

大跨径桥梁高强混凝土收缩徐变特性研究

陈灿明, 黄卫兰, 王 宏, 唐崇钊, 丁建彤

(南京水利科学研究院 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 介绍了高强混凝土收缩徐变测试及其成果在大跨径预应力混凝土桥梁建设中的应用. 分析论述了减水剂、早强剂和硅粉3类外加剂对收缩徐变的影响, 以及收缩徐变与试件等效厚度的关系; 构件尺寸和湿度条件仅与干徐变和干缩有关. 提出可采用相似曲线平移法进行湿度调整, 在缺乏徐变与等效厚度关系资料时可借鉴已有成果作插值推算.

关 键 词: 高强混凝土; 徐变; 收缩; 外加剂; 尺寸效应; 湿度调整

中图分类号: U448.35:TU528.042 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)04-0062-06

大跨径预应力混凝土桥梁主梁跨中一旦出现下挠过大, 不但影响其正常运用, 还可能威胁桥梁的结构安全. 大跨径预应力混凝土桥梁的下挠属长期变形, 在分析其下挠过大的原因时, 高强度混凝土收缩徐变的影响因素及其长期取值的估计为工程技术界所关注^[1-2]. 水泥、骨料和外加剂是影响混凝土变形的主要因素. 在混凝土中掺入减水剂和早强剂是现代高强混凝土的重要技术. 为研究外加剂对收缩徐变的影响, 本试验选用2种系列减水剂、1种早强剂, 配置4种配比的混凝土试件进行收缩徐变测试.

混凝土的收缩徐变与构件断面尺寸关系较大, 采用标准试件进行测试得到的收缩徐变与实际结构构件的收缩徐变可能会有较大差异. 据有关文献资料^[3-4]介绍, 当构件的等效厚度大于40~50 cm时, 收缩徐变与试件尺寸关系已不明显. 根据实际工程中主梁的结构尺寸, 采用4种等效厚度的试件进行测试, 其中最小厚度为7.5 cm, 最大厚度大于50 cm, 着重研究外加剂和试件尺寸对大跨度桥梁高强度混凝土收缩徐变的影响.

1 试验概况

用4种配合比的混凝土试件(见表1)比较掺入外加剂对收缩徐变的影响. 根据桥用混凝土的特点, 要求7 d强度 f_{cu7} 与28 d强度 f_{cu} 之比 $f_{cu7}/f_{cu}=0.80\sim0.85$, 3 d的强度比 $f_{cu3}/f_{cu}=0.70\sim0.75$. 用1#配比制作模拟试件比较尺寸对收缩徐变的影响. 混凝土原材料为双龙集团水泥厂生产的PO42.5普通硅酸盐水泥、江西产中砂、江苏句容产石灰岩碎石. 采用棱柱体混凝土试件测试其收缩和徐变, 试件长45 cm, 正方形截面边长 $L=15$ cm, 卧式成型, 使试件的受载方向、变形测量方向与桥梁的主要应力和变形方向一致或相近.

表1 试验混凝土配合比

Tab. 1 Mix proportion of concrete

编 号	配制标志	水灰比 W/B	材料用量/(kg·m ⁻³)					萘系 减水剂 FDN/ %	早强剂 Na ₂ SO ₄ / %	聚羧酸 减水剂 PC-2/ %
			水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	硅粉/ %	砂/ (kg·m ⁻³)	直径5~31.5 mm 石子/(kg·m ⁻³)			
1#	C50	0.33	159	482	0	614	1 150	0.70		
2#	C50FNa	0.33	159	482	0	614	1 150	0.70	1.0	
3#	C50PC	0.33	159	482	0	614	1 150			0.50
4#	C60SP	0.32	154	482	5	614	1 150			0.80

收稿日期: 2009-12-25

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200631822327)

作者简介: 陈灿明(1962-), 男, 江苏靖江人, 高级工程师, 主要从事水工结构试验、检测与安全评估. E-mail: cmchen@nhri.cn

混凝土的收缩和徐变还与构件的形状尺寸有关^[3-6],用棱柱体试件截面积 ω 与暴露边长 L 之比来衡量。 ω/L 表示比表面积, $h=L/2$ 表示等效厚度或等效板厚.混凝土试件的相关说明见表2.

表2 混凝土试件的相关说明

Tab.2 Relevant instructions of concrete specimens

测试目的	试件外形尺寸	测试内容	表面密封处理形式	等效板厚 h/cm	混凝土配比编号
外加剂影响比较	正方形截面边长 15 cm 柱体长度 45 cm	收缩变形 徐变变形	—相对侧面暴露 另一相对侧面密封	15	1#~4#
试件尺寸影响比较	正方形截面边长 15 cm 柱体长度 45 cm	收缩变形徐变变形	四侧面暴露	7.5	1#
			—相对侧面暴露	15	
			一个侧面暴露	30	
			四侧面密封	>50	

混凝土拌合料采用机械拌和,振动台振捣,坍落度控制不小于 18 cm. 试验室温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$,湿度为 $(65\pm 5)\%$. 所有测量徐变变形的试件在成型后第 7 d 加载,主要加载设备有 350 kN 弹簧式徐变仪,500 kN 液压千斤顶;荷载大小由 400 kN 钢环测力计测量. 变形测量设备有标准千分表架和千分表. 每个柱体试件安装 2 只固定式千分表,测量标距 150 mm. 加载方法参照规范中抗压徐变试验方法^[7]的有关条款.

2 试验结果及分析

经测试得出,1#~4# 配比混凝土试件对应的标准立方块抗压强度 $f_{\text{cu}7}$ 分别为 54.3,54.8,50.4 和 60.2 MPa,徐变加载试件抗压弹性模量 E_7 分别为 39.5,38.7,38.4 和 39.3 GPa;按有关资料^[8]的弹性模量推算公式得出弹性模量 E_7 分别为 35.2,35.3,34.6 和 36.0 GPa. 可见,4 种配比混凝土试件的弹性模量推算值比实测结果略高(9.2%~12.2%),其原因可能是试验采用的石灰岩碎石为粗骨料、骨料岩性硬度适中,高强度胶凝体发挥了弹性骨架支撑作用,且胶浆与骨料结合良好.

加载试件的总应变 $\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_e + \varepsilon_c$,其中: ε_e 为试件的弹性应变; ε_c 为徐变应变; ε_s 为收缩应变. 应力应变关系为:

$$\varepsilon = S(t) + \frac{\sigma}{E(\tau)} + \sigma C(t, \tau) \quad (1)$$

式中: $S(t)$ 为试件的纵向(长度)收缩应变,是持续测试的时间函数; σ 为加载应力锁定值(MPa); $E(\tau)$ 为混凝土弹性模量(MPa),是加载时试件混凝土龄期 $\tau(\text{d})$ 的函数; $C(t, \tau)$ 为混凝土徐变度(MPa^{-1}),即单位应力的徐变变形,为加载龄期和荷载持续作用时间 $t-\tau$ 的函数.

将混凝土桥梁视为均质线弹性徐变体时,梁中的下挠变形(或变形增量) W 与弹性瞬时变形(或变形增量) W_e 之间存在下述关系^[4]

$$W(t) = W_e(1 + \Phi) \quad (2)$$

式中: Φ 为混凝土的徐变系数, $\Phi = E(\tau)C(t, \tau)$.

各试验条件下混凝土徐变度时程曲线、徐变系数时程曲线及混凝土收缩应变曲线见图 1~2. 试验所有试件的测试和加载均从 7 d 龄期开始,为便于表示,以 t 表示从 7 d 开始的持续时间,将 $C(t, \tau)$, $E(\tau)$, $\Phi(t, \tau)$ 写成 $C(t)$, E (或 E_7), $\Phi(t)$.

图 1(a)显示各配比混凝土试件收缩到 300 d 时仍以较高的速率发展;至 360 d,1#,2#混凝土试件的收缩量达 250×10^{-6} ,3#,4#混凝土的收缩量为 210×10^{-6} 和 140×10^{-6} . 收缩量最大的 1#混凝土与收缩最小的 4#混凝土之间收缩值相差 110×10^{-6} ,为平均值 208.3×10^{-6} 的 55.2%,是收缩最小的 4#混凝土的 84.6%. 混凝土的骨料为品质较好的石灰岩碎石,使用高效减水剂后混凝土用水量减少、强度增加而且早期强度发展快,是收缩量降低的主要原因之一. 1#,2#和 3#混凝土的收缩量基本接近,4#混凝土掺有 5% 的硅粉,收缩量有较大下降,这与一般试验的结果一致^[9].

图 1(b) 为不同板厚混凝土试件的收缩曲线. 由于全密封试件的变形即为该配比混凝土的自生变形, 其余 3 种密封型式的收缩变形主要为自生变形和干缩变形. 从图可见, 试验配置的混凝土试件收缩量以自生变形应变为主; 至 360 d 时, 全密封试件的自生变形应变为 208×10^{-6} , 不密封、2 面封和 3 面封试件的干缩应变分别为 66×10^{-6} , 43×10^{-6} 和 10×10^{-6} .

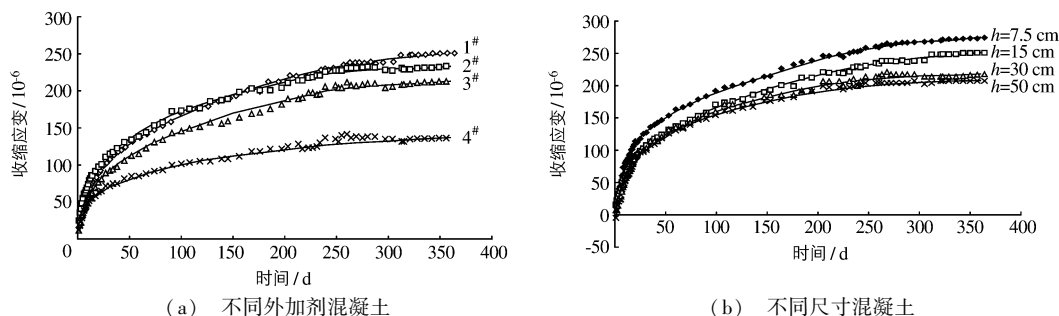


图 1 混凝土收缩曲线

Fig. 1 Shrinkage curves

图 2(a) 为不同外加剂混凝土的徐变度曲线. 至 360 d 时, 1#~4# 混凝土的徐变系数分别达到 1.25, 0.66, 0.90 和 0.43. 4 种配比混凝土的徐变度和徐变系数都比普通混凝土要小, 这与一般高性能混凝土的试验结果一致^[6,9-10]. 2#, 4# 混凝土的徐变度和徐变系数较 1#, 3# 混凝土要小, 这与掺入早强剂 NaSO_4 和硅粉有关.

图 2(b) 为 4 种模拟板厚试件在实验室相对湿度 (65 ± 5)% 条件下观测所得的徐变度曲线. 可以看出, 板厚 30 cm 试件的徐变与密封试件的徐变即基本徐变已经比较接近; 至 360 d 时模拟厚度为 7.5 和 15 cm 试件的徐变速率仍较大.

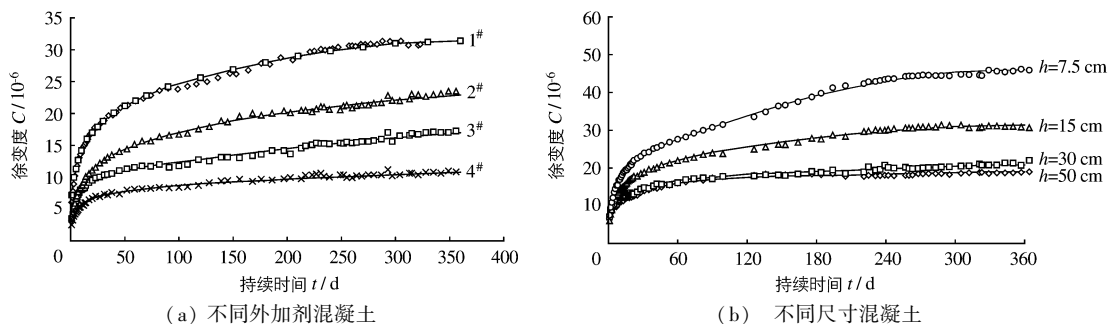


图 2 混凝土徐变度过程线

Fig. 2 Creep curves

3 成果应用的尺寸效应与湿度调整

3.1 徐变变形的尺寸效应

当正方形截面的边长 L 或圆形截面的直径 D 大于 $80 \sim 100 \text{ cm}$ ^[3-4] 时, 徐变变形的变化基本与边长 L 或直径 D 的增大无关, 徐变为基本徐变 C_0 . 基本徐变与加载时的弹性变形之比为基本徐变系数 Φ_0 . 截面尺寸不大且表面暴露在空气中的加载试件, 其徐变变形减去基本徐变后的差值为干徐变, 记为 C_+ , 相应的徐变相对值为干徐变系数 Φ_+ . 徐变度 C 和徐变系数 Φ 有下述关系:

$$C = C_0 + C_+, \quad \Phi = \Phi_0 + \Phi_+ \quad (3)$$

根据试验结果, 持荷 360 d 时, $\Phi_0 = 0.75$, 相应 h 为 7.5, 15, 30 cm 的 Φ_+ 值分别为 1.07, 0.50, 0.08, $\Phi \sim h$ 的关系可用下式表示:

$$\Phi = 0.75 + 2.07e^{-(0.081h+0.001h^2)} \quad (4)$$

当采用密封试件的基本徐变作为基准时,尺寸效应系数 k_1 可用下式表示:

$$k_1 = 1 + 2.77e^{-(0.081h+0.001h^2)} \quad (5)$$

式(5)等号右边的第2项为干徐变与基本徐变的相对值.当用等效板厚 $h=7.5$ cm 的徐变作为基准时,徐变系数 Φ 相对值 k_2 可用下式表示:

$$k_2 = 0.41 + 1.143e^{-(0.081h+0.001h^2)} \quad (6)$$

式(6)等号右边第1项为基本徐变,约为标准试件(边长或直径15 cm)徐变的40%.上述徐变系数 Φ 和相对值 k_1, k_2 的计算结果见表3.

表3 徐变系数 Φ 及其相对值 k_1 和 k_2 计算结果

Tab.3 Calculation results of creep coefficient Φ and relative value k_1 and k_2

h / cm	徐变系数 Φ		k_1	k_2
	式(4)	试验值	式(5)	式(6)
7.5	1.82	1.82	2.43	1.00
15	1.24	1.24	1.66	0.68
30	0.82	0.82	1.10	0.45
>50	0.75	0.75	1.00	0.41

3.2 徐变的湿度调整

由于桥梁所处的环境湿度与普通徐变实验室的相对湿度存在较大差异,对于非密封试件而言,应对干徐变或干徐变系数的试验结果进行湿度调整.徐变系数的湿度调整可以采用线性推移法或湿度系数修正法.

3.2.1 线性推移法 设试验室的标准湿度为 $H_{\text{标}}(\%)$,桥梁的环境湿度为 $H(\%)$,设干徐变系数 $\Phi_{\text{干}}$ 与湿度差 $(100-H)$ 成正比时,有

$$\frac{\Phi_{\text{干}}(H)}{\Phi_{\text{干}}(H_{\text{标}})} = \frac{100-H}{100-H_{\text{标}}} = x \quad (7)$$

因 $\Phi(H) = \Phi_0 + \Phi_{\text{干}}(H)$,故有

$$\Phi(H) = (1-x)\Phi_0 + x\Phi(H_{\text{标}}) \quad (8)$$

式中: $\Phi(H)$ 为相对湿度 H 的徐变系数推算值; Φ_0 为密封试件的徐变系数试验值; $\Phi(H_{\text{标}})$ 为标准湿度非密封试件的徐变系数值; x 为比例系数, $x=(100-H)/(100-H_{\text{标}})$.

根据试验结果,用线性推移方法推算的 $H=60\% \sim 100\%$ 的徐变系数见表4.

表4 用线性推移公式作湿度调整的徐变系数 $\Phi(H, h)$

Tab.4 Creep coefficients $\Phi(H, h)$ according to formula

等效厚度 h / cm	徐变系数					
	$H=50\%$	$H=60\%$	$H=70\%$	$H=80\%$	$H=90\%$	$H=100\%$
7.5	2.09	1.82	1.55	1.29	1.02	0.75
15	1.36	1.24	1.12	1.00	0.87	0.75
30	0.84	0.82	0.80	0.79	0.77	0.75
>50	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

3.2.2 湿度系数修正法 CEB/FIP(1970)模型和 ACI(1978)模型的湿度修正方法是将徐变系数 Φ 乘以湿度修正系数. CEB/FIP(1978)模型则将徐变系数分为可复徐变(弹性后效变形)系数和不可复徐变(塑性流动)系数,对不可复徐变部分乘以尺寸修正系数和湿度修正系数作为形状尺寸和湿度修正.以上计算模型都对基本徐变 C_0 或基本徐变系数 Φ_0 进行了尺寸和湿度修正,但几种方法计算结果相差较大^[11].

ACI(1978)法采用的湿度修正公式为

$$K_H = 1.27 - 0.006H \quad (H > 40\%) \quad (9)$$

CEB/FIP(1978)法给出湿度修正系数的列表值(见表5). CEB/FIP(1970)法采用图解法给出湿度系

数^[3],该系数值可用下式^[10]表示:

$$K_H = 1 + 3.25[1 - e^{-0.01685(100-H)}] \quad (10)$$

式(10)所示的湿度系数是标准试件在几种湿度条件下徐变变形与基本徐变变形的比值,等号右边第2项为干徐变与基本徐变之比.CEB/FIP(1970)模型、ACI(1978)模型和 CEB/FIP(1978)模型的湿度系数典型值见表5.

表5 计算模型的湿度系数典型值

Tab.5 Relative humidity and humidity coefficient

计算模型	湿度系数典型值				
	H=100%	H=90%	H=70%	H=50%	H=40%
CEB/FIP 70	1.00	1.50	2.30	2.85	/
CEB/FIP 78	0.80	1.00	2.00	/	3.00
ACI 78	0.67	0.73	0.85	0.97	1.03

注:CEB/FIP70 为图示值;CEB/FIP78 为表格值;ACI78 根据式(9)计算.

本试验未作不同湿度条件下的徐变与尺寸效应关系测试,根据上述模型,讨论湿度调整方法.

设干徐变系数 $\Phi_{\mp}(H, h)$ 可以表示为湿度函数 $f_1(H)$ 和尺寸函数 $f_2(h)$ 之积,其中

$$f_1(H) = 1 - e^{-0.01685(100-H)}, \quad f_2(h) = e^{-(0.081h+0.001h^2)} \quad (11)$$

取 $\Phi_{\mp}(H, h) = Af_1(H)f_2(h)$. 当 $H=60\%$ 时, 命 $Af_1(60)f_2(h) = 2.08f_2(h)$, 可得 $A=4.242$. 考虑湿度和试件尺寸影响的徐变系数 Φ 如下

$$\Phi(H, h) = 0.75 + 4.242[1 - e^{-0.01685(100-H)}]e^{-(0.081h+0.001h^2)} \quad (12)$$

现将几个典型湿度和厚度的计算结果列于表6. 比较表6与表4可见, $h=7.5$ cm 时, 徐变系数相差最大为0.10; $h=15$ cm 时, 最大差值为0.04, 相对差值在5%以内. 故这2种湿度调整方法均可应用.

表6 用式(12)计算的徐变系数与湿度尺寸关系

Tab.6 Creep coefficients Φ and size effect calculated by formula (12)

等效厚度 h/ cm	徐变系数					
	H=50%	H=60%	H=70%	H=80%	H=90%	H=100%
7.5	1.99	1.82	1.62	1.37	1.09	0.75
15	1.32	1.24	1.15	1.04	0.91	0.75
30	0.84	0.82	0.81	0.79	0.77	0.75
>50	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

4 结 语

(1) 掺硅粉和掺早强剂 NaSO_4 可使混凝土徐变度和徐变系数明显减小; 聚羧酸 PC-2 降低混凝土徐变的效果优于萘系 FDN;

(2) 在试验室相对湿度条件下, 板厚 30 cm 试件的徐变与基本徐变已经比较接近, 但板厚 7.5 和 15 cm 试件在持荷 300 d 后徐变速率仍然较大, 构件尺寸越小, 对徐变影响越大;

(3) 根据试验结果拟合, 高强桥用混凝土持荷 360 d 的徐变系数和板厚的关系可用 $\Phi = 0.75 + 2.08e^{-(0.081h+0.001h^2)}$ 表示;

(4) 桥梁所处环境湿度与徐变实验室的相对湿度存在差异, 应对干徐变 $C_{\mp}$ 或干徐变系数 $\Phi_{\mp}$ 的试验结果进行湿度调整, 徐变系数的湿度调整可以采用湿度系数修正法和线性推移法;

(5) 标准湿度和尺寸的徐变系数 $\Phi(H_{\text{标}}, h_m)$ 和基本徐变系数 Φ_0 是进行湿度调整和尺寸关系插值推算的2个数据基点, 应根据实际工程材料进行试验得出. 在仅有 $\Phi(H_{\text{标}}, h_m)$ 和 Φ_0 时, 可借助现有经验或公式进行插值计算.

参 考 文 献:

- [1] 谢峻,王国亮,郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技, 2007(1): 47-50. (XIE Jun, WANG Guo-liang, ZHENG Xiao-hua. State of art of long-term deflection for long span prestressed concrete box-girder bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007(1): 47-50. (in Chinese))
- [2] 沈飞峰. 徐变对大跨径混凝土箱梁桥长期挠度影响[J]. 山西建筑, 2009(14): 317-319. (SHEN Fei-feng. On the influence of the concrete creep on the long-term deflection of the long-span box-girder bridges[J]. Shanxi Architecture, 2009(14): 317-319. (in Chinese))
- [3] 惠荣炎, 黄国兴, 易冰岩. 混凝土的徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988: 64-66. (HUI Rong-yan, HUANG Guo-xing, YI Bing-yan. Concrete creep[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988: 64-66. (in Chinese))
- [4] 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: 203-204. (TANG Chong-zhao. Concrete creep mechanics and test technology[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1982: 203-204. (in Chinese))
- [5] 周履, 陈永春. 收缩徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994: 328-350. (ZHOU Lv, CHEN Yong-chun. Concrete shrinkage and creep[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994: 328-350. (in Chinese))
- [6] 陈肇元, 朱金铨, 吴佩刚. 高强混凝土及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992: 80-84. (CHEN Zhao-yuan, ZHU Jin-quan, WU Pei-gang. High-strength concrete and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992: 80-84. (in Chinese))
- [7] SL352-2006, 水工混凝土试验规程[S]. (SL352-2006, Water resources and hydropower engineering concrete test procedures [S]. (in Chinese))
- [8] 陈灿明, 黄卫兰, 唐崇钊, 等. 混凝土强度与弹模依时增长相关性公式的试验研究[J]. 公路工程, 2010(2): 51-55. (CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, TANG Chong-zhao, et al. Experimental study on the formula of the relevance between concrete strength and elasticity modulus[J]. Highway Engineering, 2010(2): 51-55. (in Chinese))
- [9] 冯乃谦. 高性能混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 226-230. (FENG Nai-qian. Structures of high performance concrete[M]. China Machine Press, 2004: 226-230. (in Chinese))
- [10] 陈灿明, 黄卫兰, 陆采荣, 等. 桥用高性能混凝土的徐变与应用[J]. 水利水运工程学报, 2007(2): 1-9. (CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, LU Cai-rong, et al. Creep of high-performance concrete for bridges and its application[J]. Hydro-Science and Engineering, 2007(2): 1-9. (in Chinese))
- [11] 周履. 英国迪河湾桥高性能混凝土徐变和收缩的试验与分析[J]. 国外桥梁, 2002(1): 10-14. (ZHOU Lv. Test and analysis of high-performance concrete creep and shrinkage[J]. Foreign Bridges, 2002(1): 10-14. (in Chinese))

Study of high-strength concrete creep and shrinkage for long-span bridges

CHEN Can-ming, HUANG Wei-lan, WANG Hong, TANG Chong-zhao, DING Jian-tong

(Key Laboratory of Water Science and Engineering, Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: High-strength concrete creep and shrinkage tests as well as its application to the long-span pre-stressed concrete girder bridge are described in the paper. The test results include size effect of creep and shrinkage specimens and comparative analysis of creep and shrinkage. Some influences of two kinds of water reducing agent, early strength agent and silicon powder on creep and shrinkage are analyzed. The methods of equivalent thickness and size effect are proposed. The tests show that component size and humidity conditions merely affect dry creep and dry shrinkage, therefore, it is proposed that the method of shifting a similar curve is adopted to adjust humidity. If there is lack of data (results) between creep and equivalent thickness, interpolation method is adopted according to present data. Calculation reckoning should be indicated in detail and the present data should be proved.

Key words: high-strength concrete; creep; shrinkage; admixture; size effect; humidity adjustment