

DOI: 10.11779/CJGE2014S2014

# 疏排桩-土钉墙组合支护基坑整体稳定性分析

刘澄赤<sup>1, 2</sup>, 杨敏<sup>1, 2</sup>, 刘斌<sup>1, 2</sup>, 古海东<sup>1, 2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 疏排桩-土钉墙组合支护是疏排桩与土钉墙组合形成的一种新型支护形式, 是复合土钉墙发展的趋势之一。目前这一支护结构已在工程中应用, 但对其的整体稳定性分析, 目前尚未有统一的较好的理论分析方法。分别采用刘斌(2011)方法和有限元强度折减法计算疏排桩-土钉墙组合支护基坑的整体稳定性安全系数, 并将两种方法的计算结果与离心机试验安全系数以及滑裂面位置进行对比分析。对比结果表明, 采用刘斌(2011)方法计算得到的安全系数比强度折减法的计算值更接近于试验值, 刘斌(2011)方法更适用于疏排桩-土钉墙组合支护的整体稳定性分析。

**关键词:** 疏排桩; 土钉墙; 离心机试验; 整体稳定; 强度折减法

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0082-05

**作者简介:** 刘澄赤(1990-), 女, 江苏南通人, 硕士, 主要研究方向为桩基础与深基坑。E-mail: dodolcc@126.com。

## Overall stability analysis of scattered pile-soil-nailing composite retaining system for foundation pits

LIU Cheng-chi<sup>1, 2</sup>, YANG Min<sup>1, 2</sup>, LIU Bin<sup>1, 2</sup>, GU Hai-dong<sup>1, 2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground

Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Scattered row pile-soil-nailing wall retaining structure is a new support form which combined soil-nailing wall and sparse row piles. It's one of important directions of the composite soil-nailing wall. This new retaining structure is used in engineering practices, but a unified method is not available for analysis of its overall stability. The suitability of LIU Bin's method and the strength reduction method in calculating the overall stability safety factor is discussed based on the centrifugal model tests. The results indicate that LIU Bin's method is more suitable for the overall stability analysis of scattered pile-soil-nailing composite retaining system for foundation pits.

**Key words:** scattered pile; soil-nailing wall; centrifugal model test; overall stability; strength reduction method

## 0 引言

土钉墙因施工简便、经济高效而成为一种较为可靠的基坑支护形式, 目前几乎在全国各地被广泛应用。但由于其变形难以有效控制, 支护深度受场地条件制约。为此, 我国工程界将土钉与搅拌桩、微型桩、预应力锚索等依据具体工程条件进行组合, 发展形成了复合土钉墙。但随着工程实践的需求, 为了进一步拓展土钉墙的适用范围和支护深度, 又发展形成了疏排桩-土钉墙组合支护结构, 如图1所示。

在构造上, 疏排桩-土钉墙组合支护结构将土钉、锚索等水平向支护结构与排桩、搅拌桩等竖向支护结构相组合。设置土钉用来提高桩间土体的稳定性, 同时设置排桩可以减小土钉墙的变形, 拓展土钉墙的支护深度。在作用原理上, 疏排桩-土钉墙组合支护结构结合了支挡型和加固型支护结构的特征, 在边坡荷载作用下, 由于疏排桩与土钉墙之间存在变形差异,

疏排桩籍由遮拦效应以及土钉摩擦加筋和注浆加固的作用, 会使土颗粒在疏排桩间相互楔紧的区域内形成一种加筋式的土质传力体系, 即加筋式土拱效应, 并借此将土压力分配传递于疏排桩和土钉墙, 从而形成疏排桩-土钉-土拱相互作用体系, 如图1(b)所示。所以, 疏排桩-土钉墙组合支护结构结合了排桩抗弯能力强和土钉墙经济便捷的优点, 已经成功应用于广州、深圳等地, 并取得了显著的社会和经济效益<sup>[1-2]</sup>。

目前, 对于疏排桩支护基坑、土钉墙支护基坑的整体稳定性分析, 较多采用的是规范法中推荐的圆弧条分法, 而圆弧条分法未能考虑土体内部的应力应变关系以及土体与排桩、土钉等的共同作用。有限元强度折减法克服了圆弧条分法中将土条假设为刚体的缺点, 考虑了土体的非线性本构关系, 能够模拟边坡的

施工过程,可适用于任意复杂的边界条件<sup>[3-4]</sup>。随着计算机技术的飞跃发展,强度折减法在计算土坡稳定性方面发展较快,但都仅限于纯土坡的应用,较少地考虑土钉、排桩、锚杆等结构体的作用。

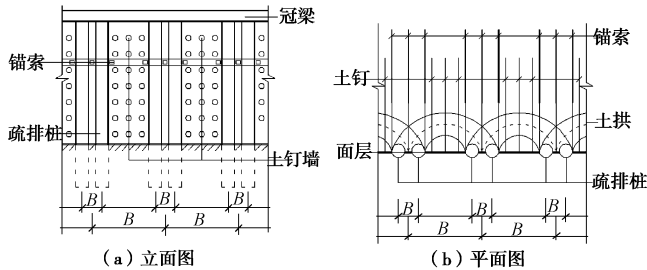


图 1 疏排桩-土钉墙组合支护结构示意图

Fig. 1 Scattered row pile-soil-nailing wall retaining structure

关于疏排桩-土钉组合支护基坑的整体稳定性分析,目前还没有统一的较好的理论分析方法的介绍。本节分别采用刘斌(2011)方法和有限元强度折减法计算疏排桩-土钉墙组合支护基坑的整体稳定性安全系数,并离心机模型试验就安全系数以及滑裂面位置进行对比分析,验证两种方法是否适用于疏排桩支护基坑以及土钉墙支护基坑的整体稳定性分析。

## 1 整体稳定性分析方法

### 1.1 刘斌(2011)方法<sup>[5]</sup>

刘斌等<sup>[5]</sup>以瑞典圆弧条分法为基础,将疏排桩-土钉墙组合支护结构的整体失稳破坏滑裂面假定为圆弧,同时增加考虑土钉和疏排桩的作用,建立计算模型如图 2 所示。

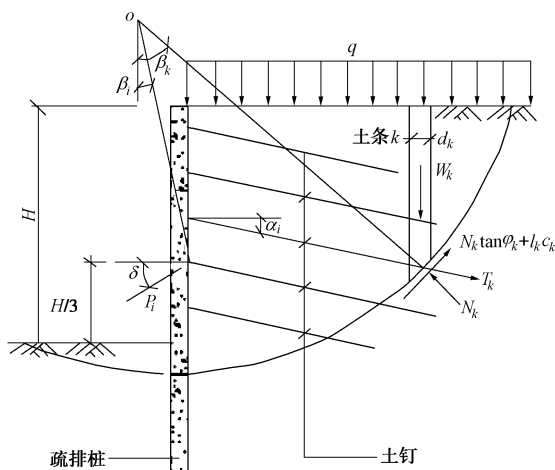


图 2 疏排桩-土钉墙组合支护结构整体稳定计算模型

Fig. 2 Computational model for overall stability

其中,基坑顶部作用均布荷载  $q$ ; 土条  $k$  的重力为  $W_k$ , 土体的内摩擦角和黏聚力分别为  $\varphi_k$ 、 $c_k$ ; 土条底部弧长为  $l_k$ , 法向反力为  $N_k$ , 切向阻力为  $N_k \tan \varphi_k +$

$l_k c_k$ ; 考虑第  $i$  排土钉的拉力  $T_i$  在整体稳定中的抗滑作用; 疏排桩的抗滑作用根据疏排桩所承担的边坡荷载  $P_P$  计算抗力矩。

疏排桩-土钉墙组合支护结构的整体稳定系数  $K_s$  计算公式为:

$$K_s = \frac{\sum_{k=1}^m [c_k l_k + (W_k + q d_k) \cos \beta_k \tan \varphi_k] + M_P / (BR)}{\sum_{k=1}^m (W_k + q d_k) \sin \beta_k} + \frac{\sum_{i=1}^n [T_i \cos(\alpha_i + \beta_i) + 0.5 T_i \sin(\alpha_i + \beta_i) \tan \varphi_i] / S_{hi}}{\sum_{k=1}^m (W_k + q d_k) \sin \beta_k} \quad (1)$$

式中  $m$  为滑动体分条数;  $n$  为滑动体内土钉数;  $d_k$  为土条宽度;  $\beta_k$  为滑动面处切线与水平面之间的夹角;  $\alpha_i$  为土钉与水平方向的夹角; 土钉拉力  $T_i$  取按土钉在滑动体外有效锚固段的黏结强度和土钉杆材抗拉强度计算所得的较小值;  $S_{hi}$  为土钉的水平间距;  $B$  为疏排桩间距;  $R$  为圆弧滑裂面的半径;  $M_P$  为疏排桩抗力矩。

该方法需要知道支护结构中疏排桩承担的荷载, 计算比较繁琐不易于编程实现, 且该方法的计算可靠性尚需验证。

### 1.2 有限元强度折减法

有限元强度折减技术的基本原理是对土体的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ , 分别增加折减系数  $F_t$  得到  $c_t$  和  $\varphi_t$ , 如下式:

$$c_t = c / F_t \quad (2)$$

$$\varphi_t = \arctan(\tan \varphi / F_t) \quad (3)$$

然后采用折减后的土体强度指标  $c_t$  和  $\varphi_t$  对土体进行有限元分析, 并通过不断增加折减系数, 反复分析土坡, 直至达到临界破坏, 此时得到的折减系数即为安全系数。本文有限元分析中破坏标准采用边坡坡顶位移发生突变作为失稳依据, 对应的安全系数作为支护结构的最终安全系数<sup>[6]</sup>。

模拟疏排桩-土钉墙组合支护基坑, 本文建立三维有限元模型简图如图 3 (a) 所示, 桩、土钉和面层均采用线弹性本构模型, 土体采用莫尔-库仑本构模型; 为了减少计算量, 根据对称性选取相邻 3 根桩为模型计算宽度, 如图 3 (b) 所示。

对于材料模拟, 模型桩采用壳单元模拟; 土体采用 C3D8 实体单元模拟; 土钉采用梁单元模拟; 面层采用实体单元模拟。对于接触形式, 桩和土体采用 contact 面面接触形式, 即切线方向采用罚函数接触, 摩擦系数为  $\tan(0.75\varphi)$ , 法向方向采用硬接触; 面层和土体间采用 contact 面面接触形式; 土钉和面层、土

钉和土体都采用 embed 嵌入接触。

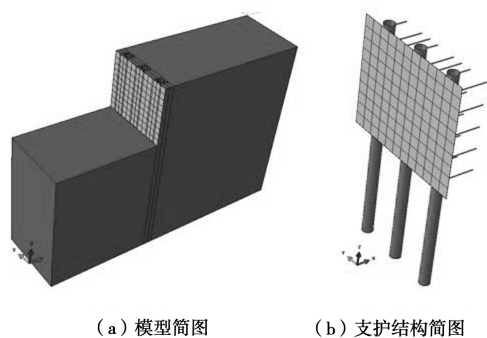


图 3 有限元模型图  
Fig. 3 FEM model

对于加载工况，在地应力平衡和基坑开挖时，将土钉和面层单元杀死，待基坑开挖完成后再将土钉和面层单元激活，然后进行逐级加载。加载中，每级荷载下运行 600 s，模型失稳的判断依据为：在某一级荷载下，基坑坡顶的水平位移不收敛则认为模型在该级荷载作用下已经失稳。

该方法的优点是安全系数可以直接给出，不需要事先假设滑裂面的形式和位置，并且滑裂面的范围更加直观。

2 离心机模型试验验证

同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室在 TLJ-150 复合型岩土离心机上进行了离心机模型试验，取用上海杨浦区五角场的灰色砂质粉土为试验用土。土样的级配曲线如图 4 所示，表 1 为土样的物理力学性质，其中黏聚力和内摩擦角均为固结不排水条件下的土体强度参数。

表 1 土样的物理力学特性

| Table 1 Physical and mechanical properties of soils |        |   |                |                       |
|---|--------|---|----------------|-----------------------|
| 比重  | 含水率    | 重度                                      | 黏聚力            | 内摩擦角                  |
| $G$   | $w/\%$ | $\gamma /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $c/\text{kPa}$ | $\varphi /(^{\circ})$ |
| 2.7   | 26.3   | 19.0                                    | 7.0            | 33.5                  |

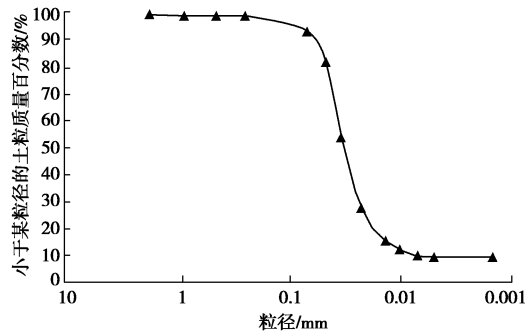


图 4 土的颗粒级配累计曲线  
Fig. 4 Distribution curve of test soil

离心机模型试验共进行了 13 组饱和土离心机模

型试验，试验采用的模型箱尺寸为 900 mm×700 mm×700 mm（长度×宽度×高度）。其中第 6~13 组为疏排桩-土钉墙组合支护模型，这 8 组的模型参数如表 2。

表 2 模型试验分组

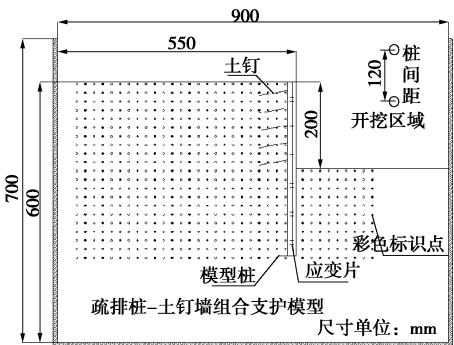
| Table 2 Groups for model tests |          |           |           |           |
|--------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 模型编号                           | 模型桩间距/mm | 模型土钉长度/mm | 土钉水平间距/mm | 土钉竖向间距/mm |
| 6                              | 120      | 66.7      | 20        | 40        |
| 7                              | 120      | 100       | 20        | 40        |
| 8                              | 120      | 133.3     | 20        | 40        |
| 9                              | 120      | 200       | 20        | 40        |
| 10                             | 80       | 66.7      | 20        | 40        |
| 11                             | 160      | 66.7      | 20        | 40        |
| 12                             | 120      | 66.7      | 20        | 20        |
| 13                             | 120      | 66.7      | 40        | 20        |

试验中采用外径 20 mm，内径 14 mm 的铝管制作模型中的疏排桩，桩内壁布置弯曲应变片，桩表面经打磨后的实际外径为 18 mm，桩长为 400 mm，杨氏模量为 70 GPa。采用 1 mm 钢丝打磨后在表面粘贴土颗粒来制作模型中的土钉，实际外径约为 1.8~2.3 mm。采用 0.3 mm 的铝板模拟混凝土面层，试验模型剖面图和实物图如图 5 所示。各模型材料参数如表 3 所示。

表 3 有限元模型材料参数

| Table 3 Material parameters of FEM model |                        |              |   |
|--|------------------------|--------------|---|
| 模型材料                                     | 弹性模量<br>$E/\text{MPa}$ | 泊松比<br>$\nu$ | 重度<br>$\gamma /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ |
| 桩（铝管）                                    | 70000                  | 0.2          | 27  |
| 土钉                                       | 210000                 | 0.2          | 78  |
| 面层（铝板）                                   | 70000                  | 0.2          | 27  |
| 土体                                       | 30                     | 0.35         | 19  |

离心机加载时，先将离心加速度预加载到 10g，检查设备及传感器工作状态，保证正常的情况下继续加载到 30g，之后按每级 10g 分步加载，每步加载到预定加速度值后运行 10 min，然后加载下一级。最大加载到 120g，期间一旦发现模型破坏，即刻停机。



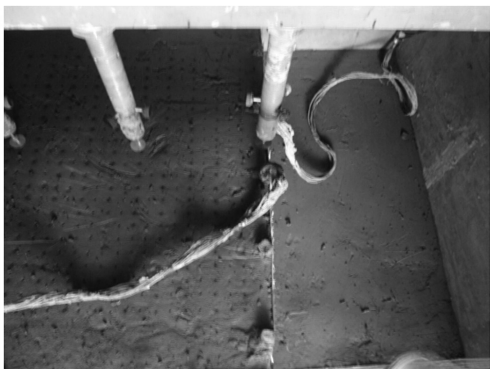


图 5 基坑离心机模型

Fig. 5 Centrifuge models of foundation pit

3 计算结果对比

采用与离心机模型一致的模型尺寸、模型参数及加载工况后,有限元强度折减法计算结果中的增量位移场云图能清楚地反映边坡失稳时的滑动面形状,如图 6 所示即为模型试验 10 在最大离心加速度  $n=80g$  时的增量位移云图。

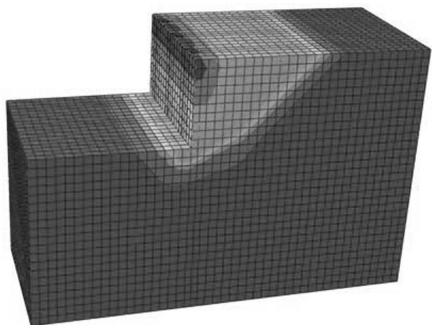


图 6 疏排桩-土钉墙组合支护基坑增量位移场云图 (离心机试验 10)

Fig. 6 Contours of incremental displacement (model test 10)

从图 6 可以看出,滑裂面为绕过坑底且过桩身的近似圆弧,最大滑裂面位置距离坑壁约 270 mm,要远大于离心机试验结果的 120 mm。可见,从滑裂面位置来考虑,强度折减法计算疏排桩-土钉墙组合支护基坑稳定性效果并不明显。

假定在离心机试验中,模型失稳破坏时的安全系数为 1,基于这 8 组疏排桩-土钉墙组合支护基坑离心机模型,由有限元强度折减法计算得到的整体稳定安全系数与刘斌(2011)方法及离心机模型试验结果的对比关系如表 4 所示,其中  $n$  为最大离心加速度。

由表 4 可知,无论是有限元强度折减法还是刘斌(2011)提出的计算方法,在计算疏排桩-土钉墙组合支护基坑整体稳定安全系数时,计算效果都不好;与有限元强度折减法相比,刘斌(2011)的计算方法与

试验结果更为接近。

表 4 疏排桩-土钉墙组合支护基坑整体稳定安全系数

Table 4 Comparison of overall stability safety factor

| 离心机模型<br>试验编号  | 安全系数  |          |     |
|----------------|-------|----------|-----|
|                | 强度折减法 | 刘斌(2011) | 试验值 |
| 6 ( $n=60g$ )  | 0.64  | 0.72     | 1   |
| 7 ( $n=80g$ )  | 0.75  | 0.68     | 1   |
| 8 ( $n=90g$ )  | 0.59  | 0.73     | 1   |
| 9 ( $n=120g$ ) | 0.53  | 0.69     | 1   |
| 10 ( $n=80g$ ) | 0.62  | 0.59     | 1   |
| 11 ( $n=50g$ ) | 0.67  | 0.78     | 1   |
| 12 ( $n=80g$ ) | 0.73  | 0.82     | 1   |
| 13 ( $n=40g$ ) | 0.56  | 0.71     | 1   |

笔者分析刘斌(2011)方法产生误差的原因有:

①假定条件产生的误差,如假定滑动面为圆柱面及滑动土体为不变形的刚体;②忽略了所有土条间的作用力,不能满足所有的平衡条件等。而有限元强度折减法产生误差的原因可能有:①建模时桩、土钉和面层采用线弹性模型,而实际材料的应力-应变关系和几何边界条件都是非线性的;②土体采用莫尔-库仑模型没有考虑应力路径,不包含土体的所有非线性特性;③离散误差,有限元网格划分得越细,引起的离散误差越小,但考虑到计算效率,单元不可能过于细化;④加载时每级荷载下运行 600 s,而离心机试验中每级荷载加载 10 min 存在时间效应。

4 结 语

本文在简要阐述疏排桩-土钉墙组合支护结构的工作原理、工程应用以及离心机模型试验的基础上,对这种复合土钉支护结构的整体稳定性分析计算方法进行了讨论。

在分析滑裂面位置时,通过对有限元强度折减法计算模型得到的增量位移云图与离心机模型试验结果进行对比,发现强度折减法计算疏排桩-土钉墙组合支护基坑稳定性效果并不明显。

在计算疏排桩-土钉墙组合支护基坑整体稳定安全系数时,无论是有限元强度折减法还是刘斌(2011)提出的计算方法,计算结果均不理想;相较于有限元强度折减法,刘斌(2011)的计算方法与离心机试验结果更为接近。故建议优先使用刘斌(2011)方法分析该支护基坑的整体稳定性。

因此,对于疏排桩-土钉墙组合支护基坑整体稳定性分析还有待进一步研究完善。由于本文采用的试验土样为灰色砂质粉土,进一步研究还可以考虑其他土层条件或土体分层等情况下的计算分析。

## 参考文献:

- [1] 吴忠诚, 杨志银, 罗小满, 等. 疏排桩锚-土钉墙组合支护结构稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 3607 - 3613. (WU Zhong-cheng, YANG Zhi-yin, LUO Xiao-man, et al. Stability analysis of scattered row pile-soil-nailed wall protection structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3607 - 3613. (in Chinese))
- [2] 杨志银, 张俊. 复合土钉墙技术在深圳的应用与发展[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 2): 1673 - 1676. (YANG Zhi-yin, ZHANG Jun. Development and application of composite soil nailing walls in Shenzhen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S2): 1673 - 1676. (in Chinese))
- [3] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 407 - 411. (LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 407 - 411. (in Chinese))
- [4] 古海东, 杨敏, 孙宽, 等. 强度折减法在排桩支护结构稳定性分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(6): 1168 - 1172. (GU Hai-dong, YANG Min, SUN Kuan, et al. The application of Strength-reduction method in stability analysis of row pile retaining structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(6): 1168 - 1172. (in Chinese))
- [5] 刘斌, 杨敏. 疏排桩-土钉墙组合支护结构的计算参数与支护特性[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊 1): 1372 - 1376. (LIU Bin, YANG Min. Analysis of parameters and retaining characteristics of composite structure with scattered piles and soil nailing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S1): 1372 - 1376. (in Chinese))
- [6] 刘金龙, 栾茂田. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土工程学报, 2005, **26**(8): 1346 - 1348. (LIU Jin-long, LUAN Mao-tian. Discussion on criteria for evaluating stability of slope in elasto-plastic FEM based on shear strength reduction technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **26**(8): 1346 - 1348. (in Chinese))

(本文责编 明经平)