

土钉倾角对基坑侧壁变形与稳定性能的影响*

肖昔泽, 张亚芳, 刘浩, 吴庆华
(广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 设计并建立了物理实验模型, 开展土钉倾角对基坑侧壁变形与稳定性能影响的物理实验研究, 并与自行研发的基坑工程三维可视化实时监测及失稳预警系统(3D Visualized Monitoring System, 3DVMS)进行对比分析, 检验了研发系统的有效性。研究结果表明: 不同倾角土钉支护基坑的侧壁变形与稳定性能各异, 当土钉倾角为 30° 时, 支护效果最佳。

关键词: 基坑变形; 基坑稳定; 实时监测; 土钉倾角

中图分类号: TU94 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2013)02-0028-05

Affects of Inclination of Soil Nails on the Deformation and Stability of Excavation

XIAO Xize, ZHANG Yafang, LIU Hao, WU Qinghua

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The affects of inclination of soil nails on the deformation and stability of excavation has been studied by designing and setting a laboratory model. A self-developed codes named 3D visualized monitoring system (3DVMS) has been adopted for comparing and verifying. The result indicated that the deformation and stability performance of excavation sidewall varies due to different inclination of soil nails. In conclusion, the soil nailing supports the sidewall best when the soil nails are inclined 30 degrees to the horizontal.

Key words: deformation of excavation; stability of excavation; real-time monitoring; inclination of soil nail

随着城市化进程的加快, 城市人口和规模的不断膨胀带动了城市地下空间工程与高层建筑迅速发展, 基坑面积不断扩大、开挖深度不断增加对基坑的安全和稳定带来了更大的挑战, 对基坑支护结构体系提出了更高的要求^[1]。土钉支护是在深基坑工程施工中常采用的一种开挖边坡和侧壁加固支护方式, 是由较密排列的土钉体和喷射混凝土面层所构成的一种支护, 适用于一般黏性土、粉土、杂填土和素填土、非松散的砂土、碎石土等地质条件^[2]。但土钉支护效果受土钉数量、位置布置、间距以及插入土层的倾角等因素影响。国内外诸多

学者对土钉支护对基坑的影响开展了研究并取得一批有价值的成果。冯志焱等^[3]研究了一种用于土钉支护分析的简化方法, 为进一步的模拟研究打下了基础; 任连伟^[4-6]作了类似的数值计算方面的研究; 另还有一些学者则作了土钉支护相关的理论及试验研究^[7-9], 国外也开展了土钉设计和性能方面的相关研究^[10-11]。但现有的研究成果大多基于单一的数值模拟或独立的理论研究, 将理论分析和物理实验相结合并自行研发程序开展研究的相关成果不多见。

本文在理论分析基础上, 利用自行研制的物理

* 收稿日期: 2012-09-20

基金项目: 广东省科技计划重点攻关资助项目(2009A030302016); 广东省科技计划资助项目(2011B050300019); 广东省高等学校高层次人才资助项目(2050205); 广州市属羊城学者科研资助项目(12A007G)

作者简介: 肖昔泽(1986年生), 男, 研究生; 通讯作者: 张亚芳; E-mail: zhangyafang2004@163.com

模型进行土钉倾角变化对基坑侧壁变形与稳定特征影响的研究，参照国家相关规范^[12-13]，利用自行研发的 3DVMS 程序进行有限元计算和实时监测及预警可视化分析，并将结果与相关规范和其他学者的研究成果进行对比，以验证所研发的 3DVMS 程序的有效性。

1 3DVMS 预警系统

基坑工程三维可视化实时监测及失稳预警系统 (3DVMS) 是由广州大学土木工程学院和计算机学院联合研发的可运用于基坑工程实时监测和可视化预警的软件系统。3DVMS 程序具备一般 CAE 软件的几何建模、网格剖分、有限元运算、后处理等功能，可与数据采集仪等设备兼容，将传感器采集到的实时位移数据输入有限元程序中，进行实时可视化预警分析，让用户直观实时了解基坑的位移变形及稳定动态，达到实时预警效果。

2 实验简述

2.1 实验主要硬件设备及材料

物理实验模型包括自行设计研制的厚度为 15 mm 的有机玻璃板制成的土箱，箱体尺寸 1 000 mm × 1 000 mm × 1 000 mm，箱内为碾细的黏土；一台 HC - 1210 智能型数据采集仪；若干型号为 WZ - G01 和 WZ - G02 的位移传感器；连接装置如图 1 所示。主要通过数据采集仪将接收采集到的数据信息输入到 3DVMS 系统，进行有限元分析，得到基坑全场的位移分布，进行实时监测和预警。



图 1 实验设备及连接图

Fig. 1 Experimental devices and installation

本实验用粗细和材质均匀的竹材料模拟土钉支护模型，所有土钉的直径为 6 mm，长度为 400 mm。此外，还有 20 kg 标准加载块若干。

2.2 基坑支护与加载方案设计

本实验在基坑模型侧壁中央位置等间距布置三支位移传感器，从上到下依次定义为 A、B、C 处。

将位移传感器、采集仪、计算机等依次相连。位移传感器接收到位移信号后，经过采集仪的数据处理，将模拟信号转变为数字信号 (A/D 转换)，并作为数值分析的数据输入，经过有限元计算和后处理，分别得到不同土钉倾角支护的基坑整体节点处的位移值。基坑模型的俯视图和立面图分别见图 2 所示，数据采集与分析系统的流程图见图 3。

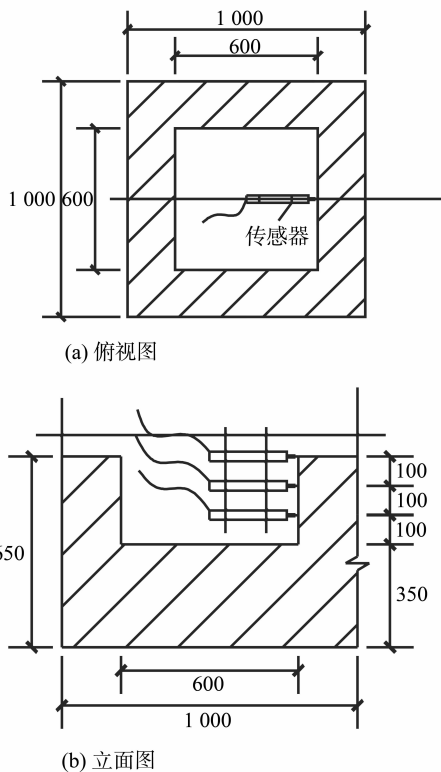


图 2 基坑模型实验装置图 (单位: mm)

Fig. 2 Sketch of laboratory test

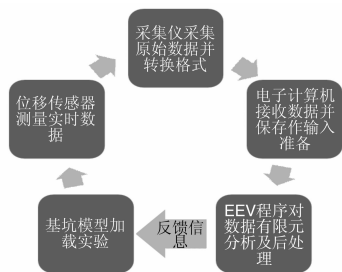


图 3 实验循环体系

Fig. 3 Procedure of the test

利用角度尺等工具将粗细和材质相同的竹材料按照设定的角度插入土中形成基坑土钉支护模型，土钉一共 8 根，分两排、每排 4 根布置，如图 4 所示。

为模拟真实的基坑边界条件，同时也为缩短实验周期，实验中在基坑边缘指定区域加上质量为

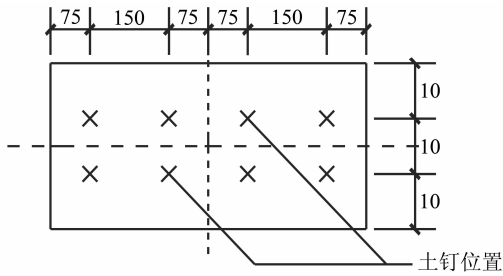
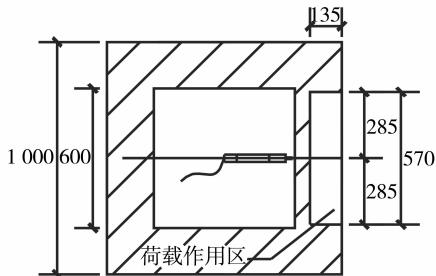


图 4 土钉支护点 (单位: mm)

Fig. 4 Arrangement of soil nails

20 kg 的统一规格的标准加载块。共设置了三种不同等级的工况, 在指定区域作用 2 个加载块的即为一级加载工况; 在指定区域作用 4 个标准加载块的即为二级加载工况; 在指定区域作用 6 个标准加载块的即为三级加载工况。图 5 (a) 为荷载作用区域, 图 5 (b) 即为三级加载工况。



(a) 加载区域 (单位: mm)



(b) 实际加载图 (三级荷载)

图 5 荷载

Fig. 5 Loading 2.3 加载与位移测量

本研究共进行了土钉倾角 (与水平方向的夹角) 分别为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° 的 10 组实验。每组实验开始前均对土体重新松动, 将土钉按照预设的角度从侧壁插入土体中, 其他影响因素尽量控制到一致。实验时首先开启各项硬件设备, 运行采集仪软件以记录传感器传输来的的实时位移数据, 建模并启动 3DVMS 程序, 对采集仪输入的数据进行有限元运算, 计算结果以渲染图形式实时在计算机屏幕上显示, 达到预设的预警阈值即刻蜂鸣报警。

对每个角度的土钉支护基坑, 均完成了三种工

况的实验研究, 即首先施加一级工况荷载, 观察采集仪上读取到的传感器实时位移数据, 待其值稳定后, 对模型施加二级工况荷载; 同样的方法施加三级工况荷载直至实验结束。

3 实验结果与讨论

3.1 土钉支护的理论模型分析

基坑土体的破坏主要与其抗剪强度有关, 而抗剪强度的主要参数包含两个, 即土的黏聚力 c 与土的内摩擦角 φ 。对于本实验采用的碾细黏土, c 取值 10 kPa; 内摩擦角 φ 取值 35° ; 土的重度取 18 kN/m^3 。

要防止基坑侧壁的滑移面发生剪切破坏, 土钉提供的抵抗摩擦力需平衡滑移面能承受的最大剪切力和土体重力的合力, 才能使基坑不至于产生过大变形甚至破坏 (图 6)。考虑到此实验由于存在加载块的外力, 参考文献 [14] 的分析, 在临界土体失稳时, 综合公式表述如下:

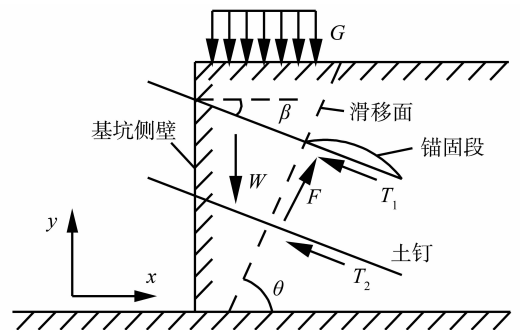


图 6 土钉支护受力分析图

Fig. 6 The stress analysis of soil nails bracing

$$G + W \geq F \sin \theta + \sum T \sin \beta; \quad (1)$$

$$F \cos \theta = \sum T \cos \beta; \quad (2)$$

$$W = \gamma S; \quad (3)$$

$$F = c + \sigma \tan \varphi \quad (4)$$

其中, W 为土的有效重力; F 为土体滑移面的剪切力; T 为土钉提供的有效抗力; σ 为土体剪应力; S 为滑移段土体的面积; G 为加载块所施加的外力。

从上述公式可见, 当土钉的材质一定时, 可通过改变其倾角来达到更好的支护效果。

3.2 基坑位移变形特征讨论

本实验的位移监测点设置在基坑模型侧壁的中心位置。图 7 为三级工况下不同土钉倾角时的位移拟合曲线图。采用位移传感器与基坑侧壁土体直接

接触，测得基坑侧壁 A、B、C 处三个测点的实时位移数据，采用 ORIGIN 拟合成曲线图，图 7 中 A-1 代表基坑侧壁 A 处在一级工况的位移，A-2 代表 A 处二级工况的位移，以此类推。

由图 7 (a) 可见：在一级工况下，不同倾角的土钉支护所发生的位移各有差异。在 0° 倾角时，

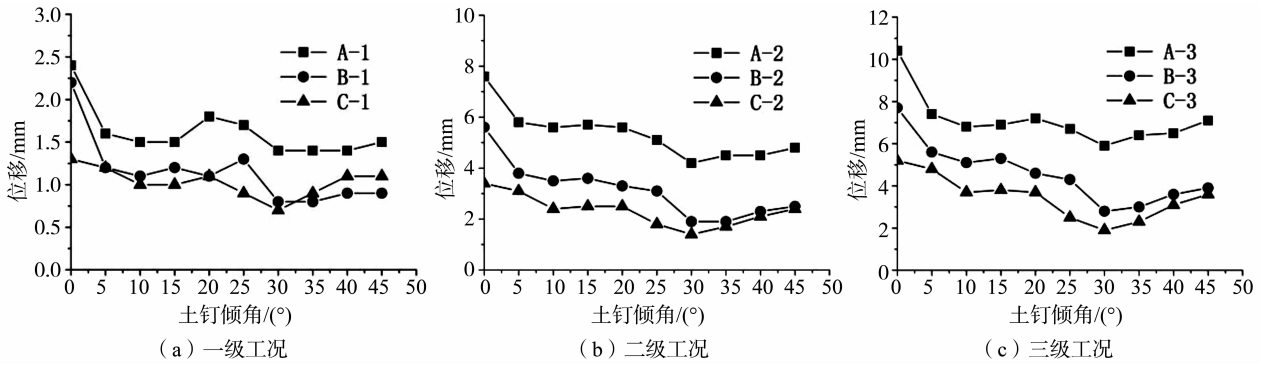


图 7 各级工况条件下不同土钉倾角的基坑侧壁位移

Fig. 7 The displacement of sidewall vs inclination of soil nails in each loading case

由图 7 (b) 可知：在二级工况时，0° 倾角的位移变化情形与一级荷载下基本相似，而 10°、15°、20° 下的位移变形和稳定情形也基本相同。而 30° 对应的 A 处位移和 C 处位移明显小于其它倾角时，支护效果最好，而此时 B 处位移则与 35° 时相当，也为最小的。

由图 7 (c) 可知：在三级工况下，0° 角的位移变形情形与前两者加载情况下基本相同，而 10°、15°、20° 时的位移变化也基本相似。土钉倾角 30° 时，所对应的各测点对应的位移均小于其它倾角，说明该角度的土钉对基坑支护效果最佳。

综合图 7 (a)、(b)、(c) 可知，在工况逐级递增的情况下，基坑侧壁 A、B、C 三测点的位移均逐步增大。但 A 处位移增长较快，B 处次之，C 处较小，可见基坑侧壁靠近上部位置更危险，在施工过程中需要重点关注。同时，研究表明，当土钉倾角为 30° 时，各工况荷载作用下所产生的位移均为最小，说明该倾角下的土钉对基坑的支护效果最佳，该结果与香港地区土钉支护结构对基坑稳定性能影响的相关文献相吻合^[15]。

3.3 预警分析

基坑工程中，实时监测和预警是信息化施工的重要保证，它能为施工人员提供即时预警信息，使基坑在遭遇过大变形或失稳破坏前得到即时补救，保证基坑的安全。可视化预警尤其高效，而对于可视化基坑变形状态显示及预警，有学者也做了该领

A 处和 B 处位移的位移明显比其他倾角时大，而 C 处位移却与其它倾角的趋于相近。从 5° 到 15° 时，A、B、C 处位移均非常接近，变化不明显。而倾角在 30° 时，除 A 处位移与 35° 和 45° 相当之外，其余均明显小于其他角度的位移值。

域的研究^[16]，取得了初步进展。

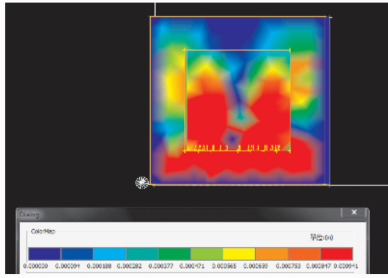
本实验针对基坑侧壁位移变化也作了预警分析，预警值的大小根据现行规范要求及物理模型等效比例原则综合设定。根据各工况下监测点 A、B 及 C 的位移值，输入到 3DVMS 程序中，经过有限元计算分析实现了对基坑整体的实时预警。云图结果表明，加载区域基坑侧壁的土体首先出现代表基坑位移较大的红色，随着工况荷载的增加，红色区域不断增大。当超过预警阈值时，系统发出蜂鸣报警讯号。图 8 (a) 是加载前期的位移预警云图，图 8 (b) 是加载后期的位移预警云图。

图 9 为不同土钉倾角的各测点达到预警阈值所需的时间。可见当土钉倾角为 30° 时，各测点达到预警阈值所用的时间最长。同样表明土钉倾角 30° 的支护效果最好，与香港地区基坑土钉支护的相关文献相一致^[15]。

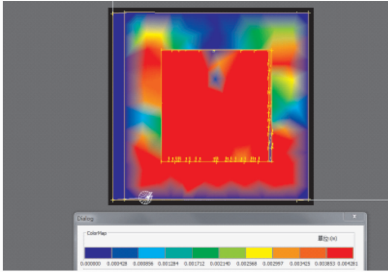
4 结 论

1) 在受到逐级递加的竖向荷载作用时，基坑侧壁水平侧向位移逐步增大。基坑侧壁开挖面的上部位移增加的幅度和速度较大，而下部位移则增加的较为平缓。

2) 当土钉倾角为 30° 时，基坑侧壁的水平位移最小，同时达到预警阈值所需的时间最长，说明 30° 为最佳土钉支护倾角，此时基坑的支护效果最佳。



(a) 监测前期



(b) 监测后期

图 8 3DVMS 程序的预警可视化效果图

Fig. 8 Visualization of warning by using 3DVMS

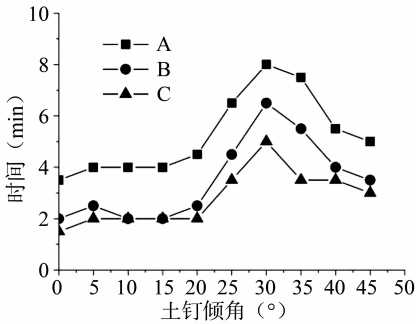


图 9 不同土钉倾角时各测点达预警值所需时间

Fig. 9 The time needed for each measuring points to reach warning trigger

3) 通过物理实验分析, 并通过与其他学者研究成果和相关规范的对照和检验, 说明了自行研发的 3DVMS 程序的有效性。

参考文献:

[1] 周景星, 李广信, 虞石民, 等. 基础工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 261 - 262.

- [2] 闫富有, 刘忠玉, 祝彦知, 等. 基础工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 286 - 287.
- [3] 冯志焱, 唐竟. 土钉墙稳定性的一种简化分析方法[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(1): 5268 - 5270.
- [4] 任连伟, 刘希亮, 杨超. 土钉支护类型对基坑位移影响的数值模拟分析[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(2): 33 - 34.
- [5] 俞登华, 尹骥. 复合土钉支护基坑位移和稳定性的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 162 - 165.
- [6] 朱磊, 龚晓南, 邢伟. 土钉支护基坑抗隆起稳定性计算方法研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 168 - 170.
- [7] 刘平旺, 张卫国, 王领. 复合土钉支护基坑开挖中侧向变形性状分析[J]. 中国市政工程, 2008(2): 60 - 61.
- [8] 赵延林, 安伟光. 基于可靠性的复合土钉支护基坑稳定性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(10): 1301 - 1304.
- [9] 王巍, 刘斯宏. 土钉倾角对斜面加固效果影响的试验研究[J]. 人民珠江, 2010(5): 23 - 26.
- [10] GULER E, BOZKURT C F. The effect of upward nail Inclination to the stability of soil nailed structures[J]. Geotechnical Engineering For Transportation Projects, 2004: 2213 - 2220.
- [11] CHIN K H, TRONGTHAM N, WOLSCHLAG C. Design of permanent soil nail walls using numerical modeling techniques[C]. USA: Earth Retention Conference, 2010: 748 - 755.
- [12] 中国建筑科学研究院. JGJ120 - 99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [13] 山东省建设厅. GB50497 - 2009 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [14] PRASHANT A, MUKHERJEE M. Soil nailing for stabilization of steep slopes near railway tracks[M]. India: Research Designs and Standards Organization, 2010: 68 - 69.
- [15] CHAN R K S. Guide to soil nail design and construction[M]. Hong Kong: Civil Engineering and Development Department, 2008: 23 - 24.
- [16] 薛飞. 基坑支护系统控制及三维可视化研究[D]. 上海: 同济大学, 2006: 128 - 129.