

文章编号: 1000-4750(2016)12-0206-11

平缀管式等截面钢管混凝土格构柱 荷载-位移骨架曲线计算方法

袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 蔡慧雄

(福州大学土木工程学院, 福建, 福州 350116)

摘 要: 基于平缀管式等截面钢管混凝土格构柱在水平低周反复荷载作用下的拟静力试验结果, 采用 OpenSees 建立纤维单元杆系计算模型, 对影响此类结构水平荷载-位移骨架曲线的主要因素进行参数分析。采用三折线简化模型模拟水平荷载-位移骨架曲线, 通过理论推导或数据统计分析得到了平缀管式等截面钢管混凝土格构柱相关骨架曲线控制参数的简化计算公式, 包括: 考虑柱肢与缀管剪切变形的弹性阶段刚度的计算公式; 基于塑性铰破坏并考虑轴力-弯矩相关曲线的水平峰值荷载的计算公式; 基于数据统计分析并考虑实际工程需要的位移延性系数的峰值位移与极限位移的简化计算公式。与拟静力试验、有限元参数分析以及模拟实际结构尺寸扩大参数分析的结果进行的比较表明, 三折线简化模型可以有效地模拟平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的骨架曲线, 相关骨架曲线控制参数的简化计算公式具有较高精度。

关键词: 钢管混凝土格构柱; 等截面; 平缀管式; 骨架曲线; 简化计算方法

中图分类号: TU312 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.08.0671

CALCULATION METHOD OF LOAD-DISPLACEMENT SKELETON CURVE FOR UNIFORM SECTIONAL CFST LATTICE COLUMN WITH FLAT LACING TUBE

YUAN Hui-hui, WU Qing-xiong, CHEN Bao-chun, CAI Hui-xiong

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fujian, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Based on quasi-static test results, fiber element models using OpenSees software were established to investigate the effects of major factors on the horizontal load-displacement skeleton curve of a uniform sectional CFST lattice column with flat laced tubes. Then a tri-linear model was proposed to simulate the load-displacement skeleton curve, and the simplified calculation methods of related control parameters of the model were also put forward through theoretical derivation and statistics analysis, including the elastic stiffness calculation formula considering the shear deformation of CFST limbs and lacing tubes; the horizontal peak load calculation formula based on a virtual work principle and the correlation curves between axial force and bending moment; the simplified calculation method of the peak displacement and ultimate displacement for which the displacement ductility factors obtained by statistical data can be selected flexibly according to the actual requirements. Compared with the results of quasi-static tests, FEM parameter analysis, and extended parameter analysis for actual structural size, the tri-linear model can effectively simulate the skeleton curve of such structures, and the

收稿日期: 2015-08-14; 修改日期: 2016-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178118, 51508104); 教育部“新世纪优秀人才支持计划资助”项目(NCET-13-0737)

通讯作者: 吴庆雄(1973—), 男, 福建人, 研究员, 博士, 博导, 从事桥梁与结构工程的研究(E-mail: wuqingx@fzu.edu.cn).

作者简介: 袁辉辉(1985—), 男, 福建人, 助理研究员, 博士, 从事桥梁与结构工程的研究(E-mail: yuanhh@fzu.edu.cn);

陈宝春(1958—), 男, 福建人, 教授, 博士, 博导, 从事桥梁与结构工程的研究(E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn);

蔡慧雄(1992—), 男, 福建人, 硕士生, 从事桥梁工程的研究(E-mail: 1293627299@qq.com)

simplified calculation formulas for related control parameters of a skeleton curve have high accuracy.

Key words: CFST lattice column; uniform section; flat lacing tube; skeleton curve; simplified calculation method

钢管混凝土格构柱凭借其施工方便、承载能力和结构刚度大、抗震性能强、综合造价经济合理等优点,近年来正逐渐地在我国西部山区高墩建设中得到应用,如四川省雅安经石棉至泸沽高速公路上的干海子大桥^[1]。深入研究钢管混凝土格构柱的抗震性能,对于组合结构在我国这样一个多地震国家的推广应用具有非常重要的现实意义。

荷载-位移骨架曲线能够直观地反映出衡量结构抗震性能的一些重要指标,包括弹性阶段刚度、屈服荷载、屈服位移、峰值荷载、峰值荷载位移、极限荷载、极限位移及下降段刚度等特征值,以上内容可概括为结构的强度、刚度和延性等力学特性。骨架曲线模型是进行结构非线性抗震分析的基础,确定骨架曲线模型的方法一般是结合低周往复荷载试验并进行理论分析得到。

目前对钢管混凝土单肢柱骨架曲线模型的研究已较为成熟,如:钟善桐^[2]提出了圆形钢管混凝土构件荷载-位移骨架曲线的计算模型;金雪峰等^[3]提出了方形钢管混凝土轴压柱的钢管壁发生局部屈曲时的屈曲系数、屈曲半波长及临界屈曲应力表达式;韩林海^[4]基于大量的试验和有限元计算结果,对圆形、方形和矩形钢管混凝土柱的骨架曲线进行了研究,探讨了含钢率、钢材屈服强度、混凝土抗压强度、轴压比和长细比等主要因素对骨架曲线的影响,从而建立了钢管混凝土单肢柱的骨架曲线模型;赵忠虎等^[5]研究分析了压弯构件的恢复力模型骨架曲线,从而得到了压弯构件力和变形的关系;徐超等^[6]采用三折线模型拟合方形设肋薄壁钢管混凝土柱的骨架曲线;卢德辉等^[7]通过 OpenSees 软件平台建立基于纤维截面的空心钢管混凝土柱有限元模型,考虑轴压比、长细比、截面空心率、截面含钢率和材料强度等因素对骨架曲线的影响。从结构组成来看,钢管混凝土单肢柱是钢管混凝土格构柱的主要组成构件,上述研究可为钢管混凝土格构柱骨架曲线模型的研究提供重要的参考。

目前关于钢管混凝土格构柱荷载-位移骨架曲线模型的研究成果甚少。罗瑶^[8]主要考虑轴压比、长细比、材料强度及缀管尺寸对K形缀管钢管混凝土格构柱的骨架曲线的影响,不过其骨架曲线特征

值是通过数据拟合归纳得到相关公式,无法应用于平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的骨架曲线上。

综上所述,对于在实际工程中得到应用的平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的骨架曲线模型,目前国内外还没有进行过系统的研究,而在实际结构计算过程中,尤其是结构静力弹塑性计算过程中,此类结构的骨架曲线模型是非常重要的参数,有必要对其进行专门的研究,建立相应的理论模型,以便为今后该类结构恢复力模型的建立和抗震设计提供参考依据。

因此,本文在拟静力试验研究的基础上^[9],基于 OpenSees 软件平台采用建立精确的纤维单元杆系有限元模型,分析各主要因素对平缀管式等截面钢管混凝土格构柱水平荷载-位移骨架曲线的影响规律,在此基础上采用三折线简化模型模拟水平荷载-位移骨架曲线,通过推导或回归得到平缀管式等截面钢管混凝土格构柱相关骨架曲线特征值的简化计算公式。

1 骨架曲线影响参数的有限元分析

1.1 有限元计算模型

如图 1 所示,文献[9]对平缀管式钢管混凝土格构柱在低周反复荷载作用下的滞回性能进行了拟静力试验和非线性有限元分析。

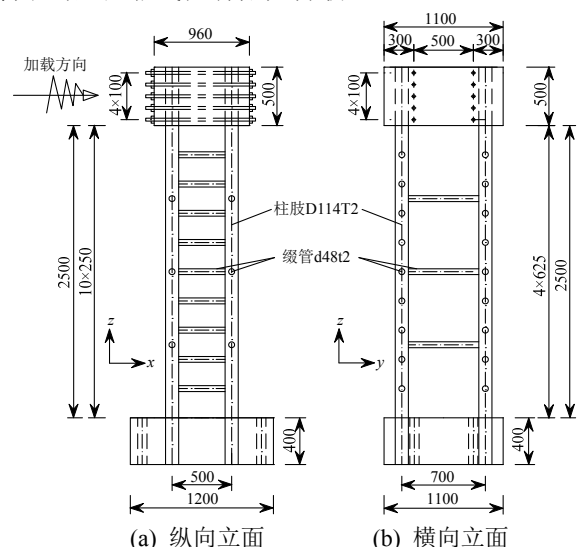


图 1 平缀管式钢管混凝土格构柱标准试件图 /mm
Fig.1 Standard specimen diagram of uniform sectional CFST Lattice column with flat lacing tube

采用 OpenSees 建立纤维单元杆系计算模型，对平缀管式钢管混凝土格构柱试验试件的滞回性能进行模拟。如图 2 所示，将钢管混凝土截面和缀管截面划分为多个纤维单元，其中钢管细分成沿圆周方向 30 等分、沿径向分成 2 等分，管内混凝土细分成沿圆周方向 30 等分、沿径向分成 16 等分。钢材本构选择 Giuffre-Menegotto-Pinto 双线性模型^[10]，柱肢管内混凝土采用 Susantha 等^[11]提出的基于 Mander^[12]模型曲线改进的钢管约束混凝土模型。

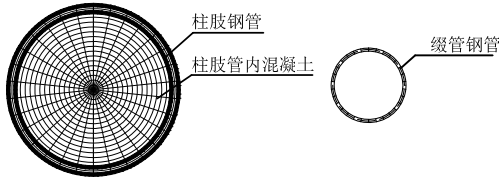


图 2 纤维单元截面划分

Fig.2 Division of cross section for Fiber element

由于文献[9]已进行有限元模拟与拟静力试验得到的滞回曲线的对比，本文主要针对骨架曲线的简化计算，因此，将基于低周反复荷载作用下滞回曲线结果得到的各试件水平荷载-位移骨架曲线示于图 3。可以看出，有限元计算结果与试验结果吻

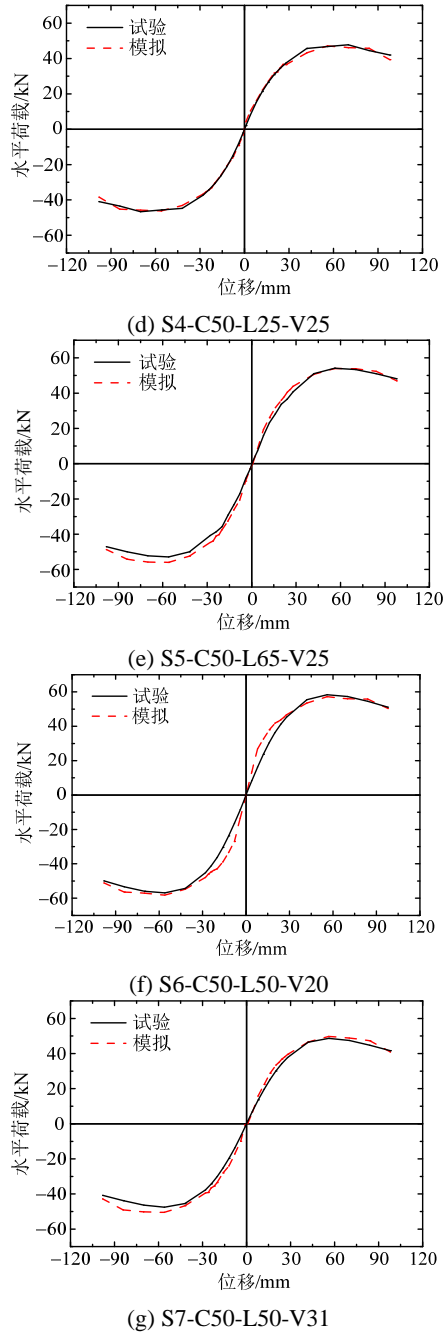
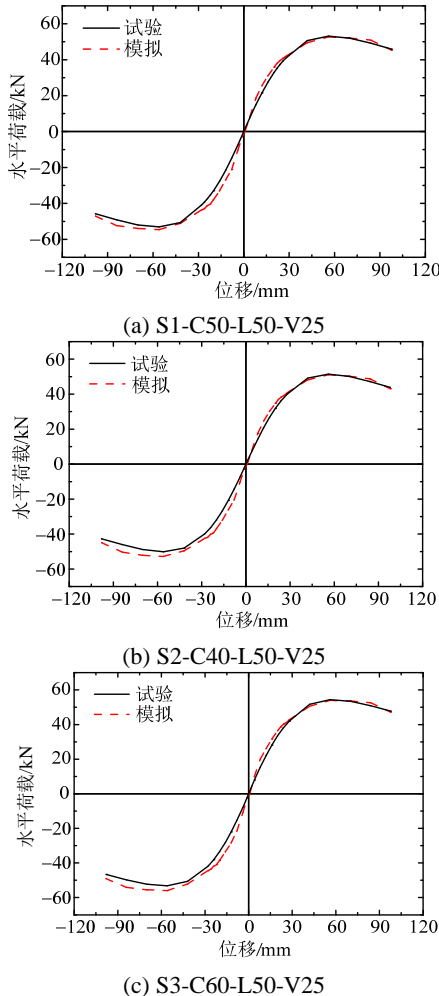


图 3 有限元模拟与拟静力试验得到的水平荷载-位移骨架曲线

Fig.3 Horizontal load-displacement skeleton curve obtained by FEM simulation and quasi-static cyclic test

合良好，说明采用本文建立的非线性有限元模型可比较准确地模拟平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的水平荷载-位移骨架曲线。

1.2 有限元参数取值

由于影响平缀管式等截面钢管混凝土格构柱抗震性能的构造参数较多，限于时间和成本，文献[9]仅对柱肢管内混凝土强度、柱肢纵向间距和缀管竖向间距三个参数进行了试验研究。为全面了解各主要参数对此类结构骨架曲线的影响规律，本文扩

大原有试验参数的范围,在原有参数的基础上选取了轴压比、柱肢长度、柱肢钢材屈服强度作为拓展参数,开展有限元参数分析,参数取值详见表1。

钢管混凝土格构柱试验模型的标准试件肢柱采用直径 $\Phi=114$ mm、壁厚 $t=2$ mm 的 Q345 钢管,缀管采用直径 $\Phi=48$ mm、壁厚 $t=2$ mm 的 Q345 空钢管,柱肢管内混凝土强度等级为 C50,柱肢长度为 2500 mm,柱肢纵向间距为 500 mm,缀管竖向间距为 250 mm。在参数分析中,参考实际工程应用中可能使用的范围确定参数取值范围,如柱肢钢材屈服强度的取值分别对应 Q235、Q295、Q345、Q420 钢材,混凝土强度等级为 C40、C50、C60、C70,轴压比为 0.10、0.15、0.20、0.30、0.40、0.50,柱肢长度为 1250 mm、1500 mm、2000 mm、2500 mm、3750 mm、5000 mm,柱肢纵向间距为 250 mm、350 mm、450 mm、500 mm、550 mm、650 mm,缀管竖向间距为 150 mm、200 mm、250 mm、300 mm、350 mm。

表 1 有限元分析的基本参数 /mm

Table 1 Basic parameters for finite element analysis

试件 编号	试件几何尺寸			无量纲分析参数				
	柱肢 长度 l_c	柱肢 间距 d_c	缀管 间距 d_z	钢材 种类	混凝土 强度 等级	轴压 比 n	长细 比 λ	缀管疏密 系数 c_z
S01	2500	500	250	Q345	C50	0.15	9.94	0.50
S02	2500	500	250	Q235	C50	0.15	9.94	0.50
S03	2500	500	250	Q295	C50	0.15	9.94	0.50
S04	2500	500	250	Q420	C50	0.15	9.94	0.50
S05	2500	500	250	Q345	C40	0.15	9.94	0.50
S06	2500	500	250	Q345	C60	0.15	9.94	0.50
S07	2500	500	250	Q345	C70	0.15	9.94	0.50
S08	2500	500	250	Q345	C50	0.10	9.94	0.50
S09	2500	500	250	Q345	C50	0.20	9.94	0.50
S10	2500	500	250	Q345	C50	0.30	9.94	0.50
S11	2500	500	250	Q345	C50	0.40	9.94	0.50
S12	2500	500	250	Q345	C50	0.50	9.94	0.50
S13	1250	500	250	Q345	C50	0.15	4.97	0.50
S14	1500	500	250	Q345	C50	0.15	5.96	0.50
S15	2000	500	250	Q345	C50	0.15	7.95	0.50
S16	3750	500	250	Q345	C50	0.15	14.90	0.50
S17	5000	500	250	Q345	C50	0.15	19.87	0.50
S18	2500	500	150	Q345	C50	0.15	9.94	0.30
S19	2500	500	200	Q345	C50	0.15	9.94	0.40
S20	2500	500	300	Q345	C50	0.15	9.94	0.60
S21	2500	500	350	Q345	C50	0.15	9.94	0.70
S22	2500	250	250	Q345	C50	0.15	19.50	1.00
S23	2500	350	250	Q345	C50	0.15	14.10	0.71
S24	2500	450	250	Q345	C50	0.15	11.02	0.56
S25	2500	550	250	Q345	C50	0.15	9.04	0.45
S26	2500	650	250	Q345	C50	0.15	7.66	0.38

表 1 中的钢管混凝土格构柱对 y 轴的名义长细比 $\lambda^{[13]}$ 和缀管疏密系数 c_z 按下式计算:

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{\sum(I_{sc} + a_i^2 A_{sc}) / \sum A_{sc}}} \quad (1)$$

$$A_{sc} = A_s + A_c \quad (2)$$

$$I_{sc} = \pi D^4 / 64 \quad (3)$$

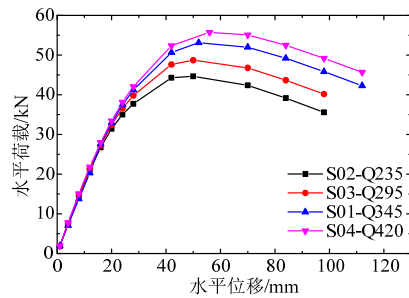
$$L = ul_c \quad (4)$$

$$c_z = d_z / d_c \quad (5)$$

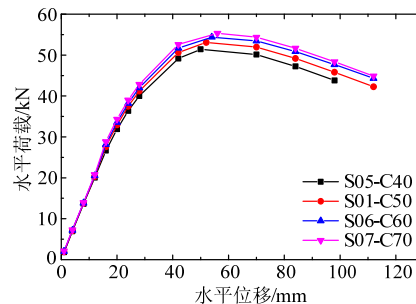
式中: L 为钢管混凝土格构柱的计算长度; l_c 为钢管混凝土格构柱的长度; u 为考虑柱端约束条件的计算长度系数,试件下端固定,上端平移但不转动,取 $u=1.0^{[14]}$; I_{sc} 为单根柱肢的组合截面惯性矩; A_{sc} 为单根柱肢的组合截面面积; a_i 为单根柱肢中心到 y 轴的距离; D 为单根柱肢的钢管外径; d_z 为缀管的竖向间距; d_c 为柱肢纵向间距。

1.3 骨架曲线的影响参数分析

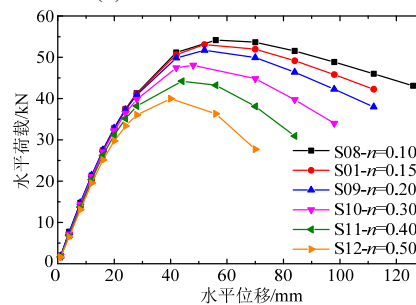
采用表 1 所示的各基本参数取值,基于低周反复荷载作用下的有限元滞回曲线结果求得不同试件的骨架曲线示于图 4。



(a) 柱肢钢材屈服强度



(b) 柱肢管内混凝土强度



(c) 轴压比

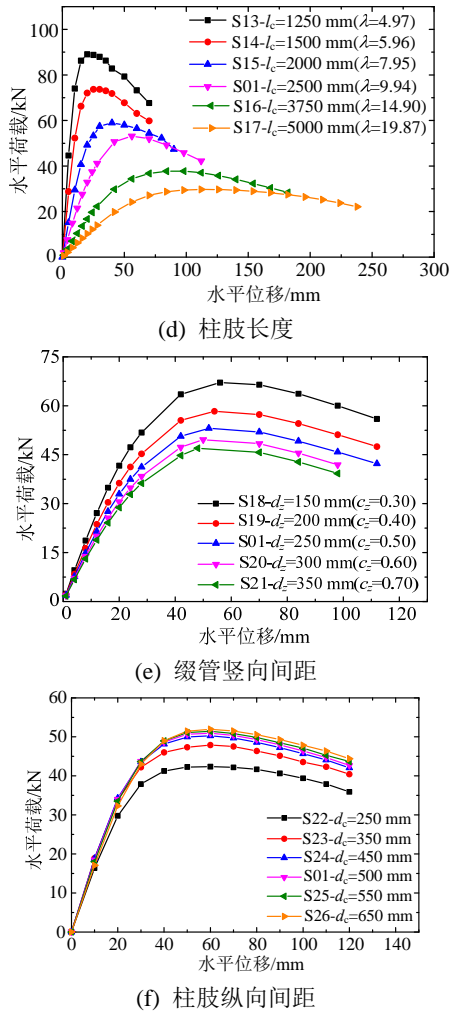


图4 各主要参数对平缀管式钢管混凝土格构柱骨架曲线的影响

Fig.4 Influence of main parameters on skeleton curves of uniform sectional CFST lattice column with flat lacing tube

图4(a)为柱肢钢材屈服强度 f_y 对平缀管式钢管混凝土格构柱骨架曲线的影响。可以看出,柱肢钢材屈服强度对骨架曲线的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,随着柱肢屈服强度 f_y 的增大,柱肢约束效应系数提高,试件承载力和弹塑性阶段的刚度提高,位移延性增大。

图4(b)为柱肢管内混凝土强度 f_c 对平缀管式钢管混凝土格构柱骨架曲线的影响。与柱肢钢材屈服强度相似,柱肢管内混凝土强度对试件骨架曲线的初始弹性阶段和下降阶段的曲线形状影响不大;随着管内混凝土强度 f_c 的增大,水平承载力略微增大。

图4(c)给出了不同柱轴压比 n 情况下平缀管式钢管混凝土格构柱的骨架曲线。可以看出,轴压比 n 对曲线形状影响较大:轴压比 n 越大,试件的水平承载力越小,强化阶段刚度也越小,骨架曲线下

降段的下降幅度随之增大,位移延性明显减小。在本次有限元分析中,轴压比 n 对曲线弹性阶段刚度几乎没有影响,弹性阶段刚度随轴压比增大略微下降,这是因为在弹性阶段构件的变形很小, $P-\Delta$ 效应不明显。

图4(d)为不同柱肢长度 l_c (即名义长细比 λ)情况下平缀管式钢管混凝土格构柱的骨架曲线。可以看出,钢管混凝土格构柱的名义长细比 λ 不仅会影响骨架曲线数值,还会影响曲线形状;随着名义长细比 λ 的增加,弹性阶段和强化阶段刚度越来越小,水平承载力较大幅度减小。

图4(e)为不同缀管竖向间距(即缀管疏密系数 c_2)情况下平缀管式钢管混凝土格构柱的骨架曲线。可以看出,钢管混凝土格构柱的缀管疏密程度对骨架曲线的影响较大;缀管疏密系数 c_2 越大(即水平缀管的布置越稀疏),钢管混凝土格构柱各柱肢之间的连结越弱,骨架曲线的弹性阶段刚度越来越小,水平承载力较大幅度减小。

图4(f)为不同柱肢纵向间距 d_c 情况下平缀管式钢管混凝土格构柱的骨架曲线。可以看出,柱肢纵向间距 d_c 主要对骨架曲线的弹性阶段刚度和水平承载能力有影响;随着柱肢纵向间距 d_c 从250 mm增大至450 mm,骨架曲线的弹性阶段刚度与水平承载力有较大幅度的提高;而当柱肢纵向间距从450 mm增大至650 mm时,格构柱的弹性阶段刚度和水平承载能力的增幅显著减小。

通过以上骨架曲线的影响参数分析,明确了影响骨架曲线各控制阶段的主要计算参数,即影响构件刚度的主要参数为柱肢长度、缀管竖向间距、柱肢纵向间距;影响水平承载能力的主要参数为柱肢长度、轴压比、缀管竖向间距、柱肢钢材屈服强度;影响构件延性的主要参数为柱肢长度、轴压比、柱肢钢材屈服强度,从而为后面简化计算公式的构筑打下基础。

2 骨架曲线简化模型及计算公式

2.1 三折线简化模型

尽管采用有限元数值方法可较准确地计算平缀管式钢管混凝土格构柱的荷载-位移骨架曲线,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利于工程应用,因此有必要提供此类结构的荷载-位移骨架曲线的简化模型。

根据拟静力试验^[9]和上述有限元分析结果,平

缀管式钢管混凝土格构柱的水平荷载-位移骨架曲线模型可采用如图 5 所示的三折线简化模型,分为弹性段 OA 、强化段 AB 和退化段 BC 三个部分,在简化时假定正反方向的骨架曲线对称。图中, A 点为屈服荷载点, B 点为荷载峰值点, C 点为极限破坏点。

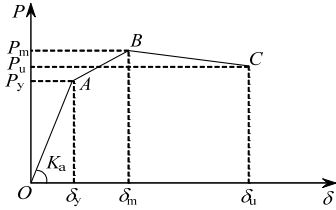


图 5 骨架曲线三折线简化模型

Fig.5 Simplified trilinear skeleton curve model

通过拟静力试验和参数分析可以得到,平缀管式钢管混凝土格构柱骨架曲线三折线简化模型中, A 点处的屈服荷载约为峰值荷载的 0.7 倍,即:

$$P_y = 0.7P_m \quad (6)$$

在拟静力试验中当退化段的水平荷载值下降至峰值荷载的 85%时可认为试件已发生破坏, C 点处的极限荷载为峰值荷载的 0.85 倍,即:

$$P_u = 0.85P_m \quad (7)$$

因此,为建立图 5 所示的荷载-位移骨架曲线三折线简化模型,还需要确定以下 4 个参数:

- 1) 弹性阶段刚度 K_a ;
- 2) 荷载峰值点 B 处的峰值荷载 P_m ;
- 3) 荷载峰值点 B 处对应的峰值位移 δ_m ;
- 4) 极限荷载点 C 处对应的极限位移 δ_u 。

2.2 弹性阶段刚度 K_a

由前述 1.3 节骨架曲线参数分析的结果可知,柱肢钢管屈服强度、柱肢管内混凝土强度、轴压比这三个参数对平缀管式钢管混凝土格构柱的弹性阶段刚度影响很小,可忽略不计。因此,在计算弹性阶段刚度时,可将格构柱近似为纯弯柱。

在柱顶水平荷载 P 作用下,柱顶水平位移可按 $\delta = Pl_c^3 / 3(EI)_{cfstn}$ 计算,从而得到钢管混凝土格构柱弹性阶段刚度的一般表达式为:

$$K_{a0} = \frac{3(EI)_{cfstn}}{l_c^3} \quad (8)$$

式中, $(EI)_{cfstn} = 4E_s(I_s + A_s d_c^2 / 4) + 4E_c(I_c + A_c d_c^2 / 4)$ 为格构柱截面的组合抗弯刚度, E_s 为柱肢钢材弹性模量, E_c 为混凝土弹性模量, I_s 为单根柱肢钢管截面惯性矩, I_c 为单根柱肢管内混凝土截面惯性矩,

d_c 为柱肢纵向间距, A_s 为单根柱肢钢管截面面积, A_c 为单根柱肢管内混凝土截面面积, l_c 为钢管混凝土格构柱的长度。

由于钢管混凝土格构柱采用平缀管作为柱肢的连结构件,使得在计算此类构件的抗弯刚度时需要考虑剪切变形的影响。为此,本文采用叶智威^[15]提出的考虑剪切变形的平缀管式钢管混凝土格构柱的弯曲刚度 $\zeta(EI)_{cfstn}$,并考虑柱端约束条件的计算长度 L ,得到平缀管式钢管混凝土格构柱弹性阶段刚度计算公式为:

$$K_a = \frac{3\zeta(EI)_{cfstn}}{L^3} \quad (9)$$

式中,剪切修正系数 $\zeta = (-1 + \sqrt{1 + 4\pi^2 \mu}) / 2\pi^2 \mu$,平

缀管式钢管混凝土格构柱的剪切系数 $\mu = \frac{(EI)_{cfstn}}{L^2} \cdot$

$$\left\{ \frac{d_c d_z}{6(EI)_{zg}} + \frac{2d_z \eta_z}{d_c (GA)_{zg}} + \frac{d_z^2}{6(EI)_{cfst1}} + \frac{\eta_c}{2(GA)_{zg}} \right\}, \eta$$

为截面剪力不均匀系数,实心圆为 1.11,薄壁管为 2, $(EI)_{zg} = E_z I_z$ 为单根缀管截面抗弯刚度, $(EI)_{cfst1} = E_s I_s + E_c I_c$ 为单根柱肢截面抗弯刚度, $(GA)_{zg} = G_z A_z$ 为单根缀管截面剪切刚度, $(GA)_{zg} = G_s A_s + G_c A_c$ 为单根柱肢截面剪切刚度, E_z 为缀管钢材弹性模量, I_z 为单根缀管截面惯性矩, G_z 为缀管钢材剪切模量, A_z 为单根缀管截面面积, G_s 为柱肢钢材剪切模量, G_c 为管内混凝土剪切模量。

2.3 峰值荷载 P_m

通过观察拟静力试验中试件的破坏形态、分析有限元分析中柱肢的应力状态,本文认为平缀管式钢管混凝土格构柱的破坏机制是由于塑性铰的产生导致结构的超静定次数减少最终成为崩塌机构,其破坏机构示于图 6。在此,采用虚位移原理,推导得到图 6 所示的水平峰值荷载 P_m 为:

$$P_m = \frac{\sum M_{pc} + \sum M_{pz}}{l_c} \quad (10)$$

式中, M_{pc} 为轴力 N 作用下钢管混凝土柱肢截面的极限弯矩; M_{pz} 为缀管截面的极限弯矩; l_c 为钢管混凝土格构柱的长度。

对于压弯构件的钢管混凝土柱肢,轴力与弯矩的关系曲线可近似表达为^[4] $N/N_{cu} + M_{pc}/M_{cu} = 1$,对该式进行整理,可以得到钢管混凝土柱肢截面极限弯矩 M_{pc} 计算公式为:

$$M_{pc} = \left(1 - \frac{N}{N_{cu}}\right) M_{cu} \quad (11)$$

式中: N 为柱顶竖向力; N_{cu} 为考虑长细比影响的钢管混凝土柱肢截面的轴压承载力; M_{cu} 为钢管混凝土柱肢截面的抗弯承载力。

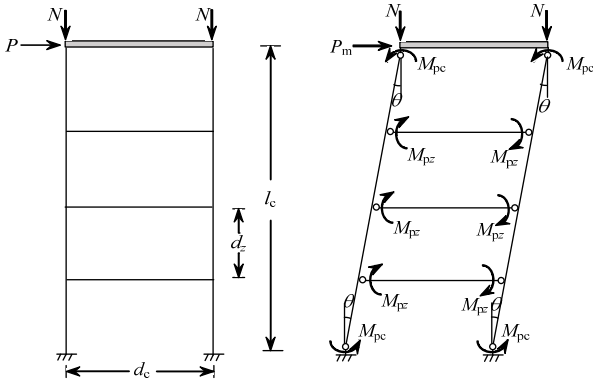


图6 平缀管式钢管混凝土格构柱塑性破坏机构示意图
Fig.6 Plastic collapsing mechanism of uniform sectional CFST lattice column with flat lacing tube

参照《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923-2013)^[13]和《钢管混凝土结构技术规程》(CECS 28-2012)^[16], 式(11)各参数的计算公式为:

$$N = nN_{cy} = n(f_s A_s + f_s A_c E_c / E_s) \quad (12)$$

$$N_{cu} = \varphi N_{c0} = \varphi \cdot 0.9 f_c A_c (1 + \sqrt{\xi_0} + \xi_0) \quad (13)$$

$$M_{cu} = \gamma_c W_{sc} N_{c0} / A_{sc} \quad (14)$$

式中: n 为轴压比; N_{cy} 为柱肢钢管屈服时的轴力; N_{c0} 为柱肢截面轴心受压承载力; f_s 为柱肢钢材屈服强度; f_c 为混凝土轴心抗压强度; $\xi_0 = A_s f_s / A_c f_c$ 为钢管混凝土的约束效应系数; $W_{sc} = \pi D^3 / 32$ 为钢管混凝土格构柱组合截面的截面系数; γ_c 为钢管混凝土柱肢截面塑性发展系数, $\gamma_c = 1.1 + 0.48 \ln(\xi_0 + 0.1)$; φ 为钢管混凝土格构柱的稳定系数, 按式(15)~式(19)计算^[13]。

$$\varphi = \begin{cases} 0.658 \lambda_n^2, & \lambda_n \leq 1.5 \\ 0.877 / \lambda_n^2, & \lambda_n > 1.5 \end{cases} \quad (15)$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda^*}{\pi} \sqrt{\frac{f_{sy} A_s + f_{ck} A_c + A_c \sqrt{\rho_c f_{sy} f_{ck}}}{E_s A_s + E_c A_c}} \quad (16)$$

$$\lambda^* = K' \lambda \quad (17)$$

$$K' = \begin{cases} 1.1K, & K\lambda \leq 40 \\ K\sqrt{1 + 300 / (K\lambda)^2}, & K\lambda > 40 \end{cases} \quad (18)$$

$$K = \sqrt{1 + \mu} \quad (19)$$

式中: $\rho_c = A_s / A_c$ 为钢管混凝土截面含钢率; λ^* 为钢管混凝土格构柱的换算长细比; λ 为按式(1)计算

的名义长细比; K 为换算长细比系数; K' 为换算长细比修正系数; μ 为格构柱的剪切系数, 当 $\mu > 0.5$ 时, 将 μ 按 0.5 计算。

对于平缀管式钢管混凝土格构柱, 水平缀管的轴力非常小, 主要承受弯矩和剪力, 因此, 仿照式(14)得到空心钢缀管截面极限弯矩 M_{pz} 计算公式:

$$M_{pz} = M_{pu} = \gamma_z W_z f_s \quad (20)$$

式中: $W_z = 2I_z / D_z$ 为单根缀管的截面系数, I_z 为单根缀管截面惯性矩, D_z 为单根缀管外径; γ_z 为单根缀管截面塑性发展系数, 取 1.15^[14]。

2.4 峰值位移 δ_m

借鉴文献[4]钢管混凝土单肢柱峰值位移计算公式的表达形式, 平缀管式钢管混凝土格构柱峰值位移 δ_m 的计算公式为:

$$\delta_m = \mu_m \delta_{ya} = \mu_m P_m / K_a \quad (21)$$

式中: μ_m 为峰值位移延性系数; δ_{ya} 为按图 7 所示方法确定的屈服位移; P_m 为按式(10)计算的峰值荷载, 主要考虑了轴压比和钢材屈服强度的影响; K_a 为按式(9)计算的弹性阶段刚度。

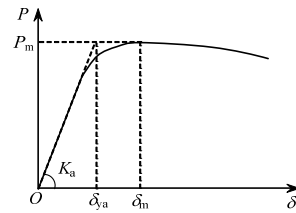


图7 屈服位移 δ_{ya} 的确定

Fig.7 Definition of yield displacement δ_{ya}

通过 1.3 节可知, 平缀管式钢管混凝土格构柱的峰值位移延性系数 μ_m 受轴压比、长细比和缀管疏密系数等多个参数的影响, 若希望像钢管混凝土单肢柱一样通过数据拟合得到单参数回归公式^[4]十分困难。然而, 如图 8 所示, 对有限元参数分析中得到的峰值位移延性系数 μ_m 进行数据统计, 发现有限元分析得到的峰值位移延性系数 μ_m 的数值基本落在 1.7~2.2 的区间之内, 平均值为 1.95。

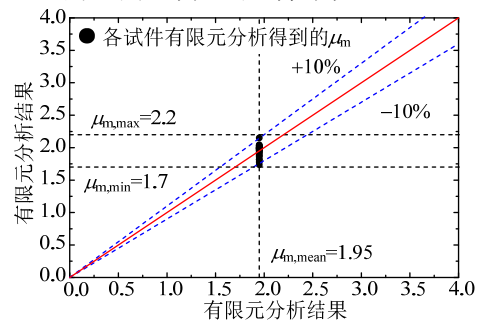


图8 峰值位移延性系数 μ_m 统计数据

Fig.8 Statistics of peak displacement ductility coefficient μ_m

因此,在实际应用中,当平缀管式钢管混凝土格构柱满足 $5.0 \leq \lambda \leq 19.9$, $0.1 \leq n \leq 0.5$, $0.3 \leq c_2 \leq 1.0$ 时,峰值位移延性系数可取统计数据的平均值 $\mu_{m,mean} = 1.95$ 进行计算;若趋于保守设计,可取统计数据的最小值 $\mu_{m,min} = 1.7$ 进行计算,即:

$$\mu_m = \begin{cases} 1.95 & \text{平均值} \\ 1.70 & \text{最小值} \end{cases} \quad (22)$$

2.5 极限位移 δ_u

对于平缀管式钢管混凝土格构柱的极限位移 δ_u ,同样可以采用极限位移延性系数 μ_u 来表示:

$$\delta_u = \mu_u \delta_{ya} = \mu_u P_m / K_a \quad (23)$$

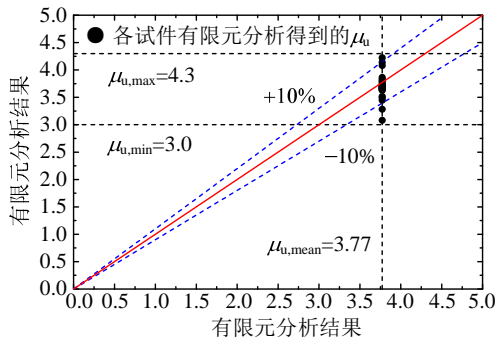


图9 极限位移延性系数 μ_u 统计数据

Fig.9 Statistics of ultimate ductility coefficient μ_u

如图9所示,对有限元法得到的极限位移延性系数 μ_u 进行统计分析,发现除个别数据外,极限位移延性系数 μ_u 的数值基本落在 3.0~4.3 的区间之内,平均值为 3.77。

因此,与峰值位移延性系数一样,在实际应用中平缀管式钢管混凝土格构柱的极限位移延性系数可根据工程需要取平均值或最小值,即:

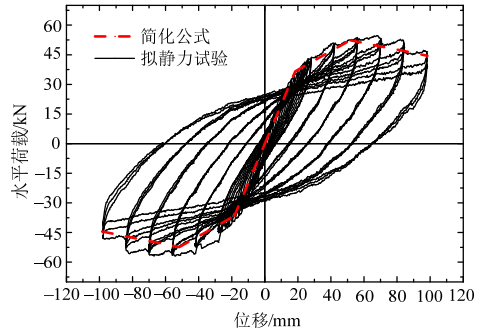
$$\mu_u = \begin{cases} 3.77 & \text{平均值} \\ 3.00 & \text{最小值} \end{cases} \quad (24)$$

3 骨架曲线计算公式的精度验证

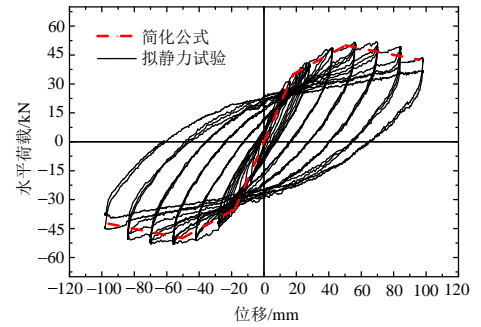
3.1 与拟静力试验结果的比较

为验证本文提出的平缀管式钢管混凝土格构柱骨架曲线简化模型的准确性和适用性,运用上述简化计算公式对文献[9]的7根平缀管式钢管混凝土格构柱拟静力试验试件的骨架曲线进行模拟,将试验得到的滞回曲线和简化算法得到的结果绘于图10。

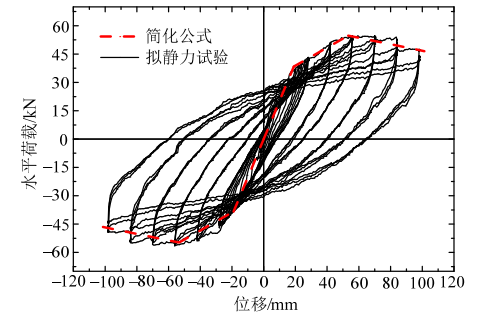
可以看出,本文简化计算方法得到的骨架曲线与拟静力试验结果的总体趋势相似,其曲线的形状、斜率、峰值点基本一致,从而说明三折线简化模型可以有效地模拟平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的骨架曲线。



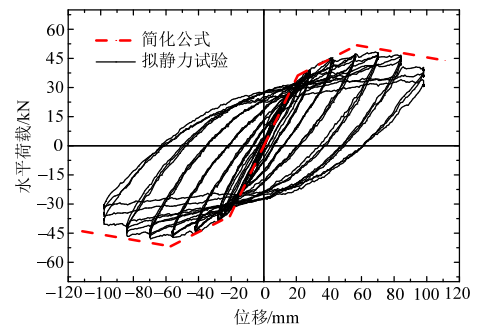
(a) S1-C50-L50-V25



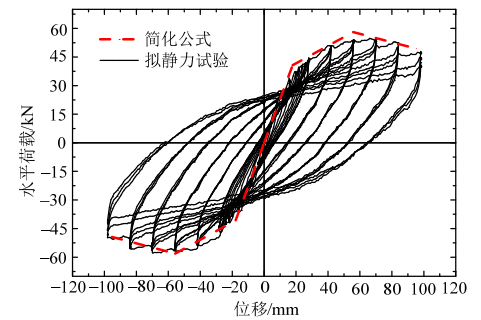
(b) S2-C40-L50-V25



(c) S3-C60-L50-V25



(d) S4-C50-L25-V25



(e) S5-C50-L65-V25

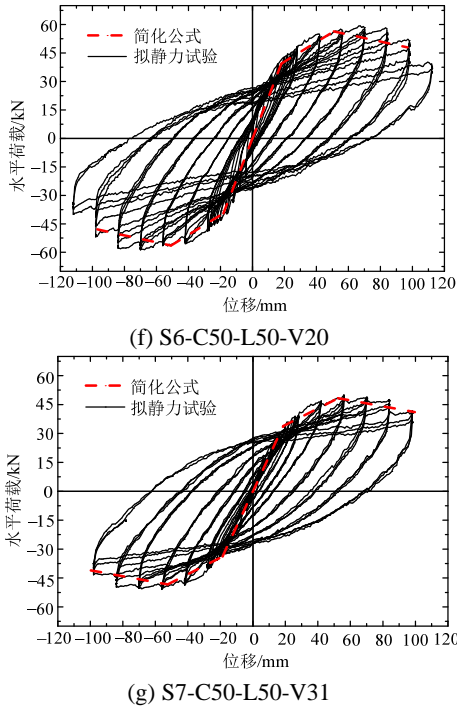


图 10 骨架曲线计算结果与拟静力试验结果的比较
Fig.10 Comparison of skeleton curve obtained by simplified models and quasi-static test results

3.2 与有限元参数分析结果的比较

本文提出的骨架曲线三折线简化模型中，峰值位移 δ_m 和极限位移 δ_u 是通过有限元参数分析得到的相关结果进行统计后得到的统计计算公式，不能再次与有限元参数分析得到的骨架曲线进行比较。本文提出的弹性阶段刚度 K_a 与峰值荷载 P_m 的计算公式均通过理论推导得到，因此，本小节可采用有限元参数分析的相关结果对这两个骨架曲线特征值的简化计算公式进行精度验证。

为验证考虑柱肢与缀管剪切变形的弹性阶段刚度 K_a 计算公式(9)的正确性，将公式计算结果与有限元分析结果进行对比。如图 11 所示，考虑剪切变形的弹性阶段刚度计算公式的结果与有限元结果吻合良好，相对误差平均值为-4.46%，标准差为 0.090，离散系数为 0.094。

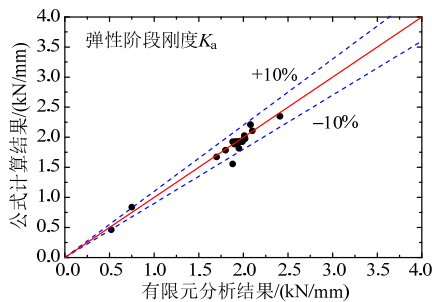


图 11 弹性阶段刚度计算值与有限元值的比较
Fig.11 Comparison of elastic stage stiffness obtained by simplified formula and FEM analysis

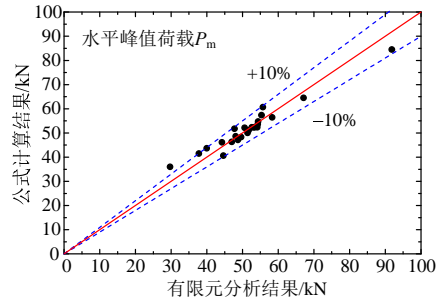


图 12 水平峰值荷载计算值与有限元值的比较
Fig.12 Comparison of horizontal peak load obtained by simplified formula and FEM analysis

为验证基于塑性铰破坏并考虑轴力-弯矩相关曲线的水平峰值荷载 P_m 计算公式(10)的正确性，将公式计算结果与有限元分析结果进行对比。如图 12 所示，峰值荷载计算公式与有限元结果吻合良好，相对误差平均值为 1.07%，标准差为 0.066，离散系数为 0.065。

3.3 与扩大参数分析结果的比较

由于 2.4 节与 2.5 节的峰值位移 δ_m 、极限位移 δ_u 的计算方法是通过有限元参数分析的结果进行数据统计分析得到的，故不能如 3.2 节那样直接采用第 1 节有限元参数分析的结果进行精度验证。因此，本节进行实际结构尺寸的扩大参数有限元分析。

参照干海子大桥^[17-18]第 2 联 26#~29#格构墩所采用的几何尺寸和材料强度，确定了表 2 所示的 F1~F4 试件，即：试件 F1~F4 的墩高分别为 66 m、54 m、42 m、32 m，墩底柱肢纵向间距分别为 4.15 m、3.33 m、2.85 m、2.44 m；除了试件 F1 的柱肢钢管壁厚 $t=16$ mm 外，其余试件的柱肢均采用直径 $\Phi=720$ mm、壁厚 $t=12$ mm 的 Q345 钢管；柱肢管内填充 C50 混凝土；柱肢间的缀管采用直径 $\Phi=406$ mm、壁厚 $t=10$ mm 的 Q345 钢管，缀管竖向间距为 2 m。另外，通过对干海子大桥的桥墩轴压比进行统计确定了实际桥墩恒载作用下的轴压比为 0.15。

表 2 有限元验证分析中的试件参数 /mm
Table 2 Parameters of specimens for FEM analysis

试件编号	轴压比	钢材种类	混凝土强度等级	柱肢长度	柱肢间距	缀管间距	柱肢外径	柱肢厚度	缀管外径	缀管厚度
F1	0.15	Q345	C50	66000	4150	2000	720	16	406	10
F2	0.15	Q345	C50	54000	3330	2000	720	12	406	10
F3	0.15	Q345	C50	42000	2850	2000	720	12	406	10
F4	0.15	Q345	C50	32000	2440	2000	720	12	406	10

根据表 2 所示参数，通过有限元分析计算得到试件 F1~F4 的荷载-位移滞回曲线；同时，运用前

述简化计算公式得到各试件的三折线骨架曲线。图 13 和表 3 分别表示了骨架曲线和骨架曲线特征值控制参数。由于格构柱的屈服荷载和极限荷载均可由峰值荷载通过式(6)和式(7)得到,使得在表 3 没有列出这两个参数。

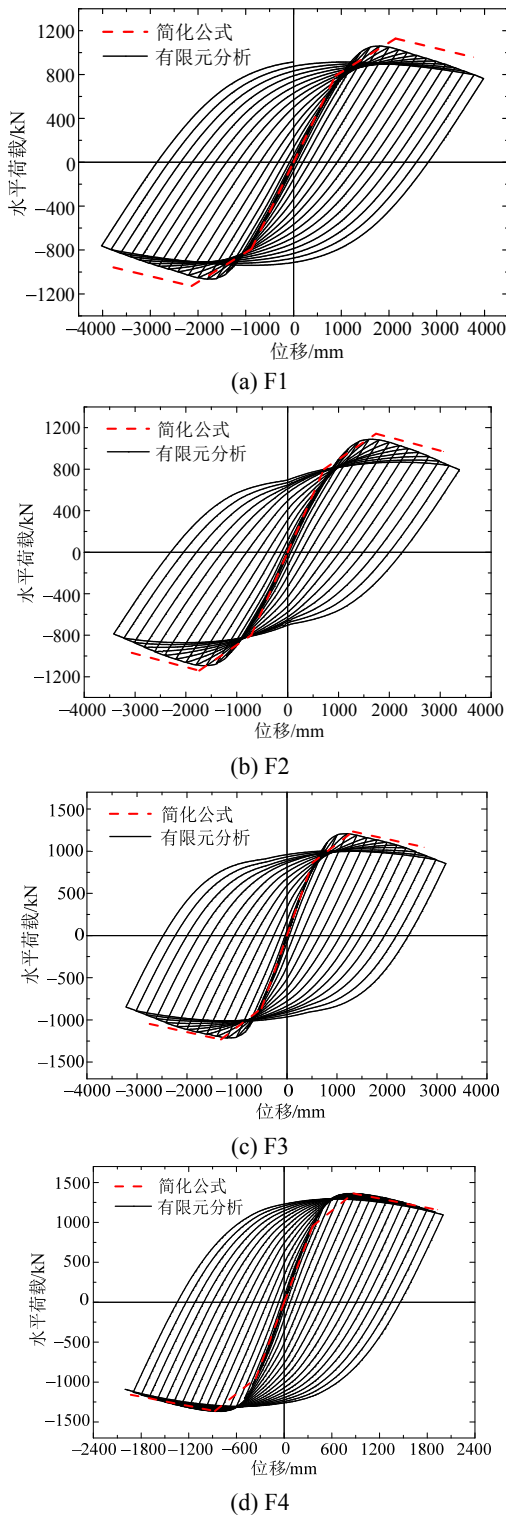


图 13 骨架曲线计算结果与有限元结果的比较

Fig.13 Comparison of skeleton curve obtained by simplified formula and FEM analysis

从图 13 可知,当将本文提出的简化计算方法应用于实际工程尺寸的结构时,根据该方法得到的骨架曲线与采用有限元纤维模型得到的滞回曲线总体趋势相似,其骨架曲线的形状、斜率及峰值点基本一致。从表 3 可以看出,各试件的弹性阶段刚度与峰值荷载的简化公式计算值与有限元分析结果的误差均不超过 6%,再一次说明本文提出的简化计算公式(9)和式(10)能够精确地计算出平缀管式钢管混凝土格构柱的弹性阶段刚度与峰值荷载。

表 3 骨架曲线特征值控制参数的有限元值与计算值

Table 3 Characteristic values of skeleton curve obtained by FEM analysis and simplified formula

		试件编号	F1	F2	F3	F4
弹性阶段刚度 $K_a/(kN/mm)$	有限元值	0.889	1.093	1.767	2.770	
	简化算法	0.898	1.117	1.694	2.663	
	误差/(%)	1.0	2.2	-4.2	-3.9	
峰值荷载 P_m/kN	有限元值	1064.7	1095.3	1214.8	1367.4	
	简化算法	1128.3	1141.0	1232.9	1363.2	
	误差/(%)	6.0	4.2	1.5	-0.3	
峰值位移 δ_m/mm	有限元值	1820.0	1620.0	1220.0	790.0	
	简化算法	2136.3	1737.0	1237.4	870.3	
	误差/(%)	17.4	7.2	1.4	10.2	
极限位移 Δ_u/mm	有限元值	3111.9	2767.9	2434.6	1795.4	
	简化算法	3770.0	3065.3	2744.2	1929.9	
	误差/(%)	21.1	10.7	12.7	7.5	

对于能够反映试件延性的峰值位移和极限位移来说,除了试件 F1(换算长细比 $\lambda^*=33.7$)的极限位移计算值与有限元分析结果的误差达到 21.1%以外,大部分位移数据的误差不超过 15%,说明采用位移延性系数计算公式(22)和式(24)能比较准确地评估实际尺寸结构的延性。

综上所述,三折线简化模型可以有效地模拟平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的骨架曲线,本文提出的相关骨架曲线特征值简化计算公式的精度能满足实际工程应用的要求。

4 结论

(1) 基于经拟静力试验验证的纤维单元杆系有限元模型,对影响平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的水平荷载-位移骨架曲线的主要参数进行的分析表明:长细比与缀管疏密系数是影响此类结构刚度的主要因素;轴压比、长细比、缀管疏密系数、材料强度等因素对结构的强度影响显著;影响结构延性的主要因素是长细比、轴压比和缀管疏密系数。

(2) 采用三折线简化模型模拟水平荷载-位移骨架曲线,通过理论推导或数据统计分析得到了平缀

管式等截面钢管混凝土格构柱相关骨架曲线控制参数的简化计算公式,包括:考虑柱肢与缀管剪切变形的弹性阶段刚度的计算公式;基于塑性铰破坏并考虑轴力-弯矩相关曲线的水平峰值荷载的计算公式;基于数据统计分析并考虑实际工程需要的位移延性系数的峰值位移与极限位移的简化计算公式。

(3) 与拟静力试验、有限元参数分析以及模拟实际结构尺寸的扩大参数分析的结果进行的比较表明,三折线简化模型可以有效地模拟平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的水平荷载-位移骨架曲线,相关骨架曲线特征值简化计算公式的精度能满足实际工程应用的要求。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 牟延敏, 陈宜言, 黄冀卓. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊 1): 1—10.
Chen Baochun, Mu Tingmin, Chen Yiyang, Huang Jizhuo. State-of-the-art of research and engineering application of steel-concrete composite bridges in China [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Suppl 1): 1—10. (in Chinese)
- [2] 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, 2003: 73—77.
Zhong Shantong. Research and applications of unified theory of concrete filled steel tube [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 73—77. (in Chinese)
- [3] 金雪峰, 张学文, 蔡健. 方形钢管混凝土轴压柱局部屈曲性能的研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 30(7): 885—887.
Jin Xuefeng, Zhang Xuwen, Cai Jian. Analysis of the local buckling of the steel plates in thin-walled concrete-filled steel box columns [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2007, 30(7): 885—887. (in Chinese)
- [4] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 500—507.
Han Linhai. Theory and practice of concrete filled steel tube [M]. Beijing: Science Press, 2007: 500—507. (in Chinese)
- [5] 赵忠虎, 张国庆. 压弯构件恢复力模型骨架曲线的研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(9): 73—76.
Zhao Zhonghu, Zhang Guoqing. Study of restoring force model skeleton curve of press-bending component [J]. Industrial Construction, 2007, 37(9): 73—76. (in Chinese)
- [6] 徐超, 张耀春, 卢孝哲. 方形设肋薄壁钢管混凝土柱的恢复力模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(4): 514—520.
Xu Chao, Zhang Yaochun, Lu Xiaozhe. Restoring force model of square concrete-filled thin-walled steel tubular column with ribs [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(4): 514—520. (in Chinese)
- [7] 卢德辉, 王宏伟, 周云. 基于 OpenSees 的空心钢管混凝土柱恢复力计算公式研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(5): 626—631.
Lu Dehui, Wang Hongwei, Zhou Yun. Research on resilience formula of hollow concrete-filled steel tube based on OpenSees [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(5): 626—631. (in Chinese)
- [8] 罗瑶. 四肢钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D]. 湖南: 中南大学, 2013.
Luo Yao. Studies on the seismic performance of four-tube concrete filled steel tubular laced columns [D]. Hunan: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [9] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 吕银花. 平缀管式等截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验与有限元分析[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 226—235.
Yuan Huihui, Wu Qingxiong, Chen Baochun, Lü Yinhua. Seismic performance test and finite element analysis of concrete-filled steel tubular laced columns [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 226—235. (in Chinese)
- [10] Menegotto M, Pinto P E. Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]. Proceedings IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structural Acted on by Well-Defined Repeated Loads, Lisbon, 1973: 15—22.
- [11] Susantha K A S, Ge H, Usami T. Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes [J]. Engineering Structures, 2001, 23(10): 1331—1347.
- [12] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 1804—1826.
- [13] GB 50923-2013, 钢管混凝土拱桥技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
GB 50923-2013, Technical code for concrete-filled steel tube arch bridges [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [14] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
GB 50017-2003, Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [15] 叶智威. 钢管混凝土单圆管标准拱桥面外稳定性研究[D]. 福州: 福州大学, 2012.
Ye Zhiwei. Research on the lateral stability of standard concrete-filled steel tubular arch bridges with single pipe ribs [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2012. (in Chinese)
- [16] CECS 28-2012, 钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
CECS 28-2012, Technical specification for concrete-filled steel tubular structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [17] 吴庆雄, 黄育凡, 陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 89—96.
Wu Qingxiong, Huang Yufan, Chen Baochun. Shaking tables testing study of lightweight bridge with CFST composite truss girder and lattice pier [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9): 89—96. (in Chinese)
- [18] 吴庆雄, 黄育凡, 陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁非线性地震响应分析[J]. 工程力学, 2015, 32(12): 90—98.
Wu Qingxiong, Huang Yufan, Chen Baochun. Nonlinear seismic performance of lightweight bridge with CFST composite truss girder and lattice pier [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(12): 90—98. (in Chinese)