文章编号:1671-1637(2026)06-0115-08

碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的徐变性能预测

黄敦文*[1,2],邹有宝[1],窦淑豪[1],夏立鹏[1],贺 君[1,2],彭 晖[1,2]
(1. 长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室,湖南 长沙 410114)

摘 要:为探讨碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的徐变预测方法,开展了不同应力强度比、强度、加载龄期的碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的徐变试验,探讨了碱激发混凝土的基本徐变和干燥徐变与水泥混凝土的相似性与差异性;结合既有徐变数据,提出了基于欧洲混凝土协会(CEB-FIP)的徐变模式的修正预测方法。结果表明:碱激发混凝土的线性徐变临界点在应力强度比为0.6~0.8;碱激发混凝土的基本徐变大于同等强度的水泥混凝土,而干燥徐变在加载前期发展较慢;碱激发混凝土的徐变系数随强度、加载龄期的变化规律与水泥混凝土类似,CEB-FIP徐变模式中双曲幂函数依然可用于碱激发混凝土的徐变预测;参数分析表明,影响名义徐变系数的内部相对湿度参数需修正,用以匹配碱激发混凝土基本徐变较大的情况,此外徐变随时间发展系数也需围绕内部相对湿度加以修正。建立的徐变预测模型可为碱激发混凝土结构的徐变性能研究提供有效途径。

关键词:桥梁工程;碱激发混凝土;徐变试验;预测模型;基本徐变;干燥徐变;徐变发展
中图分类号:U444 **文献标志码**:A **DOI**:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.128

Creep property prediction of alkali-activated fly ash-slag concrete

HUANG Dun-wen*[1,2], ZOU You-bao[1], DOU Shu-hao[1], XIA Li-peng[1], HE Jun[1,2], PENG Hui[1,2]
(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. National-local Joint Engineering Laboratory of Technology for Long-term Performance Enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: To discuss the creep prediction method for alkali-activated fly ash-slag concrete, creep tests on alkali-activated fly ash-slag concrete under varying stress-strength ratios, strength levels, and loading ages were carried out. The similarities and differences between alkali-activated concrete and cement concrete in the basic creep and drying creep were explored. Based on the existing creep data, a modified prediction method based on the creep model of the European Concrete Committee (CEB-FIP) was proposed. The results reveal that the critical point for linear creep in alkali-activated concrete occurs at a stress-strength ratio of 0.6-0.8. Additionally, the basic creep of alkali-activated concrete exceeds that of cement concrete with equivalent strength, while its drying creep develops more slowly during the early loading stage. The variation patterns of the creep coefficient with

出版历程:2025-08-13 收稿,2025-11-03 修回,2025-11-27 录用
基金项目:国家自然科学基金项目(52578162,52008036);湖南省自然科学基金项目(2026JJ40049,2024JJ5017);湖南省教育厅优秀青年项目(22B0344)
***作者简介**:黄敦文(1990-),男,湖南武冈人,副教授,博士生导师,工学博士,E-mail:dw.huang@csust.edu.cn。
引用格式:黄敦文,邹有宝,窦淑豪,等. 碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的徐变性能预测[J]. 交通运输工程学报,2026,26(6):115-122.
Citation: HUANG Dun-wen, ZOU You-bao, DOU Shu-hao, et al. Creep property prediction of alkali-activated fly ash-slag concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(6): 115-122.

strength and loading age resemble those of cement concrete. The hyperbolic power function from the CEB-FIP creep model remains applicable for predicting the creep of alkali-activated concrete. According to the parameter analysis, the internal relative humidity term affecting the notional creep coefficient needs adjustment so as to match the higher basic creep of alkali-activated concrete. In addition, the coefficient describing the time development of creep should also be modified with respect to internal relative humidity. The established creep prediction model offers a viable approach for investigating the creep property of alkali-activated concrete structures.

Keywords: bridge engineering; alkali-activated concrete; creep test; prediction model; basic creep; drying creep; creep development

Publication history: Received 2025-08-13; Received in revised form 2025-11-03; Accepted 2025-11-27

Funding: National Natural Science Foundation of China (52578162, 52008036); Hunan Provincial Natural Science Foundation (2026JJ40049, 2024JJ5017); Distinguished Young Scholar Project of Hunan Provincial Education Department (22B0344)

* **Corresponding author**: HUANG Dun-wen, associate professor, PhD, E-mail: dw. huang@csust. edu. cn.

0 引 言

碱激发胶凝材料以富含硅、铝的粉煤灰、矿渣等固体废弃物为原料,具有低碳减排的特点,属于环境友好的无机胶凝材料[1-3]。由于碱激发材料的力学和工作性能与水泥基材料类似,被科技界和工业界视为硅酸盐水泥的绿色替代品之一。近些年,关于碱激发材料强度、收缩以及耐久性方面的研究已较为系统[4-5],但涉及徐变性能的文献报道较少。长期荷载作用下混凝土徐变通常会导致结构的内力重分布以及挠曲变形的持续增长,是混凝土结构设计必须考量的因素之一[6-8]。

通常情况下,碱激发混凝土的凝胶组成和孔径分布与水泥混凝土有较大区别。碱激发矿渣等富钙体系以C-A-S-H凝胶为主,其与水泥石的C-S-H凝胶同属1.43 nm托勃莫来石结构,但由于Al元素部分取代Si-O四面体中Si元素,促使C-A-S-H的链长和凝胶结构发生改变[9]。而碱激发粉煤灰等低钙体系以N-A-S-H凝胶为主,由于缺乏Ca元素,凝胶结构呈现无定型的空间网格状,隶属于类沸石结构[10]。Jia等[11-12]发现C-A-S-H凝胶以及N-A-S-H凝胶的徐变模量都小于C-S-H凝胶。这与报道的碱激发混凝土的基本徐变远大于同等强度的水泥混凝土的规律相匹配[13-14]。然而Caron等[15-16]研究发现,碱激发混凝土的干燥徐变略低于水泥混凝土,特别是在加载前期。碱激发混凝土的基本徐变数倍于水泥混凝土,然而其早期干燥徐变却低于水泥混凝土,这可能与碱激发材料特殊的孔径分布有关。硬化后的胶凝材料的徐变特性与荷载作用下孔隙水的黏性流动以及与外界的水分交换密切相关[17]。碱激发矿渣浆体的孔径分布呈现“单峰”特征,有别于水泥石的“双峰”趋势,且前者介孔体积占比远大于后者[18]。碱激发粉煤灰的孔径分布虽与水泥石类似[19],为使碱激发粉煤灰具有常温固化的能力,通常需加入富钙的矿渣。碱激发粉煤灰-矿渣材料孔结构的致密程度与矿渣掺量呈正相关[20-23]。致密的孔结构意味着易脱水的大孔体积占比小,恐导致持续荷载作用下碱激发混凝土的干燥徐变发展较缓慢。因而,不同环境湿度下碱激发混凝土的徐变发展值得关注。

混凝土徐变常受到材料强度、养护条件、加载龄期、应力-强度比、截面尺寸等众多因素影响。Hojati等[24]研究表明,碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的强度越低,徐变越明显。而碱激发混凝土的徐变受养护温度的影响显著,养护温度越高、时间越长,对应的徐变越小[25]。因而依赖高温固化的碱激发低钙粉煤灰的徐变系数远低于水泥混凝土[26-27]。Noushini等[27-29]研究了各类纤维对碱激发混凝土徐变的抑制作用,发现适宜的纤维掺量能将碱激发材料的徐变控制在较低水平。少数学者还探讨了碱激发混凝土徐变性能的影响因素,如:加载龄期[30]、应力-强度比[31]、截面尺寸[32],并发现了与水泥混凝土类似的徐变规律。以上研究关注的是干燥徐变的大小,少有人探讨徐变系数随时间的发展与水泥混凝土的差异性。

本文以应用最广的碱激发粉煤灰-矿渣混凝土为代表,测试了持续荷载作用下碱激发混凝土的基

本徐变和干燥徐变，并与欧洲混凝土协会（CEB-FIP）徐变模型计算结果进行了对比，分析了碱激发混凝土徐变随时间的发展规律与水泥混凝土的相似性和差异性，进而提出了基于CEB-FIP徐变模型的修正方法用于碱激发混凝土的徐变预测，以期为碱激发混凝土的徐变性能研究提供有效手段。

1　试验介绍

1.1　原材料及配合比

选取产自中国的一级粉煤灰和S95粒化高炉矿渣，用水玻璃、粉末状氢氧化钠混合去离子水作为激发剂，制备碱激发材料。表1列出了X射线荧光光谱（XRF）测试的粉煤灰和矿渣的化学组成。所用粉煤灰和矿渣的密度分别为2.6、2.9 g·cm^{-3}，比表面积分别为500、425 m^2·kg^{-1}，中值粒径分别为23.2、24.0 μm。此外，所用水玻璃中Na_2O质量占比8.35%，SiO_2占比26.54%，H_2O占比65.11%。本试验的具体配合比参数如表2所示。其中细骨料选用中国ISO标准砂，粒径范围为0.08～2 mm，密度约为1.47 g·cm^{-3}。粗骨料则使用连续级配的玄武岩碎石，其中3～5、5～8、8～12 mm粒径分别占粗骨料质量的30%、40%、30%，压碎指标为6.5%。

表1　基于质量百分比的原料的化学组成

Table 1　Chemical composition of raw materials based on weight percentage　　%

组成物质	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	SO_3	TiO_2	K_2O	Fe_2O_3	其他
高炉矿渣	44.06	30.23	13.72	5.58	3.16	1.79	0.50	0.41	0.55
粉煤灰	3.05	56.90	31.24	0.54	0.61	1.34	2.06	3.80	0.46

表2　碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的配合比

Table 2　Mixed ratios of alkali-activated concrete

编号	粉煤灰与矿渣的质量比	水胶比	碱当量/%	模数	浆骨比	砂率	28 d立方体标准抗压强度/MPa
AAC-40	5∶5	0.43	4.2	1.2	1∶4	0.375	40.20
AAC-45	5∶5	0.41	4.0	1.2	1∶4	0.375	48.67
AAC-50	7∶3	0.41	5.0	0.8	1∶4	0.375	52.16
AAC-55	7∶3	0.40	5.0	0.8	1∶4	0.375	56.40

将氢氧化钠、水玻璃与水按照表2比例进行精确称量，随后置入带烧杯的磁力搅拌机充分混合，持续时间至少8 h，以确保各组分均匀分散。待激发剂制备完毕，将胶凝材料和骨料按既定比例干拌4 min，之后混合激发剂再搅拌4 min后置入特定模具。

1.2　试验方案

1.2.1　力学性能测试

依照中国《混凝土物理力学性能试验方法标准》（GB/T 50081—2019）的强度测试方法，选用边长100 mm的立方体试块开展表2所示的各组碱激发混凝土的28 d抗压强度测试，然后按照尺寸折减系数换算成标准抗压强度。

1.2.2　徐变试验

因既有文献[13]～[16]、[24]～[32]聚焦于碱激发混凝土的干燥徐变影响因素，本试验重点探讨应力强度比、强度以及加载龄期对基本徐变的影响研究。各工况下每组试件由7个100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体组成，其中3个用于测试棱柱体抗压强度，2个用于徐变加载，剩下2个用于参比收缩测试。所有试件置于20 ℃±3 ℃、60%±10%RH的恒温恒湿室，用保鲜膜密封包裹至加载龄期。干燥徐变试件在加载试验前12 h去掉密封薄膜，而基本徐变试件一直处于密封状态。选用精度0.001 mm的千分表测试徐变以及参比收缩试件两侧200 mm标距的应变。

参照中国《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082—2024）提供的方法开展徐变测试，如图1所示。

(a)　基本徐变　　(b)　干燥徐变

图1　基本徐变和干燥徐变测试

Fig. 1　Basic creep and drying creep tests

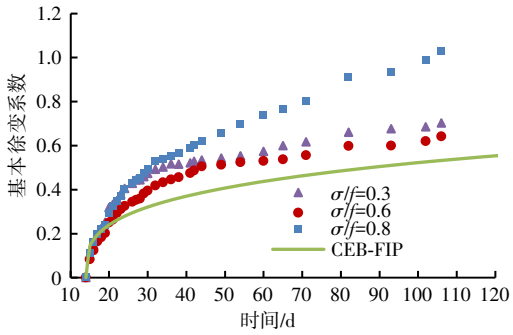
AAC-55和AAC-50试件用于应力强度比（0.2～0.8）和强度工况的基本徐变测试，AAC-45用于加载龄期（7、14、28 d）工况的基本徐变测试，而AAC-40用于干燥徐变测试。除应力强度比工况

外，其余各组都采用0.4的应力强度比加载，测试周期为持载1～5个月（常规测试1个月，若发现与水泥基材料规律不同则延长测试期）。

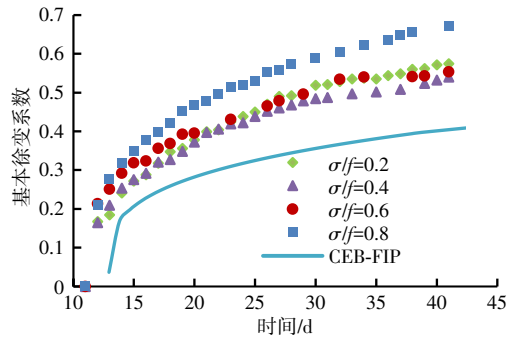
2 徐变试验结果分析

2.1 不同应力强度比下的基本徐变

AAC-55和AAC-50试块在不同应力σ与强度f比作用下的基本徐变系数如图2所示。图2(a)、(b)显示碱激发混凝土的基本徐变发展快于CEB-FIP模型预测的水泥混凝土徐变。此外，应力强度比为0.6及以下时，AAC-55和AAC-50的基本徐变系数近似相等，变化幅度很小，即徐变系数发展与应力强度比近似无关。这意味着徐变与弹性应变的比值（徐变系数）的发展规律符合线性徐变的特点，即单位徐变与应力无关。而当应力强度比达到0.8时，二者的基本徐变系数均发展较快，与应力强度比为0.6时的差值随时间逐渐扩大，特别是AAC-55对应的曲线呈现不收敛趋势。结合文献[15]、[31]展示的不同应力强度比下碱激发混凝土干燥徐变的发展规律，可以认定碱激发混凝土的线性徐变临界点在应力强度比为0.6～0.8，其高于水泥混凝土的应力强度比0.4。



(a) AAC-55



(b) AAC-50

图2 不同应力强度比下的基本徐变系数

Fig. 2 Basic creep coefficients with various stress-strength ratios

2.2 不同强度下的基本徐变

不同强度试块的基本徐变系数如图3所示。由图3可知，碱激发混凝土强度越高，基本徐变越小，这与CEB-FIP模型计算的水泥混凝土徐变随强度变化规律保持一致。不过，碱激发混凝土基本徐变随强度的变化幅度明显大于水泥混凝土。

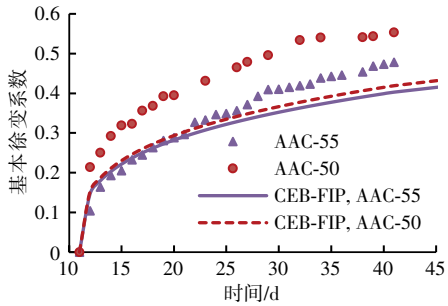


图3 不同强度下的基本徐变系数

Fig. 3 Basic creep coefficients with various strengths

2.3 不同加载龄期下的基本徐变

AAC-45试件在第7、14、28 d加载的基本徐变系数如图4所示。从图4可以看出，加载龄期越晚，基本徐变越小，这与CEB-FIP模型计算的水泥混凝土徐变随加载龄期变化规律保持一致。不同的是，碱激发混凝土基本徐变随加载龄期的变化幅度明显大于水泥混凝土。结合图2、3的分析可以发现，基本徐变系数最终测试值越大的曲线，与CEB-FIP模型计算的水泥混凝土徐变系数相差也越显著。

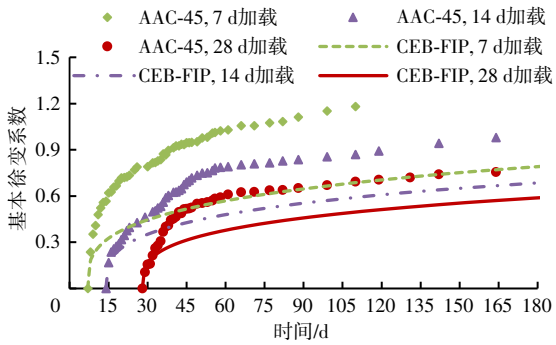


图4 不同加载龄期下的基本徐变系数

Fig. 4 Basic creep coefficients with various loading ages

2.4 干燥徐变

AAC-40试件测试的干燥徐变系数如图5所示。图5中测试值与CEB-FIP模型计算的水泥混凝土徐变系数相差不大。加载前30 d，测试值略低于计算值后逐渐反超，该规律与Ma等[13-15]的试验规律类似。不同的是，实测曲线和计算曲线交界点出现的时间不同，这可能与持续荷载作用下水分蒸发速率相关。中高钙碱激发混凝土的孔结构致密[20]，易失水的大孔体积占比较少，故与失水干燥有关的徐变

部分较小，进而导致碱激发混凝土加载前期的干燥徐变发展较缓慢。之后，随着基本徐变的发展，带动干燥徐变整体超过水泥混凝土。

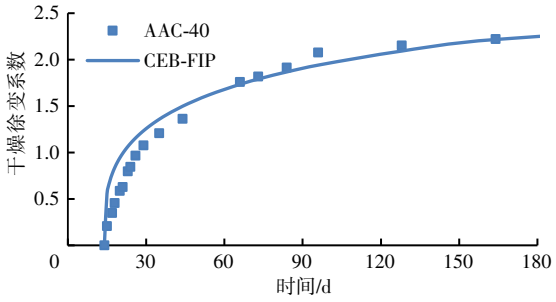


图 5　AAC-40 试件的干燥徐变系数曲线

Fig. 5　Drying creep curve of AAC-40 specimen

3　基于 CEB-FIP 修正模型的徐变预测

3.1　CEB-FIP 模型的适应性

中国公路桥规中徐变计算方法借鉴了欧洲 *Fib model code for concrete structures*（CEB-FIP MC90），而当前规范的公开版本已更新至 CEB-FIP MC2010，故本文以此模型为研究对象。该模型定义的徐变系数为

$$\varphi(t,t_0)=\varphi_0\beta_c(t,t_0) \tag{1}$$

$$\varphi_0=\varphi_{RH}\beta(f_{cm})\beta(t_0) \tag{2}$$

$$\beta_c(t,t_0)=\left[\frac{t-t_0}{\beta_H+(t-t_0)}\right]^{0.3} \tag{3}$$

式中：$\varphi(t,t_0)$为混凝土在龄期 t 时刻的徐变系数；φ_0 为名义徐变系数；$\beta_c(t,t_0)$为描述徐变随时间发展的系数；t_0 为加载龄期；φ_{RH} 为与环境湿度 R_H 和构件理论厚度 h 有关的内部湿度参数；$\beta(f_{cm})$为与平均圆柱体抗压强度 f_{cm} 有关的参数；$\beta(t_0)$为与 t_0 有关的参数；β_H 为与 f_{cm}、R_H、h 有关的参数。

前述测试结果（图 2～5）都显示碱激发混凝土的基本徐变系数和干燥徐变系数随时间的发展趋势与 CEB-FIP MC2010 模型计算的徐变系数发展趋势吻合，仅发展速率有所不同，这说明 $\beta_c(t,t_0)$所选用的双曲幂函数形式在碱激发混凝土徐变预测上依然适用，但函数表达式需做出修正以适用碱激发混凝土的徐变发展速率。表 3 对比了各组工况下徐变系数最终测试值与 CEB-FIB 模型的计算结果。

表 3　徐变系数的测试值与模型计算对比

Table 3　Comparison between tested and calculated value creep coefficients

参数	基本徐变系数					干燥徐变系数		
	AAC-55	AAC-50	AAC-45			AAC-40		
	11 d 加载		7 d 加载	14 d 加载	28 d 加载	14 d 加载		
	持载 30 d		持载 90 d			持载 15 d	持载 30 d	持载 180 d
测试值	0.478	0.553	1.151	0.870	0.706	1.077	1.364	2.278
计算值	0.403	0.419	0.662	0.581	0.511	1.234	1.499	2.299
变化率/%	18.6	32.0	73.9	49.7	38.2	−12.7	−9.0	−0.9

由表 3 可知，各组的基本徐变系数都大于 CEB-FIP 模型计算值，不过二者的偏差与徐变系数的发展速率有关，即徐变系数发展越慢，偏差越小。比如强度更高的 AAC-55 试件的徐变发展较慢，其偏差小于 AAC-50；加载龄期从 7 d 至 28 d，对应的徐变发展逐渐变慢，其偏差也随之变小。造成这种现象的原因可能也与孔径分布有关。虽然碱激发材料的 C-A-S-H 和 N-A-S-H 凝胶的蠕变模量低于水泥基材料的 C-S-H 凝胶[11-12]，但混凝土徐变还受到应力作用下孔隙水移动的影响[17]。水泥混凝土强度越高，孔径分布越致密，其与碱激发混凝土的孔径分布越相似，因而计算结果偏差越小。加载龄期越长，也对应着加载时刻的混凝土强度越大。这可以从偏差的变化规律与强度发展规律吻合得以验证。中高钙的碱激发混凝土的早期强度发展快于水泥混凝土，对应 7 d 偏差最大，而后偏差快速衰减。这意味着 $\beta(f_{cm})$和 $\beta(t_0)$对碱激发混凝土徐变的描述都需要围绕强度指标进行调整。

与基本徐变系数测试值偏大的情况不同，干燥徐变系数测试值则小于模型计算值，特别是在加载前期。这反映出内部湿度参数 φ_{RH} 对碱激发混凝土的徐变随湿度变化的描述无法适用。结合以上分析，可推断出材料强度越大，即大孔体积占比越少，碱激发混凝土和水泥混凝土的孔径分布差异会变小，二者干燥徐变的偏差也会随之减小。这一推断可从 Caron 等[15]的研究结果得以佐证。也就是说内部湿度参数 φ_{RH} 也还需围绕强度指标进行修正。

3.2　模型修正

由前述分析可知，φ_{RH} 不能很好地描述湿度变化对碱激发材料徐变的影响，特别是混凝土与大气环

境无水分交换条件下的基本徐变。通过观察规范CEB-FIP MC2010定义的内部湿度参数φ_{RH}为

$$\varphi_{RH}=\left(1+\frac{1-R_H/100}{0.1\sqrt[3]{h}}\alpha_1\right)\alpha_2 \tag{4}$$

$$\alpha_1=\left(35/f_{cm}\right)^{0.7}$$

$$\alpha_2=\left(35/f_{cm}\right)^{0.2}$$

易知,通过调整与强度有关参数α_1、α_2可解决表3反映的碱激发材料与水泥基材料在基本徐变和干燥徐变测试下的徐变值相差较大的问题。假定参数α_1、α_2修正为η_1、η_2,即

$$\begin{cases}\eta_1=\gamma_1\alpha_1\\ \eta_2=\gamma_2\alpha_2\end{cases} \tag{5}$$

式中:γ_1为影响干燥徐变的内部湿度修正系数;γ_2为影响基本徐变的内部湿度修正系数。

观测式(2)可发现,参数$\beta(t_0)$、$\beta(f_{cm})$与φ_{RH}是连乘的关系,则也可假定γ_2是作为$\beta(t_0)$、$\beta(f_{cm})$与φ_{RH}的综合修正参数。另外,通过修正强度有关参数α_3来调整徐变随时间发展系数$\beta_c(t,t_0)$。其中,参数β_H可改写为

$$\beta_H=1.5h\left[1+\left(1.2R_H/100\right)^{18}\right]+250\eta_3 \tag{6}$$

$$\eta_3=\gamma_3\alpha_3$$

$$\alpha_3=\left(35/f_{cm}\right)^{0.5}$$

式中:γ_3为徐变系数随时间发展函数的修正系数。

至此,碱激发材料的徐变预测模型可表示为

$$\varphi=\left(1+\delta_1\gamma_1\right)\delta_2\gamma_2\left(\frac{\delta_4}{\delta_3+\delta_5\gamma_3+\delta_4}\right)^{0.3} \tag{7}$$

$$\delta_1=\frac{1-R_H/100}{0.1\sqrt[3]{h}}\alpha_1$$

$$\delta_2=\alpha_2\beta(f_{cm})\beta(t_0)$$

$$\delta_3=1.5h\left[1+\left(1.2R_H/100\right)^{18}\right]$$

$$\delta_4=t-t_0$$

$$\delta_5=250\alpha_3$$

式中:δ_i为CEB-FIP MC2010中各参数组合下的自变量(i=1~5)。

将式(7)两边取对数,可得

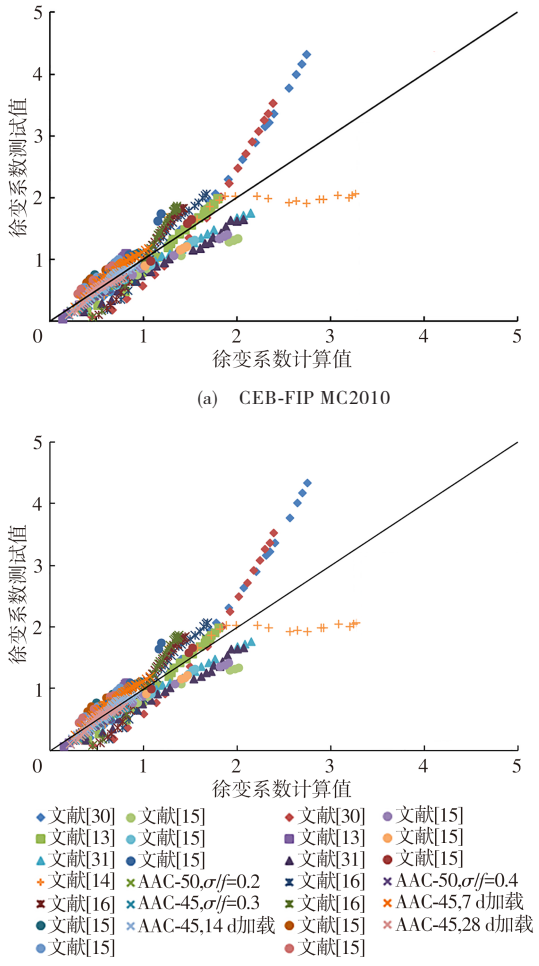
$$\ln(\varphi)-\ln(\delta_2)-0.3\ln(\delta_4)=$$

$$\ln\left(1+\delta_1\gamma_1\right)+\ln(\gamma_2)-0.3\ln\left(\delta_3+\delta_5\gamma_3+\delta_4\right) \tag{8}$$

令$y=\ln(\varphi)-\ln(\delta_2)-0.3\ln(\delta_4)$,$x_1=\delta_1$,$x_2=\delta_3+\delta_4$,$x_3=\delta_5$,可得

$$y=\ln\left(1+\gamma_1x_1\right)-0.3\ln\left(x_2+\gamma_3x_3\right)+\ln(\gamma_2) \tag{9}$$

统计文献[13]~[18]中的可常温固化的硅酸钠激发粉煤灰-矿渣体系(含碱激发矿渣混凝土)的徐变测试数据,结合本文测试结果,按照式(9)进行计算拟合,易得待定系数$\gamma_1=0.720$,$\gamma_2=1.939$,$\gamma_3=4.141$。图6列出了CEB-FIP MC2010模型在修正前后的计算值与测试值对比。



(a) CEB-FIP MC2010

(b) 修正模型

图6 计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparisons between calculation and measurement values

由图6可以看出:经过γ_1、γ_2、γ_3三个参数修正后的模型与实测值的拟合程度得到了较大提升,相关性系数R^2由修正前的0.703提升至修正后的0.854。除文献[14]、[30]中的2组数据外,其他吻合程度良好。文献[30]试件因采用了饱和石灰水浴这一非标养护方式,养护期间碱性$Ca(OH)_2$溶液恐打破硬化浆体内的液相平衡,影响碱激发后期的产物形成。另外,文献[14]试验所用前驱体为富镁矿渣,其活性镁与碱性孔溶液的缓慢水化反应会生成层状双氢氧化物。产物的不同可能导致了前述的计算偏差。鉴于碱激发体系原料的多样性,本修正模

型仅适用于标准和自然养护的硅酸钠激发碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的徐变行为。

4 结　语

（1）碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的线性徐变临界点在应力强度比为0.6～0.8，高于水泥混凝土的应力强度比0.4。

（2）碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的基本徐变大于同等强度的水泥混凝土，这与碱激发材料C-A-S-H和N-A-S-H凝胶体系的徐变模量偏小有关。

（3）碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的干燥徐变发展较水泥混凝土缓慢，这与中高钙碱激发材料的孔结构致密有关，即易干燥失水的大孔体积占比较少。

（4）碱激发粉煤灰-矿渣混凝土的徐变系数随强度、加载龄期的变化规律与水泥混凝土类似，但变化幅度偏大。此幅度会随强度、加载龄期等因素变化有所区别。引起徐变系数发展越慢的工况，二者徐变系数偏差越小。

（5）CEB-FIP徐变模型中双曲幂函数依然可用于碱激发混凝土徐变预测，但影响名义徐变系数的内部相对湿度参数需修正，用以匹配碱激发材料基本徐变远大于原模型计算规律的差异。此外，徐变随时间发展系数也需要修正来自内部相对湿度的影响。

（6）本预测方法仅用于标准和自然养护的硅酸钠激发粉煤灰-矿渣体系，且受限于样本数据，模型的普适性还有待加强。后续还需探讨激发剂特征、前驱体物化性质对碱激发混凝土徐变性能的影响，以提升模型的适用性。

参 考 文 献：

Reference ：

[1] 李　峰，张荣荣，周思齐，等. 碳纳米管增强火山灰基地聚合物的制备与性能表征[J]. 交通运输工程学报，2023，23(2)：153-165.
LI Feng, ZHANG Rong-rong, ZHOU Si-qi, et al. Preparation and characterization of carbon nanotubes reinforced volcanic ash-based geopolymer [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2): 153-165.

[2] 张　阳，田绍强，马　涛，等. 固废基地聚物稳定碎石力学性能和干燥收缩特性研究[J]. 中国公路学报，2023，36(12)：120-130.
ZHANG Yang, TIAN Shao-qiang, MA Tao, et al. Mechanical performance and drying shrinkage characteristics of solid waste based geopolymer-stabilized macadam [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(12): 120-130.

[3] 彭　晖，张　白. 地聚物混凝土耐久性研究进展[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版)，2023，20(5)：1-24.
PENG Hui, ZHANG Bai. Research progress on the durability of geopolymer concrete[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2023, 20(5): 1-24.

[4] ZHANG P, WANG K X, LI Q F, et al. Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders-A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120896.

[5] DING Y, DAI J G, SHI C J. Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 68-79.

[6] 闫　斌，潘雨亭，娄徐瑞利，等. 收缩徐变作用下的大跨度斜拉桥上无砟轨道受力特性[J]. 交通运输工程学报，2025，25(6)：90-97.
YAN Bin, PAN Yu-ting, LOU Xu-rui-li, et al. Mechanical characteristics of ballastless track on long-span cable-stayed bridge under shrinkage and creep effects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(6): 90-97.

[7] 邓继华，何子谙，贺　君，等. 考虑剪切变形的钢-混组合梁时变分析的精确有限元法[J]. 交通运输工程学报，2026，26(5)：111-124.
DENG Ji-hua, HE Zi-an, HE Jun, et al. Exact finite element method for time-dependent analysis of steel-concrete composite beam considering shear deformation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(5): 111-124.

[8] 王彦磊，朱劲松. 基于混凝土徐变及收缩智能预测的预应力钢筋混凝土桥梁长期变形分析方法[J]. 中国公路学报，2025，38(11)：51-63.
WANG Yan-lei, ZHU Jing-song. Long-term deformation analysis method of prestressed reinforced concrete bridges based on intelligent prediction of concrete creep and shrinkage [J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(11): 51-63.

[9] PROVIS J L, VAN DEVENTER S J J. 碱激发材料[M]. 刘　泽，译. 北京：中国建材工业出版社，2019.
PROVIS J L, VAN DEVENTER S J J. Alkali-activated materials[M]. Translated by LIU Ze. Beijing: China Construction Science and Technology Press, 2019.

[10] SHI C J, KRIVENKO P V, ROY D. 碱-激发水泥和混凝土[M]. 史才军，译. 北京：化学工业出版社，2008.
SHI C J, KRIVENKO P V, ROY D. Alkali-activated cement and concretes[M]. Translated by SHI Cai-jun. Beijing: Chemical Industry Press Co., Ltd., 2008.

[11] JIA Z J, CAO R L, ZHANG S Q, et al. Revealing the difference between creep behavior of hydration products of Portland cement and alkali-activated slag paste at early age[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 77: 107556.

[12] GAO H, SHIKHOV I, HAMED E, et al. New insights on the basic creep mechanism of one-part alkali activated slag and fly ash paste[J]. Cement and Concrete Research, 2024, 186: 107691.

[13] MA J X, DEHN F. Shrinkage and creep behavior of an alkali-activated slag concrete[J]. Structural Concrete, 2017, 18(5): 801-810.

[14] HUMAD A M, PROVIS J L, HABERMEHL-CWIRZEN K, et al. Creep and long-term properties of alkali-activated Swedish-slag concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(2): 04020475.

[15] CARON R, PATEL R A, DEHN F. Experimental study on basic and drying creep for an alkali-activated slag concrete and comparison with existing creep models[J]. Structural Concrete, 2023, 24(5): 6405-6420.

[16] NEGAHBAN E, BAGHERI A, SANJAYAN J. One-year study of restrained shrinkage and creep behaviours of geopolymer concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 376: 131057.

[17] 黄国兴,惠荣炎,王秀军.混凝土徐变与收缩[M].北京:中国电力出版社,2012.
HUANG Guo-xing, HUI Rong-yan, WANG Xiu-jun. Creep and shrinkage of concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

[18] HUANG D W, CHEN P, PENG H, et al. A review and comparison study on drying shrinkage prediction between alkali-activated fly ash/slag and ordinary Portland cement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 305: 124760.

[19] MA Y, HU J, YE G. The pore structure and permeability of alkali activated fly ash[J]. Fuel, 2013, 104: 771-780.

[20] HUANG D W, CHEN P, PENG H, et al. Drying shrinkage performance of medium-Ca alkali-activated fly ash and slag pastes[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 130: 104536.

[21] HUANG D W, CHEN H, ZOU Y B, et al. Influence of raw material properties on microscopic and mechanical characteristics of alkali-activated materials[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03319.

[22] HUI Y X, ZHANG R J, MEN G Y, et al. Fly ash for sustainable roads: A comprehensive review on mechanisms and performance optimization [J]. Journal of Road Engineering, 2025, 5(4): 618-638.

[23] LIU Z Z, FENG T T, ZHU X Y, et al. Bird's-eye view of recycled solid wastes in road engineering [J]. Journal of Road Engineering, 2024, 4(2): 93-150.

[24] HOJATI M, RAJABIPOUR F, RADLIŃSKA A. Creep of alkali-activated cement mixtures[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00954.

[25] CASTEL A, FOSTER S J, NG T, et al. Creep and drying shrinkage of a blended slag and low calcium fly ash geopolymer Concrete[J]. Materials and Structures, 2016, 49(5): 1619-1628.

[26] WALLAH S E. Creep behaviour of fly ash-based geopolymer concrete[J]. Civil Engineering Dimension, 2010, 12(2): 73-78.

[27] NOUSHINI A, CASTEL A, GILBERT R I. Creep and shrinkage of synthetic fibre-reinforced geopolymer concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2019, 71(20): 1070-1082.

[28] ZHOU X Y, CHEN P, JIAO Z Z, et al. Effect of fibre dosage and stress-strength ratio on creep of polypropylene fibre-reinforced alkali-activated slag concrete[J]. Materials and Structures, 2021, 54(5): 193.

[29] ZHOU X Y, ZHENG W Z, ZENG Y S, et al. Effect of fiber content and stress-strength ratio on the creep of basalt fiber-reinforced alkali-activated slag concrete[J]. Structural Concrete, 2022, 23(1): 382-394.

[30] UN C H, SANJAYAN J G, NICOLAS R S, et al. Predictions of long-term deflection of geopolymer concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 10-19.

[31] ZHOU X Y, WANG Y, ZHENG W Z, et al. Effect of stress-strength ratio on creep property of sodium silicate-based alkali-activated slag concrete[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3643.

[32] GAO H, HAMED E, AL-DAMAD I M A, et al. Creep behaviour of alkali activated slag and fly ash concrete: Effects of hypothetical thickness, aggregates, and loading age[J]. Materials and Structures, 2025, 58(5): 160.