

文章编号:1000-582X(2011)04-107-06

框架边节点斜压机构混凝土强度有效因数解析

崔建宇¹,孙建刚¹,宋玉普²,渡边史夫³

(1.大连民族学院 土建系,辽宁 大连 116622;

2.大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024;

3.日本京都大学 土建系,日本 京都 606-8501)

摘要:利用斜压-桁架模型对以往35个剪切破坏型以及6个梁屈服后剪切破坏型钢筋混凝土框架边节点试件抗剪强度进行解析。探讨了混凝土抗压强度、柱轴压比、节点水平箍筋量、节点竖向箍筋量以及斜压机构倾角等参数对斜压机构混凝土强度有效因数 ρ 的影响。研究表明,混凝土强度越高,最大荷载时 ρ 值衰减率越大;普通强度混凝土时节点箍筋对 ρ 值衰减的抑制效果比高强度混凝土时明显;节点箍筋配箍率小于0.3%范围内斜压机构承担总剪力的80%以上。根据对 ρ 值的解析结果提出了针对节点强度的计算式,计算值与试验结果吻合。

关键词:钢筋混凝土框架;边节点;抗剪强度;有效因数;解析

中图分类号:TU528.59

文献标志码:A

Analysis of concrete strength effective factors of diagonal strut mechanism on frame exterior beam-column joints

CUI Jian-yu¹, SUN Jian-gang¹, SONG Yu-pu², WATANABE Fumio³

(1. Department of Civil Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116622, Liaoning, P. R. China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China;

3. Department of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan)

Abstract: This paper uses the strut-truss model to analyze the shear strength of reinforced concrete frame exterior joints through thirty-five shear failure type joints without beam flexural yield and six shear failure joints after beam flexural yield. It discusses the influence of parameters including concrete compressive strength, column axial-compression ratio, amount of joint horizontal or vertical hoop, and angle of strut mechanism etc., on concrete strength effective factor ρ of diagonal strut mechanism. The analysis results show that ρ value deterioration ratio at peak load increases with the increase of concrete strength. The effect of joint hoop on ρ value deterioration is more significant using ordinary strength concrete than the case using high strength concrete. The contribution of strut mechanism to joint shear force is more than 80% when joint shear reinforcement ration is less than 0.3%. The joint strength equation is proposed based on the analysis results of the factor ρ , and the calculated values agree well with the experimental results.

Key words: reinforced concrete frame; exterior joints; shear strength; effective factor; analysis

收稿日期:2010-12-20

基金项目:建设部科研基金资助项目(09-K1-35);国家民委国际交流合作项目(20080308104)

作者简介:崔建宇(1967-),男,副教授,日本京都大学工学博士,主要从事混凝土结构研究。

渡边史夫(联系人),男,教授,博士生导师,(E-mail)watanabe.fumio@takenaka.co.jp。

STRUT-TRUSS 受力模型作为钢筋混凝土梁柱节点理论分析时的受力模型被广泛使用。但由于节点受力复杂,量化分析和综合归纳的难度均较大,国内外在节点抗剪强度计算时往往只能采用试验式。我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)^[1]的节点强度式 11.6.4 就是以混凝土强度、节点箍筋量、节点箍筋屈服强度、柱轴压比及节点约束条件作为影响参数的经验式。但由于试验大多集中在八十到九十年代初期,难以满足高强度材料下的节点强度评估要求。

以国外已经实施的 35 个 J 型框架中间层边节点(梁屈服前节点剪压破坏)以及 6 个 BJ 型边节点(梁屈服后节点剪压破坏)作为解析对象^[2-13],利用 STRUT-TRUSS 受力模型^[14]对斜压机构中混凝土抗压强度有效系数 ρ 及其影响参数间的影响规律进行了分析。提出直接反映斜压机构耐荷能力的节点抗剪强度式,并将计算结果与试验结果进行比较。影响参数包括混凝土抗压强度、柱轴压比、节点水平箍筋配箍率、节点竖向箍筋配箍率、斜压机构倾角。

1 解析模型

1.1 节点抗剪模型

1.1.1 斜压杆机构

如图 1(a)所示,假定柱弯拉筋锚固点 A 到节点内角 B 的连线方向为该受力方向斜压杆机构传力方向。斜压杆 D_1 在 AB 方向承担的外力 V_{j1} 及水平方向能分担的剪力 V_{jh1} 分别为

$$V_{j1} = \alpha_B L_d B_j, \quad (1)$$

$$V_{jh1} = V_{j1} \cos \varphi_1, \quad (2)$$

其中, φ_1 为斜压杆 D_1 与水平方向的夹角; ρ 为混凝土强度有效系数; σ_B 为圆柱体混凝土抗压强度。

1.1.2 桁架机构

图 1(b)、(c)分别表示由节点水平箍筋、柱中间筋或节点竖向箍筋构成的桁架机构 D_2 、 D_3 。桁架机构在 AB 方向所能传递的斜方向外力 V_{j2} 、 V_{j3} 以及水平方向承担的剪力 V_{jh2} 、 V_{jh3} 分别为

$$V_{j2} = F_h / \cos \varphi_1, \quad (3)$$

$$V_{jh2} = F_h, \quad (4)$$

$$V_{j3} = F_v / \sin \varphi_1, \quad (5)$$

$$V_{jh3} = F_v \cot \varphi_1, \quad (6)$$

其中, F_h 、 F_v 分别为节点水平箍筋、柱中间筋的张力。

1.1.3 节点抗剪强度

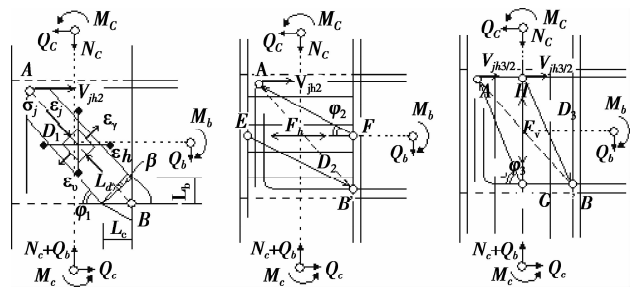
综合以上分析,节点在 AB 方向及水平方向承担的总外力 V_{AB} 、 V_{jh} 分别为

$$V_{AB} = V_{j1} + V_{j2} + V_{j3}, \quad (7)$$

$$V_{jh} = V_{j1} \cos \varphi_1 + F_h + F_v \cot \varphi_1, \quad (8)$$

斜压杆受压区内混凝土平均压应力为

$$\sigma_j = V_j / L_d B_j. \quad (9)$$



(a)斜压杆机构 (b)水平箍筋木行架机构 (c)竖向箍筋木行架机构

图 1 节点抗剪机构

1.2 传力机构分配率

利用 Schafer, K^[15]的抗剪机构分配原则并结合以前的试验结果^[16],设 D_1 、 D_2 、 D_3 耐荷机构的分配率 R_d 、 R_h 、 R_v 分别为

$$R_d = \frac{(1 - r_h)(1 - r_v)}{(1 - r_h r_v)}, \quad (10)$$

$$R_h = \frac{r_h(1 - r_v)}{1 - r_h r_v}, \quad (11)$$

$$R_v = \frac{r_v(1 - r_h)}{1 - r_h r_v}. \quad (12)$$

其中, r_h 、 r_v 为辅助分配系数

$$r_h = \frac{2 \tan \varphi_1 - 1}{3}, \quad (13)$$

$$r_v = \frac{2 \cot \varphi_1 - 1}{3}. \quad (14)$$

则三机构在水平方向承担剪力的关系可表示为

$$V_{j1} \cos \varphi_1 : F_h : F_v \cot \varphi_1 = R_d : R_h : R_v. \quad (15)$$

1.3 斜压机构有效抵抗面积

根据 Paulay^[17]的提案,斜压杆机构有效高度 L_d (见图 1a)由最大荷载时梁柱临界面处混凝土弯压区高度求得

$$L_b = 0.3h_b (\text{J 型节点}), \quad (16)$$

$$L_b = 0.15h_b (\text{BJ 型节点}), \quad (17)$$

$$L_c = \left(0.3 + 0.85 \frac{N_c}{A_g f'_c}\right) h_c. \quad (18)$$

其中, L_b 及 L_c 分别为梁、柱临界面处混凝土弯

压区高度; h_b 及 h_c 分别为梁、柱街面高度; N_c 及 A_g 分别为柱轴力及柱截面面积; f'_c 为混凝土抗压强度。

则斜压杆宽度为

$$L_d = \cos\beta_1 \sqrt{L_c^2 + L_b^2} \approx \sqrt{L_c^2 + L_b^2} \quad (19)$$

则斜压机构有效面积为

$$A_{sr} = L_d B_j, \quad (20)$$

$$B_j = (B_c + B_b)/2. \quad (21)$$

其中, B_j 为节点有效宽度,是梁、柱截面宽度的平均值。

1.4 节点箍筋有效面积

试验结果证明^[3-5,8],靠近节点中央位置的箍筋约束效果比节点边缘的箍筋有效。采用 Hwang^[2]的提案,节点核心区 AB 对角线范围在垂直及水平方向的中央一半范围内节点箍筋有效面积(包括柱中间筋)分别为各自对应箍筋的总面积,剩下范围的箍筋有效面积为对应箍筋总面积的 50%。

1.5 节点核心区应变协调条件

由式(15)求出 F_h 、 F_v 后,水平及垂直两方向节点平均应变

$$F_h = A_{th} E_{s1} \epsilon_h \leq F_{yh}, \quad (22)$$

$$F_v = A_{tv} E_{s2} \epsilon_v \leq F_{yv}. \quad (23)$$

式中, A_{th} 、 A_{tv} 为节点在水平及垂直方向箍筋有效面积。如图 2 所示,在节点核心区 AB 方向及其正交方向混凝土应变 ϵ_j 、 ϵ_r 与水平及垂直方向节点平均应变 ϵ_h 、 ϵ_v 之间的关系

$$\epsilon_r = \epsilon_h + (\epsilon_h - \epsilon_j) \cot^2 \varphi_1, \quad (24)$$

或者 $\epsilon_r = \epsilon_v + (\epsilon_v - \epsilon_j) \tan^2 \varphi_1. \quad (25)$

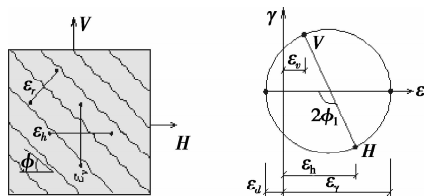


图 2 节点应变摩尔圆

1.6 约束混凝土应力-应变关系

约束混凝土应力-应变关系设定如下

$$\sigma_j = \rho' \sigma_B \left[2 \left(\frac{\epsilon_j}{\rho \epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_j}{\rho \epsilon_0} \right)^2 \right], \quad (26)$$

$$\epsilon_0 = -0.002 - 0.001 \left(\frac{\sigma_B - 20}{80} \right). \quad (27)$$

如图 3 所示, σ_j 、 ϵ_j 分别为约束混凝土压应力、

压应变; σ_B 、 ϵ_0 分别为圆柱体混凝土抗压强度及对应的应变。

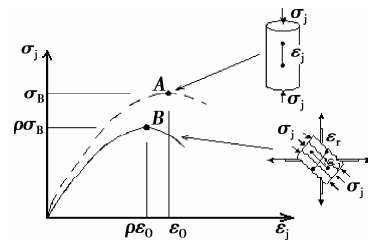


图 3 约束混凝土应力-应变曲线

1.7 混凝土抗压强度有效系数

约束混凝土有效抗压强度取决于与其正交方向混凝土拉应变 ϵ_r (图 3 所示),随着 ϵ_r 的增大混凝土有效抗压强度呈降低趋势。采用 Pang, X. B. D^[18]的混凝土抗压强度有效系数提案

$$\rho = \frac{5.8}{\sqrt{\sigma_B}} \frac{1}{\sqrt{1 + 400\epsilon_r}} \leq \frac{0.9}{\sqrt{1 + 400\epsilon_r}}. \quad (28)$$

1.8 解析程序

关于节点抗剪强度的主要解析流程如下:

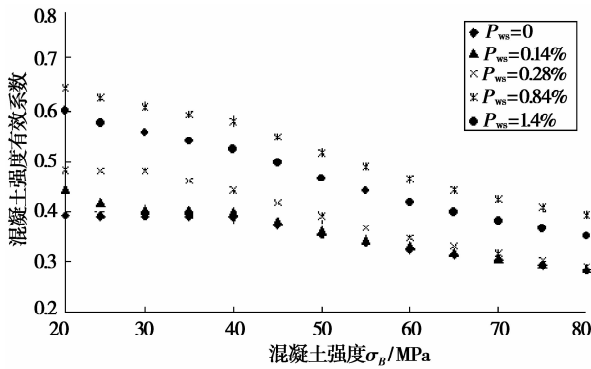
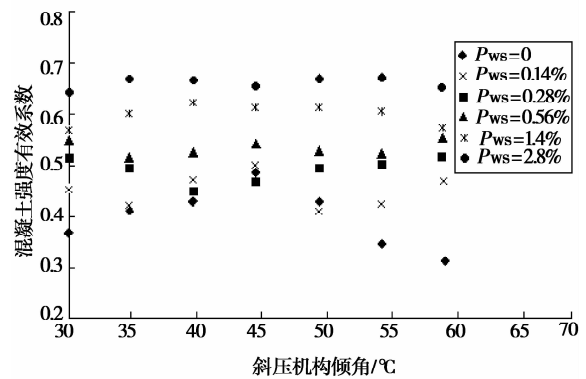
- 1) 给与基本解析参数 φ_1 、 σ_B 、 L_c 、 L_b 、 A_{jh} 、 A_{jv1} 、 A_{jv2} 各种钢筋弹性模量及屈服应变、节点核心区几何尺寸;
- 2) 给与节点核心区水平方向剪力增量 ΔV_{jh} ;
- 3) 求三耐荷机构分配率;
- 4) 求 σ_j ;
- 5) 求混凝土强度有效系数 ρ' , 其中, $\rho' = \frac{\sigma_j}{\sigma_B}$;
- 6) 求 ϵ_j 及 ϵ_0 ;
- 7) 判断节点抗剪箍筋是否屈服, 求 ϵ_h 及 ϵ_v ;
- 8) 求与 AB 方向正交方向的混凝土应变 ϵ_r ;
- 9) 求混凝土强度有效系数 ρ ;
- 10) 如果 ρ 与 ρ' 相等则继续进行下一步, 如果 ρ 与 ρ' 不等则返回(2);
- 11) 如果 σ_j 大于 $\rho\sigma_B$ 则继续下一步, 如果 σ_j 小于 $\rho\sigma_B$ 则返回(2);
- 12) 求 V_{jh} ;
- 13) 解析结束。

2 节点强度式

2.1 混凝土强度 σ_B 对 ρ 值的影响

混凝土强度对 ρ 值的影响规律见图 4。总体上随混凝土强度提高 ρ 值逐渐降低。提高节点箍筋配箍率对 20~40 MPa 普通强度混凝土的 ρ 效果相对明显。混凝土强度 40~80 MPa 范围的 ρ - σ_B 关系式如下

$$\rho = 0.39 + 0.003(40 - \sigma_B). \quad (29)$$

图4 混凝土强度 σ_B 对 ρ 值的影响图6 斜压机构倾角 φ 对 ρ 值的影响

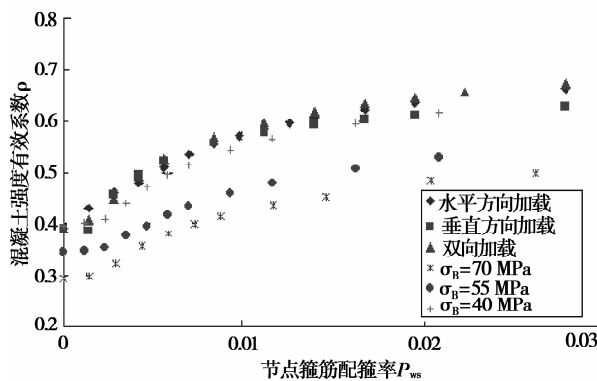
2.2 节点箍筋配箍率 P_{ws} 对 ρ 值的影响

节点箍筋配箍率对 ρ 值的影响规律见图5。总体趋势,随着节点箍筋配箍率 P_{ws} 的提高 ρ 值上升,配箍率超过 1.0% 以后 ρ 值上升率变小。高强度混凝土时 ρ 值上升率小于低强度混凝土。 ρ - P_{ws} 关系式如下

$$\rho = 0.39 + 1.2P_{ws}^{0.4} (\sigma_B: 20 \sim 40 \text{ MPa}), \quad (30)$$

$$\rho = 0.39 + 1.5P_{ws}^{0.5} (\sigma_B: 40 \sim 50 \text{ MPa}), \quad (31)$$

$$\rho = 0.39 + 5.5P_{ws}^{0.9} (\sigma_B: 50 \sim 80 \text{ MPa}). \quad (32)$$

图5 节点箍筋配箍率 P_{ws} 对 ρ 值的影响

2.3 斜压机构倾角 φ 对 ρ 值的影响

斜压机构倾角 φ 对 ρ 值的影响规律见图6。节点箍筋配箍率越低, ρ 值的波动就越大,倾角 45° 时, ρ 值最大。配筋率 2.8% 时对 ρ 值影响很小。只考虑配箍率不大于 0.2% 时倾角的影响,具体公式如下

$$\rho = 0.43 + 0.01(45 - \varphi)(\varphi \geq 45), \quad (33)$$

$$\rho = 0.49 + 0.01(\varphi - 45)(\varphi < 45). \quad (34)$$

2.4 节点抗剪强度式

以普通强度混凝土、节点箍筋配箍率 0.2% 以

上为例, ρ 值最终表达式如下

$$\rho = 0.39 + 0.003(40 - \sigma_B) + 1.2P_{ws}^{0.4}. \quad (35)$$

则节点抗剪强度式如下

$$V_{jh} = \rho \sigma_B A_{sr} \cos \varphi. \quad (36)$$

其中, V_{jh} 为节点水平方向抗剪强度; $\rho \sigma_B$ 为节点混凝土有效抗压强度; A_{sr} 为图 1(a) 斜压机构有效抗压面积,由 1.2 节的式(20)求得。

使用以上节点强度式对 35 个 J 型节点以及 6 个 BJ 型节点的计算值与试验值的比较见表 1。试验值与试验值之比的平均值为 0.95、均方差为 0.132,计算结果与试验结果基本吻合。表中解析参数范围:混凝土抗压强度 19~76 MPa、柱轴压比 -0.2~0.6、节点水平配箍率 0~0.97%、节点竖向配箍率 0~1.6%、斜压杆抗剪机构角度 $30^\circ \sim 60^\circ$ [3-14]。

3 结论

根据上述解析结果可得出结论:

- 1) 随着混凝土强度的提高,增加节点箍筋配箍率对提高混凝土强度有效系数的效果逐渐减小;
- 2) 节点配箍率不大于 1.2% 时,增加节点箍筋配箍率对提高混凝土强度有效系数效果明显;
- 3) 混凝土抗压强度越高,最大荷载时混凝土强度有效系数越低;
- 4) 节点配箍率小于 0.3% 且没有竖向节点箍筋及柱中间筋时,节点剪力的 80% 以上由斜压杆机构承担;
- 5) 基于 STRUT-TRUSS 受力模型、以斜压机构中混凝土强度有效系数为主要参数提出的节点抗剪强度式对计算中间层边节点抗剪强度有效。

表1 计算参数及计算值与试验值比较一览表

编号	破坏类型	混凝土抗压强度	斜压机构抗压面积	斜压机构倾角	斜压机构宽度	斜压机构水平方向长度	斜压机构垂直方向长度	节点箍筋配箍率	ρ	V_{jh}/kN		计算值/试验值
		σ_B/MPa	A_{sjr}/mm^2	$\Phi/(^\circ)$	B_j/mm	h_b/mm	h_c/mm	$P_{ws}/\%$		计算值	试验值	
A-O③	J	27.5	22 780	50	190	187	160	0.36	0.460	20 7845	229 820	0.90
A-O-P⑧	J	27.5	22 780	50	190	187	160	0.36	0.553	207 845	220 463	0.94
B1④	J	30.6	20 611	50	190	200	167	0.3	0.579	241 110	256 396	0.94
B2④	B.J	30.6	16 508	50	190	200	167	0.3	0.595	193 113	222 709	0.87
B3④	J	30.6	25 187	50	190	200	167	0.3	0.564	294 646	284 468	1.04
B4④	J	30.6	25 187	50	190	200	167	0.45	0.567	294 646	299 440	0.98
1B⑤	J	33.6	49 905	63.6	280	380	188	0.56	0.536	437 961	464 576	0.94
2B⑥	J	35	47 754	61.1	280	340	188	0.62	0.541	474 415	485 072	0.98
3B⑤	J	41	49 961	63.6	280	380	188	0.87	0.530	532 273	567 056	0.94
4B⑤	BJ	44.6	34 518	61.1	280	340	188	0.98	0.528	426 702	467 056	0.91
5B⑤	J	24.4	63 923	57.7	320	380	240	0.49	0.575	502 594	519 680	0.97
6B⑤	BJ	39.8	45 067	57.7	320	380	240	0.49	0.540	536 362	568 160	0.94
NRC8⑥	J	70.3	17 734	46.1	190	186	179	0.32	0.295	322 975	363 055	0.89
NRC9⑥	J	75.9	17 734	46.1	190	186	179	0.24	0.259	333 016	358 239	0.93
NRC10⑥	J	75.2	17 734	46.1	190	186	179	0.21	0.253	331 887	358 980	0.92
NRCJ5⑦	J	59.2	24 536	47.2	225	200	185	0.75	0.423	482 175	578 813	0.83
NRCJ6⑦	J	32.8	24 536	47.2	225	200	185	0.75	0.548	298 662	282 725	1.06
NRCJ7⑦	J	58.8	29 591	58.3	225	300	185	0.78	0.413	447 962	544 793	0.82
NRCJ8⑦	J	54.8	24 550	46.5	225	200	190	0.17	0.411	463 138	445 534	1.04
U40L⑧	J	24.8	40 668	58.3	280	320	198	0	0.393	214 923	251 530	0.85
R41L⑧	J	27.2	40 668	58.3	280	320	198	0.28	0.611	238 671	290 472	0.82
NO.4⑨	J	33.6	30 562	59	215	300	180	0.26	0.589	265 477	302 505	0.88
POC-1⑩	B.J	23.4	21 205	49.6	215	200	170	0.26	0.478	161 369	134 479	1.20
POC-2⑩	BJ	23.4	21 205	49.6	215	200	170	0.26	0.478	161 369	134 479	1.20
POC-3⑩	J	23.4	26 349	49.6	215	200	170	0.26	0.463	200 515	223 020	0.90
POC-4⑩	J	23.4	26 349	49.6	215	200	170	0	0.455	162 654	215 086	0.76
HOC-1⑩	J	23.4	26 349	49.6	215	200	170	0.26	0.463	200 515	215 086	0.93
HOC-2⑩	J	23.4	26 349	49.6	215	200	170	0.26	0.463	200 515	207 153	0.97
HOC-3⑩	J	23.4	26 349	49.6	215	200	170	0.26	0.463	200 515	215 086	0.93
HOC-4⑩	J	23.4	26 349	49.6	215	200	170	0	0.455	162 654	196 134	0.83
卜-P18⑪	J	25.6	59 397	48.8	350	320	280	0.13	0.592	593 700	600 320	0.99
卜-P22⑪	J	25.6	59 397	41.6	350	320	360	0.13	0.601	538 477	671 400	0.80
NO.6⑫	J	42	67 734	55.1	375	380	265	0.20	0.551	930 389	928 125	1.00
NO.8⑫	J	42	67 734	52.6	375	380	290	0.20	0.556	973 323	933 563	1.04
NO.9⑫	J	42	67 734	58.8	375	380	230	0.20	0.542	862 786	821 831	1.05
NO.10⑫	J	60	67 734	55.1	375	380	265	0.20	0.458	1 070 116	898 875	1.19
NO.11⑫	J	42	67 734	55.1	375	380	265	0.20	0.551	930 389	911 250	1.02
BUC⑬	J	19	51 272	61.1	280	335	185	0.34	0.559	278 580	247 590	1.13
BUT⑬	J	19	34 986	61.1	280	335	185	0.34	0.566	190 092	241 920	0.79
J-10⑭	BJ	57.4	66 668	54.5	350	350	250	0.41	0.496	1 159 809	1 244 373	0.93
NO.3⑮	J	21	73 424	53.7	375	340	250	0.22	0.586	545 876	572 758	0.95

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家标准. 混凝土结构设计规范 GB 50010-2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 崔建宇, 孙建刚, 宋玉普. 钢筋混凝土框架角节点抗剪强度试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(5): 34-40.
- [3] 藤井栄, 森田司郎. 鉄筋コンクリート外部柱・梁接合部のせん断抵抗機構[J]. 日本建築学会構造系論文報告集, 1989, 398: 61-71.
- [4] EHSANI M R, WIGHT J K. Effect of transverse beams and slab on behavior of reinforced concrete beam-to-column connections[J]. ACI Structural Journal, 1985, 82(2): 188-195.
- [5] 服部覚志, 角徹三, 松野一成. 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱梁外部接合部のせん断抵抗性状 その3 柱軸力と帯筋を実験変数とした実験概要と結果[J]. 日本建築学会学術講演梗概集, 1992, 3(8): 201-202.
- [6] 牧部一成, 城攻, 三浦厚. 高強度材料を用いたRC外部柱梁接合部のせん断抵抗性状その1 実験計画、耐力[J]. 日本建築学会学術講演梗概集, 1991, 3(2): 641-642.
- [7] 沢田洋平, 城攻, 牧部一成. 高強度材料を用いたRC外部柱梁接合部のせん断抵抗性状について その1 実験概要、破壊性状、耐力[J]. 日本建築学会学術講演梗概集, 1992, 8(3): 197-198.
- [8] 小倉弘一郎, 関根正孝. 鉄筋コンクリート外部柱・梁接合部に関する実験的研究[J]. 日本建築学会学術講演梗概集, 1998, 10(2): 1881-1882.
- [9] 新藤健太, 倉本洋. 梁主筋にプレート付ナット定着筋を用いた隅柱-梁接合部の三軸変動加力実験[J]. コンクリート工学年次論文報告集, 2000, 22(3): 709-714.
- [10] 田畑卓, 西原寛. RC造ト. T. L形柱梁接合部のせん断及び定着性状[J]. コンクリート工学年次論文報告集, 2006, 23(3): 373-378.
- [11] 川勝康志郎. 梁主筋を機械式定着した外部柱・梁接合部のせん断性状[J]. コンクリート工学年次論文報告集, 2000, 22(3): 703-707.
- [12] 藤原幹弘, 西村泰士, 南宏一. 2方向地震力を受ける立体柱梁接合部の弾塑性性状[J]. コンクリート工学年次論文報告集, 2004, 10(3): 525-530.
- [13] 塩屋俊幸, 中澤春生, 長澤保紀, 等. Tヘッドバーノ開発[J]. コンクリート工学年次論文報告集, 2000, 22(3): 1291-1296.
- [14] HWANG S J, LEE H J. Analytical model for predicting shear strengths of exterior reinforced concrete beam-column joints for seismic resistance[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(5): 846-857.
- [15] SCHAFFER K. Strut-and-Tie models for design of structural concrete [R]. Tainan: Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University, 1996, 2: 140.
- [16] 崔建宇. 鉄筋コンクリート柱・梁接合部の耐震性能に関する研究[D]. 日本: 日本京都大学, 2003.
- [17] PAULAY T, PRIESTLEY M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings [M]. United States: John Wiley and Sons, 1992.
- [18] PANG X B, HSU T T C. Fixed angle softened truss model for reinforced concrete [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(2): 197-207.

(编辑 陈移峰)