

# 疏排桩-土钉墙基坑支护中土钉墙加固效果试验研究

杨敏<sup>1,2</sup>, 古海东<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 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:** 采用同济大学中型岩土离心机进行了5组疏排桩-土钉墙组合支护基坑的离心机模型试验。离心机模型试验结果表明: 组合支护结构中土钉能够显著提高桩间土体稳定性。土钉长度对疏排桩-土钉墙组合支护基坑稳定性、破坏模式以及桩间土拱效应影响显著。在本文研究的土性和基坑条件下, 当土钉长度和基坑高度之比( $L/H$ )为0.33时, 桩间土拱效应明显, 桩间土体滑裂面形态与疏排桩支护结构形似, 当 $L/H$ 为0.67时, 桩间土拱效应不明显, 滑裂面形态与土钉墙支护结构相似。随着土钉长度的增加, 疏排桩-土钉墙组合支护基坑中的排桩内力逐渐减小。

**关键词:** 疏排桩; 土钉墙; 破坏模式; 桩身内力; 离心机模型试验

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0001-06

**作者简介:** 杨敏(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为深基坑及桩基工程。E-mail: yangmin@mail.tongji.edu.cn。

## Centrifuge tests on soil-nailing reinforcing effect in scattered row piles and soil nailing for excavations

YANG Min<sup>1,2</sup>, GU Hai-dong<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A centrifuge study on pile-soil nailing (PSN) is carried out by Tongji University. The results of five groups of tests performed on the centrifuge in Tongji University show that the soil nailing of PSN can greatly increase the stability of cuttings. The length of soil nails has significant effects on the stability, failure mode and soil-arching effect of PSN. When the ratio of the nail length to the excavation depth ( $L/H$ ) is 0.33, the soil-arching effect is very obvious, and the sliding surface morphology of PSN is similar to that of scattered pile retaining structure. However, when the  $L/H$  ratio is 0.67, the soil-arching effect is not obvious, and the sliding surface morphology of PSN is similar to that soil-nailing retaining structure. The pile internal forces of PSN decreases with the increase of the length of soil nails.

**Key words:** scattered pile; soil-nailing wall; failure mode; pile internal force; centrifugal model test

## 0 引言

疏排桩支护结构具有排桩抗弯能力强的优点, 但桩间距受到桩间土体滑移失稳的限制; 土钉墙支护施工技术施工简便、经济高效, 但其变形难以有效控制, 支护深度有限。将疏排桩与土钉墙组合, 形成的疏排桩-土钉墙组合支护结构, 即应用土钉墙支护疏排桩桩间土体, 可以结合排桩与土钉墙的优点, 提高疏排桩间土体的稳定性, 同时从土钉墙的应用角度来讲, 设置排桩可以减小土钉墙的变形, 拓展了土钉墙的支护深度。目前, 疏排桩-土钉墙组合支护结构已在工程实践中广泛应用, 但是其加固机理、荷载传递路径以及破坏模式还有待深入研究<sup>[1-8]</sup>。

本文通过1组无支护基坑、1组排桩支护基坑、1组土钉墙支护基坑和2组疏排桩-土钉墙组合支护基

坑的离心机模型试验, 研究了不同支护结构的破坏模式, 探讨了土钉墙在疏排桩-土钉墙组合基坑支护中的加固效果。

## 1 离心机模型加工和试验分组

### 1.1 试样制备

离心机模型试验在同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室中的TLJ-150复合型岩土离心机上进行。试验用土取自上海杨浦区五角场的砂质粉土, 该土样的级配曲线如图1所示。

本次离心机试验制备含水率为40%的饱和土样,

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972179)

收稿日期: 2012-08-23

土样的物理力学性质如表 1 所示。在  $1g$  ( $g$  为重力加速度) 状态下, 在净空为  $700\text{ mm} \times 900\text{ mm} \times 700\text{ mm}$  (高) 的模型箱中, 完成模型制备。

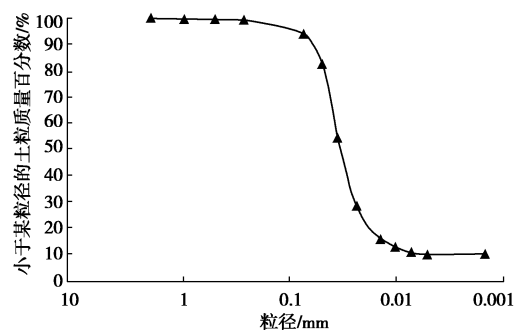


图 1 试验用土级配曲线

Fig. 1 Distribution curve of test soils

表 1 土样的物理力学特性

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

比重	含水率 /%	密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )
2.7	40	1.8	7	33.5

在填土前, 模型箱两侧用凡士林黏贴双层聚四氟乙烯薄膜以减小侧壁摩擦。模型中所用的桩采用外径为  $20\text{ mm}$ , 内径  $14\text{ mm}$  的铝管 (如图 2 所示), 桩内壁布置弯曲应变片, 桩表面打磨后的外径为  $18\text{ mm}$ , 桩长  $400\text{ mm}$ , 杨氏模量为  $70\text{ GPa}$ , 土钉选用直径为  $1\text{ mm}$  的钢丝 (如图 3 所示), 打磨后先涂抹 AB 双面胶, 然后黏上土颗粒, 黏上土颗粒后的土钉直径约为  $2\text{ mm}$ 。土钉墙的面板采用厚度为  $0.3\text{ mm}$  的整体铝片 (如图 4 所示) 杨氏模量为  $70\text{ GPa}$ , 填土时将排桩预先埋入土中。



图 2 模型桩

Fig. 2 Model piles

## 1.2 试验分组

试验分组如表 2 所示。由于离心加速度值的改变, 模型对应原型尺寸将发生变化, 不同离心加速度下所对应的试验原型尺寸如表 3 所示,  $40g$  时对应原型边坡高  $8\text{ m}$ ,  $100g$  时对应原型边坡高  $20\text{ m}$ 。整个支护结构模型简图如图 5 所示。

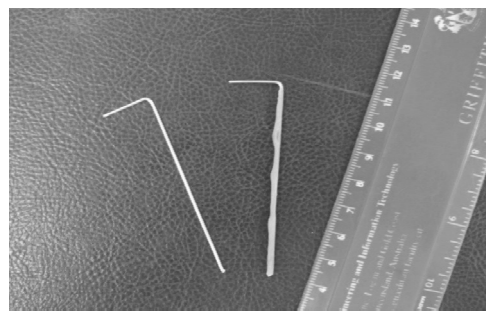


图 3 模型土钉

Fig. 3 Model nails

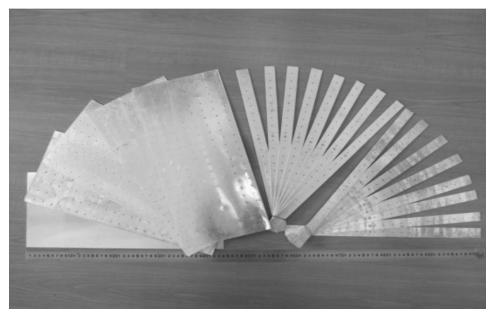


图 4 土钉墙面层

Fig. 4 Surface of soil-nailing wall

## 1.3 试验步骤

试验时, 将制备好的离心机模型吊入离心机吊篮, 进行模型固结试验 (模型比例尺为  $60$ ), 试验开始后离心加速度以  $10g$  为一级, 每级加速度下运转  $3\text{ min}$ , 最后在  $60g$  的离心加速度下进行固结试验, 固结完成的判断标准为模型箱中的孔隙水压力消散  $95\%$  以上。固结结束后将模型箱吊出, 开挖成高度为  $200\text{ mm}$ 、坡角为  $90^{\circ}$  的竖直基坑, 拆开模型箱侧壁, 在模型基坑侧表面用长度为  $1\text{ mm}$  的彩色大头针布置标记点, 如图 5 所示。标记点布置完毕后重新组装模型箱, 然后将模型箱吊入离心机吊篮, 在模型箱表面安装差动式位移传感器, 如图 6 所示。待模型箱中的位移传感器、土压力盒以及桩身应变片等接线通道调试完毕后, 开启离心机, 先在  $10g$  加速度下运转  $3\text{ min}$ , 观看离心机是否运转正常, 一切正常后从  $30g$  离心加速度开始以每  $5g$  为一级, 每级加速度下运转  $15\text{ min}$ , 如果模型在这一级加速度下破坏, 或者在期间的任意加速度下破坏, 试验即告结束。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏模式

不同支护结构加载破坏时的最大离心加速度如表 2 所示, 疏排桩 - 土钉墙组合支护基坑加载失稳最大离心加速度明显高于其他支护结构。

表 2 离心机模型试验结果

Table 2 Results of centrifugal 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	基坑原型 高度/m	最大离心 加速度/g
1	—	—	—	—	6	30
2	120	—	—	—	8	40
3	—	66.7	20	40	10	50
4	120	66.7	20	40	16	80
5	120	133.3	20	40	18	90

表 3 加速度与原型尺寸关系

Table 3 Relationship between acceleration and prototype size

加速度值/g	边坡高度 $H$ /m	疏排桩长度 $L$ /m	疏排桩直 径 $D$ /mm	土钉 长度 $l$ /m			土钉直径 $d$ /mm	土钉间距/m	
								水平向 $S_h$	竖直向 $S_v$
1	0.200	0.400	20	0.200	0.133	0.067	2	0.02	0.04
40	8.000	16.00	800	8.000	5.33	2.67	80	0.80	1.60
60	12.00	24.00	1200	12.00	8.00	4.00	120	1.20	2.40
80	16.00	32.00	1600	16.00	10.67	5.33	160	1.60	3.20
100	20.00	40.00	2000	20.00	13.33	6.67	200	2.00	4.00

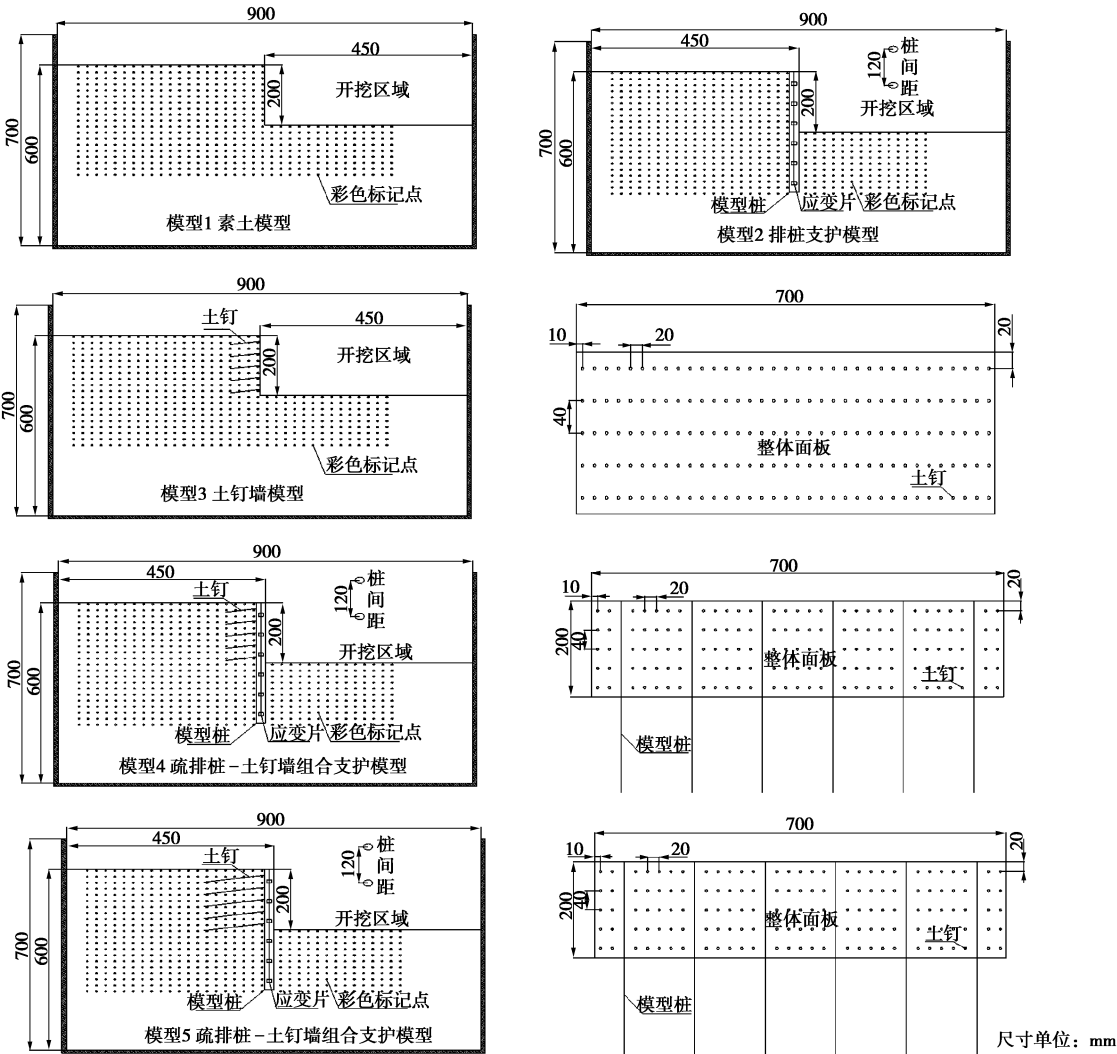


图 5 基坑离心机模型

Fig. 5 Centrifuge models of excavations

图 7 显示了无支护基坑、排桩支护基坑、土钉墙支护基坑以及 2 组疏排桩 - 土钉墙组合支护基坑离心机加载破坏后照片。图 8 为离心模型加载破坏后的滑裂面素描图。

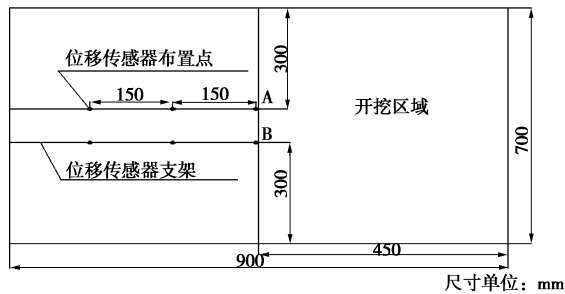
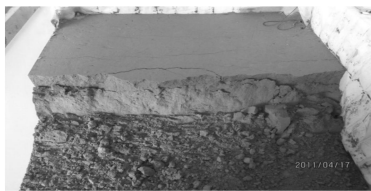
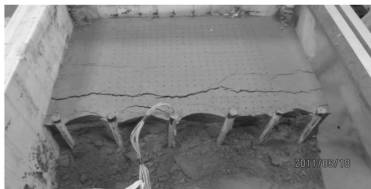


图6 位移传感器布置图

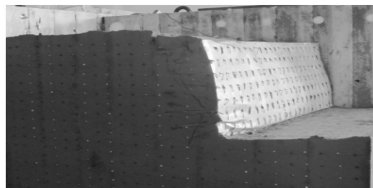
Fig. 6 Layout of displacement sensors



(a) 无支护基坑



(b) 排桩支护基坑



(c) 土钉墙支护基坑

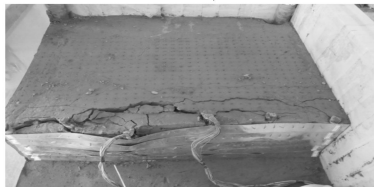
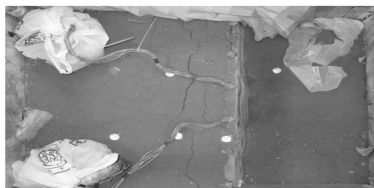
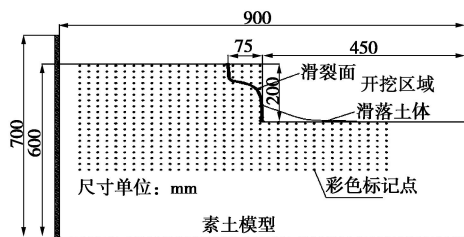
(d) 疏排桩-土钉墙组合支护基坑 ( $L/H=0.33$ )(e) 疏排桩-土钉墙组合支护基坑 ( $L/H=0.67$ )

图7 离心机模型试验后基坑形态

Fig. 7 Shapes of excavation after centrifugal model tests



(a) 无支护基坑

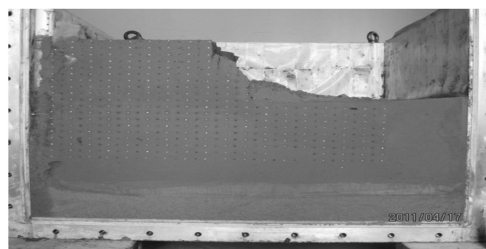
由图7和图8可知，无支护基坑的破坏特征为砂性土边坡塑性塌落，具体表现为瞬时的脆性整体滑裂和塌落，滑裂土体散碎；疏排桩支护基坑，桩间土体的失稳也具有砂性土边坡塑性塌落的特征，滑裂土体散碎，桩间土体具有明显的拱效应，最大拱高约为22 mm，由于受土拱效应的影响，滑裂面在边坡上部呈现弧形，下部受土拱效应影响小，滑裂面近似斜坡，滑裂面在边坡上部为直立土拱曲面，在边坡下部为平面斜坡；土钉支护基坑，土钉以箍束骨架的形式在钉-土复合加固区中起到了摩擦加筋和注浆加固的作用，提高了土坡的整体刚度与稳定性，其失稳表现为渐进的具有一定延性的整体滑裂，破坏特征为渐进性砂性土边坡塑性塌滑，塌滑范围比素土边坡塌滑范围大，滑裂面比较完整，滑裂面可简化为圆弧面；疏排桩-土钉墙组合支护基坑，由于桩间土钉墙的设置，提高了桩间土体的稳定性，改善了桩间土体特性，破坏特征为渐进性砂性土边坡塑性塌滑，包括2种类型：当桩间土钉长度较短时（如图7(d)所示），桩间土拱效应明显，最大拱高约为12 mm，桩间土体滑裂面形态与疏排桩支护结构形似，但由于土钉墙的存在，土体稳定性提高，土体差异变形减小，与疏排桩支护结构相比，在桩间距相等的情况下，土拱直立深度变大，土拱矢高变小；当桩间土钉长度较长时（如图7(e)所示），桩间土拱效应不明显，滑裂面形态与土钉墙支护结构相似，滑裂面为圆弧滑裂面，但由于疏排桩的存在，在接近基坑底部的范围，桩后土体将被遮拦留存。

## 2.2 桩身内力

根据换算公式(1)可以将模型桩桩身弯曲应变读数换算出疏排桩支护结构以及疏排桩与土钉墙组合支护结构中模型桩在不同离心加速度下的桩身弯矩，图9为离心加速度为30g时排桩支护结构（模型2）与2组疏排桩-土钉墙组合支护结构（模型4与模型5）的桩身弯矩分布。

$$M = \frac{EI\varepsilon}{y} = \frac{n^3 E\pi(D^4 - d^4)\varepsilon}{64D/2}, \quad (1)$$

式中， $EI$  为模型桩的抗弯刚度， $D$ 、 $d$  为不同离心加



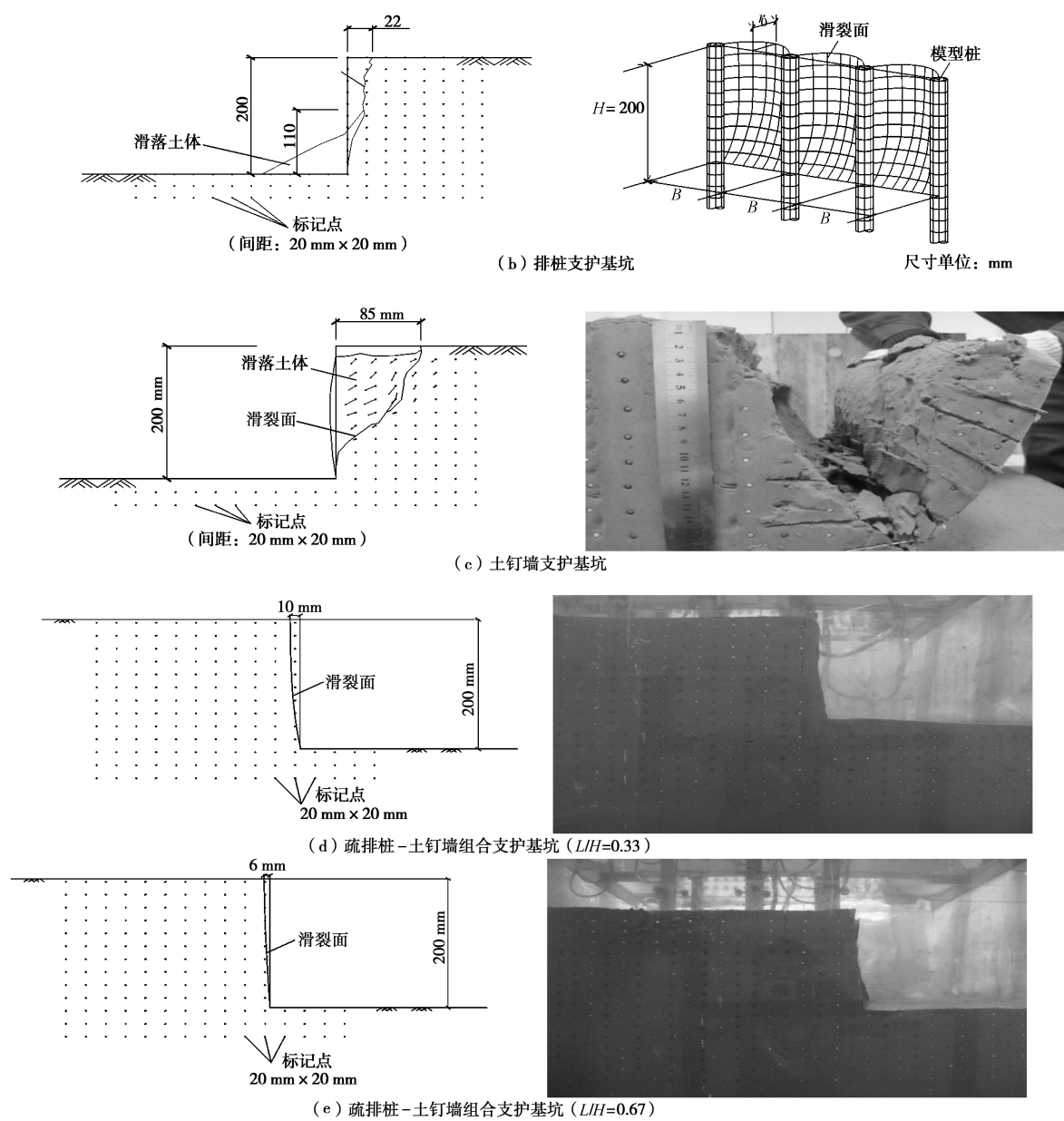


图 8 试验后模型破裂面素描图

Fig. 8 Failure surfaces of models after tests

速度下对应的模型桩外径和内径,  $n$  为离心机加速度,  $\varepsilon$  为弯曲应变实测值。

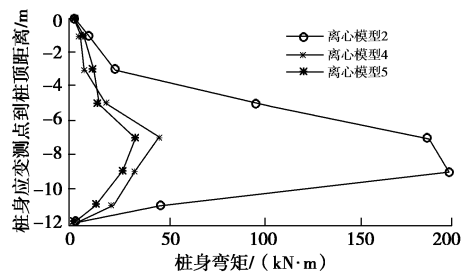


Fig. 9 Distribution of internal forces of piles under different supporting forms

由图 9 可知, 疏排桩支护结构的桩身弯矩要比同样桩间距下的疏排桩 - 土钉墙组合支护结构大 3 倍左

右, 这是因为对于疏排桩支护基坑, 桩间土压力通过土拱效应传递到桩上, 排桩承担了整个支护结构的绝大部分荷载, 而对于疏排桩 - 土钉墙组合支护基坑, 由于土钉墙的存在, 桩间土体荷载首先由土钉墙承担, 因此排桩上承担的土压力明显减小。随着土钉长度的增加, 疏排桩 - 土钉墙组合支护基坑桩间土拱效应越来越不明显, 因土拱效应而传递到桩身的土压力变小, 因此随着土钉长度的增加, 疏排桩 - 土钉墙组合支护结构中的排桩内力逐渐减小。

### 3 结 论

通过一组无支护基坑、一组疏排桩支护基坑、一组土钉墙支护基坑以及 2 组疏排桩 - 土钉墙组合支护基坑的离心机模型试验, 主要得出以下结论:

(1) 疏排桩-土钉墙组合支护基坑稳定性明显高于疏排桩支护和土钉墙支护基坑,土钉长度对组合支护结构稳定性和破坏模式影响显著,随着土钉长度的增加,组合支护基坑破坏模式由竖排桩支护结构破坏模式向土钉墙破坏模式转变。

(2) 土钉长度对疏排桩-土钉墙组合支护基坑桩间土拱效应影响显著,当土钉较短时( $L/H=0.33$ )桩间土拱效应明显,当土钉较长时( $L/H=0.67$ )时桩间土拱效应不明显。

(3) 对于疏排桩-土钉墙组合支护基坑,由于土钉墙的存在,桩间土体荷载首先由土钉墙承担,因此桩身内力较疏排桩支护基坑明显减小;随着土钉长度的增加,疏排桩-土钉墙组合支护结构桩间土拱效应越来越不明显,桩身内力逐渐减小。

#### 参考文献:

- [1] 杨敏,刘斌.疏排桩-土钉墙组合支护结构工作原理[J].建筑结构学报,2011,32(2):126-133.(YANG Min, LIU Bin. Retaining characteristics of composite structure with scattered piles and soil nailing[J]. Journal of Building Structure, 2011, 32(2): 126-133. (in Chinese))
- [2] 刘斌,杨敏,杨志银,等.疏排桩-土钉墙组合基坑支护结构设计与实践[J].土木工程学报,2010,43(10):106-114.(LIU Bin, YANG Min, YANG Zhi-yin, et al. Design and practice of composite structure with scattered row piles and soil nailing for pit-protection[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 106-114. (in Chinese))
- [3] TERAMOTO K, TAGA N, NARUSE T, et al. Model loading tests of reinforced slope with steel bars[C]// International Conference on Earth Reinforcement Practice. Fukuoka, 1992: 561-566.
- [4] FRYDMAN S, BAKER R, LEVY A. Modeling the soil nailing-excavation process[C]// Proceedings of International Conference Centrifuge 94. Singapore, 1994: 669-674.
- [5] TEI Kouji. A study of soil nailing in sand[D]. Oxford University, 1993.
- [6] 安关峰.深基坑疏排桩支护应用分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):1044-1048.(AN Guan-feng. Application and analysis of sparse pile support for deep foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 1044-1048. (in Chinese))
- [7] 周德培,肖世国,夏雄.边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J].岩土工程学报,2004,26(1):132-135.(ZHOU De-pei, XIAO Shi-guo, XIA Xiong. Discussion on rational spacing between adjacent anti-slide piles in some cutting slope projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 132-135. (in Chinese))
- [8] 金钢锋,屠毓敏,阮长青.土钉基坑支护中疏排桩抗滑效应研究[J].岩土力学,2005,26(4):577-579.(JIN Gang-feng, TU Yu-min, RUAN Chang-qing. Study on anti-sliding effect of the cattered row piles in soil nailing wall pit-protection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 577-579. (in Chinese))

(本文责编 明经平)