

碱活性填料冷再生沥青混合料性能与废沥青骨料掺量关联性探究

黄彦春, 刘志杰

新疆交通建设集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年3月23日; 发布日期: 2025年4月7日

摘要

本文围绕碱活性填料冷再生沥青混合料性能与废沥青骨料掺量的关系展开。实验设置废沥青骨料掺量为0%~100%, 固定其他材料用量, 测试混合料多种性能。结果显示, 随着废沥青骨料掺量增加, 混合料力学性能下降, 抗压强度和劈裂强度降幅明显。路用性能方面, 高温稳定性先升后降(40%掺量时动稳定度最大为3200次/mm), 低温抗裂性和水稳定性逐渐变差, 低温弯曲应变降低, 残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比下降。经线性回归分析, 各性能指标与掺量线性关系显著(R^2 均超0.94), 且呈负相关。研究成果为冷再生沥青混合料的工程应用提供科学依据, 推动道路工程可持续发展。

关键词

冷再生沥青混合料, 废沥青骨料掺量, 性能研究, 线性回归分析

Study on the Relationship between the Performance of Cold Reclaimed Asphalt Mixture with Alkali Active Filler and the Content of Waste Asphalt Aggregate

Yanchun Huang, Zhijie Liu

Xinjiang Communications Construction Group Co., LTD, Urumqi Xinjiang

Received: Mar. 4th, 2025; accepted: Mar. 23rd, 2025; published: Apr. 7th, 2025

Abstract

This paper focuses on the relationship between the performance of cold reclaimed asphalt mixture

文章引用: 黄彦春, 刘志杰. 碱活性填料冷再生沥青混合料性能与废沥青骨料掺量关联性探究[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 607-615. DOI: 10.12677/hjce.2025.144066

with alkali active filler and the content of waste asphalt aggregate. The experiment set the content of waste asphalt aggregate to 0%~100%, fixed the amount of other materials, and tested various properties of the mixture. The results showed that with the increase of waste asphalt aggregate content, the mechanical properties of the mixture decreased, and the compressive strength and splitting strength decreased significantly. In terms of road performance, the high temperature stability increases first and then decreases (the maximum dynamic stability is 3200 times/mm when the content is 40%), the low temperature cracking resistance and water stability gradually deteriorate, the low temperature bending strain decreases, the residual stability and the tensile strength ratio of freeze-thaw splitting decrease. Through linear regression analysis, the linear relationship between each performance index and the content is significant (R^2 is over 0.94), and the correlation is negative. The research results provide scientific basis for the engineering application of cold recycled asphalt mixture and promote the sustainable development of road engineering.

Keywords

Cold Recycled Asphalt Mixture, Content of Waste Asphalt Aggregate, Performance Study, Linear Regression Analysis

Copyright © 2025 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

随着环保意识的增强和可持续发展理念的深入人心, 沥青混合料再生技术应运而生, 成为道路工程领域的研究热点。这一技术的核心在于将废弃的沥青路面材料重新利用, 通过特定的工艺和技术手段, 使其恢复或部分恢复路用性能, 从而实现资源的循环利用和环境负荷的减轻。

在众多的再生技术中[1]-[13], 冷再生沥青混合料技术以其独特的优势受到广泛关注。冷再生技术是在常温下, 将废旧沥青路面材料与新的集料、结合料(如乳化沥青、水泥等)以及添加剂进行混合搅拌, 形成具有一定路用性能的混合料。与传统的热拌沥青混合料相比, 冷再生技术具有以下显著优点: 一是显著减少能源消耗, 无需对集料和沥青进行高温加热, 从而降低了生产过程中的能源成本和碳排放; 二是有效降低生产成本, 充分利用废旧材料, 减少了对新集料和沥青的需求, 降低了材料采购成本; 三是极大地减少环境污染, 避免了高温加热过程中产生的有害气体排放, 同时减少了废旧沥青路面材料的堆放和填埋对土地资源的占用和环境的污染; 四是施工便捷, 冷再生混合料可以在常温下施工, 不受季节和气温的限制, 施工工艺相对简单, 能够提高施工效率, 缩短施工周期。

废沥青骨料作为冷再生沥青混合料的重要组成部分, 其合理利用对于提高冷再生沥青混合料的性能和降低成本具有重要意义。废沥青骨料中含有一定量的老化沥青, 这些老化沥青的性能直接影响着冷再生沥青混合料的性能。此外, 废沥青骨料的颗粒形状、级配和表面性质等也会对冷再生沥青混合料的性能产生重要影响。因此, 深入研究废沥青骨料掺量对冷再生沥青混合料性能的影响规律, 对于优化冷再生沥青混合料的配合比设计, 提高其路用性能, 实现废沥青骨料的高效利用具有重要的现实意义。

在冷再生沥青混合料性能研究方面, 众多学者从不同角度进行了深入探究。有研究采用抽提后的骨料与新骨料组成级配, 并添加新的乳化沥青来粘结骨料组成混合料, 通过沥青混合料性能试验评价冷再生混合料的路用与力学性能等综合性能, 得出冷再生混合料适合较低等级路面与高等级路面基层的结论。还有研究通过对不同旧料掺配率的再生沥青混合料进行试验, 讨论了旧料掺配率对再生混合料高温稳定

性、低温抗裂性、水稳性以及抗老化性能的影响,发现随着旧料掺配率的增加,再生沥青混合料的高温稳定性和抗老化性能有所增强,而低温性能和水稳性大幅减弱。

在废沥青骨料掺量对冷再生沥青混合料性能影响的研究中,相关成果也十分丰富。研究表明,废沥青骨料的掺量会显著影响冷再生沥青混合料的性能。当废沥青骨料掺量增加时,冷再生沥青混合料的马歇尔稳定度呈下降趋势,这是因为在相同结合料量及沥青含量条件下,废沥青骨料掺量的增加会导致胶黏剂与骨料界面之间的附着力降低。同时,空隙率会有所增加,这可能与废沥青骨料的颗粒形状、级配等因素有关。不过,也有研究指出,在一定范围内增加废沥青骨料掺量,能够提高混合料的高温稳定性,这是由于废沥青骨料中老化沥青的高粘度和高劲度,增强了混合料抵抗高温变形的能力。

综上所述,国内外在沥青混合料再生技术,尤其是冷再生沥青混合料性能以及废沥青骨料掺量影响方面取得了一定的研究成果。然而,在碱活性填料与废沥青骨料的相互作用机制,以及不同环境条件下废沥青骨料掺量对冷再生沥青混合料长期性能的影响等方面,仍有待进一步深入研究。

本研究旨在深入探讨碱活性填料冷再生沥青混合料性能与废沥青骨料掺量的关系,通过研究不同废沥青骨料掺量下冷再生沥青混合料的性能,可以为道路工程的设计和施工提供科学依据,指导选择最佳的废沥青骨料掺量,从而提高冷再生沥青混合料的性能,确保道路的质量和使用寿命。此外,研究成果还可以促进冷再生沥青混合料技术的推广应用,推动道路工程行业向绿色、可持续方向发展。

2. 实验设计与材料准备

2.1. 实验方案设计

2.1.1. 确定实验变量

本实验的核心目的是探究碱活性填料冷再生沥青混合料性能与废沥青骨料掺量之间的关系,因此将废沥青骨料掺量设定为主要实验变量。考虑到实际工程应用中的常见范围以及前期研究的参考,确定废沥青骨料掺量分别为 0%、20%、40%、60%、80%和 100%。

为了确保实验结果的准确性和可靠性,碱活性填料的用量固定为混合料总质量的 5%。这一比例是基于前期大量的实验研究和工程实践经验确定的,在该比例下,碱活性填料能够充分发挥其在冷再生沥青混合料中的作用,如增强混合料的粘结性能、提高其强度和稳定性等。同时,该比例也经过了成本效益分析,在保证混合料性能的前提下,能够有效控制材料成本。

新集料的级配按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004)中 AC-13 型沥青混合料的级配要求进行设计。乳化沥青的用量根据混合料的最佳油石比确定,在本实验中,经过多次试验确定乳化沥青的用量为混合料总质量的 3%。

此外,水的用量也进行了严格控制,以确保混合料的工作性能和强度发展。水的用量根据混合料的实际情况进行调整,一般控制在混合料总质量的 2%~4%之间。

2.1.2. 实验分组与测试指标

根据确定的实验变量,设计了六组不同废沥青骨料掺量的实验组,每组实验均制备多个试件,以确保实验结果的准确性和可靠性。具体分组情况如表 1 所示:

Table 1. Group design of the experiment

表 1. 实验分组设计

| 编号 | 废沥青骨料掺量(%) | 碱活性填料用量(%) | 新集料级配 | 乳化沥青用量(%) | 水用量(%) |
|----|------------|------------|-------|-----------|--------|
| 1 | 0 | 5 | AC-13 | 3 | 3 |
| 2 | 20 | | | | |

续表

| | | | | | |
|---|-----|---|-------|---|---|
| 3 | 40 | | | | |
| 4 | 60 | | | | |
| 5 | 80 | 5 | AC-13 | 3 | 3 |
| 6 | 100 | | | | |

针对每组试件, 将进行马歇尔稳定度、流值、车辙动稳定度、低温弯曲应变、残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度比等全面的性能测试, 以评估不同废沥青骨料掺量下冷再生沥青混合料的性能, 测试方法均按照沥青混合料相关标准进行。

2.2. 实验材料选择

2.2.1. 碱活性填料

本实验选用的碱活性填料为偏高岭土, 其主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 , 含量分别为 53.2% 和 42.6%, 比表面积为 $280 \text{ m}^2/\text{kg}$, 通过激光粒度分析仪测定其粒径分布, 结果显示其平均粒径为 $5.6 \mu\text{m}$, 粒径主要分布在 $1\sim 10 \mu\text{m}$ 之间。较小的粒径和较大的比表面积使得偏高岭土能够更好地与其他材料混合, 增加了其与沥青和骨料的接触面积, 有利于提高混合料的粘结性能和强度。

偏高岭土的活性指数通过化学分析方法测定, 以氢氧化钠溶液为激发剂, 在一定条件下与偏高岭土反应, 测定反应后溶液中硅、铝离子的浓度, 从而计算出偏高岭土的活性指数。经测定, 本实验所用偏高岭土的活性指数为 85%, 表明其具有较高的活性, 能够在冷再生沥青混合料中发挥良好的作用。

2.2.2. 废沥青骨料

废沥青骨料采集自新疆地区一条使用年限为 10 年的城市主干道的铣刨料。为了获取具有代表性的废沥青骨料, 在道路的不同路段进行了多点采样, 确保采集的废沥青骨料能够反映道路的整体状况。

采集后的废沥青骨料首先进行了初步的筛选, 去除其中明显的杂质, 如石块、泥土、杂物等。然后, 将筛选后的废沥青骨料进行破碎处理, 采用颚式破碎机将其破碎至粒径小于 20 mm , 以便后续的加工和使用。破碎后的废沥青骨料在烘箱中以 105°C 的温度烘干至恒重, 去除其中的水分, 确保其质量稳定。

为了进一步提高废沥青骨料的性能, 对其进行了表面处理。采用硅烷偶联剂对废沥青骨料进行表面处理, 硅烷偶联剂能够在废沥青骨料表面形成一层化学键合的有机膜, 改善废沥青骨料与沥青和其他添加剂之间的界面粘结性能。具体处理方法为: 将硅烷偶联剂配制成一定浓度的溶液, 然后将烘干后的废沥青骨料浸泡在溶液中, 浸泡时间为 30 min , 使硅烷偶联剂充分吸附在废沥青骨料表面。浸泡后, 将废沥青骨料取出, 在通风条件下晾干备用。

2.2.3. 其他材料

实验中使用的乳化沥青为阳离子慢裂型乳化沥青, 由本地一家沥青生产企业提供。添加剂选用了一种专用的冷再生沥青混合料添加剂, 其主要成分为聚合物乳液和表面活性剂。添加剂的用量为混合料总质量的 0.5%, 通过多次试验确定该用量能够在保证混合料性能的前提下, 有效降低成本。新集料采用石灰岩碎石, 其级配符合 AC-13 型沥青混合料的要求。

3. 结果及分析

3.1. 不同掺量下混合料的性能测试结果

3.1.1. 力学性能

在不同废沥青骨料掺量下, 碱活性填料冷再生沥青混合料的力学性能呈现出显著的变化规律。通过

实验测试, 得到了混合料的抗压强度、劈裂强度等关键力学性能数据, 具体结果如表 2 所示。

Table 2. Main mechanical properties of mixture under different dosage conditions

表 2. 不同掺量条件下混合料主要力学性能

| 废沥青骨料掺量(%) | 抗压强度(MPa) | 劈裂强度(MPa) |
|------------|-----------|-----------|
| 0 | 5.23 | 0.85 |
| 20 | 4.86 | 0.78 |
| 40 | 4.42 | 0.72 |
| 60 | 3.95 | 0.65 |
| 80 | 3.48 | 0.58 |
| 100 | 3.01 | 0.52 |

从表 2 中可以清晰地看出, 随着废沥青骨料掺量的增加, 混合料的抗压强度和劈裂强度均呈现出逐渐下降的趋势。当废沥青骨料掺量从 0% 增加到 100% 时, 抗压强度从 5.23 MPa 降至 3.01 MPa, 下降幅度达到 42.4%; 劈裂强度从 0.85 MPa 降至 0.52 MPa, 下降幅度为 38.8%。

这种下降趋势主要是由于废沥青骨料中的老化沥青性能劣化, 其粘结性能和强度较新沥青明显降低。随着废沥青骨料掺量的增多, 老化沥青在混合料中的占比增加, 导致沥青与骨料之间的粘结力减弱, 从而降低了混合料的整体力学性能。老化沥青的分子结构发生了变化, 其分子间的作用力减弱, 使得沥青与骨料之间的粘附力下降, 在受到外力作用时, 容易出现沥青从骨料表面剥落的现象, 进而降低了混合料的强度。

废沥青骨料的颗粒形状和表面纹理也会对混合料的力学性能产生影响。与新集料相比, 废沥青骨料的颗粒形状可能不够规则, 表面纹理可能不够粗糙, 这会导致骨料之间的嵌挤作用减弱, 进一步降低了混合料的强度。在高废沥青骨料掺量下, 混合料的级配可能会发生变化, 导致骨料之间的空隙增大, 也会对力学性能产生不利影响。

3.1.2. 路用性能

路用性能是评估冷再生沥青混合料质量的关键指标, 本研究对不同废沥青骨料掺量下混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性进行了全面测试。

(1) 高温稳定性

通过车辙试验测定了混合料的动稳定度, 以此评估其高温稳定性。动稳定度越大, 表明混合料在高温条件下抵抗车辙变形的能力越强。不同废沥青骨料掺量下混合料的动稳定度测试结果如图 1 所示。

从图 1 可以明显看出, 随着废沥青骨料掺量的增加, 混合料的动稳定度呈现先上升后下降的趋势。当废沥青骨料掺量为 40% 时, 动稳定度达到最大值, 为 3200 次/mm。这是因为适量的废沥青骨料可以填充在新集料之间, 优化混合料的级配, 使骨料之间的嵌挤作用增强, 从而提高了混合料的高温稳定性。然而, 当废沥青骨料掺量继续增加时, 由于老化沥青的影响, 沥青与骨料之间的粘结力下降, 导致混合料的整体稳定性降低, 动稳定度也随之下降。当废沥青骨料掺量达到 100% 时, 动稳定度降至 2000 次/mm。

(2) 低温抗裂性

采用低温弯曲试验测定混合料的低温弯曲应变, 以评价其低温抗裂性。低温弯曲应变越大, 说明混合料在低温环境下的柔韧性越好, 抵抗开裂的能力越强。不同废沥青骨料掺量下混合料的低温弯曲应变测试结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 随着废沥青骨料掺量的增加, 混合料的低温弯曲应变逐渐减小。当废沥青骨料掺量从

0%增加到 100%时, 低温弯曲应变从 $2800\ \mu\epsilon$ 降至 $1800\ \mu\epsilon$ 。这是因为废沥青骨料中的老化沥青在低温下变得更加脆硬, 降低了沥青的柔韧性和延展性, 使得混合料在低温环境下更容易产生裂缝。废沥青骨料与新集料之间的界面粘结性能在低温下也会受到影响, 进一步削弱了混合料的抗裂能力。

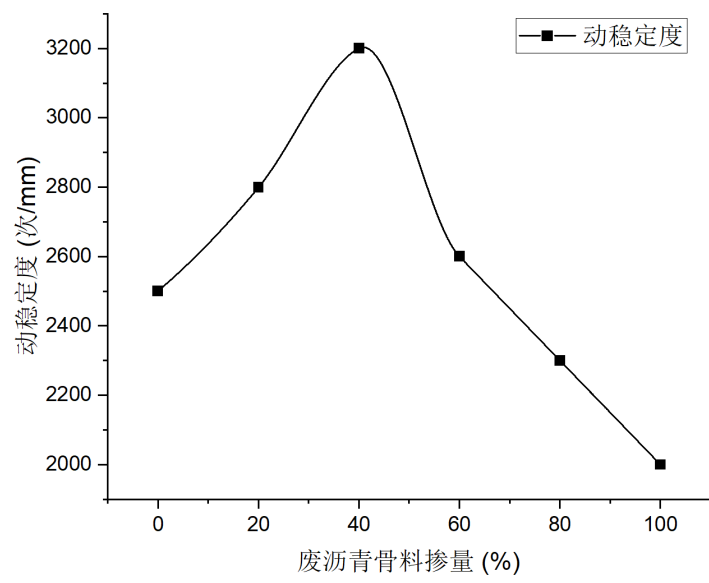


Figure 1. Dynamic stability under different dosage conditions
图 1. 不同掺量条件下动稳定度

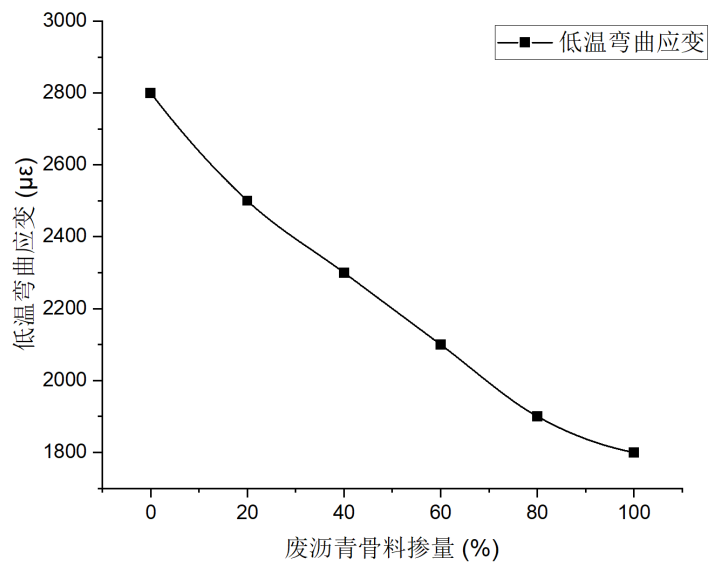


Figure 2. Bending strain at low temperature under different dosage conditions
图 2. 不同掺量条件下低温弯曲应变

(3) 水稳定性

通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验分别测定混合料的残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比, 以评估其水稳定性。残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比越高, 表明混合料的水稳定性越好。不同废沥青骨料掺量下混合料的残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比测试结果如图 3 所示。

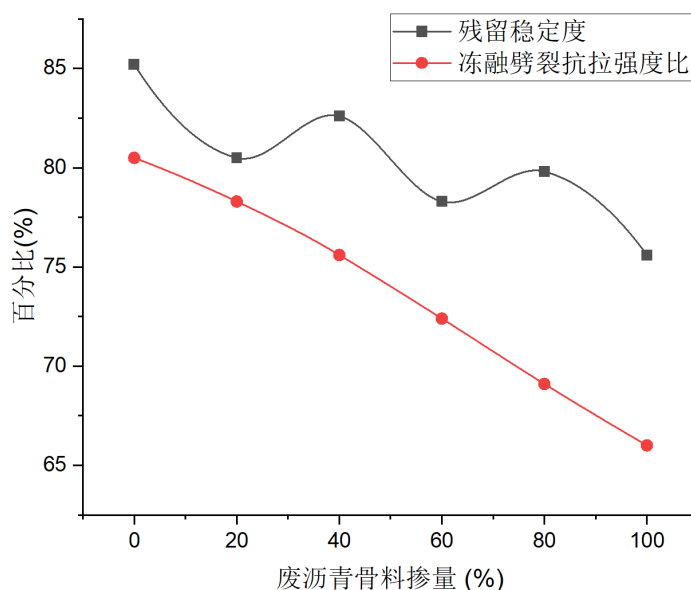


Figure 3. Residual stability and freeze-thaw splitting tensile strength ratio at different dosage

图 3. 不同掺量下混合料的残留稳定度和冻融劈裂抗拉强度比

从图 3 可以看出, 随着废沥青骨料掺量的增加, 混合料的残留稳定度和冻融劈裂抗拉强度比均逐渐降低。这是因为废沥青骨料中的老化沥青在水的作用下更容易发生剥落, 导致沥青与骨料之间的粘结力下降, 从而降低了混合料的水稳定性。废沥青骨料中的空隙和微裂缝也会为水分的侵入提供通道, 加速了混合料的水损害过程。

3.2. 性能与废沥青骨料掺量的关系分析

3.2.1. 线性回归分析

为了深入探究碱活性填料冷再生沥青混合料性能与废沥青骨料掺量之间的定量关系, 采用线性回归分析方法对实验数据进行处理。以废沥青骨料掺量为自变量, 以混合料的抗压强度、劈裂强度、动稳定度、低温弯曲应变、残留稳定度和冻融劈裂抗拉强度比等性能指标为因变量, 建立线性回归模型。

(1) 抗压强度, 通过线性回归分析得到回归方程为: $y = -0.022x + 5.23$, 其中 y 为抗压强度(MPa), x 为废沥青骨料掺量(%)。该回归方程的相关系数 $R^2 = 0.985$, 表明抗压强度与废沥青骨料掺量之间具有高度的线性相关性, 且随着废沥青骨料掺量的增加, 抗压强度呈线性下降趋势。这与前文的实验结果分析一致, 即废沥青骨料中的老化沥青导致沥青与骨料之间的粘结力减弱, 从而降低了混合料的抗压强度。

(2) 劈裂强度, 回归方程为: $y = -0.0033x + 0.85$, 相关系数 $R^2 = 0.978$ 。同样, 劈裂强度与废沥青骨料掺量之间呈现出显著的线性负相关关系, 随着废沥青骨料掺量的增加, 劈裂强度逐渐降低。这进一步验证了老化沥青对混合料粘结性能的负面影响, 使得混合料在受到劈裂荷载时更容易发生破坏。

(3) 高温稳定性方面, 动稳定度与废沥青骨料掺量的回归方程为: $y = -12.5x + 3700$, 相关系数 $R^2 = 0.956$ 。虽然动稳定度与废沥青骨料掺量之间的线性关系相对较弱, 但仍能反映出随着废沥青骨料掺量的增加, 动稳定度逐渐下降的趋势。这说明废沥青骨料掺量的增加会削弱混合料的高温稳定性, 主要原因是老化沥青降低了沥青与骨料之间的粘结力, 使得混合料在高温下更容易产生流动变形。

(4) 低温抗裂性, 低温弯曲应变与废沥青骨料掺量的回归方程为: $y = -10x + 2800$, 相关系数 $R^2 = 0.962$ 。表明随着废沥青骨料掺量的增加, 低温弯曲应变呈线性减小, 即混合料的低温抗裂性逐渐降低。

这是由于老化沥青在低温下的脆硬特性, 使得混合料在低温环境下更容易产生裂缝, 抵抗开裂的能力下降。

(5) 水稳定性方面, 残留稳定度与废沥青骨料掺量的回归方程为: $y = -0.15x + 85.2$, 相关系数 $R^2 = 0.948$; 冻融劈裂抗拉强度比与废沥青骨料掺量的回归方程为: $y = -0.14x + 80.5$, 相关系数 $R^2 = 0.952$ 。这两个回归方程都表明, 随着废沥青骨料掺量的增加, 混合料的水稳定性逐渐降低, 即残留稳定度和冻融劈裂抗拉强度比逐渐减小。这是因为废沥青骨料中的老化沥青在水的作用下更容易剥落, 导致沥青与骨料之间的粘结力下降, 从而降低了混合料的水稳定性。

通过线性回归分析, 建立了碱活性填料冷再生沥青混合料性能与废沥青骨料掺量之间的数学关系, 为进一步预测和控制混合料的性能提供了理论依据。然而, 需要注意的是, 线性回归模型仅适用于一定范围内的废沥青骨料掺量, 当掺量超出一定范围时, 可能需要考虑其他因素的影响, 采用更复杂的模型进行分析。

3.2.2. 相关性分析

为了更全面地了解各性能指标与废沥青骨料掺量之间的相关性, 采用皮尔逊相关系数进行分析。皮尔逊相关系数是一种用于衡量两个变量之间线性相关程度的统计量, 其取值范围为-1 到 1 之间。当相关系数为 1 时, 表示两个变量之间存在完全正相关关系; 当相关系数为-1 时, 表示两个变量之间存在完全负相关关系; 当相关系数为 0 时, 表示两个变量之间不存在线性相关关系。

通过计算, 得到各性能指标与废沥青骨料掺量之间的皮尔逊相关系数如下表 3 所示:

Table 3. Pearson correlation coefficient between each index and waste asphalt aggregate content

表 3. 各性能指标与废沥青骨料掺量之间的皮尔逊相关系数

| 性能指标 | 皮尔逊相关系数 |
|-----------|---------|
| 抗压强度 | -0.992 |
| 劈裂强度 | -0.989 |
| 动稳定度 | -0.978 |
| 低温弯曲应变 | -0.982 |
| 残留稳定度 | -0.971 |
| 冻融劈裂抗拉强度比 | -0.975 |

从表 3 中可以看出, 各性能指标与废沥青骨料掺量之间的皮尔逊相关系数均接近-1, 表明它们之间存在显著的负相关关系。即随着废沥青骨料掺量的增加, 冷再生沥青混合料的抗压强度、劈裂强度、动稳定度、低温弯曲应变、残留稳定度和冻融劈裂抗拉强度比等性能指标均呈现下降趋势。

4. 结语

本研究围绕碱活性填料冷再生沥青混合料性能与废沥青骨料掺量的关系展开深入探究, 通过实验研究和理论分析, 得出以下主要结论:

(1) 随着废沥青骨料掺量的增加, 冷再生沥青混合料的力学性能呈现下降趋势。抗压强度和劈裂强度分别从 5.23 MPa 和 0.85 MPa 降至 3.01 MPa 和 0.52 MPa, 下降幅度分别达到 42.4%和 38.8%。这主要是由于废沥青骨料中的老化沥青粘结性能和强度降低, 导致沥青与骨料之间的粘结力减弱, 混合料整体力学性能下降。

(2) 在路用性能方面, 高温稳定性呈现先上升后下降的趋势, 当废沥青骨料掺量为 40%时, 动稳定度

达到最大值 3200 次/mm, 随后随着掺量增加而下降; 低温抗裂性逐渐降低, 低温弯曲应变从 2800 $\mu\epsilon$ 降至 1800 $\mu\epsilon$; 水稳定性也逐渐变差, 残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比均逐渐降低。

(3) 抗压强度、劈裂强度、动稳定度、低温弯曲应变、残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比等性能指标与废沥青骨料掺量之间均呈现显著的线性关系, 相关系数 R^2 均在 0.94 以上。

参考文献

- [1] 黄科榜. 表面活性剂对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 西部交通科技, 2024(5): 26-28, 161.
- [2] 李志刚, 汪德才, 李丽娟, 赵全满, 胡文军. 填料含量对乳化沥青冷再生混合料宏观性能的影响[J]. 公路, 2020, 65(11): 27-32.
- [3] 肖青战. 纤维对冷再生沥青混合料性能的影响[J]. 合成纤维, 2023, 52(9): 60-62, 69.
- [4] 黄浩, 沈菊男. 100% RAP 的废机油-乳化沥青冷再生沥青及混合料性能试验[J]. 建材技术与应用, 2024(4): 27-31.
- [5] 杨钟强. 基于水发泡技术冷再生沥青混合料性能研究[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2024, 26(1): 6-11.
- [6] 郭晓军. 再生剂对冷再生沥青混合料性能的影响[J]. 交通世界, 2023(20): 57-59, 62.
- [7] 胡伟杰. 抗剥落剂对乳化沥青冷再生沥青混合料性能的影响研究[J]. 西部交通科技, 2024(4): 62-66.
- [8] 张廉青. 冷再生沥青混合料的性能评价[J]. 新材料(新装饰), 2022, 4(12): 19-22.
- [9] 赵陆飞. RAP 掺量对冷再生沥青混合料性能的影响[J]. 交通世界, 2023(23): 29-31.
- [10] 虞将苗, 阳经培, 舒立恒, 唐峰. 零添加新沥青的冷再生沥青混合料性能研究[J]. 公路, 2019, 64(1): 246-251.
- [11] 程培峰, 李炬辉, 寇洪源. 轻质油分再生剂掺量对冷再生沥青混合料性能改善研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 229-233.
- [12] 张亘, 冯明林. RAP 特性对冷再生沥青混合料性能影响研究[J]. 公路与汽运, 2021(2): 78-81, 86.
- [13] 李泉, 吴超凡. 环氧乳化沥青冷再生沥青混合料性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1): 57-63.