

引用本文:申 翊,徐文博,董志伟,等.深基坑剪力键支护模型优化研究[J].建筑科学与工程学报,2020,37(5):193-202.

SHEN Hong, XU Wen-bo, DONG Zhi-wei, et al. Optimization Research on Deep Foundation Pit Shear Bond Supporting Model[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 193-202.

DOI:10.19815/j.jace.2019.10058

深基坑剪力键支护模型优化研究

申 翊¹, 徐文博¹, 董志伟¹, 雷美清², 余秀玲¹

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:为寻求深基坑剪力键支护模型的优化形式,在剪力键支护体系构想与模型试验的基础上,设计了3组剪力键与直立桩之间不同组合形式的试验方案,在模拟基坑开挖过程中,对各方案中支护模型的桩顶水平位移、桩身内力及基坑外侧填土表面的沉降进行监测,同时设计了4个系列12组剪力键模型方案进行有限元数值模拟。结果表明:斜向桩与腰梁连接的节点位于直立桩桩身处的剪力键组支护效果优于斜向桩与腰梁连接的节点位于相邻直立桩中间的剪力键组;腰梁位于直立桩上部的剪力键组支护效果优于腰梁位于直立桩中部和下部的剪力键组;腰梁高度对支护效果的影响大于斜向桩与直立桩连接节点位置的影响;剪力键模型的支护效果与斜向桩和竖向的夹角非正相关,并且在实际工程中夹角越大所占用的地下空间越大,基于数值模拟可认为斜向桩与竖向的夹角 30° 为剪力键支护结构的适宜角度;斜向桩与腰梁连接的节点位于直立桩桩身处、斜向桩与竖向夹角 30° 且腰梁位于直立桩上部的剪力键组是较优的支护形式,这些成果可为剪力键支护技术的开发与应用中提供借鉴。

关键词:深基坑;剪力键支护模型;桩顶水平位移;桩身弯矩;支护形式

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)05-0193-10

Optimization Research on Deep Foundation Pit Shear Bond Supporting Model

SHEN Hong¹, XU Wen-bo¹, DONG Zhi-wei¹, LEI Mei-qing², YU Xiu-ling¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: In order to find the optimal form of deep foundation pit shear bond supporting model based on the conception and model test of the shear bond supporting system in the early stage, a scheme including 3 tests for various combinations of shear bonds and vertical piles was designed. In the process of simulating the foundation pit excavation, the horizontal displacement of the pile top, the internal force of the pile body and the settlement of the fill surface were monitored, and the finite element numerical simulations including 4 series and 12 sets of shear bond model plan were carried out. The results show that the shear bond supporting system which has the joint of

收稿日期:2019-10-27

基金项目:国家自然科学基金项目(11672215)

作者简介:申 翊(1969-),女,湖北武汉人,副教授,工学博士,E-mail:shenhong@whut.edu.cn.

通信作者:徐文博(1995-),男,湖北武汉人,工学硕士研究生,E-mail:328429360@qq.com.

the inclined pile and the waist beam close to upright pile is better than that with joint at the middle of the adjacent upright piles, the supporting system with the waist beam at the upper part of the upright piles is better than that at the middle or lower part of the upright piles, and the influence of the height of waist beam on supporting effect is greater than that of joint position between inclined pile and vertical pile. Supporting effect of the shear bond model is not positively correlated to the angle between inclined pile and vertical direction, and the larger the angle in practical engineering, the larger the underground space will be occupied, so it can be assumed that 30° will be an appropriate angle for the shear bond support system based on numerical simulations. Thus, the model group with joints connecting the oblique piles and the waist beam close to upright piles, the angle of 30° between inclined pile and vertical direction, and the waist beam at the upper part of the upright piles is considered to be a superior supporting system, which can be used for reference in the development and application of shear bond support technology.

Key words: deep foundation pit; shear bond supporting model; horizontal displacement of pile top; pile bending moment; supporting form

0 引言

随着中国城市现代化建设的快速推进及国民经济的高速发展,深、大基坑工程的规模不断增大,数量不断增多。20 世纪 90 年代起,向高空、地下争取空间已成为城市发展的主要趋势,地铁、隧道、商场、地下车库等各类地下工程在城市中心也逐渐普遍^[1-2]。因此对基坑的支护要求也越来越高,支护难度也越来越大,各种新型支护形式及技术应运而生。

沈振元^[3]在高水位地区应用搅拌桩复合土钉墙,为复杂环境下的基坑工程提供了一种有效支护手段。余佳骏等^[4]基于 BOTDA 传感技术,智能改造普通的 SMW 工法桩,令其能于基坑开挖过程中自动获得 H 型钢翼缘应变,并对某大型厂房在深厚软土中的基坑进行实例验证。王斌等^[5]在昆明某基坑已经施工完大部分支护结构,而原桩锚设计方案无法继续实施的情况下,采用“半逆作法”方案,有效地缩短了施工总工期。顾孟寒^[6]针对深基坑工程中采用冻结法施工中出现的冻土蠕变、冻胀、冻土墙的绝热和冻结帷幕设计等问题提出了连拱冻土墙的结构形式。郑刚等^[7]通过模型试验探究了多级支护的分离式、整体式、关联式 3 种破坏模式的特征。夏彪^[8]通过实际工程监测数据及有限元分析,探究 h 型双排桩的变形性状,并与传统双排桩进行对比分析。丁洁民等^[9]针对上海中心大厦基坑工程,采用结构受力性能均匀良好的圆筒形无内支撑基坑围护结构形式。黄茂松等^[10-12]指出将主体和支护联合的施工技术是城市化发展一种有效支护技术。李启民

等^[13]在支护桩设计位置钻打直孔,利用挤扩机具在桩孔壁上挤扩成支装或盘装腔模,形成了一种新型支护结构——挤扩支盘支护桩。徐源等^[14]将双排桩倾斜一定角度作为基坑支护结构,并进行了 8 组室内模型试验,在试验过程中对比不同角度、不同排距以及不同组合形式的双排桩受力性状。彭文祥等^[15]对 4 种不同排距的双排桩支护结构进行室内模型试验,探究双排桩的最优排距及内力。王鹏等^[16]基于深基坑微型桩支护模型试验,对深基坑开挖工程中及堆载时的支护结构和基坑边坡的力学变化特征和破坏形式进行了研究。张玉成等^[17]对 2 个基坑工程采用多种支护结构组合共用,为类似的软土基坑工程提供了指导性的设计思路。

当基坑开挖深度较大时,单排悬臂桩因桩身内力与桩顶位移过大而不适用;双排桩悬臂支挡深度可达 $9\sim 10\text{ m}$ ^[14],但当开挖深度更大时双排桩同样不再适用。申翊等^[18]考虑将部分悬臂桩抽出改为斜向桩,与剩余直立的悬臂桩用腰梁连接,即构成剪力键支护体系,在不影响主体地下结构施工的前提下,期望增大支护结构的整体刚度,减小桩顶位移及桩身内力,并用模型试验验证了剪力键支护结构相对单排悬臂桩的优势。本文在前期工作基础上研制了斜向桩与直立桩不同组合形式的剪力键支护模型,通过改变斜向桩与直立桩桩身的连接形式,对比分析不同组合形式的剪力键支护模型的桩顶位移、桩身弯矩及填土面沉降随开挖深度的变化规律,同时进行了有限元数值模拟,对各剪力键支护模型的支护效果进行对比,从而得出优化的剪力键支护形式。

1 模型试验

模型槽的尺寸对试验结果有着一定的影响,研究者针对不同的研究对象所采用模型槽的尺寸也各不相同^[19-21]。鉴于工程中常用到 $\phi 800@1\ 200\text{ mm}$ 的混凝土灌注桩,本次试验的模型桩选用 50 mm (外径) $\times 2\text{ mm}$ (壁厚)的 PVC 管,桩径比例 $1:16$ 。考虑试验槽的尺寸需大于最大开挖深度时模型桩潜在的最危险滑动面尺寸,将其设计为 2.5 m (长) $\times 1.3\text{ m}$ (宽) $\times 1.5\text{ m}$ (高),正面安置 1 块尺寸为 $1\ 200\text{ mm}$ (长) $\times 850\text{ mm}$ (宽) $\times 12\text{ mm}$ (厚)的钢化玻璃(图 1),试验槽底部铺设 20 cm 厚的垫层。



图 1 模型试验槽
Fig. 1 Model Test Channel

1.1 剪力键支护模型方案设计

考虑改变腰梁位置及斜向桩与腰梁连接的节点位置,按表 1 中剪力键支护模型方案进行试验。在模拟基坑开挖过程中,对模型桩桩顶水平位移、桩身内力及桩后填土表面沉降进行监测。

表 1 剪力键支护模型方案

模型方案	第 1 组	第 2 组	第 3 组
腰梁位置	直立桩上部	直立桩上部	直立桩中部
斜向桩与腰梁节点位置	相邻直立桩中间	直立桩桩身处	相邻直立桩中间
斜桩与竖向夹角/ $^{\circ}$	15		

第 1 组模型含直立桩 9 根、斜向桩 8 根,且每根斜向桩与腰梁连接的节点在相邻 2 根直立桩中间,直立桩长 1.3 m ,斜向桩长 0.9 m 。斜向桩与竖向夹角为 15° ,其桩底与直立桩桩底齐平,桩顶与直立桩通过角钢制作的腰梁相连接,与腰梁连接的节点处利用螺栓固定,腰梁与直立桩间也是利用螺栓固定,如图 2 所示。腰梁设置在桩底以上 87 cm 位置(腰梁位于直立桩上部)。

第 2 组模型含直立桩 9 根、斜向桩 9 根,斜向桩

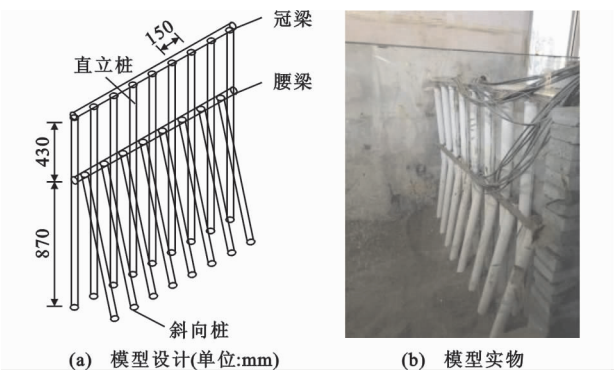


图 2 第 1 组剪力键模型

Fig. 2 The First Set of Shear Bond Model
通过腰梁固定在直立桩桩身处。第 2 组模型中直立桩与斜向桩的桩长以及连接角度、腰梁位置等均与第 1 组模型相同,主要区别在于斜向桩与腰梁连接节点的位置,如图 3 所示。

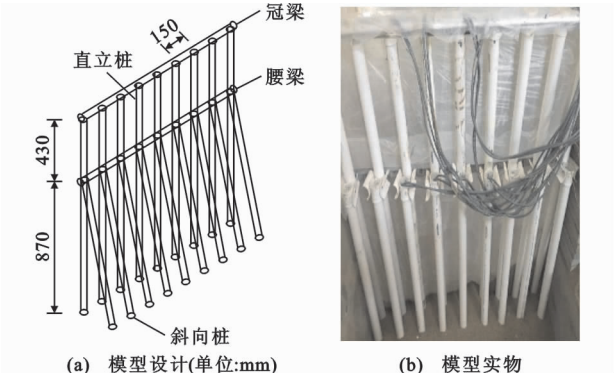


图 3 第 2 组剪力键模型

Fig. 3 The Second Set of Shear Bond Model
第 3 组模型与第 1 组相似,不同之处在于腰梁的位置及斜向桩的长度,其腰梁位于桩底以上 65 cm 处(腰梁位于直立桩桩身中部),斜向桩长 67 cm ,模型制作步骤与第 1 组相同。

在各组剪力键支护模型组装前,先分别选取 8 根测试桩(其中直立桩 4 根、斜向桩 4 根,每组模型最中间位置的 4 根作为测试桩),在桩身内壁沿桩长布设应变片,应变片间距为 $10\sim 15\text{ cm}$ 。

1.2 模型桩的标定

试验开始前需要先测定模型桩的弹性模量,本文采用简支梁加载试验的方法进行标定,确定模型桩的弹性模量 $E=2.34\text{ GPa}$ 。

1.3 试验步骤

(1)将剪力键支护模型按设计的位置放入试验槽内就位。

(2)采用落雨法填砂,人工移动漏斗,使砂均匀落下。每填筑 10 cm 厚停下来整平填砂表面,并静

置一段时间后继续填筑,每次填筑重复相同的操作步骤和时间,以确保填料的密实度一致,直到填至桩底以上 1.2 m 处。

(3)填砂完毕后在桩顶及拟开挖基坑外侧的砂土表面架设百分表,并将测试桩的应变片导线与应变采集仪相连,应变采集仪与电脑相连,完成后静置 2 d。

(4)分层开挖,每层开挖 10 cm,共开挖 80 cm。每层开挖完毕后整平砂土表面,静置 10~15 min 稳定后记录百分表读数。试验过程中若桩顶位移大于 40 mm 或发生基坑失稳现象应立即停止试验,并拍照记录。

2 试验结果与分析

2.1 桩顶水平位移及桩后土体沉降

前述 3 组剪力键模型的桩顶水平位移与基坑开挖深度的关系如图 4 所示。

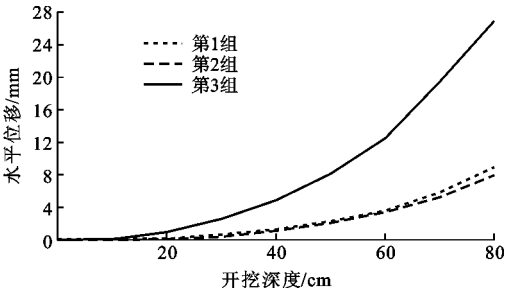


图 4 桩顶水平位移与开挖深度关系

Fig. 4 Relationship Between Horizontal Displacement of Pile Top and Excavation Depth

由图 4 可以看出:3 组模型的最大桩顶水平位移分别为 8.95、7.93、26.9 mm,位移随开挖深度增大而增大,但第 2 组和第 1 组的位移增长相比于第 3 组明显较缓,且第 2 组的位移略低于第 1 组。因此就桩顶水平位移而言,斜向桩与腰梁连接的节点位于相邻直立桩中间时,腰梁在直立桩上部的剪力键模型明显优于腰梁在直立桩中部的,而对于相同的腰梁位置,斜向桩与腰梁连接的节点位于直立桩桩身处的剪力键模型优于节点位于相邻直立桩中间的。

以上 3 组模型桩后填土表面沉降的比较如图 5 所示。由图 5 可以看出,桩后填土表面的沉降随开挖深度增加而增加,第 2 组模型桩后填土沉降最大值为 3.554 mm,第 1 组及第 3 组模型的桩后填土沉降最大值分别为 4.986、7.554 mm。显然就桩后填土表面沉降而言,第 2 组模型优于第 1 组,第 1 组模型优于第 3 组。

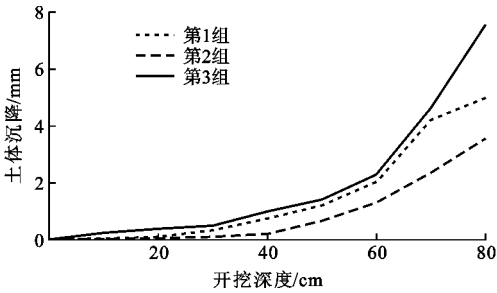


图 5 桩后填土表面沉降与开挖深度关系

Fig. 5 Relationship Between Fill Surface Settlement and Excavation Depth

因此,从桩顶水平位移及桩后填土表面沉降来看,第 2 组剪力键模型的支护效果较好。

2.2 桩身弯矩

试验中通过应变采集仪记录的桩身应变,结合所标定的模型桩弹性模量,可计算出基坑开挖过程中的桩身弯矩。

第 1 组剪力键模型的桩身弯矩与开挖深度关系如图 6 所示。

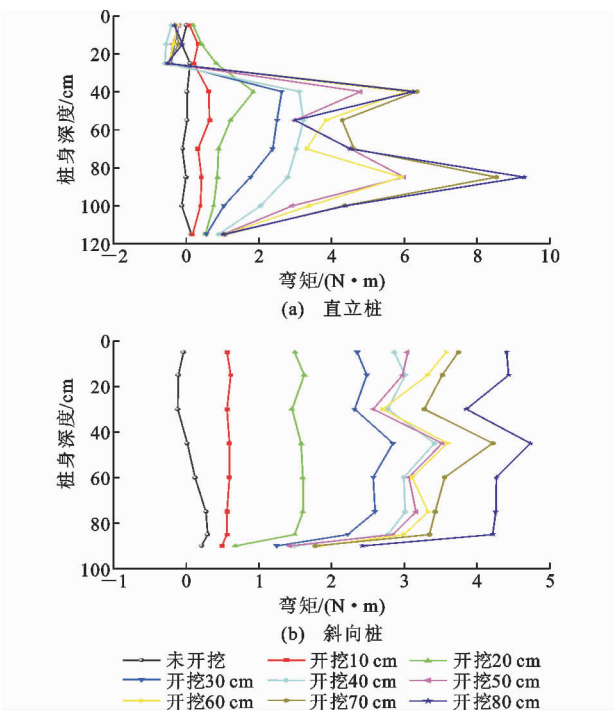


图 6 第 1 组模型桩身弯矩与开挖深度关系

Fig. 6 Relationship Between Bending Moment and Excavation Depth of the First Set of Model Piles

对于直立桩部分[图 6(a)],桩顶以下 25 cm 范围内的弯矩值较小(-0.5~0.5 N·m)。开挖深度 20 cm 以上时,在桩顶 25 cm 以下弯矩开始有明显的增长,开挖深度 50 cm 以上时,桩身弯矩存在 2 个极大值。开挖深度 40 cm 时,在桩身 25 cm 处出

现最大负弯矩 $-0.58\text{ N}\cdot\text{m}$,开挖深度 80 cm 时,在桩身 85 cm 处出现最大正弯矩 $9.30\text{ N}\cdot\text{m}$,桩底弯矩迅速减小收敛至 $1.03\text{ N}\cdot\text{m}$ 。对于斜向桩部分[图6(b)],桩顶弯矩随开挖深度增大。开挖深度 80 cm 时,斜向桩桩身 30 cm 处的极小值为 $3.86\text{ N}\cdot\text{m}$,桩身 45 cm 处出现最大正弯矩 $4.74\text{ N}\cdot\text{m}$,桩底弯矩减小收敛至 $2.43\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

第 2 组剪力键模型的桩身弯矩与开挖深度关系如图 7 所示。

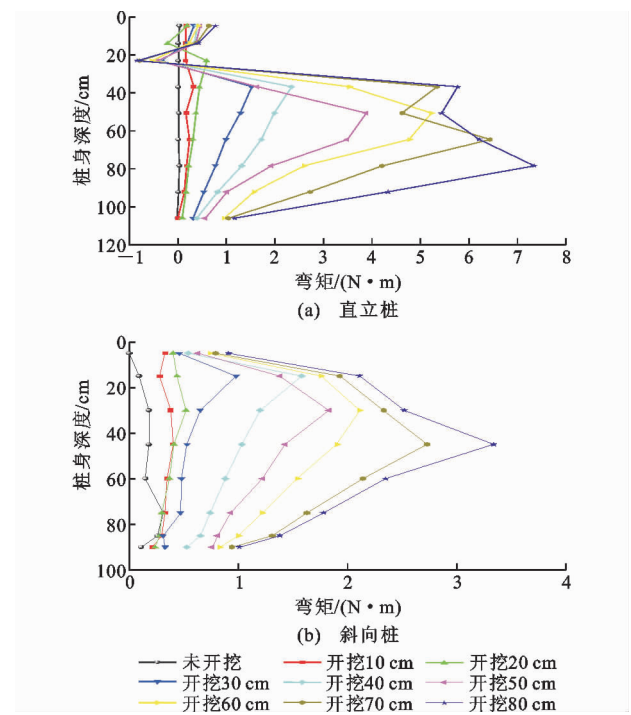


图 7 第 2 组模型桩身弯矩与开挖深度关系
Fig. 7 Relationship Between Bending Moment and Excavation Depth of the Second Set of Model Piles

对于直立桩部分[图 7(a)],桩顶以下 25 cm 范围弯矩值较小($-0.8\sim0.8\text{ N}\cdot\text{m}$)。开挖深度 70 cm 以上时,桩身出现弯矩的 2 个极大值点,随开挖深度的增加,最大弯矩点位置下移。当开挖深度 80 cm 时,在桩身 25 cm 处出现最大负弯矩 $-0.83\text{ N}\cdot\text{m}$,桩身 85 cm 处出现最大正弯矩 $7.35\text{ N}\cdot\text{m}$,桩底弯矩迅速减小收敛至 $1.2\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

对于斜向桩部分[图 7(b)],桩顶弯矩均较小($0\sim0.8\text{ N}\cdot\text{m}$),开挖深度 30 cm 以上时,桩身弯矩存在 1 个极值点,且该点随开挖深度的增加逐渐下移。开挖深度 80 cm 时,在桩身 45 cm 处出现最大弯矩 $3.34\text{ N}\cdot\text{m}$,桩底弯矩减小收敛至 $1.01\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

第 3 组剪力键模型的桩身弯矩与开挖深度关系如图 8 所示。

对于直立桩部分[图 8(a)],桩顶以下 25 cm 范

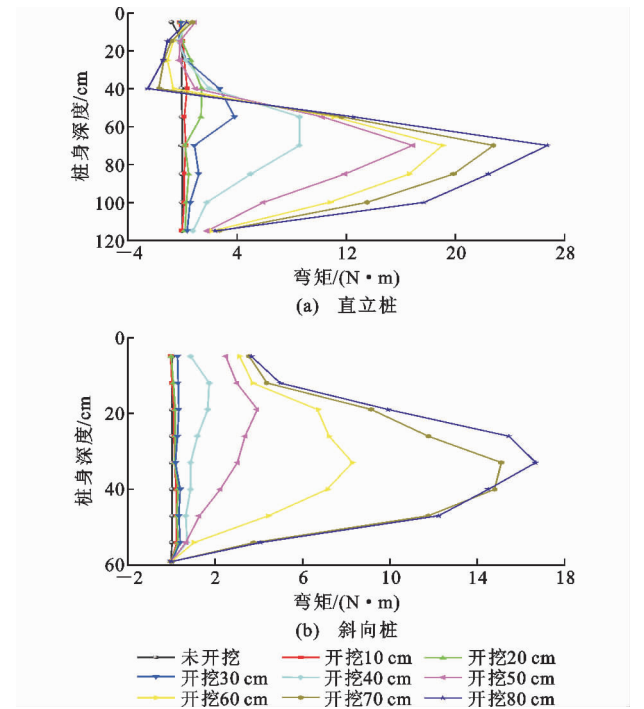


图 8 第 3 组模型桩身弯矩与开挖深度关系
Fig. 8 Relationship Between Bending Moment and Excavation Depth of the Third Set of Model Piles

围内弯矩值较小($-2.0\sim1.0\text{ N}\cdot\text{m}$)。当开挖深度达到 80 cm 时,直立桩在桩身 40 cm 处出现最大负弯矩 $-2.49\text{ N}\cdot\text{m}$,在桩身 70 cm 处出现最大正弯矩 $26.73\text{ N}\cdot\text{m}$,同时桩底弯矩迅速减小收敛至 $2.45\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

对于斜向桩部分[图 8(b)],开挖深度 30 cm 以内时桩身弯矩几乎为 0 ,桩顶弯矩随着开挖深度的增加而有所增大。开挖深度 40 cm 以上时,桩身弯矩存在 1 个极大值点,当开挖深度为 80 cm 时,在桩身 33 cm 处出现最大正弯矩 $16.67\text{ N}\cdot\text{m}$,桩底弯矩减小收敛至 0 。

从上述 3 组剪力键模型的桩身弯矩分布曲线不难发现,第 3 组模型中的直立桩与斜向桩的桩身最大弯矩均明显大于第 1 组和第 2 组模型中的相应弯矩。因此,从桩身承受的弯矩来看,腰梁高度对于支护效果的影响要大于斜向桩连接节点对支护效果的影响。

3 有限元数值模拟

本文采用 MIDAS/GTS 对基坑开挖的试验过程进行了数值模拟,与相应模型试验监测结果进行对比,探究不同组合形式的剪力键模型支护效果。

本次建模采用摩尔-库仑本构模型,将模型的前后侧面及左右侧面各截面法向位移设为 0 ,底面取

零位移全约束,上表面定义为自由面,无约束。桩与梁连接的各节点按固接处理。共设置了 4 个系列 12 组数值模拟,方案见表 2。模拟中所用材料参数如表 3 所示。

表 2 数值模拟方案
Tab. 2 Numerical Simulation Scheme

模拟组编号	腰梁位置	斜向桩与腰梁节点位置	斜向桩与竖向夹角/(°)
1-1	直立桩上部	相邻直立桩中间	15
1-2	直立桩中部		
1-3	直立桩下部		
2-1	直立桩上部	直立桩桩身处	15
2-2	直立桩中部		
2-3	直立桩下部		
3-1	直立桩上部	直立桩桩身处	30
3-2	直立桩中部		
3-3	直立桩下部		
4-1	直立桩上部	直立桩桩身处	45
4-2	直立桩中部		
4-3	直立桩下部		

注:上部为桩底以上 87 cm,中部为桩底以上 65 cm,下部为桩底以上 43 cm;模拟组 1-1、2-1 及 1-2 分别对应模型试验的第 1 组、第 2 组及第 3 组。

表 3 材料参数
Tab. 3 Material Parameters

名称	材料	E/MPa	ρ	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
冠(腰)梁	合金	70 000	0.25	76.93		
模型桩	PVC 管	2 340	0.34	14.00		
试验用砂	砂	20	0.30	18.30	0	35

注: ρ 为泊松比; γ 为重度; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

剪力键支护模型及基坑外侧土体的建模如图 9 所示。模型一共开挖 8 层,每层厚 10 cm。模拟基坑开挖完成后,可从计算结果中分别提取每组试验的桩身位移、弯矩及桩后填土的沉降。

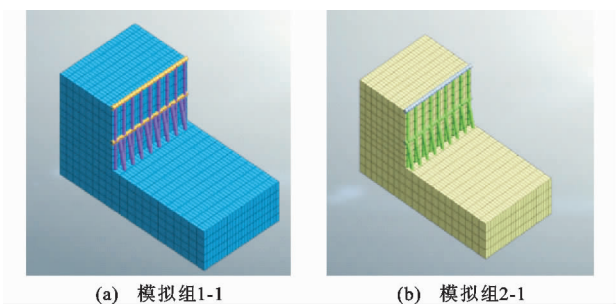


图 9 剪力键模拟

Fig. 9 Simulation of Shear Bond

数值模拟组 1-1、2-1、1-2 中剪力键模型的直立

桩桩身水平位移如图 10 所示。由图 10 可以看出,模拟组 1-2 中直立桩在相同开挖深度下各处的水平位移均要大于模拟组 1-1 和 2-1。桩身最大水平位移均发生在桩顶处,模拟组 1-1、2-1 及 1-2 的最大桩身水平位移分别为 7.29、6.35、13.05 mm,略低于对应模型试验中的 8.95、7.93、26.90 mm。数值模拟表明,开挖深度 30 cm 以内时,桩身水平位移极小,开挖深度 40 cm 以上时,直立桩上部位移增加明显。以开挖深度 80 cm 为例,模拟组 1-1 在桩顶以下 118 cm 范围内位移增加明显,模拟组 1-2 在桩顶以下 97 cm 范围内位移增加明显,模拟组 2-1 在桩顶以下 92 cm 范围内位移增加明显,可见斜向桩支撑在直立桩身处可更好地限制直立桩的水平位移,腰梁位置低对直立桩水平位移向下部的传递有一定制约作用,但同时直立桩上部位移增加也更明显。

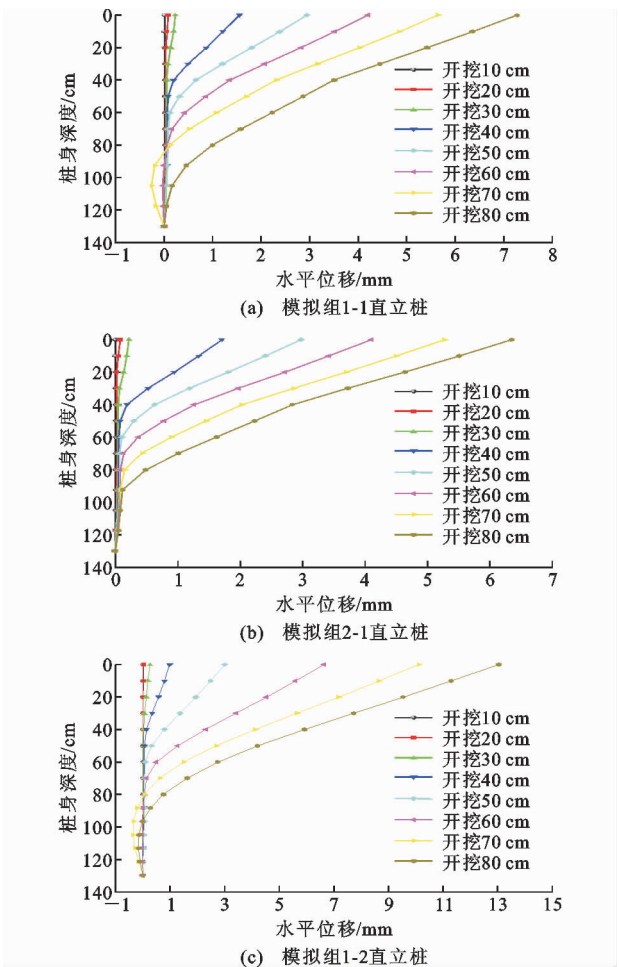


图 10 模拟的桩身水平位移

Fig. 10 Horizontal Displacement of Piles by Simulation

模拟组 1-1 剪力键模型弯矩分布如图 11 所示。由图 11(a)可知,直立桩在开挖深度 70 cm 时,桩身约 30 cm(从桩顶往桩底计)处出现最大负弯矩

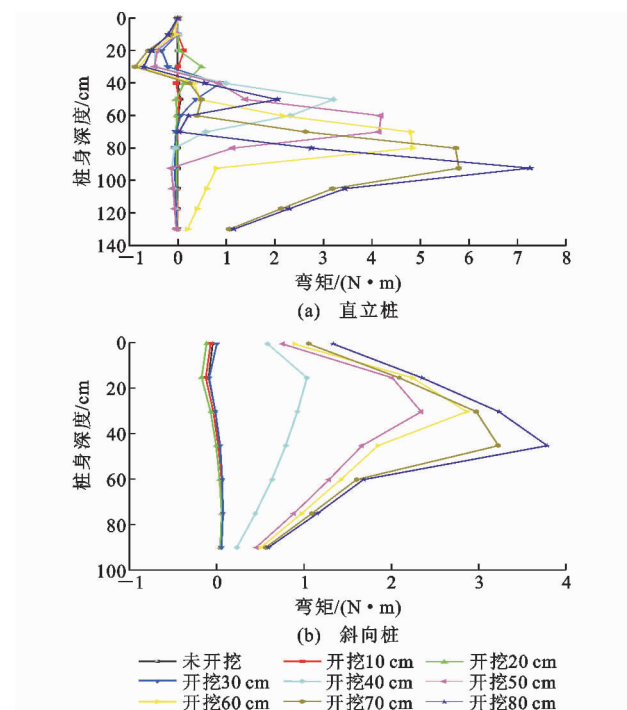


图 11 模拟组 1-1 中桩身弯矩

Fig. 11 Pile Bending Moment in Simulation Group 1-1

— $0.89 \text{ N} \cdot \text{m}$,开挖深度 80 cm 时,桩身约 90 cm 处出现最大正弯矩 $7.25 \text{ N} \cdot \text{m}$,桩底弯矩迅速减小收敛至 $1.15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。由图 11(b)可知,斜向桩在开挖深度 30 cm 以内时,桩身弯矩数值极小,开挖深度 20 cm 时,斜向桩桩身 15 cm(从斜向桩顶往斜向桩底计)处出现最大负弯矩 $-0.18 \text{ N} \cdot \text{m}$,开挖深度 40 cm 以上时,桩身出现弯矩极大值,且极值点位置随开挖加深逐渐下移,开挖深度 80 cm 时,桩身 45 cm 处出现最大正弯矩 $3.78 \text{ N} \cdot \text{m}$,桩底弯矩迅速减小收敛至 $0.59 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

模拟组 2-1 剪力键模型弯矩分布如图 12 所示,与图 11 模拟组 1-1 的桩身弯矩分布相似。开挖深度 80 cm 时,直立桩桩身约 30 cm 处出现最大负弯矩 $-0.81 \text{ N} \cdot \text{m}$,桩身约 90 cm 处出现最大正弯矩 $6.24 \text{ N} \cdot \text{m}$,桩底弯矩迅速减小至 $-0.43 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。斜向桩桩身 45 cm 处出现最大正弯矩 $3.07 \text{ N} \cdot \text{m}$,桩底弯矩迅速减小收敛至 $1.22 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

模拟组 1-2 剪力键模型弯矩分布如图 13 所示,与模拟组 1-1 的桩身弯矩分布相似,但其最大弯矩值比模拟组 1-1 的大。开挖深度 80 cm 时,直立桩桩身 30 cm 处出现最大负弯矩 $-0.9 \text{ N} \cdot \text{m}$,桩身 88 cm 处出现最大正弯矩 $7.93 \text{ N} \cdot \text{m}$,桩底弯矩迅速减小收敛至 $1.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。斜向桩桩身 27 cm 处出现最大正弯矩 $8.28 \text{ N} \cdot \text{m}$,桩底弯矩迅速减小收敛至

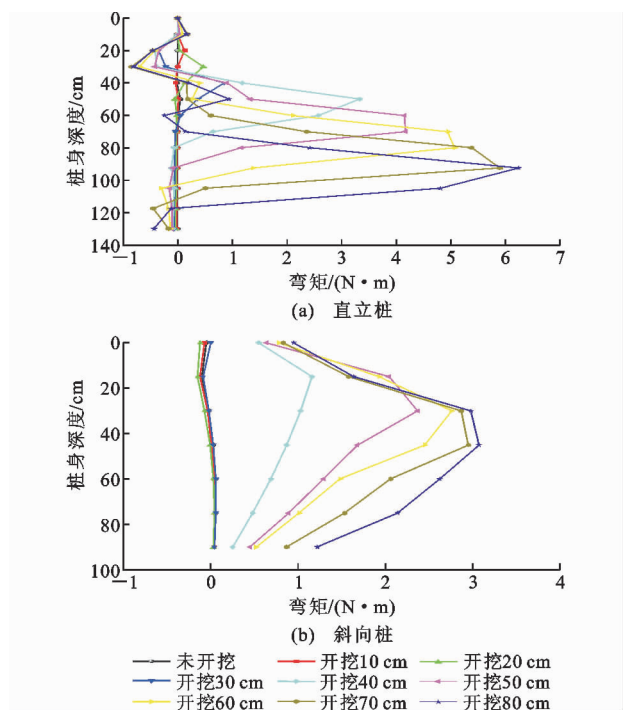


图 12 模拟组 2-1 中桩身弯矩

Fig. 12 Pile Bending Moment in Simulation Group 2-1

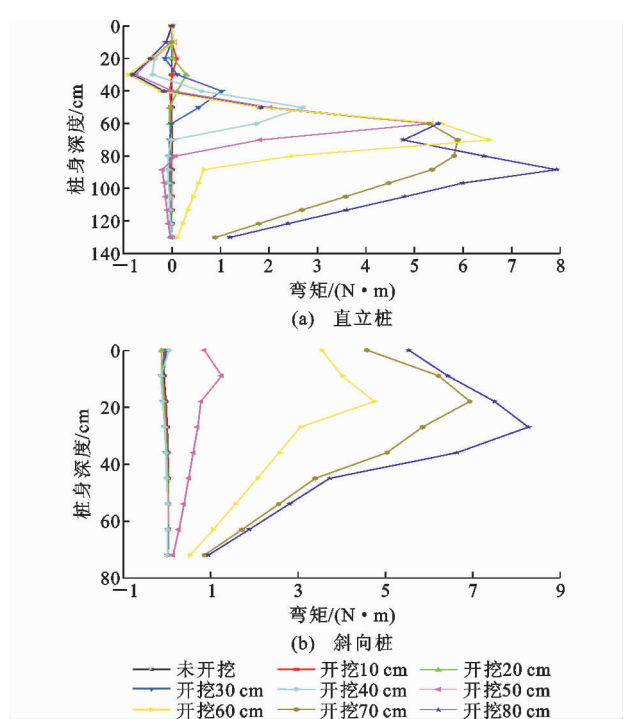


图 13 模拟组 1-2 中桩身弯矩

Fig. 13 Pile Bending Moment in Simulation Group 1-2

$0.95 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

从以上对比分析不难看出,3 组数值模拟中的直立桩桩顶水平位移以及直立桩和斜向桩的最大正负弯矩值均略小于对应的模型试验测量结果,但弯矩和位移的分布规律大致相同。将 3 组数值模拟结

果进行对比可以发现:模拟组 2-1 的桩身最大弯矩、最大水平位移、填土表面沉降均小于模拟组 1-1, 1-2,与对应模型试验中的观测结果一致。可见在占用相同地下空间且耗材基本相同的情况下,腰梁位于竖直桩桩身上部且斜向桩与腰梁连接的节点位于竖直桩桩身处的剪力键模型对基坑的支护性能更优。

表 2 中的 12 组数值模拟方案结果汇总于表 4。

表 4 剪力键模型数值模拟结果比较

Tab. 4 Numerical Simulation Results Comparison
Among Shear Bond Models

模拟组 编号	最大桩身弯矩/ (N·m)	桩顶水平位移/ mm	填土表面沉降/ mm
1-1	7.25	7.29	6.60
1-2	8.28	13.05	11.64
1-3	19.00	30.29	26.68
2-1	6.24	6.35	5.75
2-2	7.14	12.38	11.09
2-3	18.75	29.55	26.54
3-1	3.14	2.32	0.56
3-2	7.02	8.41	2.20
3-3	14.59	24.17	7.09
4-1	4.11	1.78	0.62
4-2	11.22	9.48	2.47
4-3	15.94	20.04	5.73

由表 4 可以看出,系列 2、系列 3、系列 4 的斜向桩与腰梁的连接节点均位于竖直桩桩身,将其模拟数据进行对比可以发现:腰梁位于竖直桩上部时,模拟组 3-1 的桩顶位移值略大于模拟组 4-1,小于模拟组 2-1,而最大桩身弯矩值、坑后土体沉降值均小于模拟组 2-1 与 4-1;腰梁位于竖直桩中部时,系列 3 的最大桩身弯矩值、水平位移值、土体沉降值均小于系列 2 与系列 4;腰梁位于竖直桩下部时,模拟组 3-3 的桩顶水平位移与坑后土体沉降大于模拟组 4-3。可见剪力键模型的支护效果与斜向桩在竖向的夹角非正相关,并且在实际工程中夹角越大剪力键所占用的地下空间越大,因此基于剪力键模型的数值模拟,理论上可认为斜向桩与竖向的夹角 30°为剪力键支护结构的适宜角度。

在所有模拟系列中,模拟组 3-1 的 3 项数值最小(除桩顶水平位移略大于模拟组 4-1),由此可见:腰梁高度相同、斜向桩与腰梁连接的节点位置靠近直立桩桩身处的模型性能优于节点在相邻 2 根直立桩中间的;斜向桩与腰梁连接的节点位置相同,腰梁位置较高的模型性能优于腰梁在低处的;腰梁高度

对于支护效果的影响程度要大于斜向桩与腰梁连接节点位置的影响。这与模型试验研究中所得出结论是一致的。

4 结 语

(1)剪力键模型中直立桩桩顶水平位移随基坑开挖深度的增加而增大。斜向桩支撑于直立桩桩身处可更好地限制直立桩的水平位移;腰梁位于低处对直立桩水平位移向下部的传递有一定的制约作用,但同时直立桩上部位移增加也更明显;腰梁位于高处可减少桩顶的水平位移。

(2)剪力键模型中斜向桩支承于直立桩桩身处有利于削弱最大弯矩。腰梁位于低处则直立桩和斜向桩承受的最大弯矩均相对较大,腰梁位于高处有利于减少桩身弯矩。

(3)对剪力键模型的支护性能来说,腰梁位置的影响程度大于剪力键与腰梁连接的节点位置的影响。

(4)剪力键模型的支护效果与斜向桩和竖向的夹角非正相关,基于数值模拟可认为斜向桩与竖向的夹角 30°为剪力键支护结构的适宜角度。

(5)在占用相同地下空间且耗材基本相同的情况下,腰梁位置较高且斜向桩与腰梁连接的节点越靠近直立桩桩身,斜向桩与竖向的夹角接近 30°时,该剪力键模型支护效果较优,这些成果在剪力键支护技术的开发与应用中可资借鉴。

参考文献:

References:

[1] 龚晓南. 21 世纪岩土工程的发展展望[J]. 岩土工程学报,2000,22(2):238-242.
GONG Xiao-nan. Prospects for the Development of Geotechnical Engineering in the 21st Century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2000,22 (2):238-242.

[2] 王海波,蔡志刚. 我国深基坑工程发展现状与展望 [J]. 天津建设科技,2013,23(4):32-33.
WANG Hai-bo, CAI Zhi-gang. Development Status and Prospect of Deep Foundation Pit Engineering in China[J]. Tianjin Construction Science and Technology,2013,23(4):32-33.

[3] 沈振元. 复合土钉墙在基坑中的应用[J]. 建筑科学, 2012,28(增 1):165-167,175.
SHEN Zhen-yuan. Application of Composite Soil Nailing Wall in Foundation Pit[J]. Building Science, 2012,28(S1):165-167,175.

- [4] 余佳骏,陈 静,彭 智,等. 智能 SMW 工法桩在基坑工程中的应用[J]. 低温建筑技术,2016,38(12):117-119.
YU Jia-jun, CHEN Jing, PENG Zhi, et al. Application of Intelligent SMW Pile in Foundation Pit Engineering[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016, 38(12):117-119.
- [5] 王 斌,张领帅. 复杂环境基坑半逆作法支护结构的探讨[J]. 土工基础,2016,30(5):533-537.
WANG Bin, ZHANG Ling-shuai. Application of the Semi Reverse Construction Method in Complex Supporting Structures[J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(5):533-537.
- [6] 顾孟寒. 冻结法在深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程技术,2000(2):80-83.
GU Meng-han. Application of Freezing Method in Deep Foundation Pit Engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2000(2):80-83.
- [7] 郑 刚,聂东清,程雪松,等. 基坑分级支护的模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(5):784-794.
ZHENG Gang, NIE Dong-qing, CHENG Xue-song, et al. Experimental Study on Multi-bench Retaining Foundation Pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5):784-794.
- [8] 夏 彪. h 型双排桩在基坑工程中的变形特性研究[D]. 衡阳:南华大学,2016.
XIA Biao. The Deformation Characteristics Research of h-type Double-row Piles in Foundation Engineering[D]. Hengyang: University of South China, 2016.
- [9] 丁洁民,巢 斯,吴宏磊,等. 上海中心大厦绿色结构设计关键技术[J]. 建筑结构学报,2017,38(3):134-140.
DING Jie-min, CHAO Si, WU Hong-lei, et al. Key Technology of Green Building in the Shanghai Tower Structural Design[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3):134-140.
- [10] 黄茂松,王卫东,郑 刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报,2012,45(6):146-161.
HUANG Mao-song, WANG Wei-dong, ZHENG Gang. A Review of Recent Advances in the Underground Engineering and Deep Excavations in Soft Soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6):146-161.
- [11] 李广信. 基坑支护结构上水土压力的分算与合算[J]. 岩土工程学报,2000,22(3):348-352.
LI Guang-xin. Estimating the Water and Earth Pressures on the Supporting Structure Around a Foundation Pit Separately and Together[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3):348-352.
- [12] 王卫东,王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
WANG Wei-dong, WANG Jian-hua. Design, Analysis and Case Histories of Deep Excavations Supported by Permanent Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [13] 李启民,何满潮,唐业清. 挤扩支盘支护桩试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(10):1667-1670.
LI Qi-min, HE Man-chao, TANG Ye-qing. Experimental Study on Squeezed Branch Piles as Retaining and Protecting of Foundation Excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10):1667-1670.
- [14] 徐 源,郑 刚,路 平. 前排桩倾斜的双排桩在水平荷载下的性状研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(增1):93-98.
XU Yuan, ZHENG Gang, LU Ping. Behaviors of Double-row Contiguous Retaining Piles with Raking Front-row Piles Under Horizontal Loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1):93-98.
- [15] 彭文祥,刘 彬. 深基坑双排桩支护排距室内模型试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2018,45(1):121-127.
PENG Wen-xiang, LIU Bin. Indoor Model Test Study on Row Spacing of Double-row Piles Supporting Deep Excavation Pit[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2018, 45(1):121-127.
- [16] 王 鹏,高 洁,段 旭,等. 深基坑微型桩支护的模型试验研究[J]. 工业建筑,2018,48(7):101-105, 210.
WANG Peng, GAO Jie, DUAN Xu, et al. Model Test Research on Deep Foundation Excavation Supported by Micropiles[J]. Industrial Construction, 2018, 48(7):101-105, 210.
- [17] 张玉成,杨光华,钟志辉,等. 软土基坑设计若干关键问题探讨及基坑设计实例应用分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(11):2334-2343.
ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, ZHONG Zhi-hui, et al. Discussion on Some Key Problems in Soft Soil Foundation Pit Design and Application Analysis of Design Examples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11):2234-2243.
- [18] 申 翊,李 晓,雷美清,等. 剪力键支护体系的构想及模型试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(7):2574-2580.
SHEN Hong, LI Xiao, LEI Mei-qing, et al. Conception

and Model Test of Shear Bond Supporting System [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (7): 2574-2580.

[19] 司光武. 矩形与圆形截面抗滑桩离心模型试验及颗粒流数值模拟研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

SI Guang-wu. Study on Rectangle and Circle Cross-section Antislid e Piles Based on Geotechnical Centrifuge Model Test and Particle Flow Code[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2017.

[20] 何颐华,杨 斌,金宝森,等. 深基坑护坡桩土压力的工程测试及研究[J]. 土木工程学报,1997,30(1):16-24.

HE Yi-hua,YANG Bin,JIN Bao-sen,et al. Study on the Earth Pressure of Fender Piles for Excavations in Real Projects and Model Tests[J]. China Civil Engineering Journal,1997,30(1):16-24.

[21] 俞 晓. 深基坑开挖与支护的模型试验与 ANSYS 分析研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2005.

YU Xiao. Research on Model Test of Deep Excavation Bracing and Numerical Simulation with ANSYS[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2005.