

文章编号:1673-9469(2026)02-0036-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.02.005

## 加筋陡边坡应力与变形特性分析

赵旭东<sup>1,2</sup>, 曲庆闯<sup>1,2</sup>, 谢小慧<sup>1,2</sup>, 刘伟超<sup>1,2\*</sup>, 杨广庆<sup>1,2</sup>, 杨艳<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;  
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 为了深入探讨高强土工布在高填方陡坡中的加固效果, 通过模型试验, 将高强土工布与普通土工布、土工格栅等不同土工合成材料进行对比分析。结果表明, 与普通土工布、土工格栅加筋坡体相比, 高强土工布加筋陡坡在减小坡体沉降、侧向位移以及竖向附加应力方面效果较好。同时研究了高强土工布不同铺设方式对坡体竖向附加应力和变形特性的影响, 结果表明, 改变高强土工布的铺设方式可以增强黄土高填方陡坡的安全性和稳定性。在5种不同铺设方式中, 采用向下挖两道凹槽后铺设土工布的加筋铺设方式(凹×2)能有效减小加筋陡坡坡顶沉降和竖向附加应力。研究结果可为高强土工布加筋陡边坡应用提供参考。

**关键词:** 加筋黄土; 陡边坡; 高强土工布; 土工合成材料; 模型试验; 铺设方式

中图分类号: TU59

文献标识码: A

## Analysis of Stress and Deformation Characteristics of Reinforced Steep Slopes

ZHAO Xudong<sup>1,2</sup>, QU Qingchuan<sup>1,2</sup>, XIE Xiaohui<sup>1,2</sup>, LIU Weichao<sup>1,2\*</sup>,  
YANG Guangqing<sup>1,2</sup>, YANG Yan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** To further investigate the reinforcement effects of high-strength geotextiles in high-fill steep slopes, model tests were conducted to compare high-strength geotextiles with other different geosynthetic materials including common geotextiles and geogrids. The results indicated that high-strength geotextile-reinforced steep slopes showed better performance in reducing slope body settlement, lateral displacement, and additional vertical stress compared with those reinforced with common geotextiles and geogrids. At the same time, the influence of different laying methods of high-strength geotextile on the stress and deformation characteristics of the slope body was studied. The results showed that changing the laying methods of high-strength geotextiles could enhance the safety and stability of high-fill loess steep slopes. Among the five different laying methods, the reinforced laying method of digging two grooves downwards and laying geotextiles (concave×2) can effectively reduce the crest settlement and additional vertical stress of the reinforced steep slopes. The research results can provide a reference for the engineering application of high-strength geotextile-reinforced steep slopes.

**Key words:** reinforced loess; steep slope; high-strength geotextile; geosynthetics; model test; laying method

收稿日期: 2024-03-13 修回日期: 2024-04-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52079078); 国家重点研发计划项目(2022YFE0104600); 河北省自然科学基金资助项目(E2025210095)

第一作者: 赵旭东(1996—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 从事加筋边坡方面的研究。

\* 通信作者: 刘伟超(1984—), 男, 河南漯河人, 博士, 副教授, 从事土工合成材料应用方面的研究。

随着中国“西部大开发”战略和“一带一路”倡议的持续推进,黄土高原地区的高填方工程数量显著增多,并成为该地区基础设施建设的重要组成部分。然而,由于加筋黄土边坡应用技术尚不成熟,随着高填方工程数量增加,边坡破坏等工程安全事故频发,这些事故不仅造成了重大的经济损失,也威胁到了人员安全。近年来,在建或已建成的高填方项目中,边坡破坏事故已经导致多个工程项目暂停或废弃<sup>[1-2]</sup>。特别是黄土滑坡事件,造成了严重的经济损失和人员伤亡<sup>[3]</sup>,在我国西北地区已引起了广泛关注。随着城市用地日益紧张,建设选址逐渐向山区拓展,导致高填方边坡建设项目急剧增多<sup>[4]</sup>。为了平衡项目成本与用地需求,这些高填方边坡往往被建造成陡峭的形态,这进一步加剧了工程安全的挑战。在此背景下,确保高填方工程在施工、运营及维护阶段的安全,已经成为工程技术领域的一大难题。

高岳权<sup>[5]</sup>对黄土地区某高速公路的高填方路堤滑坡问题进行了深入的理论与数值模拟研究,发现高填方路堤滑坡的根本原因在于黄土下卧层的不均匀湿陷性沉降。因此,控制黄土高填方陡边坡的沉降、改善坡体的受力状况是确保工程安全的关键。而有研究表明,土工布等土工合成材料能很好地控制土坡的沉降和改善坡体的受力状况,如陈周与等<sup>[6]</sup>发现土工布加筋土体具有良好的应力扩散作用,能够均衡差异沉降并减少总沉降。翁效林等<sup>[7]</sup>研究表明,新老路基接缝处的加筋材料能起到裹附作用,增强路基的板结效果,形成有效的土拱效应,从而利用路堤填料本身的刚度调整地基的沉降变形。在改善坡体受力情况方面, Kim 等<sup>[8]</sup>对两个实际的土工合成材料的加筋挡土墙和未加筋土体进行有限元分析,探讨土工合成材料的加筋效果,发现加筋可以有效增强填土体的强度并减少其变形。廖鸿等<sup>[9]</sup>采用土工格栅加筋土挡墙的方式设计高填方路堤,显著减少了填筑体的高度、填方和挖方量以及坡面防护面积。王家鼎等<sup>[10]</sup>基于有限元法对山西北张沟国内最高的黄土高填方加筋黄土高填路堤开展了稳定性数值模拟分析,结果表明,加筋作用能有效减小路堤的变形,提高其稳定性。HAN 等<sup>[11]</sup>发现,使用短切土工合成材料作为次要加固材料,能够减少主筋的张力和侧向变形。刘少博等<sup>[12]</sup>通过对土工布加筋黄土进行三轴剪切试验,探讨了不同围压和加筋方式下的强度及变形特性,发现在适当

的围压范围内,通过加筋的方式能有效提升土体强度和抗变形能力。而对于黄土高填方陡坡工程,已有研究证明了加筋方法的适用性,例如张志清等<sup>[13-15]</sup>分别研究了土工格栅、土工布加筋对高填方路堤稳定性和变形特性的影响,并对加筋位置确定方法、加筋方案进行对比改进,验证了土工合成材料加筋的可行性与良好效果,有效提升了加筋边坡的稳定性。唐培连等<sup>[16]</sup>在场地受限条件下将土工布加筋应用于高填方边坡中,取得了良好的效益。但总体而言,目前关于土工布在黄土高填方陡边坡中的应用效果和影响因素研究仍相对有限。

基于以上分析,高强土工布加筋能够有效改善高填方地区的强度与变形问题。本研究通过模型试验,对高强土工布、普通土工布、土工格栅等不同土工合成材料进行比较分析,同时考察了不同铺设方式对坡体侧向位移、坡顶沉降、竖向附加应力的影响,以期对土工布加筋边坡推广应用提供借鉴。

## 1 模型试验

### 1.1 试验材料

本试验所用黄土取自位于山西省忻州市保德县境内的兴保铁路复线工程储装运系统工程。将筛除大颗粒石块后的黄土作为模型试验填土,通过直剪试验、液塑限试验、击实试验等,测得试验填土的重度为  $18 \text{ kN/m}^3$ ,黏聚力和摩擦角分别为  $1.64 \text{ kPa}$ 、 $34^\circ$ ,液限和塑限分别为  $28.31\%$ 、 $16.7\%$ ,最优含水率为  $16\%$ 。

本试验选用土工袋作为护坡材料,其内部填充物为剔除大颗粒石块后的黄土,其参数与上述黄土的基本物理力学参数一致。土工袋填充完成后,用缝包机将土工袋密封。试验所用筋材包括普通土工布、土工格栅和高强土工布,其筋材拉伸强度依次为  $100$ 、 $100$  和  $400 \text{ kN/m}$ ,筋材实物图见图 1。

本试验使用的模型箱尺寸为  $1.5 \text{ m}$ (长) $\times$  $0.5 \text{ m}$ (宽) $\times$  $1.0 \text{ m}$ (高),所用筋材宽度均为  $50 \text{ cm}$ ,铺设长度均为  $80 \text{ cm}$ ,反包长度均为  $40 \text{ cm}$ ,如图 2 所示。试验加载仪器为千斤顶,测试元件包括百分表、应变片、土压力盒和采集仪,它们分别用来测定坡顶竖向位移、坡面水平位移、筋材应变和土中应力等,其中,竖直土压力盒直径为  $80 \text{ mm}$ ,测试元件布置图见图 3。

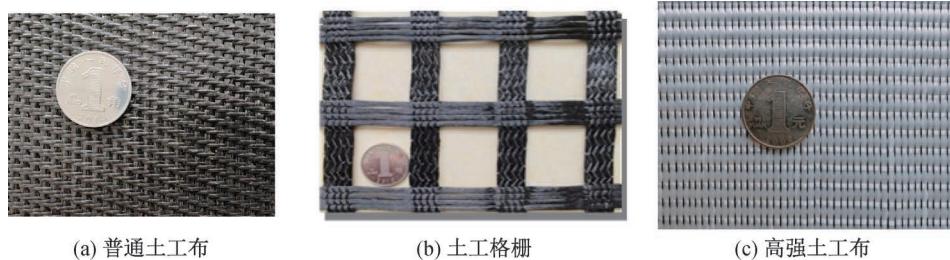


图1 筋材示意图

Fig.1 Schematic diagram of reinforcement materials

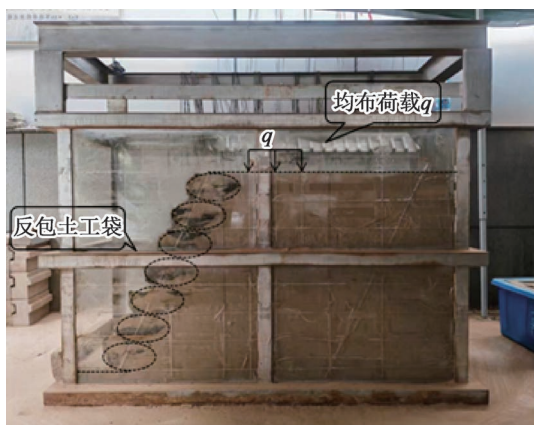


图2 加筋陡坡模型图

Fig.2 Diagram of reinforced steep slope model

1.2 试验方案

本文共开展7组模型试验,选用3种不同类型的土工布,其中高强土工布按照5种不同类型的铺设方式进行铺设。具体方案如表1所示,筋材铺设方式示意图如图4所示,#1—#3工况用于对比不同加筋材料的加筋效果,#4—#7工况用于对比土工布不同铺设方式的加筋效果,其中的“凹”是指填料压实后挖出凹槽,“凸”是指堆土形成凸

表1 试验方案

Tab.1 Test program

工况编号	筋材拉伸强度 / (kN · m <sup>-1</sup> )	铺设方式	筋材类别
#1	100	平铺	普通土工布
#2	100	平铺	土工格栅
#3	400	平铺	高强土工布
#4	400	凹×1 铺设	高强土工布
#5	400	凹×2 铺设	高强土工布
#6	400	凸×1 铺设	高强土工布
#7	400	凸×2 铺设	高强土工布

起,×1、×2 分别是指形成1道或2道凹槽(凸起)。

本试验边坡模型的坡度设定为1:0.5,坡高80 cm,其中包括了10 cm高的垫层。采用分层填筑方式施工,每层填土经压实和整平后高度均为10 cm,通过控制边坡的总填土量,分8次完成填筑,将填土的压实度控制在90%。在各层土填筑、压实、整平后,在填土表面铺设筋材,根据图3所设定的监测元件安装位置,分别粘贴应变片、埋设土压力盒、安装百分表等。

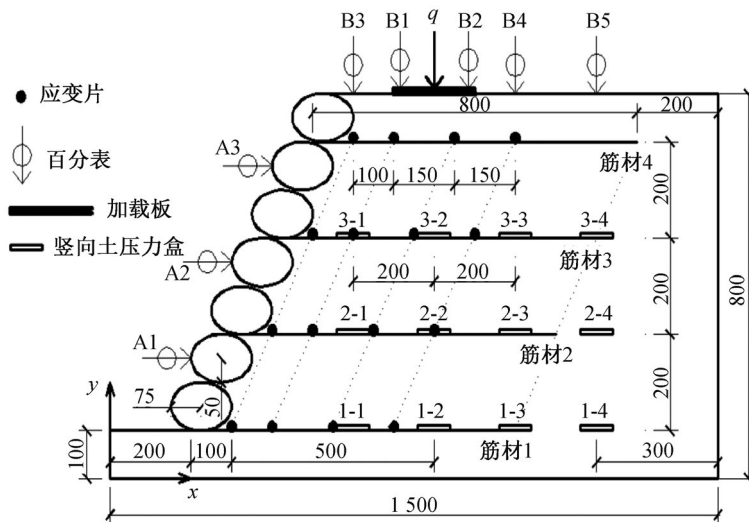


图3 监测元件布置图(单位:mm)

Fig.3 Monitoring element layout diagram(unit: mm)

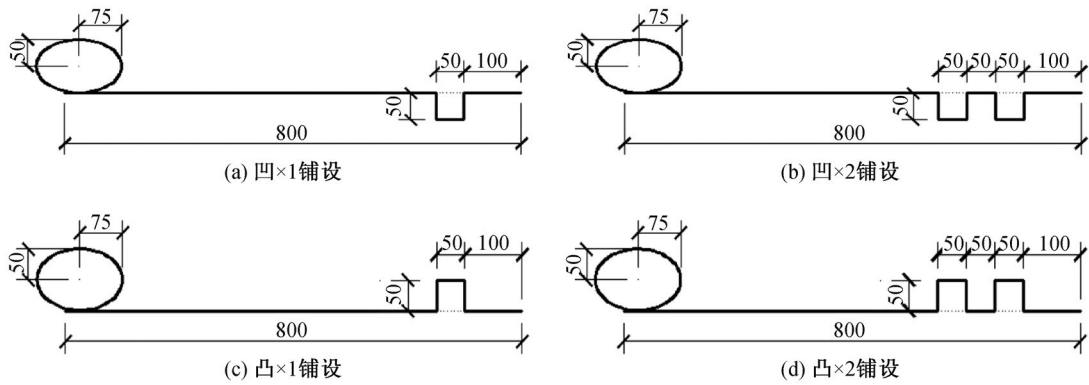


图 4 筋材铺设方式示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of reinforcement material laying methods (unit: mm)

试验加载采用固定在模型箱顶部的千斤顶,加载板尺寸为 0.4 m(长)×0.2 m(宽),试验采用分级加载方式,加载等级依次为 10、20、30、40、50、60 和 70 kPa,加载完成后,以一次卸载的方式将荷载从 70 kPa 降至 0 kPa。

## 2 试验结果分析

### 2.1 筋材类别对加筋黄土陡边坡应力与变形特性的影响

#### 2.1.1 筋材类别对加筋黄土陡边坡坡顶沉降的影响

试验过程中,在坡顶设置百分表 B1、B2,用于记录不同荷载等级下坡顶变形,取二者平均值作为坡顶沉降值,可得不同筋材加筋陡边坡坡顶沉降随荷载等级的变化曲线,如图 5 所示。

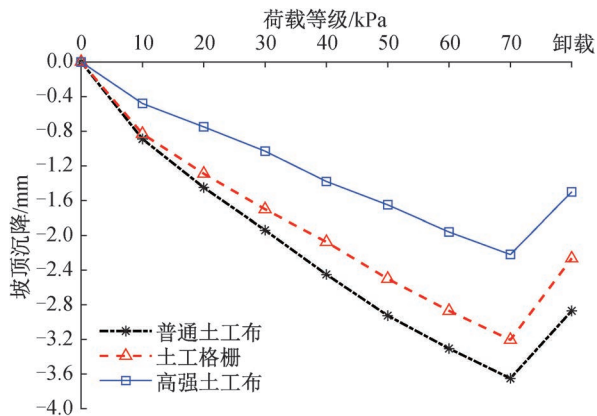


图 5 不同筋材加筋陡边坡坡顶沉降随荷载等级变化图

Fig. 5 Variation of crest settlement in steep slopes reinforced with different types of reinforcement materials as a function of load levels

由图 5 可知,在进行分级加载的初期,即荷载为 10 kPa 时,坡顶沉降增长较快,其原因可能是土体在荷载作用下被进一步压密。随着加载

量不断增大,普通土工布、土工格栅以及高强土工布加筋陡边坡的坡顶沉降均呈增加的趋势,并且这种增加趋势基本呈线性。对比三者的沉降量,普通土工布加筋陡边坡的坡顶沉降量最大,土工格栅加筋陡边坡次之,而高强土工布加筋陡边坡最小。这表明不同类型的筋材对于增强坡体稳定性的效果存在差异,其中高强土工布的加筋效果最为显著。此外,在卸载后,各种筋材加筋陡边坡的坡顶沉降均有所回弹,表明加筋筋材在卸载后有一定程度上的弹性恢复,表现为侧向位移的减小。

图 6 为 3 种筋材加筋陡边坡的坡顶沉降随边坡水平距离的分布情况。在各级荷载作用下,3 种筋材的坡顶沉降在加载点正下方最大,而在加载点两侧有所减小。靠近边坡的测点沉降略大于远离边坡的测点沉降,这可能是由边坡发生侧向位移引起的。而由图 6 可知,距加载点 0.4 m 处测点的坡顶沉降值最小。这表明荷载引起的最大变形主要集中在加载区域,而随着距离的增加,其影响逐渐减小。比较不同筋材的加筋效果,可以看出相对于普通土工布和土工格栅加筋陡边坡,高强土工布加筋陡边坡在减小坡顶沉降方面表现出更优异的加筋效果。其原因可能是高强土工布具有较高的抗拉强度,且整体性更好,可以更有效地分散荷载,进而减少因局部荷载作用引起的坡顶沉降。

#### 2.1.2 筋材类别对加筋黄土陡边坡侧向位移的影响

试验开始前在坡面上安装了 A1、A2、A3 3 个百分表(位置如图 3 所示),用以测定加筋黄土陡边坡的侧向位移,对其加载和卸载过程中的数据进行整理可得加筋陡边坡坡面侧向位移随荷载等级变

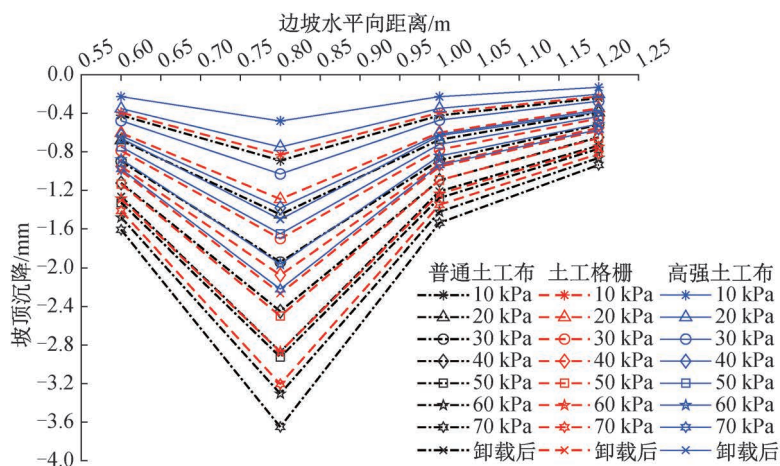


图6 不同筋材加筋陡坡坡顶沉降图

Fig. 6 Crest settlement in steep slopes reinforced with different types of reinforcement materials

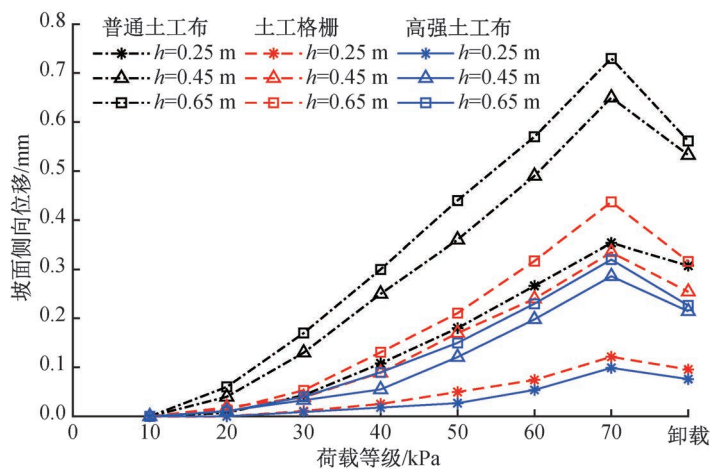
化曲线,如图7所示。由图7可知,随着荷载的不断增大,3种筋材的加筋陡坡侧向位移均呈线性增长。具体来说,普通土工布加筋陡坡的侧向位移最大,其次是土工格栅加筋陡坡,而高强土工布加筋陡坡的侧向位移最小。这表明,高强土工布加筋陡坡效果最好。

为更加清晰地展示在不同坡面高度处的侧向位移,本文绘制了以坡面高度为纵坐标的加筋陡坡坡面侧向位移图,如图8所示。由图可知,在坡高为0.45 m和0.65 m处,筋材种类对加筋陡坡坡面的侧向位移影响显著。高强土工布加筋陡坡在各个坡高处的侧向位移最小,表明其限制坡面侧向位移的效果最佳;普通土工布加筋陡坡在各个坡高处的侧向位移较大,限制侧向位移的效果较差。土工格栅加筋陡坡的侧向位移控制效果介于二者

之间。高强土工布加筋陡坡有效地抑制了侧向变形,这可能归因于其较高的拉伸强度和良好的荷载分散能力。

### 2.1.3 筋材类别对加筋陡边坡竖向附加应力的影响

根据《土力学》<sup>[17]</sup>,附加应力是由外部作用引起的,是导致地基变形和建筑物沉降的主要因素。图9为坡体竖向附加应力沿水平向距离分布情况。由图可知,在同一荷载等级下,采用普通土工布、土工格栅、高强土工布加筋陡坡沿筋长方向在荷载施加中心线位置的竖向附加应力最大,且向两侧逐渐减小。该竖向附加应力的分布与《土力学》<sup>[17]</sup>中描述的均布荷载作用在矩形基础上时,土中附加应力扩散规律总体一致。



注:  $h$  为测点与加载面的竖直距离

图7 不同筋材加筋陡坡坡面侧向位移随荷载等级变化图

Fig. 7 Variation of lateral displacement along the slope face in steep slopes reinforced with different types of reinforcement materials as a function of load levels

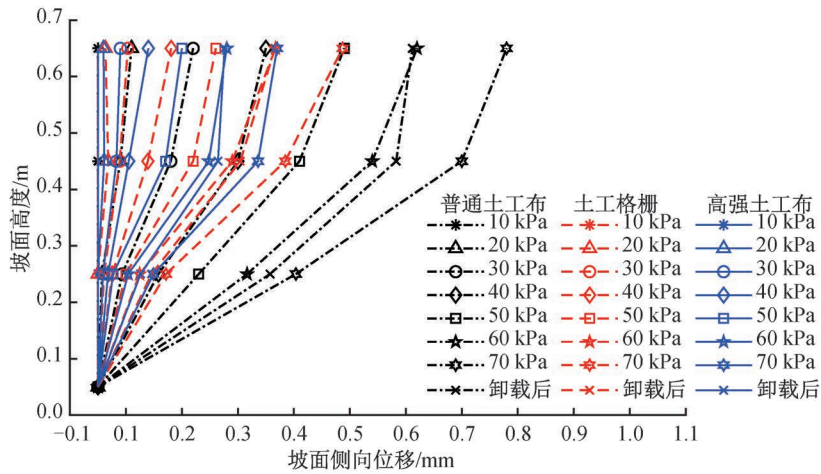


图 8 不同筋材加筋陡坡坡面侧向位移图

Fig. 8 Lateral displacement along the slope face in steep slopes reinforced with different types of reinforcement materials

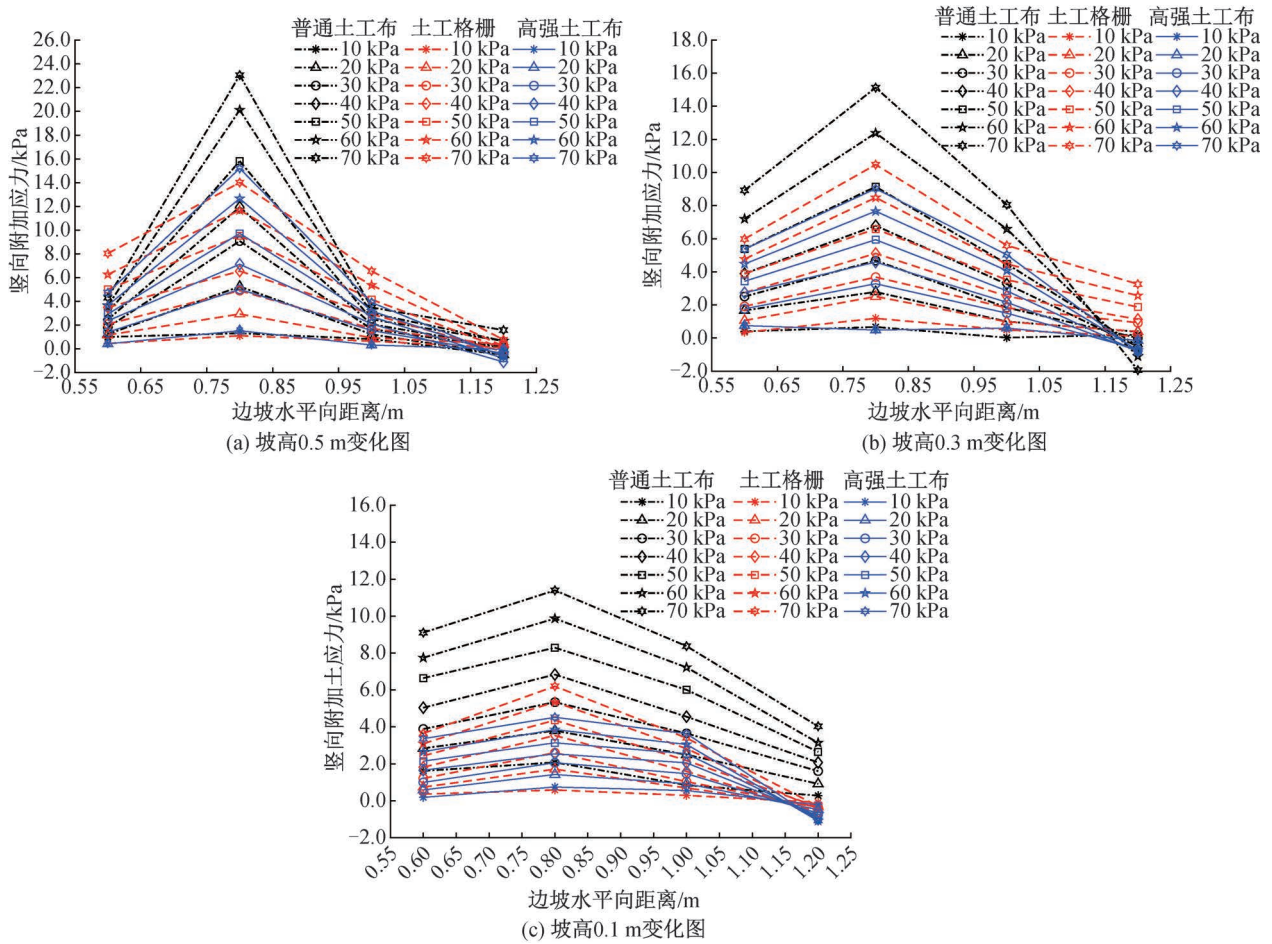


图 9 坡体竖向附加应力沿水平向距离分布图

Fig. 9 Distribution of additional vertical stress along the horizontal distance in the slope body

在边坡水平距离相同、荷载等级相同时,针对坡高为 0.5、0.3、0.1 m 3 种情况,普通土工布加筋陡坡的竖向附加应力均高于土工格栅和高强土工布加筋陡坡,表明普通土工布在减少竖向附加应力方面的效果有限。在相同荷载等级下,坡高

0.5 m 处土工格栅加筋陡坡加载位置的竖向附加应力略低于高强土工布加筋陡坡,两侧则略高,二者总体较为接近。说明在靠近坡顶的位置,土工格栅和高强土工布在降低竖向附加应力方面效果相近;而坡高 0.3 m 和 0.1 m 处,高强土工布加筋

陡坡的竖向应力比土工格栅加筋陡坡低,说明在较低坡高处高强土工布加筋陡坡的效果优于土工格栅加筋陡坡。

总体而言,3种筋材中,高强土工布在降低加筋陡坡内部竖向附加应力方面的效果最为显著,其次是土工格栅,而普通土工布的效果相对较差。这个结果与陡坡坡顶沉降变化趋势相吻合,为加筋材料的选择提供了重要的依据。

## 2.2 筋材铺设方式对加筋黄土陡边坡受力与变形特性的影响

为进一步探讨如何优化高强土工布的加筋效果,本文提出了使土工布部分向上凸起或向下凹陷的曲线型加筋铺设方式(如表2和图4所示)并开展模型试验研究,着重考察筋材铺设方式对荷载作用下加筋陡坡的受力和变形特性的影响,以期为实际工程应用提供更为可靠的依据。

### 2.2.1 筋材铺设方式对加筋黄土陡边坡坡顶沉降的影响

按照表1中的#3、#4、#5、#6、#7 5种工况进行铺设,采用设置在坡顶的竖向百分表记录在不同荷载等级、不同铺设方式下的坡顶沉降,绘制坡顶沉降与荷载关系曲线如图10所示。

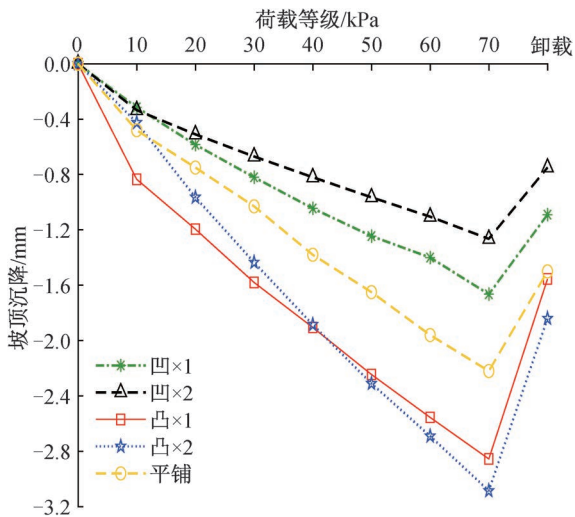


图10 不同铺设方式加筋陡坡坡顶沉降随荷载等级变化图  
Fig. 10 Variation of crest settlement in steep slopes reinforced with different laying methods as a function of load levels

由图10可以看出,在凹×1和凹×2铺设工况下,坡顶沉降相较于平铺工况显著减少,其中凹×2铺设工况下的坡顶沉降最小,凹×1工况次之;而在凸×1和凸×2工况下,坡顶沉降则相较于平铺工况有所增加,但凸×1和凸×2两种工况坡顶沉降差异不显著。凹×1和凹×2工况下的坡顶沉降小于

凸×1和凸×2工况,这是因为凹形加筋可以实现高强土工布与土体的紧密结合,并利用凹槽壁提供侧向支撑,提高土体压实度,同时土料将土工布向凹槽内压入时可实现对土工布的预张拉,能更有效地传递荷载,减少沉降。而凸形加筋的覆土层可能在压实度上与下层土体不匹配,填筑质量不易控制,削弱加筋效果,从而可能导致较大沉降。

### 2.2.2 筋材铺设方式对加筋黄土陡边坡侧向位移的影响

图11呈现了5种不同铺设方式下加筋陡坡坡面侧向位移随荷载等级变化情况。由图11可知,相较于其他铺设方式,在凹×2铺设方式下,加筋陡坡相同高度处的坡面侧向位移明显减小,而在凸×2铺设方式下的侧向位移则相对较大。此外,凹×1铺设方式的陡坡坡面侧向位移小于平铺方式,而凸×1铺设方式下的坡面侧向位移与平铺方式接近。

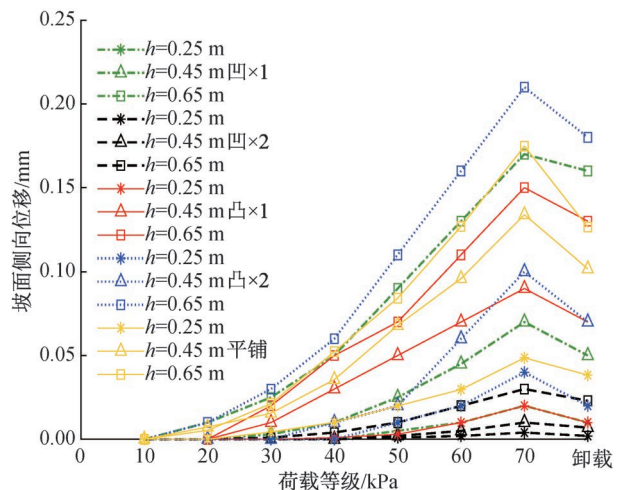


图11 不同铺设方式下加筋陡坡坡面侧向位移随荷载等级变化图

Fig. 11 Variation of lateral displacement of reinforced steep slopes with load level under different laying methods

对比不同铺设方式下加筋陡坡坡面侧向位移,凹形铺设方式(凹×1和凹×2)坡面侧向位移显著小于凸形铺设方式(凸×1和凸×2),这是因为凹形铺设方式显著增强了筋材对坡面侧向位移的限制作用,而凸形铺设方式(凸×1和凸×2)未能有效控制侧向位移。这可能是因为凹形铺设方式形成的土工布在与土体的接触面上产生更多的摩擦力且实现了预张拉的效果,有助于抵抗侧向滑移,从而减少了侧向变形。相比之下,在凸形铺设方式下土工布与土体的相互作用较弱,在控制侧向位

移时效果不佳。

### 2.2.3 筋材铺设方式对加筋黄土陡边坡竖向附加应力的影响

图 12 为不同铺设方式加筋陡边坡竖向附加应力

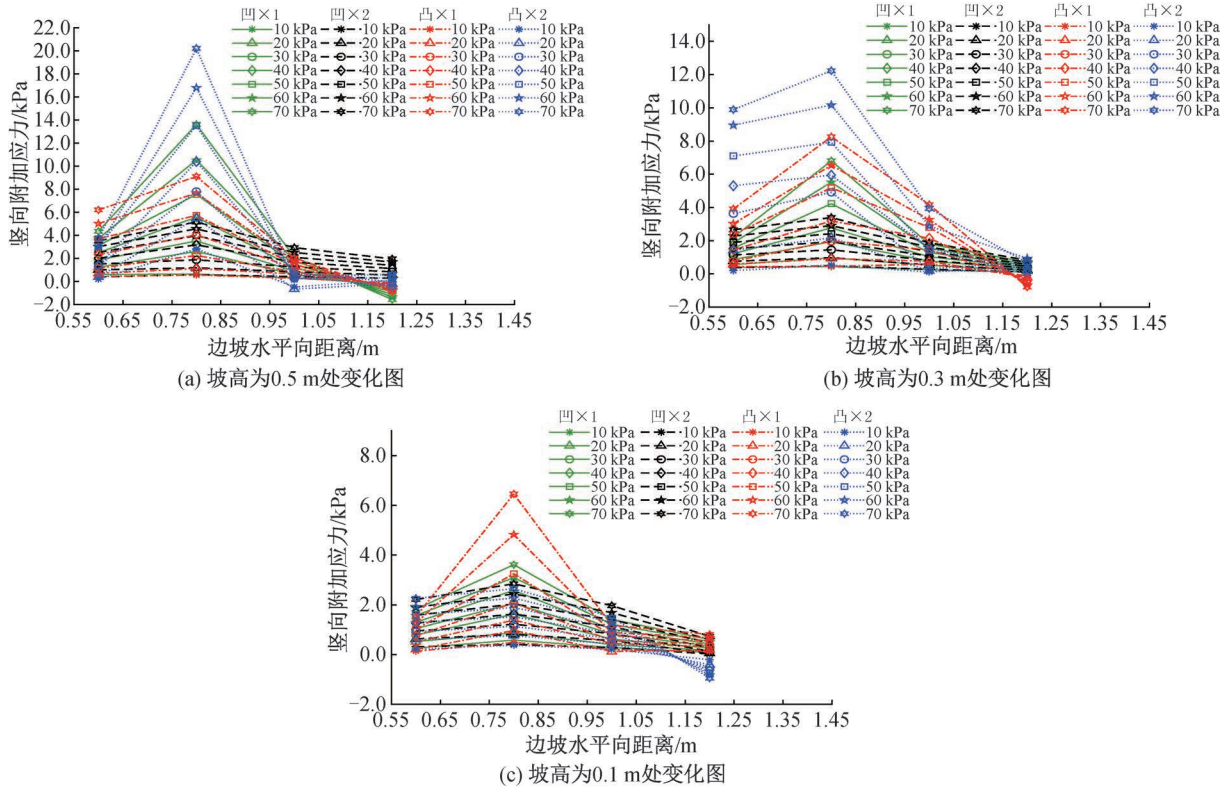


图 12 不同铺设方式加筋陡边坡竖向附加应力分布情况

Fig. 12 Distribution of additional vertical stress in steep slopes reinforced with different laying methods

具体而言,从图 12(a)可以观察到,在坡高 0.5 m 处,凸×2 铺设方式的竖向附加应力最大,而凹×2 铺设方式的应力最小。相比之下,凸×1 铺设方式的竖向附加应力略低于凹×1 铺设方式。由图 12(b)可知,在坡高 0.3 m 处,凸×2 铺设方式的竖向附加应力同样最大,而凹×2 铺设方式的应力最小。凸×1 铺设方式的竖向附加应力明显高于凹×1 铺设方式。从图 12(c)可以看出,在坡高 0.1 m 处,凸×1 铺设方式的竖向附加应力最大,而凸×2、凹×1 及凹×2 铺设方式的应力相对较小且相等。

综上可知,凹×2 铺设方式的筋材在减少竖向附加应力方面表现最优,其次是凹×1 和凸×1 铺设方式,二者在效果上相似且次于凹×2;凸×2 铺设方式在减少竖向附加应力方面的效果最弱。这些现象表明了筋材铺设方式对于优化加筋陡坡的重要性。

### 3 结论

1) 在筋材铺设方式不变的条件下,高强土工

分布情况。由图可知,5 种铺设方式加筋陡坡在荷载施加位置的中心线处均出现了竖向附加应力的最大值,且该附加应力在荷载施加位置两侧逐渐减小。

布加筋显著降低了加筋黄土陡边坡的坡顶沉降、侧向位移和竖向附加应力,证明了高强土工布在提升陡边坡稳定性方面的有效性。

2) 在考虑不同筋材铺设方式的工况中,高强土工布采用凹×2 铺设方式在降低黄土陡边坡的竖向附加应力、侧向位移和坡顶沉降表现出较佳的效果,突显了筋材铺设方式在优化加筋效果中的重要性。

3) 筋材的种类对陡边坡坡体的受力结构产生显著影响,而不同的铺设方式会影响到筋土界面作用的有效发挥。因此,合理选择筋材的种类和铺设方式对于确保陡边坡坡体的安全性和稳定性有重要影响。

尽管本研究已取得初步成果,但关于高强土工布不同铺设方式对陡边坡强度和变形影响的进一步研究仍具有重要价值。未来研究需要更深入地探讨不同铺设方式对加筋效果的具体影响机理,以便为土工布在高填方陡坡工程中的应用提供更加科学的指导依据。

## 参考文献:

- [1] ZHANG F Y, YAN B B, FENG X M, et al. A rapid loess mudflow triggered by the check dam failure in a bulldoze mountain area, Lanzhou, China [J]. *Landslides*, 2019, 16(10): 1981-1992.
- [2] 孙萍萍, 张茂省, 贾俊, 等. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 96-107.  
SUN P P, ZHANG M S, JIA J, et al. Geo-hazards research and investigation in the loess regions of western China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 96-107.
- [3] DUAN Z, CHENG W C, PENG J B, et al. Investigation into the triggering mechanism of loess landslides in the south Jingyang platform, Shaanxi Province[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(7): 4919-4930.
- [4] 叶帅华, 张玉巧, 房光文. 黄土高填方边坡的稳定性影响因素及其变形规律[J]. *兰州理工大学学报*, 2021, 47(3): 120-126.  
YE S H, ZHANG Y Q, FANG G W. Stability factors and deformation law of loess high fill slope [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2021, 47(3): 120-126.
- [5] 高岳权. 黄土地区高填方路堤滑坡机理及控制措施研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(S1): 393-399.  
GAO Y Q. Study on the landslide mechanism and control measures of high embankment in loess area [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(S1): 393-399.
- [6] 陈周与, 马时冬. 超软地基上土工布加筋土挡墙的试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2001, 18(6): 29-32.  
CHEN Z Y, MA S D. Experimental study on reinforced retaining wall by artificial textile on super-soft soil foundation [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, 18(6): 29-32.
- [7] 翁效林, 李林涛, 张留俊. 拓宽黄土路基湿化破坏机制模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 1075-1080.  
WENG X L, LI L T, ZHANG L J. Model experimental research on wetting damage mechanism of widening loess roadbed [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 1075-1080.
- [8] KIM Y S, WON M S. Deformation behaviors and finite element analyses of geosynthetic reinforced soil walls [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2005, 9(5): 363-369.
- [9] 廖鸿, 徐超, 杨阳. 某机场飞行区土工格栅加筋高边坡优化设计[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 113-121.  
LIAO H, XU C, YANG Y. Optimal design of the high geogrid-reinforced slope at the airfield of an airport [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2021, 48(6): 113-121.
- [10] 王家鼎, 谢婉丽, 骆凤涛. 高填方加筋黄土路堤稳定性的有限元分析[J]. *地理科学*, 2007, 27(2): 268-272.  
WANG J D, XIE W L, LUO F T. Finite element analysis on stability of high reinforced embankment in loess valley [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 268-272.
- [11] HAN J, JIANG Y, XU C. Recent advances in geosynthetic-reinforced retaining walls for highway applications [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2018, 12(2): 239-247.
- [12] 刘少博, 顾强康, 梁建伟, 等. 土工布加筋黄土力学性能研究[J]. *建筑结构*, 2015, 45(14): 99-102.  
LIU S B, GU Q K, LIANG J W, et al. Research on the mechanics property of fabric reinforced loess [J]. *Building Structure*, 2015, 45(14): 99-102.
- [13] 张志清. 土工格栅加筋高填方黄土路堤稳定性分析[J]. *公路*, 2007, 52(8): 115-118.  
ZHANG Z Q. Stability analysis of geogrid reinforced high fill loess embankment [J]. *Highway*, 2007, 52(8): 115-118.
- [14] 胡江碧, 费雪良, 何欢. 高填方路堤最佳加筋方案的确定及稳定性分析[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(9): 792-796.  
HU J B, FEI X L, HE H. Method of stability analysis and ascertaining the best reinforced scheme in high reinforced embankment [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(9): 792-796.
- [15] 张伟. 阿尔及利亚东西高速公路加筋土路堤设计[J]. *西安科技大学学报*, 2015, 35(6): 774-779.  
ZHANG W. Design of Algeria east-west highway reinforced embankment [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2015, 35(6): 774-779.
- [16] 唐培连, 车文侠, 刘艳东, 等. 土体加筋技术在站场高填方边坡工程中的应用[J]. *油气储运*, 2017, 36(5): 585-589.  
TANG P L, CHE W X, LIU Y D, et al. Application of soil reinforcement technology in the field of station fill slope engineering [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(5): 585-589.
- [17] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2022.  
LI G X, ZHANG B Y, YU Y Z. *Soil mechanics* [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2022.

(责任编辑 周雪梅)