

配抗剪钢筋混凝土板的冲切

卢志红

(土木与环境工程研究所)

摘要 本文根据11块钢筋混凝土板的冲切试验,分析抗剪弯起钢筋对冲切强度的影响规律,抗剪钢筋不同的平面布置位置对冲切强度及延性的贡献,探讨冲切破坏机理,建立半理论半经验的冲切强度计算公式,所得结论可供修订混凝土结构设计规范及工程设计参考。

关键词 冲切强度,抗剪配筋特征值,冲切锥

0 引言

在钢筋混凝土结构中,经常会遇到板的冲切问题,如支撑在柱上的无梁楼盖、柱下基础等。这类结构的受力特征不同于梁板柱结构,其板柱间为点支撑,板所承受的荷载直接传给柱子,属于局部受力的形式。若设计不当,会发生脆性破坏—冲切破坏,这种破坏具有很大的危险性。然而,完全避免冲切破坏是不可能的,只有设法提高抗冲切承载力,改善其变形性能,在柱头周围适当配置弯起钢筋、箍筋等均可达到上述目的。本文通过11块板的冲切试验,研究弯起钢筋对冲切强度的影响和对冲切延性的贡献。针对工程中柱头范围内钢筋较多施工不便的问题,寻找合理的构造方式,并通过对砼、钢筋应变测量分析,探讨冲切破坏机理。

1 试验

1.1 试件

全部11个试件为中间带柱头的方板,分三个系列,两批制作。

系列A试件配有数量不同的抗剪弯起钢筋,抗剪配筋特征值的计算公式为

$$q_s = A_w f_y / S h_o f_{cu}$$

式中, S 为加荷面周长; h_o 为板的平均有效高度, $h_o = (h_{0上} + h_{0下})/2$; f_y 为弯起钢筋的屈服强度; f_{cu} 为砼的立方强度; A_w 为抗剪弯起钢筋的面积。对于如图1所示每个方向布置3根弯起钢

• 本文1991-11-07收到。

表 1 试件实际参数及破坏荷载

试件 编号	试件尺寸				抗弯钢筋			抗剪钢筋		混凝土		破坏 荷载 V_u KN	V_u $\frac{V_u}{Ch_0f_{cu}}$
	L (mm)	L ₀ (mm)	b (mm)	h (mm)	c (mm)	l (mm)	μ (%)	配筋情况	q_u	f_{cu} (N/mm ²)			
A1	1400	1200	150	123	250	12	1.53	4 ϕ 6	0.05	28.5	430	0.491	
A2-1	1400	1200	150	123	250	12	1.53	2 ϕ 6+4 ϕ 8	0.039	32.3	485	0.488	
A2-2	1400	1200	150	123	250	12	1.53	2 ϕ 6+4 ϕ 8	0.052	24.3	430	0.575	
A3-1	1400	1200	150	123	250	12	1.53	6 ϕ 10	0.075	27.3	485	0.577	
A3-2	1400	1200	150	123	250	12	1.53	6 ϕ 10	0.165	12.4	300	0.787	
A4	1400	1200	150	123	250	12	1.53	4 ϕ 12+2 ϕ 10	0.133	24.3	380	0.509	
A5	1400	1200	150	123	250	12	1.53	6 ϕ 12	0.202	18.9	395	0.680	
B-1	1400	1200	150	123	250	12	1.53	6 ϕ 10	0.075	27.3	450	0.536	
B-2	1400	1200	150	123	250	12	1.53	6 ϕ 10	0.108	18.9	353	0.611	
C-1	1400	1200	150	123	250	12	1.53	/	/	32.3	415	0.418	
C-2	1400	1200	150	123	250	12	1.5	/	/	28.5	317	0.362	

钢筋的屈服强度为: $\phi 8, f_y = 302.2 \text{ N/mm}^2$; $\phi 12, f_y = 345.7 \text{ N/mm}^2$; $\phi 10, f_y = 267.5 \text{ N/mm}^2$; $\phi 6$ 钢筋因在调查过程中被冷拉了, 其强度为 $f_y' = 848 \text{ N/mm}^2$.

筋的情况, A_m 为四个方向弯起钢筋面积的总和。
A3-2是在第一批试件试验后测出截锥体的角度后制作的, 沿与锥体界面相垂直方向预埋砼内部应变计, 量测砼内部的应变情况

系列 B 试件仅弯起钢筋的平面位置与 A 不同, 其它均相同。系列 C 不配弯起钢筋。试件的实测参数见表1。

1.2 试验装置

为便于观察受拉面的裂缝, 采用如图2所示的加载方式。板四周简支, 模拟无梁楼盖反弯点处的受力情况。

2. 试验结果与分析

2.1 二类破坏现象

所有试件的破坏现象归纳起来, 可分成二类, 第一类: 试件破坏时, 伴随着一声巨响, 锥体冲出板面; 柱头陷入板内, 电子秤上吨位下降至零。第二类: 试件破坏时只听到砼的碎裂声, 柱头陷入板内, 电子秤上吨位下降至极限荷载的50%左右即稳定。当千斤顶继续向上顶时, 逐渐出现锥体底面轮廓, 吨位下降, 可分离出锥体。上述第一类破坏比第二类更为突然, 按目前对冲切破坏的定义^{〔1〕}, 这二种破坏均属于冲切破坏。

A1、A2-1、A2-2、A3-1发生第一类破坏。

其它 A 类试件则为第二类破坏。由表1可见, 发生第二类破坏试件的 q_v 较高, 说明当 q_v 高于某值(约为0.133)时, 即使发生冲切破坏, 仍具有约50%的剩余承载力。同时, 试件能承受进一步的变形, 即其延性得到提高。这些特性减少了由冲切破坏的突然性而带来的极大的危险性, 这对于地震设防区的建筑犹为重要。A 类试件存在第二类破坏现象, 是由于较大的 q_v 存在, 使得板剪压区砼达到极限强度时, 抗剪筋未屈服, 且抗剪筋对柱区砼有较强的约束。因此达到极限荷载后, 板仍

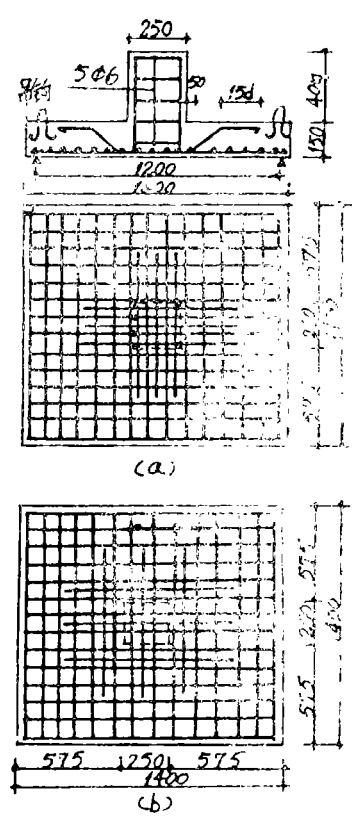


图1 配筋示意图
(a)系列 A (b)系列 B

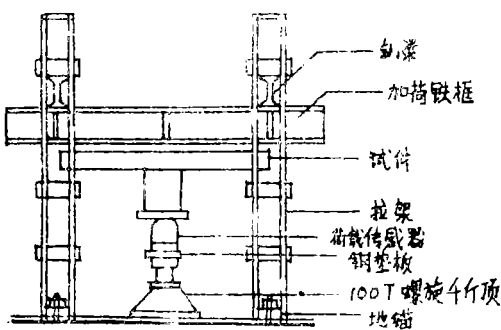


图2 试验装置图

有一定的残余承载力。

B 类试件均为第二类破坏。 $B-1$ 的 q_u 与 $A3-1$ 相同。二者的破坏荷载很接近,而破坏现象却不同,说明 B 类配筋构造对提高板的剩余承载力及延性效果更好。这是因为抗剪筋的分布范围大,提高了剪拉区面积,同时也提高了板的整体性。

系列 C 均发生第一类破坏。

2.2 冲切锥

试验后取出截锥体,发现 A 、 B 系列试件的锥体,在弯起钢筋段中部至柱边部分锥面往外凸,这是由于弯起钢筋约束了它所包围的砼,而 C 试件斜面则相当平整,如图3。锥体斜面与底边夹角为 $25^\circ-32^\circ$ 。

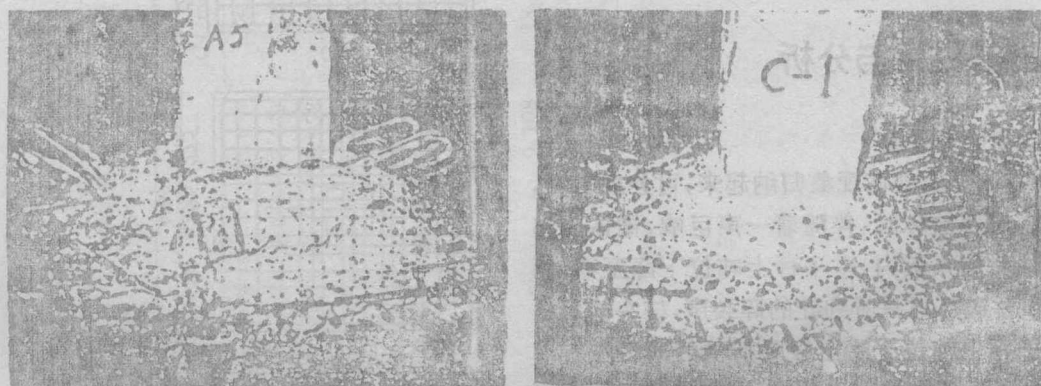


图3 试件破坏后的截锥体

2.3 裂缝

各试件裂缝形状基本相同,以 $A5$ 为例,见图4。最大裂缝宽约 $0.8-1.0\text{mm}$,裂缝形状说明受拉面裂缝是由弯矩控制的。

2.4 挠度

测得的试件受拉面中点的荷载—挠度曲线基本呈直线状,破坏前无挠度剧增现象,说明冲切破坏为脆性破坏。

2.5 抗剪配筋特征值 q_u 对冲切强度的影响。

图5以 V/f_cCh_0 为纵坐标, q_u 为横坐标,作出本次试验大部分试件的对应点,以及哈尔滨建筑工程学院刘广义所做试验部分试件点(其 B 类板 $\mu=1.6\%$, $h_0=9.3\text{cm}$; C

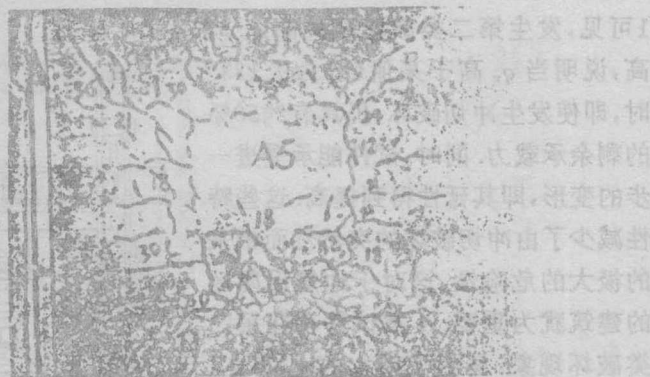


图4 试件受拉面裂缝图

类板 $\mu=1.2\%$, $h_0=12.3\text{cm}$), 由点的分布可判断 q_v 有上限值, 约为 0.16. 在上限值范围内, 抗冲切强度随 q_v 增大而增大, 当 q_v 大于上限值时, 冲切强度基本上不再增长. 对 $q_v < 0.16$ 的点按线性回归, 得

$$V'/f_{ac}Ch_0 = 0.393 + 2.475q_v$$

在图5上作出这一直线, 再利用 $q_v =$

0.165 的点作一与 q_v 轴平行的线, 交于 $q_v = 0.152$, $V'/f_{ac}Ch_0 = 0.787$.

由此得到 q_v 的上限值为 0.152. 从 $q_v = 0.023$ 及 0.04 附近点的分布来看, q_v 下限值约为 0.04. 由图5可看出, 本次试验 B 试件的冲切强度随 q_v 的增长规律与 A 类相同. 图中并作出了文献[2]的试验点, 基本都分布在回归直线附近.

2.6 配与不配抗剪钢筋板的强度比较

由表1可见, C 试件的 V'/f_{ac}

Ch_0 值比配有弯起钢筋试件的要小. 设 $Y = V'/f_{ac}Ch_0$, 将 C 试件中具有最大 Y 值的 C-1 与 A、B 试件中具有最小 Y 值的试件 A2-1 相比: $Y_{A2-1}/Y_{C-1} = 0.488/0.418 = 1.17$. 即 A2-1 的抗冲切强度比 C-1 高 17%, 说明抗剪弯起钢筋能有效地提高板的抗冲切强度.

3 冲切破坏机理

根据量测的钢筋和砼的应变表明, 板在受载后, 沿锥体界面砼的应变情况大致为: 在受压面靠近柱子的某一区域, 砼处于剪压应力状态, 与之相邻的其它区域砼受到剪拉应力作用. 当荷载达到 20% 的破坏荷载时, 在板的一半厚度与锥体界面相交处, 受拉区砼的拉应力达到砼抗拉极限强度, 从而产生第一条斜裂缝. 随荷载增加, 裂缝不断扩展, 当斜裂缝扩展到弯起钢筋处, 弯起钢筋拉应力突增, 弯起钢筋的存在抑制了斜裂缝的扩展. 荷载继续增大, 弯起钢筋及砼的应力也不断增大, 不断有砼达到抗拉极限强度而开裂, 剪拉区锥体界面不断形成. 一旦弯起钢筋屈服, 则受拉区所有未开裂的砼很快就在剪拉应力的作用下撕裂. 与此同时, 靠近柱子的剪压区砼也达到极限强度而形成完整的冲切锥, 柱头陷入板内而破坏.

4 冲切强度计算公式

4.1 力学模型

由上述的破坏过程及机理分析, 可取冲切锥作为极限状态下的力学模型, 并作如下假设:

(1) 极限状态下的冲切锥为一正四面锥, 锥面与底面夹角 $\alpha = 30^\circ$; (2) 不计砼剪拉区的拉应力, 忽略剪拉区剪应力; (3) 极限状态下砼剪压区的抗剪强度由二个部分组成: 其一为砼的纯剪强

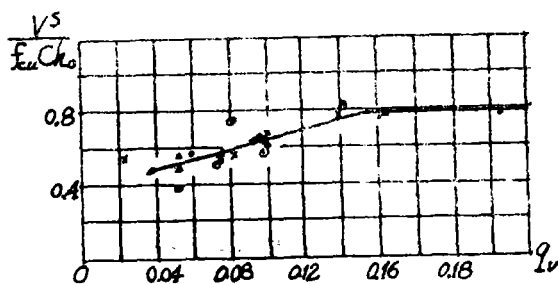


图5 q_v 对冲切强度的影响

▲—本次试验的 A 类试件; ○—本次试验的 B 类试件;
×—刘文中的 B 类试件; ●—刘文中的 C 类试件;
⊙—文献[2]中的 B 类试件

度,取 $\tau_0=0.2f_c'$;其二为剪摩强度, $\tau_s=n\sigma$,其中 n 为砼的摩擦系数,取 $n=1.4_{(3)}$;(4)达到极限状态时,剪压区砼产生应力重分布,砼压应力均匀分布,为 σ_c ;(5)忽略抗弯钢筋的销栓作用;(6)设与锥体相交的弯起钢筋全部屈服。

根据上述假设作出简化后的力学模型如图6。

4.2 建立公式

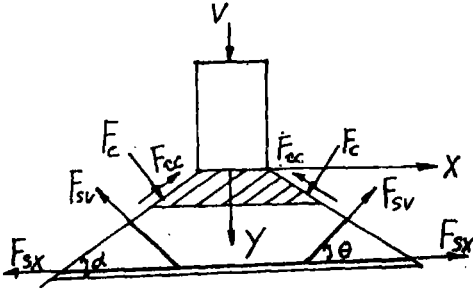


图6 简化后的力学模型

设锥体四个斜面上砼的剪压面积为 A_s ,由上述假设得到剪压区砼压应力的合力 F_c 为 $F_c=\sigma_c A_s$,设 $\sigma_c=m'f_c$,则

$$F_c = m'f_c A_s, \quad (1a)$$

式中, m' 为砼剪压区压应力与砼轴心抗压强度 f_c 的比值。由假设(3)得

$$\tau_c = 0.2f_c' + 1.4\sigma_c \quad (2)$$

f_c' 为砼圆柱抗压强度。由文献[3], $f_c'/f_{cm}=0.84$, $f_c=0.67f_{cm}$,代入式(2)得

$$\tau_c = (0.251 + 1.4m')f_c = \gamma f_c,$$

则剪压区砼剪应力的合力 F_{cx} 为

$$F_{cx} = \gamma f_c A_s, \quad (3)$$

$$\Sigma F_y = 0,$$

$$V + F_{cx} \cos \alpha - F_{cy} \sin \alpha - F_{sy} \sin \theta = 0, \quad (4)$$

其中, F_{sy} 为抗剪弯起钢筋的合力。

将式(1a)、(3)及 $F_{sy}=A_{sv}f_y$,代入式(4)得

$$V = (\gamma - m' \cot \alpha) f_c A_s \sin \alpha + A_{sv} f_y \sin \theta,$$

设 $A_s = KSh_0$,代入式(5)得

$$V = (\gamma - m' \cot \alpha) K f_c Sh_0 \sin \alpha + A_{sv} f_y \sin \theta, \quad (5a)$$

$$\text{令 } \beta = (\gamma - m' \cot \alpha) K.$$

对试验数据分析,得到 β 与剪跨比 m 成线性关系,设 $\beta = K_1(K_2 + m)$.经线性回归,求出 $K_1=0.0091$, $K_2=27.45$.将 β 及 $\sin \alpha = 1/2$ 代入式(5a),得到冲切强度计算公式

$$V = 0.00455(27.45 + m)Sh_0f_c + A_{sv}f_y \sin \theta, \quad (6)$$

式中第一项为砼对冲切抗力的贡献,第二项为抗剪钢筋的贡献。

4.3 上限公式

前已述及, q_v 的上限值为0.152,其所对应纵坐标为 $V/f_{cm}Ch_0=0.787$.以 $C=S/4$ 代入得上限公式

$$V = 0.294Sh_0f_c. \quad (7)$$

公式(6)、(7)适用于砼标号低于C45、剪跨比 $m=2-7$ 的构件。利用式(6)、(7)对配弯起钢筋的29个试件进行验算,得到计算值与试验值的比值 $\bar{X}=1.012$,均方差 $\sigma=0.122$.若同时对包括13个无剪力钢筋的板进行验算,则 $\bar{X}=0.976$, $\sigma=0.151$,见表2。

表 2 应用公式(6)、(7)的计算结果与试验值对比

试验 作者	序 号	试件 编号	f_{cu} N/mm ²	f_c N/mm ²	集中荷载 面积 mm ²	h_0 mm	$m = \frac{L_0 - C}{2h_0}$	q	V_c KN	V_w KN	V KN	V^* KN	V \bar{V}	计算 公式
本文 试验	1	A1	28.5	19.1	250×250	123	3.86	0.055	334.6	136.3	470.9	430.0	1.10	(6)
	2	A2-1	32.3	21.6	250×250	123	3.86	0.039	379.2	109.6	488.8	485.0	1.01	(6)
	3	A2-2	24.3	16.3	250×250	123	3.86	0.052	285.3	109.9	395.2	430.0	0.92	(6)
	4	A3-1	27.3	18.3	250×250	123	3.86	0.075	320.5	178.1	498.6	485.0	1.03	(6)
	5	A3-2	12.4	8.31	250×250	123	3.86	0.165			300.4	300.0	1.00	(7)
	6	B-1	27.3	16.3	250×250	123	3.86	0.075	320.5	178.1	498.6	455.0	1.10	(6)
	7	B-2	18.9	12.66	250×250	123	3.86	0.108	221.9	177.5	399.4	355.0	1.13	(6)
	8	C-1	32.3	21.64	250×250	123	3.86	0.0	379.2		379.2	415.0	0.91	(6)
	9	C-2	28.5	19.1	250×250	123	3.86	0.0	334.6		334.6	317.0	1.06	(6)
哈建工 刘广义 试验	10	A1-1	23.3	15.61	250×250	73	6.52	0.075	176.1	90.2	266.3	250.0	1.07	(6)
	11	B1-1	19.9	13.33	250×250	93	5.1	0.023	183.6	30.1	213.7	260.0	0.82	(6)
	12	B1-3	19.9	13.33	250×250	93	5.1	0.100	183.6	130.9	314.5	300.0	1.05	(6)
	13	B1-4	20.3	13.60	250×250	93	5.1	0.093	187.3	121.7	309.0	300.0	1.03	(6)
	14	B1-5	20.3	13.60	250×250	93	5.1	0.113	187.3	150.8	338.1	325.0	1.02	(6)
	15	B1-6	20.3	13.60	250×250	93	5.1	0.140	187.3	186.9	374.2	365.0	1.03	(6)
	16	C1-1	31.2	20.90	250×250	123	3.86	0.060	366.3	162.8	529.1	540.0	0.98	(6)
	17	C1-2	23.3	15.61	250×250	123	2.85	0.092	273.5	186.4	459.9	492.0	0.93	(6)
	18	C1-3	23.3	15.61	250×250	123	2.85	0.113	273.5	229.0	502.5	547.0	0.92	(6)
	19	C1-4	18.8	12.60	250×250	123	2.85	0.163			455.5	500.0	0.91	(7)
	20	C1-5	18.8	12.60	250×250	123	2.85	0.212			455.5	460.0	0.99	(7)
	21	C1-H	31.5	21.11	250×250	123	2.85	0.060	369.8	164.4	534.2	512.0	1.04	(6)
	22	C1-2-1	25.6	17.15	250×250	123	2.85	0.084	300.5	187.0	487.5	479.0	1.02	(6)
	23	C1-2-2	25.6	17.15	250×250	123	2.85	0.084	300.5	187.0	487.5	535.0	0.91	(6)
	24	C1-2-3	28.0	18.76	250×250	123	2.85	0.077	328.7	187.5	516.2	580.0	0.89	(6)

表 2 应用公式(6)、(7)的计算结果与试验值对比 (续表)

试验 作者	序 号	试件 编号	f_{ts} N/mm^2	f_c N/mm^2	集中荷载 面积 mm^2	h_0 mm	$m = \frac{L_0 - C}{2h_0}$	q_0	V_c KN	V_{cr} KN	V KN	V' KN	V V'	计算 公式
文 献 [2]	25	B3	16.1	10.79	254×254	112	6.80	0.096	191.3	124.4	315.7	292.8	1.08	(6)
	26	B5	17.6	11.79	254×254	112	6.80	0.083	209.1	117.5	326.6	385.9	0.85	(6)
	27	B6	20.5	13.74	254×254	112	6.80	0.141	243.6	232.6	476.2	478.0	1.00	(6)
	28	B10	56.3	37.72	254×254	112	6.80	0.054	543.7	195.5	730.2	545.0	1.34	(6)
	29	B13	58.2	38.99	254×254	112	6.80	0.230			1008.7	795.0	1.27	(7)
	30	B15	49.8	33.37	254×254	112	6.80	0.073	534.7	264.3	799.0	703.2	1.14	(6)
	31	B17	14.7	9.85	254×254	112	6.80	0.088	174.7	104.1	278.8	363.2	0.77	(6)
哈 建 工 李 田	32	F1	30.0	20.10	250×250	130	3.65		369.8		369.8	520.0	0.71	(6)
	33	F2	23.0	15.39	240×240	145	3.31		299.8		299.8	425.0	0.71	(6)
	34	F3	21.15	14.17	170×170	115	4.48		161.0		161.0	260.0	0.62	(6)
	35	F4	46.8	31.36	170×170	115	4.48		342.5		342.5	330.0	1.04	(6)
	36	F5	42.2	28.27	240×240	145	3.31		550.8		550.8	540.0	1.02	(6)
文 献 [4]	37	R2	31.8	21.31	254×254	114	6.89		385.6		385.6	318.0	1.21	(6)
	38	S1-60	28.0	18.76	254×254	114	6.89		339.5		339.5	397.0	0.86	(6)
	39	S5-60	26.6	17.82	203×203	114	7.11		259.4		259.4	349.0	0.74	(6)
	40	S1-70	29.4	19.70	203×203	114	7.11		286.7		286.7	400.0	0.72	(6)
	41	S5-70	27.6	18.49	305×305	114	6.67		399.3		399.3	386.0	1.03	(6)
	42	H1	31.3	20.97	254×254	114	6.89		379.5		379.5	379.0	1.00	(6)

注:1、当砼等级大于C45时,取C45计算;2、哈尔滨建筑工程学院李田的试验数据取自其研究生毕业论文(1986.6)。

5 主要结论

- 1)适当配置弯起钢筋能提高板的冲切强度;
- 2) q_v 的上限值为0.152, 在上限范围内, 构件的抗冲切强度随 q_v 增大而增大.
- 3)将部分弯起钢筋布置在柱外 $h_0/4$ 处, 其对抗冲切强度的影响与将弯起筋全部布置在柱头内的效果相同, 而前者对延性的提高效果较好.
- 4)当 q_v 大于约0.133时, 构件发生冲切破坏后的剩余承载力将提高到约为极限荷载的50%, 构件延性也得到显著提高.
- 5)本文建议的半经验半理论公式与试验结果吻合良好. 公式概念清晰, 形式简明.

参 考 文 献

- [1] 楼板及基础冲切强度专题报告: 钢筋混凝土板和基础冲切强度的试验研究, 建筑结构学报, 4. (1987).
- [2] *Elstner, R. C. and Hongsted, E.*, J. of ACI, 53, July (1956), 29-58.
- [3] 王传志、滕智明主编, 钢筋混凝土结构理论, 中国建筑工业出版社, (1985), 54-55, 37-38.
- [4] 童启明, 钢筋混凝土板的冲切度计算, 南京工学院学报, 1(1981).

Punching Shear of Concrete Slabs With Shear Reinforcement

Lu Zhihong

(*Institute of Civil and Environmental Engineering*)

Abstract Based on punching shear test taken on 11 reinforced concrete slabs, the author analyses the effect of shear reinforcement on punching shear strength; and discusses the effect of different planar layouts of shear reinforcement on punching shear strength and ductility; and inquires into the mechanism of punching shear damage; and works out a semiempirical formula for computing punching shear strength. The results may serve a reference for the revision of design specifications of concrete structure and its engineering design.

Key words punching shear strength, shear reinforcement, punching cone.