

文章编号: 1007-2993(2024)01-0078-07

中空 GFRP 筋土钉抗拔性能研究

刘 军¹ 申 精¹ 张建全² 宋 晔¹ 刘 鹏³

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101;

3. 北京市市政四建设工程有限公司, 北京 100176)

【摘要】 中空 GFRP 筋土钉是一种空心厚壁土钉, 具有质量轻、易切割、耐腐蚀等优点。目前, 对中空 GFRP 筋土钉的研究相对较少, 对其抗拔性能和抗拔机理尚不清楚。依托北京地铁 12 号线北岗子站基坑工程, 对中空 GFRP 筋土钉进行了现场抗拔试验, 并采用 FLAC3D 数值模拟探究了不同拉拔力下中空 GFRP 筋土钉应力和位移沿钉长的分布规律, 分析了不同内径和长度对应力分布和抗拔力的影响, 对中空 GFRP 筋土钉的抗拔机理进行了分析。研究表明, 拉拔过程中土钉的位移和轴力沿钉长呈指数衰减, 剪应力在距钉头 1.5 m 处达到峰值, 在距离钉头 3.5 m 处降至零; 增大内径使土钉轴力沿钉长衰减更快, 同时可提高其抗拔承载力, 建议外径为 32 mm 的中空 GFRP 土钉内径取为 15 mm; 增加土钉长度不仅可以在一定范围内提高其抗拔力, 还可使土钉轴力分布更均匀; 中空 GFRP 筋土钉的破坏过程可分为弹性、塑性和破坏三个阶段, 其破坏形式表现为拔出。

【关键词】 中空 GFRP 筋土钉; 抗拔试验; 抗拔机理

【中图分类号】 TU432

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.01.014

Study on the Pullout Resistance of Hollow GFRP Reinforced Soil Nails

Liu Jun¹ Shen Jing¹ Zhang Jianquan² Song Ye¹ Liu Peng³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Beijing Urban Construction Geotechnical and Design Institute Limited Company, Beijing 100101, China; 3. Beijing No.4 Municipal Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100176, China)

【Abstract】 Hollow GFRP reinforced soil nail is a kind of hollow thick-walled soil nail, which has the advantages of light weight, easy cutting, and corrosion resistance. At present, there are relatively few studies on hollow GFRP soil nails, and their pullout resistance and pullout resistance mechanisms are still unclear. Relying on the foundation pit project of Beigangzi Station of Beijing Metro Line 12, the field pullout test of hollow GFRP reinforced soil nails was carried out, and numerical simulation in FLAC3D was used to investigate the distribution of stress and displacement along the nail length of hollow GFRP reinforced soil nails with different pullout force. The effects of different inner diameters and lengths on stress distribution and pullout resistance were analyzed, and finally, the pullout resistance mechanism of hollow GFRP reinforced soil nails was summarized. The results show that the displacement and axial force of soil nails in the process of pullout decay exponentially along the length of the nails. The shear stress peaks at 1.5 m from the nail head and decreases to zero at 3.5 m from the nail head; increasing the inner diameter makes the axial force of the soil nail decay faster along the nail length, and at the same time improves its pullout capacity. It is recommended that the inner diameter of the hollow GFRP soil nails with an outer diameter of 32 mm be taken as 15 mm; increasing the length of the soil nails not only improves the pullout capacity to a certain extent, but also makes the axial force of the nails more uniformly distributed; the destructive process of the hollow GFRP soil nails can be divided into the three stages of elasticity, plasticity, and damage, and the damage form is manifested as pullout.

【Key words】 hollow GFRP reinforced soil nails; pullout test; pullout resistance mechanism

0 引言

土钉墙是一种经济、简便、施工快速、不需大型施工设备的基坑支护形式^[1], 在我国已得到了广泛的

应用。传统土钉芯杆采用钢筋, 质量重且抗腐蚀性差, 当地条件受限时往往会伸入相邻场地, 由于钢筋不易切割, 会影响到相邻场地新建筑物的施工。玻璃纤

基金项目: 北京未来城市设计高精尖创新中心资助(UDC2019032824)

作者简介: 刘 军, 男, 1965 年生, 汉族, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 教授, 主要从事岩土与地下工程的教学与研究工作。E-mail: liujun01@tsinghua.org.cn

维筋(GFRP)质量轻、强度高、易切割、抗腐蚀性强,将其用作土钉芯杆替代传统土钉,可有效避免传统土钉的不利影响,逐渐被广泛应用到地下工程中^[2-3]。

土钉墙支护通常是发挥土钉受拉的作用,因此土钉的抗拔特性是衡量其支护效果的一项重要指标。国内外专家和学者开展了对土钉抗拔特性的研究^[4-8],朱鸿鹄等^[9]采用双曲线模型推导了 GFRP 土钉在拉拔过程中的剪应力和剪应变之间的关系,并依托室内试验进行了验证,提出了容许拉拔力通过位移控制的思路;张 芯等^[10]基于拉拔试验采用室内模拟试验和数值模拟对 GFRP 筋与砂浆的粘结性能进行了分析,认为纤维筋极限粘结强度应取灌浆体抗压强度的 1/5;陈 超等^[11]依托武汉市蔡甸区东风电动车工地 E1F1 段进行 GFRP 筋的现场拉拔试验,探究了拉拔过程中应力沿杆体的分布规律,并分析了不同参数对 GFRP 筋应力分布的影响,认为上覆压力对轴力传递范围无显著影响,黏聚力和内摩擦角增大到一定值时, GFRP 筋轴力开始下降;罗金标等^[12]探究了玄武岩纤维复合材料(BFRP)的力学特性,认为平行索的抗拔极限荷载最高,绞索的抗拔极限荷载最低,但抗拔刚度最高。刘 军等^[13]开展了室内锚固试验

和数值模拟探究了 GFRP 筋土钉钉头的极限抗拉强度与变形破坏规律。

中空 GFRP 筋在保证承载力的前提下节省筋材,同时可兼做注浆管,简化施工工序,节省施工时间。但是,当前尚缺少对中空 GFRP 筋土钉抗拔性能的研究,为此,依托北京地铁 12 号线北岗子站 1 号夹层风道东侧基坑,采用 FLAC3D 对中空 GFRP 筋土钉的抗拔特性进行了研究,探究了拉拔过程中土钉应力与位移的分布规律,分析了内径和长度对中空 GFRP 筋土钉的应力分布和抗拔承载力的影响,阐释了中空 GFRP 筋土钉的抗拉机理。

1 中空 GFRP 筋土钉抗拔试验

北京地铁 12 号线北岗子站夹层风道基坑开挖深度为 6 m,采用土钉墙支护,边坡坡率 1:0.30,设置 4 道土钉(见图 1)。场地表层为人堆堆积层,其下为第四纪全新世冲洪积层,场地地层自上而下依次为:①₁杂填土,①素填土,①₁杂填土,粉质黏土③₁层,粉细砂③_{3k}层。其中人工填土层较厚,对基坑工程影响较大。中空型 GFRP 土钉长度为 8 m,直径为 32 mm,内径为 15 mm,钻孔直径为 100 mm, GFRP 筋的弹性模量为 46 GPa,注浆材料为 M20 水泥砂浆。

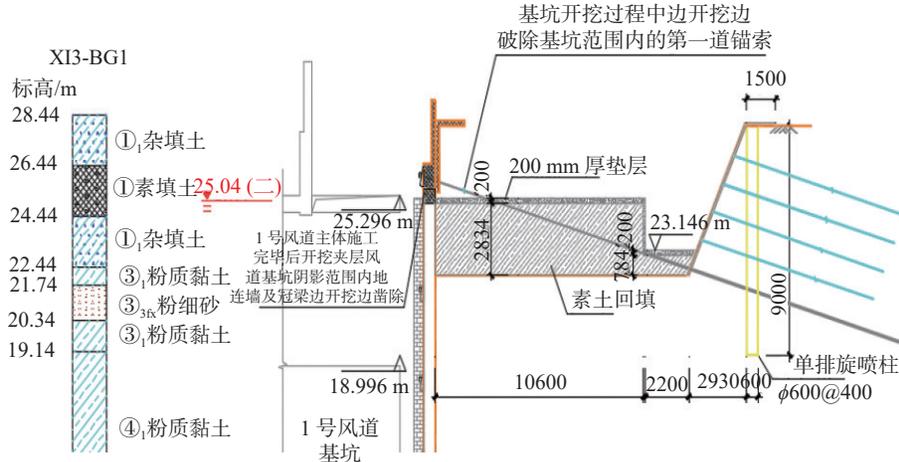


图 1 夹层风道基坑土钉墙支护和地层条件(单位:mm)

抗拔试验按照《建筑基坑工程支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[14]进行,根据设计抗拔承载力要求,中空 GFRP 筋土钉预估破坏荷载为 90 kN, GFRP 筋的破坏荷载为 450 kN。抗拔试验照片见图 2,典型荷载-位移曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,在荷载小于 80 kN 时,土钉荷载-位移曲线近似于线性变化,呈现出弹性特征,随着荷载增加其非线性特征较为明显,表现为前期随荷载增加,位移增长较慢,随着荷载的进一步增加,土钉的位移增长迅速,整个土钉拉拔过程的力学行为呈现出了

近似弹塑性特征。分析其原因,该中空 GFRP 筋土钉拉拔过程的破坏为土钉和土体之间的界面破坏,这与现场试验观察到的现象是一致的,在荷载施加到 181 kN 时,土钉未出现破坏迹象,在增加到 275 kN 时,土钉位移急剧增加,土钉被拔出。

2 数值模拟

为进一步探究中空 GFRP 筋土钉的抗拔性能,采用 FLAC3D 进行了数值模拟分析。

2.1 数值模型的建立

依托工程实际建立的数值模型,为避免边界的

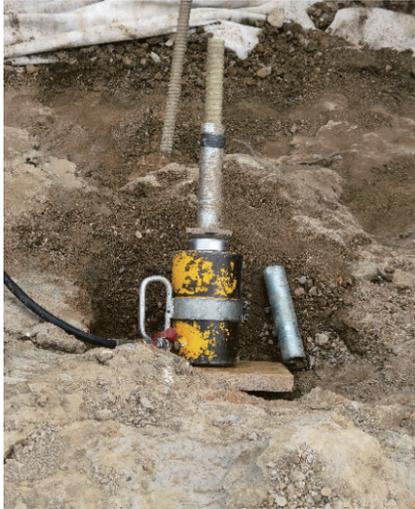


图2 现场抗拔试验

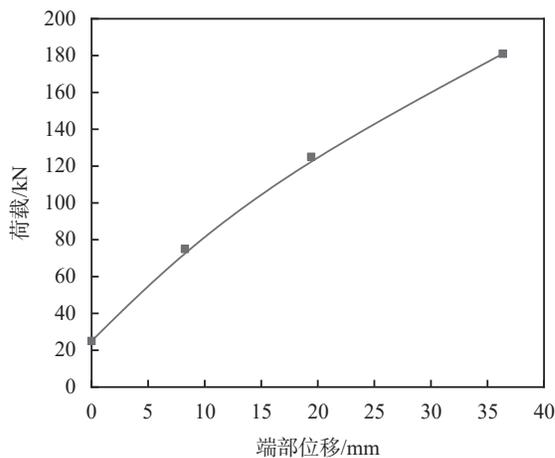


图3 中空 GFRP 筋土钉荷载-位移曲线

影响,模型尺寸为 $2\text{ m} \times 10\text{ m} \times 2\text{ m}$,土钉采用现场试验中对应的中空 GFRP 筋土钉,土钉周围水泥浆范围为直径 10 cm ,水泥浆及土体均采用实体单元,其中土钉和水泥浆采用线弹性模型,土体采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型,模型四周约束其法向位移,底部采用固定支座约束,顶部不做约束。考虑到现场抗拔试验,在试验过程中,张拉机直接作用在土体上,为和现场试验相符合,土钉临空侧约束了除土钉外其它部分的法向位移,同时为模拟和现场试验相同的埋深条件,通过在顶部施加覆荷载的方式进行模拟。土体的计算参数按岩土工程勘察报告选用,其重度为 18.4 kN/m^3 ,黏聚力为 18 kPa ,内摩擦角为 14° ,弹性模量为 12 MPa ,泊松比为 0.3 ,在 FLAC3D 输入参数时将弹性模量和泊松比换算为体积模量和剪切模量。土体与水泥浆及水泥浆与土钉之间采用接触面单元模拟,接触面单元遵循莫尔-库仑破坏准则,接触面单元的接触刚度取相邻单元等效压缩模量的 10 倍,黏聚力和内摩擦角根据现场试验和模型试

算得出,物理力学参数如表 1 和表 2 所示。为减少计算量,计算模型取建立模型的一半(见图 4)。

表 1 材料参数表

名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa
土体	18.4	12	0.30	19
GFRP筋	20.0	46000	0.28	
水泥砂浆	22.0	3000	0.25	

表 2 接触面参数表

接触类别	法向刚度 K_n/MPa	切向刚度 K_s/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角 $(^\circ)$
GFRP土钉与水泥浆	$5.75\text{e}12$	$5.75\text{e}12$	1760	26
水泥砂浆与土体	$3.75\text{e}11$	$3.75\text{e}11$	23.8	18

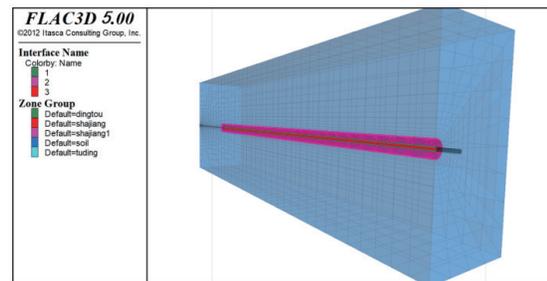


图4 数值模型

数值模拟过程如下:

- (1)初始应力场建立。在不安装土钉的前提下,施加上覆荷载,在施加重力的前提下平衡。
- (2)成孔。去除土钉预定位置周围的土体。
- (3)安装土钉。在预定位置安装土钉,平衡后将位移和速度清零。
- (4)土钉拉拔。通过对钉头施加应力,监测其不同应力下的受力情况,通过对钉头施加恒定速度使土钉达到破坏状态,测定其抗拔承载力。

考虑到 FLAC3D 中若直接施加拉拔力,会导致网格畸变,数值模拟难以收敛,为此,将实际工程中施加的力换算为应力作用于土钉端头。取现场实际的拉拔力 50 kN 、 90 kN 、 180 kN 和 300 kN 换算为应力,作为数值模拟拉拔作用的施加。

数值模拟的土钉荷载-位移曲线结果同现场试验结果对比情况如图 5 所示,由图 5 可见,数值模拟结果与现场试验数据基本一致,验证了数值模拟结果的准确性。

2.2 结果与分析

2.2.1 不同拉拔力下中空 GFRP 筋土钉的响应

(1)位移分布

图 6 为中空 GFRP 筋土钉在不同荷载作用下位

移沿钉长的分布图。由图 6 可知, 不同拉拔力作用下, 位移沿钉长分布方式近乎是相同的, 在靠近钉头处衰减较快, 近似呈对数分布, 位移集中在土钉端部 2 m 的范围之内, 随着荷载的增大, 位移沿钉长的变化趋势并未发生改变, 而土钉的位移范围进一步增大, 最大位移值进一步增大, 且最大位移的增加呈现出了明显的非线性特征。当施加的拉拔力为 300 kN 时, 此时达到土钉的抗拔极限承载力, 土钉发生破坏, 土钉全长均表现出较大的位移。

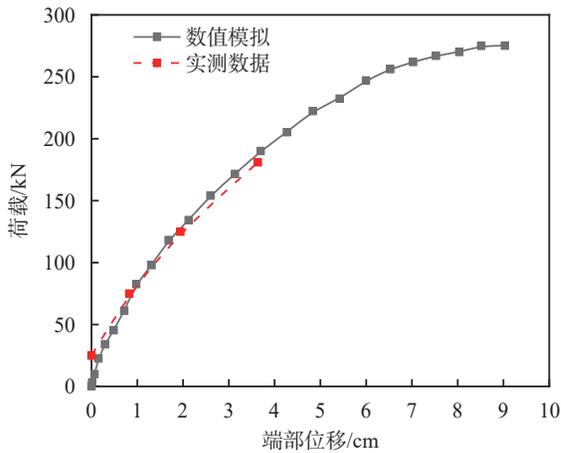


图 5 数值结果与现场试验结果对比

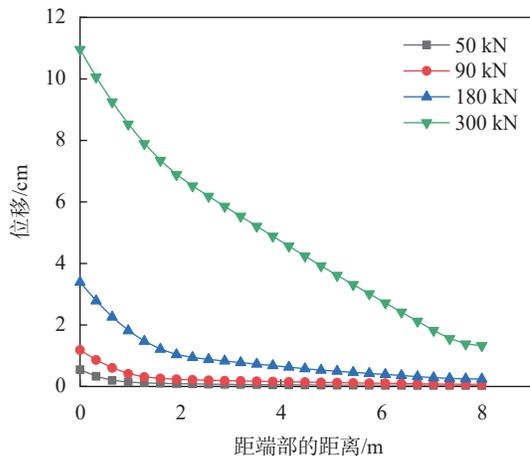


图 6 不同荷载下中空 GFRP 土钉位移沿钉长分布图

(2) 轴力分布

图 7 为不同荷载下中空 GFRP 筋土钉轴力沿钉长的分布图, 由图 7 可知, 中空 GFRP 筋土钉的轴力主要分布在前端, 且轴力衰减速度较快, 最后在底端部轴力趋于 0。随着荷载的不断施加, 轴力逐渐向内部传递, 在土钉破坏时, 全长均分布有较高的应力, 这与土钉的位移分布趋势相同, 其原因在于在荷载施加过程中, 土钉轴力的递减是由于 GFRP 土钉与水泥浆的摩擦引起的, 而越靠近钉头的 GFRP 筋的变形越大, 水泥浆与 GFRP 筋之间的摩擦越大, 因而导致

了轴力在靠近钉头位置衰减较快的趋势, 而在破坏时土钉已经出现了明显的滑移, GFRP 筋整体均维持较高的应力水平。

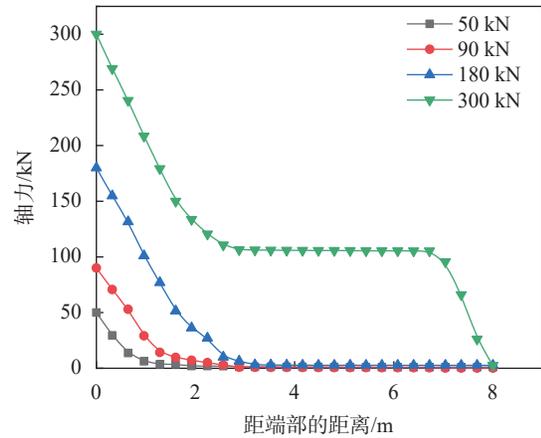


图 7 不同荷载下中空 GFRP 筋土钉轴力沿钉长分布图

(3) 剪应力分布

图 8 为中空 GFRP 筋土钉剪应力沿钉长的分布图, 由图 8 可知, 拉拔力较小时, 剪应力主要分布在端头处, 随着拉拔力的增加, 剪应力向内传递, 剪应力集中分布在土钉前端 3.5 m 范围内, 且存在明显的峰值。剪应力从钉头处逐渐增加, 至 1.5 m 附近处达到峰值, 在距离钉头 3.5 m 左右剪应力衰减至 0, 而后基本不变, 增大拉拔力后, 剪应力峰值在荷载增长前期增加较快, 后期增长较为缓慢, 但仍分布在前端 3.5 m 范围, 剪应力的峰值位置并无明显移动。当拉拔力进一步增加为 300 kN, 此时土钉发生破坏, 剪应力出现了在末端较大的情况。分析剪应力出现上述分布及变化趋势的原因, 首先土钉的位移和轴力的分布主要集中在端部, 且衰减较快, 从而限制了土钉剪应力的传递, 其次在拉拔力较小时, 土钉前端的摩阻力并未完全发挥, 随着拉拔力的进一步增大, 摩阻力充分发挥, 因而出现了剪应力在前期增长较快, 后期增长较为缓慢的现象。

2.2.2 土钉内径对抗拔的影响

中空率是中空 GFRP 筋土钉的一项重要参数, 对土钉轴力分布及抗拔承载力有一定影响。因此在设定 GFRP 筋外径为 32 mm 情况下, 探究了不同中空率下土钉的轴力分布规律与抗拔承载力。考虑到数值模拟中施加的荷载为应力, 由于不同内径的土钉施加相同拉拔力时应力不同, 难以进行比较, 因此本节对不同内径下的 GFRP 筋土钉施加相同应力进行比较, 施加的应力统一取前节所选取的 145 MPa。

(1) 轴力分布

图 9 为不同内径下施加相同应力的轴力图, 由

图9可知,在施加相同应力时,不同内径的土钉轴力沿钉长的分布形式无明显变化,仍呈指数型衰减,但随着土钉内径的增加,其轴力沿钉长方向的递减规律呈现出了明显的差异性,整体表现为随着内径的增加,轴力沿钉长的递减速度加快。这是由于随着土钉内径的增大,内部水泥浆的面积增大,摩擦作用增大,因而轴力衰减明显,分布相对集中。

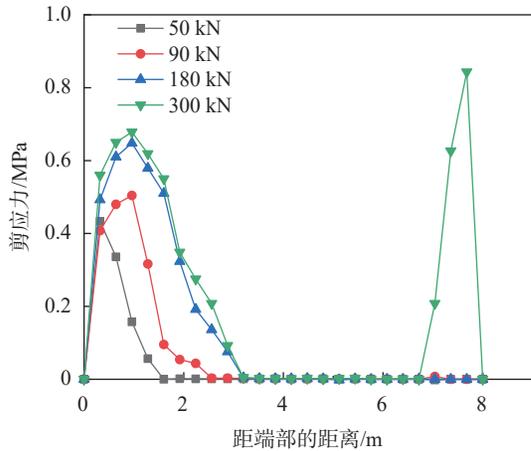


图8 不同荷载下中空 GFRP 筋土钉剪应力沿钉长分布图

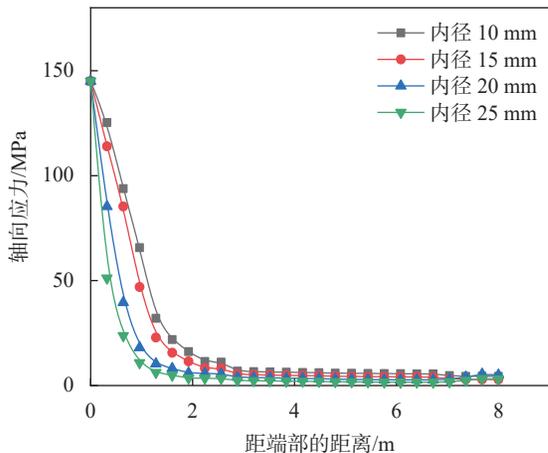


图9 不同内径下中空 GFRP 筋土钉轴力沿钉长分布图

(2)荷载-位移曲线

图10为不同内径下土钉的荷载-位移曲线,由图10可知,随着土钉内径的增大即中空率的提高,土钉极限拉拔应力有了显著提高,这主要是由土钉与水泥浆的接触面积增大和水泥浆对土钉的共同约束作用造成的。

外径一定的前提下,不同内径的芯杆实体截面积不同,因而采取拉拔应力对土钉进行了分析,但考虑到土钉壁厚变薄之后,其强度会明显降低,同时抗拉性能下降。不同土钉内径下的抗拔力的变化曲线如图11所示,由图11可知,当土钉内径小于等于15 mm时,土钉的极限拉拔力随内径的增加整体呈上升趋势,但当土钉内径大于15 mm时,土钉的极限拉拔

力随内径的增加开始呈下降趋势,据此可以得出,此种外径为32 mm的中空土钉的内径取为15 mm时,可实现在节省材料前提下达到较好的支护效果。

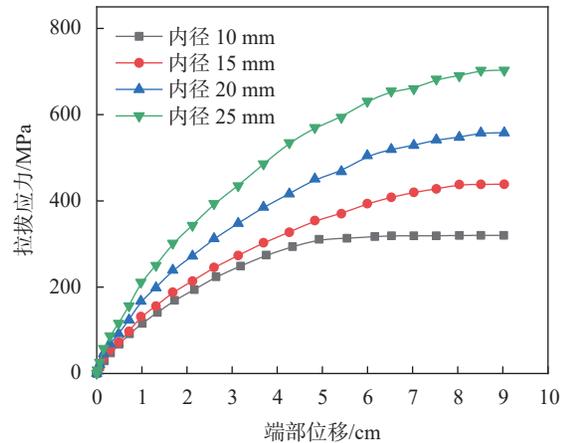


图10 不同内径下中空 GFRP 筋土钉荷载-位移曲线

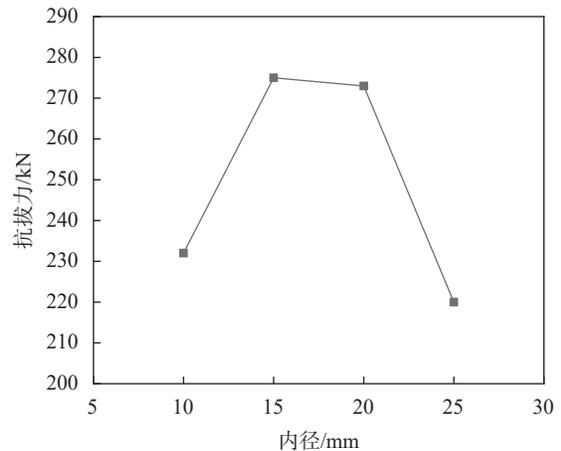


图11 不同内径下中空 GFRP 筋土钉抗拔力变化图

2.2.3 土钉长度对抗拔的影响

土钉的长度对其拉拔过程中的轴力分布和抗拔力均有一定的影响^[15-16],为此探究了在施加相同拉拔力时土钉的轴力分布(本研究选取抗拔力为90 kN,在其它拉拔力作用下规律相同),同时进一步探究了长度对抗拔力的影响。

(1)轴力分布

图12为不同长度土钉轴力沿钉长的分布,由图12可知,不同长度的土钉其轴力均表现为向内衰减的特性,其中长度短的土钉的衰减速度更快,轴力更为集中,随着土钉长度增加,其轴力有进一步向内扩展的趋势,但当土钉长度达到8 m时,继续增加土钉长度对轴力分布的影响并不明显。

(2)荷载位移曲线

图13为不同长度的土钉的荷载-位移曲线,由图13可知,不同长度的土钉前期荷载-位移曲线形态相近,随着拉拔力的增大,土钉的荷载-位移曲线表

现出了明显的塑性特征, 呈现非线性分布。

图 14 为不同长度下土钉抗拔力变化, 由图可知, 随着土钉长度的增加, 土钉的抗拔力随之增大, 但并非呈线性增大, 表现为前期增长较快, 后期增长缓慢。

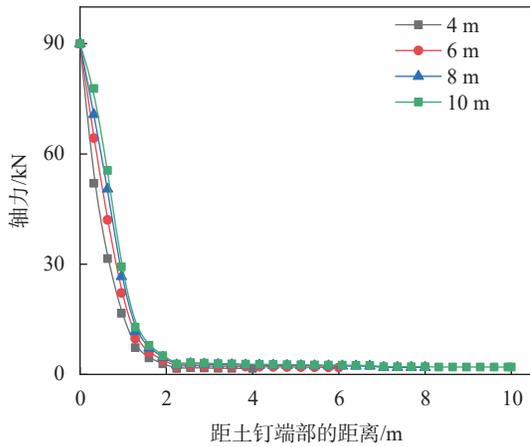


图 12 不同长度下中空 GFRP 筋土钉轴力沿钉长分布图

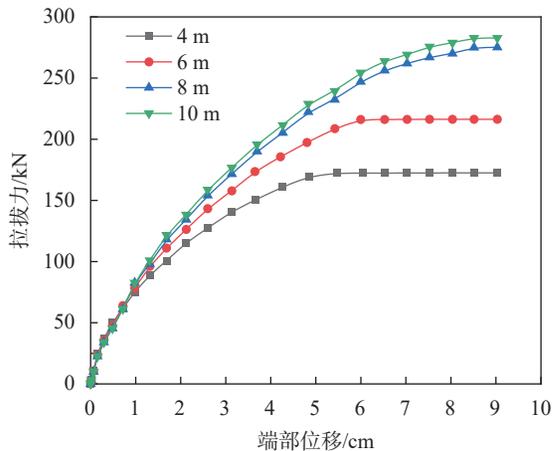


图 13 不同长度下中空 GFRP 筋土钉荷载-位移曲线

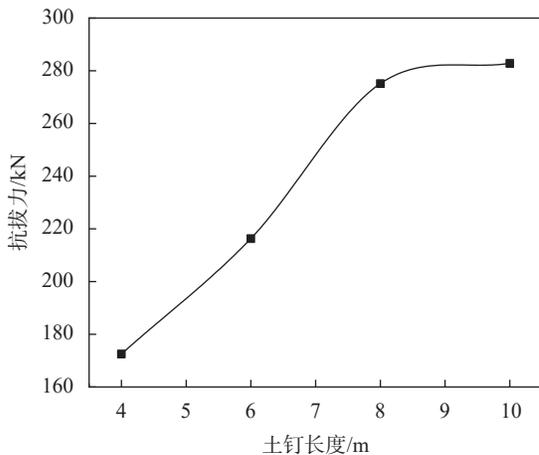


图 14 不同长度下中空 GFRP 筋土钉抗拔力变化图

3 中空 GFRP 筋土钉抗拔机理分析

与传统土钉不同, 由于中空 GFRP 筋可兼做注浆管, 导致中空土钉内部填充水泥浆。综合现场试验和数值模拟, 中空型 GFRP 筋土钉具有更高的承载

力, 为深入了解其受力机理和承载能力, 需对其进一步分析。

图 15 为中空 GFRP 筋土钉拉拔过程中的受力机理图, 中空 GFRP 筋土钉由于其内部水泥浆的存在, 增大了 GFRP 筋体与水泥浆的接触面积, 显著提高了 GFRP 筋与水泥浆的黏结力, 提高其安全性能。同时 GFRP 筋由于内部存在水泥浆, 其荷载传递路径为 GFRP 筋将荷载传递给内外两侧水泥浆, 外侧水泥浆将力传递给土体, 内部水泥浆则将荷载向内传递, 起到分担 GFRP 筋荷载的作用, 因而其在拉拔过程中可有效减少土钉位移, 保证其安全性能。

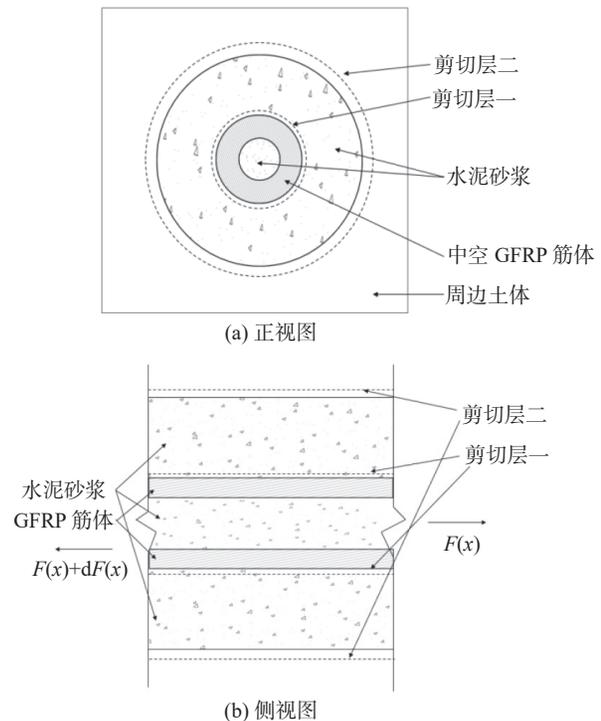


图 15 中空 GFRP 筋土钉抗拔机理示意图

综合现场试验和数值模拟, 土钉的拉拔大致可分为三个阶段: 第一阶段为弹性阶段, 在拉拔力较小时 (小于 80 kN), 土钉仅在端部发生位移, 土钉的拉拔力和位移近似呈线性分布; 第二阶段为塑性阶段, 此时, 随着拉拔力的增加, 剪应力沿钉长并非均匀分布, 拉拔力和位移为非线性关系; 第三阶段为破坏阶段, 随着荷载的进一步增加, 整个土钉都表现出较高的应力水平, 直至土钉发生拔出破坏。增加土钉长度和内径可延缓土钉的破坏, 但中空型 GFRP 筋土钉内径不易过大, 否则其筋体壁厚过薄, 抗拉强度降低, 在拉拔过程中容易导致 GFRP 筋体的断裂破坏。

4 结论

(1) 中空 GFRP 筋土钉在拉拔过程中, 其轴力和位移沿钉长的分布呈现出明显的非线性特征, 呈现出

指数型衰减,最后趋于0,随着拉拔力的增大,其轴力的影响范围进一步增大,当拉拔力增加至破坏荷载时,土钉全长均存在较高的轴力;其剪应力的分布呈现出明显的“峰值”特征,剪应力主要分布在土钉前段0~3.5 m范围,剪应力峰值出现在距端部1.5 m左右位置,前期随着荷载的增加,剪应力增长较快,到加载后期,土钉界面已充分发挥摩阻力,其剪应力增长相对缓慢。

(2)在相同拉拔应力下,随着土钉的内径增大,土钉的轴力分布相对比较集中;在相同的拉拔力下,不同长度土钉轴力均表现为向内衰减的特征,但长度较短的土钉,其轴力分布更为集中,随着土钉长度的增大,轴力有向内部进一步扩展的趋势。

(3)中空 GFRP 筋土钉在拉拔过程中的全程荷载-位移曲线大致可划分为弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段;由于中空型土钉内部充填砂浆,增大内径可提高中空土钉的抗拔力,但同时也会减小土钉抗拉强度,数值分析表明,外径 32 mm 的中空 GFRP 筋土钉内径取为 15 mm 时可较好发挥其抗拉、抗拔强度特性。

(4)中空型 GFRP 筋土钉已成功应用于北京地铁 12 号线北岗子站基坑支护。基坑监测显示,土钉墙坡顶的最大水平位移为 15.33 mm,垂直位移为 14.39 mm,远小于建筑基坑监测技术标准(GB 50497—2019)^[17]中的位移限值;中空 GFRP 筋土钉最大位移为 11.56 mm,最大轴力为 40.67 kN,远小于其极限破坏荷载。同时,相比传统土钉,中空 GFRP 筋土钉减小了环境污染,拥有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 刘 军,周与诚,白雪峰. 基坑工程设计施工及风险控制[M]. 北京:清华大学出版社,2023.
- [2] 刘伟庆,方 海,方 园. 纤维增强复合材料及其结构研究进展[J]. 建筑结构学报,2019,40(4): 1-16.
- [3] 刘 军,原海军,李京凡,等. 玻璃纤维筋在盾构工程中的研究与应用[J]. 都市轨道交通,2014,27(1): 81-85,103.
- [4] 马崇武,刘忠玉. 土钉拉拔过程数值模拟[J]. 玻璃钢/复合材料,2013,(S3): 12-15.
- [5] 匡 政,张明义,白晓宇,等. 风化岩地基GFRP抗浮锚杆力学与变形特性现场试验[J]. 岩土工程学报,2019,41(10): 1882-1892.
- [6] 孙 丽,杨泽宇,朱春阳,等. GFRP筋纤维混凝土黏结滑移性能试验研究[J]. 土木工程学报,2020,53(S2): 259-264.
- [7] 白晓宇,刘雪颖,张明义,等. GFRP筋及钢筋抗浮锚杆承载特性现场试验及荷载-位移模型[J]. 复合材料学报,2021,38(12): 4138-4149.
- [8] 白晓宇,井德胜,王海刚,等. GFRP抗浮锚杆界面黏结性能现场试验[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(4): 748-763.
- [9] 朱鸿鹄,张诚成,裴华富,等. GFRP土钉拉拔特性研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(10): 1843-1849.
- [10] 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(4): 131-136.
- [11] 陈 超,徐东升,徐学勇,等. 玻璃纤维锚杆在基坑支护中的应力分布规律[J]. 科学技术与工程,2020,20(32): 13394-13401.
- [12] 罗金标,彭哲琦,汪 昕,等. 新型玄武岩纤维复合材料(BFRP)锚杆力学性能研究[J]. 复合材料科学与工程,2022,(12): 79-86.
- [13] 刘 军,宋 晔,张健全,等. GFRP筋土钉支护钉头的锚固性能[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文),1-10 [2023-12-04]<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220430.1400.004.html>.
- [14] JGJ 120—2012 建筑基坑工程支护技术规程[S].
- [15] 冯 君,王 洋,吴红刚,等. 玄武岩纤维复合材料土层锚杆抗拔性能现场试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(7): 2563-2573.
- [16] 张耀升,王连广,黄小斌,等. 注浆锚杆界面应力分析及临界锚固长度计算[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(11): 1618-1624.
- [17] GB 50497—2019 建筑基坑工程监测技术标准[S].

收稿日期:2023-04-20