

橡胶粉改性再生骨料混凝土抗冻性研究

杨洪生¹, 王 帅², 赵庆新²

(1. 黑龙江省交通科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 燕山大学 河北省重型装备与大型结构力学可靠性重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:以相对动弹性模量和质量变化率作为评价指标,研究了水灰比为0.45的基准混凝土及再生骨料掺量(质量分数)为25%、50%和75%的混凝土在水中和3.5%氯化钠溶液中的抗冻性,并掺入细骨料体积5%和10%的橡胶粉对其改性。结果表明:混凝土的抗冻性随再生骨料掺量的增加而下降;再生骨料掺量为25%和50%时,其对抗冻性的影响较小,掺加橡胶粉可有效改善混凝土的抗冻性;再生骨料掺量为75%时,其对抗冻性影响显著,掺加橡胶粉具有一定的改善作用,但与基准组混凝土相比,最大冻融循环次数仍下降30%以上;水冻的破坏特征为相对动弹性模量下降过大,掺入5%橡胶粉的抗冻性能最好;盐冻的主要破坏特征为质量变化率超过规定要求,掺入10%橡胶粉的抗冻性能最佳;橡胶粉对抗盐冻性能的改善明显优于抗水冻性能。

关键词:再生骨料混凝土;橡胶粉;抗冻性;相对动弹性模量;质量变化率

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0130-05

Rubber Powder Modified Frost Resistance of Recycled Aggregate Concrete

YANG Hongsheng¹, WANG Shuai², ZHAO Qing-xin²

(1. Hei Long Jiang Institute of Highway and Transport Research, Harbin 150080, P. R. China;

2. Key Laboratory of Mechanical Reliability for Heavy Equipments and Large Structures of Hebei Province,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004, P. R. China)

Abstract: Utilizing relative dynamic elastic modulus and weight loss of concrete as evaluation indices, the frost resistance of concrete with 0.45 water-cement ratio and different recycled aggregate replacement proportions was studied in the water and 3.5% sodium chloride solution. The mass proportions of recycled aggregate are 25%, 50% and 75%, respectively. Furthermore, the frost resistance of the modified concrete with 5% and 10% rubber powder volume fractions replacing fine aggregates was studied. The results show that: the frost resistance of concrete decreases with the increase of recycled aggregate, when the recycled aggregate mass fractions are 25% and 50%, its influence on the frost resistance of concrete is little, and mixing rubber powders can effectively improve the frost resistance of concrete; when the recycled aggregate mass fraction reaches 75%, its effect on the frost resistance of concrete is significant, and mixing rubber powders has certain improvement effect, but compared with the benchmark group of concrete the maximum freeze-thaw cycles decreases more than 30%. In water frozen test, the weight loss is small and the relative dynamic elastic modulus loss is quite obvious. The frost resistance is better when adding 5% volume fraction of rubber powders. In salt frozen test, the main characteristic is the weight loss exceeds the requirements. The frost resistance is better when adding 10% volume fraction of rubber powders. The improvement effect of rubber powder to the frost resistance of concrete in salt solution is much better than that in water.

Key words: recycled aggregate concrete; rubber powder; frost resistance; relative dynamic elastic modulus; mass loss rate

废弃混凝土块经过破碎、清洗、分级后,按一定的比例混合形成再生骨料,部分或全部代替天然骨料配制而成的新混凝土称为再生骨料混凝土^[1]。目前对再生骨料混凝土的研究大多集中在其力学性能方面。李俊等^[2]的试验结果表明:水胶比是影响再生骨料混凝土的最主要因素,并采用多元回归分析法,建立了再生混凝土强度与水胶比、再生骨料掺量、超细粉煤灰掺量的经验公式。Kou等^[3]的研究结果表明:随

着再生骨料掺量的增加,再生混凝土抗压强度和弹性模量都逐渐减小。而对再生混凝土耐久性方面研究相对较少,各个学者得出的结论也不尽相同。王立久等^[4]的研究表明:再生混凝土的抗冻性较基准组混凝土相当,甚至在水灰比一定的条件下优于基准组混凝土。而 Roumiana^[5]、Abdelgadir^[6]、Salem^[7]和戴薇原^[8]等的研究表明:再生混凝土的抗冻性低于甚至明显低于基准组混凝土。Gokce^[9]的研究表明:原始

混凝土是否引气对再生混凝土的抗冻性能有着很大的影响。有部分学者对改善再生混凝土抗冻性能进行了研究。宋少民^[10]的研究表明:掺加粉煤灰和高效减水剂、降低水胶比可以提高再生骨料混凝土的耐久性。Vivian^[11]研究了分两步拌合配制混凝土的方法可以提高再生混凝土的耐久性。

随着全球汽车工业发展,每年都产生大量的废旧轮胎,部分学者将废旧轮胎制成橡胶粉掺入混凝土中对混凝土的抗冻性能进行改善。Paine^[12]研究了 0.1~1.5 mm、2~8 mm 和 5~25 mm 粒径的橡胶粉对混凝土抗冻融性能的影响,结果表明:橡胶粉能大幅提高混凝土的抗冻融性能,掺入橡胶粉的混凝土抗冻融循环能力与掺加引气剂的相当。张亚梅等^[13]的研究均表明:橡胶粉掺量在合理范围内加入可大幅提高混凝土在水中和氯化钠溶液中的抗冻性;一定量的橡胶粉对普通混凝土的抗冻性能都有所提高。为合理利用再生骨料和橡胶粉,本文系统研究了再生骨料掺量为 25%、50% 和 75% 的混凝土在水中和 3.5% 氯化钠溶液中的抗冻性,并掺入细集料体积 5% 和 10% 的橡胶粉,探讨了其对再生骨料混凝土抗冻性的改善作用。

1 原材料与实验方法

1.1 原材料

实验采用秦皇岛浅野水泥厂生产的 P. O 42.5R 普通硅酸盐水泥;采用秦皇岛独楼外加剂厂生产的奈系高效减水剂,减水率为 21%;天然细骨料采用河砂,细度模数为 2.8;天

然粗骨料为破碎石灰石,5~16 mm 连续级配;橡胶粉粒径为 40~60 目,表观密度 1 020 kg/m³;再生骨料为秦皇岛某 C30 废弃水泥混凝土路面经破碎、筛分、级配而成,级配与天然骨料相同。粗骨料性能指标如表 1 所示:

表 1 粗骨料的基本性能

骨料类别	天然骨料	再生骨料
表观密度/ kg·m ⁻³	2 650	2 461
堆积密度/ kg·m ⁻³	1 462	1 286
吸水率/ %	0.5	2.4
压碎值/ %	11.8	18.8

1.2 配合比设计

再生骨料与天然骨料采用相同的级配,等质量取代天然骨料,其取代比例为 25%、50% 和 75%。由于再生粗骨料吸水率较大,在试件制备前对再生粗骨料进行喷湿处理,喷水量为再生骨料质量的 1.9%,并通过减水剂用量控制混凝土的坍落度在 90~120 mm 之间。橡胶粉等体积取代细骨料,其比例为 5% 和 10%。具体配合比及 28 d 抗压强度见表 2 所示。

每个配合比成型尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的试件两组,共 6 块,一组用于水冻,一组用于盐冻,同时成型 100 mm×100 mm×100 mm 的试件,用于抗压强度的测试。24 h 后脱模,标准养护至预定龄期。

表 2 混凝土配合比、28d 抗压强度及超声波波速

编号	再生骨料 掺量/ %	橡胶粉掺 量/ %	配合比/(kg·m ⁻³)								28 d 抗压 强度/MPa	初始超声 波波速 /(km·s ⁻¹)
			水泥	水	天然细 骨料	再生细 骨料	天然粗 骨料	再生粗 骨料	橡胶粉	减水剂		
R0-0	0	0	400	180	740	0	1100	0	0	2.41	52.31	5.031
R25-0	25	0	400	180	555	185	825	275	0	2.43	50.22	5.000
R50-0	50	0	400	180	550	370	550	370	0	2.48	47.03	4.925
R75-0	75	0	400	180	185	555	275	825	0	2.52	43.16	4.651
R25-5	25	5	400	180	555	185	825	275	14.2	2.49	44.11	4.828
R50-5	50	5	400	180	550	370	550	370	14.2	2.53	41.74	4.694
R75-5	75	5	400	180	185	555	275	825	14.2	2.64	39.11	4.627
R25-10	25	10	400	180	555	185	825	275	28.4	2.77	39.27	4.762
R50-10	50	10	400	180	550	370	550	370	28.4	2.82	38.63	4.645
R75-10	75	10	400	180	185	555	275	825	28.4	3.24	37.37	4.490

1.3 试验方法

按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》GBJ82-85 中抗冻性能试验的“快冻法”进行。分别进行水冻和盐冻性能的研究,盐冻中采用质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液。冻融实验前 4 d 将试件从养护室取出,分别浸泡于水中和浓度为 3.5% 的盐溶液中。为了研究试件冻融过程中的损伤演化规律,应用混凝土超声波检测仪测试不同冻融循环后的波速,各配合比试件的初始超声波波速如表 2 所示,用(1)式计算相对动弹性模量;应用感量为 0.1 g 的电子天平测定试件质量,用(2)式计算不同冻融循环的质量变化率。

$$E = \left(\frac{v_t}{v_0} \right)^2 \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta\omega = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

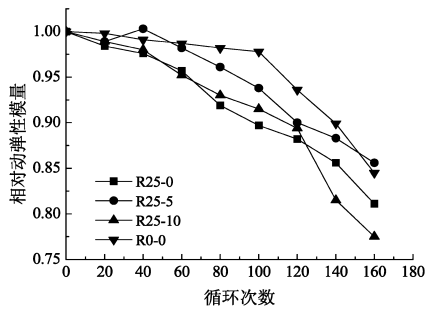
式中: E 为相对动弹性模量; v_t 为冻融后纵向波速; v_0 为冻融前纵向波速; $\Delta\omega$ 为质量变化率; m_t 为试件冻融后质量; m_0 为冻融试验前质量。

每 20 个冻融循环测试一次,当相对动弹性模量小于 60% 或者质量变化率超过 5% 时即评定试件破坏。试件明显破坏或无法测得超声波波速时,停止试验。

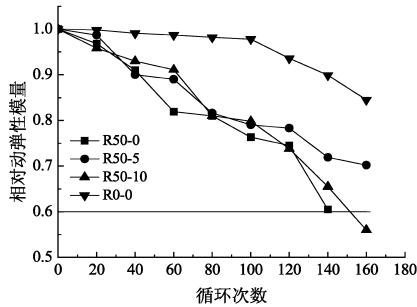
2 试验结果与分析

2.1 橡胶粉改性再生骨料混凝土抗水冻性能

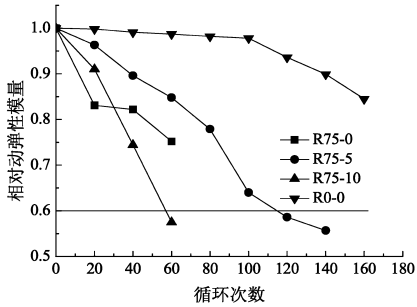
各系列混凝土在水中冻融循环相对动弹性模量变化和 质量变化率如图 1 和图 2 所示。



(a) 再生骨料掺量25%



(b) 再生骨料掺量50%



(c) 再生骨料掺量75%

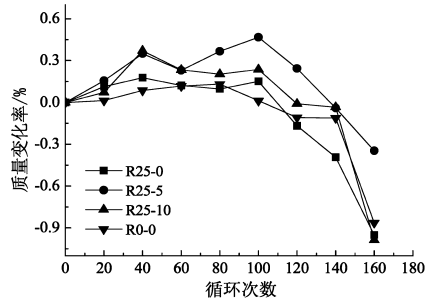
水中相对动弹性模量随冻融循环次数的变化规律

从图 1 可以看出,再生骨料掺量为 25% 时,各系列混凝土达到 160 个循环,其相对动弹性模量都在 60% 以上,掺加 5% 橡胶粉混凝土的抗冻性与基准组非常接近。当再生骨料掺量为 50% 时,未掺加胶粉与胶粉掺量为 10% 的混凝土达到 140 个循环后发生破坏,而掺加胶粉 5% 的混凝土达到 160 个循环时仍未破坏,抗冻性略低于基准混凝土。当再生骨料掺量为 75% 时,只进行到 60 个循环时,R75-0 与 R75-10 已无法测得超声波波速,认为其已经破坏,R75-5 性能最佳,但与基准混凝土相比仍有大幅度下降,R75-5 与 R0-0 相比最大冻融次数下降 30% 以上。从图 2 可以看出,随着循环的进行,混凝土质量都是先略有增长后开始下降,但是质量损失率较小,均低于 5%。根据以上分析,水冻中试件的破坏控制指标为相对动弹性模量损失过快,随再生骨料掺量提高,混凝土抗水冻性下降。

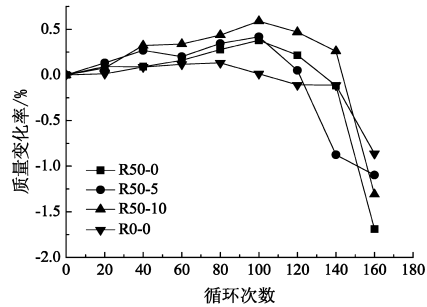
橡胶粉对再生骨料混凝土抗冻性具有一定的改善作用,再生骨料掺量为 25% 和 50% 时,其抗冻性比基准组混凝土略有下降,掺加 5% 橡胶粉的抗冻性能最好,再生骨料掺量为 75% 时,混凝土抗冻性显著下降,掺橡胶粉虽有改善作用,但仍明显低于基准混凝土。

2.2 橡胶粉改性再生骨料混凝土抗盐冻性能

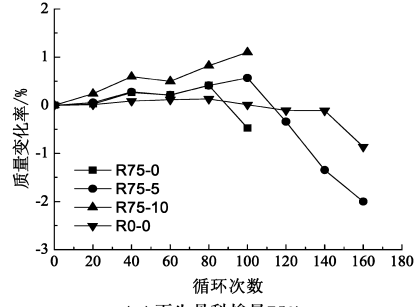
各系列混凝土在盐溶液中冻融循环相对动弹性模量变



(a) 再生骨料掺量25%



(b) 再生骨料掺量50%



(c) 再生骨料掺量75%

图 2 水中质量随冻融循环次数的变化规律

化和质量变化率如图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以看出,再生骨料掺量为 25% 和 50% 的混凝土进行到 160 个循环时相对动弹性模量均大于 60%。而当再生骨料掺量为 75% 时,R75-0、R75-5 和 R75-10 分别只进行了 60、80 和 100 个循环后,已无法测得超声波波速,认为其已经破坏。从图 4 可以看出,经过 160 个循环,大部分试件的质量损失率高于 5%。可见盐冻中的破坏模式主要为质量变化率超过规定要求,并随着再生骨料掺量的增加,经受相同冻融循环次数,质量变化率明显增加。对比基准组与不掺橡胶粉的再生骨料组可知,随再生骨料掺量的提高,混凝土抗盐冻性能不断下降。

掺加橡胶粉后再生骨料混凝土抗盐冻性能明显改善。对于再生骨料掺量为 25% 和 50% 的情况,掺 10% 橡胶粉的抗冻性能优于基准混凝土,其改善抗冻性的程度要优于水冻的情况。再生骨料掺量为 75% 时,橡胶粉对抗冻性虽有改善,但与基准组混凝土相比抗冻性仍有大幅下降,最大冻融次数下降 30% 以上。

2.3 机理浅析

从 2.2 的分析可以看出,与基准混凝土相比,再生骨料掺量为 25% 和 50% 时,混凝土抗冻性依次略有下降,当再生骨料掺量为 75% 时,其抗冻性明显下降。从表 1 可知再生骨

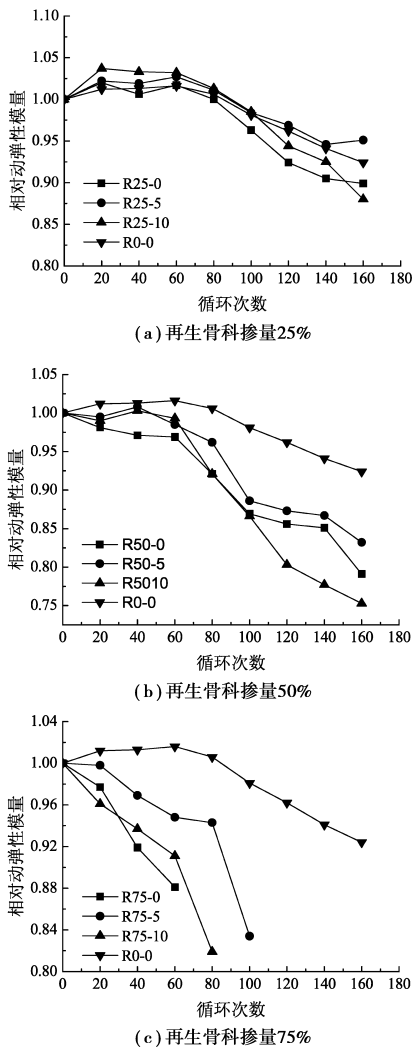


图 3 盐溶液中相对动弹性模量随冻融循环次数的变化规律

料压碎值较高,从表 2 中可知,随着再生骨料掺量的提高,混凝土 28 d 抗压强度逐渐减小,这些现象均说明再生骨料可能存在着一定的缺陷和损伤。有研究表明:利用超声波的声学特征和超声波波速能够反映混凝土试件内部的损伤程度^[14]。基于此,应用式(3)分析了不同再生骨料掺量混凝土的损伤度情况,如图 5 所示。

$$D = 1 - \left(\frac{v_t}{v_0} \right)^2 \quad (3)$$

式中: D 为混凝土的损伤度; v_t 为不同再生骨料掺量混凝土初始超声波波速; v_0 为基准组混凝土初始超声波波速。

由图 5 可以看出,再生骨料掺量为 25% 和 50% 时,混凝土损伤度分别为 1.2% 和 4.2%,随着再生骨料掺量的增加混凝土损伤度变大,说明再生骨料本身存在缺陷。当再生骨料掺量提高到 75% 时,由于再生骨料缺陷的积累,混凝土损伤度增大到 14.5%,从而导致其抗冻性能大幅下降。

橡胶粉属于弹性体,具有很好的压缩和拉伸变形能力,当受到外力作用时能够产生较大变形。当混凝土经受冻融循环时,内部将产生相应的应力而发生膨胀,橡胶粉为膨胀提供了一定空间从而对混凝土的抗冻性有所提高,对抗冻性有利^[13]。但另一方面,橡胶粉的加入使得混凝土强度降低,橡胶粉与基体之间的结合面较为薄弱,随着橡胶粉掺量的增

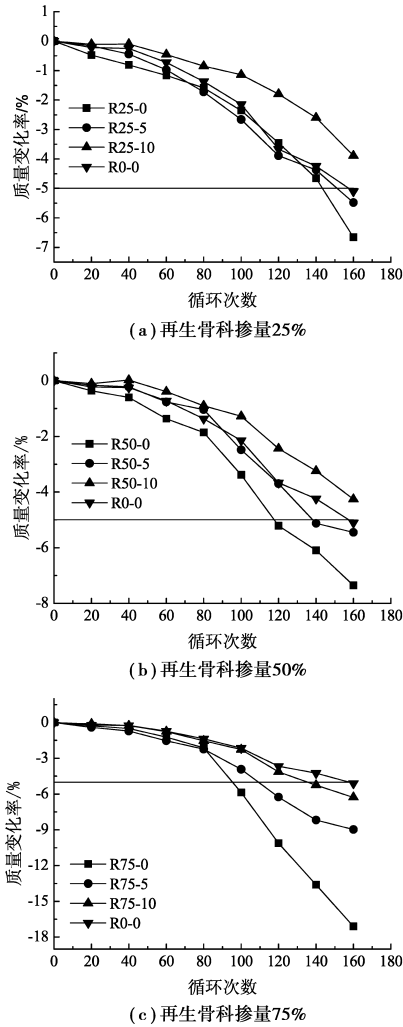


图 4 盐溶液中质量随冻融循环次数的变化规律

加薄弱界面势必增多,对抗冻性能不利。因此,对于一特定的情况,理论上橡胶粉应存在一最佳掺量,使混凝土抗冻性最佳。根据本文研究,水冻时掺入 5% 体积的橡胶粉对混凝土抗冻性改善最好。进行盐冻时,由于盐冻的膨胀率大于水冻结时的膨胀率^[15],掺入 10% 橡胶粉能更充分的发挥其有利方面,为混凝土的膨胀提供更多的空间,对混凝土抗冻性能的改善较好。

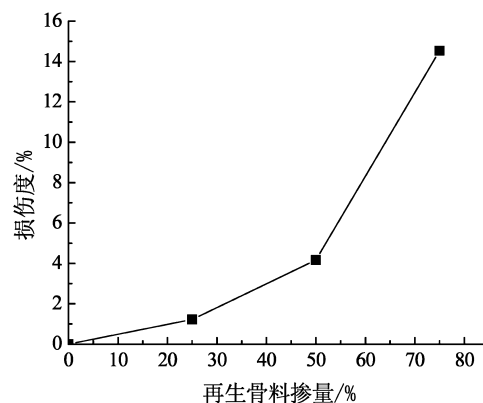


图 5 再生骨料掺量与损伤度关系

盐冻试件表面剥落情况如图 6 所示,照片比例为 1:1。由图 6 可见,R50-0 在经受 140 次盐冻融后,大量粗骨料裸

露;R50-5 部分粗骨料裸露;而 R50-10 只有少量粗骨料外露。这充分佐证了本文的试验结果。

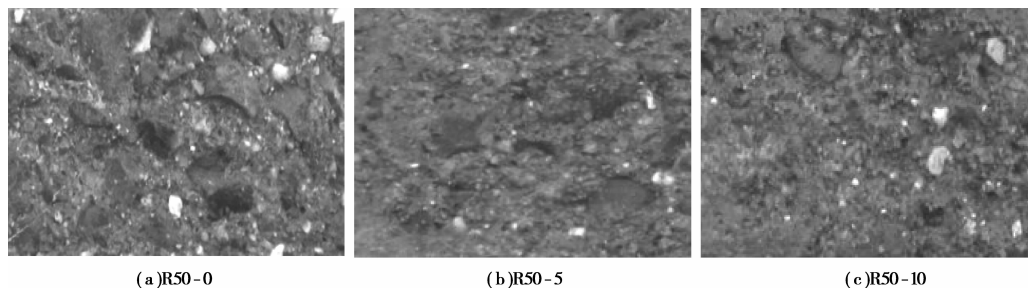


图 6 经受 140 次盐冻融循环混凝土表面剥落情况

3 结论

1) 随再生骨料掺量的提高混凝土抗冻性下降;再生骨料掺量为 25% 和 50% 时,混凝土损伤度略有提高,抗冻性能依次略有下降;当再生骨料掺量为 75% 时,其损伤度显著提高,混凝土的抗冻性能明显下降。

2) 对于抗水冻性能,橡胶粉的加入能明显提高混凝土的抗冻性能,橡胶粉的最佳掺量为细集料体积的 5%;对于抗盐冻性能,橡胶粉的最佳掺量为细集料体积的 10%;橡胶粉对再生骨料混凝土抗盐冻性的改善程度明显优于抗水冻性能。

3) 再生骨料掺量为 75% 时,即使用橡胶粉改性,其抗冻性也明显低于基准混凝土。

参考文献:

- [1] 刘数华,冷发光. 再生混凝土技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,2007.
- [2] 李俊,尹健,周士琼,等. 基于正交试验的再生骨料混凝土强度研究[J]. 土木工程学报,2006,39(9):43-46.
LI Jun, YIN Jian, ZHOU Shiqiong, et al. Study on the strength of recycled aggregate concrete based on orthogonal experiment[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 43-46.
- [3] Kou S C, Poon C S, Chan D. Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete[J]. Materials and Structures, 2008, 41(7): 1191-1201.
- [4] 王立久,汪振双,崔正龙. 再生混凝土抗冻耐久性试验及寿命预测[J]. 混凝土与水泥制品,2009(4):6-8.
WANG Lijiu, WANG Zhenshuang, CUI Zhenglong. Tests on frost-resistance and life-span prediction of recycled concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2009(4): 6-8.
- [5] Roumiana Z, Franco B, Eric W. Frost resistance of recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(10): 1927-1932.
- [6] Abdelgadir A, Gholamr F, Burkan O, et al. Durability of recycled aggregates concrete designed with equivalent mortar volume method[J]. Cement & Concrete Composites, 2009(31): 555-563.
- [7] Salem R M, Burdette E G, Jackson N M. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregates concrete[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(3): 216-221.

- [8] 戴薇原,孙伟民,缪汉良. 再生混凝土的抗冻融性试验研究[J]. 混凝土,2007(8):69-74.
DAI Weiyuan, SUN Weimin, MIAO Hanliang. Experimental study on freeze-thaw durability of recycled concrete[J]. Concrete, 2007(8): 69-74.
- [9] Gokce A, Nagataki S, Saeki T, et al. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(5): 799-806.
- [10] 宋少民,孙永梅. 建筑垃圾再生混凝土耐久性能的研究[J]. 商品混凝土,2009,(3):34-36.
SONG Shaomin, SUN Yongmei. The research on durability of recycled aggregate concrete with construction waste[J]. Beton Chinese Edition—Ready-mixed Concrete, 2009, (3): 34-36.
- [11] Vivian W Y, Tam C M. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach[J]. Mater Sci, 2007(42): 3592-3602.
- [12] Paine K A, Dhir R K, Moroney R, et al. Use of crumb rubber to achieve freeze thaw resisting concrete[C]. //Proceedings of the International Conference on Concrete for Extreme Conditions, University of Dundee, Scotland, UK, 2002; 486-498.
- [13] 张亚梅,赵志远,陈胜霞,等. 橡胶粉对混凝土在水和 NaCl 溶液中抗冻性的影响[J]. 东南大学学报:自然科学版,2006,36:834-841
ZHANG Yamei, ZHAO Zhiyuan, CHEN Shengxia, et al. Impact of rubber powder on frost resistance of concrete in water and NaCl solution[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36: 834-841.
- [14] 陈士纯. 超声波测试法在混凝土非局部损伤本构模型中的应用[J]. 武汉大学学报:工学版,2001,34(3):92-94.
CHEN Shichun. Application of ultrasonic test method to nonlocal damage constitutive model of concrete[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(3): 92-94.
- [15] 慕儒,缪昌文,刘加平,等. 氯化钠、硫酸钠溶液对混凝土抗冻性的影响及其机理[J]. 硅酸盐学报,2001,29(6):523-529.
MU RU, MIAO Changwen, LIU Jiaping, et al. Effect of NaCl and Na₂SO₄ solution on the frost resistance of concrete and its mechanism. Journal of Chinese Ceramic Society. 2001, 29(6): 523-529.