

文章编号:1671-6833(2011)02-0071-04

## 砂浆粘结 GFRP 土钉抗拔承载力室内试验研究

马崇武<sup>1</sup>, 刘忠玉<sup>2</sup>, 周高永<sup>2</sup>

(1. 东莞理工学院 建筑工程系, 广东 东莞 523808; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 为探索 GFRP 筋代替钢筋用作土钉抗拉材料的可行性, 自制了试验模型箱, 通过室内拉拔试验, 探讨了拉拔过程中砂浆粘结 GFRP 土钉钉头位移的变化情况以及极限抗拔力随土体覆压力的变化规律。试验结果表明, 砂浆粘结 GFRP 土钉的拉拔特性类似于砂浆粘结钢筋土钉, 且钉头位移和拉拔荷载之间的关系可用双曲线来描述。此外, 在进行土钉抗拔承载力计算时, 对密实填土宜考虑钉土界面处的剪胀效应。

**关键词:** 土钉; 室内试验; 玻璃纤维增强塑料; 抗拔承载力; 剪胀

**中图分类号:** TU432

**文献标志码:** A

### 0 引言

钢筋作为一种传统抗拉材料用作土钉的筋材在支护工程中被广泛使用, 而钢筋的耐腐蚀性差一直是永久锚固工程中的隐患, 因此在保持加固体系的安全性、稳定性且成本适宜的前提下, 引入新型的耐腐蚀材料以达到加固的耐久性效果越来越受到大家的重视。另外, 随着城市大规模建设的发展, 在临近原有建筑物附近修建新的建筑物的现象比较普遍, 这样原有建筑物的基坑支护如采用土钉墙, 那么这些旧钢筋土钉的存在, 就会影响到新建筑物基础工程的施工, 特别是桩基础。因此, 如果能用一种易切割的新材料代替钢筋来制作土钉, 不用考虑后期拆除的问题, 则会大大拓宽土钉的适用范围。玻璃纤维增强塑料 (Glass Fiber Reinforced Polymer, 简称 GFRP) 筋就是可选材料之一, 它具有强度高、质量轻、耐腐蚀性强、易切割、低松弛、耐电磁等诸多优点, 作为一种新型复合材料具有很高的性价比, 如能将 GFRP 筋代替钢筋, 可以解决钢筋土钉存在的诸多问题。

和钢筋土钉一样, 在 GFRP 土钉墙支护设计时, 土钉的抗拔承载力仍是重要指标之一, 对此可以借鉴已有的在钢筋土钉抗拔特性方面的研究成果。例如, 文献[1-2]将荷载传递函数引入到土钉平均极限抗拔力的计算中; 文献[3]把土钉墙

的抗拔力分为钉土作用抗拔力和土体自承作用抗拔力两部分; 文献[4-5]强调了施工过程对土钉受力的影响; 文献[6]通过数值模拟分析了土钉抗拔的破坏形式; 文献[7]通过室内模型试验研究了钉土界面位移与剪应力的关系; 文献[2, 8-10]通过现场试验分析了影响钉土界面强度或抗拔力的主要因素; 文献[11]在计算土钉的抗拔承载力时考虑了钉土界面的剪胀效应。总的来说, 土钉的抗拔特性受土层特性、钉土界面性质、筋材材料特性、筋材与砂浆间的粘结特性以及施工过程等因素的影响。

为检验 GFRP 筋在土钉墙设计中的适用性, 文献[12-13]已初步进行了 GFRP 筋与水泥砂浆之间的粘结性能试验。为了解 GFRP 土钉的抗拉特性, 笔者自制了模型试验箱, 拟通过拉拔试验, 讨论砂浆粘结 GFRP 土钉钉头位移的变化规律, 研究其抗拔承载力、土钉侧面摩阻力与土体覆压力的关系。

### 1 试验方案

#### 1.1 试验箱及填土

箱体四角采用 50 mm × 50 mm 角铁, 其他各面采用 4.5 mm 钢板, 截面尺寸为长 × 宽 × 高为 1.5 m × 1.5 m × 1.0 m, 箱体四周用槽钢加固, 槽钢规格 80 mm × 5 mm, 在箱体纵向面的中心处切

收稿日期: 2010-09-26; 修订日期: 2010-10-17

基金项目: 广东省科技计划项目 (2007B060401021), 东莞市科技计划项目 (2008108101025)

作者简介: 马崇武 (1965-), 男, 甘肃甘谷人, 东莞理工学院教授, 博士, 主要从事环境与基础工程中的力学问题, E-mail: macw@dgat.eclu.cn.

割直径为 120 mm 的洞.然后,分层填入郑州市某工地粉土压实,用环刀法测得其干密度为  $1.65 \text{ g/m}^3$ ,用固结快剪试验测得其抗剪强度参数:黏聚力  $c = 31.5 \text{ kPa}$ ,内摩擦角  $\varphi = 35^\circ$ .

## 1.2 试验材料

(1) GFRP 筋:本次试验采用的 GFRP 筋为广东晓士达纤维增强塑料公司生产的 ASLAN100,玻璃纤维含量 70%,直径 16 mm,抗拉强度 655 MPa,弹性模量 40.8 GPa,总长度 2 m(拟埋入土中 1.5 m),其表面为增强粘结效果作粘砂处理,并有纤维缠绕形成的螺纹刻痕.试验前检查 GFRP 筋无刻痕、磨损、皱褶、翘曲.由于 GFRP 筋抗剪性较弱,在杆件端部用直径 25 mm × 长 200 mm × 厚 2 mm 钢套管以环氧树脂粘结,以防止 GFRP 筋在达到极限抗拉强度前就在端部受剪压而破坏.

(2) 砂浆:本次试验拟采用 M15 的水泥砂浆,水、水泥和砂质量配合比为 1:1.7:3.4,外加 FND 减水剂来增强砂浆的流动性以便于灌浆.同期制作砂浆试块一组,标准养护 28 d,测得砂浆的实际强度为 14.6 MPa.

## 1.3 GFRP 土钉设置

在模型箱预留孔洞处,水平掏直径为 120 mm 的圆洞,将 GFRP 筋固定在洞的中心位置,然后无压灌入水泥砂浆.为方便浆液流入并充分填满孔洞,可于灌浆前将模型箱适当倾斜,边灌边振捣,最后洞口要适当封堵,等砂浆凝固后再放平.图 1 为灌浆后的土钉模型箱照片.



图 1 灌浆后的土钉模型箱

Fig.1 Photo of model box with grouted soil nail

## 1.4 加载及位移量测装置

为模拟边坡上覆土压力,拉拔前在箱内土体上部施加堆载,静置 3 d 待土体变形稳定后进行拉拔试验.拉拔试验时,用穿心千斤顶加持在 GFRP 筋外露端部的钢套管上施加拉拔力.另在固定于 GFRP 筋外露根部的表架上对称各设置一个百分表,其读数变化的平均值即为土钉的钉头位移.整个试验装置如图 2 所示.

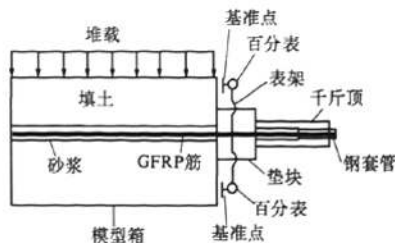


图 2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic of pullout test setup

## 1.5 拉拔试验

待各项工作准备完毕后,开始拉拔试验.加载采用慢速维持荷载法,即以每级加载增量 1 ~ 3 kN 施加拉力,变形稳定后测读钉头位移值,然后施加下一级荷载.试验终止条件取为:①位移突然增加很大(前一级位移增量的 5 倍以上);②千斤顶无法加载,压力表无法稳定;③杆件拉断.本次试验最后都是以满足终止条件②而结束.

## 2 试验结果及分析

限于加载条件,本次试验进行了 3 组,上覆荷载  $p$  分别取为 18.8、35.6 和 53.3 kPa.如实际土体重度以  $18 \text{ kN/m}^3$  计,这分别对应于实际埋深约 1、2 和 3 m.

### 2.1 钉头位移随端部拉力的变化规律

图 3 给出了 3 种上覆压力下土钉顶端位移  $u$  随端部拉力  $F$  的变化曲线.可以看出,3 条曲线都是先陡后缓,并且土钉将要被拔出时的极限位移随上覆压力的增大而增大.这类似于文献[7]对植于密实填土中的钢筋土钉的拉拔试验结果.

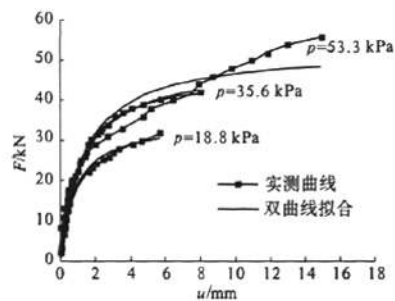


图 3 钉头位移随杆端拉力的变化规律

Fig.3 Curves of displacement of nail head with pullout load

另外,分析曲线的形态,可以用双曲线函数来拟合:

$$F = \frac{au}{b+u} \quad (1)$$

式中: $a, b$  分别为拟合参数,见表 1。从表 1 可以看出,相关系数高达 0.946 以上,这说明用双曲线拟合是合适的。

表 1 双曲线拟和结果

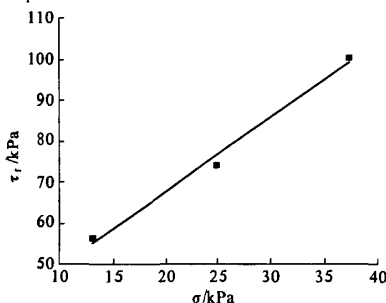
Tab.1 Fitting parameters of hyperbolic function

上覆压力 $p/\text{kPa}$	18.8	35.6	53.3
$a$	35.64	49.72	53.31
$b$	0.93	1.29	1.37
相关系数 $R^2$	0.991	0.998	0.946

## 2.2 钉侧极限摩阻力

在分析平均极限摩阻力  $\tau_f$  与上覆土层压力关系时,压力一般取为土钉周边的平均压力  $\sigma^{[7]}$ 。如果知道了土体的静止土压力系数  $k_0$ ,则  $\sigma = (1 + k_0)\sigma_v/2$ 。一般地,  $k_0 = 1 - \sin\varphi$ 。而上述试验测得的极限拉拔力除以土钉的侧面积即为  $\tau_f$ ,这样可画出  $\sigma - \tau_f$  曲线,并且常用直线拟和,如图 4 所示,则

$$\tau_f = 31.2 + 1.82\sigma = 31.2 + \sigma \tan 61.3^\circ \quad (2)$$

图 4  $\sigma - \tau_f$  关系Fig.4 Relationship between  $\sigma$  and  $\tau_f$ 

式(2)说明,土钉与周围土体界面的视摩擦角为  $61.3^\circ$ ,这远远大于土体的内摩擦角  $35^\circ$ 。这种现象曾出现在文献[7]对密实填土中钢筋土钉的拉拔试验中。这说明土钉界面附近的土体在拉拔过程中出现了剪胀现象。正是由于这种剪胀现象的存在,拉拔时钉土界面处产生了一个压力增量  $\Delta\sigma_n$ ,使得抗剪强度增大<sup>[7,11,14]</sup>。文献[11,14]曾对此进行过讨论,并分别从不同的角度给出了  $\Delta\sigma_n$  的估算方法。

## 2.3 土钉抗拔承载力

对于土钉抗拔承载力的理论计算,文献[1-2]曾给出了一个解析计算式。从其分析过程可以看出,钉土界面处的应力状态除钉头截面处达到临界状态外,其他各处均处于弹性状态,因此这里称该解答为弹性解。在此基础上,文献[11]考虑到拉拔过程中钉土截面的剪胀效应,给出了抗拔

承载力的塑性解表达式(3):

$$P_u = N(l) = \frac{EAtu_1(e^{\psi} - e^{-\psi})}{2} \quad (3)$$

式中:

$$t = \sqrt{\frac{2K \tan \varphi \tan \psi}{ER}};$$

$$u_1 = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{k_s - K \tan \psi \tan \varphi} + \frac{c + \sigma \tan \varphi}{K \tan \varphi \tan \psi};$$

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1 + \mu_s}{E_s} + \frac{1 - 2\mu_h \mu - \mu_h}{E_h}\right)R}.$$

式中: $EA$  为土钉的抗拉刚度; $l$  为钉长; $R$  为土钉半径; $c, \varphi$  和  $\psi$  分别为界面层的黏聚力、内摩擦角和剪胀角; $k_s$  为剪切变形系数,应通过抗拔试验

测定,估算时,可取为  $k_s = \frac{E_s}{8(1 - \mu_s^2 R)^2}$ ;  $\mu_s$  和  $E_s$

分别为周围土体的泊松比和变形模量; $\mu_h$  和  $E_h$  分别为土钉的横向和纵向泊松比; $E_h$  为土钉的横向弹性模量。

这里,根据文献[15],近似取剪胀角  $\psi = 35^\circ - 30^\circ = 5^\circ$ ,另取填土的变形模量  $E_s = 20 \text{ MPa}$ ,按式(3)估算了土钉在 3 种压力下的抗拔承载力,见表 2。为便于比较,表 2 也给出了按文献[1-2]弹性解析式得到的计算结果。很明显,考虑剪胀效应时算得的抗拔承载力的塑性解比不考虑剪胀时的解答更接近于试验值。

表 2 抗拔承载力计算结果与实验结果比较

Tab.2 Computed and experimental results

of pullout resistance

上覆压力/ kPa	试验值/ kN	弹性解/ kN	塑性解/kN	
			不考虑剪 胀效应	考虑剪胀 效应
18.8	32.0	21.2	23.1	34.1
35.6	42.0	25.6	27.9	41.1
53.3	56.0	30.2	32.9	48.5

## 3 结论

通过室内模型试验,分析了拉拔过程中砂浆粘结 GFRP 土钉钉头位移的变化规律,讨论了上覆压力对抗拔承载力的影响,为 GFRP 土钉的推广应用打下了一定的基础,并得到如下结论:和密实填土中砂浆粘结钢筋土钉类似,土钉端部拉拔力与端部位移的关系可用双曲线来描述;且在拉拔过程中,钉土界面附近的土体存在剪胀效应。所以,在进行土钉抗拔承载力估算时,宜适当考虑剪胀效应的有利影响。

## 参考文献:

- [1] 王建党,贾立宏,秦四清,等. 深基坑土钉支护抗拔机理[J]. 东北大学学报:自然科学版,1999,20(1):71-74.
- [2] 何颖成,邵小红,张晓鹏,等. 土钉支护抗拔力研究[J]. 四川建筑科学研究,2003,29(3):90-92.
- [3] 丁振明,秦四清,刘军,等. 土钉支护体系抗拔力机理研究[J]. 岩土力学,2005,26(11):1799-1802.
- [4] 郭院成,秦会来,李峰. 土钉支护中土钉力的计算方法[J]. 岩土工程学报,2006,28(增刊):1513-1516.
- [5] 贺若兰,张平,李宁. 土钉支护加固机理的数值分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2007,34(1):14-19.
- [6] 魏焕卫,杨敏,孙剑平. 土钉抗拔承载力计算方法[J]. 水文地质工程地质,2009,(5):23-26,34.
- [7] PRADHAN B, THAM L G, YUE Z Q, et al. Soil - nail pullout interaction in loose fill materials [J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2006, 6(4): 238-247.
- [8] 张敏健,应惠清. 土钉的抗拔性能试验研究[J]. 建筑施工,2005,27(4):19-20.
- [9] 李典庆,常晓林. 土钉抗拔试验对粘结强度估计的影响[J]. 四川大学学报:工程科学版,2006,38(3):17-23.
- [10] 陆益成,薛艳. 土钉抗拔承载力的原位试验研究[J]. 江苏地质,2008,32(2):133-136.
- [11] 马崇武,刘忠玉,周高永. 考虑剪胀效应的土钉抗拔承载力计算[J]. 东莞理工学院学报,2010,17(1):83-87.
- [12] 刘忠玉,尚亚龙,闫富有,等. GFRP 筋的砂浆粘结性能试验研究[J]. 工业建筑,2008,38(6):71-73.
- [13] 尚亚龙. GFRP 筋砂浆锚固性能试验研究[D]. 郑州:郑州大学土木工程学院,2008.
- [14] WANG Zheng-gui, RICHWIEN W. A study of soil-reinforcement interface friction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1): 92-94.
- [15] VERMEER P A. The orientation of shear bands in biaxial tests[J]. Geotechnique, 1990, 40(2): 223-236.
- [16] 中国建筑科学研究院. JGJ 99—120 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.

## Laboratory Experimental Study on Pullout Resistance of Mortar Grouted GFRP Soil Nails

MA Chong-wu<sup>1</sup>, LIU Zhong-yu<sup>2</sup>, ZHOU Gao-yong<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to verify the applicability of GFRP bar in soil nailing design, a large-scale laboratory apparatus have been built and used in the pullout experiments of mortar grouted glass fiber reinforced polymer (GFRP) soil nails. The displacements of nail head under different pullout loads are measured, and the ultimate pullout loads under different overburden pressures are obtained. The experimental results show that the pullout behavior of mortar grouted GFRP soil nails is similar to that of mortar grouted steel soil nails, and the relation between the displacement of nail head and the pullout load can be described with the hyperbolic function. In addition, there exists the dilatancy effect of the soil near the nail in dense fills during pull out, which should be taken into account in estimating the pullout resistance of soil nails.

**Key words:** soil nailing; laboratory experiment; glass fiber reinforced polymer (GFRP); pullout resistance; dilatancy