

钢管混凝土静力力学性能理论研究现状

黄一杰^{1,2}, 王长青³, 孙黄胜¹, 孙跃东¹, 王清¹, 刘艺¹

- (1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;
2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;
3. 同济大学 材料科学与工程博士后流动站, 上海 200092)

摘要:从理论分析和计算方法两个方面介绍了钢管混凝土静力力学性能的国内外研究现状,总结了现阶段理论研究的成果。分析了各种研究方法的特点并指出目前研究存在的缺陷。分析结果表明,在对钢管混凝土静力分析时,外部钢材大都采用了基于经典塑性理论所建立的力学模型;而受核心混凝土较复杂的物理特性影响,其本构模型选用种类较多,主要有塑性理论模型与损伤理论模型等,且每一种模型均较实际有所差异。另外,现有针对钢管混凝土力学分析的计算方法较为简单,有待于进一步研究。基于以上分析,结合钢管混凝土的受力特点,探讨了钢管混凝土静力力学性能理论研究中的关键问题。最后展望了钢管混凝土力学研究的发展方向。

关键词:钢管混凝土;静力力学性能;塑性理论;损伤理论

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)05-0032-08

Theoretical Research Status of Concrete-filled Steel Tube's Static Mechanical Behavior

Huang Yijie^{1,2}, Wang Changqing³, Sun Huangsheng¹, Sun Yuedong¹, Wang Qing¹, Liu Yi¹

- (1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
3. Postdoctoral Mobile Research Station, College of Material Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper first introduced the research status on the static mechanical behavior of concrete-filled steel tube (CFST) at home and abroad, focusing on its theoretical analysis and calculation methods. The current theoretical research findings were summarized and the features as well as shortcomings of different research methods were analyzed. It is found that the static mechanical analysis of the outer steel tube mostly adopts the mechanical model based on the theory of plasticity while various constitutive models, including, plastic model and damage model, have been adopted to study core concrete due to its complex physical properties and these existing models could not fully reflect the actual properties of core concrete. It is also found that the current calculation methods of CFST mechanical behavior are relatively simple and need to be further studied. Then, based on the above research findings and mechanical characteristics of CFST, this paper explored the key problems in researches on static mechanical behaviors of CFST. Finally, it forecasted the development trend of static mechanical studies on CFST.

Key words: concrete-filled steel tube; static mechanical behavior; plastic theory; damage theory

钢管混凝土具有承载力高、刚度大、变形能力强和抗震能力优异等特点^[1],目前已广泛应用于大跨和高

收稿日期: 2015-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408346);山东省“泰山学者”建设工程专项资金项目(TSHW20130956)

作者简介: 黄一杰(1983—),男,山东泰安人,博士,主要从事组合结构与混凝土材性研究。E-mail: 302huangyijie@163.com

管等建筑结构中。而钢管混凝土的静力力学性能(压、拉、弯、剪和扭等)也是现阶段的研究重点。国内外研究人员针对钢管混凝土的静力性能开展了大规模的试验研究^[2-3],得出的试验数据与结果对现阶段的工作有重要的基础作用。但受制于试件个数、影响参数和试验条件等因素,试验得出的结论具有局限性。为此,需在试验研究基础上结合理论分析,深入探讨钢管混凝土的力学性能。

对钢管混凝土的理论研究有不同的方法,但这些方法的关键是如何考虑钢管与核心混凝土之间的相互约束作用以及在这种相互作用下混凝土与钢材的受力变形特性。正是这种相互作用导致了钢管混凝土力学性能发生变化。国内外研究人员采用不同的方法对其分析,虽然不同方法的理论研究结果与试验存在一定差异,但都对深入分析钢管混凝土静力力学性能以及探寻其本质提供了新的途径。

当前,针对混凝土静力力学性能的研究已经具有一定规模,但一些长期存在的问题和难点有待于进一步分析。本研究基于现有资料与数据进行探讨,为钢管混凝土的受力性能研究提供依据。

1 理论研究现状

目前,对钢管混凝土静力力学性能的理论研究主要包含力学模型和计算方法两大部分。其中力学模型是获得目标反应的基础与核心,力学模型选取的合理与否直接关系到所得结论与实际情况的差异大小。而计算方法是实现理论分析的途径与手段,影响分析计算的效率与精度。本文分别对钢管混凝土静力性能两个方面的研究进行分析,重点探讨理论研究的现状。

1.1 力学模型

对于钢管混凝土的力学模型,可按照组成部分的情况分为整体力学模型与离散力学模型两类^[4-5]。其中整体力学模型是将钢管混凝土视为一个物理统一体,即虽然构件由两种材料组成,但却可以在宏观上视为统一体。该力学模型以哈尔滨工业大学钟善桐教授^[4]所提出的“统一理论”为代表,以大量的试验数据和分析结果为基础,利用分析拟合方法,给出钢管混凝土在各种静力荷载下的受力变形函数表达式。离散力学模型是分别建立核心混凝土与钢材的物理力学模型,而后通过数值计算得出钢管混凝土在各种静力条件下的力学反应。对比两类模型,统一理论法简洁、实用、运算量少,但其具体物理力学意义有待于进一步研究。分离力学模型虽构造复杂、计算繁琐,但可分析材料之间的相互约束作用,物理力学意义较明确,本文主要针对这一类模型进行分析。

离散型力学模型主要包含有三方面:即核心混凝土力学模型、钢管力学模型以及考虑在钢管与核心混凝土交界面上的二者相互作用的力学模型。

1.2 钢管力学模型

钢管处于三向受力状态,其等效应变关系一般被认为与单轴受力状态下的关系相同(图1,图中 f_p 、 f_y 、 f_u 分别为钢材的比例、屈服与抗拉强度, ϵ_e 、 ϵ_y 、 ϵ_p 、 ϵ_u 分别为钢材弹性应变、屈服应变、屈服阶段末端应变和峰值应变)。按照钢材的特点,其应力应变关系可分成二阶段至五阶段等不同类型,如二阶段理想弹塑性或弹塑性强化模型等。但不论采用哪种类型,其所采用的基本理论与思路都是一致的,即基于弹塑性理论所建立的力学模型。

经典的弹塑性理论包含有三部分:屈服准则、流动法则、强化法则。其中屈服准则中经常采用的主要有四种形式:Tresca、Von-Mises、Hill与Drucker-Prager(DP)。针对钢材一般采用Von-Mises屈服准则。而流动法则描述了塑性变形的方向,解决加载过程中应力增量与应变增量应服从的规律。一般包含有关联流动法则与非关联流动法则两类,对于钢材一般采用关联流动法则。强化法则主要有各向同性强化(isotropic hardening)、随动强化(kinematic hardening)和

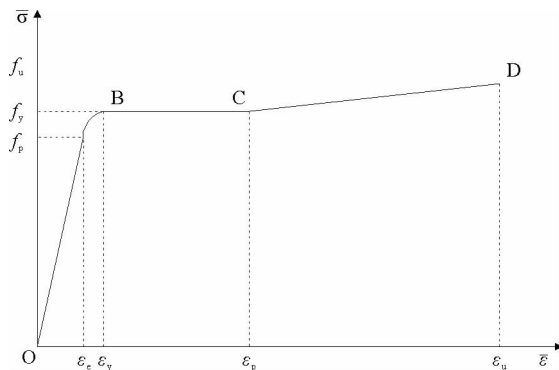


图1 钢材等效应力应变关系

Fig. 1 The equivalent stress strain relationship

混合强化(anisotropic hardening)三大类,在不同受力条件下,选用合适的强化法则。

另外,在钢材的力学模型中所采用的应力应变关系,描述了钢材受力变形发展变化趋势,是确定屈服、强化等阶段应力应变物理数学表达式的重要依据。对于钢材的应力应变关系按照前述,可分成二阶段至五阶段等不同类型,这些划分都是在钢材性能基础上经简化或调整所得出的,不同模型中的基本物理量(屈服强度、抗拉强度、弹性模量和泊松比等)近似一致,在此不再一一详述。另外,国内外部分研究人员考虑钢材的屈曲、有效约束等因素^[6-8]的影响,对关系曲线形式进行调整,以使得更能与实际相符合。

1.3 核心混凝土静力力学模型

现阶段,已经有一系列比较完整的针对钢管混凝土中核心混凝土的力学理论模型,如经验关系模型、非线性弹性模型、塑性模型、塑性断裂模型、塑性损伤模型、边界面模型、内时理论模型等。采用不同的模型对核心混凝土的反应进行解释与分析,以期更好地计算模拟力学性能。

1.3.1 经验关系模型

经验关系模型即将基于试验或其他资料所给定的在钢管约束作用下核心混凝土轴向应力应变关系曲线进行分析拟合,最终得出显式函数表达式。Liang^[9], Han^[10], Choi 与 Xiao^[11-12], Johansson^[13], Gerstle^[14]等采用不同的核心混凝土经验关系表达式,并基于纤维力学模型和平均截面迭代等方法对钢管混凝土的静力性能进行分析。所采取的关系模型表达式如式(1)~(4):

$$\sigma_c = \begin{cases} \beta_c f'_{cc} + \left(\frac{\epsilon_{cu} - \epsilon_c}{\epsilon_{cu} - \epsilon'_{cc}} \right) (f'_{cc} - \beta_c f'_{cc}), \epsilon'_c < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}; \\ \beta_c f'_{cc}, \epsilon_c > \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_o} = \begin{cases} 2(\epsilon/\epsilon_o) - (\epsilon/\epsilon_o)^2, \epsilon \leq \epsilon_o \\ 1 + q[(\epsilon/\epsilon_o)^{0.1\xi} - 1], \epsilon > \epsilon_o, \xi \geq 1.12 \\ (\epsilon/\epsilon_o)/\beta[(\epsilon/\epsilon_o) - 1]^2 + (\epsilon/\epsilon_o), \epsilon > \epsilon_o, \xi < 1.12 \end{cases} \quad (\text{圆钢管混凝土}); \quad (2)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_o} = \begin{cases} 2(\epsilon/\epsilon_o) - (\epsilon/\epsilon_o)^2, \epsilon \leq \epsilon_o \\ (\epsilon/\epsilon_o)/\beta[(\epsilon/\epsilon_o) - 1]^2 + (\epsilon/\epsilon_o), \epsilon > \epsilon_o \end{cases} \quad (\text{方钢管混凝土}); \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{oct}}{K} = 3\epsilon_{oct}, 3\epsilon_{oct} \leq c \\ \frac{(3\epsilon_{oct} - \frac{\sigma_{oct}}{K} + \sqrt{2}a)^2}{2a^2} - \frac{(3\epsilon_{oct} + \frac{\sigma_{oct}}{K} - \sqrt{2}c)^2}{2b^2} = 1, 3\epsilon_{oct} > c \end{cases} \quad (4)$$

其中: ϵ_{cu} 为极限应变取 0.02; β_c 反映了在峰值应力后钢管所提供的约束效应; ξ 为约束系数; ϵ_o 为峰值应变; σ_{oct} 为八面体应力; ϵ_{oct} 为八面体应变; a, b, c 为相应的参数,计算方法可参考文献[11]。

采用经验关系模型,可以方便地得出钢管混凝土的力学反应参数,但这种方法是基于对试验数据的拟合得出,不具有严格的物理力学含义,且模型中参数选取受试件个数和影响因素多少的限制,影响其推广应用。

1.3.2 非线性弹性模型

非线性弹性模型的特征是:随着应力的增加,变形按照一定规律非线性增长;卸载时,应变沿曲线返回,不留残余应变。能够反映混凝土受力变形的特点,在单调比例加载情况下有较好的准确度,模型表达式简明直观。

这类模型包含较多的表达方式,其应用范围和准确度也有所差异。按照物理性能差异性可分为各向同性、正交异性与各向异性。刘洁等^[15]采用 Ottosen 三维各向同性全量型非线性本构模型描述了钢管混凝土中核心混凝土受力变形性能,破坏准则采用 Ottosen 三参数准则。计算所得结果与实际值符合较好。

非线性弹性模型虽具有上述优点,但不能很好地反映卸载和加载之间的区别,因此对循环加载以及非比例加载情况下的适用有一定限制。

1.3.3 塑性理论模型

塑性理论模型最早是针对金属材料建立的,可较好地反映金属材料在应力下的强化与塑性流动等物理特性。但混凝土材料的构造和性质与金属材料有明显差异。为了使塑性模型可用于描述混凝土物理性能,

做出一系列的假定与调整,使得相应的运算量增大。现阶段,由于计算机技术的发展,研究人员对钢管混凝土中核心混凝土塑性力学模型一般采用计算编程来实现,特别是基于大型通用有限元软件来计算其力学性能。目前较常应用的通用有限元软件有 Ansys 和 Abaqus。

1) Ansys

采用 Ansys 软件对核心混凝土的静力力学进行分析时,大部分研究人员^[16-18]为使混凝土应力应变强化关系与实际数据相吻合,一般采用多线性同向强化塑性模型(multilinker isotropic hardening)。该模型采用 Von-Mises 屈服准则、关联流动法则、各向同性强化准则以及多线性的材料应力应变关系曲线;另外,为反映混凝土脆性材料压碎和开裂破坏特性,采用 Willam-Warnke(W-W)的 5 参数破坏准则。

通过对混凝土材料的相关试验研究可知:混凝土不存在明显的屈服点,不同于钢材等金属材料,假设的混凝土屈服面较难满足 Von-Mises 所限定的形状;由于混凝土材料存在有剪胀(扩容)特性,采用关联流动法则所计算的结果,其变形性能与实际存在一定差异,因此并不是一个好的选择。且在 Ansys 塑性模型中,对于核心混凝土的应变软化描述也须进一步完善。

2) Abaqus

Abaqus 主要有三种混凝土本构模型:塑性损伤(plasticity damage)、弥散开裂(smearred crack)与脆性开裂(brittle cracking)^[19]。脆性断裂模型适用于素混凝土以及配筋较少的混凝土,并不适用于钢管混凝土的受力分析。弥散开裂模型的力学基础基于经典塑性理论,其屈服条件是采用分段屈服面来考虑混凝土受拉、受压性能的差异,如式(5)所示。而塑性流动法则采用的是相关联流动法则,使得计算结果会过高估计混凝土塑性体积应变与变形。核心混凝土的强化是通过定义混凝土单轴应力应变关系曲线来实现。

$$\begin{cases} f_c = q - 2ap - (1 - a)\sigma_{ci}, (\text{受压}) \\ f_t = q - (3 - b \frac{\sigma_{ti}}{f_{tk}})p - (2 - \frac{b}{3} \frac{\sigma_{ti}}{f_{tk}})\sigma_{ci}, (\text{受拉}) \end{cases} \quad (5)$$

其中: a 表示混凝土双轴受压强度与单轴受压强度之比, b 由平面应力状态下某一受拉极限点确定, σ_{ci} 与 σ_{ti} 为混凝土单轴压、拉应力应变曲线上应力值, $q = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$, $p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ 。

弥散开裂模型考虑了混凝土在受压、受拉条件下的屈服条件变化,使得该模型进一步与实际情况相吻合。但所采用的关联流动法则使得核心混凝土在外力作用下的反应发生一定差异,另外对混凝土的应变软化物理现象也须进一步研究。

1.3.4 塑性损伤模型

塑性理论模型可以有效地描述混凝土塑性流动、应变强化以及屈服变化等物理现象且数学构造严格,但其存在达到破坏面后材料完全破坏的基本假定,因此无法有效分析应变软化后的性能,且大多采用关联流动法则。基于这些问题,不少研究人员开始采用塑性损伤理论来分析钢管混凝土中核心混凝土的力学性能。

塑性损伤模型是以塑性力学与损伤力学为基础,模型分为塑性与损伤两大部分。其中:塑性部分主要包含屈服准则,流动法则以及强化准则,塑性部分主要基于有效应力空间;损伤部分主要包含损伤准则、损伤张量、损伤演化法则及损伤加/卸载判定准则等,损伤部分的建立须符合热力学第二定律。塑性损伤模型将塑性与损伤耦合,以反映混凝土的强化、流动以及软化等各种物理性能。

现阶段,针对钢管混凝土中核心混凝土的塑性损伤模型选取主要有两种思路:一是直接利用现有通用有限元软件(如 Abaqus 等)提供的力学本构;二是依据相关力学理论与核心混凝土的受力特性,编制相关力学本构模型。

1) 通用有限元采用的模型

较多研究人员直接采用 Abaqus 所提供的塑性损伤模型(plasticity damage)^[20](Han 与 Yang^[21-22], Hu^[23], Ellobody^[24])。该塑性损伤模型是基于 Lubliner^[25]、Lee 等^[26]提出的模型基础上建立的,分为塑性与损伤两部分,其塑性部分较传统的塑性模型有一定的改进。首先,该模型中塑性势函数并未直接采用屈服函

数的表达式,而是采用非关联流动法则,可以较好地反映核心混凝土的受力变形情况。其次,塑性部分的建立是基于有效应力空间而非名义应力空间。模型的损伤部分,损伤张量以单轴受压损伤标量 d_c 与受拉损伤标量 d_t 分别反映拉、压作用下的损伤发展。该模型可以较好地分析混凝土的力学行为。但是,模型主要考虑了单轴压、拉受力状态下混凝土的损伤劣化,对处于复杂受力状态下的混凝土损伤劣化描述仍然是以单轴受力的损伤变量来描述,这与实际情况有所差异。另外,该模型也未充分考虑核心混凝土的变围压约束作用效应。因此,Tao^[27]等将 Abaqus 中的塑性损伤模型进行修正,考虑围压变化对塑性流动准则、损伤演化法则以及强化准则所产生的影响,分析结果与钢管混凝土试验研究结果一致性良好。

2) 其他塑性损伤模型

Luccioni 等^[28-29]依据塑性力学和损伤力学理论,建立了针对钢管混凝土中约束核心混凝土的塑性损伤本构模型。该模型与 Abaqus 模型的主要区别是对屈服准则,流动法则,损伤函数以及强化参数选取等方面的调整。其中屈服准则是基于改进型 Lubliner-Oller 表达式,而流动法则直接采用屈服准则中的函数表达式,为关联流动法则,损伤函数采用 Von-Mises 关系表达式。采用文献^[25, 28-29]的塑性损伤本构模型对钢管混凝土受力进行分析时,虽然分析结果与实际符合较好,但存在塑性体积应变与变形被过高估计等问题。

1.3.5 塑性断裂模型

考虑到混凝土的受力特性,钟善桐等^[30]建立了针对钢管混凝土中核心混凝土的塑性断裂模型。将应力增量分为三部分:弹性部分、塑性部分和断裂损伤部分。塑性应力按照经典塑性理论通过加载面在主应力空间求解,断裂损伤应力通过应变空间的势函数处理。而应变增量是由弹性、塑性和微裂纹三部分合成。该模型可以较好地描述硬化、软化等特性,但是须定义两种加载面,计算量大、应用复杂。

1.3.6 内时理论模型

韩林海等^[31]所建立的约束核心混凝土内时理论模型,采用一个内变量——内时,来表示不可逆损伤积累。该模型将混凝土受力后的变形分为体积变化和形状改变两部分,每一部分又分为弹性变形与非弹性变形部分,脱离了经典塑性理论,可用于模拟混凝土复杂性能。但该模型参数过多且不相互独立,而且部分参数缺乏明确物理意义。

1.3.7 边界面模型

文献^[32-34]采用边界面模型来分析钢管混凝土中的核心混凝土力学性能。边界面模型可以描述材料由强化到弱化的全过程,通过当前应力状态与边界上点之间的距离控制混凝土应力应变的所有阶段,并将材料强度与塑性变形联系在一起,具有较明确的物理意义。但这种模型缺乏对循环等荷载下目标响应描述的适应性检验,且为便于应用存在较多简化。

1.4 钢管与核心混凝土交界面上的相互作用力学模型

针对钢管与核心混凝土交界面上的相互作用,按照方向可分为径向、切向两部分。其中径向相互作用表征存在于二者之间的围压应力,切向相互作用代表钢管与混凝土之间的粘结滑移。

1) 径向相互作用

Huang^[35]、Wang^[36]等就钢管与核心混凝土之间的径向作用进行了力学分析,给出了二者之间围压应力发展变化的关系模型。研究表明:钢管混凝土中围压应力的发展变化并不是理想的保持恒定或者简单的双折线变化,而是呈一种非线性变化的趋势。产生这种现象的原因是被动作用与材料非线性影响。在非线性的相互作用下,核心混凝土的受力变形性能与恒定围压下有明显不同。

2) 切向相互作用

在外力作用下,钢材与混凝土沿构件轴线方向的变形产生差异,两者发生粘结滑移。对于钢管混凝土的粘结滑移力学模型,国内外相关研究人员^[37-38]对其进行了数值分析与试验研究,拟合了完整的基于位置函数的粘结滑移本构非线性模型。模型综合考虑了化学胶结力、摩擦力与机械咬合力的作用,较完整地反映出粘结滑移的发展变化趋势。

上述研究结论为后续工作奠定了基础,但主要是以试验数据拟合得出、未能深入探讨引起其变化发生的本质与机理。

1.5 计算方法

现阶段对钢管混凝土静力性能非线性进行分析时,三类算法应用较为广泛:完全牛顿拉普森算法(Newton Raphson algorithm, NR)、修正牛顿拉普森算法(Modified Newton Raphson algorithm, MNR)和欧拉后退算法(Euler-Backward algorithm)或改进欧拉算法^[27]等。

采用完全牛顿拉普森算法(NR)在计算过程中,每一次平衡迭代都需要修改刚度矩阵。如果在某次迭代计算中发现计算有不收敛的趋势,则程序重新开始求解,同时应用正切和正割刚度矩阵的加权组合。当迭代计算收敛时,程序重新开始采用正切刚度矩阵进行计算。

为了改善牛顿拉普森方法的收敛性与效率,在牛顿拉普森算法的基础上提出了修正牛顿拉普森算法(MNR)。在这种方法中正切刚度矩阵在每一子步中都被修正。在一个子步的平衡迭代期间矩阵不被改变。

而欧拉算法或改进欧拉算法是不同于牛顿拉普森解法的另一类非线性问题线性化计算方法。从有限元的角度上来讲,是将给定的荷载从零开始,划分为若干荷载段,然后连贯、逐段分析处理。其特点是可以得到整个荷载变化过程中一些中间值结果,并可以与加载历史有关,这一点在解决弹塑性问题时尤为重要^[39]。

对比这三类计算方法, NR 收敛速度为二阶,而 MNR 与欧拉算法的收敛速度为一阶。但在进行弹塑性分析时, NR 算法为了保证能够比例加载,一般其加载步取的较小。MNR 虽然不需要形成切线刚度矩阵,但在大变形以及非线性分析时存在较大问题。而改进欧拉算法是二阶的,精度有所提高,实用性较为广泛。

2 存在的问题

目前,在钢管混凝土静力性能的理论分析方面已经取得了较多研究成果,为深入分析钢管混凝土静力力学性能以及探寻其本质提供了思路。但也存在一些问题,在后续的研究工作中需要进一步的完善与改进。

1) 钢材力学模型的选取。现有的钢材本构模型一般选用双折线模型或者三折线模型,忽略了钢材的弹塑性工作阶段的影响(主要是泊松比变化带来的影响)。该影响在普通钢筋混凝土构件中的作用并不显著,却对钢管混凝土构件的影响较大,特别是对核心混凝土的受力性能影响明显。这一问题在直接利用通用有限元软件进行计算分析时尤为突出。

2) 核心混凝土本构模型的选用。经验关系模型缺乏严格的力学构造;非线性弹性模型可以较好地反映构件在单调加载条件下的受力性能,而对卸载与往复加载的情况符合较差;塑性模型不能很好地处理应变变化的性能;而塑性损伤模型中的损伤参数、演变准则等未能有效考虑多维受力与围压变化的影响;塑性断裂、内时理论与边界面模型中存在部分参数缺乏明确物理意义、计算应用复杂的问题。针对这些缺陷需要进行进一步的试验与理论分析工作。

3) 钢管与核心混凝土交界面上的相互作用主要针对围压应力与粘结滑移。对于钢管混凝土中的相互作用模型,受条件限制,其变化发展趋势与内在机理仍须进一步的深入研究。

4) 相关算法仍然需要进一步的完善。在对钢管混凝土静力性能分析时,现采用的主要算法为 NR、MNR 等,计算收敛速度与精度不高。因此,将新的效率高、精度好的算法引入受力分析中具有重要意义。

3 结论与展望

1) 钢管混凝土的理论研究主要包含力学模型和计算方法两大部分。力学模型可按照组成部分的情况分为整体力学模型与离散力学模型两类。其中,分离力学模型可分析材料之间的约束作用,物理力学意义较明确,主要包含核心混凝土力学模型、钢管力学模型与考虑在钢管与核心混凝土交界面上的二者相互作用的力学模型三大部分。

2) 现阶段钢管混凝土中核心混凝土所采用的力学模型主要有经验关系、非线性弹性、塑性、塑性损伤和塑性断裂等本构模型。各种模型从不同角度来解释在被动围压下混凝土的受力特性,形式差异较大,但大多都在描述混凝土塑性流动与损伤破坏劣化等方面与实际有所差异。而对于钢管与核心混凝土交界面上相互作用,现有分析未能深入探讨引起其变化发生的本质与机理。另外,目前主要的计算方法在计算精度与效率方面有待于进一步提高。

3) 现有的理论研究中,在钢管和约束混凝土力学模型以及计算方法等方面均存在一些问题。建议后续研究主要在以下方面进行:核心混凝土与钢管之间的相互作用,特别是约束围压的特点和发展变化规律,建立相应的数学模型;建立可以有效描述核心混凝土在复杂应力状态下考虑围压作用的力学本构模型,该本构模型应准确反映核心混凝土的塑性流动以及损伤破坏劣化;应用并推广新型的计算方法,提高计算效率与精度。

参考文献:

- [1] Morino S, Uchikoshi M, Yamaguchi I. Concrete-filled steel tube column system-its advantages[J]. Steel Structures, 2001(1): 33-44.
- [2] Tomii M, Yoshimura K, Morishita Y. Experimental studies on concrete filled steel tubular stud columns under concentric loading[C]//Proceeding International Colloquium on Stability of Structures under Static and Dynamic Loads, Washington, 1997:132-145.
- [3] Yang Y F, Ma G L. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube stub columns and beams [J]. Thin Walled Structures, 2013, 66:62-75.
- [4] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论-研究与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006:24-32.
- [5] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2007:106-115.
- [6] Tao Z, Uy B, Han L H, et al. Analysis and design of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns under axial compression[J]. Thin Walled Structures, 2009, 47:1544-1566.
- [7] Uy B. Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling[J]. Journal of Structural Engineering-ASCE, 2000, 126(3):341-352.
- [8] Ge H B, Usami T. Strength of concrete-filled thin-walled steel box column; experiment[J]. Journal of Structural Engineering-ASCE, 1992, 118(11):3036-3054.
- [9] Liang Q Q, Fragomeni S. Nonlinear analysis of circular concrete-filled steel tubular short columns under axial loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65:2186-2196.
- [10] 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]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(9):1241-1269.
- [11] Choi K K, Xiao Y. Analytical studies of concrete-filled circular steel tubes under axial compression[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 136(5):565-573.
- [12] Xiao Y. Experimental study and analytical modeling of triaxial compressive behavior of confined concrete[D]. Fukuoka: Kyushu University, 1989.
- [13] Johansson M. The efficiency of passive confinement in CFT columns[J]. Steel & Composite Structures, 2002, 2(5):379-396.
- [14] Gerstle K H. Simple formulation of biaxial concrete behavior[J]. ACI Journal Proceedings, 1981, 78(1):382-378.
- [15] 刘洁, 王正中. 钢管混凝土核心短柱轴压荷载-变形非线性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010, 29(2):224-227.
Liu Jie, Wang Zhengzhong. A non-linear analysis on axial loading-deformation of composite short columns with core of concrete filled steel tube[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2010, 29(2):224-227.
- [16] Soundararajan A, Shanmugasundaram K. Finite element analysis on the flexural behaviour of concrete filled steel tube beams[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 48(2):505-516.
- [17] Rajeshkumar B, Anil K P, Helen S. FE analysis of concrete filled cold formed steel sections using Ansys[J]. International Journal of Advanced Computer Engineering, 2013, 3(1):11-18.
- [18] El-Hewity M M. On the performance of circular concrete-filled high strength steel columns under axial loading[J]. Alexandria Engineering Journal, 2012, 51:51-59.
- [19] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4):59-67.
Nie Jianguo, Wang Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4):59-67.
- [20] ABAQUS, Theory Manual, Version 6. 11[CP].
- [21] 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 Constructional Steel Research, 2013, 80:188-201.
- [22] Han L H, Liu W, Yang Y F. Behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns subjected to axially local compression

- [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64: 377-387.
- [23] Hu H T, Huang C S, Wu M H. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect [J]. Journal of Structure Engineering, 2003, 129: 1322-1329.
- [24] Ellobody E, Young B, Lam D. Behaviour of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns [J]. Journal of Construction Steel Research, 2006, 62: 706-715.
- [25] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-329.
- [26] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [27] Tao Z, Wang Z B, Yu Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 9: 121-131.
- [28] Luccioni B M, Rougier V C. A plastic damage approach for confined concrete [J]. Computers and Structures, 2005, 83: 2238-2256.
- [29] Luccioni B M. Formulación de un modelo constitutive para materiales ortótropos [D]. Argentina: Universidad Nacional de Tucumán, 1993.
- [30] 钟善桐. 高层钢管混凝土结构 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1999: 98-106.
- [31] 韩林海, 钟善桐. 利用内时理论描述钢管混凝土在复杂受力状态下核心混凝土的本构关系 [J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1993, 26(2): 48-55.
- Han Linhai, Zhong Shantong. The use of endochronic theory in describing the constitutive relations of core concrete of concrete filled tubular under multiple loaded conditions [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1993, 26(2): 48-55.
- [32] 查晓雄, 唐家祥. 钢管混凝土结构非线性有限元分析中混凝土边界面模型的研究及应用 [J]. 工程力学, 1999, 16(6): 29-35.
- Zha Xiaoxiong, Tang Jiaxiang. The study and application of concrete bounding surface constitutive relationships to the non-linear finite element analysis of concrete filled steel tubular structures [J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(6): 29-35.
- [33] 查晓雄, 钟善桐. 钢管初应力对钢管混凝土压弯、压弯扭构件工作性能的影响 [J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1997, 30(2): 45-53.
- Zha Xiaoxiong, Zhong Shantong. The behavior effect on concrete filled steel tubular members subjected to compression-bending, compression-bending-torsion under the initial stress of steel tube [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997, 30(2): 45-53.
- [34] 杨炳麟. 钢管混凝土柱的弹塑性有限元分析 [J]. 武汉水利电力学院学报, 1990, 23(4): 1-5.
- Yang Binglin. Elastoplastic finite element analysis for steel tubed concrete column [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1990, 23(4): 1-5.
- [35] Huang Y J, Xiao J Z, Zhang C. Theoretical study on mechanical behavior of steel confined recycled aggregate concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 76: 100-111.
- [36] Wang Y, Chen J, Geng Y. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns [J]. Engineering Structures, 2015, 86: 192-212.
- [37] 件建斌. 方钢管混凝土结构粘结滑移基本性能 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011: 149-180.
- [38] Roeder C W, Cameron B, Brown C B. Composite action in concrete filled tubes [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(5): 477-484.
- [39] 郭乙木, 陶伟明, 庄茁. 线性与非线性有限元及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 23-30.

(责任编辑: 吕海亮)