

圆钢管再生镍铁渣混凝土柱冲击性能试验*

罗才松^{1,2}, 陈华艳¹, 付朝江¹, 邓蜀鹏¹, 祁 皓², 王碧珍³, 张泽群⁴

(1. 福建理工大学福建省土木工程新技术与信息化重点实验室 福州, 350118)

(2. 福州大学土木工程学院 福州, 350108) (3. 福建省中霖工程建设有限公司 南平, 353000)

(4. 侨智建设有限公司 福州, 350000)

摘要 为研究掺镍铁渣钢管再生混凝土柱抗冲击性能,以粗骨料替代率、轴压比、落锤质量及冲击能量为变化参数,设计并制作了11根圆钢管再生混凝土柱。通过落锤冲击试验,得到了试件的破坏形态、位移时程曲线及冲击力时程曲线,研究了轴压比、粗骨料取代率、冲击能量和落锤质量对钢管再生混凝土柱侧向冲击性能的影响。结果表明:钢管再生混凝土柱抗冲击性能良好,能量吸收率基本恒定在67%左右;与取代率为0%相比,再生粗骨料取代率为30%时,试件跨中挠度平均降低8.9%;再生粗骨料取代率为70%时,试件跨中挠度平均降低11.4%;随着冲击能量的增加,试件跨中残余位移显著增大;轴压比在0~0.4以内,轴向力对钢管再生混凝土抗冲击性能有提高作用;落锤质量由330 kg增加至430 kg,冲击持续时间增加16%;套箍系数增大,跨中挠度减小。

关键词 钢管混凝土柱;落锤冲击;冲击能量;再生块体混凝土;时程曲线;轴压比

中图分类号 TU398.9;TU375.3

引言

据统计,我国目前每年建筑垃圾产生总量约为35.5亿吨,如果建筑垃圾能够得到充分的再利用,不仅可以解决约1/3的填埋和污染问题,还可以减少周边城市与生活垃圾一起产生的二次污染^[1-2]。再生混凝土(recycled aggregate concrete,简称RAC)的使用,可以减少废弃混凝土随意堆放造成的环境污染和土地占用,具有可持续发展的意义^[3-4]。由于废弃混凝土在破碎过程中会产生大量微裂纹和裂缝,初始损伤积累较多,一般不能用于承重结构中^[5]。镍铁渣(ferronickel slag,简称FNS)是腐殖土型红土矿在电炉或高炉中还原熔炼镍铁后产生的浅绿色冶金废渣^[6]。为了解决冶金废渣再利用问题,减少堆积物的二次污染,有学者将镍铁渣研磨后作为矿物掺合料取代部分水泥,制备混凝土。文献[7-8]研究了强度等级为C30和C35的混凝土,分别添加不同含量(10%~50%)的镍铁渣复合掺合料,试验结果表明,普通混凝土的轴向抗压强度、弹性模量、劈裂抗拉强度、立方抗压强度与普通混凝土的正相关关系适用于不考虑特定粉剂掺量的镍铁渣混凝土,其泊松比和压缩破坏模式与普通混凝土相同。刘梁友等^[9]研究了掺量为10%~40%的镍铁渣粉对水泥强

度的影响,发现随着镍铁渣掺入量的增加,3 d和28 d抗压强度逐渐降低。如何将再生混凝土应用于承重结构之中,成为推广和应用再生混凝土技术必须解决的关键问题。钢管混凝土结构以其较高的结构承载力、优良的抗震性能、较快的施工速度和低廉的造价等优势,广泛应用于工业厂房、大跨结构和民用建筑中^[5]。为了改善再生混凝土的性能,研究人员采用钢管对再生混凝土进行约束,研究钢管再生混凝土(recycled aggregate concrete filled steel tube,简称RACFST)结构的力学性能。

目前,对钢管再生混凝土柱的研究主要集中在偏压、受弯、压弯和抗震等方面。结构在使用过程中除了遭受永久荷载与可变荷载之外,还会遭受偶然荷载的作用^[10]。康苗等^[11]研究了中空夹层钢管混凝土试件抗冲击性能,结果表明,随着冲击质量的增大,冲击持续时间增长。Shakir等^[12]研究了普通和再生混凝土柱抗侧向冲击,结果表明,2种混凝土填充的钢管混凝土柱抗侧向冲击性能相当。杨有福等^[13]通过落锤冲击试验研究了再生混凝土粗骨料取代率、冲击能量及轴压比对钢管再生混凝土柱的影响。

笔者将工业废料镍铁渣与建筑固废综合回收利用,用镍铁渣作为胶凝材料替代部分水泥,对11根掺镍铁渣圆钢管再生混凝土柱进行试验,通过改变

* 福建省自然科学基金资助项目(2022J01928);福建省住建厅科技资助项目(2022-K-71,2022-K-305)

收稿日期:2021-05-17;修回日期:2021-07-01

再生混凝土取代率、轴压比、落锤质量及冲击能量,对圆钢管再生混凝土构件进行了侧向落锤冲击试验。

1 试验研究

1.1 试验材料

试验材料采用普通硅酸盐水泥、自来水、天然河沙、高效减水剂、天然粗骨料及再生粗骨料。再生粗骨料由施工现场龄期超过28 d的废料混凝土破碎得到,粒径为5~14 mm连续级配。试验所用镍铁渣的密度为2.86 g/cm³,比表面积为425.6 m²/kg,平均粒径为13.953 μm,主要粒径分布在1~100 μm。镍铁渣和水泥的主要化学组分见表1,通过X射线粉末衍射仪测试镍铁渣的矿物成分,其X射线衍射(X ray diffraction,简称XRD)图如图1所示。由图可知,试验所用的镍铁渣的晶相组成主要包括方解石(Ca₂CO₃)、镁铝尖晶石(MgAl₂O₄)、尖晶橄榄石((Mg,Fe)₂SiO₄)以及硅酸镁(Mg₂(SiO₄))。此外,在30~45°之间存在一个明显的“馒头峰”,表明该镍铁渣中存在大量的非结晶组分,这说明镍铁渣具有较好的潜在水化活性,在碱性物质激发下出现火山灰反应,可作为胶凝材料使用。

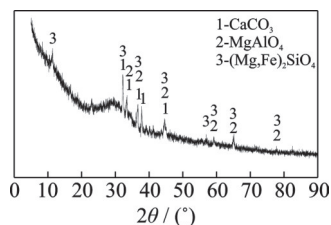


图1 镍铁渣 XRD 图

Fig.1 XRD curve of FNS

表1 镍铁渣和水泥的主要化学组分

氧化物	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	其他
FNS	37.47	24.82	21.37	10.53	1.72	0.32	3.77
水泥	21.69	62.55	4.38	2.05	3.34	2.89	3.10

本研究试验所用镍铁渣掺量占再生混凝土总胶凝材料的20%,再生混凝土质量配合比为胶凝材料(水泥+镍铁渣):砂:粗骨料(天然骨料+再生骨料):水=546:604:1 075:180。考虑到再生骨料吸水率较大,再生混凝土在拌制时额外加入了按再生骨料吸水率计算得的附加用水。粗骨料取代率分别为0%,30%,70%和100%,试验时的立方体抗压强度分别为41.8,51.0,37.7和46.9 N/mm²。无缝圆钢管所采用的钢材为Q345,实测钢材性能见表2。

表2 实测钢材性能

Tab.2 The mechanical properties of steel

钢管壁厚/ mm	屈服强度/ (N•mm ⁻²)	极限强度/ (N•mm ⁻²)	弹性模量/ (N•mm ⁻²)
4.5	391	533	1.97×10 ⁵

1.2 试件设计

笔者共设计了11根钢管再生混凝土柱,考虑到仪器自身加载能力并结合实际工程的尺寸要求,对试件进行1:2缩尺后确定了试件的尺寸。试件外径 $D=149$ mm,钢管壁厚 $t=4.5$ mm,长度均为 $L=1 800$ mm。为了模拟真实的工程情况,即柱在正常使用中的固定端约束,考虑设备加载方式,在每根试件两端设置30 mm厚的端板,端板尺寸为350 mm×350 mm。两端端板上各设置8个螺栓孔,螺栓孔与反力钢墩螺栓连接形成固端约束。试件尺寸及构造见图2,试件主要参数及试验结果见表3。

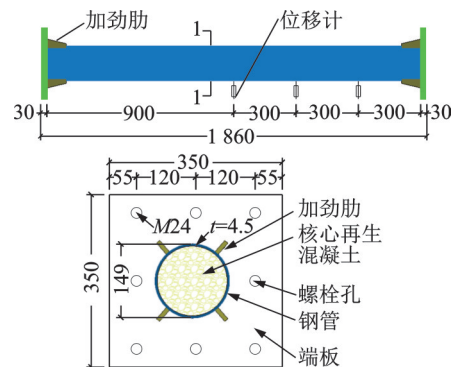


图2 试件尺寸及构造(单位:mm)

Fig.2 Dimensions and details of specimens (unit:mm)

试件设计主要考虑了粗骨料取代率、落锤质量、冲击能量和轴压比。表3中试件编号规则如下:第1个字母R表示圆钢管再生混凝土,C表示圆钢管混凝土;第2个字母代表轴压比情况,P表示预加轴压比为0.2,P'表示预加轴压比为0.4,N表示未加轴压力;最后1个数字表示落锤冲击高度,5表示落锤冲击高度为5 m,以此类推。其他字母意义如下: r 为再生混凝土取代率; f_{cu} 为立方体抗压强度; E 为冲击能量; E_1 为试件整体受弯变形所吸收的能量; ξ 为套箍系数; F_p 为冲击力峰值; F_{pl} 为冲击力平台值; T_d 为冲击持续时间; Δ_b 为跨中挠度峰值。

文献[14-15]对钢管再生混凝土柱抗压承载力进行了计算对比,结果表明,采用《钢管混凝土结构技术规范》^[16]计算的承载力与试验值最为接近。本研究轴力设计值按文献[16]计算如下

表 3 试件主要参数及试验结果
Tab.3 The specimen list and test results summary

试件编号	轴压比 N/N_u	$r/\%$	$f_{cu}/(N \cdot mm^{-2})$	落锤质量/kg	ξ	E/kJ	E_1/kJ	E_1/E	F_p/kN	F_{pl}/kN	T_d/ms	Δ_p/mm
RP70-5	0.2	70	37.7	330	1.38	16.2	12.3	0.76	1 177	165	22	52
RP70-7	0.2	70	37.7	330	1.38	22.7	14.2	0.63	1 357	153	25	66
RP70-9	0.2	70	37.7	330	1.24	29.1	17.1	0.59	1 559	147	31	97
RN70-5	0.0	70	37.7	330	1.38	16.2	13.0	0.80	1 113	139	28	53
CP*-5	0.4	0	41.8	330	1.24	16.2	12.7	0.78	1 205	181	22	50
RP30-9	0.2	30	51.0	330	1.02	29.1	16.6	0.57	1 619	154	30	105
CP-9	0.2	0	41.8	330	1.21	29.1	16.3	0.56	1 571	157	29	91
RP70-6.1	0.2	70	37.7	380	1.38	22.7	15.7	0.69	1 308	167	29	73
RP70-5.4	0.2	70	37.7	430	1.38	22.7	15.1	0.67	1 250	148	29	72
RP100-5	0.2	100	46.9	330	1.11	16.2	11.5	0.71	1 192	183	22	49
RP30-7	0.2	30	51.0	330	0.91	22.7	14.4	0.63	1 329	164	26	70

$$N_u = 0.9A_c f_c (1 + \alpha \xi) \quad (\xi < 1) \quad (1)$$

$$N_u = 0.9A_c f_c (1 + \sqrt{\xi} + \xi) \quad (\xi > 1) \quad (2)$$

$$\xi = A_s f_y / A_c f_c \quad (3)$$

其中: N_u 为钢管混凝土柱轴压承载力; ξ 为钢管混凝土构件套箍系数; α 为与混凝土强度有关系数,本研究取 2; A_s, A_c 分别为钢管和再生混凝土横截面积。

轴压比 $p = N_0 / N_u$, 其中: N_0 为试件施加的轴力。冲击能量 $E = mgh$, 由落锤的重力势能转换而来, 其中: m 为落锤质量; g 为重力加速度; h 为落锤下落的高度。

1.3 试验装置和加载方式

试验装置如图 3 所示。落锤由竖直方向导轨约束, 保证在冲击过程中落锤处于试件跨中正上方。落锤由圆形锤头、配重块和力传感器三部分组成。配重总质量可在 230~980 kg 范围内调整, 落锤试验

机有效高度为 14.5 m。试件两端分别用压梁夹持, 底部铰支座可以自由转动, 钢墩竖向平面有间距为 120 mm 的螺栓孔用于固定试件, 通过螺栓与试件连接形成固端约束。

超高型落锤试验机自带加压系统, 共有 6 个油压千斤顶, 每根最大拉力为 60 t。千斤顶通过水平拉杆与弹簧碟片相连, 通过加压设备施加拉力, 与钢墩组成自平衡反力系统。试验中通过试验室吊车梁将试件调至钢支座上, 然后调节构件位置, 使锤头处于试件跨中, 固定试件端部。通过 4 个空心油压千斤顶施加轴力, 待施加轴力达到预加设计值后, 释放落锤, 落锤沿着导轨自由落下, 对试件施加侧向冲击荷载。试验中测量和记录的数据有冲击力和跨中挠度时程曲线。落锤信号调理仪可测量落锤速度, 冲击力和跨中挠度由落锤中电信号传感器与多通道同步数据采集仪采集。通过调理仪触发装置, 触发数据采集系统与高速摄像系统同步进行, 使用高速相机记录整个冲击过程。

2 试验结果

2.1 冲击过程

RP70-9 落锤撞击试件过程如图 4 所示。可以看出, 整个冲击过程分为 5 个阶段: ①落锤沿导轨向下撞击试件, 在撞击瞬间, 试件以大于落锤的速度向下运动(0~1 ms); ②试件通过变形消耗获得瞬间动能, 下降速度变慢, 落锤在重力作用下以稍大于试件的速度向下, 再次撞击试件, 并和试件一起向下运动, 直至速度为 0, 此时位移达到峰值(1~22 ms); ③试件弹性恢复, 释放一部分弹性势能, 将能量传递回落锤, 一起向上运动(22~29 ms); ④向上一段距离

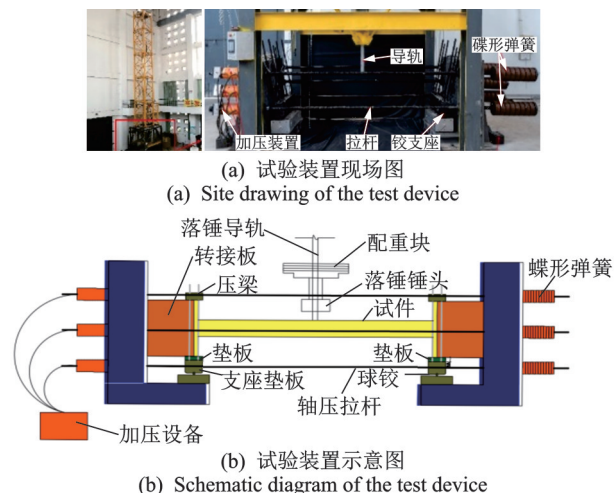


图 3 落锤冲击试验装置

Fig.3 Drop hammer impact test device

后,试件储存的弹性势能耗散,在平衡位置附近自由振动(35 ms);⑤落锤由于自身惯性,继续向上运动,直至速度为0,再次向下运动,撞击试件,反复几次之后,落锤动能全部消耗,试件自身由于阻尼消耗最终静止。本研究冲击持时为22~31 ms。

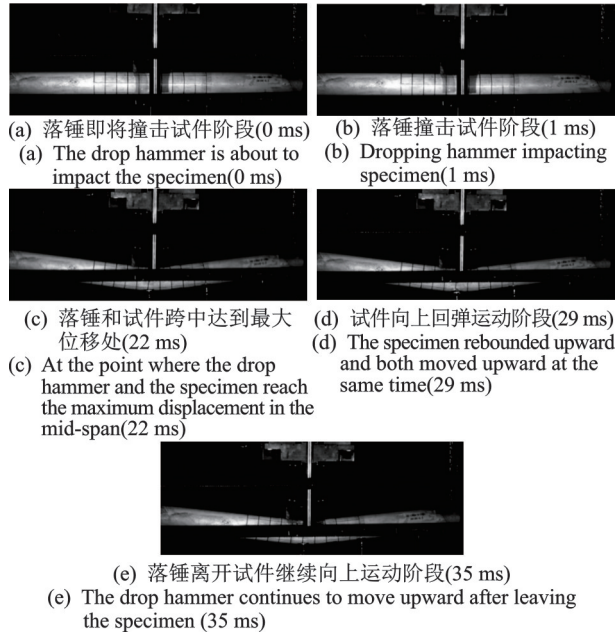


图4 落锤撞击试件过程

Fig.4 Impact process of drop hammer on specimen

2.2 破坏模式

RP70系列试件破坏模式和残余变形曲线如图5所示。由图5(a)可见:试件发生了明显的弯曲变形,随着能量的增加,试件跨中变形挠度也增大,跨中局部屈曲区域增大,试件固支端局部屈曲更加明显;由于跨中和固定支座附近钢材的屈服和内部混凝土破坏,形成了两处塑性铰,其余部分变形很小。图5(b)为试件残余变形曲线,可以看出,试件撞击部位两侧变形模式基本相同。

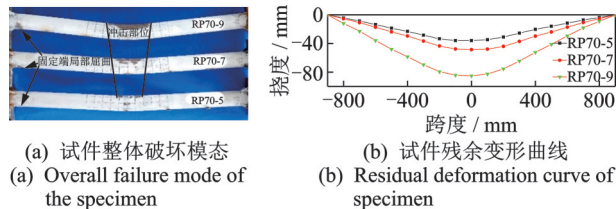


图5 RP70系列试件破坏模式和残余变形曲线

Fig.5 Failure mode and residual deformation curve of RP70 series specimens

图6为试件CP-9和RP30-9跨中局部破坏模式。由图6(a)可以知,试件在冲击点附近变形最明显,落锤撞击点受到瞬间较大压力,发生明显的局部屈曲。

由图6(b)可知,跨中底部混凝土受拉破坏,产生裂缝,顶部在外钢管屈曲处混凝土碎屑最明显。CP-9内部破碎呈贯穿长竖线,RP30-9在相同冲击能量下内部核心再生混凝土呈小碎块状,掺镍铁渣的再生混凝土强度越高就越脆^[8],而管内混凝土与钢管接触界面未见明显滑移。由冲击试验发现,再生混凝土能与钢管共同工作,其抵抗冲击性能良好。

由图6(c)可知,固支支座底部因受压发生了局部屈曲,其上部由于巨大拉力而发生断裂,断裂部位在加劲肋末端。对比于图5(a),试件除了冲击点与固端支座附近外,未见明显局部破坏。构件在不同冲击能量下的局部变形增加,但是增加的趋势很小,几乎可以忽略。随着能量增加,构件弯曲变形最为明显,并通过弯曲变形吸收了能量。

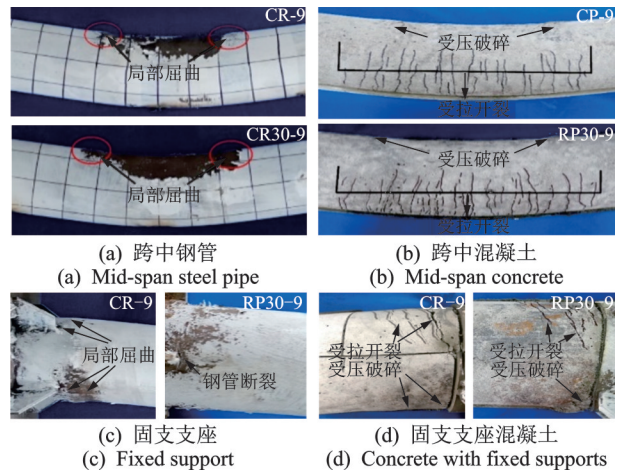


图6 试件CP-9和RP30-9跨中局部破坏模式

Fig.6 Local failure modes of CP-9 and RP30-9 specimens

2.3 冲击力

图7为冲击力时程曲线,分为峰值段、平台段和下降段。峰值段过程为:①在0~1 ms落锤撞击试件瞬间(点A),冲击力迅速增大到峰值 F_p ,试件获得较大动能,导致试件向下运动速度大于落锤速度,落锤与试件分离,因此冲击力瞬间降低,直至为0;②试件由于变形,动能不断被消耗而速度降低,落锤由于重力作用继续向下,再次撞击试件,冲击力出现反弹,出现第2次峰值;③落锤和试件之间能量相互转换,冲击力发生振荡(1~10 ms)。平台段过程经多次能量转换,最终落锤与试件以相似的速度向下运动,此时冲击力在一个恒定范围内波动(10~29 ms)。在下降阶段,试件将动能全部转化为自身势能,由于试件弹性势能的释放,使落锤得到向上运动的动能,直至最后脱离试件,此过程中冲击力不断减小,最终为0(点B)。通过对冲击力时程曲线积分,得到平台段的平均值 F_{pl} 以及冲击持续时间 T_d 。

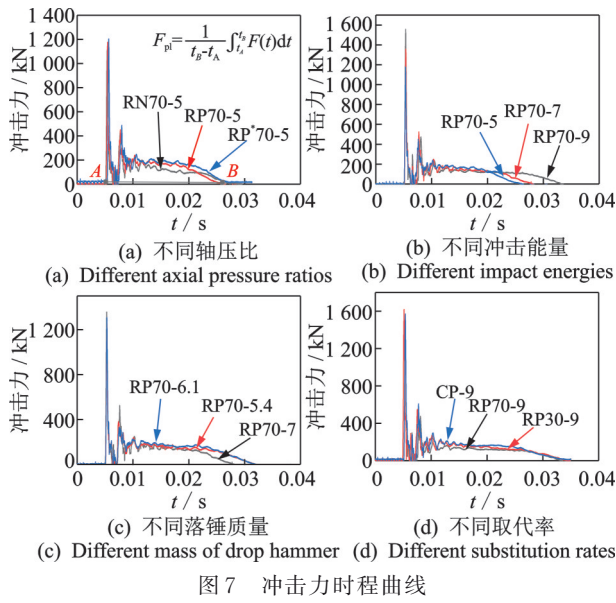


图 7 冲击力时程曲线

2.4 跨中挠度

图 8 为跨中挠度时程曲线。所有曲线呈现相同的特点:0~22 ms 内试件获得较大的动能,通过塑性和弹性变形,快速耗散获得的动能,试件跨中挠度迅速增大至峰值 Δ_p ,且能量越大,曲线斜率越大;跨中挠度达到峰值时(22~29 ms),试件和落锤向上运动,最终在一个恒定值附近振动;试件在阻尼作用下消耗掉全部能量,最后停止。

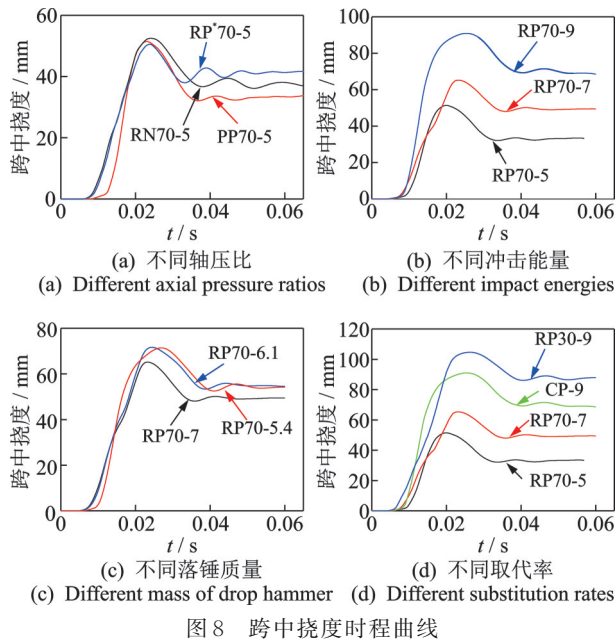


图 8 跨中挠度时程曲线

2.5 冲击力-跨中挠度

冲击力-跨中挠度曲线见图 9。可以看出:对于

钢管再生混凝土试件,当冲击力达到峰值时,试件跨中挠度在 0~1 mm 之间,说明冲击力达到峰值时试件整体变形不明显,主要发生局部变形;冲击力进入平台段,跨中挠度有较大变化,试件发生了塑性变形;冲击力进入下降段后,试件跨中挠度随之减小。

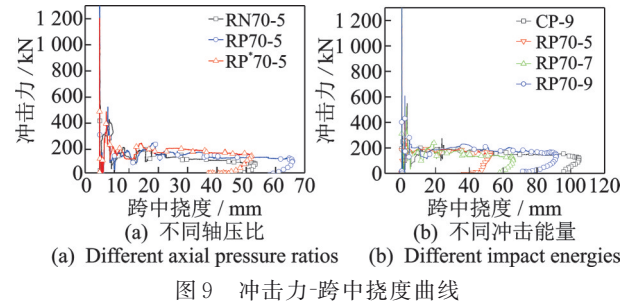


图 9 冲击力-跨中挠度曲线

3 参数分析

3.1 冲击能量

冲击能量的影响如图 10 所示。由图 10(a,b)可以看出,再生骨料取代率对冲击力峰值的影响不明显,随着取代率的增加,平台值呈下降趋势。由表 3 可以得到,与再生粗骨料取代率为 0% 相比,取代率为 30% 时,冲击力平台值下降 7.9%~9.9%;取代率为 70% 时,冲击力平台值下降 8.8%~14%。由图 10(c)可以看出,冲击持续时间和跨中挠度峰值随着冲击能量的增大而增加,这是因为冲击能量越大,试件消耗的塑性变形能越大,发生的弯曲变形越大,需要的时间也越多。由图 10(d)可以看出,随着冲击能量的增大,试件跨中挠度峰值变化明显增大。

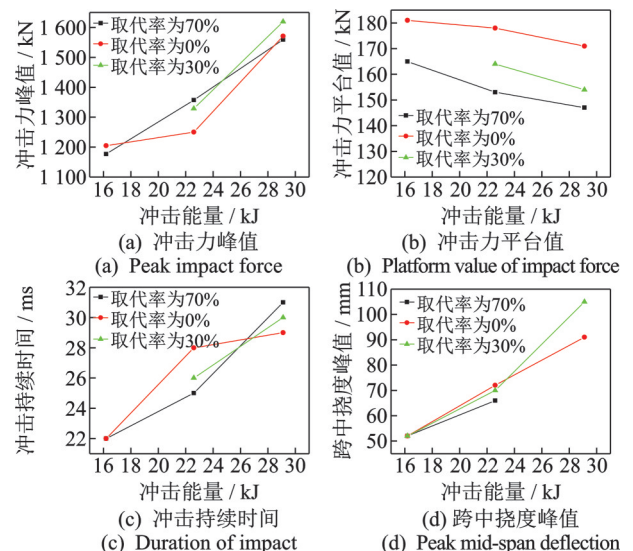


图 10 冲击能量的影响

Fig.10 Impact energy effect

3.2 套箍系数

图11为套箍系数-跨中挠度关系曲线。对冲击能量相同而混凝土强度不同的钢管再生混凝土试件,其跨中挠度随套箍系数的增大而减小。这是因为随着套箍系数的增加,钢管对于混凝土的约束能力增强,使混凝土三轴受力更加明显,混凝土抗压强度增大,钢管再生混凝土柱抗冲击性能增加。

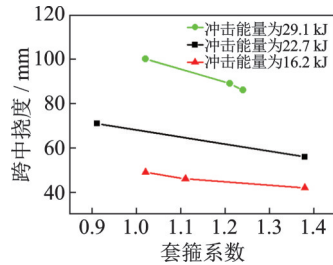


图11 套箍系数-跨中挠度关系曲线

Fig.11 Relationship curve between hoop coefficient and mid span deflection

3.3 落锤质量的影响

图7(c)和图8(c)为相同冲击能量、不同落锤质量下试件的冲击力时程曲线和跨中挠度时程曲线对比。由图7(c)和表3可以看出:随着落锤质量从330 kg增加至430 kg,冲击力峰值由1 357 kN降至1 250 kN,降低了7.9%;冲击持续时间由25 ms增加到29 ms,增加了16%,而冲击力平台值基本保持不变。由图8(c)和表3可以看出:随着落锤质量的增加,试件跨中斜率变大,跨中峰值挠度由66 mm增加到73 mm,跨中残余挠度增加了10%。这表明落锤质量的改变对冲击持续时间影响较大,对冲击力平台值和冲击力峰值影响不大。

3.4 轴压比的影响

图7(a)和图8(a)为相同冲击能量、不同轴压比下试件冲击力时程和跨中挠度时程曲线对比。由图7(a)和表3可以看出:随着轴压比从0增加至0.4,冲击力峰值由1 113 kN增加至1 205 kN,增加了8.3%;冲击力平台值由130 kN增加至181 kN,增加了28%。轴压比对冲击力平台值影响更显著,这是因为轴力作用下,构件界面抗弯强度得到提高,从而提高了界面抗冲击能力。由图8(a)和表3可以看出:轴压比从0增加至0.4,跨中挠度峰值由53 mm降低至50 mm,降低了6%。这说明本次试验轴压比在0~0.4以内时,轴向力能够提高钢管再生混凝土柱的抗冲击性能。

3.5 能量吸收

冲击试验过程中,忽略摩擦阻力,冲击能量 E 由三部分消耗,即落锤势能、试件局部变形和试件弯曲变形,其中试件局部变形较小,本研究忽略摩擦力损失的能量。通过冲击力(F)-跨中挠度(Δ)曲线可量化试件整体弯曲变形所吸收的能量。将试验所得的 F - Δ 曲线通过积分,求出曲线与 x 轴的包络面积,将所得面积记为 E_1 (试件弯曲变形消耗的冲击能量),得到整体变形的能量吸收率(energy absorption ratio,简称EAR),即 $EAR = E_1/E$ 。各试件整体弯曲变形的能量吸收率见图12。由图可知:随着能量的增加,试件弯曲变形吸收能有所下降;冲击能量越大,试件破坏越严重,局部屈曲消耗的能量也有所增加;试件弯曲变形吸收能量保持在67%左右,表明钢管再生混凝土试件通过整体变形吸收了大部分冲击能量,即平台段是冲击过程中主要的耗能阶段^[17]。

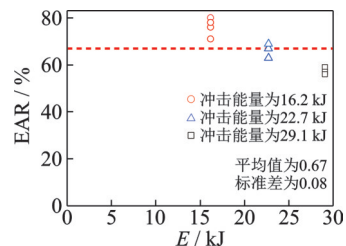


图12 各试件整体弯曲变形的能量吸收率

Fig.12 Energy absorption rate of whole bending deformation of each specimen

4 结论

1) 与钢管混凝土试件类似,在冲击荷载作用下分为3个阶段,即冲击力峰值阶段、平台段和下降段。在冲击作用下,构件呈整体弯曲破坏模式,以整体弯曲变形为主,基于试验结果可以获得相应能量吸收指标,能量吸收率在67%左右。

2) 随着再生粗骨料的增加,冲击力峰值变化较小,平台值呈下降趋势。在相同冲击能量下,粗骨料取代率为0%时,混凝土破坏在冲击点两侧均匀分布,呈细小裂缝状;加入再生粗骨料混凝土时,由于内部薄弱区增多,在冲击点附近不均匀分布,呈碎块状。

3) 在相同冲击能量下,落锤质量由330 kg增加至430 kg,冲击持续时间增加16%,残余挠度增加10%,而冲击力峰值、平台值影响不大。

4) 预加轴力对冲击力平台值影响最为显著,轴压比由0~0.4变化时,冲击力平台值增加了28%,轴向力对钢管再生混凝土的抗冲击性能有提高作用。

5) 相同冲击能量下,随着钢管套箍系数的增

大,跨中挠度呈下降趋势。

参 考 文 献

- [1] 丛军辉. 吉林省建筑废弃物资源化再利用一体化项目研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2017.
- [2] 杨亚楠. 废弃EPS泡沫、炉渣与建筑废渣制混凝土砌块资源化研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- [3] 梁世波, 周紫情, 赵志坚. 再生混凝土政策现状及建议[C]//北京力学学会第二十七届学术年会论文集. [S.l.]: 北京力学学会, 2021: 1144-1146.
- [4] AKHTAR A, SARMAH A K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: a global perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 186: 262-281.
- [5] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(9): 45-56. ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study on seismic behavior of recycled aggregate concrete filled steel tube columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(9): 45-56. (in Chinese)
- [6] 苗希望, 白智韬, 卢光华, 等. 典型铁合金渣的资源化综合利用研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报, 2020, 42(6): 663-679. MIAO Xiwang, BAI Zhitao, LU Guanghua, et al. Review of comprehensive utilization of typical ferroalloy slags[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(6): 663-679. (in Chinese)
- [7] 祁皓, 刘旭宏, 杨绵越, 等. 掺镍铁渣-矿渣复合微粉混凝土配合比设计[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(12): 7-11, 17. QI Ai, LIU Xuhong, YANG Mianyue, et al. Mix proportion design of concrete containing compound admixture of ferronickel slag-slag micro powder[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(12): 7-11, 17. (in Chinese)
- [8] QI A, LIU X H, WANG Z W, et al. Mechanical properties of the concrete containing ferronickel slag and blast furnace slag powder[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117120.
- [9] 刘梁友, 刘云, 张康, 等. 镍铁渣用作混合材对水泥性能影响的研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(6): 1705-1710, 1715. LIU Liangyou, LIU Yun, ZHANG Kang, et al. Influence of nickel-iron slag used as admixture on cement properties[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(6): 1705-1710, 1715. (in Chinese)
- [10] 林志丹. 船舶撞击桥梁事故原因与教训浅析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(6): 311-313. LIN Zhidan. Analysis on the causes and lessons of ship collision with bridge[J]. Highway Traffic Science and Technology (Application Technology Edition), 2020, 16(6): 311-313. (in Chinese)
- [11] 康苗, 朱翔, 王蕊, 等. 侧向冲击作用下圆钢管-钢骨混凝土柱抗冲击性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(supp1): 128-135. KANG Miao, ZHU Xiang, WANG Rui, et al. Study on impact resistance of circular steel tube columns filled with steel-reinforced concrete under lateral impact[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(supp1): 128-135. (in Chinese)
- [12] SHAKIR A S, GUAN Z W, JONES S W. Lateral impact response of the concrete filled steel tube columns with and without CFRP strengthening[J]. Engineering Structures, 2016, 116: 148-162.
- [13] 杨有福, 张智成. 圆钢管再生混凝土构件抗侧向冲击性能试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(11): 31-38. YANG Youfu, ZHANG Zhicheng. Tests on circular recycled aggregate concrete-filled steel tubular members under lateral impact loads[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11): 31-38. (in Chinese)
- [14] 陈梦成, 方苇, 黄宏, 等. 锈蚀圆钢管再生混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 138-146. CHEN Mengcheng, FANG Wei, HUANG Hong, et al. Axial compressive behavior of recycled concrete filled corroded circular steel tubular columns[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 138-146. (in Chinese)
- [15] 胡乃冬, 杜喜凯, 刘濮源, 等. 方钢管再生混凝土偏压长柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(supp2): 36-42. HU Naidong, DU Xikai, LIU Puyuan, et al. Experimental study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete-filled square steel tubular long columns under eccentric compression loading[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(supp2): 36-42. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50936—2014 钢管混凝土结构技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [17] 石岩, 李宣莹, 张君博, 等. 中空夹层金属管混凝土构件侧向冲击试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(5): 982-988. SHI Yan, LI Xuanying, ZHANG Junbo, et al. Test analysis of concrete-filled double skin metal tubular members under lateral impact[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(5): 982-988. (in Chinese)



第一作者简介:罗才松,男,1980年11月生,博士、正高级实验师。主要研究方向为防灾减灾工程及防护工程。
E-mail:0716jpu@163.com

通信作者简介:陈华艳,女,1980年10月生,硕士、副教授。主要研究方向为防灾减灾及防护工程。
E-mail:kxchy@163.com