

DOI: 10.11779/CJGE201704017

基于 FLAC^{3D} 数值模拟的让压锚索边坡加固机理研究

朱安龙¹, 张胤², 戴妙林³, 徐建强¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210006;

3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 高地应力或软岩地区开挖边坡的卸荷变形量及范围均较大, 普通锚杆(索)已不能满足此类变形的需要, 探索新型支护措施已成为必然趋势。提出一种能够体现让压锚索工作原理的本构模型, 结合 FLAC^{3D} 软件和 FORTRAN 编程语言成功实现了让压锚索边坡加固的数值模拟方法。以锦屏一级左岸边坡加固设计为例, 对边坡开挖卸荷过程中不同锚索的边坡加固效果和影响规律进行模拟分析。结果表明, 较普通锚索加固效果, 让压锚索在边坡大变形方面具有明显优势, 且其数值模拟方法的实现也为让压锚索支护方案的设计及优化提供了科学依据。

关键词: 大变形边坡; 让压锚杆; 设计让压值; 安全系数

中图分类号: TU42; TV223.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)04-0713-07

作者简介: 朱安龙(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水电工程设计。E-mail: zhu_al@ecidi.com。

Reinforcement mechanism of slopes with yielding anchor cables based on numerical simulation of FLAC^{3D}

ZHU An-long¹, ZHANG Yin², DAI Miao-lin³, XU Jian-qiang¹

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China; 2. Nanjing Water Planning and Designing

Institute Corp., Ltd., Nanjing 210006, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University,

Nanjing 210098, China)

Abstract: The unloading deformation and range of the excavation slope are larger in high-ground stress or soft rock areas, and the ordinary bolt (cable) cannot meet the need of such deformation. So, exploring the new support measures has become an inevitable trend. A constitutive model to simulate the working principles of yielding anchor is put forward, and the numerical simulation method for the reinforcement of the yielding anchors are successfully realized. Taking the reinforcement design of the slope at the left bank of Jingping I Hydropower Station as a typical example, the effectiveness and influence of slope reinforcement in the excavation and unloading process are simulated and analyzed. The results show that the yielding anchor has certain advantages in the large deformation of the slope, and the numerical simulation method may provide a scientific basis for the design of the yielding anchor supporting scheme.

Key words: large-deformation slope; yielding anchor; design yield value; safety factor

0 引 言

伴随着越来越多的大型水利工程建设, 各类工程边坡处理已成为工程建设的重要组成部分^[1]。保障工程边坡的安全稳定, 不仅是主体工程能够顺利进行的前提条件, 也是确保相关施工人员及附近居民的人身安全的一项重要措施。近几年, 边坡失稳带来的灾难性破坏已被全球专家所关注, 据相关资料统计, 滑坡灾害已成为全球地质灾害之首^[2]。说明在目前的边坡工程建设中还是存有许多问题, 如常规加固措施已不能有效地阻止边坡变形, 且加固设计在理论与应用方面的结合还不够完善等。

当遇到复杂多变的地质条件, 使得开挖后普遍出现大面积的卸荷变形, 造成常规加固措施, 普通锚杆(索)甚至预应力锚杆(索)经常出现成片被拉断的破坏现象。雅砻江上某电站在建设过程中, 由于开挖卸荷的作用, 在开挖完成一段时间后, 破裂程度和破裂深度都表现出随时间增长的趋势, 曾出现一些预应力锚索的锚头被拉断现象^[3]。根据郑静等对国内 16 处边坡锚固工程进行检查, 边坡预应力锚索结构失效破坏类型中, 锚索受荷超限是其中主要因素之一^[4-5]。鉴

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51279050)

收稿日期: 2016-01-22

于以上问题，众多学者针对新型锚杆（索）的加固效应及数值模拟方面进行了相关研究，并取得了一定的成果。其中让压锚杆（索）因能够灵活适应岩体大变形的特点，被越来越多的专家学者所关注。余伟健等^[6]针对大硐室的开挖与支护进行了相关优化设计和数值分析，提出采用不同让压长度的支护方案有利于岩体的长期稳定。连传杰等^[7]建立了一种考虑高预应力让压锚杆锚芯与岩石间剪切破坏作用的三维锚杆计算模型及相应有限元程序，用于模拟高预应力让压锚杆的力学特性。刘景书^[8]采用鸟窝锚索及高强让压锚杆对煤矿巷道进行相关支护，并取得了良好效果。李术才等^[9]针对巨野矿区深部高地应力厚顶煤巷道的支护特点，采用“先抗后让再抗”的支护理念，开发了高强让压型锚索箱梁（PRABB）支护系统。王阔^[10]依据“先刚后柔，柔中带刚”的支护观点，建立了预应力让压锚杆的本构关系，并对其数值计算方法进行了相关研究。

1 让压锚杆分析

国外对让压技术的研究已有30多年的历史，在中国的研究始于20世纪80年代中期，主要集中于煤炭矿山领域^[11-12]。所研制的让压锚杆（索）种类也是数不胜数，其中以可延伸式锚杆（索）最为常见，按其基本工作原理，大致分为延伸杆件和设置滑动结构元件两大类^[13]。本文基于第二类预应力让压锚索，重点分析了其让压工作原理及数值模拟方法。

1.1 让压锚杆工作原理

较常规锚索的工作特征，让压锚索在让压阶段时是通过一种可定量的让压构件，使锚索在恒定拉力作用下变形持续增加直至达到设定的让压量后锁定，让压构件示意图详见图1。该类锚索可产生与岩体相适应的变形，避免其拉断失效的同时保持恒定的支护作用。除此之外，让压前和锁定后锚索的力学特性与常规锚索一致。

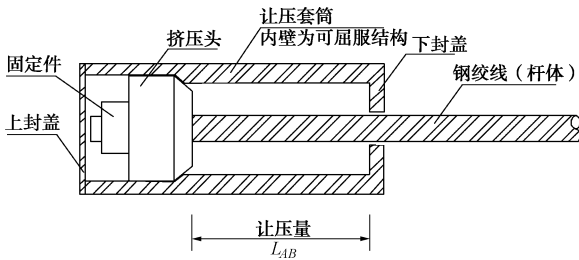


图1 让压构件示意图

Fig. 1 Diagram of yielding components

1.2 让压本构模型的建立

根据工程现场试验得到的让压锚索杆体拉力 - 变

形量关系曲线，进行适当的简化，确定应力 - 应变关系曲线，详见图2。该曲线可概化为5个阶段，分别为弹性变形阶段 $O'A$ 、让压阶段 AB 、弹性变形阶段 BC 、塑性强化阶段 CD 和脆性破坏阶段 DE 。主要控制点分别为预应力 σ_0 、让压起始应力 σ_{brs} 、让压终止应力 σ_{bre} 、屈服应力 σ_{bs} 、峰值强度 σ_{bp} 和让压量 L_t 。

(1) $O'A$ 阶段：弹性变形阶段， A 点为让压锚索的让压起始点，相应的让压起始应力和应变为 σ_{brs} 和 ϵ_{brs} ，弹性模量为 E_b 。

(2) AB 阶段：让压阶段，让压装置发挥作用，杆体受力只有很小的变化， B 点为锚索的让压终止点，相应的让压终止应力和应变为 σ_{bre} 和 ϵ_{bre} 。 AB 阶段的弹性模量 E_{br} 为接近于零的数值。

(3) BC 阶段：弹性变形阶段， C 点为锚索抗拉屈服点，相应的屈服应力和应变为 σ_{bs} 和 ϵ_{bs} 。 BC 阶段的弹性模量为 E'_b 。

(4) CD 阶段：塑性强化阶段，此阶段杆体既有弹性变形，又有塑性变形， D 点为锚索峰值强度，相应的峰值应力和应变为 σ_{bp} 和 ϵ_{bp} 。对于钢材来说，塑性变形相对较小。 CD 阶段的弹性模量为 E'_b 。

(5) DE 阶段：脆性破坏阶段，杆体受力超过了它的峰值强度，致使锚索的锚固力迅速下降，锚固失效。

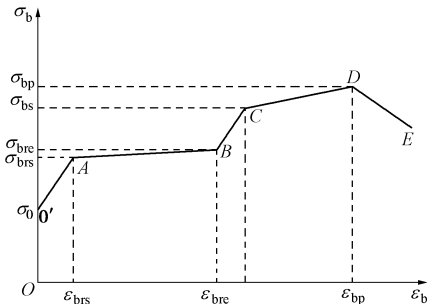


图2 让压锚索应力 - 应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of yielding anchor cables

提出变参数分段模拟模型来实现锚索的让压作用，即在试验规律的基础上，确定应力应变关系的控制特征点，将关系曲线近似分成5段来研究，每一段采用不同的材料参数来控制锚索的应力应变关系，从而实现锚索的让压原理。预应力让压锚索的应力 - 应变关系，可采用如下本构模型：

$$\sigma_b = \begin{cases} \sigma_0 + E_b \epsilon_b & (0 \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{brs}) \\ \sigma_{brs} + E_{br} (\epsilon_b - \epsilon_{brs}) & (\epsilon_{brs} \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{bre}) \\ \sigma_{bre} + E_b (\epsilon_b - \epsilon_{bre}) & (\epsilon_{bre} \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{bs}) \\ \sigma_{bs} + E'_b (\epsilon_b - \epsilon_{bs}) & (\epsilon_{bs} \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{bp}) \\ \sigma_{bp} \text{ (理想塑性), 或 } 0 \text{ (断裂)} & (\epsilon_b \geq \epsilon_{bp}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ_{brs} ， ϵ_{brs} 为让压起始应力和应变； σ_{bre} ， ϵ_{bre}

表 1 岩体和结构面力学参数
Table 1 Mechanical parameters of rock and structural planes

类别	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg·m ⁻³)	黏聚力 /MPa	摩擦角 /(°)
III ₁	8.0	4.8	12.0	0.25	2.80	1.50	46.9
III ₂	5.8	2.7	7.0	0.30	2.78	0.90	47.0
IV ₁	3.3	1.1	3.0	0.35	2.75	0.60	34.9
IV ₂	2.2	0.7	2.0	0.35	2.75	0.40	30.9
断层 f ₄₂₋₉	4.0	0.1	0.4	0.35	2.60	0.02	16.7
煌斑岩脉 X	3.3	1.1	3.0	0.35	2.75	0.40	29.2

为让压结束应力和应变。

1.3 让压数值模拟的实现

计算模型，对其稳定性、锚索加固方案优化以及岩体弱化影响进行数值模拟研究。

数值模拟采用拉格朗日有限差分软件FLAC^{3D}进行计算，其力学模型是塑性模型，屈服准则采用莫尔-库仑准则。为模拟让压锚索的支护作用，结合Fortran编程语言对FLAC^{3D}软件进行二次开发，开发流程详见图3。充分发挥了FLAC^{3D}软件在处理几何非线性和大变形问题的计算优势，以及Fortran编程语言对计算变量的灵活控制特点，具体实现了图2及式（1）所描述的让压锚索应力应变关系。

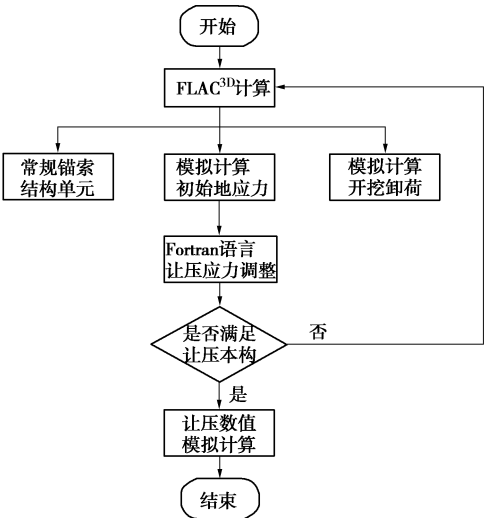


图 3 让压锚索数值模拟流程图

Fig. 3 Flow chart of numerical simulation for yielding anchor cable

2 预应力让压锚索加固岩体数值模拟研究

锦屏一级水电站左岸含有多条软弱结构和多组节理裂隙，其地质构造十分复杂，需开挖岩体高达 530 m，开挖量为 550 万 m³，成为目前水电工程中开挖高度高、规模大、条件差的重点工程。选取左岸边坡较有代表性的 II 1-II 1 剖面进行研究，其中主要发育有 f₅、f₈、f₄₂₋₉ 断层、煌斑岩脉 X 等主要结构面，具体工程地质剖面图详见图 4。经概化后，可建立相应数值

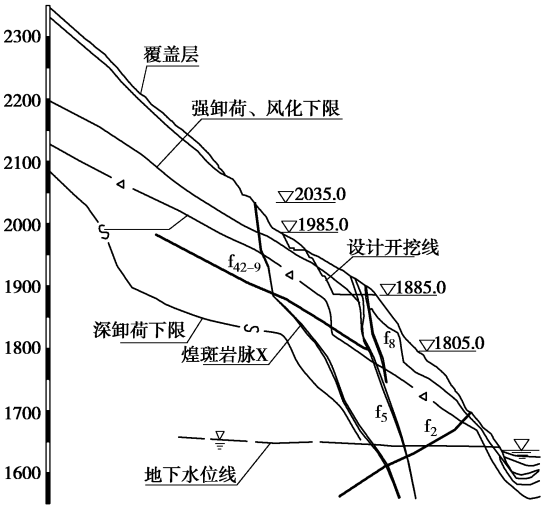


图 4 锦屏一级水电站左岸 II 1-II 1 剖面图

Fig. 4 II 1-II 1 profile of left bank of Jinping I Hydropower Station

2.1 加固岩体分布及概化数值计算模型

断层结构面主要由散体结构的岩屑、角砾及泥质物质组成，除 f₄₂₋₉ 宽度整体在 0.5 m 以内外其余均大于 1 m，最大为 f₅ 断层，达到 10 m。上部砂板岩中 f₅、f₈ 断层间存在宽 10~20 m 的破碎带和影响带，形成可能失稳破坏的重要边界。煌斑岩脉 X 受卸荷影响，多松弛破碎，遇水易软化。根据以上结构特点，可将 II 1-II 1 剖面进行概化处理，得到图 5 所示概化剖面及相应数值计算网格模型。数值计算网格模型共有 6039 个节点，4173 个六面体和四面体单元；边坡开挖卸荷区域分为 K1~K6 共 6 个区域；模拟计算约束条件为左侧边界和底部边界施加法向约束，垂直剖面的位移为零。

结合现场工程地质探测与现场的力学试验，开挖加固计算所需左岸边坡岩体和结构面的建议力学参数值详见表 1。由于 f₅、f₈ 断层位于开挖区域内，将不参与开挖后边坡加固计算中，故在此省略其相应力学参数值的介绍。

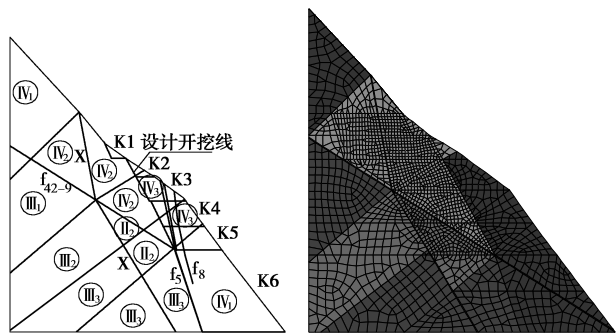


图 5 左岸 II 1-II 1 概化剖面及相应数值计算网格模型

Fig. 5 II 1-II 1 generalized profile of left bank and numerical model

2.2 加固方案设计

全部开挖后，边坡形成以 f_{42-9} 断层为底滑面，以煌斑岩脉 X 后缘滑动面的潜在滑动块体，在其上依据工程经验选取了 4 个监测特征点，编号为 1~4，用以跟踪分析潜在滑动块体的位移变化情况，特征点布置位置详见图 6 (a)。同时配合开挖设计，在高程上的间距为 4 m，纵向的间距亦为 4 m，共布置 54 根锚索，编号随高程降低依次为 1~54 号。其中编号为 1~25 号锚索穿过煌斑岩脉 X，锚索抗拉强度和屈服强度的相应轴力均为 4550 kN，让压起始应力的相应轴力为 4323 kN；编号为 26~54 号锚索穿过断层 f_{42-9} ，锚索抗拉强度和屈服强度的相应轴力均为 6370 kN，让压起始应力的相应轴力为 6052 kN，锚索自由段长度均为 80 m，锚索布置位置详见图 6 (b)。

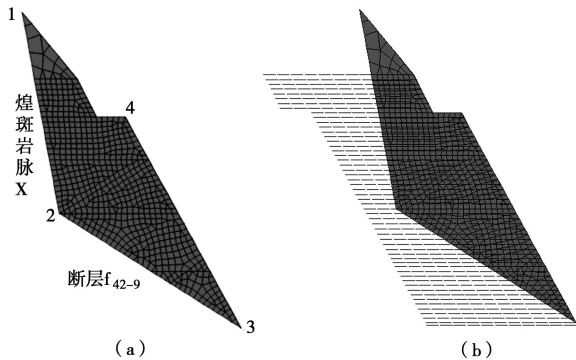


图 6 开挖后的潜在滑动块体及加固锚索布置示意图

Fig. 6 Potential sliding blocks after excavation and reinforcement layout of anchor cables

3 让压锚索与常规锚索加固效应对比分析

根据数值计算得到的应力场，对滑动面上的每个单元累加计算得到总抗滑力和总滑动力，二者的比值即为块体稳定安全系数。分别采用让压和常规两类锚索进行相同过程的加固数值模拟计算，分析开挖时及

开挖后，岩体变形及安全系数的变化情况，以此对比分析相应加固效果。具体计算与分析过程详见图 7。

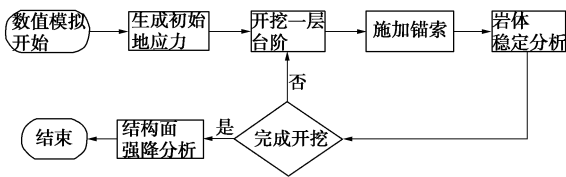


图 7 边坡岩体加固数值模拟计算与分析流程图

Fig. 7 Flow chart of numerical simulation for reinforcement of slope blocks

3.1 边坡岩体开挖及加固效果分析

边坡开挖加固模拟过程为：1 级开挖区域 K1 被开挖后，施加 1~8 号预应力锚索；2 级开挖区域 K2 被开挖后，施加 9~18 号预应力锚索；3 级开挖区域 K3 被开挖后，施加 19~29 号预应力锚索；4 级开挖区域 K4 被开挖后，施加 30~41 号预应力锚索；5 级开挖区域 K5 被开挖后，施加 42~54 号预应力锚索；最后 6 级开挖区域 K6 被开挖。

(1) 潜在块体安全系数分析

开挖过程中，采用常规锚索及本文提出的让压锚索分别进行岩体加固，得到相应潜在块体的安全系数变化规律曲线见图 8，具体变化数据详见表 2，安全系数为潜在滑动块体周边结构面上抗滑力之和与滑动力之和的比值。结果可知：加固效果均为在第 1 级~第 4 级的开挖加固过程中，块体安全系数呈增大趋势，而第 5 级开挖加固后的安全系数小于第 4 级，这是由于在坡脚部位开挖后，抗力降低引起的；但采用让压锚索加固的安全系数均大于采用普通锚索所得安全系数，尤其在第 6 级开挖结束后，采用让压锚索和普通锚索方案所得安全系数分别为 1.661 和 1.457，差值达 0.204。

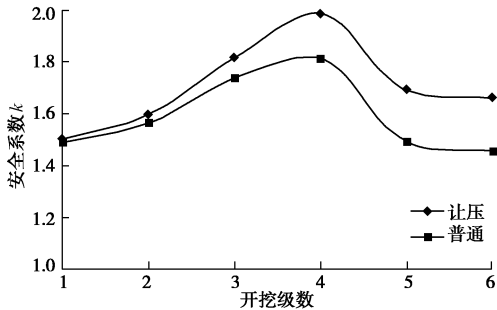


图 8 开挖加固过程与块体安全系数关系曲线

Fig. 8 Relation between excavation reinforcement process and safety factor of block

(2) 特征点监测位移分析

在 1~6 级的边坡开挖过程中，潜在滑动块体上的 4 个特征点的水平向位移和竖向位移变化曲线详见图

9 (a) ~ (d), 水平向位移呈现向坡内变形的特点, 这是锚索预应力与开挖卸荷综合影响的结果, 锚索预应力产生的位移大于开挖卸荷的位移, 由于让压锚索方案的预应力大于普通锚索, 故让压锚索方案向坡内的位移大于普通锚索方案。对于竖向位移, 开挖卸荷和锚索水平向预应力产生的泊松效应, 呈现向上变形的特点, 让压锚索方案的向上竖向位移大于普通锚索方案。

表 2 开挖加固过程中滑动块体安全系数和滑动面屈服单元百分比

Table 2 Safety factors of sliding blocks and percentages of sliding surface yielding unit in excavation reinforcement process

开挖加固级数	安全系数 K		滑动面屈服单元百分比/%	
	让压	普通	让压	普通
第一级	1.503	1.490	9	9
第二级	1.597	1.565	13	13
第三级	1.817	1.737	3	3
第四级	1.984	1.812	7	6
第五级	1.693	1.492	7	14
第六级	1.661	1.457	3	14

3.2 边坡岩体降强分析

边坡长期处于自然状态下, 由于物理和化学的作用, 岩体内结构面的力学参数随着时间推移而降低, 故对锦屏左岸边坡 II 1- II 1 剖面, 潜在滑动块体的潜在滑动面煌斑岩脉 X 和断层 f42-9 的抗剪强度参数 c (黏聚力) 和 f (内摩擦角) 进行强度折减计算, 用以研究二种锚索加固方案的岩体变形和稳定性。

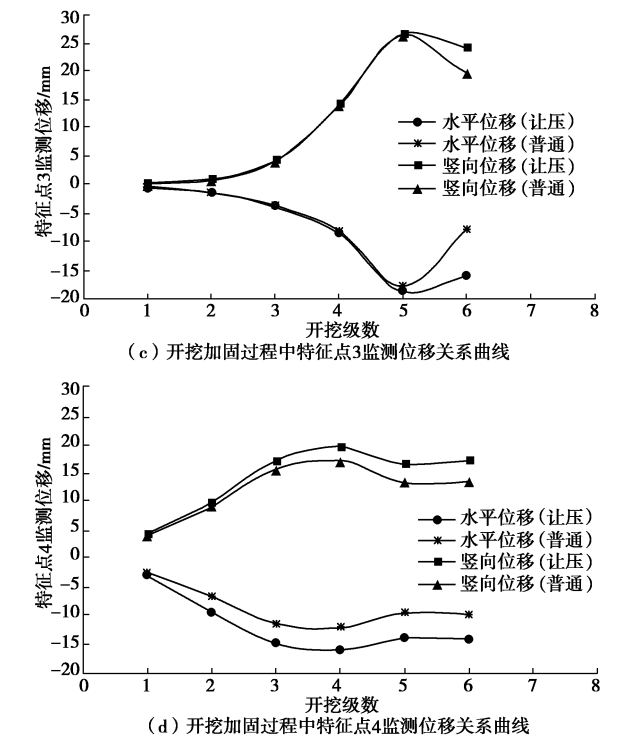
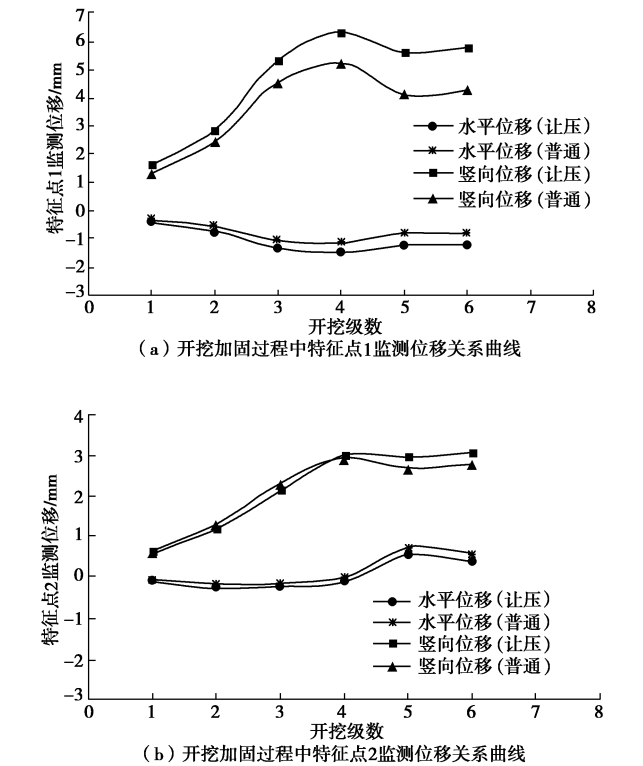


图 9 开挖加固过程中各特征点监测位移曲线

Fig. 9 Monitoring displacement curve of monitoring point in the excavation strengthen process

(1) 潜在块体安全系数分析

针对不同的边坡岩体加固措施, 强度折减后所得安全系数变化规律详见图 10, 具体变化数据详见表 3。研究发现: 让压锚索和普通锚索加固安全系数随强度降低均呈现先减后增且差距逐渐缩小的规律, 曲线变化的拐点位于降强倍数 1.2~1.25 之间; 降强倍数小于 1.25 时, 安全系数随着降强倍数的增加而减小, 其中随岩体力学性能的降低, 让压锚索对应的安全系数降低速率较大, 二者差距逐渐缩小至基本相同; 当降强倍数超过 1.25 时, 以上两种方案所得安全系数随着降强倍数的增加而增加, 其安全系数增加速率基本相同。由表 3 可知: 降强倍数达到 1.25 后, 让压锚索方案和普通锚索方案的最小安全系数为差值在 0.002 以内, 二种加固方案所得安全系数大小基本相同。

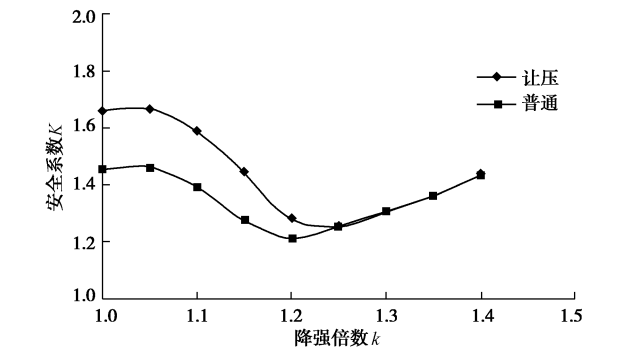


表 3 滑动块体安全系数和滑动面屈服单元百分比

Table 3 Safety factors of sliding blocks and percentages of sliding surface yielding unit in strength reduction process

降强 倍数 k	安全系数 K		滑动面屈服单元百分比/%	
	让压	普通	让压	普通
1.05	1.666	1.461	21	32
1.1	1.59	1.394	32	40
1.15	1.445	1.28	41	84
1.2	1.281	1.215	89	97
1.25	1.256	1.255	99	99
1.3	1.306	1.308	100	100
1.35	1.363	1.363	100	100

(2) 特征点监测位移分析

绘制降强过程中 4 个特征点的水平向位移和竖向位移与降强倍数 k 的关系曲线, 详见图 11 (a) ~ (d)。由图可见: 让压锚索方案的水平向和竖向位移均小于普通锚索方案, 位移随着降强倍数的增加而增加; 降强倍数小于 1.30 时, 位移值均较小, 大于 1.30 后出现快速增长, 尤其是降强倍数 1.35 时, 此时为让压锚索和普通锚索的最大水平向位移。

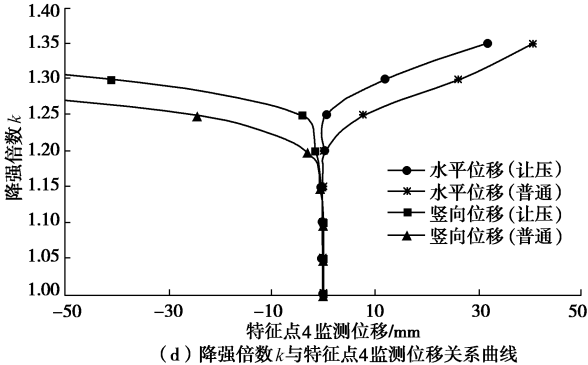
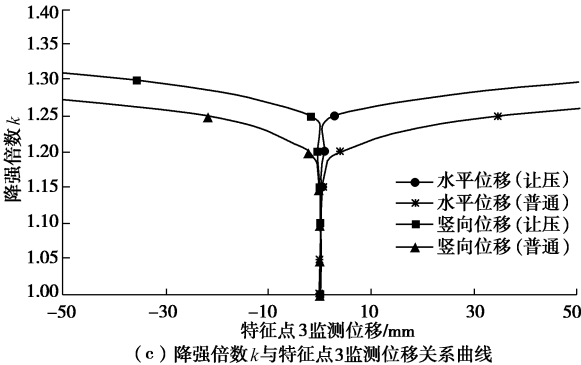
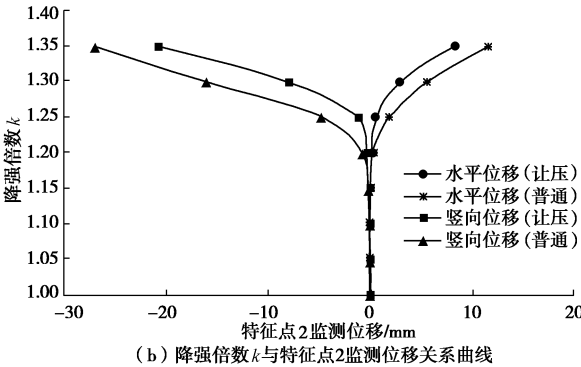
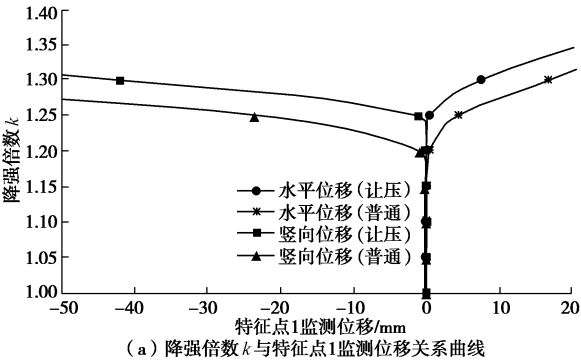


图 11 特征点监测位移与降强倍数 k 关系曲线

Fig. 11 Relation curve between displacement of monitoring point and strength reduction k

3.3 支护效果评价

综合以上让压锚索和普通锚索的加固效应分析可知: 让压锚索方案能够有效提高开挖过程中潜在滑动块体的安全系数; 有效减小开挖过程中潜在滑动块体的位移发展; 有效抑制滑动面抗剪强度参数降低造成的潜在滑动块体失稳破坏的发展。

4 结论和建议

(1) 开发让压锚杆的本构模型, 将其与数值计算软件联合求解, 合理有效地反映了让压锚杆的力学特性, 分阶段探讨了让压锚杆的支护机理, 为科学设置让压距离提供研究方法。

(2) 由于让压锚杆在支护初期可以施加较大的支护荷载, 边坡向坡内变形趋势更明显, 安全系数也较普通锚杆大。而且随着开挖的进行, 边坡变形和安全系数之间的差异逐渐增大, 让压锚杆的优越性逐渐显现, 说明让压锚杆更适用于高边坡等大型重要锚固工程。

(3) 边坡主要滑动面力学参数降强分析显示, 降强系数小于 1.25 时, 随着边坡岩体参数强度的降低, 让压锚杆方案的边坡变形小于普通锚杆方案, 安全系数大于普通锚杆方案, 说明让压锚杆相比普通锚索更加适应复杂地质条件。

(4) 让压锚杆进入让压状态时, 只要让压距离设计合理, 锚杆依然处于设计的受力状态, 因此让压锚索的自身安全性更高。

(5) 让压锚杆在边坡中支护效果的分析, 在国内外研究中还不多见, 其理论和实践方面还存在很大的不足, 其中计算模型的简化, 让压荷载及让压距离的确定等尚无成熟的理论研究成果和实践经验, 建议进一步开展相关的理论和工程应用研究。

参考文献:

[1] 杨建, 黄静波. 水电水利工程边坡若干问题探讨[J]. 水

- 力发电, 2013, **39**(5): 16 - 19. (YANG Jian, HUANG Jing-bo. Discuss on some problems of hydropower and water conservancy engineered slope[J]. Water Power, 2013, **39**(5): 16 - 19. (in Chinese))
- [2] LU Ying-long, WANG Lian-guo, ZHANG Bei. An experimental study of a yielding support for roadways constructed in deep broken soft rock under high stress[J]. Mining Science and Technology, 2011, **21**(5): 839 - 844.
- [3] 李仲奎, 周 钟, 汤雪峰, 等. 锦屏一级水电站地下厂房洞室群稳定性分析与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(11): 2167 - 2175. (LI Zhong-kui, ZHOU Zhong, TANG Xue-feng, et al. Stability analysis and considerations of underground powerhouse caverns group of Jinping I hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(11): 2167 - 2175. (in Chinese))
- [4] 郑 静, 韩 龙, 朱本珍, 等. 边坡锚固工程质量问题及其影响[J]. 铁道工程学报, 2009(1): 27 - 31. (ZHENG Jing, HAN Long, ZHU Ben-zhen, et al. The problems related to the anchorage engineering for side slope and their effects[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(1): 27 - 31. (in Chinese))
- [5] 郑 静, 朱本珍. 边坡锚索结构的失效因素与破坏类型[J]. 铁道工程学报, 2010(1): 10 - 13. (ZHENG Jing, ZHU Ben-zhen. Failure factor and failure damage type of slope anchor structure[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(1): 10 - 13. (in Chinese))
- [6] 余伟健, 高 谦, 韩 阳, 等. 不稳定围岩开挖与让压支护的优化设计及数值分析[J]. 煤炭学报, 2008, **33**(1): 11 - 16. (YU Wei-jian, GAO Qian, HAN Yang, et al. Optimization design and numerical analysis of excavation and yield supporting for unstable surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2008, **33**(1): 11 - 16. (in Chinese))
- [7] 连传杰, 韦立德, 王 阁. 高预应力让压锚杆数值模拟方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 1437 - 1443. (LIAN Chuan-jie, WEI Li-de, WANG Ge, et al. Development of 3D numerical simulating methods for high prestressed yield bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1437 - 1443. (in Chinese))
- [8] 刘景书. 鸟窝锚索及高强让压锚杆在冲击性全煤巷道中的应用[J]. 煤矿开采, 2010, **15**(1): 62 - 64. (LIU Jing-shu. Application of nest anchored rope and yielding anchored bolt with high strength in full-coal roadway with bursting liability[J]. Coal Mining Technology, 2010, **15**(1): 62 - 64. (in Chinese))
- [9] 李术才, 王 琦, 李为腾, 等. 深部厚顶煤巷道让压型锚索箱梁支护系统现场试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(4): 656 - 666. (LI Shu-cai, WANG Qi, LI Wei-teng, et al. Comparative field test study of pressure relief anchor box beam support system in deep thick top coal roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 656 - 666. (in Chinese))
- [10] 王 阁. 预应力让压锚杆的数值模拟研究及其应用[D]. 济南: 山东科技大学, 2007. (WANG Ge. Numerical simulation of pre-stressed yield bolt support and its application[D]. Jinan: Shangdong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese))
- [11] 曾祥勇, 邓安福. 锚索与锚杆联合锚固支护岩坡的有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(4): 44 - 45. (ZENG Xiang-yong, DENG An-fu. Finite element analysis of rock cutting slope reinforced by combined action of prestressed anchor cable and anchor bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(4): 44 - 45. (in Chinese))
- [12] 何满潮, 齐 干, 程 骋, 等. 深部复合顶板煤巷变形破坏机制及耦合支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(5): 987 - 993. (HE Man-chao, QI Gan, CHENG Cheng, et al. Deformation and damage mechanisms and coupling support design in deep coal roadway with compound roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(5): 987 - 993. (in Chinese))
- [13] CHARLIE C L. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2010(7): 396 - 404.