

文章编号:1671-683X(2006)01-0036-04

预应力混凝土连续刚构桥实测应变与应力的转换

王卫锋¹, 刘春燕², 范学明³

(1. 华南理工大学交通学院, 广东 广州 510640 2. 广州大鹏房地产有限公司, 广东 广州 510095; 3. 华南理工大学建筑学院, 广东 广州 510640)

摘要: 混凝土实测应变除弹性应变外还包含混凝土的自由变形、徐变和温度应变等非应力应变, 介绍了预应力混凝土连续刚构桥中应力间接测量的方法和步骤. 在混凝土实测应变与应力的转换中, 采用无应力计去除非应力应变, 利用预埋在主梁中性轴的应变计进行混凝土徐变系数识别, 并采用叠加法对徐变应变进行分离. 混凝土内部应力测量关键在于应力应变转换, 而应力应变转换关键在于徐变系数的识别. 在西江大桥施工监控期间, 先采用中性轴应力来识别徐变系数, 再进行徐变应变分离的方法, 应力实测值与弹性理论计算值比较接近.

关键词: 应力应变转换; 徐变系数识别; 西江大桥; 应力监测

中图分类号: U 448.35; U 441.50 **文献标识码:** A

0 引言

西江大桥是广东省中(山)—江(门)高速公路跨越西江水道的关键控制性工程, 全长 1 760 m. 主桥为预应力混凝土刚构连续混合结构, 长 620 m, 跨径组合为 1×70 m+4×120 m+1×70 m (图 1). 上部构造按上、下行分离式设计, 主梁为单箱单室预应力混凝土箱梁, 顶宽 13.5 m, 底宽 7.0 m, 梁高纵桥向为变值, 箱梁底板下缘按二次抛物线变化, 箱梁中心线 0# 块高 6.5 m, 跨中合拢段及边跨现浇段梁高均为 2.8 m. 设计荷载为汽车—超 20 级, 挂车—120 级. 西江大桥主梁施工的主要工法为挂篮平衡式悬臂现浇, 主桥单幅共有梁段 141 个, 其中采用落地支架现浇的梁段有 21 个, 合拢梁段 6 个, 挂篮式平衡悬臂现浇施工的梁段 120 个.

1 测量方案

1.1 测量方法的确定

目前混凝土应力测量有直接法和间接法两种. 直接法是指利用应力传感器直接感知混凝土内部应力的一种测量方法. 间接法是指首先利用各种应变传感器测量出混凝土的内部应变, 再通过一定的换算方法转换为混凝土应力的一种测量方法^[1]. 由于目前能直接测量混凝土内部应力的

传感器非常少^[1], 不便于应用, 而应变传感器则种类繁多, 各有不同的特点, 能较好地适应大规模测量. 因此对西江大桥的应力测量选择了间接法测量, 并与温度测量一并进行.

1.2 测量截面以及布点的确定

(1) 截面位置的确定^[2] 选取测量截面的原则是: ①通过模拟施工计算, 得到全桥各类构件施工全过程中的应力包络线, 从而获取各类构件的最不利位置, 进而选取截面位置. ②截面的选择力求对称, 以增加结果的可比性, 便于分析. ③截面的选取应注意避开圣维南区, 因为该区应力分布较为复杂, 如果不进行局部分析, 很难预测出它的应力, 这样不利于实测应力的对比分析.

根据以上原则, 西江大桥全桥应力断面布置图如图 2 所示.

(2) 各测量截面的传感器布点位置各测试断面应变传感器布设如图 3 所示. 其中, A1# 和 A2# 号测点传感器仅在墩顶断面中性轴位置布设.

1.3 应变测量时机的确定

由于一天中结构的温度是随着时间变化的, 应变测量时要避免是由于结构局部温差引起的温度应变造成的误差. 经过温度测试表明, 在清晨太阳出来前后结构受到温度的影响最小^[3], 因此宜选择清晨作为应变测量的时间.

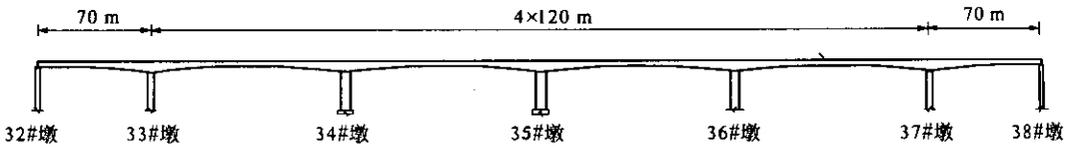


图 1 西江大桥主桥立面图

Fig.1 Elevation of the the Xijiang bridge

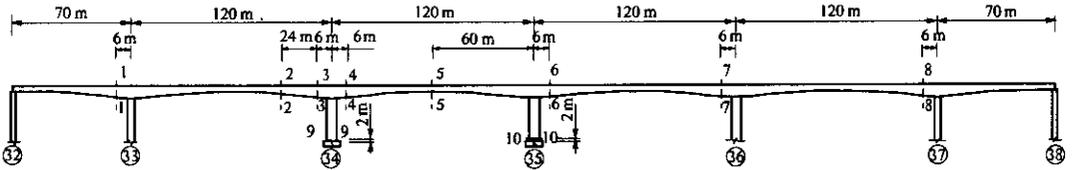


图 2 西江大桥应力监测断面位置图

Fig.2 Stresses monitor sections in the Xijiang bridge

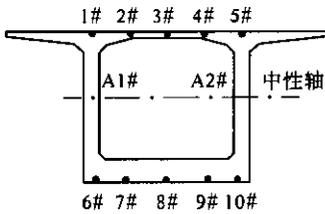


图 3 断面测点布置图

Fig.3 Positions of the strain gauges

短,后期应力变化不大,可将时段分得长一些。

事先根据徐变试验资料计算出每一时段的 $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{n-1}$ 为加荷龄期的总变形过程线(总变形是徐变变形和瞬时弹性变形之和),或制成相应于应力增量作用龄期之后各时段中点龄期的有效弹模和总变形的关系数据表供进一步计算使用。

由前述徐变概念可以得知某一时刻的实测应变,不仅有该时刻弹性应力增量引起的弹性应变,而且还包含在此以前所有应力增量引起的总变形。即图 4 中 $\tau_{i-1} \sim \tau_i$ 时段的应力增量 $\Delta\sigma_i$ 引起的总变形,将包含在该时段以后所有 $\tau_{n-1} \sim \tau_n$ ($n \geq i+1$) 时段的总应变 ϵ'_n 中,因此在计算以后时段的应变增量时应予以扣除。

2 应变分离与转换

2.1 应变转换为应力的计算方法^[4]

实际上,混凝土的实测应变包含有:荷载引起的弹性应变、徐变引起的应变、收缩引起的应变、体系温度变化引起的应变、局部温差引起的应变、湿度引起的应变等 6 项。上述 6 项中除第一项是直接应变外,其它各项都含有自由应变及产生应力的约束应变,而实际需要的是第一项及后 5 项中的约束应变,5 项中的自由应变则需要使用无应力计予以排除。所谓无应力计是用一个锥形的双层套筒制成,锥形套筒的内筒中浇筑混凝土并埋设一只应变计,将无应力计埋设在混凝土中之后,内筒中的混凝土由于两层套筒间隙的隔离而不承受外力作用,仅通过筒口和筒外结构混凝土连成整体以保持相同的温湿度。

西江大桥的应力监测采用叠加法来计算混凝土的实际应力。如图 4 所示,将单轴应变过程线划分成许多时段,根据徐变的概念,每一时段的应力增量都将引起该时段为加载龄期的瞬时弹性变形和徐变变形,二者之和为总变形,并进而对以后各时段的应变值都产生影响。计算各个时段的应力增量时都应对此加以考虑。

现在结合图 4 说明,将单轴应变过程线分为 n 个时段,时段可以是等间距的,也可以是不等间距的,早期每个时段的应力增量较大,时段划分要

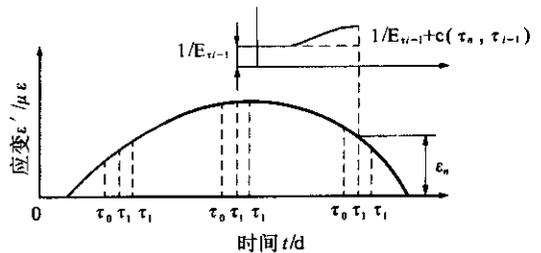


图 4 叠加法计算原理

Fig.4 Sketch of superposition method

在计算时段之前的总变形影响值,我们称之为“承前应变”,用 ϵ_h 表示

$$\epsilon_h = \int_{\tau_0}^t \frac{d\sigma_x(\tau)}{d\tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + \alpha(t, \tau) \right] d\tau \quad (1)$$

式(1)是计算承前应变的数学式,实际上可用下面的近似式计算。

$$\epsilon_h = \sum_{i=0}^t \Delta\sigma_i \left[\frac{1}{E(\tau_i)} + \alpha(\bar{\tau}_n, \tau_i) \right] \quad (2)$$

式(2)表示时段 $\tau_{n-1} \sim \tau_n$ 之前的承前应变,式中 $\bar{\tau}_n = (\tau_n + \tau_{n+1})/2$ 是时段中点的龄期。在龄期 $\bar{\tau}_n$ 的应力增量应为

$$\Delta\sigma_n = E_s(\bar{\tau}_n, \tau_{n-1}) [\epsilon'_n(\bar{\tau}_n) - \epsilon_h(\bar{\tau}_n)]$$

$$= E_s(\overline{\tau}_n, \tau_{n-1}) \{ \epsilon'_n(\overline{\tau}_n) - \sum_{i=0}^n \Delta\sigma_i \times [\frac{1}{E(\tau_i)} + c(\tau_n, \tau_i)] \} \quad (3)$$

式(1)~(3)中： $E_s(\tau_n, \tau_{n-1})$ 为 τ_n 时刻的有效弹性模量； $\epsilon'_n(\overline{\tau}_n)$ 为 τ_n 时刻的单轴应变值； c 为混凝土的徐变系数。

在 τ_n 时刻的混凝土实际应力是

$$\sigma_n = \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\sigma_i + \Delta\sigma_n = \sum_{i=0}^n \Delta\sigma_i \quad (4)$$

式(3)就是混凝土实测应变转化成应力的计算公式。值得注意的是式(3)的应变是实测应变扣除无应力计测试的应变和温度影响后的应变，即只包含弹性应变和徐变应变。

2.2 徐变系数的识别

虽然混凝土徐变的精确计算是很难的，但由于其在混凝土应力分离中的重要性，合理估算收缩徐变的影响是非常重要的。因此必须寻求和试验较为吻合的徐变理论和徐变计算方法，从而达到应变分离的目的^[5,6]。

实际上，可利用部分现场徐变试验资料对徐变理论计算公式进行修正的方法，可以较合理地估算出收缩徐变的影响。这其中，徐变系数的识别又是估算徐变影响的重要环节。

试验测量中，徐变系数的识别采用在主梁中性轴处理设应变计，利用主梁中性轴应力只与预应力有关，中性轴的应力可以利用预应力张拉前后的应变直接测量，而与主梁重量无关的特点来对徐变系数进行识别^[4,5]，具体流程如图5所示。

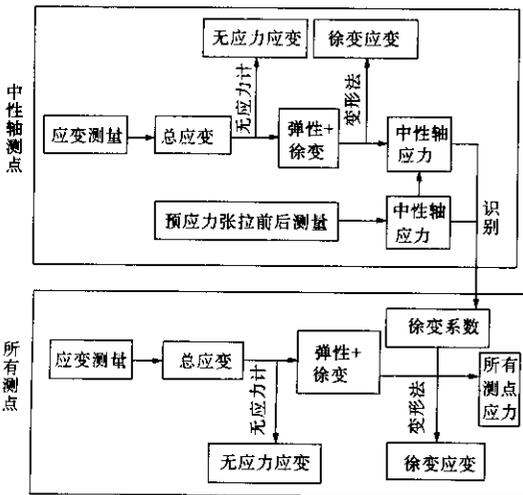


图5 应变-应力转换图

Fig.5 Translation of Stresses - Strains

3 应力测试结果

西江大桥在施工过程中分为13个施工阶段。

计算所用数据包括材料参数、几何参数和荷载参数，其中加载龄期、材料弹模均为实测数据，徐变系数采用的是徐变弹性体理论，使用本文提出方法进行徐变系数的识别和应力的计算。

例如，第一个工况砼的龄期为7d，实测应力0.66 MPa，实测砼弹性模量为39.3 GPa；第二个工况砼的龄期为14d，实测应力为1.32 MPa，砼弹性模量为41.2 GPa；在砼龄期为20d时测得应变为55 $\mu\epsilon$ （扣除收缩、温度等影响），砼弹性模量为42.0 GPa，识别的徐变系数 $c(17,7), c(17,14)=0.42$ ，则砼龄期为20天时的实测应力计算过程如下：

$$\Delta\sigma_0 = 0.66 - 0 = 0.66 \text{ MPa} ;$$

$$\Delta\sigma_1 = 1.32 - 0.66 = 0.66 \text{ MPa} .$$

则由式(3)可计算出砼的龄期14d到20d内的实测应力增量为

$$\Delta\sigma_2 = 42 \times 10^9 \times [55 - (0.66 \times \frac{1}{39.3 \times 10^3} \times 0.73 \times 10^6 + 0.66 \times \frac{1}{41.2 \times 10^3} \times 0.42 \times 10^6)] \times 10^{-6} ,$$

$$\Delta\sigma_2 = 1.55 \text{ MPa} .$$

由式(4)可得砼龄期为20d时的实测应力：

$$\sigma_2 = 0.66 + 0.66 + 1.55 = 2.87 \text{ MPa} .$$

同理可计算后续工况的实测应力。由于篇幅所限，本文仅列出左幅6-6断面应力测试的部分数据。如图6所示。

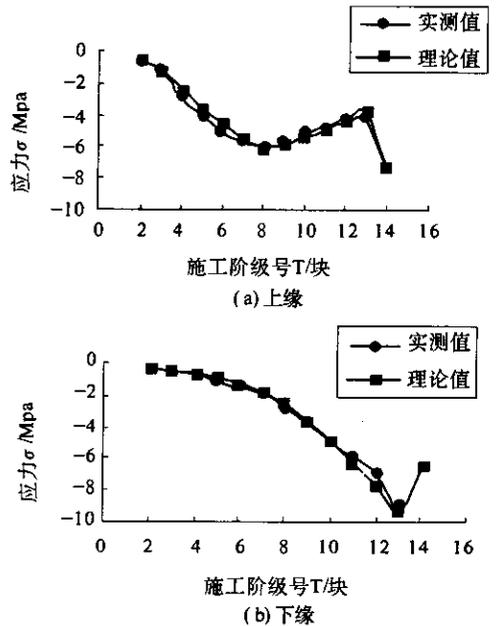


图6 左幅6-6断面上下缘平均应力实测理论曲线图

Fig.6 Mean Stresses Result Contrast of Measured and Theoretical in the low & up margin of section 6-6

从图6中可以看出，实测值与计算值都是比较接近的，说明本文提出的应变转换为应力的计算方法是行之有效的。

4 结论

(1) 混凝土内部应力测量关键在于应力应变转换,而应力应变转换关键在于徐变系数的识别. 本文通过先采用中性轴应力来识别徐变系数,再进行徐变应变分离的方法,应力实测值与弹性理论计算值比较接近.

(2) 事实上,测量工作有两大重点,一是取得原始数据,二是分析数据. 为了能最终得到精确的测量结果,必须精心制定测量方案,获取数据后同时还必须进行科学的分析,两者是相辅相成的.

参考文献:

[1] 储海宁. 混凝土坝内部观测技术[M]. 北京:水利电

力出版社,1989 25~36.

- [2] 韩大建,徐郁峰,王卫锋,等. 大跨度混凝土斜拉桥主梁应力监测中徐变应变的分离[J]. 桥梁建设,2003,14(1):55~58.
- [3] 向木生,田晓彬,徐华,等. 预应力混凝土梁桥应力测试技术[J]. 武汉理工大学学报,2001,25(3):266~269.
- [4] 王卫锋,徐郁峰,韩大建,等. 崖门大桥施工中的应力及温度测量[J]. 桥梁建设,2003,14(1):31~34.
- [5] 叶方谦,余利华. 大跨度预应力混凝土桥施工应力监测[J]. 交通科技,2004,20(4):1~4.
- [6] 陈树礼,苏木标,张文学. 混凝土连续梁桥施工阶段应力监测研究[J]. 石家庄铁道学院学报,2004,17(3):39~42.

Transition between Measured Strain and Stress in Prestressed Concrete Continuous Rigid Frame Bridge

WANG Wei-feng¹, LIU Chun-yan², FAN Xue-ming³

(1. College of Traffic and Communications, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Dapeng Real Estate Company, Guangzhou 510095, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The measurable concrete strain includes the free deformation strain, the creep strain and the temperature strain besides the elastic strain. This paper introduces the methods and steps of indirect stress measurement of pre-stress concrete continuous bridge. In the transition from concrete strain to stress, the no-stress-meters are adopted to remove the no-stress-strain. The strain gauges that are installed at the neutral beam axis are used to identify the creep factor. Separating the creep strain with the superimposing method is introduced into the transition. The key to concrete stress measure is the translation from strain to stress. And the transition's key is the identification of creep factor. In construction supervision period of Xijiang Bridge, the stress of neutral beam axis is adopted to identify the creep factor and then the creep strain is separated. The results show that the stress value is very close between measurement and calculation.

Key words: transition between measured strain and stress; creep factor identification; Xijiang Bridge; stress monitoring