

中砂层盾构穿越路基的沉降变形影响因素分析

韩昀希^{1,2}, 王宇佳¹, 孙铁成^{1,2,3}, 索晓明⁴, 杜志田⁴

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

4. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘要:路基变形是关乎运营铁路安全的重要指标,同时也是运营事故的潜在诱发因素。盾构隧道下穿既有铁路是造成其路基变形的重要原因之一,因此基于工程地质详勘确定了不同工况的地基强度参数,开展路基沉降变形数值计算分析。研究结果表明:地基采用不同加固方式处理后的铁路路基,其地基加固强度与路基顶的沉降变形值呈负相关性;地层损失对于路基沉降变形有较大影响,且在一定范围内路基沉降变形随着地层损失率的增加而逐步增大,地表沉降槽宽度系数与地层损失密切相关;采用 MJS 工法加固盾构隧道周围土体能够减小盾构穿越路基的沉降。本研究结论可为有效解决盾构穿越路基的沉降变形问题提供借鉴参考。

关键词:盾构穿越路基;沉降槽宽度系数;数值分析;地层损失;MJS 工法

中图分类号: TU921 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)02-0046-07

0 引言

随着城市建设的快速发展,地下铁路的数量不断增多,出现了大量盾构穿越既有交通设施、构筑物、管线的施工案例^[1-3]。盾构下穿铁路将引起铁路线路变形,不仅加剧了轨道的不平顺,同时加大了轮轨间的冲击力,加速轨道结构和基床的破坏^[4]。保障列车安全运行的关键问题在于保证铁路路基的沉降均匀,因此如何精准预测地表沉降变形成为类似工程的最重要关注点之一。

目前,学者大多采用 Peck 提出的地表沉降变形预估公式对地表沉降变形进行估算^[5]。Peck 公式假定在不排水条件下,地面变形由地层的损失引起,地表沉陷槽形状近似高斯曲线分布,继而侯学渊等^[6]考虑到施工扰动后土体固结作用引起的变形特点,加入时间因素,修正了经验公式。韩焯等^[7]通过对国内地表沉降已有监测数据分析,验证了 Peck 公式在中国的适用性。但是,实际讨论加固方案、地层处理等问题时,Peck 理论公式在三维和复杂边界条件下的适用性并不强,因此,数值解成为了复杂条件下进行沉降问题预测的新手段。围绕着盾构隧道下穿构筑物带来的影响,孙连勇等^[8]以某区间隧道为背景,模拟盾构隧道近距离下穿胶济铁路线桥梁与路基引起的变形情况。杨林^[9]针对盾构下穿既有铁路提出了加固方案和安全控制的技术措施,保障了地铁盾构在掘进过程中铁路列车的行车安全。蔡小培等^[10]考虑盾构隧道下穿施工、高速铁路结构间的相互作用关系,建立轨道-路基-土体有限元模型,分析盾构开挖过程中高速铁路轨道变形特征,并探讨盾构下穿施工对列车运行的影响规律。梁超强等^[11]针对太原地区汾河漫滩地层盾构下穿浅基础建筑物这一施工工况,比较 FLAC3D 模拟与现场监测 2 种方法得到的结果,分析建筑物存在与否以及建筑物刚度对于沉降规律的影响。刘立明^[12]通过模拟地铁盾构下穿高铁加固措施的效果,得出对盾构下穿段进行特殊注浆加固后,可以显著减小盾构施工引起的沉降。综上所述,数值计算已成为预测实际问题的重要手段之一。

收稿日期:2022-03-02 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzb.20220023

基金项目:国铁集团重点课题(N2020G009);国家自然科学基金(5217083250)

作者简介:韩昀希(1997—),男,硕士研究生,研究方向为地下工程、人工冻土等领域。E-mail:hyxzhans@qq.com

韩昀希,王宇佳,孙铁成,等.中砂层盾构穿越路基的沉降变形影响因素分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(2):46-52.

目前针对此类问题的核心是地层加固方法的选择,尤其是面对复杂工况条件时,MJS工法(Metro Jet System)作为应用于地铁施工的一种全方位高压喷射注浆工法,可有效应对施工区域狭小、周围构筑物保护要求高等施工限制,因此被广泛应用于盾构土体加固处理中。基于某地铁线下穿既有铁路路基工程,采用数值计算方法对其进行分析,分别讨论不同地基强度、不同地层损失率、采用MJS工法加固地层3种因素与铁路路基沉降变形规律之间的关系,最后探究Peck公式中沉降槽宽度系数与地基强度和地层损失的关系,从而为后续类似工程的施工提供设计参考和理论依据。

1 工程概况与模型建立

1.1 工程概况

某地铁区间盾构隧道拟正交下穿上部原有铁路,涉铁工程线路全长约3.7 km。隧道依次正交下穿高铁线路基、客运联络线路基、客车停车线路基,隧道穿越铁路线平面位置关系图、纵断面图如图1所示。

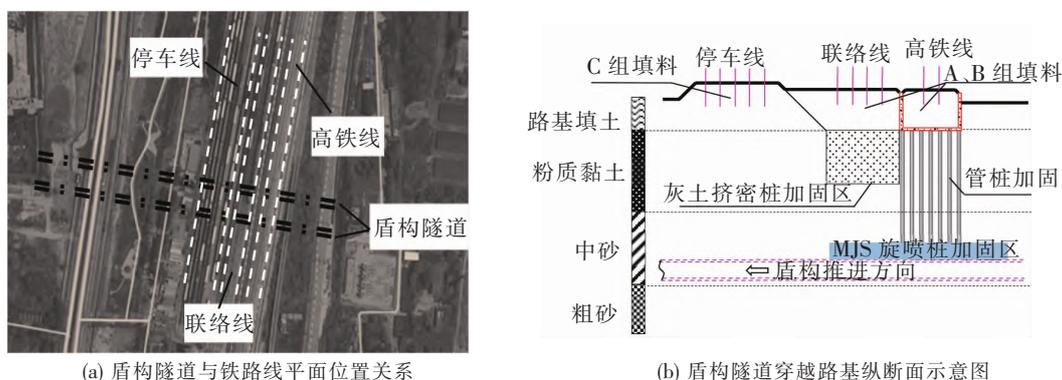


图1 盾构隧道穿越路基示意图

3种铁路列车运营参数如下:高铁线路基上运营的列车设计时速为350 km/h,联络线为250 km/h,停车线为160 km/h。

1.2 盾构施工有限元模型

在考虑盾构隧道开挖影响范围的基础上,模型尺寸为:长130 m,宽96 m,高51.2 m。使用摩尔-库仑弹塑性模型来模拟土体。模型的地层组成及分布根据勘察报告确定,具体尺寸及土体分层情况见图2。

计算模型边界条件设置如下:约束土体底面的Y方向、前后面的Z方向以及左右面的X方向位移,顶面为自由表面。随后先进行初始地应力平衡以抵消土体自重变形,再模拟盾构开挖。

1.3 计算假定

本次计算采取以下假定:①依据刚度等代原则获取联络线灰土挤密桩加固地基以及高铁线管桩加固区地基的刚度;②盾构隧道中心在整个过程中的埋深不变,即认为盾构水平掘进;③由于地下水位埋深大于隧道埋深,所以在计算过程中未考虑地下水的影响;④不考虑盾构机外壳和土体之间的相对滑动,未考虑衬砌管片与注浆层、注浆层与土层之间的摩擦接触。

隧道利用复合式土压平衡盾构机施工,盾构外径为6.2 m,管片外径6.0 m,内径为5.4 m,管片厚度为300 mm,管片环宽1200 mm,同步注浆层厚度为100 mm。盾构的掘进、管片拼装、盾尾同步注浆是一个连续循环过程,利用生死单元法对盾构逐环掘进过程进行模拟。

1.4 计算参数及工况的选取

为了探究地层沉降的计算方法,1969年,Peck对隧道开挖诱发的地表沉陷工程实测值进行了大量的数据分析,首先提出了地表沉降槽高斯曲线分布和地层损失的概念,并确定了地表沉降变形预估的公式

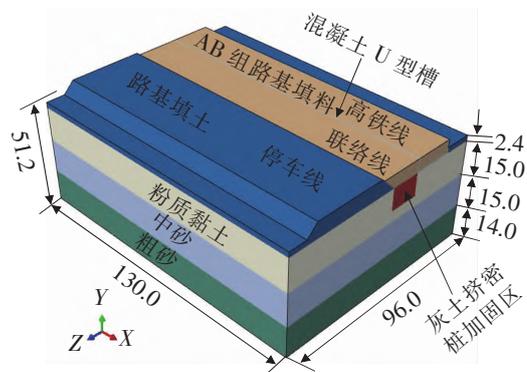


图2 模型尺寸示意图(单位:m)

形式

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

$$S_{\max} = \frac{V_i}{i \sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

式中, S_{\max} 为隧道轴线上方所对应的地表最大沉降量; i 为地面沉降槽中心到曲线拐点的距离, 即沉降槽宽度; V_i 为单位长度上的地层损失。

Peck 公式中最重要的参数为沉降槽宽度 i 和地层损失 V_i , Attewell et al^[13] 研究了沉降槽宽度的参数取值, 在实测数据回归分析的基础上, 得到了沉降槽宽度与隧道埋深的关系, 依据摩尔-库仑原理推导了地表沉降槽宽度的计算公式

$$i = Kz_0 \quad (3)$$

$$W = 2.5i \quad (4)$$

式中, K 为沉降槽宽度系数, 主要取决于土质; z_0 为隧道埋深; W 为地表沉降槽总宽度。

由上述已有研究可知, 地表的沉降最大沉降主要取决于地层损失、土质条件、隧道埋深等因素。在利用 Peck 公式进行地面沉降计算中, 地层损失率和沉降槽宽度系数是 2 个最重要参数。沉降槽宽度系数主要与地层条件有关, 本工程中由于既有地基加固处理方式不同, 导致土层参数发生改变, 因此根据计算假定通过改变土层的弹性模量、泊松比、黏聚力和摩擦角等参数, 实现对不同强度铁路地基的模拟; 根据中国 Peck 公式的适用性统计分析结果建议, 土压平衡盾构地层损失率在 0.03% ~ 3.79%, 平均值为 0.96%^[14], 选取 1% 的地层损失率作为基本分析工况。

根据现场地质勘察报告, 结合计算假定和已有的参考文献, 选取表 1 所示不同土层以及原有铁路地基加固区的参数, 地铁隧道的支护条件参数如表 2 所示。

表 1 土层、加固区计算参数

地层名称	厚度/m	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
C 组填料(路基填土)	7.2	1 850	25	0.30	7	8
粉质黏土	15.0	1 850	13	0.32	20	18
中砂	15.0	1 950	40	0.30	—	38
粗砂	14.0	1 950	40	0.30	—	40
MJS 工法地基	—	1 950	55	0.28	20	33
AB 组填料	5.4~6.0	1 850	40	0.30	20	40
灰土挤密桩地基	10.0	2 000	35	0.29	30	25
管桩加固区粉质黏土	15.0	1 850	40	0.28	20	20
管桩加固区中砂	3.0	1 950	50	0.25	—	38

表 2 支护参数表

部件名称	厚度/m	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
衬砌管片	0.30	2 500	35 000	0.20
同步注浆	0.10	2 200	50	0.25

为了探讨不同地基强度的铁路路基、地层损失率以及加固方案对盾构隧道施工造成的路基顶部沉降的影响, 共进行 3 种工况的仿真模拟。工况 1 的盾构隧道周围土体不采取加固措施, 地层损失率为 0; 工况 2 的盾构隧道周围土体不采取加固措施, 地层损失率为 1%; 工况 3 的盾构隧道周围土体采取 MJS 工法加固, 地层损失率为 1%。

2 计算结果分析

2.1 不同地基强度铁路线的沉降计算结果

图 3(a)是 3 种不同路基在无地层损失情况下,盾构隧道单线贯通时的沉降变形曲线,其中左、右隧道中心线位置分别位于 50、70 m 处。曲线变化趋势表明在隧道开挖通过后,地表下沉形成沉降槽,沉降槽形态符合 Peck 提出的地层沉降理论中的高斯曲线形态。3 种路基在隧道中心线处均达到最大沉降,其中地基强度最低的停车线沉降最大,达到 3 mm;使用管桩后加固地基强度最高的高铁线沉降最小,为 2.2 mm。

图 3(b)是继单线开挖完毕后,右线开挖引起的 3 种路基地表沉降变形曲线。停车线沉降值为 2.9 mm,高铁线沉降值为 2.4 mm。

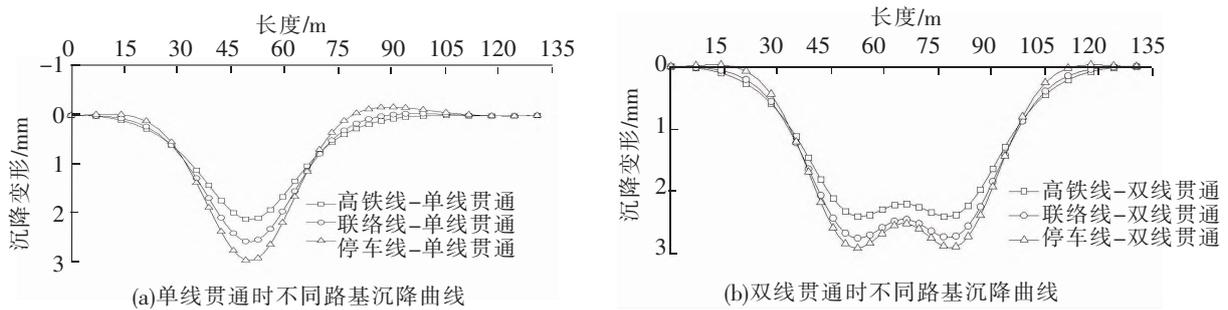


图 3 工况 1 不同路基沉降曲线

如图 3 可以得出,对比 3 种地基经过不同加固处理的铁路路基,其中,高铁线路基采取的加固措施最为严格,处理后的地基强度最高,联络线地基强度次之,停车线地基最弱,而计算结果也呈现出路基下方地基强度越高,受下方施工扰动越小,沉降越少的规律。

尽管地表沉降值均未超出安全容许范围,但由于计算采取了一定假定和简化,所得结果往往相比实测结果较小。其中,地层损失体积是盾构隧道施工中挖土体积与建成隧道体积之差,建成隧道体积包括包裹隧道管片的外围注浆体积。地层损失率为地层损失体积与建成隧道体积的比值,主要用来表征盾构施工中的地层损失,是引起地面沉降最主要的因素,为了更准确模拟实际结果,应当加入地层损失率的影响。

2.2 不同地层损失率的沉降计算结果

在工况 1 的基础上通过对注浆层设置体积收缩系数来实现地层损失的模拟。图 4(a)是 3 种不同路基在地层损失率为 1%,未采取加固措施情况下,盾构隧道单线贯通时的沉降变形曲线。与工况 1 相比,3 种路基沉降值均有所增加,停车线的最大沉降达到 4.9 mm,增加 1.9 mm;高铁线沉降为 3.7 mm,增加 1.3 mm。

图 4(b)是继单线开挖完毕后,右线开挖引起的 3 种路基地表沉降变形曲线。停车线沉降值为 5.6 mm,增加 2.7 mm;高铁线沉降值为 5 mm,增加 2.6 mm。

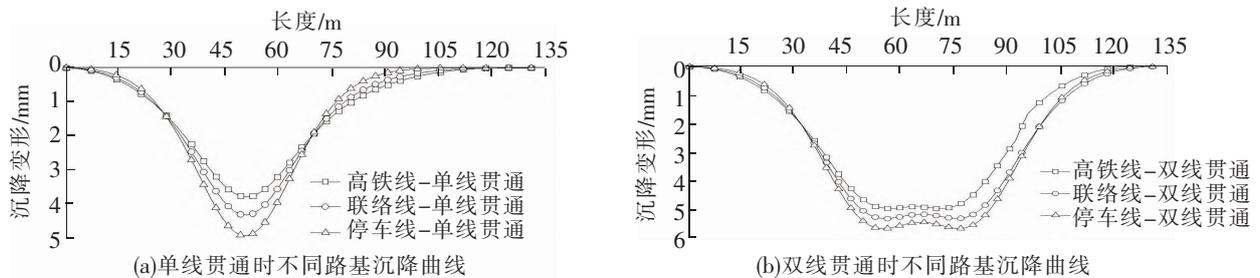


图 4 工况 2 不同路基沉降曲线

图 4 表明,地层损失率对沉降的影响不可忽略,为了进一步深入探究地层损失率的改变对不同类型路基所产生的沉降变形量,在上述工况 1 的基础上另取 4 种不同的地层损失率,分别为 0.15%、0.30%、

0.50%和 0.75%,进行仿真模拟,得到不同路基的沉降变形随地层损失率改变的变化曲线如图 5 所示。

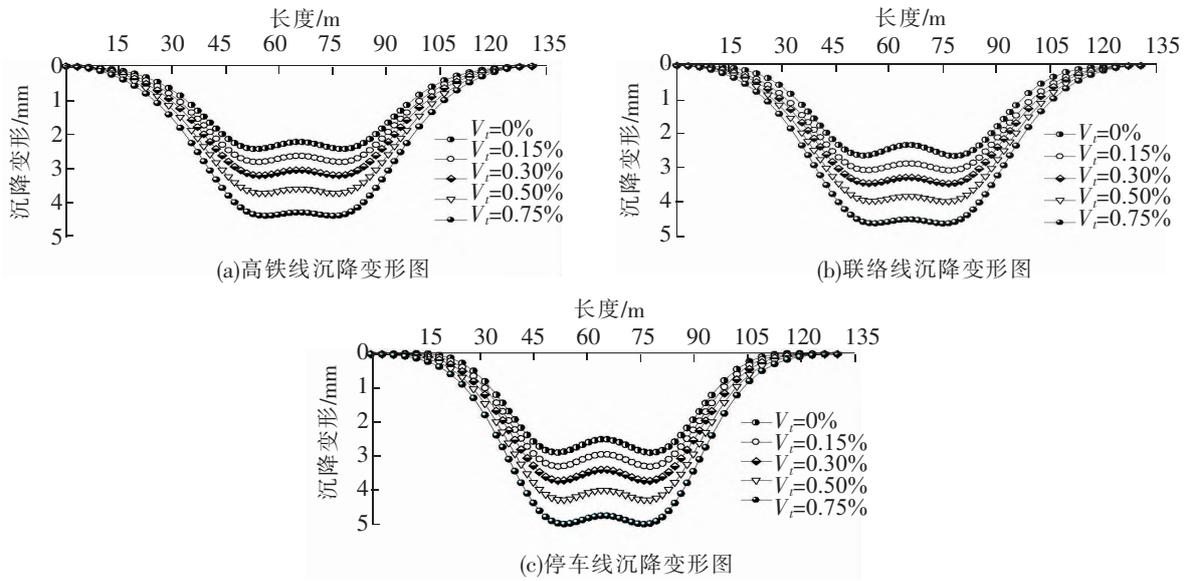


图 5 地层损失率改变后不同路基的沉降曲线

对于 3 种路基,沉降值均随着地层损失率的增大而增大,当地层损失率为 0.75%时,路基沉降变形值均达到最大,分别为 4.35、4.61、4.99 mm。将双隧道贯通后的路基最大沉降变形随地层损失率的关系绘于图 6。

可以看出,路基的最大沉降与地层损失率基本呈线性关系增加。地层损失率每增加 0.1%,高铁线路基沉降增加 0.26 mm,联络线路基为 0.33 mm,停车线为 0.35 mm;另外,还可以发现:当路基下方的地基强度增大时,路基最大沉降变形受地层损失的影响减小。以上分析说明铁路路基的沉降变形对地层损失较敏感,在盾构隧道施工过程中,尽量减小地层损失是有效控制路基沉降变形的关键。

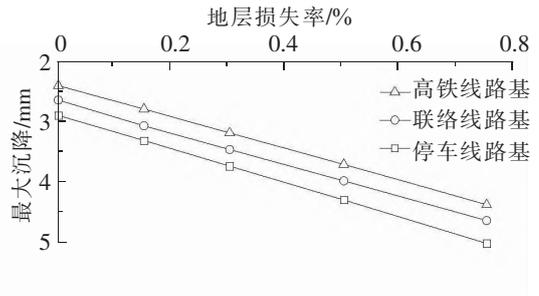


图 6 最大沉降与地层损失率关系图

实际工程中,即使按照相关施工规程严格操作,及时进行注浆减小地层损失,仍无法完全避免盾构隧道土体开挖后,由于应力释放造成上部土体承载能力的降低,最终造成地表沉降变形的出现。为了从根源上减小地表沉降变形值,需要对盾构隧道周围土体进行预加固处理,减小应力释放的影响范围,从而降低盾构穿越路基的沉降变形,确保施工期间列车运行安全。

3 盾构隧道土体加固设计

3.1 MJS 工法加固设计

由于高铁线路基下方存在 18 m 长的管桩加固区,桩底距离盾构隧道拱顶最近处为 3 m,常规加固方案受限,因此对盾构区间隧道结构拟采用 MJS 工法加固,加固范围位于盾构隧道上方 3.0 m,左右距离隧道 2.0 m 的区域,MJS 工法加固横断面示意如图 7 所示。

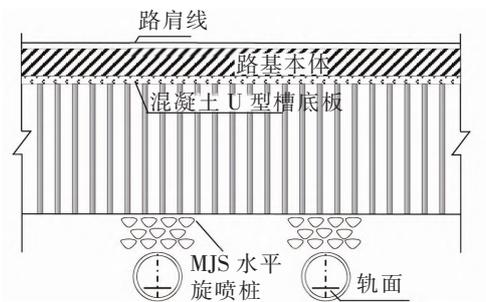


图 7 盾构加固区域示意图

3.2 MJS 工法处理计算结果

在工况 2 的基础上对模型进行修改,得到 3 种不同路基在地层损失率为 1%,采取 MJS 工法加固后盾构隧道单线贯通时的沉降变形曲线如图 8(a)所示,可以发现,产生最大沉降的停车线沉降值已经降低到 3.9 mm,相比未采取加固措施时降低 20.4%,而对沉降控制要求最高的高铁线,最大沉降也减少

16.2%,达到 3.1 mm。图 8(b)所示双线贯通后,所有路基沉降全部控制在 5 mm 以内,地表沉降得到很大改善,满足铁路安全运行条件。

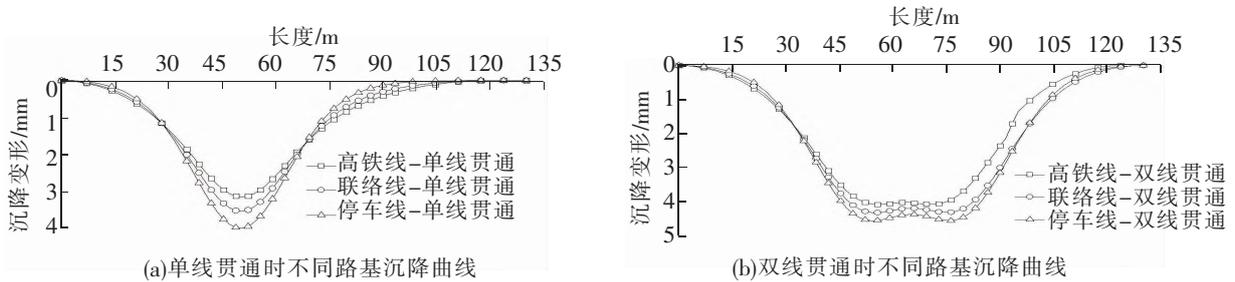


图 8 工况 3 不同路基沉降曲线

4 沉降槽宽度系数讨论

由前述 Peck 理论可知:沉降槽宽度 i 为地面沉降槽中心到地表沉降变形预估曲线拐点的距离。依此,对以上 3 种工况中单线隧道开挖完毕后的沉降槽宽度进行提取,并根据式(3)计算得到不同工况的铁路线沉降槽宽度系数 K ,如图 9 所示。

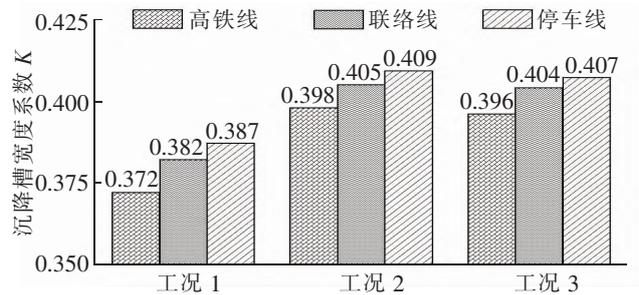


图 9 沉降槽宽度系数图

前文已提及 3 种铁路路基的地基强度依次为高铁线>联络线>停车线。不难发现,同一工况下,沉降槽宽度系数随着铁路线地基加固强度的提高,呈现逐渐减小的趋势;而在同一铁路路基中,随着地层损失率的增加,沉降槽宽度系数逐步增大。该结论与 Peck 理论所述一致,说明沉降槽宽度系数 K 与土质条件以及地层损失有很大关系。当采取 MJS 工法加固后, K 值有小幅减小,表明沉降槽宽度有所降低,即采用 MJS 工法加固能够减小盾构开挖带来的地表沉降影响范围,再次验证了加固方案的可靠性。

为了进一步探究地层损失率与沉降槽宽度系数的关系,绘制 3 条铁路线的沉降槽宽度系数 K 与地层损失率的变化规律,如图 10 所示。地层损失率在 0%~0.75%时,沉降槽宽度系数与其关系基本为线性正相关,但当地层损失率大于 0.75%后,随着损失率的增加,系数 K 仍然在增大,而增加速率减小,曲线有变平缓的趋势。由此推测当地层损失率增加至一定值时,沉降槽宽度系数将不再增加,二者并非简单的正比关系。

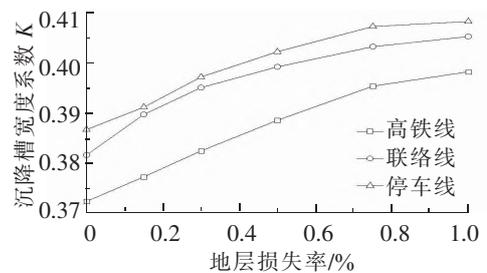


图 10 沉降槽宽度系数与地层损失率关系图

5 结论

基于盾构隧道正交下穿高速铁路路基实际工况开展数值模拟,分析地基强度、地层损失率、MJS 工法加固 3 种工况下路基沉降变形,以探究 Peck 公式中沉降槽宽度系数 K 与地基强度和地层损失的关系。研究结果表明:

- (1) 盾构下穿既有铁路线路后的地表沉降槽形态符合高斯曲线规律,与 Peck 理论所述一致。地表沉降变形大小与地基加固强度呈负相关,地基强度越高,路基顶部沉降越小。
- (2) 地层损失率对地表沉降有较大影响,在研究范围内,路基的最大沉降与地层损失率的增大呈线性增加关系,且铁路地基加固强度越低,路基沉降受地层损失的影响越大。
- (3) 沉降槽宽度系数 K 与地基强度、地层损失率关系密切。当地层损失率大于 0.75%后, K 值增加速率开始减小,由此推测存在一个临界地层损失率,当地层损失率大于临界值后, K 值趋于稳定。

(4) 基于理论分析和数值验证,提出的 MJS 工法加固方案可以实现对地表沉降的有效控制。

参 考 文 献

- [1]李士中. 合肥地区新建盾构隧道下穿铁路路基段地层预加固措施研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 60-64.
- [2]刘国栋,袁冯丹,许超. 软土地层盾构穿越密集房屋群水平定向注浆加固技术[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(7): 1228-1235.
- [3]高丙丽. 地铁隧道暗挖施工对既有管线的变形影响规律及其控制技术[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 96-101.
- [4]徐干成,李成学,王后裕,等. 地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 269-272.
- [5]Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of 7th international conference on soil mechanics and foundations engineering. Mexico City: State of the Art Report, 1969: 225-231.
- [6]侯学渊,廖少明. 盾构隧道沉降预估[J]. 地下工程与隧道, 1993(4): 24-32.
- [7]韩焯,李宁, Standing J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007(1): 23-28.
- [8]孙连勇,黄永亮,王启民,等. 地铁盾构隧道下穿既有铁路变形控制研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 140-145.
- [9]杨林. 地铁盾构隧道下穿既有铁路加固方案数值分析[J]. 铁道建筑技术, 2017(3): 78-82.
- [10]蔡小培,蔡向辉,谭诗宇,等. 盾构下穿施工对高速铁路轨道结构的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(7): 11-17.
- [11]梁超强,葛忻声,赵娟,等. 盾构下穿浅基础建筑的沉降规律分析[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(2): 256-262.
- [12]刘立明. 地铁盾构下穿哈大高速铁路加固效果分析[J]. 山西建筑, 2020, 46(16): 136-138.
- [13]Attewell P B, Hurreli M R. Settlement development caused by tunneling in soil[J]. Ground Engineering, 1985, 18(8): 17-20.
- [14]吴昌胜,朱志铎. 不同隧道施工方法引起地层损失率的统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 19-30.

Analysis on Influencing Factors of Settlement Deformation of Subgrade Crossed by Shield Tunneling in Medium Sand Stratum

Han Yunxi^{1,2}, Wang Yujia¹, Sun Tiecheng^{1,2,3}, Suo Xiaoming⁴, Du Zhitian⁴

- (1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
4. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: The deformation of subgrade is an important index of railway safety, and also is a potential inducing factor of operational accidents. Shield tunnel crossing under existing railway is one of the most important causes of subgrade deformation. Therefore, the research chose foundation strength in different working condition based on the engineering geological investigation to making numerical analysis of subgrade settlement deformation. The result shows that: when the foundation of railway subgrade treated by different reinforcement methods, the reinforcement strength of foundation has a negative correlation relationship with the settlement of subgrade. The settlement of subgrade is strongly influenced by stratum loss rate, and gradually enlarged with the stratum loss rate enhance within limits. The width coefficient of ground settlement trough has a great relevance to stratum loss rate. Using MJS method to reinforce the soil around shield tunnel can reduce settlement of subgrade caused by shield crossing. The conclusions of this study can provide reference for effectively solving the settlement deformation problem of shield tunneling through subgrade.

Key words: subgrade crossed by shield; width coefficient of settlement trough; numerical analysis; stratum loss; MJS method