

Analysis of the influence of high-heap soil unloading on the deformation of shield tunnels

Yuhang Li¹ Chuanjun Li²

1. Hefei Rail Transit Group Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230001, China

2. Mechanical Industry Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi' 710043, China

Abstract

A large area of loading or unloading above a shield tunnel will cause a large vertical displacement of the tunnel and cause damage to the tunnel structure. In this paper, based on the theory of elastic foundation beams, the tunnel structure is equivalent to an elastic foundation beam. The quantitative calculation method of the tunnel bulge is used to solve the maximum bulge value of the tunnel. The construction scheme of this project adopts the method of finite element numerical simulation to verify the results of each other, predict the deformation of the tunnel, and ensure the safety of the tunnel.

Keywords

elastic foundation beam; mound unloading; shield deformation; numerical Simulation; Tunnel uplift

高堆土卸载对盾构隧道变形影响分析

李宇航¹ 李传军²

1. 合肥市轨道交通集团有限公司, 中国·安徽 合肥 230001

2. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 中国·陕西 西安 710043

摘 要

盾构隧道上方大面积加载或卸载, 都会造成隧道产生较大的竖向位移, 导致隧道结构发生破坏。本文根据弹性地基梁理论, 将隧道结构等效成弹性地基梁, 采用求算隧道隆起的定量计算方法来求解隧道最大隆起值, 并且结合合肥某工程待开发地块, 高土堆的卸载和加载的施工方, 采用有限元数值模拟的方法, 将结果互相验证, 预测隧道变形, 确保隧道使用安全。

关键词

弹性地基梁; 土堆卸载; 盾构变形; 数值模拟; 隧道隆起

1 引言

21 世纪以来, 随着城市建设的发展, 各种地块相继开发, 经常会出现盾构隧道上方进行土体开挖卸载或建造建筑物加载施工的活动, 这必然会对盾构隧道结构产生影响。

上世纪 60 年代, Terzaghi 等^[1]就发现了小开挖段产生的回弹量小于大开挖段引起的回弹量; 文献 [2] 进行了卸载工况下盾构隧道结构承载能力的足尺实验研究, 得到隧道结构在卸载工况下的受力机理及关键性能点; 文献 [3] 通过实测数据分析了加卸载对下方既有盾构隧道的影响; 文献 [4] 采用了 ANSYS 结构分析软件, 通过数值模拟研究卸载工况下盾构隧道结构承载性能; 本文利用 Mindlin 弹性半空间应力解, 采用基于弹性地基梁理论得到的求算隧道隆起的定

量计算方法, 预测土堆卸载造成隧道隆起发生的竖向位移, 并以合肥龙川路某地块开发工程为背景, 建立三维有限元模型, 将数值模拟结果和理论公式得到的结果进行对比, 以此来验证数值模拟结论的可靠性, 预测施工方案的可行性, 并对该地块开发工程提出合理化建议, 为类似工程提供借鉴和参考。

2 理论方法计算

将地铁衬砌隧道等效成处于土层中的弹性地基梁, 不规则的高土堆等效成垂直矩形均布荷载 p , 长度和宽度分别为 l 和 b , 隧道埋深为 h 。为简化计算, 作以下基本假定^[5]:

- (1) 土体为均质、弹性半空间体;
- (2) 隧道结构为弹性拼接体, 截面和刚度保持不变;
- (3) 不考虑隧道的存在对土体位移和附加应力的影响;
- (4) 加载或卸载在隧道结构下卧土层中产生的附加应力可以根据 Boussinesq 解求得。

【作者简介】李宇航 (1996-), 男, 中国安徽淮北人, 本科, 工程师, 从事工程监测及测量研究。

在地表作用垂直向下的均布荷载 p , 对隧道下卧土体中产生的竖向附加应力为:

$$\sigma_z = \alpha_c p$$

$$\alpha_c = \frac{1}{2} \pi \left[\frac{lbz(l^2 + b^2 + 2z^2)}{(l^2 + z^2)(b^2 + z^2)\sqrt{l^2 + b^2 + z^2}} + \arcsin \frac{lb}{\sqrt{(l^2 + z^2) + (b^2 + z^2)}} \right]$$

根据推导得到的求算隧道隆起的定量计算方法^[6]来计算隧道结构的纵向位移;

将隧道纵向看作是均布荷载作用下的 Winkler 弹性地基无限长梁, 由此得到隧道与地层相互作用的力学方程可写为:

$$EI \frac{d^4 S(x)}{dx^4} = -Dp + q(x) \quad (1)$$

根据 Winkler 地基模型, 地基沉降与基础梁挠曲变形协调方程 $p = kS(x)$, 将 (1) 式修改得到的力学方程为:

$$EI \frac{d^4 S(x)}{dx^4} + K \cdot S(x) = q(x) \quad (2)$$

式中, EI : 隧道刚度, $S(x)$: 隧道竖向位移, K : 综合地基基床系数 k 与隧道外径 D 的乘积, $q(x)$: 竖向附加应力 σ_z 与隧道外径 D 的乘积。公式 (2) 是一个具有边界条件的四阶微分方程, 求解条件需在无穷远处的隧道位移 S 和 S' 转角为零。

为更方便求解该方程, 需将上式转化为一个一阶积分方程, 再使用数值积分的方法求解。对一受集中力 P_0 作用下的地铁隧道, 有:

$$EI \frac{d^4 S(x)}{dx^4} + K \cdot S(x) = p_0 \quad (3)$$

求解上式, 得到其通解为:

$$S(x) = e^{\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x) \quad (4)$$

上式的 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 都为待定系数; 而 $\lambda = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}}$ 。

坐标原点位于集中力 P_0 作用点, 所以 $S(x)|_{x \rightarrow \infty} = 0$ 得 $C_1 = C_2 = 0$; 根据对称性,

$$S'(x)|_{x \rightarrow \infty} = 0$$

得 $C_3 = C_4 = C$; 由此得到 (3) 式的通解为:

$$S(x) = Ce^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x)$$

在 原 点 右 侧 $x = \varepsilon$ (ε 为无穷小) 处将隧道切开, 隧道截面上剪力为:

$$Q = -EIS'''(x)|_{x \rightarrow \infty} = -P_0$$

所以得到 $C = \frac{P_0 \lambda}{2}$, 则方程 (3) 的解为:

$$S(x) = \frac{P_0 \lambda}{2K} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (5)$$

对于附加荷载 $q(x)$ 作用下的隧道, 在一点 ξ 作用的集中荷载 $q(\xi)d(\xi)$, 由上式可得该荷载引起隧道上任意点 x 的位移 $d(x)$ 为:

$$dS(x) = \frac{q(\xi)\lambda}{2K} e^{-\lambda|x-\xi|} (\cos \lambda|x-\xi| + \sin \lambda|x-\xi|) d\xi \quad (6)$$

在隧道附加分布荷载范围内积分, 得到方程 (2) 的解, 即为隧道隆起值得计算公式:

$$S(x) = \frac{\lambda}{2K} \int_{-\infty}^{+\infty} q(\xi) e^{-\lambda|x-\xi|} (\cos \lambda|x-\xi| + \sin \lambda|x-\xi|) d\xi \quad (7)$$

相应求得隧道纵向的曲率半径公式为:

$$\rho = S''(x) = \frac{\lambda^3}{K} \int_{-\infty}^{+\infty} q(\xi) e^{-\lambda|x-\xi|} (\cos \lambda|x-\xi| + \sin \lambda|x-\xi|) d\xi = 2\lambda^2 S(x) \quad (8)$$

3 工程实例及数值模拟分析

3.1 工程概况

合肥地铁 4 号线某区间线路经过的规划工业用地为高堆土区, 场地最大高度高于周边道路约 4~10m, 后期地块开发会对盾构区间线路影响较大。

3.2 材料参数

根据勘察报告、设计图纸、相关规范标准等参考资料, 得到本次分析所需材料参数如下。

表 1 土体参数表

材料名称	重度 γ (kN/m ³)	泊松比 ν	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 ϕ (°)
杂填土	18.0	0.38	5.0	8.0
黏土	19.3	0.29	55.0	13.0
粉质黏土	20.4	0.28	33.0	15.0
全风化砂质泥岩	20.5	0.24	35.0	15.0
强风化砂质泥岩	20.9	0.19	45.0	20.0
中风化砂质泥岩	21.6	0.14	180.0	30.0

表 2 结构参数表

材料参数	弹性模量 E (MPa)	泊松比 ν	重度 γ (kN/m ³)	结构构件
C50	34500	0.2	25.0	隧道衬砌
C35	31500	0.2	23.5	钱板、桩
无重力实体	0	0	0	建筑物

衬砌隧道的直径为 6.0m, 壁厚 0.3m, 标高顶面高程为 18.69m。

3.3 模型建立

采用 Midas GTS NX 对高堆土卸载施工方案进行三维建模分析。

土体采用修正摩尔库伦本构模型, 该本构模型可以模拟基于幂函数的非线性弹性和弹塑性性模型的组合行为, 模型中通过分别定义加载弹性模量和卸载弹性模量, 优化因开挖 (移除荷载) 导致的地面隆起现象。本模型尺寸为 $265\text{m} \times 198\text{m}$, 共有 679262 网格单元, 土层采用四面体网格, 详见图 1、2。由于高堆土堆地表面形态不规则, 通过测量的高程数据, 采用地形数据生成器生成地表形态。

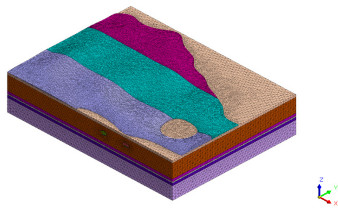


图 1 三维网格划分示意图 (a)

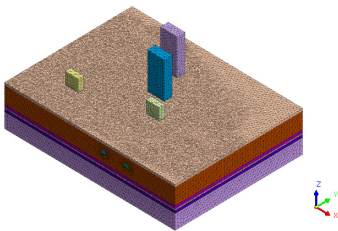


图 2 三维网格划分示意图 (b)

3.4 施工方案及工况设置

本模型主要模拟了两个施工方案, 一: 高土堆卸载阶段: 将高土堆图 1 中红色段、绿色段、紫色段依次分成 1、2、3 段土分段依次开挖; 施加建筑物荷载阶段。二: 或先从中间第 2 段土开挖, 再分别卸载第 1、3 段土; 施加建筑物荷载阶段。

建筑物荷载是以面荷载的形式, 施加在建筑物网格底面, 低层建筑荷载取值 89.1KN/m^2 , 高层建筑荷载取值 226.8KN/m^2 ^[7], 低层建筑采用 400mm 厚筏板, 高层建筑采用 800mm 厚筏板, 地基施加桩基础, 直径 0.6m。

3.5 模拟结果及分析

由于研究重点在于分析地铁结构在高土堆卸载以及施加建筑物荷载过程中的应力应变, 对于地表本身不作过多分析。

各工况下地铁隧道变形值见表 3、4。

由表 3 和表 4 对比可见, 开挖卸载土体阶段, 隧道衬砌都会产生很大的变形, 尤其三段土在无其它施工工序来抑制土体回弹的情况下完全卸载, 隧道衬砌竖向位移最大值达到了 19.89mm, 已经超出规定的预警值 (10mm), 但未超出控制值 (20mm)。另外, 隧道的水平位移最大值 3.35mm, 未超出规定的预警值 (10mm) 及控制值 (20mm); 另外, 通

过两个施工方案的对比发现, 先卸载中间第 2 段土 (土层较厚) 再卸载第 1、3 段土比按顺序施工产生的位移更大, 危害更大。此外, 对地基施加足够的桩支撑的情况下, 施加建筑物荷载对隧道的影响可以控制在安全范围。

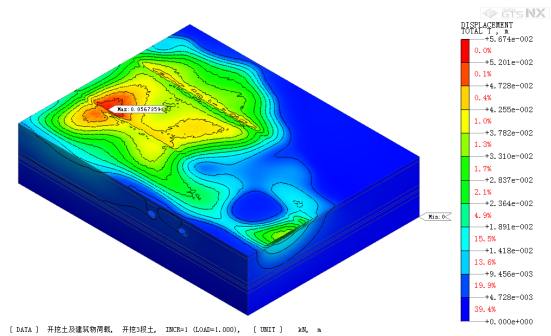


图 3 整体模型位移云图 (开挖第 3 段土)

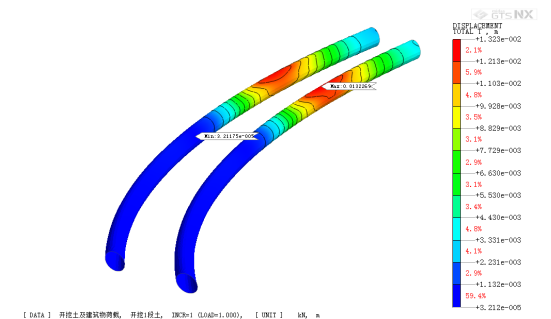


图 4 地铁隧道衬砌总位移云图 (开挖第 1 段土)

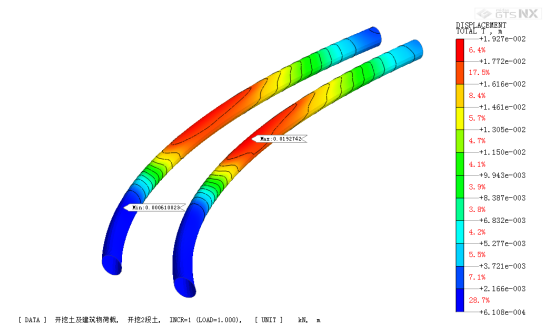


图 5 地铁隧道衬砌总位移云图 (开挖第 2 段土)

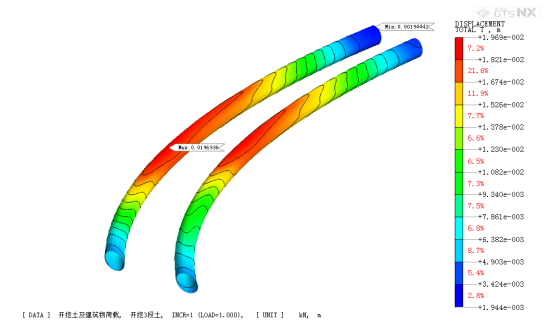


图 6 地铁隧道衬砌总位移云图 (开挖第 3 段土)

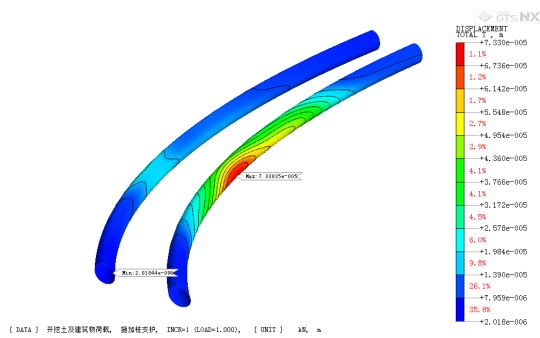


图 7 地铁隧道衬砌总位移云图（施加桩基础）

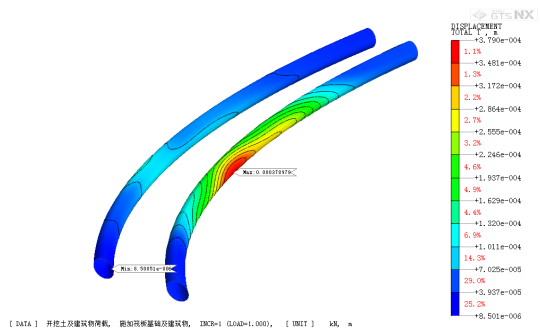


图 8 地铁隧道衬砌总位移云图（施加筏板基础和建筑物）

表 3 施工方案 1 各工况下地铁隧道变形最大值

工况	右线隧道		左线隧道	
	竖向位移 (mm)	横向位移 (mm)	竖向位移 (mm)	横向位移 (mm)
开挖第一段土	13.20	-1.54	13.02	1.45
开挖第二段土	19.21	-2.55	18.98	-1.76
开挖第三段土	19.48	-3.32	19.67	-2.13
施加桩支护	-0.07	-0.03	-0.02	-0.01
施加筏板及建筑物荷载	-0.33	-0.18	-0.13	-0.07

表 4 施工方案 2 各工况下地铁隧道变形最大值

工况	右线隧道		左线隧道	
	竖向位移 (mm)	横向位移 (mm)	竖向位移 (mm)	横向位移 (mm)
开挖第二段土	18.95	-2.64	18.75	-2.19
开挖第一段土	19.44	-2.52	19.23	-1.77
开挖第三段土	19.71	-3.35	19.89	-2.15
施加桩支护	-0.07	-0.03	-0.02	-0.01
施加筏板及建筑物荷载	-0.33	-0.18	-0.13	-0.07

4 计算值与模拟值对比

根据上述理论计算公式，计算地铁隧道的竖向位移，将表面不规则高堆土近似等效成矩形均布荷载。隧道的外径为 6.0 米，隧道刚度 EI 为 $6.433 \times 10^7 \text{KN/m}^3$ ，根据工程勘察报告及取值规范要求，综合地基基床系数 $k=1.0 \times 10^4 \text{KN/m}^3$ ，根据规范要求，采用某地区地铁隧道纵向处于弹塑性临界状

态对应的曲率半径经验值为 $\rho=4685\text{m}$ 。求解：

$$\lambda=\sqrt[4]{\frac{K}{4EI}}=\sqrt[4]{\frac{6.0\times10^4}{4\times6.433\times10^7}}=0.1235$$

然后根据式（8）求隧道纵向最大隆起值：

$$S_{\max}=\frac{1}{2\lambda^2\rho}=\frac{1}{2\times0.1235^2\times4685}=7.0\text{mm}$$

即最大隆起理论计算值 7mm，而数值模拟计算出的结果最大隆起值为 19.69mm。

计算值和理论值具有差异是因为综合地基基床系数 k 的取值未考虑土堆卸载，地基土的回弹。

5 结论及工程建议

采用的高土堆分段卸载施工方案不可行，对临近地铁 4 号线结构安全影响较大，地铁结构变形部分结果超过控制值，地铁隧道结构的主要变形特征为：衬砌竖向位移较大，衬砌最大总位移 19.89mm，接近安全控制临界值，土堆开挖卸载是引起变形的主要诱因，通过数据结果对比，先卸载第二段土（最厚层土），再分别卸载第 1、3 段土比按 1、2、3 依次卸载对隧道结构产生的危害更大，地铁隧道结构最大变形是由于第 2 段堆土土层较厚，此处是土堆卸载过程中应重点监测区域，且隧道左侧区域的土层比隧道右侧的土层厚，所以卸载左侧的土体时，会产生更大的回弹变形。

地铁结构安全监测建议：监测卸载土层较厚的地铁区间段，并适当向两端延伸；建议施工过程中对地铁隧道衬砌、轨道、及砟道进行内力及变形监测，实时评估临近地铁结构存在的风险，并做好应急预案，对高土堆下部以及临近隧道的周围土体采用合理的方法进行地基加固，尽量减少土体回弹量，比如施加抗拔桩等加固地基土体。土堆卸载是引起地铁结构变形的主要诱因，建议土堆施工按步分层分段进行，实时监控，避免超挖，尽可能减少对地铁结构安全的影响，隧道左侧的土层较厚，右侧的土层较浅，先卸载土层薄的地段，然后进行地基加固，一边加固地层，一边继续卸载土体，与此同时进行实时监测。

参考文献

[1] Terzaghi.K,Peck.R.B.Soil Mechanics in Engineering Practice.1967.
[2] 柳献,张浩立,鲁亮,刘洪波,黄小平.卸载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究[J].城市轨道交通研究,2015,18(05):38-43.
[3] 沈国根,鄂俊宇,丁建峰,王燕平.加卸载对下方既有盾构隧道影响实测与分析[J].南京工程学院学报(自然科学版),2016,14(04):61-64.
[4] 鲁亮,何燕清,郝晓斌.卸载工况下盾构隧道结构承载性能数值模拟分析[J].现代隧道技术,2017,54(06):143-150.
[5] 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.
[6] 王涛,李浩,徐日庆.上方大面积加(卸)载引起盾构隧道的变形分析[J].现代交通技术,2008(03):29-31+57.
[7] 许江,顾义磊,康骥鸣.隧道与地表构筑物相互影响的研究[J].岩土力学,2005(06):889-892.马航,袁磊,李翔,等.