

文章编号:1006-7329(2003)06-0033-06

## 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\*

张川, 陈臣, 张百胜

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**通过对已有试验数据的分析,探讨了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,着重在极限承载力和破坏形态方面。在研究了纵筋率影响一般规律的基础上,对不同规范的抗剪承载力确定方法进行了评价。

**关键词:**钢筋混凝土;梁;纵筋率;受剪性能

**中图分类号:**TU375.1

**文献标识码:**A

## Effect of Varying Longitudinal Reinforcement Ratios on Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Without Web Reinforcement

ZHANG Chuan, CHEN Chen, ZHANG Bai-sheng

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Effect of varying longitudinal reinforcement ratios on shear behavior of reinforced concrete simply supported beams without web reinforcement was analyzed in this paper, with emphasis on both shear ultimate capacity and failure mode, on the basis of available testing data. Generic laws were thus obtained and codified methods, including ACI Code and China Design Code of Reinforced Concrete Structures, were evaluated as a result.

**Keywords:** reinforced concrete; beam; longitudinal reinforcement ratio; shear

已有的研究表明,纵筋率是影响无腹筋梁受剪性能的重要因素之一。Talbot<sup>[1]</sup>于1907年通过对106根无腹筋梁的试验研究指出,梁的抗剪承载力并非仅受混凝土强度影响,纵筋率较高的梁比纵筋率较低的梁具有更高的抗剪承载力。Moody等<sup>[2]</sup>通过对42根集中荷载作用下的简支梁的抗剪试验研究也证实纵筋率是影响无腹筋简支梁抗剪承载力的主要因素之一。Krefeld等<sup>[3]</sup>1966年通过试验研究指出,钢筋混凝土无腹筋梁在开裂截面的剪力主要由两部分承担:①斜裂缝顶端之上未开裂的混凝土;②纵筋的销栓作用。沿纵筋发生的撕裂裂缝的发展是导致抗剪破坏的直接诱因。Kani<sup>[4]</sup>的试验研究表明:当纵筋率由0.80%增大到2.80%时,梁的抗剪承载力约提高一倍。Batchelor等<sup>[5]</sup>发现,纵筋率对抗剪承载力有显著的影响,尤其是在纵筋率较小时。

由于纵筋率的显著影响,国外许多学者在试验研究的基础上提出的抗剪承载力计算经验公式里大都包括了纵筋率项。1941年,Moretto<sup>[1]</sup>在对一系列梁的抗剪试验研究基础上,首先将纵筋率作为影响梁抗剪承载力的一个变量,放进抗剪承载力计算公式中。之后,许多学者提出的抗剪承载力公式也包含了纵筋率的影响。一些国家的规范,如美国ACI规范抗剪承载力详细公式,也将纵筋率

\* 收稿日期:2003-08-24

作者简介:张川(1965-),男,江西南昌人,教授,博士,主要从事钢筋混凝土结构性能、结构抗震性能研究。

包含在抗剪承载力计算公式中。

在这些规范抗剪承载力计算公式所依托的梁的抗剪试验中,为了保证试件剪切失效前不发生弯曲失效,试件配置的纵筋量往往较多,纵筋率通常在 2.8% 以上<sup>[6]</sup>。注意到在实际工程中梁的纵筋率一般都小于 2%,常为 1% 左右,因此,这些试验与实际工程中的常见情况是不相符的,基于较高纵筋率的抗剪试验得到的这些基础数据的代表性值得怀疑。实际上,在美国 ACI 规范抗剪承载力详细公式建立后不久,Rajagopalan 等<sup>[7]</sup>便在试验研究的基础上指出在纵筋率小于 1% 时,该公式是不安全的。我国钢筋混凝土结构设计规范 GB50010-2002 也存在同样的问题。建立规范公式所采用的试验数据中,纵筋率大于 2% 的试验数据占总数的 60% 以上,且在公式中未显式体现纵筋率的影响。

本文通过收集整理能得到的试验数据,深入分析纵筋含量对受剪性能的影响规律。在此基础上,评价美国 ACI 规范抗剪详细公式和我国规范抗剪计算公式的合适性,以明确按照这些规范公式设计的安全程度。

## 1 纵筋率对集中荷载作用下无腹筋简支梁受剪性能的影响规律

### 1.1 纵筋率对集中荷载作用下无腹筋简支梁抗剪承载力的影响

为了了解纵筋率对集中荷载作用下无腹筋简支梁抗剪承载力影响的规律及影响大小,作者收集了国内外剪跨比为 3 左右(具体为  $2.9 \leq \lambda \leq 3.07$ )的集中荷载作用下无腹筋简支梁的试验数据<sup>[8,9]</sup>共 130 组。试验数据的主要变化因素为纵筋率、混凝土强度及截面尺寸。其中纵筋率变化范围为 0.5% ~ 3.5%。

以无量纲量  $V/f_t b h_0$  作为抗剪承载力指标,基于试验数据绘制纵筋率与抗剪承载力的散点关系图即可看到纵筋率对抗剪承载力的影响规律。

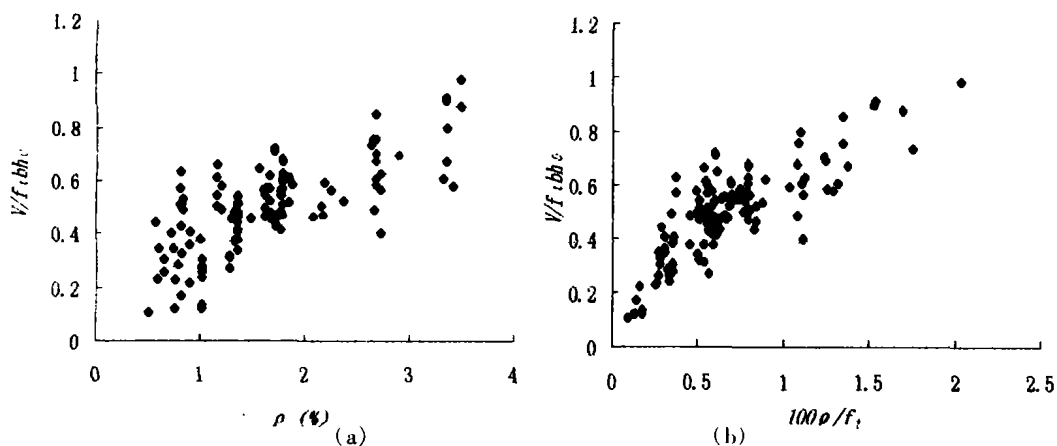


图 1 纵筋率与抗剪承载力的散点关系图(剪跨比为 3 左右)

图 1 为由这 130 组试验数据得到的纵筋率与抗剪承载能力的散点关系图。其中,图 1(a)、(b)分别取不同的横坐标  $\rho(\%)$  和  $100\rho/f_t$  展示纵筋率对抗剪承载能力的影响。从图 1(a)中可以看出,纵筋率对抗剪承载力有显著的影响,纵筋率较小时,抗剪承载力较低,纵筋率较大时,抗剪承载力较高。因试验数据点包含不同的截面尺寸及混凝土强度对抗剪承载力的影响,因而,图 1(a)数据点离散性较大,而以  $100\rho/f_t$  作为横坐标,如图 1(b)所示,则呈现出较强的规律性, $100\rho/f_t$  与  $V/f_t b h_0$  略呈线性关系。当纵筋率较小时,抗剪承载力随纵筋率增大而提高更显著;当纵筋率较大时,抗剪承载力随纵筋率增大而提高的幅度相对较小。

为了考虑剪跨比的影响,本文收集了剪跨比从 1 至 8.5 的集中荷载作用下的无腹筋简支梁抗

剪试验数据共 399 组<sup>[3,4]</sup>,纵筋率变化范围为 0.5% ~ 5.01%。这里将这些试验数据按剪跨比为  $\lambda \leq 1.17$ ,  $1.17 < \lambda < 2.5$ ,  $\lambda \geq 2.5$  三类,得到这三类剪跨比下的纵筋率与抗剪承载力的关系如图 2 所示。

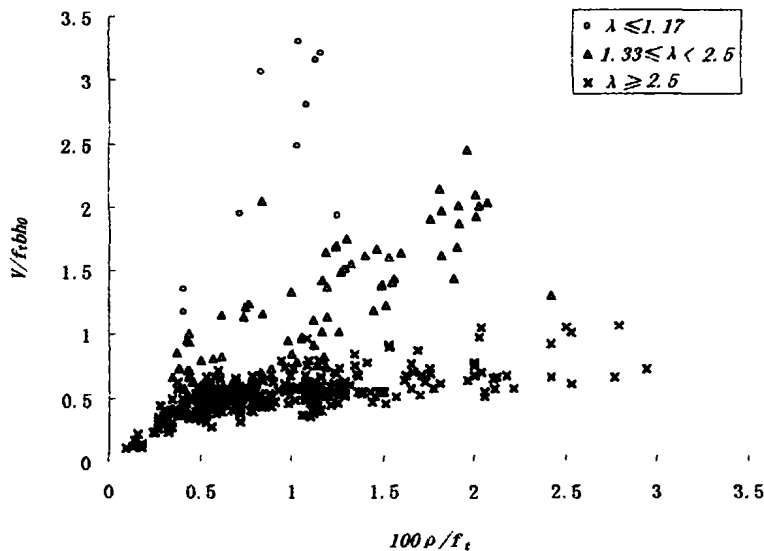


图 2 不同剪跨比下纵筋率对抗剪承载力的影响

由图 2 可以看到,剪跨比对纵筋率与抗剪承载力的关系影响很大,不同剪跨比下纵筋率对抗剪承载力的影响程度显著不同。 $100\rho/f_t$  增长一倍时,若剪跨比很小(1 左右), $V/f_tbh_0$  约增长 2 ~ 3 倍;剪跨比在 1 ~ 2.5 时, $V/f_tbh_0$  约增长一倍;剪跨比大于 2.5 时,纵筋率对抗剪承载力的影响很小。也就是说,对应同样的纵筋率增长,小剪跨比时抗剪承载力的增长比大剪跨比时要显著得多。

值得注意的是,剪跨比较大的情况下(剪跨比大于 2.5),试验数据展现的  $100\rho/f_t$  与  $V/f_tbh_0$  关系的规律表现出比较明显的非线性关系。 $100\rho/f_t$  较小(小于 0.6 左右)时, $V/f_tbh_0$  增长显著, $100\rho/f_t$  越大, $V/f_tbh_0$  增长越趋于平缓。而其他两组剪跨比下的试验数据中包含小纵筋率试件的数据很少,因此尚无法知道在剪跨比较小的情况下,是否也有同样的变化规律。

### 1.2 纵筋率对集中荷载作用下无腹筋筒支梁破坏形态的影响

Kani<sup>[4]</sup>和施岚青等<sup>[10]</sup>都曾指出,纵筋率可能影响梁的破坏形态。Kani 指出,当纵筋率很小时,梁将发生弯曲破坏,当纵筋率提高到某一程度时,梁的破坏形态将由弯曲破坏转变为剪切破坏。若纵筋率进一步提高,还会使得梁的破坏形态由剪切破坏再转变为弯曲破坏。施岚青等<sup>[10]</sup>在以线性关系回归纵筋率与抗剪承载力的关系时,也证实了以上规律。

从上文的讨论中可以看到,纵筋率与抗剪承载力的关系具有非线性特点,纵筋率很大时,抗剪承载力随纵筋率提高而增长的幅度很小。

## 2 试验数据与我国规范抗剪公式及美国规范 ACI318 - 99 抗剪详细公式的对比

### 2.1 我国规范抗剪承载力公式

我国新规范 GB50010 - 2002 中给出的集中荷载作用下无腹筋梁抗剪承载力计算公式为:

$$V_c = \frac{1.75}{\lambda + 1} \beta_h f_t b h_0 \quad (1)$$

式中: $V_c$ ——无腹筋梁的抗剪承载力;

$\lambda$ ——剪跨比;

$\beta_h = (800/h_0)^{1/4}$ ——截面高度影响系数;

$f_t$ ——混凝土抗拉强度;

$b$ ——梁矩形截面宽度;

$h_0$ ——梁截面有效高度。

我国规范公式(1)形式上未包含纵筋率项,但并非表示我国规范忽略了纵筋率对无腹筋简支梁抗剪承载力的影响。事实上,在20世纪80年代,建立我国GBJ10-89规范时,规范抗剪专题组为使公式便于实际设计应用,采用剪切强度控制区及其下包线理论<sup>[10]</sup>将纵筋率项略去了。新规范GB50010-2002仍沿用这种偏下的方法,所以,公式中仍未包含纵筋率项。

## 2.2 试验数据与规范公式的对比

作者收集到的试验数据中,剪跨比为3左右的数据较多,且纵筋率变化范围较宽,较能说明问题,因此,将剪跨比为3左右的试验数据与我国规范GB50010-2002无腹筋梁抗剪承载力公式进行对比。

基于规范式(1)对截面有效高度 $h_0 > 800$  mm时才考虑截面尺寸效应带来的抗剪承载力下降的这一做法,我们首先从剪跨比为3左右的130组试验数据中筛选出了截面有效高度低于800 mm的113组试验数据,以此与规范公式进行对比。

图3(a)给出了这113个试验实测抗剪承载力与按式(1)得到计算抗剪承载力的对比情况,其中,按式(1)计算时,剪跨比 $\lambda$ 取为3.0。从图3(a)中可以明显的看到,当纵筋率较小时,较多实测值低于式(1)的计算值,113组试验实测数据中共有21个实测值低于式(1)的计算值;纵筋率小于1.0%的19组试验实测数据中共有12个实测值低于式(1)的计算值,占63%。从图3(b)可以看到,以 $\rho/f_t$ 作为变量时, $\rho/f_t$ 较小时实测值低于式(1)的计算值这一趋势十分明显。在 $100\rho/f_t$ 小于0.5的21组试验实测数据中共有13个实测值低于式(1)的计算值,占62%;在 $100\rho/f_t$ 小于0.4的15组试验实测数据中共有11个实测值低于式(1)的计算值,占73%。图3中的两个最低试验数据点的实测抗剪承载力仅为式(1)的计算值的一半,这两个试验数据来自Collins等(1999)所做的BH25和BH50两个试件的试验结果,两个试件中的混凝土强度 $f_c'$ 均达到了98.8 MPa,约相当于 $f_{cu}$ 为120 MPa,若考虑这种超高强混凝土可能带来的受剪性能上的差异以及对我国规范的适用性,将这两个点排除不讨论,则在其他普通混凝土强度下,实测抗剪承载力最低值也仅为式(1)的计算值的66%。

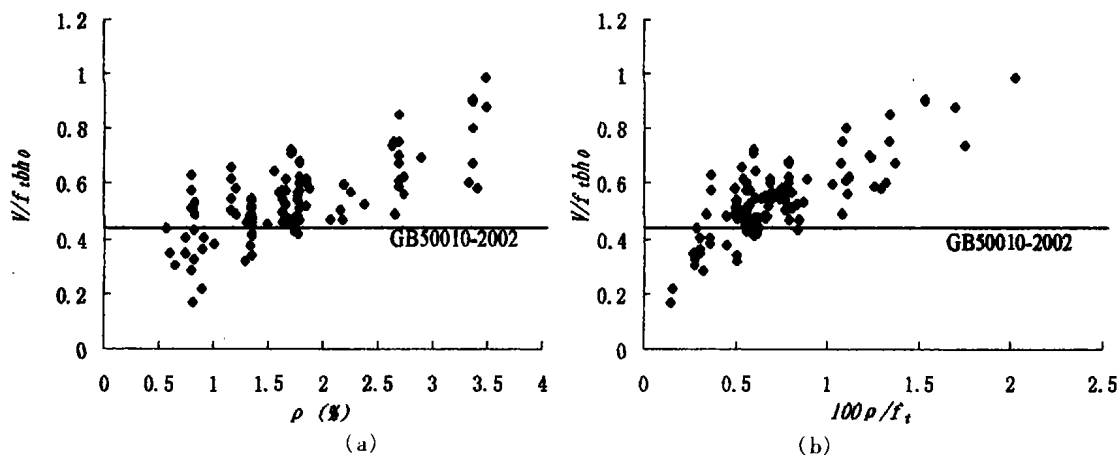


图3 集中荷载作用下无腹筋简支梁抗剪承载力实测值与式(1)计算值的对比

从图3(a)可见,纵筋率与抗剪承载力的关系在剪跨比较大的情况下呈现出明显的非线性关系。纵筋率小于1%时,随纵筋率增大,承载力增大的趋势最为显著,大部分的试验散点值比规范中的公式(1)的计算值小;纵筋率为1%~2%时,这一增大趋势趋缓,仍有不少的试验散点值比规

范中的公式(1)的计算值小;纵筋率大于2%时,这一增大趋势逐渐趋于平缓,所有的试验散点值均比规范中的公式(1)的计算值大。

上述讨论表明,我国规范中的无腹筋梁的抗剪强度公式在纵筋率小于2%时,其计算结果可能偏不安全。导致这一结果的原因很多,其中规范公式依据的抗剪试验基础数据,主要由纵筋率大于2%的梁的抗剪试验而获得可能是主要原因。实际上,在图3(a)中,若将纵筋率大于2%的试验散点值得到的下包线,延伸到纵筋率小于2%的范围,那么这一范围中的许多散点落在这条下包线之下就不足为奇。

### 2.3 与美国规范 ACI318-99 的对比

美国 ACI 规范抗剪详细计算公式考虑了纵筋率对抗剪承载力的影响,具体公式为:

$$V_c = \left( 1.9 \sqrt{f'_c} + 2500 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 3.5 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (\text{psi}) \quad (2)$$

或 
$$V_c = \left( 0.16 \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.29 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

式中:  $f'_c$ ——混凝土圆柱体试件轴心抗压强度;

$\rho_w$ ——纵筋率;

$M_u$ 、 $V_u$ ——计算截面的弯矩和剪力;对剪跨比大于2的情况,计算截面取距弯矩最大截面  $d$  处的截面;

$d$ ——截面有效高度;

$b_w$ ——截面宽度。

这里我们也将剪跨比为3左右的130组试验实测数据与ACI规范计算公式(3)进行了对比。图4给出了对比的结果。从该图中可以明显的看到,尽管ACI规范式考虑了纵筋率对抗剪承载力的影响,但考虑得不合适或者说不充分。首先,可以看到,纵筋率与混凝土强度比值较小时很多实测值都小于式(3)计算值。比如,当  $\frac{100\rho}{\sqrt{f'_c}}$  小于0.2时,大多数实测抗剪承载力都低于式(3)计算值,

其中最小实测值仅为式(3)计算值的35%左右,也就是说,在这一范围ACI规范公式的结果是不安全的。其二,图中可以明显的看出,与试验数据展现的规律相比,ACI规范式斜率偏小,即,ACI规范公式并没有较真实地反映出纵筋率对抗剪承载力的影响的规律。

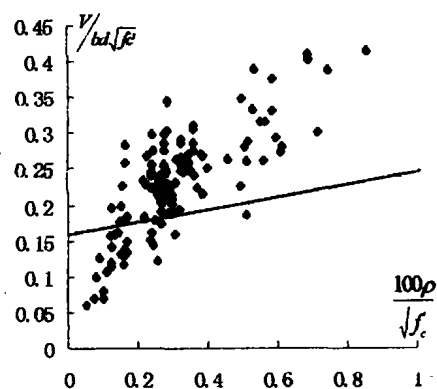


图4 简支梁抗剪承载力实测值与式(3)计算值的对比

### 3 结论

本文通过对受集中荷载作用的钢筋混凝土无腹筋简支梁的试验数据的分析,探讨了纵筋率对集中荷载作用下无腹筋简支梁抗剪承载能力的影响规律。并基于剪跨比为3左右的抗剪试验数据评价了纵筋率变化下我国规范 GB50010-2002 和美国规范 ACI318-99 抗剪承载力计算公式。主要结论有:

1) 纵筋率是抗剪承载力的主要影响因素之一。纵筋率与混凝土强度的比值  $\rho/f_c$  与抗剪承载力水平  $V/fbh_0$  呈现出明显相关性。剪跨比为3时,当  $100\rho/f_c$  由0.15左右增长到1.5(为原来的10倍)时,无量纲的抗剪承载能力由0.2左右增长到0.8左右(为原来的4倍)。

2) 我国规范主要依据的是纵筋偏大的试验数据确定剪切强度计算下限值的,但是其计算值可能是偏不安全的。研究结果表明,在纵筋率小于2%时,尤其是当纵筋率小于1%时,这一现象尤其显著。不仅如此,纵筋率小时,试件的破坏形态也可能发生变化。

3) 尽管 ACI 规范考虑了纵筋率对抗剪承载力的影响,但它低估了这一影响的大小。本文对比了剪跨比为 3 左右的情况下试验实测值与美国规范 ACI318-99 抗剪详细公式计算值,对比结果表明,当小于 0.2 时,大多数实测抗剪承载力都低于 ACI318-99 抗剪详细公式计算值,其中最小实测值仅为公式计算值的 35% 左右,说明此时 ACI 规范式是不安全的。

4) 剪跨比对由纵筋率增长而带来的抗剪承载力增长的幅度有显著的影响。剪跨比很小(1 左右)时,纵筋率对抗剪承载力的影响很大,随  $100\rho/f_t$  增大,  $V/f_tbh_0$  的增长非常显著:  $100\rho/f_t$  增长一倍时,  $V/f_tbh_0$  约增长 2~3 倍;剪跨比较大(大于 2.5)时,纵筋率对抗剪承载力的影响相对较小。

## 参考文献:

- [1] ACI-ASCE Committee 326. Shear and Diagonal Tension[J]. ACI Structural Journal, 1962, 59(2): 277-333.
- [2] Moody K G, Viest I M, Elstner R C, Hognestad E. Shear Strength of Reinforced Concrete Beams. Part 1[J]. ACI Structural Journal, 1954, 51(12): 317-332.
- [3] Krefeld William J, Thurston Charles. Contribution of Longitudinal Steel to Shear Resistance of Reinforced Concrete Beams [J]. ACI Structural Journal, 1966, 63(3): 325-343.
- [4] Kani G N J. Basic Facts Concerning Shear Failure[J]. ACI Structural Journal, 1966, 63(6): 675-690.
- [5] Batchelor Barrington de V, Kwun Bankit. Shear in RC Beams Without Web Reinforcement[J]. ASCE. Journal of Structural Engineering, 1981, 107(5): 907-921.
- [6] Tompos Eric J, Frosch Robert J. Influence of Beam Size, Longitudinal Reinforcement, and Stirrup Effectiveness on Concrete Shear Strength[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(5): 559-567.
- [7] Rajagopalan K S, Ferguson PHIL M. Exploratory shear tests emphasizing percentage of longitudinal steel[J]. ACI Structural Journal, 1968, 65(8): 634-638.
- [8] 白生翔. 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: 中国建筑科学研究院, 1985.
- [9] Zararis Prodromos D, Papadakis George Ch. Diagonal Shear Failure and Size Effect in RC Beams without Web Reinforcement[J]. ASCE. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7).
- [10] 施岚青, 徐有邻. 钢筋混凝土受弯构件的剪切强度控制区及其下包线[J]. 建筑结构学报, 1983, 4(1): 23-34.
- [11] 白生翔. 钢筋混凝土结构设计与构造——85 年设计规范背景资料汇编[M]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1985.
- [12] MacGregor J G, Gergely P. Suggested Revisions to ACI Building Code Clauses Dealing with Shear in Beams[J]. ACI Structural Journal, 1977, 74(10): 493-500.