

文章编号:1007-9629(2022)08-0789-09

钢纤维橡胶混凝土的循环受压应力-应变关系

赵秋红^{1,2,*}, 董 硕¹, 朱 涵^{1,2}, 于 泳³

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350; 3. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要:采用等强配合比优化设计来制备橡胶掺量 0%~20.0%、钢纤维掺量 0%~1.5% 的 12 组钢纤维橡胶混凝土(SFR-RuC)试件,并且通过单轴循环受压应力-应变全曲线试验分析其循环受压力学性能.结果表明:配合比优化设计后,在橡胶掺量为 20.0% 时可以得到与普通 C60 混凝土基本等强的 SFR-RuC;与普通混凝土、橡胶混凝土及钢纤维混凝土相比,SFR-RuC 的循环受压力学性能更优,破坏呈明显延性特征,延性和韧性更高,滞回耗能能力更强,塑性应变累积和刚度退化更缓慢;综合考虑橡胶及钢纤维掺量的影响,在试验数据基础上提出的 SFR-RuC 单轴循环受压应力-应变关系模型,可以为 SFR-RuC 结构的设计分析提供一定的理论基础.

关键词:橡胶混凝土;钢纤维;等强度设计;循环受压应力-应变关系;破坏机理

中图分类号:TU528.31;TU528.572 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2022.08.004

Stress-Strain Relations of Steel Fiber Reinforced Rubberized Concrete under Uniaxial Cyclic Compression

ZHAO Qiuhong^{1,2,*}, DONG Shuo¹, ZHU Han^{1,2}, YU Yong³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coastal Civil Structure and Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: Twelve groups of steel fiber reinforced rubberized concrete (SFR-RuC) with crumb rubber content ranging from 0%–20.0% and steel fiber content ranging from 0%–1.5% were prepared by optimizing the mixture design at equal strength, and uniaxial cyclic compression tests were performed to investigate their cyclic mechanical behavior. The results show that SFR-RuC with 20.0% rubber particles can be obtained with the similar strength to normal concrete C60 by optimizing the mixture design. Compared with specimens of normal concrete, rubber concrete and steel fiber reinforced concrete, the SFR-RuC specimens show good mechanical properties under uniaxial cyclic compression, and the failure mode of SFR-RuC specimens is ductile. The ductility, toughness and dissipated energy of SFR-RuC specimens are obviously enhanced, while the plastic strain accumulation and stiffness degradation become slower. Based on experimental data and comprehensively considering the influence of crumb rubber and steel fibers, a constitutive model is proposed to generalize the stress-strain response of SFR-RuC under uniaxial cyclic compression, which can provide some theoretical background for the design and analysis of SFR-RuC structure.

Key words: rubber concrete; steel fiber; equal strength design; cyclic stress-strain relation; failure mechanism

将橡胶和钢纤维共同掺入混凝土中来制备钢纤维橡胶混凝土(SFR-RuC),具有良好的延性、韧性、抗裂性和耐损伤能力^[1-7].Karimipour等^[3]发现与橡胶混凝土相比,SFR-RuC的抗压、劈裂抗拉及抗弯强度

收稿日期:2021-06-01; 修订日期:2021-08-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678406, 51878447, 51378340, 51708314)

第一作者(通讯作者):赵秋红(1975—),女,湖北宜昌人,天津大学特聘研究员,博士生导师,博士.E-mail: qzhao@tju.edu.cn

均有显著提高。Li等^[4]和Noaman等^[5]发现,受压时SFR-RuC中钢纤维的桥联拉结及橡胶的增韧抗裂作用能够得到充分发挥,显著提高混凝土的抗压韧性。Fu等^[6]研究了SFR-RuC的断裂韧性,发现橡胶和钢纤维分别在初始裂缝和不稳定裂缝发展阶段起作用,协同增强其断裂韧性。但是,橡胶颗粒的掺入导致SFR-RuC的抗压强度显著降低^[7]。因此,为了将SFR-RuC更广泛地应用于结构工程中,有必要对其抗压强度进行优化控制。

混凝土的循环力学行为对其结构抗震性研究具有重要意义。普通混凝土^[8-9]和纤维混凝土^[10-13]的单轴受压循环力学行为已经得到了研究,并建立了相应的循环本构关系模型,对于SFR-RuC单轴循环受压力学行为的研究则尚未见报道。

本文通过配合比优化设计来制备与普通C60混凝土等强的SFR-RuC,并对不同橡胶及钢纤维掺量的SFR-RuC试件进行单轴循环受压应力-应变全曲线试验,分析橡胶及钢纤维对其循环受压力学性能的影响,建立SFR-RuC单轴循环受压应力-应变关系模型,为其在结构工程的应用提供一定的理论基础。

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为P·O 42.5普通硅酸盐水泥;粗骨料(CA)为粒径5~20 mm的连续级配碎石;细骨料(FA)为细度模数2.64的连续级配中砂;外加剂(SP)为减水率(质量分数)25%~35%的聚羧酸高性能减

水剂;钢纤维(SF)采用端钩型钢纤维,长30 mm,等效直径0.75 mm,长径比40,平均抗拉强度不低于1 000 MPa;拌和水(W)为自来水;橡胶颗粒(R)由废旧轮胎经过机械破碎、筛分、清洗、除尘等流程制得,粒度1.00 mm,密度为1 050 kg/m³。

1.2 试件设计

为研究SFR-RuC单轴循环受压应力-应变全过程的力学行为,本文以橡胶颗粒和钢纤维掺量为变量,设计了12组试件。其中,钢纤维掺量 V_f (体积分数,下同)分别为0%、0.5%、1.0%、1.5%,橡胶颗粒掺量 ρ_r (体积分数,等体积替代砂)分别为0%、5.0%、10.0%、15.0%、20.0%。首先,设计强度等级为C60的普通混凝土(NC)试件;然后,加入预定掺量的橡胶颗粒,以轴心抗压强度达到40~50 MPa为目标,通过降低水胶比来进行配合比优化设计,得到等强橡胶混凝土(RuC)试件;最后,加入预定掺量的钢纤维,得到SFR-RuC试件。混凝土配合比及主要性能见表1。其中,R代表橡胶,F代表钢纤维,之后数字代表相应的掺量,如R10F1代表掺加10.0%橡胶颗粒、1.0%钢纤维的钢纤维橡胶混凝土, ϵ_c 为峰值应变, E_c 为弹性模量。由于钢纤维长度在40 mm以内,按照CECS 13—2009《纤维混凝土试验方法标准》,可采用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件以及尺寸为100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体试件,并考虑尺寸效应乘以强度转换系数0.90。每组配合比均制作9个试件,其中3个立方体试件用于测量抗压强度(f_c),3个棱柱体试件用于测量轴心抗压强度(f_{cu})以确定预加载标准,另外3个

表1 混凝土的配合比及主要性能
Table 1 Mix proportions and main properties of concretes

Specimen No.	m_w/m_b	Mix proportion/(kg·m ⁻³)							f_{cu} /MPa	f_c /MPa	ϵ_c /(mm·m ⁻¹)	E_c /GPa
		SF	R	W	C	FA	CA	SP				
NC	0.340	0	0	160.00	470.00	820.00	960.00	4.70	68.7	48.7	1.9	38.7
R10F0	0.285	0	34.17	155.00	544.00	738.00	960.00	5.40	68.2	48.3	2.2	35.8
R20F0	0.245	0	68.33	145.00	593.00	656.00	960.00	5.90	65.7	47.3	2.5	34.9
R0F05	0.340	39.25	0	160.00	470.00	820.00	960.00	4.70	72.1	50.9	2.0	39.9
R0F1	0.340	78.50	0	160.00	470.00	820.00	960.00	4.70	75.1	53.6	2.2	42.5
R0F15	0.340	117.75	0	160.00	470.00	820.00	960.00	4.70	78.9	57.3	2.3	45.3
R5F1	0.325	78.50	17.08	156.00	480.00	779.00	960.00	4.80	75.8	53.8	2.3	41.3
R10F05	0.285	39.25	34.17	155.00	544.00	738.00	960.00	5.40	71.6	50.7	2.3	40.1
R10F1	0.285	78.50	34.17	155.00	544.00	738.00	960.00	5.40	74.7	53.2	2.5	40.2
R10F15	0.285	117.25	34.17	155.00	544.00	738.00	960.00	5.40	77.7	56.2	2.6	43.7
R15F1	0.270	78.50	51.25	155.00	575.00	697.00	960.00	5.80	76.1	51.5	2.6	39.8
R20F1	0.245	78.50	68.33	145.00	593.00	656.00	960.00	5.90	70.6	49.3	2.8	39.2

棱柱体试件用于测量单轴循环受压应力-应变(σ - ϵ)曲线。

1.3 试验加载装置及测点布置

采用 YAW-5000A 型微机控制电液伺服压力机(可施加最大荷载为 5 000 kN)对棱柱体试件施加循环轴压荷载,可实现精度为 1% 的闭环控制加载,内置 Wintest 数据采集系统以获得试件所受轴压荷载;试件中部安装 WTB-100 型引伸计,量测标距为 100 mm,精度为 1/1 000 000,外接静态数据采集系

统以获得试件的压应变;为保证数据的同步检测,将 2 个数据采集系统的采集频率调整为一致,并在加载板下对称设置 2 个精度为 0.01 mm 的位移计,以监测轴向位移,如图 1 所示。首先对试件预加载至同组试件轴心抗压强度的 10%,然后开始循环加载试验。试验加载采用位移控制模式,加载速率为 0.005 mm/s,每级位移增量为 0.24 mm,应变增量 $\Delta\epsilon = 0.8 \times 10^{-3}$;卸载采用力控制模式,加载速率为 10 kN/s^[9]。

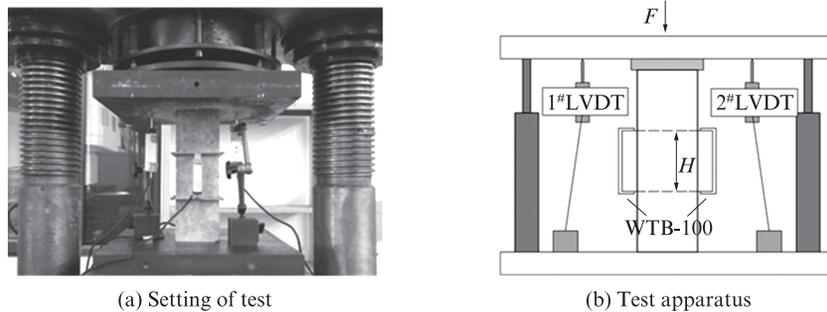


图 1 试验加载及测量装置
Fig. 1 Test setup and instrumentation

2 结果及分析

2.1 循环受压全过程及破坏形态

图 2 为 SFR-RuC 试件单轴循环受压全过程。由图 2 可见,SFR-RuC 试件单轴循环受压曲线包括 6 个特征阶段及其他加卸载阶段,各阶段曲线特征及裂缝发展如下:

(1)弹性阶段 *OA*. 曲线呈线性,骨料、水泥基体及橡胶颗粒受压产生弹性变形,试件基本无裂缝。

(2)细观裂缝扩展阶段 *AB*. 曲线开始呈非线性,水泥基体在粗骨料周围形成初始裂缝,并发展成微裂缝。橡胶颗粒强度较低,周围易形成薄弱带,微裂缝开展更为细密,并对其起到一定阻裂作用。钢纤维的约束作用尚未开展,十分有限。

(3)宏观裂缝扩展阶段 *BC*. 曲线呈明显非线性直至峰值点,在循环压力作用下,部分微裂缝连通形成宏观裂缝,试件横向变形发展速率明显增大,表面出现肉眼可见的竖向短裂缝。横跨宏观裂缝的钢纤维开始拉结并约束裂缝的开展,峰值应变显著增大。橡胶颗粒导致基体内部裂缝更为细密,形成多缝开裂,使得更多钢纤维横跨宏观裂缝,有效拉结裂缝及约束其开展。

(4)断裂发生阶段 *CD*. 曲线开始下降,*D*点应力约为峰值应力的 90%。宏观裂缝进一步扩展延伸,试

件表面出现多条不连续竖向短裂缝,沿对角线平行分布,交结形成主裂缝。钢纤维进一步有效约束宏观裂缝的发展和延伸。

(5)持续破坏阶段 *DE*. 曲线持续下降,*E*点应力约为峰值应力的 60%~75%。主裂缝逐渐联结,斜向扩展成为斜裂面。斜裂面的抗剪及变形能力主要由钢纤维提供。

(6)收敛阶段 *EF*. 曲线下降趋于平缓,斜裂面持续变宽,发展延伸形成裂缝破坏带。在循环压力作用下,斜裂面上的混凝土受到挤压而剥落,拉结的钢纤维逐渐被拔出并发出声响。

(7)卸载阶段 *GH*. 曲线下降至零,横跨主裂缝的钢纤维拉应力降低,弹性变形恢复,裂缝宽度减小。

(8)再加载第 1 阶段 *HI*. 曲线再次上升至卸载时的应变,但无法达到卸载时的应力,裂缝宽度基本与卸载时相同。再加载第 2 阶段 *IJ*,曲线继续发展至下一级卸载应变,裂缝宽度增加且数量增多。

图 3 为 SFR-RuC 试件断裂面的微观形态。由图 3 可见:橡胶颗粒与水泥基体之间存在明显的裂隙,界面过渡区的水化产物较少,其黏结及密实度较差,存在较大空隙,形成基体内的受力薄弱区,为多缝开裂的产生提供了条件;钢纤维与基体的裂隙细小,黏结密实度较高,使其在裂缝开展时能够更好地起到拉结作用。

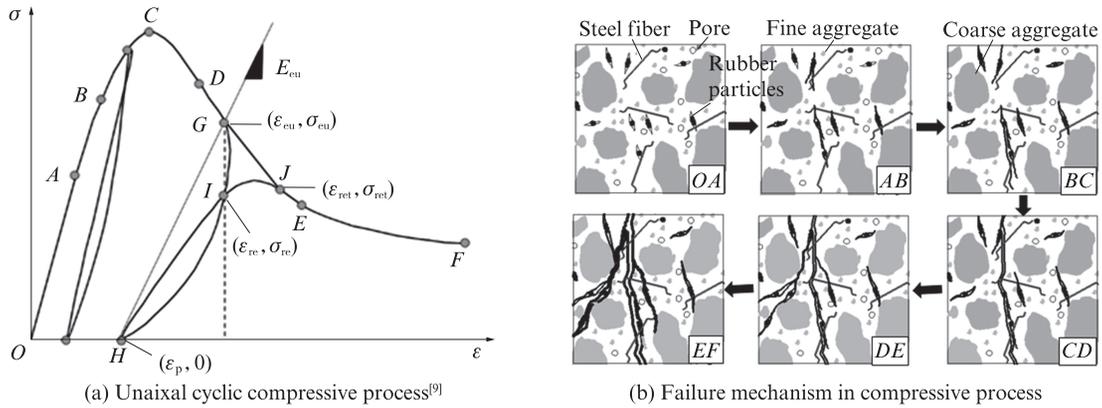


图 2 SFR-RuC 试件单轴循环受压全过程
Fig. 2 Uniaxial cyclic compressive process of SFR-RuC specimen

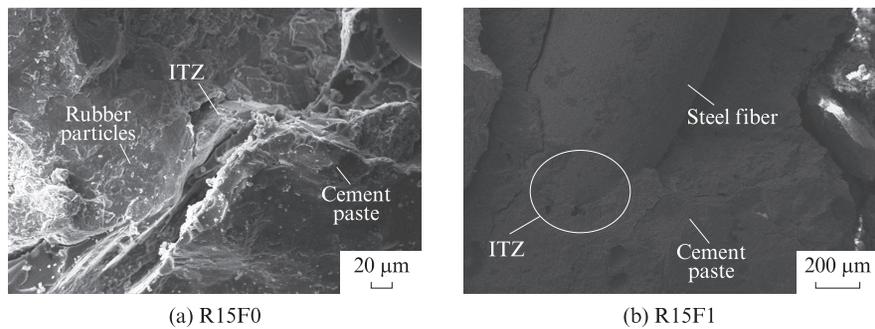


图 3 SFR-RuC 试件断面的微观形态
Fig. 3 Micro morphology of fracture surface of SFR-RuC specimens

图 4 为 12 组试件的循环受压破坏形态. 由图 4 可见:

(1)普通混凝土试件呈现明显的脆性破坏特征, 裂缝穿过粗骨料形成断裂面, 完全破碎; 橡胶混凝土试件破坏形态较为完整, 裂缝从加载端附近往下扩展汇聚成主裂缝; 橡胶掺量越大, 裂缝越细密, 分布越均匀; 钢纤维混凝土试件表面有明显的斜向裂缝带, 纤维掺量增加时裂缝宽度减小.

(2)当 SFR-RuC 试件的橡胶掺量在 10.0% 以下时, 表面也形成斜向裂缝带, 与钢纤维混凝土试件相比, 其裂缝更细密, 分布更均匀; 当橡胶掺量大于

10.0% 时, SFR-RuC 试件表面出现细密裂缝, 与橡胶混凝土试件更为相似.

2.2 循环受压应力-应变全曲线

图 5 为试件的单轴循环受压应力-应变全曲线. 由图 5 可见: 橡胶和钢纤维的掺入对混凝土的单轴循环受压力学行为, 尤其是后期循环的影响明显, 显著增加了试件的延性及耗能能力; 与普通混凝土、橡胶混凝土及钢纤维混凝土试件相比, 在橡胶自身耗能阻裂机制和钢纤维拉结耗能机制的共同作用下, SFR-RuC 试件的塑性变形及延性更高, 滞回环面积明显增加.

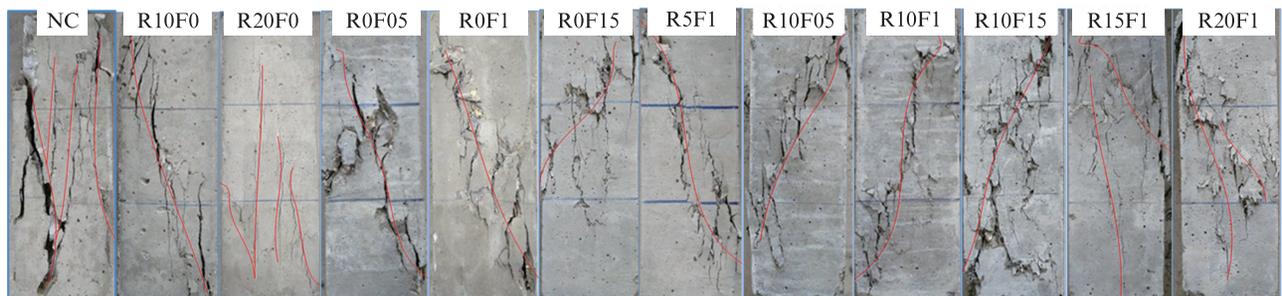


图 4 12 组试件的循环受压破坏形态
Fig. 4 Cyclic compressive failure modes of twelve groups of specimen

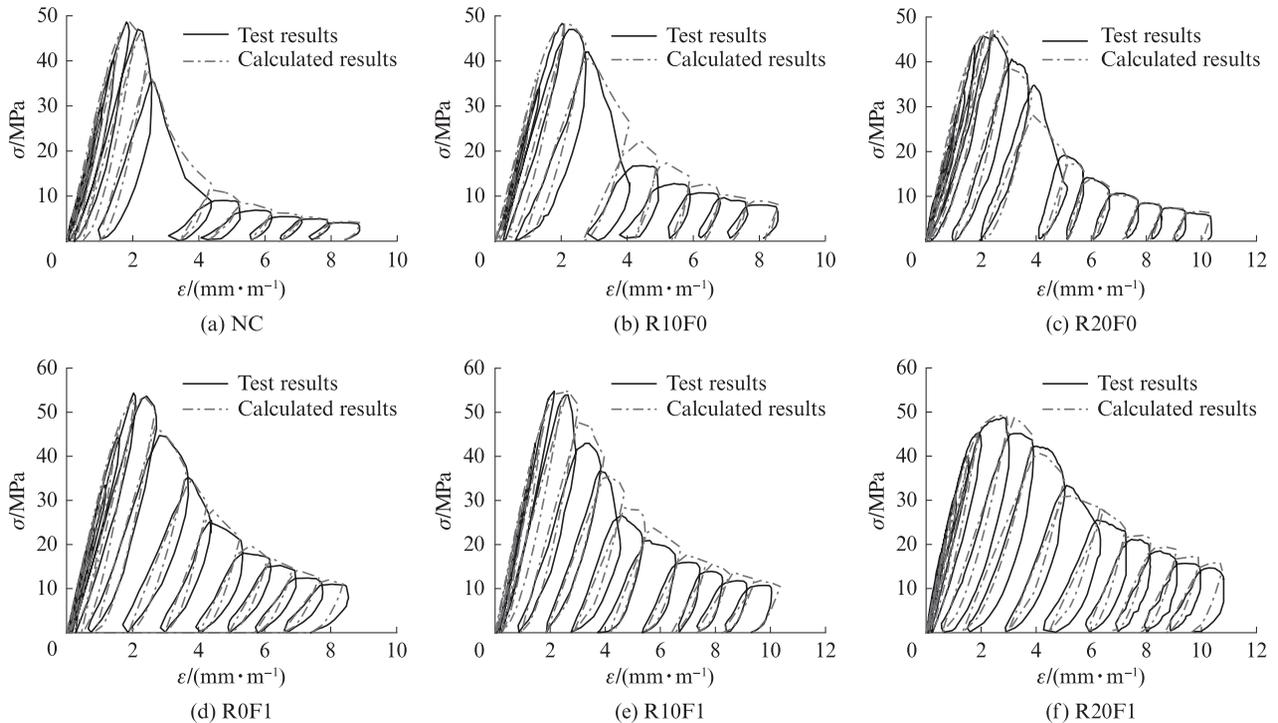


图5 试件的单轴循环受压应力-应变全曲线
Fig. 5 Uniaxial cyclic compressive stress-strain curves of specimens

图6为试件的循环受压全曲线包络线.由图6和表1可见:

(1)当钢纤维掺量不变、橡胶掺量增加时,包络线下的面积明显增加,而峰值应力几乎不变.表明通过配合比优化设计,成功克服了橡胶掺入对SFR-RuC抗压强度的削弱,使材料在橡胶掺量高达

20.0%时仍能与C60混凝土基本等强,且耗能能力明显提高,适宜应用于结构抗震.

(2)当橡胶掺量不变、钢纤维掺量增加时,试件的抗压强度及耗能能力均有所提高,钢纤维掺量由0%增至1.5%时,抗压强度提高了16%,这是由于更多钢纤维参与到抵抗裂缝开展及拉结耗能的过程中.

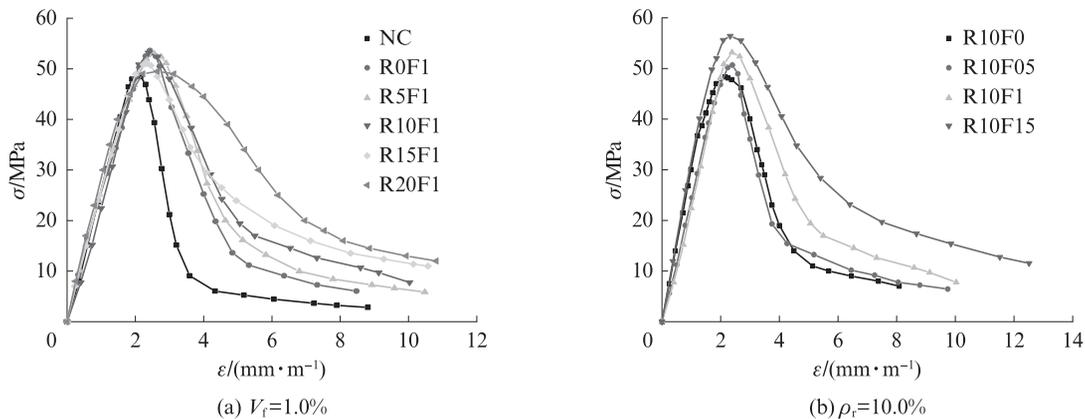


图6 试件的循环受压全曲线包络线
Fig. 6 Envelope curves of the cyclic compressive curves of specimens

2.3 刚度退化率

图7为试件刚度退化率与卸载点应变的关系.图中 ϵ_{eu} 为卸载点应变, E_{eu}/E_c 为刚度退化率, E_{eu} 为卸载刚度,定义为循环受压应力-应变全曲线的卸载点与相应塑性应变点所连直线的斜率^[9](见图2).由图7可见:SFR-RuC的刚度退化率 E_{eu}/E_c 在循环

加载前期随着卸载应变的增加明显下降,尤其是在到达峰值点之前,之后下降趋势明显变缓;与普通混凝土相比,掺入橡胶或钢纤维均使得材料的刚度退化率增加,即刚度退化变得更为缓慢,这种趋势在循环加载后期随着橡胶或者钢纤维掺量的增加更为明显.

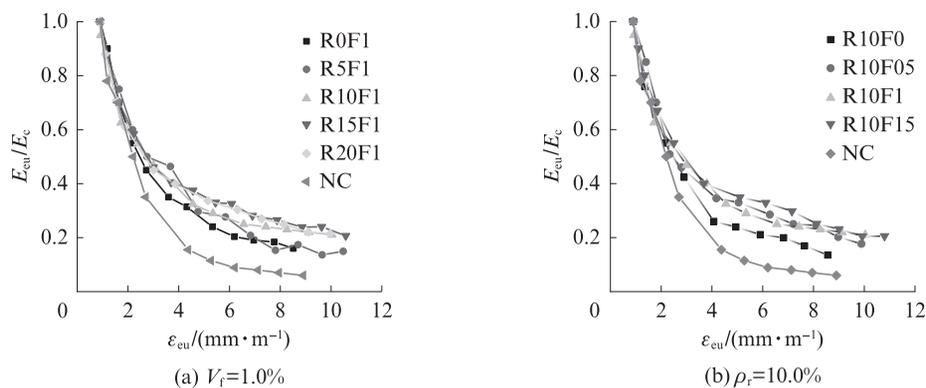


图7 试件刚度退化率与卸载点应变的关系

Fig. 7 Relationship between stiffness degradation ratio and unloading strain of specimens

2.4 塑性应变

图8为试件塑性应变与卸载点应变的关系.图中 ϵ_{eu}/ϵ_c 为标准化卸载点应变, ϵ_{eu} 为卸载点应变; ϵ_p/ϵ_c 为标准化塑性应变, ϵ_p 为塑性应变,定义为试件在循环轴压荷载作用下,卸载至应力为零时相应的残余应变^[11](见图2).由图8可见:塑性应变随着卸载点应变的增加而增加,在 $\epsilon_{eu}/\epsilon_c \leq 2$ 时增加更快,之后基本呈线性增加的趋势.橡胶掺量的增加对塑性应变几乎无影响,但加载后期随着钢纤维掺量的增加,塑性应变有所降低,这是由于该阶段钢纤维的拉结作用开始充分发挥,减小了混凝土的塑性应变累积.因此,本文以分段函数的形式来描述SFR-RuC在单轴循环受压时塑性应变与卸载点应变的关系,如式(1)所示.当 $\epsilon_{eu}/\epsilon_c \leq 2$ 时采用幂函数^[11]的形式,在试验数据

的基础上拟合幂函数;当 $\epsilon_{eu}/\epsilon_c > 2$ 时采用线性函数的形式,并引入钢纤维特征参数 λ_f ,在试验数据的基础上将线性函数的控制参数 γ_f, φ_f 拟合为 λ_f 的线函数(见式(2)、(3)),所得曲线与试验数据的对比如图8所示.

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_c} = \begin{cases} 0.25 \left(\frac{\epsilon_{eu}}{\epsilon_c} \right)^{2.52}, & \frac{\epsilon_{eu}}{\epsilon_c} \leq 2 \\ \gamma_f \left(\frac{\epsilon_{eu}}{\epsilon_c} \right) - \varphi_f, & \frac{\epsilon_{eu}}{\epsilon_c} > 2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\gamma_f = 1.1 - 0.25\lambda_f \quad (2)$$

$$\varphi_f = 0.77 - 0.5\lambda_f \quad (3)$$

式中: γ_f, φ_f 为考虑钢纤维影响的塑性应变控制参数; λ_f 为钢纤维特征参数, $\lambda_f = V_f l_f / d_f$,其中 V_f, l_f, d_f 为钢纤维体积分数、长度和等效直径, l_f / d_f 为长径比.

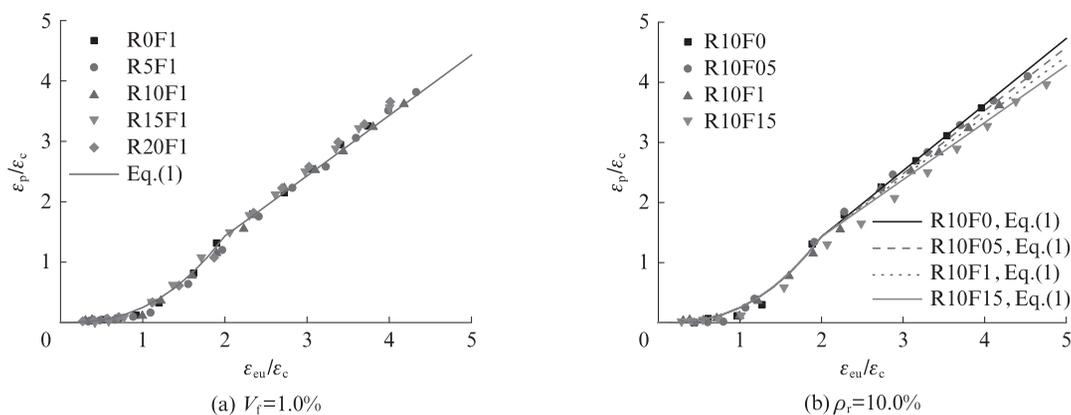


图8 试件塑性应变与卸载点应变的关系

Fig. 8 Relationship between plastic strain and unloading strain of specimens

2.5 应力退化

由图5可见,SFR-RuC在单轴循环受压加卸载过程中存在应力退化现象,即再加载曲线接近包络线时其应力达不到上一级卸载应力.图9为试件应力退化率与卸载点应变的关系.图中 ϵ_{eu}/ϵ_c 为标准化卸

载点应变, $\xi = \sigma_{re} / \sigma_{eu}$ 为应力退化率,其中 σ_{eu} 为卸载点应力, σ_{re} 为转折点应力,定义为再加载曲线达到上一个循环卸载应变 ϵ_{eu} 时的应力^[12](见图2).由图9可见,应力退化率随着卸载点应变的增加而降低,在 $\epsilon_{eu}/\epsilon_c > 2$ 时变化不再明显,且橡胶和钢纤维掺量对

SFR-RuC 应力退化率的影响无明显规律. 因此, 本文在试验数据的基础上, 拟合出线性分段函数来描述

应力退化率与卸载点应变的关系, 如式(4)所示, 所得曲线与试验数据的对比见图9.

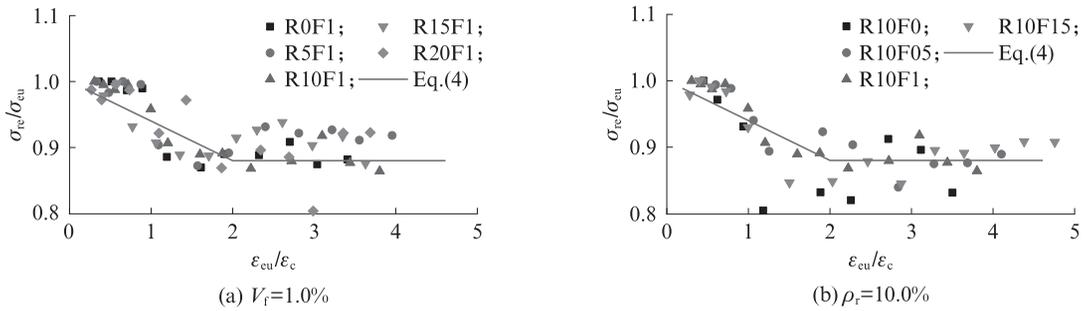


图9 试件应力退化率与卸载点应变的关系

Fig. 9 Relationship between stress degradation ratio and unloading strain of specimens

$$\xi = \frac{\sigma_{re}}{\sigma_{eu}} = \begin{cases} 1 - 0.06 \frac{\epsilon_{eu}}{\epsilon_c}, & 0 < \frac{\epsilon_{eu}}{\epsilon_c} \leq 2 \\ 0.88, & \frac{\epsilon_{eu}}{\epsilon_c} > 2 \end{cases} \quad (4)$$

2.6 再加载曲线起点应变与终点应变关系

图10为试件再加载曲线的起点应变与终点应变的关系. 图中 ϵ_p/ϵ_c 为再加载曲线标准化起点应变, $\epsilon_{ret}/\epsilon_c$ 为标准化终点应变, 其中 ϵ_p 为再加载曲线起点应变即塑性应变, ϵ_{ret} 为再加载曲线终点应变. 由图10可知, 再加载曲线终点应变随起点应变的增加而增加, 在 $\epsilon_{eu}/\epsilon_c \leq 1$ 时增加更快, 之后基本呈线性增加的

趋势, 且橡胶和钢纤维掺量对 SFR-RuC 再加载曲线终点应变的影响无明显规律. 因此, 本文提出以分段函数的形式来描述 SFR-RuC 在单轴循环受压时再加载曲线终点应变与起点应变的关系, 当 $\epsilon_{eu}/\epsilon_c \leq 1$ 时, 根据试验数据拟合为幂函数的形式; 当 $\epsilon_{eu}/\epsilon_c > 1$ 时, 根据试验数据拟合为线性函数的形式, 如式(5)所示. 所得曲线与试验数据的对比见图10.

$$\frac{\epsilon_{ret}}{\epsilon_c} = \begin{cases} 1.85 \left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_c} \right)^{0.35}, & 0 < \frac{\epsilon_p}{\epsilon_c} \leq 1 \\ 0.98 \frac{\epsilon_p}{\epsilon_c} + 0.87, & \frac{\epsilon_p}{\epsilon_c} > 1 \end{cases} \quad (5)$$

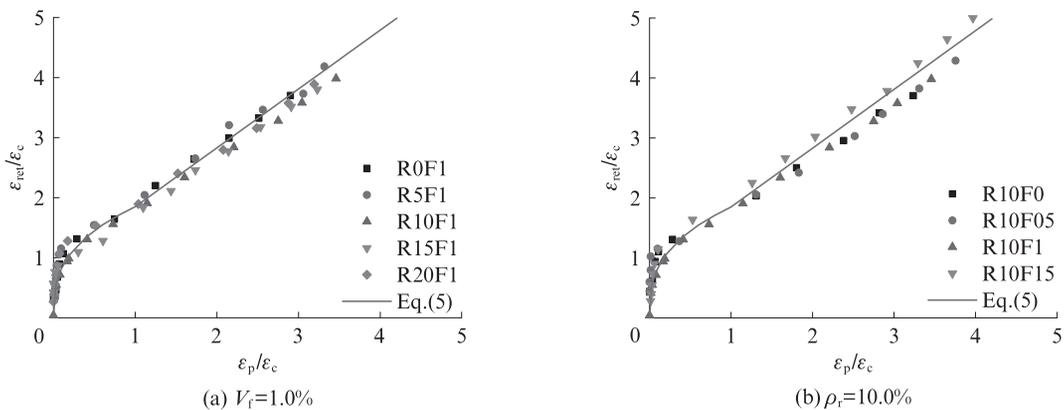


图10 试件再加载曲线的起点应变与终点应变的关系

Fig. 10 Relationship between ending point strain and starting point strain on reloading curve of specimens

3 循环应力-应变关系

3.1 循环应力-应变曲线包络线

已有研究表明, 混凝土单轴循环受压应力-应变全曲线包络线的形状与混凝土单轴单调受压应力-应变全曲线大致相同^[8,12], 可采用损伤本构模型来描述. 因此, 本文采用 GB 50010—2010《混凝土结构设

计规范》的损伤本构模型来描述 SFR-RuC 单轴循环受压应力-应变全曲线的包络线, 如式(6)~(12)所示.

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \epsilon \quad (6)$$

$$d_c = 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n}, x \leq 1 \quad (7)$$

$$d_c = 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2 + x}, x > 1 \quad (8)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}, \rho_c = \frac{f_c}{E_c \varepsilon_c}, n = \frac{E_c \varepsilon_c}{E_c \varepsilon_c - f_c} \quad (9)$$

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f_{cu}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_c = (700 + 172\sqrt{f_c}) \times 10^{-6} \quad (11)$$

$$\alpha_c = 0.157f_c^{0.785} - 0.905 \quad (12)$$

式中: d_c 为混凝土轴压损伤演化参数; α_c 为下降段形状参数.

考虑到橡胶与钢纤维的正向协同作用,在试验数据的基础上,本文分别采用钢纤维特征参数 λ_f 和橡胶特征参数 λ_r 对SFR-RuC的弹性模量 $E_{c,fr}$ 、峰值应变 $\varepsilon_{c,fr}$ 及下降段形状参数 $\alpha_{c,fr}$ 进行拟合及修正,如式(13)~(16)所示. $E_{c,fr}$ 、 $\varepsilon_{c,fr}$ 及 $\alpha_{c,fr}$ 的计算值与单轴循环受压试验测得值的对比如表2所示.由表2可见,计算值与试验值吻合良好.

$$E_{c,fr} = E_c(1 + 0.365\lambda_f - 0.209\lambda_r) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{c,fr} = \varepsilon_c(1 + 0.347\lambda_f + 1.532\lambda_r) \quad (14)$$

$$\alpha_{c,fr} = \alpha_c \left[1 - \varphi_{fr}(1.9874\lambda_r + 0.104 \frac{l_f}{d_f} V_f^{0.55}) \right] \quad (15)$$

$$\varphi_{fr} = \lambda_f^{0.07} / e^{\lambda_r} \quad (16)$$

式中: λ_r 为橡胶特征参数, $\lambda_r = \rho_r d_r$,其中 ρ_r 、 d_r 为橡胶颗粒等体积替换率和平均粒径; λ_f 为钢纤维特征参数, $\lambda_f = V_f l_f / d_f$,其中 V_f 、 l_f 、 d_f 为钢纤维体积分数、长度和等效直径, l_f / d_f 为长径比; φ_{fr} 为同时考虑钢纤维和橡胶影响的下降段形状控制参数,当橡胶掺量或钢纤维掺量为0%时, φ_{fr} 取为1.0.

3.2 卸载曲线和再加载曲线

在试验数据的基础上,采用幂函数的形式^[8]拟合得到SFR-RuC单轴循环受压过程中卸载曲线的公式,如式(17)所示.

$$\frac{\sigma}{\sigma_{eu}} = a \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_{eu} - \varepsilon_p} \right)^{m_{ul}} \quad (17)$$

式中: a 为卸载曲线参数,拟合取为1.0; m_{ul} 为卸载速率控制参数,根据试验数据拟合为标准化卸载点应变 $\varepsilon_{eu} / \varepsilon_c$ 的幂函数:

$$m_{ul} = 1 + 0.589 \left(\frac{\varepsilon_{eu}}{\varepsilon_c} \right)^{0.368} \quad (18)$$

由图2可见,再加载曲线在转折点 ε_{re} 前后的变化规律有所不同.在试验数据的基础上,采用分段函数的形式^[8]拟合得到SFR-RuC再加载曲线的公式,如式(19)、(20)所示.

$$\frac{\sigma}{\sigma_{re}} = \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_{re} - \varepsilon_p} \right)^{n_{rl}}, \varepsilon \leq \varepsilon_{eu} \quad (19)$$

$$\sigma = \sigma_{re} + (\sigma_{ret} - \sigma_{re}) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{eu}}{\varepsilon_{ret} - \varepsilon_{eu}} \right), \varepsilon > \varepsilon_{eu} \quad (20)$$

式中: n_{rl} 为再加载速率控制参数,根据试验数据拟合为标准化塑性应变 $\varepsilon_p / \varepsilon_c$ 的幂函数:

$$n_{rl} = 1 - 0.136 \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_c} \right)^{0.425} \quad (21)$$

3.3 应力-应变关系验证

对已有文献中钢纤维混凝土的单轴循环受压应力-应变曲线^[9]、非等强的橡胶混凝土和SFR-RuC的单轴单调受压应力-应变曲线^[5]进行对比验证.图11为试件单轴循环受压应力-应变曲线计算值和试验值的比较.由图11可知,提出的模型能够较好地预测等强橡胶混凝土和SFR-RuC、钢纤维混凝土的单轴循环受压应力-应变全过程,但在预测非等强橡胶混凝土和SFR-RuC的单轴受压曲线下降段时,应力值偏大.这是由于通过配合比优化设计的等强SFR-RuC及橡胶混凝土克服了橡胶颗粒掺入对抗压强度的不利影响,同时保持峰值后延性较好.因此,考虑到材料的单轴循环受压应力-应变全过程会受

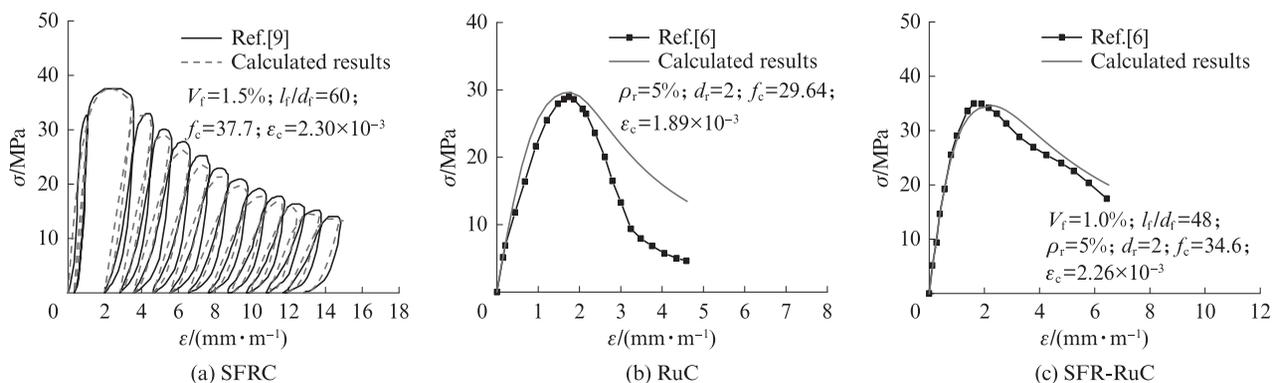


图11 试件单轴循环受压应力-应变曲线模型结果与试验结果的比较

Fig. 11 Comparisons between experimental and calculated results of cyclic compressive stress-strain curves of specimens

到混凝土基体性能、橡胶颗粒及钢纤维特性等因素的影响,本文提出的模型适用于橡胶粒径为1 mm且等体积替代砂率0%~20.0%、钢纤维为端钩型长径比40且体积分数0%~1.5%、轴心抗压强度在40~50 MPa之间的等强SFR-RuC,具体使用时可根据实际试验数据进行调整。

4 结论

(1)钢纤维的掺入可以显著改善橡胶混凝土的单向循环受压力学性能,SFR-RuC试件的循环受压破坏呈明显延性特征,裂缝更为细密且完整性更好。与普通混凝土、橡胶混凝土及钢纤维混凝土试件相比,SFR-RuC试件的延性及韧性更高、滞回耗能能力增强,塑性应变累积及刚度退化更为缓慢。

(2)钢纤维与橡胶颗粒起到良好的协同作用,在循环加载初期,橡胶颗粒周围形成了薄弱带,使得微裂缝开展更为细密,更多钢纤维横跨于裂缝两侧;在循环加载后期,钢纤维有效桥接宏观裂缝,减小裂缝宽度并提供一定的变形能力,提高了材料的延性及耗能。

(3)通过配合比优化设计,成功克服了橡胶掺入对材料抗压强度削弱的缺点,SFR-RuC在橡胶掺量高达20.0%时仍能与C60混凝土基本等强,且耗能能力明显提高,适用于结构抗震中。

(4)在循环加载后期,随着橡胶和钢纤维掺量的增加,SFR-RuC的刚度退化更为缓慢,塑性应变降低,但橡胶和钢纤维掺量对于SFR-RuC的应力退化及再加载曲线的影响无明显规律。在试验数据的基础上提出了SFR-RuC塑性应变、应力退化及再加载曲线终点应变的分段函数模型。

(5)同时考虑橡胶和钢纤维的影响,提出了等强SFR-RuC的单向循环受压应力-应变关系模型,以及卸载和再加载曲线的计算公式。模型计算值与本文及文献中的试验结果吻合较好,在具体使用时可以根据实际试验数据进行调整。

参考文献:

- [1] LI Y, LI Y Q. Experimental study on performance of rubber particle and steel fiber composite toughening concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 146:267-275.
- [2] GANESAN N, RAJ J B, SHASHIKALA A P. Flexural fatigue behavior of self-compacting rubberized concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44:7-14.
- [3] KARIMIPOUR A, GHALEHNOVI M, BRITO J. Mechanical and durability properties of steel fibre-reinforced rubberised concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119463.
- [4] LI Y, LI Y Q. Experimental study on performance of rubber particle and steel fiber composite toughening concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 146:267-275.
- [5] NOAMAN A T, BAKAR B H A, AKIL H M. Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 163-170.
- [6] FU C Q, YE H L, WANG K J, et al. Evolution of mechanical properties of steel fiber-reinforced rubberized concrete (FR-RC) [J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 160:158-166.
- [7] 赵秋红,董硕,朱涵. 钢纤维-橡胶/混凝土单轴受压全曲线试验及本构模型[J]. 复合材料学报, 2021, 38(7):2359-2369. ZHAO Qiuhong, DONG Shuo, ZHU Han. Experimental on stress-strain behavior and constitutive model of steel fiber-rubber/ concrete subjected to uniaxial compression [J]. Acta Material Compositae Sinica, 2021, 38(7):2359-2369. (in Chinese).
- [8] BAHN B Y, HSU C T T. Stress-strain behavior of concrete under cyclic loading[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(2) : 178-193.
- [9] 过镇海,张秀琴. 混凝土在反复荷载作用下的应力-应变全曲线[J]. 工业建筑, 1981, 11(9):14-17. GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin. Complete stress-strain curve of concrete under cyclic loads[J]. Industrial Construction, 1981, 11 (9):14-17. (in Chinese)
- [10] OTTER D E, NAAMAN A E. Properties of steel fiber reinforced concrete under cyclic load[J]. Materials Journal, 1998, 85(4) : 254-261.
- [11] CAMPIONE G, MENDOLA L L. Stress-strain behavior in compression of lightweight fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic loads[J]. Earthquake Resistant Engineering Structures, 2001, 57(9):387-396.
- [12] 吕西林,张颖,年学成. 钢纤维高强混凝土在单调和重复荷载作用下轴压应力-应变曲线试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(1):135-143. LÜ Xilin, ZHANG Ying, NIAN Xuecheng. Experimental study on stress-strain curves for high-strength steel fiber reinforced concrete under monotonic and repeated compressive loadings[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38 (1) : 135-143. (in Chinese)
- [13] 徐礼华,李彪,池寅,等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土单轴循环受压应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4) : 140-152. XU Lihua, LI Biao, CHI Yin, et al. Experimental investigation on stress-strain relation of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete subjected to uniaxial cyclic compression [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (4) : 140-152. (in Chinese)