

文章编号: 1000-4750(2011)08-0113-06

# 预应力空腹式钢骨混凝土梁受弯性能研究

王连广<sup>1</sup>, \*慕光波<sup>2</sup>

(1. 东北大学结构工程研究所, 沈阳 110004; 2. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 抚顺 113001)

**摘 要:** 通过 5 根无粘结预应力空腹式钢骨混凝土梁和 1 根非预应力空腹式钢骨混凝土梁的受弯试验, 分析梁截面应变分布、变形、预应力筋内力增量发展及裂缝分布规律。结果表明: 在其它参数条件相同的情形下, 对空腹式钢骨混凝土梁施加预应力, 可显著提高梁的抗裂承载力; 以受拉区混凝土开裂和受拉钢骨下边缘屈服为转折点, 试验梁的荷载-变形曲线呈三直线特征; 破坏形态与非预应力空腹式钢骨混凝土梁相比裂缝出现较迟, 裂缝向上开展缓慢, 主裂缝特征不明显; 建立的无粘结预应力空腹式钢骨混凝土梁的抗裂承载力和极限承载力计算公式与试验结果吻合较好。

**关键词:** 无粘结; 预应力; 空腹式; 钢骨混凝土梁; 承载力

**中图分类号:** TU312.1 **文献标志码:** A

## RESEARCH ON BENDING PERFORMANCE OF PRESTRESSED LATTICE TYPE STEEL REINFORCED CONCRETE BEAM

WANG Lian-guang<sup>1</sup>, \*MU Guang-bo<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Structural Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shi Hua University, Fushun 113001, China)

**Abstract:** Five unbonded prestressed lattice type steel-reinforced concrete beams and one lattice type steel-reinforced concrete beam were tested. The sectional strain variation, deformation, tendon stress increment development and crack distribution were analyzed further. The results show that applying prestress to a lattice type steel-reinforced concrete beam can improve crack bearing capacity obviously under the same other parameters. The load-deformation curves take the crack of tensile region concrete and the yield of tensile steel lower flange as deviation points and appear a trilinear characteristic. The beam failure modes are compared with those of a non prestressed lattice type steel-reinforced concrete beam, the crack appears late and develops more slowly, and the main crack characteristic is not obvious. The calculation results obtained by using crack and ultimate bearing capacity formulas suggested in this paper are in good agreement with the experiment ones.

**Key words:** unbonded; prestressed; lattice type; steel reinforced concrete beam; bearing capacity

空腹式钢骨混凝土结构是在钢筋混凝土内部埋置由缀板(条)连接角(槽)钢构成空间桁架钢骨的一种结构形式, 空间桁架钢骨对核心混凝土有较好的约束, 使核心混凝土的极限压缩变形、抗压强度、刚度均有所提高<sup>[1-2]</sup>。然而, 钢骨本身面光, 与周围

混凝土之间的粘结力不足, 裂缝与变形控制难以满足要求, 将预应力技术<sup>[3-5]</sup>应用至空腹式钢骨混凝土结构中可有效解决上述问题。目前, 国内外对预应力空腹式钢骨混凝土结构的研究<sup>[6-8]</sup>处于初步阶段, 而对预应力空腹式钢骨混凝土梁受弯性能的研究

收稿日期: 2009-12-22; 修改日期: 2011-05-13

基金项目: 辽宁省教育厅基金项目(2009A441)

作者简介: 王连广(1964—), 男, 辽宁鞍山人, 教授, 博士, 博导, 从事结构工程研究(E-mail: lgwneu@hotmail.com);

\*慕光波(1977—), 女, 辽宁朝阳人, 讲师, 博士, 从事结构工程研究(E-mail: muguangbo2005@sina.com).

究尚未见到相关文献报道。为此,笔者通过试验,研究预应力空腹式钢骨高强混凝土梁的受力性能<sup>[9]</sup>。

## 1 试验概况与方法

### 1.1 试验概况

本次试验共制作 5 根预应力空腹式钢骨混凝土梁和 1 根非预应力空腹式钢骨混凝土梁。试件截面尺寸均为 200mm×300mm, 梁长为 3000mm, 计算跨度为 2700mm。混凝土强度的实测强度值为  $f_c=48.4\text{N/mm}^2$ 。预应力钢筋采用抗拉强度为

1860N/mm<sup>2</sup>, 直径为 15.2 的 7 股钢绞线, 截面积为 138.7mm<sup>2</sup>, 张拉控制应力为 1320N/mm<sup>2</sup>。钢骨采用 Q235 等边角钢, 截面尺寸见表 1, 将 $\phi 10$  光圆钢筋截成水平杆和竖腹杆, 与角钢焊接在一起, 形成空腹式钢骨架, 纯弯段杆间距为 150mm, 弯剪段杆间距 100mm。试件 PSRC1 按直线布置一根预应力钢筋, 试件 PSRC2~试件 PSRC4 按直线布置 2 根预应力钢筋, 试件 PSRC5 按抛物线形式布置 2 根预应力钢筋, 试件 SRC6 无预应力钢筋, 未配置非预应力纵向受力钢筋及箍筋。

表 1 试验梁参数及计算结果

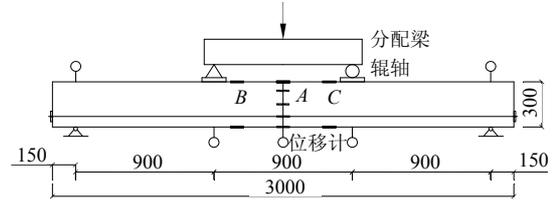
Table 1 Parameters and calculation results of testing beams

试件编号	骨架上弦	骨架下弦	开裂承载力/(kN·m)			极限承载力/(kN·m)		
			$M_{cr}$ 计	$M_{cr}$ 测	$M_{cr}$ 计/ $M_{cr}$ 测	$M_u$ 计	$M_u$ 测	$M_u$ 计/ $M_u$ 测
PSRC1	L30×30×3	L40×40×4	39.8	48.6	0.819	99.7	114.3	0.872
PSRC2	L30×30×3	L40×40×4	59.8	59.4	1.008	144.0	137.7	1.046
PSRC3	L40×40×4	L45×45×5	61.7	62.1	0.994	158.1	151.2	1.046
PSRC4	L45×45×5	L50×50×5	56.3	57.6	0.977	122.3	132.3	0.924
PSRC5	L40×40×4	L45×45×5	60.4	58.5	1.032	162.6	171.9	0.946
SRC6	L30×30×3	L40×40×4	11.2	12.9	0.868	48.7	51.3	0.949

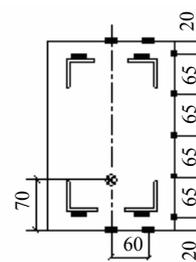
### 1.2 试验方法

试验在 500t 压力机上进行。采用简支梁三分点加载, 荷载由分配梁传递给试验梁。在加载点下设置刚度较大的钢垫板, 并在钢垫板下铺一薄层细沙, 以使加载点下的混凝土均匀受压。加载采用单调分级制度, 荷载控制, 每级荷载为 5kN, 记录各测点仪表的读数, 观察并记录梁体裂缝出现的位置及裂缝开展过程, 并记录开裂荷载, 当荷载达到试件预计极限荷载的 80%后, 放慢加载速度改为 2kN 一级加载, 直至试验梁破坏。试验梁两端预应力筋处分别放置 30t 穿心式压力传感器, 监控预应力随荷载的变化情况。在混凝土上、下及侧面, 钢骨上表面、下表面分别粘贴应变片, 测量加载过程中的应变。在跨中、加载处及支座处分别布置位移计, 测量试件的变形及支座位移。试验装置及测点布置见图 1。

特征, 并且预应力梁与非预应力梁的应变分布类似。可认为预应力空腹式钢骨混凝土梁的纯弯段范围内, 截面应变分布符合平截面假定。



(a) 试验装置示意图



(b) A 处混凝土及 A, B, C 处钢骨应变片布置

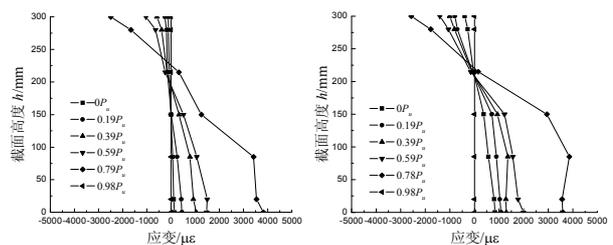
图 1 试验装置及测点布置图

Fig.1 Test device and measuring point arrangement

## 2 试验结果分析

### 2.1 梁截面应变分布

试验测得截面应变沿梁截面高度分布, 见图 2。可以看出, 各试验梁沿截面高度应变在加载初期呈线性关系, 中和轴高度变化较小, 截面表现为弹性受力特征; 荷载作用后期, 截面高度方向应变呈非线性关系, 中和轴高度上升, 截面表现为塑性受力



(a) PSRC1

(b) PSRC2

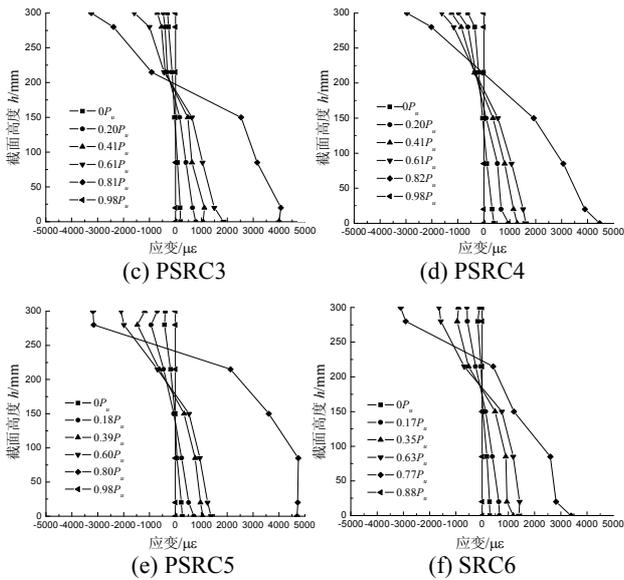


图2 截面应变分布

Fig.2 Strain distribution of sections

### 2.2 荷载-变形曲线

各试验梁的荷载-变形曲线, 见图3。可以看出, 预应力空腹式钢骨混凝土梁的荷载-变形曲线均呈现出三直线的特征, 相应的受力过程分为3个阶段。从加载至受拉区混凝土开裂为第1阶段, 此阶段试验梁的整体工作性能良好, 荷载-变形曲线呈线性变化, 随着荷载的增加, 受拉区混凝土应力达到抗拉强度而开裂, 荷载-变形曲线有一微小偏折; 从梁体开裂至受拉区钢骨下边缘屈服为第2阶段, 变形随着荷载增加而加快, 荷载-变形曲线基本仍保持线性关系, 说明混凝土开裂对构件刚度影响不大, 随着荷载增加, 当 PSRC1~PSRC5 分别达到  $76.4\%P_u$ 、 $76.7\%P_u$ 、 $72.6\%P_u$ 、 $77.5\%P_u$ 、 $74.6\%P_u$  时, SRC6 达到  $77.2\%P_u$ ,  $P_u$  为极限荷载, 受拉钢骨下边缘达到屈服应变, 荷载-变形曲线出现第2次偏折; 从受拉钢骨下边缘屈服至梁体破坏为第3阶段, 此阶段梁体的变形增长速度明显大于荷载的增长速度, 荷载-变形曲线非线性特征愈来愈明显, 截面刚度大幅削弱, 荷载继续增加, 梁体的变形速度进一步加快, 并伴有清晰崩裂声响, 直至受压区混凝土被压溃而破坏。

比较试件 PSRC1、试件 PSRC2 和试件 SRC6 的荷载-变形曲线可以看出, 其它参数相同的情况下, 初始预应力越大, 梁的开裂承载力越大。这表明施加的预应力程度越高, 在截面上建立的有效预应力越大, 推迟了梁的开裂时间, 使梁弹性工作阶段延长, 从而提高了梁的开裂承载力。比较试件

PSRC2、试件 PSRC3(PSRC4 试件因其试验过程中有一根预应力筋出现脆断, 无法与之比较)的荷载-变形曲线可以看出, 其它参数相同的情况下, 含钢率越大, 梁的极限承载力越高。

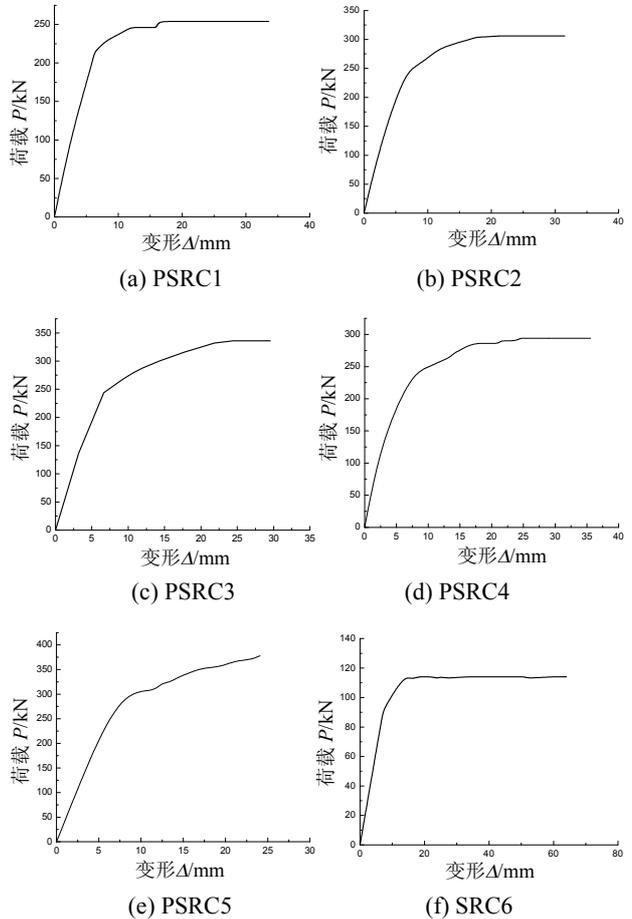
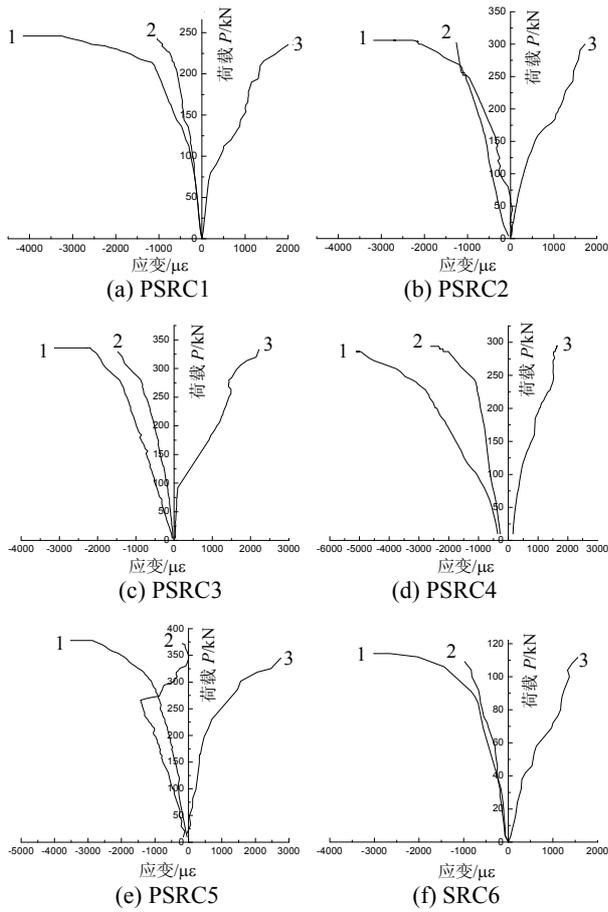


图3 荷载-变形曲线

Fig.3 Load-displacement curves

### 2.3 荷载-应变曲线

各试验梁荷载-应变曲线, 见图4, 可以看出, 在荷载作用初期, 混凝土和钢骨的应变较小, 荷载-应变曲线呈线性变化, 混凝土和钢骨完全处于弹性阶段; 随着荷载增加, 截面应变随之增大, 当荷载达到极限荷载的40%左右, 受拉区混凝土应力达到极限抗拉强度而开裂, 此时受拉、压钢骨处于弹性状态; 混凝土开裂后, 随着荷载增加, 截面应变进一步增大, 当荷载达到极限荷载的70%左右, 受拉区钢骨下边缘出现屈服(约  $1360\mu\epsilon \sim 1560\mu\epsilon$ ), 受压区混凝土荷载-应变曲线非线性受力特征愈来愈明显; 随荷载进一步增大, 受压区钢骨屈服或未屈服, 受压区混凝土应变显著增大至极限压应变(约  $-3000\mu\epsilon \sim -4000\mu\epsilon$ ), 试验梁因梁顶压溃而破坏。



注：图中数字 1、2、3 分别代表受压边缘混凝土应变、受压区角钢应变和受拉区角钢应变

图 4 荷载-应变曲线

Fig.4 Load-strain curves

2.4 预应力筋应力增量

预应力筋应力增量与荷载关系曲线，见图 5。可以看出，预应力钢筋的应力增量随荷载的变化呈三直线特征，分别以混凝土开裂、受拉钢筋下边缘屈服为分界点。受拉区混凝土开裂前，在荷载作用下，预应力筋应力增量很小，应力增量与荷载近似成线性关系；受拉区混凝土开裂后，预应力筋的应力增长明显；当受拉区钢筋应力达到屈服强度后不再增长，而预应力筋的应力增长速度显著加快，荷载-预应力钢筋应力增量曲线的非线性特征愈来愈明显，直至试验梁破坏，此时各试件梁无粘结筋的应力均未达到极限抗拉强度。(PSRC4 试件因其试验过程中有一根预应力筋出现脆断，故图 5 中的预应力筋应力增量曲线出现异常)

2.5 裂缝分布

预应力空腹式钢骨混凝土梁的破坏过程与预应力混凝土适筋梁的破坏过程相似，在外荷载作用下，首先在跨中区段内混凝土最薄弱的截面发生开

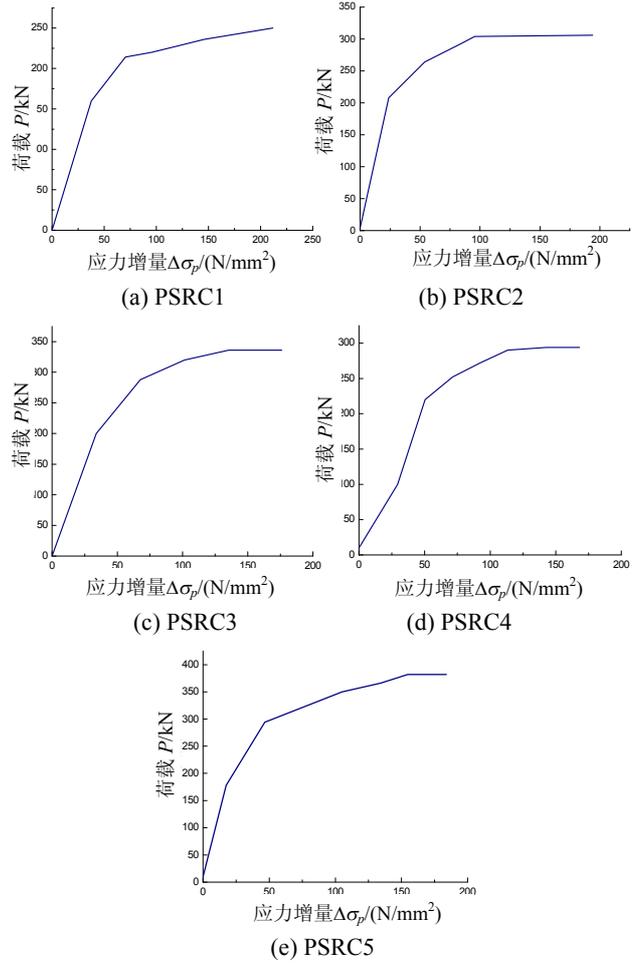
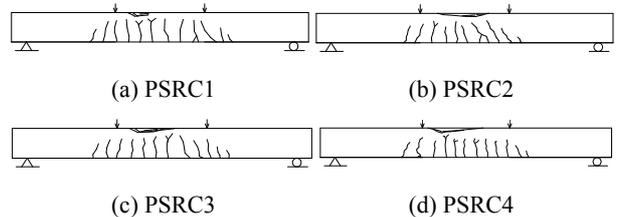


图 5 荷载-无粘结筋应力增量曲线

Fig.5 Load-stress increment curves

裂，出现第 1 批细微裂缝，随着荷载增加不断有新裂缝出现，但裂缝发展比较缓慢，裂缝分布比较均匀；受拉钢筋屈服后，荷载增量主要由预应力筋和受压区混凝土承担，此阶段裂缝宽度不断增大，裂缝间距逐渐减小，最后试验梁因受压区混凝土被压溃而破坏，破坏时受压区混凝土呈层状压碎，破坏区域为三角形。预应力空腹式钢骨混凝土梁 PSRC1~梁 PSRC5 与空腹式钢骨混凝土试验梁 SRC6 相比裂缝出现较迟，即 PSRC1~PSRC5 分别达到 42.5% $P_u$ 、43.1% $P_u$ 、41.1% $P_u$ 、43.5% $P_u$ 、34.0% $P_u$ ，而 SRC6 达到 25.1% $P_u$ ， $P_u$  为极限荷载，试验梁出现裂缝，且裂缝向上开展缓慢，主裂缝特征不明显。典型梁裂缝分布，见图 6。



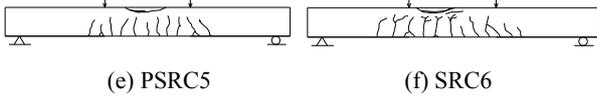


图 6 试验梁裂缝分布图  
Fig.6 Crack distribution of test beams

### 3 承载力计算

为研究问题方便,现做如下基本假定:1) 截面应变符合平截面假定;2) 钢骨、混凝土和非预应力钢筋之间粘结良好变形协调;3) 开裂时受拉混凝土进入塑性状态,混凝土弹性模量取受压混凝土弹性模量的一半;4) 极限状态下受压区混凝土应力分布为矩形,取应力块高度为实际高度的 80%,即  $\alpha = x/x_u$ ;5) 上下钢骨完全屈服。

#### 3.1 抗裂承载力计算

在外荷载作用下,当外荷载作用在梁底产生的拉应力与预应力作用在梁底产生的压应力相等时,梁底应力为零,称为消压状态。外荷载继续增加,梁底混凝土拉应力达到混凝土抗拉强度  $f_{tk}$  时,混凝土即将开裂,此时,无粘结筋应力增量采用粘结降低系数求得,预应力筋的拉力为:

$$N_{p1} = A_p \left[ \sigma_{pe} + \alpha_p \eta \left( \frac{h - x_{cr} - a_p}{h - x_{cr}} f_{tk} + \frac{M_0 e}{I_{0c}} \right) \right]$$

式中:  $\sigma_{pe}$  为预应力筋的有效预应力;  $A_p$  为预应力筋的面积;  $I_{0c}$  为换算截面惯性矩;  $\alpha_p$  为预应力筋与混凝土的弹性模量比,即  $\alpha_p = E_p/E_c$ ;  $h$  为梁截面高度;  $f_{tk}$  为混凝土轴心抗拉强度;  $\eta$  为粘结降低系数;  $M_0$  为消压弯矩;  $a_p$  为预应力筋距截面底端的距离;  $x_{cr}$  为截面底端即将开裂时混凝土的受压区高度;  $e$  为中和轴距截面底端的距离。

对于空腹式钢骨混凝土受弯构件,钢骨对称布置,构件截面中和轴位于上、下钢骨之间,即中和轴不经过钢骨,见图 7。通过截面应变关系,得到混凝土、钢骨及非预应力钢筋的受力,根据内力平衡条件得到受压高度  $x_{cr}$ 。

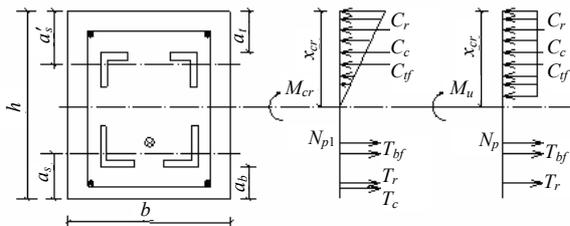


图 7 中和轴不经过钢骨  
Fig.7 Neutral axis not across the steel

将各内力对中和轴取矩得到梁的开裂弯矩为:

$$M_{cr} = \alpha_R A_r \frac{(h - x_{cr} - a_r)^2}{h - x_{cr}} f_{tk} + N_{p1} (h - x_{cr} - a_p) + \alpha_E A_s \frac{(h - x_{cr} - a_s)^2}{h - x_{cr}} f_{tk} + \alpha_E A'_s \frac{(x_{cr} - a'_s)^2}{h - x_{cr}} f_{tk} + \frac{1}{2} b f_{tk} (h - x_{cr})^2 + \alpha_R A'_r \frac{(x_{cr} - a'_r)^2}{h - x_{cr}} f_{tk} + \frac{1}{3} \frac{b x_{cr}^3}{h - x_{cr}} f_{tk} \quad (1)$$

式中:  $\alpha_E$  为钢骨与混凝土的弹性模量之比,即  $\alpha_E = E_s/E_c$ ;  $\alpha_R$  为非预应力钢筋与混凝土的弹性模量之比,即  $\alpha_R = E_r/E_c$ ;  $a'_s$ 、 $a_s$  为空腹式梁中上部、下部角钢截面重心距截面上端、下端的距离;  $a'_r$ 、 $a_r$  为空腹式梁中上部、下部钢筋截面重心距截面上端、下端的距离;  $A'_s$ 、 $A_s$  和  $A'_r$ 、 $A_r$  为空腹式梁中截面上部、下部角钢截面面积和上部、下部钢筋截面面积。

#### 3.2 极限承载力计算

分析预应力空腹式钢骨混凝土梁的截面形式及受力特点,在极限承载力状态时,当受拉非预应力钢筋屈服、钢骨屈服、混凝土压碎时,可能出现预应力钢筋达到或者未达到极限抗拉强度两种情况。预应力钢筋达到极限抗拉强度时,拉力为:

$$N_p = f_{pu} A_p$$

当预应力钢筋未达到极限抗拉强度时,可根据我国《无粘结预应力混凝土技术规程》<sup>[10]</sup>确定预应力钢筋的拉力  $N_p = \sigma_p A_p$ ,且应满足  $\sigma_{pe} \leq \sigma_p \leq f_{py}$ 。

根据内力平衡条件可得受压区高度  $x_{cu}$ 。

将各内力对中和轴取矩得梁抗弯承载力为:

$$M_u = N_p (h - x_{cu} - a_p) + f_r A_r (h - x_{cu} - a_r) + f_y A_s (h - a_s - x_{cu}) + f_y A'_s (x_{cu} - a'_s) + f_r A'_r (x_{cu} - a'_r) + \alpha (1 - 0.5\alpha) f_c b x_{cu}^2 \quad (2)$$

式中:  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度;  $f_r$  为受拉非预应力钢筋的屈服强度;  $f_y$  为钢骨的屈服强度。

#### 3.3 试验验证

利用给出的抗裂承载力计算公式(1)和极限承载力计算公式(2)计算结果与试验对比结果,见表 1,计算开裂弯矩与实测弯矩比的平均值为 0.95,变异系数为 0.086;计算极限弯矩与实测弯矩比的平均值为 0.96,变异系数为 0.076,理论计算结果与试验结果吻合良好。说明利用本文建立的预应力空腹式钢骨混凝土梁开裂承载力和极限承载力计算公式是合理的,计算结果偏于保守。

## 4 结论

通过预应力空腹式钢骨混凝土的试验研究与理论分析, 主要结论有:

(1) 其它参数条件相同情形下, 对空腹式钢骨混凝土梁施加预应力, 明显提高梁体的抗裂承载力。

(2) 预应力空腹式钢骨混凝土梁的荷载-变形曲线、荷载-无粘结预应力钢筋应力增量曲线均呈现三直线特征, 分别以受拉区混凝土开裂和受拉钢骨下边缘屈服为偏折点, 预应力筋的应力在受拉钢骨屈服后快速增长。

(3) 预应力空腹式钢骨混凝土梁的破坏过程与预应力钢筋混凝土适筋梁的破坏过程相似, 最终皆因受压区混凝土被压溃而破坏, 破坏时受压区混凝土呈层状压碎, 破坏区域为三角形。预应力作用明显地延迟混凝土裂缝出现, 裂缝向上开展缓慢, 主裂缝特征不明显。

(4) 本文所建立的预应力空腹式钢骨混凝土梁的抗裂承载力和极限承载力计算公式, 计算结果与试验结果吻合良好, 且计算结果偏于保守。

### 参考文献:

- [1] 王连广. 钢与混凝土组合结构理论与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
Wang Lianguang. Theory and calculation of steel and concrete composite structures [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [2] Johnson R P. Composite structures of steel and concrete [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1995.
- [3] 林同炎, Burns Ned H. 预应力混凝土结构设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.  
Lin Tongyan, Burns Ned H. Design of prestressed concrete structures [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983. (in Chinese)
- [4] 王有志. 预应力混凝土结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
Wang Youzhi. Prestressed concrete structures [M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese)
- [5] 李国平. 预应力混凝土结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.  
Li Guoping. Design theory of prestressed concrete structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2000. (in Chinese)
- [6] 袁伟斌, 干钢, 金伟良. 预应力型钢混凝土结构受弯构件研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(增刊 1): 116—119.  
Yuan Weibin, Gan Gang, Jin Weiliang. Study on prestressed steel reinforced concrete structures subjected to bending moment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(z1): 116—119. (in Chinese)
- [7] 刘军进. 预应力钢骨混凝土梁的理论分析和试验研究[D]. 南京: 东南大学, 1999.  
Liu Junjin. Theory analysis and experiment research [D]. Nanjin: Southeast University, 1999. (in Chinese)
- [8] 胡翔, 薛伟辰. 预应力钢骨混凝土梁研究与应用进展[J]. 建筑技术, 2006, 37(5): 336—339.  
Hu Xiang, Xue Weichen. Progress in research and application of PSRC beams [J]. Architecture Technology, 2006, 37(5): 336—339. (in Chinese)
- [9] 慕光波. 预应力钢骨混凝土梁受力性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.  
Mu Guangbo. Mechanical behaviors study of prestressed steel reinforced concrete beams [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. (in Chinese)
- [10] JGJ92-2004, 无粘结预应力混凝土结构技术规程[S]. 2005.  
JGJ92-2004, Technical standard of unbonded prestressed concrete structure [S]. 2005. (in Chinese)