

斜拉桥施工监控中混凝土应力换算方法*

李旭升¹, 文清峰², 刘福章¹, 刘世忠¹

(1. 兰州铁道学院, 甘肃 兰州 730070 2. 成都市干道建设指挥部, 四川 成都 610000)

摘要:通过对预应力混凝土斜拉桥的应力监测结果分析,发现混凝土在加载龄期较早时的收缩徐变较大,直接用所测得的钢筋应力通过弹模比法换算求得的混凝土应力值与理论值相差较大.针对在加载龄期较早情况下,考虑混凝土的收缩徐变引起的钢筋和混凝土之间的应力重分布,通过静力平衡和变形协调条件,由实测钢筋应力算出的混凝土应力与理论计算值吻合较好,相应的收缩徐变总量与规范值较接近.本文方法在某独塔预应力混凝土斜拉桥监控中取得了比较满意的结果.

关键词:应力监测;应力重分布;收缩;徐变

中图分类号: TU378

文献标识码: A

预应力混凝土斜拉桥是一种跨越能力较大的桥梁,为高次超静定结构.因其外形美观,易于悬臂施工得到了广泛运用.由于斜拉桥通常采用自架设体系施工方法,必然给桥梁带来较为复杂的内力和位移变化,自身又是一个多次超静定的结构体系,为了确保线型控制的要求和大桥在修建中以及营运状态的安全,进行施工监控是非常必要的.在全桥监控过程中,有应力监控、线型监控和索力监控^[1].其中应力监控是进行各种参数修正,确保大桥受力合理、安全的基本保证.然而,混凝土桥除了本身是非匀质材料和材料特性不稳定外,它的力学性能还要受到温度、龄期、收缩、徐变的影响.因此,对预应力混凝土桥中的应力采用合理的监控系统并做出科学的分析判断,必须有一套切合实际的理论依据作为实测数据是否正确反映桥梁实际状态的标准.

1 应力测试

结构截面应力(混凝土应力、钢筋应力、钢结构应力等)监测是施工监控的主要内容之一,它是施工过程中的安全预警系统^[2].其结构上某指定点的应力随着施工的推进,其值是不断变化的.由于桥梁施工的时间较长,所以应力监测是一个长时间的连续量测过程.目前应力监测主要有电阻应变仪法、钢弦式传感器法等.对于要求适合于现场复杂情况、连续时间较长且量测过程始终要以初零点为起点的应力

监测,目前基本上均采用钢弦式传感器.根据理论和实验,钢弦的自振频率与钢弦的内应力之间的关系为

$$f(\sigma) = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

式中: f 为钢弦自振频率; L 为钢弦长度; σ 为钢弦内应力; ρ 为钢弦材料密度.

钢弦式传感器的工作原理是:当传感器受力后,传感器的弹性元件发生变形,使固定在其中的钢弦内应力发生变化,钢弦的自振频率也相应改变.利用频率接收仪中的激励功能使钢弦振动,并接收其自由振荡频率.

在使用中,将传感器安置在预计会出现较大应力和受力敏感的部位,只要测定传感器的频率,通过上述的频率—应力关系并考虑温度、混凝土收缩、徐变的修正,即可通过测试钢筋应力求得混凝土的应力.

2 应力分析

钢弦式传感器测得的是频率,通过频率—应力换算也只能得出钢筋的应力.由于钢筋的受力性能好、强度远高于混凝土的强度,在混凝土中的力学行为稳定,且易于应力测试,在桥梁应力监测中多直接测试钢筋应力.首先考虑的是混凝土的应力,常用的做法是:根据钢筋与混凝土共同工作原理,通过弹性

* 收稿日期:2001-09-30

作者简介:李旭升(1970-)男,浙江衢州人,兰州铁道学院硕士研究生.

模量换算得出混凝土的应力.

$$\text{因 } \varepsilon_s = \varepsilon_c$$

$$\text{故 } \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\sigma_c}{E_c}$$

$$\sigma_c = \frac{\sigma_s}{E_s} E_c = \frac{\sigma_s}{\gamma}$$

式中: σ_c 、 σ_s 分别为混凝土和钢筋的应力; E_c 、 E_s 分别为混凝土的割线弹性模量和钢筋的弹性模量; $\gamma = E_s/E_c$ 为弹模比.

在钢筋应力不高,混凝土加载龄期较晚(三周以上)的条件下,这种换算的结果是令人满意的.然而随着桥梁施工新工艺的不断涌现,混凝土加载龄期越来越早(三天左右),预应力混凝土高强钢筋、钢绞线、混凝土外加剂的广泛应用,使得上述的计算方法

表现出越来越大的偏差.某些测试结果如不加以综合分析,根本没有使用价值.在此,笔者主要讨论考虑由于混凝土收缩徐变产生应力重分布情况下的混凝土应力计算.众所周知,混凝土的应变主要由三部分构成^[3]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{sh} + \varepsilon_e$$

式中: ε 为总应变; ε_{sh} 为收缩应变; ε_e 为瞬时弹性应变; ε_{cr} 为混凝土徐变应变.其中徐变变形的最终值可达混凝土瞬时弹性变形的 1.5 ~ 3.5 倍或更大^[3],为了得到混凝土的真实应力,必须计算出 ε_e ,然后由混凝土的本构关系求得混凝土的应力.

现以某预应力混凝土斜拉桥主梁上翼板为例进行分析.

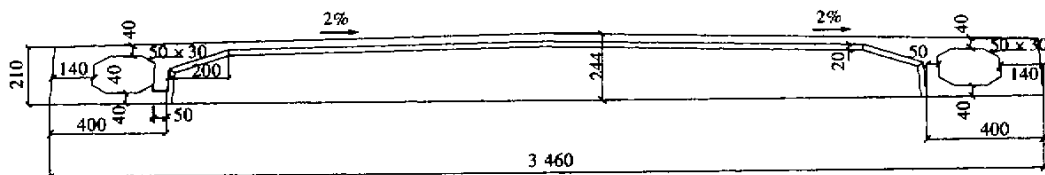


图1 预应力混凝土斜拉桥边肋式主梁断面(cm)

首先,取主梁上翼板单位宽度进行分析,如图2所示.

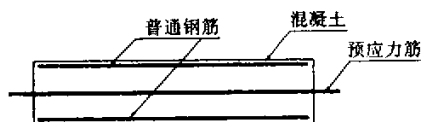


图2 单位宽度主梁翼板

把预应力看成外载,不考虑孔道摩擦造成的预应力不均匀分布,其等效力学模型如图3所示.



图3 主梁翼板等效力学模型

在现阶段,预应力值为控制张拉预应力值(N)减去孔道摩擦、锚具、锚垫板压缩以及弹性变形引起的预应力损失后的值^[4].单位宽度总面积为

$$A = A_c + A_s + A' \quad (1)$$

式中: A 为截面总面积; A_c 为混凝土净面积; A_s 为普通钢筋面积; A' 为预应力钢筋孔道面积.

$$N_T = -\sigma_p A_p \quad (2)$$

式中: N_T 为有效预应力; σ_p 为预应力钢筋有效应力; A_p 为预应力钢筋面积.

由静力平衡关系有

$$N_T = A_c \sigma_c + A_s \sigma_s \quad (\text{初状态}) \quad (3)$$

式中: σ_c 、 σ_s 分别为混凝土和普通钢筋内力重分布前应力.

但经过一定时间后,混凝土和钢筋发生了内力重分布(由收缩徐变引发)

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon'_0 - \varepsilon_0 \quad (4)$$

式中: $\Delta\varepsilon$ 为应变差; ε_0 为初总应变; ε'_0 为内力重分布后总应变.由变形协调条件可得:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s = \varepsilon_0 \quad (5)$$

$$\varepsilon'_c = \varepsilon'_s = \varepsilon'_0 \quad (6)$$

式中: ε_c 、 ε_s 分别为混凝土、普通钢筋初应变; ε'_c 、 ε'_s 分别为混凝土、普通钢筋内力重分布后的应变.

$$\text{因 } \Delta\varepsilon = \varepsilon'_s - \varepsilon_s = \frac{\sigma'_s}{E_s} - \frac{\sigma_s}{E_s} = (\sigma'_s - \sigma_s)/E_s \quad (7)$$

$$\text{故 } \varepsilon'_0 = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \quad (8)$$

设发生内力重分布后的预应力为 N'_T

$$N'_T = N_T - E_p \Delta\varepsilon A_p \quad (9)$$

式中: E_p 为预应力钢筋的弹性模量.

由静力平衡关系有

$$N'_T = A_s \sigma'_s + A_c \sigma'_c \tag{10}$$

式中： N'_T 为发生内力重分布后的预应力； σ'_c 、 σ'_s 分别为发生内力重分布后混凝土、普通钢筋应力。

把式(9)代入式(10)得混凝土应力为

$$\sigma'_c = (N'_T - A_s \sigma'_s) / A_c = (N_T - E_p A_p \Delta \epsilon - A_s \sigma'_s) / A_c \tag{11}$$

把式(7)代入式(11)得：

$$\sigma'_c = [N_T - E_p A_p (\sigma'_s - \sigma_s) / E_s - A_s \sigma'_s] / A_c \tag{12}$$

式(12)即为预应力混凝土不受外力作用，由于混凝土自身收缩徐变，造成的预应力在普通钢筋和混凝土之间的内力重分布后的混凝土的应力。

如有外荷载（如斜拉桥索的水平分力），设斜拉索的水平分力引起的压应力为 N_c ，如图 4 所示。



图 4 增加索水平分力后荷载图

内力平衡关系可表达为

$$N''_T + N_c = A_c \sigma''_c + A_s \sigma''_s \tag{13}$$

式中： N''_T 为第二次内力重分布后的预应力； N_c 为斜拉索引起主梁水平方向力； σ''_c 、 σ''_s 分别为第二次内力重分布后混凝土、普通钢筋的应力。

自张拉斜拉索后，应变差为

$$\Delta \epsilon = \epsilon''_0 - \epsilon_0 = \epsilon''_s - \epsilon_s = (\sigma''_s - \sigma_s) / E_s \tag{14}$$

式中 ϵ''_s 为第二次内力重分布后普通钢筋应变。

$$N''_T = N_T - \Delta \epsilon E_p A_p = N_T - (N''_s - N_s) E_p A_p / E_s \tag{15}$$

由式(13)得：

$$\sigma''_c = (N''_T + N_c - A_s \sigma''_s) / A_c \tag{16}$$

把式(15)代入式(16)可得：

$$\sigma''_c = [N_c + N_T - (\sigma''_s - \sigma_s) E_p A_p / E_s - A_s \sigma''_s] / A_c \tag{17}$$

由上述推导过程可知，当相对于该截面张拉第 n 对索时有：

$$\sigma_c^{(n+1)} = [N_c^1 + N_c^2 + \dots + N_c^n + N_T - (\sigma_s^{(n+1)} - \sigma_s) E_p A_p / E_s - A_s \sigma_s^{(n+1)}] / A_c \tag{18}$$

式中： $\sigma_c^{(n+1)}$ 为相对于该截面张拉第 n 对索后，内力重分布后的混凝土应力； $N_c^1, N_c^2, \dots, N_c^n$ 分别为相对于该截面张拉第 1, 2, ..., n 对索后水平方向的分力。

当求得了混凝土的应力后，即可求出混凝土的瞬时弹性应变，由钢筋应变减去混凝土瞬时弹性应变，就得收缩与徐变应变总和。

3 实测结果与应用

在某斜拉桥的主梁断面上，共 13 个断面埋设了钢弦计，如图 5 所示，每个断面放置了十七个传感器，现取出南向三号块板中的两个测点（129, 130），按上述的方法分析各点结果如表 1 所示。

表 1 测点实测钢筋应力，按弹模比法、考虑重分布法的混凝土计算应力及收缩徐变和对照表 MPa

129 测点钢筋与混凝土应力实测分析						130 测点钢筋与混凝土应力实测分析						备 注
实测钢筋应力	钢筋砼总应变 10^{-4}	收缩徐变应变和	理论砼应力	弹模比法换算应力	重分布砼应力	实测钢筋应力	钢筋砼总应变	收缩徐变应变和	理论砼应力	弹模比法换算应力	重分布砼应力	
41.52	2.08E-04	6.67E-05	4.15	6.92	4.03	37.34	1.87E-04	4.48E-05	4.15	6.22	4.06	张拉预应力筋
50.77	2.54E-04	1.08E-04	4.16	8.46	4.18	46.14	2.31E-04	8.44E-05	4.16	7.69	4.18	张拉第 3 对索
81.53	4.08E-04	2.86E-04	4.16	13.59	3.95	75.14	3.76E-04	2.56E-04	4.16	12.52	3.88	张拉预应力筋
83.44	4.17E-04	2.96E-04	4.16	13.91	3.94	76.63	3.83E-04	2.64E-04	4.16	12.77	3.87	张拉预应力筋
82.62	4.13E-04	2.84E-04	4.17	13.77	4.18	76.63	3.83E-04	2.57E-04	4.17	12.77	4.10	张拉第 4 对索
94.45	4.72E-04	3.53E-04	4.17	15.74	4.10	88.70	4.44E-04	3.28E-04	4.17	14.78	3.98	张拉预应力筋
94.71	4.74E-04	3.46E-04	4.18	15.79	4.38	89.87	4.49E-04	3.26E-04	4.18	14.98	4.25	张拉第 5 对索
122.59	6.13E-04	4.91E-04	4.18	20.43	4.18	121.27	6.06E-04	4.92E-04	4.18	20.21	3.92	南面拉预应力
112.19	5.61E-04	4.37E-04	4.18	18.70	4.25	119.07	5.95E-04	4.81E-04	4.18	19.85	3.95	北面拉预应力
119.06	5.95E-04	4.69E-04	4.20	19.84	4.53	121.54	6.08E-04	4.89E-04	4.20	20.26	4.25	张拉第 6 对索

由表 1 可知，若不考虑应力重分布，直接将实测钢筋应力按弹模比法换算成混凝土应力显然不能反映混凝土的真实受力状态，必然得出错误的结论。事实

上，混凝土的收缩、徐变由于握裹力的存在能够在钢弦计上反映出来，在一个施工段（斜拉索张拉）完成后，斜拉桥在支架上绑扎钢筋、预应力管道定位（约

需三天时间)此阶段斜拉桥几乎无载荷变化,而钢弦计每天均测到频率有较大改变(每次测量在夜间

恒定的温度段进行,以避免温度影响),这部分的应变改变量就是由于收缩、徐变造成的^[5]。

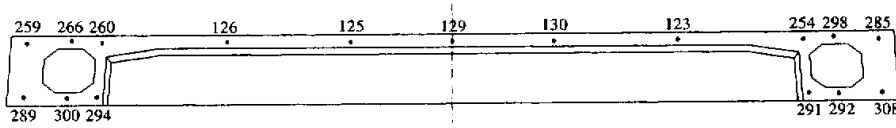


图5 主梁3号块南向断面应力测点布置示意图(共17个测点)

表1中的数据测量时间均集中在一个月左右,说明在早期加载的混凝土中收缩、徐变的影响非常显著。用ANSYS通用有限元软件进行分析,以上两点的钢弦计方向的应力在 $5.97 \sim 6.60 \text{ MPa}$ (已考虑桥横向加预应力)之间变化,从表中可以看出考虑了应力重分布的计算结果与理论值吻合较好。

4 结论

通常,混凝土的加载龄期较晚,按弹模比换算法得出的混凝土应力基本能够反映实际受力情况,但在加载龄期较早的混凝土中,计算混凝土的应力和数据分析时,不注意考虑混凝土的收缩徐变影响将混凝土看成线弹性材料按弹模比进行换算,计算结果将偏离实际情况(将比理论解大几倍),究其原因就是在早期加载的混凝土,由于这种材料本身的非

线性行为造成的非弹性应变将占据很大比重,线性换算关系不再成立,因此在实测数据分析时应将收缩和徐变的影响加以慎重考虑,本文所提出的方法在实践中已获得了良好的应用效果。

参考文献:

- [1] 徐君兰.大跨度桥梁施工控制[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [2] JTJ 027—96,公路斜拉桥设计规范(试行)[S].
- [3] 范立础.桥梁工程(上)[M].北京:人民交通出版社,1983.
- [4] JTJ 023—85,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [5] 周履,陈永春.收缩徐变[M].北京:中国铁道出版社,1994.

A Method About Concrete Stress Conversion in Construction Monitoring of Prestressed Concrete Cable Stayed Bridge

LI Xu-sheng¹, WEN Qing-feng², LIU Fu-zhang¹, LIU Shi-zhong¹

(1. Lanzhou Railway University, Lanzhou 730070, China;

2. Headquarter of Roadway Construction of Chengdu City, Chengdu 610000, China)

Abstract: This paper presents a method of calculating concrete stress for the monitoring of prestressed concrete cable stayed bridge. In the concrete loaded early circumstances, shrinkage and creep of concrete is serious. Stress redistribution should be considered. Here, by solving the balancing equation and condition of deforming-compatibility, concrete stress is obtained and identical to the theory and total of shrinkage and creep are close to the answer. The method has been applied in a single-tower prestressed concrete cable stayed bridge.

Key words: stress-monitoring; redistribution of stress; shrinkage creep