

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.002

桁架-拱模型用于钢筋混凝土梁的 受剪承载力计算分析

史庆轩, 王朋, 王秋维

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要:依据桁架-拱模型理论分析了钢筋混凝土梁的受剪机理并给出了受剪承载力公式,该公式考虑了混凝土的软化效应、拱体作用等因素对钢筋混凝土梁的受剪承载力影响,并结合试验数据对公式中系数进行了修正。当结构材料与原建立规范计算公式时的材料性能差异较大时,规范公式不再适用。而经计算,采用桁架-拱理论公式的计算结果与试验结果比值的均值更接近于1,标准偏差和变异系数均较规范公式计算结果小,与试验结果吻合较好。采用美国规范 ACI 318-08 中构件受剪承载力公式对所收集试验数据进行计算,计算结果表明,美国规范较中国规范保守。研究结果表明:桁架-拱理论公式可以用于钢筋混凝土梁的受剪承载力计算。

关键词:钢筋混凝土梁;受剪承载力;桁架-拱模型;混凝土结构设计规范

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)04-0007-06

Shear Capacity Calculation Analysis of Reinforced Concrete Beams Based on Truss-arch Model

Shi Qingxuan, Wang Peng, Wang Qiuwei

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: According to the theory of truss-arch model, the shear mechanism of reinforced concrete beam was analyzed, and formula of shear bearing capacity was proposed. In this formula, softening effect of concrete and the arch function were taken into account, and the coefficients in the formula were amended with experimental data. When the performance difference between the structural material and the original material is huge, the code formula of shear bearing capacity calculation is inapplicable. After the computation, the ratio of the results calculated by truss-arch model theory formula and the results calculated by the current code formula was close to 1, and the standard deviation coefficient and coefficient of variation were smaller than those of standard formula results, and the results calculated by truss-arch model formula were in good agreement with the experimental results. The collected experimental data was calculated with the shear capacity formula in ACI318-08, and the calculation results showed that United States building code was more conservative than the standard of China. The results indicate that the shear bearing capacity formula based on truss-arch model can be used for computation of shear bearing capacity of reinforced concrete beams.

Key words: reinforced concrete beam; shear capacity; truss-arch model; code for design of concrete structures

收稿日期:2012-12-23

基金项目:国家自然科学基金(50978215,51178380,51108370)

作者简介:史庆轩(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事混凝土结构及抗震研究,(E-mail)qingxuanshi@sina.com。

钢筋混凝土构件斜截面受剪承载力计算是混凝土构件设计中的重要课题。由于影响钢筋混凝土构件抗剪强度的因素众多,破坏形态复杂,对混凝土构件受剪机理的认识尚不完善,至今未建立一套较为完整的理论体系^[1]。目前要做到定量分析钢筋混凝土构件的斜截面受剪承载力还存在很多困难,当然试验研究是一种最为直接和有效的方法,但全面的试验对比研究耗资巨大,一般难以实现。到目前为止,尽管各国学者进行了大量的关于钢筋混凝土梁的受剪承载力理论分析和试验研究,但由于各学者研究的侧重点不同且该问题本身具有复杂性,致使至今钢筋混凝土构件的抗剪问题没有得到很好地解决。包括中国在内的多国规范都是采用半经验半理论的计算方法进行构件受剪承载力设计,该方法具有计算简单且不易出错等优点,但缺点是缺乏明确的力学模型,且当结构材料与原建立规范计算公式时的材料差异较大时,规范公式的计算结果的可信程度遭到质疑。因此,迫切需要建立混凝土构件的受剪理论模型和模型理论计算公式,以解决受剪承载力的设计问题。采用桁架-拱模型理论分析钢筋混凝土构件的受剪机理,给出了钢筋混凝土梁的受剪承载力计算公式,探讨了有关计算参数的取值,并结合收集的 136 根关于钢筋混凝土梁受剪承载力研究的试验数据,验证桁架-拱模型理论的有效性。

1 桁架-拱模型

桁架-拱模型是一种在桁架模型基础上加以考虑混凝土的受压拱体效应发展演化而来的模型。桁架-拱模型认为,构件的所受总剪力由桁架模型和拱模型共同承担,即构件中受压混凝土既起受压上弦杆的作用又起斜压腹杆和拱的作用,如图 1 所示。

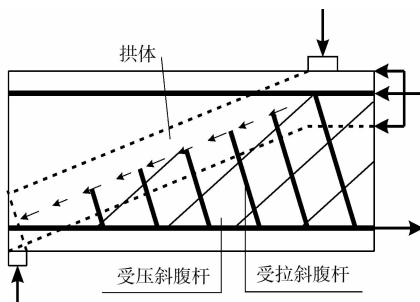


图 1 桁架-拱模型

1.1 桁架模型

桁架模型最早由德国的 Ritter 所提出,也称古典桁架模型^[2]。后经众多学者研究和发展,形成了多种桁架理论并被多国规范所采用,如拉压杆模型

(美国规范^[3])、变角桁架模型(欧洲规范^[4])等。该模型的缺点是没有考虑混凝土的抗剪能力对构件受剪承载力的贡献,全部剪力由腹筋承担。

桁架模型认为桁架的受压上弦杆为受压区混凝土和上部受压纵筋,受拉下弦杆为下部受拉纵筋,腹杆则由受拉的箍筋及斜裂缝间的受压混凝土斜杆构成。如图 2,图中 h 为构件截面高度、 z 为构件截面高度方向上两边缘纵筋之间的距离,可取为 $z=0.9h$ 。

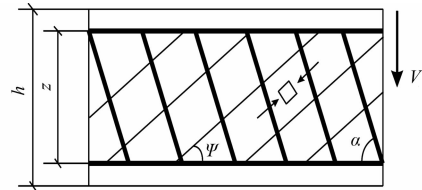


图 2 桁架模型

1) 桁架拉杆

建立拉杆隔离体,如图 3 所示。受拉作用面 AB 与水平面间的夹角为 ψ 、桁架拉杆与水平面间的夹角为 α 、桁架拉杆垂直作用于面 AB' ,面 AB 与面 AB' 间的夹角为 β 。

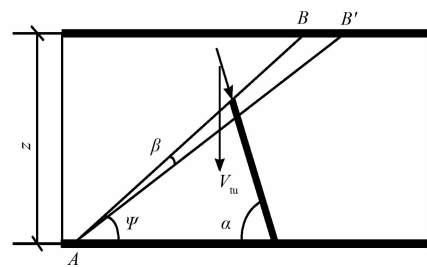


图 3 拉杆隔离体

由图 3 知, $\beta = \psi + \alpha - 90^\circ$; 拉力有效垂直作用面 AB' 长为

$$\overline{AB'} = \overline{AB} \cos \beta = z \cdot \sin(\alpha + \psi) / \sin \psi \quad (1)$$

设箍筋间距为 s ,则箍筋间距在 AB' 上的投影为 $s/\sin \alpha$ 。由此可以得到拉杆(箍筋)总拉力:

$$T = A_{sv} f_{yv} \overline{AB'} / (s/\sin \alpha) \quad (2)$$

拉杆并不一定与箍筋长度方向重合,而是与该斜截面的拉力合力方向一致,但为了方便计算,仍然取拉杆合力方向与箍筋长度方向重合,而实际结构构件中的箍筋一般与构件长方向垂直,因此取 $\alpha = 90^\circ$,此时,由式(1)、(2)可得:

$$T = \rho_s f_{yv} b z \cot \psi \quad (3)$$

2) 桁架压杆

建立压杆隔离体,如图 4 所示,受压面 AB 与水平面间的夹角为 α 、桁架压杆与水平面间的夹角为 ψ 、桁架压杆垂直作用于面 AB' ,面 AB 与面 AB' 间

的夹角为 β 。

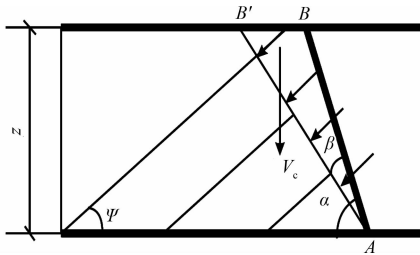


图4 压杆隔离体

同理有, $\beta = \psi + \alpha - 90^\circ$; 压力有效垂直作用面 AB' 长度为:

$$\overline{AB'} = \overline{AB} \cos \beta = z \sin(\alpha + \psi) / \sin \alpha \quad (4)$$

压杆上的总压力:

$$C = \sigma_c b \overline{AB'} \quad (5)$$

同理取 $\alpha = 90^\circ$, 整理上式得:

$$C = \sigma_c b z \cos \psi \quad (6)$$

1.2 拱模型

众多试验结果表明^[5], 抗剪单元的抗剪强度是由箍筋承担的主要部分和混凝土承担的次要部分共同组成。Park^[6]和 Paulay^[7-8]认为构件中不仅存在“梁作用”(桁架作用), 还存在拱作用。

当 $T_u = C_{\max}$ 时, 即桁架拉杆与桁架压杆同时达到最大强度, 同时破坏, 这是设计中最为理想的结果, 但实际情况并非如此。一种情况是设计中为了保证框架梁柱在大震情况下的变形性能, 箍筋配置的往往较多, 箍筋并不一定能够达到屈服而混凝土则提前压坏; 另一种情况则是箍筋应力达到屈服, 而混凝土则未达到抗压强度, 这是所希望的破坏形态, 因为这种破坏具有一定的延性, 此时混凝土中的应力为:

$$\rho_s f_{yv} b z \cot \psi = \sigma_c b z \cos \psi \quad (8)$$

整理式(8)得:

$$\sigma_c = \rho_s f_{yv} / (\sin \psi) \quad (9)$$

由于 $f_c > \sigma_c$, 混凝土的富余强度 σ_a 可表示为

$$\sigma_a = f_c - \cos(\psi - \theta) \sigma_c \quad (10)$$

将式(9)带入式(10)并令:

$$\beta_0 = \frac{\cos(\psi - \theta) \rho_s f_{yv}}{\nu \cdot \sin \psi \cdot f_c} \leq 1 \quad (11)$$

$$\text{则有: } \sigma_a = (1 - \beta_0) f_c \quad (12)$$

式中: ν 为混凝土软化系数, 将在后面进行讨论。

由于首先假定了桁架拉杆达到极限承载能力 V_{tu} , 混凝土还有富余的强度也就是拱的强度 σ_a , 需要说明的是, 拱作用并非是在桁架拉杆达到极限承载能力之后才起作用, 而是在构件受力过程中一直有拱的作用, 认为其混凝土强度为 σ_a 是偏于安全的

简化。

2 桁架-拱的受剪承载力理论公式

1) 桁架拉杆承担的剪力

桁架拉力 T 的竖向投影即为桁架拉杆承担的剪力:

$$V_{tu} = T \sin \alpha = \rho_s f_{yv} b z \cot \psi \quad (13)$$

2) 桁架压杆承担的剪力

桁架压力 C 的竖向投影即为桁架压杆承担的剪力:

$$V_c = C \sin \psi = \sigma_c b z \cos \psi \sin \psi \quad (14)$$

3) 拱体承担的剪力

将桁架拉、压杆承担的剪力的物理意义绘制于图5。

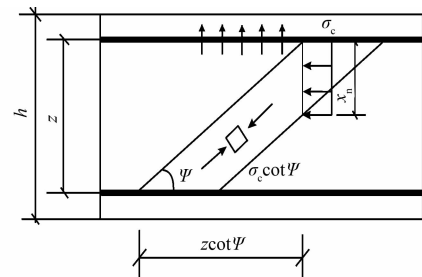


图5 混凝土开裂区水平投影

$$V_{tu} = V_c = \rho_s f_{yv} b z \cot \psi \quad (15)$$

$$V_c = V_{tu} = \sigma_c b z \sin \psi \cos \psi \quad (16)$$

由图5和式(15)可看出开裂区水平投影长度为 $z \cot \psi$, 而由图5和式(16)可看出混凝土受压区在 z 的范围内的高度为 $x_n = z \sin \psi \cos \psi$ 。

拱截面高度即混凝土受压区高度还应包括保护层厚度, 此处可简化取为 $x_n = h \sin \psi \cos \psi$ 。拱模型如图6所示。拱的作用是将构件内部斜向压应力直接传递到支座, 因此, 拱模型的长度取值与构件受力情况有关, 受横向集中荷载时, 取荷载作用点到支座的距离; 受横向均布荷载时, 取构件跨度的一半。

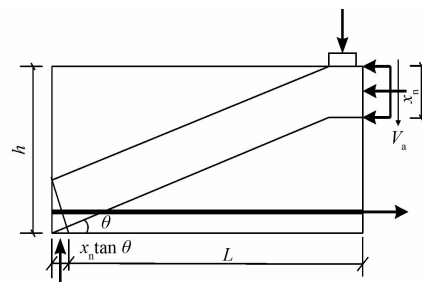


图6 拱模型

当箍筋达到屈服强度后, 拉杆承载力不再增加, 继续加载, 所加荷载全部由混凝土“拱”承担。如前

分析,混凝土上的压应力再增加 σ_a , 则混凝土达到其抗压强度 f_c , 随即构件宣布破坏, 丧失承载能力。此时拱内的剪力为:

$$V_a = \sigma_a \sin \theta \cdot b \cdot x_n \quad (17)$$

将式(12)代入式(17)整理得:

$$V_a = \sin \theta \sin \psi \cos \psi (1 - \beta_0) f_c b h \quad (18)$$

由图 6 的几何关系可以得

$$\tan \theta = (h - x_n) / (L + x_n \tan \theta)$$

求解得:

$$\tan \theta = \sqrt{(L/x_n)^2 + (h - x_n)/x_n} - L/x_n \quad (19)$$

$$\sin \theta = (h - x_n) / \sqrt{(h - x_n)^2 + (L + x_n \tan \theta)^2} \quad (20)$$

其中: $x_n = h \sin \psi \cos \psi$; L 为钢筋混凝土梁的拱跨度, 均布荷载作用时取梁净跨度的 1/2, 集中荷载作用时, 取荷载作用点到支座的距离;

$$\text{令: } \lambda_1 = \sin \theta \sin \psi \cos \psi$$

则式(17)可改写为:

$$V_a = \lambda_1 (1 - \beta_0) \cdot f_c b h \quad (21)$$

该桁架-拱模型综合考虑构件中混凝土受压与箍筋的受拉作用, 因此, 构件的受剪承载力既为桁架模型的受剪承载力与拱模型的受剪承载力之和, 用公式表示为 $V_u = V_{tu} + V_c + V_a$ 。将式(13)、(14)和(21)代入可得基于桁架-拱模型理论的混凝土构件受剪承载力计算公式, 即

$$V_u = \rho_s f_{yv} b z \cot \psi + \sigma_c b z \cos \psi \sin \psi + \lambda_1 (1 - \beta_0) f_c b h \quad (22)$$

3 桁架-拱理论公式计算参数取值的讨论

3.1 混凝土压杆承压角

承压角与构件的破坏形态(临界裂缝倾角)有关, 也就是与横向荷载的位置、剪跨比、配箍率等有关, 且承压角一般在 $45^\circ \geq \psi \geq 26.6^\circ$ 范围内, 即 $1 \leq \cot \psi \leq 2$ 范围内变化。假定混凝土破坏斜面为 45° 时, 即取 $\psi = 45^\circ$, 易知此时箍筋系数最小, 也就是说箍筋对抗剪贡献最小, 这是偏于安全的假定。文中取承压角 $\psi = 45^\circ$ 。

日本按桁架-拱模型^[9]计算抗剪时, 假定混凝土斜压角为 45° ; 美国规范^[3]是采用拉压杆模型, 对于斜压角的取值是根据圣·维南原理, 集中作用力的影响不超过一个构件宽度的原则, 按图 7 进行取值。

如果是框架梁柱, 按图 7(c)取值, 即 $\psi = 45^\circ$, 即日本和美国规范关于框架梁柱的取值是一致的, 但对于简支梁或连续梁文献^[9]的取值更偏于安全。

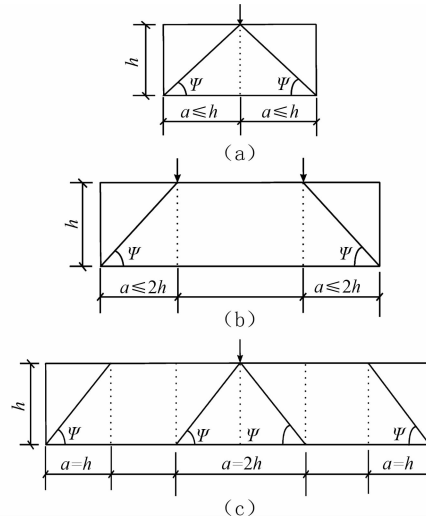


图 7 ACI318 斜压角取值

欧洲规范^[4]是按变角桁架模型建立的公式, 不考虑拱的作用, 采取了对任意截面进行拉杆、压杆双验算的计算方法, 分别满足下面 2 式:

$$V_{Ed} \leq V_{tu} = \rho_{sv} f_{yv} b z \cot \psi$$

$$V_{tu} \leq V_{cmax} = f_c b z / (\cot \psi + \tan \psi)$$

式中 V_{Ed} 为截面剪力设计值。欧洲规范中斜压角不是取为定值, 而是给出承压角范围: $45^\circ \geq \psi \geq 21.8^\circ$, 即: $1 \leq \cot \psi \leq 2.5$, 由于当取 $\cot \psi = 2.5$ 时, 最节约箍筋。斜压角 ψ 也可以用上述 2 式迭代求得。

3.2 混凝土软化系数

众多试验表明, 混凝土在剪切受力状态下会发生软化, 即混凝土强度的降低, 这方面的研究成果在各国规范中均有所体现, 混凝土软化仅适用于桁架-拱模型等的公式推导, 而对于经验数理统计回归公式则不予以考虑。

混凝土的软化系数一般用 ν 来表示, 即用 νf_c 来替换 f_c , 但各国规范对于软化系数 ν 的取值情况不尽相同。日本 AIJ 规范^[9], 取 $\nu = 0.7 - f_c/200$ 。美国规范 ACI318^[3], 取 $\nu = 0.6$ 。欧洲规范^[4]规定: 当 $f_{ck} \leq 60$ MPa 时, 取 $\nu = 0.6$; 当 $f_{ck} > 60$ MPa 时, 取 $\nu = 0.6(1 - f_{ck}/250)$, 且当计算的 $\nu < 0.5$ 时, 取 $\nu = 0.5$ 。上述中, f_c 、 f_{ck} 均表示混凝土圆柱体抗压强度。混凝土软化系数采用与上述各国规范相似的计算方法, 经多次试算, 采用 $\nu = 0.7 - f_c/120$, 且当 $\nu < 0.4$ 时, 取 $\nu = 0.4$ 时, 计算结果与试验结果吻合程度较高, 故建议混凝土软化系数采用次公式计算。

3.3 箍筋应力水平

箍筋对核心混凝土的约束作用属于侧向压力的被动约束作用, 因此箍筋对混凝土的约束效果主要取决于箍筋的应力发挥水平。日本进行了约束混

土的大量试验研究^[2,10],试验表明,当配箍率 $\rho_s \geq 1.2\%$ 时,箍筋不再屈服,这一结论不仅适用于高强箍筋,普通箍筋亦然;当 $\rho_s f_{yv} > 4.0$ 时,箍筋亦不能屈服,也就是说箍筋应力水平 $\rho_s f_{yv} \leq 4.0$ 。

4 桁架-拱模型受剪承载力的实用公式

由以上力学模型分析,基于桁架-拱模型的钢筋混凝土梁的受剪承载力公式为:

$$V_u = \rho_s f_{yv} b z \cot \phi + \nu_c b z \cos \phi \sin \phi + \lambda_1 (1 - \beta_0) \cdot \nu f_c b h \quad (23)$$

将式(9)代入式(23),即得钢筋混凝土梁的受剪承载力实用计算公式:

$$V_u = (\cot \phi + \nu \cos \phi) \rho_s f_{yv} b z + \lambda_1 (1 - \beta_0) \cdot \nu f_c b h \quad (24)$$

式中,取 $\phi = 45^\circ$; $x_n = h \sin \phi \cos \phi$; λ_1 为系数, $\lambda_1 = \sin \theta \sin \phi \cos \phi$,其中 $\sin \theta$ 按式(20)计算; ν 为混凝土软化系数, $\nu = 0.7 - f_c / 120$,且当 $\nu < 0.4$ 时,取 $\nu = 0.4$; β_0 为系数, $\beta_0 = \frac{\cos(\phi - \theta) \rho_s f_{yv}}{\nu \sin \phi f_c}$,且 $\beta_0 \leq 1$; $\rho_s f_{yv}$ 为箍筋平均约束应力,且当 $\rho_s f_{yv} > 4.0$ 时,取 $\rho_s f_{yv} = 4.0$ 。

5 受剪承载力计算对比分析

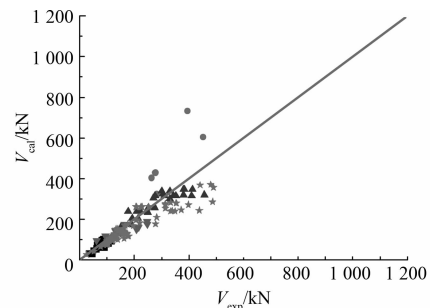
5.1 与试验结果的对比分析

共收集了136根关于钢筋混凝土梁受剪的试验数据^[11-15],文献[11]为集中荷载作用下有腹筋连续梁的抗剪强度试验数据,文献[12]、[14]为集中荷载作用下简支梁的抗剪强度试验数据,文献[13]为对称荷载作用下钢筋混凝土框架梁抗剪强度的试验数据,文献[15]为钢筋混凝土构件试验数据集(中国建筑科学研究院),钢筋混凝土梁的加载方式有集中荷载作用和均布荷载作用2种,所有钢筋混凝土梁均为单方向单调加载,其发生的破坏形态有主筋屈服后剪切破坏、主筋屈服前斜压剪切破坏形态和弯剪型破坏,试件有普通箍筋约束混凝土梁和高强箍筋约束混凝土梁。钢筋混凝土梁的基本设计参数:混凝土轴心抗压强度为 $10.4 \sim 62.78 \text{ N/mm}^2$,箍筋强度为 $212 \sim 1442 \text{ N/mm}^2$,配箍率为 $0.06\% \sim 1.15\%$,平均约束应力为 $0.4064 \sim 16.08 \text{ N/mm}^2$,截面尺寸为 $b = 110 \sim 400 \text{ mm}$ 、 $h = 190 \sim 1000 \text{ mm}$,钢筋混凝土梁的形式有连续梁、简支梁、框架梁3种。

图8为桁架-拱模型公式的计算值(V_{cal})和试验值(V_{exp})的对比结果(图中斜直线为 $V_{cal}/V_{exp} = 1$),计算值与试验值比值的平均值为0.9268,标准偏差为0.2089,变异系数为0.2254,最大值为1.8530,

最小值为0.5550。表1给出了 V_{cal}/V_{exp} 分布情况,计算值小于 $1.15V_{exp}$ 的试件占试件总数的88.97%,且计算值小于0.6倍的试验值的试件仅占试件总数的2.94%。

综上所述,用桁架-拱理论模型公式计算的结果与试验结果吻合较好,桁架-拱模型可以作为钢筋混凝土梁剪切破坏的理论模型,其为中国规范建立关于钢筋混凝土构件受剪承载力计算的理论模型奠定基础。



注:—■—wei[11] • kang[12] ▲ riben[13] ▼ hunan[14] * shujuji[15]

图8 桁架-拱模型计算值与试验值的对比

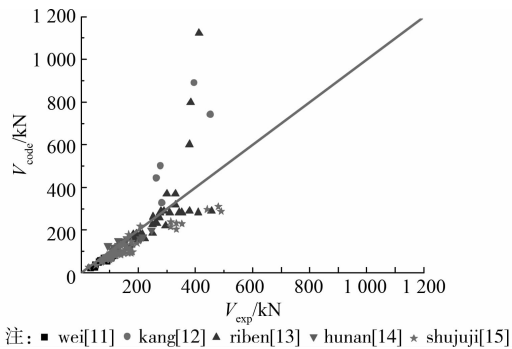
表1 V_{cal}/V_{exp} 的分布情况

V_{cal}/V_{exp} 的范围	试件的个数	占试件总数的百分比/%
小于0.6	4	2.94
0.6~0.8	34	25.00
0.8~1.15	83	61.03
大于1.15	15	11.03

5.2 与中国现行规范的对比分析

图9为收集的136根钢筋混凝土梁^[11-15]按照中国现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)公式的计算值(V_{code})与试验值(V_{exp})的对比结果(图中斜直线为 $V_{code}/V_{exp} = 1$),规范计算值与试验值比值的平均值为0.8518,标准偏差为0.3114,变异系数为0.3655,最大值为2.7184,最小值为0.5039。从图中可以看出,虽然大部分试件的规范计算值与试验值的比值(V_{code}/V_{exp})接近于1,能够满足一定的设计计算要求,但还有部分试件的规范计算值远远大于试验值,且规范计算值的离散性较大。离散性较大的试件主要是文献[12]中混凝土强度等级高于C40的钢筋混凝土梁和文献[13]中平均约束应力大于4的高强箍筋混凝土梁。

综上,混凝土强度等级较高、平均约束应力大于4的钢筋混凝土梁的规范计算值较试验值高的多,即表明现行规范公式有很大的局限性,当采用高强混凝土或高强箍筋时规范公式不再适用。



注: ■ wei[11] • kang[12] ▲ riben[13] ▼ hunan[14] * shujuji[15]

图 9 2010 规范公式计算值与试验值的对比

5.3 与美国 ACI 318-08 规范的对比分析

美国 ACI 318-08 规范钢筋混凝土梁的受剪承载力由混凝土提供的剪力与箍筋提供的剪力共同组成,即:

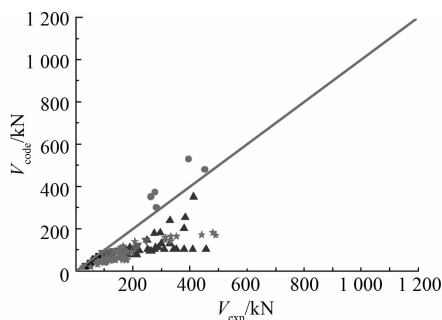
$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_c = 2\lambda \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$V_s = A_v f_{yt} d/s$$

式中: V_c 为混凝土受剪承载力; λ 为轻骨料混凝土强度修正系数,普通混凝土取 1.0; f'_c 为圆柱体混凝土抗压强度,且其取值为 $f'_c < 68.96$ MPa; b_w 为梁的宽度,mm; d 为截面有效高度,mm; V_s 为箍筋受剪承载力; A_v 为箍筋的截面面积; f_{yt} 为箍筋的屈服强度; s 为箍筋间距。

图 10 为收集的 136 根钢筋混凝土梁^[11-15]按照美国 ACI 318-08 规范公式计算值(V_{cal})与试验值(V_{exp})的对比结果(图中斜直线为 $V_{cal}/V_{exp} = 1$),规范计算值与试验值比值的平均值为 0.556 1,标准偏差为 0.194 0,变异系数为 0.348 9,最大值为 1.344 6,最小值为 0.226 0。从图中可以看出,除文献[12]数据外,所收集试验数据的计算结果均比试验值低,且文献[13]中数据计算结果偏低的构件均为高强箍筋约束混凝土梁,因此,美国规范高估了混凝土的抗剪作用,低估了箍筋的抗剪作用。



注: ■ wei[11] • kang[12] ▲ riben[13] ▼ hunan[14] * shujuji[15]

图 10 ACI318-08 规范公式计算值与试验值的对比

6 结束语

经理论分析和试验验证,可以得到以下结论:

1) 当使用高性能或高强度的结构材料时,中国混凝土结构设计规范中的受剪承载力公式的计算结果不安全。

2) 桁架-拱理论模型分析钢筋混凝土构件的受剪机理是合理的,且基于该理论模型的钢筋混凝土梁的受剪承载力公式,当结构材料性能差异较大时,依然能保证计算结果的有效性。

3) 箍筋应力发挥水平是有上限的,同时桁架-拱模型公式的计算结果也验证了日本关于平均约束应力取值的正确性。

4) 对于钢筋混凝土梁的受剪承载力计算,美国规范较中国规范保守。

参考文献:

- [1] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S],北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [2] 日本建筑学会. 鉄筋コンクリート構造計算規準. 同解説[S]. 2010.
- [3] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. 2008.
- [4] EN1992-1-1 Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings [S]. 2004.
- [5] ACI-ASCE committee 426. The shear strength of reinforced concrete members [J]. Journal of the Structural Division Proceeding, 1973, 99 (6): 1019-1187.
- [6] Watson S, Zahn F A, Park R. Confined reinforcement for concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering of ASCE, 1994, 120(6): 1798-1824.
- [7] Ghee A B, Priestley M J N, Paulay T. Seismic shear strength of circular reinforced concrete columns [J]. Structural Journal, 1989, 86(1): 45-59.
- [8] Paulay T, Priestley M J N. 钢筋混凝土和砌体结构的抗震设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:493.
- [9] 日本建筑学会. 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針. 同解説[S],1990.
- [10] 高木仁之,田中礼治,狩野芳一. 高強度鉄筋をいた鉄筋コンクリート部材の設計上の問題点—せん断補強筋として利用場合[J]. コンクリート工学,1990,28(5): 85-88.
Takagi H, Tanaka R J, Kano Y. Design of high-strength threads reinforced concrete members—Application of shear reinforcement [J]. Concrete Institute, 1990, 28(5):85-88.
- [11] 卫纪德. 集中荷载作用下有腹筋连续梁的抗剪强度[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报,1985(4):1-12.

29.
Zhu L M, Qian J H, Zhang W Y. Optimal location of viscous dampers in large-span space structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 22-29.
- [9] 熊仲明, 王佳, 郭瑜. 基于耗能减震结构耗能装置的优化设置的研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2011, 43(2): 166-171.
Xiong Z M, Wang J, Guo Y. Research on optimization setting based on passive energy dissipation structural device [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2011, 43(2): 166-171.
- [10] 李宏男, 曲激婷. 基于遗传算法的位移型与速度型阻尼器位置优化比较研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(2): 252-257.
Li H N, Qu J T. Comparison of optimal placement of displacement-based and velocity-based dampers using genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(2): 252-257.
- [11] 孙黄胜, 陈士海, 施卫星. 黏滞阻尼器连接相邻结构减震优化分析[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 207-211.
Sun H S, Chen S H, Shi W X. Optimal design of viscous dampers connecting adjacent structures [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(1): 207-211.
- [12] FEMA273 NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings [S]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 1997: 310-320.
- [13] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [14] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- [15] 魏链, 王森. 论高层建筑结构层间位移角限值的控制[J]. 建筑结构, 2006, 36(Sup1): 49-55.
Wei L, Wang S. Discussion on inter-story displacement angle of high-rise building [J]. Building Structure, 2006, 36(Sup1): 49-55.
- (编辑 王秀玲)

(上接第 12 页)

- Wei J D. The shear strength of continuous beam with web reinforcement under concentrated loads [J]. Journal of Harbin Architectural and Civil Engineering Institute, 1985(4): 1-12.
- [12] Kang S K. Shear behavior of reinforced concrete beams and prestressed concrete beams [D]. The University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.
- [13] 福原正志, 黒正清治. 鉄筋コンクリート部材における高強度せん断補強筋補強効果に関する実験研究[C]// 日本建築学会論文報告集, 昭和 57 年.
- [14] 李娟. HRB500 级箍筋混凝土梁斜截面受力性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [15] 中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土构件试验数据集—85 年设计规范背景资料续编[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [16] 支运芳, 蒋超, 甘民, 等. 纵筋率对有腹筋约束梁受剪性能影响的研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(4): 64-69.
Zhi Y F, Jiang C, Gan M, et al. Study on effect of longitudinal reinforcement ratio on shear behavior of restrained beams with web reinforcement [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(4): 64-69.
- [17] 张川, 陈臣, 张百胜. 集中荷载作用下纵筋率对钢筋混凝土无腹筋简支梁受剪性能的影响[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(6): 33-38.
Zhang C, Chen C, Zhang B S. Effect of varying longitudinal reinforcement ratios on shear behavior of reinforced concrete beams without web reinforcement [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(6): 33-38.
- (编辑 胡玲)