

①
P6, 18(2)

高强混凝土, 柱, 抗剪强度, 剪跨比
试验

第18卷 第2期
1996年6月

重庆建筑大学学报
Journal of Chongqing Jianzhu University

Vol. 18 No. 2
Jun. 1996

1-9

高强砼柱抗剪强度的试验研究

李立仁 李明[✓] 支运芳 牛绍仁 TU 528.31
(建筑工程学院)

摘 要 本文通过 16 根高强砼柱的试验, 研究了高强砼框架柱的抗剪性能, 讨论了剪跨比、轴压比等因素对破坏形态、开裂剪力及抗剪强度的影响。对现行规范的抗剪计算公式的适用性进行了探讨。研究成果填补了国内高强砼框架柱抗剪强度研究的空白, 可作为编制高强砼设计规范的参考。

关键词 高强砼, 抗剪强度, 剪跨比, 轴压比, 极限剪力

中图法分类号 TU502.6

高层建筑下部柱承受很大的轴压力, 若采用高强砼制作, 可减少截面尺寸, 减少砼用量, 增加使用空间, 有明显的社会效益和经济效益。故在高层建筑中的柱采用高强砼的工程日益增多。国内外历次大地震后进行的震害调查表明, 地震时柱的剪切破坏现象十分严重。高强砼具有延性差, 破坏呈脆性的特点, 因此, 高强砼框架柱在水平荷载作用下的抗剪性能问题, 为高强砼应用中急待解决的问题之一。

高强砼梁、柱抗剪强度的研究是《砼结构设计规范》第五批重点课题“高强砼性能研究”中的一个子项。目前梁的抗剪性能研究已有成果, 但柱的抗剪性能研究尚无成果报道。本文为高强砼框架柱抗剪强度及受力性能研究的阶段成果, 着重考虑了剪跨比和轴压比对高强砼框架柱破坏形态、抗剪强度及开裂剪力的影响。

1 试件设计及试验方法

这批共进行了 16 根高强砼框架柱试件的抗剪试验。试件详见图 1, 纵筋实测屈服强度 $f_y = 360\text{N/mm}^2$, 试验区段内配置 $\Phi 6.5@130$ 双肢箍, 箍筋实测强度 $f_{yv} = 352\text{N/mm}^2$ 。配箍率 $\rho_v = 0.0051$, 配箍特征值 $\lambda_v = \rho_v \frac{f_y}{f_c} = 0.0391 \sim 0.0421$ 。

试件在重庆市三建司预制厂制作, 主要材料为: 重庆水泥 525 # 矿渣水泥; 粗骨料采用歌乐山石灰岩碎石; 砂为长江特细砂 ($M_x \leq 0.7$, 含泥量 $\leq 3\%$)。砼搅拌时掺加了水泥用量 0.5% 的 NNO 高效减水剂。所用材料均为工地材料, 未经专门挑选。

试验在我院结构试验室进行。为模拟框架柱受力, 采用卧式反对称加载, 弯矩比 $|M^-|/|M^+| = 1$ 。加载方式见图 2, 试件参数和加载位置参数见表 1。

收稿日期: 1995 - 09 - 01

李立仁, 男, 1952 年生, 副教授, 重庆建筑大学建筑工程学院(630045)
国家教委博士点专项科研基金及重庆市科研基金资助项目

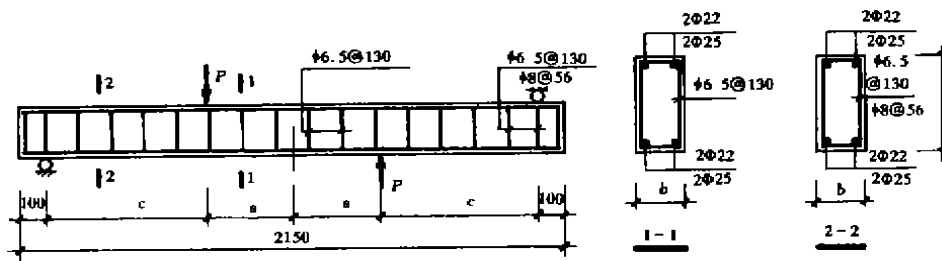


图 1 (括号内数字用于 C3.0-X)

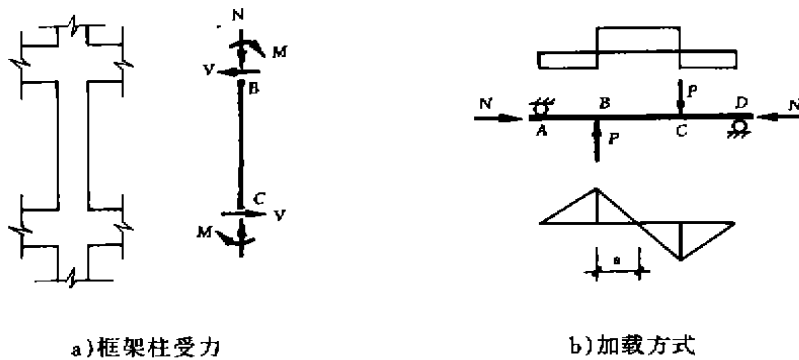


图 2

试验时, 首先施加 50kN 轴向力, 并在此荷载下进行物理对中, 待对中完成后, 将轴压力 N 分几级加至预定值, 该轴压力 N 在试验中保持不变, 然后分级施加横向荷载, 直至试件破坏。试验中量测了每级荷载下的纵筋应变、箍筋应变和砼应变, 记录了柱的侧向变形, 砼斜向裂缝出现时的荷载值及破坏荷载值。所有数据均用 7V08 数据采集系统记录。

2 试验结果及分析

2.1 框架柱的剪切破坏形态

试验结果表明, 高强砼框架柱产生斜压、剪压和剪拉-撕裂三种破坏形态。剪跨比 $\lambda = 1$ 的试件 ($\lambda = \frac{M}{Vh_0} = \frac{a}{h_0}$), 以及 $\lambda = 1.5$ 和 2, 但轴压力 $n > 0.5$ ($n = \frac{N}{fbh_0}$) 的试件, 当达到 0.76 ~ 0.96 破坏荷载时, 在柱截面中部出现沿加载点连线方向的斜裂缝。随荷载继续增大, 斜裂缝顺加载点连线方向发展, 形成主斜裂缝。同时, 在主斜裂缝两侧, 还会逐渐出现若干平行于主斜裂缝的小裂缝。这些平行裂缝在试件中形成若干“斜柱体”, 如图 3 示。最后, 主斜裂缝发展为临界斜裂缝, 砼斜柱体在压力下达到抗压强度而压碎, 试件达到极限抗剪强度而破坏。破坏过程突然, 呈脆性破坏特征。

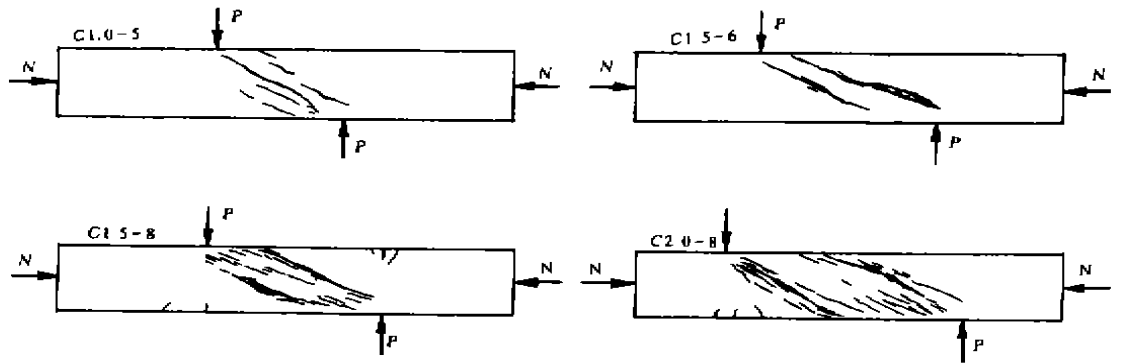


图 3

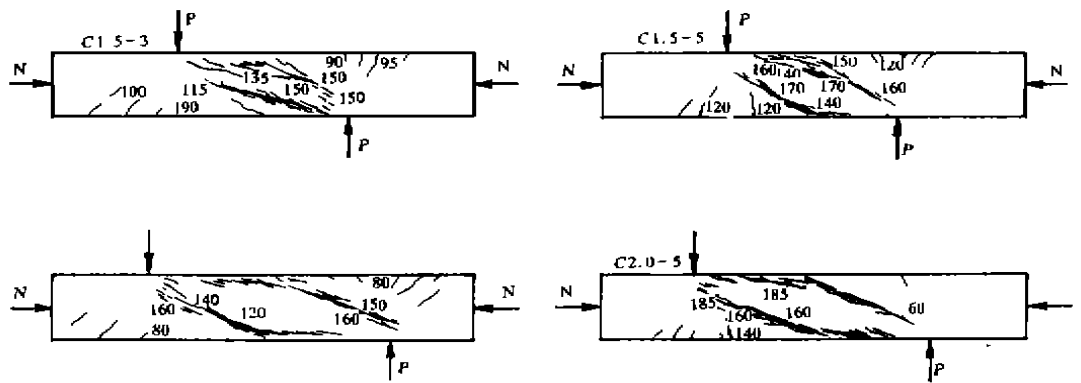


图 4

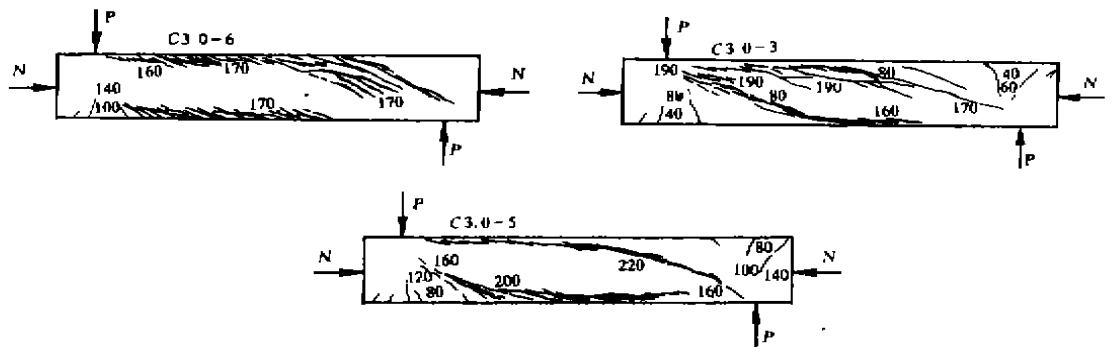


图 5

剪跨比 $\lambda = 1.5$ 和 2 且轴压比 n 较小的试件, 都首先在弯矩较大区出现弯曲裂缝, 尔后, 在弯曲裂缝向上发展的同时, 在反弯点两侧出现腹剪斜裂缝。接近破坏时, 反弯点两侧斜裂缝发展成为临界斜裂缝, 在两加载点间形成“枣核体”状的砼斜压体(图 4), 当达极限荷载时, 斜压体端部砼压碎, 试件产生剪压破坏。

剪跨比 $\lambda = 3$ 的试件, 除 C3.0 - 6 由于粘结失效产生粘结—撕裂破坏外(图 5a), 均产生剪拉—撕裂破坏。其破坏特征为: 首先在弯矩较大区段产生弯曲裂缝, 然后, 随荷载增大,

在反弯点两侧出现两条明显的斜裂缝。该斜裂缝向加载点方向延伸，斜向与纵筋相交，导致沿纵筋产生不同程度的粘结—撕裂小裂缝（见图 5b）。试件破坏时，与临界主斜裂缝相交的箍筋屈服，产生较大变形，裂缝很宽，不出现砼压碎区。故称为剪拉—撕裂破坏。

2.2 斜裂缝出现时的剪力 V_{cr}

由斜向布置的砼表面的应变片，结合实测箍筋应变值，得到了试件斜向开裂时的剪力值 V_{cr} （见表 1）。图 6 绘出了 V_{cr} 与轴压比 n 的关系，可以看出， V_{cr} 与 n 基本成线性关系增

表 1 试验参数及试验结果

试件编号	b (mm)	h_0 (mm)	a (mm)	c (mm)	剪跨比	f_{cu} (MPa)	f_c (MPa)	轴压比 n	λ_s	斜裂剪力 V_{cr} (kN)	破坏剪力 V_u (kN)	$\frac{V_{cr}}{V_u}$	破坏形态
C1.0-5	102	175	175	800	1.0	56	45.92	0.476	0.0391	145.3	151.8	0.96	斜压
C1.5-0		174				52	42.64	0.000	0.0421	43.9	95.0	0.55	剪压
C1.5-3		174				56	45.92	0.109	0.0391	65.0	109.6	0.60	剪压
C1.5-5	100	175	262.5	712.5	1.5	56	45.92	0.325		102.3	124.2	0.82	剪压
C1.5-6								0.563		95.0	116.9	0.81	斜压
C1.5-8						52	42.64	0.797	0.0421	102.3	135.2	0.76	斜压
C2.0-0								0.000		30.4	86.5	0.44	剪压
C2.0-3		174						0.314		77.0	102.6	0.75	剪压
C2.0-5	100		350	625	2.0			0.476		100.7	118.6	0.85	剪压
C2.0-6						56	45.92	0.586	0.0391	96.2	121.8	0.79	斜压
C2.0-8								0.780		125.2	134.6	0.93	斜压
C3.0-0								0.000		36.9	83.0	0.42	斜拉
C3.0-3								0.314		55.4	87.7	0.63	剪拉—撕裂
C3.0-5	100	173	525	450	3.0	52	42.64	0.516	0.0421	73.8	101.5	0.73	剪拉—撕裂
C3.0-6								0.586		64.6	78.5	0.82	粘结—撕裂
C3.0-8								0.762		86.7	96.9	0.89	剪压

注： $f_c = 0.82f_{cu}$ ； $\lambda_s = \rho_s f_{sv} / f_c$

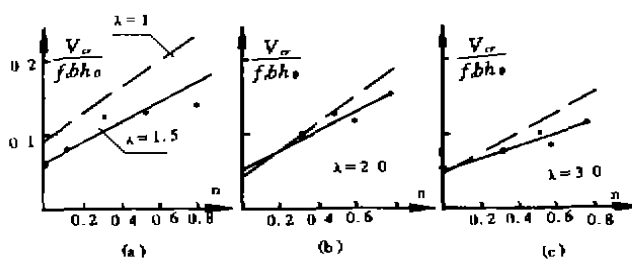


图 6

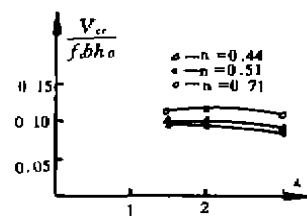


图 7

长，表明轴压力有效地推迟了斜裂缝的出现，增大了框架柱的抗裂能力。对比三种不同剪跨比时的开裂剪力 V_{cr} ，可以发现，当 $\lambda = 3$ 时， V_{cr} 随 n 增大的速率明显降低。图 6 中虚线表示文献 [1] 中给出的低强度砼框架柱的 $V_{cr} - n$ 关系曲线，显然，高强砼框架柱的 V_{cr} 随 n

增大的速率(图6中实线斜率)低于低强砼,这与高强砼抗拉强度增长速率低于抗压强度增长速率的特点是一致的。

剪跨比对 V_c 的影响不明显,从图7可知,随 λ 增大, V_c 仅略有降低。

2.3 纵筋应力与箍筋应力

这批试件纵筋配筋率较大,故试件破坏时纵筋应力均低于屈服强度。在砼开裂前,纵筋应变成线性变化,试件的理論反弯点位置与纵筋应变零点重合。但斜裂缝出现后,纵筋应变产生明显重分布,纵筋拉应变范围逐渐加大,在试件接近破坏时,部分试件纵筋受拉应变范围跨越反弯点,使纵筋大部分受拉。同时,纵筋应变梯度明显增大,加之纵筋砼保护层厚度偏小,导致砼与纵筋的粘结不足以抵抗纵筋相邻截面的应力差而产生沿纵筋的粘结—撕裂裂缝。这一现象在剪跨比 λ 大的试件中尤为突出。

箍筋应力在斜裂缝出现前一直很小,一旦裂缝出现,箍筋中应力急剧增大。在破坏区段内与裂缝相交的箍筋,试件破坏时应力都达屈服强度。

2.4 影响抗剪强度的因素

在影响抗剪强度的诸多因素中,这次主要考虑了轴压力和剪跨比的影响。试验结果表明,轴压力能增加高强砼框架柱的抗剪强度。图8绘出了不同剪跨比 λ 时,相对极限剪力

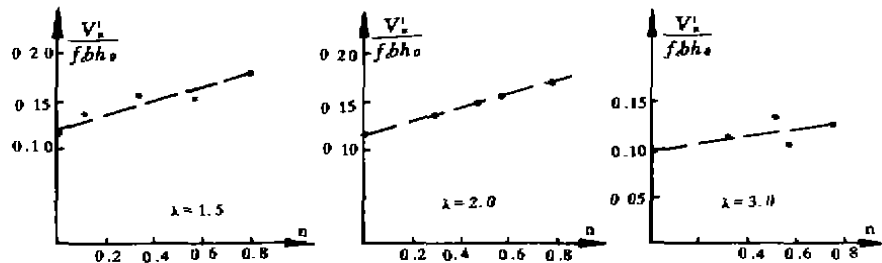


图8

$V_u / f_b h_0$ 与轴压比 n 的关系。由图可知,随 n 增大, V_u 成线性增长。但 $\lambda = 3$ 的试件, V_u 增长的速率明显较 $\lambda = 1$ 、2 的试件要低一些。这是因 λ 较大时,弯曲正应力及弯形较大,且 σ_y 的影响较小的缘故。

剪跨比 λ 对框架柱的抗剪强度有很大影响,这种影响主要是通过试件的剪切破坏形态来表现。当剪跨比 λ 较小时($\lambda \leq 2$),整个试验段都受到直接作用于试件的反对称横向力 P 产生的竖向应力 σ_y 的影响,致使砼斜柱体端部处于双向受压状态,试件将产生斜压和剪压破坏。另外, λ 较小时,剪压区高度较大,能承受较大的轴力和剪力,故 λ 较小时,试件的抗剪强度高。

λ 较大的试件($\lambda = 3$),横向力 P 产生的竖向应力 σ_y 的影响较小,斜裂缝比较平缓,剪压区的面积较小,较大的横向力会在柱中产生较大的侧向变形,引起较大的附加弯矩,鉴于上述各种因素的综合影响,致使 λ 较大试件的抗剪强度降低。图9为 $V_u / f_b h_0$ 与 λ 之间的关系,反映了抗剪强度随 λ 增大而减小的现象。在轴压比很大时,这种趋势更为明显。

3 抗剪强度计算公式

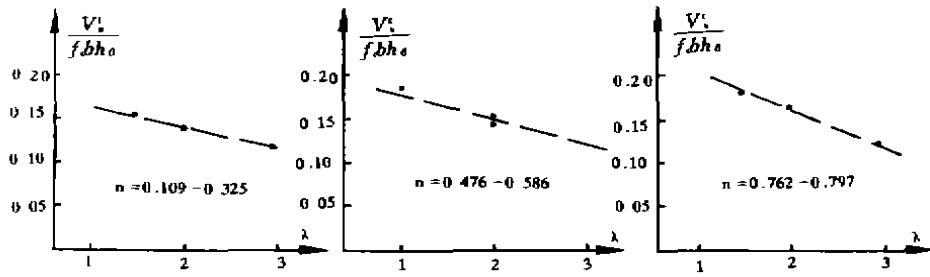


图 9

目前国内外规范均没有高强砼框架柱抗剪强度计算公式。普通低强度砼框架柱抗剪强度计算公式主要有两种表达形式：一是将轴力提供的抗剪能力直接并入砼的抗剪能力项中，如 ACI 公式^[2]。

$$V_u = 0.166(1 + 0.073 \frac{N}{A}) \sqrt{f_c} b h_0 + \frac{f_{yv} A_{sv}}{S} h_0 \quad (1)$$

式中：N - 柱承受的轴压力； f_c - 砼圆柱体抗压强度

另一种形式是在梁的抗剪强度计算公式的基础上叠加一项轴压力提供的抗剪能力。我国规范 GBJ 10 - 89^[3]采用了这一种表现形式。

$$V_u = \frac{0.2}{1.5 + \lambda} f_c b h_0 + 1.25 \frac{f_{yv} A_{sv}}{S} h_0 + 0.07N \quad (2)$$

式中：N ≤ 0.3 $f_c b h_0$ ；其余参数意义同规范。

公式(1)、(2)均是建立在低强度砼抗剪试验的基础上得出，能否适用于高强砼还需检验。若将这批试验的各项参数及试验结果代入(1)、(2)式，可得表 2 的计算结果。其中 C3.0 - 6 为粘结撕裂破坏，强度偏低，仅供参考。由表 2 可看出，ACI 规范公式(1)中没有反应出剪跨比 λ 的影响，在 λ 较小时，计算结果过于保守。我国规范公式较好，但在 λ 较大时，个别试件偏不安全，这与高强砼约束梁的试验结果相一致^[4]。

目前已有高强砼约束梁抗剪强度研究结果，[4] 给出了专题组建议的梁抗剪强度计算公式。

$$V_u = \frac{0.18 \lambda b h_0}{\lambda - 0.79} \sqrt{f_c} + (1.25 + 0.08 \lambda) \frac{f_{yv} A_{sv}}{S} h_0 \quad (3)$$

将这批试件中的三个梁试件 (N = 0) 的试验数据代入(3)式，试验与计算结果符合较好。若按 GBJ10 - 89 框架柱抗剪公式的模式，可写出高强砼框架柱抗剪计算公式为：

$$V_u = V_{c1} + V_n \quad (4)$$

$$V_n = V_u - V_{c1} \quad (5)$$

若认定按(3)式计算， $V_{c1} = V_{c1}$ ，可由(5)式得出轴压力贡献的抗剪能力 V_n ，图 10 显示了 V_n 与轴压比 n 的关系。随轴压比 n 增大， V_n 近似线性增加。但剪跨比大的试件， V_n 增加的速率明显要低一些。

将式(3)代入式(4)，令 $V_n = \alpha N$ ，可得：

$$V_u = \frac{0.18\lambda b h_0}{\lambda - 0.79} \sqrt{f_c} + (1.25 + 0.08\lambda) \frac{f_{yv} A_{sv}}{S} h_0 + \alpha N \quad (6)$$

表 2 试验结果与计算结果对比

试件号	V_u^1 (kN)	V_u^2 (kN)	V_u^3 (kN)	V_u^7 (kN)	V_u^1/V_u^2	V_u^2/V_u^3	V_u^3/V_u^7
C1.0-5	151.80	82.40	122.90	107.87	1.842	1.235	1.407
C1.5-0	95.00	50.10	89.10	86.10	1.896	1.066	1.103
C1.5-3	109.60	57.80	99.90	107.00	1.896	1.097	1.024
C1.5-5	124.20	71.90	112.20	107.49	1.727	1.107	1.155
C1.5-6	116.90	82.70	107.00	104.01	1.414	1.092	1.124
C1.5-8	135.20	96.30	107.00	104.01	1.404	1.264	1.300
C2.0-0	86.50	50.10	82.00	77.90	1.726	1.055	1.110
C2.0-3	102.60	68.30	100.00	95.81	1.502	1.026	1.071
C2.0-5	118.60	82.40	104.50	98.49	1.439	1.135	1.204
C2.0-6	121.80	88.70	104.50	98.49	1.373	1.165	1.237
C2.0-8	134.60	101.30	104.50	98.49	1.329	1.288	1.367
C3.0-0	83.00	50.10	72.50	73.90	1.657	1.145	1.123
C3.0-3	87.70	68.30	90.40	91.81	1.284	0.974	0.955
C3.0-5	101.50	80.00	90.40	91.81	1.269	1.123	1.106
C3.0-6	78.50	84.10	90.40	91.81	0.933	0.868	0.855
C3.0-8	96.90	94.30	90.40	91.81	1.024	1.069	1.055
平均值 \bar{X}							1.156
标准差 σ							0.1216
变异系数 C_v							0.1052

V_u^1 、 V_u^2 、 V_u^7 分别按(1)、(2)、(7)式计算得出

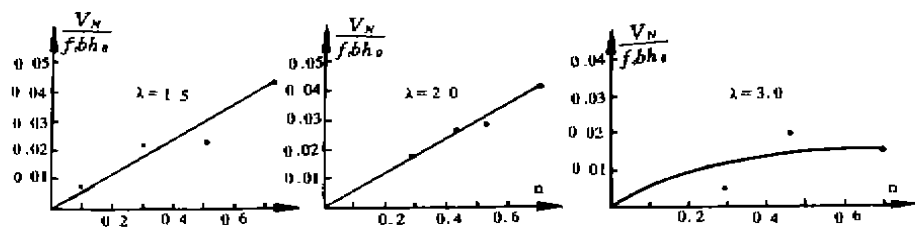


图 10

取 $V_u = V_u'$, 可得实测轴压力对抗剪强度的贡献系数。如对(6)式中 N 给定限值 $N \leq 0.3f_c b h_0$, 则可得 $\alpha'_{0.3}$ (α' , $\alpha'_{0.3}$ 见表 3)。

从表中可看出, 剪跨比 λ 较大时, α' 值偏低, 在对 N 限值后, 大多试件 $\alpha'_{0.3}$ 大于 0.07。为与现行规范协调, 取 $\alpha = 0.07$, 故得高强砼框架柱抗剪计算公式:

$$V_u = \frac{0.18\lambda b h_0}{\lambda - 0.79} \sqrt{f_c} + (1.25 + 0.08\lambda) \frac{f_{yv} A_{sv}}{S} h_0 + 0.07N \quad (7)$$

$$N \leq 0.3f_c b h_0$$

计算结果列于表 2, 可以看出, 计算与试验符合较好。

图 11 为 V 与剪跨比 λ 的关系曲线。 λ 越大, 轴压力贡献的献剪能力 V 越小。轴压比较大的试件, 这种现象更为明显。表 3 中的 α' , $\alpha'_{0.3}$ 值也反映了同样的趋势。

表 3

试件编号	α'	$\alpha'_{0.3}$	试件编号	α'	$\alpha'_{0.3}$
C1.0-5	0.1426	0.2586	C2.0-6	0.0793	0.1777
C1.5-3	0.2188	0.2188	C2.0-8	0.0773	0.2311
C1.5-5	0.1206	0.1493	C3.0-3	0.0515	0.0624
C1.5-6	0.0638	0.1384	C3.0-5	0.0627	0.1247
C1.5-8	0.0722	0.2206	C3.0-8	0.0354	0.1039
C2.0-3	0.0922	0.1110	平均值	0.0354	0.1039
C2.0-5	0.0901	0.1644			

4 结 论

1) 轴压力可提高高强砼框架柱斜裂缝出现时的剪力, 推迟裂缝出现。但与普通强度砼框架柱相比, 轴压力对提高 V_u 的作用明显降低。

2) 剪跨比对 V_u 的大小基本没有影响。

3) 高强砼框架柱抗剪强度随轴压比增大而增加, 但随 λ 增大而降低, 这种趋向与普通强度砼框架柱相同。

4) 对剪跨比较大的高强砼框架柱, 现行规范的框架柱抗剪强度计算公式偏不安全。将进一步研究纵筋配筋率、配箍特征值等参数对高强砼框架柱抗剪强度的影响。

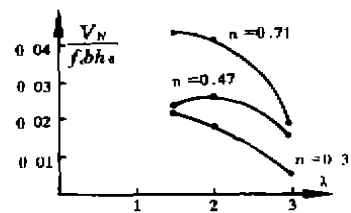


图 11

参 考 文 献

- 1 牛绍仁,李立仁. 钢筋砼框架柱的抗剪强度. 约束砼与普通砼强度理论及应用学术讨论会论文集,烟台·1987
- 2 Building Code Requirement for Reinforced Concrete(ACI 318 - 89 Revised 1992) and Commentary, American Concrete Institute, Sept. 1992
- 3 《混凝土结构设计规范》GBJ 10 - 89. 北京: 建筑工业出版社, 1989
- 4 陈肇元,朱金铨,吴佩刚. 高强砼及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1992(10)

(编辑: 胡玲)

Experimental Study on Shear Strength of High Strength Concrete Columns

Li Liren Li Ming Zhi Yunfang Niu Shaoren

(Faculty of Civil Engineering)

Abstract On basis of the experiment on sixteen high strength concrete columns, their shear behaviors are analysed. The effects of shear - span ratio and axial compression ratio on failure behavior, cracking shear and shear strength are analysed. The authors have discussed the suitability of the design equations for shear strength in the code. This experimental study on shear strength of high strength concrete frame columns is the first one in this field at home and the results can be served as reference for the code of high strength concrete design.

Keywords high strength concrete, shear span ratio, axial compression ratio, shear strength, ultimate shear strength