

## 双线盾构施工地面沉降槽形状判别数值研究\*

汪壮壮<sup>1,2,3</sup> 汪学清<sup>3</sup> 杨晶晶<sup>1,2</sup> 赵云猛<sup>3</sup> 陈博<sup>3</sup>

(1. 中建材(合肥)钢构科技有限公司, 230051, 合肥; 2. 合肥水泥研究设计院有限公司, 230051, 合肥;

3. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 100083, 北京)

**摘要** [目的] 双线盾构施工地面沉降槽形状会随隧道净距、埋深发生变化, 因此需对沉降槽随净距、埋深的演化机理进行深入研究。[方法] 以成都地铁17号线小南街站—人民公园站区间双线盾构工程为依托, 采用数值模拟方法分析了不同净距-埋深组合工况下双线盾构施工的地面沉降槽形状变化过程, 基于双线地面沉降公式拟合出各工况中各项取值, 并提出沉降槽形状判据 $S$ 。[结果及结论] Peck公式和刘波公式能较好地表达地面沉降的模拟监测结果: 当 $S \in [0.319, 0.536)$ 时, 沉降槽呈“V”形; 当 $S \in [0.536, 0.783)$ 时, 沉降槽呈“U”形; 当 $S \in [0.783, 1.120)$ 时, 沉降槽呈“浅W”形; 当 $S \in [1.120, 3.873)$ 时, 沉降槽呈非对称“W”形; 当 $S \geq 3.873$ 时, 沉降槽呈“双V”形或“双W”形。当隧道埋深为 $1D$  ( $D$ 为隧道直径), 且两隧道之间的净距为 $2D$ 至 $3D$ 时, 两隧道中线附近的地面会出现隆起现象, 并且随着净距的增加, 隆起的范围也会相应增大。在两隧道中心正上方的地面上, 由于盾尾注浆压力的作用, 部分沉降被抵消, 导致该区域的沉降槽呈现出独特的“双W”形形态。

**关键词** 地铁隧道; 盾构法; 沉降槽形状判据; 数值模拟

**中图分类号** U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.008

### Numerical Study on Shape Discrimination of Land Subsidence Groove during Double-line Shield Construction

WANG Zhuangzhuang<sup>1,2,3</sup>, WANG Xueqing<sup>3</sup>, YANG Jingjing<sup>1,2</sup>, ZHAO Yunmeng<sup>3</sup>, CHEN Bo<sup>3</sup>

(1. CNBM (Hefei) Steel Structure Technology Co., Ltd., 230051, Hefei, China; 2. Hefei Cement Research &amp; Design Institute Co., Ltd., 230051, Hefei, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, 100083, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] The shape of the land subsidence grooves during double-line shield construction varies with the clear distance and buried depth of the tunnel. Thus, it is necessary to conduct an in-depth study on the evolution mechanism of the subsidence groove with clear distance and buried depth.

[Method] Based on the double-line shield project between Xiaonan Station and Renmin Park Station of Chengdu Line 17, numerical simulation is used to analyze the shape change process of the subsidence groove in the double-line shield construction under different clear distance-buried depth combination working conditions. Based on the double-line land subsidence formula, the values of each item in each working condition are fitted, and the shape criterion  $S$  of the subsidence groove is proposed. [Result & Conclusion] Peck formula and Liu Bo formula can express the simulated monitoring results of land subsidence well. When  $S \in [0.319, 0.536)$ , the subsidence groove is in a V-shape; when  $S \in [0.536, 0.783)$ , the subsidence groove is in a U-shape; when  $S \in [0.783, 1.120)$ , the subsidence groove is in a shallow W-shape; when  $S \in [1.120, 3.873)$ , the subsidence groove is in an asymmetric shallow W-shape; when  $S \geq 3.873$ , the subsidence groove is in a double V-shape or a double W-shape. When the buried depth of the tunnel is  $1D$  ( $D$  is the tunnel diameter) and the clear distance between the two tunnels is  $2D$  to  $3D$ , the ground near the middle line of the two tunnels will bulge, and with the increase of the clear distance, the range of the bulge will increase accordingly. On the ground directly above the center of the two tunnels, due to the effect of the shield tail grouting pressure, part of the subsidence is offset, resulting in a unique double W-shape of the subsidence groove in this area.

**Key words** subway tunnel; shield method; subsidence groove shape criterion; numerical simulation

地铁隧道修建过程中, 地面沉降变形易引发各类工程事故, 特别是对于双线隧道而言, 盾构施工过程中的相互扰动加剧了地面变形的复杂性。尽管学者们已广泛研究双线隧道盾构施工导致的地面沉降, 但关于隧道净距、埋深变化对地面沉降槽形态的影响及其形状演变过程的定量分析仍显不足。文献[1]通过有限元方法提出了相对水平距离

\* 国家重点实验室开放课题(2021-HYSDDYB-001)

系数  $C$ ,用以界定双线盾构隧道之间的间距,并基于该系数进一步预测沉降曲线的形态是否满足正态分布。文献[2]通过对现有文献双线隧道盾构施工地面沉降数据进行分析,发现地面沉降槽形状可采用相对间距系数  $C$  来判别,但其只给出了“V”形和“W”形两种形式的  $C$  值范围。文献[3]通过两隧道中线处的沉降量与两侧最大沉降量的最小值进行比较来判断沉降曲线呈“V”形或“W”形。现实中,地面沉降曲线随隧道净距和埋深的改变是一个复杂连续的过程。本文以成都地铁 17 号线小南街站—人民公园站区间(以下简称“南公区间”)双线盾构工程为实际案例,综合运用理论公式与数值模拟方法,深入研究了双线隧道盾构施工过程中地面沉降槽形态随隧道净距和埋深变化的具体过程,并提出了沉降槽形状判据,以实现沉降槽演变规律的定量描述,为后续类似双线盾构施工项目的地面沉降变形预测提供科学依据和参考。

## 1 工程概况

成都地铁 17 号线二期工程位于成都市平原区,整体北东高、南西低,地势平坦,场地地貌单元为岷江水系冲积平原 I 级阶地。南公区间右线起止点里程为 YDK84+635.801—YDK84+907.491,区间长为 271.69 m;左线起止点里程为 ZDK84+635.801—ZDK84+902.771,区间长为 266.97 m,施工顺序为先左后右。两隧道平均埋深约 19.95 m,净距为 17 m(净距指两隧道外边界的最短距离),地下水埋深为 4.3~4.9 m。根据钻孔显示场地范围内上覆第四系全新统杂填土(Q4ml),其下为第四系全新统冲洪积层(Q4al+pl)黏土、粉质黏土、黏质粉土、细砂、砂卵石土,下伏基岩为白垩系上统灌口组(K2g)泥岩,简化后的地层剖面如图 1 所示。本工程采用土压平衡盾构机掘进,盾构机主要穿越砂卵石地层,各土层的物理力学参数见表 1。衬砌管片直径为 8.3 m,厚度为 0.3 m,环宽为 1.5 m。盾尾注浆层厚为 0.3 m,注浆压力为 0.3 MPa,每环注浆为 12 m<sup>3</sup>,支护材料参数见表 2。

## 2 地面沉降理论

### 2.1 地面沉降公式介绍

文献[4]认为地面沉降由地层损失引起即地面沉降槽体积等于土体损失体积,提出了单条隧道开

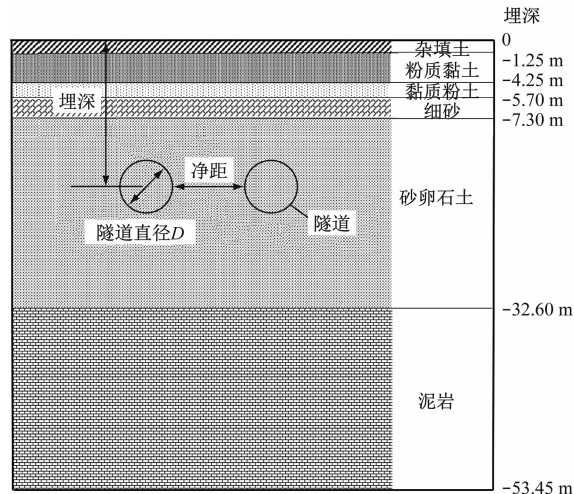


图 1 地层剖面

Fig. 1 Stratigraphic section

表 1 土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	厚度/m	密度/ (g/ cm <sup>3</sup> )	弹性 模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ (°)
杂填土	1.25	1 860	2	0.15	5	18
粉质黏土	3.00	1 970	7	0.30	10	18
黏质粉土	1.45	1 990	7	0.25	10	20
细砂	1.60	1 600	3	0.20	3	23
砂卵石	25.30	2 100	100	0.20	3	40
泥岩	20.85	2 200	5 000	0.35	125	27

表 2 支护材料参数

Tab. 2 Supporting material parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	厚度/m
衬砌	10 500	0.25	2 500	0.3
注浆体	9	0.22	—	0.3

挖造成的地面沉降可用下式计算,即 Peck 公式:

$$S_x = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中:

$S_x$ ——距隧道中心水平距离为  $x$  处地面的沉降值,单位 m;

$i$ ——地面沉降槽宽度,即沉降槽曲线拐点距隧道中心的水平距离,单位 m;

$S_{\max}$ ——地面最大沉降量,  $S_{\max} = \frac{AV_L}{i\sqrt{2\pi}}$ , 单位 m,其中  $A$  为盾构开挖面积,单位 m<sup>2</sup>;  $V_L$  为地层损失率。

沉降槽宽度  $i$  采用文献[5]提出的公式进行计算:

$$i = kz \quad (2)$$

式中:

$k$ ——沉降槽宽度参数;

$z$ ——隧道埋深,单位 m。

文献[6]基于部分实测沉降数据对 Peck 公式进行了补充,通过将左、右两条隧道盾构施工引起的地面沉降相互叠加,得到了双线隧道施工诱发的地面沉降的计算式即刘波公式:

$$S_x = S_{\max,l} \exp \left[ -\frac{(x + L/2)^2}{2i_l^2} \right] + S_{\max,r} \exp \left[ -\frac{(x - L/2)^2}{2i_r^2} \right] \quad (3)$$

式中:

$S_{\max,l}$ ——沉降槽左侧最大沉降量,单位 m;

$S_{\max,r}$ ——沉降槽右侧最大沉降量,单位 m;

$L$ ——两隧道中心的水平距离,单位 m;

$i_l$ ——左侧沉降槽宽度,单位 m;

$i_r$ ——右侧沉降槽宽度,单位 m。

## 2.2 南公区间地面沉降公式的确定

式(1)和式(3)在工程中应用广泛,故采用其分别预测南公区间单、双线盾构施工的地面沉降量,过程的关键在于确定沉降槽宽度参数  $k$  及地层损失率  $V_L$ 。

参考文献[7-9]对单线盾构施工  $k$  与  $V_L$  取值的研究结果并结合本工程的土质条件,单线情况  $V_L$  取 1%, $k$  取 0.48。根据盾构开挖半径  $R$  为 4.15 m,隧道埋深  $z$  为 19.95 m,计算得出  $i$  为 9.576 m, $S_{\max} = 22.5409 \times 10^{-3}$  m,代入式(1)得到单线盾构完成后地面沉降计算公式:

$$S_x = 22.5409 \times 10^{-3} \exp \left( -\frac{x^2}{2 \times 9.576^2} \right) \quad (4)$$

一般地,先行线由于受后行线盾构扰动影响,地面沉降值会稍大于后行线,因此先行线一侧的沉降槽更加深而窄,其反映在参数取值上即先行线  $k_1$  稍小于后行线  $k_2$ ,而先行线  $V_{L1}$  稍大于后行线  $V_{L2}$ 。根据该工程先左后右的施工顺序并参考文献[10]关于砂卵石地层双线盾构施工地面沉降公式的参数取值研究结论,左线  $k_1$  取 0.47、 $V_{L1}$  取 0.98%,则左线  $i_l$  为 9.3765 m, $S_{\max,l}$  为  $22.5601 \times 10^{-3}$  m;右线  $k_2$  取 0.5, $V_{L2}$  取 0.85%,则右线  $S_{\max,r}$  为  $18.3934 \times$

$10^{-3}$  m, $i_r$  为 9.9750 m;隧道间距  $L$  为 25.3 m,将所有参数代入式(3)得到双线盾构完成后地面沉降计算公式:

$$S_x = 22.5601 \times 10^{-3} \exp \left[ -\frac{(x + 12.65)^2}{2 \times 9.3765^2} \right] + 18.3934 \times 10^{-3} \exp \left[ -\frac{(x - 12.65)^2}{2 \times 9.9750^2} \right] \quad (5)$$

## 3 数值模拟

### 3.1 模型建立

采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立南公区间三维弹塑性双线隧道盾构模型,为观测隧道开挖引起的地面沉降特征,在模型纵向  $y = 22.5$  m 处横断面的地面以  $y$  坐标轴为对称轴左右布置监测点,如图 2 所示。

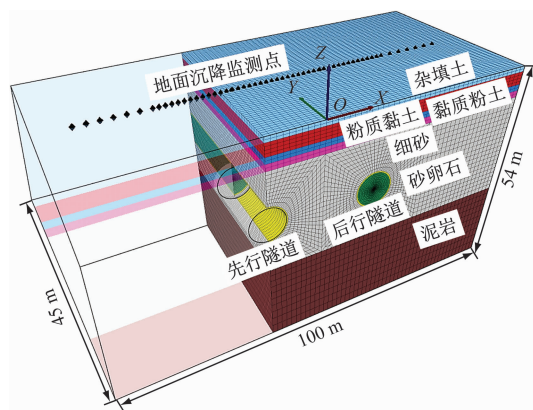


图2 数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model

模型  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的尺寸分别为 100 m、45 m、54 m,共划分了 345 600 个单元,353 861 个网格节点。土层与盾尾注浆层采用实体单元模拟,衬砌采用壳单元模拟,衬砌管片和注浆体设为弹性,不考虑衬砌管片的纵向与横向螺栓连接以及盾壳与土体之间的摩擦。边界条件为底面固定,四周侧面约束法向位移,顶面自由,采用 Mohr-Coulomb 本构关系计算。为使模拟更接近实际盾构施工,考虑盾构机掌子面推力及管片外围注浆压力,开挖步距与管片宽度一致,盾构开挖模拟过程如图 3 所示。

### 3.2 地面沉降结果对比分析

单线盾构完成后监测点地面沉降模拟值与式(4)表示的沉降曲线见图 4。式(4)计算的地面最大沉降值为 22.54 mm,模拟得到的最大沉降值为 22.20 mm,两者相差仅 2%,这说明 Peck 公式能很好地表达数值模拟结果。



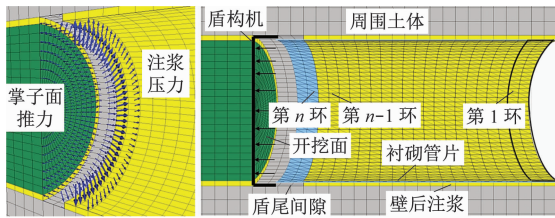


图3 盾构开挖模拟过程

Fig. 3 Shield excavation simulation process

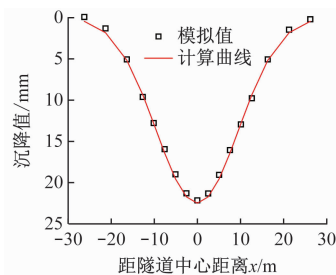


图4 单线盾构完成后地面沉降模拟值与计算曲线

Fig. 4 Simulation values and calculation curves of land subsidence after completion of single-line shield tunnel

图5为双线盾构完成后监测点地面沉降模拟值与式(5)表示的沉降曲线。由图5可知:地面沉降曲线与各监测点模拟值吻合度较高,均为“浅W”形。两隧道之间地面受先行线及后行线施工两次扰动,土体位移变化情况十分复杂,而刘波公式是基于Peck公式叠加推出的半理论半经验公式,故曲线中间段地面沉降模拟值与计算曲线吻合度稍差,但整体来说计算曲线仍能较好地反映数值模拟结果。两者地面沉降值相差最大的点位于左侧沉降峰值处,计算值为23.30 mm,模拟值为22.26 mm,两者相差不到5%。

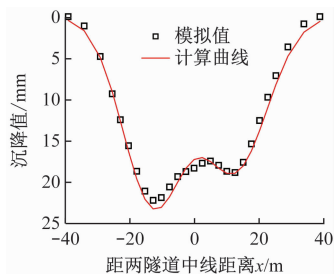


图5 双线盾构完成后地面沉降模拟值与计算曲线

Fig. 5 Simulation values and calculation curves of land subsidence after completion of double-line shield tunnel

综上所述,Peck公式及刘波公式中特征参数 $S_{\max}$ 、 $i$ 、 $S_{\max, L/r}$ 和 $i_{L/r}$ 取值适当,可以较为准确地表达各监测点地面沉降的数值模拟结果。

## 4 地面沉降槽形状判别

### 4.1 沉降槽判据的提出

观察并分析双线盾构地面沉降计算公式(3)的结构形式, $S_{\max, l}$ 和 $S_{\max, r}$ 影响沉降曲线的左右峰值大小,指数部分 $(x \pm L/2)^2/2i_{L/r}^2$ 则影响沉降曲线的形状,因此根据指数项的结构特征提出双线盾构地面沉降槽形状判据 $S$ ,通过下式来预测其形状:

$$S = \frac{(L/2)^2}{2i_m^2} \quad (6)$$

式中:

$i_m$ ——左侧沉降槽宽度 $i_l$ 和右侧沉降槽宽度 $i_r$ 的平均值, m。

依托该工程地质条件,建立隧道埋深为 $2D$ ,净距分别为 $0.5D$ 、 $1.0D$ 、 $1.5D$ 、 $2.0D$ 、 $2.5D$ 、 $3.0D$ 、 $3.5D$ 、 $4.0D$ 、 $4.5D$ 双线盾构模型,各组模型均选取盾构开挖方向 $y=22.5$  m处横断面的地面以 $y$ 轴为对称轴布置地面沉降监测点,分析在不同净距的情况下盾构施工地面沉降槽变化规律,9种净距工况单、双线盾构完成后各监测点沉降模拟值及双线盾构地面沉降拟合曲线如图6所示。

单线盾构施工完成后地面沉降槽形状均为“V”形,最大沉降值为20.5 mm。对于双线盾构施工,两隧道净距为 $0.5D$ 时,沉降槽形状为“V”形,地面最大沉降位于两隧道中线( $x=0$  m)处,沉降值为26.6 mm。净距为 $1.0D$ 时,原本沉降槽“波谷”附近的曲线由陡峭变得平缓,沉降槽形状演变为“U”形,最大沉降位置由 $x=0$  m向左偏移至 $x=-6$  m,最大地面沉降值为22.5 mm。净距为 $1.5D$ 时,沉降曲线开始慢慢形成第二个“波谷”,此时左右两侧的沉降峰值分别为21.0 mm、17.4 mm,沉降槽初显“浅W”形。净距达到 $2.0D$ 时,第二“波谷”完全形成,沉降槽呈非对称“W”形,左右两侧沉降峰值分别为20.4 mm、17.0 mm。净距 $2.5D$ — $4.0D$ 工况非对称“W”形沉降槽右侧的“波谷”逐渐变深。当净距为 $4.5D$ 时,沉降曲线关于两隧道中线( $x=0$  m)基本对称,沉降槽呈“双V”形,左、右两侧沉降峰值分别为20.6 mm、19.0 mm,此时双线盾构诱发的左半部分沉降曲线与单线盾构引起的地面沉降曲线几乎重合,说明净距大于 $4.5D$ 之后右侧后行隧道盾构对左侧地面的扰动影响几乎消失,地面沉降可以看成两隧道各自施工单独引起的。

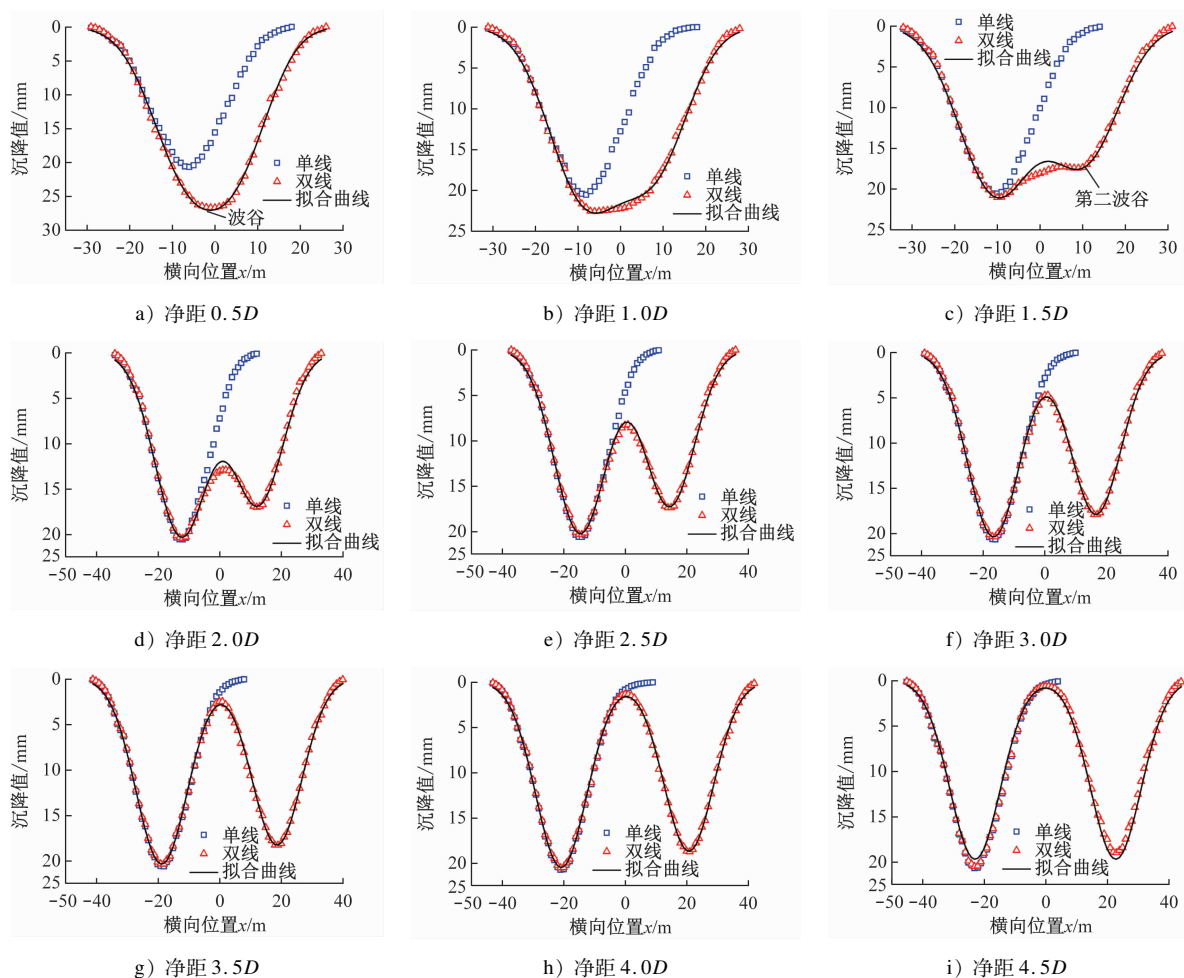


图6 埋深 $2D$ 不同净距工况单、双线盾构施工地面沉降模拟值及双线地面沉降拟合曲线

Fig. 6 Simulation values of land subsidence of single-line and double-line shield constructions and the fitting curves of double line land subsidence under different clear distance conditions with  $2D$  buried depth

由于式(3)能较好地表达双线盾构施工地面沉降模拟结果,故通过 Matlab 软件将上述各种工况模拟得到的沉降数据采用式(3)进行拟合,拟合得到的双线地面沉降公式的各项取值见表3,通过提出的沉降槽判据式(6)计算出各工况的 $S$ 值。对比图6数值模拟结果发现: $S \in [0.319, 0.536)$ 时,沉降槽呈“V”形; $S \in [0.536, 0.783)$ 时,沉降槽呈“U”形; $S \in [0.783, 1.120)$ 时,沉降槽呈“浅W”形; $S \in [1.120, 3.873)$ 时,沉降槽呈非对称“W”形; $S \geq 3.873$ 时,沉降槽呈“双V”形。采用判据 $S$ 判断南公区间地面沉降槽形状,根据上节双线盾构地面沉降公式各特征参数的取值: $i_1$ 为 $9.3765\text{ m}$ , $i_r$ 为 $9.9750\text{ m}$ , $L$ 为 $25.3\text{ m}$ ,代入式(6)求得 $S$ 为 $0.855$ 。从 $S$ 值所在的分布区间可知,该盾构区间地面沉降槽应呈“浅W”形,这与式(5)和数值模拟得到的沉降槽形状一致。

#### 4.2 判据的进一步验证与分析

由沉降槽判据公式结构可知 $S$ 不仅与隧道净距有关,还与埋深有关,故建立埋深分别为 $1.0D$ 、 $1.4D$ 、 $1.6D$ 、 $1.8D$ 、 $2.0D$ ,净距分别为 $1.0D$ 、 $1.5D$ 、 $2.0D$ 、 $2.5D$ 、 $3.0D$ 组合工况的双线盾构模型,通过分析各工况的地面沉降槽形状,进一步验证 $S$ 所划区间的可行性并加以完善判据。图7为25种组合工况双线盾构施工地面沉降曲线。由图7可知:双线隧道净距为 $1.0D$ 时,随着埋深增加,地面沉降槽形状由“W”形向“浅W”形再向“U”形转化;双线隧道净距为 $1.5D$ 时,随着埋深增加,地面沉降槽形状由“W”形向“浅W”形转化;双线隧道净距为 $2.0D$ 时,除了埋深 $1.0D$ 工况双线盾构施工完成后的地面沉降槽为“双W”形,其余各埋深工况盾构完成后地面沉降槽均为“W”形;双线隧道净距为 $2.5D$ 和 $3.0D$ 情况下,埋深 $1.0D$ 、 $1.4D$ 工况双线盾构完成

表 3 不同净距双线盾构施工地面沉降公式各项的拟合值

Tab.3 Fitting values of various items in land subsidence formula for double-line shield construction with different clear distances

净距/m	$S_{\max,l}/\text{mm}$	$i_l/\text{m}$	$(L/2)/\text{m}$	$S_{\max,r}/\text{mm}$	$i_r/\text{m}$	$i_m/\text{m}$	$S$
$0.5D$	21.42	8.358	6.23	15.56	7.228	7.793	0.319
$1.0D$	20.65	8.352	8.30	16.19	7.687	8.020	0.536
$1.5D$	20.41	8.492	10.38	16.30	8.100	8.296	0.783
$2.0D$	20.14	8.472	12.45	16.61	8.165	8.318	1.120
$2.5D$	20.24	8.403	14.53	17.25	8.107	8.255	1.549
$3.0D$	20.40	8.327	16.6	17.91	8.027	8.177	2.061
$3.5D$	20.40	8.319	18.68	18.31	8.047	8.183	2.606
$4.0D$	20.49	8.32	20.75	18.69	8.070	8.220	3.186
$4.5D$	19.75	8.203	22.83	19.75	8.203	8.203	3.873

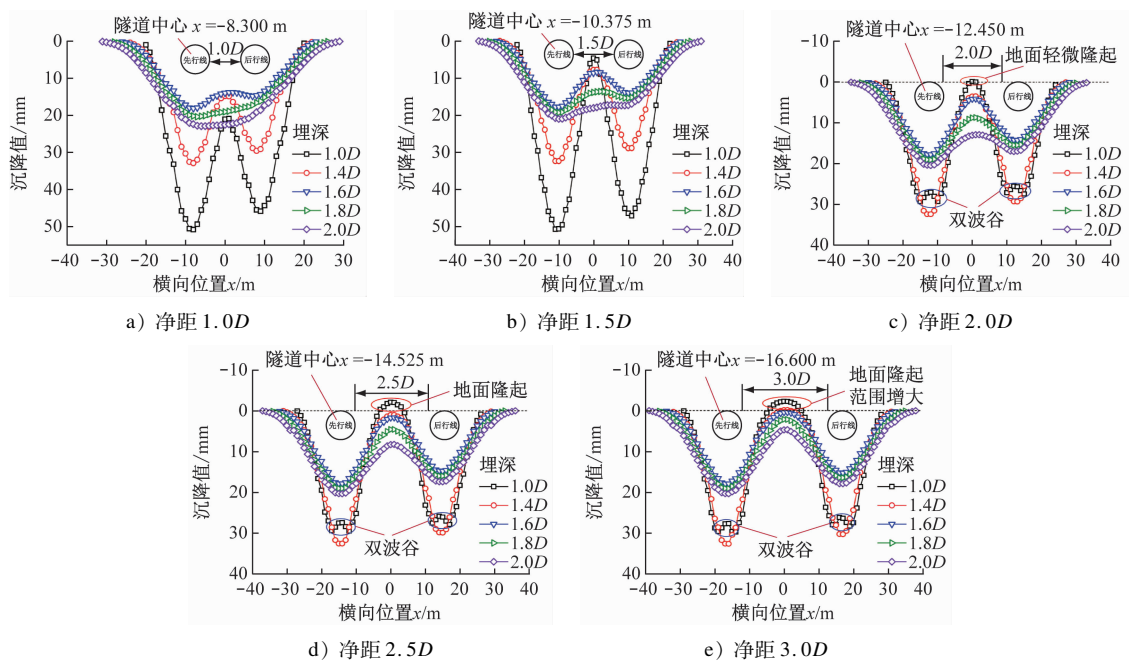


图 7 不同埋深-净距组合工况双线盾构施工地面沉降曲线

Fig.7 Land subsidence curves of double-line shield construction under different buried depth-clear distance combination working conditions

后地面沉降槽分别为“双 W”形、“双 V”形,其余各埋深工况盾构完成后地面沉降槽均为非对称“W”形。

图 7 中埋深  $1.0D$ , 净距  $2.0D$ — $3.0D$  组合工况两隧道中间段地面出现地面隆起, 主要原因是每条隧道盾构诱发的沉降槽两端部隆起段在此处交汇形成, 随着净距增加, 隆起范围不断增大。因为沉降槽波谷位置代表隧道中心正上方地面的沉降值, 该位置距隧道最近, 受盾尾注浆压力影响最大, 而覆土层较浅时盾尾注浆压力使上覆土体产生向上的位移抵消了一部分沉降, 所以波谷处曲线出现一

小段凸起, 使得双线地面沉降槽呈“双 W”形, 如图 8 所示。

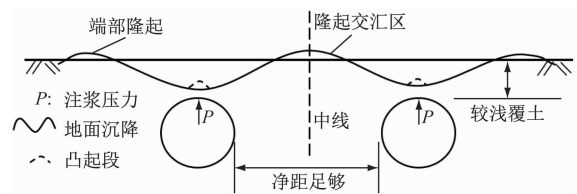


图 8 沉降曲线示意图

Fig.8 Schematic diagram of subsidence curve

每种组合工况中, 地面各监测点的沉降值皆采用式(3)拟合得到各项拟合值见表 4, 各工况地面沉

降曲线的拟合度  $R^2$  均大于 95%。只是在双线隧道净距足够且埋深较浅时,地面沉降槽会出现另一种“双 W”形,也即  $S \geq 3.873$  时,沉降槽呈“双 W”形(隧道埋深为  $1.0D$  时)。利用判据  $S$  进行预测发现,只有一组工况即净距-埋深为  $2.0D-1.0D$  的预测结果(“W”形)与监测点得到的沉降槽形状(“双

W”形)有所偏差,其余组合工况均与图 7 数值模拟结果一致,准确率高达 96%,进一步验证了上述判据区间的有效性。另外,笔者收集到两组成都地区类似的盾构工程实例并利用  $S$  进行预测,发现其预测结果与现场实测结果一致(见表 5),说明该判据在实际工程中也具有一定的实用性。

表 4 25 种组合工况双线盾构施工地面沉降公式各项拟合值

Tab. 4 Fitting values of various items in land subsidence formula for double-line shield construction under 25 combination working conditions

净距-埋深	$S_{\max,l}/\text{mm}$	$i_l/\text{m}$	$(L/2)/\text{m}$	$S_{\max,r}/\text{mm}$	$i_r/\text{m}$	$i_m/\text{m}$	$S$	形状	$R^2$
1.0D-1.0D	51.74	4.909	8.30	45.89	4.926	4.918	1.424	W	0.977 5
1.0D-1.4D	32.08	5.153	8.30	29.04	4.699	4.926	1.420	W	0.995 2
1.0D-1.6D	17.62	6.754	8.30	13.70	6.063	6.409	0.839	浅 W	0.997 0
1.0D-1.8D	19.17	7.791	8.30	14.69	7.182	7.487	0.615	U	0.996 8
1.0D-2.0D	20.65	8.352	8.30	16.19	7.687	8.02	0.536	U	0.997 3
1.5D-1.0D	52.64	4.864	10.38	48.62	4.767	4.816	2.323	W	0.975 9
1.5D-1.4D	31.93	5.192	10.38	28.66	4.882	5.037	2.123	W	0.996 8
1.5D-1.6D	17.78	6.588	10.38	14.03	6.168	6.378	1.324	W	0.997 1
1.5D-1.8D	18.99	7.751	10.38	14.89	7.358	7.555	0.944	浅 W	0.996 4
1.5D-2.0D	20.41	8.492	10.38	16.30	8.100	8.296	0.783	浅 W	0.995 7
2.0D-1.0D	31.27	5.204	12.45	29.30	5.041	5.123	2.953	W	0.955 9
2.0D-1.4D	31.94	5.100	12.45	27.87	4.957	5.029	3.065	W	0.996 1
2.0D-1.6D	17.84	6.454	12.45	14.35	6.123	6.289	1.960	W	0.996 2
2.0D-1.8D	18.97	7.602	12.45	15.37	7.293	7.448	1.391	W	0.997 2
2.0D-2.0D	20.14	8.472	12.45	16.61	8.165	8.318	1.120	W	0.996 2
2.5D-1.0D	33.07	5.105	14.53	31.30	4.993	5.049	4.141	双 W	0.956 0
2.5D-1.4D	32.25	5.136	14.53	29.89	4.813	4.975	4.266	双 V	0.996 3
2.5D-1.6D	17.92	6.385	14.53	14.89	6.088	6.237	2.714	W	0.995 9
2.5D-1.8D	19.07	7.495	14.53	16.01	7.137	7.316	1.972	W	0.997 2
2.5D-2.0D	20.24	8.403	14.53	17.25	8.107	8.255	1.549	W	0.996 9
3.0D-1.0D	32.06	5.178	16.60	30.46	5.104	5.141	5.213	双 W	0.965 5
3.0D-1.4D	32.31	5.072	16.60	30.17	4.831	4.952	5.620	双 V	0.997 5
3.0D-1.6D	18.09	6.384	16.60	15.48	6.093	6.239	3.540	W	0.997 1
3.0D-1.8D	19.22	7.418	16.60	16.62	7.123	7.271	2.606	W	0.997 6
3.0D-2.0D	20.40	8.327	16.60	17.91	8.027	8.177	2.061	W	0.997 2

表 5 沉降槽判据预测与实测情况对比

Tab. 5 Comparison between the prediction and actual measurement of land subsidence criterion

名称	$L/\text{m}$	$i_m/\text{m}$	$S$	预测形状	实测形状
文献[10]	14	7.069	0.490	V	V
文献[11]	13	3.800	1.463	W	W

## 5 结 论

1) Peck 公式和刘波公式均能较好地表达南公

区间单、双线盾构施工地面沉降模拟结果。

2) 隧道埋深为  $2.0D$  时,净距从  $0.5D$  到  $4.5D$  地面沉降槽由“V”形—“U”形—“浅 W”形—非对称“W”形—“双 V”形演变。净距大于  $4.5D$  时,后行线对先行线几乎不产生扰动。

3) 埋深为  $1.0D$ ,净距为  $2.0D-3.0D$  时,两隧道中线附近地面出现隆起且随净距增加,隆起范围增大,两隧道中心上方地面因受盾尾注浆压力影响较大抵消了一部分沉降,使得沉降槽呈“双 W”形。



4) 提出的沉降槽判据  $S = (L/2)^2 / 2i_m^2$  可对成都地区双线盾构施工引起的地面沉降槽形状进行预测。当  $S \in [0.319, 0.536)$  时, 沉降槽呈“V”形; 当  $S \in [0.536, 0.783)$  时, 沉降槽呈“U”形; 当  $S \in [0.783, 1.120)$  时, 沉降槽呈“浅 W”形; 当  $S \in [1.120, 3.873)$  时, 沉降槽呈非对称“W”形; 当  $S \geq 3.873$  时, 沉降槽呈“双 V”或“双 W”形(隧道埋深为  $1.0D$  时)。

## 参考文献

- [1] 魏纲, 庞思远. 基于有限元模拟的双线平行盾构隧道近距离界定[J]. 市政技术, 2014, 32(1): 76.  
WEI Gang, PANG Siyuan. The definition of close range between parallel shield tunnels based on numerical simulation[J]. Municipal Engineering Technology, 2014, 32(1): 76.
- [2] 邱明明, 杨果林, 吴镇清, 等. 双孔平行地铁隧道盾构施工地表沉降分布规律研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 96.  
QIU Mingming, YANG Guolin, WU Zhenqing, et al. Distribution laws of surface settlement induced by shield construction of twin-tube metro tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 96.
- [3] 范雨, 苏艺, 袁勇, 等. 复合地层双线地铁隧道施工地表沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 762.  
FAN Yu, SU Yi, YUAN Yong, et al. Study on ground settlement law of double-line subway tunnel construction in composite stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 762.
- [4] PECK R B. Deep Excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: State of the Art Report, 1969: 225.
- [5] O'REILLY M P, NEW B M. 831153 Settlement above tunnels in the United Kingdom — their magnitude and prediction [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(1): A18.
- [6] 刘波, 陶龙光, 丁城刚, 等. 地铁双隧道施工诱发地表沉降预测研究与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 356.  
LIU Bo, TAO Longguang, DING Chenggang, et al. Prediction for ground subsidence induced by subway double tube tunneling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(3): 356.
- [7] 魏纲. 盾构法隧道地面沉降槽宽度系数取值的研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(12): 74.  
WEI Gang. Study on calculation for width parameter of surface settlement trough induced by shield tunnel[J]. Industrial Construction, 2009, 39(12): 74.
- [8] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1354.  
WEI Gang. Selection and distribution of ground loss ratio induced by shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1354.
- [9] 杨小强, 欧尔峰. 兰州砂卵石地层盾构施工的 peck 公式参数优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(3): 231.  
YANG Xiaoqiang, OU Erfeng. Parameter optimization of peck formula for shield construction in Lanzhou sand pebble ground [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2020, 39(3): 231.
- [10] 冯亮, 巫锡勇, 牟迪, 等. 成都砂卵石地层双线隧道 Peck 公式参数取值研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(1): 100.  
FENG Liang, WU Xiyong, MOU Di, et al. Parameters selection research of Peck formula for twin tunnels in sandy-pebble stratum [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(1): 100.
- [11] HE C, FENG K, FANG Y, et al. Surface settlement caused by twin-parallel shield tunnelling in sandy cobble strata[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2012, 13(11): 858.

· 收稿日期:2022-07-19 修回日期:2022-12-28 出版日期:2024-10-10  
Received:2022-07-19 Revised:2022-12-28 Published:2024-10-10  
· 通信作者:汪壮壮,助理工程师,3465218767@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

