

引用本文:王建超,李华钰,裘子铭.再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土力学性能研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(1):21-27.
WANG Jianchao, LI Huayu, QIU Ziming. Study on mechanical properties of recycled large aggregate-self-compacting mortar rock-filled concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 21-27.

DOI:10.19815/j.jace.2021.09124

再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土力学性能研究

王建超,李华钰,裘子铭

(沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:为研究再生大骨料粒径、原始强度和自密实砂浆强度对再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土力学性能的影响,采用压力机对 7 组不同再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土试块进行了一系列试验研究。结果表明:自密实砂浆能够充分填充更小骨料粒径构成的堆石体,骨料粒径由 100 mm 降至 60 mm 时,自密实砂浆仍可充分地填充堆石体,其立方体抗压强度仅下降 5.97%,而轴心抗压强度与劈裂抗拉强度的降幅均在可行范围内,侧面反映出自密实砂浆可填充再生大骨料堆石体且效果显著;在再生大骨料-自密实砂浆混凝土棱柱体轴心受压的应力-应变关系中,再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土的强度、静态弹性模量和峰值压应变均与骨料粒径、自密实砂浆强度和再生骨料原始强度呈正相关,再生骨料粒径的影响小于再生骨料原始强度和自密实砂浆强度的影响;通过拟合提出的再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土的强度计算公式和单轴受压多项式型本构模型、有理分式型本构模型计算结果与实测值吻合度良好。

关键词:再生混凝土;自密实砂浆;力学性能;试验研究;再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)01-0021-07

Study on mechanical properties of recycled large aggregate-self-compacting mortar rock-filled concrete

WANG Jianchao, LI Huayu, QIU Ziming

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the effects of the particle size of recycled large aggregate (RLA), the strength of RLA and the strength of self-compacting mortar (SCM) on the mechanical properties of recycled large aggregate-self-compacting mortar rock-filled concrete (RLA-SCMRFC), a series of experimental studies were carried out on 7 groups of different RLA-SCMRFC using a press. The results show that the SCM can fully fill the rockfill body composed of a smaller aggregate particle size. When the RLA particle size decreases from 100 mm to 60 mm, the SCM can still fill the rockfill fully, and its cube compressive strength only decreases by 5.97%, while the axial compressive strength and splitting tensile strength are both within a feasible range, which reflects that SCM can fill RLA and the effect is significant. In the stress-strain relationship of RLA-SCMRFC prism under axial compression, it is concluded that the strength, static elastic modulus and peak strain of RLA-SCMRFC are positively correlated with RLA particle size, strength of

收稿日期: 2021-09-21

基金项目: 辽宁省教育厅基金资助项目(LT2019011); 辽宁省科技厅基金资助项目(20180550696)

作者简介: 王建超(1981-),男,工学博士,副教授, E-mail: wangjianchao005@163.com。

SCM and strength of RLA, and the influence of RLA particle size is less than that of the RLA strength and SCM strength. The calculated value of the strength calculation formula and the uniaxial compression polynomial constitutive model and rational fraction constitutive model of RLA-SCMRFC proposed through fitting is in good agreement with the measured value.

Key words: recycled aggregate concrete; self-compacting mortar; mechanical property; test research; recycled large aggregate-self-compacting mortar rock-filled concrete

0 引 言

再生大骨料自密实混凝土(recycled large aggregate self-compacting concrete, RLA-SCMRFC)是基于堆石混凝土^[1-2]和再生混凝土基础之上发展出的一种新型混凝土,其保留了堆石混凝土的施工工艺,同时以废弃混凝土块体作为再生大骨料替代了堆石混凝土中的天然大粒径岩石。其施工过程主要为:将再生大骨料填入模板中,利用重力相互堆积形成堆石体,再倒入自密实混凝土,利用其高流动性填充再生大骨料堆石体之间的空隙,形成固结的混凝土结构^[3-8]。这种混凝土继承了堆石混凝土水泥用量小、水化热少、热变形小、无需振捣的优点^[1-9],又可以重新利用废弃混凝土,是建筑垃圾回收再利用的有效方法^[10-12]。

若使自密实混凝土有效填充到堆石体且保证堆石混凝土强度,自密实混凝土除了具有足够的流动性外,还要有足够的通过性能,以通过模具中的障碍孔隙而不失去均匀性^[13-14]。国内外学者进行的通过性试验表明通过障碍时的自密实混凝土会表现出明显的流动性下降和离析稳定性下降^[15-20]。这是由于自密实混凝土浆体在剪应力低于屈服应力时会保持静止,无法继续填充堆石体;自密实混凝土中的粗细集料颗粒在通过孔隙障碍时,停滞的颗粒连结而形成颗粒拱,进而发生堵塞。粗颗粒粒径与障碍间隙的关系对自密实混凝土的填充性能具有显著影响^[19-21]。对堆石体而言,其骨料间隙与大骨料粒径密切相关^[22],为保证堆石混凝土填充密实,通常令大骨料粒径在 100 mm 以上,限制了堆石混凝土的应用范围。一些学者为扩大其应用范围,使用了自

密实砂浆(self-compacting mortar, SCM)填充更小骨料粒径的堆石体^[21-24],对其填充性、力学性和耐久性等进行了研究,但以往的文献中未有对自密实砂浆填充再生大骨料堆石体的研究。

由于再生大骨料相比于天然大骨料具有更加粗糙的表面和更高的孔隙率^[25],用自密实砂浆填充再生大骨料堆石体时可能表现出更差的填充性。本文旨在通过对再生大骨料自密实砂浆堆石混凝土的力学性能研究,验证自密实砂浆填充再生大骨料堆石体的可行性,并对其强度、应力-应变关系提出预测模型,以拓展再生混凝土和堆石混凝土的应用范围。

1 试验概况

1.1 试验材料

水泥选用山水牌 P. O42.5 级水泥;粉煤灰为Ⅰ级粉煤灰;细骨料为Ⅱ区中砂,细度模数为 2.97;再生大骨料来源于沈阳建筑大学结构实验室的废弃试验梁,经过人工破碎、清洗和筛分筛选出粒径分别为(60±5) mm、(80±5) mm 和(100±5) mm 的块体。在水中浸泡 2 d 后于试件制作的 30 min 前从水池中取出,散去表面水分至饱和面干状态;减水剂为羧酸高效液体减水剂,减水效率为 46%,试验前与水混合后使用;水为普通自来水。

1.2 自密实砂浆配合比

本试验所用砂浆的强度等级为 M20、M30 和 M40,依据全计算配合比设计方法^[26-27],运用正交试验,配制出满足工作性能的自密实砂浆,各配合比见表 1。

1.3 试验分组

试验设计了 7 组不同的再生大骨料-自密实砂

表 1 自密实砂浆配合比

Table 1 Self-compacting mortar mix proportion

砂浆 标号	水胶比	砂率/%	减水剂 掺量/%	各材料用量/(kg·m ⁻³)					实测强度/ MPa
				水泥	砂	粉煤灰	减水剂	水	
M40	0.46	44	3	471.74	1 300	202.17	20.22	310	44.21
M30	0.54	44	2	453.70	1 300	194.44	12.96	350	36.54
M20	0.62	44	1	432.42	1 300	185.32	6.18	383	25.84

浆混凝土 RLA-SCMRFC 试块,其中再生大骨料粒径分别为(60±5) mm、(80±5) mm 及(100±5) mm,再生大骨料原始强度(与废弃混凝土试验梁同期浇筑的立方体抗压试验强度)分别为 35. 94、44. 79、51. 43 MPa,自密实砂浆强度分别为 25. 84、36. 54、44. 21 MPa。详细试件设计分组见表 2。

表 2 试验分组及结果
Table 2 Test groups and results

分组	再生骨料原始强度 $f_{cu,old}/\text{MPa}$	自密实砂浆立方体抗压强度 $f_{cu,SCM}/\text{MPa}$	再生骨料粒径 d/mm	立方体抗压强度 $f_{cu,rfc}/\text{MPa}$	轴心抗压强度 $f_{c,rfc}/\text{MPa}$	劈裂抗拉强度 $f_{t,rfc}/\text{MPa}$	$f_{c,rfc}/f_{cu,rfc}$	$f_{t,rfc}/f_{cu,rfc}$
L1	44. 79	44. 21	60±5	34. 17	23. 24	2. 28	0. 68	0. 066 7
L2	44. 79	44. 21	80±5	35. 66	23. 28	2. 40	0. 65	0. 067 3
L3	44. 79	44. 21	100±5	36. 34	25. 80	2. 50	0. 71	0. 068 8
L4	35. 94	44. 21	60±5	30. 21	19. 03	1. 87	0. 63	0. 061 9
L5	51. 43	44. 21	60±5	38. 20	25. 21	2. 71	0. 66	0. 070 9
L6	44. 79	25. 84	60±5	24. 57	16. 78	1. 37	0. 68	0. 055 8
L7	44. 79	36. 54	60±5	30. 69	20. 72	1. 83	0. 68	0. 059 6

1. 4 试件制备

由于再生大骨料的粒径大于规范^[12]中规定的标准试块的骨料最大粒径,故采用对大尺寸试件(尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm、300 mm×300 mm×600 mm)中心部位切割取芯的方式得到标准试块(尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm、150 mm×150 mm×300 mm),以避免试块截面差异过大导致的离散性。

试验所用试件采用普通型堆石混凝土施工工艺进行:将再生大骨料放入大尺寸模具中形成再生大骨料堆石体,同时控制单一再生骨料替代率 η 在 30%±1% 范围,避免再生骨料替代率对 RLA-SCMRFC 力学性能产生影响;再将制备好的自密实砂浆沿模具的一个角倒入,浇筑过程无需振捣,完全依靠自密实砂浆自身的流动性填满整个模具内;标准条件养护 28 d 后,将 300 mm×300 mm×300 mm 的立方体试件和 300 mm×300 mm×600 mm 的棱柱体试件取芯切割成 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试件和 150 mm×150 mm×300 mm 的棱柱体试件,并将小试件表面用水泥浆抹平。

1. 5 试验结果

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[28],使用沈阳建筑大学 5 000 kN 压力机进行立方体抗压试验、轴心抗压试验和劈裂抗拉试验,试验结果如表 2 所示。

2 结果分析

试件的立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度见图 1~3。由图 1~3 和表 2 可知:RLA-SCMRFC 立方体抗压强度、轴心抗压强度和劈裂抗拉均随再生骨料粒径减小而减小,但减小幅度不大,

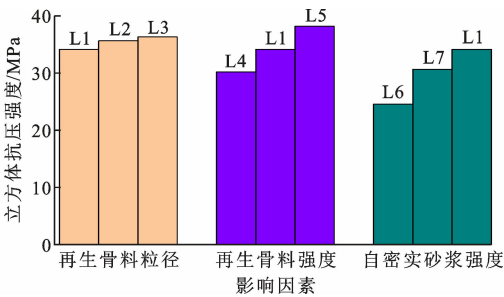


图 1 立方体抗压强度

Fig. 1 Cube compressive strength

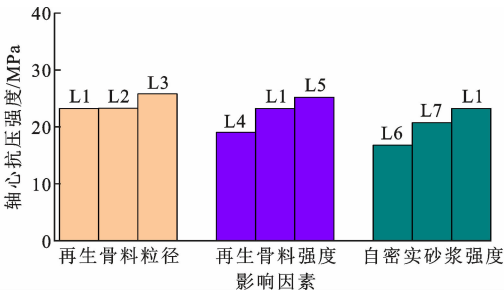


图 2 轴心抗压强度

Fig. 2 Axial compression strength

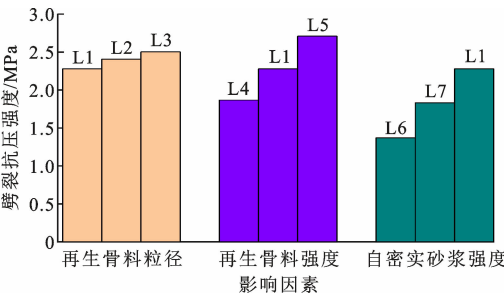


图 3 劈裂抗拉强度

Fig. 3 Splitting tensile strength

再生骨料粒径由 100 mm 减小到 80 mm 和 60 mm 时,立方体抗压强度仅降低 1. 87% 和 5. 97%,轴心

抗压强度均降低 10%，劈裂抗拉强度降低 4% 和 8.8%。说明自密实砂浆在填充更小粒径的再生大骨料堆石体时，虽然受到的黏滞阻力增大，通道直径变小，造成填充密实度降低，但强度降低幅度不大，说明用自密实砂浆填充再生大骨料堆石体是可行的。

RLA-SCMRFC 立方体抗压强度、轴心抗压强度和劈裂抗拉强度均随再生大骨料原始强度和自密实砂浆配置强度增大而增大，但自密实砂浆强度的影响更为显著。RLA-SCMRFC 轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值变化范围在 0.65~0.71 之间，这一值略小于普通混凝土；劈裂抗拉强度与立方体

抗压强度的比值变化范围在 0.055 8~0.070 9 之间，且 SCM 强度对其影响明显较大。

通过对试验数据进行拟合，得到立方体抗压强度和轴心抗压强度转换公式为

$$f_{c,rfc}=\alpha_1 f_{cu,rfc}$$

(1)

式中： α_1 为转换系数，对于再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土取 0.67。

立方体抗压强度和劈裂抗拉强度转换公式为

$$f_{t,rfc}=0.009\,1f_{cu,rfc}^{1.56}$$

(2)

表 3 给出了强度计算值及相对误差。由表 3 可知，相对误差均在合理范围内。

表 3 强度计算值及相对误差

Table 3 Calculation value of strength and relative error

分组	立方体抗压强度 $f_{cu,rfc}$			轴心抗压强度 $f_{c,rfc}$			劈裂抗拉强度 $f_{t,rfc}$		
	实测值/MPa	计算值/MPa	相对误差/%	实测值/MPa	计算值/MPa	相对误差/%	实测值/MPa	计算值/MPa	相对误差/%
L1	34.17	34.38	0.68	23.24	22.21	4.41	2.28	2.25	1.34
L2	35.66	35.49	0.65	23.28	23.18	0.43	2.40	2.40	0.13
L3	36.34	36.60	0.71	25.80	23.62	8.45	2.50	2.47	1.08
L4	30.21	31.56	0.63	19.03	19.64	3.17	1.87	1.85	0.66
L5	38.20	36.31	0.66	25.21	24.83	1.52	2.71	2.67	1.24
L6	24.57	24.95	0.68	16.78	15.97	4.82	1.37	1.34	1.93
L7	30.69	30.65	0.68	20.72	19.95	3.73	1.83	1.90	3.83

以 Wu 等^[29]提出的公式为基础，以表 2 试验数据为依据，对公式中相关系数进行修正，提出适用于再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土立方体抗压强度的计算公式，见式(3)。

$$f_{cu,rfc}=[(\frac{1.35f_{cu,old}}{f_{cu,SCM}})^{0.86\eta}\frac{f_{cu,SCM}}{1.35}(1-\eta)+(\frac{f_{cu,SCM}}{1.35f_{cu,old}})^{1.1\eta}f_{cu,old}\eta]K_a$$

(3)

$$K_a=0.001\,5d+0.839\,9$$

(4)

式中： K_a 为再生骨料粒径影响系数。

将实测值与式(3)计算值列于表 3 中，可以看出相对误差均在合理范围内，该公式精度较好。

3 单轴受压应力-应变曲线

图 4 为试验得到的再生大骨料-自密实砂浆混凝土棱柱体轴心受压应力-应变($\sigma-\epsilon$)曲线，因试验条件限制，仅取其上升阶段。可以看出，RLA-SCMRFC 的轴心受压性能与普通混凝土相似。加载初期和荷载达到极限荷载的 80% 之前，应力-应变曲线几乎处于线弹性阶段。这从侧面说明再生大骨料与自密实砂浆之间有良好的界面特性，并没有过早发生塑性变形。随着荷载的增加，当应力达到极限强度的 80%~100% 时，应力-应变曲线斜率开始变小，此时开始发生了塑性变形。从构件表面开始出

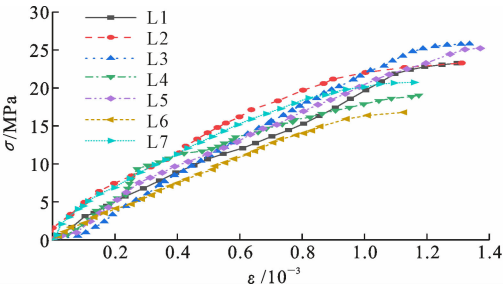


图 4 单轴受压应力-应变曲线

Fig. 4 Curves of uniaxial compression stress-strain

现了裂缝，并随着荷载的进一步增大，裂缝迅速扩展。随着荷载到达峰值应力，裂缝逐渐增多，直到构件发生破坏。

图 5 为试件的静态弹性模量。由图 5 可知：RLA-SCMRFC 的静态弹性模量随再生骨料粒径、再生骨料强度和自密实砂浆强度的增大而增大，其中再生骨料强度和自密实砂浆强度影响较大，再生骨料粒径影响较小。图 6 为试件的峰值压应变。由图 6 可知：峰值压应变随再生骨料粒径、再生骨料强度和自密实砂浆强度的增大而增大，但再生骨料粒径对其影响很小，再生骨料强度和自密实砂浆强度的影响较为明显。

对试验结果进行拟合，提出 RLA-SCMRFC 静态弹性模量 $E_{c,rfc}$ 计算公式为

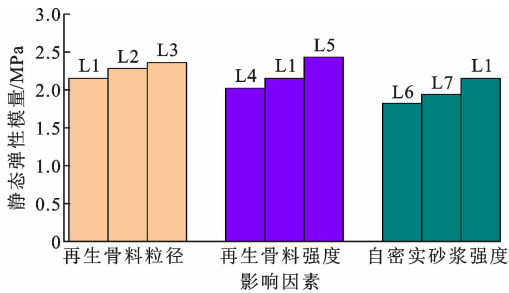


图 5 静态弹性模量

Fig. 5 Static elasticity modulus

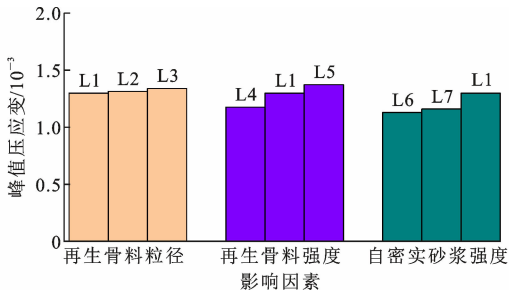


图 6 峰值压应变

Fig. 6 Peak compressive strain

$$E_{c,rfc} = \frac{10^5}{3.1 + 55/f_{cu,rfc}} \quad (5)$$

峰值压应变 $\epsilon_{p,rfc}$ 计算公式为

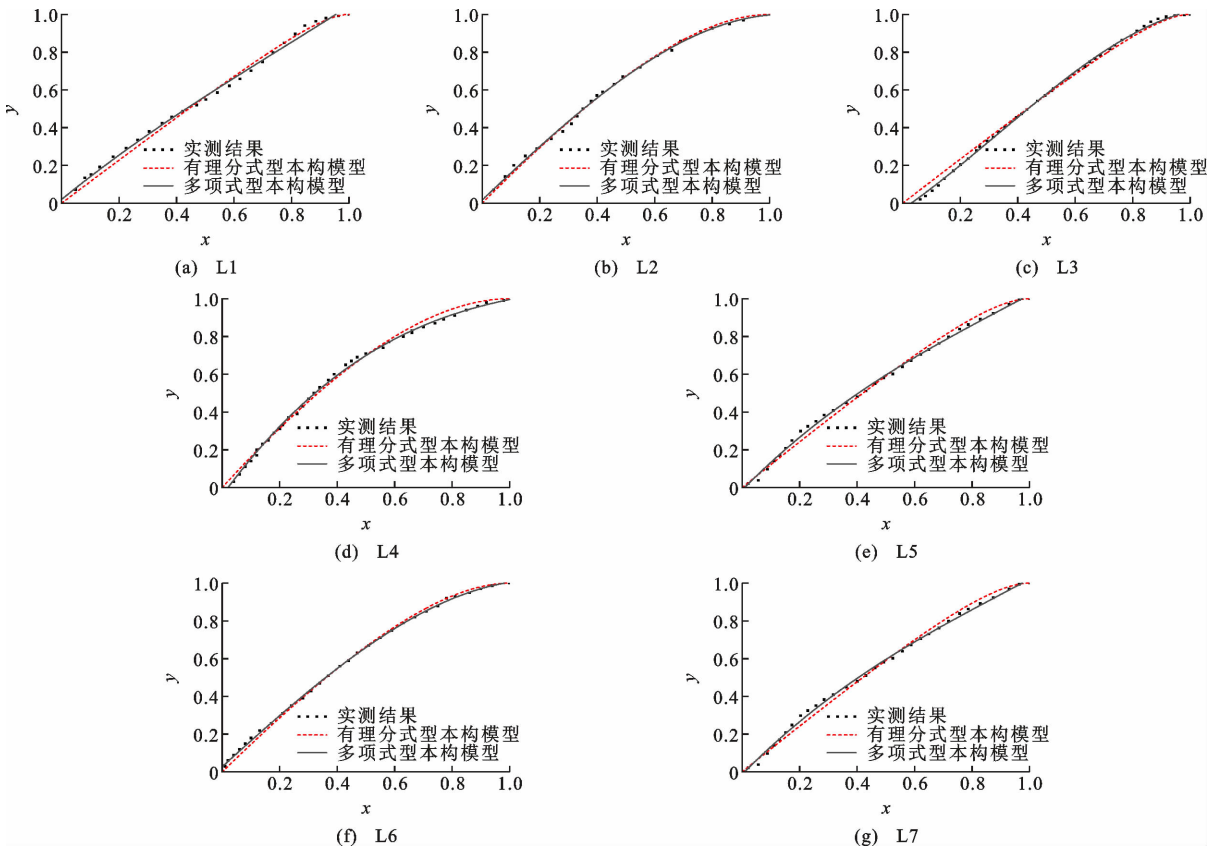


图 7 实测与计算应力-应变曲线

Fig. 7 Test and calculated stress-strain curves

$$\epsilon_{p,rfc} = 620 + 130\sqrt{f_{c,rfc}} \quad (6)$$

表 4 列出了静态弹性模量和峰值压应变实测值与计算值之间的相对误差。可以看出,最大相对误差为 9.98%,公式精度较高。

表 4 静态弹性模量和峰值压应变

Table 4 Static elasticity modulus and peak compressive strain

分组	静态弹性模量 $E_{c,rfc}$			峰值压应变 $\epsilon_{p,rfc}$		
	实测值/ GPa	计算值/ GPa	相对误差/%	实测值/ 10^{-6}	计算值/ 10^{-6}	相对误差/%
L1	21.523	21.233	1.35	1 297	1 262	2.69
L2	22.842	21.412	6.26	1 312	1 263	3.76
L3	23.587	21.547	8.65	1 337	1 297	3.02
L4	20.234	20.187	0.23	1 174	1 201	-2.32
L5	24.329	21.901	9.98	1 371	1 289	5.99
L6	18.240	18.590	-1.92	1 128	1 197	-6.15
L7	19.421	20.306	-4.56	1 158	1 196	-3.32

对单轴受压应力-应变曲线横、纵坐标进行量纲一化处理,以 $x = \epsilon/\epsilon_{p,rfc}$ 和 $y = \sigma/f_{c,rfc}$ 为横、纵坐标,绘制出各组构件轴心受压的归一化应力-应变曲线(图 7)。

基于江见鲸等^[30]提出的多项式型本构模型,对

原式中的系数进行修正,得出再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土单轴受压本构模型,表达式见式(7)。

$$y=ax^3+bx^3+cx \quad (7)$$

$$b=-1.590\ 3a-0.479\ 8 \quad (8)$$

$$c=0.600\ 8a+1.512\ 5 \quad (9)$$

$$a=[(0.041\ 5f_{cu,SCM}-1.731\ 8)(-0.021\ 4d+1.415\ 6)(0.002\ 1f_{cu,old}^2-0.018\ 6f_{cu,old}+4.297)+10.435]/0.826\ 5 \quad (10)$$

基于欧盟 CEB-FIP MC90 规范提出的有理分式型本构模型,对原式中相关系数进行修正,得出再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土单轴受压本构模型,表达式见式(11)。

$$y=\frac{Kx-x^2}{1+(K-2)x} \quad (11)$$

$$K=[-0.006\ 4f_{cu,SCM}+1.547\ 2)(0.000\ 3d+1.261\ 6)(-0.032f_{cu,old}+2.784\ 3)-1.269\ 3]/0.705\ 4 \quad (12)$$

从图 7 可以看出,多项式型本构模型和有理分式型本构模型得到的结果都可以很好地与实测结果相吻合。

4 结 语

(1) RLA-SCMRFC 的抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量和峰值应变分别随着再生骨料粒径、再生骨料强度以及自密实砂浆强度的增大而增大。RLA-SCMRFC 轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值变化范围在 0.65~0.71 之间,略小于普通混凝土。劈裂抗拉强度与立方体抗压强度比值同普通混凝土近似。

(2) 各种工况下试件的应力-应变曲线发展规律同普通混凝土大致相同,破坏形态也同普通混凝土类似,通过对试验数据的拟合,得到多项式型本构模型和有理分式型本构模型,两者都可以很好地与试验值相吻合。

(3) 自密实砂浆能够充分填充更小骨料粒径构成的堆石体,用自密实砂浆替代自密实混凝土填充堆石体是可行的。

参考文献:

References:

[1] 金 峰,安雪晖,石建军,等.堆石混凝土及堆石混凝土大坝[J].水利学报,2005,36(11):1347-1352.
JIN Feng, AN Xuehui, SHI Jianjun, et al. Study on rock-fill concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11): 1347-1352.

[2] 吕 森,安雪晖,李鹏飞,等.自密实混凝土全过程智能生产研究进展[J].清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(8): 1270-1280.
LÜ Miao, AN Xuehui, LI Pengfei, et al. Review of smart production techniques for the entire self-compacting concrete production process[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(8): 1270-1280.

[3] OKAMURA H. Self-compacting high-performance concrete[J]. Concrete International, 1997, 19(7): 50-54.

[4] GOODIER C I. Development of self-compacting concrete[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings, 2003, 156(4): 405-414.

[5] 赵 筠. 自密实混凝土的研究和应用[J]. 混凝土, 2003(6): 9-17.
ZHAO Jun. The research and application of self-compacting concrete[J]. Concrete, 2003(6): 9-17.

[6] OKAMURA H, OUCHI M. Self-compacting concrete [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(1): 5-15.

[7] 王国清,程利平. 自密实混凝土的发展历史和研究现状[J]. 中国水运(下半月刊), 2011, 11(1): 240, 243.
WANG Guoqing, CHENG Liping. Development history and research status of self-compacting concrete[J]. China Water Transport, 2011, 11(1): 240, 243.

[8] 庞超明,秦鸿根,何宏荣,等. 影响自密实混凝土性能的因素探讨[J]. 商品混凝土, 2005(6): 11-14, 5.
PANG Chaoming, QIN Honggen, HE Hongrong, et al. Discussion on the factors affecting the performance of self-compacting concrete [J]. Ready-mixed Concrete, 2005(6): 11-14, 5.

[9] 何世钦,陈 宸,周 虎,等. 堆石混凝土综合性能的研究现状[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 10-18.
HE Shiqin, CHEN Chen, ZHOU Hu, et al. Current research on comprehensive properties of rock filled concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 10-18.

[10] 张晓芳. 再生大骨料自密实混凝土力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
ZHANG Xiaofang. Study on mechanical properties of recycled large aggregate self-compacting concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.

[11] 王海超,孙利敏. 再生大骨料自密实堆石混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2013(8): 137-139.
WANG Haichao, SUN Limin. Study on the mechanical behavior of big recycled aggregates fill concrete

- [J]. Concrete, 2013(8):137-139.
- [12] POON C S, CHAN D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(3):293-305.
- [13] 安雪晖, 金 峰, 石建军. 自密实混凝土充填堆石体试验研究[J]. 混凝土, 2005(1):3-6, 42.
AN Xuehui, JIN Feng, SHI Jianjun. Experimental study of self-compacting concrete filled prepacked rock[J]. Concrete, 2005(1):3-6, 42.
- [14] 谢越韬. 自密实混凝土填充性能及堆石混凝土界面微观特性研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
XIE Yuetao. Experimental study on the filling capacity of SCC and the microscopic properties of the interfaces in RFC[D]. Beijing:Tsinghua University, 2014.
- [15] CHEVOIR F, GAULARD F, ROUSSEL N. Flow and jamming of granular mixtures through obstacles[J]. Europhysics Letters, 2007, 79(1):14001.
- [16] ROUSSEL N. Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes[J]. Materials and Structures, 2007, 40(10):1001-1012.
- [17] ROUSSEL N, STEFANI C, LEROY R. From mini-cone test to abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(5):817-822.
- [18] ROUSSEL N, COUSSOT P. "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: from slump to spreading flow[J]. Journal of Rheology, 2005, 49(3):705-718.
- [19] ROUSSEL N, NGUYEN T L H, YAZOGLI O, et al. Passing ability of fresh concrete: a probabilistic approach[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(3):227-232.
- [20] NG I Y T, WONG H H C, KWAN A K H. Passing ability and segregation stability of self-consolidating concrete with different aggregate proportions [J]. Magazine of Concrete Research, 2006, 58(7):447-457.
- [21] XIE Y T, CORR D J, CHAUCHE M, et al. Experimental study of filling capacity of self-compacting concrete and its influence on the properties of rock-filled concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56:121-128.
- [22] BRYANT S L, KING P R, MELLOR D W. Network model evaluation of permeability and spatial correlation in a real random sphere packing[J]. Transport in Porous Media, 1993, 11(1):53-70.
- [23] 袁金艳. 自密实砂浆堆石混凝土性能研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014.
YUAN Jinyan. Research on the self-compacting mortar filling rock-fill concrete[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [24] 武海勇. 自密实砂浆充填堆石混凝土试验研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014.
WU Haiyong. Experimental study on self-compacting mortar filling rock-fill concrete [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [25] 肖建庄, 李佳彬, 兰 阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003(10):17-20, 57.
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete — a review[J]. Concrete, 2003(10):17-20, 57.
- [26] 张云国, 李梦楠, 薛向锋. 自密实砂浆配合比设计及其工作性能[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(3):60-64.
ZHANG Yunguo, LI Mengnan, XUE Xiangfeng. Design method and workability study of self-compacting mortar[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(3):60-64.
- [27] 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
Standard for test method of basic properties of construction mortar: JGJ/T 70—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [28] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [29] WU B, ZHANG S Y, YANG Y. Compressive behaviors of cubes and cylinders made of normal-strength demolished concrete blocks and high-strength fresh concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78:342-353.
- [30] 江见鲸, 李 杰, 金伟良. 高等混凝土结构理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
JIANG Jianjing, LI Jie, JIN Weiliang. Advanced theory of concrete structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.