

# 千枚岩填料力学特性与改良技术研究综述

蒋毅<sup>1</sup>, 唐丙秋<sup>2</sup>, 李合兴<sup>2</sup>, 薛明<sup>2</sup>, 涂家弘<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>湖南省茶江高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙

<sup>2</sup>湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙

<sup>3</sup>中南大学土木工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月18日; 发布日期: 2026年2月28日

## 摘要

千枚岩作为一种广泛分布的变质岩, 储量丰富, 常被考虑用于公路与铁路路基填筑。然而, 其压实难度大、抗剪强度低、水稳定性差等工程缺陷, 限制了其直接作为路基填料的可行性。本文阐述千枚岩作为路基填料的基本物理力学特性、水稳定性与动力响应规律, 梳理其化学改良、物理改良及复合改良等主流技术的国内外研究进展, 分析不同改良方案的作用机理、技术优势与适用条件。总结千枚岩改良土的微观结构演化规律与长期稳定性影响因素。指出当前研究中存在的不足, 并对未来研究方向进行展望, 以期千枚岩在路基工程中的安全高效利用提供理论参考与技术支撑。

## 关键词

千枚岩, 路基填料, 力学特性, 改良技术, 长期稳定性

# The Review on the Mechanical Properties and Improvement Techniques of Phyllite Filling Materials

Yi Jiang<sup>1</sup>, Bingqiu Tang<sup>2</sup>, Hexing Li<sup>2</sup>, Ming Xue<sup>2</sup>, Jiahong Tu<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Hunan Chajiang Expressway Construction and Development Co., Ltd., Changsha Hunan

<sup>2</sup>Hunan Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Changsha Hunan

<sup>3</sup>School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan

Received: January 27, 2026; accepted: February 18, 2026; published: February 28, 2026

## Abstract

Phyllite, a widely distributed metamorphic rock with abundant reserves, is often considered for use

\*通讯作者。

文章引用: 蒋毅, 唐丙秋, 李合兴, 薛明, 涂家弘. 千枚岩填料力学特性与改良技术研究综述[J]. 土木工程, 2026, 15(2): 256-265. DOI: 10.12677/hjce.2026.152046

in highway and railway roadbed filling. However, its engineering drawbacks—such as difficulty in compaction, low shear strength, and poor water stability—limit its feasibility as a direct filler material. This paper reviews the fundamental physical and mechanical properties of phyllite as a roadbed filler, along with its water stability and dynamic response characteristics. It summarizes research progress, both domestically and internationally, on mainstream improvement techniques including chemical, physical, and composite modifications. The mechanisms, advantages, and applicable conditions of different improvement methods are analyzed. Furthermore, the evolution of the microstructure and factors influencing the long-term stability of improved phyllite soil are discussed. The paper also identifies current research gaps and suggests directions for future study, aiming to provide theoretical reference and technical support for the safe and efficient use of phyllite in roadbed engineering.

## Keywords

Phyllite, Roadbed Filling, Mechanical Properties, Improvement Techniques, Long-Term Stability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

为实现千枚岩的工程资源化利用，众多学者针对其力学特性与改良技术开展了大量系统性研究。受试验条件、研究技术手段等因素的显著，已有研究成果主要聚焦于千枚岩的基本物理性质与压实特性，即：通过室内基础试验确定其最优含水率、最大干密度等关键参数，分析不同压实工艺对填料密实度的提升效果，厘清千枚岩的压实特性与路用性能。随着岩土力学试验技术和微观测试手段的发展，为深入探究千枚岩的水稳定性演化规律、动力荷载下的响应特征及性能劣化的微观作用机理创造了有力条件。同时，千枚岩的改良技术也从单一的化学掺料或物理级配调整，向多技术协同的复合改良方向转型，且技术体系日趋成熟完善。本文通过整合近年来千枚岩路基填料领域的相关研究成果，剖析其力学特性的内在制约因素与演化规律，梳理各类改良技术的研究现状、适配场景与应用效果，旨在为千枚岩路基的设计优化、施工管控与长期运维提供实用的参考价值。

## 2. 千枚岩路基填料基本力学特性

### 2.1. 物理性质与压实特性

千枚岩的物理性质由其变质成因与风化程度决定，直接主导其压实性能与路用适配性。天然千枚岩多经历区域变质与后期风化作用，颗粒呈典型的板状或片状形态，颗粒长径比大且级配离散性强。表 1 与图 1 为长沙市茶绕高速沿线的典型千枚岩混合填料颗粒级配试验结果。土样的不均匀系数  $C_u$  为 48.45，曲率系数  $C_c$  为 0.81，不满足不均匀系数需大于 5 且曲率系数  $C_c$  在 1~3 之间的要求，属于级配不良土，且千枚岩颗粒变异离散型较大。此外，部分未强风化的千枚岩填料虽级配曲线连续，但因片状颗粒间黏结力微弱且易形成架空结构，常规碾压工艺下压实度难以突破 90%，显著低于普通碎石土的压实水平。

千枚岩填料的压实特性受含石率与含水率影响显著。图 2 为长沙市茶绕高速部分路段千枚岩混合填料的典型击实特征曲线，结果表明，千枚岩填料的干密度受含水率影响较大，在施工压实时应将填料含水率控制在最佳含水率附近。李健等[1]通过击实试验发现，千枚岩填料的含石率达到 55% 时，其最大干密度达到峰值  $2.358 \text{ g/cm}^3$ ，为最佳级配。含石率过高会导致颗粒间空隙增大，压实效果下降；含石率过



著。蒲超等[3]通过三轴压缩试验发现,千枚岩的抗剪强度与围压呈显著正相关,最大主应力随围压增大线性增长;在低围压下呈张-剪复合型破坏模式,当围压大于 10 MPa 时转变为沿节理面滑动的剪切破坏,破裂面完全贯通且断面平整,体现出围压对剪切破坏形态的调控作用。

千枚岩的抗剪强度还与风化程度密切相关。强风化千枚岩因颗粒破碎严重,黏聚力仅为弱风化千枚岩的 60%~70%,且剪切过程中易发生颗粒滑移,表现出应变软化特性。赵秀绍等[4]的研究表明,千枚岩与红黏土混合后,红黏土的细颗粒可填充千枚岩颗粒间隙,增加颗粒间点面接触,使混合土的黏聚力提升至 45~60 kPa,内摩擦角保持在 40°以上,抗剪强度显著改善。

此外,一些学者通过单轴压缩试验揭示了千枚岩的力学性能关联规律[5]:其峰值应力区间分布在 70~105 MPa,且存在明显的性能正相关关系,即弹性模量越大,峰值应力越高,对应的应力-应变曲线也越陡峭,岩体的脆性特征就越突出。千枚岩在单轴加载下的破坏形式以竖向拉伸破坏和 Y 型剪切破坏为主,仅少数表现为 X 状斜面剪切破坏,从微观层面分析,其破坏本质是颗粒间发生错动而引发的拉伸损伤。通过 PFC3D 数值模拟验证发现,千枚岩弹性模量与峰值强度的模拟值和室内试验实测值吻合度较高,裂隙扩展形态也与实际破坏特征基本一致,这一模拟手段可有效揭示千枚岩强度特性与破坏行为的内在关联。

### 2.3. 水稳定性与崩解特性

千枚岩中含有的蒙脱石、绿泥石等亲水矿物,遇水后会膨胀,导致颗粒间联结力丧失,产生崩解现象,因此水稳定性差是千枚岩作为路基填料的主要瓶颈。对千枚岩填料的干湿循环试验表明,其崩解量随循环次数增加呈线性递增趋势,耐崩解性逐渐降低;浸水 48 h 后,千枚岩的单轴抗压强度可下降 50%以上,软化系数小于 0.52,属于劣质软岩[6]。

另外,千枚岩的崩解特性与颗粒级配、含水率密切相关。通常,填料中粒径小于 0.075 mm 的细颗粒含量越高,土体的崩解速率越快;在千枚岩填料在最优含水率附近崩解率最低,而含水率过高或过低都会加剧崩解。有研究发现[7],纯千枚岩在浸水 10 min 内即可完全崩解,而掺入 3%水泥后,崩解速率降低至原来的 1%,水稳定性显著提升。对于千枚岩土石混合料,其崩解时间可缩短至 4~5 min,水稳定性更差,长沙市茶绕高速部分路段千枚岩混合料的崩解特性试验结果如图 3 与图 4 所示。

### 2.4. 动力响应特性

路基在运营过程中承受车辆循环荷载作用,其动力响应特性直接影响长期稳定性。千枚岩的动力特性主要表现为累积塑性应变、弹性应变及滞回特性。未改良千枚岩在振动次数达到 600~800 次后,总应变超过 15%,达到破坏条件;而掺入水泥后,累积应变可控制在 1%以内,表现出良好的动力特性[8]。

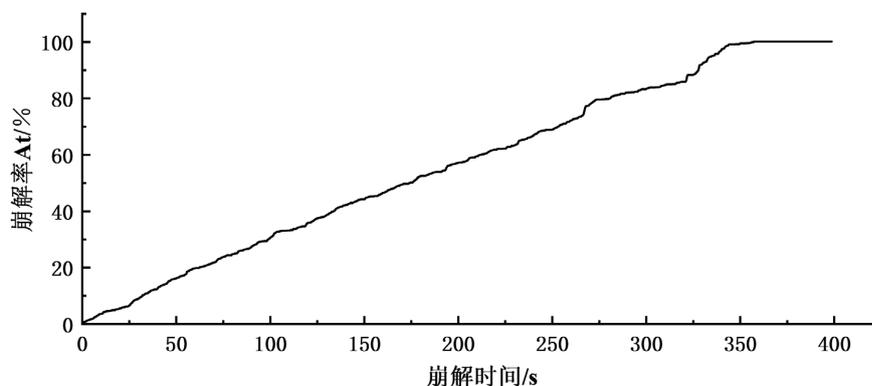


Figure 3. Collapse ratio curve of phyllite soil rock mixture  
图 3. 千枚岩土石混合料崩解率曲线

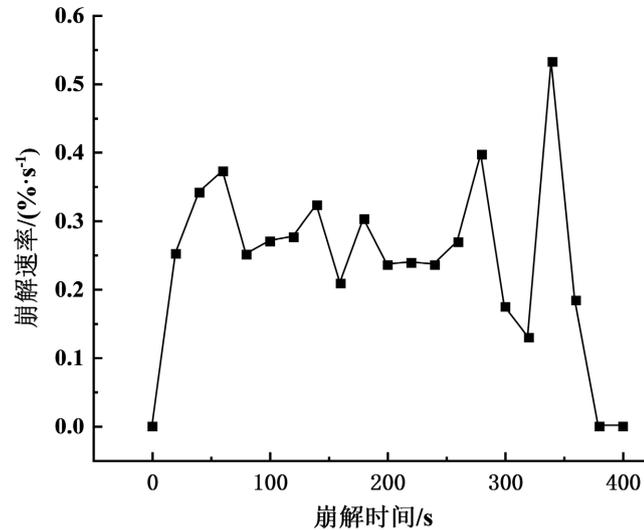


Figure 4. Collapse rate curve of phyllite soil rock mixture  
图 4. 千枚岩土石混合料崩解速率曲线

另外,千枚岩的动力响应受荷载频率、围压等因素影响。循环荷载频率为 2 Hz 时,千枚岩的累积塑性应变增长速率最快;围压增大可抑制颗粒滑移,减少累积变形,表现在其动弹性模量显著增大。此外,千枚岩的滞回圈形状随振动次数演化,从初始的不规则图形逐渐向柳叶形过渡,体现了土体的密实化过程。

## 2.5. 本节小结

千枚岩填料力学特性受自身结构与环境影响显著,核心缺陷集中于压实、强度与稳定性三方面。物理层面,其颗粒多呈片状,级配差异大,天然状态下易形成架空结构,常规碾压难以密实,需通过调控含石率或优化压实工艺改善;抗剪强度随含水率升高与风化程度加剧而降低,水浸会削弱颗粒间胶结力,与红黏土等材料混合可通过颗粒填充提升强度;水稳定性是关键短板,亲水矿物遇水易膨胀崩解,干湿循环会持续加剧这一问题;动力响应上,未改良千枚岩承受循环荷载时易产生累积变形,抗动载能力较弱,围压增大或改良处理可有效缓解。

## 3. 千枚岩路基填料改良技术研究进展

### 3.1. 化学改良技术

化学改良是通过掺入无机或有机结合料,改变千枚岩填料的物理化学性质,提升其工程性能,是目前应用最广泛的改良方式。

#### 3.1.1. 水泥改良

水泥作为常用的无机结合料,通过水化反应生成胶结物质,增强颗粒间联结。研究表明,水泥掺量 3%~5%时改良效果最佳:毛雪松等[9]运用水泥进行千枚岩填料改良,发现 3%水泥掺量可使千枚岩的回弹模量线性增大,现场挠度减小;方鹏等[10]对比了 3%、4%、5%三种掺量下千枚岩填料的改良效果,发现掺入 4%、5%水泥后,千枚岩填料的 CBR 显著提高,并且确定对千枚岩填料掺加 4%水泥的改良方案经济更合理。

水泥改良的核心机理在于水化反应与火山灰效应的协同作用。当水泥掺量为 3%~5%时,其水化生成的钙硅酸盐水化物(CSH)与水化铝酸钙(CAH)可在千枚岩颗粒表面形成胶结膜,填充颗粒间隙并构建连续

胶结网络；同时，水化产生的氢氧化钙为千枚岩中活性  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  提供碱性环境，激发火山灰反应，生成额外胶结物质，进一步提升土体整体性。

### 3.1.2. 石灰改良

石灰改良千枚岩的核心作用是离子交换与火山灰反应。石灰与千枚岩颗粒表面的阳离子发生交换，降低颗粒亲水性，促进颗粒团聚；同时，石灰水化生成的氢氧化钙与千枚岩中的二氧化硅、氧化铝反应，生成水化硅酸钙和水化铝酸钙，提升强度与水稳定性。

赵秀绍等[11]的试验表明，石灰改良千枚岩的最佳掺量为 3%，此时填料的自由膨胀率可从 12% 降至 5% 以下，水稳定性大幅改善；当掺量超过 3% 时，改良效果增幅不足 5%，且会因石灰消解不完全导致后期体积膨胀风险。需注意的是，石灰改良的早期强度较低，7 d 强度仅为 28 d 强度的 40%~50%，需保证不少于 7 d 的保湿养护期，待火山灰反应充分后才能发挥设计强度，因此适用于下路堤等对早期强度要求不高的填筑部位。

## 3.2. 物理改良技术

物理改良通过调整千枚岩的颗粒级配或压实工艺，改善其密实度与结构稳定性，具有环保、成本低的优势。

### 3.2.1. 颗粒级配调整

通过掺入粗颗粒材料(如碎石、砾石)或细颗粒材料(如红黏土、粉质土)，优化千枚岩的级配组成。例如在千枚岩中掺入的红黏土后，颗粒间隙得到有效填充，压实度得到显著提高；魏佩顺的研究[12]表明，含石率 55% 的千枚岩级配最为合理，此时改良土的压实性能与抗剪强度最优。颗粒级配调整的关键是使填料形成密实的骨架结构，减少空隙率，提升抗变形能力。

### 3.2.2. 压实工艺优化

合理的压实工艺是保证千枚岩路基压实质量的关键。可选用“羊角碾 + 重型振动压路机”组合设备：羊角碾利用突出碾轮的集中压力(可达 1400~7000 kPa)，进行片状颗粒破碎、打破架空结构；26t 级重型振动压路机则通过高频振动(2~4 Hz)促进细颗粒填充间隙，提升密实度，二者协同解决千枚岩“难破碎、难密实”问题[13]。

## 3.3. 复合改良技术

复合改良结合化学改良与物理改良的优势，通过多种改良剂或技术的协同作用，全面提升千枚岩的工程性能，是近年来的研究热点。

### 3.3.1. 水泥 - 红黏土复合改良

赵林浩等[8]的循环荷载试验表明，水泥可通过胶结作用降低千枚岩的累积塑性应变，红黏土可通过颗粒填充与塑性变形改善土体弹性应变，二者最佳配比为红黏土掺和比 40%~60% + 水泥掺量 3%~5%，此时改良土在 600 次循环荷载后的累积应变 < 1%，滞回圈面积最小，刚度与韧性达到最优平衡。其作用机理为红黏土填充千枚岩孔隙，水泥胶结形成三维骨架，共同抵御荷载变形与水分侵蚀，适用于对长期稳定性要求高的路基核心部位。

### 3.3.2. 石灰 - 红黏土复合改良

石灰与红黏土复合改良千枚岩可有效抑制胀缩变形。通过加入 5% 石灰 + 40% 红黏土对千枚岩填料进行复合改良，其自由膨胀率从 12% 降至 2% 以下，干湿循环后的强度衰减率小于 15%，显著优于单一改

良方案[11]。石灰的离子交换作用与红黏土的颗粒填充作用相结合，既改善了千枚岩的水敏性，又提升了密实度。

### 3.3.3. 其他复合改良方案

微生物改良、纤维增强等新型技术也逐步应用于千枚岩复合改良。李玉婷等[14]采用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术改良强风化千枚岩,通过微生物代谢生成碳酸钙胶结颗粒,使千枚岩的黏聚力提升 50% 以上;纤维增强改良则通过掺入聚丙烯纤维,抑制千枚岩改良土的裂隙发育,提升韧性与抗裂性能。

## 3.4. 本节小结

千枚岩改良已形成多技术路径体系,各有侧重与优势。化学改良中,水泥通过水化生成胶结网络提升强度,石灰借助离子交换改善水敏性,均需控制最佳掺量;物理改良聚焦级配调整与压实工艺,掺加颗粒材料优化级配、采用专用压实设备打破架空结构,环保且成本低;复合改良是研究热点,水泥-红黏土、石灰-红黏土等组合可协同优化多项性能,微生物改良、纤维增强等新型技术则通过创新机理为改良提供新方向,各类技术均围绕优化颗粒联结与抑制水敏性展开。

## 4. 千枚岩改良土微观机理与长期稳定性

### 4.1. 微观结构演化特征

微观结构是千枚岩改良土宏观性能的内在决定因素。通过扫描电子显微镜(SEM)与 X 射线衍射(XRD)分析发现,长沙市茶绕高速部分路段千枚岩颗粒呈片状松散堆积,孔隙率较高,主要矿物成分为石英、高岭石与绿泥石,其微观电镜图片如图 5 所示。掺入水泥后,水化产物 CSH 与 CAH 在颗粒表面形成胶结膜,填充孔隙,使颗粒联结从点接触转变为面接触,形成致密结构。

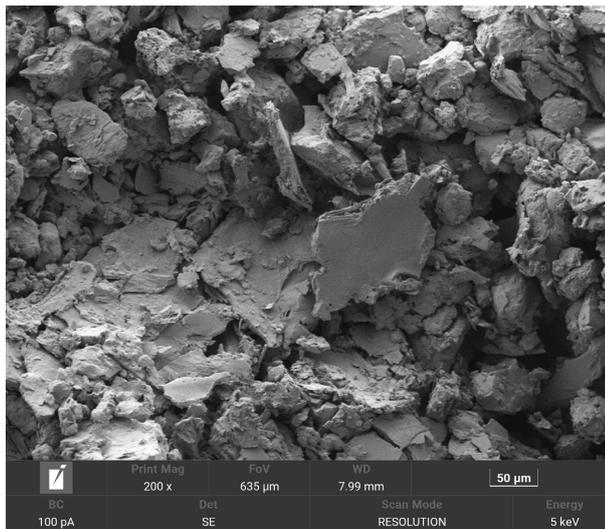


Figure 5. SEM image of phyllite

图 5. 千枚岩 SEM 图像

红黏土的掺入可改变千枚岩的矿物组成,降低绿泥石、伊利石等亲水矿物的相对含量,增加颗粒间的点面接触,减少架空孔隙。试验表明[7],红黏土掺和比 60%时,千枚岩中高岭石的峰值显著降低,改良土的抗水软化能力大幅提升。水泥与红黏土复合改良时,胶结物质分布更均匀,孔隙填充效果更佳,微观结构更稳定。

部分学者[15]揭示了千枚岩微观结构的损伤演化路径,其结果发现天然状态下的千枚岩颗粒连接紧密,微观结构完整性较好;经历循环加卸载作用后,其内部会萌生晶间裂纹、穿晶裂纹及次生孔隙,这些裂隙会为后续干湿循环中水分的侵入提供通道;经过多次干湿循环后,绿泥石等黏土矿物的反复胀缩会促使裂纹进一步扩展,同时引发可溶性矿物的溶蚀,导致颗粒边界逐渐光滑,微观结构从致密状态转为松散状态。

初始损伤的累积会改变千枚岩的破裂模式:低损伤状态下,千枚岩主要沿节理方向发生张拉破裂;高损伤状态下,内部微裂纹数量激增,剪切破裂特征凸显,宏观上表现为千枚岩层内多条次级裂纹发育,并可贯通至变质砂岩层形成张拉主裂纹,最终引发岩体的整体失稳。

## 4.2. 长期稳定性影响因素

千枚岩改良土的长期稳定性受环境因素与荷载条件共同影响。干湿循环与冻融循环会导致改良土强度衰减,具体呈现“先增后减”特征。殷剑亮[16]对水泥改良土进行了最高12次干湿循环试验,发现第3次循环时粘聚力达到峰值,第12次循环时降至最低,最大折减系数达20.2%。核心原因是初期循环中,铁、锰质胶结物质被淋滤至裂缝中实现颗粒再胶结,多次循环后胶结物质流失导致粘聚力衰减。循环荷载作用下,改良土的累积塑性应变随荷载次数增加呈先快后慢的增长趋势,3年内的沉降量约占总沉降量的70% [11]。

养护龄期对千枚岩改良土的长期性能至关重要。养护7d内,水泥改良土的强度增长迅速,达到28d强度的75%~89%;养护28d后,强度增长趋缓,此时水化反应基本完成,胶结结构趋于稳定[9]。此外,路基深度、围压大小等也会影响改良土的长期稳定性,路基深度0.5m处的改良土受动应力影响最大,需重点强化改良。

此外,温度场变化也会对千枚岩的稳定性造成影响。王连华的研究[17]指出水-温循环耦合作用会显著加剧千枚岩动力学性能劣化,对其长期动态服役稳定性构成突出威胁。随水-温循环次数增加,千枚岩的动态应力-应变曲线的极速弹性阶段逐步缩短,屈服阶段应变增长率持续攀升,动态峰值抗拉强度呈负指数规律衰减,且水-温耦合工况下的强度降幅明显高于单一温度自然降温工况。其中温度循环冷水降温工况对千枚岩的强度影响最为显著,凸显了水-温耦合的强劣化效应。

## 4.3. 本节小结

千枚岩改良土宏观性能提升源于微观结构优化,天然千枚岩松散的片状堆积经改良后,通过胶结物填充孔隙、降低亲水矿物占比,实现颗粒接触状态与结构致密性改善。长期稳定性受环境与荷载耦合作用明显,干湿、冻融循环会导致强度衰减,循环荷载下累积变形呈“先快后慢”趋势;养护龄期决定改良效果发挥,充分养护可确保胶结结构稳定;路基不同深度受动应力影响不同,特定区域需强化改良,以保障长期服役性能。同时水-温耦合会加剧千枚岩动态拉伸性能劣化,工程中需兼顾其动态稳定性防护。

## 5. 改良方法比选

结合以上对千枚岩填料改良方法的相关论述,从强度增长率、水稳系数提升、施工难度、经济成本、环境效益等多个维度,对水泥、石灰、物理改良及复合改良进行定性评级,比选结果如表2所示。

## 6. 研究不足与展望

### 6.1. 现有研究不足

尽管千枚岩路基填料的力学特性与改良技术研究已取得显著进展,但仍存在以下不足:

- (1) 对复杂环境条件，如对高温高湿、冻融交替条件，千枚岩改良土的长期性能研究不足，试验模拟与实际工程场景存在差距；
- (2) 改良机理的微观研究不够深入，对不同改良剂之间的协同作用机制尚未完全明确；
- (3) 缺乏统一的千枚岩改良土性能评价标准，不同研究的试验条件与评价指标不一致，难以进行横向对比；
- (4) 现场应用技术不够成熟，改良效果的现场检测与长期监测数据匮乏。

**Table 2.** Comparison table of phyllite improvement methods

**表 2.** 千枚岩改良方法比选表

改良技术类型	强度增长率	水稳系数提升	施工难度	经济成本	环境效益
水泥改良	高	高	中等	中等	中等
石灰改良	中等	中等	中等	较低	中等
水泥-红黏土复合改良	高	高	较高	中等	中等
石灰-红黏土复合改良	中等	高	较高	较低	较高
微生物/纤维增强复合改良	中等	中等	较高	较高	高
物理改良	低	低	低	低	高

\*其中复合改良施工难度较高是因其需要精准控制配比与分层压实。

## 6.2. 相关研究展望

针对现有研究不足，未来可从以下方面开展深入研究：

- (1) 强化复杂环境耦合作用下的试验研究，模拟干湿-冻融-循环荷载耦合工况，揭示千枚岩改良土的长期演化规律；
- (2) 结合微观试验与数值模拟，深入分析改良剂与千枚岩颗粒的相互作用机制，建立基于微观损伤的本构模型；
- (3) 制定千枚岩改良土的技术标准与施工规范，统一评价指标与检测方法；
- (4) 开发新型高效改良剂与改良技术，如纳米材料改良、生物酶改良等，提升改良效果并降低成本；
- (5) 开发针对千枚岩的专用液态固化剂，使改良范围更加均匀；
- (6) 加强现场试验与长期监测，积累工程应用数据，优化改良方案与施工工艺。

## 7. 结论

千枚岩作为储量丰富且具备工程资源化利用潜力的路基填料，其力学特性与改良技术的研究对交通基建领域具有重要实践价值。天然千枚岩因自身结构与矿物特性，存在压实难度大、抗剪强度低、水稳性差、动力响应敏感等固有缺陷，直接填筑无法满足路基工程的路用要求，易引发沉降、失稳等病害。

通过各类改良技术可有效改善千枚岩的工程性能：化学改良中，3%~5%水泥掺量能借助水化与火山灰效应提升强度，3%石灰掺量可降低水敏性；物理改良通过优化级配与压实工艺，能打破架空结构、提升密实度；复合改良技术中，水泥-红黏土复合改良因协同效果显著成为优选方案，微生物胶结等新型技术则为绿色改良提供了新方向。

千枚岩改良土的性能提升源于微观结构优化，即颗粒联结增强、孔隙填充密实、亲水矿物占比降低。其长期稳定性受环境与荷载耦合作用影响较大，需通过合理改良方案与养护工艺保障。未来研究应聚焦

复杂环境下的长期性能、微观改良机理及标准化体系, 推动千枚岩在路基工程中的规模化高效应用, 实现资源节约与工程安全的双赢局面。

## 参考文献

- [1] 李健. 改良千枚岩填料路基沉降特性研究[D]: [硕士学位论文]. 长安: 长安大学, 2018.
- [2] 饶桐, 梁庆国, 常伟学. 高速公路路基千枚岩填料性能研究[J]. 路基工程, 2025(6): 52-56.
- [3] 蒲超, 孟陆波, 李天斌. 三轴压缩条件下千枚岩破裂与能量特征研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 359-366.
- [4] 赵秀绍, 付智涛, 耿大新, 等. 千枚岩土-红黏土混合土抗剪强度试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(8): 120-126.
- [5] 黄丹, 许庆梅. 千枚岩力学特性与破坏特征研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(4): 57-62.
- [6] 卢世杰, 蒋亚军, 杜红军, 等. 千枚岩用于高速公路路基填料的适用性研究[J]. 路基工程, 2017(4): 87-91.
- [7] 王梓尧. 千枚岩土复合改良土长期稳定性试验及适用性研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
- [8] 赵林浩, 赵秀绍, 章定文, 等. 循环荷载下水泥与红黏土改良千枚岩土变形特性[J]. 中国公路学报, 2025, 38(5): 38-50.
- [9] 毛雪松, 朱凤杰, 黄喆, 等. 改良千枚岩填料的 CBR 值影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 43-48.
- [10] 方鹏, 马顺礼. 水泥改良风化千枚岩作为路基填料应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8(5): 67-69, 72.
- [11] 赵秀绍, 陈子溪, 饶江龙, 等. 红黏土、石灰复合改良千枚岩土胀缩特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(11): 50-56.
- [12] 魏佩顺. 千枚岩路基填料级配对路基性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(5): 943-946.
- [13] 毛雪松, 樊宇朔, 孟庆猛. 高速公路强风化千枚岩填筑路基施工方案研究[J]. 中外公路, 2014, 34(6): 1-4.
- [14] 李玉婷. 微生物改良强风化千枚岩填料的物理力学特性及干湿效应研究[D]: [博士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
- [15] 苗帅升, 苏立君, 胡兵立. 循环加卸载与干湿循环后不同损伤度软硬互层岩体力学特性试验研究[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.tu.20241120.1412.004>, 2024-11-21.
- [16] 殷剑亮. 干湿循环作用下千枚岩全风化土的工程特性及其不稳定斜坡治理[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- [17] 王连华. 水-温循环作用下千枚岩的动态拉伸特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(4): 109-119.