

## 预制预应力砼 T 梁侧弯线形分析研究\*

王贵

(湖南建工交通建设有限公司, 湖南长沙 410004)

**摘要:** 后张法预应力砼 T 梁在张拉预应力钢绞线后,受多种因素特别是钢束孔道定位偏差的影响,易发生侧弯变形,严重影响主梁安全性和耐久性。文中通过现场调研和数值模拟计算,研究后张法预应力砼 T 梁侧弯变形的线形,为理论上计算侧弯变形量和施工过程中控制侧弯变形量提供参考。

**关键词:** 桥梁;预应力砼 T 梁;侧弯变形;线形

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)06-0131-04

装配式预应力砼梁桥以其标准化、规范化、现场施工便捷和经济效益良好等优势,被广泛应用于工程建设项目中。湖南地区已建和在建项目中有大量桥型选择装配式预应力砼梁桥,实地调研发现在实际施工中由于 T 形预制梁截面相对较小、刚度较弱、自身横向抗弯刚度较小,在张拉预应力钢束后,受多种因素的综合作用,T 梁产生一定程度侧弯,预应力钢束的孔道定位偏差对侧弯变形量的影响更明显。过大的变形不仅影响后续施工的正常进行,同时严重影响结构的安全性和耐久性。当前,有关侧弯变形的研究多集中在定性分析和侧弯变形控制方面,对于定量计算的讨论还较少,相关规范性文件对 T 梁侧弯变形量的允许值也没有具体规定,仅部分地区在地方标准中进行了部分阐述。该文依托平益[平江(湘赣界)至益阳安化]高速公路矮洲汨水大桥,通过实地调研了解 T 梁侧弯变形情况,采用有限元数值计算模型模拟钢束孔道偏位,计算侧弯变形量,利用数学统计方法,得出符合数据变化规律的曲线形式,为 T 梁侧弯变形研究提供理论参考。

## 1 侧弯变形影响因素分析

影响预应力 T 梁侧弯变形的因素很多,包括预应力钢束在施工过程中的张拉顺序及张拉工艺、钢束孔道定位偏差、构件截面形式和尺寸大小、张拉时砼的强度等。

施工经验表明,存在多根预应力钢束时,不同钢束施工顺序产生的侧弯值不相同,在其他项目满足规范要求的前提下,通过优化钢束张拉顺序,可保证

钢束侧弯变形满足规范要求。严格按设计施工要求和规范标准进行操作,可使这些因素对 T 梁侧弯变形的影响程度降到最低。矮洲汨水大桥 T 梁预制场调研结果表明,钢束孔道定位偏差是一个突出问题,波纹管在施工中产生定位偏差,将直接导致波纹管中的钢束偏离设计位置,张拉后将在非轴向上产生额外的应力,特别是对于腹板薄、高跨比小、横向刚度较小的 T 形梁,波纹管施工时的定位偏差将直接影响钢束合力的作用点,引起主梁侧弯变形。砼浇筑过程中,砼的振捣也容易引起内置波纹管产生较大内移或外偏,从而引起钢束偏位,导致主梁侧弯变形。因此,重点针对钢束孔道定位偏差引起的钢束侧弯变形进行分析。

## 2 数值模拟分析

从预应力孔道定位偏差着手,研究 T 梁侧弯变形量沿梁纵向变化的规律。根据矮洲汨水大桥 40 m 预应力 T 梁设计图纸,利用 MIDAS FEA 建立数值计算模型,划分单元进行侧弯变形量数值计算。

### 2.1 模型参数

该桥位于平江县安定镇官滩村、美潭村,桥位区最低地面高程约 72.56 m(中部汨水两岸),最高约 115.17 m(伍市端桥台),相对高差约 40.0 m。桥位区有乡村机耕道正交下穿通过,交通较便利。全长 727.8 m,全桥采用 40 m 简支变连续 T 梁结构,共分为 6 联,桥跨布置为 18×40 m 预应力 T 梁,桥面净宽 2×11.75 m。主梁采用 C50 砼,设置 N1、N2、N3、N4、N5 5 组预应力钢束,边梁和中梁预应力钢

\* 基金项目:山西省交通运输厅科技项目(2017-1-37)

束均不设平弯段。钢束采用 1860 高强钢绞线,截面面积 1 400 mm<sup>2</sup>,边梁钢束截面面积 1 540 mm<sup>2</sup>,中梁钢束布置形式见图 1、图 2。表 1 为该桥 5 组 15 束钢束孔道定位偏差情况。

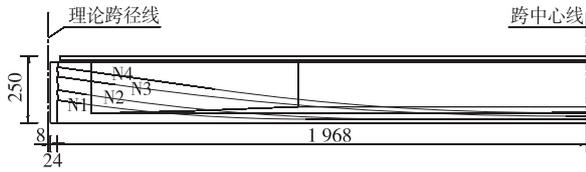


图 1 钢束竖弯示意图(单位:cm)

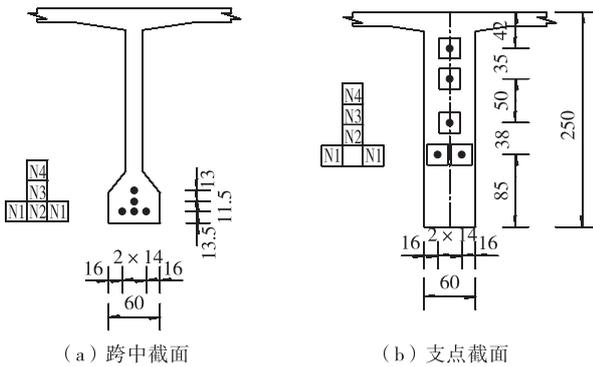


图 2 支点孔道和跨中孔道定位示意图(单位:cm)

表 1 T 梁截面预应力钢束定位偏差数据

组号	T 梁跨径/m	钢束定位偏差/mm			备注
		N1	N2	N3	
1	40	20	13	5	N1 胀模 1 cm
2	40	3	13	0	N2 胀模 0.5 cm
3	40	3	5	0	—
4	40	14	15	7	N1 胀模 0.8 cm, N2 胀模 1 cm
5	40	5	8	4	—

### 2.2 模型建立

利用有限元软件分别建立 40 m T 梁的边梁和中梁实体模型,输入预应力钢束单元,计算钢束整体同向偏位 2、4、6、8、10、12、14 mm 时的侧弯变形量。模型中, X 轴与梁纵向中线重合, Y 轴平行于梁横桥向、垂直于 X 轴。中梁模型 T 梁侧弯变形见图 3。



图 3 T 梁侧弯变形示意图

### 2.3 数据提取

根据 CJJ 2—2008《城市桥梁工程施工与质量验收规范》,预制梁侧向弯曲小于  $L/1\ 000$  ( $L$  为构件长度)且不大于 10 mm。中梁和边梁钢束整体同向偏位 10 mm 时的侧弯变形量见表 2、表 3。

表 2 中梁纵向中轴线各点侧弯变形量

X/m	侧弯变形量/mm	X/m	侧弯变形量/mm
0.000	0.074 99	10.600	7.258 74
0.583	0.528 49	10.900	7.424 59
1.166	0.968 16	11.500	7.747 92
1.458	1.186 87	12.100	8.072 78
2.041	1.620 10	12.400	8.223 97
2.625	2.048 82	13.000	8.500 63
2.917	2.261 41	13.600	8.790 01
3.500	2.682 93	13.900	8.907 70
4.091	3.104 81	14.500	9.166 10
4.682	3.520 99	15.100	9.391 44
4.977	3.726 45	15.400	9.496 21
5.568	4.133 26	16.000	9.687 74
5.868	4.334 48	16.600	9.844 18
6.455	4.730 83	16.900	9.933 33
7.045	5.119 05	17.500	10.075 90
7.637	5.498 91	18.100	10.191 90
7.932	5.685 71	18.400	10.261 90
8.522	6.041 03	19.000	10.369 60
9.114	6.399 38	19.600	10.465 30
9.409	6.574 94	20.000	10.508 50
10.000	6.919 01		

表 3 边梁纵向中轴线各点侧弯变形量

X/m	侧弯变形量/mm	X/m	侧弯变形量/mm
0.000	0.019 24	10.600	6.326 54
0.583	0.030 00	10.900	6.587 39
1.166	0.030 38	11.500	6.830 72
1.458	0.249 46	12.100	7.135 58
2.041	0.679 00	12.400	7.286 77
2.625	1.101 62	13.000	7.563 43
2.917	1.320 21	13.600	7.852 81
3.500	1.735 73	13.900	7.970 50
4.091	2.197 61	14.500	8.228 90
4.682	2.583 79	15.100	8.464 24
4.977	2.729 25	15.400	8.559 01
5.568	3.194 06	16.000	8.780 54
5.868	3.397 28	16.600	8.906 98
6.455	3.783 63	16.900	8.990 03
7.045	4.182 85	17.500	9.108 78
7.637	4.551 71	18.100	9.254 76
7.932	4.738 51	18.400	9.294 73
8.522	5.106 83	19.000	9.402 40
9.114	5.467 18	19.600	9.578 11
9.409	5.647 74	20.000	9.671 32
10.000	5.991 81		

## 3 侧弯线形拟合分析

利用数学统计方法对表 2、表 3 中数据进行分析处理和数学拟合,确定符合数据变化特征的曲线

方程。分别选取二次多项式、三次多项式、四次多项式作为目标函数。

### 3.1 中梁

利用 MATLAB 软件对表 2 中数据进行数学拟合, 所得曲线方程见表 4。

表 4 中梁侧弯变形曲线方程拟合结果

目标函数形式	拟合结果
二次多项式	$y = -0.026 25x^2 + 1.05x - 0.598 3$
三次多项式	$y = -1.046 \times e^{-19}x^3 - 0.026 25x^2 + 1.05x - 0.598 3$
四次多项式	$y = 2.464 \times e^{-5}x^4 - 0.001 971x^3 + 0.024 28x^2 + 0.605 8x + 0.251 5$

通过数学拟合所得曲线方程反算中梁侧弯变形量, 结果见表 5。各函数对中梁侧弯变形量的拟合结果对比见图 4。

由图 4 可知: 二次多项式计算值和三次多项式计算值吻合程度较高, 二者变化规律和发展趋势基本相同, 说明利用二次、三次多项式来描述中梁侧弯变形的发展规律的误差基本相同。在顶点和两侧部位, 二次、三次多项式曲线与数值模拟计算值之间存在一定距离, 吻合程度较低。四次多项式计算值和数值模拟计算值的吻合程度较高, 利用四次多项式描述中梁侧弯变形的误差比二次、三次多项式的小, 具有更高的计算精度。

表 5 中梁纵向中轴线各点侧弯变形量计算结果

X/m	不同曲线方程的侧弯变形量计算结果/mm			X/m	不同曲线方程的侧弯变形量计算结果/mm		
	二次多项式	三次多项式	四次多项式		二次多项式	三次多项式	四次多项式
0	-0.598 30	-0.598 30	0.251 50	21	9.875 45	9.875 45	10.219 36
1	0.425 45	0.425 45	0.879 63	22	9.796 70	9.796 70	10.115 48
2	1.396 70	1.396 70	1.544 85	23	9.665 45	9.665 45	9.943 15
3	2.315 45	2.315 45	2.236 20	24	9.481 70	9.481 70	9.703 84
4	3.181 70	3.181 70	2.943 34	25	9.245 45	9.245 45	9.399 63
5	3.995 45	3.995 45	3.656 53	26	8.956 70	8.956 70	9.033 17
6	4.756 70	4.756 70	4.366 58	27	8.615 45	8.615 45	8.607 73
7	5.465 45	5.465 45	5.064 93	28	8.221 70	8.221 70	8.127 15
8	6.121 70	6.121 70	5.743 59	29	7.775 45	7.775 45	7.595 86
9	6.725 45	6.725 45	6.395 18	30	7.276 70	7.276 70	7.018 90
10	7.276 70	7.276 70	7.012 90	31	6.725 45	6.725 45	6.401 88
11	7.775 45	7.775 45	7.590 53	32	6.121 70	6.121 70	5.751 00
12	8.221 70	8.221 70	8.122 47	33	5.465 45	5.465 45	5.073 09
13	8.615 45	8.615 45	8.603 68	34	4.756 70	4.756 70	4.375 52
14	8.956 70	8.956 70	9.029 73	35	3.995 45	3.995 45	3.666 27
15	9.245 45	9.245 45	9.396 78	36	3.181 70	3.181 70	2.953 94
16	9.481 70	9.481 70	9.701 57	37	2.315 45	2.315 45	2.247 68
17	9.665 45	9.665 45	9.941 45	38	1.396 70	1.396 70	1.557 26
18	9.796 70	9.796 70	10.114 36	39	0.425 45	0.425 45	0.893 02
19	9.875 45	9.875 45	10.218 80	40	-0.598 30	-0.598 30	0.265 90
20	9.901 70	9.901 70	10.253 90				

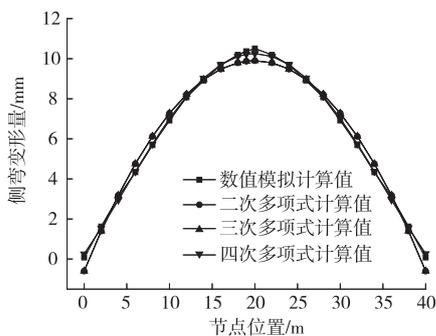


图 4 中梁函数拟合结果对比

### 3.2 边梁

与中梁类似, 对表 3 中数据进行数学拟合, 所得曲线方程见表 6。

表 6 边梁侧弯变形曲线方程拟合结果

目标函数形式	拟合结果
二次多项式	$y = -0.014 37x^2 + 0.818 6x - 0.781 2$
三次多项式	$y = -0.000 929 5x^3 + 0.013 62x^2 + 0.596 1x - 0.426 7$
四次多项式	$y = 8.357 \times e^{-5}x^4 - 0.004 283x^3 + 0.056 6x^2 + 0.408 8x - 0.255 3$

通过数学拟合所得曲线方程反算边梁侧弯变形量,结果见表5。各函数对边梁侧弯变形量的拟合

结果对比见图5。

由图5可知:4条曲线的变化规律和发展趋势

表7 边梁纵向中轴线各点侧弯变形量

X/m	不同曲线方程的侧弯变形量计算结果/mm			X/m	不同曲线方程的侧弯变形量计算结果/mm		
	二次多项式	三次多项式	四次多项式		二次多项式	三次多项式	四次多项式
0	-0.781 20	-0.427 60	-0.255 30	21	9.584 63	9.439 68	9.458 33
1	0.023 03	0.181 19	0.205 90	22	9.327 70	9.312 16	9.259 50
2	0.829 70	0.837 87	0.779 87	23	8.948 92	9.049 98	8.962 78
3	1.484 38	1.404 04	1.318 52	24	8.637 68	8.789 49	8.708 78
4	2.327 19	2.175 35	2.094 53	25	8.303 16	8.478 78	8.421 47
5	2.937 02	2.761 97	2.704 57	26	7.820 91	7.993 43	7.979 88
6	3.527 54	3.351 49	3.326 15	27	7.432 70	7.581 37	7.601 59
7	4.272 62	4.122 91	4.142 15	28	7.019 95	7.132 65	7.181 79
8	4.807 82	4.693 72	4.741 74	29	6.434 24	6.484 35	6.558 32
9	5.485 88	5.432 92	5.506 13	30	5.967 80	5.965 90	6.045 40
10	5.967 80	5.965 90	6.045 40	31	5.485 88	5.432 92	5.506 13
11	6.434 24	6.484 35	6.558 32	32	4.807 82	4.693 72	4.741 74
12	7.019 95	7.132 65	7.181 79	33	4.272 62	4.122 91	4.142 15
13	7.432 07	7.581 37	7.601 59	34	3.527 54	3.351 49	3.326 15
14	7.820 91	7.993 43	7.979 88	35	2.937 02	2.761 97	2.704 57
15	8.303 16	8.478 78	8.421 47	36	2.327 19	2.175 35	2.094 53
16	8.637 68	8.789 49	8.708 78	37	1.484 38	1.404 04	1.318 52
17	8.948 92	9.049 98	8.962 78	38	0.829 70	0.837 87	0.779 87
18	9.327 70	9.312 16	9.259 05	39	0.023 03	0.181 19	0.205 90
19	9.584 63	9.439 68	9.458 33	40	-0.781 20	-0.427 60	-0.255 30
20	9.842 80	9.506 40	9.667 90				

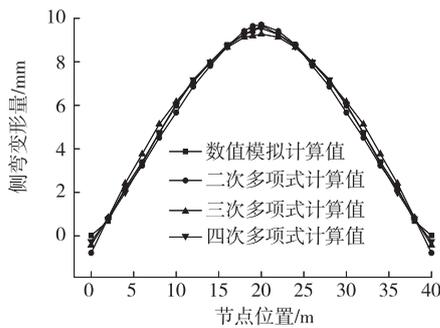


图5 边梁函数拟合结果对比

大致相同。二次多项式曲线在两侧部分均低于数值模拟计算值,三次多项式曲线在极值和曲线两侧部分与数值模拟计算值吻合程度较低,四次多项式曲线与数值模拟计算曲线的吻合程度最高。说明利用四次多项式描述边梁侧弯变形的误差比二次、三次多项式的小,具有更高的计算精度。

#### 4 结论

(1) 预应力钢束孔道定位偏差会对预应力定位产生不利影响,钢束孔道定位偏差将直接引起 T 梁侧弯变形。

(2) T 梁发生侧弯变形后,无论是中梁还是边梁,其侧弯变形曲线方程更接近于四次多项式。

#### 参考文献:

- [1] 中交第一公路工程局有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T F50-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 陈宇,贾艳敏.预制 PC 梁侧弯变形计算与控制研究[J].中外公路,2017,37(3):107-111.
- [3] 李俊峰,代步青,张志贤.40 m T 梁张拉侧弯原因分析及控制措施[J].公路交通科技,2016,12(8):34-35.
- [4] 韩永红.大跨径 T 梁张拉过程中侧弯控制措施[J].公路交通科技,2015,11(8):160-161.
- [5] 何娅兰.50 m T 梁边梁在张拉时对侧弯的控制技术[J].西南公路,2013(3):63-64.
- [6] 石险峰.大跨 T 型梁的起拱与侧弯控制技术[J].铁道建筑技术,2012(8):31-33+58.
- [7] 郑宏,牟春林.50 m 预应力 T 梁张拉侧弯控制技术研究[J].西南公路,2012(3):37-41.
- [8] 唐华,张贵明.部颁40m跨径预应力砼T梁侧弯空间分

(下转第 139 页)

续表 5

评价 指标	各等级的隶属度				
	I	II	III	IV	V
$C_{31}$	0.0	0.436	0.564	0.000	0
$C_{32}$	1.0	0.000	0.000	0.000	0
$C_{41}$	0.0	0.000	0.501	0.499	0
$C_{42}$	0.0	0.000	0.920	0.080	0
$C_{43}$	0.0	0.444	0.556	0.000	0
$C_{44}$	1.0	0.000	0.000	0.000	0

表 6 基本概率赋值函数

证据	$m(\Theta)$	$m(A)$				
		I	II	III	IV	V
$P_1$	0.815	0.000	0.129	0.056	0.000	0
$P_2$	0.000	0.039	0.706	0.255	0.000	0
$P_3$	0.000	0.367	0.276	0.357	0.000	0
$P_4$	0.000	0.195	0.138	0.536	0.131	0

3.3.3 结果分析

基于同样的基本概率赋值函数,将改进证据理论所得计算结果与模糊综合评判法和未改进的证据理论的结果进行比较,结果见表 7。

依照最大隶属度评价准则,模糊综合评判法和未改进的证据理论所得评估结果均指向 II 类桥,而改进 D-S 证据理论的评价结果指向 III 类桥,为较差的服役状态,需进行加固。

表 7 改进证据理论与其他评价方法计算结果比较

评价 方法	$m(\Theta)$	评价结果				
		I	II	III	IV	V
改进证 据理论	0	0.032	0.362	0.606	0.000	0
模糊综合 评判法	0	0.112	0.530	0.338	0.020	0
未改进的 证据理论	0	0.000	0.557	0.443	0.000	0

4 结语

采用改进 D-S 证据理论能充分考虑证据间的冲突特性,对高冲突证据进行修正,相较于 D-S 证据理论,能更有效减少异常证据对评价结果的影响,

提升评价结果的可信性。该改进算法能对大跨预应力砼桥梁的服役状态评估提供较合理的解决方法,在桥梁检测评定中有着较广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁技术状况评定标准:JTG/T H21-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

[2] 黄侨,任远,林阳子.大跨径桥梁综合评估中的不确定型层次分析法[J].公路交通科技,2008,25(3):79-83.

[3] 刘芳平,周建庭.基于模糊可拓层次分析法的大跨径桥梁综合评估[J].中外公路,2015,35(3):93-98.

[4] 熊仲明,冯成帅.大跨钢结构安全性模糊综合评估方法的应用研究[J].工程力学,2011,28(4):128-133.

[5] 李永,胡向红,乔箭.改进的模糊层次分析法[J].西北大学学报(自然科学版),2005,35(1):11-12.

[6] 田林钢,靳聪聪,巴超.改进的模糊层次分析法在海堤工程安全评价中的应用[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(3):317-320.

[7] 刘从法,罗日成,雷春燕,等.基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估[J].电力自动化设备,2013,33(6):104-107+133.

[8] 陈果,陈立波,宋兰琪.一种磨损失效融合诊断新方法及其应用[J].机械科学与技术,2009,28(9):1157-1161.

[9] 李新德,王丰羽.一种基于 ISODATA 聚类和改进相似度的证据推理方法[J].自动化学报,2015,41(3):575-590.

[10] 陕西省公路局.公路桥涵养护规范:JTG H11-2004[S].北京:中华人民共和国交通部,2004.

[11] SASMAL Saptarshi, RAMANJANEYULU K. Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(3): 1430-1443.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程结构可靠性设计统一标准:GB 50153-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

收稿日期:2019-12-12

(上接第 134 页)

析[J].中外公路,2012,32(3):192-195.

[9] 赵晓春,李玉华.预应力混凝土简支梁施工侧弯理论分析[J].公路交通技术,2008(5):54-56+65.

[10] 吴银利,李强.预应力混凝土梁侧弯的控制措施[J].铁道标准设计,2005(2):60-61.

收稿日期:2020-03-03