

## 体外预应力加固钢筋混凝土承重梁计算方法研究

②  
7-9

刘 航 李晨光

TU375.102

~~TU375~~ TU375.102

## 一、概述

结构的加固技术是目前建筑工程领域一个重要的课题。在众多的结构加固方法中, 预应力加固法是一种简便可靠, 行之有效的方法。目前关于预应力加固计算方法的系统研究进行得较少, 通常只是将加固后的结构按普通预应力混凝土结构进行处理, 忽略了加固梁自身的一些特点。

本文在多根简支梁、连续梁和框架梁预应力加固试验的基础上, 编制了预应力加固钢筋混凝土梁的非线性全过程分析程序, 根据试验结果和非线性分析结果, 提出了体外预应力加固钢筋混凝土承重梁的承载力设计计算方法。

## 二、预应力加固钢筋混凝土梁主要试验结果

本文进行了4根框架梁、2根连续梁和2根简支梁采用直线和折线体外预应力筋加固的全过程试验, 其中框架梁的有关试验情况可参阅文献[1]。试验得到的有关加固梁在承载力极限状态的主要试验结果简述如下:

对于钢筋混凝土连续梁和框架梁等超静定结构, 当采用折线预应力筋进行加固时, 预应力筋的极限应力增量较大, 达到破坏时, 负弯矩截面未形成完全的塑性铰, 计算时应考虑预应力产生的次弯矩的影响; 当采用直线预应力筋进行加固时, 预应力筋的极限应力增量较小, 与普通无粘结预应力结构的极限应力增量相近, 达到破坏时, 负弯矩截面也未形成完全的塑性铰, 预应力次弯矩对支座截面是有利的, 对跨中截面是不利的, 计算时应予以考虑。

对于钢筋混凝土简支梁, 采用折线预应力筋和采用直线预应力筋的加固效果相差不大, 主要取决于预应力反弯矩的大小。预应力筋的极限应力增

量高于普通无粘结预应力结构的极限应力增量。

## 三、预应力加固钢筋混凝土梁非线性全过程分析

## 1、计算程序的编制

为进一步了解预应力加固钢筋混凝土梁的受力特点, 编制了预应力加固钢筋混凝土梁的非线性全过程分析程序, 该程序的基本计算假定如下:

(1) 梁截面(预应力筋除外)应变满足平截面假定;

(2) 预应力筋在加载过程中的伸长量与沿混凝土整个梁长的变形量相协调;

(3) 加载时, 混凝土的本构关系方程如下:

$$\text{受压: 当 } 0 < \varepsilon < \varepsilon_0 \text{ 时, } \sigma = 1.1f_c [2\varepsilon/\varepsilon_0 - (\varepsilon/\varepsilon_0)^2]$$

$$\text{当 } \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_u \text{ 时, } \sigma = 1.1f_c [1 - 0.15(\varepsilon - \varepsilon_0)/(\varepsilon_u - \varepsilon_0)]$$

$$\text{受拉: 当 } 0 < \varepsilon < f_t/E_c \text{ 时, } \sigma = E_c \cdot \varepsilon$$

$$\text{当 } f_t/E_c < \varepsilon < 2f_t/E_c \text{ 时, } \sigma = f_t$$

$$\text{当 } \varepsilon > 2f_t/E_c \text{ 时, } \sigma = 0$$

(4) 卸载时, 混凝土的本构关系参考东南大学蓝宗建等人的工作, 对开裂混凝土, 考虑截面的裂面效应, 详见文献[2]。

(5) 非预应力钢筋的本构关系曲线采用两折线形式, 当钢筋应变低于屈服应变时, 应力为弹性模量与应变之积, 当应变高于屈服应变时, 应力等于屈服强度。

(6) 预应力钢筋的本构关系采用三折线形式, 当预应力筋的应变低于弹性上限时, 应力为弹性模量与应变之积, 当预应力筋应变介于弹性上限与屈服点之间时, 应力按试验确定的折减模量进行计算, 当应变高于屈服点时, 应力按强化

## 体外预应力

模量进行计算。

本程序模拟试验全过程,即先对钢筋砼简支梁加载至 $P_0$ ,然后卸载至 $P_1 < P_0$ ,保持 $P_1$ 不变,施加预应力,然后继续加荷载至破坏。

### 2、预应力筋的极限应力增量

一般而言,普通钢筋砼适筋梁在破坏时,受拉区非预应力钢筋可以达到屈服,受压区混凝土被压碎,对加固梁来说,试验和计算结果也得到了相同的结论,因此,本文将主要分析加固梁的预应力筋在承载力极限状态的受力特点。

对于加固梁的截面抗弯承载力,按截面平衡条件可以表述为非预应力筋与预应力筋合作用与内力臂的乘积,因此,只要确定预应力筋的极限应力就可以求得加固梁的抗弯承载力。预应力筋的极限应力可以表述为有效张拉应力和极限应力增量之和:

$$\sigma_p = \sigma + \Delta \sigma_p \quad (1)$$

关键在于如何确定极限应力增量 $\Delta \sigma_p$ 。

影响预应力筋极限应力增量的因素较多,包括预应力筋配筋率 $\rho_p$ 、非预应力筋配筋率 $\rho_s$ 、有效预应力 $\sigma_{pe}$ 和预应力筋位置 $h_p$ 与弯折角度 $\theta$ 等。

用程序对加固梁进行了变参数分析,分析结果表明,在各项影响因素中,除弯折角度 $\theta$ 对预应力筋极限应力增量 $\Delta \sigma_p$ 的影响较小外,其它影响因素均对 $\Delta \sigma_p$ 有显著影响。其中预应力筋配筋率 $\rho_p$ 、非预应力筋配筋率 $\rho_s$ 、有效预应力 $\sigma_{pe}$ 的增大可以使 $\Delta \sigma_p$ 变小,预应力筋离梁顶的距离 $h_p$ 越大, $\Delta \sigma_p$ 也越大。此外,混凝土强度也对 $\Delta \sigma_p$ 有较大影响, $\Delta \sigma_p$ 随混凝土强度的增大而增大。

由于体外预应力筋的变形与梁沿整个跨度的变形相协调, $\Delta \sigma_p$ 的变化规律应与无粘结预应力筋相似,可将上述影响因素综合考虑为预应力筋配筋指标 $\beta_p = A_p / j_{cm} b h_p$ 、非预应力筋配筋指标 $\beta_s = j_s A_s / j_{cm} b h_p$ 的函数,经过对上述变参数的四十多根梁的计算结果的回归分析, $\Delta \sigma_p$ 可近似按下

式进行计算:

$$\Delta \sigma_p = 700 - (1330 \beta_p + 1100 \beta_s) \quad (2)$$

应该指出,式(2)不适用于 $\beta_p + \beta_s > 0.45$ 的情况,当 $\beta_p + \beta_s > 0.45$ 时, $\beta_p$ 和 $\beta_s$ 对 $\Delta \sigma_p$ 的影响按非线性显著减小。另外,当按式(1)(2)计算得到的预应力筋极限应力高于屈服强度时,按屈服强度进行计算。

式(2)是根据三分点加载的加固简支梁分析得到的,由于加载方式对预应力筋极限应力增量的影响较小,式(2)可以适用于其它荷载作用下的简支梁,但该计算结果并不适用于连续梁和框架梁等超静定结构。

对折线加固的预应力筋,在纯弯状态下,弯折角对预应力极限应力增量的影响较小,但如综合考虑剪弯段的影响, $h_p$ 应取沿整个跨度的加权平均值。

### 四、预应力加固钢筋砼承重梁抗弯承载力计算方法

#### 1、简支梁抗弯承载力计算方法

$$M = f_t A_s (h_0 - x/2) + \sigma_p A_p (h_p - x/2) + f_t' A_s' (x/2 - a_s') \quad (3)$$

混凝土受压区高度 $x$ 按下式确定:

$$f_{cm} b x = f_t A_s + \sigma_p A_p - f_t' A_s' \quad (4)$$

式中, $\sigma_p$ 按式(1)(2)计算,对于折线预应力加固梁,应根据具体计算截面和弯折情况考虑角度的影响,如对试验梁的跨中截面,应将 $\sigma_p$ 的计算结果乘以 $\cos \theta$ 。

#### 2、连续梁和框架梁抗弯承载力计算方法

##### (1) $\sigma_p$ 的计算方法

对于连续梁和框架梁的控制截面,按其截面平衡条件,其抗弯承载力可以按式(3)(4)进行计算,但 $\sigma_p$ 的计算方法与简支梁不同。

简支梁在受力过程中,沿整个梁长形成单一的挠曲线,因此对直线预应力筋来说,如果预应力筋锚固在中和轴以下,其伸长量必然随外荷载的增大而增大。而在连续梁或框架梁结构中,梁在跨中部位产生的挠曲方向与支座部位相反,如

## 体外预应力

果采用布置在中和轴下的直线预应力筋,在加载过程中,跨中部位的挠曲线虽然使得预应力筋伸长,支座部位的变形却使得预应力筋缩短。因此,对直线预应力筋加固连续梁和框架梁的情况,预应力筋的极限应力增量应小于式(2)的计算值。

根据上述分析,计算连续梁或框架梁采用直线预应力筋加固的极限预应力增量 $\sigma_{pl}$ 时,可按下式进行计算:

$$\Delta \sigma_{pl} = k_1 \cdot \Delta \sigma_p \quad (5)$$

式中, $\Delta \sigma_p$ 按式(2)进行计算; $k_1$ 为折减系数,按下式计算:

$$k_1 = 1 - (1 + M^+/M^-) l/l \quad (6)$$

式中, $l$ 为预应力筋连续跨总长度; $l$ 为梁弯段总长度; $M^-$ 为按弹性分析求得的负弯矩值; $M^+$ 为按弹性分析求得的正弯矩值。

对按结构弯矩图布置的折线预应力筋加固方案,由于预应力筋在跨中和支座部位均产生伸长,其性能类似于纯弯段内的直线预应力筋,因此预应力筋的极限应力增量仍可按式(2)进行计算,但在计算 $h_p$ 时,应取沿整个跨度的加权平均值。

### (2) 次弯矩的影响

在由截面抗弯能力反求外荷载时,应该计入

表1 计算结果与试验结果的比较

试件 编号	$\sigma_p$ (MPa)		$M_u$ (kN.m)		$P_u$ (kN)	
	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
SB1	1628	1603	494	444	206	185
CB1	1276.6	1277	65.3	67.4	132	136
CB2	1312.6	1272	82.4	89.0	172	186
SF1	1139.2	1147	41.3	45.3	77	84
SF2	1487.2	1460	60.5	53.5	122	108.5
DF1	1241.6	1296	54.4	51.9	122	116
DF2	1043.8	1060	37.9	39.9	75	78.5

注: $M_u$ 实测值为按 $P_u$ 和预应力实测值计算的弹性弯矩(考虑次弯矩)

预应力对结构产生的次弯矩的影响。次弯矩可以按等效荷载方法计算综合弯矩和主弯矩之差求得。在计算次弯矩时,结构的约束条件按未出现塑性较考虑。计算极限状态弯矩时,预应力筋的应力按计算的极限应力取值。

### 3、计算结果与试验结果的比较

按上述计算方法计算了试验的7根梁在承载力极限状态的预应力筋应力 $\sigma_p$ ,截面极限弯矩 $M_u$ 和单点极限荷载 $P_u$ ,计算结果与试验结果的比较列于表1。

由表中计算结果可知,预应力筋极限应力的计算值与试验值之比的平均值为1.000,离散系数为0.025,极限承载力的计算值与试验值之比的平均值为1.007,离散系数为0.089。本文建议的加固梁承载力计算方法的计算结果与试验结果符合较好。

### 五、结论

本文在体外预应力加固钢筋混凝土承重梁的试验结果的基础上,通过非线性全过程分析,提出了加固梁的预应力极限应力增量的计算方法,在此基础上,提出了一套完整的体外预应力加固钢筋混凝土承重梁的抗弯承载力计算方法。

用该方法计算的预应力筋极限应力和抗弯承载力与试验结果符合较好,该计算方法可供工程实践或编制相关的规范、规程参考。

### 参考文献

1. 刘航,李晨光,白常举,体外预应力加固混凝土框架梁的试验研究,建筑技术,1999年第12期。
2. 蓝宗建,庞同和,刘航等,部分预应力混凝土梁裂缝闭合性能的试验研究,建筑结构学报,1998年第1期。
3. J.M.盖尔, W.韦孚,杆系结构分析(边启光译),水利电力出版社,1983年。

注:本文原载于2000年5月中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会后张预应力混凝土结构委员会《第六届后张预应力学术交流会论文集》。