

寒区低温环境水泥改良黄土性能与应用

李向阳

(甘肃省公路事业发展中心, 甘肃 兰州 730030)

摘要:针对中国寒区气候寒冷、全年平均气温低的气候特点,采用5℃、10℃、20℃、30℃分别模拟低温、室温和中温养生条件下水泥改良湿陷性黄土的现场养生条件,基于室内试验分析养生环境温度、水泥掺量、养生龄期对水泥改良黄土 R_{CBR} (加州承载比)、无侧限抗压强度、动态回弹模量的影响规律;进而采用冻融循环试验和动水冲刷试验研究水泥掺量和养生温度对水泥改良黄土抗冻融耐久性和抗冲刷性能的影响。结合室内试验成果,将4%和5%水泥改良黄土应用于填筑高速公路上路床和下路床,并测试试验段水泥改良黄土路床顶面的回弹模量、FWD动态回弹弯沉和贝克曼梁静态回弹弯沉,最终建立路床顶面回弹模量与实测弯沉以及动、静弯沉之间的拟合关系。结果表明:水泥改良黄土的 R_{CBR} 、无侧限抗压强度和动态回弹模量等力学指标均随养生温度的增加和水泥掺量的增大而持续增大;经历9次冻融循环后水泥改良土的动态回弹模量趋于稳定,综合考虑水泥改良黄土的抗冻性、抗冻融耐久性和经济性,推荐适宜的水泥掺量为4%~5%,寒区5℃、10℃环境温度施工的水泥改良土动态回弹模量折减系数可取0.80~0.85、0.90~0.95;BB实测弯沉(L_{BB})与FWD实测弯沉(L_{FWD})之间的拟合关系为: $L_{\text{BB}}=1.166\times L_{\text{FWD}}$ 。

关键词:路基工程;黄土;水泥改良黄土;力学性能;冻融循环;弯沉

中图分类号:U416.4

文献标志码:A

Properties and Application of Cement Improved Loess under Low Temperature Environment in Cold Region

LI Xiangyang

(Gansu Highway Development Center, Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: According to the cold climate and low annual average temperature in cold regions of China, the field curing conditions of cement improvement of collapsibility loess under low temperature, room temperature, and medium temperature were simulated at 5 °C, 10 °C, 20 °C, and 30 °C, respectively. Based on laboratory experiments, this study analyzed the effects of curing temperature, cement content, and curing age on R_{CBR} , unconfined compressive strength, and dynamic resilience modulus of cement improved loess. The effects of cement content and curing temperature on freeze-thaw durability and erosion resistance of cement improved loess were studied by the freeze-thaw cycle test and dynamic water erosion test. Combined with the laboratory results, the 4% and 5% cement improved loess were applied to fill the upper and lower roadbed of the expressway, with a test of the elastic modulus of the top surface of the roadbed, the dynamic elastic deflection of FWD and the static elastic deflection of Beckman beam in the test section. Finally, the fitting relationships between the elastic modulus of the top surface of the roadbed and the measured bending as well as the dynamic and static bending were established. The results show that the mechanical indexes such as R_{CBR} , unconfined compressive strength, and dynamic resilience modulus of cement improved loess increase continuously with the rise of curing temperature and cement content. After 9 freeze-thaw cycles, the dynamic

收稿日期:2024-09-11(修改稿)

基金项目:交通运输行业重点科技项目(编号:2022-MS1-0731)

作者简介:李向阳,男,高级工程师.E-mail:292641654@qq.com

resilience modulus of cement improved loess tends to be stable. Considering the freeze-resistance, freeze-thaw durability, and economy of cement improved loess, the appropriate cement content is recommended to be 4%–5%, and the reduction coefficient of dynamic resilience modulus of cement improved loess constructed at 5 and 10 °C in cold regions can be 0.80–0.85 and 0.90–0.95. The fitting relationship between the measured deflection of BB (L_{BB}) and the measured deflection of FWD (L_{FWD}) is $L_{BB}=1.166\times L_{FWD}$.

Keywords: subgrade engineering; loess; cement improved loess; mechanical properties; freeze-thaw cycle; deflection

0 引言

黄土在中国陕西省、甘肃省、青海省、河南省、山西省等省份广泛分布。黄土颗粒组成以粉粒(粒径 0.05~0.005 mm)为主,有肉眼可见的大孔,孔隙比一般为 1.0 左右,用作路基填料时难以满足高速公路路床的 R_{CBR} 指标要求(上路床 $R_{CBR}\geq 8\%$,下路床 $R_{CBR}\geq 5\%$)。为满足黄土分布区路基填筑的需求,将黄土改良尤为重要,道路工作者对黄土地区黄土改良处治与相关理论研究也不断深入^[1-2]。吴文飞等^[3]研究了固化剂改良水泥稳定黄土的强度特性及水稳定性,发现掺入水泥能大幅度提高黄土的力学性能,掺入固化剂不仅能提高水泥改良黄土的力学性能,还能有效改善黄土的抗水毁性能,但是固化剂对黄土有一定的适应性,对特定黄土需要选择性使用固化剂才能达到最优效果;贺涛^[4]、王建良^[5]研究了养生龄期、压实度、水泥掺量对水泥改良黄土无侧限抗压强度的影响,结果表明:水泥掺量越大、养生龄期越长、压实度越高,相应的水泥改良土无侧限抗压强度和 R_{CBR} 越高,抗冻耐久性越好;金明亮等^[6]研究了延迟压实时间对水泥改良黄土路床的现场施工工艺及施工效果的影响;蒋应军等^[7]研究了水泥剂量、压实度、养生龄期对水泥改良黄土水稳系数、干湿残留强度比及冻融残留强度比的影响规律;祁晓强等^[8]研究了试件成型方式、水泥掺量、压实度和冲刷作用次数对水泥改良黄土抗冲刷性能的影响;江涛^[9]研究了银西高铁甘宁段水泥改良黄土路基冻胀规律及冻胀防治效果;艾志军^[10]研究了磷石膏-水泥改良黄土的动力特性;曹金生等^[11]研究了煤气化渣改良黄土的力学特性;高中南等^[12]研究了粉煤灰改良饱和黄土动力特性;金明亮等^[13]研究了钢渣改良黄土的无侧限抗压强度、水稳定性及承载力。

总结已有研究成果可以发现^[14-16],目前中国对水

泥、石灰、固化剂、工业废渣等改良黄土的 R_{CBR} 、无侧限抗压强度、动力特性及干湿循环作用下的强度衰减规律等方面开展了大量研究,所得结论为黄土力学性能和抗水损害性能的提升和实体工程应用奠定了良好基础。但是已有研究大多是在特定养生温度条件下研究水泥改良黄土的 R_{CBR} 、无侧限抗压强度等基本力学性能,较少涉及低温养生环境下水泥改良黄土的动态回弹模量等力学性能研究,也较少涉及冻融循环作用下水泥改良黄土动态回弹模量衰减规律及抗冲刷性能方面研究,缺少现场回弹模量、动态和静态弯沉对比分析。基于此,针对中国寒区气候寒冷、全年平均气温低的气候特点,采用 5 °C、10 °C、20 °C、30 °C 分别模拟低温、室温和中温养生条件下水泥改良湿陷性黄土的现场养生条件,基于 CBR 试验、无侧限抗压强度试验、动态回弹模量试验研究低温养生温度、龄期 and 水泥掺量对改良黄土力学性能的影响,进而基于冻融循环试验及动水冲刷试验,研究了低温养生温度和水泥掺量对改良黄土抗冻性能及抗冲刷耐久性能的影响规律。最后结合实体工程应用情况,测试了水泥改良黄土路基顶面回弹模量与动、静弯沉,拟合回归了三者之间的关系,研究成果可为水泥改良黄土的工程设计和现场测试提供借鉴。

1 试验

1.1 原材料性能

(1) 黄土:采用实体工程中边坡开挖的新堆积黄土,按照《黄土地区公路路基设计与施工技术规范》(JTG/T D31-05—2017)评价黄土场地的自重湿陷性等级为Ⅱ级(中等)。按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)试验方法测试黄土的物理、力学性能,结果见表 1。最佳含水率条件下压实黄土的物理力学性能见表 2。

表1 黄土主要技术性能

Table 1 Main technical properties of loess

天然含水率/ %	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	颗粒密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙比	w_L / %	w_P / %	I_P
11.5	1.359	2.72	1.03	24.3	15.8	11.5
湿陷系数	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	剪切强度指标 $\varphi/(^{\circ})$ c/kPa		压缩系数/ (MPa^{-1})	颗粒组成/%	
					砂粒	粉粒 黏粒
0.064	4.34×10^{-4}	31.2	42	0.57	15.8	67.4 16.8

表2 压实黄土物理、力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of compacted loess

最佳含水率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	R_{CBR} / %	无侧限抗压 强度/kPa	动态回弹 模量/MPa
15.3	1.836	4.8	184.5	41.7

从表1、2可以看出:试验用黄土的压缩性高,孔隙比大, R_{CBR} 力学性能较差,不满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)高速公路下路床 R_{CBR} 不小于5%及上路床 R_{CBR} 不小于8%的最小承载比要求,另外,动态回弹模量不符合《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)重载及以上交通荷载等级路基顶面回弹模量不小于50 MPa的要求。按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)规定,此类黄土用于路床填筑时,应采取措施予以改良。

(2) 水泥:采用实体工程中使用的P·R7.5级粉煤灰硅酸盐水泥。根据检测报告,水泥的3 d、28 d抗压强度分别为24.3 MPa、44.7 MPa;3 d、28 d抗折强度分别为4.9 MPa、8.6 MPa;初凝、终凝时间分别为278 min、392 min,符合《道路硅酸盐水泥》(GB/T 13693—2017)和《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)相关指标要求。采用实验室自来水。

1.2 试验方案

(1) 试验变量:参考《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)规定的高速公路上路床压实度不小于96%,室内试验按照重型击实试验最大干密度的96%控制压实度。调研了陇西、关中、河南、冀鲁等实体工程中的水泥改良黄土的设计方案,结合路拌法施工工艺要求,考虑经济性,试验初拟的水泥掺量为2%、3%、4%、5%。根据青藏公路沿线五道梁、沱沱河、安多、那曲等典型区域近60年最热月(6—9月)平均温度实测值(最热月平均温度5~10℃)^[17-18],同时借鉴《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)附

录G中青海玉树、四川阿坝等寒区最热月平均温度及年平均气温,考虑到水泥稳定碎石普遍都在一年当中温度较高的季节施工。同时考虑施工环境温度的影响,试验研究变化水泥改良黄土的养生温度为5℃、10℃、20℃和30℃。

(2) 试验目的:基于室内CBR试验、无侧限抗压强度(UCS)试验和动态回弹模量试验,研究水泥掺量和养生温度对水泥改良黄土力学性能的影响,并建立不同力学指标之间的相关性。进而基于冻融循环试验和动水冲刷试验研究水泥掺量对水泥改良黄土耐久性性能的影响,综合以上试验成果,探讨适宜的水泥掺量范围。最后结合实体工程应用情况,给出现场压实工艺,现场测试路床顶面回弹模量、静态弯沉(贝克曼梁法)和动态回弹弯沉(落锤式FWD),建立动静弯沉及回弹模量与实测弯沉之间的拟合关系,为水泥改良黄土的工程应用提供借鉴。

1.3 试验方法

(1) 力学性能试验:水泥改良黄土的最大干密度、CBR试验[图1(a)]、无侧限抗压强度[图1(b)]、动态回弹模量等力学性能试验的试件尺寸、养生龄期、加载速率、数据处理等严格参照《黄土地区公路路基设计与施工技术规范》(JTG/T D31-05—2017)



(a) CBR 试验 (b) 无侧限抗压强度试验

图1 CBR试验与无侧限抗压强度试验

Figure 1 CBR and unconfined compressive strength test

中 T0131—2019 重型击实试验、T0134—2019 承载比 (CBR) 试验、T0148—1993 无侧限抗压强度试验、T0194—2019 动态回弹模量试验等相关要求执行。

(2) 冻融循环试验: 冻融循环试验参照《公路土工试验规程》(JTG/T D31-05—2017) 中 T0194 冻融循环试验条件, 冻融温度采用试验规程建议的重冻区—15℃冻结温度, 冻结时间为 48 h。考虑到发生冻融后的融化温度一般稍高于 0℃, 且现场冻结融化时间一般持续 1~2 d, 甚至更长^[19-20]。为了最大限度地模拟现场实际的冻融条件, 确定融化温度为 5℃, 融化时间为 48 h, 一次完整冻融循环过程需要 96 h, 重复冻融 12 次, 每次冻融结束后测试动态回弹模量 (图 2)。



(a) 冻融前试件 (b) 冻融循环 (c) 冻融后加载破坏后试件

图 2 冻融循环试验

Figure 2 Freeze-thaw cycle test

(3) 抗冲刷性能试验: 为了模拟半刚性基层沥青路面开裂后, 水下渗至路床顶面, 在行车荷载-水耦合作用下水泥改良土发生唧泥病害, 参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024) 中 T0860—2009 动水冲刷试验方法, 在 28 d 龄期养生条件下, 采用冲击力峰值为 0.5 MPa、冲刷频率 10 Hz 施力状态, 分别冲刷 0~30 min 后测试水泥改良土的质量损失率。

2 水泥改良黄土力学特性

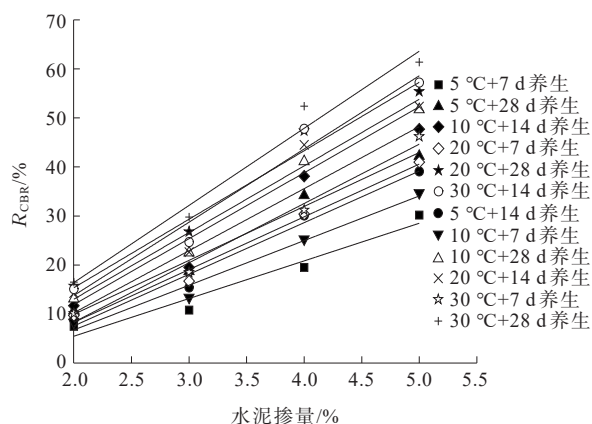
2.1 CBR 试验

不同水泥掺量、压实度及养生温度条件下的 3 d、7 d、28 d 养生龄期的 CBR 试验结果见图 3。

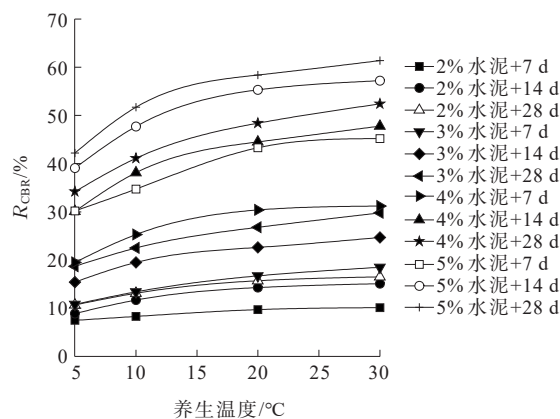
由图 3 可知:

(1) 养生龄期和养生温度相同, 水泥改良土的 R_{CBR} 随着水泥掺量增大呈线性增大, 水泥掺量由 2% 增大至 5%, 12 组试件的 R_{CBR} 均值由 6.9% 增大至 20.1%, R_{CBR} 均值提高了近 2 倍。水泥改良黄土的过程是复杂的化学和物理过程, 随着水泥掺量增大, 改

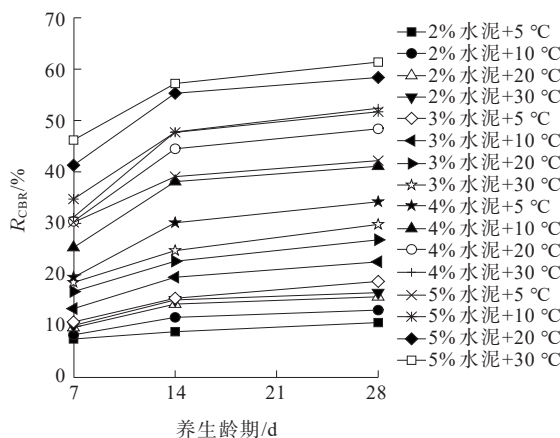
良土中的离子交换反应、水泥水化反应提供的胶凝材料数量越多, 改良土的整体性越好。



(a) 不同水泥掺量 R_{CBR}



(b) 不同养生温度 R_{CBR}



(c) 不同养生龄期 R_{CBR}

图 3 CBR 试验结果

Figure 3 CBR test results

(2) 水泥改良黄土的 R_{CBR} 随着养生温度增加而增大, 在水泥掺量和养生龄期相同条件下, 养生温度由 5℃ 增大至 10℃, R_{CBR} 均值增大了 20%~25%, 养生温度由 10℃ 增大至 20℃, R_{CBR} 均值增大了 10%~

15%, 养生温度由 20℃ 增大至 30℃, R_{CBR} 均值增大了 6%~8%。这表明寒区低温环境不利于水泥改良土力学性能的增长, 当养生温度提高至 20℃ 以后, 继续提高养生温度 R_{CBR} 提高幅值不大。这主要是低温养生环境影响水泥水化效率和速率, 当养生温度过高时, 水泥改良土试件因水分迁移速率过快而产生干缩变形, 从而形成微裂缝, 反而对 R_{CBR} 值产生负面影响。这与工程实践中温度过高季节施工水泥改良土易产生表层微裂缝或间距规则的横向裂缝的机理基本一致。因此, 应避免水泥稳定土在低温或高温季节施工, 必要时在水泥改良土顶面铺设级配碎石垫层, 以隔断反射裂缝。

(3) 与混凝土强度增长规律基本相同, 在相同水泥掺量和养生温度条件下, 水泥改良土的强度随着养生龄期的增长而提高, 养生龄期超过 7 d 后 R_{CBR} 仍有明显增长, 在养生 7~28 d 龄期内, R_{CBR} 持续增大, 但增长率不断减小, 计算可知: 14 d 龄期 R_{CBR} 比 7 d 龄期 R_{CBR} 增大 40%~45%, 而 28 d 龄期 R_{CBR} 比 14 d 龄期 R_{CBR} 增大 10%~15%。

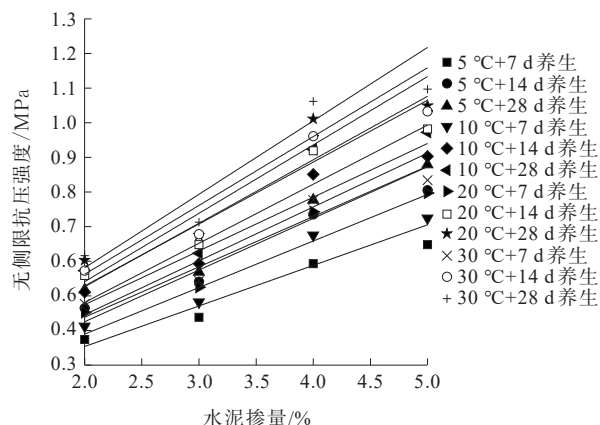
(4) 以满足 7 d 龄期 R_{CBR} 不小于 8% 为约束条件, 5℃ 养生的水泥改良土最小水泥掺量为 3%, 考虑到路拌法施工的均匀性, 最小水泥掺量应不少于 4%; 而 10~30℃ 养生的水泥改良土最小水泥掺量仅为 2%, 路拌法施工最小水泥掺量可采用 3%。

2.2 无侧限抗压强度试验

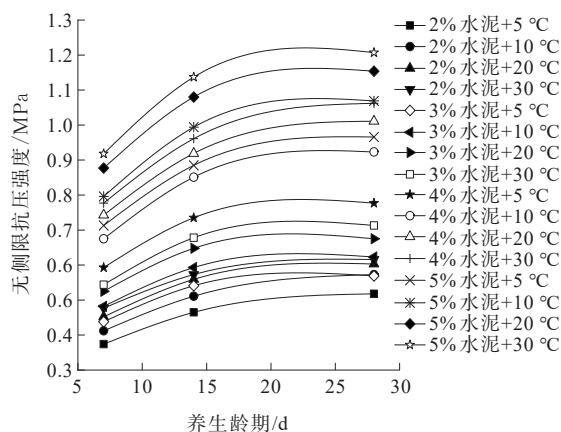
不同水泥掺量和养生温度条件下, 水泥改良黄土在 3 d、7 d、28 d 养生龄期的无侧限抗压强度试验结果见图 4。

由图 4 可知: 在相同试验条件下, 水泥改良黄土的无侧限抗压强度随养生龄期、水泥掺量及养生温度的变化趋势与 CBR 试验结果基本一致。水泥改良黄土的无侧限抗压强度随水泥掺量增大而线性增大, 水泥掺量由 2% 增大至 5%, 无侧限抗压强度均值增大了 90%~100%; 改良土的无侧限抗压强度随着养生温度升高而增大, 养生温度由 5℃ 增大至 10℃, 水泥改良土无侧限抗压强度增大了 9%~19%, 养生温度由 10℃ 增大至 20℃, 相同养生龄期和水泥掺量下的无侧限抗压强度增大了 5%~10%, 养生温度由 20℃ 增大至 30℃, 相同养生龄期和水泥掺量下的无侧限抗压强度增大了 2%~6%; 28 d 养生龄期内的无侧限抗压强度随着养生龄期延长而持续增大, 同时强度

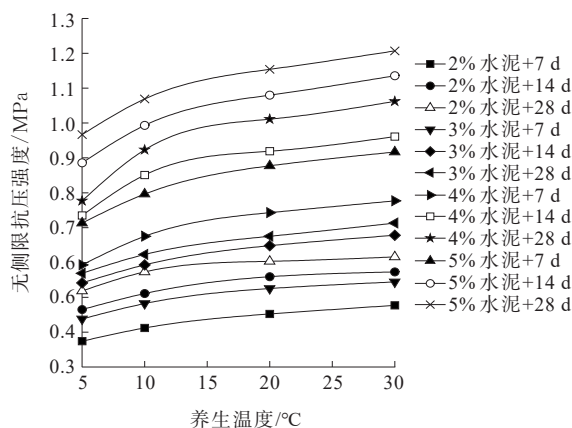
增长速率减小, 水泥改良土养生 14 d 龄期比 7 d 龄期的无侧限抗压强度增大了 25%~30%, 而 28 d 龄期无侧限抗压强度比 14 d 龄期增大了 5%~15%。



(a) 不同水泥掺量无侧限抗压强度



(b) 不同养生龄期无侧限抗压强度



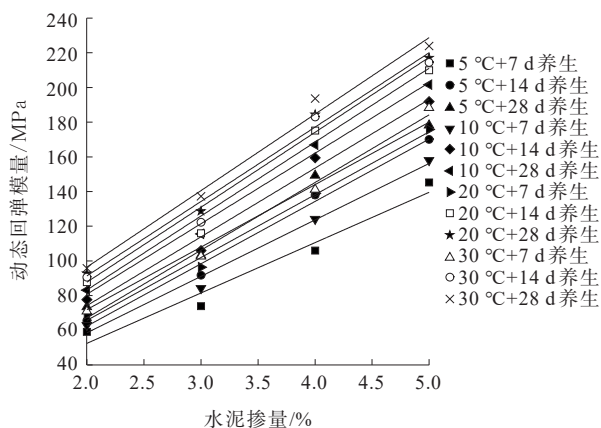
(c) 不同养生温度无侧限抗压强度

图 4 无侧限抗压强度试验结果

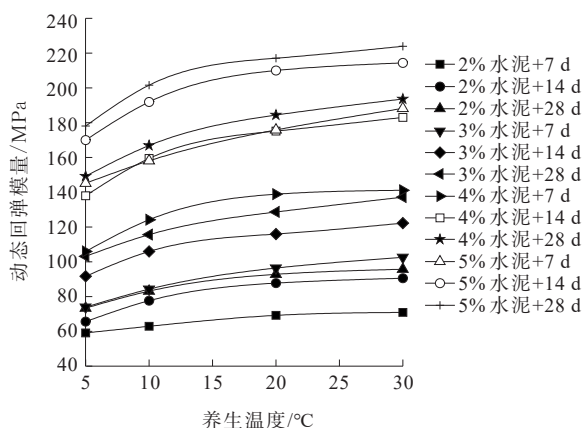
Figure 4 Unconfined compressive strength test results

2.3 动态回弹模量试验

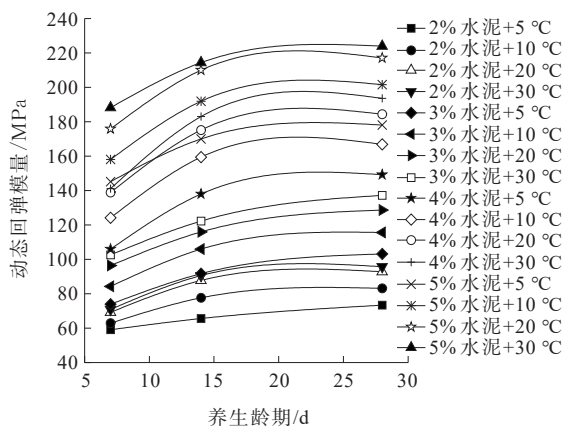
不同水泥掺量、压实度及养生温度条件下的 7 d、14 d、28 d 养生龄期的动态回弹模量试验结果见图 5。



(a) 不同水泥掺量动态回弹模量



(b) 不同养生温度动态回弹模量



(c) 不同养生龄期动态回弹模量

图5 动态回弹模量试验结果

Figure 5 Results of dynamic resilience modulus test

由图5可知:

(1) 养生龄期和养生温度相同,水泥改良土的动态回弹模量随着水泥掺量增大呈线性关系增大,拟合优化度 R^2 大于0.9。5℃养生条件下,水泥掺量由2%增大至5%,7 d、14 d、28 d龄期的动态回弹模量增大了145.7%、159.1%、142.6%;10℃养生条件下,

水泥掺量由2%增大至5%,7 d、14 d、28 d龄期的动态回弹模量增大了151.4%、147.3%、145.6%;20℃养生条件下,水泥掺量由2%增大至5%,7 d、14 d、28 d龄期的动态回弹模量增大了154.1%、139.5%、133.9%;30℃养生条件下,水泥掺量由2%增大至5%,7 d、14 d、28 d龄期的动态回弹模量增大了165.4%、136.6%、134.1%。

(2) 水泥改良黄土的动态回弹模量随着养生温度升高而增大,以28 d龄期的动态回弹模量为例,养生温度由5℃提高至10℃,2%、3%、4%、5%水泥掺量条件下改良土的28 d龄期动态回弹模量分别增加13.2%、12.1%、11.9%、14.2%;养生温度由10℃提高至20℃,2%、3%、4%、5%水泥掺量条件下改良土的28 d龄期动态回弹模量分别增加11.7%、11.2%、10.5%、7.7%;养生温度由20℃提高至30℃,2%、3%、4%、5%水泥掺量条件下改良土的28 d龄期动态回弹模量分别增加3.1%、6.7%、5.1%、3.1%。提高养生温度后水泥改良土的动态回弹模量增大趋势明显,尤其是养生温度由5℃增大至20℃,动态回弹模量增幅平均值可达20%~30%。因此,水泥改良黄土应在温度较高季节施工,对于寒区低温季节施工的水泥改良黄土,应对室内标准养生温度下的动态回弹模量予以折减,5℃、10℃环境温度施工的水泥改良土动态回弹模量折减系数可取0.80~0.85、0.90~0.95,小于20℃养生环境的水泥改良土动态回弹模量折减系数可插值确定。

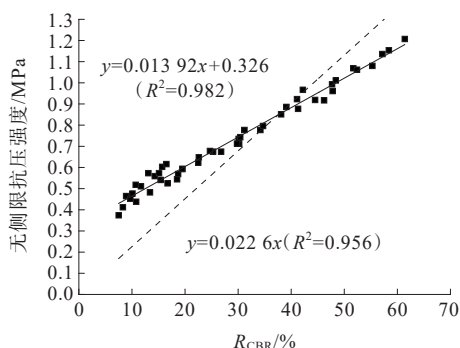
(3) 在相同水泥掺量和养生温度条件下,水泥改良土的动态回弹模量随着养生龄期的增长而持续增大,但动态回弹模量增长率随养生龄期增加而不断减小,14 d龄期动态回弹模量比7 d龄期动态回弹模量增大了10%~30%,28 d龄期动态回弹模量仅比14 d龄期动态回弹模量增大了5%~15%,增长幅度明显减小。《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)要求路基结构以路床顶面动态回弹模量为设计指标,从动态回弹模量增长趋势来看,建议现场养生10~14 d即可加铺上层水泥稳定级配碎石结构层。

2.4 力学性能相关性

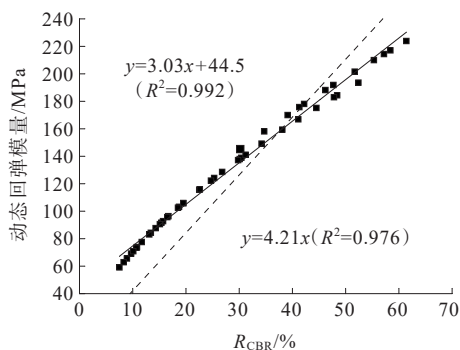
在相同试验条件下水泥改良黄土的 R_{CBR} 、无侧限抗压强度及动态回弹模量的增长趋势基本相同,为了便于现场条件不充分时也能够按照经验公式进行

两种强度之间的换算,建立了相同试验条件下 R_{CBR} 与无侧限抗压强度及 R_{CBR} 与动态回弹模量的拟合关系,如图6所示。

由图6拟合结果可知:无侧限抗压强度(q_{UCS})与 R_{CBR} 之间满足过零点直线拟合 $q_{\text{UCS}}=0.022\,6\times R_{\text{CBR}}$,拟合优化度 R^2 大于0.95,或常规直线拟合 $q_{\text{UCS}}=0.013\,92\times R_{\text{CBR}}+0.326$,拟合优化度 R^2 大于0.98。动态回弹模量 M_{MR} 与 R_{CBR} 之间满足过零点直线拟合 $M_{\text{MR}}=4.21\times R_{\text{CBR}}$,拟合优化度 R^2 大于0.97,成常规直线拟合; $M_{\text{MR}}=3.03\times R_{\text{CBR}}+44.5$,拟合优化度 R^2 近似等于1.0。 R_{CBR} 作为选择路基填料的唯一力学指标,受现实条件限制时,可根据 R_{CBR} 值估算标准状态下填料的回弹模量,当 R_{CBR} 不超过40%时,建议采用公式 $M_{\text{MR}}=4.21\times R_{\text{CBR}}$ 估算动态回弹模量,拟合精度高,且有一定冗余度。



(a) R_{CBR} 与无侧限抗压强度拟合关系



(b) R_{CBR} 与动态回弹模量拟合关系

图6 R_{CBR} 与无侧限抗压强度及动态回弹模量的拟合关系

Figure 6 Fitting relationship between R_{CBR} and unconfined compressive strength and dynamic resilience modulus

3 水泥改良黄土耐久性能试验

3.1 冻融循环试验

采用90 d龄期试件进行冻融循环试验,冻融循环结束后测试经历不同冻融循环作用后的水泥改良

土试件的动态回弹模量。按照《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)要求,季节性冰冻地区路基回弹模量设计值应考虑冻融条件下的折减(折减系数为经历 N 次冻融循环后动态回弹模量实测值与冻融前动态模量标准值的比值),分析冻融循环试验过程中动态回弹模量折减系数的变化情况,结果见图7。

由图7可知:

(1) 随着冻融循环作用次数增加,水泥改良黄土的动态回弹模量持续减小,同时冻融循环过程中动态模量的衰减速率减小。在经历前5次冻融循环过程中,水泥改良土的动态回弹模量下降最为明显,经历5~9次冻融循环过程中动态回弹模量下降幅值逐渐减缓,经历9次冻融循环后动态回弹模量趋于平稳,并最终达到稳定状态,建议后续采用9次冻融循环试验来评价水泥改良黄土的抗冻融耐久性。

(2) 与冻融循环试验过程中动态模量衰减趋势相同,随着冻融循环次数增大,水泥改良土的动态回弹模量折减系数减小,前5次冻融循环试验过程中的动态回弹模量折减系数衰减幅度较大,经历9次冻融循环后动态回弹模量折减系数趋于稳定。

(3) 相同养生温度和冻融循环作用次数条件下,水泥改良土的动态回弹模量折减系数随着水泥掺量的增大呈增大趋势,当水泥掺量达到4%后,继续增大水泥掺量后动态回弹模量折减系数增大幅值减缓。从抗冻性和经济性考虑,适宜的水泥掺量为4%~5%。

(4) 在相同水泥掺量和相同冻融循环作用次数条件下,水泥改良土的动态回弹模量折减系数随强度发展过程中的养生温度升高而持续增大,养生温度5~20℃的动态模量折减系数增大趋势最明显,养生温度超过20℃后动态回弹模量折减系数增长率减小。

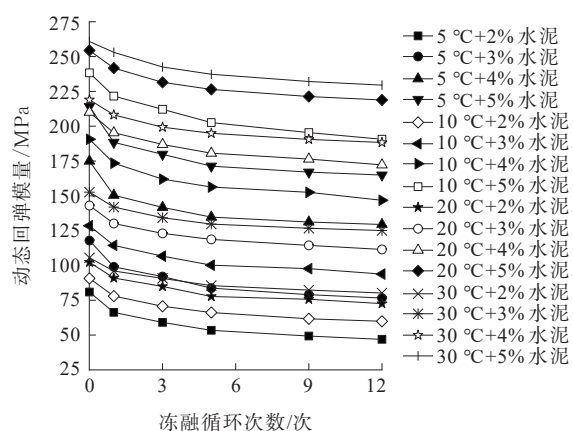
(5) 计算经历9次冻融循环后4%、5%水泥掺量下改良黄土的动态回弹模量折减系数,5℃养生条件下,4%、5%水泥改良土的动态回弹模量折减系数分别为0.75、0.78;10℃养生条件下,4%、5%水泥改良土的动态回弹模量折减系数分别为0.81、0.82;20℃养生条件下,4%、5%水泥改良土的动态回弹模量折减系数分别为0.82、0.86;30℃养生条件下,4%、5%水泥改良土的动态回弹模量折减系数分别为0.86、0.88。5~10℃低温环境养生的水泥改良土动态回弹

模量折减系数取 0.75~0.80,接近规范建议冻融折减系数 0.70~0.95 的下限,10~20 °C 养生的水泥改良土动态回弹模量折减系数取 0.80~0.85,接近规范建议的冻融循环折减系数的中值,20~30 °C 养生的水泥改良土动态回弹模量折减系数取 0.85~0.90,接近规范

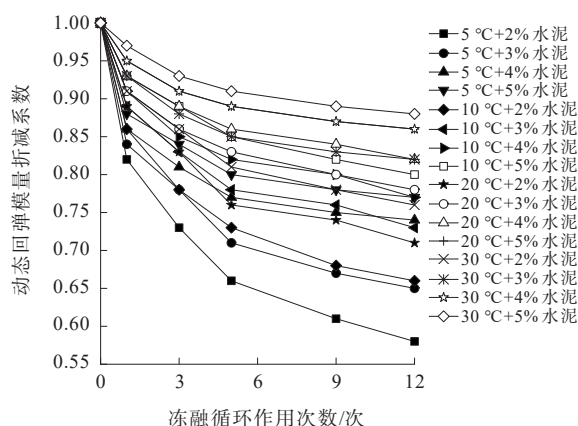
推荐折减系数的上限。

3.2 动水冲刷试验

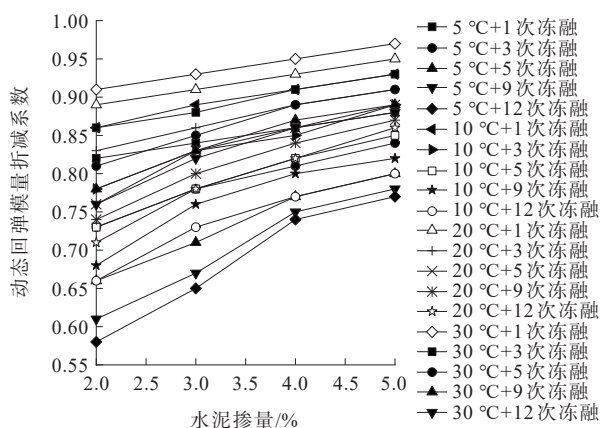
变化水泥掺量为 2%~5%,在养生温度 5 °C、10 °C、20 °C、30 °C 条件下养生 90 d,养生结束后进行动水冲刷试验。结果如图 8 所示。



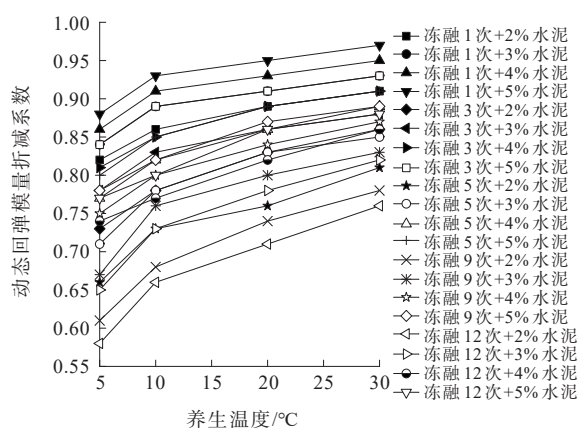
(a) 动态回弹模量随冻融循环作用次数衰减规律



(b) 不同冻融循环作用次数动态模量折减系数



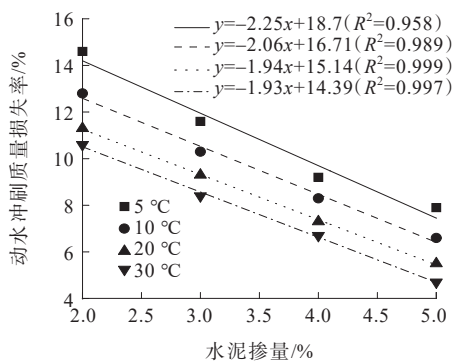
(c) 不同水泥掺量动态模量折减系数



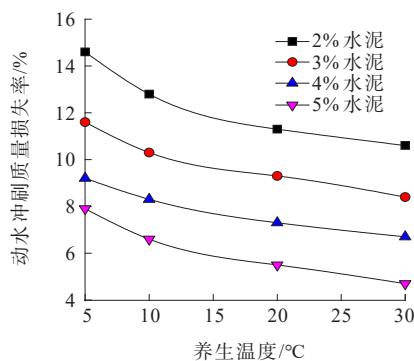
(d) 不同养生温度动态模量折减系数

图 7 水泥改良土冻融循环试验结果

Figure 7 Results of freeze-thaw cycle test of cement improved loess



(a) 不同水泥掺量动水冲刷质量损失率



(b) 不同养生温度动水冲刷质量损失率

图 8 动水冲刷试验结果

Figure 8 Results of dynamic water erosion test

由图8试验结果可知:

(1) 随着水泥掺量增大,水泥改良土的动水冲刷质量损失率呈线性关系减小,在5℃、10℃、20℃、30℃养生条件下,水泥掺量由2%增大至5%,水泥改良土的动水冲刷质量损失率分别减小了48.9%、48.4%、51.3%、55.7%,增大水泥掺量能显著提高水泥改良黄土的抗冲刷性能,水泥掺量每增加1%,水泥改良黄土的动水冲刷质量损失率减少2%。

(2) 相同水泥掺量条件下,随着养生龄期内的温度增加,水泥改良黄土的抗动水冲刷质量损失率减小,在2%、3%、4%、5%水泥掺量条件下,养生温度由5℃提高至30℃后,水泥改良黄土的动水冲刷质量损失率减小了27.4%、27.6%、27.2%、28.3%,表明养生期间环境温度越高,水泥改良黄土的抗动水冲刷性能越好。

4 工程应用

基于室内研究成果,将4%水泥改良黄土和5%水泥改良黄土应用于某高速公路下路床和上路床。现场施工温度最低10℃,养生期间平均温度15~20℃。采用路拌法施工,为保证在水泥初凝结束前完成碾压工序,现场确定施工段长度为200 m。松铺系数1.21~1.25,现场压实采用20 t压路机静压1遍后弱振1遍+26 t振动压路机强振6遍+20 t压路机静压1遍,压实完成后压实度达到了97.4%~98.9%,压实度满足要求($\geq 96\%$)。

在路床施工结束后养生7~14 d龄期内,试验段纵向每隔25 m设置1个测试断面,每个测试断面布设4个测点,试验段共计布设120个检测点,测点位置做好标记,按照《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 3450—2019)中T0943—2008承载板法测试路床顶面回弹弯沉,间隔4 h以上采用落锤式弯沉仪(FWD)检测,随后在相同点位采用贝克曼梁(BB)复测弯沉,对比不同养生龄期条件下这两种方法检测试验段路床的弯沉值差异,同时建立路基顶面回弹弯沉与FWD、BB实测弯沉之间的拟合关系,结果见图9。

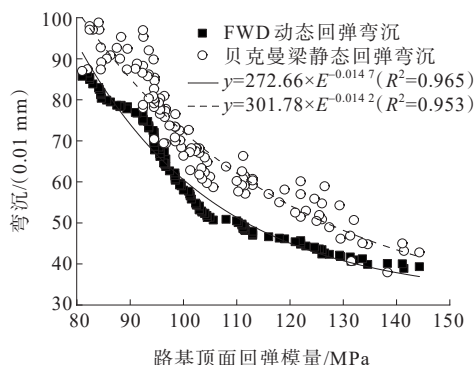
由图9结果可知:

(1) 现场养生7~14 d后,水泥改良黄土路基顶面回弹模量实测值为80~145 MPa,试验过程中发现路基顶面实测回弹模量和弯沉值变异性较大,分析其原因:① 测试周期长达7 d,试验期间水泥改良黄

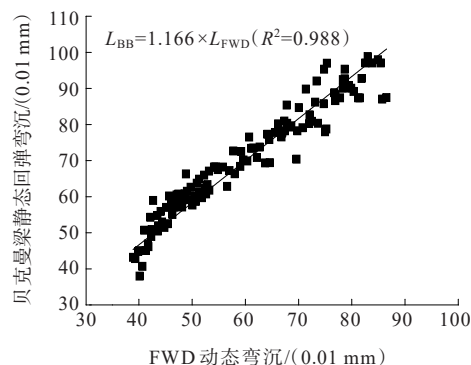
土的回弹模量仍处于增长阶段,导致不同龄期内水泥改良土回弹模量和弯沉差异较大;② 路拌法施工工艺施工过程中水泥撒布量、拌和用水量等不均匀导致的水泥剂量离析,水泥改良土强度不均匀,拌和用水量离析导致压实度不均匀,这都会严重影响回弹模量和弯沉测试结果。总体上,现场实测路基顶面回弹模量远大于《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2017)重载交通路基顶面回弹模量不小于60 MPa的要求,实体工程施工质量良好。

(2) 现场养生7~14 d后,水泥改良黄土的FWD动态回弹弯沉为40(0.01 mm)~85(0.01 mm);BB静态回弹弯沉为45(0.01 mm)~100(0.01 mm),养生时间越长,回弹弯沉越小,养生7~14 d期间弯沉的减小趋势明显。

(3) 实测相同点位处的FWD动态回弹弯沉小于BB静态回弹弯沉,拟合结果表明:FWD实测弯沉(L_{FWD})与BB实测弯沉(L_{BB})之间具有良好的线性拟合关系, $L_{BB}=1.166 \times L_{FWD}$,拟合优化度 R^2 接近0.99,



(a) 路基顶面回弹模量与弯沉之间拟合关系



(b) FWD动态弯沉与BB静态弯沉拟合关系

图9 水泥改良土路基顶面回弹模量与弯沉测试结果
Figure 9 Test results of resilience modulus and deflection of cement improved loess subgrade top surface

研究成果可为水泥改良黄土用于高速公路路床提供借鉴。

(4) 水泥改良黄土路床顶面实测回弹模量 E 与动、静态弯沉之间具有良好的指数关系。拟合方程为: $L_{BB}=301.78 \times E^{-0.0142}$ 、 $L_{FWD}=272.66 \times E^{-0.0147}$ 。

5 结论

(1) 养生龄期和养生温度相同,水泥改良土的 R_{CBR} 、无侧限抗压强度和动态回弹模量均随着水泥掺量增大呈线性增大,水泥改良黄土的力学性能随养生温度稳定增加而增大,增加水泥掺量和提高养生温度都有助于增强水泥改良黄土的抗冲刷性能和抗冻耐久性能。

(2) 随着冻融循环次数增大,水泥改良土的动态回弹模量折减系数减小,冻融 9 次后动态回弹模量趋于平稳。对于寒区低温季节施工的水泥改良黄土,应对室内标准养生温度下的动态回弹模量予以折减,5℃、10℃环境温度施工的水泥改良土动态回弹模量折减系数可取 0.80~0.85、0.90~0.95,小于 20℃ 养生环境的水泥改良土动态回弹模量折减系数可插值确定。

(3) 现场养生 7~14 d 后,4%(下路床)、5%(上路床)水泥改良黄土的 FWD 动态回弹弯沉为 40(0.01 mm)~85(0.01 mm),BB 静态回弹弯沉为 45(0.01 mm)~100(0.01 mm),4%、5% 水泥改良黄土路床顶面实测回弹模量为 80~145 MPa,动、静弯沉与路床顶面弯沉之间具有良好的指数关系,动、静弯沉之间有良好的线性关系。

参考文献:

References:

- [1] 王翰越,蒋应军.石灰改良黄土路基填料抗冻性能分析[J].中国科技论文,2020,15(2):154-159.
WANG Hanyue, JIANG Yingjun. Analysis of frost resistance performance of lime improved loess roadbed filler[J].China Sciencepaper,2020,15(2):154-159.
- [2] 赵丹妮,曹宝花,许江波,等.不同纳米黏土改良黄土试验结果对比分析[J].中外公路,2024,44(1):55-65.
ZHAO Danni, CAO Baohua, XU Jiangbo, et al. Comparative analysis of test results of different nano-clay improved loess[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024,44(1):55-65.
- [3] 吴文飞,张纪阳,何锐,等.固化剂改良水泥稳定黄土强度及水稳性研究[J].硅酸盐通报,2016,35(7):2159-2165.
WU Wenfei,ZHANG Jiyang,HE Rui,et al.Firming agent to improve strength and water stability of stabilized loess with cement[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016,35(7):2159-2165.
- [4] 贺涛.青海地区水泥改良黄土的特性研究[J].路基工程,2021(6):35-38.
HE Tao. Study on characteristics of loess improved by cement in Qinghai Area[J].Subgrade Engineering,2021(6): 35-38.
- [5] 王建良.青海地区水泥改良黄土技术与性能研究[J].公路,2017,62(6):60-63.
WANG Jianliang.Study on technology and performance of cement improving loess in Qinghai Area[J].Highway,2017, 62(6):60-63.
- [6] 金明亮,韦正鹏.湿陷性黄土地区水泥改良土路床的现场试验研究[J].兰州理工大学学报,2023,49(3):135-139.
JIN Mingliang, WEI Zhengpeng. Study of field test of cement-modified soil road bed in collapsible loess area[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2023,49(3): 135-139.
- [7] 蒋应军,王翰越,乔怀玉,等.水、干湿及冻融循环作用下水泥改良黄土路基稳定性[J].科学技术与工程,2020,20(35):14592-14599.
JIANG Yingjun, WANG Hanyue, QIAO Huaiyu, et al. Stability of cement-modified loess subgrade under water, wet-dry and freezing-thawing cycles[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(35):14592-14599.
- [8] 祁晓强,袁可佳,蔡露瑶,等.水泥改良黄土抗冲刷性能影响因素研究[J].硅酸盐通报,2021,40(7):2418-2427.
QI Xiaoliang, YUAN Kejia, CAI Luyao, et al. Influencing factors of anti-erosion performance of cement improved loess[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40 (7):2418-2427.
- [9] 江涛.银西高铁甘宁段水泥改良黄土路基冻胀规律及冻胀防治效果评价[J].铁道标准设计,2021,65(9):8-17.
JIANG Tao.The frost heave law of cement-improved loess as filling material for subgrade and evaluation of anti-frost effect in Gansu-Ningxia section of Yinchuan-Xi'an high-speed railway[J].Railway Standard Design,2021,65(9): 8-17.
- [10] 艾志军.磷石膏-水泥改良黄土动力特性试验[J].岩土工程技术,2021,35(5):341-346.

- AI Zhijun. Test on dynamic characteristics of phosphogypsum cement improved loess[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2021, 35(5): 341-346.
- [11] 曹金生, 武立波, 孙萌萌, 等. 煤气化渣改良黄土的力学特性试验分析[J]. 中国科技论文, 2024, 19(1): 23-32.
- CAO Jinsheng, WU Libo, SUN Mengmeng, et al. Experimental analysis of mechanical properties of loess improved by coal gasification slag[J]. China Sciencepaper, 2024, 19(1): 23-32.
- [12] 高中南, 钟秀梅, 王峻, 等. 粉煤灰改良饱和黄土动力特性研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(3): 91-98.
- GAO Zhongnan, ZHONG Xiumei, WANG Jun, et al. Dynamic characteristics of saturated loess improved by fly ash[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(3): 91-98.
- [13] 金明亮, 王兴涛, 郑万鹏, 等. 钢渣作为胶凝剂稳定黄土路基研究与应用[J]. 公路, 2022, 67(9): 101-108.
- JIN Mingliang, WANG Xingtao, ZHENG Wanpeng, et al. Research and application of steel slag as gelling agent to stabilize loess subgrade[J]. Highway, 2022, 67(9): 101-108.
- [14] 常应红, 赵金朋, 张晓轴, 等. 侧向受控条件与压实度对陕北地区压实黄土压缩特性的影响[J]. 中外公路, 2024, 44(4): 64-72.
- CHANG Yinghong, ZHAO Jinpeng, ZHANG Xiaozhou, et al. Influence of lateral constraint conditions and compactness on compression characteristics of compacted loess in Northern Shaanxi[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 64-72.
- [15] 张宜洛, 李宁, 邓展伟, 等. 内蒙古地区典型路基土动态回弹模量研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 13-20.
- ZHANG Yiluo, LI Ning, DENG Zhanwei, et al. Research on dynamic resilience modulus of typical subgrade soil in Inner Mongolia[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4): 13-20.
- [16] 黄崇伟, 朱宝兵, 章毅, 等. 潮湿路基水泥改良细粒土动态回弹模量试验研究[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 18-23.
- HUANG Chongwei, ZHU Baobing, ZHANG Yi, et al. Experimental study on dynamic resilient modulus of cement-improved fine-grained soils in wet subgrade[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 18-23.
- [17] 司伟, 马磊, 仁乾龙珠, 等. 青藏高寒地区真实环境冻融作用的量化与统计[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 237-243.
- SI Wei, MA Biao, RENQIAN Longzhu, et al. Quantification and statistics of site freeze-thaw cycles in Qinghai-Tibet Plateau cold region[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40(2): 237-243.
- [18] 司伟, 胡永平, 马磊, 等. 青藏公路沿线真实环境冻融次数变化分析[J]. 中国科技论文, 2018, 13(19): 2161-2166.
- SI Wei, HU Yongping, MA Biao, et al. Variation of freeze-thaw cycles in the real environment along with the Qinghai-Tibet Highway[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(19): 2161-2166.
- [19] 王宏. 沙漠戈壁地区水泥稳定碎石基层沥青路面拱胀调查与防治措施[J]. 公路, 2019, 64(3): 266-274.
- WANG Hong. Investigation of asphalt pavement blow-up on cement stabilized crushed stone base and preventive measures in Gobi Desert[J]. Highway, 2019, 64(3): 266-274.
- [20] 田宇翔, 马磊, 王大龙, 等. 高寒地区水泥稳定碎石弯拉特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2569-2573.
- TIAN Yuxiang, MA Biao, WANG Dalong, et al. Flexural tensile characteristics of cement-stabilized macadam in cold plateau regions[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(9): 2569-2573.