文章编号: 1000-4750(2008)11-0062-08

钢管混凝土框架实用荷载-位移恢复力模型研究

王文达 ^{1,2}, *韩林海 ²

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050; 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要:根据钢管混凝土柱-钢梁平面框架在恒定轴力与水平低周往复荷载共同作用下的试验结果,分析了钢管混凝土框架典型的水平荷载-水平位移滞回关系曲线的特征。基于非线性有限元理论,对影响钢管混凝土框架荷载-位移骨架曲线的主要因素进行了分析,结果表明:钢管混凝土柱含钢率、钢材强度、混凝土强度、柱轴压比、长细比、梁柱线刚度比及梁柱强度比等参数对钢管混凝土框架的荷载-位移骨架曲线有较大的影响。基于系统的参数分析结果,该文建议了单层钢管混凝土框架的荷载-位移恢复力模型。荷载-位移骨架曲线模型及滞回曲线模型的计算结果得到了试验及精确理论计算结果的验证。

关键词:钢管混凝土;钢梁;框架;骨架曲线;滞回性能;参数分析;恢复力模型

中图分类号: TU398; TU528.59 文献标识码: A

RESEARCH ON PRACTICAL RESILIENCE MODEL OF LOAD VERSUS DISPLACEMENT FOR CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR FRAME

WANG Wen-da^{1,2}, *HAN Lin-hai²

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The typical character of hysteretic curves of lateral load-displacements (P- Δ) was analyzed based on the experimental results of the planar composite frame, composed of concrete filled steel tubular (CFST) columns and I shape steel beam under sustaining axial load and cyclic lateral load. Parametric study is performed about the factors pertinent to the behavior of load-displacement envelop curves of CFST frames based on nonlinear finite element theory. The results show that the parameters, such as the steel ratio of the CFST column, strength of steel and concrete, the axial load level and slenderness ratio of the CFST column, the ratios of the beam to column linear stiffness and the beam to column strength, etc., have a influence on the behavior of load—displacement envelop curves. The load-displacement hysteretic model of one story CFST composite frame is established based on the systematic parametric analytical results. The envelop curve model and hysteretic relationship model are verified by experimental and accurate theoretic results respectively.

Key words: concrete filled steel tubular (CFST); steel beam; frame; envelope curve; hysteretic performance; parametric analysis; resilience model

钢管混凝土结构由于具有承载力高、塑性韧性 好、耐火性能较好、施工速度快、综合效益好等工 程特点而在高层超高层建筑和多高层住宅中的应 用越来越普遍。钢管混凝土柱与钢梁框架结构是钢管混凝土结构中常用的结构形式之一,深入研究其抗震性能具有重要的理论意义和应用价值。

收稿日期: 2007-05-17; 修改日期: 2007-09-27

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070003087); 中国博士后基金项目(20080430404)

作者简介: 王文达(1976一), 男, 甘肃人, 副教授, 博士后, 从事组合结构及结构抗火研究(E-mail: wdwang@tsinghua.edu.cn);

^{*}韩林海(1967一),男,内蒙古人,教授,博士,从事组合结构、混合结构及结构抗火研究(E-mail: lhhan@tsinghua.edu.cn).

恢复力模型是进行结构非线性抗震分析的基 础,由于地震作用过程的变形速度不快,且是反复 多次循环加载过程,因此,可在结构恢复力特性试 验研究的基础上,加以综合、理想化而形成简化的 恢复力模型。确定恢复力模型的方法目前多采用结 合低周往复荷载试验并进行理论分析得到(胡聿贤, 1988^[1])。以往对钢管混凝土构件研究较多,而对钢 管混凝土柱-钢梁框架结构体系的恢复力特性研究 并不多,其中试验研究主要集中在低周往复荷载试 验方面,主要有: Matsui(1985)^[2]、Morino 等(1993)^[3]、 Kawaguchi 等(1997)^[4]、张文福(2000)^[5]、李斌等 $(2002)^{[6]}$ 、王来等 $(2003)^{[7]}$ 、许成祥 $(2003)^{[8]}$ 和王文达 等(2006)^[9]。对钢管混凝土框架力学性能的理论分 析则较少。张文福(2000)[5]采用切线刚度矩阵方法 进行了单层钢管混凝土框架荷载-位移全过程分析。 丁阳等(2004)[10]分别按照钢管混凝土的统一模量理 论和分离模量理论,利用 ANSYS 软件对许成祥 (2003)[8]中的钢管混凝土框架模型试验进行了数值 模拟。王铁成等(2005)[11]在王来等(2003)[7]试验结果 的基础上,用 ANSYS 考察了轴压比对方钢管混凝 土框架延性的影响。聂建国等(2005)^[12]用 SAP2000 对某 10 层方钢管混凝土框架结构进行了 pushover 分析,并与钢筋混凝土框架结构的动力特性进行了 对比研究。孙修礼等(2007)[13]采用非线性分析程序 IDARC 研究了钢管混凝土框架的骨架曲线,并进行 了参数分析。

钢管混凝土框架结构的理论分析需要进行非 线性分析,精确意义上的分析一般为考虑几何非线 性和材料非线性的二阶弹塑性分析方法(Yang 等, 1994^[14]; Chen 等, 1994^[15]), 都很缓慢费时, 也难 以用统一的数学方程描述,因此不便直接用于实际 工程结构的抗震分析, 因此有必要提供简化的钢管 混凝土框架 P-△实用恢复力模型, 简化模型要求既 能够反映结构的实际恢复力曲线特征, 又要便于数 学描述以便于工程应用。恢复力模型主要有曲线型 和折线型两种, 曲线型模型由连续曲线构成, 刚度 变化连续, 较符合实际工程特征, 但其刚度计算较 复杂,应用不方便; 折线型模型由多段直线段构成, 刚度变化不连续,存在拐点或刚度突变点,但由于 刚度确定较为简单,在工程实际中应用较为广泛。 因此,本文采用折线型恢复力模型来反映钢管混凝 土框架的滞回特性。

本文在王文达等(2006)[9]的钢管混凝土柱-钢梁

低周往复荷载试验结果的基础上,进一步分析其典型的水平荷载-水平位移滞回关系曲线特征,并基于非线性有限元理论对影响钢管混凝土框架荷载-位移骨架曲线的主要因素进行参数分析。基于系统的参数分析结果,建议了单层钢管混凝土框架的水平荷载-水平位移恢复力模型,并进行了算例验证。

1 钢管混凝土框架*P-*⊿滞回曲线特征

王文达等(2006)^[9]完成了一批钢管混凝土柱-钢梁框架低周往复荷载试验研究,结果表明各框架试件的荷载-位移(P- Δ)滞回曲线规律类似,具有一致的特征,图 1 所示为钢管混凝土柱-钢梁框架典型的P- Δ 滞回曲线(CF-22 试件)。曲线上各主要特征点对应的时刻如下:O 点为框架正向加载零点;A 点为框架正向加载弹性阶段末,开始进入弹塑性阶段;B 点为框架正向极限荷载点;F 点为框架正向强化阶段末,开始进入下降段;G 点为下降段曲线上点;C 点为反向加载零点;D 点为反向加载时的弹性阶段末对应点,开始进入反向弹塑性阶段;E 点为反向加载极限荷载点。

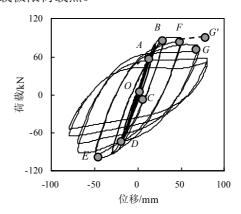


图 1 典型钢管混凝土框架 *P-∆* 滞回曲线(CF-22) Fig.1 Typical *P-∆* hysteretic curve of CFST frame (CF-22)

根据框架 $P-\Delta$ 滞回曲线上不同阶段的特征点,该曲线大致可分为以下几个阶段: 1) OA 段: 该段为弹性段,荷载-位移呈直线关系。2) AB 段: 该段为弹塑性段,荷载-位移关系开始表现为非线性性质。3) BC 段: 卸载段,从 B 点开始卸载,荷载-位移基本呈直线关系,卸载刚度与 OA 段的刚度基本相同。4) CD 段: 反向加载阶段,构件处在弹塑性阶段。5) BF(或 DE)段: $P-\Delta$ 曲线进入强化段,D 点为弹塑性阶段结束点。6) EF 段: 工作情况类似于BF 段。7) FG(G')段: 下降段。对于柱轴压比较小的情况,如 $n \leq 0.3$ 时, $P-\Delta$ 关系曲线将保持较长范

围的近似水平的强化段,因此当加载位移较小时可能不会出现下降段,即 FG'段的工作特性与 BF 段类似,但如果加载位移较大,由于框架梁的屈服及后期屈曲,荷载一般都会下降,只是下降趋势会比较平缓;当轴压比较大时,如 n>0.3 时, $P-\Delta$ 关系曲线一般都会出现下降段,且随着轴压比的增大,下降段的出现也越来越早,下降段的坡度也越来越大。

2 P-△ 滞回曲线的影响因素分析

王文达(2006)^[16]分别进行了钢管混凝土柱-钢梁框架单调加载和往复加载时P- Δ 曲线的全过程数值模拟,理论分析得到试验结果的验证。结果表明,单调加载时钢管混凝土框架P- Δ 曲线与往复加载时P- Δ 滞回曲线的骨架线基本重合。图 2 给出了部分典型框架试件的计算对比,可见钢管混凝土框架P- Δ 滞回曲线骨架线与单调加载 P- Δ 曲线基本重合,因此,暂可借用钢管混凝土框架单调加载时的P- Δ 曲线代替其 P- Δ 滞回曲线的骨架线进行参数分析。

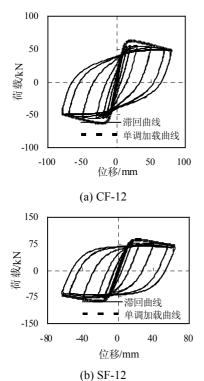


图 2 钢管混凝土框架试件 *P-Δ* 单调加载曲线与 滞回曲线对比

Fig.2 Compare of P- Δ monotonic and hysteretic curves of test CFST frames

影响钢管混凝土框架 $P-\Delta$ 滞回关系曲线骨架线的主要因素有:钢管混凝土柱截面含钢率 (α) :柱钢

材屈服极限(f_{v}); 混凝土抗压强度(f_{cu}); 柱轴压比(n); 柱长细比(λ); 梁柱线刚度比(i); 梁柱强度比(k_m)。 方钢管混凝土柱框架与圆钢管混凝土柱框架规律 类似(王文达,2006[16]),本文只给出圆钢管混凝土 框架计算结果。采用基于非线性纤维梁柱单元理论 的有限元方法进行计算(王文达,2006[16]),参数分 析依据工程常用参数范围进行,即钢管混凝土柱截 面含钢率 $\alpha = 0.05 - \alpha = 0.2$, 柱钢材屈服强度 $f_v =$ 235N/mm² $-f_v$ =420N/mm²,混凝土强度 f_{cu} = $30\text{N/mm}^2 - f_{cu} = 90\text{N/mm}^2$,柱轴压比 n = 0 - n = 0.9,柱 长细比 $\lambda=20-\lambda=80$, 梁柱线刚度比 i=0.25-i=2, 梁柱强度比 $k_m=0.4-k_m=0.8$ 。典型算例的基本条件 为: D=400mm, Q345 钢材, C60 混凝土, 柱轴压 比 n=0.4, 柱截面含钢率 $\alpha=0.1$, 框架柱高度 H=3000mm, 框架梁跨度 L=6000mm, 框架梁尺寸需 满足局部稳定等相关构造要求,钢材为 Q345,梁 柱强度比为 $k_m=0.8$,且依据其抗弯承载力和构造要 求来确定钢梁几何尺寸。

2.1 柱截面含钢率

图 3(a)所示为柱截面含钢率对圆钢管混凝土框架 P-Δ曲线的影响。可见随着含钢率提高,框架弹性阶段刚度和水平承载力都有所提高,下降段的下降幅度也略有减小,但含钢率总体上主要影响曲线的数值,对 P-Δ曲线的形状影响很小。

2.2 柱钢材屈服强度

图 3(b)所示为柱钢材屈服强度对框架 $P-\Delta$ 曲线的影响。可见柱钢材强度对 $P-\Delta$ 曲线的初始弹性阶段和下降阶段的曲线形状影响不大,但对弹性阶段后期接近进入弹塑性阶段的刚度有一定影响,随着 f_y 增大,柱约束效应系数提高,框架承载力和弹塑性阶段的刚度有所提高,但位移延性有减小趋势。

2.3 混凝土强度

图 3(c)所示为混凝土强度对框架 P- Δ 曲线的影响。混凝土强度对框架弹性阶段刚度和承载力有一定影响,随着 f_{cu} 增大,框架弹性刚度和承载力都增大,但曲线下降趋势变得更为明显,即位移延性有减小趋势。

2.4 轴压比

图 3(d)给出了不同柱轴压比 n 情况下框架的 P- Δ 曲线。由图中可见,n 对曲线形状影响较大: n 越大,框架承载力越小,强化阶段刚度也越小。当 n 达到一定数值时,曲线将出现下降段,且下降幅度随 n 增加而增大,框架位移延性越来越小。当 n 较小时对曲线弹性阶段刚度几乎没有影响,这是因

为在弹性阶段构件的变形很小, $P-\Delta$ 效应并不明显,且随着n 增大,核心混凝土开裂面积会减少,这一因素又会使构件的刚度略有增加。但n>0.5 时,框架弹性阶段刚度随轴压比增大有明显下降。

2.5 柱长细比

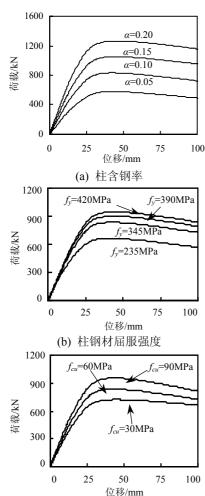
图 3(e)所示为不同框架柱长细比时框架 P- Δ 曲线,可见,柱长细比 λ 不仅会影响曲线数值,还会影响曲线形状。随着 λ 增加,弹性阶段和强化阶段刚度越来越小,承载力也有较大幅度减小。

2.6 梁柱线刚度比

图 3(f)所示为不同梁柱线刚度比时框架 *P-Δ*曲线,可见框架梁柱线刚度比对其承载力和刚度有一定影响,随着梁柱线刚度比增加,框架弹性刚度有所提高,但承载力增加并不明显。

2.7 梁柱强度比

从图 3(g)可看出,随着梁柱强度比增加,框架弹性刚度和水平承载力都有较明显提高,但对于其下降阶段的曲线形状没有明显影响,且基本上峰值荷载对应的水平位移相同,可见梁柱强度比对框架的延性没有明显影响。



(c) 混凝土强度

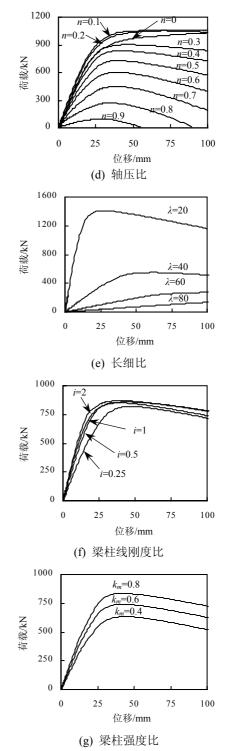


图 3 各主要参数对圆钢管混凝土框架 P-△ 骨架曲线的影响 Fig. 3 Influence of main parametric on P-△ envelope curves of CFST CHS frames

3 钢管混凝土框架 *P-∆* 恢复力模型

尽管采用数值方法可较为准确地计算钢管混凝土框架的 P-Δ滞回曲线,从而可较为深入地认识该类结构的工作特点,但计算过程较为复杂且不便于工程应用,因此有必要提供钢管混凝土框架的

 $P-\Delta$ 滞回曲线的简化模型。参考韩林海(2007)^[17]中 钢管混凝土构件的 $P-\Delta$ 滞回模型,发现在如下参数范围,即 n=0-n=0.6, $\alpha=0.05-\alpha=0.2$, $\lambda=10-\lambda=80$, $f_y=200N/mm^2-f_y=500N/mm^2$, $f_{cu}=30N/mm^2-f_{cu}=90N/mm^2$, $\xi=0.2-\xi=4$,钢管混凝土柱-钢梁框架的 $P-\Delta$ 滞回模型可采用图 4 所示的三线型模型,其中,滞回模型中骨架曲线的特征参数为:弹性阶段刚度 (K_a) 、B 点位移 (Δ_p) 和最大水平荷载 (P_m) 及第三段刚度 (K_T) 。

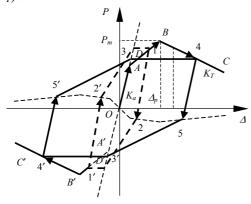


图 4 钢管混凝土框架 *P-Δ* 滞回曲线模型 Fig.4 Hysteretic model for *P-Δ* curve of CFST frames

模型中骨架曲线按照下述方法确定:结合王文达等(2006)^[9]中钢管混凝土框架 P- Δ 试验骨架曲线的特征,采用三折线型骨架曲线模型来模拟,如图 5 所示,模型可分为弹性段 OA,弹塑性段 AB 和下降段 BC。A 点为曲线弹性阶段的终点,B 点为曲线峰值点,其水平荷载值为 P_m ,对应的水平位移为 Δ_p 。经大量算例分析并参考韩林海(2007)^[17]中钢管混凝土构件的简化 P- Δ 骨架曲线模型,A 点的水平荷载大小可取 $0.6P_m(P_A=0.6P_m)$ 。

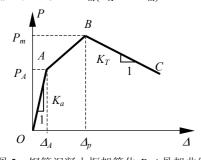


图 5 钢管混凝土框架简化 P- Δ 骨架曲线模型 Fig.5 Simplified P- Δ envelope curve model for CFST frame

上述三折线模型中每段直线方程可表示如下:

$$P = f(\Delta) = \begin{cases} K_a \Delta, & 0 \le \Delta \le \Delta_A \\ P_A + K_2(\Delta - \Delta_A), & \Delta_A \le \Delta \le \Delta_p \\ P_m + K_T(\Delta - \Delta_p), & \Delta_p < \Delta \end{cases}$$
 (1)

式中: P_A 和 Δ_A 分别为 A 点对应的荷载及位移; K_2

为第二段直线的刚度,其余参数含义同前。各参数 之间的关系如下:

$$\Delta_A = P_A / K_a = 0.6 P_m / K_a \tag{2}$$

$$K_2 = \frac{P_m - P_A}{\Delta_p - \Delta_A} = \frac{0.4 P_m}{\Delta_p - 0.6 P_m / K_a}$$
 (3)

可见,只要确定了 K_a 、 Δ_p 、 P_m 及 K_T ,图 5 所示的 P- Δ 骨架曲线模型即可确定。王文达(2006)^[16]中推导了钢管混凝土框架的简化二阶分析方法,从而为图 5 所示的骨架曲线模型提供了有关参数。具体如下。

1) 弹性阶段刚度 Ka:

$$K_{a} = 2\left(\frac{12i_{c}}{L_{c}^{2}} - \frac{6nN_{u}}{5L_{c}}\right) - 2\frac{\left(\frac{6i_{c}}{L_{c}} - \frac{nN_{u}}{10}\right)^{2}}{4i_{c} + 3i_{b} - \frac{2nN_{u}L_{c}}{15}}$$
(4)

其中的有关参数为: i_b 为梁线刚度; i_c 为柱线刚度; n为柱轴压比; N_u 为柱轴压承载力; L_c 为框架柱高度。 其中框架柱的弹性抗弯刚度依据韩林海(2007)^[17]确定,即对于圆钢管混凝土框架柱 $EI_c=E_sI_s+0.6E_cI_c$; 对于方、矩形钢管混凝土框架柱 $EI_c=E_sI_s+0.2E_cI_c$ 。其中, E_c 和 E_s 分别为混凝土与钢管的弹性模量, I_c 和 I_s 分别为核心混凝土与外钢管的截面惯性矩。

2) 最大水平荷载 $P_m=2P_c$,其中 P_c 为相应框架柱水平承载力,可按照 DBJ13-51-2003(2003)^[18]中压弯构件确定,但注意此时框架柱的计算长度系数可按下式取值,其中 i_b 和 i_c 含义同前:

$$\mu = \sqrt{\frac{3.75i_b/i_c + 4}{3.75i_b/i_c + 1}} \tag{5}$$

- 3) B 点位移 Δ_p 由式(6)确定,其中 M_{1c} 由式(7)确定, M_{pc} 为钢管混凝土框架柱抗弯极限承载力,依据 DBJ13-51-2003(2003)^[18]中钢管混凝土压弯构件相关条文确定, Δ_4 则由式(2)确定。
- 4) 第三段刚度 K_T 由式(8)确定。式(8)中 EI_c 为柱抗弯刚度, L_c 、n、 N_u 含义同前,p 为钢管混凝土柱弯矩-曲率模型中的强化段模量系数,依据韩林海(2007)^[17]中钢管混凝土构件弯矩-曲率模型确定。

5) 模型软化段。

模型中需考虑再加载时的软化问题,在钢管混凝土柱-钢梁平面框架 P- Δ 滞回模型中,当从图 4中的 1点或 4点卸载时,卸载线将按弹性刚度 K_a 进行卸载,并反向加载至 2点或 5点,2点和 5点纵坐标荷载值分别取 1点和 4点纵坐标荷载值的 0.2

倍;继续反向加载,模型进入软化段 23'或 5D',点 3'和 D'均在 OA 线的延长线上,其纵坐标值分别与 1(或 3)点和 4(或 D)点相同。随后,加载路径沿 3'1'2'3

或 D'4'5'D 进行, 软化段 2'3 和 5'D 的确定办法分别 与 23'和 5D'类似。

$$\Delta_{p} = \Delta_{A} + \frac{\left(4i_{c} - \frac{2nN_{u}L_{c}}{15} + 3i_{b}\right)}{\left(\frac{6i_{c}}{L_{c}} - \frac{nN_{u}}{10}\right)} \frac{k_{m}M_{pc}}{3i_{b}} + \frac{4i_{c} - \frac{2nN_{u}L_{c}}{15}}{\left(\frac{12i_{c}}{L_{c}} - \frac{6nN_{u}}{5L_{c}}\right)\left(4i_{c} - \frac{2nN_{u}L_{c}}{15}\right) - \left(\frac{6i_{c}}{L_{c}} - \frac{nN_{u}}{10}\right)^{2} \left(\frac{M_{pc} - M_{1c}}{L_{c}}\right)$$
(6)

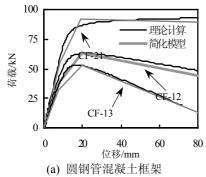
$$M_{1c} = \left(-\frac{6i_c}{L_c} + \frac{nN_u}{10}\right) \frac{\left(4i_c - \frac{2nN_uL_c}{15} + 3i_b\right)}{\left(\frac{6i_c}{L_c} - \frac{nN_u}{10}\right)} \frac{k_m M_{pc}}{3i_b} + \left(2i_c + \frac{nN_uL_c}{30}\right) \frac{k_m M_{pc}}{3i_b}$$
(7)

$$K_{T} = 2 \left(p \left(\frac{12EI_{c}}{L_{c}^{3}} - \frac{6nN_{u}}{5L_{c}} \right) - \frac{p \left(\frac{6EI_{c}}{L_{c}^{2}} - \frac{nN_{u}}{10} \right)^{2}}{\frac{4EI_{c}}{L_{c}} - \frac{2nN_{u}L_{c}}{15}} - (1-p)\frac{nN_{u}}{L_{c}} \right)$$
(8)

4 钢管混凝土框架恢复力模型的验证

4.1 骨架曲线模型验证

王文达(2006)^[16]中对文献[9]中的钢管混凝土框架进行了考虑材料及几何非线性的有限元分析,其理论计算结果与试验曲线吻合良好。图 6 所示分别为采用本文 $P-\Delta$ 骨架曲线模型计算的文献[9]中部分试验框架的 $P-\Delta$ 曲线与其理论曲线对比,可见在弹性阶段和下降段吻合较好,而弹塑性段有一定



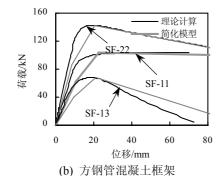
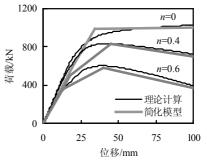


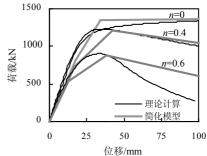
图 6 框架试件 *P-* △ 理论骨架曲线与简化模型对比 Fig.6 Comparisons of *P-* △ envelope curves of CFST test frames between theory and model

偏差。

为研究在更大参数范围内本文 P- Δ 骨架曲线模型的适用性,选取了钢管混凝土框架典型算例进行了对比,其中典型算例的基本计算条件是: D= 400mm (或 B=400mm), α =0.1,Q345 钢,C60 混凝土,柱高 H=3000mm,梁跨度 L=6000mm,梁柱线刚度比 i=0.33(圆柱框架)或 i=0.42(方柱框架),典型算例中柱轴压比 n=0-n=0.6 变化。计算结果对比见



(a) 圆钢管混凝土框架



(b) 方钢管混凝土框架

图 7 框架 *P-∆* 理论骨架曲线与简化模型算例对比 Fig.7 Comparisons of *P-∆* envelope curves of CFST frame between theory and model

图 7,可见简化模型的弹性阶段和第三阶段与理论模型吻合较好,而弹塑性阶段(第二阶段)则偏低于理论计算方法。不过作为简化模型,二者总体上吻合较好,可满足一般工程中的应用要求。

4.2 滞回曲线模型验证

图 8 所示为王文达等(2006)[9]中部分钢管混凝

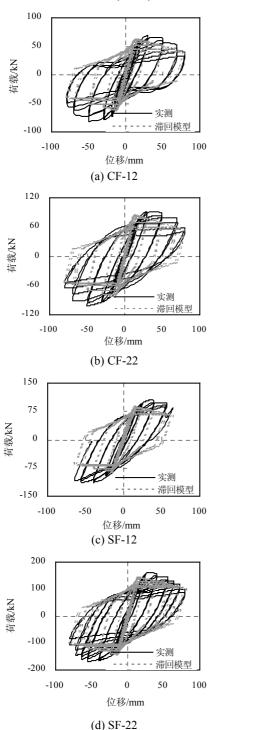


图 8 钢管混凝土框架 *P-Δ* 滞回模型与试验滞回曲线对比 Fig.8 Comparisons *P-Δ* hysteretic curves of CFST frames between experiment and model

土柱-钢梁框架试件 P- Δ 实测滞回曲线与本文滞回模型的对比情况,可见二者总体上吻合较好。

5 结论

单层单跨框架是最基本的框架结构组成单元, 任何复杂的多层多跨框架结构可看成单层单跨框 架的组合和叠加,因此研究单层单跨框架的力学性 能,可为以后多层多跨框架及空间框架力学性能的 研究提供理论基础。单层单跨钢管混凝土框架的恢 复力模型也可为建立整体结构层恢复力模型提供 基础。

基于钢管混凝土柱-钢梁框架低周往复荷载试验结果的基础上,本文分析了钢管混凝土框架典型的 P-Δ滞回曲线特征,并基于非线性有限元理论对影响钢管混凝土框架P-Δ骨架曲线的主要因素进行参数分析。基于系统的参数分析结果,分别建议了钢管混凝土柱-钢梁平面框架的 P-Δ骨架线模型和滞回模型。骨架曲线模型与相关文献提供的理论计算结果进行了对比,两种结果总体上吻合良好。滞回曲线模型与相关的试验滞回曲线也进行了比较,总体上本文的滞回模型可以反映钢管混凝土柱-钢梁框架滞回性能的主要特点,可为钢管混凝土整体框架结构的抗震性能分析提供参考。

参考文献:

- [1] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988. Hu Yuxian. Seismic engineering [M]. Beijing: Earthquake Press, 1988. (in Chinese)
- [2] Matsui C. Strength and behavior of frames with concrete filled square steel tubular columns under earthquake loading [C]. Proceedings of the 1st International Specialty Conference on CFST. Harbin, 1985. 143—146.
- [3] Morino S, Kawaguchi J, Yasuzaki C. Behavior of concrete filled steel tubular 3-D sub-assemblages [C]. Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Composite Construction in Steel and Concrete II. Potosi, USA, 1993. 726-741.
- [4] Kawaguchi J, Morino S, Sugimoto T. Elastoplastic behavior of concrete-filled steel tubular frames [C]. Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Steel and Concrete Composite Construction III. ASCE, New York, USA, 1997. 272—281.
- [5] 张文福. 单层钢管混凝土框架恢复力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
 - Zhang Wenfu. Research on resilience performance of single floor concrete-filled steel tubular frame [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000. (in Chinese)

- [6] 李斌, 薛刚, 张园. 钢管混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 53-56. Li Bin, Xue Gang, Zhang Yuan. Experimental study on behaviors of concrete filled steel tubular frame [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(5): 53-56. (in Chinese)
- [7] 王来,王铁成,陈倩. 低周反复荷载下方钢管混凝土框架抗震性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 113-117.
 - Wang Lai, Wang Tiecheng, Chen Qian. Experimental research on seismic performances of joint reinforced with inner ring stiffener of concrete-filled square tubular frame [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(3): 113—117. (in Chinese)
- [8] 许成祥. 钢管混凝土框架结构抗震性能的试验与理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
 - Xu Chengxiang. Experimental and theoretical research on seismic behavior of concrete-filled steel tubular frames [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. (in Chinese)
- [9] 王文达, 韩林海, 陶忠. 钢管混凝土柱-钢梁平面框架 抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 48-58.
 - Wang Wenda, Han Linhai, Tao Zhong. Experimental research on seismic behaviour of concrete-filled CHS and SHS columns and steel beam planar frames [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(3): 48—58. (in Chinese)
- [10] 丁阳, 许成祥, 戴学新. 钢管混凝土框架结构抗震性能的非线性有限元分析[J]. 建筑结构, 2004, 34(1): 7-10.
 - Ding Yang, Xu Chengxiang, Dai Xuexin. Nonlinear finite element analysis on the seismic behavior of concrete-filled steel tubular frame [J]. Building Structure, 2004, 34(1): 7–10. (in Chinese)
- [11] 王铁成, 卢明奇. 轴压比对方钢管混凝土框架延性影响的有限元分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005,

- 35(1): 70-75.
- Wang Tiecheng, Lu Mingqi. Finite element analysis of effect of axial load level on ductility of CFRT frames [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(1): 70–75. (in Chinese)
- [12] 聂建国,秦凯,肖岩. 方钢管混凝土框架结构的 push-over 分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(3): 68-70. Nie Jianguo, Qin Kai, Xiao Yan. Push-over analysis on the seismic behavior of a concrete-filled rectangular tubular frame structure [J]. Industrial Construction, 2005, 35(3): 68-70. (in Chinese)
- [13] 孙修礼, 梁书亭, 段友利. 钢管混凝土框架骨架曲线 研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(1): 99—103. Sun Xiuli, Liang Shuting, Duan Youli. Research on envelop curves of concrete filled steel tubular frame structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(1): 99—103. (in Chinese)
- [14] Yang Y B, Kuo S R. Theory and analysis of nonlinear framed structures [M]. Singapore/New York: Prentice Hall. 1994.
- [15] Chen W F, Toma S. Advanced analysis for steel frames: Theory, software and applications [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1994.
- [16] 王文达. 钢管混凝土柱-钢梁平面框架的力学性能研究 [D]. 福州: 福州大学, 2006.

 Wang Wenda. Research on mechanics behaviour of concrete-filled steel tubular columns and steel beam planar frames [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006. (in Chinese)
- [17] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2007. Han Linhai. Concrete-filled steel tubular structures— Theory and application [M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [18] DBJ13-51-2003, 钢管混凝土结构技术规程[S]. 2003. DBJ13-51-2003, Technical specification for concrete-filled steel tubular structures [S]. 2003. (in Chinese)