

文章编号:1007-9629(2021)05-1002-09

考虑地震量级作用下橡胶纤维混凝土的 受压动力性能

艾思平, 唐鹏

(安徽水利水电职业技术学院 市政与交通工程学院, 安徽 合肥 231603)

摘要:为探究橡胶纤维混凝土受压动力性能,分别按0%和30%橡胶取代率、0%和0.6%聚丙烯纤维掺量配制4种配合比橡胶纤维混凝土;同时考虑8种地震量级加载应变率,应用液压伺服机对橡胶纤维混凝土开展单轴受压试验,得到不同加载工况下橡胶纤维混凝土受压破坏形态和应力-应变曲线.结果表明:掺有橡胶颗粒和聚丙烯纤维的混凝土静动力受压破坏形态完整性相对较高,橡胶颗粒作用能够有效提高混凝土的延性特征;随着加载应变率的提高,橡胶纤维混凝土峰值应力逐步增大,其中单掺聚丙烯纤维的混凝土峰值应力动力提高系数和弹性模量动力提高系数明显高于其他配合比工况,单掺橡胶颗粒的混凝土所表现出的规律则与之相反;另外,分别提出了加载应变率与橡胶纤维混凝土峰值应力动力提高系数和弹性模量动力提高系数的关系方程,并对其受力机理进行了探讨.

关键词:橡胶颗粒;聚丙烯纤维;混凝土;受压动力

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.014

Compression Dynamic Behavior of Rubber Fiber Reinforced Concrete under Action of Earthquake Magnitude

AI Siping, TANG Peng

(College of Municipal and Traffic Engineering, Anhui Water Conservancy Technical College, Hefei 231603, China)

Abstract: In order to determine the dynamic performance of rubber fiber reinforced concrete (RFRC) under compression, four kinds of rubber fiber reinforced concrete were prepared according to 0%, 30% rubber substitution rate and 0%, 0.6% polypropylene fiber content respectively under eight earthquake loading strain rates. According to the test results, the failure modes and stress-strain curves of rubber fiber reinforced concrete under different loading conditions are obtained. Through comparative analysis of the mechanical parameters of rubber fiber reinforced concrete under different loading conditions, the following conclusions are obtained: the integrity of rubber particle and polypropylene fiber reinforced concrete under static and dynamic pressure is relatively high, and the rubber particle can effectively improve the extension of concrete with the increase of loading strain rate, the peak stress of rubber fiber reinforced concrete increases gradually. The dynamic improvement coefficients of peak stress and elastic modulus of concrete with polypropylene fiber are significantly higher than those of other mixing conditions, whereas the situation for concrete with rubber particles is just the opposite. At the same time, the relationship equations between the loading strain rate and the dynamic improvement coefficients of peak stress and elastic modulus are put forward respectively, and the stress mechanism is discussed.

收稿日期:2020-05-31; 修订日期:2020-07-27

基金项目:安徽高校自然科学基金重点项目(KJ2017A601, KJ2018A0734)

第一作者:艾思平(1972—),女,安徽怀远人,安徽水利水电职业技术学院副教授,硕士.E-mail:asp215578@163.com

通讯作者:唐鹏(1980—),男,湖南临武人,安徽水利水电职业技术学院讲师,硕士.E-mail:peng_tp2009@163.com

Key words: rubber particle; polypropylene fiber; concrete; compression force

橡胶纤维混凝土是将橡胶颗粒和聚丙烯纤维作为混凝土拌和料中的一部分所形成的一种较为新型的混凝土.它将橡胶混凝土和聚丙烯纤维混凝土的优势有机结合,能有效提高混凝土的工作性能^[1-2].同时橡胶颗粒一般来源于废旧轮胎,此举可实现废旧轮胎的二次利用,避免废旧轮胎对环境安全产生影响,具有较高的研究价值和工程应用前景^[3].

目前关于橡胶混凝土和聚丙烯纤维混凝土的研究基本集中于其配合比设计、力学性能和耐久性能等方面.其中 Eldin 等^[4]通过设计不同橡胶粒径和取代率,研究了橡胶混凝土拉压力学性能,结果表明橡胶粒径越大、橡胶取代率越高,橡胶混凝土拉压强度下降越明显; Topcu 等^[5]对橡胶混凝土变形性能进行分析,结果表明橡胶混凝土具有明显的塑性变形能力,而弹性变形能力相对较弱; Song 等^[6]通过试验分析发现,聚丙烯纤维能够提高混凝土抗压强度、抗拉强度和抗冲击能力,对于混凝土早期收缩裂缝有一定抑制作用; Yao 等^[7]对低掺量混合纤维混凝土抗压、劈拉和弯曲力学性能进行试验研究,提出了不同纤维混合作用下混凝土的最高强度和弯曲韧性.

在实际工程中,混凝土结构不仅受到静力作用,同时会受到地震、撞击和爆炸等动力作用,因此,对于混凝土动力性能的研究具有重要意义^[8]. Sallam^[9]对橡胶混凝土圆柱体试件进行落锤冲击试验,结果表明橡胶混凝土强度随加载应变率的增大而增大,同时橡胶混凝土对裂缝具有较好的抑制作用; Alhozaimy 等^[10]对聚丙烯纤维混凝土静动力受压力学性能进行研究,结果表明聚丙烯纤维能够提高混凝土静动力抗压强度; 梁宁慧等^[11]考虑超高应变率对聚丙烯纤维混凝土受压力学性能的影响,研究结果显示聚丙烯纤维使得混凝土动态极限韧性得到提高.上述研究仅针对橡胶混凝土或聚丙烯纤维混凝土的

受压动力性能展开分析,尚未开展橡胶纤维混凝土的受压动力性能研究.然而,研究橡胶纤维混凝土的受压动力性能,对于进一步理解该类型混凝土的动力特性具有重要意义.

本文主要考虑地震量级加载应变率,应用液压伺服机对橡胶纤维混凝土受压动力性能展开试验研究.通过试验得到不同加载工况下橡胶纤维混凝土的力学特征参数,由此对比分析橡胶取代率、聚丙烯纤维掺量和加载应变率对混凝土力学参数的影响;同时从定量角度建立加载应变率对橡胶纤维混凝土力学参数影响的关系方程,并对其受力机理进行分析.

1 试验方案

1.1 试件设计与配合比

本文参考文献[2, 11]配制橡胶纤维混凝土.其中:单掺橡胶颗粒混凝土的橡胶取代率(质量分数,本文涉及的取代率、掺量等均为质量分数) $R=30\%$ 、聚丙烯纤维掺量 $w_F=0\%$;单掺聚丙烯纤维混凝土的聚丙烯纤维掺量 $w_F=0.6\%$ 、橡胶取代率 $R=0\%$;普通混凝土设计强度为 30 MPa,参照 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》确定其配合比;橡胶纤维混凝土中的橡胶颗粒含量由等体积取代细骨料方法计算得到.具体配合比见表 1.表 1 所示 4 种配合比中,所用水、水泥(普通硅酸盐水泥 P·O42.5)、粗骨料(粒径范围 4~16 mm 天然碎石,表观密度 2 580 kg/m³)均来源一致;所用橡胶颗粒粒径范围 2~5 mm,表观密度 1 270 kg/m³,堆积密度 820 kg/m³,纤维含量不大于 0.1%,拉伸强度不小于 15 MPa,断裂伸长率不小于 500%;细骨料均采用河砂,河砂细度模数 2.5,表观密度 2 650 kg/m³,堆积密度 1 850 kg/m³;聚丙烯纤维物理特性参数由厂家提供,与文献[11]相同.

表 1 橡胶纤维混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of rubber fiber reinforced concrete

Sample code	Cement	Water	Fine aggregate	Rubber particle	Coarse aggregate	Polypropylene fiber
C-0%-0%	279.00	178.00	780.00	0	1 034.00	0
C-0%-0.6%	279.00	178.00	780.00	0	1 034.00	13.63
C-30%-0%	279.00	178.00	546.00	96.90	1 034.00	0
C-30%-0.6%	279.00	178.00	546.00	96.90	1 034.00	12.80

1.2 试验加载方案与设备

本文考虑地震量级加载应变率对不同设计工况下橡胶纤维混凝土受压动力性能的影响.采用

WEW-100B 型液压伺服机,该设备装备独立的荷载传感器和位移传感器;同时应用应变片和应变采集仪对混凝土受压过程中的变形数值进行测量,测量

精度满足试验要求^[2].根据试验装置加载限制要求和文献[2],确定混凝土试件设计尺寸为100 mm×100 mm×100 mm.考虑混凝土材料具有一定随机性和离散性特征,每种工况设计3个试件开展试验,取均值分析.

不同加载应变率范围对应不同的静动力作用效应,如图1所示^[8].采用力和位移混合控制的加载方法,即首先应用力控制方式,将试件从无应力状态加

载至混凝土设计强度值 f_c 的5%,如此反复3次完成试验预加载.位移控制加载属于正式加载,本文考虑地震量级加载应变率,首先设置静力加载应变率 $\dot{\epsilon}_s=1.0\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 作为基准对比工况,然后考虑地震量级加载应变率范围,设置7种动力加载应变率,即 $\dot{\epsilon}_d$ 分别为 5.0×10^{-5} 、 1.0×10^{-4} 、 5.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 、 5.0×10^{-3} 、 1.0×10^{-2} 、 $5.0\times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.待正式加载时开始采集试验数据,直至试件破坏,停止加载.

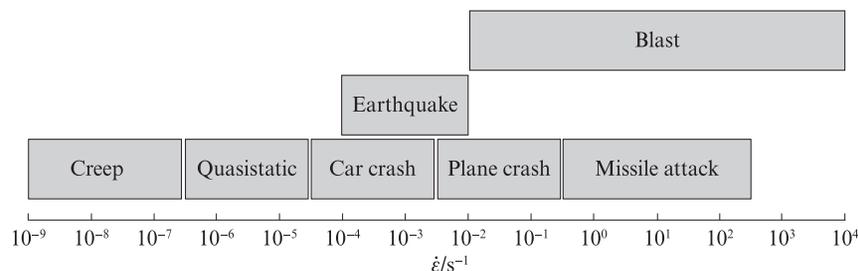


图1 加载应变率与静动力作用范围

Fig. 1 Loading strain rate and range of static and dynamic action

在混凝土受压试验加载过程中,需要控制试件与设备接触面之间存在的摩擦作用.本文采用3层聚四氟乙烯塑料薄膜和2层机械黄油放置于试件与设备接触面上,将摩擦作用控制在合理范围之内,以满足试验加载要求^[8].

2 试验结果分析

2.1 破坏形态

对于混凝土破坏形态的研究有助于更好地从宏观角度分析混凝土力学性能.通过本文橡胶纤维混凝土受压动力加载试验,可得到不同加载工况下的

橡胶纤维混凝土破坏形态.考虑全文篇幅,选取4种配合比混凝土中 $\dot{\epsilon}_s$ 为 $1.0\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $\dot{\epsilon}_d$ 为 $5.0\times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的受压破坏形态(见图2)展开分析.

由图2可见,对于同种配合比试件,随着加载应变率的提高,其损坏逐渐严重,所表现出的脆性破坏特征逐渐明显.由于混凝土自身的特性,在其内部存在一定量的空隙和微裂缝,由此形成混凝土初始损伤.在静力加载应变率作用下,混凝土初始损伤部分有足够的时间形成裂缝和进一步扩展,最终使得混凝土在压力作用下形成贯穿式裂缝,均匀分布在混凝土非加载面上.其中,含有橡胶颗粒的试件破坏后会伴随

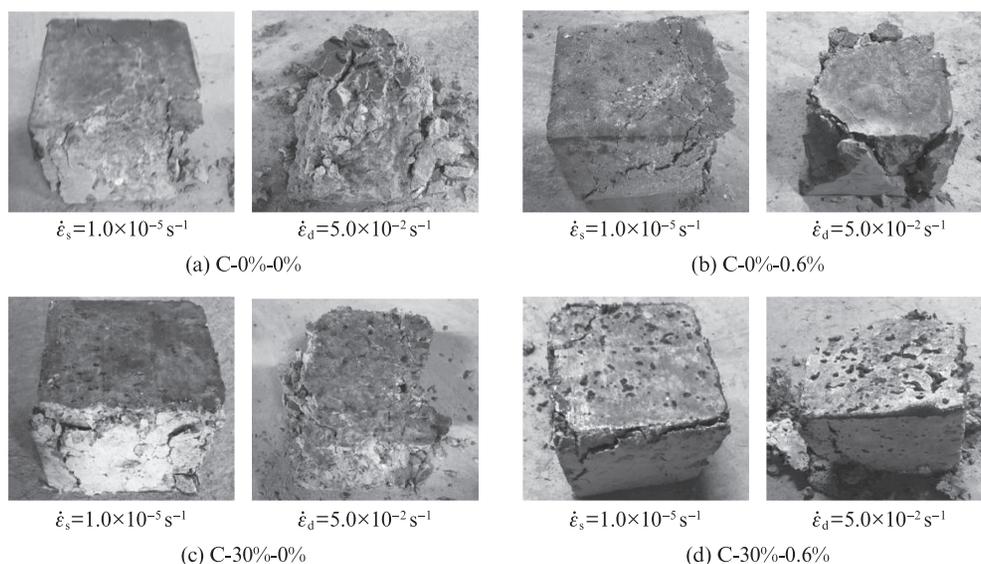


图2 不同加载工况下橡胶纤维混凝土的受压破坏形态

Fig. 2 Compression failure modes of rubber fiber reinforced concrete under different loading conditions

部分橡胶颗粒的脱落,同时试件破坏后的完整性相对较高.在高加载应变率作用下,混凝土初始损伤形成的裂缝来不及扩展,试件无法在短时间内形成均匀应力状态,一般有1~2条主斜裂缝在试件中贯穿,同时伴随部分粗骨料的破坏和部分橡胶颗粒的脱落,最终形成如图2所示的破坏形态.

掺聚丙烯纤维试件在受压破坏后的完整性明显提高,其破坏后的裂缝数量较少、裂缝宽度较小.掺聚丙烯纤维试件在受压破坏后有2条主斜裂缝贯穿式发展,主斜裂缝周围分布较多细小裂缝,破坏时伴随着部分聚丙烯纤维的拉出或者拉断.在高加载应变率作用下,掺聚丙烯纤维试件均存在一定程度的粗骨料破坏.对于聚丙烯纤维掺量为0%的试件而言,在静力加载应变率作用下,裂缝均匀分布

在其非加载面上;在动力加载应变率下则呈现以斜裂缝为主的贯穿式破坏形态.对于聚丙烯纤维掺量为0.6%的试件而言,静动力加载应变率作用下的破坏形态均为基本相似的偏斜向贯穿式裂缝.分析原因在于聚丙烯纤维与混凝土砂浆之间的相互作用,使得裂缝的发展得到一定抑制,试件更易形成均匀应力状态;同时,本文考虑的加载应变率范围为中低应变率状态,故当聚丙烯纤维掺量为0.6%时,静动力加载应变率作用下的混凝土破坏形态基本相似.

2.2 应力-应变曲线

根据本文橡胶纤维混凝土受压加载方案,可得到不同加载工况下橡胶纤维混凝土受压应力-应变曲线,如图3所示.

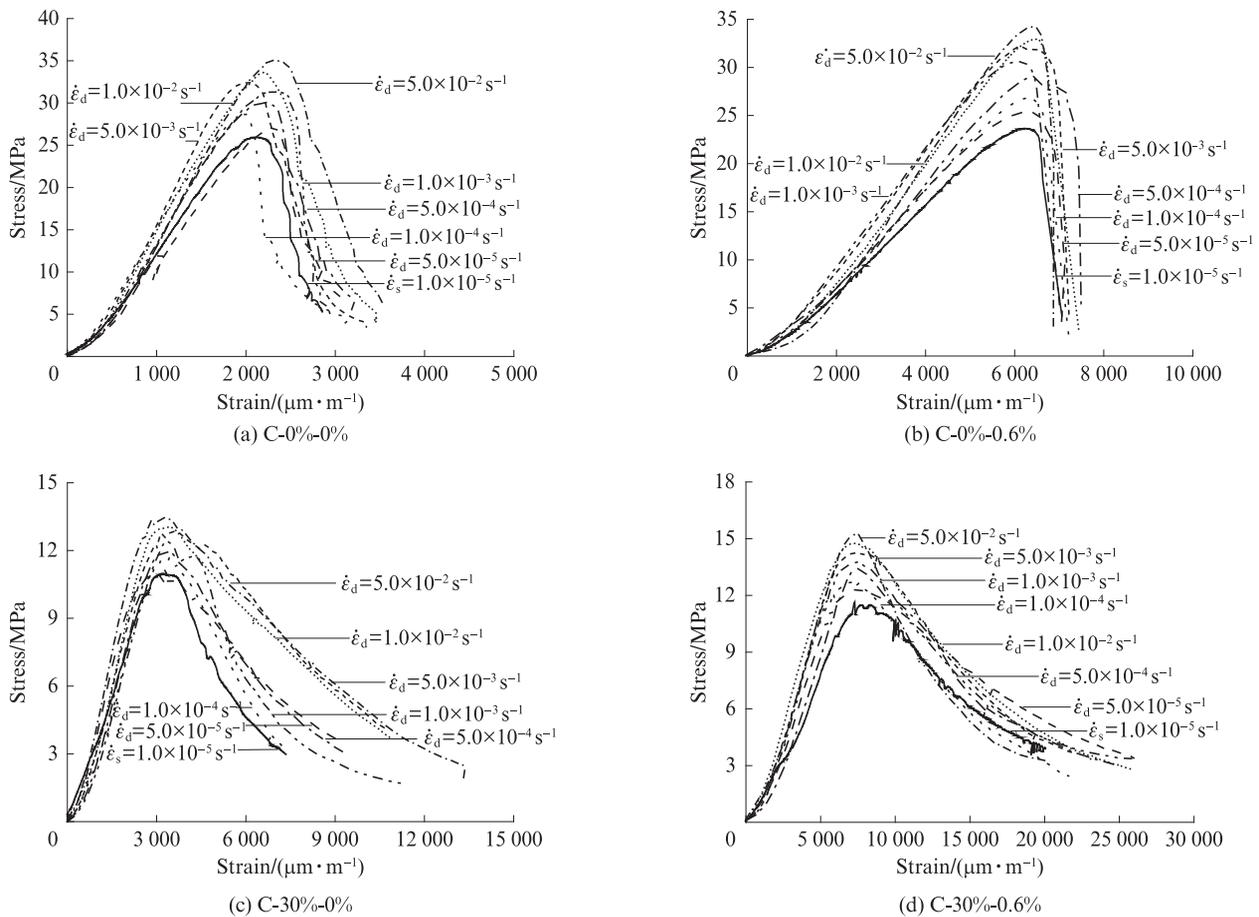


图3 不同加载工况下橡胶纤维混凝土受压应力-应变曲线
Fig. 3 Compression stress-strain curves of rubber fiber reinforced concrete under different loading conditions

根据图3分析,在不同配合比和加载应变率作用下,混凝土受压应力-应变曲线发展趋势基本相同,均表现出良好的连续性和光滑性.受压应力-应变曲线均分为弹性阶段、弹塑性阶段和下降段,应力-应变曲线发展趋势与加载应变率和橡胶纤维掺量无关.

对于同种配合比试件,其受压峰值应力随着加载应变率的提高均逐步增大,弹性模量也有逐步增大趋势,但峰值应变受加载应变率影响不明显.与其他配合比试件存在明显差异的是掺橡胶颗粒混凝土的应力-应变曲线下下降段,该下降段发展逐步变缓,表现

出塑性变形能力.分析原因主要是橡胶颗粒具有较好的变形能力,从而使得掺橡胶颗粒混凝土的应力-应变曲线下降段表现出较好的延性特征.分析聚丙烯纤维掺量对混凝土受压应力-应变曲线下降段的影响可知,单掺聚丙烯纤维混凝土在受压破坏后表现出一定的脆性破坏特征.对于同种配合比试件,加载应变率对其应力-应变曲线下降段的影响基本相同.

混凝土吸能能力为混凝土开始加载直至试件发生破坏所需要的能量,计算时一般取应力-应变曲线达到峰值应力点时与应变坐标轴所包含面积^[12].根据本文不同加载工况下橡胶纤维混凝土受压应力-应变曲线计算得到不同加载应变率对混凝土吸能能力及其提升率的影响,如图4、5所示.

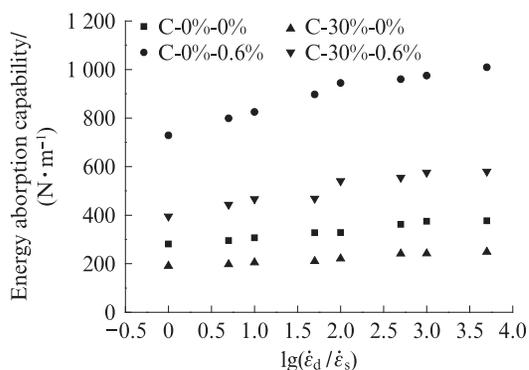


图4 加载应变率对混凝土吸能能力的影响

Fig. 4 Effect of loading strain rate on energy absorption capacity of concrete

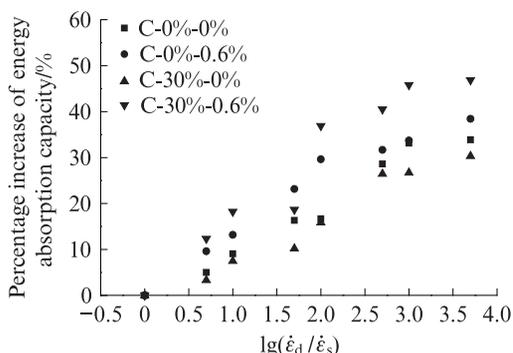


图5 加载应变率对混凝土吸能能力提升率的影响

Fig. 5 Effect of loading strain rate on percentage increase of energy absorption capacity of concrete

由图4、5可见,随着加载应变率的提高,混凝土吸能能力逐步增大.橡胶取代率和聚丙烯纤维掺量均为0%的普通混凝土试件在加载应变率为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时,其吸能能力为281.39 N/m;当加载应变率提高至 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,其吸能能力升至376.62 N/m,提升率为33.84%.单掺聚丙烯纤维试件的吸能能力由加载应

变率为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的728.97 N/m提高至加载应变率为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时的1 009.06 N/m,提升率为38.42%;单掺橡胶颗粒试件的吸能能力由加载应变率为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的190.95 N/m提高至加载应变率为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时的248.86 N/m,提升率为30.33%;双掺橡胶颗粒和聚丙烯纤维试件的吸能能力由加载应变率为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的394.74 N/m提高至加载应变率为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时的579.64 N/m,提升率为46.84%.由上述分析可知,本文所设计配合比中,掺入一定量的聚丙烯纤维将使普通混凝土的吸能能力提高,而掺入橡胶颗粒将使普通混凝土的吸能能力降低.

2.3 力学特征参数

为进一步探究加载应变率对橡胶纤维混凝土受压动力性能的影响,由图3所示的橡胶纤维混凝土受压应力-应变曲线提取峰值应力、弹性模量和峰值应变,用以分析橡胶纤维混凝土力学特征参数受橡胶取代率、聚丙烯纤维掺量和加载应变率影响的变化规律.

2.3.1 峰值应力

对于混凝土峰值应力受加载应变率影响的定量分析一般采用峰值应力动力提高系数 α_{DIF} ,其定义如式(1)所示^[13].

$$\alpha_{\text{DIF}} = \sigma_d / \sigma_s \quad (1)$$

式中: σ_d 为动力加载应变率($\dot{\epsilon}_d = 5.0 \times 10^{-5} \sim 5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)作用下的橡胶纤维混凝土峰值应力,MPa; σ_s 为静力加载应变率($\dot{\epsilon}_s = 1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)作用下的橡胶纤维混凝土峰值应力,MPa.

由图3所示的橡胶纤维混凝土受压应力-应变曲线提取混凝土峰值应力,并应用式(1)计算得到加载应变率对混凝土峰值应力及动力提高系数的影响,如图6、7所示.

由图6、7可见,当加载应变率相同时,单掺聚丙

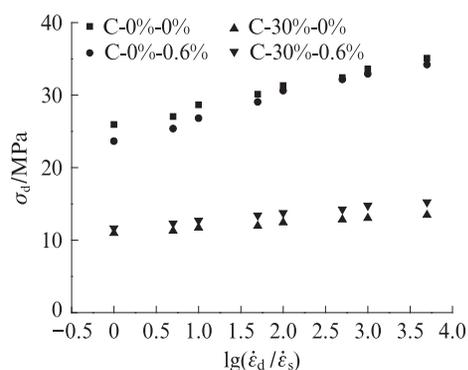


图6 加载应变率对混凝土峰值应力的影响

Fig. 6 Effect of loading strain rate on peak stress of concrete

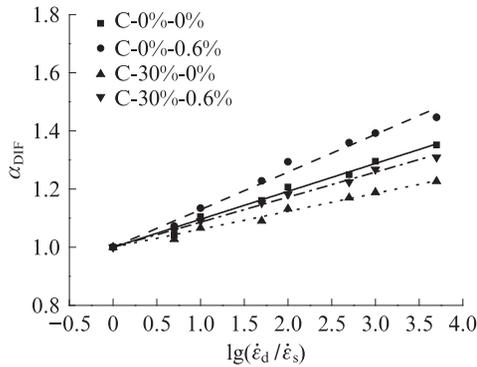


图7 加载应变率对混凝土动力提高系数的影响
Fig. 7 Effect of loading strain rate on dynamic improvement coefficient of concrete

烯纤维试件的峰值应力较普通混凝土试件有所降低;双掺橡胶颗粒和聚丙烯纤维试件的峰值应力较单掺橡胶颗粒试件有所提高.对于同种配合比试件,随着加载应变率的提高,其峰值应力逐步增大.其中:普通混凝土试件在静力加载应变率 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 下的峰值应力为25.94 MPa,在动力加载应变率 $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 下的峰值应力提高至35.07 MPa,提高幅度为35.20%;单掺聚丙烯纤维试件在静力加载应变率 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 下的峰值应力为23.65 MPa,在动力加载应变率 $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 下的峰值应力提高至34.21 MPa,提高幅度为44.64%;单掺橡胶颗粒试件、双掺橡胶颗粒和聚丙烯纤维试件在静力加载应变率 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 下的峰值应力分别为10.97、11.64 MPa,在动力加载应变率 $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 下的峰值应力则分别提高至13.46 MPa和15.24 MPa,提高幅度分别为22.70%和30.89%.从总体趋势分析可知,掺橡胶颗粒混凝土的峰值应力受加载应变率影响所提高的幅度相对较低,掺聚丙烯纤维混凝土的峰值应力受加载应变率影响所提高的幅度较大.文献[14-15]对加载应变率为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 作用下的普通混凝土受压动力性能进行研究,得出其峰值应力提高幅度一般为30%~40%,本文普通混凝土试件的峰值应力受加载应变率影响所提高的幅度基本符合这一提高区间范围.不同试验存在一定差异性的原因主要在于试件尺寸的设计以及混凝土本身具有随机性和离散性.对于橡胶混凝土受压动力性能的研究,文献[16]研究了加载应变率为 $1.67 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和橡胶取代率为0%~7%的混凝土受压动力特性,结果表明随着橡胶取代率的提高,混凝土峰值应力受加载应变率影响所提高的幅度逐步降低;文献[17]采用超高应变率,应用霍普金森压杆对橡胶混凝土受压动力性能进行试验研

究,结果表明含有橡胶颗粒混凝土的峰值应力受加载应变率影响所提高的幅度低于普通混凝土.橡胶取代率较高时,橡胶混凝土的峰值应力变化规律与橡胶取代率较低时基本相似,即橡胶混凝土峰值应力受加载应变率影响所提高的幅度低于普通混凝土.掺聚丙烯纤维混凝土的峰值应力受加载应变率影响所提高的幅度高于普通混凝土,原因在于加载应变率的提高使得混凝土损伤发生一定迟滞效应,混凝土应力无法均匀分布,裂缝发展迅速,在破坏形态中存在部分粗骨料的损伤破坏,最终使得混凝土峰值应力逐步增大;同时聚丙烯纤维掺量的提高使得混凝土在受压作用下的侧向变形所受影响随之增大,加载应变率越高其侧向变形受到的影响越大,最终掺聚丙烯纤维混凝土的峰值应力受加载应变率影响所提高的幅度相对较高.

对于普通混凝土峰值应力动力提高系数与加载应变率之间的定量分析一般采用式(2)进行表述.该方程说明混凝土峰值应力动力提高系数 α_{DIF} 与 $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 呈线性变化关系^[18].

$$\alpha_{DIF} = b + a \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (2)$$

式中:参数 a 表示 α_{DIF} 受加载应变率影响的提高幅度大小;参数 b 为静力加载应变率下的混凝土峰值应力动力提高系数,一般取值 $b=1$.

依据式(2),对本文试验数据进行数学回归分析,得到橡胶纤维混凝土峰值应力动力提高系数 α_{DIF} 与加载应变率的关系,如式(3)~(6)和图7所示.

试件C-0%-0%:

$$\alpha_{DIF} = 1 + 0.0960 \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (3)$$

试件C-0%-0.6%:

$$\alpha_{DIF} = 1 + 0.1294 \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (4)$$

试件C-30%-0%:

$$\alpha_{DIF} = 1 + 0.0617 \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (5)$$

试件C-30%-0.6%:

$$\alpha_{DIF} = 1 + 0.0861 \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (6)$$

分析图7可见,式(2)对橡胶纤维混凝土峰值应力动力性能的定量分析具有较好的适用性.对比分析式(3)~(6)中的待定系数 a 可知,在相同橡胶颗粒取代率下,掺聚丙烯纤维混凝土的系数 a 相对较高;在相同聚丙烯纤维掺量下,掺橡胶颗粒混凝土的系数 a 相对较低.与定性研究结果相同,即橡胶颗粒使得混凝土峰值应力受加载应变率影响而导致的变化有所减小,聚丙烯纤维使得混凝土峰值应力受加载应变率影响而导致的变化有所增大.

2.3.2 变形参数

研究混凝土力学性能中的变形参数时,一般通过混凝土的弹性模量和峰值应变进行分析.根据图3和式(7),可提取橡胶纤维混凝土的弹性模量,而峰值应变即为混凝土峰值应力所对应的应变值.混凝土弹性模量计算式为^[2]:

$$E = \frac{\sigma_{0.5} - \sigma_{0.1}}{\epsilon_{0.5} - \epsilon_{0.1}} \quad (7)$$

式中: $\sigma_{0.5}$ 和 $\sigma_{0.1}$ 为混凝土峰值应力的50%和10%,MPa; $\epsilon_{0.5}$ 和 $\epsilon_{0.1}$ 为混凝土峰值应变的50%和10%.

加载应变率对混凝土的弹性模量和弹性模量动力提高系数 E_d/E_s (E_d 和 E_s 分别为动力加载应变率和静力加载应变率下的混凝土弹性模量)的影响见图8、9.

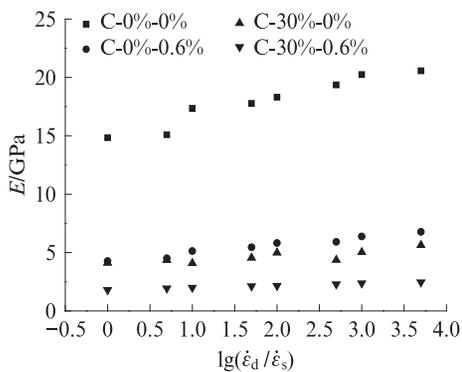


图8 加载应变率对混凝土弹性模量的影响

Fig. 8 Effect of loading strain rate on elastic modulus of concrete

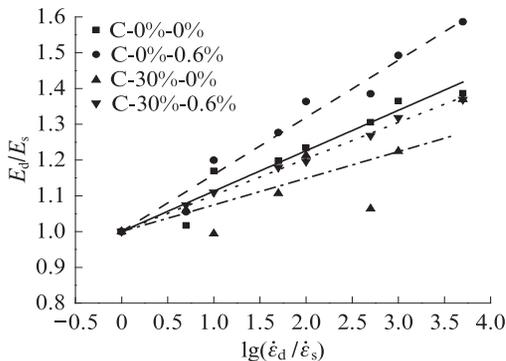


图9 加载应变率对混凝土弹性模量动力提高系数的影响

Fig. 9 Effect of loading strain rate on elastic modulus dynamic improvement coefficient of concrete

由图8、9可见,在相同加载应变率下,掺橡胶颗粒和聚丙烯纤维混凝土的弹性模量相对较低.橡胶颗粒取代率和聚丙烯纤维掺量均为0%的普通混凝土试件在加载应变率为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时,其弹性模量为13.54GPa,在加载应变率提高至 $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,其弹性模量为16.19GPa,弹性模量受加载应变率影

响所提高的幅度为19.57%;单掺聚丙烯纤维试件的弹性模量由静力加载应变率 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的4.27GPa提高至动力加载应变率 $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时的6.77GPa,提高幅度为58.65%;单掺橡胶颗粒试件的弹性模量由静力加载应变率 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的4.11GPa提高至动力加载应变率 $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时的5.63GPa,提高幅度为37.00%;双掺橡胶颗粒和聚丙烯纤维试件的弹性模量由静力加载应变率 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的1.80GPa提高至动力加载应变率 $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时的2.46GPa,提高幅度为36.90%.从总体趋势分析可知,对于同种配合比试件,随着加载应变率的提高,混凝土弹性模量逐步增大;聚丙烯纤维掺量相同时,掺有橡胶颗粒的混凝土弹性模量受加载应变率影响所提高的幅度相对较低;橡胶颗粒取代率相同时,掺有聚丙烯纤维的混凝土弹性模量受加载应变率影响所提高的幅度相对较高.

对于橡胶纤维混凝土弹性模量受加载应变率影响的定量关系提出类似于式(2)所示的表达形式,根据本文不同加载工况下橡胶纤维混凝土弹性模量进行定量计算分析,得到式(8)~(11).

试件C-0%-0%:

$$E_d/E_s = 1 + 0.113 \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (8)$$

试件C-0%-0.6%:

$$E_d/E_s = 1 + 0.159 \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (9)$$

试件C-30%-0%:

$$E_d/E_s = 1 + 0.074 \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (10)$$

试件C-30%-0.6%:

$$E_d/E_s = 1 + 0.101 \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (11)$$

由式(8)~(11)和图9可知,式(2)对橡胶纤维混凝土弹性模量在加载应变率影响下的变化幅度具有较好的定量分析效果.通过分析式(8)~(11)的参数值可知,4种配合比橡胶纤维混凝土的弹性模量在加载应变率影响下的变化规律与定性分析结论相一致.

由图3所示曲线提取峰值应变,采用与峰值应力相同的定性分析方式,分析加载应变率对橡胶纤维混凝土峰值应变及其变化系数的影响,如图10、11所示.

由图10、11可见,相同聚丙烯纤维掺量下,掺有橡胶颗粒的混凝土峰值应变相对较高;相同橡胶取代率下,掺有聚丙烯纤维的混凝土峰值应变相对较高.当橡胶取代率和聚丙烯纤维掺量分别为(0%,0%)、(0%,0.6%)、(30%,0%)和(30%,0.6%)时,橡胶纤维混凝土峰值应变的变化区间

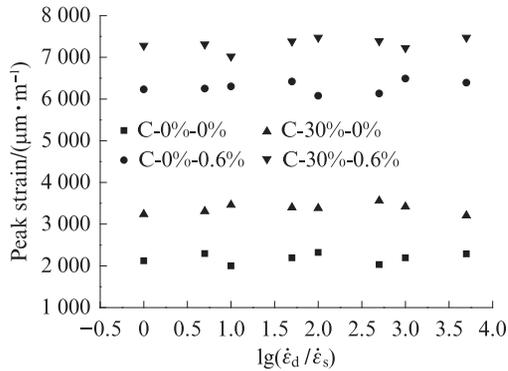


图10 加载应变率对混凝土峰值应变的影响
Fig. 10 Effect of loading strain rate on peak strain of concrete

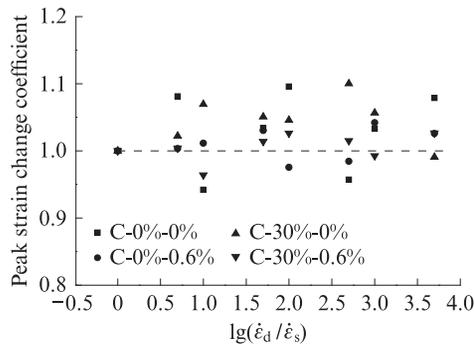


图11 加载应变率对混凝土峰值应变变化系数的影响
Fig. 11 Effect of loading strain rate on peak strain change coefficient of concrete

分别为1 997~2 323、6 077~6 491、2 848~3 560、7 019~7 474 $\mu\text{m}/\text{m}$,峰值应变变化系数的变化区间分别为-5.80%~9.58%、-2.44%~4.21%、-0.93%~10.01%和-3.60%~2.65%。文献[13]对于普通混凝土极限应变受加载应变率影响而导致的变化尚无定论,分别是:随着加载应变率的提高,普通混凝土极限应变逐步增大;随着加载应变率的提高,普通混凝土极限应变逐步减小;随着加载应变率的提高,普通混凝土极限应变基本没有变化。本文研究的橡胶纤维混凝土极限应变受加载应变率的影响所发生的变化较为离散,没有明确规律,这主要与混凝土材料的随机性和离散性有关,而混凝土的随机性和离散性表现在混凝土应变参数中。

3 结论

(1)相同加载应变率作用下,掺橡胶颗粒和聚丙烯纤维的混凝土在受压破坏后的完整性相对较高;加载应变率对不同取代率橡胶混凝土受压破坏形态的影响规律基本相似;当聚丙烯纤维掺量为0.6%时,静动力受压作用下的混凝土破坏形态基本相似,与不掺聚丙烯纤维的混凝土所表现的规律存在明显不同。

(2)相同橡胶取代率和聚丙烯纤维掺量下,随着加载应变率的提高,混凝土峰值应力和弹性模量明显增大。掺橡胶颗粒混凝土的峰值应力和弹性模量受加载应变率影响而导致的变化幅度相对较低,掺聚丙烯纤维混凝土的变化幅度相对较高。

(3)随着橡胶取代率和聚丙烯纤维掺量的提高,橡胶纤维混凝土的塑性变形能力逐步增大,加载应变率对橡胶纤维混凝土塑性变形能力没有明显影响。随着加载应变率的提高,橡胶纤维混凝土的峰值应变变化较为离散,这与混凝土材料的随机性和离散性有关。

(4)提出了加载应变率与橡胶纤维混凝土峰值应力动力提高系数和弹性模量动力提高系数的关系方程,并对其受力机理进行了探讨分析,研究结果对结构设计有参考价值。

参考文献:

- [1] HOSSAIN F M Z, SHAHJALAL M, ISLAM K, et al. Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225:983-996.
- [2] 胡艳丽,高培伟,李富荣,等.不同取代率的橡胶混凝土力学性能试验研究[J].*建筑材料学报*,2020,23(1):85-92.
HU Yanli, GAO Peiwei, LI Furong, et al. Experimental study on mechanical properties of rubber concrete with different substitution rates[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1):85-92. (in Chinese)
- [3] WANG J Q, DAI Q L, SI R Z, et al. Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234:1351-1364.
- [4] ELDIN N N, SENOUCI A B. Rubber-tire particles as concrete aggregate [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1993, 5(4):478-496.
- [5] TOPCU I B. The properties of rubberized concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(2):304-310.
- [6] SONG P S, HWANG S, SHEU B C. Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(8):1546-1550.
- [7] YAO W, LI J, WU K R. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(1):27-30.
- [8] SHIMING S, YUPU S. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 40:322-329.
- [9] SALLAM H E M. Impact resistance of rubberized concrete [J]. *Engineering Research Journal*, 2008, 31(3):265-271.
- [10] ALHOZAIMY A M, SOROUSHIAN P, MIRZA F. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete

- and the effects of pozzolanic materials [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1996, 18(2):85-92.
- [11] 梁宁慧,杨鹏,刘新荣,等.高应变率下多尺寸聚丙烯纤维混凝土动态压缩力学性能研究[J].*材料导报*,2018,32(2):288-294.
LIANG Ninghui, YANG Peng, LIU Xinrong, et al. A study on dynamic compressive mechanical properties of multi-size polypropylene fiber concrete under high strain rate [J]. *Materials Review*, 2018,32(2):288-294. (in Chinese)
- [12] 闫东明,林皋,王哲,等.不同应变速率下混凝土直接拉伸试验研究[J].*土木工程学报*,2005(6):97-103.
YAN Dongming, LIN Gao, WANG Zhe, et al. A study on direct tensile properties of concrete at different strain rates [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005(6):97-103. (in Chinese)
- [13] 曾莎洁,李杰.混凝土单轴受压动力全曲线试验研究[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2013,41(1):7-10.
ZENG Shajie, LI Jie. Experimental study on uniaxial compression behavior of concrete under dynamic loading[J].*Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(1):7-10. (in Chinese)
- [14] WATSTEIN D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete [J]. *ACI Journal*, 1953, 49(4):729-744.
- [15] 李杰,晏小欢,任晓丹.不同加载速率下混凝土单轴受压性能大样本试验研究[J].*建筑结构学报*,2016,37(8):66-75.
LI Jie, YAN Xiaohuan, REN Xiaodan. Large-sample experimental study on uniaxial compressive behavior of concrete under different loading rates [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(8):66-75. (in Chinese)
- [16] 袁兵,刘锋,丘晓龙,等.橡胶混凝土不同应变率下抗压性能试验研究[J].*建筑材料学报*,2010,13(1):12-16.
YUAN Bing, LIU Feng, QIU Xiaolong, et al. Experimental study on compressive performances of rubber concrete under different strain rate [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(1):12-16. (in Chinese)
- [17] 郭永昌,刘锋,陈贵炫,等.橡胶混凝土的冲击压缩试验研究[J].*建筑材料学报*,2012,15(1):139-144.
GUO Yongchang, LIU Feng, CHEN Guixuan, et al. Experimental investigation on impact resistance of rubberized concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(1):139-144. (in Chinese)
- [18] 施林林,宋玉普,沈璐.不同应变率下大骨料及湿筛混凝土单轴受压试验研究[J].*世界地震工程*,2016,32(2):270-276.
SHI Linlin, SONG Yupu, SHEN Lu. Experimental study on uniaxial compression properties of large aggregate and wet-sieved concrete at different strain rates [J]. *World Earthquake Engineering*, 2016, 32(2):270-276. (in Chinese)