

非常规钢管混凝土力学性能研究进展

宋雨轲 吕金琢 张金旭

黑龙江大学建筑工程学院, 黑龙江省哈尔滨市, 150006;

摘要: 钢管混凝土是将混凝土灌入薄壁钢管内形成的组合结构,钢管混凝土有着很好的塑性和韧性,并且构件的承载力高,耐火极限相比于常规钢结构要长,在实际工程中施工简单便利, 有着良好的经济效益和社会效益。近年来建筑领域中的许多专家将其列为重点研究对象, 这使钢管混凝土在理论研究方面以及实际工程应用方面取得了重大突破性进展和显著的成就。再生混凝土技术可以将建筑垃圾回收利用制备成新的混凝土。钢管再生混凝土技术是再生混凝土技术如今发展的重要方向。本文围绕再生混凝土及其钢管组合结构的力学性能, 结合国内外研究进展进行了论述与探讨, 并对钢管再生混凝土力学性能的研究现状进行了归纳梳理,对未来的钢管再生混凝土组合结构在实际工程中的应用具有一定的参考价值。

关键词: 钢管混凝土; 再生混凝土; 钢管再生混凝土; 组合结构; 力学性能; 研究现状; 研究进展

DOI: 10.69979/3029-2727.26.02.021

引言

钢管混凝土是一种典型的组合结构形式。它在钢管中灌实混凝土,使钢管与核心混凝土在受力时形成一个整体,如同“骨骼”与“肌肉”般紧密结合、协同工作,这种组合结构体现了两者良好的组合效应,外部钢管对核心混凝土起到了套箍约束作用,在提高其强度的同时有效改善其脆性,同时核心混凝土阻止了钢管向内的屈曲,提高了薄壁钢管在受压情况下的稳定性。近年来,在实际工程需求与绿色可持续发展理念的双重驱动下,再生骨料与再生混凝土的回收再利用成为研究热点。大量相关研究旨在制备新型绿色混凝土,其成果既促进了混凝土技术的多元化,也为实现高性能、可持续的钢管混凝土组合结构提供了新的研究方向

1 国内外钢管混凝土的研究历程

1.1 国外钢管混凝土研究历程

钢管混凝土的国际研究可追溯至 20 世纪五六十年代。1965 年,Chapman、Neogi 和 Furlong^[1-2]等人发表的试验研究被视为重要开端,早期工作主要围绕圆截面形式展开。此类截面虽能对核心混凝土形成极为有效的约束,但其固有的几何特性也导致了节点构造复杂、施工不便,在与其他构件协同工作时存在一定局限性。

Konn K 等考虑到轴压力学性能对钢管再生混凝土做了研究,发现钢管再生混凝土的力学性能与普通混凝土

力学性能基本一致,但前者的刚度和承载力较后者有所降低^[3]。日本学者 Konno 等人较早进行了相关探索,将再生混凝土用于钢管约束结构;其研究揭示了在此类约束条件下,再生混凝土与普通混凝土的核心力学性能具有可比性^[4]。

1.2 国内钢管混凝土研究历程

20 世纪 70 年代,矩形钢管混凝土进入系统研究阶段。国内的相关工作于 80 年代相继开展,以郑州大学、同济大学等院校为代表,研究主要围绕矩形钢管混凝土短柱及同类构件的受力特性展开^[5]。

继杨永芳等学者较早提出将再生混凝土用于钢管结构后^[6],国内研究迅速聚焦于钢管再生混凝土的性能。针对轴压短柱,研究表明其荷载-变形曲线总体趋势与普通钢管混凝土相似;其主要差异在于承载力,前者通常低于后者,并且承载力随再生骨料取代率的增加而呈现规律性下降。

为揭示再生粗骨料含量对钢管再生混凝土短柱轴压性能退化的影响,陈宗平等以 10%为级差设置再生粗骨料取代率作为关键参数。研究从组合轴压刚度退化、损伤及耗能等角度,系统分析了取代率对圆、方两种截面钢管再生混凝土短柱轴压性能衰减的影响程度^[7]。

2 非常规钢管混凝土力学性能研究进展

2.1 钢管再生粗骨料混凝土轴压力学性能研究

陈杰^[8]开展了 24 个短柱试件（其中 18 个为钢管再生混凝土，6 个为钢管普通混凝土）的轴心受压试验，系统考察了含钢率、钢材强度、核心混凝土强度及再生粗骨料取代率的影响。试验重点观测了试件的轴向荷载-变形关系及破坏模式。结果表明：在钢管的有效约束下，钢管再生混凝土试件的结果离散性较小，其荷载-应变曲线与普通混凝土试件相似，且满足试验一致性要求。

黄靓^[9]以粗骨料取代率和套箍系数为变量，设计了 20 个试件（外径 $D=165\text{mm}$ ，高度 $H=500\text{mm}$ ），钢管壁厚分为 2.5mm 与 3.75mm 两种，取代率设置为 0%、30%、50%、70% 及 100%。试验采用直缝钢管。结果表明：试件的峰值应力随取代率提高而逐渐降低，但其对应的峰值应变却随之增大。分析指出，这可能是因为再生粗骨料（尤其含砖骨料）表面附着的老水泥基体增加了胶凝材料总量，从而提升了变形能力，导致峰值应变的增大。

2.2 钢管再生细骨料混凝土轴压力学性能研究

胡佳星^[10]通过 54 个短柱（包括 51 个钢管再生混凝土与 3 个钢管普通混凝土试件）的轴压试验，系统研究了再生粗、细骨料取代率、含钢率及混凝土强度对试件力学性能的影响，并记录了试验现象、破坏形式与荷载-位移曲线。研究表明：当以再生细骨料取代砂后，其荷载-位移曲线与普通试件相似；此外，所有钢管再生混凝土试件的破坏形态均为剪切破坏，与普通试件亦基本一致。

郝文佳^[11]采用钼尾矿等量取代天然中砂，设计了 8 种混凝土配合比。研究首先测试了钼尾矿核心混凝土的力学性能，继而通过对 16 根短柱的轴压试验，探究了取代率对钼尾矿钢管混凝土短柱承载力的影响。结果表明：在固定水灰比与水泥用量的前提下，提高钼尾矿取代率会导致混凝土抗压强度小幅下降，弹性模量变化规律不明显，但其性能仍满足同等级混凝土要求，证明了替代的可行性。此外，短柱的破坏形态与普通钢管混凝土相似，且不受取代率的显著影响。

3 结论与展望

3.1 结论

近年来，钢管混凝土组合结构在实际建筑领域中应用的越来越广泛，例如在桥梁、建筑、地下结构以及港口工程等众多领域。将各种矿物废料以及建筑垃圾应用于钢管混凝土组合结构是顺应当今钢管混凝土组合结构绿色低碳化可持续发展的主要手段之一。本文研究的是非常规钢管混凝土，研究方向主要是有两种，一个是替代混凝土配合比中的细骨料，另一个是替代混凝土配合比中的粗骨料。本文的结论有以下几点：

（1）在其他条件相同的条件下，再生骨料钢管混凝土的抗压强度随再生骨料取代率的增大呈负相关，但降幅有限；其弹性模量未呈现显著变化规律。整体上，其力学性能满足同等级普通钢管混凝土的要求，证明用矿物废料或建筑垃圾在一定的范围内替代钢管混凝土内核心混凝土中的粗、细骨料这种技术是可行的，可以应用到实际工程当中。

（3）钢管混凝土组合结构中影响其承载力的不单单只是其核心混凝土，外部钢管也起到了很大的作用。例如套箍系数也会影响钢管混凝土的承载力。在一定范围内套箍系数提高，钢管混凝土的承载力就越大。

（4）再生骨料钢管混凝土的应力-应变曲线与普通钢管混凝土的应力-应变曲线类似。与现有规范相比，应力-应变曲线能够良好拟合。因为骨料的原因，我们还要考虑再生骨料取代率对钢管混凝土的承载力的影响，根据实验数据对现有规范中普通钢管混凝土承载力计算公式进行修正，提出一个符合自己新材料的一个钢管混凝土承载力公式，令这种新材料的钢管混凝土处于能够投入实际工程应用的一个安全范围内。

3.2 展望

将矿物废料和建筑垃圾用作材料，顺应我国绿色发展国策，开展以再生骨料替代天然砂石制备钢管混凝土的研究，兼具显著的环保意义与工程应用价值，再生骨料钢管混凝土必然是建筑领域中的研究热点。我认为为了推广这种新材料再生骨料钢管混凝土的发展，今后可在以下方面进行研究探索：

（1）可以用在钢管混凝土组合结构的内部填充的新型材料有很多种类，每种材料的特性都有其独特的方面，以后的研究应进行综合考虑各种内填的新型材料的优缺点，将现在已经成熟的钢管混凝土组合结构技术与

内填的新材料进行结合,制备出具有多种优异性能的钢管混凝土组合结构。

(2) 为了充分发挥钢管混凝土组合结构的优点,规范要求钢管内核心混凝土强度不得低于 C40,但一些新型的内填材料强度达不到 C40,所以我们还要研究内填材料本身的性能,可以通过调制配合比或者通过一些化学反应令其材料强度最低达到 C40 要求,这样才能更好的发挥钢管混凝土组合结构的优良作用。

(3) 材料本身的性能例如强度、刚度、塑性、韧性、疲劳性能、耐久性、防火性等等,除了材料本身的性能,我们更加要对其力学性能进行研究。力学性能不单单是轴压承载力性能研究,还有抗折强度、抗拉强度、抗剪切强度等等。无论是材料的性能还是力学性能,我们要研究的方面有很多,每种特性都有着其独特的作用,都影响着其作为新型的钢管混凝土组合结构在建筑领域中的独特作用,所以我们的研究道路是任重而道远的。

(4) 研究的最终目的是要将所研究的东西应用到实际生活之中,所以我们的研究要结合实际。值得关注的是,某些新型内填材料可显著提升钢管混凝土组合结构的力学性能与耐久性能,但是其高昂的成本并不能被实际建筑工程中接受并使用,所以我们后续的研究还应该考虑经济条件和经济效益,可以对所研究出的新型内填材料的钢管混凝土组合结构进行合理评估,使其可以兼顾结构性能和经济性。

参考文献

- [1] P. K. Neogi, H. K. San and J. C. Chapman. Concrete Filled Tubular Steel Columns under Eccentric Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 1969, 47(5): 187~195.
- [2] Furlong, R. w. Strength of Steel-Encased Concrete Beam-Columns [J]. Journal of Structural Division, 1998, 99(5): 113~124.
- [3] Konno K, Sato Y, Kakuta Y, et al. The Property of Recycled Concrete Column Encased by Steel Tube Subjected to Axial Compression[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1997, (19): 351-358.
- [4] 再生骨料混凝土充填钢管柱抗压强度预测模型[J]. 复合材料 B 部分: 工程, 2019, 173: 106938.
- [5] 陈志华, 杜颜胜, 等. 矩形钢管混凝土结构研究综述[J]. 建筑结构, 2015, 45(16): 40-46+76.
- [6] 杨永芳, 韩旭华. 再生骨料混凝土充填钢管(RACFST)在短期荷载作用下的抗压和抗弯行为[J]. 钢结构与复合材料, 2006, 6(3): 257-284.
- [7] 陈宗平, 徐金俊, 薛建阳. 取代率对钢管再生混凝土短柱轴压性能退化的影响分析[J]. 实验力学, 2014, 29.
- [8] 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.
- [9] 黄靓, 林明明, 高畅, 等. 钢管含砖骨料再生混凝土柱轴压力学试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(03): 699-706. DOI: 10. 19713/j. cnki. 43-1423/u. T 20190366.
- [10] 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, 2020. DOI: 10. 27061/d. cnki. ghgdu. 2019. 002722.
- [11] 郝文佳. 钢管钼尾矿混凝土短柱轴压力学性能研究[D]. 西安: 西京学院, 2020. 温钼尾矿混凝土填充钢管短柱轴向压缩力学性能研究[D]. 西安: 西京大学, 2020.

作者简介: 宋雨轲(2000.09-), 男, 汉族, 籍贯辽宁大连, 全日制研究生, 研究方向: 土木工程材料与结构。