H_e, H, w, F, C 和 D 是只具有长度的量纲。 E_s 和 c' 的量纲为 M/LT^2 。 $E_w I_w, E_T I_T$ 和 $E_T A_T$ 的量纲分别为 $ML^2/T^2, ML^3/T^2$ 和 ML/T^2 。式(1)中的参数主要由 4 个参数的量纲组成(H_e, E_s, ρ 和 g),这 4 个参数中的任意 3 个参数均不可能组成一个无量纲组,因此采用参数 H_e, E_s 和 g 作为无量纲分析的重复变量。

以基坑开挖直径为例,可写为:

$$[D_B] = [H_e]^{a_1} [E_s]^{a_2} [g]^{a_3} \quad (2)$$

按照量纲形式写出:

$$[L] = [L]^{a_1} [M/LT^2]^{a_2} [LT^{-2}]^{a_3} \quad (3)$$

可得: $a_1 = 1, a_2 = 0, a_3 = 0$ 和无量纲组 D_B/H_e 。为了确保无量纲组具有明显的物理意义,隧道和基坑间的距离(F)采用基坑开挖直径(D_B)而不是开挖深度(H_e)进行量纲分析。无量纲组 F/D_B 可直接用于判断既有隧道位于基坑内侧或外侧。采用相同的量纲分析方法,共得到 14 组无量纲组:

$$\left(\varepsilon, \frac{u}{H_e}\right) = f\left\{\begin{array}{l} \frac{D_B}{H_e}, \frac{H}{H_e}, \frac{w}{H_e}, \frac{F}{H_e}, \frac{H_e}{C}, \frac{C}{D} \\ \frac{E_w I_w}{E_s H_e^3}, \frac{E_T I_T}{E_s H_e^4}, \frac{E_T A_T}{E_s H_e^2}, \rho, e, \varphi', \psi, \frac{c'}{E_s} \end{array}\right\} \quad (4)$$

上述无量纲组可分为基坑开挖尺寸(D_B/H_e 、 H/H_e),基坑与隧道相对位置(F/B 、 H_e/C 、 C/D),地连墙刚度(w/H_e 、 $E_w I_w/(E_s H_e^3)$),隧道-土体相对刚度($E_T I_T/(E_s H_e^4)$ 、 $E_T A_T/(E_s H_e^2)$)以及土体参数($\rho g H_e/E_s$ 、 φ' 、 e 、 ψ 、 c'/E_s)。本文将针对基坑开挖尺寸(D_B/H_{ec})和基坑与隧道相对位置(H_e/C 、 C/D)的无量纲组,开展系统的有限元参数分析。

2 三维有限元仿真模拟

2.1 计算工况

采用 ABAQUS 商业软件开展有限元仿真模拟,研究不同隧道埋深、开挖尺寸作用下既有隧道的三维变形机理。表 1 汇总了有限元计算工况。深基坑在隧道正上方开挖,土体相对密度 D_r 为 68%。基坑开挖深度 H_e 为 9 m,隧道埋深比 C/D 分别为 2.0、2.5 和 3.0。基坑开挖直径介于 18~73 m 之间。地下连续墙为 0.96 m 厚的混凝土。既有隧道的直径为 6 m,厚度为 400 mm 的混凝土。

表 1 有限元计算工况汇总

Table 1 Summary of all numerical analysis			
相对密度 $D_r/\%$	基坑直径 D_B/m	开挖深度 H_e/m	埋深比 C/D
68	18~63	9	2.0、2.5 和 3.0

2.2 有限元网格和边界条件

图 2 为有限元三维网格。砂土层和地下连续墙采用六面体的实体单元(C3D6)模拟;既有隧道

采用 4 节点的壳单元(S4)模拟。网格四周约束水平位移,而网格底部同时约束水平和竖向位移。深基坑开挖通过 ABAQUS 提供的生死单元进行模拟。

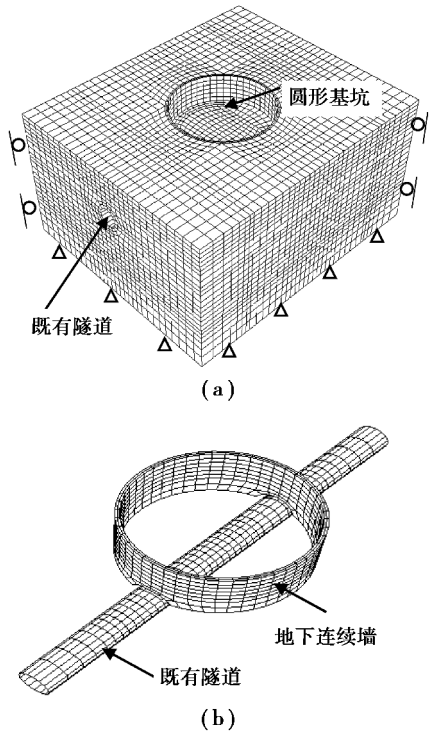


图 2 有限元网格和边界条件

Fig.2 Finite element model and boundary conditions

2.3 本构模型

采用 Wolffersdorff^[24] 提出的亚塑性土体模型模拟砂土的应力应变关系,此本构模型的控制方程为:

$$\dot{T} = f_s(L; D + f_d N \|D\|) \quad (5)$$

式中: L 是四阶张量; N 是二阶张量; D 是变形率。 f_s 和 f_d 分别反映土体应力应变关系随平均应力水平和相对密度(孔隙比)变化。此模型只需一组参数,便可以模拟不同密度下基坑-隧道间的相互作用。此模型需要 8 个土体参数($\varphi'_c, h_s, n, e_{d0}, e_{c0}, e_{i0}, \alpha$ 和 β)。在此基础上,Niemunis 和 Herle^[25] 加入粒间应变概念,改进的模型可以考虑土体刚度随剪切应变和应力路径旋转而发生改变。这一改进需要 5 个土体参数(m_R, m_T, R, β_T 和 χ)。参数 m_R 和 m_T 控制应力路径旋转时土体刚度的变化。参数 R 控制土体刚度的弹性区域。参数 β 和 χ 控制土体刚度随应力增加而折减的速率。

地下连续墙和既有隧道采用线弹性模型进行模拟。弹性模量和泊松比分别为 30 GPa 和 0.2。地连墙和隧道的重度为 25 kN/m³。

2.4 本构模型参数标定

土体参数(φ'_c 、 h_s 、 n 、 e_{d0} 、 e_{c0} 和 e_{i0})取自于文献报道的结果^[26],而三轴试验结果用于标定参数 a 和 b ^[27]。采用砂土刚度随应变增加而折减的三轴试验结果^[28]标定与粒间应变相关的 5 个参数(m_T 、 m_R 、 R 、 β_r 和 χ)。所有模型参数及其物理意义见表 2。

表 2 数值模拟土体参数

Table 2 Soil parameters used in numerical analysis

参数	数值
极限状态下摩擦角 $\varphi'_c/(^\circ)$	30
硬度 h_s/GPa	2.6
控制土体压缩曲线的坡度 n	0.27
零围压下的最小孔隙比 e_{d0}	0.61
零围压下的极限状态孔隙比 e_{c0}	0.98
零围压下的最大孔隙比 e_{i0}	1.10
相对密度对峰值摩擦角的影响 α	0.14
相对密度对土体刚度的影响 β	3
应力路径 180°旋转时土体刚度控制参数 m_R	8
应力路径 90°旋转时土体刚度控制参数 m_T	4
土体刚度的弹性区域 R	2×10^{-5}
土体刚度随应变折减速率 β_r	0.1
土体刚度随应变折减速率 χ	1.0

图 3 比较了实测和亚塑性模型预测的砂应力应变关系曲线。Maeda 等^[27]测量了不同密度下(D_r 为 50%和 70%)的丰浦砂应力应变关系曲线。采用表 2 的土体参数对常规三轴试验进行预测。当轴向应变逐渐增加时,试验得到的土体偏应力快速增加,随后伴随着不同程度的应力软化现象(见图 3(a))。采用同一组本构模型参数,此模型可很好地捕捉不同密度下的砂土的剪胀特性及轴向应变和偏应力的关系。模型预测结果和实测结果非常一致,这表明:此亚塑性本构模型可以反映不同

应力状态下土体应力应变关系。深基坑开挖过程中,土体的状态(应力和孔隙比)不断发生变化。因此,土体本构模型能否反映土体状态对土体刚度的影响,对预测基坑开挖引起的隧道变形至关重要。

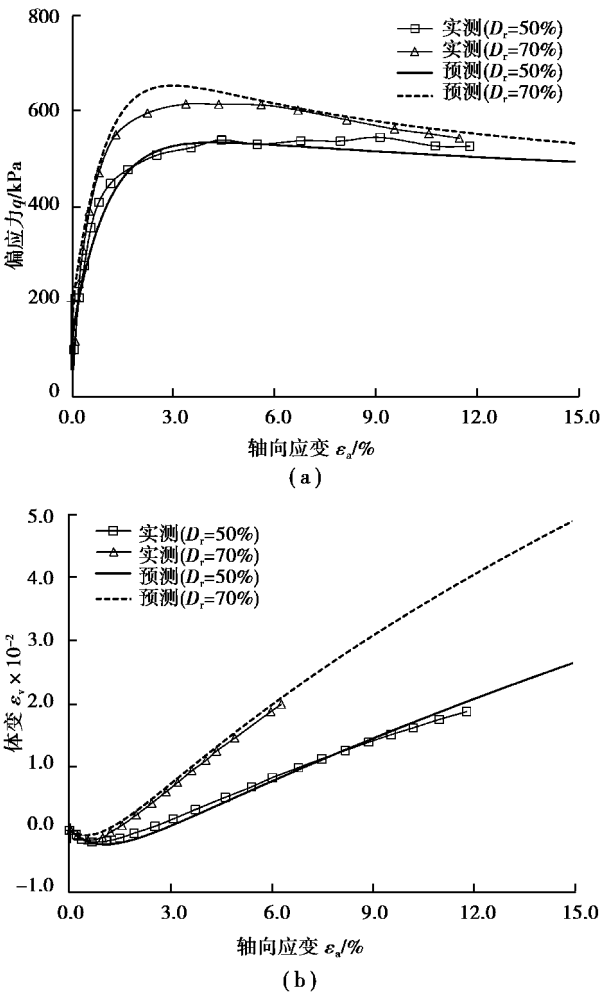


图 3 实测和模型预测的应力-应变曲线

Fig. 3 Measured and predicted stress-strain curves

图 4 比较了实测和亚塑性模型预测的砂土刚度折减曲线。砂土小应变的实测曲线取自于 Yamashita^[28]。当土体应变大于 10⁻³%,模型预测的土体刚度折减曲线与实测结果基本吻合。当土体应变小于 10⁻³%时,模型预测结果和实测结果有着很大的差别。这主要是因为实测曲线采用局部差动位移传感器测量土体应变。而当土体应变小于 10⁻³%时,局部差动位移传感器不能准确捕捉土体应变。通过采用此组本构模型参数,已成功预测了方形基坑开挖引起下卧隧道变形的有限元参数分析^[10-11]。

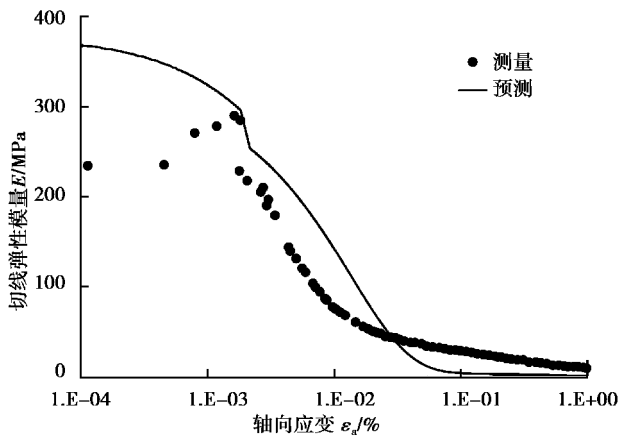


图4 实测和模型预测的土体刚度随应变折减曲线

Fig. 4 Measured and predicted curves of soil stiffness with strain reduction

3 基坑开挖深度的影响

图5为基坑开挖引起的隧道变形,限于篇幅,只给出基坑开挖直径为27 m、开挖深度为9 m和隧道埋深比为2.0的计算结果。由于竖向应力释放,基坑开挖将不可避免地导致隧道隆起。当基坑开挖深度分别为3.0 m、6.0 m和9.0 m时,最大隧道隆起分别为0.024% H_e 、0.066% H_e 和0.126% H_e 。(深基坑最大开挖深度)。

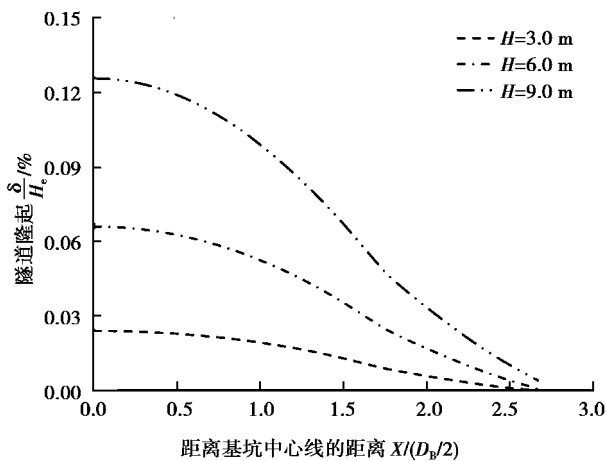


图5 基坑开挖深度对隧道隆起的影响

Fig. 5 Influence of excavation depth on tunnel heave

随着基坑开挖深度的增加,隧道隆起增加的速率逐步加大。这是因为随着深基坑的开挖,土体应力释放和剪切作用导致土体刚度的折减。在相同的竖向应力释放条件下,土体刚度越小,引起的土体位移越大,进而导致的隧道隆起也就越大。基坑开挖引起的最大隧道隆起发生在基坑中心线下方。随着与基坑中线的距离增加,隧道隆起迅速降低。

对于此工况,基坑开挖引起隧道隆起的影响范围为1.3倍的基坑直径($1.3D_B$)。

图6为基坑开挖引起的隧道横向弯曲应变。由于隧道周围应力的对称变化,隧道横向弯曲应变呈现出左右对称。在隧道顶部和底部,隧道外表面受拉,而隧道水平起拱线处的外表面受压,这表明隧道竖向受拉而水平向受压。随着基坑开挖深度的增加,应变增加的速率逐步加大。基坑开挖引起的横向弯曲应变的最大值始终发生在隧道顶部。这是因为隧道顶部距离基坑底部最近,经受的竖向应力释放也最大。隧道顶部处的横向弯曲应变已超过素混凝土抗拉极限应变。因此,工程中应重点监测隧道顶部处的弯曲应变。

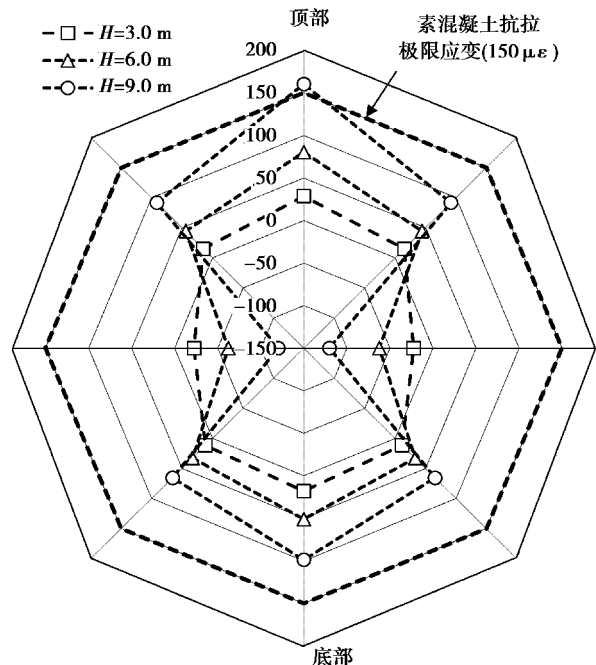


图6 基坑开挖深度对隧道横向弯曲应变的影响

Fig. 6 Influence of excavation depth on bending strain of tunnel along the transverse direction

图7为基坑开挖引起的隧道纵向弯曲应变。由于基坑开挖引起的不均匀隆起,隧道往上弯曲,形成明显的上拱和下凹区。在每一开挖深度下,上拱区的最大弯曲应变是下凹区弯曲应变的2倍左右。因此,工程师可采用上拱区的最大弯曲应变作为设计参数。随着基坑开挖深度的增加,土体应力释放和剪切作用导致土体刚度的折减。因此,基坑开挖引起的隧道纵向弯曲应变以递增的速率增加。由图6和图7可见,基坑开挖引起的隧道最大横向和纵向弯曲应变分别为160 $\mu\epsilon$ 和97 $\mu\epsilon$ 。可见:隧道的最大横向弯曲应变是最大纵向弯曲应变的

1.65倍。这是因为隧道的纵向抗弯刚度明显大于横向抗弯刚度。因此,工程中要重点监测基坑开挖引起的隧道横向弯曲应变。在后文的有限元参数分析中,只给出基坑开挖引起的隧道最大隆起和最大横向弯曲应变。

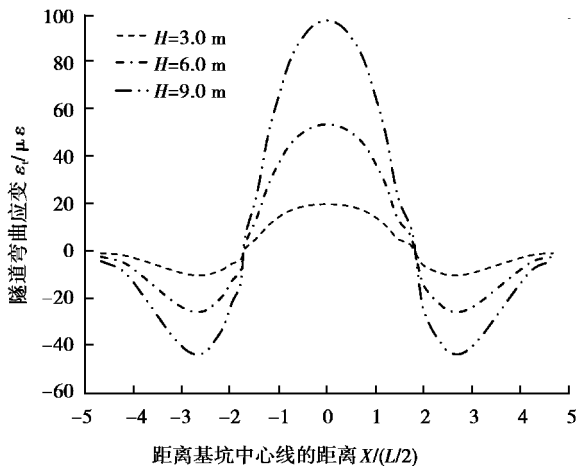


图7 基坑开挖深度对隧道纵向弯曲应变的影响

Fig. 7 Influence of excavation depth on bending strain of tunnel along the longitudinal direction

4 开挖直径对隧道三维变形的影响

4.1 最大隧道隆起

图8为不同隧道埋深比和基坑开挖直径下的最大隧道隆起(δ_{tm}/H_e)。基坑最大开挖深度为9m,而隧道埋深比(C/D)为2.0、2.5和3.0。

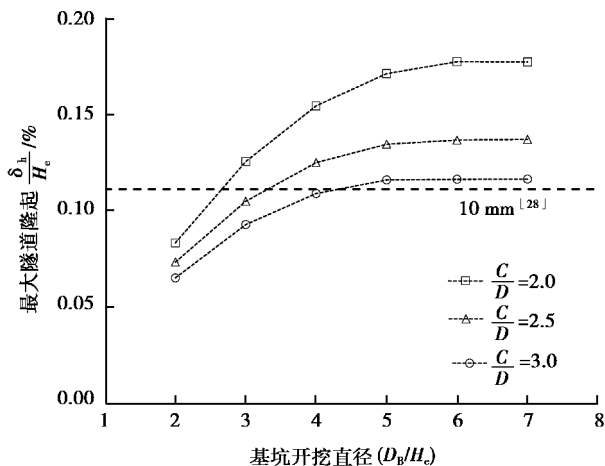


图8 基坑开挖直径对最大隧道隆起的影响

Fig. 8 Influence of excavation length on the maximum tunnel heave

在给定隧道埋深比下,基坑开挖引起的隧道最大隆起以递减的速率随着基坑直径的增加而增加。这说明,随着基坑开挖直径的增加,基坑中心线下

的隧道最大隆起逐步从三维变形过渡到二维变形。圆形基坑的拱效应使得基坑水平挤土效应急剧降低。因此,圆形基坑引起的隧道隆起主要是由竖向应力释放引起的。随着基坑开挖直径的增加,三维效应对隧道隆起的约束作用逐步降低。因此,隧道最大隆起随着基坑开挖直径的增加而增加。

给定基坑开挖直径下(D_b/H_e),基坑开挖引起的隧道最大隆起随着埋深比的增加而逐步降低。这是因为:深埋隧道周围土体的应力和刚度明显比浅埋隧道要大。另外,土体竖向应力释放随着深度的增加而明显降低。因此,在基坑开挖深度一定的情形下,深埋隧道的隆起明显小于浅埋隧道。

给定隧道埋深比下:当基坑开挖直径从 $6H_e$ 增加到 $7H_e$,隧道最大隆起的增量值小于1%。这表明基坑开挖直径达到 $7H_e$ 时,基坑中心线正下方的隧道隆起接近其最大值。但若忽视小直径深基坑($D_b/H_e=2.0$)开挖的三维效应,隧道最大隆起被高估了90%~110%。因此,若不考虑基坑开挖引起隧道的三维变形,将会得到非常保守的结果。当深基坑开挖直径大于4倍开挖深度时,不同埋深比下的最大隧道隆起均超过了上海规范的要求^[29]。

4.2 隧道最大横向弯曲应变

图9为不同隧道埋深比和基坑开挖直径下隧道最大横向弯曲应变 ϵ_t 。当在给定隧道埋深比下,隧道最大横向弯曲应变以递减的速率随基坑开挖直径的增加而增加。另外,随着隧道埋深比的增加,基坑开挖引起的隧道最大横向弯曲应变急剧降低,这与图8显示的隧道隆起变化规律是一致的。

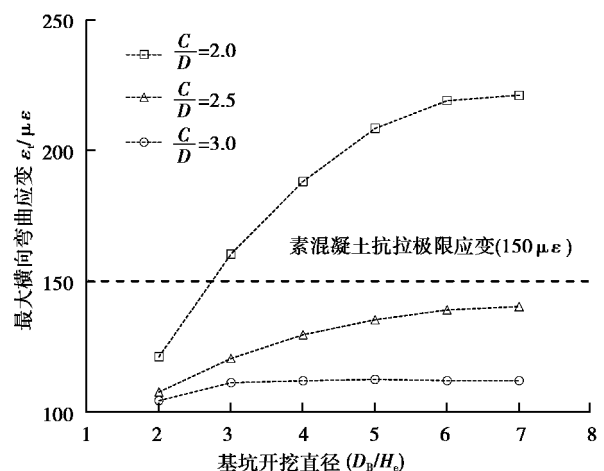


图9 基坑开挖直径对隧道最大横向弯曲应变的影响

Fig. 9 Influence of excavation length on the maximum tensile strain of tunnel along the transverse direction

给定隧道埋深比下,将基坑开挖直径从 $6H_e$ 增加到 $7H_e$,隧道最大横向弯曲应变的增量值小于1%。若忽视小直径基坑($D_b/H_e=2.0$)开挖的三维效应,弯曲应变被高估了80%($C/D=2.0$),再次说明考虑隧道三维变形的重要性。

对于浅埋隧道($C/D=2.0$):当深基坑开挖直径大于2倍开挖深度时,基坑开挖引起的隧道纵向弯曲应变已经超过素混凝土的极限抗拉应变。因此,当基坑开挖尺寸较大时,应采用相应的加固措施,以确保既有运营隧道的安全。

5 结论

通过开展有限元参数分析,系统研究了圆形基坑开挖尺寸引起下卧隧道的三维变形。基于有限元仿真结果,得到以下结论:

(1)通过开展量纲分析,圆形基坑与隧道相互作用的无量纲组主要包括基坑开挖尺寸、基坑与隧道相对位置、地连墙刚度、隧道-土体相对刚度以及土体参数。

(2)深基坑开挖引起的隧道横向弯曲应变最大值始终发生在隧道顶部。隧道上拱处的最大纵向弯曲应变是下拱处应变的2倍左右。由于隧道具有较大纵向弯曲刚度,隧道最大纵向弯曲应变明显小于最大横向弯曲应变。

(3)基坑开挖引起的隧道隆起、横向弯曲应变以递减的速率随着基坑开挖直径的增加而增加。当开挖直径达到7倍开挖深度时,隧道隆起和横向弯曲应变达到最大值。若忽视小直径基坑开挖的三维效应,隧道隆起和横向弯曲应变被大大高估。

参考文献 (References)

- [1] Burford D. Heave of tunnels beneath the shell centre, London, 1959-1986[J]. Géotechnique, 1988, 38(1): 135-137.
- [2] Chang C T, Sun C W, Duann S W, et al. Response of a Taipei rapid transit system tunnel to adjacent excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 151-158.
- [3] 刘国彬, 黄院雄, 侯学渊. 基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 202-207. (Liu Guobin, Huang Yuanxiong, Hou Xueyuan. The prediction and control of rebound deformation of the existed tunnels right under excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 202-207. (in Chinese)).
- [4] 唐仁, 林本海. 基坑工程施工对邻近地铁盾构隧道的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增1): 1629-1639. (Tang Ren, Lin Benhai. Analysis on the impact of foundation pit construction on neighboring metro tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(Supp.1): 1629-1639. (in Chinese)).
- [5] 冯龙飞, 杨小平, 刘庭金. 紧邻地铁侧方深基坑支护设计及变形控制[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1581-1587. (Feng Longfei, Yang Xiaoping, Liu Tingjin. Supporting design and deformation control of deep excavation adjacent to the metro side[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6): 1581-1587. (in Chinese)).
- [6] Hu Z F, Yue Z Q, Zhou J, et al. Design and construction of a deep excavation in soft clay adjacent to the Shanghai metro tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(5): 933-948.
- [7] 田海洋. 深基坑施工对既有变形运营隧道影响实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 663-667. (Tian Haiyang. The field test analysis on effect of adjacent excavation of deep foundation pit on deformed metro tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 663-667. (in Chinese)).
- [8] 郭永发, 杨翔, 叶林, 等. 某基坑支护方案对相邻地铁区间的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 726-731. (Guo Yongfa, Yang Xiang, Ye Lin, et al. Influence of foundation pit supporting scheme on adjacent existing subway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 726-731. (in Chinese)).
- [9] Huang X, Huang H W, Zhang D M. Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels[A]// Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering[C]. 2014: 3-18.
- [10] Ng C W W, Shi J W, Hong Y. Three-dimensional centrifuge modelling of basement excavation effects on an existing tunnel in dry sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(8): 874-888.
- [11] Ng C W W, Shi J W, Mašin D., et al. Influence of sand density and retaining wall stiffness on the three-dimensional responses of a tunnel to basement excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1811-1829.
- [12] Lo K Y, Ramsay J A. The effect of construction on existing subway tunnels - a case study from Toronto[J].

- Tunnelling and Underground Space Technology, 1991, 6(3): 287-297.
- [13] 张玉成, 杨光华, 姚捷, 等. 基坑开挖卸荷对下方既有地铁隧道影响的数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增1): 109-115. (Zhang Yucheng, Yang Guanghua, Yao Jie, et al. Numerical simulation and analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Supp.1): 109-115.(in Chinese)).
- [14] Zheng G, Wei S W. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15 (Supp.2): 69-75.
- [15] 沈辉, 罗先启, 李野, 等. 深基坑施工对地铁车站影响的数值仿真分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 1018-1028. (Shen Hui, Luo Xianqi, Li Ye, et al. Numerical simulation and analysis of influence of deep excavation on adjacent subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 1018-1028.(in Chinese)).
- [16] 许杰, 顾国荣, 杨石飞. 邻近地铁基坑开挖影响有限元参数化分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 241-247. (Xu Jie, Gu Guorong, Yang Shifei. Parametric finite element analysis of pit excavation near subway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 241-247.(in Chinese)).
- [17] 李宇升, 喻卫华. 深基坑施工对紧邻地铁区间隧道结构影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 352-358. (Li Yusheng, Yu Weihua. Analysis on Influence of Deep Pit Construction on Neighboring Metro Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 352-358. (in Chinese)).
- [18] 蔡建鹏, 刘国宝. 基坑施工对下卧地铁盾构隧道影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增2): 1877-1881. (Cai Jianpeng, Liu Guobao. Numerical analysis for influence of foundation pit excavation underlying shield tunneling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Supp. 2): 1877-1881. (in Chinese)).
- [19] 邹伟彪, 张冬梅, 蔡雄威. 基坑开挖对邻近地铁变形的实时监测与数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增2): 1728-1736. (Zou Weibiao, Zhang Dongmei, Cai Xiongwei. Numerical simulation and real time monitoring of foundation pit excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(Supp.2): 1728-1736. (in Chinese)).
- [20] Shi J W, Liu G B, Huang P, et al. Interaction between a large triangular excavation and adjacent structures in Shanghai soft clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 282-295.
- [21] Tan, Y, Wang D. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. I: bottom-up construction of the central cylindrical shaft [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11): 1875-1893.
- [22] Atkinson J H, Richardson D, Stallebrass S E. Effect of recent stress history on the stiffness of overconsolidated soil[J]. Géotechnique, 1990, 40(4): 531-540.
- [23] Mair R J. Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations [J]. Journal of Penetration, 1993, 93(1): 759-762.
- [24] Von Wolffersdorff P A. A hypoplastic relationship for granular material with a predefined limit state surface [J]. Mechanics of Cohesive-Frictional Material, 1996, 1: 251-271.
- [25] Niemunis A, Herle I. Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range [J]. Mechanics of Cohesive-frictional Material, 1997, 2: 279-299.
- [26] Herle I, Gudehus G. Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies [J]. Mechanics of Cohesive-frictional Materials 1999, 4(5): 461-486.
- [27] Maeda K, Miura K. Relative density of dependency of mechanical properties of sands [J]. Soils and Foundations 1999, 39(1): 69-79.
- [28] Yamashita S, Jamiolkowski M, Presti D C F L. Stiffness nonlinearity of three sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(10): 929-938.
- [29] Liu H L, Li P, Liu J Y. Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(2): 276-283.