

# 往复荷载混凝土性能及钢管混凝土柱抗震性能研究进展

张金旭 宋雨轩 吕金琢

黑龙江大学建筑工程学院，黑龙江省哈尔滨市，150006；

**摘要：**在查阅国内外有关往复荷载混凝土及钢管混凝土柱的研究文献，对往复荷载混凝土及钢管混凝土柱进行了一系列的总结，论述了往复荷载混凝土及钢管混凝土柱研究现状，并寻找出对往复荷载混凝土及钢管混凝土柱有利和积极的作用的研究变量。

**关键词：**钢管混凝土柱；往复荷载混凝土；抗震性能；承载能力；组合结构

**DOI：**10.69979/3029-2727.26.02.022

## 引言

钢管混凝土是向钢管填充混凝土所形成，该构件能大幅度提高承载力，构件按截面形式可分为圆形、方型、矩形等截面形式、该构件不但提高了混凝土的抗压强度还使其韧性和塑性得到大幅提升，从而提高了结构的可靠性、承载力，同时又节省了材料。钢管混凝土通过将钢管与混凝土组合为一体，不仅克服了两种材料各自的局限性，而且有效整合了二者的优势。这种组合结构通过有机结合不同属性的材料，充分发挥了混凝土承载力强的优势，同时借助钢材抗压、抗拉强度高、弹塑性好的特点，从而显著提升整体力学性能。在外部荷载作用下，钢管与混凝土协同受力，钢管对核心混凝土形成有效约束，使其处于多向受压状态，进而提高混凝土的强度与韧性。

国内外研究循环往复荷载混凝土的比较少，基本上都是在研究混凝土轴压力学性能的偏多。研究循环往复荷载混凝土对于结构抗震有很大帮助，有着较好的应用前景。

## 1 研究现状

### 1.1 循环往复荷载混凝土研究

林桂武<sup>[1]</sup>对循环荷载 PVA 纤维再生混凝土进行了研究，研究发现循环往复荷载 PVA-FRAC 主要发生斜向劈裂破坏，小于 50%取代率的裂缝较细一些，随着取代率增大峰值应力先增大后减小，随着峰值应力不断增加，PVA 纤维的加入提高了再生混凝土的延性和耗能能力，通过研究发现 PVA 掺量 0.1%时耗能最好，增加幅度为 26.19%。

王长青<sup>[2]</sup>对配置方形箍筋、菱形复合箍筋和八边形复合箍筋再生混凝土在循环往复荷载下应力-应变曲线

包络图、共同点曲线和单调荷载下应力应变关系全曲线形状相似，相似比值在 0.718-0.925 之间，箍筋约束再生混凝土强度和变形能力显著增高，残余应变随着卸载应变的增大而增大。建立了循环荷载下约束再生混凝土的残余变形方程，并提出了相应的卸载应力-应变曲线模型。该模型能有效改善其脆性较大的问题，为再生混凝土结构的抗震分析与设计提供了理论依据。

陈宇<sup>[3]</sup>基于连续损伤力学理论，推出了混凝土受压损伤变量演化方程，提出了混凝土弹塑性损伤本构模型。

权文立<sup>[4]</sup>基于试验结果，提出应力退化率及加、卸载曲线简化模型，建立了 FAAC 单轴循环受压应力-应变曲线计算方程，具有较好的精度。

徐礼华<sup>[5]</sup>通过循环往复荷载下，研究钢纤维参数对混凝土的影响，建立了循环受压下钢纤维混凝土弹塑性损伤本构模型，加入钢纤维提高了混凝土的峰值强度和峰值应变，钢纤维混凝土应力应变曲线下降段随着钢纤维掺量的增加变得平滑，韧性和延性也变得较好。

陈宇良<sup>[6]</sup>说明了钢纤维在循环往复荷载下各个阶段都有很好的阻裂效果，加入钢纤维后再生混凝土有很好的延性特征，钢纤维在的掺入一定程度上会降低再生混凝土的峰值应力，随着钢纤维的增加再生混凝土主裂缝宽度逐渐减小，钢纤维加入 1.0vol%时峰值应力降低幅度最小为 5.9%；峰值应变增加最大为 15.9%。

徐礼华<sup>[7]</sup>说明了随着钢纤维掺量的增加混凝土塑性应变减小，与普通混凝土相比相同应变点卸载时，钢纤维混凝土塑性应变累计较小卸载刚度比率较大。提出了分段式应力退化模型，混杂纤维的加入可以改善混凝土循环荷载力学行为。

晏方<sup>[8]</sup>研究表明，轻骨料混凝土的塑性应变主要与

循环加载次数相关,随次数增加而增长,两者关系可采用幂函数模型进行拟合;而该应变受混凝土强度等级及陶粒预湿时间的影响较小。

## 1.2 钢管混凝土抗震性能研究

钢管混凝土通过组合钢管与混凝土,有效融合了钢材与混凝土的材料特性:既发挥了混凝土抗压承载力高的优势,又利用了钢材抗拉、抗压强度高、弹塑性好的特点,通过钢管的横向约束,核心混凝土在受力时处于三向受压状态,其抗压强度与变形能力等关键力学指标因此获得提升。

李佳岐<sup>[9]</sup>研究发现破坏都为鼓曲破坏且内部混凝土被压碎。骨架曲线都有完整上升段、下降段和峰值段滞回曲线饱满。不同取代率峰值荷载承载力幅度变化不大于8%,说明取代率对钢管混凝土的影响有限。分析了不同取代率下的承载力退化、刚度退化、变形能力和耗能能力。证明了尾矿砂用于钢管混凝土取代是可以的。

韩林海<sup>[10]</sup>本文系统考察了含钢率、轴压比等关键参数对滞回及骨架曲线的影响。基于分析结果,建立了构件的弯矩-曲率模型和P- $\Delta$ 滞回模型,并给出了位移延性系数的简化计算公式。

何腾伟<sup>[11]</sup>研究表明,GFRP约束再生混凝土短柱表现出良好的力学性能,其破坏形态均表现为中部鼓曲。随着核心再生混凝土骨料取代率增大,试件的极限承载力逐渐降低。再生骨料取代率提高会导致试件在加载前期抵抗荷载的能力减弱,破坏特征更为明显,但在后期变形阶段延性有所改善,极限位移增大。此外,提高核心混凝土的强度可有效提升短柱的轴压性能,具体表现为极限承载力和刚度显著提高,但后期变形能力相应下降。

刘方达<sup>[12]</sup>研究表明,组合柱的荷载-位移滞回曲线呈饱满的纺锤形,等效粘滞阻尼系数平均值为0.27。在水平反复荷载作用下,组合柱在各加载阶段的承载力衰减系数均高于0.9,表明其具有较好的抗承载力衰减性能。

张国伟<sup>[13]</sup>通过试验表明,其刚度与承载力退化过程较为稳定。钢管材料对其抗震性能影响显著,而核心混凝土强度对压弯构件承载力的影响相对有限,主要作用于构件刚度。适当提高轴压比可在一定程度上改善构件的抗震性能与滞回特性,但轴压比过大会导致变形能力迅速退化。此外,减小径厚比有助于提升钢管混凝土柱

的承载力及弹性阶段刚度;在径厚比较小的情况下,随着轴压比增大,构件的滞回耗能能力呈现增强趋势。

杜喜凯<sup>[14]</sup>对9根方钢管混凝土柱开展往复荷载下的滞回性能研究表明:其延性系数随轴压比增大而显著降低,初期下降较快,之后渐趋平缓;随长细比增大,延性系数逐渐减小,且超过一定值后降幅加剧;而随套箍系数提高,延性系数则大致呈线性增长。

何学杰<sup>[15]</sup>通过对高强方钢管混凝土柱及普通混凝土柱的拟静力试验,研究了分析了长细比、套箍系数与轴压比等参数对构件滞回性能、刚度退化及耗能能力的作用。结果表明:随着套箍系数提高,试件滞回曲线更饱满,骨架曲线下降段更平缓,水平承载力提升明显,刚度退化减缓,延性改善;试件高度增加则导致初始刚度、承载力及延性均下降;轴压比增大虽可提升初始刚度,但会加快后期刚度退化,峰值荷载呈现先增后降趋势,延性随之降低;钢材强度提高能显著增大滞回环面积、提升初始刚度与承载力,但对延性的改善效果有限。

彭林苗<sup>[16]</sup>通过有限元分析研究了方钢管型钢再生混凝土短柱的抗震性能,重点考察了再生混凝土取代率、含钢率、钢管厚度、轴压比、钢材强度及型钢截面类型对其滞回性能与骨架曲线的影响。结果表明:取代率、钢材强度、厚度及轴压比对抗震性能影响显著;含钢率提高可明显提升承载力,但延性与耗能能力有所下降;轴压比增大会导致承载力与延性降低,而耗能能力则略有提升。此外,含钢率、钢材强度及轴压比的提高均会增强试件刚度。

胡佳星<sup>[17]</sup>通过对3个普通钢管混凝土短柱与51个钢管再生混凝土短柱开展轴压试验,研究了含钢率、再生骨料取代率及核心混凝土强度对试件承载力、刚度与延性的影响。试验表明,两者的破坏形态基本一致,但再生骨料因吸水率较高,会导致其短柱的承载力与刚度有所降低。核心混凝土强度与含钢率对两类短柱力学性能的影响规律相似。此外,再生骨料来源的不同可使试件极限承载力产生约11.6%的差异,对刚度的影响可达24.2%。

杜颜胜<sup>[18]</sup>研究表明,矩形截面钢管尾矿砂再生混凝土柱具有较好的抗震性能,其平均位移延性系数约达2.7,等效黏滞阻尼系数分布于0.05~0.3区间。试件在循环荷载下表现出明显的刚度退化,而承载力退化较为平缓。模型验证表明,依据相关参数建立的有限元模型能有效模拟其受力行为,计算所得的骨架曲线与滞回曲线

均与试验数据吻合良好。

## 2 结论与展望

本文系统综述了往复荷载下混凝土材料及其与钢管组合构件的抗震性能研究进展。

在往复荷载下,混凝土性能受材料组成影响显著。研究表明,将再生粗骨料取代率控制在 $\leq 50\%$ 的合理范围内,对构件承载力影响有限(降幅通常 $< 8\%$ ),且可能改善延性。纤维掺入效果明确,如PVA纤维掺量为 $0.1\%$ 时,耗能能力可提升 $26.19\%$ 。

对于钢管混凝土柱,其抗震性能关键受轴压比、含钢率等参数调控。轴压比增大(尤其 $> 0.6$ )会加速性能退化,而提高含钢率与钢材强度能有效提升承载力与刚度(如含钢率增加可使承载力提升 $8.3\%-14.3\%$ )。现有本构与恢复力模型(相似比 $0.718-0.925$ )为设计与分析提供了可靠依据。

未来研究可集中于深化合理取代率下绿色混凝土的长期性能;拓展新型组合构件在复杂受力下的抗震机理;发展融合智能算法的精细化设计与全寿命性能评估方法;推动关键成果纳入规范,以促进该体系更广的安全、经济应用。

## 参考文献

- [1] 林桂武,刘康,陈宇良. 循环荷载下PVA纤维再生骨料混凝土力学性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023.
- [2] 王长青,肖建庄,李秋义. 循环往复荷载作用下约束再生混凝土力学性能试验[J]. 建筑结构学报, 2020.
- [3] 陈宇,李忠献. 基于应力-应变曲线的混凝土弹塑性损伤本构模型[J]. 北京工业大学学报, 2014.
- [4] 权文立,黄炜,毛文桢,等. 循环荷载作用下纤维增强蒸压加气混凝土力学性能试验[J/OL]. 复合材料学报.
- [5] 徐礼华,李长宁,李彪,等. 循环受压状态下钢纤维混凝土一维弹塑性损伤本构模型研究[J]. 土木工程学

报, 2018, 51(11): 77-87.

- [6] 陈宇良,李浩,叶培欢,等. 循环荷载作用下钢纤维再生混凝土力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11).
- [7] 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(04).
- [8] 晏方,陈宇良,陈宗平,等. 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土循环受压力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(08).
- [9] 李佳岐. 钢管尾矿砂再生混凝土柱抗震性能研究[D]. 天津大学, 2021.
- [10] 韩林海,游经团,杨有福,等. 往复荷载作用下矩形钢管混凝土构件力学性能的研究[J]. 土木工程学报, 2004.
- [11] 何腾伟. GFRP约束钢管再生混凝土短柱力学性能研究[D]. 长安大学, 2023.
- [12] 刘方达. 方钢管型钢再生混凝土组合柱抗震性能及设计方法研究[D]. 西安理工大学, 2023.
- [13] 张国伟. 钢管混凝土柱在地震作用下的累积损伤性能研究[D]. 湖南大学, 2009.
- [14] 杜喜凯. 往复荷载作用下钢管混凝土柱性能试验及理论分析[D]. 天津大学, 2010.
- [15] 何学杰. 高强方钢管超高性能混凝土柱抗震性能研究[D]. 长江大学, 2023.
- [16] 彭林苗. 高强方钢管型钢再生混凝土短柱抗震性能及地震损伤模型[D]. 广州大学, 2023.
- [17] 胡佳星. 圆钢管再生细骨料混凝土短柱轴压力学性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [18] 杜颜胜,李佳岐,陈志华,等. 矩形截面钢管尾矿砂再生混凝土柱抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022.

作者简介: 张金旭(2000.11-),男,汉族,黑龙江省密山市,硕士研究生,主要从事土木工程材料和结构工程研究。