

DOI:10.11784/tdxbz201902024

水泥土中 GFRP 筋的界面黏结特性试验研究

陈昌富^{1,2}, 黄佳彬^{1,2}, 张根宝^{2,3}, 朱世民^{1,2}

(1. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 长沙 410082;

2. 湖南大学岩土工程研究所, 长沙 410082;

3. 湖南城市学院, 益阳 413000)

摘要: 加筋水泥土桩锚支护技术广泛应用于边坡与基坑工程的加固, 而常用的钢筋等金属材料筋体在富水及高腐蚀性的环境中往往会面临锈蚀的风险. 玻璃纤维增强塑料筋(GFRP 筋)因其抗拉强度高、抗腐蚀性强等特点将成为金属材料筋体的重要替代. 为揭示 GFRP 筋-水泥土界面的黏结特性, 通过 12 组不同配比下水泥土的无侧限抗压强度试验以及对应水泥土中 GFRP 筋的单元体中心拉拔试验, 获得了 GFRP 筋-水泥土界面黏结滑移曲线, 并进一步得到了界面黏结强度与水泥掺入比及土体含水量的相关关系. 基于界面黏结滑移曲线的形态特征, 对 GFRP 筋-水泥土界面的承载过程及机理进行了分析. 研究表明: GFRP 筋-水泥土界面黏结强度随土体含水量的增大而降低, 随水泥掺入比的增大而升高; GFRP 筋-水泥土界面极限黏结强度与筋体周围水泥土的无侧限抗压强度呈明显的线性关系; 界面黏结滑移曲线可分为弹性段、软化段、残余上升段、残余下降段 4 个阶段, 各阶段分界点对应的界面黏结强度与界面极限黏结强度间存在不同的比例关系, 可引入强度折减系数进行刻画. 本文研究揭示了 GFRP 筋在水泥土中的黏结强度发挥机理, 建立了基于水泥土配比的界面黏结强度预测模型, 为 GFRP 筋加筋水泥土技术的工程应用提供了理论依据.

关键词: 水泥土; GFRP 筋; 水泥掺入比; 含水量; 界面黏结强度; 预测模型

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2019)增 1-0120-08

Bond Behavior of Tensioned GFRP Tendons Embedded in Cemented Soils

Chen Changfu^{1,2}, Huang Jiabin^{1,2}, Zhang Genbao^{2,3}, Zhu Shimin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University,

Changsha 410082, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University,

Changsha 410082, China; 3. Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: Reinforced cemented soil piled or anchored structures are extensively used in slope stabilization and excavation support. However, the conventionally used metal reinforcement usually faces corrosion risk in the environment with rich water and corrosive substances. Owing to its characteristics such as high tensile strength and corrosion resistance, glass fiber reinforced polymer (GFRP) tendon tends to be a competitive alternative to metal reinforcement. To reveal the interface bond behavior of GFRP tendon embedded in cemented soils, 12 groups of tests, including uniaxial compression tests on cemented soil specimens and element pull-out tests on GFRP tendon reinforced cemented soil specimens, were conducted with varying cemented soil dosages. Moreover, the bond-slip curves for pull-out specimens, together with the correlation associating the interface bond strength with the cement and moisture contents, were obtained. On the basis of the characteristics of bond-slip curves, the bond mobilization process and mechanism of the interface between GFRP tendon and cemented soil were analyzed. Research results indicate that the interface bond strength decreased with the increase in moisture content but increased with the increase in cement content. The ultimate interface bond strength tended to be linearly correlated with the uniaxial compressive strength of cemented soil near the tendons. The bond-slip curve was characterized by four consecutive stages, i.e., elastic, strain-softening, re-

收稿日期: 2019-02-18; 修回日期: 2019-03-20.

作者简介: 陈昌富(1963—), 男, 博士, 教授, cfchen@163.com.

通信作者: 张根宝, gbzhang@hnu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41572298).

sidual-ascending, and residual-descending stages. The interface bond strengths corresponding to the demarcation points of various stages were correlated with the ultimate interface bond strength in different proportions, which can be characterized by reduction factors. The research in this paper uncovers the mobilizing mechanism of bond strength of GFRP tendons embedded in cemented soils and establishes a prediction model for the interface bond strength based on cemented soil dosage, providing theoretical reference for engineering applications of GFRP tendons reinforced cemented soil structures.

Keywords: cemented soil; GFRP tendon; cement content; moisture content; interface bond strength; prediction model

加筋水泥土桩锚支护技术常用于软土地区的软基处理和建筑基坑支挡,其在珠三角和长三角地区的实际工程应用效果已有报道^[1-2],相应的设计实践已有行业规范指导^[3].在腐蚀性物质浓度较高以及地下水富集的区域,由于钢筋锈蚀破坏的风险较大,锚杆锚固技术实践中通常采用玻璃纤维增强塑料筋(以下简称 GFRP 筋)来替代钢筋作为锚杆筋体,以充分利用其抗腐蚀性能好、抗拉强度高、重量轻等特点^[4].虽然加筋水泥土桩锚技术的应用实践中尚未见 GFRP 筋用作筋体的报道,但是考虑到软土区域地层富水条件以及腐蚀性物质分布问题也较为突出,GFRP 筋作为加筋水泥土桩锚技术中的一种筋体选择具有重要的应用前景.

实际工程中,土层锚杆失效的原因多数情况下并不是加筋体或注浆体的强度破坏,而在于加筋体与注浆体界面或注浆体与周围土体界面上产生了较大滑移^[3],即土层灌浆锚杆的抗拔承载力取决于较薄弱的锚固界面强度.同理,可以认为对于采用 GFRP 筋作为加筋体的水泥土桩锚结构,其承载性能的确定依赖于对 GFRP 筋-水泥土界面的黏结特性的掌握.关于 GFRP 筋在环境介质中黏结强度的研究报道主要集中在混凝土介质与水泥砂浆介质^[5]两个领域,并重点考察筋体表面参数对界面黏结强度的影响^[6-7],以及界面黏结滑移模型的建立与评价^[8].关于水泥土中加筋体的黏结性能研究则主要针对普通带肋钢筋^[9-10]或钢管^[11-12]以及 SMW 工法中的型钢^[2, 13].关于 GFRP 筋体材料在水泥土介质中黏结性能的研究尚未见文献报道.

考虑到水泥土的强度主要受到水泥掺入比、土体含水量、龄期等因素的影响^[14-16],类比可知,GFRP 筋在水泥土介质中的黏结强度必然受到水泥土配比的影响.鉴于此,本文将水泥掺入比及土体含水量作为试验参数,采用单元拉拔试验对 GFRP 筋在水泥土介质中的黏结性能进行研究,探讨了水泥土配比对 GFRP 筋-水泥土界面黏结强度的影响规律,并对 GFRP 筋-水泥土界面进行了黏结滑移的全过程分

析.研究结果有助于深入了解 GFRP 筋水泥土锚杆的承载机理,可为加筋水泥土桩锚结构的设计计算提供必要依据.

1 GFRP 筋-水泥土黏结滑移试验

1.1 试验材料

试验中制备水泥土试样和加筋水泥土拉拔试样主要用到土体、水泥以及加筋体三种材料.试验用土取自湖南省长沙市湘江与靳江河交汇处的淤泥质软土;水泥为 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥;加筋体为商用 GFRP 筋;三种材料的相关信息如表 1 所示.

1.2 试验装置

本试验使用的拉拔装置如图 1 所示^[17],配置了两个力传感器,量程分别为 3 kN(精度为 0.001 kN)和 30 kN(精度为 0.01 kN).在对拉拔试样进行拉拔力加载时须根据水泥土试样的无侧限抗压强度选用相应的力传感器,以保证拉拔力的量测精度.轴向位移通过与试样底座相连的位移计测得,其量程为 25 mm,精度为 0.01 mm,该量程对应的拉拔位移可保证拉拔试样已完成界面剪切破坏.

表 1 试验材料的相关信息

Tab.1 Relevant information of test materials

性质	信息
土样	
比重	2.69
液限/%	46.8
塑限/%	22.2
塑性指数/%	24.6
不均匀系数	5.0
水泥	
抗压强度/MPa	42.5(28 d 龄期)
GFRP 筋	
公称直径/mm	16
肋距/mm	10.1
抗拉强度/MPa	466
抗剪强度/MPa	127
弹性模量/GPa	40

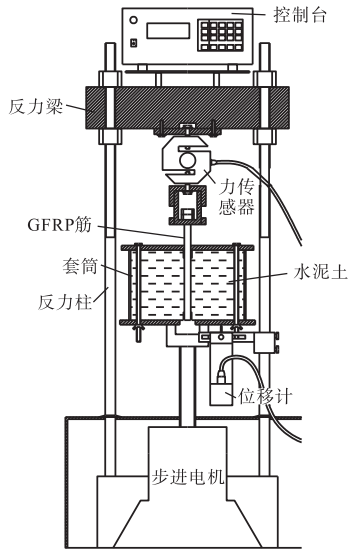


图 1 单元拉拔试验采用的拉拔装置示意

Fig.1 Schematic of pull-out devices used in element pull-out test

本试验采用 CMT4204 微机控制万能试验机(量程为 19 kN,精度为 0.001 kN)和 TYB600 型压力测试机(量程为 600 kN,精度为 0.01 kN)进行混凝土试样的无侧限抗压强度测试. 混凝土立方体试样尺寸为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm, 试验操作按照混凝土无侧限抗压强度试验相关规程进行.

1.3 试件制备

根据混凝土设计配比(如表 2)将相应质量的干土和水泥加水配置成混凝土立方体试样和拉拔试样. 其中试样的分组编号为该组试样的混凝土配比, 如编号 6018 表示制备混凝土时所加水的质量为干土质量的 60%, 所加水泥的质量为干土与水和质量的 18%.

采用机械搅拌, 振捣后装模, 密封袋封存后置于恒温地下室中养护. 养护一定天数后, 将试样取出进行加载测试.

表 2 试验结果统计

Tab.2 Statistics of test results

编号	含水量 w/%	水泥掺入比 α/%	破坏椎体高度 Δl/mm	黏结长度修正系数 α _l	极限黏结强度 τ _f /kPa	无侧限抗压强度 f _{cu} /kPa
6018	60	18	8	1.111	1 649.57	2 548
6024	60	24	10	1.143	2 628.90	4 949
6030	60	30	6	1.081	4 312.24	7 687
7018	70	18	10	1.143	491.96	1 506
7024	70	24	12	1.176	1 480.38	2 837
7030	70	30	9	1.127	2 541.44	4 969
8018	80	18	20	1.333	306.70	936
8024	80	24	13	1.194	683.24	1 984
8030	80	30	8	1.111	1 337.34	3 569
9018	90	18	10	1.143	326.27	863
9024	90	24	15	1.231	520.62	1 608
9030	90	30	12	1.176	727.02	2 401

拉拔试样的示意图与尺寸如图 2 所示. 试样为圆柱形, GFRP 筋与混凝土的黏结长度为 5 倍的筋体直径, 试件上端留有 20 mm 长度亚克力套管, 以防止混凝土顶部发生局部受压; 下端同样留有 20 mm 长套管, 以保证拉拔过程中黏结段长度恒定. 套管将在试件初步硬化后移除.

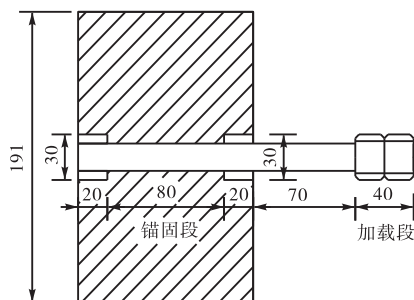


图 2 拉拔试样的示意(单位:mm)

Fig.2 Schematic of pull-out specimen(unit:mm)

2 GFRP 筋-混凝土界面破坏形态

试验中对 12 个不同混凝土配比的拉拔试样进行了拉拔. 全部试样均发生筋体的拔出破坏, 典型破坏形态如图 3 所示. GFRP 筋体保持完整, 肋间残留有被剪坏的水泥, 混凝土一侧孔壁有明显刮痕.



图 3 GFRP 筋-混凝土界面破坏形态

Fig.3 Failure mode of GFRP tendon-cemented soil interface

GFRP 筋拔出时,水泥土发生拉剪破坏,形成直径与亚克力套管直径相同的锥体,如图 4 所示,图中 l_0 为无黏结段长度, l_1 为锚固段长度, Δl 为锚固段前端水泥土缺口长度,即椎体高度. 椎体形成时并未监测到拉拔位移,可认为界面剪切发生于椎体破坏之后,二者并无相互影响. 水泥土椎体破坏引起实际黏结段长度的减小,在拉拔结束后,将试样劈开,用直尺测量锚固段顶部的水泥土缺口高度,取两侧测量值的均值为最终结果,测量精度为 1 mm,结果如表 2 所示.

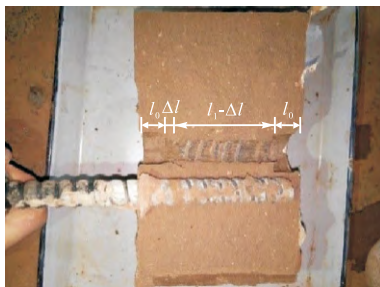


图 4 黏结段顶部的水泥土椎体

Fig.4 Cemented-soil cone at the loaded end of bond section

3 试验结果

3.1 黏结强度计算

GFRP 筋与水泥土的黏结长度较小,根据单元拉拔试验原理^[17],可认为黏结应力沿黏结长度均匀分布,可由式(1)计算:

$$\tau = \alpha_1 \frac{F}{\pi d l_1} \quad (1)$$

式中, F 为拉拔力; d 为 GFRP 筋的公称直径; α_1 为黏结段长度修正系数,可根据水泥土椎体高度按式(2)计算:

$$\alpha_1 = \frac{l_1}{l_1 - \Delta l} \quad (2)$$

3.2 黏结滑移计算

拉拔过程中 GFRP 筋未黏结段将产生拉伸变形,试验量测到的拉拔位移须将该段变形减去以获得实际的界面滑移量:

$$s = s_m - \frac{F l_2}{E A_1} \quad (3)$$

式中, s_m 为位移计量测值; l_2 为 GFRP 筋未黏结段长度; E 为 GFRP 筋弹性模量; A_1 为 GFRP 筋的横截面积,按 GFRP 筋的公称直径计算.

3.3 水泥土无侧限抗压强度

采用制备拉拔试样的同批次水泥土制备 3 个水泥土立方体块,并与拉拔试样置于同一环境中养护,

并与拉拔试验同一天进行水泥土立方体无侧限抗压试验. 采用三个水泥土立方体试样的无侧限抗压强度均值作为拉拔试样中加筋体周围水泥土的强度代表值,计算公式如下:

$$f_{cu} = \frac{N}{A_c} \quad (4)$$

式中, N 为加载过程中的最大轴向压力(塑性破坏时取 10% 压缩变形对应的轴向压力); A_c 为水泥土立方体的受压面积.

3.4 试验结果统计

本次试验的 12 组试样(包含拉拔试样和水泥土立方体试样)的试验结果汇总如表 2 所示.

4 含水量对黏结强度的影响

本试验中含水量取值分别为 60%、70%、80%、90%,将具有相同水泥掺入比的拉拔试样的极限黏结强度绘于一条曲线上,如图 5 所示.

由图 5 可知,在其他条件相同的情况下, GFRP 筋的极限黏结强度随含水量的增大而降低,且降低的速度逐渐变缓.

本试验采用的水泥掺入比有 18%、24%、30% 三个水平,将相同含水量的拉拔试样的极限黏结强度绘于一条曲线上,如图 6 所示. 由图 6 可知,在其他条件相同的情况下, GFRP 筋的极限黏结强度随掺入比的增大而升高,且提高的速度逐渐增快.

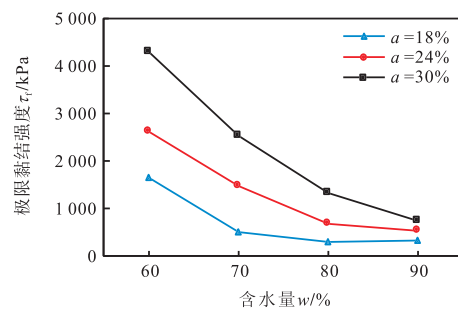


图 5 极限黏结强度随含水量变化

Fig.5 Ultimate bond strength versus moisture content

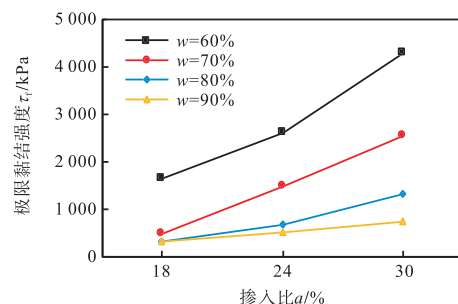


图 6 极限黏结强度随水泥掺入比变化

Fig.6 Ultimate bond strength versus cement content

5 极限黏结强度回归分析

5.1 无侧限抗压强度与极限黏结强度的关系

对表 2 数据分析发现,水泥土中 GFRP 筋的极限黏结强度 τ_f 与水泥土立方体的无侧限抗压强度 f_{cu} 呈线性相关(如图 7),对应的线性回归公式为

$$\tau_f = 0.5089f_{cu} \tag{5}$$

回归分析的确系数 R^2 达到 0.9334,表明线性关系较强,试验结果可信度较高.

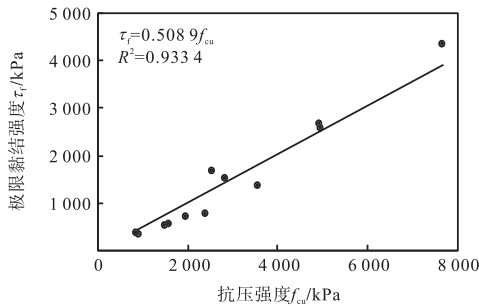


图 7 极限黏结强度与抗压强度的关系

Fig.7 Ultimate bond strength versus compressive strength

5.2 极限黏结强度经验公式

对表 2 数据进行回归分析,发现极限黏结强度 τ_f 与水泥掺入比 a 、含水量 w 之间存在幂函数关系,对应的幂函数拟合公式如下:

$$\tau_f = 7424.3229w^{-4.1512}a^{2.1971} \tag{6}$$

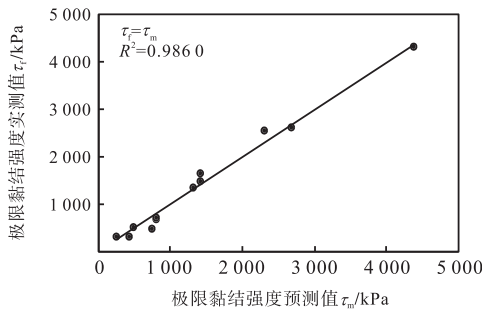


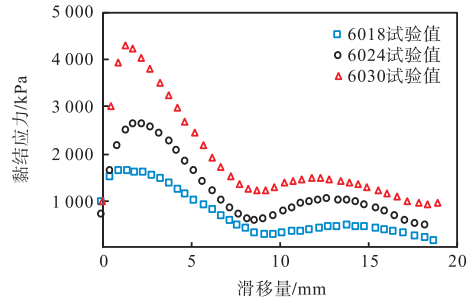
图 8 极限黏结强度预测效果

Fig.8 Prediction effect for ultimate bond strength

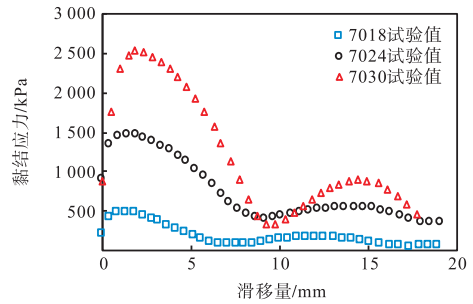
采用式(6)预测得到的界面极限黏结强度与实测值对比,确定系数 $R^2 = 0.9860$,如图 8 所示,回归效果良好.

6 黏结滑移过程分析

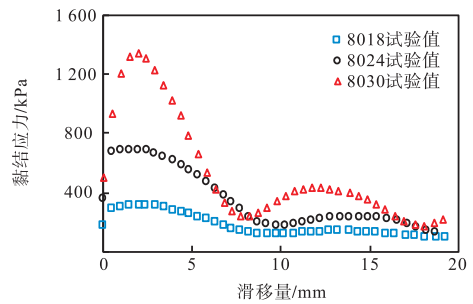
对 12 个试样进行拉拔试验得到的黏结滑移曲线如图 9 所示.



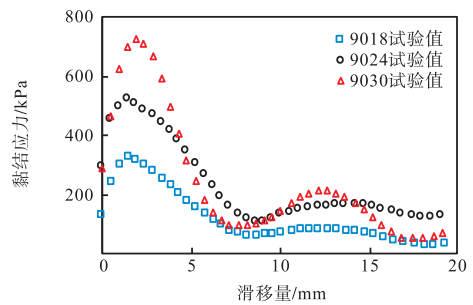
(a) 含水量 60%



(b) 含水量 70%



(c) 含水量 80%



(d) 含水量 90%

图 9 界面黏结滑移曲线

Fig.9 Interface bond-slip curves

图 9 的黏结滑移曲线具有相似的形态特征,其典型示意图如图 10 所示.基于拉拔过程中试样的破坏状态,可将界面黏结滑移过程分为以下四个阶段.

上升段(OA):拉拔初期 GFRP 筋与水泥土协调变形,起始点附近曲线近似为直线段;随着荷载增加,试件进入塑性变形阶段,同时发生相对滑移,如

图 11(a)所示. 随着径向压力的增大,塑性区不断扩大,当塑性区贯穿水泥土凸起时,形成破坏面 1,同时荷载达到最大值,如图 11(b)所示.

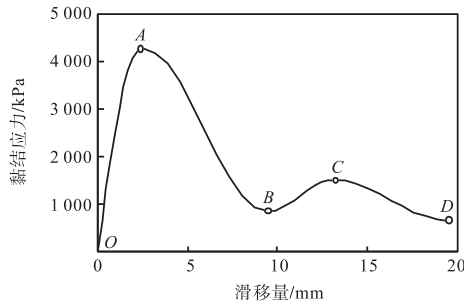


图 10 黏结滑移曲线典型示意

Fig.10 Typical schematic for bond-slip curve

下降段(AB): GFRP 筋沿破坏面 1 运动,径向压力减小,荷载不断降低,由于肋前碎土堆积,当筋体运动到略小于 1 个肋长的位置时,荷载到达谷值,如图 11(c)所示.

残余上升段(BC): GFRP 筋沿碎土层表面运动,径向压力增加,水泥土突起再次被剪碎,当破坏面 2 形成时,荷载达到残余峰值点,如图 11(d)所示.

残余下降段(CD): GFRP 筋沿破坏面 1 运动,径向压力减小,荷载不断降低,由于肋前碎土堆积,当筋体移动到约为两个肋距的位置时,荷载到达残余谷值点,如图 11(e)所示.

基于上述分析,将各阶段分界点的黏结应力和滑移量信息进行统计,结果如表 3 所示.需要说明的是,编号“7030”试样的试验曲线对应的 D 点滑移量已经超过了加载装置的拉拔位移限值,因而未能记录到有效的数据.

进一步分析表 3 数据发现,极限黏结强度 τ_f 与残

余黏结强度 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 之间存在明显的线性相关关系.

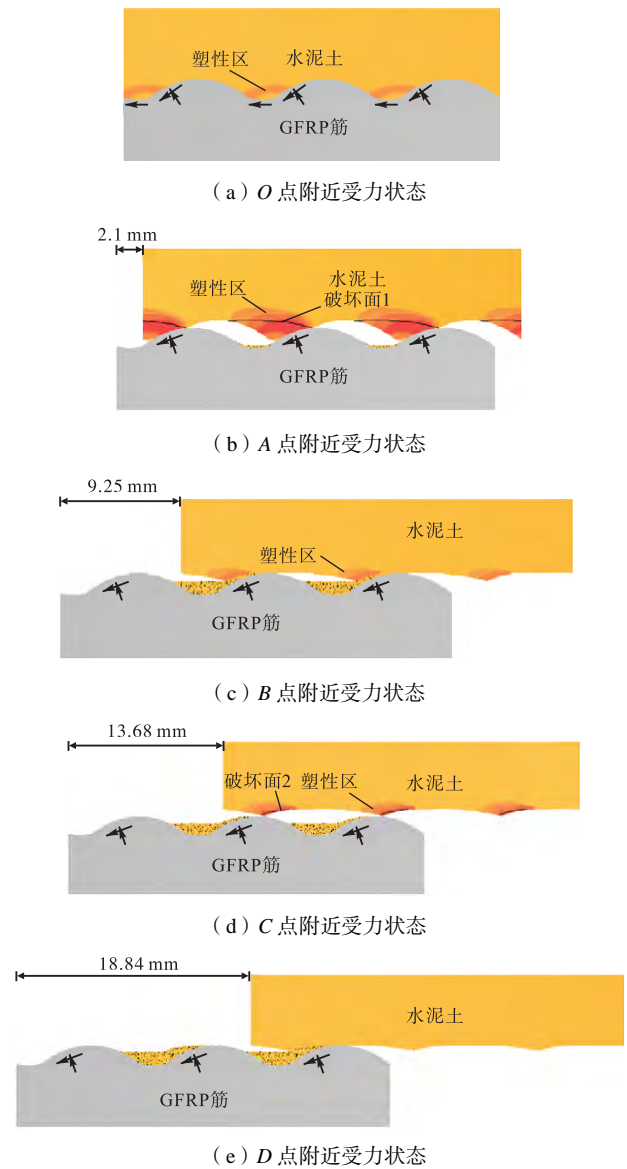


图 11 各分界点受力状态示意

Fig.11 Schematic of force states at demarcation points

表 3 分界点信息统计

Tab.3 Statistics of information at demarcation points

编号	分界点 A		分界点 B		分界点 C		分界点 D	
	τ_f /kPa	s_f /mm	τ_1 /kPa	s_1 /mm	τ_2 /kPa	s_2 /mm	τ_3 /kPa	s_3 /mm
6018	1 649.57	1.33	279.07	9.79	469.73	14.48	140.92	19.79
6024	2 628.90	2.40	588.30	9.28	1 028.82	13.46	463.25	19.08
6030	4 312.24	1.92	1 244.74	9.05	1 489.39	12.14	946.33	18.76
7018	491.96	1.83	82.42	8.05	183.31	12.34	58.26	17.95
7024	1 480.38	1.84	409.59	9.38	558.80	14.98	362.78	19.09
7030	2 541.44	2.50	333.44	9.99	896.65	14.96	—	—
8018	306.70	2.49	109.09	10.20	131.63	13.90	91.18	19.10
8024	683.24	2.37	171.63	10.19	230.12	14.69	119.37	19.50
8030	1 337.34	2.15	237.63	8.39	428.28	12.08	174.08	18.49
9018	326.27	1.99	59.68	9.00	81.00	13.20	27.00	19.00
9024	520.62	1.83	108.04	9.25	167.42	15.04	120.28	18.55
9030	727.02	2.52	95.083	8.05	214.45	12.94	52.08	17.95

由于界面黏结强度主要由水泥土对 GFRP 筋的径向约束控制,对应的约束效果(即界面法向应力)与界面的表面形状有关.由前述黏结滑移过程分析可知,黏结界面形状在极限强度 τ_f 处(A点)已基本确定,后续滑移发展均在此基础上进行,因此可将极限黏结强度作为基准值,引入强度折减系数以刻画黏结滑移曲线上各分界点对应的强度发展变化,具体公式如下:

$$\tau_i = \beta_i \tau_f \quad (7)$$

式中, τ_i 为第 i 个分界点对应的界面黏结强度; β_i 为对应的强度折减系数.

此外,各分界点对应的滑移量 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_f 也具有较好的统计规律.根据对不同试样的黏结滑移曲线的分界点信息进行统计分析,可以给出各分界点对应的折减系数以及滑移量的建议值,如表 4 所示.

表 4 各分界点对应的折减系数与滑移量的建议值

Tab.4 Recommendation values of reduction factor and slip corresponding to demarcation points

	A 点	B 点	C 点	D 点
折减系数 β_i	1	0.234 9	0.350 2	0.193 1
R^2	—	0.874 4	0.985 3	0.903 7
滑移量/mm	2.10	9.22	13.68	18.84
变异系数	0.168 8	0.079 0	0.080 2	0.029 3

7 结 论

本文介绍了不同水泥土配比下的 GFRP 筋-水泥土界面黏结特性测试.通过对加筋水泥土试样的单元拉拔试验以及对应水泥土试样的无侧限压缩试验,获得了界面黏结强度与水泥土抗压强度以及水泥土配比的关系.基于试验现象观察,通过对界面黏结滑移曲线的特征点信息进行统计分析,给出了水泥土中 GFRP 筋在拉拔荷载作用下的界面承载全过程定性分析.本文研究工作的主要结论有:

(1) GFRP 筋-水泥土界面黏结强度与同一配比下水泥土的无侧限抗压强度呈明显线性比例关系.

(2) GFRP 筋-水泥土界面黏结强度与水泥掺入比和含水量表现为幂函数相关关系.

(3) 本文获得的黏结滑移曲线可分为上升段、下降段、残余上升段、残余下降段四个阶段;可引入强度折减系数来刻画各分界点黏结强度与极限黏结强度的关系.

(4) 水泥土中 GFRP 筋的极限黏结强度可通过水泥土无侧限抗压强度或水泥土配比(水泥掺入量与含水量)预测得到.设计计算中可根据已知参数选择相应的预测模型估算筋体-水泥土界面的极限黏结强度.

参考文献:

- [1] 孙超, 郭浩天. 深基坑支护新技术现状及展望[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3): 104-117.
Sun Chao, Guo Haotian. Present situation and prospect of new technology for deep foundation pit support[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3): 104-117(in Chinese).
- [2] 马 邴, 徐光黎. SMW + 水泥土桩锚结构在基坑工程中的应用—以武汉长江 I 级阶地基坑工程为例[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 934-938, 964.
Ma Yun, Xu Guangli. Application of SMW and pile anchor retaining structure in a soft soil excavation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 934-938, 964(in Chinese).
- [3] 北京交通大学隧道与岩土工程研究所. 加筋水泥土桩锚支护技术规程(CECS147)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
Institute of Tunnel and Geotechnical Engineering, Beijing Jiaotong University. Technical Specification for Retaining and Protection with Reinforced Cement Soil Piles and Anchors(CECS147)[S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [4] 高丹盈, 朱海堂, 谢晶晶. 纤维增强塑料筋锚杆及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2205-2210.
Gao Danying, Zhu Haitang, Xie Jingjing. Applications of fiber reinforced plastic (FRP)bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2205-2210(in Chinese).
- [5] 薛伟辰. 非金属锚杆界面黏结强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 206-209.
Xue Weichen. Experimental studies on interface bond strength of non-metallic anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 206-209(in Chinese).
- [6] 罗小勇, 唐谢兴, 匡亚川, 等. GFRP 锚杆锚固黏结性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(3): 521-527.
Luo Xiaoyong, Tang Xiexing, Kuang Yachuan, et al. Test research on anchorage adhesive property of GFRP anchor bolt[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(3): 521-527(in Chinese).
- [7] 郝庆多, 王言磊, 侯吉林, 等. GFRP 带肋筋黏结性能试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 158-165, 179.

- Hao Qingduo, Wang Yanlei, Hou Jilin, et al. Experimental study on bond behavior of GFRP ribbed re-bars[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(10): 158-165, 179(in Chinese).
- [8] 高丹盈, 朱海堂, 谢晶晶. 纤维增强塑料筋混凝土黏结滑移本构模型[J]. *工业建筑*, 2003, 33(7): 41-43, 82.
- Gao Danying, Zhu Haitang, Xie Jingjing. The constitutive models for bond slip relation between FRP rebars and concrete[J]. *Industrial Construction*, 2003, 33(7): 41-43, 82(in Chinese).
- [9] Chen C, Zhang G, Zornberg J G, et al. Interface behavior of tensioned bars embedded in cement-soil mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 840-853.
- [10] 刘全林, 杨有莲. 加筋水泥土斜锚桩基坑维护结构的稳定性分析及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(S2): 5331-5336.
- Liu Quanlin, Yang Youlian. Stability analysis of inclined anchorage pile for reinforced cement-soil in bracing excavation structure and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(S2): 5331-5336(in Chinese).
- [11] 刘干斌, 叶荣华, 沈学毅, 等. 搅拌水泥土锚杆作用机理及基坑支护工程应用[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(S2): 363-366.
- Liu Ganbin, Ye Ronghua, Shen Xueyi, et al. Mechanism of cement-soil mixing anchor and application in foundation pit support project[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(S2): 363-366(in Chinese).
- [12] 刘干斌, 沈学毅, 苏舟, 等. 搅拌水泥土锚杆抗拔变形试验改进研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(S1): 78-82.
- Liu Ganbin, Shen Xueyi, Su Zhou, et al. Improvement test of uplift resistance and deformation of cement-soil mixing anchor[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 78-82(in Chinese).
- [13] 于宁, 朱合华, 梁仁旺. 插钢筋水泥土力学性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(11): 78-84.
- Yu Ning, Zhu Hehua, Liang Renwang. Experimental study on mechanical properties of reinforced cemented-soil[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(11): 78-84(in Chinese).
- [14] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj T S. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clay with Abrams' law as a basis[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(4): 439-444.
- [15] Chew S H, Kamruzzaman A H M, Lee F H. Physico-chemical and engineering behavior of cement treated clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(7): 696-706.
- [16] Åhnberg H. Strength of Stabilized Soils-A Laboratory Study on Clays and Organic Soils Stabilized with Different Types of Binder[D]. Sweden: Lund University, 2006.
- [17] 陈昌富, 梁冠亭, 汤宇, 等. 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(6): 1115-1122.
- Chen Changfu, Liang Guanting, Tang Yu, et al. Anchoring solid-soil interface behavior using a novel laboratory testing technique[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(6): 1115-1122(in Chinese).

(责任编辑:武立有)