

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.03.032

近距平行双线盾构隧道地表沉降曲线分析

朱林

(辽宁省交通科学研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 由于盾构隧道的修建过程极易造成周边土体变形,因此,准确预测盾构施工引起的地表沉降是盾构工程亟待解决的难点问题之一。依托西安地铁某区间双线平行隧道工程,采用数值模拟与现场监测的方法,分析了双线平行盾构隧道开挖对地表沉降造成的影响。研究的结果表明:在隧道埋深一定时,随着两隧道间距的增大,沉降曲线的最大沉降值逐渐减小,沉降曲线逐渐地由单峰状态演变为双峰状态;在隧道间距一定时,随着两隧道埋深的增加,沉降曲线逐渐由双峰状态变为平缓曲线最终变为单峰状态。通过计算结果得到了地表沉降曲线单、双峰分界函数,并讨论了不同土层参数对沉降曲线规律的影响,为以后盾构隧道施工引起的地表沉降预测提供了参考。

关键词: 平行双线盾构隧道;地表沉降;数值模拟;单峰和双峰

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)03—0208—06

Behavior Analysis of Ground Settlement Induced by the Construction of Parallel Shield Tunnels

ZHU Lin

(Liaoning Transportation Research Institute Co., Ltd, Shenyang, Liaoning 110000, China)

Abstract: It is easy to trigger soil deformation during the construction of shield tunnel, therefore, predicting the ground settlement caused by shield tunneling is one of the very important issues. Based on one shield tunneling project of Xi'an Metro, this paper analyzed the behaviors of parallel shield tunnels ground settlement by numerical simulations and field monitoring. The results indicate that the maximum value of ground settlement curve gradually decreases with the increasing of horizontal distance between two tunnels when buried depth of tunnel is determined, and gradually change from single peak to double peak; when horizontal distance is determined, the ground settlement curve gradually change from double peak to single peak with the increasing of tunnel buried depth. The boundary functions of single and double peak are obtained by numerical simulations, and the influences of different soil parameters on the ground settlement curve are discussed. This study could provide references for the ground settlement prediction for future shield tunnel construction.

Keywords: parallel shield tunnels; ground settlement; numerical simulation; single and double peak

近年来,我国大中城市的地铁建设快速发展,其中盾构法以高安全性得到了广泛应用。然而盾构施工必然会破坏土层原有平衡状态,引起地表沉降,特别是双线隧道施工,地表沉降相比较单线隧道更为明显。若地表沉降过大,将会对地表已有建筑物或道路造成严重影响。因此,深入研究双线隧道施工引起的地表沉降规律具有重要意义。

隧道施工引起周围地层移动的系统研究以 Peck 于 1969 年发表的软土中开挖及隧道施工的现状报告为开端^[1],至今已有近半个世纪的历史。吴华君等^[2]提出近距离双线水平平行盾构施工引起的总的土体沉降曲线符合正态分布规律,并建立了修正的二维 Peck 公式,能够计算双线平行盾构隧道施工引起的地表沉降值;张承林^[3]指出当隧道间距

较小时, 沉降曲线为“单峰”形态, 而双线隧道间距较大时, 会呈现“双峰”特征。刘招伟等^[4]以广州地铁二号线为工程背景, 采用数值模拟与实测数据对比的方法, 分析了地表沉降规律, 指出只要选取合理的计算模型和参数, 采用有限元来研究盾构隧道的力学过程是一种有效, 灵活的方法。王国才等^[5]分析了地表沉降沿横向、纵向分布随盾构推进的变化规律和不同深度处地层的沉降变化规律。魏纲^[6]基于双线水平平行盾构施工中土体损失引起的土体变形二维解析解, 建立土体变形三维解析解, 并指出随 L 增加, 沉降曲线由 V 型变为 W 型。吴昌胜等^[7]通过对不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究, 得出中小直径、大直径 ($D > 10 \text{ m}$) 盾构隧道施工引起的地层损失率在 $0.0\% \sim 2.0\%$ 占 93.19% 、在 $0.0\% \sim 0.5\%$ 之间的近 70% ; 中小直径盾构隧道引起的地层损失率随着地层粘聚力、内摩擦角以及弹性模量的增大而逐渐减小。范雨等^[8]通过对复合地层双线地铁隧道施工地表沉降规律的研究, 推导出双线隧道相对间距系数, 可预测双线隧道施工地表沉降曲线形式及两条隧道施工相互扰动影响程度。

现有研究针对双线隧道开挖引起地表沉降, 依据现场实测数据和数值计算结果, 虽然建立了经验和半经验公式, 但未对地表沉降曲线为单峰和双峰状态给出界定, 本文采用数值模拟的方法, 分析了两隧道不同的间距以及隧道埋深对地表沉降曲线造成的影响, 并给出了双线隧道施工引起的地表沉降曲线单、双峰分界函数公式, 并结合实际工程验证了该公式的可行性, 通过对土体物理力学参数分析, 得到不同土层下地表沉降曲线单、双峰分界函数, 可为预测双线隧道施工引起的地表沉降曲线提供参考。

1 工程实例分析

1.1 工程概况

本文所采用的现场工程地质资料来源于西安地铁某区间岩土工程勘察报告, 采用的盾构施工参数以及监测数据来源于中铁九局集团有限公司项目部现场实测结果。该线路隧道为平行双线盾构施工隧道, 隧道所在土层主要为中砂、粗砂, 两隧道中心间距为 13.2 m , 隧道的中心埋深约为 19.0 m , 测点布置如图 1 所示, 每个沉降监测断面双线布设 12 个沉降监测点, 左右中线上各布设一个。盾构隧道施工引起的地表变形与沉降会造成邻近建筑物的变形和损坏, 因此, 工程前期合理预测地表变形与沉降规律

十分必要。

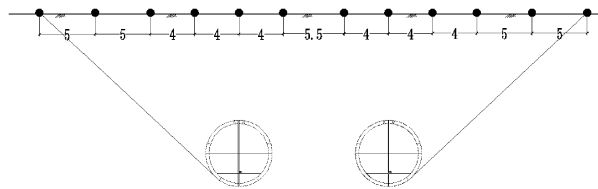


图 1 监测断面横向布置示意图

计算模型采用如下基本假定^[8-9]:

(1) 土体材料采用摩尔-库仑本构模型; (2) 管片采用线弹性材料; (3) 认为土与管片环是协调变形且不考虑土体与管片的脱离现象; (4) 认为管片环是连续的整体, 未考虑管片拼装块间螺栓的连接; (5) 未考虑隧道开挖的时间效应, 只研究施工阶段造成的影响。

1.2 土层及材料参数确定

为方便数值计算, 本文将土层简化为规则均匀的层次, 各土层计算参数见表 1。模型结构的主要力学参数见表 2。

表 1 土层物理力学参数

土层	厚度 H/m	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(\circ)$
杂填土	3	18.0	10	0.25	3	8.0
粉质黏土	2	20.0	18	0.30	32	26.5
粉细砂	2	20.0	20	0.26	0	30.0
中砂	6	20.7	30	0.27	0	32.0
粗砂	27	20.8	35	0.28	0	34.0

表 2 支护结构材料参数

名称	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν
管片	25	3450	0.2

1.3 数值模型建立

本文采用 MIDAS/NX 有限元软件进行数值建模, 隧道开挖直径取 $D = 6 \text{ m}$, 当模型边界大于隧道尺寸的 3 倍时, 可以认为, 土体受施工开挖的影响不明显, 故本文计算模型的横向及竖向尺寸分别为 60 m 和 40 m 。对模型两侧施加水平方向的约束, 模型下侧施加竖直方向约束, 模型上侧为自由边界, 见图 2。计算时的荷载主要为路面荷载及土体自重, 采用平面应变弹塑性本构模型进行分析, 模型中土体采用二维平面四边形及三角形单元模拟, 盾构管片用一维弹性梁单元进行模拟。

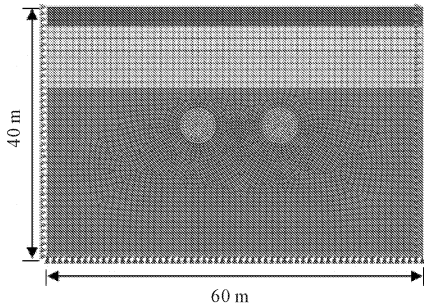


图2 数值分析模型

2 模拟结果分析

双线平行隧道先行开挖左线隧道,再开挖右线隧道,将模拟得到的竖向沉降值绘制成曲线图见图3。由图3可知,左线开挖后,沉降最大点出现在隧道中心正上方,最大沉降值为3.72 mm,沉降曲线符合 Peck 沉降槽规律;当右线开挖后,由于叠加效应,沉降最大点发生偏移,最终稳定在距离左线隧道中心约6 m 的位置,即两隧道轴线连线中点附近,最大沉降值为5.72 mm,最大沉降值比单线隧道引起的最大沉降增大约53.8%,且沉降影响范围明显增大,沉降曲线为单峰沉降槽形式,仍符合 Peck 沉降槽变形规律。

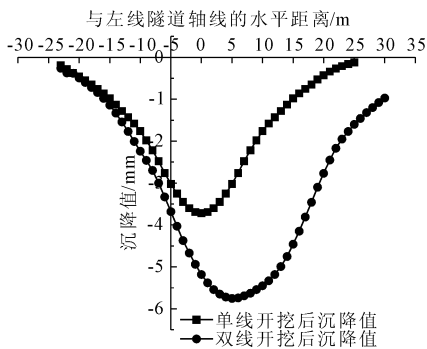


图3 沉降曲线模拟结果

1969年,Peck在统计分析大量地下工程施工引起地表沉降实测数据的基础上,提出了地表沉陷槽的形状与概率论中正态分布曲线相近理论。由此产生了计算盾构施工引起的地表沉降值的 Peck 公式,其表达式如下:

$$S(x) = S(x)_{\max} \exp(-x^2/2i^2) \quad (1)$$

$$S(x)_{\max} = V_s / (\sqrt{2\pi} \cdot i) \quad (2)$$

$$i = Z / [\sqrt{2\pi} \cdot \tan(45^\circ - \varphi/2)] \quad (3)$$

以文景区间盾构隧道施工为例,单线隧道的开挖面积约为30.96 m²,地层损失率取为0.5%^[10]。隧道中心埋深约为19.274 m,代入公式可以得到

$i = 14.59 \text{ m}$, $V_s = 0.1548 \text{ m}^3/\text{m}$,对于双隧道开挖,则可通过叠加原理并加以修正获得相应的地表沉降曲线,从而得到基于工程实际施工条件的 Peck 变形公式:

$$y = 4.23 \left[\exp(-x^2/2 \times 14.59^2) + \exp(-(x - 13.2)^2/2 \times 14.59^2) \right] \quad (4)$$

去除误差过大的测点值,取试验段3个断面的地表沉降监测数据及 Peck 变形公式计算值绘制成折线图见图4。

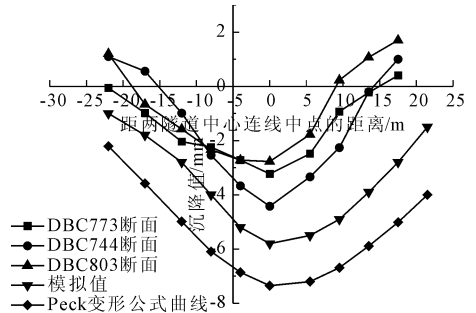


图4 监测断面横向地表沉降散点图

由图4可知,沉降曲线均为单峰状态,DBC744监测断面最大沉降值为4.42 mm,峰值出现在两隧道中心连线中点处,其余两个监测断面 DBC773 和 DBC803 的最大沉降值点也出现在两隧道中心连线中点附近。由 Peck 变形公式求得的沉降曲线整体偏于保守,最大沉降值为7.53 mm,与实测曲线偏差较大。模拟沉降曲线最大沉降值为5.72 mm,模拟沉降曲线与实测沉降曲线较为接近,比较吻合,说明本文采用的模型及计算参数选取合理,具有可行性。

3 沉降曲线单、双峰分界函数拟合

对于双隧道施工引起的地表沉降曲线的形态研究,韩昌瑞等^[11]定性地描述了曲线的变化规律,并指出形成单峰沉降曲线,除受隧道间距 L 的影响外,与隧道埋深 Z 也有一定的关系,但并未指出何种情况沉降曲线为单峰状态,何种情况沉降曲线为双峰状态。本章通过研究隧道埋深和隧道间距对开挖引起的地表沉降曲线形态的影响,定量的给出沉降曲线形态与隧道埋深和隧道间距之间的函数关系,用以预判盾构施工引起的地表沉降曲线形态,能够提前在地表沉降最大区域做好防范工作,并分析了土体力学参数对沉降曲线形态的影响,土体力学参数的影响将主要针对黏土、砂土这两种土层进行模拟分析,探究其单、双峰分界函数的变化规律。

3.1 计算工况

基于第3节实际工程的分析,采用相同的计算

模型,对沉降曲线的单、双峰分界标准进行深入研究。图5为两平行隧道的平面位置关系图, L 为隧道间距, Z 为隧道埋深。模拟过程中先进行左线隧道开挖,然后再进行右线隧道的开挖,本节共分析了16种工况,具体工况如表4所示。

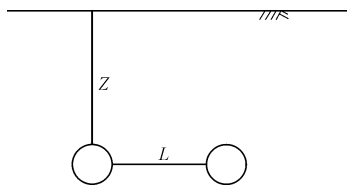


图5 双隧道平面布置图

表3 两隧道的位置参数

Z/D				L/D			
第一组	第二组	第三组	第四组	第一组	第二组	第三组	第四组
1.0	2.0	2.5	3.0	0.5	1.1	1.5	2.0
—	—	—	—	0.6	1.2	1.6	2.1
—	—	—	—	0.7	1.3	1.7	2.2
—	—	—	—	—	1.4	1.8	2.3
—	—	—	—	—	—	1.9	—

3.2 隧道埋深和间距的影响

以黏土地层为例,进行详细说明,模拟分析过程中土层的弹性模量取上述介绍的3倍^[12]。将计算结果绘制成曲线如图6—图9所示,由图可知,当 $Z=1.0D$ 时,地表最大沉降值可达5.08 mm,当 $Z=2.0D$,地表最大沉降值为8.01 mm,随着埋深的增加,地表沉降值增幅显著,但当 $Z=2.5D$ 与 $3.0D$ 时,地表最大沉降值为较为接近,地表沉降对于隧道埋深的敏感性降低,是由于在隧道埋深达到一定程度时,土体会形成土拱效应,能够起到缓解地表沉降的作用。

当 $Z=1.0D$ 时, L 每增大 $0.1D$,最大沉降值约减小23.2%; $Z=2.0D$ 时, L 每增大 $0.1D$,最大沉降值约减小6.3%; $Z=3.0D$ 时, L 每增大 $0.1D$,最大沉降值约减小3.1%。在隧道埋深一定时,随着两平行隧道间距的增加,沉降影响范围逐渐增大,地表沉降值逐渐减小,并且随着两隧道间距的增加,隧道开挖引起的最大沉降值减小幅度明显变缓。

对于双线平行隧道,其地表沉降曲线由两个单线隧道开挖引起的地表沉降相互叠加所得到,沉降值要大于单隧道施工引起的沉降值,在埋深一定时,随着隧道间距的变化沉降曲线的形态也将发生改变。当 $Z=1.0D, L=0.5D$ 时,沉降曲线为单峰状态,峰值为5.01 mm,随着 L 增大到 $0.6D$ 时,沉降曲

线中心区域变为平缓曲线,当隧道 L 增加到 $0.7D$ 后,沉降曲线出现了两个峰值,左侧峰值为2.84 mm,右侧峰值为2.82 mm,双峰最大峰值比单峰峰值减小约43.3%;当 $Z=2.0D, L=1.2D$ 时,沉降曲线为单峰状态,随着 L 增大到 $1.3D$ 时,沉降曲线中心区域变为平缓曲线,当 L 增加到 $1.4D$ 后,沉降曲线变为双峰曲线,左侧峰值为6.61 mm,右侧峰值为6.55 mm,双峰曲线最大峰值比单峰峰值减小约11.5%;当 $Z=3D$ 时,随着 L 的增加沉降曲线由单峰变为双峰的速率明显放缓,双峰曲线最大峰值比单峰峰值减小约4.83%。由此可知,随着埋深的增加,沉降曲线的双峰峰值比单峰峰值减小的幅度逐渐变小,且对于黏土地层,沉降曲线呈现双峰状态时,两峰值相差不大。

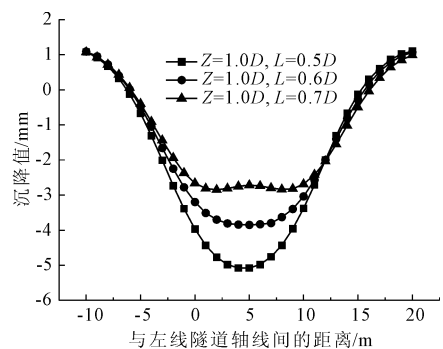


图6 不同隧道间距条件下的沉降曲线 ($Z/D=1.0$)

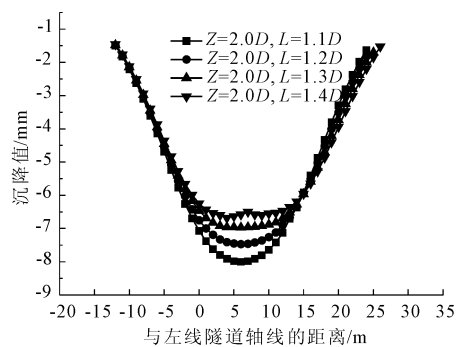


图7 不同隧道间距条件下的沉降曲线 ($Z/D=2.0$)

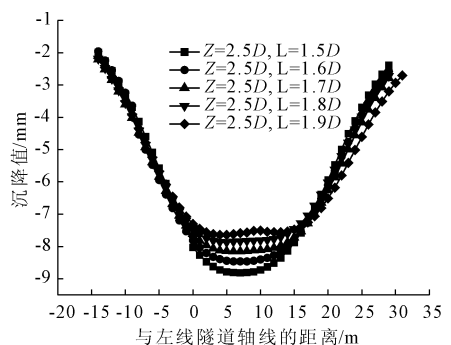


图8 不同隧道间距条件下的沉降曲线 ($Z/D=2.5$)

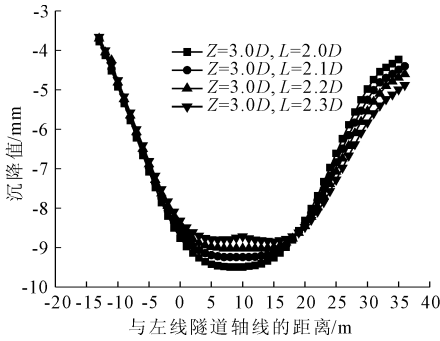


图 9 不同隧道间距条件下的沉降曲线 ($Z/D = 3.0$)

由以上 16 种工况的分析,可总结出双线隧道在不同埋深及间距的情况下引起的地表沉降曲线单、双峰分界点,现将分界点绘制成散点图并进行曲线拟合如图 10 所示。隧道的位置参数坐标位于该函数下部区域,则地表沉降曲线形态为单峰状态,位置参数坐标位于该函数上部区域,则沉降曲线形态为双峰状态。

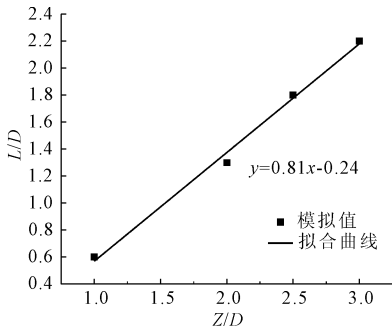


图 10 黏土地层沉降曲线单、双峰分界点拟合

3.3 土体力学参数的影响

本节主要针对弹性模量和黏聚力两个土体力学参数进行分析,选取砂土中三种不同弹性模量和黏土中三种不同黏聚力的土层进行数值模拟分析。具体分析过程如上节所述,在进行近百组模拟分析的基础上,可得到不同力学参数下地表沉降曲线单、双峰分界点。

采用砂土进行模拟分析时,黏聚力取值为零,分别取三种不同弹性模量的砂土进行分析,由其沉降曲线可知,单隧道开挖时地表沉降符合经典 Peck 公式沉降规律,双隧道开挖后引起的地表沉降不再关于两隧道中点对称,沉降曲线的峰值正常变化,说明黏聚力影响着地表沉降曲线形态。不同弹模下的土层的分界函数如图 11 所示,随着弹性模量的增大,分界函数的斜率逐渐增大。当隧道埋深 Z 与隧道间距 L 较小时,不同弹模造成分界函数的差异不明显,但随着 Z 与 L 的逐渐增大,不同弹模土体得到

的单、双峰分界区域开始显现出明显差别。在隧道埋深 Z 一定的条件下,随着隧道间距 L 的增加,弹性模量越大,沉降曲线为单峰的区域越大;在隧道间距 L 一定的条件下,随着隧道埋深 Z 的增加,弹性模量越小,沉降曲线为单峰的区域越小。

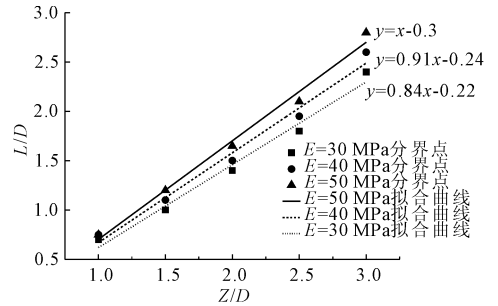


图 11 不同弹性模量土层的分界拟合函数

分别取三种不同黏聚力的黏土进行模拟分析,由图 12 可知,不同黏聚力下,分界函数的斜率几乎相等。在隧道埋深 Z 一定的条件下,随着隧道间距 L 的增加,黏聚力越小,沉降曲线为单峰的区域越大;在隧道间距 L 一定的条件下,随着隧道埋深 Z 的增加,黏聚力越大,沉降曲线为单峰的区域越小。

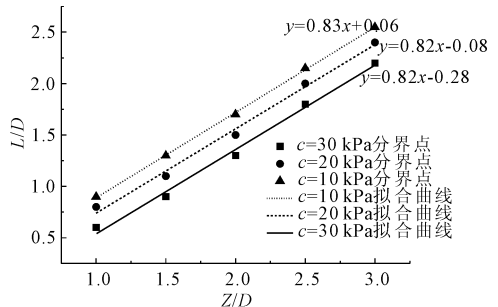


图 12 不同黏聚力土层的分界拟合函数

本文通过近百组工况的模拟,得出了曲线的变化规律与已有研究成果基本吻合,并且定量的给出了曲线形态与隧道间距及隧道埋深的函数关系,基于西安地铁区间隧道工程分析得出位置参数坐标为 $Z/D = 2.71, L/D = 1.03$,将其代入砂土地层沉降曲线分界函数中,该点位于函数曲线下方,即位于单峰区域,与现场监测数据沉降曲线及由 Peck 变形公式计算得出的沉降曲线均为单峰状态相符,证明了本文得出的分界函数的可行性。由此,预测盾构施工引起地表沉降曲线的形态,可为施工提供有效参考。

4 结 论

结合西安地铁某区间双线盾构隧道工程,采用数值分析和地表监测相结合的方法,对平行双隧道

盾构施工引起的地表沉降规律进行了深入研究,现得到主要结论如下:

(1) 双线隧道开挖引起的地表沉降有叠加效应,引起的地表最大沉降值约为单线开挖的1.5倍,地表沉降影响范围约为两隧道中心距的3.5倍。

(2) 在隧道埋深一定时,随着隧道间距的增大,沉降曲线的最大沉降值逐渐减小,埋深分别为 $2D$ (D 为隧道直径)和 $3D$ 时,隧道水平间距每增大 $0.1D$,最大沉降值分别减小约6.3%和3.1%;在隧道间距一定,埋深小于 $2.5D$ 条件下,随着埋深的增加,沉降曲线的最大沉降值逐渐增大,在间距为 $1.5D$ 时,埋深每增大 $0.5D$,最大沉降值增大约14.9%。

(3) 砂土地层和黏土地层分界函数分别为 $y = 0.84x - 0.22$ 和 $y = 0.81x - 0.24$;对于砂土地层,随着弹性模量的增大,分界函数的斜率逐渐增大,沉降曲线为单峰区域逐渐增大;对于黏土地层,随着黏聚力的增大,分界函数的斜率相差不大,沉降曲线为单峰区域逐渐减小。

参考文献:

[1] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]//In: Proc. 7th ICSMFE. Mexico City: [s. n.], 1969:225-290.
[2] 吴华君,魏纲. 近距离双线平行盾构施工引起的土体沉降计算[J]. 现代隧道技术,2014,51(2):63-69.

[3] 张承林. 双线隧道施工对地表沉降的影响数值模拟分析[J]. 公路交通科技,2016(10):168-170.
[4] 刘招伟,王梦恕,董新平. 地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8):1297-1301.
[5] 王国才,马达君,杨阳,等. 软土地层中地铁盾构施工引起地表沉降的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(S1):273-277.
[6] 魏纲. 双线平行盾构隧道施工引起的三维土体变形研究[J]. 岩土力学,2014,35(9):2563-2568.
[7] 吴昌胜,朱志铎. 不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(12):2258-2265.
[8] 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(S2):762-768.
[9] 李娟,王思瑶,张标,等. 双孔隧道的地表沉降预测及其可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S1):428-435.
[10] Mair R J. Settlement effects of bored tunnels[C]//Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London,1996:43-53.
[11] 韩昌瑞,贺光宗,王贵宾,等. 双线并行隧道施工中影响地表沉降的因素分析[J]. 岩土力学,2011,32(s2):485-487,495.
[12] 程雪松,郑刚,邓楚涵. 基坑悬臂排桩支护局部失效引发连续破坏机理研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(7):1249-1263.

(上接第80页)

[11] 徐海滨,杜修力. 基于预插粘性界面单元的混凝土细观拉伸断裂过程数值模拟[J]. 北京工业大学学报,2014,40(11):1667-1672.
[12] 刘永平,郝志明,李潘. 基于黏结裂缝模型的混凝土细观损伤模拟[J]. 混凝土,2017(8):22-26.
[13] 董凡. 基于细观模型的混凝土静力破坏行为研究

[D]. 郑州:华北水利水电大学,2019.
[14] Chang Li, Jiang Guo. Cracking simulation of asphalt concrete beam specimen using cohesive zone model[J], Construction and Building Materials, 2019,214:49-60.
[15] 杨木秋,林泓. 混凝土单轴受压受拉应力-应变全曲线的试验研究[J]. 水利学报,1996(6):60-66.