

土钉支护工作性能的应力路径分析

贺若兰^{1,2}, 张平³, 刘宝琛²

(1. 中南大学土木建筑学院, 湖南长沙 410075; 2. 长沙理工大学桥梁与结构工程学院, 湖南长沙 410076;

3. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要: 采用数值方法, 从土体应力路径的角度研究了土钉支护的工作性能和加固机理。结果显示: 应力路径分析方法能够很好地反应随着基坑开挖、支护工序一步步推进, 土体应力不断转移叠加的力学响应过程。土钉的应力扩散和应力分担作用使得土钉头部和中部位土体的切向应力减小、法向应力增大, 应力路径由垂直逼近强度包线方向转为基本平行于强度包线方向; 土钉的应力传递作用又将钉头部位土体的应力转移至钉尾深部的土体。整个支护系统通过土钉的应力扩散、应力分担和应力传递这 3 大作用不仅大大降低了钉头部位土体的应力水平, 而且明显改善了它的应力状态, 同时又有效地调动了钉尾深部土体自身的强度。

关键词: 土钉支护; 应力路径; 加固机理; 数值分析

中图分类号: TU463

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)08-1256-04

作者简介: 贺若兰(1975-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事岩土工程教学与研究工作。E-mail: ruolan98@163.com。

Stress path analysis on working behaviors of soil nailing

HE Ruo-lan^{1,2}, ZHANG Ping³, LIU Bao-chen²

(1. School of Bridge and Structure Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China; 2. School of

Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Using the numerical method, the reinforcement mechanism of soil-nailing based on stress path analysis was studied. It was shown that the stress path method could effectively represent the mechanical response of soil mass in accordance with the working procedure of excavation and supporting. The stress dispersion and sharing of nails caused the reduction in tangential stress and the increase in normal stress, and therefore it resulted in change of stress path of soil mass from vertical to parallel to the strength envelope. Furthermore, the stress transmission of nails from the forepart to the rearend of soil rendered its stress and strength level, that is the stress significantly falling at the forepart and the strength fully developing at the rearend.

Key words: soil-nailing; stress path; reinforcement mechanism; numerical analysis

0 引言

土钉支护技术的应用实践日新月异, 相应的研究发展也很快, 但大多数^[1-3]都只从土体位移和土钉内力这两方面进行分析, 却较少研究土体本身的力学特性。本文拟从被支护土体的应力状态和随开挖、支护全过程发展的应力路径这个角度进行研究。基于数值方法能够很好地模拟岩土体从工程行为开始到行为结束全过程力学响应的特点, 首先建立基坑土钉支护系统的数值分析模型, 并和实测工程对比, 验证模型的精度; 然后分别对比分析有、无支护以及不同支护参数(土钉密度和土钉长度)对土体应力状态和应力路径的影响; 通过定量分析获得对支护土体变形过程的理解、特别是由于工程扰动(开挖、支护)对土体应力产生改变的过程; 从而对土钉支护的加固机理作出规律性

的解释。

1 分析模型的建立和验证

选用 Shen C K 等^[4]专门为研究基坑土钉支护工作性能所进行的现场足尺模型试验进行数值建模以验证模型的可靠性, 因为该试验的测试数据与施工步骤有较明显的对应关系, 测试结果比较全面。

试验工程场区地层主要为砂质粉土和粉质黏土, 基坑垂直开挖 9.2 m 深, 分 5 步进行, 每步挖深 1.8 m。土钉为钻孔注浆钉, 直径 0.1 m, 沿深度设置 5 排, 设计长度 6.1 m, 水平和垂直间距均为 1.8 m。

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ3026); 湖南省教育厅科研基金资助项目(05C264)

收稿日期: 2006-09-25

本文采用接触 - 摩擦型界面单元^[5]模拟钉土界面复杂的力学特性, 用梁单元模拟土钉、实体单元模拟土体, 应用从奥地利引进的岩土分析软件 FINAL^[6]对支护系统建立数值分析模型, 如图 1 所示。土体本构关系采用弹塑性模型、屈服准则为 Mohr-Coulomb 准则; 界面采用能模拟其张开、闭合、滑移过程的接触摩擦单元^[7]; 分析参数根据试验资料确定, 见表 1。

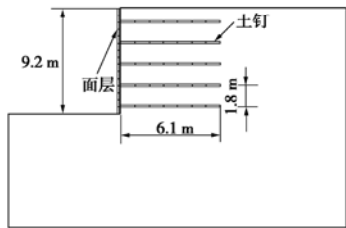


图 1 分析模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of analytic model

表 1 数值分析的力学特性参数

Table 1 Mechanical parameters for numerical analysis				
	弹性模量 E/MPa	泊松比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
土层	15	0.30	5	35
界面			150	0
土钉	21000	0.25		
面层	10000	0.167		

选用现场测试中有代表性的边坡位移和土钉内力与数值结果对比分析, 如图 2 所示: 位移和内力的计算与实测曲线趋势都很接近, 说明本文所建立的数值模型可以比较准确地模拟实际支护的效果。

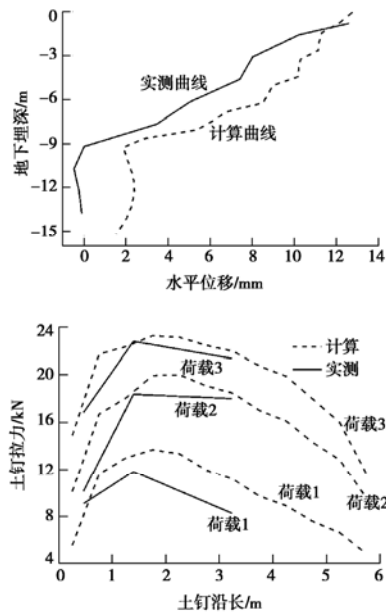


图 2 数值模拟结果和现场实测结果对比

Fig. 2 Comparison between numerical analysis and field measurement

2 加固机理的应力路径分析

2.1 有、无支护时应力路径对比分析

对比有、无支护两种工况, 在不同埋深 (1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 8.5 m) 位置 (对于有支护情况分别相当于上下两排土钉的中间部位单元, 这样选取有助于尽量减少钉体应力集中的影响), 分别取钉头、钉中和钉尾三处土体单元分析其最危险滑动面 (与最小主应力方向夹角为 $45^\circ + \varphi/2$ 的平面) 上随开挖、支护过程发展的应力路径, 如图 3 所示: 在相应土钉未发挥作用 (即对应各步开挖深度以下, 尚未被激活的土钉) 之前的开挖步中, 两种工况下的土体应力路径完全重合, 法向应力径直减小、切向应力径直增大, 应力路径垂直靠拢抗剪强度包络线, 说明开挖卸荷导致土体渐进破坏的过程。而在土钉发挥作用以后的开挖步中, 二者的应力路径有了明显区别。如图 3 (a) 所示, 土钉头部的土体虽然在有、无支护时都跨过强度包线进入了塑性, 但有支护条件下应力路径明显改向, 切向应力增长放缓, 尤其是法向应力不减反增, 由 Mohr-Coulomb 准则 $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ 可知, 法向应力增大, 抗剪强度将明显提高; 同时其小主应力也明显增大, 从无支护时 2.35 kPa 增大到有支护的 30.49 kPa, 由于土体具有压硬性, 由 Janbu 模量公式 $E_t = K_E p_a (\sigma_3/p_a)^n$ ^[8] 可知土体变形模量随围压增大而增大, 说明支护系统的整体箍束作用还同时等效增大了土体的变形模量。所以说, 切向应力降低改善了土体的应力状态, 而且法向应力和小主应力增大更增加了土体的强度和刚度。

如图 3 (b) 所示, 土钉中部土体在无支护时大都跨过了强度包线, 但支护后则均未进入塑性, 说明土钉发挥应力分担作用, 大大降低了钉间土体的剪应力。同时, 支护系统的加筋作用还将等效提高复合土体的抗剪强度 (早在 60 年代, 法国工程师 Henri Vidai 就曾对带状拉筋的砂土进行过三轴剪切试验, 结果表明加筋后复合土体强度可提高 3 倍左右^[9])。

如图 3 (c) 所示, 土钉尾部的土体在两种情况下都进入了塑性, 而且有支护时更加靠近强度包线, 这正好说明土钉的应力传递作用充分调动了钉尾深部土体自身的强度。

2.2 土钉间距对土体应力路径的影响分析

土钉间距变化时, 位于土钉头部、中部和尾部位置土体的应力路径 (随着基坑开挖支护逐步向下推进的路径) 如图 4 所示。

开挖卸荷使得钉头部位的土体都跨过强度包线进入了塑性, 但土钉密度的增大仍然明显地改变了土体

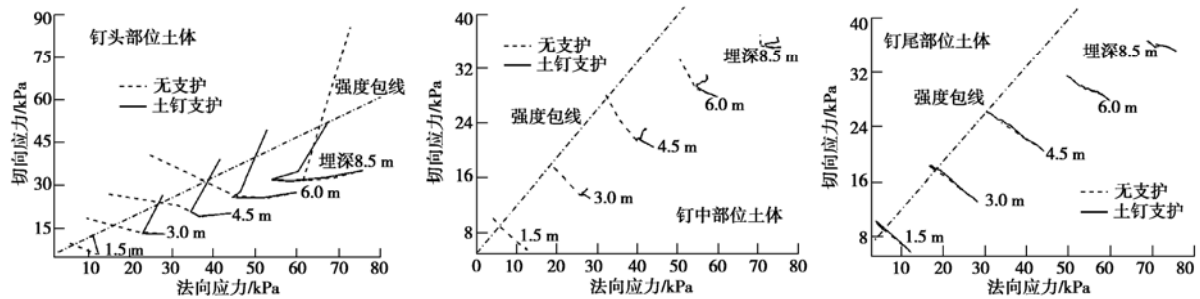


图3 有、无支护的土体应力路径对比

Fig.3 Comparison of stress path of soil mass between nail-supported and un-supported conditions

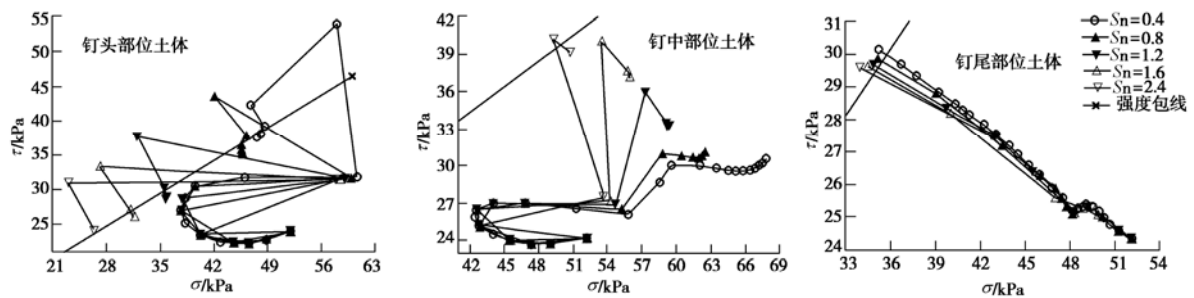


图4 土钉密度对土体应力路径的影响

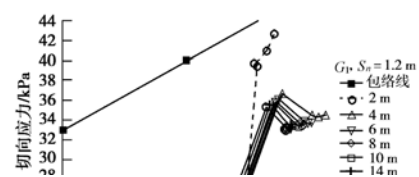
Fig.4 Effect of nail density on stress path of soil mass

的应力路径,使得钉间土体法向应力和最小主应力显著增大、土体抗剪强度和刚度得到明显增强。

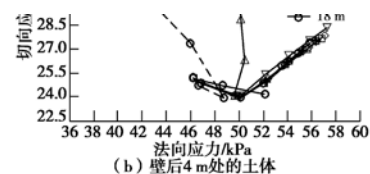
钉中部位的土体受开挖卸荷影响相对较弱,加上土钉发挥一部分应力分担作用,所以土体的应力路径基本上都没有跨过强度包线进入塑性。增大土钉密度的作用体现在使得土体应力路径明显地更加远离强度包线、应力状态得到更好的改善。

钉尾部位的土体与中部土体相比受开挖卸荷的影响应该更弱,但实际应力路径却更加靠近、有的甚至还穿过强度包线,这也是土钉的应力传递作用所致。土体应力路径受土钉密度变化的影响不太明显。

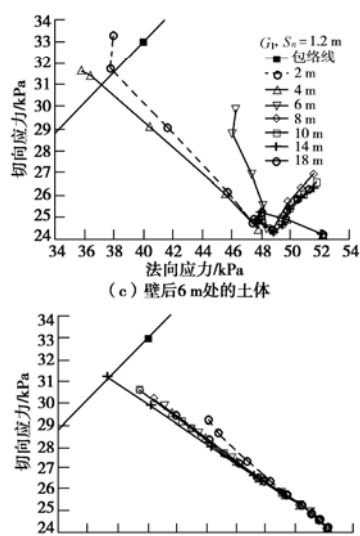
部位的土体应力转移至钉尾深部(此处土体依然处于应力集中区内),使得这一部分土体应力更加集中。若增大土钉长度,使其应力分担作用足以覆盖开挖引起的土体应力集中区;加上其应力传递作用再将钉头部位的土体应力转移至钉尾深部(此处土体已经处于应力集中区外);这样将使得整个区域土体的应力场都得到很好的改善。



长度不足以扩散和分担土体内由于开挖卸荷产生的过大应力,其应力路径将穿过强度包线进入塑性。同样在壁后6m远处,2m和4m钉长方案中土体应力路径都穿过了强度包线;依此类推。原因就是:钉长较短时,其应力分担作用不足以覆盖由开挖卸荷引起的土体应力集中区;而且,其应力传递作用还要将钉头



(b) 壁后4m处的土体



(1) 应力路径分析方法能够很好地反应随着基坑开挖、支护过程一步步推进, 土体应力状态不断转移、叠加的力学响应过程。

(2) 土钉头部(基坑边壁附近)区域, 各步开挖卸荷使得土体应力路径垂直逼近、最后直线穿过强度包线进入塑性; 土钉的作用主要表现为彻底改变应力路径为基本平行于强度包线的走向, 即法向应力明显增大、切向应力明显减小; 显著改善土体的应力状态。

(3) 土钉中部区域, 开挖卸荷的作用同样使得土体应力路径垂直逼近强度包线, 但是影响程度较轻、所以只有埋深较浅的土体进入塑性; 土钉的应力分担作用表现非常明显: 彻底改变土体的应力路径为平行强度包线, 应力状态明显改善、应力水平更显著降低, 都没有进入塑性。

(4) 土钉尾部区域, 土体应力受开挖卸荷影响更小, 但支护却使得其应力路径反而更加垂直靠近强度包线; 这正是土钉的应力传递作用将钉头和钉中部位的土体应力转移到钉尾深部土体、从而充分利用这一区域土体自身强度的体现。

(5) 有、无土钉支护对比说明土钉的主要作用是明显改善钉头部位土体应力路径的方向、大大降低钉中部土体的应力水平, 同时提高钉尾部位土体的应力水平、充分调动其自身的强度发挥。

参考文献:

- [1] 曾宪明, 林 皋, 易 平, 等. 土钉支护软土边坡的加固机理实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(3): 429 - 433. (ZENG Xian-ming, LIN Gao, YI Ping, et al. Testing study on the reinforcement mechanism of soil nailing support for soft clay slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 429 - 433. (in Chinese))
- [2] 张明聚, 郭忠贤. 土钉支护工作性能的现场测试研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(3): 319 - 323. (ZHANG Ming-ju, GUO Zhong-xian. Research on behaviors of soil nailing by field test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(3): 319 - 323. (in Chinese))
- [3] ZHANG M J, SONG E X, CHEN Z Y. Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional
- [5] 雷晓燕, SWOBODA G, 杜庆华. 接触摩擦单元的理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 23 - 32. (LEI Xiao-yan, SWOBODA Gunter, DU Qing-hua. Theory and application of contract-friction element mode[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 23 - 32. (in Chinese))
- [6] SWOBODA G. Program system FINAL-finite element analysis program for linear and nonlinear structures. Version 7.1[M]. Innsbruck: Publisher of Innsbruck University, 2001: 1 - 50.
- [7] 李 宁. 岩土工程数值仿真分析[C]// 陕西省岩石力学与工程学会岩土力学与工程论文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994: 19 - 33. (LI Ning. Numerical emulation model for geotechnical problems[C]//Shanxi Province Society for Rock Mechanics and Engineering. Symposium on Geomechanics and Engineering. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1994: 19 - 33. (in Chinese))
- [8] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 19 - 20. (SHEN Z J. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000: 19 - 20. (in Chinese))
- [9] 刘成宇. 土力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990: 239 - 240. (LIU C Y. Soil mechanics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990: 239 - 240. (in Chinese))