

粉砂地层盾构近距离侧穿已有建筑的控制技术\*

史运杰<sup>1</sup>,许烨霜<sup>1</sup>,沈水龙<sup>1</sup>,樊江苏<sup>2</sup>

(1.上海交通大学 土木工程系和海洋工程国家重点实验室,上海 200240;  
2.中铁十六局集团有限公司东莞项目部,广东 东莞 523000)

**摘 要:**依托穗莞深城际轨道太平隧道工程,在其侧穿一多层房屋时,采用控制地层损失与旋喷桩加固土体相结合的方式,很好地保护了现有房屋的安全与正常使用状态。通过分析隧道穿越过程中房屋的实测变形规律,并进行有限元数值分析,比较了有无旋喷桩和地层损失率对土体垂直位移、房屋角点沉降、房屋整体倾斜、土体深层水平位移的变化规律。分析结果表明,设置旋喷桩和控制地层损失均能有效减小沉降和土体位移,但控制地层损失的效果远比设置旋喷桩要明显。随着地层损失的增大,土体水平位移曲线由“勺”型渐变至S型,最大水平位移位置逐渐上移且位于隧道的上边界附近。

**关键词:**粉砂地层;盾构隧道;地面建筑;地层损失;旋喷桩;数值模拟

中图分类号:O319.56      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2017)03-0753-06

Control of Shield Tunneling Passing Through a Nearby Building in Silty Soil

Shi Yunjie<sup>1</sup>, Xu Yeshuang<sup>1</sup>, Shen Shuilong<sup>1</sup>, Fan Jiangsu<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, and State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P.R. China; 2. Project Department in Shenzhen, China Railway 16th Bureau Group, Dongguan, Guangdong 523000, P.R. China)

**Abstract:** Protection measures including control of ground loss and jet grouting column are adopt during Guangzhou-Dongguan-Shenzhen inter-city rail passing through a nearby multi-story building. Observation on the building shows that the building is in a safe using condition. Finite element method was used to analysis the deformation of building during tunnel excavation and the numerical results were compared with measured results. The analytical results show that both jet grouting columns and reduction of ground loss has the effect of reducing soil deformation, building settlement, and building tilt. However, reduction of ground loss is more effective than installation of jet-grouting columns. With increase of ground loss, horizontal displacement curve of soil changes from "spoon" shape to S shape. Moreover, the depth of maximum horizontal displacement of soil moves up to the upper boundary of the tunnel.

**Keywords:** silty soil; shield tunnel; ground building; ground loss; jet grouting pile; numerical simulation

\* 收稿日期:2016-12-03(修改稿)  
作者简介:史运杰(1983-),男,山东苍南人,工程师,硕士生,主要从事隧道开挖对岩土的动力学影响方面的研究工作。  
E-mail:syjletter@163.com  
通讯作者:许烨霜(1978-),女,江西抚州人,博士,副研究员,主要从事隧道地下空间和地下水开发利用等领域的研究工作。E-mai:xuyeshuang@sjtu.edu.cn  
基金项目:国家自然科学基金(41672259)

0 引言

随着地下空间的规模的日益增大,盾构法的应用也日益广泛<sup>[1]</sup>。盾构法由于有地层损失会造成地面沉降<sup>[2-3]</sup>。软土地层中的建筑基础多为桩基础,此类房屋适应差异沉降的能力弱,研究盾构隧道穿越此类房屋的影响实用性强。国外学者 Rowe 等<sup>[3]</sup>于 1983 年提出了“地层损失”的概念并引入到有限元计算中。王建秀等<sup>[4]</sup>研究了盾构施工中地层损失率对地面沉降的影响并提出了根据实测排土量和注浆量估算地层损失率的计算方法。张宇亭等<sup>[5]</sup>利用数值模拟研究了软土地层中隧道开挖对地面沉降的影响。上述研究仅从地层损失率方面对地面沉降进行了分析。

此外,工程中常采用旋喷桩加固土体来减小隧道开挖对土体的扰动,沈水龙等<sup>[6-7]</sup>,王志丰等<sup>[8]</sup>,车东日等<sup>[9]</sup>研究了旋喷桩对土体的扰动效应以及旋喷桩加固土体的强度、压缩模量和抗剪强度等的变化。采取旋喷桩加固土体后,隧道近距离侧穿桩基础房屋常引起房屋沉降,目前较少文献涉及此方面的研究,也缺乏隧道侧穿既有建筑时,控制地层损失率与旋喷桩加固相结合的影响研究。

依托穗莞深城际轨道太平隧道工程,隧道超近距离侧穿房屋,设置了旋喷桩加固土体。通过数值模拟的方式拟合验证房屋在设置旋喷桩后的实测变形发展规律。比较旋喷桩设置与否对房屋的沉降影响,探讨地层损失率的变化诱发的房屋沉降和土体变形规律。

1 工程概况与实测变形

1.1 工程概况

穗莞深城际轨道交通太平隧道左线长度为 2 894.3 m,最大纵向坡度为 5.3%,管片外径为 8.5 m,内径为 7.7 m,管片壁厚为 0.4 m,采用外径为 8.86 m 的土压平衡盾构机施工。图 1 显示了隧道穿越一建筑群时的平面关系及断面关系。隧道外边缘距离 7 号房屋的距离仅 2.5 m,隧道中心埋深为 22.75 m。7 号房屋为 5 层框架结构,首层面积为 85 m<sup>2</sup>,基础型式为预应力管桩+承台+基础梁,管桩长 6 m。在隧道与 7 号房屋之间设厚度为 1.8 m、深度为 29 m 的旋喷桩进行土体加固。

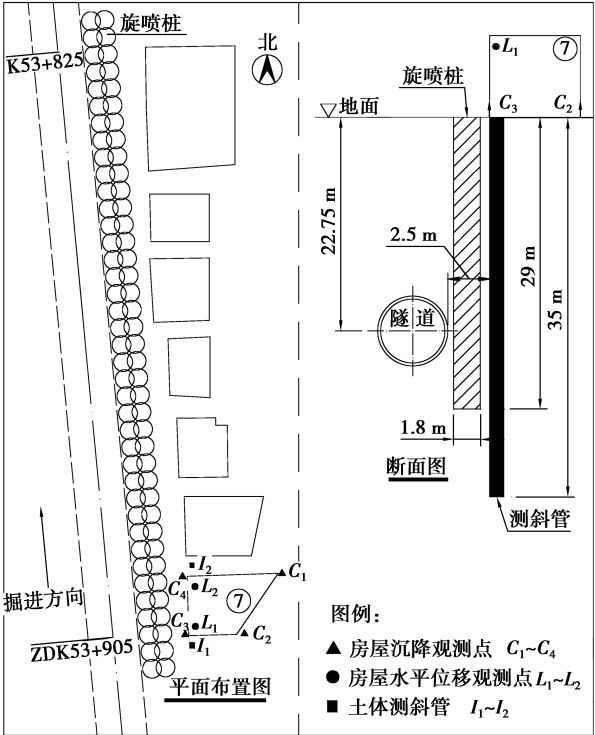


图 1 隧道与房屋关系图

Fig.1 Plan and sectional view of tunnel and building

图 2 为 7 号房屋处的土层划分以及物理力学参数,由图可知,隧道位于粉砂层。盾构掘进的动力效应和盾尾注浆极易扰动土体、引起孔隙水压力的上升,甚至导致粉砂液化继而联动造成地面建筑的剧烈沉降。旋喷桩的设置相当于在隧道与建筑之间设置了一道“隔离墙”,可以有效减小隧道开挖对房屋基础下土体的扰动。

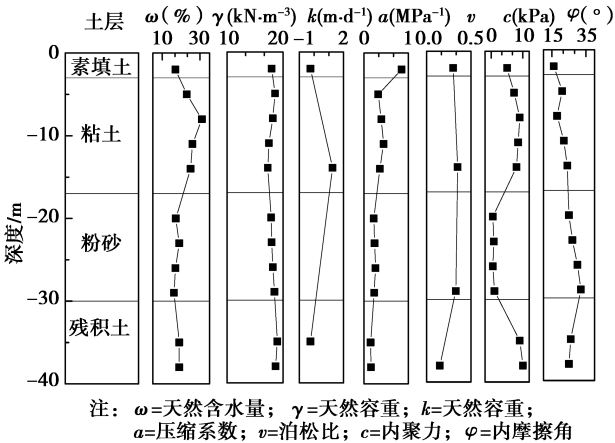


图 2 土层参数

Fig.2 Soil profile and properties

2.2 实测变形

图 3 为 7 号房屋的角点沉降变化图。当盾构推进到建筑物前方 20~30 m 时,即引起房屋沉降

的变化。在盾构机头到达之前呈现先隆起后下降的波动状态,最大隆起发生在换刀期间的C4点,隆起量为1.56 mm。盾构机头通过之后房屋沉降则转为明显的下降趋势,在盾尾通过房屋时沉降出现小幅波动,继而继续呈现下降的趋势。截止到监测结束时,C1~C4点的最终沉降量分别为3.3、2.2、9.1 mm及9.2 mm,据此推算房屋两侧的倾斜值分别为0.08%和0.04%,满足规范<sup>[10]</sup>要求。

从图3中可以看出,两个近隧道测点C3、C4的沉降量和沉降速率基本相同,两个远隧道测点C1、C2的沉降量和沉降速率也基本相同。但近隧道测点的沉降量和沉降速率明显大于远隧道测点,表明近隧道处土体所受的扰动明显大于远隧道处。

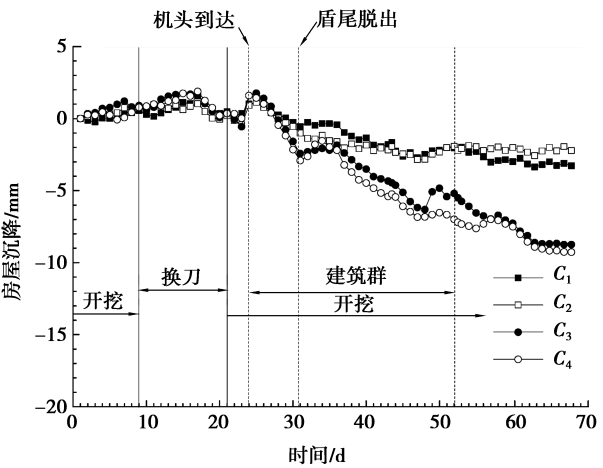


图3 房屋沉降变化  
Fig.3 Settlement of building

图4为7号房屋的水平位移变化图。由于框架结构房屋自身的刚度较大,在小变形的范围内,

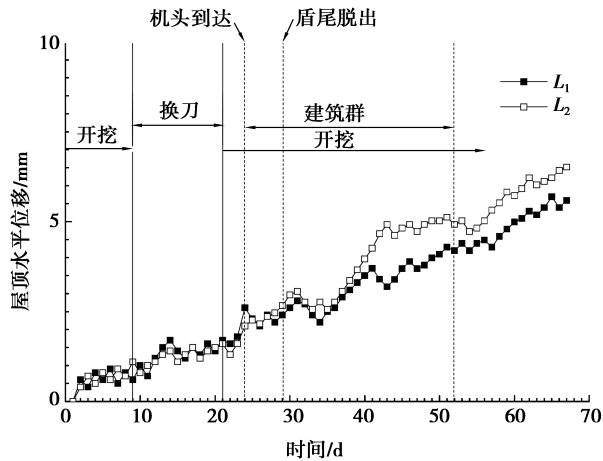


图4 房屋水平位移变化  
Fig.4 Horizontal displacement of building

屋顶的水平位移和房屋角点的沉降遵循一定的几何关系。故而从理论上分析水平位移和沉降的变化规律应基本一致,图4较好地验证了这一规律。房屋的水平位移出现在盾构到达前,换刀期间呈现一定的波动状态,盾构机头通过之后发展迅速。盾尾通过房屋时水平位移出现小幅波动,继而继续发展。截止到监测结束时, $L_1$ 、 $L_2$ 的最终水平位移量分别为5.6 mm和6.5 mm。

## 2 有限元建模计算

### 2.1 建立有限元模型

实测数据表明,房屋沿隧道开挖方向断面上的变形基本一致,可采用二维模型进行分析。用PLAXIS建立平面应变模型,模型的网络划分如图5所示。范围取为50 m×40 m,共有1 326个单元,10 858个节点。模型底面为固端,两侧面限制水平位移并释放竖向位移自由度,顶面为自由变形。

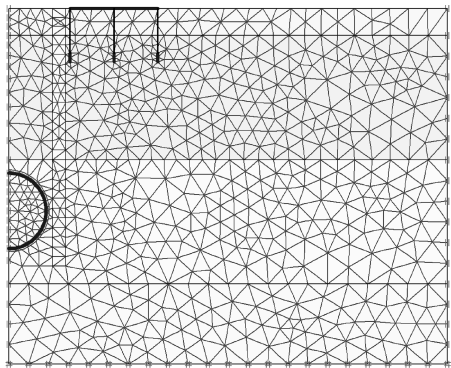


图5 模型网格划分  
Fig.5 FEM meshes

对该有限元模型作以下假定:

- (1) 土体采用摩尔-库伦模型,土体设为不排水状态;
- (2) 不考虑盾构开挖过程中孔隙水压力的上升与消散,水位维持在地表下3 m;
- (3) 仅考虑旋喷桩设计桩径内土体的增强,旋喷桩设计桩径以外的土体按照原状土考虑;
- (4) 房屋的整体刚度和重量折算到建筑基础板单元上。

按照下列步骤进行数值模拟:

- 第1步进行初始地应力平衡;
- 第2步通过激活房屋板单元模拟房屋的建造;
- 第3步将进行了旋喷桩加固的土体单元的物理力学性质提高来模拟旋喷桩的施工;
- 第4步通过激活隧道衬砌单元模拟隧道开挖;

第 5 步调整程序中的地层损失率参数,研究房屋角点沉降和土体变形变化。

2.2 参数取值

模型中土体参数如表 1 所示,其中旋喷桩的参数是根据现场对成桩体的取样检测数据取值。计算模型中结构参数如表 2 所示。

表 1 计算用土层参数

Table 1 Soil parameters for calculation

名称	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 /kPa	泊松 比	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	粘聚力 /kPa
填土	16.20	2 100	0.30	16.0	5.0
黏土	15.10	4 700	0.35	22.0	8.2
粉砂	16.30	11 000	0.33	30.0	0.56
残积土	15.50	15 000	0.15	25.0	9.85
旋喷桩	20.20	80 000	0.30	27.0	48.0

表 2 计算用结构参数

Table 2 Structural parameters for calculation

名称	轴向 刚度/ (kN)	抗弯 刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	泊松 比	等效厚度 /m	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
基础板	$1 \times 10^{10}$	$1.1 \times 10^{10}$	0.15	3.5	25.5
隧道衬砌	$1.4 \times 10^8$	$2.42 \times 10^6$	0.15	0.4	26.0
桩基	$2 \times 10^7$	$8.9 \times 10^5$	0.15	0.75	25.5

2.3 计算结果与实测值比较

施工过程严格控制出土量,保持每环推进过程中的总注浆量和注浆压力。按照文献[4]中的方法,土体的地层损失率初始值估算为 1.1%。

图 6 为地层损失为 1.1%时有旋喷桩的水平位移实测值与计算值的比较图。实测值曲线和计算值曲线基本吻合。图 7 是地层损失率为 1.1%时有旋喷桩的土体垂直位移云图。根据图 7 中数值模拟结果,在有旋喷桩时,C3、C2 点的垂直位移分别为 9.3 mm 和 3.1 mm,这也与实测值基本吻合。基于上述两项数值模拟和实测的比较结果,可综合判定数值模拟模型的合理性。

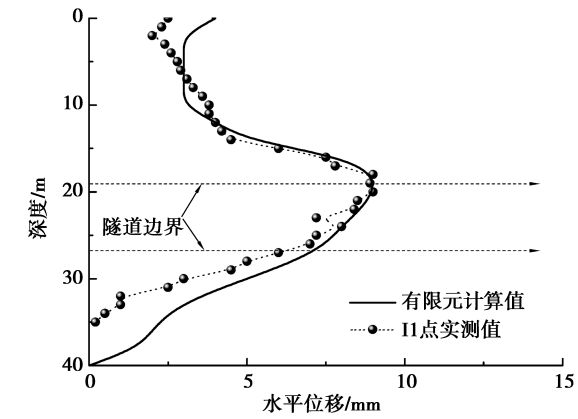


图 6 土体水平位移计算值与实测值比较图(I1 点有旋喷桩)  
Fig.6 Comparison between observed and simulated horizontal displacement (point I1 with jet grouting column)

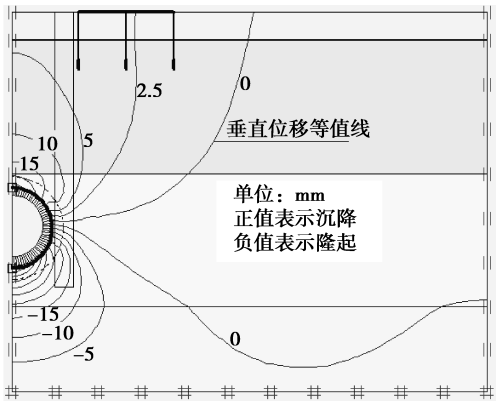


图 7 土体垂直位移图(有旋喷桩)  
Fig.7 Vertical displacement of soil (with jet grouting column)

3 分析讨论

基于有限元模型研究旋喷桩和地层损失率对土体变形和房屋沉降的影响规律。其中,地层损失率与盾构实际施工中的轴线偏移量、刀盘外缘与管片之间的固有空隙尺寸、注浆量等因素有关。参考已有工程的地层损失率值,文中地层损失率的起始值设为 0.5%,最大值设为 2.0%,增长步长设为 0.3%或 0.6%。

3.1 旋喷桩对土体垂直位移的影响

图 8 是地层损失率为 1.1%时的无旋喷桩的土体垂直位移云图。比较图 7 和图 8 可知:有旋喷桩时,土体的垂直沉降规律大致相同,均在隧道正上方产生最大沉降值。土体的最大沉降值从 35 mm (图 8 中隧道顶部第一条等值线)降低至 25 mm (图 7 中隧道顶部第一条等值线),减大幅度为 28.6%;地面发生沉降的范围从 28.2 m 减小到 24.1 m,减大幅度为 15.2%。旋喷桩能有效减小土体沉降值和沉降范围。



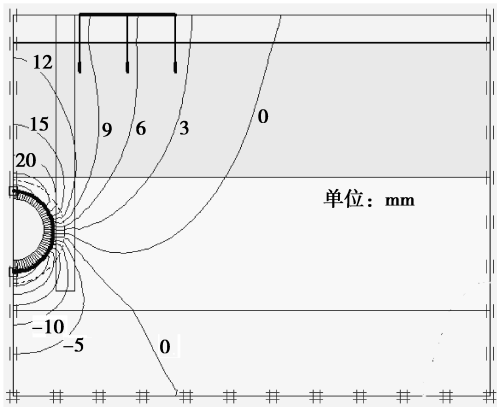


图8 土体垂直位移图(无旋喷桩)

Fig.8 Vertical displacement of subsoil (without jet grouting column)

3.2 旋喷桩和地层损失对房屋沉降的影响

图9为C2点、C3点在不同地层损失时的沉降变化图,并进行了有旋喷桩和无旋喷桩时的比较。由图9可知:无论旋喷桩设置与否,C2、C3点的沉降均随着地层损失率的增大而增大,呈线性增长的规律。

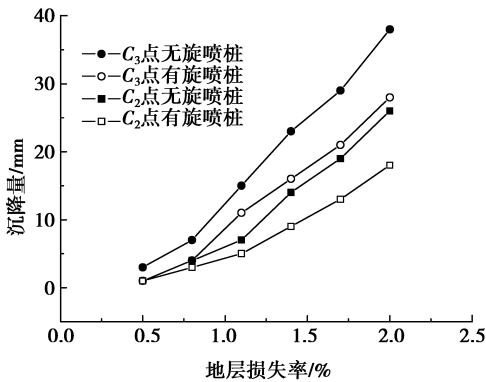


图9 C2、C3点沉降量对比

Fig.9 Comparison between settlement at C2 and C3 point

旋喷桩设置后,地层损失0.5%时,C2、C3点的沉降量减小值分别为0.1 mm、1.9 mm;地层损失1.1%时,沉降量减小值则分别为5 mm、7 mm;当地层损失增至2.0%时,沉降量减小值分别为8 mm、10 mm。设置旋喷桩可有效减小房屋沉降,该减小作用随着地层损失的增大而愈加明显。

图10为不同地层损失时C2、C3点的房屋整体倾斜率变化图。无论旋喷桩设置与否,整体倾斜率均随着地层损失率的增大而增大。旋喷桩的设置使整体倾斜值降低约0.2‰~0.25‰。无旋喷桩地层损失1.1%时整体倾斜为1‰,设置旋喷桩后,即便地层损失增大至1.7%,整体倾斜也仅为0.95‰。由此可见,旋喷桩的设置对减小房屋的整

体倾斜是大有裨益的。

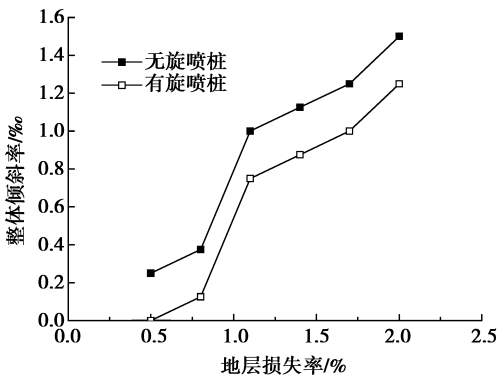


图10 房屋整体倾斜对比

Fig.10 Comparison of the overall housing tilt

3.3 旋喷桩和地层损失对土体水平位移的影响

图11为距隧道边缘2.5 m处深层土体水平位移在有无旋喷桩时的比较图。在深度0~15 m和30 m以下的范围内,旋喷桩和地层损失变化对土体水平位移影响均较小。在深度15~30 m的范围内,旋喷桩的设置可有效减小土体深层水平位移,地层损失0.5%时水平位移最大值减小比例约为12%,1.1%时为20%,1.7%时为22%。分析图11中的曲线分布可知,控制地层损失比设置旋喷桩能更有效地减小土体水平位移。

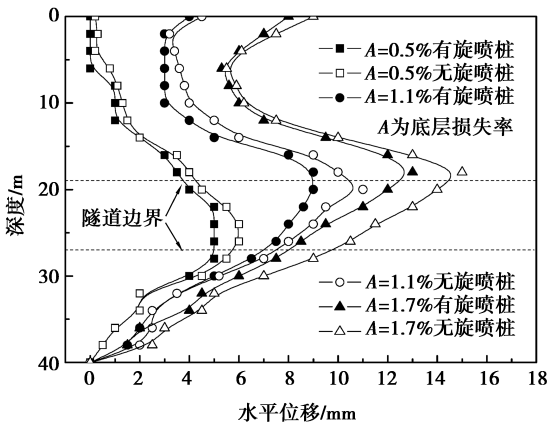


图11 土体水平位移对比

Fig.11 Comparison of horizontal displacement of soil

随着地层损失的增大,土体水平位移曲线由“勺形”渐变至S形,最大水平位移位置逐渐上移且均位发生于隧道掘进界面附近。

4 结论

针对粉砂地层中隧道超近距离侧穿桩基础多层框架房屋进行研究,得出主要结论如下:

(1)实际施工过程采用控制地层损失与旋喷

桩加固土体相结合的方式很好地保护了现有房屋的安全使用。实测数据和数值模拟数据在房屋角点沉降和土体水平位移两方面均吻合较好,证明数值模拟可用于施工参数的预测分析。

(2)实测数据表明,房屋在盾构机头到达前就已经开始产生幅度约1.5 mm的垂直位移波动。在机头通过后,房屋的沉降逐渐加大。房屋的4个角点中,近隧道测点和远隧道测点的变化规律基本相同,但近隧道测点的沉降值和沉降速率明显大于远隧道测点。

(3)数值模拟表明,尽管设置旋喷桩能在一定程度上减小房屋的沉降和土体位移,但是通过控制地层损失可更有效地减小房屋的沉降和土体位移。

(4)数值模拟还表明,土体水平位移曲线在地层损失较小时为“勺”形,随着地层损失的增大渐变至S形。最大水平位移位置随地层损失的增大逐渐上移,最大水平位移点位于隧道的上边界附近。旋喷桩的设置可使得土体最大水平位移减小,减小幅度与地层损失率有关。

#### 参考文献(References)

- [1] 王梦恕.中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J].隧道建设,2010,30(4):351-364.(Wang Mengshu. An overview of development of railways, tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2010,30(4):351-364.(in Chinese))
- [2] 许烽霜,马磊,沈水龙.上海市城市化进程引起的地面沉降因素分析[J].岩土力学,2011,32(增1):578-582.(Xu Yeshuang, Ma Lei, Shen Shuilong. Influential factors on development of land subsidence with process of urbanization in Shanghai [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(Supp.1):578-582.(in Chinese))
- [3] Rowe R K, Kack G J. A theoretical examination of the settlements induces by tunneling : four case histories [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20 (2):299-314.
- [4] 王建秀,田普卓,付慧仙,等.基于地层损失的盾构隧道地面沉降控制[J].地下空间与工程学报,2012,8(3):569-576.(Wang Jianxiu, Tian Puzhuo, Fu Huixian, et al. Ground settlement controlling of shield tunnel by strata loss theory [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012,8(3):569-576.(in Chinese))
- [5] 张宇亭,寇晓强,左殿军,等.软黏土地层盾构开挖扰动及工后沉降数值模拟研究[J].岩土工程学报,2013,35(增2):753-757.(Zhang Yuting, Kou Xiaoqiang, Zuo Dianjun, et al. Numerical simulation of disturbance characteristics and post-construction settlement caused by shield excavation in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Supp.2):753-757.(in Chinese))
- [6] Shen S L, Luo C Y, Xiao X C, et al. Improvement efficacy of RJP method in Shanghai soft deposit [A] // Advances in ground improvement: research to practice in the united states and China [C]. ASCE, Florida, 2009:170-178.
- [7] 沈水龙,许烽霜,常礼安,等.深层搅拌桩周围土体劈裂的研究与分析[J].岩土力学,2006,27(3):378-388.(Shen Shuilong, Xu Yeshuang, Chang Li'an, et al. Analysis research on soil fracturing around deep mixing column [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (3):378-388.(in Chinese))
- [8] 王志丰,沈水龙,许烽霜.基于圆形断面自由紊动射流理论的旋喷桩直径预测方法[J].岩土工程学报,2012,34(10):1957-1960.(Wang Zhifeng, Shen Shuilong, Xu Yeshuang. Prediction of the diameter of jet-grouted column based on turbulent flow theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (10):1957-1960.(in Chinese))
- [9] 车东日,罗春泳,沈水龙.水泥混合上海黏土 pH 值和电导率与强度特性研究[J].岩土力学,2012,33(12):3611-3615.(Che Dongri, Luo Chunyong, Shen Shuilong. Relationship between chemical properties and strength characteristics of the cement treated Shanghai clayey soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (12):3611-3615.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范(GB 50007—2001)[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the Peoples Republic of China. Code for design of building foundation (GB 50007—2001) [S]. Beijing: China building industry press, 2012. (in Chinese))