

# 复合外加剂对石屑混凝土抗冻性的影响

邢有红<sup>1</sup>, 蒋林华<sup>2</sup>, 周明喜<sup>3</sup>, 肖玉明<sup>2</sup>, 姚利群<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院瑞迪高新技术公司, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学材料科学与工程系, 江苏 南京 210098; 3. 句容市建筑工程质量监督站, 江苏 句容 212400)

**摘要:** 针对石屑混凝土在工程应用中存在的需水量大、抗冻性低等不足之处, 提出在其中掺入适量的复合外加剂, 以求改善其性能. 在同水灰比条件下, 对掺不同外加剂的石屑混凝土试件进行了冻融循环试验. 结果表明, 掺复合外加剂的石屑混凝土抗冻融循环能力明显提高. SEM 照片表明, 复合外加剂引入的大量微小的封闭气泡是提高石屑混凝土抗冻性的主要原因.

**关键词:** 复合外加剂; 石屑混凝土; 抗冻性; 动弹性模量

中图分类号: TU528.042 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2005)S1-0063-03

随着我国基本建设的快速发展, 建筑用砂的需求也逐步加大. 在一些地区天然砂资源不能满足工程应用的情况下, 选用当地的人工砂代替天然砂, 不仅可以解决天然砂资源的供需矛盾, 同时具有显著的经济效益和社会效益<sup>[1]</sup>.

石屑是人工砂的一种, 与天然砂相比, 石屑具有质地坚硬、表面粗糙多孔、有尖锐棱角、黏结性能良好等特点. 一些学者也对石屑混凝土的性能进行了较为全面的研究<sup>[2-4]</sup>. 试验研究以及实际工程的应用结果均表明: 由于石屑中一定量石粉的存在, 使得石屑混凝土与普通天然砂混凝土相比需水量较大, 抗冻性较低, 强度下降明显. 针对石屑混凝土在工程应用中还存在的这些不足之处, 可以考虑在石屑混凝土中加入适量的复合外加剂(减水剂与引气剂的复掺), 以全面改善石屑混凝土的性能.

## 1 试验研究

### 1.1 原材料

**a. 水泥.** 试验用水泥为中国水泥厂生产的石城牌 42.5 级普通硅酸盐水泥, 其安定性及强度均符合规范要求.

**b. 粗骨料.** 试验所用粗骨料为 5~20 mm 的碎石. 经过反复冲洗, 尽量减少其含泥量. 经测定其颗粒级配满足 JGJ53-92《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》中规定的使用要求.

**c. 细骨料.** 细骨料为句容市建筑工程质量监督

站提供的句容地区产石屑. 石屑的筛分结果表明: 其累计筛余百分含量在大部分情况下都落在了 II 级配区内, 只有 0.16 mm 孔径的筛余较少, 累计筛余百分含量超出了 II 级配区的要求, 这是石屑中含有较多的粒径小于 0.16 mm 的石粉所致. 石屑的主要物理性能指标如下: 堆积密度为 1560 kg/m<sup>3</sup>, 表观密度为 2710 kg/m<sup>3</sup>, 空隙率为 42.3%, 石粉含量为 19.3%, 细度模数为 2.80.

**d. 外加剂.** ①引气剂 A, 一种新型阴离子、非离子多元复合型引气剂. 其水溶性好, 对混凝土强度影响极小, 气泡稳定性高, 与其他外加剂合用相容性好. ②减水剂 B, 萘系高效减水剂. ③减水剂 C, 木质磺酸钙类减水剂. ④减水剂 D, UNF-5 高效减水剂.

## 1.2 试验内容与方法

### 1.2.1 试验内容

试验选用引气剂 A 与减水剂 B 复合掺入, 同时还选择了 C、D 两种外加剂进行对比试验. 试验研究了复合外加剂对石屑混凝土抗冻性的影响. 试验的混凝土配合比见表 1.

表 1 石屑混凝土配合比参数

试件编号	外加剂种类	外加剂掺量/%	用水量/(kg·m <sup>-3</sup> )	水灰比	砂率/%	含气量/%	坍落度/mm
X1			240	0.6	38	1.0	52
X2	A、B	A(0.5/万) B(1.0%)	203	0.6	34	4.5	33
X5	C	0.5	204	0.6	34		31
X6	D	0.5	210	0.6	34		33

作者简介: 邢有红(1978—), 男, 山西长治人, 助理工程师, 硕士, 从事混凝土外加剂研究.

### 1.2.2 试验方法

试验参照 GBJ82-85《普通混凝土长期性能及耐久性试验方法》进行,采用快冻法,使饱和的混凝土在水中冻结和融化,每个冻融循环时间为 4~5 h. 试验所用仪器为美国生产的 H-3185 型快速冻融仪. 试件尺寸为 100 mm × 75 mm × 400 mm,在冻融过程中,保证试件中心温度控制在  $(-17 \pm 2)^\circ\text{C} \sim (8 \pm 2)^\circ\text{C}$  之间. 每隔 25 个循环测定试件的自振频率,并以冻融循环试验前测定的动弹性模量为 100%,计算指定冻融循环次数后的相对动弹性模量,同时检查其外部损伤情况和质量损失.

### 1.3 试验结果

详细试验结果见表 2 和表 3. 表 2 所给出的最终冻融循环次数中, X2 组试件的 200 次为终止试验时所经历的总冻融循环次数,其余均为各组试件经测定其自振频率并判断为破坏前所经历的总冻融循环次数.

表 2 冻融试验前后试件的基本物理特征

试件编号	最终冻融循环次数	质量损失			初始频率/Hz
		冻前/g	冻后/g	损失率/%	
X1	75	7667	7671		4935
X2	200	7658	7536	1.59	4994
X5	175	7567	7422	1.92	4984
X6	175	7602	7538	0.84	5038

冻融循环试验过程中,温度控制在  $-17 \sim 8^\circ\text{C}$  之间,变化速度非常均匀,这说明试验中对温度的控制较好. 比较同水灰比的几组试件的冻融循环试验结果可以看出,普通石屑混凝土的抗冻性较差,当冻融循环达到 75 次时,试件已经破坏,抗冻等级只有 D50. 而掺外加剂的石屑混凝土抗冻性均有明显的提高,抗冻融循环次数均可以达到 150 次以上. 其中掺复合外加剂的石屑混凝土抗冻性最好,抗冻融循环次数至少可以达到 200 次,而且这时石屑混凝土试件并没有破坏,由于对比试验结果已经非常明显,此时终止了试验. 从混凝土的抗冻性指数这一角度来看,复合外加剂对石屑混凝土的抗冻性指数影响很大. 此外,只有掺复合外加剂的石屑混凝土抗冻性指数可以达到 0.4 以上,同时考虑到石屑混凝土本身的抗渗性较好,可以认为能用于与水直接接触和遭受冻融的部位. 试验过程中,每隔 25 个循环测定一次动弹性模量,同时注意观察了各组试件外表面

表 3 冻融试验详细结果

试件编号	指定冻融循环次数下的相对动弹性模量/%								外观	抗冻等级	耐久性指数
	25	50	75	100	125	150	175	200			
X1	80.7	67.4	43.3						剥落明显	D50	0.11
X2	94.7	94.3	95.0	93.7	87.2	82.8	78.7	72.2	表面剥落	$\geq$ D200	0.48
X5	95.1	94.9	95.2	94.6	77.9	63.7	40.9		剥落明显	D150	0.24
X6	96.7	96.6	95.5	96.3	76.0	65.1	45.2		表面剥落	D150	0.26

的剥落情况. 其中 X1 组试件在表面有整体剥落的情况下宣告破坏. X2 组试件在达到 75 次冻融循环后表面开始有少量圆锥体混凝土块体剥落,但块体体积不大,此后剥落块体沿圆形逐渐向外扩散,但不太明显,直到试验终止. X5, X6 组试件在达到 50 次冻融循环后表面就开始有整体剥落现象,随着循环次数的增加,剥落现象比较明显. 虽然各试件均有剥落现象,但由表 2 可知,各试件的质量损失率都不大,特别是掺复合外加剂的石屑混凝土在 200 次冻融循环后质量损失不超过 1.6%.

各组试件相对动弹性模量的变化如图 1 所示. 观察其相对动弹性模量变化趋势可知,普通石屑混凝土动弹性模量下降很快,冻融 75 次以前即宣告破坏. 同时还可以发现一个规律,即所有掺外加剂的混凝土试件,在 0~25 次冻融循环过程中,冻弹性模量有一定程度的降低;但在此后的 25~100 次冻融循环内动弹性模量总体趋势保持下降,但下降幅度不大. 在 100 次以后的冻融循环过程中,掺引气剂的石屑混凝土的动弹性模量呈现小幅下降的趋势,这种趋势一直保持,直到试验结束. 而不掺引气剂时,下降的幅度明显加大,在达到 175 次循环后同时宣告破坏. 这说明在冻融循环过程中,复合外加剂的作用在冻融循环达到 100 次以后表现明显.

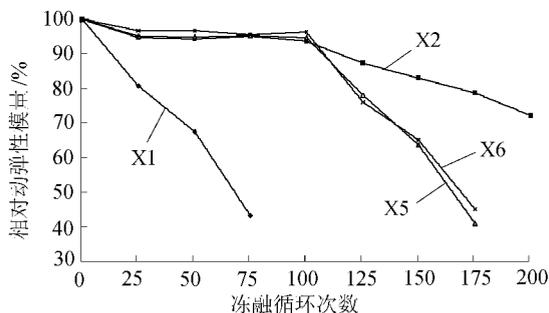


图 1 相对动弹性模量变化趋势

## 2 机理分析

混凝土是一种毛细孔多孔体,存在于毛细孔中的自由水是混凝土遭受冻害的主要原因. 当混凝土的温度降到  $0^\circ\text{C}$  以下传到毛细孔,在达到符合孔内压力的冻结条件时,首先在毛细孔壁上生成冰核,然后沿着孔壁冻结,形成一个完全封闭的冰壳. 由于水冻结成冰,体积膨胀,因此冰壳内的水承受的压力变

大.水的冻结温度是随着环境压力的变化而变化的<sup>[5]</sup>,如果要继续冻结,混凝土的温度就必须继续下降,必然导致毛细孔中的水不断冻结成冰,最终形成若干个由冰包围的球形水体.水冻结膨胀不仅使冰壳内的水体承受很大的压力,同时也把这个压力传向了毛细孔壁.温度越低,冻结的水量越多,毛细孔壁承受的压力也越大.

普通石屑混凝土中毛细孔周围没有足够的排水空间,在孔内水的冻结膨胀压力作用下,毛细孔会张开,并持续向外开展,以降低孔内的水压力,直到全部的水冻结成冰.升温融解时,由于毛细孔本身存在的塑性变形,体积变大,外围的水会补充进入,并充满毛细孔.孔的扩张恶化了混凝土的内部结构,从而导致强度降低,弹性模量变小.在反复的冻融循环作用下,裂缝将不断扩展,弹性模量逐渐下降.这是普通石屑混凝土抗冻性较差的原因.从试验中可以看出:X1组普通石屑混凝土试件所能经受的冻融循环次数不到75次.但掺复合外加剂的石屑混凝土,其毛细孔的周围聚集着许多微小的球形气泡,这些气泡处于封闭状态,内部不含水.因此,当温度下降而导致毛细孔壁破裂时,微裂缝会将毛细孔与这些气泡连通,其内部的水会沿着裂缝涌入气泡,毛细孔内的压力也随之降低.当升温融解时,涌入气泡的水也不会再进入毛细孔中,因此毛细孔内部的含水率降低.由于初始裂缝的产生,动弹性模量下降较大.在此后的冻融过程中,由于气泡消减裂缝尖端应力集中的作用,动弹性模量的下降也会变得缓慢.这也可以解释从图1中看到的石屑混凝土的动弹性模量在前25个循环内下降幅度较大,而在此后的冻融过程中,如25~100个循环内,动弹性模量只是呈小幅下降趋势.特别是掺复合外加剂的石屑混凝土,由于引气而形成的气泡非常多,可以容纳的水量也是相当大的,因此破坏过程相当缓慢.

对比X5和X6组石屑混凝土试件,其抗冻性比X1组试件有所提高,可能是因为其中所掺外加剂也具有一定的引气效果的缘故.

### 3 微观分析

对掺复合外加剂的试样进行了SEM分析,如图2所示.从图2可以很明显看出:普通石屑混凝土由于一定量石粉的存在,其结构比较致密,但复合外加剂的掺入可以在一定程度上引入大量微小的封闭气泡.这些气泡直径大约在50~200 $\mu\text{m}$ 之间,距离在200~500 $\mu\text{m}$ 之间,分布比较均匀.正是这些气泡的存在,极大地提高了石屑混凝土的抗冻性.

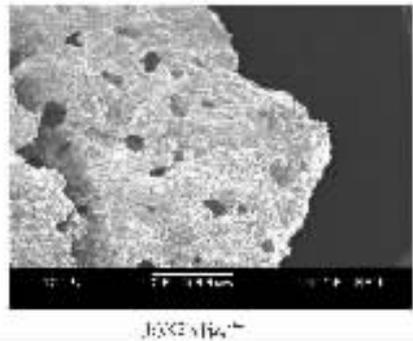
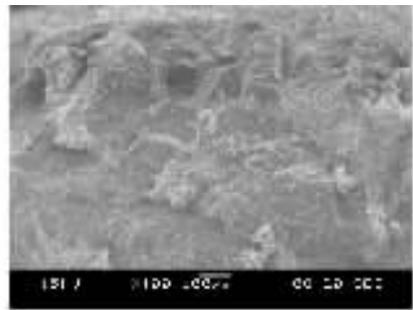


图2 水化28d的石屑混凝土SEM照片

## 4 结论

a. 掺复合外加剂的石屑混凝土内部的裂缝在冻融作用下逐渐扩展,与气泡连通后,这些气泡才能够发挥缓解冻胀压力的作用.

b. 掺复合外加剂的石屑混凝土的破坏表现为初次冻融时相对动弹性模量下降幅度较大,而后变缓并继续保持,而普通石屑混凝土则表现为几乎看不出初次冻融循环所引起的相对动弹性模量的变化与后期的差别,表现为持续的下降,直至破坏.

c. 复合外加剂所形成的微小气泡,极大地缓解了石屑混凝土内部孔隙水的冻胀压力,显著提高了石屑混凝土的抗冻性,掺复合外加剂的石屑混凝土的抗冻融循环次数可以达到普通石屑混凝土的4倍以上,抗冻耐久性指数也有大幅度提高.

### 参考文献:

- [1] 陈家珑. 机制石屑砂及其在普通混凝土中的应用研究[J]. 建筑技术开发, 1999, 26(1): 40-42.
- [2] 洪锦祥. 石屑混凝土及小波网络对其强度预测研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [3] KIM J K, LEE C S, PARK C K et al. The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete. Cement and Concrete Research, 1997, 27(11): 1719-1729.
- [4] DONZA H, CABRERA O, IRASSAR E F. High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete Research, 2002, 32: 1755-1761.
- [5] 方璟, 武世翔. 混凝土在试验室条件下冻融破坏的特点[J]. 混凝土与水泥制品, 2003(4): 18-20.

(收稿日期: 2005-08-02 编辑: 熊水斌)