

工程地质学报
Journal of Engineering Geology
ISSN 1004-9665, CN 11-3249/P

《工程地质学报》网络首发论文

题目: 基于离散元的 GFRP 筋-水泥土界面黏结特性分析
作者: 张根宝, 何仕林, 陈昌富, 徐长节, 毛凤山
DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0629
收稿日期: 2021-09-13
网络首发日期: 2022-04-28
引用格式: 张根宝, 何仕林, 陈昌富, 徐长节, 毛凤山. 基于离散元的 GFRP 筋-水泥土界面黏结特性分析[J/OL]. 工程地质学报.
<https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2021-0629>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于离散元的 GFRP 筋-水泥土界面黏结特性分析

张根宝^{①④}，何仕林^{②③}，陈昌富^{②③}，徐长节^⑤，毛凤山^{②③}

(① 湖南城市学院土木工程学院，益阳 413000，中国)

(② 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室，长沙 410082，中国)

(③ 湖南大学土木工程学院，长沙 410082，中国)

(④ 城市地下基础设施结构安全与防灾湖南省工程研究中心，益阳 413000，中国)

(⑤ 江西省地下空间技术开发工程研究中心，南昌 330013，中国)

摘要 加筋水泥土结构的承载性能取决于筋体-水泥土界面的黏结性能。为深入探究 GFRP 筋-水泥土界面黏结性能的发挥机制，采用国产矩阵离散元软件 MatDEM 对水泥土中 GFRP 筋拉拔试验进行了数值模拟。首先，将数值模拟得到的荷载-位移曲线与试验结果进行对比，验证了数值模型的可靠性；然后，通过模拟计算分析筋体-水泥土界面位移场演化、剪切带发展及胶结破坏演化规律，从细观上揭示了 GFRP 筋-水泥土界面黏结滑移机理；最后，通过参数分析研究了 GFRP 筋体肋形态特征对界面黏结滑移特性的影响规律。研究表明：(1) GFRP 筋-水泥土界面黏结滑移全过程发生两次剪切破坏，当拉拔位移至 4mm 时发生第一次剪切破坏，当拉拔位移为 10mm 时发生第二次剪切破坏；(2) 剪切带厚度与剪切颗粒数随拉拔位移的增加总体呈上升趋势，在拉拔初期上升趋势相对明显，随着界面滑移发展上升趋势逐渐减缓；(3) 胶结破坏点随着拉拔位移的增加逐渐从界面处沿径向向两侧水泥土扩展，胶结破坏曲线与荷载-位移曲线都存在分段现象，且二者之间存在对应关系。(4) GFRP 筋体的肋距主要影响界面荷载峰值和谷值对应的拉拔位移，肋高对界面荷载峰值和谷值显著影响，且在恒定肋距下，存在最优肋高可最大程度调动界面黏结强度。研究成果可以为加筋水泥土结构界面承载设计计算实践提供必要参考。

关键词 水泥土；GFRP 筋；离散元；剪切带；界面滑移；参数分析

中图分类号：P642.3 **文献标识码**：A doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0629

DISCRETE ELEMENT METHOD-BASED CHARACTERIZATION OF INTERFACE BOND BEHAVIOR OF GFRP TENDON EMBEDDED IN CEMENTED SOILS

ZHANG Genbao^{①④}，HE Shilin^{②③}，CHEN Changfu^{②③}，XU Changjie^⑤，MAO Fengshan^{②③}

(① Hunan City University, Yiyang 413000, China)

(② Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

(③ College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(④ Hunan Engineering Research Center for Structural Safety and Disaster Prevention of Urban Underground Infrastructure, Yiyang 413000, China)

(⑤ Jiangxi Engineering Research Centre for Development of Underground Space Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract The load-bearing performance of the reinforced cement-soil structure depends on the interface bond behavior of the reinforcement embedded in cement soils. Aiming to investigate the mobilization mechanism of interface bond strength between the GFRP tendon and cemented soils, the element pullout test of GFRP tendon embedded in cement soil was modeled numerically using domestic matrix discrete element software MatDEM. First, the load-displacement curve obtained by the numerical simulation was compared with the experimental results to validate the reliability of the numerical modelling; second, the evolution of the displacement field of the reinforcement-soil interface, the development of the shear band, and the evolution of the cementation failure were

*收稿日期：2021 - 09 - 13；修回日期：2022 - 01 - 02。

基金项目：国家杰出青年科学基金项目（资助号：51725802），国家自然科学基金项目（资助号：51878276，51908210，51978254），湖南省自然科学基金项目（资助号：2020JJ5024），长沙市科技项目（资助号：kq2004013）

This research is supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No.51725802), National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51878276, 51908210, 51978254), Natural Science Foundation of Hunan(Grant No.2020JJ5024) and Science and Technology Plan of Changsha (Grant No.kq2004013).

第一作者简介：张根宝(1988 -)，男，博士，硕士生导师，主要从事岩土锚固方面的教学和科研工作。E-mail: genbao@hncu.edu.cn

通讯作者简介：陈昌富(1963 -)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事边坡工程及支护工程、地基处理等方面的研究。E-mail: cfchen@163.com

interpreted to characterize the interface bond-slip behavior of GFRP tendon embedded in cemented soils from the microscopic view; Lastly, the impact of rib geometric features on the interface bond-slip behavior was studied in parametric sensitivity analysis. The concluded remarks are obtained in this work as follows: (1) the tendons-soil interface experiences shear failure twice in the pullout process of GFRP tendon embedded in cemented soils corresponding to the pullout displacement of 4mm and 10mm, respectively; (2) the thickness of shear band and the number of particles in shear condition increase along with the development of pullout displacement, but the increasing trend slows down over the increasing interface slip; (3) the cementation failure of particles develops from the interface to the neighboring cemented soils radially over the increase of pullout displacement, and in a stagewise trend corresponding to that of the pullout load-displacement response. (4) the magnitude of rib spacing affects the pullout displacement corresponding to each characterizing load, while the magnitude of rib height affects the magnitude of each characterizing load, and there is an optimal rib height for a constant rib spacing which can mobilize to the largest extent the interface bond strength. The findings in this work can provide insights to the design practice of load-bearing interface for the reinforced cement-soil structures.

Key words Cemented soil; GFRP tendon; Discrete element; Shear band; Interface slip; Parametric sensitivity analysis

0 引言

加筋水泥土桩锚结构在软土地基加固和建筑基坑支护等领域应用逐渐增多,应用效果获得了业界的认可(孙超等,2018;王炳等,2019)。工程中通常用钢筋作为加筋水泥土结构的加筋体,由于水泥土适用地层的土体常具有一定的腐蚀性,导致钢筋锈蚀,从而影响结构的使用寿命。相比于钢筋,GFRP(玻璃纤维增强塑料)筋具有抗腐蚀性能好、抗拉强度高、抗磁性能好、重量轻等优点(朱鸿鹄等,2012),将GFRP筋替代钢筋作为加筋体具有重要的应用前景。

实际工程中,锚固系统失效通常是由岩土体与锚固体界面产生的滑移破坏导致的(尤春安等,2009),加筋水泥土结构的承载性能主要取决于水泥土与加筋体的界面黏结性能。由于缺少关于水泥土与GFRP筋界面黏结性能的设计准则,将GFRP筋作为加筋体的加筋水泥土结构还未在实际工程中得到应用。因此,开展GFRP筋-水泥土界面黏结性能的研究具有重要的理论意义和应用价值。

目前,大部分学者都是通过现场及室内拉拔试验来研究筋体-岩土体界面的黏结性能。洪成雨等(2017)通过现场拉拔试验指出土钉表面粗糙度、灌浆压力及上覆土压力是影响界面摩阻力的关键参数,叶新宇等(2021)通过室内模型试验指出注浆压密效应是影响土钉抗拔性能的重要因素。张冠军等(2002),于宁等(2004),Chen et al.(2018)通过室内拉拔试验对筋体-水泥土界面的黏结性能进行了研究,指出水泥土的抗压强度、掺入比、龄期以及筋体的表面形态对筋体-水泥土界面的黏结性能有重要影响。关于GFRP筋在不同黏结介质中的黏结性能研究主要集中在混凝土、风化岩(白晓宇

等,2018,2020)以及砂浆(薛伟辰等,2005;张景科等,2014)等方面,着重考虑了GFRP筋的直径、肋距等表面形态特征对界面黏结强度的影响(郝庆多等,2008;罗小勇等,2015),并基于回归分析建立了界面黏结滑移模型(陆新征等,2005;Chen et al.,2020)。关于GFRP筋在水泥土介质中黏结性能的研究报道较少,主要通过水泥土中GFRP筋拉拔试验得到界面黏结滑移曲线,并基于拉拔破坏后筋体附着水泥土的形态特征对筋体-水泥土界面承载过程进行初步分析(陈昌富等,2019,2020)。

上述研究的关注点侧重于筋体-岩土体界面的黏结强度发展规律,对于界面黏结强度发挥机制,即界面黏结滑移过程中黏结体应力变形和剪切带演化等,未做深入分析。GFRP筋-水泥土界面的黏结性能涉及到水泥土与GFRP筋两种材料之间的复杂相互作用,通过室内或现场的拉拔试验仅能在宏观上获得GFRP筋-水泥土的界面黏结滑移曲线,无法从细观上获取GFRP筋-水泥土黏结滑移过程中筋体与土体共同受力变形的特征。数值仿真方法可以从内部揭示材料相互作用机制,能够为试验研究提供有效补充。因此,已有学者采用数值模型对结构体-岩土体界面承载机理进行了研究,主要包括桩-土界面(钱建固等,2015,2016)、加筋体-混凝土界面(王海龙等,2011)以及岩石锚杆界面(车纳等,2018;方威等,2018)等。大部分数值模拟是采用有限元法、有限差分法等方法,无法准确描述界面的接触关系以及变形破坏的细观机理。离散元法能有效地模拟材料的宏细观力学响应及变形破坏过程(Potyondy et al.,2004),但单元数量受到计算效率的限制。国产离散元软件MatDEM依靠图形处理器在平衡单元数量和计算效率方面性能优良,成为岩土和地质工程领域离散元模拟的重要工具(刘春等,2020)。然而,有关GFRP筋-水泥土界

面黏结特性方面的数值仿真研究，目前未见文献报道。

为此，本文采用离散元数值模拟方法，对 GFRP 筋在水泥土中的拉拔试验和界面黏结滑移响应进行了全过程数值仿真，重点考察了界面黏结滑移过程中界面位移场演化、剪切带发展规律以及胶结破坏演化等在室内试验中无法获取的关键特征和信息，从细观上揭示了 GFRP 筋-水泥土界面黏结滑移破坏机制，并通过参数分析研究了筋体形态特征对界面黏结特性的影响规律。

1 水泥土中 GFRP 筋拉拔试验离散元模拟

1.1 离散元模型建立

为深入分析 GFRP 筋-水泥土界面黏结滑移特性，采用国产矩阵离散元软件 MatDEM 对陈昌富等（2019）开展的水泥土中 GFRP 筋单元体拉拔试验进行数值模拟。单元体试验（陈昌富，2019）中所制备的单元体试样如图 1 所示，基于单元体试样的对称性，建立了其二维离散元模型，如图 2 所示。

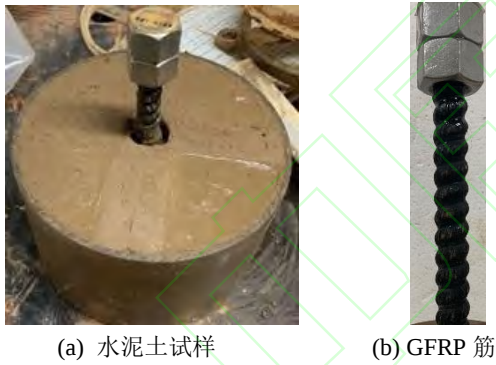


图 1 单元体试样
Fig.1 Element specimen

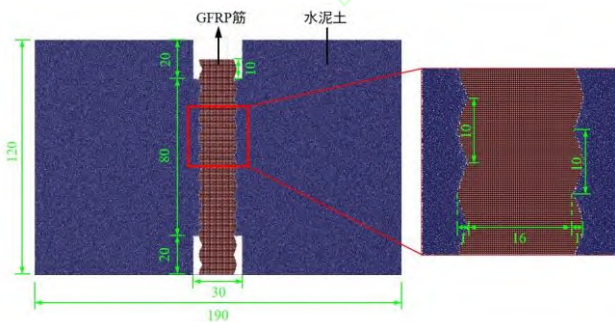


图 2 水泥土中 GFRP 筋拉拔试验离散元模型(单位: mm)
Fig.2 Discrete element modelling for pullout test of GFRP tendon embedded in cement soils (unit: mm)

模型中间部分为带肋 GFRP 筋，筋体直径为 16mm，肋间距与肋高分别为 10mm 及 1mm，筋体

周围为水泥土，水泥土试样直径为 190mm，高为 120mm，GFRP 筋与水泥土的黏结长度为 80mm。采用 MatDEM 中的 Toolcut 函数切割堆积模型来实现筋体肋的外轮廓模拟。颗粒间采用线弹性接触模型，单元平均粒径为 1.5mm（颗粒粒径介于 1.23~1.77mm），总数为 323617 个，其中，水泥土单元数为 262472 个，GFRP 筋单元数为 40356 个，边界单元数为 20789 个。

1.2 材料设置

本文离散元模型的力学性质主要受单元的接触模型和宏细观力学参数控制。在 MatDEM 中，模型材料参数的输入值为 5 个宏观力学参数，包括杨氏模量 E 、泊松比 ν 、抗压强度 C_u 、抗拉强度 T_u 和内摩擦系数 μ_i 。对于线弹性接触模型，单元的 5 个细观力学参数（法向刚度 K_n 、切向刚度 K_s 、断裂位移 X_b 、初始抗剪力 F_{s0} 和摩擦系数 μ_p ）可由 5 个宏观力学参数以及单元直径 d 通过（Liu et al., 2017）给出的转换公式计算得到。转换公式如下：

$$K_n = \frac{\sqrt{2}Ed}{4(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{\sqrt{2}(1-5\nu)Ed}{4(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$X_b = \frac{3K_n + K_s}{6\sqrt{2}K_n(K_n + K_s)} T_u d^2 \quad (3)$$

$$F_{s0} = \frac{1-\sqrt{2}\mu_p}{6} C_u d^2 \quad (4)$$

$$\mu_p = \frac{-2\sqrt{2} + \sqrt{2}I}{2 + 2I}, \quad I = \left[(1 + \mu_i^2)^{1/2} + \mu_i \right]^2 \quad (5)$$

由于随机堆积模型的力学性质通常会比设定值小，因此，为获得力学性质更准确的材料，需要对材料参数进行自动训练。材料训练的过程为：先用设定的材料参数来建立随机堆积模型；然后对堆积模型进行单轴压缩、抗拉强度、抗压强度测试，获得堆积模型的实际弹性模量和强度；再通过实测值和设定值的比率反复调整细观参数，直至各材料力学性质收敛于设定值。

参考本课题组已开展的水泥土中 GFRP 筋拉拔试验所采用实际材料的物理力学性质（陈昌富等，2019），本文数值建模过程中设置的水泥土与 GFRP 筋的宏观力学参数如表 1 所示，通过材料训练及转换公式得到的水泥土与 GFRP 筋的细观力学参数见表 2。

表 1 水泥土与 GFRP 筋的宏观力学参数
Table 1 Macro parameters of cement soils and GFRP tendon

材料	杨氏模量 E/GPa	泊松比 ν	抗拉强度 T_u/MPa	抗压强度 C_u/MPa	内摩擦系数 μ_i
水泥土	0.36	0.2	0.28	3.64	0.5
GFRP 筋	40	0.18	622	100	0.48

表 2 水泥土与 GFRP 筋的细观力学参数

Table 2 Micro parameters of cement soils and GFRP tendon

材料	法向刚度 $K_n/\text{N m}^{-1}$	切向刚度 $K_s/\text{N m}^{-1}$	断裂 位移 X_b/m	抗剪力 F_{s0}/N	摩擦系数 μ_p
水泥土	5.104×10^9	2.422×10^9	0.0033	1.177×10^8	0.1208
GFRP 筋	6.435×10^{11}	1.575×10^{11}	0.064	3.318×10^9	0.1054

注：表 1 的宏观力学参数中，水泥土的杨氏模量、泊松比、抗压强度及 GFRP 筋的杨氏模量、泊松比、抗拉强度均取自于文献（陈昌富等，2019），表 2 的细观力学参数均由宏观力学参数经过材料训练得到。

1.3 模型平衡及荷载施加

对模型赋予材料参数后，模型中各单元间受力会发生急剧变化。为了防止模型由于骤然增加的单元间应力而炸裂，需要对模型进行强胶结平衡，将单元间赋予足够大的抗拉力和初始抗剪力，随后再进行标准平衡，将系统的能量迅速耗散。对模型不断进行胶结与平衡，直至单元运动达到稳定状态，从而获得稳定的数值模型来满足高精度的模拟。

模型加载方案与试验（陈昌富等，2019）保持一致。采用位移控制的准静态加载方式，对 GFRP 筋顶部施加缓慢速度来模拟位移荷载的施加，拉拔速度为 0.01mm/时间步，直至筋体拔出长度为 20mm 时停止模拟，为满足较高精度的数值模拟，需要进行足够多的迭代计算，本文模型中设置迭代计算次数为 10 万次。

2 模拟结果与分析

2.1 荷载-位移曲线

图 3 为 GFRP 筋-水泥土拉拔试验荷载-位移曲线的数值模拟结果与试验（陈昌富等，2019）结果对比，两者变化趋势基本一致，拉拔荷载先随着位移的增加而增大，达到峰值点后呈现波动式衰减。离散元模拟的荷载-位移曲线显示的峰值点荷载与试验记录的峰值点荷载非常接近，都处于 8~10kN 之间。然而，峰值点后波动式衰减段的荷载值却略高于试验值，这可能是由于离散元模型中的水泥土颗粒单元与实际土颗粒在力学行为与形状上存在差异性所导致的，比如试验中筋体周围存在部分土颗粒被剪碎的情况，但数值模型中模拟水泥土的颗粒单元无法破碎。

另一方面，从图 3 中可观察到荷载-位移曲线上存在 5 个荷载特征点 a、b、c、d、e，可依次定义为荷载初始点、第一峰值点、第一谷值点、第二峰值点以及第二谷值点，分别对应 GFRP 筋拔出位移为 1mm、4mm、10mm（一个肋间距）、14mm、20mm（两个肋间距）时的筋体端部荷载。

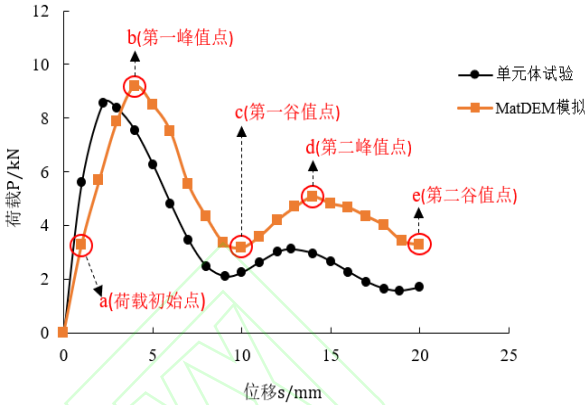


图 3 荷载-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curve

2.2 界面位移场演化分析

图 4 为 GFRP 筋-水泥土拉拔试验模拟结束后（s=20mm）的模型位移云图。从图中可以看出，

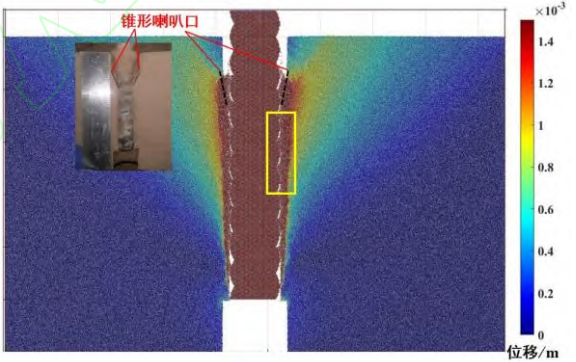


图 4 拉拔结束后水泥土位移云图

Fig.4 Post-pullout displacement contour of cemented soils 筋体拔出对周围水泥土的位移影响范围主要发生在二者界面处，靠近筋体上部的水泥土位移影响范围呈现出一个倒锥形喇叭口，这与试验（陈昌富等，2019）观察一致。

为了进一步从细观上研究 GFRP 筋-水泥土的界面黏结滑移破坏机制，对研究区域进行聚焦，选取图 4 中黄色矩形框对应的界面处三个肋距长度范围来进行研究，提取荷载-位移曲线上不同拉拔位移下的 GFRP 筋-水泥土界面位移场演化情况，如图 5 所示。

图 5a~图 5e 是水泥土凸起部分的塑性区由初步形成发展至贯通的过程，当筋体拔出至 s=1mm 时，此时筋体与水泥土近似处于弹性平衡状态，筋体受

拉时肋凸起部分对周围水泥土有挤压作用，在水泥土凸起部分开始形成塑性区（图 5b）；随着筋体继续拔出，水泥土凸起部分的塑性区不断扩大，

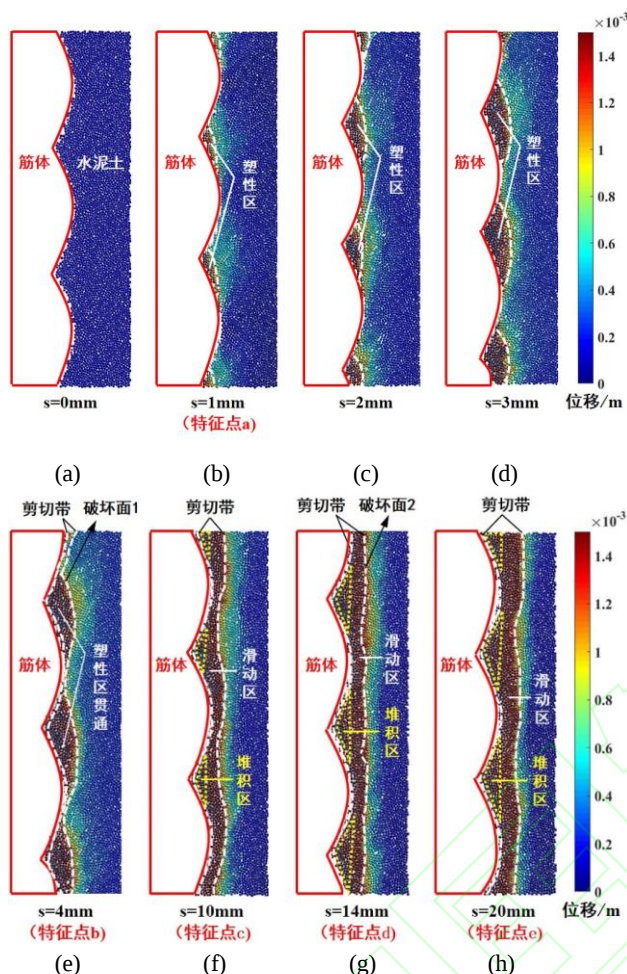


图5 不同拉拔位移下界面附近水泥土位移场演化过程

Fig.5 Evolution of displacement field of cemented soils adjacent to interface under different pullout displacements

直到筋体拔出至 $s=4\text{mm}$ 时，塑性区贯通整个水泥土凸起部分，界面处开始发生剪切破坏形成破坏面1（图 5e），在云图中表现为位移量达到 1.5mm 的紫色区域和位移量不足 1mm 的黄绿色区域分界线，此时曲线上荷载达到最大值。图 5e~图 5h 为水泥土凸起部分的塑性区贯通后进入塑性变形阶段并与筋体发生相对滑移的过程，当 $s>4\text{mm}$ 时，筋体与水泥土开始发生相对滑移，界面处滑动的水泥土颗粒形成滑动区并沿着破坏面1移动，并填充在筋体相邻肋间区域伴随筋体向上移动，并由于滑动产生挤压导致部分堆积水泥土再次附着在筋体肋间表面形成堆积区（图 5f 黄色虚线区域）。堆积区水泥土颗粒的增加导致界面处的摩阻力及机械咬合力减弱，从而使得筋体与水泥土的黏结作用持续减弱，直至筋体拔出至 $s=10\text{mm}$ 时，曲线上荷载降低至第一谷值点；当拉拔位移 $s=14\text{mm}$ 时，界面处发生第二次

剪切破坏形成破坏面2（图 5g），此时曲线上荷载上升至第二峰值点。需要注意的是，与第一次剪切破坏相比，第二次剪切破坏形成的塑性区及剪切破坏面较小，所以曲线上拉拔荷载第二次上升的幅度要小于第一次；当 $s>14\text{mm}$ 时，滑动区沿着破坏面2移动，直至筋体拔出至 20mm 时，由于肋前堆积区土颗粒的增加（图 5h），筋体与水泥土的黏结作用再次减弱，曲线上荷载下降至第二谷值点。

由上述分析可知，在界面黏结滑移过程中筋体附近水泥土发生了两次剪切破坏，水泥土内剪切带演化过程可以通过剪切颗粒数变化来刻画，如图 6 所示。从图中可以发现，剪切颗粒数随拉拔位移的增加总体呈上升趋势，在拉拔初期 ($0\text{mm}<s<4\text{mm}$)，水泥土与筋体处于线弹性阶段，界面未发生剪切破坏，剪切颗粒数都为零；当拉拔位移超过 4mm 时，界面处发生第一次剪切破坏，水泥土与筋体开始发生相对滑动，随着滑动区的发展，剪切颗粒数缓慢上升，直至筋体拔出至 14mm 时发生第二次剪切破坏，随后剪切颗粒数的上升趋势逐渐减缓。

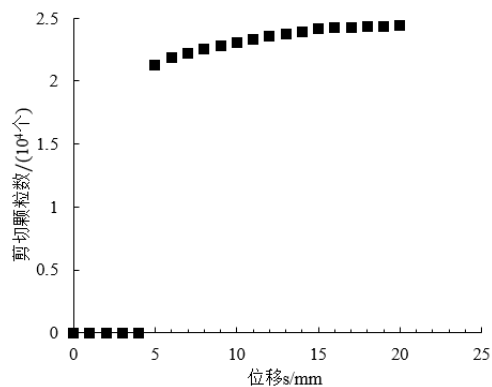


图6 不同拉拔位移下剪切颗粒数的变化

Fig.6 Variation of the number of shear particles under different pullout displacements

2.3 胶结破坏演化分析

本文数值模型中水泥土颗粒间是通过胶结作用

连接的，由以上位移场演化分析可知，随着筋体的拔出会引起周围水泥土颗粒的滑移，同时，相邻的水泥土颗粒间会发生相对位移。当单元间法向相对位移超过断裂位移 X_b 时，相互胶结的颗粒单元间将发生胶结破坏并生成裂隙。

GFRP 筋体附近水泥土变形破坏的发展过程可以通过离散元模型中颗粒胶结破坏情况反映。MatDEM 中记录了拉拔过程模型中胶结破坏的变化情况，如图 7 所示。

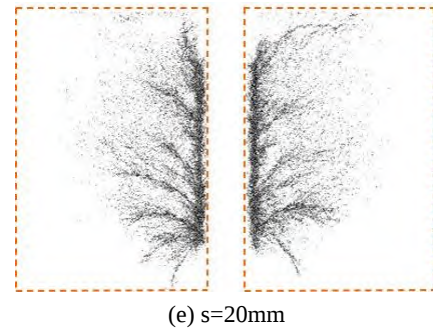
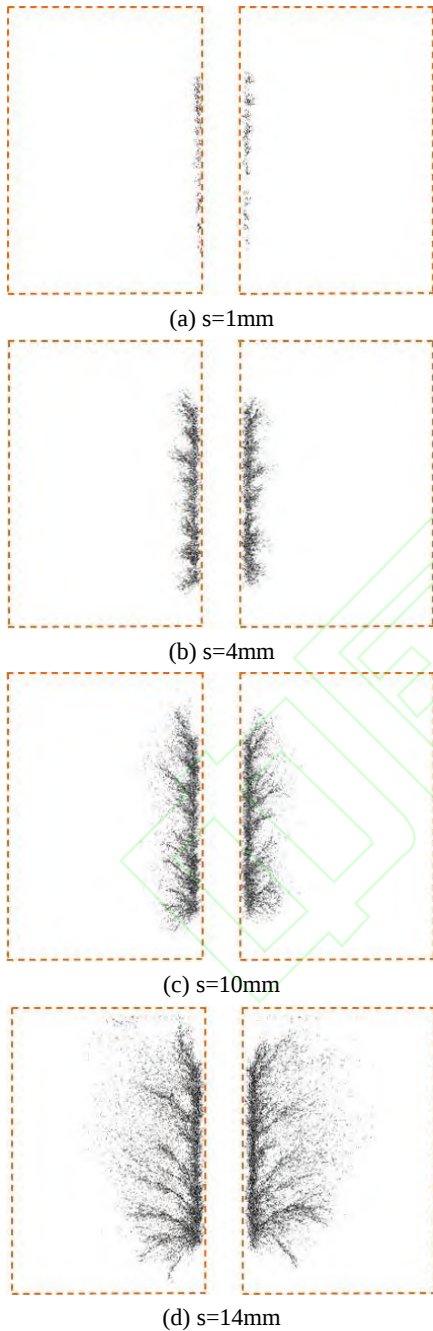


图 7 不同拉拔位移下胶结破坏演化
Fig.7 Cementation failure evolution of model under different pullout displacements

从图中可以看出，胶结破坏区域随着拉拔位移的增加逐渐从 GFRP 筋-水泥土界面处沿径向朝两侧土体扩展；胶结破坏区域在拉拔端一直往斜上方向发展，在自由端则逐渐呈斜上转斜下的趋势。

图 8 为拉拔荷载和胶结破坏数随拉拔位移的变化关系。结合图 7 和图 8 可以发现，胶结破坏曲线与荷载-位移曲线都存在分段现象，且二者之间存在对应关系：在拉拔初期（ $s=1\text{mm}$ ），水泥土与筋体开始产生挤压作用，在界面处有零散的胶结破坏特征；随着拉拔位移的增加，荷载位移曲线基本呈线性关系，胶结破坏数增加也较快；当拉拔荷载上升至第一峰值时（ $s=4\text{mm}$ ），零散的胶结破坏点逐渐在界面处扩展成连续的破坏面并形成裂纹，随后拉拔荷载逐渐降低，胶结破坏数增长减慢；当 $s>10\text{mm}$ 时，胶结破坏由界面处逐渐向两侧土体扩展，拉拔荷载再一次上升；直至 $s=14\text{mm}$ 时，扩展至水泥土中的胶结破坏数上升幅度不再明显，拉拔荷载再次降低，此时胶结破坏曲线趋于水平。

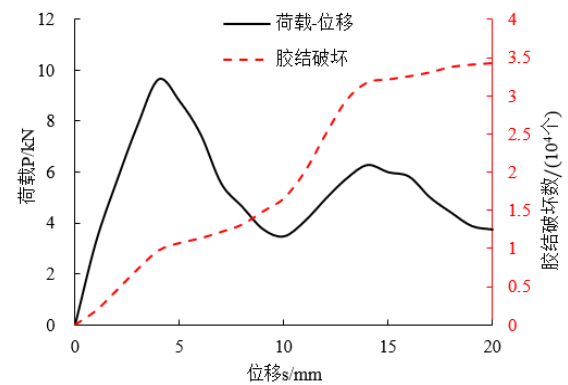


图 8 拉拔荷载和胶结破坏数随拉拔位移的变化关系
Fig.8 Variation of pullout load and the number of particles undergoing cementations failure versus pullout displacement

3 界面黏结滑移特性参数分析

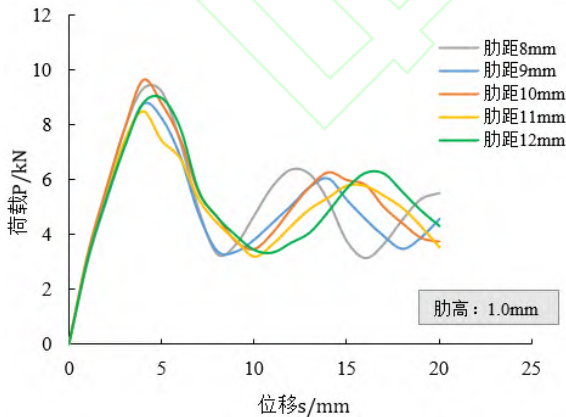
为了进一步分析 GFRP 筋体形态特征对筋土界

面承载特性的影响，基于试验所用的 GFRP 筋的形态参数，结合实际 GFRP 筋产品参数可选范围，分别在 10mm 肋距和 1mm 肋高情形下，变化筋体肋高和肋距，考察 GFRP 筋体与水泥土界面黏结滑移响应的演化规律。

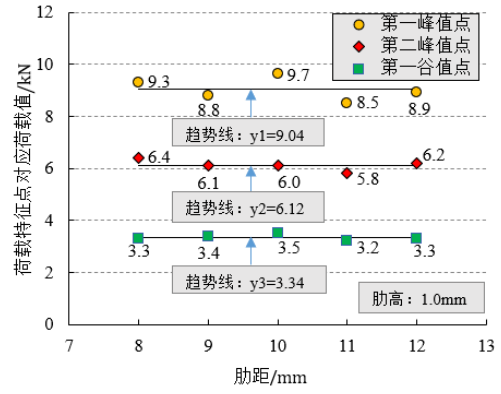
3.1 肋距的影响

筋体肋高为 1mm，不同肋距下 GFRP 筋体单元在水泥土中拉拔荷载-位移曲线变化，如图 9 所示。由图 9a 可知，肋距变化对荷载位移曲线的影响主要体现在残余段，特别是残余段荷载峰值点和谷值点对应的拉拔位移，而对荷载峰值和谷值的影响则并不明显。图 9b 为不同肋距下荷载特征点对应荷载值的变化趋势。可以看到，肋距对特征点荷载值影响很小，荷载值随肋距变化趋势近似为水平线，荷载第一峰值点都在 9.04kN 上下，荷载第二峰值点荷载都在 6.12kN 附近，荷载第一谷值点都在 3.34kN 附近。图 9c 为荷载峰值点和谷值点对应拉拔位移随肋距变化趋势图。可以发现，荷载特征点对应位移值均与肋距成线性增长关系，荷载第一峰值对应位移增长率为零，荷载第一谷值对应位移增长率为 0.96，荷载第二峰值对应增长率为 1.45。

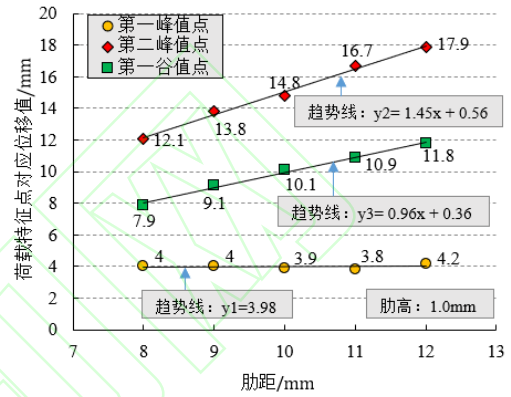
结合前文界面位移场演化分析，不难发现产生上述肋距影响的主要原因在于，筋体肋距只影响界面附近塑性区的发展速率，而对塑性区的发展规模影响较小，具体表现为图 5e 中塑性区贯通区域并未完全调动肋间土体，图 5g 中滑动区只涉及筋体长度，二者均未受到肋距的直接影响。



(a) 不同肋距下荷载-位移曲线



(b) 荷载特征点对应荷载值随肋距的变化



(c) 荷载特征点对应位移值随肋距的变化

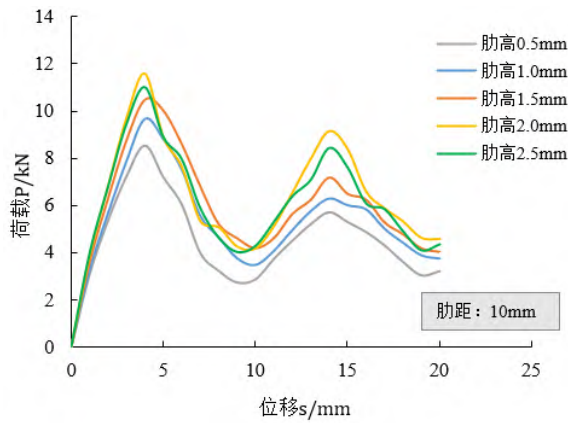
图 9 肋距对界面黏结特性的影响

Fig.9 Impact of rib spacing on interface bond behavior

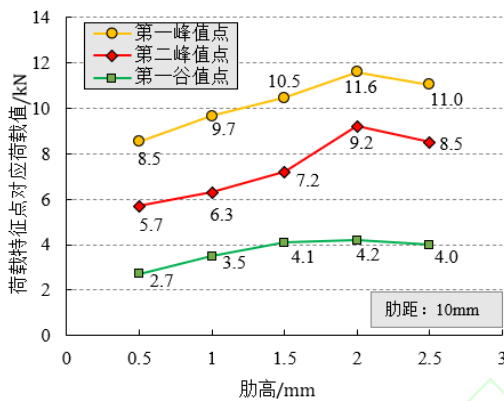
3.2 肋高的影响

图 10 为肋距为 10mm 时不同肋高下 GFRP 筋体单元在水泥土中拉拔荷载-位移曲线对比。从图 10a 可以看出，肋高变化主要对荷载特征点对应荷载值影响显著，对荷载特征点对应位移值影响很小。值得说明的是，如图 10b 所示，荷载峰值随着肋高增加而增大，当肋高为 2.0mm 时达到最大（荷载第一和第二峰值分别为 11.6kN 和 9.2kN），继续增大肋高，则会引起荷载峰值降低。荷载谷值也有类似变化趋势。说明在恒定肋距下，存在最优肋高，可以最大程度调动界面黏结强度。从图 10c 可知，荷载特征点对应位移对肋高变化不敏感，均分别保持在 4mm、1 倍肋距、1.5 倍肋距和 2 倍肋距附近。

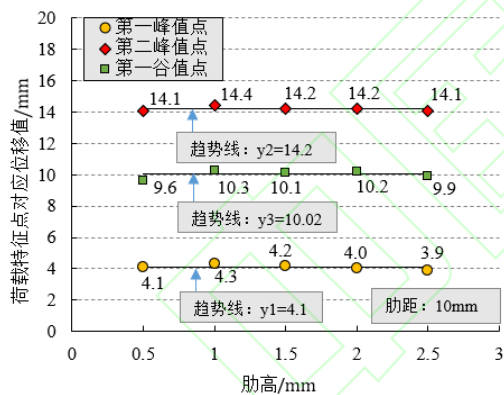
肋高所产生的影响依旧可从界面附近塑性区发展规模的角度分析，肋高直接决定了图 5e 中土体贯通塑性区的高度和图 5g 中堆积区土楔的体积，前者表现为胶结破坏颗粒数量大小，后者则表现为拉拔随动土体质量大小。



(a) 不同肋高下荷载-位移曲线



(b) 荷载特征点对应荷载值随肋高的变化



(c) 荷载特征点对应位移值随肋高的变化

图 10 肋高对界面黏结特性的影响

Fig.10 Impact of rib height on interface bond behavior

4 结论

本文通过建立 GFRP 筋-水泥土拉拔试验的二维离散元数值模型,对 GFRP 筋-水泥土界面黏结滑移破坏全过程进行数值模拟,结合荷载-位移曲线、界面位移场演化、剪切带发展及胶结破坏演化和参数分析,深入研究了 GFRP 筋-水泥土界面黏结滑移破坏机制。得到以下结论:

(1) 数值模拟得到的荷载-位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,

拉拔荷载先随着位移的增加而增大,达到峰值点后呈现波动式衰减,与试验结果基本一致,验证了本文数值模型的可靠性。

(2) GFRP 筋-水泥土界面黏结滑移全过程会发生两次剪切破坏,当拉拔位移为 4mm 时生成破坏面 1,随后发生第一次剪切破坏,当拉拔位移至 10mm(一个肋间距)时生成破坏面 2,随后发生第二次剪切破坏,这也造成了拉拔荷载经历两次上升与下降。

(3) 剪切带内剪切颗粒数随拉拔位移的增加总体呈上升趋势,在拉拔初期上升趋势相对明显,随着滑动区的发展上升趋势逐渐减缓。

(4) 胶结破坏点初次形成于 GFRP 筋-水泥土界面处,随着拉拔位移的增加逐渐从界面处沿径向往两侧水泥土扩展,胶结破坏曲线与荷载-位移曲线都存在分段现象,且二者之间存在对应关系。

(5) GFRP 筋体肋距主要影响荷载特征点对应位移值,对荷载峰值和谷值影响很小;筋体肋高对荷载峰值和谷值影响显著,且在恒定肋距下,存在最优肋高可最大程度调动界面黏结强度。

本文研究尚存在一定局限性,一方面,试验中 GFRP 筋体的肋是呈三维螺旋状上升的,其引起的非对称效应影响需要进行三维数值仿真研究;另一方面,GFRP 筋-水泥土界面黏结性能受到多种因素影响,如围压、筋体直径以及水泥土配比和龄期等,对应的影响机制拟在后续工作中进一步研究。

参考文献

- Bai X Y, Zhang M Y, Wang Y H, et al. 2020. Field test on bond strength between Glass Fiber Reinforcement Polymer anti-floating anchor and concrete floor[J]. Journal of China University of Mining&Technology, 49(1): 93-102.
- Bai X Y, Zhang M Y, Zhu L, et al. 2018. Experimental study on shear characteristics of interface of full-bonding glass fiber reinforced polymer anti-floating anchors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(6): 1407-1418.
- Che N, Wang H N, Jiang M J, et al. 2018. Mechanism investigation of rock bolt failure in anchorage segment under pullout via DEM[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 14(S2): 716-724.
- Chen C F, Huang J B, Zhang G B, et al. 2019. Bond behavior of tensioned GFRP tendons embedded in cemented soils[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 52(S1): 124-131.
- Chen C F, Zhang G B, Zornberg J G, et al. 2018. Interface behavior of tensioned bars embedded in cement-soil mixtures[J]. Construction and Building Materials, 186: 840-853.

- Chen C F, Zhang G B, Zornberg J G, et al. 2020. Interface bond behavior of Tensioned Glass Fiber-reinforced Polymer (GFRP) tendons embedded in cemented soils[J]. *Construction and Building Materials*, 263: 120-132.
- Fang W L, Si M J, Jiang M J. 2018. Numerical simulation of sliding failure in rock-bolt interface by discrete element model[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 35(05): 73-78+84.
- Hao Q D, Wang Y L, Hou J L, et al. 2008. Experimental study on bond behavior of GFRP ribbed rebars[J]. *Engineering Mechanics*, (10): 158-165+179.
- Hong C Y, Liu Z X, Zhang M X, et al. 2017. Effect of grouting pressure and overburden pressure on pullout resistance of soil nails[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 38(S2): 317-322.
- Hong C Y, Liu Z X, Zhang Y F, et al. 2017. Influence of Critical Parameters on the Peak Pullout Resistance of Soil Nails Under Different Testing Conditions[J]. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3(2): 1-7.
- Liu C, Le T C, Shi B, et al. 2020. Discussion on three major problems of the engineering application of the particle discrete element method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(6): 1142-1152.
- Liu C, Xu Q, Shi B, et al. 2017. Mechanical properties and energy conversion of 3D close-packed lattice model for brittle rocks[J]. *Computers & Geosciences*, 103: 12-20.
- Lu X Z, Ye L P, Teng J G, et al. 2005. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface[J]. *Journal of Building Structures*, (4): 10-18.
- Luo X Y, Tang X X, Kuang Y C, et al. 2015. Test research on anchorage adhesive property of GFRP anchor bolt[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 12(3): 521-527.
- Potyondy D O, Cundall P A. 2004. A bonded-particle Model for Rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8): 1329-1364.
- Qian J G, Wang B, Chen H W, et al. 2015. Model test and bearing mechanism study on grouting-screw uplift pile[J]. *Journal of Building Structures*, 36(10): 146-152.
- Sun C, Guo H T. 2018. Present situation and prospect of new technology for deep foundation pit support[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 35(3): 104-117.
- Tang C, Shi B, Gao W. 2007. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3): 194-202.
- Wang B, Xu B L. 2019. Application of LXX method pile technology in foundation pit support[J]. *Water Transport Engineering*, (S1): 120-124.
- Wang H L, Li C H, Xu G X. 2011. Mesoscopic numerical simulation of bond behavior of ribbed bars and concrete[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 46(3): 365-372.
- Xue W C. 2005. Experimental studies on interface bond strength of non-metallic anchors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, (2): 206-209.
- Ye X Y, Peng R, Ma X Y, et al. 2021. The enhancement of compaction grouting on a compaction-grouted soil nail in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*: 1-9.
- You C A, Zhan Y B. 2009. Analysis of interfacial slip mesomechanics in anchorage section of prestressed anchor cable[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(10): 1976-1985.
- Yu N, Zhu H H, Liang R W. 2004. Experimental study on mechanical properties of reinforced cemented-soil[J]. *China Civil Engineering Journal*, 37(11): 79-84.
- Zhang G J, Xu Y F, Fu D M. 2002. Research and application of SMW section steel pullout test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(3): 444-448.
- Zhang J K, Chen W W, He F G et al. 2014. Field experimental study on anchorage performance of GFRP at conservation earthen sites[J]. *Journal of Engineering Geology*, 22(5): 804-810.
- Zhou M C, Qian J G, Huang M S, et al. 2016. Discrete element simulation of failure mechanism of interface between grouting-screw pile and soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 37(S1): 591-595+608.
- Zhu H H, Zhang C C, Shi B et al. 2012. Physical modelling of time dependent pullout behavior associated with GFRP anchor[J]. *Journal of Engineering Geology*, 20(5): 862-867.
- 白晓宇, 张明义, 王永洪, 等. 2020. GFRP 抗浮锚杆与混凝土底板黏结特性现场试验[J]. *中国矿业大学学报*, 49(1): 93-102.
- 白晓宇, 张明义, 朱磊, 等. 2018. 全长黏结 GFRP 抗浮锚杆界面剪切特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 37(6): 1407-1418.
- 车纳, 王华宁, 蒋明镜, 等. 2018. 岩石锚杆锚固段拉拔破坏机理离散元分析[J]. *地下空间与工程学报*, 14(S2): 716-724.
- 陈昌富, 黄佳彬, 张根宝, 等. 2019. 水泥土中 GFRP 筋的界面黏结特性试验研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 52(S1): 124-131.
- 方威, 司马军, 蒋明镜. 2018. 岩石锚杆界面滑移破坏的 DEM 数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 35(5): 73-78+84.
- 郝庆多, 王言磊, 侯吉林, 等. 2008. GFRP 带肋筋黏结性能试验研究[J]. *工程力学*, (10): 158-165+179.
- 洪成雨, 刘子雄, 张孟喜, 等. 2017. 灌浆压力与上覆土压力对土钉摩阻力的影响研究[J]. *岩土力学*, 38(S2): 317-322.
- 刘春, 乐天呈, 施斌, 等. 2020. 颗粒离散元法工程应用的三大问题探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 39(6): 1142-1152.

陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. 2005. FRP-混凝土界面黏结滑移本构模型[J]. 建筑结构学报, (4): 10-18.

罗小勇, 唐谢兴, 匡亚川, 等. 2015. GFRP 锚杆锚固黏结性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 12(3): 521-527.

钱建固, 王斌, 陈宏伟, 等. 2015. 注浆螺纹抗拔桩室内模型试验与承载力机理分析[J]. 建筑结构学报, 36(10): 146-152.

孙超, 郭浩天. 2018. 深基坑支护新技术现状及展望[J]. 建筑科学与工程学报, 35(3): 104-117.

王炳, 许宝龙. 2019. 加筋水泥土锚桩(LXK)技术在基坑支护中的应用[J]. 水运工程, (S1): 120-124.

王海龙, 李朝红, 徐光兴. 2011. 带肋钢筋与混凝土黏结性能的细观数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 46(3): 365-372.

薛伟辰. 2005. 非金属锚杆界面黏结强度试验研究[J]. 岩土工程学报, (2): 206-209.

叶新宇, 彭锐, 马新岩, 等. 2021. 压密效应对新型压密注浆土钉的强化研究[J]. 岩土工程学报: 1-9.

尤春安, 战玉宝. 2009. 预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 28(10): 1976-1985.

于宁, 朱合华, 梁仁旺. 2004. 插钢筋水泥土力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 37(11): 79-84.

张冠军, 徐永福, 傅德明. 2002. SMW 工法型钢起拔试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 21(3): 444-448.

张景科, 谌文武, 和法国. 2014. 土遗址加固中 GFRP 锚杆锚固性能现场试验研究[J]. 工程地质学报, 22(5): 804-810.

周敏明, 钱建固, 黄茂松, 等. 2016. 注浆成型螺纹桩桩土接触面机制的离散元模拟[J]. 岩土力学, 37(S1): 591-595+608.

朱鸿鹄, 张诚成, 施斌, 等. 2012. GFRP 锚杆拉拔时效模型研究[J]. 工程地质学报, 20(5): 862-867.