

风化砂岩中地铁隧道埋深对 地表沉降影响的数值分析*

叶 红

(武汉交通职业学院,湖北 武汉 430065)

摘 要: 为了进一步研究地铁隧道开挖引起的地表沉降,文章利用 FLAC3D 软件数值模拟了风化砂岩中地铁隧道埋深对地表沉降的影响。数值模拟的研究结果表明:(1)位于地铁隧道中轴线正上方处的地表沉降值最大,距离地铁隧道中轴线两侧的地表沉降值逐渐减小;(2)在地铁隧道掌子面附近,地铁隧道已开挖处的地表沉降值最大,掌子面处的地表沉降值次之,地铁隧道未开挖处的地表沉降值最小。研究成果可为风化砂岩中地铁隧道开挖引起的地表沉降预测提供参考作用。

关键词: 地铁隧道;地表沉降;数值模拟;风化砂岩

DOI: 10.3969/j.issn.1672-9846.2016.02.016

中图分类号: U452.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-9846(2016)02-0072-05

一般情况下,城市地铁隧道在开挖过程中,会遇到比翻山越岭的公(铁)路隧道还要复杂的地质情况^[1]。如果地铁隧道开挖引起比较大的不均匀沉降甚至坍塌,会对地面建筑物造成比较大的损坏^[2]。为了消除地铁隧道开挖引起的地表沉降带来的安全隐患,有必要对开挖过程中的地铁隧道进行预测,有效降低地铁隧道开挖引起的事故发生概率^[3]。然而由于地铁隧道周边环境的复杂性,导致很难通过一些常规的数值模型来数值模拟地铁隧道开挖引起的地表沉降。鉴于此,许多学者主要从理论分析、数值模拟分析、现场试验分析等不同角度对地铁隧道开挖引起的地表沉降进行了研究。

目前关于地铁隧道开挖引起的地表沉降的相关研究有:陈春舒、夏元友等^[2,4]用 Peck 公式对长江一级阶地地区武汉地铁 4 号线 5 标段盾构实例

的地表断面沉降数据进行了拟合,并结合随机介质理论推导了地层水平位移公式以及地层沉降理论公式。周奇才、邱业建等^[5-6]根据图像传感器网络的沉降变形监测原理,建立了地铁隧道沉降变形监测系统的数学模型,利用误差分析理论对系统测量误差进行了分析,提出了沉降变形监测系统的误差累积计算模型,在全面总结分析沉降观测过程中误差来源及原理的基础上,提出了有针对性的误差降低或消除方法。王铁男等^[7]结合沈阳地铁青怀区间段的相关资料,用 FLAC 软件对该区间段的地铁隧道开挖进行了数值模拟分析,得到了沈阳地铁青怀区间段的隧道位移变形以及各种应力云图等重要工程信息。以上的研究均假设地铁隧道周边岩土体的力学性质为均质的,本文假设风化砂岩中地铁隧道上方砂岩的力学性质按线性函数梯度变化,数值模拟研究地铁隧道埋

*收稿日期:2016-04-24

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目“力学性质梯度变化地层中地铁开挖引起地表沉降的数值模拟研究”(编号:B2016566)。

作者简介:叶 红(1977-),男,湖北咸宁人,武汉交通职业学院交通工程学院副教授,主要从事岩土工程研究。

深对地表沉降影响。

1 风化砂岩的力学性质

岩石在大气、太阳、水和生物等的作用下出现破碎、疏松,矿物成分发生次生变化,这种现象称为岩石风化^[8]。全风化的岩石,浸水能崩解,压缩性能增大,手可捏碎;强风化的岩石,变形量小,承载强度低,物理力学性质显著降低,岩块单轴抗压强度小于原岩的 1/3;弱风化的岩石,力学性质较原岩低,单轴抗压强度为原岩的 1/3—1/2;微风化的岩石,物理性质几乎不变,力学强度略有减弱。由于岩石风化作用一般是自岩体表面逐渐向岩体内部进行的,因此愈靠近地表,风化作用就愈强烈,岩石风化程度也愈严重;愈向岩石内部,岩石风化得愈轻微,最后过渡到未经风化的新鲜岩石。随着岩石深度的增加其风化程度一般会减小,直至未风化区域风化程度不在改变,其力学性质也在做相应的变化。在砂岩风化程度变化区域,随着风化程度的逐渐减小,风化砂岩的弹性模量会增加,风化砂岩的泊松比会减小,风化砂岩的凝聚力也会增加,风化砂岩的内摩擦角也会减小^[9]。如果在风化区域内风化砂岩的力学参数随岩体深度按线性函数变化,其力学参数函数可按下表表达:

$$E = E_0 + k_e z \quad (z \leq H) \quad (1)$$

$$\nu = \nu_0 - k_\nu z \quad (z \leq H) \quad (2)$$

$$c = c_0 + k_c z \quad (z \leq H) \quad (3)$$

$$\varphi = \varphi_0 - k_\varphi z \quad (z \leq H) \quad (4)$$

在上述公式中, E_0 、 ν_0 、 c_0 、 φ_0 分别为地表处风化砂岩的弹性模量(GPa)、泊松比(无量纲)、凝聚力(MPa)、内摩擦角($^\circ$); k_e 为风化砂岩力学参数弹性模量随砂岩深度变化的系数(GPa/m), k_ν 为风化砂岩力学参数泊松比随砂岩深度变化的系数(/m), k_c 为风化砂岩力学参数凝聚力随砂岩深度变化的系数(MPa/m), k_φ 为风化砂岩力学参数内摩擦角随砂岩深度变化的系数($^\circ$ /m);在 $z \leq H$ 范围内风化砂岩的力学参数按线性函数变化,在 $z \geq H$ 范围内风化砂岩的力学参数为常数。

2 数值模拟研究

地铁隧道开挖后,隧道上方一定范围内地表会发生沉降,形成地表沉降槽,如图 1 所示。在地铁隧道开挖过程中引起地表沉降的因素有很多,其中,隧道埋深及其上方覆盖岩土体的物理力学

性质是主要因素^[10]。

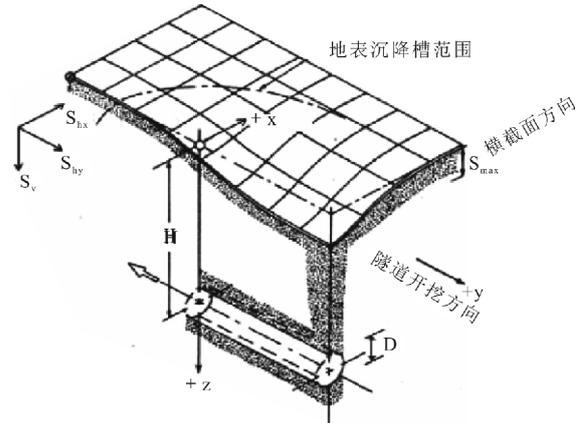


图 1 地铁隧道开挖引起的地表沉降示意图^[11]

本文假定地铁隧道上方覆盖岩土体的物理力学参数按线性函数变化,本文主要采用 FLAC3D 软件数值模拟隧道埋深对地表沉降的影响。为了降低尺寸效应和提高计算效率^[12-13],FLAC3D 软件数值模型尺寸($x \times y \times z$)设为 $120m \times 120m \times 60m$, x 方向表示地铁隧道的横向(垂直于地铁隧道开挖方向), y 方向表示地铁隧道的纵向(平行于地铁隧道开挖方向), z 方向表示砂岩层厚度;隧道直径(D)6m,隧道埋深(H)分别取 9m、15m、21m、27m、33m,边界条件为 $z=0$ 平面自由且其它平面固定,以此探讨隧道埋深对地表沉降的影响。依据相关参考文献的研究成果^[14],地表处风化砂岩的弹性模量 E_0 取 11GPa,地表处风化砂岩的泊松比 ν_0 取 0.28,地表处风化砂岩的凝聚力 c_0 取 1.494MPa,地表处风化砂岩的内摩擦角 φ_0 取 30.52° ;如果风化砂岩力学参数弹性模量随砂岩深度变化系数 k_e 为 0.05 GPa/m,风化砂岩力学参数泊松比随砂岩深度变化系数 k_ν 为 0.001 /m,风化砂岩力学参数凝聚力随砂岩深度变化系数 k_c 为 0.01MPa/m,风化砂岩力学参数内摩擦角随砂岩深度变化系数 k_φ 为 $0.2^\circ/m$;则隧道埋深上方($z \leq H$)风化砂岩的力学参数表达式如下:

$$E = 11 + 0.05z \quad (5)$$

$$\nu = 0.28 - 0.001z \quad (6)$$

$$c = 1.494 + 0.01z \quad (7)$$

$$\varphi = 30.52 - 0.2z \quad (8)$$

当地铁隧道中心至地表的距离(H)分别为 9m、15m、21m、27m、33m 时,距离地铁隧道掌子面 8m 且隧道已开挖处的地表($y=-8m$)、掌子

面处的地表 ($y = 0\text{m}$)、距离地铁隧道掌子面 4m 且隧道未开挖处的地表 ($y = 4\text{m}$)，通过 FLAC3D 软件数值模拟隧道埋深对此三个断面处的地表沉降分布情况的影响，图 2 表示这三个断面的地表测点位置。

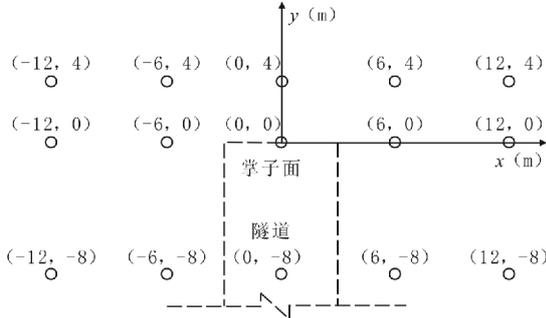


图 2 掌子面附近地表测点平面图

图 3-图 7 表明当地铁隧道直径为 6m，地铁隧道中心至地表的距离 (H) 分别为 9m、15m、21m、27m、33m 时，地铁隧道掌子面附近地表沉降的分布情况。在同一横向断面上位于地铁隧道中轴线正上方处的地表沉降值最大，距离地铁隧道中轴线两侧的地表沉降值逐渐减小，即均以地铁隧道中轴线为沉降中心呈“V”字形展开；在同一横向断面上，地铁隧道中心至地表的距离 (H) 越大，地表沉降曲线越趋于平缓，且地表沉降最大值逐渐减小，说明随着地铁隧道中心至地表距离的增加其对地表沉降的影响范围在逐渐扩大；地铁隧道中心至地表的距离 (H) 不改变的情况下，将地铁隧道掌子面前后横向断面的地表沉降最大值进行比较，距离地铁隧道掌子面 8m 且隧道已开挖处的地表沉降最大值最大，掌子面处的地表沉降最大值次之，距离地铁隧道掌子面 4m 且隧道未开挖处的地表沉降最大值最小。

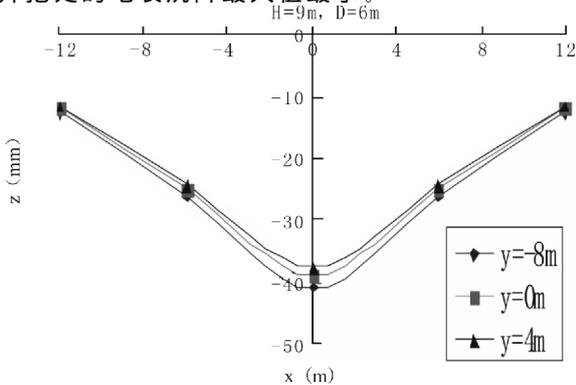


图 3 地铁隧道掌子面附近地表沉降曲线图 ($H=9\text{m}$)

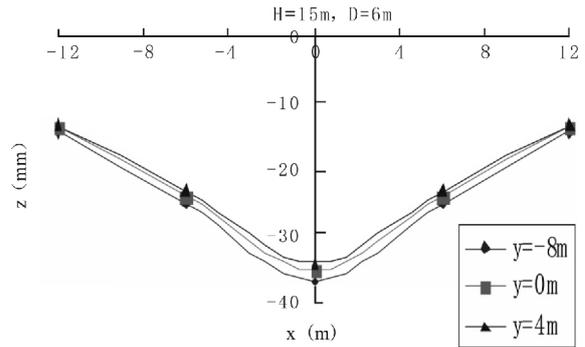


图 4 地铁隧道掌子面附近地表沉降曲线图

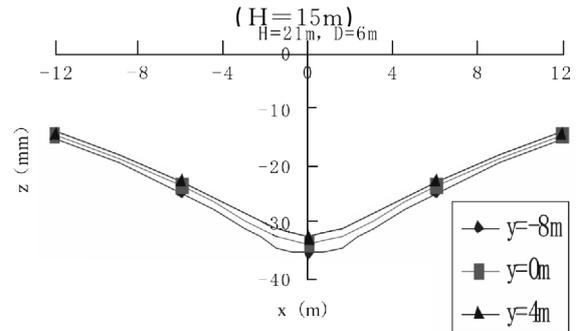


图 5 地铁隧道掌子面附近地表沉降曲线图

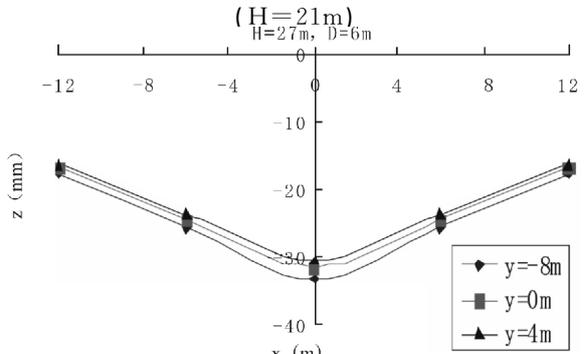


图 6 地铁隧道掌子面附近地表沉降曲线图

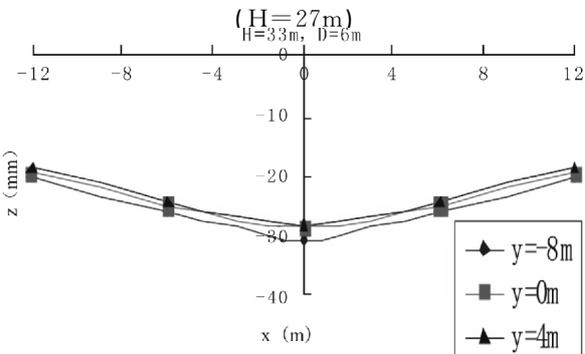


图 7 地铁隧道掌子面附近地表沉降曲线图

图 8-图 10 表明地铁隧道中心至地表的距离 (H) 分别为 9m、15m、21m、27m、33m 时，地铁隧道掌子面前后地表沉降的分布情况。由图 8-图

10 可知: 在地铁隧道直径不变的情况下, 地铁隧道中心至地表的距离越大, 地表沉降最大值就逐渐减小直至收敛, 但对地表沉降的影响范围在逐渐扩大, 这是因为地铁隧道的开挖造成了岩土体内部应力的改变, 地铁隧道中心至地表的距离越大, 岩土体内部应力的改变对地铁隧道中轴线上的地表沉降值的影响就越小, 但对地表沉降的影响范围在逐渐扩大。也就是说, 在本文的数值模拟中, 如果其它条件相同, 随着地铁隧道埋深的增大, 地表沉降会逐渐减小, 但沉降影响范围会逐渐增大, 形成“宽而浅”的沉降槽。

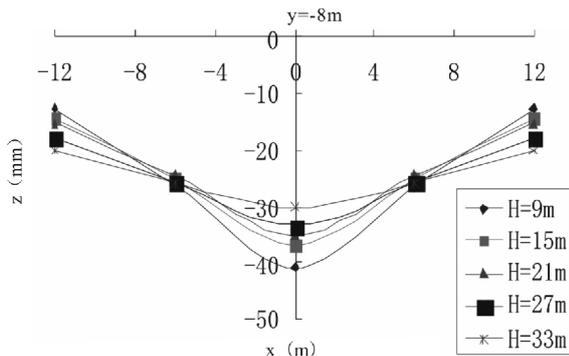


图 8 地铁隧道中心至地表距离变化时的地表沉降曲线图 ($y = -8\text{m}$)

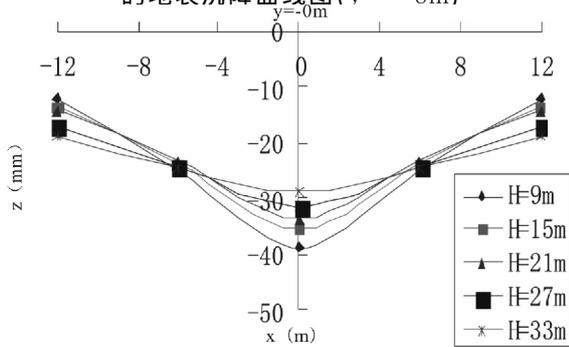


图 9 地铁隧道中心至地表距离变化时的地表沉降曲线图 ($y = 0\text{m}$)

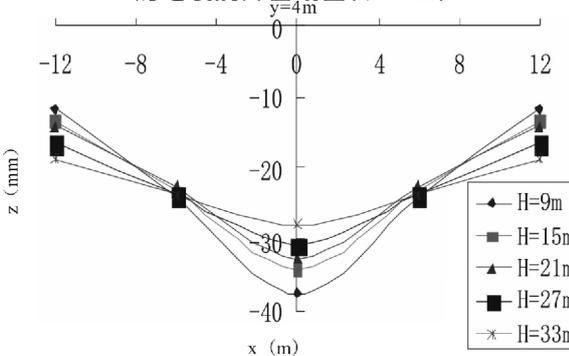


图 10 地铁隧道中心至地表距离变化时的地表沉降曲线图 ($y = 4\text{m}$)

由图 11 可以看出: 随着地铁隧道中心至地表距离 (H) 的逐渐增大, 地表沉降最大值逐渐减小, 这是因为随着地铁隧道中心至地表距离 (H) 的增大减小了地铁隧道的开挖引起的岩土体内部应力改变对地表的影响; 地铁隧道中心至地表的距离 (H) 分别为 9m、15m、21m、27m、33m 时, 距离地铁隧道掌子面 8m 且隧道已开挖处的地表沉降最大值最大, 掌子面处的地表沉降最大值次之, 距离地铁隧道掌子面 4m 且隧道未开挖处的地表沉降最大值最小, 由此可以推断出, 地铁隧道在开挖过程中地表沉降会经历“微小沉降—急剧沉降—缓慢沉降—沉降基本稳定”这几个阶段。这是因为地铁隧道的开挖引起的岩土体内部应力改变对未开挖处的地表的影响距离较远, 对已开挖处的地表的影响距离较近。

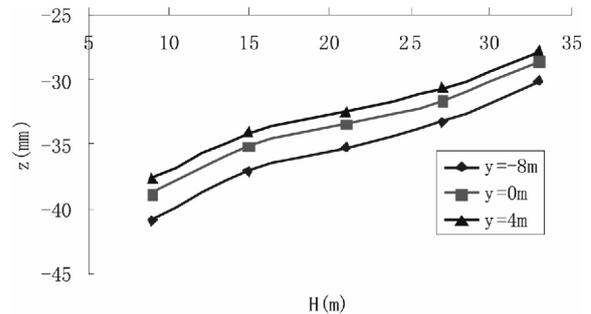


图 11 地表沉降最大值与地铁隧道中心至地表距离的关系图

3 结论

通过 FLAC3D 软件, 数值模拟了风化砂岩中地铁隧道直径 (D) 为 6m 和地铁隧道埋深 (H) 分别为 9m、15m、21m、27m、33m 时地铁隧道埋深对地表沉降分布情况的影响, 得到以下结论:

- (1) 在同一个横向断面上, 位于地铁隧道中轴线正上方处的地表沉降值最大, 距离地铁隧道中轴线两侧的地表沉降值逐渐减小;
- (2) 在同一个横向断面上, 随着地铁隧道中心至地表的距离的增加, 横向地表沉降曲线图逐渐趋于平缓, 地表沉降最大值逐渐减小;
- (3) 在地铁隧道掌子面附近, 地铁隧道已开挖处的地表沉降曲线最陡峭, 地铁隧道未开挖处的地表沉降曲线最平缓, 掌子面处的地表沉降曲线介于两者之间; 地铁隧道已开挖处的地表沉降最大值最大, 掌子面处的地表沉降最大值次之, 地铁隧道未开挖处的地表沉降最大值最小。

以上研究虽然数值模拟分析了地铁隧道中心

至地表的距离对地表沉降分布情况的影响,但还存在一定的局限性,例如:地铁隧道埋深的继续增加对地表沉降分布情况的影响还需要进一步的探讨。以上研究虽然取得了一定的数值模拟成果,但还需要通过实验来验证。

参考文献:

- [1]裴春,李俊才,郭亮,等.地铁隧道沉降规律多因素分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2014,(6):104-110.
- [2]夏元友,陈春舒,BAKRI Mudthir,等.浅埋隧道开挖引起的土体水平位移分析[J].岩土力学,2015,(2):354-360.
- [3]高彩云,崔希民,高宁.熵权遗传算法及极限学习机地铁隧道沉降预测[J].测绘科学,2016,(2):71-75.
- [4]陈春舒,夏元友. Peck 公式在长江一级阶地盾构中的适用性研究[J].武汉理工大学学报,2013,(9):85-90.
- [5]周奇才,傅天宏,熊肖磊,等.地铁隧道沉降变形实时监测系统误差分析[J].测控技术,2014,(2):120-123.
- [6]邱业建,雷明锋,唐雨.沉降观测中的误差及降低误差的方法[J].湖南交通科技,2015,(1):85-88,171.
- [7]王铁男,郝哲. FLAC 在地铁隧道数值模拟中的应用[J].沈阳大学学报,2010,(1):11-14.
- [8]叶红.风化岩体中压力型锚索锚固机理与设计方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [9]张卫中,陈从新,余明远.风化砂岩的力学特性及本构关系研究[J].岩土力学,2009,(S1):33-36.
- [10]柳厚祥.地铁隧道盾构施工诱发地层移动机理分析与控制研究[D].西安:西安理工大学,2008.
- [11]陈春舒.地层位移模型在浅埋隧道工程中的适用性研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [12]叶红,陈燕平.岩体风化程度对压力型锚索锚固机理影响的数值模拟研究[J].化工矿物与加工,2014,(4):29-31.
- [13]叶红,陈燕平.基于 Boussinesq 问题解的压力型锚索锚固段的应力分析[J].化工矿物与加工,2015,(9):31-35.
- [14]蔡光煌.非均质地层中地铁开挖引起地表沉降的数值模拟研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.

我国工程教育正式加入《华盛顿协议》

据《中国教育报》报道,2016年6月2日上午,在马来西亚吉隆坡举行的国际工程联盟大会上,经过《华盛顿协议》组织的闭门会议,全体正式成员集体表决,全票通过了中国的转正申请。至此,我国成为《华盛顿协议》第18个正式成员。

作为国际上最具影响力的工程教育学位互认协议,成立于1989年的《华盛顿协议》,由美国等6个英语国家的工程教育认证机构发起,其宗旨是通过多边认可工程教育认证结果,实现工程学位互认,促进工程技术人员国际流动。

经过20多年的发展,目前《华盛顿协议》成员遍及五大洲,包括中国、美国、英国、加拿大、爱尔兰、澳大利亚、新西兰、中国香港、南非、日本、新加坡、中华台北、韩国、马来西亚、土耳其、俄罗斯、印度、斯里兰卡等18个正式成员。

我国于2013年6月成为《华盛顿协议》预备成员,2014年初提交转正申请,经过该组织的资料审查、现场考察和会议表决后,今年6月实现转

正。成为正式成员后,我国将全面参与《华盛顿协议》各项规则的制定,我国工程教育认证的结果将得到其他成员认可,通过认证专业的毕业生在相关国家申请工程师执业资格时,将享有与本国毕业生同等待遇。

“正式加入《华盛顿协议》,标志着我国高等教育对外开放向前迈出了一大步,我国工程教育质量实现了国际实质等效,工程教育质量保障体系得到了国际认可,工程教育质量达到了国际标准,中国高等教育真正成为了国际规则的制定者,与美国、英国、加拿大、日本等高等教育发达国家平起平坐,实现从国际高等教育发展趋势的跟随者向领跑者转变。”教育部高等教育教学评估中心主任吴岩表示,今后,我国将全面参与《华盛顿协议》的各项标准和规则制定,在各项事务中发挥更加积极主动的作用,工程教育认证的中国标准、方法和技术也将影响世界。