

DOI: 10.11779/CJGE201903009

新型拉压复合型锚杆锚固性能研究 II：模型试验

涂兵雄¹, 俞 缙¹, 何锦芳¹, 程 强², 许国平³, 贾金青⁴

(1. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 厦门源昌城建集团有限公司, 福建 厦门 361004;
3. 福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福建 福州 350025; 4. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 针对传统拉力型和压力型锚杆存在受力集中、锚固体与岩土体界面黏结强度发挥不充分、抗拔承载力偏低的问题, 研发了一种新型拉压复合型锚杆。通过对传统锚杆及拉压复合型锚杆开展模型试验, 对比研究了不同锚杆的极限抗拔承载力及其锚固性能。结果表明: 拉压复合型锚杆极限抗拔承载力比传统拉力型锚杆大幅提高, 拉压长度比为 1:2 和 2:1 时, 分别提高 79% 和 161%, 且具有更好的位移延性和抗变形能力; 拉压复合型锚杆峰后残余抗拔承载力显著提高, 传统拉力型和压力型锚杆稳定残峰比最大值均不超过 0.40, 锚头相对拔出变形 $\xi_s=2.5\%$ 时, 残峰比平均值分别为 0.292 和 0.259; TC360-12 锚杆和 TC360-21 锚杆稳定残峰比最小值分别不低于 0.45 和 0.60, $\xi_s=2.5\%$ 时, 残峰比平均值分别为 0.545 和 0.790; 拉压长度比为 2:1 的拉压复合型锚杆即将破坏时, 受拉锚固段和承压锚固段协同承载能力更强, 界面黏结强度得到充分发挥, 锚杆极限抗拔承载力更高。

关键词: 拉压复合型锚杆; 模型试验; 极限抗拔承载力; 荷载位移曲线

中图分类号: TU455

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)03-0475-09

作者简介: 涂兵雄(1984-), 男, 主要从事基坑工程、边坡工程及地下空间工程等领域的教学与科研工作。E-mail: tubingxiong@163.com。

Analysis of anchorage performance on new tension-compression anchor II: model test

TU Bing-xiong¹, YU Jin¹, HE Jin-fang¹, CHENG Qiang², XU Guo-ping³, JIA Jin-qin⁴

(1. Fujian Engineering Technology Research Center for Tunnel and Underground Space, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Yuanchang Urban Construction Group Co., Ltd., Xiamen 361004, China; 3. Fujian Academy of Building Research Co., Ltd.,

Fuzhou 350025, China; 4. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The new tension-compression composite anchor (TC-anchor) is developed to overcome the shortcomings of the traditional tensile-type anchor (T-anchor) and pressure-type anchor (C-anchor), such as stress concentration, insufficient bonding strength between anchorage body and soil mass, and low uplift bearing capacity. The ultimate uplift bearing capacity and anchorage performance are analyzed comparatively based on the model tests for T-anchor, C-anchor and TC-anchor. The results show that, in contrast with T-anchor, the ultimate uplift bearing capacities of TC-anchor significantly increase by 79% and 161% respectively for the tension-compression anchorage length ratios (TCAL-ratio) of 1:2 and 2:1. The TC-anchor has better displacement ductility and deformation resistivity, and its residual uplift bearing capacity increases significantly. The maximum ratios of the residual uplift bearing capacity to the ultimate one (RU-ratio) of T-anchor and C-anchor are both not more than 0.40, with the average values of 0.292 and 0.259 for relative out deformation of anchor head $\xi_s=2.5\%$. The tension and compression anchorage segments of TC-anchor with TCAL-ratio of 2:1 have stronger coordination-bearing capacity. When the TC-anchor is closed to failure, the bonding strength between grouting body and concrete failure plays sufficiently. So the ultimate uplift bearing capacity of TC-anchor with TCAL-ratio 2:1 is higher.

Key words: tension-compression composite anchor; model test; ultimate uplift bearing capacity; load-displacement curve

0 引 言

近年来, 随着国家城镇化建设的飞速发展和城市建设用地的日益稀缺, 地下空间的开发与利用^[1-2]正在

向深基坑、大规模方向发展。大量的地下交通枢纽、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408242, 51678112); 中国博士后科学基金项目(2016M592082)

收稿日期: 2018-02-03

地下商业城、地下车库及地下人防工程等在城市中不断涌现。深基坑支护工程面临挑战的同时,也为岩土工程锚固技术的发展带来新的机遇。各种新型锚固技术不断创新并应用于实际工程,为国家的经济建设和城市发展做出了巨大贡献。

如,郭钢等^[3-4]通过模型试验研究了均质砂土中扩体锚杆的承载特性,研究表明,与普通拉力型锚杆相比,扩体锚杆的极限承载力、承载比与安全性均有大幅度提高,增大扩体锚固段直径可明显提高扩体锚杆承载力。胡建林等^[5]针对扩体锚杆研制了机械扩孔器,抗拔试验研究结果表明扩体锚杆的承载力比普通锚杆平均提高 20%~30%。张虎元等^[6]针对楠竹加筋复合锚杆开展现场拉拔试验,研究了钢绞线与内黏结剂的滑移模型;并通过单轴压缩试验、拉拔试验和三点弯曲试验测试了楠竹加筋复合锚杆的静力学指标^[7]。曹佳文等^[8]通过模型试验研究了充气锚杆在砂土中的荷载位移曲线规律,得出充气锚杆的极限抗拔承载力约为单锚片螺旋锚的 4.3 倍,是双锚片螺旋锚的 1.9 倍,且极限侧阻力约为一般注浆扩大头锚杆的 2~4 倍。彭文祥等^[9]通过球孔扩张理论较好地描述了充气锚杆膨胀体端部对土体产生的弹性、塑性变形力学机制,并得到了充气锚杆极限承载力的理论计算方法。刘钟等^[10]研发了具有多重防腐功能的承压型囊式扩体锚杆,承载力比传统锚杆提高 2~3 倍。上述新型锚杆技术的开发、研究及应用取得了较好的理论成果和工程效益。

本文针对新型拉压复合型锚杆^[11],对其开展了室内模型试验研究,并与传统拉力型和压力型锚杆进行对比,分析了拉压复合型锚杆的承载特性,以期对拉压复合型锚杆的后续理论研究及工程应用提供参考和依据。

1 拉压复合型锚杆

传统锚杆按锚固段的受力形式可分为两类^[12],即荷载集中型锚杆(如拉力型锚杆、压力型锚杆)和荷载分散型锚杆(如拉力分散型锚杆、压力分散型锚杆)。而拉压复合型锚杆是有别于传统锚杆的一种新型锚杆,其结构示意图如图 1 所示。它在传统拉力型锚杆锚固段的杆体中固定增设一个承压板,并通过适当的技术措施,把传统单一的锚固段划分为同时具有两个受力状态不同的锚固段。具体为,在锚固段中位于承压板前端的锚杆杆体上设置套管或其它隔离措施,使承压板前端的锚杆杆体与锚固体隔离开来;而承压板后端的锚杆杆体不设置套管,使杆体与锚固体能有效黏结。

当锚杆受力后,锚头受到的拉力直接通过无黏结

的杆体传递至承压板节点处,拉动承压板使其产生向外侧变形的趋势,从而使得承压板节点处的力分解成两部分。一部分力通过承压板挤压位于其前端的锚固体,使其处于受压状态(类似压力型锚杆的锚固段),形成一个承压锚固段。另一部分力通过承压板后面的有黏结杆体拉动锚固体,使其处于受拉状态(类似拉力型锚杆的锚固段),形成一个受拉锚固段。承压锚固段和受拉锚固段均通过锚固体与岩土体界面的黏结强度来提供抗拔承载力。

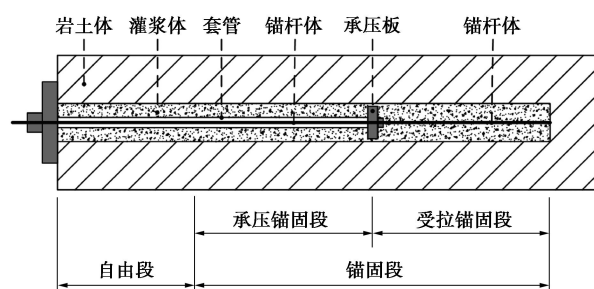


图 1 拉压复合型锚杆结构示意图

Fig. 1 Structure of tension-compression composite anchor

而传统荷载集中型锚杆受力后,岩土体与锚固体界面的剪应力都是直接从一端向另一端传递。传统拉力型锚杆界面的剪应力是从自由段与锚固段交界处开始向锚杆底部传递;而传统压力型锚杆界面的剪应力是从底部的承压板处向锚头方向传递。因此,荷载集中型锚杆都在荷载开始传递始端的界面上存在明显的应力集中现象^[13-14],剪应力容易超过界面的极限黏结强度而出现界面软化^[15],进而脱黏导致渐进式破坏^[16]。另外,由于界面剪应力传递时沿锚固段衰减较快,使得实际发挥作用的有效锚固段可能小于实际锚固段长度。且剪应力在锚固段上分布不均匀,最终导致岩土体与锚固体界面的黏结强度得不到充分发挥,抗拔承载力偏低。

因此,与荷载集中型锚杆相比,拉压复合型锚杆具有以下优点:

(1) 应力集中现象小。拉压复合型锚杆受力后,承压板前端的承压锚固段和后端的受拉锚固段共同承担锚头受到的荷载,使得承压锚固段和受拉锚固段分别承受的荷载大大减小,在相同外荷载作用下,拉压复合型锚杆锚固体与岩土体界面峰值剪应力显著降低,岩土体与锚固体界面的应力集中现象也大幅削弱。

(2) 界面黏结强度充分发挥。拉压复合型锚杆的界面剪应力是从承压板处同时向承压锚固段和受拉锚固段两侧传递,整体分布形态呈“中间大,两头小”趋势,剪应力传递长度相对更长,剪应力分布相对更加均匀,从而使得界面的黏结强度得到充分发挥。

(3) 极限抗拔承载力高。由于拉压复合型锚杆界面的剪应力峰值减小,界面黏结强度充分发挥,因此,

锚固体与岩土体界面剪应力达到极限时, 锚杆抗拔承载力大幅提高。

2 试验设计

2.1 试验目的

(1) 通过试验, 研究新型拉压复合型锚杆的承载特性、破坏规律及其与传统拉力型和压力型锚杆的承载力之比 (承载比)。

(2) 研究拉压复合型锚杆的受拉锚固段分担荷载与总荷载之比 (受拉承载系数)。

(3) 对比分析新型拉压复合型锚杆与传统拉力型和压力型锚杆的峰后残余抗拔承载力特性及规律。

2.2 试验方案

基于试验目的, 采用室内模型试验方法开展研究。试验采用混凝土浇筑试件模拟岩石。锚杆钻孔采用预埋直径 50 mm 的 PVC 制作, 试件浇筑成型养护 28 d 后拔出 PVC 管, 再密封孔底、安装锚杆杆体及灌浆, 完成锚杆试件制作。结合试验室既有加载设备, 并考虑岩层锚杆模型试验有效锚固长度^[17]测试结果, 设计锚杆锚固长度 360 mm, 试件采用自密实 C30 商品混凝土。断面尺寸均为 250 mm×250 mm。锚固体采用纯水泥浆, 水灰比 0.5, 水泥采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 锚杆灌浆时, 在室内同步制作 70.5 mm×70.5 mm×70.5 mm 水泥浆试块。试验共设计了 4 组锚杆 (传统拉力型锚杆、传统压力型锚杆、拉压长度比分别为 1:2 和 2:1 的拉压复合型锚杆), 每组锚杆设计 4 件平行试验锚杆。

为便于下文分析统一表述, 拉力型锚杆代号定为 T 锚; 压力型锚杆代号定为 C 锚; 拉压复合型锚杆代号定为 TC 锚; $n_{l,tc}$ 为拉压长度比, 即受拉锚固段长度 $l_{a,t}$ 与承压锚固段长度 $l_{a,c}$ 之比; TC360-12 表示锚固段长度为 360 mm, 拉压长度比为 1:2 的拉压复合型锚杆, 其受拉锚固段长度为 120 mm, 承压锚固段长度为 240 mm。特殊地, 拉力型锚杆可视为拉压长度比为 1:0 的拉压复合型锚杆 (没有承压锚固段); 压力型锚杆可视为拉压长度比为 0:1 的拉压复合型锚杆 (没有受拉锚固段)。

2.3 锚杆制作

锚杆杆体选用 8.8 级 M18 螺丝杆, 拉力设计值约 129 kN, 拉力极限值约 160 kN, 杆长 500 mm。承压板选用配套的直径 42 mm 钢垫片, 垫片底部用 M18 螺母锁定, 通过螺母和垫片组成固定的承压板。承压锚固段采用 3 层隔离措施将螺丝杆与灌浆体进行隔离, 具体为先在螺丝杆上黏贴透明胶带, 后包裹厚度 3 mm 的 EVA 泡棉, 再覆盖透明胶带进一步减阻。拉压复合型锚杆杆体制作如图 2 所示。锚杆试件加工制

作及灌浆如图 3 所示。

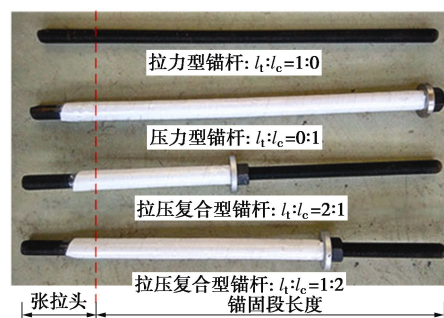


图 2 锚杆杆体制作图

Fig. 2 Anchor body and specimens

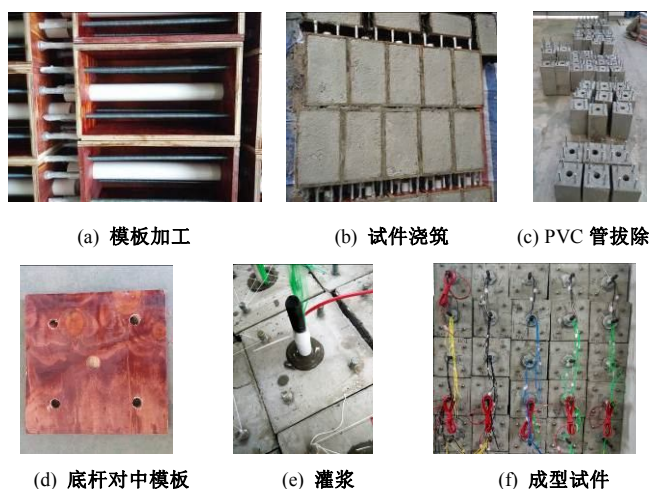


图 3 试件制作

Fig. 3 Preparation of specimens

2.4 试验加载系统

试验加载设备采用杭州邦威机电控制工程有限公司制造的 MAS-100 及 MAS-500/250 伺服作动器, 额定最大拉力量程分别为 100 kN 和 250 kN。试验采用 0.5 kN/min 速率加载至 0.5 kN 再卸载至 0 kN 后, 统一按加载速率 0.01 mm/s 进行全程位移控制加载, 直至试验结束。试验加载系统主要由加载架、伺服作动器、加载板、反拉板等构成, 其示意图如图 4 所示。加载板顶至试件顶距离统一控制为 80 mm, 在出露加载板顶的杆体上旋拧两颗 M18 螺母。

2.5 试验测试系统

试验采用江苏东华测试技术股份有限公司生产的位移传感器及其配套的 DH3816N 静态应变测试系统进行采集, 试验对加载板、反拉板、反拉梁以及锚杆孔底变形进行测量。其中, 加载板和反拉板上分别对称布置两支位移传感器, 加载装置及全部位移计安装如图 4 所示。

通过对各部位监测变形进行计算, 并考虑张拉头段的拉伸变形, 可以得到张拉荷载与试件顶部处杆体的位移关系曲线, 即荷载位移曲线。

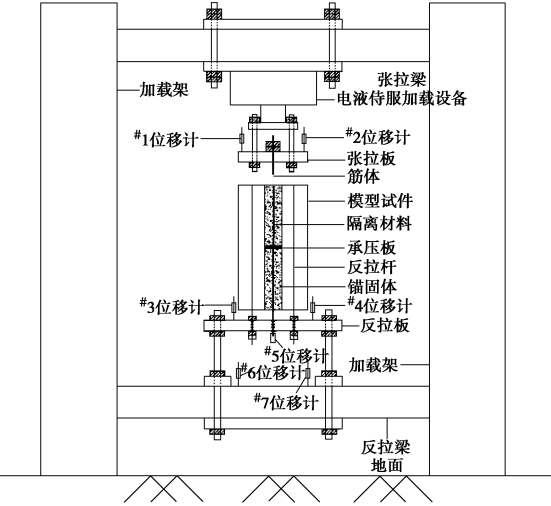


图 4 加载装置及位移计安装示意图

Fig. 4 Schematic diagram for installation of loading devices and displacement meters

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

4 组锚杆拉拔试验结果汇总如表 1 所示。

表 1 锚杆试验成果

Table 1 Results of anchor tests

序号	编号	P_u /kN	S_u /mm	$\bar{\tau}_u$ /MPa	\bar{P}_u /kN	$\frac{R}{\bar{P}_u}$ /%	n_t	\bar{n}_t
1	T360-1	53.6	1.71	0.948	50.8	20.47	—	—
2	T360-2	53.2	1.46	0.941				
3	T360-3	43.2	0.88	0.764				
4	T360-4	54.2	1.09	0.939				
5	C360-1	41.5	1.13	0.802*	45.4	28.54	—	—
6	C360-2	53.0	1.32	1.022*				
7	C360-3	40.3	1.41	0.777*				
8	C360-4	46.9	1.55	0.905*				
9	TC360-12-1	82.2	2.79	1.454	91.0	19.01	1.62	1.79
10	TC360-12-2	99.5	2.95	1.759			1.96	
11	TC360-12-3	84.3	3.00	1.490			1.66	
12	TC360-12-4	98.2	3.06	1.737			1.93	
13	TC360-21-1	118.6	2.79	2.097	132.3	21.39	2.33	2.61
14	TC360-21-2	123.8	2.23	2.189			2.44	
15	TC360-21-3	140.1	4.75	2.478			2.76	
16	TC360-21-4	146.9	6.21	2.597			2.89	

注：①因试验采取全程位移控制加载，表中极限抗拔承载力 P_u 取锚杆破坏前加载阶段的最大荷载， S_u 取相应 P_u 的拉拔位移。 \bar{P}_u 为各组锚杆极限抗拔承载力平均值。② $\bar{\tau}_u$ 为锚杆达到极限抗拔承载力时，水泥浆锚固体与混凝土基体界面的平均剪应力。③ R/\bar{P}_u 为各组锚杆极限抗拔承载力的极差与平均值的比值。④ n_t 为拉压复合型锚杆极限抗拔承载力与拉力型锚杆极限抗拔承载力平均值之比（承载比）； \bar{n}_t 为各组拉压复合型锚杆的承载比平均值。⑤试验同期水泥浆试块抗压强度 36.8 MPa^[18]。

从表 1 中可以看出，4 组锚杆的极限抗拔承载力

试验结果均满足极差不超过平均值的 30%^[19]，其中压力型锚杆试验结果的极差与平均值之比最大，达 28.54%；其余 3 组约为 20%左右，比较一致。传统拉力型锚杆极限抗拔承载力最低为 43.2 kN，最高为 54.2 kN，平均值为 50.8 kN，界面平均剪应力平均值为 0.898 MPa。传统压力型锚杆极限抗拔承载力最低为 40.3 kN，最高为 53.0 kN，平均值为 45.4 kN，界面平均剪应力平均值为 0.876 MPa。

理论上，压力型锚杆的灌浆体处于受压状态，会因泊松效应产生侧胀使得界面侧阻力在一定范围内有一定程度增加，极限抗拔承载力略高于同条件的拉力型锚杆。但是试验实测压力型锚杆极限抗拔承载力平均值略低于拉力型锚杆，可能有以下 3 个方面的原因：①压力型锚杆杆体制作时，采用螺母和垫片制作承压板，导致螺母和垫片（表面比较光滑）从底部灌浆体中拔出，底部灌浆体残留长度约 37 mm，导致压力型锚杆实际总锚固段长度约只有 323 mm，小于拉力型锚杆的 360 mm。按拉力型锚杆界面平均剪应力平均值计算，抗拔承载力约低估 5.2 kN，考虑残留灌浆体的承载力损失，则实际总锚固段长 360 mm 的传统压力型锚杆极限抗拔承载力平均值约为 50.6 kN，与拉力型锚杆结果基本一致。②水泥净浆浆体强度较高（强度测试结果为 36.8 MPa），而锚固段长度相对较短（ $l_a=7.2D$ ），使得浆体刚度较大，受压时浆体的径向膨胀效果较弱。导致浆体与基体之间的黏结强度提高效果很弱。因此，其极限抗拔承载力没有明显高于拉力型锚杆。③压力锚杆试验结果的极差与平均值之比为 28.54%，明显高于拉力型锚杆试验结果 20.47%，表明压力型锚杆试验结果离散性更高。

拉压复合型锚杆 TC360-12 的极限抗拔承载力最低为 82.2 kN，最高为 99.5 kN，平均值为 91.0 kN，为传统拉力型锚杆极限抗拔承载力平均值的 1.79 倍，极限抗拔承载力平均提高 79%；界面平均剪应力平均值 1.610 MPa，界面黏结强度比传统锚杆发挥程度大大提高。而拉压复合型锚杆 TC360-21 的极限抗拔承载力最低 118.6 kN，最高为 146.9 kN，平均值为 132.3 kN，为传统拉力型锚杆极限抗拔承载力平均值的 2.61 倍，极限抗拔承载力提高 161%；界面平均剪应力平均值 2.340 MPa，界面黏结强度发挥程度比 TC360-12 锚杆进一步提高。

3.2 荷载位移曲线

依据试验结果，计算汇总了各组锚杆荷载与端头位移，并绘制相应荷载位移曲线，如图 5 所示。

从图 5 可以看出，整体而言，4 组锚杆的 16 个试件的荷载位移曲线形态基本是荷载随位移先增大再减

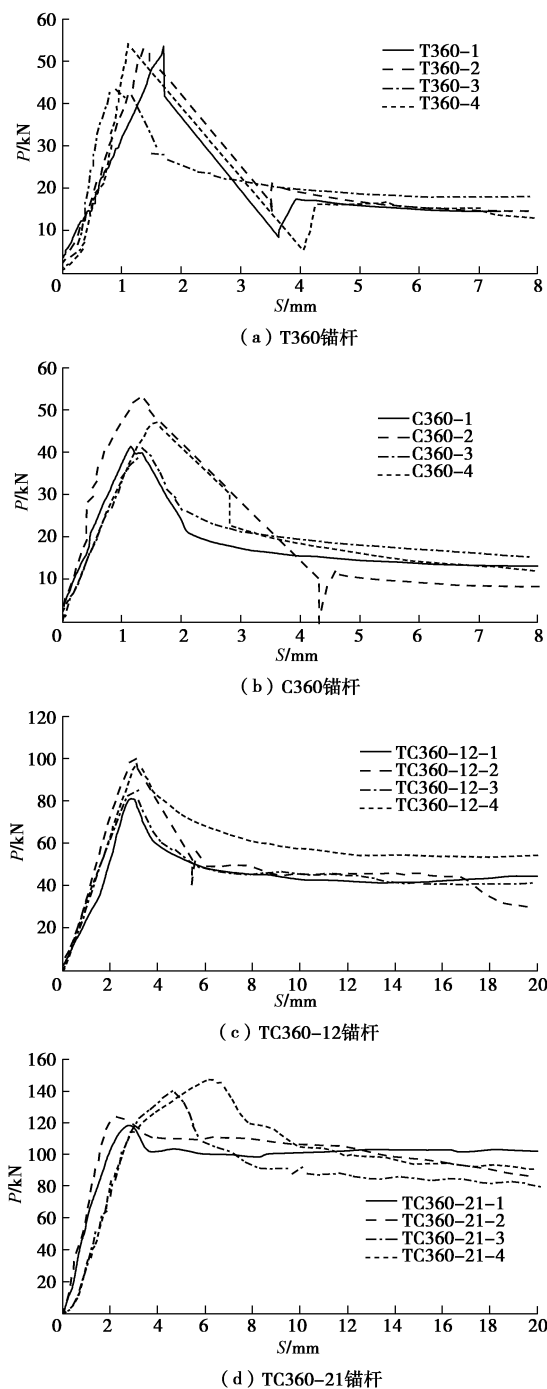


图5 锚杆荷载位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of anchors

小,继而趋于稳定。部分试件荷载位移曲线出现峰后曲线快速下降继而迅速反弹现象(如 T360-1、T360-2、T360-4、C360-2、TC360-12-2),主要是因为锚杆的破坏形式及试验加载方式。试验全程采用匀速位移进行加载,上述5个试件在加载过程表现为脆性破坏,破坏前没有明显征兆,破坏时灌浆体瞬间被拔出,并伴随“嘣”的响声。这是由于上述锚杆脆性破坏时,锚杆杆体连同灌浆体被瞬间飞速拔出,瞬时拔出速度大于甚至远大于试验加载速度,导致连接加载设备的加载板与锁定锚杆杆体的螺母之间产生脱离,故需要加

载设备提供的拉拔力瞬间大幅下降,甚至接近零拉力(如 C360-2),这个过程对应荷载位移曲线的峰后快速下降段。随着加载设备持续加载,张拉钢板与锁定杆体的螺母再次接触,进而挤压,并随张拉位移增加使得张拉力增加,对应荷载位移曲线上的反弹段。

需要说明的是,上述5个试件采用加载设备自行采集的荷载位移曲线峰后段是近垂直陡降,因为加载是位移控制,拉力瞬间显著减小时,而位移基本没有增加,所以曲线陡降。而锚固体快速拔出后,位移计测得杆体瞬间增大后的拉拔变形,故计算绘制的峰后曲线呈快速下降而非陡降。

从图5(a)中可以看出,传统拉力型锚杆更多地表现为脆性破坏,且峰后残余抗拔承载力显著下降。从图5(b)中可以看出,传统压力型锚杆更多地表现为缓慢破坏,峰后残余抗拔承载力也显著下降。

从图5(c)中可以看出,TC360-12型拉压复合型锚杆荷载位移曲线形态的3个阶段较为明显(加载上升段、峰后下降段、残余稳定段),TC360-12-2型锚杆尽管出现峰后陡降段,但是降幅相比传统拉力型锚杆明显减小。TC360-12锚杆的峰后残余抗拔承载力较传统锚杆有明显提高,拉拔变形达到16mm(约为锚固段长度的4.4%)时,残余抗拔承载力仍比较稳定。

从图5(d)中可以看出,TC360-21型拉压复合型锚杆荷载位移曲线形态与TC360-12型锚杆及传统锚杆均有所不同,主要表现为其峰后下降段较TC360-12锚杆均进一步减小,而残余抗拔承载力更高,且其稳定性更好。另外,TC360-21-3和TC360-21-4锚杆在拉拔力超过约120kN后,锚杆刚度明显降低,表现为荷载位移曲线斜率明显减小,曲线变缓。分析其原因,主要是由于杆体在高应力水平下,单位荷载增量产生的拉应变增加(杆体材料试验结果表明,M18螺丝杆拉拔荷载与拉应变曲线呈双折线,曲线拐点对应拉力约为120kN,张拉力大于120kN后,螺丝杆弹性模量降低)。

3.3 破坏规律

4组锚杆在加载过程中,破坏现象整体均为灌浆体从基体中被拔出,如图6所示。个别试件被拔出时,灌浆体端头周围的基体有薄层起皮现象,可能是灌浆体拔出时,界面剪应力在端头孔口周边产生一定的拉应力,导致表层混凝土被拉裂,出现起皮现象。TC360-21-1锚杆拔出时,起皮薄层呈锥形,连同灌浆体一同拔出。

从4组锚杆中,各取2个典型锚杆试件进行切割,得到典型灌浆体芯柱破坏情况如图7所示。从图7中可以看出,传统的T360锚杆灌浆体被拔出,因锚固体受拉导致灌浆体有明显裂纹。传统的C360锚杆的

灌浆体被拔出,但因钢垫板和螺母表面光滑,导致其周边一定长度范围(约 37 mm)的灌浆体残留在孔内。

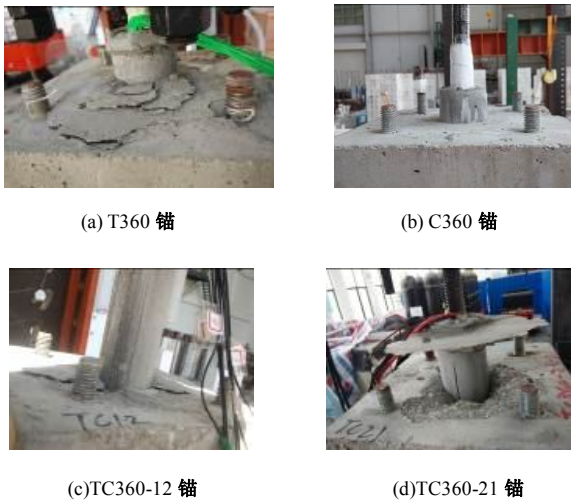


图 6 典型锚杆试验破坏现象

Fig. 6 Typical failure phenomenon of test anchors

TC360-12 锚杆承压锚固段和受拉锚固段的灌浆体均被拔出(垫板后灌浆体有小孔洞,但周边表面较为平顺,可能是灌浆时气泡导致浆体未充分密实)。TC360-21 锚杆承压锚固段被拔出,但受拉锚固段的灌浆体底部与试件底部平齐,表明受拉锚固段未被拔出;且承压板后侧的杆体明显从受拉锚固段中被拔出(承压板与受拉锚固段之间发生明显分离),表明受拉锚固段杆体与灌浆体界面先于灌浆体与混凝土基体界面发生破坏,导致 TC360-21 锚杆实测极限抗拔承载力偏低(灌浆体与混凝土基体界面没有发生破坏)。这也证实了 TC360-21 锚杆受拉锚固段与灌浆体界面的黏结强度发挥更加充分,受拉锚固段抗拔承载力显著提高。

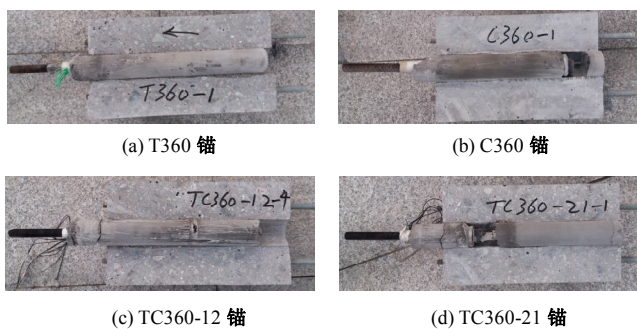


图 7 典型灌浆体破坏现象

Fig. 7 Typical failure phenomenon of grouting bodies

锚杆拉力达到极限抗拔承载力时,传统拉力型和压力型锚杆对应的最大张拉位移为 1.71 mm (T360-1) 和 1.55 mm (C360-4);而 TC360-12 锚杆和 TC360-21 锚杆对应的最小张拉位移分别为 2.79 mm (TC360-12-1) 和 2.23 mm (TC360-21-2),均高于传统锚杆。表明新型拉压复合型锚杆比传统锚杆具有更好的位移延性和抗变形适应能力。

3.4 荷载分担比

提取编号 T360-1、TC360-12-4、TC360-21-4 锚杆杆体的应变片(受拉锚固上黏贴有应变片,位置及间距如图 8 所示)在不同张拉荷载作用下的应变,得到杆体应变沿长度的分布曲线,结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, T360-1 实测杆体最大应变距离端头约 60 mm,最大值为 1356.8 $\mu\epsilon$;距离端头 210 mm 位置的应变为 301.1 $\mu\epsilon$,约为最大值的 22%;距离端头 300 mm 位置的应变为 156.0 $\mu\epsilon$,约为最大值的 11%,表明 $l=300\sim 360$ mm 区间的锚固段对承载力贡献较小,界面黏结强度发挥程度很小。

TC360-12-4 和 TC360-21-4 锚杆的受拉锚固段长为 120 mm 和 240 mm,其杆体应变沿长度的分布形态基本一致,整体近似呈线性减小分布规律,且在承压板后应变最大。TC360-12-4 锚杆破坏时,最大应变为 1777.6 $\mu\epsilon$,距离承压板 60 mm 处(距离端头 300 mm)应变为 1039.1 $\mu\epsilon$,约为最大值的 58.5%;距离承压板 90 mm 处(距离端头 330 mm)应变为 763.3 $\mu\epsilon$,约为最大值的 43%。可见,受拉锚固段界面上剪应力分布相对更加均匀,界面黏结强度发挥更加充分。

TC360-21-4 锚杆实测最大应变为 3455.8 $\mu\epsilon$,对应张拉荷载 130 kN(依据破坏荷载 146.9 kN 测得 3 点应变结果,线性拟合得端头最大应变为 3461.7 $\mu\epsilon$)。张拉荷载为 110 kN 时, $l=230$ mm 处杆体应变为 1124.3 $\mu\epsilon$,约为 $l=120$ mm 处应变(3008.9 $\mu\epsilon$)的 37%; $l=280$ mm 处杆体应变为 60 $\mu\epsilon$,仅约为 $l=120$ mm 处应变的 2%。张拉荷载为 130 kN 时,前 4 点应变片测得应变均增加,且增幅基本一致,按线性拟合外推杆体应变零点约位于 $l=327.7$ mm (小于 360 mm)位置,表明杆体后端锚固体进一步发挥承载作用。张拉荷载为 146.9 kN 时,第 3 号和第 4 号应变片的应变明显增加,如按线性拟合外推 $l=360$ mm 杆体应变约 1196 $\mu\epsilon$,约为拟合最大应变的 35%。可以判断受拉锚固段界面剪应力传递深度进一步增加,剪应力更高,黏结强度发挥更加充分。

为研究新型拉压复合型锚杆在总拉力作用下,承压锚固段与受拉锚固段各自分担荷载情况,基于拉压复合型锚杆受拉锚固段杆体应变沿长度近似呈线性减小的分布特征,近似采用受拉锚固段上第一支应变片(紧靠承压板螺母)的应变值与杆体端头总应变之比作为受拉锚固段分担荷载与总荷载之比(下文记为受拉承载系数,用符号 η_t 表示),汇总如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, TC360-12-4 锚杆的受拉承载系数小于 TC360-21-4 锚杆。TC360-12-4 锚杆破坏时(98.2 kN),受拉承载系数为 0.567,受拉锚固段分担荷载约 55.7 kN,单位受拉锚固段长度的荷载分担能力为 0.46 kN/mm;而承压锚固段(长度 240 mm)仅分

担荷载 42.5 kN, 单位承压锚固段长度的荷载分担能力为 0.18 kN/mm, 远低于受拉锚固段。TC360-21-4 锚杆在 130 kN 时, 受拉承载系数为 0.688, 受拉锚固段分担荷载约 89.5 kN, 单位受拉锚固段长度的荷载分担能力为 0.37 kN/mm; 而承压锚固段 (长度 120 mm) 分担荷载约 40.5 kN, 单位承压锚固段长度的荷载分担能力为 0.34 kN/mm, 与受拉锚固段基本一致。可见, 拉压长度比为 2:1 的拉压复合型锚杆即将破坏时, 受拉锚固段和承压锚固段协同承载能力更强, 界面黏结强度更能同步得到充分发挥, 锚杆极限抗拔承载力更高。

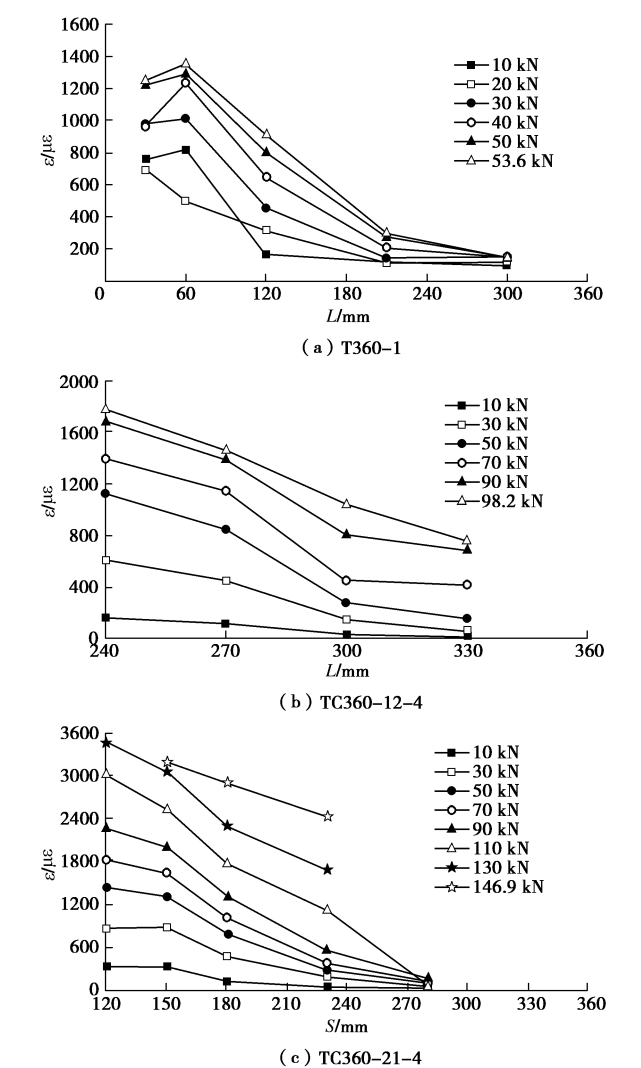


图 8 锚杆杆体应变分布
Fig. 8 Strain distribution of anchor bodies
表 2 不同荷载时的受拉承载系数
Table 2 Tension bearing coefficients under different loads

锚杆	荷载/kN						
	30	50	70	90	98.2	110	130
TC360-12-4	0.662	0.715	0.628	0.588	0.567	—	—
TC360-21-4	0.976	0.959	0.861	0.825	0.843	0.897	0.688

3.5 残余抗拔承载力

图 5 的结果表明, 新型拉压复合型锚杆在拉力达

到极限抗拔承载力后, 随着拉拔变形的增加, 锚杆仍具有较高的残余抗拔承载能力, 且稳定性较好。为定量分析拉压复合型锚杆的残余抗拔承载能力, 对试验结果进行归一化处理。将拉拔力除以极限抗拔承载力得张拉荷载比, 记为 $\xi_p=P/P_u$; 将锚杆端头拔出变形除以锚固段长度得锚头相对拔出变形, 记为 $\xi_s=s/l_a$ 。对于峰后曲线段, 记 ξ_p 为 $\xi_{p,r}$, 表示为残余抗拔承载力与极限抗拔承载之比 (下文简称残峰比)。绘制 $\xi_p-\xi_s$ 曲线如图 9 所示。

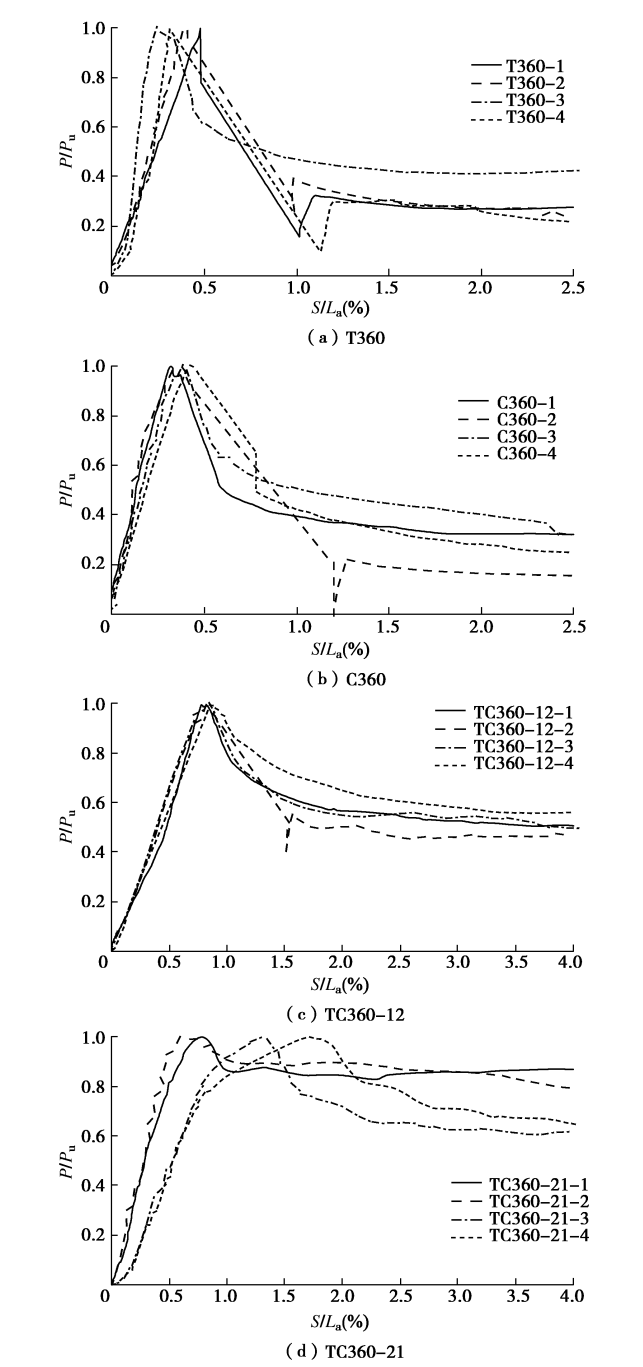


图 9 残峰比曲线
Fig. 9 Curves of ratios of residual to peak bearing capacity
从图 9 可以看出, 传统拉力型和压力型锚杆稳定

残峰比最大值约不超过 0.4, 而 TC360-12 锚杆最小值约不低于 0.45, TC360-21 锚杆最小值约不低于 0.6。当 $\xi_s=2.5\%$ 时, 传统拉力型锚杆的残峰比分别为 0.275, 0.254, 0.423, 0.217, 平均值 0.292; 传统压力型锚杆的残峰比分别为 0.318, 0.153, 0.316, 0.247, 平均值 0.259; 而拉压复合型锚杆 TC360-12 锚杆的残峰比分别为 0.549, 0.465, 0.558, 0.608, 平均值为 0.545; TC360-21 锚杆的残峰比分别为 0.850, 0.872, 0.653, 0.784, 平均值为 0.790。可以看出, 拉压复合型锚杆的残峰比明显高于传统拉力型锚杆和压力型锚杆, 残余抗拔承载力大幅提高。其中 TC360-21 锚杆的残峰比更高, 峰后残余承载性能更好。

4 结 论

(1) 拉压复合型锚杆极限抗拔承载力比传统拉力型和压力型锚杆大幅提高; 拉压长度比为 1:2 和 2:1 时, 拉压复合型锚杆极限抗拔承载力分别比传统拉力型锚杆提高 79% 和 161%。

(2) 拉压复合型锚杆比传统拉力型和压力型锚杆具有更好的位移延性和抗变形能力。

(3) 拉压复合型锚杆峰后残余抗拔承载力显著提高, 传统拉力型和压力型锚杆稳定残峰比最大值约不超过 0.40, TC360-12 锚杆和 TC360-21 锚杆稳定残峰比最小值约不低于 0.45 和 0.60。

(4) 拉压长度比为 2:1 的拉压复合型锚杆即将破坏时, 受拉锚固段和承压锚固段协同承载能力更强, 界面黏结强度同步得到充分发挥, 锚杆极限抗拔承载力更高。

致 谢: 试验过程中, 华侨大学土木工程学院的许祺、黄俊达、章耀达、许义林、陈奕、洪泽达同学对本课题提供了大量的帮助, 在此对他们表示由衷的感谢!

参考文献:

- [1] 贾 强, 应惠清, 张 鑫. 锚杆静压桩技术在既有建筑物增设地下空间中的应用[J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 2053 - 2058. (JIA Qiang, YING Hui-qing, ZHANG Xin. Construction of basement in existing buildings by static bolt-pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 2053 - 2058. (in Chinese))
- [2] 刘宝琛. 综合利用城市地面及地下空间的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(1): 109 - 111. (LIU Bao-chen. Some aspects for utilization of ground surface and underground space in cities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, **18**(1): 109 - 111. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 郭 钢, 刘 钟, 李永康, 等. 扩体锚杆拉拔破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1677 - 1684. (GUO Gang, LIU Zhong, LI Yong-kang, et al. Model test research on failure mechanism of underreamed ground anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1677 - 1684. (in Chinese))
- [5] 胡建林, 张培文. 扩体型锚杆的研制及其抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1615 - 1619. (HU Jian-lin, ZHANG Pei-wen. Development of underreamed anchor and experimental study of uplift resistance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1615 - 1619. (in Chinese))
- [6] 张虎元, 王晓东, 王旭东, 等. 楠竹加筋复合锚杆内部界面黏结滑移模型[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 789 - 796. (ZHANG Hu-yuan, WANG Xiao-dong, WANG Xu-dong, et al. Bond-slip model for bamboo-steel cable composite anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 789 - 796. (in Chinese))
- [7] 王晓东, 张虎元, 吕擎峰. 楠竹加筋复合锚杆静力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(12): 108 - 115. (WANG Xiao-dong, ZHANG Hu-yuan, LÜ Qing-feng. Laboratory study of the static properties of bamboo-steel cable composite anchor[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(12): 108 - 115. (in Chinese))
- [8] 曹佳文, 彭振斌, 彭文祥, 等. 充气锚杆在砂土中的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 1957 - 1962. (CAO Jia-wen, PENG Zhen-bin, PENG Wen-xiang, et al. Model test study of inflated anchors in sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 1957 - 1962. (in Chinese))
- [9] 彭文祥, 张 旭, 曹佳文. 充气锚杆极限承载力计算方法[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1696 - 1702. (PENG Wen-xiang, ZHANG Xu, CAO Jia-wen. Calculation method for ultimate bearing capacity of inflatable anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1696 - 1702. (in Chinese))
- [10] 刘 钟, 郭 钢, 张 义, 等. 囊式扩体锚杆施工技术与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(增刊 2): 205 - 211. (LIU Zhong, GUO Gang, ZHANG Yi, et al. Construction technology and engineering applications of capsule-type

- under-reamed ground anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 205 - 211. (in Chinese))
- [11] 涂兵雄, 贾金青, 俞 缙, 等. 一种拉压复合型锚杆:ZL201420450678.5, 中国[P]. 2014. (TU Bing-xiong, JIA Jin-qin, YU Jin, et al. A tension-compression composite anchor: ZL201420450678.5, China[P]. 2014. (in Chinese))
- [12] 程良奎, 范景伦, 韩 军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 35 - 45. (CHENG Liang-kui, FAN Jing-lun, HAN Jun, et al. Ground anchorage[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 35 - 45. (in Chinese))
- [13] SERRANO A, OLALLA C. Tensile resistance of rock anchors[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**(4): 449 - 474.
- [14] KILIC A, YASAR E, ATIS C D. Effect of bar shape on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, **18**(1): 1 - 6.
- [15] 郭锐剑, 谌文武, 段 建, 等. 考虑界面软化特性的土层锚杆拉拔受力分析[J]. 中南大学学报, 2012, **43**(10): 4003 - 4009. (GUO Rui-jian, CHEN Wen-wu, DUAN Jian, et al. Pullout mechanical analysis of soil anchor based on softening behavior of interface[J]. Journal of Central South University, 2012, **43**(10): 4003 - 4009. (in Chinese))
- [16] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(10): 1976 - 1985. (YOU Chun-an, ZHANG Yu-bao. Analysis of interfacial slip mesomechanics in anchorage section of prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(10): 1976 - 1985. (in Chinese))
- [17] 夏元友, 陈泽松, 顾金才, 等. 压力分散型锚索受力特点的室内足尺模型实验[J]. 武汉理工大学学报, 2010, **32**(3): 33 - 38. (XIA Yuan-you, CHEN Zhe-song, GU Jin-cai, et al. Indoor full-size model test on stress features of pressure-dispersive prestressed anchorage cable[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, **32**(3): 33 - 38. (in Chinese))
- [18] JGJ/T70—2009 建筑砂浆基本性能试验方法标准[S]. 2009. (JGJ/T70—2009 Standard for test method of basic properties of construction mortar[S]. 2009. (in Chinese))
- [19] JGJ/T 401—2017 锚杆检测与监测技术规程[S]. 2017. (JGJ/T 401—2017 Technical specification for testing and monitoring of anchors[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017. (in Chinese))