

文章编号:1005-0523(2018)05-0035-09

在盾构穿越处新扩建铁路时地基加固处理措施研究

黄龙

(绍兴市轨道交通集团有限公司,浙江 绍兴 312000)

摘要:针对后施工的铁路对先行盾构施工的隧道结构产生较大影响的情况,分析了水泥搅拌桩和桩板组合结构2种地基加固效果,通过理论计算、数值模拟的方法,得到了采用搅拌桩加固时隧道变形将超出地铁隧道保护标准,而采用桩板结构能够控制隧道的变形的基本结论。研究结论可为同类工程提供有益的参考。

关键词:盾构隧道;水泥搅拌桩;桩板结构;路基沉降

中图分类号:U459.3

文献标志码:A

我国城市轨道交通建设已经进入一个高速发展的时期,截至2017年底,中国内地已有35个城市开通运营地铁,投入运行的线路总长已超过4 000 km。同时随着铁路客运需求的增加,一些低等级的铁路运营线面临着运量不足的问题,《中长期铁路网规划》提出了建设快速客运网络及城际轨道交通、优化和完善东中部路网的发展总体思路,大部分既有线需要进行电气化、提速和扩能改造。由此就会遇到盾构隧道下穿铁路或者扩建铁路上跨隧道等两者相互交叉穿越的问题。工程界和学术界对盾构隧道施工引起铁路变形的规律进行了大量研究^[1-4],但是对于扩建铁路施工对隧道变形的影响研究相对较少,特别是当两者基本处在同期施工时的地基处理措施研究较少。

以南京某盾构隧道下穿宁启铁路为工程背景,对盾构穿越处扩建铁路地基加固处理措施进行研究,可为将来类似工程的设计、施工提供一些参考。

1 工程概况

本工程盾构隧道采用土压平衡盾构施工,内径5.5 m,外径6.2 m,管片宽为1.2 m,管片采用错缝拼装。盾构隧道与宁启铁路基本正交,角度为83°,隧道中心距地表13.2 m,线间距约为21 m,坡度为4‰单面坡,左、右线分别从既有路基和涵洞下方穿过,平面位置如图1所示。

盾构下穿的铁路为国家I级单线铁路,设计速度为客车120 km/h,货车80 km/h,扩能改造完成后客车设计速度达到200 km/h,路基高度5.7 m左右,有砟轨道,正线设计线间距为5 m,地基处理采用Φ500 mm搅拌桩,间距1.3 m,桩长7~12 m,梅花形布置。

本工程地貌单元属于侵蚀堆积岗地,地形有一定起伏变化,土层性质局部变化较大,盾构主要穿越土层③-1b1-2粉质粘土、③-2b2-3粉质粘土、③-2bc2粉质黏土夹粉土、③-3b1-2粉质粘土。土层参数见表1所示。

收稿日期:2018-03-14

作者简介:黄龙(1988—),男,工程师,硕士,主要研究方向为轨道交通地下结构。

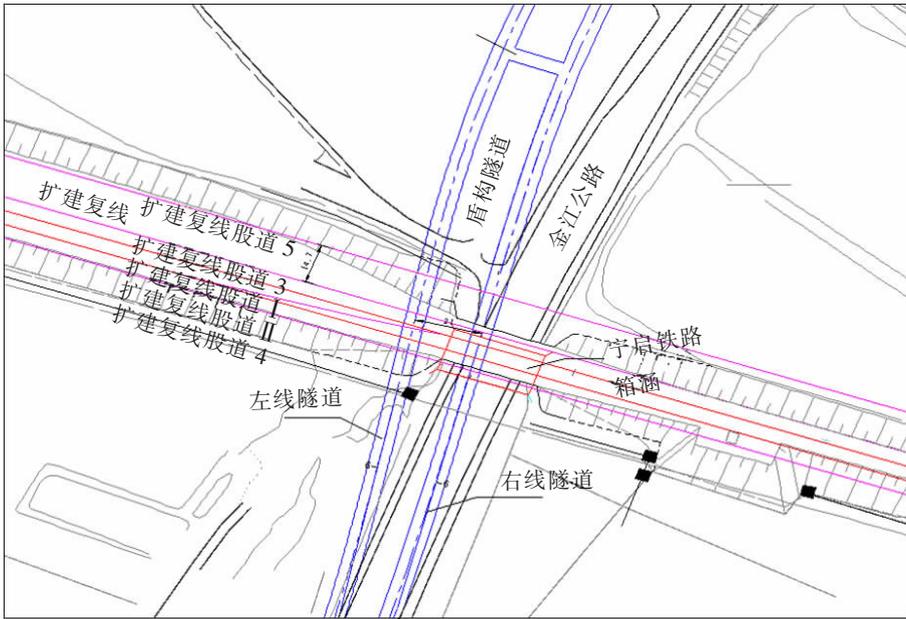


图 1 地铁盾构隧道与宁启铁路位置关系平面示意图

Fig.1 The schematic plan of shield tunnel and Ningqi railway

表 1 土层的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

层号	岩土名称	含水率/ %	重度/ (kN/m ³)	孔隙比	E_{s1-2} / MPa	粘聚力 (直快)/ kPa	内摩擦角 (直快)/ (°)	侧压力系 数	承载力特 征值/ kPa
②-1b2-3	粉质黏土	33.6	18.2	0.990	5.44	10.2	7.1	0.54	110
②-2b4	淤泥质粉质黏土	40.8	17.7	1.167	3.83	8.8	5.9	0.60	75
②-3b2	粉质黏土	25.3	19.3	0.748	6.49	28.8	10.8	0.48	150
③-1b1-2	粉质黏土	25.7	19.3	0.756	8.36	51.1	13.1	0.41	220
③-2b2-3	粉质黏土	29.7	18.8	0.851	6.10	31.4	9.9	0.45	135
③-2bc2	粉质黏土夹粉土	29.6	19.0	0.816	6.68	20.9	19.9	0.40	160
③-3b1-2	粉质黏土	24.9	19.4	0.736	8.53	49.5	12.4	0.41	210
④-1b1	粉质黏土	23.7	19.7	0.694	9.79	65.4	13.0	0.36	260
④-2b2	粉质黏土	23.7	19.6	0.698	7.64	37.5	12.6	0.40	180
④-4e	中粗砂混卵砾石	15.4	20.6	0.460	17.19	8.1	27.1	0.32	260
④-4b2	粉质黏土	21.6	19.9	0.644	10.29	65.3	9.7	0.45	180
K2c-2	强风化泥质砂岩 (21.5)							0.35	310
K2c-3	中风化泥质砂岩 (21.7)							0.30	900

根据工程实际情况,在穿越位置,盾构先行施工,铁路后施工,后施工的铁路将会对新建隧道的结构变形产生较大的影响,为确保新建隧道安全性,有必要在盾构施工前选择合理的地基加固处理措施。

2 盾构穿越处扩建铁路地基处理方案选择

盾构下穿处土性主要为粉质粘土和粉质粘土夹粉土为主,渗透系数小,在施工荷载或者动荷载作用下土体易发生流土,将会产生较大的工后沉降。为避免上述情况的发生,选取水泥搅拌桩和桩板两种地基加固处理方式进行对比分析。

水泥搅拌桩加固:直径 500 mm,桩间距 500 mm 满堂加固,桩长 25 m,桩长进入④-1b1 粉质黏土,加固剖面图如图 2 所示。

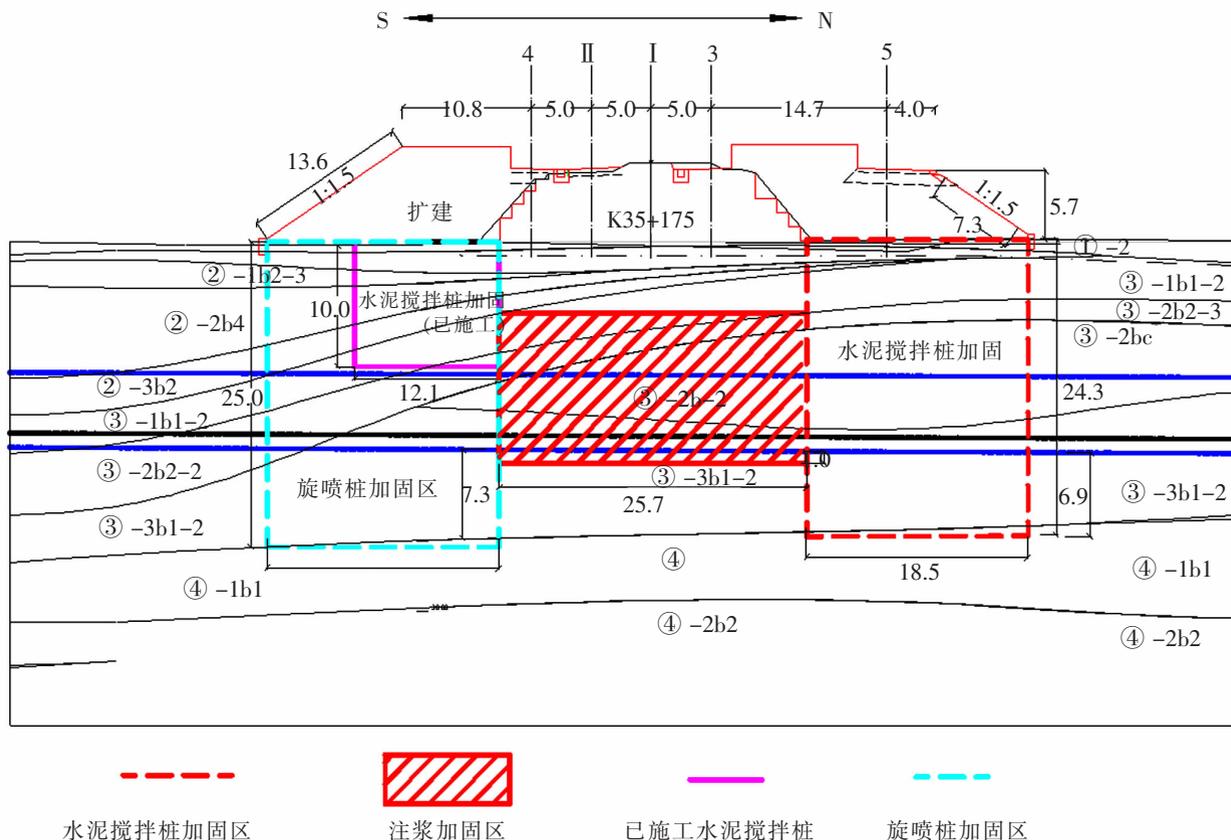


图 2 搅拌桩加固图(单位:m)

Fig.2 Cement mixing pile reinforcement(Unit:m)

桩板加固:桩基采用钻孔灌注桩,桩径 1.2 m,桩长 43 m,桩尖进入 K2c-3 中分化泥质砂岩 3 m 左右,沿隧道方向桩间距 3~5.0 m;北侧混凝土板(混凝土强度 C35)厚度 1.3 m,为两跨连续板布置,托梁尺寸宽×厚为 1.4 m×1.5 m,长度与混凝土板一致;南侧混凝土板厚度 1.5 m,梁宽 1.4 m,厚 1.5 m。扩建涵洞下方同样采用桩板结构,桩板加固如图 3 所示。

2.1 搅拌桩加固方案

2.1.1 路基沉降计算分析

分别选择以下 4 种工况进行沉降计算分析:

- 1) $\Phi 500$ mm 搅拌桩,梅花形布置,搅拌桩间距为 1.3 m,桩长 10 m;
- 2) $\Phi 500$ mm 搅拌桩,梅花形布置,搅拌桩间距为 1.3 m,加固竖向范围为从地面至隧道下方 1 m,桩长 18 m;

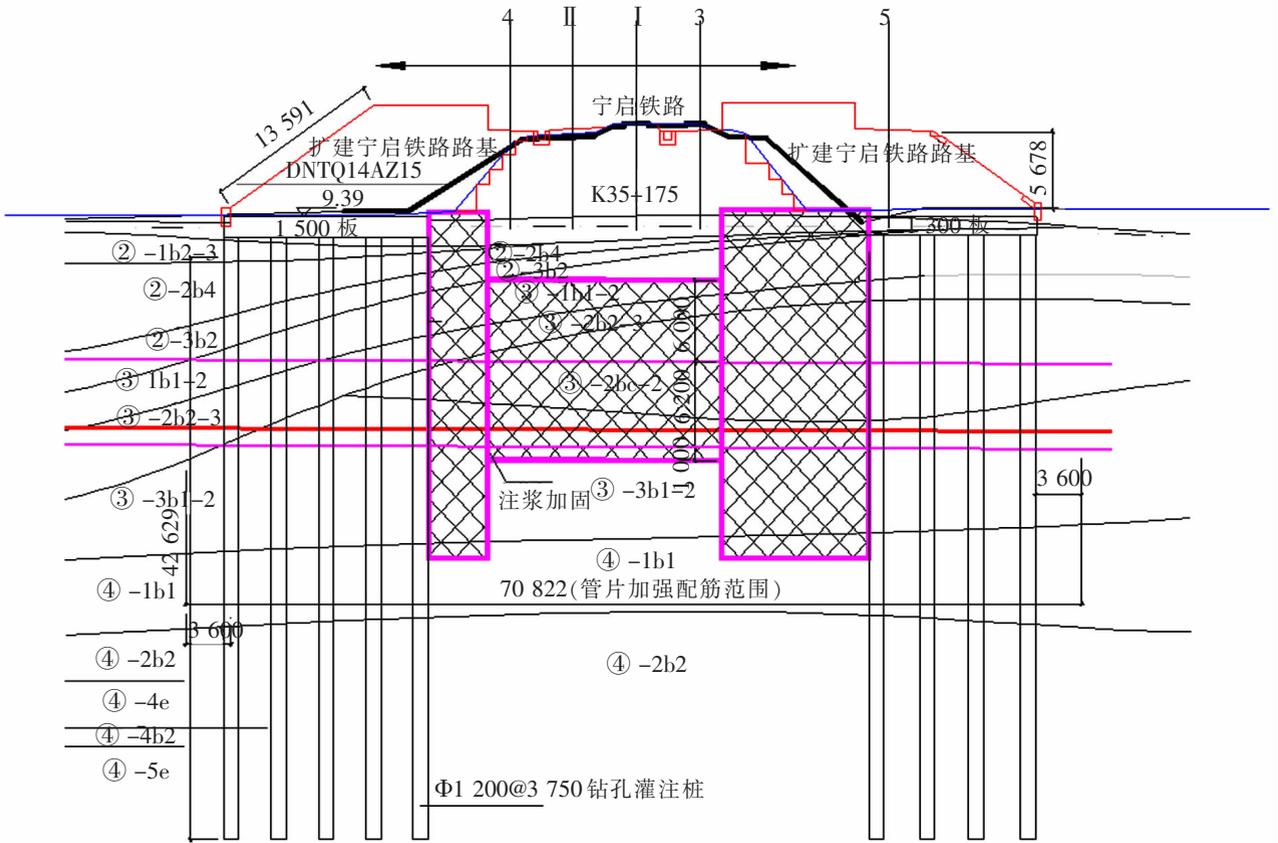


图 3 桩板加固图(单位:m)
Fig.3 Pile-plank reinforcement(Unit:m)

- 3) 搅拌桩 Φ500@500 mm 满堂加固, 桩长 18 m;
- 4) 搅拌桩 Φ500@500 mm 满堂加固, 加固竖向范围从地面至④-1b1 层粉质黏土, 桩长 25 m。

根据《铁路工程地基处理技术规程》^[5]中复合地基沉降算法, 公式见(1), 其中轨道和列车荷载按换算土柱进行。

$$S = m_s(S_1 + S_2) \tag{1}$$

式中: S_1 为加固区沉降量, 采用复合模量计算; S_2 下卧层沉降量, 采用 Boussinesq 法; m_s 为沉降经验修正系数, 与地基条件、荷载强度等因素有关, 根据地区沉降观测资料及经验确定, 对于软土地基, 其值可取 1.0~1.2。

地下水位位于地表以下 1 m, 压缩层厚度根据 $\sigma_z = 0.1 \sigma_1$ 确定, 计算得压缩层厚度为 38.1 m, 沉降计算结果如表 2 所示。

表 2 沉降计算结果
Tab.2 Computation results of ground settlement

参数	无加固	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
总沉降	438.88	227.11	163.41	105.78	68.07
加固区		52.34	82.77	25.14	29.45
下卧层		174.77	80.64	80.64	38.62

mm

根据《新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定》^[6]关于有砟轨道路基一般地段工后沉降不应大于 15 cm,路桥过渡段不应大于 8 cm,由表 2 可知,采用 10,18,25 m 搅拌桩地基处理时,其工后沉降基本能满足沉降要求,但是考虑到新建盾构隧道的存在,路基施工产生的地基变形会对新建隧道产生较大的影响,因此需要对 4 种工况下的隧道变形进行分析。

2.1.2 扩建复线施工对新建隧道变形影响分析

1) 计算模型。分析 4 种工况下扩建复线路基施工对新建盾构隧道的影响。采用数值模拟方法,建立三维有限元模型,土体采用硬化弹塑性模型(HS),在几何模型底部施加完全固定约束,在周边施加竖直滑动约束,模型表面为自由边界。扩建复线路基采用均布荷载替代,非下穿地段搅拌桩加固区桩土单元采用复合模量的方法用实体单元等效替代。

2) 新建隧道变形分析。由于左右线隧道变形规律基本一致,因此选择左线为研究对象,4 种工况下隧道底部纵向变形曲线如图 4 所示。

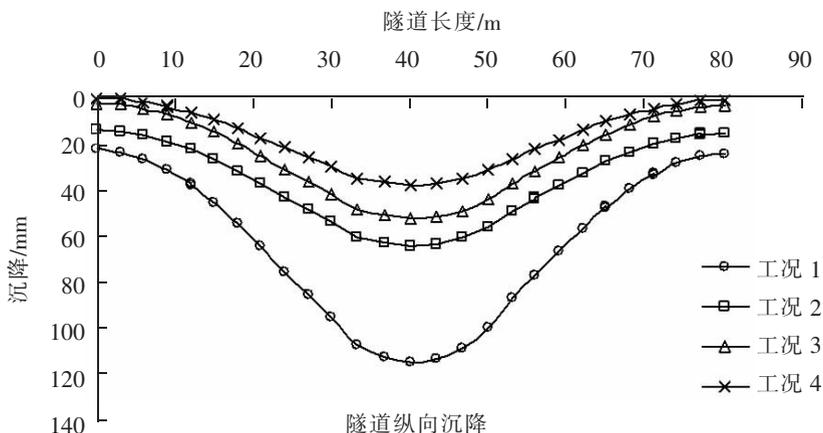


图 4 不同工况下隧道底部纵向沉降

Fig.4 The longitudinal settlement of tunnel bottom under different conditions

由图 4 可知,在宁启复线路基施工荷载作用下,4 种工况下隧道的最大沉降和最小曲率半径见表 3 所示。

表 3 隧道纵向最大沉降及最小曲率半径

Tab.3 The maximum longitudinal settlement and the minimum curvature radius of tunnel

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
最大沉降/mm	114.56	64.40	52.4	38.0
最小曲率半径/m	2 878.57	5 980.57	6 005.58	10 117.15

注:最小曲率半径计算公式按 $R=L^2/2\delta$,其中 L 为相邻测点的间距,这里 L 取 5 m; δ 为 3 点 A,B,C 中 A,C 点的平均沉降与 B 点沉降差的轴对量,A,B,C 为测点。

地铁隧道保护的技术指标^[7]一般要求工程活动对地铁隧道的附加位移量需满足地铁隧道的最大位移量 $\leq \pm 20$ mm,地铁隧道变形的曲率半径控制指标 $R \geq 15\ 000$ m,由表 3 可知,工况 1~4 无法满足隧道保护要求,虽然增加桩长可以减小隧道变形,但是工况 4 搅拌桩桩长已达到 25 m,一方面增加桩长施工质量可能无法保证,另一方面工程造价也会显著地提高;因此搅拌桩进行地基加固对隧道的变形控制难以达到预期的效果。

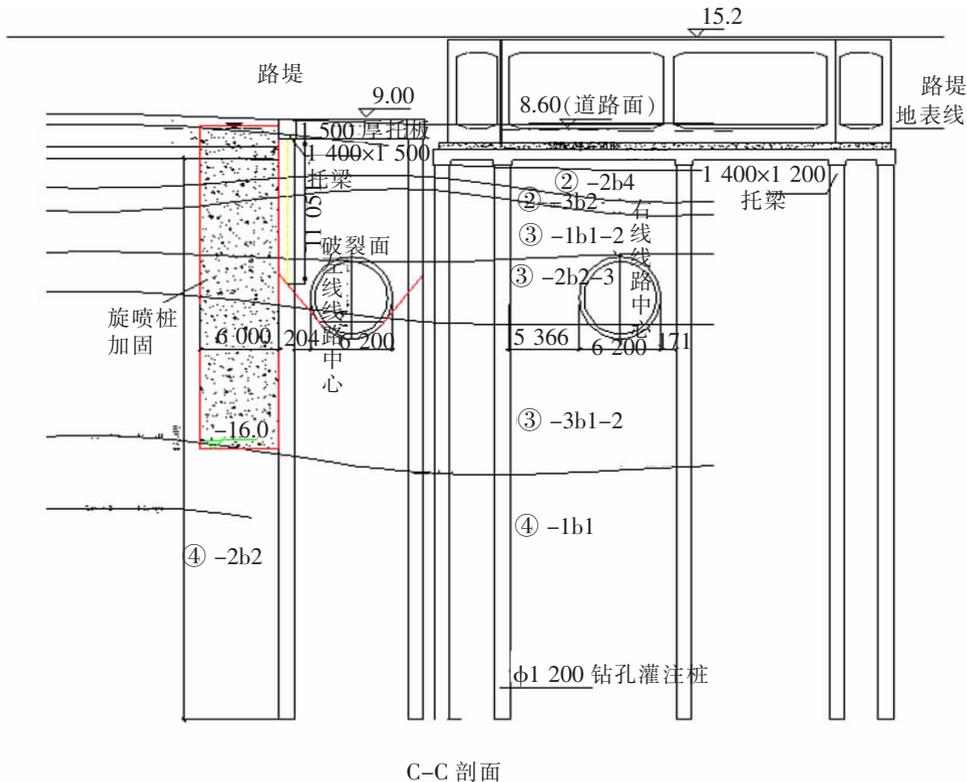


图 6 桩板加固剖面图(单位:m)

Fig.6 Cross section of pile-plank reinforcement(Unit:m)

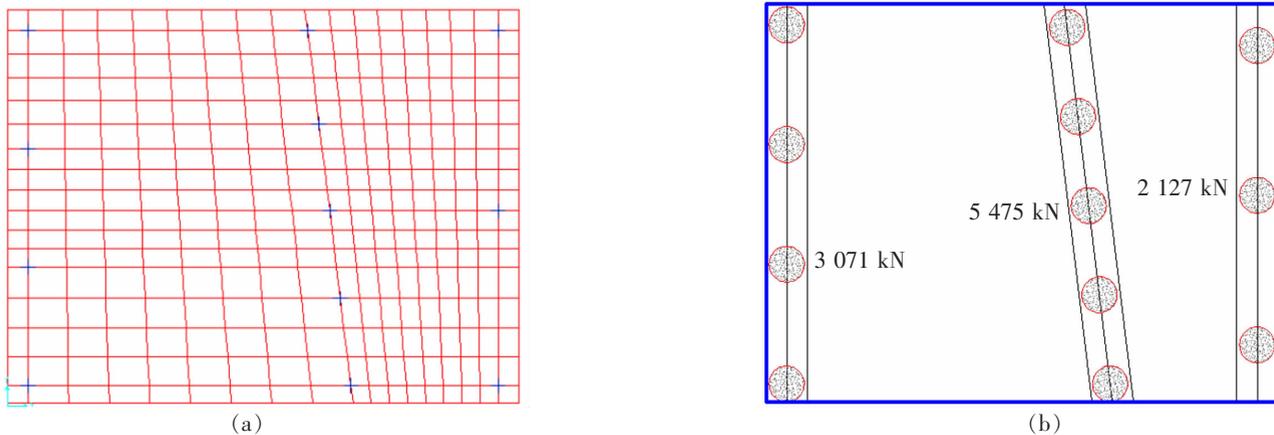


图 7 北侧混凝土板模型及计算结果图

Fig.7 North concrete slab model and the calculation results of pile top force

计算结果表明,桩顶反力最大值发生在北侧混凝土板的中排桩上,最大值为 5 475 kN。

由于钻孔灌注桩桩尖已进入 K2c-3 分化泥质砂岩中,因此对于桩基的沉降只考虑桩体本身的压缩沉降,根据公式(2)

$$S_p = \frac{\mu_p p + p_{bo}}{2E_p} l \quad (2)$$

式中: μ_p 为应力集中系数; l 为桩身长度; E_p 为桩身材料变形模量; p 为桩项端承力密度; p_{bo} 为桩端端承力密度。

按照最不利情况,即不考虑桩间土对上部荷载的分担作用,而完全由桩承担,计算得桩的最大压缩沉降为 4.1 mm。

根据《铁路桥涵地基与基础设计规范》^[11]中关于钻孔灌注桩容许承载力的计算公式(3),可得到钻(挖)孔灌注桩的容许承载力

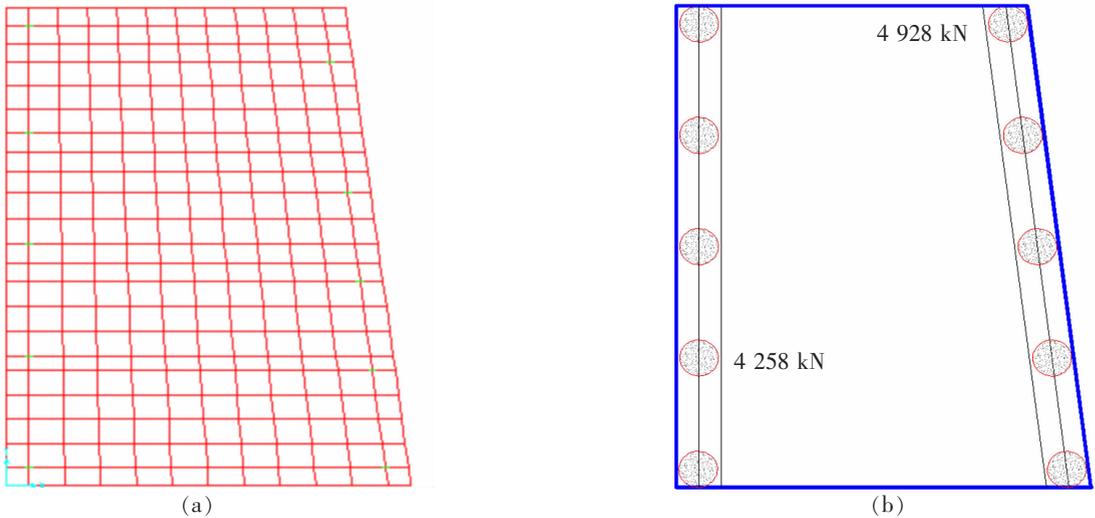


图8 南侧混凝土板模型及计算结果图

Fig.8 South concrete slab model and the calculation results of pile top force

$$[P]=\frac{1}{2}U\sum f_i l_i+m_0 A[\sigma] \quad (3)$$

式中:[P]为桩的容许承载力,kN; U 为桩身截面周长,m; f_i 为各土层极限摩阻力,kPa; l_i 为各土层厚度,m; A 为桩底支承面积, m^2 ; $[\sigma]$ 为桩底地基土的容许承载力,kPa; m_0 为桩底支撑承载力折减系数。

计算得钻孔灌注桩的容许承载力为6 571.6 kN,考虑盾构隧道开挖引起的桩基承载力的损失,即不考虑破裂面范围内的桩基的承载力,如图7所示,折减后钻孔灌注桩容许承载力为5 753.4 kN,最大反力为5 475 kN,满足承载力要求。

2.2.2 扩建复线施工对新建隧道变形影响分析

1) 计算模型。采用数值模拟方法,建立三维有限元模型,土体采用硬化弹塑性模型(HS),桩、板和涵洞框架采用线弹性模型,在几何模型底部施加完全固定约束,在周边施加竖直滑动约束,模型表面为自由边界。非下穿地段搅拌桩加固区桩土单元采用复合模量的方法用实体单元等效替代。

2) 扩建复线施工对隧道变形影响分析。扩建复线路基施工引起的隧道变形如图9所示,左、右线隧道的最大沉降和最小曲率半径如表4所示。

表4 隧道纵向最大沉降及最小曲率半径
Tab.4 The maximum longitudinal settlement and minimum curvature radius of tunnel

参数	左线	右线
最大沉降/mm	4.28	2.36
最小曲率半径/m	68 546.9	163 037.7

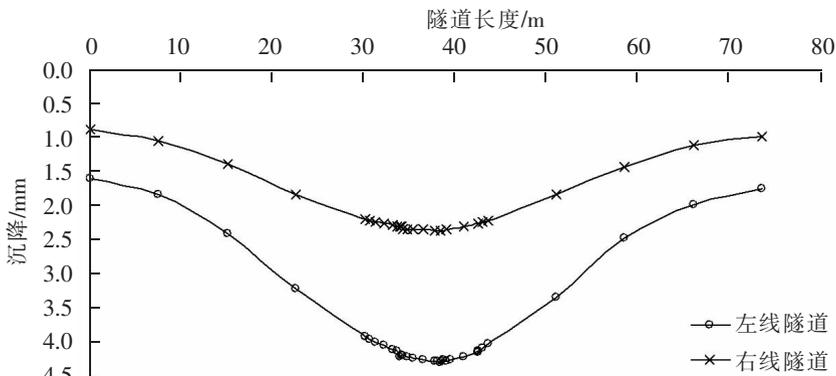


图9 左、右线隧道纵向沉降

Fig.9 The longitudinal settlement of left and right tunnel

由表4可知,采用桩+板加固后,扩建路基施工对新建盾构隧道影响很小,最大隧道变形不到5 mm,能够满足工程活动对地铁隧道的附加位移量需满足地铁隧道的最大位移量 $\leq \pm 20$ mm,地铁隧道变形的曲率半径控制指标 $R \geq 15\ 000$ m。

3 结语

1) 采用桩长25 m的水泥搅拌桩进行地基加固处理时,铁路的工后沉降能满足沉降控制要求,但是隧道的最大沉降和最小曲率半径分别达到38 mm和10 117.5 m,不能满足地铁隧道保护的技术指标要求。

2) 采用桩板加固方案,铁路路基施工引起的盾构隧道的结构变形很小,最大沉降不到5 mm,最小曲率半径也远超过15 000 m,能够满足相应地铁隧道保护标准。

参考文献:

- [1] 王坤. 宁波地区地铁盾构下穿铁路路基的控制性研究[J]. 铁道工程学报, 2017(4):91-95
- [2] 钱王苹,漆泰岳,乐弋舟,等. 盾构隧道下穿高速铁路的安全因素分析及应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11):2282-2289
- [3] 徐干成,李成学,王后裕等. 地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2):269-272.
- [4] 唐黎明. 地铁盾构近距离下穿多座高铁桥梁影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(2):45-53.
- [5] 中华人民共和国铁道部. TB10106-2010 铁路工程地基处理技术规程[S]. 北京:中国铁道出版社, 2010.
- [6] 中华人民共和国铁道部. 新建时速200公里客货共线铁路设计暂行规定[铁建设函[2005] 285号][S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
- [7] 上海市市政管理局. 沪市政法(94)第854号上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定[S]. 上海, 1994.
- [8] 霍军帅,王炳龙,周顺华. 地铁盾构隧道下穿城际铁路地基加固方案安全性分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5):71-77.
- [9] 阮承志. 复合式盾构下穿高铁施工技术与管理过程控制研究[J]. 江苏建筑, 2012(5):60-62.
- [10] 同济大学. 宁波地铁1号线二期工程盾构隧道下穿铁路技术方案研究[R]. 上海:同济大学, 2011.
- [11] 中华人民共和国铁道部. TB10002.5-2005 铁路桥涵地基和基础设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.

Research on Foundation Treatment Measures for Shield Tunnel Crossing Sections under Extension Railway Construction

Huang Long

(Shaoxing Rail Transit Group Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

Abstract: The later constructed railway may have great influence on the former constructed shield tunnel. For this case, the paper analyzed two types of foundation treatment measures, including cement mixing pile and pile-plank structure. According to the results of theoretical calculation and numerical simulation, the deformation of shield tunnel with cement mixing pile reinforcement is above the protection standard of subway while the deformation of shield tunnel with pile-plank reinforcement can control the deformation of the tunnel. The research may provide reference for similar projects in the future.

Key words: shield tunnel; cement mixing pile; pile-plank structure; subgrade settlement