

• 研究论文 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201700834

GFRP锚杆加固顺层岩质边坡的机制研究

孙长宁^{1,2,4}, 苏立君^{1,2,3,4*}, 张崇磊^{1,2,3,4}, 肖思友^{1,2,4}

(1.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2.中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;
3.中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:由于传统钢筋锚杆存在易腐蚀、耐久性差等缺点, GFRP(玻璃纤维增强复合材料)锚杆得到了高度重视。然而, GFRP锚杆的弹性模量小且抗剪强度低, 故其加固顺层岩质边坡的机制仍需进一步研究。考虑顺层岩质边坡的顺层滑移破坏模式, 基于Winkler假定和锚杆荷载传递机理对边坡岩体与锚杆的相互作用机制进行理论分析, 建立剪切位移作用下锚杆的力学模型, 并对其进行验证。基于此, 结合GFRP锚杆的物理力学参数(如弹性模量、抗剪强度等), 考虑坡体剪切位移、锚杆与潜在滑面夹角及岩体无侧限抗压强度等影响因素, 分析GFRP锚杆加固顺层岩质边坡的机制。结果表明: 1) 当锚杆与潜在滑面夹角为45°时, 硬岩中坡体较小的剪切位移导致GFRP锚杆发生剪切屈服; 软岩中坡体产生较大的剪切位移时, GFRP锚杆发生受拉屈服。2) 当锚杆屈服时, GFRP锚杆在加固不同抗压强度的岩体时提供的抗力差异较大, 加固软岩时抗力最大; 随着岩体无侧限抗压强度增大, GFRP锚杆提供的抗力逐渐变小; 相比而言, 钢筋锚杆在加固不同抗压强度的岩体时提供的抗力大小基本接近。3) 硬岩中, 锚杆与潜在滑面夹角对GFRP锚杆抗力的影响较大, 夹角越小, 抗力越大; 软岩中, 锚杆与潜在滑面夹角对GFRP锚杆抗力的影响较小; 当夹角为5°~60°时, GFRP锚杆均能提供较大抗力。研究结果为岩质边坡锚固研究及工程应用提供参考。

关键词:GFRP锚杆; 顺层岩质边坡; 顺层滑移破坏; 力学模型; 机制

中图分类号:TU47

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)03-0216-08

Mechanisms of GFRP Anchor Bolt for Strengthening Rock Bedded Slope

SUN Changning^{1,2,4}, SU Lijun^{1,2,3,4*}, ZHANG Chonglei^{1,2,3,4}, XIAO Siyou^{1,2,4}

(1.Inst. of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2.Key Lab. of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3.CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China; 4.Univ. of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: High attention had been drawn to the new anchor bolt materials represented by glass fiber reinforced polymer (GFRP) as the traditional steel anchor bolt show certain disadvantages, including low corrosion resistance and poor durability. However, due to the shortcoming of the GFRP anchor bolt, including relatively low shear strength and elastic modulus, the mechanism of the GFRP anchor bolt to strengthen rock bedded slope need to be further studied. The interaction mechanism between rock mass and anchor bolt was analyzed based on the Winkler's assumption and the loading transfer mechanism. Then the mechanical model of anchor bolt under the action of shear displacement was established and verified. On this basis, by considering some influence factors, such as shear displacement, the angle between the anchor bolt and potential sliding surface and unconfined compressive strength of rock mass, the mechanisms of the GFRP anchor bolt for strengthening rock bedded slope were studied. It is concluded that: 1) when the angle between the anchor bolt and the sliding surface was 45°, the GFRP anchor bolt generated shear yield because of a small shear displacement in hard rock, and the GFRP anchor bolt presented tensile yield in soft rock. 2) when the anchor bolt yielded, the differences between the resistances of the GFRP anchor bolt for reinforcing different rocks are obvious. The greater the unconfined compressive strength of rock mass is, the smaller the resistance of the GFRP anchor bolt is. In contrast, the differences between the resistances of the steel an-

收稿日期:2017-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41761144077; 41790432; 51278397); 中国科学院西部之光“一带一路”国际合作团队资助项目(苏立君)

作者简介:孙长宁(1989—), 男, 博士生. 研究方向: 山地灾害及其动力过程. E-mail: changningsun66@163.com

* 通信联系人 E-mail: sulijun1976@163.com

网络出版时间:2018-05-06 00:03:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180506.0002.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

chor bolt for different rocks are slight.3) In hard rock,the angle between the anchor bolt and the sliding surface had a great impact on the resistance of anchor bolt.The smaller the angle is,the greater the resistance is.In soft rock,the angle between the anchor bolt and the sliding surface had a small impact on the resistance of GFRP anchor bolt.The GFRP bolt can provide greater resistance for the angle from 5° to 60° .These results can provide some references for anchoring of rock slope and related engineering applications.

Key words: GFRP anchor bolt;rock bedded slope;bedding-slip failure;mechanical model;mechanisms

随着经济建设的迅速发展,交通工程日渐增多,山区道路路堑开挖容易发生边坡失稳,尤其以顺层岩质边坡最为常见。顺层岩质边坡是指层面和坡面的走向、倾向接近或大体一致的层状结构岩质边坡。边坡的加固方式有多种,其中锚杆以其施工方便、安全可靠、节约投资等优点被广泛应用。

传统锚杆一般选用钢筋作为杆体材料。工程中发现传统锚杆破坏失效主要是因为锚杆遭受腐蚀^[1]。GFRP锚杆是一种由基质材料和纤维材料复合而成的新型加固材料制成的筋材。与传统钢筋锚杆相比,其具有耐腐蚀、抗拉强度高、性价比高、耐疲劳、易成形、自重轻、方便施工等优点,通过GFRP锚杆替代钢筋锚杆用于边坡加固工程,能有效解决锚杆结构的耐久性问题^[2-4]。目前,GFRP锚杆预应力锁定方法较复杂^[5],故以非预应力锚杆(如全长黏结型锚杆或土钉)形式加固边坡较多^[6-9]。大量研究表明,GFRP锚杆的抗拉强度、与砂浆体的黏结强度、蠕变性能等可满足工程需要^[3-4,10-11]。

然而,GFRP锚杆存在弹性模量小、抗剪强度较低的缺点。与土层锚杆不同,岩质边坡加固工程中的锚杆需要考虑其横向抗弯抗剪作用^[12-17]。因此,需要考虑GFRP锚杆的材料特性,对其加固顺层岩质边坡的机制进行研究。

针对岩体节理锚杆加固,许多学者考虑剪切作用,建立锚杆的力学模型。Pellet等^[13]基于最小势能原理的变分法,建立了锚杆横向剪切力与横向剪切位移和锚杆轴向力与轴向位移的关系。陈文强等^[15]基于Pellet建立的理论模型,考虑结构面剪胀性,对剪切过程中锚杆的轴向和横向作用进行力学分析,并通过室内直剪试验验证了模型的有效性。Li等^[14]基于超静定梁理论,建立了剪切作用下全长黏结锚杆的力学模型,进而分析锚杆轴力和剪力与位移之间的关系。王发玲等^[17]考虑边坡岩体与锚杆的相互作用,运用结构力学相关理论对全长黏结型锚杆加固顺层边坡的机制进行研究,提出锚杆加固顺层边坡的力学模型。

作者根据顺层岩质边坡的破坏模式,基于Winkler假定和锚杆荷载传递机理,对边坡岩体与锚杆横向和轴向的相互作用机制进行理论分析,建立剪切位移作用下锚杆的力学模型。结合GFRP锚杆的材料特性,考虑坡体剪切位移、锚杆与潜在滑面夹角及岩

体无侧限抗压强度等影响因素,利用上述建立的锚杆力学模型分析GFRP锚杆加固顺层岩质边坡机制。

1 顺层岩质边坡破坏模式

顺层岩质边坡变形和破坏的影响因素很多,包括地形地貌、地质构造、地层岩性、岩体结构、水文地质特征和人类工程活动等。根据现有文献和现场调查发现,顺层岩质边坡的破坏模式主要有顺层滑移破坏、顺层滑移-拉裂破坏、楔形体滑移失稳破坏、滑移-弯曲破坏、滑移-压致拉裂破坏、滑劈破坏、陡倾岩层的弯曲-拉裂倾倒破坏、沿底部软岩塑流-拉裂破坏等^[18-19]。

主要考虑顺层岩质边坡沿潜在滑面发生顺层滑移的破坏模式。不稳定岩体发生平面滑动主要表现为边坡在自重及其他外力作用下沿软弱结构面发生顺层滑移破坏。

2 锚杆力学模型

根据顺层岩质边坡沿潜在滑面滑移的破坏模式,采用全长黏结型锚杆加固。当边坡不稳定体产生位移时,全长黏结锚杆作为被动锚杆,提供利于坡体稳定的抗力。假设不稳定体发生沿潜在滑面方向的位移 δ (一般通过坡体位移监测数据获得),则沿滑面方向可分解为垂直于锚杆方向的位移 δ_n 和沿锚杆轴向的位移 δ_a ,O点为锚杆与潜在滑面的交点,锚杆与潜在滑面夹角为 γ , L_p 、 L_a 为以滑面为界限的锚杆各部分长度,如图1所示。

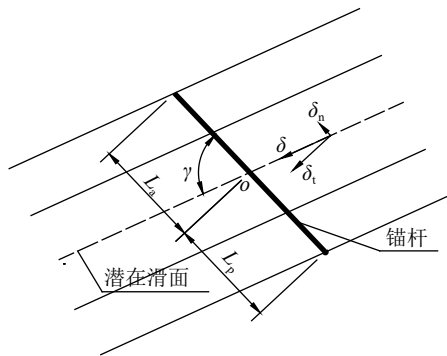


图1 锚杆加固顺层岩质边坡示意图

Fig. 1 Anchor bolt for strengthening rock bedded slope

大量研究表明,在剪切位移作用下,锚杆的应力与变形沿滑面呈反对称分布。因此,可取锚杆的半边进行分析。根据锚杆与周围岩体的相对位移及岩体

自身变形能力,将其分为弹性变形段和塑性变形段^[13-14,20]。假设塑性变形段的长度为 l_f ,以 O 点为中心,如图2所示。

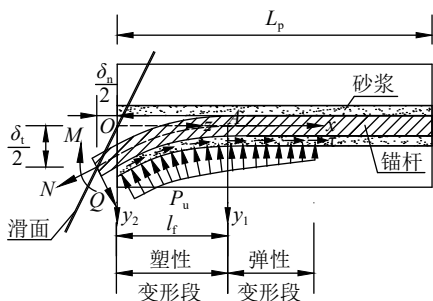


图2 剪切位移作用下锚杆的受力示意图

Fig. 2 Forced diagram of anchor bolt under the action of shear deformation

2.1 横向受力分析

考虑垂直于锚杆方向的位移 δ_t ,锚杆与周围介质相互作用,将锚杆假设成梁^[12-16],对锚杆的横向受力进行分析,如图2所示。

1) 锚杆周围岩体弹性变形段

当剪切位移较小时,锚杆周围岩体均处于弹性阶段,岩体与锚杆完全黏结,可认为周围岩体对锚杆的反作用力符合Winkler假定^[12]。在图2的 xAy_1 坐标系中,锚杆的挠曲微分方程为:

$$E_b I \frac{d^4 y_1}{dx^4} + K dy_1 = 0 \quad (1)$$

求解微分方程得:

$$y_1(x) = e^{\alpha x} [A_1 \cos(\alpha x) + A_2 \sin(\alpha x)] + e^{-\alpha x} [A_3 \cos(\alpha x) + A_4 \sin(\alpha x)] \quad (2)$$

式中: K 为反力系数, $K = \frac{300\sigma_c}{d}$ ^[21], kPa/m ; $\alpha = \sqrt[4]{\frac{Kd}{4E_b I}}$; σ_c 为岩体无侧限抗压强度, MPa ; d 为锚杆直径; A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为待定系数。上式中存在关系: 转角 $\theta = \frac{dy}{dx}$, 弯矩 $M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2}$, 剪力 $Q = -EI \frac{d^3 y}{dx^3}$ 。锚杆末端边界条件为 $Q_L = 0$, $M_L = 0$; 设锚杆 A 点处的剪力为 $-Q_0$, 弯矩为 $-M_0$, 可求解式(2), 得到锚杆位移表达式:

$$y_1 = \frac{1}{2E_b I \alpha^3} e^{-\alpha x} [Q_0 \cos(\alpha x) + \alpha M_0 (\cos(\alpha x) - \sin(\alpha x))] \quad (3)$$

2) 锚杆周围岩体塑性变形段

当剪切位移增大到一定程度时,锚杆受压侧岩体被压坏, O 点附近岩体出现塑性变形段,假定受压侧岩体作用于锚杆的均布反力为 P_u ,其中 $P_u = \sigma_c d$ ^[13-14]。如图2所示,设岩体作用于锚杆 O 点处的弯矩为 M ,剪力 Q ,由对称性可得 $M = 0$;结合锚杆 A 点处的受力,可得:

$$\begin{cases} Q = Q_0 + P_u l_f, \\ Q l_f - \frac{1}{2} P_u l_f^2 - M_0 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),得:

$$y_1 = \frac{1}{2E_b I \alpha^3} e^{-\alpha x} [(Q - P_u l_f) \cos(\alpha x) + \alpha (Q l_f - \frac{1}{2} P_u l_f^2) (\cos(\alpha x) - \sin(\alpha x))] \quad (5)$$

如图2中的 zOy_2 坐标系,锚杆的挠曲微分方程为:

$$E_b I \frac{d^4 y_2}{dz^4} + P_u = 0 \quad (6)$$

求解式(6)可得:

$$y_2 = C_1 + C_2 z + C_3 z^2 + C_4 z^3 - \frac{P_u}{24 E_b I} z^4 \quad (7)$$

由于锚杆在 xAy_1 和 zOy_2 坐标系中的位移、转角、弯矩和剪力连续,可知边界条件为:

$$\begin{cases} y_1|_{x=0} = y_2|_{z=l_f}, & y_1'|_{x=0} = y_2'|_{z=l_f}, \\ \left[(-E_b I) \frac{d^2 y_1}{dx^2} \right]_{x=0} = \left[(-E_b I) \frac{d^2 y_2}{dz^2} \right]_{z=l_f}, \\ \left[(-E_b I) \frac{d^3 y_1}{dx^3} \right]_{x=0} = \left[(-E_b I) \frac{d^3 y_2}{dz^3} \right]_{z=l_f} \end{cases} \quad (8)$$

根据上述边界条件和式(5),可得:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{Q(2l_f^3 \alpha^3 + 6\alpha^2 l_f^2 + 6l_f \alpha + 3)}{6E_b I \alpha^3} - \frac{P_u(l_f^4 \alpha^3 + 4l_f^3 \alpha^2 + 6l_f^2 \alpha + 4l_f)}{8E_b I \alpha^3}, \\ C_2 = \frac{P_u l_f \alpha (l_f^2 \alpha^2 + 3l_f \alpha + 3) - 3Q \alpha (l_f \alpha + 1)^2}{6E_b I \alpha^3}, \\ C_3 = 0, & C_4 = \frac{Q}{6E_b I} \end{cases} \quad (9)$$

将求得的系数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 代入式(7),得到锚杆塑性变形段的位移方程。当 $z = 0$ 时,锚杆的横向位移为:

$$y_2 = C_1 = \frac{Q(2l_f^3 \alpha^3 + 6\alpha^2 l_f^2 + 6l_f \alpha + 3)}{6E_b I \alpha^3} - \frac{P_u(l_f^4 \alpha^3 + 4l_f^3 \alpha^2 + 6l_f^2 \alpha + 4l_f)}{8E_b I \alpha^3} = \frac{\delta_t}{2} \quad (10)$$

根据上述分析可知,锚杆受压侧岩体由弹性变形段过渡到塑性变形段的临界位移为:

$$y_0 = \frac{P_u}{Kd} = \frac{\delta_{t0}}{2} \quad (11)$$

式中, δ_{t0} 为对应岩体的临界变形。

由式(5)可知,当 $x = 0$ 时,锚杆的横向位移为:

$$y_1 = \frac{1}{2E_b I \alpha^3} [(Q - P_u l_f) + \alpha (Q l_f - \frac{1}{2} P_u l_f^2)] = \frac{\delta_0}{2} \quad (12)$$

因此,当 $\delta_t \leq \delta_{t0}$ 时, $l_f = 0$,锚杆周围岩体均处于弹性变形阶段,可得:

$$Q = E_b I \alpha^3 \delta_t \quad (13)$$

当 $\delta_t > \delta_{t0}$ 时, $l_f > 0$,锚杆周围岩体出现塑性变形。由式(10)和(12)可得 δ_t 与 l_f 的关系表达式:

$$\delta_t = \frac{2P_u[1+2(l_f\alpha+1)^3]}{3Kd(l_f\alpha+1)} + \frac{P_u l_f(l_f\alpha+3)(l_f\alpha+2)}{12E_b I \alpha(l_f\alpha+1)} \quad (14)$$

因此,在给定剪切位移 δ_t 时,根据式(14)可求得 l_f 。基于此,由式(10)可得在剪切位移 δ_t 作用下锚杆所受的剪力:

$$Q = \frac{12E_b I \alpha^3 \delta_t + 3P_u(l_f^4 \alpha^3 + 4l_f^3 \alpha^2 + 6l_f^2 \alpha + 4l_f)}{8l_f^3 \alpha^3 + 24l_f^2 \alpha^2 + 24l_f \alpha + 12} \quad (15)$$

2.2 轴向受力分析

如图2所示,设周围岩体弹性变形段锚杆的轴向位移为 s_1 ,塑性变形段锚杆的轴向位移为 s_2 ,在此基础上,基于锚杆荷载传递机理,对锚杆进行轴向受力分析。

1) 锚杆周围岩体弹性变形段

假设锚杆侧面与岩体之间以切向线性弹簧联系,则锚杆的轴向受力为:

$$dN = \tau(x)\pi d dx \quad (16)$$

锚杆侧面与岩体之间剪切变形满足:

$$\tau(x) = k_s s(x) \quad (17)$$

式中, $s(x)$ 为相对剪切位移, k_s 为剪切弹性变形刚度。

由文献[22]可知,当砂浆体与岩体特性相同时:

$$k_s = \frac{G_m}{r_b \ln(R/r_b)} \quad (18)$$

当砂浆体与岩体特性不相同时:

$$k_s = \frac{G_m G_g}{r_b [G_m \ln(r_g/r_b) + G_g \ln(R/r_g)]} \quad (19)$$

式中: G_m 、 G_g 为岩体和砂浆的剪切模量, $G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}$, E_m 为岩体的弹性模量,可取 $E_m = 350\sigma_c$ [23]; r_b 为锚杆的半径, $r_b = d/2$; r_g 为钻孔半径; R 为锚杆的影响半径,可取 $R = 10r_g$ [24]。因此将式(17)代入式(16)可得:

$$dN = k_s \pi d s(x) dx \quad (20)$$

又因为:

$$\varepsilon_x = \frac{ds}{dx} = \frac{N}{E_b A} \quad (21)$$

将式(20)代入(21)可得:

$$\frac{d^2 s}{dx^2} - \frac{4k_s}{E_b d} s = 0 \quad (22)$$

求微分方程可得:

$$s(x) = Z_1 e^{\beta x} + Z_2 e^{-\beta x} \quad (23)$$

式中: $\beta = \sqrt{\frac{4k_s}{E_b d}}$ 。如图2所示,锚杆轴向边界条件 $x=0$ (A点)处轴力为 $-N_0$,根据文献[24-25],可设 $x=L_p$ 处轴力为0。因此,根据上述边界条件,结合式(21)可得:

$$s(x) = \frac{N_0 \text{ch}[\beta(x-L_p)]}{E_b A \beta \text{sh}(\beta L_p)} \quad (24)$$

在 $x=0$ 处的总弹性变形量为:

$$s_1 = \frac{N_0}{E_b A \beta \text{th}(\beta L_p)} \quad (25)$$

当 $l_f=0$ 时, $s_1 = \frac{\delta_n}{2}$,可得 $x=0$ 处锚杆的轴力为:

$$N_0 = \frac{E_b A \delta_n \beta \text{th}(\beta L_p)}{2} \quad (26)$$

将式(24)代入式(21)可得轴力表达式为:

$$N = N_0 \frac{\text{sh}[\beta(x-L_p)]}{\text{sh}(\beta L_p)} \quad (27)$$

2) 锚杆周围岩体塑性变形段

对于锚杆周围岩体塑性变形段,设岩体作用于锚杆的摩擦力为均布的[26],锚杆与砂浆体之间的摩擦角为 ϕ ,则轴向变形为:

$$s_2 = \frac{N_0 l_f + 0.5 P_u \pi \tan \phi l_f^2}{E_b A} \quad (28)$$

又因为:

$$s_1 + s_2 = \frac{\delta_n}{2} \quad (29)$$

$$N_0 = \frac{(E_b A \delta_n - P_u \pi l_f^2 \tan \phi) \beta \text{th}(\beta L_p)}{2[1 + l_f \beta \text{th}(\beta L_p)]} \quad (30)$$

$$N = N_0 + 0.5 P_u \pi l_f \tan \phi \quad (31)$$

设坡体滑面摩擦角为 ϕ_0 ,根据上述分析可得,锚杆为边坡稳定提供的抗力为:

$$T = Q \sin \gamma + N \cos \gamma + [N \sin \gamma - Q \cos \gamma] \tan \phi_0 \quad (32)$$

2.3 锚杆屈服形式

1) GFRP锚杆屈服形式

GFRP锚杆属于各向异性材料,根据最大应力理论[27],确定剪切屈服时满足

$$\tau_m = \frac{Q}{A} = [\tau] \quad (33)$$

受拉屈服时满足

$$\sigma_m = \frac{N}{A} = [\sigma] \quad (34)$$

2) 钢筋锚杆屈服形式

一般情况下,钢筋作为金属材料满足von-Mises准则,剪切屈服时满足

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{N}{A}\right)^2 + 3\left(\frac{Q}{A}\right)^2} = \sigma_y \quad (35)$$

式中, σ_y 为锚杆的屈服应力。

弯曲屈服时满足[15]

$$\sigma_2 = \frac{M_0}{W} + \frac{N_0}{A} = 1.7\sigma_y \quad (36)$$

2.4 求解步骤

- 1)给定岩体的剪切位移 δ ,根据锚杆与滑面的夹角,得到 δ_t 和 δ_n 。
- 2)根据式(11)计算临界位移 δ_{t0} 。
- 3)①当 $\delta_t \leq \delta_{t0}$ 时, $l_t = 0$,在此基础上,分别由式(13)、(4)和(26)计算得到 Q 、 M_0 、 $N_0(N)$; ②当 $\delta_t > \delta_{t0}$ 时, $l_t > 0$, 由式(14)计算得到 l_t ,在此基础上,分别由式(15)、(4)、(30)和(31)计算得到 Q 、 M_0 、 N_0 、 N 。
- 4)根据第3)步的计算结果,结合式(33)~(36),判断锚杆是否屈服。

3 对比验证

3.1 试验验证一

Pellet等^[13]利用剪切试验模型描述了加锚顺层岩质边坡在荷载作用下的力学行为。为验证上述力学模型的可行性,利用本文力学模型分析Pellet剪切试

验,并与该试验报道的结果进行对比。试验模型尺寸为30 cm×30 cm×60 cm,岩体内结构面与锚杆的夹角为45°,模型上部表面施加荷载,见图3。根据文献[13]确定岩体和锚杆的相关参数,见表1。

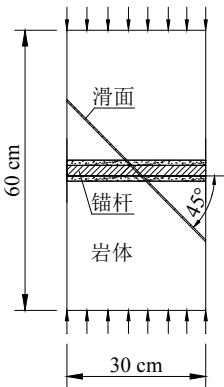


图 3 锚杆剪切试验模型

Fig. 3 Shear test model for anchor bolt

表 1 岩体与锚杆的参数

Tab. 1 Parameters of the rock and anchor bolt

岩体				锚杆			
σ_c /MPa	E_m /GPa	ν_m	φ_0 /($^{\circ}$)	d /mm	D /mm	E_b /GPa	σ_y /MPa
150	52.5	0.2	25	3	6	210	600

图4为模型在剪切位移(δ)作用下,锚杆提供的抗力。由图4可知,当剪切位移达到一定值时,锚杆开始进入屈服阶段,图4中用黑色箭头注释。在锚杆屈服前,本文力学模型计算结果与Pellet试验结果呈现较好吻合。

3.2 试验验证二

Grasselli^[20]开展了大尺寸加锚双节理岩体剪切试验,分析锚杆提供的抗力,具体参数见表2。当锚杆与节理面夹角为45°时,将试验测得锚杆提供的抗力与利用本文力学模型计算的结果进行对比,见图5。

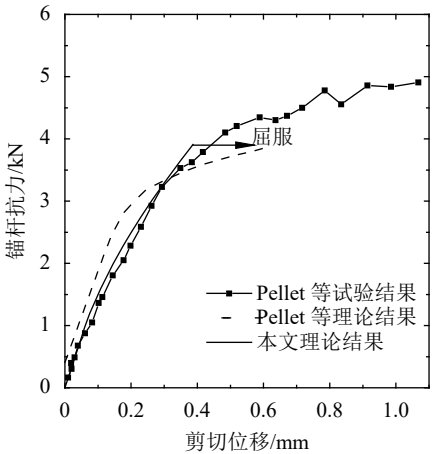


图 4 剪切位移作用下锚杆的抗力(夹角45°)

Fig. 4 Resistance of anchor bolt under the action of shear deformation with intersection angle 45°

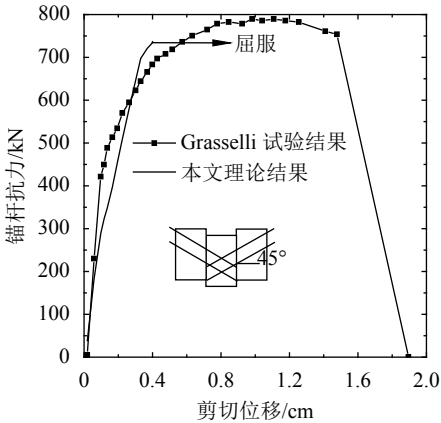


图 5 剪切位移作用下锚杆的抗力

Fig. 5 Resistance of anchor bolt under the action of shear deformation

表 2 岩体与锚杆的参数

Tab. 2 Parameters of the rock and anchor bolt

岩体				锚杆			
σ_c /MPa	E_m /GPa	ν_m	φ_0 /($^{\circ}$)	d /mm	D /mm	E_b /GPa	σ_y /MPa
35	29.7	0.2	40	20	40	210	600

由图5可知,锚杆在剪切变形作用下可划分为3个阶段,即弹性阶段、屈服阶段和塑性流动阶段。与Grasselli试验结果对比,在锚杆屈服前,本文的理论计算结果较为接近。

由于本文力学模型假设锚杆杆体处于弹性状态,因此,当锚杆屈服后,该理论不再适用。利用本文力学模型分析锚杆屈服前的内力是可行的,该模型较好地反映了锚杆在剪切作用下的力学机制。

4 加固机制分析

与钢筋锚杆相比,GFRP锚杆的弹性模量小,且抗剪强度差。根据《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》^[28],GFRP锚杆参数取值如下:弹性模量为40 GPa,抗拉强度为700 MPa,抗剪强度为140 MPa。将试验验证一中锚杆物理力学参数更新为上述GFRP锚杆的参数值,考虑剪切位移(δ)、锚杆与潜在滑面夹角(γ)及岩体无侧限抗压强度(σ_c)等影响因素,利用上述力学模型分析GFRP锚杆加固顺层岩质边坡的机制,结果见图6~9。

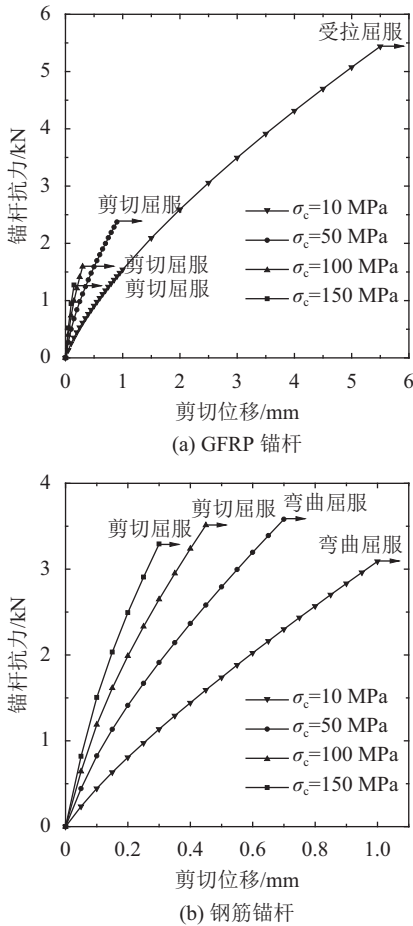


图6 屈服前锚杆抗力 T 与剪切位移 δ 关系

Fig. 6 Relationship between resistance and shear deformation before anchor bolt is yielded

由图6可知,随着剪切位移的增加,锚杆提供的抗力逐渐变大。在硬岩($\sigma_c=150$ MPa)中,GFRP锚杆与钢筋锚杆均在较小的剪切位移作用下发生剪切屈服。在软岩($\sigma_c=10$ MPa)中,GFRP锚杆在较大的剪切位移作用下发生受拉屈服,而相比GFRP锚杆,钢筋锚杆在较小的剪切位移作用下发生弯曲屈服。对于屈服时锚杆提供的抗力,钢筋锚杆在不同抗压强度的岩体中提供的抗力差异较小,抗力大小基本接近;GFRP锚杆在不同抗压强度的岩体中提供的抗力差异较大,加固软岩时抗力最大,随着岩体无侧限抗压强度增大,GFRP锚杆提供的抗力逐渐变小。

由上述对比分析可知,由于GFRP锚杆存在弹性模量小、抗剪强度低的缺点,在剪切位移作用下,GFRP锚杆与钢筋锚杆的加固机制不同。

图7为锚杆与滑面夹角为45°时,GFRP锚杆内力比 Q/N (滑面处锚杆的剪力与轴力之比)与剪切位移的关系曲线。由图7可知,当剪切位移较小时,GFRP锚杆的 Q/N 相对较大,随着剪切位移的增加, Q/N 逐渐减小。

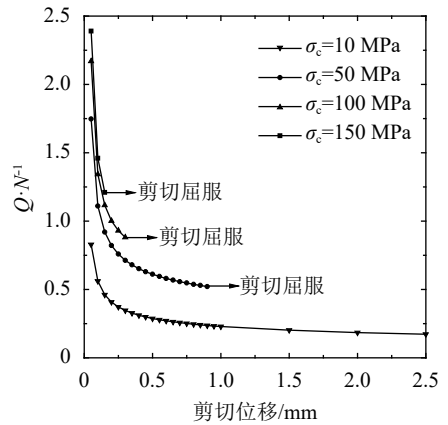


图7 屈服前GFRP锚杆内力比 Q/N 与剪切位移 δ 关系

Fig. 7 Relationship between Q/N and δ before anchor bolt is yielded

由图6(a)和7可知,在加固硬岩时,锚杆内力比 Q/N 较大(销钉作用),GFRP锚杆以剪切屈服为主,因其抗剪强度低,故屈服时锚杆提供的抗力较小;在加固软岩时,锚杆内力比 Q/N 较小,GFRP锚杆以受拉屈服为主,可充分发挥GFRP锚杆抗拉强度高的优势,故屈服时锚杆提供的抗力相对较大,约为加固硬岩时所提供抗力的4倍。因此,GFRP锚杆更适合加固软岩边坡。

图8为屈服时GFRP锚杆内力比 Q/N 和锚杆与滑面夹角 γ 的关系曲线。由图8可知,随着 γ 的增加,锚杆内力比 Q/N 逐渐变大,即当锚杆与滑面夹角较小时,锚杆承受的剪力相对较小;反之,相对较大。对于加固不同抗压强度岩体的GFRP锚杆,在硬岩中,随着

γ 的增大, GFRP 锚杆内力比 Q/N 逐渐增大, 其承受的剪力甚至大于轴力; 在软岩中, GFRP 锚杆内力比 Q/N 始终很小, 主要承受轴向拉力。

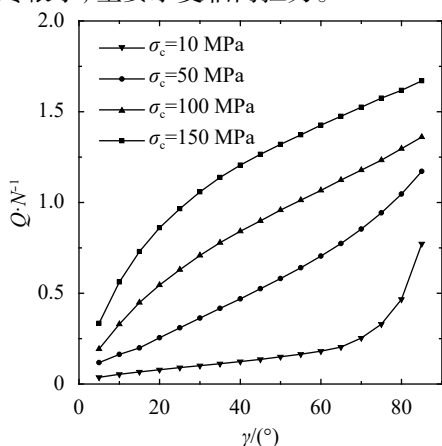


图 8 屈服时 GFRP 锚杆内力比 Q/N 与锚杆与滑面夹角 γ 关系

Fig. 8 Relationship between Q/N and γ as GFRP anchor bolt is yielded

图 9 为屈服时 GFRP 锚杆抗力 T 和锚杆与滑面夹角 γ 关系曲线。图 9 中节点处的箭头表示以该节点的夹角 γ 为基准, γ 变小, GFRP 锚杆抗力由受拉屈服控制, 反之由剪切屈服控制。由图 9 可知, 对于抗压强度为 10、50、100、150 MPa 的岩体, γ 分别为 30° 、 15° 、 5° 、 5° 时, 锚杆抗力最大。通过对比可知, 在硬岩中, 仅当 γ 较小时, GFRP 锚杆抗力较大; 在软岩中, 当 $\gamma = 5^\circ \sim 60^\circ$ 时, GFRP 锚杆均能提供较大的抗力。因此, GFRP 锚杆加固软岩边坡时, 安装角对锚杆抗力的影响较小。

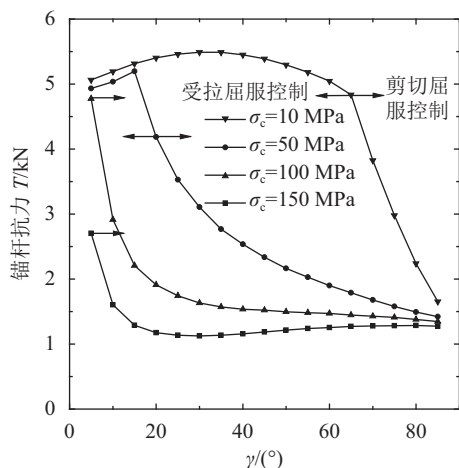


图 9 屈服时 GFRP 锚杆抗力 T 与锚杆与滑面夹角 γ 关系

Fig. 9 Relationship between T and γ as GFRP anchor bolt is yielded

5 结 论

1) 考虑顺层滑移破坏模式, 推导了全长黏结型

锚杆加固顺层岩质边坡的力学模型。通过两个试验对比验证表明, 该力学模型分析锚杆屈服前的内力是可行的, 能够较好地反映加锚顺层岩质边坡中锚杆在剪切作用下的力学机制。

2) 考虑 GFRP 锚杆的抗拉强度高、抗剪强度差、弹性模量小等特点, 分析发现: 当锚杆与潜在滑面夹角为 45° 时, GFRP 锚杆在硬岩中发生剪切屈服, 在软岩中发生受拉屈服。当锚杆屈服时, GFRP 锚杆在不同抗压强度的岩体中提供的抗力差异较大, 加固软岩时抗力最大, 随着岩体无侧限抗压强度增大, GFRP 锚杆提供的抗力逐渐变小; 相比而言, 钢筋锚杆在不同抗压强度的岩体中提供的抗力大小基本接近, 故 GFRP 锚杆与钢筋锚杆加固顺层岩质边坡的机制不同。

3) GFRP 锚杆适合加固岩体抗压强度较小的顺层岩质边坡。在剪切作用下, 锚杆以受拉屈服为主, 从而避开其抗剪强度差的劣势, 充分利用其抗拉强度高的优势, 可提供较高的抗力。此外, GFRP 锚杆加固软岩边坡时, 安装角对锚杆抗力的影响较小。

由于锚杆屈服后进入塑性阶段, 本构关系复杂, 需要通过试验确定, 故本文未考虑锚杆塑性阶段的力学机制。然而, GFRP 锚杆属于脆性材料, 可以不考虑其屈服后产生塑性强化。

参考文献:

- [1] Cheng Liangkui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 7-12. [程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7-12.]
- [2] Ye Lieping, Feng Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36. [叶列平, 冯鹏. GFRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.]
- [3] Liu Long, Li Guowei, He Guanjuan, et al. Development of load anchorage device for pre-stress GFRP soil nail reinforcement element in slopes and field tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 718-726. [刘龙, 李国维, 贺冠军, 等. GFRP 锚杆结构预应力锁定装置研制与现场试验[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 718-726.]
- [4] Cheng Liangkui, Zhang Peiwen, Wang Fan. Several mechanical concepts for anchored structures in rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 668-682. [程良奎, 张培文, 王帆. 岩土锚固工程的若干力学概念问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668-682.]
- [5] Huang Shengwen, Liu Tingwang, Qiu Xianhui, et al. A study of weak rock slopes with GFRP soil-nailing[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 90-96. [黄生文, 刘廷望, 邱贤辉, 等. GFRP 土钉加固软岩边坡的研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 90-96.]

- [6] Xu D, Yin J. Analysis of excavation induced stress distributions of GFRP anchors in a soil slope using distributed fiber optic sensors[J]. *Engineering Geology*, 2016, 213: 55–63.
- [7] Zhao Wen, Wang Hao, Chen Yun, et al. Laboratory and field tests use of BFRP anchor bolt in supporting soil slope[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(5): 1008–1015. [赵文, 王浩, 陈云, 等. BFRP筋锚杆土质边坡支护应用研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(5): 1008–1015.]
- [8] Li Guowei, Gao Lei, Huang Zhihui, et al. Pull-out model experiment on failure mechanism of full-length bonding glass fiber reinforced polymer rebar[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1653–1663. [李国维, 高磊, 黄志怀, 等. 全长黏结玻璃纤维增强聚合物锚杆破坏机制拉拔模型试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1653–1663.]
- [9] Yeung A T, Cheng Y M, Tham L G, et al. Field evaluation of a glass-fiber soil reinforcement system[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2007, 21(1): 26–34.
- [10] Nkurunziza G, Benmokrane B, Debaiky A S, et al. Effect of sustained load and environment on long-term tensile properties of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars[J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(4): 615.
- [11] Jewell R A, Pedley M J. Analysis for soil reinforcement with bending stiffness[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(10): 1505–1528.
- [12] Oreste P P, Cravero M. An analysis of the action of dowels on the stabilization of rock blocks on underground excavation walls[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2008, 41(6): 835–868.
- [13] Pellet F, Egger P. Analytical model for the mechanical behaviour of bolted rock joints subjected to shearing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1996, 29(2): 73–97.
- [14] Li X, Nemcik J, Mirzaghorbanali A, et al. Analytical model of shear behaviour of a fully grouted cable bolt subjected to shearing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 31–39.
- [15] Chen Wenqiang, Jia Zhixin, Zhao Yufei, et al. Analysis of axial and transverse effects of rock bolt during shearing process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(1): 143–148. [陈文强, 贾志欣, 赵宇飞, 等. 剪切过程中锚杆的轴向和横向作用分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(1): 143–148.]
- [16] Ge Xiurun, Liu Jianwu. Study on the shear resistance behavior of bolted rock joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1988, 10(1): 8–19. [葛修润, 刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究[J]. *岩土工程学报*, 1988, 10(1): 8–19.]
- [17] Wang Faling, Liu Caihua, Gong Zhe. Mechanisms of bolt support for bedding rock slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1465–1470. [王发玲, 刘才华, 龚哲. 顺层岩质边坡锚杆支护机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1465–1470.]
- [18] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [19] Li Anhong, Zhou Depei, Feng Jun. Failure modes of bedding rock cutting slope and design countermeasures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, (Supp 1): 2915–2921. [李安洪, 周德培, 冯君. 顺层岩质路堑边坡破坏模式及设计对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, (增1): 2915–2921.]
- [20] Grasselli G. 3D behaviour of bolted rock joints: experimental and numerical study[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(1): 13–24.
- [21] Ferrero A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(6): 595–605.
- [22] Xu Hongfa, Wang Wu, Jiang Miao, et al. Theoretical analysis of pullout deformation and stiffness of grouted rockbolts[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(10): 1511–1516. [许宏发, 王武, 江森, 等. 灌浆岩石锚杆拉拔变形和刚度的理论解析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(10): 1511–1516.]
- [23] He Peng, Liu Changwu, Wang Chen, et al. Correlation analysis of uniaxial compressive strength and elastic modulus of sedimentary rocks[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(4): 7–12. [何鹏, 刘长武, 王琛, 等. 沉积岩单轴抗压强度与弹性模量关系研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(4): 7–12.]
- [24] Li C, Stillborg B. Analytical models for rock bolts[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(8): 1013–1029.
- [25] Yang Qing, Zhu Xunguo, Luan Maotian. Development of hyperbolic model for fully grouting rock bolt and parameters analysis for anchoring effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(4): 692–698. [杨庆, 朱训国, 栾茂田. 全长注浆岩石锚杆双曲线模型的建立及锚固效应的参数分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(4): 692–698.]
- [26] Zhang Wei, Liu Quansheng. Synthetical deformation analysis of anchor bolt in jointed rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1067–1074. [张伟, 刘泉声. 节理岩体锚杆的综合变形分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(4): 1067–1074.]
- [27] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50608—2010 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Sun Changning, Su Lijun, Zhang Chonglei, et al. Mechanisms of GFRP anchor bolt for strengthening rock bedded slope[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(3): 216–223. [孙长宁, 苏立君, 张崇磊, 等. GFRP锚杆加固顺层岩质边坡的机制研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(3): 216–223.]