

文章编号:1673-9469(2026)02-0011-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.02.002

加筋煤矸石挡墙静载模型试验研究

郝子晔^{1,2}, 陈昌山^{1,2,3}, 刘伟超^{1,2*}, 杨广庆^{1,2}, 孟凌霄⁴, 杨佳⁵

- (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. 中安国泰(北京)科技发展有限公司, 北京 102212;
4. 中国建设基础设施有限公司, 山东 济南 250101;
5. 中国土工合成材料工程协会, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为提高煤矸石利用率, 减少煤矸石堆存带来的危害, 探究将煤矸石作为填料用于加筋土挡墙工程的可行性及不同筋材参数对挡墙的影响。通过模型试验, 对不同筋材长度(0.66H、0.99H、1.31H(H为墙高))和不同筋材强度(10、20、30 kN/m)工况下挡墙的应力及变形规律进行了研究。结果表明: 挡墙承受荷载时, 墙面变形自下而上逐渐增大, 竖向附加应力及筋材应变均呈单峰分布, 峰值点位于荷载正下方; 增加筋材长度可以有效限制墙面变形和墙顶沉降, 增加筋材强度有利于增强竖向应力的扩散效果; 总体上, 在70 kPa荷载作用下土工格栅加筋煤矸石挡墙墙面最大位移为0.1%H, 墙顶沉降为0.27%H~0.45%H, 且筋材应变均小于0.12%, 筋土之间能够较好地相互作用, 挡墙整体处于稳定状态; 在实际工程中, 建议筋材长度不应小于0.5H。

关键词: 煤矸石; 土工格栅; 加筋土挡墙; 应力变形; 作用机理

中图分类号: TU411.93

文献标识码: A

Model Test Study on Reinforced Coal Gangue Retaining Wall Under Static Load

HAO Ziye^{1,2}, CHEN Changshan^{1,2,3}, LIU Weichao^{1,2*}, YANG Guangqing^{1,2}, MENG Lingxiao⁴, YANG Jia⁵

- (1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. Cathay Safety Technology Co., Ltd., Beijing 102212, China;
4. China Construction Infrastructure Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China;
5. China Technical Association on Geosynthetics, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: In order to improve the utilization rate of coal gangue and reduce the harm caused by coal gangue accumulation, the feasibility of using coal gangue as filler in reinforced soil retaining wall projects and the influence of different reinforcement parameters on retaining walls were explored. Through model tests, the stress and deformation laws of retaining walls under different reinforcement lengths (0.66H, 0.99H, 1.31H, where H is the wall height) and different reinforcement strengths (10 kN/m, 20 kN/m, 30 kN/m) were studied. The results show that when the retaining wall is subjected to a load, the deformation of wall surface increases gradually from bottom to top, while the vertical additional stress and the reinforcement strain show a unimodal distribution, with the peak point located directly below the load. Increasing the reinforcement length has a significant effect on limiting the lateral displacement of wall surface and the settlement at the top of the wall. Increasing the reinforcement strength is conducive to enhancing the diffusion effect of the vertical stress. Overall, under a vertical load of 70 kPa, the maximum displacement of wall surface of the geogrid-reinforced coal gangue retaining wall

收稿日期: 2024-10-21 修回日期: 2025-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0104600); 中建股份科技研发计划(CSCEC-2020-Z-52)

第一作者: 郝子晔(1998—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 从事土工合成材料应用研究。

* 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研究。

is $0.1\%H$, the settlement at the top of the wall is $0.27\%H$ to $0.45\%H$, and the reinforcement strain is less than 0.12% , where the geogrid and the coal gangue achieves a good interaction, and the whole wall is in a stable state. In practical engineering, it is recommended that the length of the reinforcement be no less than $0.5H$.

Key words: coal gangue; geogrid; reinforced soil retaining wall; stress and deformation; mechanism of action

煤矸石是煤炭生产过程中产生的一种固态废弃物。我国作为煤炭大国,当前煤矸石堆积数量已达 60 亿吨,且仍以每年约 1.5 亿吨的速度不断累积^[1]。煤矸石的随意堆积不仅会占用大量土地,更会产生有害物质,对环境造成严重危害。尽管煤矸石的堆积会产生巨大的危害,但我国对煤矸石的利用程度仍有所不足,利用率远小于产出率^[2-3]。目前,煤矸石利用途径主要在热能发电、生产化工产品及作为建筑材料等方面^[4-5]。国内外学者对煤矸石的特性及其在工程方面的应用进行了大量研究。Zhang 等^[6]探究了煤矸石在荷载作用下的破碎机理和孔隙演化规律,并分析了煤矸石颗粒形状及位置对破碎的影响;Wu 等^[7]通过三轴蠕变试验研究了不同粒度分布下煤矸石的蠕变特性,解释了煤矸石的蠕变变形与时间的关系,并建立了煤矸石的三轴蠕变规律模型;朱海龙等^[8]通过土工格栅加筋煤矸石的大型三轴试验研究发现,合适尺寸的土工格栅网孔可以更好地与加筋土形成互锁结构,更充分地发挥土工格栅的加筋作用。

加筋结构在岩土工程领域中应用甚广,国内外学者对加筋结构及其机理进行了大量研究。张航等^[9]通过动回弹模量试验,建立了土工格栅加筋碎石土的动回弹模量预估模型;赵建斌等^[10]提出增加加筋层数有利于加筋结构保持长期动力稳定状态;郭志华等^[11]探究了预制模块面板加筋土挡墙面板连接稳定性的分析方法,并对挡墙模块尺寸及加筋间距提出了建议;Wang 等^[12]基于非线性弹性理论与应力膨胀理论提出两种确定土压力系数的方法,以预测承受荷载时加筋土挡墙潜在破坏面处筋材受力情况;Li 等^[13]采用强度折减法通过数值模拟研究了加筋土挡墙的破坏机理,提出挡墙高度与筋材长度对挡墙的破坏模式起主要作用。

目前关于煤矸石的工程应用和加筋结构的研究取得了较为丰富的研究成果,但是将煤矸石用于加筋土挡墙结构,并对其应力和变形规律开展的研究相对较少。本文通过土工格栅加筋煤矸石挡墙模型试验,对竖向荷载作用下不同筋材长度

及筋材强度的土工格栅加筋煤矸石挡墙受力、变形规律及加筋机理进行研究。

1 试验方案

1.1 试验材料

填料选用济南某煤矸石堆场的煤矸石,根据《铁路路基支挡结构设计规范》(TB 10025—2019)^[14],试验挡墙每层填筑的厚度设计为 200 mm,填料的粒径不应大于单层填料压实厚度的 $1/3$ 。因此,在试验前剔除了粒径 65 mm 以上的煤矸石块。对筛选后的填料进行筛分,得到填料的级配曲线如图 1 所示。由图 1 可知,该煤矸石填料的不均匀系数 $C_u = 6.9$,曲率系数 $C_c = 3.2$,根据《土的工程分类标准》(GB 50145—2007)^[15],该填料为级配不良的碎石土。通过直剪试验测定煤矸石填料力学性质,得到煤矸石的抗剪强度-垂直压力关系曲线如图 2 所示。由图 2 可知,煤矸石的内摩擦角为 28° 。

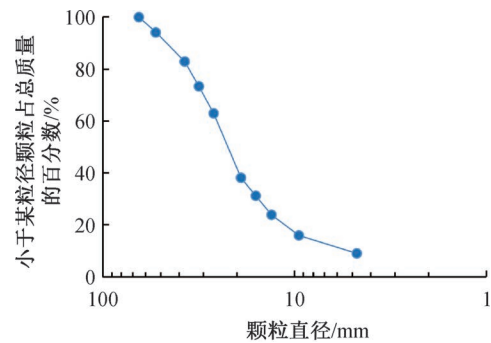


图 1 煤矸石填料的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curve of coal gangue

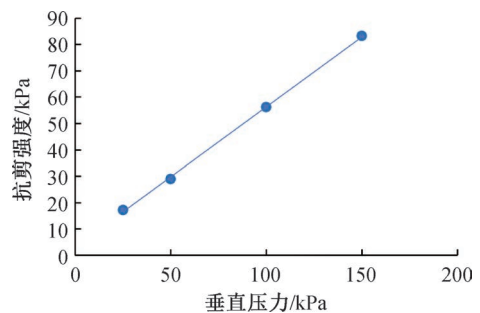


图 2 煤矸石的抗剪强度-垂直压力关系曲线

Fig. 2 Shear strength-vertical pressure relationship curve of coal gangue

土工格栅选用高密度聚乙烯单向拉伸格栅,其基本物理力学特性如表 1 所示。

表 1 土工格栅基本物理力学特性
Tab.1 Basic physical and mechanical properties of the geogrid

材料编号	肋条厚度 /mm	肋条宽度 /mm	弹性模量/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	2%应变强度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	5%应变强度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	极限抗拉强度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
1	1.2	5.2	77.32	1.84	3.77	10.51
2	1.2	5.2	153.54	3.59	7.30	20.92
3	1.2	5.2	231.67	5.50	11.55	31.70

1.2 模型填筑及测试元件布置

本文采用尺寸为 1.5 m×0.5 m×1.0 m(长×宽×高)的模型箱进行试验,如图 3 所示。挡墙模型尺寸为 1.2 m×0.5 m×0.8 m(长×宽×高),填筑之前在侧壁均匀涂抹凡士林以减小侧壁摩擦。在填筑过程中,每层称取相同重量的填料,分三次填筑夯实,保证夯实后压实度不低于 90%。填筑到设计高度后,铺设土工格栅,于格栅纵肋粘贴应变片,格栅上方埋设土压力盒,以测定筋材应变及土压力,填筑完成后,在距墙背 30 cm 位置设置一块尺寸为 0.20 m×0.50 m×0.05 m(长×宽×厚)的钢板作为加载板,并于加载板位置及墙面架设位移计,测定墙顶沉降与墙面位移,测量元件布置如图 4 所示,填筑过程及填筑完成后模型箱如图 5 所示。

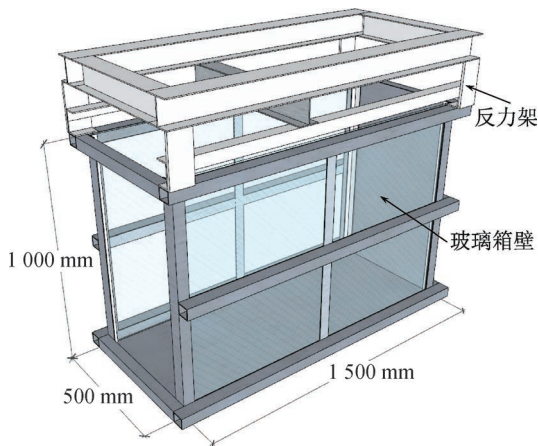
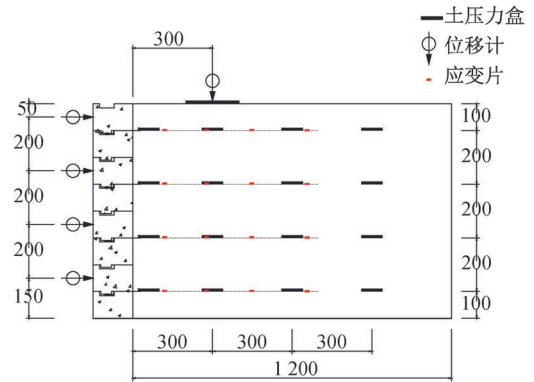


图 3 模型箱示意图

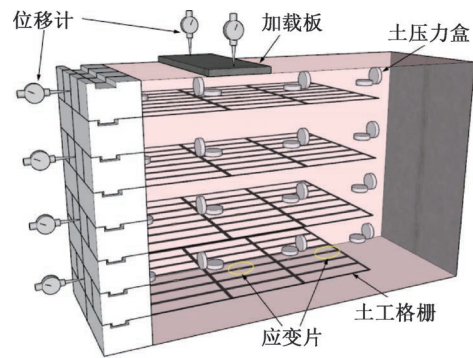
Fig. 3 Schematic diagram of model box

1.3 加载方案及工况设计

为深入研究加筋煤矸石挡墙在荷载作用下内部筋土的相互作用机理,本文以筋材长度和强度作为变量进行工况设计。由于土工格栅横肋间距为 0.26 m,为保证筋材横肋的完整性,工况 1、工况 2、工况 3 分别选取了含有 2、3、4 条完整横肋,筋材



(a) 测量元件布置图



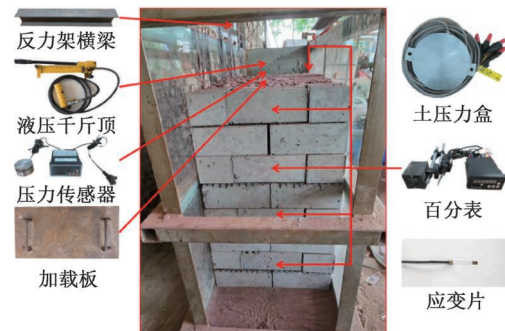
(b) 挡墙模型及测量元件三维整体概览图

图 4 试验模型及测量元件布置图(单位:mm)

Fig. 4 Layout of the test model and measuring elements(unit: mm)



(a) 模型填筑完成侧视图



(b) 试验元件及加载示意图

图 5 加筋煤矸石挡墙模型实物图

Fig. 5 Physical photographs of reinforced coal gangue retaining wall model

强度为 20 kN/m 的格栅,其长度分别为 0.53、0.79、1.05 m(与墙高的比例关系分别为 $0.66H$ 、 $0.99H$ 、 $1.31H$);工况 2、工况 4、工况 5 分别选取了筋材强度为 20、10、30 kN/m 的格栅,其长度均为 0.79 m。

试验通过液压千斤顶及反力架进行加载,根据《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)^[16],当前铁路轨道及列车荷载均不超过 70 kPa,综合考虑相关试验条件及规范,对每种工况分级施加荷载,加载等级共设 7 级,分别为 10、20、30、40、50、60 和 70 kPa,试验时每级荷载施加后需等到挡墙各参数达到稳定方可进行下级加载。

2 试验结果分析

2.1 墙面侧向位移

以工况 2 为例进行分析,加筋煤矸石挡墙墙面侧向位移沿墙高的分布情况如图 6 所示。由图 6 可知,加筋土层的应力扩散作用使墙面侧向位移自上而下逐渐减小,最大位移位于挡墙上部。这一规律在其他学者的研究中同样有所体现, Li 等^[17]以砂和粉煤灰作为填料进行加筋土挡墙模型试验,同样得出墙面侧向位移自上而下逐渐减小,最大位移位于挡墙上部的规律。

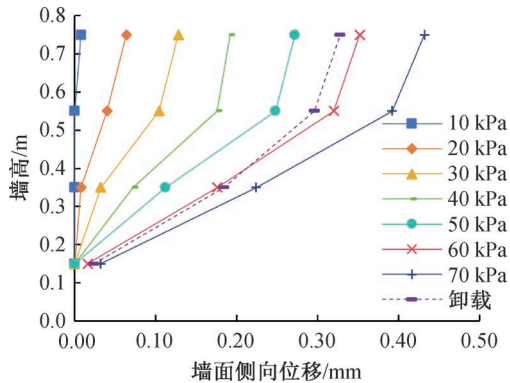
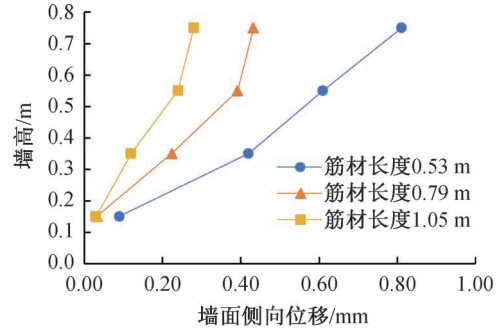


图 6 加筋煤矸石挡墙墙面侧向位移沿墙高分布情况

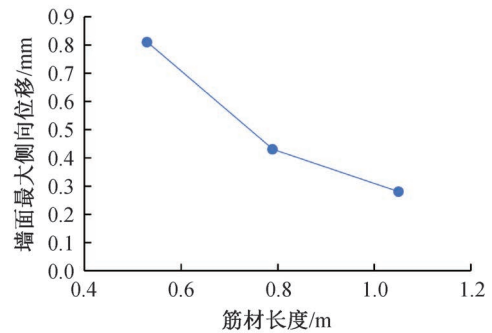
Fig. 6 Distribution of lateral displacement of reinforced coal gangue retaining wall along the wall height

对荷载为 70 kPa 时不同筋材长度下挡墙墙面的侧向位移进行分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知,筋材长度 0.53、0.79、1.05 m 的墙面最大侧向位移分别为 0.81 mm ($0.10\%H$)、0.43 mm ($0.05\%H$)、0.28 mm ($0.03\%H$),即随筋材长度的增加,墙面侧向位移逐渐减小,且筋材长度越大,增加筋材长度对减小墙面侧向位移的作用越弱。因为随着筋材长度增加,筋材作用范围增大,抗拔力增

大,对墙面的约束作用也随之增强,故墙面位移减小。可见在实际工程中,可根据实际情况适当增加墙顶位置筋材长度,以减小变形,增加挡墙稳定性。



(a) 70 kPa 荷载作用下墙面侧向位移分布



(b) 不同筋材长度下墙高 0.75 m 处墙面侧向位移分布

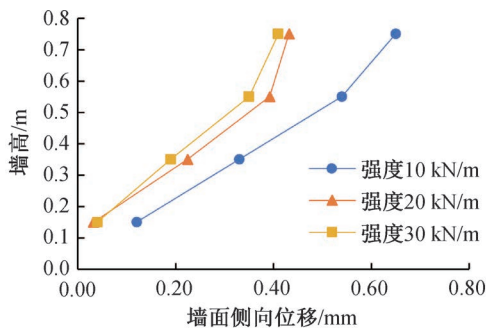
图 7 不同筋材长度下墙面侧向位移分布情况

Fig. 7 Distribution of lateral displacement of wall surface under different reinforcement lengths

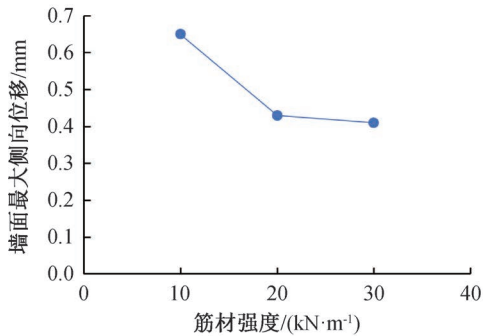
对荷载为 70 kPa 时不同筋材强度下加筋煤矸石挡墙墙面侧向位移进行分析,结果如图 8 所示。由图 8 可知,筋材强度 10、20、30 kN/m 的墙面最大侧向位移分别为 0.65 mm ($0.08\%H$)、0.43 mm ($0.05\%H$)、0.41 mm ($0.05\%H$),最大差值仅为 0.24 mm,总体上墙面侧向位移随筋材强度增加而减小,但减小幅度较小。原因可能为 70 kPa 荷载作用下筋材强度未能充分发挥,故筋材强度对墙面最大侧向位移影响不大。

2.2 墙顶竖向沉降

不同筋材长度下加筋煤矸石挡墙墙顶沉降随荷载等级的变化情况如图 9 所示。由图 9(a) 可知,随着荷载的增加,墙顶沉降的变化趋势基本一致。在施加第 1 级荷载时,挡墙填料在荷载作用下被进一步压实,因此产生较大沉降;在之后的加载过程中,沉降随荷载增加呈线性增大的趋势,卸载后墙顶变形出现一定回弹。对比图 9(b) 不同筋材长度下墙顶最大竖向沉降曲线可知,随着筋材长度的增加,墙顶沉降逐渐减小。其原因如图 10 所示,



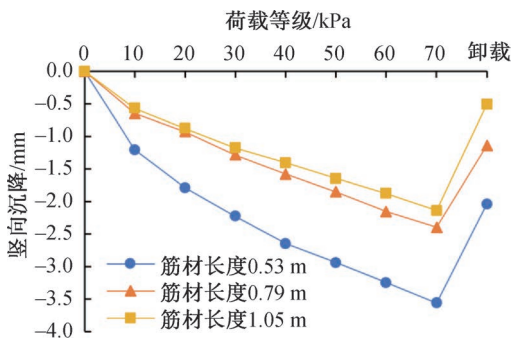
(a) 70 kPa作用下墙面侧向位移分布



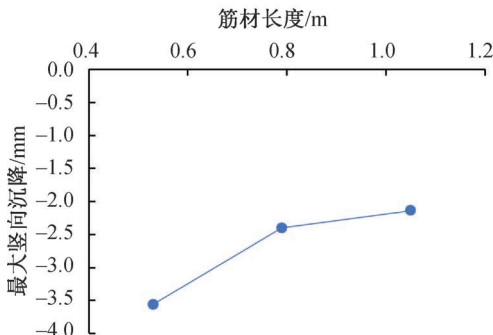
(b) 不同筋材强度下墙高0.75 m处墙面侧向位移分布

图 8 不同筋材强度下墙面侧向位移分布情况

Fig. 8 Distribution of lateral displacement of wall surface under different reinforcement strengths



(a) 墙顶沉降随荷载的变化情况



(b) 不同筋材长度下墙顶最大竖向沉降

图 9 不同筋材长度下墙顶沉降变化情况

Fig. 9 Changes of settlement at the top of the wall under different reinforcement lengths

当挡墙在荷载作用下发生沉降时,筋材产生向下的挠曲变形,荷载下方(即“网兜效应”区间)沉降

较大,筋材变形较大,墙面侧筋材与荷载后方(即约束区间)筋材变形较小,墙面侧筋材与荷载后方筋材为遏制荷载下方筋材的变形而产生一定的张拉力,使筋材承托上方填料^[18]。筋材越长,筋材后方约束区域的范围越大,筋土间的摩擦作用对格栅变形区的限制作用越强,从而可以更稳定地承托填料,减小土体沉降,但当筋材长度增加到一定值时,再增加筋材长度,其对格栅变形区的限制作用将会逐渐减弱。故实际工程中应选择合适筋材长度,否则将会造成材料浪费。

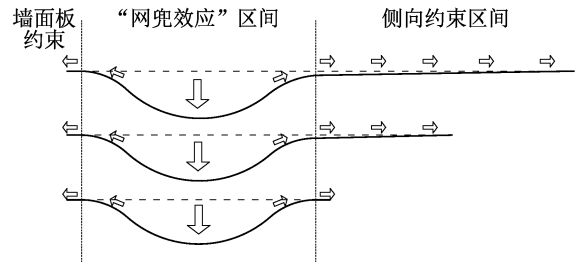
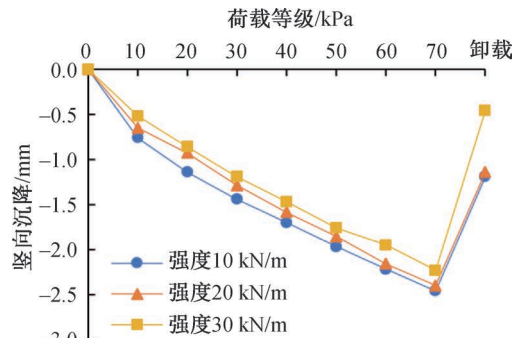


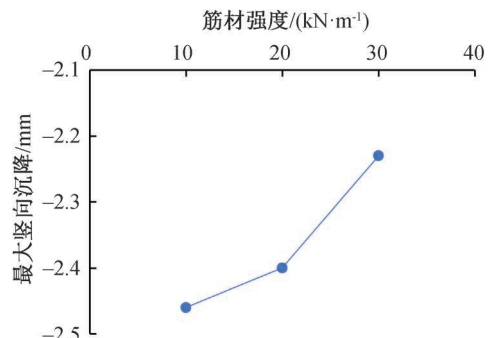
图 10 筋材“网兜效应”示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the “membrane effect” of reinforcement materials

不同筋材强度下加筋煤矸石挡墙墙顶沉降随荷载等级的变化情况如图 11 所示。由图可知,在施加 70 kPa 荷载时,筋材强度为 10、20、30 kN/m 的



(a) 墙顶沉降随荷载的变化情况



(b) 不同筋材强度下墙顶最大竖向沉降

图 11 不同筋材强度下墙顶沉降变化情况

Fig. 11 Changes of settlement at the top of the wall under different reinforcement strengths

挡墙沉降分别为 2.46 mm (0.31% H)、2.40 mm (0.30% H)、2.23 mm (0.28% H), 最大差值仅为 0.23 mm。随着筋材强度的增加, 墙顶沉降有所减小, 但减小幅度不大。原因可能为本次试验模型较小、施加荷载强度较低, 填料竖向变形不大, 强度为 10 kN/m 的筋材就足以发挥“网兜效应”, 承托上方土体, 增加筋材强度并不能使其强度优势得到充分发挥, 因而无法对墙顶沉降产生更好的限制效果。

2.3 墙内竖向应力

以工况 2 为例进行分析, 加筋煤矸石挡墙墙内竖向附加应力沿筋材方向的分布情况如图 12 所示。由图可知, 挡墙内竖向附加应力沿筋材方向呈先增后减的趋势, 峰值位于距离墙面 0.3 m 处, 即施加荷载的位置。自第 4 层(最上层)至第 1 层(最下层), 竖向附加应力峰值逐层减小。这是因为第 4 层距荷载施加位置最近, 荷载主要由加载板下方土体和筋材承担, 而墙面侧与筋材后方承受竖向附加应力较小, 故变形较小; 在较大的竖向附加应力作用下, 筋材向下产生挠曲变形从而产生较大的张力, 可较好地承托上方填料, 使得传递至下一层的竖向附加应力减小, 即加筋土体具有较好的应力扩散效应。

对 70 kPa 荷载作用下不同筋材长度时加筋煤矸石挡墙墙内竖向附加应力峰值, 以及未加筋时荷载正下方位置的竖向附加应力 Boussinesq 理论值进行对比分析^[19], 如图 13 所示。由图可知, 加筋后挡墙各层竖向附加应力峰值相较于理论值均有一定程度减小, 由此可以认为筋材对竖向附加应力具有扩散作用。对比不同筋材长度下竖向附加应力峰值的变化情况可知, 随着筋材长度的增加, 各层竖向附加应力峰值均相应降低。这是因为筋材越长, 其发挥的“网兜效应”越明显, 筋材对附加应力的扩散效果也越好。在挡墙中部, 筋材长度对竖向附加应力的影响更为显著, 原因在于挡墙中上部筋材承受应力较大, 筋材变形会产生更大的张力, 从而承担更多的竖向附加应力, 有利于发挥应力扩散效应; 而在挡墙上部, 由于距离荷载作用位置较近, 应力扩散效应尚来不及发挥作用; 在挡墙下部, 因竖向附加应力较小, 应力扩散效应也不明显。

对 70 kPa 荷载作用下不同筋材强度时加筋煤矸石挡墙墙内竖向附加应力峰值进行对比分析, 如图 14 所示。由图可知, 随着筋材强度的增

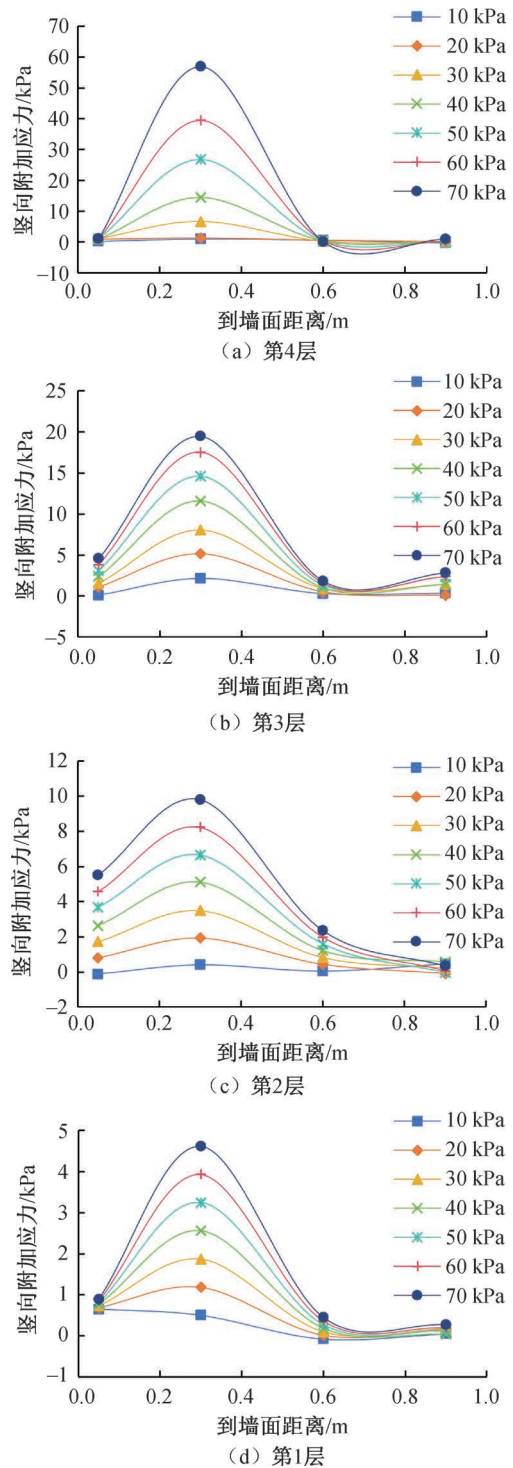


图 12 墙内竖向附加应力沿筋材方向分布情况

Fig. 12 Distribution of vertical additional stresses in the wall along the reinforcement material direction

加, 墙内竖向附加应力峰值逐渐降低。原因在于筋材强度越大, 相同变形情况下其产生的张力越大, 即当土体发生相同变形时, 强度大的筋材可以更好地发挥“网兜效应”, 承担更多的竖向附加应力。这一现象在挡墙中部表现得更为明显。

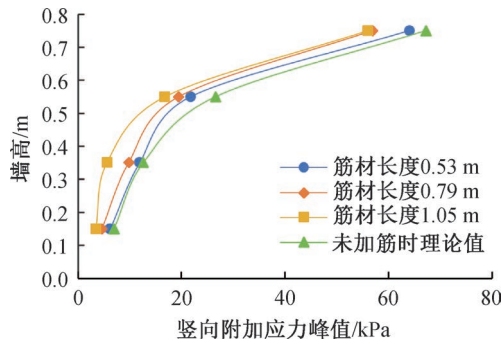


图 13 不同筋材长度下墙内竖向附加应力峰值沿墙高分布情况

Fig. 13 Distribution of peak vertical additional stress in the wall along the wall height under different reinforcement lengths

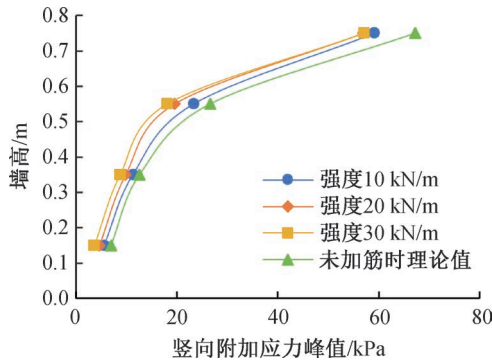
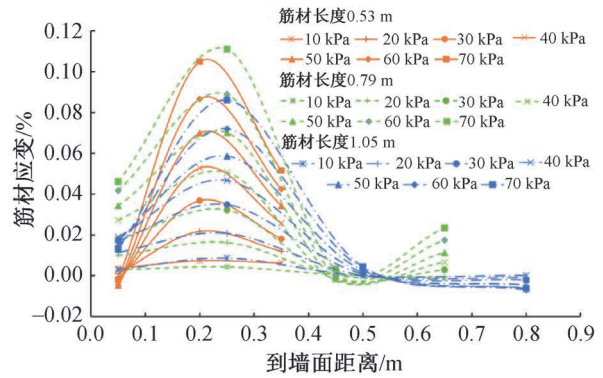


图 14 不同筋材强度下墙内竖向附加应力峰值沿墙高分布情况

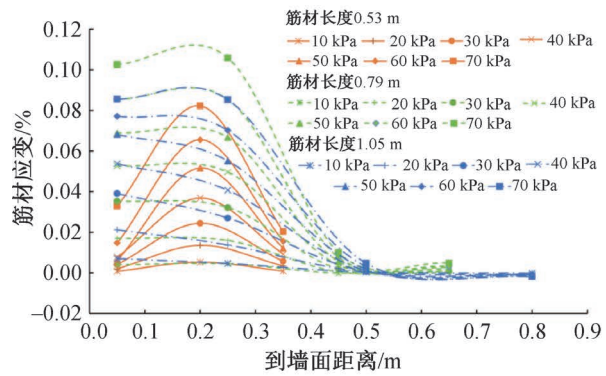
Fig. 14 Distribution of peak vertical additional stress in the wall along the wall height under different reinforcement strengths

2.4 筋材应变

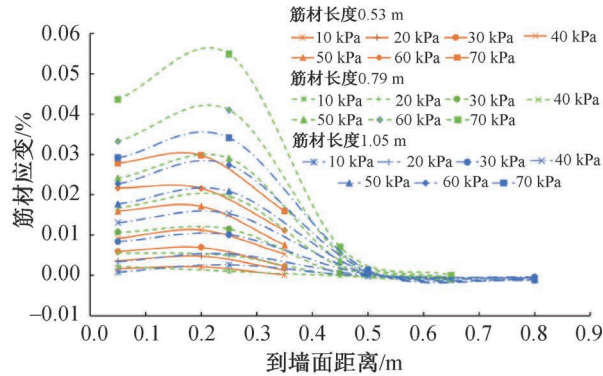
不同筋材长度及不同筋材强度下,加筋煤矸石挡墙筋材应变沿筋材方向的分布情况如图 15、16 所示。由图 15、16 可知,筋材应变沿筋材方向先增大后减小,峰值位于荷载施加位置下方,且墙面处筋材应变相较于筋材末端应变大。原因主要有两个方面:一是在荷载作用下,墙面发生位移,距墙面较近的筋材首先被拉伸,从而产生应变;而筋材末端由于筋土相互作用,产生的应变有所减小。二是挡墙填筑时,墙面处填料不易压实,施加荷载后,在上部压力的作用下,墙面附近土体被进一步压实并发生一定沉降,进而使得墙面处筋材产生较大应变。从第 4 层至第 1 层,随着应力逐渐扩散,筋材应变也逐渐减小。总体而言,在 70 kPa 荷载作用下,三种工况的筋材应变均不超过 0.12%,可认为挡墙均处于稳定状态。由于应力的扩散,第 1 层挡墙筋材应变均不超过 0.03%,说明荷载传递至第 1 层时,对挡墙的影响已经很小。



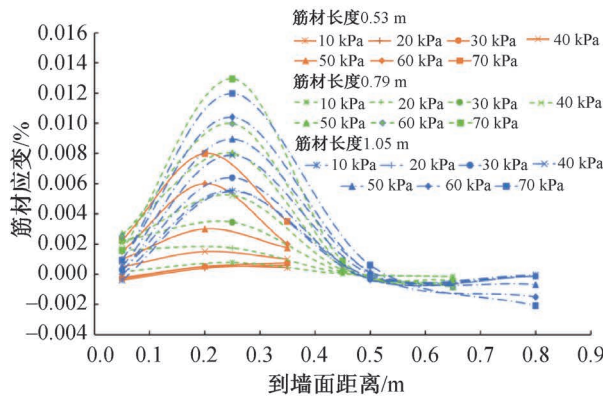
(a) 第4层



(b) 第3层



(c) 第2层



(d) 第1层

图 15 不同筋材长度下筋材应变沿筋材方向分布情况

Fig. 15 Distribution of reinforcement strain along the reinforcement direction under different reinforcement lengths

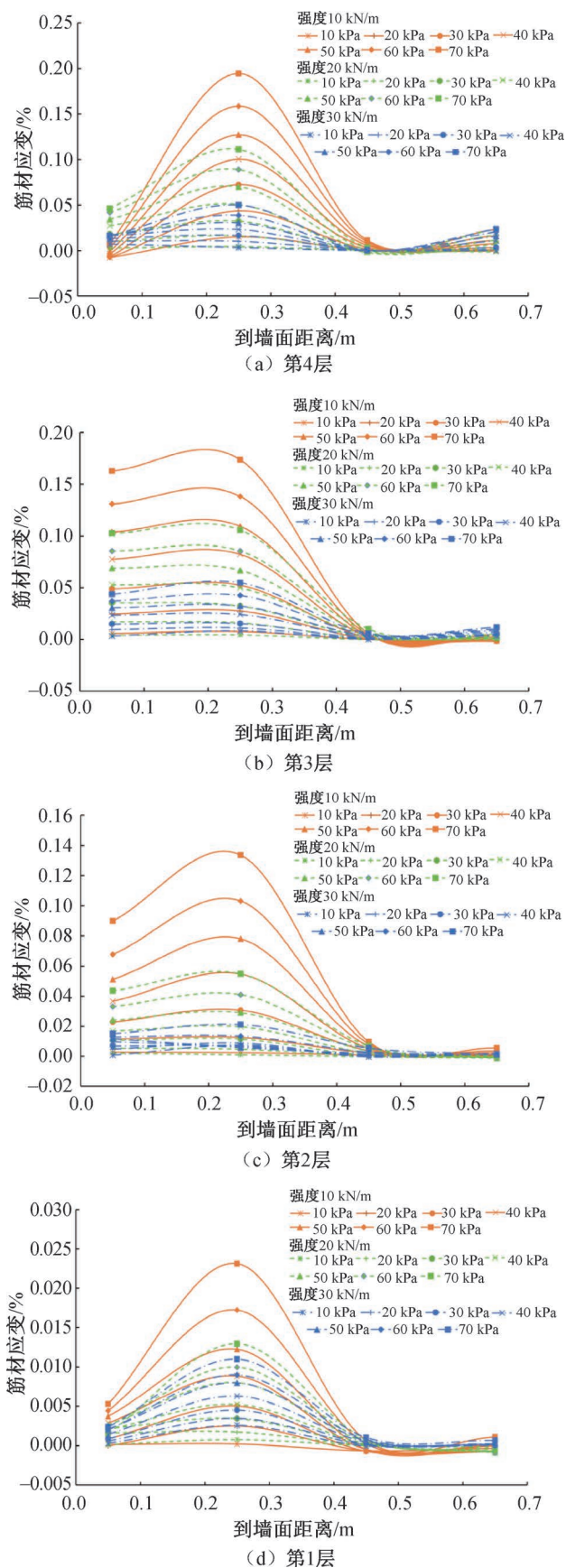


图 16 不同筋材强度下筋材应变沿筋材方向分布情况

Fig. 16 Distribution of reinforcement strain along the reinforcement direction under different reinforcement strengths

在筋材长度为 0.79 m 与 1.05 m 的工况下,随着筋材长度的增加,各层筋材在筋材末端的应变均较小,即筋材末端基本不发挥作用。由此可见,应选择合适的筋材长度,否则可能会造成材料浪费。对于不同筋材强度的情况,随着筋材强度的增加,筋材应变峰值逐渐降低。根据图 16 中筋材应变规律,当墙面距离超过 $0.5H$ 后,筋材应变均已接近 0 且趋于稳定,故建议筋材长度不应小于 $0.5H$ 。

3 结论

1) 土工格栅加筋煤矸石挡墙在承受荷载时,其墙内竖向附加应力沿筋长方向呈现先增大后减小的趋势,峰值点位于荷载正下方;墙面侧向变形自下而上逐渐增大,最大位移出现在挡墙上部;在实际工程中应重点关注挡墙承受荷载位置处及上部墙面的变形与稳定情况。

2) 增加筋材长度可使筋材更好地发挥“网兜效应”,限制墙面侧向位移和墙顶沉降,筋材长度从 $0.66H$ 增加到 $1.31H$ 时,墙面最大侧向位移从 0.81 mm ($0.10\%H$) 减小到 0.28 mm ($0.03\%H$),墙顶沉降从 3.56 mm ($0.45\%H$) 减小到 2.14 mm ($0.27\%H$),但筋材长度也不宜过长。在实际工程中,建议筋材长度不应小于 $0.5H$,可根据实际情况,在挡墙上部变形较大位置适当增加筋材长度。

3) 筋材强度从 10 kN/m 增加到 30 kN/m 时,墙面最大侧向位移仅从 0.65 mm ($0.08\%H$) 减小到 0.41 mm ($0.05\%H$),墙顶沉降从 2.46 mm ($0.31\%H$) 减小到 2.23 mm ($0.28\%H$),增加筋材强度对限制墙体变形的效果并不显著,但对提升竖向应力的扩散效果及减小筋材应变具有一定作用。在实际工程中,为保证工程安全稳定、减小筋材变形,可适当提高筋材强度要求。

4) 根据本次试验结果,土工格栅加筋煤矸石挡墙在荷载作用下墙面最大侧向位移为 $0.1\%H$,墙顶沉降为 $0.27\%H \sim 0.45\%H$,且筋材应变均小于 0.12% ,总体上应力变形均较小,墙体整体处于稳定状态,土工格栅与煤矸石能够较好地相互作用。在实际工程中采用土工格栅加筋煤矸石挡墙有利于减少占地、促进环境保护和提升工程质量。本文研究成果可为后续推广应用和相关研究提供一定的参考。

参考文献:

[1] 马文清,刁淑腾,李陈,等. 煤矸石资源化及其渣山土

- 壤重构技术研究进展[J]. 中国铝业, 2024, 48(2): 57-64.
- MA W Q, DIAO S T, LI C, et al. Progress on resource application of coal gangue and soil reconstruction technology of coal gangue slag hill[J]. China Molybdenum Industry, 2024, 48(2): 57-64.
- [2] ZHENG Q W, ZHOU Y, LIU X, et al. Environmental hazards and comprehensive utilization of solid waste coal gangue[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2024, 34(2): 223-239.
- [3] 刘泽, 段开瑞, 周梅, 等. 煤矸石在土木工程材料中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(10): 84-95.
- LIU Z, DUAN K R, ZHOU M, et al. State-of-the-art utilization of coal gangue in civil engineering materials[J]. Materials Reports, 2024, 38(10): 84-95.
- [4] 梅陆森, 周瑞清, 马腾. 煤矸石综合利用与资源化应用路径研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(23): 73-75.
- MEI L S, ZHOU R Q, MA T. Study on comprehensive utilization and resource application path of coal gangue [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2023(23): 73-75.
- [5] HAO Y, GUO X N, YAO X H, et al. Using Chinese coal gangue as an ecological aggregate and its modification: a review[J]. Materials, 2022, 15(13): 4495.
- [6] ZHANG C, LI B, SONG Z Y, et al. Breakage mechanism and pore evolution characteristics of gangue materials under compression[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(11): 4823-4835.
- [7] WU P F, CHEN B W, LIANG B, et al. Research on the bearing creep characteristics and constitutive model of gangue filling body[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 15207.
- [8] 朱海龙, 邢义川, 张爱军, 等. 加筋粗粒土强度的试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013(1): 41-47.
- ZHU H L, XING Y C, ZHANG A J, et al. Experimental investigation on shear strength of reinforced coarse-grained soil[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013(1): 41-47.
- [9] 张航, 周志刚, 韩健. 土工格栅加筋碎石土主动回弹模量及预估模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(4): 52-59.
- ZHANG H, ZHOU Z G, HAN J. Experimental analysis on dynamic resilience modulus and prediction model of geogrid reinforced gravel soil[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(4): 52-59.
- [10] 赵建斌, 白晓红, 谢明星, 等. 循环荷载作用下小间距加筋土动力响应特性试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 125-133.
- ZHAO J B, BAI X H, XIE M X, et al. Experimental study on dynamic response characteristics of small-spaced reinforced soil under cyclic loading[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 125-133.
- [11] 郭志华, 黄方成, 李斌, 等. 预制模块式面板加筋土挡墙面板连接稳定性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 1-7.
- GUO Z H, HUANG F C, LI B, et al. Connection stability analysis of geosynthetic reinforced soil walls with prefabricated modular panel[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 39(1): 1-7.
- [12] WANG L, LIU H B, WANG C H. Earth pressure coefficients for reinforcement loads of vertical geosynthetic-reinforced soil retaining walls under working stress conditions [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(4): 486-496.
- [13] LI J S, LI X Q, JING M Y, et al. Numerical limit analysis of the stability of reinforced retaining walls with the strength reduction method [J]. Water, 2022, 14(15): 2319.
- [14] 中华人民共和国铁道部. 铁路路基支挡结构设计规范: TB 10025—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for design of retaining structures of railway earthworks: TB 10025—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.
- [15] 中华人民共和国水利部. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of soil: GB/T 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [16] 国家铁路局. 铁路路基设计规范: TB 10001—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- National Railway Administration of People's Republic of China. Code for design of earthworks and track bed for railway: TB 10001—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [17] LI L H, YU C D, XIAO H L, et al. Experimental study on the reinforced fly ash and sand retaining wall under static load [J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118678.
- [18] SITHARAM T G, HEGDE A. Design and construction of geocell foundation to support the embankment on settled red mud[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 41: 55-63.
- [19] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- LI G X, ZHANG B Y, YU Y Z. Soil mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.

(责任编辑 周雪梅)