

超大直径盾构隧道下穿黄河大堤沉降研究

秦方方

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 济泺路隧道为第一条下穿黄河的市政道路与轨道交通合建盾构隧道。针对盾构隧道引发的黄河大堤沉降预测,基础 Peck 公式的应用受到局限。在既有研究基础上,提出超大直径泥水平衡盾构隧道三维 Peck 公式,其横向沉降计算预测、纵向沉降计算预测与黄河大堤实测沉降数据拟合效果较好。通过相关参数分析可知:随着地表以下竖向深度的增大,沉降槽形态变深收窄,最大沉降值增加、横向影响范围减少;竖向深度超过临界值后,沉降曲线向上凸起,横向沉降不再满足高斯分布;沉降槽形态变化与隧道横向间距、沉降槽宽度、隧道相对埋深、地质条件有关;先行线盾构隧道穿越大堤后,大堤土层已产生扰动,后行线盾构隧道穿越大堤,大堤地层累积沉降值及地层损失率更大。

关键词: 泥水平衡盾构隧道;黄河大堤;地层沉降;三维 Peck 公式;参数分析

中图分类号: U455.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0207-06

0 引言

隧道下穿黄河一直被认为是风险较大的工程。隧道下穿大堤时对其产生的扰动和沉降影响若无法控制或预测,将产生难以估量的安全隐患^[1-2]。

对于盾构隧道引起的地层沉降研究,早在 19 世纪盾构隧道或地铁大规模在欧洲兴建时即开始。1969 年,Peck^[3]提出用高斯分布函数表示横向地表沉降。Peck 经验公式因参数简洁、公式明确等优点得到广泛使用,目前仍为较常用的地表沉降研究方法,相关研究较多,本文选取较为典型的文献[4-6]作为参考。此外,表示横向地表沉降的计算理论还有 Celestino 法^[7]、Vorster 法^[8]等。1982 年,Attewell 等^[9]结合累计概率的理念提出纵向地表沉降经验公式。此外,表示纵向地表沉降的计算理论还有 Yoshikoshi 法^[10]、Sagaseta 法^[11]等。以上提到的方法均为经验公式法,文献[12]对既有的经验公式法进行总结。除了经验公式法,还有理论解析、边界单元法、有限元数值模拟等沉降研究方法。1978 年,Ghabossi 等^[13]提出有限元二维平面应变用于盾构施工分析,为后续的有限元三维分析打下基础。比如,朱牧原等^[14]利用 FLAC3D 数值模拟济南济泺路穿越黄河隧道的施工过程。

2021 年,济南济泺路穿黄河隧道顺利建成通车。黄河隧道盾构直径超过 14 m,属于超大直径泥水平衡盾构隧道,隧道施工对黄河大堤的沉降影响分析是工程的重难点。本文首先分析黄河隧道的大堤沉降数据,在既有研究的基础上,提出超大直径泥水平衡盾构隧道三维 Peck 公式,利用黄河隧道实测沉降数据对其反分析以及验证其适用性,为后续类似工程提供经验参考。

1 黄河隧道

1.1 工程概况

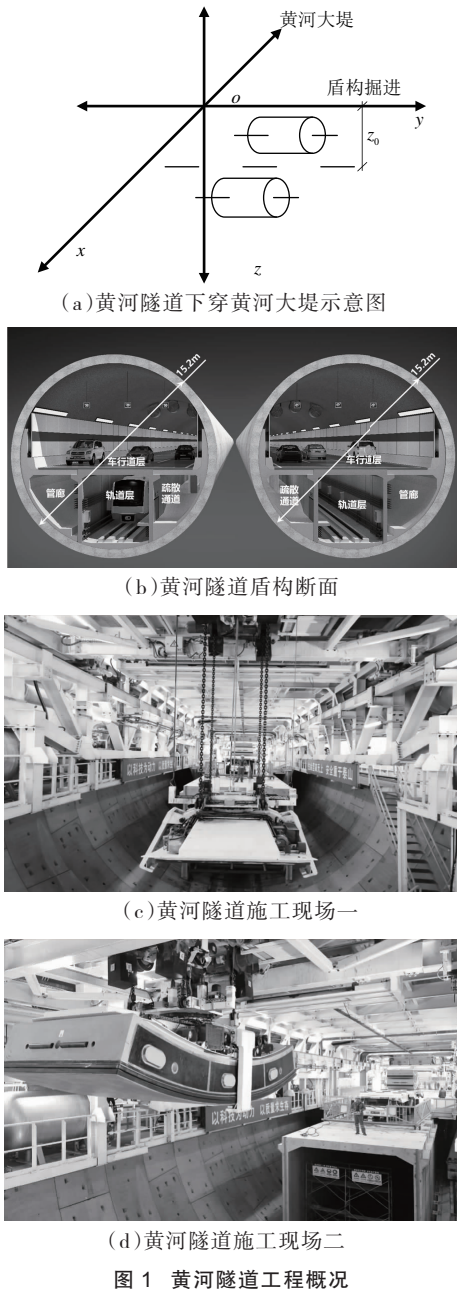
黄河隧道为市政道路与轨道交通合建双洞隧道,每个洞上层单向布置 3 个机动车道,下层单向布置轨道交通。黄河隧道采用 2 台直径 15.76 m 泥水平衡盾构机下穿黄河及南北岸黄河大堤,见图 1。隧道总长度约 3.7 km,南北工作井之间的盾构隧道段长约 2.5 km,盾构管片外径 15.2 m,内径 13.6 m,衬砌管片宽度 200 cm,管片厚度 65 cm。隧道下穿大堤处,左右隧道盾构中心之间的 L 为 34.2 m,两盾构隧道之间的虚拟中心线与大堤顶部地表最大竖向距离 z_0 为 49.6 m。

1.2 地质条件

黄河隧道盾构段穿越地层主要为粉质黏土,多夹砂层及钙质结核层,其分布不均匀,局部富集成层,同时在砂层中发现少量砂结石,钙质胶结,锤击较难击碎。粉质黏土多呈软塑~可塑状,压缩性中等~高,工程性质一般,承载力较低。

收稿日期: 2024-06-22

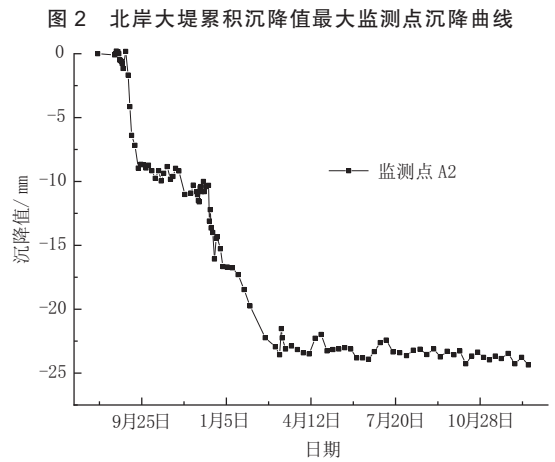
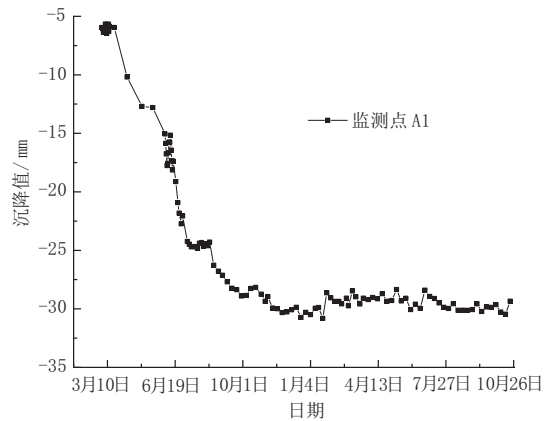
作者简介: 秦方方(1986—),男,硕士,高级工程师,从事道路交通、隧道工程设计工作。



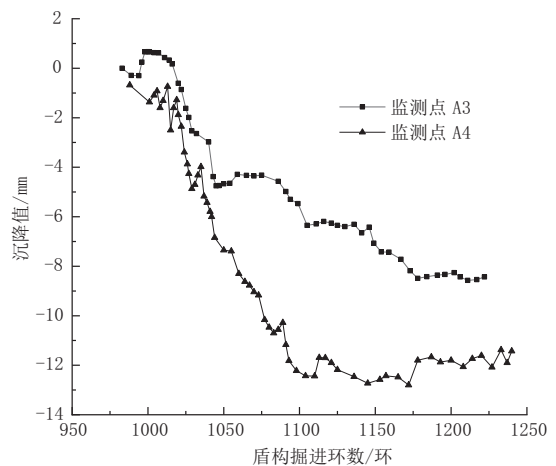
1.3 黄河大堤沉降分析

根据沉降监测数据,选取黄河北岸大堤累积沉降最大监测点 A1,沉降曲线见图 2;选取南岸大堤累积沉降最大监测点 A2,沉降曲线见图 3。从图 2 可以看出,北岸黄河大堤最大累计沉降量为 30.5 mm;从图 3 可以看出,南岸黄河大堤最大累计沉降量为 24.4 mm。图 2 和图 3 沉降曲线的初始阶段,即盾构机正下穿黄河大堤阶段,堤顶沉降变化较小,大幅度沉降发生于盾构机穿越大堤后。

选取两个非最大沉降的监测点 A3 与 A4 进行沉降过程分析,两监测点位于黄河南岸大堤同一水平线。图 4 为黄河隧道的东(右)线盾构隧道对应黄河大堤顶部地表的监测点 A3 的沉降曲线,黄河隧道的



西(左)线盾构隧道对应黄河大堤顶部地表的监测点 A4 的沉降曲线,图 4 的横坐标表示盾构隧道掘进工作面(俗称“掌子面”)所在的推进环数。



沉降第一阶段为监测点 A3 的 1 018 环之前、监测点 A4 的 1 025 环之前,堤顶沉降变化较小,对应盾构机正下穿大堤阶段,说明盾构机切口水压、泥浆比重、刀盘转速等控制较合理,对土层扰动影响较小,对应图 2 和图 3 的初始阶段。从图 4 的监测点 A3 沉降曲线还可以看出,堤顶出现稍微抬起,这是由盾构机对前方土体产生压力作用所致。

沉降第二阶段为监测点 A3 的 1 018 环~1 050 环、监测点 A4 的 1 025 环~1 080 环。堤顶出现快速沉降,对应盾构机尾部脱离黄河大堤后堤顶产生的沉降。从图 4 可以看出,此阶段沉降占比最大、沉降速度最快。此阶段的沉降主要包括盾构外壳与地层的摩擦力导致的扰动沉降、盾构尾部脱离大堤后盾构外壳和衬砌之间的空隙导致的沉降。为减少该阶段的沉降,黄河隧道通过同步注浆,并且控制注浆压力、浆液配比等方法,增大浆液的硬化速度和强度,以尽快减少盾构外壳与衬砌之间的空隙。

沉降第三阶段为监测点 A3 的 1 050 环之后、监测点 A4 的 1 080 环之后,大堤进入固结沉降。从图 4 可以看出,监测点 A3 累积沉降低于 A4。这是由于 A3 对应东(右)线隧道,施工时序在前,东(右)线隧道穿越大堤后,大堤土层已产生扰动;A4 对应西(左)线隧道,等西(左)线隧道在穿越大堤后,大堤土层累积沉降更大。

施工前,预测的黄河隧道下穿黄河大堤导致的最大累积沉降仅为 20 mm。通过黄河大堤沉降分析看出,黄河隧道盾构施工尽管采取多举措,以尽快减少盾构外壳和衬砌之间的空隙,减少大堤沉降,但黄河大堤最大累积沉降值达 30.5 mm。面对超大直径泥水平衡盾构下穿黄河及黄河大堤这一复杂工况,基础 Peck 公式的应用受到局限。

2 三维 Peck 公式

首先,单洞盾构隧道基础 Peck 公式^[3]如下所示:

$$S(x) = \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_L}{4\sqrt{2} i} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

式中: x 为到隧道中心的横向距离; $S(x)$ 为对应的地表竖向沉降值; D 为隧道盾构外径; V_L 为地层损失率,地层损失率为单位长度的地层损失体积与隧道理论排土面积之比,Peck 公式假定地层损失体积等于沉降槽体积; i 为沉降槽宽度。

双洞盾构隧道 Peck 公式^[8]如下所示:

$$S(x) = \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_{L_l}}{4\sqrt{2} i_l} e^{-\frac{(x-0.5L)^2}{2i_l^2}} + \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_{L_r}}{4\sqrt{2} i_r} e^{-\frac{(x+0.5L)^2}{2i_r^2}} \quad (2)$$

式中: V_{L_l} 为左隧道地层损失率; V_{L_r} 为右隧道地层损失率; i_l 为左隧道沉降槽宽度; i_r 为右隧道沉降槽宽度; L 为左右隧道盾构中心之间的间距。

从 Peck 公式可以看出,影响地表竖向沉降值的是地层损失率 V_L 和沉降槽宽度 i 。地层损失率 V_L 与地质条件有关,如土层黏性、土层密实度、地下水固结等。根据工程经验,不同深度的地层损失率基本相同,可认为是常数。沉降槽宽度 i 与相对埋深、地质条件有关,关于沉降槽宽度 i 的公式如式(3)所示:

$$i(z) = i(1 - az/z_0) \quad (3)$$

式中: z_0 为左右盾构隧道之间的虚拟中心线与地表竖向距离; z 为地表以下竖向深度; a 为考虑不同地质情况的无量纲参数, $0 < a < 1$ 。

将式(3)代入式(1)和式(2),分别得到二维单洞盾构隧道 Peck 公式(4)和二维双洞盾构隧道 Peck 公式(5)。

$$S(x, z) = \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_L}{4\sqrt{2} i(1 - az/z_0)} e^{-\frac{x^2}{2i^2(1 - az/z_0)^2}} \quad (4)$$

$$S(x, z) = \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_{L_l}}{4\sqrt{2} i_l(1 - az/z_0)} e^{-\frac{(x-0.5L)^2}{2i_l^2(1 - az/z_0)^2}} + \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_{L_r}}{4\sqrt{2} i_r(1 - az/z_0)} e^{-\frac{(x+0.5L)^2}{2i_r^2(1 - az/z_0)^2}} \quad (5)$$

沉降值 $S(x, z)$ 已与横向距离 x 、竖向距离 z 建立联系,只剩下与盾构掘进距离,即纵向 y 未建立联系。本文在 Attewell 等^[9]提出的纵向地表沉降经验公式基础上改进,提出地表竖向沉降与盾构掘进距离的关系公式(6),如下所示:

$$S(y) = \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_L}{4\sqrt{2} i} e^{-\frac{y^2}{2i^2}} / \left(1 + \frac{1-\eta}{\eta} e^{\frac{16\sqrt{2}iky}{\sqrt{\pi}D^2V_L}} \right) \quad (6)$$

式中: η, k 均为无量纲参数, $0 < \eta < 1, k > 0$,与地质条件、隧道埋深相关。

将式(6)融入式(4)和式(5),分别得到超大直径泥水平衡盾构隧道三维单洞盾构隧道 Peck 公式(7)和三维双洞盾构隧道 Peck 公式(8)。

$$S(x, y, z) = \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_L}{4\sqrt{2} i(1 - az/z_0)} e^{-\frac{x^2}{2i^2(1 - az/z_0)^2}} / \left(1 + \frac{1-\eta}{\eta} e^{\frac{16\sqrt{2}iky}{\sqrt{\pi}D^2V_L}} \right) \quad (7)$$

$$S(x, y, z) = \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_{L_l}}{4\sqrt{2} i_l(1 - az/z_0)} e^{-\frac{(x-0.5L)^2}{2i_l^2(1 - az/z_0)^2}} / \left(1 + \frac{1-\eta}{\eta} e^{\frac{16\sqrt{2}iky}{\sqrt{\pi}D^2V_{L_l}}} \right) + \frac{\sqrt{\pi} D^2 V_{L_r}}{4\sqrt{2} i_r(1 - az/z_0)} e^{-\frac{(x+0.5L)^2}{2i_r^2(1 - az/z_0)^2}} / \left(1 + \frac{1-\eta}{\eta} e^{\frac{16\sqrt{2}iky}{\sqrt{\pi}D^2V_{L_r}}} \right) \quad (8)$$

式(7)中 V_L, i, a, η, k 为参数;式(8)中 $V_L, V_L, i_l, i_r, a, \eta, k$ 为参数。据实际监测获得的沉降值 $S(x, y, z)$ 及坐标 x, y, z , 可反分析出以上各参数的取值。本文利用黄河隧道的沉降监测数据, 采取常用的最小二乘法进行反分析, 获得式(8)的各参数取值, 详见表1。其中, 反分析方法不适用于参数 a , 黄河隧道盾构段主要穿越粉质黏土层, a 取值宜为 0.7。

表1 黄河大堤实测沉降数据反分析获得的参数值

参数	$V_L/\%$	$V_L/\%$	i_l/m	i_r/m	a	η	k
取值	0.625	0.43	22.5	22.3	0.7	0.3	0.29

选取北岸大堤累积沉降最大监测断面为拟合对象, 对于纵向计算工况, 左右隧道均取盾构隧道掘进工作面通过计算断面 100 m, 即左隧道 $y=-100$ m, 右隧道 $y=-100$ m。将表1中反分析获得的参数代入式(8), 得到沉降曲线(见图5和图6)。图5为当 $z=0$ m、14 m 时, 大堤地表的实测沉降数据与三维 Peck 公式横向沉降计算对比。从图5可以看出, 本文提出的超大直径泥水平衡盾构隧道三维 Peck 公式横向沉降计算与实测数据拟合效果较好。从图5还可以看出, 随着深度增加, 沉降槽形态变深, 最大沉降值增加。图6为当 $z=0, 14$ m 时, 大堤地表的实测沉降数据与三维 Peck 公式纵向沉降计算对比。从图6可以看出, 本文提出的三维 Peck 公式纵向沉降计算与实测数据拟合效果较好。由于地表以下设置沉降监测点的工程代价较大, 监测点设置有限, 深层土体的实测沉降数据较少, 以试验分析数据居多。文献[6]根据大量试验分析和实测数据提出“沉降槽形态变化系数”。沉降槽形态变化系数为左右隧道中心间距 L 与沉降槽宽度 i 之比, 沉降槽宽度 i 又与相对埋深、地质条件有关, 详见式(3)。当沉降槽形态变化系数大于 2 时, 沉降曲线出现凸起现象。黄河隧道深层土体的实测沉降数据有限, 未发现沉降曲线凸起现象。在下一节“3 相关参数分析”中, 将结合黄河隧道进行理论分析, 研究随着地表以下竖向深度加大, 沉降曲线的变化趋势。

3 相关参数分析

本文继续采用双洞盾构隧道进行相关参数分析, 隧道盾构管片外径 D 取 15.2 m, 左右隧道盾构中心之间的距离 L 为 34.2 m, 两盾构隧道之间的虚拟中心线与大堤地表最大竖向距离 z_0 为 49.6 m, 以上

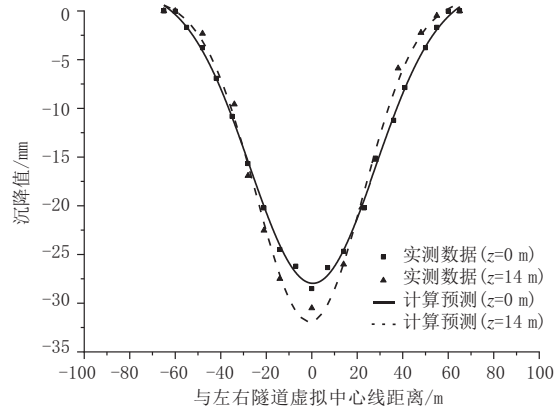


图5 实测数据与横向沉降计算

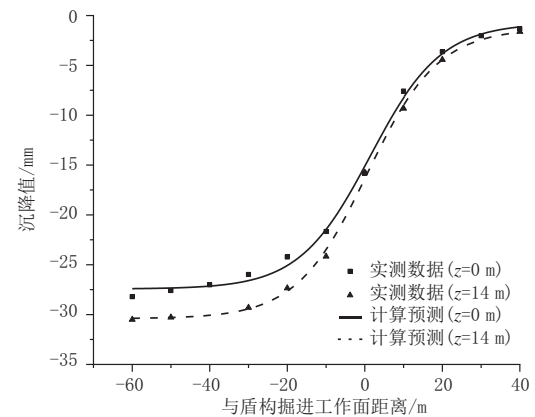


图6 实测数据与纵向沉降计算

参数与黄河隧道相同。为便于各参数分析, V_L 取值为 0.5%, V_L 取值为 0.5%, i_l 取值为 22 m, i_r 取值为 22 m, a 取值为 0.7, η 取值为 0.3, k 取值为 0.29。

3.1 竖向深度

地表以下竖向深度 z 分别取值为 0、14、28 m; 对于纵向计算工况, 左隧道 $y=-100$ m, 右隧道 $y=-100$ m。使用本文提出的双洞隧道三维 Peck 公式, 得到随深度变化的横向沉降曲线(见图7)。与图5类似, 从图7可以看出, 深度 z 由 0 m 增加到 14 m, 沉降槽形态变深收窄, 最大沉降值增加、横向影响范围减少。深度 z 增加至 28 m, 利用上一节提到的“沉降槽形态变化系数”, 可以计算出系数为 2.57, 大于 2, 沉降曲线在左右隧道虚拟中心处向上凸起, 横向沉降不再满足高斯分布。

3.2 左右隧道横向间距

左右隧道盾构中心之间的间距(横向间距) L 分别取值为 28、32、36、40、44、48、52 m。对于纵向计算工况, 左隧道 $y=-100$ m, 右隧道 $y=-100$ m。使用本文提出的双洞隧道三维 Peck 公式, 得到随横向间距变化的地表横向沉降曲线(见图8)。从图8可以看出, 横向间距 L 取值为 44 m 时, 沉降曲线不再满足高斯分布, 也正符合“沉降槽形态变化系数”的计算。

3.3 左右隧道纵向间距

先行掘进的右线隧道工作面与后行掘进的左线隧道工作面之间的间距(纵向间距) l 分别取值为0、20、40、60、80、100、120、140 m。纵向计算工况,右隧道 $y=-100$ m。使用本文提出的双洞隧道三维Peck公式,得到随左右隧道纵向间距 l 变化的地表横向沉降曲线、地表纵向沉降曲线(见图9、图10)。从图9可以看出,随着纵向间距 l 变小,最大沉降值变大,最大沉降点由右隧隧道下方转移至左线隧道方向(隧道左右与图中左右相反),左线隧道导致的大堤沉降值大于右线隧道导致的大堤沉降值。从图10可以看出,随着纵向间距 l 变小,沉降速率变大。同时结合2.3节的黄河大堤沉降数据分析,黄河隧道右线隧道穿越大堤后,大堤土层已产生扰动,等后续的左线隧道在穿越大堤,大堤地层累积沉降及地层损失率更大。双洞盾构隧道施工,纵向间距需合理控制。

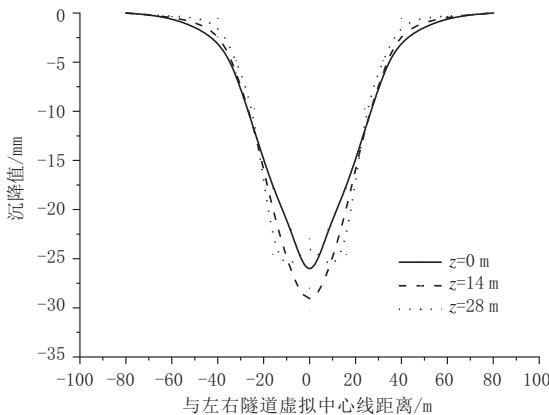


图7 随深度变化的横向沉降曲线

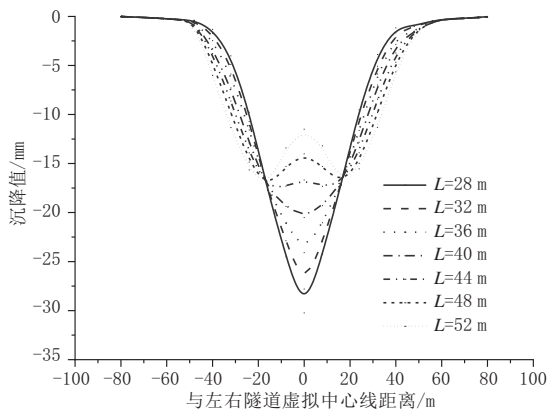


图8 随隧道横向间距变化的横向沉降曲线

4 结语

(1)根据黄河隧道盾构施工的沉降监测数据,黄河大堤最大累计沉降值为30.5 mm,超过施工前的预测值20 mm。面对超大直径泥水平衡盾构下穿黄河及黄河大堤这一复杂工况,基础Peck公式的应用受到局限。

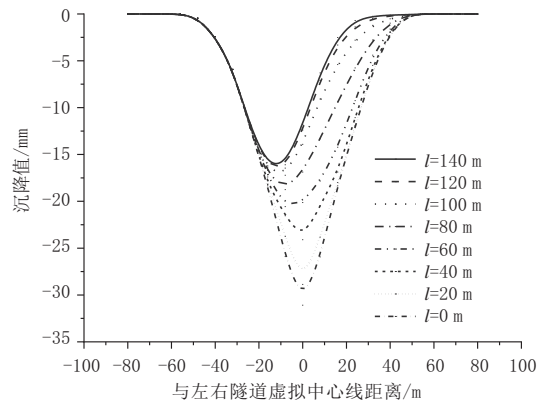


图9 随隧道纵向间距变化的横向沉降曲线

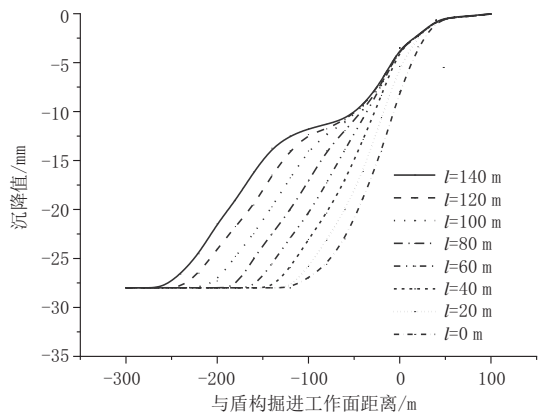


图10 随隧道纵向间距变化的纵向沉降曲线

(2)黄河隧道盾构段下穿地层主要为粉质黏土,盾构机下穿黄河大堤阶段,堤顶沉降变化较小,大幅度沉降发生于盾构机穿越大堤后。

(3)本文提出的超大直径泥水平衡盾构隧道三维Peck公式横向、纵向沉降计算与实测数据拟合效果较好。

(4)随着地表以下竖向深度的增大,沉降槽形态变深收窄,最大沉降值增加、横向影响范围减少。竖向深度超过临界值后,沉降曲线向上凸起,横向沉降不再满足高斯分布。沉降槽形态变化与隧道横向间距、沉降槽宽度、隧道相对埋深、地质条件有关。

(5)先行线盾构隧道穿越大堤后,大堤土层已产生扰动。后行线盾构隧道穿越大堤,大堤地层累积沉降及地层损失率更大。

(6)2022年,济南市黄岗路穿黄河隧道(盾构管片外径16.8 m)开工。2023年,济南市航天大道穿黄河隧道(盾构管片外径14.5 m)开工。随着盾构施工的黄河大堤沉降实测数据的进一步积累,超大直径泥水平衡盾构隧道下穿黄河大堤沉降研究有待进一步验证和完善。

参考文献:

[1]由广明.深埋大直径盾构隧道接缝防水设计与试验研究[J].城市道桥与防洪,2020(1):196-200.

- [2] 温竹茵.盾构隧道预制内部结构与管片连接研究[J].城市道桥与防洪,2020(3):193-197.
- [3] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]// Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: State of the Art Report, 1969: 225-290.
- [4] 张运强,曹文贵,周苏华,等.基于 Peck 公式的盾构隧道施工引起的地层三维沉降预测[J].铁道科学与工程学报,2021,18(1):153-161.
- [5] 陈春来,赵城丽,魏纲,等.基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J].岩土力学,2014,35(8):2212-2218.
- [6] 宫亚峰,王博,魏海斌,等.基于 Peck 公式的双线盾构隧道地表沉降规律[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(5):1411-1417.
- [7] CELESTINO T B, GOMES R, BORTOLUCCI A A. Errors in ground distortions due to settlement trough adjustment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(1):97-100.
- [8] VORSTER T E, KLAR A, SOGA K, *et al.* Estimating the effects of tunneling on existing pipelines[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11):1399-1410.
- [9] ATTEWELL P B, WOODMAN J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil[J]. Ground Engineering, 1982(11):13-22.
- [10] YOSHIKOSHI W, WATANABE O, TAKAGI N. Prediction of ground settlements associated with shield tunneling[J]. Soils and Foundations, 1978, 18(4):47-59.
- [11] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1987, 37(3):301-320.
- [12] 林存刚,刘干斌,吴世明,等.泥水盾构掘进引起的地面沉降——传统计算理论的评析与修正[J].土木工程学报,2015,48(4):111-123.
- [13] GHABOUSSI J, RANKEN R E, KARSHENAS M. Analysis of subsidence over soft ground tunnels [J]. Evaluation and Prediction of Subsidence, 1978, 10(2):182-196.
- [14] 朱牧原,魏力峰,方勇,等.超大直径盾构隧道下穿黄河大堤沉降分析与控制研究[J].现代隧道技术,2022,59(3):211-219.

(上接第 193 页)

- [3] 刘亮强,冯永山.含氟废水处理工艺综述[J].铜业工程,2022(2):114-117.
- [4] 王彩虹.浅谈含氟废水的来源及氟化物执行标准及深度除氟方法[J].皮革制作与环保科技,2023,4(3),16-18.
- [5] 鞠佳伟,高玉萍,何赞,等.pH 对铝盐絮凝剂形态分布于混凝除氟性能的影响[J].环境工程学报.2015,9(6):2563-2568.
- [6] 高洋,程洁红,戴界红.城镇污水处理厂 A₂O 工艺脱氮除磷潜力的研究[J].中国给水排水,2017,33(7):89-93.
- [7] 李宏斌,刘保成,李昌兵,等.杭州某城镇污水处理厂五段式 Bar-denpho 工艺调试运行[J].中国给水排水,2020,36(12):150-154.