

文章编号: 1674—8247(2019)04—0006—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.04.002

盾构隧道下穿既有车站变形控制研究

朱正国 陈信宇 陈自飞 李 本

(石家庄铁道大学, 石家庄 050043)

摘 要:文章以某盾构隧道下穿既有车站为研究背景,首先,对区间隧道下穿既有车站变形机理进行数值模拟计算,得到车站结构的竖向位移随各开挖步变化规律。然后分别从车站主体结构变形、地层变形等方面对比分析,提出底板加厚、周边加固、板凳桩加固和桩+袖阀管注浆加固4种控制变形技术措施方案,得到最优的板凳桩+袖阀管注浆加固措施方案;最后对板凳桩围护结构设计分别从不同桩体长度、桩体纵向间距和桩体直径三方面来进行研究,以车站底板沉降和结构竖向位移以及地表沉降等对象来对比分析,最终选定板凳桩长度为桩端底部至拱底以下5~7 m范围内,桩间距在1.6~2.2 m范围内,桩直径为1 m,使盾构开挖施工对既有邻近建筑物影响程度变小。

关键词:盾构隧道;变形机理;车站;结构;加固;板凳桩

中图分类号:U455.48⁺2 **文献标志码:**B

6

Research on Deformation Control of Shield Tunneling Under Subway Station

ZHU Zhengguo CHEN Xinyu CHEN Zifei LI Ben

(Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Taking a shield tunnel underpassing an existing station as the research background, firstly, the numerical simulation of the deformation mechanism is carried out, and the change law of vertical displacement of the station structure with each excavation step is obtained. Then, from the comparison of the main structure deformation and stratum deformation of the station, 4 technical solutions for controlling deformation, namely, the bottom plate thickening, peripheral reinforcement, bench pile reinforcement and pile + sleeve valve tube grouting reinforcement, are proposed to obtain the optimal bench pile + Sleeve valve tube grouting reinforcement scheme; finally, the design of the bench pile retaining structure is studied from 3 aspects: length of pile, longitudinal spacing of piles and pile diameter. Comparative analysis is taken on the settlement of the station floor, the vertical displacement of the structure and the ground surface settlement. Finally, the length of the bench pile is selected from the bottom of the pile end to the bottom of the arch to the range of 5 ~ 7 m. The distance between the piles is in the range of 1.6 ~ 2.2 m, and the pile diameter is 1 m, which makes the shield excavation has smaller influence on the existing adjacent buildings.

Key words: shield tunnel; deformation mechanism; station; structure; reinforcement; bench pile

收稿日期: 2019-06-08

作者简介: 朱正国(1977-),男,博士,教授,博士生导师。

基金项目: 河北省高校百名创新人才支持计划(Ⅲ)(SLRC2017054);河北省人才工程培养经费资助项目(A201802005)

引文格式: 朱正国, 陈信宇, 陈自飞, 等. 盾构隧道下穿既有车站变形控制研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(4): 6-11.

ZHU Zhengguo, CHEN Xinyu, CHEN Zifei, et al. Research on Deformation Control of Shield Tunneling Under Subway Station [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 6-11.

随着城市地铁轨道线路的新建与运营,出现了很多上穿或下穿既有路线建筑物的工程,产生新建与既有铁路的相互交错关系,必然会遇到新建地铁隧道近距穿越既有线路或既有车站、新建车站近距穿越既有线路或既有地铁车站以及平面交叉穿越或邻近侧穿等复杂工况^[1],同时就会出现对既有建筑物、市政管线及地面附属设施产生沉降塌陷破坏等一系列环境问题尤其,新建盾构隧道下穿既有建筑物车站主体结构影响风险度高,微小的土体扰动将会对既有运营车站产生较大影响。

目前,国内外学者在盾构隧道施工引起的地表变形及对既有建筑物的影响领域取得了较多的研究成果^[2-13],但由于隧道开挖土层介质的复杂性以及研究手段的有限性,特别是针对粉细砂地质和施工环境的特殊性,仍有许多问题需要研究。

因此,本文以某地铁下穿既有车站工程为研究背景,采取理论研究和数值模拟相结合的方式分析下穿既有车站变形机理及开展变形控制研究,在地下工程近接施工过程中采取合适的施工技术和辅助工法,从而在设计施工中有效地预测和避免塌陷变形的发生,将对既有建筑物的影响降到最低,确保施工安全进行。

1 盾构隧道下穿既有车站数值模拟研究

1.1 计算模型和计算参数

为减少边界约束效应,计算范围按左右边界距隧道中心线距离的3~5倍洞径考虑,底部边界距隧道底部的距离按3~5倍盾构直径考虑,指定区间盾构掌子面前进方向为Y轴正向,沿地层垂直向上为Z轴正向,隧道横断面向右方向为X轴正向,即整个模型在X、Y、Z 3个方向集合尺寸为63 m×60 m×49.5 m(盾构隧道地层埋深21.5 m,管片拱顶距车站底板4.05 m)。三维计算模型及局部模型,如图1所示。

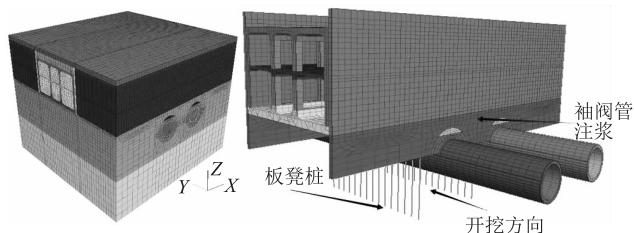


图1 三维计算模型及局部模型图

土层视为摩尔-库仑理想弹塑性材料。既有车站结构、盾构管片和盾壳均视为弹性材料且采用实体单

元,板凳桩采用桩单元。支护结构均视为弹性材料。初期支护采用壳单元,二次衬砌采用实体单元。围岩物理力学参数参照地质勘察资料和TB 10003-2016《铁路隧道设计规范》^[14]选取,板凳桩、车站结构和支护的物理力学指标,如表1所示。

表1 板凳桩、车站结构及支护物理力学参数表

材料名称	密度 (kg/m ³)	弹性模 /GPa	泊松 比	直径 /m	横截面积 /m ²	极惯性矩 /m ⁴
桩体	2 500	30.0	0.2	1.0	0.785 4	0.098 2
既有车站板、边墙	2 500	32.5	0.2	-	-	-
既有车站中柱	2 500	34.5	0.2	-	-	-
车站围护结构	2 560	32.5	0.2	-	-	-
盾构管片	2 500	27.6	0.2	-	-	-
盾壳	7 850	210.0	0.3	-	-	-

在目标工作面处设置了周边监测点,底板和盾构管片的监测点布置在开挖模型的中心断面($y=30$ m)位置上,其中车站上行线、中心线和下行线监测点各分为左右2个,在底板位置上 $y=30$ m分别与 $x=-7.5$ m和 $x=7.5$ m的交点位置处。车站上行线在横断面 $y=37.1$ m与 $z=33.1$ m交线处,车站中心线在横断面 $y=30$ m与 $z=33.1$ m交线处,车站下行线在横断面 $y=22.9$ m与 $z=33.1$ m交线处。

1.2 数值模拟计算假定

(1)假定土体沿地表自上而下分布的7层岩体都是水平均质的,各地层初始地应力只存在自重应力,不考虑构造应力。

(2)盾构开挖步长采用1.2 m宽度的管片环来模拟,管片衬砌采用线弹性材料的实体单元来模拟,忽略管片衬砌之间的横向和纵向连接。

(3)盾构隧道开挖去的土层材料采取null模型模拟,被钝化的空单元应力为零,没有竖向重力,同时空单元也可以被激活为盾构管片和盾壳衬砌注浆来控制围岩变形。

(4)盾尾注浆对管片与土体的空隙模拟采用同步和二次注浆,在模拟注浆时本文采取与管片处于同圆心位置的等效均质衬砌注浆厚度层来替代。

(5)由于该工程地下水位较深,在30 m以下,为简化模型计算开挖过程中不考虑地下水引起的渗流作用,围岩变形与开挖步应力释放有关,与时间效应无关,从而忽略土体的固结和蠕变作用。

1.3 车站底板、结构沉降随开挖顺序变化规律

1.3.1 车站底板沉降随开挖顺序变化规律

在正常施工状况下,盾构各施工阶段对车站的变

形影响不同。车站底板中心线沉降槽分析曲线,如图2所示。各施工阶段车站底板结构中心线左右2个监测点竖向累计沉降值情况分析,如表2所示。

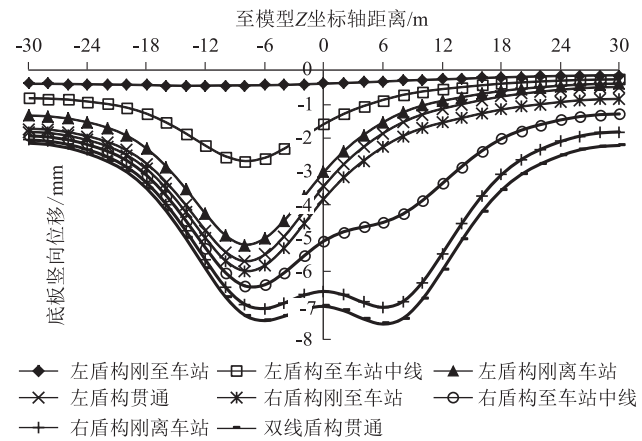


图2 正常施工各阶段车站底板中线沉降曲线

表2 各施工阶段底板中心线路左右2个监测点竖向累计沉降情况表

施工阶段	左监测点			右监测点		
	累计沉降/mm	沉降增量/mm	占最终值比/%	累计沉降/mm	沉降增量/mm	占最终值比/%
左盾构至车站	0.44	0.44	5.95	0.31	0.31	4.14
左盾构至中部	2.70	2.26	30.58	0.75	0.44	5.88
左盾构离车站	5.20	2.50	33.83	1.31	0.56	7.49
左盾构贯通	5.69	0.49	6.63	1.61	0.30	4.01
右盾构至车站	5.99	0.30	4.06	2.02	0.41	5.48
右盾构至中部	6.47	0.48	6.50	4.36	2.34	31.28
右盾构离车站	7.05	0.58	7.85	6.98	2.62	35.03
双线盾构贯通	7.39	0.34	4.60	7.48	0.50	6.68

由图2和表2可知,随着开挖,车站底板结构中心线的沉降最大值分布在盾构开挖中心线附近,沿中心线向左右两侧依次呈减小的趋势。施工结束后,其底板的最大沉降值超出车站主体结构沉降标准要求。对于车站左监测点,在盾构机从刚到车站时至模型中部这个区间内产生沉降增量为2.26 mm,累计沉降值为2.70 mm;自模型中部到刚离开车站以后各阶段累计沉降值均超出3 mm沉降标准值。

综上所述,在正常施工下盾构下穿车站的变形沉降量不满足沉降标准,需采取相应的加固措施来保障盾构施工顺序的正常开挖推进和车站主体结构的安全。

1.3.2 车站结构竖向沉降随开挖顺序变化规律

在正常施工下,盾构双线贯通时车站主体结构竖向位移云图,如图3所示。各施工阶段车站结构竖向累计沉降值情况分析,如表3所示。

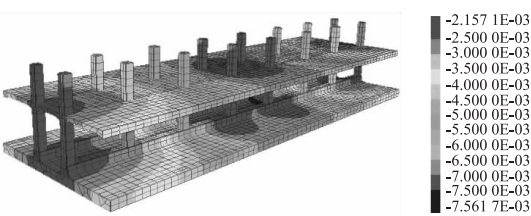


图3 双线盾构贯通时车站主体结构竖向位移云图

表3 各施工阶段车站主体结构竖向累计沉降值情况表

施工阶段	竖向沉降最大值/mm	沉降增量/mm	占最终值比/%
左盾构刚至车站	1.68	1.68	22.22
左盾构至模型中部	4.23	2.55	33.73
左盾构刚离车站	5.25	1.02	13.49
左盾构贯通	5.69	0.44	5.82
右盾构刚至车站	6.02	0.33	4.37
右盾构至模型中部	6.78	0.76	10.05
右盾构刚离车站	7.22	0.44	5.82
双线盾构全部贯通	7.56	0.34	4.50

由图3和表3可知,随着施工顺序的进行,车站主体结构竖向位移值依次增大,最大值在开挖盾构断面的正上方处。施工结束后,在开挖断面正上的柱子沉降值最大,沿车站左右两侧柱子沉降值呈递减的趋势。盾构在到达模型中部阶段及以后各阶段累计沉降值均超出3 mm沉降标准值。在下穿段区域内盾构施工对车站影响比较大,需采取加固方案来满足车站主体结构的变形要求。

1.4 盾构下穿车站变形控制方案优化分析

1.4.1 车站底板结构沉降曲线分析

为将车站主体结构位移值控制在3 mm的沉降标准范围内,本节提出4种加固措施,通过数值软件模拟对比车站结构沉降和下穿段土体分析,选出最优控制方案措施。左右双线盾构隧道全部贯通后,不同加固措施下车站结构的车站中心线沉降曲线,如图4所示。施工结束后,4种加固措施6个底板监控点最大沉降值对比分析,如表4所示。

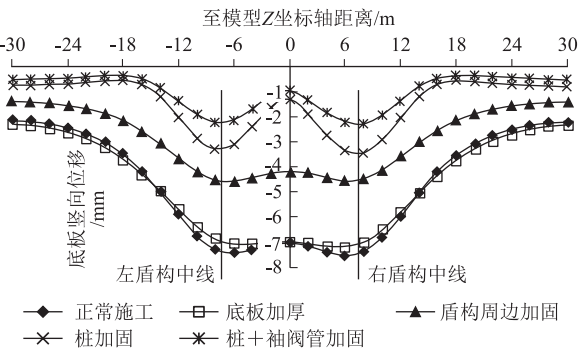


图4 各加固措施车站底板中心线的沉降曲线

表4 各加固措施底板监测点竖向沉降最大值对比表

加固措施	上行线				中心线				下行线			
	左监测点 沉降值 /mm	差值比 /%	右监测点 沉降值 /mm	差值比 /%	左监测点 沉降值 /mm	差值比 /%	右监测点 沉降值 /mm	差值比 /%	左监测点 沉降值 /mm	差值比 /%	右监测点 沉降值 /mm	差值比 /%
无加固	6.88	—	6.99	—	7.39	—	7.48	—	7.04	—	7.15	—
底板加厚	6.67	-2.99	6.79	-2.85	6.99	-5.44	7.11	-4.97	6.74	-4.25	6.86	-4.00
周边加固	4.55	-33.84	4.57	-34.69	4.60	-37.79	4.57	-38.91	4.65	-34.01	4.65	-34.90
板凳桩加固	3.61	-47.46	3.72	-46.73	3.32	-55.03	3.49	-53.28	3.58	-49.09	3.71	-48.07
桩+袖阀管加固	2.55	-62.89	2.59	-62.90	2.27	-69.23	2.32	-68.93	2.56	-63.69	2.60	-63.60

注:差值百分比=(加固最值-无加固最值)/无加固最值,正值为增幅,负值为减幅

由图4和表4可知,双线盾构全部贯通后,车站底板中心线沉降曲线值最小为桩+袖阀管注浆加固,最大值都是在开挖盾构隧道中心线的正上方。通过上行线左监测点的各加固方案沉降值与正常施工对比分析,只有桩+袖阀管注浆方案满足底板结构限制在3 mm以下的标准要求,其他监测点与之类似。

综上所述,在采取桩+袖阀管注浆方案下能够满足车站结构变形限制位移3 mm以下的标准,特别是袖阀管加固技术在实际工程中能动态地限制底板的位移值。

1.4.2 其余结构控制变形方案优化分析

同理,对比5种施工方案,进行车站主体结构竖向沉降分析。得出主要结论:盾构开挖在正常施工情况下,车站的变形最大累计沉降值达到7.56 mm,不满足车站主体结构位移值必须控制在3 mm的沉降标准范围内的要求,在车站正下方时仍需要采取相应的加固措施。从车站主体结构方面对比分析各加固措施方案,桩+袖阀管注浆加固方案的最大结构沉降值为2.80 mm,控制变形最为明显。能够满足车站主体结构和开挖周围土体各方面的标准值要求,且符合工程设计图纸实际情况。

2 盾构隧道两侧板凳桩设计合理性分析

2.1 计算工况

本章主要从桩体长度、间距和直径三方面分析设计方案的合理性,通过对比分析车站结构变形和地表沉降,找到设计合理范围值。具体方案如下:

方案一:设定桩端至拱底处、距离拱底以下3 m、4 m、5 m、6 m、7 m和8 m 7种工况。

方案二:设定桩间距为1 m、1.6 m、2.2 m和2.8 m 4种工况。

方案三:设定桩直径为0.8 m、1 m和1.2 m 3种工况。

计算模型和计算条件同前。

2.2 不同桩长模拟分析

2.2.1 车站底板沉降曲线和结构竖向位移分析

左右双线盾构隧道全部贯通后,不同桩体长度下车站结构的底板中心线沉降曲线,如图5所示。施工结束后不同桩体长度车站各部位的最大竖向沉降值与桩端至拱底处方案的差别对比分析,如表5所示。

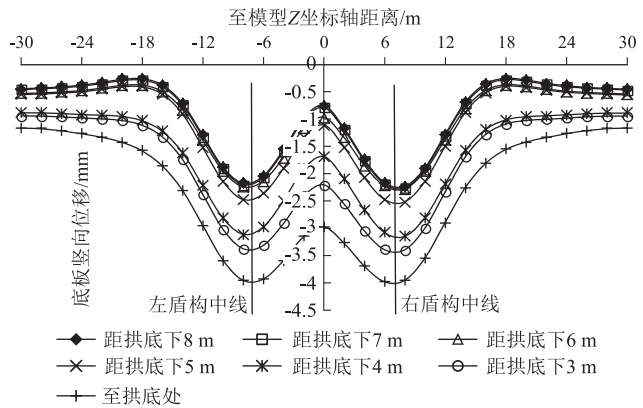


图5 不同桩长双线盾构贯通后车站底板中心线的沉降曲线

表5 不同桩长双线盾构贯通后车站各部位竖向沉降最大值对比表

不同桩长	车站各部位最大竖向沉降值/mm				差值比 /%
	上行线	中心线	下行线	主体结构	
至拱底处	4.09	3.99	4.12	4.21	—
距离拱底下3 m	3.58	3.40	3.59	3.75	-10.93
距离拱底下4 m	3.33	3.16	3.34	3.54	-15.91
距离拱底下5 m	2.74	2.52	2.73	2.97	-29.45
距离拱底下6 m	2.55	2.28	2.56	2.80	-33.49
距离拱底下7 m	2.48	2.27	2.46	2.73	-35.15
距离拱底下8 m	2.45	2.24	2.42	2.70	-35.87

注:差值百分比=(某桩长最值-至拱底处最值)/至拱底处最值,正值为增幅,负值为减幅

由图5和表5可知,随着桩体长度的增大,车站中心线沉降曲线最大值变小,都是出现在隧道中心线的正上方,由中心线向左右两侧沉降值减小,距离中心线15 m以外沉降值趋于平缓;底板上行线、中心线、下行

线和车站主体结构的沉降值都有呈逐渐减少趋势。其中后4种方案都能满足沉降标准要求,相比至拱底以下7 m方案,至拱底以下8 m方案下车站结构最大沉降值几乎无变化趋势。

综上所述,在板凳桩长度设计时建议采取桩端至拱底以下5~7 m范围内,其车站结构最大沉降值都能满足车站结构位移在3 mm以内标准要求。

2.2.2 下穿段土体地表沉降分析

取模型中部($Y=30\text{ m}$)断面与地表面的交接线为地表监测线。双线盾构全部贯通后,其地表沉降槽分析曲线,如图6所示。在左线贯通时和双线盾构贯通后,不同桩长方案下地表最大沉降值与其桩端至拱底处方案的差别对比分析,如表6所示。

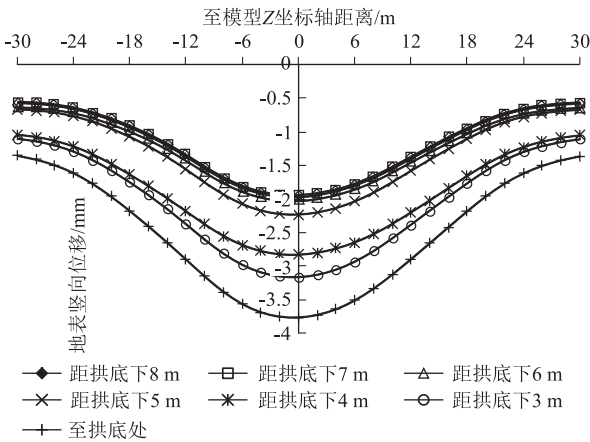


图6 不同桩长双线盾构贯通后地表沉降分析曲线

表6 不同桩长地表竖向沉降最大值对比表

不同桩长	左线盾构贯通后最大值		双线盾构贯通后最大值	
	沉降值/mm	差值比/%	沉降值/mm	差值比/%
至拱底处	2.32	—	3.76	—
距离拱底下3 m	1.96	-15.59	3.16	-15.92
距离拱底下4 m	1.81	-21.95	2.83	-24.80
距离拱底下5 m	1.42	-38.58	2.23	-40.74
距离拱底下6 m	1.32	-42.96	2.03	-46.05
距离拱底下7 m	1.30	-43.91	1.97	-47.62
距离拱底下8 m	1.28	-44.75	1.94	-48.45

注:差值百分比=(某桩长最值-至拱底处最值)/至拱底处最值,正值为增幅,负值为减幅

由图6和表6可知,双线盾构贯通后,地表最大竖向位移值出现在双线盾构距离的中心线对应地表正上方处,向左右两侧逐渐减小,至两端趋于稳定。随着桩体长度的增加,各桩长方案车站上方地表最大沉降值逐渐减小,桩端至拱底以下7 m方案继续增加桩长度1 m,地表沉降量几乎没有减少的趋势。因此,在板凳桩长度设计时应该取桩端至拱底以下5~7 m范围内,

在板凳桩长度图纸设计时采用桩端至拱底以下1倍的盾构隧道开挖直径长度方案与其相符合。

2.3 其余计算工况模拟分析

同理,其余计算工况也主要进行车站底板沉降曲线和结构竖向位移分析、地表沉降分析等分析,因篇幅关系只给出各影响因素作用下的主要结论。

(1)随着桩体长度增加,底板上行线、中心线、下行线和车站主体结构的沉降值均呈逐渐减少趋势,各桩长方案车站上方地表最大沉降值逐渐减小,在桩长度设计时应该取桩端至拱底以下5~7 m范围内。

(2)随着桩间距增大,车站结构各部位的竖向沉降值都有逐渐增大趋势,车站上方地表最大沉降值逐渐增大,板凳桩纵向间距设计合理值应该在1.6~2.2 m的范围内。

(3)随着桩直径增大,车站主体结构的竖向沉降值都有逐渐减小,车站上方地表最大沉降值也逐渐减小,从节约材料成本和满足车站结构变形标准要求两方面考虑,设计中选取板凳桩直径1 m方案。

综上所述,最终选定板凳桩长度为桩端底部至拱底以下5~7 m范围内,桩间距在1.6~2.2 m范围内,桩直径为1 m,为设计方案合理的优化范围值。

3 结论

(1)盾构开挖对车站变形影响区域主要是分布在盾构机通过车站正下时和距离车站附近处,在正常施工结束后,盾构隧道下穿车站的变形最大累计沉降值达到7.56 mm,不满足车站主体结构位移沉降标准,需要采取相应的加固措施来保障车站主体结构的安全。

(2)在控制车站主体结构变形的4种加固措施中,通过从车站结构变形、地表沉降等方面对比分析发现,板凳桩+袖阀管注浆加固效果最为明显,其方案下的车站结构最大竖向位移值为2.80 mm,满足3 mm以内的沉降标准要求值,其他3种控制措施不能满足。从而选出板凳桩+袖阀管注浆加固这种最优的控制方案技术措施。

(3)就分析设计板凳桩加固方案的合理性而言,在桩长度、开挖方向纵向桩体桩间距和桩直径的变化过程中,车站主体结构变形、地表竖向位移值都会发生显著变化。从节约材料成本和满足车站结构变形限制位移3 mm以下标准要求两方面考虑,最终选定板凳桩长度为桩端底部至拱底以下5~7 m范围内,桩间距在1.6~2.2 m范围内,桩直径为1 m,为设计方案合理的优化范围值,在其合理范围值内的方案中板凳桩

的水平位移和截面弯矩都在合理安全范围内。

参考文献:

- [1] 施成华,彭立敏. 随机介质理论在盾构法隧道纵向地表沉降预测中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 26(2): 320-323.
SHI Chenghua, PENG Limin. Application of Random Medium Theory in Prediction of Longitudinal Ground Settlement of Shield Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 26(2): 320-323.
- [2] 朱忠隆,张庆贺. 盾构法施工对地层扰动的试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 22(1): 49-52.
ZHU Zhonglong, ZHANG Qinghe. Experimental Study on Formation Disturbance Caused by Shield Construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 22(1): 49-52.
- [3] 方勇,杨斌,杨志浩,等. 地铁盾构隧道施工对地层扰动的影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(1): 36-41.
FANG Yong, YANG Bin, YANG Zhihao, et al. Analysis of Factors Influencing Formation Disturbance Caused by Subway Shield Tunnel Construction [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2014, 33(1): 36-41.
- [4] 周冠南,周顺华,王春凯,等. 盾构隧道施工对短桩基-框架结构的影响[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 51-57.
ZHOU Guannan, ZHOU Shunhua, WANG Chunkai, et al. Influence of Shield Tunnel Construction on Short Pile Foundation-frame Structure [J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 51-57.
- [5] 魏新江,洪杰,魏纲. 双圆盾构施工引起邻近桩基附加荷载的分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 783-790.
WEI Xinjiang, HONG Jie, WEI Gang. Double Round Shield Construction Causes Analysis of Additional Loads on Adjacent Pile Foundations [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 783-790.
- [6] 莫崇杰. 盾构隧道近距离小角度上穿已建暗挖隧道的施工方案研究[D]. 北京:北京交通大学, 2008.
MO Chongjie. Study on the Construction Plan of Shield Tunneling at Near-distance from a Small Angle to a Built-in Undercut Tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [7] 汪国锋,陶连金,李积栋. 密贴下穿既有线的暗挖地铁车站群顶顶托关键技术研究[J]. 施工技术, 2014, 43(23): 113-117.
WANG Guofeng, TAO Lianjin, LI Jidong. Key Technology Research on the Top Support of Undercut Subway Stations [J]. Construction Technology, 2014, 43(23): 113-117.
- [8] 于宁,朱合华. 盾构施工仿真及其相邻影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 26(2): 292-296.
YU Ning, ZHU Hehua. Shield Construction Simulation and Numerical Analysis of Its Adjacent Influence [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 26(2): 292-296.
- [9] 方勇,何川. 地铁盾构隧道施工对近接桩基的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(1): 42-47.
FANG Yong, HE Chuan. Study on the Influence of Subway Shield Tunnel Construction on the Close Pile Foundation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(1): 42-47.
- [10] 周小兵. 隧道开挖对邻近刚性桩基的影响研究[D]. 南宁:广西大学, 2012.
ZHOU Xiaobing. Research on the Influence of Tunnel Excavation on the Rigid Flexible Pile Foundation [D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [11] 赵朋. 粉细砂地层浅埋暗挖车站施工关键技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2016.
ZHAO Peng. Key Techniques for Construction of Shallow Buried Tunneling Station in Fine Sand Formation [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.
- [12] 王子甲. 双线暗涵近距离下穿既有地铁车站的影响及变形控制研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009.
WANG Zijia. Study on the Influence and Control of Deformation Control of Double Line Implicit Culvert under Existing Metro Stations [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [13] 杨天亮,严学新,王寒梅,等. 地铁隧道盾构施工引起的工程性地面沉降研究[J]. 上海地质, 2010, 31(S1): 7-11.
YANG Tianliang, YAN Xuexin, WANG Hanmei, et al. Research on Engineering Land Subsidence Caused by Shield Construction of Metro Tunnels [J]. Shanghai Geology, 2010, 31(S1): 7-11.
- [14] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnel [S].

(编辑:车晓娟 白雪)