文章编号：1009-6582(2022)03-0211-09　　DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.03.024

引文格式：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.

ZHU Muyuan, WEI Lifeng, FANG Yong, et al. Analysis and Control of the Settlement of Super-large Diameter Shield Tunnel Passing under the Yellow River Embankment[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 211-219.

超大直径盾构隧道下穿黄河大堤沉降分析与控制研究

朱牧原[1]　魏力峰[1]　方　勇[1]　付　强[2]　高腾达[2]　蒲　松[1]

（1.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室，成都 610031；2.中铁十四局集团大盾构工程有限公司，南京 250032）

摘　要：为合理控制超大直径泥水平衡盾构下穿黄河大堤过程中产生的沉降，依托济泺路穿黄隧道工程，首先结合理论分析，提出了下穿大堤的盾构参数配置，并通过现场实测数据分析了盾构隧道穿堤过程中大堤段沉降的规律与特点，然后建立数值计算模型，精细化动态模拟盾构隧道掘进过程，围绕切口水压和注浆压力分析盾构参数对黄河大堤沉降的影响，最后对大堤变坡段的掘进参数过渡方案进行比选。结果表明：相较于普通平地段，大堤段在盾尾脱出阶段的沉降初期速率更大且更易受扰动影响，且大堤顶部对深层土体的扰动较为敏感；穿堤过程中提高盾构隧道掘进参数有利于沉降控制，但控制程度存在上限，提前进行掘进参数调整有利于进一步减小沉降，建议在穿堤过程中将切口水压从300~350 kPa逐渐增至500~550 kPa，并提前10~15环进行参数过渡。

关键词：穿黄隧道；泥水平衡盾构；黄河大堤沉降；实测分析；数值模拟

中图分类号：U455.43　　**文献标识码**：A

1　引　言

随着交通隧道建设的发展，盾构法以其安全高效、环境影响小等特点[1]逐渐成为城市隧道建设的首选方案，而在城市越江通道的建设中，采用盾构掘进将不可避免地对土体产生扰动，进而对上方堤坝的安全造成威胁，需要在施工过程中重点关注。

针对盾构掘进对堤坝等构造物的影响已有不少相关研究。在理论研究方面，林存刚等[2]结合实际工程监测结果，与传统理论计算结果进行比较，发现Peck公式、修正Loganathan法、Chi法等与实际拟合度较高，同时对理论计算中拟合效果不理想的部分进行了修正；黄 海[3]对盾构隧道穿越钱塘江引起的堤坝沉降进行研究，发现盾构机通过大堤以及盾尾脱出阶段引起的沉降占总沉降的绝大部分；管 飞等[4]以南京纬三路过江隧道下穿防洪堤为工程背景，结合现场监测和理论计算，发现沉降实测值大于理论值，通过分析堤顶沉降时程曲线，验证了数值方法预测地表沉降的可行性；杜 君[5]通过ABAQUS软件模拟盾构隧道穿越大堤的动态施工过程，发现盾构掘进压力与上覆土模量对地表纵向沉降影响较大。

近年来的工程实践也积累了大量的经验，如张忠苗等[6]通过对杭州庆春路过江盾构隧道穿越大堤引起的地层沉降进行监测，发现盾构隧道在下穿大堤时引起的沉降相较一般地层沉降更大，沉降槽更宽，其横向地表监测曲线可以用Peck公式较好拟合；吴世明等[7]对泥水盾构穿越堤防的风险源进行系统分析，发现了盾构隧道靠近堤防时，泥水压力的

收稿日期：2021-08-30
修回日期：2021-10-04
基金项目：四川省杰出青年基金(2020JDJQ0032)；国家自然科学基金(52078428).
作者简介：朱牧原(1997-)，男，硕士研究生，主要从事隧道工程相关研究工作，E-mail: muyuanzhu1130@163.com.
通讯作者：方 勇(1981-)，男，博士，教授，主要从事盾构隧道方面的教学与研究工作，E-mail：fy980220@swjtu.cn.

设定应将堤防超载作用考虑在内，优化的泥水盾构掘进参数可以有效控制盾构施工引起的堤防位移。任瑛楠等[8]基于杭州地铁1号线下穿钱塘江大堤的沉降控制问题，通过建立隧道-土体-大堤三者相互作用的三维非线性有限元模型，分析穿越施工的控制措施，认为堤坝沉降主要由土体变形引起，应设立试验段，对土舱压力等参数进行控制，并将理论计算沉降与最终实测沉降曲线进行了对比，发现沼气蕴积段的沼气释放对沉降有明显影响；吴为义等[9]应用有限差分计算软件并结合现场实测，发现盾构隧道下穿大堤时堤顶的横向沉降槽呈高斯正态分布，可用Peck公式预估沉降，而大堤深层的土体横向沉降槽可近似用堤顶的沉降反映，且大堤的堤顶及深层土体的水平位移曲线近似呈倒"S"形，最大水平位移出现在地表沉降槽曲线的反弯点；杨建刚等[10]基于上海沿江通道工程，建立三维有限差分模型，对超大直径（约15 m）盾构隧道左右两线下穿导堤的四种不同工况进行模拟，并对导堤加固前后的沉降进行比较，发现盾构隧道施工顺序对堤坝沉降有一定影响，导堤的加固措施可以较好控制隆起，增大其整体稳定性；季 昌等[11]依托盾构隧道下穿上海某老旧大堤工程，对大堤加固方式以及盾构掘进参数控制进行分析与现场试验，最终得出真空联合堆载预压法可以较好控制土压盾构隧道下穿老旧大堤所引起的沉降。

济南济泺路穿黄隧道工程首次在黄河下游地区采用超大直径盾构下穿大堤，严格控制大堤沉降是盾构隧道施工的重点。本文结合施工实测结果，对大堤沉降的主要控制参数进行探究，并结合数值模拟方法对济南穿黄隧道超大直径盾构下穿大堤段的掘进参数进行深入分析，为以后该地区的类似工程提供参考。

2 工程概况

济南市济泺路穿黄隧道工程位于济南市天桥区，采用公轨合建方式，其中盾构段隧道外径为15.2 m，内径为13.9 m，属超大直径盾构隧道，管片宽2 m，为"9+1"的分块方式，错缝拼装。隧道盾构段沿线揭露地层为第四系覆盖层及燕山期基岩，自上而下具体为素填土、粉质黏土、砂层、全风化辉长岩。盾构段埋深为26.30～54.60 m，全断面基本位于粉质黏土层，其中下穿黄河南岸大堤处的地质情况如图1所示。

盾构段下穿的黄河大堤为原民埝基础上加培抬高及灌浆加固而成，大堤两侧坡度均为1∶3，宽约1.4 km，隧道穿越节点为天桥-泺口，砌石坝，现场如图2所示，背河侧有宽约100 m的淤背区。

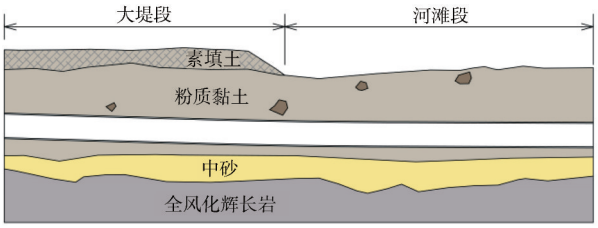


图1 大堤段地质情况

Fig.1 Geological conditions of embankment section



图2 盾构隧道下穿大堤节点

Fig.2 Current situation of the node where shield tunnel is passing under embankment

3 盾构穿堤段施工参数配置

盾构掘进所引起的地面沉降可分为初期沉降、开挖面沉降（或隆起）、盾壳扰动与盾尾脱离沉降以及工后长期沉降四个主要阶段[12]。盾构施工阶段主要涉及前三阶段。因此，在项目实际施工过程中的地表沉降控制措施也分为三个方面。

（1）初期沉降控制

初期沉降为土体受压挤密而产生的固结沉降[13]。在切口水压高于地下水压、开挖面形成高质量泥膜的情况下该沉降数值较小。为保证施工过程中顺利成膜，济南穿黄隧道项目采用重浆推进，即将泥浆比重控制在1.20～1.25 g/cm^3，黏度控制在22～24 s，并适当添加堵漏材料，减少在该地层段的失水率，维持掌子面的稳定。

（2）开挖面沉降（或隆起）控制

开挖面沉降（或隆起）与切口水压的大小和稳定性关系密切。切口水压太大，则地表隆起；太小则可能造成地表塌陷[14,15]，一般根据公式计算切口水压的上、下限值，并根据实际情况进行调整。在济南穿黄隧道工程掘进中，根据上覆土层情况不同，切口水压一般控制在0.2~0.5 MPa之间，采用海瑞克气垫式

泥水盾构机的SAMSON气压调节系统保持压力稳定。在穿越南岸大堤时，由于上覆土高度的变化，在变坡段将切口水压逐步调整至0.526 MPa，如图3所示。此外，控制刀盘转速在1.0~1.2 r/min，盾构掘进速度控制在12~18 mm/min，尽量保持推进速度稳定，确保盾构机均衡、匀速地穿越大堤，以减少对周边土体的扰动。

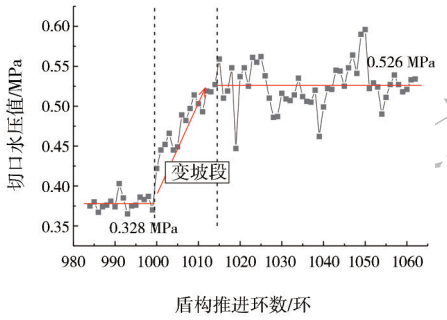


图3　穿堤段切口水压变化

Fig.3　Change in slurry pressure when passing under embankment section

（3）盾壳扰动与盾尾脱离沉降控制

该阶段沉降产生的原因主要包括盾壳与地层之间的摩擦阻力引起的盾壳扰动沉降以及盾尾脱离后盾壳与衬砌之间存在间隙引起的沉降[16]。一般通过同步注浆、向盾体径向孔注入克泥效等方式及时填充盾尾与衬砌之间的空隙。因此同步注浆是该阶段控制地层沉降的重要措施，在掘进时既需保证注浆充分，又要控制注浆压力，防止周边土体因空隙产生收缩塌陷。

济南穿黄隧道工程盾构机壳体与管片形成的空隙为26.91 m^3/环，普通段掘进时按照空隙的150%~180%填充水泥浆，当盾构机穿越黄河南岸大堤时，按照空隙的190%~200%加大注浆量，在穿越大堤时通过调整同步注浆的浆液配比，适当增加水泥的用量来保证同步注浆液更快的硬化速度及更高的强度。

4　现场沉降监测与分析

4.1　沉降监测点布置

在采用上述参数配置的情况下，为进一步掌握超大直径盾构掘进所引起的地表沉降规律，控制下穿大堤时的沉降，在下穿大堤段的堤顶处，设置三处监测点D_1、D_2、D_3，对盾构穿越堤坝前后的堤顶沉降进行记录。另在黄河对岸某平地段选取四处监测点P_1、P_2、P_3、P_4，该段地势平坦，地层单一，掘进期间无明显盾构参数变化，以此处监测结果作为大堤段监测数据的对比。同时为分析大堤段深层沉降和地表沉降之间的关系，在D_3点下方30 m与34 m的位置设置两处深层沉降监测点S_{30}、S_{34}。具体监测点布置如图4所示。

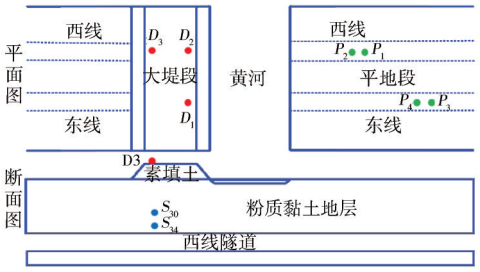


图4　测点布置示意

Fig.4　Layout of monitoring points

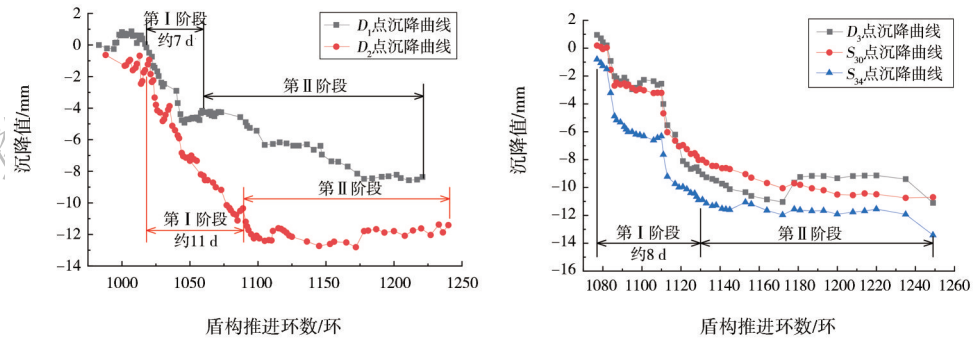
4.2　现场沉降变化规律分析

4.2.1　大堤段沉降变化分析

在盾构机穿越各监测点前5~10 d开始记录测点处沉降，沉降基本稳定后停止记录。其中大堤段各测点沉降监测结果如图5所示，图中横坐标为相应数据记录时掌子面所在的环数。

从监测点D_1~D_3的沉降曲线可以看出，在整个下穿大堤过程中，堤顶监测位置先因盾构机对前方土体的压力作用而发生轻微隆起，当盾构掘进至监测点正下方时达到最大隆起值，此阶段因掌子面处泥水支护以及盾壳的支护作用，总体沉降变化微弱，变化幅度仅在1 mm左右。当盾构机向前推进至盾尾脱离后（D_1点为第1 018环，D_2点为第1 025环，D_3点为第1 077环），沉降迅速增大，且可明显分为两个阶段，其中第Ⅰ阶段为快速沉降阶段，沉降量大，为盾尾脱离后盾尾空隙引起的土体填充以及超挖可能带来的土体损失所造成的沉降，而后进入第Ⅱ阶段，沉降平稳，为固结沉降阶段[6]。

可以看出，对于大堤段来说，第Ⅰ阶段在短时间内造成了50%以上的沉降。其中D_1点在7 d内沉降5.5 mm，约占整体沉降的65%；D_2点与D_3点分别在11 d和8 d内沉降10 mm以上，占到总体沉降的90%以上。大堤段三处监测点在第Ⅰ阶段沉降速率基本接近，约为0.8~1.3 mm/d。值得注意的是，在西线的D_2、D_3点，第Ⅰ阶段沉降与总体沉降均要高于东线的D_1点，这是因为实际施工时，东线先行掘进，已经对大堤造成了一定的扰动[17]。



（a）D_1、D_2点沉降监测曲线　（b）D_3、S_{30}、S_{34}点沉降监测曲线

图5　大堤段沉降监测曲线

Fig.5　Monitoring curves of settlement of embankment section

4.2.2　大堤段深层沉降变化分析

从图5(b)中监测点D_3与深层测点S_{30}、S_{34}的沉降对比可以看出，D_3点与S_{30}、S_{34}点的沉降趋势大致相同，D_3点的沉降相较深层测点不存在较大的滞后性。

其中，距离隧道上方3 m左右的S_{34}监测点总体沉降更大，最终沉降达到15 mm，且在盾尾脱离后沉降的第Ⅰ阶段，其沉降速率与沉降值均高于其余两点，而在第Ⅱ阶段，其固结沉降速率基本与S_{30}、D_3点一致。距离隧道上方7 m左右的S_{30}监测点则与堤顶处监测点D_3在整体沉降值以及各阶段的沉降速率都较为接近，最终沉降分别为12.40 mm与11.36 mm。

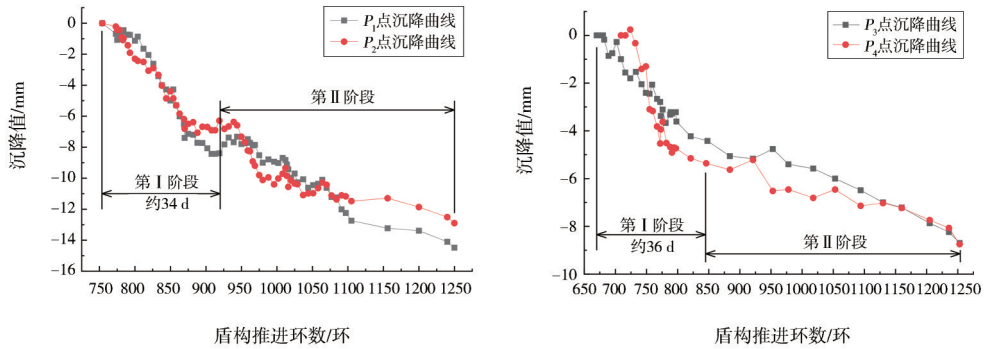
可见在粉质黏土地层条件下，大堤顶部对于深层的土体扰动较为敏感。对于依托工程来说，在埋深约37 m的15 m直径盾构隧道掘进中，高于隧顶7 m及以上的深层土体与地表土体之间不存在明显的沉降差异。从指导施工的角度，在类似工程中，将深层监测点设置在距隧顶7 m范围以内，其深层监测较为有效。

4.2.3　大堤沉降与平地沉降比对

对平地段P_1~P_4监测点的沉降变化进行记录，如图6所示。可以看出，P_1~P_4点在第Ⅰ阶段沉降（盾尾脱离后约35 d）后进入固结沉降阶段，第Ⅰ阶段沉降占总体沉降的60%左右。其中东线P_3、P_4点的总体沉降均明显小于西线P_1、P_2点的总体沉降。

与大堤段D_1~D_3监测点的沉降曲线对比来看，大堤段与平地段沉降均经历两个不同的沉降阶段。但从沉降速率对比来看，平地段的沉降速率要明显小于大堤段的沉降速率，P_1~P_4点第Ⅰ阶段沉降速率为0.16~0.24 mm/d，D_1~D_3点在第Ⅰ阶段沉降速率为平地段的5倍左右。同时平地段的不同沉降阶段在速率上的差异也没有大堤段相应差异明显。

从东、西两线的差异来看，无论是大堤段还是平地段，西线沉降均明显高于东线沉降，不同之处在于



（a）P_1、P_2点沉降监测曲线　（b）P_3、P_4点沉降监测曲线

图6　平地段沉降监测曲线

Fig.6　Monitoring curves of settlement of ground section

大堤段西线测点D_2、D_3点的第Ⅰ阶段沉降变化很大，而固结沉降极少，可见东西两线不同的施工顺序对大堤段有较大影响。

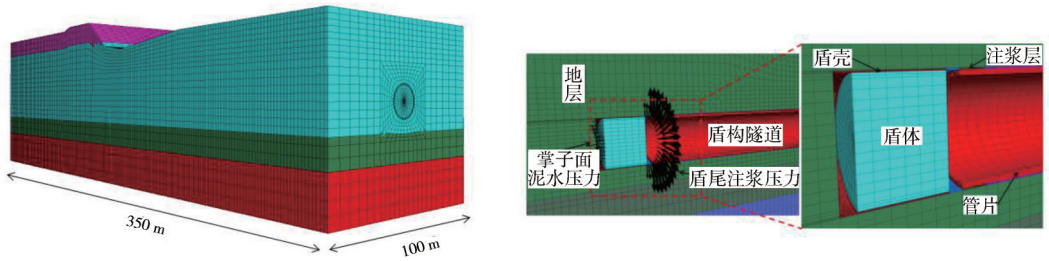
综合以上分析可见，在提高盾构切口水压与注浆压力的条件下，东西两线的最终沉降值在可控范围之内。但在加大上述盾构参数的情况下，盾尾脱离后短时间内仍产生迅速沉降。同时，大堤段相较一般工况也更易受土体扰动影响。在未经控制的情况下大堤段的快速沉降极易引起最终沉降超限。因此，在类似工程中，进一步优化泥水压力与同步注浆参数，减少对大堤段土体的扰动，使沉降尽快进入固结沉降阶段十分必要。

5 沉降控制数值模拟

基于上述分析可知，在盾构掘进过程中切口水压和注浆压力对地表沉降有着较大影响，本文采用FLAC 3D软件建立三维精细化模型模拟盾构隧道施工过程，围绕切口水压与注浆压力进一步讨论掘进参数的改变对大堤沉降的影响。

5.1 模型建立

由于盾构隧道穿越大堤处地层为全断面粉质黏土，地层影响因素变化不大，故可认为影响掘进参数变化的主要因素为隧道埋深。按照此标准，将盾构隧道下穿黄河的过程分为两个部分，即大堤段与大堤前的河滩段。以南岸大堤与河滩为原型建立三维模型，模型考虑边界效应，模型边界一般取3~5倍洞径为宜，因此模型宽度为100 m，长度为350 m，整体模型如图7所示。其中在河滩段，由于粉质黏土渗透系数较小，故不考虑施工过程中地下水位影响，通过在河滩段施加法向应力以模拟河水的对地层的荷载作用。



（a）地层模型　　（b）盾构开挖模拟

图7 数值模型建立

Fig.7 Establishment of numerical model

对盾构隧道施工过程采用精细化动态模拟，同时考虑施工过程中切口水压和注浆压力作用，共向前模拟掘进175环。模拟开挖步骤具体为：

（1）第一环（2 m）对前方土体赋予空模型模拟开挖，盾构开挖后施加梯度力模拟切口水压，并建立壳单元模拟盾壳对地层的支护。

（2）第二至七环激活实体单元，模拟盾构机。

（3）第八环改变注浆层参数，以模拟注浆液对孔隙的填充，其厚度取开挖半径与衬砌半径的差值，为0.287 m。同时施加径向应力以模拟注浆压力。

（4）第九环激活衬砌单元并改变注浆层的参数以实现注浆层的硬化。此后依次重复。

5.2 模型参数选取

将土层分布概化为4层均质土层，采用摩尔-库仑屈服准则，参考实际工程地勘结果选取岩土体参数。盾壳、衬砌管环、盾体、注浆层等部分均采用弹性模型，管片参数参考C60混凝土并对弹性模量进行折减；由于实际盾体结构难以在FLAC 3D中模拟，因此盾构实体采用实体单元代替，同时对其密度进行折减，计算密度根据盾构机的实际重量（共2 000 t）换算得到。具体参数如表1所示。

5.3 盾构下穿大堤参数控制研究

5.3.1 参数敏感性分析

首先进行不同盾构参数对地层沉降影响的敏感性分析。实际工程中，大堤段隧道埋深约40 m，河滩段隧道埋深约29 m。根据前期施工经验，注浆压力的取值一般比切口水压大0.3 MPa左右，大堤段切口水压比河滩段切口水压高约0.15~0.2 MPa，因此根据实际切口水压以及注浆压力的不同，制定计算工况如表2所示。

表1 模型各部分物理参数取值

Table 1 Values of physical parameters of numerical model

名称	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	密度/(kg/m³)
素填土	16	0.25	15	20	1 800
粉质黏土	24	0.30	18	38	1 950
中砂	40	0.20	38	0	2 100
全风化辉长岩	45	0.20	38	0	2 200
盾壳	200 000	0.25	—	—	7 850
盾构机实体	10 000	0.25	—	—	1 000
注浆液	10	—	—	—	2 200
硬化注浆	100	0.30	—	—	2 200
管片	35 500	0.20	—	—	2 500

表2 掘进参数敏感性分析计算工况

Table 2 Working conditions of sensitivity analysis of tunnelling parameters

工况序号	位置	切口水压/MPa	注浆压力/MPa
1	大堤段	0.35	0.65
2		0.40	0.70
3		0.45	0.75
4		0.50	0.80
5		0.55	0.85
6		0.60	0.90
1	河滩段	0.15	0.45
2		0.20	0.50
3		0.25	0.55
4		0.30	0.60
5		0.35	0.65
6		0.40	0.70

每个工况下，选取相应的河滩段和大堤段的切口水压与注浆压力，且均选择在模型第80环的位置（对应实际第998环）将河滩段盾构参数切换为大堤段参数（从模型的第81环位置处开始进入河滩与大堤之间的变坡段）。记录每个工况下堤顶监测点的最大沉降值，该值与盾构参数之间的变化关系如图8所示（以切口水压为例）。

根据图8可知，增大切口水压力有利于减小沉降，在支护力较小时，堤顶与河滩监测点的沉降对支护力的变化较为敏感。当切口水压力从350 kPa增大至400 kPa时，大堤段最大沉降从24.7 mm减小至15.2 mm，当切口水压继续增大至600 kPa时，最大沉降变化则逐渐减缓。可见当压力增大到一定程度时，切口水压与注浆压力对沉降控制的影响有限。

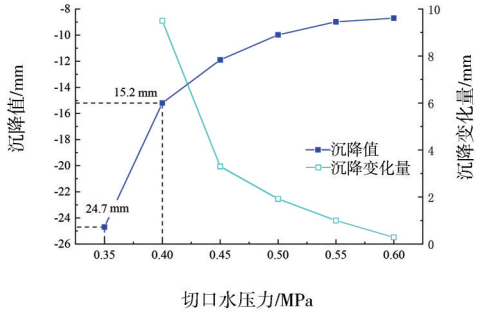


图8 最大沉降随盾构参数的变化

Fig.8 Change in maximum settlement with tunnelling parameters

同时盾构参数过大，也易引起泥水劈裂、管片上浮等现象[17,18]，故支护压力需在合理范围内，下穿大堤段最大切口水压力取值在500~550 kPa较合适，该值与实际工程也较为吻合。

5.3.2 掘进参数过渡方案分析

从盾构参数的敏感性分析可见，大堤段和河滩段掘进参数的优化对沉降控制有着显著的效果，但存在上限值。因此对沉降的进一步控制可以从参数变化位置入手。

事实上，大堤段和河滩段盾构参数的变化存在过渡段，实际施工中该过渡段的确定与参数变化通常只能依据盾构机操作人员的驾驶经验，通过数值模拟制定合理的过渡方案对于隧道的施工具有很强的现实意义。

为简化分析，假设过渡段的掘进参数是均匀变化的，则掘进参数的过渡方案主要包括过渡段环数和过渡段起始位置两部分，以工况5的掘进参数为例，即河滩段以350 kPa切口水压推进，再逐渐将压力过渡至550 kPa。其中过渡段环数取与工程实际较吻合的10环，根据起始环数不同选择8组不同方案，过渡方案如表3、图9所示。

表3 过渡方案计算工况

Table 3 Schemes for tunnelling parameters transition

过渡段方案	掘进参数改变位置	提前变坡点环数
1	第55环	26环
2	第60环	21环
3	第65环	16环
4	第70环	11环
5	第75环	6环
6	第80环	1环
7	第85环	−4环
8	第90环	−9环

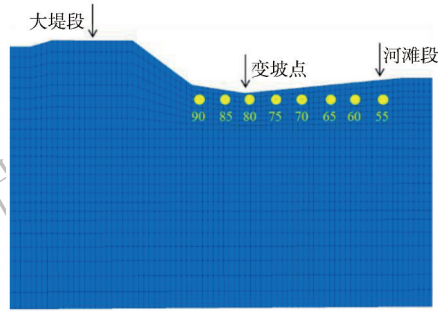


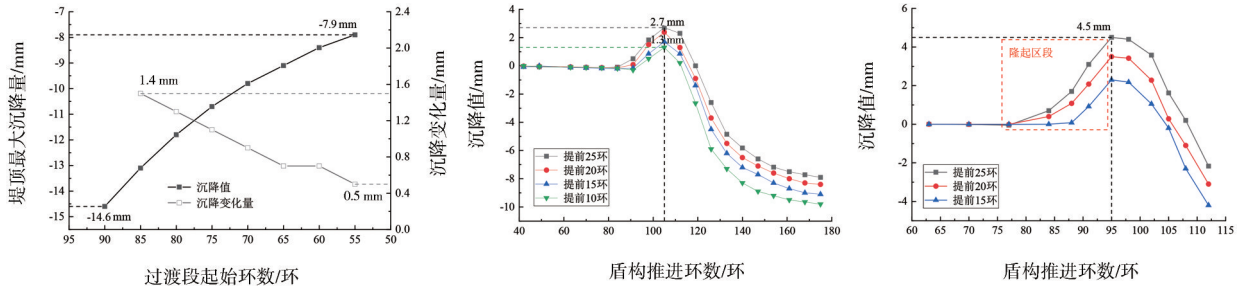
图 9　模型过渡段起始环数

Fig.9　Number of the starting ring for transition section

在堤顶设置监测点，堤顶沉降在不同过渡方案下的变化情况如图 10 所示。

由图 10(a)可以看出，提前进行掘进参数的过渡有利于降低大堤的沉降。随过渡段的起始环数不断减小，堤顶的最大沉降量不断降低，从 14.6 mm 逐渐减小至 7.9 mm。同时，随着过渡段的不断提前，沉降变化量开始减小，这表明过渡段的提前量对沉降的控制也存在上限，应对过渡段进行合理选取。

在过渡段提前的情况下，必然会存在某段掘进过程中切口水压与注浆压力偏大的情况，导致地表产生一定程度隆起。从图 10(b)中不难看出，参数变化的提前使得堤顶先出现 1~3 mm 隆起而后下沉，可以发现其隆起值对部分沉降起到了一定程度的抵消作用，最终减小了堤顶下沉。但同时，对于河滩段来说，因其覆土厚度较小，相较于大堤容易出现过大隆起，从图 10(c)可以看出，在第 95 环时已经出现 4.5 mm 的隆起，并且随提前环数的增长，隆起变化较快，容易出现击穿河床的风险。



(a) 堤顶最大沉降随过渡段变化曲线　(b) 过渡段提前情况下堤顶沉降变化　(c) 过渡段提前情况下河滩隆起变化段

图 10　过渡方案对沉降的影响

Fig.10　Influence of transition schemes on settlement

除此以外，当过渡段设置过于靠前时，长时间过高压力推进同样容易引起泥水劈裂等施工风险，综合以上，合理的过渡段应提前变坡点 10~15 环。

6　结　论

(1) 济南穿黄隧道工程采用超大直径泥水平衡盾构下穿黄河大堤，为重大风险工程。为控制地表沉降，建议采用重浆推进，并稳定切口水压，控制盾构刀盘转速和掘进速度，同时加强监测。

(2) 根据实测数据，相较于平地段，大堤段在盾尾脱离后沉降速率高，且受扰动影响大，堤顶沉降速率是平地沉降速率的 5 倍左右。同时，比较大堤段深层监测点与地表监测点的数据可发现，大堤段对地层沉降较为敏感，当深层测点高于隧顶 7 m 以上时，深层监测结果与地表监测结果趋于一致。

(3) 掘进参数的优化，有利于大提的沉降控制，但达到一定数值后，大堤沉降随切口水压以及注浆压力的变化有限，建议在盾构机穿堤过程中将切口水压由 300~350 kPa 逐渐增至 500~550 kPa。

(4) 在参数过渡段提前改变参数有利于减小堤顶沉降，但当过渡段过于靠前时，容易造成河滩段过大隆起，对于济泺路穿黄隧道工程而言，参数过渡段可提前变坡点 10~15 环。

参考文献
References

[1] 何 川, 封 坤, 方 勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97-109.
HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and Prospects on Constructing Technologies of Metro Tunnels Using Shield Tunnelling Method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97-109.

[2] 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.
LIN Cungang, LIU Ganbin, WU Shiming, et al. Land-surface Subsidence Induced by Slurry Shield Tunneling——Assessment and Modification of Traditional Calculation Methods[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(4): 111-123.

[3] 黄 海. 大直径盾构施工引起的钱塘江大堤沉降研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
HUANG Hai. Research on the Qiantang River Embankment Settlement Caused by the Large-diameter Shield Construction[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.

[4] 管 飞, 张开银. 下穿大堤盾构隧道引起的沉降分析[J]. 公路, 2017, 62(8): 293-298.
GUAN Fei, ZHANG Kaiyin. Analysis on Embankment Settlement Caused by Undercrossing of Shield Tunneling[J]. Highway, 2017, 62(8): 293-298.

[5] 杜 君. 盾构隧道穿越大堤的地表沉降研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
DU Jun. Research on Ground Settlement of Embankment in Construction of Shield Tunnels[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.

[6] 张忠苗, 林存刚, 吴世明, 等. 过江盾构隧道穿越大堤的地层沉降分析及控制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 977-984.
ZHANG Zhongmiao, LIN Cungang, WU Shiming, et al. Analysis and Control of Ground Settlement of Embankments in Construction of Cross-river Shield Tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 977-984.

[7] 吴世明, 林存刚, 张忠苗, 等. 泥水盾构下穿堤防的风险分析及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1034-1042.
WU Shiming, LIN Cungang, ZHANG Zhongmiao, et al. Risk Analysis and Control for Slurry Shield Under-passing Embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1034-1042.

[8] 任瑛楠, 王弘琦, 王建华. 土压平衡盾构施工穿越钱塘江大堤沉降控制分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 936-939.
REN Yingnan, WANG Hongqi, WANG Jianhua. Settlement Control of Qiantang River Embankments during Undercrossing of EPB Shield Tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 936-939.

[9] 吴为义, 孙宇坤, 李 良, 等. 过江隧道大直径盾构下穿引起的大堤变形分析[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(4): 78-82.
WU Weiyi, SUN Yukun, LI Liang, et al. Analysis of Embankment Settlement in Construction of Undercrossing Large-diameter Cross River Shield Tunnel[J]. China Railway Science, 2016, 37(4): 78-82.

[10] 杨建刚. 大直径盾构下穿越导堤数值分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1569-1572.
YANG Jiangang. Finite Difference Analysis of Impact of Undercrossing Super-large-diameter Shield Tunnel on Training Jetty[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1569-1572.

[11] 季 昌, 王 力. 软土地区盾构穿越待改建老旧大堤的变形控制研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(3): 108-117.
JI Chang, WANG Li. On Deformation Control for the Shield Passing through Old Embankment to Be Rebuilt in Soft Soil Area[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(3): 108-117.

[12] 宗树红. 超大直径盾构隧道穿越黄河施工控制技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
ZONG Shuhong. Research on Construction Control Technology of Super Large Diameter Shield Tunnel Crossing the Yellow River [D]. Jinan: Shandong University, 2018.

[13] 苟凌云. 盾构法隧道施工引起地表沉降规律研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
GOU Lingyun. Research on Surface Settlement Caused by Shield Tunnel Construction[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.

[14] 林存刚, 张忠苗, 吴世明, 等. 泥水盾构掘进参数对地面沉降影响实例研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 116-126.
LIN Cungang, ZHANG Zhongmiao, WU Shiming, et al. Case Study of Slurry Shield Driving Parameters′ Influences on Ground Surface Settlements[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 116-126.

[15] 何国军, 马 元, 朱学银, 等. 超大型泥水平衡盾构致地面沉降的原因及控制[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(8): 72-74.
HE Guojun, MA Yuan, ZHU Xueyin, et al. Reasons and Control for Settlement Caused by Super Large Slurry Balancing Shield[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(8): 72-74.

[16] 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.
WU Changsheng. Study on the Ground Deformation Induced by Large Diameter Shield Tunnelling Construction[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
[17] 罗雄文, 张文广, 梁荣柱. 双孔隧道中后掘进盾构对地表沉降的影响[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9): 82-89.
LUO Xiongwen, ZHANG Wenguang, LIANG Rongzhu. Influence of Subsequent Shield Tunneling on Ground Surface Settlement during Construction of Twin Tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(9): 82-89.
[18] 王 滕, 袁大军, 金大龙, 等. 泥水盾构中劈裂压力影响因素研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增 1): 31-36.
WANG Teng, YUAN Dajun, JIN Dalong, et al. Influence Factors of Fracturing Pressure during Slurry Shield Tunnelling[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 31-36.

Analysis and Control of the Settlement of Super-large Diameter Shield Tunnel Passing under the Yellow River Embankment

ZHU Muyuan[1] *WEI Lifeng*[1] *FANG Yong*[1] *FU Qiang*[2] *GAO Tengda*[2] *PU Song*[1]
(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
2. China Railway 14th Bureau Group Mega Shield Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 250032)

Abstract: To reasonably control the settlement of the slurry shield with a super-large diameter in the process of tunnelling under the Yellow River embankment, this paper carries out a case study on the Jiluo Road Tunnel Project passing under the Yellow River. Firstly, the parameters configuration was put forward for the shield passing under the embankment through theoretical analysis. Secondly, the pattern and characteristics were analyzed of settlement in the embankment section where the shield tunnel is passing through according to the field measured data. Thirdly, a numerical calculation model was established to accurately and dynamically simulate the excavation process of the shield tunnel and to analyze the impact of the shield parameters on the settlement of the Yellow River embankment according to the slurry pressure and grouting pressure. Finally, the transition schemes of excavation parameters were compared for the section of the embankment with variable slope. The results show that the initial speed of settlement in the embankment section is greater and more susceptible to disturbances in the phase of the shield tail leaving the segment, compared to the ordinary ground section, and the top of the embankment is more sensitive to disturbance from deep soil masses; In the process of passing under the embankment, it is conducive to settlement control to improve the tunnelling parameters of the shield tunnel, though with an upper limit to the degree of control, while adjusting the tunnelling parameters in advance would be beneficial to further reduce the settlement. Therefore, it is recommended to gradually increase the slurry pressure from 300~350 kPa to 500~550 kPa in the process of passing under the embankment and carry out parameter transition 10~15 rings in advance.

Keywords: Tunnel passing under the Yellow River embankment; Slurry shield; Settlement of the Yellow River embankment; Field measurement analysis; Numerical simulation