

DOI: 10.11779/CJGE20220780

上方基坑开挖引起下卧隧道纵向变形分析方法

黄茂松^{1,2}, 李 豪^{1,2}, 俞 剑^{*1,2}, 张陈蓉^{1,2}, 倪雨萍^{1,2}

(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)

摘 要: 上方基坑开挖引起下卧隧道纵向响应的分析方法大多将基坑开挖处理为基底简单卸荷作用, 采用基底卸荷引起的隧道轴线处自由土体的附加应力作为输入条件, 视之为隧道所受到的荷载。然而, 这种力输入条件并非隧道受到的真实荷载, 导致得不到合理的隧道响应。为此, 首先从理论上分析当前的力输入条件的不足以及位移输入条件较为合理的原因, 并对两种输入条件下 Winkler 地基模量进行区分, 指出位移输入条件和力输入条件应分别采用被动和主动 Winkler 地基模量。其次, 通过对比有限元和 Winkler 方法得到的隧道响应, 验证了位移输入条件的合理性, 而当前的力输入条件会低估隧道的响应。最后, 鉴于力输入方法的工程实用性, 提出利用荷载放大系数调整输入荷载的大小, 以获得合理的隧道响应。利用大量的有限元算例进行研究, 确定了荷载放大系数的简化计算公式, 通过与工程案例的实测结果对比, 验证了所提出方法的可行性。

关键词: 上方基坑; 隧道; 纵向变形; 输入条件; Winkler 地基模量

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)11-2209-08

作者简介: 黄茂松(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: mshuang@tongji.edu.cn。

Approach for evaluating longitudinal deformation of underlying tunnels due to excavation of upper foundation pit

HUANG Maosong^{1,2}, LI Hao^{1,2}, YU Jian^{1,2}, ZHANG Chenrong^{1,2}, NI Yuping^{1,2}

(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)

Abstract: For most of the analysis methods for the longitudinal response of underlying tunnels, excavation of the foundation pits is treated as a simple unloading of the base and the additional stress of the greenfield soil at the tunnel axis is taken as the input condition. However, this force input condition is not the real load to which the tunnel is subjected, resulting in an unreasonable tunnel response. To this end, the reasons why the current force input condition is insufficient and the displacement input condition is more reasonable are firstly analyzed theoretically, and the Winkler subgrade moduli of the two input conditions are distinguished. It is proposed that the passive and active Winkler subgrade moduli should be used for the displacement and pressure input conditions, respectively. Secondly, by comparing the tunnel response obtained by the finite element model and the Winkler methods, it is verified that the displacement input condition is reasonable, while the current force input condition would underestimate the tunnel response. Finally, given the engineering practicality of the force-based method, it is proposed to adjust the magnitude of the force input condition by using the load amplification factor to obtain a reasonable tunnel response. Using a large number of finite element calculations for parametric studies, a simplified formulation for the load amplification factor is proposed. The feasibility of the proposed method is verified by comparing with the field measurements of a case study.

Key words: upper foundation pit; tunnel; longitudinal deformation; input condition; Winkler subgrade modulus

0 引 言

随着城市建设的加速发展, 高密度城市基坑工程对周边既有建(构)筑物的影响日益凸显。对于既有地铁隧道, 轻则将增加其附加内力, 诱发隧道的纵向不均匀变形, 重则影响隧道结构安全及正常运营。

上方基坑开挖卸荷对下卧盾构隧道影响的简化分

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738010); 国家重点研发计划课题(2016YFC0800202)

收稿日期: 2022-06-20

***通信作者** (E-mail: 002yujian@tongji.edu.cn)

析通常采用两阶段分析方法：①第一阶段将基坑开挖的卸荷效应处理为在基坑底部施加竖直向上的均布荷载，计算卸荷引起的隧道轴线处自由土体的附加应力或位移响应作为输入条件（一般利用 Mindlin 解得到）；②第二阶段将隧道轴线处自由土体的附加应力或位移响应作用于隧道上，利用弹性地基梁法计算隧道的响应。可见，两阶段法的一个关键在于获得合理的隧道轴线处的自由土体响应。对于基坑开挖引起下卧隧道响应问题，目前的研究采用的输入条件有两种：①隧道轴线处自由土体的附加应力；②隧道轴线处自由土体的位移。已有研究大多采用隧道轴线处自由土体的附加应力作为输入条件，将其视为加载于隧道上的荷载^[1-8]，也有采用隧道轴线处自由土体位移的方式^[9-11]。本文将以隧道轴线处自由土体的附加应力作为输入条件的两阶段方法称为力输入方法，将以隧道轴线处自由土体位移作为输入条件的称为位移输入方法。当前的研究都忽略了采用这种力输入条件能否合理地模拟上方基坑开挖引起的隧道-土体相互作用，力输入条件和位移输入条件是否等效的问题。黄栩等^[12]曾指出上方开挖卸荷除了在隧道上产生附加荷载外，隧道侧向土体的变形也对隧道产生影响。地面堆载对地铁隧道和市政管线的影响也存在类似的问题。Zhang 等^[13]曾针对地面堆载的管线响应问题从机理上分析了不同输入方法（力输入、位移输入和力-位移耦合输入）计算结果的合理性，指出力输入方法的计算结果明显偏小，推荐采用位移输入方法或力-位移耦合输入方法。但从工程实用来说，力输入方法比较简单直观，因此也有必要对目前常用的力输入方法进行改进。

弹性地基梁法主要分为 Winkler 地基方法和弹性理论解，其中，Winkler 地基方法使用最为广泛，但对 Winkler 地基模量的研究存在不足。常用的 Vesic 地基模量虽能对主动荷载下地表梁给出与弹性理论解相近的弯矩值，但是，对于具有一定埋深的隧道却不一定能给出合理的结果。另外，主动荷载（力输入）下与被动荷载（位移输入）下地基模量也不尽相同^[14]。俞剑等^[14]曾提出位移输入条件下考虑隧道埋深的 Winkler 地基模量表达式；还对力输入条件给出了考虑隧道埋深的 Vesic 地基模量表达式的归一化修正^[13]。

针对以上问题，本文从隧道-土相互作用的机理和两阶段方法的原理出发，分析了基坑开挖引起隧道变形问题中当前的力输入和位移输入条件的合理性，对主动和被动 Winkler 地基模量进行了区分。通过对比不同输入条件的 Winkler 方法和有限元结果，验证位移输入条件的合理性而当前的力输入条件会严重低估隧道响应。鉴于力输入方法的实用性，提出荷载放大系数以弥补当前力输入条件在理论上的缺陷。

1 两阶段分析方法

下面探讨力输入条件和位移输入条件的合理性以及不同输入条件下 Winkler 地基模量的合理选择。

1.1 不同输入条件下隧道-土相互作用分析

上方基坑开挖对下卧隧道影响分析通常将基坑开挖视为土体简单卸荷。图 1 给出基坑开挖引起隧道轴线处自由土体附加应力与位移的示意图，其中：虚线隧道表示隧道所在的位置，隧道结构并不存在，红色标记表示各分析方法所采用的输入条件； h_c 为基坑开挖深度； h_t 为下卧隧道轴线埋深； $\{p\}$ 为基底卸荷； $\{u_s\}$ 为由基坑卸荷 $\{p\}$ 引起的隧道轴线处自由土体位移； $\{f_s\}$ 为隧道轴线处自由土体的附加应力； $\{u_1\}$ 为由 $\{f_s\}$ 引起的隧道轴线处自由土体位移； $\{u_2\}$ 为施加基底卸荷 $\{p\}$ 的同时在隧道轴线处的自由土体上施加反向的附加应力 $\{-f_s\}$ 而引起的隧道轴线处自由土体的位移，它代表在基坑卸荷 $\{p\}$ 的作用中消除隧道轴线处自由土体的附加应力 $\{f_s\}$ 的影响后剩余的隧道轴线处的自由土体位移。根据输入条件的不同，基坑开挖引起下卧隧道纵向响应的两阶段分析方法可分为 3 种：①力输入方法，采用基坑卸荷 $\{p\}$ 引起的隧道轴线处自由土体的附加应力 $\{f_s\}$ 作为输入条件，这也是当前研究最常采用的方法；②位移输入方法，采用基坑卸荷 $\{p\}$ 引起的隧道轴线处自由土体位移 $\{u_s\}$ 作为输入条件；③耦合输入方法，一个输入条件为隧道轴线处自由土体的附加应力 $\{f_s\}$ ，另一个输入条件为施加基底卸荷 $\{p\}$ 的同时在隧道轴线处的自由土体上施加反向的附加应力 $\{-f_s\}$ 而引起的隧道轴线处自由土体的位移 $\{u_2\}$ 。

下面借助耦合输入方法的原理说明力输入方法不合理的原因。图 1 (c) 所示耦合输入方法是根据弹性理论叠加原理得到的，基坑卸荷 $\{p\}$ 在隧道轴线处产生的自由土体位移 $\{u_s\}$ 看作由两部分叠加组成：①在隧道轴线处的自由土体上施加附加应力 $\{f_s\}$ 引起的隧道轴线处自由土体的位移 $\{u_1\}$ ；②施加基底卸荷 $\{p\}$ 的同时在隧道轴线处的自由土体上施加反向的附加应力 $\{-f_s\}$ 而引起的隧道轴线处自由土体的位移 $\{u_2\}$ ，即 $\{u_s\} = \{u_1\} + \{u_2\}$ 。理论上，耦合输入条件和位移输入条件是等效的。然而，当前的基坑开挖引起下卧隧道响应的分析方法多采用上述力输入方法，仅将隧道轴线处自由土体的附加应力 $\{f_s\}$ 视为作用在隧道上的荷载，与其对应的隧道轴线处的自由土体位移 $\{u_1\}$ 远小于隧道轴线处自由土体位移 $\{u_s\}$ 。换言之，隧道轴线处自由土体的附加应力 $\{f_s\}$ 只是隧道所受真实荷载的一部分， $\{f_s\}$ 和 $\{u_s\}$ 并不是等效的输入条件，这将

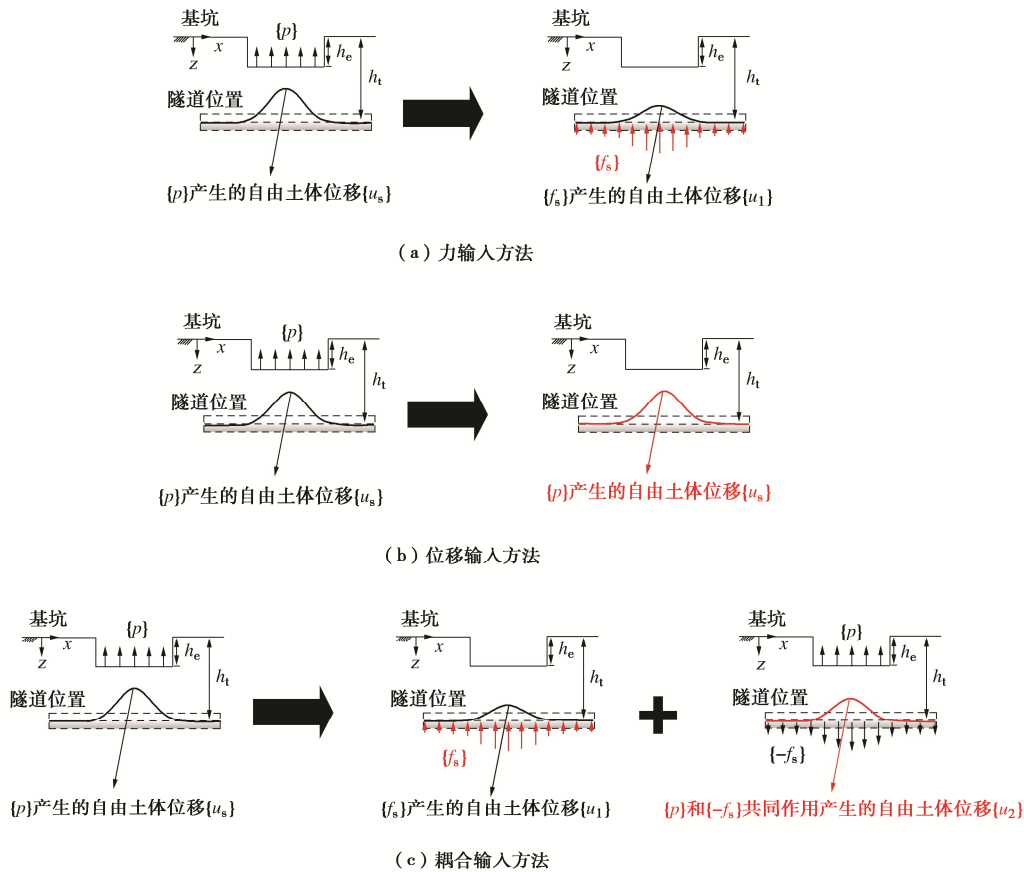


图 1 基坑开挖引起隧道轴线处自由土体附加应力与位移

Fig.1 Additional stresses and displacements of free soil at tunnel axis caused by excavation of foundation pit

导致力输入方法计算的隧道响应远小于位移输入和耦合输入方法, 无法合理地模拟上方基坑开挖引起的隧道-土体相互作用。

1.2 主动和被动 Winkler 地基模量

假定隧道为两端自由的梁(图 2), 上方基坑开挖引起下卧隧道纵向响应的基于力输入条件的 Winkler 地基方法和基于位移输入条件的 Winkler 地基方法为

$$[\mathbf{K}_p]\{u_p\} = \{F_a\} - [\mathbf{K}_s^a]\{u_p\}, \quad (1)$$

$$[\mathbf{K}_p]\{u_p\} = [\mathbf{K}_s^p](\{u_s\} - \{u_p\}). \quad (2)$$

式中: $[\mathbf{K}_p]$ 为隧道的刚度矩阵; $\{u_p\}$ 为隧道位移; $\{F_a\}$ 为主动荷载; $[\mathbf{K}_s^a]$, $[\mathbf{K}_s^p]$ 为土体刚度矩阵, 矩阵元素分别为主动 Winkler 模量 k_a 和被动 Winkler 模量 k_p , 上标 a 和 p 分别为主动荷载和被动位移。

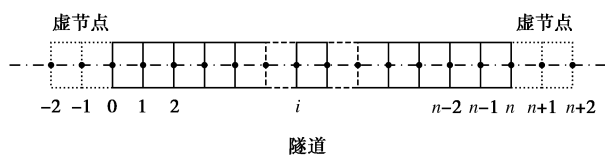


图 2 隧道结构有限差分示意图

Fig. 2 Finite difference diagram of tunnel structure

对比式(1), (2), 若认为 $[\mathbf{K}_s^a] = [\mathbf{K}_s^p]$, 即 $k_a = k_p$,

则隐含了土体抗力 $\{f\} = [\mathbf{K}_s^p]\{u_p\}$, 将推出位移输入条件下土体位移 $\{u_{sr}\}$ 等于自由土体位移 $\{u_s\}$ 与隧道位移 $\{u_p\}$ 之和, 导致 $\{u_{sr}\} \neq \{u_p\}$, 出现矛盾。因此, 被动 Winkler 模量 k_p 与主动 Winkler 模量 k_a 是不同的, 即力输入条件使用主动 Winkler 地基模量 k_a , 位移输入条件下使用被动 Winkler 地基模量 k_p 。

对于主动 Winkler 地基模量 k_a , 目前被广泛使用的是由 Vesic 提出的表达式^[15]。但 Vesic 的推导是针对集中力作用下放置在地表的弹性地基梁。由于隧道具有一定的埋深, 主动 Winkler 地基模量应当能够考虑隧道埋深的影响。Zhang 等^[13]通过对 Vesic 表达式的归一化修正来实现:

$$k_a = \frac{4-5\nu}{\eta_a} \frac{0.65E_s}{1-\nu^2} \sqrt{\frac{E_s B^4}{EI}}, \quad (3)$$

$$\eta_a = \begin{cases} 4-5\nu & (h_t/B \leq 0.5) \\ 1+B/h_t & (h_t/B > 0.5) \end{cases}. \quad (4)$$

式中: EI 为隧道的等效抗弯刚度; E_s , ν 分别为土体弹性模量和泊松比; B 为隧道直径; η_a 为与深度有关的系数。

对于被动 Winkler 地基模量 k_p , Klar 等^[16]指出在位移输入问题中使用 Vesic 地基模量是不够准确的。

为此, 俞剑等^[14]提出了被动位移输入条件下考虑隧道埋置深度的 Winkler 地基模量表达式:

$$k_p = \frac{3.08}{\eta_p} \frac{E_s}{1-\nu^2} \sqrt[8]{\frac{E_s B^4}{EI}}, \quad (5)$$

$$\eta_p = \begin{cases} 2.18 & (h_t/B \leq 0.5) \\ (1+B/1.7h_t) & (h_t/B > 0.5) \end{cases} \quad (6)$$

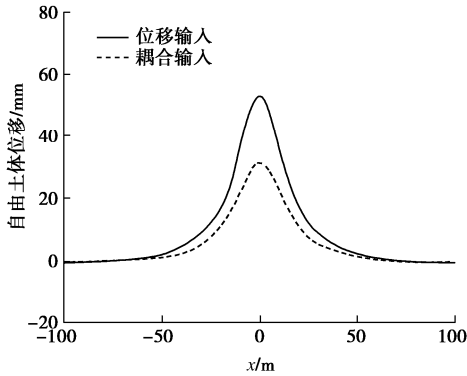
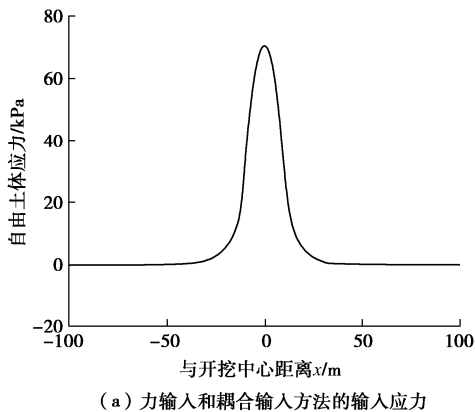
式中: η_p 为考虑隧道埋深的系数。

1.3 算例验证

通过对比弹性有限元和 Winkler 地基方法, 验证基于不同输入条件的基坑开挖引起下卧隧道纵向变形分析方法的合理性。首先, 在无隧道结构的有限元中提取隧道轴线处土体的位移作为位移输入方法的输入位移, 提取附加应力作为力输入和耦合输入方法的输入应力。其次, 将提取的附加应力反向加载于隧道轴线所在土体, 同时施加基底卸荷, 得到耦合输入方法的输入位移。最后, 将有隧道结构的有限元计算得到的隧道响应作为参考标准, 将位移输入、耦合输入和力输入条件下 Winkler 地基方法得到的隧道响应与之对比。

开展如下算例: 隧道轴线埋深为 12 m, 直径 6.2 m, 壁厚 0.35 m, 长 200 m。隧道弹性模量为 5 GPa, 泊松比为 0.2。土体弹性模量为 20 MPa, 泊松比为 0.3。方形基坑位于隧道正上方, 边长为 20 m, 深为 5 m, 坑底卸荷为 90 kPa。为了消除边界效应的影响, 有限元尺寸设为 200 m×200 m×70 m。模型底部约束竖向位移, 四周约束水平位移。

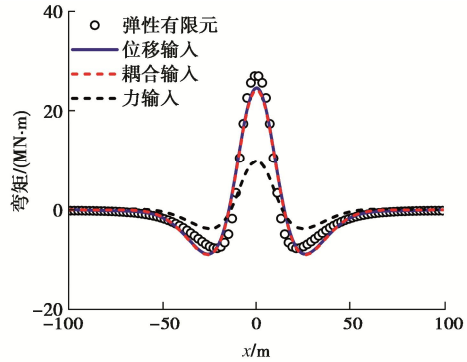
有限元获取的输入条件如图 3 所示, 从图 3 (b) 可以看出, 耦合输入方法的输入位移是很可观的, 如前所述, 这一部分位移代表在基坑卸荷 {p} 的作用中消除隧道轴线处自由土体的附加应力 {f_s} 的影响后剩余的自由土体位移, 说明隧道轴线处自由土体的附加应力 {f_s} 只引起隧道轴线处自由土体的部分响应, 因此, 隧道轴线处自由土体的附加应力 {f_s} 只是隧道所受到的真实荷载的一部分。



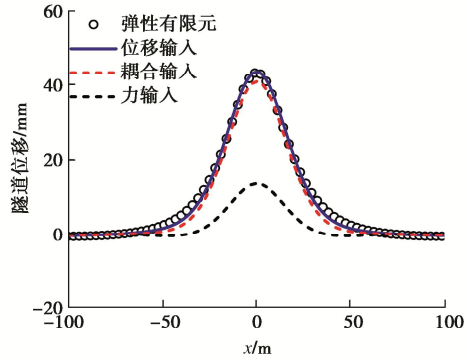
(b) 位移输入和耦合输入方法的输入位移
图 3 有限元得到的输入条件

Fig. 3 Input conditions obtained by finite element method

图 4 给出了位移输入、耦合输入和力输入条件下 Winkler 地基方法和弹性有限元得到的隧道位移和弯矩, 可以看出位移输入方法和耦合输入方法的结果非常接近, 而力输入方法的结果远小于二者, 说明耦合输入条件和位移输入条件是等效的; 还可以看出, 位移输入条件和耦合输入条件的结果与有限元的结果基本一致, 而力输入条件无法得到准确的预测结果, 说明当前的力输入条件不能获得合理的隧道响应, 而位移输入和耦合输入条件可以获得合理的隧道响应, 这与 Zhang 等^[13]的算例分析是一致的。



(a) 弯矩



(b) 位移

图 4 有限元与 Winkler 方法对比

Fig. 4 Comparison of results by Winkler and finite element methods

基于以上分析, 针对上方基坑开挖对下卧隧道的

影响, 当采用 Winkler 地基方法分析时, 有两种途径可以获得较为合理的隧道响应:

- (1) 位移输入方法, 使用隧道轴线处的自由土体位移 $\{u_s\}$ 作为输入条件, 并采用式 (5) 所示的被动 Winkler 地基模量, 得到隧道响应。
- (2) 耦合输入方法, 使用隧道轴线处自由土体的附加应力 $\{f_s\}$ 作为输入条件, 并采用式 (3) 所示的主动 Winkler 地基模量; 使用施加基底卸荷 $\{p\}$ 的同时在隧道轴线处的自由土体上施加反向的附加应力 $\{-f_s\}$ 而引起的隧道轴线处自由土体的位移 $\{u_2\}$ 作为输入条件, 并采用式 (5) 所示的被动 Winkler 地基模量; 对二者结果进行叠加得到的隧道响应。

2 荷载放大系数的引入

尽管位移输入方法和耦合输入方法比较合理, 但实际工程中输入位移的确定却非常困难。天然地基具有明显的分层现象, 各层之间的物理力学性质, 尤其是弹性模量差异明显。为了获得分层地基中开挖卸载对邻近隧道的影响, 张治国等^[17]采用弹性层状半空间地基模型, 在三维坐标系下进行 Laplace 变换, 利用矩阵传递技术求解位移场, 这种方法十分复杂, 大大地限制了其在实际工程中的推广运用。力输入方法概念明确, 在工程上的使用最为广泛。如前所述, 对于隧道纵向的分析, 当前力输入方法采用的输入荷载远小于隧道所受到的真实荷载, 而弹性有限元作为整体分析方法, 理论上能够反映隧道所受到的真实荷载, 可以将等效弹性有限元与力输入-Winkler 地基方法的结果进行对比, 得到荷载放大倍数对输入荷载进行调整, 使其更接近隧道所受到的真实荷载。因此, 引入荷载放大系数 Q_F , 并将其定义为弹性有限元与 Winkler 地基方法分别所得最大隧道隆起量之比。考虑到 Mindlin 应力解只包含了泊松比 ν , 不受弹性模量 E_s 影响, 且城市地区实际地层的泊松比的变化范围不大, 一般在 0.3 左右, 可近似利用弹性半空间 Mindlin 应力解计算分层地基的附加应力^[10]。

下面介绍荷载放大系数 Q_F 的确定过程。采用 ABAQUS 有限元软件进行建模计算, 模型平面尺寸是 1000 m×1000 m×100 m。图 5 为模型中上方基坑与既有隧道相对位置三视图, 其中, S 为基坑中心与隧道中心线的距离, L_w 为基坑半宽, L_h 为基坑半长。坑底卸荷弹性有限元分析的模型尺寸满足边界对基坑变形无影响的要求。为分析基坑开挖边界条件对隧道变形的影响规律, 基坑四周选取两种边界条件: 固定和自由。均质土体假设为弹性材料, 弹性模量为 80 MPa, 泊松比为 0.4, 土体重度为 18 kN/m³。基坑下卧隧道

管片外径 B 为 6.2 m, 管片厚度为 0.35 m。考虑到管片间接头对既有隧道刚度有影响, 采用等效刚度法模拟既有隧道, 盾构隧道横向刚度有效率取为 75%^[18], 同时, 纵向刚度有效率约为 20%~25%, 因此, 隧道弹性模量取为 C50 混凝土模量值 ($E_{c50}=34.5$ GPa) 的 1/7, 即 $E=E_{c50}/7=5$ GPa, 泊松比取为 0.33。

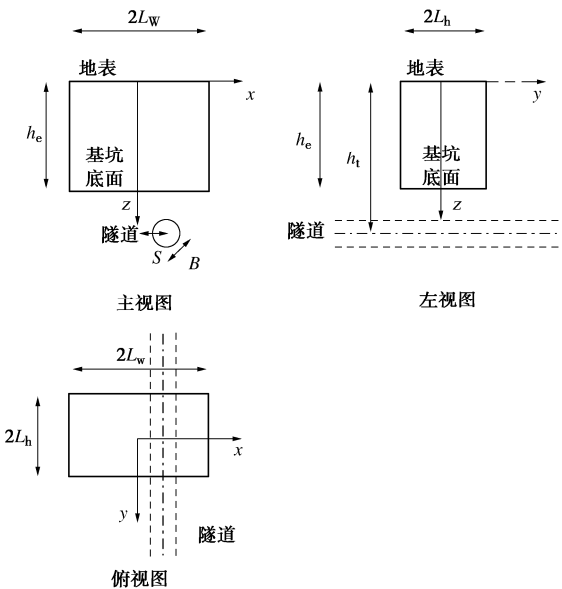


图 5 上方基坑与隧道相对位置

Fig. 5 Relative position of above foundation pit and tunnel

考虑了多个影响因素: 基坑的面积、基坑的长宽比 L_h/L_w 、基坑开挖深度 h_e 、隧道埋深 h_t 、基坑的支护条件和基坑中心与隧道中心线的距离 S 等对荷载放大系数 Q_F 的影响, 故而设定如下模型工况 (表 1), 取基坑开挖面积分别为 900, 1600, 2500 m², 取隧道轴线埋深 h_t 分别为 15, 20, 25 m, 隧道轴线埋深到坑底距离 $(h_t - h_e)$ 分别为 7, 10 m, 取隧道轴线到基坑中心距离 S 分别为 $0L_w$, $0.2L_w$, $0.4L_w$, $0.8L_w$ 。为分析基坑开挖边界条件对隧道变形的影响规律, 分别选取自由和固定两种极端情况。

表 1 模型工况

Table 1 Working conditions		
基坑面积/ m ²	基坑尺寸(长× 宽)/m	S/L_w
900	18×50	0/0.2/0.4
	22.5×40	
	30×30	
	40×22.5	
	50×18	
1600	32×50	0/0.2/0.4
	40×40	
	50×32	0/0.2/0.4/0.8
	30×83	
2500	40×62.5	0/0.2/0.4
	50×50	
	62.5×40	0/0.2/0.4/0.8
	83×30	
	83×30	

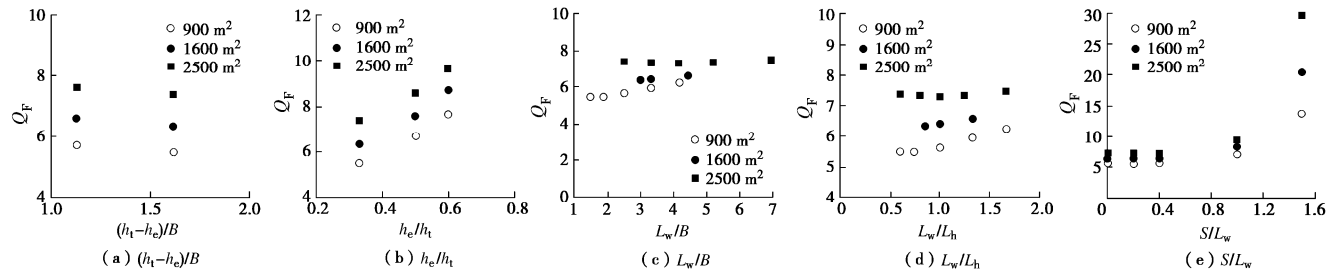


图 6 荷载放大系数影响因素

Fig. 6 Influencing factors for load amplification factor

下面对以上影响因素进行分析，图 6 分别建立荷载放大系数 Q_F 与 $(h_t - h_e)/B$ 、 h_e/h_t 、 L_h/L_w 、 L_w/B 和 S/L_w 的关系。根据以上算例，可以看出弹性有限元与两阶段分析方法（Winkler 地基）所得最大隧道响应存在较大差异，原因是隧道实际的荷载与两阶段方法中采用的荷载存在一定差异。荷载放大系数 Q_F 受 $(h_t - h_e)/B$ 、 h_e/h_t 、 L_h/L_w 、 L_w/B 和 S/L_w 的影响明显。其中，当 $S/L_w=0\sim0.8$ （隧道处于基坑内部）时， Q_F 基本无影响。本文暂不考虑隧道处于坑外的情况。

将 $(h_t - h_e)/B$ 、 h_e/h_t 、 L_h/L_w 、 L_w/B 作为参数，通过一系列的试算，可以得到荷载放大系数 Q_F 的归一化结果，如图 7。对于常规隧道，根据图 7 中平均值，荷载放大系数 Q_F 可归结为

$$Q_F = A \left[\left(\frac{h_t - h_e}{B} \right)^{1.7} \left(\frac{h_e}{h_t} \right)^{2.5} + 1.1 \right] \left(\frac{L_h}{L_w} \right)^{0.16} \left(\frac{L_w}{B} \right)^{0.35} \quad (7)$$

式中： A 为放大系数，取值 2.7~3.5，开挖面积越小，基底距离隧道越小，取值越小。可以看出荷载放大系数公式综合考虑了隧道和基坑尺寸等因素。

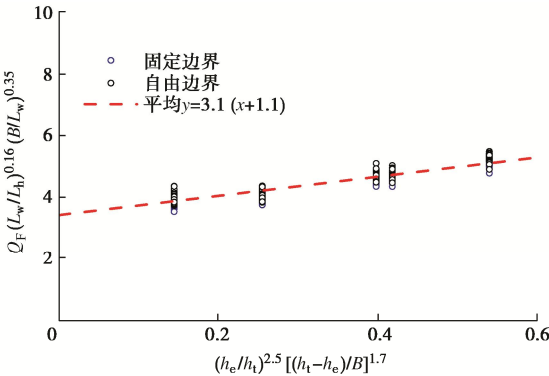


图 7 荷载放大系数 Q_F 的归一化处理

Fig. 7 Normalization of load amplification factor Q_F

3 工程实例分析

东方路地下穿越工程位于上海市浦东新区，其中 N01 段基坑位于上海地铁 2 号线某区间正上方，交叉角度为 45° ，地铁隧道顶部与基坑坑底距离为 2.76 m。N01 基坑为长 26 m、宽 18 m 的平行四边形，基坑开挖深度 6.5 m。隧道外径 6.2 m，衬砌厚度 0.35 m，

隧道轴线埋深约为 12.36 m，工程示意图如图 8 所示。由于地铁隧道离基坑非常接近，为了保证基坑开挖不对隧道产生较大影响，项目采用了分层开挖、分条开挖、水泥土搅拌桩加固等多种施工工艺^[19]。

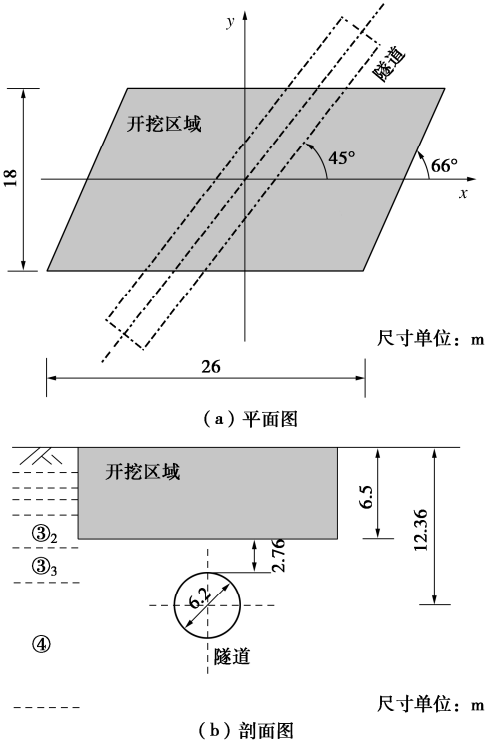


图 8 基坑开挖示意图

Fig. 8 Diagram of excavation of foundation pit

倪雨萍^[20]曾介绍了详细的施工过程和各土层的 HS-Small 模型参数，并利用 Plaxis 对该工程进行了基于 HS-Small 模型的三维全过程开挖模拟。与实测结果对比（图 9）可知，有限元较好地模拟出了基坑开挖对隧道造成的竖向位移中间大两边小的分布特点，隧道变形与实测值较为吻合，可以认为基于 HS-Small 模型的 Plaxis 有限元较好地模拟了实际工程。

考虑土体的应变量级和刚度衰减特性，根据经验可将各土层的小应变弹性模量 E_0 折减到 60%，得到各土层的等效弹性模量。各土层的小应变弹性参数采用如下方法确定： $\nu = \nu_{ur}$ ， $E_0 = 2G_0(1 + \nu)$ ， $G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c' \cos \varphi' + \sigma_3' \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{ref} \sin \varphi'} \right)^m$ ，其中 σ_3' 为每一层土中间

标高处的有效围压, $\sigma'_3 = K_0^{\text{nc}} \sigma'_v = (1 - \sin \varphi) \sigma'_v$ 。图 9 进一步给出了等效弹性有限元的分析结果, 可以发现, 当各层土的小应变弹性模量 E_0 折减到 60% 后, 弹性有限元的结果与 HS-Small 模型模拟比较接近。

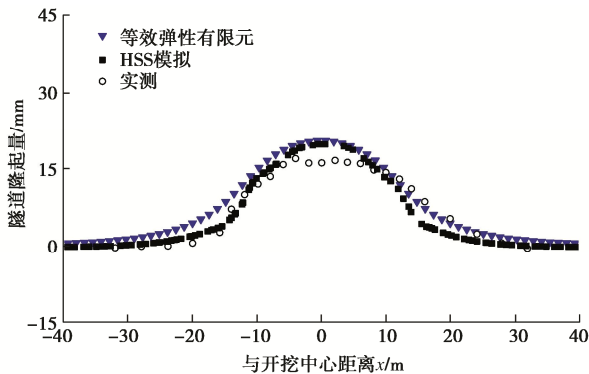


图 9 实测、HS-Small 模型和弹性模型的结果

Fig. 9 Results of measurement, HS-Small model and elastic model

最后, 采用基于力输入的 Winkler 地基方法计算隧道的纵向隆起量, 分别给出了未经调整和经荷载放大系数 Q_F 调整后的计算结果, 如图 10 所示。荷载放大系数 Q_F 根据基坑和隧道基坑尺寸及相对位置关系, 利用式 (7) 计算, 所需计算参数为 $h_t = 12.36$ m, $h_e = 6.5$ m, $B = 6.2$ m, $L_w = 13$ m, $L_h = 9$ m, $A = 2.7$, 则荷载放大系数 $Q_F = 4.2$ 。在确定 Winkler 地基模量时, 考虑地基层和土体刚度非线性, 求各层土小应变弹性模量 E_0 的加权平均值^[12,21], 再将该平均值折减到 60%, 最后代入式 (3) 计算地基模量。从图 10 可以看出, 未经调整的力输入-Winkler 地基方法计算的隧道纵向隆起量明显小于实测, 而经荷载放大系数 Q_F 调整后的力输入-Winkler 地基方法计算的隧道隆起量整体更接近实测, 说明了将隧道轴线处自由土体附加应力作为输入条件的不合理性, 以及本文提出的荷载放大系数方法的有效性。

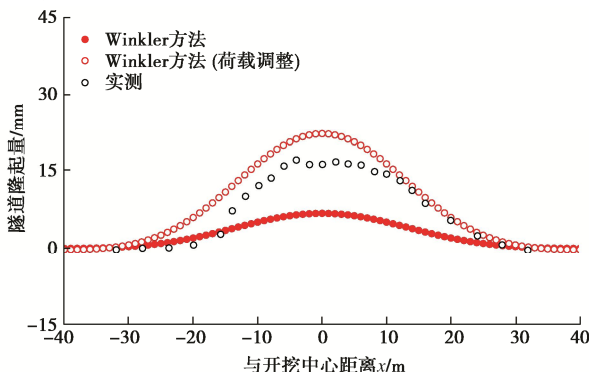


图 10 Winkler 方法与实测的对比结果

Fig. 10 Comparison between Winkler method and measurement

4 结 论

针对上方基坑开挖对下卧隧道纵向变形影响问题, 采用理论和数值的方法对当前采用的力输入条件

的不合理性和 Winkler 地基模量的合理选择进行分析与验证, 并提出利用荷载放大系数对当前力输入方法进行改进。得出 3 点结论。

(1) 当前的力输入方法仅将隧道轴线处自由土体的附加应力视为隧道受到的荷载, 无法合理模拟上方基坑开挖引起的隧道-土体相互作用; 位移输入条件和力输入条件下的 Winkler 地基模量应进行区分, 前者使用被动 Winkler 地基模量, 后者使用主动 Winkler 地基模量。通过对比有限元和 Winkler 地基方法的结果, 表明采用位移输入条件能够获得合理的隧道响应, 而采用当前的力输入条件会产生明显的低估。

(2) 鉴于力输入方法的实用性, 提出采用荷载放大系数调整输入荷载, 使得采用力输入条件下的结果更加合理; 利用弹性有限元开展大量算例研究, 给出荷载放大系数的简单表达式。

(3) 利用基于 HS-Small 模型的全过程开挖有限元和等效弹性有限元对工程案例进行了模拟研究。通过对比实测结果和经荷载放大系数调整后力输入条件下 Winkler 地基方法的结果, 验证了所提出方法的有效性。

参考文献:

- [1] 陈 郁, 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 91-94. (CHEN Yu, LI Yongsheng. Calculation of tunnel heaving due to unloading of pit excavation[J]. Underground Space, 2005, 1(1): 91-94. (in Chinese))
- [2] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1373-1380. (ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1373-1380. (in Chinese))
- [3] 姜兆华, 张永兴. 基坑开挖对邻近隧道纵向位移影响的计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 7-11, 39. (JIANG Zhao-hua, ZHANG Yongxing. Calculation of influence on longitudinal deformation of adjacent tunnels due to excavation[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 7-11, 39. (in Chinese))
- [4] 梁荣柱, 林存刚, 夏唐代, 等. 考虑隧道剪切效应的基坑开挖对邻近隧道纵向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 223-233. (LIANG Rongzhu, LIN Cungan, XIA Tangdai, et al. Analysis on the longitudinal deformation of tunnels due to pit excavation considering the tunnel shearing effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 223-233. (in Chinese))
- [5] 应宏伟, 程 康, 俞建霖, 等. 考虑地基变形连续的基坑开挖诱发邻近盾构隧道位移预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(2): 318-329. (YING Hongwei, CHENG Kang, YU Jianlin, et al. Prediction of displacement of adjacent shield tunnel induced by pit excavation considering the continuous deformation of foundation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2021, 55(2): 318-329. (in Chinese))

- YU Jianlin, et al. Prediction of shield tunnel displacement due to adjacent basement excavation considering continuous deformation of ground[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, **55**(2): 318-329. (in Chinese))
- [6] 魏 纲, 洪文强, 魏新江, 等. 基坑开挖引起邻近盾构隧道转动与错台变形计算[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(7): 1251-1259. (WEI Gang, HONG Wenqiang, WEI Xinjiang, et al. Calculation of rigid body rotation and shearing dislocation deformation of adjacent shield tunnels due to excavation of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(7): 1251-1259. (in Chinese))
- [7] 刘建文, 施成华, 雷明锋, 等. 基坑开挖对下卧地铁隧道影响的解析计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, **50**(9): 2215-2225. (LIU Jianwen, SHI Chenghua, LEI Mingfeng, et al. Analytical method for influence analysis of foundation pit excavation on underlying metro tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, **50**(9): 2215-2225. (in Chinese))
- [8] 徐国元, 黄思源. 基坑开挖对下卧盾构隧道变形影响的计算分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, **40**(9): 78-85. (XU Guoyuan, HUANG Siyuan. Calculation and analysis of the influence of foundation pit excavation on the deformation of the underlying shield tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, **40**(9): 78-85. (in Chinese))
- [9] ZHANG J F, CHEN J J, WANG J H, et al. Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **36**: 24-33.
- [10] 周泽林, 陈寿根, 涂 鹏, 等. 基坑开挖对邻近隧道影响的耦合分析方法[J]. 岩土力学, 2018, **39**(4): 1440-1449. (ZHOU Zelin, CHEN Shougen, TU Peng, et al. Coupling method for analyzing the influence on existing tunnel due to adjacent foundations pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(4): 1440-1449. (in Chinese))
- [11] 程 康, 徐日庆, 应宏伟, 等. 既有隧道在上覆基坑卸荷下的形变响应简化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(3): 637-648. (CHENG Kang, XU Riqing, YING Hongwei, et al. Simplified method for evaluating deformation responses of existing tunnels due to overlying basement excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(3): 637-648. (in Chinese))
- [12] 黄 栩, 黄宏伟, 张冬梅. 开挖卸荷引起下卧已建盾构隧道的纵向变形研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1241-1249. (HUANG Xu, HUANG Hongwei, ZHANG Dongmei. Longitudinal deflection of existing shield tunnels due to deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1241-1249. (in Chinese))
- [13] ZHANG C R, ZHU J R, HUANG M S, et al. Winkler load-transfer analysis for pipelines subjected to surface load[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **111**: 147-156.
- [14] 俞 剑, 张陈蓉, 黄茂松. 被动状态下埋管的地基模量[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(1): 123-132. (YU Jian, ZHANG Chenrong, HUANG Maosong. Subgrade modulus of underground pipelines subjected to soil movements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(1): 123-132. (in Chinese))
- [15] VESIĆ A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solid[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1961, **87**(2): 35-53.
- [16] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Soil-pipe interaction due to tunnelling: comparison between Winkler and elastic continuum solutions[J]. Géotechnique, 2005, **55**(6): 461-466.
- [17] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 层状地基中隧道开挖对临近既有隧道的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(4): 600-608. (ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Analysis on response of existing tunnels due to adjacent tunneling in multi-layered soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(4): 600-608. (in Chinese))
- [18] 郑 刚, 王 琦, 邓 旭, 等. 不同围护结构变形模式对坑外既有隧道变形影响的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1181-1194. (ZHENG Gang, WANG Qi, DENG Xu, et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on deformation of existing tunnels outside excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1181-1194. (in Chinese))
- [19] 李志高, 刘 浩, 刘国彬, 等. 基坑开挖引起下卧隧道位移的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(4): 619-623. (LI Zhigao, LIU Hao, LIU Guobin, et al. Influence analysis of deep-dip excavation on down tunnel based on the measured displacement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(4): 619-623. (in Chinese))
- [20] 倪雨萍. 基于小应变非线性弹性模型的基坑开挖诱发隧道变形数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2019. (NI Yuping. Simulation of Tunnel Deformations Adjacent to Excavation Based on a Small Strain Non-Linear Hypoelastic Model[D]. Shanghai: Tongji University, 2019. (in Chinese))
- [21] POULOS H G, DAVIS E H. Pile Foundation Analysis and design[M]. New York: Wiley, 1980.