

劲性钢筋混凝土 T 形截面梁受力性能的研究^{*}

吕凌风¹ 陈菲嫔¹ 龙通讯¹ 龚绍熙² 许琪楼²

(1 深圳市房地产开发经营公司 2 上海城建学院建工系)

摘 要 分别给出了8根弯曲破坏和2根剪切破坏的劲性钢筋混凝土 T 形截面梁的试验结构,在试验研究的基础上,将劲性钢筋混凝土梁分为完全粘结梁、部分粘结梁和部分完全粘结梁,其计算方法有机地将我国现行的钢筋混凝土结构规范的计算机方法与组合结构的计算方法联系在一起,并给出了正截面承载力及抗裂的计算公式,对抗剪承载力也进行了分析,试验结果与本文公式的计算结果符合良好^[9].

关键词 劲性钢筋混凝土梁;受力性能

分类号 TU 318.1

1 概 述

劲性钢筋混凝土有很多突出的优点,在我国工程设计中已开始应用,但国内在该方面的研究起步较晚,研究较少,目前我国尚无劲性混凝土结构的设计规程^[1]。工程设计都是参照国外规范进行的,在设计方法上很不统一^[1]。国外对劲性钢筋混凝土研究开始较早,但各国的计算理论及设计方法也不一样,它们主要以前苏联、日本、英美国家的计算设计方法为代表^[2]。因此,在吸取国外设计经验的基础上开展对劲性钢筋混凝土结构的试验研究,以建立我国自己的设计规范或规程已成为当务之急^[3]。

2 试验研究

本次试验共设计了10根构件,变化因数为劲性钢筋截面尺寸、剪力连接件布置及构件跨度,本次试验得出了以下一些结论:

(1) 劲性钢筋混凝土梁的受力过程可大致分为弹性工作阶段、带裂缝工作阶段、弹塑性工作阶段和破坏阶段^[3]。

(2) 劲性钢筋混凝土梁的破坏形态可分为:滑移破坏、超筋破坏、适筋破坏^[3]。钢筋梁破坏一般不会发生^[3]。

(3) 根据劲性钢筋混凝土梁中劲性钢筋与混凝土的粘结及滑移情况,可将劲性钢筋混凝土梁分为三类,分别为:完全粘结梁、部分粘结梁、部分完全粘结梁⁽¹³⁾根据破坏时劲性钢筋受力情况可将劲性钢筋混凝土梁分为五种⁽¹³⁾其中完全粘结梁包含三种,第一种为上翼压屈和下翼拉屈;第二种为上、下翼拉屈;第三种为上翼不屈和下翼拉屈⁽¹³⁾部分粘结梁为第四种,部分完全粘结梁为第五种⁽¹³⁾

(4) 劲性钢筋混凝土梁刚度较大,劲性钢筋下翼缘屈服时挠跨比 W_y/l_0 (平均值为1/356,能满足 $W_y/l_0 \leq \frac{1}{300} \sim \frac{1}{250}$ 的要求⁽¹³⁾但破坏时挠度很大,劲性钢筋混凝土梁的延性比 μ 值也很大,平均值为10.4,说明其延性好⁽¹³⁾

(5) 劲性钢筋混凝土梁跨中截面应变分布符合平截面假定⁽¹³⁾临近破坏时,劲性钢筋与混凝土之间出现滑移,随梁种类不同,其滑移对承载力影响也不同⁽¹³⁾混凝土极限压应变平均值为 $3\,921 \times 10^{-6}$,比普通钢筋混凝土梁有所提高⁽¹³⁾

表1 试验结果一览表

试件名称	SRCB11	SRCB12	SRCB21	SRCB22	SRCB23	SRCB31	SRCB32	SRCB33
I_0/W_y	480.7	271.4	247.3	402.6	431.8	214.4	361.8	440.1
μ	16.3	10.6	3.36	12.3	6.0	7.1	12.9	15.0
ϵ_u 10^{-6}	3 788	4 674		3 496		3 277	4 645	3 650
W_y (mm)	5.2	9.21	10.11	6.21	5.79	11.66	6.91	5.68
W_u (mm)	84.99	97.8	34.02	76.49	34.64	82.75	89.35	85.39
M_{cr} (kN·m)	16.76	13.23	16.76	13.23	13.23	13.23	17.64	17.64
M_y (kN·m)	37.5	74.92	62.62	57.33	48.51	66.2	61.74	52.92
M_u (kN·m)	88	97.05	65.25	97.42	82.46	79.38	88.2	92.61
$\frac{M_{cr}}{M_u}$	19%	14%	27%	14%	16%	17%	20%	19%
$\frac{M_y}{M_u}$	43%	77%	96%	60%	59%	83%	70%	57%
F_u (kN)	200	220	148	221	188	280	200	210
梁种类	第①种	第③种	第④种	第②种	第⑤种	第③种	第③种	第③种
破坏形态	适筋破坏	适筋破坏	滑移破坏	适筋破坏	适筋破坏	适筋破坏	适筋破坏	适筋破坏
n	8	8	6					
μ	356.3	10.4	3 921					
δ	0.262	0.408	0.139					

注: W_y —— 挠度; μ —— 延性比; ϵ_u —— 混凝土性极限压应变; M_{cr} —— 混凝土开裂弯矩; M_y —— 屈服弯矩;
 F_u —— 极限承载力⁽¹³⁾

(6) T 形截面有效翼缘的宽度按混凝土结构设计规范 GB10-89取值是可行的^[13]

(7) 劲性钢筋与混凝土之间的滑移受到很多因素的影响, 如劲性钢筋截面尺寸大小及表面粗糙程度, 有无剪力连接件, 混凝土振捣密实程度等^[13]。布置剪力连接件的梁, 其抵抗滑移的后续能力较强^[13]

试验结果参见表 1^[13]

3 正截面承载力计算

根据试验研究(3)的结论分三大类共五种梁分别计算^[13]

3.1 完全粘结梁正截面承载力计算(即第一、二、三种梁的计算)

基本假定: 劲性钢筋与混凝土之间滑移不大, 对承载力没有影响, 其余假定同 GBJ10-89 中的普通钢筋混凝土梁计算假定^[13]

3.1.1 矩形截面梁计算

对第一种梁: 劲性钢筋上翼压屈, 下翼拉屈,

$$\frac{\delta'}{1-\beta} \leq \xi \leq \frac{1}{1-\beta} \quad (1)$$

其计算公式为

$$[\omega + 2(\xi - 1)]t_w h_0 f_{yl} + 0.798 f_{cm} b \xi h_0 - A_s f_y + A_s \dot{f}_y = 0, \quad (2)$$

$$M_u = b f_{cm} \xi h_0^2 (0.798 - 0.329 \xi) + A_s f_y \delta h_0 + A_s \dot{f}_y (\omega + \delta) h_0 +$$

$$A_s f_{yl} \omega h_0 + t_w f_{yl} h_0^2 \left[\frac{1}{2} \omega^2 - (1 - \xi)^2 - \frac{1}{3} \beta \xi \right] \quad (3)$$

对第二种梁劲性钢筋上、下翼均拉屈,

$$\xi \leq \frac{\delta'}{1 + \beta} \quad (4)$$

其计算公式为

$$0.798 b f_{cm} \xi h_0 + A_s \dot{f}_y - A_s f_y - (2A_f + \omega h_0 t_w) f_{yl} = 0, \quad (5)$$

$$M_u = b f_{cm} \xi h_0^2 (0.798 - 0.329 \xi) + A_s f_y \delta h_0 + A_s \dot{f}_y (\omega + \delta) h_0 - A_f f_{yl} \omega h_0 - \frac{1}{2} (\omega h_0)^2 t_w f_{yl} \quad (6)$$

对第三种梁劲性钢筋上翼不屈, 下翼拉屈,

$$\delta \leq \frac{1}{1 + \beta}, \quad (7)$$

$$\frac{\delta'}{1 + \beta} \leq \xi \leq \frac{\delta'}{1 - \beta} \quad (8)$$

其计算公式为

$$0.798 b f_{cm} \xi h_0 + A_f f_{yl} \frac{-\beta \xi + \xi - \delta'}{\beta \xi} + \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\beta \xi - \delta' + \xi}{\beta \xi} \right)^2 - \omega \right] h_0 f_{yl} t_w - A_s f_y + A_s \dot{f}_y = 0, \quad (9)$$

$$M_u = b f_{cm} \xi h_0^2 (0.798 - 0.329 \xi) + A_f f_{yl} \omega h_0 \frac{\xi - \delta'}{\beta \xi} +$$

$$\left[-\frac{1}{2} \omega + \frac{\omega \beta \xi + \xi - \delta'}{2 \beta \xi} - \frac{\beta \xi + \xi - \delta'}{6 \beta \xi} \right] t_w h_0^2 f_{yl} + A_s f_y \delta h_0 + A_s \dot{f}_y (\omega + \delta) h_0 \quad (10)$$

其中 β 为钢筋屈服应变 ϵ_s 与混凝土极限压应变 ϵ_u 之比, 即 $\beta = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_u}$ (13) 对 I 级钢 $\beta = 0.346$, 型钢 $\beta = 0.424$, II 级钢 $\beta = 0.515$, 因为 β 的变化对构件极限承载力影响很小, 我们可取 $\beta = 0.4$;

h_0 为劲性钢筋下翼缘中心线到混凝土受压最外边缘的距离;

δ_{h0} , $\dot{\delta}_{h0}$ 分别为劲性钢筋上、下翼缘中心线到混凝土上、下边缘的距离;

ω_{h0} 为劲性钢筋上、下翼缘的距离;

x , ξ_{h0} 分别为混凝土受压区高度和相对受压区高度;

A_f 为劲性钢筋腹板的面积;

t_w 为劲性钢筋腹板的厚度;

δ_{h0} 、 $\dot{\delta}_{h0}$ 分别为劲性钢筋上下翼缘到受压、受拉柔性钢筋的距离;

f_{yt} 为劲性钢筋的屈服应力 (13)

3.1.2 T 形截面梁计算

对 T 形截面梁的计算分别将 F_{cf} 加在式 (2)、(5)、(9) 的左端, M_{cf} 加在式 (3)、(6)、(10) 的右端即可 (13)

当 $\xi > \frac{\delta}{1-\alpha}$ 时, (11)

$$F_{cf} = (b_f - b) \delta_{h0} f_{cm}, \quad (12)$$

$$M_{cf} = (b_f - b) \delta_{h0}^2 f_{cm} (1 - 0.5 \delta) \quad (13)$$

当 $\delta < \xi < \frac{\delta}{1-\alpha}$ 时, (14)

$$F_{cf} = (b_f - b) x f_{cm}, \quad (15)$$

$$M_{cf} = (b_f - b) x f_{cm} (h_0 - 0.5x) \quad (16)$$

其中 $x = (0.13 \xi + 0.67 \delta) h_0$; (17)

F_{cf} —— T 形截面翼缘部分的合力;

M_{cf} —— T 形截面翼缘部分的合力对劲性钢筋下翼缘的弯矩;

δ_{h0} —— T 形截面翼缘的高度;

α —— 受拉区混凝土塑性系数;

ϵ_u —— 混凝土轴压破坏时峰值应力对应的应变 (13)

3.1.3 T 形截面梁的判别

将 $\xi = \delta$ 分别代入式 (2)、(5)、(9) 中, 若左端之和小于 0, 则按 T 形截面梁计算, 反之按矩形截面梁计算 (13)

3.1.4 完全粘结劲性钢筋混凝土梁计算的一般方法

由计算机程序按如下顺序进行计算 (13)

(1) 从零开始, 按选定的间隔值增加 ϵ_m 值;

(2) 用迭代法求与 ϵ_m 相应的 ξ 值;

(3) 计算截面材料各微元的内力及其对劲性钢筋下翼缘的弯矩;

(4) 对各微元内力及弯矩求和;

(5) 若 $|F_{if}| > |F_{\text{容}}|$, 则重复 (2) ~ (4) 的步骤直至 $|F_{if}| \leq |F_{\text{容}}|$;

(6) 若 $\epsilon_m \geq \epsilon_u$, 则打印计算结果 (13) 若 $\epsilon_m < \epsilon_u$, 则继续增加 ϵ_m , 直至 $\epsilon_m \geq \epsilon_u$ (13)

其中 ϵ_m —— 混凝土压应变的循环变量;

F_{if} —— 各微元内力之和;

$F_{容}$ —— 设定的允许误差⁽¹³⁾

3.2 部分粘结梁正截面承载力计算(即第四种梁)

假定跨中纯弯段钢筋混凝土截面与劲性钢筋截面分别符合平截面假定, 劲性钢筋与混凝土之间产生滑移, 使二者不共同工作, 但可使二者中和轴一致, 应变不连续(其余假定同混凝土结构设计规范 GBJ10-89)⁽¹³⁾ 此假定由试验结果所得⁽¹³⁾ 参见图 1⁽¹³⁾

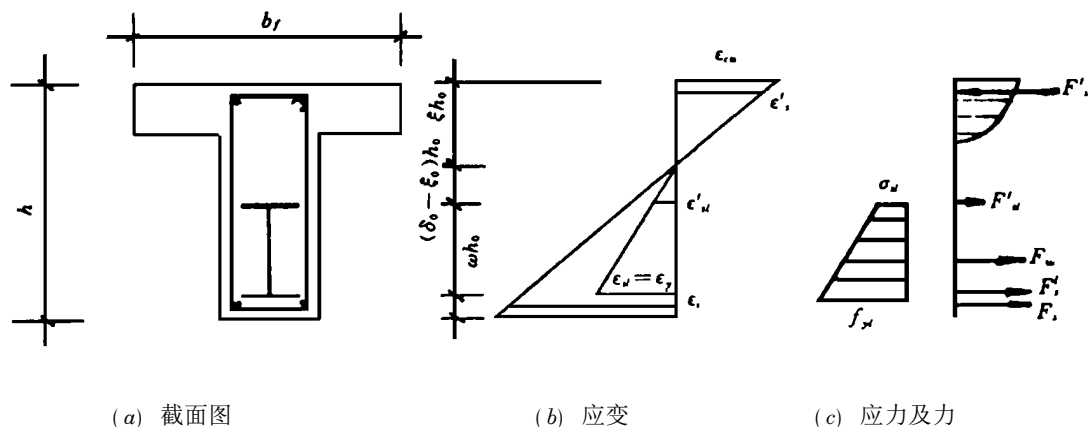


图 1

其计算公式为, 当 $\xi < \delta$ 时, 按矩形截面梁计算:

$$0.798bf_{cm}\xi h_0 - \frac{1-2\xi+\delta'}{2(1-\xi)}f_{yt}\omega h_0^2 + A_s f_y - A_s f_y - \frac{1+\delta'-2\xi}{1-\xi}A_s f_y = 0, \quad (18)$$

$$M_u = -\frac{1}{6}t_w f_{yt} \omega h_0^2 \frac{1-3\xi+2\delta'}{1-\xi} -$$

$$\frac{\delta'-\xi}{1-\xi}f_{yt}A_s \omega h_0 + A_s f_y \delta h_0 + A_s f_y (\delta' + \omega h_0 + bf_{cm}\xi h_0^2 (0.798 - 0.329\xi)) \quad (19)$$

当 $\xi > \delta$ 时按 T 形截面梁计算⁽¹³⁾ 在式(18)左边加入 F_{cf} , 在式(19)右端加入 M_{cf} ⁽¹³⁾

F_{cf} 、 M_{cf} 计算仍按式(12)~(16)⁽¹³⁾

3.3 部分完全粘结梁计算

对部分完全粘结梁可根据其栓钉连接件数量在完全粘结梁与部分粘结梁承载力之间进行插值, 插值公式为

$$M = M_1 + (M_2 - M_1) \frac{n_1}{n_2} \quad (20)$$

其中 n_2 为按完全粘结梁考虑, 所需剪力连接件数, 也即按组合梁计算所需要的剪力连接件数量;

n_1 为梁中实际布置的剪力连接件数;

M_1 为 n_1 对应之弯矩;

M_2 为 n_2 对应之弯矩⁽¹³⁾

3.4 超筋梁计算

对超筋梁的计算按第三种梁计算,取

$$\xi = \xi = \frac{1}{1 + \beta} \quad (21)$$

3.5 讨论

若假定劲性钢筋面积为零,受拉柔性钢筋中心到混凝土受压边距离为 h_0 ,则不论从第几种梁的计算公式均可推

得与混凝土结构设计规范 GBJ10-89相一致的
计算公式,对 T 形截面梁其翼缘部分的计算与 GBJ10-89 的计算略有不同(13)

影响劲性钢筋混凝土梁承载力的因素很多,主要因素有:剪力连接件的布置,劲性钢筋截面尺寸及布置,混凝土极限压应变与混凝土强度、钢筋强度等(13)

对任一截面尺寸的梁可按如下步骤确定其计算公式(13)先按第一种梁计算 ξ ,若 ξ 满足式 (1),则按第一种梁计

算(13)若不满足式(1)则按第二种梁计算 ξ 值(13)若此时 ξ 值满足式(4),则根据剪力连接情况判断是按第二种梁计算,还是按第四、第五种梁计算,若不满足式(4),则按第三种梁计算(13)

本文公式的计算结果和国外部分规范的计算结果与作者的试验结果及部分国外的试验结果进行了比较,表明本文公式的计算结果良好(13)统计参数见表2(13)

表2 统计参数

计 算 公 式		本文公式	数值叠代法	苏联规范 公 式	日本规范 公 式
类 别					
第一种梁 $n=11$	μ	1.016 7	1.019 6	0.926 5	1.020 3
	δ	0.016 4	0.016 9	0.012 7	0.034 7
第二种梁 $n=1$	μ	1.008	0.990 0	0.842 0	0.438 0
	δ	0	0	0	0
第三种梁 $n=4$	μ	1.064 8	1.072 8	1.117 5	0.643 3
	δ	0.008 1	0.007 1	0.055 6	0.025 5
第四种梁 $n=1$	μ	0.991	1.472 0	1.263	0.621 0
	δ	0	0	0	0
第五种梁 $n=1$	μ	1.102	1.125 0	0.965 0	0.496 0
	δ	0	0	0	0
总 体 $n=18$	μ	1.029 7	1.060 7	0.986 3	0.852 8
	δ	0.012 2	0.025 4	0.029 9	0.016 8

4 正截面抗裂与斜截面抗剪的研究

4.1 正截面抗裂的研究

正截面抗裂的计算采用类似于普通钢筋混凝土梁的计算方法,假定受拉区混凝土为弹塑性材料,受压区混凝土处于弹性阶段,截面应变符合平截面假定: $\epsilon_s = \alpha \epsilon_c = 2 \xi \epsilon_c$ (13)

其中 ϵ_c —— 混凝土极限拉应变;

ϵ_c —— 混凝土轴压开裂破坏时对应峰值的应变(13)

由平截面条件 $\epsilon_s = 0$, 求出 ξ_{h0} , 然后根据 $M = 0$ 求出 $M_{cr} = M_s + M_s' + M_c + M_c' + M_{sl} +$

M_{cf} 若 $b = b_f$ 则 $M_{cf} = 0$, 此时为矩形截面梁^[13]

计算结果与试验结果比值 M_{cr}/M_{cr}^e 平均值 $\mu = 0.890$ 变异系数 $\delta = 0.132\ 5$

裂缝间距与宽度的计算将混凝土结构设计规范 GBJ10-89 中公式系数进行调整, 计算公式为

$$l_m = (2.7c + 0.32 \frac{d}{\rho_{et}}) \gamma$$
$$\rho_{et} = (A_s + A_f) / 0.56h;$$
$$w_m = 0.85 \psi \frac{\delta}{E_s} (2.7 + 0.32 \frac{d}{\rho_{et}}) \gamma \quad (13)$$

其中 c —— 最外一排纵向受拉钢筋的保护层厚度;

ρ_{et} —— 按有效受拉混凝土面积计算的纵向钢筋配筋率;

d —— 钢筋直径, 对于光圆钢筋 $\gamma = 1$, 变形钢筋 $\gamma = 0.7$;

l_m —— 裂缝间距;

w_m —— 裂缝宽度^[13]

计算结果与试验结果比较见表 3^[13]

影响裂缝间距及宽度的主要因素为柔性钢筋保护层厚度及劲性钢筋的滑移^[13]

4.2 斜截面抗剪的研究

斜截面抗剪进行了 2 根梁试验, 剪跨比为 1^[13]其工作阶段可分为弹性工作阶段、带裂缝工作阶段、破坏阶段^[13]破坏形态为斜压破坏^[13]其抗剪承载力很大^[13]按苏联规范计算值比试验值高, 日本规范计算值与试验值较符合, 说明发生剪切破坏时, 劲性钢筋与钢筋混凝土已不能共同工作^[13]计算结果与试验结果比较见表 4^[13]

表3 计算与试验结果比较表

	μ	δ
l_m^c/l_m^e	1.017	0.063 5
w_m^c/w_m^e	0.875	0.086 3

注: l_m^c/l_m^e —— 裂缝间距计算值与试验值之比;
 w_m^c/w_m^e —— 裂缝宽度计算值与试验值之比^[13]

表4 计算与试验结果比较表

试件编号	苏联公式 V_u^c/V_u^e	日本公式 V_u^c/V_u^e
SRCB21 ¹	1.269	0.820
SRCB22 ¹	1.629	0.886

注: V_u^c —— 根据规范计算出的极限抗剪承载力;
 V_u^e —— 根据试验测得的极限抗剪承载力^[13]

参 考 文 献

1 胡松林 19 劲性钢筋混凝土结构的发展概况 19 南京建筑工程学院学报

2 胡松林 19 劲性钢筋混凝土结构的发展概况(续) 19 南京建筑工程学院学报

3 孙国良 19 钢—混凝土组合结构资料 19 郑州工学院, 1986

4 冶金工业部建筑研究总院译 19 日本劲性钢筋混凝土结构计算标准解说 19 988

5 冶金工业部建筑研究总院译 19 苏联劲性钢筋混凝土结构设计指南 19 983

6 中国东北设计院译 19 日本劲性混凝土设计规范(修订稿) 19 987

7 JOHN, P. COOK, P. E. COMPOSITE CONSTRUCTION METHODS. 1977

8 R. P. Johson. Composite structure of steel and concrete.

9 德国规范学会 19 钢混凝土组合梁设计与施工规范 19 974

10 梅村魁 19 劲性钢筋混凝土结构抗震设计 19 中国科学院译

A Study of Behavior, Bearing Capacity and Crack Resistance of Simple-Supported T-Section Encased Beams

Lu Lingfeng¹ Chen Feixian¹ Long Tongxun¹
Gong Shaoxi² Xu Qilou²

(¹ Sheng Zhen Properties Development and Management Corporation

² Shanghai Urban Construction)

Abstract In this paper the experimental results on eight specimens occurred flexure failure modes and two specimens occurred shear failure modes of encased beams are given. The behavior of the encased beams, which are different in steel section and in shear connectors, are studied, based on the experimental results. The formulas for the flexural bearing capacity and the crack resistance and crack-width of the encased beams are developed. The calculating results of the Russian code and the Japanese code and the author's formulas are examined by experimental results. It indicates that the author's formulas make a good prediction.

Key words T-Section Encased Beams; bearing capacity