

预应力连续钢梁负弯矩区受力性能分析

王宇琪¹, 贾艳敏^{1*}, 魏皓天¹, 王佳伟^{1,2}

(1.东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2.辽宁省交通规划设计院有限责任公司 公路养护技术研究中心)

摘要:为研究预应力连续钢梁负弯矩区受力性能,对开口截面三跨连续钢梁进行六点加载抗弯性能试验。利用有限元软件 Ansys 建立试验梁非线性分析模型模拟其抗弯过程,模型计算所得梁体挠度值和应力值与试验结果吻合良好,进而对负弯矩区进行进一步受力性能及影响因素分析。结果表明:试验梁处于弹性工作状态时,负弯矩区截面变形符合平截面假定;相较于普通连续钢梁,施加预应力使支座附近截面正应力明显减小;普通连续钢梁及预应力连续钢梁支座底板先达到屈服应力,随着荷载增加,梁体因挠度过大超过限值而不能继续承受更大荷载;当预应力不超过 135 kN 时,合理增大预应力可提高预应力连续钢梁负弯矩区抗弯承载力;随着负弯矩区支座截面处钢束上调,支座附近顶板及底板正应力减小,顶板应力变化略明显,且越靠近支座位置减小值越大,顶板受拉段长度有所减小。

关键词: 预应力; 连续钢梁; 有限元; 负弯矩; 受力性能

1 前言

在桥梁工程中,预应力钢梁相较于普通钢梁,其承载能力大幅提高,结构整体受力性能有很大改善,连续钢梁不同于简支钢梁,支座截面出现较大负弯矩,对跨中正弯矩有明显卸载作用,故连续钢梁在大跨径桥梁中得以广泛应用。目前对钢梁受力性能分析多为简支钢梁,桑敏对体外预应力简支工字钢梁进行参数分析,包括转向块数量、体外张拉偏心、布索形式等对抗弯性能的影响;段兰分析了混合设计高性能简支工字钢梁翼缘宽厚比、腹板高厚比及不同加载方式对其破坏形态和抗弯承载力的影响;李婷分析了预应力简支钢梁体外索结构的挠度并给出相关参数关系曲线,研究了其在横向均布荷载作用下弹塑性变形并提出钢梁屈服前后挠度计算公式。相较于简支钢梁,连续钢梁在各种荷载作用下,正弯矩区和负弯矩区产生不同的应力状态,负弯矩区受力较为复杂且影响因素较多。王景全通过对预应力组合梁负弯矩区受力性能进行分析,提出了组合梁负弯矩区抗弯承载力计算方法;肖维思利用有限元软件 Ansys 对四跨连续梁桥进行模拟计算,分析了连接件布置形式及抗剪刚度对装配式组合

梁桥负弯矩区结合部受力性能的影响。目前对负弯矩区受力性能研究多为钢—混组合梁结构,而对预应力连续钢梁负弯矩区的研究尚不充分。

该文首先以一片三跨连续钢梁为研究对象,在其两侧布置高强预应力钢束,形成预应力连续钢梁并进行试验,与普通连续钢梁试验结果进行对比,分析预应力对连续钢梁负弯矩区作用效果。在试验梁基础上,利用有限元软件 Ansys 建立非线性分析模型,对试验梁加载过程进行数值仿真模拟并与试验结果进行对比,以验证模型的正确性,利用模型对连续钢梁进行进一步的极限状态静力分析,并通过控制参数,分析预应力大小、负弯矩区支座位置处钢束距顶板距离对负弯矩区截面受力性能的影响。

2 试验简介

2.1 试验梁简介

设计制作一开口截面三跨连续钢梁。梁长 10 m,跨径组合为(3+4+3) m,钢板厚度 4 mm,钢梁截面尺寸见图 1。纵向沿桥梁中心线每 250 mm 设置横隔板,每 500 mm 设置加劲板。梁体采用 Q235 钢,弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$ MPa,剪切模量 $G=0.81 \times 10^5$ MPa,

收稿日期:2018-10-20

基金项目:辽宁省交通科技项目(编号:201512,201513)

作者简介:王宇琪,女,硕士研究生.E-mail:1461159299@qq.com

*通信作者:贾艳敏,女,教授,博士生导师.E-mail:yanminjia2008@126.com

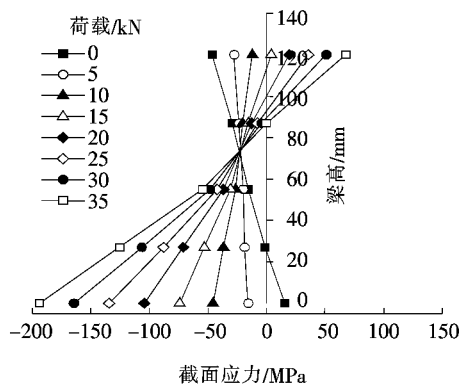


图 5 预应力连续钢梁正应力沿梁高分布图

表 1 支座顶板、底板正应力减小值及百分比

荷载/ kN	支座顶板应力				支座底板应力			
	普通钢 梁/MPa	预应力钢 梁/MPa	减小值/ MPa	百分比/ %	普通钢 梁/MPa	预应力钢 梁/MPa	减小值/ MPa	百分比/ %
20	71.14	19.57	51.57	72.5	-113.30	-104.44	8.86	7.8
25	88.17	35.71	52.46	59.5	-144.34	-134.45	9.89	6.8
30	105.54	51.29	54.25	51.4	-174.07	-164.25	9.82	5.6

顶板产生的初始应力较底板大,故抵消效果更明显。

4.2 支座附近顶、底板正应力分布分析

分析负弯矩区支座附近顶、底板正应力分布规律,普通连续钢梁及张拉力为 19.5 kN 时预应力连续钢梁负弯矩区 1[#]~6[#] 截面顶、底板应力分布随荷载变化图如图 6~9 所示。

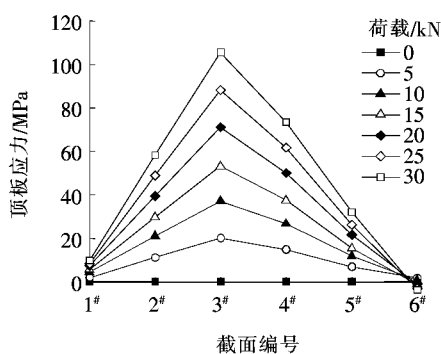


图 6 普通连续钢梁顶板正应力分布图

从图 6~9 可以看出:施加预应力后,支座附近顶板及底板正应力均有所减小,在 30 kN 荷载作用下,2[#] 截面顶板正应力减小 44.6 MPa,底板正应力减小 3.0 MPa,3[#] 截面顶板正应力减小 54.2 MPa,底板正应力减小 9.8 MPa,可见预应力对负弯矩区顶、底板应力减小效果越靠近支座位置越明显。张拉后梁体产生的初始应力与 30 kN 荷载作用下 1[#]~6[#] 截面顶、底板

应力后,钢梁在弹性工作阶段截面变形仍符合平截面假定。在相同荷载作用下,预应力钢梁相较于普通钢梁沿梁高各截面正应力均有减小。该试验梁预应力采用了折线布索的形式,钢束在支座截面处上调靠近顶板,使支座位置在张拉预应力后产生上缘受压、下缘受拉的初始应力,与外荷载引起的支座截面应力方向相反,对其有抵消作用。预应力引起支座顶板及底板正应力减小值和百分比如表 1 所示。从表 1 可见:在同级荷载下,施加预应力后,顶板应力减小值比底板要大,预应力的施加对负弯矩区支座顶板正应力减小效果更明显。从图 5 可以看出,张拉预应力后支座截面

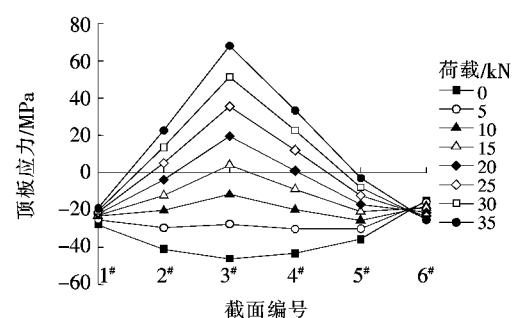


图 7 预应力连续钢梁顶板正应力分布图

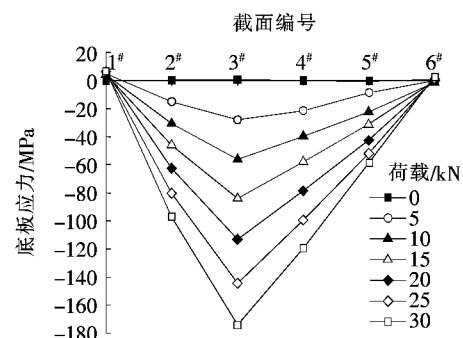


图 8 普通连续钢梁底板正应力分布图

应力变化值关系如图 10 所示。由图 10 可知:顶、底板正应力变化曲线与初始应力曲线趋势吻合,张拉预应力产生的反向弯矩可以有效抵消荷载作用产生的弯矩,可见预应力对支座顶、底板正应力变化影响效果取

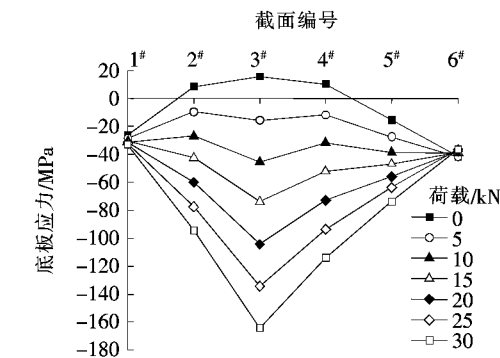


图 9 预应力连续钢梁底板正应力分布图

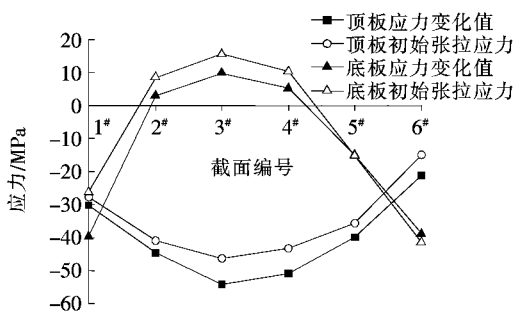


图 10 正应力变化值与初始应力关系图

决于张拉预应力后梁体的初始应力。

5 有限元结果分析

5.1 有限元结果与试验对比分析

根据试验结果分析负弯矩区在试验加载过程中截面的受力性能,该文在一定数量试验的基础上,建立了 Ansys 有限元分析模型,进而对负弯矩区受力主要影响因素进行分析,对复杂试验过程进行有效简化。Ansys 模型计算值和实测的钢梁挠度及负弯矩区支座截面顶、底板正应力值如表 2、3 所示。由表 2、3 可知:有限元计算结果与试验结果吻合良好,说明该文利用 Ansys 对预应力连续钢梁数值仿真模拟方法合理准确。

5.2 极限状态静力分析

利用 Ansys 模型对连续钢梁进行全过程静力分析,确定其极限荷载,并分析极限荷载作用下负弯矩区受力状态。普通钢梁及张拉力为 80 kN 时预应力钢梁荷载一位移曲线如图 11 所示。

从图11可以看出:在加载初期,荷载一位移曲线

表 2 各控制截面钢梁挠度试验结果与 Ansys 计算值

项目	第 1 跨 3/4 截面挠度			第 2 跨 1/2 截面挠度		
	实测值/	Ansys 计算	误差/	实测值/	Ansys 计算	误差/
	mm	值/mm	%	mm	值/mm	%
普通钢梁	5.43	5.77	6.4	7.68	7.39	3.8
预应力钢梁+19.5 kN	4.60	4.49	2.2	6.98	6.82	2.2
预应力钢梁+39 kN	3.55	3.55	0.2	6.35	6.41	0.9

表 3 支座截面顶板及底板正应力试验结果与 Ansys 计算值

荷载	1# 截面顶板应力			5# 截面底板应力		
	实测值/	Ansys 计算	误差/	实测值/	Ansys 计算	误差/
	MPa	值/MPa	%	MPa	值/MPa	%
普通钢梁+30 kN	96.96	99.68	2.8	-184.64	-197.95	7.2
预应力钢梁+20 kN	31.72	29.36	7.4	-117.28	-108.10	7.8
预应力钢梁+25 kN	47.31	44.20	6.6	-147.84	-139.94	5.3
预应力钢梁+30 kN	62.69	59.03	5.8	-177.85	-171.79	3.4

基本呈线性关系,随着荷载增大,曲线斜率开始变化并逐渐增大,梁体有部分截面进入屈服状态,此时钢梁达到弹性极限抗弯承载力,继续增大荷载,挠度曲线出现明显拐点,位移剧增,当跨中挠度达到计算跨径的

1/200时,视其达到承载能力极限状态。普通连续钢梁及预应力连续钢梁所对应弹性极限荷载分别为 35、45 kN,利用 Ansys 模型计算各自在该荷载作用下支座及跨中截面正应力如表 4 所示。

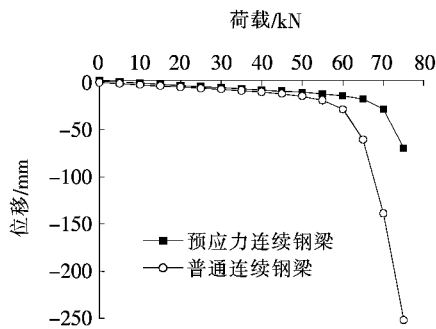


图 11 普通连续钢梁及预应力连续钢梁荷载一位移曲线图

表 4 负弯矩区支座及跨中位置截面正应力

项目	正应力/MPa			
	支座顶板	支座底板	跨中顶板	跨中底板
普通连续钢梁+35 kN	109.88	-233.06	-72.04	111.73
预应力连续钢梁+45 kN	8.99	-234.43	-133.21	51.71

由表 4 可知:支座底板应力先达到屈服强度,此时支座顶板及跨中顶、底板应力均未达到屈服。随着荷载增加,支座截面部分进入塑性,中和轴附近仍处于弹性状态,继续增大荷载截面变形发展较快,实际很难达到全截面塑性,梁体因挠度过大而不能承受更大荷载。预应力连续钢梁负弯矩区应力塑性发展过程如图 12 所示,支座截面应力图 12(d)可由预应力张拉后初始应力图 12(b)和裸梁应力图 12(c)叠加得到,可见施加预应力后,梁体产生与荷载应力相反的初始应力,改变了结构受荷载前的应力场,通过抵消作用扩大了结构的弹性受力范围,进而提高了结构的承载力。

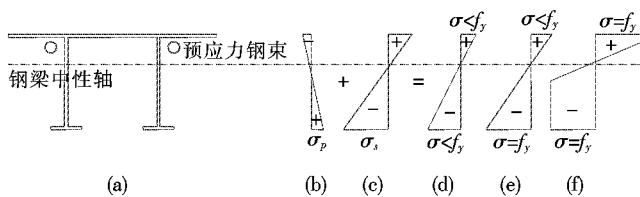


图 12 支座截面塑性应力发展过程

5.3 预应力大小对支座截面顶底板正应力影响分析

分析预应力大小对负弯矩区顶、底板正应力的影响,预应力 H 分别取 60、80、100、120 kN,支座截面顶、底板应力—荷载曲线随预应力变化的影响如图 13、14 所示。当支座底板应力达到屈服极限时,预应力连续钢梁达到弹性极限荷载,利用 Ansys 模型计算不同初始预应力下预应力连续钢梁的弹性极限荷载如

表 5 所示。

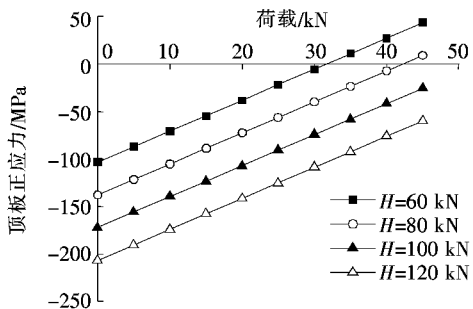


图 13 预应力大小对支座截面顶板应力—荷载曲线的影响

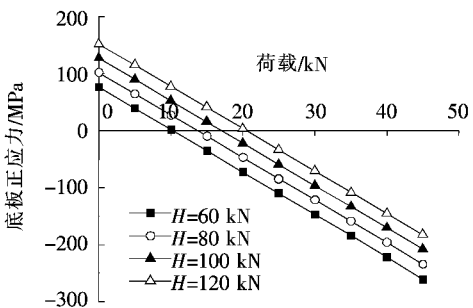


图 14 预应力大小对支座截面底板应力—荷载曲线的影响

表 5 不同初始预应力下预应力连续钢梁弹性极限荷载

初始预应力/kN	荷载/kN	初始预应力/kN	荷载/kN
60	41.69	100	48.38
80	45.09	120	51.40

从图 13、14 可以看出:顶板及底板正应力均随预应力增大等比例变化,预应力每增加 20 kN,同级荷载下顶板正应力减小约 34.4 MPa,底板正应力减小约 25.3 MPa,预应力大小对负弯矩区应力变化呈线性正比例关系,且预应力对顶板正应力影响更明显。从表 5 可知:当预应力由 60 kN 增大至 120 kN 时,弹性极限荷载由 41.69 kN 增大至 51.4 kN,提高约 23.3%,可见预应力越大,其抵消负弯矩区荷载应力的效果越显著。但同时增大预应力也会导致张拉后截面初始应力相应增大,从表 6 可以看出:当预应力超过 135 kN 时,支座顶板应力在张拉阶段即达到 235 MPa 进入屈服状态,故张拉力有一定限度,不宜过大,在不超过 135 kN 范围内,合理增大预应力可以线性提高预应力连续钢梁负弯矩区抗弯承载能力。

5.4 支座截面钢束距顶板距离对顶、底板正应力影响分析

预应力钢束的布置对结构受力会产生影响,可通

表 6 张拉后顶板及底板初始应力

预应力/kN	初始应力/MPa	
	支座顶板	支座底板
120	-206.73	152.55
130	-226.07	165.46
135	-235.21	172.38

过上调负弯矩区钢束使结构受力更加合理。简支转连续混凝土 T 梁桥负弯矩束距顶板距离对负弯矩区产生较大影响,随着负弯矩束距顶板距离的增大,预应力引起负弯矩截面次弯矩有减小趋势。分析预应力连续钢梁支座截面钢束距顶板距离 h 对负弯矩区受力的影响。分别取 $h=15、20、25、30、35$ mm 进行计算,支座附近截面顶、底板正应力变化值受 h 的影响如图 15、16 所示。从图 15、16 可见,随着支座截面钢束上调,负弯矩区顶、底板正应力均有减小,顶板正应力变化略明显,且越靠近支座位置正应力减小值越大,最大达到 15.2 MPa,负弯矩区顶板受拉段长度也将随之减小,故在支座截面钢束布置越靠近顶板,对负弯矩区受力越有利,这与文献[13]结论相一致。

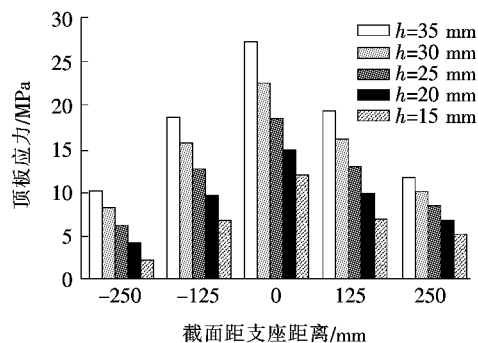


图 15 支座截面钢束距顶板距离对顶板正应力的影响

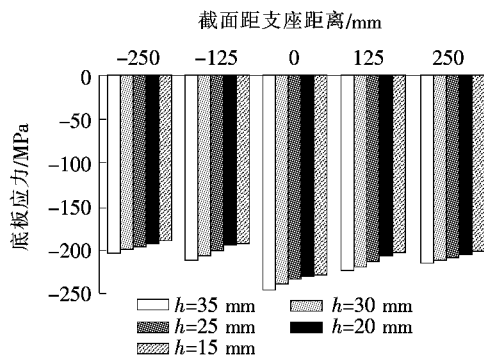


图 16 支座截面钢束距顶板距离对底板正应力的影响

6 结论

(1) 在试验加载过程中,普通连续钢梁及预应力连续钢梁均处于弹性工作阶段,施加预应力后,截面变形仍符合平截面假定,负弯矩区截面正应力明显减小,预应力对负弯矩区应力变化的影响取决于张拉预应力后梁体产生的初始应力。

(2) 在试验加载形式下,普通连续钢梁及预应力连续钢梁负弯矩区支座底板先达到屈服应力,随着荷载增加部分截面进入塑性,荷载继续增加,梁体因挠度过大超过限值而不能继续承受更大荷载。

(3) 在施加预应力不超过 135 kN 范围内,增大预应力可以有效提高负弯矩区抗弯承载能力;负弯矩区支座位置处钢束布置越靠近顶板,对负弯矩区受力越有利,越靠近支座位置效果越明显,顶板受拉段长度也随钢束上调有所减小。

参考文献:

- [1] 陆赐麟,尹思明,刘锡良.现代预应力钢结构[M].2版.北京:人民交通出版社,2007.
- [2] 钟善桐.预应力钢结构[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1986.
- [3] 桑敏.含体外索的预应力工字钢梁抗弯性能非线性有限元分析[D].华中科技大学硕士学位论文,2013.
- [4] 段兰,唐友明,王春生,等.混合设计的高性能钢梁抗弯性能试验[J].交通运输工程学报,2014(5).
- [5] 李婷.预应力钢梁体外索结构的变形分析[D].扬州大学硕士学位论文,2015.
- [6] 王景全,殷惠光,刘其伟.体外预应力组合梁负弯矩区抗弯承载能力研究[J].中国矿业大学学报,2007(3).
- [7] 肖维思,糜径超,刘玉擎.装配组合钢箱梁桥负弯矩区结合部受力性能研究[J].建筑结构学报,2015(S1).
- [8] 邓文琴,张建东,刘朵,等.新型槽钢连接件基本力学性能试验研究[J].中外公路,2016(5).
- [9] 苏家战,傅元方,黄卿维,等.钢筋超高性能混凝土梁受弯试验和有限元分析研究[J].中外公路,2017(6).
- [10] 卢亦森,龚田牛,李杉,等.预应力碳纤维布加固钢梁抗弯承载力研究[J].铁道学报,2013(6).
- [11] JTG D64-2015 公路钢结构桥梁设计规范[M].
- [12] 贾艳敏,王佳伟,韩基刚.预应力简支钢箱梁固有频率影响因素分析[J].工程力学,2009(S1).
- [13] 程文.简支转连续预应力 T 梁桥负弯矩区应力分析[D].东北林业大学硕士学位论文,2016.