

文章编号: 0451-0712(2006)05-0020-06

中图分类号: TU502.4

文献标识码: A

五河口斜拉桥高性能混凝土长期变形试验研究

陆采荣¹, 姜竹生², 刘世同², 陈灿明¹

(1. 南京水利科学研究院 南京市 210024; 2. 江苏省高速公路建设指挥部 南京市 210004)

摘 要: 五河口斜拉桥主桥和索塔高性能混凝土徐变试验研究, 给出了三个配比混凝土的瞬时弹性模量、徐变度、收缩变形和线膨胀系数, 依据测试结果提出混凝土的弹性模量、徐变度和徐变系数计算公式。分析认为, 混凝土的早期强度和弹性模量相对较高, 徐变系数较低, 对减少预应力损失和构造物后期变形、加快工程进度都是有利的; 测试结果合理可信, 计算公式拟合精度高, 报告提供的测值及公式可作应用参考。

关键词: 斜拉桥; 高性能混凝土; 徐变; 试验

1 五河口斜拉桥概况

五河口斜拉桥, 桥梁全长 2 062 m, 主桥为双塔双索面预应力混凝土斜拉桥, 主跨为 370 m, 桥面宽

38.6 m, 双向六车道。根据设计要求, 主桥主梁和索塔分别采用 C60 和 C50 高性能混凝土浇注。

为配合五河口斜拉桥的施工, 以五河口斜拉桥

收稿日期: 2006-03-10

- [5] 杨学广, 于春, 王世杰. 高性能高耐久性混凝土在桥梁工程上的应用研究[J]. 森林工程, 2002.
- [6] 冯圣清, 肖镇辉. 超高泵程混凝土的研究与应用[J]. 混凝土与水泥制品, 1995.

- [7] 陆采荣, 梅国兴. 厦门海沧大桥混凝土试验专题报告[R]. 南京水利科学研究院, 1997.
- [8] 蔡跃波, 等. “九五”国家重点科技攻关项目, 海工高性能混凝土成套技术研究[R]. 2000.

Test and Research on High Performance Concrete for Main Girder of Wuhekou Cable-stayed Bridge

LIU Shi-tong¹, WANG Yong-an¹, LU Cai-rong², SHAN Guo-liang²

(1. Jiangsu Provincial Department for Expressway Construction, Nanjing 210004, China;

2. Hanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: To Counter the PC concrete box girder of Wuhekou Cable-stayed Bridge, the effect of mixing fly ash, compositely mixing fly ash and silicon powder or fibers addition on physical mechanic performance and durability of high performance concrete (HPC) are researched mainly. The results of researches show that the C60 HPC adopting composite mixing fly ash and superplasticizer techniques has good workability, advanced mechanisms performance, and durability, especially its less dry shrinkage. All these characteristics can meet the requirements for the project progress, such as the prestressed tension within 3 days and the temperature control for a large volume concrete cast. The C60 HPC are successfully applied to the box girder in the Wuhekou Cable-stayed Bridge.

Key words: high performance concrete; fly ash; combining fly ash and high performance admixture; workability; durability; application to engineering

主梁前期施工C60、主梁后期施工C60(主梁配比因原材料变化重新调整)及索塔C50三种施工用高性能混凝土为对象,研究不同加载龄期的弹性变形和徐变变形等,为大桥的施工和监控提供技术支持。混凝土及试件的制作组次见表1。

表1 混凝土与试件加载分组汇总

混凝土名称	分组加载龄期
索塔C50	3 d、7 d、28 d、90 d
主梁前期C60	3 d、7 d、28 d、90 d
主梁后期C60	3 d、7 d

注:每配比混凝土各设一组校核试件。主梁前期C60和主梁后期C60为主梁工程前期施工和后期施工的两种配比的混凝土,后同。

试验方法依据《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》GBJ82—85和《水运工程混凝土试验规程》JTJ270—98及《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》JTGE30—2005。

2 试验材料与混凝土配比

试验混凝土用材选自五河口斜拉桥工程施工的在用材料,材料产地厂家及有关说明如下。

水泥:江苏巨龙水泥集团有限公司生产的巨龙牌52.5(R)水泥(用于索塔C50混凝土和主梁前期C60混凝土)。

嘉新京阳水泥有限公司生产的52.5(R)水泥(用于主梁后期C60混凝土)。

粉煤灰:南京热电厂I级粉煤灰。

细骨料:河砂,产地为宿迁洛马湖。

粗骨料:碎石,岩性为石灰岩,产地为徐州睢宁和淮安盱眙。

外加剂:UC—II型高效减水剂(用于索塔C50混凝土和主梁前期C60混凝土);博得国际贸易有限公司生产的马贝SX(用于主梁后期C60混凝土)。

索塔C50、主梁前期C60及主梁后期C60三种配比的材料用量见表2。

表2 混凝土材料用量

工程部位及混凝土强度等级	水泥 kg/m ³	粉煤灰 kg/m ³	砂 kg/m ³	石 kg/m ³	用水量 kg/m ³	外加剂 kg/m ³	坍落度 cm
索塔C50	419(巨龙)	74	676	1 057(睢宁)	180	4.93(UC—I)	21.5
主梁前期C60	490(巨龙)	54	660	1 032(睢宁)	172	6.80(UC—I)	22.0
主梁后期C60	464(京阳)	52	672	1 051(盱眙)	163	6.71(马贝SX)	21.0

3 试验结果与分析

3.1 混凝土的弹性模量与强度

图1、图2所示为三种混凝土的瞬时弹性模量和抗压强度随龄期变化的曲线,表3为弹性模量和抗压强度与其28 d龄期值的比值。

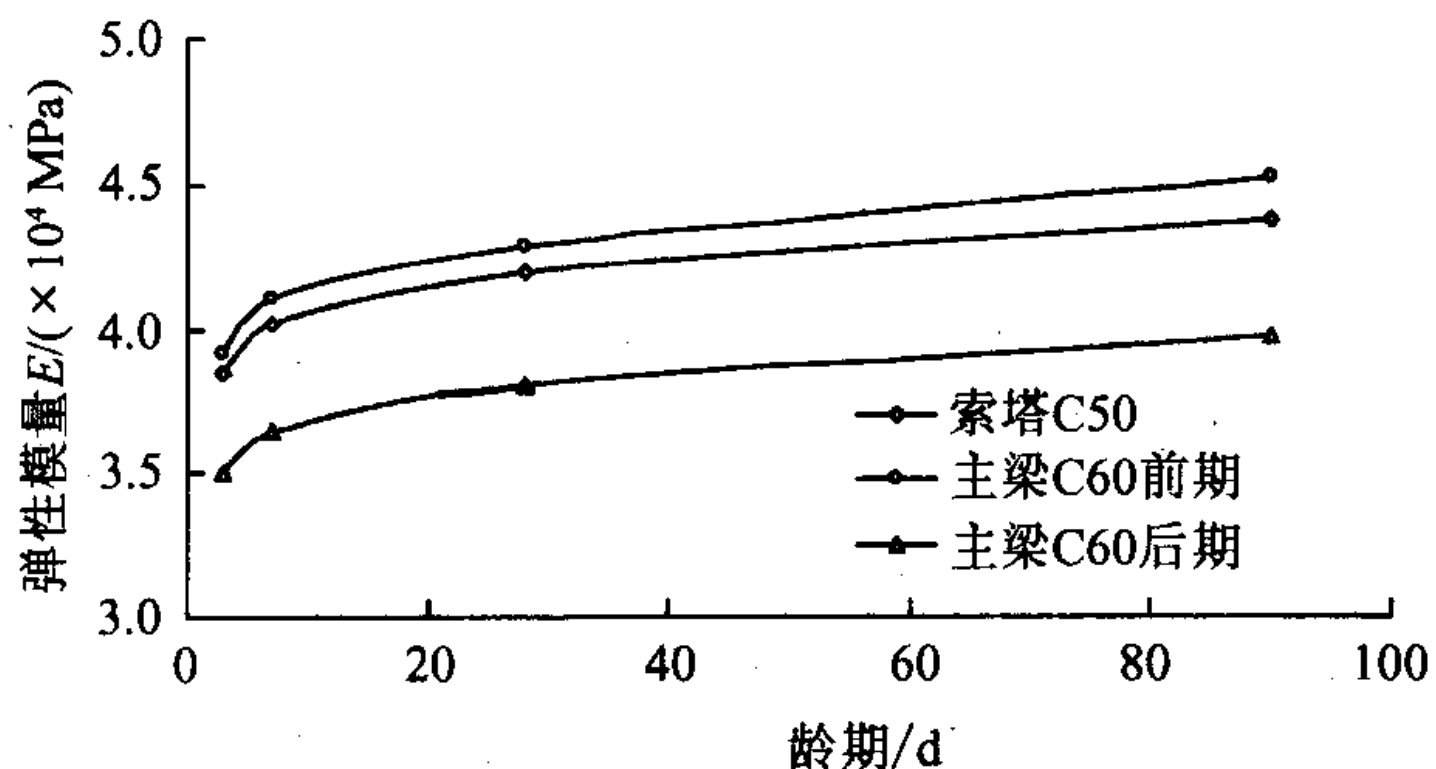


图1 混凝土的瞬时弹性模量曲线

图1、图2显示,主梁前期C60与主梁后期C60两种混凝土的抗压强度接近,混凝土的早期强度和早期弹性模量比较高,从28 d至90 d一段时间的相对增加值较小。主梁前期C60的弹性模量值明显高于

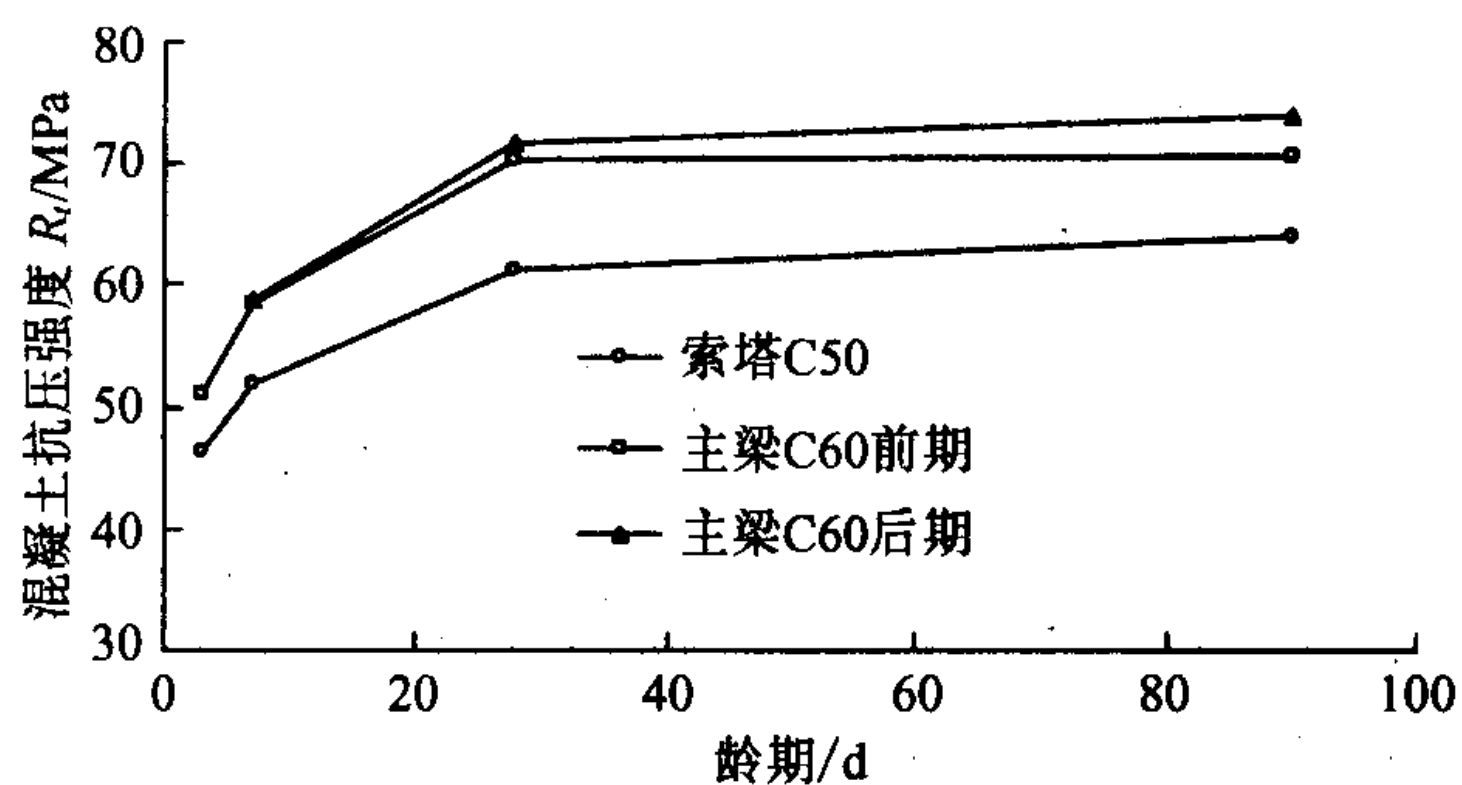


图2 混凝土抗压强度曲线

表3 混凝土弹性模量、抗压强度比值

项目	弹性模量比 E_t/E_{28}				抗压强度比 R_t/R_{28}			
	3 d	7 d	28 d	90 d	3 d	7 d	28 d	90 d
索塔C50	0.92	0.96	1.00	1.04	0.76	0.85	1.00	1.04
主梁前期C60	0.91	0.96	1.00	1.05	0.73	0.83	1.00	1.00
主梁后期C60	/	/	/	/	/	0.82	1.00	1.03
平均值	0.91	0.96	1.00	1.05	0.75	0.83	1.00	1.02

主梁后期C60的相应龄期弹性模量值。上述差异主要与粗骨料特性有关。图1中主梁后期C60混凝土

28 d 和 90 d 的弹性模量值,为参照了主梁前期 C60 及索塔 C50 两种混凝土的弹性模量变化以及主梁后期 C60 混凝土 3 d、7 d 两个龄期弹性模量后,提出的建议值,是一种经验借鉴。

按照第六届国际预应力混凝土会议建议的强度时间关系^[4],时间(龄期) t 分别为 3 d、7 d、28 d、90 d、360 d 的强度 R_t 与标准强度 R_{28} 之比,对加有早强剂的快硬普通硅酸水泥混凝土而言,比值 R_t/R_{28} 的建议值为 0.55、0.75、1.00、1.15、1.20。本试验三个施工配比混凝土的试验结果,平均值为 0.75、0.83、1.00、1.02(缺 360 d 试验值)。可见本工程施工用混凝土的早期强度较高。

三种混凝土在 7 d 龄期以后弹性模量的增加都不大,从平均值一栏看 7 d 至 28 d 增加 4% 左右,从 28 d 至 90 d 增加 5% 左右。

试验结果说明,五河口斜拉桥索塔 C50 和主梁 C60 混凝土早期强度和早期弹性模量较高,特别适用于工期要求紧又要早期张拉的情况,能有效减小张拉后的预应力损失,能加快施工进度。

为便于施工与监控的内插和外延计算,可用指数型公式表示混凝土弹性模量 $E(t)$ 与时间 t 的关系,公式型式如下:

$$E(t) = E_0(1 - \alpha_1 e^{-\beta_1 t} - \alpha_2 e^{-\beta_2 t}) \quad (1)$$

式中: E_0 为弹性模量的最终值; α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 为试验常数; t 为龄期,d。

采用曲线回归法进行计算,确定出各混凝土的上述常数,见表4。利用公式进行插值及外延计算时,时间 t 以不小于 3 d 为宜。

表4 弹性模量式(1)的试验常数汇总

混凝土名称	$\frac{E_0}{\times 10^4 \text{ MPa}}$	α_1	$\frac{\beta_1}{1/d}$	α_2	$\frac{\beta_2}{1/d}$
索塔 C50	4.53	0.10	0.012	0.11	0.25
主梁前期 C60	4.68	0.12	0.014	0.15	0.37
主梁后期 C60	4.12	0.11	0.012	0.12	0.30

3.2 混凝土的收缩

混凝土的干缩采用标准试件在专门设置的干缩试验室观测试件长度,通过不同时间(龄期)所测试件长度的变化推算得混凝土的干缩变形。混凝土干缩试验标准试件为正方形截面的长柱体,截面边长为 100 mm,柱体长度 515 mm。干缩试验室的控制温度为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $60\% \pm 5\%$ 。试件长度用混凝土干缩测量仪测量。

五河口斜拉桥索塔 C50 及主梁前期 C60 两组混凝土试件分潮湿养护 2 d 和 7 d 两组。试件成型完毕后分别在标准养护室放置 2 d 和 7 d 再移至干缩试验室;试件在养护室内 24 h 拆模,满 2 d 龄期(经 48 h)在养护室测定试件长度并以此时所测长度值作为基准值。其后的基本观测时间按混凝土龄期计算为 3 d、7 d、14 d、28 d、60 d、90 d、180 d。具体观测时测试时间及测次都因当时条件有一定调整。图3、图4为索塔 C50 及主梁前期 C60 混凝土试件的收缩试验结果。

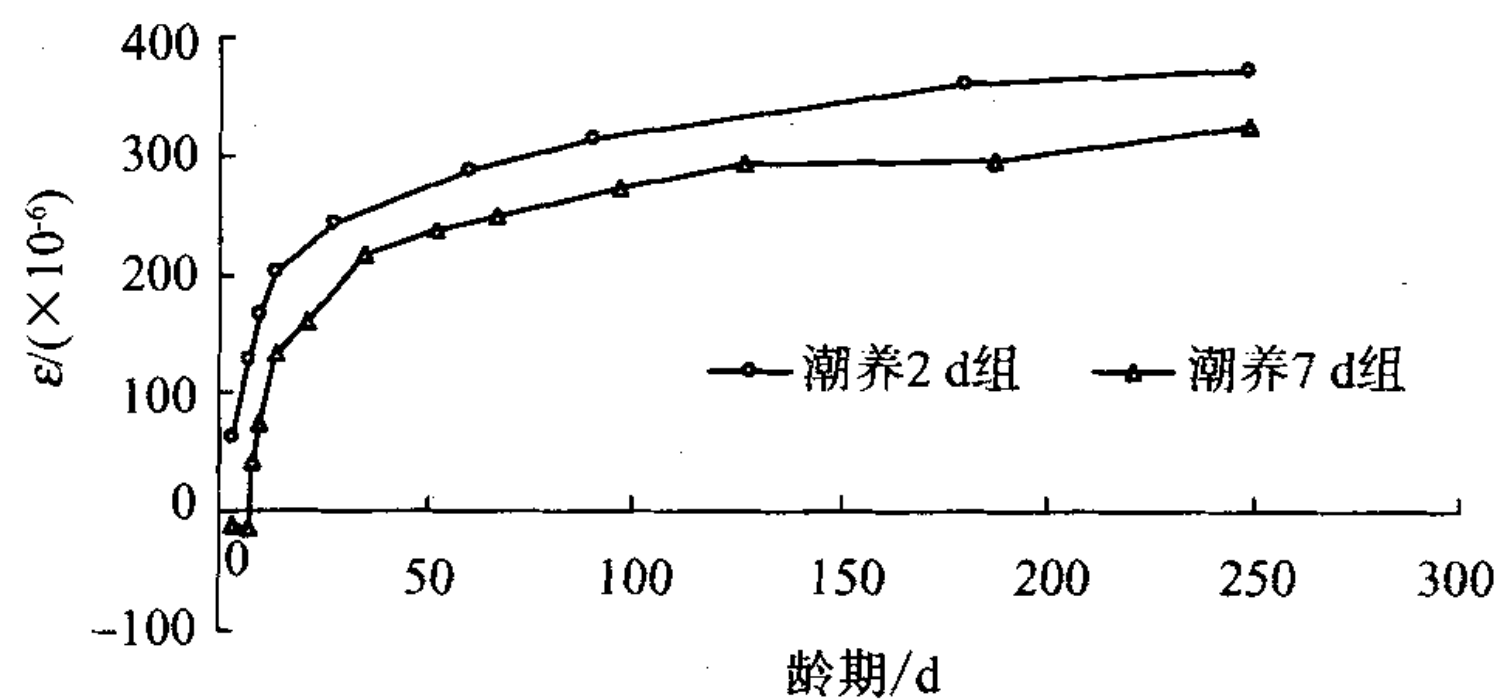


图3 索塔 C50 混凝土收缩曲线

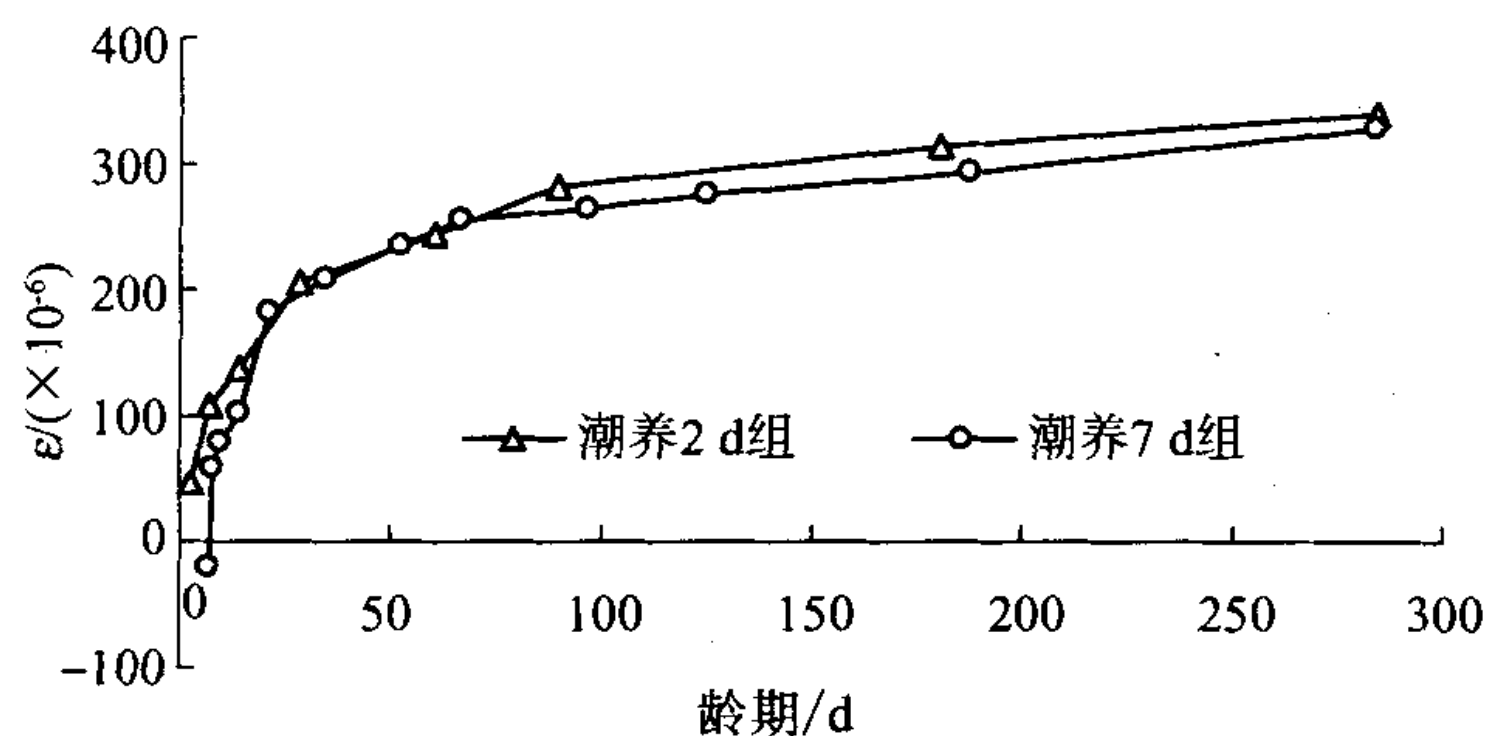


图4 主梁前期 C60 混凝土收缩曲线

从图3、图4看,混凝土龄期在 250 d 后干缩变形基本趋于稳定,大约在 20~25 d 时干缩变形达到稳定值的一半左右;混凝土潮湿养护 2 d 的干缩变形均大于潮湿养护 7 d 在相同龄期的干缩变形,其差值在龄期 7 d 时最大,100 d 以后两组曲线均趋于平行。由于潮湿养护时间相差 5 d,早期两组试件的干缩变形相差较大,平均相对差值达到 35% 以上,但随着时间的延长,相对差值减小,平均下降到 10% 以内。

通过两组混凝土两种养护制度的干缩测值,得到如下结论:混凝土材料和配比是影响干缩值的重要因素,养护制度的最终影响估计在 10% 左右。

3.3 徐变度

由于介质温度的波动、仪器仪表误差及操作等因素的影响,徐变测值的连线往往不是一条光滑曲

线,会有跳动甚或有个别离群值。为消除这种影响,可用三点匀整法、作图匀整法和方程匀整法。本报告结合徐变度的插值与外延计算需要,用曲线方程拟合法直接给出徐变度公式,兼数值匀整。

混凝土徐变只有部分可复^[2,5]。根据试件卸载后徐变的恢复,将徐变度分成可复徐变 C_y 及不可复徐变 C_n 。可复徐变与持续时间 $t-\tau_0$ 有关,表示为 $C_y(t-\tau_0)$;不可复徐变与加载龄期 τ_0 及持续时间 $t-\tau_0$ 有关,表示为 $C_n(t, \tau_0)$ 。索塔C50、主梁前期C60的徐变度用下述公式表示:

$$C(t, \tau_0) = C_y(t - \tau_0) + C_n(t, \tau_0) \quad (2)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} C_y(t - \tau_0) &= C_1[1 - e^{-\gamma_1(t - \tau_0)}] + \\ &C_2[1 - e^{-\gamma_2(t - \tau_0)}] \\ C_n(t, \tau_0) &= C_3[1 - e^{-\gamma_3(t - \tau_0)}] + \\ &C_4[1 - e^{-\gamma_4(t - \tau_0)}] + C_5[1 - e^{-\gamma_5(t - \tau_0)}] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $C_y(t - \tau_0)$ 为可复徐变或称弹性后效, $10^{-6}/\text{MPa}$; $C_n(t, \tau_0)$ 为不可复徐变, $10^{-6}/\text{MPa}$; $C(t, \tau_0)$ 为徐变度, $10^{-6}/\text{MPa}$; τ_0 为加载龄期,d; t 为观察时间,d; $t - \tau_0$ 为持荷时间,d。

式中的常数和系数 $C_1 \sim C_5$ 、 $\gamma_1 \sim \gamma_5$ 值见表5。

表5 徐变度公式拟合系数

项 目		索塔 C50	主梁前期 C60	主梁后期 C60
弹性后效 C_y	$\gamma_1/(1/d)$	0.2	0.1	0.2
	$\gamma_2/(1/d)$	1.8	1.0	1.2
	C_1	2.8	3.2	2.0
	C_2	0.7	0.4	2.1
不可复徐变 C_n	$\gamma_3/(1/d)$	$1.0 + 2.0e^{-0.06\tau_0}$	$1.5 + 1.5e^{-0.5\tau_0}$	$1.2 + 1.5e^{-0.04\tau_0}$
	$\gamma_4/(1/d)$	$0.01 + 0.22e^{-0.038\tau_0}$	$0.015 + 0.4e^{-0.12\tau_0}$	$0.015 + 0.4e^{-0.05\tau_0}$
	$\gamma_5/(1/d)$	$0.005 + 0.023e^{-0.016\tau_0}$	$0.010 + 0.018e^{-0.1\tau_0}$	$0.010 + 0.030e^{-0.08\tau_0}$
	C_3	$1.2 + 4.0e^{-0.08\tau_0}$	$0.7 + 3.0e^{-0.1\tau_0}$	$1.5 + 6.8e^{-0.11\tau_0}$
	C_4	$3.0 + 5.0e^{-0.05\tau_0}$	$2.5 + 5.0e^{-0.05\tau_0}$	$2.5 + 7.1e^{-0.05\tau_0}$
	C_5	$4.5 + 7.0e^{-0.04\tau_0} + 5.0e^{-0.5\tau_0}$	$3.0 + 7.0e^{-0.04\tau_0} + 2.0e^{-0.5\tau_0}$	$3.1 + 7.8e^{-0.008\tau_0} + 0.5e^{-0.6\tau_0}$

图5、图6为五河口斜拉桥索塔C50、主桥主梁前期C60两种配比混凝土4个加载龄期(3 d、7 d、28 d、90 d)的徐变度曲线。

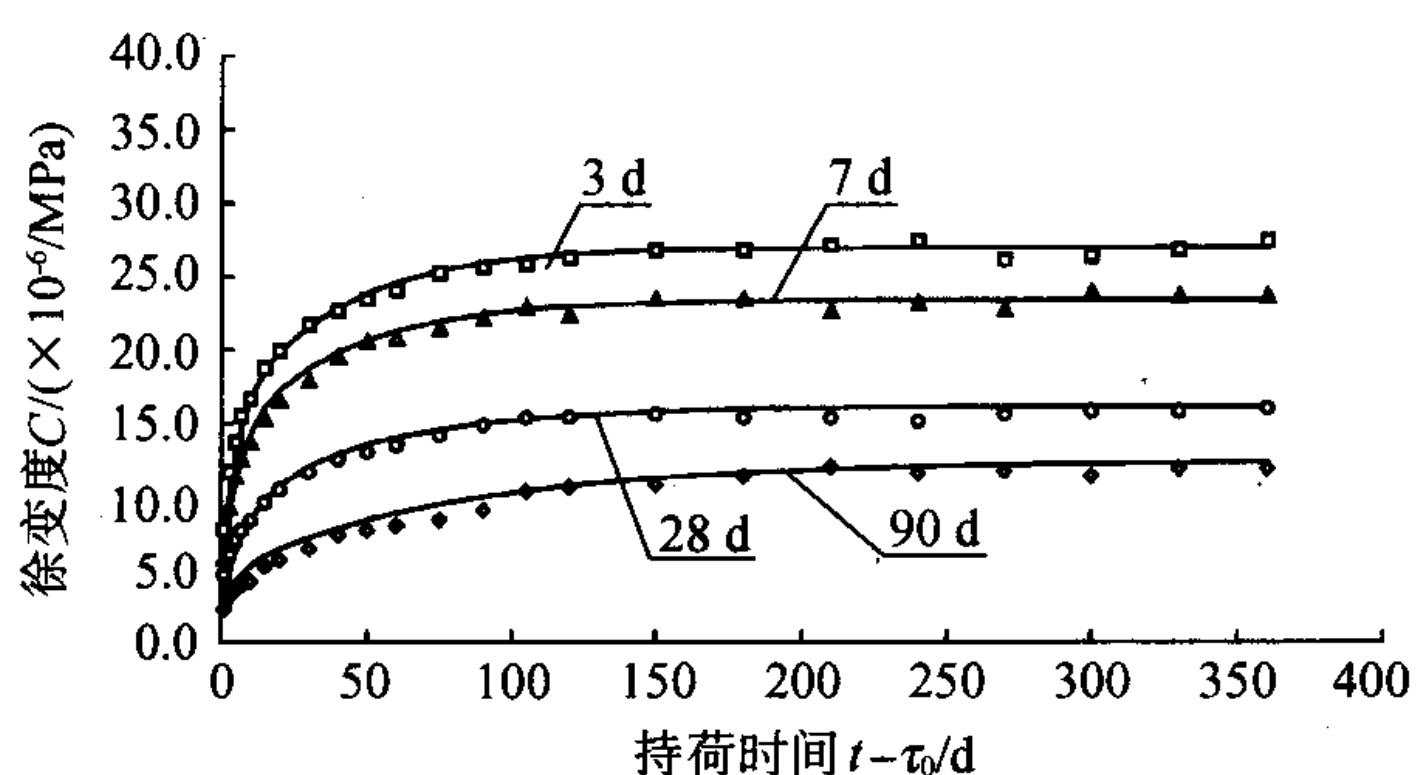


图5 索塔C50混凝土徐变度曲线

主梁后期C60混凝土3 d和7 d两个加载龄期的测试曲线见图7。为了能够进行插值和外延计算,利用现有资料,如混凝土的徐变度、抗压强度、徐变与强度积的变化等,提出一个建议公式,用以描述该配比混凝土徐变度与加载龄期及持续时间的关系。

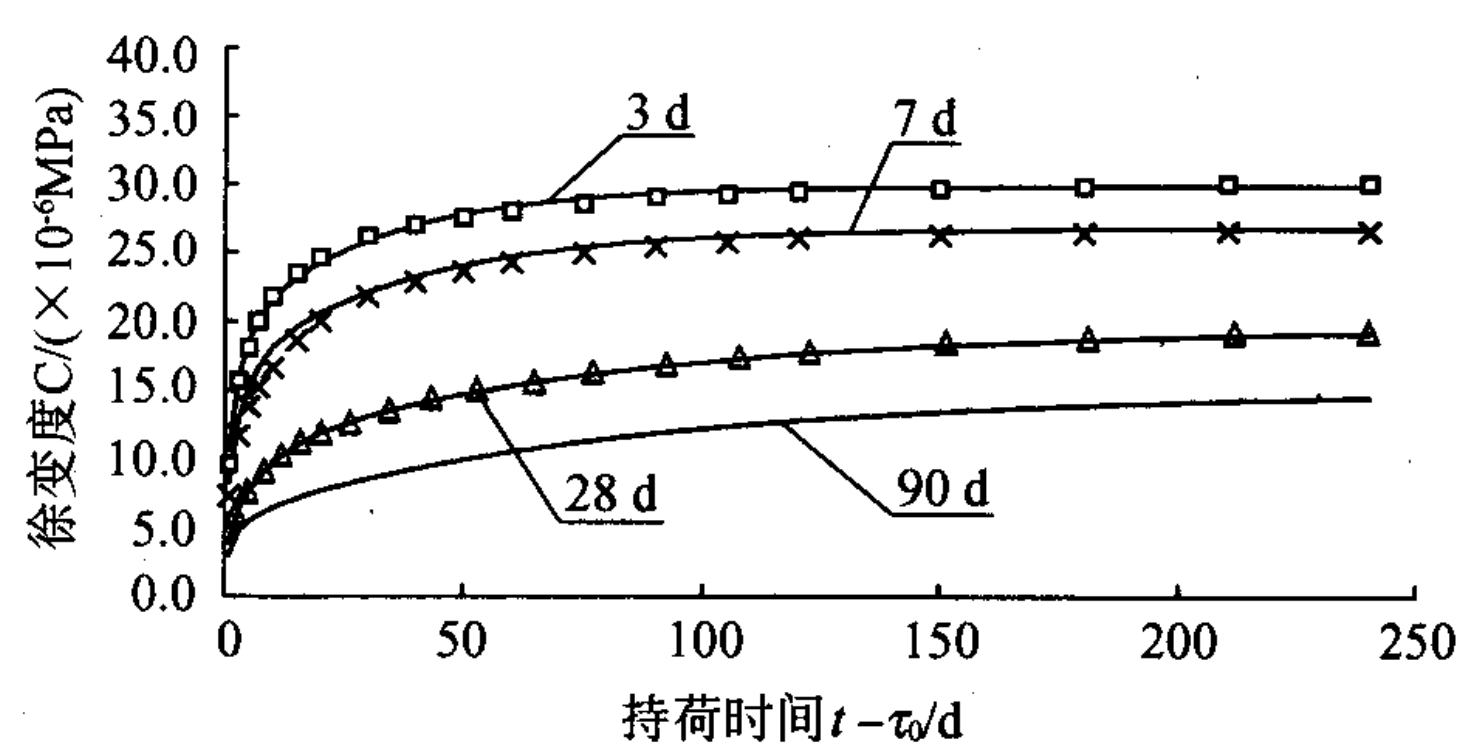


图6 主梁前期C60混凝土配比徐变度曲线

徐变度公式仍用前面式(2)的形式,具体形式为公式(3),式中的常数及系数见表5。图7为五河口大桥主梁后期C60混凝土在3 d和7 d龄期加载的徐变度曲线以及28 d、90 d龄期加载的徐变度建议值曲线。

3.4 徐变系数

图8、图9及图10为索塔C50、主梁前期C60及主梁后期C60三种配合比混凝土的徐变系数曲线。

徐变系数的数值变化,与加载龄期及荷载持续时间有关。持续时间相等时,徐变系数基本上随着加

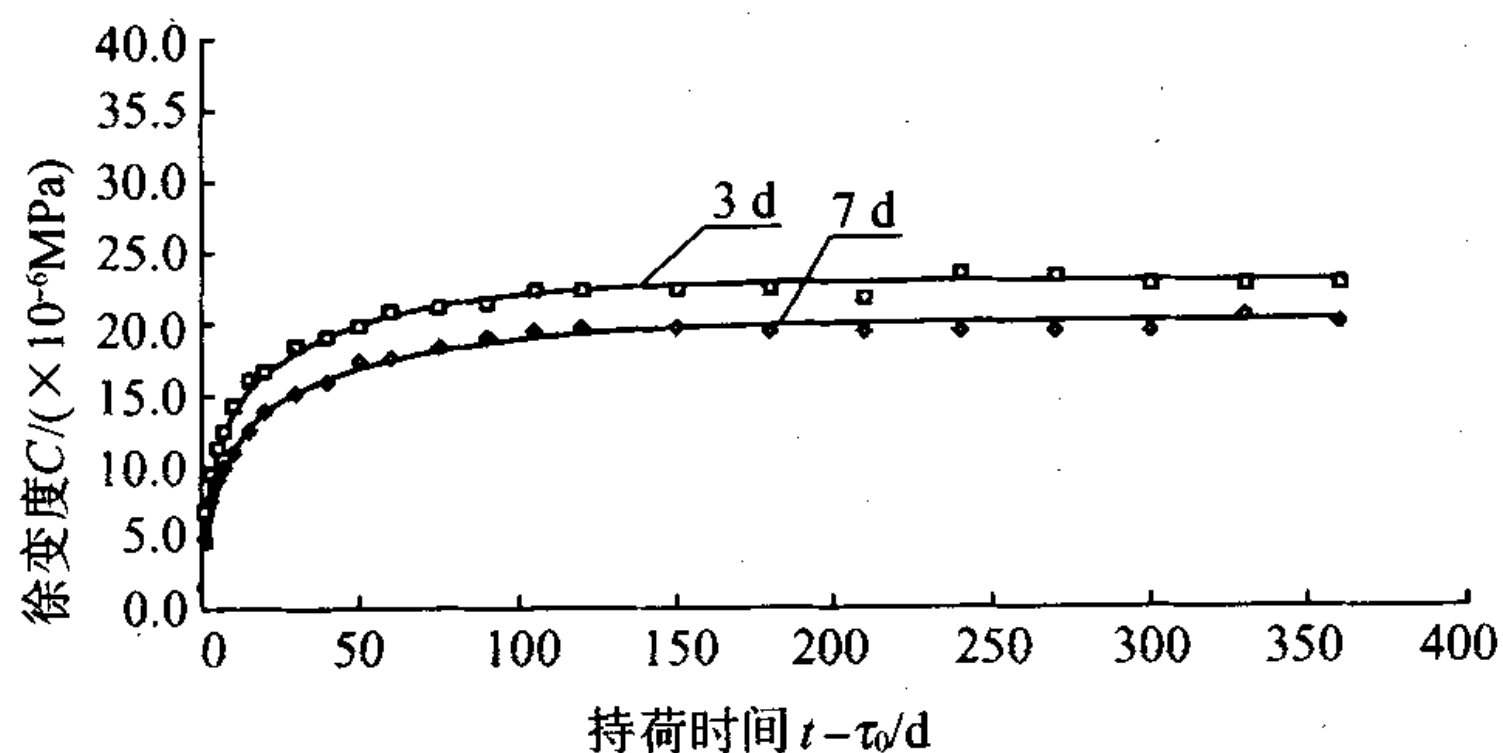


图7 主梁后期C60混凝土徐变度曲线

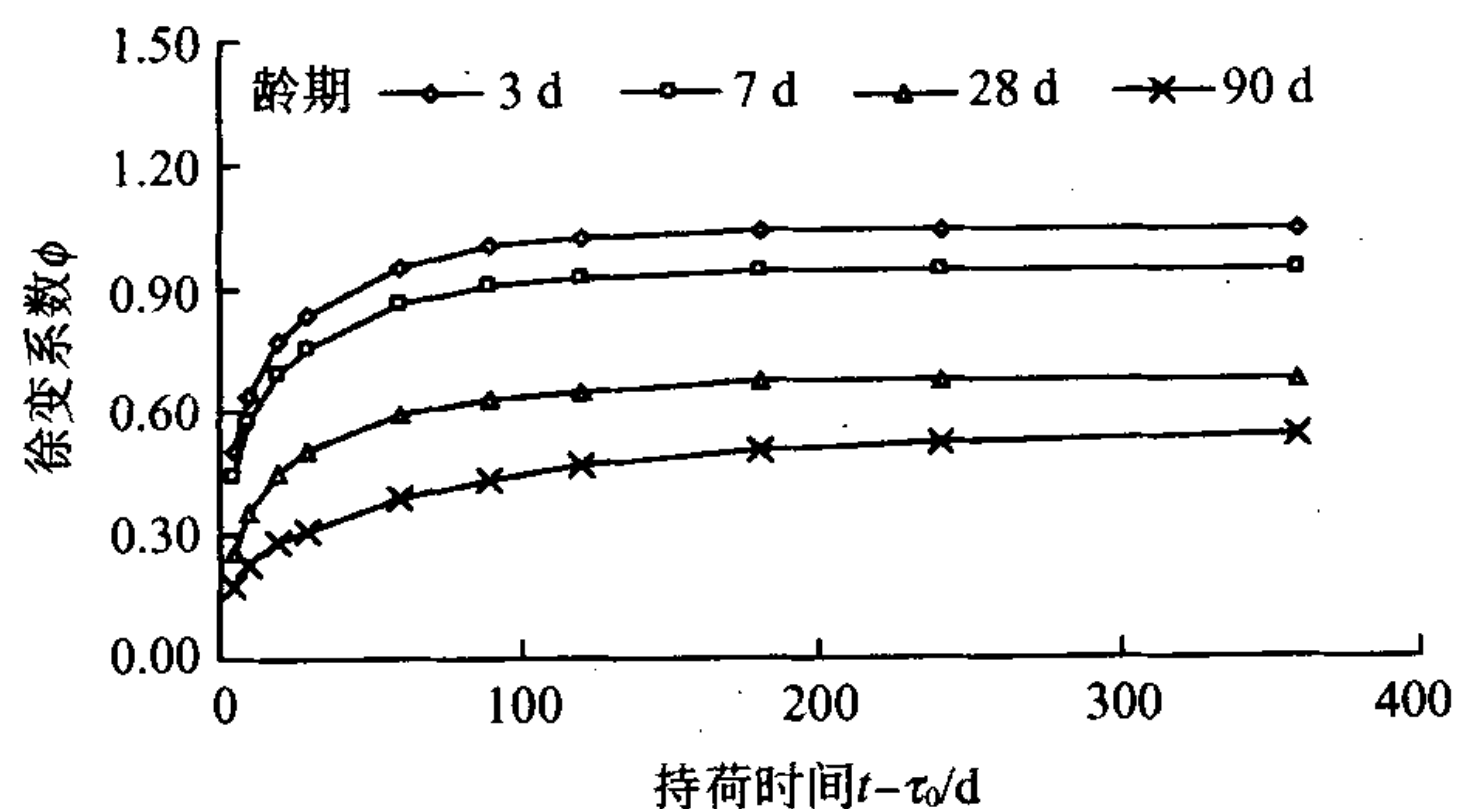


图8 索塔C50混凝土徐变系数曲线

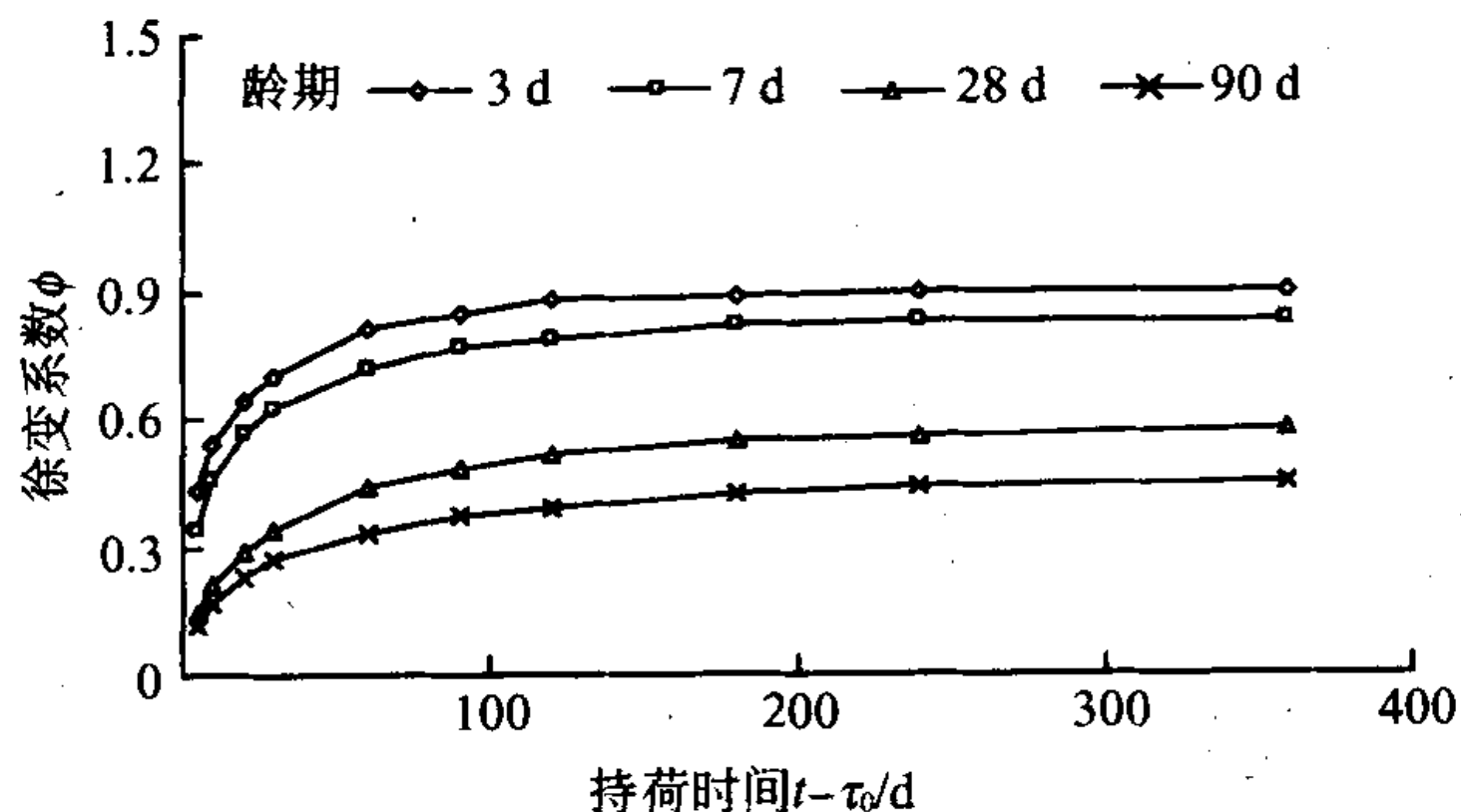


图9 主梁前期C60混凝土徐变系数曲线

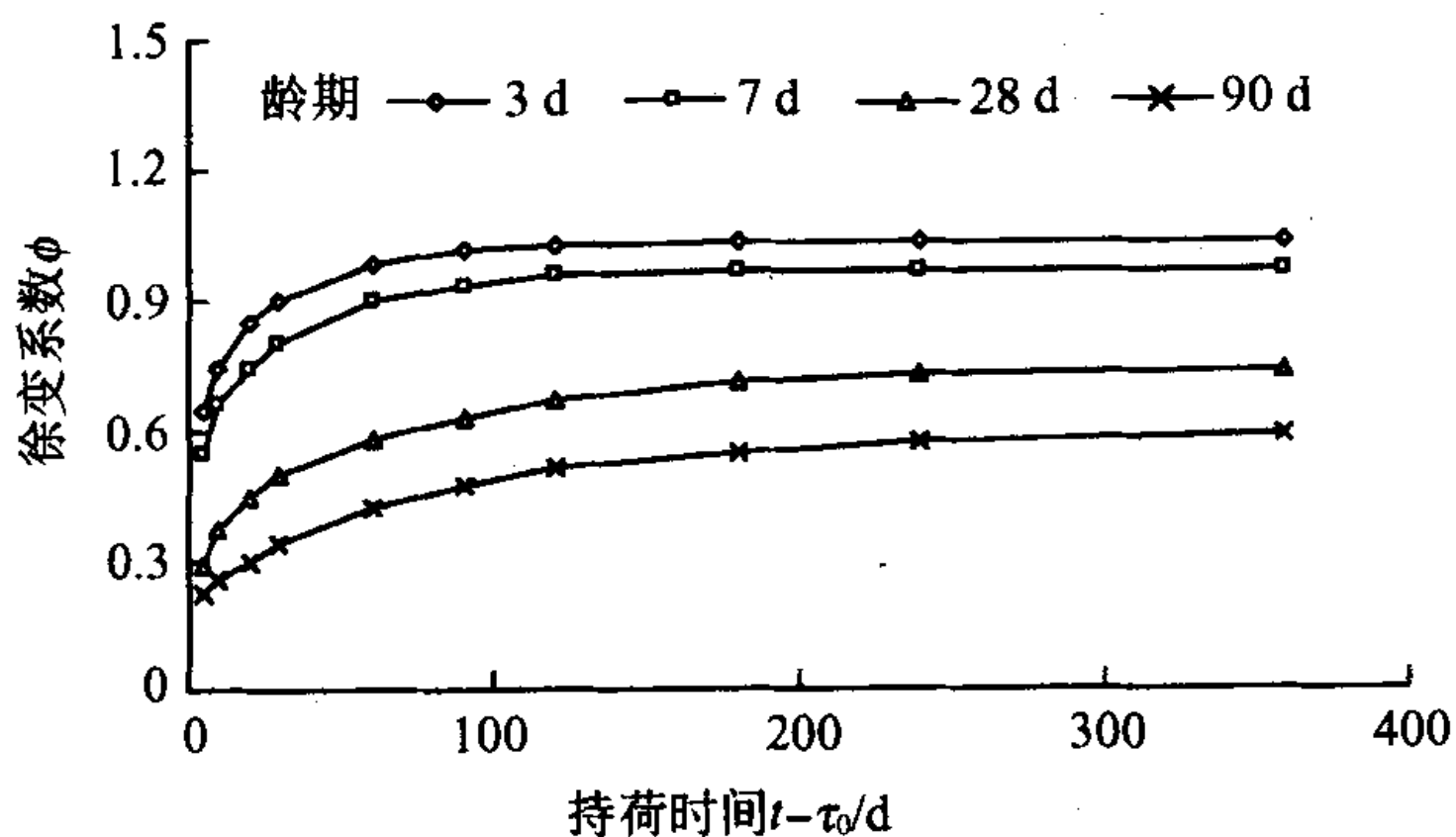


图10 主梁后期C60混凝土徐变系数曲线

载龄期增大而变小,说明徐变度随加载龄期变大而减小。

试验结果表明,五河口斜拉桥索塔C50和主梁C60高性能混凝土的徐变是较小的。根据以往的试验成果以持荷一年为例,南京长江二桥5个配比的徐变度为 $21.9 \times 10^{-6}/\text{MPa} \sim 28.6 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ (加载龄期均为7 d),宜万铁路宜昌长江铁路大桥两个配比的徐变度为 $21.1 \times 10^{-6}/\text{MPa} \sim 25.3 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ (加载龄期均为7 d),黄石大桥主梁混凝土的徐变度为 $46.5 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ (加载龄期为5 d)、 $30.2 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ (加载龄期为28 d)、海沧大桥主梁混凝土徐变度为 $34.0 \times 10^{-6}/\text{MPa} \sim 35.7 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ (加载龄期为3 d,持荷时间150 d)。而五河口斜拉桥索塔C50和主梁C60高性能混凝土同条件下的徐变度为 $23.7 \times 10^{-6}/\text{MPa} \sim 19.9 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ (加载龄期7 d)、 $13.4 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ (加载龄期28 d)。因此说明五河口斜拉桥配置的索塔C50和主梁C60高性能混凝土具有了较好的力学和变形性能。

3.5 混凝土的线膨胀系数

测试混凝土的线膨胀系数时,先将密封试件放在注满清水的恒温槽中,由自动控制设备对水实施升温及保持水的温度恒定,用搅水器不断搅水以保证槽内各点的水温一致。试验水温有20℃、30℃、40℃、50℃四级,每级温度下的恒温时间控制以应变计的电阻值稳定时为止(30 min测读一次,连续三次测值不变时即可认为试件内外温度已经一致)。最后根据应变计所测之应变值与温度的变化,推算混凝土的线膨胀系数 α_T 。

索塔C50: $\alpha_T = 9.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$;

主梁前期C60: $\alpha_T = 9.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$;

主梁后期C60: $\alpha_T = 8.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

混凝土的线膨胀系数 α_T 会因合成材料的品质及配比用量不同而有差别,前者主要为骨料的变形特征,后者主要为水泥用量。一般工程设计的常用取值为 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,这对于水泥用量较高的中、高强度混凝土可能是合适的。例如:海沧大桥主梁混凝土的线膨胀系数为 $10.25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \sim 10.29 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,宜万铁路宜昌长江铁路大桥主梁混凝土为 $9.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \sim 9.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。本试验中三种配比的高性能混凝土水泥用量虽然都较高,线膨胀系数值理应在常见值的偏大范围,故而主梁后期C60的测值为 $8.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 应属于略为偏低,说明五河口斜拉桥在原材料的选择和控制以及配合比的确定方面是成功的。

4 结语

本报告提出的试验结果有五河口斜拉桥索塔C50、主梁前期C60两种材料配比混凝土分别在龄期3 d、7 d、28 d及90 d加载的弹性模量和徐变度,给出了上述混凝土弹性模量和徐变度计算公式的具体形式;给出主梁后期C60混凝土3 d、7 d两个加载龄期的弹性模量和徐变度,并根据前两种混凝土测试结果的分析及以往经验,拟出28 d和90 d两个龄期的参考值,然后据之给出弹性模量和徐变度公式及徐变系数。所有测试结果量值在可信范围、变化规律合理,提出的计算公式拟合精度较高,符合混凝土长期变形的基本特征。

试验结果列有索塔C50及主梁前期施工C60两种混凝土按标准方法所得的收缩变形,比较了2 d和7 d湿养对收缩的影响。给出了三种配比的高性能混凝土线膨胀系数的测试结果。其测试结果比同类工程的混凝土线膨胀系数略低,这与五河口原材料品质及配合比有关。

本试验结果,均已运用于工程检验。结果表明,五河口斜拉桥索塔C50和主梁C60高性能混凝土具

有良好的力学和变形性能。

参考文献:

- [1] GBJ82-85,普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S].
- [2] JTJ270-98,水运工程混凝土试验规程[S].
- [3] JTG E30-2005,公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S].
- [4] 建筑材料编写组. 建筑材料[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1979.
- [5] 唐崇钊. 混凝土的徐变力学与试验技术[M]. 北京:水利电力出版社,1982.
- [6] 惠荣炎,黄国兴,易冰若. 混凝土的徐变[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.
- [7] 黄卫兰. 南京长江二桥混凝土徐变试验报告[R]. 南京水利科学研究院,2000.
- [8] 陈灿明,黄卫兰. 宜万铁路宜昌长江铁路大桥混凝土徐变试验报告[R]. 南京水利科学研究院,2005.
- [9] 盛兆宝. 高强混凝土的徐变试验报告[R],黄石长江公路大桥主梁高强混凝土变形参数测定[R]. 南京水利科学研究院,1993.
- [10] 唐崇钊. 厦门海沧大桥工程混凝土徐变试验报告[R]. 南京水利科学研究院,1998.

Test and Research on Long Term Deformation of High Performace Concrete in Wuhekou Cable-stayed Bridge

LU Cai-rong¹, JIANG Zhu-Sheng², LIU Shi-tong², CHEN Can-ming¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Provincial Department for Expressway Construction, Nanjing 210004, China)

Abstract: In this paper the test measurements, analysis methods of creep and the results of testing for the HPC that used in the Wuhekou Cable-stayed Bridge are introduced. By the normal methods, three mixing proportions of concrete, the moment elastic modulus, creep degree, deformation of shrinkage and coefficient of linear expansion are presented. Meanwhile the calculation formulas of the moment elastic modulus, creep degree and coefficient of creep are achieved. The results of experiments indicate when the early strength of concrete is higher and the coefficient of creep is lower, this condition profits to reduce the lose of prestress and long term deformation, as well as to construct quickly. The results of test are reasonable and the calculation formulas are high accurate that provide a useful reference for application.

Key words: cable-stayed bridge; HPC; creep; experiment