

DOI: 10.11779/CJGE201712005

# 水泥掺量和颗粒级配对碎石基床冻融特性影响的试验研究

王天亮<sup>1, 2</sup>, 宋宏芳<sup>3, 1</sup>, 郭卓豪<sup>1, 2</sup>, 岳祖润<sup>1, 2</sup>, 林永清<sup>1, 2</sup>

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043; 3. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 基于水泥稳定碎石在寒区高速铁路路基基床中应用的工程背景, 借鉴公路行业水泥稳定碎石工程性能评估方法并结合寒区高速铁路路基基床的特点, 通过一系列室内试验, 深入研究和分析了水泥掺量、颗粒级配对碎石基床压实效果、冻胀性能、渗透性能、冻融耐久性能和温干缩指标的影响规律。研究结果表明: 试验配比条件下, 水泥稳定碎石基床各项压实指标均满足或超过高铁路基基床压实标准。较大粒径土颗粒的缺失, 削弱了水泥稳定碎石试样的冻胀敏感性, 提高了渗透性, 降低了强度和水稳定性; 水泥的掺加有效地弥补了粒径缺失导致的强度降低现象, 但却增大了温缩、干缩变形; 抗压强度随冻融次数的增加呈现整体衰减的趋势, 并在经历 10 次冻融后趋于稳定。工程实践中, 建议选用细粒土含量 3%、水泥掺量 3% 的级配碎石作为非渗水性基床填料, 去除 0.5 mm 以下颗粒、水泥掺量 3% 的级配碎石作为渗水性基床填料。

**关键词:** 高铁路基; 水泥稳定碎石; 水泥掺量; 颗粒级配; 工程性能

中图分类号: TU411.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2180-07

作者简介: 王天亮(1981-), 男, 河北保定人, 博士, 副教授, 研究方向为地基变形控制与特殊土路基。E-mail: wangtl@stdu.edu.cn。

## Freeze-thaw characteristics of subgrade macadam fillings influenced by cement content and grain-size composition

WANG Tian-liang<sup>1, 2</sup>, SONG Hong-fang<sup>3, 1</sup>, GUO Zhuo-hao<sup>1, 2</sup>, YUE Zu-run<sup>1, 2</sup>, LIN Yong-qing<sup>1, 2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Motivated by the practical application of cement-stabilized macadam to high-speed railway subgrade in cold regions, a series of tests are conducted using an integrated method learnt from an evaluation system used for semi-rigid highway foundations considering the characteristics of high-speed railway subgrade in cold regions. The compaction results, frost-heave property, permeability, freeze-thaw durability and shrinkage property of subgrade macadam fillings influenced by cement content and grain size composition are deeply studied and analyzed. The following results are obtained. The compaction indexes of cement-stabilized macadam subgrade are satisfied or exceed the compaction standard under the tested compositions. The lack of large-sized soil particles weakens the frost-heave sensibility, improves the permeability, and reduces the compressive strength and moisture stability of cement-stabilized macadam samples. In addition, a mixture of cement effectively compensates for the reduction in compressive strength and increases the shrinkage deformation of cement-stabilized macadam samples. The compressive strength decreases with every increment of freeze-thaw cycles, and then levels off after 10 freeze-thaw cycles. For the engineering practice of high-speed railway subgrade in cold regions, the cement-stabilized macadam with 3% of fines and 3% of cement addition is suitable for the subgrade without any demand for permeability, and the cement-stabilized macadam with grains greater than 0.5 mm in size and 3% of cement addition is suitable for the required permeability of subgrade.

**Key words:** high-speed railway subgrade; cement stabilized macadam; cement content; grain-size composition; engineering characteristic

基金项目: 河北省高校拔尖人才项目(BJ2014050); 中国铁路总公司课题(2014G003-F)

收稿日期: 2016-09-17



## 0 引言

水泥稳定碎石在高速铁路路基基床上的推广与应用并非开始于严寒地区, 而是在优质填料缺乏地区考虑基床加强、填料改性后易压实等原因对级配碎石进行了水泥稳定处理<sup>[1]</sup>。伴随中国寒区高速铁路建设的快速发展, 级配碎石掺加水泥的方法被认为是一种较好的冻胀防控措施, 广泛应用于哈大、哈齐、盘营等高速铁路路基基床中<sup>[2-3]</sup>。然而, 水泥稳定碎石在寒区高速铁路路基中应用的研究并不成熟且研究成果相对较少, 文献[2, 4, 5]中多以冻胀率作为决定性的评估指标, 缺乏多指标控制, 且对于最佳水泥掺入量的结论也不一致。

相比于水泥稳定碎石在高速铁路路基基床中的应用, 其在公路中的应用则较为广泛, 相关研究成果较多也较成熟。目前, 中国大多数公路采用传统的悬浮密实型水泥稳定碎石基层材料, 后通过改进碎石级配和水泥掺量, 提出了骨架密实型水泥稳定碎石基层材料<sup>[6]</sup>。在水泥稳定碎石强度和变形特性研究方面, 多将无侧限抗压强度、间接抗拉强度、劈裂回弹模量、断裂韧度、弯拉疲劳强度等强度特性<sup>[6-14]</sup>, 以及温缩系数、干缩系数等变形特性<sup>[6, 14-15]</sup>作为水泥稳定碎石工程性能与应用的评估指标, 所关注的影响因素也主要集中在水泥掺量、碎石级配、改良方法、养护龄期等方面<sup>[6-7, 13-15]</sup>。在寒区工程的应用中, 其温缩特性和冻融耐久性(无侧限抗压强度)常被作为重要的评估指标<sup>[16-17]</sup>。上述研究成果为水泥稳定碎石在严寒冻融环境下高速铁路路基基床中的应用与研究提供了开阔的思路和方法, 对于建立较完善的评价指标和试验方法具有十分重要的工程实际意义。

鉴于上述, 本文借鉴公路水泥稳定碎石的研究方法并结合寒区高速铁路路基的特点, 考虑压实系数、冻胀率、渗透系数、冻融耐久性和温干缩系数等力学指标, 深入分析水泥掺量和碎石颗粒级配等因素的影响规律, 并给出寒区高铁路基水泥稳定碎石基床的合理水泥掺量和颗粒级配, 进一步丰富严寒地区高速铁路路基基床的抗冻胀措施。

## 1 试验材料及试验方案

### 1.1 级配碎石材料

选取中国铁道科学研究院所提出的渗透性级配碎石<sup>[3]</sup>作为试验材料(图 1), 其不均匀系数  $C_u < 10$ , 曲率系数  $C_c$  为 1~3, 为良好级配。

### 1.2 试验方案

针对水泥稳定碎石基床的冻融特性, 研究 3 种水泥掺量(0, 1% 和 3%), 3 种 0.075 mm 以下细粒含量(0, 3% 和 5%) 和 3 种去除某粒径(0.1, 0.5, 1.7 mm)

以下范围土颗粒的级配碎石, 含水量均为 5%。其中, 试样标号  $C_x F_y$  表示水泥掺量为  $x$  (0, 1% 和 3%), 且 0.075 mm 以下细粒土含量为  $y$  (0, 3% 和 5%); 试样编号  $C_x P_z$  表示水泥掺量为  $x$  (1%, 3% 和 5%), 且去除某粒径  $z$  (0.1, 0.5, 1.7 mm) 以下范围的土颗粒。

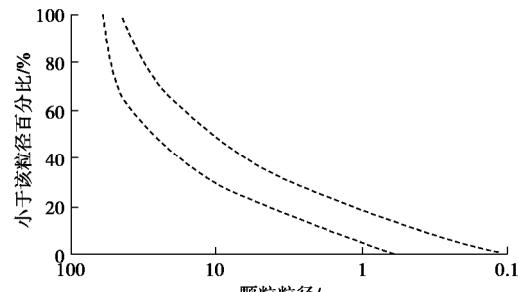


Fig. 1 Particle-size ranges of permeability-graded macadam

根据试验要求的颗粒级配和含水量配制土样, 浸润一昼夜后掺加#325 普通硅酸盐水泥, 并拌合均匀。试样制备时, 分层击实, 层与层之间刮毛, 压实度控制在 97%, 所有试样均按照常温静置养护 7 d 后进行水泥稳定碎石冻融特性的测试。

### 1.3 试验装置及过程控制

(1) 压实性能测试。采用自主研制开发的模拟铁路路基填土压实质量的测试装置(专利号: ZL201620157184.7, 如图 2 所示)测试水泥稳定碎石的压实性能。其中, 试样筒内径为 900 mm, 总高度为 600 mm。待所制备试验常温静置养护 7 d 后, 开展高铁路基压实质量检测指标的测试。

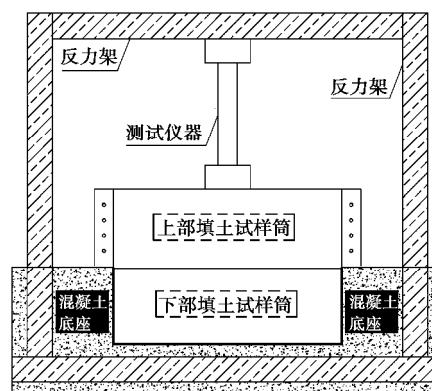


图 2 碎石基床压实性能测试装置

Fig. 2 Apparatus for compaction tests on macadam subgrade

(2) 冻胀性能测试。采用大粒径土体冻胀性能测试装置(专利号: ZL201410570666.0)测试水泥稳定碎石的冻胀性能, 如图 3 所示。试样尺寸为直径 450 mm×高度 700 mm, 在 7 d 养护期间, 试样顶端铺设塑料薄膜、试样筒外壁包裹保温棉。待达到 7 d 养护时间后, 调节连接上、下冷浴盘的低温恒温冷浴至+1℃, 恒温 48 h。待恒温结束后, 调节上冷浴盘的温度至-20℃(依照现场实测土体温度设定<sup>[18]</sup>), 开始第一次冻

结过程,持续72 h;然后,调节上冷浴盘的温度至15 °C,开始第一次融化过程,持续48 h;依次进行3次冻融循环。

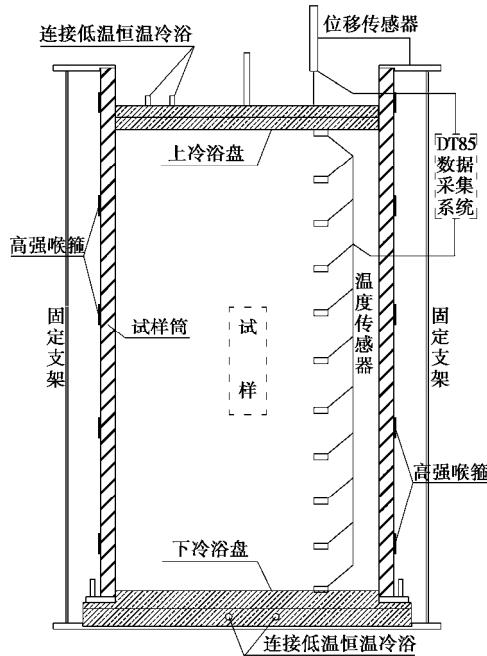


图3 大粒径土体冻胀性能测试装置

Fig. 3 Apparatus for frost-heave tests on large-size particles

(3) 渗透性能、冻融耐久性和温干缩性能测试。渗透性能测试的试样直径为300 mm,高度为550 mm;温干缩性能测试的试样为长550 mm×宽150 mm×高150 mm的梁式试件;冻融耐久性测试的试样直径为150 mm,高度为150 mm,采用塑料薄膜包裹试样的方法以确保试样水分不流失。依照文献[16, 19]和试验结果,冻融耐久性测试试样经历1, 5, 10, 15, 25次冻融循环后的强度性能。

## 2 压实特性

采用模拟铁路路基填土压实质量测试装置得到水泥稳定碎石的压实性能测试结果,如表1所示。水泥稳定碎石试样的压实质量测试指标值是级配碎石试样压实质量指标值的2~3倍,水泥的掺加有效地提高了碎石的压实效果;同时,各项测试指标值均远远超过《高速铁路设计规范》对高速铁路路基表层填料的压制质量控制要求。这说明水泥稳定碎石具有较好的填筑压实性能。

表1 压实质量测试结果统计

Table 1 Results for compaction tests

检测指标	试样编号						控制 标准值
	C0F3	C3F3	C3P0.5	C5P0.5	C3P1.7	C5P1.7	
$K_{30}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	525	1273	881	1240	686	752	190
$E_{v2}/\text{MPa}$	265	1181	685	1590	594	631	120
$E_{v2}/E_1$	2.13	2.33	2.49	3.43	2.34	2.21	—
$E_{vd}/\text{MPa}$	79	235	187	285	154	223	55

## 3 冻融特性

### 3.1 反复冻胀、融沉过程分析

多次冻融过程中试样内部温度变化时程曲线如图4所示(0 cm处为暖端,70 cm处为冷端)。由图4可知,在单向冻结条件下,随着深度的增加,试样内部温度逐渐降低或升高,具有与现场实测结果相同的变化规律<sup>[18]</sup>;此过程中,水分的反复结冰、融化导致土颗粒的移动,宏观现象表现为土体的体积发生变化,一维变形条件下表现为土体表面的反复冻胀隆起、融化下陷<sup>[19]</sup>,如反复冻融位移变化时程曲线图5所示。

由图5可知,多次冻融位移变化时程曲线呈现正弦式变化趋势,这与呈现余弦式变化过程的土体内部温度相差90°相位差(图4);再者,虽然各次冻融过程中土体内部温度分布规律一致,但冻胀量最大值均未出现在第一次冻胀过程中。

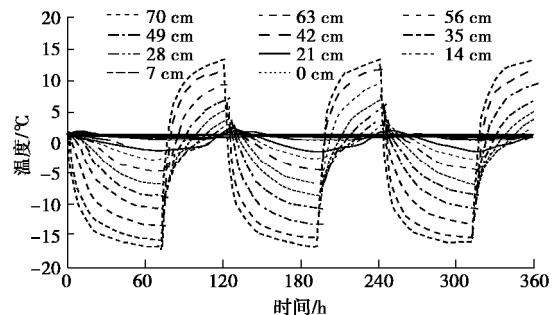


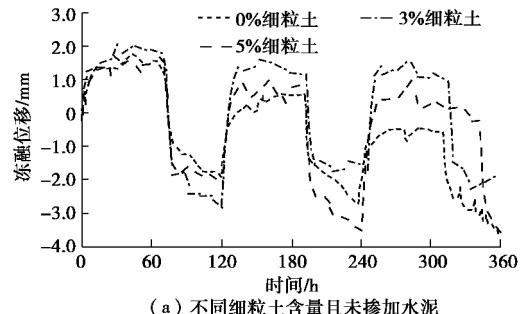
图4 多次冻融过程中土体内部温度时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of internal temperature of samples

在经历3次反复冻结和融化过程后,与细粒含量较多的级配碎石试样相比,不含细粒土的级配碎石试样呈现压缩沉陷的现象(图5(a))。相比于细粒含量和水泥掺量对冻胀性能的影响,颗粒级配的影响更加显著,当所去除的粒径范围达到一定值时,基于上可以消除水泥稳定碎石试样的冻胀敏感性(如图5(c)中的曲线1.7 mm)。

### 3.2 冻胀率

冻胀率是反应土体冻胀敏感性的一个重要指标,定义为一定试验时间内试样的冻胀变形量与冻结深度的比值。图6给出了级配碎石试样的冻胀率与细颗粒含量、水泥掺量和颗粒级配的相互关系。



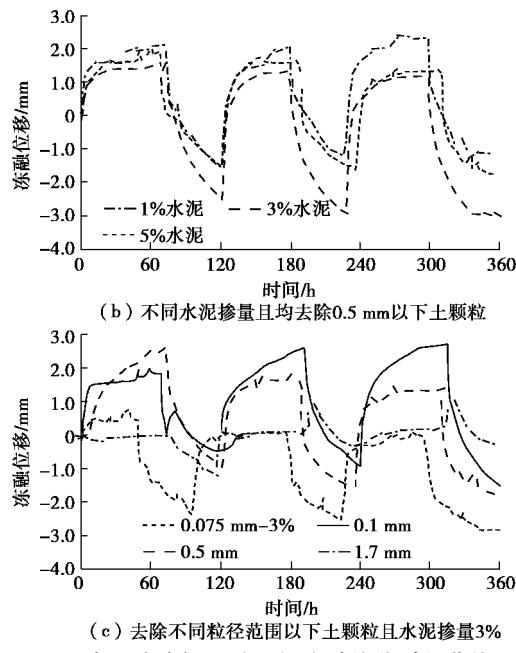


图 5 水泥稳定级配碎石的冻融位移时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of freeze-thaw deformation for aggregated macadam with different particle distributions

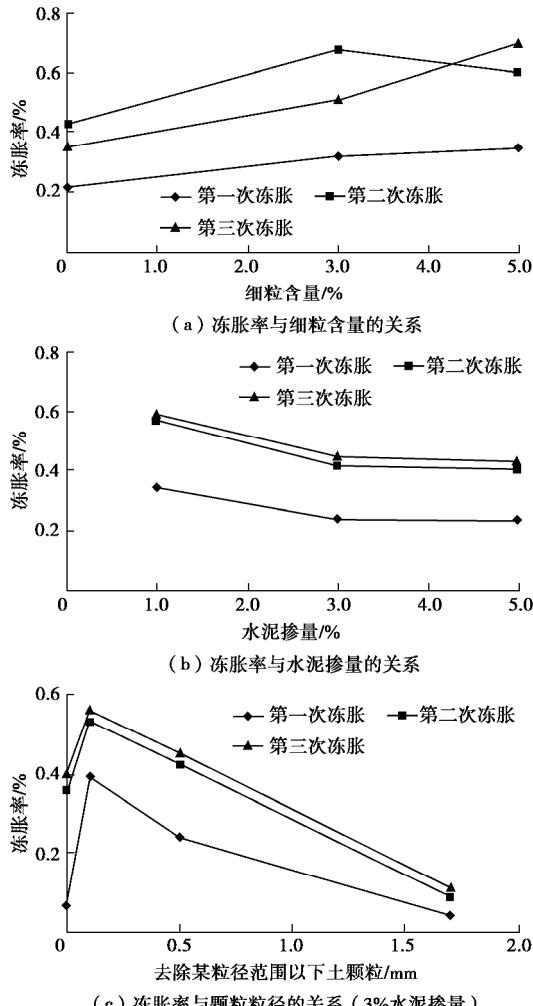


图 6 冻胀率与细粒含量、水泥掺量、颗粒粒径的关系

Fig. 6 Curves of frost-heave ratio vs. fine content, cement content and particle-size composition

在此次试验的细颗粒含量范围内, 级配碎石试样的冻胀率与细颗粒含量呈现线性增加的趋势(图 6 (a))。伴随所掺加水泥量的增加, 水泥稳定碎石试样的冻胀率呈现先减小而后趋于稳定的趋势(图 6 (b))。针对颗粒级配的影响, 当水泥掺量为 3% 时, 随着级配碎石中所去除粒径范围的增加, 水泥稳定碎石试样的冻胀率呈现先增大而后迅速减小的趋势, 存在明显的峰值点, 且当所去除粒径范围达到 1.7 mm 时, 其冻胀率基本上可以忽略(图 6 (c))。这说明细颗粒和水泥大大提高水泥稳定碎石试样密实度的同时, 降低了渗透性能(表 2), 无法形成较大的冻胀变形量; 当去除粒径小于 0.1 mm 范围的颗粒时, 试样中有利于水分迁移的贯通孔隙增多, 冻胀量增大; 随着所去除粒径范围的增大, 渗透性急剧增大(见表 2), 试样的持水性越差, 从而无法形成较大的冻胀量<sup>[3]</sup>。

### 3.3 渗透特性

由表 2 可知, 水泥稳定碎石试样的渗透性与碎石的颗粒级配密切相关, 相同水泥掺量条件下, 所去除的碎石颗粒粒径范围越大, 渗透性越好, 当试样中所去除的碎石颗粒粒径超过 0.5 mm 范围时, 其渗透系数已远大于  $10^{-5} \text{ m/s}$ <sup>[3]</sup>。这也说明, 所去除的碎石颗粒粒径范围越大, 水泥稳定碎石的持水性越差, 从而无法形成较大的冻胀量(图 6 (c))。

表 2 渗透系数试验结果统计

Table 2 Test results for permeability coefficient

试样编号	C3F3	C3P0.1	C3P0.5	C3P1.7	C1P0.5	C5P0.5	C5P1.7
渗透系数 $(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.123	0.167	44.3	200	22.2	55.5	500

### 3.4 耐久性

耐久性是评价水泥稳定碎石工程性能的重要指标, 主要从水泥稳定碎石的水稳定性和抗冻融耐久性两方面展开研究分析。

#### (1) 水稳定性分析

图 7 给出了浸水、不浸水条件下水泥稳定碎石试样无侧限抗压强度与水泥掺量、颗粒级配的关系曲线, 浸水后( $25^{\circ}\text{C}$ 恒温养护 7 d, 最后 1 d 浸水)抗压强度与不浸水( $25^{\circ}\text{C}$ 恒温养护 7 d)抗压强度的比值即为水稳定性系数, 如表 3 所列。浸水后水泥稳定碎石试样所去除的颗粒粒径范围越大, 试样的水稳定性越差; 同时, 水泥的掺加有效地提升了试样的水稳定性。当水稳定性系数大于 0.70 时, 水泥稳定碎石具有较好的水稳定性<sup>[16]</sup>, 因此当水泥掺量介于 3%~5% 时, 试样的水稳定性较好。

此外, 同一颗粒级配下水泥稳定碎石试样的抗压强度随水泥掺量的增多呈现线性增大的趋势(图 7 (a)); 而同一水泥掺量下试样的抗压强度随所去除颗

粒粒径范围的增大而迅速衰减(图7(b))。较大范围颗粒粒径的缺失大大削弱了级配碎石试样的抗压强度和密实程度,而水泥的掺加有效地弥补了由于某中粒径缺失所导致的强度衰减现象。

表3 水稳定性系数

Table 3 Test results for moisture stability coefficient

颗粒级配	水泥掺量		
	1%	3%	5%
F3(细粒含量为3%)	0.88	0.93	0.96
P0.1(去除0.1 mm以下土颗粒)	0.77	0.78	0.88
P0.5(去除0.5 mm以下土颗粒)	0.36	0.77	0.86
P1.7(去除1.7 mm以下土颗粒)	0.46	0.70	0.71

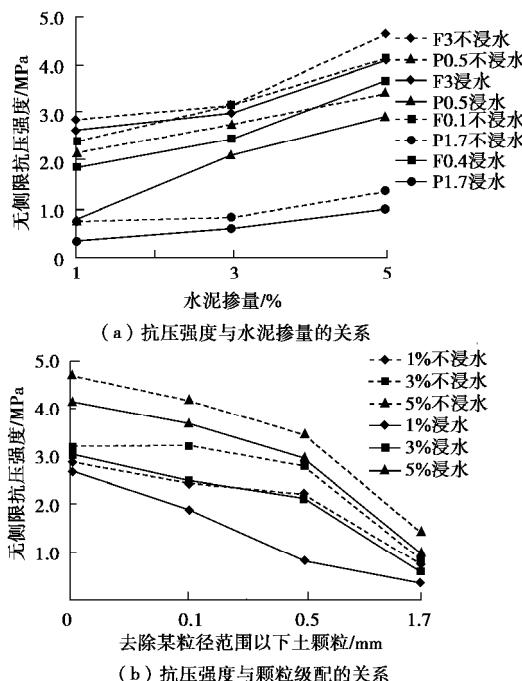


图7 抗压强度与水泥掺量、颗粒粒径的相互关系

Fig. 7 Curves of strength vs. cement content and particle size composition

## (2) 冻融耐久性

将水泥稳定碎石试样分别常温养护7 d和28 d后进行多次冻融后的无侧限抗压强度试验,试验结果如图8所示。在强烈的冻结和融化作用下,水泥稳定碎石试样的抗压强度均呈现整体衰减的趋势,并在经历10次冻融后趋于稳定;此外,与养护28 d后试样的抗压强度在冻融前期出现陡降式衰减现象相比(图8(b)),养护7 d后的试样则出现了强度增长的现象(图8(a)),这主要是由于冻融前期养护7 d试样的养护强度增幅大于冻融衰减作用,而养护28 d试样的养护强度已达到峰值所导致的。

相比于养护7 d的强度,试样C3F3和C5P0.5养护28 d后的强度增幅达到一倍以上,而试样C3P0.5的增幅则不明显(见图8(b));同时,试样C3F3和C5P0.5养护28 d后的抗压强度随冻融次数增加的衰减幅度远大于试样C3P0.5。这主要是由于相比于试样

C3P0.5,试样C3F3和C5P0.5分别具有细粒含量高、水泥掺量大的特点,较高的细粒含量和水泥掺量导致试样的强度增幅明显,但是也降低了试样的抗冻融耐久性能<sup>[16]</sup>。

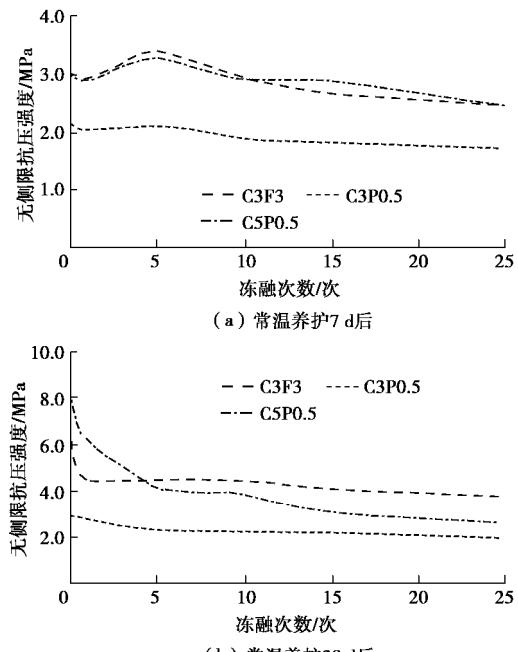


图8 水泥稳定碎石抗压强度与冻融次数的关系

Fig. 8 Curves of strength vs. freeze-thaw cycles

## 3.5 温干缩性能

寒区高速铁路路基基床中应用水泥稳定碎石材料,其在温度、干湿效应作用下的变形和裂缝问题应引起足够的重视<sup>[2]</sup>。图9给出了水泥稳定碎石试样的干缩系数 $a_{di}$ 、温缩系数 $a_t$ 的变化过程。

$$a_t = \frac{e_i}{t_i - t_{i+1}}, \quad (1)$$

式中,  $a_t$ 为温缩系数( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ),  $e_i$ 为第*i*个温度下的温缩应变( $10^{-6}$ ),  $t_i$ 为第*i*个温度区间( $^{\circ}\text{C}$ )。

$$a_{di} = \frac{e_i}{W_i}, \quad (2)$$

式中,  $a_{di}$ 为第*i*次干缩系数( $10^{-6}/\%$ ),  $e_i$ 为第*i*次干缩应变( $10^{-6}$ ),  $W_i$ 为第*i*次失水率(%)。

由图9(a)可以看出:干缩系数随试样暴露时间的增长而迅速增大,并在11 d后趋于稳定;水泥稳定碎石中的细粒土有效地抑制了试样的干缩变形,干缩系数较小;且相同颗粒级配条件下,水泥掺量越多,干缩系数越大,原因是水泥掺量多,水化作用使材料失水率增加,收缩变形增大<sup>[6]</sup>。

风干状态下,试件C3P0.5和C5P0.5的温缩系数随温度变化呈现双峰特征,温缩系数最大值出现在 $10^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 区间内;而试件C8P0.5和C3F3的温缩系数随温度变化则呈正弦曲线特征,温缩系数最大值出现在 $0^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 区间内,见图9(b)。由此可见,级配

和水泥掺量不同, 水泥稳定碎石试样的温缩系数随温度变化趋势不同, 出现峰值的温度区间亦不同<sup>[15]</sup>, 但多发生在 10℃~ -10℃ 区间内, 即处于风干状态下的水泥稳定碎石基床最不利温度区间为 10℃~ -10℃。

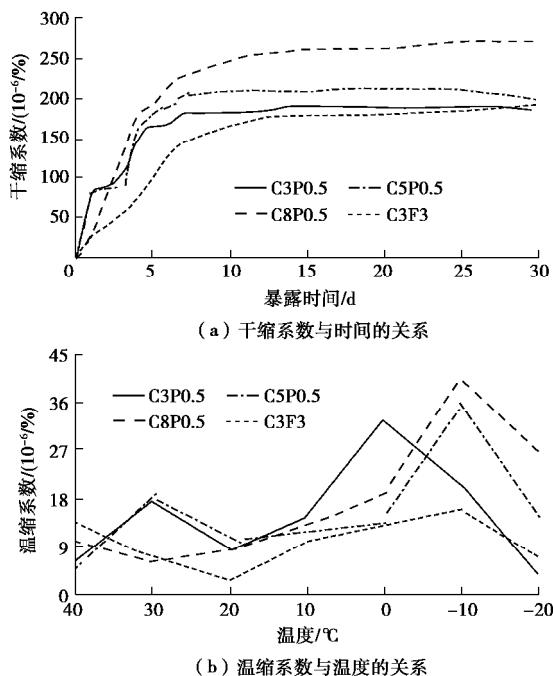


图 9 水泥稳定碎石温干缩系数的变化规律

Fig. 9 Shrinkage coefficient of cement-stabilized macadam

## 4 分析与讨论

针对水泥稳定碎石基床在寒区高铁路基中的应用, 有效地控制冻胀变形关乎高铁的运营安全, 但一味的追求低冻胀率将有可能导致承载力下降、路基体内积水、路基面变形开裂等问题的出现, 易形成冻胀往复循环、难以整治的状态, 严重影响高速铁路的正常运营。

(1) 冻胀率与抗压强度正相关, 与渗透系数负相关。例如, 虽然去除 1.7 mm 以下粒径的水泥稳定碎石试样冻胀率很低且渗透系数很大(表 2 和图 6), 即使掺加水泥, 其强度增长缓慢且耐久性较差(见表 3 和图 7)。

(2) 水泥掺量为 1% 的各种配比无法满足渗透性和水稳定性要求(表 2, 3), 且现场施工拌合质量无法控制; 同时, 对于去除 0.1 mm 以下粒径的水泥稳定碎石试样易形成较大的冻胀变形(图 6 (c))。综合上述, 优选出 3 种水泥稳定碎石材料配比 C3F3、C3P0.5 和 C5P0.5。

(3) 考虑冻融耐久性和温干缩性能, 试样 C3F3 具有较好的冻融耐久性和温干缩性能(图 8, 9), 但其渗透性能较差(表 2)。因此, 建议将含 3% 细颗粒、掺加 3% 水泥的水泥稳定碎石基床作为不透水基床。

对比试样 C3P0.5 和 C5P0.5, 两者经历多次冻融后的强度均达到 2.0 MPa 以上, 且渗透性较好, 但试样 C5P0.5 经历多次冻融后的强度衰减达到 50% 以上, 抗冻融耐久性较差(图 8); 同时, 相同颗粒级配条件下, 水泥掺量越多, 温缩、干缩系数越大, 不利于基床稳定(图 9)。因此, 建立将去除 0.5 mm 以下土颗粒、掺加 3% 水泥的水泥稳定碎石基床作为渗水性基床。

## 5 结论与展望

本文以冻胀率作为重要评价指标, 综合考虑压实效果、承载能力、排水性能、耐久性能和温干缩变形性能, 分析和讨论了水泥稳定碎石基床在寒区高铁路基中应用的合理水泥掺量和颗粒级配。

(1) 试验方案配比的水泥稳定碎石基床均具有较好的压实性能, 各项压实指标均满足和超过了高铁路基基床压实标准。

(2) 去除较大粒径范围的土颗粒大大降低了级配碎石的冻胀敏感性, 增大了渗透性能, 却削弱了抗压强度和水稳定性。

(3) 水泥的掺加有效地弥补了粒径缺失导致的级配碎石强度降低现象, 但却降低了级配碎石的渗透性能, 增大了温缩、干缩变形。

(4) 水泥稳定碎石的温干缩系数随水泥掺量的增加而增大, 风干状态下水泥稳定碎石基床最不利温度区间为 10℃~ -10℃。

(5) 工程实践中, 水泥稳定碎石基床的合理水泥掺量为 3%, 宜选用 3% 细颗粒含量的水泥稳定碎石基床作为不透水基床, 选用去除 0.5 mm 以下土颗粒的水泥稳定碎石基床作为渗水性基床。

## 参考文献:

- [1] 荆志东, 刘俊新. 红层泥岩半刚性基床结构动态变形试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2116~2121. (JING Zhi-dong, LIU Jun-xin. Experimental research on dynamic deformation of semi-rigid structures of subgrade bed-mudstone of red beds[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2116~2121. (in Chinese))
- [2] 杨西锋. 高纬度严寒地区高速铁路路基防冻胀设计研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(8): 6~11. (YANG Xi-feng. Design research on subgrade anti-frost for high-speed railway in high latitude and severe cold region[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(8): 6~11. (in Chinese))
- [3] 闫宏业, 赵国堂, 蔡德钩, 等. 高速铁路渗透性基床防冻胀结构研究[J]. 铁道建筑, 2015(5): 98~102. (YAN Hong-ye,

- ZHAO Guo-tang, CAI De-gou, et al. Research on anti-frost heaving structure of permeable subgrade bed on high speed railway[J]. Railway Engineering, 2015(5): 98 - 102. (in Chinese))
- [4] 赵世运, 杨彦克, 李福海, 等. 高速铁路路基冻胀特性水泥掺入的改性研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(5): 71 - 75. (ZHAO Shi-yun, YANG Yan-ke, LI Fu-hai, et al. Research on cement-modified frost heave characteristics of high-speed railway subgrade[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(5): 71 - 75. (in Chinese))
- [5] 熊志文, 金兰, 程佳, 等. 高速铁路改良粗颗粒填料冻胀特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(5): 1 - 6. (XIONG Zhi-wen, JIN Lan, CHENG Jia, et al. Experimental study on frost heaving characteristics of improved coarse grain filling for high speed railway[J]. China Railway Science, 2015, 36(5): 1 - 6. (in Chinese))
- [6] 曾梦澜, 薛子龙, 谷世君, 等. 开级配水泥稳定碎石基层路用性能的试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(4): 579 - 583. (ZENG Meng-lan, XUE Zi-long, GU Shi-jun, et al. Trial study on the pavement performance of open graded cement stabilized aggregate base[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(4): 579 - 583. (in Chinese))
- [7] FARHAN A H, DAWSON A R, THOM N H, et al. Flexural characteristics of rubberized cement-stabilized crushed aggregate for pavement structure[J]. Materials and Design, 2015, 88: 897 - 905.
- [8] 李 頤, 蒋应军, 任皎龙. 基于振动法的抗疲劳断裂水泥稳定碎石强度标准[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 276 - 283. (LI Di, JIANG Ying-jun, REN Jiao-long. Strength standard of anti-fatigue-fracture cement stabilized macadam based on vibration testing method[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 276 - 283. (in Chinese))
- [9] 王 龙, 解晓光. 水泥稳定碎石振动与静压成型物理力学指标关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10): 276 - 283. (WANG Long, XIE Xiao-guang. Relationship on index of physics and mechanics cement stabilized aggregates between vibrating and static compacting methods[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(10): 276 - 283. (in Chinese))
- [10] DISFANI M M, ARULRAJAH A, HAGHIGHI H, et al. Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as a supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 667 - 676.
- [11] ARULRAJAH A, DISFANI M M, HAGHIGHI H, et al. Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 146 - 155.
- [12] BAN H, PARK S W. Characteristics of modified soil-aggregate system and their application in pavements[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(6): 1672 - 1678.
- [13] MA YH, GU JY, LI Y, et al. The bending fatigue performance of cement-stabilized aggregate reinforced with polypropylene filament fiber[J]. Construction and Building Materials. 2015, 83: 230 - 236.
- [14] ERHAN Güneyisi, MEHMET Gesoglu, TURAN Özturan, et al. Fracture behavior and mechanical properties of concrete with artificial lightweight aggregate and steel fiber[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 156 - 168.
- [15] 孙兆辉. 水泥稳定碎石温缩变形特性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(2): 249 - 252. (SUN Zhao-hui. Research on temperature shrinkage deformation properties of cement stabilized macadam[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(2): 249 - 252. (in Chinese))
- [16] 吴瑞麟, 张良陈, 韩卓, 等. 水泥稳定碎石基层长期浸水及冻融实验研究[J]. 华中科技大学学报, 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, 2011, 39(10): 113 - 115. (in Chinese))
- [17] 庄少勤, 刘朴, 孙振平. 水泥稳定碎石变形性能及其影响因素[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(4): 356 - 363. (ZHUANG Shao-qin, LIU Pu, SUN Zhen-ping. Investigation on deformation and its influencing factors of cement-stabilized macadam base[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(4): 356 - 363. (in Chinese))
- [18] ZHANG Yu-zhi, DU Yan-liang, SUN Bao-chen. Temperature distribution analysis of high-speed railway roadbed in seasonally frozen regions based on empirical model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 114: 61 - 72.
- [19] WANG Tian-liang, LIU Yao-jun, YAN Han, et al. An experimental study on the mechanical properties of silty soils under repeated freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 112(4): 51 - 65.