

冻融循环作用下橡胶自密实混凝土力学性能研究

张卫东¹, 王振波², 何卫忠¹

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 221009)

摘要:通过橡胶自密实混凝土的快速冻融试验,研究了不同橡胶取代率下橡胶自密实混凝土力学性能随冻融循环次数的变化规律.试验结果表明:在相同冻融循环次数下,橡胶取代率对橡胶自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度影响较大,但与取代率不成比例关系;在相同橡胶取代率的情况下,立方体抗压强度及劈裂强度均显示出随冻融循环次数增加而下降的趋势.通过对相关数据的分析研究,给出了橡胶自密实混凝土拉压比随冻融循环次数变化的规律,回归立方体抗压强度、劈裂强度与冻融循环次数间的简明关系式.

关键词:橡胶自密实混凝土;冻融循环;取代率;立方体抗压强度;劈裂强度

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.017

0 引言

为了提高混凝土浇筑施工的效率,降低振捣噪音,保证形状复杂、配筋密集构件的浇筑质量,降低施工难度,上个世纪 80 年代日本东京大学冈村教授研究团队提出了自密实混凝土(SCC),经过近十年的发展,自密实混凝土得到了普遍认可,被大量运用在实际工程项目中^[1-2].

为解决混凝土自重大及动力性能、延性偏差的问题,拓展废弃轮胎等橡胶制品的二次利用途径,尝试将废旧橡胶制成橡胶粉或颗粒加入混凝土中制成橡胶混凝土,此方面的研究较多且已形成了相应的研究成果^[3-5].关于橡胶自密实混凝土物理力学性能等方面的研究较少.马昆林等^[6]研究了橡胶集料体积分数对 SCC 抗压强度的影响,其试验结果显示两者之间存在较好的线性关系,并针对抗压强度下降原因进行了详细的分析,建议了最佳橡胶集料体积分数;文献[7]研究了橡胶体积取代率对 SCC 收缩性能、电阻及力学性能的影响,并拟合了相关参数之间的关系式;文献[8]表明随着橡胶取代率的增加,自密实混凝土的抗冲击性能有所提高,但其强度及弹性模量有所下降;文献[9]表明膨胀土、橡胶的存在明显降低了自密实混凝土的力学性能及动弹性模量,同时降低了氯离子渗透系

数;文献[10]研究了橡胶取代率对新拌自密实混凝土流变特性的影响.

鉴于此,课题组从橡胶自密实混凝土的力学性能出发,通过改变冻融循环次数及橡胶取代率,研究了自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度及拉压比的影响,探讨了立方体抗压强度、劈裂强度与冻融循环次数之间的关系式,为类似研究提供参考.

1 试验

1.1 试验材料

水泥(C)采用“海螺”牌 P·O42.5 普通硅酸盐水泥;砂(S)为中粗河砂,其细度模数为 2.6;石子(G)为连续级配碎石,粒径为 5~20 mm;粉煤灰(FA)为南京嘉琪粉煤灰公司生产的 I 级粉煤灰;减水剂(SP)为江苏博特的 PCA(I)羧酸高效减水剂;搅拌水(W)为当地自来水;橡胶(RP)为粒径为 350 μm 的硫化橡胶粉.

1.2 试验设计

为了系统研究橡胶体积取代率、冻融循环次数对自密实混凝土力学性能的影响,设计制作了 150 个 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,其中 75 个用于研究橡胶取代率及冻融循环次数对橡胶自密实混凝土立方体抗压强度的影响,

收稿日期:2016-05-30;修订日期:2016-07-19

基金项目:江苏省高校“青蓝工程”优秀骨干教师基金资助项目;淮安市科技计划基金资助项目(HAS2014021-3)

作者简介:张卫东(1981—),男,江苏南通人,淮阴工学院副教授,主要从事新型建筑材料性能研究, E-mail:jsntzwd@163.com.

剩下 75 个用于研究两者对劈裂强度的影响. 以 C40 自密实混凝土配合比为基准,具体如表 1 所示. 按照等体积原则,橡胶粉取代河砂的体积取代率分别为 5%、10%、15% 和 20%.

表 1 自密实混凝土配合比
Tab.1 Self-compacting concrete mix ratio

编号	水胶比	配合比/(kg·m ⁻³)						
		C	S	G	FA	RB	W	SP
SCC	0.38	350	740	930	150	0.0	190	2.82
RSCC-5	0.38	350	703	930	150	14.8	190	2.82
RSCC-10	0.38	350	666	930	150	29.7	190	2.82
RSCC-15	0.38	350	629	930	150	44.5	190	2.82
RSCC-20	0.38	350	592	930	150	59.4	190	2.82

注:SCC 表示自密实混凝土;RSCC-y 中 RSCC 表示橡胶自密实混凝土,y 表示橡胶体积取代率.

1.3 试验方法

为了保证橡胶粉能与粗细骨料及水泥彼此均匀混合,先将其倒入搅拌 30 s,然后在搅拌过程中慢慢注水搅拌 4 min. 具体试验步骤按照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》^[11]中具体规定执行,每个冻融循环周期约为 4 h,试件中心最低和最高温度分别控制在 -18±2℃ 和 5±2℃. 为了研究冻融循环次数对橡胶自密实混凝土力学性能的影响,待冻融循环次数达到 25、50、75、100 次后,分别从冻融箱中取出立方体试件,自然晾干后依照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T50081—2002)^[12]中规定方法进行立方体抗压强度及劈裂强度试验.

2 试验结果及分析

2.1 橡胶取代率的影响

橡胶取代率(y)对自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度影响的关系曲线分别见图 1、图 2.

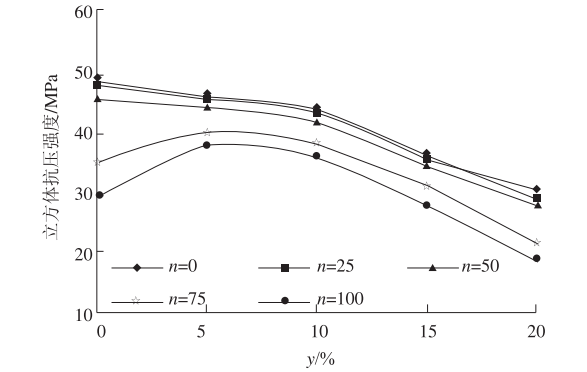


图 1 橡胶取代率与立方体抗压强度关系
Fig.1 Relation between compressive strength and replacement rate of rubber

由图 1 可知,橡胶取代率与立方体抗压强度关系明显. 当冻融循环次数分别为 0、25、50 次时,随着橡胶取代率的提高,橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度均呈下降趋势. 对试验数据的分析

可知,当冻融循环次数为 25 次时,橡胶取代率分别为 5%、10%、15%、20% 的自密实混凝土的立方体抗压强度相应为 45.5、43.2、35.6、28.7 MPa,为基准自密实混凝土立方体强度(47.8 MPa)的 95.19%、90.38%、74.48%、60.04%,可见随着取代率升高呈现出前期下降较缓慢,后期下降较快的趋势.

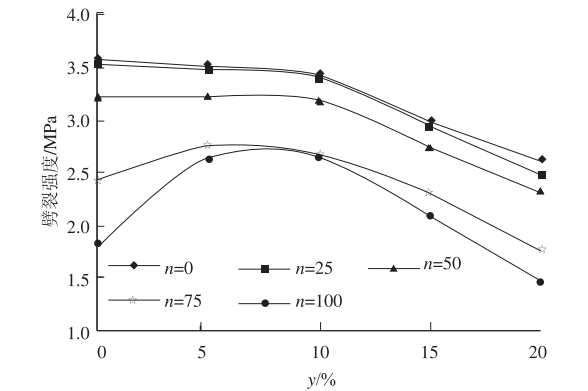


图 2 橡胶取代率与劈裂强度关系
Fig.2 Relation between split strength and replacement rate of rubber

随着橡胶取代率的增加,冻融循环次数为 75 次、100 次的橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度的变化情况基本保持一致,呈先上升后下降的发展趋势. 当冻融循环次数为 75 次时,橡胶取代率为 5%、10%、15%、20% 的自密实混凝土的立方体抗压强度分别为 39.8、37.9、31.2、21.8 MPa,为同样冻融条件下基准自密实混凝土立方体强度(35.1 MPa)的 113.4%、108.0%、88.9%、62.1%,这表明橡胶取代率 5% 为立方体抗压强度先上升后下降的拐点,但橡胶取代率为 10% 的橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度比基准混凝土高. 表明在冻融循环次数较高的情况下,橡胶的存在可以有效地提高自密实混凝土的立方体抗压强度,但取代率以不超过 10% 为宜.

由图 2 可知,橡胶取代率与劈裂强度关系明显.当冻融循环次数为 0、25、50 次时,随着橡胶取代率的提高,橡胶自密实混凝土的劈裂强度均呈下降趋势;当冻融循环次数为 75、100 次时,随着橡胶取代率的增加,橡胶自密实混凝土的劈裂强度呈先上升后下降的发展趋势,拐点同样位于橡胶取代率 5% 处.表明在一般冻融环境下,橡胶的存在不利于提高自密实混凝土抗劈裂强度,但冻融循环次数较高(如 100 次),合理控制橡胶取代率可以有效提高橡胶自密实混凝土的劈裂强度.

通过对比分析可知,一方面橡胶弹性模量及强度较低,加上橡胶憎水且周围易吸附气泡进而降低橡胶与水泥基体间结合性能,随着橡胶取代率增加导致初始微裂缝及孔隙增多,进而降低橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度及劈裂强度;另一方面增多的微裂缝、孔隙及橡胶的易变形性有利于缓解冻融循环导致的损伤.当前者的不利作用起主导作用时,某些冻融条件下混凝土抗压及劈裂强度随取代率上升而下降;当两者交互起主导作用时,某些冻融条件下橡胶自密实混凝土立方体抗压强度及劈裂强度随取代率增加呈现先增大后下降趋势.

2.2 冻融循环次数的影响

冻融循环次数对不同橡胶取代率的自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度影响的关系曲线分别见图 3、图 4.

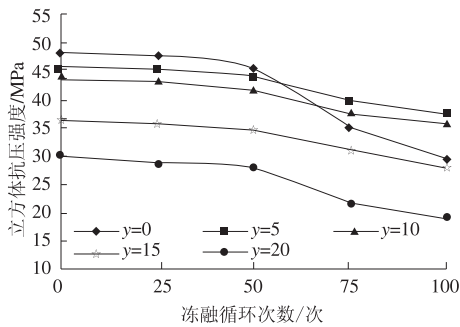


图 3 冻融循环次数与立方体抗压强度关系
Fig. 3 Relation between compressive strength and freeze-thaw cycles

由图 3 可知,随着冻融循环次数的增加,基准自密实混凝土及不同橡胶取代率的自密实混凝土立方体抗压强度均下降,但下降速度不同.通过对不同橡胶取代率的自密实混凝土的抗压强度随冻融循环次数变化情况分析可知,以 50 次冻融循环为界,抗压强度下降呈现前缓后快的趋势,5% 取代率的橡胶自密实混凝土的总体变化速度较为缓慢,每递增 25 次冻融循环,立方体抗压强度约为

基准自密实混凝土强度的 99.13%、96.08%、86.71% 及 81.14%.

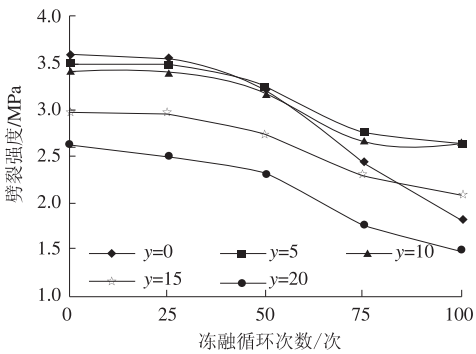


图 4 冻融循环次数与劈裂强度关系
Fig. 4 Relation between split strength and freeze-thaw cycles

由图 4 分析可知,随着冻融循环次数的增加,基准自密实混凝土及不同橡胶取代率的自密实混凝土的劈裂强度均随之下降,且下降速度明显快于立方体抗压强度的下降速度.通过对不同橡胶取代率的自密实混凝土的抗压强度随冻融循环次数变化情况分析可知,当循环次数位于 50~75 次时,橡胶自密实混凝土劈裂强度下降最为迅速,波动范围为 92.02%~78.35%;超过 75 次后,下降速度减缓明显,波动范围仅为 78.35%~74.93%.

结合冻融循环条件下橡胶对立方体抗压强度的影响分析可知,橡胶的存在会降低自密实混凝土的基本力学性能,且对劈裂强度影响较大,但同时也表明控制橡胶取代率,可降低冻融循环对自密实混凝土力学性能的影响,进一步提高其抗冻耐久性能.

2.3 拉压比

拉压比是反映混凝土脆性的主要指标之一.橡胶自密实混凝土拉压比(劈裂强度/立方体抗压强度)与冻融循环的关系曲线见图 5.

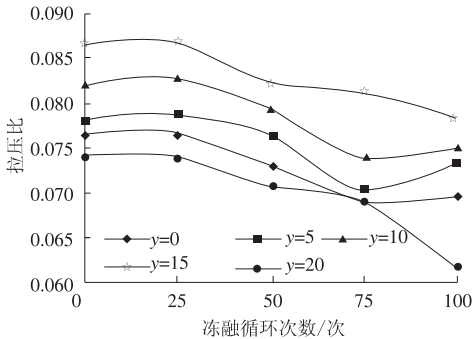


图 5 冻融循环次数与拉压比关系
Fig. 5 Relation between freeze-thaw cycles and tension compression ratio

由图 5 可知,在相同冻融循环次数下,橡胶自密实混凝土的拉压比均随橡胶取代率的增加而增大,这表明橡胶取代部分细骨料有利于提高自密实混凝土的塑性;橡胶取代率相同条件下,橡胶自密实混凝土的拉压比随冻融循环次数大体呈下降趋势,但取代率低于 15% 时,冻融循环次数为 100 的自密实混凝土拉压比却高于循环次数为 75 的自密实混凝土的拉压比. 由于研究所限,未进行橡胶取代率为 20% 的橡胶自密实混凝土在更高冻融循环次数下的力学试验,无法反映该取代率下自密实混凝土的拉压比变化情况. 结合普通自密实混凝土在冻融作用下拉压比比值变化情况,可知橡胶取代细骨料能提高处于冻融作用下的自密实混凝土的拉压比比值,且提高其塑性.

2.4 关系曲线

为了解橡胶自密实混凝土与冻融循环次数的关系,笔者根据最小二乘法,回归得到了不同橡胶取代率的橡胶自密实混凝土立方体抗压强度 f'_d 、劈裂强度 f'_t 与冻融循环次数 N 的关系曲线,如图 6、图 7.

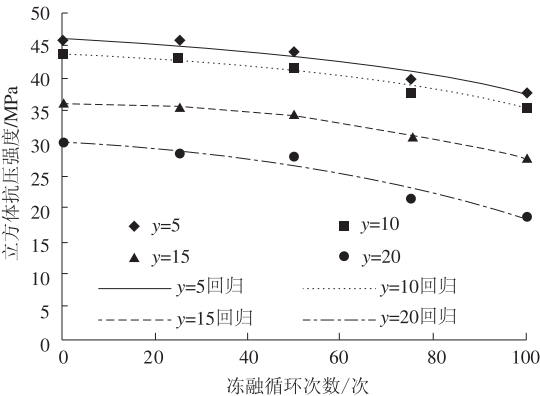


图 6 立方体抗压强度与冻融循环次数拟合关系
Fig. 6 Regressive relation between compressive strength and freeze-thaw cycles

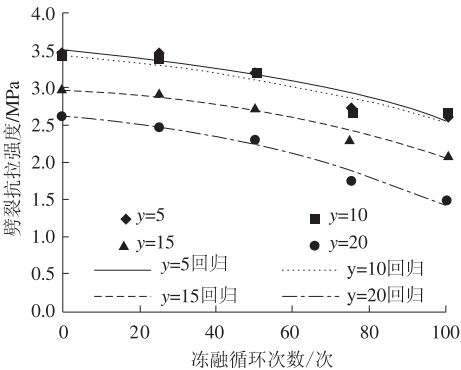


图 7 劈裂强度与冻融循环次数拟合关系
Fig. 7 Regressive relation between freeze-thaw cycles and split strength

橡胶取代率为 5% 的 f'_d 与 N 的拟合关系式如式(1)所示,45.9 为该橡胶自密实混凝土在冻融循环次数为零条件下的立方体抗压强度试验值 f_d .

$$\begin{cases} y = 5: f_d = 45.9 - 0.008\ 7N - 0.000\ 8N^2 \\ R^2 = 0.966\ 7 \\ f'_d = f_d - 0.008\ 7N - 0.000\ 8N^2 \end{cases} \quad (1)$$

其余 f'_d 、 f'_t 与 N 的关系式同理可得,具体如表 2 所示.

表 2 橡胶自密实混凝土力学性能与冻融循环次数关系式
Tab. 2 Relation between freeze-thaw cycles and mechanical properties of rubberized self-compacting concrete

取代率/y	关系式	R^2
y = 5	$f'_d = f_d - 0.008\ 7N - 0.000\ 8N^2$	0.966\ 7
y = 10	$f'_d = f_d - 0.022\ 9N - 0.000\ 6N^2$	0.975\ 9
y = 15	$f'_d = f_d + 0.000\ 4N - 0.000\ 9N^2$	0.995\ 5
y = 20	$f'_d = f_d - 0.021\ 5N - 0.001N^2$	0.954\ 8
y = 5	$f'_t = f_t - 0.003\ 4N - 0.000\ 06N^2$	0.953\ 8
y = 10	$f'_t = f_t - 0.003\ 8N - 0.000\ 05N^2$	0.898\ 8
y = 15	$f'_t = f_t - 0.001\ 7N - 0.000\ 08N^2$	0.969\ 0
y = 20	$f'_t = f_t - 0.003\ 4N - 0.000\ 08N^2$	0.976\ 0

注:由于笔者研究的冻融循环次数有限,故 $0 \leq N \leq 100$.

由式(1)及表 2 可知,立方体抗压强度、劈裂强度两者与冻融循环次数的相关性较好,且反映出两者随冻融循环次数的变化规律.

3 结论

(1)橡胶取代率对橡胶自密实混凝土立方体抗压、劈裂强度影响明显,但不成比例关系. 当冻融循环次数为 0、25 及 50 次时,随着取代率的增加,两强度呈现出下降趋势. 而循环次数为 75 及 100 次时却呈现先上升后下降趋势,表明在较高冻融循环次数下,合理控制橡胶取代率有助于提高自密实混凝土的力学性能.

(2)随着冻融循环次数的增加,立方体抗压强度、劈裂强度随之下降,表明橡胶自密实混凝土损伤越严重. 橡胶取代率为 5% 时,橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度、劈裂强度受冻融循环影响最小,变化速率相对缓慢.

(3)相同取代率条件下,橡胶自密实混凝土拉压比随冻融循环次数增加大体呈下降趋势;相同冻融条件下,橡胶自密实混凝土拉压比随橡胶取代率增加而增大,显示出橡胶的存在有助于提高冻融状态下自密实混凝土的抗裂性能.

(4)通过对试验数据的统计回归,给出了橡

胶自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度与冻融循环次数之间的关系式,且相关性较好,为橡胶自密实混凝土的抗冻耐久性研究提供参考。

参考文献:

- [1] 王国杰. 自密实混凝土圆环约束收缩试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(12): 173 - 180.
- [2] 阎培渝, 余成行, 王强, 等. 高强自密实混凝土的减缩措施[J]. 硅酸盐学报, 2015(4): 363 - 367.
- [3] ELDIN N N, SENOUCI A B. Rubber-tire particles as concrete aggregate[J]. Journal of materials in civil engineering, 1993, 5(4): 478 - 496.
- [4] GANJIAN E, KHORAMI M, MAGHSOUDI A A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete[J]. Construction and building materials, 2009, 23(5): 1828 - 1836.
- [5] 张卫东, 相军, 王成武. 废橡胶对再生混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(2): 49 - 52.
- [6] 龙广成, 马昆林, 谢友均. 橡胶集料对混凝土抗压强度的降低效应[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 758 - 762.
- [7] YUNG W H, YUNG L C, HUA L H. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete[J]. Construction and building materials, 2013(41): 665 - 672.
- [8] KHALIL E, ABD-ELMOHSEN M, ANWAR A M. Impact resistance of rubberized self-compacting concrete[J]. Water science, 2015, 29(1): 45 - 53.
- [9] LI N, LONG G C, ZHANG S S. Properties of self-compacting concrete incorporating rubber and expanded clay aggregates[J]. Key engineering materials, 2014, 629: 417 - 424.
- [10] GÜNEYISI E, GESOGLU M, NAJI N, et al. Evaluation of the rheological behavior of fresh self-compacting rubberized concrete by using the herschel-bulkley and modified bingham models[J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2016, 16(1): 9 - 19.
- [11] 中国建筑科学研究院. GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] 中国建筑科学研究院. GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

Study of Mechanical Properties of Rubberized Self-compacting Concrete Subjected to Freeze-thaw Cycle

ZHANG Weidong¹, WANG Zhenbo², HE Weizhong¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Through the freezing and thawing tests, the influence of replacement rate of rubber on mechanical properties of rubberized self-compacting concrete (RSCC) under different cycle times of freeze-thaw were studied. The results showed that the replacement rate of rubber had great influence on cubic compressive strength and split strength of RSCC under the same freeze-thaw cycle time, but not in proportional relation; cubic compressive strength and split strength of RSCC under the same replacement rate of rubber decreased with the freeze-thaw cycle times increasing. Based on the analysis of the test data, the change law between tension-compression ratio and freeze-thaw cycle times was given, and the relevant simple formula were regressed between cubic compressive strength, split strength and freeze-thaw cycle times. This study could serve as a reference for durability of RSCC under freezing and thawing environment.

Key words: rubberized self-compacting concrete; freeze-thaw cycle; replacement rate; cubic compressive strength; split strength