

中文引用格式:陈晨,余捷,刘哲,等. 循环荷载作用下抗浮多铃型扩体锚杆拔出模型试验[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 109-118.

英文引用格式:CHEN Chen, YU Jie, LIU Zhe, et al. Pull-out model test of anti-floating multi-bell-shaped anchor under cyclic loading[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 109-118.

## 循环荷载作用下抗浮多铃型扩体 锚杆拔出模型试验\*

陈晨<sup>1</sup>副教授, 余捷<sup>1</sup>, 刘哲<sup>1</sup>, 谢莎莎<sup>\*\*1</sup>副教授, 易程程<sup>2</sup>

(1 武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

2 武汉天创建设集团有限公司, 湖北 武汉 430050)

中图分类号: X935 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.06.0081

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52174085); 教育部磷资源开发利用工程中心、湖北省中低品位磷矿开发利用协同创新中心创新基金资助(LCX2021009); 武汉工程大学研究生创新基金资助(CX2022167)。

**【摘要】** 为研究地下水位变动导致锚杆抗拔性能劣化的原因, 提高扩体锚杆在抗浮过程中的锚固性能, 首先, 通过单次拉拔试验, 得出不同埋深情况下多铃型扩体锚杆拔出过程中承载性能的变化情况; 然后, 根据单次拉拔试验得出的抗拔极限承载力进行循环试验, 在不同循环荷载比、循环次数和循环频率下, 探索多铃型扩体锚杆承载性能演化机制; 最后, 利用图像粒子测速法(PIV)分析周围土体变形机制, 得出单次拉拔及循环荷载作用下周围土体位移的变化特性。结果表明: 铃型扩体锚杆拔出过程中轴力-位移曲线大致分为弹性、震荡和破坏3个阶段, 且随着埋深增加, 锚杆的抗拔极限承载力和土体位移逐步递增; 在循环荷载作用下, 增加循环荷载比、循环次数以及循环频率均会降低锚杆锚固性能。

**【关键词】** 循环荷载; 抗浮; 多铃型扩体锚杆; 锚杆拔出; 承载力; 土体位移

### Pull-out model test of anti-floating multi-bell-shaped anchor under cyclic loading

CHEN Chen<sup>1</sup>, YU Jie<sup>1</sup>, LIU Zhe<sup>1</sup>, XIE Shasha<sup>1</sup>, YI Chengcheng<sup>2</sup>

(1 College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Engineering,

Wuhan Hubei 430070, China; 2 Wuhan Tianchuang Construction Group Co., Ltd.,

Wuhan Hubei 430050, China)

**Abstract:** In order to study the reasons for the deterioration of the anchor performance caused by groundwater variation, a series of physical model tests were employed to explore the anchorage enhancement of the expanded anchor in the anti-floating process. Firstly, a single pull-out test was carried out through the indoor model test, and the change of bearing capacity of multi-bell-shaped expanded anchor under different buried depths during the pull-out process was obtained. Secondly, according to the ultimate uplift bearing capacity obtained from the single pull-out test, the cyclic test was carried out to

\* 文章编号: 1003-3033(2024)06-0109-10; 收稿日期: 2023-12-17; 修稿日期: 2024-03-19

\*\* 通信作者: 谢莎莎(1983—), 女, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事施工工艺优化研究。E-mail: xss@wit.edu.cn。

explore the evolution mechanism of the bearing performance of the multi-bell-shaped expanded anchor under different cyclic amplitudes, cyclic times and cyclic frequencies. Finally, the image particle velocity method (PIV) was used to analyze the deformation mechanism of the surrounding soil, and the variation characteristics of the surrounding soil displacement under single pulling-out and cyclic loading were obtained. The test results show that the axial load-displacement curve of the bell-shaped expansion anchor can be roughly divided into three stages: elasticity, vibration and failure. With the increase of buried depth, the ultimate bearing capacity and soil displacement of the anchor increase. Under the action of cyclic loadings, the increase of the cyclic load ratio, the number of cycles and the cycle frequency will weaken the bearing capacity of the anchors.

**Keywords:** cyclic load; anti-floating; multi-bell-shaped expanded anchor; anchor pull-out; bearing capacity; soil displacement

## 0 引言

随着对地下空间的利用和超高层建筑的增加,基坑的抗浮问题越发明显。特别是地处长三角城市群的地区雨水充沛、湖泊众多、地下水丰富,使得建筑工程的抗浮问题更为突出,亟待解决<sup>[1]</sup>。

锚杆自投入使用以来解决了许多工程实际问题,目前国内外学者对其开展了大量研究。如FUJITA等<sup>[2]</sup>分析30例现场试验,提出临界锚固长度这一概念,并得出最优长度。普通锚杆锚固机制的研究包括现场拉拔试验、室内模型试验以及数值模拟试验<sup>[3]</sup>。随着研究的深入,许多学者发现普通锚杆存在一定局限性<sup>[4]</sup>。例如:在土质较软、地下水丰富的工况下,通过扩大直径和加长锚固段的手段也难以有效提高锚杆抗拔力。而抗浮扩体锚杆相对于普通抗浮锚杆具有耐腐蚀性强、经济环保、更广泛的地层适应性等优点,因此,在地下抗浮工程中得到了广泛的应用。学者们也在探索各种类型的扩体锚杆,如伞锚、充气锚杆、承压型囊式扩体锚杆等。夏元友等<sup>[5]</sup>曾针对异形锚杆开展过锚固机制的相关研究,通过对4种不同类型的锚杆进行拔出试验,得出异形锚杆更能有效提高锚杆极限承载力,为后续研究打下基础。在实际工程中锚固结构除受上部结构的恒定荷载影响外,还可能受风、浪、交通等循环荷载<sup>[6]</sup>作用。陈秋南等<sup>[7]</sup>研究了充气锚杆在循环荷载作用下的拉拔试验,并将充气锚杆拉拔过程分为弹性位移、弹塑性位移以及塑性位移3个阶段,结果显示,在循环荷载下,循环荷载峰值增加导致位移速度增加,其极限抗拔承载力也随着循环次数的增加而不断减小。由于实际工程中很难观测到土体内部状况,因此,在室内试验时会借助图像粒子测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)<sup>[8]</sup>研究土体内

部位移。杨晓峰等<sup>[9]</sup>利用PIV技术在砂土中对单桩进行水平加载模型试验,得到桩侧土体位移与应变之间的关系。综上所述,现有文献更多是聚焦于单扩体锚杆,对循环荷载作用下的多扩体锚杆研究偏少。

鉴于此,笔者拟以多铃型扩体锚杆为例<sup>[10]</sup>,在砂土中开展拔出试验,研究抗浮锚杆在循环荷载作用下的锚固机制,分析不同阶段循环荷载作用下锚杆受力演化机制和破坏模式,结合PIV技术,研究循环作用下锚杆拔出时,周围土体的位移场变化特征,明确循环荷载作用下抗浮锚杆受地下水位影响机制,探索循环荷载作用下扩体抗浮锚杆的性能演化特性,以期对相关工程实践提供参考。

## 1 锚杆拔出模型试验系统

### 1.1 土体的物理性质

采用不同级配石英砂模拟试验用土,结合文献<sup>[11]</sup>,在级配不同粒径石英砂后,可较好模拟此次试验岩土体材料,具体颗粒组成与粒径级配曲线见表1和图1。可以看出,试验用土主要粒径为0.5~2.0 mm的中粗砂。级配后试验用砂土通过相关试验测得其物理力学参数见表2。

表1 试验用砂粒径组成

Table 1 Particle size composition of test sand

粒径 <i>d</i> /mm	(-∞, 0.075]	(0.075, 0.25]	(0.25, 0.5]	(0.5, 2]	(2, 5]	[5, ∞)
占比/ %	0.3	0.3	13.1	77.3	9.0	0

### 1.2 拉拔加载试验设备

采用可视化三向加载拉拔试验箱进行试验如图2所示。将相机和补光灯放置在透明亚克力板

前,

表 2 模拟地基的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of simulated foundation

密度 $\rho/$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水量 $\omega/\%$	不均匀系 数 $C_u$	相对密度 $D_r$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	最大干密度 $\rho_{\text{max}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最小干密度 $\rho_{\text{min}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
1.839	0	2.69	0.76	0	42.3	1.97	1.52

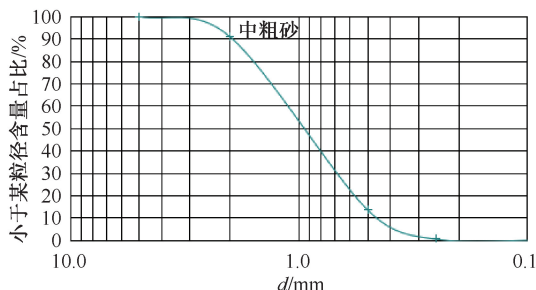


图 1 粒径级配曲线<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Particle size grading curve<sup>[11]</sup>

以便于可视化观测试验过程。填料区长宽高为 800 mm×800 mm×1200 mm,在模型箱底部铺设 400 mm 的砂土充当垫层,锚杆采用预埋式,垫层设置好后放置锚杆,确保锚杆紧贴透明亚克力板,让锚杆底端与垫层充分接触,再以每层高 50 mm 进行分层填筑,直到预设埋深。利用上部千斤顶加压达到等效埋深,根据计算,每加压 18 kPa 相当于埋深 1 m。相机拍摄间隔为 2 张/s,最后利用 PIV 处理试验数据。



图 2 可视化三向加载拉拔试验装置

Fig. 2 Visual three-way loading pulling-out test device

### 1.3 多铃型锚杆模型

锚杆采用混凝土和钢筋制作而成,锚筋采用直径 17 mm 的螺纹钢,锚固段则使用自制模具如图 3 所示,综合考虑到模型试验箱尺寸以及边界效应影响<sup>[12]</sup>,确定模型的几何相似比为 1:10。锚杆模型扩体锚固段采用水泥砂浆制作(水泥:砂:水=1:1:0.4),最大程度模拟真实工程环境下的锚

杆材料。多铃型锚杆成品与结构尺寸,如图 4 所示。

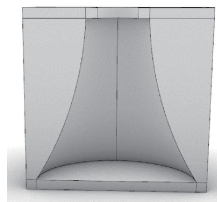


图 3 锚固段模具

Fig. 3 Anchorage section mold diagram

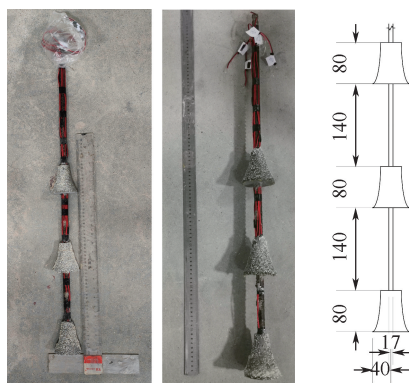


图 4 试验用锚杆成品与结构尺寸

Fig. 4 Model anchor and anchor size details

### 1.4 试验方案

试验的加载方式主要分为单次拉拔和循环荷载 2 种,主要考虑埋深、循环荷载比、循环频率和循环次数 4 个影响因素。在 3 个埋深( $H=1、2、3$  m)下,对直径为 80 mm 的锚杆拉至 100 mm,并采用位移控制的单调加载方式,其加载速率为 0.1 mm/s。选取合适的埋深,确定锚杆的单次拉拔极限承载力  $F_l$ ,以正弦波的形式进行循环加载,取值参照文献[13],其中,起始荷载为最大试验荷载的 0.1 倍,循环荷载峰值与  $F_l$  的比值为  $\lambda$ 。对锚杆开展 6 种不同循环荷载比( $\lambda=0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7$ )的循环试验,并选取合适的循环荷载比进行 3 种不同循环次数( $M=10、50、100$  次)以及 3 种不同循环频率( $f=0.01、0.025、0.05$  Hz)的拉拔试验。单次拉拔试验方案和循环荷载试验方案见表 3 和表 4。

除了 J2 组,额外安排 1 组试验参数一致的全模型锚杆(即 J4 组),并将其放置于模型箱中部以外,其余每组试验均为半模型试验。

表3 单次拉拔试验分组

Table 3 Single pulling-out test group

试验编号	锚固段尺寸/ (mm×mm)	扩体间距 L/mm	段数 n	H/m
J1	(30+80)×80	140	3	1
J2	(30+80)×80	140	3	2
J3	(30+80)×80	140	3	3
J4	(30+80)×80	140	3	2

表4 循环荷载试验分组

Table 4 Cyclic load test group

试验编号	H/m	f/Hz	M/次	λ
FZ1	2	0.01	100	0.2
FZ2	2	0.01	100	0.3
FZ3	2	0.01	100	0.4
FZ4	2	0.01	100	0.5
FZ5	2	0.01	100	0.6
FZ6	2	0.01	100	0.7
CS1	2	0.01	10	0.3
CS2	2	0.01	50	
CS3	2	0.01	10	0.5
CS4	2	0.01	50	
CS5	2	0.01	10	0.7
CS6	2	0.01	50	
PL1	2	0.025	100	0.3
PL2	2	0.050	100	
PL3	2	0.025	100	0.5
PL4	2	0.050	100	
PL5	2	0.025	100	0.7
PL6	2	0.050	100	

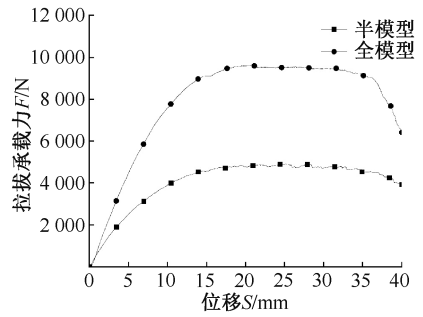


图5 多铃型扩体锚杆半模型与全模型对比

Fig. 5 Comparison between semi-model and full model of multi-bell-shaped expanded anchor

并出现震荡的现象。这是由于向上拉拔时锚固段下方形成空腔,导致周围土体流入空腔内,造成土体密实度降低拉力减小,从而出现震荡现象。③破坏阶段,多铃型扩体锚杆随着位移的增大,导致承载力迅速降低至破坏。

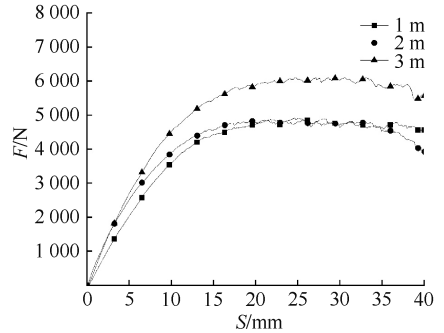


图6 不同埋深下锚杆承载力-位移曲线

Fig. 6 Bearing capacity-displacement curve of anchor under different buried depths

## 2 锚杆拔出试验结果及分析

### 2.1 锚杆拔出模型试验验证

首先需要验证确定半模型试验的精度,将其与全模型试验结果作对比验证。比对试验编号为J2的2组试验,多铃型扩体锚杆全模型与半模型的承载力位移曲线对比结果如图5所示。从图5看出,2根锚杆在埋深2 m的情况下,达到 $F_i$ 的位移均为17 mm,二者的 $F_i$ 分别为9 496.1和4 757.4 N,相差接近2倍,误差为-0.19%。

### 2.2 单次拉拔锚杆承载性能分析

分析3种埋深下的锚杆拉拔曲线,绘制锚杆承载力位移曲线,如图6所示。根据曲线锚杆拉拔过程可以分为3个阶段:①弹性阶段,多铃型扩体锚杆曲线前期接近线性增长,线性阶段埋深越大斜率越大;②震荡阶段,随着位移的上升,多铃型扩体锚杆到达抗拔极限承载力后其承载力增长进一步变缓,

当埋深为1、2和3 m的情况下,锚杆的 $F_i$ 分别为4 357.8、4 757.4和5 823.9 N,位移 $S$ 分别对应为13.9、17.1和17.7 mm。锚杆埋深从1 m增加到2 m, $F_i$ 增加了399.6 N;从2 m增加到3 m,增加1 066.1 N。可见在浅埋状态下,埋深的增加与 $F_i$ 的增加不成线性,从而得出增加埋深可有效提高抗拔极限承载力。

### 2.3 循环荷载对抗拔极限承载力影响分析

#### 2.3.1 循环荷载比

在埋深2 m下,锚杆经历不同循环荷载比( $\lambda = 0.2 \sim 0.7$ )的循环荷载作用后,单次拉拔和不同循环荷载比循环后承载力对比图,如图7所示,当 $\lambda = 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7$ 时,循环作用后抗拔极限承载力 $F$ 分别为4 322.7、4 249.8、4 158、4 149.9、4 144.5、3 820.5 N,而单次拉拔锚杆 $F_i$ 为4757.4 N,由此得出不同循环荷载比下锚杆 $F$ 衰减

率,见表 5。

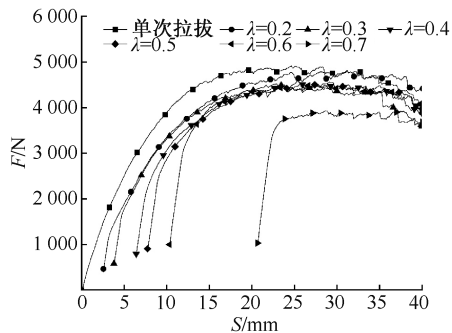


图 7 单次拉拔和不同循环荷载比循环后承载力对比

Fig. 7 Comparison of bearing capacity after single pulling-out and different cyclic load ratios

表 5 不同循环荷载比循环后抗拔极限承载力衰减率

Table 5 Attenuation rate of ultimate uplift bearing capacity after different cyclic load ratios

试验编号	$\lambda$	$M/\text{次}$	$f/\text{Hz}$	$F_i/\text{N}$	$S/\text{mm}$	衰减率/%
FZ1	0.2	100	0.0.1	4 322.7	2.56	9.1
FZ2	0.3	100	0.0.1	4 249.8	3.80	10.6
FZ3	0.4	100	0.0.1	4 158	6.42	12.6
FZ4	0.5	100	0.0.1	4 149.9	7.74	12.8
FZ5	0.6	100	0.0.1	4 144.5	10.34	12.9
FZ6	0.7	100	0.0.1	3 820.5	20.69	19.7

由图 7 可知:锚杆循环荷载作用后的抗拔力—位移曲线与单次拉拔的位移曲线一致,分为弹性阶段、震荡阶段和破坏阶段。弹性阶段,锚杆在此阶段呈抛物线式增长,达到  $F_i$  后,锚杆抗拔承载力增长变缓出现震荡阶段,最后承载力迅速下降,这是由于土体的破坏或者锚杆与周围土体产生相互滑动所致。当循环荷载比  $\lambda=0.7$  时,弹性阶段持续时间很短,说明在该循环荷载比下,锚杆周围土体产生较大破裂面,土体之间形成滑动,进而造成锚杆会迅速拉至  $F_i$ ,故此时锚杆锚固作用失效;当循环荷载比为  $\lambda=0.8$  时,循环荷载的峰值为 3 805.9 N,在锚杆循环拉拔荷载 15 个周期内发生拔出破坏,如图 8 所示。

结合图 8、表 5 可知:当循环荷载比  $\lambda=0.2$  和 0.3 时,衰减率处于 10% 以下;当循环荷载比  $\lambda=0.4、0.5、0.6$  时,衰减率处于 13% 左右;当循环荷载比  $\lambda=0.7$  时,衰减率较大,处于 20% 左右。循环荷载作用后锚杆  $F_i$  会有所降低,其中,荷载比  $\lambda$  与锚杆抗拔极限承载力有直接关系。随着循环荷载比  $\lambda$  增加,锚杆  $F_i$  逐渐衰减最大可达 20%。循环拉拔作用的荷载值不能超过  $F_i$  的 70%,否则锚杆会直接

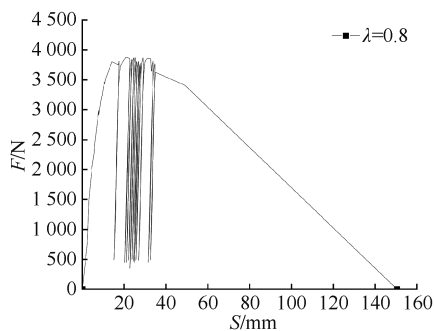


图 8  $\lambda=0.8$  时承载力位移曲线

Fig. 8 Bearing capacity displacement curve when  $\lambda = 0.8$

拔出。

循环荷载比显著影响锚杆循环荷载后竖向位移,从表 5 看出,随着循环荷载比增大,循环结束后锚杆的竖向位移也逐渐增加,特别当  $\lambda=0.7$  时,循环结束后锚杆上移 20 mm,相较于  $\lambda=0.6$  时提高 1 倍,其原因是随着循环荷载比增大,循环过程中锚杆与周围土体逐渐产生破裂面,导致循环后锚杆上拔位移较大。

### 2.3.2 循环次数

选取 FZ2、FZ4、FZ6、CS1、CS2、CS3、CS4、CS5、CS6 等 9 组试验对比循环次数影响锚杆抗拔极限承载力的程度,并与试验组 J2 对比,对比的荷载—位移曲线如图 9 所示。不同循环次数下锚杆  $F_i$  的衰减率,见表 6。

表 6 不同循环次数后抗拔极限承载力衰减率

Table 6 Attenuation rate of ultimate pull-out bearing capacity after different cycles

编号	$\lambda$	$M/\text{次}$	$f/\text{Hz}$	$F_i/\text{N}$	$S/\text{mm}$	衰减率/%
CS1	0.3	10	0.01	4 617.0	3.18	3.0
CS2		50	0.01	4 244.2	3.69	10.8
FZ2		100	0.01	4 249.8	3.80	10.6
CS3	0.5	10	0.01	4 619.7	5.23	2.9
CS4		50	0.01	4 158.9	7.13	12.6
FZ4		100	0.01	4 149.9	7.74	12.8
CS5	0.7	10	0.01	4 621.8	10.06	2.8
CS6		50	0.01	4 079.2	16.25	14.3
FZ6		100	0.01	3 820.5	20.69	19.7

由表 6 可知:循环荷载比相同的情况下,锚杆  $F_i$  的衰减率总体随着循环次数的增加而增加,最高可接近 20%,但循环在前 50 次较为明显。由于荷载比为 0.7 时,锚杆周围土体部分区域会形成破裂面,不再满足此情形。抗拔锚杆循环后位移与循环次数也有一定关系,循环次数越多,循环后锚杆向上位移

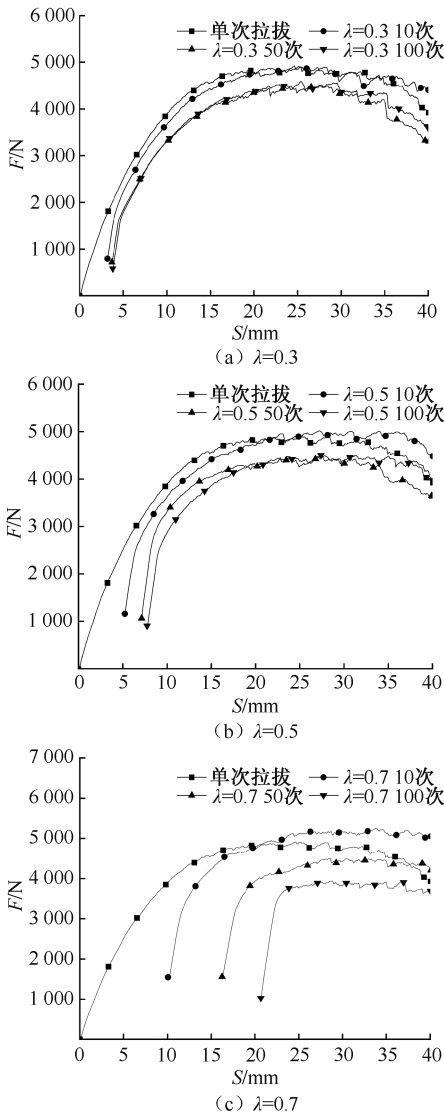


图9 单次拉拔和不同循环次数后承载力对比  
Fig.9 Comparison of bearing capacity after single pulling-out and different cycles

越大;当荷载比增大,循环次数对锚杆竖向位移影响也越明显。锚杆周围土体密实度在循环初期随着循环次数的增加而增大,对周围土体的的影响范围也逐渐扩大,而锚杆在循环过程受到的承载力越大,竖向位移也会出现明显增大的趋势。在  $\lambda = 0.7$  时,锚杆周围土体存在部分破裂面,进而造成在循环 50 次后,其位移增长过大,导致锚固作用失效。

由图 9 可知:当  $\lambda = 0.3, 0.5, 0.7$  时,弹性阶段随着循环次数增加,斜率越小,表明循环次数越大对周围土体扰动越大,导致锚杆“肩部”开始产生塑性变形,造成锚杆  $F_t$  降低。在震荡阶段,循环荷载比会影响曲线的形态,当荷载比较小时,曲线都更接近于抛物线形态,如图 9a 所示;当荷载比增大时,曲线逐渐接近于水平发展,如图 9c 所示。同时荷载比也

会加剧循环次数对锚杆承载力的影响。

### 2.3.3 循环频率

埋深 2 m 时,不同循环频率 ( $f = 0.01, 0.025, 0.05$  Hz) 循环后锚杆承载力位移曲线与单次拉拔的对比图如图 10 所示。不同循环频率下锚杆  $F_t$  衰减情况见表 7。

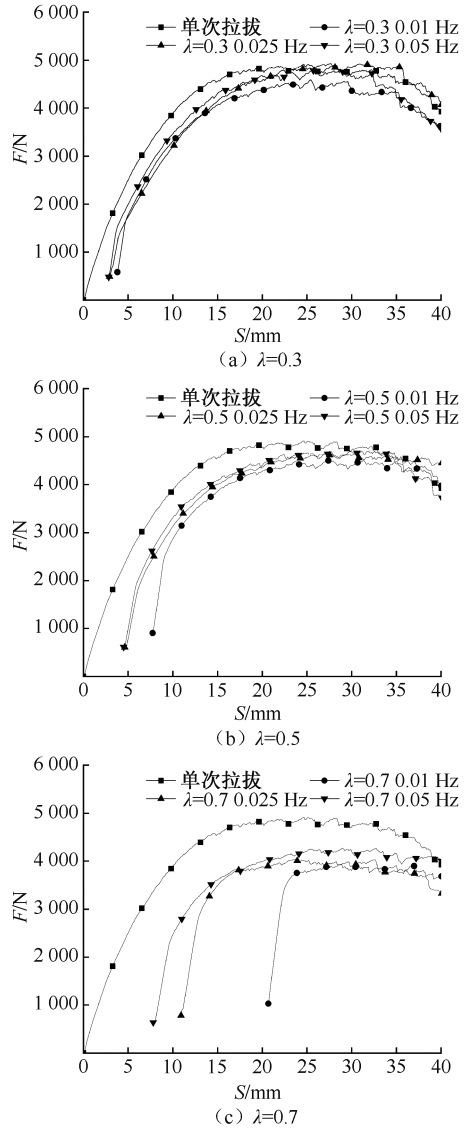


图10 单次拉拔和不同循环频率后承载力对比  
Fig.10 Comparison of bearing capacity after single pulling-out and different cyclic frequencies

由图 10 可知:在同一循环荷载比的情况下,随着循环频率的增加,锚杆的  $F$  缓慢增加。在弹性阶段,随着循环频率的加快,斜率变大,是由于加快循环频率会加密锚杆“肩部”周围土体,进而造成抗拔承载力增大。

由表 7 看出,锚杆循环后位移与循环频率也有一定关系,循环频率越高,循环后锚杆拉拔时的竖向

表7 不同循环频率后抗拔极限承载力衰减率

Table 7 Attenuation rate of ultimate pull-out bearing capacity after different cyclic frequencies

试验编号	$\lambda$	$N/\text{次}$	$f/\text{Hz}$	$F_i/\text{N}$	$S/\text{mm}$	衰减率/%
FZ2	0.3	100	0.01	4 249.8	3.80	10.6
PL1		100	0.025	4 261.5	2.93	10.4
PL2		100	0.05	4 280	2.82	10
FZ4	0.5	100	0.01	4 149.9	7.74	12.8
PL3		100	0.025	4 161.7	4.63	12.5
PL4		100	0.05	4 182.8	4.49	12.1
FZ6	0.7	100	0.01	3 820.5	20.69	19.7
PL5		100	0.025	3 825.8	10.92	19.6
PL6		100	0.05	3 832.5	7.80	19.4

位移越小,且荷载比越大,循环频率对锚杆竖向位移影响也越明显,其原因是随着循环频率的加快,锚杆“肩部”周围土体加密,减小了土体变形,而耦合加大循环荷载比和循环频率影响着锚杆锚固效果。

### 3 试验土体位移场分析

#### 3.1 单次拉拔周围土体位移场

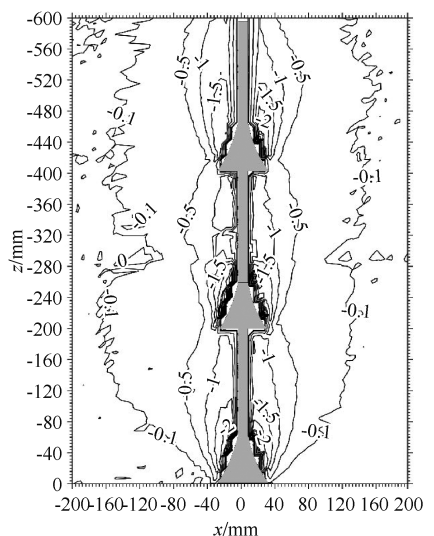
研究不同埋深下多铃型扩体锚杆周围土体变形情况,锚杆承载力达到  $F$  时对应位移为特征点,通过 PIV 技术得到从开始拉拔到特征点时的锚杆周围土体位移场,埋深为 1、2、3 mm 时,锚杆周围土体位移等值线轮廓如图 11 所示。将竖直方向位移等值线为  $-0.1$  的线确定为锚杆拔出的竖向扰动范围界限。“-”号表示土体位移方向为上。

由图 11 可知:埋深从 1 m 增加到 2 m 时,锚杆周围土体影响范围从 350 mm 增加到 380 mm 以上,而当埋深从 2 m 增加到 3 m 时,影响范围出现收缩,从超过 380 mm 降低到 370 mm,这种影响范围先增大后减小的情况与部分学者的研究类似<sup>[4,14-15]</sup>,其原因是试验中采用的加压板前方中间存在开口,缺失部分上部荷载,导致锚固段“肩部”效果降低,进而影响影响范围降低。

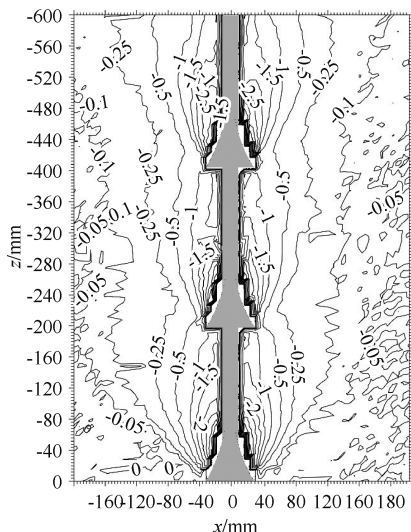
#### 3.2 循环作用后锚杆拉拔周围土体位移场分析

##### 3.2.1 循环荷载比

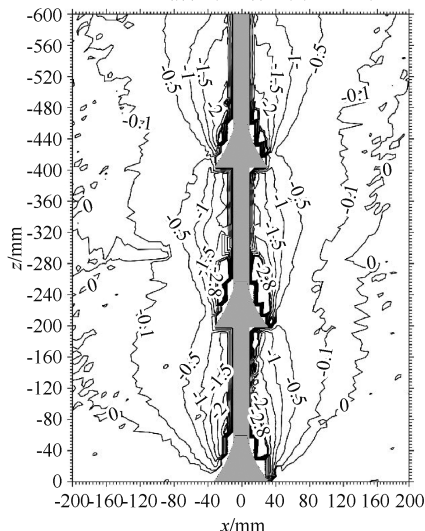
选取试验 FZ2、FZ4、FZ6,研究不同循环荷载比循环后拉拔对周围土体的影响情况。由于循环作用图片在拍摄是噪点较多,难以形成位移为 0.1 的等值线,所以在循环作用下选取以竖直方向位移等值线为  $-0.3$  的线,作为锚杆的竖向拔出扰动界限。图 12 为  $\lambda = 0.3、0.5、0.7$  时,锚杆周围土体位移等值线轮廓。由 12 图可知:循环荷载比  $\lambda = 0.3$  时,锚



(a) 埋深1 m的情况下锚杆周围土体竖向(J1)



(b) 埋深2 m的情况下锚杆周围土体竖向(J2)



(c) 埋深3 m的情况下锚杆周围土体竖向(J3)

图 11 不同埋深锚杆周围土体位移等值线轮廓  
Fig. 11 Soil vertical displacement contours around anchor with different buried depths

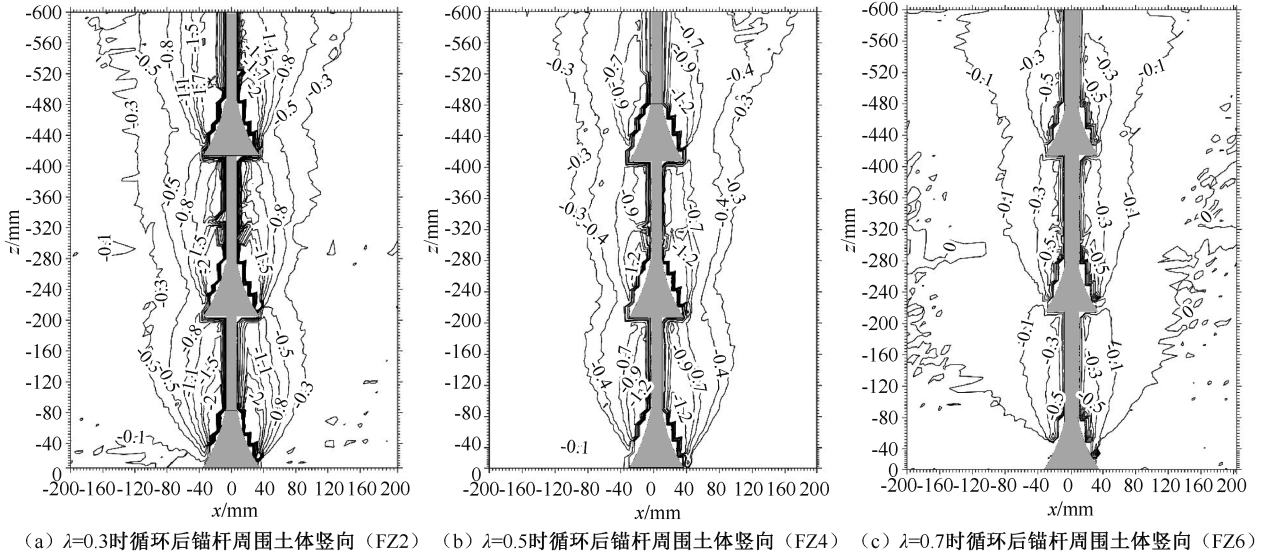


图 12 不同  $\lambda$  下锚杆周围土体位移等值线轮廓

Fig. 12 Soil vertical displacement contours around anchor under different  $\lambda$

杆周围土体影响范围为 270 mm, 相较于单次拉拔时对周围土体扰动影响范围扩大; 循环荷载比  $\lambda = 0.5$  时, 锚杆周围土体影响范围为 300 mm, 位移等值线影响范围有所扩大; 循环荷载比  $\lambda = 0.7$  时, 锚杆周围土体影响范围为 110 mm, 位移等值线影响范围减小。由此得出扰动部分主要集中在扩体“肩部”周围。由图 12 看出, 当循环荷载比  $\lambda \leq 0.5$  时, 锚杆周

围土体的位移不会因为荷载比的大小影响竖向位移范围。而通过上文分析可知, 当循环荷载比  $\lambda \geq 0.7$  时, 锚杆出现拔出破坏。由图 12c 看出, 当锚杆竖向位移影响范围减小, 使得部分土体远端出现向下位移, 说明锚杆周围部分土体破裂面已逐渐形成, 从而导致破裂面两侧土体发生了错动, 这与部分学者的研究类似<sup>[14-15]</sup>。

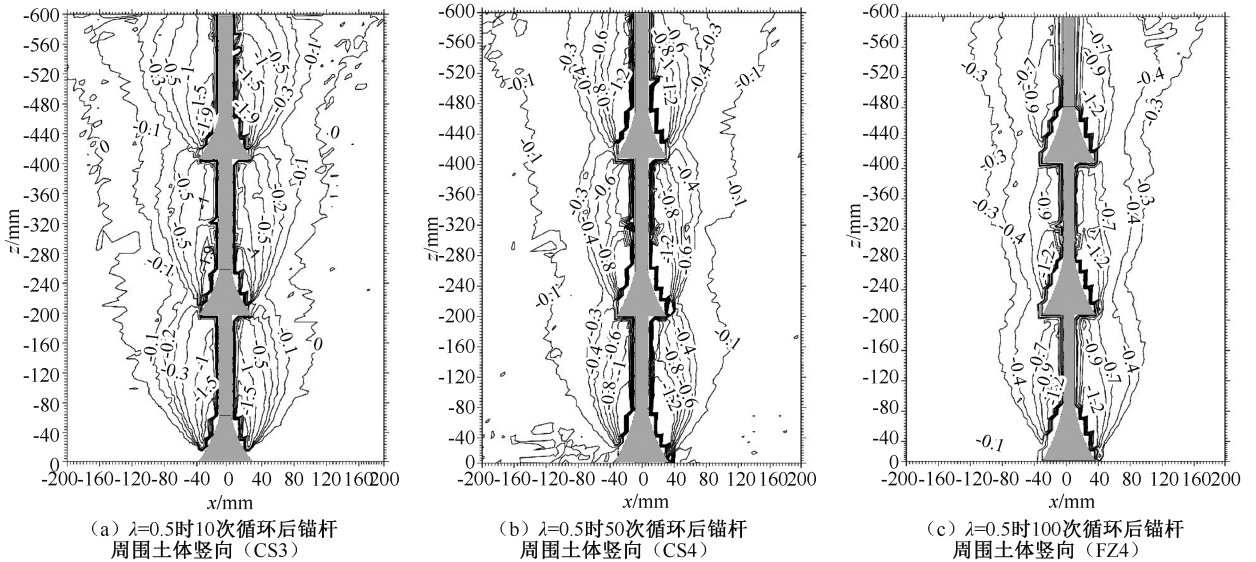


图 13 不同循环次数下锚杆周围土体位移等值线轮廓

Fig. 13 Soil vertical displacement contours around anchor under different cycle times

### 3.2.2 循环次数

选取试验 CS3、CS4、FZ4, 研究不同循环次数循环后拉拔对周围土体的影响情况。  $\lambda = 0.5$  时循环次数为 10、50、100 次下锚杆周围土体位移等值线轮廓如图 13 所示。由图 13 可知: 选取以垂直方向位

移等值线为  $-0.3$  的线, 作为扰动界限。当循环次数从 10 增加到 50 再到 100 次时, 影响范围分别为 180、260、300 mm, 整体影响范围呈增加趋势, 其原因是锚杆周围土体随着循环次数的增加受到的扰动变大, 逐渐向锚杆径向扩散, 从而导致土体受到扰动

后自身抗剪能力下降,锚杆  $F$  也随循环次数的增加而降低。

### 3.2.3 循环频率

选取试验 FZ4、PL3、PL4,研究不同循环次数频率后拉拔对周围土体的影响情况。 $\lambda = 0.5$  时,循环频率为 0.01、0.025、0.05 Hz 下锚杆周围土体位移等值线轮廓如图 14 所示。由图 14 可知:当循环频率为 0.01 Hz 时,锚杆对周围土体影响范围为 300 mm,锚杆顶端比底端影响范围大;当循环频率为

0.025 Hz 时,锚杆对周围土体影响范围为 220 mm,整体呈缩小趋势;当循环频率为 0.05 Hz 时,锚杆对周围土体影响范围为 200 mm。随着循环频率的加快,锚杆影响范围逐渐减小。由图 14 看出,频率增加使得等值位移线在扩体表面的线型会更加外扩,类似“灯笼”,频率增加会使“肩部”效应更加明显,原因是由于循环频率的加快,锚杆“肩部”附近土体被振捣更加密实,故导致拉拔时锚杆对周围土体影响范围减小,锚杆  $F$  也随之增加。

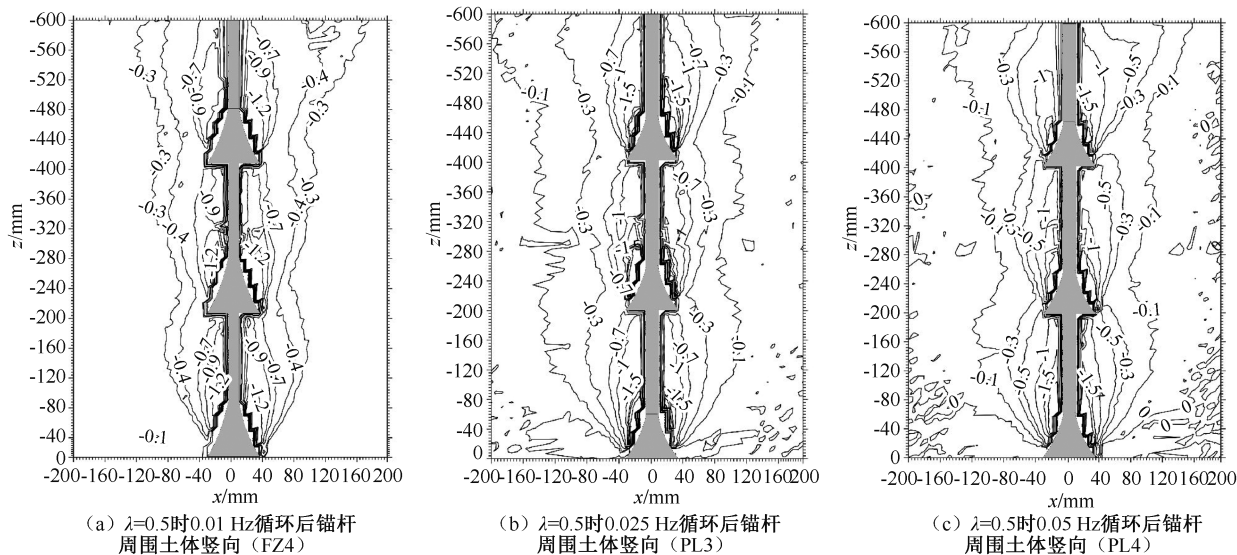


图 14 不同循环频率下锚杆周围土体位移等值线轮廓

Fig. 14 Soil vertical displacement contours around anchor under different cyclic frequencies

## 4 结论

1) 深埋情况下,多铃型扩体锚杆与其他扩体锚杆在拔出过程中承载力位移曲线区别明显,大致分为 3 个阶段:弹性阶段、震荡阶段和破坏阶段。

2) 循环荷载比对锚杆抗拔极限承载力影响较大,其衰减最大可达 20%;当循环荷载比  $\geq 0.7$  时,锚杆周围部分土体破裂面逐渐形成。

3) 循环荷载的次数和频率均会降低锚杆循环荷载后的锚杆抗拔极限承载力。循环次数增加会使锚杆抗拔极限承载力进一步降低,而循环频率加快会使锚杆  $F$  在一定程度上小幅增加。

4) 循环作用的荷载比和循环次数增大均会增加锚杆在循环加载后的竖向位移,其中循环荷载比的影响最为显著,最大可达 20 mm,而循环频率的加快会降低锚杆在循环荷载后的竖向位移。

5) 分析锚杆拉拔-位移曲线和竖向位移场的结果,在试验模拟砂土中,考虑锚杆竖向位移的安全范围( $\leq 10$  mm),结果得出抗浮多扩体锚杆在循环荷载作用下仅能提供极限承载力设计值的 60%,所以在设计时为保证构筑物安全,应留有足够富余。建议将抗浮多扩体锚杆设计安全系数设为  $\geq 1.7$  较为合理。其他岩土条件下的抗浮锚杆演化机制还需在日后工作中进一步探索。

## 参考文献

- [1] 于贵,李星,舒中文,等.高层建筑地下室上浮变形特征及处置措施研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(1):211-218.  
YU Gui, LI Xing, SHU Zhongwen, et al. Research on floating deformation characteristics and treatment measures of high-rise building basement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 211-218.

- [2] FUJITA K, UEDA K, KUSABUKA M. A method to predict the load-displacement relationship of ground anchors[J]. *Revue Française de Géotechnique*, 1978, 3: 58-62.
- [3] 王勇华, 王小勇, 牛云彪, 等. 黄土地区压力型锚索锚固机理数值模拟研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(增2): 693-701.  
WANG Yonghua, WANG Xiaoyong, NIU Yunbiao, et al. Numerical simulation research on anchoring mechanism of compression anchors in loess areas[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(S2): 693-701.
- [4] 赵象桌, 张宏伟, CAO Chen, 等. 大直径玻璃钢锚杆工作面帮支护性能试验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(2): 118-124.  
ZHAO Xiangzuo, ZHANG Hongwei, CAO Chen, et al. Experimental study on panel side supporting performance of large diameter FRP bolts[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(2): 118-124.
- [5] 夏元友, 陈晨, NI Qing. 透明土中连续球体型锚杆拔出机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(5): 804-812.  
XIA Yuanyou, CHEN Chen, NI Qing. Pull-out mechanism of continuous ball shape anchors in transparent soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(5): 804-812.
- [6] 白顺果, 侯永峰, 张鸿儒. 交通荷载作用下饱和软基的模型试验及变形分析[J]. *中国安全科学学报*, 2004, 14(12): 108-110, 107.  
BAI Shunguo, HOU Yongfeng, ZHANG Hongru. Model test and deformation analysis on saturated soft foundation under traffic loading[J]. *China Safety Science Journal*, 2004, 14(12): 108-110, 107.
- [7] 陈秋南, 刘文骏, 赵磊军, 等. 充气锚杆循环荷载作用下的位移规律试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(2): 373-380.  
CHEN Qiunan, LIU Wenjun, ZHAO Leijun, et al. Experimental study on displacement law of inflatable anchor under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(2): 373-380.
- [8] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(7): 619-631.
- [9] 杨晓峰, 李伟, 姚兆明. 基于 PIV 技术的冲刷条件下水平桩-土变形机制研究[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(2): 102-108.  
YANG Xiaofeng, LI Wei, YAO Zhaoming. Study on horizontal deformation mechanism of pile-soil under scour condition based on PIV technique[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, 40(2): 102-108.
- [10] BS 8081: 2015, Codo of practice for ground anchorages[S].
- [11] 芮瑞, 肖风钰, 程永辉, 等. 不同埋置深度下的锚板抗拔特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(10): 2 032-2 041.  
RUI Rui, XIAO Fengyu, CHENG Yonghui, et al. Experimental study on pull-out resistance of plate anchors at different buried depths[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(10): 2 032-2 041.
- [12] 曹佳文, 彭文祥, 郭振斌, 等. 充气锚杆在砂土中变形与承载特性试验研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(5): 1 369-1 374.  
CAO Jiawen, PENG Wenxiang, GUO Zhenbin, et al. Experimental study on deformation and bearing features of inflatable anchors in sands[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(5): 1 369-1 374.
- [13] YBT 4659—2018, 抗浮锚杆技术规程[S].  
YBT 4659-2018, Technical specification for anti-floating anchors[S].
- [14] 夏元友, 陈晨, NI Qing. 基于透明土的 4 种锚杆拔出对比模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(3): 399-407.  
XIA Yuanyou, CHEN Chen, NI Qing. Comparative modelling of pull-out process of four different anchorages by using transparent soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(3): 399-407.
- [15] 李元海, 朱合华, 靖洪文, 等. 基于数字照相的砂土剪切变形模式的试验研究[J]. *同济大学学报*, 2007, 35(5): 685-689.  
LI Yuanhai, ZHU Hehua, JING Hongwen, et al. Experimental investigation of shear deformation patterns in sands based on digital image correlation[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2007, 35(5): 685-689.

作者简介: 陈晨 (1984—)男,湖北武汉人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事地面与地下工程、岩土锚固工程方面的研究。E-mail: clarencechen@wit.edu.cn。

