

收缩徐变效应对三塔单索面矮塔斜拉桥的影响分析

黄春亮¹, 骆俊杰², 李蓉³, 谭希¹

(1. 中交通力建设股份有限公司 湖南分公司, 湖南 长沙 410015;

2. 中机国际工程设计研究院有限责任公司; 3. 湖南和天工程项目管理有限公司)

摘要:矮塔斜拉桥又被称之为部分斜拉桥,是一种结合了连续梁桥与斜拉桥受力特性的新桥型。近年来,在其适用跨径(100~300 m)内得到了广泛的应用,且一般多采用混凝土主梁结构。为了探讨混凝土收缩徐变效应对主梁结构的作用机制和时效特性,结合永州市城南大桥工程的设计项目,利用桥梁结构分析软件 Midas/Civil,构建桥梁仿真三维模型,研究三塔四跨单索面矮塔斜拉桥在成桥状态后,主梁、桥塔、斜拉索等构件受到收缩徐变效应作用后的反馈。通过建立空间有限元预测模型,对成桥时刻、运营 10 年后 4 个时间节点(1、3、5、10 年)的收缩徐变影响进行分析,总结出其对矮塔斜拉桥主体结构各组成部分均有较大影响的结论,在设计及施工过程中应引起足够的重视并进行关键控制。

关键词:矮塔斜拉桥; 收缩徐变; 成桥状态; 时效特性; 有限元法

矮塔斜拉桥是 20 世纪 80 年代末期由法国工程师 Jacques Mathivat 提出,并于 90 年代在日本兴起,中国的矮塔斜拉桥建设在 21 世纪初期正式起步。由于矮塔斜拉桥多为大跨径预应力钢筋混凝土桥梁,结构受恒载自重的影响较大,收缩徐变效应对结构敏感度相对较高。且梁体结构一般采用挂篮悬浇法进行施工,致使各梁段混凝土收缩徐变作用的时效特性均不相同。在桥梁运营期间,结构的受力和变形也同时在不断更迭变化中,结构强度和刚度也随着时间的推移而降低。收缩徐变效应并不能有一个统一的定论,特别是对于矮塔斜拉桥这类超静定结构,在上一阶段中所延续下来的应力状态会随着结构超静定次数的变化,给结构自身带来内力和应力的变化以及重分布,故研究收缩徐变作用对矮塔斜拉桥的影响非常重要。

该文着重研究分析收缩徐变效应对三塔单索面矮塔斜拉桥成桥状态下静力结构体系的作用机制,并总结收缩徐变效应对混凝土矮塔斜拉桥结构整体受力作用过程中的时效和发展特性。依据 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》附录 F 的计算公式,运用有限元软件进行分析,在最大程度上保证了收缩徐变效应在矮塔斜拉桥设计计算中的准确性,可为同类型桥梁设计提供参考建议。

1 混凝土收缩、徐变的计算理论

收缩徐变效应作为混凝土结构材料的基本特性,在其时效性内,影响因素极其复杂多变。从 19 世纪初期发现至今,机理研究课题并未得到根本解决,是桥梁结构设计中最不容忽视的控制因素之一。而混凝土受收缩徐变作用的过程中,对于不同的桥梁,收缩徐变效应的作用深度和整个结构的受力变化过程不尽相同。国内外学者为此付出了大量的时间进行工作研究,取得了较多的研究成果,其研究范围和深度也在不断发展。由于收缩徐变效应的计算模型和参数一直是桥梁工程重点研究的对象,世界各个国家都相继制定了相关的规范标准(收缩徐变效应模型)来进行分析控制,如中国常用的 JTG D62 模型、美国的 ACI 209 模型、欧洲的 CEB—FIB MC78 和 CEB—FIB MC90 模型等。中国的相关规范中确定了对徐变计算结构采用的是与 CEB—FIP MC90 模型相似的双曲幂函数。

从 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》得知,收缩徐变的计算主要受到 5 个关键因素的影响:① 混凝土结构加载龄期;② 混凝土发生收缩时的龄期;③ 混凝土自身的抗压强度;④ 混凝土结构自身构件的理论厚度;⑤ 年平均相对湿

度。多位学者对比了中国、美国、欧洲、日本等不同国家的代表性计算理论,并用不同模型对混凝土桥梁结构进行分析比较。从计算分析得知:不同数学模型计算结果差异较大,且中国规范所采用的并非是最不利计算模型,故在桥梁设计中,一般应考虑相应的安全系数。

2 工程项目概况

城南大桥位于湖南省永州市。主线桥梁全长 1 183.56 m(不含匝道桥梁),由西岸引桥、跨江主桥和东岸引桥三部分共同组成。其中主桥(通航孔)上跨湘江采用三塔单索面矮塔斜拉桥,桥梁结构为半漂浮体系(10[#]中墩:桥墩、索塔、主梁固结;9[#]、11[#]边墩:桥塔与主梁固结、桥墩与主梁分离)。主桥(通航孔)部分四跨一联,全长 380 m,具体跨径布置为(70+120+120+70) m(图 1)。

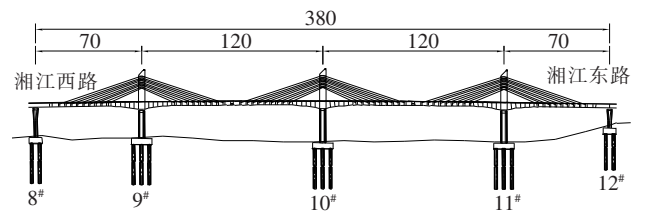


图 1 永州市城南大桥主桥立面图(单位:m)

主梁顶板全宽 34.0 m,采用预应力钢筋混凝土(混凝土标号:C55)单箱五室布置,底板宽 26 m,两侧悬臂外挑 4 m。主梁中支点高 4.8 m;跨中断面高 2.5 m,采用二次抛物线对主梁高度进行渐变处理。主梁配置三向预应力体系。

桥塔采用钢筋混凝土(混凝土标号:C50)矩形独柱式截面。塔高 21 m(不含避雷针、航空警示灯),顺桥向塔宽 4 m,横桥方向塔宽 2.4 m(图 2)。索塔上采用扇形单索面的斜拉索,每座桥塔均布置 18 对斜拉索。

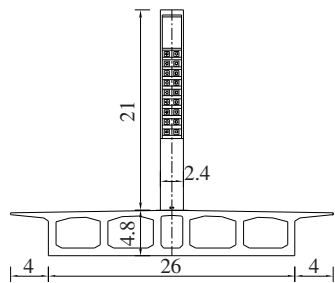


图 2 上部构造标准横断面图(单位:m)

3 三塔矮塔斜拉桥收缩徐变作用研究

3.1 有限元计算模型及主桥施工工序

城南大桥主桥利用桥梁结构通用有限元分析软件 Midas/Civil 构建了空间 3D 模型。将桥塔、斜拉索、主梁结构整体视为分析内容,材料参数取值如表 1 所示。桥墩、主梁及桥塔均以三维梁单元进行仿真构建,斜拉索则采用桁架单元(忽略结构变形)进行模拟。

表 1 材料参数			
材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
主梁	3.55×10 ⁴	0.2	2 600
桥塔	3.45×10 ⁴	0.2	2 600
斜拉索	1.95×10 ⁵	0.3	7 850

主桥整个结构计算模型共有 499 个单元(主梁 268 个、桥塔 63 个、桥墩 60 个、斜拉索 108 个),模型具体如图 3 所示。

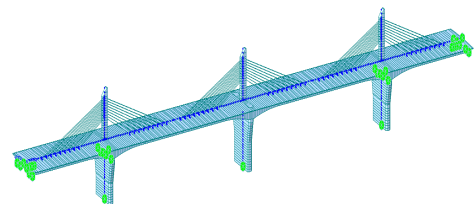


图 3 城南大桥 Midas/Civil 模型

全桥三塔共设 54 对斜拉索,均采用一次张拉到位,初张索力为 4 350 kN,斜拉索编号及施工顺序见图 4。

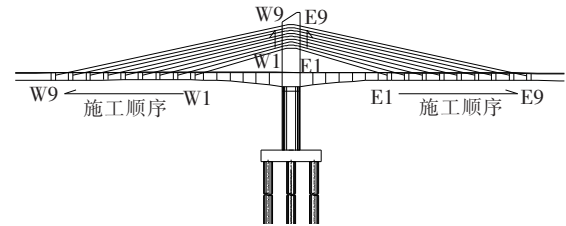


图 4 斜拉索布置图

主桥按施工步骤共划分为 22 个阶段(施工阶段详见表 2),按实际施工工序考虑混凝土加载龄期的相关影响,并考虑 10 年(3 650 d)的收缩徐变作用,为了分析收缩徐变作用对桥梁结构的时效性,在 10 年运营期间共设立 4 个阶段(时间节点)进行模拟,分别是:1、3、5、10 年。

表 2 城南大桥主桥工序

施工阶段号	施工阶段工作内容	施工工序时间/d
1	桩基、承台、桥墩	120
2	主梁支架浇筑 0 [#] 块、墩梁临时固结、浇筑桥塔	60
3	挂篮悬浇主梁 1 [#] 块	10
4	挂篮悬浇主梁 2 [#] 块	10
5	挂篮悬浇主梁 3 [#] 块	10
6	挂篮悬浇主梁 4 [#] 块	10
7	挂篮悬浇主梁 5 [#] 块	10
8	挂篮悬浇主梁 6 [#] 块、张拉 W1/E1 号拉索	10
9	挂篮悬浇主梁 7 [#] 块、张拉 W2/E2 号拉索	10
10	挂篮悬浇主梁 8 [#] 块、张拉 W3/E3 号拉索	10
11	挂篮悬浇主梁 9 [#] 块、张拉 W4/E4 号拉索	10
12	挂篮悬浇主梁 10 [#] 块、张拉 W5/E5 号拉索	10
13	挂篮悬浇主梁 11 [#] 块、张拉 W6/E6 号拉索	10
14	挂篮悬浇主梁 12 [#] 块、张拉 W7/E7 号拉索	10
15	挂篮悬浇主梁 13 [#] 块、张拉 W8/E8 号拉索	10
16	挂篮悬浇主梁 14 [#] 块、张拉 W9/E9 号拉索	10
17	挂篮悬浇主梁 15 [#] 块、边跨支架现浇段	10
18	吊架浇筑边跨合龙段	10
19	安装中跨合龙段吊架	10
20	吊架浇筑中跨合龙段	10
21	桥面系、附属工程(二期恒载)	30
22	成桥运营 1 年(计算时间节点)	365
22	成桥运营 3 年(计算时间节点)	1 095
22	成桥运营 5 年(计算时间节点)	1 825
22	成桥运营 10 年(计算时间节点)	3 650

考虑工程所处地区的全年平均相对湿度值为 70%，根据 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》附录公式，计算出主梁、桥塔的收缩应变、徐变系数变化规律如图 5、6 所示。

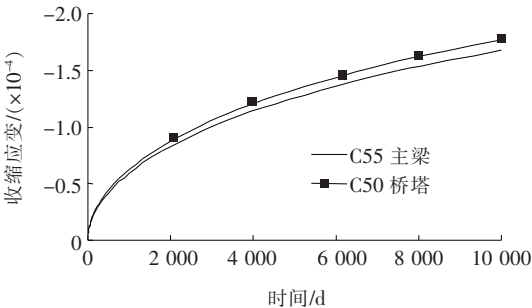


图 5 混凝土收缩应变变化规律

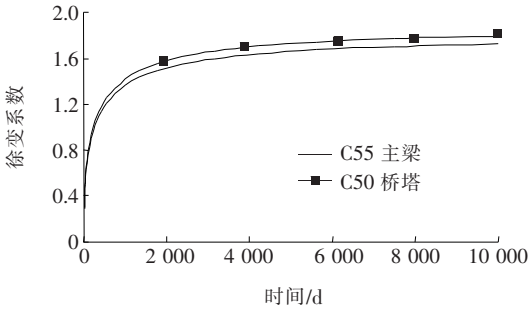


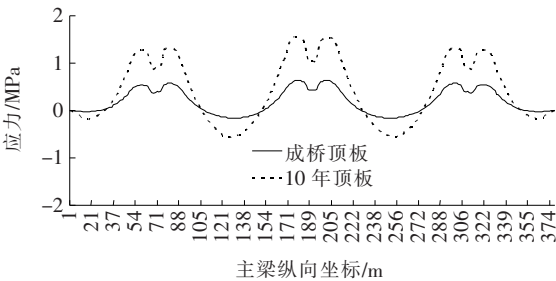
图 6 混凝土徐变系数变化规律

3.2 工程设计条件

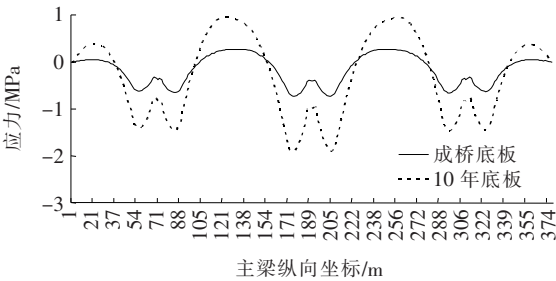
桥梁位于永州市区内，区域气候属于热带湿润气候，春夏之间雨量集中，秋季多旱，暑热期长，月平均最高温度：28.8℃；极端最高温度：39.9℃。月平均最低温度：6℃；极端最低温度：-8.5℃。设计合龙温度为 15~25℃；结构整体升温：28.8-15=13.8℃；降温：25-6=19℃；温度梯度：按照桥面 10 cm 厚沥青混凝土考虑。拉索与主梁温差按照 10℃考虑。桥塔日照温差按照 5℃考虑。

3.3 收缩徐变效应对梁体结构应力的作用

主梁混凝土从开始浇筑到张拉预应力施工的时间间距一般需要 5~10 d。在成桥运营后，由收缩徐变效应引起的主梁上缘(顶板)、下缘(底板)应力发展(成桥阶段、运营 3 650 d)的相对变化量见图 7。收缩徐变效应影响梁体控制截面应力变化见表 3。



(a) 顶板



(b) 底板

图 7 顶、底板应力(收缩徐变)随时间变化曲线

由图 7(拉应力为正值,压应力为负值)可知:由收缩徐变效应引起的混凝土梁体跨中上缘应力波动幅度为 $-0.16\sim-0.55\text{ MPa}$;主梁跨中下缘应力波动幅度为 $0.26\sim0.91\text{ MPa}$ 。

表 3 收缩徐变效应影响梁体控制截面应力

主要截面	控制截面应力/MPa				
	成桥阶段	使用1年	使用3年	使用5年	使用10年
边塔支点上缘	-5.16	-5.01	-4.79	-4.65	-4.52
边塔支点下缘	-4.74	-4.84	-5.00	-5.10	-5.17
边跨合龙段上缘	-3.63	-3.64	-3.65	-3.65	-3.66
边跨合龙段下缘	-5.39	-5.17	-4.97	-4.84	-4.73
中跨合龙段上缘	-6.08	-6.19	-6.28	-6.35	-6.43
中跨合龙段下缘	-8.79	-8.11	-7.59	-7.25	-6.98
中塔支点上缘	-4.90	-4.70	-4.45	-4.29	-4.15
中塔支点下缘	-5.06	-5.22	-5.43	-5.55	-5.65

结合图 7 与表 3 的计算结果,以中、边跨合龙段为例:在成桥时刻,箱梁中跨合龙段顶板上缘最大压应力为 -6.08 MPa ;底板下缘最大压应力为 -8.79 MPa ;在成桥 10 年后,箱梁中跨合龙段位置处上缘压应力为 -6.43 MPa ,改变量为 0.35 MPa ;下缘压应力为 -6.98 MPa ,改变量为 1.81 MPa ,跨中下缘压应力显著缩减了 25.9% 。而边跨合龙段上缘改变量为 0.03 MPa ,边跨合龙段下缘改变量为 0.66 MPa ,下缘压应力缩减 14.0% 。中跨合龙段相比边跨合龙段压应力损失明显增大。

从成桥时刻至结构运营 10 年期间,由于箱梁顶、底板厚度(顶板 0.25 cm 、底板 $80\sim25\text{ cm}$ 渐变)在非标准截面下差距较大,故收缩徐变效应对底板影响大于顶板;且梁内预应力钢束配束不同,致使上缘应力在成桥运营 5 年内变化基本趋于稳定,但下缘应力仍然在一定范围内增长。

3.4 收缩徐变效应对梁体结构挠度的影响

挠度变化结果如图 8、9 及表 4 所示。

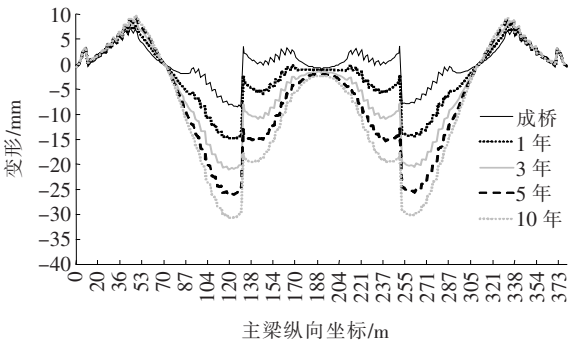


图 8 成桥至运营 10 年挠度变化曲线图

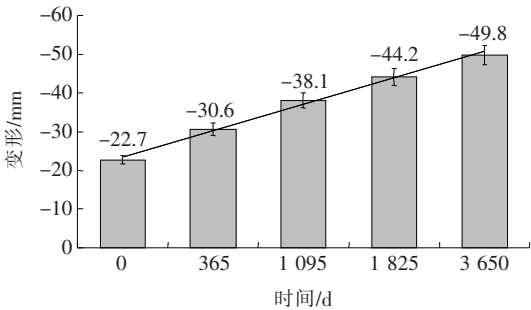


图 9 跨中挠度随时间变化图

由图 8 可知:依据收缩徐变效应的原理,在成桥 10 年时间范围内,其对主梁结构影响显著,且位移变化总值持续保持增长,但总体趋势变化逐渐放缓。特别是在前 3 年的竖向位移量达到 10 年运营期间总位移的 67.5% 。

表 4 收缩徐变效应梁体结构最大挠度

项目	最大挠度/mm				
	成桥阶段	使用1年	使用3年	使用5年	使用10年
徐变一次	-7.31	-11.39	-14.11	-16.35	-18.00
收缩一次	-1.10	-3.02	-6.05	-8.83	-11.88

随着桥梁运营时间的变化,主梁产生明显下挠变形,由于跨中梁段混凝土加载龄期相对较短,故一般跨中位置的竖向位移变化最大。结合图 9 与表 4 可知:在主梁挠度变化中,徐变作用比收缩作用的影响更大,其占据着主要地位。以成桥阶段为基准值,运营 1 年后,挠度增幅达到了 171.4% ,占总竖向位移值的 47.1% ;运营 3 年后,挠度增幅达到了 239.7% ,占总竖向位移值的 52.9% ;运营 5 年后,挠度增幅相对放缓,逐渐保持稳定状态,为基准值的 299.4% ,占总竖向位移值的 57.0% ;运营 10 年后,挠度增幅达到了 355.3% ,占总竖向位移值的 60.0% 。

3.5 收缩徐变效应对索力的作用

斜拉索为钢绞线材料,不会产生收缩徐变效应。拉索索力变化主要是由于徐变效应使主梁产生竖向位移,造成拉索长度波动,由于多次超静定结构的受力特点,致使索力在成桥运营后都出现了不同程度的衰减,降低了安全储备,索力变化如图 10、11 所示。

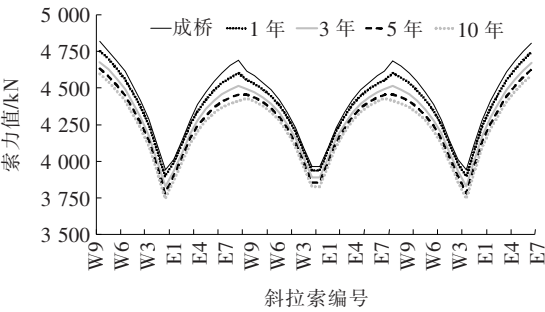


图 10 拉索索力浮动曲线图

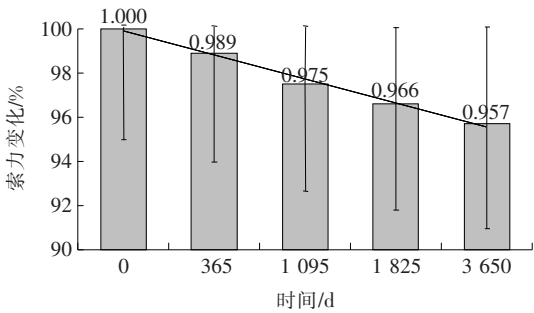


图 11 拉索索力浮动趋势图

由于该桥结构为中心对称(10# 桥墩),受篇幅限制,仅示出半幅结构边塔(9# 桥墩)及中塔(10# 桥墩)的首索(W1/E1)和尾索(W9/E9)的计算结果,如表 5 所示。

表 5 收缩徐变作用下拉索索力数值

拉索 编号	索力/kN				
	成桥 阶段	使用 1 年	使用 3 年	使用 5 年	使用 10 年
边塔 W9	4 816.6	4 752.2	4 679.9	4 633.6	4 595.4
边塔 W1	3 942.9	3 893.5	3 825.6	3 780.9	3 742.1
边塔 E1	4 010.9	3 985.8	3 933.1	3 896.4	3 862.0
边塔 E9	4 687.2	4 598.4	4 510.6	4 455.3	4 411.1
中塔 W9	4 616.8	4 555.9	4 493.0	4 456.6	4 428.2
中塔 W1	3 960.6	3 937.4	3 888.4	3 855.2	3 824.4

依据计算结果得知:城南大桥每个桥墩的 18 对斜拉索中,均是首索(短索)索力损失较小,尾索(长索)索

力损失较大。根据收缩徐变效应的影响时间范围,在成桥运营 10 年时,斜拉索(W9/E9)最大损失 276.1 kN,占总值的 5.9%左右,在成桥运营 5 年内,斜拉索最大损失 231.8 kN,占总损失值的 84.0%。斜拉索(W1/E1)最小损失 136.1 kN,占总值的 3.4%左右。在成桥使用 5 年内,索力损失相对快速,斜拉索最大损失 105.3 kN,占总损失值的 77.4%。在整个收缩徐变效应的 10 年中,无论是首索或尾索,均是前 5 年的影响显著,后 5 年的影响相对平缓,与主梁竖向位移的变化规律一致。

3.6 收缩徐变效应对桥塔内力的影响

收缩徐变效应在索塔处的影响见表 6。混凝土后期的收缩徐变影响对桥塔的轴力影响不大,变化幅度较小,故该文未列出相关数据。

表 6 收缩徐变对索塔恒载弯矩影响数值

项目	弯矩/(kN·m)				
	成桥阶段	使用 1 年	使用 3 年	使用 5 年	使用 10 年
边塔	-4 793.3	-5 836.3	-6 326.2	-6 589.0	-6 773.2
中塔	0	0	0	0	0

由于该桥以 10# 桥墩(中墩)为结构中心对称,收缩徐变效应对中墩弯矩无影响;但对边塔的弯矩值影响较大,塔底截面 10 年后倒向河中方向弯矩增加了 1 979.9 kN·m,约为成桥阶段的 141.3%。主要是因为中跨竖向位移变形通过斜拉索传递给桥塔的力更大。在标准组合作用下,桥塔塔底截面未产生拉应力,塔底截面最大压应力为 11.1 MPa,桥塔处于全断面受压状态,且塔顶位移量极小,故无需考虑塔偏失稳等问题。

3.7 收缩徐变效应对桥墩支座的作用

支座反力随时间的变化见图 12。

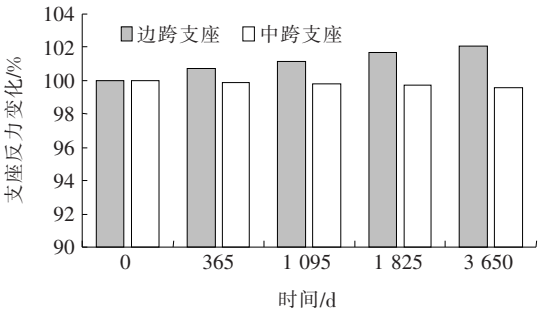


图 12 支座反力变化曲线图

由图 12 可知:随着桥梁运营时间的增加,中跨支

反力变化值较小(约为0.4%),在10年的运营过程中,基本保持稳定;边跨支反力随时间增大,呈现变大的趋势,成桥运营3年后,增大约1.21%;成桥运营5年后,增大约1.65%;成桥运营10年后,增大约2.05%。由于斜拉索索力的损失,桥塔所承受反力下降,支座所承受反力增大。

4 结论

矮塔斜拉桥的梁体结构高度相比同跨径的连续梁更小,后续成桥状态下收缩徐变效应与同跨径连续梁的影响相比也较小。但主梁仍是结构主体受力构件,收缩徐变效应作为其结构材料的固有特性,同样不可忽视。该文以永州市城南大桥工程为依托,通过建立预测分析模型,得出以下结论:

(1) 计算结果表明收缩徐变效应对主梁的作用显著,运营10年后,收缩徐变效应造成的主梁应力浮动幅度达到1.9 MPa,梁体部分下缘应力浮动幅度均为 ± 1 MPa以上,由于收缩徐变的作用,浮动幅度占作用总体的50%左右。

(2) 收缩徐变效应对梁体挠度的作用持续周期长,比重大;引起主桥跨中下挠值为28.9 mm,约占总竖向位移值的60.0%,跨中挠度变化也明显大于索塔两侧。且徐变效应在挠度的变化上相比收缩作用要更大。在设计阶段同样需要增大预拱度,在施工阶段应加强对主梁挠度的监控,保证结构在成桥运营后的长期线形变化在合理范围内。

(3) 收缩徐变效应在主桥边塔塔底产生了倒向河中(中塔)方向的弯矩,主要是由于中跨的竖向位移大于边跨,故通过斜拉索传递给桥塔的力也不同(中跨>边跨)。需在索力调整阶段进行反控,规避不利影响。

(4) 在桥梁运营10年期间,收缩徐变效应产生的斜拉索预应力损失最大达到了276.1 kN,占总值的5.9%左右,且斜拉索索力损失占总值4%以上的比例达到了总数的60%。由于中国规范选用收缩徐变效应的计算模型并非最不利,故应对矮塔斜拉桥在运营期间斜拉索的安全系数(规范要求为1.67)进行适当提高(建议不小于2.0)。

(5) 支反力在主跨支座上变化不大,在边跨支座

上出现变大趋势,与斜拉索索力损失变化的趋势相对应。

(6) 收缩徐变效应在早期5年内的影响值远超5年后的影响,主梁跨中竖向位移、斜拉索索力损失等主要是在前5年内显著变化,且发展规律协调性一致,对桥塔造成的影响其原因仍是梁体收缩徐变效应带来的二次影响,需采用一定的改善措施(如:控制改善混凝土水灰比、预应力钢束配束、调整预拱度等)来规避收缩徐变效应对结构的不利影响。在矮塔斜拉桥的设计过程中,收缩徐变效应仍应是一个着重研究的问题,对于其结构计算分析和运营安全稳定有着重要的作用和意义。

参考文献:

- [1] 罗强,陈洪伟,彭江辉. 宽幅矮塔斜拉桥后浇带对主梁受力的研究[J]. 中外公路,2017(4).
- [2] Peter F Takács. Deformations in Concrete Cantilever Bridges: Observations and Theoretical Modelling [D]. Trondheim: The Norwegian University of Sciences and Technology, 2002: 1—105.
- [3] 颜东煌,田仲初,李学文,等. 混凝土桥梁收缩徐变计算的有限元方法与应用[J]. 中国公路学报,2004(2).
- [4] Shvmore G M, Claudio M. Preflex Beam; A Metllof of Calculation of Creep and Shrinkag [J]. Journal of Bridge Engineering. ASCE, 2006, 11(1): 48—58.
- [5] 汪剑,方志. 大跨预应力混凝土箱梁桥收缩徐变效应测试与分析[J]. 土木工程学报,2008(1).
- [6] Lam Jianping. Evaluation of Concrete Shrinkage and Creep Prediction Models [D]. San Jose State University, 2002.
- [7] 丁文胜,吕志涛,孟少平,等. 混凝土收缩徐变预测模型的分析比较[J]. 桥梁建设,2004(6).
- [8] 施静娴,冉志红,谢名娥,等. 混凝土收缩徐变效应对矮塔斜拉桥索力的影响[J]. 公路工程,2014(1).
- [9] 王英飞,董伟. 混凝土收缩徐变效应对矮塔斜拉桥索力的影响评价研究[J]. 中外公路,2018(3).
- [10] 王尧,魏乐永. PC三塔斜拉桥关键技术研究[J]. 公路,2015(7).
- [11] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土设计规范[S].
- [12] JTG/T D65—01—2007 公路斜拉桥设计细则[S].