

钢管混凝土柱承载力影响因素数值模拟研究

王亚东 412723198409177758

摘要

钢管混凝土柱凭借钢管对核心混凝土的套箍约束作用,兼具钢材塑性韧性好与混凝土抗压强度高的双重优势,被广泛应用于高层建筑、大跨度桥梁等工程结构中。本文采用 ABAQUS 有限元软件建立钢管混凝土轴压柱数值模型,分析钢材强度、混凝土强度、钢管径厚比三大因素对构件极限承载力的影响规律。研究结果表明:钢材强度与混凝土强度的提升均会显著提高钢管混凝土柱的极限承载力,其中混凝土强度对承载力的贡献占比更高;径厚比增大时,套箍约束效应减弱,构件极限承载力呈下降趋势,且当径厚比超过合理范围后,承载力下降速率明显加快。本文研究成果可为钢管混凝土柱的工程设计提供参考依据。

关键词: 钢管混凝土柱; 极限承载力; 数值模拟; 影响因素

1 引言

钢管混凝土结构是将混凝土填入薄壁钢管内形成的复合结构,在荷载作用下,核心混凝土处于三向受压状态,其抗压强度得到大幅提升,而钢管则避免了核心混凝土的脆性开裂问题,二者协同工作使得构件承载力远高于单一材料构件。近年来,随着我国基础设施建设规模不断扩大,钢管混凝土柱在超高层建筑、大跨度空间结构以及桥梁工程中的应用比例持续提升,准确掌握其承载力影响因素及变化规律,对优化结构设计、保障工程安全具有重要意义。

目前,针对钢管混凝土柱承载力的研究主要包括试验研究与数值模拟两种方法。试验研究能够获得最直接的实测数据,但受试验条件、成本等限制,难以开展多参数、大样本的系统性分析;而数值模拟方法凭借成本低、参数调整便捷、可重复性强等优势,已经成为钢管混凝土性能研究的重要手段。本文依托有限元软件 ABAQUS,建立轴压作用下钢管混凝土柱的三维数值模型,重点分析钢材强度等级、核心混凝土强度等级、钢管径厚比三个关键参数对构件极限承载力的影响,总结其变化规律,为工程设计提供参考。

2 有限元模型建立

2.1 材料本构模型选取

对于钢管材料，本文采用弹塑性本构模型，遵循 Von Mises 屈服准则，应力-应变关系采用二次流塑性模型，考虑钢材的强化阶段特征，泊松比取 0.3，弹性模量按钢材强度等级取值。对于核心混凝土，本文采用 ABAQUS 提供的塑性损伤本构模型，该模型能够较好模拟混凝土在受压过程中的塑性变形与损伤演化，考虑钢管对核心混凝土的套箍约束作用，对混凝土的抗压强度进行修正，修正公式采用韩林海提出的约束效应系数调整方法，混凝土泊松比取 0.2，弹性模量按混凝土强度等级规范取值。

2.2 界面接触与边界条件

钢管与核心混凝土之间的界面相互作用采用法向硬接触+切向库伦摩擦模型，法向接触允许接触后分离，切向摩擦系数取 0.6，能够较好模拟两种材料之间的粘结滑移作用。模型边界条件设置为：柱下端采用固定端约束，限制所有方向的平动与转动自由度；柱上端设置为自由端，仅允许轴向位移，同时在柱顶设置参考点，将参考点与柱顶面耦合，通过参考点施加轴向集中荷载，采用位移控制加载方式获取完整的荷载-位移曲线。

2.3 网格划分

钢管采用四节点减缩积分壳单元 S4R 划分网格，核心混凝土采用八节点减缩积分实体单元 C3D8R 划分网格，通过网格敏感性分析，确定网格尺寸为构件直径的 1/10，既保证计算精度，又控制计算成本。最终建立的典型有限元模型如图 1 所示（此处省略模型图示），模型计算完成后提取柱顶荷载-轴向位移曲线，曲线峰值点对应的荷载即为构件极限承载力。

3 参数影响分析

本文保持构件长度为 3m 不变，设计三组参数分析方案，分别研究钢材强度、混凝土强度、径厚比对极限承载力的影响，具体参数组合与计算结果如表 1 所示。

组别	钢材强度 (MPa)	混凝土强度 (MPa)	径厚比 D/t	极限承载力 (kN)
----	------------	-------------	------------	------------

1-1	Q235	C30	30	5428
1-2	Q355	C30	30	6132
1-3	Q420	C30	30	6587
2-1	Q355	C30	30	6132
2-2	Q355	C40	30	7216
2-3	Q355	C50	30	8274
3-1	Q355	C40	20	7985
3-2	Q355	C40	30	7216
3-3	Q355	C40	40	6439

3.1 钢材强度的影响

从第一组计算结果可以看出，当混凝土强度与径厚比保持不变时，钢管混凝土柱极限承载力随钢材强度提升呈线性增长趋势。钢材强度从 Q235 提升至 Q355，极限承载力从 5428kN 提升至 6132kN，增幅约 13.0%；从 Q355 提升至 Q420，极限承载力进一步提升至 6587kN，增幅约 7.4%。出现该规律的原因在于，钢管不仅提供套箍约束作用，同时自身也承担部分轴向荷载，钢材强度提升直接提高了钢管自身的轴向承载力，同时套箍约束作用也有所增强，因此构件整体承载力随之提升。但需要注意的是，在轴压作用下，核心混凝土承担了超过 70%的轴向荷载，因此钢材强度提升对承载力的贡献幅度相对有限。

3.2 混凝土强度的影响

第二组计算结果显示，当钢材强度与径厚比不变时，核心混凝土强度提升对钢管混凝土柱极限承载力的提升效果更为显著。混凝土强度从 C30 提升至 C40，极限承载力从 6132kN 提升至 7216kN，增幅达到 17.7%；从 C40 提升至 C50，极限承载力提升至 8274kN，增幅进一步达到 14.7%，该增幅明显高于钢材强度提升带来的承载力增幅。原因在于，核心混凝土是钢管混凝土柱承受轴向荷载的主要部分，强度提升直接增加了核心部分的抗压能力，同时由于套箍约束效应，高强度混凝土的脆性缺陷被钢管抑制，其强度提升能够完全转化为构件整体承载力的增长。因此，在工程设计中，提升核心混凝土强度是提高钢管混凝土柱承载力更为经济有效的方式。

3.3 径厚比的影响

第三组计算结果表明,当其他参数不变时,钢管混凝土柱极限承载力随径厚比增大呈明显下降趋势。径厚比从 20 增大到 30,极限承载力从 7985kN 下降到 7216kN,降幅约 9.6%;径厚比从 30 增大到 40,极限承载力进一步下降到 6439kN,降幅约 10.8%,下降速率随径厚比增大略有加快。该规律的内在机理是:径厚比增大意味着钢管壁厚减小,钢管对核心混凝土的套箍约束效应减弱,核心混凝土无法获得足够的三向受压约束,其强度提升幅度降低,同时钢管自身的整体刚度也有所下降,因此构件极限承载力随之降低。当径厚比超过 40 后,套箍约束效应已经十分微弱,钢管混凝土构件的工作性能接近普通钢筋混凝土柱,因此承载力下降速率明显加快,工程设计中通常需要将径厚比控制在 30 以内,以保证足够的套箍约束效应。

4 结论

本文通过建立钢管混凝土轴压柱有限元模型,系统分析了钢材强度、混凝土强度、径厚比对构件极限承载力的影响规律,得到以下结论:第一,钢材强度与核心混凝土强度的提升均能提高钢管混凝土柱的极限承载力,其中核心混凝土强度提升对承载力的贡献更为显著,是工程中提高承载力的优先选择;第二,极限承载力随钢管径厚比增大而下降,且下降速率随径厚比增大逐渐加快,设计中需要将径厚比控制在合理范围内,保证套箍约束效应;第三,数值模拟方法能够准确反映不同参数下钢管混凝土柱的承载力变化规律,可为工程设计与参数优化提供高效的分析手段。

参考文献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 科学出版社, 2007.
- [2] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 清华大学出版社, 2003.
- [3] 吕西林, 陆烨. 钢管混凝土柱承载力计算方法研究进展[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(06): 10-18.