

文章编号:2095-1922(2012)06-0974-07

方钢管混凝土短柱轴压承载力尺寸效应

陆新征¹ 张万开¹ 李 易² 叶列平¹

(1. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 清华大学土木工程系, 北京 100084;
2. 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京工业大学, 北京 100124)

摘要:目的 方钢管混凝土短柱轴心受压承载力存在尺寸效应,为了提高大尺寸方钢管混凝土轴心受压承载力设计计算的准确性,研究了考虑尺寸效应的方钢管混凝土短柱轴压承载力计算方法.方法 笔者介绍了日本 AIJ 规范、美国 AISC-LRFD 规程、欧洲 EC4 规范和我国韩林海等提出的方钢管混凝土短柱轴压承载力计算公式,并用这些公式对收集的大量实验结果进行了计算分析,然后在已有的计算公式基础上引入尺寸效应模型,采用修正后的计算公式进行计算并与未修正的计算结果进行比较.结果 现有的方钢管混凝土短柱轴压承载力计算公式的计算结果存在明显的尺寸效应,而在这些计算公式中引入尺寸效应模型进行修正后,计算结果的尺寸效应得到了明显改善.结论 笔者探讨的4种计算公式都存在随着构件尺寸增大计算结果比实验值偏大的趋势,即计算公式无法准确反映构件轴压承载力存在的尺寸效应;通过引入混凝土材料的尺寸效应模型,对方钢管混凝土轴压承载力计算公式进行修正,可以有效减小方钢管混凝土轴压承载力的尺寸效应影响,从而为方钢管混凝土轴心受压承载力设计计算提供参考.

关键词:方钢管混凝土柱;轴压承载力;尺寸效应;设计方法

中图分类号:TU375 文献标志码:A

Size Effect of Axial Strength of Concrete-Filled Square Steel Tube Columns

LU Xinzheng¹ ZHANG Wankai¹ LI Yi² YE Lieping¹

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 100084; 2. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing, China, 100124)

Abstract: Concrete-filled square steel tube columns with very large sectional sizes are widely applied in recent years. However, the existing axial strength models of concrete-filled square steel tube column are proposed mostly based on small sectional size specimens. Thus, the accuracy of existing models for large specimens, viz the size effect of these models, need further investigation. In this work, the design methods to calculate the axial strength of concrete-filled square steel tube column proposed by the AIJ code of Japan, the AISC-LRFD design specification of the United States, the EC4 code of Europe and Han of China are introduced. Based on 252 test specimens, the comparisons between the test results and the computational results by different design methods are conducted. It can be concluded from the comparison that the design methods

收稿日期:2012-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51178249);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0528);中国博士后科学基金项目(2012M510301);北京工业大学博士启动基金项目(004000543112529)

作者简介:陆新征(1978—),男,副教授,博士,主要从事结构非线性仿真及防灾减灾研究.

for the axial strength of concrete-filled square steel tube columns have obvious size effects. The existing design models may overestimate the strength of the specimens with large sectional size. By introducing the size effect model of concrete, the design methods are modified and the predicted results are obviously improved. This method considering size effect may provide a reference on calculating the axial strength of concrete-filled square steel tube columns with large size.

Key words: concrete-filled square steel tube columns; axial strength; size effect; design method

混凝土作为一种准脆性材料,其材料性能存在随试件几何尺寸变化的尺寸效应。典型的例子是相同混凝土配制的试件的轴压强度随试件尺寸增大而减小^{[1] - [2]}。国内学者也对混凝土构件轴压性能的尺寸效应开展了研究^[3]。混凝土的尺寸效应在方钢管混凝土承载力中也有明显体现。吴寒亮^[4]等根据 Bazant 的统一尺寸律^{[5] - [6]}分析了 5 组共 19 个圆钢管混凝土柱轴心受压实验,结果表明圆钢管混凝土轴心受压柱的尺寸效应满足 Bazant 的统一尺寸律。李小伟^[7]采用折减混凝土强度的方法考虑混凝土材料的尺寸效应,推导了方钢管混凝土极限承载力计算公式,计算值与实验结果符合良好。Sakino^[8]等人在钢管混凝土柱轴压承载力计算中引入混凝土强度折减系数以考虑混凝土受压强度的尺寸效应,计算结果与实验结果吻合良好。Yamamoto^[9]等通过考虑混凝土强度的尺寸效应提出了计算方钢管混凝土短柱承载力的方法,在一定范围内可以提高方钢管混凝土短柱的承载能力计算精度。

现有的研究表明,通过参考混凝土材料的尺寸效应研究成果,在方钢管混凝土柱轴压承载力计算中引入混凝土强度折减系数,可以取得较好效果。但现有的研究主要是不同学者在各自提出的计算公式上进行了考虑混凝土材料尺寸效应的修正,且统计的数据量也比较小。而对已成文的规范或规程的计算公式,并没有进行基于大量试验数据的相关研究。笔者介绍了日本 AIJ 规范、美国 AISC - LRFD 规程、欧洲 EC4 规范和我国韩林海等提出的四种方钢管混凝土短柱轴压承载力计算公式,这些公式并没有明确将混凝土材料的尺寸效应考虑在其中,因此笔者采用前述思路对各个计算公式进行修正,以考察这些计算公式在考虑尺寸效应前后的计算结果差异。

1 方钢管混凝土尺寸效应修正公式

针对钢管混凝土轴压承载力存在的尺寸效应

问题,日本学者野口贵文等^[10]提出按下式考虑混凝土的尺寸效应:

$$\sigma_N = \sigma_0 (V/V_0)^{-1/(1+b)} \quad b = 27. \quad (1)$$

式中: σ_0 为参考试件的强度, MPa; V_0 为参考试件的体积, mm^3 ; b 为系数。

Blanks 和 McNamara^[11]通过对混凝土圆柱体抗压强度实验进行仔细研究后,认为混凝土圆柱体轴心抗压强度存在尺寸效应,并提出以下尺寸效应系数 γ_U 对混凝土圆柱体轴心抗压强度进行修正:

$$\gamma_U = 1.67 D_c^{-0.112}. \quad (2)$$

式中: D_c 为圆柱体混凝土试件的直径; mm。

对于方形混凝土试件,通过面积等效原理将方形转换为圆形后,取等效圆形试件的直径,即 $D_c = \sqrt{4A/\pi}$, A 为构件截面积, mm^2 。按式(2)对方钢管混凝土构件的混凝土轴心抗压强度进行折减,可考虑方钢管混凝土轴心受压构件的混凝土强度的尺寸效应。笔者从公式的易用性考虑,也采用了式(2)对方钢管混凝土轴心受压构件的尺寸效应进行修正。由于式(2)是根据混凝土试验提出的,而方钢管混凝土中的混凝土与普通混凝土边界条件和受力状态差异较大,根据混凝土试验得到的 γ_U 的表达式不一定适用于钢管混凝土,因此将式(2)应用于各个公式时,对 γ_U 进行如下变形:

$$\gamma_U = k D_c^{-r}. \quad (3)$$

式中: k 和 r 为待定常数,针对不同的计算公式,根据收集的试验数据进行回归分析得到。

2 各公式的计算结果

笔者共收集了 252 个来自不同国家或地区的学者进行的正方形钢管混凝土构件轴压试验数据,分别采用上文提到的 4 个公式计算其承载力。由于韩林海公式对参数取值范围有一定的要求,在收集的试验数据中共有 56 个构件试验不满足韩林海公式的要求,因此,韩林海公式计算试件数

量为196个。

2.1 韩林海公式

韩林海等^[12]研究了 $f_y = 200 \sim 700 \text{ MPa}$ 、 $f_{cu} = 30 \sim 120 \text{ MPa}$ 、 $\alpha = 0.03 \sim 0.2$ 范围内的钢管混凝土轴压荷载-变形关系,得到了钢管混凝土轴压轴心受压时的强度指标 f_{scy} 。提出了钢管混凝土轴压强度承载力的计算公式。其方钢管混凝土的计算公式如下:

$$f_{scy} = (1.18 + 0.85 \cdot \xi) \cdot f_{ck},$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha \frac{f_y}{f_{ck}},$$

$$N_u = A_{sc} \cdot f_{scy}. \tag{4}$$

式中: ξ 为钢管混凝土的约束效应系数; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值,MPa; f_y 为钢材屈服强度,MPa; α 为钢管混凝土截面含钢率; A_{sc} 为钢管混凝土横截面面积,mm²。

根据Blanks和McNamara^[11]的研究成果,引入混凝土强度修正系数 γ_U 考虑方钢管混凝土轴心受压构件的尺寸效应。按照方钢管混凝土构件

截面钢材部分的名义承载力占截面总名义承载力的比率对混凝土部分进行修正,具体计算公式如式(5)所示:

$$N_u = A_{sc} \cdot f_{scy} \cdot (1 - \beta) \cdot \gamma_U + A_{sc} \cdot f_{scy} \cdot \beta. \tag{5}$$

式中: β 为钢材部分的名义承载力占截面总名义承载力的比率,即: $\beta = A_s f_y / (A_s \cdot f_y + A_c \cdot f_{ck})$ 。

采用式(4)、(5)对收集得到的196个方钢管混凝土短柱轴心受压实验数据进行计算,其中 γ_U 通过对试验数据进行回归分析得到,其表达式为

$$\gamma_U = 3.10 D_c^{-0.222}. \tag{6}$$

计算结果如图1所示,图中 D 为方钢管混凝土边长, N_{uc} 为计算结果, N_{ue} 为试验结果。从图1可以看出,不考虑尺寸效应时,随着构件截面尺寸增大,按式(4)的计算结果明显有比实验值偏大的趋势,而考虑尺寸效应后,计算值随着构件尺寸增大而比实验值偏大的趋势得到了明显削减,也从另一个侧面说明了考虑尺寸效应后,计算的准确性有所提高。

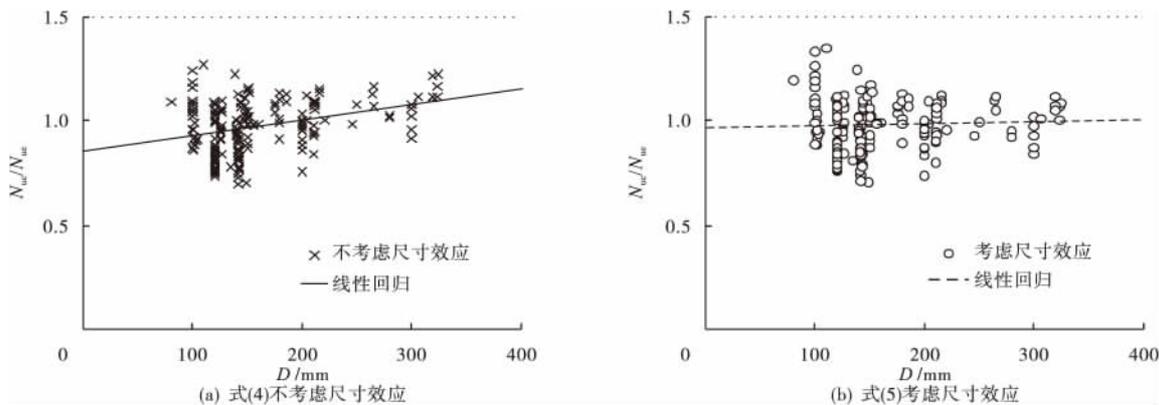


图1 韩林海公式计算结果

Fig. 1 The results of HLH formula

2.2 日本AIJ规范

日本AIJ规范^[13-14]采取叠加钢材和混凝土二者承载力的方法计算钢管混凝土柱轴心受压承载力,对于短柱则按下式(7)计算轴心受压强度承载力:

$$N_u = 0.85 \cdot A_c \cdot f_c + A_s \cdot f_y. \tag{7}$$

式中:系数0.85是考虑结构中的混凝土强度与试件混凝土强度的差异等因素而提出的对试件混凝土强度的修正^[15]。在式(7)中引入文献[11]提出的混凝土强度尺寸效应模型,以考虑方钢管混凝土柱的混凝土尺寸效应,则考虑混凝土尺寸效应

的计算公式如式(8)所示:

$$N_u = \gamma_U \cdot 0.85 \cdot A_c \cdot f_c + A_s \cdot f_y. \tag{8}$$

采用式(7)、(8)对收集得到的252个方钢管混凝土短柱轴心受压实验进行计算,其中 γ_U 通过对试验数据进行回归分析得到,其表达式为

$$\gamma_U = 5.02 D_c^{-0.280}. \tag{9}$$

计算结果如图2所示。从图2可以看出,式(7)存在预测结果随着试件尺寸增大而增大的趋势,表现出明显的尺寸效应。而引入尺寸效应模型后,式(8)的预测效果得到明显改善。

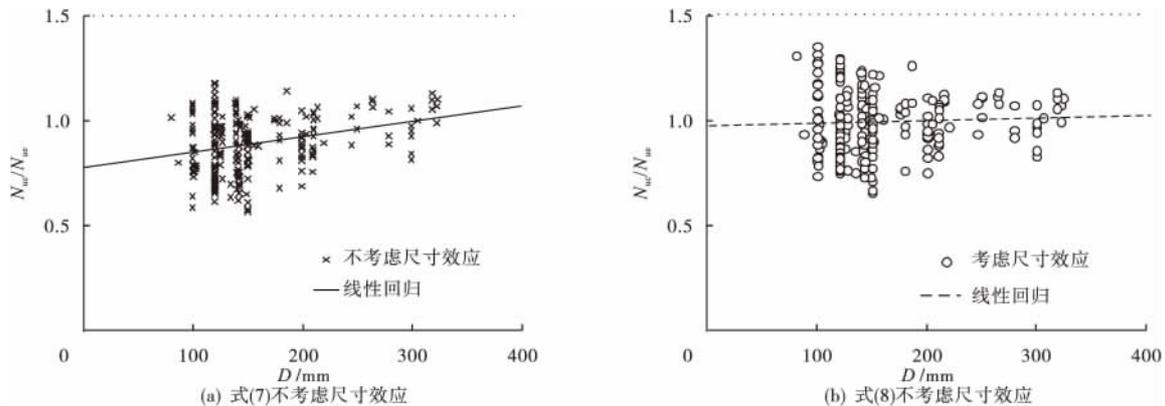


图 2 日本 AIJ 计算公式计算结果

Fig. 2 The results of AIJ formula

2.3 美国 AISC - LRFD 规程

美国钢结构协会 AISC 制定的 LRFD 规程^[14, 16]考虑了构件的整体稳定性, 首先将混凝土的强度折算到钢材中, 得到钢材名义抗压强度 F_{cr} , 再由 F_{cr} 计算轴压构件的承载力, 如式(10)所示:

$$N_u = A_s \cdot F_{cr} \quad (10)$$

式中 F_{cr} 按式(11)计算:

$$F_{cr} = \begin{cases} (0.658^{\lambda_c^2}) \cdot F_{my} & \lambda_c \leq 1.5 \\ (0.877/\lambda_c^2) \cdot F_{my} & \lambda_c > 1.5. \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$F_{my} = f_y + 0.85 \cdot f'_c \cdot (A_c/A_s),$$

$$\lambda_c = \frac{kL}{\pi r_m} \sqrt{\frac{F_{my}}{E_m}},$$

$$E_m = E_s + 0.4E_c(A_c/A_s). \quad (12)$$

式中: F_{my} 为修正后的钢管屈服强度; λ_c 为相对长

细比; k 为有效计算长度系数; E_m 为修改后的钢材弹性模量, MPa; r_m 为截面回转半径, mm.

式(12)中计算 F_{my} 时对混凝土的强度作了固定系数 0.85 的折减, 以考虑结构中的混凝土强度与试件混凝土强度的差异等因素^[17]. 在式(12)中引入文献[11]提出的混凝土强度尺寸效应模型, 以考虑方钢管混凝土柱的混凝土尺寸效应, 即按式(13)计算 F_{my} :

$$F_{my} = f_y + \gamma_U \cdot 0.85 \cdot f'_c \cdot (A_c/A_s). \quad (13)$$

采用式(10)~(13)对收集得到的 252 个方钢管混凝土短柱轴心受压实验进行计算, 其中 γ_U 通过对试验数据进行回归分析得到, 其表达式为:

$$\gamma_U = 6.19D_c^{-0.318}. \quad (14)$$

计算结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 与 AIJ 规范结果类似, 式(12)存在明显的尺寸效应. 而修正后的式(13)尺寸效应影响明显减小.

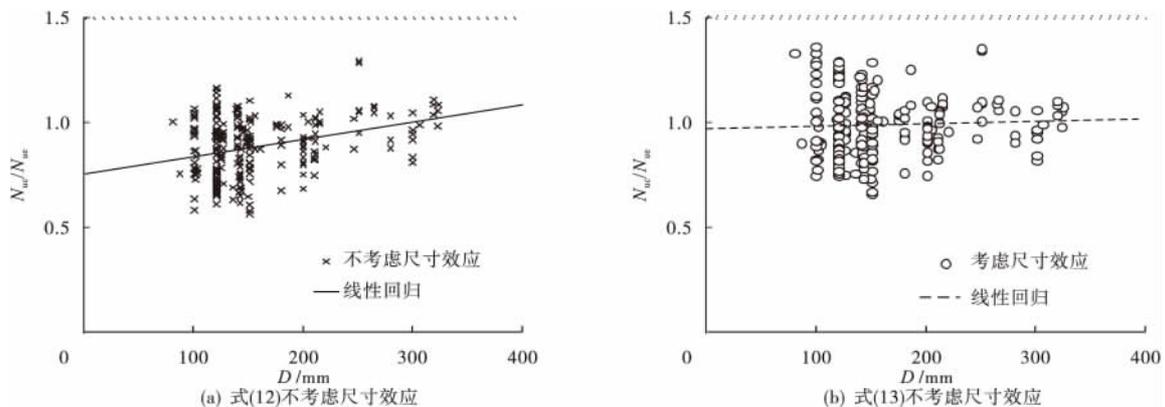


图 3 美国 AISC - LRFD 规程计算公式计算结果

Fig. 3 The results of AISC-LRFD formula

2.4 欧洲 EC4 规范

EC4 规范^[18-19]按下式(15)、(16)计算方钢管混凝土轴压构件承载力,

$$N_u = \chi N_{pl,R} \quad (15)$$

其中:

$$N_{pl,R} = A_s f_y + A_c f_{ck} \quad (16)$$

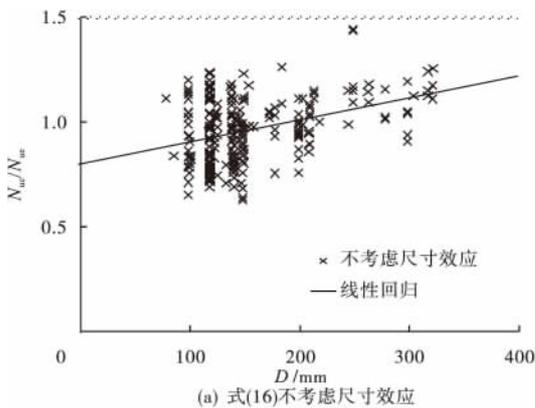
式中: A_s 为方钢管混凝土截面钢管截面面积, mm^2 ; A_c 为核心混凝土截面面积, mm^2 ; f_y 为钢材屈服强度, MPa ; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值, MPa ; χ 为轴压稳定系数, 与换算长细比 $\bar{\lambda}$ 及截面有效弹性刚度 $(EI)_e$ 有关, χ 按下式计算:

$$\chi = \begin{cases} 1.0 & \bar{\lambda} \leq 0.2 \\ 1 / (\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}) & \bar{\lambda} > 0.2 \end{cases}$$

$$\phi = 0.5 [1 + 0.21(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{N_{pl,R} / N_{cr}}$$

$$N_{cr} = \pi^2 (EI)_e / l^2$$



$$(EI)_e = E_s I_s + 0.8 E_c I_c$$

为了考虑方钢管混凝土轴心受压构件的尺寸效应,在上述计算公式中计算 $N_{pl,R}$ 时引入混凝土强度折减系数 γ_U ,以考虑方钢管混凝土柱的混凝土尺寸效应,即:

$$N_{pl,R} = A_s f_y + A_c f_{ck} \cdot \gamma_U \quad (17)$$

采用式(15)~(17)对收集得到的252个方钢管混凝土短柱轴心受压实验进行计算,其中 γ_U 通过对试验数据进行回归分析得到,其表达式为:

$$\gamma_U = 6.29 D_c^{-0.318} \quad (18)$$

计算结果如图4所示.从图4可以看出,采用欧洲 EC4 规范计算方钢管混凝土短柱轴心受压强度承载力时,同样表现出了明显的尺寸效应,即随着构件截面尺寸增大,根据式(16)的计算值比试验值偏大趋势增加,而考虑尺寸效应后,这种趋势得到了明显改善.

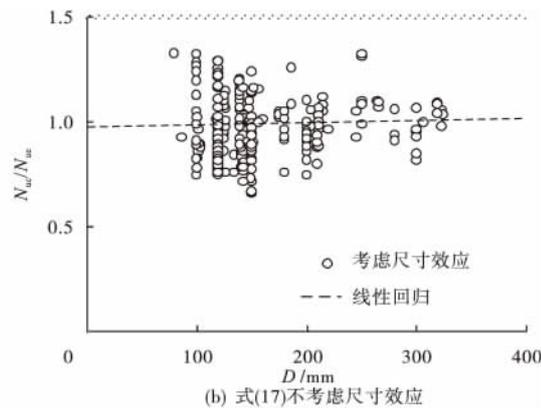


图4 欧洲 EC4 规范计算公式计算值与实验值

Fig. 4 The calculation results of Eurocode 4 formula

3 计算结果比较

将前述四种钢管混凝土构件轴心受压承载力设计计算公式的计算结果进行比较,结果如表1所示,表中 N_{ucA} 表示不考虑尺寸效应修正的计算结果, N_{ucB} 表示考虑尺寸效应修正的计算结果.

为说明尺寸效应的影响,将收集的试验数据分为 $D \leq 200 \text{ mm}$ 和 $D > 200 \text{ mm}$ 两个集合分别计算.从表中也同样可以看出,现有计算公式在构件尺寸 $> 200 \text{ mm}$ 后预测结果偏大的趋势比较明显.而通过尺寸效应修正后,这一趋势得到明显改善.同时,尺寸效应修正后,计算公式误差的变异系数也有所降低.

4 外推计算比较

近年来,一些重大工程中使用的方钢管混凝土其尺寸甚至达到 3000 mm 以上.由前面的分析可知,现有的计算公式的预测结果随着构件尺寸的增大明显偏于不安全.而这样大尺寸的钢管混凝土又无法进行足尺试验.而笔者通过分析已有钢管混凝土试验中存在的尺寸效应,给出了大尺寸钢管混凝土的考虑尺寸效应的修正方法,对保障这些重大工程中钢管混凝土结构的安全具有很好的参考价值.

选取了 $D = 1000 \text{ mm}$ 、 $D = 2000 \text{ mm}$ 、 $D = 3000 \text{ mm}$ 3种截面尺寸,截面宽厚比 D/t 根据常见的宽厚比取值3种情况为100、50、20,混凝土

强度取值为中等混凝土强度($f_{cu} = 50$ MPa), 钢材强度取值为 $f_y = 210$ MPa. 根据以上条件, 分别采用前文介绍的公式进行计算, 结果如表 2 所示. 表

中 t 为钢管壁厚, N_{ucA} 表示各计算公式未引入尺寸效应模型的计算结果, N_{ucB} 表示各计算公式引入尺寸效应模型的计算结果.

表 1 各计算公式计算结果比较

Table 1 Comparison of the results from each formula mentioned above

计算式		所有试件		$D \leq 200$ mm 试件		$D > 200$ mm 试件	
		N_{ucA} / N_{ue}	N_{ucB} / N_{ue}	N_{ucA} / N_{ue}	N_{ucB} / N_{ue}	N_{ucA} / N_{ue}	N_{ucB} / N_{ue}
韩林海	平均值	0.975	0.986	0.954	0.980	1.063	1.012
	均方差	0.122	0.119	0.120	0.125	0.086	0.081
	变异系数	0.125	0.121	0.126	0.128	0.081	0.080
日本 AIJ	平均值	0.890	0.982	0.873	0.976	0.979	1.013
	均方差	0.128	0.139	0.133	0.146	0.092	0.086
	变异系数	0.144	0.142	0.152	0.150	0.094	0.085
美国 AISC - LRFD	平均值	0.883	0.986	0.863	0.978	0.983	1.020
	均方差	0.136	0.144	0.132	0.149	0.111	0.109
	变异系数	0.154	0.146	0.153	0.152	0.113	0.107
欧洲 EC4	平均值	0.964	0.986	0.938	0.979	1.093	1.018
	均方差	0.149	0.141	0.140	0.147	0.122	0.105
	变异系数	0.155	0.143	0.149	0.150	0.112	0.103

表 2 各计算公式外推计算结果比较

Table 2 Comparison of the extrapolated results from each formula mentioned above

D/mm	t/mm	D/t	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	N_{ucA} / N_{ucB}			
					韩林海公式	日本 AIJ	美国 AISC - LRFD	欧洲 EC4
1 000	10.00	100.0	210.0	50.0	1.395	1.172	1.222	1.387
1 000	20.00	50.0	210.0	50.0	1.303	1.142	1.182	1.317
1 000	50.00	20.0	210.0	50.0	1.169	1.089	1.113	1.197
2 000	20.00	100.0	210.0	50.0	1.562	1.365	1.449	1.645
2 000	40.00	50.0	210.0	50.0	1.419	1.292	1.356	1.513
2 000	100.00	20.0	210.0	50.0	1.224	1.175	1.209	1.302
3 000	30.00	100.0	210.0	50.0	1.664	1.487	1.594	1.811
3 000	60.00	50.0	210.0	50.0	1.487	1.384	1.462	1.632
3 000	150.00	20.0	210.0	50.0	1.255	1.223	1.262	1.360

从表 2 可以看出, 当构件尺寸增大, 尺寸效应的影响也愈发明显. 当构件尺寸达到 3 m 时, 不考虑尺寸效应可能会高估承载力达到 50% 左右. 因此, 笔者提出的尺寸效应模型对安全合理应用大尺寸方钢管混凝土有着良好的参考价值.

5 结 论

(1) 选取了国内学者韩林海、日本 AIJ 规范、美国 AISC - LRFD 规程和欧洲 EC4 规范提出的四种钢管混凝土构件轴心受压承载力计算公式, 对收集得到的 252 个方钢管混凝土短柱轴压实验

数据进行计算,计算结果表明,随着构件截面尺寸增大,这4种计算公式的计算结果都有比实验值偏大的趋势,即计算公式无法准确反映构件轴压承载力存在的尺寸效应。

(2) 通过将混凝土的尺寸效应模型引入方钢管混凝土轴心受压构件计算公式,可以有效削弱各计算公式随着截面尺寸增大而结果偏高的趋势,提高各计算公式的准确性,从而为方钢管混凝土轴心受压承载力设计计算提供参考。

参考文献:

- [1] Tanigawa Y, Yamada K. Size effect in compressive strength of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1978, 8(2): 181-190.
- [2] 苏捷,方志,杨钻. 混凝土单轴受压性能尺寸效应的试验研究[J]. *工业建筑*, 2012, 42(6): 122-126.
(Su Jie, Fang Zhi, Yang Zuan. Experimental study on the size effect of concrete uniaxial compressive behavior [J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(6): 122-126.)
- [3] 杜修力,符佳,张建伟. 钢筋混凝土柱轴心受压性能尺寸效应的大比尺试验研究[J]. *土木工程学报* 2010, 43(S2): 1-8.
(Du Xiuli, Fu Jia, Zhang Jianwei. The experimental study on size effect of the large-size reinforced concrete column under axial loading [J]. *China Civil Engineering Journal* 2010, 43(S2): 1-8.)
- [4] 吴寒亮,王元丰. 钢管混凝土柱的尺寸效应研究[J]. *哈尔滨工业大学学报* 2007, 39(S2): 22-25.
(Wu Hanliang, Wang Yuanfeng. Study on size effect of concrete filled steel tubular columns [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(s2): 22-25.)
- [5] 王文标,黄晨光,赵红平,等. 结构破坏的尺度律[J]. *力学进展*, 1999, 29(3): 383-433.
(Wang Wenbiao, Huang Chenguang, Zhao Hongping et al. Scaling of structural failure [J]. *Advances in Mechanics*, 1999, 29(3): 383-433.)
- [6] 李勇,郑建军,金贤玉. Bazant 尺寸效应律分析及其应用[J]. *混凝土* 2003, 2: 35-36 43.
(Li Yong, Zheng Jianjun, Jin Xianyu. Analysis and application of Bazant's size effect laws [J]. *Concrete* 2003, 2: 35-36 43.)
- [7] 李小伟,赵均海,朱铁栋,等. 方钢管混凝土轴压短柱的力学性能[J]. *中国公路学报* 2006, 19(4): 77-81.
(Li Xiaowei, Zhao Junhai, Zhu Tiedong, et al. Mechanics behavior of axially loaded short columns with concrete-filled square steel tube [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(4): 77-81.)
- [8] Sakino K, Nakahara H, Morino S, I. Nishiyama. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2004, 130(2): 180-188.
- [9] Yamamoto T, Kawaguchi J, S. Morino. Scale effect on compression behavior of concrete-filled steel tube short columns [J]. *Research Reports of the Faculty of Engineering* 2000, 25: 27-44.
- [10] Noguchi T, Tomosawa F. Relationship between compressive strength and various mechanical properties of high strength concrete [J]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Tokyo, 1995, (472): 11-16.
- [11] Blanks R F, McNamara C C. Mass concrete tests in large cylinders [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1935, 31: 280-303.
- [12] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
(Han Linhai. Concrete-filled steel tubular structures: theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2007.)
- [13] Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures [S]. *Architectural Institute of Japan (AIJ)*, Oct., 1997.
- [14] 陶忠, 韩林海. 方钢管混凝土基本构件承载力设计方法[J]. *哈尔滨建筑大学学报* 2001, 34(3): 16-22.
(Tao Zhong, Han Linhai. Design of concrete filled square steel tubular members [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 2011, 34(3): 16-22.)
- [15] 马欣伯, 张素梅, 孙玉平. 日本 AIJ 关于圆钢管混凝土构件承载力设计方法介绍[J]. *工业建筑*, 2004, 34(2): 69-74.
(Ma Xinbo, Zhang Sumei, Sun Yuping. Introduction to AIJ method of load-carrying capacity of concrete-filled circular steel tubes [J]. *Industrial Construction*, 2004, 34(2): 69-74.)
- [16] Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]. *American Institute of Steel Construction (AISC), Inc*, 1999.
- [17] 马欣伯, 张素梅. 美国 AISC-LRFD (99) 关于圆钢管混凝土构件承载力设计方法介绍[J]. *工业建筑* 2004, 34(2): 61-64.
(Ma Xinbo, Zhang Sumei. Introduction to AISC-LRFD method of load-carrying capacity of concrete-filled circular steel tubes [J]. *Industrial Construction*, 2004, 34(2): 61-64.)
- [18] Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. *European Committee for Standardization*, 2004.