

张洗,郭聚坤,惠迎新,等.道路用煤矸石路基残余剪切特性与细观行为[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):42-51.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250297

ZHANG Shen, GUO Jukun, HUI Yingxin, et al. Residual shear characteristics and microscopic behavior of coal gangue subgrade for road use[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(1): 42-51. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250297

道路用煤矸石路基残余剪切特性与细观行为

张洗¹, 郭聚坤², 惠迎新^{1,3,4*}, 闫升^{3,4}, 潘明江^{5,6}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 山东交通职业学院公路与建筑系, 山东潍坊 261206; 3. 宁夏交通建设股份有限公司, 宁夏银川 750001; 4. 宁夏固废资源道路化应用中心, 宁夏银川 750004; 5. 新疆交通建设集团股份有限公司, 新疆乌鲁木齐 830016; 6. 新疆交建规划勘察设计有限公司, 新疆克拉玛依 834099)

摘要: 为探究含水率与颗粒级配对煤矸石路基残余抗剪特性的影响机制, 通过排水往复直接剪切试验, 测试不同条件下煤矸石的力学响应, 并采用离散元数值模拟方法, 从细观角度分析剪切过程中的颗粒位移场及接触力链网络的演化特征。研究表明: 煤矸石剪切应力-位移曲线表现为应变硬化型, 双曲线模型对二者关系的拟合效果较好。随着含水率的增大, 残余抗剪强度显著降低, 颗粒间摩擦与嵌锁作用减弱, 且高分形维数下该效应更明显。低分形维数下, 力链集中度较高, 粗颗粒形成稳定的骨架结构主导材料的力学性能。高分形维数下, 细颗粒填充作用增强, 接触分布更均匀, 抗剪稳定性下降。研究结论为煤矸石路基的材料设计与长期稳定性预测提供理论依据。

关键词: 路基工程; 煤矸石; 残余强度; 颗粒级配; 力学机制; 分形维数; 嵌锁效应

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)01-0042-10

Residual shear characteristics and microscopic behavior of coal gangue subgrade for road use

ZHANG Shen¹, GUO Jukun², HUI Yingxin^{1,3,4*}, YAN Sheng^{3,4}, PAN Mingjiang^{5,6}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Highway and Architecture, Shandong Transport Vocational College, Weifang 261206, China; 3. Ningxia Communications Construction Company Limited, Yinchuan 750001, China; 4. Ningxia Solid Waste Resource Roadization Application Center, Yinchuan 750004, China; 5. Xinjiang Transportation Construction Group Company Limited, Urumqi 830016, China; 6. Xinjiang Communications Construction Planning Survey and Design Institute Company Limited, Karamay 834099, China)

Abstract: To explore the influence of water content and particle gradation on the evolution of residual shear strength characteristics of coal gangue subgrade fill and reveal the underlying mechanisms, this study employed drained repeated direct shear tests to evaluate the mechanical responses of coal gangue under varying conditions. Additionally, discrete element numerical simulations were conducted to analyze, from a mesoscopic perspective, the evolution characteristics of particle displacement fields and contact force chain networks during shearing. The results indicate that the shear stress-displacement curves of coal gangue exhibit strain-hardening behavior, which can be well fitted by a hyperbolic model. The residual shear strength decreases significantly with increasing water content, accompanied by a reduction in interparticle friction and interlocking effects. This trend is more pronounced in samples with higher fractal dimensions (well-graded). At the mesoscopic level, specimens with lower fractal dimensions are dominated by a coarse-particle skeleton with highly concentrated force chains, whereas those with higher fractal dimensions show enhanced fine-particle filling, leading to a more uniform distribution of contacts and reduced shear stability. This study elucidates the macro-mesoscopic coupling

收稿日期: 2025-07-05 修回日期: 2025-08-31 接受日期: 2025-09-26 责任编辑: 黄琦

基金项目: 丝绸之路经济带创新驱动发展试验区、乌昌石国家自主创新示范区科技发展计划项目(2023LQ03002); 宁夏回族自治区交通运输厅科技项目(202300196); 潍坊市科技发展计划项目(2024GX067)

作者简介: 张洗(1995-), 男, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 主要从事煤矸石路基填筑技术研究。E-mail: 1323845183@qq.com

通信作者: 惠迎新(1985-), 男, 内蒙古阿拉善人, 博士, 教授, 主要从事固废资源道路工程综合应用方面的研究。E-mail: huiyx@seu.edu.cn

mechanisms and provides an important theoretical basis for material design and long-term stability prediction of coal gangue subgrades.

Keywords: roadbed engineering; coal gangue; residual strength; particle size distribution; mechanical mechanism; fractal dimension; interlocking effect

0 引言

中国是全球最大的煤炭消费国,预计到2035年,煤炭需求量将占全球总需求量的47%。目前,中国规模较大的煤矸石堆存点已超过2 600座,每年新增煤矸石超过3亿t,累计堆存量将近70亿t。煤矸石中含有硅酸盐类矿物,直接堆放或充填回井会污染土地和水资源^[1-2]。鉴于煤矸石具备一定的强度和刚度,常将煤矸石进行压实等处理后用作路基填料,实现规模化消纳^[3]。尽管煤矸石在路基填筑工程中应用较为广泛,但其硬度明显低于传统碎石填料,在车辆反复载荷作用下易发生剪切破坏,可能导致路面开裂甚至下沉。

近年来,学者从强度模型、颗粒破碎与累积变形机理以及残余强度特性等方面,对粗粒土及其固废替代材料在交通土工工程中的应用开展研究^[3]。梁彭等^[4]构建了粒径为10~30 mm的无胶结卵石颗粒的抗剪强度模型,研究表明,颗粒骨架结构特征在强度形成过程中起主导作用,为粗粒类填料力学行为预测提供了新思路。贺建清等^[5]开展了掺土煤矸石的路用力学特性及填筑技术研究,揭示了煤矸石与土体混合后在强度与压实性方面的耦合效应,为煤矸石的工程应用奠定了基础。张成梁等^[6]、徐宁等^[7]通过排水往复直接剪切试验发现,级配与压实度对煤矸石和垃圾筛分土混合料的抗剪强度影响显著。张振东等^[8]通过循环载荷试验揭示了堆石料颗粒的破碎规律,提出颗粒破碎是影响粗粒土强度与变形演化的重要因素。李扬波等^[9]研究表明,在循环载荷作用下,碎石的累积变形不仅取决于加载条件,也与材料级配特性密切相关。WICHTMANN等^[10]提出高周次累积模型,通过循环三轴试验验证了“应力吸引子”理论,为确定长期交通载荷作用下粗粒类填料的变形模式提供理论依据。在实际工程中,煤矸石等粗粒固废材料在服役期内必然面临颗粒破碎与变形累积问题,其长期稳定性亟待增强。残余强度是粗粒土长期稳定性的关键指标,学者对此展开了广泛研究。王顺等^[11]通过对比不同环剪方法,揭示了试验方式对滑带土残余强度的影响差异。VAUNAT等^[12]研究了高吸力条件下低塑性黏土的

残余强度,拓宽了研究残余强度的土类范围。MIAO等^[13]研究表明,剪切速率对饱和黏性土与颗粒土的残余强度影响显著。DUONG等^[14]研究表明,速率与加速度对黏土及黏土-膨润土混合物残余强度的作用机制较为复杂。上述研究为粗粒土抗剪强度模型的建立、煤矸石及固废类填料的工程应用以及颗粒破碎与残余强度机理分析奠定了基础,但仍存在以下问题,有待进一步研究:一是现有强度模型多针对天然粗粒土,对于煤矸石等特殊固废材料的结构特征研究不够深入;二是大部分研究集中于静力或单向载荷作用,长期交通循环载荷作用下煤矸石路基的强度与变形耦合机制尚不明确;三是对于残余强度的研究多聚焦于黏土类土体,不同速率和加载方式下粗粒固废材料残余强度的演化规律有待进一步研究。

为进一步探究煤矸石路基的残余剪切特性,以乌玛高速公路惠农至石嘴山段煤矸石路基填筑工程为依托,通过排水往复直接剪切试验,分析不同含水率和级配下煤矸石的残余剪切特性,并通过离散元软件模拟,从细观层面分析煤矸石的抗剪强度机理,以期煤矸石在路基工程中的实际应用提供参考。

1 排水往复直接剪切试验

1.1 试验仪器

采用自主研发的大型多功能循环直剪仪(见图1),该设备由法向加载、剪切向驱动和数据采集控制系统构成,上、下剪切盒的直径为10 cm,高为5 cm,最大法向载荷为40 kN,最大剪切位移为100 mm,可实现大尺寸试样排水往复直接剪切,较真实地反映路基填料在交通载荷反复作用下的剪切响应。



图1 大型多功能循环直剪仪

Fig.1 large multi-functional cyclic direct shear apparatus

1.2 试验材料

煤矸石取自宁夏回族自治区石嘴山市平罗县,天然状态下较坚硬,未发生自燃,形状极不规则。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)获取试样基本物理力学指标,见表1。通过X射线荧光光谱分析(XRD),得到煤矸石的主要化学成分,见表2。经20 mm、5 mm、2 mm、0.5 mm和0.075 mm标准筛筛分,各粒组煤矸石形态见图2,煤矸石微观形貌见图3。

表1 煤矸石基本物理力学指标
Tab.1 basic physical and mechanical indicators of coal gangue

最大干密度 (g·cm ⁻³)	压碎值 /%	烧失量 /%	塑性 指数	有机质 质量分数/%	自由 膨胀率/%
2.13	27	12.1	5.8	2.8	38

表2 煤矸石化学成分
Tab.2 chemical composition of coal gangue

化学成分	质量分数/%	化学成分	质量分数/%
SiO ₂	56.897	SO ₃	0.300
Al ₂ O ₃	29.655	P ₂ O ₅	0.075
Fe ₂ O ₃	5.200	MnO	0.057
CaO	2.408	Cl	0.033
K ₂ O	2.062	Cr ₂ O ₃	0.022
MgO	1.411	ZrO ₂	0.017
TiO ₂	1.064	NiO	0.012
Na ₂ O	0.776	SrO	0.011



图2 各粒组煤矸石形态

Fig.2 morphology of coal gangue in each particle group

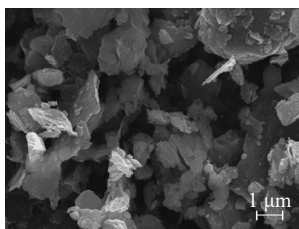


图3 煤矸石微观形貌

Fig.3 micro morphology of coal gangue

1.3 试验方案

颗粒级配和含水率是影响粗粒土强度特性的重要因素^[15]。采用分形模型级配方程^[16-17]进行级配设计,即

$$P_i = \left(d_i / d_{\max} \right)^{3-D}, \quad (1)$$

式中: d_i 为颗粒粒径; P_i 为粒径小于 d_i 的颗粒的累积质量分数; d_{\max} 为粒径最大值,本文取20 mm; D 为分形维数。

按照分形维数递增的顺序,取分形维数为1.39、2.29和2.61,对煤矸石进行配样,级配曲线见图4, XRD图谱见图5。

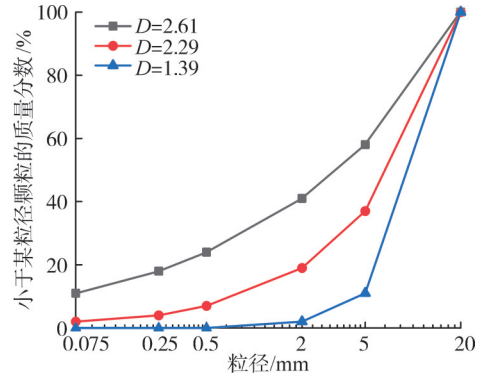


图4 不同分形维数下煤矸石颗粒级配曲线

Fig.4 particle size distribution curve of coal gangue under different fractal dimensions

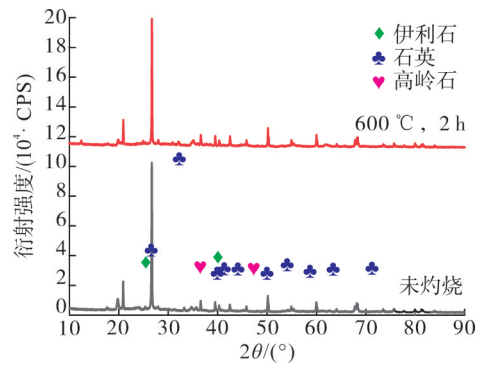


图5 煤矸石XRD图谱

Fig.5 XRD spectrum of coal gangue

图5显示,煤矸石的主要矿物相为高岭石、石英和伊利石。法向应力直接影响粗粒土的颗粒破碎效应及剪切强度^[18]。若法向应力过高,试样可能因过压实而破坏原有级配,试验结果与实际情况存在偏差;若法向应力过低,在剪切过程中可能发生水平推移,测量数据失真,试样难以达到预期破坏模式。结合相关研究与工程实际,法向应力取300 kPa、450 kPa、600 kPa和750 kPa,含水率(质量分数)取0%、3%、6%和9%。为满足剪切盒边长与试样最大粒径比不小于5的要求,煤矸石粒径控制在20 mm以下。剪切位移振幅取10 mm,循环5次,剪切速率取0.1 mm/min。当剪切位移达到试样尺寸的10%时,判定试样发生剪切破坏。

2 结果分析

2.1 剪切应力-剪切位移分析

含水率为6%、不同级配和剪切循环次数下煤矸石剪切应力-剪切位移关系见图6。

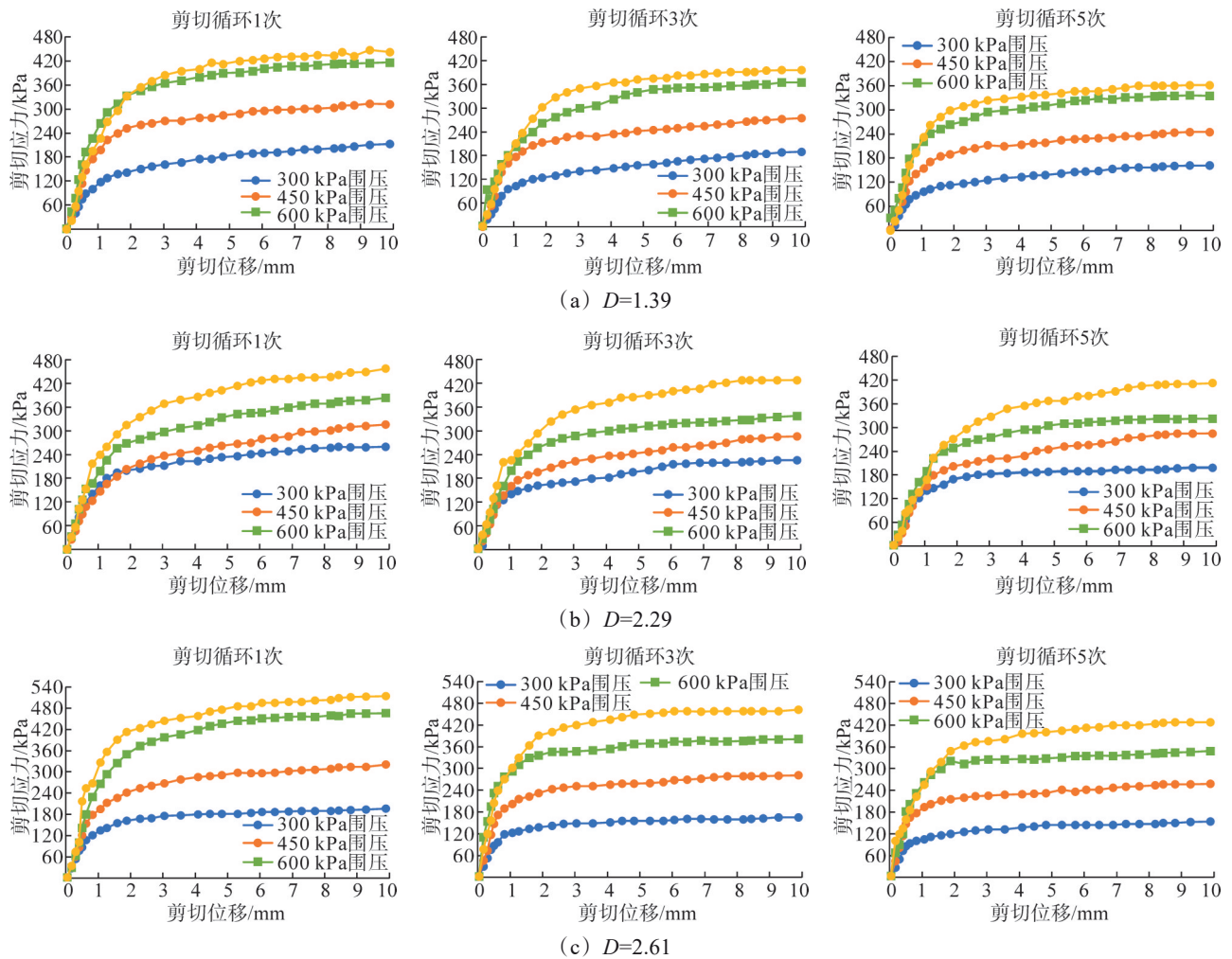


图 6 不同分形维数下煤矸石剪切应力-剪切位移曲线

Fig.6 shear stress-shear displacement curve of coal gangue under different fractal dimensions

规定第 1 次剪切 10 mm 处的剪切应力为抗剪强度, 第 5 次剪切 10 mm 处的剪切应力为残余剪切强度。由图 6 可以看出, 在剪切初始阶段, 剪切应力近似呈线性增长, 呈弹性力学特性, 表明在初始加载阶段煤矸石主要以颗粒骨架的嵌锁作用和摩擦力来抵抗外载荷作用。随着剪切位移的增大, 剪切应力增速变慢, 未出现应变软化现象, 属于应变硬化型。不同剪切次数下剪切应力-剪切位移变化趋势基本一致, 与文献[17]、文献[18]研究结论一致。 D 为 1.39 时, 法向应力超过 600 kPa 后, 继续增大法向应力对抗剪强度的提升效果有限。 D 为 2.29 及 2.61 时, 法向应力的增大与抗剪强度的提升幅度基本呈线性关系。剪切次数相同的条件下, 法向应力越小, 剪切应力-剪切位移关系曲线出现拐点越早, 与文献[16]得出的级配优化能改善骨架结构、增强承载力的结论一致。5 次剪切循环后, 残余剪切强度、抗剪强度均明显降低。法向压力越大, 剪切应力损失越小。这是由于法向压

力较小时, 煤矸石颗粒间的约束作用较弱, 颗粒更易发生相对滑动和旋转。在循环剪切过程中, 颗粒之间相互摩擦, 棱角逐渐磨损, 表面趋于光滑, 嵌锁效应减弱, 抗剪能力显著下降。发生破碎后, 颗粒之间的接触状态由粗糙接触逐渐演变为光滑接触, 使得剪切面上的抗剪强度进一步降低。由于颗粒间的咬合作用远大于滑动摩擦力, 使得剪切应力随法向应力的增大而增大。法向应力越大, 剪切循环导致的强度损失越小。在实际工程中, 可通过合理控制分形维数 ($D \geq 2.2$) 以及提高压实度来提升残余强度, 降低强度损失率, 从而改善路基的长期稳定性。

采用双曲线模型分析煤矸石剪切应力-剪切位移关系, 即

$$\tau = \frac{\delta}{a + b\delta}, \quad (2)$$

式中: τ 为剪切应力; δ 为剪切位移; a 为表征材料初始剪切刚度的系数; b 为表征材料极限剪切强度的系数。

剪切刚度为

$$k_0 = 1/a_0 \quad (3)$$

模型峰值剪切应力为

$$\tau_u = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\delta}{a + b\delta} = \frac{1}{b} \quad (4)$$

破坏比为

$$R_f = \tau_f / \tau_u \quad (5)$$

式中, τ_f 为试验峰值剪切应力。

试验及模型拟合值见表 3。其中, D 、 σ 和 N 为试验工况参数; τ_f 为试验实测值; τ_u 为模型拟合值; R_f 、 k_0 、 a 、 b 为模型计算值。限于篇幅, 仅以含水率为 6%、 D 为 1.39、不同剪切次数下的试验值为例, 与双曲线模型的拟合值进行对比, 见图 7。

表 3 试验及模型拟合值
Tab.3 experimental and model fitted values

D	法向应力 σ/kPa	循环剪切次数	τ_f/kPa	τ_u/kPa	R_f	k_0	$a/10^3$	$b/10^3$	
1.39	300	1	212.49	234.04	0.93	157.33	6.35	4.27	
		3	189.03	207.83	0.91	130.04	7.69	4.82	
		5	161.93	174.98	0.92	144.93	6.92	5.73	
	450	1	312.09	346.68	0.94	308.61	3.23	2.88	
		3	274.43	292.83	0.93	289.67	3.44	3.41	
		5	244.23	266.18	0.91	250.63	3.99	3.74	
	600	1	416.14	469.18	0.88	409.41	2.44	2.13	
		3	365.98	415.84	0.87	301.11	3.31	2.42	
		5	244.87	285.72	0.85	405.52	2.46	3.52	
	750	1	442.53	538.67	0.82	302.11	3.31	1.85	
		3	395.65	475.91	0.83	288.02	3.46	2.12	
		5	361.41	414.39	0.87	339.14	2.94	2.41	
	2.29	300	1	259.72	285.39	0.91	254.34	3.93	3.52
			3	225.78	243.47	0.92	214.78	4.65	4.12
			5	198.67	217.56	0.91	249.08	4.01	4.59
450		1	315.68	376.32	0.83	168.86	5.92	2.65	
		3	285.95	322.13	0.88	199.68	5.03	3.12	
		5	285.82	332.26	0.85	182.96	5.46	3.65	
600		1	383.31	436.99	0.87	263.64	3.79	2.28	
		3	337.91	388.66	0.86	265.78	3.76	2.57	
		5	322.83	377.38	0.85	267.54	3.73	2.65	
750		1	457.13	540.96	0.84	288.82	3.46	1.84	
		3	428.39	509.55	0.84	286.84	3.48	1.96	
		5	411.92	473.93	0.86	204.34	4.89	2.11	
2.61		300	1	196.27	209.25	0.93	261.22	3.82	4.77
			3	165.35	172.86	0.95	278.73	3.58	5.78
			5	153.76	157.59	0.97	248.88	4.01	6.34
	450	1	320.54	353.17	0.90	300.31	3.32	2.83	
		3	281.34	297.15	0.94	429.83	2.32	3.36	
		5	257.81	265.88	0.96	456.38	2.19	3.76	
	600	1	466.91	553.77	0.84	347.11	2.88	1.84	
		3	381.72	396.65	0.95	844.51	1.18	2.51	
		5	348.67	374.35	0.93	546.21	1.83	2.67	
	750	1	514.57	581.82	0.88	481.61	2.07	1.71	
		3	462.35	515.59	0.89	551.81	1.81	1.93	
		5	428.16	481.07	0.89	433.92	2.32	2.07	

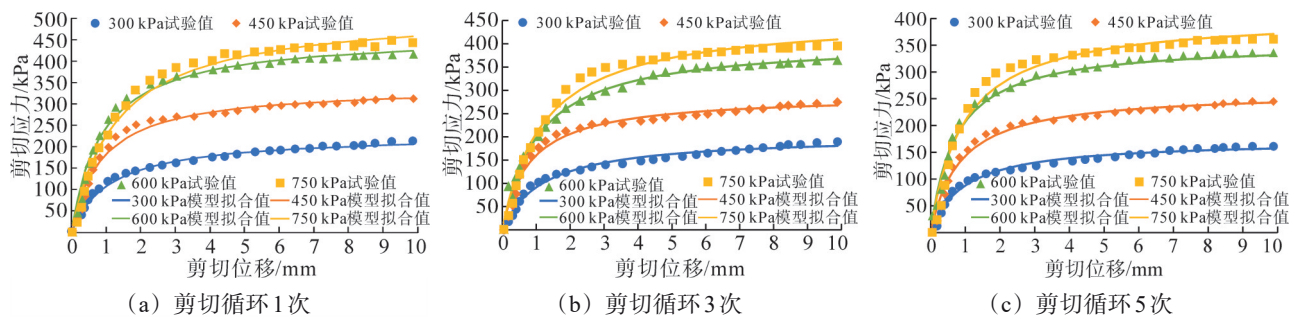


图 7 不同法向应力下试验值与双曲线模型拟合值对比

Fig.7 comparison of experimentl values and fitted values of hyperbolic model under different normal stresses

由表 3、图 7 可知,随着剪切循环次数的增加, τ_f 和 τ_u 不断减小,且降幅与 D 有关, D 越小,剪切强度的下降幅度越大。这是由于 D 较大时,煤矸石颗粒表面更复杂,颗粒间的嵌锁效应更强、摩擦力更大,在多次剪切作用下抗剪稳定性更优。随着法向应力的增大, τ_f 和 τ_u 下降速率明显变缓,法向应力对剪切强度的削弱效应逐渐减弱。这是由于高法向应力作用下,颗粒间的接触点数更多、接触面积更大,摩擦力和嵌锁效应增强,材料能更好地抵抗剪切引起的颗粒滑移和破坏。这表明将煤矸石应用于高填方路基或堤坝基础等高法向应力的工程环境中,抗剪性能较稳定。 R_f 集中在 0.82~0.97,说明采用双曲线模型描述煤矸石的剪切应力-剪切位移关系是可行的。随着剪切循环次数的增加和法向应力的增大, R_f 略有降低。这是由于试验条件下材料的剪切强度可能受局部应力集中、颗粒破碎的影响,模型预测结果更接近理想状态下颗粒的力学特性。 k_0 整体上随法向应力的增大而增大。法向应力较小时, k_0 增长较快,法向应力较大时, k_0 增长缓慢。 D 对 k_0 影响较大。 D 为 1.39 时, k_0 下降幅度较大,表明在剪切过程中粗糙度较低的颗粒更易发生滑移、磨损,导致 k_0 明显衰减。 D 为 2.29 时,颗粒表面结构更复杂,颗粒之间的嵌锁作用更强,在循环剪切过程中 k_0 损失较

小。整体来看,法向应力主要影响 k_0 初始值, D 决定了循环剪切过程中 k_0 的衰减趋势。

2.2 残余抗剪强度分析

(1) 含水率对残余抗剪强度指标的影响

以 D 为 1.39 的试样为例,采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,分析不同含水率下煤矸石剪切应力与法向应力的关系,见图 8。由图 8 可以看出,随着含水率的增大,煤矸石的峰值剪切应力、残余抗剪强度显著降低。高含水率条件下,黏聚力衰减更为剧烈。含水率为 3% 时,剪切循环 1 次,黏聚力为 82.5 kPa。剪切循环 3 次,黏聚力为 20.5 kPa。剪切循环 5 次,黏聚力降至 7.2 kPa,与第一次相比,降幅高达 91.3%。含水率为 9% 时,剪切循环 1 次、3 次和 5 次,黏聚力分别为 82.6 kPa、51.7 kPa 和 33.9 kPa,与第一次相比,剪切循环 5 次后,降幅高达 58.9%。产生这种现象的原因是多次剪切循环后,煤矸石颗粒间的嵌锁作用减弱,使得黏聚力迅速降低。含水率为 3% 时,随着剪切循环次数的增加,内摩擦角变化不明显。含水率为 0、6% 和 9% 时,内摩擦角逐渐减小。这是由于含水率为 0 时,在剪切过程中煤矸石颗粒结构发生调整,部分颗粒破碎并填充孔隙,整体摩擦阻力下降。含水率为 6% 和 9% 时,水膜效应主导颗粒接触行为,使得内摩擦角对循环剪切的敏感性降低。

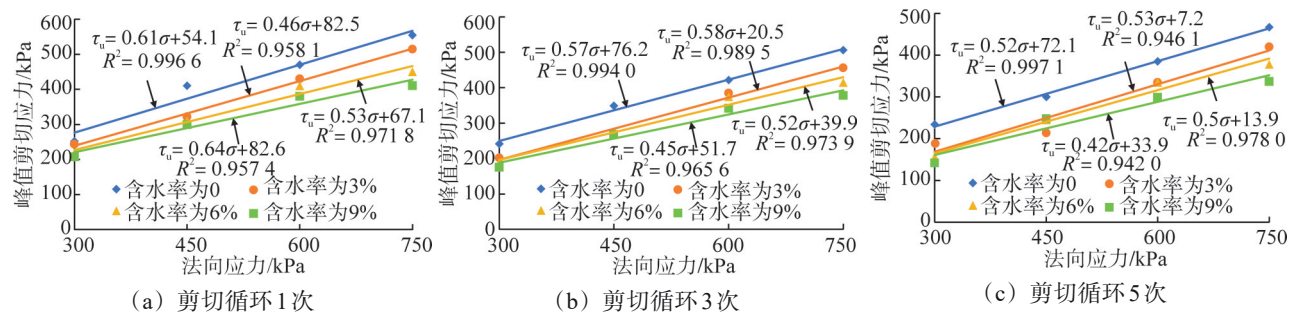


图 8 不同含水率下峰值剪切应力-法向应力关系

Fig.8 relationship between peak shear stress and normal stress under different water contents

(2) 分形维数对抗剪强度指标的影响

以含水率为 6% 的试样为例, 不同分形维数下煤矸石峰值剪切应力-法向应力的关系见图 9。D 较小时, 煤矸石初始抗剪强度较大。在循环剪切作用下, 黏聚力不断衰减。D 较大时, 煤矸石初始黏聚力较小, 剪切过程中颗粒滑移加剧, 抗剪强度衰减幅度较大。D 为 1.39、2.29 和 2.61 时, 与剪切循环 1 次相比, 剪切循环 5 次, 煤矸石的黏聚力分别由 91.1 kPa、110.0 kPa 和 17.1 kPa 降至 36.0 kPa、51.0 kPa 和 5.0 kPa, 降幅分别为 60.4%、53.6% 和 70.6%。D 越大, 细颗粒含量越高, 颗粒间接触点

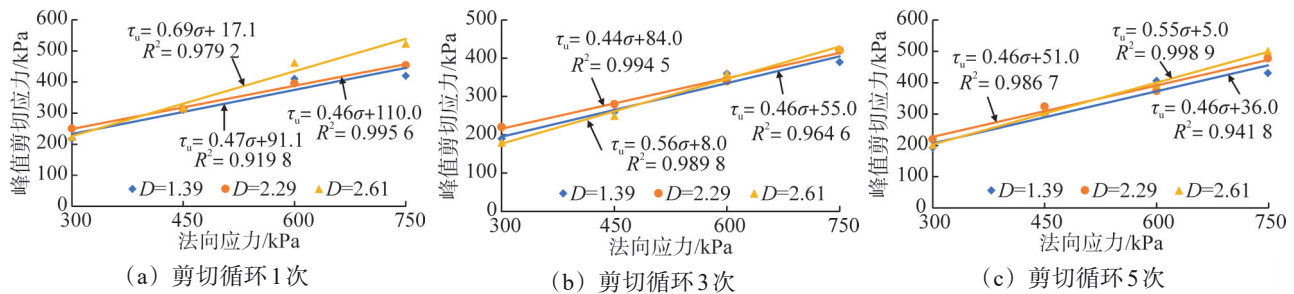


图 9 不同分形维数下峰值剪切应力-法向应力关系

Fig.9 relationship between peak shear stress and normal stress under different fractal dimensions

3 剪切界面细观行为演化分析

煤矸石是典型的不连续颗粒介质, 颗粒非均匀性和各向异性显著。为真实再现颗粒的接触、滑移以及破坏过程, 常采用离散元法 (DEM) 进行数值模拟, 分析煤矸石位移场以及力链网络演化等细观行为。本文通过与室内排水往复直剪试验结果进行多轮标定, 使模拟所得的峰值剪切强度、残余剪切强度及剪切位移与试验值相吻合, 确保模型输入参数的合理性。模拟过程中, 颗粒的力链分布、裂隙扩展模式以及剪切应力-位移曲线与试验值基本一致, 较好地反映循环剪切作用下煤矸石的力学行为。

3.1 模型构建

煤矸石剪切试验的数值模型见图 10。模型由 6 个墙体组成, 尺寸与室内试验保持一致。按照实际颗粒级配生成的颗粒数目达百万级, 考虑到颗粒数量过多会降低计算效率, 故采用粒径放大法^[19]获得模型试样级配。将级配曲线分段, 得到分段点的粒径及对应的质量累计百分数。由于煤矸石颗粒的密度相同, 质量含量即为体积含量。因此, 以体积含量为控制参数, 随机生成每个区段所对应的煤矸石颗粒。

数量越多, 内摩擦角越大。D 为 1.39、2.29 时, 剪切前后内摩擦角均集中在 $24.8^\circ \sim 25.3^\circ$ 。剪切循环对内摩擦角影响较小, 表明在剪切循环过程中, 虽然颗粒的嵌锁效应有所削弱, 但整体摩擦特性较为稳定。D 为 2.61 时, 剪切循环 1 次至 5 次, 内摩擦角由 34.8° 降至 28.8° , 这是由于过多细颗粒的存在使得大颗粒不再直接接触, 剪切时承受应力的主要是细颗粒。与粗颗粒相比, 细颗粒间的嵌锁作用相对较弱, 滑动摩擦力远低于粗颗粒遭受剪切时的骨架结构破坏力。

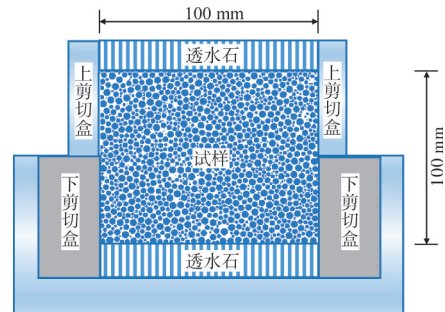


图 10 剪切试验数值模型

Fig.10 numerical model of shear test

3.2 细观参数的确定

采用线性接触模型来定义球体-球体以及球体-墙体之间的相互作用。细观参数的标定以室内试验值为基准, 按照“宏观力学指标-细观参数”相对应的思路进行调整。首先, 以剪切试验所得的弹性模量和泊松比为目标, 通过调节法向刚度 k_n 、切向刚度 k_s 及 k_n/k_s 来控制模型的整体刚度; 其次, 调整颗粒间的摩擦系数来匹配峰值剪切强度与残余剪切强度; 最后, 引入适当的黏聚力参数, 保证数值模拟曲线能反映试样由峰值剪切强度至残余剪切强度的变化过程。标定全程采用试凑法, 即在合理的物理区间内对参数进行逐步调整, 以剪切应力-剪切位移曲线的拟合效果作为细观参数是否标定正确的判据。调整后的数值模拟细观参

数见表 4。

表 4 数值模拟细观参数

Tab.4 meso parameters of numerical simulation			
参数	取值	参数	取值
颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 134	阻尼系数 c	0.7
$k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	6×10^6	摩擦系数 μ	0.35
$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	6×10^6	孔隙率 n	0.16

法向应力为 600 kPa 下, 剪切应力-剪切位移关系见图 11。曲线整体可划分为 3 个阶段: 剪切初始阶段, 应力随位移近似线性增长, 此时, 试样结构逐渐紧密, 颗粒发生重排; 速率步进阶段, 应力波动增长, 颗粒滑移、嵌挤, 力链不断调整; 残余剪切阶段, 应力趋于稳定, 表明材料已完成结构重组。模拟值与试验值基本吻合, 曲线变化趋势基本一致, 验证了数值模型的可行性以及细观参数的可靠性。但在剪切位移为 0 时, 剪切应力模拟值不为 0, 产生这种现象有以下三方面原因。一是在法向压力伺服过程中, 侧壁会对颗粒产生微小的水平分力, 从而在剪切启动时形成一定的初始剪切应力。二是在沉积、压实及加载过程中, 颗粒间会形成非对称接触网络, 在法向应力作用下产生剪向分力, 导致在尚未施加显式剪切位移时, 接触切向力不严格为 0。三是模拟过程中, 剪切力的记录点、滑移参考面与试验所定义的“位移为 0”的点可能存在微小差异, 从而出现偏移量。

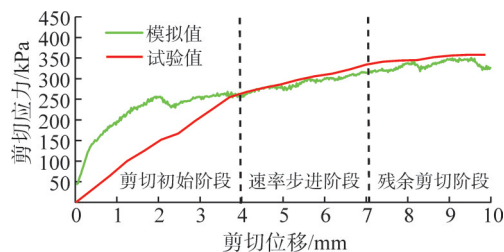


图 11 剪切应力-剪切位移关系对比

Fig.11 comparison of relationship between shear stress and shear displacement

3.3 模拟结果分析

(1) 位移场、力链演化特征

不同分形维数下煤矸石的位移场、力链演化特征见图 12。 D 为 1.39 时, 在剪切初始阶段, 力链分布较为松散, 剪切界面处以绿色和浅蓝色的弱力链为主, 仅在局部形成短促的黄色强力链, 表明该阶段应力传递路径较短, 方向性较弱。由于颗粒尺寸较大, 力链连接的颗粒数较少, 且力链长度较短、强度较低, 未出现明显的应力集中现象。颗粒位移的深色区域分布较广, 剪切带较宽且边界模糊, 颗粒滑移较为分散、随机。在速率步进阶段, 力链逐渐集中并形成应力传递路径,

大颗粒通过强力链承担主要应力, 使剪切带沿特定方向发展。在残余剪切阶段, 力链逐渐集中于剪切带区域, 形成明显的主力链路径, 应力主要由少数大颗粒承担。由于应力高度集中, 部分大颗粒发生滑移或破坏, 结构整体可能失稳。 D 为 2.29 时, 在剪切初始阶段, 剪切面附近出现大量橙色和红色力链, 力链走向逐渐与剪切方向趋于一致。界面处力链颜色逐渐由浅变深, 表明应力更集中, 接触网络趋于稳定。颗粒明显向剪切面滑移、聚集, 深色区域明显收缩, 剪切带边界逐渐清晰, 宽度显著减小, 表明颗粒间的滑移行为已逐渐局限于主剪切面附近。在速率步进阶段, 力链逐渐向界面区域集中, 但集中程度较低, 剪切带宽度适中, 力链整体仍保持一定的均匀性。在残余剪切阶段, 力链集中于剪切带区域, 具有一定的分散性, 应力分担能力和抗破坏性能较好。 D 为 2.61 时, 在剪切初始阶段, 力链分布最为均匀且密集, 稳定性最强。由于颗粒尺寸较小, 力链强度相对较弱, 应力集中现象不明显, 呈较稳定的网状结构。在速率步进阶段, 力链在剪切带区域逐渐集中, 较少出现分叉和弯曲, 力链网络具有明显的方向性和分布集聚特征。在残余剪切阶段, 力链集中于剪切带区域, 但仍保持一定的分散性。

通过上述分析可知, 随着剪切试验的进行, 图中深色剪切带区域均呈逐渐收缩的变化趋势, 剪切带宽度不断减小。随着 D 的增大, 煤矸石颗粒结构由松散状态变得更加致密, 细颗粒含量的增加使得剪切带宽度逐渐减小, 剪切破坏模式由整体滑移向剪切交界面滑移转变。

(2) 接触方向占比分析

通过分析残余剪切阶段接触方向的占比玫瑰图, 可揭示煤矸石颗粒在剪切后的组构特征及受力传递机制, 从而更准确地描述其长期剪切变形特性^[20-21]。不同分形维数下残余剪切阶段接触方向占比玫瑰图见图 13。 D 为 1.39 时, 接触方向具有明显的方向性, 但分布不均匀。随着试验的进行, 接触方向依旧保持较强的方向性, 表明在剪切扰动下粗颗粒仍能维持稳定的接触网络, 结构破坏程度较低。 D 为 2.29 时, 颗粒分布相对均匀, 既有一定的骨架支撑, 也存在细颗粒填隙效应, 力链结构分布协调, 抗扰动能力中等。随着试验的进行, 剪切行为促使颗粒发生有序重排, 形成较稳定的剪切带, 接触方向进一步集中, 剪切主方向明显。 D 为 2.61 时, 玫瑰图接近“正圆形”, 接触方向非常均匀, 无明显主方向。细颗粒占主导地位, 导致结构整体排列松散, 接触网络随机性较高。随着试验的进行, 接触方向仍未明显集中, 方向性不

强。这是由于在剪切过程中细颗粒容易移动、重排，接触网络不稳定，表明高分形维数下，煤矸石结构的稳定性和抗剪能力较弱。

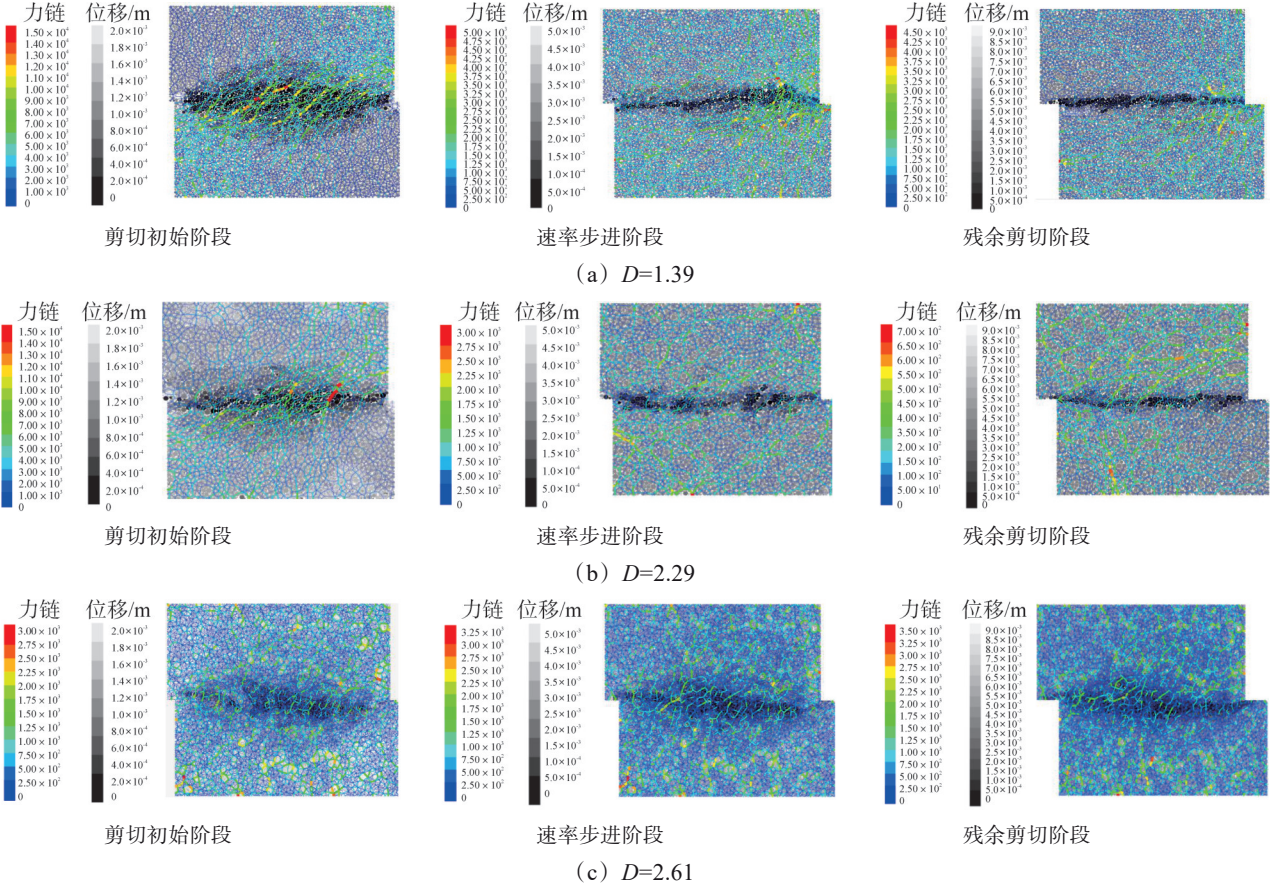


图 12 不同分形维数下煤矸石力链、位移场演化

Fig.12 evolution of force chain and displacement field of coal gangue under different classification dimensions

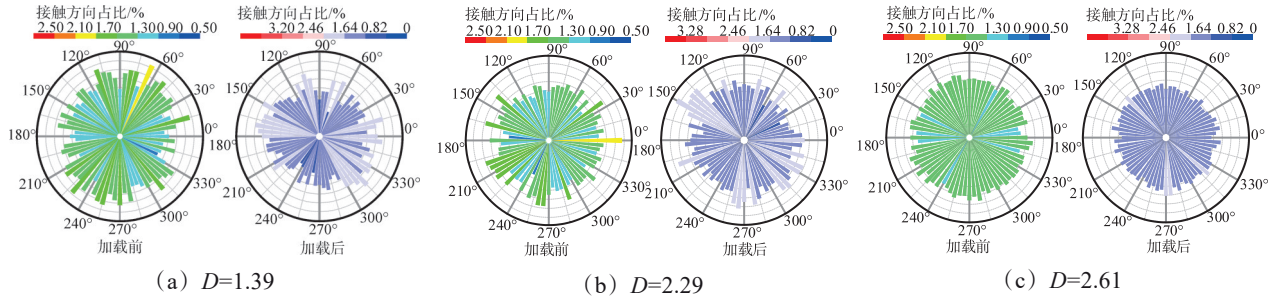


图 13 不同分形维数下残余剪切阶段接触方向占比玫瑰图

Fig.13 rose chart of the proportion of contact direction in the residual shear stage under different classification dimensions

4 结论

(1) 煤矸石剪切应力-位移整体呈应变硬化特性，无明显软化现象。随着剪切循环次数的增加，残余剪切强度显著衰减，但在高法向应力作用下，仍能保持较高强度，颗粒嵌锁效应显著。在承受较大载荷的路基环境中，煤矸石抗剪稳定性较好，双曲线模型可有效预测其长期力学行为。

(2) 低分形维数下，煤矸石初始强度较高，力

链较集中，易诱发局部应力集中，黏聚力衰减较快。高分形维数下，力链分布均匀，内摩擦角显著减小，细颗粒起主导作用，剪切带稳定性不足。

(3) 增大含水率会加速黏聚力损失，含水率对内摩擦角的影响呈非线性特征。随着分形维数的提高，剪切带宽度逐渐减小，破坏模式由整体滑移向界面滑移转变。在路基设计中，需综合考虑颗粒级配与含水率，避免路基力学性能快速退化。

(4) 煤矸石更适用于高法向应力的路基工程。

为兼顾强度与耐久性,推荐采用中等分形维数级配。在施工及养护过程中,为减缓黏聚力损失,煤矸石含水率应控制在6%以下。

参考文献(References):

- [1] 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):88-99.
LIU Ze, DUAN Kairui, ZHOU Mei, et al. State-of-the-art utilization of coal gangue in civil engineering materials[J]. Materials Reports, 2024, 38(10):88-99.
- [2] 李亚清,宋沆,邓军,等.煤矸石固废资源化利用制备分子筛研究现状及进展[J].材料导报,2025,39(15):147-157.
LI Yaqing, SONG Hang, DENG Jun, et al. Research status and progress of molecular sieves prepared by resource utilization of coal gangue solid waste[J]. Materials Reports, 2025, 39(15):147-157.
- [3] 张军辉,陈莎莎,顾凡,等.工业废弃料在路基改良中的应用综述[J].中国公路学报,2023,36(10):1-16.
ZHANG Junhui, CHEN Shasha, GU Fan, et al. Industrial waste materials utilized in subgrade modification: a review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10):1-16.
- [4] 梁彭,魏玉峰,黄鑫,等.基于结构信息的粗粒土抗剪强度模型研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(10):2930-2940.
LIANG Peng, WEI Yufeng, HUANG Xin, et al. Study on shear strength model of coarse-grained soil based on structural information[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(10):2930-2940.
- [5] 贺建清,靳明,阳军生.掺土煤矸石的路用工程力学特性及其填筑技术研究[J].土木工程学报,2008,41(5):87-93.
HE Jianqing, JIN Ming, YANG Junsheng. A study on the road engineering mechanical properties of coal gangue mixed with clay and the filling techniques[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(5): 87-93.
- [6] 张成梁,孙龙,张洪江,等.不同配比的煤矸石与垃圾筛分土抗剪试验[J].中国水土保持科学,2013,11(3):35-39.
ZHANG Chengliang, SUN Long, ZHANG Hongjiang, et al. Experimental study of effects of different ratio of gangue mixture to screening refuse soil on shearing strength[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(3):35-39.
- [7] 徐宁,徐永福.建筑垃圾在高速公路路基填筑中的现场直剪试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(18):263-268.
XU Ning, XU Yongfu. In-situ direct shear test investigation of construction waste in subgrade filling of expressway[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(18):263-268.
- [8] 张振东,李国英.循环荷载作用下堆石料颗粒破碎特性试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(8):1510-1516.
ZHANG Zhendong, LI Guoying. Experimental study on particle breakage behaviors of rockfill under cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8):1510-1516.
- [9] 李扬波,张家生,朱志辉,等.循环荷载作用下铁路路基级配碎石填料累积变形研究[J].工程科学与技术,2018,50(5):130-137.
LI Yangbo, ZHANG Jiasheng, ZHU Zhihui, et al. Accumulated deformation of gravel filler of subgrade under cyclic loading[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(5):130-137.
- [10] WICHTMANN T, TRIANTAFYLIDIS T. Stress attractors predicted by a high-cycle accumulation model confirmed by undrained cyclic triaxial tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 69: 125-137.
- [11] 王顺,项伟,崔德山,等.不同环剪方式下滑带土残余强度试验研究[J].岩土力学,2012,33(10):2967-2972.
WANG Shun, XIANG Wei, CUI Deshan, et al. Study of residual strength of slide zone soil under different ring-shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10):2967-2972.
- [12] VAUNAT J, AMADOR C, ROMERO E, et al. Residual strength of a low plasticity clay at high suctions[C]//Unsaturated Soils 2006. Carefree, Arizona, USA. American Society of Civil Engineers, 2006: 1279-1289.
- [13] MIAO H B, WANG G H. Shear rate effect on the residual strength of saturated clayey and granular soils under low-to high-rate continuous shearing[J]. Engineering Geology, 2022, 308:106821.
- [14] DUONG N T, SUZUKI M, VAN HAI N. Rate and acceleration effects on residual strength of Kaolin and Kaolin-bentonite mixtures in ring shearing[J]. Soils and Foundations, 2018, 58: 1153-1172.
- [15] 郭聚坤,王瑞,寇海磊,等.纹理特征对钢与砂界面剪切性能的影响[J].中国科技论文,2023,18(2):172-178.
GUO Jukun, WANG Rui, KOU Hailei, et al. Effect of groove characteristics on shear properties of steel-sand interface[J]. China Sciencepaper, 2023, 18(2):172-178.
- [16] 张宗堂,高文华,刘昌平,等.级配对煤矸石路基填料压实与强度特性的影响试验研究[J].工程地质学报,2023,31(5):1774-1781.
ZHANG Zongtang, GAO Wenhua, LIU Changping, et al. Experimental study of gradation effect on compaction and strength characteristics of coal gangue subgrade filler[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5):1774-1781.
- [17] 孙向军,潘家军,卢一为,等.级配和密度组合对粗粒土强度特性的影响[J].长江科学院院报,2023,40(8):133-138.
SUN Xiangjun, PAN Jiajun, LU Yiwei, et al. Influence of gradation and density combination on strength characteristics of coarse-grained soil[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(8):133-138.
- [18] 闫超萍,龙志林,周益春,等.钙质砂剪切特性的围压效应和粒径效应研究[J].岩土力学,2020,41(2):581-591,634.
YAN Chaoping, LONG Zhilin, ZHOU Yichun, et al. Investigation on the effects of confining pressure and particle size of shear characteristics of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2):581-591,634.
- [19] 邢杰,余湘娟,高磊,等.基于颗粒流离散元的黏性土三轴剪切试验数值模拟[J].科学技术与工程,2017,17(35):119-124.
XING Weijie, YU Xiangjuan, GAO Lei, et al. Numerical simulation of cohesive soil triaxial shear test based on particle flow discrete element[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(35): 119-124.
- [20] 敬耀辉,张延年,汪青杰,等.碱激发自燃煤矸石基胶凝材料水化特性研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):659-666.
JING Yaohui, ZHANG Yannian, WANG Qingjie, et al. Study on the hydration characteristics of alkali-activated spontaneous combustion coal gangue-based cementitious materials[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(6): 659-666.
- [21] MA Q, HE X, ZHOU Y G, et al. An approach to DEM simulation of hollow torsional shear tests for achieving general loading paths[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 172:106402.