

钢筋混凝土无腹筋对边简支构件 剪压区混凝土的强度*

井卫星 丁自强

(郑州工学院)

摘 要: 本文以一组无腹筋对边简支构件为依据, 参考其抗剪承载力的塑性解, 分析了构件宽厚比的变化对其剪压区混凝土应力状态的影响, 建立了此类构件剪压区混凝土的复合强度与单向轴心抗压强度的关系式, 论证了混凝土标准试块的抗压强度与构件中类似应力状态区域的混凝土抗压强度之间的关系, 进而提出了无腹筋对边简支构件从梁过渡到板的连续的抗剪承载力计算公式。

关键词: 钢筋混凝土, 构件, 剪压区, 强度

影响无腹筋简支梁抗剪承载力的主要因素之一是其剪压区混凝土的强度。当随着梁宽的增加而逐渐过渡到对边简支板时, 其剪压区混凝土的应力状态也有了新的变化。目前, 国内外主要的混凝土结构设计规范中, 此类构件抗剪承载力的计算公式, 一则未考虑构件宽厚比变化的影响, 二则用混凝土标准试块的轴心抗压强度去体现构件剪压区混凝土的变化着的复合应力状态下的抗压强度。

本文拟通过对一组无腹筋对边简支构件抗剪性能试验结果的分析, 研究此类构件宽厚比的变化对其剪压区混凝土应力状态的影响, 论证标准试块混凝土的抗压强度与构件中类似应力状态区域的混凝土抗压强度的关系, 并将此结果引入抗剪承载力的计算公式, 进而建立一个无腹筋对边简支构件从梁过渡到板的连续的抗剪承载力的计算公式, 对目前研究尚少的无腹筋对边简支厚板抗剪承载力的计算提供参考。

1 无腹筋对边简支构件剪压区混凝土的应力分析

1.1 无腹筋对边简支构件的剪压型破坏

为研究需要, 作者做了十一块条形荷载作用下无腹筋对边简支构件抗剪承载力的试验。在这组试件中, 纵向配筋率 ρ_l 、横向配筋率 ρ_b 和剪跨比 λ 基本不变, 跨厚比 $l/h_0 < 6$ 亦变化不大, 主要变量是宽厚比 b/h_0 , 其取值范围为0.683~8.35 (表1), 即 b/h_0 的变化使构件从简支梁过渡到对边简支厚板。试件的试验简图如图1所示。

* 收稿日期: 1990.04

表1 抗剪承载力试验结果

试件号	$b \times h_0$ (mm)	f_{cu} (MPa)	ρ_l (%)	ρ_b (%)	a/h_0	l/h_0	b/h_0	V_u^0 (KN)
SS-1-a	250×182	17.7	2.13	0.31	1.77	5.49	1.37	109.40
SS-2-a	500×185	16.3	2.09	0.31	1.71	5.41	2.70	238.13
SS-3-a	745×187	11.4	2.08	0.30	1.82	5.35	3.98	225.80
SS-4-a ₁	998×183	13.3	2.12	0.31	1.78	5.46	5.45	383.72
SS-5-a	1246×179	17.0	2.20	0.32	1.85	5.59	6.96	593.99
SS-6-a	1494×179	14.8	2.18	0.32	1.85	5.59	8.35	666.25
SS-4-a ₂	997×178	12.8	2.19	0.32	1.79	5.61	5.60	388.76
SS-4-d	999×229	16.6	2.18	0.32	1.83	4.28	4.36	587.59
SS-4-c	995×276	14.1	2.21	0.32	2.19	3.62	3.61	380.99
I-1-1	153×224	32.2	1.76	0	1.38	5.83	0.683	103.68
I-1-2	152×222	21.2	1.79	0	1.67	5.88	0.685	77.77

试验表明: 当试件的 b/h_0 较小时, 其破坏形态与相应梁的剪压破坏形态相同。当 b/h_0 逐渐变大时, 破坏形态和梁虽有较明显的差异, 但还未出现本质变化。经分析, 其抗力模式为“单向拉杆拱壳”, 与相应梁的“单向拉杆拱”抗力模式基本类似^{〔2〕}。因此, 认为这一组试件都属于剪压型破坏。

1.2 无腹筋对边简支构件剪压区混凝土的应力分析

由设在试件剪压区混凝土上的应变片的测试结果表明: 在裂缝出现前, 此处的混凝土以弹性变形为主, 当剪压区混凝土出现不规则的网状裂缝后, 会出现掉渣现象, 整个试件即达到抗剪承载力的极限状态。鉴于剪压区混凝土压碎裂缝历程短, 故假定可按弹性体来分析剪压区混凝土上的应力状态。

随着试件 b/h_0 的增大, 试件由梁向板过渡, 则其剪压区混凝土上的应力状态就从二向受压一向受剪 (图 2(a)) 渐渐变为三向受压一向受剪 (图 2(b)), 而且垂直于板跨方向的压应力 σ_z 沿板宽的方向也是变化的。现有测试水平还无法测出试件剪压区混凝土内各处复合受力的真实情况, 再加上剪压区混凝土在加载过程中并非一直处于弹性阶段, 而试件的某些特征值对剪压区混凝土的受力又有不同程度的影响, 因此, 要从理论上去分析试件剪压区混凝土在复合受力下的实际强度是很困难的。而利用试验结果

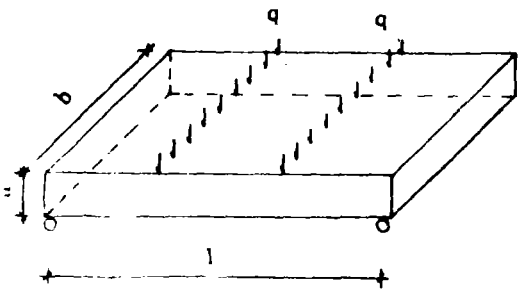
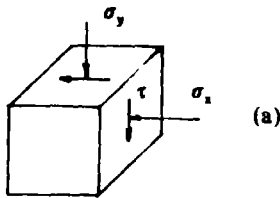
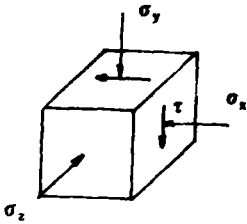


图 1



(a)



(b)

图 2

分析得到剪压区混凝土的复合受力强度和轴心抗压强度关系,进而以此将剪压区混凝土的剪力抗力体现在构件抗剪承载力的计算公式中,不失为一种有效的途径。

2 无腹筋对边简支构件宽厚比的变化对剪压区混凝土强度的影响

试验表明:影响无腹筋简支梁抗剪承载力的主要因素是剪跨比 λ 、混凝土的强度等级和纵筋配筋率 ρ 。对于无腹筋对边简支厚板,虽然目前试验资料很少,但从其破坏机理的分析中,可得出类似的结论。本文试件中配有纵向和横向的网状钢筋,因此,钢筋的销栓作用及其和剪压区混凝土的交互作用都和相应的简支梁不同。这种销栓作用随裂缝出现的部位和形式发生随机变化,不易单独分离考虑,而其和剪压区混凝土的交互作用可通过研究剪压区混凝土的强度来反映。国内现有混凝土结构设计规范中对无腹筋简支梁的抗剪承载力的计算中,未有直接体现纵筋配筋率 ρ 的影响。本文试件中的纵向和横向配筋率基本相同,因此,在以下的分析中不单独考虑纵向和横向配筋率的影响。

本文试验表明:当试件的宽厚比 b/h_0 增大时,试件抗剪承载力的特征值 $V_u^0/f_c b h_0$ 也随之增大(图3)。由于试件属剪压型破坏,因此,有理由认为,这种增大是因为试件剪压区混凝土的抗压强度随着其应力状态的变化而有所提高的原因,因为,三向受压一向受剪应力状态下混凝土的抗压强度高于二向受压一向受剪下的混凝土抗压强度。参考[1]中所论构件抗剪承载力塑性极限分析的结果,可将所论构件的极限抗剪承载力写为:

$$V_u = \frac{0.44}{\lambda + 0.33} b h_0 \eta f' \quad (1)$$

式中: η —混凝土塑性抗压强度的折减系数,其确定方法见[1];

f' —剪压区混凝土在复合应力下的抗压强度。

剪压区混凝土在复合应力作用下的抗压强度随着试件宽厚比 b/h_0 的变化而变化,由理论方法不易求出,这里将借助试验结果找出其与轴心抗压强度 f_c 的关系,按上述分析将 f' 和 f_c 的关系表达为:

$$f' = K_c f_c \quad (2)$$

式中, K_c 为剪压区混凝土复合受力强度增大系数,其主要与试件的宽厚比 b/h_0 有关。将(2)式代入(1)式得:

$$K_c = V_u / \left(\frac{0.44}{\lambda + 0.33} b h_0 \eta f_c \right) \quad (3)$$

现在再以表1中实测试件的抗剪承载力 V_u^0 代入(3)式中的 V_u , 计算出一组 K_c 的数据,然后以 K_c 为纵座标,以 b/h_0 为横座标作散点图(图4),由此可得回归公式:

$$K_c = 1.08 + 0.17b/h_0 - 0.0112(b/h_0)^2 \quad 0.7 \leq b/h_0 \leq 5.5 \quad (4)$$

经过对式(4)进行统计分析,其统计参数分别为:均值为0.991,均方差为0.133,离散系数为0.135。

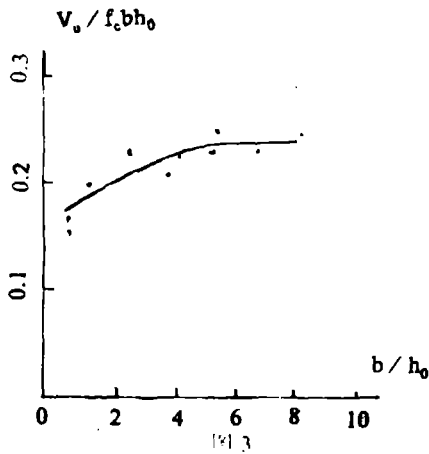


图3

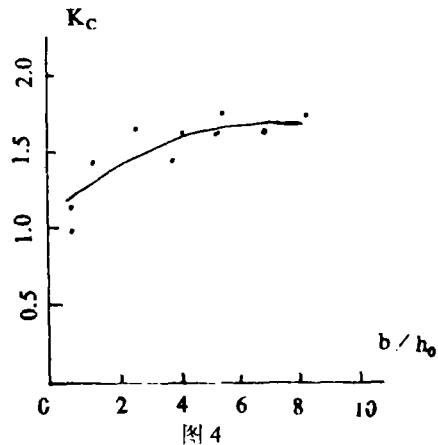


图4

建立此公式所用的资料中, $b/h_0 = 0.683 \sim 8.35$, 考虑到在[2]中将 $b/h_0 > 5.5$ 的所论构件定义为板, 在图4中又可看到当 $b/h_0 > 5.5$ 时, K_c 值随 b/h_0 的变化速率明显减缓, 为使 K_c 的表达式与[2]中板的定义一致, 将 K_c 的定义域缩为 $0.7 < b/h_0 < 5.5$ 。

将(4)式代入(2)式可以得出, 当 $b/h_0 = 0.7$ 时, $f' = 1.194f_c$ 。此时构件属于梁, 其剪压区混凝土处于二向受压一向受剪的应力状态, 其复合受力下的抗压强度 f' 为单向轴心抗压强度的 1.194 倍。这与 Kupfer 得出的混凝土试块在双向受压条件下的抗压强度接近^[5], 表明混凝土标准试块的抗压强度和构件中在类似应力状态下混凝土的抗压强度基本相同。这说明现在所论构件剪压破坏机理的分析与试验结果基本吻合, 也说明用混凝土试块的强度指标去反映构件中处于类似应力状态区域的混凝土对构件抗力的作用是可行的。

当 $b/h_0 = 5$ 时, $f' = 1.67f_c$, 此时构件为板, 其剪压区的混凝土处于三向受压一向受剪应力状态, 即处于三向复合受力下的混凝土的抗压强度为单向轴心抗压强度的 1.67 倍, 此结果与美国 ACI-ASME 1975 年编制混凝土原子反应堆设计规范采用的三轴受压强度变化曲线^[4]也是协调一致的。

上述结果也即是说条形荷载作用下无腹筋对边简支板剪压区混凝土的抗压强度明显高于相应简支梁剪压区混凝土的抗压强度。按照前述影响抗剪承载力的主要因素的分析则可断定, 前者比后者构件的抗剪承载力有明显提高。这说明对边简支板有明显的双向作用, 也说明在混凝土结构设计规范中将此类板按相应的梁设计抗剪承载力是偏于保守的。

3 条形荷载作用下无腹筋对边简支构件抗剪承载力计算的统一公式

目前, 国内规范对包括条形荷载作用下对边简支板在内的柱面弯曲板的抗剪承载力的计算中, 对和相应的梁相比抗剪承载力的提高都有所反应。但是, 由于试验资料的不足, 还未建立专门用于此类板抗剪承载力计算的公式。如在美国设计规范 ACI318-77 中, 柱面弯曲板抗剪承载力的设计采用相应梁的计算公式, 而适当放宽抗剪钢筋的构造要求。苏联设计规范 СНиП II 21-75 中, 用梁的抗剪承载力的公式去设计相应的板的抗剪承载力, 而将后者的抗剪承载力提高 25%。这里运用本文的试验研究结果, 拟将集中荷载作用下的无腹筋简支梁和条形荷载作用下的无腹筋对边简支板抗剪承载力的设计公式统一表

达出来。方法是,在现有所论梁的抗剪承载力的设计公式中乘上一个与构件宽厚比有关的系数表达式,用以反应构件宽厚比的变化对其抗剪承载力的影响。当然,这种影响主要来源于构件随宽厚比的变化及其剪压区混凝土的应力状态的变化。考虑到所论梁和板的衔接,将此统一表达为:

$$V \leq K_b V_u^b \quad (5)$$

$$K_b = \begin{cases} 1, & 0.3 \leq b/h_0 \leq 1 \\ 0.945 + 0.055(b/h_0), & 1 < b/h_0 \leq 5.5 \\ 1.25, & 5.5 < b/h_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, V_u^b 表示无腹筋简支梁的抗剪承载力,这里偏于安全地取 $b/h_0 < 1$ 时按无腹筋简支梁计算。关于 V_u^b 的计算方法建议用[3]或有关规范进行。考虑到利用试验数据的下包线建立抗剪承载力计算公式的习惯作法,为确保设计公式的安全度及计算简便, K_b 是在公式(4)的基础上经简化而得⁽²⁾。

建议公式(5)在 $0.3 < b/h_0 < 1$ 时可用于集中荷载作用下无腹筋简支梁抗剪承载力的设计,在 $b/h_0 > 5.5$ 时,可用于条形荷载作用下无腹筋对边简支厚板抗剪承载力的计算,在 $1 < b/h_0 < 5.5$ 时,可用于介于上述两类构件之间构件抗剪承载力的计算。因此,建议公式不仅克服了国外规范计算不连续的缺陷,也填补了国内规范无此类厚板抗剪承载力计算公式的不足。此外,从公式可看出,用建议公式计算的所论板,其抗剪承载力比相应的梁提高了 25%,若参考用于设计,则具有一定的经济意义。

4 关于建议公式推广的讨论

在我国新修订的《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)中,集中荷载作用下的有腹筋简支梁和约束梁抗剪承载力的设计公式可以统一表达为:

$$V \leq V_c + V_s \quad (7)$$

式中, V_s 为腹筋的抗剪承载力; V_c 为构件中混凝土的抗剪承载力,它等于相应的无腹筋梁的抗剪承载力。

在实际工程中,特别是在水利和港口工程中,跨厚比 $l/h_0 \leq 8$ 的厚板常被采用。实践证明,这类板需要进行斜截面承载力的计算,由于板较宽,一般只用弯筋作为腹筋去抵抗剪力。对于这类板,按照本文建议公式建立的思路,只将 V_c 部分作以修正即可用于有腹筋厚板抗剪承载力的计算。同理,对在不同形式的荷载作用下的有腹筋板和无腹筋板,都可以在前人对相应梁抗剪承载力计算研究的基础上,仅对公式中的 V_c 进行修正即可,而在 V_c 的修正中,只需要研究相应板中剪压区混凝土的复合受力抗压强度和轴心抗压强度的关系就行了。利用这种方法,可以大大减小试验研究的工作量。

5 结 语

本文的试验研究表明:无腹筋对边简支构件剪压区混凝土的抗压强度随构件宽厚比的

增大而增大,在一定范围内两者之间的关系可由文中的公式(2)和(4)表示。从而进一步得出另一结论,即:无腹筋对边简支厚板抗剪承载力相对于梁的提高主要是由于前者剪压区混凝土抗压强度的提高所致。

对不同荷载和不同支承的柱面弯曲板,本文建议按如下的统一模式建立设计公式:

$$V \leq K_b V_u^b$$

这样,可利用前人关于相应梁抗剪承载力的研究成果,再进一步研究相应板中剪压区混凝土的抗压强度与轴心抗压强度的关系,就可将相应梁的抗剪承载力的计算公式修正后用于相应板抗剪承载力的计算,以此收到事半功倍的效果。

参 考 文 献

- (1) 井卫星,丁自强. 无腹筋简支单向板抗剪强度的塑性极限分析. 水利学报, 1989.6
- (2) 丁自强,井卫星. 钢筋混凝土无腹筋单向矩形板抗剪强度的试验研究. 水利电力部科研成果鉴定材料, 1988.1
- (3) 丁自强,黄相才. 集中荷载钢筋混凝土弯筋梁抗剪强度的试验研究. 水力发电, 1980.5
- (4) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Nuclear Power Plant Components. ACI, Standard 359-74, 1975
- (5) H.Kupfer. et.al. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses. Journal of ACI, Aug. 1969

Concrete Strength of Shear Compression Region of Reinforced Concrete Components Supported on the Opposite Sides and Without Shear Steel Bars

Jing Weixing Ding Ziqiang
(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: According to the test results of components supported on the opposite sides and without shear steel bars. Consulting their plastic solution on shear resistance, this thesis analyzes effect of the width deep ratio of components on stress condition in concrete of the shear compression region, sets up the formula of compound compressive strength of concrete of shear compression region with axial compressive strength of concrete proves the relationship between compressive strength of concrete of standard test lump and that of concrete under similar stress condition in components, furthermore, poses the shear resistance formula of the components supported on the opposite sides and without shear steel bars, which can calculate the component changing from the beam into the slab continuously.

Keywords: reinforced concrete, component, shear compression region, strength