

文章编号:1007-9629(2023)05-0516-08

石灰岩机制砂混凝土抗冻性能研究

王 振^{1,2}, 李化建^{1,2,*}, 黄法礼^{1,2}, 易忠来^{1,2}, 杨志强^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:为探明石灰岩机制砂在严寒地区应用的合理性,以相对动弹性模量为评价指标,研究了混凝土强度等级、含气量和石粉含量对石灰岩机制砂混凝土抗冻性能的影响规律,采用吸水率和气泡间距系数分析了石灰岩机制砂混凝土冻融破坏原因.结果表明:高强石灰岩机制砂混凝土具有高抗冻和破坏突发特征,提高混凝土强度等级或引入适量优质气泡是提高石灰岩机制砂混凝土抗冻性能的有效途径;当 C30 和 C60 石灰岩机制砂混凝土含气量分别为 6.4% 和 4.4% 时,混凝土的抗冻性能最佳;石灰岩石粉对混凝土性能有正、负双重效应,其含量控制在 10.0% 以内对混凝土抗冻性能、力学性能和工作性能有利.

关键词:机制砂;石灰岩;混凝土;抗冻性能

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.05.009

Frost Resistance of Limestone Manufactured Sand Concrete

WANG Zhen^{1,2}, LI Huaqian^{1,2,*}, HUANG Fali^{1,2}, YI Zhonglai^{1,2}, YANG Zhiqiang^{1,2}

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory for Track Technology of High-Speed Railway, China Academy of Railway Science Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to determine the applicability of the utilization of limestone manufactured sand in severe cold area, taking the relative dynamic elastic modulus as the evaluation index, the effects of strength, air content and powder content on the frost resistance of limestone manufactured sand concrete were studied, and the reasons of freeze-thaw failure of manufactured sand concrete were analyzed by water absorption and bubble spacing coefficient. The results show that high strength limestone manufactured sand concrete has the characteristics of high frost resistance and sudden failure. Increasing the strength and introducing appropriate amounts of bubbles are effective ways to improve the frost resistance of limestone manufactured sand concrete. The frost resistance is the best when the air content of C30 and C60 manufactured sand concrete is 6.4% and 4.4%, respectively. The limestone powder in manufactured sand has both positive and negative effects on the performance of concrete. The content of limestone powder in manufactured sand is controlled within 10.0%, which is beneficial to frost resistance, mechanical properties and workability.

Key words: manufactured sand; limestone; concrete; frost resistance

采用机制砂替代河砂,将其作为混凝土骨料逐渐成为工程材料绿色发展的主流趋势.石灰岩凭借储量丰富、可加工性良好和矿物成分单一等优势^[1],

被广泛用于制备机制砂石骨料.石灰岩石粉在水泥基材料中具有填充、成核、稀释和化学反应作用^[2-3],通常被用作水泥混合材和混凝土矿物掺合料^[4-5].然

收稿日期:2022-05-09; 修订日期:2022-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1934206);中国铁道科学研究院集团有限公司院基金资助项目(2020YJ049,2021WR002)

第一作者:王 振(1993—),男,湖南岳阳人,中国铁道科学研究院集团有限公司助理研究员,硕士. E-mail:wangzhenbanana@163.com

通讯作者:李化建(1976—),男,安徽阜阳人,中国铁道科学研究院集团有限公司研究员,博士生导师,博士. E-mail:chinasailor@163.com

而,由于石灰石粉存在潜在的碳硫硅钙石侵蚀破坏^[6],GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》和DL/T 5421—2010《水工混凝土结构耐久性技术规范》等混凝土耐久性设计标准要求,低温硫酸盐环境中不能使用石灰石粉或者须经专项认证后才能使用石灰石粉,因此石灰石粉的应用受到一定限制.石灰岩机制砂加工过程必然产生石灰石粉.尽管提出了石粉限值要求——Q/CR 865—2022《铁路混凝土用机制砂》中石粉含量不高于7%;CCPA-S001《结构混凝土性能技术规范》也规定,用于盐冻环境下机制砂中的石灰石粉含量应小于3%;但1 m³混凝土中依然会引入大量石粉,对石灰岩机制砂在严寒地区的应用提出了严峻考验.

国内外学者开展了石灰岩机制砂混凝土抗冻性能研究.如Li等^[7]指出石灰岩机制砂中石粉含量由0%增加到20%时,低强混凝土的抗冻性能降低;而当石粉含量由0%增加到15%时,并不影响高强混凝土的抗冻性.Wang等^[8]也得出相似结论.郭育霞等^[9]认为,外掺石灰岩石粉不超过20%时,C50混凝土的抗冻性能随着石粉掺量的增加而提高;内掺石灰岩石粉取代水泥后,当取代率增大时,混凝土的抗冻性能降低.Panesar等^[10]指出,石灰岩石粉取代水泥质量高于15%时,混凝土的抗冻性能开始降低.然而,由于混凝土强度等级和含气量等参数差异性较大,导致石灰岩机制砂混凝土的抗冻性能研究结论尚不统一.

混凝土的吸水率能够衡量其内部开孔孔隙中可冻水的含量^[11],是表征混凝土抗冻性能的重要指标;

硬化混凝土气泡间距系数能够表征混凝土在水分入侵后对冻结应力的抵抗能力^[12].鉴于此,本文以不同混凝土强度等级、含气量(体积分数)和石粉含量(质量分数,文中涉及的含量、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)的石灰岩机制砂混凝土为研究对象,采用相对动弹性模量评价混凝土的抗冻性能;同时结合吸水率和气泡间距系数分析混凝土的冻融破坏原因,以期明确严寒地区石灰岩机制砂混凝土的适用性,并为石灰岩机制砂混凝土抗冻性能提升提供指导.

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,性能指标满足GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》要求;粉煤灰(FA)为F类I级粉煤灰;粗骨料为5~20 mm连续级配碎石(G);减水剂(SP)为减水率32%、固含量28.25%的聚羧酸系高性能减水剂;引气剂(AE)为减水率7%、含气量4.1%的松香树脂类引气剂;水(W)为自来水;细骨料为石灰岩机制砂(LS)和河砂(RS),主要性能如表1所示.LS由82%方解石和18%白云石矿物组成;RS由32%石英、45%硅质岩、13%铁质岩、5%石英岩和5%其他岩石碎屑组成.制备不同石粉含量石灰岩机制砂的步骤如下:先将原状石灰岩机制砂中的石粉筛出,再按不同比例往石灰岩机制砂中添加石粉.石灰岩石粉的中值粒径(D_{50})为20.5 μm ,其粒度分布见图1.

表1 细骨料的主要性能

Table 1 Main properties of fine aggregates

No.	Apparent density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Soundness/%	Crushing index/%	MB value/%	Water absorption (by mass)/%	14 d expansivity/%	$w(\text{mica})/\%$	Modulus of fineness
LS	2.70	1	11	1.0	1.0	0.07	0	2.8
RS	2.57	2	—	—	0.8	0.01	0.1	2.7

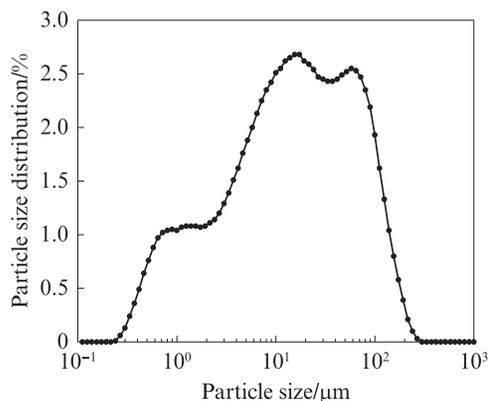


图1 石灰岩石粉的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of limestone powder

1.2 配合比

参照JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》,设计C30、C45和C60石灰岩机制砂混凝土配合比,见表2.通过掺加适量减水剂和引气剂,将新拌混凝土的坍落度和含气量分别控制为(180±10) mm和4.0%~5.0%.

以表2配合比为基准,通过调整减水剂和引气剂的掺量来制备不同含气量石灰岩机制砂混凝土.其中C30L、C30M和C30H分别表示含气量为3.0%、4.6%和6.4%的C30机制砂混凝土,C60L、C60M和C60H分别表示含气量为2.8%、4.4%和6.5%的C60石灰岩机制砂混凝土.

表2 石灰岩机制砂混凝土配合比
Table 2 Mix proportions of limestone manufactured sand concretes

Strength grade	Water-binder ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)							Slump/mm	Air content(by volume)/%
		C	FA	LS or RS	G	W	SP	AE		
C30	0.50	280.00	70.00	832.00	1 081.00	175.00	1.50	0.11	175	4.6
C45	0.40	320.00	80.00	805.00	1 085.00	160.00	1.75	0.21	170	4.6
C60	0.28	384.00	96.00	734.00	1 101.00	135.00	3.40	0.27	185	4.4

Note: The limestone powder content of manufactured sand is 7.5% (by mass).

制备不同石粉含量石灰岩机制砂混凝土时,将C30和C60混凝土中的石灰岩机制砂石粉含量(以石灰岩机制砂质量计)设计为0%、5.0%、7.5%、10.0%、12.5%和15.0%,并采用河砂制备对照组混凝土RSC30和RSC60.

1.3 试验方法

(1)抗冻性能 依据GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行快冻法试验.将试件养护至28 d龄期后,先测试其初始动弹性模量和质量,每冻融循环25次后再测试其相对动弹性模量和质量损失率;当试件相对动弹性模量下降至60%或质量损失率达到5%时停止试验,并记录抗冻循环次数及质量损失率.

(2)吸水率 首先将边长为100 mm的立方体试件养护至28 d;然后在60℃下烘干至恒重(质量记为 m_1);接着将其完全浸没在水中,保持水面至少高出试件25 mm;当试件分别浸泡0.5、1.0、3.0、14.0、24.0、36.0、48.0 h后,将其取出并擦干表面水分,迅速称重(质量记为 m_i).不同浸泡时间(i)条件下混凝土的吸水率(A)按式(1)计算.

$$A = \frac{m_i - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

(3)气泡间距系数 参照TB/T 3275—2018《铁路混凝土》,首先将标准养护28 d龄期的试件切割成边长为100 mm、厚度为20 mm的棱柱体试件,并将其表面抛光;然后采用黑色颜料标记骨料和浆体,采用白色颜料标记孔隙;最后将处理后的试件置于RapidAir自动图像分析仪中,测试其气泡间距系数.

2 结果与讨论

2.1 混凝土强度等级对石灰岩机制砂混凝土抗冻性能的影响

图2显示了强度等级为C30、C45和C60的石灰岩机制砂混凝土的抗压强度.图3为不同强度等级石灰岩机制砂混凝土抗冻性能.由图3可见,当相对动弹性模量降至60%时,C30、C45和C60石灰岩机制砂混凝土抗冻循环次数分别为400、500、1 000次,质

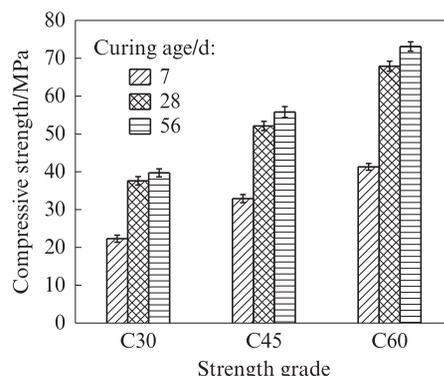


图2 石灰岩机制砂混凝土抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of limestone manufactured sand concretes

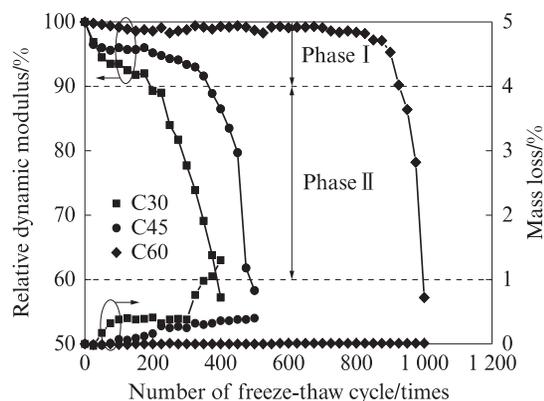


图3 不同强度等级石灰岩机制砂混凝土抗冻性能

Fig. 3 Frost resistance of limestone manufactured sand concrete with different strength grades

量损失率分别为1.30%、0.40%和0.01%.由于试件的质量损失率远小于冻坏状态时的标准限值(5%),本文以相对动弹性模量降至60%时的抗冻循环次数来评判石灰岩机制砂混凝土的抗冻性能.根据经典结晶压理论可知,环境温度降低使混凝土大孔中的水逐渐结冰生长,当冰晶体积增长约9%时,冰晶生长对孔隙壁面产生径向压应力和环向拉应力,当壁面所受冰晶应力超过基体极限应力时,混凝土内部微裂纹扩展,基体之间的黏结力下降,冻结和融化循环作用下混凝土出现内部损伤和表面剥落现象^[11].混凝土的抗冻性能与基体强度有关,由于高强混凝土浆体的堆积密度更高、孔隙更少^[13],基体屈服应力

更高,因此其抗冻性能高于低强混凝土.由图3还可见,C30、C45和C60石灰岩机制砂混凝土的抗冻耐久性指数(冻融循环次数为300次时的混凝土相对动弹性模量)分别为77.8%、93.4%和98.8%,可应用于GB/T 50476—2019所要求的具有不同饱水程度的严寒环境.

按照损伤理论观点,材料在循环荷载或长期荷载作用下,一般会经历从无损伤到形成微裂纹损伤过程和裂纹拓展形成宏观破坏过程2个阶段^[14].本文以相对动弹性模量90%为第1阶段(phase I)节点,相对动弹性模量60%为第2阶段(phase II)节点.图3显示:C60石灰岩机制砂混凝土的相对动弹性模量由100%降至90%需要经历长时间冻融循环,而相对动弹性模量由90%降至60%时只经历了75次冻融循环;C45和C30石灰岩机制砂混凝土的相对动弹性模量由90%降至60%时分别经历了150次和225次冻融循环.潘刚华等^[14]将高强混凝土冻融损伤变化速率快的现象称为“结构敏感性”.曹建国等^[15]指出高强混凝土冻融破坏具有突发性.文献[16]采用荷载-位移($P-\Delta$)曲线量化混凝土脆性,将 $P-\Delta$ 曲线下积分总面积定义为单位体积混凝土破坏过程吸收的总能量 C_e ,峰值荷载前 $P-\Delta$ 曲线下积分面积定义为混凝土破坏前吸收的能量 C_{em} ,峰值荷载后 $P-\Delta$ 曲线下积分面积定义为混凝土破坏后吸收的能量 C_{ep} , C_e 与 C_{em} 的比值定义为压缩延性指数(CTI).C30、C45和C60石灰岩机制砂混凝土的 $P-\Delta$ 曲线如图4所示.根据图4得到上述3种强度混凝土的CTI分别为1.41、1.22和1.20,C60混凝土脆性最大.由于提高混凝土强度等级有利于提升冻融损伤的阈值,冻融循环的累积应力作用须达到较高水平才能致使内部出现裂缝,导致高强混凝土在第1阶段经历较长的冻融循环;在裂缝扩展过程中,由于高强混凝土脆性大、损伤速率高^[14],冻融应力作用的累积能量使裂纹快

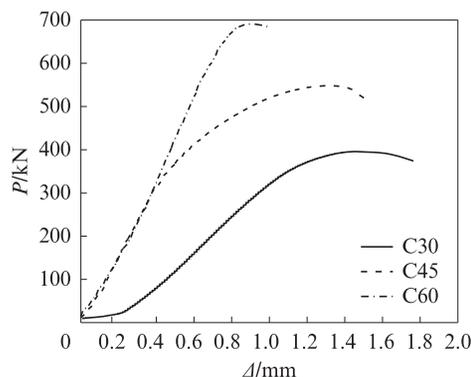


图4 石灰岩机制砂混凝土 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 4 $P-\Delta$ curves of limestone manufactured sand concretes

速扩展和连接,因此高强混凝土在第2阶段的相对动弹性模量下降显著,表现出“脆性冻坏”.

图5为不同强度等级石灰岩机制砂混凝土的吸水率.由图5可见,石灰岩机制砂混凝土在浸水0~3 h内吸水率迅速增长,3~24 h内吸水速率缓慢增长,24 h后吸水率基本不再增长.这是因为试件在浸水前期内部未填充孔隙较多,水分向混凝土内部迁移速率较快,当试件达到一定吸水程度后,混凝土内部孔隙饱水程度增大,水分向内部迁移速率变慢.由试件48 h吸水率可知,吸水率与混凝土强度等级呈负相关,原因有两方面:一是低强混凝土水胶比大,混凝土硬化后因剩余水分较多,致使内部产生了较多水分通道;二是高强混凝土水泥用量大,随着龄期延长和水泥水化程度增大,水化产物均匀填充混凝土内部微小缺陷,促进了混凝土的密实程度.

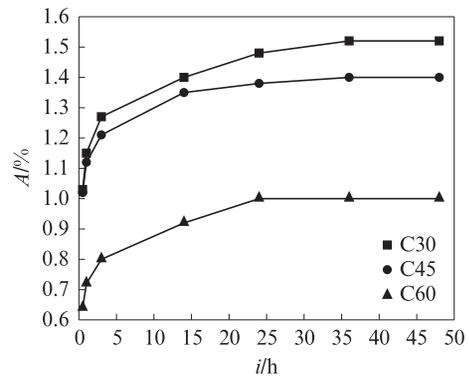


图5 不同强度等级石灰岩机制砂混凝土的吸水率

Fig. 5 Water absorption of limestone manufactured sand concretes with different strength grades

图6为不同强度等级石灰岩机制砂混凝土的气泡间距系数.由图6可见,随着强度等级的提升,石灰岩机制砂混凝土气泡间距系数增大,C30、C45和C60混凝土的气泡间距系数分别为132、146、176 μm .这

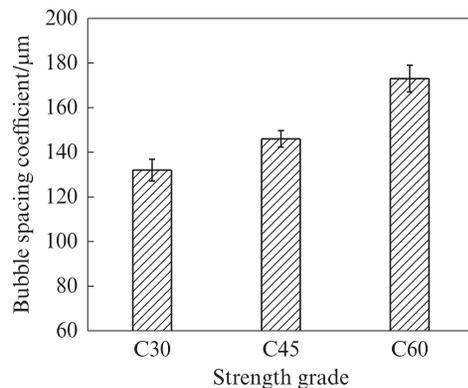


图6 不同强度等级石灰岩机制砂混凝土的气泡间距系数

Fig. 6 Bubble spacing coefficient of limestone manufactured sand concretes with different strength grades

主要与高强混凝土中胶凝材料含量高,水化产物不断填充孔隙提高密实度有关^[17].因此,高强混凝土抗冻性更高的原因是:(1)基体强度高,抗冻胀应力破坏的能力强;(2)密实程度高,外界水的渗透性小,混凝土内部的冻胀力小.

2.2 含气量对石灰岩机制砂混凝土抗冻性能的影响

图7为不同含气量石灰岩机制砂混凝土的抗压强度.由图7可见,随着含气量的增大,石灰岩机制砂混凝土的抗压强度略有降低.这是因为混凝土强度损失与引气增大混凝土孔隙率有关^[18].当采用优质引气剂后,不同含气量混凝土基本处于同一强度等级,与文献[19]中“含气量为3.5%~6.1%时,混凝土抗压强度随含气量增加而降低程度不大”的规律相似.试验测得的新拌混凝土含气量比硬化混凝土含气量高1.5%~2.5%,与混凝土成型振捣过程中气泡溢出和水化产物填充内部孔隙相关,且两者相关性强.需要指出的是,本文混凝土含气量未作特殊说明均为新拌混凝土含气量.

图8为不同含气量石灰岩机制砂混凝土的抗冻性能.由图8可知,含气量增大显著提升了C30石灰岩机制砂混凝土的抗冻性能,当含气量为3.0%时,

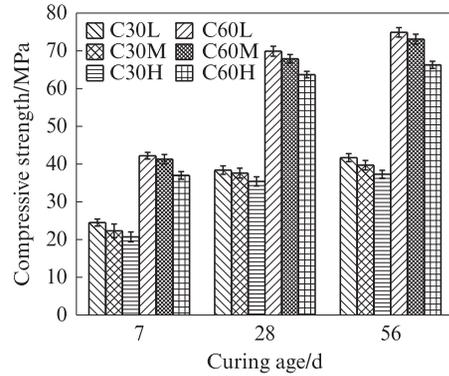


图7 不同含气量石灰岩机制砂混凝土的抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of limestone manufactured sand concretes with different air contents

混凝土抗冻循环次数仅为100次;当含气量为6.4%时,C30混凝土抗冻循环次数达到550次,与含气量4.6%的C45混凝土相当,且略高于含气量2.8%的C60混凝土.这说明适当引气是提高中低强度等级混凝土抗冻性能的关键.由图8还可见;含气量为2.8%、4.4%和6.5%的C60石灰岩机制砂混凝土的抗冻循环次数分别为500、1000、750次,即含气量为4.4%的机制砂混凝土抗冻性能最佳;C60混凝土达到最佳抗冻性能的含气量水平低于C30混凝土.

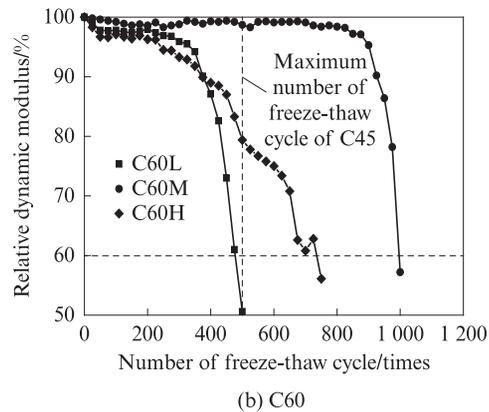
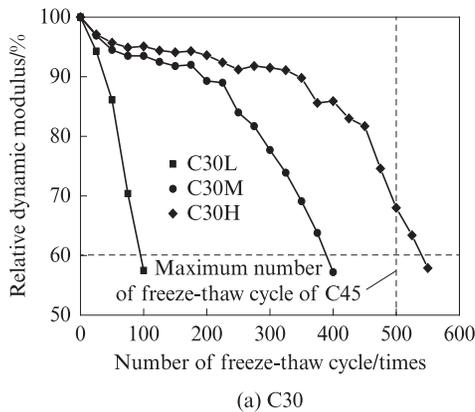


图8 不同含气量石灰岩机制砂混凝土的抗冻性能

Fig. 8 Frost resistance of limestone manufactured sand concretes with different air contents

图9为不同含气量石灰岩机制砂混凝土的48h吸水率.由图9可见:当石灰岩机制砂混凝土抗压强度等级相同而含气量不同时,高含气量的石灰岩机制砂混凝土的吸水率明显较大,但C30机制砂混凝土的抗冻性能并未降低(图8(a)),反而提高.原因在于引气剂引入的部分气泡虽然为水分富集于混凝土内部提供了场所,但也引入了较多均匀微小气泡,缓解了混凝土的结晶压^[12].

图10为不同含气量石灰岩机制砂混凝土的气泡间距系数.由图10可见:在引气剂作用下,石灰岩

机制砂混凝土中引入大量微小气泡,增大了混凝土含气量并细化了气泡孔径,导致石灰岩机制砂混凝土的气泡间距系数随着含气量的增大而减小;C30混凝土气泡间距系数的减小程度比C60混凝土大,其受冻时能够缓解更多的冻胀应力,宏观上表现为抗冻性能的提升效果更显著.综上可知,混凝土在冻融循环作用下是否产生破坏,主要取决于两方面:一是自身抵抗冻胀应力破坏的能力;二是内部缓冲结晶应力的能力.高强混凝土通过提升强度提高了混凝土的抗冻性能,中低强混凝土可通过引入合适含

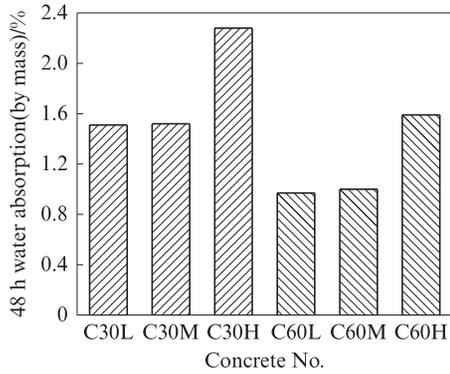


图9 不同含气量石灰岩机制砂混凝土的48 h吸水率
Fig. 9 48 h water absorption of limestone manufactured sand concretes with different air contents

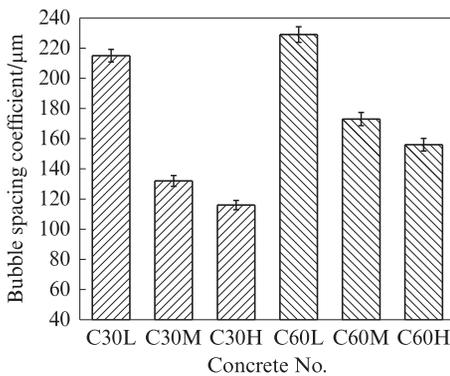


图10 不同含气量石灰岩机制砂混凝土的气泡间距系数
Fig. 10 Bubble spacing coefficient of limestone manufactured sand concretes with different air contents

量的气泡,吸收和缓冲冻胀应力,以提升其抗冻性.

2.3 石粉含量对石灰岩机制砂混凝土抗冻性能的影响

图11为不同石粉含量石灰岩机制砂混凝土的工作性能.由图11可见:石灰岩机制砂混凝土的坍落度和含气量随石粉含量增加而变化程度较小,主要是因为石粉含量增大有利于增加浆体体积,从而提高流动

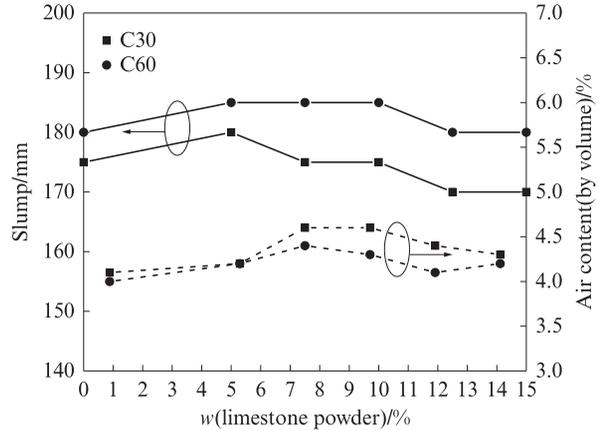


图11 不同石粉含量机制砂混凝土的工作性能
Fig. 11 Workability of manufactured sand concretes with different limestone powder contents

性,但石粉含量增大也会加大对外加剂的吸附量,降低其作用效果.石粉含量每增加5.0%,C30石灰岩机制砂混凝土中的粉体增加约41.6 kg/m³,细骨料则相应减少.

图12为不同石粉含量石灰岩机制砂混凝土的抗压强度.由图12可见:随着石粉含量的增加,石灰岩机制砂混凝土的抗压强度略有提升;当石粉含量为10.0%时,C30和C60混凝土抗压强度最高;当石粉含量高于10.0%时,石粉稀释效应增强^[20],且过量石粉降低了骨料体积分数,破坏了骨料颗粒级配特征,导致混凝土抗压强度降低.由图12还可见,适当石粉含量的石灰岩机制砂混凝土的抗压强度优于河砂混凝土.其原因在于:石灰岩石粉的填充作用^[21]能够改善浆体密度;方解石矿物中Ca和O的平面结构与水化硅酸钙(C-S-H)中的CaO层相似,石灰岩石粉发挥的晶核作用^[22]使C-S-H在其表面的沉淀增强,促进水化产物形成;石灰岩石粉中的CaCO₃能够与铝酸三钙(C₃A)反应生成碳铝酸盐^[23],加快水化进程.

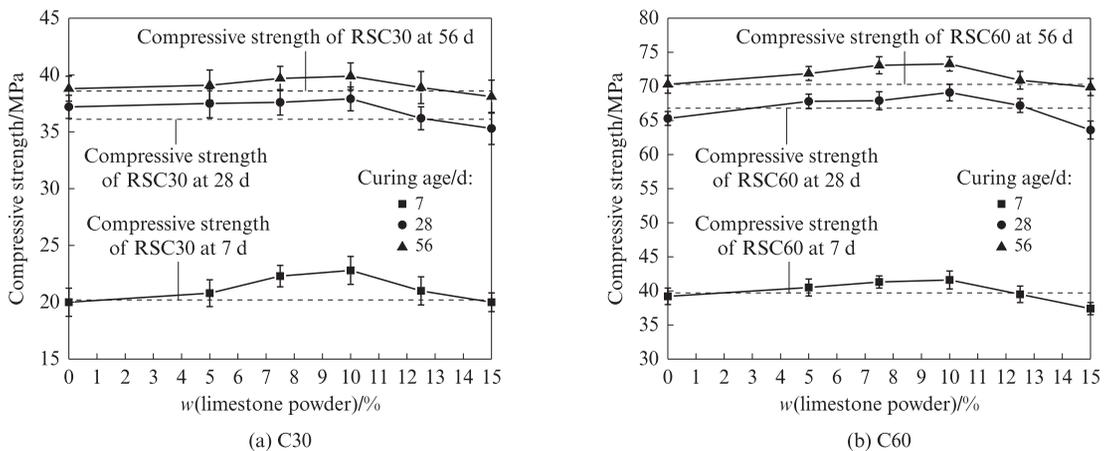
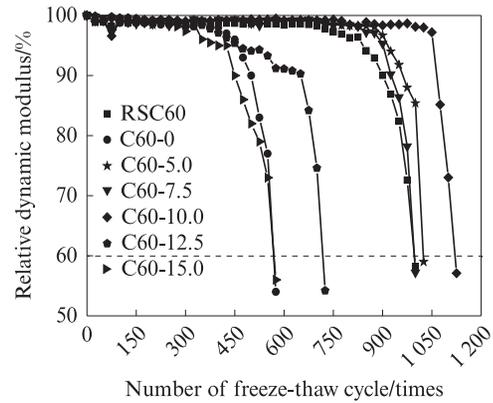
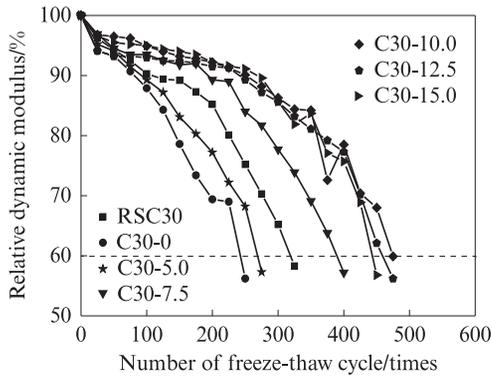


图12 不同石粉含量机制砂混凝土的抗压强度
Fig. 12 Compressive strength of manufactured sand concretes with different limestone powder contents

图13为不同石粉含量石灰岩机制砂混凝土的抗冻性能.其中“C30-”后面的数字代表石粉含量(%).由图13可见:随着石粉含量的增加,C30和C60石灰岩机制砂混凝土的抗冻性能均先增后降;当石粉含量为10.0%时,C30和C60石灰岩机制砂混凝土的抗冻循环次数最高,分别为475、1100次.石粉含量对不同强度等级石灰岩机制砂混凝土抗冻性能的影响规律存在差异——对于C30机制砂混凝土,当石粉含量为

7.5%~15.0%时,石灰岩机制砂混凝土抗冻性能高于F400(400次抗冻循环)且优于河砂混凝土(RSC30);对于C60石灰岩机制砂混凝土,当石粉含量为5.0%~10.0%时,石灰岩机制砂混凝土抗冻性能高于F1000(1000次抗冻循环)且优于河砂混凝土(RSC60).由此可见,适量石粉含量是制备高抗冻石灰岩机制砂混凝土的关键因素之一.综合考虑抗冻性、强度等级和工作性能,石灰岩机制砂的石粉含量宜小于10.0%.



(a) C30

(b) C60

图13 不同石粉含量石灰岩机制砂混凝土的抗冻性能

Fig. 13 Frost resistance of limestone manufactured sand concrete with different limestone powder contents

图14为不同石粉含量石灰岩机制砂混凝土的48 h吸水率.由图14可见:随着石粉含量的增加,石灰岩机制砂混凝土的吸水率先降后增,石灰岩机制砂混凝土的吸水率变化程度较小,石粉含量的影响程度明显小于强度和含气量.图15为不同石粉含量石灰岩机制砂混凝土的气泡间距系数.由图15可见:(1)随着石粉含量的增加,石灰岩机制砂混凝土的气泡间距系数先降后升.石粉含量增加发挥了填充效应,优化了机制砂颗粒级配,对改善浆体流变性能和

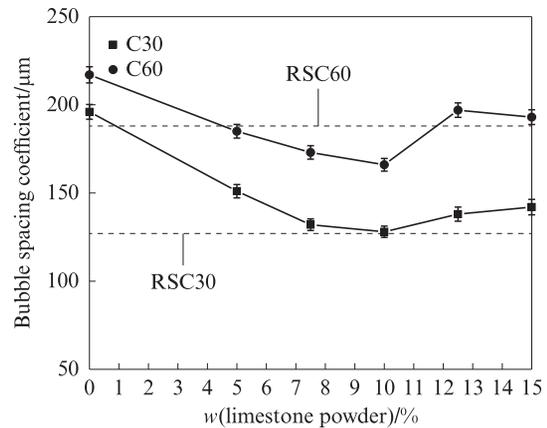


图15 不同石粉含量石灰岩机制砂混凝土的气泡间距系数
Fig. 15 Bubble spacing coefficient of limestone manufactured sand concretes with different powder contents

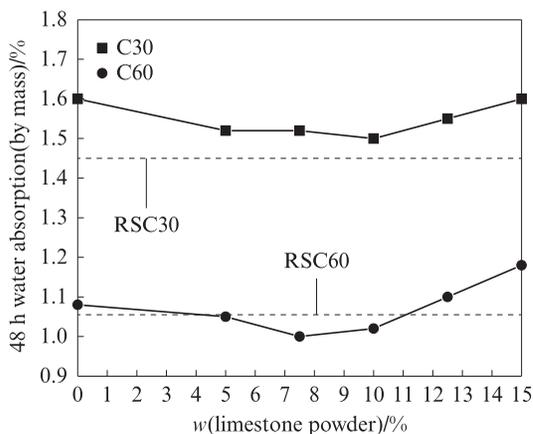


图14 不同石粉含量石灰岩机制砂混凝土的48 h吸水率
Fig. 14 48 h water absorption of limestone manufactured sand concretes with different limestone powder contents

气泡参数有利^[24].(2)当石粉含量为10.0%时,硬化混凝土气泡间距系数最小;当石粉含量超过10.0%时,其对机制砂颗粒级配的破坏能力超过优化能力,不利于气泡生成和稳定,导致混凝土气泡间距系数增大.机制砂混凝土的吸水率表征外界水分向混凝土内部进行扩散的能力,硬化混凝土气泡间距系数则表征混凝土在水分入侵后对冻结应力的抵抗能力.石粉含量对吸水率和气泡间距系数的影响程度均不高,但这两方面的叠加作用导致石粉含量对机制砂混凝土抗冻性能表现出较大差异.

3 结论

(1)通过提高混凝土强度等级、适当引气以及控制石粉含量能够制备出适用于严寒地区抗冻要求的石灰岩机制砂混凝土。

(2)相同含气量条件下,随着混凝土强度等级的提高,石灰石机制砂混凝土抗冻性提高。高强混凝土基体脆性大,具有冻融破坏突发特征。

(3)引入优质气泡可以提高石灰岩机制砂混凝土的含气量,降低气泡间距系数,缓解混凝土结冰冻胀应力,提升混凝土抗冻性能。C30和C60混凝土最佳抗冻性能的含气量分别为6.4%和4.4%。

(4)石灰岩石粉在机制砂混凝土中具有正、负双重效应。当石粉含量为10.0%时,C30和C60石灰岩机制砂混凝土的抗冻性能最好;综合考虑抗冻性能、力学性能和工作性能,石灰岩机制砂石粉含量以小于10.0%为宜。

参考文献:

- [1] OSMAN G, BEKIR B, OGUZHAN Y B, et al. The effect of limestone and bottom ash sand with recycled fine aggregate in foam concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 54: 104689.
- [2] 肖佳, 张泽的, 韩凯东, 等. 水泥-石灰石粉浆体颗粒水膜厚度与其屈服应力关系[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2): 231-236, 246.
XIAO Jia, ZHANG Zedi, HAN Kaidong, et al. Relationship between water film thickness and yield stress of cement-ground limestone powder paste[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2):231-236, 246. (in Chinese)
- [3] WANG D H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 181:659-672.
- [4] 李化建, 赵国堂, 谢永江, 等. 石灰石粉作为混凝土矿物掺合料的研究[J]. *铁道建筑*, 2012, 458(4):135-138.
LI Huajian, ZHAO Guotang, XIE Yongjiang, et al. Study on limestone powder as mineral admixture in concrete[J]. *Railway Engineering*, 2012, 458(4):135-138. (in Chinese)
- [5] 肖佳, 韩凯东, 张泽的. 水泥-石灰石粉浆体絮体生长多重分形特征[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(5):901-907.
XIAO Jia, HAN Kaidong, ZHANG Zedi. Multifractal characteristics of floc growth in cement-ground limestone pastes [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(5): 901-907. (in Chinese)
- [6] ZENG H, LI Y, ZHANG J, et al. Effect of limestone powder and fly ash on the pH evolution coefficient of concrete in a sulfate-freeze-thaw environment[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 16:1889-1903.
- [7] LI B X, WANG J L, ZHOU M K. Effect of limestone fines content in manufactured sand on durability of low- and high-strength concretes[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(8):2846-2850.
- [8] WANG J L, ZHOU M K, HE T S, et al. Effects of stone dust on resistance to chloride ion permeation and resistance to freezing of manufactured sand concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 36(4):482-486.
- [9] 郭育霞, 贡金鑫, 李晶. 石粉掺量对混凝土力学性能及耐久性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(3):266-271.
GUO Yuxia, GONG Jinxin, LI Jing. Influence of mass fractions of limestone powder on mechanical property and durability of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(3):266-271. (in Chinese)
- [10] PANESAR D K, ZHANG R. Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials—A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 251:118866.
- [11] 孙科科, 彭小芹, 冉鹏, 等. 地聚合物混凝土抗冻性影响因素[J]. *材料导报*, 2021, 35(24):24095-24100.
SUN Keke, PENG Xiaoqin, RAN Peng, et al. The influence factor of the anti-freeze of geopolymer concrete [J]. *Materials Review*, 2021, 35(24):24095-24100. (in Chinese)
- [12] TUNSTALL L E, LEY M T, SCHERER G W. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 150:106557.
- [13] LEONID D. Design estimation of concrete frost resistance [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 211:779-784.
- [14] 潘钢华, 孙伟, 姜阳. 高强混凝土抗冻性的理论和实验研究[J]. *硅酸盐学报*, 1999, 27(6):637-643.
PAN Ganghua, SUN Wei, JIANG Yang. Theoretical and experimental research on frost resistance of high strength concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1999, 27(6): 637-643. (in Chinese)
- [15] 曹建国, 李金玉, 林莉, 等. 高强混凝土抗冻性的研究[J]. *建筑材料学报*, 1999, 2(4):292-297.
CAO Jianguo, LI Jinyu, LIN Li, et al. Study on frost-resistance of high-strength concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 1999, 2(4):292-297. (in Chinese)
- [16] FAROOQI M U, ALI M. Effect of pretreatment and content of wheat straw on energy absorption capability of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 224:572-583.
- [17] SOKHANSEFAT G, MORADIAN M, FINNELL M, et al. Using X-ray computed tomography to investigate mortar subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 108:103520.
- [18] ZHANG P, LI D, QIAO Y, et al. Effect of air entrainment on the mechanical properties, chloride migration, and microstructure of ordinary concrete and fly ash concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(10):04018265.