

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.03.010



圆钢管混凝土轴压长柱极限承载力的 稳定系数法

臧兴震^{1,2}, 何子奇³, 徐创泽²

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000; 2. 甘肃省交通规划勘察设计
院有限公司, 兰州 730030; 3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:为完善圆钢管混凝土轴压长柱极限承载力的计算理论,对比分析了中国国家标准 GB 50936—2014 和 CECS 28: 2012 中轴压短柱极限承载力的 N_0 计算公式,并把 GB 50936—2014 中基于套箍系数的 N_0 计算公式改写成统一的形式,提出了基于正则长细比的轴压长柱的稳定系数计算式,并通过 36 个试件的对比,对计算式的精度和适用范围进行了分析。研究表明,现行国标 GB 50936—2014 中基于套箍系数的 N_0 计算公式更为精确,基于 N_0 计算公式和本文的稳定系数,可以计算得到更为精确的轴压长柱的极限承载力。

关键词:钢管混凝土;轴压构件;极限承载力;稳定系数法;

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)03-0075-08

Stability coefficient method for ultimate strength of long concrete-filled steel tubular columns under axial compression

Zang Xingzhen^{1,2}, He Ziqi³, Xu Chuangze²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China;
2. Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd, Lanzhou 730030, P. R. China;
3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The ultimate strength formula of short columns under axial compression, which were given by the current code GB 50936-2014 and the current specification CECS 28: 2012, were compared and analyzed to improve the theory of ultimate strength of long concrete-filled steel tubular columns under axial compression. The formula of the ultimate strength of short columns, basing on confinement coefficient which was given by GB 50936-2014, was rewritten as a unified form. A new stability coefficient was proposed for long concrete-filled steel tubular columns under axial compression. The accuracy of the proposed stability coefficient was validated by 36 specimens. The results show that the formula of short columns based on the confinement coefficient and the proposed stability coefficient can provide good prediction of ultimate strength for both short and long concrete-filled steel tubular columns under axial compression.

收稿日期:2016-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51308051)

作者简介:臧兴震(1980-),男,博士生,主要从事钢管约束混凝土柱研究,(E-mail)xingzhen1980@126.com。

Received:2016-11-05

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51308051)

Author brief:Zang Xingzhen(1980-), PhD candidate, main research interest: concrete-filled steel tubular columns, (E-mail)xingzhen1980@126.com.

Keywords: concrete-filled steel tubular columns; axial compression member; ultimate strength; stability coefficient method

钢管混凝土轴压构件由钢管和其核心混凝土两种材料组成。其中,核心混凝土受钢管的约束作用而强度提高,混凝土则延缓或阻止了钢管的面外局部屈曲^[1-3]。钢管混凝土构件因其具有良好的承载性能和经济性能而广泛应用,关于钢管混凝土构件的研究也在轴压短柱^[4-6]、轴压长柱^[7-9]、偏压长柱^[10-13]、柱的抗震性能^[14-15]等方面不断深化,Min等^[16]提出的钢管混凝土统一理论则把钢管和混凝土认为是一种材料,此外,双剪强度理论也分别应用于钢管混凝土的轴压短柱^[17]、轴压长柱^[18]的极限承载力研究。

经过学者们多年的不懈努力,现行中国国家标准《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)^[19]于 2014 年 12 月 1 日开始实施,使得中国钢管混凝土结构的工程实践具有了国家标准。与此前的《钢管混凝土结构技术规程》(CECS 28: 2012)^[20]相比,GB 50936—2014 中钢管混凝土轴压长柱的极限承载力计算公式有了较大的改变:一是 GB 50936—2014 同时提供了基于构件正则长细比的轴心受压构件稳定系数 φ 和考虑长细比影响的承载力折减系数 φ_1 ,二是 GB 50936—2014 中考虑长细比影响的承载力折减系数 φ_1 与 CECS 28: 2012 中的不同。

为了对准确合理应用现行国家标准 GB 50936—2014 指导中国钢管混凝土结构的工程实践,本文在分析该标准中轴压短柱极限承载力的基础上,提出了轴压长柱极限承载力计算的稳定系数法,并通过试验数值进行对比对其计算精度和适用范围进行验证。

1 轴压短柱极限承载力的公式分析

1.1 轴压短柱承载力的现行公式

现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)^[19]给出了两种计算轴压短柱极限承载力的方法,一是基于钢管和混凝土作为一种材料

的设计方法,记为 GB 50936—2014 的方法(I),另一种则是基于极限平衡理论的设计方法,记为 GB 50936—2014 的方法(II)。GB 50936—2014 的方法(I)和 GB 50936—2014 的方法(II)对于钢管混凝土轴压短柱极限承载力的计算有较大区别。

中国协会标准 CECS 28: 2012 中轴压短柱极限承载力的计算方法与 GB 50936—2014 的方法(II)相似,但后者由于考虑了不同强度等级混凝土对极限荷载的影响,更为细致。

为对比以上 3 种轴压短柱极限承载力的计算方法的不同,选取文献[4]中的 56 个外径为 D 、壁厚为 t 、几何长度为 L 的轴压短柱(图 1),分别按照 GB 50936—2014 的方法(I)、GB 50936—2014 的方法(II)以及 CECS 28: 2012 中轴压短柱极限承载力的公式计算得到承载力 N_{01} 、 N_{02} 和 N_{03} ,计算中对文献[4]中的单位采用 $1 \text{ kgf/cm}^2 = 1 \text{ MPa}/9.81 = (1 \text{ N/mm}^2)/9.81$ 和 $1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$ 进行了转换(表 1)。表 1 还列出了文献[4]中的试验值 $N_{u,\text{exp}}$ 以及比值 $N_{01}/N_{u,\text{exp}}$ 、 $N_{02}/N_{u,\text{exp}}$ 和 $N_{03}/N_{u,\text{exp}}$ 。

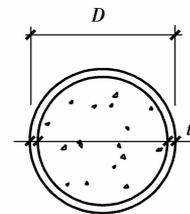


图 1 钢管混凝土柱横截面

Fig. 1 Concrete-filled steel tubular columns cross section

由表 1 可以看出, $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 的较大值以 CECS 28: 2012 的方法居多,最大值可达 1.496; $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 的较小值以 GB 50936—2014 的方法(I)居多,最小值为 0.301;而由 GB 50936—2014 的方法(II)得到的 $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 的值最大值和最小值分别为 1.120 和 0.541,大部分的 $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 值与 1 比较接近。

表 1 钢管混凝土轴压短柱极限承载力对比

Table 1 Comparison on Ultimate Strength of Short Concrete-filled Steel Tubular Columns under Axial Compression

试件 编号	D/mm	t/mm	L/mm	$f_a/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$f_{ck}/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	极限荷载计算值			$N_{u,\text{exp}}/$ kN	比值		
						N_{01}/kN	N_{02}/kN	N_{03}/kN		$N_{01}/N_{u,\text{exp}}$	$N_{02}/N_{u,\text{exp}}$	$N_{03}/N_{u,\text{exp}}$
G-21	273	8	1 100	319.1	36.1	4 902.7	5 697.0	5 991.4	5 576.2	0.879	1.022	1.074
G-32	273	8	1 100	319.1	12.3	3 380.2	3 930.9	3 930.9	4 037.6	0.837	0.974	0.974

续表1

试件 编号	D/mm	t/mm	L/mm	$f_a/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	$f_{ck}/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	极限荷载计算值			$N_{u,exp}/$ kN	比值		
						N_{01}/kN	N_{02}/kN	N_{03}/kN		$N_{01}/N_{u,exp}$	$N_{02}/N_{u,exp}$	$N_{03}/N_{u,exp}$
G-33	273	8	1 100	319.1	12.3	3 380.2	3 930.9	3 930.9	3 841.6	0.880	1.023	1.023
G-56	273	8	1 100	319.1	18.1	3 713.3	4 480.5	4 480.5	5 194	0.715	0.863	0.863
G-57	273	8	1 100	319.1	18.1	3 713.3	4 480.5	4 480.5	5 292	0.702	0.847	0.847
G-34	201	2	880	244.6	12.6	845.4	997.1	1 034.5	1 068.2	0.791	0.933	0.968
G-35	201	2	880	244.6	12.6	845.4	997.1	1 034.5	1 038.8	0.814	0.960	0.996
G-46	201	2	840	244.6	34.8	1 691.1	1 610.1	1 934.7	1 293.6	1.307	1.245	1.496
G-50	201	2	810	244.6	47.9	2 196.1	2 010.9	2 434.6	1 636.6	1.342	1.229	1.488
G-51	201	2	810	244.6	48.7	2 227.4	2 035.8	2 465.1	1 690.5	1.318	1.204	1.458
G-38	96	5	410	427.1	12.6	739.0	895.7	895.7	911.4	0.811	0.983	0.983
G-39	96	5	451	427.1	12.6	739.0	895.7	895.7	842.8	0.877	1.063	1.063
G-44	96	5	450	427.1	34.8	808.2	1 163.6	1 163.6	1 043.7	0.774	1.115	1.115
G-45	96	5	450	427.1	34.8	808.2	1 163.6	1 163.6	1 166.2	0.693	0.998	0.998
G-48	96	5	400	427.1	47.9	904.0	1 301.0	1 301.0	1 176	0.769	1.106	1.106
G-49	96	5	400	427.1	47.9	904.0	1 301.0	1 301.0	1 171.1	0.772	1.111	1.111
G-58	96	5	400	427.1	47.9	904.0	1 301.0	1 301.0	1 073.1	0.842	1.212	1.212
G-59	96	5	405	427.1	47.9	904.0	1 301.0	1 301.0	1 122.1	0.806	1.159	1.159
G-36	121	12	500	305.8	12.6	988.8	1 692.7	1 692.7	2 415.7	0.409	0.701	0.701
G-37	121	12	500	305.8	12.6	988.8	1 692.7	1 692.7	2 371.6	0.417	0.714	0.714
G-12	121	12	500	305.8	34.8	778.2	2 081.7	2 081.7	2 499	0.311	0.833	0.833
G-1	166	5	660	285.4	32.6	1 650.9	1 922.8	2 016.2	1 744.4	0.946	1.102	1.156
G-2	166	5	660	285.4	32.6	1 650.9	1 922.8	2 016.2	1 695.4	0.974	1.134	1.189
G-3	166	5	660	285.4	32.6	1 650.9	1 922.8	2 016.2	1 705.2	0.968	1.128	1.182
G-4	166	5	660	285.4	32.6	1 650.9	1 922.8	2 016.2	1 734.6	0.952	1.108	1.162
G-12	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 862	0.934	1.068	1.137
G-13	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 932.56	0.900	1.029	1.096
G-14	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 886.5	0.922	1.054	1.122
G-15	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 871.8	0.929	1.063	1.131
G-16	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 695.4	1.026	1.173	1.249
G-22	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 734.6	1.003	1.147	1.221
G-23	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	2 028.6	0.857	0.980	1.044
G-24	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 813	0.959	1.097	1.168
G-26	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 764	0.986	1.128	1.200
G-29	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	2 107	0.825	0.944	1.005
G-30	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 680.7	1.035	1.183	1.260
G-40	121	12	500	305.8	12.6	988.8	1 692.7	1 692.7	2 234.4	0.443	0.758	0.758
G-41	121	12	500	305.8	12.6	988.8	1 692.7	1 692.7	2 332.4	0.424	0.726	0.726
G-43	121	12	500	305.8	34.8	778.2	2 081.7	2 081.7	2 420.6	0.321	0.860	0.860
G-47	121	12	500	305.8	34.8	778.2	2 081.7	2 081.7	2 018.8	0.385	1.031	1.031
G-52	121	12	500	305.8	48.7	887.8	2 289.4	2 289.4	2 587.2	0.343	0.885	0.885
G-53	121	12	500	305.8	48.7	887.8	2 289.4	2 289.4	1 871.8	0.474	1.223	1.223
G-7	166	5	350	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 783.6	0.975	1.115	1.187

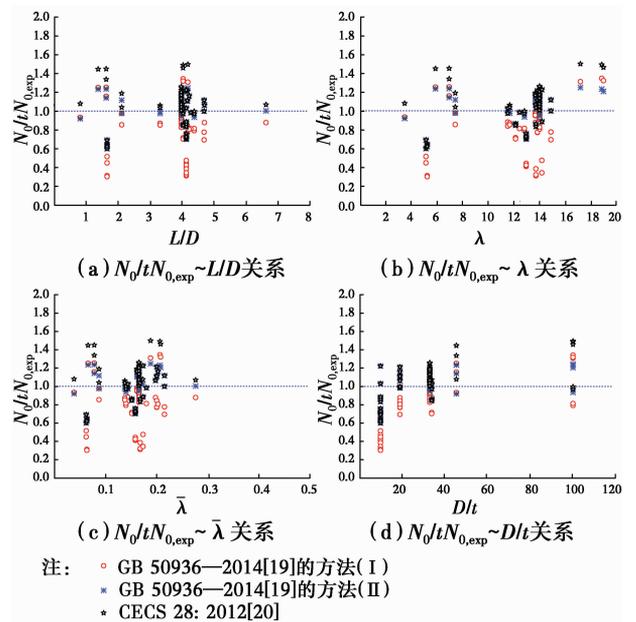
续表 1

试件 编号	D/mm	t/mm	L/mm	$f_a/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$f_{ck}/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	极限荷载计算值			$N_{u,\text{exp}}/$ kN	比值		
						N_{01}/kN	N_{02}/kN	N_{03}/kN		$N_{01}/N_{u,\text{exp}}$	$N_{02}/N_{u,\text{exp}}$	$N_{03}/N_{u,\text{exp}}$
G-8	166	5	350	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	2 038.4	0.853	0.976	1.039
G-9	166	5	550	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 999.2	0.870	0.995	1.059
G-10	166	5	550	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	2 043.3	0.851	0.973	1.036
G-11	166	5	660	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 974.7	0.881	1.007	1.072
G-18	166	5	1 100	285.4	36.1	1 739.0	1 989.0	2 117.1	1 984.5	0.876	1.002	1.067
G-64	320	7	260	259.9	55.0	7 374.7	7 268.8	8 528.7	7 908.6	0.932	0.919	1.078
G-65	320	7	440	259.9	55.0	7 374.7	7 268.8	8 528.7	5 899.6	1.250	1.232	1.446
G-66	320	7	520	259.9	55.0	7 374.7	7 268.8	8 528.7	5 889.8	1.252	1.234	1.448
G-67	320	7	520	259.9	55.0	7 374.7	7 268.8	8 528.7	6 379.8	1.156	1.139	1.337
G-60	121	12	200	305.8	9.5	1 211.5	1 624.6	1 624.6	2 704.8	0.448	0.601	0.601
G-61	121	12	200	305.8	9.5	1 211.5	1 624.6	1 624.6	2 352	0.515	0.691	0.691
G-62	121	12	200	305.8	16.3	856.5	1 766.3	1 766.3	2 744	0.312	0.644	0.644
G-63	121	12	200	305.8	16.3	856.5	1 766.3	1 766.3	2 842	0.301	0.622	0.622
最大值										1.342	1.245	1.496
最小值										0.301	0.601	0.601
平均值										0.806	1.005	1.059
方差										0.269	0.168	0.215

1.2 轴压短柱极限承载力的参数分析

为确定不同参数对轴压短柱极限承载力的影响,图 2 分别给出了表 1 中的 $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 值与 L/D 、 λ 、 $\bar{\lambda}$ 和 D/t 的关系,其中 L 为构件几何尺寸, D 和 t 分别为构件的外径和壁厚, λ 和 $\bar{\lambda}$ 分别为构件的长细比和正则长细比, λ 和 $\bar{\lambda}$ 的定义见后文。由图 2 (a) ~ (c) 可知, $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 的数值不随 L/D 、 λ 以及 $\bar{\lambda}$ 的增大呈规律性变化,这是因为对于轴压钢管混凝土短柱,由于 L/D 的数值被限制在较小的范围内(如 $L/D \leq 4$),构件是以全截面屈服为破坏模式的,故 L/D 、 λ 以及 $\bar{\lambda}$ 不是影响 $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 数值的关键因素。由图 2 (d) 可看出, $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 的较小值主要出现在径厚比 D/t 较小的试件上,即当径厚比 D/t 在 10 左右时 GB 50936—2014 和 CECS 28: 2012 中的轴压短柱极限承载力计算公式均偏过于安全,这是因为径厚比 D/t 越小,钢管对核心混凝土的约束就越强,构件的实际承载力就越高。事实上,径厚比 D/t 在 10 左右的情况在实际工程中极少。

剔除表 1 中与径厚比 D/t 在 10 左右对应的 $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 值,可得表 2 所示的 $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 最大值、最

图 2 $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 与 L/D 、 λ 、 $\bar{\lambda}$ 和 D/t 的关系Fig. 2 Relationship between $N_0/N_{u,\text{exp}}$ and L/D , λ , $\bar{\lambda}$ and D/t

小值、均值和方差。由表 2 可以看出,当径厚比 D/t 较大时,由 GB 50936—2014 的方法(II)得到的 $N_0/N_{u,\text{exp}}$ 的均值是三者之中与 1.000 最为接近,而

最大值和方差是三者之中最小的。因此,建立轴压长柱极限承载力的稳定系数法时,以 GB 50936—2014 的方法(II)的方法计算轴压短柱的极限承载力 N_0 。

表 2 $N_0/N_{0,\text{exp}}$ 的数值对比
Table 2 Comparison on value of $N_0/N_{0,\text{exp}}$

	最大值	最小值	均值	方差
GB 50936—2014 ^[19] 方法(I)	1.342	0.693	0.931	0.161
GB 50936—2014 ^[19] 方法(II)	1.245	0.847	1.069	0.101
CECS 28:2012 ^[20]	1.496	0.847	1.140	0.153

2 轴压长柱极限承载力的稳定系数法

2.1 本文稳定系数法的计算式

GB 50936—2014^[19] 给出的稳定系数计算式为

$$N_u = \varphi N_0 \quad (1)$$

式中: N_0 为轴压短柱的极限承载力; φ 为轴压长柱的稳定系数。

根据前述分析,轴压短柱极限承载力 N_0 按《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)方法(II)计算。根据 GB 50936—2014 方法(II)的轴压短柱极限承载力计算式,本文把该计算式改写为

$$1 + \sqrt{\theta} + \theta N_0 = \min[0.9A_c f_c (1 + \alpha\theta), 0.9A_c f_c (1 + \sqrt{\theta} + \theta)] \quad (2)$$

式中: α 为与混凝土强度等级有关的系数,根据 GB 50936—2014,对于强度等级为 C50 及以下的混凝土,式(2)中的 α 值为 2.0;对于强度等级为 C55~C80 的混凝土,式(2)中的 α 值为 1.8。

对于强度等级为 C50 及以下的混凝土,由于式(2)中的 α 值为 2.0,此时 $1+2\theta$ 与 $1+\sqrt{\theta}+\theta$ 在 $\theta=1$ 处相交。对于强度等级为 C55~C80 的混凝土,由于式(2)中的 α 值为 1.8,此时 $1+2\theta$ 与 $1+\sqrt{\theta}+\theta$ 在 $\theta=1.563$ 处相交(图 3)。根据 GB 50936—2014^[13] 的计算公式,当 $\theta \leq 1/(\alpha-1)^2 = 1$ 时应采用 $1+2\theta$ 计算轴压短柱的极限承载力 N_0 。由图 3 可知,当 $\theta \leq 1$ 时由 $1+2\theta$ 计算的数值均不大于由 $1+\sqrt{\theta}+\theta$ 计算的数值,这表明式(2)是正确的。同样的也可分析式(2)对于强度等级为 C55~C80 的混凝土也是正确的。

对于稳定系数 φ ,参照 GB 50936—2014^[19] 中稳

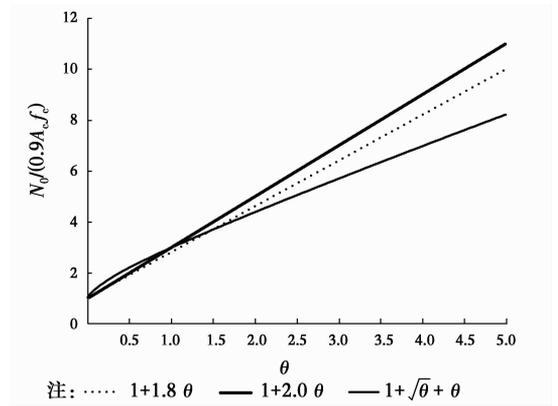


图 3 $N_0/(0.9A_c f_c) \sim \theta$ 关系

Fig. 3 Relationship between $N_0/(0.9A_c f_c)$ and θ

定系数的计算公式,本文提出轴压长柱的稳定系数 φ 的计算式为

$$\varphi = \frac{1}{2\lambda} [(1.15 + 0.30\bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2) - \sqrt{(1.15 + 0.30\bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\lambda^2}] \quad (3)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_a}{E_a}} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\mu L}{i_0} \quad (5)$$

$$i_0 = \sqrt{\frac{I_a + \frac{I_c E_c}{E_a}}{A_a + \frac{A_c f_c}{f_a}}} \quad (6)$$

式中: E_a 和 f_a 分别为钢管的弹性模量和屈服强度; I_a 和 A_a 分别为钢管的惯性矩和横截面面积; E_c 和 f_c 分别为混凝土的弹性模量和屈服强度; I_c 和 A_c 分别为混凝土的惯性矩和横截面面积; μ 和 L 分别为钢管混凝土轴压长柱的计算长度系数和几何长度。

2.2 其他文献稳定系数法的计算式

GB 50936—2014 方法(I)的稳定系数计算式为

$$\varphi = \frac{1}{2\lambda_x} [(\bar{\lambda}_x^2 + 1 + 0.25\bar{\lambda}_x) - \sqrt{(\bar{\lambda}_x^2 + 1 + 0.25\bar{\lambda}_x)^2 - 4\lambda_x^2}] \quad (7)$$

$$\bar{\lambda}_x = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_x}{E_x}} \approx 0.01\lambda_x (0.001f_a + 0.781) \quad (8)$$

现行国家标准 GB 50936—2014 中考虑长细比影响的承载力折减系数 φ_L 由 3 部分组成,该标准的三段 φ_L 计算式可写为式(9)的统一形式。同样,也可以把 CECS 28:2012^[20] 的两段式考虑长细比影响的承载力折减系数计算式写为式(10)的形式。

$$\varphi = \max\{1 - 0.115 \sqrt{\max(\frac{L_e}{D}, 4) - 4}, 1 - 0.0226[\max(\frac{L_e}{D}, 4) - 4]\} \quad (9)$$

$$\varphi = 1 - 0.115 \sqrt{\max(\frac{L_e}{D}, 4) - 4} \quad (10)$$

式中： L_e 为柱的等效计算长度，其计算式为 $L_e = \mu kL$ ； μ 为考虑柱端约束条件的计算长度系数； k 为考虑柱身弯矩分布梯度影响的等效长度系数； L 为构件的几何长度。

3 本文稳定系数法计算式的验证

为验证本文计算式的精度，分别采用 GB 50936—2014 方法(I)、GB 50936—2014 方法(II)、CECS 28: 2012 和本文的稳定系数计算文献[7]中的 26 个轴压试件和文献[10]中的 10 个轴压试件的极限承载力，计算中轴压短柱极限承载力 N_0 分别选用对应的计算式，本文的 N_0 则选用式(2)和式(3)计算，计算结果分别为 N_{u1} 、 N_{u2} 、 N_{u3} 和 N_{u4} (表 3)。计算中采用 $1 \text{ kgf/cm}^2 = 1 \text{ MPa}/9.81 = (1 \text{ N/mm}^2)/9.81$ 和 $1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$ 把文献[7]和文献[10]的非国标单位转换为国标单位。如文献[7]中的 $f_{ck} = 347 \text{ kgf/cm}^2 = 35.4 \text{ N/mm}^2$ ， $f_a = 3458 \text{ kgf/cm}^2 = 352.9 \text{ N/mm}^2$ ， $E_a = 2.05 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 = 209184 \text{ N/mm}^2$ 。对于混凝土弹性模量，则根据转换后的 f_{ck} 数值先查《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[21] 确定出混凝土强度等级，再由该标准确定其弹性模量，如文献[7]中的 $f_{ck} = 35.4 \text{ N/mm}^2$ 与 C55 混凝土的 $f_{ck} = 35.5 \text{ N/mm}^2$ 几乎一致，则查 GB 50010—2010 可知其弹性模量为 $E_c = 3.55 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。

表 3 还列出了文献[7]和文献[10]中的试验值 $N_{u, \text{exp}}$ 以及比值 $N_{u1}/N_{u, \text{exp}}$ 、 $N_{u2}/N_{u, \text{exp}}$ 、 $N_{u3}/N_{u, \text{exp}}$ 和 $N_{u4}/N_{u, \text{exp}}$ 。由表 3 可知，在 $N_{u1}/N_{u, \text{exp}}$ 、 $N_{u2}/N_{u, \text{exp}}$ 、 $N_{u3}/N_{u, \text{exp}}$ 和 $N_{u4}/N_{u, \text{exp}}$ 中， $N_{u1}/N_{u, \text{exp}}$ 的最大值是四者之中最大的而最小值是四者之中最小的，尽管其平均值 0.956 较其他的平均值小，但其方差 0.266

表明 GB 50936—2014 方法(I)的计算离散性较大。由表 3 可知， $N_{u4}/N_{u, \text{exp}}$ 值的最大值最小而最小值最大，其平均值和方差均较 $N_{u2}/N_{u, \text{exp}}$ 和 $N_{u3}/N_{u, \text{exp}}$ 的平均值和方差为小。因此，由 GB 50936—2014 的方法(II)的 N_0 计算式和本文的稳定系数可以计算得到更为准确的轴压长柱的极限承载力。

事实上，GB 50936—2014 方法(II)中轴压长柱极限承载力的计算公式是由 CECS 28: 2012 中的公式改进而得到的。图 4 对比了 GB 50936—2014^[19] 与 CECS 28: 2012^[20] 基于 L_e/D 的稳定系数的计算式文献[7]中的试验数据。由图 4 可知，在 $4 \leq L_e/D \leq 30$ 范围内，由 GB 50936—2014 的方法(II)的稳定系数计算式得到的更偏安全一些。此外，本文前述分析已指出 GB 50936—2014 的方法(II)的 N_0 公式也较 CECS 28: 2012 中的 N_0 公式更能预测轴压短柱的极限承载力。因此，GB 50936—2014 方法(II)也比 CECS 28: 2012 更能准确计算轴压长柱的极限承载力。基于以上分析可知，本文的稳定系数在计算精度上较 GB 50936—2014^[19] 的方法好。此外，本文的稳定系数具有明确的物理意义，而且，与国际主流标准的稳定系数制定方法一致，因此，本文的稳定系数计算方法可以作为一种有益的补充，指导钢管混凝土结构轴压长柱的稳定设计。

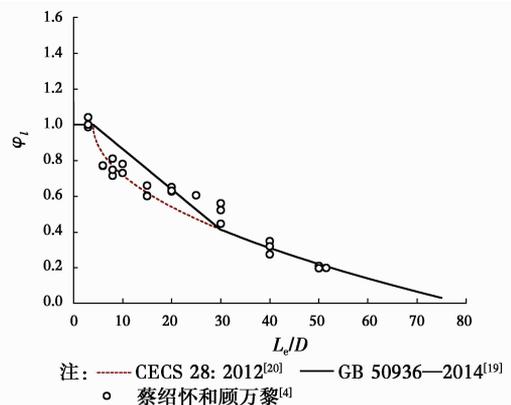


图 4 考虑长细比影响的承载力折减系数

Fig. 4 Reduction factor of ultimate strength for slenderness ratio

表 3 钢管混凝土轴压长柱极限承载力对比

Table 3 Comparison on ultimate strength of long concrete-filled steel tubular columns under axial compression

试件 编号	$D/$ mm	$t/$ mm	$L/$ mm	$f_a/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$f_c/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	极限荷载计算值					$N_{u, \text{exp}}/$ kN	比值			
						N_{u1}/kN	N_{u2}/kN	N_{u3}/kN	N_{u4}/kN	$N_{u1}/N_{u, \text{exp}}$		$N_{u2}/N_{u, \text{exp}}$	$N_{u3}/N_{u, \text{exp}}$	$N_{u4}/N_{u, \text{exp}}$	
C-1	108	4	324	352.5	35.4	827.6	1 096.6	1 096.6	922.8	1 117.2	0.741	0.982	0.982	0.826	
C-2	108	4	324	352.5	35.4	827.6	1 096.6	1 096.6	922.8	1 058.4	0.782	1.036	1.036	0.872	
C-3	108	4	324	352.5	35.4	827.6	1 096.6	1 096.6	922.8	1 073.1	0.771	1.022	1.022	0.860	

续表 3

试件 编号	D/ mm	t/ mm	L/ mm	f _a / (N·mm ⁻²)	f _c / (N·mm ⁻²)	极限荷载计算值				N _{u,exp} / kN	比值			
						N _{u1} /kN	N _{u2} /kN	N _{u3} /kN	N _{u4} /kN		N _{u1} /N _{u,exp}	N _{u2} /N _{u,exp}	N _{u3} /N _{u,exp}	N _{u4} /N _{u,exp}
C-4	108	4	648	352.5	35.4	798.0	1 047.0	918.3	889.4	825.2	0.967	1.269	1.113	1.078
C-5	108	4	648	352.5	35.4	798.0	1 047.0	918.3	889.4	828.1	0.964	1.264	1.109	1.074
C-6	108	4	864	352.5	35.4	776.4	997.5	844.4	865.0	766.4	1.013	1.302	1.102	1.129
C-7	108	4	864	352.5	35.4	776.4	997.5	844.4	865.0	801.6	0.968	1.244	1.053	1.079
C-8	108	4	864	352.5	35.4	776.4	997.5	844.4	865.0	869.3	0.893	1.147	0.971	0.995
C-9	108	4	1080	352.5	35.4	752.2	947.9	787.7	838.5	836.9	0.899	1.133	0.941	1.002
C-10	108	4	1080	352.5	35.4	752.2	947.9	787.7	838.5	783.0	0.961	1.211	1.006	1.071
C-11	108	4	1620	352.5	35.4	675.5	824.0	678.3	761.2	707.6	0.955	1.165	0.959	1.076
C-12	108	4	1620	352.5	35.4	675.5	824.0	678.3	761.2	646.8	1.044	1.274	1.049	1.177
C-13	108	4	1620	352.5	35.4	675.5	824.0	678.3	761.2	643.9	1.049	1.280	1.054	1.182
C-14	108	4	2160	352.5	35.4	570.4	700.1	592.2	668.3	672.3	0.848	1.041	0.881	0.994
C-15	108	4	2160	352.5	35.4	570.4	700.1	592.2	668.3	697.8	0.817	1.003	0.849	0.958
C-16	108	4	2160	352.5	35.4	570.4	700.1	592.2	668.3	676.2	0.844	1.035	0.876	0.988
C-17	108	4	2700	352.5	35.4	453.7	576.2	518.7	566.9	648.8	0.699	0.888	0.800	0.874
C-18	108	4	3240	352.5	35.4	352.6	453.6	453.6	469.5	559.6	0.630	0.811	0.811	0.839
C-19	108	4	3240	352.5	35.4	352.6	453.6	453.6	469.5	478.2	0.737	0.948	0.948	0.982
C-20	108	4	3240	352.5	35.4	352.6	453.6	453.6	469.5	600.7	0.587	0.755	0.755	0.782
C-21	108	4	4320	352.5	35.4	219.6	339.9	339.9	317.6	373.4	0.588	0.910	0.910	0.850
C-22	108	4	4320	352.5	35.4	219.6	339.9	339.9	317.6	343.0	0.640	0.991	0.991	0.926
C-23	108	4	4320	352.5	35.4	219.6	339.9	339.9	317.6	294.0	0.747	1.156	1.156	1.080
C-24	108	4	5400	352.5	35.4	147.0	241.3	241.3	221.6	225.4	0.652	1.070	1.070	0.983
C-25	108	4	5400	352.5	35.4	147.0	241.3	241.3	221.6	210.7	0.698	1.145	1.145	1.051
C-26	108	4	5560	352.5	35.4	139.3	227.6	227.6	210.8	212.7	0.655	1.070	1.070	0.991
PA2-1	166	5	710	288.5	47.2	2 292.3	2 202.9	2 296.2	1 836.9	1 656.2	1.384	1.330	1.386	1.109
PA2-2	166	5	710	288.5	50.8	2 399.6	2 270.6	2 388.6	1 891.6	1 906.1	1.259	1.191	1.253	0.992
PA3-1	166	5	870	326.2	50.8	2 418.2	2 386.3	2 345.3	2 003.8	1 827.7	1.323	1.306	1.283	1.096
PA3-2	166	5	870	295.6	50.8	2 381.5	2 251.0	2 240.4	1 893.1	1 862.0	1.279	1.209	1.203	1.017
PA4-1	166	5	1 700	305.8	50.8	2 235.7	2 029.2	2 1 860.1	1 787.4	1 543.5	1.448	1.315	1.205	1.158
PA4-2	166	5	1 700	326.2	50.8	2 254.1	2 108.9	2 1 917.1	1 852.6	1 460.2	1.544	1.444	1.313	1.269
PA5-1	166	5	2 700	300.7	34.4	1 498.4	1 464.0	1 268.4	1 392.9	1 117.2	1.341	1.310	1.135	1.247
PA5-2	166	5	2 700	300.7	34.4	1 498.4	1 464.0	1 268.4	1 392.9	1 271.1	1.179	1.152	0.998	1.096
PA6-1	166	5	3 700	298.7	34.4	1 217.5	1 182.8	1 075.4	1 189.0	983.9	1.237	1.202	1.093	1.208
PA6-2	166	5	3 700	298.7	34.4	1 217.5	1 182.8	1 075.4	1 189.0	958.4	1.270	1.234	1.122	1.241
最大值											1.544	1.444	1.386	1.269
最小值											0.587	0.755	0.755	0.782
均值											0.956	1.135	1.046	1.032
方差											0.266	0.156	0.144	0.125

4 结论

对比了轴心受压短柱极限承载力的计算式,提出了轴心受压长柱稳定承载力的计算式,并经 36 个试件进行验证。得到结论如下:

1)当径厚比 D/t 在 10 左右时,GB 50936—2014 和 CECS 28: 2012 中的轴压短柱极限承载力计算公式均偏过于安全。

2)GB 50936—2014 中基于套箍系数的轴压短

柱极限承载力的公式具有较高的精度。

3)本文的轴压长柱稳定系数具有明确的物理意义。由本文的稳定系数和 GB 50936—2014 中基于套箍系数的轴压短柱极限承载力公式,可以得到更为精确的轴压长柱极限承载力。

参考文献:

[1] GUO S C, LIU H F. Elastic analysis on post-local buckling of steel plates in thin-walled rectangular

- concrete-filled steel tube columns [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 204-208:912-916.
- [2] BUKOVSKÁ P, KARMAZÍNOVÁ M, NEUBAUEROVÁ P, et al. Buckling resistance of steel tubular columns filled by high-strength concrete [J]. *International Journal of Mechanics*, 2012, 95:172-177.
- [3] DING F X, LU D R, BAI Y, et al. Comparative study of square stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 98:443-453.
- [4] 蔡绍怀, 焦占拴. 钢管混凝土短柱的基本性能和强度计算 [J]. *建筑结构学报*, 1984, 5(6): 13-29.
CAI S H, JIAO Z S. Behavior and ultimate strength of short concrete-filled steel tubular columns [J]. *Journal of Building Structures*, 1984, 5(6): 13-29. (in Chinese)
- [5] RUI X, LU Z, REN Z, et al. Experimental research on the performance of micro-expansion and self-compacting concrete-filled steel tubular short column under axial compression [J]. *Procedia Earth & Planetary Science*, 2012, 5(32):19-24.
- [6] DING F X, FANG C, BAI Y, et al. Mechanical performance of stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 98:146-157.
- [7] 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): 32-40.
CAI S H, GU W L. Behaviour and ultimate strength of long concrete-filled steel tubular columns [J]. *Journal of Building Structures*, 1985, 6(1): 32-40. (in Chinese)
- [8] QI H T, GUO L H, LIU L P, et al. Axial load behavior and strength of tubed steel reinforced-concrete (SRC) stub columns [J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(9):1141-50.
- [9] ZHANG J C, YANG J. Study on mechanism of L-shaped concrete-filled steel tubular columns subjected to axial compression [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 476/477/478:2463-2468.
- [10] 蔡绍怀, 邸小坛. 钢管混凝土偏压柱的性能和强度计算 [J]. *建筑结构学报*, 1985, 6(4): 32-42.
CAI S H, DI X T. Behaviour and ultimate strength of concrete-filled steel tubular columns under eccentric loading [J]. *Journal of Building Structures*, 1985, 6(4): 32-42. (in Chinese)
- [11] ZHOU X H, YAN B, LIU J P. Behavior of square tubed steel reinforced-concrete (SRC) columns under eccentric compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 91:129-138.
- [12] ZHOU X H, LIU J P, WANG X, et al. Behavior and design of slender circular tubed-reinforced-concrete columns subjected to eccentric compression [J]. *Engineering Structures*, 2016, 124:17-28.
- [13] ABDELGADIR E, BOHAI J, ZHONGQIU F, et al. The behavior of lightweight aggregate concrete filled steel tube columns under eccentric loading [J]. *Steel & Composite Structures*, 2011, 11(6):469-488.
- [14] HAN L H, LI W. Seismic performance of concrete-filled steel tubular (CFST) structures [C]// *Seismic Design of Industrial Facilities*, 2014.
- [15] LIU J, ABDULLAH J A, ZHANG S. Hysteretic behavior and design of square tubed reinforced and steel reinforced concrete (STRC and/or STSRC) short columns [J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(7): 874-888.
- [16] MIN Y U, ZHA X, JIANQIAO Y E, et al. A unified formulation for circle and polygon concrete-filled steel tube columns under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2013, 49(2):1-10.
- [17] WANG J, ZHAO J H, SAI W U, et al. Calculation of axial bearing capacity of rectangular concrete-filled steel tube short column based on twin shear unified strength theory [J]. *Journal of Architecture & Civil Engineering*, 2011, 28(3):88-92.
- [18] ZHANG Y, ZHAO J. Calculation of compressive bearing capacity of concrete-filled twin steel tubes based on twin shear unified strength theory [J]. *Mechanics in Engineering*, 2012, 34(3):36-42.
- [19] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB 50936-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [20] 钢管混凝土结构技术规程: CECS 28:2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Technical specification for concrete-filled steel tubular structures: CECS 28:2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [21] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)