

文章编号: 1000-4750(2008)04-0121-07

钢管混凝土哑铃形轴压长柱极限承载力研究

*陈宝春¹, 盛叶²

(1. 福州大学土木工程学院, 福建, 福州 350002; 2. 福建农林大学交通学院, 福建, 福州 350002)

摘 要: 共进行了 10 根不同长细比的钢管混凝土哑铃形轴压长柱(5 根强轴向破坏, 5 根弱轴向破坏)的试验研究。对于沿强轴方向失稳破坏的试件, 通过在弱轴方向焊接波形钢板以加大其抗弯刚度来实现, 试验结果表明这一方法是可行的。与单圆管轴压长柱相似, 哑铃形轴压长柱试件的极限承载力和弹塑性阶段切向刚度均随着试件长细比的增加而减小。但相同长细比情况下, 与单圆管长柱弹性失稳破坏不同, 哑铃形长柱属弹塑性失稳破坏。提出了哑铃形轴压长柱的非线性有限元计算方法, 并进行了长细比对极限承载力影响的参数分析。研究结果表明: 哑铃形轴压长柱的稳定系数与单圆管的不同, 但沿强轴、弱轴向失稳的极限承载力随长细比变化而变化的规律基本一致, 提出了将二者统一的稳定系数简化计算公式。

关键词: 钢管混凝土; 哑铃形; 轴压; 长柱; 极限承载力; 有限元

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A

RESEARCH ON LOAD-CARRYING CAPACITY OF CONCRETE-FILLED-STEEL TUBULAR DUMBBELL-SHAPED LONG COLUMNS UNDER AXIAL LOADS

*CHEN Bao-chun¹, SHENG Ye²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2. College of Transportation, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Experiments of 10 concrete-filled-steel tubular (CFST) dumbbell-shaped Long columns with various slenderness ratio subjected to axial load were carried out, in which 5 specimen were failed in the strong-stress-axis direction; another 5 were failed in the weak-stress-axis direction. It is proved by the test that the failure of dumbbell shaped specimen in strong-stress-axis direction can be realized by welding corrugated steel webs in its weak-stress-axis direction to increase flexible rigidity in this direction. Similar with the long columns of single tube section, the load-carrying capacity and the elastic-plastic tangential stiffness of CFST dumbbell-shaped long columns decrease with the increasing of slenderness ratio. But elastic-plastic instability occurred on dumbbell-shaped long columns instead of the elastic instability in one of single tube section with same slenderness ratio. A nonlinear finite element method is provided for dumbbell-shaped long column, and the influence of slenderness ratio on its load-carrying capacity is analyzed by parametric studies. It is shown that the stability coefficient of dumbbell-shaped long CFST columns is different from that of long CFST columns of single tube section. However, the rules of load-carrying capacity in the weak-stress-axis and strong-stress-axis directions for dumbbell-shaped long CFST column, varying with the slenderness ratio, are similar. A simplified formula to calculate the stability coefficient is presented by unifying the rule in two directions.

收稿日期: 2006-09-11; 修改日期: 2007-06-15

基金项目: 福建省基础性研究计划重大项目(2003F007)

作者简介: *陈宝春(1958), 男, 福建罗源人, 教授, 博士, 博导, 从事桥梁与结构工程研究(E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn);

盛叶(1978), 女, 湖北潜江人, 讲师, 博士, 从事桥梁与结构工程研究(E-mail: shengye@fzu.edu.cn).

Key words: concrete-filled-steel tube; dumbbell shape; axial load; long column; load-carrying capacity; finite element

由于钢管混凝土哑铃形截面与单圆管截面相比,具有截面抗弯刚度大的特点;与桁式拱肋相比,构造简单,造型简洁,在跨径 100m 附近的钢管混凝土拱桥中得到了广泛应用^[1-2]。文献[3-4]对钢管混凝土哑铃形轴压和偏压短柱进行的试验研究表明,它与单圆管和桁式截面相比,受力性能与极限承载力均有其自身的特点。在试验研究的基础上,文献[3-5]分别提出了钢管混凝土哑铃形轴压短柱极限承载力的简单迭代法、偏压短柱极限承载力的修正格构式算法和等效单圆管法。此外,文献[6]对哑铃形梁进行了试验研究,文献[7]对哑铃形截面灌注管内混凝土时的截面应力进行了分析。

应用于拱肋中的钢管混凝土哑铃形构件长细比均较大,然而,迄今尚未见有关钢管混凝土哑铃形长柱的研究。为此,在上述研究的基础上,开展了钢管混凝土哑铃形轴压长柱分别沿弱轴方向破坏和沿强轴方向破坏的试验。对哑铃形轴压长柱进行了以长细比为参数的有限元分析。试验结果和有限元分析结果均表明,相同长细比变化下,哑铃形轴压长柱的稳定性优于单圆管轴压长柱,提出了哑铃形轴压长柱的稳定系数计算公式。

1 试验简介

1.1 试件设计与制作

共设计制作了 2 组试件,其中 A 组为沿弱轴向破坏的试件,C 组为沿强轴向破坏的试件。与单圆管截面各向刚度相同不一样,哑铃形截面强轴方向的刚度是弱轴方向刚度的好几倍。弱轴向基本上是两根单圆管受力,而强轴向抗弯惯性矩比较大,受力也比单圆管要复杂。在没有外部加劲的情况下,钢管混凝土哑铃形轴压长柱均为沿弱轴方向的失稳破坏。

为了使其能沿着强轴方向破坏,本文提出了在哑铃形长柱的弱轴方向设置波形钢板加劲的试验方法。波形钢板的纵向刚度非常小(轴向有效弹性模量是原弹性模量的几分之一),基本上不承受轴向压应力^[8]。在哑铃形轴压长柱的弱轴方向用波形钢板加劲,目的是在不提高其轴压承载力的同时提高哑铃形长柱的弱轴向抗弯刚度。因此,本文的试件中 A 组沿弱轴向破坏的试件是无波形钢板的试件,

C 组为沿强轴向破坏的试件是有波形钢板的试件。

两组试件的截面尺寸均与文献[3-4]钢管混凝土哑铃形短柱的基本构件相同,见图 1,由两根 $\phi 108\text{mm}\times 4\text{mm}$ 的无缝钢管和 4mm 厚的钢腹板焊接而成,试件两端焊有两个厚 10mm、长宽为 $320\text{mm}\times 180\text{mm}$ 的矩形钢板。

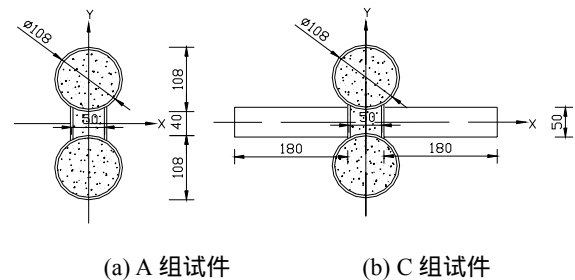


图 1 试件断面 /mm

Fig.1 Specimen cross section

波形钢板的两波峰间距为 180mm,波峰至波谷的垂直间距为 40mm,厚为 4mm,其示意图如图 2 所示,为使构件在纵向压缩变形时波形钢板与压力机底板不接触,其纵向长度稍短于试件长度,波形板两端设置有 4mm 厚的加劲板以防止其过早屈曲。

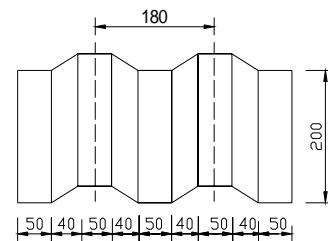


图 2 波形钢板 /mm

Fig.2 Corrugated sheet steel

钢管和腹腔内均灌注 C50 混凝土,钢管采用 Q345 钢,材性试验测得钢材屈服强度 $f_y=321.6\text{MPa}$,抗拉强度 $f_u=469\text{MPa}$,钢材弹性模量 $E_s=2.01\times 10^5\text{MPa}$,混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}=49.9\text{MPa}$,轴心标准抗压强度 $f_{ck}=33.4\text{MPa}$,混凝土弹性模量 $E_c=3.45\times 10^4\text{MPa}$ 。

对于 A 组试件,断面强轴、弱轴方向的抗弯刚度 I_x^A 、 I_y^A 分别为 $1.39\times 10^{-4}\text{m}^4$ 和 $0.14\times 10^{-4}\text{m}^4$, $I_x^A/I_y^A=9.93$ 。x 轴(强轴)方向的抗弯刚度大于 y 轴(弱轴)方向的抗弯刚度。轴压长柱试件将沿着弱轴(y 轴)方向失稳破坏。

对于 C 组试件, 设置了波形钢板后, x 轴、 y 轴方向的抗弯刚度 I_x^B 、抗弯刚度 I_y^B 分别为 $1.41 \times 10^{-4} \text{m}^4$ 和 $3.17 \times 10^{-4} \text{m}^4$, $I_x^B / I_y^B = 1 / 2.25$, 使 x 轴向(未设置波形钢板前截面的强轴方向)的抗弯刚度反而小于 y 轴向的抗弯刚度。这就使得长柱试件的破坏能沿着强轴方向(x 轴)失稳破坏。

试件设计以长细比 $\lambda = L/i$ 为参数变化, 其中 L 为试件设计长度, 分别为 400mm、800mm、1600mm、2400mm、3200mm, i 为截面回转半径, A 组试件沿弱轴向失稳, 弱轴向等效回转半径 $i = \sqrt{I_y/A} = 26\text{mm}$, C 组试件由于弱轴方向设置了波形钢板, 轴向力作用下沿强轴向失稳, 强轴向等效回转半径 $i = \sqrt{I_x/A} = 74.3\text{mm}$ 。

各试件详细资料如表 1 所示, 其中 A0-0、C0-0、C1-0 属于短柱。其作用有两个: 一是为考察长柱的稳定系数提供对比; 二是为了比较波形钢板对构件轴压强度的影响(因为短柱时不存在强轴方向破坏或弱轴方向破坏的问题)。

表 1 试件资料一览表

Table 1 Information of specimens

试件编号	L/mm	λ	波形钢腹板
A0-0	400	5.4	—
A1-0	800	30.4	—
A2-0	1600	60.8	—
A3-0	2400	91.2	—
A4-0	3200	121.6	—
C0-0	400	5.4	有
C1-0	800	10.8	有
C2-0	1600	21.5	有
C3-0	2400	32.3	有
C4-0	3200	43.1	有

1.2 试验装置

试验在福州大学结构工程试验中心的 500t 压力机上进行。试件在中截面与四分点截面处均布设有纵向及环向的应变片, 上下端板处各设置 1 个百分表测试竖向位移。弱轴向失稳试验在弱轴向各四分点处设置 1 个位移计测试 $L/4$ 、 $L/2$ 和 $3L/4$ 处的水平挠度, 中截面处由于有波形钢板加劲, 无法设置百分表, 在哑铃形的两圆管外侧分别设置 1 个量程为 30 的百分表测试长柱弱轴向挠度。强轴向失稳试验在中截面强轴向设置 1 个量程为 50 的百分表测试强轴向挠度, 试验装置如图 3 所示。

试验采用分级加载, 每级荷载持荷时间约为

3min, 弹性范围内每级为预计极限荷载的 1/10, 在钢管屈服后为 1/20。当接近破坏时慢速连续加载, 并连续记录变形值, 直至试件最终破坏。数据采用自动采集系统进行采集。



(a) A 组试件 (b) C 组试件

图 3 试验加载装置

Fig.3 Testing set-ups

2 波形钢板对哑铃形轴压强度的影响分析

波形钢板焊在 C 组试件上的目的是增大弱轴向的抗弯刚度, 使试件能够沿强轴向破坏, 但它不应影响轴压短柱的强度。为此, 对无波形板的 A0-0 和有波形钢板的 C0-0、C1-0 的轴压短柱试验结果进行比较(A0-0、C0-0 试件长细比 λ 为 5.4, C1-0 长细比 λ 为 10.8, 均小于 16, 在短柱范围之内)。

从图 4 三个试件的荷载-竖向变形曲线可以看出, A0-0 与 C0-0、C1-0 的极限承载力基本相等, 荷载-竖向变形曲线也十分相似, 波形钢板的设置对哑铃形轴压短柱的极限承载能力基本没有影响, 试件属于强度破坏(见图 5)。

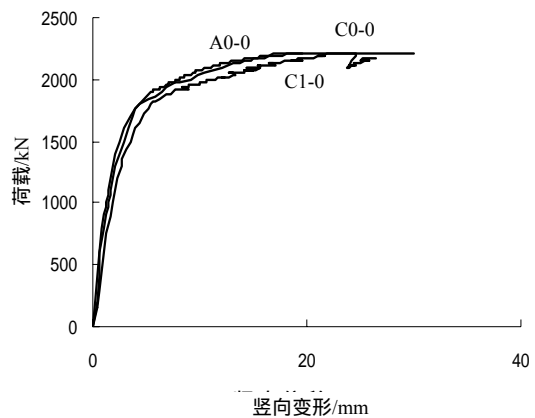


图 4 短柱试件荷载-竖向变形曲线

Fig.4 Load-vertical deformation curves of stubs specimen



图5 轴压短柱试件 A1、试件 C1 试验照片

Fig.5 Test photo of stub specimens under axial load

3 轴压长柱试验结果与分析

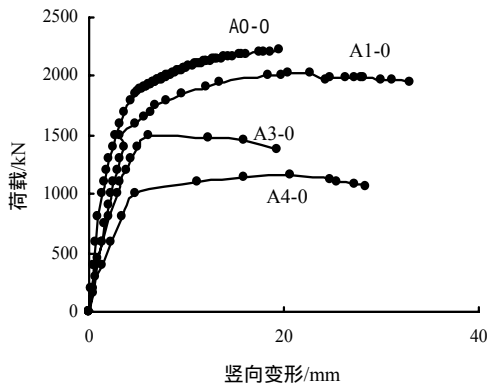
3.1 试件破坏形态

轴压长柱的试验表明，试件的弹塑性和延性都很好，在变形很大的情况下仍然能够承受一定的荷载。A 组长柱试件呈弱轴向压弯破坏，试件弱轴向挠度较大。C 组长柱试件呈强轴向压弯破坏，波形钢板的设置有效抑制了哑铃形长柱向弱轴向失稳破坏。波形钢板的折叠效应使其整体上自由地随试件的整体变形而变形，仅部分试件由于局部变形(主要靠近端部)波形钢板中部会出现局部屈曲。

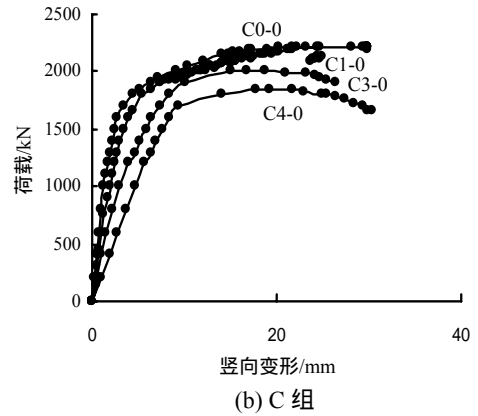
3.2 荷载-竖向变形曲线

图 6(a)、图 6(b)为两组试件在不同长细比下的荷载-竖向变形曲线。从图 6 可见，随着长细比的增大，试件弹塑性阶段的切向刚度减小，弹性段缩短，极限承载力显著降低。4.2 节的有限元分析进一步验证了这个规律。

两组试件的极限荷载和长细比的关系曲线见图 7。由图 7 可以看出，两组试件的长细比相同时，其极限荷载基本相同，随长细比变化规律基本一致。需要指出的是 C 组试件发生强轴向失稳，而强轴向刚度是弱轴向刚度的 2.82 倍，相同的长(高)度情况下，其长细比要远小于 A 组试件，极限承载力要远大于 A 组试件。



(a) A 组



(b) C 组

图6 荷载-竖向变形试验曲线

Fig.6 Tested load-vertical deformation curves

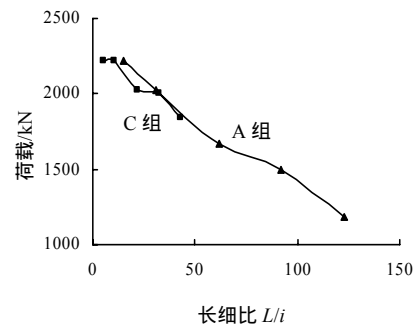
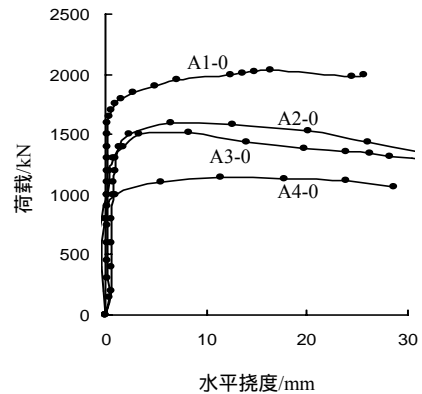


图7 极限荷载和长细比的关系曲线

Fig.7 Relation curves of ultimate load and slenderness ratio

3.3 荷载-水平挠度曲线

图 8 给出了两组试件的荷载-中截面水平挠度曲线。从图 8 中可以看出，哑铃形长柱试件和单圆管长柱试件的水平挠度曲线随长细比变化规律基本一致，随着长细比的增加，构件进入弹塑性阶段对应的相应荷载减小。A 组试件水平挠度的增长速度比 C 组试件快，且下降段也比 C 组试件明显。这是因为 A 组试件沿弱轴向失稳，在发生水平挠度时，其抵抗变形的能力类似于单圆管，而哑铃形截面强轴方向的抗弯惯性矩要远大于单根圆管，抵抗变形的能力比单圆管强，没有单圆管容易发生失稳。



(a) A 组

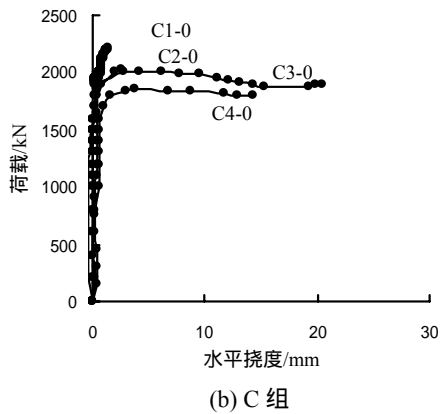
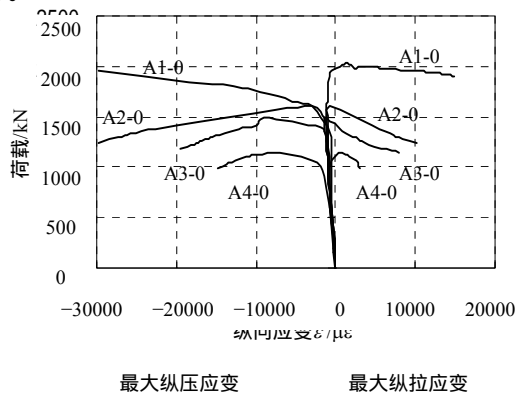


图 8 荷载-中截面水平挠度试验曲线

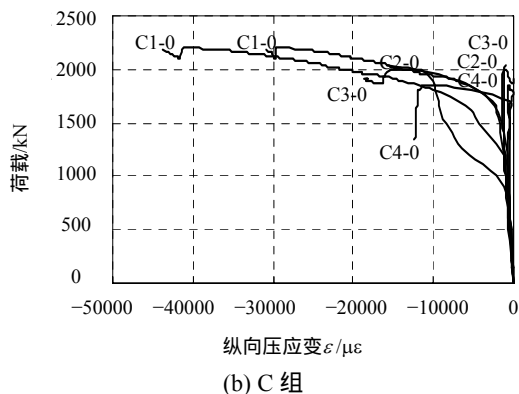
Fig.8 Tested curves of load-deflection at middle section

3.4 荷载-中截面边缘纵应变曲线

图 9 为试件的荷载-中截面边缘纵应变曲线,其中左侧为最大纵向压应变,右侧为最大纵向拉应变。从图 9 中可以看出,在附加弯矩的作用下,A 组试件由全截面受压转向压弯变形,接近破坏时中截面应变分布表现为大偏压受力。而 C 组试件由于长细比在 5.4~43.1 之间,相当于中长柱,接近破坏时全截面受压,中截面应变分布表现为小偏压受力。



(a) A 组



(b) C 组

图 9 荷载-中截面边缘纵应变试验曲线

Fig.9 Tested curves of load-strain at edges of middle section

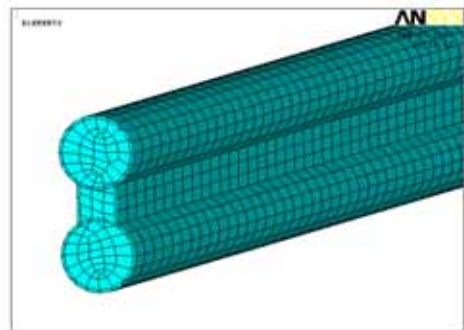
哑铃形长柱试件和单圆管长柱试件的荷载-应变曲线随长细比变化规律基本一致,极限承载力和最大纵向压应变均随着长细比增大而减小^[9]。但在长细比 $L/i \in (80,120)$ 情况下,破坏时哑铃形长柱的边缘最大纵向应变均超过 $3000 \mu\epsilon$,远大于本文材料性试验测得钢材的屈服应变 $1600 \mu\epsilon$,属于弹塑性失稳。而文献[9]中单圆管长柱在长细比 $L/i \in (80,120)$ 时,对应最大边缘纵向应变约为 $1000 \mu\epsilon \sim 1500 \mu\epsilon$,属于弹性失稳破坏。

4 有限元分析

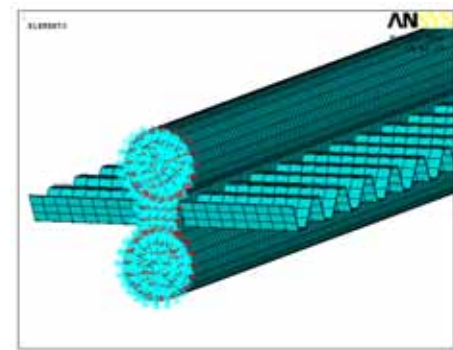
4.1 有限元分析方法

根据文献[1]对实际拱桥的统计资料表明,哑铃形钢管混凝土拱的长细比 L/i 变化范围为 40~120 之间(其中计算长度 L 取半跨拱轴弧长乘以有效长度系数 0.72)。而由于试验条件的限制,本文中 A 组试件的数量和 C 组试件的长细比区间都受到限制,需要通过有限元计算扩大参数分析范围。

本文采用大型通用软件 ANSYS 进行有限元分析。钢管混凝土哑铃形柱采用弹塑性梁单元 BEAM188 模拟,波形钢板采用 SHELL181 单元模拟,试件的有限元模型见图 10。由于实际结构都存



(a) A 组



(b) C 组

图 10 有限元模型

Fig.10 Finite element model of the specimens

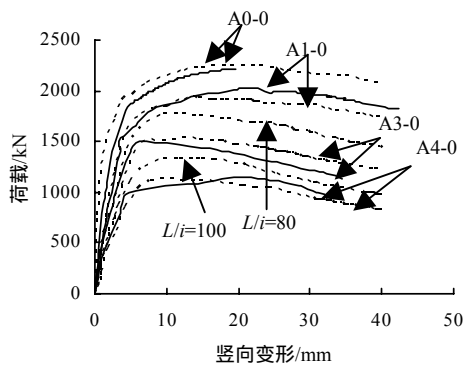
在初始缺陷, 计算时为了让 A 组(C 组)试件沿弱轴(强轴)方向失稳破坏, 在试件弱轴(强轴)方向赋予 $L/1000$ (L 为构件长度)的初始弯曲^[10]。

钢管混凝土组合材料采用双单元法建模型^[11], 其中外部单元赋以钢材料属性, 内部单元赋以混凝土材料属性。

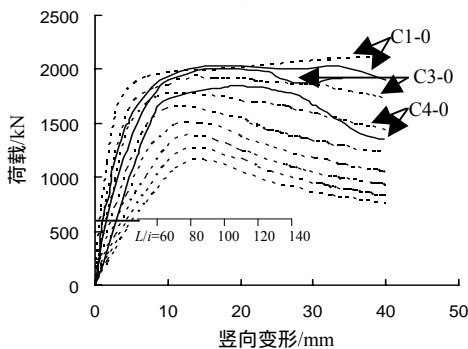
由文献[3-6]得知, 哑铃形截面中两圆管的荷载-变形曲线及泊松比曲线和单圆管钢管混凝土基本一致, 可以作为单圆管考虑。腹腔内混凝土所受套箍极小, 可以作为普通混凝土考虑。因此本文中圆管内核心混凝土采用以一维方式表达的套箍混凝土本构关系, 具体公式详见文献[12]。腹腔内混凝土采用 Hognested 的普通混凝土本构模型^[13], 钢材的应力-应变关系采用四折线本构模型。材料本构关系模型的输入采用 ANSYS 提供的基于 Von Mises 屈服准则的多线性等向强化模型(MISO)。有限元非线性求解方法采用 Newton-Raphson 法。

4.2 荷载-竖向变形曲线计算结果

A 组试件与 C 组试件的荷载-竖向变形曲线随长细比变化的规律一致, 图 11 的荷载-竖向变形曲线中, 给出了两组试件的试验曲线(实线)和部分长细比变化下的有限元计算曲线(虚线)。计算曲线与试验曲线拟合较好。



(a) A 组



(a) C 组

图 11 荷载-竖向变形计算曲线

Fig.11 Calculated curves of load-vertical deformation

4.3 极限承载力计算结果

极限承载力的试验值和计算值采用相同的定义, 当荷载-竖向位移曲线无下降段时, 以纵向应变达到 $10000\mu\epsilon$ 时对应的荷载为极限承载力, 有下降段时以荷载-位移曲线的最高点对应的荷载为极限承载力。

表 2 为有限元计算值与试验值的比较, 其中稳定系数试验值 $\varphi_{le} = N_{le} / N_{0e}$, 稳定系数计算值 $\varphi_{lit} = N_{lit} / N_{0it}$, 以 $\lambda = 16$ 作为短柱与长柱的长细比分界点, N_{0e} 、 N_{0it} 分别对应着长细比 $\lambda = 0-16$ 的轴压短柱极限承载力试验值和计算值的平均值。

表 2 计算值与试验值比较

Table 2 Comparison between calculated value and test data

失稳方向	长细比 λ	极限承载力/kN			稳定系数		
		N_{le}	N_{lit}	$\frac{N_{lit}}{N_{le}}$	φ_{le}	φ_{lit}	$\frac{\varphi_{lit}}{\varphi_{le}}$
弱轴	0-16	2215	2115	0.955	1.000	1.000	1.000
	30.4	2030	1946	0.959	0.916	0.920	1.004
	40.0	—	1796	—	—	0.849	—
	60.8	1670	1650	0.988	0.754	0.780	1.034
	80.0	—	1502	—	—	0.710	—
	91.2	1500	1448	0.965	0.677	0.685	1.012
	100.0	—	1341	—	—	0.634	—
	121.6	1278	1268	0.992	0.577	0.600	1.040
	140.0	—	1072	—	—	0.507	—
	强轴	0-16	2215	2115	0.955	1.000	1.000
21.5		2040	1998	0.979	0.920	0.945	1.027
32.3		2004	1934	0.965	0.904	0.914	1.011
43.1		1847	1772	0.959	0.833	0.838	1.006
60.0		—	1650	—	—	0.780	—
80.0		—	1509	—	—	0.713	—
100.0		—	1376	—	—	0.651	—
120.0		—	1268	—	—	0.600	—
140.0		—	1156	—	—	0.547	—
比值均值				0.970		1.017	
比值方差				0.014		0.015	

由表 2 可以看出: 极限承载力和稳定系数的计算值与试验值的比值均值分别为 0.970 和 1.017, 比值方差分别为 0.014 和 0.015, 表明本文提出的有限元方法可以比较准确地计算出钢管混凝土轴压长柱的稳定极限承载力。

5 极限承载力简化算法

沿用短柱中的等效单圆管法, 将哑铃形轴压长柱等效为外径 $D = 4i$ (i 为哑铃形截面回转半径)的单圆管长柱, 轴压长柱极限承载力计算公式如下:

$$N_l = \varphi_l \cdot N_0 \tag{1}$$

式中, N_0 为哑铃形短柱轴压极限承载力, 计算公式详见文献[5], 以下着重讨论稳定系数 φ_l 的计算方法。

将 A 组构件和 C 组构件稳定系数试验值 φ_{le} (见表 2 倒数第 3 列) 分别以小圆点和小三角的形式标在图 12 中。将 A 组构件和 C 组构件稳定系数计算值 φ_{li} (见表 2 倒数第 2 列) 以空心圆点和空心三角的形式标在图 12 中。

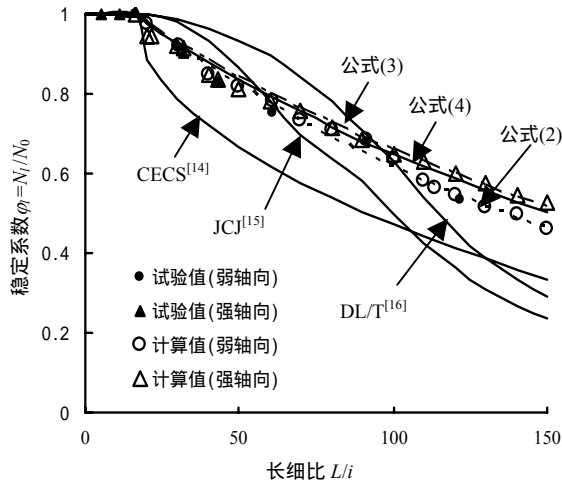


图 12 稳定系数和长细比的关系曲线

Fig.12 Relation curves of stability coefficient and slenderness ratio

图 12 中还给出了国内 CECS^[14]、JCJ^[15]和 DL/T^[16]三本钢管混凝土结构规程中所提供的单圆管长柱稳定系数 φ_l 曲线。由图 12 可以看出, 国内 CECS、JCJ 和 DL/T 三本规程所提供单圆管长柱的稳定系数不能直接应用于哑铃形轴压长柱中。

对 A 组构件计算值 φ_{li} 、试验值 φ_{le} 以长细比 L/i 为变量进行拟合回归(回归系数 R 平方值为 0.9883), 得轴压长柱(弱轴向失稳)稳定系数计算公式如下:

$$\varphi_l = e^{-0.0058(L/i-16)} \quad (2)$$

对 C 组构件计算值 φ_{li} 、试验值 φ_{le} 以长细比 L/i 为变量进行拟合回归(回归系数 R 平方值为 0.9806), 得轴压长柱(强轴向失稳)稳定系数计算公式如下:

$$\varphi_l = e^{-0.0050(L/i-16)} \quad (3)$$

由于哑铃形长柱沿强(弱)轴失稳的极限承载力均随长细比的增大均呈指数函数下降, 且规律曲线基本一致, 考虑将其统一为式(4)(回归系数 R 平方值为 0.9705)。

$$\varphi_l = e^{-0.0051(L/i-16)} \quad (4)$$

由图 12 可见, 式(4)能较好地反映出钢管混凝土哑铃形轴压长柱(沿强、弱轴破坏)稳定极限承载力随长细比变化规律, 可供工程应用参考。

6 结论

(1) 为使钢管混凝土哑铃形轴压长柱沿强轴向破坏, 本文提出了将波形钢板焊于试件弱轴方向的方法, 试验结果表明它不影响轴压短柱的强度且可以增大弱轴向的刚度使其沿强轴向破坏, 试验结果表明这个方法是可行的。

(2) 无论是沿强轴向破坏还是沿弱轴向破坏, 长柱试件的钢管外壁均未出现局部外凸或开裂现象, 破坏形式为整体失稳破坏; 随着长细比增加, 试件弹性阶段的切向刚度减小, 弹性段缩短, 极限承载力显著降低。

(3) 运用大型通用程序 ANSYS 对哑铃形轴压长柱进行了有限元分析, 计算结果与试验结果吻合较好。

(4) 哑铃形轴压长柱(强轴、弱轴向失稳)极限承载力随长细比变化的规律基本相同, 二者的极限承载力可采用统一公式进行计算, 本文提出了统一的简化计算公式可供工程应用参考。

参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥 [M]. 第二版. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Chen Baochun. Concrete-filled steel tube arch bridges [M]. 2nd Edition. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [2] Chen Baochun. State-of-the-art of the development of arch bridges in China [C]. Proceedings of the 4th International Conference on New Dimensions of Bridge, Fuzhou, China, 2005: 13-24.
- [3] 陈宝春, 黄福云, 盛叶. 钢管混凝土哑铃形轴压短柱试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 187-194.
Chen Baochun, Huang Fuyun, Sheng Ye. Experiment research on dumbbell shaped concrete filled steel tube concentrically-loaded columns [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 187-194. (in Chinese)
- [4] 陈宝春, 肖泽荣, 韦建刚. 钢管混凝土哑铃形偏压构件试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 89-95.
Chen Baochun, Xiao Zerong, Wei Jianguang. Experiment research on concrete filled steel tubular dumbbell shaped columns under eccentric loads [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 89-95. (in Chinese)

(参考文献转第 133 页)

- (in Chinese)
- [8] 王东升, 王国新, 冯启民. 桥梁结构地震反应邻梁碰撞分析等效刚体模型[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 81—85.
Wang Dongsheng, Wang Guoxin, Feng Qimin. Equivalent rigid-body compact model of pounding between adjacent bridge girders during earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 81—85. (in Chinese)
- [9] Schiehlen W, Seifried R. Three approaches for elastodynamic contact in multibody systems [J]. Multibody System Dynamics, 2004, 12(1): 1—16.
- [10] Anagnostopoulos S A. Equivalent viscous damping for modeling inelastic impacts in earthquake pounding problems [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33(8): 897—902.
- [11] Goldsmith W. Impact: The theory and physical behavior of colliding solids [M]. London, U K: Edward Arnold, 1960.
- [12] Van Mier J G M, Puijssers A F, Reinhardt H W, Monnier T. Load-time response of colliding concrete bodies [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(2): 354—374.

(上接第 127 页)

- [5] 陈宝春, 黄福云, 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形短柱极限承载力的等效单圆管算法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(6): 50—53.
Chen Baochun, Huang Fuyun, Xiao Zerong. Equivalent single circular tube ultimate capacity method of short columns of dumbbell shape with concrete filled steel tube [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(6): 50—53. (in Chinese)
- [6] 陈宝春, 盛叶, 韦建刚. 钢管混凝土哑铃形梁受弯试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 119—125.
Chen Baochun, Sheng Ye, Wei Jianguang. Experimental research on concrete filled steel tubular dumbbell shaped beam under pure bending moment [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 119—125. (in Chinese)
- [7] 陈宝春, 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形拱肋灌注管内混凝土时的截面应力分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 73—76.
Chen Baochun, Xiao Zerong. Analysis on sectional stresses of dumbbell shaped CFST arch rib when pouring concrete into steel tube [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 73—76. (in Chinese)
- [8] 陈宝春, 黄卿维. 波形钢板 PC 箱梁桥应用综述[J]. 公路, 2005(7): 45—53.
Chen Baochun, Huang Qingwei. State-of-art of application of prestressed concrete box-girder bridges with corrugated steel webs [J]. Highway, 2005(7): 45—53. (in Chinese)
- [9] 蔡绍怀, 顾万黎. 钢管混凝土长柱的性能和强度计算[J]. 建筑结构学报, 1985, 6(1): 33—42.
Cai Shaohuai, Gu Wanli. Behavior and ultimate strength of long concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 1985, 6(1): 33—42. (in Chinese)
- [10] 韩林海. 钢管(高强)混凝土轴压稳定承载力研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31(3): 23—28.
Han Linhai. Researches for the stability bearing capacity of (high strength) concrete filled steel tubular members subjected to axial compression [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture, 1998, 31(3): 23—28. (in Chinese)
- [11] 韦建刚, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥材料非线性分析方法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 344—348.
Wei Jianguang, Chen Baochun. Finite element methods for analysis on material nonlinearity of concrete-filled steel tubular arch [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2004, 32(3): 344—348. (in Chinese)
- [12] 陈宝春, 秦泽豹, 彦坂熙, 陈友杰. 钢管混凝土拱(单圆管)面内受力双重非线性有限元分析[J]. 铁道学报, 2003, 25(4): 80—84.
Chen Baochun, Qin Zebao, Hikosaka Hiroshi, Chen Youjie. Analysis of concrete filled steel tubular (single tube) arch subjected to in-plane loads by nonlinear finite element method [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(4): 80—84. (in Chinese)
- [13] Hognested E, Hanson N W. Concrete stress distribution in ultimate strength design [J]. Journal of American Concrete Institute, 1955, 52(4): 455—479.
- [14] 中国工程建设标准化协会标准. CECS 28: 90 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 1990.
Standard of the Construction Standard Committee of China. CECS 28: 90 Specification for design and construction of concrete filled steel tubular structures [S]. Beijing: The Statistics Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [15] 国家建筑材料工业局标准. JCJ 01-89 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
Standard of the Architectural Material Bureau of China. JCJ 01-89 Specification for design and construction of concrete filled steel tubular structures [S]. Shanghai: Tongji University Press, 1989. (in Chinese)
- [16] 中国电力行业标准. DL/T 5058-1999 钢管混凝土组合结构设计规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
Standard of the Economic and Trade Committee of China. DL/T 5058-1999 Specification for design of steel-concrete composite structures [S]. Beijing: Electric Power Publishing House, 1999. (in Chinese)