文章编号:2096-5052(2026)03-0023-08　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.03

双线大直径盾构隧道施工沉降预测

赵世超[1,2],王剑宏[1,3*],王超[1,4],鲁佳霖[1],杜昌言[1,4]
(1.山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 2.济南城市建设集团有限公司, 山东 济南 250014;
3.早稻田大学理工研究院, 日本 东京 1698555; 4.中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211899)

摘要:为研究大直径泥水盾构双线下穿铁路堤坝施工沉降问题,探讨盾构下穿施工过程中铁路的沉降变形规律,本研究依托济南市济泺路穿黄北延隧道工程开展相关研究。综合利用数值模拟、理论分析与现场监测手段,具体设置 15%、20%、25%等 3 种不同应力释放率的工况并开展分析。研究结果表明:铁路的沉降量总体与应力释放率呈正相关关系,但在铁路中心处该相关性减弱甚至局部呈相反趋势;地面沉降是由盾构穿越前后整个过程中逐渐积累形成的,沉降变化最大的阶段发生在盾构穿越前后 10~20 环之间;通过构建地层体积损失与应力释放的关系,对比 Peck 理论与数值模拟沉降规律,发现数值分析所得的沉降预测结果整体大于现场实际监测数据。基于上述结果得出结论,本研究所采用的模型与分析方法具备一定的安全富裕度,能够为安全预测大直径泥水盾构施工沉降风险提供有力的分析工具。

关键词:盾构隧道;沉降分析;数值模拟;应力释放;地层损失
中图分类号:U456.3; TU433　　**文献标志码**:A

引用格式:赵世超,王剑宏,王超,等. 双线大直径盾构隧道施工沉降预测[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):23-30. Zhao Shichao, Wang Jianhong, Wang Chao, et al. Prediction of settlement during construction of twin large-diameter shield tunnels[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):23-30.

Prediction of settlement during construction of twin large-diameter shield tunnels

Zhao Shichao[1,2], Wang Jianhong[1,3*], Wang Chao[1,4], Lu Jialin[1], Du Changyan[1,4]
(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China;
2. Jinan City Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;
3. Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 1698555, Japan;
4. China Railway 14th Bureau Group Mega Shield Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 211899, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the construction settlement issue of a twin-tube, large-diameter slurry shield tunnel crossing beneath a railway embankment, and to explore the settlement and deformation patterns of the railway during the shield undercrossing process, relevant research was conducted based on the Northern Extension Project of the Jiluo Road Crossing the Yellow River Tunnel in Jinan. In terms of research methods, numerical simulation, theoretical analysis, and field monitoring were comprehensively utilized. The stress release method was adopted for the numerical analysis, and three working conditions with stress release rates of 15%, 20%, and 25% were established and analyzed. It was shown by the results that the railway settlement was generally positively correlated with the stress release rate; however, this correlation was weakened, and an opposite trend was even locally exhibited at the center of the railway. The ground settlement was observed to gradually accumulate throughout the entire process before and after the shield crossing, and the stage with the maximum settlement variation was observed between 10 and 20 rings before and after the shield passage.

收稿日期:2026-04-20;**修回日期**:2026-04-29;**接受日期**:2026-05-22;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52130808)
第一作者简介:赵世超(1980—),男,山东日照人,正高级工程师,主要研究方向为路桥建设与管理。E-mail:15005311600@163.com
*通信作者简介:王剑宏(1975—),男,山东菏泽人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为城市基础设施的建设与运维。
E-mail:j.h.wang@sdu.edu.cn

Furthermore, by establishing the relationship between stratum volume loss and stress release, the settlement patterns obtained by Peck′s formula and numerical simulation were compared. It was found that the settlement prediction results obtained by numerical analysis were generally greater than those obtained from actual field monitoring. Based on the above results, it was concluded that the model and analysis method adopted in this study had a certain safety margin and could provide a powerful analytical tool for the safety prediction of settlement risks during large-diameter slurry shield construction.

Keywords: shield tunneling; settlement analysis; numerical simulation; stress release; ground loss
Received: 2026-04-20; **Revised**: 2026-04-29; **Accepted**: 2026-05-22; **Published**: 2026-09-20

0 引言

随着我国城市轨道交通的快速发展,地下盾构隧道日益增多,受限于空间与规划,盾构隧道下穿既有建(构)筑物的现象愈发频繁。浅覆土条件下的盾构下穿施工极易扰动周边地层,不仅引发地表变形,还易导致冒浆等工程险情。特别是当隧道下穿铁路、堤坝等对变形控制要求极高的重要设施时,过大的地层沉降将严重威胁其结构稳定与运营安全。不均匀沉降往往极易诱发盾构管片接缝张开、错台等次生结构病害[1]。因此,针对浅埋盾构下穿重要设施的沉降变形预测与控制,已成为当前盾构工程领域的重点和难点,开展相关沉降规律研究具有重要的工程现实意义。

盾构掘进施工导致的沉降变形引起了学者们广泛关注。邹浩等[2]结合杭州地铁 2 号线某区间隧道下穿既有铁路路基工程现场监测数据,分析隧道下穿既有铁路时列车轨道、路基坡脚及路肩的位移变化规律;耿招等[3]通过建立三维数值模型,分析围岩塑性区、围岩应力、围岩变形、衬砌变形及地表沉降特征,研究结果表明隧道开挖引起的地表沉降规律明显,既有铁路受隧道开挖的影响在可控范围内;王东星[4]依托黄土地区盾构区间下穿既有西户铁路工程,通过数值模拟、现场监测等方法开展研究,验证盾构隧道下穿既有西户铁路的变形控制技术合理可行;杜明芳等[5]通过有限元数值模拟的方法模拟盾构下穿铁路箱涵工程,研究发现模拟结果与现场实测地表沉降变化趋势基本一致。另外,关于盾构施工扰动地层研究,林存刚[6]在庆春路隧道的现场试验反演所得竖向地应力释放率为 18%;杜洪泽等[7]利用地应力释放法分析了沈阳地铁 1 号线隧道施工,发现地表沉降与地层损失率和地应力释放率成正比,并通过最大地表沉降值推算出该段地层损失率为 1.747%、地应力释放率为 74.071%;张振等[8]结合雄安地铁 1 号线实测数据,验证盾构施工地表沉降的高斯分布特征,修正得到适用于该地区的沉降槽宽度系数(0.81~0.92)与地层损失率(3.3%~6.2%),证实扰动参数的区域性差异;阮永芬等[9]针对昆明湖相沉积地层的特殊性,通过理论推导与参数反演,提出适用于该地区双线盾构隧道的地表沉降预测公式;齐永洁等[10]依托杭州环城北路-天目山路盾构隧道工程,采用数值模拟方法分析土岩复合地层中盾构施工的地表位移规律,推导适用于该地层的地表位移计算公式;郭耀耀等[11]通过构建软土地层双线顶管施工三维模型,探究埋深与间距耦合效应下地表沉降槽的形态演化规律;沈青松等[12]针对矩形顶管地表沉降计算难题,改进随机介质理论被积函数并推导积分结果,提出简化精准的计算方法,经工程验证相对误差约 5%。

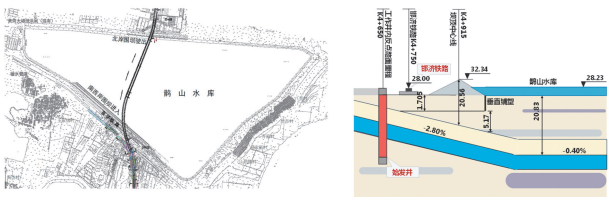
济南济泺路穿黄北延隧道工程下穿邯济铁路与堤坝重要设施,且堤坝脚部的截渗沟埋深极小,亟须开展风险分析研究以确保施工安全。因此,本研究针对上述高风险下穿区段,综合采用三维数值模拟、理论分析与现场监测等方法,重点探究双线大直径泥水盾构施工引起的地表沉降变化规律及预测方法,旨在为该工程及类似地层条件下的项目提供科学的安全施工控制依据。

1 工程条件与研究方法

1.1 工程概况

济南黄河隧道北延工程南起小吕庄,北至国道 G308,隧道全长 4 463 m。其中盾构隧道段总长 2 045 m,自黄河北岸始发 50 m 后穿越邯济铁路,随后掘进不足 100 m 开始下穿鹊山水库南岸堤坝,进入 1 550 m 连续水域段,由鹊山水库北岸堤坝穿出。盾构隧道为间距约 12 m 双线大直径泥水平衡盾构隧道,隧道外径 15.2 m,盾构每环管片长度 2 m,单环掘进进尺 2 m。盾构隧道采用刀盘直径 15.76 m 盾构机,均从南岸始发,西线隧道先行、随后进行东线隧道施工。邯济铁路是冀鲁两地东西横向的交通要脉,

连接京广、京九、京沪三大铁路干线,根据规范要求,路基及轨道的容许沉降量被严格控制在±10 mm以内。围坝坝顶标高 31.80~33.50 m,水库最高蓄水位30.40 m,高于周边地面约 6 m。因此,盾构下穿铁路与堤坝施工要求极高。下穿鹊山水库堤坝及邯济铁路段平面与纵断图如图 1 所示。



(a) 平面示意图　　(b) 纵断面示意图

图 1　下穿堤坝及铁路段平面与纵断面示意图

Fig.1　Schematic diagram of plan and longitudinal sections of the dike and railway crossing section

1.2　地质与隧道条件

工程现场地质条件复杂,地层主要为黏性土、粉土,伴有砂层、钙质结核等。其中,盾构隧道主要穿越两层粉质黏土层,其密度分别为 1 930 与 1 950 kg/m^3,弹性模量 11 100、13 050 kN/m^2。地下水位埋深 1.4~5.8 m,相应标高 20.59~23.14 m,高于截渗沟底部。盾构隧道管片外径 15.2 m,厚度 650 mm,铁路及水库堤坝处埋深 11.7 m,隧道间距约 12 m。本隧道为公轨合建项目,管片混凝土强度等级为 C60,弹性模量 E_c 取为 36 000 N/mm^2。

1.3　研究方法

(1) 沉降计算理论法

隧道施工沉降理论分析一般采用 Peck 沉降槽理论[13],即地表沉降是由地层损失引起;因此施工引起的地表沉降,可以考虑为地表沉降槽体积等于地层损失体积。Peck 基于大量的地表沉降实测数据,提出地表沉降理论公式

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

式中:$S(x)$为距隧道中心线水平距离 x 处的地表沉降,mm;$S_{\max}$为隧道中心线上方的最大地表沉降,mm;i 为沉降槽宽度系数,m,即沉降曲线反弯点至隧道中心线的距离。

最大沉降 $S_{\max}$通过地层损失体积确定

$$S_{\max}=\frac{V_L\cdot A}{\sqrt{2\pi}\cdot i},\tag{2}$$

式中:V_L 为体积损失率,%,反映开挖引起的地层损失程度,通常取 0.5%~2.0%;A 为隧道开挖断面面积,m^2。

沉降槽宽度系数常采用 i 经验公式确定

$$i=K\cdot z_0,\tag{3}$$

式中:z_0 为轴线埋深,m;K 为与地层性质有关的系数(无黏性土取 0.2~0.3,黏性土取 0.4~0.7)。

其他学者基于 Peck 的研究对不同情况进行了修正。Hansmire 等[14]进行了中密到密砂的统计试验,发现开挖体的土体损失体积 V 与沉降槽体积 V_S 相等,在黏性土中也得到了相同的规律。因此,用于表征地层损失的体积损失率,对地表沉降分析尤为重要。

(2) 基于应力释放法的沉降数值模拟

隧道施工地面沉降比较复杂,基于数值模拟的施工沉降预测通常采用简便的地应力释放法,以地应力释放率 γ 来考虑隧道施工对地层扰动影响。通过改变开挖边界支护力来模拟开挖区域土体松动效果,将因开挖减少的围岩支护力以地应力释放率 γ 进行折减,则开挖后隧洞边界的支护力

$$F=(1-\gamma)F^0,\tag{4}$$

式中:F^0为原地层地应力,kPa;F 为开挖后作用在隧洞边界上的水平与竖向支护力,kPa。

由于隧道开挖后作用在隧洞边界上的水平与竖向支护力减少,导致地层发生沉降。根据既有研究[15]与工程经验,泥水平衡盾构一般地层应力释放率考虑 10%~30%。

(3) 地层体积损失与应力释放关系建立

在连续介质力学框架下,应力释放导致围岩向洞内位移,通过积分位移可得体积损失。因此,在给定地层和隧道条件下,可通过力学模型建立地层地应力释放率 γ 与体积损失率 V_L 的关系。

设隧道所在深度的初始竖向地应力为 p_0,则地应力状态可表示为竖直方向:$\sigma_u=p_0$,水平方向:$\sigma_h=K_0p_0$,其中 K_0 为静止侧压力系数,通常 $0.3\leqslant K_0\leqslant 2.0$。

对于圆形隧道(半径 R),在非均匀压力场,孔边径向位移 $u_r(\theta)$是角度 θ(从水平轴起算)的函数。根据弹性力学中 Kirsch 解[16]的位移场,孔壁处径向位移为

$$u_r(R,\theta)=\frac{R}{4G}[(1+K_0)p_0\gamma-(1-K_0)p_0\gamma\cos 2\theta],\tag{5}$$

式中:G 为地层的剪切模量,MPa。设隧道孔壁周围任意一点的初始地应力状态为 σ^{initial},假设支护力按相同比例释放,即开挖后孔壁支护力为$(1-\gamma)\sigma^{\text{initial}}$。则单位长度隧道因径向位移造成的面积损失

$$\Delta A=\int_0^{2\pi}u_r(R,\theta)\cdot R\mathrm{d}\theta。\tag{6}$$

代入 u_r 并积分最后可得体积损失率

$$V_L=\frac{\Delta A}{\pi R^2}=\frac{(1+K_0)p_0\gamma}{2G}。\tag{7}$$

2 数值分析

2.1 数值建模

数值建模主要模拟地质与地形变化，模型选取从盾构始发井开始、穿过堤坝进入水域区的区段，全长 500 m。为减少边界影响，考虑隧道外径（D = 15.2 m）与最大埋深（H=34 m），模型左右边界均取至两隧道外侧 2H 以上的距离。模型总宽度由两侧向外延伸的 4 倍最大埋深、单个隧道外径以及东西两线中心距叠加而成，最终取值为 220 m，模型底部在隧道下方延伸 2H 以上、最深标高取值−45.0 m。此外考虑地层分布的复杂性和数值模拟的局限性，根据土层分布与地质特性进行简化，建立的三维模型如图 2 所示，详细地质条件如表 1 所示。其中，现场堤坝表面与内侧面铺设采用 C20 混凝土材料的 2D 板壳模型。模型四周法向约束、切向自由，底部全约束（$x/y/z$ 向），地表自由。地下水位参考 2022 年 1 月 21 日测量数据，水位高程 28.23 m。水库区内蓄水作为面荷载施加于堤坝内侧和库底。考虑到施工期以短期力学扰动为主，渗流对沉降的影响相对次要；且泥水盾构通过同步注浆形成隔水层，进一步弱化渗流效应。因此，本次数值模拟暂不考虑渗流场耦合，仅在模型中施加初始静水压力场。

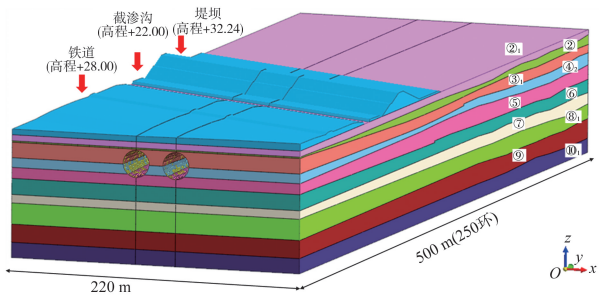


图 2 下穿堤坝及铁路段三维数值模型

Fig.2 3D numerical model of the dike and railway crossing section

表 1 三维模型地质条件

Table 1 Geological conditions of the 3D mode

地层编号	土层名称	弹性模量/（kN·m^{-2}）	静止侧压力系数	泊松比	黏聚力/（kN·m^{-2}）	内摩擦角/（°）	密度/（kg·m^{-3}）
②$_1$	粉质黏土	11 100	0.50	0.333	30.1	30.0	1 930
②	粉土	9 450	0.47	0.320	15.6	32.0	1 940
③$_1$	粉质黏土	13 050	0.57	0.363	31.3	25.5	1 950
④$_2$	粉质黏土	13 950	0.55	0.355	32.8	26.7	1 970
⑤	粉质黏土	14 550	0.50	0.333	36.3	30.0	1 990
⑥	粉质黏土	14 250	0.48	0.324	36.3	31.3	1 970
⑦	粉质黏土	24 150	0.45	0.310	41.0	33.4	1 980
⑧$_1$	粉质黏土	25 950	0.45	0.310	35.3	33.4	1 990
⑨	粉质黏土	43 450	0.43	0.301	57.7	34.8	2 000
⑩$_1$	粉质黏土	43 050	0.42	0.300	59.0	35.5	1 990

注：地层编号见图 2。

2.2 数值模拟方法

盾构施工沉降分析采用应力释放法，结合本工程浅埋、大直径泥水盾构特点及粉质黏土地层条件，并参考类似工程经验与相关研究成果，选取 15%、20%、25% 3 组典型应力释放率，分别对应保守、常规及偏不利工况，以系统分析不同扰动程度下的地层变形响应。本次数值模拟采用摩尔−库伦弹塑性本构，不采用线弹性本构。前文理论计算所用 Kirsch 解为线弹性解析解，仅用于推导单孔弹性位移与体积损失的理论关系；而实际粉质黏土地层在开挖扰动下会产生塑性屈服与非线性变形，线弹性假设无法反映真实地层响应。弹塑性本构可合理刻画塑性变形与应力重分布，更贴近西线单孔施工实际，故用于数值模拟以提高结果准确性。

数值模拟分析的具体步骤如下：开展整体模型的初始应力分析，保持地层应力、将变形归零；模拟分析西线隧道开挖施工，每一环分两步进行，第一步开挖考虑地层应力释放率 15%，第二步安装管片；重复上述步骤模拟分析西线 2～250 环施工；模拟分析东线隧道 1～250 环开挖施工，同样每一环分两步，第一步开挖考虑地层应力释放率 15%，第二步安装管片。针对地层应力释放率 20%、25%，实施了同样的模拟分析。其中，地层应力释放模拟是在开挖区域边界土体单元节点上处施加释放后的支护

反力。

3　结果分析

3.1　地表沉降结果

针对先行西线隧道盾构施工,选取应力释放率 20%的模拟结果进行沉降变化分析。

(1) 地表沉降量与理论比较

西线盾构施工竖向最大沉降量云图如图 3 所示,其中标示了铁路、截渗沟与堤坝位置的最大沉降量。由图 3 可知:隧道开挖施工后,竖向沉降变形最大为 27.3 mm,发生在埋深最浅的截渗沟位置,其次为铁道 26.5 mm,排水沟 24.0 mm,堤坝为 19.0 mm,可见隧道埋深越浅,其沉降量越大。此外,由图 3 可见,隧道断面呈椭圆变形。

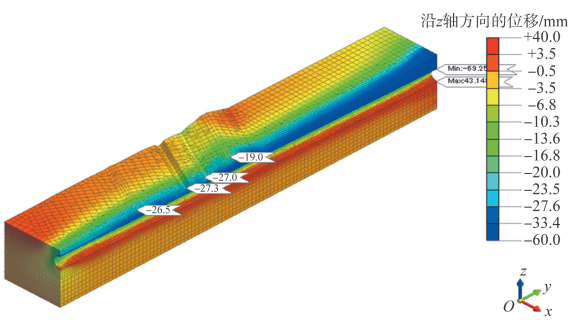


图 3　西线盾构施工最大沉降量云图

Fig.3　Cloud chart of maximum settlement during west line shield construction

根据地质条件(见表 1)与地应力释放率 20%,利用公式(7)计算地层体积损失率,进而利用 Peck 公式(1)计算地表沉降量,并与数值模拟进行了比较,比较结果如图 4 所示。其中,初始地应力按泥水盾构切口压力对应的静水压力取值,堤坝与铁道的初始地应力 p_0 = 165.9, 145.7 kPa,由公式(7)计算得到地层体积损失率 V_L 分别为 3.3%、2.9%。由图 4 可知:地面沉降横向分布以开挖西线隧道为中心形成了沉降槽,且最大沉降 Peck 理论值与数值结果基本一致。但是,地表沉降槽宽度范围存有差异,理论沉降槽宽度大约 60 m,而数值模拟得出的沉降槽分布在大约 160 m 范围内。此外,数值与理论都显示,埋深越小地表沉降量越大。总之,隧道施工改变地层应力场,导致地表发生沉降,形成以隧道中心为最大沉降的沉降槽。

(2) 施工沉降变化规律

铁路、截渗沟与堤坝位置的沉降变化曲线与理论沉降示意图如图 5 所示。由图 5(a)可知:地表沉降量在盾构掘进通过前后变化幅度较大,最大增幅出现在盾构到达前,而最大值发生在穿过以后。铁道中心沉降量在到达前 14 环左右开始快速增大,在穿过后 32 环左右达到最大;而截渗沟与堤坝沉降量分别在到达前 15 环与 12 环开始急剧变大,最大值发生在穿过后 35 环与 20 环。此外,考虑截渗沟、铁道与堤坝中心的标高分别为 22.00、28.00 与 32.24 m,可知隧道埋深越小,沉降量越大。因此,对于浅埋区间盾构施工,在到达前后都要注意开挖面压力及壁后注浆压力以有效控制沉降量。

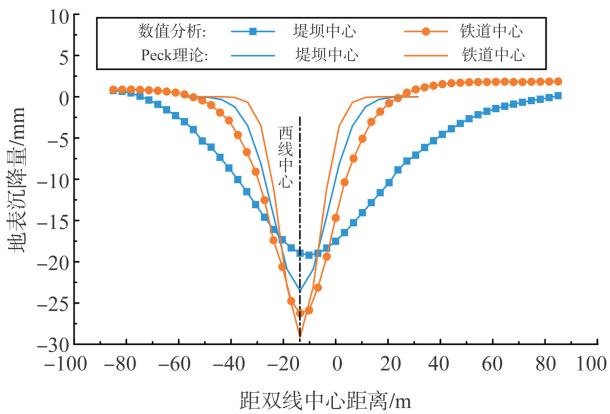


图 4　西线盾构施工沉降槽

Fig.4　Settlement trough of west line shield construction

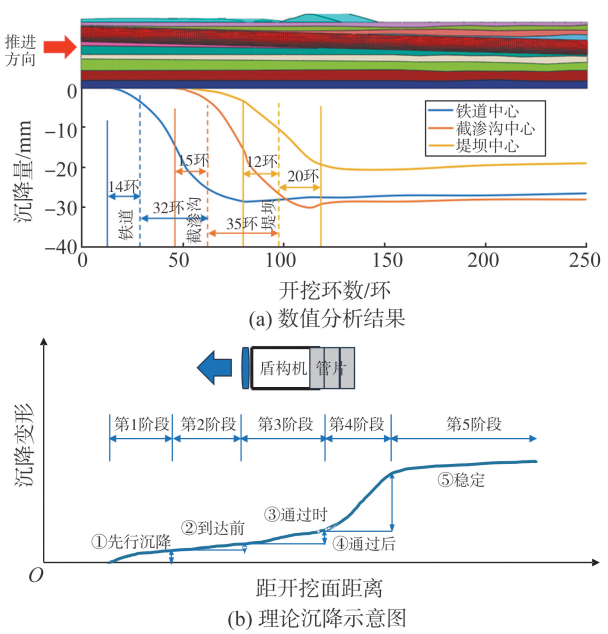


图 5　西线施工沉降变化曲线

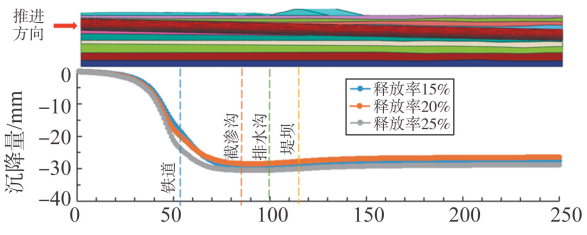
Fig.5　Settlement variation curve of west line construction

关于盾构施工过程沉降变化,数值分析结果与理论在沉降趋势上基本相似。在实际施工的理论规律中,如图 5(b)所示,盾构引起的沉降过程可详细分为:到达前先行沉降;到达时开挖前沉降/隆起;通过时沉降;脱盾后沉降;后续沉降。但本研究数值模

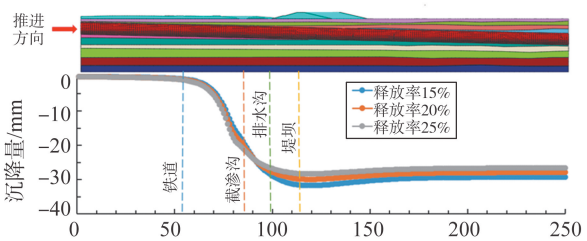
拟所采用的应力释放法，主要反映地层应力宏观释放导致的整体沉降趋势，未能捕捉实际工序（如开挖面支护压力、盾体摩擦及壁后注浆等）带来的局部波动特征。

3.2 应力释放率影响

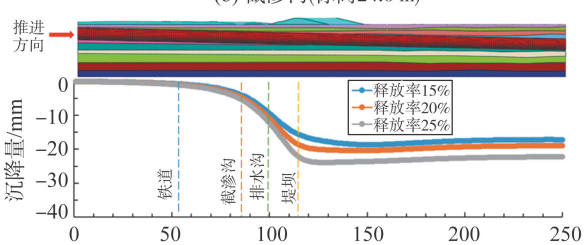
开展 15%、20%、25% 3 种不同应力释放率下西线隧道施工数值模拟，得到铁道、截渗沟与堤坝中心 3 处盾构施工沉降变化如图 6 所示。



(a) 铁道中心(标高28.0 m)



(b) 截渗沟(标高24.0 m)



(c) 堤坝中心(标高32.4 m)

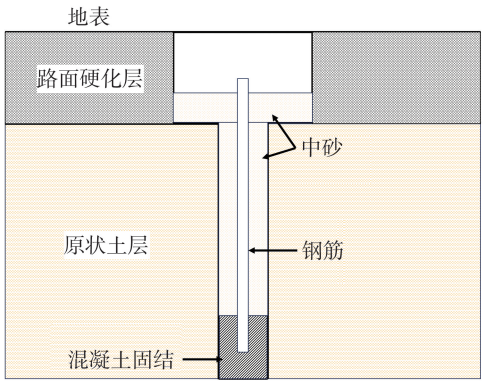
图 6 不同释放率下施工沉降变化曲线

Fig.6 Settlement variation curves under different release rates

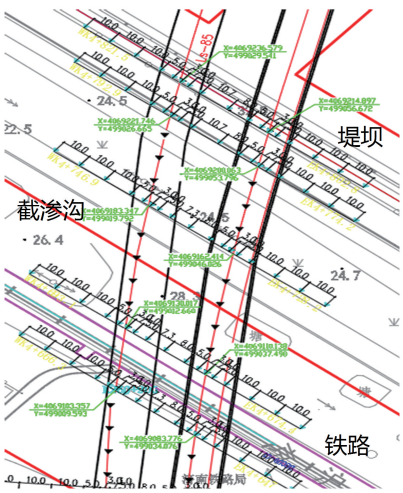
由图 6 可知：地表沉降量大小和应力释放率呈正相关，应力释放率越高，地表沉降量越大。在盾构到达时，沉降增加幅度达到最大，而且此时沉降量与应力释放率呈正相关，但在盾构经过后，沉降量在趋于稳定过程中与应力释放率并无明显关系，有时会出现相反趋势，当应力释放率以 5% 的梯度变化时，地表最大沉降量的增幅均小于 5 mm。在东线开挖安装完毕后，分析不同位置的变形，发现与西线开挖安装过程类似，堤坝、铁道、截渗沟位置沉降量与应力释放率呈正相关。

3.3 监测数据对比验证

铁路、堤坝沉降监测各设置 17 个监测点，监测点具体设定如下，先用水钻开孔，将 Φ25 螺纹钢（长 80～120 cm）沉降标打入钻孔底部原状土中 60 cm，使其顶端低于地面 5 cm，外侧采用套管保护，并用黄砂对钻孔孔隙进行填充至密实。地表沉降监测点构造及布置如图 7 所示。



(a) 监测点构造



(b) 监测点布置

图 7 地表沉降监测布置

Fig.7 Layout of surface settlement monitoring

铁道与堤坝中心的地表沉降对比如图 8 所示。由图 8 数值模拟结果可知：铁道与堤坝中心的地表沉降槽基本一致，东线施工后沉降槽宽度与深度都变大，可见复线施工加剧沉降。埋深更大的堤坝沉降较小、沉降槽呈大 V 形，而铁道中心沉降从西线施工完后的 V 形变成东线施工后的 U 形。可见埋深越小，沉降量越大，相邻隧道的施工影响也越显著。另一方面，现场监测的地表沉降数据与数值模拟结果差异较大，堤坝中心沉降分布在西线施工后呈 V 形，而东线施工完呈双 V 形；且最大沉降量明显小于模拟值。铁道中心沉降未形成沉降槽，东线隧道中心甚至出现局部隆起。

总体而言，数值模拟结果整体大于现场监测数据，表明基于应力释放法的数值模拟可作为盾构施

工沉降预测的安全方法,但无法精准预测大直径泥水盾构施工沉降。东线铁道中心监测与数值模拟差异显著,本工程为大直径、浅埋深双线泥水盾构隧道,施工中切口压力、同步注浆等关键参数存在动态调控时间差,导致铁道中心附近土体未发生持续沉降,局部甚至出现应力重分布引起的隆起现象,与数值模拟理想化的静态应力释放假设存在本质区别。同时,本次数值计算采用摩尔-库伦本构模型,该模型难以反映土体小应变阶段的高刚度特性,会高估施工引起的沉降变形,也是模拟结果偏大的重要原因之一。此外,泥水盾构可通过精细化控制开挖面平衡压力、优化双液浆同步注浆工艺,有效降低地层体积损失、抑制地层应力释放,这也是实测沉降偏小的重要因素。因此,采用应力释放法预测地表沉降时,需综合考虑工程地质、隧道埋深及现场施工控制参数的影响。

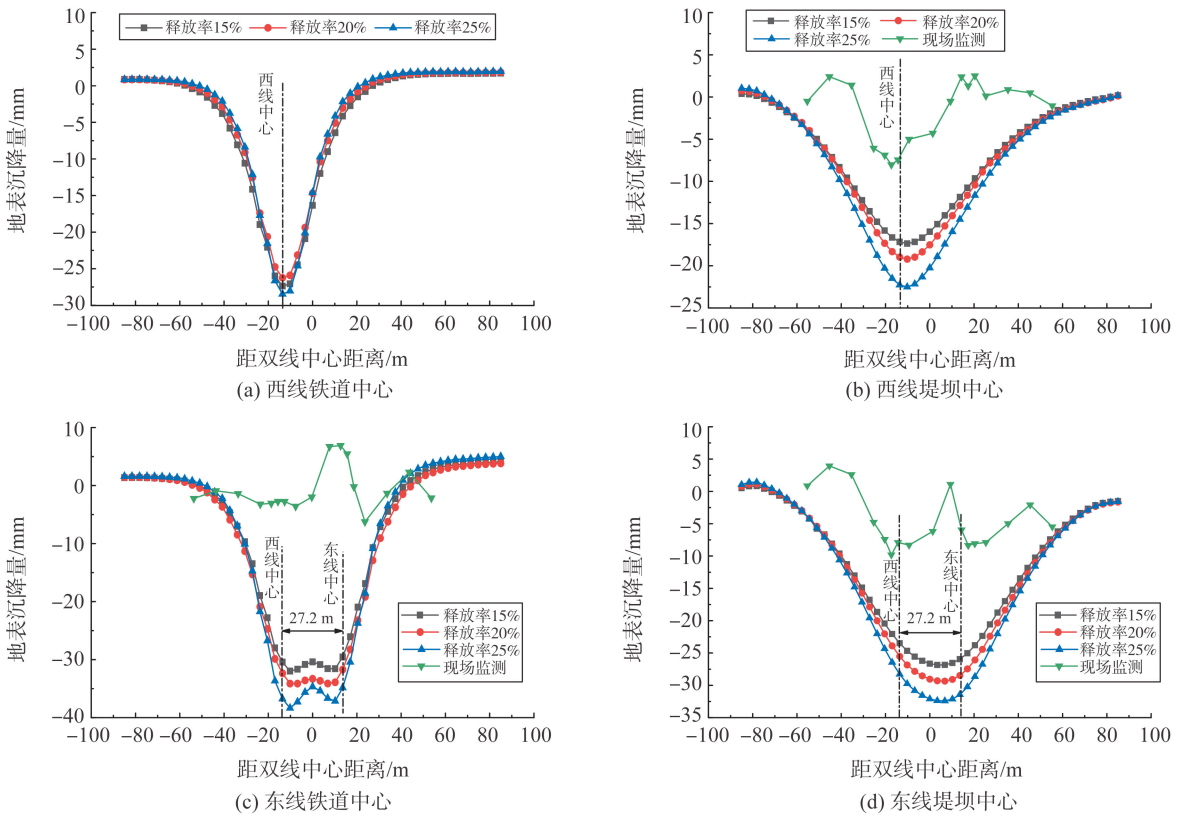


图 8　铁道与堤坝中心的地表沉降对比

Fig.8　Comparison of surface settlement at the centers of railway and dike

4　结论

本研究依托济南济泺路穿黄北延隧道工程,采用理论、三维数值模拟与现场监测等方法研究双线大直径泥水盾构施工沉降,探明关键处的地表沉降变化规律。

(1) 地表沉降量与应力释放率呈正相关,应力释放率越大,地表沉降变形越大,且释放率变化 5% 左右沉降量变化不超过 5 mm;地表沉降量随埋深变小而增大。

(2) 地面最大沉降量是盾构穿越该区域前后整个过程中逐渐积累形成的;地面沉降在盾构穿越前后增幅最大,约发生在盾构切口到达并穿越该区域前后的 10~20 环之间。

(3) 利用提出的地层体积损失与应力释放关系式,有效连接 Peck 理论与基于地应力释放法的数值分析,对比探讨了两者在沉降预测中的差异性及安全余量。

尽管基于应力释放法的数值模拟可作为盾构施工沉降安全预测方法,但很难精准预测实际大直径泥水盾构施工沉降,因为泥水盾构施工切口压力与注浆质量控制极大影响地层体积损失。因此,今后需要综合考虑地质与隧道条件、现场盾构施工控制参数等,进一步研究完善地应力释放法以提高方法适用性及预测准确性。

参考文献:

[1] Liu Xian, Gu Kejie, Zhang Baichuan, et al. Automated quantification of longitudinal joint opening in shield tun-

nels using enhanced multi-modal YOLO and laser scanning[J]. Smart Underground Engineering, 2025, 1(2): 113-134.

[2] 邹浩, 陈金国. 软土地区盾构下穿施工对铁路路基影响分析: 以杭州地铁 2 号线某区间现场监测为例[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(2): 199-206.
Zou Hao, Chen Jinguo. Analysis of influence of shield tunneling in soft soil on upper railway subgrade: a case study of site monitoring of a section on Hangzhou metro line No.2[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(2): 199-206.

[3] 耿招, 孙光吉, 张世奇, 等. 盾构隧道下穿既有铁路稳定性分析[J]. 中外公路, 2020, 40(增刊 2): 212-217.
Geng Zhao, Sun Guangji, Zhang Shiqi, et al. Stability analysis of shield tunnel under existing railway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(S2): 212-217.

[4] 王东星. 黄土地区盾构下穿既有铁路风险及变形控制技术研究[J]. 安徽建筑, 2023, 30(9): 156-158.
Wang Dongxing. Research on risk and deformation control technology of shield undercrossing existing railway in loess area[J]. Anhui Architecture, 2023, 30(9): 156-158.

[5] 杜明芳, 赵文才, 蒋敏敏. 盾构隧道下穿铁路箱涵引起轨道和地表沉降研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 122-129.
Du Mingfang, Zhao Wencai, Jiang Minmin. Study on track and surface settlement caused by shield tunnel passing through railway box culvert[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2020, 39(2): 122-129.

[6] 林存刚. 盾构掘进地面隆陷及潮汐作用江底盾构隧道性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 205-209.
Lin Cungang. Research on shield tunnelling-induced ground surface heave and subsidence and behavior of underwater shield-driven tunnels subject to tidal bores[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 205-209.

[7] 杜洪泽, 李守巨. 基于应力释放的盾构隧道开挖地表沉降分析[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊 1): 241-246.
Du Hongze, Li Shouju. Analysis on surface settlement induced by shield tunneling based on stress release[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S1): 241-246.

[8] 张振, 董亚博, 罗明福, 等. 盾构隧道施工对地表沉降的影响[J]. 土工基础, 2024, 38(5): 816-820.
Zhang Zhen, Dong Yabo, Luo Mingfu, et al. Impact of shielded tunnel excavation on the ground subsidence[J]. Soil Engineering and Foundation, 2024, 38(5): 816-820.

[9] 阮永芬, 邱龙, 槐以高, 等. 昆明湖相沉积地层 Peck 公式研究[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(11): 66-73.
Ruan Yongfen, Qiu Long, Huai Yigao, et al. Research on Peck formula for sedimentary strata of Kunming Lake[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(11): 66-73.

[10] 齐永洁, 朱建才, 周建, 等. 土岩复合地层中盾构施工引起的地表位移预测[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 1054-1062.
Qi Yongjie, Zhu Jiancai, Zhou Jian, et al. Prediction of surface displacement caused by shield construction in soil-rock composite strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 1054-1062.

[11] 郭耀耀, 周爱兆, 涂可诚, 等. 软土地层双线顶管施工地表沉降预测模型[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(5): 2121-2129.
Guo Yaoyao, Zhou Aizhao, Tu Kecheng, et al. Prediction model of surface settlement in double pipe jacking construction in soft soil stratum[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(5): 2121-2129.

[12] 沈青松, 陈烨, 叶盛华, 等. 基于随机介质理论和 Peck 公式的矩形顶管地表沉降改进计算方法[J]. 岩土工程技术, 2025, 39(4): 504-510.
Shen Qingsong, Chen Ye, Ye Shenghua, et al. Improved calculation method for settlement of rectangular pipe jacking based on random medium theory and Peck formula[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2025, 39(4): 504-510.

[13] Peck R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, Mexico: International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMGE), 1969: 225-290.

[14] Hansmire W H, Cording E J. Discussion of "subsidence over soft ground tunnel"[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, 102(3): 259-261.

[15] Nakamura H, Yamazaki I, Nakahiro T, et al. A design method for shield tunnel introducing the concept of stress release ratio[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1999, 1999(638): 241-250.

[16] Kirsch E G.Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre[J]. Zeitschrift des Vereinesdeutscher-Ingenieure, 1898, 42(29): 797-807.

(编辑:张延欢)