

文章编号: 1007-2993(2026)03-0468-07

基于大三轴试验的废旧轮胎格栅 加筋风化砂力学特性研究

常 胜¹ 赵建飞¹ 刘亚珍² 齐 园¹ 刘志鲲² 张宏博²

(1. 葛洲坝集团交通投资有限公司, 湖北武汉 430022; 2. 山东大学齐鲁交通学院, 山东济南 250002)

【摘要】 采用废旧轮胎格栅加筋粗粒料, 可有效增加界面承载力, 提高耐久性, 避免施工损伤, 在加筋路基方面具有重要的工程应用价值, 但目前有关废旧轮胎格栅加筋土抗剪特性的研究较为缺乏。以废旧轮胎格栅加筋风化砂为研究对象, 考虑不同围压、不同加筋率的变化, 开展了大三轴室内试验, 以揭示废旧轮胎格栅加筋风化砂三轴剪切特性, 确定抗剪强度参数。结果表明: 试件剪切破坏形态与加筋率和围压具有强相关性, 相比纯砂破坏形态, 废旧轮胎加筋土未发生贯穿性剪切面, 试件中部呈现鼓胀破坏, 且随加筋率及围压的提升, 试件鼓胀变形减小; 不同于纯砂的应变软化特征, 加筋试件均表现出应变硬化特征; 无论有无加筋, 土体均表现出了剪胀性特征, 且围压越大, 体积膨胀越明显, 加筋率的影响很小; 废旧轮胎格栅加筋土的峰值强度与等效内摩擦角随加筋率增大而大幅提高, 而内摩擦角与剪胀角增幅较小。

【关键词】 废旧轮胎格栅; 风化砂; 大三轴试验; 应力-应变关系; 抗剪强度

【中图分类号】 TU411

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0265

Mechanical properties of waste tyre grid reinforced weathered sand based on large triaxial test

CHANG Sheng¹ ZHAO Jianfei¹ LIU Yazhen² QI Yuan¹ LIU Zhikun² ZHANG Hongbo²

(1. GEZHOUBA Group Transportation Investment Co., Ltd., Wuhan 430022, Hubei, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

【Abstract】 Waste tyre grid reinforced coarse granular material can effectively increase the interface bearing capacity, improve durability, avoid construction damage, and has important engineering application value for reinforced roadbed. However, there is a lack of in-depth study on the shear characteristics of waste tyre grid reinforced soil. Therefore, in order to reveal the triaxial shear characteristics of waste tyre grid reinforced weathered sand and determine the parameters of shear strength, taking into account the changes of different confining pressure and different reinforcement rate, a large triaxial indoor test was carried out. The results show that the shear damage pattern of the specimen has a strong correlation with the reinforcement rate and the confining pressure. Compared with the damage pattern of pure sand, the waste tyre reinforced soil did not have a penetrating shear surface, and the middle part of the specimen showed a bulging break. The bulging deformation of the specimen was reduced with the increase of the reinforcement rate and the confining pressure. At the same time, unlike the strain softening characteristics of pure sand, the reinforced specimens showed a strain hardening phenomenon. With or without reinforcement, they showed shear expansion characteristics, and the greater the confining pressure, the more obvious the volume expansion, but the effect of the reinforcement rate is very small. The peak strength and equivalent internal friction angle of the waste tyre grid reinforced soil increased the most with the increase of the reinforcement rate, while the increase of the internal friction angle and shear expansion angle was small.

【Key words】 waste tyre grid; weathered sand; large triaxial test; stress-strain relationship; shear strength

0 引言

我国交通基础设施建设高速发展, 路网密度日益增大, 路基工程建设地域多样化增强。受水文地质及环

境因素的影响, 路堤不均匀沉降、路面开裂、路堤滑坡等现象屡见不鲜, 严重危害人们的生命财产安全。为提高路堤稳定性, 增强土体强度特性, 土工格栅加

作者简介: 常 胜, 男, 1981年生, 硕士, 正高级工程师, 主要从事高速公路项目建设管理工作。E-mail: 654674331@qq.com

通信作者: 刘亚珍, 女, 1998年, 硕士, 工程师, 研究方向为废旧资源循环利用技术。E-mail: liuyazhen@sdu.edu.cn

筋技术得以大量应用^[1-2], 取得了良好的应用效果。研究表明, 土工格栅作为加筋体使用时, 其适用填料为洁净粗粒料^[3]。然而, 当将其用作粒径较大的回填料时, 难以形成颗粒嵌挤效应, 使得其界面承载力难以得到充分发挥。同时, 硬度较大的粗粒料或大粒径碎石碾压施工时会对土工格栅产生施工损伤, 严重降低其抗拉拔承载力与耐久性^[4]。

为解决上述问题, 国内外学者开展了大量研究工作, 有学者提出废旧轮胎具有高弹、高强及高摩阻、高耐久等技术优势, 抗施工碾压、抗颗粒刺入能力强, 可替代土工格栅进行路基加筋。Li 等^[5]通过室内拉拔试验与数值模拟, 揭示了拉拔过程中轮胎条带与砂土间的界面破坏机制; Ma 等^[6]通过直剪试验探究了不同尺寸的废旧轮胎条带与砖粉间的剪切特性; 杜振江等^[7]考虑不同轮胎条带掺量及长宽比对黄土抗剪强度的影响, 揭示了轮胎条带掺量、长宽比的增加对提高黏聚力有显著影响, 而对内摩擦角的影响较小。袁雪峰^[8]、王 昊^[9]等采用轮胎条带和 TDA 材料联合加筋技术, 分别验证了其在粉土和砂土中的应用效果。

上述研究多集中于废旧轮胎格栅与土体的界面摩擦特性, 但对于加筋路基, 废旧轮胎格栅加筋土将承担较大的抗剪作用, 因此, 有必要针对其抗剪特性开展研究工作。受废旧轮胎格栅尺寸限制, 常规的土工三轴仪无法完成相关试验工作, 因此, 该方面研究成果较为匮乏。本研究采用粗粒土大三轴试验仪, 针对废旧轮胎格栅加筋风化砂开展了不同加筋层数的试验测试, 揭示了不同加筋率条件对填料抗剪特性的影响规律, 并建立了不同加筋率条件下废旧轮胎加筋风化料峰值应力、剪切强度及初始切线模量等力学参数, 为废旧轮胎格栅加筋路基设计提供了基础数据及理论方法, 同时促进废旧轮胎资源的循环利用。

1 三轴试验材料及试验方案

1.1 废旧轮胎格栅加工

选取市场常见的 175/70R14 型号轮胎, 分离轮胎胎壁与胎面, 截断后得到不同长度的轮胎条带, 见图 1。对条带采用螺栓进行机械连接而形成格栅, 见图 2。

根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)三轴试验条文说明, 三轴试样尺寸不小于土样粒径的 5 倍。试验采用直径 20 cm、高度 40 cm 的圆柱体试件尺寸进行制样, 选择格栅尺寸为 15 cm(条带长度)×2 cm(条带宽度)×1.5 cm(条带厚度), 网孔尺寸 6 cm×6 cm(净尺寸为 4 cm×4 cm), 满足条带总宽度(4 cm)、总厚度(3 层 4.5 cm)的比例要求, 格栅设置

见图 3。

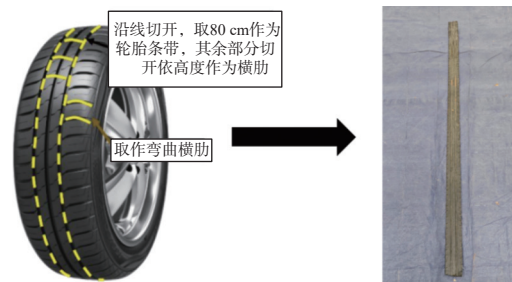


图 1 轮胎条带制备方案

Fig. 1 Tyre strip preparation scheme



图 2 轮胎格栅搭接图

Fig. 2 Tyre grid lap diagram

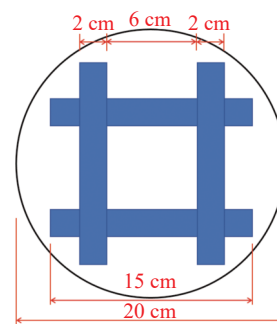


图 3 废旧轮胎格栅尺寸

Fig. 3 Waste tyre grid dimensions

1.2 风化料

试验填料选用风化砂(见图 4(a)), 根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对风化砂填料开展筛分试验与相对密实度试验, 分别得到颗粒级配曲线(见图 4(b))与物理力学参数(见表 1)。

1.3 试验设备与工况设置

试验加载设备由主机、轴向加压系统、自平衡三轴压力室、围压及反压控制系统、自动控制程序及数据采集处理系统六大部分构成。试验针对废旧轮胎格栅加筋风化砂试件开展不固结不排水三轴试验。为反映加筋土路基的实际压实状态, 选取相对密实度为 0.7 的密砂, 填料风化砂含水率为 $8\% \pm 0.5\%$, 围压分别为 200, 300, 400 kPa; 废旧轮胎格栅分别采用 0, 1, 2, 3 层(见图 5)。试验工况见表 2。

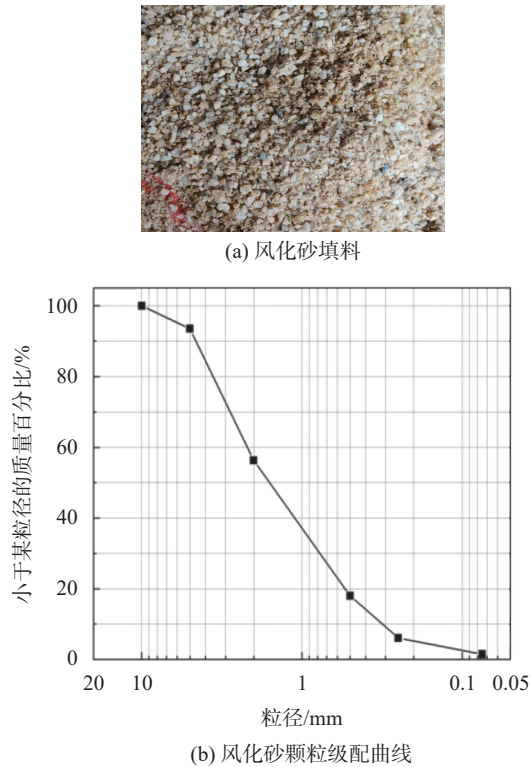


图4 试验填料及其级配曲线
Fig. 4 Test filler and its gradation curve

表1 风化砂物理力学参数
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of weathered sand

有效粒径 d_{10}/mm	中值粒径 d_{50}/mm	不均匀 系数	曲率 系数	土粒 比重	最小 干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最大 干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
0.361	1.671	6.6	0.73	2.65	1.522	1.805

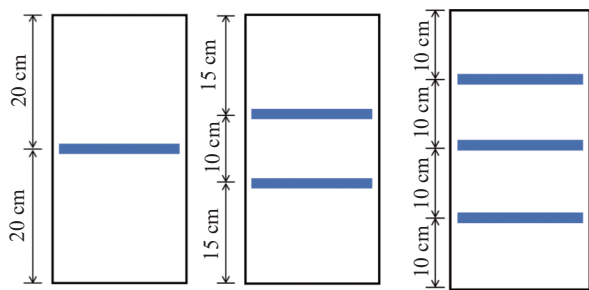


图5 轮胎格栅加筋布设示意图
Fig. 5 Schematic diagram of tyre grid reinforcement layout

三轴试验采用应变控制, 轴向加载速率选择试样高度的0.5%~1%, 剪切速率选择2 mm/min, 破坏标准为出现峰值偏应力或者剪切至轴向应变达到20%, 步骤见图6。

2 试验结果分析

2.1 废旧轮胎格栅加筋试件破坏形态

图7为不同围压条件下不同加筋层数试件的破

表2 试验工况设置
Tab. 2 Test condition settings

工况序号	围压/kPa	加筋层数
S-1	200	
S-2	300	纯砂
S-3	400	
I-1	200	
I-2	300	1层轮胎格栅
I-3	400	
II-1	200	
II-2	300	2层轮胎格栅
II-3	400	
III-1	200	
III-2	300	3层轮胎格栅
III-3	400	

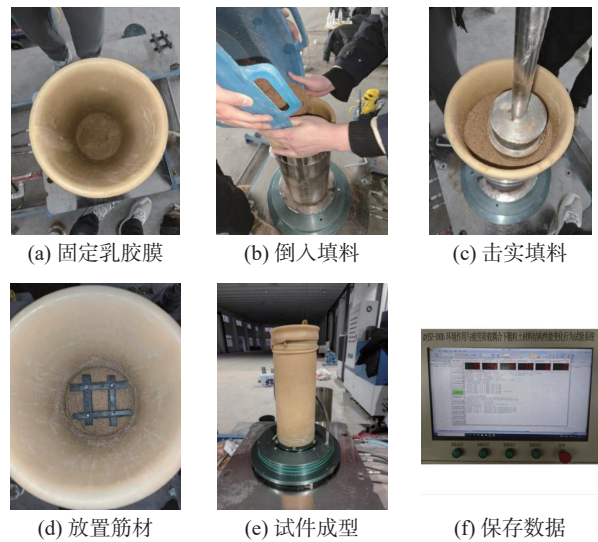


图6 三轴试验过程
Fig. 6 Triaxial test process

坏形态。无加筋试件破坏模式见图7(a)、图7(e)、图7(i), 均表现为斜向剪切破坏特征。对于1层加筋试件的破坏模式则有所变化, 如图7(b)、图7(f)、图7(j)所示, 其破坏形态与围压有关, 当围压较小时呈斜向剪切破坏模式, 当围压较大时则呈现鼓胀破坏, 鼓胀变形集中于加筋格栅与上下承压板之间位置, 但加筋处鼓胀并不明显。对于2层、3层加筋, 围压对破坏模式的影响减弱, 更多表现为轻微膨胀变形, 且加筋层数越多, 对试件径向变形的约束越明显。

格栅与砂土颗粒相互作用机理如图8所示, 风化砂颗粒与筋材网孔形成了较为密实的嵌挤结构, 围压越大, 风化砂密实度越高, 颗粒嵌挤效应越明显, 筋-土之间的界面约束效应越显著, 阻碍了试件表面

砂土颗粒之间发生相对位移。因此,同等加筋条件下,高围压试件的变形明显小于低围压试件。

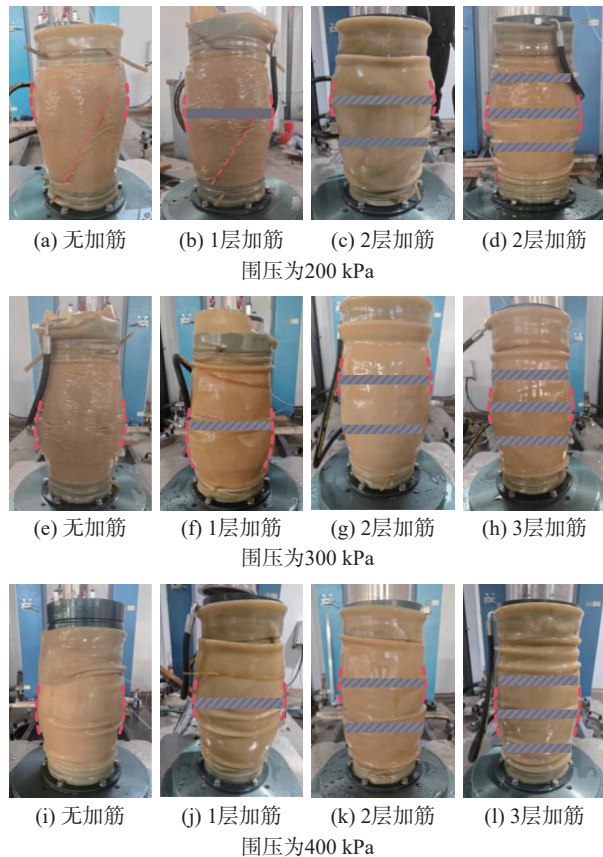


图 7 不同围压、不同加筋层数条件下试件破坏形态
Fig. 7 Damage pattern of specimens under different confining pressure and number of reinforcement layers

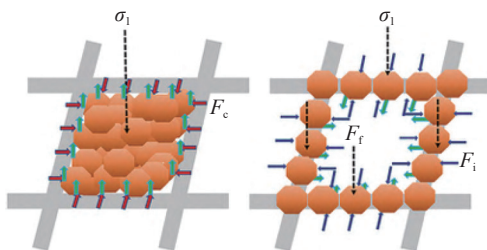


图 8 格栅与砂土颗粒相互作用示意图
Fig. 8 Schematic diagram of the interaction between the grid and sand particles

进一步对比加筋体的影响,纯砂试件由于缺少格栅的阻隔效应,随轴向变形增大,剪应力达到临界应力状态时,试件内部逐步出现剪切滑裂面,当滑裂面贯通时即发生破坏。加筋试件由于格栅的阻隔效应,阻碍了试件内部滑裂面的形成,使得土体滑裂面当遇到格栅时由斜向滑移转为水平移动,故加筋试件多呈鼓胀变形,且加筋层数越多,鼓胀变形越小。

2.2 废旧轮胎格栅加筋试件偏应力-应变关系

试件在不同围压条件下的应力-应变曲线见

图 9。由图可知,随围压增加,纯砂试件的峰值强度不断提高,峰值偏应力在各围压条件下分别为 789.25, 1028.45, 1359.18 kPa, 对应的轴向应变为 4.56%、8.43% 和 11.49%。对于围压为 200, 300 kPa 时,纯砂试件表现出明显的应变软化特性,而围压为 400 kPa 时则表现为理想弹塑性变形。

与纯砂相比,设置废旧轮胎格栅后试件的偏应力-应变关系发生了明显的变化,具体表现为:(1)格栅改变了应力-应变关系,不再表现为应变软化,而是转变为理想弹塑性或应变硬化特征,更有利于抗剪能力的提升;(2)通过设置格栅,对于同一轴向应变,加筋土峰值强度明显增大,如轴向应变为 20%、围压为 300 kPa 时,4 种工况对应的峰值强度分别为 947, 1210, 1342, 1396 kPa,表明格栅有利于风化料抗剪能力的提升,但不宜布设过密;(3)随着围压的增大,各工况均呈现出峰值强度显著提高的特征,如轴向应变为 20%、加筋层数为 1 层时,3 种围压对应的峰值强度分别为 825, 1216, 1665 kPa。因此,废旧轮胎格栅用作加筋土边坡时,宜布置在中下部位置,以增大侧向围压提高抗剪能力。

2.3 废旧轮胎格栅加筋试件体应变变化规律

图 10 为不同加筋条件下试件体应变随轴向应变的变化规律。由图可知,无论有无加筋,随轴向应变增加,试件均表现为由初始剪缩转为剪胀特性,直至试验结束。同时,围压越大,剪胀性越明显,而增设加筋格栅后,剪胀性明显减弱,降低幅度最大可达约 50%。不仅如此,加筋层数对试件剪胀性也有较为明显的影响,表现为层数越多,剪胀性越弱,当增设 3 层加筋、围压为 200 kPa 时,表现为理想弹塑性变形状态,未呈现剪胀性。

分析原因:体应变是由剪应力引起土颗粒位置和排列变化(不可恢复),使颗粒间的孔隙增大或减小,发生的体积变化。如图 11 所示,对于密砂,颗粒咬合紧,受到剪切荷载时,颗粒间会发生错动,翻滚,提升、转动、拔出,导致土颗粒之间孔隙体积会增大,即剪胀。然而,当设置加筋后,由于废旧轮胎格栅刚度大、抵抗剪切变形能力强,限制了颗粒的翻转、错动等运动趋势,因此,使得加筋试件的剪胀性减弱,有利于加筋路基/边坡稳定性及变形控制。

2.4 废旧轮胎格栅加筋风化砂力学参数的确定

参考前人研究^[10],格栅埋置在土体内部时可以带动土体与筋带协同变形,承受外荷载作用时格栅与土体接触位置发生错动,筋带与土体间的摩擦力和横肋阻抗共同作用阻止变形产生,因此加筋率变化对试件

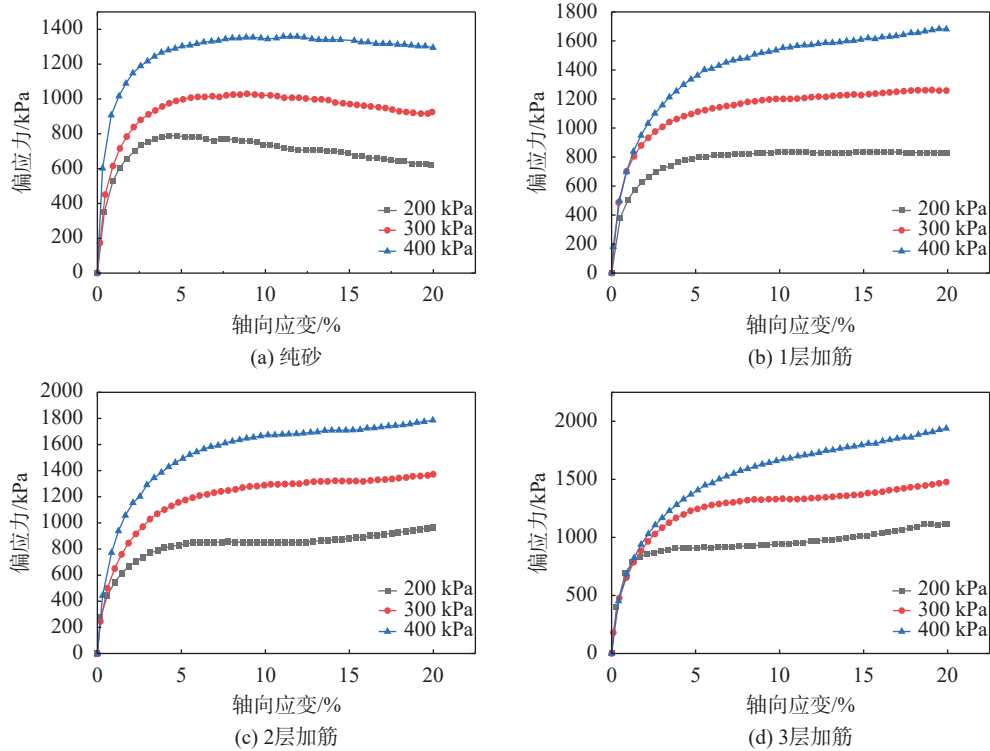


图 9 不同围压条件下试件应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of specimens under different confining pressure conditions

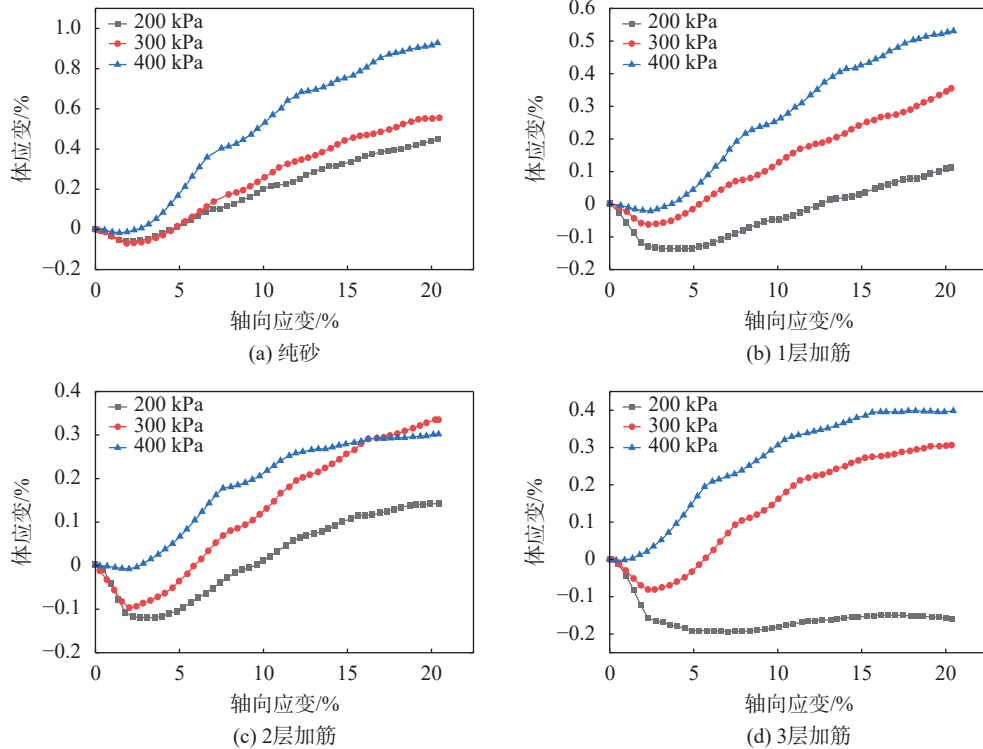


图 10 不同加筋条件下风化砂试件体应变-轴向应变关系

Fig. 10 Relationship between body strain-axial strain of weathered sand specimens under different reinforcement conditions

力学特性产生至关重要的影响。

2.4.1 峰值偏应力

为探究加筋层数及围压对试件峰值偏应力的影响,绘制不同试验条件下试件的峰值偏应力变化图

(见图 11)。试件在剪切过程中未见峰值偏应力时,参考《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[1],以试件轴向应变为 20% 对应的偏应力作为峰值偏应力。

由图 11 可知,围压相同条件下,随格栅加筋层

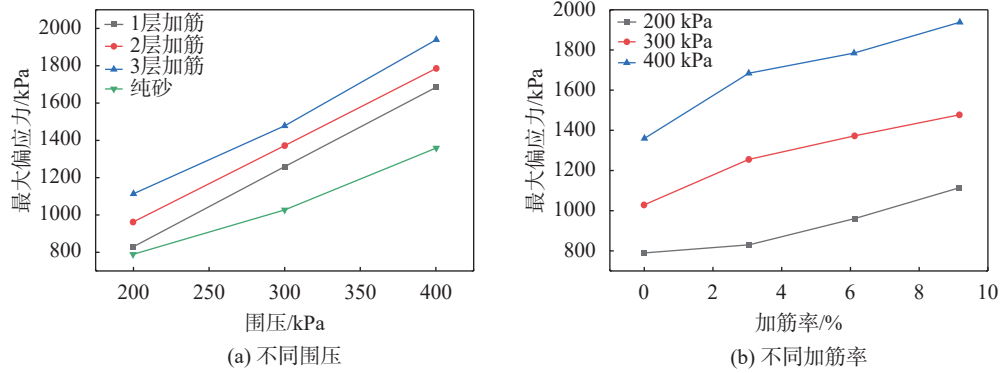


图 11 不同试验条件下加筋试件峰值偏应力

Fig. 11 Peak bias stress of reinforced specimen under different test conditions

数增加, 试件的峰值偏应力呈近似线性增大。围压越高, 格栅加筋对试件峰值偏应力提升作用越强, 如围压为 300 kPa 时, 单层加筋试件的峰值偏应力为 1257.32 kPa, 双层加筋试件峰值偏应力为 1371.92 kPa, 3 层加筋试件的峰值偏应力为 1476.96 kPa, 相较同围压条件下的纯砂试件偏应力(625.53 kPa)分别提升了 1.01, 1.21, 1.4 倍。

2.4.2 抗剪强度参数的确定

土工加筋结构可视为各向异性的复合材料, 承受荷载过程中, 通过格栅与填土协同作用可充分发挥填土的抗剪力, 填土与拉筋的摩擦力和拉筋抗拉力的共同作用使得加筋土的强度明显提高, 提升加筋体的整体力学性能^[12-13]。此类作用的发挥类似土体黏聚力的作用, 其原理见图 12。图中 σ_v 为垂直方向应力, σ_h 为水平方向应力, σ_h' 为由废旧轮胎格栅转移给土体的水平方向应力, ζ_h 为土体的侧向应变, F 为格栅所受拉力。由于 σ_h' 的存在, 使土体的抗剪强度增大。

根据前述三轴试验结果, 采用如下方法确定抗剪强度:

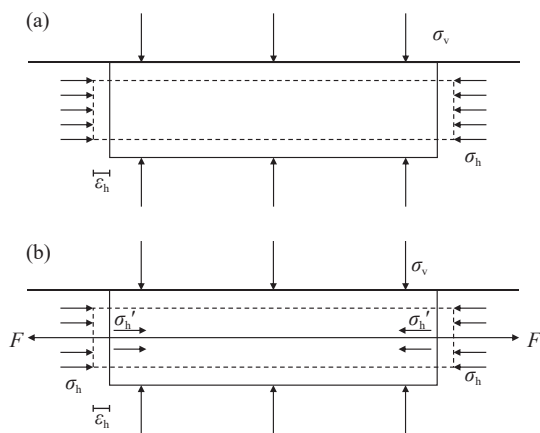


图 12 准黏聚力加筋原理示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the principle of quasi-adhesive reinforcement

$$\sin \varphi_f = \frac{(\sigma'_1/\sigma'_3)_f - 1}{(\sigma'_1/\sigma'_3)_f + 1} \quad (1)$$

式中: φ_f 为砂土破坏内摩擦角; $(\sigma'_1/\sigma'_3)_f$ 为试件破坏时的主应力比, 针对本文试验数据分析, 选取应变为 20% 对应的应力比。

$$c_r = \frac{\alpha_F \sqrt{K_p}}{2h_{vr}} \quad (2)$$

式中: c_r 为黏聚力; α_F 为破坏时单位宽度加筋体的受力; K_p 为被动土压力; h_{vr} 为相邻加筋层间的垂直间距。

峰值剪胀角计算公式如下:

$$\sin \psi_p = \frac{(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}}{2 - (d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}} \quad (3)$$

式中: $d\varepsilon_1$ 为轴向应变增量; $d\varepsilon_v$ 为体应变增量。峰值剪胀角为 $\varepsilon_1 - \varepsilon_v$ 曲线斜率最大处对应的值。

通过式(1)一式(3)计算得到不同加筋率条件下试件抗剪强度及剪胀角参数(见表 3)。

表 3 不同加筋率条件下试件力学指标

Tab. 3 Mechanical indexes of specimens under different reinforcement rate conditions

工况	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	剪胀角/(°)
未加筋	38.19	31.22	6.07
1层加筋	37.90	61.39	6.72
2层加筋	40.08	253.30	6.86
3层加筋	42.25	388.69	8.28

由表 3 可知, 经轮胎格栅加筋后的试件黏聚力明显增加, 且加筋层数越多黏聚力越强。格栅在试件内部与砂土颗粒之间产生摩擦力, 且轮胎表面与土颗粒之间的嵌锁作用使其对黏聚力起到增强效果; 而试件的内摩擦角相对黏聚力变化不大, 但仍有一定程度的提升, 这是由于轮胎格栅网孔尺寸较大, 在试件内部较难形成嵌挤效应, 故提升作用较小。三个参数中剪胀角变化幅度最小, 表明剪胀角主要取决于风化砂

颗粒,与筋带关系不大。

3 结论

对废旧轮胎格栅加筋土体开展大三轴试验,探究不同围压、不同加筋率条件下加筋复合土体的破坏形态与力学特性,主要结论如下:

(1)试件剪切破坏形态与加筋率和围压具有强相关性。纯砂破坏形态为斜向贯穿性剪切破坏,体积呈现一定的膨胀性;而废旧轮胎加筋土则未发生贯穿性剪切面,试件中部呈现鼓胀破坏,但随加筋率及围压的提升,试件鼓胀变形减小,表明废旧轮胎网孔对风化砂颗粒具有明显的侧向约束作用。

(2)试件偏应力-应变关系表明,纯砂表现出明显的应变软化特性,且围压越低,应变软化越显著;而加筋试件则均表现出应变硬化现象,且围压越大、加筋层数越多,应变硬化现象越显著,峰值强度越高。

(3)试件轴向应变-体应变关系表明,无论有无加筋,均表现出了明显的剪胀性特征,且围压越大,体积膨胀越明显。虽然随着加筋率的增加,剪胀性略有减小,但减小幅度较小。

(4)根据三轴试验结果,计算得到了废旧轮胎格栅加筋风化砂峰值强度、内摩擦角、等效黏聚力及剪胀角。计算结果表明加筋土峰值强度及等效黏聚力与加筋率关系较为显著,而内摩擦角及剪胀角则随加筋率提高仅略有增大。

参 考 文 献

- [1] 袁超,蔡晓光,李思汉,等.有限空间加筋土挡墙研究综述[J].*防灾科技学院学报*,2025,27(1):50-58. (YUAN C, CAI X G, LI S H, et al. A research review of reinforced soil retaining walls in confined space[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2025, 27(1): 50-58. (in Chinese))
- [2] 张震,郭小鹏.土工格栅和土工织物加筋地基研究综述[J].*路基工程*,2021(2):1-8. (ZHANG Z, GUO X P. Review of geogrid and geotextile reinforced foundations[J]. *Subgrade Engineering*, 2021(2): 1-8. (in Chinese))
- [3] 马军,梁媚,李珂.加筋材料地基处理在改扩建高速公路中的应用研究[J].*公路*,2025,70(4):71-77. (MA J, LIANG M, LI K. Study on the application of reinforced material foundation treatment in the reconstruction and expansion of motorways[J]. *Highway*, 2025, 70(4): 71-77. (in Chinese))
- [4] ZHANG H B, WANG H, LI Y Y, et al. An investigation of the pullout behaviors of tire strips embedded in tire-derived aggregate reinforced sand[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(24): 35599-35614.
- [5] LI L H, CHEN Y J, FERREIRA P M V, et al. Experimental investigations on the pull-out behavior of tire strips reinforced sands[J]. *Materials*, 2017, 10(7): 707.
- [6] MA Q, DENG Q, MOU J, et al. Large-scale direct shear test on scrap tire strip reinforced brick powder[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 6046037.
- [7] 杜振江,刘武超,杨永奇.大尺寸轮胎条-黄土混合物剪切特性试验研究[J].*长江科学院院报*,2019,36(9):125-130. (DU Z J, LIU W C, YANG Y Q. Shear performance of large-size scrap tire strip-loess mixture[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2019, 36(9): 125-130. (in Chinese))
- [8] 袁雪峰.基于TDA复合土的废旧轮胎条带加筋路堤承载特性研究[D].济南:山东大学,2021. (YUAN X F. Study on the bearing characteristics of reinforced embankment with scrap tire strips embedded in TDA composite soil[D]. Ji'nan: Shandong University, 2021. (in Chinese))
- [9] 王昊. TDA-粉土复合填料中废旧轮胎条带拉拔特性及承载机理研究[D].济南:山东大学,2022. (WANG H. Research on the pullout behavior and bearing mechanism of waste tire strips embedded in TDA-silt composite[D]. Ji'nan: Shandong University, 2022. (in Chinese))
- [10] 王正宏,包承纲,李广信.土工合成材料的加筋作用及其分析计算[J].*地基处理*,1992,3(1):1-10. (WANG Z H, BAO C G, LI G X. Reinforcement of geosynthetics and its analytical calculation[J]. *Journal of Ground Improvement*, 1992, 3(1): 1-10. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国交通部.公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineering: JTG E40—2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [12] 蔡晓光,冯加煜,刘巍巍,等.土工合成材料界面摩擦特性试验研究[J].*建筑结构*,2025,55(3):139-144,94. (CAI X G, FENG J Y, LIU W W, et al. Experimental study on interface friction characteristics of geosynthetics[J]. *Building Structure*, 2025, 55(3): 139-144,94. (in Chinese))
- [13] GRAY D H, AL-REFEAI T. Behavior of fabric - versus fiber - reinforced sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112(8): 804-820.

收稿日期:2025-06-13