DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250805

盾构隧道下穿漫水桥对其桥梁结构变形影响分析

高鑫崇[1,2],白亚飞[3],苑广友[1,2],刘岩钊[1,2],苏士才[1,2],张锦程[1,2]
(1.北京市市政工程设计研究总院有限公司,北京市 100082; 2.北京市城市桥梁安全保障工程技术研究中心,北京市 100082; 3.北京城市排水集团有限责任公司,北京市 100013)

摘 要: 以南水北调某支线工程盾构隧道下穿某漫水桥为工程实例,采取有限元数值模拟方法对盾构隧道下穿漫水桥施工全过程进行模拟,并通过计算分析提出了桥梁变形控制指标,结果表明盾构隧道下穿漫水桥施工对桥梁桩基产生了不同程度的沉降,但是桥梁各项变形均小于控制指标,能够保证盾构隧道施工安全穿越漫水桥。

关键词: 盾构隧道;下穿施工;漫水桥;桩基沉降;变形影响分析
中图分类号: U443.15;TU997 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)01-0242-06

Analysis on Influence of Shield Tunneling Down-crossing Submersible Bridge on Its Bridge Structure

GAO Xinchong[1,2], BAI Yafei[3], YUAN Guangyou[1,2], LIU Yanzhao[1,2], SU Shicai[1,2], ZHANG Jincheng[1,2]
(1. Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Urban Bridge Safety Assurance, Beijing 100082, China; 3. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Taking the shield tunneling down-crossing a submersible bridge in a branch project of the South-to-North Water Diversion Project as an engineering example, the finite element numerical simulation method is adopted to simulate the entire construction process of the shield tunneling down-crossing the submersible bridge. Through calculation and analysis, the deformation control indicators of the bridge are proposed. The results show that the construction of the shield tunneling down-crossing the submersible bridge causes varying degrees of settlement in the bridge pile foundation. However, each deformation of the bridge is all smaller than the control indicators, which can ensure the safe passage of shield tunnels through submersible bridges during construction.

Keywords: shield tunnel; down-crossing construction; submersible bridge; pile foundation settlement; deformation impact analysis

0 引 言

近年来我国地下工程建设发展迅速,盾构法作为一种成熟的施工工法广泛应用于我国地下工程建设中,在城市中建设地下工程经常出现穿越既有桥梁的情况。盾构隧道施工会破坏地层的力学平衡,对周围桥梁基础造成差异沉降。漫水桥作为一种较为特殊的桥梁形式,往往建成年代较早,并没有考虑后期地下工程穿越工况,对新增的差异沉降较为敏感。故需要严格控制盾构隧道下穿时对漫水桥梁所造成的变形影响。贾龙飞[1]通过数值模拟研究了地铁盾构区间穿越跨河桥施工对桥梁的附加变形影响,并提出了工程优化措施;刘明高[2]通过三维数值模拟分析研究了超大直径盾构隧道的掘进力、注浆压力对桥梁桩基位移和内力的影响;李新章[3]研究了明开管道基坑施工对既有铁路桥墩的影响;吴华州[4]利用数值模拟研究了盾构隧道下穿施工对箱涵结构的影响规律。高磊[5-6]对电力隧道和地铁穿越桥梁的前评估方法进行了研究和探讨;刘能文[7]提出了地铁隧道穿越桥梁时,桥梁结构改造的思路和方法;杨琳杰[8]通过数值模拟和试验相结合的方法研究了盾构区间下穿桥梁桩基托换技术的各项设计参数对托换结构的影响程度;李兵[9]通过有限元软

收稿日期: 2025-08-15
基金项目: 北京市市政工程设计研究总院有限公司科研项目"暗挖施工穿越既有道路设施评价体系与变形控制指标研究"(2025-BKDL-026)
作者简介: 高鑫崇(1994—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计、咨询评估工作。

件数值模拟了地铁区间施工对邻近地下通道的影响；张照太[10]采用数值模拟方法，精细化模拟地铁竖井及横通道开挖施工，研究施工对既有人行天桥的变形规律，提出了对桥梁的保护措施；金晶[11]对天然气管线穿越高速公路桥梁进行计算分析，指导了管线路由优化穿越位置；刘志鹏[12]对地下管线、周边建筑物和土体进行了变形监测，给出了综合管廊顶管施工对周围土体的变形规律；杜壹伦[13]通过有限元软件Plaxis模拟盾构掘进穿越黄浦江的过程，预测出盾构施工对两岸防汛墙造成的影响；钟伟程[14]采用有限元软件对盾构区间在岩溶发育区地层穿越市政桥梁进行数值模拟分析，研究了在岩溶强发育地层中盾构施工对附近土层和附近桥梁桩基础的影响；魏炜[15]通过建立三维力学模型研究了地铁盾构施工下的桥梁桩基变形规律和受力特征，分析了桩基础水平变位、桩基承载能力等变化规律。周国志[16]使用FLAC 3D软件建立有限元模型，研究了盾构隧道穿越不同类型的桥梁时，桩基础位移变化以及多种穿越工况下桩基础变形的差异性；郭旭东[17]采用数值模拟方法，研究了地铁盾构施工对桥梁，桩基弯矩、位移的影响，并对桥梁上部结构的附加内力进行核算；周群立[18]研究了盾构施工时土体和桥梁桩基变形规律，并对桥梁主梁进行计算分析，提出适合的地层损失率，并给出了差异沉降控制指标，以及穿越施工时应采取的保护措施；赵小虹[19]采用有限元和Peck公式相互结合的方法，研究了盾构开挖对地层不同深度的竖向变形，并与实际监测数据进行验证，结果发现地层损失率在0.41%～0.5%之间变化，且不同深度的地层损失率基本不变。目前很少对盾构隧道穿越漫水桥施工的案例。本文以北京市南水北调某支线工程盾构隧道下穿某漫水桥为工程实例，通过有限元软件数值模拟的方法预测了盾构隧道下穿施工对桥梁变形的影响，并提出相关建议，可为类似工程提供参考。

1　工程概况

1.1　盾构隧道概况

北京市南水北调某支线工程穿越某漫水桥段采用盾构内衬钢管方案。外部采用盾构一衬，盾构机外径4 000 mm，盾构管片厚300 mm，成洞洞径3 400 mm。内部二衬采用DN2600钢管，钢管壁厚18 mm。为使管道充水后内外压受力分开，在管道上部240°范围内设聚乙烯泡沫板，管道与一衬之间的空隙需要填充自密实混凝土。

1.2　桥梁概况

某漫水桥建于1966年，桥梁全长408.9 m，跨径组合为29×14.1 m，桥宽11.85 m。桥梁上部结构为单箱双室简支空心板，板间通过铰缝连接，横向共11片板，板高0.5 cm，中板宽度105 cm，边板宽度110 cm，边板外腹板为圆弧形利于过水。下部结构为双柱式盖梁，墩柱外侧为混凝土套管，外径93.2 cm、内径80 cm，桩基为直径150 cm的摩擦桩，位于卵石层。桥梁横断面示意见图1。

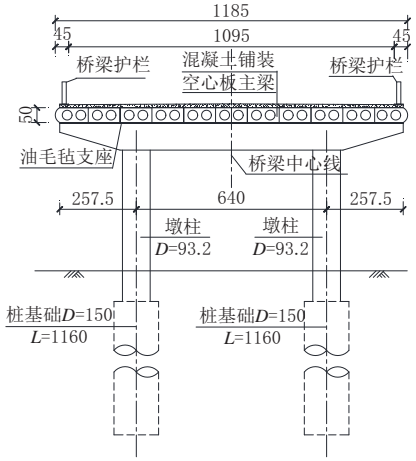

图1　桥梁17轴至18轴横断面示意图（单位：cm）

1.3　工程地质

根据地勘报告，漫水桥工程场地地层主要为上部填土，中部卵石，下部基岩多层结构。地层由上至下依次为杂填土①$_1$、卵石填土①、卵石②、卵石③及砂岩。其中盾构隧道所在地层为卵石②和卵石③，局部含漂石及孤石。地下水的类型以第四系孔隙潜水类型为主，含水层主要是由第四系冲洪积卵砾石组成。

1.4　穿越概况

本工程盾构隧道从漫水桥17轴至18轴间下方斜交穿越，与桥梁17轴桩基础水平最小净距为2.82 m，与桥梁18轴桩基础水平最小净距为4.18 m。依据《穿越既有道路设施工程技术要求》（DB11/T 716—2019）[20]中的要求，本穿越工程风险等级为一级，桥梁17轴至18轴桩基础均在主要影响区范围内。盾构隧道与漫水桥的相对位置关系见图2、图3。

2　盾构隧道施工对桥梁结构安全的影响及桥梁允许变形控制值

2.1　盾构隧道工程对桥梁结构安全的影响

盾构隧道穿越漫水桥施工对桥梁结构影响范围

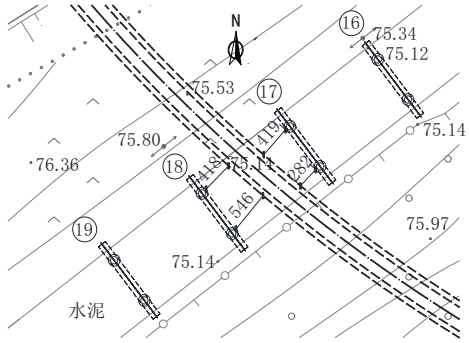

图 2　盾构隧道与桥梁桩基础相对位置关系平面图（单位：cm）

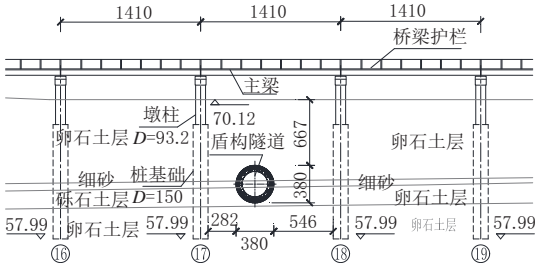

图 3　盾构隧道与桥梁桩基础相对位置关系立面图
（单位：高程 m，其他 cm）

为桥 17 轴至 18 轴下部机构及 16 轴至 19 轴上部结构。盾构施工引起地层应力变化对桥梁结构的影响有以下几个方面：

（1）漫水桥上部结构为简支空心板梁。穿越施工如造成基础的纵向不均匀沉降，虽不会造成主梁内力重分布，但过大的沉降会导致桥面铺装开裂，防水体系失效影响桥梁耐久性，同时影响行车舒适性；桥梁的横向不均匀沉降会引起铰缝失效，影响桥梁横向传力，进而造成单板受力的情况。

（2）下部结构盖梁横桥向墩柱桩基础不均匀沉降，会造成盖梁与墩柱组成的刚架结构内力重分布，盖梁、墩柱截面内力增加，影响盖梁及墩柱结构安全。

（3）盾构隧道穿越自稳定性较差的卵石层，不易形成自然应力拱，施工过程中土体容易发生扰动甚至塌落。本漫水桥桩基础设计为摩擦桩，桩基承载能力由桩侧摩阻及桩端的承载力组成，原桥设计时没有考虑本次盾构隧道下穿施工的影响。下穿施工会扰动土层，进而对桩侧摩阻力及侧向土压力产生影响，降低桩基的竖向承载力。

（4）桥梁基础沉降及水平位移会引起桥梁墩柱倾斜、支座脱空、上部结构变位；过大的变位会引起桥面铺装系统变形破坏，伸缩缝两侧高差，桥梁栏杆扭曲变形等，对车辆通行和桥面排水系统带来不利的影响。

2.2　桥梁允许变形控制值

结合盾构隧道下穿漫水桥施工可能对桥梁结构产生的影响，并计入桥梁运营荷载，参阅原桥梁设计、竣工资料，运用 MIDAS Civil 有限元软件，对漫水桥受影响的下部结构双柱盖梁建立空间梁单元模型，进行承载能力极限状的验算，计算工况见表 1，计算模型及结果见图 4 至图 6。

表 1　双柱盖梁计算工况表

工况	工况描述	计算目的
工况 1	1#墩沉降 5 mm	盖梁 2#墩顶位置最不利负弯矩

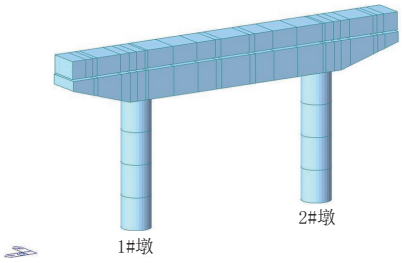

图 4　双柱盖梁有限元计算模型

图 5　工况 1 下盖梁新增附加弯矩（单位：kN·m）

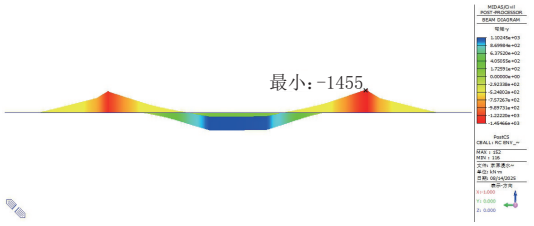

图 6　计入差异沉降的基本组合作用下盖梁墩顶位置最大负弯矩
（单位：kN·m）

查阅竣工图纸，盖梁配置了 18 根直径为 22 mm 的钢筋。经过计算分析，当墩柱差异沉降为 5 mm 时，盖梁顶新增附加弯矩 167 kN·m，此时盖梁基本组合下最大墩顶负弯矩为 1 455 kN·m，基本满足配筋要求。但同时考虑到桥梁在运营过程中可能已经发生部分沉降，综合分析得出盾构隧道穿越施工时，漫水桥应满足的变形控制技指标：

（1）简支板梁纵向相邻轴基础竖向差异沉降控制值 5 mm；

（2）同一轴盖梁下横桥向两个相邻墩柱间差异沉降控制值 2 mm；

（3）桥梁任意测点竖向均匀沉降控制值为 10 mm；

（4）主桥墩柱新增倾斜不大于 1‰。

3　有限元建模方法

地下工程施工引起地层变形的方法有经验法、解析法、有限元法等，本工程需要分析盾构施工全过程对桥梁变形的影响，采用 MIDAS GTS NX 有限元软件建立“地层结构法”模型，并添加施工阶段进行下穿施工全流程精细化施工模拟。

3.1　计算假定

（1）实际工程中各地层是复杂起伏的，所以呈现各项异性的特征。考虑到本工程各相近地层材料参数差异不大，本次计算根据地勘报告中的实际地层对土体进行水平分层，并采用程序中自带的各项同性弹塑性 3D 体单元进行模拟；

（2）实际地层中的部分土层夹杂了较软弱的土层，但在软件计算中，土层中的软弱夹层会严重影响计算的收敛性和准确性，因此本模型中选取了 3 层具有代表性的土体，土体参数根据地勘报告取值，其强度随地层深度的增大逐渐增大；

（3）由于地下水在桩底以下，本次计算不考虑地下水。

3.2　计算准则及相关参数

本次计算采用 MIDAS GTS NX 中自带的修正摩尔库伦计算准则，修正摩尔库伦计算准则是对传统摩尔库伦准则的改进，也叫硬化土计算准则，适用于淤泥、砂土或砂卵石土的行为特性。本工程的地层参数和结构材料参数见表 2、表 3。

表 2　土层参数表

编号	厚度/m	压缩模量/MPa	泊松比	γ/(kN·m^{-3})	c/kPa	φ/(°)
1	2.0	25.0	0.28	18.0	0	32.0
2	10.0	35.0	0.25	21.0	0	38.0
3	6.0	40.0	0.20	21.5	0	40.0

表 3　结构材料参数表

结构	材料	弹性模量/MPa	泊松比	计算准则	模拟单元
盖梁	200	26 000	0.27	弹性本构	梁单元
桥墩	200	26 000	0.27	弹性本构	桩单元
桩基础	200	26 000	0.27	弹性本构	梁单元
管片	C50	35 000	0.2	弹性本构	板单元
盾壳	Q345	206 000	0.2	弹性本构	板单元
注浆层	C25	29 120	0.2	弹性本构	实体单元

3.3　模型建立

地层结构法有限元模型整体尺寸为 60 m×40 m×24 m，共 17 230 个单元。漫水桥桩基、墩柱、盖梁与盾构隧道的空间相对关系见图 7。

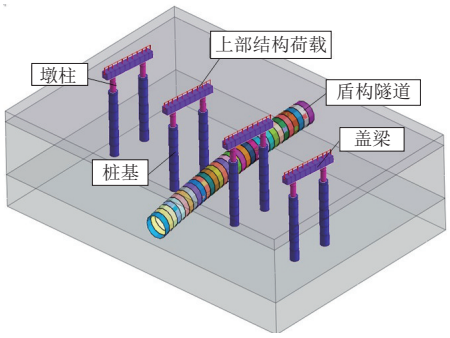

图 7　桥梁与盾构隧道相对位置图

盾构隧道的管片采用 2D 板单元模拟、盾构机外壳采用 2D 板单元模拟；注浆层采用 3D 实体单元模拟；桥梁下部结构的墩柱和盖梁采用 1D 梁单元模拟；桥梁桩基础采用桩界面单元模拟，并通过定义切向和法向刚度模拟桩土效应。

3.4　边界条件及荷载

模型底面全部土体节点施加固定约束，整体模型纵桥向两侧面（垂直 X 轴的两侧面）土体节点施加 X 方向位移约束，模型横桥向两侧面（垂直 Y 轴的两侧面）土体节点施加 Y 方向位移约束，模型顶面不做任何约束。

荷载包括自重和来自桥梁上部结构的外在荷载，其中上部结构重量以线荷载形式加入到模型中；掘进力和注浆压力以均布面压力荷载形式施加至开挖掌子面和注浆层外侧面。

3.5　施工阶段模拟

本次数值计算模拟盾构施工，在盾构机外壳的作用下每次开挖一个管片的长度 1.2 m，然后进行注浆加固随后安装管片，计算时此两步同时进行。如此循环，直到全线贯通，本模型共分 33 环开挖。

4　计算结果及分析

4.1　有限元计算结果

（1）桩基竖向位移计算结果

本次数值计算的核心内容是分析盾构开挖对既有桥梁桩基（即风险源）的影响，盾构隧道施工完成后，桥梁桩基最大沉降为 0.408 8 mm，发生在 17 轴南侧桩基 S17（S 代表南侧桩基、N 代表北侧桩基，后两位数字代表轴号），桥梁各轴最终位移见图 8，桩基沉降过程曲线见图 9。

（2）墩柱倾斜计算结果

盾构隧道施工完成后，墩柱新增倾斜计算结果见表 4 至表 7，墩柱水平位移最大值为 0.407 mm，位于 18 轴南侧墩柱，其新增倾斜度为 0.1‰，小于墩柱

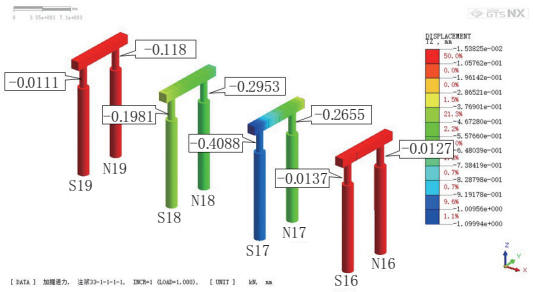

图 8　盾构隧道施工完成后桥梁桩基础竖向位移云图（负值表示沉降）（单位：mm）

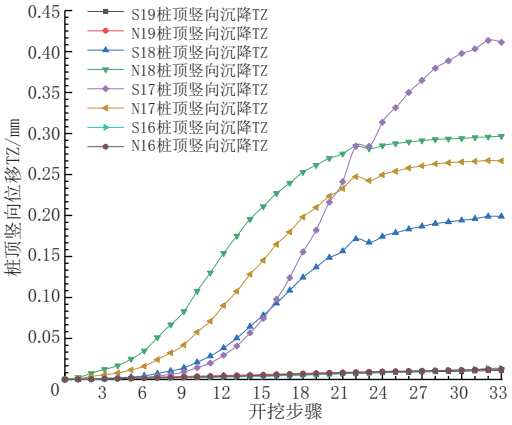

图 9　桩基沉降过程曲线图（正值表示沉降）（单位：mm）

新增倾斜控制指标 1‰。

表 4　墩柱纵桥向（TX 向）新增倾斜计算表一

墩柱号	S19	N19	S18	N18
墩顶 TX/mm	0.17	0.18	0.00	0.20
墩底 TX/mm	0.30	0.14	0.41	0.17
倾斜度	0.03‰	0.08‰	0.10‰	0.09‰

表 5　墩柱纵桥向（TX 向）新增倾斜计算表二

墩柱号	S17	N17	S16	N16
墩顶 TX/mm	0.51	0.16	0.19	0.19
墩底 TX/mm	0.16	0.18	0.19	0.38
倾斜度	0.09‰	0.08‰	0.001‰	0.05‰

表 6　墩柱横桥向（TY 向）新增倾斜计算表一

墩柱号	S19	N19	S18	N18
墩顶 TX/mm	0.021	0.022	0.178	0.157
墩底 TX/mm	0.141	0.014	0.158	0.020
倾斜度	0.03‰	0.01‰	0.01‰	0.03‰

表 7　墩柱横桥向（TY 向）新增倾斜计算表二

墩柱号	S17	N17	S16	N16
墩顶 TX/mm	0.062	0.098	0.001	0.001
墩底 TX/mm	0.018	0.000	0.006	0.044
倾斜度	0.02‰	0.02‰	0.001‰	0.01‰

4.2　计算结果分析

（1）桥梁桩基竖向沉降规律分析

根据图 9 可知，盾构隧道刚开始掘进时，由于 N18 与 N17 号桩距离盾构开始端最近，因此最先受到影响。在开挖到第 15 环时，其最大竖向沉降已经达到 0.2 mm 左右，随着盾构隧道继续开挖，N18 与 N17 桩顶的竖向沉降逐渐增大，但是增幅明显减缓，开挖到第 24 环之后，其竖向沉降基本稳定值在 0.28 mm，因为在盾构管片和注浆压力的作用下，N18 与 N17 桩附近的土体基本达到稳定，同理 N17、N16、N19、S17、S16 和 S19 桩也呈现这样的沉降规律。

由图 8 可知，17 轴和 18 轴桩基沉降值较大，这是因为隧道开挖以后隧道上方的土体出现沉降，下部土体由于卸载出现回弹，朝着隧道内径方向收敛，形成一个“沉降槽”，见图 10。

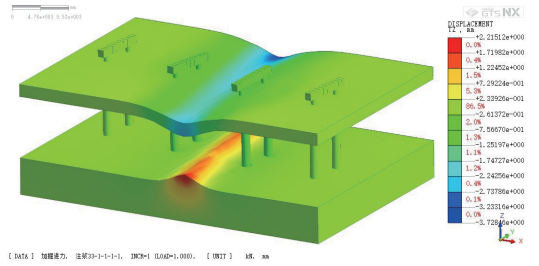

图 10　盾构隧道施工后地表“沉降槽”图（单位：mm）

17 轴、18 轴桩基正好位于盾构隧道的两侧，处于竖向沉降的影响最大的范围边缘，即沉降槽边缘。16 轴与 19 轴桩基离盾构隧道的距离比 17 轴和 18 轴的桩基远，处在竖向沉降较小的范围内，因此随着盾构机的不断前进，后方地表土体逐渐达到沉降稳定，17 轴与 18 轴的桩基 N17、S17、N18、S18 的竖向沉降比其他各桩的沉降大。

（2）纵桥向及横桥向相邻桩基差异沉降分析

根据桥梁各轴桩基竖向位移结果，盾构隧道施工过程中纵桥向相邻轴桩基差异沉降变化曲线见图 11，横桥向相邻桩基差异沉降变化曲线见图 12，桥梁桩基最终差异沉降计算表见表 8、表 9。

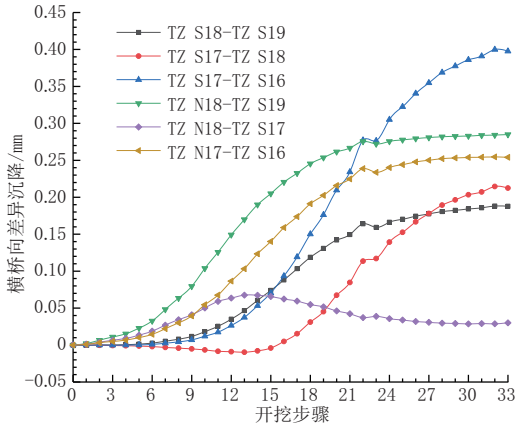

图 11　纵桥向相邻轴桩基差异沉降曲线图（单位：mm）

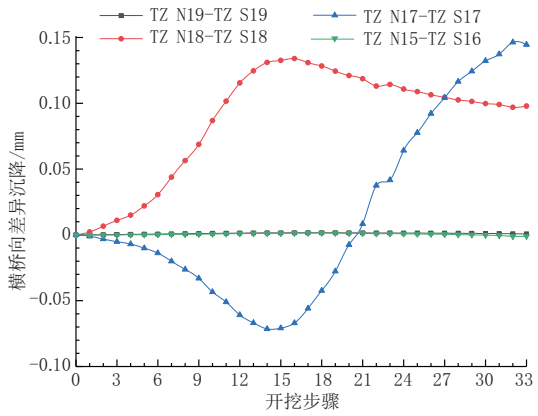

图 12　横桥向相邻桩基差异沉降曲线图（单位：mm）

表 8　相邻桩基差异沉降计算结果表一　　单位：mm

桩号	N16	N17	N18	N19
最大竖向沉降	0.013	0.266	0.295	0.011
纵桥向桥墩差异沉降	0.253		0.029	0.284
横桥向桥墩差异沉降	0.001	0.143	0.097	0

表 9　相邻桩基差异沉降计算结果表二　　单位：mm

桩号	S16	S17	S18	S19
最大竖向沉降	0.014	0.409	0.198	0.011
纵桥向桥墩差异沉降	0.395		0.210	0.187
横桥向桥墩差异沉降	0.001	0.143	0.097	0

盾构隧道开挖完成后，所有桥桩的最大竖向沉降为 0.409 mm，发生在 17 轴南侧桩基（S17），小于控制指标 10 mm；纵向相邻轴桩基的最大差异沉降值为 0.395 mm，发生在 16 轴至 17 轴南侧桩基（S16 至 S17）之间，小于控制指标 5 mm；横向相邻桩基最大差异沉降值为 0.143 mm，发生在 17 轴的 2 个桩基（N17 至 S17）之间，小于控制指标 2 mm。盾构隧道下穿漫水桥施工造成的桥梁各项变形均未超标。

5　结　语

（1）盾构法隧道施工会扰动土层，引起地层应力变化，会对桩基础的侧向土压力、侧向摩阻力产生不利影响，最终降低桩基的竖向承载力。

（2）桥梁的横向差异沉降会对下部结构的盖梁墩柱产生附加内力，造成上部结构铰缝失效，形成单板受力状态，影响结构安全。

（3）纵桥向差异沉降过大会导致桥面铺装开裂、防水体系失效，影响桥梁耐久性，同时影响行车舒适性。

（4）桥梁基础沉降及水平位移会引起桥梁墩柱倾斜、支座脱空、上部结构变位；过大的变位会引起桥面铺装系统变形破坏，伸缩缝高差，栏杆变形，影响桥梁的使用功能。

（5）为了确保盾构隧道下穿桥梁施工安全，应对被穿越桥梁提出沉降控制技术指标。控制指标应结合盾构隧道穿越施工对既有桥梁结构可能产生的影响进行具体分析，分析时需要考虑桥梁的运营荷载，同时参照桥梁设计、竣工资料，结合桥梁特点综合确定。

（6）有限元方法是常用的地下工程模拟方法，通过建立有限元模型，设置施工阶段，可以全过程预测地下工程施工对既有桥梁造成的变形影响。本工程盾构隧道穿越施工全过程对漫水桥变形影响均未超标，可保证盾构隧道施工安全穿越漫水桥。

（7）建议盾构隧道施工时严格控制盾构参数，加强桥梁基础变形监测，并制定切实可行的应急预案，以应对施工过程中的突发事件，确保隧道施工期间桥梁的运营安全。

（8）桥梁在运营过程中可能已经发生了部分沉降。建议施工过程中进行第三方监测，对桥梁基础变位进行监测的同时，对桥梁的开裂状况、支座状况等影响桥梁安全的因素进行观测，及时掌握桥梁安全状态。

参考文献：

[1] 贾龙飞，李洋，李兴，等. 北京地铁 14 号线隧道穿越东郊灌渠跨河桥影响分析[J]. 市政技术，2015，33（6）：91-94；98.
[2] 刘明高，陈仁东，孙和美，等. 超大直径盾构隧道穿越桥梁桩基影响研究[J]. 市政技术，2019，37（1）：67-71.
[3] 李新章. 穿越既有铁路桥的管道基坑施工对桥墩影响的安全评估分析[J]. 工程技术研究，2022，7（23）：67-69.
[4] 吴华州，郭易东，蔡志勇，等. 盾构近接施工对箱涵的影响分析与控制[J]. 山西建筑，2023，49（3）：150-154.
[5] 高磊，金晶，黄卫东. 电力隧道穿越天桥的分析与研究[J]. 工程与建设，2015，29（4）：506-507；518.
[6] 高磊，金晶，黄卫东. 地铁穿越桥梁的前评估分析与研究[J]. 工程与建设，2014，28（1）：15-16；19.
[7] 刘能文，王琛妹. 地铁隧道穿越桥梁的综合技术[J]. 市政技术，2013，31（3）：76-80；96.
[8] 杨琳杰. 盾构隧道下穿既有桥梁桩基托换技术研究[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2024.
[9] 李兵，刘力. 地铁区间施工对邻近地下通道的影响分析[J]. 山西建，2025，51（6）：117-121.
[10] 张照太，申庆梦，马文辉，等. 地铁竖井横通道施工对既有天桥影响规律研究[J]. 科学技术创新，2024（18）：149-152.
[11] 金晶，高磊，马晶. 天然气管线穿越桥区咨询研究[J]. 市政技术，2014，32（5）：123-127.
[12] 刘志鹏，李永杰. 顶管施工综合管廊下穿市政道路及周边管线变形监测[J]. 智能建筑与智慧城市，2023（7）：134-137.
[13] 杜壹伦. 上海市银都路隧道穿越对防汛墙的影响分析[J]. 城市道桥与防洪，2023（12）：115-118.
[14] 钟伟程. 岩溶强发育区盾构隧道下穿市政桥梁的数值模拟分析[J].

（下转第 262 页）