

# Experimental Study on Pre-Excavation of Wuzhun Railway Bridge Affected by Shield

Jun Shi

Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai  
Email: 1029058634@qq.com

Received: Oct. 26<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 15<sup>th</sup>, 2018; published: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2018

---

## Abstract

When the shield tunneling passes through the built railway pile foundation, it will cause soil disturbance, which will cause surface settlement and affect the stability of the pile foundation. In this paper, through the shield pre-excavation experiment in a certain section of Xinjiang Metro Line 1, the main factors causing the deformation and settlement of the soil are the propulsion speed, earth pressure, soil discharge, grouting volume, total thrust of the shield construction and cutter torque. According to this, reasonable construction parameters are designed in the later construction to ensure the reliability of the shield construction and the safety of railway operation.

## Keywords

Shield Construction, Deformation Factor, Settlement Analysis

---

# 盾构影响乌准铁路桥预掘进实验研究

施 军

上海隧道工程有限公司, 上海  
Email: 1029058634@qq.com

收稿日期: 2018年10月26日; 录用日期: 2018年11月15日; 发布日期: 2018年11月22日

---

## 摘 要

盾构施工穿越已建成铁路桩基时, 会造成土体扰动, 进而产生地表沉降和影响桩基稳定性。本文通过新疆地铁一号线某区间的盾构预掘进实验, 分析出造成土体变形沉降的主要因素为推进速度、土压力、出土量、注浆量、盾构施工总推力和刀盘扭矩等, 并据此在后期施工中设计合理的施工参数, 以保证盾构施工的可靠性和铁路运营的安全性。

## 关键词

盾构施工, 变形因素, 沉降分析

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国社会经济的发展, 城市人口迅速增长, 现有的城市地面资源呈现匮乏状态, 因而, 大力拓展地下空间有利于解决推进现代化进程中所面临的土地紧缺问题。地铁作为发展地下空间的一种有效手段, 可有效缓解交通堵塞问题, 从而被广泛应用。但是, 为保证地铁安全性往往将其设计成长直线状态进行运营, 从而不可避免的会与已有建筑交叉。在地铁建设中, 近距离的采用土压平衡盾构机施工时则会对周围构筑物产生影响, 造成土体变形沉降, 从而引发安全性问题。故此, 先期分析盾构施工的变形沉降及其影响因素, 并据此提出相关施工建议措施, 对后续施工作业有重要指导意义。

近距离的采用盾构施工推进, 将会对周围结构如桥桩、已有建筑等造成不利影响。根据王立峰[1]的研究可知, 盾构施工时会产生土体扰动, 使得周围土体松动而造成隧道周围土体应力重分布, 对近距离穿越的已有铁路桥桩基而言, 在其垂直于桩体纵向上, 桩体两侧存在不小的压力差异, 从而引起桥桩发生变形或位移, 大大改变了桩基的承载状态。而姜忻良[2]等人分析得出, 地铁隧道施工会对建筑物产生影响, 使得横向倾斜和纵向倾斜随盾构施工出现不同变化, 且整体建筑结构的扭矩出现显著变化。因此, 盾构近距离施工时会对周围已建成结构产生影响而出现不同程度的沉降危害, 减小盾构推进产生的不利风险并采取有效措施加以消除则显得尤为重要。

在工程实际中, 大量研究发现盾构施工的掘进参数与周围地表变形沉降有着极大关联性。颜波[3]等人的研究通过广州某地铁区间进行现场监测和智能化施工, 得出了最优盾构掘进参数; 且提出三阶段的技术工艺, 将地表沉降控制在最佳范围。此外, 金明[4]等人现场监测多个掘进参数对沉降量的影响, 并直接进行结果分析后得出了该区间施工参数与变形相关关系, 对后续工程具有指导意义。

鉴于以上简述, 盾构侧穿施工对乌准铁路正常运营和桩基存在潜在影响。为了保证铁路股道的安全, 将推进前的 20 环作为盾构穿越桥桩的试推进阶段, 在此 20 环的实验段内, 需要把握分析出土量、推进速度、刀盘扭矩等六个主要因素与施工过程中的变形沉降关系, 进而更好把控土体性质分析和土体变形沉降规律, 从而达到正确设定盾构施工参数和正确采用减少土体沉降变形措施的目的。

## 2. 盾构穿越桥桩预掘进实验

### 2.1. 工程概况

本次实验取用新疆地铁 1 号线某区间作为研究现场。该区间位于城北主干道下方, 东西向布置, 区间右线全长 2667.232 m, 左线全长 2663.604 m。区间出站后, 向西穿越乌准铁路桥。乌准铁路桥为双线桥(现状为单线运营), 铁路桥下方为城北主干道, 施工中的乌鲁木齐 1 号线隧道下穿范围桥梁结构型式为后张预应力混凝土连续梁桥。该区间拟采用土压平衡盾构机盾构法施工, 区间隧道在里程 YJDK2+650~YJDK2+765 处侧穿乌准铁路桥桩。区间左线隧道距离桥梁桩基最近距离为 6.6 m, 区间右线

隧道距离桥梁桩基最近距离为 4.6 m。

## 2.2. 确定掘进参数

采用盾构施工法新建地铁隧道时, 根据朱嵘[5]等人的研究可知, 地铁隧道近距离穿越已建铁路桥桩会造成土体松动, 由于松动会诱导整个工作面上土层的土体扰动从而发生变形。所以, 确定施工中各掘进参数对本实验中所观测的变形沉降量的影响具有重要意义。参考颜波[3]等人的研究并结合本实验区间具体工况, 得出了各主要掘进参数的确定原则如下:

1) 推进速度: 由于推进速度过快可能造成正面土体受压而变形隆起; 而过慢的推进速度则易产生较为严重的叩头现象, 使得在施工高程上产生移动而偏离原有的设计轴线。因此, 施工过程中对推进速度有严格要求。理想的推进速度应选取合理参数来保证刀盘切削土壤而非挤压土体。过量的挤压会造成过大地层扰动量, 实际中只需根据实际情况选取稳定参数匀速推进即可。

2) 土仓压力: 土仓压力是一个极为重要的对土体沉降变形产生直接影响的掘进参数, 且其侧面反映影响沉降的数值大小[6]。例如过大的土仓压力, 易造成桥桩上周的地表易发生突出隆起现象, 威胁到安全性能。根据土压盾构平衡原理, 推进土仓压力要与开挖正面土体压力保持平衡来保证施工平稳推进。参考土力学原理, 即可计算出开挖正面土压力值, 但由于侧穿既有结构则必须考虑附加应力, 故而其压力值应当适当增加 0.2~0.3 bar。

3) 出土量: 通过颜波[3]等人的研究可知, 盾构施工排土量多少直接影响到盾构开挖面稳定盾构正面土压力, 控制排土量是控制地表变形的重要措施。实际工程中, 考虑到可能存在超挖和地层损失等现象, 往往出土量的取值为计算理论值的 90%左右为最佳。

4) 注浆量: 盾构机施工前进时, 由于存在盾构外围的建筑空隙, 工程上采用注浆法填充空隙。注浆的质量直接反应后期变形沉降的控制好坏, 因而, 注浆量必须控制在合理范围。盾构施工中由于是机器与人工共同操作会产生渗漏现象, 故此注浆量一般取外围建筑空隙的 1.5~1.8 倍为宜。

5) 总推力: 总推力作为盾构施工的重要参数, 往往直接反映其对土壤扰动的情况。例如, 过大的推力会造成盾构机上方土体向上隆起。故此, 严格控制总推力取值对施工具有重要意义。但实际工程中, 由于地质条件的复杂性决定了准确预算总推力大小的困难性。本次预掘进实验中, 参考了孙捷城[7]等的研究, 确定了总推力在数值计算上主要由盾构侧面与周围土层的摩阻力和盾构掘进的正面阻力之和所构成。

6) 刀盘扭矩: 将刀盘扭矩控制在合理的范围, 以减小对盾构机的磨损, 同时, 以防止推进速度过慢或者产生超挖施工, 进而避免造成施工工期延迟或地表沉降值变化过大。刀盘扭矩主要由刀盘切削土体扭矩等六部分组成, 因此本次实验采用孙捷城[7]等人的计算方法, 在此不赘述。

总之, 多重因素对盾构施工中的地表沉降变形产生影响, 且盾构在施工中对不同因素的敏感不一。所以本次实验通过各盾构掘进参数与地表沉降的实时敏感性分析, 兼顾把握各施工地区地质、土层情况, 定量的研究主要的施工参数与变形沉降值的相关关系。

## 2.3. 确定变形监测位置

盾构施工过程中, 由于土体缺失造成周围土体不同程度的变形而土压力释放。本次预掘进实验采用近距离匀速施工, 则必须对推进影响范围内的掘进参数和沉降量进行重点监测。

本次实验中, 取盾构穿越的 50 m 范围作为监测区段。并沿隧道中心线每 5 m 布置一个沉降监测点, 同时, 各布设 2 条垂直于隧道轴线监测横断面, 每个横断面布设 11 点, 轴线中心一点, 轴线左右各布 5 点, 距离轴线分别为 2.5 m、6.5 m、11.5 m、16.5 m、21.5 m。乌淮铁路桥变形监测详细布置如图 1 所示。

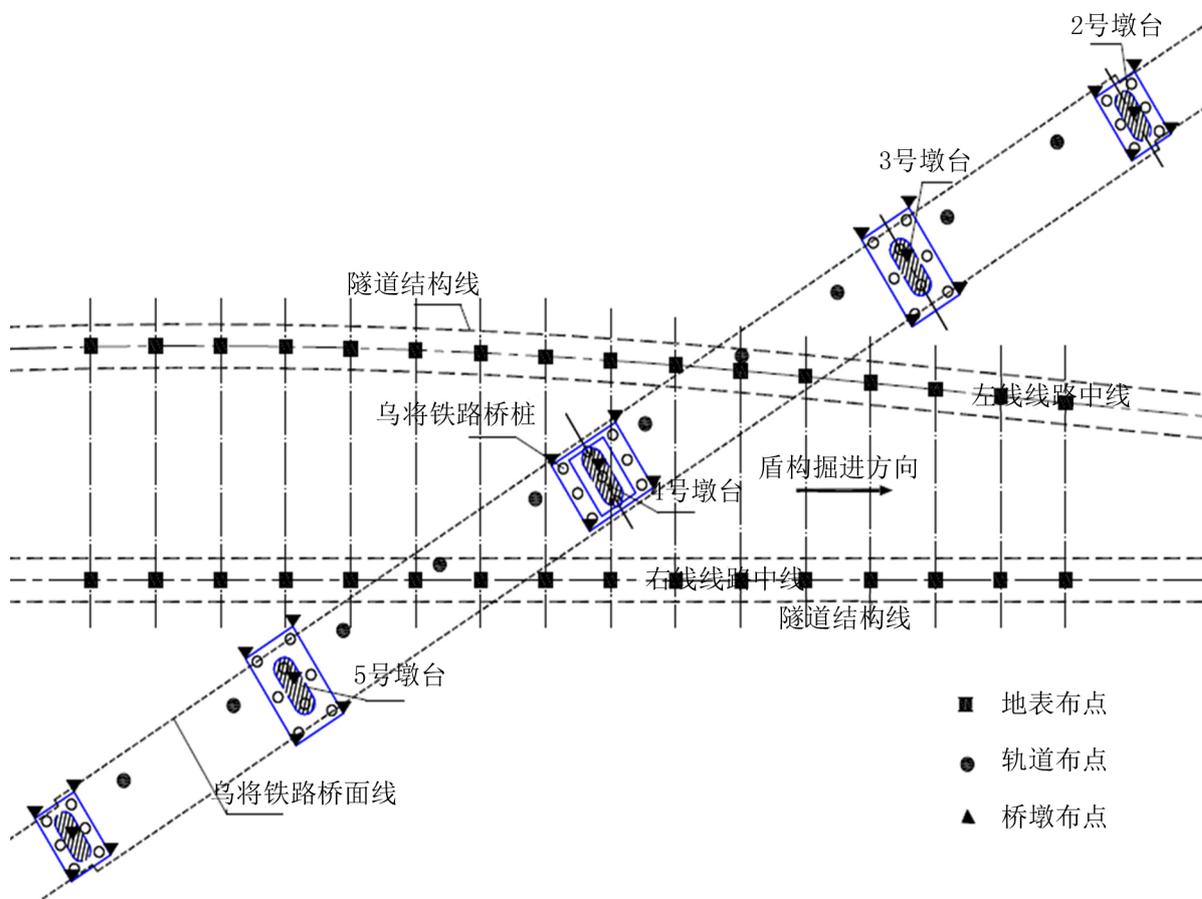


Figure 1. Schematic diagram of the monitoring point of the Wuzhun Railway Bridge

图 1. 乌准铁路桥监测点布置示意图

## 2.4. 其他要求

1) 前期准备: ①穿越桥桩前, 对所有施工人员进行技术交底, 使他们清楚准确的知道各桥桩和盾构穿越时的相对位置, 并针对不同复杂情况应掌握的施工技术。②在施工过程中, 应该及时总结该穿越地段土层地质条件, 掌握其对应的盾构施工方案以及把握施工阶段的盾构推进施工参数和同步压浆量, 进而不断优化施工方案。③盾构掘进至桥桩前 50 米时, 需对盾构施工的各仪器、部件和系统进行检查与调试以达到最优工作状态, 保证穿越桥桩过程中不发生机械故障和压浆管路堵塞情况。

2) 控制要求: ①监测要求: 施工侧穿时, 可适当增加对地面变形、桩位变形和桥桩倾斜程度的观测次数, 并根据实际施工情况而加以合理的调整。②切口土压力施工参数控制: 在盾构穿越桥桩下土层进程中应严格把控切口的平衡土压力与切口压力相关的如总推力、刀盘扭矩等施工参数; 同时, 还应该尽可能的降低土压力变化波动频率。因此, 在此次实验中, 盾构推进速度要以 2 cm/min 为最佳, 出土量也宜不超过计算的理论数值 33.1 m<sup>3</sup>/m。③均匀施工: 为降低推进穿越进程可能产生的不利影响, 需做到平衡均匀的推进通过。④管片拼装控制: 为保证施工按时完成, 拼装时必须安排最干练的工人进行作业以尽量降低安装时间, 与此同时, 拼装结束后, 要继续以合理的速度立即进行下一环的推进工作来防止土体表面的变形。⑤盾构纠偏量控制: 保持盾构前进姿态尽可能的变化不太, 也不可过频的变换其前进姿势。每一环都需检查管片超前量, 隧道轴线和折角变化不能超过 0.4%。⑥同步注浆控制: 把控好同步注浆的剂量和浆液质量; 同时为减少施工中变形沉降, 必须保证同步注浆及时有效的填充掘进前进产生的建筑空隙。⑦信息化施工: 施工时必须密切监测地面变形沉降

数值,做到最少每四小时进行一次全面测量,且将监管数据及时传递给值班人员,在分析过后还必须立即反馈盾构现场人员以供及时调整;穿越铁路桥必须按照实际工况进行全天候的连续跟踪检测。⑧后期补压浆控制:对于施工产生的建筑空隙,在完成填补其空隙的同步注浆工作完成后,会产生由于盾构机不断推进而浆液随时间推移而收缩变形而导致地面沉降的问题,因此视实际情况,在管片脱出盾尾5环后,对管片的建筑空隙进行二次注浆。⑨壁后跟踪控制:待盾构穿越后,必须对桥桩继续进行跟踪监测直至桥桩变形趋于稳定。

### 3. 预掘进实验掘进参数与沉降分析

推进前 20 环作为盾构预掘进实验区段,在本实验段内,主题把握推进速度、注浆量、土压力、出土量、盾构施工总推力和刀盘扭矩等几个主要因素与地表变形沉降的关系,同时,密切监测实验段的变形量和变形速率,从而把握此区间的土体性质和土体变形特点,进而更好的设定施工参数和采取减少沉降的措施,以保证施工的安全可靠。

#### 3.1. 试验段掘进参数分析

本次实验中,对预掘进区段的 20 环按每两环进行划分,并且对每两环施工过程中的推进速度等六个参数进行跟踪监测。图 2 至图 7 所示为各主要掘进参数在预掘进实验阶段内的监测图:

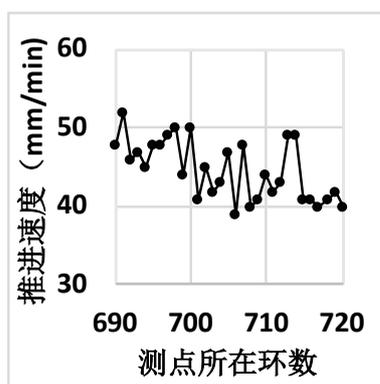


Figure 2. The monitoring map between the location of the measuring point and the propulsion speed

图 2. 测点所在环数与推进速度

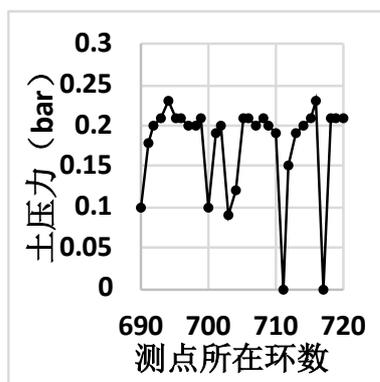


Figure 3. The monitoring map between the location of the measuring point and the earth pressure

图 3. 测点所在环数与土压力

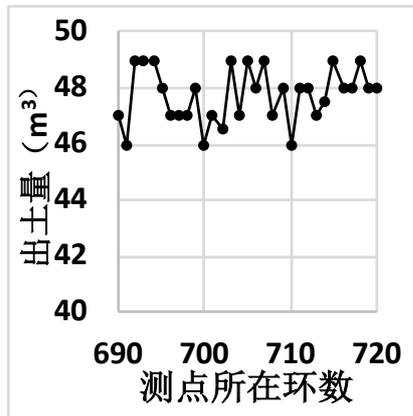


Figure 4. The monitoring map between the location of the measuring point and the amount of soil in the survey

图 4. 测点所在环数与出土量

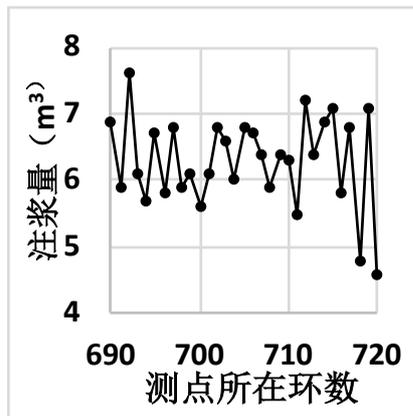


Figure 5. The monitoring map between the location of the measuring point and the amount of grouting

图 5. 测点所在环数与注浆量

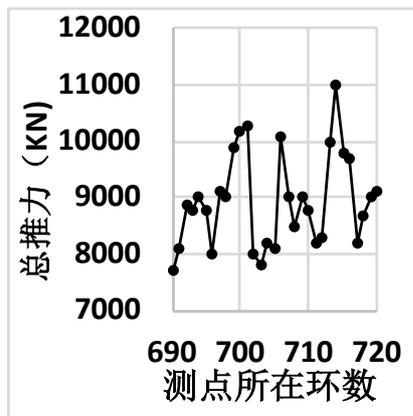


Figure 6. The monitoring map between the location of the measuring point and the total thrust

图 6. 测点所在环数与总推力

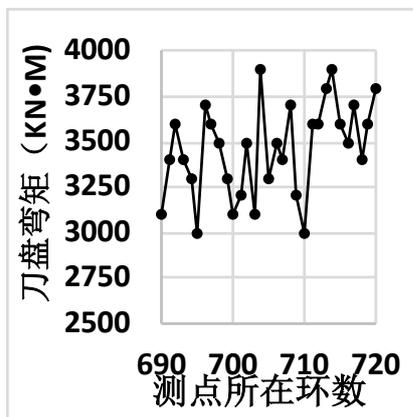


Figure 7. The monitoring map between the position of measuring point and the torque of the cutter head

图 7. 测点所在环数与刀盘扭矩

研究表明,各掘进参数总会不同程度的影响地表沉降变形。故此,本次实验参考了国内大量具体施工案例分析,并结合图 2 至图 7 中所描述的该区间内预掘进实验的各参数情况,确定了后期施工的掘进参数调整方法。具体如下:

1) 推进速度主要分布在 40~50 mm/min 范围内,是为了保证盾构施工平稳推进,且不影响周围桩基承载力所必须采取的措施之一。推进速度要保持均匀稳定,若土层情况良好时,可适当加快推进速度,同时合理增加顶部土压力和推顶力,可有效控制地表沉降。

2) 掘进土压力在前十环由于处于盾构始发阶段,还未形成稳定土仓压力,故而,此后基本保持在 0.2 bar 左右。掘进过程中,存在软质土层与管片拼装过程,故而在施工中存在土压力下降甚至到零值附近。具体施工时,可由土力学原理计算盾构掘进土压力,并考虑到附加引力情况,适当增加 0.2~0.3 bar。

3) 出土量在前期出现小量增加是由于盾构开始是未稳定现象,而后,随着盾构机匀速平稳前进,其出土量保持在 46~49 m<sup>3</sup> 左右则更利于减少土体扰动。出土量与推进速度、土压力密切相关,由于该地区土质条件良好,推进速度保持均匀,但考虑到土压力出现波动,取土量为 0.9 倍左右的理论计算出土量。

4) 注浆量主要控制在 5~7 m<sup>3</sup>/环左右,土层复杂情况不一,掘进速度在出现波动而导致注浆量在该范围内上下波动。应该注意的是,出现渗透量较大的土层可以适当增加注浆量来减少土层损失。此外,注浆过程实际是为了填充建筑空隙,因此,要保证浆液质量,避免沉降过大,若需要时,可采取二次注浆法以减少地表变形沉降。

5) 盾构推进总推力主要在 7000~11,000 kN 范围内。前期盾构机始发状态则不稳定,造成波动向上;而后遇到相对硬质土层,则推力适当增加来保证推进速度均匀。由于总推力过大,而注浆液体需要硬化稳定期,则会加快土体变形速率,因此,总推力应该维持在稳定范围达到控制沉降的目的。根据监测情况,总推力在 9000 kN 左右为宜。

6) 刀盘扭矩主要分布在 3000~4000 kN·m,相对来说,该区段内的土层总体上较均匀,故而扭矩的波动范围还算较小。当然,盾构施工开始后,将会逐渐增加到维稳数值而匀速推进。图中监测表明存在波动情况,为防止过大的地表沉降,因此,本实验区间刀盘扭矩是根据实际地质条件并结合刀盘切削土壤等各部分扭矩计算得出。

### 3.2. 实验段沉降监测分析

盾构施工过程中会对土体产生挤压或松动,从而引起地表及构筑物出现沉降现象。因而,需对预掘

进实验区段的沉降量、变形速率进行监测，以防止出现过大的变形，保证盾构后期施工的安全性和地面铁路的正常运营。图 8 至图 15 为预掘进实验阶段在某几天对各监测点的沉降量和变形速率的监测图。

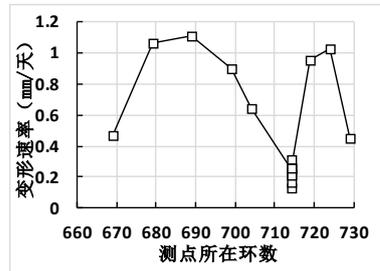


Figure 8. Relationship between the position of the measuring point and the deformation rate

图 8. 测点所在环数与变形速率

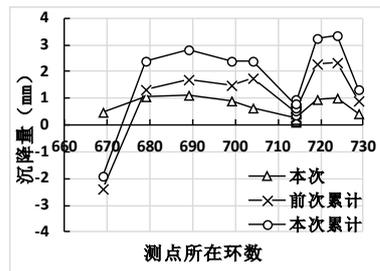


Figure 9. Relationship between the location of the measuring point and the settlement

图 9. 测点所在环数与沉降量

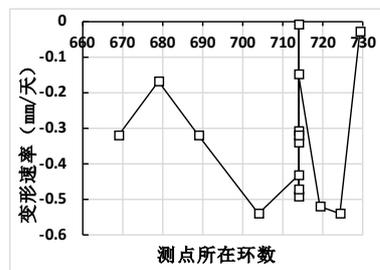


Figure 10. Relationship between the position of the measuring point and the deformation rate

图 10. 测点所在环数与变形速率

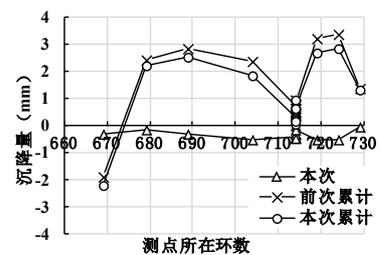


Figure 11. Relationship between the location of the measuring point and the settlement

图 11. 测点所在环数与沉降量

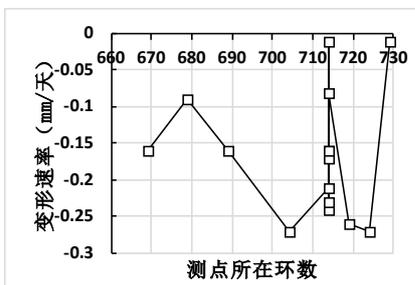


Figure 12. Relationship between the position of the measuring point and the deformation rate

图 12. 测点所在环数与变形速率

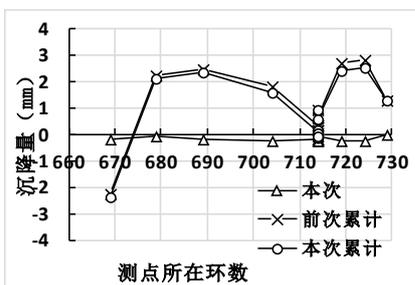


Figure 13. Relationship between the location of the measuring point and the settlement

图 13. 测点所在环数与沉降量

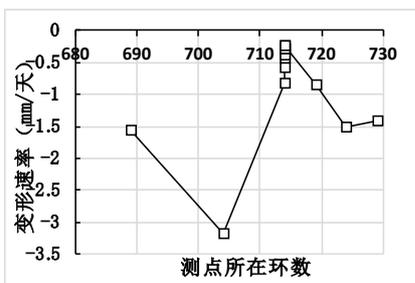


Figure 14. Relationship between the position of the measuring point and the deformation rate

图 14. 测点所在环数与变形速率

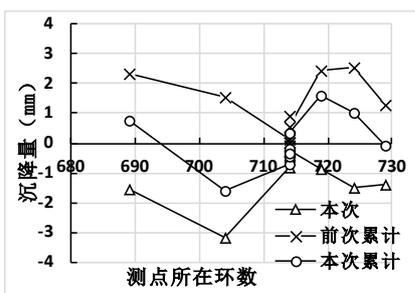


Figure 15. Relationship between the location of the measuring point and the settlement

图 15. 测点所在环数与沉降量

以国内多条盾构穿越铁路桥桩的施工案例作参考,提出了下穿沉降监测预警值要求如下:地表的累计沉降控制在不大于 10 mm 内,沉降速率报警值为 $\pm 1$  mm/天[5]。且由图中可知,7月25~28日的监测沉降量和沉降速率处于监测预警范围之内,因此符合实验阶段的施工要求。

同时,为了后期盾构施工有一个合理的控制标准,并结合本次预掘进实验的新疆地区的土层情况与施工难易程度总结出以下的监测预警方案和处理措施:

地表累计沉降控制在 $\pm 10$  mm,沉降速率报警值为 $\pm 1$  mm/天。依据设计沉降控制标准,监控量测实施按照三级预警进行反馈和控制,一旦出现预警马上启动应急预案,按照应急预案要求采取相应的措施,见表 1。

**Table 1.** Three level warning mechanism decision table

**表 1.** 三级预警机制判定表

预警级别	措施	预警状态描述
黄色预警	增加监测频率	“双控”指标(变化量、变化速率)均超过监控量测控制值(极限值)的 70%时,或双控指标之一超过监控量测控制值的 85%时;
橙色预警	加强支护	“双控”指标均超过监控量测控制值的 85%时,或双控指标之一超过监控量测控制值时;
红色预警	暂停施工	“双控”指标均超过监控量测控制值,或实测变化速率出现急剧增长时。

#### 4. 结论与建议

通过上述研究,本文获得了以下几点结论和建议:

1) 本文总结了盾构近距离穿越铁路桥引起地表变形沉降隧主要影响因素为推进速度等六方面。并结合工程案例,确定了该区间施工时各个掘进参数的确定原则和简单调整方法。但六个参数有机结合对盾构施工和沉降变形的影响还有待研究。

2) 盾构施工穿越已建成铁路桥桩时,根据预实验段沉降量和变形速率的监测,参考大量实际工程案例,分析得出预掘进试验期间并未引起铁路桥出现超出范围的变形沉降。

3) 结合该地区具体工况,确定了变形沉降监测预警值,并据此建立了三级预警机制,为后期盾构施工中出现超出预警值范围的不同情况提供了处理措施。

4) 依据预掘进实验段掘进参数和地面沉降数据,并结合该区间施工情况,于后期施工中提出了以下几点建议:①上部土压力不得低于 0.2 bar,保持满仓推进。②推进速度不宜过快或过慢,保持在 4~5 cm/min。③严格控制出土量,不得超挖,每环出土量控制在 47~48 m<sup>3</sup> 左右。④严格控制注浆量,保证建筑间隙填充完全,每环注浆量 6.5 m<sup>3</sup>,并根据注浆压力适度调整。⑤严格控制总推力和刀盘扭矩,不宜有过大波动。⑥成型的隧道要及时开孔检查注浆填充情况,填充不饱满的要及时进行二次注浆,二次注浆压力不得超 3.5 bar。

#### 参考文献

- [1] 王立峰. 盾构施工对桩基的影响及桩基邻近度划分[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 319-324.
- [2] 姜忻良, 贾勇, 赵保健, 王涛. 地铁隧道邻近建筑物影响的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3047-3052.
- [3] 颜波, 杨国龙, 林辉, 林沛元, 吴文彪. 盾构隧道施工参数化与地表沉降控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2): 1683-1687.
- [4] 金明, 司翔宇, 杨平. 地铁隧道盾构施工参数对地表沉降影响的实验研究[J]. 现代城市轨道交通, 2009(5): 32-35.
- [5] 朱嵘. 盾构隧道施工对周围环境影响分析及施工参数优化[J]. 建筑与发展, 2009(6): 69-74.
- [6] Finno, R.J. and Clough, G.W. (1985) Evaluation of Soil Response to EPB Shield Tunneling. *Journal of Geotechnical Engineering*, **111**, No. 2.
- [7] 孙捷城, 王国富, 路林海, 刘瑞琪, 李罡, 唐卓华. 厚冲击土层盾构掘进参数设定及地表变形规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(3): 487-497.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)