

# 体外预应力连续组合梁预应力筋拉力计算方法及全过程受力分析

张彦玲<sup>1</sup>, 李运生<sup>1</sup>, 樊健生<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北石家庄 050043; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

**摘要:**对体外预应力钢-混凝土连续组合梁进行全过程受力分析时,需准确计算预应力筋的拉力,因此,对预应力组合梁中预应力增量及全过程受力分析的计算方法进行了研究。根据梁体自身在荷载作用下的变形条件,采用几何方法给出了各种布筋形式下体外预应力筋伸长量的计算方法;基于共轭梁法,并考虑连续组合梁内力重分布,采用迭代法得到了预应力连续组合梁的荷载-变形曲线和预应力筋拉力随荷载的变化规律,计算结果与模型试验及其它文献中的模型试验结果进行了对比,结果吻合良好。研究表明:体外预应力组合梁中预应力筋的荷载-拉力关系曲线反映出预应力筋经历了从弹性到塑性的发展过程。根据梁自身在荷载作用下的几何变形条件,得到任意加载时刻的预应力筋拉力,用于全过程受力分析。

**关键词:**组合梁; 体外预应力; 预应力; 全过程受力分析; 共轭梁法

中图分类号:TU398.901 文献标志码:A

## Analysis of prestressing load and whole mechanical process of externally prestressed continuous composite beams

ZHANG Yanling<sup>1</sup>, LI Yunsheng<sup>1</sup>, FAN Jiansheng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to study the whole bending process of externally prestressed steel-concrete continuous composite beams, the prestressing load should be calculated accurately. The calculating method of the prestressing load and the whole bending process analysis were researched. According to the geometric deformation condition of the composite beams under load, the calculation method of the elongation length of external tendons of various layout was given firstly. Then, considering the changing law of bending moment redistribution coefficient with load, the load-deformation curve and law of prestressing increment with load were obtained using the principle of conjugate beam method and iteration method. The numerical results were compared with the model test results and results from other reference. The numerical results agreed well with the test results. Study results indicate that the load-prestressing load curve of externally prestressed composite beam is developed from elastic to plastic stage. Using the prestressing load developed from the geometric deformation condition the development process with load can be more precisely reflected, the prestressing load under arbitrary loading condition can be obtained.

**Keywords:** composite beam; external prestressing; prestressing; whole process of mechanical analysis; conjugate beam method

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2009000893),河北省教育厅青年基金项目(2010277)。

作者简介:张彦玲(1973—),女,河北吴桥人,工学博士,副教授。E-mail:06mzhang@163.com

收稿日期:2010年6月

# 0 引言

对组合梁施加预应力是控制混凝土开裂的有效措施。依据预应力筋设置位置,预应力组合梁可分为体内预应力和体外预应力组合梁。体外预应力钢-混凝土组合梁采用高强钢筋或预应力钢索对梁体施加无粘结预应力,可提高梁的承载力和刚度,降低中间支座负弯矩,延缓裂缝的形成和发展,并减少体内预应力筋的布置,极大地方便了施工和维护,使该结构形式尤其适用于桥梁结构<sup>[1-2]</sup>。

20世纪50年代,各国学者开始对体外预应力钢-混凝土组合梁的承载力、刚度、滑移变形等方面进行较为系统的理论及试验研究。在预应力连续组合梁方面,Basu<sup>[3]</sup>、Tong<sup>[4]</sup>、和 Ayyub等<sup>[5]</sup>分别对体外预应力连续组合梁进行了预应力筋张拉应力及承载力试验和理论研究;宗周红等<sup>[6-7]</sup>进行了预应力钢-混凝土连续组合梁的静力全过程试验,并进行了非线性分析;聂建国等<sup>[8]</sup>对预应力钢-混凝土连续组合梁内力重分布过程及弯矩调幅系数进行了研究;陈世明等<sup>[9]</sup>研究了负弯矩作用下体外预应力组合梁的开裂荷载和极限荷载。各国研究者虽对体外预应力组合梁的研究取得了一系列成果,但由于模型试验和实桥试验的数量都较少,预应力组合梁的设计规范至今尚未完善。欧洲规范4(EC4)<sup>[10]</sup>和GB 50017—2003《钢结构设计规范》<sup>[11]</sup>都没有给出预应力组合梁和无粘结预应力钢索的应用条文。

对预应力连续组合梁进行受弯全过程受力分析,是研究其整体受力性能的重要手段。但是,对于体外预应力连续组合梁,由于处在锚固和转向块之外的无粘结体外预应力筋与钢梁可产生自由的相对运动,截面变形不再协调,因此,确定荷载作用下预应力钢索的应力增量,成为确定预应力组合梁性能的关键因素之一。在此方面,已开展了预应力筒支组合梁和连续组合梁的相关研究,王彤等<sup>[12]</sup>给出了具有任意非预应力钢筋的体外索筒支梁极限状态的计算方法;房贞政等<sup>[13]</sup>提出了采用变形协调系数法计算无粘结筋极限应力的实用方法;杜进生等<sup>[14]</sup>建立了基于结构变形的无粘结预应力筋应力变化分析方法。但目前的计算模式多是在实验室通过试验结果建立的经验公式,尚未得到统一的结论。

本文对体外预应力连续组合梁的预应力筋拉力和全过程受力的计算方法进行了研究,给出了任意布筋形式下体外预应力筋伸长量的计算公式,并在

此基础上,采用共轭梁法得到了体外预应力连续组合梁的荷载-变形全过程曲线,同时进行了体外预应力钢-混凝土组合梁的静载模型试验,将理论分析结果与试验结果进行了对比。

# 1 体外预应力筋伸长量的计算方法

体外预应力筋通常为直线或折线布置,连续组合梁体外预应力筋常见的布置形式见图1所示。

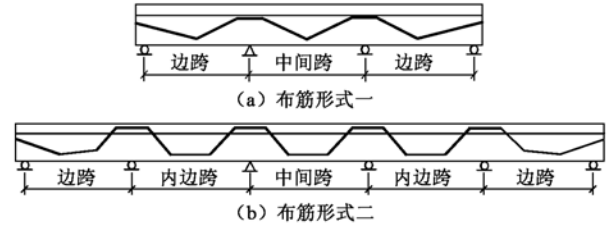


图1 多跨连续组合梁体外力筋布置形式

Fig. 1 Layouts of external tendons of multiple-span continuous composite beams

体外预应力筋的预应力增量由其受弯过程中的伸长量 $\Delta l_{pr}$ 决定,而 $\Delta l_{pr}$ 则与体外预应力筋的布置形式有关。根据图1所示的任意跨度的体外预应力筋的布置形式,分别对典型的边跨、内边跨和中间跨体外预应力筋的伸长量进行计算,见图2所示。

根据几何变形条件,由几何关系可得边跨体外预应力筋伸长量 $\Delta L_{pb}$ 为:

$$\Delta L_{pb} = \Delta L_{pb1} + \Delta L_{pb2} \quad (1)$$

$$\Delta L_{pb1} = w_B \sin \alpha_b + (w_C - w_D) \sin \beta_b + \sqrt{(w_B - w_C)^2 + l_{BC}^2} - l_{BC} \quad (2)$$

$$\Delta L_{pb2} = (d_p - c_b) \sin \theta_E \quad (3)$$

内边跨体外预应力筋伸长量 $\Delta L_{pbc}$ 为:

$$\Delta L_{pbc} = \Delta L_{pbc1} + \Delta L_{pbc2} \quad (4)$$

$$\Delta L_{pbc1} = (w_H - w_G) \sin \alpha_{bc} + (w_I - w_J) \sin \beta_{bc} \quad (5)$$

$$\Delta L_{pbc2} = (d_p - c_b) \sin \theta_F + (d_p - c_c) \sin \theta_K \quad (6)$$

中间跨体外预应力筋伸长量 $\Delta L_{pc}$ 为:

$$\Delta L_{pc} = \Delta L_{pc1} + \Delta L_{pc2} \quad (7)$$

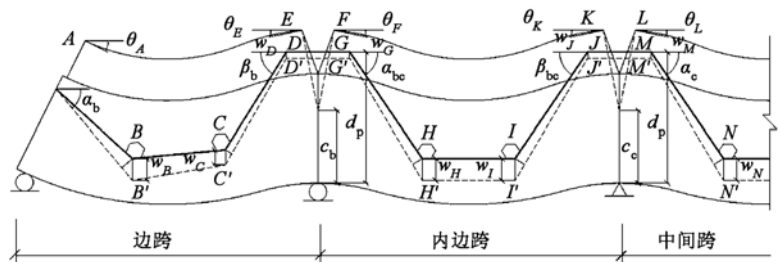


图2 折线形布置体外预应力筋伸长量示意图

Fig. 2 Elongation sketch of externally prestressed tendons arranged in fold line

$$\Delta L_{pc1} = 2(w_N - w_M) \sin \alpha_c \quad (8)$$

$$\Delta L_{pc2} = 2(d_p - c_c) \sin \theta_L \quad (9)$$

令  $n$  为连续组合梁的总跨数, 根据  $n$  的不同取值, 体外预应力筋总的伸长量  $\Delta L_{pr}$  可分别表示为:

当  $n = 1$  时, 相当于只有中间跨的简支组合梁, 且  $w_M = 0$ ,  $\Delta L_{pc2} = 0$ , 故:

$$\Delta L_{pr} = \Delta L_{pc} = \Delta L_{pc1} \quad (10)$$

当  $1 < n \leq 3$  时, 为两跨或三跨连续梁, 不存在内边跨, 有:

$$\Delta L_{pr} = 2\Delta L_{pb} + (n - 2)\Delta L_{pc} \quad (11)$$

当  $n \geq 4$  时, 为 4 跨以上连续梁, 有:

$$\Delta L_{pr} = 2\Delta L_{pb} + 2\Delta L_{pbc} + (n - 4)\Delta L_{pc} \quad (12)$$

式中:  $c_b$  为连续组合梁第一内支座负弯矩区截面钢梁受压区高度;  $c_c$  为连续组合梁中间内支座负弯矩区截面钢梁受压区高度;  $d_p$  为负弯矩区预应力筋形心到钢梁下翼缘的高度;  $\alpha_b$ 、 $\beta_b$ 、 $\alpha_{bc}$ 、 $\beta_{bc}$ 、 $\alpha_c$ 、 $\beta_c$  分别为边跨、内边跨和中间跨的体外预应力筋在该跨端部的张拉角度;  $w_b \sim w_n$  分别为图中各点对应的挠度;  $\theta_A$  为支座 A 截面转角;  $\theta_E$  为边跨对第一内支座截面相对转角的贡献;  $\theta_f$  为内边跨对第一内支座截面相对转角的贡献;  $\theta_k$  为内边跨对中间支座截面相对转角的贡献;  $\theta_L$  为中间跨对中间支座截面相对转角的贡献;  $l_{BC}$  为图 2 中 B 点到 C 点的预应力筋长度。

体外预应力筋的应变  $\varepsilon_{pr}$  为:

$$\varepsilon_{pr} = \varepsilon_{pe} + \Delta L_{pr} / L_{pr} \quad (13)$$

式中:  $\varepsilon_{pe}$  为体外预应力筋的有效预拉应变;  $L_{pr}$  为体外预应力筋的原长。

由此得到体外预应力筋的总拉力为:

$$N_{pr} = E_p \varepsilon_{pr} = E_p (\varepsilon_{pe} + \Delta L_{pr} / L_{pr}) \quad (14)$$

式中,  $E_p$  为预应力筋的弹性模量。

对于简支或连续组合梁中体外预应力筋的各种布置形式, 均可按式 (10) ~ (12) 进行预应力筋伸长量的计算。

## 2 体外预应力连续组合梁受弯全过程分析

为计算预应力筋的伸长量, 首先根据组合梁的荷载-变形关系确定对应于控制截面某一级曲率下图 2 所示各点的挠度和转角值, 然后代入式 (10) ~ (12) 计算  $\Delta L_{pr}$ , 并由伸长量计算预应力筋的应力增量, 最后代入内力平衡方程得到截面弯矩-曲率关系及荷载-变形曲线。因此, 首先需要采用共轭梁法得到非预应力连续组合梁的荷载-变形曲线。

### 2.1 共轭梁法原理

连续组合梁的荷载-变形关系可采用共轭梁法得到。共轭梁法的原理是: 实梁任意横截面的转角值

等于虚荷载作用于虚梁同一截面上的虚剪力值; 实梁任意横截面形心处的挠度值等于虚荷载作用于虚梁同一截面上的虚弯矩值; 所谓的虚荷载是将梁上的实际曲率分布图作为荷载施加在虚梁上<sup>[15]</sup>。在共轭梁法中, 虚梁与实梁的支承条件具有一定的对应关系, 连续梁实梁的边较支座和中间支座则分别对应于虚梁的铰支座和中间链铰, 见图 3 所示, 图中  $L$  为梁的跨度。

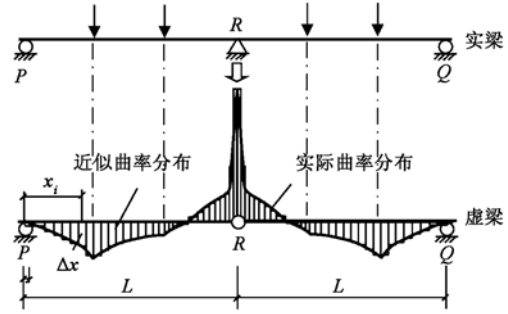


图 3 共轭梁法

Fig. 3 Conjugate beam method

根据共轭梁法原理, 实梁上  $P$  端截面转角和中间支座  $R$  处截面的相对转角则为虚梁上的虚支座反力  $V'_p$  和  $V'_R = V'_{Rl} + V'_{Rr}$ , 对称加载时, 由虚内力平衡可得:

$$V'_p = V'_Q = \sum_{i=1}^n \phi_i \Delta x (1 - x_i / L) \quad (15)$$

$$V'_{Rl} = V'_{Rr} = \sum_{i=1}^n \phi_i \Delta x x_i / L \quad (16)$$

距离虚梁  $P$  支座  $x_i$  处截面的虚剪力, 即为实梁相应截面处的转角  $\theta_{xi}$ :

$$\theta_{x_i} = V'_{x_i} = V'_p - \sum_{j=1}^i \phi_j \Delta x \quad (17)$$

距离虚梁  $P$  支座  $x_i$  处截面的虚弯矩, 即实梁相应截面处的挠度  $w_{x_i}$ , 可表示为:

$$w_{x_i} = M'_{x_i} = V'_p x_i - \sum_{j=1}^i \phi_j \Delta x (x_i - x_j) \quad (18)$$

计算中应变取受拉为正, 受压为负; 轴力取垂直于截面指向右侧为正; 弯矩取截面下缘受拉为正, 上缘受拉为负; 曲率取截面下缘受拉为正。

### 2.2 预应力连续组合梁荷载-变形曲线的程序编制

要得到体外预应力组合梁控制截面的弯矩-曲率关系, 需要首先根据连续组合梁的荷载-挠度计算步骤得到力筋在转向块处梁体的挠度, 然后再计算每一级荷载下预应力筋的应力增量, 因此在计算过程中需要一个试算迭代过程, 即首先按无预应力的情况, 由非预应力组合梁的荷载-变形程序初步计算出针对控制截面每一级截面曲率的预应力增量, 然后代入内力平衡方程中, 重新计算体外预应力组合梁正负弯矩区截面的弯矩-曲率关系, 再代入荷载-变形

计算程序中重复预应力增量的计算过程,如果和前一次计算误差小于5%,则认为计算正确。对于工程要求的精度来说,只重复试算一次即可。

由于连续组合梁负弯矩区混凝土开裂引起内力重分布,使负弯矩区弯矩减小,正弯矩区弯矩增大,故其实际弯矩与按弹性方法计算得到的弯矩不同,需根据内力重分布程度的大小确定出各截面的实际弯矩,得到截面曲率沿梁长度方向的真实分布情况,进而得到组合梁各截面的变形及受弯全过程曲线。

关于连续组合梁内力重分布程度随荷载的变化规律,本文作者在文献[16]中已有详细分析,见文献[16]中式(2)。文献[16]中还得到了非预应力连续组合梁正负弯矩区的弯矩-曲率( $M-\phi$ )曲线及非预应力连续组合梁的荷载-挠度及荷载-转角曲线。本文在文献[16]基础上,采用FORTRAN语言编制了体外预应力连续组合梁荷载-挠度和荷载-转角曲线的计算程序,具体计算步骤为:

- (1)按无体外预应力筋的情况计算正、负弯矩区的 $M-\phi$ 曲线;
- (2)根据外荷载和支座情况找出沿梁轴弯矩最大的截面位置(连续组合梁通常为支座截面,假定该截面处于第 $m$ 微段内),以此截面作为控制截面;
- (3)对控制截面增量施加截面曲率, $\phi_m^j = \phi_m^{j-1} + \Delta\phi$ ;
- (4)对每一级 $\phi_m^j$ ,根据荷载-变形计算步骤计算图2所示的体外预应力筋转向块处的挠度和各梁跨端部截面的转角;
- (5)由式(10)~(13)计算预应力筋伸长量 $\Delta l_{pr}$ 和应变 $\varepsilon_{pr}$ ,并根据应力-应变关系得到预应力筋应力 $\sigma_{pr}$ ;
- (6)将 $\sigma_{pr}$ 代入预应力组合梁的内力平衡方程,重复 $M-\phi$ 曲线的计算程序,得到当前曲率下的截面弯矩;
- (7)判别支座截面曲率 $\phi_m^j$ 和最大正弯矩截面曲率 $\phi_k^j$ 是否达到各自的极限曲率 $\phi_u'$ 及 $\phi_u$ ,如均未超过,则令 $j = j + 1$ ,重复步骤(3)~(6),即得体外预应力组合梁的 $M-\phi$ 全曲线,若达到 $\phi_u'$ 或 $\phi_u$ ,停止计算;
- (8)重新读入新的 $M-\phi$ 全曲线,重复步骤(2)~(5),得到预应力筋伸长量 $\Delta l_{pr}$ 和荷载-挠度、荷载-转角曲线。

### 3 模型试验及试验验证

#### 3.1 本文模型试验

##### 3.1.1 试验概况

为了研究钢-混凝土连续组合梁负弯矩

区的受力性能,以及体外预应力对组合梁受力性能的影响和预应力增量随荷载的变化规律,设计了3根在梁内产生负弯矩的反向(加载方向向上)加载的简支组合梁(SCB1~SCB3)和3根2跨连续组合梁(SCB4~SCB6),其中,SCB2和SCB5均为折线布筋的无粘结体外预应力组合梁,各采用 $\Phi 15.2$ 钢绞线作为预应力筋,板内普通钢筋配筋率为1.347%。按照欧洲规范4(EC4)<sup>[10]</sup>的规定,钢梁截面均为第I类截面,满足塑性设计的要求。由于本文主要研究预应力连续组合梁预应力增量及全过程受力分析,故仅对其中的预应力连续组合梁SCB5的试验概况进行描述。SCB5在两个梁跨的三分点处用分配梁施加竖向集中荷载,其构造及截面尺寸见图4,图中 $s$ 为栓钉间距,栓钉为 $\Phi 10 \times 50$ 。

##### 3.1.2 材性参数及本构关系

体外预应力连续组合梁SCB5的混凝土强度等级为C30,实测立方体抗压强度为36.1MPa,轴心抗压强度为24.1MPa。钢梁及普通钢筋力学性能见表1。预应力钢绞线未进行材性试验,设计及计算均采用规范标准值,即强度标准值取 $f_{pk} = 1860\text{MPa}$ ,弹性模量取 $E_s = 1.95 \times 10^5\text{MPa}$ 。

表1 钢材力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel

钢材种类	直径或板厚/ mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	抗拉强度 $f_u$ /MPa
钢筋	12	395.8	558.5
	6	409.0	552.9
钢板	6	357.2	466.7
	8	369.5	468.5

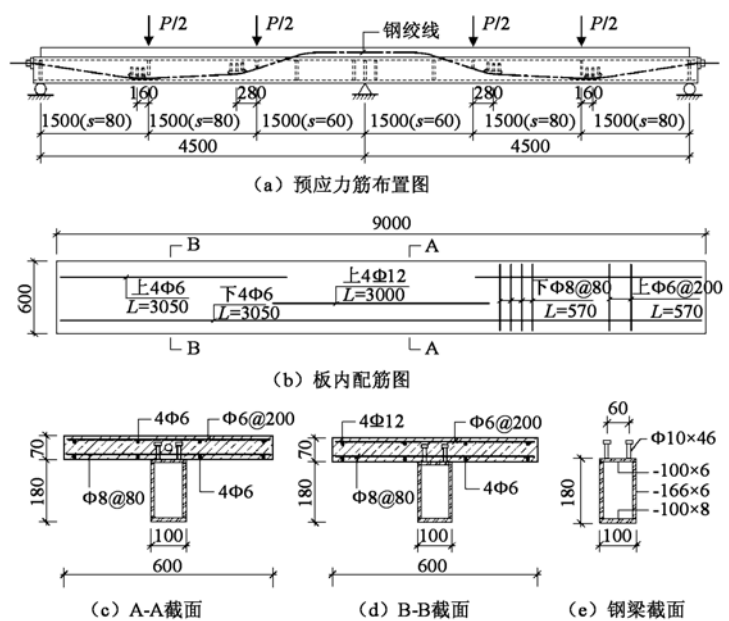


图4 SCB5构造及截面尺寸

Fig.4 Structure and dimensions of SCB5

混凝土单轴受压、受拉应力-应变关系及钢梁和普通钢筋的本构关系均参见文献[16]。对于预应力筋,当应力小于弹性极限时(一般取为 $0.7f_{pu}$ ),其应力-应变关系取为直线;超过弹性极限后,应力-应变关系可用 Ramberg-Osgood 曲线近似模拟<sup>[17]</sup>:

$$\sigma_{pr} = \begin{cases} E_p \varepsilon_{pr} & (\sigma_{pr} \leq 0.7f_{pu}) \\ \frac{E'_p \varepsilon_{pr}}{\left[1 + \left(\frac{E'_p \varepsilon_{pr}}{f_{pu}}\right)^m\right]^{1/m}} & (\sigma_{pr} > 0.7f_{pu}) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $f_{pu}$  为预应力筋的抗拉强度; $E_p$  为预应力筋的弹性模量; $E'_p$  为荷载为 0 时 Ramberg-Osgood 曲线的斜率,取  $E'_p = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ;  $m$  为曲线形状系数,取  $m = 4$ 。

### 3.1.3 试验验证

试验中量测了典型截面的应变、跨中挠度、支座转角、支座反力、负弯矩区裂缝宽度、混凝土板与钢梁交界面的相对滑移等。根据连续组合梁各级加载值和实测支座反力,得到各级荷载作用下支座截面和最大正弯矩截面的实测弯矩值;根据钢梁上、下翼缘的应变差与钢梁高度的比值,得到各级荷载作用下支座截面和最大正弯矩截面的实测曲率,由此可得到体外预应力连续组合梁 SCB5 支座截面和最大正弯矩截面的实测弯矩-曲率关系分别见图 5 和图 6。根据本文 2.2 节中的计算方法及编制的计算程序,得到 SCB5 支座截面和最大正弯矩截面弯矩-曲率关系的计算曲线,结果也示于图 5 和图 6 中,可以看出,计算值与试验值吻合较好。

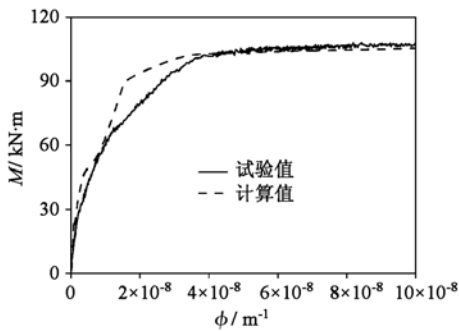


图 5 SCB5 支座截面弯矩-曲率关系  
Fig. 5 Moment-curvature relationship of SCB5 at supported

预应力连续组合梁 SCB5 的实测跨中荷载-挠度曲线(取图 4a 中的左跨)见图 7 所示,根据图 5 和图 6 中计算出的支点和最大正弯矩截面的弯矩-曲率关系,由 2.2 节中的计算步骤得到 SCB5 的跨中荷载-挠度曲线计算值,见图 7 所示。试验中同时量测了 SCB5 中预应力筋的应变,体外预应力筋总拉力试验

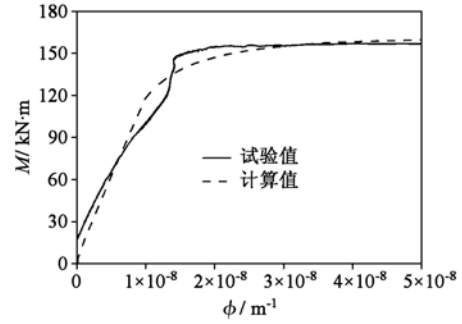


图 6 SCB5 最大正弯矩截面-弯矩曲率关系  
Fig. 6 Moment-curvature relationship of SCB5 at section of maximum positive moment

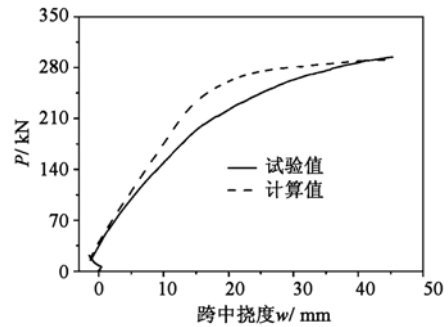


图 7 SCB5 荷载-挠度曲线  
Fig. 7 Load-deflection curves of SCB5

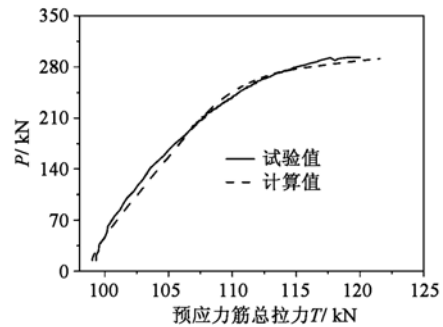


图 8 SCB5 预应力筋总拉力比较

Fig. 8 Comparison of total prestressing load of SCB5

值与本文计算值的比较见图 8,可见两者吻合良好。从图 8 可看出,随着荷载的增加,预应力筋经历了从弹性到塑性的发展过程,但对于无明显屈服点的预应力筋,弹性与塑性无明显分界点。

### 3.2 其它文献的模型试验

文献[18]进行了 6 根跨度 4.0m 的两跨预应力连续组合梁模型试验(PCCB-1 ~ PCCB-6)。钢梁截面为箱型,宽 100mm,高 160mm,腹板厚度 5.0mm,上翼缘厚度 6.0mm,下翼缘厚度 8.0mm,满足欧洲规范 4(EN1994)<sup>[10]</sup>规定的塑性设计要求。混凝土板宽 500mm,高 70mm,中支座负弯矩配筋 5  $\Phi$  12;板内横向配筋  $\Phi$  6@60;栓钉间距为  $\Phi$  8@60 及  $\Phi$  8@80(双排)。各模型梁的变化参数为预应力的布筋形式(直

线或折线)、根数(1根或2根)和布置位置(在钢箱梁内部或外部),取其中钢箱梁内直线布置1根预应力筋的PCCB-1梁和箱内折线布置1根预应力筋的PCCB-3梁进行分析,截面尺寸、材性参数及栓钉布置图详见文献[18],材料本构关系仍取3.1.2节所述。PCCB-1和PCCB-3梁预应力筋布置方式见图9。

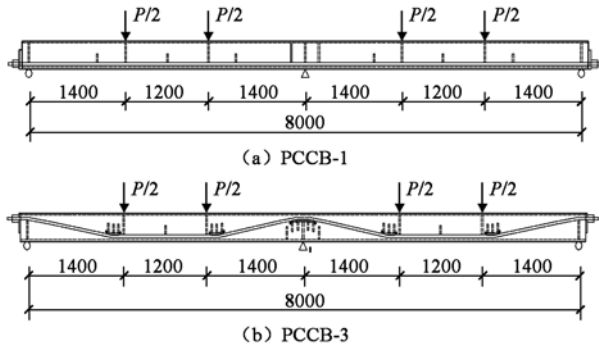


图9 PCCB-1和PCCB-3预应力筋布置图

Fig. 9 Prestressing tendon layout of PCCB-1 and PCCB-3

由2.2节中的计算步骤得到PCCB-1和PCCB-3的跨中荷载-挠度曲线(取图9中的左跨)及预应力筋总拉力的计算值与试验值的比较分别见图10和图11所示,可以看出,计算值与试验值吻合较好。

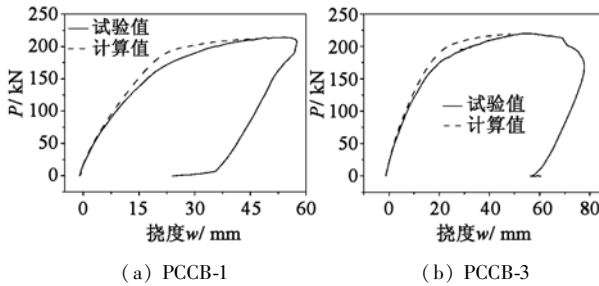


图10 PCCB-1和PCCB-3跨中荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curves of PCCB-1 and PCCB-3

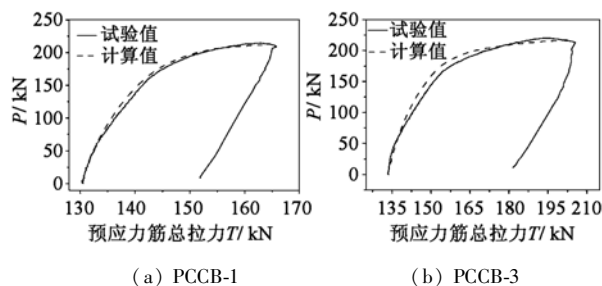


图11 PCCB-1和PCCB-3荷载-总拉力曲线

Fig. 11 Load-prestressing load curves of PCCB-1 and PCCB-3

## 4 结论

(1)根据预应力筋与组合梁锚固点的变形协调条件,结合体外预应力组合梁全过程受力分析中的

荷载-挠度曲线,可以按照几何变形条件直观地反映预应力筋随荷载的变形规律;

(2)基于共轭梁法原理,考虑内力重分布随荷载大小的变化规律,采用迭代法对预应力连续组合梁进行受力全过程分析,可得到较好的结果;

(3)从荷载与预应力筋总拉力的关系曲线可看出,预应力筋经历了从弹性到塑性的发展过程,且无明显分界点。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Nan, Chung C Fu. Experimental and theoretical studies on composite steel-concrete box beams with external tendons[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(2):275-283.
- [2] 洪英维. 体外预应力钢箱-混凝土组合梁试验研究[D]. 南京:南京工业大学, 2005. (HONG Yingxiang. Experimental research of external prestressed steel box-concrete composite beams[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [3] Basu P K, Sharif A M. Partically prestressed continuous composite beams[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1987, 113(9):1909-1938.
- [4] Tong Wenxin, Saadatmanesh H. Parametric study of continuous prestressed composite girders[J]. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 1992, 112(3):186-206.
- [5] Bilal M Ayyub, Young G Sohn, Hamid Saadatmanesh. Prestressed composite girder I: experimental study of negative moment[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1992, 118(10):2743-2762.
- [6] 宗周红,郑则群,房贞政,等. 体外预应力钢-混凝土组合梁试验研究[J]. *中国公路学报*, 2002, 15(1):44-49. (ZONG Zhouhong, ZHENG Zequan, FANG Zhenzheng, et al. Experimental study of external prestressed steel-concrete composite continuous beams [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2002, 15(1): 44-49. (in Chinese))
- [7] 宗周红,车惠民. 预应力钢-混凝土组合梁有限元非线性分析[J]. *中国公路学报*, 2000, 13(2):48-51. (ZONG Zhouhong, CHE Huimin. Nonlinear analysis of prestressed composite steel-concrete beams by the finite element method[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2000, 13(2):48-51. (in Chinese))
- [8] 聂建国,李绍敬,李晨光,等. 预应力钢-混凝土连续组合梁内力重分布试验研究[J]. *工业建筑*, 2003, 33(12):12-14. (NIE Jianguo, LI Shaojing, LI Chenguang, et al. Experimental study on internal force redistribution of steel-concrete continuous composite beams[J]. *Industrial Construction*, 2003, 33(12): 12-14. (in Chinese))
- [9] 陈世明,孙森泉,张志彬. 体外预应力钢-混凝土组

- 合梁负弯矩区的承载力研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 14-20. (Chen Shiming, Sun Senquan, Zhang Zhibin. Load carrying capacity of steel-concrete composite beams with external tendons under negative bending[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 14-20. (in Chinese))
- [10] Eurocode 4 Part 1: general rules and rules for buildings[S]. Revised draft. 1991.
- [11] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. (GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. (in Chinese))
- [12] 王彤,王宗林,张树仁,等. 任意配筋条件下体外预应力混凝土简支梁极限分析[J]. 中国公路学报. 2002, 15(4): 62-67. (WANG Tong, WANG Zonglin, ZHANG Shuren, et al. Ultimate analysis for externally prestressed simple supported concrete beam with random reinforcement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(4):62-67. (in Chinese))
- [13] 房贞政,宗周红. 无粘结预应力筋极限应力的变形协调系数法[J]. 土木工程学报,1995,28(1):55-63. (Fang Zhenzheng, Zong Zhouhong. Calculation of ultimate stress in unbonded tendons by strain compatibility coefficient method[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(1): 55-63. (in Chinese))
- [14] 杜进生,刘西拉. 基于结构变形的无粘结预应力筋应力变化研究[J]. 土木工程学报, 2003,36(8):12-19. (Du Jinsheng, Liu Xila. Research on the variations of unbounded prestressed tendons stresses based upon the structural deformation[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(8): 12-19. (in Chinese))
- [15] 何政,欧进萍. 钢筋混凝土结构非线性分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007. (HE Zheng, OU Jinping. Nonlinear analysis of reinforced concrete structures[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007. (in Chinese))
- [16] 张彦玲,李运生,樊健生. 连续组合梁弯矩重分布特征及其随荷载的变化规律[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2011, 42(2): 449-455. (ZHANG Yanling, LI Yunsheng, FAN Jiansheng. Characteristics of bending moment redistribution and changing law with load in continuous composite beams[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(2): 449-455. (in Chinese))
- [17] Hsu Thomas T C, Mo Y L. Softening of concrete in torsional members-prestressed concrete[J]. ACI Journal, 1985, 82(5):603-615.
- [18] 李绍敬. 预应力及其加固钢-混凝土连续组合梁的试验研究[D]. 北京:清华大学,2003. (LI Shaojing. Experimental study on prestressed and prestress reinforced continuous steel-concrete composite beams [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese))