

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.07.015

盾构侧穿邻近桥桩施工影响及加固措施研究

陈江¹, 陈思明², 傅金阳¹, 朱双厅³, 阳军生¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中铁建设投资集团有限公司, 广东 深圳 518055;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 410075)

摘要: 结合长沙地铁1号线下穿新中路立交桥的实际工程, 采用数值计算和现场监测相结合的方法, 分析旋喷桩对盾构侧穿邻近桥桩时的加固效果。经计算和实测数据对比, 表明由于对桩基进行旋喷桩的隔离加固, 使得地表的横向沉降槽与传统的横向沉降槽有明显区别; 同时靠近桥桩的地层水平位移明显减少。此外, 由于旋喷桩的保护桩基作用, 大大减少了盾构掘进对地表以及桥墩沉降的影响。

关键词: 隧道工程; 旋喷桩; 数值计算; 桩基; 现场监测

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)07-0097-06

Study on Effect of Shield Tunneling Side-crossing Adjacent Piles and Reinforcement Measures

CHEN Jiang¹, CHEN Si-ming², FU Jin-yang¹, ZHU Shuang-ting³, YANG Jun-sheng¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;
2. China Railway Construction & Investment Group Co., Ltd. Shenzhen Guangdong 518055, China;
3. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou Zhejiang 310014, China)

Abstract: Based on the under-passing construction project of Changsha Metro Line 1 to the Xinzhong Road overpass, using numerical calculation and on-site monitoring, the reinforcement effect of jet grouting pile when shield tunneling side-crossing adjacent bridge piles is analysed. The comparison between numerical result and measurement data shows that (1) due to the isolation and reinforcement effect of the jet grouting pile on the pile foundation, the lateral surface settlement trough and classic surface settlement trough have obvious difference; (2) the ground horizontal displacement near the bridge piles reduced apparently; (3) since the protection of jet grouting pile to pile foundation, the effect of shield excavation on the settlements of ground surface and the pier is greatly reduced. In the result, site monitoring and the numerical results are similar.

Key words: tunnel engineering; jet grouting pile; numerical calculation; pile foundation; on-site monitoring

0 引言

随着大城市地铁建设的快速发展, 地铁穿越高层建筑和桥梁的次数越来越多, 而且浅层地表经常埋置各种管线, 如排污管、军事电缆等等, 地铁隧道不可避免地从小型建筑物基础的下部或侧边近距

离穿越。特别是在杂填土和砂卵石地层中, 盾构施工对地层产生的扰动会造成影响, 引起地表和建筑物的沉降, 甚至发生建筑物的裂缝和路面倒塌。特别是隧道下穿立交桥时, 对盾构的掘进参数的控制和建筑物的加固措施, 提出了更高的要求。因此开展这方面的研究非常有意义, 既能确保盾构顺利穿

收稿日期: 2014-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378505; 50808178)

作者简介: 陈江(1985-), 男, 浙江义乌人, 博士研究生。(chenjianggood@163.com)

越，又能保证桥梁的运行安全。

近年来，国内外许多学者对在盾构下穿临近桩基及其采取加固保护效果进行了分析和研究。兰宇等^[1]研究表明在不加固情况下，采用旋喷桩对地层进行加固后，桥墩沉降能够得到较好的控制；张顶立等^[2]研究了城市隧道开挖对地表建筑群的影响，得出隔离桩能够阻断地层变形引起的应力传递，从而控制地层变形；吴昌将等^[3]认为在隔离桩的保护作用下，隧道开挖产生的地表与建筑物的沉降可以得到有效的减少；孙国庆^[4]提出采取基础注浆加固和跟踪注浆方式能有效控制建筑物沉降的意见。李兆平^[5]等认为对岩体进行预注浆加固，提高了隧道施工安全性；王俊^[6]、朱双厅^[7-8]等提出采用旋喷桩加固和袖阀管注浆对桥梁桩基进行加固和保护，加固效果良好。

在国外，Lee^[9]等提出隧道施工对桥桩的影响范围比以前的研究范围要大得多，为旋喷桩的加固范围提供了参考依据。Kun^[10]提出根据地质条件来对桩基采取旋喷桩加固或者普通的注浆加固措施。

本文以长沙市地铁 1 号线下穿新中路立交桥为研究背景，选取了 L4 桥墩所在的 YDK24 + 330 典型断面，以测斜管和地表沉降观测资料为依据，分析旋喷桩的隔断加固效果。

1 工程概况

长沙地铁 1 号线涂家冲站 - 铁道学院站区间 Y (Z)DK23 + 900.000 ~ 24 + 650.000 段下穿新中路立交桥，长约 750 m。区间左右线均采用盾构法施工，隧道结构内径为 5.4 m，外径 6.0 m，采用 300 mm 厚 C50 钢筋混凝土管片衬砌。新中路立交桥 L 匝道 L04 混凝土桥墩，直径为 1.2 m，其基础为直径 1.2 m 的摩擦端承桩。隧道与桥桩水平净距离约为 6.32 m。此处隧道覆土厚度约为 18.5 m。

盾构穿越 L04 混凝土桥墩附近的地层上半部大多粉质黏土，下半部分通过粗砂、卵石层，自稳能力差，透水性强，地下水位较高，掌子面容易产生涌水、涌砂，造成细颗粒物质大量流失，引起开挖面失稳、地面沉降甚至塌陷，同时围岩均分布有高强度、大粒径的卵石，容易造成超挖和排渣困难，对盾构设备磨损严重，施工风险极高。

为了保证盾构施工时，L4 桥桩的安全，施工前预先打设 3 排 $\phi 800@500$ 三重管旋喷桩，起到隔离保护的作用。旋喷桩顶部到达盾构顶板以上不小于 6 m，底部距离盾构底板以下不小于 3 m，起到加固

土体和隔离保护的作用，见图 1。

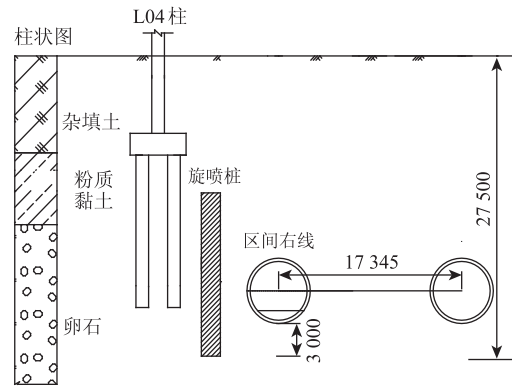


图 1 YDK24 + 330 断面示意图 (单位: mm)
Fig. 1 Schematic diagram of cross-section YDK24 + 330 (unit: mm)

2 数值计算

2.1 模型参数选取

根据所选取 YDK24 + 330 (L4 柱) 典型断面，模型采用三维 8 节点单元 C3D8R，土体本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型。因为混凝土在强度破坏之前，线性关系良好，所以本文混凝土衬砌结构采用线弹性模型，运用 ABAQUS 软件进行计算分析^[11]。为保证模型边界不受隧道开挖的影响，沿 X 方向共取 100 m；沿 Y 方向取 60 m；沿隧道轴线 Z 方向 40 m。模型左右两侧约束 X 水平方向位移，模型前后两侧约束 Z 方向位移，底部约束 3 个方向位移。土体和管片均采用实体单元模拟，见图 2。本文为了对比分析，分别就两种情况进行了计算，分别是：工况 1 未加旋喷桩双隧道依次开挖，工况 2 旋喷桩隔离加固后双隧道依次开挖。模型计算参数选取来自长沙地铁 1 号线的地勘报告，如表 1 所示。

表 1 模型计算参数
Tab. 1 Model calculation parameters

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
杂填土	1 890	0.024	0.35	35	13.4
粉质黏土	2 000	0.04	0.3	65	20
卵石	2 100	0.16	0.25	5	35
旋喷桩	2 150	10.4	0.2	900	38
桩基	2 500	30	0.18	—	—
衬砌	2 500	28	0.2	—	—

2.2 隧道开挖过程的有限元数值计算

(1) 确定模型的影响范围，根据地质勘探报告结果确定地层性质；并依照设计参数确定管片及旋喷桩参数。

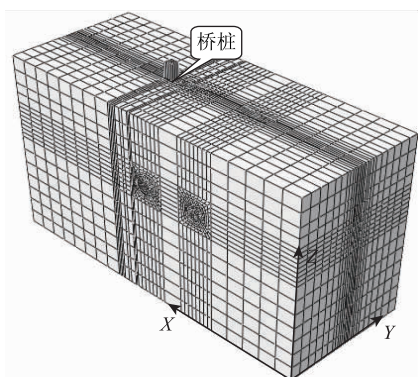


图2 划分网格后的三维模型

Fig. 2 Three-dimensional meshed model

(2) 确定边界条件,加桥桩荷载和桩土接触,墩荷载的 L4 桥墩为一柱四桩。

(3) 施加地层重力,再进行地应力平衡。

(4) 对地层进行旋喷桩的加固,见图 3,旋喷桩的大小为 $15\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 11.3\text{ m}$ 。

(5) 开始盾构开挖时,应力释放采用弹性模量的衰减方法^[12],在衬砌施工前,将开挖区单元的模量降低,依次来模拟应力释放效应,地应力释放 40%;盾构开挖后到安装管片时,应力释放 25%。管片长为 1.5 m ,土体开挖和管片安装采用 Model Change, Remove 和 Add 生死单元。

(6) 安装管片,应力全部释放,管片承受土层压力。

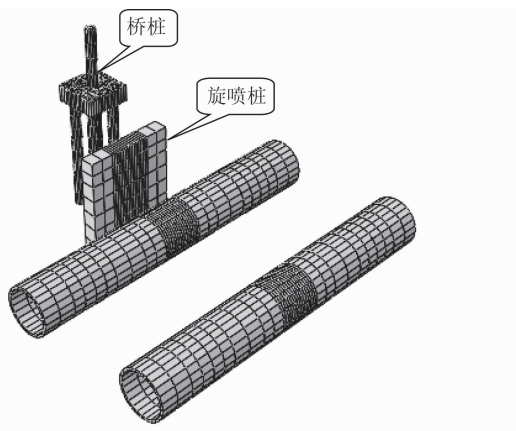


图3 结构体空间位置关系

Fig. 3 Relationship of structure spatial position

2.3 计算结果分析

(1) 地表沉降分析

从图 4 和图 5 中可以看出,当盾构开挖土体后,拱顶上的地层开始产生沉降变形,拱底土体开始产生隆起,由于拼装的管片衬砌与地层密贴,随着盾构的推进,管片变形越来越明显,随着与隧道中心

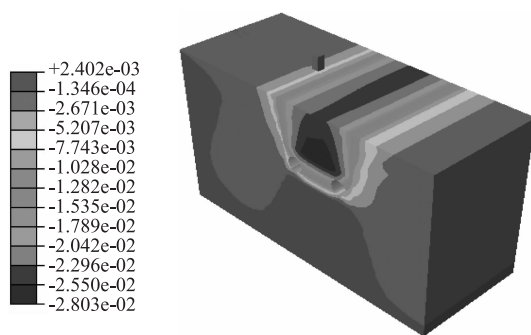


图4 工况 1 未加旋喷桩 Y 方向位移云图 (单位: m)

Fig. 4 Contour of Y-direction displacement without jet grouting pile reinforcement under condition 1 (unit: m)

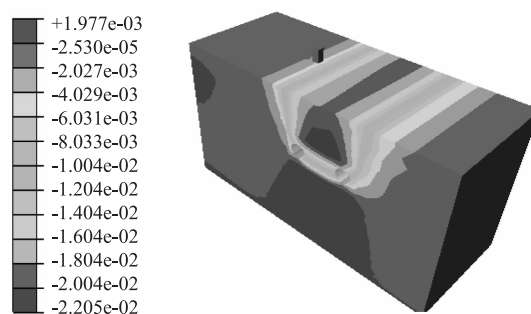


图5 工况 2 加旋喷桩后的 Y 方向位移云图 (单位: m)

Fig. 5 Contour of Y-direction displacement after jet grouting pile reinforcement under condition 2 (unit: m)

线的距离不断增加,地表的沉降量也依次递减,地表沉降曲线基本符合正态分布规律,同时也验证了隧道开挖横向沉降槽理论。

L4 桥墩附近的地层未进行旋喷桩隔离加固之前,隧道拱顶的最大沉降达到 28 mm 隧道底部最大隆起 4.5 mm ,此时该断面的最大地表沉降有 23.5 mm ;对 L4 桥墩附近的地层进行旋喷桩隔离加固后,隧道衬砌的变形降低,隧道拱顶的最大沉降达到 22.1 mm ,隧道底部最大隆起 3.6 mm ,在此工况下最大地表沉降量为 18.4 mm ,而实测数据的最大地表沉降值有 17.8 mm 。实测数据和数值模拟结果都能基本符合 Peck 公式地表沉降槽横向沉降曲线的规律,见图 6。

(2) 水平位移分析

C₁ 号测斜管埋在旋喷桩和桥墩之间,埋深为 16 m ,与桥墩桩基的水平距离为 1 m ,与旋喷桩左侧面的水平距离为 1 m ,见图 7~图 9。

两种工况下的水平位移如图 10 和图 11 所示。C₁ 号测斜管在不同的工况条件下以及实测值中,其最大水平位移都发生在地表,实测侧向位移值与数

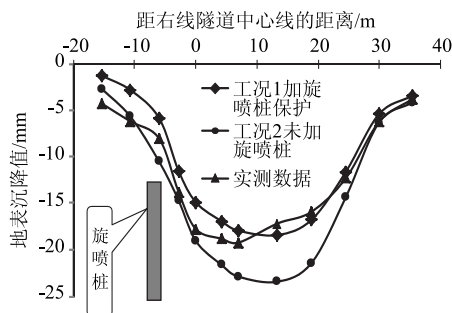


图6 实测地表沉降值和数值模拟结果的对比

Fig. 6 Contrast between measured settlement value and numerical simulation result



图7 L4桥墩

Fig. 7 Pier L4

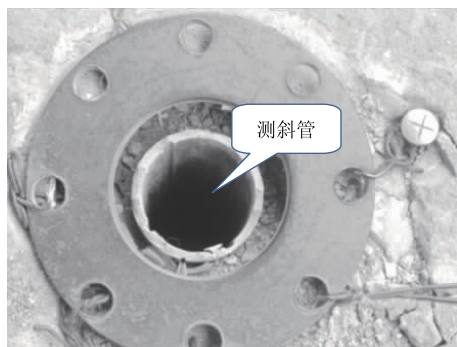


图8 测斜管

Fig. 8 Inclinometer

值模拟值的总体变化趋势一致,测斜管实测的最大水平位移 5.8 mm;在工况 2 条件下,加了旋喷桩后, C_1 号测斜管所在位置不同深度土体,其最大水平位移 4.8 mm;而在工况 1 条件下,没有进行旋喷桩隔离加固的情况下, C_1 号测斜管不同深度土体的最大水平位移 6.4 mm,采取旋喷桩隔离加固后,最大水平位移减少了 25%,见图 12。这说明采取旋喷桩隔断加固的措施能明显减少土体的水平位移。

C_2 号测斜管埋在旋喷桩和右线隧道之间,埋深为 23.5 m,比盾构隧道底部的工程低 3 m,和旋喷桩的加固深度一样,与旋喷桩右侧面水平距离为

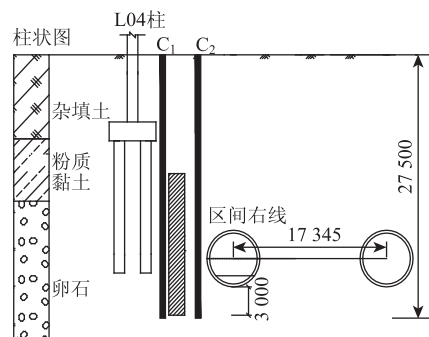
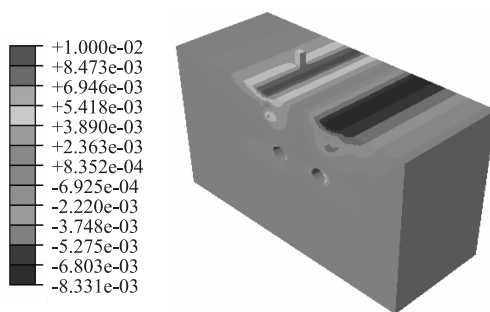
图9 C_1 和 C_2 测斜管布置 (单位: mm)Fig. 9 Layout of inclinometer C_1 and inclinometer C_2 (unit: mm)

图10 工况 1 未加旋喷桩 X 方向位移云图 (单位: m)

Fig. 10 Contour of X-direction displacement without jet grouting pile reinforcement under condition 1 (unit: m)

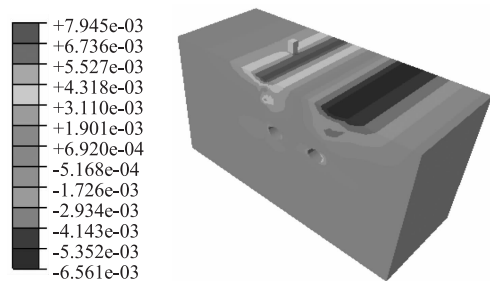
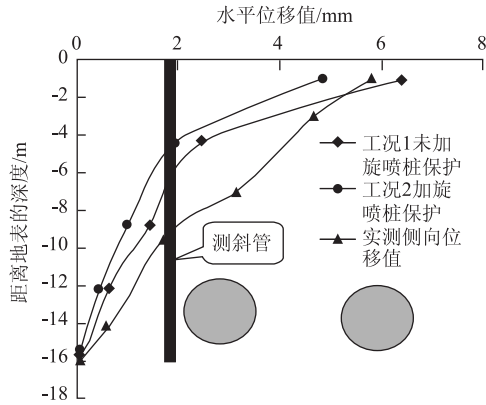


图11 工况 2 加旋喷桩后的 X 方向位移云图 (单位: m)

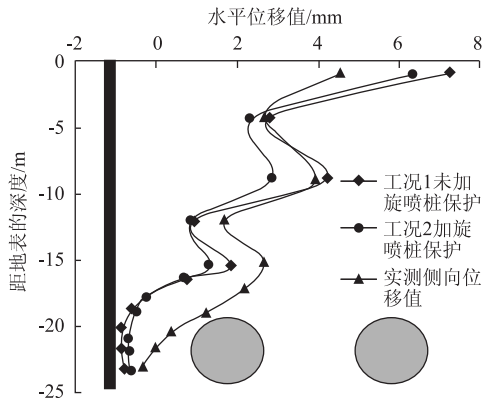
Fig. 11 Contour of X-direction displacement after jet grouting pile reinforcement under condition 2 (unit: m)

1 m,与右线隧道的水平距离为 1.52 m (见图 7 ~ 图 9)。

C_2 号测斜管在不同的工况条件下以及实测值中,其最大水平位移都发生在地表,实测水平位移值与数值模拟值的总体变化趋势一致,测斜管实测最大水平位移 4.58 mm;在工况 2 的条件下,加了旋喷桩后, C_2 号测斜管所在位置不同深度土体,其最大水平位移为 6.4 mm;而在工况 1 的条件下,没有进行旋喷桩加固措施时, C_2 号测斜管不同深度土体的最大水平位移为 7.2 mm。可以看出,采取旋喷桩隔断

图12 C₁号测斜管所在位置不同深度土体的水平位移Fig. 12 Soil horizontal displacements in different depths measured by inclinometer C₁

加固措施后,最大水平位移减少了36.4%,见图13。在距离地表埋深15 m到25 m的土体,由于盾构隧道开挖扰动的影响,附近土体的水平位移变化较大,同时也说明了采取旋喷桩隔断加固措施的重要性。

图13 C₂号测斜管所在位置不同深度土体的水平位移 (单位: mm)Fig. 13 Soil horizontal displacements in different depths measured by inclinometer C₂ (unit: mm)

(3) 桥桩的沉降分析

在工况1未加旋喷桩的情况下,桥桩最大沉降值为1.8 mm,见图14,而在工况2旋喷桩隔断加固的情况下,桥桩的最大沉降为1.2 mm,见图15。这说明由于旋喷桩隔断加固的效果,使桥桩沉降减少了2/3,也说明旋喷桩的隔断加固对桥桩减少沉降起到明显的效果。

3 结论

(1) 在盾构隧道开挖时,旋喷桩的隔断加固措施对减少地表沉降的效果非常明显,与未采取旋喷

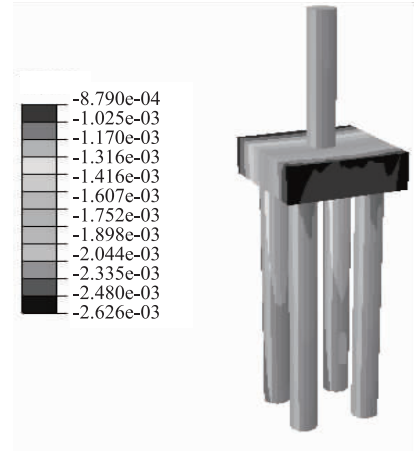


图14 工况1未加旋喷桩时竖向位移云图 (单位: m)

Fig. 14 Contour of vertical displacement without jet grouting pile reinforcement under condition 1 (unit: m)

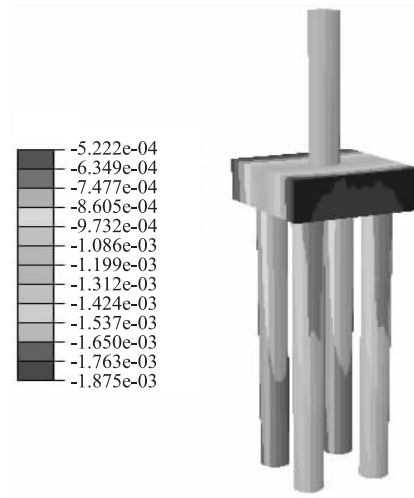


图15 工况2加旋喷桩后桥桩的竖向位移云图 (单位: m)

Fig. 15 Contour of vertical displacement after jet grouting pile reinforcement under condition 2 (unit: m)

桩加固之前比,在此工程中减少地表沉降值可达20%以上。在旋喷桩的隔断加固作用下,减少了盾构隧道开挖产生的地表沉降和桥桩沉降。

(2) 旋喷桩对隧道附近土体水平位移的隔断效果非常明显,与未采取旋喷桩隔断加固措施之前相比,在此工程中减少的地中水平位移可达25%以上。在旋喷桩的隔断加固措施下,减少了盾构开挖对邻近桥墩的影响,为以后类似工程的建设提供借鉴。

(3) 数值模拟结果能与实测地表沉降值较好地符合,实测地表沉降曲线与Peck公式的地表沉降槽基本一致,因此采用数值模拟的方法预测盾构施工对桥桩的影响在实际工程的应用具有一定指导作用。

参考文献:

References:

- [1] 兰宇, 方勇, 段绍和, 等. 地铁盾构隧道侧穿锦江大桥施工的三维数值模拟 [J]. 铁道工程学报, 2009, 126 (3): 79-83.
LAN Yu, FANG Yong, DUAN Shao-he, et al. Numerical Simulation for Construction of Metro Shield Tunnel Undercrossing Jinjiang Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 126 (3): 79-83.
- [2] 张顶立, 李鹏飞, 侯艳娟, 等. 城市隧道开挖对地表建筑群的影响分析及其对策 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (2): 296-302.
ZHANG Ding-li, LI Peng-fei, HOU Yan-juan, et al. Influence due to Urban Tunnel Excavation on Ground Buildings and its Countermeasures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (2): 296-302.
- [3] 吴昌将, 张子新, 丁文其, 等. 盾构侧穿邻近古建筑的施工影响分析及保护措施加固效果的研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (1): 158-165.
WU Chang-jiang, ZHANG Zi-xin, DING Wen-qi, et al. Influences of Construction of Side-crossing Shield Tunnel on Adjacent Ancient Architectures and Reinforcement Effect of Protection Measures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (1): 158-165.
- [4] 孙国庆. 下穿隧道建筑物保护方案比选及注浆方案试验研究 [J]. 铁道工程学报, 2010, 144 (9): 35-40.
SUN Guo-qing. Comparison and Choice of Protective Schemes for Building Around Under-passing Tunnel and Experimental Study on Grouting Scheme [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 144 (9): 35-40.
- [5] 李兆平, 李铭凯, 黄庆华. 南京地铁车站下穿既有铁路站场施工技术研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (6): 1061-1066.
LI Zhao-ping, LI Ming-kai, HUANG Qing-hua. A Study of Construction Technique for the Nanjing Subway Station under the Nanjing Railway Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (6): 1061-1066.
- [6] 王俊. 旋喷桩与袖阀管注浆在桥梁桩基加固中的应用 [J]. 铁道建筑, 2013, 24 (9): 24-26.
WANG Jun. Churning Pile and Sleeve Valve Pipe in Bridge Pile foundation Strengthening [J]. Railway Engineering, 2013, 24 (9): 24-26.
- [7] 朱双厅, 沈炜东, 刘锦成, 等. 长沙地铁富水软弱地层盾构下穿京广铁路风险分析与控制研究 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58 (6): 102-107.
ZHU Shuang-ting, SHEN Wei-dong, LIU Jin-cheng, et al. Construction Risk Analysis and Control Measures for a Changsha Metro's Shield Tunnel Crossing below Existing Beijing-Guangzhou Railway in Water-rich Soft Soil Stratum [J]. Railway Standard Design, 2014, 58 (6): 102-107.
- [8] 朱双厅. 长沙地铁砂卵石地层盾构紧邻桥桩施工隔断保护研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
ZHU Shang-ting. Study on Partition Protection of Pile Adjacent to Metro Shield Tunnel Construction in Changsha Sandy Cobble Stratum [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [9] LEE Y J, BASSETT R H. Influence Zones for 2D Pile-soil-tunnelling Interaction Based on Model Test and Numerical Analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22 (1): 325-342.
- [10] KUN M, ONARGAN T. Influence of the Fault Zone in Shallow Tunneling: A Case Study of Izmir Metro Tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 33 (1): 34-45.
- [11] 于清泉. 超大规模群桩基础承载性能试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2009.
YU Qing-quan. Test Research on Characteristic of Vertical Bearing Capacity of Super Pile Group [D]. Nanjing: Southeast University, 2009.
- [12] HIBBITT K, SORENSEN I. ABAQUS Standard User's Manual (Version 6.2) [R]. Pawtucket: Dassault systems Simulia Corp., 2001.