

DOI: 10.11779/CJGE2014S2038

浆囊袋压力型土钉新技术及工作机理研究

张旭辉¹, 吴 欣¹, 俞建霖^{2, 3}, 何 萌⁴, 龚晓南^{2, 3}

(1. 宁波半边山投资有限公司, 浙江 宁波 315732; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 4. 汉嘉设计集团股份有限公司, 浙江 杭州 310005)

摘要: 为解决软土地基中土钉抗拔力小、施工质量难以控制的问题, 开发了浆囊袋压力型土钉新技术, 介绍了其工艺原理和施工技术, 提出了相应的承载力计算方法。最后采用三维有限元分析方法研究了浆囊袋压力型土钉的荷载传递规律, 分析了注浆体直径、长度以及地基土质条件的影响。

关键词: 土钉; 浆囊袋; 压力型; 承载力; 工作机理

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0227-06

作者简介: 张旭辉(1975-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为软土地基处理。E-mail: zhangxuhui@21cn.com。

New slurry pressure type soil-nailing technology and its working mechanism

ZHANG Xu-hui¹, WU Xin¹, YU Jian-lin^{2, 3}, HE Meng⁴, GONG Xiao-nan^{2, 3}

(1. Ningbo Half-Hill Investment Co., Ltd., Ningbo 315732, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering,

Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering,

Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Hanjia Design Group Co., Ltd., Hangzhou 310005, China)

Abstract: In soft soil foundation, the strength of soft soils is low and the quality of the construction of the conventional soil-nailing is hard to be controlled. To solve these problems, new slurry pressure type soil nailing technology is developed, and the soil-nailing ultimate resistance is calculated by carrying out the field pullout tests. In addition, the finite element software is adopted to establish the three finite element analysis model for slurry pocket pressure type soil nailing. The transfer law of load is studied, and the effects of the soil conditions and the dimensions of the grouting are analyzed.

Key words: soil nailing; slurry pocket; pressure type; bearing capacity; working mechanism

0 前 言

近年来中国的城市建设发展异常迅速, 地下工程越来越多, 涌现出了大量的基坑工程。对于大型基坑工程, 如采用内支撑式围护结构, 围护体系的造价高, 土方开挖困难, 施工工期长。而土钉支护具有施工简单方便, 工期较短, 造价低, 噪声污染小的优点; 同时可在基坑中形成较大的挖土空间, 加快施工进度^[1]。但在软土地基中, 由于软黏土自身强度较低, 常规土钉施工时注浆可控性差, 土钉抗拔力小, 施工质量难以保证, 因此一般不建议使用^[2-4]。

另外目前基坑周边往往难以有足够的设置土钉所需的地下空间, 导致土钉末端需超出用地红线以外。随着工程建设的进一步发展, 许多曾经设置过土钉的场地将面临二次开发, 那些曾经发挥过重要作用的土钉却成为再次开发的障碍, 造成开发的困难和建设费用的增加。在一些临时性加固工程中, 如果能将土钉回收进行二次利用, 不仅可以节约大量材料, 也可以降低工程造价, 获得很好的经济效益。

浆囊袋压力型土钉在常规土钉施工工艺的基础上, 采用加浆囊袋和扩孔注浆的施工工艺以及可回收的特殊构造实现了土钉受力机制由常规的拉力型向压力型的转变, 达到了提高抗拔力、注浆可控性和回收筋材的目的, 特别适合于在软土地基中使用。

本文首先介绍了浆囊袋压力型土钉的原理和施工工艺, 接着提出了其极限抗力的计算方法, 最后采用数值分析方法对其荷载传递规律及影响因素进行了分析研究。

1 工艺原理

浆囊袋压力型土钉在普通土钉工艺的基础上, 在成孔后采用加浆囊袋及扩孔注浆施工工艺, 使得扩孔后注浆体直径一般可在 250~300 mm 左右。由于注浆浆液的扩散受浆囊袋制约, 从而能够保证浆液在可控范围(浆囊袋)内扩散, 同时土钉直径有保证(即为

表 1 试验土钉所处土层的主要物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层名称	含水率 /%	重度 /(kN·m ⁻³)	孔隙比	压缩模量 /MPa	地基承载力特征值 /kPa	固结快剪 $\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
淤泥质黏土	45.5	17.4	1.281	2.24	65	8.1	13.4

浆囊袋直径)。另外通过可回收的特殊构造实现土钉受力机制由拉力型向压力型的转变, 土钉抗拔力可以达到常规土钉的2倍左右, 因此土钉密度可以大幅度降低, 从而降低工程造价。通过控制注浆体的用量即可比较准确地判断土钉的直径是否达到要求, 因此施工质量比较容易控制。当土钉的工作任务完成后, 可将主筋进行回收后重复利用, 同时避免成为今后的地下障碍物。浆囊袋压力型土钉的工艺原理见图1。从工艺原理分析可见, 浆囊袋压力型土钉也可作为预应力锚索使用。

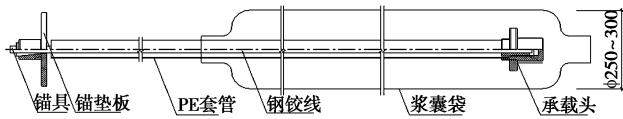


图 1 浆囊袋压力型土钉工艺原理图

Fig. 1 Principle of slurry pocket pressure type soil-nailing

2 施工工艺

浆囊袋压力型土钉施工流程为: 土钉制作→造孔→土钉置入孔内→注浆→张拉锁定(也可不张拉)→回收。

(1) 土钉制作: 将钢绞线、承载头、浆囊袋等按照设计图样组装成一体。浆囊袋采用土工布制作, 长度一般不小于土钉总长的2/3, 浆囊袋下端部袋口用铅丝扎紧, 上端部袋口与注浆管及钢绞线分别扎紧。沿主筋全长放置浆囊袋内注浆管和浆囊袋外注浆管。制作完成后的土钉如图2所示。

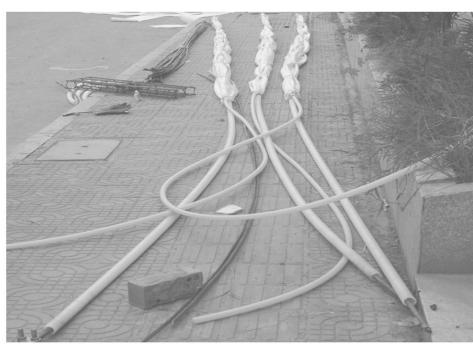


图 2 制作完成后的浆囊袋压力型土钉

Fig. 2 Produced slurry pocket pressure type soil-nailing

(2) 造孔: 造孔可采用地质钻机或液压造孔机(锚杆钻)成孔。在软土中钻进时孔壁相对软弱, 易出现钻头下垂, 并使钻杆尾部向上翘起, 因此可调整

钻机的角度略小于设计角度为宜。造孔时宜慢转速钻进, 尽可能减少对锚固地层的扰动。钻进过程中用清水或泥浆循环冲洗, 排除孔内残土。

(3) 土钉置入: 安放时应注意保护浆囊袋。当钻孔有坍塌、缩径现象, 土钉不能顺利地置入孔内时, 应拉出土钉重新进行清孔, 不得强行置入土钉。

(4) 注浆: 采用一次注浆工艺。注浆材料为纯水泥浆, 水灰比为0.55, 可在浆液中掺入适量的减水剂、早强剂和膨胀剂, 添加剂的具体掺入量由试验确定。浆液应搅拌均匀, 随拌随用, 一次拌料在初凝前用完。

(5) 张拉锁定: 浆囊袋压力型土钉的端部用夹片式锚具使垫板与土体面层相连, 在注浆完成10 d后可施加预应力。锁定后若发现有明显预应力损失时, 应进行补偿张拉。

(6) 回收: 在地下室施工完毕, 土方回填至土钉头下方300~500 mm后可开始回收土钉主筋: 使钢绞线与承载头分离后抽出钢绞线, 从而达到回收主筋的目的。

3 浆囊袋压力型土钉的承载力研究

3.1 现场抗拔试验研究

在杭州某工地进行现场抗拔试验研究。该场地地基土体分为8个工程地质层, 试验土钉处于淤泥质黏土层中。该土层灰色, 流塑, 饱和, 含较多的有机腐殖质, 干强度中等—高, 韧性中等—高, 其主要物理力学参数如表1所示。

本次试验进行了2根浆囊袋压力型土钉(^{#1}, ^{#2})的抗拔力试验, 得到其荷载位移曲线如图3, 4。其中^{#1}土钉长度为17 m, 其中浆囊袋长度12 m, 直径为250 mm, 承载头位于浆囊袋最底端位置。主筋选用直

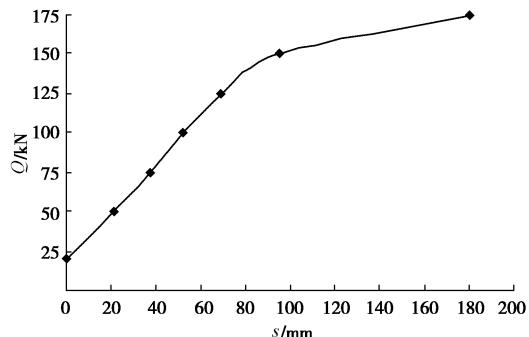
图 3 ^{#1} 土钉抗拔试验荷载 - 位移曲线

Fig. 3 Q-S curve of slurry pocket soil-nailing No. 1

径 15.24 mm, 标准强度为 1860 MPa 的无黏结钢绞线。

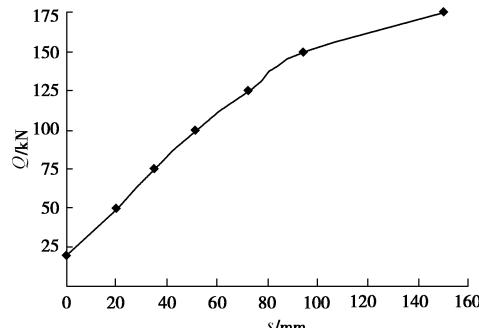


图 4 #2 土钉抗拔试验荷载-位移曲线

Fig. 4 Q-S curve of slurry pocket soil-nailing No. 2

由图 3, 4 可见: #1 和 #2 浆囊袋压力型土钉的极限抗拔力为 150 kN, 平均每延米注浆段可提供的抗拔力在 11.5~12.5 kN。

3.2 承载力计算方法

根据浆囊袋压力型土钉的特点及抗拔试验的结果, 并基于工程中简洁实用的考虑, 假设黏结应力沿注浆段全长均匀分布。

由于承载头位于注浆体的底端, 荷载施加时, 荷载直接传至底部的承载头, 再由承载头加压于注浆体, 即注浆体受压。因此压力型可回收土钉可能出现以下三种破坏形态: 钢绞线断裂破坏、注浆体压碎破坏以及沿注浆体~土体间的剪切滑移破坏。故土钉的极限抗力 T 可采用以下公式来计算, 并取其小值:

$$T = A_s f_{ptk} , \quad (1a)$$

$$T = A_c f_c \lambda , \quad (1b)$$

$$T = \pi D L \tau . \quad (1c)$$

式中 A_s 为钢绞线的截面积 (m^2); f_{ptk} 为钢绞线的强度极限值 (kPa); A_c 为注浆体承压面积 (m^2); f_c 为注浆体抗压强度极限值 (kPa); λ 为注浆体在局部承压及有侧限条件下, 其抗压强度的提高系数; D 为注浆体 (即浆囊袋) 直径 (m); L 为注浆体 (即浆囊袋) 长度 (m); τ 为注浆体与土体之间的界面极限黏结强度标准值 (kPa), 一般可根据现场试验确定, 也可根据表 2 取值^[2]。

表 2 土钉与不同土层界面的极限黏结强度标准值

Table 2 Ultimate standards of bond strength of interface with different layers of soil-nailing

土层类别	土的状态	τ / kPa
素填土	—	30~60
黏性土	软塑	15~30
	可塑	30~50
	硬塑	50~70
	坚硬	70~90
粉土		50~100
砂土	松散	70~90
	稍密	90~120
	中密	120~160
	密实	160~200

3.3 计算值与实测值对比

根据式 (1a) ~ (1c) 计算可得#1 土钉的极限抗力为 113.04 kN, #2 土钉的极限抗力为 122.46 kN。现场试验中#1、#2 土钉的极限抗拔力为 150 kN, 与计算值比较接近, 且有一定的安全度, 说明采用式 (1a) ~ (1c) 计算浆囊袋压力型土钉极限抗力是合适的。

4 浆囊袋压力型土钉的荷载传递规律研究

4.1 模型的建立

首先建立单根浆囊袋压力型土钉数值分析模型的标准算例。土钉由注浆体和土体两部分构成, 注浆体长度为 12 m, 直径 270 mm, 荷载作用于注浆体末端。为反映工程实际, 模型的计算域应选择足够大, 土体长度取 60 m, 土体高度取 20 m, 土钉设置在 10 m 高度处。土体厚度方向取 10 m。有限元分析模型如图 5 所示。

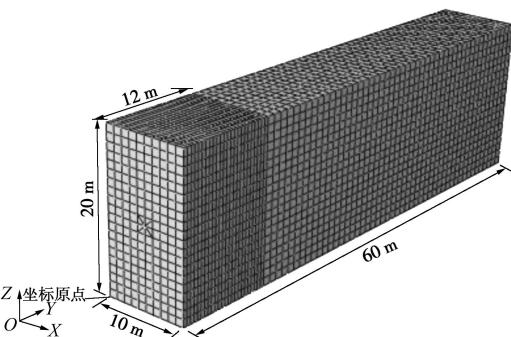


图 5 浆囊袋压力型土钉模型图

Fig. 5 Model of slurry pocket pressure type soil nailing

假定土体为连续的各向同性均质弹塑性体, 本构关系符合 Mohr-Coulomb 模型, 注浆体为连续的各向同性均质线弹性体; 认为在荷载施加过程中, 土钉注浆体与土体间的摩擦系数保持不变; 考虑地基土的初始应力场, 不考虑土钉设置时对周围土体指标的影响; 不考虑地下水的影响。

土体上部为自由边界, 不受任何约束; 法线为 X 方向的两侧面分别受 X 方向的位移约束; 法线为 Y 方向的两侧面分别受 Y 方向的位移约束; 土体底部边界为固定约束。土钉本身不进行任何约束。

有限元模型的材料参数取值如表 3 所示。

对浆囊袋压力型土钉施加 100 kN 的荷载, 得到注浆体轴向应力和侧阻应力分布分别如图 6, 7 所示。

由图 6 可以看出: 压力型土钉注浆体压应力在承载头处即土钉末端为最大值; 随着远离承载头而逐渐减小, 在近端处接近于零; 越靠近土钉末端注浆体压应力的变化速率越大。

表3 有限元模型的材料参数取值

Table 3 Values of material parameters of finite element model

名称	重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	膨胀角/(°)
注浆体	22.0	20000	0.30	—	—	—
土体	17.4	3	0.45	15	15	2

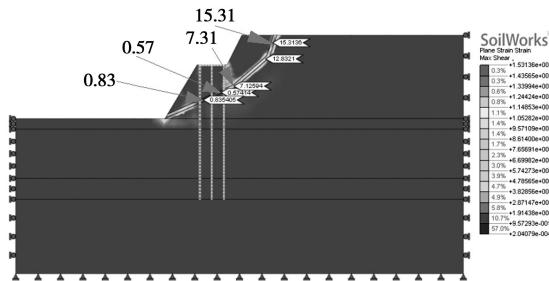


图6 土钉注浆体轴向应力分布

Fig. 6 Distribution of axial stress of grouting

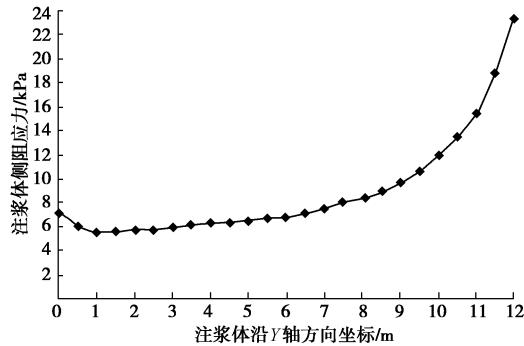


图7 土钉注浆体侧阻应力分布

Fig. 7 Distribution of lateral resistance stress of grouting

由图7可以看出, 压力型土钉注浆体侧阻应力在承载头处即土钉末端附近为最大值, 接着在较短距离内迅速减小, 之后保持平缓下降。由于土钉通常按一定角度打设, 土钉末端的埋深最大, 相应的钉-土之间的极限侧摩阻力也最大, 因此与拉力型土钉相比, 压力型土钉更有利于发挥注浆体的侧摩阻力, 可以提供更大的抗拔力。

4.2 影响因素分析

在标准算例的基础上变化参数得出浆囊袋压力型土钉应力分布的规律, 研究浆囊袋压力型土钉的作用机理。

(1) 注浆体直径的影响

分别取土钉注浆体直径为270, 350, 400, 450 mm四种情况进行计算, 注浆体轴向应力和侧阻应力分布分别如图8, 9所示。

由图8, 9可以看出: 在相同的荷载作用下, 随着注浆体的直径增大, 注浆体承受的压应力和侧摩阻力及其变化速率均表现为减小, 分布更为均匀。说明

在相同荷载作用下, 增大注浆体的直径可改善浆囊袋压力型土钉的受力状态。

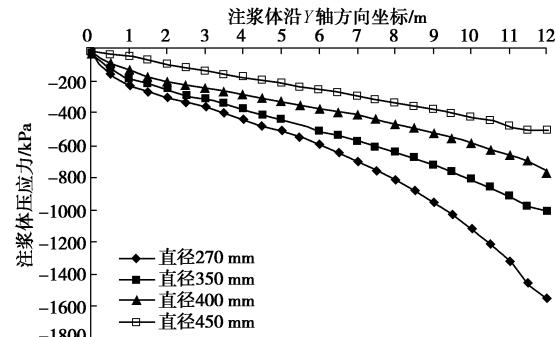


图8 不同注浆体直径情况下注浆体轴向应力分布

Fig. 8 Distribution of axial stress of grouting with different grouting diameters

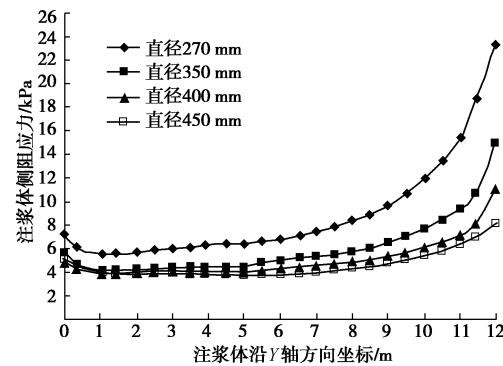


图9 不同注浆体直径情况下注浆体侧阻应力分布

Fig. 9 Distribution of lateral resistance stress of grouting with different grouting diameters

(2) 注浆体长度的影响

分别取土钉注浆体长度为12, 16, 18, 20, 22 m五种情况进行计算, 当施加荷载为100 kN时, 注浆体轴向应力、注浆体侧阻应力分布分别如图10, 11所示。

由图10, 11可以看出, 在相同的荷载作用下, 随着注浆体长度的增加, ①注浆体最大压应力基本不变但压应力变化速率逐步减小; ②注浆体最大侧阻应力基本不变, 但侧阻应力较小的平缓段长度明显增大, 因此适当的增加注浆体长度可以在一定程度上提高土钉的抗拔能力, 但效率越来越低。

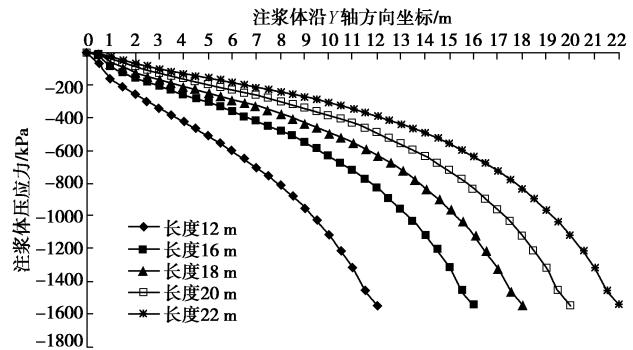


图10 不同注浆体长度情况下注浆体轴向应力分布

Fig. 10 Distribution of axial stress of grouting with different grouting lengths

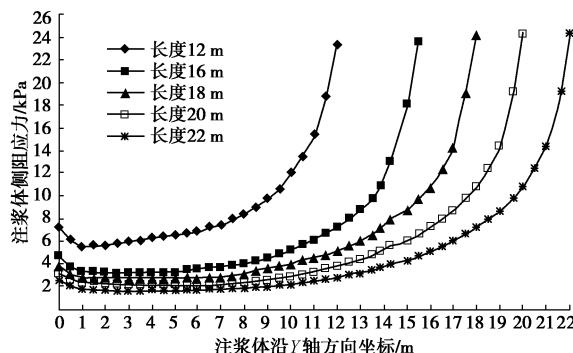


图 11 不同注浆体长度情况下注浆体侧阻应力分布

Fig. 11 Distribution of lateral resistance stress of grouting with different grouting lengths

(3) 土体参数的影响

将土体参数改变如表 4 所示, 改变后的算例为参考算例。

表 4 有限元模型土体改变参数后取值

Table 4 Values of changed material parameters of finite element model

名称	重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	膨胀角/ $^{\circ}$
改变参数 后土体	21.0	30	0.35	18	30	2

当施加荷载为 100 kN 时, 浆囊袋压力型土钉的注浆体轴向应力、注浆体侧阻应力分布分别如图 12, 13 所示。

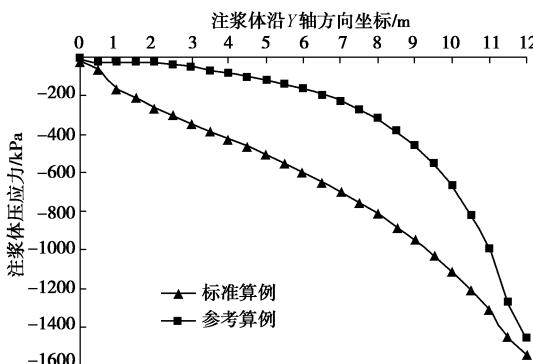


图 12 不同土体参数情况下注浆体轴向应力分布

Fig. 12 Distribution of axial stress of grouting with different soil parameters

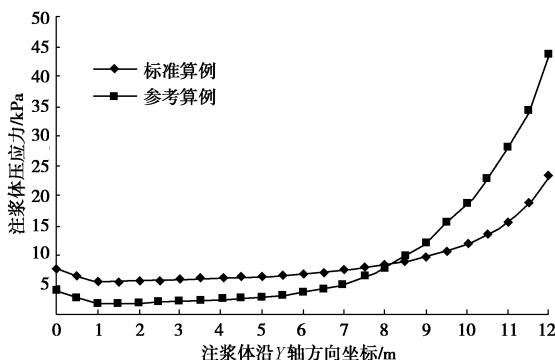


图 13 不同土体参数情况下注浆体侧阻应力分布

Fig. 13 Distribution of lateral resistance stress of grouting with different soil parameters

由图 12, 13 可以看出: ①在相同的荷载作用下, 注浆体压应力峰值比较接近, 但地基土质条件越好, 注浆体末端压应力变化速率越大, 压应力值总体表现为下降, ②地基土质条件越好, 注浆体侧阻应力值变化幅度越大, 末端处明显增大, 而近端处应力水平有所下降。

5 结 论

本文针对新开发的浆囊袋压力型土钉技术, 介绍了其工艺原理和施工技术, 开展了土钉的现场抗拔试验及其承载力研究, 并应用三维有限元分析模型, 研究了浆囊袋压力型土钉的荷载传递规律。得出以下 3 点结论。

(1) 浆囊袋压力型土钉能够显著提高土钉抗拔力, 施工工艺简便、质量易控制, 并且筋材可回收, 特别适合于在软土地基中使用。

(2) 本文提出的浆囊袋压力型土钉的极限抗力计算方法是合适的, 且有一定的安全度。

(3) 通过对浆囊袋压力型土钉三维有限元分析得出以下结论: 压力型土钉比拉力型土钉更有利于发挥注浆体的侧摩阻力, 可以提供更大的抗拔力; 增大注浆体的直径可改善浆囊袋压力型土钉的受力状态; 适当增加注浆体长度可以在一定程度上提高土钉的抗拔能力, 但效率越来越低; 地基土质条件越好, 注浆体承受的压应力值总体表现为下降, 土钉末端处侧阻应力明显增大, 而近端处有所下降。

参考文献:

- [1] 张旭辉. 锚管桩复合土钉支护稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002. (ZHANG XU-hui. Stability of channel-steel-piles composite soil nailing[D]. Hangzhou: ZheJiang University, 2002. (in Chinese))
- [2] CECS 96—97 基坑土钉墙支护技术规程[S]. 1997. (CECS 96—97 Specification for soil nailing in foundation excavations[S]. 1997. (in Chinese))
- [3] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 1999. (in Chinese))
- [4] YB9258—97 建筑基坑工程技术规程[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1998. (YB9258—97 Ministry of Metallurgical Technical Specifications for Foundation Pits Excavation for Buildings[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998. (in Chinese))
- [5] 吴铭炳. 软土基坑土钉墙支护的理论与实践[J]. 工程勘察, 2000(3): 40—43. (WU Ming-bing. The theory and

practice of soil nailing bracing in foundation pit of soft soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2000(3): 40 - 43. (in Chinese))

[6] 梁勇彪, 徐霞琴. 土钉墙支护在极软土基坑工程中的应用[J]. 岩土工程师, 2003, 15(3): 42 - 43. (LIANG Yong-biao, XU Xia-qin. Application of soil Nailing in excavation of soft ground[J]. Geotechnical Engineer, 2003, 15(3): 42 - 43. (in Chinese))

[7] 张 瀚, 郑俊杰, 辛 凯. 土钉墙支护技术在软土基坑中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 923 - 925. (ZHANG Chao, ZHENG JUn-jie, XIN Kai. Application of soil nail technique in soft soil foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 923 - 925. (in Chinese))

[8] 吴铭炳. 软土地基土钉支护研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 687 - 690. (WU Ming-bing. The study for soil nailing in soft clay foundation excavation[J]. Chinese of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 687 - 690. (in Chinese))

[9] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 64 - 67. (CHEN Zhao-yuan, CUI Jing-hao. Application of soil nailing supported in excavation[M]. Beijing: China Architecture &Building Press, 1997: 64 - 67. (in Chinese))

[10] 庞晓明, 沈水龙, 许烨霜. 复合土钉支护基坑的工程实例分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1838 - 1841. (PANG Xiao-ming, SHEN Shui-long, XU Ye-shuang. Analysis of behavior of nailing supported mixed soil-cement wall in excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S0): 1673 - 1676. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)