

简谐动力波作用下锚杆拉拔试验研究

谈一评^{1, 2}, 曾镇强^{1, 2}

(1. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 针对锚固工程中遇到的动力问题, 采用简谐动力波作用下的破坏试验, 研究在动力作用下锚杆的锚固机理、锚杆剪应力分布规律及动态抗拔力; 结果表明: 在动力波作用下剪应力从锚杆端部到底端轮番增大, 使锚杆剪应力沿全长均发挥作用, 动力作用下抗拔力均比静态经验公式及静态试验结果大。

关键词: 锚杆; 剪应力分布; 试验研究; 动力拉拔; 简谐动力波

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)03-0409-06

作者简介: 谈一评(1960-), 女, 副教授, 主要从事土木工程方面研究。E-mail: 13609030675@139.com。

Pull-out tests on anchor bolts under simple harmonic waves

TAN Yi-ping^{1, 2}, ZENG Zhen-qiang^{1, 2}

(1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Faculty of Civil and Transportation Engineering, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With regard to the dynamic problem in the anchor engineering, a destructive experiment using harmonic seismic waves is designed to analyze anchorage mechanism, shear stress distribution and dynamic pull-out resistance under dynamic load. The results show that the shear stress under dynamic action becomes stronger from the top end to the bottom end of the anchor bolt and play its role along the whole anchor bolt. The pull-out resistance under dynamic action is stronger than the experimental simulation under static situation and experiment.

Key words: anchor bolt; stress distribution; experimental research; dynamic drawing; simple harmonic wave

0 引言

岩土锚固是岩土工程领域的重要分支, 已在水利水电、铁路交通、城市建设、地下工程、国防建设、采矿等工程中得到广泛应用。采用岩土锚固技术能充分调用和提高岩土体的自身强度和自稳能力, 确保施工的安全和工程稳定, 并节约工程造价、加快施工进度, 具有显著的经济效益和社会效益^[1]。

前人的研究主要围绕静力荷载作用下的锚杆进行探讨, 有少数关于爆炸等瞬间动力作用下的锚杆试验研究^[2-5], 总结前人研究可得如下结论:

(1) 影响锚固结构承载力的因素有: 锚杆的形态, 如螺纹钢筋、钢绞线、光面钢筋; 锚杆的直径及长度; 锚杆杆体强度; 锚杆倾角; 灌浆体材质; 岩石强度等。

(2) 锚杆剪应力沿杆长非均匀分布, 而是沿杆方向先增大后减小至零单峰形式, 即当荷载一定时, 锚杆锚固的有效长度是一定的, 达到一定长度后增加锚杆长度锚固力并不增加。

锚杆在静力作用下工作状态已做过多种试验研究并取得成果, 但关于类似地震等循环荷载作用下锚杆设计和计算方面的理论, 目前还基本处于空白。本文

针对我国近年来不断发生的地震灾害, 在广东工业大学结构实验室采用美国MTS大型拟动力实验系统, 对试件施加简谐动力波来模拟地震波, 对锚杆在循环动力荷载作用下的工作机理进行试验研究, 为锚固结构在地震作用下的性能研究提供了一些具有一定参考价值的依据。

1 静力作用下全长黏结式锚杆的受力特性

尤春安等^[6]利用 Mindlin 问题的位移解导出全长黏结式锚杆受力的弹性解:

$$\tau = \frac{P}{\pi a} \left(\frac{1}{2} \tau z \right) \exp\left(-\frac{1}{2} t z^2\right) \quad (1)$$

式中 $t = \frac{1}{(1+\nu)(3-2\nu)a^2} \left(\frac{E}{E_a}\right)$; P 为抗拔力; τ 为锚

杆杆体所受剪应力; E , ν 分别为岩体的弹性模量和泊松比, a 为锚杆半径, E_a 为锚杆弹性模量。

基金项目: 亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题基金项目 (2011KB10)

收稿日期: 2012-05-14

通过算例得出锚杆的轴力和剪应力的分布曲线,如图1所示。

朱玉等^[7]采用复合幂函数模型来描述锚固段剪应力分布曲线,并绘制了剪应力沿锚固段分布曲线,如图2所示。

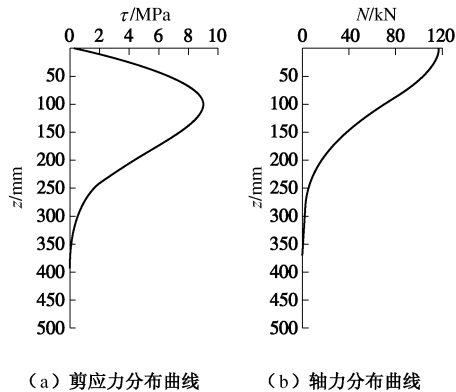


图1 全长黏结式锚杆应力分布曲线

Fig. 1 Stress curves of a wholly grouted anchor bolt

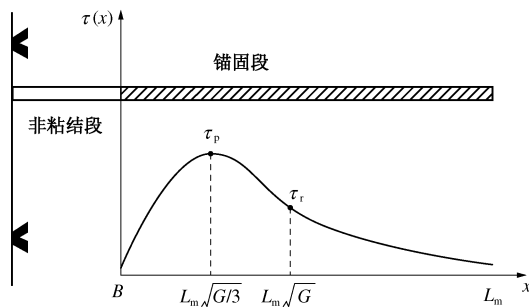


图2 剪应力沿锚固长度的分布

Fig. 2 Shear stress curves of anchor bolt

上述研究均对锚杆在静力作用下的工作机理进行研究,研究表明拉力型锚杆剪应力沿杆长非均匀分布,而是沿杆方向先增大后减小至零的单峰形式,按照规范中剪应力均匀分布来设计显然是不够合理的。下面通过试验研究锚杆在循环动力荷载作用下的工作机理。

2 试验设计

2.1 试验的目的

本次试验参考静力锚杆试件制作的基础上设置的简谐动力波作用下锚杆破坏试验,旨在研究锚固体受力及失效的全过程,包括:动力作用下锚杆剪应力分布规律、锚杆在动力作用下的抗拔力,为锚杆动力设计理论提供试验依据。

本次试验研究的目的有:

(1)研究在简谐动力波作用下锚固体从变形到失效经历的主要过程;

(2)分析在不同锚固长度,不同加载频率下锚杆的剪应力分布规律;

(3)对比分析在简谐动力波作用下锚杆剪应力分布、抗拔力与静力作用下的区别。

基于以上目的,本试验观察与收集的主要数据如下:

- (1) 锚固结构的主要破坏情况;
- (2) 生成锚杆荷载与位移曲线;
- (3) 锚固结构的最大承载力与最大承载力对应的位移;
- (4) 由动态采集仪采集锚杆在不同锚固长度处的应变值。

2.2 试件材料:

(1) 采用等级为C30的混凝土模拟中硬岩体。试件外径300 mm,高度450 mm。

(2) 锚杆采用直径16 mm的HRB335钢筋,外露长度100 mm,锚固长度4种:10d(160 mm)、15d(240 mm)、17.5d(280 mm)、20d(320 mm)(d为钢筋直径),每种锚固长度各一个试件,钢筋贴片处预先打磨光滑。

(3) 灌浆材料采用水泥砂浆,配合比为水泥:砂:水=1:2:0.45。水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥。灌浆体直径为70 mm。

(4) 应变片粘贴如图3所示,应变片采用2 mm×3 mm箔式胶基应变片,灵敏度系数为2.0。布置于锚固体与钢筋表面孔口下20, 50, 90, 130, (170 mm)、(210 mm)、(250 mm)、(290 mm)处。

2.3 试件模型及加载制度

制作的试件如图3所示,试件由圆柱形的混凝土基体预埋螺栓锚杆灌浆材料组成,下部通过预埋螺栓与承拉板连接,试验在拉伸试验机上进行。

试件的加载采用美国MTS大型拟动力实验系统,该系统具有1000, 500, 250 kN共6支双作用助动器,配有400 L/min大型液压源系统,配合美国伯克利加州大学开发的开放式有限元分析工具Opensees及与MTS共同开发的接口软件,实现结构混合实验实时数据通讯,满足本项目试验研究的工作条件。加载机制按照《岩土锚杆(索)技术规程》^[8]规定:反复荷载的变化幅度不大于锚杆拉力设计值的20%。简谐波的波幅按照经验公式计算的抗拔力的5%幅度递增。为方便实验采用简谐波模拟地震波,采用的简谐波形式如图4。

试验过程采用正弦波连续加载方式,直至试件破坏为止。本次试验加载列表见表1,整个试验系统如图5, 6。表中静态抗拔力的估算采用经验公式^[1]:

$$P = \pi DL \varphi \alpha [\tau] = (0.6 - 0.72) \pi DL [\tau] \quad (2)$$

表1 试件加载列表

Table 1 Loading levels list of samples

试件编号	锚固深度/mm	孔径/mm	静态抗拔力/kN	加载频率/Hz	预应力/kN	加载等级/kN		
						30%	35%	40%
1	160	70	10.1	1	6.1	3.0	3.5	4.0
2	240	70	15.2	1	6.1	4.6	5.3	6.1
3	280	70	17.7	1	6.1	5.3	6.2	7.1
4	320	70	20.3	1	6.1	6.1	7.1	8.1
5	160	70	10.1	2	6.1	3.0	3.5	4.0
6	240	70	15.2	2	6.1	4.6	5.3	6.1
7	280	70	17.7	2	6.1	5.3	6.2	7.1
8	320	70	20.3	2	6.1	6.1	7.1	8.1

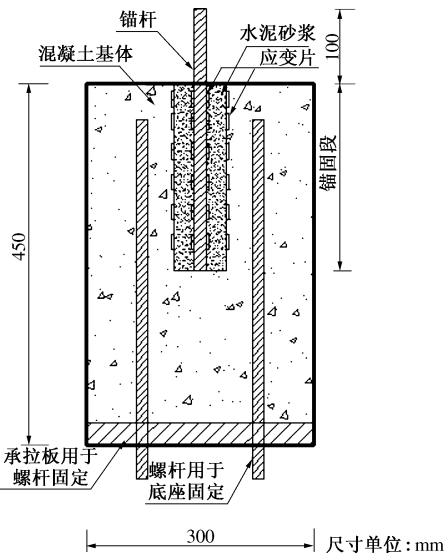


图3 试件结构

Fig. 3 Structure of sample

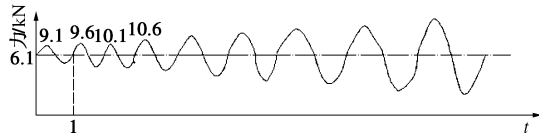


图4 正弦波荷载示意图

Fig. 4 Sine wave load schematic diagram



图5 试验系统

Fig. 5 Test system

根据规范^[8], 式中 $\varphi\alpha$ 为黏结系数和锚固长度有效系数之积取0.6; L 为锚固长度; D 为锚固直径; $[\tau]$ 为接触界面的黏结强度, 灌浆体为M30水泥砂浆, 其与螺

纹钢筋之间的黏结强度设计值为2.0~3.0 MPa, 与硬岩孔壁的黏结强度设计值为1.6~3.0 MPa, 与混凝土的平均黏结强度为1.4~2.8 MPa。初始预应力按照240 mm静态抗拔力的40%在加载前施加。

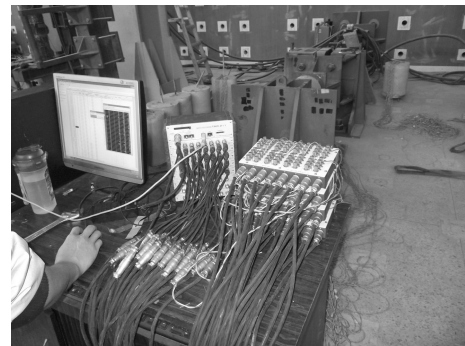


图6 数据采集系统

Fig. 6 Data acquisition system

3 试验结果与分析

3.1 试件的破坏形式

本次试验8个试件, 其中一个锚杆拉断破坏, 一个锚杆拔出兼表层混凝土劈裂破坏, 其余均锚杆拔出破坏, 破坏情况如图7~9, 加载结果的数据情况见表2。



图7 锚杆拔出

Fig. 7 Pull-out of anchor bolt

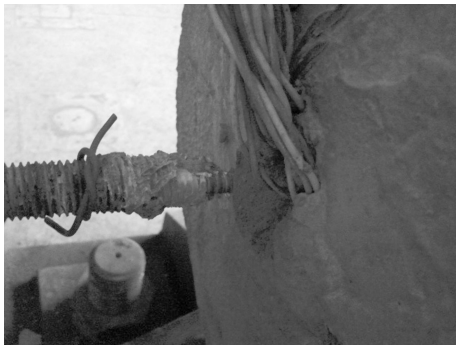


图8 锚杆拉断

Fig. 8 Breakage of anchor bolt



图9 锚杆拔出兼基体劈裂破坏

Fig. 9 Pull-out anchor bolt and fractured damage of matrix

表2 试件加载结果表

Table 2 Loading results of samples

试件编号	最大承载力/kN	此时位移/mm	破坏形式
1	26.7	1.12	滑丝破坏(试件不成功)
2	66.4	4.93	锚杆拔出(见图7)
3	80.1	2.71	锚杆拔出兼混凝土表层劈裂(见图9)
4	68.0	3.30	锚杆拔出
5	62.7	5.12	锚杆拔出
6	65.5	2.43	锚杆拔出
7	74.9	3.88	锚杆拉断(见图8)
8	62.4	3.81	锚杆拔出

3.2 锚杆的剪应力分布形式

试验加载过程应变片数据采用动态采集仪采集,每秒钟采集5个,数据较多,数据处理过程分3个过程,前期、中期、后期。前期为承载力达到30%时刻,中期为达到承载力60%时刻,后期为达到最大承载力时刻。采用将一秒内的数据平均值形成图形进行分析。根据3个时期的应力曲线得出加载过程的剪应力变化过程。锚固深度160 mm由于滑丝破坏数据采集不完全,舍弃该组数据;试件3由于锚固体未居中,混凝土表层受径向力导致发生混凝土劈裂破坏,承载力与其余组相差较大,该组数据也舍弃,剩下6个试件的剪应力如图10~15。

(1) 试件2 锚杆剪应力分布曲线

从图10中可知,加载开始时候,20 mm的应变片失效无数值,但峰值仍然出现在50 mm的锚头附

近,随着加载的进行,因锚杆与砂浆接触面裂缝迅速开展,端部的应变急速增加,此时应变片已经破坏,导致数值出现负值且非常大,变得不稳定,同时峰值向杆底传递,到临近破坏时端部应变片受剪破坏,峰值出现在杆中部,底端应力有不断增大的趋势。

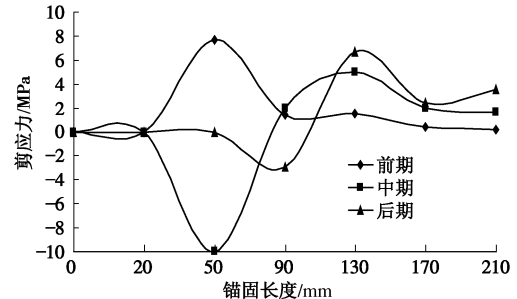


图10 锚杆剪应力分布曲线

Fig. 10 Shear stress curves of anchor bolt

(2) 试件4 锚杆剪应力分布曲线

从图11可知,在加载过程中峰值首先出现在锚头,单峰形式明显,随着加载的进行,锚头的剪应力值不断增大,同时随着裂缝的开展,中部的黏结力增大,并逐渐出现剪应力峰值,底端剪应力全过程均在增大。

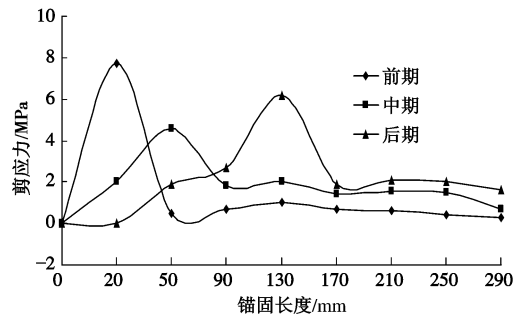


图11 锚杆剪应力分布曲线

Fig. 11 Shear stress curves of anchor bolt

(3) 试件5 锚杆剪应力分布曲线

从图12可以明显看出,从加载开始,峰值出现在端部,随着加载的进行,端部的应变片迅速增大,同时随着裂缝开展,中底部的黏结强度增大,应力也相应增大,逐渐出现剪应力峰值,到临近结束时杆端应力较小,锚杆底端应力增大。

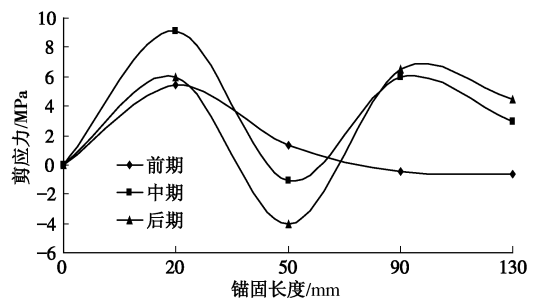


图12 锚杆剪应力分布曲线

Fig. 12 Shear stress curves of anchor bolt

(4) 试件6 锚杆剪应力分布曲线

从图13可知, 加载开始, 剪应力峰值出现在端部, 而且剪应力较小, 随着加载进行, 端部应力增大较快, 而且130 mm处的应力也在增大, 随着裂缝的开展, 端部黏结效果逐渐减弱, 中部黏结效应发生作用, 峰值逐渐转移到中部附近, 到加载临近结束, 锚杆底端附近应力不断增大, 也出现峰值。

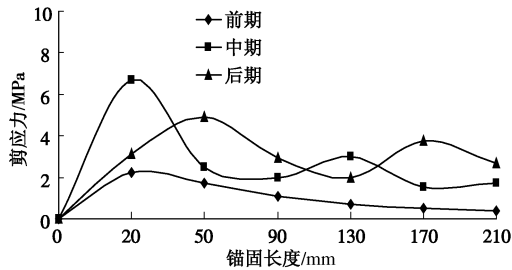


图 13 锚杆剪应力分布曲线

Fig. 13 Shear stress curves of anchor bolt

(5) 试件 7 锚杆剪应力分布曲线

从图 14 可以看出在加载前期, 峰值仍然出现在锚头端部附近, 随着加载的进行, 中部到底端的应力值一直在增大, 虽然为负值增大, 但并不影响曲线的扩展形式, 到临近破坏时锚杆前端应变片破坏, 数值为 0, 同时末端的剪应力仍在不断传递扩大。

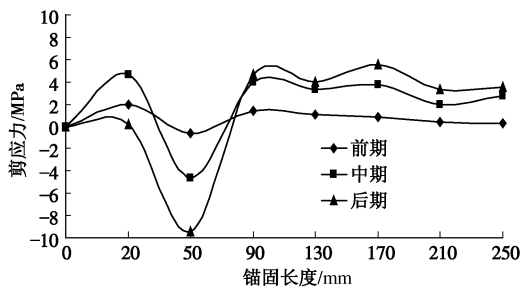


图 14 锚杆剪应力分布曲线

Fig. 14 Shear stress curves of anchor bolt

(6) 试件 8 锚杆剪应力分布曲线

由图15可以看出在加载初期峰值仍然出现在锚端, 随着加载的进行中部应力增大, 引起应变片的不稳定, 中后部也有峰值趋势, 图形不规则, 到加载后期端部的应变片已经提前破坏, 峰值出现在中部, 同时底端应力也在增大。

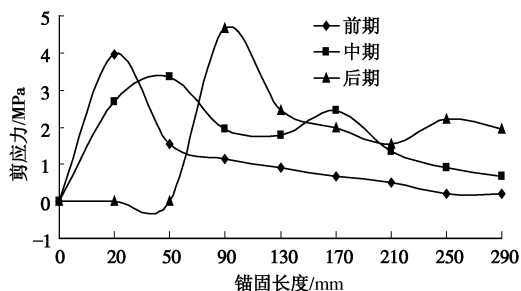


图 15 锚杆剪应力分布曲线

Fig. 15 Shear stress curves of anchor bolt

经分析锚杆剪应力总结如下: 加载初期, 剪应力峰值首先出现在锚杆端部, 沿锚杆向下都相对较小; 随着加载进行, 端部剪应力急剧增大, 且远离端部的锚杆剪应力也开始增加; 到临界破坏, 锚杆剪应力峰值向杆底传递, 可以看出在动态作用下, 沿着锚杆的剪应力分布不均匀, 且最大剪应力并不始终保持在锚杆端部, 会向锚杆底端转移。

3.3 锚杆在简谐动力波作用下的抗拔力分析

根据经验公式 (2), 当锚固长度为320 mm的静态抗拔力值分两种情况:

(1) 取决于灌浆体与岩石之间黏结强度, 抗拔力为59.1~141.8 kN;

(2) 取决于灌浆体与螺纹钢筋之间黏结强度, 抗拔力为19.3~34.7 kN。

故静态抗拔力取两者较小值为19.3~34.7 kN。

而战玉宝^[9]通过与本文几乎同等条件下的静力试验, 测出静态抗拔力为3.49~59.09 kN。

但本试验结果得出 (见表2), 锚固长度从160 mm到320 mm的动态抗拔力均在60~70 kN, 均比经验公式及试验得出的静态抗拔承载力大。

从3.2节锚杆剪应力传递规律可以看出, 动态剪应力随着加载的进行, 峰值向底端传递, 表明动力作用下黏结应力沿整条杆都得到充分的利用, 这就是动态抗拔力比静态抗拔力大的原因所在。

4 结 论

本文通过动力模型试验, 研究在简谐动力波作用下的锚杆工作机理, 得出以下结论:

(1) 在本次试验情况下, 锚固结构在动荷载作用下的主要破坏情况有3种: 锚杆拔出、锚杆拉断、表层混凝土劈裂破坏。而锚杆与灌浆体之间的黏结作用失效致锚杆拔出为最主要的破坏形式。而锚杆拉断主要是在反复荷载作用下锚杆塑性屈服破坏。

(2) 本文对动力作用下锚杆剪应力曲线、承载力进行了较深入的分析, 通过分析看出在动态作用下, 沿着锚杆的剪应力分布不均匀, 且最大剪应力会向锚杆底端转移。

(3) 本试验作用下测得动力作用下抗拔力均比静态经验公式及静态试验大, 这是因为在动力作用下的锚杆剪应力分布沿杆长非均匀分布, 且加载的全过程锚杆从中部到底端的剪应力会轮番增大, 即锚杆沿全长剪应力均发挥效果, 这与静力作用下峰值以下剪应力趋向于0不同。

(4) 锚杆剪应力在动载作用下的传递规律, 与地震对建筑物地震荷载类似, 地震荷载重复多变, 未

等结构物裂缝开展,荷载可能瞬间减小至0,抑制了裂缝开展时间,承载力不至于瞬间达到屈服,也即是说锚杆在循环动力荷载作用下的破坏过程是一个类似累积损伤的破坏过程。

(5) 本次8个成功试件所测抗拔力均在60~70 kN,只有一个达到80 kN多,是由于试件制作过程锚固体未居中导致加载时混凝土表层受较大径向力作用。在本次试验条件下,加载频率的不同,对锚杆剪应力分布、抗拔力大小影响区别不大。同时试件达到最大承载力时的位移量均较小,这表明在震多发区的锚杆动力设计应严格控制位移量。

(6) 本次试验有两个试件为锚杆屈服拉断破坏,这时锚杆承载力取决于钢筋的强度,在重复动力过程中,应注意材料的疲劳脆性破坏,选择强度较高的杆体,尽量避免此种情况发生。

参考文献:

- [1] 程良奎, 范景伦. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (CHEN Liang-kui, FAN Jing-lun. Geotechnical anchorage[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 战玉宝, 毕宣可, 尤春安. 预应力锚索锚固段应力分布影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 49 - 53. (ZHAN Yu-bao, BI Xuan-ke, YOU Chun-an. Analysis of factors influencing the stress distribution in prestressed cables[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(6): 49 - 53. (in Chinese))
- [3] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339 - 341. (YOU Chun-an. Mechanical analysis of the fully bonded anchor[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 339 - 341. (in Chinese))
- [4] 孙冰, 曾晟, 丁德馨, 等. 混凝土锚杆的瞬态动力响应实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 244 - 248. (SUN Bing, ZENG Sheng, DING De-xin, et al. The experimental study of the concrete anchor in the instantaneous power[J]. Mining and Safety Engineering, 2010, 27(2): 244 - 248. (in Chinese))
- [5] 单仁亮, 周纪军, 夏宇, 等. 爆炸荷载下锚杆动态响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1540 - 1546. (SHAN Ren-liang, ZHOU Ji-jun, XIA Yu, et al. Experimental study of the anchor under blast load[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1540 - 1546. (in Chinese))
- [6] 尤春安, 高明, 张利民, 等. 锚固体应力分布的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊1): 63 - 66. (YOU Chun-an, GAO Ming, ZHANG Li-min, et al. Experimental study about the stress distribution of the anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S1): 63 - 66. (in Chinese))
- [7] 朱玉, 卫军, 廖朝华. 确定预应力锚索锚固长度的复合幂函数模型法[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(8): 60 - 63. (ZHU Yu, WEI Jun, LIAO Chao-hua. The method of composite power function model used to determine the prestressed anchorage length[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(8): 60 - 63. (in Chinese))
- [8] 中冶集团建筑研究总院. CECS 22: 2005 岩土锚杆(索)技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005. (Architectural Research Institute of the Governance Group. CECS 22: 2005 Technical specification for ground anchors[S]. Beijing: China Planning Press, 2005. (in Chinese))
- [9] 占玉宝. 锚固体应力分布的试验及数值模拟研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2005. (ZHAN Yu-bao. An anchoring experiment and numerical simulation on stress distribution[D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese))