

高性能轻质水泥基材料在地基处理中的应用 研究综述

吴双喜

[上海城建市政工程(集团)有限公司,上海市 200000]

摘要: 为满足软弱及复杂地基条件下工程建设对减载、高效与耐久性的综合需求,高性能轻质水泥基材料(HPLCM, high-performance lightweight cement-based material)近年来在地基处理领域得到广泛关注。该类材料通过优化胶凝体系与孔结构设计,在显著降低材料密度的同时,实现了较高的力学性能,具有良好的工程适应性。综述了HPLCM的组成设计原理、物理力学特性及其在路基减载、地基加固、空洞填充和复合地基中的典型应用形式,重点分析了其工程应用效果与存在的关键技术问题,并对未来研究与工程推广方向进行了展望,为相关工程实践和科研工作提供参考。

关键词: HPLCM;地基处理;软土地基;泡沫混凝土;减载加固

中图分类号: TU528.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0021-07

Review of Application of High-performance Lightweight Cement-based Materials in Foundation Treatment

WU Shuangxi

[Shanghai Chengjian Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200135]

Abstract: In recent years, high-performance lightweight cement-based materials (HPLCM) have received extensive attention in the field of foundation treatment in order to meet the comprehensive demands for load reduction, high efficiency and durability in engineering construction under weak and complex foundation conditions. By optimizing the design of binder system and pore structures, this kind of material has achieved high mechanical properties and has good engineering adaptability, while significantly reducing the material density. A comprehensive review is on the composition design principle of HPLCM, its physical and mechanical properties, and its typical application forms in roadbed load reduction, ground reinforcement, void filling and composite foundations. The focus is on analyzing its engineering application effects and the existing technical problems. The future research and engineering promotion directions are expected, which provides the references for the relative engineering practices and scientific research.

Keywords: HPLCM; ground treatment; soft soil foundation; foam concrete; load reduction and reinforcement

0 引言

地基处理是土木工程建设中的关键技术环节,其处理效果直接关系到上部结构的安全性、适用性及服役耐久性。在软土、填土、淤泥质土以及其他不良地基条件下,地基承载力不足、压缩性大和变形控制困难等问题尤为突出,已成为制约工程建设质量与使用性能的重要因素^[1-2]。针对上述问题,工程实践中通常采用换填^[3]、堆载预压^[4]、强夯^[5]、桩基及复合地基^[6]等传统地基处理方法。然而,这些方法

在实际应用中往往存在施工周期较长、施工扰动大、对周边环境的影响显著以及工程造价较高等不足^[7],尤其是在软弱地基地区,大量填筑土石材料会显著增加地基附加应力,易引发过大沉降甚至结构失稳,难以满足现代工程对安全性、经济性与可持续性的综合要求。

在此背景下,基于“减载优先、协同加固”的地基处理新理念逐渐受到关注。其中,HPLCM因其密度可设计、施工方式灵活、整体性好等特点,在路基减载、地基加固及沉降控制工程中展现出独特优势^[8-9]。通过以轻质材料替代传统土石填料,可在保证必要力学性能的前提下显著降低地基所承受的附加荷载,从源头上缓解软弱地基的变形问题。因此,

收稿日期: 2026-02-10

作者简介: 吴双喜(1989—),男,本科,工程师,从事道路桥梁施工工作。

HPLCM被认为是解决软土地基工程中“高填筑—大沉降”矛盾的有效技术途径之一。

相较于普通轻质材料,HPLCM不仅具备更高的比强度和更优的变形协调能力,还在抗裂性、抗冻性、抗渗性及环境适应性方面表现出明显优势,使其能够更好地满足现代地基处理工程对材料综合性能的要求^[9-10]。特别是在软土地基、特殊环境地基以及对沉降控制要求严格的工程中,该类材料可通过“减载—加固—协同变形控制”的方式发挥综合效益,具有良好的工程应用前景。

近年来,随着材料科学、岩土工程及施工技术的不断发展,HPLCM在地基处理领域的理论研究与工程实践均取得了积极进展,其已逐渐成为岩土工程与材料工程交叉融合的重要研究方向之一^[11]。然而,针对其材料设计理论、工程适用性评价以及长期服役性能等方面仍需进一步系统研究。

本文综述了HPLCM在地基处理中的应用,介绍了HPLCM的组成、材料设计理论和基本性能特点,探讨了在地基处理中的主要应用形式及应用效果,并对目前应用中的存在问题与发展趋势做了展望。

1 HPLCM的组成与应用现状

HPLCM是一类以水泥基胶凝材料为主体,通过引入可控轻质组分并对材料体系进行系统优化,在显著降低材料密度的同时兼顾力学性能、耐久性能及工程适应性的功能型工程材料^[12]。相较于传统轻质混凝土或泡沫混凝土,该类材料更加注重材料整体性能的协同设计,强调“低密度—高比强度—高耐久性”的统一,其组成体系、设计理念及性能特征均呈现出明显的工程导向与性能导向特征。

1.1 材料组成

HPLCM作为下一代工程减载与地基加固材料,其材料体系已远超传统的“简单发泡混凝土”,逐渐发展为一种多组分协同、性能可设计的新型复合体系。其基本组成包括胶凝材料体系、轻质组分、外加剂体系以及增强材料等主要部分,这些组分通过合理的配合比设计、颗粒级配优化与功能性协同作用,使材料在低自重条件下仍能实现高强度、高耐久性和工程适配性。

在胶凝材料体系方面,通过引入高活性矿物掺合料如硅灰^[13]、粉煤灰^[14]、粒化高炉矿渣粉^[15]等,可显著改善浆体的水化活性和微观结构,形成更为均匀致密的C-S-H凝胶相,从而提高材料的后期强度、

耐久性和抗裂性能。国内外研究主要围绕活性粉体与多组分胶凝体系的界面结构演化进行了深入探讨,这些成果为高性能轻质体系的胶凝设计提供了理论基础^[16-17]。

轻质组分是实现材料低密度特性的核心,其形式主要包括物理发泡产生的均匀微细气孔以及多种轻骨料的复合填充体系^[18]。在发泡体系中,气泡的稳定性与均匀性是影响材料整体性能的关键,通过选择合适的发泡剂与浆体基质配方,可在浆体硬化过程中形成封闭或半封闭气孔结构,减轻材料密度的同时,使气孔对强度的负面影响降至最低。童胜等^[19]分析了不同流变性能地质聚合物浆中泡沫的受力性能和气孔结构特征,其结果表明优化浆体屈服应力与表面活性剂组合是形成稳定泡孔结构的有效途径。

轻骨料体系则通过引入如膨胀珍珠岩、膨胀蛭石、陶粒、玻化微珠等密度远低于传统骨料的填料,实现减重效果,同时在一定程度上保留材料的骨架效应。近年来,国内外开始探索轻质矿物废料与工业副产物作为轻骨料的可持续利用路径,例如利用浮石^[20]、矿渣膨胀物^[21]等新型轻质骨料,在保证低密度的同时提高材料的环境友好性与循环利用性能。

外加剂体系在HPLCM中承担着调控浆体性能与提升工程性能的多重作用。高效减水剂(如聚羧酸系)能够在低水胶比条件下显著改善浆体的流动性与泵送性,有助于实现低孔隙率与高强度协同;稳泡剂则用于提高发泡体系的气泡稳定性,防止施工与硬化阶段的气泡破裂或聚合,从而保证材料孔结构的均一性^[22]。此外,通过引入缓凝剂、促凝剂等功能性外加剂,还可以调节凝结时间与早期强度发展,使材料在不同工程条件下具有可控性。

增强材料是高性能轻质体系的“性能加速器”,尤其是在改善材料脆性、抗裂性能及断裂韧性方面发挥关键作用。国内外大量研究聚焦于纤维增强技术在轻质水泥基材料中的应用,其中包括聚乙烯醇纤维、聚丙烯纤维、钢纤维以及玄武岩纤维等不同类型纤维的单一或混合掺入优化^[23-24]。纤维在材料内部的桥联和能量耗散作用能够有效控制微裂缝的产生与扩展,使材料在受力破坏过程中表现出更高的抗裂强度和延性响应,这对于地基处理等需要控制变形与破坏模式的工程尤为重要。

近年来,HPLCM在材料组成方面展现出以下突

破性进展:一是在胶凝体系中引入纳米材料(如纳米二氧化硅、纳米氧化铝等)以进一步细化孔结构与强化界面性能,提高材料早期强度与耐久性^[25];二是在轻骨料体系中利用功能性轻质矿物与再生材料以提升材料的可持续性^[26];三是在外加剂体系中开发出复合型稳泡与性能调控剂,以实现更高的发泡稳定性与施工适应性;以及在纤维增强方面引入混杂纤维体系以同时提升强度与韧性^[27]。

1.2 设计理论

HPLCM 的设计理论突破了传统混凝土以抗压强度为主导的单一性能导向,转而构建以性能协同与工程适应性为核心的多参数耦合设计体系。其本质在于在满足地基处理承载与稳定要求的前提下,实现材料密度—强度—变形—耐久性之间的最优匹配。

在密度控制层面,材料整体密度可表示为:

$$\rho_d = \rho_m(1 - V_L) + \rho_L V_L \tag{1}$$

式中: ρ_d 为轻质水泥基材料干密度,kg/m³; ρ_m 为胶凝基体密度,kg/m³; V_L 为轻质组分体积分数,%; ρ_L 为轻质组分表观密度,kg/m³。

研究表明,当孔径分布满足窄谱特征时,材料抗压强度 f_c 与孔隙率之间可近似表示为^[28]:

$$f_c = f_0 \exp(-\alpha n) \tag{2}$$

式中: f_0 为材料基体强度,MPa; α 为与孔结构形态相关的材料常数; n 为孔隙率,%。

在力学性能设计层面,HPLCM 通常采用比强度指标^[29-30],比强度计算公式如下:

$$S = \frac{f_c}{\rho_d} \tag{3}$$

式中: f_c 为材料基体强度,MPa; ρ_d 为轻质水泥基材料干密度,kg/m³。

此外,该类材料的设计需与地基工程服役环境相耦合。针对地下水作用、冻融循环及化学侵蚀等环境因素,通过降低连通孔比例、优化孔壁结构及提高胶凝体系稳定性,提升材料的长期耐久性能。

1.3 基本性能特点

HPLCM 最突出的技术特征在于低密度条件下实现较高比强度与良好工程适应性。其干密度通常可在 300~2000 kg/m³ 范围内实现连续可调,显著低于普通混凝土及传统水泥稳定材料。表 1 给出了国内参考文献中的典型研究成果,从表 1 可以看出,HPLCM 在保持较低干密度的同时,具备显著更高的抗压强度与力学稳定性。相比传统混凝土体系,其孔隙结构更均匀、界面过渡区优化明显,实现轻质化与高强

度的良好平衡,综合性能优势更加突出。

表 1 典型研究成果:材料性能比较

材料体系	干密度/ (kg·m ⁻³)	力学性能/MPa		备注
		抗压	抗折	
粉煤灰体系 ^[10]	1 250~1550	70.99	—	孔隙率小于 65%
硫铝酸盐+粉煤灰体系 ^[12]	380	0.58	—	早强轻质
页岩陶粒体系 ^[16]	1 665	21.2	20.2	界面过渡区体积分数较小
矿渣硫铝酸盐体系 ^[28]	1 200	17.7	2.1	—
再生轻骨料体系 ^[30]	1 520	58.9	—	轻骨料分布优化

在力学性能方面,HPLCM 除具备满足设计要求的抗压性能外,其弹性模量明显低于常规混凝土,有利于实现与软弱地基的变形协调,降低地基—填充体界面处的应力集中风险^[31]。图 1 所示为 HPLCM 在均布荷载作用下传力示意图,轻质骨料作为封闭球形孔隙在荷载作用下发生变形,致使荷载传递路径重新分布。这种机制显著提升了材料的抗开裂性能与极限应变,使其失效模式由典型的脆性破坏转变为延性破坏。

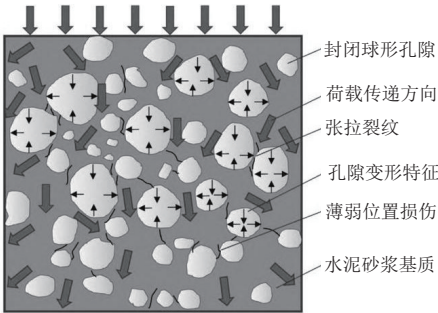


图 1 HPLCM 在均布荷载作用下传力示意图

在施工性能方面,HPLCM 通常表现出良好的流动性、自密实性及可泵性,能够适应灌注、回填、大体积填筑及复杂空间填充等多种施工工艺要求。其施工过程对周围土体扰动较小,有利于控制施工引起的附加沉降与变形,并可在一定程度上缩短工期、降低施工难度和综合成本。

在耐久性能方面,通过优化胶凝材料组成、改善界面过渡区质量及调控孔隙结构特征,HPLCM 表现出较好的耐久性能。图 2 展示了 HPLCM 从微观到宏观的多尺度结构特征。左侧为硬化水泥浆的微观尺度,主要包含孔隙和水泥浆固相;中间为砂浆的细观尺度,包含水泥浆、砂粒、界面过渡区(ITZ)及气孔;右侧为混凝土的宏观尺度,由砂浆、粗骨料、ITZ 和气孔组成,体现了不同尺度结构之间的层级关系。图 3 所示为 HPLCM 的 CT 扫描图像,从图中可以看出

HPLCM 基体致密且孔隙分布较为均匀,有助于耐久性能的提升。

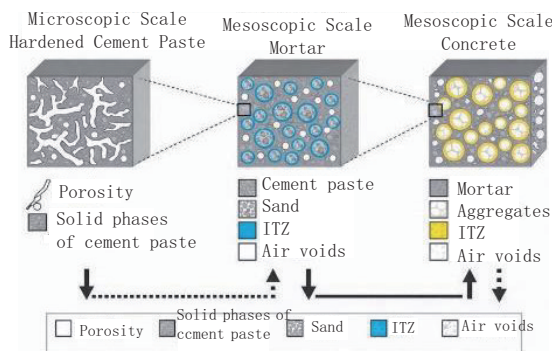


图2 HPLCM从微观到宏观的多尺度结构特征

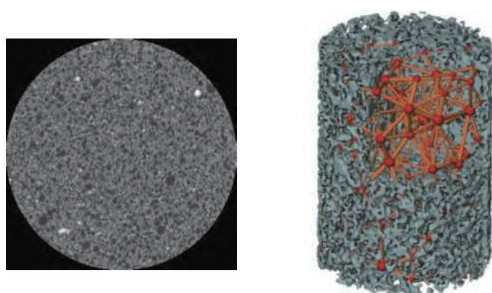


图3 HPLCM的CT扫描图像

2 主要应用形式

2.1 路基与堤坝减载处理

在HPLCM多类型工程应用中,路基与堤坝减载处理是其最早实现规模化应用、技术体系相对成熟的工程领域之一。针对软土、淤泥质土及高压缩性地基条件下路基和堤坝填筑过程中易产生的大变形和不均匀沉降问题,HPLCM通过显著降低填筑自重,为地基长期稳定性控制提供了有效技术途径^[32]。

在公路与城市道路工程中,通过以低密度轻质材料替代传统土石方填料,可在满足路基结构稳定要求的前提下显著降低地基附加应力,有效抑制施工期及运营期沉降发展^[33]。工程实践表明,当轻质水泥基材料干密度控制在合理区间时,其比强度和整体稳定性能够满足路基填筑的基本承载需求,同时与下伏软弱地基表现出良好的变形协调性。

在堤坝与防洪工程领域,HPLCM主要应用于软基堤防填筑、堤身加高及病险堤坝加固改造等工程场景^[34]。相较于传统换填或重力式加固方式,该类材料能够在不显著增加堤基应力水平的情况下完成结构补强,有利于降低堤坝整体滑动及稳定性破坏风险。特别是在高地下水位或施工条件受限区域,其良好的流动性和可泵性使其适用于分层浇筑或灌注施工,减少对既有堤体结构的扰动。

2.2 地基加固与空洞填充

依托其良好的流动性、自密实性及可泵送性能,HPLCM在地下空洞、溶洞及老旧地基空隙充填加固工程中展现出独特的应用优势^[35]。在复杂地质条件或既有结构条件受限的工程环境中,传统回填材料往往难以实现均匀填充,易产生离析、空鼓或局部应力集中等问题,而HPLCM能够在重力或低压条件下充分流动,自主填充不规则空间,显著提高充填密度与整体性。

在岩溶发育地区及地下采空区治理工程中,该类材料常以灌注方式用于溶洞、裂隙及松散区的整体充填与加固^[36]。通过合理控制材料密度与凝结硬化特性,可在有效填充空洞的同时,避免对周围土体和结构产生过大的附加应力。材料硬化后形成连续、整体性良好的加固体,不仅能够显著提高地基的整体承载能力,还可有效抑制空洞再发展及地表不均匀沉降。

在老旧建筑地基加固与地下设施病害治理工程中,HPLCM同样表现出良好的工程适应性^[37]。其低密度特性有利于减小对既有结构的附加荷载,而适度的力学强度和变形能力则可实现加固体与原有地基之间的变形协调,降低界面开裂风险。通过优化配合比设计及外加剂体系,材料的凝结时间和早期强度可根据施工需求进行调控,满足快速封堵或分阶段加固的工程要求。

此外,在地下水位较高或施工环境复杂的条件下,HPLCM通过胶凝体系与孔结构优化,表现出较好的抗离析性和体积稳定性,减少了充填过程中浆体流失及加固效果不均的问题^[38]。

2.3 复合地基与功能层应用

复合地基体系中,HPLCM通过合理控制密度、弹性模量与强度水平,在复合地基中承担“应力缓冲—变形协调—荷载重分配”的关键作用,有效改善传统刚性或半刚性加固体系中易出现的应力集中与差异沉降问题。

在桩—土共同作用体系中,HPLCM可布置于桩顶、桩间或桩帽下方,形成具有一定承载能力和变形能力的过渡介质。当上部结构荷载作用于复合地基时,该材料可通过自身较低的弹性模量和良好的延性特征,对桩顶集中荷载进行扩散与调节,使部分荷载向桩间土体转移,从而提高桩土共同承载效率,降低单桩受力峰值。同时,其整体连续性有助于增强桩间土的约束效果,改善复合地基整体稳定性^[39]。

在加筋地基或加筋垫层体系中,HPLCM 可与土工格栅、土工织物等加筋材料协同使用,作为填充或包覆介质,形成具有一定整体刚度的复合结构层。该层既可限制筋材变形、提高加筋效果,又可通过材料本身的变形吸收能力,缓解不同结构层之间的刚度突变,实现变形协调控制。

此外,在软土地基、厚填土地基及不均匀地基条件下,将 HPLCM 作为功能过渡层引入复合地基体系,有助于提升地基长期服役性能与安全储备,体现了其在现代地基工程中由“轻质填充材料”向“多功能工程材料”转变的发展趋势。

3 工程应用效果与典型案例分析

3.1 泡沫轻质土在桥台背填筑中的应用

G106 黄石铁山至大冶段改建工程第二标段,由于要为后期市政路预留空间,台背需要轻质材料进行回填。受现场条件限制,该路段桥台后路基填筑高度约为 2 m,局部纵坡最大达 2.3%,在常规填筑条件下易诱发桥台附近不均匀沉降,从而增加“桥头跳车”等行车安全隐患。

同时,工程区域地下水位较高,且河道护岸结构对外部附加荷载较为敏感,若采用传统二灰土换填方案,可能对桥台及护岸稳定性产生不利影响。综合考虑地基承载、变形控制及周边结构安全等因素,最终采用泡沫混凝土作为桥台后路基的轻质换填材料。所选泡沫混凝土抗压强度等级为 CF0.8,容重等级为 W5,其主要技术指标满足《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》(CJJ/T 177—2012)的相关要求。

如图 4 所示,为进一步提升泡沫混凝土填筑体的整体稳定性和抗裂能力,工程在填筑层内设置了两层镀锌钢丝网片。其中,顶部以下 1 m 及底部以上 1 m 高度区域布置两层镀锌金属网,金属网规格为 A3.2 mm,按照 10 cm×10 cm 间距布置;泡沫土顶面设置一层 HDPE 防渗土工膜,厚度为 0.5 mm,从而形成分层约束与整体协同受力结构。

工程实施效果表明,泡沫混凝土的轻质特性显著降低了桥台后填筑荷载及对河道护岸产生的侧向压力,在满足路基承载力和使用性能要求的同时,有效控制了差异沉降,保障了桥台及周边河道结构的安全性。该工程实例充分验证了泡沫混凝土在复杂水系交叉节点路基减载与沉降控制中的工程适用性。

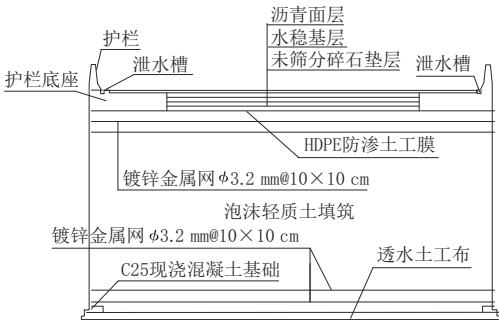


图 4 泡沫混凝土设计图

3.2 轻骨料混凝土在岩溶地基处理中的应用

武九铁路至江碧路段,场地地下存在较多的溶洞和土洞,地基承载力不均匀,易产生不均匀沉降。根据前期地质勘察结果,在桥台及引道基础范围内发现多处大小不一的溶洞,最大洞高约 3 m,埋深平均为 10 m。为保证结构安全并减少对原有地层的扰动,工程采用轻骨料混凝土对溶洞及裂隙进行填充处理。

轻骨料混凝土采用人工轻骨料与水泥基胶凝材料拌制而成,具有密度小、自重轻、流动性好及抗压性能稳定等特点。该工程中使用的轻骨料混凝土表观密度约为 1 500 kg/m³,较普通混凝土可降低约 40% 的自重,从而减少对下覆溶洞顶板的附加压力。同时材料具有较好的泵送性能和填充能力,能够通过注浆管道充填复杂形态的溶洞空间,提高地基整体稳定性。此外,其硬化后具有良好的抗压强度和耐久性,可形成稳定的人工填充体。

图 5 所示为轻质骨料混凝土注浆示意图,施工过程中首先通过钻孔探测确定溶洞位置和规模,然后布置注浆孔和排气孔。随后采用压力泵送方式将轻骨料混凝土注入溶洞内部,使其逐步填充空隙并形成整体结构。待混凝土达到设计强度后,再进行上部基础施工。工程实施后,地基承载力显著提高,监测结果表明桥台沉降均匀,满足设计要求。

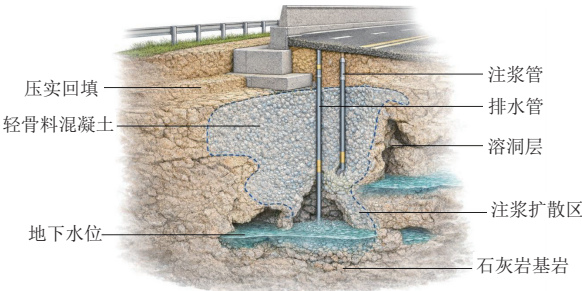


图 5 轻质混凝土注浆示意图

3.3 纤维增强混凝土在复合地基处理中的应用

常溧高速公路部分路段位于深厚软土地基区

域,天然地基承载力不足,工后沉降控制难度大。如图6所示,为提高地基整体稳定性并控制道路运营后的不均匀沉降,工程采用“桩—垫层”复合地基处理方式,在桩间设置纤维增强混凝土垫层,以改善地基受力条件。

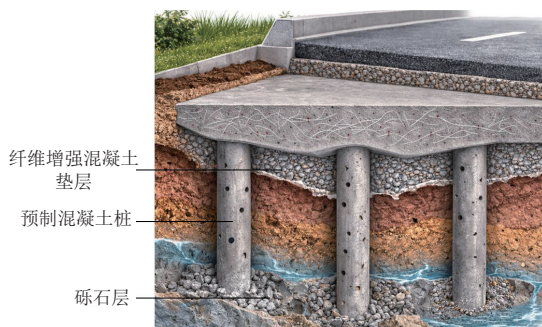


图6 纤维增强混凝土在复合地基处理中的示意图

本项目中,纤维增强混凝土是在普通混凝土中掺入玄武岩纤维形成的复合材料。该材料具有轻质、高强、抗裂性能好和韧性高等特点,密度约为 $2\,000\text{ kg/m}^3$,相较于普通混凝土减重约16%。同时其抗压强度可超 80 MPa ,并具有良好的抗拉和抗冲击性能。纤维在混凝土内部形成三维分散结构,能够有效抑制裂缝扩展,提高整体结构的稳定性。同时,还能增强垫层的整体性,使荷载更加均匀地传递到桩体与土体中,从而显著提高地基承载能力。工程实施后,复合地基整体变形得到有效控制,道路运行监测表明沉降稳定且均匀,满足设计要求。

4 存在问题与发展趋势

尽管HPLCM在地基处理工程中展现出良好的应用前景,但其在工程推广和长期服役过程中仍面临若干亟需解决的问题。首先,材料力学性能与密度之间的协同调控仍存在一定局限性。在低密度条件下,材料孔隙率较高、孔壁相对薄弱,易导致抗压强度和抗拉性能不足,对其在承载型或半承载型地基处理中的应用形成制约。其次,孔结构稳定性对施工质量高度敏感,发泡过程、搅拌工艺及现场施工条件的微小波动均可能引起气孔合并或破裂,进而影响材料的均匀性与工程性能。

在应用层面,HPLCM的设计与施工尚未完全形成统一的技术标准和评价体系,材料性能指标与工程设计参数之间的对应关系仍有待进一步明确,这在一定程度上制约了其规模化和规范化应用。在现有标准覆盖范围方面,目前已发布实施的部分标准可为HPLCM应用提供一定技术支撑,主要包括《水

泥基轻质回填料》(T/CECS 10418—2024),规定了材料的分类、原材料、技术要求与试验方法;《城市地下空间轻质材料回填技术规程》(T/CECS 1241—2023)适用于泡沫混凝土、EPS颗粒混合轻质材料、低强度流动性固化土等回填城市地下空间的工程调查、材料、设计、施工、监测与质量检验;《公路泡沫轻质土路基技术规范》(DB44/T 2794—2025)作为广东省地方标准,适用于各等级新建、改扩建公路以及运营期公路路基养护。这些标准主要面向传统轻质材料在特定场景的应用,对HPLCM具有一定参考价值但针对性不足。其次,现有体系存在明显缺失:一是材料性能设计与评价体系缺失,现有标准主要规定固定密度等级下的强度指标,未能建立指导HPLCM配合比优化设计以实现“性能设计”理念的标准方法;二是孔结构质量控制标准空白,现有标准主要关注宏观性能检验,但对微观孔结构的孔径分布、孔隙形态、封闭性等缺乏质量控制指标和检测方法;三是设计施工一体化标准缺失,现有标准沿用传统轻质材料施工要求,未针对HPLCM特性制定专门的施工工艺标准;四是经济性与适用性评价标准欠缺,目前缺乏基于全寿命周期的经济性评价指南、不同工程场景的适用性选择标准以及原材料质量控制与替代方案的技术要求。

未来发展趋势方面,HPLCM将朝着多尺度结构协同设计和功能集成化方向发展。通过引入高活性矿物掺合料、纳米材料及纤维增强技术,实现孔结构精细化调控与力学性能提升,将是重要研究方向。同时,结合地基工程需求开展材料性能定向设计,强化材料与工程环境的协同适配,有望进一步拓展其在复合地基、特殊地质条件及长期服役工程中的应用范围。此外,建立完善的设计方法、施工规范及性能评价体系,将为该类材料的工程化推广提供关键支撑。

5 结论

本文综述了HPLCM在地基处理中的应用现状,系统介绍了其组成、材料设计理论与基本性能,并总结了其在路基减载、地基加固、空洞填充及复合地基等工程中的主要应用形式与效果。主要结论如下。

(1)HPLCM具有低密度、高比强度、高耐久性等显著优势,通过优化胶凝体系、轻质组分及增强机制,可实现从低强度减载填充到具备一定承载能力的准结构型材料覆盖的强度范围,具备良好的工程

适用性,是地基处理工程的理想材料选择。

(2)HPLCM力学性能表现优异。引入纤维增强体系、优化孔结构分布后,可显著提升材料的裂缝起裂应力与极限应变,提高抗裂性能与耗能能力,从而增强地基结构整体稳定性与安全储备,适用于受变形控制或耐久性要求较高的工程场景。

(3)在工程应用方面,HPLCM主要用于路基与堤坝减载、地基加固与空洞填充、复合地基与功能层构建等。其工程效益表现为显著减轻荷载、降低沉降、改善地基承载力与抗变形能力。

(4)未来研究与应用发展方向应聚焦多尺度结构协同设计与功能集成化。一方面需进一步开展材料性能的定向设计,强化轻质组分、纤维增强与孔结构协同优化,提升材料在复杂工况下的可靠性;另一方面应结合地基工程需求,建立完整的材料—构件—工程体系适配机制,推动标准化体系建设。特别是在复合地基、特殊地质条件及长期服役工程中,HPLCM仍具有较大应用潜力与发展空间。

参考文献:

[1] 胡同宁.软土地基处理技术在建筑基础工程中的应用研究[J].现代工程科技,2025,4(13):45-48.

[2] 胡海波.高层建筑岩土勘察分析及地基处理技术应用研究[J].工程建设,2025,57(5):48-54.

[3] 严琼,乔可帅,陈钊,等.基于连续-离散耦合的公路拓宽路基变形及换填处治宏观细观分析[J].公路交通科技,2017,34(10):26-33.

[4] 占鑫杰,杨守华,朱群峰,等.真空联合堆载预压法在寒区筑坝工程中的应用[J].水利水运工程学报,2023(6):168-175.

[5] 王家磊,韩进宝,余虔,等.强夯法加固低含水量湿陷性粉土地基试验研究[J].兰州理工大学学报,2025,51(5):143-148.

[6] 宋胤恺,佟建兴,周圣斌,等.木桩复合地基作用机理及工程特性试验研究[J].岩土工程学报,2025,47(增刊2):236-240.

[7] 刘汉龙,赵明华.地基处理研究进展[J].土木工程学报,2016,49(1):96-115.

[8] 江朝华,李智成,方佳敏,等.废弃疏浚沙土固化利用研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(12):111-116.

[9] 黄振宇,隋莉莉,王芳.超轻质高延性水泥基材料力学性能研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(2):223-229.

[10] 杲晓龙,王俊颜.超轻质水泥基复合材料基本力学性能[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(12):67-73.

[11] 陈永辉,石刚传,曹德洪,等.气泡混合轻质土置换路基控制工后沉降研究[J].岩土工程学报,2011,33(12):1854-1862.

[12] 娄冬,曹京京.高韧性轻质硫铝酸盐水泥基发泡保温材料的制备及性能研究[J].新型建筑材料,2016,43(11):79-82.

[13] 罗杰波,彭晓彤,刘兆磊,等.硅灰和水泥对免蒸压加气混凝土的性能影响与微观分析[J].中国粉体技术,2025,31(2):152-160.

[14] 冯浩,秦猛,何兆益,等.硅灰、粉煤灰对矿渣地质聚合物性能的影响[J].无机盐工业,2025,57(11):91-99.

[15] 蔡惠华.掺合料及温度对轻质泡沫混凝土强度影响的研究[J].港口航道与近海工程,2025,62(3):77-81.

[16] 汪洪菊,段君峰,武文龙,等.页岩陶粒混凝土细观参数及损伤演化研究[J].中国测试,2025,51(5):27-33.

[17] 邢建庭,任蛟龙.塑料再生骨料轻质混凝土疲劳特性宏观分析与疲劳寿命预测[J].塑料科技,2025,53(7):62-69.

[18] 胡雅群,汤强,宋心彤,等.掺粉煤灰的泡沫混凝土强度试验研究[J].混凝土,2025(11):168-171.

[19] 童胜,王成云,胡爽子,等.料浆流变性能对地质聚合物泡沫混凝土成孔机理的影响[J].混凝土与水泥制品,2025(8):95-99.

[20] 杜建婷,翁维素,崔俊毅,等.铁尾矿砂浮石混凝土多孔砖砌体力学性能试验研究[J].河北建筑工程学院学报,2024,42(1):1-7.

[21] 李丽琴,陈丽丽.掺膨胀剂和矿物掺合料混凝土耐海水侵蚀性能的研究[J].新型建筑材料,2008(2):7-10.

[22] 韩磊,曹红星,方纪明,等.泡沫混凝土生产用稳泡剂及硬化后孔隙结构研究现状[J].混凝土世界,2025(11):86-90.

[23] 宗翔,张睿.PVA纤维-改性橡胶粒径对混凝土基本力学性能影响及微观分析[J].长春工程学院学报(自然科学版),2025,26(4):41-46.

[24] 孙振平,邹爽,赵雪松,等.钢纤维的端钩数目对钢纤维混凝土性能的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2025,53(12):1936-1942.

[25] 刘昌智,李春清,陈敦,等.低温环境下纳米二氧化硅对混凝土性能的影响[J].科学技术与工程,2025,25(9):3813-3820.

[26] 卢西方,单莉莉,王恒.再生骨料混凝土性能试验研究与工程应用[J].四川水泥,2026(1):6-7.

[27] 刘欣鹏,王成,姚明星,等.复合盐侵蚀下早龄期混杂纤维混凝土腐蚀劣化试验[J].混凝土,2025(11):88-96.

[28] 李双成,周俊成,褚雅楠,等.基于低碱水泥的轻质多孔混凝土配合比设计及性能分析[J].混凝土世界,2023(12):42-45.

[29] 王青,高舒畅,高嘉呈,等.掺陶砂超高性能轻质混凝土的性能及其影响因素[J].硅酸盐通报,2023,42(6):1996-2006.

[30] 陈雪梅,严云,张旭,等.高强再生轻骨料和玻璃微珠配制轻质高强混凝土的研究[J].混凝土与水泥制品,2012(10):7-10.

[31] 黄锋,刘星辰,张班,等.多孔轻质混凝土力学性能敏感性试验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(7):9-16.

[32] 赵国平,韩凤雷.公路改扩建工程中软土路基路面拼接施工技术研究[J].工程机械与维修,2025(4):141-143.

[33] 赵昱龙.轻质泡沫混凝土在改扩建路基中的应用与性能研究[J].江苏建材,2025(4):36-38.

[34] 胡伟,林波,徐永福.泡沫混凝土的特性及其在航道整治工程中的应用[J].中国水运,2025(24):74-77.

[35] 张贵章.试析泡沫混凝土充填技术在复杂岩溶空洞地基处理中的应用[J].科技创新导报,2019,16(23):56-57.

[36] 罗承浩.泡沫混凝土充填技术在复杂岩溶空洞地基处理中的应用[J].福建建设科技,2018(6):45-48.

[37] 代明升.轻质砂加气混凝土楼板在砖木建筑加固中的应用[J].山西建筑,2019,45(5):80-81.

[38] 张斌,王晓文,张晓旭.生态挡墙与轻质混凝土在道路工程中的联合应用[J].交通节能与环保,2021,17(5):76-78.

[39] 侯文龙.微型桩与轻质混凝土在路堤边坡病害治理中的应用[J].西部探矿工程,2025,37(8):24-28.