

文章编号 :1007-649X(2000)02-0054-04

钢筋混凝土梁受剪承载力的统一计算方法

陈 萌¹,刘 辉²,刘立新¹,赵更奇¹

(1 郑州工业大学土木建筑工程学院,河南 郑州 450002;2. 郑州市建筑工程监督站,河南 郑州 450000)

摘 要 :在对国内外钢筋混凝土梁的受剪性能进行较系统分析的基础上,补充了 11 根钢筋混凝土简支短梁在顶部集中荷载和均布荷载作用下的试验,试验梁的主要变化参数为剪跨比、跨高比、水平腹筋率和垂直腹筋率.根据试验结果,对试验梁的工作性能、主要的剪切破坏形态、混凝土顶的抗剪作用、抗剪腹筋(包括水平腹筋、垂直腹筋)的作用等进行了较为深入的分析,提出了可适用钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁相互协调的受剪承载力的统一计算方法.

关键词 :剪切;深梁;短梁

中图分类号 :TV 375 文献标识码 :A

我国现行的《混凝土结构设计规范》(GBJ 10-89)^[1](以下简称 GBJ 10-89)中明确规定:深梁是指跨高比 $l_0/h\leq 2$ (简支深梁)或 $l_0/h\leq 2.5$ (连续深梁)的梁;一般情况下,将跨高比 $l_0/h>5$ 的梁称为浅梁; $l_0/h=2$ (或 2.5)~ 5 之间的梁称为短梁.在 GBJ 10-89 中分别给出了深梁和浅梁的受剪承载力计算公式,而未给出短梁的计算公式.这就使得短梁的受剪承载力计算在与深梁和浅梁的统一和协调上遇到了一定的困难.钢筋混凝土梁的抗剪性能由于其受力机理复杂,影响因素较多,国内外的设计规范中有关梁的抗剪公式多种多样,公式的计算值有时相差较大^[2].这种差别在国内的铁路、公路、港口、水利水电工程的混凝土结构设计规范中也严重存在.目前,正值国

家标准 GBJ 10-89 规范修订之际,若能处理好深梁、短梁和浅梁受剪承载力计算公式的统一和协调,不仅可以实现国内不同行业混凝土结构设计规范的统一,还可以与国外先进规范相接轨.为此,本文有针对性地补充了部分短梁的试验,通过试验研究、分析,提出了可适用深梁、短梁和浅梁相互协调的受剪承载力建议公式,供国家规范修订参考.

1 试验方案

试验梁共计 11 根,其中集中荷载梁 6 根,均布荷载梁 5 根.所有的试验梁中既配有水平腹筋又配有垂直腹筋,试验梁的有关参数分别见表 1、表 2.

表 1 集中荷载作用下有腹筋梁试验结果

试件编号	b/mm	h_0/mm	l_0/h	λ	$f_{cu}/(\text{N}/\text{mm}^2)$	纵筋	$\rho/\%$	竖向腹筋	$\rho_{sv}/\%$	水平腹筋	$\rho_s/\%$	V_u/kN	破坏形态
Lc-4-0.5	180	365	4	0.5	23.13	2Φ25	1.49	Φ6 @150	0.21	Φ6 @110	0.29	420	斜压
Lc-4-1	180	365	4	1	24.80	2Φ25	1.49	Φ6 @150	0.21	Φ6 @110	0.29	300	斜压
Lcs-4-1	180	365	4	1	29.07	2Φ25	1.49	Φ6 @250	0.13	Φ6 @155	0.20	277.3	斜压
Lc-5-2	180	365	5	2	27.03	3Φ25	2.24	Φ6 @150	0.21	Φ6 @110	0.29	200	剪压
Lc-5-2.5	180	365	5	2.5	24.00	3Φ25	2.24	Φ6 @150	0.21	Φ6 @110	0.29	138.9	剪压
Lc-6-3	180	365	6	3	29.50	3Φ25	2.24	Φ6 @150	0.21	Φ6 @110	0.29	145.0	斜拉

说明:1.Lc 表示集中荷载试验梁,梁号的第二列数字表示跨高比,第三列数字表示剪跨比.

表 2 均布荷载作用下有腹筋梁试验结果

试件编号	b/mm	h_0/mm	l_0/h	$f_{cu}/(\text{N}/\text{mm}^2)$	纵筋	$\rho/\%$	竖向腹筋	$\rho_{sv}/\%$	水平腹筋	$\rho_s/\%$	V_u/kN	破坏形态
Lu-2	180	465	2	25.80	2 Φ 25	1.17	Φ 6 @150	0.21	Φ 6 @150	0.21	420	斜压
Lu-3	180	365	3	26.60	2 Φ 25	1.49	Φ 6 @150	0.21	Φ 6 @110	0.29	431	斜压
Lu-4	180	365	4	31.03	2 Φ 25	1.49	Φ 6 @150	0.21	Φ 6 @110	0.29	349.3	斜弯
Lus-4	180	365	4	23.69	2 Φ 25	1.49	Φ 6 @250	0.13	Φ 6 @155	0.20	260	斜压
Lu-7	180	365	7	23.31	3 Φ 25	2.24	Φ 6 @150	0.21	Φ 6 @110	0.29	193.9	剪压

说明 :1.腹筋的 $f_{yv}=448\text{ N}/\text{mm}^2$;2.Lu 表示均布荷载试验梁 梁号的第二列数字表示跨高比.

纵筋及腹筋均采用预埋电阻应变片,纵筋电阻应变片布置在跨中,梁两侧对称贴片,腹筋电阻应变片布置的位置均在支座及加荷点连线附近(估计将要出现临界斜裂缝的位置),对于均布荷载的梁,应变片的位置基本上布置在支座与 1/4 跨连线附近,也是梁两侧对称贴片.试件的加荷采用液压同步加载设备.集中荷载作用下的试验梁采用两点对称加载,均布荷载作用下的试验梁,当 $l_0/h\leq 4$ 时采用 4 点加荷等代, $l_0/h>4$ 时采用六点加荷等代.钢筋的应变通过 7V13 数据采集器自动记录并打印出结果;用百分表量测跨中挠度;当试验梁开裂后,量测各级荷载下的裂缝宽度.

2 试验分析

2.1 试验现象

(1)试验梁从加荷至破坏,其工作状态经历了 3 个阶段:弹性工作阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段.在试验过程中,对于跨高比相同的试验梁,均布荷载梁破坏时的支座截面受剪承载力要大于集中荷载梁破坏时的支座截面受剪承载力,此外,还可观察到试验梁随着跨高比或剪跨比的增大,其相对刚度不断降低.

(2)试验结果表明,梁的破坏形态与剪跨比、跨高比有关.斜压破坏多发生于剪跨比 $\lambda\leq 1$ 的集中荷载梁和跨高比 $l_0/h\leq 4$ 的均布荷载梁的情况,剪压破坏一般在剪跨比 $1<\lambda<3$ 的集中荷载梁和跨高比 $4<l_0/h\leq 8$ 的均布荷载梁中出现,试验中有 1 根梁发生了斜拉破坏(Lc-6-3),剪跨比较大.

2.2 混凝土顶的抗剪作用

混凝土顶的受剪承载力与剪跨比、跨高比有关.在集中荷载作用下,剪跨比是影响无腹筋梁受剪承载力的主要因素,随着剪跨比的增大受剪承载力下降.图 1 给出了收集到的 169 根钢筋混

土无腹筋梁受剪承载力随剪跨比的变化情况.由图 1 可看出,当剪跨比 $\lambda\leq 0.25$ 时,随着剪跨比的增大,受剪承载力下降不明显;而当剪跨比 $\lambda\geq 3$ 即斜拉破坏范围内,受剪承载力下降也不明显;而当 $0.25\leq\lambda\leq 3$ 时,随着剪跨比的增大,受剪承载力下降明显.

在均布荷载作用下,跨高比是影响梁受剪承载力的主要因素,随着跨高比的增大,受剪承载力下降.图 2 给出了收集到的 70 根钢筋混凝土无腹筋梁受剪承载力随跨高比 l_0/h 的变化情况.由图 2 可看出,当 $l_0/h\leq 2$ 即在深梁范围内,受剪承载力随跨高比的变化不明显;当跨高比 $l_0/h>8$ 后,受剪承载力下降也不明显;而当 $l_0/h=2\sim 5$,即在短梁范围内时,受剪承载力的变化较明显,随着跨高比的增大,受剪承载力下降.

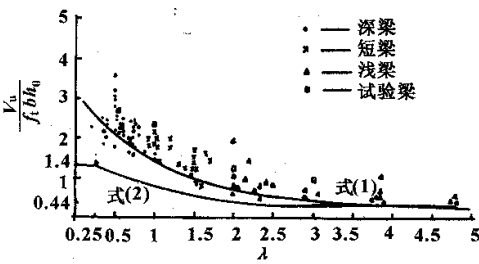


图 1 集中荷载作用下无腹筋梁受剪承载力

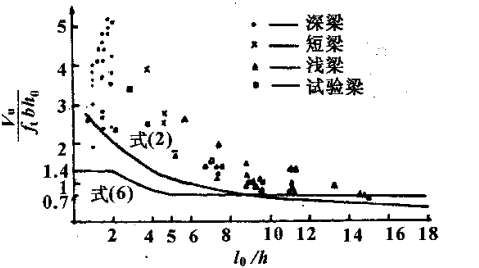


图 2 均布荷载作用下无腹筋梁的受剪承载力

2.3 腹筋的作用

图 3 中分别给出了集中荷载作用下、均布荷

载作用下梁的抗剪强度与腹筋应变的关系.

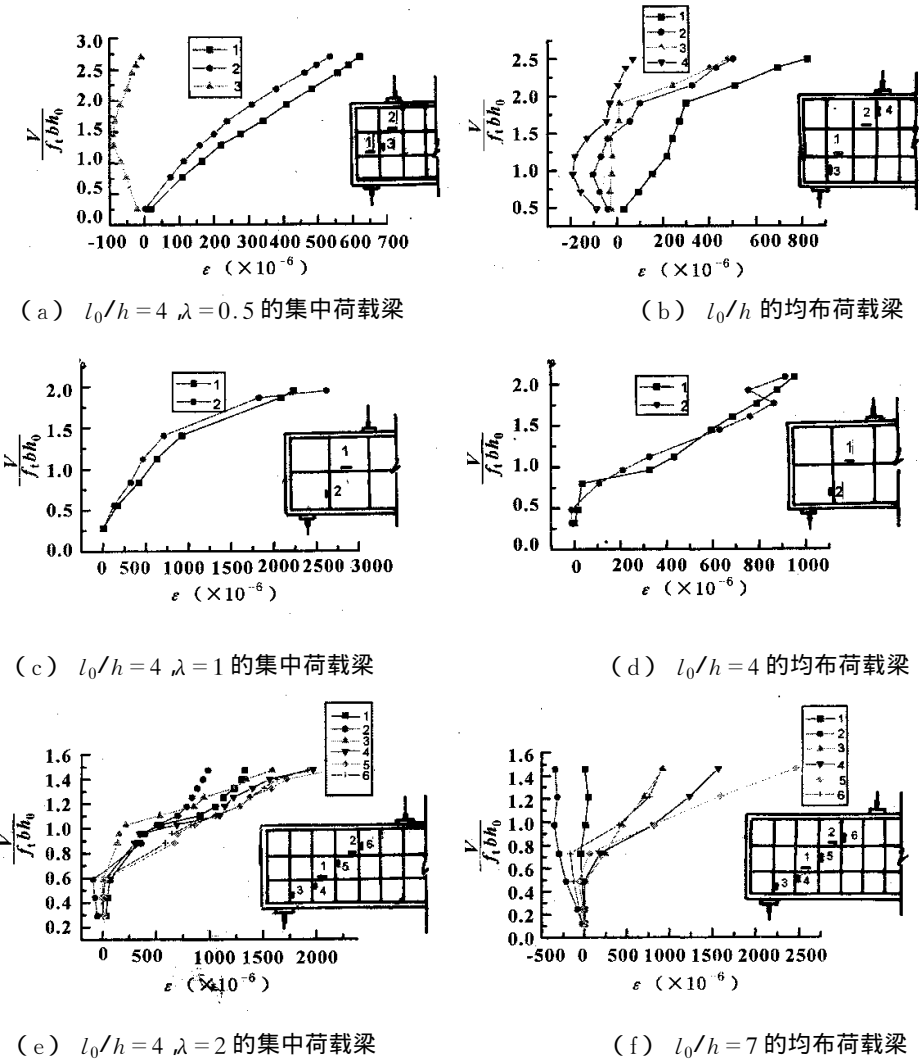


图 3 试验梁的抗剪强度与腹筋应变的关系

从图 3 中可看出,当斜裂缝出现以前,腹筋的拉应变很小,有些甚至出现了压应变,这时梁内的应力主要由混凝土来承担.随着荷载的增加,斜裂缝出现后,腹筋上的应变片穿过斜裂缝时,腹筋的应变骤然增加,而且随着荷载的增加,应变呈线性增加,一直保持较大的数值.通过对图 3 中梁的抗剪强度与腹筋应变关系的统计分析,可得出如下结论:

(1) 当剪跨比 $\lambda < 1$ (集中荷载梁)或跨高比 $l_0/h < 4$ (均布荷载梁)时,试验梁的垂直腹筋应变小于 0,处于受压的工作状态;而水平腹筋的应变均大于 0,处于受拉的工作状态,且随着荷载的增加,水平腹筋的应变呈线性增加,梁破坏时水平腹筋的应变可达到 $600 \sim 800 \mu\epsilon$,但水平腹筋未达到其屈服强度.

(2) 当剪跨比 $\lambda = 1$ (集中荷载梁)或跨高比 $l_0/h = 4$ (均布荷载梁)时,无论是水平腹筋还是

垂直腹筋,均处于受拉的工作状态,且二者的作用也大致相同.此次试验中,集中荷载作用下的梁 Lcs-4-1,梁破坏时它们的水平腹筋和垂直腹筋的应力可达到 360 N/mm^2 .

(3) 当剪跨比 $1 < \lambda \leq 3$ (集中荷载梁)或跨高比 $l_0/h > 4$ (均布荷载梁)时,垂直腹筋的应变大于水平腹筋的应变,除了靠近支座和加荷点附近的垂直腹筋之外,垂直钢筋的应变数值都很大,破坏时穿过斜裂缝的垂直腹筋应力均可达到 360 N/mm^2 .

由以上结论可知,当 $\lambda < 1$ 或 $l_0/h < 4$ 时,水平腹筋的作用大于垂直腹筋的作用,但水平腹筋的抗剪作用不大;当 $\lambda = 1$ 或 $l_0/h = 4$ 时,二者的作用大致相同;当 $1 < \lambda < 3$ 或 $l_0/h > 4$ 时,垂直腹筋的作用大于水平腹筋的作用,且穿过斜裂缝的垂直腹筋应力均可达到 360 N/mm^2 ,上述结果为 GBJ 10-89 规范修订采用 III 级钢作为箍筋提

供了试验依据。

2.4 纵筋的作用

纵向钢筋穿越斜裂缝有“销栓”作用,能直接承受一部分剪力,并且它还约束斜裂缝的扩展,使斜裂缝上端的剪压区面积增大,因而纵向钢筋的配筋量越大,梁的抗剪能力越强^[3]。集中荷载作用下,当其他条件相同时,纵筋配筋率 ρ 与梁的抗剪能力大致成线性关系。随着剪跨比 λ 的不同, ρ 的影响程度也不同。 λ 较小时,纵筋的销栓作用明显, ρ 对抗剪能力的影响较大;而 λ 较大时,纵筋的销栓作用减弱, ρ 对抗剪能力的影响较小。均布荷载作用下,当其他条件相同时,纵筋配筋率 ρ 与梁的抗剪力大致成线性关系。随着跨高比 l_0/h 的不同, ρ 的影响程度也不同。 l_0/h 较小时,纵筋的销栓作用明显, ρ 对抗剪能力的影响较大;而 λ 较大时,纵筋的销栓作用减弱, ρ 对抗剪能力的影响较小。

3 受剪承载力计算

文献[4]中根据钢筋混凝土梁受剪的桁架—拱受力模型,推导出适用于深梁、短梁和浅梁受剪承载力计算的统一公式^[4]。

集中荷载作用下:

$$V_u = \frac{3.3}{0.8 + 1.7\lambda} f_t b h_0 + \frac{\lambda^2}{1.42 + 1.03\lambda} \cdot \frac{A_{sv} f_{yv}}{s_h} h_0 + \frac{0.23}{6.50\lambda - 0.35} \cdot \frac{A_{sh} f_{sh}}{s_v} h_0; \quad (1)$$

均布荷载作用下:

$$V_u = \frac{10}{2.42 + 1.29l/h} f_t b h_0 + \frac{(l/h)^2}{22.72 + 4.12l/h} \cdot \frac{A_{sv} f_{yv}}{s_h} h_0 + \frac{0.94}{6.64l/h - 1.43} \cdot \frac{A_{sh} f_{sh}}{s_v} h_0. \quad (2)$$

从式(1)、式(2)中可以看出,随着剪跨比或跨高比的增大,混凝土的作用减小,垂直腹筋的作用增大,水平腹筋的作用减少。这些特点与试验结果符合良好,如图1、图2所示。但公式(1)、(2)仍比较复杂,不便于实际工程的应用,依据试验分析,在保证安全度的前提下,简化理论公式,得出相互衔接的深梁、短梁和浅梁受剪承载力的实用计算公式。在短梁的范围内既要考虑水平腹筋的作用,也要考虑垂直腹筋的作用,因而短梁的受剪承载力计算公式可由表示混凝土作用、水平腹筋和垂直腹筋作用的三项式表达;在深梁的范围内,可以忽略垂直腹筋的作用,仅考虑水平腹筋的抗剪作

用,其受剪承载力计算公式可仅由表示混凝土作用、水平腹筋作用的二项式来表达;在浅梁的范围内,可以忽略水平腹筋的作用,仅考虑垂直腹筋的抗剪作用,其受剪承载力可仅由表示混凝土作用、垂直腹筋作用的二项式来表达。建议公式如下:

浅梁:在均布荷载作用下,

$$V \leq 0.7 \beta_p f_t b h_0 + 1.25 \frac{A_{sv} f_{yv}}{s_h} h_0; \quad (3)$$

集中荷载作用下,

$$V \leq \frac{1.75}{\lambda + 1} \beta_p f_t b h_0 + 1.0 \frac{A_{sv} f_{yv}}{s_h} h_0 \quad (0.25 \leq \lambda \leq 3). \quad (4)$$

深梁:

$$V \leq 1.4 f_t b h_0 + 0.5 \frac{A_{sv} f_{yv}}{s_v} h_0. \quad (5)$$

短梁:在均布荷载作用下,

$$V \leq 0.7 \frac{(8 - l_0/h)}{3} \beta_p f_t b h_0 + 1.25 \left(\frac{l_0}{3h} - \frac{2}{3} \right) \frac{A_{sv} f_{yv}}{s_h} h_0 + \frac{1}{6} (5 - l_0/h) \frac{A_{sh} f_{sh}}{s_v} h_0; \quad (6)$$

集中荷载作用下,

$$V \leq \frac{1.75}{\lambda + 1} \beta_p f_t b h_0 + \frac{(l_0/h - 2)}{3} \frac{A_{sv} f_{yv}}{s_v} h_0 + \frac{(5 - l_0/h)}{6} \frac{A_{sh} f_{sh}}{s_v} h_0. \quad (7)$$

式中:当 $l_0/h < 2$ 时,取 $l_0/h = 2$; λ 为计算截面的剪跨比,当 $l_0/h = 5$ 时,取 $\lambda = \alpha/h_0$; α 为集中荷载作用点至支座间的距离。 λ 的上限为3,下限为1.5;当 $l_0/h \leq 2$ 时,取 $\lambda = 0.25$;当 $2 < l_0/h < 5$ 时,取 $\lambda = \alpha/h_0$, λ 的上限为 $0.917l_0/h - 1.584$,下限为 $0.417l_0/h - 0.584$; β_p 为纵向钢筋作用系数,取 $\beta_p = 0.78 + 15\rho$,当 $\rho < 1.5\%$ 时,取 $\rho = 1.5\%$;当 $\rho > 3.0\%$ 时,取 $\rho = 3\%$ 。

参考文献:

- [1] GBJ 10-89 混凝土结构设计规范[S].
- [2] 邹银生,方志狄,谨.钢筋混凝土梁斜截面抗剪承载力综述与建议[R].长沙:湖南大学土木工程系,1998,12-8.
- [3] 郑州工学院土木建筑工程系.钢筋混凝土结构[M].郑州:河南科学技术出版社,1991.
- [4] 刘立新,蔡耀东,陈萌.钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁的受剪承载力分析及设计建议[J].郑州:郑州工业大学学报,1998,19(2):1-8.

(下转 78 页)

(上接 57 页)

The Uniform Calculation Method for Shear Capacity of R.C. Beams

CHEN Meng¹, LIU Hui², LIU Li-xin¹, ZHAO Geng-qi¹

(1. College of Civil & Building Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China; 2. Architectural Engineering Quality Supervision, Zhengzhou 450000, China)

Abstract Based on the systematic analysis of the shear behavior for R.C. beams, the tests of 11 simple supported beams under the top concentrated loads and the uniform loads are supplemented. The prime variable is shear span ratio, span depth ratio, horizontal web reinforcement ratio and vertical web reinforcement ratio. According to the test results, the working behavior, the prime shear failure modes, the effect of concrete and web reinforcement (horizontal web reinforcement and vertical web reinforcement) and other aspects of R.C. beams are analysed. The uniform calculation method for shear capacity of deep beams, short beams and shallow beams for practical is presented.

Key words shear capacity; deep beam; short beam