

弃土边坡竹筋加固机理及坡体稳定性影响

朱 颖, 李 悦, 张舶航

(江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:攀西地区昔格达土由于工程性质差,容易引发公路临时弃堆体边坡失稳现象。竹筋加固方法具有就地取材方便、价格低廉等优点,在工程应用增多,但对其系统的研究较为匮乏。为此,本文以四川攀西地区某公路一临时弃土场为例,通过理论分析、加筋弃土三轴试验、有限元分析方法,探讨弃土边坡竹筋加固机理及竹筋加固间距对弃土边坡稳定性影响。结果表明:1)竹筋对土体整体性的提升作用明显,与未加筋土体相比,表现出“强”黏聚力的特性,且加筋土体的抗剪强度显著提高;2)筋带间距与弃土场边坡的安全系数呈反比例非线性变化关系,当间距超过1 500 mm时,竹筋对边坡加固效应急剧减弱;3)昔格达土筋带间距宜取350 mm。本文研究结果可为此类弃土工程的临时支挡防护提供参鉴。

关键词:弃土边坡; 竹筋加固; 有限元分析; 坡体稳定性

中图分类号:TU43

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)11-0029-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.11.145

Reinforcement mechanism of bamboo on spoil slope and influence on slope stability

ZHU Ying, LI Yue, ZHANG Bohang

(Jiangsu Engineering Survey and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu, China)

Abstract: Due to the poor engineering nature, the Xigeda soil in Panxi area is easy to cause the instability of the slope of the temporary spoil slope of the highway. The bamboo reinforcement method has the advantages of convenient local materials and low price, and the engineering application has been increased, but the research on its system is relatively scarce. Therefore, a temporary spoil of a highway in Panxi area of Sichuan province is taken as an example, and the mechanism of bamboo reinforcement of spoil slope and the influence of bamboo reinforcement spacing on the stability of spoil slope is discussed through theoretical analysis, triaxial test of reinforced spoil and finite element analysis. The results show that: 1) Compared with the unreinforced soil, the bamboo reinforcement has a significant effect on the improvement of soil integrity, and the shear strength of the reinforced soil is significantly improved. 2) The spacing of the reinforcement belt has an inverse proportional nonlinear relationship with the safety factor of the spoilslope, and when the spacing exceeds 1, 500 mm, the effect of bamboo reinforcement on the slope is weakened sharply. 3) The spacing of the soil reinforcement belt should be 350 mm. The results can provide references for the temporary support protection of similar spoil projects.

Key words: spoil slope; bamboo reinforcement; finite element analysis; slope stability

西南山区高速公路建设过程会形成大量的弃土临时边坡,一般为土石混合体,具有孔隙大、非饱和、欠固结等结构特点^[1]。因弃土堆填不当

引发的边坡失稳事件屡有发生。现有研究以弃土场选址^[2]、弃土场堆填施工方法^[3]和高填方弃土场的稳定性研究^[4]为主。沈明祥等^[5]在现场调研

收稿日期: 2024-04-03

作者简介: 朱 颖(1992—),女,工程师,从事土木工程方面的研究工作。

和模拟分析基础上,评估分析了高速公路弃土场抗剪强度指标对坡体稳定性影响;抗兴培等^[6]在现场测试试验的基础上,分析了黏性土碎石类渣体和风化岩类渣体的物理力学特性对弃土堆砌高度的影响;肖建宇等^[7]在理论分析的基础上,借助饱和非饱和理论分析了强降雨条件下弃土场边坡稳定性变化历程。桩基托梁挡土墙^[8]、锚固排水耦合^[9]、浆砌片石联合土工格栅^[10]等弃土边坡加固方式,主要借鉴于冶金行业矿山排土场的相关研究成果^[11],以永久弃土场为主的“强”支护为主。但是高速公路弃土场以场内周转路基弃方而集中堆弃的临时弃土场居多,“强”支护经济性差且环境污染大,但仅采用植被防护或坡体片石等方法又无法保全坡体稳定。如何采用绿色经济的“弱”支护手段达到稳定临时弃土边坡的研究仍需要进一步探讨。竹筋加固法是将天然竹子制作成筋材,用于边坡加固,不仅价格低廉且绿色环保。近年来,不少学者对竹筋加固的工程应用进行研究^[12-13],但多选用单一的研究手段,针对竹筋加固的系统研究还相对匮乏。因此,本文依托四川攀西地区某在建高速公路工程,对重塑昔格达土弃土边坡采用的竹筋加固机理及竹筋作用机制进行分析;结合加筋土体的室内三轴剪切试验,开展弃土边坡加竹筋间距对高速公路工程弃土边坡稳定性影响的数值模拟分析,以期为此类“弱”支护手段在重塑昔格达土边坡中的应用提供参鉴。

1 工程概况

某高速公路位于攀西地区,全长约为 120 km,路宽为 24.5 m,全线 50% 线路以挖方为主。挖方土体以昔格达组粉砂岩和泥岩为主,开挖弃方在线路沿线集中堆弃,形成了临时弃土场。昔格达组土体是一种半成岩、工程性质较差的极软岩,遇水易软化和崩解,其物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩土体物理力学参数

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	密度/(g·cm ⁻³)
毛石	820.0	0.25	27.5	81	2.18
三七灰土	26.8	0.27	35.7	72	1.89
弃土	25.0	0.30	28.0	30	2.10
岩体	6 122.0	0.26	34.8	1 220	2.50

为保障弃土边坡的稳定性,施工过程中对其进行处理,具体如图 1 所示。其中 1 区宽度为 2.5 m,采用灰土+竹筋面板做成 45°坡体;2 区为弃土加竹筋加固;3 区为浆砌片石护坡;4 区为弃方弃土;5 区为原地基岩土体。

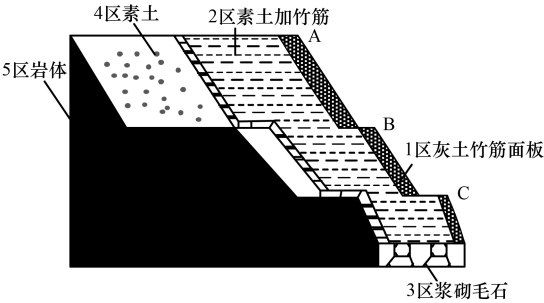


图 1 边坡典型剖面土

弃土堆填所用加固竹筋为直径小于 50 mm 的竹子。取稍根部部位,剖为 4 瓣,并相互搭接形成竹筋网片。竹筋需进行防腐处理,通过注(浸)入防止虫菌滋生化学物质,再高温(温度不小于 80 ℃)蒸煮,蒸煮时间需大于 3 h。本文采用本地凤尾竹在 80 ℃ 以上的煤焦油中,蒸煮 3 h。加筋现场处理如图 2 所示。



图 2 加筋现场处理

2 加筋土体三轴试验

竹筋弃土边坡实施过程中,竹筋条宽度取 5 cm、厚度取 1 cm,纵横间距分别取 30、50 cm。根据试验机尺寸,将三轴试样筋条加固形式按 1:1.75 比例缩放,缩放后的试样直径为 39.1 mm、高度为 80 mm,如图 3 所示。待分层厚度击实到位后刮平并摆放筋

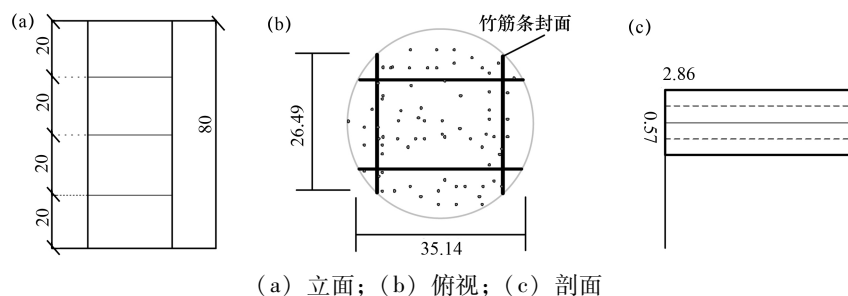
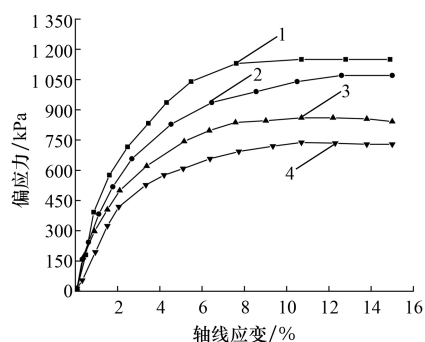


图 3 加竹筋三轴试样示意

mm

条,反复填筑击实,试样制备好后恒温养护 7 d。采用三轴试验机进行加竹筋试样的 UU 剪切试验,参考《土工试验方法标准》(GBT 50123—2019)开展和控制试验过程,试验结果如图 4 所示。由图 4 可知:竹筋加固弃土的锚固效应与围压成反比,围压越大效果越差,尤其在低围压状态时,试样峰值强度显著,但其峰值点有滞后效应。这是因为起始应力太小仅能触发很小的土体层间错动,竹筋抗剪能力不明显,待土与竹筋协同工作后,加竹筋试件峰值点出现时间点延后且逐渐增大。试验结束时,试验破坏形式为侧向鼓胀,无明显的剪切破坏面,表明竹筋的整体加固效果显著。综上,竹筋加固对土体的抗剪切变形破坏的能力有明显提升作用。



围压/kPa: 1—400; 2—300; 3—200; 4—100。

图 4 加竹筋弃土应力-应变曲线

3 加筋土工机理

土体加筋是指土与筋材组成的复合土体一同承受外部荷载。该复合土体因材料之间的不光滑接触会使筋材和土颗粒紧密结合在一起。加筋土的力学原理如图 5 所示,其中 σ 为主应力, kPa; $\Delta\sigma$ 为附加应力, kPa。由于主筋的弹性模量大于土体的弹性模量,同时受限于土筋复合体协同变形的特性,在土-筋交界面上会形成附加的切向应力,进而对土体形成约束,相当于额外的侧限应力 $\Delta\sigma_3$ (kPa)。

$\Delta\sigma_3$ 可由土体加筋后的摩尔库伦强度 ($M-C$) 包络线求得,如图 6 所示。其中: φ' 为加筋土样土体内摩擦角, ($^\circ$); $\Delta\sigma_m$ 为最大主应力差值, kPa; $\Delta\sigma_s$ 为最小主应力差值, kPa。由图 6 可知:有无加筋对 $M-C$ 包络线的曲线形式影响不大,尤其其对内摩擦角几乎无影响;但曲线截距会较未加筋的大,即表现出“强”黏聚力的特性,此种效应称为准黏聚力。

当加筋土体处于新的极限平衡状态时其应力计算公式如下。

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) + 2(c + \Delta c) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

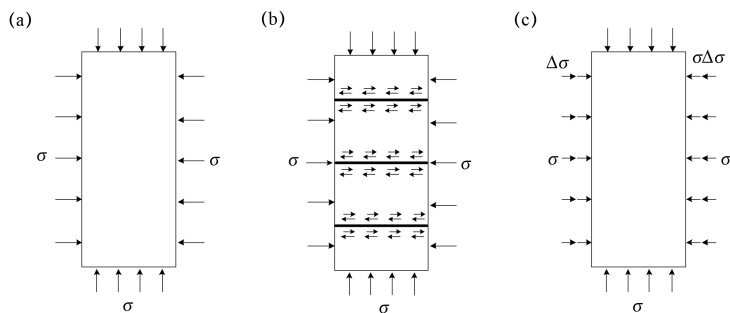


图 5 加筋土三轴试样受力分析

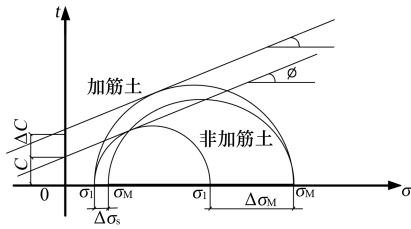


图 6 有无加筋土的应力分析圆图

$$\sigma_{1f} = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

式中： σ_{1f} 为加筋土样破坏时的最大主应力，kPa； σ_3 为试样最小主应力，kPa； $\Delta\sigma_3$ 为等效应力增量，kPa； φ 为原始土样土体内摩擦角，(°)； c 为原始土样土体黏聚力，kPa。

比较式(1)、(2)可得：

$$2\Delta c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) = \Delta\sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3)$$

式中： Δc 为加筋产生的准黏聚力，kPa。

综上，因加筋而产生的准黏聚力为

$$\Delta c = \frac{\Delta\sigma_3 \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)}{2} \quad (4)$$

式(4)中的等效应力增量 $\Delta\sigma_3$ 是由加筋土体中的筋材所产生，需通过图 1 的示意图进行推导计算。由图 1 可知：

$$\Delta\sigma_3 = \sigma_3 \left(\frac{\Delta\sigma_{1f}}{\sigma_1 + 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)} \right) \quad (5)$$

式中： $\Delta\sigma_{1f}$ 为加筋土样破坏时的最大主应力增量，kPa； σ_1 为原始土样破坏时的最大主应力，kPa。

将式(5)带入式(4)得

$$\Delta c = \frac{\sigma_3 \sqrt{k_p}}{2} \left[\frac{\sigma_{1f} - \sigma_1}{\sigma_1 - 2c \sqrt{k_p}} \right] \quad (6)$$

$$k_p = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (7)$$

式中： k_p 为被动土压力系数。

4 加竹筋间距数值模拟分析

筋带的层间间距对弃土边坡稳定性影响较大^[12-13]。筋带层间间距过大，筋带产生的加筋效应不大；筋带层间间距过小，则对边坡的施工速度和经济性提出考验。采用有限元分析软件 Abaqus 对弃土边坡竹筋加固进行分析。边坡模型

如图 7 所示，毛竹参数取值如表 2 所示。

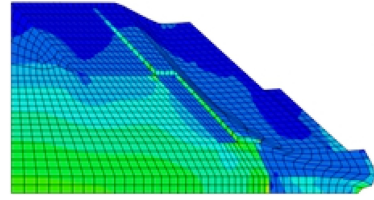


图 7 数值计算模型

表 2 毛竹各项参数

项目	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	抗剪强度/MPa	密度/(g·cm ⁻³)
顺纹	111.0	75.5	26.87	0.67
纵纹	21.5	14.8		

基于摩尔-库仑强度破坏准则建立本构模型，并进行简化：毛竹的截面换算成同等截面面积的圆形线单元，竹筋的材料特性设置为顺纹和横纹的正交异性材料。不考虑筋带层面和土体的接触摩擦，将坡体选择为嵌入的主区域，筋带选择为嵌入区域。间距考虑为 50、200、350、800、1 500、3 100 mm，计算所得不同工况下的应力云图如图 8 所示。

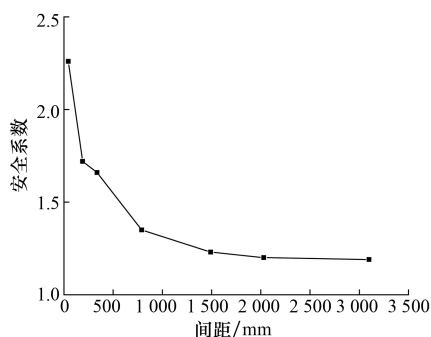
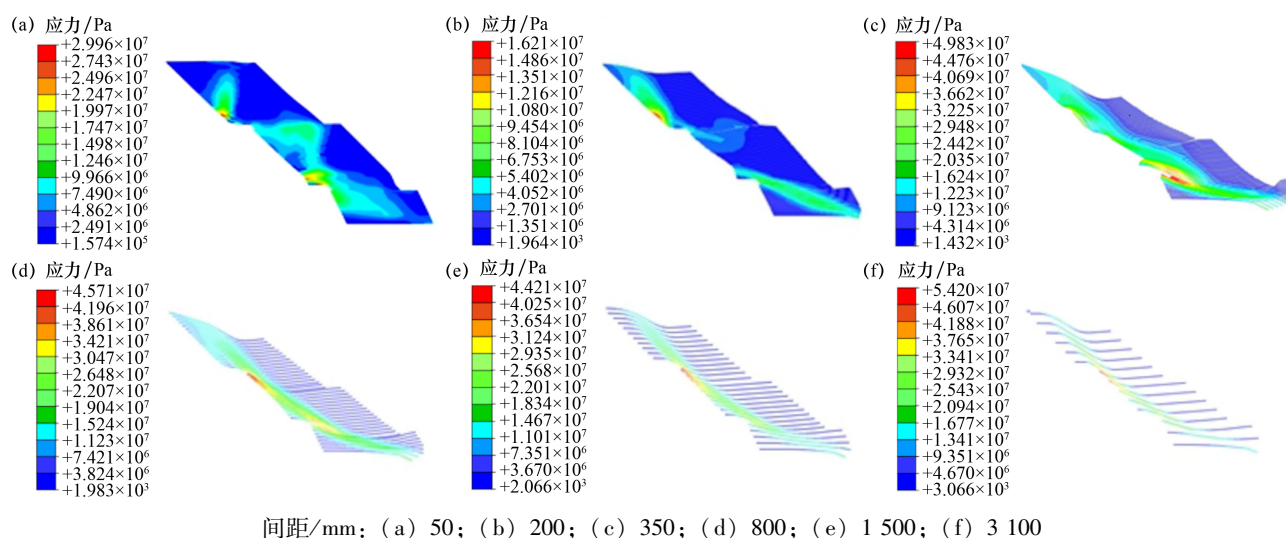
由图 8 可知：随着筋带层间间距的增大，弃土场边坡的塑性贯通区域分别向坡脚和坡顶延展。当筋带间距范围为 50~200 mm 时，边坡的塑性贯通区未贯穿筋带层，表面筋带的安全度过剩，筋带并未完全发挥出其效应，会造成经济上的浪费。

筋带间距与弃土场边坡的安全系数关系如图 9 所示。由图 9 可知：两者呈反比关系。当间距大于 1 500 mm 时，边坡的安全则不会随着间距的增大发生明显的变化，甚至在间距为 3 100 mm 时，边坡安全系数(1.19)仅较无筋带边坡(1.13)大 5%。

综上，该工程适宜的筋带间距为 350 mm。在此间距下，边坡的安全系数得到了保证，并且 350 mm 的层高和边坡单次回填土厚度一致，进而在每层回填土碾压施工完成后即可进行竹筋的铺筑，兼顾了施工速度、经济效益以及边坡稳定性。

5 结 论

本文以四川攀西地区某高速公路一临时弃土场为例，以理论分析、重塑昔格达土加筋弃土三轴试验为主，以有限元分析方法为辅，探讨弃土边坡竹筋加固机理及竹筋加固间距对弃土边坡稳定性影响，得到结论如下。



(1) 竹筋对于弃土的加筋效应随围压增加而下降。三轴剪切试验表现为侧向鼓胀,无明显的剪切破坏面,竹筋对土体的抗剪切变形破坏的能力有明显的提升作用。

(2) 与未加筋土体相比,加筋土体的抗剪强度主要体现在黏聚力上,即表现出“强”黏聚力的特性,此种效应称为准黏聚力。

(3) 筋带间距与弃土场边坡的安全系数呈反比例非线性变化关系。当间距超过 1 500 mm 时,竹筋对边坡加固效应急剧减弱。兼顾施工速度、经济效益以及边坡稳定性,本工程适宜的筋带间距建议为 350 mm。

参考文献:

- [1] 谭鹏. 山区高速公路弃土场基本特性及其稳定性分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2010.
- [2] 彭立,黄伟伟,徐希武,等. 山区高速公路弃土场选址分类方法及其稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学

报,2011,8(6):75-79.

- [3] 张华,游宏,黄晚清. 山区高速公路高填斜坡弃土场工后稳定性评估的实例分析[J]. 成都大学学报(自然科学版),2017,36(3):307-310.
- [4] 袁旭凯,许万忠,严铁军,等. 西南山区高速公路高填方弃土场破坏模式分析及稳定性研究[J]. 中外公路. 2022,5(42):1-5.
- [5] 沈明祥,罗红明,刘志鹏,等. 贵州省六盘水至威宁高速公路弃土场稳定性评估[J]. 中国岩溶,2019,38(4):559-564.
- [6] 抗兴培,孟凡成,曾超,等. 强降雨条件下弃土场边坡稳定性历程分析[J]. 中外公路,2019,39(3):34-39.
- [7] 肖建宇,谢忠勇,张著伦. 挡墙基底换填对弃土场边坡稳定性影响分析[J]. 地质灾害与环境保护,2020,31(1):81-86.
- [8] 彭楠琦,高惠瑛,吕文舒. 弃土场边坡稳定性降雨预警标准及锚固排水耦合处治研究[J]. 中外公路,2022(2):7-14.
- [9] 纪溪文. 土工格栅加固路堤边坡效果及影响因素分析[J]. 武汉理工大学学报,2021(2):59-63.
- [10] 有色金属矿山排土场设计规范:GB 50421—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2018.
- [11] 陈国舟,杜子博,田浩东,等. 竹筋格栅加固高陡沟壑黄土填方路基数值模拟研究[J]. 公路,2024,69(1):1-8.
- [12] 韩纪坤,赵进勇,孟闻远,等. 一种新型竹材生态护岸型式及其稳定性模拟分析[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(1):176-184.
- [13] 土工试验方法标准:GBT 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.