基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用

韩林海^{1*}, 杨有福², 杨华³, 李威¹

1. 清华大学土木工程系, 北京 100084;

2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;

3. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090

* 联系人, E-mail: lhhan@tsinghua.edu.cn

2020-05-21 收稿, 2020-07-08 修回, 2020-07-10 接受, 2020-07-13 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(51838008)资助

摘要 钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而成, 且钢管及其核心混凝土能共同承受外荷载作用的结构形式. 组成该类结构的材料间协同互补作用, 可有效避免或延缓钢管发生局部屈曲及混凝土发生脆性破坏. 钢管混凝土具有强度高、塑性和韧性好、抗震和抗火性能优越、施工方便等一系列技术优势, 已在工业厂房、地铁站、输电杆塔、高层建筑以及桥梁等现代工程结构中得到广泛应用, 取得了良好的建筑效果和经济效益. 本文简要回顾了钢管混凝土结构的发展概况; 针对全寿命周期服役过程中长期荷载和复杂受力两种常遇作用、地震和火灾两种极端作用工况, 阐述了基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用; 最后, 对钢管混凝土结构研究的发展趋势进行了简要展望.

关键词 钢管混凝土结构, 全寿命周期, 约束效应, 约束效应系数, 本构模型, 分析理论

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而成, 且钢管及其核心混凝土能共同承受外荷载作用的结构形式. 与传统的钢结构和钢筋混凝土结构相比, 钢管混凝土是一种相对新型的结构形式. 钢管混凝土工作的基本原理是: 受力过程中, 钢和混凝土两种材料共同工作并协同互补, 即钢管对核心混凝土产生约束, 使其处于复杂应力状态, 从而提高其抗压强度, 延性也随之改善. 同时, 混凝土对钢管产生支撑作用, 延缓或避免受压钢管发生局部屈曲, 保证钢材强度得以充分发挥^[1]. 圆形和方、矩形是工程中广泛应用的钢管混凝土(concrete-filled steel tubes, CFST)截面形式^[1~5]. 图1以圆形截面钢管混凝土轴心受压短构件为例, 给出了钢管及其核心混凝土间的相互作用示意图, 其中 p 为钢管与混凝土间的相互作用应力.

本文拟简要回顾钢管混凝土结构的发展概况, 阐

述基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用, 并对钢管混凝土结构研究的发展趋势进行展望.

1 钢管混凝土结构的发展概况

钢管混凝土结构的发展经历了逐渐演变的过程. 19世纪70年代, 英国赛文铁路桥(Severn Railway Bridge)采用了钢管混凝土桥墩, 是采用钢管混凝土形式的较早报道之一. 早期钢管混凝土的外钢管一般为无缝管或普通强度的热轧管和铸管等, 核心混凝土通常为普通强度混凝土^[6,7]. 自20世纪60年代开始, 学者们对钢管混凝土压弯构件的力学性能、钢管与核心混凝土界面的粘接性能等进行了研究, 且以圆形截面构件为主.

20世纪70~80年代开始, 钢管混凝土结构研究由基本静力性能逐步延伸至抗震性能、抗火性能及长期荷

引用格式: 韩林海, 杨有福, 杨华, 等. 基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用. 科学通报, 2020, 65: 3173–3184

Han L H, Yang Y F, Yang H, et al. Life-cycle based analytical theory of concrete-filled steel tubular structures and its applications (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3173–3184, doi: 10.1360/TB-2020-0618

图1 (网络版彩色)轴压荷载作用下圆钢管混凝土的钢管及其核心混凝土间的相互作用

Figure 1 (Color online) Interaction between steel tube and its core concrete of circular CFST under axial compression

载作用下的性能等。20世纪90年代起, 钢管混凝土的工程应用有了长足进展, 机械性能相对更好的冷弯钢管与焊接钢管等被广泛应用于钢管混凝土结构中^[2,3,8], 使外钢管的进一步薄壁化和尺寸多样化成为可能; 高强混凝土(如强度等级高于C60~C80的混凝土)的采用, 使钢管混凝土进一步高强度, 构件截面更小, 经济性能更好。在这一阶段, 为适应建筑构造的要求, 方、矩形截面钢管混凝土在工程中的应用逐渐增多。在力学性能研究方面, 学者们将单一静载下的受力性能研究进一步扩展至压弯剪和压弯扭等复合受力性能, 抗震性能研究也进一步深入。同时, 方、矩形截面钢管混凝土设计方法的研究取得了较大进展, 对采用薄壁钢管的钢管混凝土也有不少研究报道^[1,9]。

在上述研究工作的基础上, 国内外已制定了多部钢管混凝土结构相关的技术标准。如我国国家标准《钢管混凝土拱桥技术规范》GB 50923^[10]和《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936^[11]、中国工程建设标准化协会标准《钢管混凝土结构技术规程》CECS 28^[12]和《矩形钢管混凝土结构技术规程》CECS 159^[13]、电力行业标准《钢-混凝土组合结构设计规程》DL/T 5085^[14]和福建省工程建设标准《钢管混凝土结构技术规程》DBJ/T13-51^[15]等, 日本Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures^[16]、美国Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360^[17]和欧洲Design of Composite Steel and Concrete Structures EN 1994-1-1^[18]等。上述工程建设标准给出了钢管混凝土结构在材料、构件、节点和施工等方面的相关设计条文, 推动了该类结构在基础工程、工业厂房、地铁站、高层建筑及桥梁等中的应用。

近20年来, 钢管混凝土结构的研究呈现出一些新动向: 一方面, 在传统钢管混凝土结构的基础上, 基于全寿命周期的钢管混凝土分析理论得到深入发展; 另一方面, 为了进一步提高结构的性能, 采用新截面(椭圆形和多边形等)、新材料(如高强高性能混凝土, 屈服强度 ≥ 460 MPa的高强钢材、不锈钢等)和新构成形式(如中空夹层钢管混凝土等)的钢管混凝土结构^[1,4,19~22]陆续出现。此外, 还进一步拓展为由钢管混凝土构件和传统钢或混凝土构(部)件通过优化混合而成的高性能混合结构^[23], 如桁式钢管混凝土结构及其发展演变而成的钢管混凝土加劲混合结构等。上述发展动向的归纳如图2所示。

2 基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论

众所周知, 工程结构的全寿命周期包括设计、施工、运营和维护等环节。在全寿命周期内, 工程结构的可靠性将影响可持续城镇化建设过程中的环境、材

图2 (网络版彩色)钢管混凝土结构研究的发展动向

Figure 2 (Color online) Development trend of the CFST structures research

料、信息、能源、经济等诸多方面。

近年来, 钢管混凝土结构的应用领域和规模进一步扩大, 已由在工业厂房、地铁站、高层建筑和拱桥等工程的应用, 进一步拓展至高耸电视塔、大跨度桥梁、大跨越输电塔、高烈度区大跨、重载结构中的多种主体受力结构, 工程难度前所未有, 所处环境与所需考虑的作用形式(如腐蚀、爆炸、冲击等)趋于复杂, 分析与设计的精细化需求进一步提升。因此, 很难也不应将钢管混凝土全寿命周期内的设计、施工、维护等环节割裂开来。这些环节中提取出的荷载、温度、冲击能、腐蚀等作用, 将影响或耦合影响钢管混凝土结构的可靠性。为此, 只有解决上述环节中的基础理论问题, 系统建立基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论才能成为可能, 同时, 才能适用于现在已经出现的, 以及未来在此基础上进一步发展的新型钢管混凝土组合结构与混合结构。

在全寿命周期的维度上, 钢管混凝土结构分析理论特色总体上体现在如下3个方面^[1]: (1) 综合考虑施工因素(如钢管制作、核心混凝土浇灌等)、长期荷载(如混凝土收缩和徐变)及环境作用影响(如氯离子腐蚀等)的钢管混凝土结构分析理论; (2) 全寿命周期服役过程中, 钢管混凝土结构在可能导致其破坏的极端作用下(如强烈地震、火灾和撞击等)力学性能的分析理论, 以及考虑多种作用相互耦合的分析理论与方法; (3) 基于全寿命周期的钢管混凝土结构设计原理与方法。

围绕上述3个方面, 作者们基于系统的精细化实验、模拟和工程实践, 攻克了核心混凝土受被动约束效应机制难题, 建立了其通用型本构模型; 揭示了全寿命周期服役过程中的长期荷载和复杂受力两种常遇作用下、地震和火灾两种极端作用下结构的损伤机理、分析和计算方法, 为钢管混凝土结构安全、合理的推广应用提供了理论基础。

2.1 被动约束效应概念

钢管混凝土性能优势的本源在于受力过程中钢管对其核心混凝土的被动约束效应, 这一效应使其在工作机制上具有极大的复杂性。如何在概念上准确揭示约束效应机制, 量化约束效应幅值, 进而提出其核心混凝土本构模型是该领域的基础性问题。

以往, 有学者“借用”传统箍筋约束混凝土的方法, 采用“套箍指标”这一参数进行钢管混凝土构件承载力计算, 也有学者采用钢管的径(宽)厚比作为基本参数衡

量约束效应的变化。这些方法都不能完全满足基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论研究, 这是因为: (1) 钢管混凝土在受力过程中, 钢管一般处于三向应力状态且存在发生局部屈曲的趋势, 而箍筋约束混凝土中的箍筋处于环向受拉的单向应力状态; (2) 钢管混凝土的基本性能不仅决定于钢管和混凝土本身的几何尺寸与物理特性参数, 也决定于二者的“匹配”关系, 仅采用钢管径(宽)厚比作为基本参数难以准确描述被动约束效应; (3) 尚需准确反映全寿命周期服役过程中, 长期应力、循环应力和高温作用下约束效应的变化规律。

基于上述考虑, 提出了“约束效应系数”概念, 并确定用约束效应系数(ξ)作为衡量全寿命周期服役过程中钢管对其核心混凝土被动约束效应的基本参数^[1,24]。 ξ 的表达式如下:

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha \frac{f_y}{f_{ck}}, \quad (1)$$

式中, A_s 和 A_c 分别为钢管和核心混凝土的横截面积; $\alpha(=A_s/A_c)$ 为钢管混凝土截面含钢率; f_y 为钢材屈服强度, 对于单一荷载与复杂受力、长期荷载及地震作用工况, 取为常温值, 对于火灾下与火灾后作用工况, 需分别考虑实时温度与经历的最高温度的影响; f_{ck} 为核心混凝土轴心抗压强度标准值。

上述适用于多种截面形式钢管混凝土的约束效应系数概念, 较为准确地揭示了贯穿全寿命周期的长期荷载、复杂受力、地震和火灾工况下钢管与核心混凝土间作用机制的物理本质, 合理量化了钢管混凝土几何尺寸与物理特性的匹配关系, 即截面尺寸相同条件下, 钢管与混凝土的材料强度比决定约束效应; 材料强度不变情况下, 含钢率决定约束效应。约束效应系数是描述核心混凝土本构模型的关键参数, 为新型钢管混凝土结构和钢管混凝土混合结构分析理论的科学建立及深入研究创造了条件。约束效应系数还可为钢管混凝土结构概念设计提供依据, 如确定截面几何特性(截面尺寸、含钢率)、物理参数(材料强度)及二者之间的匹配关系优化, 以及结构抗震设计中的延性计算等。

2.2 通用型核心混凝土本构模型

以往, 对钢材本构模型已有系统研究, 但尚缺乏准确、通用的核心混凝土本构模型。以提出的约束效应系数为基本参数, 针对全寿命周期服役过程中钢管混

混凝土结构可能承受的多种工况, 作者们提出了适用于纤维模型法和有限元法的核心混凝土受压应力-应变关系模型. 以圆钢管混凝土为例, 式(2a)和(2b)分别给出了短期静力荷载作用下, 适用于纤维模型法和有限元法的核心混凝土受压应力(σ)-应变(ε)关系模型^[1,20,25].

(1) 纤维模型法:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & (x \leq 1), \\ 1 + q(x^{0.1\zeta} - 1), & (\zeta \geq 1.12), \\ x / [\beta_1(x-1)^2 + x], & (\zeta < 1.12), \end{cases} \quad (x > 1), \quad (2a)$$

(2) 有限元法:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & (x \leq 1), \\ x / [\beta_2(x-1)^2 + x], & (x > 1), \end{cases} \quad (2b)$$

式中, $x = \varepsilon / \varepsilon_0$, $y = \sigma / \sigma_0$, σ_0 为峰值应力, ε_0 为与 σ_0 对应的应变; q 、 β_1 和 β_2 为中间变量. 公式的适用范围是: Q235~Q460钢; C30~C80混凝土; 对于圆钢管混凝土, $\alpha=0.06\sim0.2$, $\zeta=0.6\sim4.0$; 对于方、矩形钢管混凝土, $\alpha=0.1\sim0.2$, $\zeta=1.0\sim4.0$.

在式(2)的基础上, 基于系统的试验研究, 考虑核心混凝土徐变系数和收缩应变对与峰值应力对应应变的影响规律, 建立了长期应力作用下核心混凝土受压应力-应变关系模型. 以短期静力荷载作用下核心混凝土受压应力-应变关系模型为骨架曲线, 考虑循环应力下的卸载刚度退化和软化特性, 建立了循环应力作用下核心混凝土应力-应变关系模型. 考虑全过程火灾作用下钢管混凝土经历常温、高温、降温和高温后的各个阶段, 基于温度对被动约束效应影响规律确定了高温下(后)约束效应系数计算方法, 同时考虑温度对核心混凝土峰值应力及与之对应应变的影响, 建立了能描述在这一复杂温度变化路径下的核心混凝土受压应力-应变关系模型^[1].

图3所示为不同约束情况下核心混凝土受压应力-应变关系模型示意图, 其中 σ_{02} 和 σ_{01} 分别为对应强、弱约束情况下的峰值应力, ε_{02} 和 ε_{01} 分别为对应的应变. 约束效应系数 ζ 越大, 受力过程中钢管对核心混凝土的约束作用越强, 核心混凝土峰值应力及与之对应应变的提高幅度以及应变软化的降低幅度越大.

由此, 作者们基于约束效应系数, 建立了核心混凝土通用型本构模型, 为在钢管混凝土构件与结构层次上建立精细化数值模拟模型, 厘清贯穿全寿命周期的

图3 (网络版彩色)不同约束情况下核心混凝土受压应力-应变关系示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of compressive stress-strain relationship of core concrete under different confinements

长期荷载、复杂受力、地震和火灾工况下结构的损伤机制, 进一步建立相应的承载力计算模型创造了条件.

2.3 多工况作用下钢管混凝土结构的计算分析方法

如何建立常遇静载和极端荷载作用下结构的损伤机理分析与承载力计算方法, 为大型复杂钢管混凝土工程结构安全性设计提供保障是该领域的另外一个基础性问题.

全寿命周期服役过程中, 钢管混凝土结构常处在轴压(拉)、压(拉)弯、压扭、压弯扭、压弯剪甚至压弯扭剪等单一或复杂受力状态(如图4(a)所示, 图中 N 、 M 、 T 和 V 分别代表轴力、弯矩、扭矩和剪力), 为此, 建立了钢管混凝土构件在压(拉)、弯、扭、剪及其复合受力状态下力学行为分析的精细化有限元模型. 对轴心受压(拉)、受弯、压(拉)弯、受扭、受剪、压扭、弯扭、压弯扭、压弯剪和压弯扭剪受力状态下的荷载-变形关系曲线进行了全过程模拟和分析, 有计划地开展了系列物理实验, 明晰了各受力阶段钢管及其核心混凝土截面的应力状态及其相互作用规律, 以及不同加载路径下钢管混凝土构件的力学特性, 揭示了复杂受力状态下钢管混凝土构件的损伤特征和极限状态变化规律. 在系统参数分析的基础上, 提出了相应的承载力计算方法^[1,20,26,27], 如图4(b)所示, 图中 N_u 、 M_u 、 T_u 和 V_u 分别代表轴压(拉)、受弯、受扭和受剪承载力.

针对全寿命周期服役过程中的钢管混凝土结构可能遭受的地震作用, 建立了低周反复荷载作用下钢管混凝土构件力学性能分析的精细化有限元模型, 揭示了不同截面形状钢管混凝土构件的弯矩-曲率、水平

图4 (网络版彩色)复杂受力钢管混凝土构件. (a) 加载路径; (b) 承载力包络面

Figure 4 (Color online) CFST members under complex loading. (a) Loading paths; (b) envelope surface for bearing capacity

荷载-水平位移滞回关系特性及其损伤规律, 提出了钢管混凝土构件荷载-位移滞回关系模型(如图5所示, 图中 $A(A')$ 、 $B(B')$ 和 $C(C')$ 代表骨架曲线控制点)以及位移延性系数计算的数学模型^[1,4,28].

科学进行钢管混凝土构件的抗火设计与火灾后评估, 需要考虑包括升温 and 降温在内的火灾作用全过程. 在这一过程中, 钢管混凝土同时承受荷载与温度的复杂时变作用. 若将作用路径进行简单分离, 即采用图6(a)中所示的路径 $AC'D'E'$, 无法准确模拟火灾作用全过程中的应力重分布和累积损伤, 进而高估其抗火性能. 为此, 作者们采用了可较为真实反映火灾作用全过程的路径 $ABCDE$, 建立了综合考虑荷载、温度和时间耦合作用下的钢管混凝土构件荷载-变形关系曲线及耐火极限的理论模型(如图6(b)所示, 图中 T 代表温度, $\varepsilon_o(\sigma, T)$ 、 $\varepsilon_{th}(T)$ 、 $\varepsilon_{c, tr}(\sigma, T)$ 分别代表应力应变、热膨胀应变、瞬态热应变, “+”和“-”分别代表拉应变和压应变), 明晰了全过程火灾作用下钢管混凝土构件的典型破坏特征与荷载-变形全过程关系曲线的变化规律, 分析了关键参数对钢管混凝土柱耐火极限、典型破坏特征及其承载能力的影响规律, 提出了火灾作用下钢管

图5 (网络版彩色)钢管混凝土构件的荷载-位移滞回关系模型

Figure 5 (Color online) Load-displacement hysteretic model of CFST members

混凝土受压构件的承载力和防火保护设计方法, 建立了火灾作用后构件承载力和变形计算的数学模型以及压弯构件的恢复力模型, 实现了综合考虑服役期间受力与受火全过程影响的钢管混凝土构件损伤评估^[1,25,29].

图6 (网络版彩色)全过程火灾作用下的钢管混凝土构件. (a) 荷载-温度-时间路径; (b) 理论模型

Figure 6 (Color online) CFST members under full-range fire. (a) Load-temperature-time paths; (b) theoretical model

3 基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论的应用

基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论的建立为普通钢管混凝土结构的理论研究、计算与设计奠定了基础。该理论成果也被拓展应用到一些新型钢管混凝土构件及钢管混凝土框架结构等的理论研究,并被应用于大型复杂钢管混凝土工程结构的设计中;部分成果还被多部工程技术标准采纳。

3.1 新型组合结构和混合结构工作机理研究

基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论在新型钢管混凝土构件、钢管混凝土柱-钢(钢筋混凝土、组合)梁连接节点、钢板组合剪力墙、钢管混凝土柱-钢(型钢混凝土)梁平面框架和钢管混凝土框架结构的研究中得到应用,体现出较强的通用性。

(i) 新型钢管混凝土构件. 约束效应系数(式(1))的概念被拓展应用于新型钢管混凝土,以研究不同材料或组成部分之间的相互作用,如椭圆形钢管混凝土^[19]、中空夹层钢管混凝土^[22]、内置FRP(fibre reinforced polymer/plastics)管钢管混凝土^[30]、带加劲肋钢管混凝土^[31]、内置型钢钢管混凝土^[32]、L形钢管混凝土^[33]、预制装配式钢管混凝土^[34],以及新型管材(如不锈钢管、高强钢管)和/或新型内填混凝土材料(高强混凝土、海水海砂混凝土)构成的钢管混凝土^[35~38]。

式(2)所示的核心混凝土本构模型被拓展用于中空夹层钢管混凝土柱^[22]、内置FRP管钢管混凝土柱^[30]、带加劲肋钢管混凝土柱^[31]、内置型钢钢管混凝土柱^[32]、不锈钢管混凝土柱^[36]、螺旋焊钢管混凝土柱^[39]、哑铃型钢管混凝土构件^[40]、FRP约束钢管混凝土柱^[41]、中空型外壁钢板-混凝土组合桥塔塔柱^[42]、五边形钢管混凝土翼缘组合梁^[43]等的静力性能,不锈钢管混凝土柱^[44]和部分填充混凝土矩形钢管混凝土柱^[45]的抗冲击性能,以及L形钢管混凝土混合构件^[33]、预制装配式钢管混凝土柱^[34]等的抗震性能研究。钢管混凝土构件承载力计算方法被拓展用于内置FRP管钢管混凝土柱^[30]和钢管海水海砂混凝土柱^[37]的承载力计算方法的提出。图7所示为部分新型钢管混凝土构件示意图。

(ii) 钢管混凝土柱-钢(钢筋混凝土、组合)梁连接节点. 式(2)所示的核心混凝土本构模型被拓展应用于方钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓节点^[46]等的静力性能,以及方钢管混凝土柱-钢梁内隔板节点^[47]、方钢管混凝土柱-组合梁节点^[48]、方钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁贯通节点^[49]等的抗震性能研究。图8所示为部分钢管混凝土柱-钢(钢筋混凝土、组合)梁连接节点示意图。

(iii) 钢板组合剪力墙. 式(2)所示的核心混凝土本构模型被拓展用于双钢板组合剪力墙^[50]和多腔双钢板组合剪力墙^[51]的抗震性能研究。图9所示为钢板组合剪力墙示意图。

(iv) 钢管混凝土柱-钢(型钢混凝土)梁平面框架。

图7 (网络版彩色)新型钢管混凝土构件。(a) 椭圆钢管混凝土柱; (b) 中空夹层钢管混凝土柱; (c) 内置FRP管钢管混凝土柱; (d) 带加劲肋钢管混凝土柱; (e) 内置型钢钢管混凝土柱; (f) T形钢管混凝土柱; (g) 预制装配式钢管混凝土柱; (h) 不锈钢管混凝土柱; (i) 螺旋焊钢管混凝土柱; (j) 哑铃型钢管混凝土构件; (k) FRP约束钢管混凝土柱; (l) 五边形钢管混凝土翼缘组合梁

Figure 7 (Color online) Innovative CFST members. (a) Elliptical CFST column; (b) double-skin CFST column; (c) CFST column with inner FRP tube; (d) CFST column with stiffeners; (e) steel-reinforced CFST column; (f) T-shaped CFST column; (g) precast segmental CFST column; (h) concrete-filled stainless steel tube column; (i) concrete-filled spiral welded steel tube column; (j) dumbbell-shaped CFST member; (k) FRP confined CFST column; (l) concrete-filled pentagonal flange beam

图8 (网络版彩色) 钢管混凝土柱-钢(钢筋混凝土、组合)梁连接节点. (a) 方钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓节点; (b) 方钢管混凝土柱-钢梁内隔板节点; (c) 方钢管混凝土柱-组合梁节点; (d) 方钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁贯通节点

Figure 8 (Color online) CFST column to steel/reinforced concrete/composite beam joints. (a) Square CFST column to steel beam blind bolted joint; (b) square CFST column to steel beam internal diaphragm joint; (c) square CFST column to composite beam joint; (d) square CFST column to reinforced concrete beam through-beam joint

式(2)所示的核心混凝土本构模型被拓展用于方钢管混凝土柱-型钢混凝土梁框架^[52]、钢管混凝土加劲混合柱-型钢混凝土梁框架^[53]和带支撑内置夹层板的方钢管混凝土柱-钢梁框架^[54]的抗震性能, 以及钢管混凝土柱-工字形钢梁框架^[55]的火灾(高温)下性能研究. 图10所示为部分钢管混凝土柱-钢(型钢混凝土)梁平面框架示意图.

(v) 钢管混凝土框架结构. 式(2)所示的核心混凝土本构模型被拓展用于多层钢管混凝土框架^[56]和高层钢管混凝土结构^[57]的抗震性能研究. 图11所示为钢管混凝土框架结构示意图.

基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论研究方面取得的成果, 还为深入研究桁式钢管混凝土结构

图10 (网络版彩色) 钢管混凝土柱-钢(型钢混凝土)梁平面框架. (a) 方钢管混凝土柱-型钢混凝土梁框架; (b) 钢管混凝土加劲混合柱-型钢混凝土梁框架; (c) 带支撑内置夹层板方钢管混凝土柱-钢梁框架; (d) 钢管混凝土柱-工字形钢梁框架

Figure 10 (Color online) CFST column to steel/steel reinforced concrete beam frame. (a) Square CFST columns to steel reinforced concrete beam frame; (b) concrete-encased CFST column to steel reinforced concrete beam frame; (c) square CFST columns to steel beam frame with external sandwich composite wall panels; (d) CFST columns to I-shaped steel beam frame

图9 (网络版彩色) 钢板组合剪力墙. (a) 双钢板组合剪力墙; (b) 多腔钢板组合剪力墙

Figure 9 (Color online) Steel plate composite shear walls. (a) Composite shear wall with double plates and filled concrete; (b) multi-cell steel plate composite shear wall

和钢管混凝土加劲混合结构的工作机理和设计原理及其在桥梁结构中的应用创造了条件^[23].

3.2 工程设计和工程技术标准制订

基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论的主要成果, 如核心混凝土通用型本构模型、复杂受力状态下承载力计算方法、火灾下承载力计算和防火保护设计方法, 被应用于钢管混凝土工程结构的受力分析与计算, 如高层/高耸结构^[58-63]、大跨/空间结构^[64-66]及重载结构^[67]等.

基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论的部分成果, 被多部国家标准^[10,68,69]、行业/团体标准^[12-14,70-73]及福建省《钢管混凝土结构技术规程》DBJ/T13-51^[15]等工程建设标准采纳. 该理论已拓展应用到钢管再生混凝土结构的系统研究, 并制订了该结构的技术标准^[74].

4 结语

钢管混凝土结构是更充分考虑结构的安全性、适用性、和谐性以及良好的可施工性等综合因素的产物.

图 11 (网络版彩色) 钢管混凝土框架结构. (a) 多层钢管混凝土框架; (b) 高层钢管混凝土结构

Figure 11 (Color online) CFST frame structures. (a) Multi-story CFST frame; (b) high-rise CFST structures

合理设计并应用钢管混凝土结构, 符合现代工程结构发展和建设节约型社会的需要, 有利于较大幅度地实现建设投入经济性与结构性能有效性的统一. 本文简要回顾了钢管混凝土结构的发展概况, 阐述了基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用.

目前, 国内外虽然在钢管混凝土结构设计理论方面取得了不少成果, 但对钢管混凝土结构仍有不少问题需要深入研究, 简要归纳如下:

(1) 环境友好型钢管混凝土结构设计原理研究. 在钢管混凝土工程中研究应用高性能材料, 如高强度钢、不锈钢、高韧性混凝土等, 将进一步提高材料利用率,

降低造价并提高结构的工作性能. 采用新型材料也将给钢管混凝土结构的设计原理带来革新, 需进一步深入开展相关研究工作.

(2) 新型钢管混凝土结构及钢管混凝土混合结构设计原理研究. 近些年, 工程技术人员在工程实践中发展和应用了中空夹层钢管混凝土、桁式钢管混凝土结构和钢管混凝土加劲混合结构等结构形式^[5,23]. 需在系统研究工作机理和设计原理的基础上, 制订相应的新型钢管混凝土结构及钢管混凝土混合结构技术标准.

(3) 钢管混凝土结构综合抗灾能力研究. 对现代钢管混凝土结构抵抗灾害的能力有着更高的要求, 如在海洋环境中的大跨越输电塔等, 要求结构更好地适应荷载和环境长期的共同作用, 满足在全寿命服役周期内的安全性、适用性、耐久性及灾后的功能可恢复性等要求. 在极端灾害作用下以及全寿命周期内钢管混凝土结构设计原理方面, 关键基础科学问题尚有待于继续深入研究, 如爆炸、撞击以及多灾种耦合作用下的结构破坏机制, 荷载和腐蚀共同作用下的结构受力机理等.

最后, 需要指出的是, 钢管混凝土已成为结构工程领域的重要分支, 其内涵十分丰富, 国内外相关研究成果众多. 对钢管混凝土结构研究和发展进行系统完整的论述, 超出了作者们的知识和能力范围, 且已有不少相应的文献可以参阅.

参考文献

- 1 Han L H. Concrete Filled Steel Tubular Structures: Theory and Practice (in Chinese). 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016 [韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践. 第三版. 北京: 科学出版社, 2016]
- 2 Zhong S T. Unified Theory of Concrete Filled Steel Tube: Research and Application (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2006 [钟善桐. 钢管混凝土统一理论——研究与应用. 北京: 清华大学出版社, 2006]
- 3 Cai S H. Modern Steel Tube Confined Concrete Structures (Revised Ed) (in Chinese). Beijing: China Communications Press, 2007 [蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构(修订版). 北京: 人民交通出版社, 2007]
- 4 Han L H, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *J Constr Steel Res*, 2014, 100: 211–228
- 5 Han L H, Li W, Wang W D, et al. Advanced Composite and Mixed Structures: Testing, Theory and Design Approach (in Chinese). 2nd ed. Beijing: Science Press, 2017 [韩林海, 李威, 王文达, 等. 现代组合结构和混合结构——试验、理论和方法. 第二版. 北京: 科学出版社, 2017]
- 6 Association for Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS). Concrete Filled Steel Tubes—A Comparison of International Codes and Practices. ASCCS Seminar Report, Innsbruck, Austria, 1997
- 7 Shams M, Saadeghvaziri M A. State of the art of concrete-filled steel tubular columns. *ACI Struct J*, 1997, 94: 558–571
- 8 Shanmugam N E, Lakshmi B. State of the art report on steel-concrete composite columns. *J Constr Steel Res*, 2001, 57: 1041–1080
- 9 Gourley B C, Tort C, Denavit M D, et al. A Synopsis of Studies of the Monotonic and Cyclic Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Members, Connections, and Frames. Report No. NSEL-008, NSEL Report Series, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008
- 10 GB 50923-2013. Technical Code for Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridges (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2013 [中华人民共和国国家标准GB 50923-2013. 钢管混凝土拱桥技术规范. 北京: 中国计划出版社, 2013]

- 11 GB 50936-2014. Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2014 [中华人民共和国国家标准GB 50936-2014. 钢管混凝土结构技术规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014]
- 12 CECS 28:2012. Technical Specification for Concrete-Filled Steel Tubular Structures (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2012 [中国工程建设标准化协会标准CECS 28:2012. 钢管混凝土结构技术规程. 北京: 中国计划出版社, 2012]
- 13 CECS 159:2004. Technical Specification for Structures with Concrete-Filled Rectangular Steel Tube Members (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2004 [中国工程建设标准化协会标准CECS 159:2004. 矩形钢管混凝土结构技术规程. 北京: 中国计划出版社, 2004]
- 14 DL/T 5085-1999. Code for Design of Steel-Concrete Composite Structure (in Chinese). Beijing: China Electric Power Press, 1999 [中华人民共和国电力行业标准DL/T 5085-1999. 钢-混凝土组合结构设计规程. 北京: 中国电力出版社, 1999]
- 15 DBJ/T13-51-2010. Technical Specification for Concrete-Filled Steel Tubular Structures (in Chinese). Fuzhou: Fujian Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, 2010 [福建省工程建设标准DBJ/T13-51-2010. 钢管混凝土结构技术规程. 福州: 福建省住房和城乡建设厅, 2010]
- 16 Architectural Institute of Japan. Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2008
- 17 ANSI/AISC 360-16. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction (AISC), 2016
- 18 EN 1994-1-1. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2004
- 19 Dai X H, Lam D, Jamaluddin N, et al. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression. *Thin-Walled Struct*, 2014, 77: 26–35
- 20 Han L H, Yao G H, Zhao X L. Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *J Constr Steel Res*, 2005, 61: 1241–1269
- 21 Du Y, Chen Z, Wang Y B, et al. Ultimate resistance behavior of rectangular concrete-filled tubular beam-columns made of high-strength steel. *J Constr Steel Res*, 2017, 133: 418–433
- 22 Tao Z, Yu Q. New Composite Structural Columns: Testing, Theory and Design Approach (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006 [陶忠, 于清. 新型组合结构柱——试验、理论与方法. 北京: 科学出版社, 2006]
- 23 Han L H, Mou T M, Wang F C, et al. Design theory of CFST (concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2020, 53: 1–24 [韩林海, 牟廷敏, 王法承, 等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用. *土木工程学报*, 2020, 53: 1–24]
- 24 Han L H, Hou C, Hua Y X. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression: Life-cycle based performance. *J Constr Steel Res*, 2020, 170: 106063
- 25 Han L H, Yao G H, Tao Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-Walled Struct*, 2007, 45: 24–36
- 26 Han L H. Tests on stub columns of concrete-filled RHS sections. *J Constr Steel Res*, 2002, 58: 353–372
- 27 Yang Y F, Han L H. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns. *J Constr Steel Res*, 2006, 62: 1310–1324
- 28 Han L H. Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes. *J Constr Steel Res*, 2004, 60: 313–337
- 29 Yang H, Han L H, Wang Y C. Effects of heating and loading histories on post-fire cooling behaviour of concrete-filled steel tubular columns. *J Constr Steel Res*, 2008, 64: 556–570
- 30 Li G C, Yang Z J, Lang Y, et al. Behavior of high strength concrete filled square steel tubular columns with inner CFRP circular tube under bi-axial eccentric loading. *Adv Steel Constr*, 2013, 9: 231–246
- 31 Zhu A, Zhang X, Zhu H, et al. Experimental study of concrete filled cold-formed steel tubular stub columns. *J Constr Steel Res*, 2017, 134: 17–27
- 32 Cai J, Pan J, Wu Y. Mechanical behavior of steel-reinforced concrete-filled steel tubular (SRCFST) columns under uniaxial compressive loading. *Thin-Walled Struct*, 2015, 97: 1–10
- 33 Zhou T, Ren Z, Jiang B, et al. Calculating method study and parameter analysis of slender LCFST columns under axial loading. *Int J Steel Struct*, 2019, 19: 1645–1661
- 34 Li C, Hao H, Bi K. Numerical study on the seismic performance of precast segmental concrete columns under cyclic loading. *Eng Struct*, 2017, 148: 373–386
- 35 Mashiri F R, Uy B, Tao Z, et al. Concrete-filled VHS-to-steel fabricated section stub columns subjected to axial compression. *J Constr Steel Res*, 2014, 95: 141–161
- 36 Tam V W Y, Wang Z B, Tao Z. Behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel stub columns. *Mater Struct*, 2014, 47: 293–310
- 37 Li Y L, Zhao X L, Raman S R K, et al. Tests on seawater and sea sand concrete-filled CFRP, BFRP and stainless steel tubular stub columns. *Thin-Walled Struct*, 2016, 108: 163–184
- 38 Javed M F, Sulong N H R, Memon S A, et al. FE modelling of the flexural behaviour of square and rectangular steel tubes filled with normal and high strength concrete. *Thin-Walled Struct*, 2017, 119: 470–481

- 39 Aslani F, Uy B, Hur J, et al. Behaviour and design of hollow and concrete-filled spiral welded steel tube columns subjected to axial compression. *J Constr Steel Res*, 2017, 128: 261–288
- 40 Chen B, Sheng Y, Fam A, et al. Torsional behavior of a new dumbbell-shaped concrete-filled steel tubes. *Thin-Walled Struct*, 2017, 110: 35–46
- 41 Wang Z B, Yu Q, Tao Z. Behaviour of CFRP externally-reinforced circular CFST members under combined tension and bending. *J Constr Steel Res*, 2015, 106: 122–137
- 42 Zhang X G, Liu G, Gao Y, et al. Research on the bearing capacity of hollow concrete-filled steel exterior wall composite bridge tower column (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2018, 51: 90–98 [张喜刚, 刘高, 高原, 等. 中空型外壁钢板-混凝土组合桥塔塔柱承载力研究. 土木工程学报, 2018, 51: 90–98]
- 43 Gao F, Zhu H P, Zhang D H, et al. Experimental investigation on flexural behavior of concrete-filled pentagonal flange beam under concentrated loading. *Thin-Walled Struct*, 2014, 84: 214–225
- 44 Bambach M R. Design of hollow and concrete filled steel and stainless steel tubular columns for transverse impact loads. *Thin-Walled Struct*, 2011, 49: 1251–1260
- 45 Zhu A Z, Xu W, Gao K, et al. Lateral impact response of rectangular hollow and partially concrete-filled steel tubular columns. *Thin-Walled Struct*, 2018, 130: 114–131
- 46 Wang J, Zhang N, Guo S. Experimental and numerical analysis of blind bolted moment joints to CFTST columns. *Thin-Walled Struct*, 2016, 109: 185–201
- 47 Kang L, Leon R T, Lu X. Shear strength analyses of internal diaphragm connections to CFT columns. *Steel Compos Struct*, 2015, 18: 1083–1101
- 48 Nie J, Qin K, Cai C S. Seismic behavior of connections composed of CFSSTCs and steel-concrete composite beams—Finite element analysis. *J Constr Steel Res*, 2008, 64: 680–688
- 49 Tang X L, Cai J, Chen Q J, et al. Seismic behaviour of through-beam connection between square CFST columns and RC beams. *J Constr Steel Res*, 2016, 122: 151–166
- 50 Nie J G, Ma X W, Tao M X, et al. Effective stiffness of composite shear wall with double plates and filled concrete. *J Constr Steel Res*, 2014, 99: 140–148
- 51 Chen Z H, Jiang Y T, Zhang X M, et al. Parametric analysis and calculation method for bending and shear capacities of innovative composite shear walls. *Adv Struct Eng*, 2017, 20: 1046–1058
- 52 Zhou L, Su Y. Experimental study on seismic behavior of SRC deep beam-to-CFST column frames. *J Constr Steel Res*, 2019, 155: 157–175
- 53 Wang K, Lu X F, Yuan S F, et al. Analysis on hysteretic behavior of composite frames with concrete-encased CFST columns. *J Constr Steel Res*, 2017, 135: 176–186
- 54 Wang J, Li B, Li J. Experimental and analytical investigation of semi-rigid CFST frames with external SCWPs. *J Constr Steel Res*, 2017, 128: 289–304
- 55 Wang J X, Wang W D. Analysis of planar frame with steel beam-concrete-filled steel tubular columns after exposure to complete fire process under different fire cases (in Chinese). *J Build Struct*, 2014, 35: 102–109 [王景玄, 王文达. 不同火灾工况下钢梁-钢管混凝土柱平面框架受火全过程分析. 建筑结构学报, 2014, 35: 102–109]
- 56 Wang Y, Nie J, Cai C S. Numerical modeling on concrete structures and steel-concrete composite frame structures. *Compos Pt B-Eng*, 2013, 51: 58–67
- 57 Jiang H, Fu B, Liu L, et al. Study on seismic performance of a super-tall steel-concrete hybrid structure. *Struct Des Tall Spec Build*, 2014, 23: 334–349
- 58 Lu X, Lu X, Guan H, et al. Earthquake-induced collapse simulation of a super-tall mega-braced frame-core tube building. *J Constr Steel Res*, 2013, 82: 59–71
- 59 Sun F F, Ran M M, Zhou J, et al. Mechanical behavior of huge crossover joint between two concrete-filled steel tubular columns (in Chinese). *J Build Struct*, 2017, 38: 69–76 [孙飞飞, 冉明明, 周健, 等. 钢管混凝土柱巨型交叉节点受力性能研究. 建筑结构学报, 2017, 38: 69–76]
- 60 Liu Q X, Wang Q W, Zhang J J, et al. Performance-based seismic design on the ultra high-rise steel structure of tower A of Kashi International Duty-free Plaza (in Chinese). *Build Struct*, 2014, 44: 7–12 [刘琼祥, 王启文, 张建军, 等. 喀什国际免税广场A塔超高层钢结构性能化抗震设计. 建筑结构, 2014, 44: 7–12]
- 61 Lu J L, Yang L L, Gong M F, et al. Elastic-plastic time-history analysis of the main building of Guohai Plaza in Taiyuan under rare earthquake (in Chinese). *Build Struct*, 2014, 44: 42–46, 74 [路江龙, 杨律磊, 龚敏锋, 等. 太原国海广场主楼罕遇地震弹塑性时程分析. 建筑结构, 2014, 44: 42–46, 74]
- 62 Yuan K, Li Y M, Liu L P, et al. Deformation and energy-based seismic performance analysis of super tall buildings in low seismic intensity region (in Chinese). *Build Struct*, 2014, 44: 13–18 [袁康, 李英民, 刘立平, 等. 基于变形和能量的低烈度区超高层建筑抗震性能分析. 建筑结构, 2014, 44: 13–18]
- 63 Guo Y L, Wang Y H. Analytical studies on design method and application of multi-column out-plane buckling in open-space region of the

- Guangzhou New TV Tower (in Chinese). J Build Struct, 2010, 31: 87–93 [郭彦林, 王永海. 广州新电视塔透空区外筒群柱面外稳定承载力与设计方法研究. 建筑结构学报, 2010, 31: 87–93]
- 64 Zhang J M, Xiao R C. Ultimate bearing capacity analysis of the Wu Gorge Bridge over Yangtze River (in Chinese). J Highway Transport Res Dev, 2004, 21: 37–40 [张建民, 肖汝诚. 巫峡长江大桥极限承载能力分析. 公路交通科技, 2004, 21: 37–40]
- 65 Zhang J M, Zheng J L, Qin R. Double nonlinear stability analysis for the Yonghe Bridge (in Chinese). J Highway Transport Res Dev, 2002, 19: 58–62 [张建民, 郑皆连, 秦荣. 南宁永和大桥双重非线性稳定分析. 公路交通科技, 2002, 19: 58–62]
- 66 Fan H, Wang L J, Wen S Q, et al. Dynamic elastic-plastic analysis on the main stadium of Wuhan Optical Valley International Tennis Center (in Chinese). Build Struct, 2016, 46: 50–58 [范浩, 王丽君, 温四清, 等. 武汉光谷国际网球中心主场馆动力弹塑性分析. 建筑结构, 2016, 46: 50–58]
- 67 Li Z, Wang W D, Yu Q. Calculation and practice for fire resistance of concrete-filled steel tubular columns in underground engineering (in Chinese). Railway Eng, 2009, (9): 60–63 [李竹, 王文达, 于清. 地下工程中钢管混凝土柱的抗火计算与实践. 铁道建筑, 2009, (9): 60–63]
- 68 GB 50016-2006/2014. Code for Fire Protection Design of Buildings (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2006, 2014 [中华人民共和国国家标准GB 50016-2006/2014. 建筑设计防火规范. 北京: 中国计划出版社, 2006, 2014]
- 69 GB 51249-2017. Code for Fire Safety of Steel Structures in Buildings (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2017 [中华人民共和国国家标准GB 51249-2017. 建筑钢结构防火技术规范. 北京: 中国计划出版社, 2017]
- 70 CECS 200:2006. Technical Code for Fire Safety of Steel Structure in Buildings (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2006 [中国工程建设标准化协会标准CECS 200:2006. 建筑钢结构防火技术规范. 北京: 中国计划出版社, 2006]
- 71 JGJ/T 249-2011. Technical Specification for Steel Arch Structure (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 [中华人民共和国行业标准JGJ/T 249-2011. 拱形钢结构技术规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011]
- 72 JTG/T D65-06-2015. Specifications for Design of Highway Concrete-Filled Steel Tubular Arch Bridges (in Chinese). Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015 [中华人民共和国行业推荐性标准JTG/T D65-06-2015. 公路钢管混凝土拱桥设计规范. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015]
- 73 T/CECS 546-2018. Technical Standard for Structures with Concrete-Filled Multicellular Steel Tube Walls (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2018 [中国工程建设标准化协会标准T/CECS 546-2018. 钢管混凝土束结构技术标准. 北京: 中国计划出版社, 2018]
- 74 T/CECS 625-2019. Technical Specification for Recycled Aggregate Concrete-Filled Steel Tubular Structures (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2019 [中国工程建设标准化协会标准T/CECS 625-2019. 钢管再生混凝土结构技术规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019]

Summary for “基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用”

Life-cycle based analytical theory of concrete-filled steel tubular structures and its applications

Lin-Hai Han^{1*}, Youfu Yang², Hua Yang³ & Wei Li¹

¹ Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

³ School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

* Corresponding author, E-mail: lhhan@tsinghua.edu.cn

Concrete-filled steel tube (CFST) is a composite structure consisting of a steel tube filled with concrete. The steel tube and its concrete core work together to carry external loads applied to the structure. Due to the interaction between the two kinds of materials, i.e., the confinement effect of steel tube on the core concrete, CFST structures can effectively delay/avoid the local buckling of the steel tube and the brittle failure of the concrete core. The superior structural properties of CFST include high strength and stiffness, good ductility, excellent seismic and fire performances, and easy construction. Therefore, CFST structures have been extensively used in large-scale constructions including industrial plants, subway stations, transmission towers, high-rise buildings, and bridges, etc. CFST structures have also offered substantial benefits on architectural appearance and engineering economy.

The confinement effect in CFST throughout its service-life essentially contributes to the structural advantages, whilst it has, at the same time, brought about enormous complexities in the corresponding load-resisting mechanisms. Firstly, an in-depth understanding and accurate characterization of the confinement effect, and the development of some feasible constitutive models for the core concrete that facilitate the analysis and design of major infrastructures, becomes the key issue to be addressed. The salient loading factors in the service-life of CFST structures need to be considered in the constitutive models, such as long-term sustained load, low-cycle cyclic load and full-range fire. Secondly, the establishment of damage mechanism analysis and strength prediction models for CFST structures considering long-term sustained load, complex loading conditions, earthquake and fire becomes another key issue that needs to be resolved for the safety design of major CFST constructions.

Life-cycle based damage mechanism and analytical theory of concrete-filled steel tubular structures have been investigated and established based on nearly 20 years of persistent and systematic study. The design methods for the ultimate loading capacity of CFST structures were further proposed. The major research outcomes can be summarized in the following three aspects: (1) The interaction between the steel tube and its core concrete as well as the passive confinement mechanism in CFST were revealed. A general constitutive model for the confined core concrete under various stress/action conditions was established with the “confinement factor” as an essential variable. The considered actions include long-term sustained stress, cyclic load and elevated temperature. (2) Theoretical models were established to account for the damage mechanism of CFST structures under long-term sustained load and complex loading conditions. The ultimate strength of CFST members under various loading conditions was analysed, including compression, tension, bending, shear, torsion, and the combinations of different loads and load paths. The creep and shrinkage of concrete as well as the deformation of CFST under long-term sustained load were accurately simulated. (3) Theoretical models were established to simulate the damage mechanism of CFST under earthquake and full-range fire. The hysteretic properties and ductility of CFST members under low-cycle cyclic loading were revealed. The model for calculating the fire resistance of CFST columns was proposed, in which the coupling effects of loads and full-range fire were taken into account.

This paper briefly reviews the development of CFST structures and outlines the life-cycle based analytical theory for CFST structures. Finally, the potential development trends of the CFST structures are discussed.

concrete-filled steel tubular structures, life-cycle, confinement effect, confinement factor, constitutive model, analytical theory

doi: [10.1360/TB-2020-0618](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0618)