

# 钢管为圆钢管的高强混凝土柱斜截面承载力计算

陈周熠<sup>1),2)</sup> 赵国藩<sup>3)</sup> 林立岩<sup>4)</sup> 易伟建<sup>1)</sup>

[提要] 介绍了以圆钢管为钢骨的劲性高强混凝土柱的剪切性能试验的试验概况,在此基础上研究了它的斜截面承载力计算方法。在计算时,采用了将构件分成几个独立的抗力机构,相互叠加构成构件抗力体系的计算方法的计算模型。进而利用剪切性能试验得到的数据结果进行参数回归,得到以圆钢管为钢骨的劲性高强混凝土柱的斜截面承载力计算公式。

[关键词] 高强混凝土 劲性混凝土柱 斜截面承载力

**Calculation of Ultimate Shear Strength of High Strength Concrete Column Reinforced with Concrete Filled Steel Tube/Chen Zhouyi<sup>1,2</sup>, Zhao Guofan<sup>3</sup>, Lin Liyan<sup>4</sup>, Yi Weijian<sup>1</sup>** (1 Civil Engineering Department, Hunan University, Changsha 410082, China; 2 Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3 Civil Engineering Department, Dalian University of Science and Engineering, Dalian 116023, China; 4 Liaoning Province Architecture Design and Research Institute, Shenyang 110005, China)

**Abstract:** General situation about shear experiments of high concrete columns reinforced with concrete filled steel tube is presented, and method for calculating ultimate shear strength of the columns is discussed based on the experimental results. Shearing resistant mechanism of the columns can be made up of several simple individual shearing resistant mechanisms, and then the formula for calculating ultimate shear strength can be established by superposing the actions of these shearing resistant mechanisms. In the further analysis, the unknown parameter in the formula is regressed using the test data of shear experiments.

**Keywords:** high strength concrete; composite steel concrete column; shear strength

## 0 前言

借鉴劲性钢筋混凝土的思考方法,文[1]提出了以圆钢管为钢骨的劲性高强混凝土柱(简称钢管高强混凝土核心柱)(见图1)。钢管高强混凝土核心柱的抗震性能的试验研究<sup>[2]</sup>表明,这种柱型可以有效地改善普通高强混凝土构件延性差的缺点,减小构件断面,增强柱的承载能力,有很好的研究和应用前景。文[3]进行了核心柱的剪切性能试验研究,分析和研究了核心柱的剪切破坏特征以及诸多因素对核心柱剪切性能的影响。以上述研究为基础,下面进一步讨论钢管高强混凝土核心柱的斜截面强度的计算方法,并利用剪切试验结果,得出了可供工程设计使用的计算公式。

## 1 剪切性能试验概况<sup>[3]</sup>

大连理工大学土木系与辽宁省建筑设计研究院合作进行了钢管高强混凝土核心柱的剪切性能试验<sup>[3]</sup>,所用柱试件是按框架柱受力特征,将上、下两层柱在中点(反弯点)截断,试件中部伸出突梁,用以模拟节点承受水平荷载。试件设计截面为  $b \times h = 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ,总长度为 1 500 mm,变化试件中部突梁的尺寸,就可以改变试件的剪跨比。主要试验参数为剪跨比、配箍率  $\nu$  和钢管含钢率  $\rho_{\text{tube}}$  等,共设计制作了 29

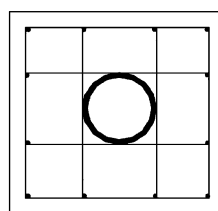


图 1 柱横截面

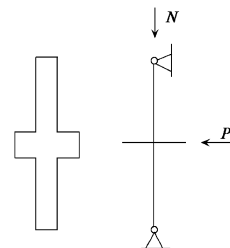


图 2 试件模型和加载方案简图

根试件,试件具体参数见表 1。试件所用 I 5 箍筋的实测屈服强度为 236MPa,所用的钢管是采用无缝钢管车削加工而成,其实测屈服强度:  $\phi 54 \times 2$  的钢管为 381MPa,  $\phi 65 \times 2$  的钢管为 367MPa,  $\phi 80 \times 2$  的钢管为 352MPa。试验采用 5 000 kN 长柱试验机施加竖向荷载,在长柱试验机的活动平台上配置了一个水平加荷框架装置,给柱试件施加水平荷载。试件的模型和加载方案简图如图 2 所示。

由试验结果可以观察到各柱的破坏形态,得到各柱的  $P$ - $\Delta$  滞回曲线,据此可以分析和考察诸多因素对

1) 湖南大学土木系,400082; 2) 厦门大学,361005; 3) 大连理工大学土木系,116023; 4) 辽宁省建筑设计研究院,沈阳,110005。

钢管高强混凝土核心柱剪切状态下延性的影响。由试验结果还可以得到各柱试件在某确定轴力  $N$  (对应轴压比  $n_t$ ) 下的水平极限荷载值  $V_t$ , 这为建立核心柱斜截面强度的计算公式提供了宝贵的试验依据。

钢管高强混凝土核心柱抗剪承载力的计算值和试验值的比较 表 1

试件类型	试件编号	$f_{cu}$ (MPa)	$n_t$	tube (%)	s (%)	v (%)		$b$ (mm)	$h$ (mm)	$V_t$ (kN)	$V_n$ (kN)	$V_n/V_t$
不带核心钢管	A1-4-2	81.2	0.493	0	2.4	1.28	1	200	201	290	202	1.435
	B1-4-2	90.6	0.441	0	2.4	1.28	1	200	200	301	213	1.413
	B2-4-2	89.5	0.443	0	2.4	1.28	0.75	203	208	335	240	1.395
	B4-4-2	89.5	0.443	0	2.4	1.28	1.4	201	203	310	196	1.581
带核心钢管	A1-1-2	90.5	0.495	0.82	2.4	1.28	1	210	200	470	311	1.506
	A1-1-3	89.5	0.492	0.82	2.4	0.9	1	200	202	394	267	1.475
	A1-2-1	84.3	0.494	1.0	2.4	1.79	1	200	215	580	390	1.485
	A1-2-2	81.2	0.493	1.0	2.4	1.28	1	200	205	498	316	1.571
	A1-2-3	91.4	0.482	1.0	2.4	0.9	1	200	203	458	285	1.606
	A1-3-2	84.3	0.494	1.22	2.4	1.28	1	200	205	525	347	1.512
	A2-2-1	83.6	0.492	1.0	2.4	1.79	0.75	205	205	640	433	1.475
	A2-2-2	89.5	0.492	1.0	2.4	1.28	0.75	200	203	635	368	1.722
	A2-2-3	91.6	0.481	1.0	2.4	0.9	0.75	200	199	470	317	1.480
	A2-3-2	85.7	0.436	1.22	2.4	1.28	1	200	208	521	352	1.478
	B1-2-1	90.5	0.442	1.0	2.4	1.79	1	200	205	601	386	1.555
	B1-2-2	87.5	0.426	1.0	2.4	1.28	1	200	210	446	330	1.349
	B1-2-3	87.5	0.426	1.0	2.4	0.9	1	198	202	442	277	1.593
	B1-3-2	100.5	0.408	1.22	2.4	1.28	1	198	202	515	362	1.421
	B2-1-2	89.7	0.449	0.82	2.4	1.28	0.75	200	203	499	344	1.446
	B2-1-3	89.7	0.449	0.82	2.4	0.9	0.75	200	205	453	303	1.491
	B2-2-1	85.7	0.435	1.0	2.4	1.79	0.75	200	210	618	438	1.408
	B2-2-2	95.8	0.448	1.0	2.4	1.79	0.75	205	200	566	444	1.274
	B2-2-3	91.8	0.447	1.0	2.4	0.9	0.75	203	200	569	321	1.768
	B2-3-2	86.3	0.432	1.22	2.4	1.28	0.75	203	205	586	401	1.457
	B4-2-2	88.6	0.449	1.0	2.4	1.28	1.4	200	200	360	274	1.312
	B4-2-3	89.7	0.449	1.0	2.4	0.9	1.4	200	205	389	244	1.589
	B4-3-3	97.9	0.439	1.22	2.4	0.9	1.4	203	205	360	271	1.327
	C1-2-2	89.5	0.375	1.0	2.4	1.28	1	198	204	439	324	1.351
C2-2-2	88.6	0.379	1.0	2.4	1.28	0.75	195	200	541	359	1.505	

注: (1) 不带核心钢管柱试件的  $V_n/V_t$  的统计参数  $n=4$ ,  $\bar{x}=1.456$ ,  $s=0.073$ 。(2) 带核心钢管柱试件的  $V_n/V_t$  的统计参数  $n=25$ ,  $\bar{x}=1.486$ ,  $s=0.115$ 。

## 2 斜截面承载力计算

### 2.1 公式模型的建立

新颁布施行的《钢筋混凝土设计规范》<sup>[4]</sup>在计算偏心受压构件斜截面承载力时,基于试验基础,采用了偏下限的经验公式:

$$V = 1.75 f_t b h_0 / (\lambda + 1) + f_{yv} A_{sv} h_0 / s + 0.07 N \quad (1)$$

上式反映了混凝土强度等级、箍筋、轴压力及剪跨比等对钢筋混凝土构件斜截面承载力的影响,物理概念明确。为与混凝土设计规范相协调,钢管混凝土核心柱的斜截面强度计算也采用与上式相近的经验公式。

观察破坏的剪切试验柱试件,最终的破坏基本上是由构件的斜裂缝和核心钢管与混凝土之间粘结破坏

裂缝所引起。当体积配箍率较小时,核心钢管与外围钢筋混凝土之间的粘结裂缝比较多,而适当配置箍筋的柱试件则主要发生斜截面裂缝。为了考虑问题方便,将柱构件分成几个独立的抗力机构,相互叠加构成柱构件的抗力体系。参见图 3,将钢管混凝土核心柱分成钢筋混凝土梁式抗力机构、钢筋混凝土斜压棱柱抗力机构、核心钢管梁式抗力机构、核心钢管斜压棱柱抗力机构和保护层斜压棱柱抗力机构等五部分。

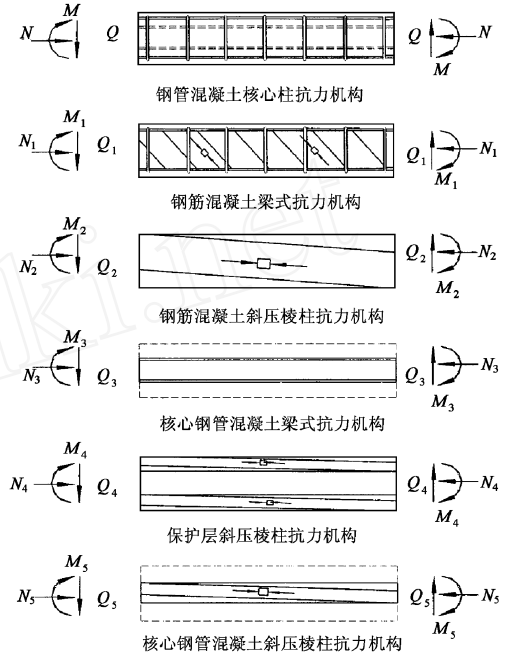


图 3 柱的剪切抗力机构

参照式(1),列出钢管混凝土核心柱斜截面抗剪强度公式:

$$V = 1.75 f_t b h_0 / (\lambda + 1) + f_{yv} A_{sv} h_0 / s + 0.07 N + F \quad (2)$$

式中  $V$  为构件斜截面上的剪力设计值,  $f_t$  为混凝土轴心抗拉强度设计值,  $b$  为柱截面宽度,  $h_0$  为柱截面的有效高度,  $\lambda$  为计算截面的剪跨比,  $f_{yv}$  为箍筋的抗拉强度设计值,  $A_{sv}$  为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积,  $s$  为沿构件长度方向上箍筋的间距,  $N$  为与剪力设计值  $V$  相应的轴向压力设计值,  $F$  为核心钢管的梁式抗力机构的抗剪承载力。

在式(2)中,钢筋混凝土梁式抗力机构与公式中的前两项物理意义相吻合,反映了柱混凝土强度、箍筋、剪跨比的影响。钢筋混凝土斜压棱柱抗力机构、保护层混凝土斜压棱柱体抗力机构以及核心钢管混凝土斜压棱柱抗力机构与公式中的第三项物理意义相吻合,反映了轴压力  $N$  的影响。较之普通的钢筋混凝土,由于钢管对混凝土约束作用可以提高混凝土强度,核心钢管混凝土斜压棱柱抗力机构相应地可以发挥更大的

作用,但是,为安全起见,第三项仍取为  $0.07N$ ,且当  $N > 0.3f_cA$  时,取  $N = 0.3f_cA$ 。核心钢管的梁式抗力机构的抗剪承载力用公式中的第四项  $F$  表示,是需要重点考虑的问题,下面讨论这一项的取值。

当构件出现斜裂缝时,钢管刚好穿过斜裂缝,抑制裂缝的开展,承担拉应力。假定斜裂缝的模型如图4所示,则核心钢管拉力垂直于斜裂缝上的投影分量为:

$$F = f_{yt} A_{st} \sin \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为考虑应力不均匀及部分钢管未达到屈服强度的调整系数,  $f_{yt}$  为钢管抗拉强度设计值,  $A_{st}$  为钢管面积。由图4可知

$$\sin \alpha = \frac{h_0}{\sqrt{H_n^2 + h_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (H_n/h_0)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4}} \quad (4)$$

则核心钢管混凝土斜截面抗剪强度式(2)可写为:

$$V = 1.75f_t bh_0 / (\alpha + 1) + f_{yv} A_{sv} h_0 / s + 0.07N + f_{yt} A_{st} / \sqrt{1 + 4} \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为方向调整系数,可以将  $\alpha$  变成一个统一的待定参数,用  $\beta$  表示,则式(5)变为:

$$V = 1.75f_t bh_0 / (\beta + 1) + f_{yv} A_{sv} h_0 / s + 0.07N + f_{yt} A_{st} / \sqrt{1 + 4} \quad (6)$$

## 2.2 参数 $\beta$ 的回归

式(6)中的待定参数  $\beta$  可以利用前文所述核心柱剪切试验的试验数据进行回归分析得出,这只需要将这批试验数据代入式(6)求解即可。这批数据共有29根高强混凝土剪切柱试件,其中有A1-4-2等4根不带核心钢管的柱试件,其余25根为核心柱剪切试件。

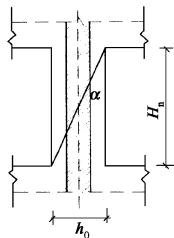


图4 裂缝模型

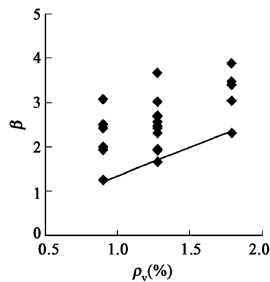


图5  $\beta$  -  $\rho_v$  相关关系

对于不带核心钢管的柱试件,直接可以利用混凝土结构设计规范中的偏心受压构件的斜截面承载力计算公式进行计算,即式(1)。经过验算,4根不带核心钢管的柱试件的计算结果见表1。从表中可知,这四个试件用规范式(1)计算的结果,斜截面承载力试验值与计算值的比值在1.456左右,这说明试验中存在一定的系统误差,由于参数  $\beta$  反映的是核心钢管对斜截面承载力的贡献,因此,在用其余的25根核心柱试件的试验数据来回归参数  $\beta$  时,也应该考虑扣除这部分误差,而不能将其归结为全由核心钢管来承担。这样,

在将核心柱试件的试验数据代入式(6)来计算  $\beta$  时,由式(6)的前三项计算得到的值在总的剪力值中也让它被扣除1.456倍,剩下的部分才认为由核心钢管来承担,这样处理的结果,应该更合理。

按照上述方法利用25根核心柱试件的试验数据求解  $\beta$ ,将  $\beta$  与体积配箍率  $\rho_v$  绘制在同一个图上,如图5所示,发现  $\beta$  与体积配箍率之间存在较强的相关性,说明核心钢管要与一定数量的箍筋共同作用才能防止钢管与外围混凝土的粘结破坏,构成柱试件的剪切抗力机构和延性保证体系。考虑到安全性,回归出调整系数  $\beta$  与体积配箍率  $\rho_v$  的偏下限经验公式:

$$\beta = 0.25 + 112 \rho_v \quad (7)$$

当  $\rho_v = 3.2\%$  时,取  $\beta = 3.2\%$ 。

## 2.3 计算结果与试验结果的比较

由以上分析,可以得到钢管混凝土核心柱斜截面承载力计算公式的完整表达式为:

$$V = 1.75f_t bh_0 / (\beta + 1) + f_{yv} A_{sv} h_0 / s + 0.07N + f_{yt} A_{st} / \sqrt{1 + 4} \quad (8)$$

式中:当  $N > 0.3f_cA$  时,取  $N = 0.3f_cA$ ; 按式(7)计算。

按式(8)对上述剪切性能试验的29根试件进行计算,计算结果参见表1。由表1可知,带核心钢管的柱试件的试验值与计算值之比的平均值  $\bar{x} = 1.486$ ,与不带核心钢管的柱试件用规范公式计算的结果相近,表明本章所得到的斜截面承载力计算公式中关于钢管所承担的承载力的确定是合理的。

需要说明的是,建立式(8)所依据的核心柱的剪切性能试验结果是在单调加载下得到的,因此式(8)只适用于核心柱在静力下的抗剪计算,与之相应的抗震设计的斜截面承载力计算公式还有待进一步的试验和理论研究才能给出。

## 3 结语

简要介绍了钢管高强混凝土核心柱的剪切性能试验,进而讨论了其斜截面承载力的计算方法。采用将构件分成几个独立的抗力机构,相互叠加构成构件的抗力体系的思路建立了钢管高强混凝土核心柱的斜截面承载力计算模型,并利用剪切性能试验得到的数据进行参数回归,得出了相应的计算公式。

### 参考文献

1. 林立岩. 高强混凝土柱的设计回顾与探讨. 见: 高强混凝土及其应用第二届学术讨论会论文集. 南京: 东南大学, 1995.
2. 赵国藩, 张德娟, 黄承逵. 钢管混凝土增强高强混凝土柱的抗震性能研究. 大连理工大学学报, 1996, 36(6).
3. 辽宁省建筑设计研究院, 大连理工大学土木系. 钢管高强混凝土核心柱剪切性能的试验研究, 1997.
4. 混凝土结构设计规范 (GB50010—2002). 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.