

基坑土钉墙数值模拟

周 波, 彭社琴, 赵其华

(成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘 要: 通过数值模拟, 对比实例工程的观测数据, 讨论了土钉墙支护的基本规律、破坏模式、各排土钉发挥的作用、施工影响以及土层参数的影响, 对设计和施工提出了建议。
关键词: 土钉墙; 土钉应力; 破坏形式; 施工影响
中图分类号: TU 452 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2006) 02-0072-03

Simulation of Soil Nailing Wall

ZHOU Bo, PENG She-qin, ZHAO Qi-hua

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Using numerical simulation and comparing with the in situ testing to discuss the basic rule of soil nailing wall, the failure mode, respective action of upper and bottom soil nail, the effect of constrction scheme and soil parameter. In the end, some suggestions to the design and construction of soil nailing wall are given.
Key words: soil nailing; stress in the soil nail; failure mode; effect of construction scheme

土钉墙支护技术, 因施工及时灵活、结构轻巧可靠、材料用量小等优点, 近年来被广泛应用于基坑支护和边坡加固工程中。然而在这些工程后的土钉墙设计理论, 却远远落后于工程需要。造成这种状态的原因, 是土钉墙的作用原理极其复杂, 涉及的计算参数繁多, 很难用简单的公式来表达其力学行为。在这样的情况下, 为了减少工程事故、指导工程施工、修正设计理论和方法, 采用现场测试和适应于复杂条件分析的数值模拟就相当重要。本文以一具体基坑土钉墙工程为例, 对比分析数值模拟结果和现场测试数据, 在土钉墙的作用机理方面作了一些探讨, 表明在选择合适的参数时, 数值模拟对土钉墙的设计和施工具有指导意义。

1 工程概况

该基坑位于成都市中心, 东面临街, 其余三面紧邻建筑物。基础埋深 10 m 左右, 场地地层由上至下依次为: 人工填土(厚 3~6 m)、粉质黏土及黏土(厚 0~1 m)、稍密卵石(厚 0.5~2 m)、中砂(厚 0.6~3.1 m)、中密卵石(厚 5~7 m)、密实卵石(厚 4~7 m)泥岩等。依据地勘资料和基坑四周的建筑物分布特点, 确定整个基坑除南段四层楼房下采用人工挖孔桩外, 其余采用土钉墙支护。土钉设计为七排, 行距 1.2 m, 排距 1.2 m, 最大钉长 12 m, 其余依次为 10 m, 9 m, 8 m, 7 m, 6 m, 5 m。

2 现场测试方案

研究测试方法有: 土钉应变测试、基坑附近地表土体的变形破裂观测, 基坑顶部水平位移监测。本文主要是作测试结果和数值模拟的对照分析。

3 数值模拟及其结果分析

数值模拟采用 flac3d 软件, falc3d 是连续介质快速拉格

朗日差分分析方法(fast lagrangian analysis of continua)的英文缩写, 是一个用于分析和解决工程力学问题的三维显式差分法程序, 可以有效地模拟岩土体及其它材料结构的工程力学行为。目前 falc3d 软件在我国尤其是在岩土工程界得到了广泛的认可和应用, 并取得了具有工程指导意义的应用成果。其优点之一就是具有模拟锚索、土钉类岩土工程构件的 Cable 单元, 以及模拟衬砌、喷射混凝土的 Shell 类单元。

土钉的模拟, 主要是土钉和周围土体的相互接触作用, Cable 单元自带接触的力学行为, 不必另外设置接触面。土钉的抗拔试验表明土钉周围剪应力和位移的关系可以表示为图 1^[2], 在达到峰值剪应力之前成 $\tau = kU$ 的线性增长关系, 达到峰值后剪应力不再增长。Cable 单元的力学行为服从这种试验结果, 土钉和土体的摩擦峰值采用莫尔-库仑型的确定原则, 即: 当作用在土钉上的法向力为 N 时, 峰值为 $N \tan \varphi + c$ (c 为土钉和土体的黏结力, φ 为摩擦角), 并允许在达到峰值后土钉和土体之间滑移。

喷射混凝土面层的模拟, 要实现面层和土体的完全嵌合, 若有空隙或者重叠都会影响土体应力的分布。采用普通单元要做到这一点比较繁琐, 因为设置混凝土面层时土体已经发生变形, 必须得到欲施加面层处土体的各节点的当前坐标才能实现完全嵌合。采用 Shell 类单元, 易于实现喷射混凝土面层的模拟。

土体采用莫尔-库仑模型, 有剪切屈服条件和拉伸屈服条件。

首先在重力作用下求解得自重应力场, 然后模拟实际的开挖过程, 每开挖 1.2 m 后设置一排土钉和喷射混凝土面层。各开挖工况下土钉的应力分布和塑性区的发展见图 2 (a)~(g), 土中线的宽度表示该处土钉应力的分布, 浅色代表拉伸屈服单元, 深色表示剪切屈服单元。

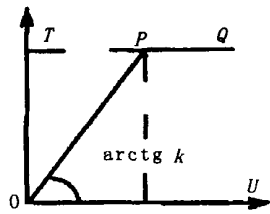


图 1 土钉周围剪应力和位移关系图

4 土钉支护的基本特征

4.1 单根土钉应力的沿钉长分布和发展

初期土钉应力最大值位置在面层处, 随着开挖的进行,

土钉轴力的最大值位置逐渐向坑外方向移动, 呈中部应力大两端应力小的形式。这一过程反映了潜在破裂面的不断扩大, 因为土钉轴力最大值就在潜在破裂面附近。图 3 是第一排土钉中点处的应力随计算时步的增长曲线, 可见, 随着开挖加深土钉应力不断增大, 其原因是开挖引起边坡变形的增长, 稳定性降低, 土钉的加固作用得以发挥并不断增强。

4.2 各排土钉应力大小

开挖完成后各排土钉应力的分布如图 2(h) 所示, 为上部 and 下部小、中间大的分布形式。上面的土钉有效长度大于下面的土钉。

4.3 土钉墙的位移

开挖完成时的变形图如图 4 所示, 最大位移点发生在土钉墙顶部, 最大沉降也在此点, 和监测结果一致。

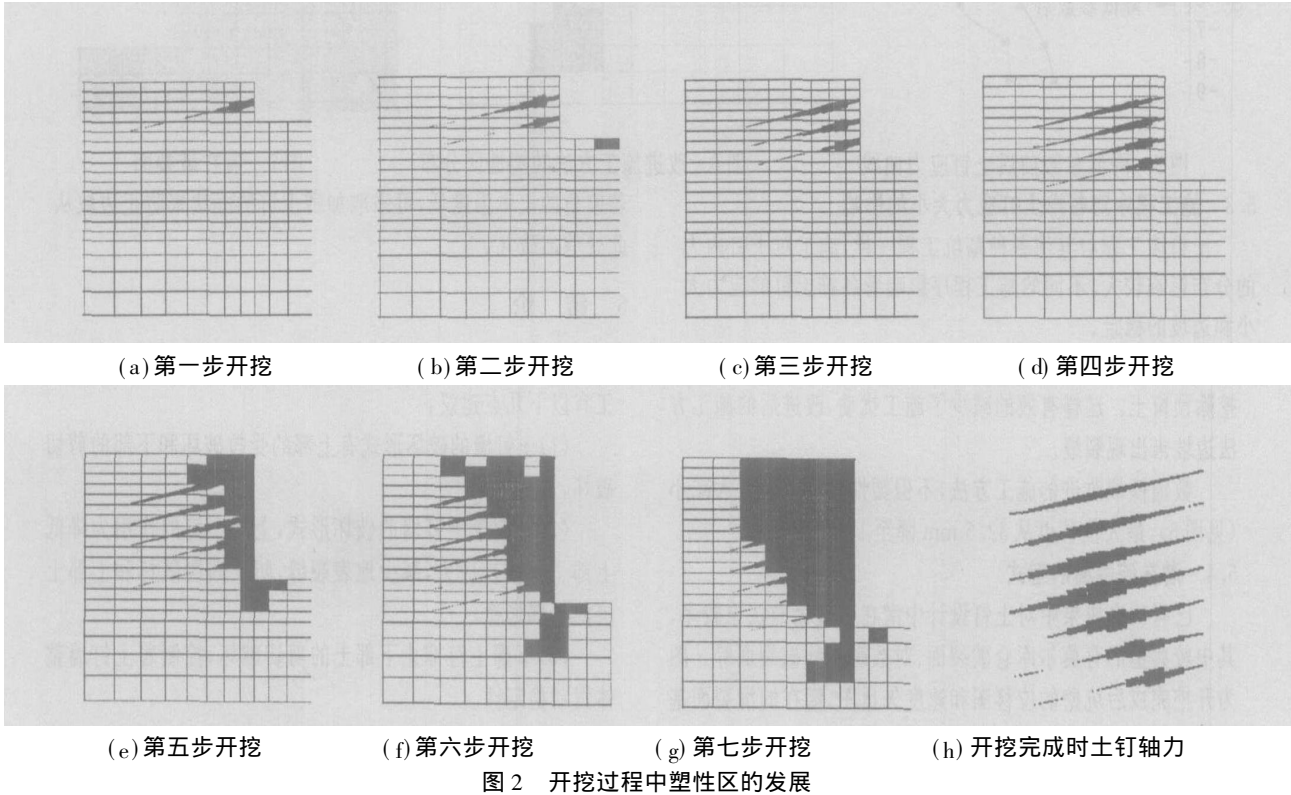


图 2 开挖过程中塑性区的发展

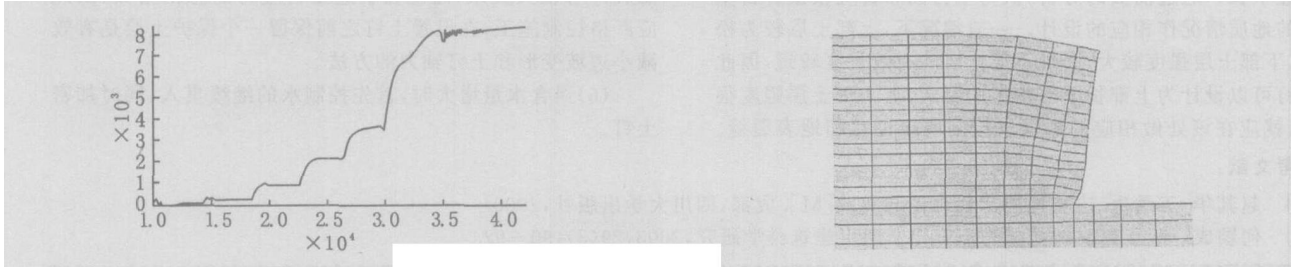


图 3 第一排土钉应力增长曲线

图 4 坑壁变形图(放大 50 倍)

5 几个问题的探讨

5.1 土钉墙的破坏形式

参照已有的研究成果, 结合锦贸大厦基坑工程的实测和观测资料, 基坑边坡变形破坏模式主要有两种常见类型, 即倾倒和滑塌。

基坑的下挖造成坑壁的侧向卸荷, 破坏了原有的应力状态, 坑壁产生以拉裂倾倒为主的变形。开挖的继续变形, 拉裂面向深处进一步发展, 裂缝出现, 此时坡体仍以拉裂倾倒变形为主。锦贸大厦深基坑距坑壁 2 m、6 m 两处裂缝, 表现为

倾倒变形, 因此顶部的位移最大。

在开挖深度较大时, 土钉墙底部土体剪应力集中而形成剪切塑性区, 若这部分土层自身力学性能较差或者超挖等因素影响, 土体剪出, 整个土钉墙失稳, 滑塌破坏。

各步开挖的塑性区分布如图 2 所示, 在上部土主要是拉伸屈服区, 意味着上部土体主要是拉裂破坏; 下部分布剪切屈服区, 为剪切破坏。随着开挖加深屈服区不断扩大, 边坡趋于失稳。从工程监测情况来看, 首先在地表出现近于平行于坑壁的拉裂缝, 随后由于超挖或含水状态的恶化, 下部土体剪出而产生失稳。

5.2 各排土钉的作用

从以上屈服区的分布图可以看出,上部土钉的作用主要是约束土钉墙上部土体,降低拉应力,控制拉裂、倾倒造成的上部土体的局部失稳,而对整体滑动的稳定性贡献较少。而中下部土钉的作用是降低该处土体的剪应力,控制着整体滑动稳定,在边坡失稳前,中下部土钉(特别是下部土钉)应力快速增长,土钉与周围土体的摩阻力逐渐到达峰值,最后土

钉被拔出边坡失稳。
数值模拟中降低土层的参数来模拟工程中边坡稳定系数的降低,得到的各层土钉最大应力和降低参数前的各层土钉最大应力如图 5 所示。下部土钉应力增长较大,而上部土钉应力增长很小,反映了对边坡整体滑动起控制作用的是下部土钉。

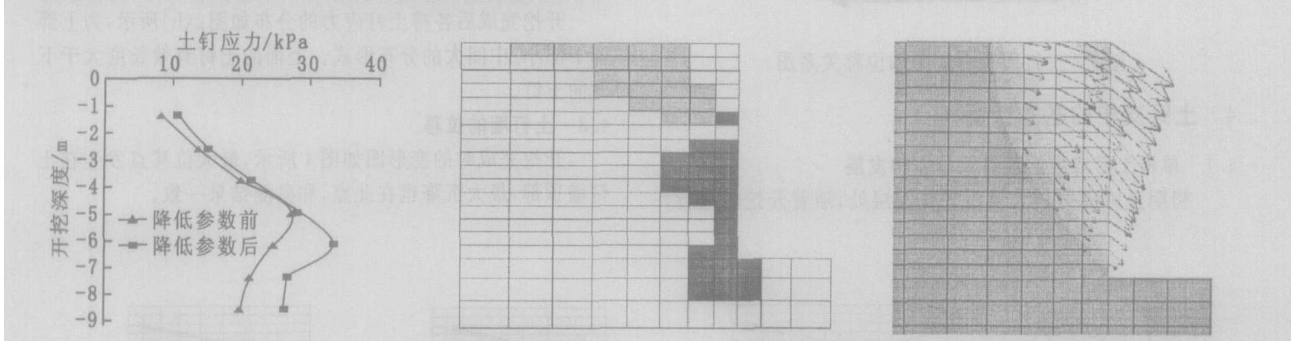


图 5 降低参数前后土钉应力曲线

图 6 改进施工方法的塑性区分布

图 7 潜在破裂面

5.3 施工程序对各排土钉应力大小的影响

土钉墙工程与其他各种基坑工程一样,施工对土钉内力的分布影响较大。不同的施工程序影响着各排土钉的应力大小和边坡的稳定。

锦贸大厦基坑在施工过程中,开始施工方法为一次性清理工作面至设定边壁,鉴于某些部位出现裂缝,因此改变了施工方法——预留几十厘米厚的保护层,待打入土钉后再挖除预留土。这样有效的减少了施工扰动,改进后的施工方法边坡未出现裂缝。

数值模拟改进的施工方法,不但塑性区的范围大大减小(见图 6),最大位移也从 32.5 mm 降至 15 mm。

5.4 潜在破裂面的型式

已有研究成果中对土钉设计中潜在破裂面的认识较多,其中较典型的有莫尔库仑破裂面、对数螺旋线破裂面等。图为开挖完成后坑壁的位移图和速度矢量图,潜在的滑裂面基本呈对数螺旋型,如图 7 所示,宽度约为 0.5 H。

5.5 设计中土钉长度的确定

目前关于土钉长短设置的看法一般有两种:上长下短和上短下长。通过前面的分析,认为土钉的布置应根据各自基坑的地质情况作相应的设计。一般情况下,上部土层较为松散,下部土层强度较大,而且下部土钉的有效长度较短,因此土钉可以设计为上部长下部稍短的形式。若上部土层强度很低,就应在该处做相应的加强以控制墙顶位移和地表裂缝。

参考文献:

[1] 赵其华,王兰生. 边坡地质工程理论与实践[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000.
[2] 何颖成,等. 土钉支护抗拔力研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 90- 92.

6 结 论

土钉墙的工作状态涉及因素繁多,作用机理复杂,因此加强监测和数值模拟工作对于探讨和研究土钉墙作用机理是非常有意义的。通过以上分析,可以对土钉墙的设计和施工有以下几点建议:

- (1) 土钉墙的破坏形式有上部的受拉破坏和下部的剪切破坏。
- (2) 对应于土钉墙的破坏形式,上部土钉的作用为降低上部土体的拉应力,减少地表裂缝,防止倾倒破坏和上部土层的局部失稳。
- (3) 下部土钉抑止下部土的剪切破坏,控制着土钉墙整体滑动稳定性。
- (4) 土钉布置一般可采取上长下短的形式,再针对具体情况对软弱部位加强。
- (5) 重视施工方法: 土钉墙的边坡变形、土钉应力都和施工程序有很大关系,超挖会引起土钉应力的急剧增大,因此应严格控制施工,在设置土钉之前保留一个保护层是有效减小边坡变形和土钉轴力的方法。
- (6) 遇含水量增大时,首先控制水的继续贯入,同时加密土钉。

(上接第 6 页)

[14] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 1- 412.
[15] 鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究[J]. 科学通报, 1997, 42(23): 2 535- 2 538
[16] Derbyshire, E, Kemp, R A, Meng, X M.. Variations in loess and palaeosol properties as indicators of palaeoclimatic gradients across the Loess Plateau of Northern China, Quaternary Science Reviews, 1995, 14: 681- 697.
[17] 董光荣,陈惠忠,王贵勇,等. 150 ka 以来中国北方沙漠、沙地演化和气候变化[J]. 中国科学(B), 1995, 25(12): 1303- 1312.
[18] 董光荣,靳鹤龄,陈惠忠. 末次间冰期以来沙漠- 黄土边界带移动与气候变化[J]. 第四纪研究, 1997, (2): 158- 165.
[19] 董光荣,李森,李保生,等. 中国沙漠形成演化初步研究[J]. 中国沙漠, 1991, 11(4): 23- 32.
[20] 董光荣,王贵勇,李孝泽,等. 末次间冰期以来我国东部沙区的古季风变迁[J]. 中国科学(D), 1996, 26(5): 437- 444.