

文章编号: 1007-2993(2024)01-0090-05

## 聚丙烯纤维加固膨胀土边坡稳定性分析

任浩<sup>1,2</sup> 张紫怡<sup>1,2</sup> 党芳<sup>1,2</sup> 郝晨曦<sup>1,2</sup> 张宇航<sup>1,2</sup> 南亚林<sup>3,4</sup> 郭鸿<sup>1,5</sup> 杨奎斌<sup>1,5</sup>

(1. 陕西理工大学土木工程与建筑学院, 陕西汉中 723001; 2. 陕西理工大学人居环境科研学社, 陕西汉中 723001;

3. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西西安 710054; 4. 陕西省土体工程技术研究中心, 陕西西安 710054;

5. 陕西理工大学秦巴山地岩土环境与灾害防治研究中心, 陕西汉中 723001)

**【摘要】** 为提高膨胀土边坡稳定性, 改善膨胀土力学性能, 使用聚丙烯纤维对膨胀土进行改性。通过直剪试验计算出不同围压、不同聚丙烯纤维掺量改性膨胀土边坡的抗剪强度变化规律, 并应用 Geostudio 软件中的极限平衡法对不同聚丙烯纤维掺量的膨胀土边坡进行分析。研究发现, 聚丙烯纤维含量在一定范围内可有效提高膨胀土边坡抗剪强度, 掺量 0.14% 的纤维土在直剪试验中表现出较好的抗剪性能, Geostudio 极限平衡法分析结果显示, 0.14% 纤维土边坡稳定系数为 2.431, 较素膨胀土边坡稳定性系数提高 0.591。建议采用掺量 0.14% 的纤维土加固膨胀土边坡。

**【关键词】** 直剪试验; Geostudio 软件; 极限平衡法; 聚丙烯纤维; 加固膨胀土边坡

**【中图分类号】** TU411

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.01.016

## Slope Stability Analysis of Polypropylene Fiber Reinforced Expansive Soil

Ren Hao<sup>1,2</sup> Zhang Ziyi<sup>1,2</sup> Dang Fang<sup>1,2</sup> Hao Chenxi<sup>1,2</sup> Zhang Yuhang<sup>1,2</sup> Nan Yalin<sup>3,4</sup>

Guo Hong<sup>1,5</sup> Yang Kuibin<sup>1,5</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China; 2. Student Research Society of Human Settlements, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China; 3. China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Soil Engineering Technology Research Center of Shaanxi, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. Research Center of Geotechnical Environment and Geological Hazards Control in Qinling-Daba Mountains, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China)

**【Abstract】** To improve the slope stability of the expanding soil and improve the mechanical properties of the expanding soil, the polypropylene fiber was used to modify the expanded soil, and the shear strength change law of the slope of the modified expansion soil with different confining pressure and different polypropylene fiber dosage was calculated through the straight shear test, and then the slope of the expanded soil with different polypropylene fiber content was analyzed based on Geostudio software using the limit equilibrium method. It is found that the polypropylene fiber content can effectively improve the shear strength of the slope of the expanded soil within a certain range, and the 0.14% fiber soil showed good shear resistance in the straight shear test. The analysis results of Geostudio's limit equilibrium method show that the stability coefficient of 0.14% fiber soil slope is 2.431, which is 0.591 higher than that of plain expansive soil slope. It is recommended to use 0.14% fibrous soil to strengthen the slope of expanded soil.

**【Key words】** straight shear test; Geostudio; limit equilibrium method; polypropylene fiber; reinforcement of expansive soil slope

### 0 引言

膨胀土为高塑性黏土, 富含亲水性物质, 具有吸水膨胀, 失水收缩特性, 对环境的湿热变化极其敏感, 性质极不稳定<sup>[1]</sup>, 易发生滑坡等地质灾害。膨胀土边坡不稳定问题一直是工程实践亟待解决的难题, 发生

不稳定问题的主要原因是裂隙作用, 膨胀土为裂隙结构体, 裂隙的存在极大降低了土体抗剪强度。当裂隙附近应力集中程度超过膨胀土极限强度时, 裂隙周围土体开始软化<sup>[2]</sup>, 从而产生滑坡。故开展膨胀土力学特征研究对加固膨胀土边坡有着重要借鉴意义。

**基金项目:** 陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-324); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(23JC019); 国家级大学生创新创业计划项目(202210720001)

**作者简介:** 任浩, 男, 2002年生, 汉族, 陕西西安人, 在读大学本科。研究方向: 岩土工程。E-mail: 1814488701@qq.com

**通讯作者:** 郭鸿, 男, 1984年生, 博士, 副教授。研究方向: 颗粒物质力学、岩土工程理论及数值模拟。E-mail: hguo@snut.edu.cn

为提高膨胀土边坡稳定性,众多学者针对加固膨胀土边坡开展了大量的试验研究。邹维列等<sup>[3]</sup>描述了膨胀土滑坡的一般原理,并提出加固膨胀土边坡采用经济成本低的土工合成材料。邓铭江等<sup>[4]</sup>对北疆膨胀土渠道边坡的多层破坏机理和加固方法进行的研究,并建议采用抗滑支挡加固膨胀土边坡。杜兆萌<sup>[5]</sup>采用极限平衡法验证了抗滑桩加固膨胀土边坡方法的合理性。吴继玲等<sup>[6]</sup>提出聚丙烯纤维可以增强膨胀土的抗剪强度,且膨胀土抗剪强度不随干湿循环次数的增加而发生变化。陈翔等<sup>[7]</sup>开展了大量的干湿循环和直剪试验,得出掺量 0.3% 的纤维土在干湿循环试验中抗剪强度最大。

自 20 世纪 60 年代纤维加筋法被提出以来,采用聚丙烯纤维加固素土,因其具有抗剪强度提高幅度大、成本低等优点,逐渐被应用于土木工程。纤维加筋法通常向土体中均匀加入丝状聚丙烯纤维,故可以增强土体各个方向的强度。本研究选择质地坚韧聚丙烯纤维作为试验材料,研究不同聚丙烯纤维掺量膨胀土抗剪强度变化规律,并利用 Geostudio 中极限平衡法建立边坡模型,对加固前后膨胀土边坡稳定系数进行分析。研究可为膨胀土边坡加固提供借鉴。

## 1 试验材料与试验方案

### 1.1 材料参数

试验所用膨胀土取自陕西省汉中市城固县的柳林机场,土体呈黄褐色,土质坚硬,土中的裂隙较发育。将取回的膨胀土进行自然风干、碾碎,过 2 mm 筛。通过液塑限试验、击实试验测得膨胀土的一些基本物理指标(见表 1)。试验所用膨胀土蒙脱石含量不高,自由膨胀率为 55%,参考《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ 112—87),土样具有弱膨胀性。

表 1 膨胀土物理性质指标

最优含水率 w/%	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	液限 w <sub>L</sub> /%	塑性指数 I <sub>p</sub> /%	自由膨胀率 F <sub>s</sub> /%
16.8	1.75	42.36	20.44	55

试验所用聚丙烯纤维呈白色丝状,其长度约为 17 mm,平均直径 45 μm,此种纤维材料具有强度高、韧性大、弹性好等特点,所用的聚丙烯纤维的基本物理力学参数见表 2。

### 1.2 试验方案

试验采用最优含水率为 16.8%、干密度为 1.75 g/cm<sup>3</sup> 的膨胀土试样,通过添加不同掺量的聚丙烯纤维对其进行改良,并测试其抗剪强度指标的变化。采用底面积 30 cm<sup>2</sup>、高 2 cm 的环刀分别切取聚丙烯含

量为 0%、0.04%、0.10%、0.14%、0.18% 膨胀土试样各 3 组,共 15 个膨胀土试样。

表 2 聚丙烯纤维基本物理力学性质

平均长度 /mm	平均直径 /μm	平均断裂 伸长率/%	平均拉伸 强度/MPa	平均拉伸 模量/GPa
17	45	21	825	16

## 2 膨胀土直剪试验结果分析

通过直剪试验得出不同围压、不同聚丙烯纤维掺量的改性膨胀土的剪切应力随剪切位移变化曲线。图 1 为不同纤维掺量试样剪切应力随剪切位移变化曲线。可以看出当剪切位移小于 1 mm 时,剪切应力均随剪切位移快速上升,到达一定限度后曲线增长缓慢并逐渐趋于稳定。原因为膨胀土受剪时,由于土体受压后排列紧密,一部分土体颗粒与另一部分颗粒碰撞挤压,产生了相对摩擦力,因而抗剪强度在前期表现为逐渐增大的趋势,但当颗粒与颗粒、颗粒与纤维的间隙越来越小时,土中随机分布的聚丙烯纤维会有效抑制土颗粒之间的滑动,从而阻止其发生咬合。

通过图 1(a)、图 1(b)可以看出,剪切位移小于 1 mm 时,0.14% 纤维土剪切应力随位移增长较慢,而当剪切位移大于 2 mm 时,0.14% 纤维土曲线较其他掺量纤维土曲线急剧增长。另外,从图 1(c)曲线可以看出,膨胀土曲线在剪切位移分别增长到 1 mm、3 mm 时,其剪切应力数值分别增长至 9.3 kPa、15.5 kPa。0.14% 纤维土曲线在剪切位移增长到 1 mm、3 mm 时,其剪切应力数值分别增长至 9.6 kPa、28.9 kPa。纤维土抗剪能力较素土有较大提升,这是因为采用纤维改良后的膨胀土,纤维被周围土体包裹,纤维和土颗粒之间的摩擦力能够有效地阻止土颗粒间的错动与重排,在一定程度上能够延缓微裂隙的形成与发展,减小裂隙数量与裂隙宽度,降低裂隙贯通率,从而提高了土体抗剪能力。

图 2 为不同围压试样剪切应力随剪切位移变化曲线。分析图 2 可得,不同聚丙烯纤维掺量的纤维土的抗剪能力随围压的增大而提高。其中,纤维含量 0.14% 的膨胀土试样在 300 kPa 围压条件下,剪切位移为 2.9 mm 时,剪切应力达到最大值 48.3 kPa。

图 3 为 300 kPa 下抗剪强度与聚丙烯纤维掺量关系曲线。分析图 3 可得,当聚丙烯纤维含量超过 0.14% 时,剪切应力曲线呈现下降趋势。掺 0.14% 聚丙烯纤维能显著提高膨胀土的峰值抗剪性能。

纤维加筋法体现在将聚丙烯纤维均匀掺入膨胀土,素土颗粒与纤维丝交错在一起形成无数的“交错

点”，任意区域纤维受压将牵动各个区域的纤维受力，从而在土体内部形成网状结构。纤维含量越多，交错点越多其纤维土抗剪强度越强。然而并不是纤维含量越多膨胀土抗剪能力指标越大<sup>[8]</sup>，当聚丙烯纤维含量超过 0.14% 时，剪切应力曲线呈现下降趋势。本次直剪试验得出的各材料抗剪强度由高到低依次为 0.14% 纤维土、0.18% 纤维土、0.10% 纤维土、0.04% 纤维土和素膨胀土，其中 0.14% 纤维土改良效果最为显著。

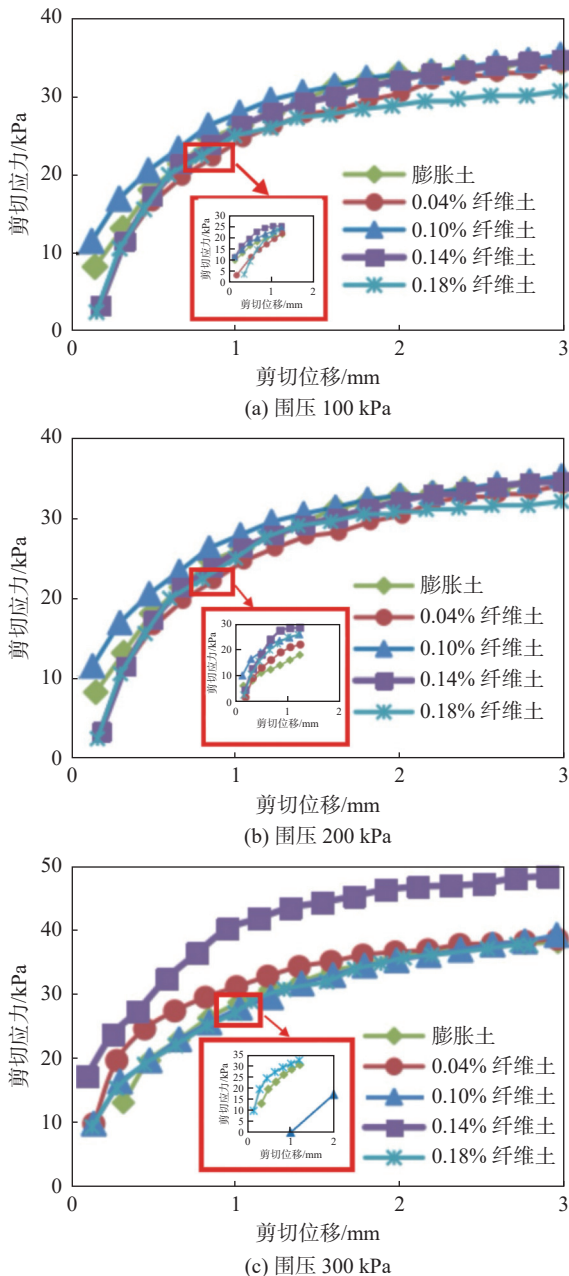


图 1 不同纤维掺量试样剪切应力随剪切位移变化曲线

### 3 边坡稳定性分析方法和结果

#### 3.1 分析方法

极限平衡法是假设边坡处于不稳定条件下，忽

略边坡内部变形对边坡稳定性产生影响，简化之后导出其受外力作用并分析边坡受外力作用安全系数。Morgenstern-Price 法(M-P 法)、Fellenius 法是目前主要的极限平衡法。

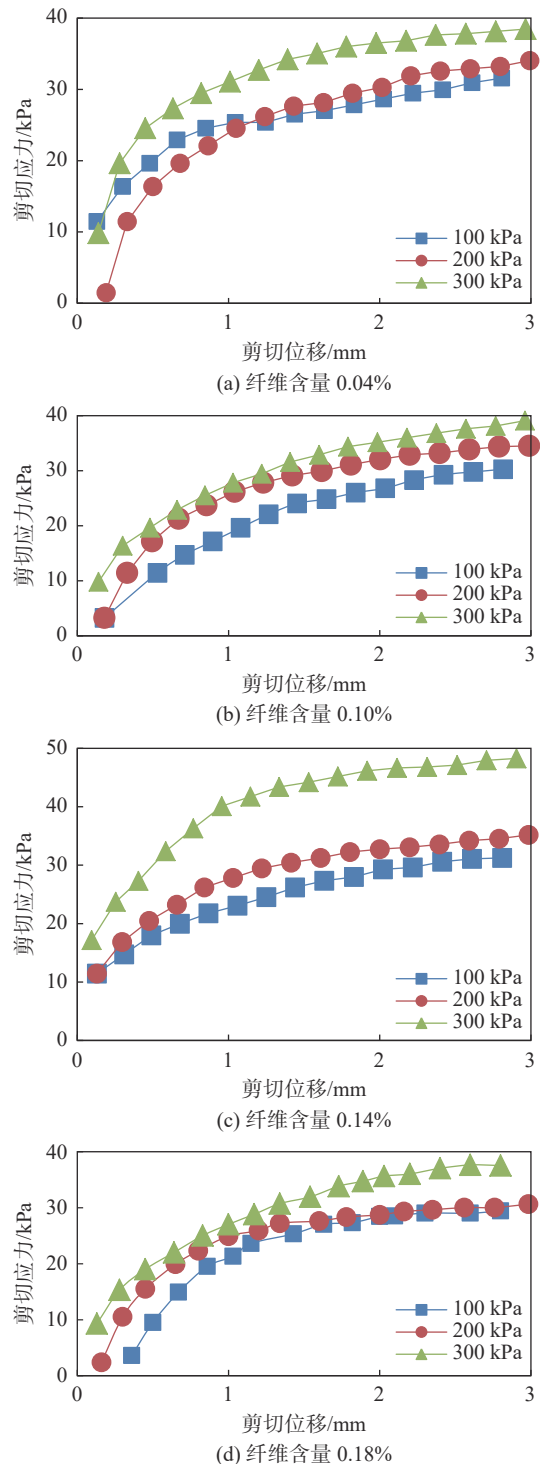


图 2 不同围压试样剪切应力随剪切位移变化曲线

Geostudio 软件 SLOPE/W 模块中 M-P 法使用半正弦函数，半正弦函数趋向于条间剪力朝向滑体的中部并在顶部减小，M-P 方法不仅考虑条间剪力和

法向力,也满足力矩平衡和力平衡条件,其稳定性以安全系数为标准。

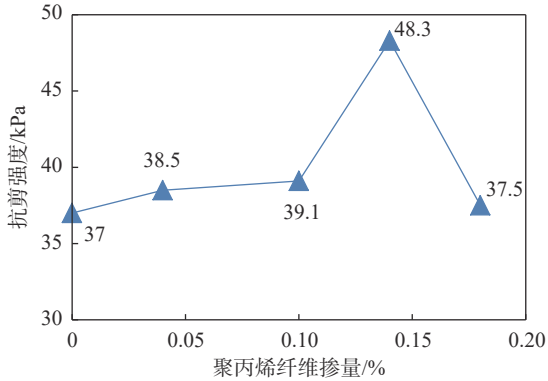


图3 围压 300 kPa 抗剪强度与聚丙烯纤维掺量关系

极限平衡法使用抗滑应力和滑动应力之比表示边坡稳定程度,图4列举出土条作用力分布状况,土条两侧剪切应力不能超过土条作用面的抗剪强度<sup>[9]</sup>,即

$$F_v = \frac{E' \tan \varphi'_{av} + c'_{av} (y - z)}{X} > F \quad (1)$$

式中:  $F_v$  为稳定系数;  $E'$  为法向垂直压力;  $X$  为剪切应力;  $\tan \varphi'_{av}$  为摩擦系数;  $c'_{av}$  为土条黏聚力;  $y$  为滑坡断裂面的纵坐标值;  $z$  为边坡表层的纵坐标值。

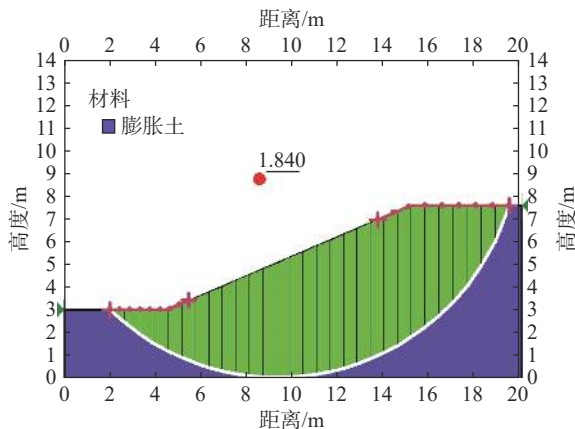


图4 素膨胀土边坡模型

### 3.2 分析结果

根据直剪试验数据,分别计算出不同纤维掺量膨胀土土样在 100 kPa、200 kPa、300 kPa 围压条件下的抗剪强度,利用库仑定律计算出不同纤维掺量土样的内摩擦角和黏聚力参数(见表3)。

采用表3中不同纤维试样的主要力学参数,使用 Geostudio 中 SLOPE/W 模块对边坡稳定性研究,并得出各边坡安全系数及力学性能参数。

选取高为 7.5 m、宽 20 m 的剖面,纤维土天然重度  $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ ,内摩擦角  $\varphi=13.539^\circ$ ,黏聚力  $c=19.695 \text{ kPa}$ 。利用 Geostudio 中 SLOPE/W 模块,采用极限平衡法对膨胀土滑坡剖面进行稳定性研究,计

算得 0% 纤维土边坡模型如图4所示。

表3 不同纤维掺量土样的主要力学指标

纤维掺量/%	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$
0.00	13.539	19.695
0.04	17.523	21.852
0.10	23.59	24.223
0.14	27.857	27.823
0.18	18.753	25.823

选取高为 7.5 m、宽 20 m 的剖面,纤维土天然重度  $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ ,内摩擦角  $\varphi=23.590^\circ$ ,黏聚力  $c=24.223 \text{ kPa}$ 。利用 Geostudio 中剖面进行稳定性研究,计算得 0.10% 纤维土边坡模型如图5所示。

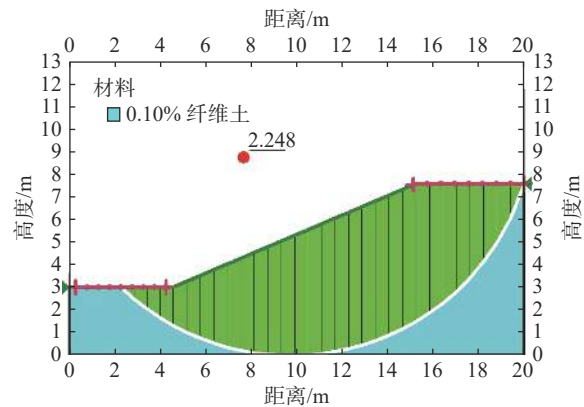


图5 0.10% 纤维土边坡模型

选取高为 7.5 m、宽 20 m 的剖面,纤维土天然重度  $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ ,内摩擦角  $\varphi=27.857^\circ$ ,黏聚力  $c=27.823 \text{ kPa}$ 。利用 Geostudio 中 SLOPE/W 模块,采用极限平衡法对膨胀土滑坡剖面进行稳定性研究,计算得 0.14% 纤维土边坡模型如图6所示。

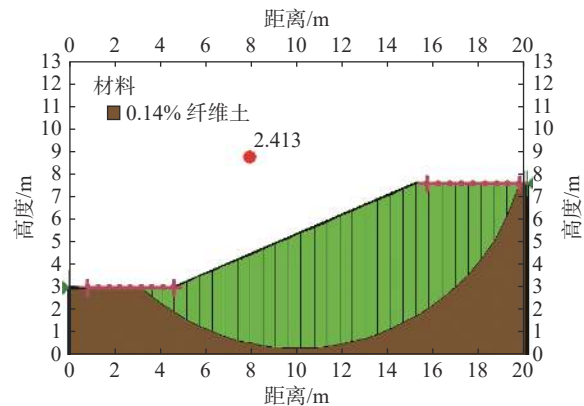


图6 0.14% 纤维土边坡模型

选取高为 7.5 m、宽 20 m 的剖面,纤维土天然重度  $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ ,内摩擦角  $\varphi=18.753^\circ$ ,黏聚力  $c=25.823 \text{ kPa}$ 。利用 Geostudio 中 SLOPE/W 模块,采用极限平衡法对膨胀土滑坡剖面进行稳定性研究,计算得 0.18% 纤维土边坡模型如图7所示。

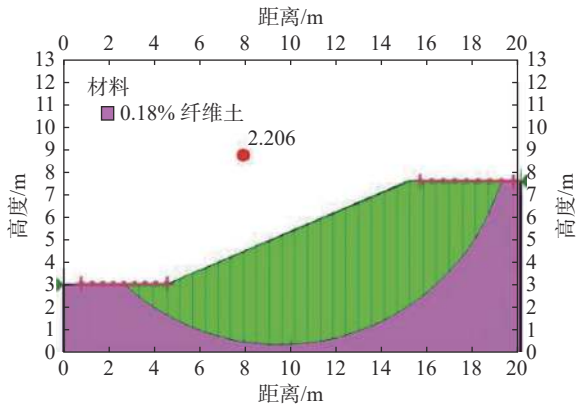


图7 0.18%纤维土边坡模型

图8为边坡安全系数随纤维含量变化曲线。由图8可知,安全系数随着纤维含量增加而呈现先增加后衰减的趋势且拟合直线斜率约为2.5751。安全系数在该拟合直线附近波动,0.14%聚丙烯纤维边坡安全系数为2.413,较素膨胀土边坡安全系数增长0.591。这是因为纤维土的剪切应力会在一定范围内随聚丙烯纤维含量的增加而增加,当聚丙烯纤维极限应变达到峰值之前,边坡安全系数都在稳步上升<sup>[10]</sup>。

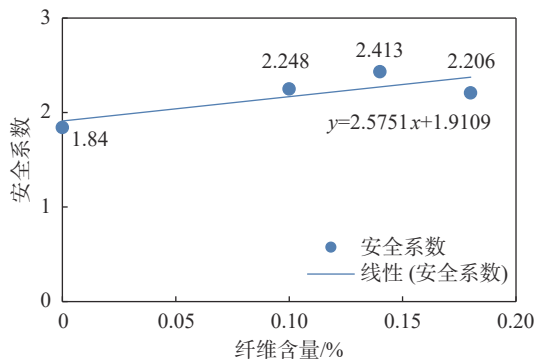


图8 安全系数随纤维含量变化曲线

### 3.3 力学参数分析

利用 Geostudio 中 SLOPE/W 模块得到素膨胀土边坡模型、0.10%纤维土边坡模型、0.14%纤维土边坡模型参数、0.18%纤维土边坡模型参数,导出总抗滑应力与纤维含量关系如图9所示。

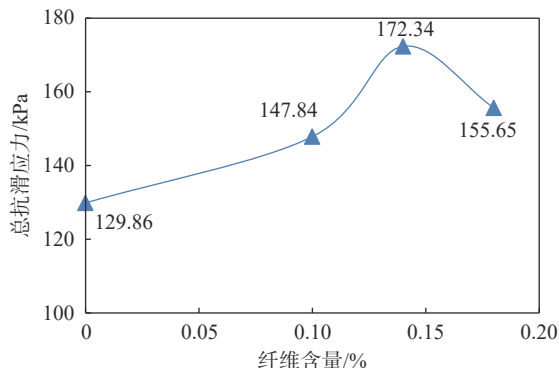


图9 总抗滑应力与纤维含量关系

由图9可知,边坡总抗滑应力与纤维含量曲线

依然呈现正态分布趋势,0.14%纤维土边坡总抗滑应力较素膨胀土边坡总抗滑应力增长42.48 kPa,0.10%纤维土边坡总抗滑应力较素膨胀土边坡总抗滑应力增长17.98 kPa。由此可见,掺入聚丙烯纤维可显著增强边坡抗滑应力,聚丙烯纤维还可以增强纤维土边坡的峰值抗剪强度、减少其残余强度的损失、延长试样破坏的时间<sup>[11]</sup>。汉中市柳林机场的膨胀土边坡建议采用0.14%掺量的聚丙烯纤维加固。

## 4 结论

(1)各掺量纤维土直剪试验结果表明,聚丙烯掺量小于等于0.14%时,抗剪强度随纤维含量增加而增大,聚丙烯掺量大于0.14%时,抗剪强度开始下降;聚丙烯掺量为0.14%时加固效果最为显著,其抗剪强度较同条件下的素膨胀土提高11.3 kPa。

(2)Geostudio 软件 SLOPE/W 模块的分析结果表明,采用聚丙烯纤维加固后膨胀土边坡稳定性系数显著提高,聚丙烯掺量为0.14%时边坡稳定性提高幅度最大,与同条件下的素膨胀土边坡相比,稳定性系数提高0.591,总抗滑应力提高42.48 kPa。

(3)对于汉中市柳林机场膨胀土边坡,建议采用0.14%掺量的聚丙烯纤维进行加固。

## 参考文献

- [1] 边加敏. 弱膨胀土干湿循环直剪强度试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6): 81-85, 91.
- [2] 郑勇. 膨胀土边坡失稳成因机制及其演化过程分析[J]. 中国水运, 2009, 9(12): 152-153.
- [3] 邹维列, 蔺建国, 韩仲, 等. 膨胀土边坡加固技术研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 126-139.
- [4] 邓铭江, 蔡正银, 朱洵, 等. 北疆渠道膨胀土边坡破坏机制及加固措施[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 50-55.
- [5] 杜兆萌. 成都地区膨胀土边坡抗滑桩分析方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [6] 吴继玲, 武升平, 郑方万. 干湿循环对纤维膨胀土特性影响的试验研究[J]. 工程勘察, 2011, 39(9): 14-18.
- [7] 陈翔, 张福海, 张晓阳, 等. 干湿循环效应对纤维膨胀土抗剪强度室内试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(19): 175-179.
- [8] 邓小龙, 孙光吉, 俞永华, 等. 聚丙烯纤维加筋膨胀土的强度特性研究[C]//2020年工业建筑学术交流会议论文集(下册). 中冶建筑研究总院有限公司, 2020.
- [9] 刘杰, 李建林, 王乐华, 等. 三种边坡安全系数计算方法对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2896-2903.
- [10] 张小平, 施斌. 加筋纤维膨胀土的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2008, (4): 60-62.
- [11] 吴继玲. 加筋纤维膨胀土强度与变形特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.