

基于分段式模型考虑界面损伤的 GFRP 锚杆-砂浆粘结性能数值模拟

寇海磊¹,荆皓^{1*},徐客¹,田华²

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海大工程检测鉴定有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要: 通过编写 Vumat 子程序定义玻璃纤维增强塑料(GFRP)锚杆材料参数,并考虑 GFRP 锚杆与砂浆界面的不均匀及损伤特性进行正交各向异性建模,借助 ABAQUS 有限元软件对 GFRP 锚杆与砂浆界面的粘结滑移特性进行分段模拟,探究 GFRP 锚杆轴力、界面剪应力分布形态,进而对不同直径 GFRP 锚杆-砂浆界面力学特性进行分析。研究表明:分段式有限元模型能够较好地反映 GFRP 锚杆-砂浆的粘结特性。随着施加荷载的增加,GFRP 锚杆所受轴力逐渐增大,荷载传递深度逐渐加深,锚固作用自上而下逐渐发挥;GFRP 锚杆拔出所需最大拉力、界面破坏位移随直径减小而增大。GFRP 锚杆发生破坏的临界直径为 28 mm,当直径大于 28 mm 时发生滑移破坏,直径小于 28 mm 时发生强度破坏。计算确定直径 28 mm GFRP 锚杆的锚固系数 K_1 为 0.155。

关键词: GFRP 锚杆;数值分析;界面刚度损伤;粘结滑移;锚固系数

中图分类号: TU52

文献标识码: A

Numerical Simulation of Bonding Performance of GFRP Anchor-mortar Considering Interface Damage Based on Piecewise Model

KOU Hailei¹, JING Hao^{1*}, XU Ke¹, TIAN Hua²

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

2. Qingdao Haida Engineering Testing and Identification Co. LTD, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: The material parameters of glass fiber reinforced plastic (GFRP) bolt were defined by writing VUMAT subroutine. Orthotropic anisotropic modeling was carried out considering the non-uniformity and damage characteristics of the interface between GFRP bolt and mortar. The bond slip characteristics of the interface between GFRP bolt and mortar were simulated sectionally by ABAQUS. The distribution of axial force and interfacial shear stress of GFRP bolt were explored, and the interface mechanical properties of GFRP bolt-mortar with different diameters were analyzed. The results show that the piecewise finite element model can better reflect the bonding characteristics of GFRP bolt-mortar. With the increase of the applied load, the axial force of the GFRP bolt gradually increases, the load transfer depth gradually deepens. The anchoring effect gradually plays from top to bottom. The maximum pull force and interfacial failure displacement of GFRP bolt increase with the decrease of diameter. The critical diameter of slip failure and strength failure is 28 mm. The slip failure occurs when the diameter is larger than 28 mm and the strength failure occurs when the diameter is less than 28 mm. The anchorage coefficient K_1 of 28 mm diameter GFRP bolt is determined to be 0.155.

Key words: GFRP anchor; numerical analysis; interface stiffness damage; bond slip; anchorage coefficient

收稿日期:2021-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51879246)

作者简介:寇海磊(1983-),男,山东潍坊人,博士,副教授,主要从事岩土工程方向的研究。

* 通讯作者:荆皓(1996-),男,山东德州人,硕士研究生,主要从事岩土工程方向的研究。

玻璃纤维增强塑料 (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP) 是一种新型正交各向异性复合材料,其具有耐腐蚀、耐电磁干扰等优点。GFRP 锚杆是以玻璃纤维为增强体、合成树脂为基本体,经挤拉、固化、缠绕一次成型的锚杆,相比于钢筋等金属材料锚杆,具有抗拉强度高、自重轻、松弛性低、经济性好等优势^[1-3]。

相比于钢筋锚杆,GFRP 锚杆的锚固滑移以及破坏机理更为复杂。郭恒宁等^[4]研究表明钢筋滑移主要由砂浆拉裂、剪切破坏引起,而 GFRP 锚杆的滑移主要由 GFRP 筋的螺纹肋削弱或剪切破坏引起。在有限元数值分析中,GFRP 锚杆的粘结界面损伤、刚度退化以及界面粘结不均匀性是进行有限元模拟的难点。Delhomme 和 Brun^[5]对 GFRP 锚杆的拉拔特性进行了有限元分析,研究了静态拉拔过程中锚固系统的失效机制;Mohamed 等^[6]通过有限元模拟对 GFRP 锚杆在拉拔过程中控制剪切变形的有效性进行了研究;Zhang 等^[7]通过数值分析对 GFRP 材料抗拔性能的时变性进行了分析,但上述模型均未考虑 GFRP 锚杆-砂浆界面损伤;Metwally^[8]采用非线性弹簧单元模拟复合材料锚杆与砂浆界面的粘结滑移,得到粘结-滑移曲线,但该模型未考虑粘结界面的不均匀性。Cohesive 粘结单元可有效模拟 GFRP 锚杆与砂浆界面的粘结特性。贾科科等^[9]通过 Cohesive 粘结单元对 GFRP 锚杆-砂浆界面进行有限元分析,得到了其界面应力分布规律,但未考虑材料的各向异性和界面损伤;白晓宇等^[10]通过 Cohesive 粘结单元模拟锚杆-砂浆界面的力学行为,探究全长粘结 GFRP 锚杆的拉拔特性与变形规律,但未考虑界面粘结的不均匀性。

本文基于分段式模型在考虑界面损伤以及界面粘结不均匀性的基础上,利用 Cohesive 接触面单元对 GFRP 锚杆与砂浆界面的粘结滑移特性进行数值分析,进一步对不同直径 GFRP 锚杆的粘结性能以及基本锚固长度进行研究。

1 数值建模分析

1.1 GFRP 锚杆参数确定

GFRP 锚杆是一种正交各向异性材料,抗拉强度高,抗剪强度低,破坏时呈脆性。影响较大的主抗拉强度通过外粘接钢管拉拔试验确定,如图 1 所示。本次拉拔试验使用的 GFRP 锚杆试验参数见表 1。



图 1 GFRP 锚杆拉拔试验

Fig. 1 Pull test of GFRP anchor

表 1 GFRP 锚杆拉拔试验参数

Tab. 1 Test parameters of GFRP anchor pull-out test

材料	直径 /mm	密度 /(g·cm ⁻³)	长度 /cm	纤维 含量 /%	肋高 /mm	肋间距 /mm	螺旋 角度 /(°)
GFRP	28	2.1	60	78	1	1	30

参考试验^[11]和《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608 — 2010)^[12],进行 3 组 GFRP 锚杆拉拔试验 (G28-1, G28-2, G28-3),使用引伸计精确测定 GFRP 的弹性模量,试验结果如图 2 所示,GFRP 锚杆的极限抗拉强度为 650 MPa,弹性模量为 41 GPa。本次有限元模拟中 GFRP 锚杆的数值材料参数见表 2。

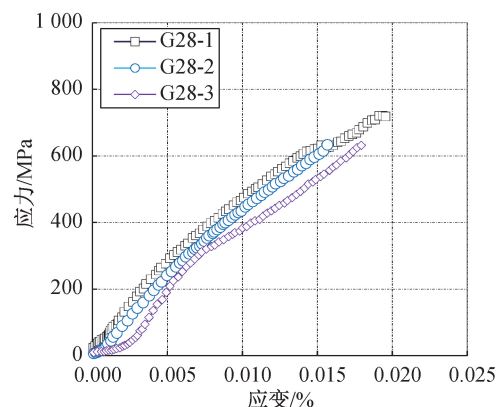


图 2 GFRP 拉拔试验结果

Fig. 2 Results of pull test

1.2 砂浆及微风化岩石本构关系

砂浆性质与混凝土接近,砂浆本构关系近似使用混凝土塑性损伤模型,相关参数按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[13]采用,其中 ε_t , ε_c , α_t , α_a , α_d 五个参数按照规范选取,选用如下公

表 2 GFRP 锚杆数值模型材料参数

Tab. 2 Material parameters of GFRP anchor pull-out numerical model

弹性模量/GPa			泊松比			剪切模量/GPa			纤维方向/MPa		垂直方向/MPa		剪切强度/MPa		
E_1	E_2	E_3	V_{12}	V_{13}	V_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	X_T	X_C	Y_T	Y_C	S_{12}	S_{13}	S_{23}
41.0	8.3	8.3	0.26	0.26	0.30	4.1	4.1	3.1	750	410	31	118	150	150	64

式进行拟合:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_t &= 65f_t^{0.54} \times 10^{-6} \\ \varepsilon_c &= (172f_c^{0.5} + 700) \times 10^{-6} \\ \alpha_t &= 0.31f_t^{2.005} \\ \alpha_a &= 0.012485f_c + 2.4 \\ \alpha_d &= 0.157f_c^{0.785} - 0.905 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

本文采用基于 Sidoroff 能量等价原理的损伤关系,该表达式形式简单,易于收敛,如下:

$$d_0 = \sqrt{\sigma/E_0\varepsilon} \quad (2)$$

式中, d_0 为损伤变量, σ 和 ε 分别代表砂浆的应力以及应变, E_0 为砂浆的弹性模量。

微风化岩石采用线性 Druker-Prager (D-P) 准则,通过屈服面的大小来定义材料力学特性,屈服面变大时发生硬化行为,反之发生软化行为。该准则包含两个参数,应力 σ 和等效塑性应变 ε^{pl} 。本文中 σ 采用单轴抗拉强度, $\varepsilon^{pl} = \int \Delta \varepsilon^{pl} dt$,取值为 0。

1.3 Cohesive 粘聚面本构关系

Cohesive 单元是由 Barenblatt G I^[14] 引入、Camanho^[15] 拓展的方法,属于损伤力学范畴,用以求解粘塑性、粘弹性、断裂、纤维断裂等行为。

使用牵引-分离法则 (Traction-separation law) 来模拟单元间的粘结力,通过 sweep 命令定义中部的分离线以及参数,通过分离线的分离和滑动模拟裂缝开展和界面滑移,单元简图见图 3。图 4 表示 Cohesive 单元的本构模型,斜率代表界面刚度 K_{tt} ,面积代表断裂能量释放量 G_{TC} ,滑移达到 δ_t^0 界面发生损伤,达到 δ_t^f 界面出现裂缝,上升段为弹性段,下降段为退化段。参数选取中, $\tau_{max} = 1.67P/\pi DL$, P 表示最大拉力, D 为界面直径, L 为锚固长度。对于 GFRP 锚杆-砂浆界面而言,上升和下降段本构关系不对称,损伤阶段应变大于弹性阶段的应变,一般有 $\delta_t^f = 2.3\delta_t^0$ 。

Cohesive 粘聚面的损伤采用最大名义应力准则^[16],表达式如下:

$$\text{MAX} \left\{ \frac{\delta_n}{\delta_n^{max}}, \frac{\delta_s}{\delta_s^{max}}, \frac{\delta_t}{\delta_t^{max}} \right\} = 1 \quad (3)$$

式中, δ_n :法线方向的分离值; δ_s :第一剪切方向的分离值; δ_t :第二分离方向的分离值。

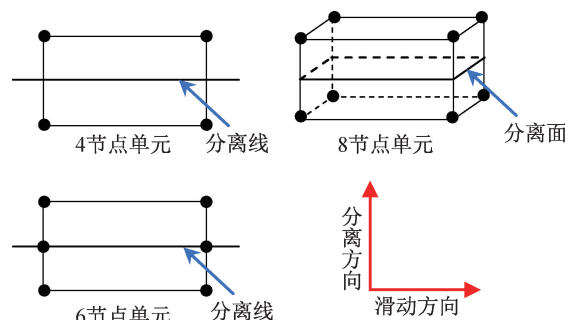


图 3 Cohesive 单元简图

Fig. 3 Cohesive element diagram

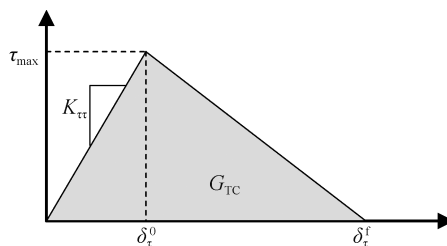


图 4 Cohesive 单元本构模型

Fig. 4 Cohesive element constitutive model

1.4 分段式数值模型建立及参数选取

根据 Kou 等^[17] 现场模型试验,本次数值模拟中 GFRP 锚杆锚固长度为 4.0 m,直径为 28 mm,砂浆直径为 120 mm,微风化岩石直径 2.0 m。在实际工程中,砂浆与锚杆呈现一种界面不均匀连接的状态,因此本文采用分段式建立数值模型。以三种粘结行为来考虑 GFRP 表面形态以及 GFRP 锚杆-砂浆界面刚度不均匀性,将粘结长度分为 1.0、1.0、2.0 m 三段,如图 5 所示,每段对应界面刚度分别为 8.6、14.6、18 GPa。由于砂浆-微风化岩石界面直径大,不易产生粘结的不均匀性,因此砂浆-微风化岩石界面采用一种粘结行为进行模拟,选用界面刚度为 20 GPa。

利用 Surface-based cohesive behavior 创建接触面来模拟粘结界面,利用接触对 (Contact pairs) 施加粘性行为,将约束加在从面上,通过细化从面优化结果。从面一般选择刚度比较小的面,本文数值模拟将 GFRP 筋定义为从面。粘结面通过通用

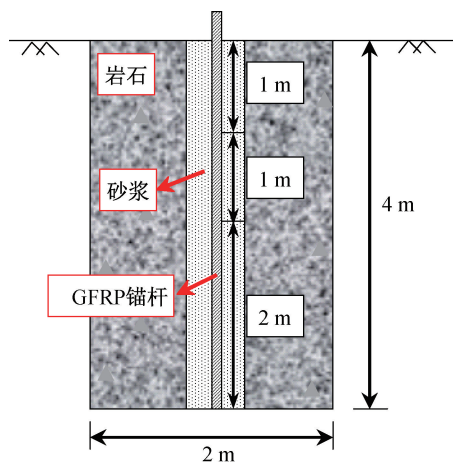


图5 界面粘结示意图

Fig. 5 Interfacial bonding diagram

接触(General contact)定义粘结行为,全局接触属性(Global contact)设置为无摩擦,在特殊接触里设置两个粘结界面为Cohesive粘结面,Cohesive材料基本参数如表3所示。需要说明的是,由于界面机械咬合作用而产生的残余摩擦应力对界面粘结行为具有一定影响^[18],但在本文中没有考虑。

表3 Cohesive 单元材料参数

Tab. 3 Material parameters of Cohesive element

弹性模量 /GPa	剪切模量 /GPa	名义主应变 变	密度 /(kg·m ⁻³)	破坏位移 /m	最大剪应力 /MPa	粘性系数
18	18	0.000 13	2 100	0.018	2.3	0.001

砂浆较混凝土骨料少、硬度低,弹性模量取18 GPa,标号取C20,均采用C3D8R单元划分网格,具体力学参数见表4。岩石参数取值采用Kou等^[17]现场试验中风化花岗岩的工程勘察参数,岩石参数见表5。将砂浆的底面和侧面设置为固定约束,对GFRP锚杆施加垂直向上的均布应力。

表4 砂浆物理力学参数

Tab. 4 Physical and mechanical parameters of mortar

密度 /(kg·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	膨胀角/(°)	偏心系数	σ_{b0} /σ _{c0}	固定应力比	粘性系数
2 400	18	0.2	30	0.1	0.667	0.01	0.000 5

表5 微风化花岗岩物理力学参数

Tab. 5 Physical and mechanical parameters of slightly weathered granite

容重 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	剪切模量 /GPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
27	21	11.6	0.24	4 000	45.6

2 结果分析

2.1 数值模拟与试验结果对比

图6为GFRP锚杆荷载滑移数值模拟与现场试验结果对比,现场试验以50 kN为一级进行分级加载。由图可以看出,数值模拟结果与四组现场试验结果吻合较好,说明本次模拟的可行性。当荷载小于150 kN时,荷载滑移曲线呈近似的线性变化,荷载增速较快;在大于150 kN时荷载增速放缓,峰值破坏荷载为400 kN左右。

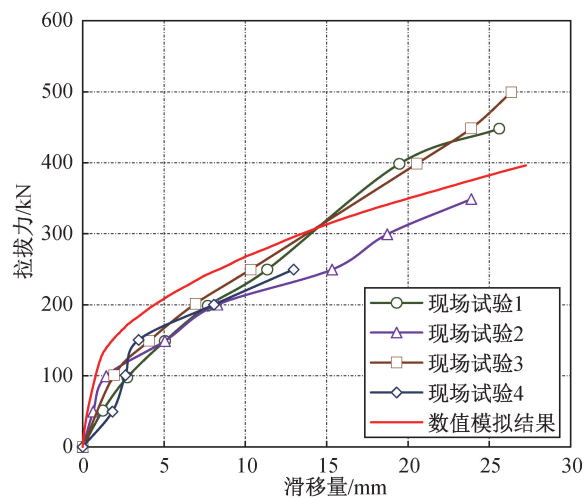


图6 有限元结果与试验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation results with test results

2.2 GFRP 锚杆应力曲线分析

图7表示GFRP锚杆轴力分布图,可以看出,越靠近受力端轴力越大,沿锚固深度方向向下传递,轴力不断减小。荷载传递深度随荷载增加逐渐加深,锚固作用自上而下逐段发挥。当荷载小于150 kN时,荷载传递深度小于1 m,此时只有第一段砂浆-锚杆界面发挥锚固作用。当荷载达到200 kN时,荷载传递深度达到1.5 m,曲线在1 m处出现明显的拐点,这是分段式建模的结果(界面刚度发生了变化)。此时,第二段砂浆-锚杆界面剪切力开始发挥锚固作用。当杆端力达到400 kN时,上部界面破坏,荷载传递深度达到3 m,曲线有两个明显的拐点,第三段砂浆-锚杆界面剪切力开始发挥锚固作用,现场试验中测得最终传递深度为3 m,故数值模型与现场试验结果完全吻合。

GFRP锚杆与砂浆界面的剪应力分布曲线如图8所示,不同于张明义^[19]钢筋锚杆最大剪应力发生在受力端的结论,GFRP锚杆荷载滑移关系和

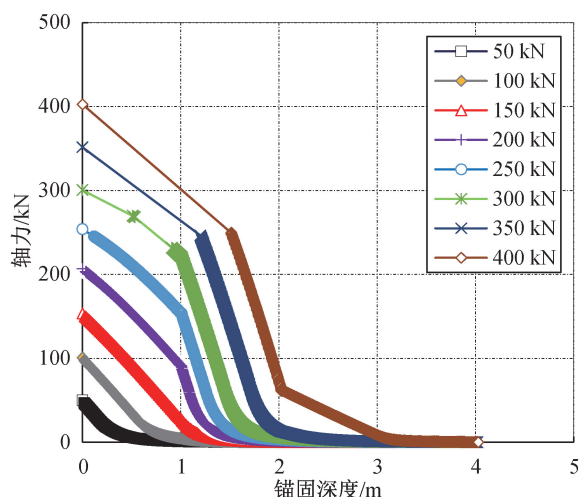


图7 轴力分布曲线图

Fig. 7 Curves of axial force distribution

尤春安^[20]推导的全长粘结锚固公式中剪应力分布规律非常接近。GFRP 锚杆剪应力最大值发生在距离地面一定位置处,随荷载不断增大,剪应力峰值不断向锚固深处移动。

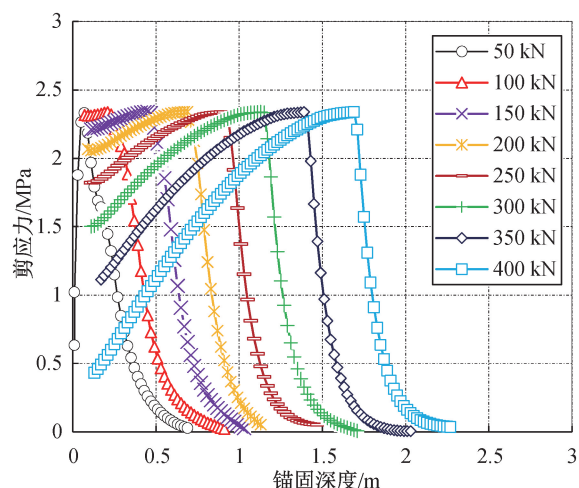


图8 剪应力分布曲线图

Fig. 8 Curves of shear stress distribution

由图8可知,曲线上段较下段平稳,但峰值大小变化不大,剪应力最大值为2.4 MPa,与试验中测得的剪应力2~2.7 MPa的区间范围吻合良好。界面剪应力值小于C50高强混凝土的抗剪强度(8 MPa左右),有利于防止GFRP的剪切破坏。荷载为200 kN时剪应力峰值点距受力端0.7 m,300 kN时达到1.2 m,400 kN时为1.7 m,正常使用时多在0.5~1.5 m范围内,钢筋锚杆剪应力峰值在0~1.2 m^[19],在剪应力峰值分布段可以采取额外措施如Arias的涂抹砂浆层法^[21],添加防护垫层或者改变相应位置GFRP螺纹螺距以减小破坏风险。

2.3 不同直径 GFRP 锚杆的粘结性能

在锚杆支护中,锚杆直径是一个重要的参数,不同直径 GFRP 锚杆在受拉时的力学性能是重要的工程指标。在只改变锚杆直径的条件下,分别对直径16、20、24、28、32 mm GFRP 锚杆进行有限元模拟分析,得到不同直径 GFRP 锚杆的荷载滑移曲线,结果如图9所示。

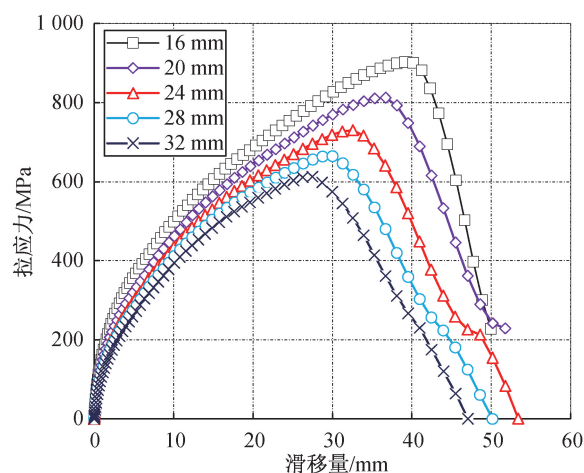


图9 不同直径的 GFRP 锚杆的荷载滑移曲线

Fig. 9 Load-slip curves of GFRP anchors with different diameters

GFRP 锚杆荷载端拉应力最大值对应的滑移量即界面破坏位移。分析可得,在滑移量达到界面破坏位移之前,GFRP 锚杆荷载端拉应力逐渐增大。在达到界面破坏位移时,荷载端拉应力达到极限拉应力,并随着滑移量的增大而迅速减小。随着 GFRP 锚杆直径减小,锚杆极限拉应力增大。界面破坏位移随着锚杆直径减小而不断增大。直径小于24 mm时,最终破坏位移随直径的减小而增大,直径大于24 mm时,由于界面应力过高,界面损坏程度加快,粘结界面很快发生损坏,最终破坏位移随直径减小而减小。

直径28 mm GFRP 锚杆极限拉应力达到了极限抗拉强度650 MPa(拉拔试验测得)。因此,强度破坏和滑移破坏的临界直径是28 mm,GFRP 锚杆直径大于28 mm时界面发生滑移破坏,反之发生强度破坏。直径小于28 mm的锚杆因为受力超过其极限抗拉强度而不符合设计要求,会发生材料破坏,因此直径小于28 mm的锚杆需谨慎用于支护工程。

图10表示不同直径 GFRP 锚杆的有限元轴应力分布,分析可得,对于同一直径锚杆,荷载端拉应力越大,轴力传递深度越大。随着 GFRP 锚杆直

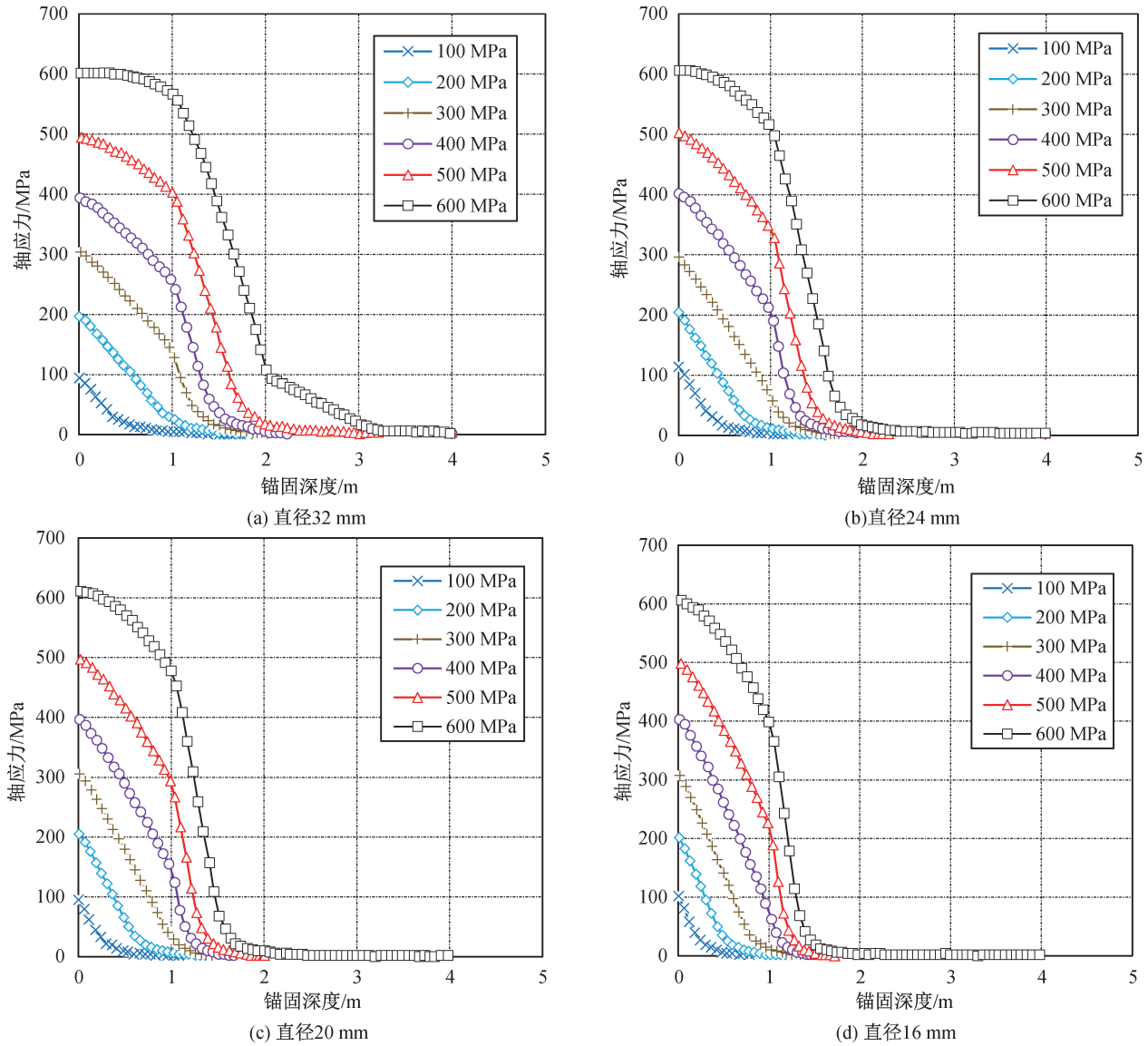


图 10 不同直径 GFRP 锚杆轴应力分布图

Fig. 10 Axial stress distribution curves of GFRP anchors with different diameters

径的减小,轴力传递的深度变小,轴力的影响范围变小。有限元分析中轴力的传递深度反映了界面的破坏范围,轴力传递深度越大,说明传递深度上部粘结界面破坏的更加严重。不同直径锚杆承受抗拉荷载的能力不同,GFRP 直径越小锚杆轴应力的传递深度越浅,界面破坏范围越小。

2.4 GFRP 锚杆基本锚固长度计算

图 11 表示 GFRP 锚杆锚固界面剪切机制示意图。其剪切关系由两个剪切界面构成,砂浆-微风化岩石剪切界面强度大于 GFRP 锚杆-砂浆剪切界面的强度,试验时均为 GFRP 锚杆拔出和砂浆劈裂两种破坏形式。基本锚固长度是锚杆达到极限强度所需最小锚固长度,小于该锚固长度则锚杆不

能完全发挥作用,由图 11 受力机制进行推导得:

$$\pi d \tau(x) dx = A_s [F(x) + dF(x)] - A_s F(x) \quad (4)$$

$$\tau(x) = \frac{A_s}{\pi d} \frac{dF(x)}{dx} \quad (5)$$

式中, A_s 是截面面积, d 为锚杆直径, $\tau(x)$ 是界面轴向应力, $F(x)$ 是截面轴向力。平均粘结强度 τ_u 随锚固长度的增加而减小,但是锚固长度的变化范围通常很小, τ_u 变化幅度也很小。在不考虑砂浆劈裂时,将 GFRP 锚杆-砂浆粘结界面的平均粘结强度近似看成常数 k_1 :

$$\tau(x) = \tau_u = k_1 \quad (6)$$

$$L = \frac{A_s}{\pi d} \frac{F}{\tau_u} = K_1 d F \quad (7)$$

在考虑砂浆界面劈裂时,将 GFRP 锚杆-砂浆粘结界面的平均粘结强度视为 $\sqrt{f_c}/d$ 的线性函数:

$$\tau(x) = \tau_u = k_2 \sqrt{f_c} / d \quad (8)$$

$$L = \frac{A_s}{\pi d} \frac{F}{\tau_u} = K_1 d^2 F / \sqrt{f_c} \quad (9)$$

公式(7)反映了 GFRP 锚杆在砂浆中的基本锚固长度是直径和材料极限抗拉强度的一次函数, K_1 为锚固系数,此式未考虑砂浆劈裂的影响,适用于直接拔出的锚固形式,根据直径 28 mm GFRP 锚杆模拟结果计算得锚固系数为 0.155,可见 M32.5 砂浆中的最小锚固长度远大于在 C30 混凝土($K_1 = 0.015$)中的最小锚固长度。极限抗拉强度 F 由材料性质确定,可以近似认为不考虑砂浆劈裂的基本锚固长度只是直径的函数,直径越大基本锚固长度越大。在考虑砂浆破坏时最小锚固长度和直径的平方成正比,在锚杆设计时可以增加锚固长度或者减小直径提高安全系数,在工程中锚固长度由基本锚固长度乘以安全系数确定,安全系数可取 1.3~1.4。需要强调的是,实际工程中锚杆-砂浆粘结应力本身是非均匀分布的,计算较为复杂。本文通过引入平均粘结强度与安全系数以简化基本锚固长度的计算,在误差允许的范围内切实可行。

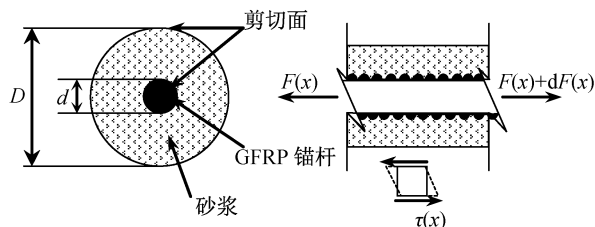


图 11 GFRP 锚杆的剪切机制^[17]

Fig. 11 Schematic illustration of pullout mechanism of GFRP anchor

3 结论

本文基于分段式模型在考虑界面损伤以及界面粘结不均匀性的基础上对 GFRP 锚杆与砂浆界面的粘结滑移特性进行数值分析,并对不同直径 GFRP 锚杆的粘结性能以及基本锚固长度进行了研究,所得结论如下:

1) 通过考虑界面不均匀粘结状态以及损伤对 GFRP 锚杆与水泥砂浆进行分段式建模,对锚杆-砂浆界面滑移曲线进行了研究,并与现场试验结果进行了分析对比,验证了模型的可行性与合

理性。

2) GFRP 锚杆应力随荷载增加逐渐增大,并沿锚固深度向下传递;荷载传递深度随荷载增加逐渐加深,锚固作用自上而下逐段发挥。在只改变 GFRP 锚杆直径的条件下,极限拉应力、界面破坏位移随直径减小而增大。GFRP 锚杆发生强度破坏和滑移破坏的临界直径是 28 mm,直径大于 28 mm 时界面发生滑移破坏,反之发生强度破坏;GFRP 锚杆直径越小,荷载传递深度越小,界面破坏范围越小。

3) 推导并确定 GFRP 锚杆在砂浆中的基本锚固长度经验公式。对于直径 28 mm GFRP 锚杆,确定其锚固系数 $K_1 = 0.155$,为 GFRP 锚杆的工程锚固提供参考。

参考文献:

- [1] 郑晨,白晓宇,张明义,等. 玻璃纤维增强聚合物锚杆在地下结构抗浮工程中的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(13): 194-202.
- [2] 高丹盈,房栋,谷泓学. GFRP-钢绞线复合筋与混凝土黏结机理及强度计算模型[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4): 130-139.
- [3] 郝庆多,王言磊,欧进萍. 拉拔条件下 GFRP 筋与混凝土粘结强度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008(1): 103-111.
- [4] 郭恒宁,张继文. FRP 筋与混凝土粘结滑移性能的试验研究[J]. 混凝土, 2006(8): 1-4.
- [5] DELHOMME F, BRUN M. Pullout Simulation of Post Installed Chemically Bonded Anchors in UHPFRC[C]//International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR). Cape Town, South Africa. 2018: 11007.
- [6] MOHAMED N, FARGHALY A S, BENMOKRANE B, et al. Numerical Simulation of Mid-rise Concrete Shear Walls Reinforced with GFRP Bars Subjected to Lateral Displacement Reversals[J]. Engineering Structures, 2014(73): 32-71.
- [7] ZHANG C C, ZHU H H, XU Q, et al. Time-dependent Pullout Behavior of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Soil Nail in Sand[J]. Can. Geotech. J., 2015(52): 671-681.
- [8] METWALLY I M. Three-dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Deep Beam Reinforced with GFRP Bars[J]. Hbrc Journal, 2015, 110(1): 1-14.
- [9] 贾科科,张明义,李伟伟,等. GFRP 抗浮锚杆在混凝土底板中荷载传递机制的数值模拟[J]. 青岛理工大学学报, 2016, 37(1): 22-26.

(下转第 54 页)

- ance of Elevated Steel Silos During Van Earthquake, October 23, 2011 [J]. Natural Hazards, 2015, 75 (1): 265-287.
- [5] KANYILMAZ A, CASTIGLIONI C A. Reducing the Seismic Vulnerability of Existing Elevated Silos by Means of Base Isolation Devices[J]. Engineering Structures, 2017, 143:477-497.
- [6] BUTENWEG C, ROSIN J, HOLLER S. Analysis of Cylindrical Granular Material Silos under Seismic Excitation [J]. Buildings, 2017, 7(3):61.
- [7] 周长东, 郭坤鹏, 孟令凯, 等. 钢筋混凝土料仓-散料的静力相互作用分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2015, 43(11):1656-1661.
- [8] 周长东, 张泳, 邱意坤, 等. 地震作用下料仓结构贮料侧压力计算方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2020, 47(11):74-83+94.
- [9] TREMBLAY R, MITCHELL D, TINAWI R. Damage to Industrial Structures Due to the 27 February 2010 Chile Earthquake 1[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(8):735-749.
- [10] PIERACCINI L, SILVESTRI S, TROMBETTI T. Refinements to the Silvestri's Theory for the Evaluation of the Seismic Actions in Flat-bottom Silos Containing Grain-like Material[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 11(13):3493-3525.
- [11] DURMUS, AYSEGUL, LIVAOGLU, et al. A Simplified 3 DOF Model of A FEM Model for Seismic Analysis of A Silo Containing Elastic Material Accounting for Soilstructure Interaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 77:1-14.
- [12] KANYILMAZ A, CASTIGLIONI C A. Reducing the Seismic Vulnerability of Existing Elevated Silos by Means of Base Isolation Devices[J]. Engineering Structures, 2017, 143:477-497.
- [13] ZAOUI D, DJERMANE M. Contribution to the Seismic Behaviour of Steel Silos: Full Finite-element Analysis Versus the Eurocode Approach[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2018, 19(7):757-773.
- [14] NIELSEN J, ROTTER J M. On the Definition of Design Values for Loads on Silos and Tanks[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(16):2499-2506.
- [15] 王世豪. 料仓卸料流态及压力影响因素的细观机理研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2018.
- [16] 贾玲玲, 赵真, 柳春光. 柱承式料仓结构在接连二次地震作用下的动力响应和抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(04):62-69.
- [17] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- [18] GB 50077—2017, 钢筋混凝土料仓设计标准[S].

(责任编辑 王利君)

(上接第36页)

- [10] 白晓宇, 张明义, 匡政, 等. 全长黏结 GFRP 抗浮锚杆拉拔特性分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2019, 50(8):1997-2000.
- [11] 刘汉东, 于新政, 李国维. GFRP 锚杆拉伸力学性能试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 20:3719-3723.
- [12] GB 50608—2010, 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范[S].
- [13] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [14] BARENBLATT G I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture[J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55-129.
- [15] CAMANHO P P, DAVILA C G, AMBUR D R. Numerical Simulation of Delamination Growth in Composite Materials [M]. NASA Langley Technical Report Server, 2001.
- [16] MOËS N, BELYTSCHKO T. Extended Finite Element Method for Cohesive Crack Growth[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(7): 813-833.
- [17] KOU H L, GUO W, ZHANG M Y. Pullout Performance of GFRP Anti-floating Anchor in Weathered Soil [J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2015, 49: 408-416.
- [18] BENMOKRANE B, WANG P, TON-THAT T M, et al. Durability of Glass Fiber-reinforced Polymer Reinforcing Bars in Concrete Environment[J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(3):143-153.
- [19] 张明义, 张健, 刘俊伟, 等. 中风化花岗岩中抗浮锚杆的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(21): 2741-2746.
- [20] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3):339.
- [21] ARIAS J P M, VAZQUEZ A, ESCOBAR M M. Use of Sand Coating to Improve Bonding Between GFRP Bars and Concrete[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(18): 2271-2278.

(责任编辑 王利君)