

隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响分析

李 雪¹, 周顺华¹, 王培鑫¹, 李晓龙²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海东华地方铁路开发有限公司, 上海 200071)

摘 要: 针对饱和砂土地区盾构隧道超近接高铁桥墩摩擦桩的工程问题, 采用钻孔灌注桩及高压旋喷桩组合隔断隧桩间位移。分别对钻孔灌注桩、高压旋喷桩及盾构上下行线近接高铁桥梁桩基引起的高铁桩基的变形及变位开展现场试验, 对现场实测数据及规律进行分析。结果表明, 钻孔灌注桩施工使高铁桥墩产生沉降, 占施工过程最大沉降量的 75%~125%; 高压旋喷桩施工导致桥墩产生隆起, 占施工过程最大沉降量的-50%, 旋喷桩施工完成后将持续一段时间; 盾构施工对高铁桥墩竖向变形产生影响, 距离高铁桩基越近影响越大, 同时累计沉降跟盾构施工控制有较大关系。

关 键 词: 盾构隧道; 高铁桩基; 隔离桩; 近接施工

中图分类号: U 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)增 1-0235-06

Analysis of impact of isolation piles and shield tunnelling on adjacent high-speed railway pile foundation

LI Xue¹, ZHOU Shun-hua¹, WANG Pei-xin¹, LI Xiao-long²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Donghua Local Railway Development Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: In light of the adjacent high-speed railway pile foundation problem induced by the process of shield tunnelling in the saturated sandy stratum, the isolation piles, including bored pile and jet grouting pile, were applied to resist the displacement of the pile foundation. An experiment was investigated in order to determine the effect on high-speed railway piles by the adjacent construction of bored pile, jet grouting pile and shield tunnel. The monitoring in-situ was carried out. The results shows that the settlement of high-speed railway piles is induced by the performance of bored pile, the settlement value may account for almost 75%-125% of maximum ones. The heave of the high-speed railway is induced by the performance of jet grouting piles; the heave value may account for the -50% of the maximum settlement. Meanwhile, the process of the heave can last for a long time. The specific operation of shield tunnel machine affects the magnitude of the adjective high-speed railway piles subsidence; the closer the distance between the shield tunnel and the piles, the larger the influence; the cumulative settlement is associated with operation of the shield tunnelling.

Keywords: shield tunnel; high-speed railway pile foundation; isolation piles; adjacent construction

1 引 言

近年来城市轨道交通等地下空间的开发所带来的环境问题受到广泛关注, 其中盾构近距离穿越高铁桩基等问题尤为突出。杭州、南京、无锡等地区地铁施工都面临盾构超近距离侧穿高铁桩基的案例, 而高速铁路对变形控制非常之严格, 地铁盾构超近接高铁桩基施工将改变其周围土体应力状态, 使高铁桩基发生变形和变位, 直接影响高速铁路列车的使用功能和运行安全, 因此有必要采取隔离措

施进行加固。关于盾构超近距离近接高铁桩基的工程经验相对较少, 对于采用何种保护措施、施工过程及效果如何尚缺乏可靠的资料和认识, 此类问题还处于探索阶段。

盾构近接桩基方面已有部分研究成果。张志强等^[1-2]对地铁近接桥梁桩基及建筑物桩基的影响采用数值分析方法, 得出盾构近接桩基施工将会导致靠近桩侧盾构弯矩和变形有增大趋势。吴波等^[3]通过三维数值分析的方法对地铁施工近邻桩基加固效果分析得出, 通过支撑减载以及在短桩底部注浆加

固不能明显减少施工造成的桥基沉降。总之采用数值分析方法能够得出隔离桩加固前后桩基的影响程度^[4-8],对隔离桩的施工过程难以模拟,而现阶段隔离桩施工对高铁桩基的影响现场数据也较缺乏,此类分析鲜见文献。本文结合杭州地铁1号线盾构近接高铁桩基的一个典型工程现场试验研究,分析了高铁旁侧钻孔灌注桩、高压旋喷桩及盾构上下行线施工高铁桩基的变形、变位数据及规律,得出一些有意义的结论,可为高铁桩基周边该类隔离桩施工行为的理论研究提供参考。

2 工程概况

杭州地铁号线下穿高铁余杭南站是国内首例地铁近接穿越运营高铁桩基的工程。土压平衡盾构近距离侧穿沪杭高铁余杭南站工点下穿段长45 m、隧道与高铁斜交的交角约 62° ,盾构隧道外缘与沪杭高铁桩基最小净距为5.19 m,同时高铁桩基承台与盾构隧道端头井最小净距为3.62 m,平面及纵断面如图1、2所示。

面如图1、2所示。

下穿段盾构隧道埋深11.7 m,管片外径为6.2 m,内径为5.5 m,宽1.2 m,厚0.35 m。线路平面上位于直线段与半径为450 m圆曲线过渡的缓和曲线上;线路纵坡坡度为2‰。下穿段盾构主要穿越土层为③₂粉砂层、③₅砂质粉土,土层含水率26%左右,饱和度高达93%,内摩擦角 33° ,渗透系数 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/s,相应土层物理力学指标见表1。下穿段高架桥上设2条正线、2条站线及2座站台;下部桥梁及基础承台独立。沿垂直于高铁纵向正线下方桥墩长8.5 m,宽3.5 m,高9.5 m。承台长10.38 m,宽9.3 m,高3.5 m。站线下方承台长14.3 m,宽9.3 m,高3.5 m。承台顶面在地面以下约0.5 m。桥梁基础为钻孔灌注桩,通长配筋,直径为1.5 m,正线下方桩长69.5 m,站线下方桩长71.5 m,均为摩擦桩,正线和两侧站线钻孔桩数量分别为8根和12根。采用钻孔灌注桩与高压旋喷桩双桩组合隔断结构来隔断盾构施工位移和运营期振动的试验方案,钻孔灌

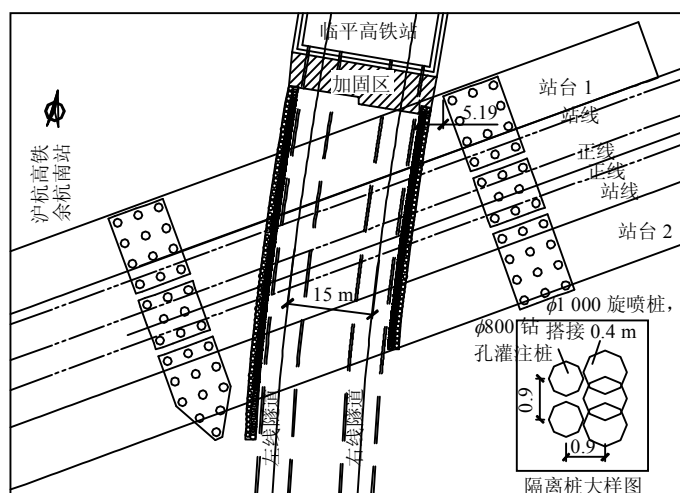


图1 地铁盾构隧道与高铁桩基平面图(单位: mm)

Fig.1 Layout of shield tunnel and pile foundation(unit: mm)

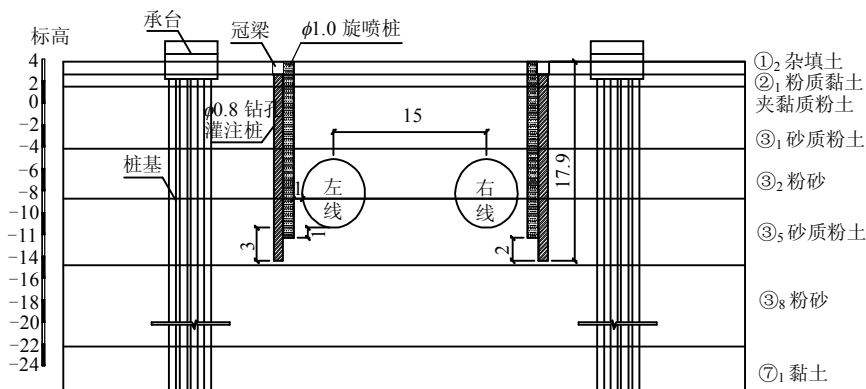


图2 地铁盾构隧道与高铁桩基横断面图(单位: m)

Fig.2 Transverse section of shield tunnel and pile foundation(unit:m)

表 1 土层主要物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical indexes of soils

土层名称	含水率 /%	孔隙比	重度 (kN/m^3)	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/($^\circ$)
② ₁ 黏质粉土夹 粉质黏土	29.3	0.846	18.8	7.9	6	27.0
③ ₁ 砂质粉土	27.1	0.771	19.1	14.38	4	30.5
③ ₂ 粉砂	25.5	0.743	19.2	13.08	1	32.0
③ ₅ 砂质粉土	26.5	0.771	19.0	12.22	1	31.0
③ ₈ 粉砂	25.0	0.731	19.2	12.69	0	32.5
⑥ ₁ 粉质黏土	33.8	0.977	18.2	5.09	19	17.0
⑦ ₁ 黏土	28.1	0.836	18.8	6.57	31	15.5

注桩桩径为 0.8 m, 桩长约 17 m, 中心间距为 0.9 m。旋喷桩桩径为 1.0 m, 桩长约 16 m, 咬合 0.4 m, 钻孔桩紧靠旋喷桩组合施作。左侧双桩隔断范围下至站台 2 边缘外 3.8 m, 上至盾构端头井加固区, 加固长度约 62 m, 右侧双桩隔断范围下至站台 2 边缘外 3.3 m, 上至盾构端头井加固区, 加固长度约 45 m。隔离桩采用跳桩法施工, 其平面与纵断面见图 1、2。

3 隔离桩盾构施工过程及试验内容

3.1 隔离桩及盾构施工

考虑到隔离桩及盾构施工均会影响到高铁桩基的空间位置, 对隔离桩及盾构施工相对应时间段进行描述, 见表 2。

表 2 隔离桩及盾构施工相应时间
Table 2 Construction time of isolation piles and shield tunnel

施工工况	施工时间/年-月-日
右侧 钻孔桩施工	2011-11-08~2011-12-22
旋喷桩施工	2011-11-22~2011-11-26
左侧 钻孔桩施工	2011-11-07~2011-11-28
旋喷桩施工	2011-11-28~2011-12-03
冠梁施工	2011-12-04~2011-12-14
路面恢复	2011-12-15~2011-12-20
右线穿越加固区	2011-12-22~2011-12-31
左线穿越加固区	2012-02-18~2012-02-27

3.2 现场试验内容

为了分析隔离桩及盾构施工对高铁桩基的影响, 在高铁桥墩侧布置一系列竖向变形测点及水平变形测点, 现场竖向沉降采用天宝 DiNi03 电子水准仪, 每公里往返水准观测精度为 0.3 mm。水平位移采用索佳 NET05 系列全站仪测量, 测点位置设置棱镜, 通过坐标法测量, 测角精度为 0.5", 可以时刻监控盾构推进过程中的桥梁变形, 竖向测点及水平变形布点平面如图 3 所示。测点 (仅标注 3[#]、4[#]墩

测点) 均布置在桥墩侧面。

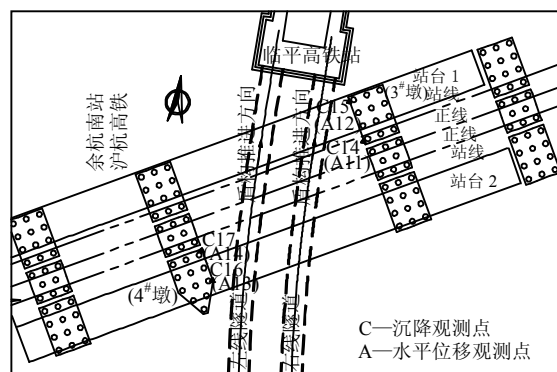


图 3 穿越段段变形测点布置图

Fig.3 Layout of deformation measuring points

4 隔离桩及盾构施工对桩基的影响

4.1 隔离桩及盾构施工对桥墩竖向变形的影响

以盾构隧道左右线距离高铁桩基最近的 3[#]、4[#]墩为例, 图 4 为隔离桩及盾构施工过程中 3[#]墩测点 C14、C15 的竖向变形发展历程。

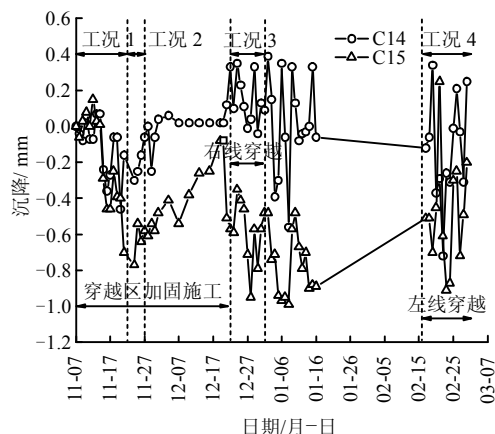


图 4 3[#]墩竖向变形时程曲线

Fig.4 Vertical deformation of pier #3 vs. time

工况 1: 东侧钻孔灌注桩施工, 位移发展由平缓波动段和下降段组成, 平缓段在 ± 0.2 mm 范围内波动, 下降段最大变化量达到 1 mm。平缓段的主要原因是钻孔灌注桩从远离 3[#]桥墩的位置施工, 先期影响较小, 钻孔灌注桩施工时, 孔壁坍塌或缩颈极易使周边土体发生位移及变形^[9-10], 当钻孔灌注桩施工接近 3[#]桥墩时, 导致 3[#]墩高铁桩基周边土体卸载, 应力释放, 3[#]墩有比较明显下降趋势。工况 2: 东侧高压旋喷桩施工, 位移发展趋势主要为上升阶段, 主要原因为高压旋喷桩施工过程中, 对土体冲切和搅拌的同时, 还对高铁桩基造成挤压, 尤其在饱和砂土中更为明显^[11-12], 迫使高铁桥墩有隆起

趋势。从量测结果可以看出, 高压旋喷桩施工完一段时间, 桥墩竖向位移还表现为上升趋势, 但速率明显比旋喷桩施工要小, 说明高压旋喷桩使土体产生挤压作用并不是刚施工完成就结束, 高压旋喷桩施工完成后固化还在继续, 持续时间为 21 d 左右。工况 3: 右线盾构穿越阶段, 右线距离 3 号桥墩下桩基最近仅距离 5.19 m, 盾构穿越过程中, 测点 C15 沉降量达到 1 mm, 且盾构穿越后沉降量影响时间较长, 持续约 12 d, 原因为盾构开挖掌子面土体扰动, 盾壳脱出盾尾后, 盾尾空隙不能被立即填充, 同步注浆浆液初凝时间较长所致。工况 4: 左线盾构穿越阶段, 左线盾构距离 3 号桥墩距离较远, 穿越对竖向变形有一定影响但值较小。图 5 描述了隔离桩及盾构施工过程中 4 号墩测点 C16、C17 的竖向变形发展历程。

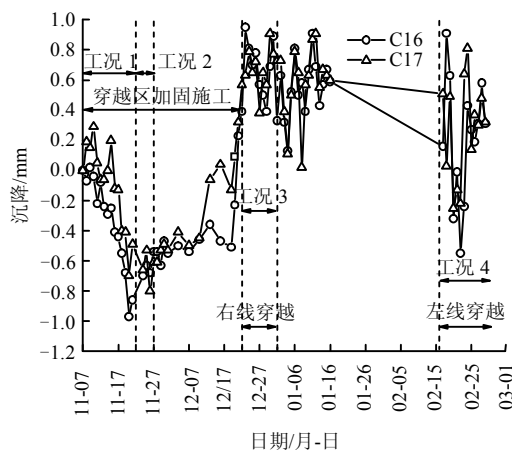


图 5 4#墩竖向变形图时程曲线

Fig.5 Vertical deformation of pier #4 vs. time

工况 1: 西侧钻孔灌注桩施工, 变形过程分为平缓段及下降段。钻孔灌注桩施工 4 号墩竖向变形先经历小幅度上升段然后经历明显下降段, 最大量达到 1 mm。该阶段竖向位移最大变形量达 1.4 mm。下降段由于钻孔灌注桩施工, 钻孔桩周边土体卸载, 围压降低, 土体应力释放, 导致沉降发生。工况 2:

西侧高压旋喷桩施工, 变形过程主要为上升段, 由于旋喷桩施工工艺的特殊性, 对周边土体冲切和搅拌的同时, 还对临近桩基造成挤压, 桥墩产生隆起。工况 3: 右线盾构穿越, 右线盾构距离 4 号桥墩相对较远, 穿越过程中变化幅度不大。工况 4: 左线盾构穿越, 左线盾构外侧距离 4 号桥墩下桩基最近仅为 6.16 m, 施工对其有一定影响, 掘进过程中最大隆起量达 0.8 mm, 最大沉降量为 0.8 mm, 变化量达到 1.6 mm。为更好地说明各个施工阶段位移变化量情况, 对各施工阶段引起的竖向变形情况进行统计, 见表 3。

综合 3#、4#桥墩竖向变形实测数据可以得出, 钻孔灌注桩近距离施工对高铁桥墩沉降影响较大, 占施工过程最大变形量百分比, 最小值约 75%, 最大值达到 125%, 说明钻孔灌注桩施工对桥墩的竖向沉降变形影响不可忽略。高压旋喷桩近距离施工使高铁桥墩产生隆起变形, 隆起变形时间持续时间相对较久一些, 占施工过程最大变形量约 40% 左右。盾构施工使高铁桥墩竖向变形产生沉降, 距离桥墩越近影响越严重, 距离桥墩较远影响也相对减小, 同时对高铁桥墩的竖向变形影响也跟盾构掘进控制有很大关系, 右线(先推)施工控制较平稳, 3#、4#桥墩影响都较小。左线施工掘进速度过快, 施工参数控制不严格, 导致盾构掘进对桥墩影响较大, 最大值占施工过程最大变形量的 150%, 因此掘进过程中有效控制盾构姿态, 匀速推进对减小周边地层扰动具有很大意义。从 3#、4#桥墩累计变形看, 整体都呈现微微隆起现象, 量值都在 0.4 mm 以内, 说明采用隔离桩施工, 有效控制盾构掘进过程, 能起到很好的隔离效果。

4.2 隔离桩及盾构施工对桥墩水平变形的影响

水平变形“正值”代表向加固区方向, “负值”代表背离加固区方向。从图 6、7 可以看出, 加固区隔离桩施工整体对桥墩水平变形有一定的影响, 其中 4#墩水平位移整体向着加固区, 累计最大值为 0.5 mm, 盾构穿越阶段, 4#墩测点 A14 整体向

表 3 各施工阶段引起的竖向变形统计

Table 3 Vertical deformations compared with different construction stages

编号	钻孔桩施工		旋喷桩施工		盾构右线施工		盾构左线施工		最大沉降量 /mm	累计变形量 /mm
	沉降量 /mm	占最大沉降量 /%	沉降量 /mm	占最大沉降量 /%	沉降量 /mm	占最大沉降量 /%	沉降量 /mm	占最大沉降量 /%		
C14	-0.53	74	0.30	42	-0.36	50	-0.32	44	-0.72	0.25
C15	-0.85	86	0.37	37	-0.60	61	-0.48	48	-0.99	-0.20
C16	-0.99	102	0.34	35	-0.22	23	-1.46	151	-0.97	0.31
C17	-0.99	124	0.31	39	-0.20	25	-1.01	126	-0.80	0.32

注: 沉降量正值代表隆起, 负值代表沉降。

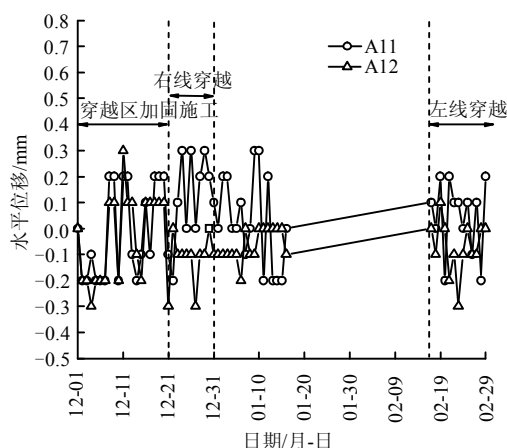


图 6 3#墩水平变形时程曲线
Fig.6 Horizontal deformations of pier #3 vs. time

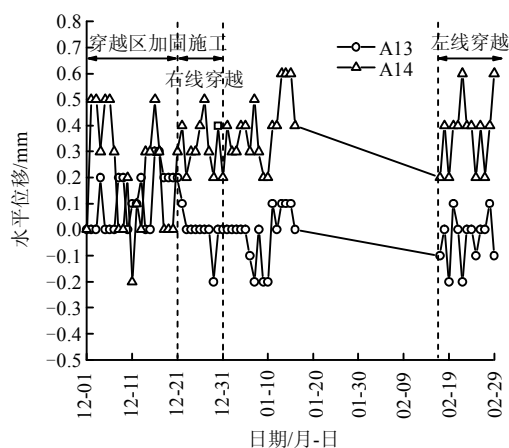


图 7 4#墩水平变形时程曲线
Fig.7 Horizontal deformations of pier #4 vs. time

着加固区移动, 而 A13 测点基本处于稳定状态。

整体来看, 隔离桩施工使高铁桥墩向着加固区方向移动, 原因可能是隔离桩施工使侧向土体卸载, 土压力减小所致。盾构施工由于有了隔离桩的作用, 整体变形比较小, 最大值不超过 0.7 mm。

5 结 论

(1) 钻孔灌注桩近接高铁桩基施工, 由于周边土体卸载, 应力释放缘故, 导致高铁桥墩产生竖向沉降, 钻孔灌注桩施工引起的桥墩竖向沉降不可忽略, 占施工过程最大沉降量的 75%~125%。

(2) 高压旋喷桩近接高铁桩基施工, 施工过程中对土体冲切和搅拌作用, 使周边土体产生挤压效应, 导致桥墩竖向方向发生隆起变形, 并且在施工完成后还将持续一段时间, 其隆起量约占施工过程最大变形量约 50%。

(3) 盾构近接高铁桩基施工, 相同条件下距离高铁桩基越近对其影响越大, 反之影响越小, 同时

盾构近接高铁桩基影响对其盾构掘进参数的有效控制较为敏感。

参 考 文 献

- [1] 张志强, 何川. 深圳地铁隧道邻接桩基施工力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 204—207.
ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan. Study on the mechanical behaviour of a metro tunnel construction adjacent to existing pile foundations in Shenzhen[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(2): 204—207.
- [2] 张志强, 何川. 地铁盾构隧道近接桩基的施工力学行为研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 92—95.
ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan. Research on mechanics behaviour of a shield tunnel construction in metro adjacent to existing pile foundation[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2003, 25(1): 92—95.
- [3] 吴波, 刘维宁, 索晓明, 等. 地铁施工近邻桥基加固效果三维数值分析[J]. 铁道工程学报, 2005, 22(5): 48—52.
WU Bo, LIU Wei-ning, SUO Xiao-ming, SHI Yu-xin, et al. Research on the reinforcing effect of adjacent short pile bridge foundation in metro station construction[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2005, 22(5): 48—52.
- [4] 李永盛, 黄海鹰. 盾构推进对相邻桩体力学影响的实用计算方法[J]. 同济大学学报, 1997, 25(3): 274—277.
LI Yong-sheng, HUANG Hai-ying. Computation of mechanical effects on adjacent piles by shield excavation[J]. **Journal of Tongji University**, 1997, 25(3): 274—277.
- [5] 吕培林, 周顺华. 软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律分析[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 12—16.
LU Pei-lin, ZHOU Shun-hua. Analysis on upper rail settlement in soft ground resulting from shield tunnelling across main rail line[J]. **China Railway Science**, 2007, 28(2): 12—16.
- [6] 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, 25(2): 293—296.
YU Ning, ZHU He-hua. The simulation of shield tunnel construction and analysis of its influence upon surrounding environments[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 293—296.

- [7] 孙永玉, 周顺华, 宫全美, 等. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 500—506.
SUN Yun-yong, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei, et al. Distribution of deep displacement field during shield tunneling in soft-soil areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 500—506.
- [8] 朱逢斌, 杨平, ONG C W. 盾构隧道开挖对邻近桩基影响数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 299—302.
ZHU Feng-bin, YANG Ping, ONG C W. Numerical analysis on influence of shield tunnel excavation to neighboring piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(2): 299—302.
- [9] 黄大维, 周顺华, 刘重庆, 等. 护壁套管钻孔灌注桩微扰动施工分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1103—1108.
HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, LIU Chong-qing, et al. Analysis of disturbing construction of protective jacket tube for cast-in-situ bored pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 1103—1108.
- [10] 杨晓杰, 邓飞皇, 聂雯, 等. 地铁隧道近距穿越施工对桩基承载力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1290—1295.
YANG Xiao-jie, DENG Fei-huang, NIE Wen, et al. Study on effect of metro tunneling on carrying capacity of pile foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1290—1295.
- [11] 汪益敏, 张尤其. 高压旋喷桩施工对管桩基础影响的试验研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(增刊): 160—173.
WANG Yi-min, ZHANG You-qi. Experiments on effect of jet grouting on pipe pile foundation[J]. **Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)**, 2011, 47(Supp.): 160—173.
- [12] WONG I H, POH T Y. Effects of jet grouting on adjacent ground and structures[J]. **Geotechnical and Geo-environmental Engineering**, 2000, 126: 244—256.