

Research on Bearing Capacity Parameters of Prestressed Concrete Short Rib T-Beam Based on ABAQUS

Youyou Li¹, Xu Wang^{1*}, Shili Xie²

¹Northeast Forestry University, Harbin Helongjiang

²Harbin Institute of Surveying and Mapping, Harbin Helongjiang

Email: 1669517901@qq.com, wangxu9090@126.com

Received: Apr. 2nd, 2020; accepted: Apr. 21st, 2020; published: Apr. 28th, 2020

Abstract

In order to study the main influencing parameters of the bearing capacity of the prestressed concrete short rib T, this paper establishes the nonlinear model of the 32 m two span prestressed concrete continuous short rib T-beam by ABAQUS finite element software, and analyzes the main parameters affecting the bearing capacity by the control parameter method. The results show that the increase of initial prestressing force and prestressing force ratio can greatly improve the serviceability limit load of the beam; the increase of the reinforcement ratio in the tension area can not only increase the serviceability limit load of the beam, but also increase the bearing capacity limit load of the beam; the increase of the concrete strength grade and the compression reinforcement ratio has little effect on the bearing capacity of the beam.

Keywords

Prestressed Concrete Beam, Bearing Capacity, ABAQUS, Parameter Study

基于ABAQUS的预应力混凝土矮肋T梁承载力参数研究

李油油¹, 王旭^{1*}, 谢时雳²

¹东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨

²哈尔滨市勘察测绘研究院, 黑龙江 哈尔滨

Email: 1669517901@qq.com, wangxu9090@126.com

收稿日期: 2020年4月2日; 录用日期: 2020年4月21日; 发布日期: 2020年4月28日

*通讯作者。

摘要

为了研究预应力混凝土梁矮肋T承载力的主要影响参数, 本文通过ABAQUS有限元软件建立32 m两跨预应力混凝土连续矮肋T梁的非线性模型, 并通过控制参数法, 对影响承载力的主要参数进行分析, 结果表明: 初始预应力、预应力比率的增加, 可极大提高梁的正常使用极限荷载; 受拉区配筋率的提高, 不仅可提高梁的正常使用极限荷载, 也可提高梁的承载能力极限荷载; 混凝土强度等级与受压筋配筋率的提高对梁的承载力影响较小。

关键词

预应力混凝土梁, 承载力, ABAQUS, 参数研究

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着桥梁行业的发展, 为了满足更大跨越能力的要求, 预应力混凝土构件孕育而生。预应力混凝土构件因其有较好的承载力、变形小、截面小、恒载小等优点, 被广泛的使用于各类桥型之中。因此预应力混凝土构件的安全承载就称为主要的探讨对象, 大部分研究者[1] [2] [3] [4] [5]对预应力混凝土构件的极限承载力进行研究, 主要分析了在荷载下构件的挠度、应变以及中性轴的变化过程。但对预应力混凝土构件承载力的影响参数研究较少[6] [7] [8], 且研究对象都为缩尺梁。为了进一步对预应力构件的承载力影响参数, 本文以沈山高速某桥的施工标准图建立有限元模型, 对影响承载力参数进行详细分析。

2. 主要影响参数

由公预规 JTGD62-2012 可知在截面一定时, 受压区配筋、受拉区配筋、混凝土强度、受压区高度为影响梁体的极限承载力的主要因素。当构件截面高度一定时, 影响混凝土受压区高度的因素主要有哪些。为了定性的探知受压区混凝土高度的影响因素进行如下推导, 推导过程中运用了平截面假定和中性层理论。

设在初始张拉预应力和外荷载作用下截面下缘主拉钢筋应变为:

$$\varepsilon_s = \frac{f_s}{E_s} \quad (1)$$

因此钢绞线, 受压区钢筋、混凝土的应变分别为:

$$\varepsilon_p = \sigma_{p0} + f_s / E_s \quad (2)$$

$$\varepsilon'_s = \frac{x - a'_s}{h_0 - x} f_s / E_s \quad (3)$$

$$\varepsilon_c = \frac{x}{h_0 - x} f_s / E_s \quad (4)$$

式中, σ_{p0} 为钢绞线的初始张拉预应力。

由截面静力平衡方程可得

$$(\sigma_{p0} + f_s E_p / E_s) A_p + f_s A_s = \frac{bx}{2} \frac{x}{h_0 - x} f_s E_c / E_s + \frac{x - a'_s}{h_0 - x} f_s A_s \quad (5)$$

将公式(4~11)也可表示为如下形式

$$Ax^2 + Bx + C = 0 \quad (6)$$

式中, $A = bf_s E_c / E_s$

$$B = 2(\sigma_{p0} + f_s E_p / E_s) A_p + 2f_s A_s + 2f'_s A'_s$$

$$C = -2(\sigma_{p0} + f_s E_p / E_s) A_p h_0 + 2f_s A_s h_0 - 2f'_s A'_s a'_s$$

求解公式(6)可得梁体破坏时受压区高度 x_d

$$x_d = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (7)$$

由以上公式可得, 在加载过程中影响受压区高度变化的影响因素有, 配筋率、张拉预应力、混凝土强度等级。

由以上分析得出了影桥梁承载力的因素, 因此在下面章节中主要分析有效预应力、预应力比率 PPR、混凝土强度等级、受压区高度系数对预应力连续矮肋 T 梁承载力的影响。

3. ABAQUS 有限元模型

本梁为两跨预应力混凝土连续矮肋 T 梁, 单跨跨径为 16 m, 截面高度为 1050 mm, 翼缘板宽度为 1200 mm, 跨中腹板宽度为 240 mm。该 T 梁按预应力 A 类构件进行设计, 设计荷载为公路 - I 级荷载, 主要受力钢筋采用 HRB400, 钢绞线采用直径为 15.20 mm (7A5) 低松弛高强度钢绞线, 混凝土等级为 C50。通过 ABAQUS 建立有限元模型梁, 如图 1 所示为左跨模型图, 模型梁中钢筋本构采用规范《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) [9], 钢绞线本构关系采用《预应力混凝土结构设计原理》, 因模型中引入混凝土塑性损伤模型[10], 因此需引入塑性损伤因子。如表 1 所示为 CDP 模型损伤因子参数, 表 2 为塑性破坏准则参数。

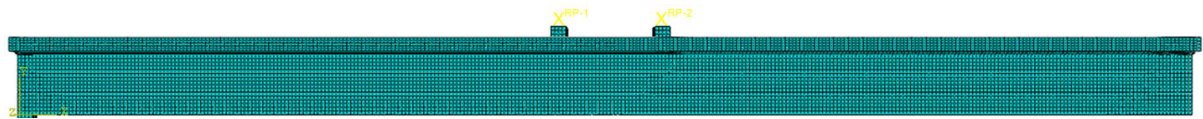


Figure 1. Left span model picture

图 1. 左跨模型图

Table 1. CDP model damage factor parameter table

表 1. CDP 模型损伤因子参数表

受压参数			受拉参数		
压应力/Mpa	非弹性应变	损伤因子	拉应力/Mpa	非弹性应变	损伤因子
22.68	0	0	2.6664	0	0
32.4	0.00073989	0.01	2.64	3.37E-05	0.01
18.5152	0.00282136	0.428544	1.26464	0.00018371	0.495671
10.8008	0.00472398	0.666642	0.786735	0.00030774	0.680391

Continued

7.40635	0.00650139	0.771409	0.584088	0.00042379	0.760819
5.58672	0.00823314	0.853722	0.472094	0.00053722	0.849034
4.4694	0.00994455	0.898389	0.400477	0.00064948	0.903712
3.7184	0.0116453	0.9253	0.35037	0.00076111	0.936711
3.18069	0.0133399	0.942763	0.313124	0.00087237	0.954691
2.77743	0.0150306	0.954738	0.284214	0.00098339	0.965692
			0.0924472	0.00440455	0.99

Table 2. Parameter table of plastic failure criterion of CDP model

表 2. CDP 模型塑性破坏准则参数表

膨胀角	偏心率	强度比 f	K_c	粘聚系数
30	0.1	1.16	0.6667	0.0005

4. 有限元分析结果

4.1. 有限元模型认证

根据公预规中的开裂弯矩、极限弯矩计算方法，得出的结果与有限元计算结果进行对比，其对比结果如表 3 所示。由表 3 可知，对于开裂弯矩的计算，有限元计算结果与规范计算结果吻合度较高，达到了 0.96。有限元计算得出的极限弯矩与规范计算值相差甚远，规范计算弯矩与有限元计算弯矩比值为 0.66，但其接近钢绞线的抗拉强度设计值与极限强度标准值之比 0.7，是因为规范对极限弯矩的计算采用设计值，而实际极限弯矩是由材料标准值决定。因此可得通过 ABAQUS 有限元模拟得出的结果与规范计算结果较为吻合。

Table 3. Comparison of cracking moment and failure moment

表 3. 开裂、破坏弯矩对比表

	开裂弯矩			极限弯矩		
	计算值	有限元值	比值	计算值	有限元值	比值
弯矩	2201	2301	0.96	2420	3642	0.66

4.2. 有效预应力 σ_{pe} 的影响

通过改变 σ_{pe} ，来分析其对梁承载力的影响。如表 4 为不同 σ_{pe} 下梁的承载力情况，从表 4 中可以处 σ_{pe} 的变化范围在 795 MPa~1395 MPa 之间，所对应的模型梁分别为 B1~B5，如图 3 所示为 B1~B5 的荷载 - 挠度曲线图。

从表 4 中可以看出 σ_{pe} 从 795 MPa 变化到 1395 MPa 时，梁的正常使用极限荷载从 372 kN 增加到了 660 kN，提高了 77%；梁的承载能力极限荷载从 1176 kN 增加到 1200 kN，提高了 2%；梁的极限位移从 235 mm 减小到 121 mm，减小了 48.5%。从图 2 中可以看出随着 σ_{pe} 的增长，同级荷载下梁的位移有较为明显的减小。产生以上结果的原因主要是：预应力的施加使梁体跨中下缘和中支座上缘产生压应变储备，这就使得必须用部分外荷载来抵消压应变储备，从而推迟梁达到正常使用极限荷载，因此所施加的预应力越大梁的正常使用极限荷载也就越大；预应力的张拉只是使预应力筋提前处于一种受力状态，提高梁体的使用性能，但不能提高预应力筋的抗拉强度，因此张拉预应力筋对梁的承载能力极限荷载影响较小；

当预应力越大, 受压缘处的压应变储备也就越大, 在相同外荷载作用下, 梁抵抗变形的能力也就越大, 因此预应力越大, 同级荷载下梁的位移有较为明显的减小。综上可知: σ_{pe} 的增加对梁的承载能力极限荷载影响较小, 但对梁的正常使用极限荷载影响较大, 且可以减小梁在各级荷载下的位移, 因此 σ_{pe} 的提高可加强梁的安全承载。

Table 4. Influence of initial prestress on bearing capacity

表 4. 初始预应力对承载力的影响

梁号	初始张拉应力/(MPa)	正常使用极限荷载/(kN)	破坏荷载/(kN)	位移/(mm)
B1	795	372	1176	235
B2	945	446	1188	211
B3	1095	528	1200	193
B4	1245	588	1200	169
B5	1395	660	1200	121

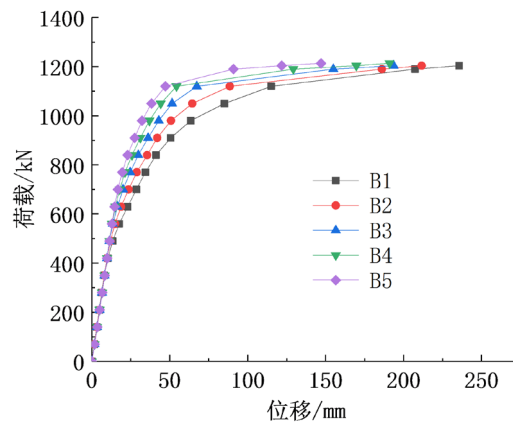


Figure 2. Load displacement curve of beam B1 - B5

图 2. B1~B5 荷载 - 位移曲线

4.3. 预应力比率 PPR 的影响

预应力比率由 A. E. Naaman 提出, 可用下列公式表达:

$$PPR = \frac{(M_u)_p}{(M_u)_{p+s}} \quad (12)$$

式中: $(M_u)_p$ 为预应力筋提供的极限抗弯承载力;

$(M_u)_{p+s}$ 为预应力和主筋提供的极限抗弯承载力之和。

如公式(13)可知, 改变主筋截面或预应力筋截面会使 PPR 发生变化, 但也会改变受压区高度系数 ξ , 但同时改变两者可使 ξ 保持不变。本小结通过保持受压区高度系数 ξ 不变, 改变预应力比率 PPR, 来研究 PPR 对预应力连续梁承载力的影响。

$$\xi = \frac{f_{sd} A_s + f_{pd} A_p - f'_{sd} A'_s (h_0 - a_s)}{f_{cd} h_0 [(b'_f - b) h'_f + bx]} \quad (13)$$

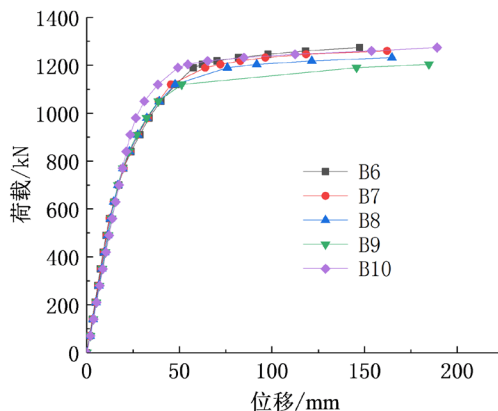
如表 5 所示为预应力比率在 0.6~1.0 变化下, 相对应梁 B6~B10 的承载力状况。如图 3 所示为梁 B6~B10 荷载 - 位移曲线。

Table 5. Influence of PPR on bearing capacity**表 5.** 预应力比率 PPR 对承载力的影响

梁号	预应力比率 PPR	正常使用极限荷载/(kN)	破坏荷载/(kN)	位移/(mm)
B6	0.6	430	1272	147
B7	0.7	490	1260	162
B8	0.8	546	1232	164
B9	0.9	617	1204	184
B10	1.0	855	1274	189

从表 5 中可以得出,当 PPR 从 0.6 增加大 1.0 时,梁的正常使用极限荷载从 430 kN 增加到了 855 kN,提高了 98%;梁的承载能力极限荷载在呈现先减小,后增加的趋势,谷值出现在 PPR = 0.9 时,谷值与最大值之间仅相差 5.3%;梁的极限位移从 147 mm 增加到了 189 mm,增加了 28%。产生以上结果的主要原因:随着 PPR 的增加,预应力筋面积相应增加,因此梁的受拉缘压应力储备也相应增加,由 4.2 可知,梁的正常使用极限荷载也随着增加;随着 PPR 的增加,钢筋截面也随着减小,由钢筋与预应力筋设计强度之比,可知钢筋截面减小量是预应力筋截面增加量的 3.7 倍;因此随着 PPR 的增加,受拉筋配筋率在急剧减小,因此梁极限位移在随之增大。由此可知,预应力筋的使用极大的减小梁内了钢筋用量。

从图 3 中可以看出随着 PPR 的增加,荷载在 770 kN 之前;梁 B10 的位移在同级荷载下相对其他各梁的增加较快,主要是因为 B10 中没有下缘受拉钢筋,因此可知对于预应力 A 类以上构件配置下缘受拉钢筋,在设计荷载内可以减小梁体位移;荷载在 100 kN 之前,梁 B6~B9 的位移在同级荷载下基本相同,因此可知对于预应力 A 类以上构件,配置下缘受拉钢筋适量即可;当荷载在 1100 kN 之后 B7 梁的位移相对各梁增加较快,但不会影响预应力 A 类构件的正常承载。综上所述:PPR 的提高,对梁的承载能力极限荷载的影响较小,对梁的正常使用极限荷载有较大的提高;但 PPR 的取值应小于 1,当 PPR = 1 时,并不利于梁的承载。

**Figure 3.** Load displacement curve of beam B6 - B10**图 3.** B6~B10 荷载 - 位移曲线

4.4. 混凝土强度等级的影响

由规范[9]可知,

$$f_{cd,C50}/f_{cd,C40} \approx \dots \approx f_{cd,C80}/f_{cd,C70} \approx 1.2 \quad (14)$$

因此,相邻混凝土等级下的受压区高度 x 之比:

$$x_{C50}/x_{C40} \approx \dots \approx x_{C80}/x_{C70} \approx 0.83 \quad (15)$$

因此可得，相邻混凝土等级下的弯矩之比：

$$\frac{M_{C50}}{M_{C40}} \approx \frac{h_0 - x_{C50}/2}{h_0 - x_{C40}/2} = \frac{h_0 - 0.83x_{C40}/2}{h_0 - x_{C40}/2} \quad (16)$$

当 $x \leq h_f$ 时，

$$\frac{M_{C50}}{M_{C40}} \approx \dots \approx \frac{M_{C80}}{M_{C70}} \approx 1 \quad (17)$$

如表 6 所示为混凝土改变对梁承载力的影响，混凝土变化范围在 C40~C80 之间，所对应的梁为 B11~B15，如图 4 所示为梁 B11~B15 的荷载 - 位移曲线。

Table 6. Influence of concrete strength grade on bearing capacity
表 6. 混凝土强度等级对承载力的影响

梁号	混凝土强度等级	正常使用极限荷载/(kN)	破坏荷载/(kN)	位移/(mm)
B11	C40	594	1212	173
B12	C50	599	1232	168
B13	C60	603	1253	161
B14	C70	610	1272	155
B15	C80	612	1280	146

从表 6 中可以看出混凝土强度等级从 C40 上升到 C80 后，梁的正常使用极限荷载从 594 kN 提高到 612 kN，提高了 3%；梁的极限荷载 1212 kN 提高到了 1280 kN，提高了 5%；极限位移从 173 mm 下降到 146 mm，减小了 16%。产生以上结果的主要原因：随着混凝土强度等级的增加，混凝土轴线抗压强度变大，受压区高度 x 减小，相应 $h_0 - x/2$ 增大，因此对梁的承载能力有相应提高，但由公式(17)可知梁的承载能力提高较小。从图 4 中可以看出混凝土强度等级的提高对正常使用荷载范围内梁的位移减小较少，但可以较大减小梁开裂后的位移，其原因是因为随着混凝土等级的提高，混凝土弹性模量也会随之增加，梁的抗弯刚度也会随着增加。综上所述，混凝土强度的提高对梁的承载力影响较小，非特殊混凝土构件不推荐采用高强度混凝土。

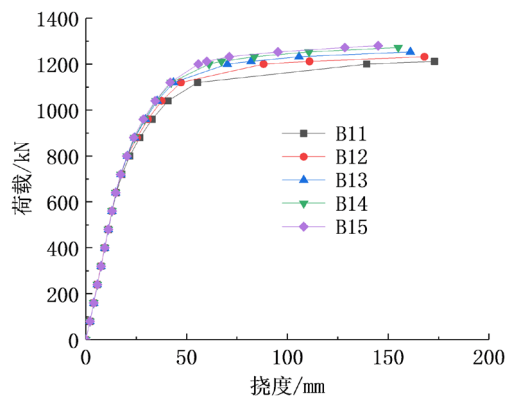


Figure 4. Load displacement curve of beam B11 - B15

图 4. B11~B15 荷载 - 位移曲线

4.5. 受压区高度系数 ζ 的影响

根据公式(13)可知,在混凝土强度等级不变的情况下,影响受压区高度系数 ζ 的因素主要有三个:受拉主、钢绞线、受压钢筋的配筋率。为了因素分析的简单化,将受压筋分为一组,将受拉筋分为一组,受拉组在保证 PPR 不变的情况下改变受拉区配筋率,具体情况见表 7 所示。

Table 7. Change table of height coefficient ζ in compression area
表 7. 受压区高度系数 ζ 变化表

	梁号	钢筋变化情况	ζ
受拉组	B16	$0.9A_p, 0.608A_s$	0.093
	B17	$1.0A_p, 0.676A_s$	0.105
	B18	$1.1A_p, 0.744A_s$	0.116
	B19	$1.2A_p, 0.811A_s$	0.127
	B20	$1.3A_p, 0.878A_s$	0.139
受压组	B21	$2.4A'_s$	0.105
	B22	$1.8A'_s$	0.108
	B23	$1.2A'_s$	0.111
	B24	$0.6A'_s$	0.114
	B25	$0.0A'_s$	0.117

如表 8 为受拉区配筋变化下,受压区高度系数 ζ 对梁承载力的影响情况,受压区高度系数变化范围为 0.093~0.139,对应的梁分别为 B16~B20,如图 5 为梁 B16~B20 的荷载 - 位移曲线图。

Table 8. The influence of ζ on bearing capacity
表 8. ζ 对承载力的影响

梁号	ζ	正常使用极限荷载/(kN)	破坏荷载/(kN)	位移/(mm)
B16	0.093	504	1144	188
B17	0.105	573	1232	168
B18	0.116	637	1312	168
B19	0.127	701	1408	200
B20	0.139	768	1472	190

从表 7、表 8 中可以看出受拉区配筋率的增加会导致受压区高度系数的增加,随着受压区高度系数的增加,使梁的正常使用极限荷载从 504 kN 提高到了 768 kN,提升了 52%;使梁的承载能力极限荷载从 1144 kN 提高到了 1472 kN,提升了 28%,对梁的极限位移影响并无规律。从图 5 中可以看出受压区高度系数的增加,可以明显的减小梁在同级荷载下的位移。综上可知,由受拉区配筋率增加导致的受压区高度系数的增加,对梁的承载能力有较大提高。

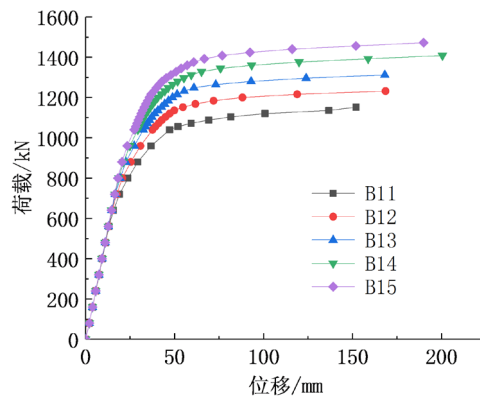


Figure 5. Load displacement curve of beam B16 - B20
图 5. B16~B20 荷载 - 位移曲线

如表 9 为受压区配筋变化下, 压区高度系数 ξ 对梁承载力的影响情况, 受压区高度系数变化范围为 0.105~0.117, 对应的梁分别为 B20~B25, 如图 6 为 B20~B25 的荷载 - 位移曲线图。

Table 9. The influence of ξ on bearing capacity
表 9. ξ 对承载力的影响

梁号	ξ	正常使用极限荷载/(kN)	破坏荷载/(kN)	位移/(mm)
B21	0.105	649	1328	148
B22	0.108	649	1321	150
B23	0.111	649	1313	155
B24	0.114	650	1306	168
B25	0.117	650	1302	170

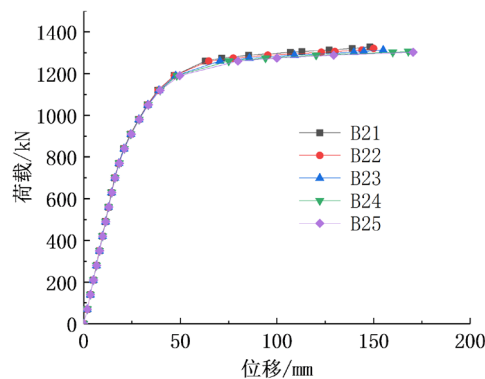


Figure 6. Load displacement curve of beam B20 - B25
图 6. B20~B25 荷载 - 位移曲线

从表 7、表 9 中可以看出受压区配筋率对受压区高度系数 ξ 的影响较小, 且随着受压区配筋率的减小 ξ 在增大。随着 ξ 的增加, 梁的正常使用极限荷载没有变化; 梁的承载能力极限荷载也影响较小, 仅减小了 1%; 梁的极限位移从 148 mm 增加到了 170 mm, 减增加了 15%。产生以上结果的原因: 受压钢筋因的减小, 会使 $h_0 - x/2$ 有所减小, 因此受压筋的变化会影响梁的承载力, 但因受压筋的配筋率较小, 因此, 受压筋的变化对梁的承载力影响极小。从图 6 中可以看出受压区高度系数的增加, 在正常使用荷载下对

梁的位移基本并无影响。综上可知,由受拉区配筋率变化导致的受压区高度系数的增加,对梁的承载能力影响较小。

5. 结论

本文通过 ABAQUS 有限元软件的控制参数法,对 32 m 两跨预应力混凝土连续矮肋 T 梁进行模拟,分析影响预应力混凝土承载力的主要参数,所得结论如下:

1) 有效预应力对矮肋 T 梁的承载能力极限荷载影响较小,但对矮肋 T 梁的正常使用极限荷载影响较大,且可以有效的减小梁在各级荷载下的位移,因此有效应力的提高可加强梁的安全承载。

2) 预应力比率 PPR 的提高,对矮肋 T 梁的承载能力极限荷载的影响较小,对矮肋 T 梁的正常使用极限荷载有较大的提高;PPR 的增加可减小截面配筋率,但 PPR 的取值应小于 1,当 PPR = 1 时,并不利于梁的正常承载。

3) 混凝土强度的提高对矮肋 T 梁的承载力影响较小,但可增大梁的抗弯刚度,减小梁在同级荷载下的位移。

4) 梁受拉区配筋率的增加或受压区配筋率的减小,都会使受压区高度系数增加。前者导致的受压区高度系数的增加,对矮肋 T 梁的承载能力有较大提高;后者导致的受压区高度系数的增加,对矮肋 T 梁的承载能力影响较小。

参考文献

- [1] 王城泉,申永刚,杨润芳,邹昀. 装配式预应力混凝土 T 梁极限承载力试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2369-2376.
- [2] 李勇,张劲泉,余波. 钢筋混凝土 T 梁旧桥极限承载能力研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(4): 66-71.
- [3] 张波,曾思智. 有粘结预应力混凝土连续梁的极限承载力研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38(1): 40-43+51.
- [4] 李琳,张正亚,吕毅刚. 预应力混凝土 T 梁抗弯承载能力试验研究与 Ansys 数值模拟[J]. 中外公路, 2016, 36(3): 183-188.
- [5] 于天来,欧武,姚爽. 预应力矮肋 T 梁受力性能研究[J]. 土木工程, 2019, 8(2): 404-412.
- [6] 钟曙亮,高芳清. 单片预应力混凝土 T 梁承载力试验研究[J]. 中国测试, 2010, 36(6): 21-23+90.
- [7] 刘小燕,颜东煌,张峰,魏洪昌,韦成龙. 预应力高强混凝土梁极限承载力分析[J]. 中国公路学报, 2006(1): 58-61+79.
- [8] 夏荣泉. 预应力混凝土梁极限承载力非线性有限元研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2005.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 曾鹏,贾艳敏,王佳伟. 既有钢筋混凝土空心板梁抗弯承载力分析[J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 39-42.