

# 火灾下有粘结预应力混凝土简支梁板的 变形非线性分析

欧阳志为, 郑文忠

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:**采用 ANSYS 程序计算得到梁板截面的温度场, 然后用 FORTRAN 语言编写程序对高温下有粘结预应力混凝土简支梁板的变形进行了非线性分析。在非线形分析过程中, 采用纤维元模型, 考虑了力与温度的相互耦合的影响, 得到梁板沿长度方向各个截面的弯矩-曲率关系, 采用共轭梁法计算了火灾下有粘结预应力混凝土简支梁板的变形。将程序计算结果与有关文献的试验数据进行比较, 吻合程度较好。同时, 分别对大跨度有粘结预应力混凝土简支梁和板在 ISO 标准升温情况下的变形进行了非线性分析。经过计算可知, 大跨度有粘结预应力混凝土简支梁在正常设计荷载水平下具有较高的耐火极限。

**关键词:**土木建筑结构; 火灾; 预应力混凝土; 变形; 非线性分析

**中图分类号:** TU375    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1671-5497(2009)02-0402-06

## Nonlinear analysis on deflection of prestressed concrete bonded simply supported beam and slab subjected to fire

OUYANG Zhi-wei, ZHENG Wen-zhong

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** The temperature fields of the beam and slab were calculated by ANSYS program, and the nonlinear analysis on the deflection of the prestressed concrete bonded simply supported beam and slab subject to fire was performed by the compiled FORTRAN program. In the nonlinear analysis a fiber element model was adopted and the coupling effect of the load and temperature was taken into account. The bending moment versus curvature relationship in all sections along the span of the beam and slab was got through analysis. The deflections of the prestressed bonded simply supported beam and slab subject to fire were obtained using the method of conjugate beam. The calculation results by the program were compared with the experimental data in related references, and a good agreement was demonstrated. Besides, the nonlinear analyses were also done on the deflections of the large-span prestressed concrete bonded simply supported beam and slab respectively in ISO standard temperature rise conditions, and the results show that the large-span prestressed concrete bonded simply supported beam has a good fire resistance under the normal design load level.

**收稿日期:** 2008-01-07.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50678050); 黑龙江省杰出青年科学基金项目(2001-8).

**作者简介:** 欧阳志为(1981-), 男, 博士研究生. 研究方向: 工程结构抗火设计. E-mail: ouyangzhiwei@126.com

**通信作者:** 郑文忠(1965-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 现代预应力结构, 工程结构评价与加固改造技术, 工程结构抗火设计. E-mail: hitwzzheng@163.com

**Key words:** civil architectural engineering; fire; prestressed concrete; deflection; nonlinear analysis

已有的火灾下预应力混凝土结构性能的研究多以试验研究为主,存在试验费用较高、模型尺寸不能过大、试验现象描述相对宏观等局限性,仅依靠试验的研究结果来指导工程应用可靠性差。在这种情况下开展火灾下预应力混凝土结构的非线性有限元分析显得尤为重要。文献[1]直接采用 ANSYS 软件对预应力混凝土梁板在火灾下的变形进行了结构分析,并给出了简化的计算结果。然而在其计算过程中,将由荷载作用产生的变形和由温度产生的变形分开考虑,并没有考虑力与温度的相互耦合作用。

本文首先采用 ANSYS 软件计算截面的温度场,然后编写 FORTRAN 语言的程序计算梁板在所求温度场下的结构变形。在结构变形分析中,采用纤维元模型,考虑了力与温度的相互耦合的影响,开展了基于截面的弯矩-曲率分析,得到梁板沿长度方向各个截面的弯矩-曲率关系后,采用共轭梁法计算得到有粘结预应力混凝土梁板的变形。

## 1 温度场计算

采用 ANSYS 软件对梁板截面的温度场进行分析。在分析过程中,假定梁板沿长度方向的温度场分布相同,而沿着截面方向的温度场分布不同。由于非预应力筋、预应力筋对温度分布的影响较小,不考虑其在温度场计算中的作用,将截面当成均匀材料进行处理。

梁为三面受火,板为一面受火。利用对称性可以将梁、板的温度场分别简化为二维、一维问题进行计算。混凝土的导热系数、比热、密度、迎火面换热系数和背火面换热系数采用文献[1]所给的公式进行计算。

## 2 结构变形分析

### 2.1 基本假定

在结构的变形分析中,需要满足以下基本假定:①平截面假定;②不考虑有粘结预应力筋、非预应力筋与混凝土之间的粘结滑移;③不考虑剪切变形、翘曲和扭转的影响。

### 2.2 程序框图

在分析过程中,先得到所划分各个截面的弯矩-曲率关系,再通过各截面的弯矩-曲率关系得

到控制截面上任意一点的荷载-挠度曲线,最后由施加的外荷载大小得到所求控制截面的挠度值。

整个结构变形分析过程采用 FORTRAN 语言编制,程序的流程如图 1 所示。

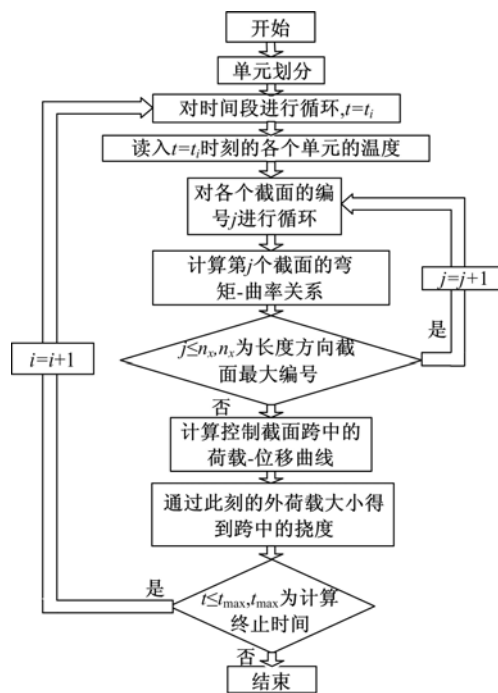


图 1 计算流程图

Fig. 1 Flowchart for calculation

### 2.3 弯矩-曲率关系

采用纤维元模型进行非线性分析。首先,沿梁板长度方向将其离散为如图 2 所示的若干个段单元。用段单元中间的截面来描述整个段单元的行为特性。曲线布置的预应力筋在段单元内近似取为直的,其在段单元中的位置由段单元两个端部的位置来确定。然后,将每个段单元沿截面离散为多个棱柱体的小单元,其截面模型见图 3。

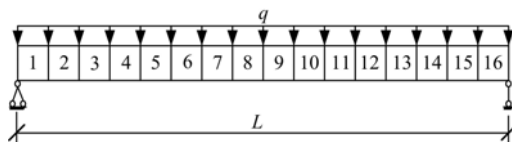


图 2 沿梁板跨度方向的段单元

Fig. 2 Segment elements along the span of beams or slabs

混凝土单元升温时的总应变  $\epsilon_c$  由应力作用下的应变  $\epsilon_\sigma$ 、热膨胀变形  $\epsilon_{th}$ 、短期高温徐变  $\epsilon_{cr}$ 、瞬态热应变  $\epsilon_r$  组成,即

$$\epsilon_c = \epsilon_\sigma + \epsilon_{th} + \epsilon_{cr} + \epsilon_r \quad (1)$$

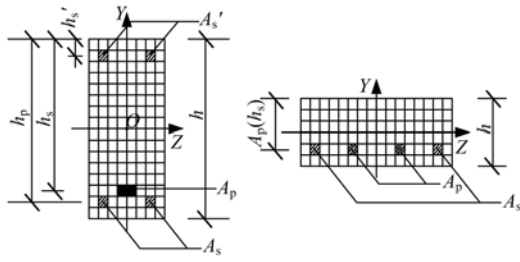


图 3 有粘结预应力的混凝土梁、板的截面单元划分

Fig. 3 Section grid of bonded prestressed concrete beams and slabs

混凝土的应力-应变关系以及短期高温徐变、瞬态热应变的计算公式采用文献[2]中的计算公式。

混凝土的热膨胀变形与骨料类型、湿度状态等多种因素有关,国内外不同文献给出了多个不同的计算公式<sup>[1,3]</sup>,本文选用 T. T. Lie 所提出的计算式

$$\epsilon_{th} = (0.008T + 6) \times 10^{-6} \Delta T \quad (2)$$

$$T \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

对于非预应力钢筋,升温时的总应变  $\epsilon_s$  由应力作用下的应变  $\epsilon_{sr}$ 、热膨胀变形  $\epsilon_{sth}$  和短期高温徐变  $\epsilon_{scr}$  组成,即

$$\epsilon_s = \epsilon_{sr} + \epsilon_{sth} + \epsilon_{scr} \quad (3)$$

非预应力筋的应力-应变关系采用文献[2]中的计算公式。

非预应力筋在高温下的膨胀变形采用 Eurocode 4 的计算公式<sup>[4]</sup>

$$\epsilon_{sth} = \begin{cases} -2.416 \times 10^{-4} + 1.2T + 0.4 \times 10^{-8} T^2, & 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 750 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 11 \times 10^{-3}, & 750 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 860 \text{ } ^\circ\text{C} \\ -6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} T, & 860 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

非预应力筋在高温下的短期徐变采用日本学者 Tsutomu Usami 提出的计算公式<sup>[5]</sup>

$$\epsilon_{str} = 10^{a/T+b} \sigma_s^{c/T+d} t^{eT+f} \text{sgn}(\sigma_s) \quad (5)$$

式中: $\epsilon_{str}$  的单位为  $100 \mu\text{s}$ ;  $\sigma_s$  的单位为  $\text{kg}/\text{mm}^2$ ;  $a, b, c, d, e, f$  为常数,取值分别为  $-7.45 \times 10^3, 3.71, 1.78 \times 10^3, 1.82, 6.47 \times 10^{-4}, -1.51 \times 10^{-1}$ 。

与非预应力筋相似,升温时预应力的总应变  $\epsilon_p$  由应力作用下的应变  $\epsilon_{pr}$ 、热膨胀变形  $\epsilon_{pth}$ 、短期高温徐变  $\epsilon_{pcr}$  以及初应变  $\epsilon_{p0}$  组成,即

$$\epsilon_p = \epsilon_{pr} + \epsilon_{pth} + \epsilon_{pcr} + \epsilon_{p0} \quad (6)$$

文献[6]对工程中常用的预应力钢筋在高温

下的性能进行了系统的试验研究,给出了其在高温下的应力-应变关系、膨胀变形、短期高温徐变的计算公式。

将梁板沿着长度 X 方向划分为  $n_1$  份,高度 Y 方向划分为  $n_2$  份,宽度 Z 方向分成  $n_3$  份。截面上任意一单元的形心坐标为  $(x_i, y_j, z_k)$ , 单元的面积  $A_{ijk}$ 。截面内非预应力筋有  $n_s$  根,面积为  $A_{sl}$ ; 预应力筋  $n_p$  根,面积为  $A_{pm}$ 。其中,  $l=1, 2, \dots, n_s; m=1, 2, \dots, n_p$ 。

根据平截面假定,可得单元的总应变为

$$\epsilon_{ijk} = \epsilon_0 - \left(\frac{h}{2} - y_i\right) \varphi \quad (7)$$

式中: $\epsilon_0$  为截面  $i$  的上边缘混凝土应变; $\varphi$  为截面  $i$  的曲率。

由截面的力、弯矩平衡方程可得计算公式

$$\sum_{k=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_2} \sigma_{ijk} A_{ijk} + \sum_{l=1}^{n_s} \sigma_{sl} A_{sl} + \sum_{m=1}^{n_p} \sigma_{pm} A_{pm} = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_2} \sigma_{ijk} A_{ijk} y_j + \sum_{l=1}^{n_s} \sigma_{sl} A_{sl} y_l + \sum_{m=1}^{n_p} \sigma_{pm} A_{pm} y_m = M_i \quad (9)$$

建立上述方程后,可以计算截面  $i$  的弯矩-曲率关系。具体的计算步骤如下:

(1) 取曲率  $\varphi = \varphi + \Delta\varphi$ 。

(2) 假定混凝土上边缘的应变为  $\epsilon_0$ 。

(3) 采用式(7)得到各个单元的总应变。

(4) 读入该时刻各单元的温度。考虑热-力耦合的关系,计算从初始升温到该时刻各单元内混凝土、非预应力筋、预应力筋的膨胀变形,短期高温徐变以及混凝土单元的瞬态热应变。由各单元的总应变扣除上述应变,并考虑预应力筋的初应变,就可以分别得到各单元内混凝土、非预应力筋、预应力筋由应力引起的应变,即

$$\epsilon_\sigma = \epsilon_c - \epsilon_{th} - \epsilon_{cr} - \epsilon_{tr} \quad (10)$$

$$\epsilon_{s\sigma} = \epsilon_s - \epsilon_{sth} - \epsilon_{scr} \quad (11)$$

$$\epsilon_{p\sigma} = \epsilon_p - \epsilon_{pth} - \epsilon_{pcr} - \epsilon_{p0} \quad (12)$$

(5) 将各单元内混凝土、非预应力筋、预应力筋由应力引起的应变代入各自在高温下的应力-应变关系,可以分别得到各单元混凝土、非预应力筋、预应力筋的应力。

(6) 将各个单元混凝土、非预应力筋、预应力筋的应力代入式(8),判别是否满足力平衡条件。

(7) 如果不满足力平衡条件,则调整混凝土上边缘应变  $\epsilon_0$ , 重复步骤(3)~(6); 如果满足力平衡

条件,则按式(9)得到与曲率  $\varphi$  对应的截面  $i$  的弯矩  $M_i$ 。

(8)循环步骤(1)~(7),可以得到截面  $i$  的弯矩-曲率关系。

同理可得其余各个截面的弯矩-曲率关系。

### 2.4 荷载-挠度曲线

在得到梁板各个截面的弯矩-曲率曲线后,就可以采用共轭梁法<sup>[7-8]</sup>计算得到梁板任意点的荷载-挠度曲线。得到控制截面的荷载-位移曲线后,通过该时刻的外荷载大小经过计算可得到控制截面的挠度。

## 3 试验验证

文献[9]对先张有粘结预应力混凝土简支板 PSS-1,后张有粘结预应力混凝土简支梁 PSBA-1、PSBA-3 的抗火性能进行了试验研究。本文将对试验跨中变形结果与程序计算结果进行比较,以验证程序计算模型的合理性。

### 3.1 先张有预应力混凝土简支板

PSS-1 为单面受火,环境温度按照  $T = 300 \lg(8t+1) + 14$  进行升温。

PSS-1 的温度场和变形计算总时间均为 58 min,每一个子步的时间间隔为 1 min。由 ANSYS 计算得到升温 58 min 时,PSS-1 沿厚度方向的温度场如图 4 所示。

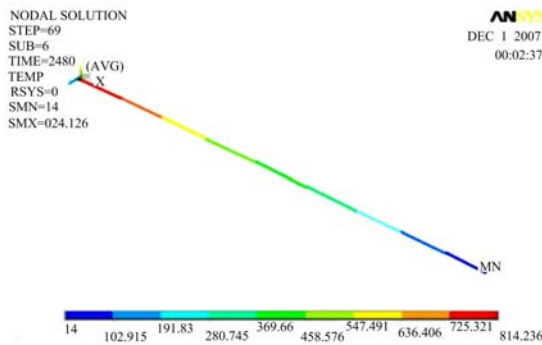


图 4  $t=58$  min 时板 PSS-1 沿厚度方向的温度场  
Fig. 4 Temperature field along the depth in Slab PSS-1 at  $t=58$  min

用所编写的程序进行计算,可以得到 PSS-1 跨中变形的试验值与计算值随时间的变化,如图 5 所示。

### 3.2 后张有预应力混凝土简支梁

PSBA-1、PSBA-3 为三面受火,环境温度按照  $T = 300 \lg(8t+1) + 14$  进行升温。

PSBA-1、PSBA-3 的温度场和变形每隔 1

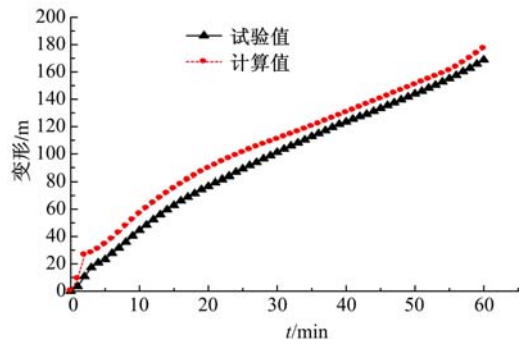


图 5 板 PSS-1 的跨中变形计算值与试验值的比较  
Fig. 5 Comparison of the variation of the calculated and measured vertical deflection at midspan of Slab PSS-1 with time

min 计算一次,计算总时间为 30 min。在温度场计算中,由于忽略了钢筋的影响,按截面尺寸和受火条件相同的梁 PSBA-1、PSBA-3 计算得到的截面温度场相同。

为减少计算量,利用梁截面的对称性,取截面的一半进行温度场计算,得到升温 30 min 时 PSBA-1、PSBA-3 的截面温度场,如图 6 所示。

经过计算,得到 PSBA-1、PSBA-3 的跨中变形计算值与试验值随时间的变化如图 7 所示。

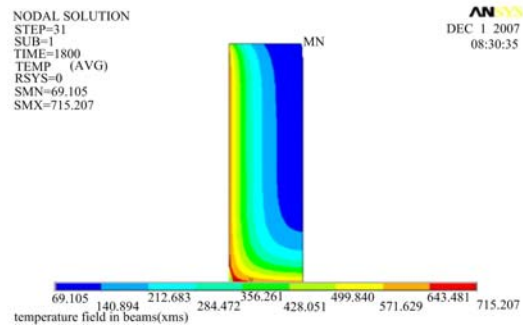


图 6  $t=30$  min 时 PSBA-1、PSBA-3 截面的温度场  
Fig. 6 Temperature field of cross-section in beam PSBA-1 and beam PSBA-3 at  $t=30$  min

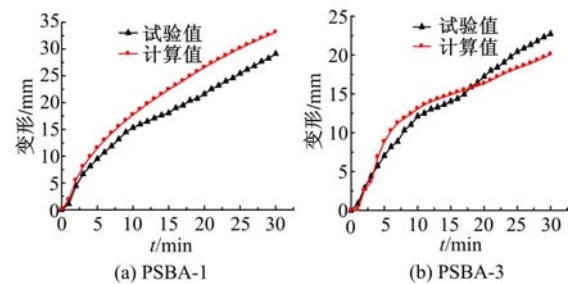


图 7 跨中变形计算值与试验值的比较曲线  
Fig. 7 Comparison of the variation of the calculated and measured deflection at midspan of beam

## 4 火灾下实际大跨度预应力混凝土梁板的计算分析

火灾试验受试验条件所限,试验梁板的尺寸通常较实际工程中的梁板小。为了更清楚地了解实际大跨度有粘结预应力混凝土简支梁板的耐火性能,本文将对火灾下实际大跨度有粘结预应力混凝土简支梁板进行计算分析,并验算其变形是否满足所要求的耐火等级。

### 4.1 大跨度预应力混凝土简支板

**算例 1** 有粘结预应力混凝土简支板 JZB-1 的跨度为 12 m,板厚为 270 mm,板宽为 1 m。承受均布恒载 10 kPa,活荷载 3.5 kPa,活荷载准永久系数取为  $\varphi_q=0.4$ 。混凝土的强度取值与 PSS-1 相同。预应力筋配筋为  $A_p=\Phi^s15@140$ ,非预应力筋配筋为  $A_s=\Phi16@140$ 。非预应力筋的保护层厚度为 25 mm。预应力筋的筋型图如图 8 所示。HRB335 钢筋的屈服强度、极限强度分别为 412 和 565 MPa,预应力钢绞线的极限强度为 2000 MPa,预应力筋的初始有效预应力为 1042 MPa。板为单面受火,迎火面的升温曲线按 ISO 的标准升温曲线计算。

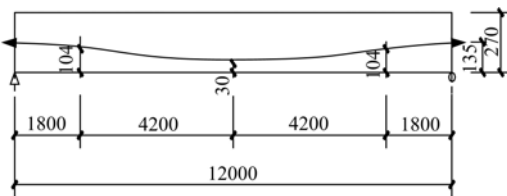


图 8 简支板 JZB-1 的筋型布置图

Fig. 8 Profile of prestressing tendon in Slab JZB-1

我国的防火试验规范中规定,梁板最大挠度超过计算跨度的 1/20,则认为梁板达到耐火极限。一级耐火等级的建筑物其楼板的耐火极限不小于 1.5 h,即 90 min<sup>[1]</sup>。

#### (1) 变形计算

计算所得板 JZB-1 的跨中变形随时间的变化曲线见图 9。由图可见,升温到 71 min 时,JZB-1 的跨中变形计算值为 599.65 mm,达到板计算跨度的 1/20。升温到 100 min 时,跨中变形的计算值为 866.42 mm。JZB-1 由最大变形得到的耐火极限为 71 min,不满足一级耐火等级的要求。

#### (2) 正截面受弯承载力验算

火灾下预应力混凝土梁板正截面受弯承载力按文献[1]中的估算方法计算,受拉区为迎火面的

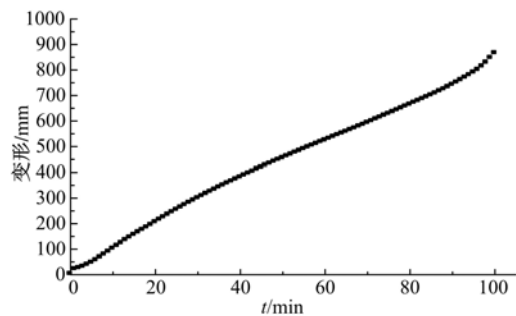


图 9 JZB-1 的跨中变形随时间的变化曲线

Fig. 9 Variation of the calculated vertical deflection at midspan of Slab JZB-1 with time

受弯构件不考虑火灾下压区混凝土强度的变化,仅考虑高温对受拉钢筋强度的影响。

升温到 71 min 时,跨中控制截面的承载力为  $M_m^t=241.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,外荷载作用下的跨中弯矩  $M_{load}^t=205.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。 $M_m^t > M_{load}^t$ ,说明升温到 71 min 时正截面受弯承载力满足要求。

(3) 由变形计算和正截面承载力验算综合可知,JZB-1 的耐火极限为 71 min,不满足一级耐火等级要求。

### 4.2 大跨度预应力混凝土简支梁

**算例 2** 有粘结预应力混凝土简支梁 JZL-1 的跨度为 24 m,截面为  $b\times h=500 \text{ mm}\times 1000 \text{ mm}$ ,承受线性均布恒载 30 000 N/m,线性均布活荷载 3000 N/m,活荷载准永久系数取为  $\varphi_q=0.4$ 。预应力筋配筋为  $A_p=1-2\times 8\Phi^s15$ ,梁下部非预应力筋配筋为  $6\Phi 25$ ,上部非预应力筋为  $2\Phi 25$ ,上下非预应力筋的保护层厚度均为 25 mm。预应力筋的筋型图如图 10 所示。混凝土的强度取值与 PSBA-1 相同,HRB400 钢筋的屈服强度、极限强度分别为 450 和 590 MPa,预应力钢绞线的极限强度为 2000 MPa,预应力筋的初始有效预应力为 1042 MPa。梁为三面受火,迎火面的升温曲线按 ISO 标准升温曲线计算。

算例 2 的计算步骤与算例 1 相似。一级耐火等级的建筑物的简支梁的耐火极限不小于 2.0

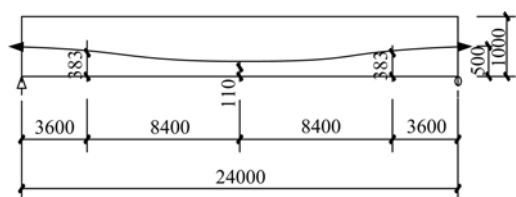


图 10 简支梁 JZL-1 的筋型布置图

Fig. 10 Profile of prestressing tendon in Beam JZL-1

h, 即 120 min<sup>[1]</sup>。

### (1) 变形计算

计算得到梁 JZL-1 的跨中变形随时间的变化曲线如图 11 所示。

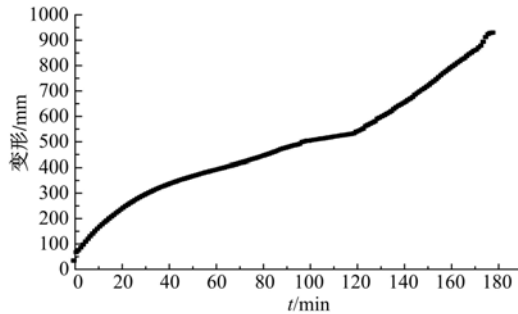


图 11 JZL-1 的跨中变形随时间的变化

Fig. 11 Variation of the calculated vertical deflection at midspan of Beam JZL-1 with time

升温到 120 min 时, JZL-1 跨中变形计算值为 528.64 mm, 升温到 179 min 时, 跨中变形计算值为 926.07 mm。升温到 120 min 时, 最大变形小于计算跨度的 1/20, 满足一级耐火等级要求。

### (2) 正截面受弯承载力验算

分别计算各根非预应力筋的屈服强度和预应力筋的条件屈服强度, 得到跨中控制截面处受弯承载力  $M_m^r = 3113.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。外荷载作用下的跨中弯矩  $M_{\text{load}}^r = 2246.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。  $M_m^r > M_{\text{load}}^r$ , 说明升温到 90 min 时正截面受弯承载力满足要求。

(3) 由变形计算和正截面承载力验算可知, JZL-1 的耐火极限超过 120 min, 满足一级耐火等级要求。

从算例的计算结果可知, 在正常设计荷载水平下, 大跨度的预应力混凝土简支梁在火灾下的抗火性能较好, 具有较高的耐火极限。由于大跨度预应力混凝土梁截面尺寸较大, 承担大部分荷载的预应力筋混凝土保护层较厚, 升温时预应力筋温度相对较低, 抗力下降小, 因此梁的承载力下降幅度小。当截面较大时, 只有靠近迎火面边缘部分混凝土温度较高, 弹性模量降低幅度大, 而其余大部分截面温度较低, 混凝土弹性模量降低幅度小, 因此整个截面的刚度降低幅度有限, 火灾下梁的最大变形与跨度的比值较小。

## 5 结束语

采用非线性有限元分析对火灾下有粘结预应力混凝土简支梁板的变形进行了计算, 所得到的

结果与相关试验数据吻合较好, 验证了本文方法的合理性, 为进行大量的有粘结预应力混凝土简支梁板的抗火性能分析提供了依据。

采用本文的模型, 分别对大跨度的有粘结预应力混凝土简支梁和板在 ISO 标准升温情况下的变形进行了非线性分析。计算结果表明, 大跨度预应力混凝土简支梁的抗火性能较好, 在正常设计荷载水平下具有较高的耐火极限。

### 参考文献:

- [1] 许名鑫. 预应力混凝土梁板抗火性能试验与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2006. Xu Ming-xin. Experiment and analysis on fire resistance of prestressed concrete beam and slab[D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2006.
- [2] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] Cai Jun, Burgess Ian, Plank Roger. A generalized steel/reinforced concrete beam-column element model for fire conditions[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 817-833.
- [4] CEN (European Committee for Standardization). EN1994 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1. 2: Structural Rules — Structural Fire Design[S].
- [5] 王中强. 无粘结预应力混凝土扁梁抗火性能的试验研究与理论[D]. 长沙: 中南大学土木建筑学院, 2006. Wang Zhong-qiang. The experimental research and theoretical analysis of fire-resistance behaviors of unbonded prestressed concrete flat beam[D]. Changsha: School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, 2006.
- [6] 张昊宇. 预应力钢丝的抗火性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2005. Zhang Hao-yu. Research on fire resistance of prestressing steel wire[D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2005.
- [7] 吕西林, 金国芳, 吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
- [8] 顾祥林, 孙飞飞. 混凝土结构的计算机仿真[M]. 上海: 同济大学出版社, 2000.
- [9] 郑文忠, 许名鑫, 杨杰, 等. 预应力混凝土简支板抗火性能试验与分析[C]// 第三届全国钢结构防火及防腐技术研讨会暨第一届全国结构抗火技术交流会, 福州, 2005.