

文章编号:1673-2049(2016)04-0025-11

钢管混凝土与钢管再生骨料混凝土抗冲击性能研究综述

李文贵^{1,2}, 罗智予¹, 龙初¹, 龙炳煌³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:介绍了钢管混凝土(CFST)和钢管再生骨料混凝土(RACFST)抗冲击性能的研究概况,总结了钢管混凝土在应变率、高温、约束系数、材料强度、冲击能量和外包约束等不同因素影响下冲击性能的相关研究成果,列举出目前对于钢管再生混凝土研究的不足之处。根据钢管混凝土抗冲击性能以及再生骨料混凝土相关特性,推测了钢管再生骨料混凝土的抗冲击性能。结果表明:钢管再生骨料混凝土具有良好抗冲击性能,相关结论为钢管再生骨料混凝土抗冲击性能的进一步研究提供了参考。

关键词:抗冲击性能;钢管混凝土;动态力学性能;钢管再生骨料混凝土;落锤

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A

Review of Impact Resistance of CFST and RACFST

LI Wen-gui^{1,2}, LUO Zhi-yu¹, LONG Chu¹, LONG Bing-huang³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: The general research situations of the impacts of concrete-filled steel tube (CFST) and recycled aggregate concrete-filled steel tube (RACFST) were introduced. The relevant research results of the impact property of CFST under different factors, such as strain rate, high temperature, constraint coefficient, material strength, impact energy and outsourcing constraints, were summarized. The current research results were summarized and the shortage of the current research were listed. According to the impact of CFST and the related properties of recycled aggregate concrete, the impact resistance of recycled aggregate concrete were speculated. The results show that RACFST has good impact resistance. The relevant conclusions indicate the direction of the further research on the impact property of RACFST.

Key words: impact resistance; concrete-filled steel tube; dynamic mechanical property; recycled aggregate concrete-filled steel tube; drop hammer

收稿日期:2016-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51408210);中央高校基本科研业务费专项资金项目(531107040800)

作者简介:李文贵(1982-),男,湖南安仁人,讲师,工学博士,E-mail:wengui.li@hnu.edu.cn。

0 引言

钢管混凝土是指在钢管内填充普通混凝土而制成的构件,钢管混凝土将钢材和混凝土优势互补,既能借助内填混凝土提高钢管壁受压时的稳定性,又因钢管的套箍约束使内部混凝土处于三向受压而提高了抗压强度,同时也提高了延性。钢管混凝土因其优越的力学性能和良好的抗震性能在高层和超高层建筑中被广泛应用。另外,人们将废弃的混凝土块经过破碎、清洗、分级后,按一定比例与级配混合,部分或全部代替砂石等天然骨料(主要是粗骨料),再加入水泥、水等配成新的混凝土,这就是再生骨料混凝土。然而再生骨料混凝土因为骨料表面附有旧砂浆,破碎过程容易导致微裂纹产生等使其性能与普通混凝土有所区别。为了更好地利用再生骨料混凝土,一些学者将再生骨料混凝土填入钢管构成钢管再生骨料混凝土,期望它能充分发挥两者的优势,获得更加优越的工作性能。

针对汽车撞击房屋结构、高架桥墩、轮船撞击桥墩和恐怖袭击等时有发生冲击现象,为了更好地了解和推广钢管混凝土,学者对其抗冲击性能进行了应变率、高温、约束系数、材料强度、冲击能量、外包约束、边界条件和冲击部位等不同因素影响的研究^[1],得到了一些重要结论。然而钢管再生骨料混凝土抗冲击性能的研究则相对较少,同时由于再生骨料混凝土力学性能的变异性,时常得到不一致的结论,使得需要进行大量试验研究才能获知钢管再生骨料混凝土的抗冲击性能。

本文通过梳理相关文献,着重介绍和分析了近年来钢管混凝土和钢管再生骨料混凝土的重要研究成果。按照钢管混凝土轴向冲击、侧向冲击顺序进行了综述和分析,并依据这些结论结合再生骨料混凝土的特性,对钢管再生骨料混凝土受冲击性能进行了推测。

1 钢管混凝土受冲击性能

钢管混凝土所受冲击从不同的冲击方向可以分为轴向冲击和侧向冲击,其中轴向冲击从应变率水平由低到高常采用液压装置、落锤、霍普金森杆(SHPB)、轻气泡冲击等进行试验。

1.1 轴向冲击

1.1.1 液压试验系统

陈肇元等^[2]采用 42 根具有不同配筋率以及长径比的钢管混凝土柱进行了静载和快速加载对比试

验,并进行了爆炸曲线加载试验。结果表明,钢管混凝土柱有较好的延性,快速加载与静载无本质区别,但强度和刚度有所增加。

1.1.2 落锤冲击

Prichard 等^[3]用落锤进行了钢管混凝土的冲击试验,发现相比素混凝土,钢管混凝土的承载力显著提高,随着加载速度以及钢管壁厚的增加,接触力都有提高;同时对破坏形式、冲击力、钢管表面应变与素混凝土柱、铝管和外包塑料管柱进行了比较分析。

李静^[4]对 16 根钢管混凝土短柱进行落锤冲击试验,结果表明钢管壁厚对冲击荷载有一定影响。在钢管壁厚超过限值后,冲击承载力随着钢管壁厚增加而增大,但趋势逐渐减缓。李珠等^[5]对 16 根钢管混凝土短柱进行了轴向冲击试验以及仿真分析,得到了与文献^[4]一致的结论,试验结果还表明,纵向变形和冲击速度呈线性关系,径向变形和速度呈二次曲线关系,且试件上点的纵向应变大于其环向应变。

任够平等^[6]对具有 3 种不同套箍系数的 15 根钢管混凝土短柱进行了轴向落锤冲击试验,结果表明随着冲击速度的增加变形增大,屈服后变形显著增大,属于延性破坏。同一冲击速度下,随套箍系数增加,试件的变形减小。郑秋^[7]利用落锤对钢管壁厚分别为 4 mm 和 6 mm 的钢管混凝土短柱进行了轴向冲击试验和有限元分析,试验发现 2 种壁厚的钢管混凝土均以斜向剪切破坏为主。

沈亚丽等^[8-9]采用落锤对 2 种壁厚的钢管混凝土和 2 种碳纤维层数的钢管约束混凝土短柱进行了不同高度的轴向冲击试验。发现外包碳纤维将改变钢管混凝土的破坏形态且能较好地改善其性能。

任晓虎等^[10]利用落锤进行了高温后钢管混凝土短柱动态冲击试验研究,高温后钢管混凝土在冲击作用下产生了较大的压缩变形,延性有所下降,但仍能够保持很好的完整性,钢管混凝土在高温作用后有良好的抗冲击能力,试验中采用的最高温度等级为 800 ℃。霍静思等^[11]进行了更高温度等级的试验,在试验中发现,降低含钢率和延长受火时间将明显加剧试件的斜向剪切破坏程度,即使钢管处于塑性流动状态,强度很低,但是仍能给混凝土提供很好的约束,保证其截面完整性。对有抗火灾倒塌和抗冲击要求的结构需要合理的含钢率。

1.1.3 霍普金森杆冲击

田志敏等^[12]采用霍普金森杆进行了钢管超高强混凝土(RPC)在冲击荷载下的试验研究。结果表

明,钢管RPC试件比无钢管约束的RPC承载能力大得多,且承载能力的提高一部分是因为钢管对混凝土的约束作用,当其他条件一定时随混凝土强度等级提高,钢管和混凝土复合构件的承载力将提高,随钢管壁厚的增加亦有类似现象。同时发现钢管和混凝土的轴向刚度比值是影响钢管超高强混凝土构件抗冲击荷载能力的控制因素。

Xiao等^[13]采用分离式霍普金森杆进行高应变率下的钢管混凝土轴向冲击试验,结果表明,应变率越大,动态强度增大系数越大,钢管混凝土对应变率的敏感性不如普通混凝土。

郑秋等^[14]利用分离式霍普金森杆进行了高温下钢管混凝土试件的抗冲击研究。按照文献^[15]分析了高温下屈服强度变化,试验结果表明,随温度提高,试件的强度下降明显,但是仍然具有良好的变形能力和后期承载力,钢管混凝土在高温下仍具有优越性能。何远明等^[16]以温度和冲击速度为主要试验参数进行了钢管混凝土抗冲击研究,相对于文献^[14]的试验研究,试件尺寸更大且更与实际接近,最高温度升至800℃,研究发现常温和高温下钢管混凝土均有显著的应变率效应,而高温下钢管混凝土强度和耗能能力均受高温劣化影响显著。钢管混凝土进入塑性之后仍能保持良好的抗冲击能力。在文献^[14]的试验基础上,Huo等^[17]进一步进行了研究,发现高温下钢材与混凝土的冲击动态响应与常温下不同,且动力增大系数不如常温下的大。

Huo等^[18]采用霍普金森杆进行了800℃高温下钢管混凝土的轴向冲击试验,试验发现:温度、冲击速度以及含钢率对钢管混凝土高温下受冲击性能有显著的影响,但在参数范围内高温、长径比、含钢率的变化并不会引起破坏模式的改变;高温下内填普通混凝土的钢管混凝土比内填微型混凝土的钢管混凝土有更优越的抗冲击性能。

霍静思等^[19]采用霍普金森杆进行了高温后钢管混凝土多次冲击后的性能研究,结果表明,钢管混凝土的耗能能力随温度升高有所增加,高温后钢管混凝土具有良好的耗能能力。常温和高温下多次冲击后钢管混凝土强度降低幅度并不显著,钢管混凝土可以用于有抗火灾倒塌与高温抗爆和抗冲击要求的结构。

1.1.4 轻气泡冲击

张望喜等^[20]等利用 $\phi 57$ 轻气泡试验装置进行了钢管混凝土柱的冲击试验,结果表明,冲击速度越大残余变形越大,外包碳纤维能改善试件的抗冲击

性能,钢管混凝土在如此高应变率的冲击行为下仍有较好的性能。

Xiao等^[21]采用轻气泡以外包约束和冲击速度为试验参数研究了钢管混凝土与约束钢管混凝土的性能,结果表明提供的侧向约束能有效改善钢管混凝土的抗冲击性能。单建华^[22]采用霍普金森杆进行了钢管混凝土和素混凝土抗冲击性能的对比,结果表明,钢管混凝土受力之后形状保持良好,属于塑性破坏;同时采用一级轻气泡进行了钢管混凝土和约束钢管混凝土的冲击试验,并结合有限元软件探索了钢管壁厚以及外包碳纤维的增加对抗冲击性能的影响。

1.2 侧向冲击

在钢管混凝土抗侧向冲击方面,一般是采用落锤试验和有限元模拟分析来进行研究。

贾电波^[23]进行了钢管混凝土抗侧向冲击的研究,结果表明,试件破坏过程属于塑性破坏,经历弹性变形、弹塑性变形、极限状态3个阶段,变形主要集中在冲击处很小范围内,这个范围外的钢管混凝土试件变形基本呈直线。钢管混凝土具有较好的抵抗侧向冲击的能力。试验结果还表明,混凝土强度越高,试件受到的约束越强,耐冲性能就越好,其中提高含钢率是提高冲击性能的最佳方式。

王蕊等^[24]对3种不同套箍系数的两端简支钢管混凝土梁侧向冲击荷载作用下的动力响应进行了试验,结果表明,冲击力时程曲线可划分为振荡阶段、稳定阶段和衰减阶段3个阶段,文献^[23]也有这一结论。同时试验结果表明,套箍系数对冲击力的影响要比对挠度的影响小得多。Wang等^[25]对约束系数分别为1.23和0.44的钢管混凝土试件进行了落锤冲击和仿真模拟,结果表明,约束系数为1.23的试件呈延性破坏且冲击力时程曲线有峰值阶段、平台值阶段和卸载阶段,而约束系数为0.44的试件呈脆性破坏且不出现平台值阶段。

王蕊等^[24]通过理论分析建立了局部变形和整体变形的关系,并推导出低速冲击下整体变形的计算公式,结果吻合良好。涂劲松等^[26]通过落锤以及仿真模拟对钢管混凝土跨中挠度进行了分析,得出了跨中挠度与冲击能量及约束效应系数间的关系,并通过回归分析得出了挠度的近似计算公式。任够平等^[27]采用落锤试验与有限元模拟对钢管混凝土柱侧向冲击作用下的横向挠度和挠度曲线进行了研究,并分析了测得的跨中最终挠度随套箍系数、约束类型及冲击能量变化的变化规律。

李珠等^[28]对固简支的 8 根钢管混凝土构件进行了落锤侧向冲击试验研究,结果表明,钢管壁厚大的试件冲击力峰值和平台值均较大,破坏所需临界能量也较大,这是因为弯曲、拉伸和剪切的联合作用破坏开始于跨中底部以及固支端顶部。王瑞峰^[29]采用落锤对两端固支、两端铰支和一端固支、一端铰支 3 种不同约束情况下的冲击性能展开了研究,结果表明,钢管混凝土构件有较好的延性,抗冲击性能良好,且约束越强,耐冲性能越好。

Bambach 等^[30]进行了方空心钢管梁和方钢管混凝土梁 2 种试件完全固支低速高质量下的冲击对比研究;同时还做了静力荷载与动力冲击的对比分析,发现由于内置混凝土能够很大程度减小局部变形,钢管混凝土梁能够承受更大的荷载,文献[31]也有类似结论。文献[30]按照弹塑性理论建立了空心钢管梁和钢管混凝土梁力-位移与能量吸收等关系,在试验基础上提出了空心钢管梁以及钢管混凝土梁受横向冲击的设计公式。

Bambach 等^[32]还进行了与文献[30]类似的试验,研究了轴向力、转动约束、轴向约束、钢管材料性能和混凝土填充等因素对吸收能量的影响,进一步提出了设计方法。结果表明,内置的混凝土对钢管混凝土吸收能量的能力提升基本没有什么帮助,但是外钢管以及两端的约束对耗能能力有很大帮助,提供轴向约束会引起薄膜张力作用,是提高耗能能力的最显著方式。Remennikov 等^[33]进行了钢管混凝土、钢管硬质聚氨酯泡沫和空心钢管在落锤横向冲击下的试验。结果表明,钢管混凝土抗冲击性能和耗能能力最好,钢管硬质聚氨酯泡沫次之,硬质聚氨酯泡沫可以作为钢管内的填充物,构成组合结构用以提高构件耗能能力。

在实际情况中,当柱受到撞击时,柱两端是受轴力作用的。王蕊^[34]在钢管混凝土受侧向冲击时考虑了轴力的影响,结果表明,钢管壁厚为 1.7 mm 的构件跨中挠度会在轴压力作用下变小,而钢管壁厚为 3.5 mm 和 4.5 mm 的构件跨中挠度都会增大,并且当钢管壁厚为 3.5 mm 的构件轴压力为 0.3 N_0 (N_0 为钢管再生骨料混凝土轴心受压短柱的承载力设计值)时,出现了瞬间失稳的现象,文献[35]获得了相一致的结论。Yousuf 等^[36]通过试验和有限元分析进行了预压轴力和横向静力荷载综合作用下空心钢管柱及钢管混凝土柱的冲击性能研究,讨论了低碳钢以及不锈钢 2 种材料的影响,并且得出了不锈钢试件比低碳钢试件具有更高的强度及耗能

能力的结论。

任晓虎等^[37]利用落锤冲击试验机和高温试验炉研究了冲击能量和受火时间对钢管混凝土梁抗冲击性能的影响。结果表明,随着受火时间的延长,构件的弯曲程度和塑性区长度将增大,最大冲击力减小,抗弯刚度减小。随冲击能量的增大,最大冲击力将增大,构件的弯曲程度和塑性区长度减小。相比钢管混凝土短柱,钢管混凝土梁的动态承载力增大系数要小,在火灾高温之后仍有良好的抗冲击性能。此外还发现钢管混凝土梁通过弯曲变形耗散了大部分冲击能量,这与文献[23]的结论一致。

侯川川等^[38]建立有限元模型进行分析,发现钢材屈服强度对构件抗冲击能力影响较为显著,但是对混凝土强度变化的影响则相对较小。章琪等^[39]通过有限元分析研究了钢管混凝土跨中遭受侧向冲击后受压承载力的变化,发现冲击后受压试件的性能力将会降低,将提前进入屈服阶段,屈服强度降低,屈服应变减小,延性有很大程度降低。试验中发现,约束效应系数对钢管混凝土柱抗冲击性能起主要影响作用。

章琪等^[40]采用 ABAQUS 软件分析了不同截面的钢管混凝土抗冲击性能,发现对于外径相同的实心钢管混凝土,增大钢管壁厚可显著减小跨中挠度。在一定范围内若适当减少核心混凝土,以空心钢管代替,能够提高构件的抗冲击性能。相同混凝土用量和钢材用量时实心钢管混凝土抗冲击性能最好,内插双 H 型钢钢管混凝土次之,空心钢管混凝土较差。王洪欣等^[41]进行了空心钢管受侧向冲击的研究,结果表明,随空心率变大,挠度变大。于璐等^[42-44]采用 ABAQUS 对不同约束情况下的十字形钢管混凝土柱、不同长细比的 T 形钢管混凝土柱,以及 L 形钢骨混凝土异形柱的冲击性能进行了研究。

另外,还有不少学者对钢管混凝土的侧向冲击进行了其他方面的研究,瞿海雁等^[45-47]通过分析构件支座和跨中塑性铰形成的特征,提出了钢管混凝土侧向冲击时的简化分析模型,有效估算了跨中和支座的动态截面极限弯矩和跨中截面最大挠度,并采用模型和试验数据结合的方式进行了一系列侧向冲击下的研究。余敏等^[48]采用有限元方法首先对钢管混凝土柱侧向落锤结果进行模拟和验证,然后进行了实心钢管混凝土柱和空心钢管混凝土柱侧向遭受汽车撞击的研究,陈忱等^[49]通过仿真分析考察了不同 FRP 种类、包裹层数、包裹形式以及钢管壁厚等情形下钢管混凝土的抗冲击特性。鞠翱天

等^[50]采用有限元模拟软件分析了钢管混凝土铁路桥限高防护架在汽车碰撞作用下的动力响应。Han 等^[51]采用落锤及仿真模拟对钢管高强混凝土横向冲击性能进行了研究,并对静力荷载和冲击作用下的受力状态、内力分布、受弯承载力进行了比较分析。Deng 等^[52]进行了 9 个简支钢管混凝土试件、2 个后张拉钢管混凝土以及 1 个纤维增强钢管混凝土的冲击试验,结果表明,后张拉钢管混凝土以及纤维增强钢管混凝土的受冲击性能比普通钢管混凝土要优越。

总之,学者对钢管混凝土抗冲击方面进行了充分的研究,获得了很多较为一致的结论。在轴向方面,动态荷载下钢管混凝土构件承载能力有所提高,并在一定范围内随冲击速度增加而提高;随钢管壁厚增加以及混凝土强度提高,钢管混凝土构件承载能力有所提高,钢管壁厚超过一定范围时承载能力提高幅度有所减小,试件一般呈斜向剪切破坏;高温下随温度升高钢管混凝土承载能力有所下降,高温下钢管混凝土仍具有应变率效应以及良好的抗冲击性能;外包碳纤维可以改善钢管混凝土构件的抗冲击性能。

在侧向方面,一些研究结果均表明,冲击力时程曲线可划分为振荡阶段、稳定阶段、衰减阶段 3 个阶段。试件经历弹性变形、弹塑性变形、极限状态 3 个阶段,变形主要集中在冲击处及两端处很小范围内。

表 1 轴向冲击时的取值方式

Tab. 1 Evaluation Method Under Axial Impact

数据来源	指标及取值方式	取值条件
文献[13]	动态强度:应力-应变曲线第 1 个波峰的峰值应力。残余强度:卸载过程稳定阶段的平均应力。切线刚度:应力-应变曲线第 1 个波峰的割线刚度。	常温, SHPB
文献[14]	屈服强度:以屈服应变对应的强度为屈服强度,按文献[15]确定屈服应变。极限强度:应变为 0.003 时对应的强度。	最高温度 400 ℃, SHPB
文献[16]	屈服强度:能量等值法 1。极限强度:应力-应变关系曲线弹塑性段结束点所对应的应力。	最高温度 800 ℃, SHPB
文献[17]	屈服强度:能量等值法 2。极限强度:应力-应变曲线上应变为 0.02 处所对应的应力。	最高温度 400 ℃, SHPB
文献[18]	屈服强度:能量等值法 1。极限强度:弹塑性结束点对应的强度值。	最高温度 800 ℃, SHPB
文献[19]	极限强度:弹塑性段终点。	常温, SHPB 轴向多次冲击

注:能量等值法 1 是指在应力-应变曲线上过原点引直线与应力-应变曲线相交,同时过极限应力引水平线,当两直线与应力-应变曲线三者所围成的 2 个区域面积相等时,过原点的直线与应力-应变曲线交点所对应的应力即为屈服应力^[18];能量等值法 2 是指在应力-应变曲线上过原点引直线与应力-应变曲线相交,同时过应力平台引水平线,当两直线与应力-应变曲线三者所围成的 2 个区域面积相等时,过原点的直线与应力-应变曲线的交点所对应的应力即为屈服应力^[17]。

表 2 侧向冲击时的取值方式

Tab. 2 Evaluation Method Under Lateral Impact

数据来源	冲击力	取值条件
文献[37]	冲击力时程曲线中第 1 个峰值和谷底的平均值	最长加热时间 90 min,落锤冲击
文献[23]	冲击力平台值	常温,落锤冲击
文献[53]	冲击力时程曲线稳定阶段初始 5 ms 内的平均冲击力	钢管再生骨料混凝土,常温,落锤冲击

在高温下因为混凝土以及钢材材料性能劣化,随着受火时间延长,构件的弯曲程度和塑性区长度将增大,最大冲击力则减小;同时随受火时间延长,钢管混凝土柱的抗弯刚度减小。随冲击能量的增大,最大冲击力将增大。相比钢管混凝土短柱,钢管混凝土梁的动态承载力增大系数要小。此外,钢材屈服强度对构件抗冲击能力影响较为显著,混凝土强度变化的影响则相对较小。增大钢管壁厚可显著减小跨中挠度,同时也是改善钢管混凝土侧向冲击性能的最有效方式之一,钢管混凝土具有较好的抵抗侧向撞击的能力。

当前研究也有一些不完善的地方,比如所进行的都是轴向中心冲击,没有偏心冲击的研究,而后者在现实生活中是常见的。因为没有统一的标准以及研究的实际情况不同,各学者分析时采用的指标不一样,有的用屈服强度研究,有的用极限强度,同时在屈服强度、极限强度等取值上采用的方式也不同,这对研究结果会产生影响。部分有代表性的取值如表 1,2 所示。

另外,各因素的影响多属于定性研究,尚未形成科学的定量关系。冲击荷载下动态承载力增大系数、挠度等关键指标虽然有学者提出计算公式,但是理论与实际方面均存在不足,应用范围也有很大限制,需要进一步完善。动态强度公式及其与实际值的符合情况统计如表 3 所示。

表 3 钢管混凝土冲击动态强度计算公式

Tab. 3 Calculation Formula of Dynamic Strength of CFST Under Impact

数据来源	计算公式	符合情况	对比条件
文献[10]	$D_{\text{CFT}} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{\text{cdi}}(T) A_{\text{ci}} + f_{\text{yd}}(T) A_{\text{s}}}{\sum_{i=1}^n f_{\text{ci}}(T) A_{\text{ci}} + f_{\text{y}}(T) A_{\text{s}}}$	高温下计算值比实际值偏小,最大相对误差为19.2%	轴向高温落锤冲击试验,最高温度 800 ℃,将混凝土划分为 n 个等壁厚的圆环,采用常温下钢材与混凝土的动态增大系数
文献[11]	$D = \frac{\sum_{i=1}^n f_{\text{cdi}}(T) A_{\text{ci}} + f_{\text{yd}}(T) A_{\text{s}}}{\sum_{i=1}^n f_{\text{ci}}(T) A_{\text{ci}} + f_{\text{y}}(T) A_{\text{s}}}$	火灾下计算值与实际值相比明显偏小	轴向火灾下落锤冲击试验,按 ISO-834 标准最长加热 90 min,将混凝土划分为 n 个等壁厚的圆环,采用常温下钢材与混凝土的动态增大系数
文献[12]	$F(t) = F_{\text{s}}(t) + F_{\text{c}}(t)$		钢管超高强混凝土 SHPB 冲击试验,数值模拟分析得出计算公式
文献[13]	$D_{\text{CFT}} = \frac{f_{\text{cd}} A_{\text{c}} + f_{\text{yd}} A_{\text{s}}}{f'_{\text{c}} A_{\text{c}} + f_{\text{y}} A_{\text{s}}}$	计算值与试验值相比约小 17%	钢管混凝土 SHPB 冲击试验
文献[17]	$N_{\text{CFT}} = D_{\text{steel}} \frac{f_{\text{y}}(T)}{f_{\text{ys}}} f_{\text{ys}} A_{\text{s}} + D_{\text{concrete}} \frac{f_{\text{c}}(T)}{f_{\text{c}}} f_{\text{cs}} A_{\text{c}}$	计算值明显高于试验值,温度较高时尤为明显	钢管混凝土高温下 SHPB 冲击试验,最高温度 400 ℃,混凝土骨料尺寸较小,采用常温下钢材与混凝土的动态增大系数
文献[18]	$N_{\text{CFT}} = D_{\text{steel}} \frac{f_{\text{y}}(T)}{f_{\text{ys}}} f_{\text{ys}} A_{\text{s}} + D_{\text{concrete}} \frac{f_{\text{c}}(T)}{f_{\text{c}}} f_{\text{cs}} A_{\text{c}}$	计算值与试验值拟合良好	钢管混凝土高温下 SHPB 冲击试验,最高温度 800 ℃,采用高温下混凝土的动态增大系数

注: D 为动力增大系数; $f_{\text{ci}}(T)$, $f_{\text{y}}(T)$ 分别为准静态下混凝土第*i*个圆环最高温度*T*时的圆柱体抗压强度和钢管屈服强度; $f_{\text{cdi}}(T)$, $f_{\text{yd}}(T)$ 分别为动态下混凝土第*i*个圆环最高温时的圆柱体抗压强度和钢管屈服强度; A_{ci} , A_{s} 分别为混凝土第*i*个圆环的横截面积及钢管的横截面积; $F(t)$ 为*t*时刻钢管混凝土构件承受的动态荷载; $F_{\text{s}}(t)$ 为*t*时刻钢管承受的荷载; $F_{\text{c}}(t)$ 为*t*时刻混凝土承受的荷载; f'_{c} , f_{y} 分别为准静态下混凝土圆柱体受压强度与钢管屈服强度; f_{cd} , f_{yd} 分别为动态下混凝土圆柱体受压强度与钢管屈服强度; A_{c} 为核心混凝土面积; N_{CFT} 为钢管混凝土的动态强度; D_{steel} , D_{concrete} 分别为钢管和混凝土的动态增长因子; $\frac{f_{\text{y}}(T)}{f_{\text{ys}}}$, $\frac{f_{\text{c}}(T)}{f_{\text{c}}}$ 分别为钢管和混凝土的高温衰减系数; f_{ys} , f_{cs} 分别为钢管和混凝土在准静态下的强度。

2 钢管再生骨料混凝土抗冲击性能研究现状

在钢管再生骨料混凝土压弯、纯弯、抗震和长期荷载等方面都有不少学者进行了研究^[54],但是钢管再生骨料混凝土抗冲击性能研究十分少见。

张智成^[53]采用 6 根钢管混凝土和 16 根钢管再生骨料混凝土构件,对钢管再生骨料混凝土构件的抗冲击性能进行了研究,其试验主要涉及再生骨料混凝土粗骨料取代率、轴压荷载、落锤高度等影响因素。结果表明,在受到侧向冲击荷载作用下,钢管再生骨料混凝土具有良好的塑性变形能力,轴向压力和侧向冲击荷载有耦合效应,再生骨料混凝土粗骨料取代率、落锤高度和轴向荷载对试件抗冲击承载力的影响总体不明显。

3 钢管再生骨料混凝土抗冲击性能的推测

再生骨料混凝土与普通混凝土的显著差别在于再生骨料表面包有一层老砂浆,表面粗糙,棱角多,同时骨料含有微裂纹,随机性变异大,造成其与普通

混凝土性能的差异。虽然目前研究较少,但是通过对钢管混凝土抗冲击性能的研究和再生骨料混凝土静态和动态的相关研究,可以对钢管再生骨料混凝土的抗冲击性能进行合理推测。

3.1 轴向冲击性能

在轴向冲击方面,李杰等^[55]所概括的普通混凝土应变率效应的因素同样对于再生骨料混凝土有作用。因此,高应变率下钢管再生骨料混凝土强度会有所提升,随着应变率的增大,强度提高。提高再生骨料混凝土强度,增加钢管壁厚和钢管强度均能提高钢管再生骨料混凝土抗冲击强度,其中在一定范围内增加钢管壁厚能显著增加约束效应,故其对抗冲击强度的提高作用相比其他几种方式更有效,但是钢管壁厚超过一定范围后增加幅度就相对降低。

再生骨料混凝土相比普通混凝土材料性能稍差,所以钢管再生骨料混凝土的性能应该比钢管普通混凝土要低,但是由于钢管和混凝土共同承受外力,其间还有钢管对混凝土的约束,所以混凝土对承载力贡献的比重有所降低,影响有所削弱,故钢管再生骨料混凝土相对钢管普通混凝土的强度差异要小于再生骨料混凝土相对普通混凝土的强度差异。陈

杰^[56]认为钢管再生骨料混凝土相对钢管普通混凝土的抗压强度降幅在10%以内,邱昌龙^[57]则发现强度降幅在5%以内,王玉银等^[58]的统计结果表明抗压强度变化幅度在-14.3%~9%范围。Hansen^[59]统计得到再生骨料混凝土较普通混凝土抗压强度降低幅度在5%~40%之间。在冲击荷载作用下,裂缝来不及发展,因此再生骨料的2层界面及微裂缝等不利因素对抗压强度的影响进一步减小,这种现象在高应变率下将更为明显,所以钢管再生骨料混凝土抗轴向冲击的能力与钢管混凝土的差异会很小,钢管再生骨料混凝土将具有良好的抗冲击性能。

在高温下由于核心混凝土材料劣化,将导致再生骨料混凝土自身多界面、多裂纹等差异的影响变得不那么显著。刘轶翔等^[60]的研究表明,由于再生骨料混凝土的比热容高于普通混凝土,导热系数低于普通混凝土,所以再生骨料混凝土的升温慢于普通混凝土,具有更强的耐热性能。因此,高温下钢管再生骨料混凝土轴向抗冲击性能应该不会显著低于钢管普通混凝土,甚至可能会更好。

3.2 侧向冲击性能

由于再生骨料混凝土性能劣于普通混凝土,所以钢管再生骨料混凝土侧向冲击能力可能会劣于钢管再生骨料混凝土,但从文献[53]的落锤试验可以看出,核心混凝土除了跨中和两端支座混凝土有明显局部损伤外,其余区域混凝土并没有明显损伤。梁跨中下方有大范围拉裂缝,一些情况下钢管会发生断裂,大多数侧向冲击的研究均是这一破坏形态^[23-24]。这表明冲击荷载作用下外钢管要承受相当一部分力而很大区域的混凝土并没有对承载力做出较大贡献,同时破坏严重区域的混凝土有一部分承受拉力,而且出现裂缝退出工作,并没有充分发挥其承载力。因此,核心混凝土对承载能力的贡献有限,使内置再生骨料混凝土还是普通混凝土引起的构件强度差别不大。文献[38]的研究表明混凝土强度变化对钢管混凝土侧向冲击性能的影响较小也证明了这一点。虽然再生骨料混凝土多了集料与老砂浆界面这一薄弱层,但是冲击速度较快的情况下很多裂缝没有足够时间很好地发展,而主裂缝因为高速冲击有沿着较短路径发展而不是沿着界面破坏的倾向,所以再生骨料混凝土与普通混凝土间的差异被进一步缩小。因此,可能会有粗骨料取代率对钢管再生骨料混凝土抗侧向冲击承载力的影响总体不明显这一结论,文献[53]的试验结果符合这一点。

按照钢管普通混凝土的相关研究结论可以推

知,由于钢管对承载能力有较大贡献,所以增加钢管强度和钢管壁厚可以有效提高钢管再生骨料混凝土抗侧向冲击的能力,增加两端约束也可以一定程度上提高抗侧向冲击的能力。受到高温作用后钢管再生骨料混凝土的强度将降低,相比钢管再生骨料混凝土短柱,梁的动态承载力增大系数要小。综合以上分析可以认为钢管再生骨料混凝土与钢管普通混凝土在抵抗侧向冲击方面无太大差异,具有良好的抗侧向冲击性能。

4 结 语

(1)钢管再生骨料混凝土是有效运用再生骨料混凝土这一经济、环保材料的重要方式,具有广阔的应用前景。建筑结构面临着汽车撞击、恐怖袭击等日益增多的冲击问题,对钢管再生骨料混凝土进行抗冲击研究具有重要的工程意义。

(2)对于钢管混凝土抗冲击性能已经有大量研究,本文按照应变率由低到高分别对钢管混凝土轴向冲击以及侧向冲击进行了综述,列举了钢管混凝土在应变率、高温、约束系数、材料强度、冲击能量和外包约束等不同因素影响下冲击性能方面的研究结论,并列举出当前研究的不足。

(3)对钢管再生骨料混凝土受冲击的研究很少,本文基于钢管混凝土抗冲击的研究以及再生骨料混凝土的相关性能,从轴向和纵向2个角度出发推测了钢管再生骨料混凝土的抗冲击性能,得出了钢管再生骨料混凝土具有良好的抗冲击性能,适用于工程实践的结论,但是尚需要试验研究的跟进用以验证理论的正确性,弥补理论推导的不足。

(4)钢管再生骨料混凝土抗冲击性能方面需要进行大量的研究,其研究工作大体与钢管普通混凝土类似。不同的是,在既定的研究下应该考虑骨料取代率、骨料来源和水灰比等再生骨料混凝土的相关属性,了解其影响并通过调整这些属性来改善钢管再生骨料混凝土的抗冲击性能。

参考文献:

References:

- [1] 卢锦钟. 钢管混凝土构件冲击力学性能研究综述[J]. 房地产导刊, 2013(10):108, 54.
LU Jin-zhong. Review of Impact Mechanical Properties of Concrete Filled Steel Tubular Members[J]. Real Estate Biweekly, 2013(10):108, 54.
- [2] 陈肇元, 罗家谦. 钢筋混凝土轴压和偏压构件在静载和快速变形下的性能[R]. 北京: 清华大学, 1986.

- CHEN Zhao-yuan, LUO Jia-qian. The Performance of Reinforced Concrete Axial Compression and Bias Compression Member Under Static Load and Rapid Deformation[R]. Beijing: Tsinghua University, 1986.
- [3] PRICHARD S J, PERRY S H. The Impact Behaviour of Sleeved Concrete Cylinders[J]. Structural Engineer, 2000, 78(17): 23-27.
- [4] 李 静. 钢管混凝土短柱轴向冲击的试验研究与仿真分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- LI Jing. Test Research and Simulation Analysis of Steel Tube-confined Concrete Short Column Under Axial Impact[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005.
- [5] 李 珠, 李宝成, 李永刚, 等. 钢管混凝土短柱轴向冲击动力特性的探讨[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(4): 383-385.
- LI Zhu, LI Bao-cheng, LI Yong-gang, et al. The Research of the Dynamic Property of Steel Tube-confined Concrete Short Column Under Axial Impact[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(4): 383-385.
- [6] 任够平, 李 珠, 王 蕊. 轴向冲击下钢管混凝土短柱的变形研究[C]//《工程力学》杂志社. 第 17 届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册). 北京:《工程力学》杂志社, 2008: 153-156.
- REN Gou-ping, LI Zhu, WANG Rui. Deformation Study of the Concrete Filled Steel Tubular Short Column Under Axial Impact[C]//*Engineering Mechanics* Periodical Office. Proceedings of the 17th National Conference on Structure Engineering (Vol Ⅲ). Beijing: *Engineering Mechanics* Periodical Office, 2008: 153-156.
- [7] 郑 秋. 钢管混凝土短柱抗冲击性能试验研究及有限元分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- ZHENG Qiu. Experimental Research and Finite Element Analysis of Concrete Filled Steel Tube Short Columns Under Impact Load[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [8] 沈亚丽. 钢管及约束钢管混凝土短柱抗冲击性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- SHEN Ya-li. Research on Impact Resistant Behavior of Concrete Filled Steel Tube and Confined Concrete Filled Steel Tube Short Columns[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [9] XIAO Y, SHEN Y L. Impact Behaviors of CFT and CFRP Confined CFT Stub Columns[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(6): 662-670.
- [10] 任晓虎, 霍静思, 陈柏生. 高温后钢管混凝土短柱落锤动态冲击试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 67-73, 84.
- REN Xiao-hu, HUO Jing-si, CHEN Bai-sheng. Dynamic Behaviors of Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns After Exposure to High Temperature[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 67-73, 84.
- [11] 霍静思, 任晓虎, 肖 岩. 标准火灾作用下钢管混凝土短柱落锤动态冲击试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 9-20.
- HUO Jing-si, REN Xiao-hu, XIAO Yan. Impact Behavior of Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns Under ISO-834 Standard Fire[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 9-20.
- [12] 田志敏, 吴平安. 冲击荷载作用下钢管超高强混凝土(简称钢管 RPC) 轴压构件的性能[C]//《工程力学》杂志社. 第 17 届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册). 北京:《工程力学》杂志社, 2008: 170-177.
- TIAN Zhi-min, WU Ping-an. Dynamic Response of RPC-filled Steel Tubular Columns with High Load Carrying Capacity Under Axial Impact Loading[C]//*Engineering Mechanics* Periodical Office. Proceedings of the 17th National Conference on Structure Engineering (Vol Ⅲ). Beijing: *Engineering Mechanics* Periodical Office, 2008: 170-177.
- [13] XIAO Y, SHAN J, ZHENG Q, et al. Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubes Under High Strain Rate Loading[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(10): 569-577.
- [14] 郑 秋, 霍静思, 陈柏生, 等. 高温下钢管混凝土抗冲击承载力试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(增 2): 519-522.
- ZHENG Qiu, HUO Jing-si, CHEN Bai-sheng, et al. Experimental Research on Impact-resistant Capacity of Concrete Filled Steel Tube Under High Temperature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(S2): 519-522.
- [15] 吕彤光. 高温下钢筋的强度和变形试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1996.
- LU Tong-guang. Strength and Deformation Test Research of Steel Under High Temperature[D]. Beijing: Tsinghua University, 1996.
- [16] 何远明, 霍静思, 陈柏生. 高温下钢管混凝土 SHPB 动态力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 52-58.
- HE Yuan-ming, HUO Jing-si, CHEN Bai-sheng. Impact Tests on Dynamic Behavior of Concrete-filled Steel Tube at Elevated Temperatures[J]. Engineering

- Mechanics, 2013, 30(1): 52-58.
- [17] HUO J S, ZHENG Q, CHEN B S, et al. Tests on Impact Behaviour of Micro-concrete-filled Steel Tubes at Elevated Temperatures Up to 400 °C [J]. Materials and Structures, 2009, 42(10): 1325-1334.
- [18] HUO J S, HE Y M, CHEN B S. Experimental Study on Impact Behaviour of Concrete-filled Steel Tubes at Elevated Temperatures Up to 800 °C [J]. Materials and Structures, 2014, 47(1/2): 263-283.
- [19] 霍静思, 何远明, 肖莉平, 等. 高温后钢管混凝土抗多次冲击力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(9): 6-10, 86.
- HUO Jing-si, HE Yuan-ming, XIAO Li-ping, et al. Experimental Study on the Dynamic Behavior of Concrete-filled Steel Tube After Exposure to High Temperatures Under Multiple Impact Loadings [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(9): 6-10, 86.
- [20] 张望喜, 单建华, 陈 荣, 等. 冲击荷载下钢管混凝土柱模型力学性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(5): 96-101, 195.
- ZHANG Wang-xi, SHAN Jian-hua, CHEN Rong, et al. Experimental Research on Mechanical Behavior of Concrete Filled Steel Tubes Model Under Impact Load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(5): 96-101, 195.
- [21] XIAO Y, ZHANG W X, SHAN J H. Behavior of CFT and CCFT Columns Under Impact Loads [C]//HAN L H, RU J P, TAO Z. Proceedings of the Ninth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts (Vol 1). Beijing: Science Press, 2006: 56-61.
- [22] 单建华. 钢管混凝土在冲击荷载作用下实验研究和有限元分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- SHAN Jian-hua. Experimental Research and Finite Element Analysis of Concrete Filled Steel Tubes Under Impact Load [D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [23] 贾电波. 钢管混凝土构件在侧向冲击载荷作用下的初步研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- JIA Dian-bo. The Accidence Research of Steel Tube-confined Concrete in the Lateral Impact [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005.
- [24] 王 蕊, 李 珠, 任够平, 等. 侧向冲击载荷作用下钢管混凝土梁动力响应的实验和理论研究[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 75-80, 93.
- WANG Rui, LI Zhu, REN Gou-ping, et al. Studies on Dynamic Response of Concrete Filled Steel Tube Under Lateral Impact Loading [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 75-80, 93.
- [25] WANG R, HAN L H, HOU C C. Behavior of Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Members Under Lateral Impact: Experiment and FEA Model [J]. Journal of Construction Steel Research, 2013, 80: 188-201.
- [26] 涂劲松, 穆启华, 李 珠, 等. 钢管混凝土侧向冲击荷载下的变形分析及简化计算[J]. 太原理工大学学报, 2007, 38(2): 156-159.
- TU Jin-Song, MU Qi-hua, LI Zhu, et al. Deformation Analysis and Simplifying Computation of Concrete-filled Steel Tube Under Lateral Impact Load [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2007, 38(2): 156-159.
- [27] 任够平, 李 珠, 王 蕊. 低速侧向冲击下钢管混凝土柱挠度研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 170-175.
- REN Gou-ping, LI Zhu, WANG Rui. The Deflection of Concrete Filled Steel Tubular Column Under Lateral Impact at Low Speed [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(5): 170-175.
- [28] 李 珠, 王瑞峰. 固简支钢管混凝土构件侧向冲击试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增 1): 193-197.
- LI Zhu, WANG Rui-Feng. Experimental Study of Fixed-freely Supported Concrete Filled Steel Tubular Under Lateral Impact Load [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S1): 193-197.
- [29] 王瑞峰. 不同约束条件钢管混凝土构件的侧向冲击试验研究与数值分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- WANG Rui-Feng. Test Research and Simulation Analysis of Steel Tube-confined Concrete with Different Restrain Condition in the Lateral Impact [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [30] BAMBACH M R, JAMA H, ZHAO X L, et al. Hollow and Concrete Filled Steel Hollow Sections Under Transverse Impact Loads [J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2859-2870.
- [31] YOUSUF M, UY B, TAO Z, et al. Transverse Impact Resistance of Hollow and Concrete Filled Stainless Steel Columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 82: 177-189.
- [32] BAMBACH M R. Design of Hollow and Concrete Filled Steel and Stainless Steel Tubular Columns for Transverse Impact Loads [J]. Thin-walled Structures, 2011, 49(10): 1251-1260.
- [33] REMENNIKOV A M, KONG S Y, UY B. Response of Foam- and Concrete-filled Square Steel Tubes Under Low-velocity Impact Loading [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011, 25(5): 373-

- 381.
- [34] 王蕊. 钢管混凝土结构构件在侧向撞击下动力响应及其损伤破坏的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- WANG Rui. Study on the Dynamic Response and Damage Failure of Concrete Filled Steel Tube Under Lateral Impact[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [35] AGHDAMY S, THAMBIRATNAM D P, DHANASEKAR M, et al. Lateral Impact Response and Parametric Studies of Axially Loaded Square Concrete Filled Steel Tube Columns[C]//TOPPING B V H, IVANYI P. Proceedings of the 14th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Cagliari: Civil-comp Press, 2013: 20-27.
- [36] YOUSUF M, UY B, TAO Z, et al. Impact Behaviour of Pre-compressed Hollow and Concrete Filled Mild and Stainless Steel Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 96: 54-68.
- [37] 任晓虎, 霍静思, 陈柏生. 火灾下钢管混凝土梁落锤冲击试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 110-115.
- REN Xiao-hu, HUO Jing-si, CHEN Bai-sheng. Anti-impact Behavior of Concrete-filled Steel Tubular Beams in Fire[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 110-115.
- [38] 侯川川, 王蕊, 韩林海. 低速横向冲击下钢管混凝土构件的力学性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(增1): 107-110.
- HOU Chuan-chuan, WANG Rui, HAN Lin-hai. Performance of Concrete-filled Steel Tubular (CFST) Members Under Low Velocity Transverse Impact[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S1): 107-110.
- [39] 章琪, 蒋庆, 陆新征. 侧向冲击对钢管混凝土受压承载力影响研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(3): 59-64.
- ZHANG Qi, JIANG Qing, LU Xin-zheng. Lateral Impact Effects on the Compressive Strength of Concrete Filled Steel Tubes[J]. Structural Engineers, 2013, 29(3): 59-64.
- [40] 章琪, 蒋庆, 陆新征. 不同截面钢管混凝土结构抗冲击性能比较[J]. 工程力学, 2013, 30(增): 89-93.
- ZHANG Qi, JIANG Qing, LU Xin-zheng. Comparison of Impact Resistance of Different Concrete Filled Steel Tube Sections[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(S): 89-93.
- [41] 王洪欣, 查晓雄, 叶福相. 空心钢管混凝土构件抗侧向冲击性能研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 107-110.
- WANG Hong-xin, ZHA Xiao-xiong, YE Fu-xiang. Impact Resistance of Hollow Concrete Filled-steel Tubular Members Subjected to Lateral Impact Loading[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(8): 107-110.
- [42] 于璐, 徐亚丰. 十字形钢管混凝土芯柱在不同约束条件下侧向冲击作用的动力响应分析[J]. 工程力学, 2012, 29(增2): 201-204.
- YU Lu, XU Ya-feng. Dynamic Response Analysis of the Cross-shaped Concrete-filled Steel Tube Core Column with Different Boundary Restraints Under Lateral Impact[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S2): 201-204.
- [43] 蒋晶, 徐亚丰. 长细比对 T 形截面钢骨混凝土芯柱侧向冲击性能分析[C]//沈阳市科学技术协会. 第十届沈阳科学学术年会论文集(信息科学与工程技术分册). 北京: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社, 2013: 1-4.
- JIANG Jing, XU Ya-feng. Analysis of Slenderness Ratio on Performance of T-shaped Steel Reinforced Concrete Core Column Under Lateral Impact[C]//Shenyang Association for Science and Technology. Proceedings of the Tenth Annual Conference on Science and Technology in Shenyang (Information science and Engineering Technology). Beijing: China Academic Journals (CD Version) Electronic Magazine, 2013: 1-4.
- [44] 任林林, 徐亚丰, 张凤荣. L 形钢骨混凝土异形柱在爆炸荷载作用下的抗爆性能分析[C]//沈阳市科学技术协会. 第十届沈阳科学学术年会论文集(信息科学与工程技术分册). 北京: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社, 2013: 10-14.
- REN Lin-lin, XU Ya-feng, ZHANG Feng-rong. Analysis of Blast Resistance of L-shaped Steel Reinforced Concrete Special-shaped Column Under Explosion Load[C]//Shenyang Association for Science and Technology. Proceedings of the Tenth Annual Conference on Science and Technology in Shenyang (Information science and Engineering Technology). Beijing: China Academic Journals (CD Version) Electronic Magazine, 2013: 10-14.
- [45] 瞿海雁, 李国强, 孙建运, 等. 侧向冲击作用下钢管混凝土构件的简化分析模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 35-41.
- QU Hai-yan, LI Guo-Qiang, SUN Jian-yun, et al. Simplified Analysis Model of Circular Concrete-filled

- Steel Tube Specimen Under Lateral Impact[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(1):35-41.
- [46] QU H Y, LI G Q, CHEN S W, et al. Analysis of Circular Concrete-filled Steel Tube Specimen Under Lateral impact[J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(5):941-951.
- [47] QU H Y, LI G Q, SUN J Y, et al. Numerical Simulation Analysis of Circular Concrete-filled Steel Tube Specimen Under Lateral Impact[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1):89-96.
- [48] 余敏, 查晓雄. 实空心钢管混凝土柱在汽车撞击下的性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(1):57-64.
- YU Min, ZHA Xiao-xiong. Behaviour of Solid and Hollow Concrete Filled Steel Tube Columns Under Vehicle Impact[J]. Progress in Steel Building Structures, 2011, 13(1):57-64.
- [49] 陈忱, 赵颖华. FRP 钢管混凝土构件抗冲击性能仿真分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(19):197-201.
- CHEN Chen, ZHAO Ying-hua. Simulation for Anti-impact Performance of Concrete-filled FRP-steel Tubes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(19):197-201.
- [50] 鞠翱天, 王金田, 王国梁, 等. 冲击荷载下钢管混凝土限高防护架的动力响应[J]. 烟台大学学报: 自然科学与工版, 2012, 25(1):59-64.
- JU Ao-tian, WANG Jin-tian, WANG Guo-liang, et al. Dynamic Response of Concrete-filled Steel Tube Height Limit Protective Frame Under Impact Loads [J]. Journal of Yantai University: Natural Science and Engineering Edition, 2012, 25(1):59-64.
- [51] HAN L H, HOU C C, ZHAO X L, et al. Behaviour of High-strength Concrete Filled Steel Tubes Under Transverse Impact Loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 92:25-39.
- [52] DENG Y, TUAN C Y, XIAO Y. Flexural Behavior of Concrete-filled Circular Steel Tubes Under High-strain Rate Impact Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(3):449-456.
- [53] 张智成. 钢管再生混凝土构件抗冲击性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- ZHANG Zhi-cheng. Study on Impact Resistant Behavior of Recycled Aggregate Concrete-filled Steel Tubular Members [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [54] 杨君, 李华林, 周华, 等. 钢管再生混凝土的研究现状[J]. 四川建材, 2014, 40(2):3-4, 6.
- YANG Jun, LI Hua-lin, ZHOU Hua, et al. The Current Research Status of Recycled Concrete Filled Steel Tube[J]. Sichuan Building Materials, 2014, 40(2):3-4, 6.
- [55] 李杰, 任晓丹. 混凝土静力与动力损伤本构模型研究进展述评[J]. 力学进展, 2010, 40(3):284-297.
- LI Jie, REN Xiao-dan. A Review on the Constitutive Model for Static and Dynamic Damage of Concrete [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(3):284-297.
- [56] 陈杰. 钢管再生混凝土短柱轴压力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- CHEN Jie. Static Behavior of Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compressive Loading[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [57] 邱昌龙. 再生混凝土研究及钢管再生混凝土短柱力学性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- QIU Chang-long. Study on Recycled Concrete and Analysis of Mechanical Properties of Steel Tube Recycled Concrete Short Column[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [58] 王玉银, 陈杰. 钢管再生混凝土构件力学性能研究综述[R]. 北京: 中国工程院, 2012.
- WANG Yu-yin, CHEN Jie. A Review of the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tubular Column[R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2012.
- [59] HANSEN T C. Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete Second State-of-the-art Report Developments 1945-1985 [J]. Materials and Structures, 1986, 19(3):201-246.
- [60] 刘轶翔, 查晓雄. 钢管再生混凝土柱承载力及抗火性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2012, 14(3):48-52.
- LIU Yi-xiang, ZHA Xiao-xiong. Study on the Ultimate Bearing Capacity and the Fire-resistance of Recycled Concrete Filled Steel Tubular (R-CFST) Columns[J]. Progress in Steel Building Structures, 2012, 14(3):48-52.