

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.01.009

橡胶自密实混凝土多龄期抗压强度试验研究

王德奎^{1,2}, 何仕³, 庄金平^{1,2}, 林晗绯⁴

(1. 闽台合作土木工程技术福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350118;
2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 3. 福建工程学院, 福建 福州 350118;
4. 福建工程学院 建筑与城乡规划学院, 福州, 350118)

摘要: 浇筑了13批次共123个标准试块分别进行7、28、60、90 d龄期的抗压试验。试验结果表明: 橡胶的掺入改善了自密实混凝土脆性破坏形态, 降低了各龄期强度, 同掺量下掺橡胶粉强度最低, 掺1~2 mm橡胶颗粒的强度最大; 7 d龄期强度可达60 d龄期强度的65%~80%; 橡胶掺量不大于30%的试件, 60 d龄期强度已经趋于稳定, 橡胶颗粒掺量40%的试件28 d龄期强度已趋于稳定; 拟合了橡胶粒径、掺量与强度的预测公式, 7 d龄期与后期强度的经验公式, 与试验结果对比吻合较好。

关键词: 橡胶自密实混凝土; 粒径; 掺量; 龄期; 抗压强度

中图分类号: TU528.0

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)01-0051-05

Experimental study on compressive strength of rubber self-compacting concrete at different curing ages

WANG Dekui^{1,2}, HE Shi³, ZHUANG Jinping^{1,2}, LIN Hanfei⁴

(1. Fujian-Taiwan Cooperative Institute of Civil Engineering Technology in Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;
2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
3. Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
4. School of Architecture and Urban Planning, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The compressive tests of the RSCC cured for 7, 28, 60 and 90 days were carried out, in which 13 batches of 123 standard test blocks were poured respectively. Results show that the addition of rubber can improve the brittle failure mode of SCC. The compressive strength of RSCC at different curing ages decreases with the addition of rubber powder, and the compressive strength of RSCC added with rubber powder is the lowest compared with that of the RSCC added with the same amount of rubber particles. In addition, the compressive strength of RSCC with the addition of rubber particles with the size of 1~2 mm is the highest. The compressive strength of RSCC cured for 7 days can reach 65%~80% of that of RSCC cured for 60 days. When the curing period exceeds 60 days, the compressive strength of RSCC with a rubber dosage of no more than 30% tends to be stable. When the curing period exceeds 28 days, the compressive strength of RSCC with a 40% rubber dosage tends to be stable. The prediction formulas of the compressive strength affected by rubber particle size and dosage were fitted, and the empirical formula of RSCC cured for 7 or more days were in good agreement with the experimental results.

Keywords: rubber self-compacting concrete; particle size; dosage; curing ages; compressive strength

废旧橡胶经机械加工后掺入混凝土中能限制良好的社会和经济效益。文献[1-4]对橡胶混凝土进行了研究, 橡胶混凝土强度随着橡胶掺量的

收稿日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(51678152); 福建省教育厅科研项目(JT180341)

第一作者简介: 王德奎(1983—), 男, 福建沙县人, 工程师, 硕士, 研究方向: 高性能混凝土与现代施工技术。

增加而降低,橡胶混凝土浇筑振捣过程中存在橡胶上浮等问题。而橡胶加入较高强度等级的自密实混凝土中不仅可以提高橡胶掺量,因自密实混凝土免振捣还可解决橡胶因振捣上浮的问题。文献[5-9]对橡胶自密实混凝土力学性能进行了研究,但相关橡胶自密实混凝土的研究文献还相对较少,且对力学性能的研究多集中在 28 d 龄期。因橡胶自密实混凝土掺粉煤灰较大,其强度在 28 d 后还会继续增加,橡胶自密实混凝土早期强度如何发展、早期强度与后期强度关系,强度与所掺橡胶粒径、橡胶掺量的关系等方面有待于继续研究完善。本文以不同橡胶掺量、不同橡胶粒径,对橡胶自密实混凝土进行多龄期的抗压强度进行试验研究。

1 试验概况

1.1 试验材料与配合比设计

参照《普通混凝土配合比设计规程》^[10]、《自

密实混凝土应用技术规程》^[11]等规程,按 C50 自密实混凝土为基准自密实混凝土进行配制。水泥:P.O 42.5,密度 3.10 g/cm³;Ⅱ级粉煤灰,表观密度 2.35 g/cm³;砂子,河砂,表观密度 2.65 g/cm³;石子采用反击破碎石,表观密度 2.75 g/cm³;减水剂采用省建科院生产的聚羧酸高效减水剂,掺量百分比按占胶料总质量计算,为满足橡胶自密实混凝土的坍落度扩展度,通过试配改变并确定减水剂的掺量。橡胶粉,表观密度 1.159 g/cm³;1~2 mm 橡胶颗粒,表观密度 1.193 g/cm³;2~4 mm 表观密度 1.126 g/cm³。试验用“混凝土类型-橡胶掺量-橡胶粒径”来编号,其中,RSCC 为橡胶自密实混凝土,SCC 为自密实混凝土;F 代表橡胶粉,L1 代表 1~2 mm 橡胶粒,L2 代表 2~4 mm 橡胶粒,如 RSCC-10-F 代表掺入橡胶粉、掺量为 10% 的橡胶自密实混凝土。经多次实验室试配,橡胶自密实混凝土各组材料用量如表 1。

表 1 橡胶自密实混凝土每立方材料用量
Tab.1 Material consumption of RSCC per cubic meter

编号	<i>m</i> _{粉煤灰} /kg	<i>m</i> _{橡胶} /kg	<i>m</i> _水 /kg	<i>m</i> _砂 /kg	<i>m</i> _{石子} /kg	<i>m</i> _{水泥} /kg	减水剂用量/%
SCC	163	0	153	800	940	382	1.6
RSCC-10-F	163	35	153	720	940	382	1.9
RSCC-20-F	163	70	153	640	940	382	2.1
RSCC-30-F	163	104	153	560	940	382	2.2
RSCC-40-F	163	139	153	480	940	382	2.2
RSCC-10-L1	163	36	153	720	940	382	1.8
RSCC-20-L1	163	71	153	640	940	382	1.9
RSCC-30-L1	163	107	153	560	940	382	1.9
RSCC-40-L1	163	143	153	480	940	382	2.0
RSCC-10-L2	163	34	153	720	940	382	1.6
RSCC-20-L2	163	68	153	640	940	382	1.6
RSCC-30-L2	163	102	153	560	940	382	1.8
RSCC-40-L2	163	136	153	480	940	382	1.8

1.2 试验方案

橡胶粒径大小、橡胶掺量是影响橡胶自密实混凝土力学性能重要因素,在配制基准自密实混凝土的基础上,通过掺入等体积取代砂的橡胶,研究不同橡胶粒径大小、掺量对橡胶自密实混凝土多龄期力学性能的影响。抗压强度试件采用 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体,一个配合比为一

批次试件,每批次试件试验龄期分别有 7、28、60 d,掺入橡胶粒径类型分别 2~4 mm 橡胶颗粒、1~2 mm 橡胶颗粒、橡胶粉,橡胶掺量分别为 10%、20%、30%、40%,共 13 批次 41 组试件,每组试件 3 个,为验证橡胶自密实混凝土 60 d 强度是否已经趋于稳定,特设置 90 d 试件两组。本次试验压力机采用 500T 液压伺服压力机,按《普通混凝土

力学性能试验方法标准》^[12](GB/T50081-2002)规定加载。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

基准自密实混凝土试块在试验加载时,细微裂缝首先出现在试件的粗糙面,荷载继续增加,部分混凝土块从粗糙面上脱落。在相对粗糙面的试件表面上,竖向裂缝首先出现在靠近棱边的上方位置并向下发展,接近极限荷载 C60 时,裂缝宽度增加并在其旁出现多条细裂缝,当细微裂缝出现在试件中心后不久,试件突然爆裂并伴随巨响,碎块飞向四周。靠近混凝土试件中部的混凝土脱落最多,往承载面两端逐渐减少,残余试件呈两个相对对称的四角锥形,破坏形态呈明显的脆性特征。

掺入 2~4 mm 橡胶颗粒系列的橡胶自密实混凝土试件破坏过程中,细微裂缝也先出现在试件的粗糙面,随荷载继续增加,部分混凝土块从粗糙面上脱落。在相对粗糙面的试件表面上,侧棱边的附近首先有细微的裂缝出现,并斜向试块中部,接近极限荷载时,有混凝土破坏时的撕裂声,相比基准自密实混凝土声音较小,无向四周飞溅混凝土块,破坏裂缝较均匀地分布试件中。橡胶掺量

越多,破坏时声音越小,试件横向变形越大,裂缝数量越多并发展越慢,试件完整性越好。

掺入 1~2 mm 橡胶颗粒的橡胶自密实混凝土试件破坏过程中,相比 RSCC-L2 系列的试件,破坏形态相似,但同橡胶掺量的试块,破坏时分布于试件的裂纹数量相对要少。

掺入橡胶粉的橡胶自密实混凝土试件破坏过程中,在同橡胶掺量下,相比掺入橡胶颗粒的试件,试件破坏时裂缝数量相对较少,但掺入橡胶粉,也有利于改善自密混凝土脆性破坏形态。

2.2 试验结果分析

表 2 为橡胶自密实混凝土多龄期抗压强度试验值与预测值,其中 f_{cc} 代表混凝土各龄期抗压强度, f_{cu1}' 、 f_{cu2}' 分别代表以橡胶、时间为变量的橡胶自密实混凝土预测公式。从试验结果整体可以看出,橡胶的掺入降低了混凝土强度,强度值随着橡胶掺量的增加而减小。相比基准试件,橡胶自密实混凝土 7 d 强度值最大降低了 22.0 MPa,28 d 强度值最大下降了 28.2 MPa,60 d 强度值最大下降了 37.3 MPa。90 d 的 RSCC-10-F、RSCC-20-L1 两组试件强度值分别为 48.0、46.8 MPa,对应同橡胶粒径、掺量、龄期 60 d 时强度值分别为 46.1、46.1 MPa,两对应组的强度差值不大,说明橡胶自密实混凝土 60 d 时强度值已趋于稳定。

表 2 橡胶自密实混凝土多龄期抗压强度试验值与预测值
Tab.2 Compressive strength test and predicted values of RSCC at different cuing ages

试验编号	7 d			28 d					60 d				
	$f_{cc}/$	$f_{cu1}'/$	$f_{cu1}'/$	$f_{cc}/$	$f_{cu1}'/$	$f_{cu2}'/$	$f_{cu1}'/$	$f_{cu2}'/$	$f_{cc}/$	$f_{cu1}'/$	$f_{cu2}'/$	$f_{cu1}'/$	$f_{cu2}'/$
	MPa	MPa	f_{cc}	MPa	MPa	MPa	f_{cc}	f_{cc}	MPa	MPa	MPa	f_{cc}	f_{cc}
SCC-0-0	44.7	44.7	1.00	52.2	52.2	54.1	1.00	1.04	61.1	61.1	59.5	1.00	0.97
RSCC-10-F	36.3	36.6	1.01	40.5	42.7	43.9	1.06	1.08	46.1	50.0	48.3	1.09	1.05
RSCC-20-F	28.6	30	1.05	34.9	35.0	34.6	1.00	0.99	39.7	41.0	38.0	1.03	0.96
RSCC-30-F	23.6	24.5	1.04	29.3	28.6	28.6	0.98	0.97	31.9	33.5	31.4	1.05	0.98
RSCC-40-F	19.3	20.1	1.04	24.0	23.5	23.4	0.98	0.97	23.8	27.5	25.7	1.15	1.08
RSCC-10-L1	37.9	38.9	1.03	49.3	45.4	45.9	0.92	0.93	51.5	53.1	50.4	1.03	0.98
RSCC-20-L1	32.3	33.8	1.05	42.9	39.5	39.1	0.92	0.91	46.1	46.2	43.0	1.00	0.93
RSCC-30-L1	27.8	29.4	1.06	37.8	34.3	33.6	0.91	0.89	41.3	40.1	37.0	0.97	0.90
RSCC-40-L1	25.2	25.5	1.01	30.3	29.8	30.5	0.98	1.01	33.3	34.9	33.5	1.05	1.01
RSCC-10-L2	37.8	38.1	1.01	42.8	44.5	45.7	1.04	1.07	47.5	52.1	50.3	1.10	1.06
RSCC-20-L2	32.5	32.5	1.00	39.2	37.9	39.3	0.97	1.00	44.7	44.4	43.2	0.99	0.97
RSCC-30-L2	26.5	27.7	1.04	36.7	32.3	32.1	0.88	0.87	39.5	37.8	35.2	0.96	0.89
RSCC-40-L2	22.7	23.6	1.04	29.9	27.5	27.5	0.92	0.92	30.3	32.2	30.2	1.06	1.00

2.2.1 橡胶掺量对各龄期橡胶自密实混凝土抗压强度的影响分析

不同橡胶掺量的橡胶自密实混凝土 7 d 强度如图 1(a) 所示。掺入橡胶粉, 橡胶掺量 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土强度相对橡胶零掺量自密实混凝土分别下降 18.8%、36.0%、47.2%、56.8%。掺入 1~2 mm 橡胶颗粒, 掺量 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土强度相对橡胶零掺量自密实混凝土分别下降了 15.2%、27.7%、37.8%、43.6%。掺入 2~4 mm 橡胶颗粒, 掺量 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土强度相对橡胶零掺量自密实混凝土分别下降了 15.4%、27.3%、40.7%、49.2%。橡胶自密实混凝土 7 d 龄期强度, 橡胶掺量越多强度越小; 随掺量的增加, 掺橡胶粉的强度值下降更快。

不同橡胶掺量的橡胶自密实混凝土 28 d 强度如图 1(b) 所示。掺入橡胶粉, 橡胶掺量 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土强度相对橡胶零掺量自密实混凝土分别下降 22.4%、33.1%、43.9%、44.0%。掺入 1~2 mm 橡胶颗粒, 掺量 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土强度相

对橡胶零掺量自密实混凝土分别下降了 5.6%、17.8%、37.6%、42.0%。掺入 2~4 mm 橡胶颗粒, 掺量 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土强度相对橡胶零掺量自密实混凝土分别下降了 18.0%、24.9%、29.7%、42.7%。橡胶自密实混凝土 28 d 龄期强度, 橡胶掺量越多强度越小; 橡胶掺量 10%、20%, 掺 1~2 mm 橡胶颗粒的强度值下降相对要小些。

不同橡胶掺量的橡胶自密实混凝土 60 d 强度如图 1(c) 所示。掺入橡胶粉, 橡胶掺量 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土强度相对橡胶零掺量自密实混凝土分别下降 24.5%、35.0%、47.8%、61.0%。掺入 1~2 mm 橡胶颗粒, 掺量 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土强度相对橡胶零掺量自密实混凝土分别下降了 15.7%、24.5%、32.4%、45.5%。掺入 2~4 mm 橡胶颗粒, 掺量 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土强度相对橡胶零掺量自密实混凝土分别下降了 22.3%、26.8%、35.4%、50.4%。橡胶自密实混凝土 60 d 龄期强度, 橡胶掺量越多强度越小。

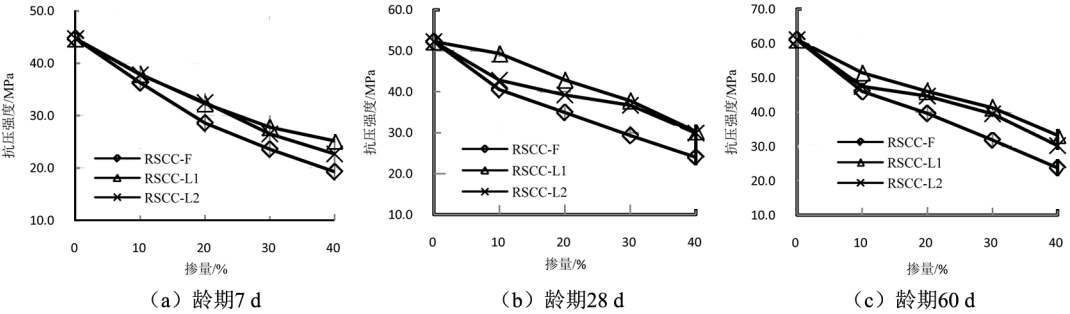


图 1 各龄期掺不同橡胶掺量强度曲线
Fig.1 Compressive strength of RSCC with different rubber dosage at different curing ages

2.2.2 橡胶粒径对各龄期橡胶自密实混凝土抗压强度的影响分析

橡胶粒径对橡胶自密实混凝土 7 d 强度的影响如图 2(a) 所示。橡胶掺量为 10% 时, 掺入不同橡胶粒径的强度值较为接近, 橡胶粒径大小对强度影响不大。橡胶掺量为 20% 时, 掺入橡胶颗粒的强度值较为接近, 但掺橡胶粉的强度值下降较为明显。橡胶掺量为 30% 时, 掺橡胶颗粒 1~2 mm 的强度值略高于掺入橡胶颗粒 2~4 mm, 掺橡胶颗粒的强度高于掺橡胶粉。橡胶掺量达 40% 时, 掺橡胶颗粒 1~2 mm 的强度高于掺橡胶颗粒

2~4 mm。综上, 掺入两种橡胶颗粒的橡胶自密实混凝土在同掺量下, 强度值较为接近, 掺橡胶粉的强度相对均较低。

橡胶粒径对橡胶自密实混凝土 28 d 强度的影响如图 2(b)。橡胶掺量 10%、20%, 掺 1~2 mm 橡胶颗粒的强度较明显高于掺 2~4 mm 橡胶颗粒, 掺橡胶粉的强度最小。橡胶掺量 30%、40%, 掺 2~4 mm 橡胶颗粒的强度值较接近掺 1~2 mm 橡胶颗粒的强度值, 掺橡胶粉的强度值与掺橡胶颗粒的强度差值较大。同掺量下掺入橡胶粉的强度均小于掺入橡胶颗粒的强度, 掺入 1~2 mm 橡

胶颗粒的抗压强度值最大,特别在掺量 10%、20% 时要明显高于其它两种橡胶类型。

橡胶粒径对橡胶自密实混凝土 60 d 强度的影响如图 2(c)。橡胶掺量 10%,掺 1~2 mm 橡胶颗粒的强度较明显高于掺 2~4 mm 橡胶颗粒。橡

胶掺量 20%、30%、40%,掺 2~4 mm 橡胶颗粒的强度值较接近掺 1~2 mm 橡胶颗粒的强度值。不同橡胶掺量,掺橡胶粉的强度值最小,与掺橡胶颗粒的强度差值较大。

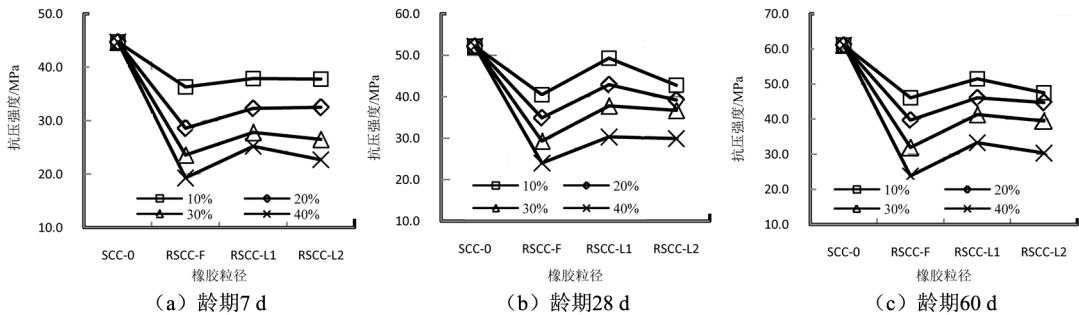


图 2 各龄期掺不同橡胶粒径强度曲线
Fig.2 Compressive strength of RSCC with different particle size at different curing ages

3 预测橡胶自密实混凝土抗压强度经验公式

3.1 以橡胶粒径、掺量为变量的抗压强度预测经验公式

通过试验获得了不同橡胶粒径、掺量的橡胶自密实混凝土抗压强度试验数据,采用最小二乘法,回归分析橡胶粒径、橡胶掺量对橡胶自密实混凝土立方体抗压强度的预测公式,所得公式(1):

$$f_{cu1}^r = f_{cu} e^{\alpha \rho} \quad (1)$$

式中, f_{cu1}^r 是 RSCC 抗压强度; f_{cu} 是 SCC 抗压强度; ρ 是掺量; α 是影响系数, 1~2 mm 橡胶取 -1.4, 橡胶粉取 -2.0, 2~4 mm 橡胶取 -1.6; 通过预测公式(1) 计算所得的预测值与试验值的对比及比值如表 1, 预测值与试验值比值的均值为 1.01, 均方差为 0.05, 说明预测公式计算所得的预测值与试验结果相吻合较好。

3.2 7 d 龄期强度预测后期强度经验公式

掺入橡胶为 1~2 mm 粒径, 掺量分别为 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土, 28 d 强度值相对 7 d 分别增长 30.1%、32.8%、36.0%、20.2%, 60 d 强度值相对 7 d 强度分别增长了 35.9%、42.7%、48.6%、32.1%。掺入橡胶粉, 掺量分别为 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土, 28 d 龄期相比 7 d 龄期分别增长了 11.6%、22.0%、24.2%、24.4%, 60 d 强度值相对 7 d 强度分别增长了 27.0%、38.8%、35.2%、23.3%, 掺量

40% 的试件 28 d 强度已经趋于稳定。掺入橡胶为 2~4 mm 粒径, 掺量分别为 10%、20%、30%、40% 的橡胶自密实混凝土, 28 d 强度值相对 7 d 分别增长了 13.2%、20.6%、38.5%、31.7%, 60 d 强度值相对 7 d 强度分别增长了 25.7%、37.5%、49.1%、33.5%, 掺量 40% 的试件 28 d 强度已经趋于稳定。在试验所得橡胶自密实混凝土 7、28、60 d 强度的基础上, 采用最小二乘法, 回归分析橡胶自密混凝土后期 28、60 d 强度与早期 7 d 强度的预测公式, 所得公式(2):

$$f_{cu2}^r = \beta f_{cu,7}^r \quad (2)$$

式中, f_{cu2}^r 为 RSCC 抗压强度; β 是龄期影响系数, 28 d 取 1.21、60 d 取 1.33; $f_{cu,7}^r$ 为 RSCC 7 d 标准试件抗压强度。通过预测公式(2) 计算所得的预测值与试验值的对比及比值如表 1, 预测值与试验值比值的均值为 0.98, 均方差为 0.012, 说明预测公式计算所得的预测值与试验结果相吻合较好。

5 结论

1) 橡胶加入改变了自密实混凝土的内部结构, 在混凝土抗压破坏中起到一定的缓冲、承载作用, 改善了自密实混凝土脆性破坏, 抗压破坏形态中具有一定的塑性特性。

2) 掺不同橡胶粒径、掺量的橡胶自密实混凝土抗压强度均随橡胶掺量的增加而减小; 掺两种不同
(下转第 80 页)