

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.11.045

黄土地层浅埋暗挖地铁隧道施工引起地表沉降预测

韩冬¹, 苏三庆²

(1.河北建工集团有限责任公司, 河北 石家庄 050000; 2.西安建筑科技大学, 陕西 西安 710000)

摘要:在我国城市地铁隧道施工引起的地表沉降的研究中,随机介质理论应用相对较晚。在对不规则隧道断面施工引起的地表沉降预测的过程中,进行了大量的简化,并且预测结果与工程实际出入较大。在修正的随机介质理论基础上,利用标准变换原理,得出了随机介质理论解析公式的极坐标表达式,使其对于任意断面隧道施工引起的地表沉降计算同样适用。在上述讨论的基础上,通过对实际工程的验证,证明了上述方法的有效性和可靠性。

关键词:黄土地区;地铁隧道;地表沉降;随机介质理论;浅埋暗挖

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)11-0168-03

0 引言

伴随着我国城市地下轨道交通建设的兴起,地铁隧道施工引起的地表沉降问题,引起了学术界和工程界的极大关注。在预测地层位移研究上,随机介质理论法应用比较广泛。随机介质理论是由波兰学者 Litwinisyn^[1]在研究煤层开采引起地表移动问题上提出来的。在我国,经过刘宝琛、廖国华等^[2-5]的进一步研究完善,已经成为地下工程施工引起的地表沉降预测的主要理论研究方法。

由于地表沉降是由地层损失造成的,根据随机介质理论的方法,通过对地层损失区域积分的方法可以实现隧道开挖引起的地表沉降进行预测。现有的方法是在直角坐标系下进行积分,对圆形隧道、椭圆形隧道已有成熟的计算公式,对于其他复杂洞形的隧道只能做简化处理,简化的积分区域与实际的积分区差异较大^[8]。

在研究过程中,把直角坐标系转换为极坐标系下,然后进行积分计算。通过公式演算,以任意一段隧道圆弧收敛引起的地表沉降为基础,通过叠加,实现对任意洞形隧道施工引起地表沉降的预测。

1 极坐标下地表沉降的预测

本文作者根据大量实际工况,通过对随机介质理论法和 Peck 法^[6]之间关系的分析,对地层主要影响角的确定进行了讨论,得到了随机介质理论的修

收稿日期: 2021-12-20

作者简介: 韩冬(1985—),男,硕士,工程师,从事结构设计工作。

正公式^[7],如式(1)所示:

$$W(X) = \iint_D \frac{\tan \beta}{\eta + R \tan \beta} \exp \left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta + R \tan \beta)^2} (X - \xi)^2 \right] d\xi d\eta \quad (1)$$

地铁隧道的断面形状以圆形断面居多,但也时常出现矩形、椭圆形、马蹄形、多心圆形等断面形状的情况。采用随机介质法预测地表沉降时,对于规则断面,积分界限比较容易确定,但对于不规则断面,积分界限的确定则比较困难^[8]。

1.1 任意圆弧段断面开挖引起的地表沉降的预测

为了便于积分区域的描述,将直角坐标形式变换为极坐标形式(见图 1)。

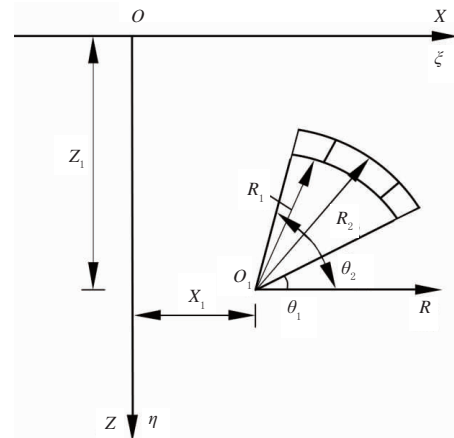


图 1 任意圆弧段开挖示意图

对地铁隧道外轮廓线上任意一段圆弧,如圆弧的圆心距地表深度为 Z_1 ,圆形坐标为 (X_1, Z_1) ,半径为 R_2 (m),起始角 θ_1 (rad),终止角 θ_2 (rad)。假定该圆弧断面为均匀收敛 ΔR ,圆弧半径由 R_2 收敛到 R_1 (见图 1)^[8]。由式(1)可得该段圆弧收敛引起的地表沉降值 $W(X)$ 为:

$$W(X)=\int_D \int_D \frac{\tan \beta}{Z_1-r \sin \theta+R \tan \beta} \exp \left\{-\frac{\pi \tan ^2 \beta}{\left(Z_1-r \sin \theta+R \tan \beta\right)^2}\left[X-\left(X+r \cos \theta\right)\right]^2\right\} r d r d \theta$$

$$=\int_{R_1}^{R_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\tan \beta}{Z_1-r \sin \theta+R \tan \beta} \exp \left\{-\frac{\pi \tan ^2 \beta}{\left(Z_1-r \sin \theta+R \tan \beta\right)^2}\left[X-\left(X+r \cos \theta\right)\right]^2\right\} r d r d \theta \quad (2)$$

1.2 任意洞形隧道施工引起的地表移动及变形的预测方法

许多地下隧道,无论是圆形的,还是马蹄形的,外轮廓线基本上都是由一段段小圆弧拼接而成的。因此,对隧道开挖在某一断面处的地表沉降计算,可以把每一段小圆弧收敛引起的沉降进行叠加。

对隧道开挖在某一断面处的地表沉降计算公式主要是收敛区域的确定,通常隧道的收敛区域往往是不规则的。将隧道外轮廓线分为 n 段,假设在此段圆弧上发生均匀收敛,即在各段圆弧上以圆环代替收敛区域。当 n 趋于无穷大时,所得收敛区域面积可视为实际工况。但 n 的取值太大,输入参数较多,计算需时较长,若 n 取值较小又不能准确描述收缩区域。实际计算时 n 的取值视收敛区域而定,结合隧道外轮廓线圆弧的段数,并以尽量准确描述收缩区域来设定圆弧段数 n ^[8]。

由前面推导的公式可得,对应隧道轮廓线上任意一圆弧段 n ,假设其对应的圆心坐标在整体坐标下的坐标为 (X_n, Z_n) ,圆弧半径为 R_{n2} (m),起始角 θ_{n1} (rad),终止角 θ_{n2} (rad)。假定隧道建成后,该圆弧发生均匀收敛 ΔR_n (m),收敛后圆弧半径为 R_{n1} (m),即 $R_{n1}=R_{n2}-\Delta R_n$ ^[8]。地层主要影响角的正切值 $\tan \beta$,与地层条件有关^[7]。则该段圆弧收敛引起的地表下沉值 $W_n(X)$ 为:

$$W_n(X)=\int_{R_{n1}}^{R_{n2}} \int_{\theta_{n1}}^{\theta_{n2}} \frac{\tan \beta}{Z_n-r \sin \theta+R \tan \beta} \exp \left\{-\frac{\pi \tan ^2 \beta}{\left(Z_n-r \sin \theta+R \tan \beta\right)^2}\left[X-\left(X+r \cos \theta\right)\right]^2\right\} r d r d \theta \quad (3)$$

因此,对于任意形状的隧道,根据叠加原理,整个隧道开挖引起的地表沉降公式如下:

$$W(X)=W_1(X)+W_2(X)+\cdots+W_{n-1}(X)+W_n(X) \quad (4)$$

根据以上地表沉降计算公式的推导,通过 Matlab 软件进行相应计算程序的编写。

2 工程实例分析

西安地铁 1 号线工程朝阳门段为东西向两条正线组成,部分采用暗挖法施工。本区段地势相对平坦,略呈东高西低之势,线路中大部分位于黄土梁洼,上部为中上更新统风积黄土(饱和),下部为中更新统冲积粉质黏土、砂层,地层环境条件具有较强的

代表性^[8]。

2.1 单线浅埋暗挖标准断面隧道施工引起的地表沉降预测

单线浅埋暗挖隧道标准断面见图 2,将隧道外轮廓线分为 8 段圆弧,各段圆弧的计算参数见表 1,开挖地层主要影响角正切值取值为 1.207。则计算所得预测值与实测值见表 2,所得地表沉降规律见图 3。

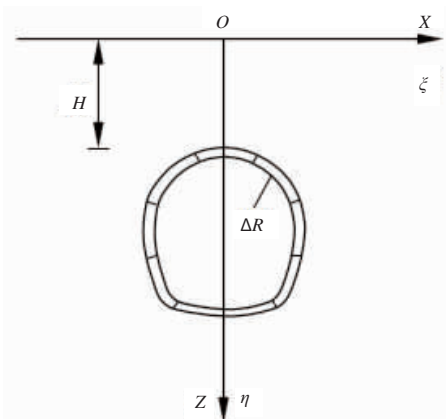


图 2 单线浅埋暗挖开挖断面收敛示意图

表 1 各段圆弧的计算参数表

圆弧编号	圆心坐标 /mm	开外半径 R_{n2} /mm	收敛后半径 R_{n1} /mm	起始角 θ_{n1} /rad	终止角 θ_{n2} /rad
1	(0, 19 430)	3 150	3 145.11	0.487	2.653
2	(260, 19 580)	3 450	3 445.11	2.653	3.14
3	(2 260, 19 580)	5 450	5 445.11	3.14	3.483
4	(-848, 20 690)	2 150	2 145.11	3.483	4.499
5	(0, 16 730)	6 200	6 195.11	4.499	4.921
6	(848, 20 690)	2 150	2 145.11	4.921	5.937
7	(-2260, 19 580)	5 450	5 445.11	5.937	6.28
8	(-260, 19 580)	3 450	3 445.11	0	0.487

表 2 开挖后地表下沉值与预测值比较

测点距离隧道中心水平距离 X/m	预测值 W_{i1} /mm	实测值 W_{i2} /mm
-18	-2.57	-2.13
-13	-7.49	-7.28
-8	-15.59	-15.91
-5	-20.69	-21.11
-2	-23.98	-24.71
0	-24.84	-25.64
2	-23.98	-24.37
5	-20.69	-21.18
8	-15.59	-16.01
13	-7.49	-7.97
18	-2.57	-2.82

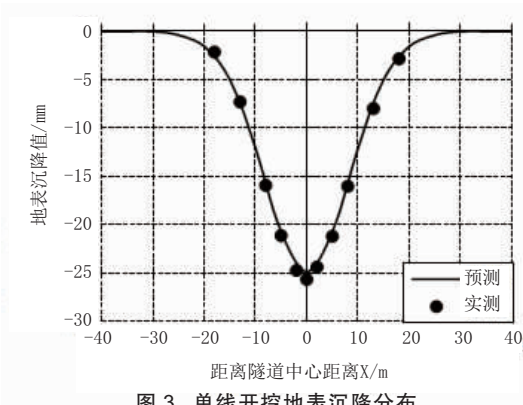


图3 单线开挖地表沉降分布

2.2 双线浅埋暗挖标准断面隧道施工引起的地表沉降预测

双线浅埋暗挖隧道标准断面见图4,将隧道外轮廓线共分为16段圆弧,各段圆弧的计算参数见表3,开挖地层主要影响角正切值取值为1.207。则计算所得预测值与实测值见表4,所得地表沉降规律见图5。

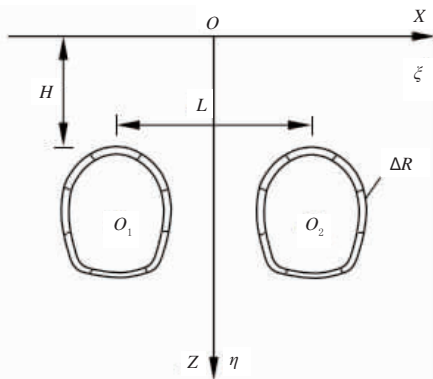


图4 双线浅埋暗挖开挖断面收敛示意图

表3 各段圆弧的计算参数表

圆弧编号	圆心坐标/mm	开外半径 R_{n2}/mm	收敛后半径 R_{n1}/mm	起始角 θ_{n1}/rad	终止角 θ_{n2}/rad	
左线	1	(-7 500, 19 430)	3 150	3 145.11	0.487	2.653
	2	(-7 240, 19 580)	3 450	3 445.11	2.653	3.14
	3	(-5 240, 19 580)	5 450	5 445.11	3.14	3.483
	4	(-8 348, 20 690)	2 150	2 145.11	3.483	4.499
	5	(-7 500, 16 730)	6 200	6 195.11	4.499	4.921
	6	(-6 652, 20 690)	2 150	2 145.11	4.921	5.937
	7	(-9 760, 19 580)	5 450	5 445.11	5.937	6.28
	8	(-7 760, 19 580)	3 450	3 445.11	0	0.487
右线	9	(7 500, 19 430)	3 150	3 144.34	0.487	2.653
	10	(7 760, 19 580)	3 450	3 444.34	2.653	3.14
	11	(9 760, 19 580)	5 450	5 444.34	3.14	3.483
	12	(6 652, 20 690)	2 150	2 144.34	3.483	4.499
	13	(7 500, 16 730)	6 200	6 194.34	4.499	4.921
	14	(8 348, 20 690)	2 150	2 144.34	4.921	5.937
	15	(5 240, 19 580)	5 450	5 444.34	5.937	6.28
	16	(7 240, 19 580)	3 450	3 444.34	0	0.487

表4 开挖后地表下沉值与预测值比较

测点距离隧道中心水平距离 X/m	预测值 W_{i1}/mm	实测值 W_{i2}/mm
-19	-9.79	-8.64
-14	-19.07	-18.86
-10	-26.49	-25.31
-7.5	-29.59	-30.07
-5	-31.68	-30.97
-2.5	-32.68	-33.17
0	-32.95	-34.36
2.5	-32.68	-33.21
5	-31.68	-32.56
7.5	-29.59	-30.54
10	-26.49	-28.01
14	-19.07	-18.91
19	-9.79	-10.21

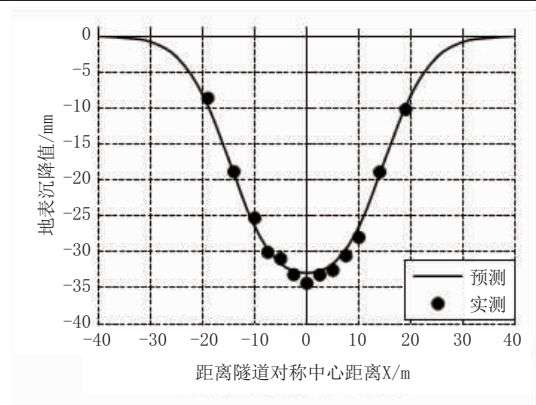


图5 双线开挖地表沉降分布

3 结论

(1)利用坐标变换,以任意一段圆弧收敛引起的地表沉降为基础,通过叠加得出了任意洞形隧道施工引起的地表沉降的计算方法,扩大了随机介质法的应用范围,并通过 Matlab 应用软件对地表沉降预测公式进行程序编写,实现了地铁多心圆断面隧道施工引起的地表沉降预测;

(2)利用本文方法分别对西安地铁1号线朝阳门段单线和双线浅埋暗挖多心圆断面地铁隧道施工引起的地表沉降进行了预测,并与实测结果进行了比较。分析可得,理论计算结果与实测结果符合较好,可供工程实际参考;

(3)隧道施工引起的地表沉降曲线是一条以隧道对称中心线(单线隧道为隧道中心线,双线隧道为对称中心线)对称的近似高斯曲线,单双线地铁隧道施工引起的地表沉降分布相似,均在中心线处产生最大沉降;

(4)由于双线隧道两隧道中心距离相对较小,导致沉降曲线呈现为“单峰”形状。

(下转第177页)

到要求的同时减少钢筋的消耗降低造价。目前该工艺已在某地铁站试验段项目中取得了较好的结果。图4给出了该实验项目地下连续桩的布置示意图,实际施工中钢筋笼下放如图5所示。

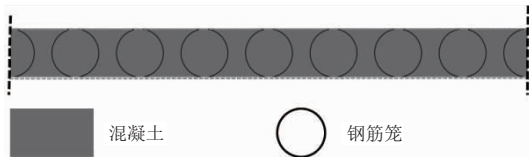


图4 地下连续桩示意图



图5 钢筋笼下放

根据咬合桩与地连墙一般设计,咬合桩中桩配筋一般为 $90\sim 120\text{ kg/m}^3$,整体配筋率为 $45\sim 60\text{ kg/m}^3$,地连墙配筋率为 $160\sim 180\text{ kg/m}^3$,在现场计算地下连续桩的配筋率后,得到地下连续桩的配筋率为 $41.15\sim 54.86\text{ kg/m}^3$,据此,可以清楚得知,地下连续

桩的配筋率是这三者之中最小,因此在钢筋材料消耗上较地下连续墙要具备更好的经济效益;且在施工过程中,地连桩钢筋笼制作较地连墙钢筋笼制作相对简单,施工更加便捷。

在墙体刚度方面,地下连续桩相当于将原来咬合桩四周土体置换为混凝土,因此地下连续桩刚度较地下连续墙要小,较咬合桩要大,且在咬合桩满足设计刚度条件下,地下连续墙一定能满足刚度条件。

在渗流路径长度方面,地下连续桩与混凝土渗流路径长度相同,而咬合桩存在咬合处的薄弱面,因此地下连续桩的渗流长度也较咬合桩要长。

参考文献:

- [1] 邹道增.深基坑地下连续墙入岩施工技术经济分析[J].工程机械与维修,2021(3):154-156.
- [2] 童争光,瞿海洋.饱和软土深基坑围护结构入岩深度优化验算及变形特性研究[J].湖南交通科技,2020,46(3):98-103.
- [3] 刘新乐,姬建华,王静波.复杂条件下超大深基坑入岩地下连续墙关键施工技术[J].施工技术,2020,49(13):76-80.
- [4] 张新宇.入岩小直径深基坑铰接法地下连续墙施工技术[J].中国市政工程,2016(S1):71-74,118-119.
- [5] 李森.复杂环境下地下连续墙入岩和深基坑出土方法探析[J].住宅与房地产,2016(18):143.
- [6] 翁厚洋,刘凤华,马西峰.超深基坑大深度入岩地下连续墙施工技术[J].施工技术,2014,43(11):115-118.
- [7] 刘礼生.深基坑工程建设中SMW工法桩围护结构及混合支撑的应用研究[J].江苏建材,2021(6):67-68.
- [8] 张晓婷.咬合桩与排桩在实际工程中的应用比较[J].城市建筑,2019,16(36):128-129.

~~~~~  
(上接第170页)

#### 参考文献:

- [1] Litwiniszyn J.The theories and model research of movements of ground masses. Proceedings of European Congress Ground Movement [R].Leeds,UK,1957.
- [2] 阳军生,刘宝琛.隧道施工引起的地表移动及变形[M].北京:中国铁道出版社,2002.
- [3] 刘宝琛,廖国华.煤矿地表移动的基本规律[M].北京:中国工业出版社,1965.
- [4] 刘宝琛,阳军生,张家生.露天开挖及疏水引起的地表移动及变形[J].煤炭学报,1999,24(1):39-42.
- [5] Liu Baochen.Ground surface movements due to underground excavation in the P.R. China,in Hudson ed.[J].Comprehensive Rock Engineering,1993,4(29):781-817.
- [6] PECK R B.Deep excavations and tunneling in soft ground, State of the Art Report [R].Proe.7th Int. Conf. On soil Mechanics and Foundation,Mexico City,1969.
- [7] 韩冬,苏三庆,郑选荣,等.地铁隧道施工引起地表沉降主要影响角的分析[J].铁道建筑,2011(4):55-58.
- [8] 韩冬.黄土地层地铁隧道施工引起地表移动及变形预测方法地铁隧道施工引起地表沉降主要影响角的分析[D].西安:西安科技大学,2011.