doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.05.013

盾构近距离下穿施工对既有桥梁下部结构的影响

李志雄[1]，李永骝[1]，毛武峰[2]，向锦艳[3]，刘庭金[3]，蔡良怡[3]
（1. 广州地铁建设管理有限公司，广州 510220；2. 广州地铁设计研究院股份有限公司，广州 510010；
3. 华南理工大学土木与交通学院，广州 510641）

摘 要：针对评估盾构隧道近距离下穿对既有桥梁桩基的安全影响问题，以某实际工程为依托，重点研究盾构在邻近桥梁桩基区域，尤其是在距离桩基 3.0 m 范围内作业及正下方穿越时，对桥梁下部结构变形、单桩扰动度及桩基承载力的影响。研究采用现场监测与数值模拟相结合的方法，对盾构施工过程中的桩基响应特征进行系统分析，并基于扰动程度对其影响进行分区评估。结果表明：①当盾构在中风化灰岩层中掘进且水平净距为 0 m 时，诱发的单桩应力扰动度显著，影响等级为“强影响”；②盾构在强风化灰岩层中掘进时，由于桩基剩余承载力不足，在水平距离 3.0 m，竖向 1.0～3.0 m 范围内的影响等级均为“强影响”；③当桩基嵌岩深度为 1.0、2.0 和 4.0 m 时，均出现较大单桩应力扰动，影响等级亦为“强影响”。研究结论可为类似工程中盾构隧道与桥梁桩基相互作用的安全评估与施工风险控制提供理论依据与工程参考。

关键词：盾构隧道；桥梁结构；下穿施工；数值模拟；影响分区
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)05-0103-11

Impact Analysis of Close-Proximity Shield Underpassing beneath Existing Bridge Substructures

LI Zhixiong[1], LI Yongliu[1], MAO Wufeng[2], XIANG Jinyan[3], LIU Tingjin[3], CAI Liangyi[3]
(1. Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., Guangzhou 510220;
2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010;
3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract: In order to evaluate the safety impact of shield tunneling under close range on existing bridge pile foundations, this article focuses on a practical project and studies the influence of shield tunneling on the deformation of the lower structure of the bridge, the disturbance degree of a single pile, and the bearing capacity of the pile foundation in the vicinity of the bridge pile foundation area, especially when operating within a range of 3.0 meters from the pile foundation and crossing directly below it. The study adopts a combination of on-site monitoring and numerical simulation to systematically analyze the response characteristics of pile foundations during shield tunneling construction, and evaluates their impact in different zones based on the degree of disturbance. The results show that: ① When the shield tunneling machine excavates in the moderately weathered

收稿日期：2024-12-02　修回日期：2025-06-20
第一作者：李志雄，男，高级工程师，主要从事轨道交通土建工程现场管理和土建技术研究，lizhixiong@gzmtr.com
通信作者：刘庭金，博士，教授，博士生导师，主要从事地铁结构安全评估和下穿涉路涉桥安全评价技术研究，liu_tingjin@163.com
基金项目：广东省自然科学基金(2023A1515012084)
引用格式：李志雄，李永骝，毛武峰，等. 盾构近距离下穿施工对既有桥梁下部结构的影响[J]. 都市快轨交通，2025，38(5)：103-113.
LI Zhixiong, LI Yongliu, MAO Wufeng, et al. Impact analysis of close-proximity shield underpassing beneath existing bridge substructures[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(5): 103-113.

limestone layer with a horizontal clearance of 0 m, the induced single pile stress disturbance is significant, and the impact level is “strong impact”; ② When tunneling in strongly weathered limestone layers, due to insufficient residual bearing capacity of the pile foundation, the impact level within a horizontal distance of 3.0 m and a vertical range of 1.0~3.0 m is classified as “strong impact”; ③ When the rock embedding depth of the pile foundation is 1.0, 2.0, and 4.0 meters, significant single pile stress disturbances occur, and the impact level is also “strong influence”. The research conclusion can provide theoretical basis and engineering reference for the safety assessment and construction risk control of the interaction between shield tunnels and bridge pile foundations in similar projects.

Keywords: shield tunnel; bridge structure; underpassing construction; numerical modelling; impact zoning

近年来国家开始大力发展城市轨道交通，导致盾构穿越既有桥梁桩基的工程日益增加，城市桥梁作为人们日常通行的重要交通设施，桥梁结构的安全与稳定也显得至关重要，在邻近桥梁桩基进行盾构施工，特别是近距离正下穿桥桩以及在距离桥梁桩基 3.0 m 范围内进行作业，对于桥梁结构安全具有显著影响。盾构近距离穿越既有桥梁桩基的影响研究也不断成为研究的热点话题。

诸多学者对此类问题进行过研究，HUANG 等[1]根据上海地铁 1 号线的实测结果，结合理论分析，推导出了盾构施工对相应桩基产生的挠曲与内力计算公式。林超等[2]根据理论分析提出一种桩底盾构施工引起的桩基承载能力损失计算方法。来高峰等[3]通过数值模拟得出了非均质土中盾构侧穿对邻近桩基承载力的影响规律。唐伟超等[4]利用 FLAC 3D 有限差分软件，研究盾构侧穿桥梁桩基过程中，不同桩基加固方案对地表沉降及桩身变形的影响。廖晨等[5-10]结合数值模拟等方法对盾构隧道正下穿桩基进行了桩基沉降、变形等分析。周鑫[11]结合盾构掘进施工引起的地层变形机理，针对砂层内地铁盾构近距离侧穿高铁桥梁群桩过程中的变形机理进行研究。

目前我国盾构下穿桩基的案例众多，但盾构近距离下穿桩基的工程案例相对较少，且现有的关于盾构穿越桥梁下部结构的研究大多侧重于桩基承载力，而对于与桥梁下部结构安全相关的承台、桥墩变形的影响研究相对较少，对桥梁下部结构安全相对缺乏系统性、全面的研究与探讨。本文以广州云台花园站—大金钟站区间线路盾构近距离下穿既有高速公路高架桥桥桩为背景，根据 FLAC 3D 三维有限差分软件及现场监测数据，研究不同相对位置关系、岩层参数以及嵌岩深度对桥梁下部结构安全的影响。

1 工程概况

本项目采用土压平衡盾构机，管片外径 6.0 m，内径 5.4 m，厚度 0.3 m，为双线盾构隧道。左右线中心线距离约 8.20～23.21 m，采用环宽 1.5 m 管片。盾构下穿段隧道顶覆土厚度为 25.8 m，下穿段左右主线桥梁上部结构为连续梁，基础为直径 1.3 m 的钻孔灌注桩，其中 R105#墩为 T 形墩，墩高 15.0 m。左线盾构掘进过程中对各桥墩的影响较小，右线掘进过程中正下穿 L105#与 R105#桥墩桩基，且与 R105#桥墩桩基最小竖向净距仅为 1.8 m。盾构隧道与左右主线桥的平面位置关系如图 1 所示。

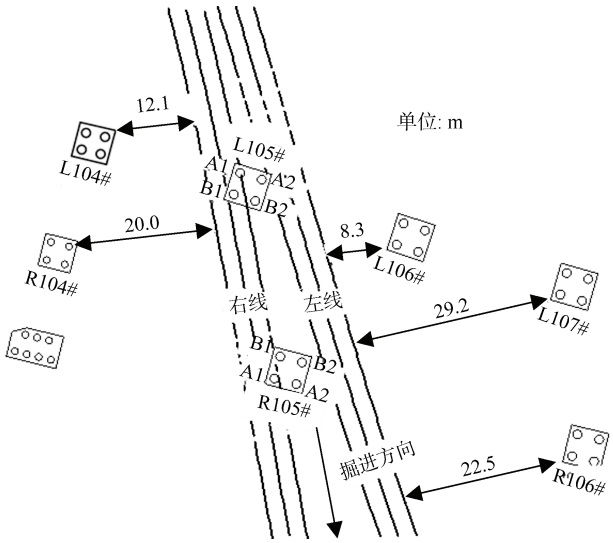


图 1 盾构隧道与左右主线桥的平面位置关系

Figure 1 Plan position of the shield tunnel in relation to the left and right mainline bridges

按照盾构下穿段最近的钻孔所揭露的土层分布情况，地面至隧道顶岩土层依次为<1-1>杂填土、<4-3>粉质黏土、<7C-2>强风化灰岩、<8C-2>中风化灰岩，左右线盾构主要在中风化灰岩层中掘进，桩端主要嵌入中风化灰岩层。表 1 为岩土层基本物理力学指标。

监测点主要布置在盾构隧道下穿段的桥梁墩台的变形位置上，示意如图 2 所示。监测频率为 1 次/d，直至施工完成后数据收敛。

表 1　岩土层基本物理力学指标

Table 1　Basic Physical and Mechanical Indicators of Geotechnical Formations

岩土层	重度/(g/cm³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	弹性模量/MPa	厚度/m
杂填土	1.80	5.0	10.0	0.37	8	4
粉质黏土	1.99	23.2	32.0	0.34	20	6
强风化灰岩	2.20	32.5	26.0	0.28	110	6
中风化灰岩	2.66	/	32.5	0.22	1 000	44

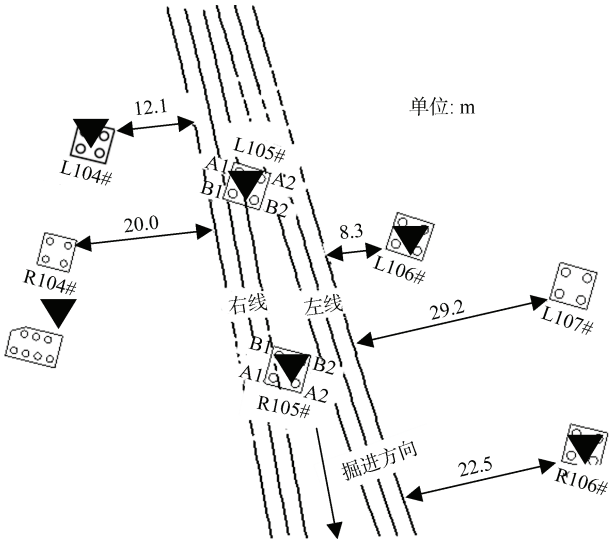


图 2　监测点平面布置示意

Figure 2　Layout of monitoring points

2　判定标准与影响分区

2.1　判定标准

对于盾构施工过程中对桥梁下部结构安全影响的判定，目前主要是通过盾构施工对地层及桥梁下部结构造成的变形，如桥桩、承台以及桥墩在盾构施工影响下产生的沉降及水平位移是否超过了规范规定的控制值；以塑性区是否贯通判定桥梁结构的安全，即当盾构顶部发生冲切破坏、剪切破坏或者拉弯破坏且塑性区与桩底之间贯通，会导致桩基承载能力降低，从而降低桥梁结构的稳定性；另外还有通过盾构施工前后桩基的承载力损失判定桥梁结构的安全。具体如表 2 所示。

2.2　影响分区

汤劲松等[12]根据单桩应力扰动度以及单桩变形扰动度，确定了单桩应力扰动度阈值、单桩变形扰动度阈值及单桩扰动度阈值，并根据各阈值盾构近接群桩施工影响分为 5 个等级。盾构施工对既有桥梁下部结构的影响程度会有所不同，目前对于盾构施工影响

表 2　桥梁结构安全与稳定的判定标准

Table 2　Criteria for determining the safety and stability of bridge structures

判定标准量	判定标准的适用范围
结构变形	盾构施工引起的桥梁结构如桩基、承台、桥梁墩台的变形是否超过控制值
塑性区	以塑性区不叠加作为基本的判定准则，桩底顶板是否发生冲切破坏、剪切破坏及拉弯破坏，以及破坏产生的塑性区是否发生贯通
结构强度变化	盾构施工会引起桥桩变形，降低桩基承载能力，造成桩基承载力损失，若损失过大，会严重威胁桥梁结构的安全
综合判定	综合以上的判定标准对桥梁结构安全进行判断

区域范围的划分，通常分为强影响区、弱影响区以及无影响区 3 大类别[13]。其中，对于位于强影响区范围内的桥梁结构，需要采取相应的保护措施以保证桥梁结构的安全稳定，对于位于弱影响区范围内的桥梁结构，需要注意加强现场监测以及根据监测数据及时调整盾构掘进过程中的施工参数，对于处于无影响区范围内的桥梁结构通常不需要采取措施。其中，汤友富等[14]根据《地铁设计规范》(GB 50157—2013)中关于单墩沉降允许值的规定，提出了按照桩基沉降允许值以及桩基沉降允许值的 70%与 30%进行桩基影响分区。

本文根据国内相关规范及工程经验，以桩基受盾构施工影响的单桩扰动度和盾构施工引起的桥墩、承台沉降及桩基水平位移及桩基剩余承载力为控制基准，初步拟定影响分区控制标准，如表 3 所示。

表 3　盾构-桩基近接施工影响分区

Table 3　Shield-pile close-proximity construction impact zoning

影响分区	桥墩沉降阈值/mm	承台沉降阈值/mm	单桩扰动度
强影响	$u\geqslant 10$	$u\geqslant 10$	0.8～2.0
弱影响	$5\leqslant u<10$	$5\leqslant u<10$	0.4～1.2
无影响	$u<5$	$u<5$	0～0.4

注：u 为沉降。

3　数值模型建立

3.1　数值模型

左线盾构掘进过程中对各桥墩的影响较小，右线掘进时对正下穿位置处的 R105#墩桥桩的影响较大，故将数值模型简化为单线盾构正下穿 R105#墩桥桩，建立的三维数值模型如图 3 所示。

模型尺寸为 60 m×81 m×60 m。模型边界条件采用位移边界条件，模型左右面 X 方向位移约束，前后面 Y 方向位移约束，底部为 Z 方向位移约束，上表面为

自由面。桥墩、承台、桩基等均采用线弹性本构模型；杂填土、粉质黏土及强风化灰岩层采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型，主要结构参数见表 4，盾构开挖的工况设置见表 5。考虑到盾构掘进过程中，会对周围岩体产生不利影响，且岩石有应变软化特性，故中风化灰岩层采用应变软化本构模型[15]。中风化灰岩参数取值：峰值应力为 28.92 MPa，残余应力为 8.0 MPa，摩擦角为 32.5°；对应的峰值应变为 0.79%，而在达到残余强度阶段时，应变增大至 0.81%。对于强风化灰岩，岩石已被破坏为破碎的土状结构，故采用 MC 本构；中风化灰岩风化程度较弱，岩石具有较高的完整性，故采用应变软化本构模型。桥梁上部结构自重及车道荷载均简化为均布荷载施加在 R105#桥墩上。

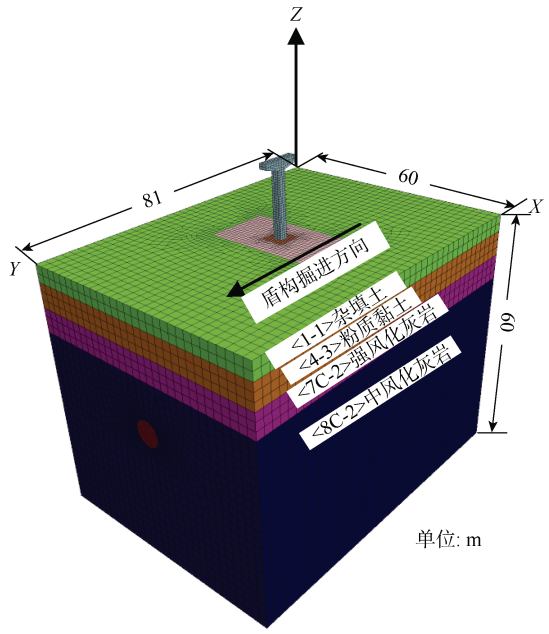


图 3　数值模型

Figure 3　Numerical modelling

表 4　主要结构参数取值

Table 4　Values of main structural parameters

结构	单元类型	材料	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN/m³)
管片	3D 实体单元	C50 混凝土	34 500	0.2	25
盾壳	2D 板单元	钢材	200 000	0.3	78
注浆层(硬化前)	3D 实体单元	水泥浆	0.02	0.45	20
注浆层(硬化后)	3D 实体单元	混凝土	10 000	0.3	25
桥墩	3D 实体单元	C30 混凝土	30 000	0.2	25
承台	3D 实体单元	C20 混凝土	25 500	0.2	25
桥桩基	3D 实体单元	C20 混凝土	25 500	0.2	25
管片	3D 实体单元	C50 混凝土	34 500	0.2	25

表 5　盾构施工开挖工况步骤

Table 5　Shield tunneling excavation analysis steps

施工工况	施工内容
工况 1	初始地应力场计算
工况 2	生成既有结构(R105#墩)
工况 3	隧道开始掘进，生成第 1 节盾壳及掘进压力
工况 4	开挖第 1 节隧道，施作第 1 节管片及注浆
工况 5	开挖第 2 节隧道、施作第 2 节管片及注浆、第 1 节注浆层硬化
工况 6	开挖第 3 节隧道、施作第 3 节管片及注浆、第 2 节注浆层硬化
工况 7	……

3.2　数值模型验证

盾构不同开挖阶段桥墩沉降发展曲线如图 4 所示，盾构掘进诱发 R105#桥墩最大沉降为 1.4 mm，与现场监测结果十分接近；在盾构下穿段，桥墩沉降迅速发展，数值模拟结果与现场监测的桥墩累计沉降发展曲线规律较为一致。桥墩水平 X 向位移发展曲线如图 5 所示，盾构掘进诱发 R105#桥墩最大水平 X 向位移为 0.5 mm，现场监测结果为 0.4 mm，与现场监测结果接近。数值模拟结果与现场监测的桥墩累计水平 X 向位移发展曲线规律较为一致，基本验证模型的有效性。

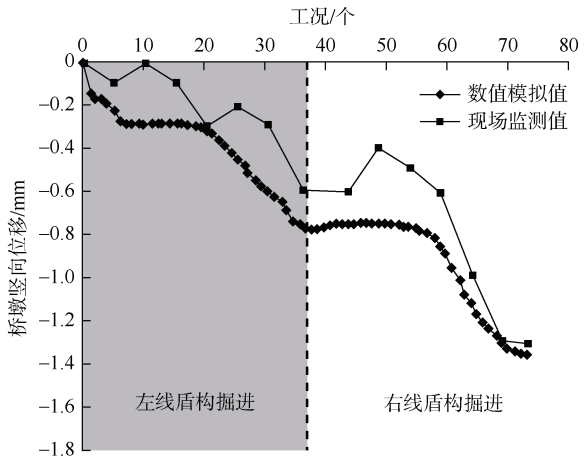


图 4　桥墩沉降发展曲线

Figure 4　Settlement development curve of bridge pier

4　参数分析

4.1　盾构与桩基相对位置关系的影响

4.1.1　对桥墩的影响

盾构掘进过程中，由于群桩遮拦效应，盾构施工对 4 根桥桩的影响有所差异，本章选取影响最大的 A1 桥桩进行分析，针对不同的水平净距(0、1、2、3 m)

下竖向净距的变化(1、1.5、2 和 3 m)对桥墩竖向位移的影响进行分析。盾构隧道与桥梁桩基相对位置关系改变的情况下，桥墩的竖向位移发展曲线如图 6 所示。

从整体上来看，随着盾构隧道与既有桩基相对位置的变化，桥墩随盾构掘进的累计竖向位移曲线变化

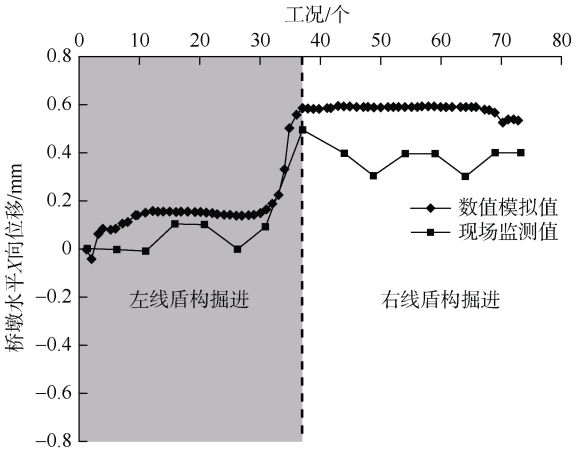
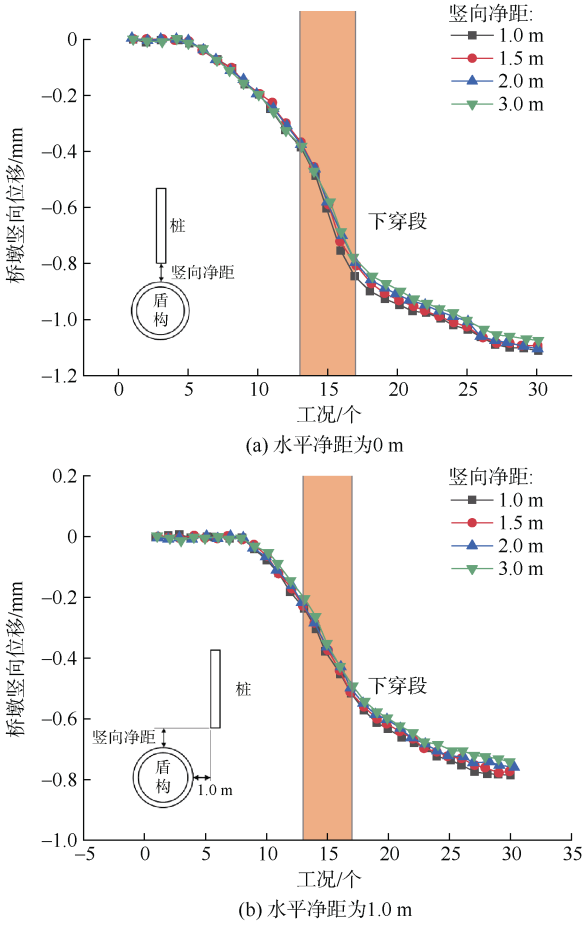


图 5　桥墩水平 X 向发展曲线

Figure 5　Pier horizontal x-direction development curve



(a) 水平净距为0 m

(b) 水平净距为1.0 m

(c) 水平净距为2.0 m

(d) 水平净距为3.0 m

图 6　盾构与桩基不同相对位置关系下桥墩竖向位移发展曲线

Figure 6　Vertical displacement development curves of the bridge pier for different shield–pile relative positions

规律基本相同，随着盾构掘进，桥墩呈下沉趋势。而当竖向净距相同时，水平净距改变引起的桥墩沉降累计值变化较为明显。在这 16 种工况下引起的桥墩累计沉降最大值为 1.5 mm，最小值为 0.7 mm，桥墩沉降控制值 10.0 mm，即盾构下穿施工引起的桥墩沉降是未超过控制标准的。本节对于类似的盾构下穿工程中沉降控制严格的工程可提供参考借鉴。

4.1.2　对承台的影响

表 6 为承台累计竖向位移，根据表 6 可知，盾构隧道与既有桩基的相对位置变化对承台竖向位移影响如下：

1) 盾构施工引起的承台最大累计沉降为 1.5 mm，发生于水平净距 0 m、竖向净距 1.0 m 时；最小累计沉降为 0.7 mm，发生于水平净距 3 m、竖向净距 3 m 时。

随着水平与竖向净距的增大，承台累计沉降逐渐减小。

表 6 承台累计竖向位移

Table 6 Cumulative vertical displacement of bearing platform mm

竖向净距/m	不同水平净距时承台累计竖向位移/mm			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	1.5	1.0	0.9	0.8
1.5	1.5	1.0	0.9	0.8
2.0	1.5	0.9	0.9	0.7
3.0	1.3	0.9	0.8	0.7

2) 承台最大累计沉降为 1.5 mm，未超过 10 mm 的沉降控制值，盾构下穿施工对承台沉降影响在控制范围内。

4.1.3 对桩基的影响

1) 对单桩变形扰动度的影响。随着桩基与盾构隧道相对位置关系的变化，桩基变形有所差异，桩基变形受到盾构施工的影响程度不同，因此根据式(1)进行单桩变形扰动度[12]分析。

$$S_2 = \frac{\Delta z}{S_v} \tag{1}$$

式中，S_2 为单桩变形扰动度；Δz 为桩顶沉降；S_v 为单桩桩顶沉降扰动度。

盾构施工引起的单桩变形扰动度如表 7 所示。单桩变形扰动度均小于 0.4，可认为扰动非常小，属于无影响分区。

表 7 不同相对位置下单桩变形扰动度

Table 7 Degree of deformation disturbance of single pile in different relative positions

竖向净距/m	不同水平净距下变形扰动度			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	0.065	0.045	0.040	0.040
1.5	0.060	0.045	0.040	0.035
2.0	0.055	0.045	0.035	0.030
3.0	0.045	0.040	0.035	0.030

2) 对单桩应力扰动度的影响。不同工况下桥桩的轴向附加应力曲线如图 7 所示。随着桩基与盾构隧道相对位置关系的变化，桩基的轴向附加应力有所差异，桩基轴向附加应力受到盾构施工的影响程度不同，因此根据式(2)及式(3)进行单桩应力扰动度[12]分析。

$$S_1 = \frac{\int_0^L s_1(z)\mathrm{d}z}{L[s_1]} \tag{2}$$

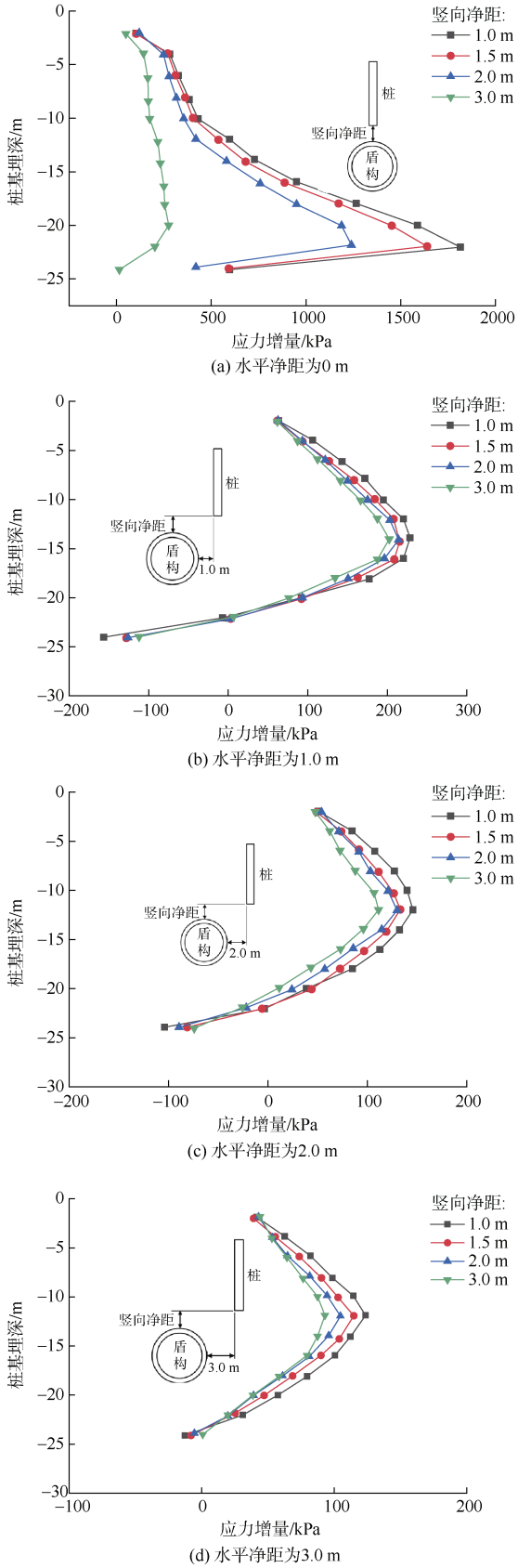


图 7 桥桩轴向附加拉应力曲线

Figure 7 Axial additional tensile stress curve of bridge pile

$$s_1(z)=\left|\frac{\sigma_1(z)-\sigma_0(z)}{\sigma_0(z)}\right| \tag{3}$$

式中，S_1 为单桩应力扰动度；L 为桩长；$s_1(z)$为单桩轴线上距桩顶 z 处的单元应力扰动度；$\sigma_0(z)$为单桩轴线上距桩顶 z 处单元扰动前的应力；$\sigma_1(z)$为单桩轴线上距桩顶 z 处单元扰动后的应力；$[s_1]$为桩身各点应力扰动的允许值，取 0.262。

盾构施工引起的单桩变形扰动度如表 8 所示。在盾构正下穿桥桩工况下，当竖向净距小于 2.0 m 时，盾构施工对桥桩的单桩应力扰动度的影响等级均为强影响；当竖向净距大于 3.0 m 时，影响等级为无影响。此外，在侧穿工况下，盾构施工对桥桩的单桩应力扰动度的影响等级大部分为弱影响。

表 8　不同相对位置下单桩应力扰动度

Table 8　Single Pile Stress Disturbance in different relative positions

竖向净距/m	不同水平净距下应力扰动度			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	1.378	0.653	0.598	0.513
1.5	1.267	0.586	0.542	0.427
2.0	1.239	0.463	0.437	0.393
3.0	0.631	0.433	0.349	0.328

根据结构重要性系数 β 定义单桩扰动度，即

$$S=\beta(S_1+S_2) \tag{4}$$

根据使用年限为 100 年的建筑物，其结构重要性系数 β 为 1.1，各工况下盾构施工引起的单桩扰动度，如表 9 所示。其影响分区与单桩情况类似。在盾构正下穿桥桩工况下，当竖向净距小于 2.0 m 时，盾构施工对桥桩的单桩应力扰动度的影响等级均为强影响；当竖向净距大于 3.0 m 时，影响等级为无影响。此外，在侧穿工况下，盾构施工对桥桩的单桩应力扰动度的影响等级大部分为弱影响。

表 9　不同相对位置下单桩扰动度

Table 9　Disturbance of single pile in different relative positions

竖向净距/m	不同水平净距下单桩扰动度			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	1.587	0.768	0.702	0.608
1.5	1.460	0.694	0.640	0.508
2.0	1.423	0.559	0.519	0.465
3.0	0.774	0.520	0.422	0.394

3) 对桩基承载力的影响。考虑到盾构施工过程中，桩周土体沉降可能要大于桥桩沉降，引起桩侧负摩阻，降低桩基承载力，因此需要找出桥桩负摩阻出现的位置，确定桩身中性点，并根据中性点位置对盾构掘进后的桩基剩余承载力进行计算。因此对于产生桩侧负摩阻及桩端阻力损失的桩基，如式(5)所示：

$$\begin{cases} R_a=(1-e')c_1A_pf_{rk}+u\sum_{i=1}^{n}c_{2i}h_i'f_{rki}+\dfrac{1}{2\zeta_s}u\sum_{i=1}^{n}l_i'q_{ik} \\ e'=\dfrac{F_1-F_2}{F_1} \end{cases} \tag{5}$$

式中，R_a 为桩基竖向承载力，e'为盾构施工后桩端承载力损失率，F_1 为开挖前桩端阻力，kN；F_2 为开挖后桩端阻力，kN；l'_i 为桩身中性点位置以下各土层的厚度；h'_i 为桩身中性点位置以下各岩层的厚度；其他参数可参考公路桥涵通用设计规范》(JTG D60—2015)。按上述公式计算得到传递到桩基的竖向荷载为 19 845 kN。

各类工况下桩基承载力安全系数如表 10 所示。根据表可以看出，盾构正下穿既有桥桩时，桩基承载力安全系数降低非常明显。

表 10　桩基承载力安全系数

Table 10　Safety factor for pile bearing capacity

竖向净距/m	不同水平净距下桩基承载力安全系数			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	4.36	3.80	5.04	5.20
1.5	4.40	4.28	5.04	5.24
2.0	4.44	4.60	5.08	5.28
3.0	4.56	4.80	5.12	5.28

4.1.4　影响分区

根据不同工况下盾构施工引起的桥梁下部结构沉降、单桩扰动度以及桩基剩余承载力可知，盾构掘进对桥梁下部结构的影响等级如表 11 所示。可以看出，盾构正下穿既有桩基对桥梁下部结构的影响非常明显。

表 11　影响等级分区

Table 11　Impact level subdivision

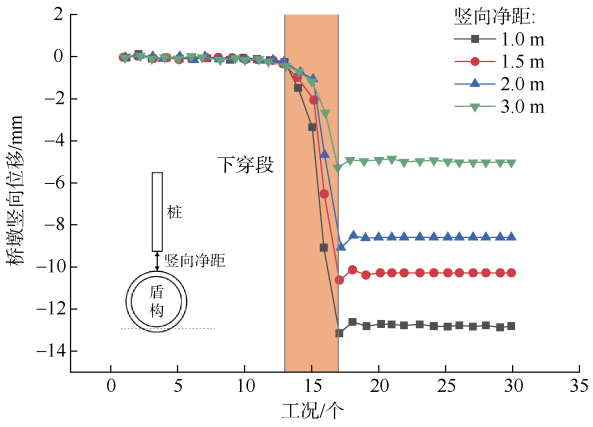
竖向净距/m	不同水平净距下影响分区			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	强影响	弱影响	弱影响	弱影响
1.5	强影响	弱影响	弱影响	弱影响
2.0	强影响	弱影响	弱影响	无影响
3.0	强影响	弱影响	无影响	无影响

4.2 盾构所处岩土层的影响

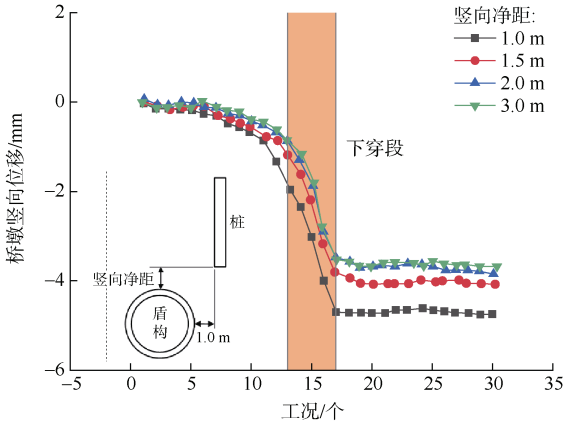
上一节探讨了盾构在中风化灰岩层中掘进时，盾构与桩基相对位置关系对桥梁下部结构的影响，本节探究盾构在强风化灰岩层中掘进时，盾构与桥桩相对位置关系对桥梁下部结构的影响。

4.2.1 对桥墩的影响

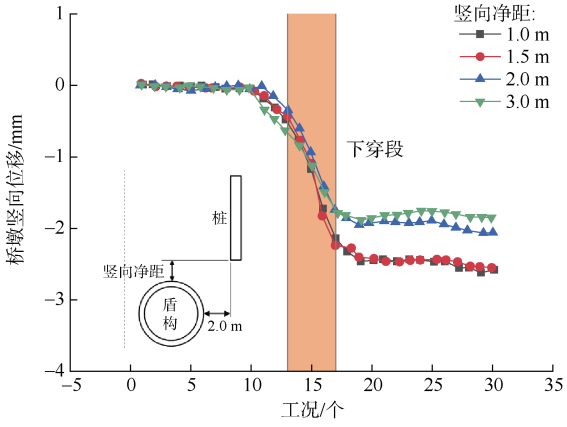
隧道与桩基相对位置关系改变桥墩竖向位移发展曲线如图 8 所示。在这 16 种工况下引起的桥墩累计沉降最大值为 7.1 mm，为盾构正下穿桥桩且竖向净距仅为 1.0 m 时，桥墩沉降控制值 10.0 mm，即盾构下穿施工引起的桥墩沉降是未超过控制标准的。



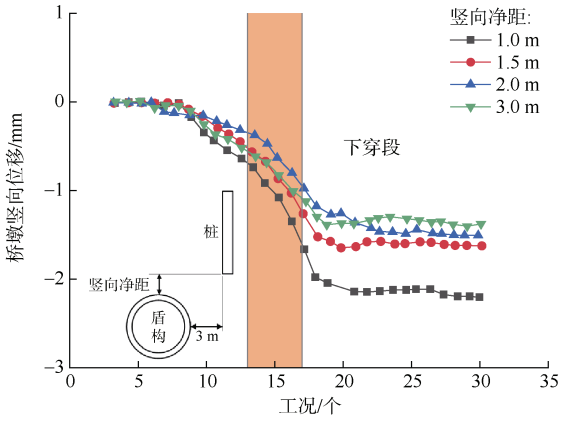
(a) 水平净距为0 m



(b) 水平净距为1.0 m



(c) 水平净距为2.0 m



(d) 水平净距为3.0 m

图 8 盾构与桩基不同相对位置关系下桥墩竖向位移发展曲线

Figure 8 Vertical displacement development curves of bridge abutment under different relative position relationship between shield and pile foundation

4.2.2 对承台的影响

盾构与桥桩不同相对位置关系下承台累计竖向位移如表 12 所示。由于承台累计沉降最大值为 7.4 mm，承台沉降控制值为 10 mm，故盾构下穿施工引起的承台沉降未超过控制标准。

表 12 承台累计竖向位移

Table 12 Cumulative vertical displacement of bearing platform

竖向净距/m	不同水平净距下承台竖向位移/mm			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	7.4	5.2	2.5	2.1
1.5	6.6	4.8	2.3	1.5
2.0	6.1	4.2	2.0	1.4
3.0	4.9	3.5	1.8	1.3

4.2.3 对桩基的影响

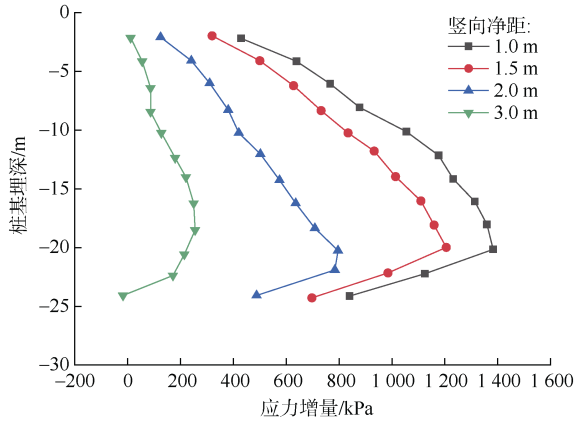
1) 对单桩变形扰动度的影响。盾构施工引起的单桩变形扰动度如表 13 所示。即使盾构在强风化灰岩层中掘进，单桩变形扰动度仍小于 0.4，可认为扰动非常小，属于无影响分区。

2) 对单桩应力扰动度的影响。同工况下桥桩的轴向附加应力曲线如图 9 所示，盾构掘进引起的单桩应力扰动度如表 14 所示。盾构在强风化灰岩层中掘进且在正下穿工况下，单桩应力扰动度明显小于其在中风化岩层掘进的正下穿工况。而在侧穿工况下，盾构施工对桥桩的单桩应力扰动度的影响等级为弱影响或无影响。

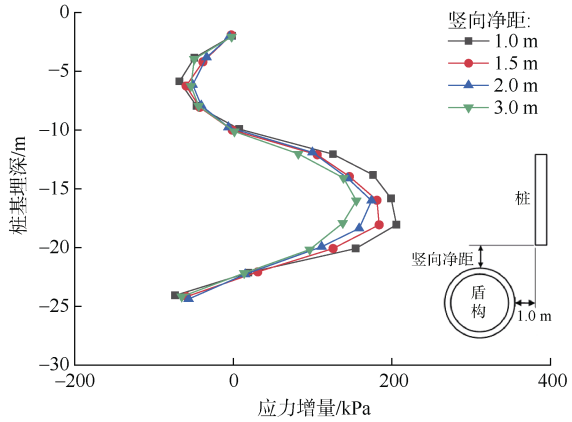
表 13　不同相对位置下单桩变形扰动度

Table 13　Degree of deformation disturbance of single pile in different relative positions

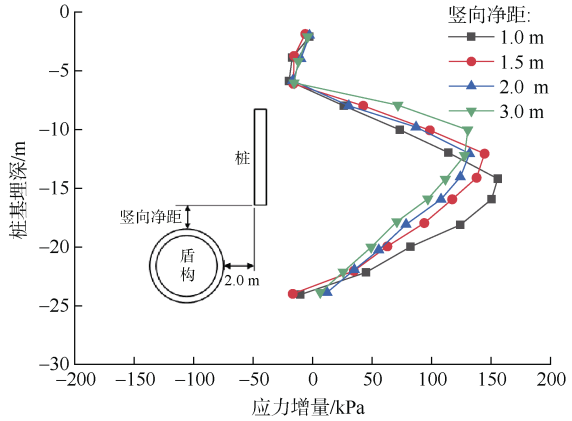
竖向净距/m	不同水平净距下单桩变形扰动度			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	0.345	0.200	0.110	0.095
1.5	0.320	0.180	0.105	0.070
2.0	0.285	0.170	0.090	0.065
3.0	0.235	0.150	0.080	0.060



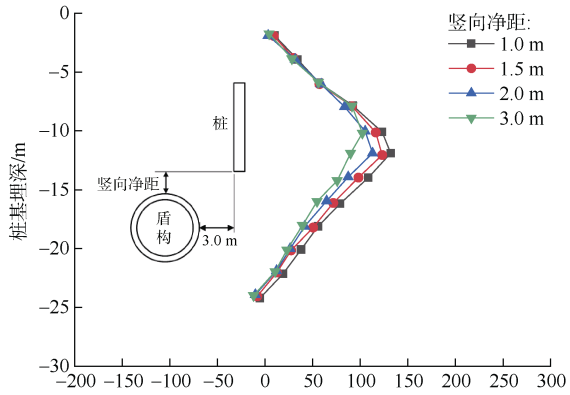
(a) 水平净距为0 m



(b) 水平净距为1.0 m



(c) 水平净距为2.0 m



(d) 水平净距为3.0 m

图 9　桥桩轴向附加拉应力曲线

Figure 9　Axial additional tensile stress curve of bridge pile

表 14　不同相对位置下单桩应力扰动度

Table 14　Single Pile Stress Disturbance in different relative positions

竖向净距/m	不同水平净距下单桩应力扰动度			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	0.706	0.475	0.434	0.317
1.5	0.651	0.447	0.318	0.307
2.0	0.554	0.336	0.303	0.267
3.0	0.495	0.252	0.228	0.218

盾构施工引起的单桩扰动度如表 15 所示。盾构在强风化灰岩层中掘进的工况下，盾构施工对桥桩的单桩应力扰动度的影响等级与其在风化灰岩层中掘进的工况下影响等级类似。由图 9 可知，在正下穿工况下，轴向附加拉应力随竖向净距的变化最明显。

表 15　不同相对位置下单桩扰动度

Table 15　Disturbance of single pile in different relative positions

竖向净距/m	不同水平净距下单桩扰动度			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	1.156	0.743	0.598	0.453
1.5	1.068	0.690	0.465	0.415
2.0	0.923	0.557	0.432	0.365
3.0	0.803	0.442	0.339	0.306

3) 对桩基承载力的影响。各类工况下桩基承载力安全系数如表 16 所示，其承载力安全系数均大于 1。

4.2.4　影响分区

盾构掘进对桥梁下部结构影响等级如表 17 所示。除正下穿工况外，在侧穿工况下盾构掘进对桥梁下部结构影响等级均为弱影响。

表 16 桩基承载力安全系数

Table 16 Safety factor for pile bearing capacity

竖向净距/m	不同水平净距下承载力安全系数			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	1.29	1.01	1.16	1.38
1.5	1.30	1.04	1.21	1.41
2.0	1.31	1.04	1.29	1.43
3.0	1.37	1.06	1.36	1.44

表 17 影响等级分区

Table 17 Impact level subdivision

竖向净距/m	不同水平净距下影响分区			
	0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
1.0	强影响	弱影响	弱影响	弱影响
1.5	强影响	弱影响	弱影响	弱影响
2.0	强影响	弱影响	弱影响	弱影响
3.0	强影响	弱影响	弱影响	无影响

4.3 桥桩嵌岩深度的影响

为了探究桥桩嵌岩深度对桥梁下部结构安全稳定的影响，本节计算嵌岩深度分别为 4.0、2.0 和 1.0 m 3 种工况下盾构掘进对桥墩、承台及桥桩的影响。

4.3.1 对桥墩的影响

随着桥桩嵌岩深度改变，桥墩的竖向位移发展曲线如图 10 所示。桥墩累计沉降量最大值为 1.5 mm，桥墩累计沉降最大值未超过控制标准。

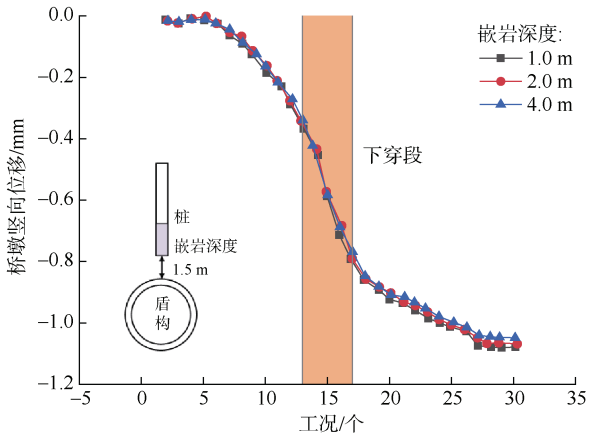


图 10 桥墩竖向位移发展曲线

Figure 10 Vertical displacement development curves

4.3.2 对承台的影响

随着桥桩嵌岩深度改变，承台的累计沉降值无明显变化，均为 1.3 mm。且盾构下穿施工引起的承台沉降未超过控制标准。

4.3.3 对桥桩的影响

1) 对单桩变形扰动度的影响。随着桥桩嵌岩深度改变，桥桩的单桩变形扰动度无明显变化，均为 0.065。

2) 对单桩应力扰动度的影响。不同工况下桥桩的轴向附加应力曲线如图 11 所示，盾构掘进引起的单桩应力扰动度分别为 1.418、1.345 和 1.285。盾构掘进引起的单桩扰动度分别为 1.631、1.551 和 1.485。

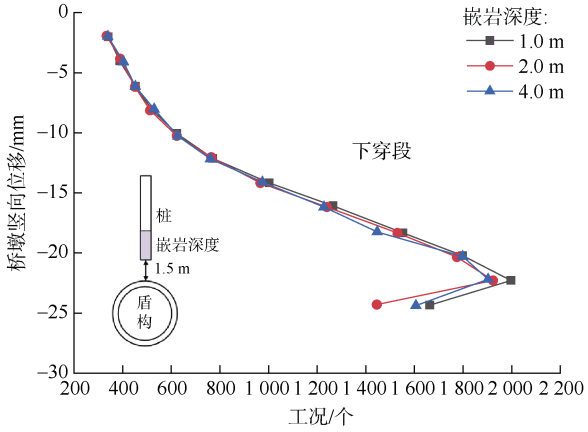


图 11 桥桩轴向附加拉应力曲线

Figure 11 Axial additional tensile stress curve of bridge pile

3) 对桩基承载力的影响。各工况下桩基承载力安全系数分别为 4.34、4.45 和 4.43。

4.3.4 影响分区

根据不同工况下盾构施工引起的桥梁下部结构沉降、单桩扰动度以及桩基剩余承载力可知，盾构掘进对桥梁下部结构的影响等级均为强影响。

5 结论

本章利用 FLAC 3D 建立隧道-土层-既有桥梁下部结构三维数值模型，分析了盾构与既有群桩基础不同相对位置关系下盾构分别在中风化与强风化灰岩层中掘进、桥桩不同嵌岩深度等不同工况下，盾构下穿施工对既有桥梁下部结构的影响，主要获得以下结论：

1) 盾构在中风化及强风化灰岩层下穿群桩基础过程中，在水平净距 3 m 范围内及竖向净距 1～3 m 范围内，桥墩、承台及桥桩的变形均未超过其变形控制值。盾构在中风化灰岩层中掘进时，由于围岩条件较好，桩基受到的变形扰动影响较小，以应力扰动为主。盾构在强风化灰岩层中掘进时所受到的变形扰动度有所增加，应力扰动度有所减小。

2) 盾构在中风化灰岩层和强风化灰岩层中施工时，随着盾构隧道与既有桩基间水平净距与竖向净距的增大，盾构施工对桥梁下部结构的影响等级逐渐减弱。其中，在中风化灰岩层中，当水平净距为 0 m、竖向净距小于等于 2.0 m 的 3 种工况下，盾构施工对

群桩的影响等级为强影响；在强风化灰岩层中，当水平净距为 0 m、竖向净距小于等于 3.0 m 的 4 种工况下，盾构施工对群桩的影响等级为强影响。

3) 当桥桩嵌岩深度不同时，由于桥桩所嵌入的岩层较好，盾构施工引起的桥梁下部结构的附加变形及附加轴向应力相差很小，且在 3 种嵌岩深度下，盾构施工对桥梁下部结构的影响等级均为强影响。

参考文献

[1] HUANG Kan, SUN Yiwei, YANG Junsheng, et al. Three-dimensional displacement characteristics of adjacent pile induced by shield tunneling under influence of multiple factors[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(5): 1597-1615.

[2] 林超，姜蓉，肖树聪，等. 盾构近接施工对摩擦桩基承载性能的影响机制及控制技术研究[J]. 岩土工程学报，2023, 45(S2): 241-246.
LIN Chao, JIANG Rong, XIAO Shucong, et al. Mechanism of influences of shield construction nearby friction pile foundation on its bearing capacity and its controlling techniques[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(S2): 241-246.

[3] 来高峰，庞晋，叶建华，等. 桩基施工对邻近运营盾构隧道结构健康趋势影响研究[J]. 岩土工程技术，2024, 38(2): 137-142.
LAI Gaofeng, PANG Jin, YE Jianhua, et al. Influence of pile foundation construction on health trend of adjacent shield tunnel structures[J]. Geotechnical engineering technique, 2024, 38(2): 137-142.

[4] 唐伟超，赵东平，朱龙. 砂卵石地层双线盾构隧道下穿桥梁影响规律和加固方案研究[J]. 现代隧道技术，2024, 61(S1): 524-533.
TANG Weichao, ZHAO Dongping, ZHU Long. Study on influence law and reinforcement scheme of double-line shield tunnel under bridge in sandy pebble stratum[J]. Modern tunnelling technology, 2024, 61(S1): 524-533.

[5] 廖晨，刘超，张子新，等. 超大直径泥水盾构施工对相邻单桩位移影响研究[J]. 地下空间与工程学报，2020, 16(4): 1248-1257.
LIAO Chen, LIU Chao, ZHANG Zixin, et al. Investigation on the effect of large-diameter slurry shield tunneling on the deformation of adjacent single pile[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2020, 16(4): 1248-1257.

[6] 周锦强，王海林，杨雄，等. 盾构隧道穿越人行天桥桩基的变形控制技术研究[J]. 结构工程师，2023, 39(1): 148-154.
ZHOU Jinqiang, WANG Hailin, YANG Xiong, et al. Study on pile foundation settlement and construction control technology of shield tunnel crossing pedestrian bridge[J]. Structural engineers, 2023, 39(1): 148-154.

[7] 张杰. 高铁盾构隧道施工对邻近桩基影响数值分析[J]. 城市道桥与防洪，2022(3): 164-167.
ZHANG Jie. Numerical analysis on influence of high-speed railway shield tunneling on adjacent piles[J]. Urban roads bridges & flood control, 2022(3): 164-167.

[8] 刘昕铭. 盾构隧道小净距正下穿桥梁桩基设计与施工[J]. 四川建筑，2023, 43(3): 70-72.
LIU Xinming. Design and construction of shield tunnel under bridge pile foundation with small clear distance[J]. Sichuan architecture, 2023, 43(3): 70-72.

[9] 方正，刘俊岩，刘燕. 双线盾构隧道下穿既有桩基桥梁变形影响分析[J]. 科技通报，2023, 39(5): 96-101.
FANG Zheng, LIU Junyan, LIU Yan. Analysis on deformation effect of double-line shield tunnel crossing existing pile foundation bridge[J]. Bulletin of science and technology, 2023, 39(5): 96-101.

[10] 成炜康，郑选荣，吕高，等. 郑州地区双线盾构隧道开挖对桩基础内力与位移的影响[J]. 中国安全生产科学技术，2020, 16(2): 79-84.
CHENG Weikang, ZHENG Xuanrong, LYU Gao, et al. Influence of double-line shield tunnel excavation on internal force and displacement of pile foundation in Zhengzhou[J]. Journal of safety science and technology, 2020, 16(2): 79-84.

[11] 周鑫. 砂层内盾构隧道小角度侧穿高铁桥梁群桩控制技术[J]. 都市快轨交通，2024, 37(5): 87-92.
ZHOU Xin. Deformation control technology of high-speed railway bridge side-crossed at a small angle by shield tunneling in sandy stratum[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(5): 87-92.

[12] 汤劲松，张宝，赵书银，等. 盾构隧道下穿不同基桩数量群桩基础施工影响[J]. 铁道工程学报，2022, 39(11): 94-99.
TANG Jinsong, ZHANG Bao, ZHAO Shuyin, et al. Construction influence of pile group foundation with different number of foundation piles undercrossed by shield tunnel[J]. Journal of railway engineering society, 2022, 39(11): 94-99.

[13] 贺思悦. 盾构隧道下穿对高铁 CFG 桩复合地基路基影响与控制技术研究[D]. 西安：长安大学，2022.
HE Siyue. Study on the influence of shield tunnel underpass on CFG pile composite foundation subgrade of high-speed railway and its control technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.

[14] 汤友富，谌启发，丁宇航，等. 双线盾构隧道下穿对邻近高铁桥梁群桩基础影响研究[J]. 现代交通与冶金材料，2023, 3(5): 58-66.
TANG Youfu, CHEN Qifa, DING Yuhang, et al. Influence of buried depth and diameter of shield tunnel on pile foundation of existing bridge[J]. Modern transportation and metallurgical materials, 2023, 3(5): 58-66.

[15] 王健，田刚，贾哲，等. 深部巷道围岩变形规律及支护参数优化模拟研究[J]. 煤炭技术，2025, 44(2): 45-51.
WANG Jian, TIAN Gang, JIA Zhe, et al. Simulation study on deformation law of surrounding rock in deep tunnels and optimization of support parameters[J]. Coal technology, 2025, 44(2): 45-51.

（编辑：傅依萱）