

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.01.020

GFRP 筋土钉支护作用仿真与受力分析^{*}

金清平¹, 姚鹏¹, 陆伟², 陈智²

(1. 武汉科技大学城市建设学院, 武汉 430065; 2. 华中科技大学土木工程与力学学院, 武汉 430070)

摘要: 玻璃纤维增强塑料 (GFRP) 筋能替代钢筋作为土钉支护材料。以某工程基坑开挖支护为背景, 利用有限元进行 GFRP 筋和钢筋土钉支护的仿真分析与比较。结果表明, GFRP 筋的受力随着开挖深度增加呈现较平稳的增长, GFRP 筋的受力增长幅度明显要小于钢筋, 整个施工过程中钢筋的受力比 GFRP 筋大。在一定埋深范围, 两种材料土钉受力分布相似; GFRP 筋土钉体受力分布更均匀, 在埋深越大的筋体段, 受开挖深度影响越大, 承力变化更明显。利用仿真分析有助于研究 GFRP 筋土钉受力分布和作用机理。

关键词: GFRP 筋; 土钉支护; 施工; 仿真

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)01-0089-04

Simulation and Force Analysis of GFRP Soil Nailing in Construction

Jin Qingping¹, Yao Peng¹, Lu Wei², Chen Zhi²

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Replacing the reinforcement as soil nailing, GFRP bars have obvious differences in mechanical properties with the reinforcement. According to a excavation engineering, two different materials of soil nailing were simulated and compared by finite element soft. The results show that the force of GFRP bars increase steadily with the depth of excavation, and the force growth rate of GFRP bars is significantly less than the reinforcement. Throughout the construction process, reinforcement force is larger than the GFRP bars. In a certain depth range, the force distribution of both materials soil nailing are similar. The force of GFRP soil nailing is more evenly distributed. In deeper place, GFRP soil nailing are impacted more significantly by excavation depth, and force changes of GFRP soil nailing are more obvious. Software simulation contributes to research on force distribution and mechanism of GFRP soil nailing.

Keywords: GFRP bars; soil nailing; construction; simulation

土钉支护技术在基坑开挖、边坡支护上是可行而且很有竞争力的工程技术, 近年来受到了广泛关注。玻璃纤维增强塑料 (GFRP) 筋能较好替代钢筋作为土钉, 从国外研究来看, 已经对纤维复合材料的理论与工程应用开展了较深入研究, 成功将 GFRP 材料和土钉应用结合起来, 取得了 GFRP 在土钉支护方面的许多成果^[1-5]。国内也对 GFRP 筋土钉进行了理论分析与试验研究^[6], 并在工程中成功用于边坡支护^[7-8], 对比了纤维复合材料与钢筋的性能, 认为纤维复合材料对边坡加固是可行的^[9]。GFRP 土钉支护结构中筋体材料和钢筋的力学参数有较大不同, 因此在应用中还需进一步研究筋体承力规律。

在法国著名土钉墙项目 Cluoterre 研究中, P. Unterreiner 等^[10]采用平面有限元的分析方法对土钉支护结构进行模拟计算, 计算结果与测试结果较为吻合。秦四清等^[11]针对实际工程开挖监测数据,

成功运用平面有限元分析方法进行了模拟计算, 并比较了支护和无支护开挖结构的位移、受力和破坏等规律。L. M. Smith^[12]、张明聚^[13]等利用三维有限元计算土钉支护结构的位移和内力, 得到基坑开挖中土钉支护结构的受力规律。李志刚^[14]结合工程实践, 利用数值模拟计算, 对直径为 21 mm 的复合材料进行了复合材料土钉、钢筋土钉与预应力复合材料土钉支护方式中变形的比较, 结果复合材料土钉变形最大。笔者根据某开挖基坑土钉支护工程, 利用三维计算软件进行模拟计算, 比较不同性能的土钉钉体材料 GFRP 筋与钢筋的受力分布, 验证 GFRP 土钉的工程可行性, 笔者采用的 GFRP 材料

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (51278391), 湖北省教育厅优秀中青年人才项目 (Q20121111)

联系人: 金清平, 副教授, 主要从事 FRP 在土木工程的应用研究

收稿日期: 2014-10-28

为玻璃纤维增强聚乙烯复合材料。

1 土钉支护作用机理

在基坑或边坡开挖中,坡面失去开挖部分土体的支撑作用,开挖到一定深度后土体自稳失衡,因此需要支护作用以保持稳定。土钉支护就是在土层中植入加筋体以增强开挖临空面的稳定。根据以往研究,土钉筋体剪切力对支护结构作用非常微小,弯曲刚度影响也很小,用土钉增强土体构成的复合体结构中,土钉主要以拉力为主,土体细微的位移能使得土钉筋体达到极限作用状态。土钉筋体能与增强的土体形成整体,在开挖进一步增大后,随着土体塑性变形的增大,土钉筋体与土体由共同受力逐渐过渡到土钉受力为主,土体塑性区开展后,土钉承力作用更大,由于土钉材料弹性模量要大得多,因此对土体开裂区的形成和延展有较好的制约作用。基于以上的作用机理,土钉支护结构在分析计算中存在内部稳定和外部稳定,计算理论也不同,土钉筋体的受力对结构稳定起着关键的作用。

2 仿真计算分析

2.1 模型建立

本工程基坑长约 500 m,宽约 100 m,工程周围有大型公共建筑。基坑上层采用土钉墙支护,坡面 80°,采用矩形布置,水平和垂直间距均为 1.4 m,设置角度为 10°,开挖深度 6 m,在 1.25 m 深处设置第一排土钉,2.65 m 深处设置第二排土钉,4.05 m 深处设置第三排土钉,5.45 m 深处设置第四排土钉。边坡在开挖中,开挖一定深度的土体(即第一阶段),然后植入土钉(材料为 FRP 筋),灌砂浆,再往下开挖一定深度(即第二阶段),再植入土钉(材料为 FRP 筋),每一阶段之间的距离是根据植入土钉的所需要的间距决定的,而土钉的间距根据设计计算确定,一般取值为 1.5~2.0 m,笔者取值 1.5 m。

在 FLAC 3D 中,用 Brick 单元模拟土体,用 Cable 单元模拟 GFRP 筋。选取计算模型的长度为 25 m,将开挖面右侧 10 m 处设定为右边界,开挖面左侧 15 m 处为左边界;计算模型的高度为 15 m,将坡底处坐标设定为零,为下边界,向上 9 m 处为基坑坑底,再向上 6 m 处为上边界,如图 1 所示。

模型各面均采用固定约束。根据实际开挖和支护过程进行仿真计算,得到各阶段的土钉受力。施工仿真模型如图 2 所示。土钉选取的材料有两种,一种是 HRB335 钢筋,直径 25 mm;一种是 GFRP 筋,直径 25 mm。钻孔孔径 130 mm,灌浆水泥采

用 425[#],水泥拉伸弹性模量取 32.5 GPa,水泥浆摩擦角 50°。GFRP 筋拉伸弹性模量为 45 GPa,泊松比采用 0.20。钢筋拉伸弹性模量为 200 GPa。

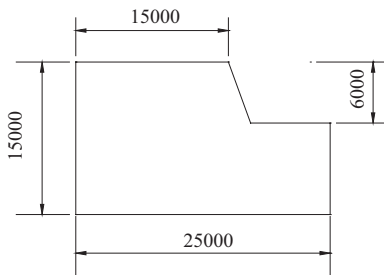


图 1 基坑开挖侧面图

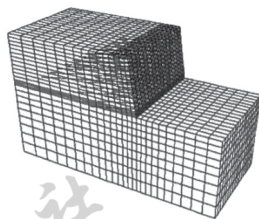


图 2 基坑开挖仿真模型

岩土体的变形参数采用的是剪切弹性模量 G 和体积弹性模量 K , 如式 (1~2)。

$$k = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

式中: E 为土体拉伸弹性模量, MPa; ν 为土体泊松比。

2.2 两种材料土钉受力比较分析

用 GFRP 土钉替换钢筋土钉,采取与钢筋土钉支护相同的施工方案,通过数值模拟来研究 GFRP 土钉支护结构系统的规律,并和钢筋土钉支护进行比较。

各排钢筋土钉和 GFRP 土钉在各个开挖阶段钉体受力分布规律及其比较,如图 3~图 5 所示。

第一排土钉上各点位置的受力变化随着开挖深度的增加,变化规律有区别。在开挖第一步由于基坑边坡的自稳能力,两种筋体几乎不受力,随着开挖深度增加,土钉开始发挥作用。从图 3 可以看出,在前三阶段开挖中钢筋受力增加更快,在第四阶段接近基坑底部时两种材料的受力增长率达到一致, GFRP 筋的受力呈现较平稳的增长,但是整个过程钢筋的受力比 GFRP 筋要大。随着开挖深度增大,两种材料受力也呈现差异。由图 4、图 5 可以看出, GFRP 筋在整个施工阶段受力较钢筋小,而 GFRP 筋的受力增长幅度明显要小于钢筋增长,并且在后期开挖中, GFRP 筋受力减小趋势更明显。再植入

第四排土钉后,向下开挖 0.5 m 达到开挖全深。较小的开挖深度导致两种材料土钉的受力变化幅度都不大,但是规律和前面几排土钉类似。由于 GFRP 筋的拉伸弹性模量远小于钢筋,因此在支护中承担的力相对较小,而是和土体形成更好的复合结构,共同承担荷载,保持边坡稳定,弱化某一种材料的作用,这样使得材料的受力更加均匀,有利于控制安全性。从以上比较可知, GFRP 筋土钉支护受力能更有利于整个结构共同作用,受力变化平缓。

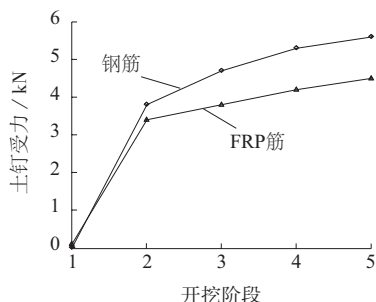


图3 第一排土钉受力变化

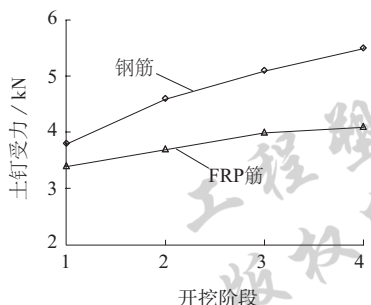


图4 第二排土钉受力变化

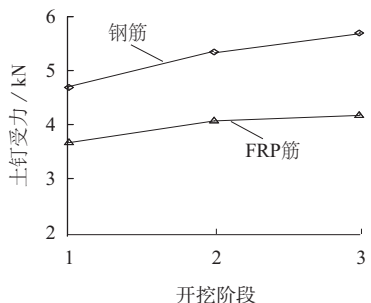


图5 第三排土钉受力变化

2.3 GFRP 筋体应力分布

分析第一排土钉在开挖过程中各点的受力变化,土钉体长 8 m,分别提取土钉点位距外缘 0.8 m,2.4 m,4.0 m,5.6 m,7.2 m 位置的受力,在开挖过程中产生的变化,如图 6~图 8 所示,其中,第一步开挖和最后一步开挖影响较小,故不列出。筋体外缘指的是植入土体中的筋体靠近被开挖的土体边坡临空面的方向。

从开挖阶段来看,钢筋土钉与 GFRP 筋土钉上

各点变化规律类似, GFRP 筋支护中在各阶段产生的变化相对较小,在起初开挖阶段钉体 2.4 m 段承受的力最大,筋体远端承载力很小,中点 4 m 及向外缘的受力相对较大,而较深的埋设段受力较小,随着开挖深度增加, GFRP 筋体受力逐渐向埋深较深的筋体段再分配。整个开挖阶段比较, GFRP 筋土钉沿着筋体分布力远端较钢筋土钉筋体变化大,而中间段及临近外边缘的受力相对平缓均匀,开挖越深,对埋设较深的筋体影响更大。受力分布与材料的力学性质有关,由于拉伸弹性模量差别较大,导致两种材料在支护中受力后表现出不同的变形, GFRP 筋拉伸弹性模量小,变形相对大,有利于力在筋体中扩散分布,因此表现出受力分布更加均匀。

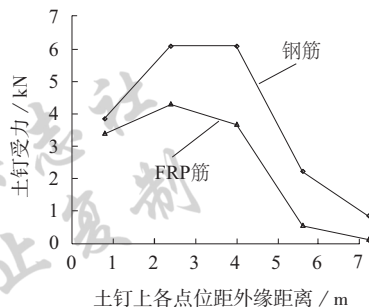


图6 第二步开挖第一排土钉各点受力变化图

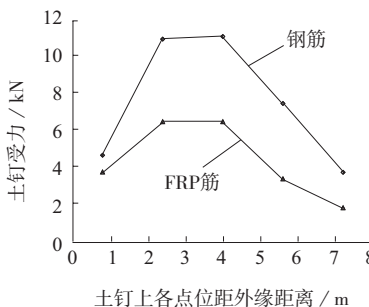


图7 第三步开挖第一排土钉各点受力变化图

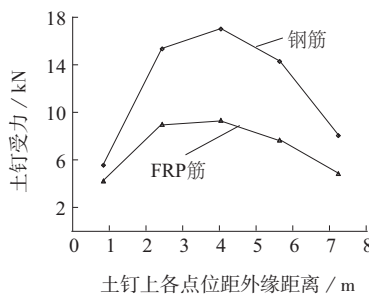


图8 第四步开挖第一排土钉各点受力变化图

3 结论

(1) GFRP 筋与钢筋作为土钉材料,在受力上存在一定差异性, GFRP 筋的受力随着开挖深度增加呈现较平稳的增长, GFRP 筋的受力增长幅度明显小于钢筋,整个施工过程中钢筋的受力比 GFRP 筋

要大。

(2) 两种材料土钉体受力分布有异同,在外缘至一定距离的土钉深度,两种材料受力相似,不同之处是在开挖中 GFRP 筋较钢筋土钉受力分布均匀,在埋深越大的筋体段, GFRP 受开挖深度影响越大,承载力变化更明显。

(3) 在分析中忽略了砂浆握裹体与两种材料的相互作用,以及对支护结构的影响,可以借助通用有限元进一步进行局部作用分析。

参考文献

- [1] Benmokrane B, Xu H, Bellavance E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, 33(5):455-465.
- [2] Frost J D, Han J. Behavior of interfaces between fiberreinforced polymers and sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(8):633-640.
- [3] Benmokrane B, Wang Peng, Ton-That T M, et al. Durability of glass reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment[J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(3):143-153.
- [4] Chen Y M, Choi Y K, Yeung A T, et al. New soil nail material—pilot study of grouted GFRP pipe nails in Korea and Hong Kong[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(3):93-102.
- [5] Hong Yungshan, Wu Chosen, Yang Shangheng. Pullout resistance of single and double nails in a model sandbox[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(5):1 039-1 047.
- [6] 黄生文,邱贤辉,何唯平,等. GFRP 土钉主要性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(8):74-78.
Huang Shengwen, Qiu Xianhui, He Weiping. GFRP soil nail material test pull-out test failure characteristics[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(8):74-78.
- [7] 彭衡和,邱贤辉. GFRP 锚杆加固高速公路红砂岩边坡的工程实例分析[J]. 公路工程, 2008(4):114-117.
Peng Henghe, Qiu Xianhui. Case study on GFRP bolts reinforcing red-sand stone slope in expressway[J]. Highway Engineering, 2008(4):114-117.
- [8] 李国维,刘朝权,黄志怀,等. 应用玻璃纤维锚杆加固公路边坡现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(9):4 057-4 061.
Li Guowei, Liu Chaoquan, Huang Zhihui, et al. In-Situ test of glass fiber reinforced polymer anchor on highway slope reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(9):4 057-4 061.
- [9] 刘汉东,于新政,李国维. GFRP 锚杆拉伸力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20):3 719-3 723.
Liu Handong, Yu Xinzheng, Li Guowei. Experimental study on tensile mechanical properties of glass fiber reinforced plastic rebar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20):3 719-3 723.
- [10] Unterreiner P, Schlosser F, Benhamida B. Calculation of the displacement of a full scale experiment soil nailed wall-french national research project clouterre: The Practice of soil reinforced in Europe[C]. London: Thomas Telford House, 1995.
- [11] 秦四清,王建党,王清,等. 土钉支护机理与优化设计[M]. 北京:地质出版社, 1999.
Qin Siqing, Wang Jiandang, Wang Qing, et al. Soil nailing mechanism and optimal design[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.
- [12] Smith L M, Su N. Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(9):583-597.
- [13] 张明聚,宋二祥,陈肇元,等. 土钉支护的三维非线性有限元分析[J]. 工程力学, 1998(S1):341-346.
Zhang Mingju, Song Erxiang, Chen Zhaoyuan, et al. Three-dimensional nonlinear finite element analysis of soil nailing[J]. Engineering Mechanics, 1998(S1):341-346.
- [14] 李志刚. 复合材料土钉受力机制及数值分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12):1 953-1 956.
Li Zhigang. Mechanical character of composite material soil-nail and numerical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12):1 953-1 956.

荷兰帝斯曼在华落成研发中心

荷兰皇家帝斯曼集团不久前在南京正式落成启用复合材料树脂研究开发与技术服务中心。

该公司称,新研发中心位于帝斯曼复合材料树脂在中国的生产基地——金陵帝斯曼树脂有限公司在南京化学工业园区的树脂工厂内,拥有多个合成实验室以及阻燃、真空导入、耐腐蚀、模压、拉挤等技术应用实验室,具备从树脂配方到复合材料应用开发的一系列研发能力。

帝斯曼复合材料树脂集团总裁 Bert Bakker 表示,中国复合材料行业在过去二十年里有了飞跃式的发展,复合材料的应用领域越来越广,对产品的性能要求也越来越高,越来越

越具体。

他强调说:“中国是帝斯曼的重要战略市场之一,为了实现可持续增长,单纯依靠产能的扩充已经不能满足市场的需求,我们必须通过创新来提升核心竞争力。”“把研发和技术服务中心建在南京的树脂工厂内部,一方面能够更加快速地对市场和客户的需求,另一方面研发和技术能够更加紧密地协作,相互配合,做到资源共享。” Bert 补充道。

该中心的总投资近 4 000 万元,整个团队由二十多位国内外复合材料专业人才组成,并将与荷兰总部的研发中心以及国内外知名大学、研究机构展开合作,从产品性能和生态环保两个维度进行创新。
(中国聚合物网)