

水泥稳定风积沙强度与收缩变形试验研究

于金良¹, 彭 帝¹, 牛永喆², 刘浪涛¹, 张 浩², 李 扬²

(1. 陕西交通控股集团有限公司, 西安 710000; 2. 陕西省交通规划设计研究院有限公司, 西安 710000)

摘 要: 采用室内试验测试水泥风积沙结合料的最大干密度、最佳含水量、无侧限抗压强度、干缩应变、温缩应变、微观结构。结果表明: 7 d 饱和无侧限抗压强度随着水泥掺入量的增加而增加。试件强度均随养护龄期 7 d 内的强度增长最为显著, 28 d 以后的强度增长率大幅降低。当压实系数小于 0.95 时, 压实系数的变化对试件强度影响较大; 当压实系数大于 0.95 时, 试件强度随压实系数的增长较小。试件干缩应变均随水泥掺量的增加而增大。试件温缩应变随水泥掺量的增加而增大。水泥与风积沙水化反应所生成的胶凝物质, 改善了风积沙水泥砂浆中胶凝物质的组成及水泥基体的界面区结构, 可有效提高水泥砂浆体结构的密度和粘结强度。建议施工采用 8%~10% 水泥掺量作为填筑高等级公路底基层控制标准。研究成果可为相关工程提供技术参考。

关键词: 水泥; 风积沙; 抗压强度; 收缩应变; 微观结构

中图分类号: U214 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0090-06
DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.015

Experimental Study on Strength and Shrinkage Deformation of Cement Stabilized Aeolian Sand

YU Jinliang¹, PENG Di¹, NIU Yongzhe², LIU Langtao¹, ZHANG Hao², LI Yang²

(1. Shaanxi Transportation Holding Group, Xi'an 710000, China;

2. ShaanXi Provincial Transport Planning Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: Indoor tests were conducted to determine the maximum dry density, optimal moisture content, unconfined compressive strength, dry shrinkage strain, thermal shrinkage strain, and microstructure of cement wind blown sand binder. The results indicate that the 7-day saturated unconfined compressive strength increases with the increase of cement content. The strength of the specimens showed the most significant increase within 7 days of curing, and the strength growth rate decreased significantly after 28 days. When the compaction coefficient is less than 0.95, the change in compaction coefficient has a significant impact on the strength of the specimen; When the compaction coefficient is greater than 0.95, the strength of the specimen increases less with the increase of the compaction coefficient. The dry shrinkage strain of the specimens increases with the increase of cement content. The thermal shrinkage strain of the specimen increases with the increase of cement content. The cementitious substances generated by the hydration reaction between cement and aeolian sand improve the composition of cementitious substances in aeolian sand cement mortar and the interface structure of the cement matrix, effectively increasing the

项目来源: 陕西省交通运输厅资助项目 (24-67K); 陕西省重点研发项目 (2024GX-YBXM-377)。

作者简介: 于金良 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 公路工程科技创新与管理。

通信作者: 彭 帝 (1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 公路工程科技创新与管理。

收稿日期: 2024-04-19

density and bonding strength of the cement mortar structure. It is recommended to use a cement content of 8% to 10% as the control standard for filling the subgrade of high-grade highways during construction. The research outcomes can serve as a technical reference for relevant engineering practices.

Key words: cement; aeolian sand; compressive strength; shrinkage strain; microstructure

0 引言

风积沙是沙漠地区丰富的自然资源,存在结构松散、内聚力低、压实度差等特点,直接作为筑路材料难以满足工程要求。通过水泥稳定化处理改善其力学性能,对推动沙漠地区可持续交通建设具有重要现实意义。特别是在气候变化背景下,深入研究风积沙稳定材料的收缩变形特性,对预防道路开裂、延长使用寿命具有重要现实意义。

近年来,国内外学者对水泥稳定风积沙进行了多角度研究。任辉明等^[1]通过研究提出重载铁路风积沙改良选用水泥等级及水泥掺量的控制标准。李根峰等^[2]对风积沙混凝土的收缩变形进行了试验研究,结果表明随着风积沙掺量的增加,混凝土的收缩变形逐渐增大。张浩等^[3-4]研究了沙漠地区某高速公路风积沙压实特性与工艺,揭示其力学响应规律;金旻昊等^[5]通过试验研究水泥固化对风积沙试样抗剪强度的影响机制,发现固化作用显著提升强度;邓培元等^[6]开展风积沙自密实混凝土力学性能试验,表明其抗压强度随风积沙掺量增加先增后减;何静等^[7]研究风积沙掺量对水泥砂浆力学性能和微观结构的影响,发现掺量 15% 时性能较优;冉武平等^[8]研究无机处治风积沙强度特性及工程应用,表明其可满足道路基层材料强度要求;严伟等^[9]研究不同养护温度下水泥改良风积沙无侧限抗压强度,发现强度随温度升高而增大;王玉清等^[10]研究风积沙 PVA-FRCC 早期收缩性能及配合比,提出了满足不同工程应用需求的较优配合比;史阳光等^[11]研究钢渣和风积沙对混凝土抗压强度的影响及机理,发现二者能提高混凝土抗压强度;刘杰等^[12]研究大掺量风积沙-水泥粉煤灰稳定砾石宏观性能,表明其可提高基层材料性能;杨熙等^[13]研究纤维与粉土提升水泥稳定风积沙抗压强度,发现纤维和粉土有协同增强作用;张浩等^[14]研究二灰稳定风积沙力学与收缩性能,发现其强度高、收缩小,适用于道路基

层;郑世龙^[15]研究塔克拉玛干沙漠风积沙工程性能,为其在工程建设中的应用提供依据。

尽管已有研究取得一定进展,但关于水泥稳定风积沙的温缩和干缩性能研究仍显不足。现有文献多聚焦单一力学性能或收缩特性,缺乏对强度发展规律与收缩变形机制的系统关联分析。特别是在不同水泥掺量、养护龄期和压实系数等多因素耦合作用下,材料性能演变规律尚不明确。此外,传统水泥稳定材料存在碳排放高的问题,而新型低碳胶凝材料在风积沙稳定中的应用研究几乎空白。以陕西毛乌素沙漠风积沙为对象,采用多尺度试验方法,系统考察水泥掺量、养护龄期和压实系数对材料力学性能和收缩变形的影响规律,结合电镜扫描揭示微观结构演变机制。创新性地提出兼顾强度和抗裂性的最优水泥掺量范围,为沙漠地区道路基层材料设计提供理论依据和技术参考,同时探索部分替代水泥的固废基掺合料可行性,推动低碳筑路技术的发展。

1 试验

1.1 原材料

试验选取陕西毛乌素沙漠地区风积沙,该风积沙的矿物组成以碎屑矿物为主,其中岩屑、长石和石英占绝对优势,三者总量超过 90% (质量分数)。次要矿物包括层状硅酸盐矿物(如白云母、黑云母)、氧化物矿物(褐铁矿、黄铁矿)、链状硅酸盐矿物(角闪石)及岛状硅酸盐矿物(锆英石),这些重矿物含量较低,通常以微量或痕量形式存在,化学成分见表 1;物理参数见表 2,由风积沙的不均匀系数和级配系数判断,风积沙的颗粒组成属于典型的级配不良筑路材料,采用 P·O 32.5 硅酸盐水泥,性能指标见表 3。

表 1 风积沙的化学成分

Table 1 Chemical composition of wind blown sand / %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	其他
66.82	15.86	6.74	2.35	1.60	3.20	2.36	1.07

材料科学

表 2 风积沙物理参数

Table 2 Physical parameters of wind blown sand					
不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	细度模数 M_x	相对密度	天然密度 / (ρ/cm^3)	天然含水量/%
2.13	0.12	0.5	2.65	1.45	2.5

表 3 水泥性能指标

Table 3 Performance indicators of cement					
抗压强度/MPa		抗弯强度/MPa		凝结时间/min	
3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝
20.4	36.8	4.2	6.9	190	385

2 试验方法

按照 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》，采用重型击实法测试水泥稳定风积沙结合料的最佳含水率和最大干密度。

按照 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》，试件的直径×高为 50 mm×50 mm，采用静压法成型相应规格试件，在标准环境下养生，分别测试水泥稳定风积沙结合料的 7、28、60、90 d 的无侧限抗压强度。

按照 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》，均采用 100 mm×100 mm×400 mm 的梁式试件进行干缩温缩试验。

3 试验结果分析

3.1 混合料基本性能测试结果

由图 1 可知。风积沙含水量为 0 时，干密度出现一个峰值；随着含水量的增加，干密度开始下降，在含水量为 2% 左右时，干密度降到最低点，随后便开始回升，一直到含水量为 14% 左右时干密度又达到一个峰值。

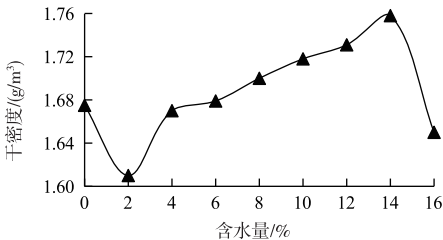
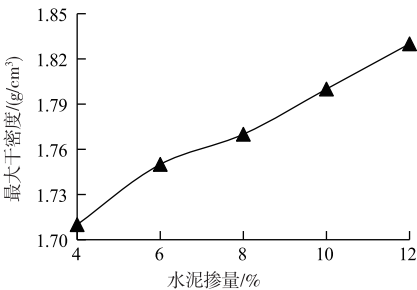


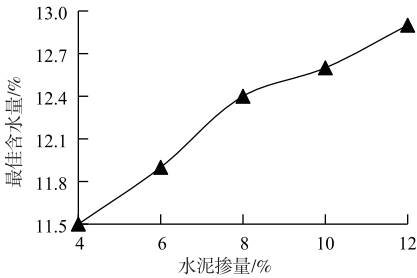
图 1 风积沙干密度与含水量的关系曲线
Fig. 1 Relationship curve between dry density and moisture content of aeolian sand

由图 2 可知，水泥稳定风积沙最大干密度和最佳

含水量均随水泥掺量的增加而增大，随着水泥掺量从 4% 增加到 12%，最大干密度由 1.71 g/cm³ 增加到 1.83 g/cm³，最佳含水量由 11.5% 增加到 12.9%，增加的趋势基本一致。由于水泥颗粒较细，而风积沙颗粒均匀、级配不良且空隙率较大，水泥填充了风积沙的空隙，在击实功的作用下，水泥沙较易排列密实，随着水泥掺量的增多，需要的最佳含水量也逐渐增大，随着水泥填充作用的增强，水泥稳定风积沙的最大干密度也随之增大。



(a) 最大干密度



(b) 最佳含水量

图 2 最大干密度、最佳含水量与水泥掺量的关系曲线
Fig. 2 Relationship curve between maximum dry density, optimal moisture content and cement dosage

3.2 7 d 饱水无侧限抗压强度分析

由图 3 可知，当压实系数为 0.95 时，水泥稳定风积沙 7 d 饱和无侧限抗压强度随着水泥掺入量的增加而增加，水泥掺量 4%、6%、8%、10%、12% 对应的试件强度分别为 0.63、0.93、1.59、2.49、2.88 MPa，其中，水泥掺量从 6% 增加到 10% 对应的强度曲线增长幅度较大，占总增长幅度的 69%。高等级公路底基层填料强度标准为：水泥稳定类材料 7 d 饱和无侧限抗压强度需满足 2 MPa。考虑试验后期强度会随龄期增长的影响，采用 P·O 32.5 级水泥时，建议设计、施工采用 8%~10% 水泥掺量作为填筑高等级公路底基层控制标准。

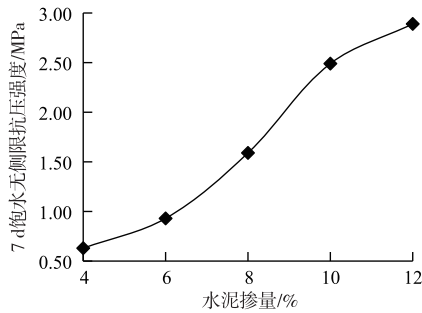


图3 水泥掺量对试件强度影响曲线
Fig. 3 Curve of the effect of cement content on the strength of test specimens

3.3 养护龄期的影响

压实系数为 0.95 时,不同水泥掺量的试件强度随养护龄期的变化曲线如图 4 所示。试件强度均随养护龄期的增加呈增长趋势,7 d 内的无侧限抗压强度增长最为显著,7~28 d 的强度增长趋势有所下降,28~60 d 及 60~90 d 的无侧限抗压强度增长率最小。水泥掺量为 6%、8%、10% 时,养护 28 d 强度相对于 7 d 强度分别增长了 23.6%、30.1%、19.6%;养护 90 d 强度相对于 7 d 强度分别增长了 41.9%、44% 和 30.5%,相比之下,水泥掺量在 8% 时的试件无侧限抗压强度随龄期的增长率最快。因此,水泥稳定风积沙试件的强度增长主要集中在 28 d 内,28 d 后养护龄期影响不大。水泥掺量 6%、8%、10% 对应 28 d 龄期的试件无侧限抗压强度分别为 1.15、2.07、2.98 MPa,可进一步断定,采用 8%~10% 水泥掺量作为高速公路底基层控制标准具有一定的合理性,可以有效提高路基体强度并满足规范要求。

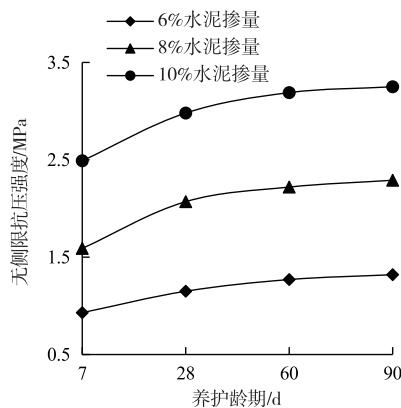


图4 养护龄期对试件强度的影响曲线
Fig. 4 Effect curve of curing age on specimen strength

3.4 压实系数的影响

由图 5 可知,试件无侧限抗压强度均随养护龄期的增加呈增长趋势。水泥掺量为 6%、8%、10% 时,试件压实系数 0.93~0.95 对应试件无侧限抗压强度增长值占 0.93~0.98 的比例分别为:73.3%、69.2%、75%,压实系数 0.95~0.98 对应试件无侧限抗压强度增长值的占比为 26.6%、30.7%、25%。说明压实系数小于 0.95 时,压实系数的大小对试件无侧限抗压强度影响较大;当压实系数大于 0.95 时,试件无侧限抗压强度随压实系数的增长较小。因此,应选择压实系数不低于 0.95,水泥稳定风积沙强度保证值才能满足要求。

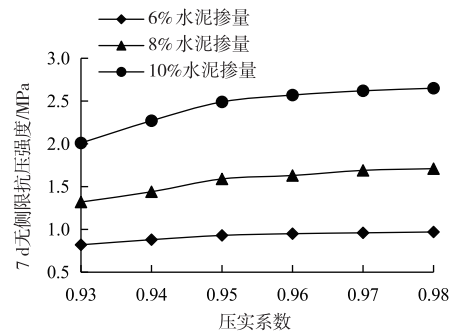


图5 压实系数对试件强度的影响曲线
Fig. 5 Influence curve of compaction coefficient on specimen strength

3.5 水泥标号的影响

压实系数为 0.95,不同标号水泥稳定风积沙试件无侧限抗压强度随水泥掺量的变化曲线如图 6 所示。不同水泥掺量情况下,相同养护龄期的 P·O 42.5 水泥稳定风积沙强度均高于 P·O 32.5 水泥。水泥掺量为 4%、6%、8%、10%、12%,水泥等级从 P·O 32.5 级提高到 P·O 42.5 级,7 d 龄期的试件强度依次增长了 6.35%、9.68%、10.06%、

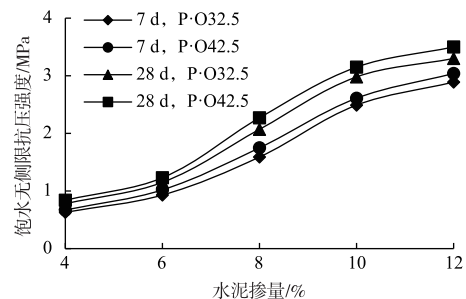


图6 水泥标号对试件强度的影响曲线
Fig. 6 Influence curve of cement grade on specimen strength

材料科学

4.82%和5.19%；对应的28 d龄期的不同水泥掺量下强度依次增长了7.69%、6.95%、9.67%、5.70%和6.05%。总体表现趋势为在相同水泥掺量情况下，试件抗压强度随水泥标号的增大而提高，随着养护龄期的增加而增大。

3.6 干缩性能测试

由图7可知，三种水泥掺量的试件干缩应变曲线均随时间先快速增加后缓慢增加，最后趋于平缓。在第7 d时，6%、8%、10%水泥掺量试件的干缩应变分别达到总干缩应变的69.4%、69.1%、70.8%；在第14 d时，干缩应变分别达到总干缩应变的82.7%、82.1%、84.4%；在28 d时，干缩应变分别达到总干缩应变的99.4%、99.5%、99.2%。所以干缩应变随着龄期的变化主要发生在试件养护的前7 d，7 d之后增长速率降低，14 d之后增长变得缓慢。龄期刚开始时，试件含水率最高，水分散失很快，因此干燥收缩变形速率也较快。通过图像纵向对比可知，不同水泥掺量的干缩应变随着养护龄期增长大小关系为10%>8%>6%，因此，水泥掺量的增加会导致干缩应变增加。

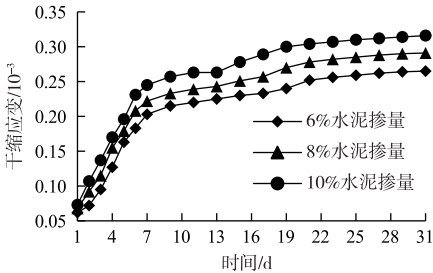


图7 干缩应变随时间变化曲线
Fig. 7 Time dependent curve of dry shrinkage strain

3.7 温缩性能测试

由图8可知，三种水泥掺量的试件温缩应变均随温度降低而增加，温缩应变的增长率也随之变大。每个温度段内温缩应变大小均为6%<8%<10%。水泥掺量为6%与8%曲线之间相对紧凑，水泥掺量为8%与10%曲线之间明显相对比较分散，增加幅度也相对较大。可以得出，试件温缩应变随水泥掺量的增加而增大，且水泥掺量越大，温缩应变增长越快。水泥掺量的提高固然会导致试件强度的增大，但在低温作用下也会引起温缩应变的急剧增大。因此，在实际生产过程中需要注意控制水泥掺量。

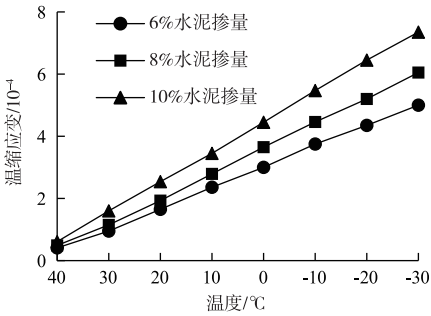
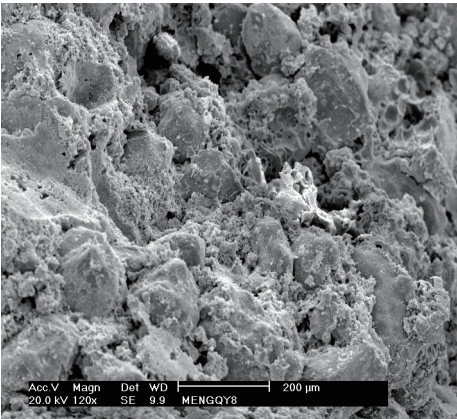


图8 温缩应变随温度变化曲线
Fig. 8 Curve of thermal shrinkage strain with temperature variation

3.8 水泥稳定风积沙电镜扫描

图9清晰地反应水泥对风积沙颗粒的粘结状态。水泥与风积沙的交界处于模糊状态，水化产物填充在风积沙的缝隙，在水泥基体中只形成一些小的孔洞，且各水化产物交织在一起，形成一个连续的整体结构，相对较大的粒团被胶结物连接构成结合料骨架，对细小颗粒有一定的包裹效应，反过来封闭并稳定骨架，因此，结合料的抗压强度较大。风积沙成分中存在大量的酸性物质SiO₂和Al₂O₃，这些酸性物质与水泥遇水产生的碱性激发剂Ca(OH)₂发生水化反应，生成强度更高的C-S-H与C-A-S，并且进一步加速了C₃S矿物的水化，加快了C-S-H凝胶和Ca(OH)₂晶体的析晶速率，对砂浆强度起到提高的作用。C-S-H凝胶的生成不仅提高了水泥砂浆体结构的密度和黏结强度，而且改善了风积沙水泥砂浆中胶凝物质的组成及水泥基体的界面区结构，对水泥风积沙砂浆结构强度的提高非常有利。



(a) 200 μm

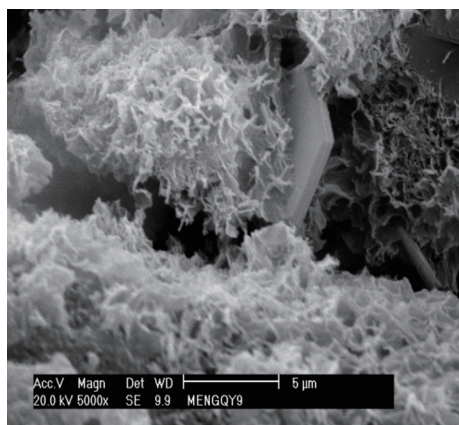
(b) 5 μm

图9 水泥稳定风积沙电镜扫描图

Fig. 9 Electron microscopy scan of cement stabilized aeolian sand

4 结论

通过采用室内试验测试水泥风积沙结合料的最大干密度、最佳含水量、无侧限抗压强度、干缩应变、温缩应变、微观结构，得到以下结论：

(1) 水泥稳定风积沙的最大干密度和最佳含水量均随水泥掺量的增加而增大。7 d 饱和和无侧限抗压强度随着水泥掺入量的增加而增加。建议设计、施工采用 8%~10% 水泥掺量作为填筑高等级公路底基层控制标准。

(2) 试件强度均随养护龄期的增加呈增长趋势，7 d 内的强度增长最为显著，7~28 d 的强度增长有所下降，28 d 以后的强度增长率大幅降低。

(3) 当压实系数小于 0.95 时，压实系数的变化对试件强度影响较大；当压实系数大于 0.95 时，试件强度随压实系数的增长较小。在相同水泥掺量情况下，试件抗压强度随水泥标号的增大而提高，随着养护龄期的增加而增大。

(4) 试件干缩应变均随水泥掺量的增加而增大，且均随时间先快速增加后缓慢增加，最后趋于平缓。试件温缩应变随水泥掺量的增加而增大，且水泥掺量越大，温缩应变增长越快。水泥与风积沙水化反应所生成的胶凝物质，改善了风积沙水泥砂浆中胶凝物质的组成及水泥基体的界面区结构，提高了水

泥沙浆体结构的密度和粘结强度，是形成以胶结力为主的固化风积沙黏聚力的来源。

参 考 文 献

- [1] 任辉明, 曾新迪, 师高鹏, 等. 水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2017 (4): 67-72.
- [2] 李根峰, 申向东, 吴俊臣, 等. 风积沙混凝土收缩变形的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016 (4): 1213-1218.
- [3] 张浩, 胡江洋, 折学森, 等. 沙漠地区某高速公路风积沙压实特性与压实工艺研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2015 (4): 806-811.
- [4] 张浩, 李哲, 折学森, 等. 毛乌素地区不同级配风积沙的压实特性与压缩特性试验研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2015 (8): 167-172.
- [5] 金旻昊, 崔强, 周楠, 等. 水泥固化作用对风积沙试样抗剪强度影响机制的试验研究 [J]. 工业建筑, 2019, 49 (7): 108-112.
- [6] 邓培元, 刘清, 韩风霞, 等. 风积沙自密实混凝土力学性能试验 [J]. 中国科技论文, 2021 (2): 164-172.
- [7] 何静, 申向东, 董伟, 等. 风积沙掺量对水泥砂浆力学性能和微观结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2015 (9): 2609-2613.
- [8] 冉武平, 赵杰, 黄文慧, 等. 无机处治风积沙强度特性及工程应用研究 [J]. 大连理工大学学报, 2018 (2): 141-146.
- [9] 严伟, 阮波, 郑世龙, 等. 不同养护温度下水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021 (3): 678-686.
- [10] 王玉清, 姚温芯, 云泽亚, 等. 风积沙 PVA-FRCC 早期收缩性能及配合比研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025 (5): 1666-1675.
- [11] 史阳光, 高峰, 刘磊, 等. 钢渣和风积沙对混凝土抗压强度的影响及机理研究 [J]. 新型建筑材料, 2025, 52 (4): 29-33.
- [12] 刘杰, 徐晓冬, 王斌, 等. 大掺量风积沙-水泥粉煤灰稳定砾石宏微观性能研究 [J]. 中国公路学报, 2025, 38 (4): 54-68.
- [13] 杨熙, 胡再强, 李宏儒, 等. 纤维与粉土提升水泥稳定风积沙抗压强度的试验研究 [J]. 水电能源科学, 2025, 43 (2): 123-127.
- [14] 张浩, 谢昆, 赵昕, 等. 二灰稳定风积沙力学与收缩性能试验研究 [J]. 公路, 2023, 68 (11): 259-263.
- [15] 郑世龙. 塔克拉玛干沙漠风积沙工程性能试验研究 [J]. 铁道建筑, 2024, 64 (1): 111-115.