

预应力混凝土受弯构件反向变形控制与验算

解恒燕^{1,2}, 郑文忠¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, xiehy555@163.com; 2. 黑龙江八一农垦大学 工程学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要:为解决国内外有关标准和文献对预应力混凝土受弯构件的变形控制不完善的问题,结合工程实践,经过试算,提出了反向变形限值.对预应力混凝土受弯构件反向变形影响因素进行了分析,对采用限制有效压应力来间接控制预应力混凝土受弯构件反向变形的的方法进行了探讨.对于预应力混凝土板,以计算跨度、跨高比及控制截面预应力筋的位置为影响因素,计算得到了预应力混凝土板控制截面有效压应力限值.对于预应力混凝土梁,以计算跨度、跨高比及梁的负荷范围为影响因素,分析得到了梁控制截面有效压应力变化规律,并计算得到了预应力混凝土梁控制截面有效压应力限值计算公式.

关键词: 预应力混凝土;受弯构件;反向变形;刚度;有效预压应力

中图分类号: TU378.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)08-1199-07

Control and calculation for upward deformation of prestressed concrete flexural member

XIE Heng-yan^{1,2}, ZHENG Wen-zhong¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, xiehy555@163.com;
2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to solve the problem that the control of deflection for prestressed concrete flexural member is not perfect in the current standards and references at home and abroad, combined with the actual practice, the allowable upward deformation was presented after calculation. The influence factors on upward deformation of prestressed concrete flexural member was analyzed, and the method through limiting the effective compressive stress to indirectly control the upward deformation of prestressed concrete flexural member was discussed. For prestressed concrete slabs, the allowable value for the effective compressive stress in the critical section was presented with the following influence factors: span, ratio of span to depth of section and the location of prestressed steel. For prestressed concrete beam, the variability of the effective compressive stress in the critical section was presented with the following influence factors: span, ratio of span to depth of section and load-bearing range. In addition, the calculation formulas of the allowable values for the effective compressive stress in the critical section of prestressed concrete beam were obtained.

Key words: prestressed concrete; flexural member; upward deformation; stiffness; effective compressive stress

目前国内外有关标准和文献对预应力混凝土

受弯构件的变形控制对象都是总变形值^[1-7],即控制按荷载效应的标准组合并考虑荷载长期作用影响的挠度减去两倍张拉预应力筋引起的弹性反拱值不超过规定限值^[8].按照这一规定,常常出现这样一种现象:外载引起的变形很大,反拱值也很大,但总变形值满足规范要求,此时构件使用功能不

收稿日期: 2008-07-10.

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(教科司[2005]290号);国家自然科学基金资助项目(50178026).

作者简介: 解恒燕(1973—),女,博士;

郑文忠(1965—),男,博士生导师,长江学者特聘教授.

佳.我们认为在现有控制总变形的基础上,应对反向变形进行合理的控制.即应对预应力混凝土受弯构件在结构自重及张拉预应力筋引起的等效荷载共同作用下的反向变形值进行有效控制.基于这一思想,结合工程实践,在与部分工程技术人员进行研讨的基础上,提出了反向变形限值.对预应力混凝土受弯构件反向变形影响因素进行了分析,对采用限制有效压应力来间接控制预应力混凝土受弯构件反向变形的的方法进行了探索.

1 预应力混凝土受弯构件变形限值

预应力受弯构件的总变形等于其按荷载效应的标准组合并考虑荷载长期作用影响的最大挠度减去两倍预应力等效荷载所引起的弹性反拱值.预应力混凝土受弯构件的总变形不应超过表1规定的限值^[1].

表1 预应力混凝土受弯构件总变形限值

构件类型		挠度限值
吊车梁	手动吊车	$l_0/500$
	电动吊车	$l_0/600$
屋盖、楼盖及楼梯结构	当 $l_0 < 7$ m 时	$l_0/200 (l_0/250)$
	当 $7 \text{ m} \leq l_0 \leq 9$ m 时	$l_0/250 (l_0/300)$
	当 $l_0 > 9$ m 时	$l_0/300 (l_0/400)$

注:表中 l_0 为计算跨度;括号内的数值适用于使用上对挠度有较高要求的构件;计算悬臂构件的挠度限值时,其计算跨度 l_0 按实际悬臂长度的2倍取用.

为保证预应力混凝土受弯构件在满足表1总变形限值要求时,具有良好的使用性能,在结构自重和预应力等效荷载共同作用下,构件的反向变形不应超过表2规定的限值^[9].

表2 预应力混凝土受弯构件反向变形限值

构件类型		反向变形限值
吊车梁	手动吊车	$l_0/1200$
	电动吊车	$l_0/1500$
屋盖、楼盖及楼梯结构	当 $l_0 < 7$ m 时	$l_0/450$
	当 $7 \text{ m} \leq l_0 \leq 9$ m 时	$l_0/550$
	当 $l_0 > 9$ m 时	$l_0/700 (\leq 50 \text{ mm})$

2 通过限制有效压应力控制预应力混凝土受弯构件反向变形

2.1 计算预应力混凝土受弯构件反向变形时的刚度取值

预应力混凝土受弯构件控制截面平均有效预压应力 σ_{pe} 为

$$\sigma_{pe} = \frac{A_p \sigma_{pe}}{A} \quad (1)$$

式中: A_p 为预应力混凝土受弯构件控制截面预应力筋截面面积 (mm^2); σ_{pe} 为预应力筋的有效预压应力 (N/mm^2); A 为预应力混凝土受弯构件毛截面面积 (mm^2).

一般在结构自重及张拉预应力筋引起的等效荷载共同作用下,中等预压应力及以上的预应力混凝土受弯构件是不开裂的.因此构件短期刚度的计算公式为^[8,10]

$$B_s = 0.85 E_c I_0 \quad (2)$$

式中: E_c 为混凝土弹性模量; I_0 为构件的换算截面惯性矩.

当建筑规模大、层数多时,房屋的建造周期比较长.因此,计算预应力混凝土受弯构件反向变形时应采用长期刚度,计算公式为^[1,3]

$$B = \frac{M_k}{M_q(\theta - 1) + M_k} B_s \quad (3)$$

式中: M_k 为按荷载效应的标准组合计算的弯矩值; M_q 为按荷载准永久组合计算的弯矩值; θ 为考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数.对于预应力混凝土受弯构件:

$$\theta = 2.0 \quad (4)$$

在计算预应力混凝土受弯构件的反向变形时,只考虑结构自重及张拉预应力筋引起的等效荷载,不考虑活荷载的影响.

$$M_k = M_q = M_{gk} + M_p \quad (5)$$

式中: M_{gk} 为按构件净尺寸计算的结构自重产生的控制截面弯矩值,此时不计入装饰荷载; M_p 为预应力等效荷载引起的控制截面弯矩值.

将式(4)及式(5)代入式(3),可算得在计算预应力混凝土受弯构件反向变形时,构件的长期刚度计算公式为

$$B = 0.425 E_c I_0 \quad (6)$$

2.2 分析思路

预应力混凝土受弯构件满足反向变形要求时控制截面有效压应力按图1所示的流程图进行计算.

3 预应力混凝土板有效压应力的计算

3.1 计算对象及影响因素

考虑到一般房屋楼盖、屋盖的预应力混凝土板的跨高比多为 $1/40 \sim 1/50$,多采用无粘结预应力工艺,预应力筋的布置多为一排,因此,预应力混凝土板的反向变形很可能通过限制其控制截面的有效压应力来实现.考虑到在相同跨度、相同板厚、相同预应力筋线型及用量、相同有效预压应力水平的情况下,简支板的反向变形相对于连续板要

大一些,因此,我们暂选择预应力简支板为计算对象.又考虑到当其他条件均相同时,按直线布置预应力筋的简支板比按抛物线布置的简支板反向变形大,因此,我们最后选取按直线布置预应力筋的简支板为计算分析对象.

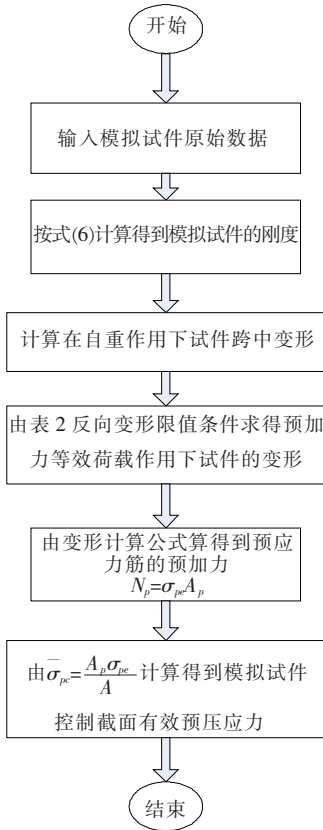


图 1 预应力混凝土受弯构件控制截面有效压应力计算流程图

影响预应力混凝土板反向变形的主要因素有板的计算跨度 l_0 、跨高比 l_0/h 、控制截面预应力筋的位置(取预应力筋的合力点距板下边缘的距离为 a)。随着强度等级的提高,混凝土的弹性模量增大并不显著,强度等级为 C40 的混凝土弹性模量比 C60 混凝土只小 10%,因此将预应力混凝土板的混凝土强度等级统一按 C40 考虑.

3.2 计算结果与分析

预应力混凝土板控制截面有效压应力的影响因素及水平如表 3 所示,按图 1 所示的流程图进行编程计算.

表 3 预应力混凝土板有效压应力的影响因素及水平

l_0/m	l_0/h	a/mm
6	40	30
8	45	35
12	50	40
-	-	45
-	-	0

3.2.1 跨度对预应力混凝土板有效压应力的影响

图 2 分别为跨度 l_0 取 6 m、8 m 及 12 m 时,预应力混凝土板有效压应力 σ_{pc} 随预应力筋位置及 a 跨高比 l_0/h 的变化情况.

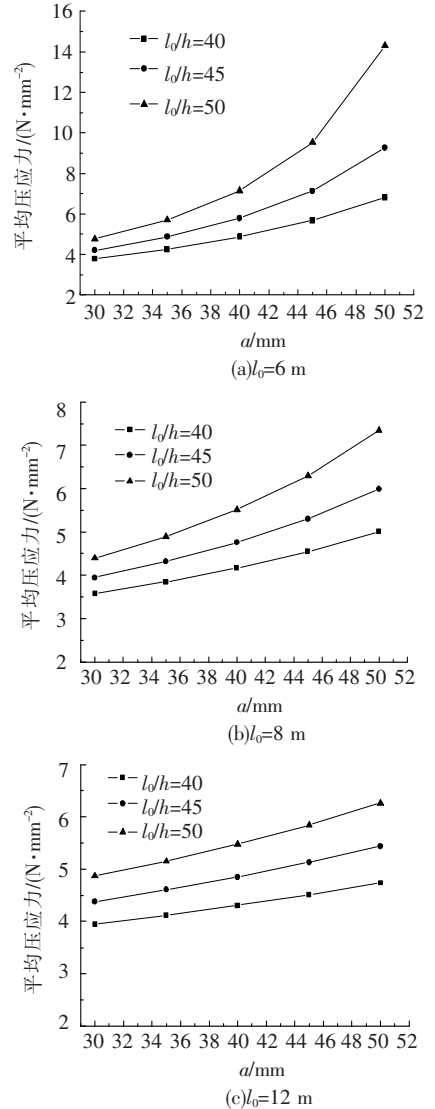


图 2 板 σ_{pc} 随 a 及 l_0/h 的变化情况

由图 2 可以看出,当预应力混凝土板的跨度一定时,随着预应力筋的合力点距板下边缘的距离及跨高比的增大,预应力混凝土板有效压应力增大.

3.2.2 跨高比对预应力混凝土板有效压应力的影响

图 3 分别为跨高比 l_0/h 取 40、45 及 50 时,预应力混凝土板有效压应力 σ_{pc} 随预应力筋位置 a 及板跨度 l_0 的变化情况.由图 3 可以看出,当预应力混凝土板的跨高比一定时,随着控制截面预应力筋的合力点距板下边缘距离的增大及板跨度的减小,预应力混凝土板有效压应力增大.跨度为 $l_0=8$ m 的板预压应力有小于跨度为 $l_0=6$ m 板

的情况,这是由于表2中预应力混凝土受弯构件反向变形限值在 $l_0 = 7\text{ m}$ 处不连续造成的。

部分试验点均在该下包线之上,也就是说,当预应力混凝土板控制截面有效压应力不大于 4.5 N/mm^2 时,基本可满足表2反向变形限值的要求,无需进行详细验算。

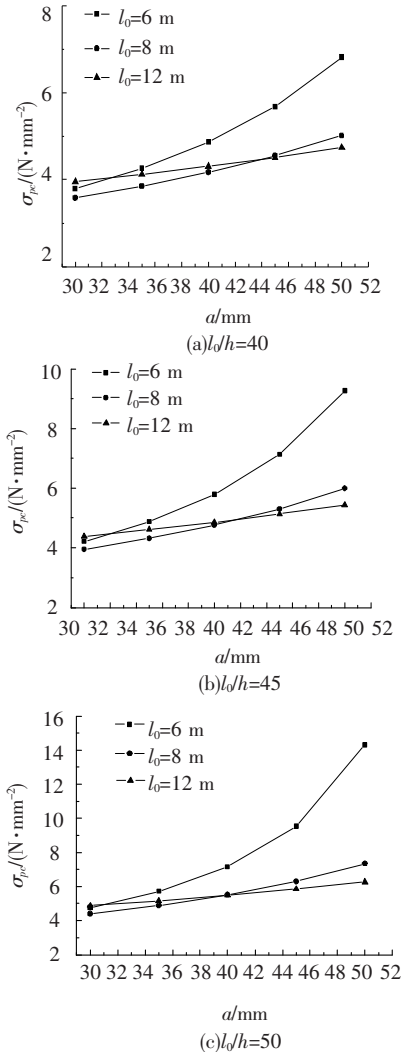


图3 板 σ_{pc} 随 a 及 l_0 的变化情况

3.3.3 预应力筋位置对预应力混凝土板有效压应力的影响

图4分别为预应力筋的合力点距板下边缘的距离 a 取30,35,40,45,50 mm时,预应力混凝土板有效压应力 σ_{pc} 随板跨度 l_0 及跨高比 l_0/h 的变化情况。由图4可以看出,对于 $a \geq 40\text{ mm}$ 的板,随着板跨高比及跨度的增大,预应力混凝土板控制截面有效压应力呈现先减小而后保持大致不变的趋势。对于 $a < 40\text{ mm}$ 的板,平均预压应力变化不大,在 $l_0 = 8\text{ m}$ 时应力发生突变,这是同样是由于表2中预应力混凝土受弯构件反向变形限值在 $l_0 = 7\text{ m}$ 处不连续造成的。

从图2~4可知,虽然各影响因素对预应力混凝土板有效压应力的影响各有差别,但有效压应力的最小值却差别不大。若取 $\sigma_{pc} = 4.5\text{ N/mm}^2$ 作为纵坐标的下包线,除少数点不满足要求外,大

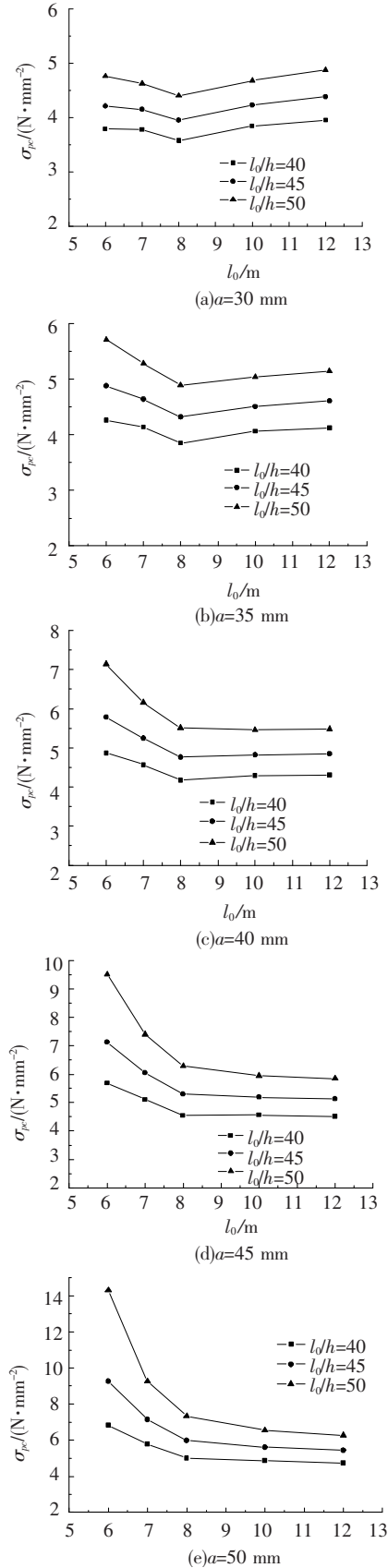


图4 板 σ_{pc} 随 l_0 及 l_0/h 的变化情况

4 预应力混凝土梁有效压应力的计算

4.1 影响因素的选取

影响预应力混凝土梁反向变形的因素较多,除了与上述预应力板相同的影响因素外,还包括梁所担负的板自重、梁的高宽比及梁的翼缘宽度(由板厚决定).这里,梁的负荷范围用 s 来表达.为使计算可行,作了如下简化:

1) 由于预应力梁的高度较大,因此预应力筋的位置不作为影响因素.与有粘结预应力混凝土梁相比,无粘结预应力混凝土梁预应力筋的位置更靠近梁边缘,这使得梁的反拱变形更为不利.因此,这里偏于安全地取预应力筋的合力点距板下边缘的距离为 $a = 80 \text{ mm}$;

2) 梁所负担板的厚度变化范围较大,这里暂取板厚为 $h_b = 120 \text{ mm}$ 进行计算;

3) 梁的高宽比取为 $h/b = 2.5$,梁的翼缘宽度取为 $b'_f = b + 12h_b = b + 1440 \text{ mm}$.

4) 预应力混凝土梁的强度等级仍统一按 C40 考虑.

5) 与预应力混凝土板的计算对象相似,取按直线布置预应力筋的简支梁进行计算.

4.2 计算结果与分析

预应力混凝土梁控制截面有效压应力的影响因素及水平如表 4 所示,按图 1 所示的流程图进行编程计算.

表 4 预应力混凝土梁有效压应力的影响因素及水平

l_0/m	l_0/h	s/m
8	12	4
12	16	6
16	20	8
20	25	10
-	-	12

4.2.1 跨度对预应力混凝土梁有效压应力的影响

图 5 分别为跨度 l_0 取 8, 12, 16, 20 m 时,预应力混凝土梁控制截面有效压应力 σ_{pc} 随梁的负荷范围 s 及跨高比 l_0/h 的变化情况.

4.2.2 跨高比对预应力混凝土梁有效压应力的影响

图 6 分别为跨高比 l_0/h 取 12、16、20 及 25 时,预应力混凝土梁控制截面有效压应力 σ_{pc} 随梁的负荷范围 s 及梁跨度 l_0 的变化情况.

4.2.3 负荷范围对预应力混凝土梁有效压应力的影响

图 7 分别为负荷范围 s 取 4, 6, 8, 12 m 时,预

应力混凝土梁控制截面有效压应力 σ_{pc} 随梁的跨度 l_0 及跨高比 l_0/h 的变化情况.

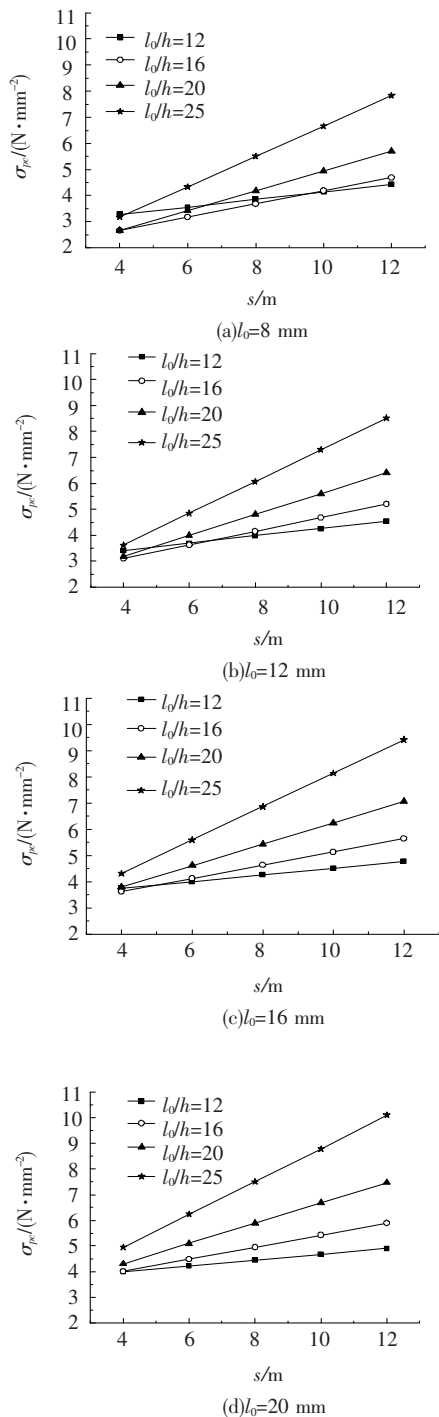


图 5 梁 σ_{pc} 随 s 及 l_0/h 的变化情况

由以上计算结果可知,当预应力混凝土梁的跨度 l_0 、跨高比 l_0/h 及负荷范围 s 其中一个因素固定时,梁控制截面有效压应力变化规律大致是随着其他两个因素的增大而增大.

4.3 预应力混凝土梁控制截面有效压应力计算公式的建立

σ_{pc} 由以上可见,预应力混凝土梁控制截面有

效压应力的变化范围较大,无法像预应力混凝土板那样给出一个统一的下包线值. 为此,采用 TableCurve 软件,以跨高比 $x = l_0/h$ 及负荷范围 $y = s$ 为自变量,拟合得到了跨度 l_0 分别为 8, 12, 16, 20 m 的预应力混凝土梁有效压应力 σ_{pc} 计算公式,拟合曲面如图 8 所示.

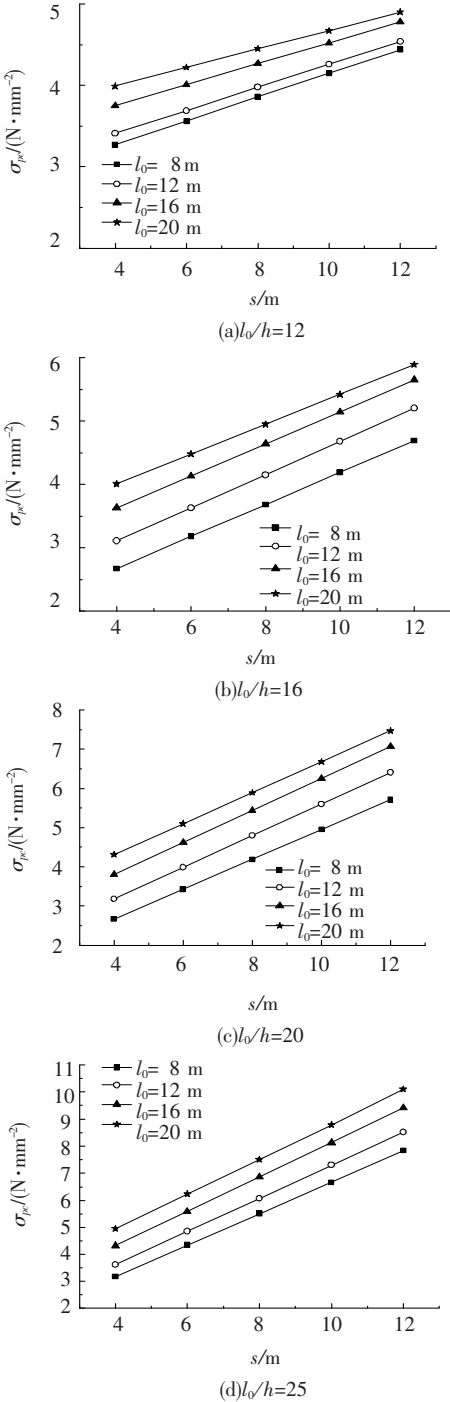


图6 梁 σ_{pc} 随 s 及 l_0 的变化情况

4 个拟合曲面的表达形式基本相似,以 $l_0 = 12$ m 为例,其计算公式为

$$\sigma_{pc} = 1/(0.58 - 0.0019x \ln x - 0.12 \ln y).$$

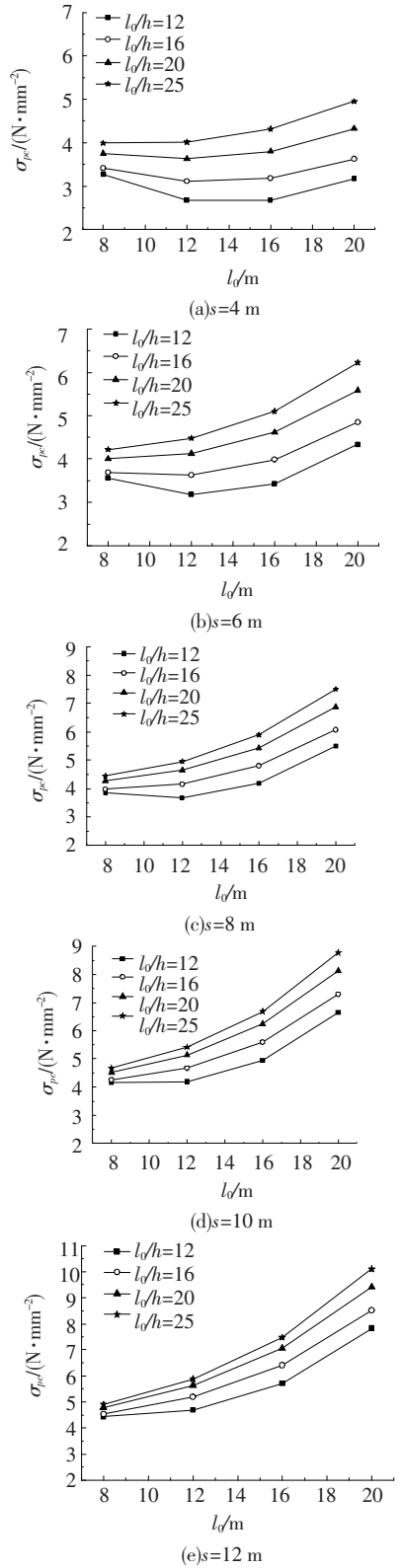


图7 梁 σ_{pc} 随 l_0 及 l_0/h 的变化情况

由图 8 可见,当梁负荷范围较小时,拟合曲面与计算点误差较大,随着负荷范围的增大,越来越多的计算点位于拟合曲面上,误差越来越小. 以 4 个拟合曲面的给出的分段函数作为计算公式使用起来不方便,设法将梁跨度作为参数引入公式中,从而将分段函数采用统一的形式表达. 以 $l_0 = 12$ m 为基准,引入系数 λ , 令 $\sigma_{pc} = \lambda/(0.58 -$

$0.0019x \ln x - 0.12 \ln y$), 经计算可得系数 λ 与梁跨度 l_0 的关系如图 9 所示。

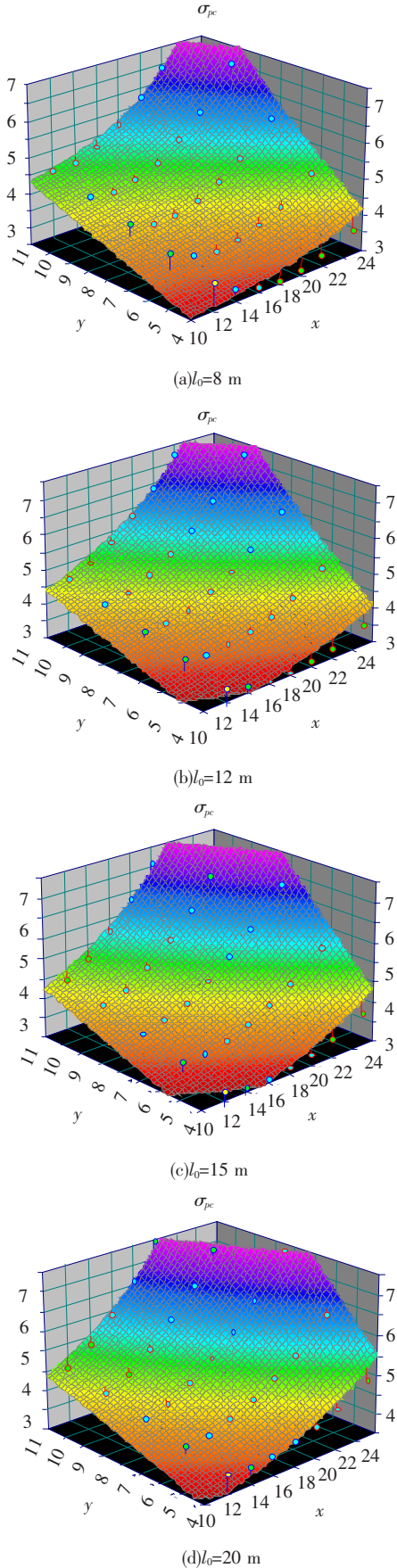


图 8 对应于不同跨度的梁 σ_{pc} 拟合曲面

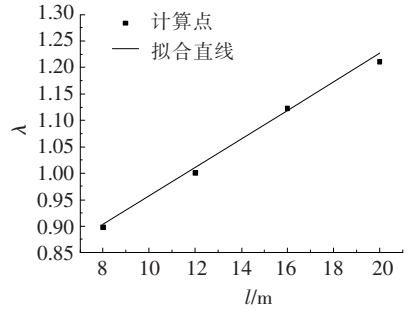


图 9 λ 与 l_0 的关系

采用线性拟合可得 λ 的计算公式为

$$\lambda = 0.687 + 0.027l_0.$$

从而得到负荷范围内板厚为 120 mm 的预应力混凝土梁控制截面有效压应力计算公式为

$$\sigma_{pc} = \frac{(0.687 + 0.027l_0)}{0.58 - 0.0019 \cdot (l_0/h) \cdot \ln(l_0/h) - 0.12 \ln s}. \quad (7)$$

采用式(7)得到的预应力混凝土梁控制截面有效压应力计算值 σ_{pc}^1 与采用程序计算的梁控制截面有效压应力计算值 σ_{pc} 比值 $\sigma_{pc}^1/\sigma_{pc}$ 的平均值为 $\bar{\alpha} = 0.968$, 均方差为 $\sigma = 0.057$, 变异系数为 $\delta = 0.059$.

以上是针对负荷范围内板厚为 $h_b = 120$ mm 计算的预应力混凝土梁控制截面有效压应力的计算. 为了得到梁截面有效压应力随不同板厚的变化规律, 计算了负荷范围内板厚为 90 ~ 240 mm 的预应力混凝土梁控制截面有效压应力, 并将计算值与板厚为 120 mm 的预应力混凝土梁控制截面有效压应力进行了比较, 比值 α 随不同板厚的变化规律如图 10 所示。

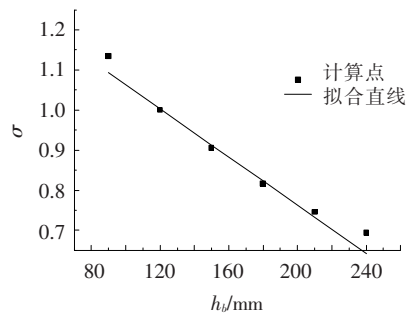


图 10 α 与 h_b 的关系

采用线性拟合可得 α 的计算公式为 $\alpha = 1.36 - 0.003h_b$. 至此, 得到了负荷范围 $s = 4 \sim 12$ m、负荷范围内板厚 $h_b = 90 \sim 240$ mm、跨度 $l_0 = 8 \sim 12$ m 及跨高比 $l_0/h = 12 \sim 25$ 的预应力混凝土梁控制截面有效压应力的计算公式:

$$\sigma_{pc} = \frac{(1.36 - 0.003h_b) \cdot (0.687 + 0.027l_0)}{0.58 - 0.0019 \cdot (l_0/h) \cdot \ln(l_0/h) - 0.12 \ln s}. \quad (8)$$

(下转第 1215 页)