

文章编号: 1672-3031(2017)03-0193-07

微膨胀抗冲磨混凝土早期徐变理论与试验研究

祝小靓^{1, 2, 3}, 丁建彤^{2, 3}, 蔡跃波^{2, 3}, 傅琼华¹(1. 江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
3. 水利部 水工新材料工程技术研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 早期徐变特性是开裂敏感性评价中很重要的因素, 为建立精度更高的微膨胀抗冲磨混凝土早期徐变模型, 提高早期混凝土应力计算精度、裂缝预测和控制的能力, 本文基于丹麦标准 TI-B102(95)的徐变试验测试方法, 针对混凝土早龄期徐变测试需要, 将初始加载龄期从3d提前到20h左右、将龄期3d前的加卸载周期加密至1d左右和每10 min自动采集变形数据3个方面, 对丹麦技术研究所提出的早期徐变测试方法做进一步改进; 通过间歇式加卸载的特殊加载方式, 在大量试验数据的拟合和优化基础上, 得到早期徐变模型的黏性和弹性系数, 获得了拟合相关性系数大幅度提高(达到0.96)的早期黏弹性模型。该方法的引用和改进, 可以弥补目前国内在早期徐变测试领域的空白。

关键字: 微膨胀; 抗冲磨混凝土; 早期; 徐变; 试验

中图分类号: TU528

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.03.005

1 研究背景

混凝土的早期应力发展除受自生体积变形、温度变形以及热膨胀系数的影响外, 徐变对混凝土的应力发展和变形性能也会产生重要的影响。通常徐变会引起混凝土变形增大或预应力损失, 对混凝土结构不利。但对于约束条件下的大体积抗冲磨混凝土, 一方面, 徐变是减小温降阶段约束拉应力发展的主要因素, 能够松弛其60%以上的拉应力^[1], 对降低开裂敏感性起到极其重要的作用; 另一方面, 徐变也会减小抗冲磨混凝土浇筑早期由于温度的升高而产生的内部预压应力, 这对早期的抗裂是不利的。混凝土的徐变性质在水化初期变化显著, 因此, 早期徐变是进行开裂敏感性评价很重要的因素。

目前, 关于徐变及应力松弛的大部分研究及模型多是基于硬化后成熟混凝土压缩徐变数据分析, 相关模型有 AASHTO 模型、B3 模型、ACI 模型和 CEB-fip 模型^[2-4]。其中一部分模型已为 ACI-209 (1992) 和 CEB-fipMC90 (1991) 等现行规范采用, 这些模型虽然能够代表硬化混凝土的徐变性能, 但较难代表实际工程中混凝土浇筑后即受到约束的徐变和应力松弛行为。对于徐变度, Bazant 等^[5]提出的硬化混凝土的双参数模型(double-power law)以及在此基础上发展而来的三参数模型(triple-power law)最为常用, 然而三参数模型虽能更好地表征混凝土在长期荷载下的徐变变形, 却不能科学地反映混凝土早期的基本徐变。

国内外关于硬化混凝土长期徐变性质的研究已经非常广泛, 但对混凝土早期徐变的性质, 尤其是在浇筑后1~2d的研究极少, 而早期徐变性质是计算混凝土应力、预测早期是否开裂不可或缺的要害。本文在丹麦技术研究所提出的早期徐变标准试验方法基础上, 进行一定的改进, 建立微膨胀抗冲磨混凝土的早期徐变模型, 为早期徐变的测试研究提供依据。

收稿日期: 2016-08-17

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2017M612154); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(Y415014); 江西省水利厅科技项目(KT201414, KT201606)

作者简介: 祝小靓(1987-), 男, 浙江衢州人, 博士后, 主要从事水工结构和混凝土耐久性等研究。E-mail: 495480427@qq.com

2 试验原材料及配合比

试验所用胶凝材料为海螺牌 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥, 南京热电厂生产的 II 级粉煤灰, Elken920U 型硅粉, 氧化钙-硫铝酸钙复合型膨胀剂(EA), HLC-IX 型聚羧酸高性能缓凝减水剂。粗骨料为人工玄武岩, 粒径分别为 5~20 mm 和 20~40 mm。细骨料采用细度模数为 2.6 的天然河砂。

按照 C₉₀50 等强度设计原则, 配合比见表 1。

表1 抗冲磨混凝土配合比

(单位: kg/m³)

编号	水胶比	水泥	粉煤灰	膨胀剂	硅粉	水	砂	小石	中石
FAS	0.355	327	87		22	155	689	531	531
FA	0.320	388	97			155	673	519	519
EA	0.330	322	94	31	23	155	676	521	521

3 试验方法

3.1 流变蠕变模型的建立 混凝土作为一种黏弹性材料, 可以采用流变模型(rheological creep model)对徐变进行研究, Burgers 模型就是最常用的一种。尽管混凝土的徐变机理尚未确定, 但是正如叶德艳等^[6]所指出, Burgers 模型关于徐变的可逆性假设以及在描述混凝土徐变特性方面, 与实际徐变特性较为吻合。

为控制混凝土早期开裂, 丹麦技术研究所^[7]对掺有硅粉和粉煤灰的 C50 混凝土进行了一系列早期性能的研究, 其中也对徐变特性进行了研究, 提出了早期徐变标准试验方法 TI-B 102(95) Test Method - Strains from Creep and Early-Age Shrinkage。其理论依据类似于 Burgers 模型, 将徐变模型表述成一个外部减震器(黏壶)和一个并联的减震器(黏壶)与弹簧的连接, 即 Maxwell 模型和 Kelvin 模型, 如图 1 所示。外部减震器代表由水泥浆体及骨料构成的不可恢复徐变(永久徐变变形), 而并联部分代表水泥浆体的可恢复变形。

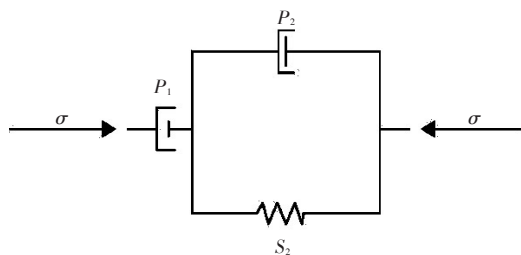


图1 流变蠕变模型

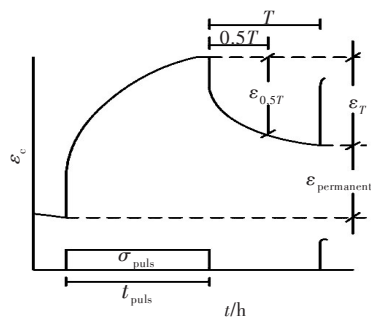


图2 加卸载荷载典型变形

通常是采用恒定荷载的徐变试验获得 Burgers 模型^[8]参数, 这种静态荷载下获得的早期徐变性能值得商榷。本文采用丹麦技术研究所提出的标准试验方法 TI-B102(95), 通过对 3 个配合比的混凝土试件进行重复交替变荷载测试, 得到徐变黏性和弹性系数:

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{\text{puls}} t_{\text{puls}}}{\varepsilon_{\text{permanent}}} \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{-E_2 T}{\ln \left(1 - \frac{\varepsilon_T E_2}{\sigma_{\text{puls}}} \right)} \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{2\varepsilon_{0.5T} - \varepsilon_T}{\varepsilon_{0.5T}^2} \sigma_{\text{puls}} \quad (3)$$

式中： η_1 为外部减震器黏性系数； η_2 为并联部分黏性系数； E_2 为并联部分弹性系数； σ_{puls} 为加载应力，MPa； t_{puls} 为持荷时间，h； $\varepsilon_{\text{permanent}}$ 为不可恢复变形， $\times 10^{-6}$ ； T 为卸荷时间，h； ε_T 为 T 时段对应可恢复变形， $\times 10^{-6}$ ； $\varepsilon_{0.5T}$ 为 $0.5T$ 时段对应恢复变形， $\times 10^{-6}$ 。

加卸载典型变形如图2所示。

徐变可以通过下式获得：

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta_2} - \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon_2 + \frac{\sigma}{\eta_1} \quad (4)$$

式中： σ 为应力，MPa； $\dot{\varepsilon}$ 为徐变率； ε_2 为并联部分徐变， $\times 10^{-6}$ 。

关于黏性和弹性系数随龄期的变化函数，有学者通过函数 $a \times \exp(b \times \text{maturity})$ ^[9]表示，也有通过 $a + b \times \exp(-(c/\text{maturity})^d)$ ^[10]表示，其中 a 代表时间为0时的性能， b 代表成熟度无穷大时的性能， c 表示曲线的拐点， d 表示曲线的弯曲程度，均可以通过最小二乘法拟合得到。

3.2 早期徐变测试方法 早期徐变测试的基本操作流程如下：(1)成型：成型试件尺寸为 $\phi 200 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 圆柱体。4个徐变试件(2种加载方式，每种加载方式2个试件)、3个自由试件(作为自生体积变形和温度变形的补偿试件)，相应12个加荷时间点的12组标准立方体试件。(2)试验条件：试件成型后，在PVC管试模的上、下面用塑料膜密封，置于 $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 实验室。至测试时间，将试件拆模，并用塑料膜密封。(3)测试：两种加载方式，分别如图3和图4所示。黏性和弹性性能由加卸载方式1和加卸载方式2交替加卸载荷载得到。

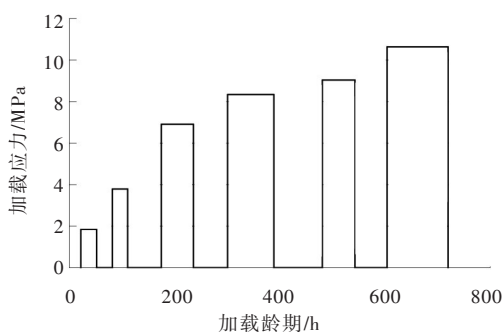


图3 加卸载方式1

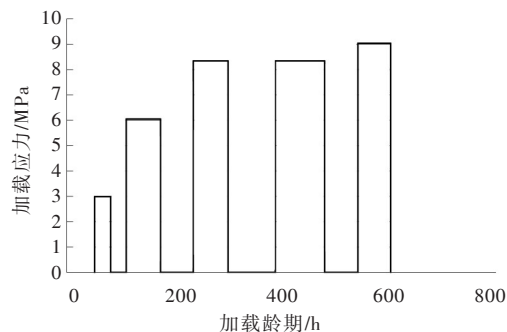


图4 加卸载方式2

通过千斤顶加载，应力水平控制在30%的抗压强度，前期加、卸载周期较短，后期周期变长。初次加荷时间为浇筑后20h左右。每一次加、卸荷载过程中记录不少于3个荷载及对应的变形，用于计算弹性模量。加、卸载过程中，通过千分表直接读取变形值，通过荷载传感器读取荷载值。加卸载完成后，通过LVDT位移自动采集装置采集恒定荷载下试件的长期变形。

3.3 早期徐变测试方法的改进 本文徐变测试基于丹麦标准TI-B102(95)的徐变试验测试方法，测试过程中发现，该方法的不足之处是初次加载时间在1d后，并不能充分考虑早龄期混凝土性能快速发展的特点，而且试验的有效数据点较少。针对以上问题，本文从初次加荷时间、持荷时间和数据采集3个方面进行了改进。

具体改进包括：(1)综合考虑混凝土自身强度和脱模后试件密封及安装需要花费的时间，将初次加荷时间从3d提前到20h左右，这样得到的结果更能反映早期的徐变性能；(2)加大了加、卸载频率，将龄期3d前的加卸载周期加密至1d左右，这样可以在早期获得更多的有效数据，改进黏弹性系数随时间发展的模型；(3)数据采集方面，采用LVDT自动位移采集仪，每10min采集一个变形数据，这样可以得到较为连续的数据点，避免了单个测点误差导致的结果不合理；(4)将每次加卸载所用的时间控制在3min内，避免时间过长引起的徐变漏测以及徐变对弹性模量测试结果的影响。

4 试验结果与分析

交替加、卸荷载作用下得到混凝土的徐变结果见图5, 徐变结果已经通过同条件下的自由试件剔除了温度变形、自生体积变形。从结果可以看出, 两种加、卸载方式得到的最终徐变值差别不大。

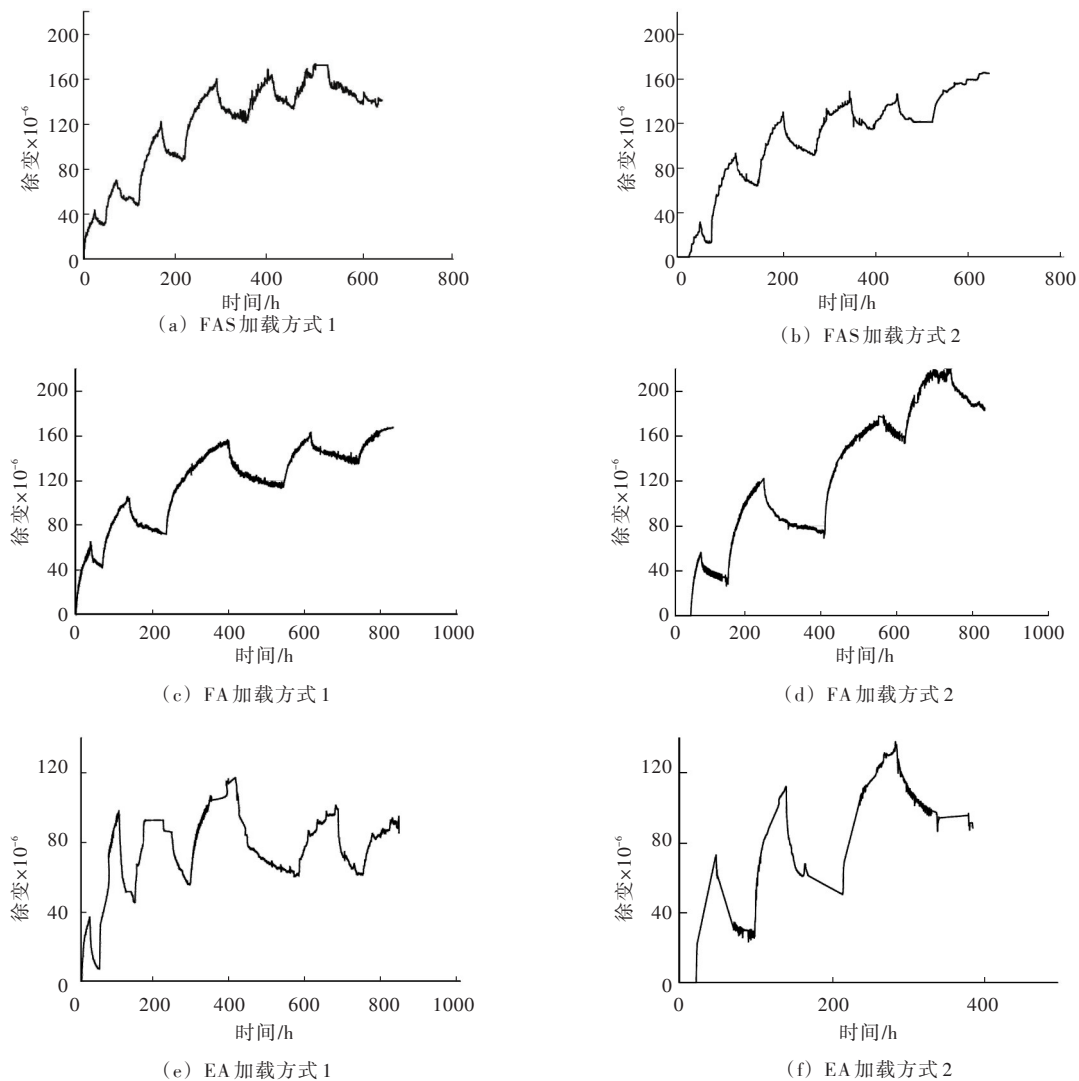


图5 交替加、卸荷载作用下徐变测试结果

从图5的徐变测试结果中按图2提取出可恢复和不可恢复变形, 按照式(1)~式(3)计算得到黏弹性系数。徐变性能受温度、加荷时间和持荷时间影响, 因此本文最终统一用等效龄期对应的徐变参数来表示。黏弹性系数计算结果见表2~表4。表5中, M 为等效龄期, h 。

采用函数 $a + b \cdot \exp(-(c/maturity)^d)$ 对徐变试验结果进行拟合, 结果见表5。

从表5可以看出, 采用该函数对结果进行拟合的相关性较高, 相关性系数基本在0.96以上, 而在对丹麦技术研究所报告中的数据拟合后发现, 其相关性系数基本在0.7左右。因此通过本文对测试方法的改进, 获得了更加准确的黏弹性系数, 进一步改进了黏弹性系数随时间变化的发展模型。

黏弹性系数随时间的变化见图6, 其中HETEK为丹麦技术研究所的结果。从图6可以看出, 不同配合比混凝土的黏弹性系数差别较大, 通过式(4)的流变模型, 可以得到徐变变形。

表2 FAS黏弹性系数计算结果

M/h	σ_{puls} /MPa	t_{puls} /h	压徐变 $\times 10^{-6}$	$\varepsilon_{\text{permanent}}$ $\times 10^{-6}$	T/h	ε_T $\times 10^{-6}$	$\varepsilon_{0.5T}$ $\times 10^{-6}$	η_1 /(MPa·h)	η_2 /(MPa·h)	E_2 /(MPa)
22	1.85	23.4	43.4	32.8	23.4	10.6	10.0	1.3E+06	7.2E+05	1.7E+05
52	2.99	23.4	36.0	22.0	22.5	14.0	12.0	3.2E+06	1.3E+06	2.1E+05
82	3.79	22.5	37.2	19.8	49.4	17.4	16.2	4.3E+06	2.1E+06	2.2E+05
111	6.05	49.4	79.2	53.0	47.6	26.2	24.4	5.6E+06	2.1E+06	2.3E+05
175	6.91	47.6	68.0	40.0	50.4	28.0	24.0	8.2E+06	3.4E+06	2.4E+05
236	8.34	50.4	63.2	28.6	68.5	34.6	31.4	1.5E+07	3.6E+06	2.4E+05
301	8.34	68.5	64.0	31.0	71.1	33.0	28.0	1.8E+07	5.0E+06	2.4E+05
389	8.34	71.1	46.4	25.4	48.0	21.0	15.0	2.3E+07	8.7E+06	3.3E+05
481	9.04	48.0	30.2	10.2	47.7	20.0	14.0	4.3E+07	1.0E+07	3.7E+05
543	9.04	47.7	28.0	7.0	72.2	21.0	16.0	6.2E+07	1.2E+07	3.9E+05
604	10.64	72.2	37.0	7.0	117.2	30.0	25.0	1.1E+08	1.2E+07	3.4E+05

表3 EA黏弹性系数计算结果

M/h	σ_{puls} /MPa	t_{puls} /h	压徐变 $\times 10^{-6}$	$\varepsilon_{\text{permanent}}$ $\times 10^{-6}$	T/h	ε_T $\times 10^{-6}$	$\varepsilon_{0.5T}$ $\times 10^{-6}$	η_1 /(MPa·h)	η_2 /(MPa·h)	E_2 /(MPa)
20.6	2.45	21.2	50.0	20.4	23.6	29.6	24.8	2.6E+06	5.8E+05	8.0E+04
48.2	4.49	25.5	71.9	16.5	51.2	55.4	52.9	7.0E+06	6.8E+05	8.1E+04
80.6	5.73	51.2	88.4	38.0	41.3	50.4	44.2	7.7E+06	1.2E+06	1.1E+05
145.6	7.17	41.3	70.0	20.0	74.4	50.0	45.0	1.5E+07	2.4E+06	1.4E+05
198.1	8.22	29.6	47.2	11.6	71.2	35.6	31.4	2.1E+07	4.0E+06	2.3E+05
292.5	9.36	70.5	66.0	26.0	100.9	40.0	36.0	2.5E+07	5.3E+06	2.3E+05
381.9	9.36	124.1	80.0	45.0	161.9	35.0	33.0	2.6E+07	7.7E+06	2.7E+05
743.9	9.36	102.3	38.4	24.4	66.2	14.0	11.0	3.9E+07	1.6E+07	6.2E+05

表4 FA黏弹性系数计算结果

M/h	σ_{puls} /MPa	t_{puls} /h	压徐变 $\times 10^{-6}$	$\varepsilon_{\text{permanent}}$ $\times 10^{-6}$	T/h	ε_T $\times 10^{-6}$	$\varepsilon_{0.5T}$ $\times 10^{-6}$	η_1 /(MPa·h)	η_2 /(MPa·h)	E_2 /(MPa)
21.2	3	17.2	50.1	28.1	39.9	22	18	2.80E+06	2.10E+06	2.30E+05
42.5	5.9	39.9	62.2	41.2	27.9	21.0	16.0	5.7E+06	3.1E+06	2.5E+05
71.3	8.6	27.9	56.0	25.0	71.4	31.0	25.0	9.6E+06	6.5E+06	2.6E+05
106.5	8.8	71.0	70.0	39.0	96.2	31.0	27.0	1.6E+07	7.0E+06	2.8E+05
195.0	10.6	96.2	90.0	56.0	163.0	34.0	32.0	1.8E+07	9.1E+06	3.1E+05
314.8	11.6	163.2	112.0	80.0	144.2	32.0	28.0	2.4E+07	1.3E+07	3.5E+05
517.3	11.8	144.3	70.0	50.0	70.0	20.0	14.6	3.4E+07	1.8E+07	5.1E+05
696.3	13.2	70.0	45.0	22.0	124.0	23.0	19.1	4.2E+07	2.1E+07	5.5E+05
783.3	12.1	124.0	54.0	34.0	90.6	20.0	15.0	4.4E+07	1.5E+07	5.9E+05

5 结论

本文徐变测试在丹麦标准 TI-B102(95)的徐变试验测试方法的基础上, 针对混凝土早龄期徐变测试需要, 将初始加载龄期从 3 d 提前到 20 h 左右、将龄期 3 d 前的加卸载周期加密至 1 d 左右、每 10 min 自动采集变形数据 3 个方面, 对丹麦技术研究所提出的早期徐变模型测试方法做进一步改进, 通过间歇式加卸荷载的特殊加载方式得到早期徐变模型的黏性和弹性系数, 获得拟合相关性系数大幅度提高(达到 0.96)的早期 Burgers 黏弹性模型。

表5 黏弹性系数拟合结果

	黏弹性系数	a	b	c	d	相关性
FAS	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	7.33E+06	8.36E+013	2.12E+06	0.32	0.969
	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	1.25E+06	1.16E+08	3.48E+03	0.48	0.973
	E_2/MPa	1.85E+05	1.42E+08	3.03E+08	0.14	0.822
EA	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	1.32E+06	1.18E+08	1.09E+03	0.38	0.977
	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	4.91E+05	2.49E+09	1.71E+06	0.21	0.997
	E_2/MPa	0.88E+05	2.47E+09	1.46E+09	0.15	0.960
FA	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	0.62E+05	8.66E+09	4.68E+09	0.11	0.987
	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	0.68E+05	1.16E+09	1.77E+07	0.14	0.989
	E_2/MPa	2.42E+05	3.63E+06	7.39E+03	0.38	0.978

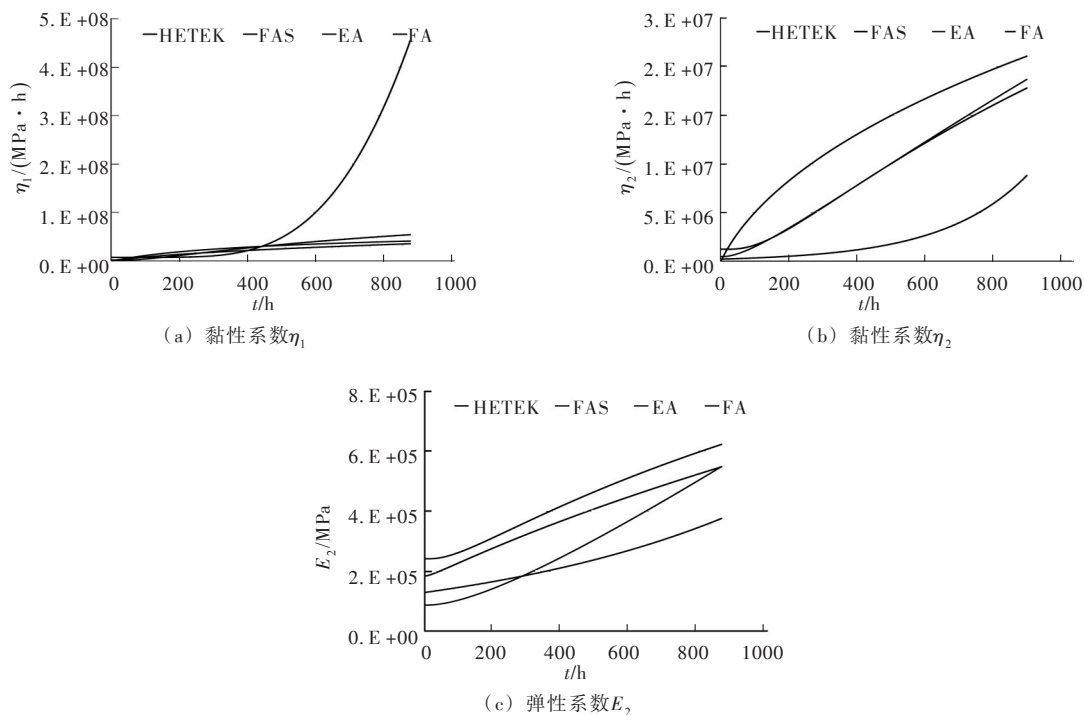


图6 黏弹性系数与等效龄期的关系

参 考 文 献:

- [1] SHIN-ICHI I, ARNON B, KONSTANTIN K . Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concrete[J] . Cement and Concrete Research, 2000, 30(11): 1701-1707 .
- [2] BAZANT Z, BAWEJA S . Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3[J] . Materials and Structures, 1995, 28(6): 38-39 .
- [3] ACI Committee 209 . Prediction of creep, shrinkage and temperature effect in concrete structures(ACI 209R-82) [S] . Detroit: American Concrete Institute, 1982 .
- [4] CEB Bulletin . CEB-FIP Model Code 1990[S] . London: British Standard Institution, 1993 .
- [5] BAZANT Z P, MURPHY W P . Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3[J] . Materials and Structures, 1995, 28(168): 357-365 .
- [6] 叶德艳, 杨杨, 洪钟 . 高性能混凝土早期拉伸徐变的实验研究[J] . 浙江工业大学学报, 2008, 36(3): 285-290 .
- [7] KIRSTEN R, HELLE S, JACOB H H . Control of Early Age Cracking in Concrete: Early Age Properties of Alternative Concrete[R] . Denmark: Danish Road Directorate, 1997 .

- [8] MONISMITH C L . Viscoelastic Behavior of Asphalt Concrete Pavements[C]//11th International Conference on the Structural Design of Asphalt pavements . Ann Arbor:University of Michigan , 1962 .
- [9] DANISH Technological Institute . Test method: Strains from creep and early-age shrinkage[S] . Denmark: Danish Technological Institute , 1996 .
- [10] KIRSTEN R, HELLE S, JACOB H H . Control of Early age Cracking in Concrete: Early age Properties of Alternative Concrete[R] . Denmark: Danish Road Directorate , 1997 .

Study on calculation starting point of autogenous volume deformation based on thermal stress test

ZHU Xiaoliang^{1, 2, 3}, DING Jiantong^{2, 3}, CAI Yuebo^{2, 3}, FU Qionghua¹

(1. Research Center on Hydraulic Structures, Jiangxi Hydraulic Research Institute, Nanchang 330029, China;

2. Material Structure Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Research Center on New Materials in Hydraulic Structures, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Focusing on the point problem involved in the calculation of autogenous volume deformation by the standard test method, this paper takes the micro-expansive abrasion-resistant concrete as the research object and improves the ASTM C1074 method for activation energy tests. In this paper, a more accurate calculation is devised for the activation energy of hydration reaction of cementitious materials, from which the equivalent age of the specimen under the actual temperature conditions can be obtained. Using the characteristics of thermal stress tests and adopting the equivalent age corresponding to the first zero stress as the effective starting point, we establish an improved autogenous volume deformation model based on the one put forward by the Japan Concrete Institute. With the Maximum expansion value of autogenous volume deformation as a cutoff point, the improved model has the unique ability to simulate the deformation before and after the point separately, which provides a good reference for the establishment of a more accurate anti-crack model.

Keywords: autogenous volume deformation; calculation starting point; thermal stress test; equivalent age; abrasion-resistant concrete

(责任编辑: 王冰伟)

(上接第 192 页)

Demonstration and implementation of earth – rockfill dam filling by stage in a soft

LI Xiaoping, MEI Wei, ZHANG Baoqiong, FAN Yong

(Yunnan Water Conservancy and Hydroelectric Survey Design and Research Institute, Kunming 650021, China)

Abstract: The length of an earth-rock dam is up to 1 172 m, of which more than 20 strata make the mechanical index of those layers different. For such complex geological conditions, how to solve the problem of uneven settlement of the dam is the key to the project. In order to solve the technical problems, this paper proves the feasibility of pre-compaction in different periods and sections. The reservoir has been running for three years, and the fact that the observed value of the dam settlement is 3 cm, verifies the correctness of this design and program.

Keywords: basic treatment; uneven settlement treatment; countermeasure

(责任编辑: 韩 昆)