

# GFRP 土钉拉拔特性研究

朱鸿鹄<sup>1,2</sup>, 张诚成<sup>1</sup>, 裴华富<sup>3</sup>, 周游<sup>1</sup>, 施斌<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;  
3. 香港理工大学土木及结构工程学系, 香港)

**摘要:** 由于传统土钉材料存在易腐蚀、耐久性差等缺点, 近年来以 GFRP 为代表的新型土钉材料得到了高度重视。针对 GFRP 土钉受力特性, 运用双曲线模型描述其在拉拔过程中剪应力-剪应变关系, 采用数值方法求解拉拔控制方程, 从而确定轴力、剪应力及位移沿钉长的分布。同时, 通过室内 GFRP 模型土钉的拉拔试验, 验证了该模型预测结果的准确性。在此基础上, 对土钉直径、土-钉界面抗剪强度、土-钉模量比等参数进行了参数分析, 并针对 GFRP 土钉容许拉拔力的确定提出了按位移控制的思路。

**关键词:** 土钉; 玻璃纤维复合材料 (GFRP); 双曲线关系; 拉拔试验; 抗剪强度

**中图分类号:** TU94.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)10-1843-07

**作者简介:** 朱鸿鹄(1979-), 男, 江苏苏州人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程及光纤监测技术等方面的研究与教学工作。E-mail: zhh@nju.edu.cn。

## Pullout mechanism of GFRP soil nails

ZHU Hong-hu<sup>1,2</sup>, ZHANG Cheng-cheng<sup>1</sup>, PEI Hua-fu<sup>3</sup>, ZHOU You<sup>1</sup>, SHI Bin<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard

Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Department of Civil and  
Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** Recently, great attention has been drawn to the new soil nail materials represented by glass fiber reinforced polymer (GFRP) as the traditional materials show certain disadvantages, including low corrosion resistance and poor durability. According to the loading characteristics of GFRP soil nails, a model using a hyperbolic shear stress-shear strain relationship is proposed to describe the pullout performance of GFRP soil nails during pullout. Numerical analysis is made to solve the pullout governing equation, based on which the distribution of axial force, shear stress and displacement along the nail length is calculated. Besides, laboratory pullout tests on a model soil nail are conducted, and the accuracy of the predicted results by the proposed model is verified by the test results. Furthermore, a parametric study of the pullout model is conducted to analyze the influence of nail diameter, shear resistance of soil-nail interface, and modulus ratio between soil and nail. Finally, the allowable pullout resistance of GFRP soil nails is suggested to be determined using the displacement control approach.

**Key words:** soil nail; glass fiber reinforced polymer (GFRP); hyperbolic relationship; pullout test; shear resistance

## 0 引言

20世纪70年代初以来, 作为边坡、基坑工程中一种常见的支护技术, 土钉在世界范围内得到了广泛的应用。目前工程中最常见的是用变形钢筋与水泥砂浆组成的钻孔注浆土钉。在生产实践中, 由于钢筋具有易腐蚀、耐久性差等缺点, 故对于新型土钉材料(如玻璃纤维增强复合材料, 即 GFRP)的研究已成为一个新的趋势。在日本、韩国、美国、加拿大、香港等发达国家和地区, GFRP 材料开始在各类工程建设中取代钢材, 并已成功应用于桩基础<sup>[1]</sup>、土工格栅<sup>[2]</sup>、土层锚杆<sup>[3]</sup>和土钉<sup>[4]</sup>等岩土加固体中。

土钉支护是通过土钉被动受拉来达到稳定土体的作用, 其受弯、受剪效应通常可以忽略<sup>[5]</sup>。极限抗拔强度是土钉设计中的一个关键参数, 其值受到诸多因素的影响, 包括施工条件、岩土体性质、灌浆方式、土-钉界面粗糙度以及边坡和钻孔几何形态等<sup>[6-15]</sup>。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB710605); 国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAK10B05); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGP2012K011); 教育部大学生创新训练计划资助项目(XZ1110284066)

收稿日期: 2011-10-17

很多研究发现, 较之传统钢筋, GFRP 土钉呈现出特殊的受力变形特性。Frost 等<sup>[16]</sup>的室内试验结果表明, 砂土-纤维增强复合材料(FRP)界面的剪切滑移规律与砂土-钢筋界面完全不同。Benmokrane 等<sup>[17]</sup>在混凝土和岩石试块中进行了一系列 GFRP 筋体的拉拔试验, 测出 GFRP 筋体在岩石破坏时的滑移位移大大超过钢筋, 并用 GFRP 材料弹性模量较小的理由来解释这一现象。邹维列等<sup>[18]</sup>通过现场拉拔试验, 研究了玻璃钢螺旋锚的锚固参数如上覆土层厚度、锚杆钻进长度以及锚固后至拉拔前的时间间隔、灌浆锚杆拉拔时锚具附近锚筋的劈裂破坏等对锚筋抗拔力和拉拔位移的影响, 并总结了玻璃钢螺旋锚的常见破坏模型。黄生文等<sup>[19]</sup>通过室内试验研究发现, GFRP 土钉受拉破坏模式主要为脆性破坏, 它与水泥砂浆的粘结强度取决于砂浆体的抗剪强度; 当 GFRP 土钉长度较短时, 土钉承载力与钉土间的抗剪强度有关。他们通过现场监测和数值模拟, 研究了土钉轴力、剪力以及土压力的分布规律<sup>[20]</sup>。以上这些研究初步验证了 GFRP 代替传统材料应用于土钉支护的可行性, 但是关于 GFRP 土钉受拉特性的定量分析还远远不够。

本文采用双曲线型模型来描述 GFRP 土钉拉拔过程中土-钉界面的剪应力-剪应变关系, 从土-钉相互作用的角度, 对 GFRP 土钉的拉拔机理和受力变形特性进行了理论分析。根据土钉拉拔的控制方程, 用数值方法得到了土钉轴力、剪应力与位移沿钉长的分布曲线。通过 GFRP 模型土钉的室内拉拔试验, 证明该拉拔模型能有效地预测 GFRP 土钉的拉拔特性。在该模型的基础上, 对影响 GFRP 土钉拉拔特性的主要因素进行了参数研究, 并得到了一些有益的结论。

## 1 GFRP 土钉拉拔力学模型

### 1.1 剪应力-剪应变的双曲线关系

双曲线函数常用来描述土体或土-钉界面的剪应力-剪应变关系<sup>[7, 21-23]</sup>。该关系可用下式表示:

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_0} + \frac{1}{\tau_{ult}} \gamma} \quad (1)$$

式中  $\tau$  为剪应力;  $\gamma$  为剪应变;  $\tau_{ult}$  为剪应力的极限值;  $G_0$  为初始剪切模量,  $G_0 = \left( \frac{d\tau}{d\gamma} \right)_{\gamma=0}$ 。

在卸载阶段, 剪应力与剪应变之间的关系可简化为一条斜率为  $G_0$  的直线(见图 1), 即

$$\tau = \tau_0 - G_0(\gamma_0 - \gamma) \quad (2)$$

其中,  $\tau_0$  与  $\gamma_0$  分别对应于卸载前的剪应力与剪应变。

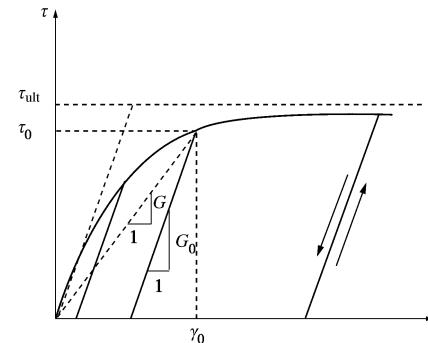


图 1 土-钉界面的双曲线型应力-应变关系<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Hyperbolic stress-strain relationship of soil-nail interface<sup>[4]</sup>

### 1.2 土钉拉拔公式

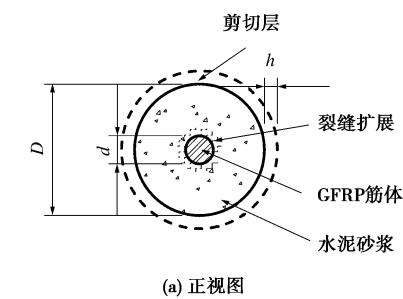
图 2 为 GFRP 土钉拉拔机理的原理图。在 GFRP 筋体和水泥砂浆未发生明显剥离前, 可假设土钉是两者组成的一个复合体, 则土钉距离钉头  $x$  处的轴力为

$$F(x) = \frac{\pi}{4} D^2 \bar{E} \varepsilon(x) \quad (3)$$

其中,  $D$  为土钉直径,  $\varepsilon(x)$  为土钉的平均轴向应变,  $\bar{E}$  为土钉的平均弹性模量, 可表示为

$$\bar{E} = \frac{E_c A_c + E_s A_s}{A_c + A_s} \quad (4)$$

其中,  $E_c$  与  $E_s$  分别对应水泥砂浆与 GFRP 筋体的弹性模量,  $A_c$  与  $A_s$  分别对应水泥砂浆与 GFRP 筋体的横截面面积。



(a) 正视图

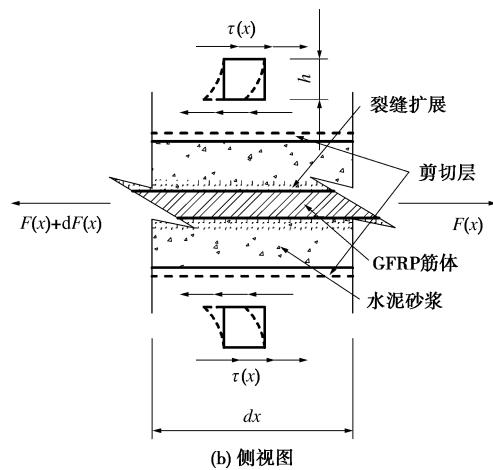


图 2 GFRP 土钉拉拔机理示意图

Fig. 2 Schematic illustration of pullout mechanics of GFRP soil nails

假设  $u(x)$  为土钉距离钉头  $x$  处横截面沿轴向的位移, 则轴力和位移的关系为

$$F(x) = \frac{\pi}{4} D^2 \bar{E} \frac{du(x)}{dx} \quad (5)$$

另外注意到, 在土钉拉拔力学模型中, 土钉拉拔力由土-钉界面上的剪应力来平衡。根据土钉单元体的平衡条件, 可推导出如下的微分方程<sup>[24]</sup>:

$$\frac{dF(x)}{dx} = \pi D \tau(x) \quad (6)$$

假设在拉拔状态下, 土-钉界面处承受剪切作用的一薄层土体(剪切层)厚度为  $h$  (见图 2), 则在钉、土之间产生相对滑移前, 土钉轴向位移与界面处土体的位移可视作相等, 即

$$u(x) = u_s(x, r)_{r=D/2} = \int_{D/2}^{(D/2)+h} \gamma(x, r) dr \quad (7)$$

其中,  $u_s(x)$  为土体剪切层的位移,  $\gamma(x, r)$  为剪切层土体所受的剪应变,  $G$  为土体的剪切模量。另设剪应变沿径向从土钉表面向外侧线性减小至 0, 即

$$\begin{cases} \gamma_{\max} = \gamma(x, D/2), \\ \gamma_{\min} = \gamma(x, D/2 + h) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

所以

$$\gamma(x, r) = \frac{\frac{D}{2} + h - r}{h} \gamma(x, D/2) \quad (9)$$

将式(9)代入式(7), 可得如下的关系:

$$u(x) = \int_{D/2}^{(D/2)+h} \gamma(x, r) dr = \frac{h}{2} \gamma(x, D/2) \quad (10)$$

假设土-钉界面的剪应力-剪应变关系为双曲线关系, 并令  $G_0^* = 2G_0/h$  为土-钉界面处的剪切系数, 则剪应力与土钉位移之间的关系可以表示为

$$\tau(x) = \frac{u(x)}{\frac{1}{G_0^*} + \frac{1}{\tau_{\text{ult}}} u(x)} \quad (11)$$

联立式(5)、(6)、(11), 可推导出如下的控制方程<sup>[4]</sup>:

$$\frac{d^2F}{dx^2} = \frac{4G_0^* F}{\pi^2 \bar{E} D^3 \tau_{\text{ult}}^2} \left( \frac{dF}{dx} - \pi D \tau_{\text{ult}} \right)^2 \quad (12)$$

式(12)为二阶微分方程, 结合一定的边界条件, 就可通过数值方法求解  $F(x)$ , 并由式(5)、(6)可分别得到  $\tau(x)$  和  $u(x)$  沿钉长的分布曲线。在卸载-重新加载循环中, 通过引入式(2), 就可以计算出  $\tau_0(x)$  与  $u_0(x)$ , 继而  $F(x)$ ,  $\tau(x)$  和  $u(x)$  也可得到。

### 1.3 参数确定方法

由式(12)可以看出, 以下 3 个参数是影响轴力沿钉长分布的主要参数: ①土钉直径  $D$ ; ②土-钉界面抗剪强度  $\tau_{\text{ult}}$ ; ③土-钉界面剪切系数与土钉弹性模

量之比(简称土-钉模量比)  $G_0^*/\bar{E}$ 。其中第 1 个参数是根据设计要求而定的, 而后 2 个参数则可通过室内拉拔试验来确定。

在拉拔试验中, 在钉头处施加的拉拔力  $F_0$  可以由拉力传感器测得, 并可得到如下的边界条件:

$$\begin{cases} F(x=0) = F_0, \\ F(x=L) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

$\tau_{\text{ult}}$  可由土钉完全拔出时的极限拉拔力计算得到, 即  $\tau_{\text{ult}} = F_{\text{ult}} / \pi D L$ 。在此引入经验系数  $\xi$  ( $\xi \geq 1$ ) 来估算对应于临界条件  $u(x) = \infty$  的极限拉拔力, 即<sup>[4]</sup>

$$F_{\text{ult}} = \xi F_{\text{max}} \quad (14)$$

其中,  $F_{\text{max}}$  为拉拔试验中所得到的最大拉拔力。

GFRP 土钉的  $\bar{E}$  可取为 GFRP 筋体与水泥砂浆的弹性模量加权平均值, 而  $G_0^*$  则可通过对钉头拉拔位移  $u_0$ -拉拔力  $F_0$  关系的拟合加以确定。

## 2 GFRP 土钉室内拉拔试验

### 2.1 试验概况

为了验证以上 GFRP 土钉拉拔模型的有效性, 在实验室室内进行了 GFRP 模型土钉的拉拔试验。试验所用土体为全风化花岗岩残积土(CDG), 相关参数列于表 1。试验中采用的 GFRP 筋体直径为 10 mm, 弹性模量为 17.14 GPa。水泥砂浆外径为 60 mm, 灌浆段长度为 0.66 m。填土在拉拔桶中分 10 层压实, 压实度保证在 95% 以上, 同时采用预埋管的方式制成土钉的钻孔。填土完毕后将 GFRP 筋体安装在孔洞中央, 并用水灰比 1:0.42 的水泥砂浆进行低压灌浆(见图 3)。

拉拔试验采用液压千斤顶施加荷载(见图 4), 包含 3 个加载与卸载过程, 与千斤顶相连的拉力传感器可实时测得拉拔力的大小。因光纤布拉格光栅(FBG)技术具有分辨率高、可串联、体积小巧等优点<sup>[25]</sup>, 故采用 FBG 应变传感器对土钉轴向应变进行监测。首先将 GFRP 筋体待测部位的表面用砂纸打磨, 再用环氧树脂将 5 个 FBG 传感器粘贴在筋体上, 同时还在钉头位置黏贴了 2 个电阻应变片进行读数对比。土钉头部的拉拔位移则用一个位移计(LVDT)进行自动测量。试验完成后, 测得土钉尾部位移(即土钉刚体位移)约为 5.5 mm, 见图 5。

表 1 拉拔试验所用土体的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil used in pullout tests

比重	含水率/%	液限/%	塑限/%	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
2.65	10	32.8	22.7	0	34.9

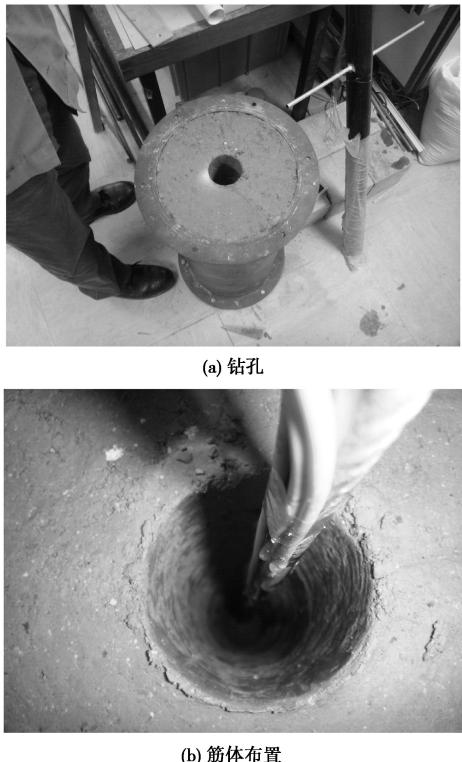


图 3 GFRP 土钉的建造过程

Fig. 3 Construction procedure of GFRP soil nails

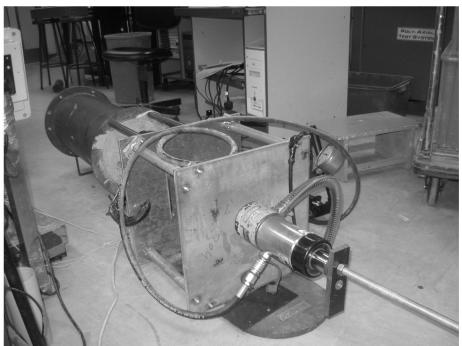


图 4 GFRP 土钉头部拉拔力的施加方式

Fig. 4 Method to apply pullout force to soil nail head



图 5 拉拔试验后土钉尾部位移情况

Fig. 5 Displacement of nail toe after pullout tests

## 2.2 拉拔试验结果

图 6 与图 7 为本次拉拔试验的结果。试验中 GFRP 土钉的最大拉拔力约为 4.3 kN。从图 6 中的拉拔力 -

位移关系曲线中可以看出, 除初始阶段外, 两者呈现高度的非线性关系, 且该关系曲线与双曲线函数吻合得较好。GFRP 土钉的卸载与再加载曲线基本重合, 其斜率与初始加载阶段的切线斜率相近, 可用一线性关系来表示。

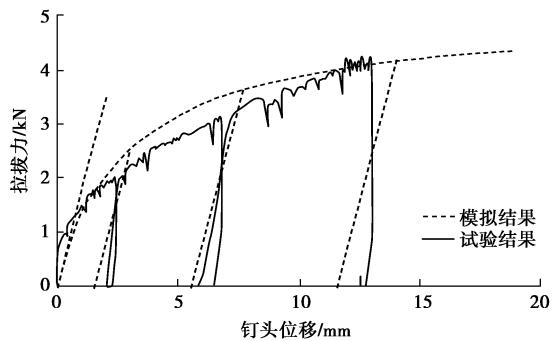


图 6 拉拔试验中的拉拔力 - 位移曲线

Fig. 6 Curves of pullout force versus displacement in pullout tests

图 7 为 FBG 应变传感器的监测结果。在试验中发现, 由于拉拔力施加方向和 GFRP 筋体轴向略有偏差, 靠土钉头部的 1 个 FBG 传感器和电阻应变片相比读数明显偏小, 所以将其读数进行了修正。图 7 显示, 土钉的轴向应变大致呈线性分布, 表明剪应力沿钉长为均匀分布。随着拉拔力的增大, 土钉轴向应变也逐渐增大, 表明土 - 钉界面处的剪应力被充分地调动起来了。

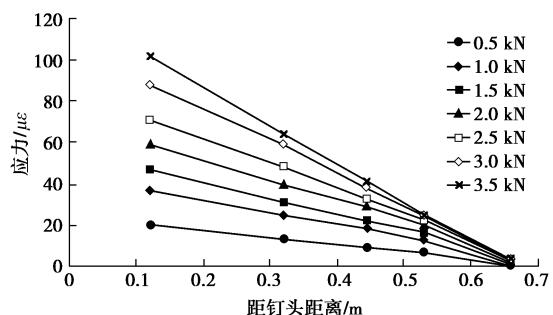


图 7 GFRP 土钉轴向应变分布曲线

Fig. 7 Distribution of axial strains measured by FBG sensors along GFRP soil nails

## 2.3 拉拔模拟结果

采用前述的拉拔模型来模拟本次试验结果,  $F_{\max}$  取 5.0 kN,  $\xi$  取 1.17, 其他参数列于表 2 中。模拟得到的 GFRP 土钉拉拔力 - 位移曲线见图 6 中的虚线, 土钉轴力、土 - 钉界面剪应力与土钉位移的分布则如图 8 所示。由图 8 (a) 可以发现, 土钉轴力沿钉长为线性分布; 随着拉拔力的增大, 土钉轴力也不断增大。土 - 钉界面剪应力、土钉位移分布曲线的形态与拉拔力也存在着相关性。在初始阶段, 剪应力、位移为均匀分布, 土钉的位移主要为刚体位移; 随着拉拔力的

增大, 土-钉界面处的剪应力不断被调动起来, 剪应力、位移沿钉长逐渐呈现出一定的非线性分布, 如图 8 (b)、8 (c) 所示。在土钉头部的位置, 土钉轴力、土-钉界面剪应力与土钉位移均达到最大值。

表 2 模拟 GFRP 土钉拉拔试验所用的参数

Table 2 Parameters used for simulating GFRP soil nail pullout tests

GFRP 土钉		土-钉界面		
直径 D/m	长度 L/m	弹性模量 $E/\text{GPa}$	抗剪强度 $\tau_{\text{ult}}/\text{kPa}$	剪切系数 $G_0^*/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
0.06	0.66	17.14	55	10

以上的模拟结果与试验结果都较吻合, 表明本文提出的拉拔模型能准确描述 GFRP 土钉的拉拔特性。若对土钉拉拔行为做出更为精确的预测, 则必须考虑土性参数、筋体特性、安装方式与时间效应等因素的综合影响。然而, 这样会使得模型过于复杂, 因此并不适于实际应用<sup>[26]</sup>。

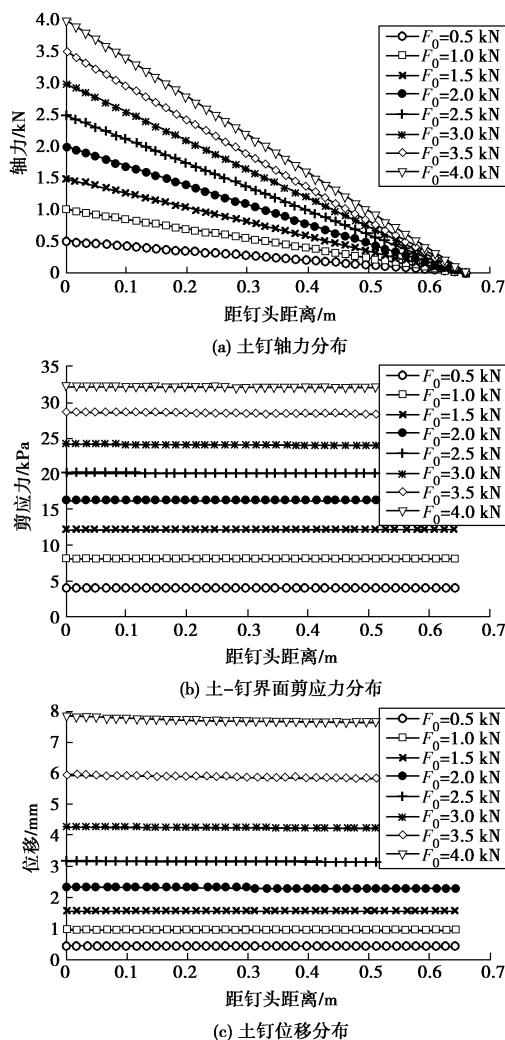


图 8 GFRP 土钉拉拔特性模拟结果

Fig. 8 Simulated pullout behavior of GFRP soil nails

### 3 参数研究

为了研究土钉直径  $D$ 、土-钉界面抗剪强度  $\tau_{\text{ult}}$  以及土-钉模量比  $G_0^*/\bar{E}$  对 GFRP 土钉拉拔力-位移关系的影响, 进行了一系列参数研究, 相关结果见图 9~11。由本次参数研究可以发现, 当拉拔力一定时, 若  $D$  或  $\tau_{\text{ult}}$  增大, 则土钉表现出相对较小的位移; 而若  $G_0^*/\bar{E}$  增大, 则土钉位移也相应增大。

由于比值  $G_0^*/\bar{E}$  反映了剪切层土体与土钉材料的相对刚度, 因此土钉材料的性能对土钉拉拔特性的影响非常大。对于 GFRP 土钉来说, GFRP 的弹性模量仅为钢筋的  $1/10\sim1/4$ , 且在土-钉界面处容易产生剥离和相对滑移的现象, 因此可能会对 GFRP 土钉支护的边坡、基坑等产生潜在的危害。在进行 GFRP 土钉支护设计时, 须推导一种位移控制标准, 以确定该类土钉的容许拉拔力。该问题可以通过将土-钉界面处的剪应变  $\gamma(x)$  限制在一定范围内的方法来解决。为使 GFRP 土钉支护在边坡及基坑工程中得到进一步的推广应用, 这方面的研究有待于继续深入。

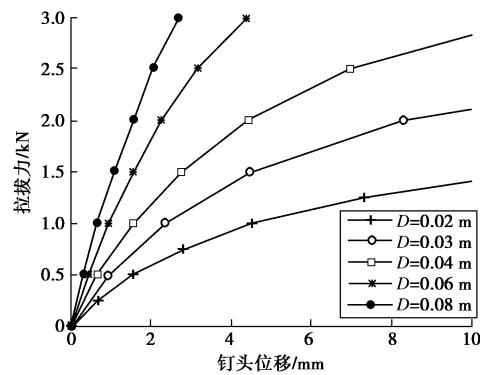


图 9 参数  $D$  对 GFRP 土钉拉拔行为的影响 ( $\tau_{\text{ult}} = 55 \text{ kPa}$ ;  $G_0^*/\bar{E} = 5.8 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ )

Fig. 9 Effect of  $D$  on pullout behavior of GFRP soil nails ( $\tau_{\text{ult}} = 55 \text{ kPa}$ ;  $G_0^*/\bar{E} = 5.8 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ )

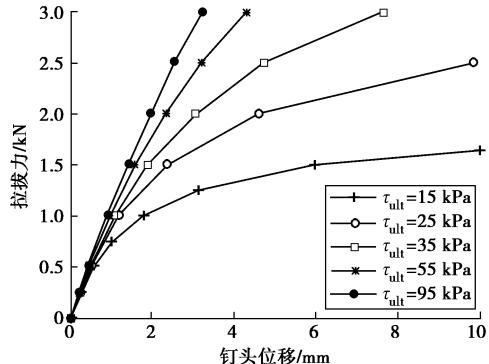


图 10 参数  $\tau_{\text{ult}}$  对 GFRP 土钉拉拔行为的影响 ( $D = 0.06 \text{ m}$ ;  $G_0^*/\bar{E} = 5.8 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ )

Fig. 10 Effect of  $\tau_{\text{ult}}$  on pullout behavior of GFRP soil nails ( $D = 0.06 \text{ m}$ ;  $G_0^*/\bar{E} = 5.8 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ )

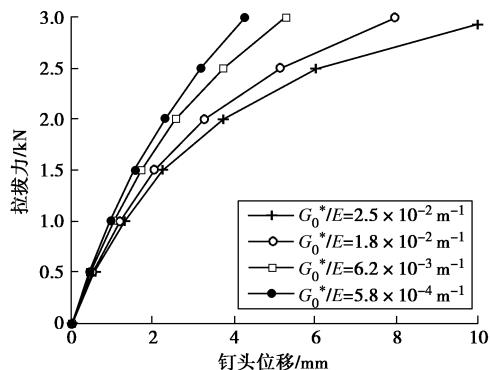


图 11 参数  $G_0^*/E$  对 GFRP 土钉拉拔行为的影响 ( $D = 0.06$  m;  $\tau_{ult} = 55$  kPa)

Fig. 11 Effect of  $G_0^*/E$  on pullout behavior of GFRP soil nails ( $D = 0.06$  m;  $\tau_{ult} = 55$  kPa)

## 4 结 论

(1) 根据剪应力-剪应变的双曲线型关系,建立了GFRP 土钉拉拔模型,根据理论推导和数值分析方法,得到了土钉轴力、土-钉界面剪应力与土钉位移沿钉长的分布情况。当拉拔力较小时,轴力沿钉长为线性分布,剪应力与位移沿钉长大致呈均匀分布;当拉拔力逐渐增大时,剪应力与位移沿钉长表现出一定的非线性关系。

(2) 室内拉拔试验表明, GFRP 模型土钉的拉拔力与钉头位移呈现明显的非线性关系。FBG 传感器的监测结果显示,土钉轴向应变沿钉长大致呈线性分布,表明轴力沿钉长也呈线性分布。这一结果与模拟结果基本一致。这说明双曲线模型能有效地描述 GFRP 土钉的拉拔特性。由于该方法较为简便实用,所以在 GFRP 土钉支护工程中具备较高的应用价值。

(3) 提出了根据拉拔试验确定土-钉界面抗剪强度  $\tau_{ult}$  与土-钉模量比  $G_0^*/E$  等参数的方法,并基于 GFRP 土钉拉拔模型进行了参数分析。研究表明,由于 GFRP 土钉刚度小,土-钉模量比因此较大,这对 GFRP 土钉的拉拔特性有明显的影响。需采用位移控制标准来确定 GFRP 土钉的容许拉拔力。

## 参考文献:

- [1] ISKANDER M, HASSAN M. State of the practice review: FRP composite piling[J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(3): 116-120.
- [2] MIYATA K. Walls reinforced with fiber reinforced plastic geogrids in Japan[J]. Geosynthetics International, 1996, 3(1): 1-11.
- [3] BENMOKRANE B, XU H, BELLAVANCE E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, 33(5): 455-465.
- [4] ZHU H H, YIN J H, YEUNG A T, et al. Field pullout testing and performance evaluation of GFRP soil nails[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2011, 137(7): 633-641.
- [5] JEWELL R A, PEDLEY M J. Soil nailing design: the role of bending stiffness[J]. Ground Engineering, 1990, 23(2): 30-36.
- [6] SCHLOSSER F. Behaviour and design of soil nailing[C]// Proceedings of International Symposium on Recent Development in Ground Improvement Techniques, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1982: 399-413.
- [7] MILLIGAN G W E, TEI K. The pull-out resistance of model soil nails[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(2): 179-190.
- [8] LUO S Q, TAN S A, YONG K Y. Pull-out resistance mechanism of a soil nail reinforcement in dilative soils[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(1): 47-56.
- [9] HONG Y S, WU C, YANG S H. Pullout resistance of single and double nails in a model sandbox[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(5): 1039-1047.
- [10] JUNAIDEN S M, THAM L G, LAW K T, et al. Laboratory study of soil-nail interaction in loose, completely decomposed granite[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 274-286.
- [11] CHU L M, YIN J H. Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2005, 131(9): 1097-1107.
- [12] PRADHAN B, THAM L G, YUE Z Q, et al. Soil-nail pullout interaction in loose fill materials[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, 6(4): 238-247.
- [13] SU L J, CHAN T C F, YIN J H, et al. Influence of overburden pressure on soil-nail pullout resistance in a compacted fill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2008, 134(9): 1339-1347.
- [14] YIN J H, SU L J, CHEUNG R W M, et al. The influence of grouting pressure on the pullout resistance of soil nails in completely decomposed granite fill[J]. Géotechnique, 2009, 59(2): 103-113.
- [15] YIN J H, ZHOU W H. Pullout test study on the influence of both grouting pressure and overburden pressure on the

- interface shear resistance of a soil nail[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2009, **135**(9): 1198 - 1208.
- [16] FROST J D, HAN J. Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, **125**(8): 633 - 640.
- [17] BENMOKRANE B, XU H, BELLAVANCE E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, **33**(5): 455 - 465.
- [18] 邹维列, 王钊, 陈春红. 玻璃钢螺旋锚用于稳定膨胀土渠坡的现场拉拔试验和锚筋的破坏形式[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(6): 970 - 974. (ZOU Wei-lie, WANG Zhao, CHEN Chun-hong. Field pull-out tests and failure model of GFRP screw anchors used to stabilize canal slopes of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(6): 970 - 974. (in Chinese))
- [19] 黄生文, 邱贤辉, 何唯平, 等. FRP 土钉主要性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(8): 74 - 78. (HUANG Sheng-wen, QIU Xian-hui, HE Wei-ping, et al. An experimental study on the performance of FRP soil nails[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(8): 74 - 78. (in Chinese))
- [20] 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. (HUANG Sheng-wen, LIU Ting-wang, QIU Xian-hui, et al. An experimental study on the performance of FRP soil nails[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(2): 90 - 96. (in Chinese))
- [21] KONDNER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1963, **89**(1): 115 - 144.
- [22] HIRAYAMA H. Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions[J]. Soils and Foundations, 1990, **30**(1): 55 - 64.
- [23] GOMEZ J E, FILZ G M, EBELING R M. Extended hyperbolic model for sand-to-concrete interfaces[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, **129**(11): 993 - 1000.
- [24] SAWICKI A. Mechanics of reinforced soil[M]. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2000.
- [25] ZHU H H, YIN J H, JIN W, et al. Soil nail monitoring using fiber Bragg grating sensors during pullout tests[C]// Proceedings of Joint 60th Canadian Geotechnical and 8th IAH-CNC Conferences. Ottawa, Canada, 2007: 821 - 828.
- [26] FRANZÉN G. SOIL NAILING: A laboratory and field study of pullout capacity[D]. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 1998.