

文章编号:1001-4888(2019)05-0824-09

竹筋格栅加筋山区挖填路基承载变形机理研究^{*}

罗正东¹, 谌灿¹, 董辉¹, 屈畅姿¹, 谭荣晒¹, 黄河²

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 岳阳市公路桥梁基建总公司, 湖南 岳阳 414021)

摘要: 为了在我国西部山区因地制宜、就地取材地利用加筋土技术, 本文研究了竹筋格栅代替土工格栅在山区挖填路基结构加固应用中的可行性。首先, 采用室内试验, 对湘西楠竹竹筋的抗拉、抗压及抗剪力性能进行了测试, 将其与传统土工格栅的力学性能对比表明, 竹筋格栅能够满足规范对加筋材料力学参数的要求; 然后, 通过现场拉拔试验, 对不同法向应力下的竹筋格栅与填筑体界面特性进行研究, 并对承载变形机理展开了分析; 最后, 利用 Flac3D 有限差分软件建立竹筋格栅加筋挖填路基的三维模型, 就挖填交界处不加筋、加土工格栅及加竹筋格栅三种不同工况进行了对比分析, 结果表明加筋能有效控制挖填路基的变形, 提高路基承载力, 且竹筋格栅的加筋效果优于土工格栅。上述结果可为竹筋格栅加筋土提供试验依据, 为类似工程的设计、施工提供参考。

关键词: 挖填路基; 竹筋格栅; 力学性能; 路基加固; 变形机理

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-083

0 引言

随着西部大开发的进一步推进, 越来越多的基础设施建设向我国西南山区延伸, 在这些山区、丘陵地带进行大规模的工程建设, 不可避免依山傍水展开, 其地势起伏较大, 地质条件亦非常复杂, 为满足工程设计及施工条件的要求, 往往采用深挖高填, 形成挖填路基结构形式。挖填路基以交接面为界, 一侧为原状地质体, 另一侧为人工填筑体, 挖填路基两侧的物理力学性质、路基内部结构及沉降时间均存在差异, 常导致该路基填方区边坡沿交接面产生差异沉降^[1], 对人们生命财产安全及区域经济发展造成严重影响。

为提高山区挖填路基结构的稳定性, 通常采用土工格栅对其进行加筋^[2,3], 从而可有效提高路基的整体稳定性, 然而, 土工合成材料的成本较高, 且属于不可再生资源, 同时, 在山高坡陡的西部山区会受地形地貌、交通运输及施工条件的限制^[4]。目前更强调人与自然的和谐相处, 岩土工程界也一直在探索保证工程质量及耐久性的前提下, 用绿色环保材料替代传统建材; 李广信教授提出加筋土材料也有回归天然的趋势^[5], 因此, 为更好地将加筋技术应用于西部欠发达山区, 有必要因地制宜, 探索一种新型的加筋材料对挖填路基进行加固, 从而提高山区挖填路基的稳定性。

竹材因具有分布广、生长速度快、可再生以及强度高等优点, 在土木工程领域得到了广泛应用^[6-8], 竹筋格栅因优良的力学特征及生态环保优点, 在一些路基工程^[9]、基坑挡墙^[10]、文物保护工程^[11]中得以应用。但是目前针对竹筋在山区挖填这种特殊路基结构中的应用还鲜见报道, 本文拟通过对湘西山区

^{*} 收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508489); 湖南省教育厅项目(16C1548); 岩土力学与工程安全湖南省重点实验室开放基金资助项目(16GES08); 湖南省建设科技计划项目(KY201918)

通讯作者: 罗正东(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事路基工程领域的研究工作。Email: luozhengdong0425@163.com

广泛分布的楠竹为研究对象,对竹材的力学性能、挖填路基中竹筋的受力特征等展开研究,从而探讨竹筋在挖填路基中的承载变形机理及其适应性。

1 楠竹筋材力学性能测试

将竹筋格栅用作挖填路基加筋材料,首先需保证其强度满足规范对筋材的力学性能要求,为此对竹筋的抗拉进行了室内测试。抗拉试验试件的制作及试验程序的设计参照《建筑用竹材物理学性能试验方法》(JG/T199[2007])规范执行。竹材的力学性能与竹子的生长年限密切相关,在生长初期随着竹龄的增加,竹材的力学性能将逐渐增强,当竹龄达到 3 年~5 年时其力学性能达到峰值并趋于稳定,之后随着竹龄的增加,其力学性能将衰减^[12],为此本次试验选用楠竹竹材的龄期为 3~5 年,直径 40mm 以上,壁厚 5~10mm 的竹材进行加工制作成竹筋。

按照规范,试验一共制作了 3 个试件,每个试件的长为 330mm,试件中部有效部分长为 60mm、宽为 4mm、厚为 10mm,两端夹具部位宽 15mm,采用万能材料试验机 WES-100B 对制作好的试件进行测试,加载速率为 5mm/min,试验系统及试件如图 1 所示。

试件 2%伸长率时的拉伸力为 50.21kN/m,抗拉弹性模量为 627.63MPa,试验结果见表 1,试件的平均抗拉强度为 236.83MPa。



图 1 抗拉试验仪器及试件
Fig. 1 Tensile test instruments and specimens

表 1 抗拉试验数据
Tab. 1 Tensile test data

试件编号	最大断裂荷载/kN	抗拉强度/MPa
1	9.28	232.00
2	9.76	248.63
3	9.63	250.18
4	8.81	216.00
5	10.46	258.29
6	8.84	241.8
平均值	9.46	236.83

将上述试验中试件伸长率为 2%时的拉伸力值与规范《土工合成材料 塑料土工格栅》GB/T17689—2008 中型号为 TGD80 和 TGDG120 的土工格栅对比,如表 2 所示,竹筋的拉伸力指标值满足规范要求,因此将其作为加筋材料应用于挖填路基是可行的。

表 2 竹筋与普通土工格栅材料性能对比
Tab. 2 Comparison of properties of bamboo bars and ordinary geogrid materials

性能指标	竹筋	TGDG80	TGD120
2%伸长率时的拉伸力/(kN·m ⁻¹)	50.21	≥26	≥36

2 竹筋现场拉拔测试

就加筋土结构而言,起加筋作用的主要是竹筋格栅的抗拔力,拉拔试验状况下竹筋的受力特征与实际工作状况更接近^[13,14],因此通过现场单根竹筋以及竹筋格栅的拉拔试验来研究竹筋与地质体的相互作用。

2.1 试验方案

试验所用楠竹的单根竹筋长度为 2.5m、宽度为 2cm、厚度为 1cm,铺设竹筋格栅时,格网大小为 10cm×10cm;试验所用填料为碎石土,经压路机分层压实后的平均压实度为 97.3%;由地质勘测资料得填料的粘聚力 c 为 25kPa,内摩擦角 φ 为 31°;采用液压千斤顶施加水平荷载,竖向荷载采取分级堆载

形式。

分别测定对应法向荷载大小为 20kPa、40kPa、60kPa、80kPa、100kPa 时加筋土的极限拉拔破坏力。竹筋格栅的编制如图 2 所示,试验分为单片竹筋及用竹筋编制成竹筋格栅两种不同工况,具体试验方案如表 3。

表 3 拉拔试验方案

Tab. 3 drawing test scheme

工况类别	方案	法向荷载/kPa
工况 1	单片竹筋	20、40、60、80、100
工况 2	竹筋格栅	20、40、60、80、100



图 2 竹筋格栅的编制

Fig. 2 The compilation of the bamboo geogrid

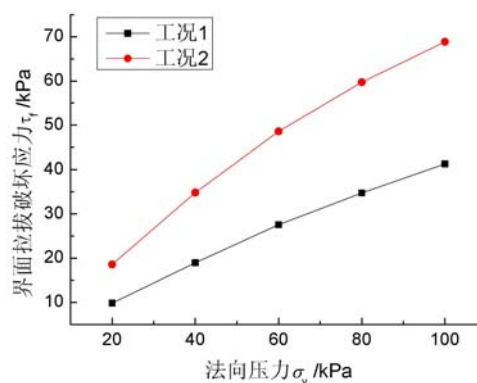


图 3 法向压力—界面拉拔破坏应力关系

Fig. 3 normal pressure interface pull out stress relationship

2.2 试验过程

本次拉拔试验中,水平荷载的控制采取慢速维持荷载法,试验步骤由 5 部分组成:(1)将竹材按照试验方案分别制作成单片竹筋与竹筋格栅的形式,竹筋格栅宽度为 1.8m;(2)将试验场地整平并铺设筋材;(3)在竹筋的上方填筑土体并压实以达到施加法向荷载的效果,同时将竹筋在拉拔端预留 20cm 的长度以供千斤顶施加水平荷载;(4)在竹筋上安装千斤顶并施加水平荷载,在千斤顶夹具口安装百分表测量竹筋的位移,试件被拔出或拔断时,记录拉拔力与拉拔位移;(5)在筋材上方填筑不同厚度的土体,并重复步骤(2)~(4),工况 2 试验与工况 1 类似,拉拔对象均为单根竹筋。

2.3 试验结果及分析

在传统的土工格栅拉拔试验研究中,通常采用公式(1)计算格栅的最大抗拔应力,该公式中抗拔应力与筋土上下交界面摩擦力相平衡,这是由于土工格栅的厚度一般较薄,其侧面与土体的摩擦力可忽略,而对于竹筋格栅,其侧面厚度一般不能忽略,这使得竹筋侧面与土体的摩擦力不可忽略,因此本文对公式(1)进行了优化,得到公式(2)。采用公式(2)求解出的竹筋格栅抗拔力考虑了筋土侧面摩擦力的影响,更符合实际工作状态。

试验获得不同法向力 σ_v 下筋材被拔出或拔动的最大抗拔力 T_f 。根据式(2)以及式(3)计算出筋材的最大抗拔应力 τ_f 及筋土界面摩擦系数 f^* ,然后计算不同法向压力 σ_v 下似摩擦系数 f^* 值,如表 4 所示,绘制法向压力 σ_v 与最大抗拔应力关系图,如图 3 所示。由于在试验过程中不同工况都是将拉拔力作用于单根竹筋,因此在计算过程中,工况 1 与工况 2 计算变量的取值相同, $b=0.02\text{m}$, $l=2.3\text{m}$, $h=0.01\text{m}$ 。

$$\tau_f = T_f / (2bl) \quad (1)$$

$$\tau_f = T_f / (2bl + 2lh) \quad (2)$$

$$f^* = \tau_f / \sigma_v \quad (3)$$

式中, T_f 为筋材被拔出时的最大抗拔力; σ_v 为法向压力; f^* 为筋土界面摩擦系数; b 为竹筋的宽度; l 为竹筋埋置的有效长度; τ_f 为最大抗拔应力。

表4 不同法向压力下似摩擦系数

Tab. 4 Similar frictional coefficient under different normal forces

f^*	σ_v/kPa				
	20	40	60	80	100
工况1	0.49	0.47	0.46	0.43	0.41
工况2	0.92	0.87	0.81	0.74	0.69

图3中不同工况法向压力与界面拉拔破坏应力均呈近似线性关系,其中工况1拟合关系如式(4),工况2拟合关系如式(5),内摩擦系数与筋土界面内摩擦角的关系如式(6)。

$$\tau_f = 0.45\sigma_v + 0.78 \quad (4)$$

$$\tau_f = 0.81\sigma_v + 2.35 \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{ss}} = \tan^{-1} f \quad (6)$$

由式(4)与式(6)可得竹筋与土的界面参数粘聚力为 0.78kPa,内摩擦角为 25° ,同理可得竹筋格栅与土的界面参数粘聚力为 2.35kPa,内摩擦角为 39° ,可见竹筋格栅与土体间的相互作用强于单片竹筋。

2.4 受力承载变形过程及其机理分析

由图3以及表4可知,在同样的法向压力下,不同工况的界面拉拔破坏应力以及似摩擦系数均有着明显的差别。工况2的界面破坏应力相比于工况1平均提高了 77.87%,工况2的平均似摩擦系数为工况1的 1.8 倍,这说明竹筋以格栅的形式铺设能增强与土的相互作用力。这是由于在对单根竹筋进行拉拔时,拉拔力仅仅只需抵抗侧面以及上下两面土体与竹筋之间产生的摩擦力,如图4中工况1所示;而竹筋格栅在试验中受到拉拔力时,将会产生3种摩擦力:(1)竹筋上下表面、侧面与土体的摩擦力;(2)单片竹筋经钢丝绑扎成格栅形状后成为了复合结构体系,受拉拔力直接作用的竹筋带动其他竹筋所产生的筋土界面摩擦力;(3)竹筋格栅结点产生的被动抗阻力,如图4中工况2所示。

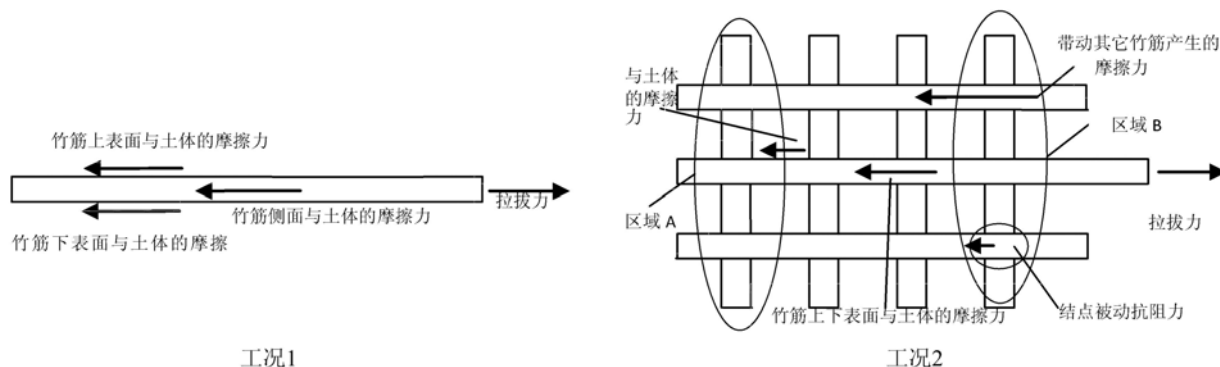


图4 不同工况下竹筋承载变形过程示意图

Fig. 4 A sketch map of the load bearing and deformation process of bamboo tendons under different working conditions

竹筋格栅在拉拔试验中如图4工况2所示,其变形大致可分为3个阶段:第一个阶段为靠近拉拔端的区域B开始产生位移的趋势,此阶段拉拔应力主要抵抗的是筋土界面的静摩擦力;第二个阶段为位移从区域B逐渐发展到区域A的过程,该阶段筋材界面的滑动摩擦力以及筋材结点被动抗阻力逐渐由拉拔端向自由端扩展;第三阶段为竹筋格栅整体完全发生移动的阶段,该阶段拉拔应力主要抵抗竹筋各界面与土的滑动摩擦力以及结点对土的被动抗阻力,在滑动过程中竹筋格栅附近的土颗粒发生位移、翻滚、错位等变化,此过程使得土体应力重分布,改变了土体应力场,从而土体的整体强度得以提高。

由前文试验可知,竹筋格栅作为一个复合结构体系,加强了筋土之间的连接,其内在机理是竹筋格栅在土中存在着有限的交织点,当某一个结点由于土体对竹筋的拉伸产生了位移的趋势,会使该结点以及格栅中其他结点产生被动抗阻力,阻止这种位移趋势的产生。由于竹筋为弹塑性材料,在竹筋未进入

塑性阶段之前,其应力应变关系呈线性,根据叠加原理,对任何线性结构体系,在给定条件下,由两个或多个力产生的合成反应是由每个力单独产生的反应之和,因此各结点产生的被动抗阻力将以线性的方式叠加,达到共同抵御变形的作用,从而提高加筋土的承载力。

3 竹筋格栅加筋挖填路基数值分析

3.1 数值模型构建

本次数值模拟试验模型以湖南省湘西地区龙永高速公路连线挖填路基 K62+345~350 路段为原型,路基尺寸为 15m×4.3m×10m (长×宽×高),坡比 1:0.466,地基尺寸为 20m×4.3m×10m (长×宽×高),挖填交界台阶高 2m,宽 1.5m,一共 5 个台阶;采用 Flac3D 进行数值分析,试验分为 3 种工况,工况 1 为挖填交界台阶处不加筋,工况 2 为加土工格栅,工况 3 为加竹筋格栅,路基模型网格划分如图 5 所示;岩土体屈服准则采用摩尔-库伦模型,相应的力学参数见表 5,土工格栅采用 Flac3D 自带的 Geogrid 单元模拟,力学参数见表 6,竹筋格栅采用实体单元进行模拟,本构模型采用各向同性弹性模型,竹筋格栅与填方区土体相互作用以及挖填交界面均使用 interface 单元模拟,参数见表 7;竹筋格栅与土工格栅均从每一层台阶内侧延伸至边坡满布,分别铺设 5 层;竹筋、填方路基以及填方路基—竹筋界面的主要力学参数参照前文力学性能试验及拉拔试验结果。

表 5 岩土体及竹筋的力学参数

Tab. 5 Mechanical parameters of rock and soil and bamboo tendons

介质	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	泊松比 μ
填方路基	19.6	10	25	21	0.3
挖方路基	21.6	45	38	36	0.3
地基	23.6	10	24	43	0.3
竹筋	10.0	627.63	—	—	0.33

表 6 土工格栅的物理力学参数

Tab. 6 Physical and mechanical parameters of Geogrid

弹性模量/MPa	泊松比	厚度/mm	耦合弹簧的 刚度/MPa	耦合弹簧的 粘聚力/kPa	耦合弹簧的 内摩擦角/ $(^{\circ})$
450	0.3	5	1.86×10^5	1.43×10^4	28

表 7 接触面单元参数

Tab. 7 Contact surface element parameters

类别	刚度 $K_n/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	刚度 $K_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
填土—竹筋	1×10^8	1×10^8	0.78	25
边坡—填土	8.5×10^5	8.5×10^3	10.5	20.4

3.2 数值计算结果分析

3.2.1 不同工况下竖向应力分析

图 6 为不同工况下路基的应力分布云图,由图可知当挖填交界面台阶处不做任何处理时,台阶处附近应力分布不均匀,应力差值较大,应力集中现象明显;当铺设了土工格栅或竹筋格栅之后,应力不均匀现象显著减少,其中铺设竹筋格栅后的应力分布更加均匀。这表明,在挖填交界台阶处铺设筋材,能有效控制应力集中现象的产生,且竹筋格栅的控制效果要优于土工格栅。这是由于在未对挖填交界台阶处进行加筋处理时,从挖方侧到填方侧,土体强度发生了突变,导致了应力集中现象的产生,加筋后,当土体中筋材在受到路基顶面传递的荷载时,筋材下端受拉,受拉区域对土颗粒产生了摩擦力和压力,抑

制了土体的变形,增强了填方侧土体的强度,缩小了填方侧与挖方侧土体强度的差值,进而减少了应力集中现象的产生,而竹筋格栅由于竹节的存在,与土体的相互作用相比土工格栅更强。

3.2.2 不同工况下差异沉降分析

图 7 为不同工况模型计算下路基顶面各点的沉降值,可见,当未对挖填交接面进行加筋处理时,路基顶面最大沉降值达 54.11mm,最大沉降与最小沉降值相差 30.33mm,路基顶面沉降曲线在挖填交界面处有突变。当在挖填交接面处铺设土工格栅或者竹筋格栅后,路基顶面最大沉降分别为 51.67mm、48.11mm,最大沉降与最小沉降分别相差 28.05mm、24.61mm,最大沉降相比于不加筋分别减少了 4.5%、11.09%,差异沉降相比于未加筋分别减少了 7.52%、18.86%,路基顶面沉降曲

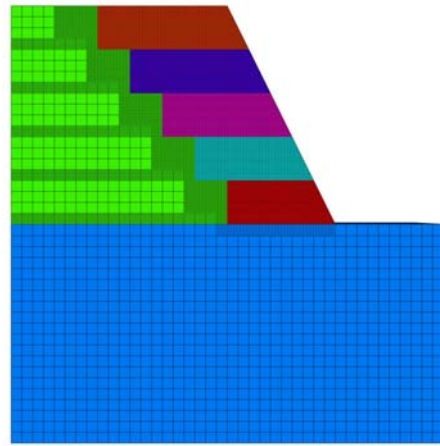


图 5 路基模型网格划分
Fig. 5 Subgrade model meshing

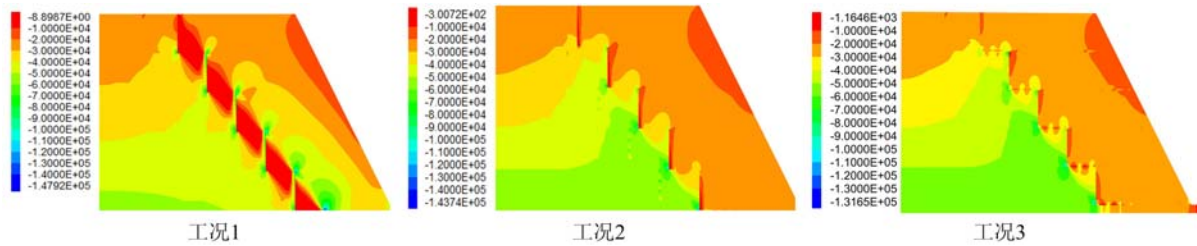


图 6 不同工况应力云图

Fig. 6 Stress cloud chart with different working conditions

线相比于未加筋时明显平滑,有效地协调了挖填交界两侧的变形,且竹筋格栅的加筋效果要优于土工格栅。

结合前述应力分析可知,应力分布越均匀,所对应的差异沉降越小,竹筋格栅控制差异沉降的效果优于土工格栅。这是由于土工格栅属于网膜结构,其抗弯能力相比竹筋格栅较小,在填方区,由于竹筋的抗弯特性,竹筋格栅将分担大部分竖向压力,从而土体所受到的竖向压力减少,减少了沉降量。

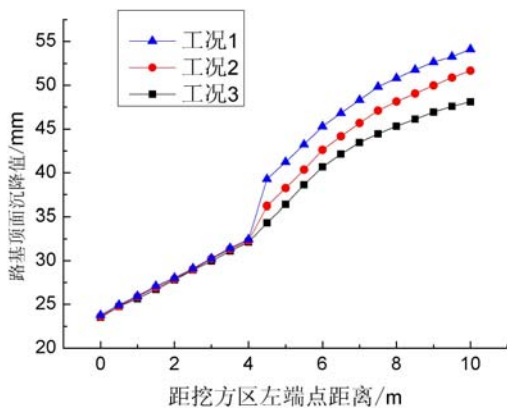


图 7 不同工况路基顶面沉降图

Fig. 7 Settlement chart of subgrade top surface in different working conditions

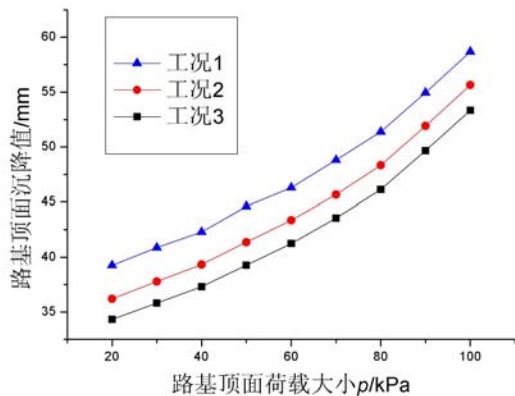


图 8 路基顶面距挖方区左端点 4.5m 处沉降—荷载关系

Fig. 8 Settlement-load relationship at the top of the excavation area at 4.5m from the top of the subgrade

3.2.3 不同工况路基承载力分析

基于挖填路基的结构特性,选取本次试验中距挖填交界面最近的沉降值观测点,分析其沉降值与外

荷载的变化规律,如图 8 所示,在不同工况、相同沉降值大小条件下的路基承载力从大到小依次为,工况 3、工况 2、工况 1。这说明,填方区加筋材料与填料间的相互作用使得填土的强度得到增强,进而有效提高了路基的承载力,同时,竹筋格栅加筋效果优于土工格栅。

4 竹筋的耐久性 & 经济性分析

4.1 竹筋的耐久性分析

竹材作为一种天然生物材料,将其作为挖填路基的加筋材料,面临的最大问题就是耐久性问题,目前国内已有部分学者对竹筋的耐久性展开了初步的研究,主要可归纳为两类,其一是通过化学药剂对其进行处理以延长其耐久性,比如,吕韬等^[4]通过“沥青煮”的方法将竹筋进行防腐,并将其应用于边坡的加筋,该工程目前虽已使用 10 余年,但竹筋仍保持完好;第二类是竹筋的辅助加筋作用,比如党发宁等^[15]通过固结理论研究发现竹筋在失效之前(假设竹筋使用年限为 10 年),土体的安全系数已达到规范要求。本文作者对竹筋的防腐也进行了研究,采用水与硼酸的混合溶液(浓度为 6%~8%)浸泡竹筋,该方法已申请授权了一项发明专利(ZL. 201210154495. 4)。

本文的研究将结合以上两种方法,其一是将采用本文作者所申请的专利技术对竹筋进行防腐处理,提高竹筋的耐久性,延长竹筋的使用寿命。其二是随着时间的增长,填方区与挖方区土体的力学性能逐渐接近,因此在竹筋失效之前,填方区与挖方区已形成整体,能满足路基使用的要求。

4.2 竹筋的经济性分析

我国拥有丰富的竹类资源,其总面积高达 538.10 万公顷。原材料的充足储备使得利用竹筋格栅加固挖填路基的成本主要为竹筋格栅的制作与防腐,其综合成本约为 1.8 元每平方米,而一般质量较好的土工格栅其综合成本约为 10 元每平方米。文华等^[16]将长为 50m、宽为 3.5m 的土工格栅加筋路基与相同尺寸的竹筋格栅加筋路基造价进行了对比,发现竹筋格栅加筋路基能节约 2 万元的投资。综上,竹筋格栅在经济性能上同样具有较大优势。

5 结论

(1) 由室内力学性能测试得知,湘西楠竹抗拉强度平均值为 236.83MPa,弹性模量为 627.63MPa,能够满足现行规范对加筋材料的要求。

(2) 竹筋格栅在受拉后,其变形由受力端逐渐发展至自由端,在此过程中,筋土界面的相互作用力主要分为两种:其一,竹筋表面与土体间的摩擦力;其二,竹筋交叉结点的被动抗阻力。同时,竹筋格栅作为一个复合结构体系,竹筋之间的紧密联系,使得其与填料间的相互作用强于单根竹筋。

(3) 基于室内竹筋力学性能测试以及室外竹筋拉拔测试获得的竹筋、填土、竹筋与填土界面的主要力学参数,对挖填路基交界面处铺设的竹筋格栅进行了模拟试验研究,结果表明竹筋格栅加筋可明显控制路基顶面差异沉降,减少应力集中现象,提高路基承载力,且其加筋效果优于土工格栅。

(4) 竹筋格栅经防腐处理后,其耐久性能满足加筋材料的使用要求,同时,相比于使用土工格栅建设路基,使用竹筋格栅更加具有经济性。

参考文献:

- [1] 苏永华, 罗正东, 李翔. 基于均匀试验的半填半挖路基边坡稳定性灰色关联分析法[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2259—2264 (SU Yonghua, LUO Zhengdong, LI Xiang. Gray correlation analysis method for cut-and-fill roadbed slope stability based on uniform experiment[J]. Rock and Soil, 2012, 33(8): 2259—2264 (in Chinese))
- [2] 杨庆刚, 黄晓明, 柴建峰. 土工格栅路堤加筋效果的影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(1): 131—137 (YANG Qinggang, HUANG Xiaoming, CHAI Jianfeng. Analysis of influence factors controlling effects of embankment reinforcement by geogrids[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(1): 131—137 (in Chinese))
- [3] 蒋堃, 徐超. 复杂地形条件下填方路基稳定性分析与设计[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3): 142—146 (JIANG Kun, XU Chao. Stability analysis and design of roadbed under complicated topography[J]. Journal of Yangtze River Scientific, 2014, 31(3): 142—146 (in Chinese))

- [4] 吕韬,焦涛,孙金坤.高填方土质边坡中竹筋的应用研究[J].土木工程学报,2010,43(7):91—96 (LV Tao, JIAO Tao, SUN Jinkun. Application of bamboo reinforcement in high fill slope[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7):91—96 (in Chinese))
- [5] 李广信.从息壤到土工合成材料[J].岩土工程学报,2013,35(1):144—149 (LI Guangxin. From “Xi-rang” to geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1):144—149 (in Chinese))
- [6] 许昆,郝际平,赵曰亭,等.竹材在建筑结构中的应用发展与研究现状[J].竹子研究汇刊,2013,32(4):12—18 (XU Kun, HE Jiping, ZHAO Yueting, et al. Development and research status of bamboo applied to building structure[J]. Journal of Bamboo Research, 2013, 32(4):12—18 (in Chinese))
- [7] 邹立华,钟坤禄,谢吉鸿,等.改性竹筋混凝土受弯构件力学性能试验研究[J].土木建筑与环境工程,2015(5):33—40 (ZOU Lihua, ZHONG Kunlu, XIE Jihong, et al. Experimental study on mechanical properties of modified bamboo reinforced concrete bending members[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2015(5):33—40 (in Chinese))
- [8] 黄凯,谢吉鸿,邹立华,等.新型改性竹筋混凝土偏压柱力学性能试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2016(6):1268—1278 (HUANH Kai, XIE Jihong, ZOU Lihua, et al. Experimental study on mechanical properties of new modified bamboo reinforced concrete columns[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016(6):1268—1278 (in Chinese))
- [9] 陈俊,符文熹,戴峰,等.用于填筑路堤加固的竹筋格栅力学性能[J].岩土力学,2017,38(1):174—179 (CHEN Jun, FU Wenxi, DAI Feng, et al. Mechanical behaviors of bamboo geogrid in reinforcing filling embankment[J]. Rock and Soil, 2017, 38(1):174—179 (in Chinese))
- [10] Moroz J G, Lissel S L, Hagel M D. Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls[J]. Construction & Building Materials, 2014, 61(3):125—137.
- [11] 孙满利,李最雄,王旭东,等.南竹加筋复合锚杆加固土遗址研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(s2):3381—3385 (SUN Manli, LI Zuixiong, WANG Xudong, et al. Experimental research on mechanical properties of pipe material for bamboo-steel composite anchor bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(s2):3381—3385 (in Chinese))
- [12] 李光荣,辜忠春,李军章.毛竹竹材物理力学性能研究[J].湖北林业科技,2014,43(5):44—49 (LI Guangrong, GU Zhongchun, LI Junzhang. Study on physical and mechanical performance of phyllostachy pubescens[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2014, 43(5):44—49 (in Chinese))
- [13] 包承纲.土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1735—1744 (BAO Chenggang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9):1735—1744 (in Chinese))
- [14] 谢宝瑾,张向东,杜常博.不同含水率下尾矿与土工格栅界面特性的试验研究[J].实验力学,2018,33(1):127—133 (XIE Baojin, ZHANG Xiangdong, DU Changbo. Experimental study of interface characteristics between geogrid and tailings with different water contents[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1):127—133 (in Chinese))
- [15] 党发宁,刘海伟,王学武.竹子作为抗拉筋材加固软土路堤的应用研究[J].岩土工程学报,2013,35(s2):44—49 (DANG Faning, LIU Haiwei, WANG Xuewu. Application of bamboo as tensile reinforcement to strengthening of embankment of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(s2):44—49 (in Chinese))
- [16] 文华,张敏,王纵开,等.乡村公路竹筋加筋土路基技术经济性能研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(6):40—43 (WEN Hua, ZHANG Min, WANG Zongkai, et al. Study on techno-economic performance of bamboo-reinforced-earth subgrade in rural highway[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(6):40—43 (in Chinese))

Study of the bearing deformation mechanism of bamboo tendon grating strengthened subgrade excavation and filling in mountain area

LUO Zheng-dong¹, CHEN Can¹, DONG Hui¹, QU Chang-zi¹, TAN Rong-shai¹, HUANG He²

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;

2. Yueyang City Roads and Bridges Construction Co., Yueyang 414021, Hunan, China)

Abstract: In order to adapt measures to local conditions and take local raw material in reinforced earth technology in mountain areas of western China, in this paper, the feasibility of using bamboo tendon grating instead of geogrid to reinforce the subgrade excavation and filling in mountain areas. Firstly, through indoor experiment, the tensile, compression and shear mechanical properties of phyllostachys pubescens tendon taken from western Hunan were measured. Comparison of mechanical properties of phyllostachys pubescens tendon with that of the traditional geogrid shows that local bamboo tendon grating can meet the specification requirements for strengthening materials mechanical parameters. Then, through the field drawing experiment, the interface characteristics of the bamboo tendon grating and filling body subjected to different normal stresses were studied, and the mechanism of bearing deformation was analyzed. Finally, using Flac 3D finite difference software, 3D model of bamboo tendon grating strengthened subgrade was established, and the three different working conditions of unreinforced, traditional geogrid and Bamboo tendon grating at the junction of excavation and filling were compared and analyzed. Results show that the strengthened bamboo tendon grating can effectively control subgrade deformation and improve its bearing capacity, and the strengthening effect of bamboo tendon grating is better than that of traditional geogrid. Above results can provide experimental evidence for bamboo tendon grating strengthening, and provide an important reference for the design and construction of similar projects.

Keywords: subgrade excavation and filling; bamboo tendon grating; mechanical properties; subgrade strengthening; deformation mechanism