

文章编号:1673-2049(2015)01-0027-08

体外预应力筋极限应力增量的理论分析与试验研究

李立峰, 李铁盔

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为研究体外预应力梁受弯破坏过程的力学性能及体外预应力筋极限应力增量,对比分析了各国规范关于体外预应力筋应力增量的计算方法,设计并完成了2根体外预应力波形钢腹板简支组合梁的抗弯承载力试验,编制了非线性全过程分析程序对2根梁进行了分析;以跨高比为主要变量,考虑混凝土强度、截面配筋状况、体外预应力筋有效预应力等因素,以平截面假定为基础,根据极限状态时梁截面内力平衡条件,通过增大受压区混凝土面积建立了体外预应力筋极限应力增量的简化计算公式,并用搜集到的19根试验梁数据对该计算公式加以验证。结果表明:体外预应力组合梁受弯破坏全过程与体内预应力梁基本类似,但是梁破坏时体外预应力筋还未进入屈服阶段,利用各规范公式计算的体外预应力筋极限应力增量比试验值小很多,与试验梁普通受拉钢筋屈服时的体外预应力筋应力增量相当;体外预应力筋的极限应力增量与跨中挠度近似呈直线关系;计算结果与试验结果吻合良好,该公式具有一定的参考价值。

关键词:体外预应力梁;波形钢腹板组合箱梁;极限状态;极限应力增量;抗弯试验

中图分类号:TU317

文献标志码:A

Theoretical Analysis and Experiment Study on Ultimate Stress Increment of Externally Prestressed Tendons

LI Li-feng, LI Tie-kui

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of externally prestressed beams under bending failure process and ultimate stress increment of externally prestressed tendons, the authors comparatively analyzed the national standardized calculation methods at home and abroad on the ultimate stress increment of externally prestressed tendons, and designed two externally prestressed composite box girders with corrugated steel webs. Moreover, the flexural bearing capacity experiment of them was completed, and a nonlinear full-range-analysis program was developed to perform the flexural behavior analysis. The authors took the span to depth ratio as the main variable, considering the concrete strength, sectional reinforcement status, prestressing force of externally prestressed tendons, based on the plane section assumption. According to the beam section internal force equilibrium conditions in limit state, the simple calculation formulae of ultimate stress increment of externally prestressed tendons were established by increasing the compressed concrete area. 19 experiment beams were collected to verify the calculation formulae. The results show that the flexural failure in the whole process of externally prestressed composite beams is similar with the inner prestressed beams, but the externally prestressed tendons has not

收稿日期:2014-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51278183)

作者简介:李立峰(1971-),男,湖南沅江人,教授,工学博士,E-mail:lilifeng@hnu.edu.cn。

yielded when the beams collapse, the values of ultimate stress increment of externally prestressed tendons calculated by standardized formulae at home and abroad are much smaller than the experiment results, yet the values are equal to the results when ordinary steel yields. The ultimate stress increment of external prestressed tendons and mid-span deflection are approximate linear relationship. The calculated results agree well with the experiment results, so the formula has a certain reference value.

Key words: externally prestressed beam; composite box girder with corrugated steel web; limit state; ultimate stress increment; bending experiment

0 引言

体外预应力结构相对于传统体内预应力结构具有截面尺寸小、自重轻的特点,体外预应力筋自我防护能力和防腐性能以及耐久性好,替换方便,因而获得了越来越广泛的应用^[1]。然而体外预应力梁的体外预应力筋与梁体、体内预应力筋的变形不协调,其变形存在滞后性,应力增量大小也不同于传统体内预应力筋,应力增量偏小且受多种因素影响,常规情况下体外预应力结构的截面抗弯强度小于体内预应力结构。在计算体外预应力梁的正截面抗弯强度时,体外预应力筋极限应力的确定尤为重要,但由于受多种因素的影响,体外预应力筋极限应力及应力增量的计算非常复杂,各国学者研究较多,但是并没有统一的理论和算法。

本文总结现有体外预应力结构的研究成果,对比分析各国规范对体外预应力筋极限应力取值的规定,讨论体外预应力梁的抗弯极限状态,在此基础上,对体外预应力梁正截面抗弯性能进行试验研究。根据极限状态下截面内力平衡,采用放大系数的方法建立体外预应力筋极限应力增量的简化计算公式,为以后工程设计提供参考。

1 体外预应力筋应力增量的研究现状

1.1 已有理论研究

在计算体外预应力筋应力增量时,为了简化计算,通常忽略“二次效应”的影响,近似按体内无粘结筋来处理。各国现有的体外及体内无粘结筋的计算公式可分为 3 类^[1-2]:①粘结折减系数公式;②依据极限应力与截面配筋指标之间的关系建立的公式;③基于等效塑性区长度的公式。根据体内无粘结筋为基础建立的计算公式得出的结果与实际结果有较大的偏差。

Harajli 等^[3-5]从不同理论角度进行了研究,主要有塑性铰区理论、非线性有限元法、粘结折减系数

法等。牛斌^[6]以混凝土塑性铰区理论为基础对体外预应力梁进行了试验研究,建立了体外预应力混凝土梁极限状态下的弯矩、挠度和体外预应力筋应力增量的计算方法;徐栋等^[7]用条带法和分层模型的方法编制了有限元非线性分析程序;李国平等^[8]根据一系列体外预应力梁试验的研究结果,利用数值模拟方法及钢筋混凝土结构的非线性有限元分析原理,建立了体外预应力混凝土梁全过程分析模型,提出了简化计算方法,给出了体外预应力混凝土简支梁桥和连续梁桥体外预应力筋极限应力的简化计算公式。

1.2 已有试验研究

在理论分析的基础上,各国学者在考虑施工方法(整体施工与节段施工)、混凝土强度、梁截面配筋情况、体外预应力筋布置方式、加载方式、跨高比等众多因素的基础上进行了大量模型试验研究^[9],如 Beaupre 等的模型试验^[10]、Gauvreau 等的整体模型试验^[10]、Sowlat 等的节段模型试验^[11],李国平等^[12-16]完成了一系列体外预应力混凝土简支梁以及连续梁的抗弯承载力试验。

1.3 理论与试验共识

通过以上理论与试验研究,已经获得了关于体外预应力筋极限应力增量影响因素的一些共识,其中跨高比、体外预应力钢束配筋率、施工方法为最主要因素。一般认为:跨高比增大,体外预应力筋极限应力增量逐渐减小,二者基本呈线性关系^[12-13];随着体内预应力筋含筋率的增加,体外预应力筋极限应力增量呈先上升后下降的趋势,在体内预应力筋的含筋率为 40%~50%时体外预应力筋极限应力增量最大^[12];随着荷载增加至极限状态,节段施工的梁体外预应力筋应力增长速度较整体施工的梁快,但是其极限应力增量小于整体施工的梁^[12-14];对于整体施工的梁,其体外预应力筋有效预应力对极限应力的影响并不大,但是对于节段式施工的梁,增加体外预应力筋有效预应力能够提高其

极限应力^[12-14];在不超筋的情况下,提高体内受拉钢筋的配筋率能明显改善体外预应力梁的受力性能,并适当提高体外预应力梁的抗弯承载力,但是对体外预应力筋极限应力增量的影响不大^[13];在最大弯矩截面设置转向块,可有效地减小体外预应力筋与梁体的变形差距,提高预应力筋的加固效率^[15-16]。

2 不同规范关于应力增量的计算公式

体外预应力筋极限应力可表述为有效预应力与极限应力增量之和的形式,即

$$f_{ps} = f_{pe} + \Delta f_{ps} \quad (1)$$

式中: f_{ps} , f_{pe} , Δf_{ps} 分别为体外预应力筋的极限应力、有效预应力和极限应力增量。

有效应力的计算与传统体内预应力结构计算相同,但是对于极限应力增量及其影响因素,各国规范的规定差异较大。

(1)美国 ACI 318-02 规范到 ACI 318-08 规范中关于体外预应力极限应力的计算公式沿袭自美国 ACI 318-77 规范,该公式以参数 f'_c/ρ_p 为主要变量,考虑了跨高比 λ 的影响,即

$$\left. \begin{aligned} f_{ps} &= f_{pe} + 70 + \frac{f'_c}{\lambda \rho_p} \\ \rho_p &= \frac{A_{ps}}{b d_p} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; ρ_p , A_{ps} 分别体外预应力筋的含筋率和截面面积; b , d_p 分别为截面受压区宽度和体外预应力筋的有效高度。

式(2)的限制条件为:当 $l/d_p \leq 35$ 时, $\lambda = 100$, 且 $f_{ps} \leq \min\{f_{py}, f_{pe} + 420\}$, 其中, l , f_{py} 分别为梁跨长和体外预应力筋的名义屈服强度;当 $l/d_p > 35$ 时, $\lambda = 300$, 且 $f_{ps} \leq \min\{f_{py}, f_{pe} + 210\}$ 。

(2)美国 AASHTO-04 规范中计算体外预应力筋极限应力增量时是基于塑性铰理论,其考虑了构件破坏时可能形成的塑性铰数目,适用于简支梁和连续梁桥的计算,具体计算公式为

$$f_{ps} = f_{pe} + 6\,300 \frac{d_p - c}{l_e} \leq f_{py} \quad (3)$$

式中: c , l_e 分别为中性轴到受压混凝土顶面的距离和无粘结筋的有效长度, $l_e = 2l_i/(N_s + 2)$, l_i 为体外预应力筋两端锚具间无粘结筋的长度, N_s 为构件失效时形成的塑性铰数目。

(3)德国 DIN 4227 规范中针对不同结构形式取用不同的极限应力增量,即

$$f_{ps} = \begin{cases} f_{pe} + 110 & \text{单跨梁} \\ f_{pe} + 50 & \text{悬臂梁} \\ f_{pe} & \text{连续梁} \end{cases} \quad (4)$$

(4)英国 BS 8110 规范中考虑了跨高比和混凝土强度的影响,并将普通钢筋截面面积等效为预应力筋截面面积,其计算公式为

$$f_{ps} = f_{pe} + \frac{7\,000}{l/d_p} (1 - 1.7 \frac{f_{pu} \rho_p}{f_{cu}}) \leq 0.7 f_{pu} \quad (5)$$

式中: f_{pu} , f_{cu} 分别为预应力筋的极限强度和混凝土的立方体抗压强度。

(5)中国《公路体外预应力混凝土桥梁设计指南》(送审稿)中的计算公式是在大量试验的基础上,以跨高比、截面配筋为主要影响因素,提炼出分别适用于简支梁和连续梁的体外预应力钢束极限应力的简化计算公式。

(6)中国《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22—2008)中对水平体外预应力筋极限应力的规定采用美国 AASHTO-04 规范中的修正公式,并考虑材料的安全系数。

(7)中国《无粘结预应力混凝土结构技术规程》(JGJ 92—2004)中规定:极限状态时体外预应力筋的极限应力增量取值为 100 MPa,但是最终极限应力 f_{ps} 应不大于材料屈服强度 f_{py} 。

不少学者曾指出美国 ACI 318 规范公式的不足,包括考虑参数比较单一,计算值与实测的预应力筋极限应力增量相关性较差,计算结果偏小,离散性较大,在跨高比为 35 处不连续,没有考虑有粘结非预应力筋及外荷载作用方式的影响。英国规范 BS 8110 的公式虽然考虑了非预应力筋的作用,但是计算结果并不理想,偏于保守,使材料性能不能充分发挥;德国 DIN 4227 规范与中国《无粘结预应力混凝土结构技术规程》均直接给定极限应力增量,且数值较小,故不能满足各种工程需要;美国 AASHTO-04 规范和中国《公路桥梁加固设计规范》中的计算公式在实质上是同样的,均是以塑性铰理论为基础推导出的公式,计算值与试验值吻合良好;中国《公路体外预应力混凝土桥梁设计指南》(送审稿)中的计算公式是以截面特性和配筋指标为基础而建立的回归公式,计算结果与试验结果的均值吻合良好,离散系数大一些^[17]。

3 体外预应力波形钢腹板组合 T 形梁试验

3.1 试验概况

为了进一步研究,本文设计了 2 根体外预应力

波形钢腹板组合梁,梁 A 预应力布置为斜线双转向布置^[13],梁 B 为直线双转向布置,试验梁的几何尺寸及加载示意图 1,其中, P 为荷载。完成抗弯承载力试验,并测试梁在加载过程中的应变、变形及体外预应力筋的应力变化。试验梁参数见表 1。

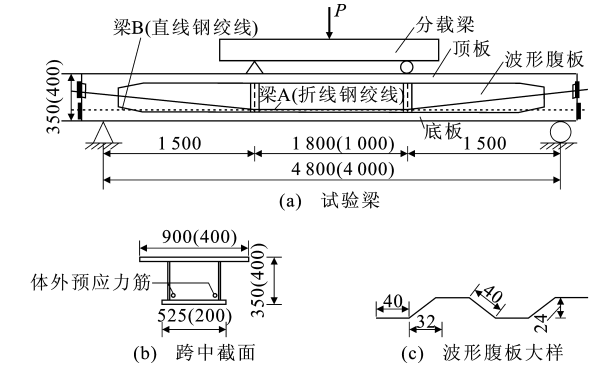


图 1 试验梁几何尺寸及加载示意(单位:mm)
Fig. 1 Schematics of Geometric Dimensions and Loading of Testing Beam (Unit:mm)

表 1 试验梁参数

Tab. 1 Testing Beam Parameters

试验梁 编号	顶板厚 度/mm	底板厚 度/mm	混凝土立方 体强度/MPa	混凝土弹性 模量/GPa	顶板钢筋截面 面积 A_s' /mm ²	顶板钢筋屈服 强度 f_y /MPa	底板钢筋截面 面积 A_s /mm ²	底板钢筋屈服 强度 f_y /MPa	有效应 力/MPa
A	40	46	70	42.9	503	390	400	390	1 000
B	60	60	60	38.0	201	280	452	480	1 110

注:钢腹板和翼缘板均采用 A3 钢,翼缘板宽度均为 80 mm,理论计算中均作为普通钢筋参与计算。

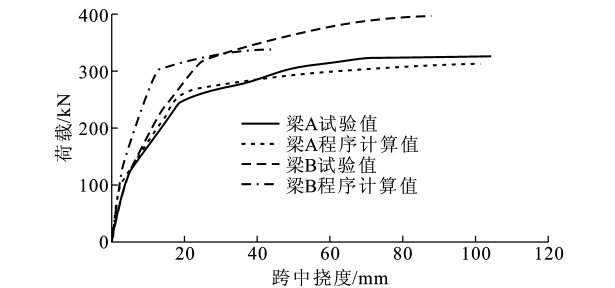


图 2 荷载-跨中挠度曲线
Fig. 2 Load-mid-span Deflection Curves

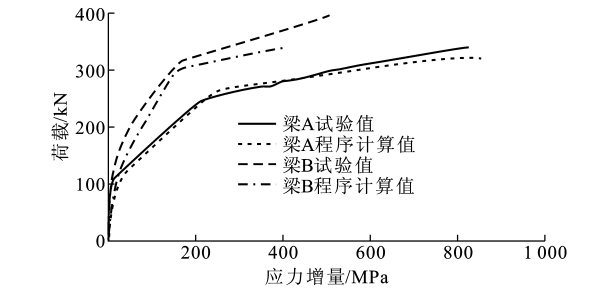


图 3 荷载-应力增量曲线
Fig. 3 Load-stress Increment Curves

在体外预应力筋应力达到非线性段后,才变为曲线,此时荷载已不再增加,梁体挠度急剧增大,直至梁顶

3.2 试验结果

3.2.1 荷载-跨中挠度曲线和体外预应力筋荷载-应力增量曲线

图 2,3 分别为荷载-跨中挠度曲线以及体外预应力筋荷载-应力增量曲线。结果表明,试验梁以底板混凝土开裂和受拉区普通钢筋屈服为分界点,明显经历了 3 个阶段:

- (1)弹性阶段。底板混凝土开裂前,梁体处于线弹性受力范围,体外预应力筋应力几乎没有变化。
- (2)开裂阶段。底板混凝土开裂后,结构刚度明显降低,但是底板混凝土较薄,受拉普通钢筋还处于线弹性范围,故梁体变形很小,体外预应力筋应力增量很小。
- (3)塑性阶段。受拉区钢筋屈服后,结构刚度迅速降低,梁体进入塑性阶段,挠度增加较快,预应力增量也明显加大。当体外预应力索仍处于弹性阶段时,荷载-跨中挠度曲线基本上还呈线性关系,只有

混凝土被压碎,试验梁破坏。

3.2.2 试验值与程序计算值比较

基于截面的轴力-弯矩-曲率($N-M-\varphi$)关系,采用 Fortran 语言编制非线性分析程序^[18],对 2 根试验梁进行全过程分析,试验值与程序计算值对比分别见表 2,3。

表 2 试验荷载与计算荷载对比

Tab. 2 Comparison Between Test and Calculated Loads

状态		开裂	受拉筋屈服	极限状态
梁 A	T_1 /kN	110.0	252.9	340.1
	T_2 /kN	108.3	250.0	320.5
梁 B	T_3 /kN	110.0	317.0	385.8
	T_4 /kN	95.0	302.0	337.4
$T_1 T_2^{-1}$		1.02	1.01	1.06
$T_3 T_4^{-1}$		1.16	1.05	1.14

注: T_1, T_2 分别为梁 A 荷载试验值和荷载程序计算值; T_3, T_4 分别为梁 B 荷载试验值和荷载程序计算值。

由表 2,3 可知,除开裂时体外预应力筋应力增量外,其他试验值较程序计算值大,但二者相差不大,总体吻合良好,结果可靠。

表 3 体外预应力筋应力增量试验值与计算值对比

Tab. 3 Comparison Between Test Results and Calculated Results of Stress Increment of External Prestressed Tendons

	状态	开裂	受拉筋屈服	极限状态
梁 A	σ_1 /MPa	8. 3	242. 1	823. 4
	σ_2 /MPa	23. 2	221. 9	783. 4
梁 B	σ_3 /MPa	9. 0	168. 9	466. 5
	σ_4 /MPa	14. 4	161. 9	402. 8
	$\sigma_1 \sigma_2^{-1}$	0. 36	1. 09	1. 05
	$\sigma_3 \sigma_4^{-1}$	0. 63	1. 04	1. 16

注: σ_1, σ_2 分别为梁 A 体外预应力筋应力增量试验值和程序计算值; σ_3, σ_4 分别为梁 B 体外预应力筋应力增量试验值和程序计算值。

3. 2. 3 体外预应力筋极限应力增量-跨中挠度曲线

已有研究表明,体外预应力筋极限应力增量与梁整体变形密切相关^[19]。本文试验也对此进行分析,梁的跨中挠度与体外预应力筋的应力增量关系曲线如图 4 所示。由图 4 可知,体外预应力筋的应力增量与跨中挠度近似呈直线关系,只有在接近承载能力极限状态时才表现为非线性,此时体外预应力筋已进入非线性状态。

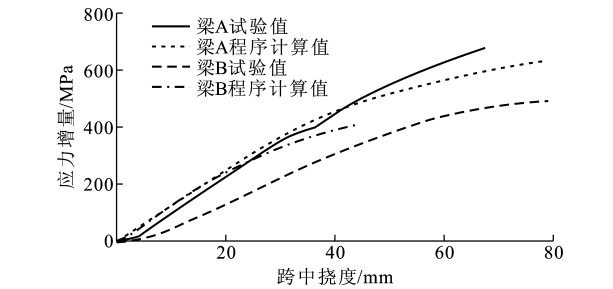


图 4 应力增量-跨中挠度曲线

Fig. 4 Stress Increment-mid-span Deflection Curves

表 4 体外预应力筋应力增量试验值与各规范计算值对比

规范	DIN 4227	ACI 318	AASHTO-04	BS 8110	《建议》	《指南》
梁 A 的应力增量 σ_5 /MPa	110. 0	155. 2	345. 5	392. 8	331. 5	293. 8
梁 B 的应力增量 σ_6 /MPa	110. 0	118. 6	196. 2	149. 0	230. 0	91. 0
$\sigma_1 \sigma_5^{-1}$	7. 5	5. 3	2. 4	2. 1	2. 5	2. 8
$\sigma_3 \sigma_6^{-1}$	4. 2	3. 9	2. 4	3. 1	2. 0	5. 1

注:根据表 3 取 $\sigma_1=823. 4$ MPa, $\sigma_2=466. 5$ MPa;《建议》为 1985 年中国土木工程学会等编著的《部分预应力混凝土结构设计建议》;《指南》为 2007 年《公路体外预应力混凝土桥梁设计指南》(送审稿)。

的最大应变将比体内有粘结预应力筋要小。

体外预应力梁在极限状态时截面应变与体内预应力梁一样,体外预应力梁的弯曲极限状态仍可采用普通体内有粘结预应力梁的弯曲极限状态,正截面内受拉钢筋达到屈服,受压区混凝土达到极限压

3. 2. 4 体外预应力筋极限应力增量试验值与各国规范计算值的比较

根据不同规范对试验梁体外预应力筋极限应力增量进行计算,然后与试验值进行对比分析,结果见表 4。结果表明:按各国规范计算的体外预应力筋极限应力增量比试验梁破坏时实测值小很多,反而更接近于试验梁受拉钢筋屈服时的应力增量。

由分析结果可知,在试验梁破坏时,受拉区钢筋早已屈服,极限拉应变远远大于规范规定的 0. 01,混凝土压应变达规范规定的极限压应变,此时的状态已远超规范规定的极限状态标志之一,即受拉区钢筋屈服,若按规范定义的极限状态,则试验结果与各国规范公式计算结果吻合良好。

4 体外预应力筋极限应力增量建议公式

4. 1 体外预应力梁的弯曲极限状态

一般而言,对于适筋梁,体外预应力筋的应力增量总是小于体内有粘结预应力筋的应力增量,荷载越大,差距越大。当结构达到极限荷载时,体外预应力筋的极限应力都不可能超过其屈服强度。究其原因在于:当体内有粘结预应力混凝土梁承受荷载时,任何截面处预应力束中的应变变化都是与其周围混凝土的变化相同的,所以体内有粘结预应力筋的最大应变发生在最大弯矩截面处。体外预应力混凝土梁承受荷载时,由于体外预应力筋能发生纵向相对滑移,整个钢束中的应变相差不大,当梁的弯曲破坏受压截面混凝土达到极限压应变时,体外预应力筋

应变,只是受拉区的体外预应力筋并未屈服。体外预应力梁正截面内力总是平衡的,且对于梁截面而言平截面假定仍适用,由此可根据截面内力平衡条件,建立体外预应力梁极限状态时体外预应力筋的极限应力增量计算公式。

4.2 简化公式推导

体外预应力梁达到弯曲极限状态时的正截面应力、应变分布如图 5 所示,其中, ϵ_{cu} , ϵ_p , ϵ_s 分别为混凝土极限压应变、体外预应力筋拉应变和体内预应力筋拉应变, M_u , f_c 分别为截面极限弯矩和混凝土极限压应力, x_0 , $f_{py,i}$, A_{pi} 分别为平截面假定的中和轴高度、体内预应力筋屈服强度和体内预应力筋截面面积, α_1 , β_1 分别为矩形压应力图的应力与受压区混凝土最大压应力的比值和矩形压应力图的高度 x 与按平截面假定的中和轴高度 x_0 的比值。

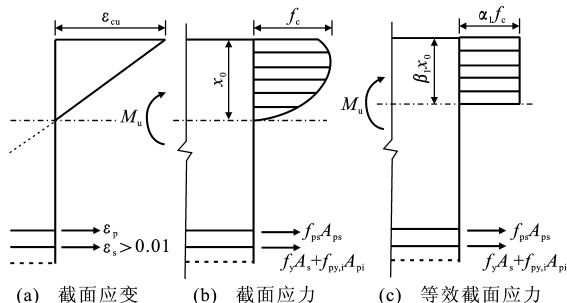


图 5 体外预应力梁极限状态截面应变和应力分布

Fig. 5 Section Strain and Stress Distributions of Externally Prestressed Beam Limit State

图 6 为极限状态梁截面应力计算。首先偏安全地假定体外预应力梁达到极限状态时完全不考虑体外预应力筋的应力增量,如图 6(a)所示,跨中最大弯矩截面轴力平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 f_c x b &= A_{ps} f_{pe} + A_{pi} f_{py,i} + A_s f_y \\ x &= \beta_1 x_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由式(6)可求得受压区混凝土面积 A_c 为

$$A_c = x_0 b = \frac{A_{ps} f_{pe} + A_{pi} f_{py,i} + A_s f_y}{\alpha_1 \beta_1 f_c} \quad (7)$$

图 6 中,若梁为矩形截面,则 $x_0 = A_c/b$;若梁为 T 形截面或箱形截面,则需要根据受压区混凝土面积 A_c 与受压区高度 x_0 之间的关系进行换算。

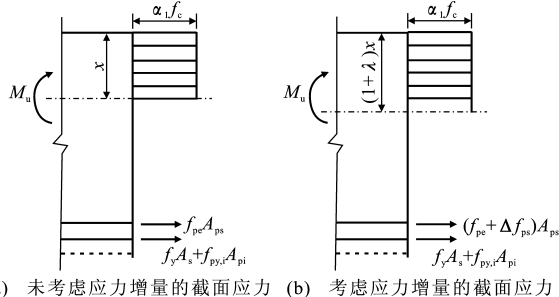


图 6 极限状态梁截面应力计算

Fig. 6 Stress Calculation of Beam Section in Limit State

实际情况是体外预应力筋有应力增量,此时可

将该受压区混凝土面积 A_c 扩大 $1+\lambda$ 倍,则扩大的混凝土面积 λA_c 上的内力由体外预应力筋增加的内力进行平衡,截面应力如图 6(b)所示。

体外预应力筋的极限应力增量 Δf_{ps} 和极限应力 f_{ps} 可由下式计算

$$\left. \begin{aligned} \Delta f_{ps} &= \frac{\alpha_1 \beta_1 f_c \lambda A_c}{A_{ps}} \\ \lambda &= \frac{1}{3.5} \gamma_1 \gamma_2 \sqrt{\frac{d_p - c}{l_e}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$f_{ps} = 0.8(f_{pe} + \Delta f_{ps}) \leq f_{py} \quad (9)$$

式中:简支梁取 $\gamma_1 = 3.4$,连续梁取 $\gamma_1 = 2.8$; γ_2 为体外预应力筋布置形式系数,直线布置取 $\gamma_2 = 1.0$,一折线布置取 $\gamma_2 = 1.4$,二折线布置取 $\gamma_2 = 1.8$ 。

根据公式(7)计算的混凝土受压区高度若大于界限受压区高度,则取界限受压区高度进行极限应力增量计算。本文收集了 19 根试验梁的数据,利用本文公式进行极限应力增量计算,计算值与试验值吻合良好。表 5 为体外预应力筋极限应力统计数据。由表 5 可知,本文公式计算值与试验值之比的平均值为 0.89,标准差为 0.109。本文搜集的试验梁所记录的极限应力增量为试验梁破坏状态时的应力增量,试验梁受压区混凝土压应变绝大部分情况下大于本文所定义的极限状态时的受压区混凝土压应变,即试验梁破坏时的状态已远超过结构抗弯承载力的极限状态,因而试验中体外预应力筋破坏时的应力增量大于极限状态时的应力增量,故本文公式的计算值比试验值偏小是合理的。本文公式计算体外预应力筋极限应力增量充分考虑了混凝土强度、跨高比、截面配筋状况、体外预应力筋的有效预应力等影响体外预应力筋极限应力增量的因素,结果具有较好的可靠性。

考虑到试验数据与实际工程应用中的差异,试验中体外预应力筋的张拉应力较实际工程中小很多,所求极限应力增量不能准确反映实际工程中体外预应力筋的极限应力状态。在实际工程中,当应用 1860 级钢绞线做体外预应力筋时,中国规范规定体外预应力筋的张拉控制应力在体外预应力筋标准强度的 60%~70%,承载力极限状态的应力限值与张拉控制应力相同,故按照中国规范的要求,体外预应力筋的极限应力增量与应力损失相当,建议在实际工程应用中求解梁的抗弯承载力时体外预应力筋的极限应力采用张拉控制应力。

5 结语

(1)体外预应力波形钢腹板组合梁受弯破坏过

表 5 体外预应力筋极限应力统计数据

Tab. 5 Statistical Data of Ultimate Stress of Externally Prestressed Tendons

数据来源	试件编号	梁类型	A_{ps}/mm^2	f_{pe}/MPa	A_s/mm^2	f_y/MPa	β_1	f_c/MPa	$\Delta f'_{ps}/\text{MPa}$	$\Delta f_{ps}/\text{MPa}$	$\frac{\Delta f'_{ps}}{\Delta f_{ps}}$
本文	A	②	278.0	1 000.0	400.00	390.0	0.76	70.0	658.96	823.40	0.80
	B	①	278.0	1 110.0	452.00	480.0	0.78	60.0	460.57	466.50	0.99
文献[20]	B6	④	278.0	844.7	402.20	382.9	0.78	58.1	482.22	622.16	0.78
	B7	④	278.0	878.8	509.00	362.2	0.78	52.8	519.15	643.84	0.81
文献[21]	SB1	①	197.4	460.0	307.88	360.9	0.80	27.6	273.14	250.00	1.09
	SB2	①	197.4	543.0	307.88	360.9	0.80	31.5	298.70	280.00	1.07
	SB3	②	197.4	402.0	307.88	360.9	0.80	27.6	365.17	330.00	1.11
	SB4	②	197.4	414.0	307.88	360.9	0.80	31.5	378.05	450.00	0.84
	SB5	②	197.4	420.0	307.88	360.9	0.80	27.6	476.47	550.00	0.87
	CB-1	④	197.4	745.0	307.88	360.9	0.80	27.6	361.86	370.00	0.98
	CB-2	④	197.4	652.0	307.88	360.9	0.80	31.5	355.54	450.00	0.79
	CB-3	⑤	197.4	586.0	307.88	360.9	0.80	27.6	424.26	500.00	0.85
	CB-4	⑤	197.4	630.0	307.88	360.9	0.80	31.5	450.74	500.00	0.90
文献[22]	PB1	①	278.0	482.0	402.00	310.0	0.80	40.0	187.58	255.00	0.74
	PB2	①	278.0	339.0	628.00	310.0	0.80	40.0	205.97	237.00	0.87
	PB3	②	278.0	539.0	402.00	310.0	0.80	40.0	348.37	457.00	0.76
	PB4	②	278.0	409.0	628.00	310.0	0.80	40.0	386.64	434.00	0.89
	PB5	③	278.0	682.0	402.00	310.0	0.80	40.0	416.24	440.00	0.95
	PB6	③	278.0	458.0	628.00	310.0	0.80	40.0	425.33	514.00	0.83

注:①为直线布置简支梁;②为一折线布置简支梁;③为二折线布置简支梁;④为单跨一折线布置连续梁;⑤为单跨二折线布置连续梁; $\Delta f'_{ps}$ 为体外预应力筋极限应力增量计算值。

程与传统体内预应力梁相似,经历了弹性阶段、开裂阶段和塑性阶段;极限状态时体外预应力筋并未进入屈服阶段,极限应力需要根据梁结构特性进行求解,试验获得的预应力增量与跨中挠度变形近似成正比。

(2)相对于直线布筋形式,折线布置的体外预应力梁更能发挥体外预应力筋的作用,建议体外预应力简支梁采用折线布置体外预应力筋,且在梁跨中及三分点处布置转向块,以减小二次效应和提高预应力筋的加固效率。

(3)以截面内力平衡为基础,考虑混凝土受压区增大系数法建立了体外预应力筋极限应力增量简化计算公式,本文公式的计算值与试验值吻合良好,且公式简洁,具有参考意义,但是在实际工程中建议体外预应力筋极限应力取张拉控制应力。

(4)本文所做试验梁为简支梁,加载方式单一,与实际公路荷载相差较大,体外预应力筋在公路荷载作用下的极限应力增量还有待进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 孙宝俊,周国华. 体外预应力结构技术及应用综述

[J]. 东南大学学报:自然科学版,2001,31(1):109-113.

SUN Bao-jun,ZHOU Guo-hua. A Survey on Structural Techniques and Applications of External Prestressing[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition,2001,31(1):109-113.

[2] 张耀庭,邱继生,黄恒卫. 体外预应力混凝土梁的研究现状综述[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2002,19(4):86-91.

ZHANG Yao-ting, QIU Ji-sheng, HUANG Heng-wei. Survey on Research of External Prestressed Concrete Beams[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition,2002,19(4):86-91.

[3] HARAJLI M,KHAIRALLAH N,NASSIF H. Externally Prestressed Members: Evaluation of Second-order Effects[J]. Journal of Structural Engineering,1999,125(10):1151-1161.

[4] DIEP B K, UMEHARA H. Non-linear Analysis of Externally Prestressed Concrete Beams[J]. Electronic Journal of Structural Engineering,2002(2):85-96.

[5] ALKHAIRI F M, NAAMAN A E. Analysis of Beams Prestressed with Unbonded Internal or External Ten-

- dons[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (9): 2680-2700.
- [6] 牛 斌. 体外预应力混凝土梁极限状态分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 7-15.
NIU Bin. Ultimate Analysis of Externally Prestressed Concrete Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 7-15.
- [7] 徐 栋, 项海帆. 体外预应力混凝土桥梁非线性分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2000, 28(4): 402-406.
XU Dong, XIANG Hai-fan. Nonlinear Analysis of Externally Prestressed Concrete Bridges[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2000, 28(4): 402-406.
- [8] 李国平, 沈 殷. 体外预应力筋极限应力和有效高度计算方法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 47-52.
LI Guo-ping, SHEN Yin. Calculation Methods for the Ultimate Stress and Effective Height of External Prestressing Tendons[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 47-52.
- [9] MARAJLI M H, MABSOUT M E, AL-HAJJ J A. Response of Externally Post-tensioned Continuous Members[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(5): 671-680.
- [10] ACI SP-120-1990, External Prestressing in Bridges [S].
- [11] SOWLAT K, RABBAT B B. Testing of Segmental Concrete Girders with External Tendons[J]. Journal Prestressed Concrete Institute, 1987, 32(2): 86-107.
- [12] 李国平. 体外预应力混凝土桥梁设计计算方法[D]. 上海: 同济大学, 2006.
LI Guo-ping. Calculating Method for Design of Externally Prestressed Concrete Bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [13] 鄢芳华. 体外预应力混凝土桥梁的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.
YAN Fang-hua. Experimental Study on External Prestressed Concrete Beams[D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [14] 陈少珍. 体外预应力混凝土连续梁抗弯承载力试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
CHEN Shao-zhen. Experimental Study on Bearing Capacity of Externally Prestressed Concrete Continuous Beams[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [15] 张晓勇. 体外预应力混凝土连续梁的结构行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
ZHANG Xiao-yong. Study on the Structural Behaviors of Externally Prestressed Concrete Continuous Beams[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [16] 杨 莉. 体外预应力混凝土连续梁受力行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
YANG Li. Study on the Structural Behaviors of Externally Prestressed Concrete Three-span Continuous Beams[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2001.
- [17] 黄 侨, 关彦超. 桥梁体外预应力筋极限应力计算方法的评价与分析[J]. 公路, 2007(12): 45-50.
HUANG Qiao, GUAN Yan-chao. Evaluation and Analysis of Calculating Method of Ultimate Stress in External Prestressing Tendons of Bridges[J]. Highway, 2007(12): 45-50.
- [18] 李立峰, 刘志才, 王 芳. 波形钢腹板 PC 组合箱梁抗弯承载力的理论与试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(7): 89-96.
LI Li-feng, LIU Zhi-cai, WANG Fang. Theoretical and Experimental Research on the Flexural Behavior of External Prestressed Composite Beam with Corrugated Webs[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(7): 89-96.
- [19] 王宗林, 王 彤, 张树仁. 体外预应力混凝土简支梁的极限强度分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(1): 114-118.
WANG Zong-lin, WANG Tong, ZHANG Shu-ren. Ultimate Strength Analysis for External Prestressed Concrete Beams[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture, 2001, 34(1): 114-118.
- [20] 杜进生, 赵益鹏. 体外预应力混凝土连续梁的弯矩重分布试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 263-269.
DU Jin-sheng, ZHAO Yi-peng. Experimental Study of Moment Redistribution in Externally Prestressed Concrete Continuous Beams[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 263-269.
- [21] 王少喻. 体外预应力加固混凝土梁体外筋应力增量研究[D]. 桂林: 桂林工学院, 2007.
WANG Shao-yu. Study on Stress Increment of External Tendons of Strengthening Concrete Beams with External Prestressed Tendons[D]. Guilin: Guilin Institute of Technology, 2007.
- [22] 张仲先, 张耀庭. 体外预应力混凝土梁体外筋应力增量的试验与研究[J]. 铁道工程学报, 2003(4): 75-80.
ZHANG Zhong-xian, ZHANG Yao-ting. Theoretical and Experimental Study on Stress Increment of External Tendons in External Prestressed Concrete Flexural Members at Ultimate State[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2003(4): 75-80.