

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^{*}

刘立新

蔡耀东

陈 萌

(郑州工业大学土建系) (河南省建筑职工大学, 郑州, 450003) (郑州工业大学土建系)

摘 要 密切配合我国混凝土结构设计规范修订的需要, 较详细地分析了钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁受剪破坏特点及影响受剪承载力的主要因素。在桁架—拱受力模型分析的基础上利用我国剪切专题组和国外学者试验数据并结合高强混凝土发展的需要, 给出了用混凝土抗拉强度 f_t 表示的钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁受剪承载力计算公式, 供规范修订参考。

关键词 剪切; 桁架—拱模型; 深梁

中图分类号 TU 375.1

1 概述

钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁受剪承载力计算的衔接问题一直是我国混凝土结构设计规范科研力求解决而尚未较好解决的课题之一。深梁一般是指跨高比 $L/h \leq 2$ 的简支梁或 $L/h \leq 2.5$ 的连续梁, 其受力模型可比拟为一变截面的拉杆拱; 浅梁一般是指 $L/h \geq 5$ 的梁, 其受力模型可比拟为桁架; 短梁是指跨高比介于深梁和浅梁之间, 即 $L/h = 2.5 \sim 5$ 的梁。我国现行混凝土结构设计规范 GBJ 10—89 中深梁和浅梁受剪承载力计算公式分别为^[1]

深梁(不区分集中荷载或均布荷载):

$$V \leq 0.1[1 + 2\lambda(\rho + \rho_{sh})]f_c b h \quad (1)$$

式中 f_c 为混凝土轴心抗压强度, b 、 h 分别为梁截面的宽度和高度, ρ 为梁底部纵向受拉钢筋的配筋率 $\rho = A_s/bh$, ρ_{sh} 为水平腹筋的配筋率 $\rho_{sh} = A_{sh}/bs_v$, 其中 s_v 为水平腹筋的间距, A_{sh} 为 s_v 范围内水平腹筋的截面面积。

浅梁在均布荷载作用下:

$$V \leq 0.07f_y b h_0 + 1.5f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (2)$$

浅梁在集中荷载作用下:

$$V \leq \frac{0.2}{\lambda + 1.5}f_c b h_0 + 1.25f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (1.4 \leq \lambda \leq 3) \quad (3)$$

以上两式中 h_0 为截面的有效高度, f_{yv} 和 s 分别为竖向腹筋的抗拉强度设计值和竖向腹筋

^{*} 国家自然科学基金(59478022)和河南省自然科学基金(984043000)资助课题

收稿日期: 1998—02—18

第一作者 男 1947年10月生 硕士学位 教授

的间距, λ 为剪跨比。从 (1) ~ (3) 式可见深梁受剪承载力计算公式中水平腹筋和纵筋起较大作用, 不考虑竖向腹筋有作用, 在浅梁受剪承载力计算公式中竖向腹筋起较大作用, 不考虑水平腹筋和纵筋的作用, 这为短梁设计计算带来了困难, 因而我国现行规范中尚未列入短梁受剪承载力的计算公式。

为解决深梁、短梁和浅梁受剪承载力计算的衔接问题, 国内众多学者进行了较多研究^[2,3]。其中文献 [3] 从深梁、短梁和浅梁的受力机理分析中提出了钢筋混凝土梁受剪的桁架一拱受力模型, 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。

在集中荷载作用下:

$$V \leq \frac{0.33}{0.8 + 1.7\lambda} f_c b h_0 + \frac{\lambda^2}{1.42 + 1.03\lambda} \cdot \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 + \frac{0.23}{6.5\lambda - 0.35} \cdot \frac{A_{sv}}{s_v} f_{yv} h_0 \quad (4)$$

在均布荷载作用下:

$$V \leq \frac{1}{2.42 + 1.29L/h} f_c b h_0 + \frac{(L/h)^2}{22.72 + 4.12L/h} \cdot \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 + \frac{0.94}{6.64L/h - 1.43} \cdot \frac{A_{sv}}{s_v} f_{yv} h_0 \quad (5)$$

以上两式与国内外试验结果等符合良好, 也较好地反映了深梁、短梁和浅梁的受力特点。从 (4) (5) 式中可以看出, 随着剪跨比或跨高比的减小, 混凝土的作用增大、竖向腹筋的作用减小, 水平腹筋的作用增大, 这些特点都是与大量试验结果相吻合的。当为深梁时, 跨高比 L/h 减小, 剪跨比 λ 也减小, 竖向腹筋的作用已很小可以忽略, 因此深梁的受剪承载力可由混凝土作用项和水平腹筋作用项的二项式表示; 当为浅梁时, 跨高比 L/h 增大且一般不配置水平腹筋, 因此浅梁的受剪承载力可由混凝土作用项和竖向腹筋作用项的二项式表示; 而对于短梁, 竖向腹筋和水平腹筋的作用均不可忽略, 其受剪承载力应由三项式表示。由于桁架一拱模型能较好地解决深梁、短梁和浅梁受剪承载力计算的衔接问题, 已被我国规范修订组采用为对受剪机理解释的模型, 要求在此基础上进行简化提出可供规范修订采用的实用公式。

随着高强混凝土的日益广泛使用, 我国混凝土结构设计规范在此次修订时已将混凝土强度等级扩大到 C80, 即扩展到高强混凝土的范围。试验结果表明, 在混凝土范围内混凝土的抗剪强度与 f_c 的符合程度不够好而与混凝土的抗拉强度 f_t 符合较好, 因而为适应高强混凝土的特点并与国际惯例接轨, 此次规范修订时拟采用 f_t 来表示混凝土的抗剪作用。混凝土的抗拉强度与抗压强度呈非线性关系, 表 1 为现行混凝土结构设计规范中混凝土抗拉强度与抗压强度的比值, 从表中可见, 在常用的 C20~C40 级混凝土范围内抗拉强度与抗压强度的比值接近 0.1, 当混凝土强度低于 C20 时比值大于 0.1, 当混凝土强度高于 C40 时比值小于 0.1, 因此用混凝土抗拉强度 f_t 作力学指标可较好地反映随着混凝土强度的提高其抗剪强度的提高的非线性关系特点。

根据我国混凝土结构设计规范此次修订的要求, 本文对钢筋混凝土受剪承载力的分析引用了国内外共 837 根梁的试验数据, 梁跨高比的范围 $L/h = 1 \sim 18$, 剪跨比 $\lambda = a/h_0 = 0.5 \sim 8$, 混凝土强度 $f_{cu} = 15 \sim 60 \text{ N/mm}^2$, 梁底纵筋配筋率 $\rho = A_s/bh_0 = 0.7\% \sim 5\%$, 竖向腹

筋的配箍率 $\rho_{sv} = A_{sv} / b_s = 0.1 \sim 0.6\%$, 水平腹筋的配箍率 $\rho_{sh} = A_{sh} / b_{sv} = 0.18 \sim 1.84\%$ 。

表 1 混凝土抗拉强度 f_t 与抗压强度 f_c 的比值

混凝土强度等级	C 15	C 20	C 25	C 30	C 35	C 40	C 45	C 50	C 55	C 60
$f_t(\text{N/mm}^2)$	0.9	1.1	1.3	1.5	1.65	1.8	1.9	2	2.1	2.2
$f_c(\text{N/mm}^2)$	7.5	10	12.5	15	17.5	19.5	21.5	3.5	25	26.5
f_t / f_c	0.12	0.11	0.104	0.1	0.094	0.092	0.088	0.085	0.084	0.083

2 集中荷载作用下的受剪承载力分析

图 1 是钢筋混凝土无腹筋深梁、短梁和浅梁受剪承载力随剪跨比 λ 的变化情况。从图中可见, 在集中荷载作用下无论是深梁、短梁还是浅梁, 剪跨比均是影响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。但当剪跨比 $\lambda \leq 1$ 即斜压破坏范围内受剪承载力随剪跨比减小的变化不明显, 且试验值离散性也较大; 当剪跨比 $\lambda \geq 3$ 即斜拉破坏范围内随着剪跨比的增大, 受剪承载力下降不明显; 只有当剪跨比 $1 \leq \lambda \leq 3$ 剪压破坏范围内, 随着

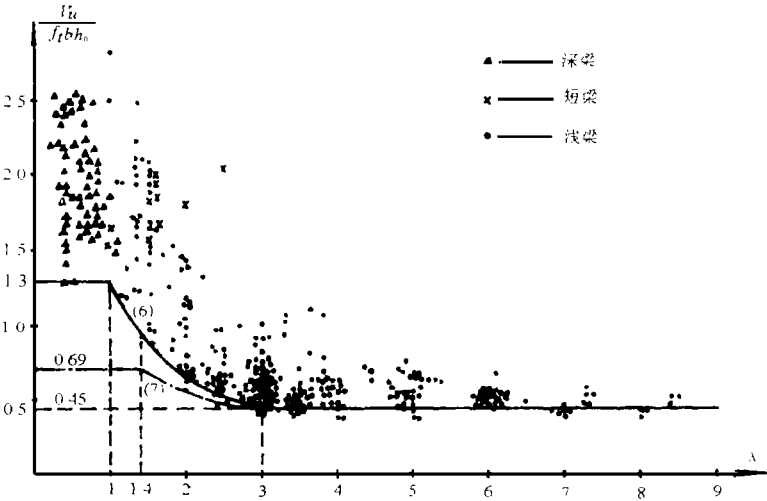


图 1 集中荷载作用下无腹筋梁受剪承载力

剪跨比的增大受剪承载力下降明显。为反映上述规律, 可用下面偏安全的下限公式来表示

$$\frac{V_u}{f_t b h_0} = \frac{10}{0.4 + 7.3 \lambda}$$

(6)

式中当 $\lambda < 1$ 时取 $\lambda = 1$, 当 $\lambda > 3$ 时取 $\lambda = 3$ 。从图 1 中可以看出 (6) 式较好地反映了无腹筋梁受剪承载力随剪跨比变化的规律。为了便于和现行规范的有关公式进行比较, 参照 (3) 式中的混凝土作用项并取 $f_t \approx 0.1 f_c$, 可得

$$\frac{V_u}{f_t b h_0} = \frac{2}{\lambda + 1.5}$$

(7)

式中当 $\lambda < 1.4$ 时取 $\lambda = 1.4$, 当 $\lambda > 3$ 时取 $\lambda = 3$ 。从图 1 中可见 (7) 式主要是反映浅梁受

剪承载力变化的偏下线表达式,其允许剪跨比的最小值为 1.4,不便于延伸到深梁的范围。

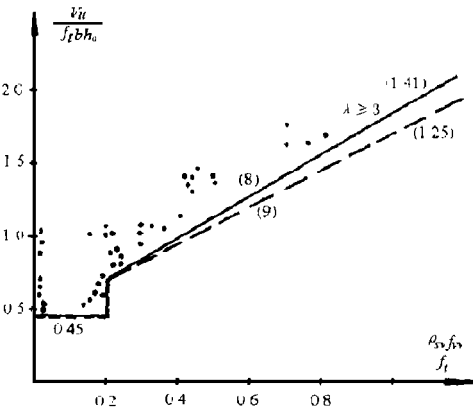


图 2 竖向腹筋的影响 (λ≥3)

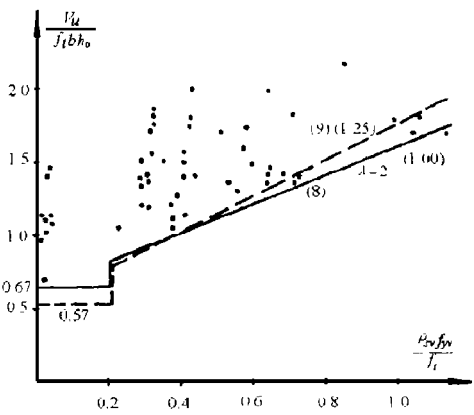


图 3 竖向腹筋的影响 (λ=2)

图 2~图 4 为有腹筋梁的受剪承载力随竖向腹筋的配箍特征值 $\rho_{sv}f_{yv}/f_t$ 变化的情况,从图中可明显看出,随着剪跨比的减小,混凝土的抗剪作用增大而竖向腹筋的抗剪作用降低。图 2 中剪跨比 $\lambda \geq 3$,腹筋的抗剪作用最大;图 3 中 $\lambda = 2$,腹筋的抗剪作用次之;图 4 中 $\lambda = 1$,腹筋对抗剪承载力的提高已不很明显,这与桁架—拱模型分析的结果是一致的。在桁架—拱模型的基础上进行简化,在集中荷载作用下配有竖向腹筋梁的受剪承载力可由下式表示

$$\frac{V_u}{f_t b h_0} = \frac{10}{0.4 + 7.3 \lambda} + \sqrt{\lambda - 1} \frac{\rho_{sv} f_{yv}}{f_t} \quad (8)$$

式中当 $\lambda < 1$ 时取 $\lambda = 1$,当 $\lambda > 3$ 时取 $\lambda = 3$,从图 2~图 4 中可以看出(8)式能较好地反映随着剪跨比的减小,竖向腹筋的抗剪作用降低的规律(图中括号内的数字为腹筋作用系数)。图 2~图 4 中还画出了参照(3)式并取 $f_t \approx 0.1 f_c$ 而得到的反映现行混凝土结构设计规范中在集中荷载作用下配有竖向腹筋梁的受剪承载力表达式

$$\frac{V_u}{f_t b h_0} = \frac{2}{\lambda + 1.5} + 1.25 \frac{\rho_{sv} f_{yv}}{f_t} \quad (9)$$

式中当 $\lambda < 1.4$ 时取 $\lambda = 1.4$,当 $\lambda > 3$ 时取 $\lambda = 3$ 。从图中可以看出,现行规范公式中竖向腹筋作用系数取定值 1.25,不能反映腹筋作用随剪跨比变化的规律,所以在修订规范时应对此种情况进行修改。

在钢筋混凝土深梁中既配竖向腹筋又配水平腹筋,国内外大量的试验研究结果表明在深梁中剪跨比较小,竖向腹筋的作用已很小而水平腹筋的作用较大。图 5 中给出一组剪跨比分别为 1 和 0.5 的只配水平腹筋不配竖向腹筋的深梁的受剪承载力随配箍特征值变化的情况,从图中可见随着水平腹筋配箍特征值增加,深梁的受剪承载力有所提高,但提高到一个

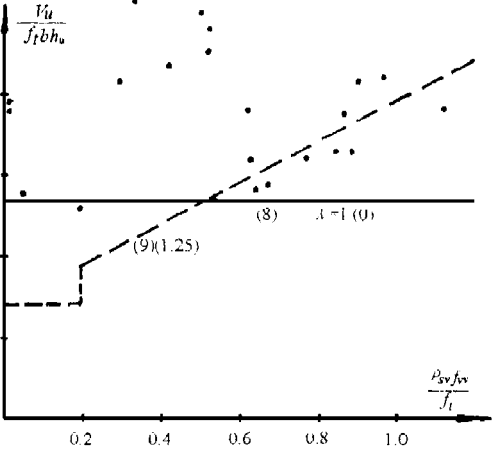


图 4 竖向腹筋的影响 (λ=1)

定程度后就不明显了。根据试验结果可采用下式来表示既配竖向腹筋又配水平腹筋梁的受剪承载力

$$\frac{V_u}{f_t b h_0} = \frac{10}{0.4 + 7.3 \lambda} + \sqrt{\lambda - 1} \frac{\rho_{sv} f_{yv}}{f_t} + 0.15 (3 - \lambda) \frac{\rho_{sh} f_{yv}}{f_t} \tag{10}$$

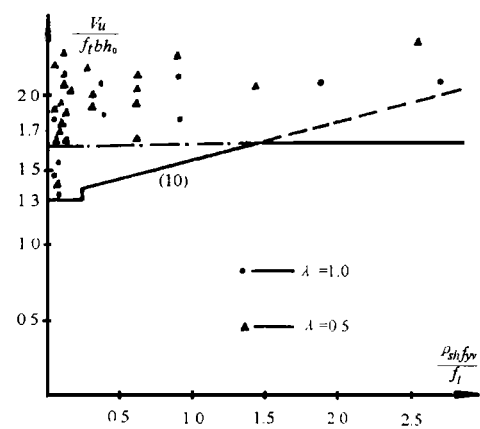


图 5 水平腹筋的影响

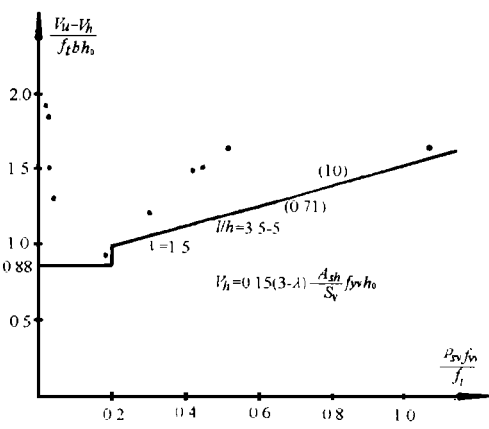


图 6 竖向腹筋和水平腹筋的综合影响

式中 ρ_{sh} 为水平腹筋的配箍率, f_{yv} 和 f_t 分别水平腹筋的屈服强度和混凝土的抗拉强度, 当 $V_u / f_t b h_0 > 1.7$ 时取 1.7。从图 5 中可见 (10) 式可较好地反映水平腹筋的抗剪作用。图 6 是一组跨高比 $L/h = 3.5 \sim 5$ 的短深受剪承载力随竖向腹筋和水平腹筋配箍特征值变化的情况, 可以看出 (10) 式可较好地反映剪跨比、竖向腹筋和水平腹筋对受剪承载力的综合影响。

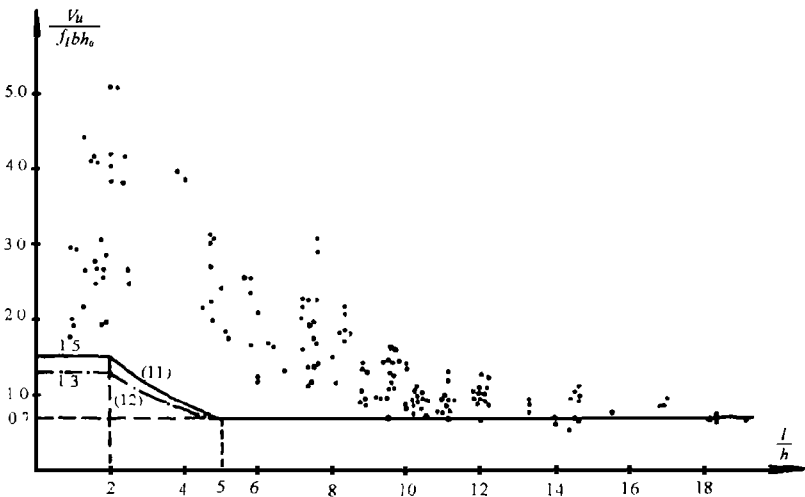


图 7 均布荷载作用下无腹筋梁受剪承载力

3 均布荷载作用下的受剪承载力分析

图 7 是在均布荷载作用下无腹筋梁的受剪承载力随跨高比 L/h 变化的情况, 从图中可

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

见随着跨高比的增大受剪承载力下降,但当跨高比大于 8 以后受剪承载力下降不明显。此外还可以看出当 $L/h \leq 2$ 即在深梁范围内时,受剪承载力随跨高比的变化不明显,而当 $L/h = 2 \sim 5$ 即在短梁范围内时,受剪承载力的变化较明显。为便于衔接深梁、短梁和浅梁的受剪承载力计算并偏于安全,在均布荷载作用下无腹筋梁受剪承载力可用下列公式表示:

$$\frac{V_u}{f_t b h_0} = \frac{10}{1.7 + 2.5L/h} \quad (11a)$$

$$\text{或} \quad \frac{V_u}{f_t b h_0} = \frac{10}{3.3 + 2.2L/h} \quad (11b)$$

以上两式中(11a)式是考虑到在均布荷载作用下深梁的受剪承载力较高的特点而采用的公式,(11b)式是考虑现行规范中深梁受剪承载力计算公式中不区分集中荷载或均布荷载的特点而采用的公式。公式中当跨高比 $L/h < 2$ 时取 $L/h = 2$,当 $L/h > 5$ 时取 $L/h = 5$ 。

和集中荷载作用的情况类似,跨高比 L/h 也是影响均布荷载作用下无腹筋梁和有腹筋梁受剪承载力的主要因素。随着跨高比的减小,混凝土和水平腹筋的抗剪作用增强,竖向腹筋的抗剪作用下降,当跨高比小于 2 时即在深梁范围内竖向腹筋的抗剪作用已可忽略;随着跨高比的增大,混凝土和水平腹筋的抗剪作用下降,而竖向腹筋的抗剪作用增强,当跨高比大于 5 时即在浅梁范围内水平腹筋的作用已可忽略。结合以上分析以及国内外试验结果提出均布荷载下有腹筋梁的受剪承载可由下列公式表示

$$\frac{V_u}{f_t b h_0} = \frac{10}{1.7 + 2.5L/h} + 0.87 \sqrt{L/h - 1} \frac{\rho_{sv} f_{yv}}{f_t} + 0.5(1 - 0.2L/h) \frac{\rho_{sv} f_{yv}}{f_t} \quad (12)$$

$$\text{或} \quad \frac{V_u}{f_t b h_0} = \frac{10}{3.3 + 2.2L/h} + 0.87 \sqrt{L/h - 2} \frac{\rho_{sv} f_{yv}}{f_t} + 0.5(1 - 0.2L/h) \frac{\rho_{sv} f_{yv}}{f_t} \quad (13)$$

式中当 $L/h < 2$ 时取 $L/h = 2$,当 $L/h > 5$ 时取 $L/h = 5$ 。从公式可以看出当跨高比 L/h 减小时,混凝土水平腹筋的作用增大,竖向腹筋的作用减小;当跨高比 L/h 增大时,混凝土和水平腹筋的作用减小,竖向腹筋的作用增大。图 8 是一组跨高比 $L/h = 5 \sim 18$ 仅配有竖向腹筋的梁的受剪承载力随配箍特征值变化的情况,从图中可见(12)、(13)式能够反映上述规律并偏于安全。

4 受剪承载力计算建议

从钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁的受剪机理和试验结果的分析中可以看出,在短梁的范围内水平腹筋和竖向腹筋均对提高抗剪承载力有明显作用,因而短梁的受剪承载力计算公式可由表示混凝土作用、竖向和水平腹筋作用的三项式来表达;在深梁范围内竖向腹筋的作用很小,其受剪承载力计算公式可仅由表示混凝土和水平腹筋作用的二项式表达;在浅梁范

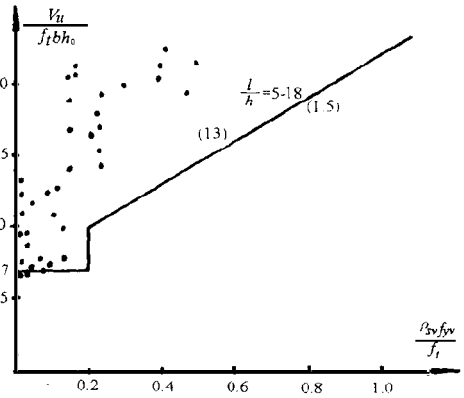


图 8 竖向配箍的影响

围内水平腹筋的作用很小,其受剪承载力可仅由表示混凝土和竖向腹筋作用的二项式来表达。上述处理原则已被我国混凝土结构设计规范修订组采纳,根据这一原则并考虑修订后的受剪承载力计算公式应与修订前的计算公式有大致相同的可靠度水准,提出钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁受剪承载力计算的建议公式如下:

方案一:

在集中荷载作用下:

$$\text{深梁} \quad V \leq \frac{10}{0.4 + 7.3\lambda} f_t b h_0 + 0.15(3 - \lambda) \frac{A_{sh}}{s_v} f_{yv} h_0 \quad (14)$$

$$\text{短梁} \quad V \leq \frac{10}{0.4 + 7.3\lambda} f_t b h_0 + \sqrt{\lambda - 1} \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 + 0.15(3 - \lambda) \frac{A_{sh}}{s_v} f_{yv} h_0 \quad (15)$$

$$\text{浅梁} \quad V \leq \frac{10}{0.4 + 7.3\lambda} f_t b h_0 + \sqrt{\lambda - 1} \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 \quad (16)$$

上述公式中当 $\lambda < 1$ 时取 $\lambda = 1$, 当 $\lambda > 3$ 时取 $\lambda = 3$ 。

在均布荷载作用下:

$$\text{深梁} \quad V \leq 0.15 f_t b h_0 + 0.3 \frac{A_{sh}}{s_v} f_{yv} h_0 \quad (17)$$

$$\text{短梁} \quad V \leq \frac{10}{1.7 + 2.5L/h} f_t b h_0 + 0.87 \sqrt{L/h - 2} \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 + 0.5(1 - 0.2L/h) \frac{A_{sh}}{s_v} f_{yv} h_0 \quad (18)$$

$$\text{浅梁} \quad V \leq 0.7 f_t b h_0 + 1.5 \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 \quad (19)$$

上述公式中当 $L/h < 2$ 时取 $L/h = 2$, 当 $L/h > 5$ 时取 $L/h = 5$ 。

方案二:

深梁(不区分集中荷载或均布荷载)均为

$$V \leq 1.3 f_t b h_0 + 0.3 \frac{A_{sh}}{s_v} f_{yv} h_0 \quad (20)$$

短梁在集中荷载作用下

$$V \leq \frac{10}{0.4 + 7.3\lambda} f_t b h_0 + \sqrt{\lambda - 1} \frac{A_{sv}}{s_v} f_{yv} h_0 + 0.15(3 - \lambda) \frac{A_{sh}}{s_v} f_{yv} h_0 \quad (21)$$

短梁在均布荷载作用下

$$V \leq \frac{10}{3.3 + 2.2L/h} f_t b h_0 + 0.87 \sqrt{L/h - 2} \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 + 0.5(1 - 0.2L/h) \frac{A_{sh}}{s_v} f_{yv} h_0 \quad (22)$$

浅梁在集中荷载作用下

$$V \leq \frac{10}{0.4 + 7.3\lambda} f_t b h_0 + \sqrt{\lambda - 1} \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 \quad (23)$$

浅梁在均布荷载作用下

$$V \leq 0.7 f_t b h_0 + 1.5 \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 \quad (24)$$

案二的建议公式中可以看出,短梁的公式中当 $\lambda=1$ 或 $L/h=2$ 时,竖向腹筋作用项消失即得到深梁的公式;当 $\lambda=3$ 或 $L/h=5$ 时,水平腹筋作用项消失即得到浅梁的公式;因而建议公式能较好地解决梁、短梁和浅梁受剪承载力计算的衔接问题。提出方案一和方案二的两组建议公式是便于在规范修订时考虑与水工、港工、公路和铁路相关规范配合时进行选择。

参考文献

- 1 混凝土结构设计规范 (GBJ 10—1989). 北京:中国建筑工业出版社. 1989
- 2 钱国梁等. 钢筋砼梁与深梁承载力统一计算方法的探讨. 建筑结构, 1995.(8). 24~29
- 3 刘立新. 钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁受剪承载力的统一计算方法. 建筑结构学报. 1995.12(4). 13~21
- 4 中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土构件试验数据集. 1985.8. 173~187

Analysis and Design Suggestion for Shear Capacity of Reinforced Concrete Deep Beams ,Short Beams and Shallow Beams

Liu Lixin Cai Yaodong^{*} Chen Meng

(Zhengzhou University of Technology)

^{*} (Henan Profesional University of Building Worker)

Abstract In this paper the behavior and the factors affecting the shear capacity of reinforced concrete deep beams ,short beams and shallow beams are discussed in detail .Based on the theory of“truss —arch” model and the test results available at home and abroad the calculating formulas for shear capacity of reinforced deep beams ,short beams and shallow beams under both concentrated and distributed loads are given ,and these formulas may be the reference for revision of P ·R ·C code .

Key words shear capacity ;“truss —arch” model ;deep beams