

混凝土双向受弯构件斜截面承载力设计简便方法

曾庆响

(五邑大学土木工程系 江门 529020)

[提要] 在分析大量文献资料的基础上,采用“等效截面”将双向受弯构件转化为单向受弯构件。根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)规定的单向受弯构件斜截面承载力计算方法,建立相应的双向受弯构件计算公式,方法简便实用,与规范相适应,采用混凝土轴心抗拉强度表达构件的承载力。计算结果与试验结果对比表明方法可行,且偏于安全。此外,还根据试验资料,建立了斜截面承载力计算的回归公式。

[关键词] 钢筋混凝土 双向受弯构件 斜截面承载力 等效截面 回归公式

Convenient Design Method for Oblique Section Strength of Reinforced Concrete Beam Subjected to Biaxial Bending

Author: Zeng Qingxiang (Department of Civil Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: Based on the academic analysis, a biaxial bending member is equivalent to a single bending member by the rule of equivalent cross section. According to the calculation method for shear capacity of reinforced concrete beam subjected to single bending in Code for design of concrete structures GB50010—2002, a convenient design method for shear strength of reinforced concrete beam subjected to biaxial bending is established. The comparison between calculation and test results show that the convenient design method is feasible and safe. A regressive design formula is also presented according to the test data.

Keywords: reinforced concrete; biaxial bending member; shear strength; equivalent cross section; regressive formula

一、引言

受弯构件的斜截面承载力受到混凝土强度、箍筋和纵筋的配置、剪跨比(或跨高比)、构件截面的形状与尺寸、荷载类型及作用位置等众多因素的影响。到目前为止,构件的抗剪机理还不十分明确,与受弯构件正截面承载力的研究深度相差甚远。国内外学者在钢筋混凝土构件抗剪方面的研究主要集中在单向受弯构件,提出了许多计算模型,国外相关规范和我国新修订的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)^[1](以下简称“规范”)也有明确的计算方法。但是对于双向受弯构件抗剪问题的研究却还很不够,据公开的文献资料显示,开展这一课题研究的专家和学者非常有限。当然该课题的研究也取得了可喜的成果^[2-12],提出了不少以混凝土轴心抗压强度表示的计算方法,但总的说来,试验数据还有待更广泛和大量的积累,研究也有待进一步的深入。

二、等效截面与等效剪跨比

试验研究表明:双向受弯构件的抗剪机理与单向受弯构件基本相同,因此可以设法将双向受弯构件转化为单向受弯构件,建立双向受弯构件的等效单向受弯截面,然后利用单向受弯构件的大量研究成果^[13-19]解决双向受弯构件的计算问题。

双向受弯构件的受剪承载力随着荷载斜弯角 α

截面高宽比的增大而降低,但它们之间的具体函数关系还无法确定。随着荷载斜弯角的变化,构件截面的宽度和有效高度将由 b 和 h_0 转变为 h 和 b_0 , 截面高宽比将由 h/b 转变为 b/h , 如图 1 所示。假定荷载斜弯角与构件截面的有效高度和宽度是线性变换关系,则可按图 1(c) 所示将双向受弯截面转化为等效的单向受弯截面,当荷载斜弯角为 0° 或 90° 时,即为单向受弯情况,如图 1(a), (b), 等效截面与实际截面相同。等效截面宽度:

$$b_{eq} = b + \frac{h-b}{90} \alpha \quad (1)$$

近似取截面有效高度 $h_0 = 0.9h$ (当 $\alpha = 0^\circ$ 时), $b_0 = 0.9b$ (当 $\alpha = 90^\circ$ 时), 则等效截面有效高度:

$$h_{0eq} = 0.9 \left[h - \frac{h-b}{90} \alpha \right] \quad (2)$$

在集中荷载作用下,若荷载作用点到支座边缘的距离(剪跨)为 a , 则构件的等效剪跨比:

$$\lambda_{eq} = a/h_{0eq} \quad (3)$$

这样,等效截面就考虑了双向受弯构件两个特有的影响因素:荷载斜弯角和截面高宽比。

三、简便计算方法及与试验结果的比较

1. 规范公式法

对于双向受弯构件,利用等效截面,根据现行“规范”可得如下受剪承载力的计算方法。以下各式中,当

$$V_{cs} = \frac{1.66}{\lambda_{eq} - 0.44} f_t b_{eq} h_{0eq} + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_{0eq} \quad (11)$$

由于回归公式法中, 追求的目标是均方差最小, 计算所得的结果约为试验结果的平均值, 只能用于承载力的估算, 若用于工程设计则可靠度太低。

3. “规范公式法”与“回归公式法”的比较

用前面两种计算方法对文献试验构件斜截面承载力进行计算, 结果见表 1~ 4。表中构件混凝土抗拉强度根据规范取 $f_t = 0.88 \times 0.395 f_{cu}^{0.55} = 0.3476 f_{cu}^{0.55}$; 等效截面尺寸 b_{eq}, h_{0eq} 由式(1), (2) 确定。四种条件下试件的实测值与计算值之比的统计结果如表 5 所示。从计算结果可以看出, “规范公式法”用于双向受弯构件仍属于斜截面受剪承载力偏下值的计算公式, 符合现行规范受剪计算公式的原则。在“回归公式法”中, 在均布荷载作用下, 由于有腹筋和无腹筋两种情况的试验数据都较少, 统计结果离散性较大, 有待补充试验数据, 调整公式的参数; 在集中荷载作用下, 有腹筋和无腹筋两种情况的回归公式都能较好地符合试验结果, 尤其是有腹筋条件下, 用于回归的数据包括简支梁和约束梁两种支承条件, 计算结果也能与实测结果吻合良好。

四、应用举例

例如, 某承受均布荷载作用的钢筋混凝土简支梁, 截面尺寸为 $b \times h = 250\text{mm} \times 600\text{mm}$, 混凝土强度等级为 C30, 纵筋为 HRB400, 箍筋采用 HRB235; 根据计算, 梁所受的最不利的剪力设计值为 $V_x = 156\text{kN}$, $V_y = 234\text{kN}$, 试确定箍筋用量。

解: (1) 根据规范查得 $f_c = 14.3\text{MPa}$, $f_t = 1.43\text{MPa}$, $f_{yv} = 210\text{MPa}$;

(2) 总剪力 $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 281.233\text{kN}$, 荷载斜弯角 $\alpha = \arg \tan(V_x / V_y) = 33.69^\circ$;

(3) 由式(1), (2) 计算得 $b_{eq} = 339.33\text{mm}$, $h_{0eq} = 450.24\text{mm}$;

(4) 验算截面尺寸: $h_{0eq} / b_{eq} = 1.33 < 4.0 \cdot 25 \beta_f f_c b_{eq} \times h_{0eq} = 546.832\text{kN} > V = 281.233\text{kN}$, 满足要求;

(5) 由式(6) 计算可得 $A_{sv} / s \geq 1.084$, 取双肢 $\Phi 10$ ($A_{sv} = 157\text{mm}^2$), 则 $s \leq 145\text{mm}$, 取 $s = 140\text{mm}$, 满足箍筋的最小直径和最大间距要求。

(6) 验算配箍率: $\rho_{sv} = A_{sv} / b_{eq} s = 0.308\% > \rho_{sv, \min} = 0.24 f_t / f_{yv} = 0.163\%$, 满足要求。

故梁的箍筋可配双肢 $\Phi 10 @ 140$, 沿梁长均匀布置。

五、 V_x / V_{ux} 和 V_y / V_{uy} 的关系

在研究钢筋混凝土双向受弯构件的斜截面承载力时, 通常会考虑 V_x / V_{ux} 和 V_y / V_{uy} 的关系, 并用如下的

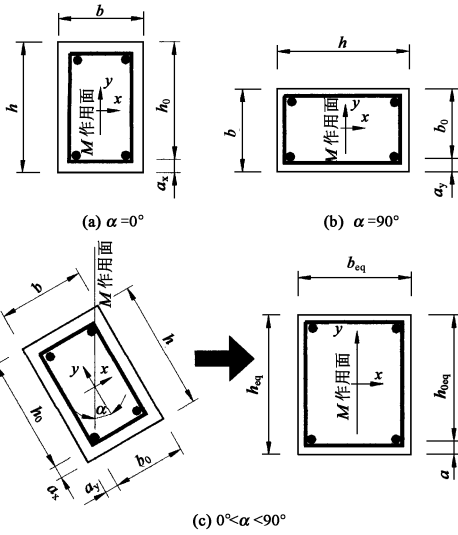


图 1 双向受弯构件的等效截面

等效剪跨比 $\lambda_{eq} < 1.5$ 时, 取 $\lambda_{eq} = 1.5$, 当 $\lambda_{eq} > 3$ 时, 取 $\lambda_{eq} = 3$ 。截面高度影响系数 $\beta_h = (800 / h_{0eq})^{1/4}$ 。当 $h_{0eq} < 800\text{mm}$ 时, 取 $h_{0eq} = 800\text{mm}$; 当 $h_{0eq} > 2000\text{mm}$ 时, 取 $h_{0eq} = 2000\text{mm}$ 。

(1) 无腹筋双向受弯构件

均布荷载作用

$$V \leq V_c = 0.7 \beta_h f_t b_{eq} h_{0eq} \quad (4)$$

集中荷载作用

$$V \leq V_c = \frac{1.75}{\lambda_{eq} + 1} \beta_h f_t b_{eq} h_{0eq} \quad (5)$$

(2) 有腹筋双向受弯构件

均布荷载作用

$$V \leq V_{cs} = 0.7 f_t b_{eq} h_{0eq} + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_{0eq} \quad (6)$$

集中荷载作用

$$V \leq V_{cs} = \frac{1.75}{\lambda_{eq} + 1} f_t b_{eq} h_{0eq} + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_{0eq} \quad (7)$$

2. 回归公式方法

为了与现行规范相适应, 采用规范方法公式的形式, 根据文[2]~ [6]的试验数据和最小二乘法原理, 确定公式的待定参数。

(1) 无腹筋双向受弯构件

均布荷载作用

$$V_c = 1.24 \beta_h f_t b_{eq} h_{0eq} \quad (8)$$

集中荷载作用

$$V_c = \frac{0.83}{\lambda_{eq} - 1.01} \beta_h f_t b_{eq} h_{0eq} \quad (9)$$

(2) 有腹筋双向受弯构件

均布荷载作用

$$V_{cs} = 1.36 f_t b_{eq} h_{0eq} + 0.14 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_{0eq} \quad (10)$$

梁号	b (mm)	h (mm)	b _{eq} (mm)	h _{0eq} (mm)	斜弯角 α(°)	f _{cu} (MPa)	f _t (MPa)	实测 V _t (kN)	规范公式法		回归公式法	
									V _c (kN)	V _t /V _c	V _c (kN)	V _t /V _c
L1	150	224	156.58	195.68	8.0	18.8	1.75	67.585	37.432	1.806	66.438	1.017
L2	146	150	146.36	134.68	8.0	33.1	2.38	64.574	32.870	1.965	58.340	1.107
L3	150	301	163.42	258.82	8.0	45.6	2.84	135.858	84.124	1.615	149.311	0.910
L4	141	150	142.40	133.74	14.0	20.1	1.81	81.756	24.138	3.387	42.843	1.908
L5	150	300	173.33	249.00	14.0	33.1	2.38	71.733	71.972	0.997	127.744	0.562
L6	152	222	162.89	190.00	14.0	40.8	2.67	86.727	57.901	1.498	102.769	0.844
L7	154	297	196.26	229.26	26.6	20.1	1.81	109.476	57.031	1.920	101.224	1.082
L8	154	225	174.98	183.61	26.6	33.1	2.38	94.188	53.578	1.758	95.096	0.990
L9	145	150	146.48	133.67	26.6	45.6	2.84	61.227	38.942	1.572	69.118	0.886
L10	144	229	157.22	194.20	14.0	40.8	2.67	76.110	57.122	1.332	101.386	0.751
L11	150	225	161.67	192.00	14.0	40.8	2.67	87.511	58.071	1.507	103.071	0.849
L12	152	223	158.31	195.02	8.0	18.8	1.75	38.413	37.719	1.018	66.947	0.574
L13	153	226	159.49	197.56	8.0	20.1	1.81	107.810	39.936	2.700	70.883	1.521

均布荷载作用下的有腹筋双向受弯梁^[5]

表 2

梁号	b (mm)	h (mm)	b _{eq} (mm)	h _{0eq} (mm)	斜弯角 α(°)	f _{cu} (MPa)	f _t (MPa)	箍筋		实测 V _t (kN)	规范公式法		回归公式法	
								配筋	f _y (MPa)		V _{cs} (kN)	V _t /V _{cs}	V _{cs} (kN)	V _t /V _{cs}
L1	145	201	149.98	176.42	8	35.31	2.47	Φ6.5@130	268	67.585	75.906	0.890	91.982	0.735
L2	148	197	152.36	173.38	8	30.52	2.28	Φ6.5@150	268	64.574	67.838	0.952	84.505	0.764
L3	148	202	152.80	177.48	8	27.43	2.15	Φ6.5@170	268	135.858	64.005	2.123	81.611	1.665
L4	148	200	156.09	172.72	14	27.43	2.15	Φ6.5@150	268	81.756	66.156	1.236	81.431	1.004
L5	149	198	156.62	171.34	14	35.31	2.47	Φ6.5@170	268	71.733	68.789	1.043	92.318	0.777
L6	151	201	158.78	173.90	14	30.52	2.28	Φ6.5@130	268	86.727	73.790	1.175	88.673	0.978
L7	150	201	164.73	167.64	26	30.52	2.28	Φ6.5@170	268	109.476	65.976	1.659	87.758	1.247
L8	146	199	161.31	165.32	26	27.43	2.15	Φ6.5@130	268	94.188	68.392	1.377	80.901	1.164
L9	145	200	160.89	165.70	26	35.31	2.47	Φ6.5@150	268	61.227	70.637	0.867	91.984	0.666

集中荷载作用下的有腹筋双向受弯梁(L1~L12^[2]; L13~L25^[6])

表 3

梁号	b (mm)	h (mm)	b _{eq} (mm)	h _{0eq} (mm)	斜弯角 α(°)	f _{cu} (MPa)	f _t (MPa)	剪跨 a (mm)	箍筋		实测 V _t (kN)	规范公式法		回归公式法	
									配筋	f _y (MPa)		V _{cs} (kN)	V _t /V _{cs}	V _{cs} (kN)	V _t /V _{cs}
L1	162	259	177.09	219.52	14	19	1.76	260	Φ6.5@150	300	115.3	76.747	1.502	136.173	0.847
L2	145	355	177.67	290.10	14	19	1.76	710	Φ6.5@150	300	84.0	84.223	0.997	113.189	0.742
L3	150	256	180.62	202.84	26	34.4	2.43	310	Φ6.5@130	300	127.5	92.599	1.377	167.271	0.762
L4	150	355	181.89	290.80	14	34.4	2.43	750	Φ6.5@130	300	111.5	107.220	1.040	144.256	0.773
L5	160	352	189.87	289.92	14	34.4	2.43	430	Φ6.5@130	300	152.5	137.916	1.106	254.551	0.599
L6	151	252	166.71	212.66	14	19	1.76	510	Φ6.5@150	300	77.5	60.122	1.289	80.887	0.958
L7	155	245	181.00	197.10	26	19	1.76	260	Φ6.5@150	300	97.0	69.856	1.389	124.391	0.780
L8	155	257	184.47	204.78	26	34.4	2.43	310	Φ6.5@150	300	128.0	91.019	1.406	169.546	0.755
L9	152	202	166.44	168.80	26	19	1.76	230	Φ6.5@150	300	86.0	56.807	1.514	99.755	0.862
L10	145	202	161.47	166.98	26	19	1.76	230	Φ6.5@150	300	107.5	55.173	1.948	96.388	1.115
L11	150	251	158.98	217.82	8	34.4	2.43	510	Φ6.5@130	300	103.5	77.306	1.339	106.823	0.969
L12	152	252	160.89	218.80	8	34.4	2.43	260	Φ6.5@130	300	143.0	93.284	1.533	167.873	0.852
L13	152	299	174.87	248.52	14	36.1	2.50	600	Φ6.5@170	300	146.1	84.602	1.727	120.343	1.214
L14	153	300	175.87	249.42	14	37.6	2.56	550	Φ6.5@170	300	118.1	90.249	1.309	134.601	0.877
L15	154	303	177.18	251.84	14	35.7	2.48	1000	Φ6.5@170	300	114.4	77.812	1.470	101.224	1.130
L16	151	305	174.96	252.94	14	36.4	2.51	1200	Φ6.5@170	300	114.1	78.057	1.462	101.526	1.124
L17	152	302	175.33	250.80	14	33.5	2.40	1400	Φ6.5@170	300	103.5	75.345	1.374	97.625	1.060
L18	153	301	166.32	258.91	8	36.7	2.52	800	Φ6.5@170	300	135.9	77.659	1.750	100.600	1.351
L19	152	297	194.86	228.73	26	35.5	2.48	800	Φ6.5@170	300	112.1	74.915	1.496	98.229	1.141
L20	152	301	175.18	250.04	14	36.1	2.50	600	Φ6.5@170	300	125.3	85.461	1.466	121.934	1.028
L21	151	301	174.33	249.90	14	35.5	2.48	800	Φ6.5@170	300	123.8	76.294	1.623	99.083	1.249
L22	151	302	174.49	250.66	14	36.8	2.53	1000	Φ6.5@220	300	104.0	70.879	1.467	94.215	1.104
L23	150	304	173.96	252.04	14	35.3	2.47	1000	Φ6.5@200	300	113.0	72.293	1.563	95.156	1.188
L24	153	303	176.33	251.70	14	34.4	2.43	1000	Φ6.5@150	300	122.1	80.472	1.517	103.290	1.182
L25	150	298	173.02	247.48	14	34.6	2.44	1000	Φ6.5@130	300	123.7	83.422	1.483	105.506	1.172

梁号	b (mm)	h (mm)	b _{eq} (mm)	h _{0eq} (mm)	斜弯角 α(°)	f _{cu} (MPa)	f _t (MPa)	剪跨 a (mm)	实测 V _t (kN)	规范公式法		回归公式法	
										V _c (kN)	V _t /V _c	V _c (kN)	V _t /V _c
L1	147	228	159.85	193.90	14	17.0	1.65	410	30.850	28.760	1.073	38.422	0.803
L2	155	232	166.93	197.79	14	17.0	1.65	410	37.850	31.050	1.219	42.533	0.890
L3	153	228	164.75	194.71	14	20.1	1.81	410	40.000	32.730	1.222	43.954	0.910
L4	150	149	149.38	134.03	26	14.7	1.52	250	27.500	18.641	1.475	29.601	0.929
L5	147	148	147.46	133.06	26	30.0	2.26	250	42.900	26.916	1.594	42.272	1.015
L6	151	150	150.80	135.45	26	40.0	2.64	250	47.500	33.208	1.430	53.606	0.886
L8	155	229	166.26	195.70	14	20.1	1.81	570	34.650	26.350	1.315	25.652	1.351
L9	151	227	162.82	193.66	14	20.1	1.81	220	94.500	39.966	2.365	96.824	0.976
L11	148	299	160.97	256.98	8	14.7	1.52	760	30.250	27.885	1.085	26.825	1.128
L12	148	300	161.16	257.89	8	14.7	1.52	550	40.350	35.392	1.140	46.786	0.862
L13	151	299	163.83	257.56	8	14.7	1.52	300	94.000	45.026	2.088	109.082	0.862
L14	158	227	177.65	186.26	26	30.0	2.26	410	39.750	40.821	0.974	51.964	0.765
L15	154	235	166.63	200.31	14	30.0	2.26	410	46.850	43.267	1.083	60.244	0.778
L16	156	226	162.25	198.05	8	30.0	2.26	410	52.650	41.334	1.274	56.713	0.928
L17	156	238	156.00	214.47	0	30.0	2.26	410	67.850	45.382	1.495	69.456	0.977
L18	146	150	146.40	134.55	14	30.0	2.26	250	42.600	27.220	1.565	43.485	0.980
L19	148	146	148.03	131.82	8	30.0	2.26	250	52.400	26.607	1.969	41.206	1.272
L20	151	150	151.01	135.17	8	14.7	1.52	320	25.650	16.171	1.586	19.000	1.350
L21	148	299	161.08	257.15	8	14.7	1.52	680	41.050	30.321	1.354	32.013	1.282
L22	146	366	165.95	312.08	8	14.7	1.52	850	40.350	37.102	1.088	38.171	1.057

试验实测值与两种方法计算值之比的统计表 表 5

受力与配筋类型	数据来源/试件数	规范公式法				回归公式法			
		平均值	最大值	最小值	均方差	平均值	最大值	最小值	均方差
无腹筋均布荷载	文[3]/13	1.775	3.387	0.997	0.626	1.000	1.908	0.562	0.353
无腹筋集中荷载	文[4]/20	1.420	2.365	0.974	0.359	1.000	1.351	0.765	0.180
有腹筋均布荷载	文[5]/9	1.258	2.123	0.867	0.388	1.000	1.665	0.666	0.301
有腹筋集中荷载	文[2],[6]/25	1.446	1.948	0.997	0.205	0.993	1.351	0.599	0.193

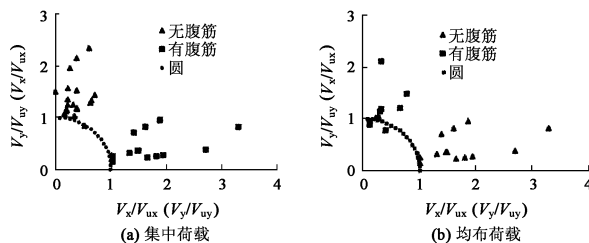


图 2 V_x/V_{ux} 和 V_y/V_{uy} 的关系

形式来分析:

$$\left(V_x / V_{ux} \right)^m + \left(V_y / V_{uy} \right)^n = 1 \quad (12)$$

若指数 $m = n = 2$, 则正好为圆。根据表 1~ 4 的试验资料, 可得 V_x / V_{ux} 和 V_y / V_{uy} 的关系如图 2 所示。其中, V_x, V_y 分别为实测值 V_t 在 x 轴和 y 轴方向受剪的分量, $V_x = V_t \cos \alpha, V_y = V_t \sin \alpha$ 。 V_{ux}, V_{uy} 分别为按现行规范计算的构件在 x, y 轴方向的受剪承载力。

对于均布荷载作用的有腹筋受弯构件

$$\begin{cases} V_{ux} = 0.7f_t b h_0 + 1.25f_{yv} \frac{A_{svx}}{s} h_0 \\ V_{uy} = 0.7f_t h b_0 + 1.25f_{yv} \frac{A_{svy}}{s} b_0 \end{cases} \quad (13)$$

对于集中荷载作用的有腹筋受弯构件:

$$\begin{cases} V_{ux} = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{svx}}{s} h_0 \\ V_{uy} = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t h b_0 + f_{yv} \frac{A_{svy}}{s} b_0 \end{cases} \quad (14)$$

对于无腹筋构件, 则取式 (13) 和 (14) 中的箍筋项为零, 混凝土项乘以系数 β_h 。

从图中可以看出, 在全部 67 个试件中, 只有 3 个有腹筋梁在均布荷载作用下的数据落在圆弧之内。假如对式 (12) 中的 V_{ux}, V_{uy} 都做相应的试验, 并取实测值, 则必将有更多的数据落在圆弧之内, 直接用于工程将使得构件的可靠度偏低。因此式 (12) 中的指数是否可取 $m = n = 2$ 还有待进一步探讨, 初步分析表明, 它与构件的配筋率等许多因素有关。

六、结语

(1) 采用等效截面, 将双向受弯构件的斜截面受剪承载力计算转化为单向受弯构件计算是可行的, “规范公式法”用于双向受弯构件仍属于斜截面受剪承载力偏小值的计算公式, 符合现行规范受剪计算公式原则。

(2) 根据试验研究分析, 双向受弯构件的斜截面承载力与纵筋配筋率等众多因素有关, 而且各因素之间的影响相互关联。而规范公式的形式未能考虑纵筋配筋率等的影响, 因此, “规范公式法”和“回归公式法”的

(下转第 64 页)

物理模型对湍动能 K 的影响是不一样的。

在模拟上海久事大厦时,采用的是 P III550, 768M 内存配置, 计算时以 10^{-3} 为收敛标准, 用 RNG $K-\varepsilon$ 和雷诺应力模型分别花费 1 小时 57 分和 7 小时 33 分。综合起来看, 在一般机器的配置情况下, 如果仅考虑建筑物表面的平均压力分布, 建议可采用 RNG $K-\varepsilon$ 模型; 如果机器配置较高, 且需要获得较准确的风流场和湍动能分布, 建议可采用雷诺应力模型。目前计算机硬件发展飞快, 若采用 P IV2.4G, 1~2G 内存配置进行计算, 雷诺应力模型所需时间至多 1h 左右, 这样对于模拟平均风环境和建筑物表面平均风压分布就不存在时间问题, 当然若选用大涡模型模拟瞬态风速和瞬态风压时, 则需要大容量的计算机才行。

六、结语

(1) 通过上海久事大厦表面平均风压的数值模拟和风洞试验结果比较可以看出, 两者是一致的, 说明应用数值风洞方法模拟高层建筑结构平均风场在实际中是可行的, 尤其在初步设计阶段, 更显示出它的优越性。

(2) 通过该大厦风环境的预测和干扰分析, 可看出数值模拟方法预测风流场方便、直观。随着城市建设的发展, 对小区风环境的研究与应用需求增加, 例如城市近地步行风等, 数值模拟方法具有重要的实用价值。

(3) 一般地, 除建筑物少数风流动剧烈的部位, 不同湍流物理模型下平均风压的结果相差甚微, 虽然不同湍流物理模型对湍动能 K 的影响较大, 但建筑工程中不直接采用湍动能 K , 建议在初步设计时可选用

RNG $K-\varepsilon$ 等花费机时较少的模型。而在施工图设计时, 建议选用雷诺应力模型计算结果更精确。

上述内容是上海现代设计(集团)有限公司基金项目的一部分, 项目还进行了上海金茂大厦等超高层建筑风工程的数值模拟, 目的是想通过本项目的研究, 逐步实现数值风洞方法在实际工程中的应用。成果显示, 数值风洞方法在确定高层建筑的平均风荷载, 特别是在初步设计阶段的应用是完全可行的, 具有成本低、速度快、效果良好等优点。

参 考 文 献

1. Murakami S. Current status and future trends in computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, (67&68): 3-34.
2. Kim S E, Boysan F. Application of CFD to environmental flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, (81): 145-158.
3. 黄本才. 结构抗风分析原理及应用. 同济大学出版社, 2001.
4. 张 维, 汤广发. 风对建筑绕流流动的数值方法. *空气动力学学报*, 1990, 8(4).
5. Zhu P G etc. Comparison of numerical simulation of wind on tall buildings by the digital wind-tunnel with the test of aerodynamic wind-tunnel. *International Conference on ACFD*, Beijing, 2000.
6. Windtech Wind Engineers PTY LTD. Cladding pressure study for Jiushi mansion Shanghai. Sydney, Australia, 2000.
7. Meroney B N, Leit B M, Rafailidis S. Wind-tunnel numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, (81): 333-345.
8. CFX5 Manual's Guide. AEA Technology PLC, U K, 2001.

(上接第 75 页)

统计结果离散性都较大。要解决这一难题, 还有待于进一步的大量试验研究。

参 考 文 献

1. 混凝土结构设计规范 (GB50010—2002). 中国建筑工业出版社, 2002.
2. 曾庆响. 钢筋混凝土双向受弯构件抗剪强度试验研究. 硕士学位论文. 南昌大学, 1993.
3. 刘德佐. 均布荷载作用下矩形截面无腹筋双向受弯梁抗剪性能的试验研究. 学位论文. 南昌大学, 1996.
4. 熊进刚. 矩形截面无腹筋双向受弯梁抗剪性能的试验研究. 学位论文. 南昌大学, 1995.
5. 张功新. 钢筋混凝土双向受弯构件抗剪强度的试验研究. 学位论文. 南昌大学, 1996.
6. 伍卫秀. 钢筋混凝土双向受弯约束梁抗剪强度的试验研究. 学位论文. 南昌大学, 1998.
7. 曾庆响, 何高勳, 虞锦晖. 钢筋混凝土双向受弯构件抗剪强度计算. *南昌大学学报(工科版)*, 1993, 15(3), (4).
8. 曾庆响, 何高勳, 虞锦晖. 钢筋混凝土双向受弯构件抗剪性能试验研究. *南昌大学学报(工程技术版)*, 1995, 17(3).
9. 曾庆响, 何高勳, 虞锦晖. 混凝土双向受弯构件的抗剪强度. *工程力学(增刊)*, 1996.
10. 曾庆响, 何高勳, 虞锦晖. 钢筋混凝土双向受弯筒支梁抗剪强度

简化计算. *工程力学(增刊)*, 1997.

11. 肖芝兰, 曾庆响. 双向受弯钢筋混凝土筒支梁抗剪性能试验研究. *建筑科学*, 2001, 17(4).
12. 曾庆响, 肖芝兰. 钢筋混凝土双向受弯构件抗剪影响因素分析. *五邑大学学报(自然科学版)*, 2002, 16(4).
13. Cheng-Tzu Thomas Hsu. Reinforced concrete members subject to combined biaxial bending and tension. *ACI*, January-February, 1986: 137-144.
14. Li Yanbo, Liu Zhigang. Researches on bearing capacity of cross-section of reinforced concrete members with L-shaped section subject to combined biaxial bending and tension. *Transaction of Tianjin University*, 2000, 6(1): 36-40.
15. Liu Chao, Chen Yunxia. Experimental and theoretical research on bearing capacity of cross-section of R. C. members with L-shaped cross section subject to combined biaxial bending and compression. *Engineering Mechanics*, 1995: 512-518.
16. Thirugnasuntharan A, et al. Flexural behavior of externally prestressed beams with large eccentricities. *Trans. Jpn. Concr. Inst.*, 1998, 20: 165-170.
17. Soroushian P. Analysis of dowel bars acting against concrete cover. *ACI Journal*, 1986, (4).
18. Belarbi A. Stirrup stress in reinforced concrete beams. *ACI Journal*, 1990, 4.
19. 张开敬. 混凝土筒支梁斜截面抗剪强度统一表达式的研究. *西南交通大学学报*, 2000, 35(1).