

土-岩复合地层盾构掘进对桥梁变形影响分析*

李亚翠¹, 杨新安², 裴子钰², 郭乐²

(1. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235;
2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:依托深圳地铁11号线宝安—碧海湾区间盾构穿越桥梁桩基工程,采用FLAC3D有限差分软件研究土-岩复合地层盾构近距离掘进对桥梁桩基础、桥面的变形影响规律及影响范围,并与实测结果进行对比。结果表明:隧道施工对周围地层的影响可划分为塑性破坏区、弹性区和无影响区3个区域;盾构隧道掘进引起的桥面沉降较大,盾构对桥面变形的影响范围为盾构掘进面距桥面为 $-5D\sim 4D$;位于2条隧道之间的桥梁桩基受到2条隧道的影响,桩身竖向位移较大,且最大竖向位移位于桩顶;位于隧道侧方的桩基,盾构施工引起的 X 方向水平位移较大,且施工对其影响范围也更大,具有一定的滞后性。

关键词:土-岩复合地层;盾构隧道;近接工程;桥梁桩基;数值模拟

中图分类号:U45

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)02-0533-10

Influence Analysis on Bridge Deformation Caused by Shield Construction in Soil-rock Compound Strata

Li Yacui¹, Yang Xinan², Pei Ziyu², Guo Le²

(1. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, P.R. China;
2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, P.R. China)

Abstract: Relying on the bridge pile foundation engineering of Baoan-Bihaiwan shield tunnel of Shenzhen Metro Line 11, FLAC3D software is used to research the influence rule and influence scope of the deformation of the bridge pile foundation and the bridge deck caused by shield tunneling from close range in Soil-rock compound strata, and the research is compared with the measured results. The results show that: The influence of tunnel construction on the surrounding strata can be divided into three areas: plastic failure zone, elastic zone and non-affected zone. Bridge deck settlement caused by Shield tunnel construction is larger, the influence scope of shield on bridge deck deformation is $-5D$ to $4D$ from Shield tunnel excavation face to bridge deck; the bridge pile foundation between the two tunnels is under the influence of two tunnels, and the vertical displacement of the pile body is larger; the maximum vertical displacement is located at the top of pile; for the pile foundation located in the tunnel side, the horizontal displacement value in X direction is bigger, and the influence scope is wider caused by shield construction; and the influence has certain hysteresis.

Keywords: soil-rock compound strata; shield tunnel; approaching engineering; bridge pile; numerical simulation

0 引言

土-岩复合地层中,土层和岩层的强度、组成等

物理力学性质相差悬殊。盾构在土-岩复合地层中施工产生的地层移动与变形较为复杂,当在这种地层中隧道与既有桥梁桩基接近时,盾构施工产生的

* 收稿日期:2018-10-22(修改稿)

作者简介:李亚翠(1990-),女,陕西咸阳人,硕士生,主要从事交通隧道与地下工程方面的研究。E-mail:2443869517@qq.com

地层移动与变形则会导致既有桥梁桩基产生更为复杂的附加变形和内力,进而影响到既有桥梁的安全和正常使用。

盾构隧道施工对邻近桩基及上部结构的影响是一个极为复杂的三维动态问题,包括隧道掘进对周围地层的影响、对桩基变形与内力的影响等。目前国内外学者对这一类问题已开展了一些研究工作。在模型试验研究^[1-4]方面,主要研究了在不同土层性质、不同桩洞距条件下隧道施工对地层变形及其对邻近既有桩基的影响。根据隧道施工对邻近桩基的影响程度,可以将桩与隧道的位置关系划分为 3 个范围:小于 $0.25D$ 时,桩受严重影响; $0.25D \sim 2D$ 时,桩基竖向位移随土体损失及桩洞距而发生变化;超过 $2D$ 时,桩基几乎不受影响^[5]。理论分析方面,Loganathan 等^[6]提出了“两阶段”分析方法来研究隧道掘进对既有桩基侧向与轴向的影响。李早等^[7]采用“两阶段”分析方法,提出了隧道对群桩竖向位移和内力影响的解析方法。数值模拟是目前研究此类问题最为常用且便捷的方法,可以将桥梁结构和周围土体以及盾构隧道施工视为整体进行计算分析^[8-10]。Loganathan 等^[11]通过引入边界元方法来分析隧道穿越邻近单桩与群桩施工的影响。Gordon 等^[12]采用三维弹塑性本构模型,通过考虑土体的固结作用来预测桩-土-隧道之间的相互作用机理。朱逢斌^[13]利用数值模拟方法,总结出盾构穿越既有桩基施工的影响因素,并研究了各因素的变化对邻近单桩变形和内力以及地表沉降的影响。黄飞^[14]采用数值模拟方法研究了桩体在上部荷载、桩长、桩洞距、桩径等参数变化时桩体的位移与内力响应。

综上所述,国内外关于盾构穿越桥梁桩基的影响研究目前仍是以均质地层为主,而考虑土-岩复合地层的相关研究则很少。本文以深圳地铁宝碧区间穿越桥梁桩基工程为背景,对土-岩复合地层盾构穿越桥梁桩基础、桥面的变形情况进行了研

究,以期类似工程提供借鉴。

1 盾构隧道施工对邻近桥梁桩基影响分析

当盾构隧道穿越既有桥梁桩基施工时,隧道、土体、既有桩基及上部桥梁结构四者之间将共同作用,相互影响;四者之间的相互作用关系可以简述为:隧道掘进—周围土体变形并对外传递—作用于桥梁桩基—对桥梁上部结构产生影响。

盾构施工不可避免地会对周围土体产生扰动,从而产生地层变形。地层变形作用在既有桩基上,桩周土体的受力状态也产生了相应的改变,垂直的土体位移分量将会在桩基上施加不利的负摩阻力,引起桩基的沉降并降低桩基的承载力;水平方向的分量将会在桩基中引起侧向的变形和弯矩。桥梁桩基的变形会对上部桥梁结构产生一定的影响,使得上部桥梁结构产生附加变形,进而带来附加内力。

土层的主要沉降区和主要的水平位移区也是桩基受影响最主要的区域。盾构隧道掘进对土层主要的影响区域与盾构隧道掘进对桩基的主要影响区域有很高的相似性^[15]。隧道施工对周围地层的影响区域如图 1 所示,假如地层中没有桥梁桩基,且隧道上覆土层较厚,隧道掘进跨度较小时,由于土体黏聚力和内摩擦力的作用,隧道掘进后地层中将会形成承载拱,此时隧道施工对周围地层的影响可划分为 3 个区域:I 区——塑性破坏区,即隧道拱顶、破裂面与承载拱之间的区域,该区域内地层发生塑性变形和移动,若无支撑作用,地层将会塌落;II 区——弹性区,即破裂面与隧道掘进影响边界之间的区域,地层发生弹性变形和移动或者应力升高;III 区——无影响区,即不受隧道掘进影响的区域,地层一直保持隧道掘进前的状态。当隧道埋深较浅或者隧道跨度较大时,掘进后 I 区和 II 区的范围将会扩大,隧道施工产生的影响甚至会延伸到地表^[16]。

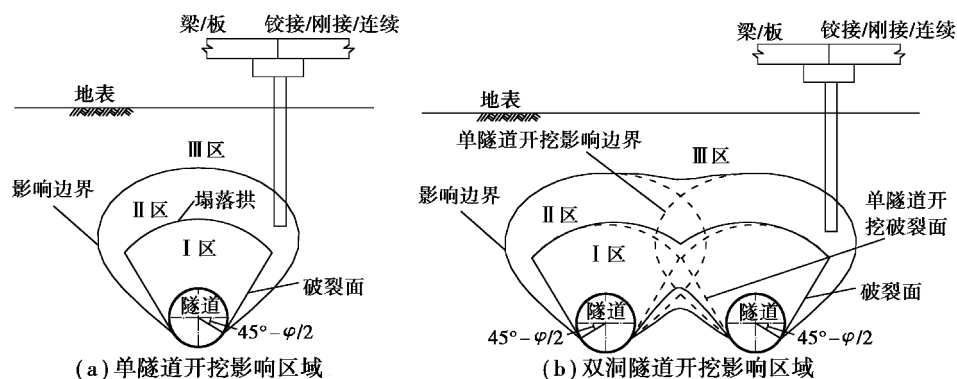


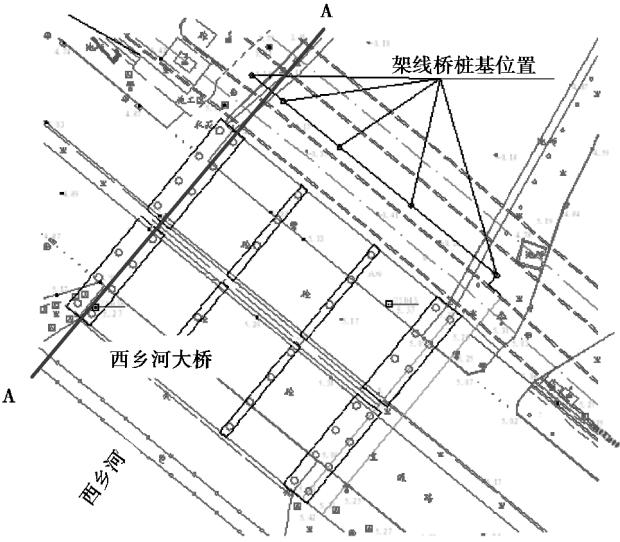
图 1 隧道施工影响区域划分示意图

Fig. 1 Division of influence area of tunnel construction

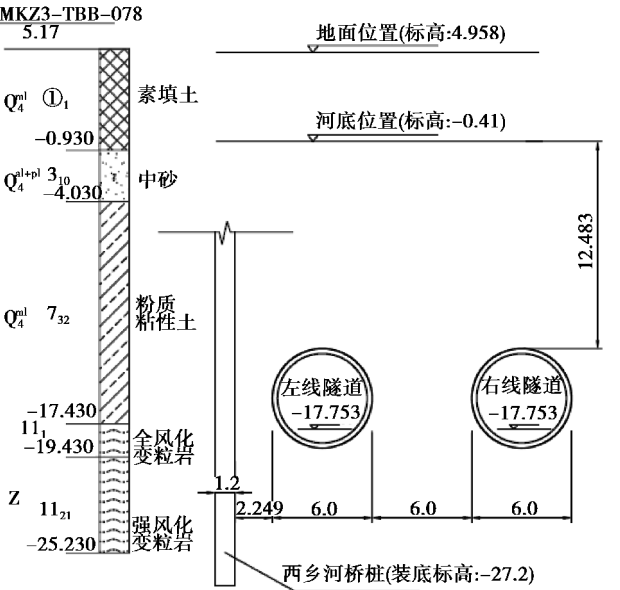
2 土-岩复合地层盾构施工对邻近桥梁桩基变形数值模拟分析

2.1 工程背景

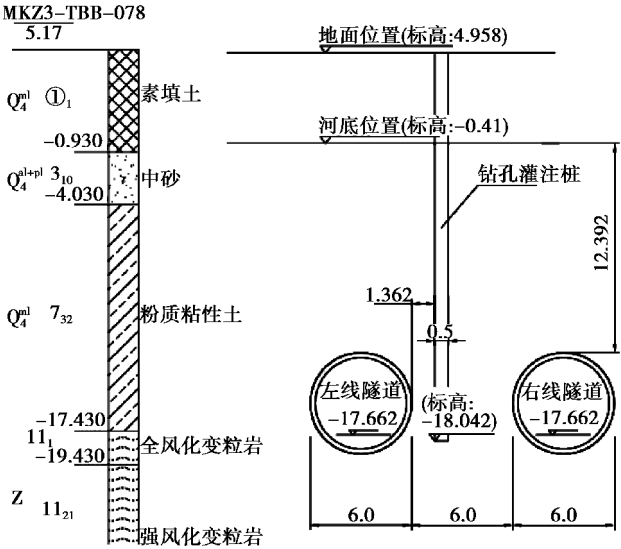
深圳地铁 11 号线宝碧区间在里程 YCK22+615~YCK22+675 穿越西乡河大桥和 110 kV 架线桥。区间隧道与桥梁桩基的相对位置关系如图 2 所示。隧道洞身穿越地层为典型的土-岩复合地层,上为残积硬塑状粉质粘土,下为全风化变粒岩和全风化片麻状混合花岗岩,隧道与桩基所夹土层多为淤泥、含有机质砂、粘土、细砂、粗砂、硬塑状砂质粘性土、可塑~硬塑状粉质粘土、全风化片麻混合花岗岩。



(a) 平面图



(b) A—A剖面图(西乡河大桥)



(c) A—A剖面图(110 kV架线桥)

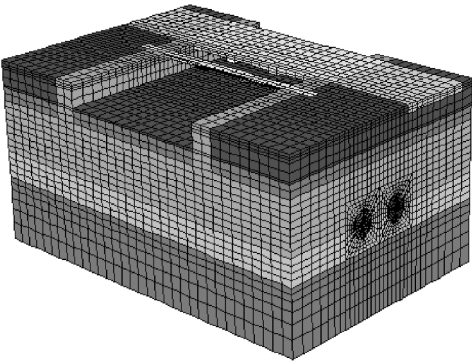
图 2 区间隧道与桥梁桩基的相对位置关系图
Fig. 2 Relative position of the interval tunnel and bridge pile foundation

2.2 模型的建立

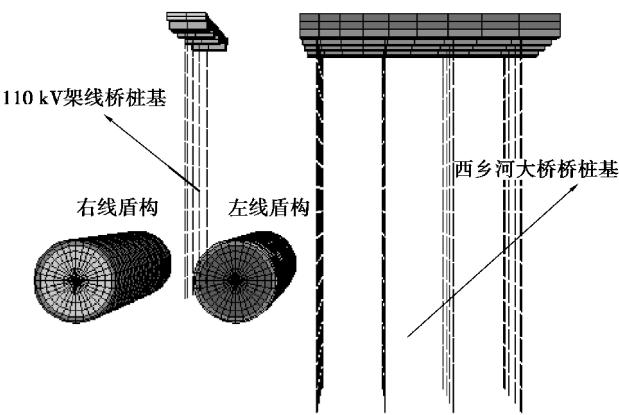
采用 FLAC3D 有限差分软件,根据隧道与桥梁相对位置关系建立三维模型。模型尺寸为:65 m×45 m×99 m(X 、 Y 、 Z 方向),隧道埋深为 18 m,隧道直径为 6 m。模型左、右两边 X 方向水平约束,前、后 Y 方向水平约束,底部 Z 方向竖向约束,上表面自由,三维计算模型如图 3 所示。桥面测点布置与桥梁桩基编号如图 4 所示。土体选用实体单元模拟,采用弹塑性 Mohr-Coulomb 本构模型,管片、承台与桥面均采用实体单元模拟,采用各向同性弹性本构模型。桩体按弹性材料考虑,采用 FLAC3D 软件中的桩单元模拟,桩与网格接触面的剪切特性与法向特性通过剪切耦合弹簧参数和法向耦合弹簧参数模拟,计算分析中,根据现有的地质资料和相关规范,采用如表 1 所示的材料物理力学参数。

Block Group

- 素填土
- 中砂
- 粉质粘性土
- 全风化岩
- 强风化岩
- 开挖左
- 管片左
- 超挖左
- 开挖右
- 管片右
- 超挖右
- 河岸加同
- 桩周
- 架线桥
- 桥面
- 承台
- 道路



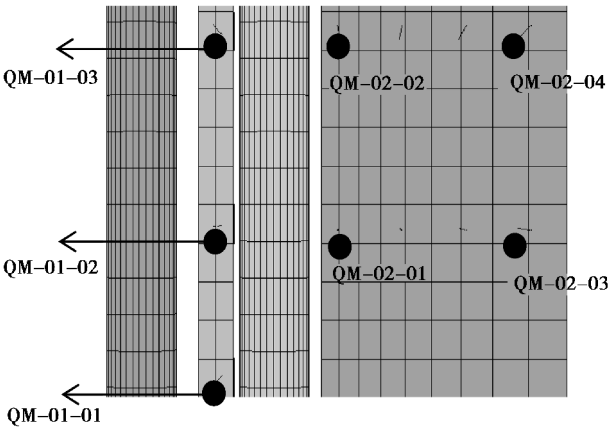
(a) 整体模型图



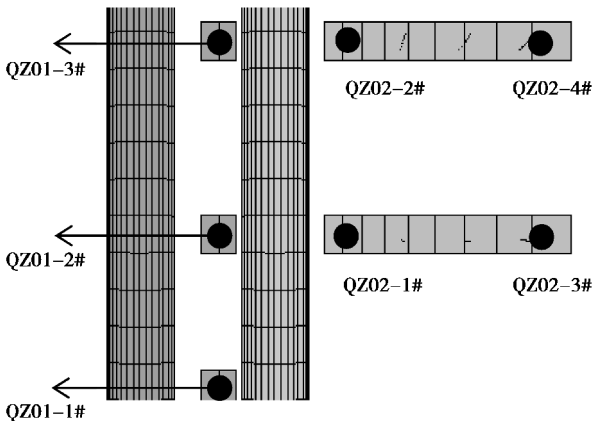
(b)隧道与桩基位置关系图

图 3 三维计算模型图

Fig. 3 Three-dimensional calculation model diagram



(a)桥面测点布置图



(b)桥量桩基编号

图 4 测点布置与桩基编号图

Fig. 4 Diagram of measuring points and pile foundation numbering

表 1 计算物理力学参数

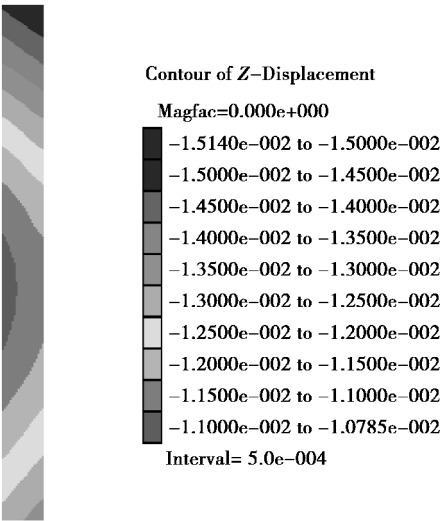
Table 1 Physico-mechanical parameters

材料	重度 $/(kN \cdot m^{-3})$	弹性 模量 $/MPa$	泊松 比	黏聚 力/ kPa	内摩 擦角 $/(^{\circ})$	厚度 $/m$
素填土	17.5	18.1	0.33	20.5	16	5.888
中砂	19.5	26.1	0.3	0	28	3.1
粉质粘土	18.2	25	0.28	25.5	22.5	12
全风化变粒岩	19.5	52	0.28	30	26.5	6
强风化变粒岩	20.5	80	0.25	40	28.5	20
桩承台	25	3×10^4	0.2	/	/	0.6
桩基础	25	3×10^4	0.2	/	/	/
西乡河大桥桥梁	25	3×10^4	0.2	/	/	1.2
110 kV 架线桥桥梁	25	3×10^4	0.2	/	/	0.6
管片衬砌	25	2.76×10^4	0.2	/	/	0.3

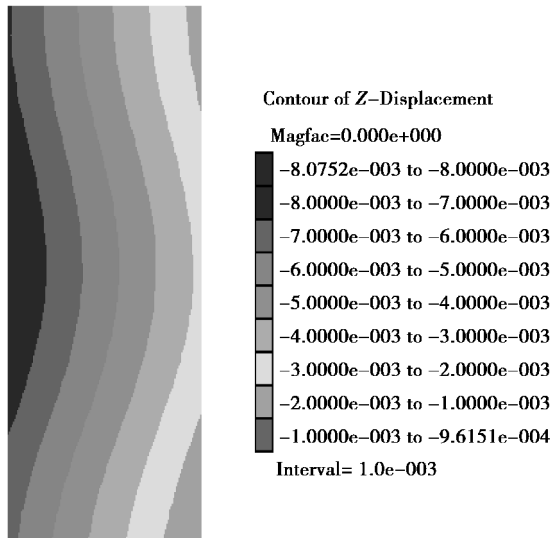
2.3 数值模拟结果分析

2.3.1 桥面变形分析

左、右线全部贯通后桥面的竖向位移、 X 方向水平位移分别如图 5、6 所示。桥面板全部表现为沉降,110 kV 架线桥最大沉降为 15.14 mm,位于桥台上方,西乡河大桥最大沉降为 8.07 mm,位于跨中靠近隧道一侧。桥面板 X 方向水平位移全部为负值,表示桥面在 X 方向向着左侧隧道移动,110 kV 架线桥的水平位移在 1 mm 以内,西乡河大桥最大水平位移为 3.42 mm,这说明距离线路中线越远的桥梁,桥面水平位移越大。



(a) 110 kV架线桥



(b) 西乡河大桥

图5 桥面竖向位移(单位: mm)

Fig. 5 Vertical displacement of bridge deck (unit: mm)

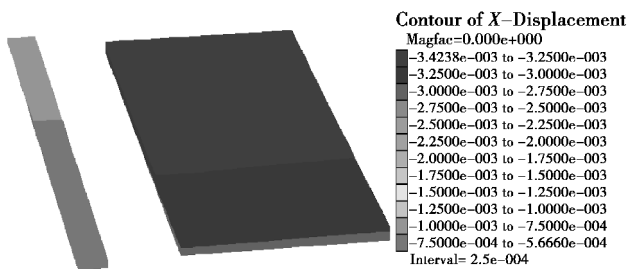
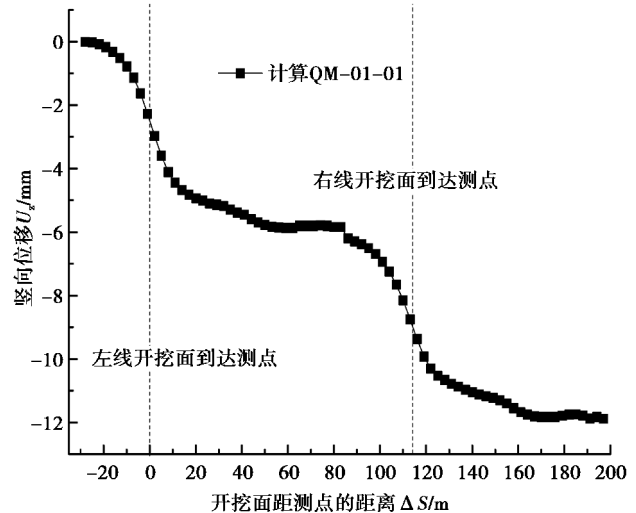


图6 桥面X方向水平位移(单位: mm)

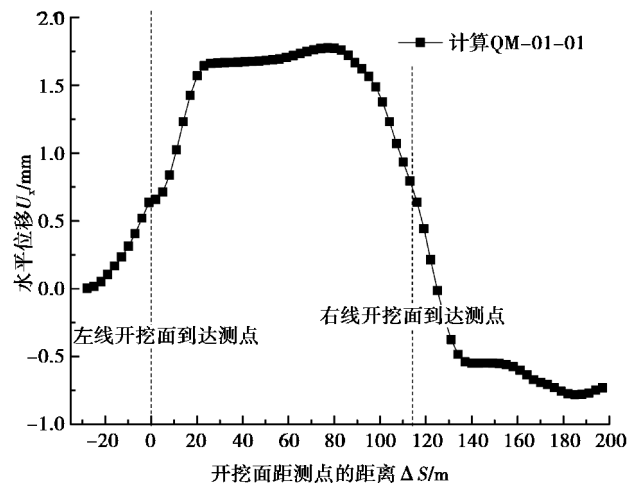
Fig. 6 Horizontal displacement in X direction of bridge deck (unit: mm)

图7为架线桥桥面测点QM-01-01的位移模拟计算曲线。图7(a)中在左线掘进面到达测点之前21 m(3.5D)至掘进面通过测点后18 m(3D)期间内桥面沉降速率较大,且在掘进面距测点-2D~2D范围内,沉降线性增长,之后桥面沉降逐渐趋于稳定;类似地,图7(b)中在左线掘进面到达测点之前30 m(5D)至掘进面通过测点后24 m(4D)期间架线桥桥面向着左线隧道移动,且移动速率较大,X方向的水平位移线性增长,之后桥面X方向的水平位移逐渐趋于稳定。右线盾构施工时,桥面竖向位移和X方向水平位移的变化规律与左线盾构施工时一致。

综上所述,盾构隧道施工引起的110 kV架线桥桥面竖向位移与西乡河大桥桥面X方向的水平位移较大,盾构施工对桥面变形的影响范围为盾构掘进面距桥面-5D~4D,在此范围内,要严格控制盾构施工参数,避免盾构施工对邻近桥梁产生较大



(a) 竖向位移



(b) X方向水平位移

图7 桥面测点QM-01-01的位移曲线

Fig. 7 Displacement curve of bridge deck measuring point QM-01-01

影响。

2.3.2 桩基变形分析

架线桥桩基位于两条隧道之间,受2条隧道施工的共同影响,桩身两侧土体的水平位移较小而竖直位移较大。西乡河大桥桩基位于隧道侧方,近隧道一侧桩几乎只受近侧隧道施工的影响,距离隧道较远的桩几乎不受隧道掘进的影响。与架线桥桩基水平位移相比,盾构施工对西乡河大桥桩基水平位移的影响程度和影响范围更大。因此,本节重点对架线桥桩基竖向位移与西乡河大桥桩基X方向水平位移进行分析。

(1)架线桥桩基竖向位移分析:图8为不同施工阶段架线桥3根桩QZ01-1#、QZ01-2#与QZ01-3#竖向位移沿桩身分布的变化情况。由图8可知,桩

身沉降最大值出现在桩顶,桩身大约有 0.4 mm 的压缩量。土-岩复合地层中由于土层软硬程度差异较大,桩顶沉降要大于均质地层中同位置的桩基^[17]。均质地层中,桩身沉降最大值亦出现在桩顶,竖向位移沿桩身分布的变化情况与土-岩复合地层略有不同;均质地层中沿桩身竖向位移分布曲线变化较为平缓,而土-岩复合地层中桩身竖向位移在隧道拱顶附近变化速率较大,在桩顶和桩底附近变化速率较小。

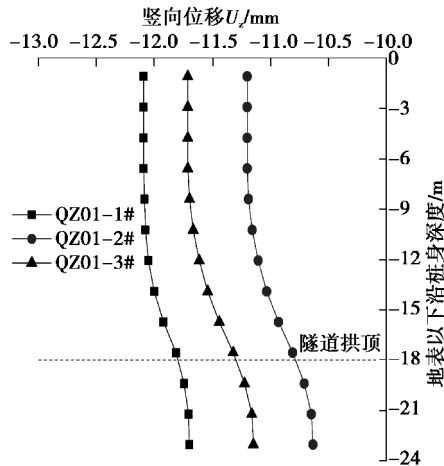


图 8 架线桥桩基竖向位移 U_z

Fig. 8 Vertical displacement U_z of trolley bridge pile

图 9 分别为 3 根桩桩身最大竖向位移随盾构掘进变化曲线图。在左线掘进面到达桩基之前约 60 m (10D) 处桩顶都开始产生沉降但沉降量很小。随着盾构掘进,在左线掘进面到达桩基之前约 12 m (2D) 处桩顶沉降速率增大,直至左线掘进面通过桩基后约 15 m (2.5D) 桩顶沉降速率逐渐减小;在右线盾构掘进时,桩顶沉降具有相似的规律。

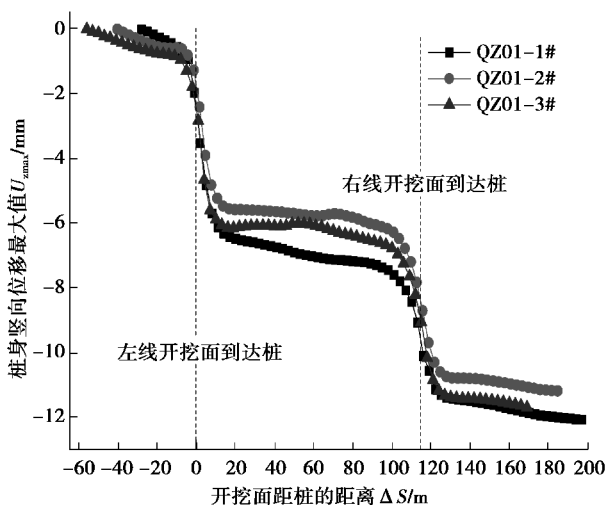


图 9 架线桥桩基竖向位移 U_z

Fig. 9 Vertical displacement U_z of trolley bridge pile

由表 2 可知,左线施工引起的桩基竖向位移所占最终位移的百分比超过 51%,说明距既有桩基越近的隧道施工对桩基产生的影响越大。

表 2 不同施工阶段 110 kV 架线桥桩身最大竖向位移

Table 2 Maximum vertical displacement of 110 kV trolley bridge in different construction stages

桩号	QZ01-1#	QZ01-2#	QZ01-3#
左线贯通后桩顶最大竖向位移/mm	-7.21	-5.72	-6.03
右线贯通后桩顶最大竖向位移/mm	-12.09	-11.2	-11.71
左线施工所占比例/%	59.63	51.10	51.45

由上述分析可知,盾构掘进对架线桥桩基桩顶沉降的影响范围约为盾构掘进面距桩基-2D~2.5D,且在距离桩基-1D~1D 范围内,桩身沉降变化最为显著,最大沉降呈线性增长。

(2) 西乡河大桥桩基 X 方向水平位移分析:图 10 为不同施工阶段西乡河大桥四根桩 QZ02-1#、QZ02-2#、QZ02-3#与 QZ02-4#桩身 X 方向水平位移沿桩身分布的变化情况。由图可知,由于西乡河大桥位于两条隧道外侧,因此在整个盾构推进过程中,桩身向着隧道方向运动,桩 QZ02-1#和 QZ02-2#桩身 X 方向累计水平位移最大值均出现在桩顶,在隧道拱顶上方随着桩身深度的增加而减小,直至土、岩分层界面深度附近达到最小值,而后随着深度的增加水平位移逐渐增大;而桩 QZ02-3#与 QZ02-4#桩身 X 方向累计水平位移最大值均出现在桩底,且其 X 方向水平位移在盾构掘进过程中几乎一直在缓慢增大,说明桩离隧道越远,由于土体变形过程缓慢,桩身变形具有滞后性。与均质地层相比,土-岩复合地层中桩顶与桩底 X 方向水平位移值相差不大。均质地层中桩身 X 方向水平位移沿桩身分布的变化情况与土-岩复合地层类似,桩顶和桩底附近 X 方向水平位移均向着隧道方向,但均质地层中 X 方向水平位移最小值出现在隧道顶部,土-岩复合地层中 X 方向水平位移最小值则出现在土、岩分层界面^[15]。

图 11 分别为四根桩桩身 X 方向最大水平位移随盾构掘进变化曲线图。由图 11 可知,在左线掘进面到达桩基之前约 15 m (2.5D) 处桩顶开始向着左线隧道移动且移动速率逐渐增大,直至左线掘进面通过桩基后约 21 m (3.5D) 桩顶水平变形逐渐趋于稳定;在右线施工时,桩顶变形具有相似的规律。

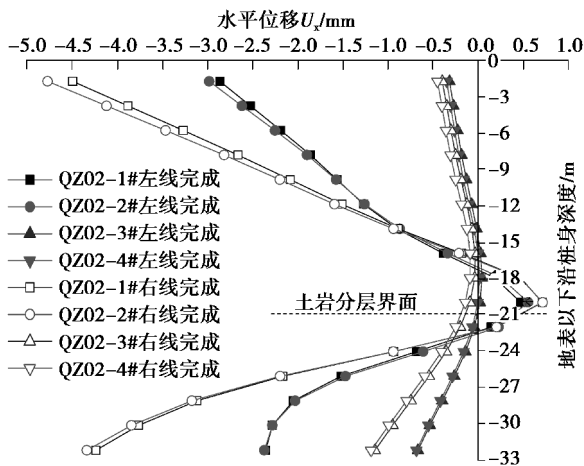


图 10 西乡河大桥桩基水平位移 U_x

Fig. 10 Horizontal displacement U_x of Xixianghe bridge pile

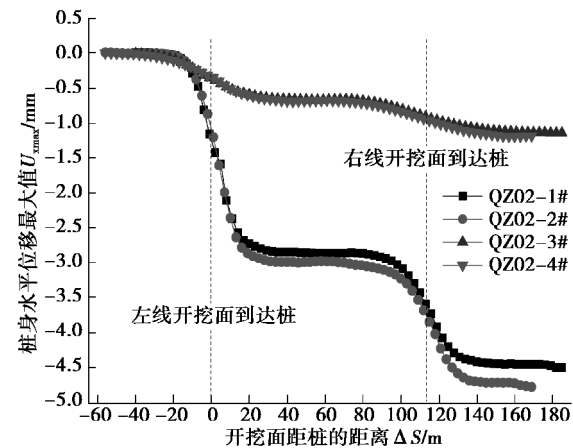


图 11 西乡河大桥桩基 $U_{x\max}$ - ΔS 关系曲线

Fig. 11 $U_{x\max}$ - ΔS curves of Xixianghe bridge pile

由表 3 可知,桩与隧道的间距越小,隧道施工引起的桩基 X 方向的水平位移越大,先掘隧道对桩基 X 方向的水平位移的影响较大,且桩距离隧道越近,先掘隧道对桩基水平位移的影响越大。

表 3 不同施工阶段西乡河大桥桩身 X 方向最大水平位移

Table 3 Maximum horizontal displacement in X direction of Xixianghe bridge in different construction stages				
桩号	QZ02-1#	QZ02-2#	QZ02-3#	QZ02-4#
左线贯通后桩身 X 方向最大水平位移/mm	-2.86	-2.98	-0.66	-0.68
右线贯通后桩身 X 方向最大水平位移/mm	-4.50	-4.77	-1.14	-1.19
左线施工所占比例/%	63.61	62.41	58.13	57.45

由上述分析可知,盾构掘进对西乡河大桥桩顶 X 方向水平位移的影响范围约为盾构掘进面距桩基 $-2.5D \sim 3.5D$,且在距离桩 $-1.5D \sim 2.5D$ 范围内,桩身 X 方向最大水平位移的变化最明显,呈线性增长。

3 工程实例与验证

地架线桥与西乡河大桥附近的地表及桥面观测点布置见图 12,其中编号以 D 开头的为地面测点,以 Q 开头的为桥面测点。

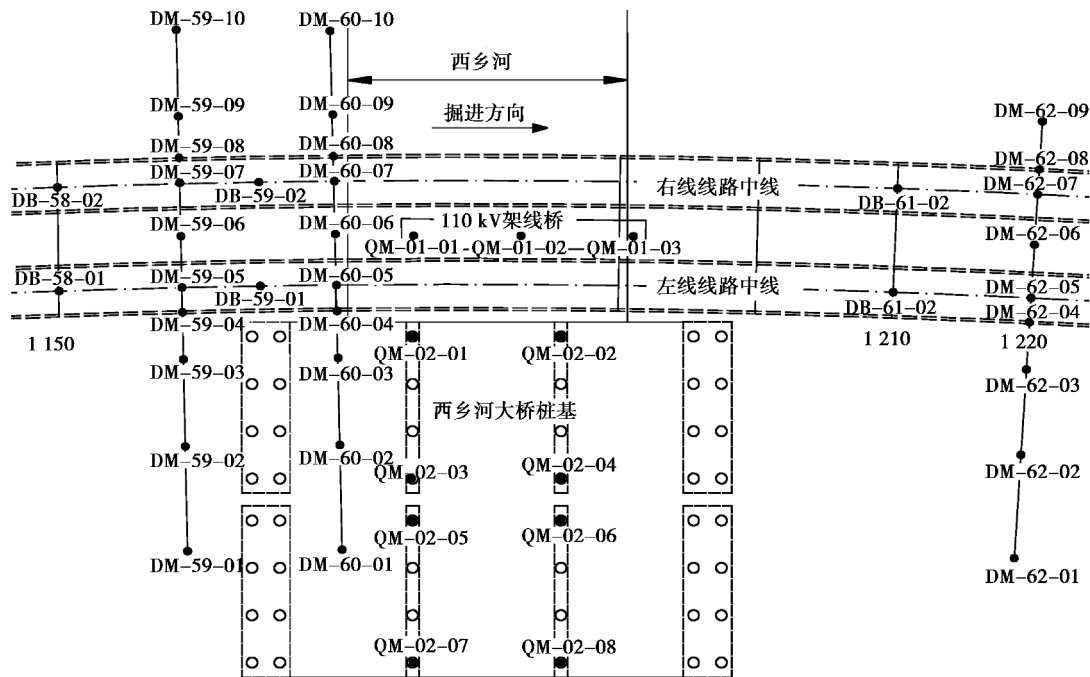


图 12 地表及桥面观测点布置图

Fig. 12 Layout of monitoring points in ground surface and bridge deck

选取与数值模拟中架线桥桥面测点 QM-01-01 位置一致的桥面观测点读取实测值。观测点 QM-01-01 竖向位移与 X 方向水平位移随盾构掘进面距测点的距离变化的现场监测曲线与数值模拟计算曲线的对比图如图 13 所示。由于架线桥位于 2 条隧道中间,因此在左线盾构掘进面到达监测点之前约 150 m ($25D$) 处桥面观测点开始产生沉降或隆起,随着盾构掘进,在左线盾构掘进面到达监测点之前约 60 m ($10D$) 处观测点沉降速率增大,直至左线盾构掘进面通过监测点后约 40 m ($7D$) 沉降速率逐渐减小;类似地,观测点在左线盾构掘进

面到达测点之前约 150 m ($25D$) 处已开始背离左线隧道移动,且在掘进面到达测点之前约 40 m ($7D$) 处移动速率较大,直至左线盾构掘进面通过测点后约 40 m ($7D$) 水平位移逐渐趋于稳定。在右线盾构掘进时,测点竖向位移和 X 方向水平位移具有相似的规律,但由于盾构掘进时停机的原因,实测位移曲线规律不明显。左线盾构掘进引起的桥面沉降约占总沉降的 60%~80%,桥面测点累计沉降最大值为 11.6 mm,测点 X 方向的水平位移最大值为 4.5 mm。

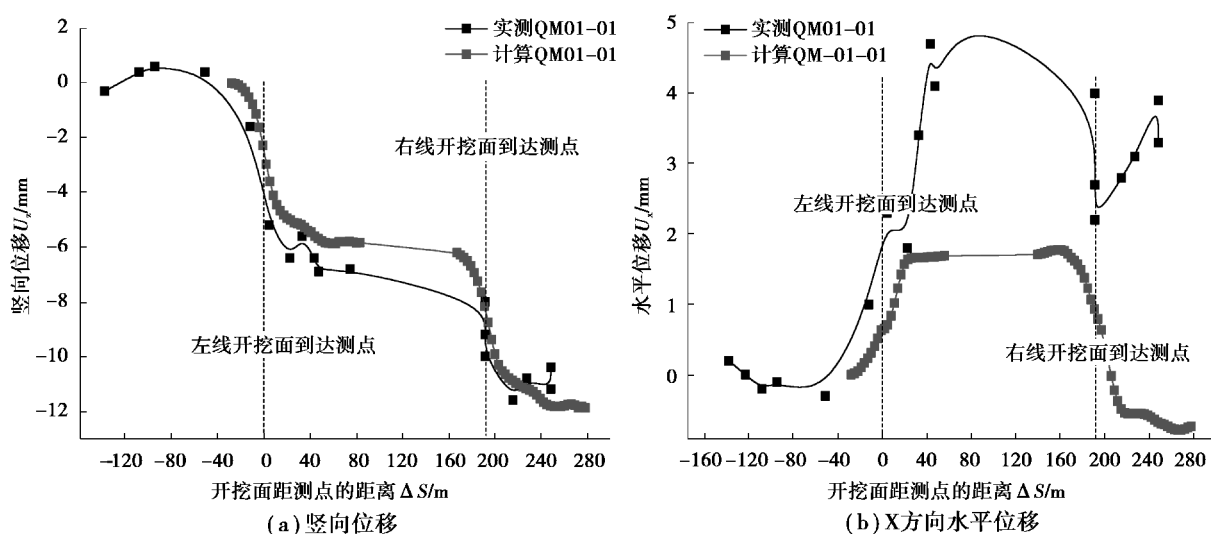


图 13 测点 QM-01-01 的实测位移曲线与数值计算曲线

Fig. 13 Measured displacement curves and numerical calculation curves of measuring point QM-01-01

图 14 为西乡河大桥桥面 4 个监测点 QM-02-01、QM-02-02、QM-02-03 与 QM-02-04 沉降随盾构掘进面距测点的距离变化的现场监测曲线。监测点 QM-02-01 与 QM-02-02 在左线盾构到达测点之前约 140 m ($23D$) 处都开始产生沉降或隆起,随着盾构掘进,在左线盾构掘进面到达测点之前约 45 m ($7.5D$) 处桥面测点隆起量增大或者沉降减小,至左线盾构掘进面到达测点之前约 28 m ($4.5D$) 处桥面测点沉降速率增大,直至左线盾构掘进面通过测点后约 60 m ($10D$) 沉降速率减小,桥面沉降逐渐趋于稳定;在右线盾构掘进时,测点沉降具有相似的规律;在整个掘进过程中,桥面测点 QM-02-01 与 QM-02-02 的最大隆起值分别为 1.34 mm、0.27 mm,最大沉降值分别为 7.86 mm、7.09 mm,左线盾构施工引起的桥面沉降约占最终

累计沉降的 69%。监测点 QM-02-03 与 QM-02-04 由于距离隧道中心线较远,因此测点沉降规律不明显且沉降较小,最大沉降值分别为 2.17 mm、3.38 mm。

由上述分析可知,架线桥桥面测点 QM-01-01 的模拟计算和实测位移曲线具有相似的规律,但由于实际施工时盾构停机等原因,实测位移曲线的规律不如模拟计算的明显。实测桥面竖向位移最大值与数值结果较为接近,而 X 方向水平位移最大值比数值结果略大;初步分析可能是数值模拟中未考虑盾构现场施工时参数改变、刀盘震动等因素对地层造成的扰动所致。盾构施工对架线桥桥面竖向位移的影响范围为盾构掘进面距测点 $-10D \sim 7D$,对 X 方向水平位移的影响范围约为盾构掘进面距测点 $-7D \sim 7D$,与数值模拟相

比,盾构施工的影响范围较大;初步分析可能是因为现场施工时掘进参数波动性大使得数值模拟中施工参数与实际情况不完全一致引起的。西乡河大桥桥面实测最大沉降值与数值结果较

为接近,盾构施工对西乡河大桥桥面沉降的影响范围为 $-7.5D \sim 10D$,相对于架线桥而言,盾构施工引起的西乡河大桥桥面沉降比较滞后,且测点离隧道越远,测点沉降越小。

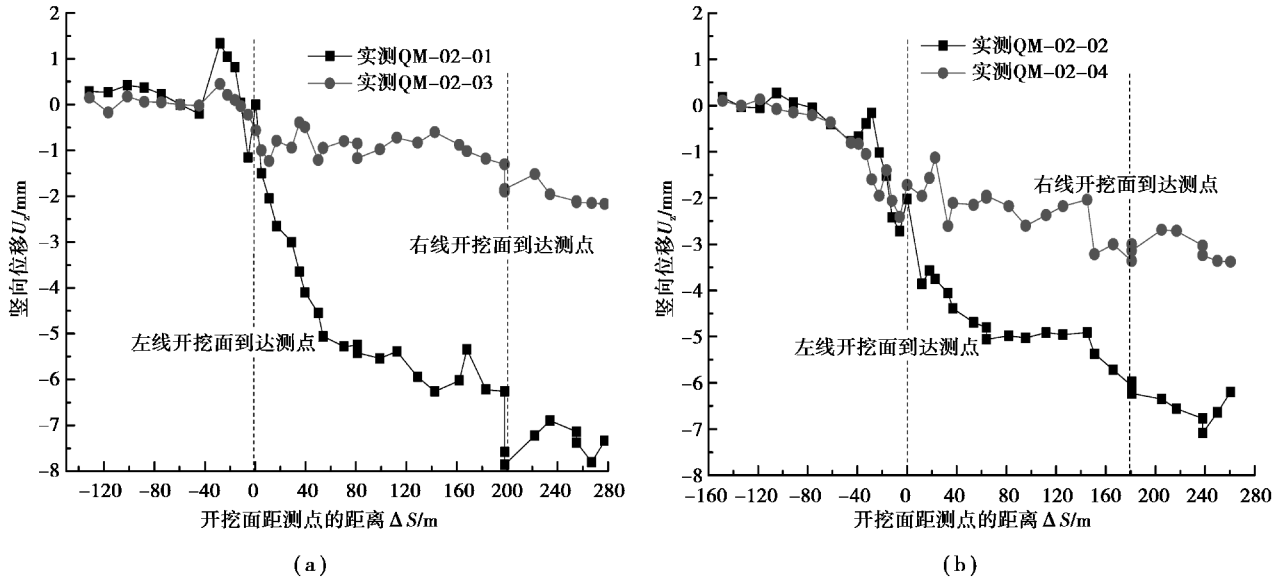


图 14 西乡河大桥桥面实测 U_z - ΔS 曲线

Fig. 14 U_z - ΔS measured curves of Xixianghe bridge deck

4 结论

依托深圳地铁 11 号线宝碧区间盾构穿越桥梁桩基工程,通过数值模拟和现场监测,对比分析了盾构施工过程中桥面变形与桥梁桩基变形的变化规律及影响范围,得出了以下结论:

(1) 盾构隧道掘进对土层主要的影响区域与盾构隧道掘进对桩基的主要影响区域有很高的相似性。假如地层中没有桥梁桩基,且隧道上覆土层较厚,隧道掘进跨度较小时,隧道施工对周围地层的影响可划分为 3 个区域:塑性破坏区、弹性区和无影响区。

(2) 位于 2 条隧道中间的架线桥桥面沉降较大,为 15.14 mm,水平位移较小,在 1 mm 以内,而位于隧道外侧的西乡河大桥桥面沉降较小,为 8.07 mm,水平位移相对而言较大,为 3.42 mm,盾构施工对桥面变形的影响范围为盾构掘进面距桥面为 $-5D \sim 4D$ 。

(3) 架线桥桩基位于两条隧道之间,受两条隧道先后掘进的叠加影响,桩身竖向位移较大,最大竖向位移位于桩顶。盾构掘进对架线桥桩基桩顶

沉降的影响范围约为盾构掘进面距桩基 $-2D \sim 2.5D$ 。

(4) 西乡河大桥位于隧道侧方,近隧道一侧桩几乎只受近侧隧道施工的影响,桩身累计 X 方向水平位移最大值出现在桩顶;距离隧道较远的桩几乎不受隧道施工的影响,桩身累计 X 方向水平位移最大值出现在桩底。盾构掘进对西乡河大桥桩基 X 方向水平位移的影响范围约为盾构掘进面距桩基 $-2.5D \sim 3.5D$ 。

参考文献 (References)

- [1] Yashima A, Shibata T, Sekiguchi H, et al. Soil movements associated with tunneling and their effects on an adjacent pile foundation[J]. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, 1985, 35(4): 115-135.
- [2] Lee K M, Rowe R K. Finite element modeling of the three-dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soil: Part I-Methods of analysis[J]. Computers and Geotechnics, 1990, 10(2): 87-110.
- [3] Lee K M, Rowe R K. Finite element modeling of the three-dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soil. Part II-Results[J]. Computers and

- Geotechnics, 1990, 10(2): 111-135.
- [4] 孙庆, 杨敏, 冉侠, 等. 隧道掘进对周围土体及桩基影响的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 989-993. (Sun Qing, Yang Min, Ran Xia, et al. Test study on tunnelling-induced soil movements and pile responses[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2011, 39(7): 989-993. (in Chinese))
- [5] Loganathan N, Poulos H G, Stewart D P. Centrifuge model testing of tunneling-induced ground and pile deformations [J]. Géotechnique, 2000, 50 (3): 283-294.
- [6] Chen L T, Poulos H G, Lognaathan N. Pile responses caused by tunneling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125 (3): 207-215.
- [7] 李早, 黄茂松. 隧道掘进对群桩竖向位移和内力影响分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 398-402. (Li Zao, Huang Maosong. Analysis of settlement and internal forces of group pile due to tunneling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (3): 398-402. (in Chinese))
- [8] 彭坤, 陶连金, 高玉春, 等. 盾构隧道下穿桥梁引起桩基变位的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 485-489. (Peng Kun, Tao Lianjin, Gao Yuchun, et al. Numerical analysis of bridge pile deformation caused by shield tunnel construction underneath[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 485-489. (in Chinese))
- [9] 徐长节, 陈其志, 任凌云. 软土地区地铁盾构穿越对城市立交桥的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 769-775. (Xu Changjie, Chen Qizhi, Ren Lingyun. Influence of shield crossing tunnels in soft soil area on city overpass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 769-775. (in Chinese))
- [10] 张恒, 陈寿根, 邓稀肥. 盾构法施工对地表及桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 552-557. (Zhang Heng, Chen Shougen, Deng Xifei. Analysis on influence of shield tunneling on ground and bridge pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3): 552-557. (in Chinese))
- [11] Loganathan N, Poulos H G, Xu K J. Ground and pile-ground respond due to tunneling [J]. Soils and Foundations, 2005, 41(1): 57-67.
- [12] Gordon T K, Lee, Ng C W W. Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 193-201.
- [13] 朱逢斌. 地铁隧道掘进对原有桩基工作性状的影响研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2007. (Zhu Fengbin. Study on the impact of tunneling on the behaviors of adjacent existing piles [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007. (in Chinese))
- [14] 黄飞. 地铁盾构法施工对邻近桩基础的影响分析 [D]. 广州: 广州大学, 2012. (Huang Fei. Analysis of the influence of subway shield tunneling on adjacent pile foundation [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012. (in Chinese))
- [15] 丁鹏华. 盾构隧道施工地层移动对临近桥梁桩基的影响研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015. (Ding Penghua. Effects of ground movements during shield tunneling on adjacent pile foundations [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [16] 周正宇. 地铁邻近既有桥梁施工影响分析及主动防护研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (Zhou Zhengyu. Research on effect and the active protection of neighboring existing bridge with subway construction [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [17] 朱逢斌, 杨平, 林水仙. 盾构隧道施工对邻近承载桩基影响研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3894-3900. (Zhu Fengbin, Yang Ping, Lin Shuixian. Study of influence of shield tunneling on neighboring loaded piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3894-3900. (in Chinese))