

· 水工岩石力学 ·

DOI:10.12454/j.jsuese.202400974



本刊网刊

红层泥岩填料强度特性及石灰改良效果研究

孔坤锋^{1,2}, 马杰^{3,4}, 袁胜洋^{3,4*}, 续嘉航^{4,5}, 陈锋^{1,2}, 刘先峰^{3,4}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 高速铁路与城轨交通系统技术国家工程研究中心, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 4. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 5. 西南交通大学 利兹学院, 四川 成都 610031)

摘要:将红层泥岩弃渣或将其经石灰改良后用作高速铁路基填料, 可实现弃渣的资源化利用。为明确红层泥岩填料饱和度对其强度特性的影响规律, 揭示石灰掺量及养护龄期对改良红层泥岩填料强度特性的影响规律及改良机理, 采用直剪试验、压汞试验、扫描电镜试验及矿物成分分析试验, 从宏-微观相结合的角度开展试验研究。结果表明: 1) 红层泥岩填料具有极强的水敏性, 饱和后黏聚力大幅降低导致抗剪强度显著降低, 孔径分布由双峰结构转化为单峰结构; 2) 石灰改良后红层泥岩填料黏聚力可提高 6.5 倍以上, 内摩擦角可提高 1.4 倍以上, 抗剪强度显著增大, 剪切行为由未改良时的硬化-剪缩转变为改良后的软化-剪胀; 3) 石灰改良填料在饱和后内部孔隙结构与非饱和状态下相比并未发生显著变化, 孔径分布依然呈双峰结构, 且随着养护龄期的增加, 改良填料内部微孔的数量逐渐减小而纳米孔的数量逐渐增多; 4) 石灰水化生成的水化硅铝酸钙填充于颗粒之间的孔隙, 将相邻土颗粒紧密胶结在一起, 形成 3 维网架结构, 增强了土颗粒之间的联结, 使得石灰改良填料的抗剪强度显著增大。研究结果可为石灰改良红层泥岩路基的设计及建造提供理论参考, 进一步促进红层泥岩弃渣在高速铁路建设中的资源化利用。

关键词: 高速铁路; 路基填料; 红层泥岩; 石灰改良; 微观结构

中图分类号: TU443.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)01-0111-10

红层泥岩广泛分布于成渝地区。“十四五”期间, 成渝地区规划修建多条铁路线路。成渝地区多山地丘陵, 线路修建不可避免进行边坡开挖和隧道开挖, 产生大量的红层泥岩弃渣, 而弃渣堆放会占用土地资源, 破坏生态环境。红层泥岩弃渣易风化破碎, 遇水后易崩解软化, 只能用作路堤本体填料, 若将红层泥岩弃渣改良后用作基床底层填料, 则能促进红层泥岩弃渣在高速铁路建设中的资源化利用, 达到减废降污、协同增效的目的。

红层泥岩用作路基填料的研究表明: 在最优含水率状态下将红层泥岩碾压密实后, 具有足够的刚度及强度, 能满足高速铁路路基动、静力学性能要求^[1-3], 但受环境变化(如降雨、蒸发及地下水位的升降)的影响, 红层泥岩填料饱和度会在较宽范围内发生变化。红层泥岩填料具有较强的水敏性^[4-5], 饱和度增加会导

致其强度特性发生变化, 强度特性与许多工程问题相关, 如红层泥岩路基变形加剧、路基边坡稳定性降低、挡土结构土压力增大等^[6-7]。路基填料在实际运营过程中饱和度变化范围较广, 不同类型土的强度随其饱和度的演化规律各不相同。对于部分粉土, 土体强度随着饱和度的降低, 呈现先增大后减小的趋势, 即强度演化呈现“山峰效应”^[8-11]; 对于部分黏性土, 土体强度随其饱和度的降低而不断增大^[12-13]。仅研究最优含水率状态或饱和状态红层泥岩填料的强度特性不能反映饱和度对强度演化规律的影响, 红层泥岩填料在不同饱和度时的强度演化特性尚未明晰。

常用的路基填料改良方法是在路基填料中掺入水泥、石灰等材料来提高路基填料的强度及抗变形能力^[14-16]。石灰改良具有原材料来源广泛、价格低廉、改良效果好等优点, 已广泛应用于填料改良领域^[17-19]。

收稿日期: 2024-11-21 修回日期: 2025-03-07 网络出版日期: 2025-03-14

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司国家创新平台开放基金项目(2023YJ377); 国家自然科学基金项目(52078432; 52478475; 52378463; 52168066)

作者简介: 孔坤锋(1996—), 男, 助理研究员。研究方向: 交通岩土工程及固废资源化利用。E-mail: 723438520@qq.com

* 通信作者: 袁胜洋, 副教授, E-mail: shengyang.yuan@swjtu.edu.cn

路基填料改良的研究表明,石灰改良能够有效增强土颗粒之间的黏结^[20-21],显著提高填料的强度及抗变形能力^[22-24],将石灰与填料拌合后经过一定时间的养护,可显著提高其强度和抗变形能力^[25-26]。填料中掺入石灰后会生成新的水化产物,将土颗粒相互胶结,形成胶凝结构^[27-28]。目前,石灰改良对红层泥岩填料力学特性的影响鲜有报道,改良机理尚不明确,亟需开展深入系统的研究。

基于此,开展了红层泥岩填料及石灰改良填料的直剪试验,明确饱和度对红层泥岩填料强度特性的影响规律,阐明石灰掺量、养护龄期对改良填料强度特性及剪胀性的影响规律,并通过扫描电镜试验、压汞试验及矿物成分分析试验,从微观角度揭示石灰改良红层泥岩填料的改良机理。研究结果可为改良红层泥岩路基的设计、建造及施工提供理论参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料及试样制备

红层泥岩填料取自成都某建设工点,基本物理特性如表 1 所示,也可参考文献[5]进一步了解红层泥岩填料的基本物理特性。

表 1 红层泥岩填料物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of red mudstone fill material

最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	比重
2.01	8.7	32.5	13.8	2.69

1.2 试验方案

将红层泥岩用作路基填料时,填筑含水率宜控制在 5%~7%^[2,29],但环境变化会导致红层泥岩填料含水率发生变化,甚至由于雨水浸泡导致饱和,故以路堤填料压实控制标准(压实系数 $K=95%$)为基准,在干密度 ρ_d 为 1.9 g/cm³时,通过研究不同饱和度试样的抗剪强度特性,来明确饱和度变化对红层泥岩填料抗剪强度特性的影响规律。试验方案如表 2 所示。

参照《铁路工程土工试验规程》(TB10102-2010),
表 2 红层泥岩填料直剪试验方案

Tab. 2 Direct shear test program of red mudstone fill material

干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	饱和度/%	竖向荷载/kPa
1.9	5.0	33	50、100、200、 300、400
	7.0	46	
	8.7	57	
	11.0	72	
	13.0	85	
	15.5(饱和)	100	

红层泥岩填料直剪试验采用 1 mm/min 的剪切速率进行快剪试验,施加的竖向荷载分别为 50、100、200、300、400 kPa,对于需要饱和的试样,采用抽气饱和的方式进行饱和。

为研究石灰改良对红层泥岩填料抗剪强度特性的影响,在最优含水率状态下制样后进行养护。根据红层泥岩填料直剪试验结果得知,红层泥岩填料具有显著的水敏感性,故将石灰改良试样抽气饱和后再进行直剪试验,试验方案如表 3 所示。

表 3 石灰改良红层泥岩填料直剪试验方案

Tab. 3 Direct shear test program of lime reinforced red mudstone fill material

干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	石灰掺量/%	养护龄期/d
1.9	8.7	2	28、90
		4	
		6	
		8	

根据《铁路路基设计规范》(TB10001-2016),宜加入质量占比不超过 8% 的石灰对路基填料进行改良,故研究石灰掺量 L_r 为 0、2%、4%、6%、8% 时,改良红层泥岩填料的抗剪强度特性,以明确石灰掺量对红层泥岩填料强度特性的影响规律。石灰改良填料强度随养护龄期增加而增大,故研究不同龄期(28、90 d)时改良红层泥岩填料的强度特性。试验所施加的竖向荷载、剪切速率与红层泥岩填料保持一致。

根据“达成线”“遂渝线”改良红层泥岩路基的研究成果及改良红层泥岩填料抗剪强度演化规律^[2,5,29],在红层泥岩中掺入质量占比为 4% 的石灰可显著提高其强度、刚度及抗变形能力。为揭示养护龄期及饱和状态对改良红层泥岩填料强度特性的作用机理,以 4% 石灰掺量为例,采用压汞试验、扫描电镜试验及矿物成分分析试验,对两种饱和状态(最优含水率及饱和状态)及不同养护龄期时填料的微观结构进行测定。微观试验采用 Liu^[30]和 Yuan^[31]的方法,微观试验方案如表 4 所示。

表 4 微观试验方案

Tab. 4 Microstructure test program

干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	石灰掺量/%	养护龄期/d
1.9	8.7	0	—
	15.5(饱和)	0	—
	8.7	4	28
	15.5(饱和)	4	28
	8.7	4	150
	15.5(饱和)	4	150

2 试验结果与分析

2.1 红层泥岩填料强度特性

参考文献[5]的方法对红层泥岩填料的峰值抗剪强度进行选取。采用摩尔-库仑强度准则对红层泥岩填料的抗剪强度进行分析,干密度 γ_d 为 1.9 g/cm^3 时,不同饱和度 S_r 下的分析结果如图1所示。图1中,直线为峰值抗剪强度与竖向荷载的摩尔-库仑一次拟合线。由图1可知,红层泥岩填料在非饱和状态下具有较高的抗剪强度,但红层泥岩填料在浸水饱和后抗剪强度显著下降,表明红层泥岩填料的水稳定性差。

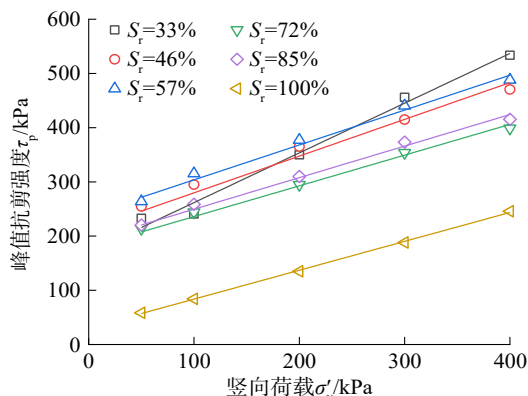


图 1 红层泥岩填料摩尔-库仑强度线

Fig. 1 Moore-Coulomb strength line of red mudstone fill material

根据摩尔-库仑强度准则确定各饱和度状态下的黏聚力和内摩擦角,干密度 γ_d 为 1.9 g/cm^3 时,黏聚力随饱和度的变化如图2所示。由图2可知,红层泥岩填料黏聚力先随着饱和度的增加呈现先增大再减小的趋势,峰值黏聚力出现于最优含水率附近,强度变化展现出典型的“山峰效应”,且黏聚力随饱和度的变化满足二次函数关系。这主要是由于随着含水率降低,气体进入土体孔隙,形成气-液弯液面,基质吸力增大,基质吸力使得相邻土颗粒接触应力增大,从而黏聚力随着含水率降低逐渐增大,直至达到黏聚力峰值。随着含水率进一步减小,弯液面数量逐渐减少,基质吸力作用面积衰减,其对抗剪强度的增益效应逐渐弱化,导致黏聚力又逐渐下降。相较于最优含水率状态下的红层泥岩填料($S_{r\text{opt}}=56.26\%$),饱和后($S_r=100\%$)红层泥岩填料黏聚力显著降低,仅有最优含水率状态时的12.5%。

图3展示了干密度为 1.9 g/cm^3 时,红层泥岩填料内摩擦角的变化。由图3可知,内摩擦角随着饱和度的增加呈幂函数下降趋势,主要归因于含水率升高导致土颗粒表面结合水膜增厚,从而对颗粒间的摩擦产生润滑效应。此外,相较于最优含水率状态,饱和红层泥岩填料内摩擦角并没有显著降低,内摩擦角依然达到了最优含

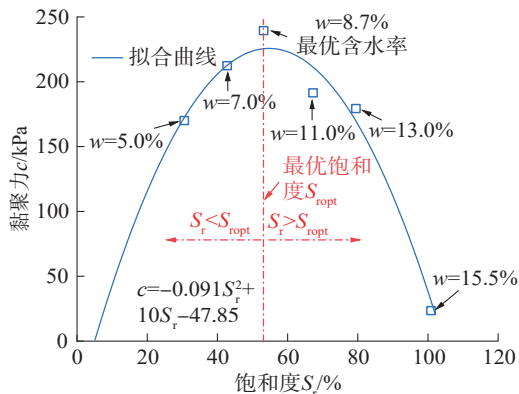


图 2 黏聚力随饱和度的变化

Fig. 2 Evolution of cohesion with degree of saturation

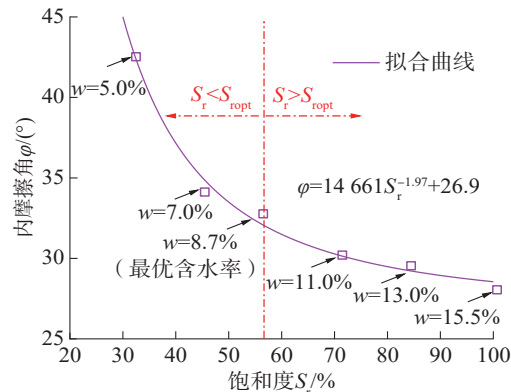


图 3 内摩擦角随饱和度的变化

Fig. 3 Evolution of internal friction angle with degree of saturation

水率状态时的86%,故红层泥岩填料在饱和后抗剪强度显著降低主要是由于黏聚力降低所致。

红层泥岩填料在最优含水率附近黏聚力达到峰值,内摩擦角在含水率小于最优含水率状态时显著增大,表明红层泥岩填料在较干状态下具有较高的抗剪强度,将其用作路基填料时,应在小于最优含水率时进行填筑,以使路基具有更高的强度。这与文献[1-3]的研究结论一致,即将红泥岩作为高速铁路路基填料时,含水量应控制在5.0%~7.0%之间(理论最优含水率为8.7%),可以获得更好的服役性能。

2.2 石灰改良红层泥岩填料强度特性

干密度为 1.9 g/cm^3 时,饱和石灰改良填料的强度如图4所示。图4中,直线为峰值抗剪强度与竖向荷载的摩尔-库仑一次拟合线。由图4可知,经石灰改良后红层泥岩填料抗剪强度显著提高。

干密度为 1.9 g/cm^3 时,饱和石灰改良填料的黏聚力随石灰掺量的变化如图5所示。由图5可知,相较于饱和红层泥岩填料的黏聚力(23.5 kPa),采用不同掺量石灰改良后黏聚力提升了6.5倍以上,且随着石灰掺量及养护时间增加,改良填料的黏聚力进一步提升。这一现象主要是由于石灰掺量越多,养护时间越

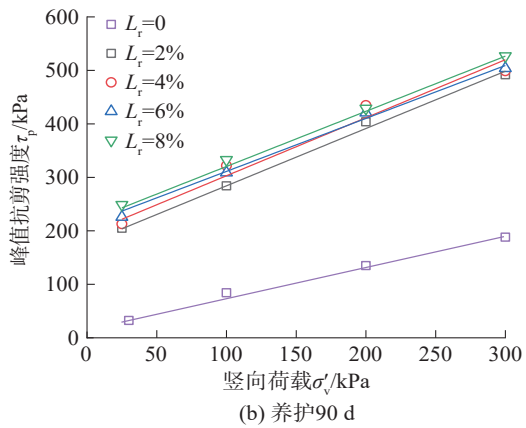
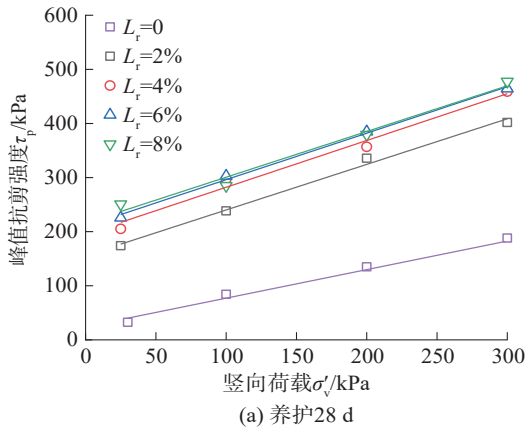


图 4 石灰改良填料摩尔-库仑强度线

Fig. 4 Moore-Coulomb strength line of lime reinforced red mudstone fill material

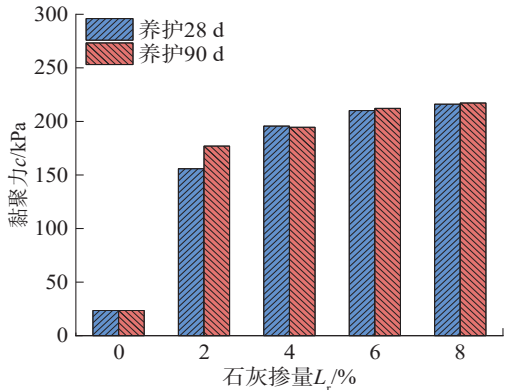


图 5 黏聚力随石灰掺量的变化

Fig. 5 Evolution of cohesion with lime content

久,石灰水化生成的胶结物越多,使得土颗粒之间的胶结作用更加牢固,从而使黏聚力随着石灰掺量的增加而增强。

干密度为 1.9 g/cm^3 时,饱和石灰改良填料的内摩擦角随掺量的变化如图 6 所示,由图 6 可知,相较于饱和红层泥岩填料的内摩擦角 (28°),采用不同掺量石灰改良后内摩擦角提升了 1.4 倍以上,且内摩擦角随着养护龄期的增加而增大。这主要是由于石灰水化产生的胶结物附着在填料颗粒表面,养护时间

越久,附着在土颗粒表面的水化产物越多,土颗粒表面越粗糙,颗粒之间的摩擦力越强,因此内摩擦角逐渐增大。

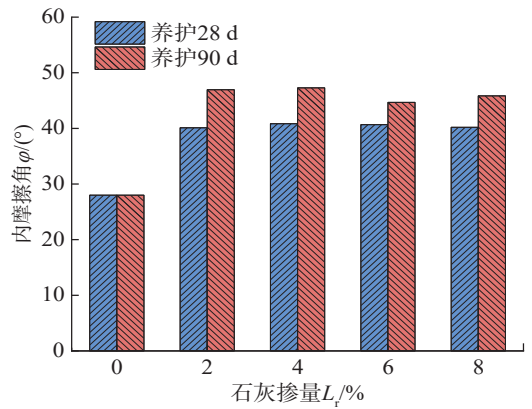


图 6 内摩擦角随石灰掺量的变化

Fig. 6 Evolution of internal friction angle with lime content

将峰值抗剪强度与残余抗剪强度的比值定义为脆性指数 I_b ^[5],干密度为 1.9 g/cm^3 时,饱和石灰改良红层泥岩填料脆性指数变化如图 7 所示。由图 7 可知,在饱和状态下,红层泥岩填料脆性指数全部为 1,峰值抗剪强度与残余抗剪强度相同,应力-位移曲线全部为硬化型,试样内部没有出现贯通裂缝,产生延性破坏。经石灰改良后,脆性指数全部大于 1,应力-位移曲线均表现为软化型,剪切破坏后出现明显的贯通裂缝,发生脆性破坏。

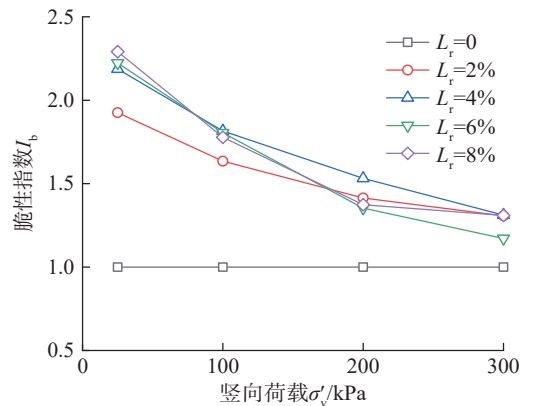


图 7 石灰改良填料脆性指数随竖向荷载的变化趋势

Fig. 7 Trend of brittleness index of lime reinforced red mudstone fill material with vertical load

图 8 展示了干密度为 1.9 g/cm^3 时,饱和石灰改良红层泥岩填料剪胀角的演变规律。从图 8 可以看出:饱和状态下的红层泥岩填料剪胀角均小于 0° ,表现为剪缩现象;石灰改良后的饱和红层泥岩填料剪胀角均大于 0° ,表现为剪胀现象,且随着石灰掺量的增加,养护龄期的增长,试样的剪胀角逐渐增大,剪切过程中剪胀变形也随之加剧。剪胀角表征破坏面与剪应力之间的夹角,剪胀角越大,表明破坏面与剪应力之间的夹

角越大,抵抗荷载的能力越强^[28],同样反映出养石灰掺量越高、护龄期越久的石灰改良填料具有越高的强度。

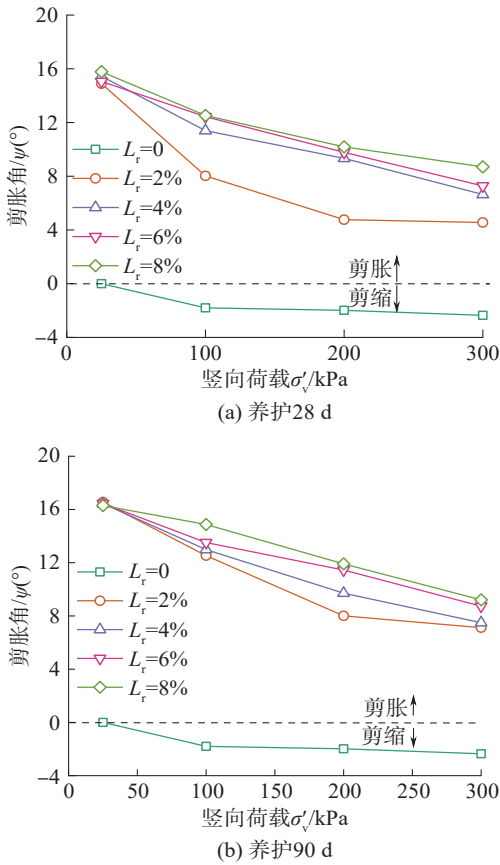


图 8 石灰改良填料剪胀角随竖向荷载的变化趋势
Fig. 8 Trend of dilatancy angle of lime reinforced red mudstone fill material with vertical load

综上所述,红层泥岩中掺入质量占比为2%的石灰后,抗剪强度及剪胀性显著提高,当掺入石灰质量占比超过4%时,黏聚力随石灰掺量增大而进一步增大的趋势并不显著,内摩擦角随着石灰掺量的变化也不明显,且掺入过多的石灰会造成工程造价的提高,故为兼顾改良效果和经济性,采用石灰改良红层泥岩填料时,可以选用4%作为石灰推荐掺量。

当采用4%石灰改良红层泥岩填料、干密度为1.9 g/cm³时,黏聚力和内摩擦角在最优含水率状态及饱和状态下的变化如图9所示。由图9可知:石灰改良可显著提高红层泥岩填料的黏聚力和内摩擦角;养护28 d后,最优含水率状态下黏聚力可提高1.36倍,内摩擦角可提高1.54倍;饱和状态下黏聚力可提高7.9倍,内摩擦角可提高1.5倍,且饱和状态下,改良红层泥岩填料抗剪强度显著高于最优含水率状态下红层泥岩填料的抗剪强度,不仅有效抑制了红层泥岩填料的水敏感性,还显著提高了红层泥岩填料的强度特性。

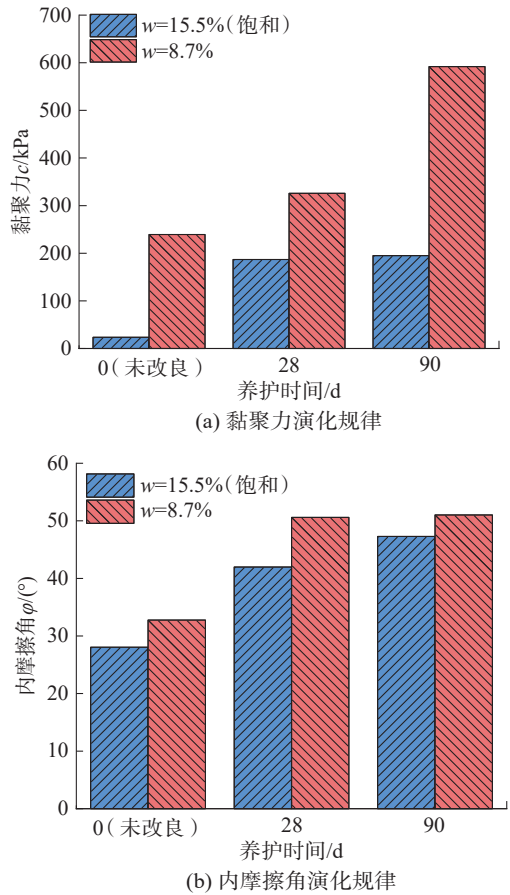


图 9 含水率对改良填料强度特性的影响

Fig. 9 Effect of water content on the strength properties of modified fill material

2.3 石灰改良红层泥岩填料机理研究

干密度为1.9 g/cm³时,在最优含水率状态和饱和状态下的红层泥岩填料孔径分布如图10所示。由图10可知:在最优含水率状态下,红层泥岩填料孔径分布呈典型的双峰结构,土体结构中存在两种孔隙,团聚体间孔隙(宏孔)及团聚体内孔隙(微孔)。

干密度为1.9 g/cm³时,最优含水率状态和饱和状态下的红层泥岩填料微观形貌如图11所示。

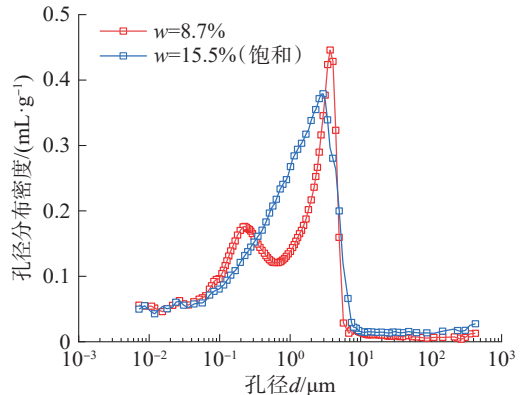


图 10 红层泥岩填料的孔径分布

Fig. 10 Pore size distribution curve of red mudstone fill material

由图 11 可知:最优含水率状态下,红层泥岩填料颗粒棱角分明,颗粒之间分布着大量的孔隙;但红层泥岩填料在饱和后发生颗粒软化,颗粒棱角消逝,颗粒间孔隙塌陷,致使孔径分布在饱和后转化为单峰结构。

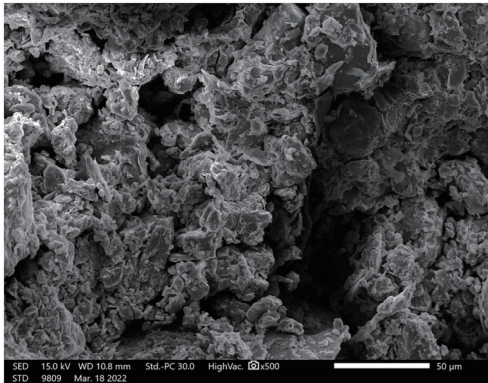
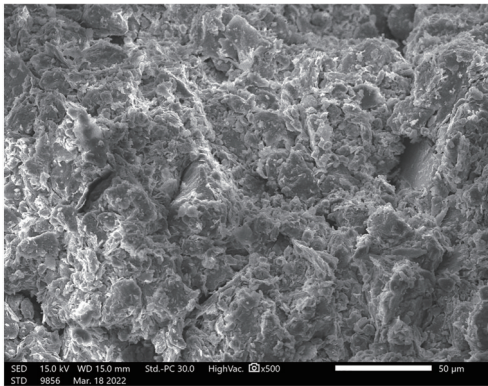
(a) $w=8.7\%$ (b) $w=15.5\%$ (饱和)

图 11 红层泥岩填料的微观形貌

Fig. 11 SEM results of red mudstone fill material

掺入质量占比为 4% 的石灰、干密度为 1.9 g/cm^3 时,不同养护时间的改良红层泥岩填料孔径分布如图 12 所示。由图 12 可知:非饱和状态下石灰改良红层泥岩填料的孔径分布呈典型的双峰结构,在饱和后石灰改良填料孔径分布依然保持为双峰结构,且内部孔隙结构与非饱和状态下相比并没有发生显著变化。随着养护龄期的增大,宏观孔隙的大小及数量并不会发生显著的变化,但微观孔隙的数量随着养护时间增加而逐渐减少,纳米孔隙($d \leq 20 \text{ nm}$)的数量逐渐增多。

图 13 展示了石灰质量比为 4%、干密度为 1.9 g/cm^3 的石灰改良填料的微观结构。由图 13 可以看出:石灰水化反应产生的水化产物紧密附着于土颗粒表面,并填充了颗粒之间的孔隙,将土颗粒紧密胶接在一起,形成 3 维网架结构,颗粒之间的孔隙被胶结物填充切割。

红层泥岩填料及改良填料的矿物成分如图 14 所示,图 14 仅对石灰改良后新产生的衍射峰进行分析。

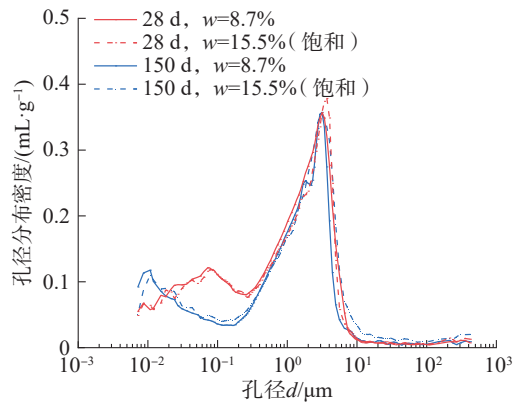
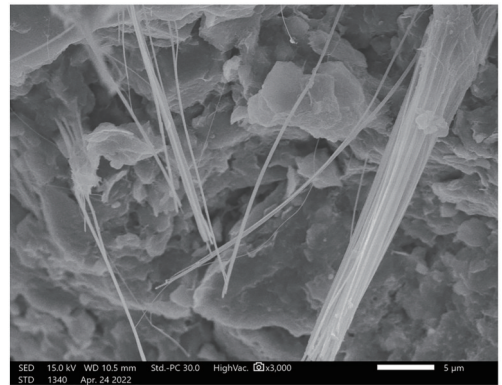
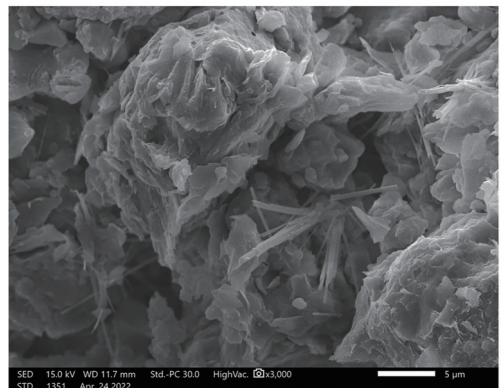


图 12 石灰改良填料孔径分布

Fig. 12 Pore size distribution of lime reinforced red mudstone fill material



(a) 3 000倍



(b) 5 000倍

图 13 石灰改良填料的微观形貌

Fig. 13 SEM images of lime reinforced red mudstone fill material

图 14 中, θ 为半衍射角,碳酸钙和水化硅铝酸钙因其峰值过大未展示波峰。由图 14 可知,掺入石灰后生成的胶结产物包含碳酸钙和水化硅铝酸钙两种。产生碳酸钙是由于石灰遇水反应后生成氢氧化钙,当其遇到空气中的二氧化碳,即发生反应生成碳酸钙,水化硅铝酸钙是由于石灰水化后形成的氢氧化钙与土体中的硅铝化合物发生反应生成的。且结合图 13 可知,石灰改良填料中生成的水化硅铝酸钙,形貌为细长针状,附着在土颗粒表面并填充土颗粒之间的孔隙。此外,

掺入石灰后,红层泥岩中的蒙脱石衍射峰消逝,表明掺入石灰后红层泥岩中的膨胀性黏土矿物被溶蚀,红层泥岩颗粒软化的主要原因是:红层泥岩中的蒙脱石遇水膨胀,导致红层泥岩颗粒崩解破碎,而蒙脱石被溶蚀后,减弱了红层泥岩颗粒的崩解,使得石灰改良红层泥岩颗粒依然能保持较完整的颗粒形貌,土颗粒之间的咬合和摩擦几乎没有降低。

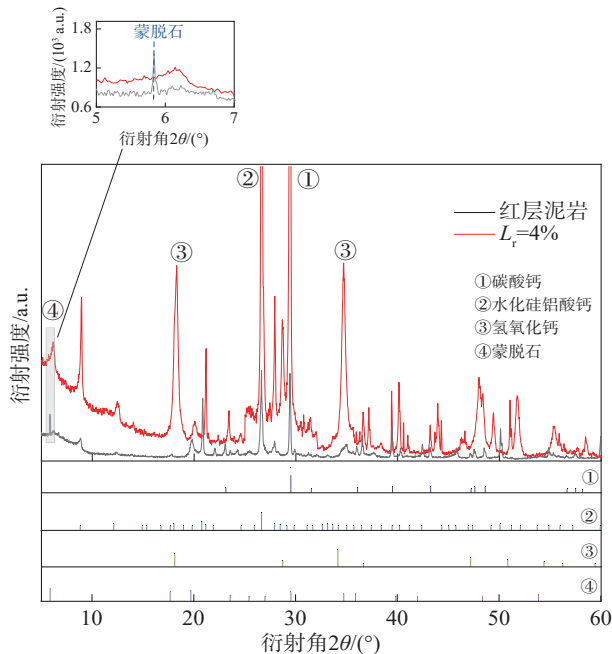


图14 红层泥岩填料及改良填料的矿物成分

Fig. 14 XRD results of red mudstone fill material and lime reinforced fill material

综上所述,红层泥岩填料在最优含水率状态下强度较高,呈团聚体结构,红层泥岩颗粒呈扁平块状,土颗粒边界粗糙,颗粒与颗粒之间咬合紧密,所以非饱和状态下红层泥岩填料强度较高。但红层泥岩填料具有较强的水敏性,饱和红层泥岩填料黏聚力仅为最优含水率状态下的13%,主要由于含有蒙脱石等膨胀性矿物,红层泥岩填料遇水后蒙脱石吸水膨胀,红层泥岩颗粒发生崩解和软化,土体孔径分布由双峰结构转变为单峰结构,团聚体结构消失,且红层泥岩遇水后土颗粒边界变得光滑,削弱了土颗粒之间的相互咬合,故使得红层泥岩在遇水后强度显著降低。石灰改良的红层泥岩填料抗剪强度显著提高,在红层泥岩填料中掺入石灰以后,一方面,石灰与红层泥岩中的化合物发生离子交换反应,将红层泥岩中的蒙脱石等膨胀性黏土矿物溶蚀,使得石灰改良红层泥岩填料在饱和状态下没有发生崩解和软化,依然能保持较完整的形貌,土颗粒之间的摩擦减弱得很少;另一方面,石灰水化生成碳酸钙及水化硅铝酸钙,生成的水化产物具有胶结能力,一部分附着在土颗粒表面胶结相邻土颗

粒,另一部分填充团聚体内部孔隙,将团聚体内部不相邻土颗粒连接在一起,养护时间越久,石灰水化生成的胶结产物越多,团聚体内部孔隙被填充得越密实,纳米孔越多,形成3维网架结构,增强了土颗粒之间的联结。

3 结论

本文从宏-微观相结合的角度,开展了不同饱和度红层泥岩填料,不同养护龄期、石灰掺量改良红层泥岩填料力学特性的试验研究,主要得到了以下结论:

1)红层泥岩填料黏聚力随着饱和度的增大呈先增大后减小的趋势,与饱和度呈二次函数关系,内摩擦角随着饱和度的增大逐渐减小,与饱和度呈幂函数关系。红层泥岩填料在饱和后抗剪强度显著降低主要是黏聚力显著降低导致的。

2)在饱和状态下,石灰改良后红层泥岩填料黏聚力可提高6.5倍以上,内摩擦角可提高1.4倍以上,显著提高了红层泥岩填料的抗剪强度,且剪切行为由未改良时的硬化-剪缩转变为改良后的软化-剪胀。

3)石灰改良填料在饱和后内部孔隙结构与非饱和状态下相比并未发生显著变化,孔径分布依然呈双峰结构,且随着养护龄期的增加,石灰改良填料中微孔的数量逐渐减少而纳米孔的数量逐渐增多。

4)经石灰改良后,红层泥岩填料颗粒形貌较完整,土体内部形成3维网架结构,增强了土颗粒之间的联结,使石灰改良填料的抗剪强度较未改良的红层泥岩填料的抗剪强度显著增大。

参考文献:

- [1] Chen Kang, Liu Xianfeng, Jiang Guanlu, et al. Experimental study on dynamic and dissipated energy behaviors of saturated red mudstone fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 571-579. [陈康, 刘先峰, 蒋关鲁, 等. 饱和红层泥岩填料动力及耗能特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 571-579.]
- [2] Wang Zhimeng, Jiang Guanlu, Wei Yongxing, et al. Experimental study of cyclic loading for subgrade bed of high speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 760-764. [王智猛, 蒋关鲁, 魏永幸, 等. 高速铁路路基现场循环加载试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 760-764.]
- [3] Ma Jie, Liu Xianfeng, Xu Jiahang, et al. Mechanical properties and influencing factors of compacted completely-weathered red mudstone filling material[J]. China Railway Science, 2023, 44(5): 1-10. [马杰, 刘先峰, 续嘉航, 等. 压实

- 全风化红层泥岩填料力学特性及其影响因素[J]. 中国铁道科学,2023,44(5):1-10.]
- [4] Chen Kang,Liu Xianfeng,Yuan Shengyang,et al.Experimental study of accumulative deformation behaviour and shakedown limit of saturated red mudstone fill material[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(5):1261-1268.[陈康,刘先峰,袁胜洋,等. 饱和红层泥岩填料累积变形特性及安定界限研究[J]. 岩土力学,2022,43(5):1261-1268.]
- [5] Liu Xianfeng, Ma Jie, Yuan Shengyang, et al. Experimental research on the influence of dry density and water content on the strength characteristics of compacted red mudstone fill material[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(10):2910-2918. [刘先峰, 马杰, 袁胜洋, 等. 干密度和含水率对压实红层泥岩路基填料强度特性的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(10):2910-2918.]
- [6] Liu Xianfeng, Pan Shenxin, Yuan Shengyang, et al. Study on stiffness softening and attenuation characteristics of compacted red mudstone[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9):2629-2636. [刘先峰, 潘申鑫, 袁胜洋, 等. 压实红层泥岩填料强度与刚度软化和衰减特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9):2629-2636.]
- [7] Liu Xianfeng, Chen Kang, Yuan Shengyang, et al. Experimental study on the small strain stiffness-strength of a fully weathered red mudstone[J]. Construction and Building Materials, 2024, 438:137058.
- [8] Zhao Yuxin, Zhang Luqian, Li Xu, et al. Unsaturated shear strength characteristics of coarse-fine mixed soils in a wide range of degree of saturation: Experimental phenomena[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11):2278-2288. [赵煜鑫, 张禄乾, 李旭, 等. 宽饱和度范围非饱和粗细混合土的强度演化规律: 试验现象[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11):2278-2288.]
- [9] Mpawenayo R, Gerard P. Accounting for the microstructure for the prediction of unsaturated shear strength of remolded fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2024, 61(2):275-290.
- [10] Kim B S, Park S W, Lohani T N, et al. Characterizing suction stress and shear strength for unsaturated geomaterials under various confining pressure conditions[J]. Transportation Geotechnics, 2022, 34:100747.
- [11] Pham T A, Sutman M. An analytical model for predicting the shear strength of unsaturated soils[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2023, 176(4):369-387.
- [12] Zhao Yuxin, Li Xu, Zhao Hongfen, et al. Evolution model of unsaturated shear strength indices over a wide range of saturation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10):2809-2820. [赵煜鑫, 李旭, 赵红芬, 等. 宽饱和度范围非饱和土抗剪强度指标的演化模型[J]. 岩土力学, 2023, 44(10):2809-2820.]
- [13] Sun Dean, Xu Qianlei, Chen Bo, et al. Mechanical behavior of unsaturated intact loess over a wide suction range[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9):1586-1592. [孙德安, 徐钱垒, 陈波, 等. 广吸力范围内非饱和原状黄土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9):1586-1592.]
- [14] Phanikumar B R, Ramanjaneya Raju E. Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilised with lime sludge and cement[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(1):129-138.
- [15] Ghavam Shirazi S, Bilsel H. Characterization of volume change and strength behavior of micro-silica and lime-stabilized Cyprus clay[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(3):827-840.
- [16] Maubec N, Deneele D, Ouvrard G. Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material[J]. Applied Clay Science, 2017, 137:107-114.
- [17] Nan Jiyun, Liu Jiankun, Chang Dan, et al. Mechanical characteristics and microstructure study of saline soil stabilized by quicklime after curing and freeze-thaw cycle [J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 201:103625.
- [18] Das G, Razakamanantsoa A, Herrier G, et al. Compressive strength and microstructure evolution of lime-treated silty soil subjected to kneading action[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 29:100568.
- [19] Zhu Yanbo, Yu Hongming, Yang Yanxia, et al. Indoor experimental research on characteristics of improved red-mudstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2):425-432. [祝艳波, 余宏明, 杨艳霞, 等. 红层泥岩改良土特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2):425-432.]
- [20] Zhang Xiwei, Mavroulidou M, Gunn M J. A study of the water retention curve of lime-treated London Clay[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(1):23-45.

- [21] Wang Yejiao, Duc M, Cui Yujun, et al. Aggregate size effect on the development of cementitious compounds in a lime-treated soil during curing[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 136:58–66.
- [22] Ying Zi, Cui Yujun, Benahmed N, et al. Changes in microstructure and water retention property of a lime-treated saline soil during curing[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(1): 319–326.
- [23] Wang Yejiao, Cui Yujun, Benahmed N, et al. Changes of small strain shear modulus and suction for a lime-treated silt during curing[J]. *Géotechnique*, 2020, 70(3):276–280.
- [24] Wang Yejiao, Cui Yujun, Tang A M, et al. Effects of aggregate size on water retention capacity and microstructure of lime-treated silty soil[J]. *Géotechnique Letters*, 2015, 5(4): 269–274.
- [25] Tran T D, Cui Yujun, Tang A M, et al. Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Héricourt clay[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(5):399–404.
- [26] Liang Zhichao, Zhang Aijun, Ren Wenyuan, et al. Fitting model for soil water characteristics of lime-improved loess and its microscopic properties[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(Supp1):241–246. [梁志超, 张爱军, 任文渊, 等. 石灰改良黄土土水特征拟合模型及微观特性[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(增刊1):241–246.]
- [27] Rosone M, Celauro C, Ferrari A. Microstructure and shear strength evolution of a lime-treated clay for use in road construction[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020, 21(9):1147–1158.
- [28] Ma Jie, Liu Xianfeng, Yuan Shengyang, et al. Multi-scale investigation on curing time effect of lime stabilized red mudstone as fill material for high-speed railway subgrade [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 443:137749.
- [29] Wang Zhimeng. Study on applicability and technology for filling subgrade using red-mudstone and improved soil in high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. [王智猛. 红层泥岩及其改良土填筑高速铁路路基适应性及工程技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.]
- [30] Liu Xianfeng, Buzzi O, Yuan Shengyang, et al. Multi-scale characterization of retention and shrinkage behaviour of four Australian clayey soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(5):854–870.
- [31] Yuan Shengyang, Liu Xianfeng, Romero E, et al. Discussion on the separation of macropores and micropores in a compacted expansive clay[J]. *Géotechnique Letters*, 2020, 10(3): 454–460.

Strength Characteristics of Red Mudstone Fill Material and the Effect of Lime Modification

KONG Kunfeng^{1,2}, MA Jie^{3,4}, YUAN Shengyang^{3,4*}, XU Jiahang^{4,5}, CHEN Feng^{1,2}, LIU Xianfeng^{3,4}

(1. National Engineering Research Center of System Technology for High-speed Railway and Urban Rail Transit, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

4. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

5. Leeds Joint School, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract:

Objective Red mudstone, a prevalent geological material in China, is frequently encountered during slope excavation and tunnel construction projects. These activities inevitably produce substantial amounts of red mudstone waste, creating significant challenges for disposal and environmental management. In addition, red mudstone waste exhibits high susceptibility to weathering, fragmentation, and water-induced disintegration and softening, which limits its engineering applications. Currently, it primarily serves as subgrade fill material. If red mudstone waste is improved for use as subgrade fill material, it reduces waste generation, expands application scenarios, and contributes to waste reduction, pollution control, and resource efficiency.

Methods This study investigated the shear strength characteristics of red mudstone fill material and lime-stabilized fill material, and analyzed the influence of the degree of saturation on the strength properties of red mudstone fill. The effects of lime content and curing age on the strength characteristics and dilatancy behavior of stabilized fill were clarified. In addition, scanning electron microscopy (SEM), mercury intrusion porosimetry (MIP), and X-ray diffraction (XRD) tests were conducted to reveal the stabilization mechanisms of lime-stabilized red mudstone fill material at the microscopic level.

Results and Discussions The experimental results indicated that the cohesion of red mudstone fill material initially increased with the degree of saturation but then decreased, and reached its peak near the optimum water content. This strength variation demonstrated a typical “peak effect” in which cohesion followed a quadratic function relationship with degree of saturation, while the internal friction angle decreased based on a power function. The cohesion of red mudstone fill material reached its maximum near the optimum water content, whereas the internal friction angle significantly increased under drier conditions, which indicated that red mudstone fill material achieved higher shear strength in a relatively dry state. Compared to the fill material at its optimum water content, the cohesion of saturated red mudstone fill material significantly decreased to only 12.5% of its peak value, while the internal friction angle remained at 86% of its optimum state, which indicated that the substantial reduction in shear strength after saturation was primarily attributed to cohesion loss. Drainage and waterproofing measures should be emphasized in red mudstone subgrade construction to mitigate water-induced softening and excessive settlement. After lime stabilization, the cohesion of saturated red mudstone fill increased by more than 6.5 times, and the internal friction angle increased by over 1.4 times, which significantly enhanced the shear strength. In addition, the shear behavior transitioned from strain hardening and shear contraction in untreated samples to strain softening and shear dilation in lime-stabilized samples. The pore structure of lime-stabilized fill remained essentially unchanged after saturation compared to the unsaturated state, and retained a bimodal distribution. With increasing curing age, the proportion of micropores decreased, while nanopores became more prevalent. In addition, lime treatment maintained the particle integrity of red mudstone fill material and formed a three-dimensional interlocking framework that strengthened interparticle bonding, markedly improving shear strength compared to untreated red mudstone fill material.

Conclusions The findings of this study provide theoretical guidance for the design, construction, and engineering application of improved red mudstone subgrades and further raise the resource utilization of red mudstone waste in high-speed railway construction.

Key words: high speed railway; subgrade fill material:red mudstone; lime reinforcement; microstructure

(编辑 吴芝明)

引用格式: kong Kunfeng, Ma Jie, Yuan Shengyang, et al. Strength characteristics of red mudstone fill material and the effect of lime modification[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(1): 111–120. [孔坤锋, 马杰, 袁胜洋, 等. 红层泥岩填料强度特性及石灰改良效果研究[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(1): 111–120.]