

冻融循环作用下水泥稳定碎石抗冻特性

田宇翔¹, 马 翥¹, 王大龙², 李 宁¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 沈阳公路路政管理局, 辽宁 沈阳 850000)

摘 要:针对水泥稳定碎石(简称水稳碎石)等半刚性基层在青藏高原高海拔地区频繁冻融循环作用下,易造成材料强度与耐久性下降,影响路面整体使用性能问题。以拉萨—贡嘎机场专用公路新建工程为依托,从水稳碎石的抗冻融性能出发,采用室内试验模拟冻融循环过程,分析水稳碎石经不同次冻融循环作用后的强度损失规律,引入抗压强度耐冻系数与劈裂强度耐冻系数作为抗冻融性能评价指标,对比分析水泥用量、养生温度和冻融循环次数与水稳碎石耐冻系数的相关性;以水稳碎石耐冻系数为主参数,水泥用量、养生温度与冻融循环次数为变量,引入温度修正系数对基层养生温度影响进行修正,并对耐冻系数进行回归,建立二元线性预测模型,计算模型计算值与试验实测值的相对误差,验证模型的拟合精度。研究表明:水稳碎石的强度与耐冻系数随冻融循环次数的增加而降低,强度在 0~5 次冻融循环周期内下降较为明显;较高的水泥用量与养生温度可有效降低水稳碎石冻融后的强度损失,建议工程中控制水泥用量为 4%(质量分数,下同),同时保证养生温度大于 10℃可有效提高材料抗冻融性能;所建二元线性预测模型具有较高的拟合精度和很好的再现性,可为水稳碎石抗冻融性能研究提供参考,为特殊地区半刚性基层设计施工提供技术指导。

关键词:道路工程;水泥稳定碎石;冻融循环;耐冻系数;预测模型

中图分类号:U416

文献标志码:A

Freeze resistance characteristics of cement-stabilized macadam under freeze-thaw cycle

TIAN Yu-xiang¹, MA Biao¹, WANG Da-long², LI Ning¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shenyang Highway Administration Bureau, Shenyang 850000, Liaoning, China)

Abstract: Strength and durability of semi-rigid type bases, such as cement stabilized macadam base, will reduce under the action of frequent freeze-thaw cycle in high-altitude areas of Qinghai-Tibet Plateau, which affect the entire performance of pavement. Based on the new project of Lhasa to Gongga Airport Dedicated Road, starting from anti-freeze-thaw performance of cement-stabilized macadam under freeze-thaw cycle, this paper used indoor experiment to simulate freeze-thaw cycle and analyzed the strength loss law of cement-stabilized macadam base under different times of freeze-thaw cycle. Freeze-resistant coefficient of compressive strength and splitting

收稿日期:2017-02-05

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG05B04);交通运输部建设科技项目(2013 318 490 010);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821161015)

作者简介:田宇翔(1990-),男,陕西西安人,工学博士研究生,E-mail:561637264@qq.com。

通讯作者:马 翥(1972-),男,甘肃会宁人,教授,博士研究生导师,E-mail:mb@gl.chd.edu.cn。

strength was introduced as evaluation index to contrast and analyze the co-relationship among cement content, curing temperature, freeze-thaw cycle number and freeze-resistant coefficient of cement-stabilized macadam. Freeze-resistant coefficient was set as main parameter. Cement content, curing temperature, and freeze-thaw cycle time were set as variables. Temperature correction coefficient was introduced to revise the influence of primary curing temperature. Regression analysis was carried out on freeze-resistant coefficient and binary linear prediction model was established to calculate relative errors between calculated values and measured values, so as to verify the fitting precision. The results show that strength and freeze-resistant coefficient declines with the increase of freeze-thaw cycle number, and strength loss is more obvious when the freeze-thaw cycle number is 0 to 5. Higher cement content and curing temperature can effectively reduce the strength loss of freeze-thaw of cement-stabilized macadam, so the recommended cement content is 4% (mass fraction, the same below) and curing temperature should be kept above 10 °C, which can effectively improve the anti-freeze-thaw properties of materials. The established binary linear prediction model has high fitting accuracy and good reproducibility, which can provide references for the anti-freeze performance research, and guide the design and construction of semi-rigid base in special areas. 7 tabs, 6 figs, 18 refs.

Key words: road engineering; cement-stabilized macadam; freeze-thaw cycle; freeze-resistant coefficient; prediction model

0 引言

水泥稳定碎石(以下简称水稳碎石)等半刚性基层材料因其整体性强、承载力高、刚度大、水稳定性好等特点,广泛应用于中国路面基层建设之中。但在使用中其逐渐暴露出收缩开裂、渗水性差和易发生疲劳破坏等问题^[1-2],尤其在青藏高原多年冻土地区,半刚性基层受频繁冻融循环作用影响,内部逐渐形成损伤累积,强度与承载能力下降,进而产生松散、开裂等病害,影响路面整体使用性能。因此,进行水稳碎石在冻融循环作用下的抗冻性能研究显得愈发重要^[3]。

国内外学者针对半刚性基层开展了大量研究。美国与欧洲各国在技术规范中以半刚性基层材料经一定次数冻融循环后的试件强度与质量损失率评价其抗冻性能,其中应用较为广泛的有美国混凝土协会(American Concrete Institute, ACI)与国际材料试验协会(International Association for Testing Materials, IATM)制定的抗冻性标准。Setzer从热力学三相共存的角度研究了水稳类材料易发生冻融破坏的条件,系统地分析了水稳材料的冻融机理与影响因素^[4];洪锦祥等通过强度、收缩等性能模拟试验分析,提出了较为合理的高原多年冻土地区水稳粒料组成设计方法^[5];沙爱民等从半刚性基层材料的结构特征出发,对不同结构类型水稳碎石的强度

与模量进行了试验研究,给出了骨架密实、骨架孔隙结构水泥稳定类基层材料的合理设计方法^[6];吴瑞麟等对水稳碎石进行了长期浸水冻融循环试验,分析了水稳碎石在冻融循环中的强度变化规律,深入研究了冻融循环对路用性能的影响^[7];朱文强通过饱水冻融循环试验,对比分析了水稳砂砾、水稳碎石、二灰稳定碎石等材料的抗冻性能和力学性能,进而分析了材料力学性能的变化对路面结构的影响^[8];蒋应军等通过室内试验研究了试件成型方式、水泥剂量、级配类型和密实度对水稳碎石强度的影响规律,深入分析了水稳碎石结构与强度的关系^[9];林敏等在水稳碎石中掺入不同剂量的早强剂,研究其技术参数,分析了不同剂量早强剂对抗冻性能的影响^[10];刘玉辉等从原材料、施工速度、压实程度、养生、抗冻性等方面对水稳碎石进行了试验研究,为高寒季冻区水稳碎石基层施工提供了宝贵经验^[11];陈志国等针对季节性冻土地区公路路面抗冻设计,提出了基于冻结指数和潮湿系数的二级区划体系与路面抗冻破坏设计方法^[12]。以上研究从材料选择、组成设计、影响因素、物理力学性能及路用性能等角度对半刚性基层的抗冻性能进行了大量分析与评价,但当前针对水稳碎石抗冻融性能的评价参数选择及性能预测方面的研究相对较少。同时,西藏高海拔地区半刚性基层研究主要针对二级和以下公路,但该地区高速公路和一级公路中暴露出大量问

题,且当前针对该地区高速公路、一级公路水稳碎石基层抗冻性研究较为匮乏,已有的水稳砂砾基层的相关研究成果应用性较差。

鉴于此,本文以拉萨—贡嘎机场专用公路新建工程项目为依托,针对西藏高海拔地区水稳碎石基层在冻融循环作用下的强度损失问题,从水稳碎石的抗冻融性能出发,通过试验研究冻融循环作用对水稳碎石材料抗压强度与劈裂强度的影响,分析水泥用量、养生温度和冻融循环次数与材料强度的相关性;引入耐冻系数分析材料强度经冻融循环后的变化规律,以期得到控制材料强度损失,提高抗冻性的施工技术指标;对耐冻系数与水泥用量、养生温度及冻融循环次数的关系进行回归拟合,建立数学预测模型并验证模型的拟合精度,为水稳碎石基层抗冻融性能研究提供参考,同时为冻融频繁地区半刚性基层设计与施工提供技术指导。

1 试验方案

1.1 试验原材料

试验原材料均采用拉萨—贡嘎机场专用新建公路工程原材料。采用西藏高争建材有限公司生产 PO42.5 普通硅酸盐水泥作为水泥原材料,按照规范《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》(GB 175—92)对水泥技术指标进行试验检测,测定其物理性能及强度指标,结果见表 1。

表 1 水泥技术指标试验结果

Tab. 1 Test results of cement technical indexes

试验项目			规定值	实测值
物理性能	凝结时间/min	初凝	≥45	160
		终凝	≤600	285
	安定性指标/mm	标准法 (雷氏法)	≤5.0	1.0
强度	抗压强度/MPa	3 d	≥17.0	25.0
		28 d	≥42.5	48.3
	抗折强度/MPa	3 d	≥3.5	5.3
		28 d	≥6.5	7.7

粗集料在水稳碎石中起骨架作用,其技术指标对水稳碎石的和易性与强度影响较大,试验集料取自拉萨—贡嘎机场专用公路沿线拉萨河南岸地区所产石灰岩碎石,其技术指标见表 2。

选取力学强度与抗疲劳性能较好的骨架密实结构进行矿料级配设计,采用逐级填充原理,通过振动试验法提出粗集料级配。参照工程实践中粗集料划分方式,划为 6 档^[13-14],具体级配组成见表 3。

表 2 集料技术指标

Tab. 2 Technical indexes of aggregate

集料规格/ mm	含泥量/ %	针片状 含量/%	压碎值/ %	表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水率/%
(20,30]	0.2	5.0		2.776	0.66
(10,20]	0.2	8.7	13.7	2.765	0.60
(5,10]	0.2	8.8		2.759	0.43
(0,5]	1.2			2.667	0.36

注:含泥量、针片状含量均为质量分数。

表 3 碎石级配

Tab. 3 Gravel gradation of macadam

筛孔尺寸/mm		31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过 率/%	规范上限	100	86	58	32	28	15.0	3.1
	规范中值	100	77	48	27	22	11.5	1.5
	规范下限	100	68	38	22	16	8.1	0
	合成级配	100	79	54	31	23	9.3	1.4

由表 3 可知,碎石级配组成在规范上限和下限之间,在 2.36 mm 左右级配分别处于规范中值的上部与下部,且接近规范中值。

按照《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG F30—2003)要求进行配合比设计,确定最佳含水率与最大干密度,根据材料用量拌制成型,每个配合比取 4%、5%、6%、7%、8% 这 5 种预定含水量(质量分数,下同)。拌和后 1 h 内完成击实试验,测定试件最大干密度和最佳含水量,结果见表 4。

表 4 击实试验结果

Tab. 4 Compaction test results

指标	试验结果		
水泥用量/%	3	4	5
最佳含水率/%	5.95	6.00	6.04
最大干密度/(g·cm ⁻³)	2.31	2.33	2.35

注:水泥用量为质量分数,下同。

1.2 试验方法

冻融循环对水稳碎石抗压强度的影响由多方面因素造成,其中水泥用量与养生温度的影响较为显著。参考《公路工程水泥与水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)中水泥混凝土抗压强度试验方法(T0554—2005),采用 15 cm×15 cm 圆柱体试件,试件脱模称量后,立即用塑料薄膜包覆,在(20±2)℃、相对湿度 95% 以上环境中进行标准保湿养生 90 d。利用低温箱与水浴桶模拟冻融循环过程,在-18℃ 环境中冻结试件 16 h,然后在 20℃ 水浴环境中融化 8 h,记为单次冻融周期(下页图 1)。在此基础上分别测定 3%、4%、5% 水泥用量的试件经 0、3、5、8、11 次冻融循环后的抗压强度变化,各设平行试件 3 组,测定后取其强度均值计算耐冻系数并进行影响因素分

析。西藏等高海拔地区气候特殊,施工条件恶劣,施工时养生温度难以满足要求,影响混凝土强度形成、基层成型和路面使用性能。为研究养生温度对水稳碎石抗冻融性能的影响,对 4%水泥用量的水稳碎石试件进行 90 d 保湿养生,设定养生温度分别为 5℃、10℃、20℃、25℃,然后测定试件经 0、3、5、8、11 次冻融循环后的抗压强度变化,各设平行试件 3 组,测定后取其强度均值计算耐冻系数并进行影响因素分析。

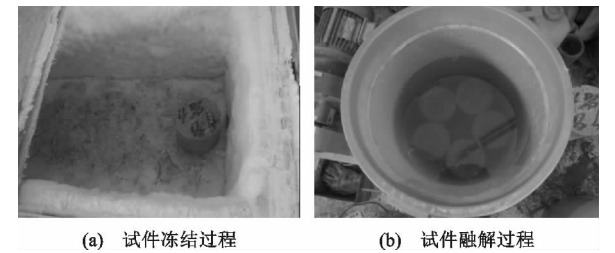


图 1 水稳碎石试件的冻结与融解过程
Fig. 1 Freezing and thawing processes of cement-stabilized macadam specimen

水稳碎石劈裂强度测定参考《公路工程水泥与水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)中水泥混凝土劈裂抗拉强度试验方法(T0561—2005),分析标准养生条件(环境温度(20±2)℃、相对湿度 95%以上)下水泥用量对水稳碎石劈裂强度的影响。将 3%、4%、5%水泥用量的水稳碎石试件进行 90 d 标准养生,测定其经 0、3、5、8、11 次冻融循环后的劈裂强度变化,各设平行试件 3 组,测定后取强度均值计算耐冻系数并进行影响因素分析。

以水稳碎石抗压强度与劈裂强度耐冻系数为研究对象,水泥用量、养生温度与冻融循环次数为变量,对耐冻系数进行回归,建立二元线性预测模型,得出耐冻系数与水泥用量、冻融循环次数与养生温度的关系,并计算模型计算值与试验实测值的相对误差值,分析模型的精度,为水稳碎石基层抗冻融性能评价提供参考。

2 冻融循环作用下抗压强度分析

2.1 水泥用量影响分析

水泥用量 3%、4%、5%的水稳碎石试件经 0、3、5、8、11 次冻融循环作用后的抗压强度变化如表 5 所示。

以试件经冻融循环后抗压强度均值 R_D 与冻融前初始强度均值 R_C 的比值,作为抗冻性评价指标,记为抗压强度耐冻系数 K_D (freeze-resistant coefficient of compressive strength),公式为

表 5 经冻融循环作用的抗压强度变化

Tab. 5 Changes of compressive strength of specimens after freeze-thaw cycles

水泥用量/%	不同冻融循环次数的抗压强度/MPa				
	0	3	5	8	11
3	5.7	5.3	5.0	4.9	4.7
3	5.7	5.2	5.0	4.9	4.8
3	5.6	5.4	5.2	4.8	4.8
4	8.1	7.5	7.3	7.0	7.0
4	8.1	7.5	7.3	7.1	7.0
4	8.2	7.4	7.4	7.2	6.9
5	8.6	8.3	8.1	7.9	7.8
5	8.5	8.4	8.0	7.9	7.8
5	8.6	8.3	8.0	7.9	7.7

$$K_D = \frac{R_D}{R_C} \times 100\%$$
(1)

水稳碎石试件抗压强度均值与耐冻系数随冻融循环次数的变化见图 2。

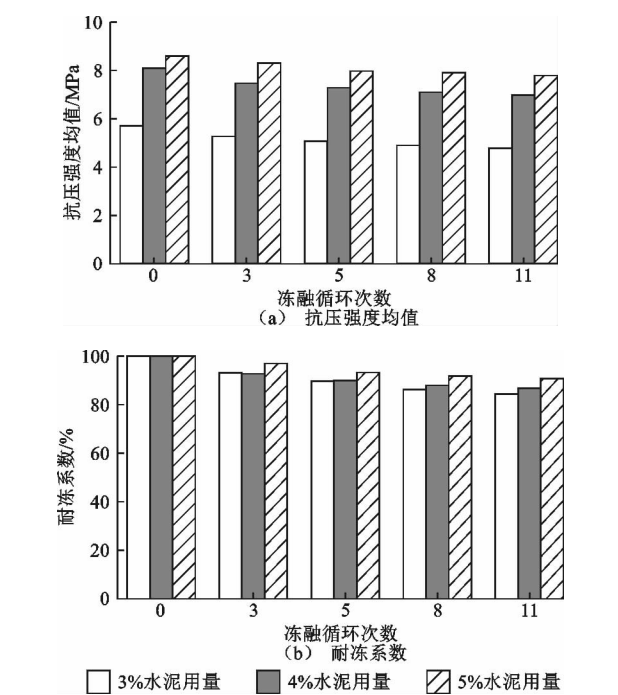


图 2 抗压特性与水泥用量、冻融循环次数的关系
Fig. 2 Relationships between compressive characteristic, cement content and freeze-thaw cycle number

由图 2 可知,水稳碎石试件抗压强度随冻融循环次数增加逐渐下降。在 0~5 次冻融循环周期内,抗压强度下降较为明显,3%、4%、5%水泥用量下试件在 0~5 次冻融循环下的强度损失分别占整体强度变化的 67%、73%、66%,5 次冻融循环后抗压强度的下降逐渐趋于平缓,可见抗压强度损失主要集中在 0~5 次冻融周期内;耐冻系数随冻融循环次数的增加呈下降趋势,相比冻融前,3%、4%、5%水泥

用量下的耐冻系数在 11 次冻融循环后分别降低了约 17%、13%、12%，水泥用量越大，耐冻系数下降程度越小。

分析其原因，水泥用量小的试件水化反应程度较低，水分剩余多；水泥用量较大时材料结构更加密实，孔隙率及饱水后含水率较低，试件内部水结冰引起体积膨胀产生的应力和渗透压力较小，在冻融循环过程中强度损失较小，耐冻系数下降较为缓慢，抗冻融性能较好。5 次冻融循环后，试件孔隙壁大量破坏，孔隙扩张基本停止，孔隙尺寸维持恒定，冻融引起的强度降低很小，耐冻系数下降趋于平缓^[15-16]。

综上所述，水泥用量大的水稳碎石试件经冻融后强度损失较少，抗冻融性能较好，在工程中可通过适当提高水泥用量以改善材料抗冻性能。3% 水泥用量的试件经冻融循环后强度损失较为明显，而 4% 与 5% 水泥用量试件的耐冻系数变化差距较小（仅为 1%），考虑到水泥用量过高可能加剧半刚性基层干缩裂缝现象，且会增加材料成本，建议采用 4% 水泥用量。

2.2 养生温度影响分析

4% 水泥用量的水稳碎石试件在 5℃、10℃、20℃、25℃ 下养生 90 d 后，经 0、3、5、8、11 次冻融循环后的抗压强度变化见表 6，抗压强度均值与耐冻系数变化见图 3。

表 6 经冻融循环作用后试件抗压强度变化

Tab. 6 Changes of compressive strength of specimens after freeze-thaw cycles

养生温度/℃	不同冻融循环次数的抗压强度/MPa				
	0	3	5	8	11
5	7.3	6.9	6.5	6.2	6.1
5	7.1	6.8	6.4	6.3	6.2
5	7.3	6.8	6.5	6.0	6.1
10	7.8	7.4	7.2	6.9	6.8
10	7.9	7.3	7.1	6.9	6.9
10	8.0	7.5	7.0	7.1	7.0
20	8.1	7.5	7.3	7.0	7.2
20	8.1	7.4	7.2	7.1	7.0
20	8.2	7.4	7.4	7.2	7.1
25	8.5	8.2	8.0	7.9	7.8
25	8.6	8.0	8.0	7.9	8.0
25	8.7	8.0	7.9	7.9	7.9

由图 3 可知：随着冻融循环次数的增加，试件抗压强度与耐冻系数均呈下降趋势，抗压强度在 0~5 次冻融循环内下降较为明显，5 次后趋于平缓，养生温度 T 较低时下降幅度较为显著；相比冻融前，经 11 次冻融循环后 5℃、10℃、20℃、25℃

下的耐冻系数分别降低约 16%、12%、10%、8.1%，可见较高养生温度下的耐冻系数下降程度明显低于较低温度。

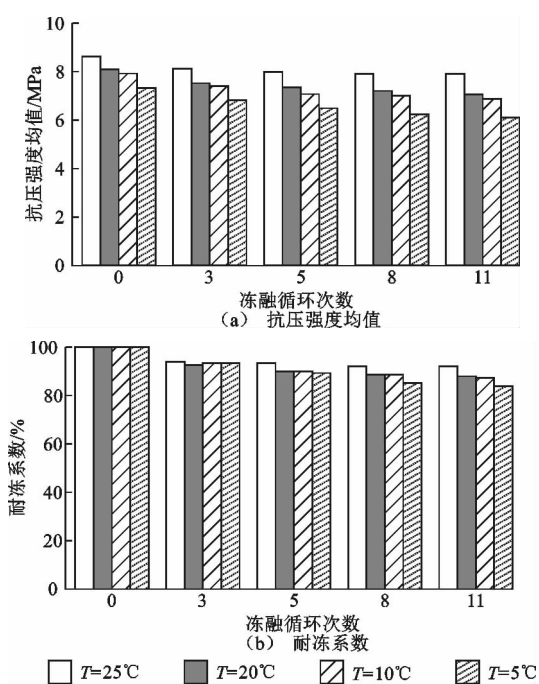


图 3 抗压特性与养生温度 T 、冻融循环次数的关系

Fig. 3 Relationships among compressive characteristic, curing temperature and freeze-thaw cycle number

从初始强度角度看，低温养生下材料的抗压强度较低，冻融前，5℃ 养生下的抗压强度仅为 25℃ 下的 84%，随着养生温度升高，初始抗压强度水平逐渐升高，10℃ 与 20℃ 下的抗压强度初始值分别可达 25℃ 下的 92% 与 94%，初始强度差距逐渐减小；从强度损失角度看，养生温度较高时，材料内部水泥水化反应较快，水分消耗量较大，在冻融循环过程中冻结的水分较少，渗透压力和附加内应力对材料内部的破坏程度较小，抗压强度损失较小，表现为养生温度较高时耐冻系数下降程度明显低于低温下的结果^[17]。

综上所述，养生温度较高时，材料初始抗压强度较大，冻融循环过程中强度损失相对较小，在施工中应对基层养生温度予以控制。由于青海、西藏等高寒地区气温较低，难以满足养生温度要求，建议限定最低养生温度为 10℃，有条件时应达到 20℃ 或以上，在保证材料初始强度的同时，以降低其在冻融循环中的损失，提高材料抗冻融性能。

2.3 耐冻系数计算模型

通过数学拟合方法对耐冻系数进行回归，以水稳碎石抗压强度耐冻系数为主参数，水泥用量与冻

融循环次数为变量,对 3%、4%、5% 水泥用量下标准养生水稳碎石试件经冻融循环作用的抗压强度耐冻系数进行回归,建立二元线性预测模型,得出耐冻系数 K'_D 与水泥用量 C 、冻融循环次数 F 的关系^[18]

$$K'_D = 2.381C - 1.264F + 90.456 \quad R^2 = 0.89 \quad (2)$$

式中: R^2 为判定系数。

为进一步研究养生温度对耐冻系数的影响,在式(2)基础上引入养生温度修正系数 K_t ,以 20℃ 为基准,修正养生温度对耐冻系数的影响,经过对比试算,结果见式(3),相关系数结果见下页表 7。

$$K'_D = K_t(2.381C - 1.264F + 90.456) \quad (3)$$

表 7 养生温度修正系数与判定系数 R^2

Tab. 7 Curing temperature correction coefficient and decision coefficient				
decision coefficient				
养生温度/℃	5	10	20	25
K_t	0.934	0.969	1	0.996
R^2	0.89	0.88	0.89	0.87

为验证预测模型对水稳碎石抗压强度耐冻系数的拟合效果与再现性,将试验获得的 90 组耐冻系数数据实测值 K_D 与二元线性预测模型得出的计算值 K'_D 进行对比,计算相对误差并绘制 45°等值线。图 4 中散点与 45°等值线(图中虚线)越接近,则模型误差越小,拟合精度越高。

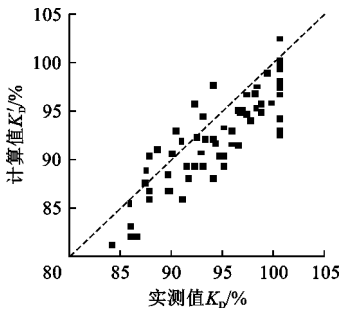


图 4 抗压强度耐冻系数模型 45°等值线

Fig. 4 Isoline with 45° of compressive freeze-resistant coefficient model

在 90 组数据的对比结果中,最大相对误差为 5.9%,平均相对误差 2.3%,模型计算误差在工程允许范围内。由图 4 可知:预测值基本分布于 45°等值线附近,拟合效果较好,所建模型具有较高的拟合精度与再现性;有利于对不同水泥用量与养生温度下的水稳碎石抗压强度耐冻系数进行预测,可满足工程的预测精度要求,为水稳碎石基层抗冻融性能评价提供参考。

3 冻融循环作用下劈裂强度分析

3.1 水泥用量影响分析

水泥用量 3%、4%、5% 下的水稳碎石试件经 0、3、5、8、11 次冻融循环后的劈裂强度均值与耐冻系数变化见图 5。

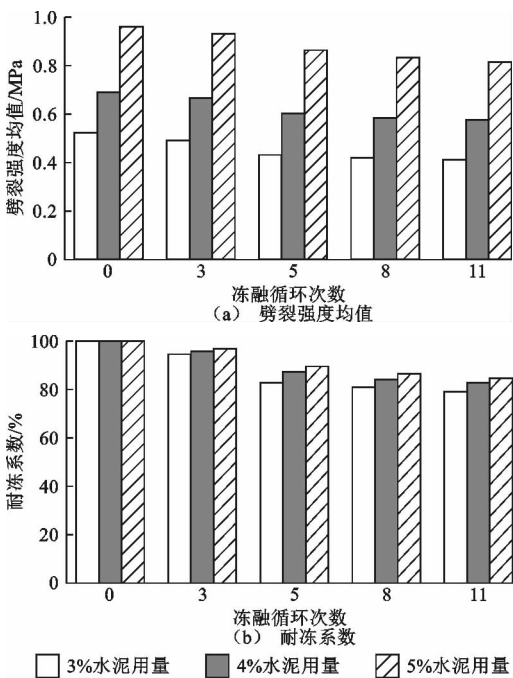


图 5 劈裂特性与水泥用量、冻融循环次数的关系

Fig. 5 Relationships between splitting characteristic, cement content and freeze-thaw cycle number

由图 5 可知,劈裂强度随冻融循环次数的增加逐渐减小。在 0~5 次冻融循环周期内劈裂强度下降较为明显,3%、4%、5% 水泥用量下试件在 0~5 次冻融循环内的劈裂强度降幅分别占强度整体变化的 79%、75%、67%;5~11 次冻融循环内劈裂强度下降趋于平缓;其对水泥用量较小的水稳碎石试件耐冻系数降幅较大,3%、4%、5% 水泥用量下试件的耐冻系数在 11 次冻融循环内分别降低了约 20%、18%、13%。其原因与抗压强度基本一致,水泥用量较小时,水化反应程度较低导致水分剩余较多,冻融循环造成的破坏较大;水泥用量较大时,材料内部的黏结力与过渡区强度较大,混合料结构密实且孔隙率较小,饱水后受冻融循环破坏较小,抗冻融性能较好。

综上所述,水泥用量较大时,冻融循环对劈裂强度的影响越小,通过提高水泥用量越能有效减小材料强度损失。由于水泥用量 4%、5% 下的耐冻系数

变化差距较小(仅为 2%),同时考虑半刚性基层的干缩裂缝现象及材料成本,故建议控制水泥用量 4%以保证水稳碎石抗冻融性能。

3.2 耐冻系数计算模型

采用二元线性模型,以水泥用量与冻融循环次数为变量,对 3%、4%、5%水泥用量下标准养生的水稳碎石试件经冻融循环的劈裂强度耐冻系数变化进行回归,得出耐冻系数 K'_{D_1} 与水泥用量 C 、冻融循环次数 F 的关系式

$$K'_{D_1} = 2.3C - 1.729F + 89.939 \quad R^2 = 0.89 \quad (4)$$

为验证模型对劈裂强度耐冻系数的拟合效果与再现性,将 45 组室内试验耐冻系数实测值与预测模型得出的计算值进行对比,计算相对误差并绘制 45°等值线,结果见图 6。

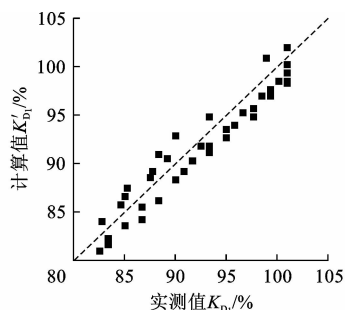


图 6 劈裂强度耐冻系数模型 45°等值线

Fig. 6 Isoline with 45° of splitting freeze-resistant coefficient model

在 45 组数据的对比结果中,最大相对误差为 3.5%,平均相对误差 1.7%。由图 6 可知,预测值基本分布于 45°等值线附近,拟合效果较好;所建模型具有较高的拟合精度与再现性,有利于对不同水泥用量下的劈裂强度耐冻系数进行预测,为水稳碎石抗冻融性能评价提供参考。

4 结 语

(1)冻融循环下的水稳碎石抗压强度与劈裂强度试验结果表明,其随冻融循环次数的增加而减小,在 0~5 次冻融循环周期内下降较为明显。水泥用量对抗冻融性能影响显著,适当增加水泥用量可有效改善水稳碎石抗冻融性能,推荐水泥用量 4%。

(2)不同养生温度下的水稳碎石抗压强度试验结果表明,养生温度越高,试件抗压强度初始值较大且在冻融循环过程中损失较小,工程中建议限定最低养生温度 10℃,以减少冻融循环对水稳碎石基层强度的影响,保证材料抗冻融性能。

(3)建立了适用于水稳碎石抗压强度与劈裂强度耐冻系数的二元线性预测模型,对其与水泥用量、冻融循环次数的关系进行回归拟合,引入养生温度修正系数进行模型修正,模型误差较小,具有较高的拟合精度与再现性,可为水稳碎石抗冻融性能分析提供模型参考。

(4)下一步应补充水稳碎石养生龄期对抗冻融性能的影响分析,并在计算模型中加入该参数,使模型更加全面准确;后期应在拉萨—贡嘎机场专用公路工程现场铺筑试验路,将现场试验与室内试验结果进行对比,验证研究结论的准确性。

参考文献:

References:

- [1] 马 磊,王秉纲. 冻土地区路面基层结构与材料[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
MA Biao, WANG Bing-gang. Pavement base structures and materials in frozen soil regions[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [2] 胡龙泉, 蒋应军, 陈忠达, 等. 骨架密实型水泥稳定碎石路用性能[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(4): 37-40.
HU Long-quan, JIANG Ying-jun, CHEN Zhong-da, et al. Road performance of cement stabilized aggregate of dense framework structure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(4): 37-40.
- [3] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 1-5.
SHA Ai-min. Material characteristics of semi-rigid base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 1-5.
- [4] SETZER M J. Micro-ice-lens formation in porous solid[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2001, 243(1): 193-201.
- [5] 洪锦祥, 缪昌文, 黄 卫, 等. 考虑冻融损伤效应的水泥混凝土路面设计方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 12-17.
HONG Jin-xiang, MIAO Chang-wen, HUANG Wei, et al. Design method for cement concrete pavement considering freeze-thaw damage effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 12-17.
- [6] 沙爱民, 胡力群. 半刚性基层材料的结构特征[J].

- 中国公路学报, 2008, 21(4):1-5.
- SHA Ai-min, HU Li-qun. Structural characteristics of semi-rigid base course material[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4):1-5.
- [7] 吴瑞麟, 张良陈, 韩卓, 等. 水泥稳定碎石基层长期浸水及冻融试验研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2011, 39(10):113-115.
- WU Rui-lin, ZHANG Liang-chen, HAN Zhuo, et al. Long-term water immersion and freeze-thaw cycles experiment of cement-stabilized macadam bases[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(10):113-115.
- [8] 朱文强. 冻融条件下水泥稳定碎石力学性能变化规律试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- ZHU Wen-qiang. Experimental study on evolution under freeze-thaw conditions mechanical properties of cement stabilized macadam[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [9] 蒋应军, 李明杰, 张俊杰, 等. 水泥稳定碎石强度影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(4):1-7.
- JIANG Ying-jun, LI Ming-jie, ZHANG Jun-jie, et al. Influence factors of strength properties of cement stabilization of crushed aggregate[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(4):1-7.
- [10] 林敏, 郑学文, 宋云连. 早强水泥稳定碎石材料抗冻性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(2):475-480.
- LIN Min, ZHENG Xue-wen, SONG Yun-lian. Experimental study of early strength cement stabilized macadam material for improving frost resistance[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(2):475-480.
- [11] 刘玉辉, 穆乃亮, 高峰, 等. 水泥稳定碎石基层高寒季冻区抗冻性试验研究[J]. 公路, 2016(6):211-215.
- LIU Yu-hui, MU Nai-liang, GAO Feng, et al. Experimental study on frost resistance of cold-frozen season in cement stabilized macadam base[J]. Highway, 2016(6):211-215.
- [12] 陈志国, 王哲人. 季节性冻土地区公路路面抗冻设计方法[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5):34-40.
- CHEN Zhi-guo, WANG Zhe-ren. Anti-frost design method for highway pavement in seasonal frost region[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5):34-40.
- [13] 王磊, 马磊, 寇军平. 嵌锁密实水泥混凝土粗集料级配组成设计方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5):12-17.
- WANG Lei, MA Biao, KOU Jun-ping. Gradation design method of coarse aggregate for interlocking dense cement concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5):12-17.
- [14] 蒋应军, 陈忠达, 彭波, 等. 密实骨架结构水泥稳定碎石路面配合比设计方法及抗裂性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(4):9-12.
- JIANG Ying-jun, CHEN Zhong-da, PENG Bo, et al. Mixture design method and anti-cracking performance of cement stabilizing crashed rock pavement with dense skeleton type[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4):9-12.
- [15] 方永浩, 陈烨, 肖婷. 冻融作用下硬化水泥浆体和混凝土结构的变化[J]. 材料导报, 2007, 21(4):157-159.
- FANG Yong-hao, CHEN Ye, XIAO Ting. Effect of freeze-thaw on the structure of hardened cement paste and concrete[J]. Materials Review, 2007, 21(4):157-159.
- [16] 程云虹, 陈东华, 王元. 混凝土抗冻性与水泥用量关系的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4):536-540, 559.
- CHENG Yun-hong, CHEN Dong-hua, WANG Yuan. Relationship between cement content and frost resistance of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4):536-540, 559.
- [17] 孙兆辉, 许志鸿, 刘志远, 等. 养生温度对水泥稳定碎石基层抗裂性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(5):555-559.
- SUN Zhao-hui, XU Zhi-hong, LIU Zhi-yuan, et al. Influence of curing temperature on crack resistance of cement-stabilized macadam base course material[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(5):555-559.
- [18] 吕松涛, 郑健龙, 仲文亮. 养生期水泥稳定碎石强度、模量及疲劳损伤特性[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9):9-15.
- LU Song-tao, ZHENG Jian-long, ZHONG Wen-liang. Characteristics of strength, modulus and fatigue damage for cement stabilized macadam in curing period[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(9):9-15.