

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.087



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



考虑尺寸效应影响的钢筋混凝土构件 纯扭承载力计算方法

金浏, 祝华杰, 杜修力

(北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:近年来,钢筋混凝土构件的抗扭设计问题受到了广泛关注,现行的设计规范是基于小尺寸试件的试验数据外推而来,并未考虑尺寸效应的影响,对大尺寸试件承载力预测值的安全度有待商榷。对比分析国内外规范中RC构件纯扭承载力计算方法公式,基于钢筋混凝土柱纯扭加载三维细观数值模拟结果,总结钢筋混凝土柱名义抗扭强度尺寸效应规律,建立可定量反映配箍率影响的名义抗扭强度尺寸效应律公式;通过引入尺寸效应系数 α_n 建立考虑结构尺寸效应影响的钢筋混凝土构件纯扭承载力建议预测公式,并将 α_n 分为3个区域,综合考虑结构设计的安全性和经济性,从而保证大尺寸试件承载力预测值的安全度;通过与90个试验数据的对比,证明修正公式能有效提高大尺寸试件承载力预测值的安全储备。

关键词:钢筋混凝土构件;纯扭承载力;尺寸效应;抗扭设计

中图分类号: TU312 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)05-0143-09

Calculation for pure torsional capacity of reinforced concrete members considering size effect

JIN Liu, ZHU Huajie, DU Xiuli

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: The torsional structure design of RC members has been widely concerned in recent years. However, the existing design codes are extrapolated based on the test data of small size specimens without considering the impact of size effect, so the safety degree of the predicted values of large size specimens remains to be further discussed. In this paper, the calculation formulas of pure torsional bearing capacity at home and abroad were compared and analyzed. Based on the results of three-dimensional mesoscopic numerical simulation of pure torsional loading of reinforced concrete columns, the size effect law of nominal torsional strength of RC columns was summarized, and the size effect law formula of nominal torsional strength which can quantitatively reflect the effect of stirrup ratio was established. Furthermore, by introducing the size effect coefficient α_n , a suggestion

收稿日期: 2022-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51978022)

作者简介: 金浏(1985-),男,博士,教授,主要从事混凝土与混凝土结构研究, E-mail: jinliu@bjut.edu.cn.

杜修力(通信作者),男,博士,中国工程院院士,教授, E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn.

Received: 2022-03-20

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51978022)

Author brief: JIN Liu (1985-), PhD, professor, main research interests: concrete and concrete structure, E-mail: jinliu@bjut.edu.cn.

DU Xiuli (corresponding author), PhD, academician of the Chinese Academy of Engineering, professor, E-mail:

duxuli@bjut.edu.cn.

predicted formula for the pure torsional capacity of RC members considering the influence of size effect was proposed, and α_n is divided into three regions, which comprehensively considers the safety and economy of structural design, so as to ensure the safety of the predicted values of large size specimens. By comparing the existing 90 test data, it was proved that the modified formula can effectively improve the safety reserve of the predicted bearing capacity of large size specimens.

Keywords: reinforced concrete members; pure torsional capacity; size effect; torsional structure design

随着城镇化的快速发展,建筑结构逐渐向大型化和复杂化发展。在城市建筑的规划和建设过程中,考虑到场地的限制以及建筑造型和道路交通的需要,经常出现斜柱以及曲线梁桥。在实际的受力状态中,斜柱及曲线梁桥的柱墩,除了受到轴力和弯矩的作用,还可能存在扭矩的作用。在扭矩存在的复合受力状态下,柱的破坏更为严重且较难预测。在2008年汶川地震回澜立交桥的震害调查^[1]中可以发现,墩梁固结的桥墩在水平地震作用下,由于扭转作用的存在,柱墩发生更为严重的扭剪破坏。

混凝土作为准脆性材料,其尺寸效应问题已被证实。笔者及团队人员在先前的工作中,已探究了钢筋混凝土(RC)柱的轴压尺寸效应^[2]、RC梁的剪切尺寸效应^[3]以及钢管混凝土柱的轴压尺寸效应问题^[4]。扭转破坏类似于剪切破坏,也具有尺寸效应行为。Bazant等^[5]、Kirane等^[6]研究发现,钢筋混凝土构件扭转破坏为典型的脆性破坏,具有明显的尺寸效应行为。Bazant等^[5]对最大截面尺寸为150 mm的素混凝土梁进行了纯扭转试验,发现素混凝土梁高从38 mm增加至150 mm,其名义抗扭强度下降了37%。Kirane等^[6]基于Bazant等^[5]的试验,进行了无/有腹筋梁(最大截面尺寸为250 mm)纯扭转破坏的数值模拟研究,发现其名义抗扭强度依然存在尺寸效应。Jin等^[7]借助三维细观数值模拟方法,进行了最大截面尺寸为1 000 mm的钢筋混凝土圆/方柱纯扭转破坏数值模拟,再次证明了钢筋混凝土柱纯扭转破坏具有明显的尺寸效应,截面尺寸从200 mm增加到1 000 mm,名义抗扭强度下降近30%。因此,为避免建筑物构件因尺寸效应行为在地震作用下发生脆性的扭转破坏,有必要关注钢筋混凝土构件的扭转设计方法。

各国现行规范中,大多数钢筋混凝土构件的纯扭承载力计算公式均是基于变角桁架理论建立的^[8-9]。试件扭转开裂后,由具有螺旋形裂缝的混凝土外壳、纵筋和箍筋共同组成空间桁架(纵筋为受拉弦杆,箍筋为受拉腹杆,斜裂缝间的混凝土为斜压腹杆),来抵抗扭矩作用。桁架模型中的压杆倾角 θ 随着纵筋与箍筋配筋强度比值的变化而变化。

美国规范ACI 318-19^[10]、欧洲规范EN 1992-A1-2014^[11]、加拿大规范CSA A23.3-04^[12]直接采用变角桁架模型建立了纯扭承载力计算公式,未考虑混凝土部分提供的抗扭作用。而中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[13]中,钢筋混凝土构件的纯扭承载力为混凝土和钢筋所起作用之和来计算,纵筋和箍筋的作用采用变角空间桁架模型体现。但至今工程中受扭构件的设计主要基于试验结果的经验公式,或根据简化力学模型推导的近似计算式。中国规范GB 50010—2010^[13]通过对钢筋混凝土构件试验数据^[14]进行经验回归,得到纯扭承载力的计算公式。但计算公式大多基于小尺寸试件的试验数据外推而来^[14],且未考虑尺寸效应的影响,对大尺寸试件承载力预测值的安全度有待进一步讨论。

综合以上分析,笔者在Jin等^[7]研究的基础上,建立了能定量反映配箍率对尺寸效应削弱影响的名义抗扭强度尺寸效应公式,进而基于此公式对中国规范提出了修正建议,考虑了尺寸效应的影响。最后,与已有RC构件纯扭破坏试验数据进行了对比分析,证明了所提出的建议公式可更合理地预测不同尺寸试件的承载力。

1 纯扭承载力规范公式

1.1 欧美规范

美国规范ACI 318-19^[10]、欧洲规范EN 1992-A1-2014^[11]、加拿大规范CSA A23.3-04^[12]基于变角桁架模型,仅考虑了钢筋的抗扭作用,提出了RC构件的纯扭承载力公式。

$$T_u = T_s = \frac{2A_o A_t f_{yv}}{s} \cot \theta \quad (1)$$

式中: T_u 为纯扭承载力; T_s 为钢筋提供的纯扭承载力; A_o 为剪应力流包围的毛面积,取 $A_o = 0.85A_{cor}$, A_{cor} 为受扭箍筋所围区域面积; A_t 为箍筋单肢截面面积; f_{yv} 为受扭箍筋的屈服强度; s 为箍筋间距; θ 为桁架模型的压杆倾角。

1.2 中国规范

中国规范GB 50010—2010^[13]考虑了钢筋和核心混凝土的抗扭作用,纯扭承载力公式为

$$T_u = T_c + T_s = \alpha_1 f_t W_t + \alpha_2 \sqrt{\zeta} \frac{f_{yv} A_{st1}}{s} A_{cor} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{f_y A_{st1} s}{f_{yv} A_{st1} u_{cor}} \quad (3)$$

式中: T_c 为核心混凝土提供的纯扭承载力; f_t 为混凝土的抗拉强度; W_t 为受扭塑性抵抗矩; ζ 为纵筋和箍筋的配筋强度比, ζ 与欧美规范中 $\cot \theta$ 的意义相当; f_y 为受扭纵筋的屈服强度; A_{st1} 为箍筋单肢截面面积; A_{st1} 为全部纵向钢筋截面面积; u_{cor} 为受扭箍筋所围区域的周长; α_1 和 α_2 是对试验结果进行统计回归确定的两个系数, $\alpha_1=0.35, \alpha_2=1.2$ 。

可以发现, 欧美规范和中国规范都未考虑结构尺寸的影响, 对大尺寸试件承载力预测值的合理性和安全性有待进一步讨论。尺寸效应主要来源于混凝土, 且钢筋的配置量对其存在影响^[7], 欧美规范仅考虑了钢筋的抗扭作用, 无法进一步考虑尺寸效应。中国规范设计公式为两者抗扭贡献的叠加, 能进一步考虑尺寸效应以及钢筋对尺寸效应的影响。

2 考虑尺寸效应的名义抗扭强度公式

2.1 名义抗扭强度与结构尺寸关系

钢筋混凝土构件的纯扭破坏与剪切破坏相似, 具有明显的尺寸效应, 已被 Bažant 及团队研究证实^[5-6]。

钢筋混凝土构件的纯扭承载力与其名义抗扭强度之间存在式(4)的对应关系^[6]。

$$\tau_u = \frac{T_{max}}{W_t} \quad (4)$$

式中: τ_u 为名义抗扭强度; T_{max} 为试件纯扭承载力; W_t 为受扭塑性抵抗矩, 对于圆形截面, $W_t=2/3 \times \pi R^3$, R 为圆形截面的半径, 对于矩形截面, $W_t=1/6 \times b^2(3h-b)$, b 和 h 分别为矩形的短边和长边。

Bažant 等^[5]进行了梁高为 38.1、76.2、152.4 mm 的素混凝土梁纯扭试验, 其名义抗扭强度分别为 3.68、3.15、2.33 MPa, 名义抗扭强度下降了 37%。Kirane 等^[6]进行了梁高为 67、133、200、270 mm 的有腹筋混凝土梁纯扭破坏数值模拟研究, 有 1.05% 和 8.82% 两种配筋率。配筋率为 1.05% 的梁名义抗扭强度下降 46%, 配筋率为 8.82% 的梁名义抗扭强度下降 33%。

对于钢筋混凝土纯扭构件, 梁和柱的纯扭力学行为相似, 主要区别在于截面形状, 梁主要为矩形截面, 而柱有圆形截面、方形截面及矩形截面。因此, Jin 等^[7]基于三维细观数值模拟方法, 建立了未施加轴压力的钢筋混凝土圆/方柱纯扭加载数值模型, 试件尺寸分为 4 组, 分别为 200、400、800、1 000 mm,

每组试件分为无腹筋柱和有腹筋柱, 无腹筋柱包含 0%、0.64%、1.28% 和 1.96% 四种纵筋率, 有腹筋柱包含 0.283%、0.377%、0.565% 和 1.131% 四种配箍率, 有腹筋柱的纵筋率均为 0.64%。图 1 给出了模拟得到的试件名义抗扭强度与结构尺寸的关系。横坐标 D 为结构特征尺寸, 圆柱取截面直径, 方柱取横截面边长。结果表明: 1) RC 柱的名义抗扭强度存在明显的尺寸效应; 2) 方柱的尺寸效应强于圆柱; 3) 纵筋率对尺寸效应影响较小; 配箍率的提高可削弱尺寸效应, 为主要影响因素。

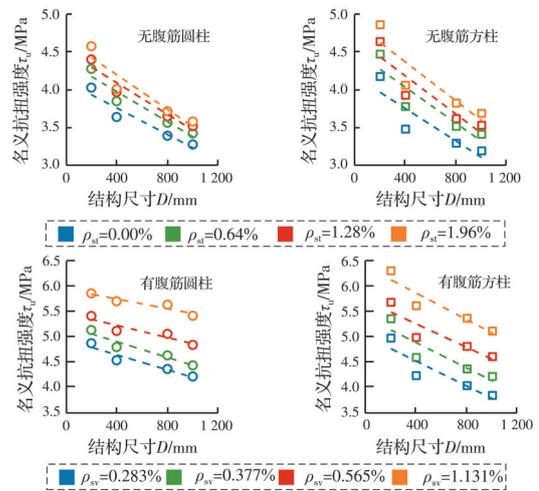


图 1 试件名义抗扭强度与结构尺寸关系^[7]

Fig. 1 Relationship between nominal torsional strength of simulated specimens and structure size^[7]

综上所述可以发现, RC 构件的名义抗扭强度具有较强的尺寸效应, 而现行国家规范中尚未考虑尺寸效应的影响, 大尺寸试件承载力预测值的安全性和合理性有待进一步讨论。

2.2 名义抗扭强度理论公式

尺寸效应律公式能定量反映名义抗扭强度与结构尺寸的关系。Jin 等^[7]基于 Bažant 等的尺寸效应律公式^[5]提出了适用于纯扭破坏的尺寸效应律公式

$$\tau_u = \frac{\tau_0 - \tau_{u\infty}}{\sqrt{1 + D/D_0}} + \tau_{u\infty} \quad (5)$$

式中: τ_0 、 D_0 为材料参数, 受截面形状、钢筋作用等因素的影响, 对于素混凝土圆柱建议取 $\tau_0=4.58, D_0=245.21$, 素混凝土方柱建议取 $\tau_0=4.80, D_0=157.11$ ^[7]; $\tau_{u\infty}$ 为无限大尺寸 ($D \rightarrow \infty$) 的名义抗扭强度, 建议取 $\tau_{u\infty}=0.5f_t$ ^[7]。但是此尺寸效应律公式对于不同配箍率工况下的试件需反复确定材料参数 τ_0 和 D_0 , 不能定量反映钢筋作用对尺寸效应的影响。因此, 结合 RC 柱尺寸效应规律, 提出了能定量反映配箍率对尺寸效应削弱影响的名义抗扭强度理论公式。

将中国规范纯扭承载力公式两边同时除以受

扭塑性抵抗矩 W_t 得

$$\tau_u = \tau_c + \tau_s = \alpha_1 f_t + \alpha_2 \sqrt{\xi} \frac{f_{yv} A_{st1}}{s W_t} A_{cor} \quad (6)$$

式中： τ_u 、 τ_c 、 τ_s 分别为总抗扭强度、混凝土提供的抗扭强度和纵筋及箍筋提供的抗扭强度。钢筋材料是一种均匀延性材料，一般不具有尺寸效应。因此，钢筋混凝土柱名义抗扭强度的尺寸效应来源于混凝土部分，同时也受到纵筋率、配箍率等钢筋作用的影响。根据 Jin 等的研究^[7]，考虑钢筋作用的影

$$\beta = \begin{cases} 1, & \rho_{sv} < \rho_{sv.min} \\ \left[\frac{f_t}{\frac{\nu_0 - \nu_{u\infty}}{\sqrt{1 + D/D_0}} + \nu_{u\infty}} - 1 \right] \tanh[\alpha(\rho_{sv} - \rho_{sv.min})] + 1, & \rho_{sv} > \rho_{sv.min} \end{cases} \quad (8)$$

式中： β 为尺寸效应削弱系数； ρ_{sv} 为配箍率； α 为调整系数，通过反复试算获得，反映不同截面形状对尺寸效应程度的影响，建议圆柱取 $\alpha=10$ ，方柱取 $\alpha=5$ ^[7]。

2.3 名义抗扭强度公式验证

为验证名义抗扭强度计算公式的合理性与适用性，利用 Fang 等^[15]、Koutchoukali 等^[16]、Bernardo 等^[17] 和 Jeng^[18] 共 47 个试件纯扭破坏试验数据，对名义抗扭强度理论公式进行验证。文献[15-18]中进行了单一截面尺寸下钢筋混凝土梁的纯扭破坏试验，探究了纵筋率、配箍率及混凝土强度对纯扭性能的影响。这些试件具有不同的结构尺寸（梁横截面宽度 $b \times$ 梁横截面高度 h 分别为 203 mm \times 305 mm、350 mm \times 500 mm、600 mm \times 600 mm、500 mm \times 700 mm）、配箍率（0.3%~2.68%）、混凝土强度（35~96.7 MPa）。

总名义抗扭强度计算值 τ_u 与试验值 τ_u 的对比如图 2 所示。需要注意的是，对于钢筋混凝土梁，这里采用梁横截面高度 h 作为结构特征尺寸。由图 2 对

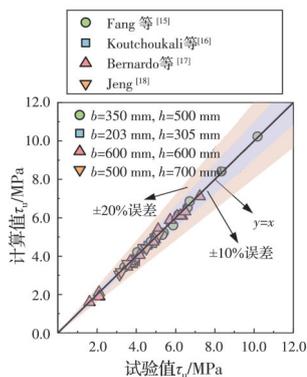


图 2 名义强度公式计算值与试验值对比

Fig. 2 Comparison between the calculated values of nominal strength formula and the test values

响机制与规律，对总抗扭强度进行修正

$$\tau_u = \tau_c + \tau_s = \left(\frac{\tau_0 - \tau_{u\infty}}{\sqrt{1 + D/D_0}} + \tau_{u\infty} \right) \beta + \alpha_2 \sqrt{\xi} \frac{f_{yv} A_{st1}}{s W_t} A_{cor} \quad (7)$$

式中：混凝土部分提供的抗扭强度采用作者提出的素混凝土柱名义抗扭强度尺寸效应律进行计算，见式(5)。考虑配箍率对尺寸效应的削弱影响，用尺寸效应削弱系数 β 表征，按式(8)计算^[7]。

$$\rho_{sv} < \rho_{sv.min} \quad (8)$$

比可知，计算值与试验值吻合较好，说明名义抗扭强度计算公式具有通用性，可以较好地预测钢筋混凝土构件名义抗扭强度，并考虑了尺寸效应的影响。需要说明的是，目前关于钢筋混凝土构件的纯扭破坏试验数据有限，名义抗扭强度理论公式的科学性和合理性需更多的试验数据，尤其大尺寸试件的试验数据进行进一步的验证和优化。

3 规范修正建议

3.1 现有规范对比

基于以上分析可以发现，RC 构件的尺寸效应较为明显，而相关规范中尚未考虑尺寸效应的影响。现通过对比现有规范，讨论规范对大尺寸试件承载力预测值的科学性和安全性。

因现有的试验数据有限，且大多为小尺寸试件，因此采用模拟数据^[7]与现有规范进行对比。根据 Deifalla^[19]的研究，可用安全指数 (I_s) 来评估规范计算模型的安全性，其值为

$$I_s = \frac{T_{模拟}}{T_{计算}} \quad (9)$$

式中： I_s 为安全指数； $T_{模拟}$ 为纯扭承载力模拟值； $T_{计算}$ 为纯扭承载力计算值。根据 I_s 值将模型预测值的安全性分为 6 类：极端危险 ($I_s \leq 0.5$)、危险 ($0.5 < I_s \leq 0.65$)、安全性低 ($0.65 < I_s \leq 0.85$)、近似安全性 ($0.85 < I_s \leq 1.30$)、保守 ($1.30 < I_s \leq 2.0$) 和极端保守 ($I_s > 2.0$)。

表 1 给出了模拟值与规范计算值的对比。 T_u 的模拟结果通过在 ABAQUS 中提取加载点扭转方向的反作用力矩 (RM) 获得。模拟工况下，混凝土抗拉强度标准值 f_t 为 4.48 MPa，纵筋屈服强度标准值

f_y 为 457 MPa,箍筋屈服强度标准值为 450 MPa。图 3 给出了 ACI 318-19^[10]预测值的安全指数,EN 1992-A1-2014^[11]和 CSA A23.3-04^[12]预测值的安全指数与之一致。图中横坐标 D 为结构特征尺寸,圆

柱取截面直径,方柱取截面边长。可以发现,其 I_s 值在 1.08~2.24 之间,对于小尺寸小配箍率试件的预测是极端保守的。

表 1 模拟值与规范计算值的对比

Table 1 Comparison of simulated values with standard calculated values

试件名称	模拟结果 $T_u/(kN \cdot m)$	欧美规范		中国规范			
		$T_u/(kN \cdot m)$	安全指数	$T_c/(kN \cdot m)$	$T_s/(kN \cdot m)$	$T_u/(kN \cdot m)$	安全指数
圆-0.283-200	10.17	4.64	2.19	3.28	3.27	6.55	1.55
圆-0.283-400	75.73	38.43	1.97	26.27	27.13	53.4	1.42
圆-0.283-800	582.51	315.03	1.85	210.18	222.37	432.55	1.35
圆-0.283-1 000	1 099.47	619.09	1.78	410.50	437.01	847.51	1.30
圆-0.377-200	10.73	5.35	2.00	3.28	3.78	7.06	1.52
圆-0.377-400	80.09	44.37	1.80	26.27	31.32	57.59	1.39
圆-0.377-800	618.63	363.76	1.70	210.18	256.77	466.95	1.32
圆-0.377-1 000	1 156.99	714.86	1.62	410.50	504.61	915.11	1.26
圆-0.565-200	11.31	6.56	1.72	3.28	4.63	7.91	1.43
圆-0.565-400	85.53	54.35	1.57	26.27	38.36	64.63	1.32
圆-0.565-800	676.19	445.52	1.52	210.18	314.48	524.66	1.29
圆-0.565-1 000	1 263.24	875.53	1.44	410.50	618.02	1 028.52	1.23
圆-1.131-200	12.25	9.27	1.32	3.28	6.55	9.83	1.25
圆-1.131-400	95.35	76.86	1.24	26.27	54.25	80.52	1.18
圆-1.131-800	753.62	630.06	1.20	210.18	444.75	654.93	1.15
圆-1.131-1 000	1 414.85	1 238.18	1.14	410.50	874.01	1 284.51	1.10
方-0.283-200	13.23	5.90	2.24	4.18	4.17	8.35	1.58
方-0.283-400	89.95	48.93	1.84	33.45	34.54	67.99	1.32
方-0.283-800	685.75	401.11	1.71	267.61	283.13	550.74	1.25
方-0.283-1 000	1 273.21	788.25	1.62	522.67	556.41	1 079.08	1.18
方-0.377-200	14.26	6.82	2.09	4.18	4.81	8.99	1.59
方-0.377-400	97.63	56.50	1.73	33.45	39.88	73.33	1.33
方-0.377-800	741.83	463.16	1.60	267.61	326.94	594.55	1.25
方-0.377-1 000	1 398.98	910.19	1.54	522.67	642.49	1 165.16	1.20
方-0.565-200	15.13	8.35	1.81	4.18	5.89	10.07	1.50
方-0.565-400	106.12	69.20	1.53	33.45	48.84	82.29	1.29
方-0.565-800	818.62	567.25	1.44	267.61	400.41	668.02	1.23
方-0.565-1 000	1 530.03	1 114.76	1.37	522.67	786.89	1 309.56	1.17
方-1.131-200	16.79	11.81	1.42	4.18	8.34	12.52	1.34
方-1.131-400	119.56	97.86	1.22	33.45	69.08	102.53	1.17
方-1.131-800	913.51	802.21	1.14	267.61	566.27	833.88	1.10
方-1.131-1 000	1 700.23	1 576.50	1.08	522.67	1 112.83	1 635.5	1.04

注:“圆-0.283-200”代表试件尺寸为 200 mm、配箍率为 0.283% 的圆柱;混凝土抗拉强度 f_t 取标准值,纵筋及箍筋屈服强度标准值;混凝土抗拉强度 f_t 为 4.48 MPa,纵筋屈服强度 f_y 为 457 MPa,箍筋屈服强度为 450 MPa;欧美规范的计算取名义强度, T_u 不换算为设计强度。

图 4 给出了 GB50010—2010^[13]预测值的安全指数,可以发现,其 I_s 值在 1.04~1.58 之间,相较 ACI318-19^[10],对小尺寸小配箍率试件的预测更接近模拟值,预测值是相对保守的。并且,随着结构尺寸的增加,中美规范预测值的 I_s 值都降低,在结构尺寸大于 400 mm 时,大配箍率试件的 I_s 值小于

1.3,安全性为近似安全。对比相同结构尺寸下不同配箍率的 I_s 值,可以发现大配箍率的 I_s 值较小,这是因为在计算模型中假设试件破坏时纵筋和箍筋都达到了屈服强度,但实际情况中大配箍率试件的箍筋间距小,试件开裂后,与斜裂缝相交的纵筋和箍筋更多,扭转承载力分配给了更多的纵筋和箍

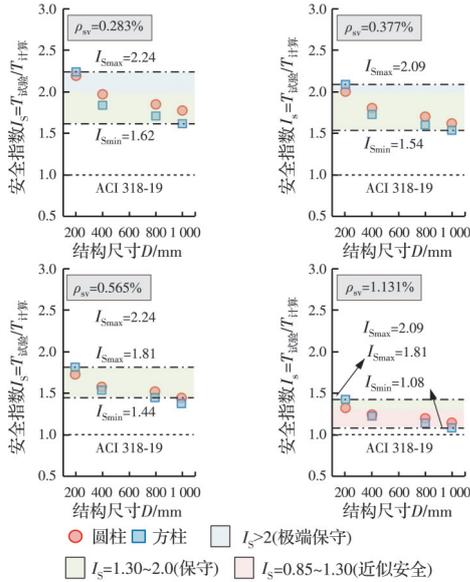


图3 规范 ACI 318-19 预测值的安全指数

Fig. 3 Safety index of predicted values of ACI-318-19

筋,导致试件破坏时箍筋和纵筋未全部达到屈服强度。

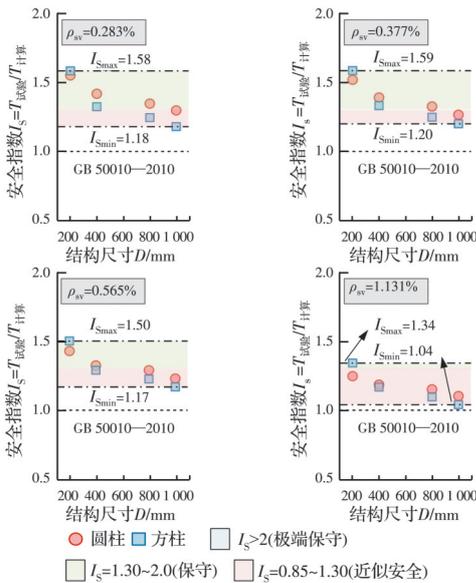


图4 规范 GB 50010—2010 预测值的安全指数

Fig. 4 Safety index of predicted values of GB 50010—2010

3.2 纯扭承载力计算建议

通过以上分析可知,中国规范 GB 50010—2010^[13]较欧美规范的纯扭承载力预测值更接近实际值,且考虑了混凝土部分承载力的贡献,但未考虑结构尺寸的影响,导致大尺寸试件承载力预测值的安全度下降。

式(7)、式(8)能较为准确地预测名义抗扭强度的尺寸效应行为,但运用到实际的结构设计上不够简便,将式(7)、式(8)进行简化,考虑尺寸效应的影响修正现有的纯扭承载力公式。尺寸效应来源于混凝土部分,因此对其进行修正

$$T_u = \alpha_h T_c + T_s \tag{10}$$

$$\alpha_h = \tau_c / \tau_c(D_{min}) \tag{11}$$

$$\tau_c = \left(\frac{\tau_0 - \tau_{\infty}}{\sqrt{1 + D/D_0}} + \tau_{\infty} \right) \beta \tag{12}$$

式中: α_h 为尺寸效应影响系数,综合考虑了结构尺寸和配箍率对纯扭承载力的影响,通过混凝土部分抗扭强度的下降比例确定; τ_c 为混凝土部分的抗扭强度,通过式(12)计算得到,下标 D_{min} 代表最小尺寸试件,建议取 $D_{min}=200$ mm。

图5给出了配箍率0.283%~1.131%的尺寸效应系数 α_h 的计算值,即图中的5条理论计算值条带,按式(11)、式(12)计算得到。可以发现,尺寸效应系数随着结构尺寸的增加而减小;相同结构尺寸下,大配箍率试件的尺寸效应系数小于小配箍率试件,反映了配箍率的提高对尺寸效应的削弱;通过计算得,当尺寸为1200 mm时,最小配箍率试件的尺寸效应系数为0.5,说明纯扭破坏具有较强的尺寸效应,在进行结构设计时不应忽略。需说明的是, $\rho_{sv}=0.283\%$ 为文献[7]模拟工况下GB 50010—2010^[13]规定的最小配箍率, $\rho_{sv}=1.131\%$ 基本覆盖了实际构件的建议配箍率。

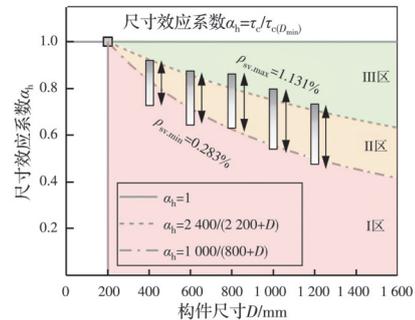


图5 尺寸效应系数 α_h 的确定

Fig. 5 Determination of size effect coefficient α_h

综合考虑到结构设计的经济性和安全性。将 α_h 分为3个区域,第I区域上限为 $\alpha_h=1$,下限为图5中顶部数据拟合合线;第II区域上限为图5中顶部数据拟合合线,下限为图5中底部数据拟合合线;第III区域上限为图5中底部数据拟合合线,下限为图5中剩余区域。拟合线的形式暂用式(13)。

$$\alpha_h = A/D + B \tag{13}$$

式中: D 为结构特征尺寸,参考文献[2-4],圆柱取截面直径,方柱取截面边长,矩形柱取截面长边,梁取截面梁高; A 和 B 为待确定系数数值,且当 $D=200$ mm时, $\alpha_h=1$,第1条拟合线 $A=2400, B=2200$,第2条拟合线 $A=1000, B=800$ 。此函数形式与CSA S806-12^[20]中关于剪切承载力尺寸效应系数的函数形式类似。

因此,在实际的结构设计中,可根据建筑物的安全等级选定相应的尺寸效应系数,具体标准为

$$\alpha_h = \begin{cases} 1, & \text{安全等级三级} \\ 2400/(2200 + D), & \text{安全等级二级} \\ 1000/(800 + D), & \text{安全等级一级} \end{cases} \quad (14)$$

式中:建筑物的安全等级按国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)^[21]确定。一级:重要的建筑物,即图 5 中的 I 区;二级:大量的一般建筑物,即图 5 中的 II 区;三级:次要的建筑物,即图 5 中的 III 区。考虑到结构设计的经济性,取区域上限值作为尺寸效应系数 α_h 的取值。

3.3 试验验证

为验证修正方法的准确性和合理性,选取了 90 个钢筋混凝土梁纯扭加载试验数据,试验数据来自 Fang 等^[15]、Koutchoukali 等^[16]、Bernardo 等^[17]、Jeng^[18]、Joh 等^[22]、Chiu 等^[23]、王振东等^[24]和王晓茵等^[25]。需要说明的是,试验试件为矩形截面梁,取梁高 h 为试

件的结构特征尺寸。试验数据库结构尺寸范围 300~800 mm,混凝土强度范围 15.22~105.7 MPa,配箍率范围为 0.17%~2.68%(配箍率为 2.68% 的试件为超筋截面梁)。

表 2 给出了试验数据库的具体细节,图 6 给出了试验值与未修正规范计算值的对比。可以发现,中国规范计算值的安全指数普遍小于欧美规范,更接近试验值。对于大尺寸试件(构件尺寸 $D > 700$ mm),由于计算公式未考虑尺寸效应,安全指数偏低,其值小于 1。需要说明的是,由于试验数据存在离散性,部分小尺寸试件(构件尺寸 $D = 200 \sim 500$ mm)的安全指数小于 1。图中的蓝色趋势线为安全指数的均值线。从安全指数的整体趋势可以发现,安全指数随结构尺寸的增加而降低,且欧美规范承载力预测值的安全指数下降幅度大于中国规范。为保证规范预测值的安全指数趋于稳定,需考虑尺寸效应的影响。

表 2 试验数据库的具体细节
Table 2 Details of the test database

文献	个数	构件尺寸	f_c'/MPa	配箍率 $\rho_{sv}/\%$
[15]	16	350 mm × 500 mm	35.5 ~ 68.4	0.41 ~ 0.91
[16]	9	205 mm × 305 mm	39.6 ~ 93.9	0.64 ~ 0.99
[17]	16	600 mm × 600 mm	46.2 ~ 96.7	0.3 ~ 2.68
[18]	7	500 mm × 700 mm	27.6 ~ 105.7	0.69 ~ 1.03
[22]	18	300 mm × 400 mm	51.5 ~ 92.2	0.22 ~ 0.87
[23]	13	420 mm × 420 mm; 300 mm × 500 mm; 250 mm × 700 mm	25 ~ 41.47	0.17 ~ 0.5
[24]	7	150 mm × 300 mm; 250 mm × 500 mm; 300 mm × 600 mm; 350 mm × 700 mm; 400 mm × 800 mm	15.22 ~ 16.06	0.37 ~ 0.47
[25]	4	200 mm × 300 mm	25.3	0.5

注:混凝土抗拉强度 f_t 未在参考文献中给出。根据 GB 50010—2010^[13], $f_t = 0.395f_{cu}^{0.55}$, $f_c' = 0.8f_{cu}$ 。

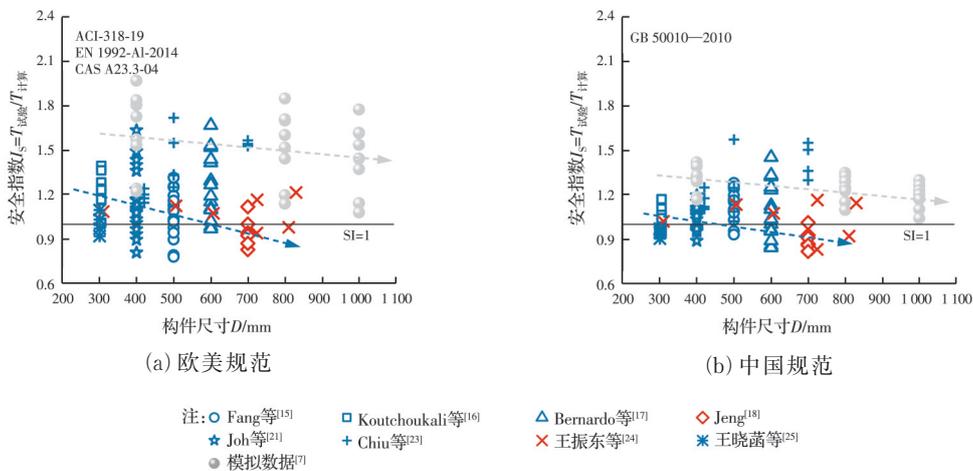


图 6 试验值与未修正规范计算值的对比

Fig. 6 Comparison between the test values and the code calculated values

图 7 给出了试验值与修正公式计算值的对比。可以发现,在未修正前,即 $\alpha_h = 1$,安全指数随着结构

尺寸的增大而降低;考虑尺寸效应修正后,最小安全指数 SI_{min} 和最大安全指数 SI_{max} 提高,反映了修正

公式对大尺寸试件承载力预测值(结构尺寸大于 200 mm)安全度的整体提高。由于试验数据较少且具有离散性,修正后依然有部分试件的安全指数小于 1。但从安全指数均值线来看,以 $\alpha_h = 2\ 400/(2\ 200+D)$ 修正时,均值线较未修正前趋于平缓,修正效果综合考虑了结构设计的安全性和经济性;以 $\alpha_h = 1\ 000/(800+D)$ 修正时,大尺寸试件安全指数提高幅度最大,修正效果最安全。要说明的是,目前关于大尺寸钢筋混凝土构件纯扭破坏试验开展较少,所提出的修正公式需进一步进行试验验证和优化。

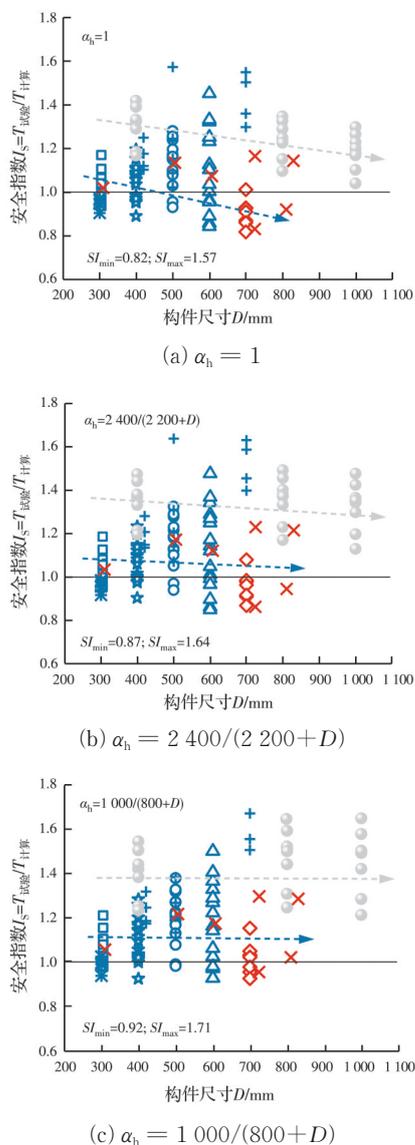
4 结论

通过对比现有规范,总结钢筋混凝土柱纯扭破坏的尺寸效应规律,建立了名义抗扭强度尺寸效应公式。基于该公式,对现有规范进行了修正,考虑了尺寸效应的影响,主要结论如下:

1)建立了钢筋混凝土柱名义抗扭强度的尺寸效应公式,该公式考虑了配箍率对其名义抗扭强度尺寸效应的削弱影响。能较好地描述其尺寸效应行为,且能定量反映配箍率对尺寸效应的削弱影响。

2)针对规范 GB 50010—2010 中钢筋混凝土构件纯扭承载力计算公式,提出了修正建议。修正后的计算公式考虑了混凝土部分的尺寸效应,保证了大尺寸试件预测值的安全度。经与相关试验结果进行对比,证明建议公式可有效提高大尺寸试件预测值的安全储备。

需要说明的是,由于目前关于钢筋混凝土构件纯扭破坏的试验开展较少,且大多基于小尺寸试件,提出的修正建议仍需用更多大尺寸试件的试验结果进行验证和优化。



注: ○ Fang等^[15] □ Koutchoukali等^[16]
 ▲ Bernardo等^[17] ◇ Jeng^[18]
 ★ Joh等^[22] + Chiu等^[23]
 × 王振东等^[24] * 王晓茜等^[25]
 ● 模拟数据^[7]

图 7 试验值与修正公式计算值的对比

Fig. 7 Comparison between the test values and the calculated values of revision formula

参考文献

[1] 孙治国, 王东升, 郭迅, 等. 汶川大地震绵竹市回澜立交桥震害调查[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 132-138.
 SUN Z G, WANG D S, GUO X, et al. Damage investigation of Huilan Interchange in Mianzhu after Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 132-138. (in Chinese)

[2] 金浏, 李平, 杜修力. 考虑尺寸影响的箍筋约束混凝土轴压本构模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1): 81-89.
 JIN L, LI P, DU X L. Compressive stress-strain model for stirrup-confined concrete columns considering the effect of structural size [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(1): 81-89. (in Chinese)

[3] 金浏, 苏晓, 徐海滨, 等. 基于细观模型的含腹筋混凝土梁受剪承载力尺寸效应[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 80-88.
 JIN L, SU X, XU H B, et al. Meso-scale simulation of size effect in shear capacity of reinforced concrete beams with web reinforcement [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 80-88. (in Chinese)

[4] 金浏, 樊玲玲, 杜修力, 等. 圆钢管混凝土柱轴压破坏行为与尺寸效应理论研究[J]. 中国科学: 技术科学,

- 2020, 50(2): 209-220.
- JIN L, FAN L L, DU X L, et al. Failure behavior and size effect theory of circular concrete-filled steel tubular columns under axial compression [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2020, 50(2): 209-220. (in Chinese)
- [5] BAŽANT Z P, ŞENER S, PRAT P C. Size effect tests of torsional failure of plain and reinforced concrete beams [J]. *Materials and Structures*, 1988, 21(6): 425-430.
- [6] KIRANE K, SINGH K D, BAŽANT Z P. Size effect in torsional strength of plain and reinforced concrete [J]. *ACI Structural Journal*, 2016, 113(6): 1253-1262.
- [7] JIN L, ZHU H J, DU X L. Meso-scale modelling of size effect on pure torsional-shear of RC columns [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, 22(1): 1-19.
- [8] DE DOMENICO D. Torsional strength of RC members using a plasticity-based variable-angle space truss model accounting for non-uniform longitudinal reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111540.
- [9] KIM M J, KIM H G, LEE Y J, et al. Pure torsional behavior of RC beams in relation to the amount of torsional reinforcement and cross-sectional properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119801.
- [10] Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318-19 [S]. American Concrete Institute, 2019.
- [11] Eurocode 2: Design of concrete structures, General rules and rules for buildings: EN 1992-1-1:2004 [S]. 2004
- [12] Canadian Standards Association. Design of Concrete Structures A23.3-04 [S]. Rexdale, Ontario: Canadian Standards Association, 2004.
- [13] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [14] 王振东, 蒋季丰. 钢筋混凝土及预应力混凝土受扭构件的设计方法[J]. *建筑结构*, 1982, 12(3): 32-37.
WANG Z D, JIANG J F. Design methods for torsion members of reinforced concrete and prestressed concrete [J]. *Building Structure*, 1982, 12(3): 32-37. (in Chinese)
- [15] FANG I K, SHIAU J K. Torsional behavior of normal- and high-strength concrete beams [J]. *ACI Structural Journal*, 2004, 101(3): 304-313.
- [16] KOUTCHOUKALI N E, BELARBI A. Torsion of high-strength reinforced concrete beams and minimum reinforcement requirement [J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(4): 462-469.
- [17] BERNARDO L A, LOPES S M R. Torsion in high-strength concrete hollow beams: Strength and ductility analysis [J]. *ACI Structural Journal*, 2009, 106(1): 39-48.
- [18] JENG C H. Unified softened membrane model for torsion in hollow and solid reinforced concrete members: Modeling precracking and postcracking behavior [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(10): 04014243.
- [19] DEIFALLA A. Refining the torsion design of fibered concrete beams reinforced with FRP using multi-variable non-linear regression analysis for experimental results [J]. *Engineering Structures*, 2021, 226: 111394.
- [20] Design and construction of buildings components with fiber-reinforced polymers: CSA S806-12[S]. Toronto, 2012.
- [21] 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [22] JOH C, KWAHK I, LEE J, et al. Torsional behavior of high-strength concrete beams with minimum reinforcement ratio [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1432697.
- [23] CHIU H J, FANG I K, YOUNG W T, et al. Behavior of reinforced concrete beams with minimum torsional reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(9): 2193-2205.
- [24] 王振东, 李东杰. 钢筋混凝土纯扭构件截面尺寸效应的试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(8): 1374-1377.
WANG Z D, LI D J. Experimental study on the effect due to the section sizes of reinforced concrete member under pure torsion [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(8): 1374-1377. (in Chinese)
- [25] 王晓菡, 柳炳康, 周徽. 再生混凝土纯扭构件抗震性能的有限元分析[J]. *山西建筑*, 2021, 47(23): 32-34.
WANG X H, LIU B K, ZHOU H. Finite element analysis of seismic behavior of recycled aggregate concrete torsional members [J]. *Shanxi Architecture*, 2021, 47(23): 32-34. (in Chinese)