第 49 卷第 2 期
2021 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 2
February，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200341

界面过渡区对混凝土徐变性能的影响

徐泽华[1,2]，赵庆新[1,2]，张津瑞[3]，佟建楠[2]

(1. 燕山大学，亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室，河北 秦皇岛 066004；2. 燕山大学，河北省土木工程绿色建造与智能运维重点实验室，河北 秦皇岛 066004；3. 天津大学，水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津 300072)

摘 要：为分析界面过渡区对混凝土徐变性能的影响，运用 Laplace 变换原理，建立了考虑界面过渡区黏弹性的混凝土徐变模型，将该模型与不考虑界面过渡区的混凝土徐变预测模型进行对比和实验验证。结果表明：考虑界面过渡区的混凝土徐变模型与实验数据吻合较好，该模型能够反映界面过渡区在混凝土徐变中的作用，加载龄期为 365 d 时，界面过渡区使粉煤灰掺量为 0、30%、60%的混凝土徐变度分别提高了 45.7%、25.1%、66.7%。根据该模型，分析了不同加载龄期时 3 种粉煤灰掺量的界面过渡区对混凝土徐变贡献度。掺加粉煤灰的界面过渡区在早期对混凝土徐变贡献度高于不掺的基准组，后期基准组的界面过渡区对混凝土徐变贡献度不断增加，这是由于界面过渡区在荷载作用下不断弱化导致。而掺加粉煤灰的 2 组，随加载龄期的增长，粉煤灰二次水化反应使界面过渡区不断增强，界面过渡区对混凝土徐变贡献度不断降低。通过分析界面过渡区参数对混凝土徐变的影响发现，当界面过渡区弹性常数 0.000 $1<E_{itz}<0.01$，黏性系数 $0.1<\eta_{itz}<10$ 时，可以较好地描述不同界面过渡区的混凝土徐变。

关键词：混凝土；界面过渡区；徐变；Laplace 变换；粉煤灰
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)02–0347–10
网络出版时间：2021–01–06



Influence of Interface Transition Zone on Creep Properties of Concrete

XU Zehua[1,2], *ZHAO Qingxin*[1,2], *ZHANG Jinrui*[3], *TONG Jiannan*[2]

(1. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;
2. Key Laboratory of Green Construction and Intelligent Maintenance for Civil Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;
3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A creep prediction model of concrete considering the viscoelasticity of interface transition zone was proposed based on the Laplace transform principle to analyze the influence of interface transition zone on the creep performance of concrete. The proposed model was compared with a model of concrete creep non-considering interface transition zone and verified by the related experiments. The results show that the data predicted by the concrete creep model considering the interfacial transition zone is consistent with the experimental results. The model can be used to analyze the effect of interface transition zone on the creep properties of concrete besides the experiments. The specific creep of concrete specimens with different fly ash contents (*i.e.*, 0, 30% and 60%) is increased by 45.7%, 25.1% and 66.7%, respectively, when the loading age is 365 d due to the interface transition zone. The contribution of the interface transition zone of concrete specimens with different fly ash contents to the creep of concrete at different loading ages was analyzed *via* the prediction by the model. The interfacial transition zone of concrete with fly ash to the concrete creep contributes greater than that without fly ash. The interface transition zone of the baseline group in the later period has an increasing contribution to the concrete creep due to the continuous weakening of the interface transition zone under the load. For the concrete specimens with fly ash, the interface transition zone continuously enhances and the contribution of the interface transition zone to the creep of concrete continuously reduces with the increase of loading age because of the fly ash secondary hydration.

收稿日期：2020–05–15。　修订日期：2020–06–25。
基金项目：国家自然科学基金(51578477)；河北省重点研发项目(19211505D)。
第一作者：徐泽华(1991—)，男，博士研究生。
通信作者：赵庆新(1973—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–05–15.　**Revised date:** 2020–06–25.
First author: XU Zehua (1991–), male, Doctoral candidate.
E-mail: 805705620@qq.com
Correspondent author: ZHAO Qingxin (1973–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: zhaoqingxin@ysu.edu.cn

The analysis of the influence of interface transition zone parameters on the concrete creep indicates that the concrete creep of different interface transition zones can be well described when the interface transition zone elasticity constant is in the range of $0.000\ 1<E_{itz}<0.01$ and the viscosity coefficient is in the range of $0.1<\eta_{itz}<10$.

Keywords: concrete; interface transition zone; creep; Laplace transform; fly ash

混凝土是一种由粗骨料、砂浆、界面过渡区等组成的多相复合材料，各相材料的力学性质对其性能产生至关重要的影响。徐变是混凝土材料本身固有的时变特性，会导致混凝土结构受力与变形随时间变化，直接影响结构的受力性能和长期变形[1]。徐变模型对工程实践具有重要的指导意义，国内外研究学者基于大量实验数据分别建立了 ACI209R 模型、CEB90 模型、B3 模型、GL2000 模型、FIP (1990)等模型[2]。随着研究的不断深化，Serra[3]和 Zeng 等[4]分别考虑混凝土强度、骨料含量等因素后，对 B3 模型和 FIP (1990)模型进行改良，并与试验进行对比，提高了模型的精度。但是，这些模型都是基于宏观层次大量试验的基础上建立的，均具有一定的局限性。

传统的细观力学模型中，常以广义自洽理论[5]和 Mori-Tanaka 法[6]为基础来预测复合材料的弹性性能，Laplace 变换原理的运用，实现了弹性模型向黏弹性模型的转换。陈松等[7]研究了长期恒定荷载下的高强混凝土砂浆–骨料体系的应力分布情况，并提出了徐变的细观模型。黄晓明等[8]将沥青混凝土视为粗集料颗粒夹杂于沥青砂浆基体内的颗粒增强复合材料，采用等效夹杂和拉普拉斯变换原理，建立了沥青混凝土细观力学模型，并与静态徐变的试验结果进行对比，发现预测值偏低，对预测模型进行修正后，与实验结果较为吻合。上述这些模型在一定程度上能较好的表征混凝土内部结构与宏观性能之间的联系，能够用于定性的分析混凝土的复杂力学行为，但是，这些细观力学模型并没有考虑界面过渡区的影响。

随着研究的不断深入以及相关理论的不断成熟，发现界面过渡区对混凝土的力学性质有很大的影响。李宗利等[9]在考虑骨料级配的基础上，提出了一种预测混凝土弹性模量的多相混合夹杂模型，研究发现，混凝土的弹性模量随着界面过渡区厚度的增大而减小，随界面过渡区力学性能的增大而增大。Sevostianov[10]将界面过渡区看成一个弹性体，探讨了界面过渡区对复合材料整体性能的影响。邓方茜等[11]基于细观力学方法，考虑界面过渡区的影响，建立可用于计算混杂纤维混凝土弹性模量的预测模型，并与实验结果进行验证。Duan 等[12]基于能量等效原理，提出了考虑界面影响的多相复合材料弹性模量理论模型。以上提出的考虑界面过渡区影响的细观模型，大多用来分析界面过渡区对复合材料弹性性能的影响，对于直接涉及界面过渡区对混凝土徐变的影响鲜有研究，考虑到混凝土在徐变中所体现出的黏弹性特性，这些模型并不适用。同时，文献[13]报道了含有黏弹性界面的细观模型更适合表征复合材料的蠕变行为，因此，基于细观力学理论预测混凝土徐变，必须考虑界面过渡区的黏弹性的特性。

基于此，本工作中将界面过渡区看成一个黏弹性体，在 Mori-Tanaka 理论基础上，运用 Laplace 变换原理，建立一个考虑界面过渡区黏弹性的混凝土徐变预测模型，将该预测模型与未考虑界面过渡区的混凝土徐变预测模型进行对比分析，并与实验相验证。在此基础上，探讨了界面过渡区对混凝土徐变的影响。

1 实验

1.1 原材料

采用秦皇岛浅野 P·Ⅱ42.5 硅酸盐水泥，绥中热电厂的一级粉煤灰，水泥熟料和粉煤灰的各项物理性能和化学成分详见表 1。细骨料为细度模数 2.8、表观密度 2 650 kg/m^3 的天然河砂。粗骨料为 5~16 mm 连续级配、表观密度 2 750 kg/m^3 的破碎石灰石。减水剂采用减水率为 21%萘系减水剂。

表 1 水泥和粉煤灰的化学成分与物理特性

Table 1 Chemical compositions and physical properties of cement and fly ash

Material	Mass fraction w/%												Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	SO_3	Loss on ignition	
Cement	63.7	20.3	4.83	3.25	3.28	0.03	1.28	0.12	0.33	0.12	2.67	3.26	350
Fly ash	7.5	49.1	32.50	4.78	0.80	0.51	1.88	0.08	1.49	0.23	0.58	1.60	390

1.2 制备

依据《普通混凝土设计规程》，混凝土中胶凝材料总量选定为 460 kg/m^3，粉煤灰掺量(占胶凝材料质量的百分率)选定为 0%，30%，60%，水胶比均为 0.37，砂率为 0.38，调整减水剂用量使混凝土的坍落度为 90~110 mm。基于混凝土的配合比，相应的去掉粗骨料，得到砂浆的配合比，并通过调整减水剂使工作性适宜，为了方便与混凝土配合比进行比较，采用以胶凝材料为“1”，各材料与之质量比进行表述。测试混凝土强度、干缩和徐变的试件尺寸均为 40 mm×40 mm×160 mm，并通过试验验证了其替代国家规范中 100 mm×100 mm×400 mm 混凝土徐变试件的可行性[14]。成型后标准养护 28 d，测得混凝土及砂浆的棱柱体抗压强度，见表 2。

表 2　水泥基材料的配合比、坍落度和棱状体 28 d 强度

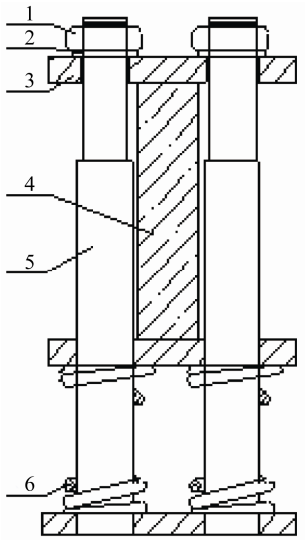
Table 2　Mix proportion, slump and prismatic 28 d strength of cement-based material

Specimen type	Mix proportion/(kg·m^{-3})					W/C ratio	Slump/mm	f_c/MPa
	Cement	Fly ash	Sand	Stone	Superplasticizer			
CF0	1.0	0.0	1.49	2.42	2.30	0.37	100	56.3
CF30	0.7	0.3	1.49	2.42	2.07	0.37	105	54.4
CF60	0.4	0.6	1.49	2.42	1.61	0.37	90	37.5
MF0	1.0	0.0	1.49		1.84	0.37		47.5
MF30	0.7	0.3	1.49		1.61	0.37		50.6
MF60	0.4	0.6	1.49		1.15	0.37		33.8

W/C is water to cement.

1.3 方法

采用弹簧式四杆徐变仪进行加载，实验装置设计图，如图 1 所示。



1—Hex nut(type1) M24; 2—Standard spring washer; 3—Support plate ; 4—Specimen; 5—Column; 6—Spring.

图 1　四杆式弹簧压缩徐变实验装置设计图[15]

Fig. 1　Design diagram of four-bar spring compression creep experimental device[15]

试件在标准养护28 d后，需先放入温度(20±2) ℃、相对湿度(60±5)%的恒温恒湿徐变室内静置 24 h，使试件与外部温湿平衡后，对试件表面进行打磨处理，粘贴应变片以硅胶密封，处理后的试件继续放入徐变室中保存 24 h 至加载，应用静态电阻应变仪与试件粘贴的应变片配合，在加载后 1、3、7、14、28、45、60、90、120、150、180、270、365 d 时测试砂浆和混凝土的徐变度。砂浆和混凝土干缩试件在标准养护 28 d 之后与徐变试件一同移入徐变室，同样进行上述处理，处理后的试件继续放入徐变室保存 24 h，应用静态电阻应变仪测读试件应变，在测定徐变试件变形的同时测定同条件放置的干缩试件变形值。

2 考虑界面过渡区黏弹性的混凝土徐变预测模型

混凝土是一种粗骨料颗粒分散于砂浆介质中的颗粒增强复合材料。基于等效夹杂理论，运用 Laplace 变换原理，建立了考虑界面过渡区黏弹性的混凝土徐变预测模型，如图 2 所示。

在该模型中，粗骨料为弹性体，力学行为表现出弹性性能[7]；砂浆表现出黏弹性性能，其力学行为需要用 Burgers 模型来描述[16]；砂浆与粗骨料之间的界面过渡区在混凝土徐变中表现出黏弹性性能，其力学行为应用 Kelvin-Voigt 模型[17]来表征。

2.1 砂浆的黏弹性本构方程

对于砂浆而言，采用经典的 Burgers 四参数模型来表征其流变特性，如图 3 所示。

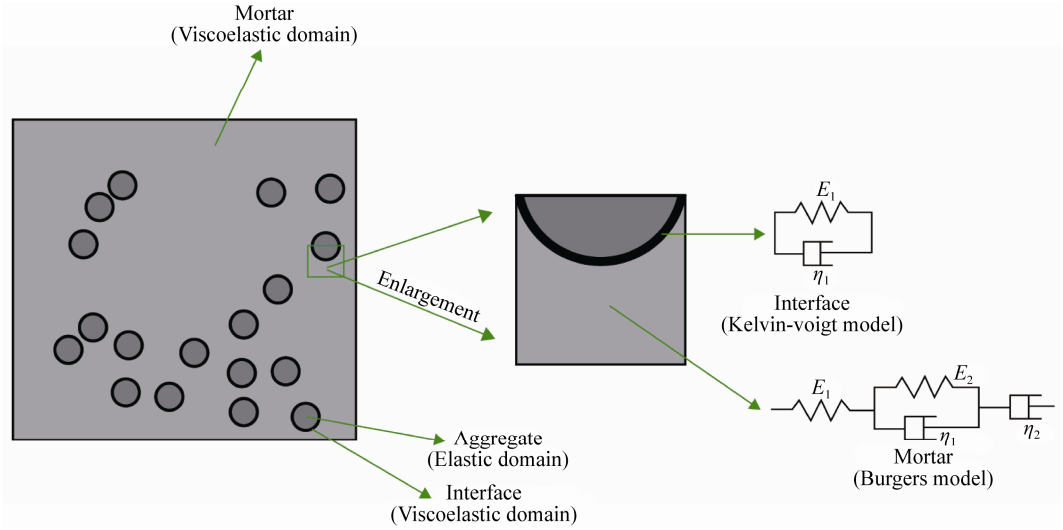


图 2 混凝土细观模型[17]

Fig. 2 Micromechanical model for concrete[17]

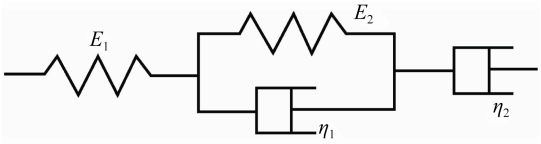


图 3 砂浆四参数 Burgers 模型[16]

Fig. 3 Four-parameter Burgers model for motar[16]

该模型是由一个 Kelvin 体和一个 Maxwell 体串联而成的，其本构方程为：

$$\sigma+p_1\dot{\sigma}+p_2\ddot{\sigma}=q_1\dot{\varepsilon}+q_2\ddot{\varepsilon} \tag{1}$$

$$p_1=\frac{\eta_2}{E_1}+\frac{\eta_1+\eta_2}{E_2},\ p_2=\frac{\eta_1\eta_2}{E_1E_2},\quad q_1=\eta_2,q_2=\frac{\eta_1\eta_2}{E_2} \tag{2}$$

式中：σ 为关于 t 的应力；$\dot{\sigma}$ 和 $\ddot{\sigma}$ 分别为应力速率和应力速率关于 t 的导数；$\dot{\varepsilon}$ 和 $\ddot{\varepsilon}$ 分别为应力速率和应力速率关于 t 的导数；E_1、E_2 和 η_1、η_2 分别为 Kelvin 体和 Maxwell 体的弹性常数和黏性系数。

对于研究混凝土的徐变，需要用 Laplace 变换原理实现弹性模型向黏弹性模型的转换，函数 $f(t)$ 的 Laplace 变换的一般形式可表示为：

$$f(s)=\int_0^{\infty}f(t)e^{-st}\mathrm{d}t \tag{3}$$

在 Laplace 变换域内，黏弹性基体的本构方程可表示为：

$$\bar{P}S_{ij}=\bar{Q}e_{ij} \tag{4}$$

式中：$\bar{P}$、$\bar{Q}$ 为关于时间的微分算子；S_{ij}、e_{ij} 分别为应力偏差分量和应变张量。

通过对 Burgers 模型进行 Laplace 变换，得到 Burgers 模型的算子 $\bar{P}(s)$、$\bar{Q}(s)$ 分别为：

$$\bar{P}(s)=1+\left(\frac{\eta_2}{E_1}+\frac{\eta_1+\eta_2}{E_2}\right)s+\frac{\eta_1+\eta_2}{E_1E_2}s^2 \tag{5}$$

$$\bar{Q}(s)=\eta_2 s+\frac{\eta_1\eta_2}{E_2}s^2 \tag{6}$$

利用式(5)和式(6)，得到砂浆的有效剪切模量：

$$\tilde{G}_m(s)=\frac{E_1\eta_2\left(E_2s+\eta_1s^2\right)}{2E_1E_2+2\left[E_2\eta_2+\left(E_1+\eta_2\right)\right]s+2\eta_1\eta_2s^2} \tag{7}$$

s 表示 Laplace 参数。

2.2 Laplace 变换域内的骨料有效模量

将界面过渡区看成一个黏弹性体，采用 Kelvin–Voigt 模型来描述，考虑界面的弹性常数 E_{itz} 和黏性系数 η_{itz}[17]，如图 4 所示。

Kelvin-Voigt 模型的本构方程为：

$$\sigma=E_{itz}\varepsilon+\eta_{itz}\dot{\varepsilon} \tag{8}$$

式中：E_{itz} 和 η_{itz} 分别为 Kelvin–Voigt 模型的弹性常数和黏性系数；ε 为关于 t 的应变。

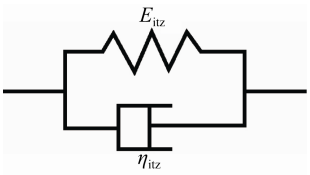


图 4 界面过渡区 Kelvin-Voigt 模型[17]

Fig. 4 Kelvin-Voigt model for interface transition zone[17]

假定骨料为弹性体，其本构方程为：

$$\sigma=E\varepsilon \tag{9}$$

式中：E 为弹性模量。

基于等效夹杂理论，将界面过渡区的影响计入骨料中。假定骨料为圆形，在 Laplace 变换域中，骨料边界纵向布置每单位长度界面常数 $E_{itz}+\eta_{itz}s$，并施加径向应力 $\sigma_r=1$，在 $r=a$ 处的径向位移可以表示为：

$$\mu_r=\frac{1-\nu_g^2}{E_g}\left(1-\frac{\nu_g}{1-\nu_g}\right)a+\frac{1}{E_{itz}+\eta_{itz}s} \tag{10}$$

式中：E_g 为骨料的弹性模量；ν_g 为骨料的 Poisson 比。

在 Laplace 变换域中，假定界面过渡区厚度为 r_{itz}，等效夹杂弹性模量和等效夹杂 Poisson 比在 $r=(a+r_{itz})$处的径向位移表示为：

$$\tilde{\mu}_r=\frac{1-\tilde{\nu}_g^2}{\tilde{E}_g}\left(1-\frac{\tilde{\nu}_g}{1-\tilde{\nu}_g}\right)\left(a+r_{itz}\right) \tag{11}$$

式中：$\tilde{E}_g$ 为骨料的等效弹性模量；$\tilde{\nu}_g$ 为骨料的等效 Poisson 比。

当 $\mu_r=\tilde{\mu}_r$ 时，可以得到：

$$\begin{aligned}&\frac{1-\nu_g^2}{E_g}\left(1-\frac{\nu_g}{1-\nu_g}\right)a+\frac{1}{E_{itz}+\eta_{itz}s}=\\&\frac{1-\tilde{\nu}_g^2}{\tilde{E}_g}\left(1-\frac{\tilde{\nu}_g}{1-\tilde{\nu}_g}\right)\left(a+r_{itz}\right)\end{aligned} \tag{12}$$

当环向体力 $f_\varphi=-4r$，$r=a$ 时，利用式(13)可以求得剪切应力 $\sigma_{r\theta}=a^2$。

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_r}{\partial\varphi}+\frac{\partial\sigma_{r\theta}}{\partial r}+\frac{2\sigma_{r\theta}}{r}+f_\varphi=0 \tag{13}$$

在 Laplace 变换域中，骨料边界横向布置每单位长度界面常数 $E_{itz}+\eta_{itz}s$，并施加剪切应力与环向体力平衡，可以得到环向位移等式为：

$$\frac{a^3}{2G_g}+\frac{\left(a+r_{itz}\right)^2}{E_{itz}+\eta_{itz}s}=\frac{\left(a+r_{itz}\right)^3}{2\overline{G}_g} \tag{14}$$

式中：G_g 为骨料剪切模量；$\overline{G}_g$ 为骨料等效剪切模量。

根据式(12)和式(14)以及弹性常数之间的关系，求得在 Laplace 变换域中骨料的有效体积模量和有效剪切模量：

$$\tilde{G}_g(s)=\frac{b^3G_g\left(E_{itz}+\eta_{itz}s\right)}{a^3\left(E_{itz}+\eta_{itz}s\right)+2b^2G_g} \tag{15}$$

$$\tilde{K}_g(s)=\frac{[a\left(E_{itz}+\eta_{itz}s\right)\left(3a^2-b^2+2b^2\nu_g\right)+4b^2G_g]bG_g\left(E_{itz}+\eta_{itz}s\right)}{3\left[a^3\left(E_{itz}+\eta_{itz}s\right)+2b^2G_g\right]\left[a\left(E_{itz}+\eta_{itz}s\right)\left(1-2\nu_g\right)+2G_g\right]} \tag{16}$$

式中：$\tilde{G}_g(s)$ 为骨料在 Laplace 变换域中的有效剪切模量；$\tilde{K}_g(s)$ 为骨料在 Laplace 变换域中的有效体积模量；$b=a+r_{itz}$。

值得注意的是，当 $E_{itz}\to\infty$，$\eta_{itz}\to\infty$以及 $r_{itz}=0$ 时，可以表示为不考虑黏弹性界面过渡区的预测模型。

2.3　Laplace 变换域内的混凝土有效模量

利用 Mori-Tanaka 法[6]，有效剪切模量及体积模量的预测公式为：

$$G_c=G_m+\frac{fG_m\left(G_g-G_m\right)}{G_m+3\delta\left(1-f\right)\left(G_g-G_m\right)} \tag{17}$$

$$K_c=K_m+\frac{fK_m\left(K_g-K_m\right)}{3K_m+3\gamma\left(1-f\right)\left(K_g-K_m\right)} \tag{18}$$

$$\gamma=\frac{K_m}{3K_m+4G_m},\delta=\frac{3\left(K_m+2G_m\right)}{5\left(3K_m+4G_m\right)} \tag{19}$$

式中：G_m 和 K_m 分别表示砂浆的剪切模量和体积模量；f 为等效夹杂骨料的体积分数，即骨料体积分数和界面过渡区体积分数之和。

由于砂浆在黏弹性分析中，可以假定材料在膨胀时表现为弹性，因此，砂浆的体积模量是恒定的，而剪切模量是与时间有关的[16]。利用式(17)~式(19)，可以得到混凝土有效剪切模量和体积模量：

$$\begin{aligned}\tilde{G}_c(s)=&\tilde{G}_m(s)+\\&\frac{f\tilde{G}_m(s)\left(\tilde{G}_g(s)-\tilde{G}_m(s)\right)}{\tilde{G}_m(s)+3\delta(s)(1-f)\left(\tilde{G}_g(s)-\tilde{G}_m(s)\right)}\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}\tilde{K}_c(s)=&\\&K_m+\frac{fK_m\left(\tilde{K}_g(s)-K_m\right)}{3K_m+3\tilde{\gamma}(s)(1-f)\left(\tilde{K}_g(s)-K_m\right)}\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}&\tilde{\gamma}(s)=\frac{K_m}{3K_m+4\tilde{G}_m(s)},\\&\tilde{\delta}(s)=\frac{3\left(K_m+2\tilde{G}_m(s)\right)}{5\left(3K_m+4\tilde{G}_m(s)\right)}\end{aligned} \tag{22}$$

式中：$\tilde{G}_c(s)$ 为混凝土在 Laplace 变换域中的有效剪切模量；$\tilde{K}_c(s)$ 为混凝土在 Laplace 变换域中的有效体积模量。

进而可以得到，在 Laplace 变换域中混凝土的有效模量：

$$\tilde{E}(s)=\frac{9\tilde{K}_c(s)\tilde{G}_c(s)}{3\tilde{K}_c(s)+\tilde{G}_c(s)} \tag{23}$$

2.4　考虑界面过渡区黏弹性的混凝土徐变柔量

徐变描述的是在恒定应力作用下随时间缓慢变形的趋势，一般用徐变度来表征。徐变柔量函数是指在单位应力下黏弹性材料产生的徐变响应，表示为：

$$J(t)=\frac{\varepsilon(t)}{\bar{\sigma}} \tag{24}$$

式中：$J(t)$徐变柔量函数；$\bar{\sigma}$ 为单位压缩应力。

通过将式(23)进行 Laplace 逆变换，可以求得：

$$\varepsilon(t)=L^{-1}\left[\frac{\bar{\sigma}3\tilde{K}_{\mathrm{c}}(s)+\bar{\sigma}\tilde{G}_{\mathrm{c}}(s)}{s9\tilde{K}_{\mathrm{c}}(s)\tilde{G}_{\mathrm{c}}(s)}\right] \tag{25}$$

将式(25)代入式(24)进而可以得到：

$$J(t)=L^{-1}\left[\frac{3\tilde{K}_{\mathrm{c}}(s)+\tilde{G}_{\mathrm{c}}(s)}{s9\tilde{K}_{\mathrm{c}}(s)\tilde{G}_{\mathrm{c}}(s)}\right] \tag{26}$$

通过式(26)可以看出，在 Laplace 变换域中，确定混凝土的有效体积模量和有效剪切模量即可求得 $J(t)$。为确定混凝土在 Laplace 变换域中有效体积模量和有效剪切模量，需要预先确定砂浆和骨料的弹性模量以及 Poisson 比，骨料的体积分数，界面过渡区厚度。

3 讨论

实验测得 MF0、MF30 和 MF60 弹性模量分别为 26.27 GPa、23.80、20.38 GPa；Poisson 比均为 0.23；骨料粒径为 5~16 mm，取 12.5 mm，其体积分数为 0.41，弹性模量为 74.50 GPa，Poisson 比为 0.3；由相关文献[18]可知，同水胶比混凝土的界面过渡区厚度变化不大，界面过渡区厚度一般在 10~50 μm，取平均值为 30 μm，利用文献[19]计算界面过渡区体积分数。通过对图 5 的实验数据进行拟合，分别获得 MF0、MF30 和 MF60 的拟合值和相关系数(见表 3)发现，MF0、MF30 和 MF60 相关系数分别为 0.995、0.994、0.998，拟合程度较高。进而可以获得 3 种砂浆的 Burgers 模型参数(见表 4)，这些参数将被用于预测 3 种混凝土的徐变。

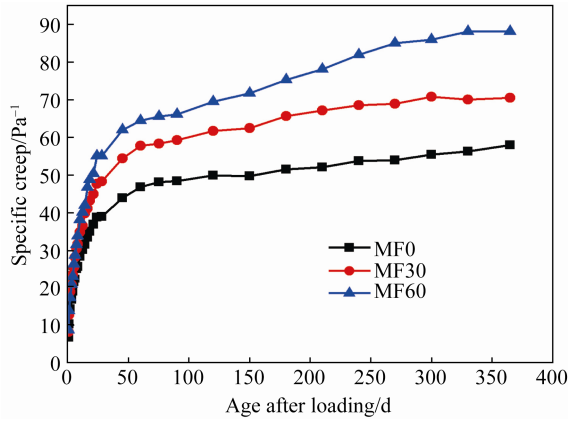


图 5 不同粉煤灰掺量下砂浆的徐变度

Fig. 5 Specific creep of mortar with different proportions of fly ash

表 3 MF0、MF30、MF60 的实验值、拟合值和相关系数

Table 3 Test value, fitting value and correlation coefficient of MF0, MF30, MF60

Ages after loading/d	Test value of MF0/Pa^{-1}	Fitting value of MF0/Pa^{-1}	Correlation coefficient	Test value of MF30/Pa^{-1}	Fitting value of MF30/Pa^{-1}	Correlation coefficient	Test value of MF60/Pa^{-1}	Fitting value of MF60/Pa^{-1}	Correlation coefficient
1	10.23	11.14	0.995	12.75	14.09	0.994	13.80	13.05	0.998
3	16.77	15.88	0.995	20.71	19.75	0.994	20.82	19.99	0.998
7	25.21	23.48	0.995	30.58	28.89	0.994	31.57	31.05	0.998
14	31.62	32.43	0.995	39.88	39.80	0.994	42.05	43.91	0.998
28	39.06	41.11	0.995	48.43	50.64	0.994	55.14	56.23	0.998
45	44.03	44.89	0.995	54.42	55.55	0.994	61.98	61.79	0.998
60	46.91	46.27	0.995	57.84	57.40	0.994	64.48	64.08	0.998
90	48.47	47.73	0.995	59.28	59.39	0.994	66.18	67.10	0.998
120	49.94	48.89	0.995	61.78	60.94	0.994	69.51	69.75	0.998
150	49.79	50.01	0.995	62.46	62.44	0.994	71.71	72.37	0.998
180	51.53	51.13	0.995	65.66	65.43	0.994	75.30	74.99	0.998
270	54.02	54.49	0.995	68.92	68.43	0.994	85.05	82.84	0.998
365	57.97	58.03	0.995	70.52	73.17	0.994	88.13	91.12	0.998

表 4 砂浆材料参数

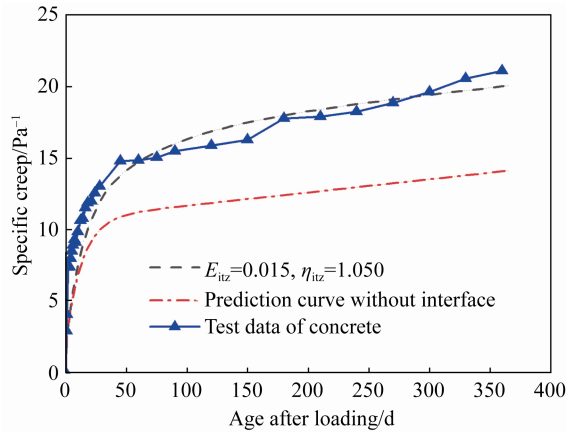
Table 4 Materia parameters of mortar

Type	E_1/GPa	E_2/GPa	η_1/(GPa·d)	η_2/(GPa·d)
MF0	118	28	26 811	369
MF30	90	20	20 050	310
MF60	109	20	11 470	250

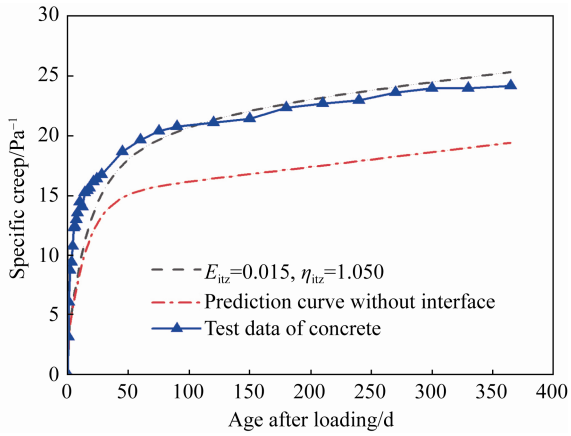
3.1 理论结果与实验结果对比分析

由于界面过渡区的 E_{itz} 和 η_{itz} 的值无法进行实验测量，可以将理论结果与实验数据进行匹配来确定，预测结果与实验数据如图 6、图 7 所示。

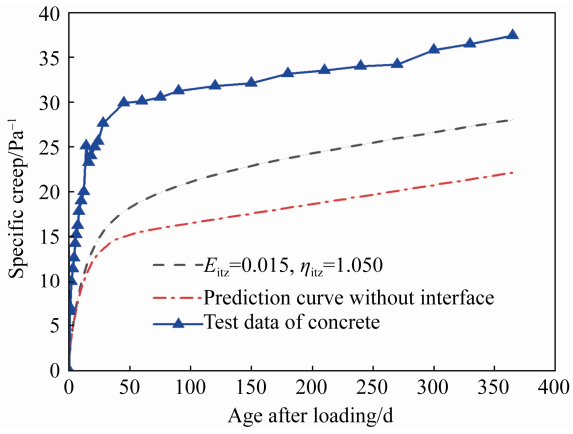
从图 6、图 7 可以看出，当不考虑界面过渡区(即



(a) CF0



(b) CF30

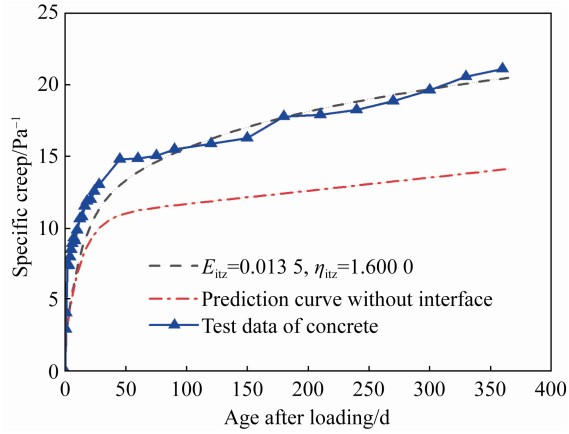


(c) CF60

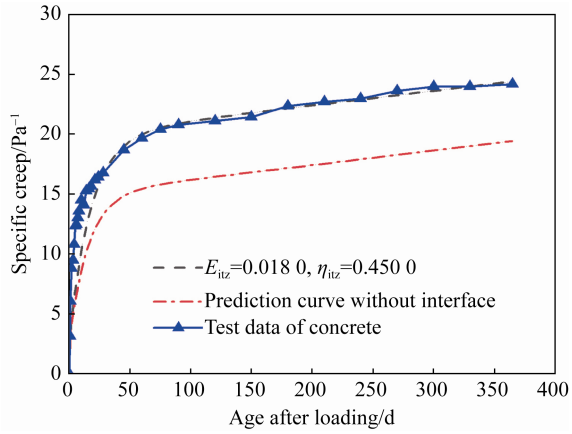
图 6　统一界面过渡区参数下的混凝土徐变预测结果

Fig. 6　Predicted result ofconcrete specific creep of interface transition zone with same parameters

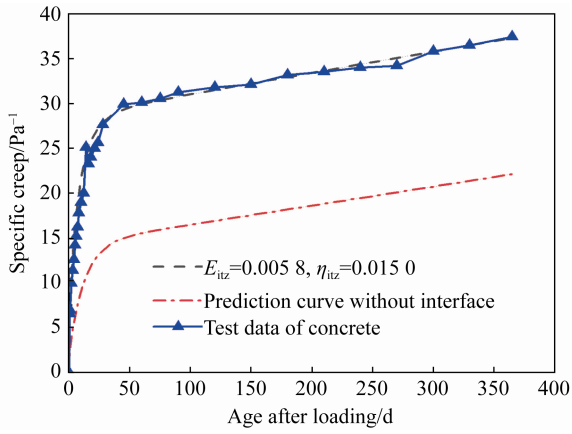
$E_{itz}\to\infty$，$\eta_{itz}\to\infty$以及 r_{itz}=0)时，混凝土的徐变值明显小于实验数据，但当骨料逐渐从水泥砂浆脱粘时，即界面过渡区参数逐渐减小，混凝土的徐变值相应增加。从图 6 可以看出，当弹性常数和黏性系数分别为 0.015 和 1.05 时，3 种粉煤灰掺量的混凝土徐变值的预测结果呈现出与实验数据相似的上升趋势，但同一组参数无法实现较准确预测 3 个配合比的徐变，即 CF0 和 CF30 预测结果较好时，CF60 的预测结果与实验数据相差很大。在图 7 可以看出，CF0，CF30，CF60 的界面过渡区参数分别设置为 0.013 5、1.6，0.018 0、0.45，0.005 8、0.015 的混凝土徐变预测结果与实验数据均较为吻合，特别是



(a) CF0



(b) CF30



(c) CF60

图 7　不同界面过渡区参数下的混凝土徐变预测结果

Fig. 7　Predicted result of concrete specific creep of interface transition zone with different parameters

CF60 的预测精度得到了明显改善。对比不同界面过渡区参数发现，CF60 的界面过渡区的参数值明显低于 CF0 和 CF30 的界面过渡区参数值，这是由于粉煤灰掺量为 60%时，混凝土界面过渡区结合较差，从而导致界面过渡区的参数值较低。综上，不考虑界面过渡区的混凝土徐变模型无法准确预测多组分混凝土的徐变，合理设定界面过渡区参数的徐变预测模型适应性较好。

3.2 黏弹性界面过渡区对徐变的影响程度

界面过渡区参数、考虑界面过渡区与不考虑界面过渡区的混凝土 365 d 徐变度预测值如表 5 所示。由表 5 可以看出：粉煤灰掺量分别为 0、30%、60%时，考虑界面过渡区的徐变度预测值较不考虑界面过渡区的混凝土徐变度预测值分别提高了 45.7%、25.1%、66.7%，这说明黏弹性界面过渡区的存在，在一定程度上，增加了混凝土的徐变。当粉煤灰掺量为 30%时，考虑界面过渡区的混凝土徐变度预测值较不考虑界面过渡区的混凝土徐变度预测值增长幅度最低，这可能是由于粉煤灰的加入，发生了二次水化反应，界面过渡区变得较为紧密，从而界面过渡区使混凝土的徐变增长幅度最低。在粉煤灰掺量 60%时，由于高掺量粉煤灰的加入，水泥用量减少，水化产物数量不足，粉煤灰二次水化不充分，界面过渡区变得较为疏松，使得混凝土徐变增幅最大。

表 5 加载 365 d 混凝土徐变度预测值

Table 5 Predicted value of specific creep of concrete after loading 365 d

Content of fly ash/%	Concrete creep		Interface transition zone creep/Pa^{-1}	E_{itz}	η_{itz}
	With interface/Pa^{-1}	Without interface /Pa^{-1}			
0	20.7	14.2	6.5	0.013 5	1.600
30	24.4	19.5	4.9	0.018 0	0.450
60	37.5	22.5	15.0	0.005 8	0.015

3.3 黏弹性界面过渡区对混凝土徐变贡献度的时变特性

为分析黏弹性界面过渡区对混凝土徐变贡献度的时变特性，利用式(27)，计算加载龄期为 3、7、14、28、45、60、90、120、180、365 d 黏弹性界面过渡区徐变度占混凝土徐变度的百分比，如图 8 所示。

$$P=\frac{C_1(t)-C_0(t)}{C_1(t)}\times 100\% \tag{27}$$

式中：$C_1(t)$为加载龄期为 t 考虑界面过渡区混凝土徐变度预测值；$C_0(t)$为加载龄期为 t 未考虑界面过渡区混凝土徐变度预测值。

由图 8 可知，CF0 的黏弹性界面过渡区徐变度占混凝土徐变度的百分比随龄期的增长而增大。这是由于界面过渡区在荷载作用下产生了滑移[20]，但是，由于荷载较小，到加载龄期 180 d 之后逐渐趋于稳定。CF30 在加载龄期 90 d 之前，黏弹性界面过渡区徐变度占混凝土徐变度的百分比随加载龄期的增大而增大，且均高于 CF0 的百分比，到加载龄期 90 d 之后，黏弹性界面过渡区徐变度占混凝土徐变度的百分比逐渐减少。这是由于粉煤灰的加入，早期水化作用不明显，界面结合能力较差，导致了加载早期界面过渡区对混凝土徐变的贡献度高于 CF0 的界面过渡区对混凝土徐变的贡献度，而在加载 90 d 之后，粉煤灰由于二次水化作用，界面过渡区结构变得紧密，从而使界面过渡区对混凝土徐变的贡献度逐渐减少。CF60 的黏弹性界面过渡区徐变度占混凝土徐变度的百分比随时间的增大而减小，且均高于 CF0 与 CF30 的黏弹性界面过渡区徐变度占混凝土徐变度的百分比。这是由于高掺量粉煤灰水泥石基体微观结构缺陷较多[21]，界面过渡区结构会更加疏松，加载早期界面过渡区对混凝土徐变的贡献度最大，而随着加载龄期的不断增大，粉煤灰二次水化的作用，界面过渡区的疏松结构逐渐被填充加强，从而使界面过渡区对混凝土徐变的贡献度不断降低。综上，建立的预测模型较好的模拟了界面过渡区的发展过程对混凝土徐变的影响，这与界面过渡区对混凝土性能影响吻合较好。

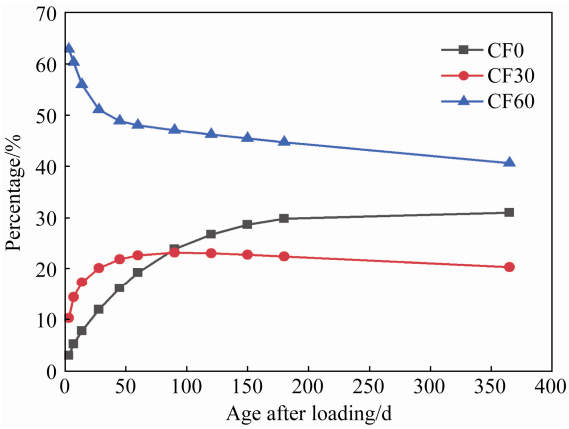


图 8 黏弹性界面过渡区徐变度占混凝土徐变度的百分比

Fig. 8 Specific creep of viscoelastic interface transition zone as a percentage of concrete specific creep

3.4 界面过渡区参数对混凝土徐变的影响

利用建立的考虑界面过渡区混凝土徐变模型，

分析了加载龄期在 365 d 时，界面过渡区黏性系数分别在 0.001、0.01、0.1、1、10 情况下，界面过渡区弹性常数对混凝土徐变的影响，如图 9 所示。由图 9 可见，当界面过渡区黏性系数一定时，混凝土徐变的随着界面过渡区弹性常数的增大而降低，界面过渡区弹性常数超过 0.1 时，混凝土的徐变逐渐趋于稳定；当界面过渡区弹性常数一定且不超过 0.1 时，混凝土的徐变随着界面过渡区黏性系数的增大而减少，界面过渡区弹性常数超过 0.1 时，混凝土的徐变不再随界面过渡区黏性系数的增大而发生变化，逐渐趋于稳定。这说明，随着界面过渡区的弹性常数或黏性系数增大，混凝土抗徐变的能力增强，当弹性常数或黏性系数足够大时，混凝土徐变值最终趋向定值。此外，还可以看出，当界面过渡区弹性常数 0.000 1<E_{itz}<0.01，界面过渡区黏性系数 0.1<η_{itz}<10 时，界面过渡区参数对混凝土徐变影响显著，因此，将界面过渡区弹性常数设定在 0.000 1~0.01、界面过渡区黏性系数设定在 0.1~10 范围内，可以较好的描述不同界面过渡区的混凝土徐变。

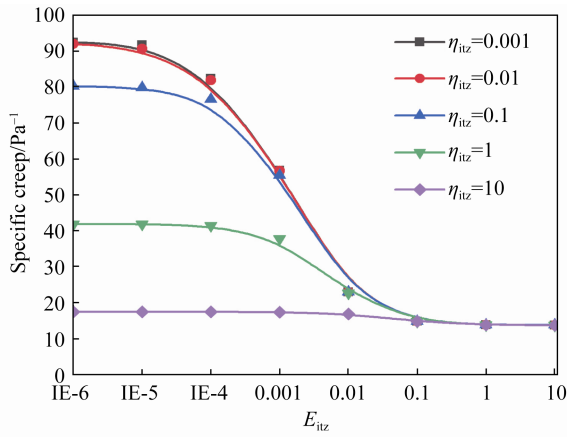


图 9　E_{itz} 对混凝土徐变度的影响

Fig. 9　Effects of E_{itz} on specific creep

4　结论

1) 粉煤灰掺量分别以 0，30%，60%等质量替代水泥时，界面过渡区的弹性常数与黏性系数分别取 0.013 5、1.6，0.018 0、0.45，0.005 8、0.015 可以很好的模拟混凝土的徐变行为，并与实验数据吻合较好。

2) 通过分析界面过渡区对混凝土徐变的影响表明，界面过渡区的存在，增加了混凝土的徐变，在加载龄期为 365 d 时，界面过渡区使 CF0、CF30、CF60 的徐变分别提高了 45.7%、25.1%、66.7%。

3) 不掺加粉煤灰的基准混凝土界面过渡区对徐变的贡献度随加载龄期增大而增大，而由于粉煤灰的二次水化，粉煤灰混凝土界面过渡区对徐变的贡献度随加载龄期而减小，这与粉煤灰混凝土界面过渡区演变的微观机理吻合，说明本徐变模型的合理性与较强的适应性。

4) 当界面过渡区弹性常数 0.000 1<E_{itz}<0.01，界面过渡区黏性系数 0.1<η_{itz}<10 时，界面过渡区参数对混凝土徐变影响显著，因此，将界面过渡区弹性常数设定在 0.000 1~0.01、界面过渡区黏性系数设定在 0.1~10 范围内，可以较好的描述不同界面过渡区的混凝土徐变。

参考文献:

[1] 魏亚, 梁思明, 高翔. 应变率对硬化水泥净浆微观力学性能及徐变行为的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1605–1612.
WEI Ya, LIANG Siming, GAO Xiang. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(11): 1605–1612.

[2] 韩伟威, 吕毅刚. 混凝土收缩徐变预测模型试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3515–3522.
HAN Weiwei, LV Yigang. J Cent South Univ: Nat Sci Ed (in Chinese), 2016, 47(10): 3515–3522.

[3] SERRA C, BATISTA A L, AZEVEDO N M. Dam and wet-screened concrete creep in compression: in situ experimental results and creep strains prediction using model B3 and composite models[J]. Mater Struct, 2016, 49(11):4831–4851.

[4] ZENG Q X, HAN D J. A simplified concrete creep and shrinkage ceb-fip90 model in long-span bridge design[J]. Appl Mech Mater, 2014, 638–640: 1059–1062.

[5] XU W X, CHEN H S, CHEN W, et al. Prediction of transport behaviors of particulate composites considering microstructures of soft interfacial layers around llip soidal aggregate particles[J]. Soft Matter, 2014(10): 627–638.

[6] ALASVAND Z K, GOLESTANIAN H. Determination of nonlinear behavior of multi-walled carbon nanotube reinforced polymer: Experimental, numerical, and micromechanical[J]. Mater Des, 2016, 109: 314–323.

[7] CHEN S, LU J. Mesoscopic numerical simulation of the mechanical properties of concrete creep[J]. J Vibroeng, 2013, 15(4): 1634–1641.

[8] 黄晓明, 李汉光, 张裕卿. 考虑粗集料和空隙的沥青混合料粘弹性细观力学分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(7): 31–36.
HUANG Xiaoming, LI Hanguang, ZHANG Yuqing. J South China Univ Techno: Nat Sci Ed (in Chinese), 2009, 37(7): 31–36.

[9] 李宗利, 邓朝莉, 张国辉. 考虑骨料级配的混凝土有效弹性模量预测模型[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 575–581.
LI Zongli, DENG Chaoli, ZHANG Guohui. J Hydraul Eng (in Chinese), 2016, 47(4): 575–581.

[10] SEVOSTIANOV I, KACHANOV M. Effect of interphase layers on the overall elastic and conductive properties of matrix composites. applications to nanosize inclusion[J]. Int J Solids Struct, 2007, 44(3):

1304–1315.

[11] 邓文茜, 徐礼华, 池寅, 等. 基于均匀化理论的混杂纤维混凝土有效弹性模量计算[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 151–170.
DENG Wenqian, XU Lihua, CHI Yin, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(2): 151–170.

[12] DUAN H, YI X, HUANG Z, et al. A unified scheme for prediction of effective moduli of multiphase composite with interface effect[J]. Mech Mater, 2007, 39(1): 81–93.

[13] PAPANICOLAOU G C, XEPAPADAKI A G, DRAKOPOULO E D, et al. Interphasial viscoelastic behavior of CNT reinforced nanocomposites studied by means of the concept of the hybrid viscoelastic interphase: Part II—Application and scaling laws[J]. J Appl Polym Sci, 2012, 124: 1578–1588.

[14] 李杨. 基于强度和弹模的粉煤灰混凝土徐变测试[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
LI Yang. Creep Test of Fly Ash Concrete Based on Strength and Elastic Modulus (dissertation, in chinese). Qinghuangdao: Yanshan University, 2013.

[15] 赵庆新, 佟建楠, 孔桦, 等. 水泥净浆–砂浆–混泥土的徐变相关性[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(1): 66–71.
ZHAO Qingxin, TONG Jiannan, KONG Ye, et al. J Yanshan Univ (in Chinese), 2014, 38(1): 66–71.

[16] GAO Y M. Interface effects on the creep characteristics of asphalt concrete[J]. Constr Build Mater, 2015, 96: 591–598.

[17] ZHU X Y, WANG X, YU Y. Micromechanical creep models for asphalt-based multi-phase particle-reinforced composites with viscoelastic imperfect interface[J]. Int J Eng Sci, 2014, 76: 34–46.

[18] CWIRZEN A, PENTTALA V. Aggregate-cement paste transitionzone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(4): 671–679.

[19] 陈惠苏, 孙伟, STROEVEN P. 水泥基复合材料界面过渡区体积分数的定量计算[J]. 复合材料学报, 2006(2): 133–142.
CHEN Huisu, SUN Wei, STROEVEN P. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2006(2): 133–142.

[20] 于俊超, 赵庆新. 钢纤维对混凝土徐变性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8): 1087–1093.
YU Junchao, ZHAO Qingxin. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(8): 1087–1093.

[21] 赵庆新, 孙伟, 郑克仁, 等. 粉煤灰掺量对高性能混凝土徐变性能的影响及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(4): 446–451.
ZHAO Qingxin, SUN Wei, ZHENG Keren, et al. J Chin Ceram Soc, 2006, 34(4): 446–451.