

超大直径穿黄河盾构隧道施工影响分析及 韧性提升研究

陈吉祥¹, 冯升明²

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 早稻田大学, 东京都 169-8555]

摘要: 针对盾构隧道穿越施工引起建(构)筑物沉降变形及受大变动荷载作用导致结构使用性能降低的问题, 依托济南黄岗路穿黄隧道工程, 做出以下研究工作: 预测外径 16.8 m 盾构隧道下穿黄河大堤施工引起的沉降变形, 从设计、施工角度提出安全控制措施; 分析外径 16.8 m 盾构隧道在运营期间面临的大变动荷载问题, 提出结构韧性提升对策。研究结果表明: 超大直径盾构隧道穿越施工时引起的大堤沉降满足变形控制要求; 通过合理设计穿越线路、管片设置剪力销和增设注浆孔预埋件、设置掘进试验段、加强施工过程管理、加强监测等措施, 可大幅降低穿越施工风险; 按多工况内力包络进行配筋设计、采用钢纤维混凝土管片和增强管片连接, 是提升隧道结构韧性的有效对策。

关键词: 盾构隧道; 黄河大堤; 大变动荷载; 变形控制; 韧性提升

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0259-06

Analysis of Construction Influence and Study of Tenacity Enhancement of Super-large Diameter Shield Tunneling across Yellow River

CHEN Jixiang¹, Feng Shengming²

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan]

Abstract: For the settlement and deformation of buildings (structures) caused by shield tunneling construction and the reduction of structural performance due to the action of large dynamic loads, relying on the Jinan Huanggang Road Crossing Yellow River Tunnel Project, the research is implemented to predict the settlement and deformation caused by the construction of a shield tunnel with an outer-diameter of 16.8 m crossing under the Yellow River embankment, and to propose the safety control measures from the perspectives of design and construction. And the problem of large variable loads faced by the shield tunnel with an outer-diameter of 16.8 m during operation is analyzed and the countermeasures for the tenacity enhancement of the structure are put forward. The results show that the settlement of embankment caused by the super-large diameter shield tunneling meets the requirements of deformation control. The risk of crossing construction can be greatly reduced through the reasonable design of the crossing route, setting up of shear pins in the segments and adding of embedded parts for grouting holes, setting up of tunneling test sections, strengthening of construction process management, enhancing of monitoring and the other measures. The reinforcement design based on the internal force envelope of multiple working conditions and the use of steel fiber reinforced concrete segments and reinforced segment connections are effective countermeasures to enhance the tenacity of tunnel structures.

Keywords: shield tunnel; Yellow River embankment; large variable loads; deformation control; tenacity enhancement

0 引言

近年来,随着中国经济社会发展和城市化扩建的需要,建设穿行在江河湖海下方的道路交通隧道的

需求日益增加。超大直径盾构隧道技术,因其应用广泛且在设计与施工方面经验丰富,已成为建设道路交通隧道的主流选择。对超大直径盾构隧道的建设和运营,在设计和施工层面受到以下因素的限制和制约:一方面,超大直径盾构隧道掘进施工会对土体造成扰动,导致临近建(构)筑物出现沉降或隆起等变形,进而影响其正常发挥使用功能;另一方面,超大直径盾构隧道的运营受到周边环境条件的

收稿日期: 2025-01-20

基金项目: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司拂晓计划(K2022K127A); 上海建工集团重点科研项目(23JCSF-39)

作者简介: 陈吉祥(1995—), 男, 硕士, 工程师, 从事盾构隧道设计与研究工作。

制约,突变的环境条件往往引起盾构隧道病害,进而可能导致隧道结构的使用性能降低。

针对盾构隧道穿越施工引起的建(构)筑物沉降变形,孙双簏等^[1]通过数值模拟法与工程类比法,从理论和实践两方面分析某大直径泥水平衡盾构在穿越建筑物群过程中对土体的作用机制和对建筑物的影响;吴亚东^[2]、周群等^[3]以上海市北横通道下穿地铁11号线为背景工程,结合盾构施工技术和施工参数,对大直径盾构穿越运营地铁隧道施工进行了研究;周隽^[4]以上海外滩通道近距离穿越运营地铁2号线为背景工程,通过数值模拟分析隧道开挖卸载和不同堆载量对下方隧道位移的影响范围和影响程度,结合工程试验段的推进情况,提出盾构施工参数控制应结合隧道内堆载的施工变形控制理念。

针对盾构隧道受到外部作用导致结构出现病害、进而造成使用性能降低的情况,邵华等^[5]描述了上海地铁某线路因沿线地面突发堆载导致盾构隧道管片产生过量变形,进而出现管片混凝土脱落、连接螺栓断裂和接缝渗漏水等病害(见图1),严重威胁到地铁结构及运营安全;何川等^[6]和李倩倩等^[7]分别分析阐述了盾构法和浅埋按挖法隧道施工给临近的运营盾构隧道带来的安全隐患和使结构使用性能降低的风险。

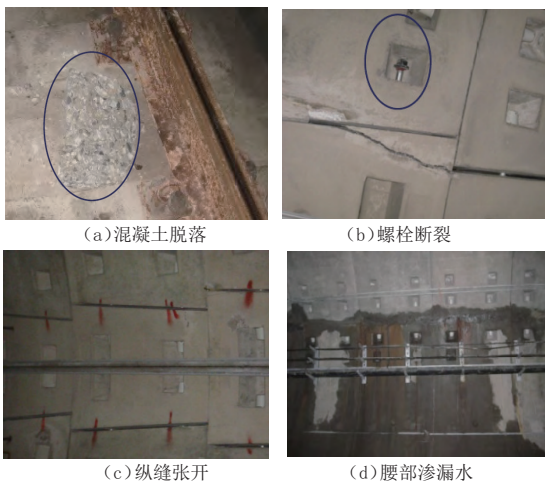


图1 突发堆载引起盾构管片病害

鉴于现有针对盾构隧道项目的研究多侧重于单独的施工阶段或运营阶段,鲜见聚焦于具体盾构隧道项目且贯穿于隧道工程全寿命周期的研究和分析。对于分别在施工期、运营期面临不同类型风险和挑战的盾构隧道项目,由于既有研究多聚焦于“点”,还需要有集成于“面”的分析与讨论,形成解决工程实际问题的系统方案。

依托济南黄岗路穿黄隧道工程,结合地勘资料,针对外径16.8 m盾构隧道下穿黄河大堤引起的变形

进行模拟分析,从设计、施工角度提出穿越施工安全控制措施;针对外径16.8 m盾构隧道在运营期间面临的大堤超高堆载和地下水位季节性变化等大变动荷载问题,从结构受力分析、管片材料和连接构造等多个方面,提出结构韧性提升对策。盾构穿越建(构)筑物设计施工关键技术以及结构韧性提升对策,可为类似项目提供技术指导与经验借鉴。

1 项目概况

黄岗路穿黄隧道工程是济南市黄河两岸核心区内部近距离交通联系通道,是跨黄河通道的重要组成部分。穿黄盾构隧道设计由黄河北岸工作井始发,自北向南依次穿越鹊山水库沉沙池、黄河、济广高速等重要节点,至黄河南岸工作井接收,盾构隧道总体设计方案如图2所示。

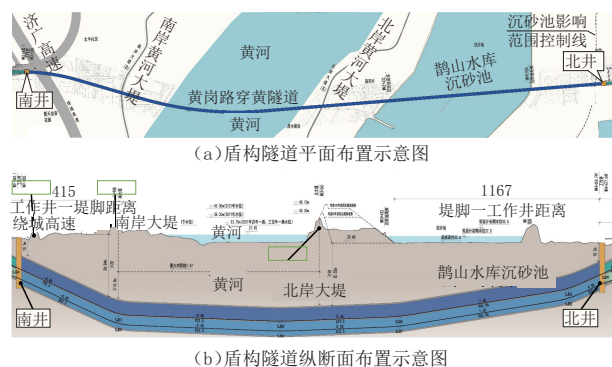


图2 盾构隧道总体设计方案(单位:m)

穿黄盾构隧道设计标准为双向6车道,设计车速为60 km/h,采用单管叠层盾构法隧道断面。穿黄盾构隧道埋深约10.3~49.5 m,隧道外径为16.8 m,内径15.4 m,环宽2.0 m;管片分为12分块,预制混凝土管片环、纵缝均采用斜螺栓连接,通过错缝拼装成环。黄岗路穿黄隧道标准断面如图3所示。

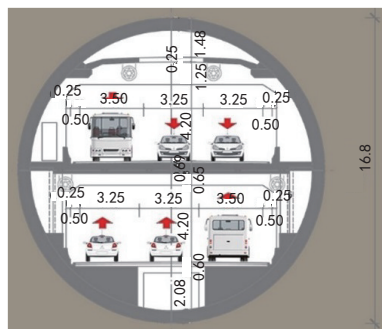


图3 盾构隧道横断面图(单位:m)

2 工程地质

根据地勘资料,穿黄盾构隧道掘进主要涉及到粉质黏土,局部存在粉土、粉砂、细砂、圆砾,其中在

粉质黏土中分布有较多钙质结核和胶结砂层,如图4所示,土层的基本物理力学参数如表1所列。



图4 钙质结核和胶结砂层



图5 现状黄河大堤

3 施工期穿越黄河大堤的影响分析

3.1 穿越节点相对关系

黄岗路隧道采用1台超大直径泥水平衡盾构机施工,开挖直径达17.5 m。盾构机由黄河的北岸向南岸掘进,两次穿越现状黄河大堤。隧址处黄河大堤始建于1890年,为砌石+扣石结构,无桩基加固;盾构穿越黄河北岸和南岸节点,盾构线路与黄河大堤的夹角分别约为63°和78°,隧道最大顶覆土深度分别为49.5 m和44.6 m。黄河大堤现状照片如图5所示,盾构与黄河大堤相对关系位置如图6所示。

3.2 穿越黄河大堤变形分析

3.2.1 Peck公式预测

在盾构法隧道施工推广应用的过程中,国外专家们根据工程实例进行了大量研究,逐渐建立了以Peck沉降槽为基础的预测理论。地表沉降横向分布曲线的形状可用Peck公式合理地表达。Peck假定由施工引起的地面沉降是在不排水的情况下发生的,

故沉降槽的体积等于地层损失的体积^[8]。根据Peck公式计算出隧道施工产生的地表沉降横向分布近似为正态分布曲线,估算式如式(1)~式(3)。

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

$$S_{\max} = V_l / (\sqrt{2\pi} \times i)$$
 (2)

$$V_l = \eta \pi R^2$$
 (3)

$$i = R \times (Z/2R)^{0.8}$$
 (4)

式中: $S(x)$ 为距离隧道中心线处的地表沉降,m; $S_{\max}$ 为隧道中心线处最大地面沉降,m; x 为距隧道中心线的距离,m; i 为沉降槽宽度系数,m; V_l 为盾构隧道单位长度地层损失,m²; η 为地层损失率; R 为盾构机外径,m; Z 为地面至隧道中心的深度,m。

参考相关统计结果^[9],由大直径盾构隧道施工引起的地层损失率在0.02%~3.36%之间,平均值为0.53%,近91.24%的概率集中于0.1%~1.0%之间,不同地质、不同洞径、不同的施工工艺都对沉降的发展

表1 土层参数

地层 编号	岩土名称	天然重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	固结快剪		标贯击数		渗透系数 $K/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	<0.025 mm 粒径含量/%
			黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	实测击数 $N/\text{击}$	修正击数 $N'/\text{击}$		
④	粉质黏土	19.2	30.0	14.0	12.8	9.1	0.03	51.1
④ ₁	粉土	19.3	9.0	27.0	12.6	9.0	0.10	34.9
④ ₂	粉砂	19.5	5.0	27.5	11.4	8.2	4.00	9.0
⑤	粉质黏土	19.4	33.0	14.0	17.6	11.6	0.01	51.7
⑤ ₁	粉土	19.6	9.0	28.0	15.9	10.6	0.25	33.8
⑤ ₂₋₃	粉细砂	20.0	3.0	30.0	24.5	16.1	10.00	6.5
⑤ ₄	圆砾	22.5	0.0	34.0	—	—	—	—
⑥	粉质黏土	19.5	41.5	14.5	25.1	15.1	0.02	52.3
⑥ ₁	粉土	19.8	12.5	29.0	21.7	13.0	0.10	37.9
⑥ ₂₋₃	粉细砂	20.5	4.0	31.5	32.1	19.4	5.00	1.8
⑥ ₄	钙质结核	20.0	20.0	26.0	33.9	20.2	0.05	17.4
⑥ ₅	胶结砂层	22.0	28.0	32.0	—	—	0.50	—
⑦	粉质黏土	19.6	50.0	16.0	32.1	17.3	0.01	54.5
⑦ ₁	细砂	20.5	3.0	34.0	31.5	17.7	5.00	0.8
⑦ ₂	钙质结核	20.0	21.0	27.5	41.0	22.1	0.05	24.7
⑦ ₃	胶结砂层	22.0	30.0	32.0	—	—	0.50	—
⑦ ₄	粉土	19.8	13.5	29.5	27.6	15.5	—	38.0

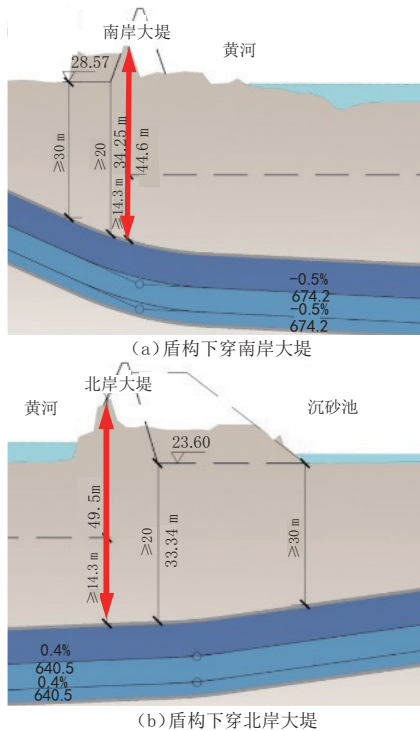


图6 盾构穿越黄河大堤示意图

产生影响,最终体现于理论计算中地层损失率的差异。结合类似工程盾构穿越黄河大堤的实际沉降情况,地层损失率按6.25‰取用,经PECK公式计算,黄岗路隧道穿越施工后,黄河大堤产生的最大沉降为28.4 mm、紧邻大堤修建的坝垛(下称“险工结构”)产生的最大沉降为25.9 mm。

3.2.2 三维数值模拟

采用有限元软件Plaxis3D,建立三维计算模型分析隧道开挖引起的大堤沉降变形。模型的X向(大堤纵向)尺寸为150 m、Y向(盾构隧道纵向)尺寸为270 m、Z(竖向)向尺寸为90 m。土层采用三维实体单元模拟,大堤范围内的主要地层从上至下依次为杂填土、黏质粉土、粉土、粉质黏土、粉细砂、黏土、粉质黏土及全风化辉长岩,土体采用Mohr-Coulomb模型;模型采用地层损失率为6.25‰;模型边界条件为地表自由、四边法向约束、底部法向约束。三维计算模型和计算结果依次如图7、图8所示。

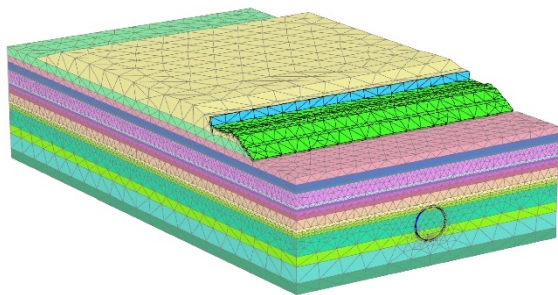


图7 三维数值模型

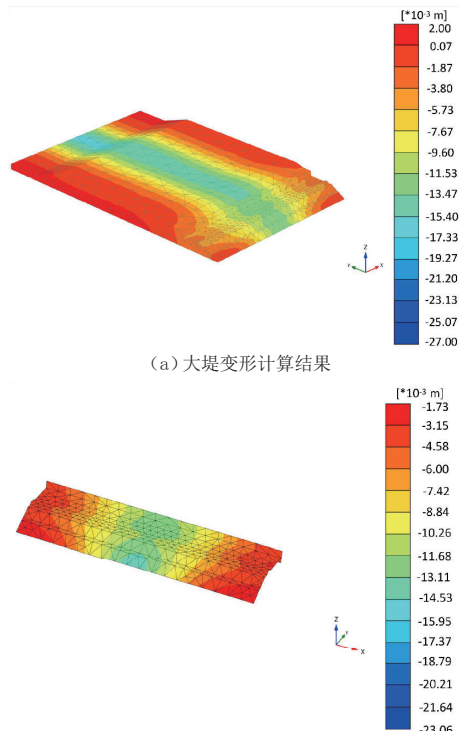


图8 黄河大堤变形云图

根据计算结果可知,隧道穿越大堤会引起地表一定的沉降变形,盾构穿越后黄河大堤最大沉降为27.2 mm,险工结构的最大沉降为23.1 mm。对比Peck公式计算结果和数值计算结果,两次计算结果相符,均满足变形控制要求(不超过30 mm)。

3.3 穿越施工安全控制措施

参考盾构隧道穿越施工的成功经验^[10-12],采取如下技术措施,可进一步优化地层损失率,减少堤防沉降,确保堤防安全。

3.3.1 设计保障措施

(1)保证穿越段设计路线顺直,避免急曲线线形,设计线路与大堤和险工保持较大交角,避免盾构穿越时因姿态调整而造成过大超挖或扰动。

(2)在隧道穿越大堤和险工段时,在管片间设置剪力销,提高隧道的纵向整体刚度,减少不均匀沉降。

(3)在隧道穿越大堤和险工段时,管片采用增设注浆孔环,预留紧急条件下二次注浆条件;同时设置监测及报警系统,根据监测情况进行二次注浆,减小后期沉降。

3.3.2 施工控制措施

(1)在盾构机穿越黄河大堤前,设置一定长度的掘进试验段,对盾构掘进参数进行试验与总结,以期指导盾构穿越施工。

(2)在盾构到达大堤前一段距离时,控制推进速

度,严格控制盾构方向,穿越中减少纠偏次数,控制单次纠偏量,确保盾构机平稳穿越。

(3)预先在大堤上布置监测点,盾构施工中加强监测,及时反馈大堤变形、沉降信息,根据监测情况及时调整施工参数。

(4)盾构穿越前需进行刀盘刀具磨损检测,进行盾构性能检测,避免盾构机在穿越区段停机。

(5)随时调整盾构施工参数,减少盾构的超挖和欠挖,以改善盾构前方土体的塌落和挤密现象,利于减少地层变形及对堤防的影响。

(6)加强同步注浆控制,选取合适的同步注浆材料,及时填充地层空隙,控制沉降变形;同时注入克泥效等盾体填充材料及时填充盾体。

(7)穿越施工过程中,严格控制盾构姿态,采用合理的施工参数,减小对土体的扰动,以做到连续、均衡、平稳推进;严格按照设计路线进行推进,防止引起过大扰动。

(8)提高管片拼装质量和防水条粘贴质量。

(9)必要时,在盾构穿越前及穿越后,对大堤和险工土层进行局部注浆加固。

4 运营期结构韧性提升研究

4.1 大变动荷载挑战

4.1.1 两岸大堤堆高高度大

黄河下游河段是举世闻名的“地上悬河”,自古以来决口改道频繁,洪水灾害严重。根据防洪评价资料和主管部门审批文件,受河道淤积影响,预测黄岗路隧道隧址处黄河百年设防洪水水位标高为43.00 m,较现状设防洪水水位标高增加约9 m。为保证设计防洪流量所需的过流断面,黄岗路隧道在运营期间面临着在两岸大堤进行有计划堆高的挑战,其中在南岸大堤最大堆高约10 m、北岸大堤最大堆高约12 m,如图9所示。综观国内外盾构隧道的建设经验,尚未有在运营中的盾构隧道上方进行如此大规模堆高的先例。

4.1.2 地下水埋深季节性变化大

黄岗路隧道场地的地下孔隙潜水与黄河水相互补给,地下水埋深持续变化。在不同时令,如丰、平、枯水期,场地的地下水埋深存在较大差异。地下水位发生变化,致使盾构隧道的内力和变形也会发生变化,如地下水位显著降低,会引起陆域段盾构隧道受力增加,可能导致管片出现局部开裂、不均匀变形等。黄岗路隧道为百年工程,服役期间面临着地下

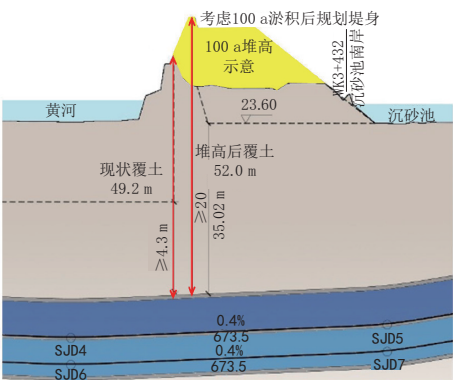


图9 黄河北岸大堤百年堆高示意图

水埋深季节性变化大的问题,因此在盾构隧道的设计过程中,需充分考虑水位变化对管片结构的影响。

4.2 结构韧性提升对策

4.2.1 结构受力按多工况进行包络

在黄河大堤断面结构设计过程中,充分考虑大变动荷载的影响:管片受力计算需结合远期堆高和地下水位季节性变化情况,管片配筋设计按多工况进行包络。以黄河北岸大堤断面为例,施工阶段的管片受力计算按现状覆土深度和常水位进行组合,使用阶段的管片受力计算按现状覆土深度、低水位和大堤堆高活载进行组合。管片受力计算采用修正惯用模型,根据规范《盾构隧道工程设计标准》(GB/T 51438)^[13]建议,衬砌环刚度折减系数 η 取0.7,接头弯矩传递系数 ζ 取0.3,变形计算考虑土体卸载拱作用的影响。北岸大堤使用阶段管片受力最为不利,管片变形满足限制要求,据此对北岸大堤段管片进行配筋设计,相应计算结果如图10所示。

4.2.2 管片掺入纤维,提升受力和抗裂性能

相关研究证明^[14-17],钢纤维混凝土相比普通混凝土在抗裂、抗震、抗疲劳等方面体现出更好的韧性特征。盾构隧道管片的材料选取决定了管片性能、整体安全性和可靠度,为应对大变动荷载的挑战,在黄河大堤断面采用钢纤维混凝土管片,提升管片的受力性能和抗裂能力。

4.2.3 增强管片连接,提高隧道整体刚度

在黄河大堤断面,黄岗路盾构隧道受大堤远期堆高和地下水位季节性变动等大变动荷载影响,从提高结构整体刚度、控制结构整体变形的角度出发,对管片的环、纵向连接进行增强,如图11所示。具体措施有:(1)在管片环间设置34个剪力销;(2)将管片环间的连接螺栓数量由34个增加至68个;(3)在管片环内预埋钢板,并在堆高施工之前,通过焊接钢板提高接缝的抗变形能力。

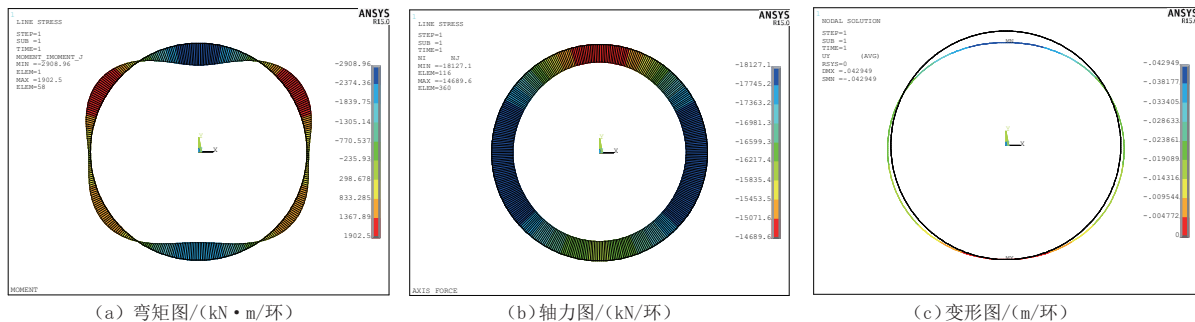
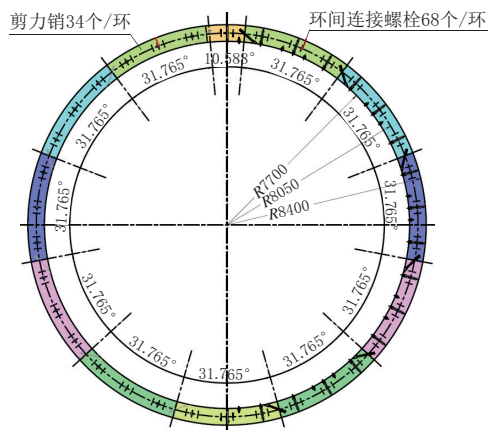
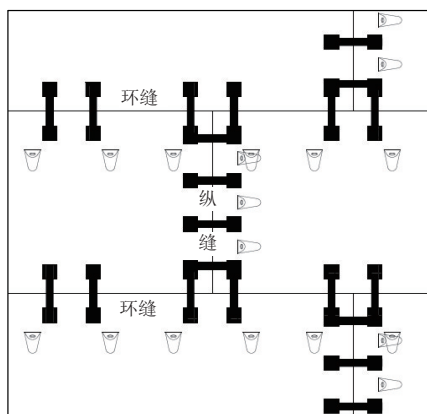


图10 北岸大堤断面管片内力及变形图



(a) 环间螺栓和剪力销分布



(b) 接缝焊接钢板示意图

图11 增强管片连接示意图

增强管片连接,是提升隧道结构韧性的有效对策。

参考文献:

- [1] 孙双麓,沈奕,周质炎,等.大直径盾构隧道穿越建筑物群变形分析与控制措施[J].现代隧道技术,2022,59(2):103-110.
- [2] 吴亚东.大直径盾构下穿运营地铁变形控制研究[J].建筑技术开发,2022,49(9):113-116.
- [3] 周群,李家平,王如路.超大直径盾构下穿施工对运营隧道的影响分析[J].现代隧道技术,2020,57(增刊1):835-842.
- [4] 周隽.软土地层超大盾构穿越运营地铁隧道的变形控制技术研究[J].上海国土资源,2016,37(2):57-60.
- [5] 邵华,黄宏伟,张东明,等.突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J].岩土工程学报,2016,38(6):1036-1043.
- [6] 何川,苏宗贤,曾东洋.盾构隧道施工对已建平行隧道变形和附加内力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(10):2063-2069.
- [7] 李倩倩,张顶立,房倩,等.浅埋暗挖法下穿既有盾构隧道的变形特性分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):3911-3918.
- [8] Peck R B. Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground [C]// Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 1969: 225-290.
- [9] 吴昌胜.大直径盾构隧道施工引起的地层变形研究[D].南京:东南大学,2018.
- [10] 杨嘉齐.大直径盾构穿越黄河粉细砂地层掘进技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [11] 李小雨,陈炜铭,易领兵,等.盾构在高水压粉砂地层中大直径长距离掘进关键技术应用研究[J].施工技术,2020,49(增刊1):585-590.
- [12] 张标,王霖雯,戈玮.盾构近距离下穿既有有线变形影响分析[J].市政技术,2024,42(7):87-94;219.
- [13] GB/T 51438,盾构隧道工程设计标准[S].
- [14] 龚琛杰,丁文其.盾构隧道钢纤维混凝土管片接头极限承载力试验[J].中国公路学报,2017,30(8):134-142.
- [15] 郑爱元,徐斌,陈湘生.海相地层地铁盾构隧道钢筋钢纤维混凝土管片可靠度研究[J].现代隧道技术,2020,57(4):52-58;73.
- [16] 张帆,张戈,徐秀峰,等.钢纤维混凝土管片结构力学特性研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(9):3463-3475.
- [17] 张金生,庄欠伟,李东,等.纤维混凝土对深埋调蓄盾构隧道管片力学性能的影响[J].上海大学学报(自然科学版),2023,29(4):758-768.

5 结 语

(1)根据Peck公式和三维数值分析结果,超大直径盾构隧道下穿黄河大堤施工时,大堤和险工变形均在变形控制标准内,安全风险可控。

(2)盾构穿越黄河大堤,应提前进行刀盘、刀具和盾构机的设备维护,穿越施工过程中应提高施工效率,避免非正常停推,减少地层损失。

(3)黄岗路隧道面临大变动荷载挑战,按多工况内力包络进行配筋设计、采用钢纤维混凝土管片和