

# 钢筋混凝土框架顶层 T 型中节点抗剪强度计算模型

崔建宇<sup>1</sup>, 车 轶<sup>2</sup>, 孙建刚<sup>1</sup>, 宋玉普<sup>2</sup>, 渡边史夫<sup>3</sup>

(1. 大连民族学院 土木工程系, 大连 116622; 2. 大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室, 大连 116024;  
3. 日本京都大学 土木工程系, 日本 京都 606-8501)

**摘 要:** 通过 4 个框架顶层 T 型中节点在低周反复循环荷载作用下的试验, 调查了节点裂缝分布特征、抗剪强度、变形性能等抗震性能指标. 结果表明: 由于梁纵筋在节点内的黏结劣化以及节点箍筋约束效果的下降, T 型节点抗剪强度与形状相同的框架中间层 T 型边节点相比平均降低 15% 以上. 本研究对 Hwang 的 STURT-TRUSS 计算模型中的斜压杆机构高度、节点箍筋有效面积等关键解析参数进行了整合, 建立了适合于 T 型节点抗剪强度的计算模型. 计算结果与试验结果吻合.

**关键词:** 钢筋混凝土框架; T 型节点; 抗剪强度; 计算模型

**中图分类号:** TU 528.59

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2011)07-0986-07

1995 年日本兵库县神戸市的里氏 7.5 级强震和 2005 年日本福冈市的里氏 6.8 级地震的震害调查表明: 遵循抗震规范<sup>[1-2]</sup>的钢筋混凝土框架梁柱节点范围内, 框架中间层 T 型边节点损伤程度普遍较轻, 由于形状相同、配筋方法类似而采用相同设计手法的顶层 T 型中节点的剪切破坏现象普遍严重<sup>[3-4]</sup>. 基于此, 日本针对该部位节点抗震性能的理论试验研究得到了重视<sup>[5-8]</sup>.

我国针对钢筋混凝土框架顶层中节点抗震性能的试验研究主要以梁或柱构件屈服后的节点剪切破坏为主<sup>[9-10]</sup>. 采用非线性有限元方法对节点抗剪强度进行了解析, 但更直观、更简明地反映节点传力机理及破坏特征, 适合于结构设计的计算模型还有待于开发<sup>[11]</sup>. 另外, T 型节点抗剪强度小于 T 型节点的试验研究结果<sup>[7-8]</sup>在理论的高度还没有真正的解释清楚. 我国混凝土规范<sup>[12]</sup>节点设计中, 也没有对 T 型节点进行说明.

为了更准确地把握 T 型节点抗剪强度, 研究采用“强梁柱构件弱节点”法使用 4 个 T 型节点试件进行试验. 在 Hwang<sup>[13]</sup> STURT-TRUSS 解析模型的基础之上, 利用试验结果对其中斜压杆高度, 节点箍筋有效面积等关键参数进行整合, 建立适用于 T 型节点的抗剪强度计算模型. 并将解析结果与试验结果进行对比.

## 1 试验概况

采用“强梁柱构件弱节点”设计方针. 缩尺比例为 1/3、1/2 的试件各 2 个. 试验参数为节点箍筋配置方式、柱筋在节点内的锚固方式. 试件参数及材料力学性能如表 1. 节点配筋如图 1 所示. 构件纵筋使用

表 1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimens

试件	柱	梁	柱筋锚固	纵筋		箍筋	节点箍筋	柱筋锚固
				柱	梁			
T-P1	220 × 220	180 × 250	锚板焊接	T-U1 10 Φ 13	4 Φ 13	Φ 6@100	3set Φ 6	U 形弯曲
T-P2	300 × 300	200 × 300	锚板焊接	T-U2 12 Φ 13	4 Φ 13	Φ 6@80	4set Φ 6	180 度弯曲

注: T-P2 垂直方向节点箍筋为 5set Φ 6; 梁筋均为通长筋.

收稿日期: 2009-04-15.

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

作者简介: 崔建宇(1967—), 男, 辽宁大连人, 副教授.

日本住友电工提供直径 13 mm、屈服强度 539 MPa 的高强度螺纹钢筋. 试验期间混凝土平均抗压强度分别为 32.7 MPa (T-P1、T-U1) 和 27.2 MPa (T-P2、T-U2) .

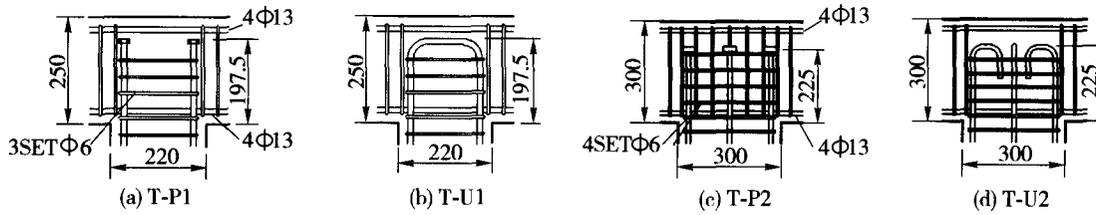


图 1 基本试件尺寸及配筋

Fig. 1 Dimensions of specimens and arrangement reinforcement

柱两侧各使用一组油压千斤顶及荷载测量仪连接梁柱端部加载点, 并施加一对大小相同、方向相反的低周反复交变荷载. 通过安装在节点四周及梁柱端部的变位计测量各部分变形.

## 2 试验结果分析

### 2.1 节点裂缝分布特征

最终节点裂缝分布特征如图 2 所示. 柱筋端部采用锚板锚固试件, 从锚板锚固点开始的交叉对角裂缝开裂集中, 其外侧三角形部分混凝土被挤出现象严重. 柱筋 U 形锚固或 180°弯曲锚固试件, 沿柱筋锚固弯起钢筋外侧的水平裂缝显著, 其外侧混凝土逐渐脱离本体.

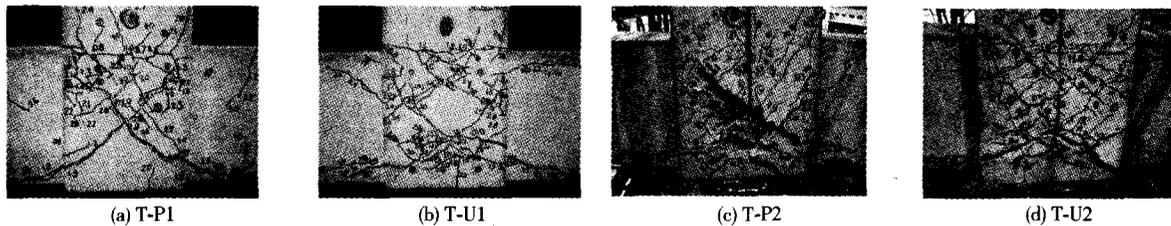


图 2 最终节点裂缝分布特征

Fig. 2 Final crack patterns of joints

### 2.2 节点抗剪强度

所有试件为梁柱构件屈服前的节点剪切破坏. 以垂直方向节点抗剪强度为例, 试验结果与计算结果的见表 2. 其中,  $Q_{cmax}$  为柱端最大剪力;  $Q_{jv,exp}$ 、 $Q_{jv,cal}$  分别为节点核心区垂直方向最大剪力试验值及遵循日本延性抗震规范的计算值<sup>[2]</sup>. 与以往 T 型节点抗剪强度试验结果<sup>[15]</sup> 比较发现, 按普通方法配筋的 T 型节点抗剪强度 (除 T-P2) 只有同样型的 T 型节点抗剪强度的 85% 左右.

表 2 节点抗剪强度试验结果

Table 2 Test results of joint shear strength

试件	柱端最大剪力/kN		节点抗剪强度/kN		试件	柱端最大剪力		节点抗剪强度	
	$Q_{cmax}$	$Q_{jv,exp}$	$Q_{jv,cal}$	$Q_{jv,exp}/Q_{jv,cal}$		$Q_{cmax}/kN$	$Q_{jv,exp}/kN$	$Q_{jv,cal}/kN$	$Q_{jv,exp}/Q_{jv,cal}$
T-P1	42.7	184	218	0.84	T-P2	78.1	309	293	1.05
T-U1	48.6	207	218	0.95	T-U2	63.3	270	293	0.92

### 2.3 节点周围力的分布特征

如图2所示,沿柱筋锚固点外侧混凝土集中开裂现象严重.随着反复荷载加载次数的增加,由此引起的梁上层筋在节点范围的黏结裂化逐渐升级.梁弯压筋逐渐转变为受拉侧,梁筋出现往复抽动的“拉风匣”现象,使节点两侧梁相对于节点的转动加剧.受其影响,最大荷载时梁临界面处混凝土受压合力作用位置十分靠近梁的受压侧边缘(图3示意的T-P1为例).

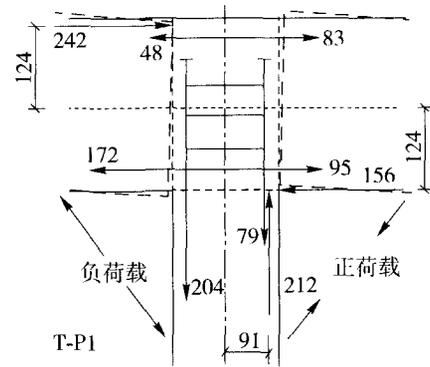


图3 节点周围力的分布 (力:kN,位移:mm)  
Fig.3 Forces around the joint

## 3 抗剪强度计算模型

### 3.1 节点抗剪模型

#### 3.1.1 斜压杆机构

如图4(a)所示,本研究假定柱弯拉筋锚固点A到右下角钢筋交叉点B的连线方向为斜压杆方向.斜压杆 $D_1$ 在AB方向的强度 $V_{j1}$ 及垂直方向的强度 $V_{jv1}$ 分别为

$$V_{j1} = \rho \sigma_B L_d B_j \tag{1}$$

$$V_{jv1} = V_{j1} \cos \phi_1 \tag{2}$$

其中, $\phi_1$ 为斜压杆机构 $D_1$ 与垂直方向的夹角; $\rho$ 为混凝土强度有效系数; $\sigma_B$ 为圆柱体混凝土抗压强度.

#### 3.1.2 桁架机构

图4(b)、4(c)表示由柱中间筋或节点竖向箍筋、节点水平箍筋构成的桁架机构 $D_2$ 、 $D_3$ .桁架机构在AB方向的强度 $V_{j2}$ 、 $V_{j3}$ 以及垂直方向的强度 $V_{jv2}$ 、 $V_{jv3}$ 分别为

$$V_{j2} = F_v / \cos \phi_2 \tag{3}$$

$$F_v = V_{jv2} = F_{v1} + F_{v2} \tag{4}$$

$$V_{j3} = F_h / \sin \phi_3 \tag{5}$$

$$V_{jv3} = F_h \cot \phi_3 \tag{6}$$

其中, $F_{v1}$ 、 $F_{v2}$ 、 $F_h$ 分别为柱中间筋、节点竖向箍筋、节点水平箍筋的张力.

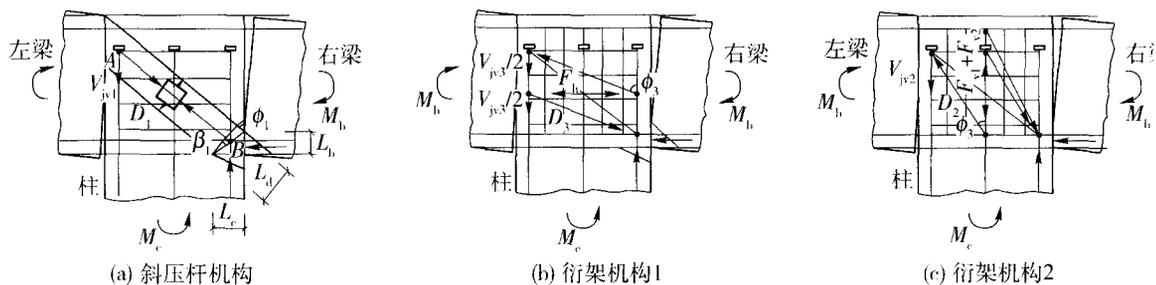


图4 节点抗剪机构

Fig.4 Shear force-resisting mechanisms of joints

#### 3.1.3 节点抗剪强度

AB方向及垂直方向的节点总强度 $V_{AB}$ 、 $V_{jv}$ 分别为

$$V_{AB} = V_{j1} + V_{j2} + V_{j3} \tag{7}$$

$$V_{jv} = V_{j1} \cos \phi_1 + F_v + F_h \cot \phi_3 \tag{8}$$

斜压杆高度范围内的混凝土平均压应力

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

### 3.2 各耐荷机构分配率

利用 Schafer<sup>[14]</sup>的抗剪机构分配原则并结合试验结果,设  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  三耐荷机构的分配率  $R_d$ 、 $R_v$ 、 $R_h$  分别为

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

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

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

其中  $r_v$ 、 $r_h$  为辅助分配系数

$$r_v = \frac{2 \tan \phi_1 - 1}{3} \quad (13)$$

$$r_h = \frac{2 \cot \phi_1 - 1}{3} \quad (14)$$

各机构在垂直方向的强度关系可表示为

$$V_j \cos \phi_1 : F_v : F_h \cot \phi_1 = R_d : R_v : R_h \quad (15)$$

### 3.3 斜压杆有效抵抗面积

为了评估斜压杆有效高度  $L_d$ ,最大荷载时梁柱临界面处混凝土受压区宽度参考 Paulay<sup>[15]</sup>的提案

$$L'_c = (0.25 + 0.85N/A_c \sigma_B) D \quad (16)$$

根据试验结果,本研究针对梁、柱构件受压区宽度提案式分别为

$$L_b = 0.2H \quad (17)$$

$$L_c = 0.3D \quad (18)$$

则斜压杆宽度为

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

斜压杆有效面积表示为

$$A_d = L_d B_j \quad (20)$$

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

### 3.4 节点核心区箍筋有效面积

试验结果证明,靠近节点中央位置的箍筋约束效果比节点边缘的有效.本研究提案,节点核心区(AB 对角线范围)在垂直及水平方向的节点箍筋有效面积(包括柱中间筋)分别为各自方向箍筋总面积的 80%,剩下范围的箍筋有效面积为箍筋总面积的 30%.

### 3.5 节点核心区应变协调条件

由式(15)求出  $F_v$ 、 $F_h$  后,垂直及水平两方向节点平均应变

$$F_v = A_v E_{s1} \varepsilon_v \leq F_{yv} \quad (22)$$

$$F_h = A_{th} E_s \varepsilon_h \leq F_{yh} \tag{23}$$

其中,  $A_{iv}$ 、 $A_{th}$  为节点在垂直及水平方向箍筋有效面积. 如图 5 所示, 在节点核心区 AB 方向及其垂直方向混凝土应变  $\varepsilon_j$ 、 $\varepsilon_r$  与垂直及水平方向节点平均应变  $\varepsilon_v$ 、 $\varepsilon_h$  之间的关系

$$\varepsilon_r = \varepsilon_h + (\varepsilon_h - \varepsilon_j) \cot^2 \phi_1 \tag{24}$$

或者

$$\varepsilon_r = \varepsilon_v + (\varepsilon_v - \varepsilon_j) \tan^2 \phi_1 \tag{25}$$

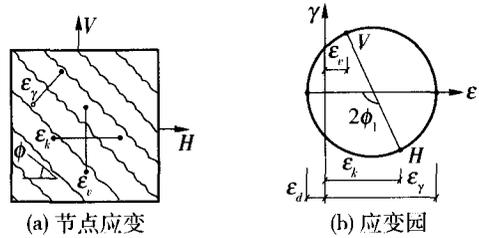


图 5 节点应变摩尔圆

Fig. 5 Mohir' strain circle of the joint

### 3.6 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

$$\sigma_j = \rho' \sigma_B \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon_j}{\rho' \varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon_j}{\rho' \varepsilon_0} \right)^2 \right] \tag{26}$$

$$\varepsilon_0 = -0.002 - 0.001 \left( \frac{\sigma_B - 20}{80} \right) \tag{27}$$

如图 6 所示,  $\sigma_j$ 、 $\varepsilon_j$  分别为约束混凝土压应力、压应变;  $\sigma_B$ 、 $\varepsilon_0$  分别为圆柱体混凝土抗压强度及对应的应变.

### 3.7 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图 6 的  $\varepsilon_j$ , 随着  $\varepsilon_j$  的增大混凝土有效抗压强度呈降低趋势. 本研究采用 Pang 等<sup>[17]</sup> 的试验式评价抗压强度有效系数

$$\rho = \frac{5.8}{\sqrt{\sigma_B}} \frac{1}{\sqrt{1 + 400 \varepsilon_r}} \leq \frac{0.9}{\sqrt{1 + 400 \varepsilon_r}} \tag{28}$$

包括本研究在内收集到的 6 个纯剪切破坏节点试件(构件没有屈服)的解析输入参数见表 3. 解析结果与试验结果的比较见表 4. 表 3 中的 yogus1、yogus2 分别表示节点水平箍筋、竖向箍筋或柱中间筋的弹性模量. 试验值与解析值之比的平均值为 1.033, 均方差为 0.13, 解析精度较高.

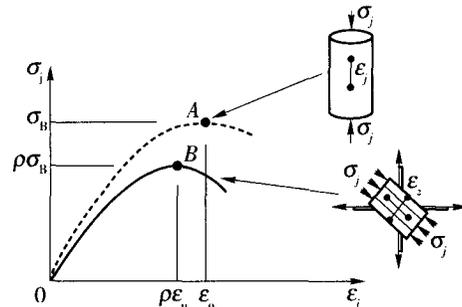


图 6 约束混凝土应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of confined concrete

表 3 节点抗剪强度解析参数

Table 3 Analysis parameters for joint shear strength

试件 编号	$\sigma_B /$ MPa	$f_{yh} /$ MPa	$f_{yv} /$ MPa	$h_b /$ mm	$h_c /$ mm	$\phi$	$L_b /$ mm	$L_c /$ mm	$H_j /$ mm	$B_j /$ mm	$A_{str} /$ mm <sup>2</sup>	$A_{th} /$ mm <sup>2</sup>	$A_{iv} /$ mm <sup>2</sup>	$E_1 /$ MPa	$E_2 /$ MPa
T-P1	32.7	283	0	168	160	44	50	66	83	190	15 732	113	0	172 000	0
T-U2	32.7	283	0	168	160	44	50	66	83	190	15 732	113	0	172 000	0
T-P2	22.9	258	473	195	240	51	60	90	108	250	27 042	376	170	167 000	213 000
T-U2	22.9	258	473	195	240	51	60	90	108	250	27 042	253	170	167 000	213 000
T-P17 <sup>[16]</sup>	25.6	357	735	268	320	44	80	120	144	350	50 478	191	1 146	189 000	197 000
T-P22 <sup>[16]</sup>	25.6	357	735	268	320	42	80	120	144	350	50 478	191	1 146	189 000	197 000

表4 解析结果与试验结果比较  
Table 4 Comparison of analysis results with test results

试件 编号	破坏 类型	$V_{j1}/$ kN	$V_{j2}/$ kN	$V_{j3}/$ kN	$V_{jv}/$ kN	$V_{jv1}/$ $V_{jv}$	$V_{jv2}/$ $V_{jv}$	$V_{jv3}/$ $V_{jv}$	$\rho$	$V_{jv}$	
										解析值	试验值
T-P1	J	172	34	0	205	0.839	0.166	0	0.52	205	184
T-U2	J	172	34	0	205	0.839	0.166	0	0.52	205	207
T-P2	J	123	32	118	274	0.449	0.117	0.431	0.694	275	309
T-U2	J	115	30	110	255	0.451	0.118	0.431	0.553	255	270
T-P17 <sup>[16]</sup>	J	382	71	171	623	0.613	0.114	0.274	0.612	623	559
T-P22 <sup>[16]</sup>	J	417	77	145	639	0.653	0.121	0.227	0.606	639	772

垂直方向节点箍筋及柱中间筋不存在且节点配箍率较低(0.3%)时,节点剪力的80%以上由斜压杆机构承担;增加节点水平箍筋配箍率对提高混凝土强度有效系数作用不大;随着混凝土强度的提高,最大荷载时混凝土强度有效系数呈降低趋势。

## 4 结论

- 1) 梁上层筋黏结裂化严重使两侧梁相对节点转动加剧,从而使斜压杆抗剪机构的有效高度变窄;
- 2) 只增加节点水平箍筋量(没有配置节点垂直箍筋或柱中间筋)对提高节点强度作用不大;
- 3) T型节点的抗剪强度小于卜型节点的抗剪强度,在设计中应加以区别;
- 4) 通过对 STURT-TRUSS 模型中斜压杆高度、节点箍筋有效面积等重要参数的整合,建立了针对 T 型节点抗剪强度的计算模型,计算结果与试验结果吻合。

## 参考文献:

- [1] 日本建筑学会. 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型設計指針・同解説[S]. 东京:丸善株式会社,1990.
- [2] 日本建筑学会. 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説[S]. 东京:丸善株式会社,1999.
- [3] 日本建築センター. 阪神・淡路大震災における建築物の被害状況調査を踏まえた建築物耐震基準・設計の解説[M]. 东京:丸善株式会社,1995:165-234.
- [4] 日本国土技術政策総合研究所建築研究部. 福岡県西方沖地震 現地被害調査報告[M]. 东京:丸善株式会社,2005:72-86.
- [5] 塩屋俊幸,中澤春生,長澤保紀,高岸正章,前之園司. 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.
- [6] 青田晃治,渡邊朋之,成瀬忠,森本敏幸. 最上階柱梁接合部におけるプレート定着工法に関する研究[J]. コンクリート工学年次論文報告集,2005,23(3):391-396.
- [7] 田畑卓,西原寛. RC造卜.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.
- [8] 竹内博幸,中村一彦,早川邦夫. 円形定着板により機械式定着された卜形接合部に関する実験的研究[J]. コンクリート工学年次論文報告集,2008,19(2):1067-1073.
- [9] 吴庆云. 钢筋混凝土框架顶层中节点抗震性能试验研究[D]. 重庆:重庆建筑大学土木工程学院,1991.  
WU Qing-yun. Experimental study on earthquake resistant performance of the interior top-of-column joints of R. C frame[D]. Chongqing: College of Architecture and Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 1991. (in Chinese)
- [10] 黄文彬. 钢筋混凝土框架中塑性铰位于柱端的顶层中节点的抗震性能试验研究[D]. 重庆:重庆建筑大学土木工程学院,1994.  
HUANG Wen-bin. Experimental study on earthquake resistant performance of the interior top-of-column joints of reinforced concrete frame including the column-hinging mechanism[D]. Chongqing: College of Architecture and Civil Engineering,

- Chongqing Jianzhu University, 1994. (in Chinese)
- [11] 焦心亮, 张连德, 卫云亭. 钢筋混凝土框架顶层中节点的非线性有限元分析[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(5): 40-47.
- JIAO Xin-liang, ZHANG Lian-de, WEI Yun-ting. Inelastic finite element analysis of interior top-of-column joints of reinforced concrete frame[J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(5): 40-47. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [13] 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, 18(2): 846-857.
- [14] SCHAFER, K. Strut-and-tie models for design of structural concrete [R]. Notes of Workshop, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan. , 1996, 2: 140.
- [15] 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]. 京都: 日本京都大学土木工務系, 2003.
- [16] PAULAY T, PRIESTLEY M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings[C]// John Wiley and Sons, New York: John Wiley and Sons, 1992: 744.
- [17] PANG X B, HSU T T. Fixed angle softened truss model for reinforced concrete[J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(2): 197-207.

## Caculated Modal for Shear Strength of T-shaped Interior Joints on RC Frame Top Layer

CUI Jian-yu<sup>1</sup>, CHE Yi<sup>2</sup>, SUN Jian-gang<sup>1</sup>, SONG Yu-pu<sup>2</sup>, Watanabe Fumio<sup>3</sup>

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

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

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

**Abstract:** Based on the experiment of four RC T-shaped interior joints on the top story of a building frame under statically cyclic loading, the indexes of the earthquake-resistant performance of the joints such as crack patterns, shear strength, deformation features etc. were investigated. The experimental results showed that the shear strength of T-shaped joints is 15% less than that of extrior joints due to the affect of beam bar bond deterioration in the joints and confined effect deterioration from joint shear bars. Based on the test data, the key analysis parameters for STURT-TRUSS model proposed by Hwang, such as the height of sturt and the effective areas of joint shear bars were improved, the caculated model for evacuating the shear strength of T-shaped joints was proposed. The results from the analysis agree well with the experimental data.

**Key words:** reinforced concrete frame; T-shaped joints; shear strength; caculated model

(责任编辑 张士瑛)