

基于拉拔试验的 GFRP 筋与砂浆粘结性能研究

张 芯¹, 李化云¹, 张志强², 邓 来¹

(1. 西华大学土木建筑与环境学院, 成都 610039; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘 要: 为了获得玻璃纤维筋与砂浆间的合理粘结性能参数, 本文采用室内拉拔试验和数值模拟反演分析相结合的手段开展了相关研究. 通过开展不同筋材直径与不同砂浆强度下的筋材拉拔试验, 得到了不同工况下的粘结强度—滑移量曲线, 探明了筋材直径与砂浆强度对 GFRP 筋粘结强度的影响规律. 基于室内拉拔试验结果, 采用有限差分软件 FLAC^{3D} 模拟再现了 GFRP 筋拉拔试验, 对软件中的粘结性能参数进行了反演分析, 修正得到了 GFRP 筋灌浆体刚度和黏聚强度的计算公式. 研究表明: GFRP 筋与砂浆间的粘结强度与筋材直径成负相关, 与砂浆强度成正相关; 在缺乏筋材拉拔试验数据时, 纤维筋锚杆极限粘结强度宜取灌浆体抗压强度的五分之一, 以求得灌浆体黏聚强度; 纤维筋锚杆灌浆体刚度可采用普通钢筋锚杆灌浆体刚度计算公式获取, 但应乘以位于(1/10, 1/15]区间内的折减系数.

关键词: GFRP 筋; 拉拔试验; 粘结性能; 反演分析; 灌浆体参数

中图分类号: TU94+2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.044005

Study on bond performance parameters of GFRP bars based on pull-out test

ZHANG Xin¹, LI Hua-Yun¹, ZHANG Zhi-Qiang², DENG Lai¹

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, China;
2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To obtain reasonable bond performance parameters of GFRP bars, the indoor pull-out test and numerical simulation are used to study the bond performance between GFRP bars and mortars. Through the pull-out tests of different reinforcement diameters and mortar strengths, the relation curves between bond strength and slip under different working conditions are obtained, and the influence of reinforcement diameter and mortar strength on the bond strength of GFRP bars is revealed. Based on the results of indoor pull-out test, the finite difference software FLAC^{3D} is used to simulate and reproduce the pull-out test of GFRP bars. The back analysis of the bond performance parameters is carried out in FLAC^{3D}, and the calculation formulas of the grouting stiffness and grouting cohesion of GFRP bars are modified. The results show that the bond strength between GFRP bars and mortar is negatively correlated with the diameter of bars, while positively correlated with the mortar strength. In the absence of pull-out test data, the ultimate bond strength of GFRP bars should be one fifth of the compressive strength of mortar to obtain the grouting cohesion. The grouting stiffness of GFRP bars can be calculated by formula of ordinary steel bars, but it should be multiplied by the reduction factor in the interval of (1/10, 1/15).

Keywords: GFRP bars; Pull-out test; Bond performance; Back analysis; Grouting parameters

收稿日期: 2020-12-22
基金项目: 国家自然科学基金(51608450); 西华大学研究生创新基金(jcyj2019064)
作者简介: 张芯(1994—), 男, 四川遂宁人, 硕士研究生, 研究方向为隧道与地下工程.
通讯作者: 李化云. E-mail: 210101good@163.com

1 引 言

在隧道建设中,由开挖引起的围岩变形均直接或间接与掌子面超前核心土强度有关,采取锚杆加固掌子面超前核心土可有效控制隧道总变形^[1]. 在工程中常采用钢筋作为锚杆,但因其抗剪强度高、耐切削、质量大等特点,不宜用作掌子面锚杆;而玻璃纤维筋(GFRP 筋)具有重量轻、抗拉强度高、耐腐蚀、易切削等优点,是代替普通钢筋作为掌子面锚杆的理想材料.

目前,针对 GFRP 筋已经开展了相关研究. 在 GFRP 筋粘结性能研究方面,薛伟辰等^[2]通过开展拉拔试验研究了 FRP 筋与不同环境介质之间的粘结性能,指出新型 FRP 筋的粘结强度略低于钢筋. 师晓权等^[3]基于 GFRP 筋与钢筋试件的拉拔试验结果,提出钢筋与 GFRP 筋的粘结力比例系数为 1.2~1.5. 张伟等^[4]利用拉拔试验,研究了粘结长度、筋材直径、螺纹间距、螺纹深度、喷沙量以及混凝土强度对 GFRP 锚杆与水泥混凝土粘结性能的影响. 白晓宇等^[5]开展现场足尺拉拔试验,探讨了 GFRP 抗浮锚杆与混凝土底板的粘结锚固性能,研究表明 GFRP 锚杆与混凝土的协同工作效果优于钢筋锚杆.

在掌子面 GFRP 筋锚杆预加固技术方面,陈涛等^[6-7]以新意法为理论基础,利用有限元软件研究了掌子面 GFRP 筋锚杆对地层开挖变形的抑制作用,提出 GFRP 锚杆能有效提高掌子面前方核心土强度,从而控制因开挖引起的地层形变. 陈炜韬等^[8]通过开展模型试验,研究了注浆、小导管、正面锚杆及其组合措施对掌子面的加固效果,提出正面锚杆对掌子面位移的控制效果优于小导管. 李斌等^[9]基于理论分析与数值模拟,确定了掌子面 GFRP 筋锚杆加固密度、加固长度以及加固范围. Li 等^[10]利用数值模拟方法研究了掌子面 GFRP 筋锚杆加固长度、加固密度、加固范围、以及轴向刚度等因素对软岩隧道掌子面稳定性的影响,得到了部分掌子面锚杆加固参数. 王秀英等^[11]采用数值模拟方法分析了 GFRP 筋锚杆对掌子面稳定性的影响. 王志杰等^[12]结合理论分析与数值模拟,建立昔格达地层隧道掌子面失稳破坏模式,确定了掌子面 GFRP 筋锚杆加固长度.

分析既有研究成果可知,在筋材锚固性能方面,主要采用室内拉拔试验研究了钢筋与混凝土以及 GFRP 筋与混凝土间的粘结性能. 因 GFRP 筋

与钢筋在材料组成上有本质不同,所以两者的粘结性能存在较大差异;并且在隧道工程中,锚杆的锚固体通常为不含粗骨料的水泥砂浆,其与筋材间的粘结性能不同于混凝土与筋材间的粘结性能. 因此,有必要开展 GFRP 筋与砂浆间的粘结性能研究. 在掌子面 GFRP 筋锚杆预加固技术方面,学者们采用数值模拟手段进行了相关研究,并提出了一系列掌子面 GFRP 筋锚杆的加固参数;但在模拟过程中,GFRP 筋的粘结性能参数取值仍按照普通钢筋处理,未能准确反映 GFRP 筋的粘结性能.

因此,本文基于室内 GFRP 筋粘结拉拔试验,研究了筋材直径和砂浆强度对 GFRP 筋粘结性能的影响;然后采用 FLAC^{3D}对 GFRP 筋粘结拉拔试验进行模拟再现,并对数值计算中的相关锚固参数反演分析,提出了适用于 FLAC^{3D}的 GFRP 筋粘结性能参数,为隧道工程中掌子面 GFRP 筋锚杆加固参数的确定提供一定的参考意义.

2 GFRP 筋粘结拉拔试验

2.1 试验方案

影响锚杆粘结性能的主要因素包括筋材直径、砂浆强度以及筋材锚固长度. 文献[3]指出,在混凝土试件中,锚固长度不小于 0.5 m 可有效保障筋材充分发挥其作用,因此本文将筋材的锚固长度取为 0.5 m. 为研究筋材直径与砂浆强度对 GFRP 筋粘结性能的影响,本次试验选用直径为 22、25 和 28 mm 的 GFRP 筋与强度等级为 M15、M20、M25 的砂浆进行试验,共计 9 种工况,详见表 1.

表 1 GFRP 筋拉拔试验工况

Tab. 1 Pull-out test conditions of GFRP bars

工况 编号	砂浆强度 /MPa	筋材直径 /mm	锚固长度 /m	试件 数量
M15-22	15	22	0.5	3
M15-25		25	0.5	3
M15-28		28	0.5	3
M20-22	20	22	0.5	3
M20-25		25	0.5	3
M20-28		28	0.5	3
M25-22	25	22	0.5	3
M25-25		25	0.5	3
M25-28		28	0.5	3

2.2 材料及试件参数

在进行 GFRP 筋粘结拉拔试验前,对每种直径的筋材各取 6 个样进行筋材拉拔试验,以获得筋

材的基本力学参数,见表 2.

表 2 不同直径 GFRP 筋的力学参数
Tab. 2 Properties of GFRP bars with different diameters

GFRP 筋直径 /mm	弹性模量 /GPa	最大拉力 /kN	抗拉强度 /MPa
22	45.3	236.9	623.20
25	43.3	324.4	660.86
28	41.9	431.4	700.61

试验所用砂浆均由中细砂、42.5 级普通硅酸盐水泥、聚羧酸减水剂组成,各强度等级砂浆的配合比见表 3.

表 3 不同强度砂浆配合比
Tab. 3 Mixed proportions of mortars with different strengths

砂浆强度	水泥/kg	砂/kg	水灰比	水/kg
M15	310	1500	0.84	260
M20	710	1219	0.38	271
M25	898	898	0.45	404

试件形状采用长方体,每类试件制作 3 个,尺寸均为 0.3 m×0.3 m×0.5 m,试件制作标准参考《混凝土结构试验方法标准》^[14]. 为防止试件出现劈裂破坏,在试件长度范围内布置 $\varphi 16$ 的纵筋与 $\varphi 8@100$ 的箍筋. 另外,为避免筋材在加载过程中被夹坏,在筋材自由端设置钢套管.

2.3 加载与测量

采用中空千斤顶进行单向逐级加载直至筋材滑移破坏,每级荷载大小为 0.2 MPa. 试验中利用百分表测量并记录每一级荷载对应的筋材拔出位移 Δu ,试件及加载系统见图 1.

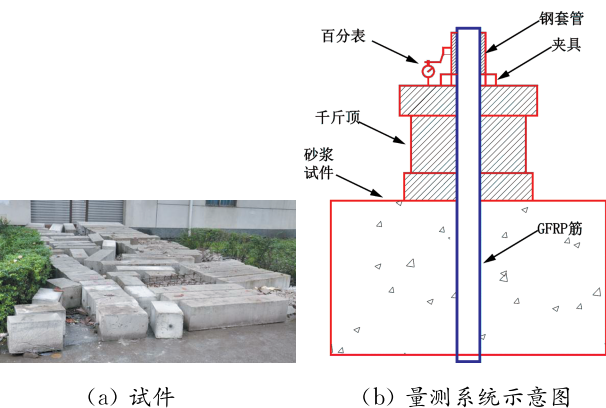


图 1 试件及量测系统示意图
Fig. 1 Specimens and measurement system

2.4 试验结果分析

2.4.1 试验结果 试验结果见表 4,表中粘结强度为描述 GFRP 筋与砂浆间粘结性能的参数,其定义为筋材锚固段内粘结应力的平均值,计算公式如下^[2]:

$$\tau = \frac{F}{\pi ld} \tag{1}$$

式中, F 为筋材拉拔力; l 为锚固长度; d 为筋材直径.

表 4 GFRP 筋粘结拉拔试验结果表
Tab. 4 Bond pull-out test results of GFRP bars

工况编号	砂浆强度 /MPa	筋材直径 /mm	抗拔力 /kN	粘结强度 /MPa	主要破坏形式
M15-22	15	22	111.02	3.21	砂浆劈裂
M15-25		25	109.91	2.80	砂浆劈裂
M15-28		28	118.33	2.69	砂浆劈裂
M20-22	20	22	179.26	5.19	砂浆劈裂
M20-25		25	186.71	4.75	筋材拔出
M20-28		28	207.30	4.71	筋材拔出
M25-22	25	22	217.04	6.28	筋材拔出
M25-25		25	234.47	5.97	筋材拔出
M25-28		28	235.32	5.35	筋材拔出

2.4.2 试件破坏形式分析 由表 4 可知,M15 级砂浆试件均出现砂浆劈裂破坏,见图 2(a). 这是因为在筋材拉拔过程中,带筋筋材会产生较大的径向应力,当砂浆试件强度以及砂浆厚度不足时,就会发生砂浆劈裂破坏,此时筋材粘结性能尚未得到充分发挥. 因此,在实际工程中采用直径为 22、25 或 28 mm 的 GFRP 筋作为锚杆时,锚固体强度应大于 M15 砂浆强度.

M20 级砂浆试件以及 M25 级砂浆试件主要发生筋材拔出破坏,见图 2(b). 此时砂浆强度足以抵抗筋材拉拔产生的径向应力,说明砂浆强度满足要求;由于筋材被拔出,使得筋材粘结性能得到了充分发挥.



(a) 砂浆劈裂 (b) 筋材拔出
图 2 试件破坏形式图
Fig. 2 Failure modes of specimens

2.4.3 砂浆强度对粘结强度的影响 选取 GFRP 筋直径为 22 mm 的试验结果进行分析,不同砂浆强度下的粘结强度-滑移量曲线见图 3. 由图 3 可知,试件破坏时的极限粘结强度随着砂浆强度的增大而增大. 这是因为在筋材拉拔过程中,当筋材-砂浆接触面未破坏时,粘结力主要由两者间的化学胶结力提供. 提高砂浆强度,则相应提高了筋材与锚杆间的化学胶结力,从而提高了粘结强度.

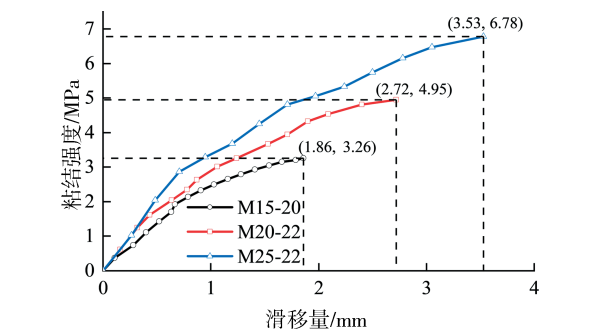


图 3 不同砂浆强度下的 GFRP 筋粘结强度-滑移量曲线
Fig. 3 Bond strength-displacement curves of GFRP bars in different mortars

2.4.4 筋材直径对粘结强度的影响 不同筋材直径下的极限粘结强度见图 4,由图 4 可知,试件的极限粘结强度随着筋材直径的增加而减小. 这是因为筋材与砂浆间的相对粘结面积 $S=\frac{4\pi d}{\pi d^2}=\frac{4}{d}$, 随着筋材直径 d 的增大,相对粘结面积减小,从而造成粘结强度减小.

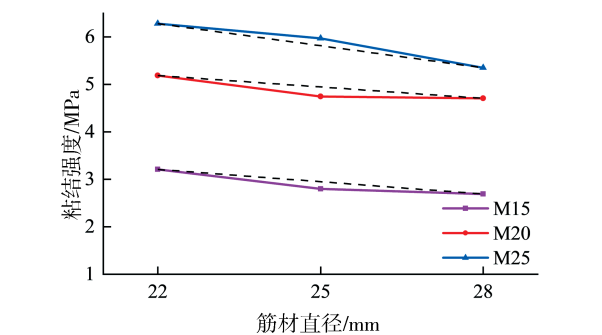


图 4 不同筋材直径下的 GFRP 筋极限粘结强度试验值
Fig. 4 Ultimate bond strengths of GFRP bars with different reinforcement diameters

3 基于 FLAC^{3D}的 GFRP 筋粘结性能

在 FLAC^{3D}中,通常采用 cable 单元模拟锚杆,通过设置灌浆体参数体现筋材与砂浆间的粘结性能,软件手册也给出了确定普通钢筋锚杆灌浆体参数的理论公式. 但由于 GFRP 筋在材料组成上与钢筋有本质上的不同,两者与砂浆间的粘结性能也

存在较大差异,因此本文采用有限差分软件 FLAC^{3D}对粘结拉拔试验进行模拟,结合室内试验成果,反演分析提出适用于 FLAC^{3D}的 GFRP 筋粘结性能参数.

3.1 拉拔试验数值模型

拉拔试验数值模型见图 5,其中砂浆试件采用实体单元进行模拟,尺寸为 0.3 m×0.3 m×0.6 m. 本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型,并在筋材自由端所在面施加法向约束. GFRP 筋采用 cable 单元进行模拟,锚固长度为 0.5 m,本构模型采用理想弹塑性模型.

在筋材自由端施加沿轴向的固定速度 v 以模拟拉拔,直至锚杆灌浆体发生破坏. 在筋材与试件交界面处设置监测点,记录锚杆拔出位移,并通过编写 fish 函数计算并记录锚杆的粘结强度,从而获得基于数值模拟试验的粘结强度-滑移量曲线.

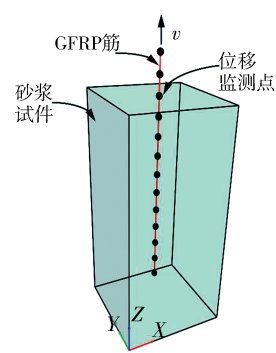


图 5 GFRP 筋拉拔试验数值模型
Fig. 5 Numerical model of pull-out tests

在 FLAC^{3D}中,筋材与砂浆间的粘结强度主要与灌浆体周长、灌浆体摩擦角、单位长度灌浆体的刚度以及单位长度灌浆体的黏聚强度等 4 个参数相关. 其中,灌浆体周长由实际钻孔直径 D 确定,本文依据工程经验将钻孔直径 D 取为 60 mm. 文献[15]指出当作用在试件上的围压为 0 时,灌浆体摩擦角对锚杆抗拔性能影响甚微,因此不做讨论. 基于以上分析,本文主要对单位长度灌浆体的刚度(下称灌浆体刚度 k_g)以及单位长度灌浆体的黏聚强度(下称灌浆体黏聚强度 c_g)进行反演分析,使数值计算得到的粘结强度-滑移量曲线与室内试验曲线尽量接近,从而得到适用于 FLAC^{3D}的 GFRP 筋粘结性能参数.

3.2 灌浆体黏聚强度反演

对于普通钢筋锚杆,当不考虑灌浆体与围岩接触面发生破坏并假设筋材与砂浆之间粘结紧密时,灌浆体黏聚强度的计算公式如下^[16]:

$$c_g = \pi d \tau_{\max} \tag{2}$$
式中, d 为筋材直径; $\tau_{\max}$ 为筋材极限粘结强度, 通常由粘结拉拔试验获得, 当缺乏试验数据时, 可取为 0.5 倍灌浆体抗压强度。

本文将 $\tau_{\max}$ 取极限粘结强度试验值时得到的灌浆体黏聚强度记为 c_{g1} , 将 $\tau_{\max}$ 取 0.5 倍砂浆抗压强度时得到的灌浆体黏聚强度记为 c_{g2} , 各试验工况下的灌浆体黏聚强度计算值及其比值见表 5。计算结果表明, 各工况下 c_{g2} 均大于 c_{g1} , 并且平均比值为 2.4。

表 5 各工况下的灌浆体黏聚强度计算值
Tab. 5 Grouting cohesions under various work conditions

工况 编号	灌浆体黏聚强度/(kN/m)		c_{g2}/c_{g1}
	c_{g1}	c_{g2}	
M15-22	225.32	518.36	2.3
M15-25	190.07	589.05	3.1
M15-28	184.73	659.73	3.6
M20-22	342.12	691.15	2.0
M20-25	357.36	785.40	2.2
M20-28	371.21	879.65	2.4
M25-22	468.60	863.94	1.8
M25-25	487.73	981.75	2.0
M25-28	436.30	1099.56	2.5

基于粘结拉拔试验结果, 选取 M20 砂浆试件进行研究。模拟过程中固定灌浆体刚度值, 将 c_{g1} 乘以不同的折减系数以研究灌浆体黏聚强度值对筋材极限粘结强度模拟值的影响, 模拟参数见表 6, 模拟结果见图 6。

表 6 M20 砂浆试件灌浆体参数
Tab. 6 Grouting parameters of M20 specimens

工况 编号	$c_g/(kN/m)$				k_g /MPa
	0.25	0.50	0.75	1.00	
M20-22	8.55e4	1.74e5	2.61e5	3.42e5	776
M20-25	8.93e4	1.79e5	2.68e5	3.57e5	889
M20-28	9.28e4	1.86e5	2.78e5	3.71e5	1020

反演结果表明, 试件极限粘结强度模拟随灌浆体黏聚强度增大而增大, 当灌浆体黏聚强度取为 c_{g1} 时, 极限粘结强度模拟值与试验值一致。另外, 由图 6 可知, 不同灌浆体黏聚强度值之比等于其对应的极限粘结强度值之比, 即:

$$\frac{c_{gi}}{c_{gj}} = \frac{\tau_i}{\tau_j} \tag{3}$$
式(3)表明, 若采用 c_{g2} 作为灌浆体黏聚强度, 则会放大 GFRP 筋在数值模拟中的极限粘结强度, 且平均放大比例为 2.4。因此, 为使得模拟结果贴合

实际, c_{g2} 应除以 2.4, 即在缺乏试验数据时, 筋材极限粘结强度应取为灌浆体抗压强度的五分之一。

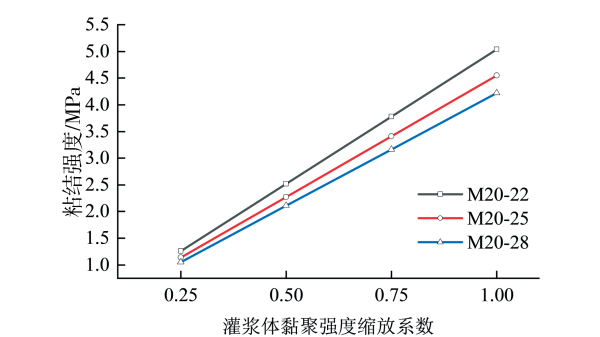


图 6 不同灌浆体黏聚强度下的极限粘结强度模拟值
Fig. 6 Ultimate bond strengths under different grouting cohesions

3.3 灌浆体刚度反演

对于普通钢筋锚杆, 假设其滑移量与抗拔力呈线性关系, 则由弹性力学可推得其灌浆体刚度计算公式为^[16]:

$$k_g = \frac{2\pi G}{\ln(1+2t/d)} \tag{4}$$

式中 G 为灌浆体的剪切模量; d 为筋材直径; t 为灌浆体厚度。

在 FLAC^{3D} 中, 由于寄宿域网格点与钻孔表面间相对剪切位移的影响, 在计算灌浆体刚度时, 通常在式(4)的基础上乘以折减系数 λ , 见式(5), 对于钢筋, 折减系数 λ 通常取 0.1。

$$k_g = \frac{2\pi G}{\ln(1+2t/d)} \cdot \lambda \tag{5}$$

为获得合理的 GFRP 筋灌浆体刚度取值, 在数值模拟中保持灌浆体黏聚强度不变, 通过改变式(5)中的折减系数以获得不同灌浆体刚度下的粘结强度-滑移量曲线, 通过与试验结果对比以确定合适的折减系数。模拟结果见图 7, 结果表明当折减系数位于(1/10, 1/15]区间时, 反演结果与试验值能有较好的贴合效果。

4 结 论

(1) 在锚固长度一定时, GFRP 筋与砂浆间的极限粘结强度与筋材直径成负相关, 与砂浆强度成正相关, 在确定 GFRP 筋锚杆加固参数时, 应综合考虑以上两个因素的影响。

(2) 当锚固长度为 0.5 m 时, M15 级砂浆试件均出现劈裂破坏, 在实际工程中应避免使用该等级砂浆作为灌浆体; 采用 M20 以及 M25 级砂浆作为灌浆体时, GFRP 筋锚杆锚固长度应大于 0.5 m。

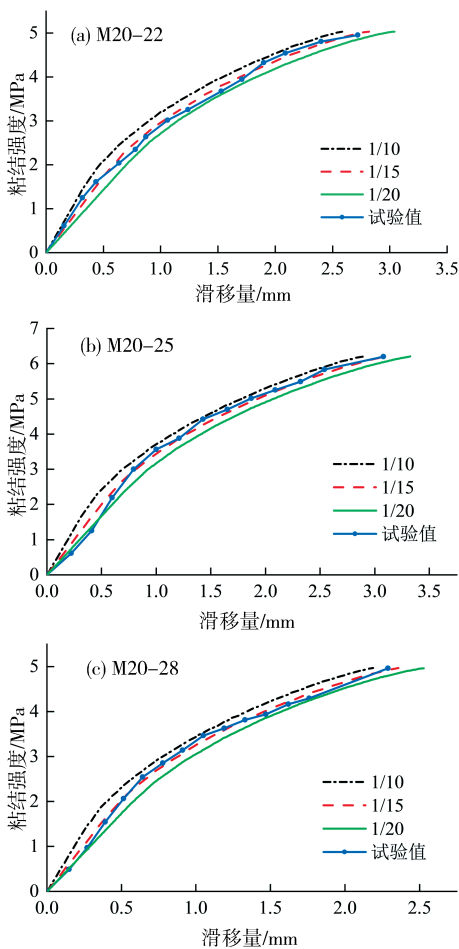


图 7 M20 砂浆试件反演结果
Fig. 7 Inversion results of M20 mortar specimens

(3) 在 $FLAC^{3D}$ 中, 灌浆体黏聚强度越大, 则极限粘结强度越大, 且灌浆体黏聚强度的比值等于其对应极限粘结强度间的比值。

(4) 计算 GFRP 筋的灌浆体黏聚强度时, 若缺少极限粘结强度试验值, 可采用灌浆体抗压强度五分之一作为极限粘结强度计算灌浆体黏聚强度。

(5) GFRP 筋的灌浆体刚度可采用基于钢筋锚杆的灌浆体刚度公式乘以折减系数获得, 折减系数位于 $[1/10, 1/15]$ 区间内。

参考文献:

[1] Lunardi P. Design and construction of tunnels anal-

ysis of controlled deformation in rock and soils (ADECO-RS) [M]. Germany: Springer, 2008.

[2] 薛伟辰, 刘华杰, 王小辉. 新型 FRP 筋粘结性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2004, 25: 104.

[3] 师晓权, 张志强, 李志业, 等. GFRP 筋与混凝土黏结性能拉拔试验研究 [J]. 铁道建筑, 2010 (10): 133.

[4] 张伟, 蒙胜益, 沈锋, 等. GFRP 锚杆与水泥混凝土粘结性能研究 [J]. 广东土木与建筑, 2018, 25: 56.

[5] 白晓宇, 匡政, 张明义, 等. 全螺纹 GFRP 抗浮锚杆与混凝土底板黏结锚固性能的试验研究 [J]. 材料导报, 2019, 33: 3035.

[6] 陈涛, 梅志荣, 李传富. 隧道玻璃纤维锚杆全断面预加固技术的应用研究 [J]. 现代隧道技术, 2008, 45: 226.

[7] 陈涛, 梅志荣. 隧道易切削锚杆全断面预加固的三维数值模拟 [J]. 现代隧道技术, 2008, 45: 22.

[8] 陈炜韬, 王明年, 张磊, 等. 预加固措施对隧道开挖稳定性的影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28: 1640.

[9] 李斌, 漆泰岳, 吴占瑞, 等. 隧道掌子面锚杆加固参数确定方法 [J]. 铁道学报, 2012, 34: 115.

[10] Li B, Hong Y, Gao B, *et al.* Numerical parametric study on stability and deformation of tunnel face reinforced with face bolts [J]. Tunn Undergr Sp Tech, 2015, 47: 73.

[11] 王秀英, 郑维翰, 张建国, 等. 软岩隧道玻纤锚杆预加固掌子面的稳定性分析 [J]. 土木工程学报, 2017, 50: 53.

[12] 王志杰, 杨宝, 高靖遥, 等. 昔格达组地层大断面隧道掌子面玻璃纤维锚杆加固参数研究 [J]. 现代隧道技术, 2019, 56: 92.

[13] 李化云. 浅埋大跨膨胀土隧道变形机理及支护力学行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

[14] GB/T 50152-2012 混凝土结构试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[15] 江文武, 徐国元, 马长年. $FLAC_{3D}$ 的锚杆拉拔数值模拟试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41: 129.

[16] Itasca Consulting Group Inc. $FLAC_{3D}$ (Version 6.0) users manual [R]. USA: Itasca Consulting Group Inc., 2019.

引用本文格式:

中 文: 张芯, 李化云, 张志强, 等. 基于拉拔试验的 GFRP 筋与砂浆粘结性能研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 044005.

英 文: Zhang X, Li H Y, Zhang Z Q, *et al.* Study on bond performance parameters of GFRP bars based on pull-out test [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 044005.