

DOI: 10.11779/CJGE2020S1018

# 旋挖挤扩灌注桩抗拔机理模型试验

陈立宏, 刘 丽, 张志鹏

(北京交通大学城市与地下工程教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘 要:** 通过室内小比尺模型试验, 进一步确定了旋挖挤扩灌注桩的承力盘最佳埋深位置和盘间距, 为其应用提供必要依据。在粉质黏土层中, 通过上拔荷载作用对 30 mm 桩径的旋挖挤扩灌注桩进行研究, 同时, 设置等直径桩作为对照组, 试验得到等直径桩和旋挖挤扩桩在上拔荷载作用下的  $Q-s$  曲线、 $S-lgr$  曲线等。研究表明: 无论在上拔量还是抗拔承载力方面, 旋挖挤扩灌注桩都优于等直径桩, 单盘桩的抗拔承载能力大约是等直径桩的 1.5~2.3 倍, 同时, 为了保证承力盘盘阻得以发挥充分, 单盘桩的承力盘埋深位置至少为 6 倍桩径, 双盘桩的承力盘间距至少为 5 倍桩径。

**关键词:** 旋挖挤扩灌注桩; 抗拔模型试验; 盘埋深位置; 盘间距; 盘阻

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0090-05

**作者简介:** 陈立宏(1975—), 男, 副教授, 博士, 主要从事基础工程和桩基础教学和科研方面的工作。E-mail: lhchen@bjtu.edu.cn。

## Model tests on pull-out mechanism of rotary excavation squeezed cast-in-place piles

CHEN Li-hong, LIU Li, ZHANG Zhi-peng

(Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Through the indoor small scale model tests, the optimal burial depth position and disc spacing of the bearing plate of the rotary excavated squeezed cast-in-situ piles are further determined, which provides the necessary basis for its application. In the silty clay layer, the 30 mm-pile diameter rotary excavation and expansion cast-in-situ pile is researched by the pull-up load. At the same time, an equal-diameter pile is set as a control group. The  $Q-s$  curve and the  $S-lgr$  curve of the equal-diameter pile and the spin-expansion and expansion-expansion pile are obtained under uplift load. The results show that both in terms of the uplift capacity and the anti-pull capacity, the rotary excavation squeezed cast-in-place piles are better than the equal-diameter ones, and the pull-out bearing capacity of the single pile is about 1.5~2.3 times that of the pile with the same diameter. In order to make sure that the bearing plate resistance is fully exerted, the bearing plate depth of the single plate pile is at least 6 times the pile diameter while that of the double-disc pile is at least 5 times the pile diameter.

**Key words:** rotary excavation squeezed cast-in-place pile; pull-out model test; burial depth position; disc spacing of bearing plate; bearing plate resistance

## 0 引 言

随着城市建设、地下工程、交通工程、近海工程等的飞速发展, 抗拔桩的应用日益广泛。传统等直径桩作为抗拔基础, 它的抗拔承载力较小, 而且具有应变软化的特性, 即在上拔过程中达到抗拔力峰值, 峰后承载能力急剧下降, 最后趋于残余强度<sup>[1-2]</sup>。因此, 等直径桩作为抗拔桩并非理想桩型。为了改变这一状况, 在等直径桩的基础上发明了变截面桩——旋挖挤扩灌注桩, 简称 DX 桩, 它具有承载力大, 经济效益好, 施工工艺简单等优点。

近年来已有大量学者进行了关于 DX 桩的模型试验研究。卢成原等<sup>[3-5]</sup>分别进行了 DX 桩上拔的相关试

验研究, 结果表明 DX 桩的承载力远高于等直径桩, 同时桩身轴力在承力盘处有突变, 承力盘对荷载的传递起着关键作用。陈轮等<sup>[6]</sup>和高笑娟等<sup>[7]</sup>通过有限元模拟研究了支盘桩在竖向荷载作用下桩周土体的应力变形情况和极限承载力, 分析支盘的形状、数量和间距等因素对支盘桩承载力的影响。钱德玲<sup>[8]</sup>通过现场试验指出 DX 桩的上拔荷载的大小取决于承力盘阻力的大小, 桩的上拔破坏将由盘阻力控制。因此, 本文是在前人研究的基础上, 通过室内模型试验探讨了 DX 桩抗拔工作机理, 得出能够充分发挥 DX 桩盘阻

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51678040)

收稿日期: 2020-06-05

力的最佳盘间距和首盘最佳埋深位置, 为 DX 桩的推广应用提供科学的理论基础。

1 模型试验方案

1.1 模型桩

试验中模型桩及承力盘均选用钢材制作。为了模拟桩身的侧摩阻特性, 桩体表面用胶水均匀黏贴一层细砂。模型桩采用两种桩型: 单盘桩和双盘桩。单盘桩以承力盘埋深为变量, 与等直径桩作对照, 观察承力盘埋深对抗拔承载性能的影响; 双盘桩以上盘埋深固定, 上下盘盘间距为变量, 与上盘埋深相同的单盘桩作对照, 观察承力盘间距对抗拔承载性能的影响。因此, 本试验有两组对照试验。桩的具体参数见表 1、2。

表 1 模型桩尺寸

Table 1 Sizes of model pile				
物理量	桩长 $L$	桩径 $d$	承力盘直径 $D$	承力盘高度 $h$
数值/mm	500	30	70	35

表 2 模型桩承力盘位置数据

Table 2 Position data of bearing plate of model pile			
支盘数量 (个)	首盘埋深 (支盘中心距桩顶)	盘间距 (支盘中心距)	试验数量 (次)
0	—	—	1×2=2
1	4d, 5d, 6d, 7d, 8d	—	5×2=10
2	6d	2d, 3d, 4d, 5d, 6d	5×2=10
合计	—	—	22

注: 考虑到试验的离散性, 每种方案要求进行 2 次平行试验, 合计 22 次。 $d=30\text{ mm}$ 。

由于桩的数量比较多, 为了避免试验记录时出现混乱, 便于管理, 我们对这些桩进行编号, 将上盘埋深为 4d, 5d, 6d, 7d, 8d 的单盘桩依次命名为 1, 2, 3, 4, 5 号, 盘间距为 2d, 3d, 4d, 5d, 6d 的双盘桩依次命名为 6, 7, 8, 9, 10 号, 等直径桩为 zk。

1.2 试验用土

试验用土采用粉质黏土, 每次试验前对土的物理力学性质进行检测。试验过程中控制黏土质量, 分层击实, 每层厚度 5 cm, 制备完成后静置 12 h 以上。土的主要物理力学指标如表 3。

表 3 土的物理力学性质指标

Table 3 Physical and mechanical properties of soil					
物理量	天然含水率 $w/\%$	土粒相对密度	孔隙比 $e$	最优含水率/ $\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
数值	19	2.56	0.66	14.5	1.834

1.3 试验装置

根据试验模型桩尺寸要求, 设计了长×宽×高=600 mm×600 mm×900 mm 的模型箱。箱体材料采用钢板制成, 厚度均为 10 mm, 并在箱体底部等受力较大部分添加加劲肋。模型箱正面采用同样厚度的钢化玻璃, 方便试验时观察土的击实情况。由于模型桩的尺寸较小, 承载力也很小, 综合经济性、适用性以及操作简便性, 设计了杠杆一砝码加载装置, 设计图如图 1。



图 1 试验模型箱及加载装置

Fig. 1 Model box and loading device

试验的量测系统主要分为以下几个部分:

(1) 应变片, 测量盘阻和桩身侧摩阻力, 应在紧贴支盘上下方黏贴应变片, 其余桩身合适处也应黏贴。应变片采取对称黏贴, 以抵消不可避免的偏心力造成的影响。同时, 等直径桩作为对照, 也应与 DX 桩在相同的位置黏贴应变片, 黏贴位置见图 2。

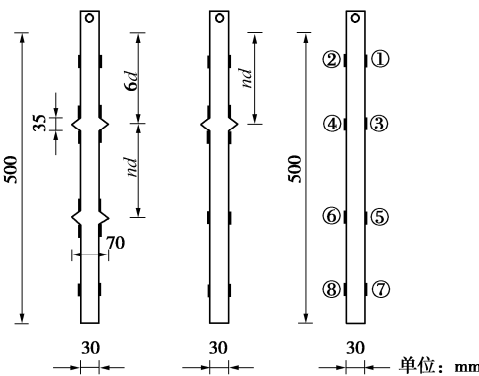


图 2 模型桩及应变片示意图

Fig. 2 Model pile and strain gauges

(2) 拉力传感器, 此传感器是应变式拉力传感器, 量程为 1 t。传感器直接与作用在桩顶的钢丝绳相连, 通过读数仪可直接读得施加在桩顶的实际荷载, 避免了传感器上方杠杆装置因摩擦等因素引起的一些误

差，荷载取值更加准确。

(3) 应变读数仪，应变片外伸导线以及拉力传感器导线与应变读数仪相连，在读数仪上读出相应传感器应变。

(4) 百分表，测量桩的上拔位移量，量程为 10 mm。本试验使用两支百分表分别置于桩顶左右侧，以避免桩顶偏心位移带来的误差。

1.4 试验内容及方法

该模型试验的两个研究目的为：①承力盘位置与间距对旋挖挤扩灌注桩抗拔承载性能的影响；②承力盘间距的最优取值等。

试验采用分级加载的方式，载荷为等重量的砝码，每级加载后荷载大小保持不变，同时在桩顶固定百分表测量模型桩上拔变形量和在桩身关键位置以及其他合适处黏贴应变片监测桩身应力应变情况，按规范的规定时间间隔记录百分表读数和传感器读数，带稳定后加下一级荷载，若变形量过大停止加载。根据试验记录，绘制桩的  $Q-S$  曲线、 $S-lgt$  曲线，由这些数据曲线获得桩的抗拔极限承载力、盘阻、侧阻，并对其进行分析与总结。

2 试验数据处理及分析

本试验有两组对照试验，一组为单盘桩与等直径桩，另一组为双盘桩与 3 号单盘桩。为了分别获得盘位置和盘间距对桩抗拔性能的影响因素，我们将试验数据分成两部分进行处理分析。

2.1 单盘桩与等直径桩对照分析

为了客观的认识试验桩的首盘埋深位置对桩的抗拔承载力的影响，我们将单盘桩与等直径桩做对照来处理分析试验结果。

(1) 等直径桩试验数据处理及分析

等直径桩试验得到的  $Q-S$  曲线、 $S-lgt$  曲线如图 3, 4，由这些曲线看出，桩的抗拔承载力大约为 680 N。

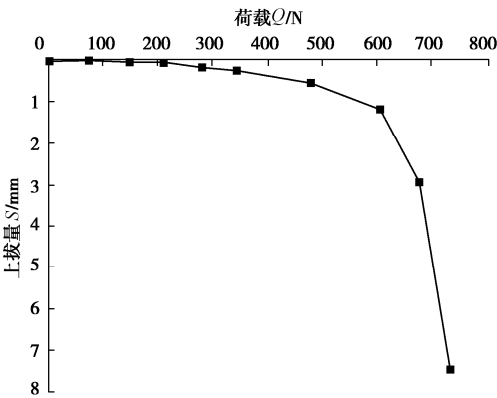


图3 等直径桩  $Q-S$  曲线图  
Fig. 3  $Q-S$  curve of equal diameter pile

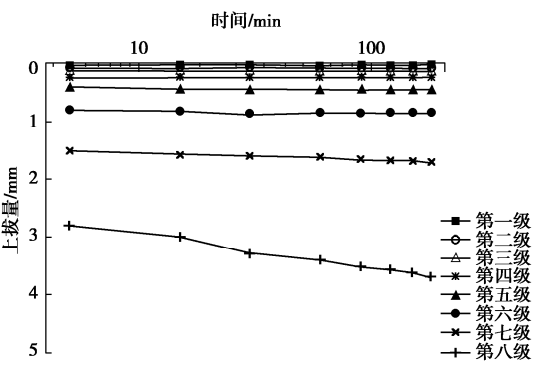


图4 等直径桩  $S-lgt$  曲线图  
Fig. 4  $S-lgt$  curves of equal diameter pile

(2) 单盘桩试验数据处理及分析

单盘桩试验得到的  $Q-S$  曲线、各桩抗拔承载力和盘阻如图 5 和表 4, 5。

表4 不同盘位单盘桩承载力

Table 4 Bearing capacities of single-disc piles at different positions			
桩号	埋深( $d=30$ mm)	承载力/N	与直孔桩承载力比值
ZK	—	678	1.00
#1	$4d$	1043	1.54
#2	$5d$	1190	1.76
#3	$6d$	1230	1.81
#4	$7d$	1318	1.94
#5	$8d$	1499	2.21

表5 单盘桩盘阻及侧阻值

Table 5 Resistance and side resistance values of single-disc piles						
桩号	#1	#2	#3	#4	#5	ZK
埋深( $d=30$ mm)	$4d$	$5d$	$6d$	$7d$	$8d$	—
盘阻极限值/N	247	297	407	458	486	—
盘阻占比	0.24	0.29	0.32	0.36	0.34	—
侧阻极限值/N	764	759	846	830	967	678
侧阻占比	0.76	0.71	0.68	0.64	0.66	1.00

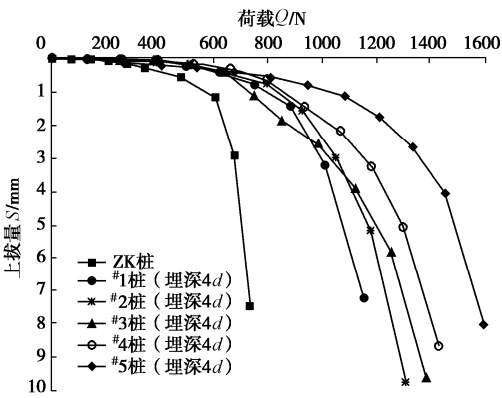


图5 等直径桩与单盘桩  $Q-S$  曲线图  
Fig. 5  $Q-S$  curves of equal-diameter pile and single-disc pile

从表 4 可知，等直径桩的承载力为 678 N，它的抗拔力很小，而 DX 桩的承载力都在 1000 N 以上，明显优于等直径桩，大约是等直径桩的 1.5~2.3 倍。

从表 5 可知, 其一, 从盘阻来看, 随着承力盘埋深增加, 盘阻呈现递增趋势。但是从 3 号桩开始, 盘阻占比却没有显著增加, 极限盘阻值增加幅度也不大。可知承力盘埋深在 6 倍桩径左右, 支盘所提供承载力已逐渐达到极限, 因此 6 倍桩径可作为承力盘的影响范围。其二, 从两种桩型的侧阻来看, 单盘桩比等直径桩的土体摩擦作用要大得多, 可能有两种原因, 一种是由于盘的存在, 导致与土的接触面积增大, 另一种是盘对土有挤压作用, 也就是盘阻的存在。

从图 5 可知, 加载前期, 随着荷载的增大, 曲线的变化趋势都比较平缓, 差别不大; 加载后期, 随着荷载的增大, 等直径桩的曲线变化迅速增大, 接近极限荷载时, 出现明显的拐点, 而 DX 桩的曲线随着荷载增大, 变化比较平缓, 没有出现明显的拐点。破坏时, 单盘桩的上拔量大约是等直径桩的 3 倍。

综上, 无论是在抗拔承载力还是上拔量方面, DX 桩都远优于等直径桩。同时, 为了盘阻的充分发挥, 盘的埋深位置至少为 6 倍桩径。

2.2 双盘桩与 3 号桩对照分析

为了客观的认识桩的承载力与盘间距的关系和抗拔特性, 我们将双盘模型桩与 3 号桩进行比较, 且 3 号桩与各种双盘桩的首盘埋深相同, 都为 6 倍桩径。

(1) 单盘 3 号桩试验数据处理及分析

3 号桩的试验数据处理如图 6, 7。

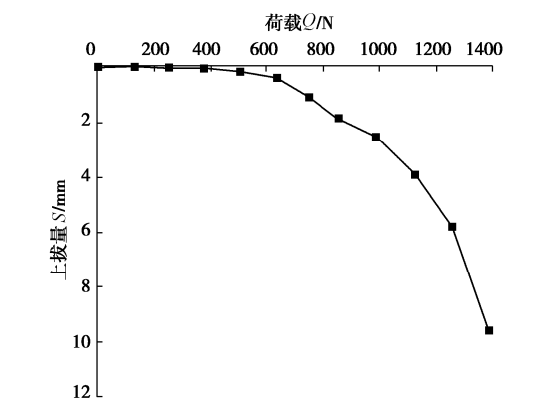


图 6 Q-S 曲线图

Fig. 6 Q-S curves

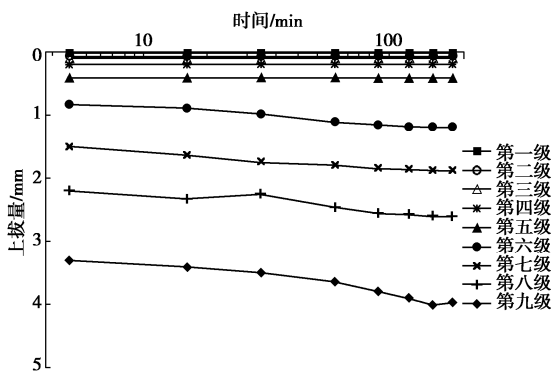


图 7 S-lgt 曲线图

Fig. 7 S-lgt curves

(2) 双盘试验数据处理及分析

双盘桩试验得到的  $Q-S$  曲线、各桩抗拔承载力和盘阻如图 8 和表 6, 7。

表 6 不同盘间距双盘桩承载力

Table 6 Bearing capacities of double-disc piles with different disc spacings

桩号	盘间距 ( $d=30\text{ mm}$ )	承载力 /N	与 3 号桩承载力 比值
#3	—	1230	1.00
#6	$2d$	1068	0.87
#7	$3d$	1361	1.11
#8	$4d$	1732	1.41
#9	$5d$	1912	1.55
#10	$6d$	1930	1.57

表 7 双盘桩盘阻及侧阻值

Table 7 Values of disc resistance and side resistance

桩号	#6	#7	#8	#9	#10	#3
盘间距 ( $d=30\text{ mm}$ )	$2d$	$3d$	$4d$	$5d$	$6d$	—
盘阻极限值/N	378	620	771	926	964	407
盘阻占比	0.36	0.48	0.48	0.49	0.49	0.32
侧阻极限值/N	713	655	823	974	1014	846
侧阻占比	0.64	0.52	0.52	0.51	0.51	0.68

从表 6 和图 8 可知, 盘间距为 2 倍桩径时, 双盘桩承载力是 3 号单盘桩的 0.87 倍, 造成这种原因可能是两盘间距很小, 形成整体作用, 双盘的盘阻难以充分发挥, 以至于双盘桩的承载力小于单盘桩。随着盘间距的增加, 抗拔承载力的极限值有明显增加, 当盘间距为 3 倍桩径时, 双盘桩的承载力是单盘桩的 1.11 倍, 提高还不是很大; 当盘间距达到 5 倍桩径时, 双盘桩承载力提高很大; 但当盘间距达到 6 倍桩径时, 双盘桩承载力的提高却变缓。这说明, 当盘间距达到 5 倍桩径时, 上下盘都单独作用, 相互影响很小, 盘阻已充分发挥, 所以, 为了盘阻的充分发挥, 盘间距最佳取值应至少为 5 倍桩径。

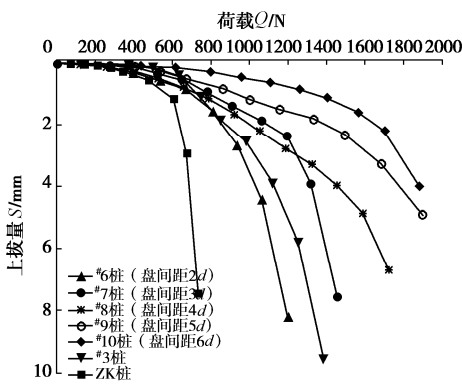


图 8 Q-S 曲线汇总图

Fig. 8 Summary of Q-S curves

从表 7 中可知, 当承力盘间距达到 5 倍桩径时, 无论是在盘阻还是侧阻方面, 双盘桩的阻力都大于单

盘桩的阻力,说明在此时,两个承力盘相互影响比较小,都发挥的比较充分,趋近于独立工作。从而也证明了双盘桩的承力盘间距最佳取值应至少为 5 倍桩径。

### 3 结 论

本次模型试验用土为粉质黏土,单盘桩承力盘位置与双盘桩盘间距对于抗拔承载力的影响,主要结论有以下几点:

(1) 试验表明在粉质黏土地基中,无论在抗拔承载能力还是上拔量方面,DX 桩所展现的特性都明显优于相同情况下的等直径桩。

(2) 单盘桩与等直径桩的对照试验表明,随着盘埋深的增加,桩的承载力也随之增大。当单盘桩埋深大于 6 倍桩径时,随着承力盘埋深的增大,盘阻极限值提高的趋势变缓,这说明盘端阻力的影响范围为六倍桩径,因而,首盘埋深应至少 6 倍桩径。

(3) 双盘桩与 3 号单盘桩的试验表明,随着盘间距的增大,两个盘相互影响逐渐减小,当盘间距大于 5 倍桩径时,近乎独立发挥抗拔作用,所以承力盘间距应至少为 5 倍桩径。

(4) 承力盘的存在改变了 DX 桩的抗拔破坏模式,在提供盘阻的同时提高了桩侧摩阻力。与等直径桩相比,DX 桩的承力盘对土产生了挤密效应,也即意味着土体能发挥更大的作用。

#### 参考文献:

- [1] 钱德玲. 支盘桩抗压和抗拔特性的研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊): 517 - 520. (QIAN De-ling. A study of compression and extraction resistance behavior of squeezed supporting disk pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S0): 517 - 520. (in Chinese))
- [2] 朱炎兵, 雷 崇. 等截面抗拔桩在地铁车站抗浮中的应用[J]. 铁道勘测与设计, 2007(5): 94 - 98. (ZHU Yan-bing, LEI Chong. Application of equal section uplift pile in anti-flouting of subway station[J]. Railway Survey and Design, 2007(5): 94 - 98. (in Chinese))
- [3] 卢成原, 孟凡丽, 王章杰, 等. 非饱和粉质黏土模型支盘桩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 522 - 525. (LU Cheng-yuan, MENG Fan-li, WANG Zhang-jie, et al. Test of model piles with branch plates in unsaturated silt clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 522 - 525. (in Chinese))
- [4] 卢成原, 孟凡丽, 吴 坚, 等. 不同土层对支盘桩荷载传递影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(20): 3547 - 3551. (LU Cheng-yuan, MENG Fan-li, WU Jian, et al. Testing study on effect of different soil layers on load transfer of model piles with branch plates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(20): 3547 - 3551. (in Chinese))
- [5] 张宝钿, 卢成原. 支盘桩的抗拔机理及工程应用[J]. 建筑技术, 2009, **40**(9): 843 - 846. (ZHANG Bao-dian, LU Cheng-yuan. Study on uplift mechanism and engineering application of disk pile[J]. Architecture Technology, 2009, **40**(9): 843 - 846. (in Chinese))
- [6] 陈 轮, 常冬冬, 李广信. DX 桩单桩承载力的有限元分析[J]. 工程力学, 2002, **19**(6): 67 - 72. (CHEN Lun, CHANG Dong-dong, LI Guang-xin. Finite element analysis of bearing capacity of a single DX pile[J]. Engineering Mechanics, 2002, **19**(6): 67 - 72. (in Chinese))
- [7] 高笑娟, 朱向荣. 用双曲线法预测挤扩支盘桩的极限承载力[J]. 岩土力学, 2006, **27**(9): 1596 - 1600. (GAO Xiao-juan, ZHU Xiang-rong. Forecasting ultimate bearing capacity of single squeezed branch pile by hyperbola method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(9): 1596 - 1600. (in Chinese))
- [8] 钱德玲. 具有高抗拔性能的支盘桩在工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(4): 678 - 682. (QIAN De-ling. Engineering application study of squeezed branch pile with high antipulling behavior[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(4): 678 - 682. (in Chinese))

(编校: 明经平)