

高寒地区道面混凝土抗冻性能研究

龚英, 闫涛

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川成都 610213)

摘要: 鉴于高寒地区混凝土冻融循环频繁、易冻坏, 因此, 如何提高混凝土抗冻性能是关键。阐述了对高寒地区道面混凝土抗冻性能进行的研究, 重点研究了道面混凝土水胶比、砂率、胶材用量和含气量对其抗冻性能的影响。研究表明: 在满足道面混凝土设计指标和现场施工性能的前提下, 增加胶材用量、降低水胶比、砂率和含气量均有利于道面混凝土抗冻性能的提高, 据此设计的道面混凝土抗冻等级能够达到 F300。研究成果对高寒地区道面混凝土抗冻性能的设计具有指导意义。

关键词: 高寒地区; 道面混凝土; 抗冻性; 质量损失率; 相对动弹模量

中图分类号: TV521; TV544

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2023)06-0025-05

Study on Frost Resistance of Pavement Concrete in Alpine Area

GONG Ying, YAN Tao

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: In view of freeze thaw cycles and vulnerability to frost damage of the concrete in the alpine area, how to improve the frost resistance of concrete is the key. This paper describes the study on the frost resistance of pavement concrete in alpine area, focusing on the effects of the water-binder ratio, sand ratio, adhesive materials and air content on the frost resistance of pavement concrete. The results show that on the premise of meeting the pavement concrete design index and field construction performance, increasing the amount of the adhesive materials, reducing the water-binder ratio, sand ratio and air content are conducive to improving the frost resistance of the pavement concrete. According to the above design, the grade of the frost resistance of pavement concrete can reach F300. The study results have a certain guiding significance for the pavement concrete in alpine area.

Key words: Alpine area; Pavement concrete; Frost resistance; Mass loss rate; Relative dynamic modulus

1 概述

我国某些高寒地区因受冻融影响其道面仅使用了 3~5 a 就陆续开始出现冻坏现象, 进而降低了道面的使用年限, 明显影响到其使用安全^[1]。因此, 在高寒地区提高混凝土的抗冻能力是延长道面混凝土寿命的关键, 也是目前高寒地区道面混凝土亟需解决的问题之一。

目前关于如何改善混凝土抗冻性的研究对象多集中于常态混凝土, 其主要技术手段表现在: (1) 适量增加水泥用量, 如肖巍等人^[2]研究了不同水泥用量对常态混凝土抗冻性能的影响, 研究表明当水泥用量低于 350 kg/m³, 水泥用量的增加会提高混凝土的抗冻性能; 当水泥用量高于 350 kg/m³, 水泥用量的增加对其抗冻性能影响不大。(2) 适量提高砂率, 如翁兴中等人^[3]研究了

不同砂率对道面混凝土抗冻性能的影响, 当混凝土砂率低于 30%, 随着砂率的增长混凝土的抗冻性能亦增加; 当砂率高于 30%, 随着砂率的增加, 其混凝土的抗冻性能降低。(3) 降低水胶比, 如曹秀丽等人^[4]对不同强度混凝土(不同水胶比)的抗冻性能进行了研究, 研究表明强度高的混凝土抗冻性能更好。(4) 适量提高含气量, 如王庆石等人^[5]对混凝土含气量与抗冻性能的关系进行了研究, 研究表明混凝土含气量增加可以使混凝土孔隙率、总孔体积、总孔面积增大, 使平均孔径、孔间距系数减小, 孔径均匀分布, 能够显著改善混凝土的内部孔隙结构, 从而提高混凝土的抗冻性, 但需兼顾混凝土强度的降低。

但目前对道面混凝土这类干硬性混凝土抗冻性能的研究相对较少。笔者认为: 对于道面混凝

收稿日期: 2023-05-30

土这类干硬性混凝土可以借鉴常态混凝土的技术思路,试验研究水胶比、砂率、胶材用量和含气量等因素,对冻融过程中道面混凝土试块质量损失率和相对动弹模的变化规律,从而为道面混凝土的高抗冻性设计提供有力的数据支撑。本文阐述了具体的研究思路和方法。

2 试验材料及方法

2.1 研究思路

表1 祁连山P·O42.5低碱水泥物理性能指标表

比表面积 /m ² ·kg ⁻¹	密度 /kg·m ⁻³	初凝 /min	终凝 /min	3 d 抗压强度 /MPa	28 d 抗压强度 /MPa	90 d 抗压强度 /MPa	3 d 抗折强度 /MPa	28 d 抗折强度 /MPa	90 d 抗折强度 /MPa
346	3.09	168	204	28.0	49.9	58.7	5.4	8.0	9.6

细骨料:天然砂,细度模数为3,含泥量为1.5%,属中砂。

粗骨料:花岗岩初糜棱岩,其分三种粒径;大石为16~31.5 mm、中石为10~20 mm、小石为5~10 mm;且其大石:中石:小石=7:2:1,压碎值为6%。

外加剂:使用北京安建世纪科技发展有限公司出品的高效减水剂,掺量为1.5%;引气剂掺量为0.15%。

2.3 试验方法

抗折试验:试件尺寸为150 mm×150 mm×550 mm,按照《混凝土物理力学性能试验方法标

为考察高寒地区道面混凝土的抗冻性,设计出不同含气量、水胶比、砂率及胶材用量(编号分别为A、W、S和C)的混凝土,在历经冻融300次后测试其混凝土表面剥落质量和相对动弹模并探究上述参数对混凝土抗冻性的影响。

2.2 原材料

水泥:祁连山P·O42.5低碱水泥。祁连山P·O42.5低碱水泥的物理性能指标见表1。

准》GB/T 50081—2019^[6]的相关规定执行。

快速冻融试验:试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082^[7]的相关规定执行。

3 试验成果及分析

3.1 抗折强度

抗折强度是道面混凝土设计的重要指标之一,根据《军用场道工程施工及验收规范》GJB 1112A—2004^[8]要求所配制的混凝土抗折强度需达到6.0 MPa。道面混凝土抗折强度见表2。

表2 道面混凝土抗折强度表

编号	水胶比	砂率 /%	胶材用量 /kg·m ⁻³	含气量 /%	7 d 抗折强度 /MPa	28 d 抗折强度 /MPa
W1	0.39	30	320	4.0	4.9	6.1
W2	0.38	30	330	4.0	5.0	6.4
W3	0.37	30	340	4.0	5.4	6.6
S1	0.38	28	330	4.0	5.2	6.5
S2	0.38	30	330	4.0	5.0	6.4
C1	0.38	30	300	4.0	4.9	6.3
C2	0.38	30	310	4.0	5.1	6.6
C3	0.38	30	330	4.0	5.0	6.4
A1	0.38	30	330	3.0	5.1	6.6
A2	0.38	30	330	4.0	5.0	6.4
A3	0.38	30	330	5.0	4.7	5.9

试验结果表明:水胶比为0.37、0.38和0.39的混凝土(W1、W2、W3)28 d抗折强度分别为6.6 MPa、6.4 MPa、6.1 MPa;与水胶比为0.39的混凝土相比,其水胶比降低至0.38和0.37,混

凝土抗折强度分别增长4.9%和8.2%。

砂率为30%的道面混凝土(S2)7 d、28 d抗折强度分别为5.2 MPa、6.5 MPa;砂率降低至28%时,道面混凝土(S1)7 d、28 d抗折强度分别

降低至 5.0 MPa、6.4 MPa。由此可见:砂率降低能够增加混凝土的抗折强度。因此,在满足混凝土和易性时宜适量降低混凝土砂率。

当含气量分别为 3.0%、4.0% 和 5.0% 时,其道面混凝土(A1、A2、A3)28 d 抗折强度分别为 6.6 MPa、6.4 MPa 和 5.9 MPa;含气量为 3%~4% 时其混凝土抗折强度差异不大;当含气量增加至 5% 时,混凝土抗折强度明显降低。

3.2 抗冻性

3.2.1 水胶比

为探究不同水胶比对道面混凝土抗冻性能的影响,此次研究的水胶比为 0.37、0.38 和 0.39 的道面混凝土在 300 次冻融循环过程中其试件的质量损失率和相对动弹模量的变化趋势见图 1 和图 2。

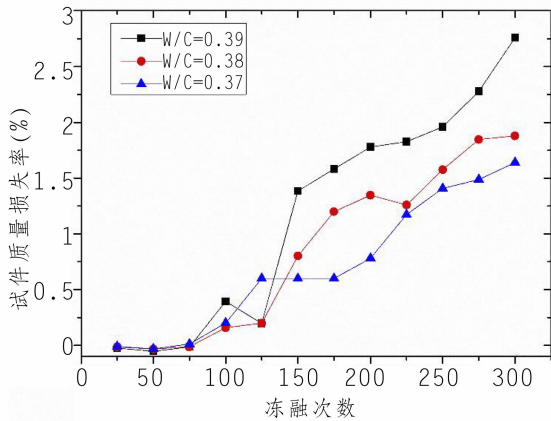


图 1 水胶比对试块冻融质量损失率的变化趋势图

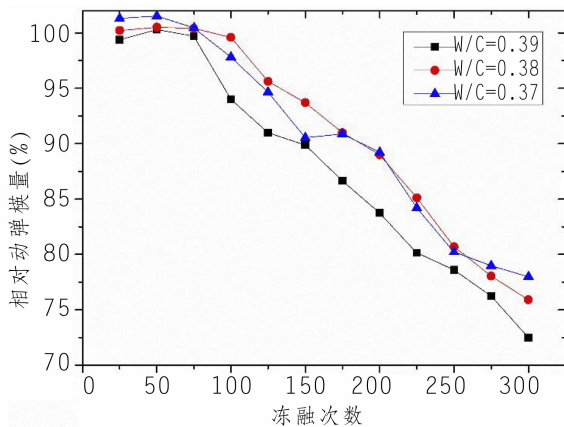
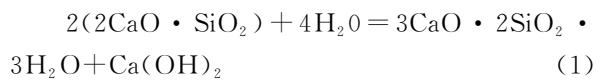


图 2 水胶比对试块相对动弹模量的变化趋势图

300 次冻融后,水胶比为 0.39、0.38 和 0.37 的混凝土试件损失率分别为 2.8%、1.9% 和 1.6%。与水胶比为 0.37 相比,水胶比增加至 0.39

和 0.38,其混凝土质量损失率分别增长了 68% 和 15%。由此可见:混凝土的质量损失率随水胶比的增大而增大。这是因为水胶比越大,混凝土强度越低;混凝土内的孔隙越多,由于冻融循环时混凝土内的水结冰产生的体积增长会在混凝土内部形成膨胀力,因此,试块在冻融过程中其剥落质量会越多,质量损失率越大。

经仔细观察发现:道面混凝土在前 75 次冻融循环中试块质量不仅没有降低,反而出现了轻微增长,这种现象在 75 次冻融后也偶尔出现。出现上述现象的原因可能有两点:(1)祁连山低碱水泥中的硅酸二钙(C_2S)含量为 25%,其水化速度较慢,水化 28 d 时并未完全反应(与表 1 中水泥 28 d 到 90 d 的水泥强度依旧增长的现象吻合);在冻融过程中其水化反应如方程(1)所示,每 1 mol 的 C_2S 与 2 mol 水反应,生成 1 mol 水化硅酸钙(CSH)和 1 mol 氢氧化钙, C_2S 的水化过程消耗了外界水,生成含有结晶水的水化产物,此过程会增加试块质量。(2)冻融过程中,正温下的混凝土根据毛细孔效应其水分会从小孔向大孔迁移;负温下毛细孔中的自由水开始结冰,基体中连接毛细管的气孔(引气剂引出的气泡,孔径为 0.1~0.2 mm)可提供有效的压力“逃逸边界”,冰晶会挤压毛细管而产生水压,部分毛细孔中的水通过水压进入小气孔中,当温度再次恢复正温时,小气孔中的水不易迁移,因此而增加了试块质量。



当水胶比 ≥ 0.38 ,冻融循环次数超过 125 次,其混凝土试件的质量损失率曲线随水胶比的增大而陡增,而水胶比为 0.37 的试件质量损失率则相对较为缓慢的增长,说明水胶比大于 0.38 的混凝土后期(冻融循环 > 125 次)的质量损失会快速增长,从而不利于混凝土的长期抗冻性。因此,为保证混凝土具有优异的长期抗冻性,其水胶比宜小于 0.38。

在冻融次数为前 75 次时,不同水胶比的混凝土的相对动弹模量呈现出先增加后降低的趋势。这与图 1 中的现象相吻合,表明冻融前期水泥还在水化、增强混凝土基体的密实性;尽管冻融过程会破坏其基体内部结构,但冻融前期混凝土的整体结构较密实,水泥水化对整体结构的增强程度

大于冻融破坏程度,因此,冻融早期其相对动弹模量增加。随着冻融次数的增加,水泥水化速率缓慢,对基体内部结构的增强程度降低,此时,冻融过程对基体破坏的程度较大,混凝土相对动弹模降低。

冻融 300 次后,水胶比为 0.39、0.38 和 0.37 的混凝土相对动弹模量为 72.5%、75.9% 和 78.0%,表现为混凝土水胶比越大,冻融过程相对动弹模量损失越大;300 次冻融循环后,水胶比为 0.37 至 0.39 的道面混凝土试块质量损失率均小于 3%,相对动弹模量均大于 70%,满足《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2019 中要求试块质量损失率不大于 5.0%、相对动弹模量不小于 60%的要求。说明上述 3 配比的混凝土具有良好的抗冻性能。

3.2.2 砂率

为探究砂率对混凝土抗冻性的影响,试验研究中采用砂率为 28% 和 30% 的道面混凝土在抗冻过程中的质量损失率和相对动弹模量的变化规律见图 3 和图 4。

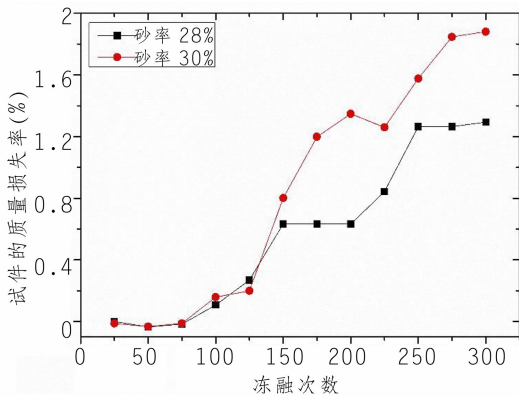


图3 砂率对试块冻融质量损失率的变化趋势图

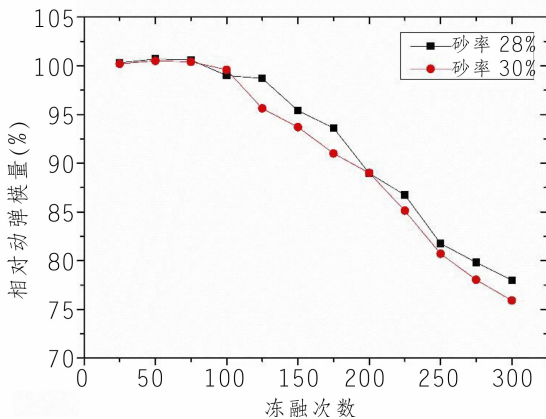


图4 砂率对试块冻融相对动弹模量的变化趋势图

由图 3 可知:砂率为 28% 和 30% 的混凝土在冻融循环 300 次后,其质量损失率分别为 1.3% 和 1.9%,故低砂率有利于混凝土的抗冻性。由于晶面过渡区是混凝土最薄弱的环节,水泥石与骨料接触部位的水灰比会增加而产生较多的空隙、形成有害介质通道,因此,混凝土的砂率越低其晶面过渡区就越少;同时,Ca(OH)₂ 在晶面过渡区的富集各向异性排列也会导致混凝土易受冻害,因此,低砂率(28%)混凝土具有更好的抗冻性能。另外,混凝土基体中骨料表面积越大,其消耗包裹骨料的水泥浆就越多;而未被水泥浆包裹的骨料在其抗冻过程中缺少水泥石的保护、导致其抗冻性能下降,故低砂率(28%)混凝土的抗冻性能更优异。

由图 4 可以看出:冻融 300 次后,28% 砂率的混凝土的相对动弹模量为 78%,高于 30% 砂率的混凝土。低砂率(28%)混凝土晶面过渡区表面积小,抗冻过程中有害介质通道较少,整体结构更致密,故其相对动弹模量较高。

综上所述,尽管高砂率会增加混凝土基体质量的损失率,降低其相对动弹模量,但从整体来看其降低幅度并不大。因此,为了更好地满足拌合物性能、方便施工,对于道面混凝土可适当提高其砂率。上述配比砂率为 28%~30% 的道面混凝土的抗冻性指标均满足《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2019 的要求。

3.2.3 胶材用量

为明晰胶材用量对道面混凝土抗冻性的影响,试验研究了 300 kg/m³、310 kg/m³ 和 330 kg/m³ 水泥用量的道面混凝土经 300 次冻融后对试件性能的影响,其结果见图 5 和图 6。

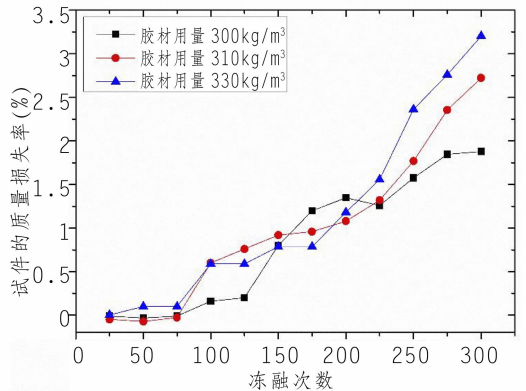


图5 胶材用量对试块冻融质量损失率的变化趋势图

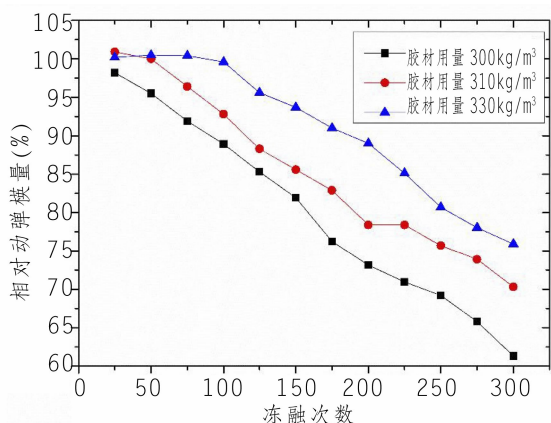


图 6 胶材用量对试块冻融相对动弹模量的变化趋势图

从图 5 可以看出:随着胶材用量的增加,混凝土抗冻性越好。在前 200 次冻融循环过程中,不同胶材用量的混凝土质量损失率无明显区别;随着冻融次数的增加,胶材用量越低,混凝土的质量损失率越大。胶材用量低时,混凝土基体骨料间的浆体不足,从而不能有效填充骨料间的空隙,导致基体存在较多连通性大的孔隙率,增加了有害介质的通道;在抗冻过程水饱和状态下,混凝土孔隙率(有害孔)较多导致基体含水率较多,负温时其基体内部的水结冰产生冻胀力,且基体内部凝结与未凝结的水之间产生渗透压,因此而降低了混凝土的抗冻性。

由图 6 得知:经过 300 次冻融循环后,胶材用量为 300 kg/m^3 、 310 kg/m^3 和 330 kg/m^3 的试件相对动弹模量分别为 61.3%、70.3% 和 75.9%。由此可见,胶材用量的增加会明显提高混凝土的抗冻性;胶材用量的增加会使混凝土基体内部更加密实,进而减少基体裂缝的数量与长度或宽度。冻融过程中,水在基体裂缝或大孔隙中结冰、再溶解而产生的体积膨胀力和渗透压会增加裂缝长度和宽度,破坏混凝土的整体密实性,降低混凝土的动弹模量;基体中裂缝越少,冻融过程中产生冻胀力和渗透压的位点越少,冻融对混凝土的相对动弹模损害越低。因此,胶材用量越多,经冻融循环后其混凝土的相对动弹模损失越少。

3.2.4 含气量

引气已被证实是减少混凝土冰冻劣化的一个有效方法。此次研究探究了引气剂引入气体(粒径为 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$)含气量的大小对道面混

凝土抗冻性能的影响,经冻融循环 300 次后,试块的质量损失率和相对动弹模量变化趋势见图 7 与图 8。

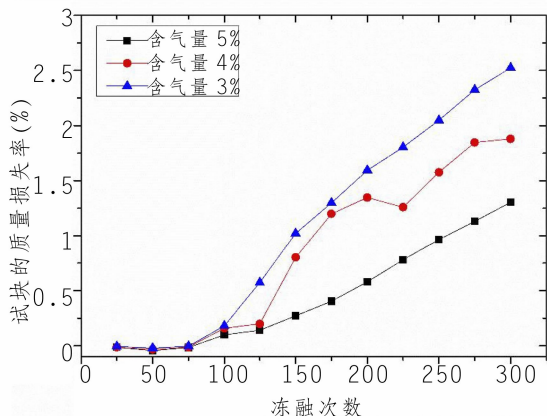


图 7 含气量对试块冻融质量损失率的变化趋势图

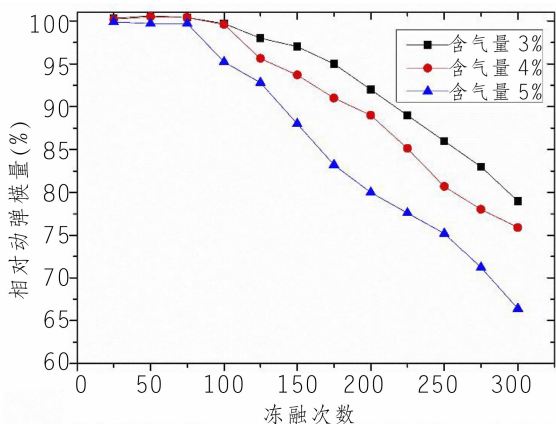


图 8 含气量对试块冻融相对动弹模量的变化趋势图

图 7 表明:冻融 300 次期间,随着混凝土含气量的增加,试块质量损失率降低;含气量高的混凝土具有更好的抗冻性能。引气剂引入的气体其气泡粒径小且不连续;混凝土内部含气量越多,气泡分布越密集,冻融过程中这些密闭性粒径小的气泡可分散孔隙水压力,从而抵消冻胀力。在进行道面混凝土配合比设计时应注意:含气量的增加会降低混凝土的力学性能。因此,在改善混凝土抗冻性的同时,应首先考虑力学强度设计要求。

由图 8 得知:冻融过程中混凝土含气量的增加会增加其相对动弹模量,从而使混凝土整体更密实。含气量的增加会分散冻融过程中试块受到的水压力,降低混凝土内部裂缝的数量,减小横向基频。仔细观察发现:随着含气量的增加,试块前期动弹模量亦在增加,这可能是所引入的大量微

(下转第 71 页)

粒表面的可溶性氟、磷被溶解,特征 X 射线信号减弱,信号点分布疏松、暗淡。但固溶在颗粒表层的氟、磷仍可被测得,信号未完全消失。

4 结 语

通过采用简单的粉磨、浸泡工艺对磷渣粉凝结时间和初期活性进行调控并证实了其取得的效果:经粉磨和浸泡后的磷渣粉其凝结时间可缩短至与纯水泥相同的水平,1 d 活性指数提升幅度 >30%。浸泡后,磷渣粉颗粒表面的氟、磷的溶解是产生上述效果的根本原因。此次研究为磷渣粉改性拓展了新思路,并为房建、市政工程混凝土中进一步提高磷渣粉掺量提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 徐迅,卢忠远,严云. 磷渣粉对硅酸盐水泥水化特性的影响[J]. 材料导报, 2008,22(增刊3):316-318.
- [2] 袁润章,朱颢安,欧阳世翥,高琼英. 关于矿渣玻璃的结构及其特性的研究[J]. 武汉建材学院学报, 1981,3(3):33-43.
- [3] Li Dongxu, Shen Jinlin, Chen Lin, Wu Xuequan. The influence of fast - setting/early - strength agent on high phosphorous slag content cement [J]. Cem. and Concr. Res., 2001,31(1):19-24.

(上接第 29 页)

气体均匀地分布在混凝土内部使其整体更加均匀、规整的缘故。

4 结 语

此次通过不同水胶比、砂率、胶材用量和含气量对高寒地区道面混凝土抗冻性能影响进行研究取得的结果为:

(1)道面混凝土水胶比越低,其冻融过程质量损失率越低;相对动弹模量增加,其抗冻性能越好。相较于高砂率的道面混凝土,低砂率的混凝土抗冻性能更优异。

(2)胶材用量为 300 kg/m³、310 kg/m³ 和 330 kg/m³,300 次冻融循环后,其试件质量损失率分别为 3.2%、2.7%和 1.9%,相对动弹模量分别为 61.3%、70.3%和 75.9%。胶材用量的增加有利于道面混凝土的抗冻性能。

(3)含气量为 3.0%、4.0%和 5.0%的道面混凝土经 300 次冻融循环后,混凝土试块的质量损失率为 2.5%、1.9%和 1.3%,相对动弹模量分别为 66.4%、75.9%和 79.0%。由此可见:高含气

- [4] 史才军,李荫余,唐修仁. 磷渣活性激发机理初探[J]. 东南大学学报,1989, 19(1):141-145.
- [5] 尹小林. 磷渣活化改性剂:CN02114132.0[P]. 2003-11-26.
- [6] 郝晋高. 磷渣中磷和氟对硅酸盐水泥的水化影响机理[D]. 武汉理工大学, 2010.
- [7] 程麟,盛广宏,皮艳灵,等. 磷渣对硅酸盐水泥的缓凝机理[J]. 硅酸盐通报,2005,24(4):40-44.
- [8] 郭成洲. 氟、磷对硅酸盐水泥熟料矿物水化过程影响机理研究[D]. 湖北:武汉理工大学,2012.

作者简介:

- 解悦(1994-),男,四川德阳人,工程师,硕士,从事混凝土材料研究工作;
雷英强(1989-),男,四川眉山人,工程师,学士,从事混凝土材料研究与技术管理工作;
杨森(1977-);男,四川巴中人,副高级工程师,学士,从事试验检测技术管理工作;
唐毅(1973-),男,四川安岳人,副高级工程师,学士,从事工程管理及混凝土材料研究工作;
丁建彤(1970-),男,江苏南京人,正高级工程师,博士,从事混凝土材料研究与技术管理工作;
何建军(1984-),男,四川射洪人,工程师,学士,从事混凝土生产管理 & 研究工作。

(责任编辑:李燕辉)

量混凝土具有更优异的抗冻性能。

参考文献:

- [1] 赵青龙,巴恒静. 寒冷地区机场道面混凝土破坏机理研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(5):81-83.
- [2] 肖巍,丁成平,谢旭剑. 水泥用量对混凝土性能影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6):276-280.
- [3] 翁兴中,张广显,韩照,等. 砂率对道面混凝土性能的影响[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013,25(2):239-244.
- [4] 曹秀丽,曹志翔,喻骁. 冻融循环对混凝土质量损失及相对动弹模量影响的试验研究[J]. 铁道建筑, 2013, 31(3):125-127.
- [5] 王庆石,王起才,张凯,等. 不同含气量混凝土的孔结构及抗冻性分析[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(1):30-35.
- [6] 混凝土物理力学性能试验方法标准,GB 50081-2019[S].
- [7] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准,GB/T 50082-2009[S].
- [8] 军用机场场道工程施工及验收规范,GJB 1112A-2004[S].

作者简介:

- 龚英(1981-),女,江西抚州人,副高级工程师,硕士,从事水电工程试验检测及应用工作;
闫涛(1995-),男,安徽太和人,工程师,硕士,从事水工新材料研发、试验及应用工作。

(责任编辑:李燕辉)