

DOI: 10.11779/CJGE2020S1038

水平荷载作用下压力型扩大头锚杆承载特性试验研究

王哲¹, 陆柯颖¹, 王乔坎², 崔涵晟¹, 任康¹, 马少俊², 许四法^{*1}

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 通过自行研制的模型试验装置, 利用 PIV 技术研究水平荷载作用下压力型扩大头锚杆力学特性以及周围土体位移发展机理。试验结果表明, 压力型扩大头锚杆的受力过程可分为侧摩阻力阶段、过渡阶段和端部阻力阶段, 在每个阶段转变之间荷载位移曲线会出现“拐点”。基于数字图像分析, 提出压力型扩大头锚杆扩大头锚固段近端土体临界位移场影响范围呈“灯泡型”, 且当扩大头锚固段长径比超过 3:1 后, 随着继续增大长径比对扩大头锚固段近端的位移场范围基本无影响。

关键词: 水平荷载; 压力型扩大头锚杆; 模型试验; 破坏特性; 土体发展机理

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0193-05

作者简介: 王哲(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。E-mail: wangzsd@zjut.edu.cn。

Experimental study on failure characteristics of pressured under-reamed anchors under horizontal loads

WANG Zhe¹, LU Ke-ying¹, WANG Qiao-kan², CUI Han-sheng¹, REN Kang¹, MA Shao-jun², XU Si-fa¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Zhejiang 310023, China; 2. Zhejiang Province

Institute of Architectural Design and Research, Zhejiang 310006, China)

Abstract: Through a self-developed model test device and PIV technology, the mechanical characteristics of pressured under-reamed anchors under horizontal loads and the development mechanism of the surrounding soil displacement are studied. The test results show that the stress process of the pressured under-reamed anchors can be divided into lateral friction stage, transition stage and end resistance stage, and there will be an "inflection point" in the load-displacement curve between the transitions of each stage. According to the image analysis, it is proposed that the influence range of critical displacement field of soil around the under-reamed anchorage segment of pressured anchor is "bulb-shaped". When the length-diameter ratio of the enlarged head anchoring section exceeds 3:1, the displacement field at the proximal end of the under-reamed anchoring section is basically unaffected with the continuous increase of length-diameter ratio.

Key words: horizontal loading; pressured under-reamed anchor; model test; failure characteristic; development mechanism of surrounding soil

0 引言

近年来, 岩土锚固技术凭借其高效、经济等特点在地下空间开发过程中应用十分广泛^[1]。随着东南沿海深厚软土地区地下空间开发深度的不断提升, 对锚固技术的要求也越来越高, 传统的锚杆的抗拔承载力已无法满足工程需求。为此, 国内外工程人员研发了一种压力型扩大头锚杆来解决传统锚杆在软土地区承载力低, 变形大等问题。

在压力型锚杆力学性能方面, 国内外学者近年来进行了大量的研究, 并取得了一些有益的成果^[2-10], 表明压力型锚杆极限承载力较拉力型锚杆在相同条件下有明显提高, 并能显著提高锚杆的可靠性。

而在扩大头锚杆的研究方面, 国内外学者也进行

了大量研究^[11-15], 得到许多有益的结论。而在基坑工程中, 用于支护体系的锚杆大多为近似水平向设置, 与竖向向设置的锚杆受力机理存在较大的差异。锚杆竖向拉拔试验仅体现了端部阻力对锚杆承载力的影响, 不能体现出锚固段末端端阻力的影响。王哲等^[16]基于极限平衡原理, 推导出适用于扩大头可回收预应力锚杆的极限抗拔力计算公式, 并通过实际工程验证计算公式的适用性。

由于目前国内外学者对扩大头锚杆的研究大多为竖向拉拔试验, 对应用于基坑支护工程水平方向扩大

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778585)

收稿日期: 2020-06-03

*通信作者 (E-mail: xusifa@zjut.edu.cn)

头锚杆承载机理的研究较少，实际工程中水平方向扩大头锚杆由于锚周土体自重影响而导致界面应力非对称分布，且存在由于埋深造成的土拱效应。为此，本文通过室内相似模型试验并结合粒子图像测速技术（PIV）对水平荷载作用下扩大头锚固段周围土体变形发展过程以及破坏模式进行研究。

1 室内模型试验

1.1 模型试验装置

考虑压力型扩大头锚杆模型的尺寸，同时为避免模型试验产生边界影响效应，本次模型试验主要考虑几何相似，考虑实际锚杆尺寸，选取相似系数为 1/10，采用几何尺寸为 1.00 m（长）×0.45 m（宽）×0.80 m（高），四周由角钢焊接及透明钢化玻璃组成的模型箱。在距离箱底 0.35 m 处的侧边角钢开有 10 mm 的圆孔，以便钢螺纹钢杆穿出模型箱外侧。试验用到主要仪器为测定抗拔力的 DM-BS 型拉力传感器与测量位移的百分表、采集试验数据的数据采集仪、加载滑轮及砝码、带状光源等辅助设备。试验装置见图 1。

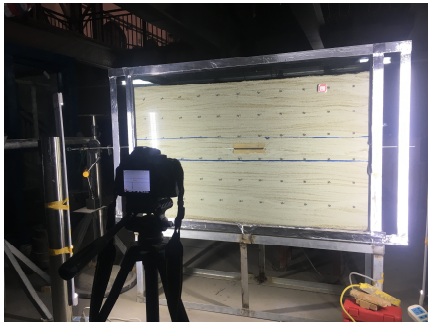


图 1 扩大头锚杆半模型试验装置

Fig. 1 Half-model test set-up of under-reamed anchor

1.2 土体材料参数

试验采用中国 ISO 标准砂，模拟地基制备采用分层填筑并加以人工振捣压实的方法通过控制每层填土厚度的方法来确保填土的均匀性，每层填土厚度 100 mm，填土总高度为 700 mm。试验模拟地基土的颗粒级配曲线及其物理力学性能指标如表 1 所示。

表 1 标准砂物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of standard sand

重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	密度 ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水 率/%	黏聚 力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(^\circ)$	土粒相 对密度 G_s	不均匀 系数 C_u
17.25	1.76	0.037	0	33.2	2.67	4.77

1.3 模型锚杆制备

扩大头锚杆锚固段材料分别采用直径为 5 cm，长度分别为 10，15，20 cm 的半圆形木块及橡胶模拟扩

大头锚固段，同时采用直径为 5 mm，长度为 100 cm 的钢螺纹杆模拟扩大头锚杆自由段，具体参数如表 2 所示。为能够真实模拟扩大头锚固段-砂土界面接触，在锚固段表面涂抹环氧树脂并将标准砂黏贴在锚固段侧表面，并保持立面光滑平整。由于钢螺纹杆的弹性模量远大于锚固段材料。因此，在荷载-位移曲线分析中忽略螺纹杆自身的弹性位移。

表 2 扩大头锚杆物理力学参数表

Table 2 Physical and mechanical parameters of under-reamed anchors

类型	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	抗压强度 /MPa	泊松比 ν
扩大 木块	6.9	7.5	24	0.47
头锚 橡胶	12.5	4.4	—	0.49
固段 钢螺纹杆	79.3	206	—	0.30

2 锚杆荷载-位移曲线分析

2.1 不同长度锚固段承载力影响分析

从图 2 中可知，扩大头锚杆荷载-位移曲线大致可分为 3 个阶段，其中橡胶锚固段的锚杆荷载-位移曲线，第一阶段和第二阶段的区分不明显，这可能是由于橡胶锚固段侧向膨胀以及橡胶锚固段与钢化玻璃之间存在不可忽略的摩擦等因素造成。

第一阶段为加载初期的侧摩阻力阶段（*oa* 段）。此阶段内，荷载-位移曲线基本呈线性增长，位移增长速率较为缓慢，抗拔承载力主要由锚固段的侧摩阻力提供，并且锚杆的位移增量相对较小。当位移在 1.2 mm 左右时，开始进入第二阶段，此时 10，15，20 cm 木制锚固段对应的抗拔力分别为 160.15，116.09，163.77 N，而橡胶锚固段对应的抗拔力分别为 61.02，76.30，81.21 N。

第二阶段为过渡阶段（*ab* 段），荷载-位移曲线的斜率减小，位移增长速率略微增大，扩大头锚固段近端土体开始形成局部的压密区，近端土体提供的抗拔力逐渐增大，锚杆的位移增量仍然相对较小。当木制锚固段位移在 2.2 mm 左右时，荷载位移曲线出现一个拐点，开始进入第三阶段，此时对应的抗拔力分别为 206.72，196.66，232.29 N。而对于橡胶锚固段对应的锚固段位移在 4.4 mm 左右时，开始进入第三阶段，此时抗拔力分别为 198.90，200.93，215.98 N。

第三阶段为端部阻力阶段（*bc* 段），荷载-位移曲线斜率出现较大幅减小，当木制锚固段位移在 5.30 mm 左右时，荷载-位移曲线再次出现一个明显的拐点，对应的抗拔力分别为 291.61，323.93，331.34 N。

而橡胶锚固段在锚固段位移在 10.90 mm 左右时, 荷载-位移曲线再次出现一个明显的拐点, 对应的抗拔力分别为 321.48, 367.66, 350.31 N。此后, 随着荷载的增大, 位移急剧增加, 表明锚杆发生破坏。

在两者锚杆发生破坏后继续增加荷载的过程中(c 段以后), 扩大头锚杆位移收敛, 并在锚杆荷载增长情况不大的情况下, 锚杆再次破坏。在整个加载过程中, 荷载位移曲线呈台阶状递增趋势, 每次破坏的荷载增加值不断减小。

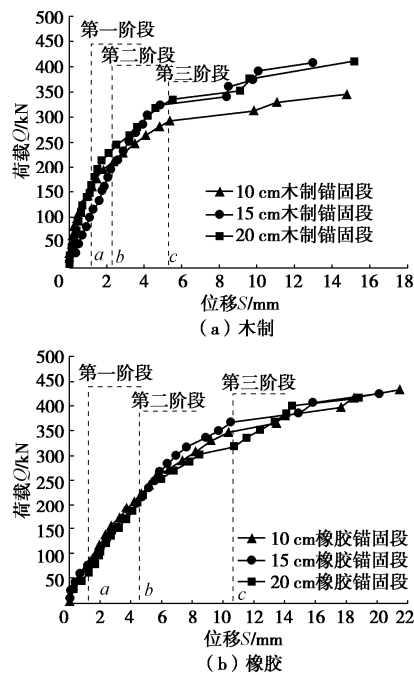


图 2 扩大头锚杆荷载 - 位移曲线

Fig. 2 Q - S curves of under-reamed anchors

当锚固段长度为 10, 15 cm 时, 木制锚固段的极限抗拔承载力提高 11.08%, 对应橡胶锚固段极限抗拔承载力提高 14.36%, 增加锚固段长度对锚杆极限抗拔承载力影响较大。当锚固段长度为 15 cm 与 20 cm 时, 木制锚固段的极限抗拔承载力提高 2.29%, 增加锚固段长度对锚杆极限抗拔承载力基本没有影响, 仅略微提高锚杆摩擦阻力阶段的荷载极限值。而对应橡胶锚固段极限抗拔承载力承载力相差不大, 因此可认为扩大头锚杆极限抗拔承载力大小主要取决于扩大头锚固段端部阻力大小, 且当长径比超过 3 : 1 时, 锚固段大小对锚杆极限抗拔承载力影响不大。

2.2 不同弹模对锚杆极限承载力影响分析

进一步对比分析相同长度的木制及橡胶锚固段的荷载 - 位移曲线, 并将数据列于表 3。当达到极限抗拔承载力时, 相同长度的橡胶锚固段极限抗拔承载力比木制锚固段承载力的增量为 10.24%, 13.50%, 5.72%。

表 3 锚固段对锚杆承载力的影响

Table 3 Effects of water content on bearing capacity of anchors				
类型	锚固段长度/cm	第一阶段承载力/N	第二阶段承载力/N	第三阶段承载力/N
木制	10	160.15	206.72	296.61
	15	116.09	196.66	323.93
	20	163.77	232.29	331.34
橡胶	10	61.02	198.90	321.48
	15	76.30	200.93	367.66
	20	81.21	215.98	350.31

同时, 木制锚固段达到破坏时的位移为 5.3 mm, 约为锚固段直径的 10%, 而橡胶锚固段达到破坏时的位移为 10.9 mm, 约为木制锚固段的 2 倍。这主要是由于橡胶锚固段弹性模量相对较小, 当施加水平荷载后, 橡胶锚固段产生了较大的轴向压缩变形, 而木制锚固段的弹性模量相对较大, 轴向压缩变形相对较小, 因此锚固段长度对极限承载力状态下锚杆位移量的影响相对较小。橡胶锚固段受压后, 锚固段发生侧向膨胀, 进一步增大了锚固段侧表面所受的正向土压力, 使之相较于木制锚固段有着更大的围压, 进一步增强了锚杆的极限抗拔承载力。因此, 锚固段弹性模量的大小对锚杆变形和极限承载抗拔力均有影响, 对变形影响较大, 对极限抗拔承载力大小的影响相对较小。

3 锚周土体位移场发展过程分析

3.1 不同长度锚固段周边土体位移矢量图

针对不同长度扩大头锚固段模型材料对锚周土体位移场变化的影响进行研究, 如图 3, 4 所示。

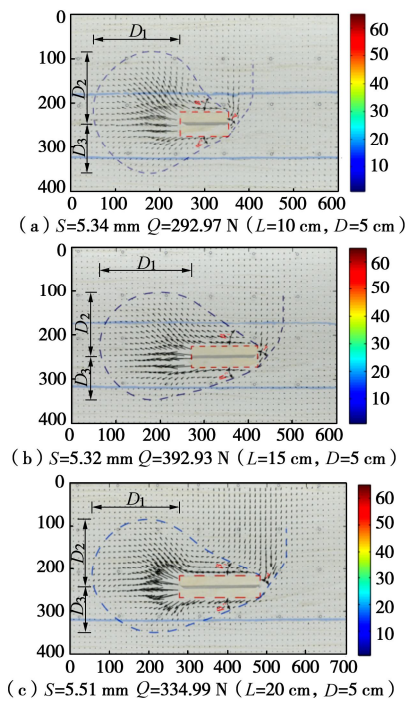


图 3 木制扩大头锚固段周边土体位移场

Fig. 3 Displacement fields of soil around wooden under-reamed bonding segment

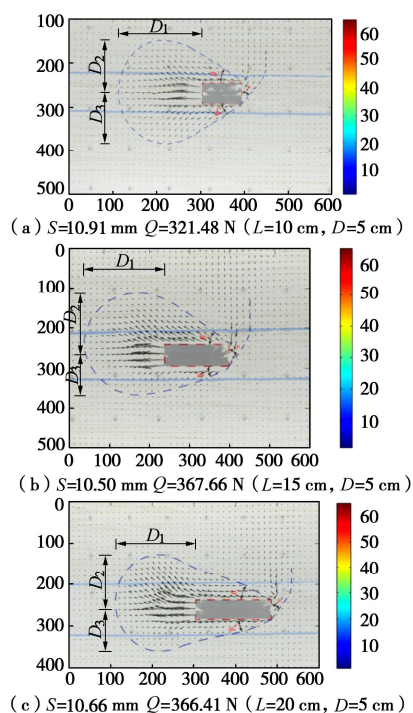


图4 橡胶扩大头锚固段周围土体位移场

Fig. 4 Displacement fields of soil around rubber under-reamed bonding segment

表4 临界位移场影响范围统计

Table 4 Influence ranges of critical displacement field

类别	长度/cm	D_1/D	D_2/D	D_3/D	β_1 /(°)	β_2 /(°)
木制 锚固 段	10	3.6	3.0	2.1	34	28
	15	4.3	3.0	2.0	35	28
	20	4.3	3.1	2.1	25	21
橡胶 锚固 段	10	4.0	2.5	2.4	35	34
	15	3.8	2.8	1.9	37	34
	20	3.9	2.8	2.1	32	28

对于不同长度的扩大头锚固段,当扩大头锚固段长度与直径的比例为3:1时,锚固段的临界位移场基本达到了稳定状态,即扩大头锚固段近端径向影响范围 D_2 约为 $3D$,轴向影响范围约 D_1 为 $4.5D$ 。若继续增大长径比,锚固段近端临界位移场的影响范围基本不变。这主要是由于锚杆到达极限抗拔力时,抗拔承载力主要由锚固段前端的土体提供,而土体压缩范围主要取决于锚固段的直径大小。

当木制锚固段和橡胶锚固段长度由15 cm增加到20 cm时,锚固段的侧面土体剪切破坏角 β_1 , β_2 均出现减小的情况。这主要是由于锚固段近端土体压密区对锚固段的侧摩阻力存在增强作用,当锚固段长度较短时,压密区对锚固段远端的侧面剪切破坏角影响较为明显;当锚固段长径比超过3:1时,由于压密区影响范围基本不变,而锚固段的加长使得锚固段远端受到端部压密区的影响减弱,导致锚固段的侧面土体剪切破坏角出现了减小的趋势。同时,该图像验证了扩

大头锚杆荷载-位移曲线长径比超过3:1时极限抗拔承载力基本没有影响的分析。

3.2 不同弹模锚固段对锚周土体位移场影响分析

对于木制及橡胶两种弹性模量不同的扩大头锚固段,在相同长度条件下,当处于临界状态时橡胶锚固段的侧面土体剪切破坏角相较于木制锚固段有所增大。其中,对于长度为10 cm的锚固段,橡胶锚固段的侧面土体剪切破坏角 β_1 、 β_2 的大小为木制锚固段的103%、121%;对于长度为15 cm的锚固段,橡胶锚固段的 β_1 、 β_2 的大小较木制锚固段增大了6%和21%;对于长度为20 cm的锚固段,橡胶锚固段的 β_1 、 β_2 的大小较木制锚固段增大了28%和33%。这是由于橡胶弹性模量相对较小,当底部施加水平荷载后,锚固段远端轴向压缩并向侧面膨胀,使得作用在锚固段侧面的正向土压力增加,从而导致橡胶锚固段的侧面土体剪切破坏角相对木制锚固段有所增加。同时,当锚固段长度较短时,锚固段近端压密区对锚固段远端侧面土体剪切破坏角影响较明显,使得长度为10, 15 cm的橡胶锚固段与木制锚固段侧面土体剪切破坏角增量大于长度为20 cm的锚固段。

同时,通过对表4进行分析可知,锚固段的临界位移场在扩大头锚固段长径比为3:1时达到稳定状态,且木制及橡胶锚固段周边土体位移场影响范围基本一致,因此扩大头锚杆土体压缩范围主要取决于锚固段的直径大小,锚固段材料弹性模量的变化对最终的临界位移场影响范围的影响相对较小。

4 结 论

(1)压力型扩大头锚杆受力过程分为侧摩阻力阶段、过渡阶段和端部阻力3个阶段。在每个阶段转变之间会出现“拐点”。

(2)相同长度的扩大头锚固段在达到极限承载力时,橡胶锚固段的极限承载力较于木制锚固段有小幅度的增加,但锚固段位移大于木制锚固段,说明锚固段弹性模量对锚杆极限承载力具有一定影响。试验过程中需考虑锚杆弹性模量对锚杆抗拔承载力的影响。

(3)压力型扩大头锚杆临界位移场影响范围均呈“灯泡型”。当锚固段长径比达到3:1后即可充分发挥扩大头锚固段的近端土体压力。此时,近端径向影响范围约为 $3D$,轴向影响范围约为 $4.5D$ 。因此,建议在实际应用过程中,需合理设置锚杆间距,以减少锚固段之间相互影响。

参考文献:

[1] 贾金青. 深基坑预应力锚杆柔性支护法的理论及实践[M].

- 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (JIA Jing-qing. Theory and Practice of Flexible Support Method of Pre-Stressed Anchor Rod in Deep Foundation Pit[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014. (in Chinese))
- [2] 张乐文, 汪 稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, **23**(5): 627 - 631. (ZHANG Le-wen, WANG Ren. Research on status quo of anchorage theory of rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(5): 627 - 631. (in Chinese))
- [3] 尤春安. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004. (YOU Chun-an. Study on the Theory and Application of Stress Transfer Mechanism of Anchorage System[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese))
- [4] 程良奎. 岩土锚固研究与新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(21): 3803 - 3810. (CHENG Liang-kui. Research and new progress in ground anchorage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(21): 3803 - 3810. (in Chinese))
- [5] 程良奎, 胡建林, 张培文. 岩土锚固技术新发展[J]. 工业建筑, 2010, **40**(1): 98 - 101. (CHENG Liang-kui, HU Jian-lin, ZHANG Pei-wen. The new development of ground anchorage in China[J]. Industrial Construction, 2010, **40**(1): 98 - 101. (in Chinese))
- [6] 尤志嘉, 付厚利, 尤春安, 等. 土层锚固体应力传递机制[J]. 岩土力学, 2018, **39**(1): 85 - 92. (YOU Zhi-jia, FU Hou-li, YOU Chun-an, et al. Stress transfer mechanism of soil anchor body[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(1): 85 - 92. (in Chinese))
- [7] 孙志峰. 高精度水平锚索技术研究及在三峡工程中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2006. (SUN Zhi-feng. 2006. Research on Technology of Horizontal Cables with High Accuracy and its Application in the Three Gorges Project[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese))
- [8] 张永兴, 卢 黎, 饶泉宇, 等. 压力型锚杆力学性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **37**(7): 2045 - 2050. (ZHANG Yong-xing, LU Li, RAO Xiao-yu, et al. Model test research on mechanical behavior of compression type-rock bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **37**(7): 2045 - 2050. (in Chinese))
- [9] 贺建清, 陈 清, 陈秋南. 压力型与拉力型锚杆工作性状
- 的室内足尺模型对比试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, **40**(4): 50 - 55. (HE Jian-qing, CHEN Qing, CHEN Qiu-nan. A comparative study of work characteristics of pressure-type and tensile-type anchors based on indoor full-sized model tests[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, **40**(4): 50 - 55. (in Chinese))
- [10] LI Jian, LI Jie. Numerical analysis on a new pressure-type anchor cable with precast anchor head based on FLAC^{3D}[C]// ACSR-Advances in Computer Science Research, 2016, **67**: 237 - 241.
- [11] 夏柏如, 方铭东. 一种扩体头型土锚的试验[J]. 现代地质, 1997, **11**(1): 91 - 94. (XIA Bo-ru, FANG Ming-dong. Test of one under-reamed ground anchor[J]. Modern Geology, 1997, **11**(1): 91 - 94. (in Chinese))
- [12] 曾庆义, 杨晓阳, 杨昌亚. 扩大头锚杆的力学机制和计算方法[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1359 - 1367. (ZENG Qing-yi, YANG Xiao-yang, YANG Chang-ya. Mechanical mechanism and calculation method of bid expanded anchor rods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1359 - 1367. (in Chinese))
- [13] 张慧乐, 刘 钟, 徐龚鑫, 等. 扩体锚杆尺寸效应模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 468 - 472. (ZHANG Hui-le, LIU Zhong, XU Gong-xin, et al. Model tests on size effect of under-reamed ground anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 468 - 472. (in Chinese))
- [14] 郭 钢, 刘 钟, 邓益兵, 等. 砂土中扩体锚杆承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(12): 3645 - 3652. (GUO Gang, LIU Zhong, DENG Yi-bing, et al. Model test research on bearing capacity characteristics of underreamed ground anchor in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(12): 3645 - 3652. (in Chinese))
- [15] LIU J, LIU M, ZHU Z. Sand Deformation around an uplift plate anchor[J]. Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(6): 728 - 737.
- [16] 王 哲, 王乔坎, 马少俊. 扩大头可回收预应力锚索极限抗拔力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊 2): 202 - 208. (WANG Zhe, WANG Qiao-kan, MA Shao-jun. A method for calculating ultimate pullout force of recoverable under-reamed prestressed anchor cable[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S2): 201 - 208. (in Chinese))

(编校: 孙振远)