

新型让压锚杆作用机理研究

郭永建^{*,1)} 姜 飞^{*} 周 浩[†] 项小珍^{**}

^{*}(青岛国信胶州湾交通有限公司, 山东青岛 266500)

[†](山东建筑大学, 济南 250101)

^{**}(杭州图强工程材料有限公司, 杭州 310000)

摘要 软岩大变形工程存在因开挖卸荷导致较大的应力释放, 在工程施工过程中将会产生较大变形的特点, 如沿用传统的锚杆进行支护, 岩体的大变形所产生的过大拉力将会造成锚杆的拉断破坏. 针对软岩大变形工程存在的该类问题, 介绍了一种新型的端部具有让压装置的新型压力分散型让压锚杆, 并对该让压锚杆的作用机理和力学行为进行分析, 得出锚固体的作用机理与传统压力分散型锚杆相比分为 3 个阶段, 并通过试验的方式确定了该让压锚杆的让压力. 这种新型让压锚杆在将锚固体压力分散的同时, 实现大变形的让压, 适宜在大变形工程中进行应用.

关键词 让压锚杆, 软岩大变形, 压力分散型, 作用机理

中图分类号: TU45 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-14-210

THE MECHANISM OF THE NEW-TYPE YIELDING BOLT

GUO Yongjian^{*,1)} JIANG Fei^{*} ZHOU Hao[†] XIANG Xiaozhen^{**}

^{*}(Qingdao Guoxin Jiaozhou Bay Traffic Co. Ltd., Qingdao 266500, Shandong, China)

[†](Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

^{**}(Hangzhou Dodrive Engineering Materials Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract The soft rock project with large deformation is characteristic of large stress released in the excavation and of large deformation in the construction process. Using the traditional rock bolt support, the large deformation of the rock mass may lead to a large tension, and make the rock bolt fracture. A new-type yielding bolt for soft rock projects with large deformation is proposed in this paper. This yielding bolt is a pressure dispersion-type yielding bolt, and contains a yield supporting device at the bottom of the bolt. The supporting mechanism of the yielding bolt includes three stages, and the yield force value is determined by experiments. The yielding bolt not only disperses the stress in the anchoring body, but also generates a yield deformation, so it could be applied to soft rock projects with large deformation.

Key words yielding bolt, soft rock project with large deformation, pressure dispersion-type, mechanism

国内外对可伸长式锚杆的研究已有 30 多年的历史, 其中著名的有 20 世纪 80 年代前苏联研制的杆体弯曲型可伸长锚杆——该类锚杆是用普通碳素钢做成波浪形, 当杆体所受拉应力达到一定值

后其波浪形段杆体开始拉直, 从而为锚杆提供一定的工作抗力和一定的伸长量; Li 等^[1-3]结合实际工程分别通过现场试验以及静力、动力分析方法对该类型锚杆的作用机理进行分析; 20 世纪 90 年代,

2014-06-09 收到第 1 稿, 2014-09-04 收到修改稿.

1) E-mail: guoyongjian1985@163.com

引用格式: 郭永建, 姜飞, 周浩等. 新型让压锚杆作用机理研究. 力学与实践, 2015, 37(2): 193-196,237

Guo Yongjian, Jiang Fei, Zhou Hao, et al. The mechanism of the new-type yielding bolt. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(2): 193-196,237

孙钧^[4]为了解决马鞍山铁矿尾矿开采的支护难题,研究了屈服锚索和屈服锚杆,以供不同的地质情况下选用,应用中取得了满意的支护效果.美国捷马公司在2005年结合我国煤矿巷洞的特点而研发的一种新型具有让压管的锚杆,其具有的高预应力、高强度以及特有的让压特性,比较适合煤矿井巷大变形软岩条件下遇到的安全支护问题;连传杰等^[5]在2008年对该类型的让压锚杆的作用机理和变形特性进行了深入研究.文章介绍的是杭州图强工程材料有限公司发明的一种新型的适用软岩大变形工程的、在锚杆端部设置让压装置的让压锚杆(索)——统称让压锚杆,并对该让压锚杆的作用机理进行分析.

1 新型让压锚杆简介

传统的让压锚杆构造形式如图1所示,分为杆体做成波浪形(图1(a))和具有锚头位置处设置让压管的形式(图1(b)).研发的新型压力分散型让压锚杆作用原理如图2所示^[6],让压装置位于锚索端部,新型让压锚杆的变形特征曲线如图3所示,当受力达到让压力时,让压装置内部产生变形,让压方式与传统让压锚杆有本质的不同.

新型的让压锚杆能够应对2个层面的问题.首先能够实现让压,满足大变形工程的变形需要;其次,实现了让压与压力分散相结合,降低了锚杆对锚固体产生的压力,降低了锚固体受压过大失效的可能性.

通过与传统让压锚杆以及压力分散型锚索进行对比,分析新型让压锚杆的优势:

(1) 与传统让压锚杆不同在于:可实现大的让压

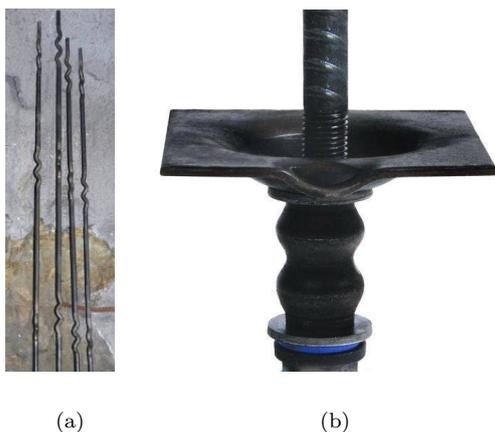


图1 传统让压锚杆

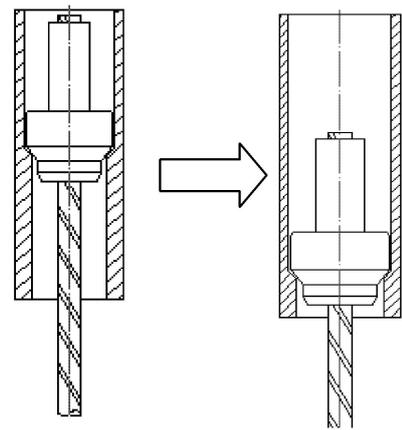


图2 新型让压锚杆

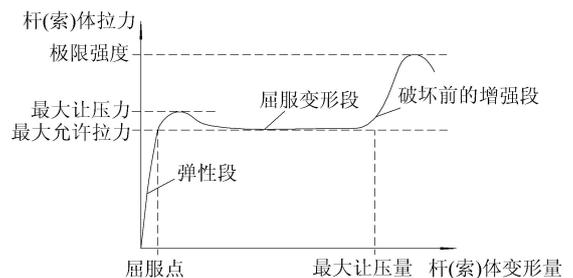


图3 让压锚杆的变形特征曲线

量,让压量可以达到30cm以上;可进行压力分散型的布置,避免普通让压锚杆施加预应力后,对锚头端部位置处的锚固体产生过大压力的问题;让压装置位于锚头端部位置,对张拉设备无特殊要求,张拉设备与普通锚索张拉的设备相同.

(2) 与压力分散性锚索的区别:具有让压装置,在锚索构造上有一定的不同;受力特性使其可适用于产生大变形的岩土工程;利用让压装置替代了普通承压板,材料性能更加可靠有效.

2 让压锚杆的受力形式分析

让压锚杆的受力具有分阶段性,可以分为3个阶段,第1个阶段由于锚杆刚刚张拉完成,让压装置还未起作用,受力与普通压力分散型锚索基本相同,对于软岩大变形工程来说这段受力过程历时较短;第2阶段,随着岩体变形的增大,锚杆的让压装置开始产生让压量,这是让压锚杆的主要作用阶段,该阶段让压锚杆的让压量不断增加,但锚索受力保持不变;第3阶段,当让压锚杆的让压量全部完成,让压锚杆又恢复到普通压力分散型锚索的状态,一般来说第3阶段只在实验室中存在,实际工程中应尽量避免.以下对让压锚杆的作用机理3阶

段作进一步分析研究。

2.1 让压前受力分析

为了研究压力分散型让压锚杆的载荷传递机理，首先分析压力集中型锚索载荷的传递，然后通过叠加的形式得到压力分散型让压锚杆的传力机理。以让压装置为坐标原点建立坐标系，沿锚固体轴线方向取一微段进行受力分析，如图 4 所示。计算过程中需要如下假设条件 [6-14]：

- (1) 让压装置附近的锚固体与岩土体为线弹性；
- (2) 锚固体与岩土体交界面满足库伦准则；
- (3) 半径为 a 的锚固体截面应力分布均匀。

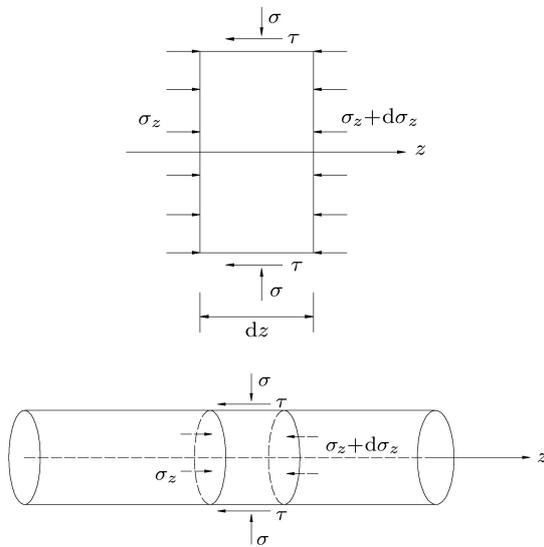


图 4 锚固段微元体受力

建立力学平衡方程 [11-12]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z \pi a^2 - (\sigma_z + d\sigma_z) \pi a^2 - \tau 2\pi a dz &= 0 \\ d\sigma_z + 2\tau dz &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据库伦准则可以得出锚固体与岩土体交界面关系式

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (2)$$

根据胡克定律得出

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma - \mu(\sigma + \sigma_z)] \quad (3)$$

由弹性力学问题中无穷平面上圆孔受均布内压 σ 作用时的位移解为

$$u_r = \frac{(1 + \mu_1)a^2\sigma}{rE_1} \quad (4)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} \quad (5)$$

在锚固体与岩土体交界面位置处， $r = a$ 。

利用积分公式

$$\int_0^a \frac{1}{E} [\sigma - \mu(\sigma + \sigma_z)] dr = \frac{(1 + \mu_1)a\sigma}{E_1} \quad (6)$$

$$\sigma_z = \frac{\tau}{\mu \tan \varphi} \left[(1 + \mu') \frac{E}{E'} + (1 - \mu) \right] \quad (7)$$

代入初始微分方程公式

$$ad\sigma_z + 2(c + k\sigma_z)dz = 0$$

并结合初始条件， $z = 0$ 时， $\sigma_z = \frac{P}{\pi a^2}$ ，可得出

$$\sigma_z = \left(\frac{P}{\pi a^2} + \frac{c}{k} \right) e^{-\frac{2k}{a}z} - \frac{c}{k}$$

其中， $k = \frac{E_1 \mu \tan \varphi}{E_1(1 - \mu) + E(1 + \mu_1)}$ ， E 和 μ 为锚固体弹性模量与泊松比， E_1 和 μ_1 为岩土体弹性模量与泊松比。

剪应力表达式为

$$\tau = \left(\frac{kP}{\pi a^2} + c \right) e^{-\frac{2kz}{a}} \quad (8)$$

轴力表达式为

$$N = \left(p + \frac{c\pi a^2}{k} \right) e^{-\frac{2kz}{a}} - \frac{c\pi a^2}{k} \quad (9)$$

很多情况下，由于黏聚力数值很小，所以并不考虑锚固体与岩土体之间的黏聚力，而是将二者之间的接触受力关系简化为库伦摩擦，即取 $c = 0$ ，此时有

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{kP}{\pi a^2} e^{-\frac{2kz}{a}} \\ N &= \left(p + \frac{\pi a^2}{k} \right) e^{-\frac{2kz}{a}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

通过叠加的形式得到压力分散型让压锚杆的传力机理公式如下

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \sum_{i=1}^n \alpha \left(\frac{kP_i}{\pi a^2} e^{-\frac{2kz}{a}} + c \right) e^{-\frac{2k(z-z_i)}{a}} \\ N &= \sum_{i=1}^n \alpha \left(P_i + \frac{c\pi a^2}{k} \right) e^{-\frac{2k(z-z_i)}{a}} - \frac{n c \pi a^2}{k} \\ \alpha &= \begin{cases} 0, & z - z_i < 0 \\ 1, & z - z_i \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

这里 n 为让压装置的数量； z_i 是第 i 个让压装置的位置距，如 $z_1 = 0$ 。

2.2 让压过程中的受力分析

随着岩体变形的增大,让压锚杆受力随之增加.当让压锚杆受力达到让压力 F_R 时,让压装置开始起作用,此时还要做一定的假设分析,假定让压装置同时起作用,产生的让压力相同.此时锚固体受力不再变化,剪应力与轴力表达形式如式 (12) 所示.

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \sum_{i=1}^n \alpha \left(\frac{kF_R}{\pi a^2} e^{\frac{-2kz}{a}} + c \right) e^{\frac{-2k(z-z_i)}{a}} \\ N &= \sum_{i=1}^n \alpha \left(F_R + \frac{c\pi a^2}{k} \right) e^{\frac{-2k(z-z_i)}{a}} - \frac{n c \pi a^2}{k} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

2.3 让压后的受力分析

该阶段让压装置的让压力达到极限,让压锚杆的受力又恢复到与普通压力分散型锚索受力相同的状态,锚固体受力如式 (13) 所示.

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \sum_{i=1}^n \alpha \left(\frac{kP_i}{\pi a^2} e^{\frac{-2kz}{a}} + c \right) e^{\frac{-2k(z-z_i)}{a}} \\ N &= \sum_{i=1}^n \alpha \left(P_i + \frac{c\pi a^2}{k} \right) e^{\frac{-2k(z-z_i)}{a}} - \frac{n c \pi a^2}{k} \\ P_i &> F_R \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

3 试验研究

3.1 室内试验

让压锚杆的让压力根据工程地质条件的不同而变化,新型让压锚杆相比于传统让压锚杆可以达到更大的让压力.以让压力 30 cm 的让压锚杆的作用机理进行室内试验研究,结果如图 5 所示.

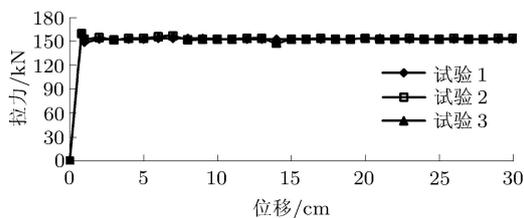


图 5 新型让压锚杆室内试验结果

试验分 3 组进行,3 组试验结果基本相同.第 1 阶段受力为弹性变形阶段,当达到让压力 159 kN, 155 kN, 160 kN 时,让压装置开始起作用,产生位移,试验结果显示让压锚杆的让压距离能够达到 30 cm,而受力也基本稳定.限于试验加载设备,未能对让压完成后的受力进行进一步分析.

3.2 现场试验

现场试验采用的让压力 30 cm 的锚杆长度为 35 m,让压装置的位置分布于 35 m, 32 m, 29 m 三处,试验结果如图 6 所示.得出的让压力的平均值为 185.3 kN,现场得出的让压力要大于室内试验,这种原因是由于现场的复杂环境产生的摩擦造成的,室内试验中锚杆与锚固体的摩擦接触要比现场试验小得多.结合室内试验和现场试验结果来看,新型让压锚杆可以适用于大变形工程.

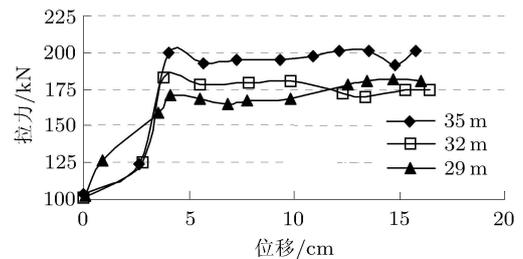


图 6 新型让压锚杆现场试验结果

4 结论

- (1) 文章介绍的新型让压锚杆的让压装置位于锚杆端部,能够在实现让压的同时将锚固体压力分散,这是该类锚杆同其他让压锚杆的不同之处;
- (2) 将让压锚杆的受力作用机理分为 3 个阶段——让压前、让压过程中、让压后受力分析,这是该类锚杆同普通压力分散型锚索的主要区别之处;
- (3) 通过让压力为 30 cm 的让压锚杆的室内试验得出的让压力分别为 159 kN, 155 kN, 160 kN, 现场试验得出的让压力的数值为 185.3 kN,由于现场的复杂环境产生的摩擦使得现场得出的让压力要大于室内试验.综合室内、现场试验得出让压锚杆的工作性能良好,能够适应软岩大变形工程的需要.

参考文献

- 1 Li CC. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, 47(3): 396-404
- 2 Charlie CL, Chantale D. Performance of D-bolts under static loading. *Rock Mech Rock Eng*, 2012, 45(2): 183-192
- 3 Li CC, Doucet C. Performance of D-bolts under dynamic loading. *Rock Mech Rock Eng*, 2012, 45(2): 193-204
- 4 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(6): 1081-1106
- 5 连传杰, 徐卫亚, 王志华. 一种新型让压管锚杆的变形特性及其支护作用机理分析. *防灾减灾工程学报*, 2008, 28(2): 242-247

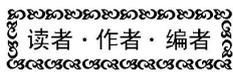
- 2 张慧娟. 使用融雪剂除雪给环境带来的危害分析. 环境保护与循环经济, 2010, (1): 75-76
- 3 黄勇, 高青, 马纯强等. 道路融雪化冰过程冰层的热融特性. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(2): 391-396
- 4 胡社荣, 彭纪超, 黄灿等. 千米以上深矿井开采研究现状与进展. 中国矿业, 2011, 20(7): 105-110
- 5 王永岩, 吕宜美, 肖志娟等. 化学腐蚀下砂岩蠕变模型的研究. 煤炭学报, 2010, (7): 1095-1098
- 6 王永岩, 王艳春. 温度-应力-化学三场耦合作用下深部软岩巷道蠕变规律数值模拟, 2012, 37(S2): 275-279
- 7 张向东, 傅强, 郑晓峰. 煤矿泥岩流变模型辨识及支护方法的确定. 力学与实践, 2011, 33(2): 30-35
- 8 程国栋, 杨成松. 青藏铁路建设中的冻土力学问题. 力学与实践, 2006, 28(3): 1-8
- 9 刘成庆. 冻土区道路翻浆原因分析. 民营科技, 2013, (5): 69
- 10 付伟, 汪稔, 胡明鉴. 不同温度下冻土单轴抗压强度与电阻率关系研究. 岩土力学, 2009, 30(1): 73-78
- 11 郑波, 张建明, 马小杰等. 高温-高含冰量冻土压缩变形特征性研究. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3063-3068
- 12 樊玲. 结冰融冰过程的数值模拟. [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2005
- 13 王军, 石磊. 基于 Fluent 的冰塞融化模拟. 山西建筑, 2009, 35(15): 362-363
- 14 许彬. 结构化网格中冰水相变传热过程的数值计算. [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2008
- 15 唐家鹏. FLUENT14.0 超级学习手册. 北京: 人民邮电出版社, 2013

(责任编辑: 胡 漫)

(上接第 196 页)

- 6 孙钧, 潘晓明, 王勇. 隧道围岩挤入型流变大变形预测及其工程应用研究. 河南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 646-653
- 7 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339-341
- 8 Kim NK. Performance of tension and compression anchors in weathered soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(12): 1138-1150
- 9 尤春安. 压力型锚索锚固段的受力分析. 岩石工程学报, 2004, 26(6): 828-831
- 10 Ansell A. Dynamic testing of steel for a new type of energy absorbing rock bolt. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(5): 501-512
- 11 贾金青, 涂兵雄, 王海涛. 压力分散型预应力锚杆的力学机理研究. 岩石工程学报, 2011, 33(9): 1320-1325
- 12 Gao F, Zhou KP, Luo XW. Effect of induction unloading on weakening of rock mechanics properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(2): 419-424
- 13 孙钧, 潘晓明. 隧道软弱围岩挤压大变形非线性流变力学特性研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1957-1968
- 14 Schmidt JW, Bennitz A, Taljsten B, et al. Mechanical anchorage of FRP tendons—A literature review. *Construction and Building Materials*, 2012, 32(s1): 110-121

(责任编辑: 刘希国)



封面图片说明

港珠澳大桥是世界桥梁史上里程碑式跨海大桥, 地处台风多发区, 长期服役中的不利载荷将不可避免导致其损伤积累和抗力衰减. 因此结合损伤识别、传感测试、信号分析等多学科交叉的桥梁安全监测技术确保其安全运营, 是一个重要而紧迫的科学问题. (图文供稿: 聂振华, 暨南大学“重大工程灾害与控制”教育部重点实验室)