**文章编号:**1007-9629(2022)03-0256-07

# 膨胀剂对混凝土早期基本徐变的影响

李  $\psi^{1,2,*}$ , 汪  $\tilde{\chi}^2$ , 王育江<sup>1,2</sup>, 刘加平<sup>1</sup>, 田  $f^2$ 

(1.东南大学材料科学与工程学院,江苏南京 211189;2.江苏苏博特新材料股份有限公司 高性能土木工程材料国家重点实验室,江苏南京 211103)

摘要:研究了自制CaO和MgO膨胀剂的掺加对C60自密实混凝土力学、变形性能及基本徐变的影响,并将徐变测试结果与fib 2010模型计算结果进行了对比.结果表明:6% CaO膨胀剂、6% (CaO+MgO)膨胀剂和10% (CaO+MgO)膨胀剂的掺加对C60自密实混凝土的抗压强度和弹性模量影响较小,但会显著降低混凝土自收缩,并增大其基本徐变变形;混凝土的徐变度和徐变系数基本随着膨胀剂总掺量或CaO膨胀组分掺量的提高而增大;当CaO膨胀剂掺量较低时,混凝土徐变度实测结果与fib 2010模型计算结果吻合度较好,CaO膨胀剂掺量较高时,混凝土徐变发展趋势明显高于模型计算结果,复合掺加MgO膨胀剂后,随着持荷时间的延长,混凝土徐变进一步增加.对于CaO膨胀剂掺量较高以及复合掺加MgO膨胀剂的混凝土,有必要研究膨胀对徐变随时间发展系数的影响,进而对模型进行修正.

关键词:CaO膨胀剂;MgO膨胀剂;混凝土;基本徐变 中图分类号:TU528.01 文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.006

## Effect of Expansive Additives on Basic Creep of Early-Age Concrete

LI Hua<sup>1,2,\*</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, WANG Yujiang<sup>1,2</sup>, LIU Jiaping<sup>1</sup>, TIAN Qian<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Sobute New Materials Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

**Abstract:** The effects of CaO-based and MgO-based expansive additives on the mechanical, deformation properties and basic creep of C60 self-compacting concrete were studied, and the test results of creep were compared with the calculation results of the fib 2010 model. The results show that the incorporation of 6% CaO-based expansive additive and 6%, 10% CaO/MgO composite expansive additives has little effect on the compressive strength and elastic modulus of C60 self-compacting concrete, but significantly reduces the autogenous shrinkage and increases the basic creep. The concrete creep compliance and creep coefficient basically increase with the increase of the total amount of expansive additive, the test results of creep compliance of concrete are in good agreement with the calculation results of fib 2010 model, but under the condition of high content of CaO-based expansive additive, the development trend of concrete creep is significantly higher than that of the calculation results. When mixing with MgO, the creep further increases with the increase of load holding duration. For the concrete incorporating high content of CaO-based and MgO-based expansive additive, it is necessary to study the influence of expansion on the development of creep with time, and then to modify the model.

Key words: CaO-based expansive additive; MgO-based expansive additive; concrete; basic creep

收稿日期:2020-12-03;修订日期:2021-01-05

基金项目:"十三五"国家重点研发计划项目(2017YFB0310100);国家自然科学基金资助项目(51738004,52008189)

第一作者(通讯作者):李 华(1987—),女,江苏南京人,东南大学博士生,江苏苏博特新材料股份有限公司高级工程师. E-mail: lihua@cnjsjk.cn

在混凝土中掺加膨胀剂制成补偿收缩混凝土是 目前工程中最常用的从材料角度抑制混凝土收缩变 形的措施之一.该措施不仅在隧道、桥梁、地下空间 等抗裂防渗要求较高的钢筋混凝土工程中得到大量 应用,还在钢管混凝土拱桥、超高层结构钢管柱等体 积稳定性要求高的填充性混凝土工程中得到使用[1-2]. 根据水化产物的不同,常用膨胀剂有硫铝酸钙型、 CaO型、MgO型,以及上述类型的复合等.作为外加 剂,膨胀剂掺入后对混凝土自收缩、干燥收缩及力学 性能的影响已有大量研究,并得到一些普遍共识规 律;但其对混凝土徐变性能的影响研究较少,且现有 研究主要集中于硫铝酸钙型膨胀剂[35].近年来,膨胀 效能更高、需水量小的CaO型膨胀剂和水化产物稳 定、膨胀历程可调控的MgO型膨胀剂在钢筋混凝土 和填充性混凝土中得到越来越多的应用.然而,其对 混凝土徐变性能,尤其是早龄期混凝土徐变性能的 影响仍缺乏研究,而徐变性能也是影响钢筋混凝土 抗裂性能以及填充性混凝土长期体积稳定性的关键 因素.

鉴于此,本文研究了CaO膨胀剂及其与MgO膨胀剂复合后对C60自密实混凝土早期徐变行为的影响,并与规范中的计算结果进行对比,以期为考虑膨

胀剂影响的混凝土徐变模型的建立提供基础.

### 1 试验

#### 1.1 原材料及混凝土配合比

膨胀剂为自制的CaO膨胀剂(编号C)和MgO 膨胀剂(编号M),其化学组成见表1.其他原材料包 括P•Ⅱ 52.5硅酸盐水泥、Ⅱ级粉煤灰、S95矿渣粉、 中河砂、石灰石、PCA-Ⅰ型聚羧酸减水剂和自来水.

参考某桥梁工程实际配合比,试验用C60自密 实混凝土配合比见表2.其中,REF代表未掺膨胀剂 的空白混凝土;6%C代表掺加6%CaO膨胀剂(以胶 凝材料总质量计)的混凝土;6%C1.7M1和 10%C1.7M1代表同时掺加CaO膨胀剂和MgO膨胀 剂的混凝土,2种膨胀组分的质量比均为1.7:1,总掺 量分别为6%和10%.

	表1 CaO膨胀剂和 MgO膨胀剂的化学组成					
Table 1	Chemical compositions of CaO-based and MgO-based					
	expansive additive					

Туре	Reactivity value/s	Chemical composition (by mass)/ $\%$						
		CaO	MgO	$\mathrm{SiO}_2$	$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{SO}_3$	IL
CaO		90.30	1.27	2.74	3.19	1.31	0.47	0.27
MgO	$150\!\pm\!10$	2.41	89.05	3.75	1.35	0.63	0.06	2.30

表 2 混凝土的配合比 Table 2 Mix proportion of concrete

								kg/m <sup>3</sup>
No.	Water	Cement	Fly ash	Slag	Expansive additive	Sand	Stone	Water reducer
REF	170.0	410.0	56.0	94.0	0	765.0	925.0	1.7
6% C	170.0	386.0	52.0	88.0	34.0	765.0	925.0	1.7
6% C1.7M1	170.0	386.0	52.0	88.0	34.0	765.0	925.0	1.9
10% C1.7M1	170.0	370.0	50.0	84.0	56.0	765.0	925.0	2.1

#### 1.2 试验方法

混凝土的压缩徐变采用弹簧式徐变仪测试,加载 龄期分别为3、7、28 d,加载应力为对应龄期同尺寸试 件轴心抗压强度(f<sub>c</sub>)的40%.混凝土徐变试件采用两 侧带有孔洞(用于预埋钢杆及固定螺母)的100 mm× 100 mm×300 mm钢模成型;2 d后拆除外钢模,立即 用塑料薄膜和铝箔纸包裹、密封试件,并放入标准实 验室((20±2)℃、相对湿度(60±5)%)养护;养护至 加载龄期后,在试件两侧预埋钢杆上架设千分表,并 采用弹簧式徐变仪测试混凝土的徐变变形.每组试 验包含2根试件,试件的徐变值取其试验平均值.同 时成型与徐变试件同尺寸的抗压强度、弹性模量及 自生体积变形试件,2 d拆模后与徐变试件同方式密 封,并放入标准实验室中养护.其中自生体积变形试 件放入标准实验室后立即用千分表测量长度变化; 抗压强度和弹性模量试件养护至各加载龄期时采用 万能试验机进行测试.

## 2 试验结果与分析

#### 2.1 混凝土力学性能

4组混凝土的轴心抗压强度(f<sub>c</sub>)如图1所示.由图 1可见,各加载龄期下,3组掺加膨胀剂的混凝土轴心 抗压强度较空白混凝土稍有降低,但降幅均不超过 10%.根据混凝土轴心抗压强度来确定混凝土徐变 测试时不同加载龄期所施加的荷载值,如表3所示. 由表3可见,由于同龄期下各组混凝土轴心抗压强度 偏差较小,不同混凝土的轴压荷载取值基本一致.4 组混凝土的静弹性模量(E)如图2所示.由图2可见, 3组掺加膨胀剂的混凝土弹性模量与空白混凝土偏 差较小,3d降幅不超过4%,7d降幅不超过7%,28d



#### 降幅不超过8%.

#### 2.2 混凝土徐变变形

4组混凝土在不同加载龄期下的总应变(ε,包括 瞬时应变和徐变应变)随时间(t)的变化如图3所示, 图中以加水成型时刻为时间零点.由图3可见,每个 加载龄期下混凝土的总应变均包含最初加载时极短 时间内的瞬时应变及随后长期的徐变应变.尽管有 研究表明,混凝土的徐变变形在加载一开始就已经 产生,加载极短时间内的变形同时包括弹性变形和 徐变变形,但精确区分该时间范围内的2种变形非常

	表 3	混凝土徐变测试时的施加荷载值
Table 3	Load	values at different loading ages for concrete

Na	Load level —	Load/ kN				
10.		3 d	7 d	28 d		
REF	0.4.6	160	200	230		
6% C		160	200	230		
6% C1.7M1	0.4 <i>J</i> c	160	190	230		
10% C1.7M1		160	190	230		



困难,本文为简化分析,仍假设最初加载时的瞬时应 变均为弹性应变.



图 3 混凝土在不同加载龄期的总应变随时间的变化 Fig. 3 Development of total strain of concrete with time at different loading ages 除弹性变形外,每个加载龄期下的总变形还包 括混凝土自身水化及水分消耗产生的自生体积变形 (ε<sub>a</sub>).对于未掺膨胀剂的空白混凝土 REF,该自生体 积变形即为自收缩;对于掺加膨胀剂的混凝土6%C、 6%C1.7M1和10%C1.7M1,该自生体积变形是混凝 土基体收缩和膨胀剂膨胀的综合结果.

4组混凝土自生体积变形随时间的变化如图4所 示,图中以加水成型时刻为时间零点,以3d龄期变 形为自生体积变形零点.由图4可以看出:在180d龄 期内,REF的收缩变形随龄期不断增加,但增长速率 逐渐放缓;膨胀剂的掺加显著降低了混凝土的自收 缩,相较于 REF,6%C、6%C1.7M1和10%C1.7M1 在180d龄期的收缩变形分别降低了236×10<sup>-6</sup>、 126×10<sup>-6</sup>、320×10<sup>-6</sup>,尤其是10%C1.7M1,在180d 内仍然表现为微膨胀状态.比较6%C、6%C1.7M1 和10%C1.7M1,并结合表2可以发现,混凝土自生体 积变形大致随着CaO膨胀组分掺量的提高而增大,即 10%C1.7M1>6%C>6%C1.7M1>REF,在CaO膨 胀组分含量近似相同的情况下(6%C和10%C1.7M1), MgO膨胀组分的掺入进一步增加了混凝土28d后的 膨胀变形.

在总应变 $(\epsilon_i)$ 上扣除瞬时弹性应变 $(\epsilon_i)$ 和自生体





积变形( $\epsilon_a$ )后,得到各组混凝土的基本徐变应变( $\epsilon_c$ ). 在此基础上,根据式(1)、(2)计算得到各组混凝土在 不同加载龄期下的徐变系数( $\varphi$ )和徐变度(C),如图 5、6所示.

$$\varphi = \varepsilon_{\rm c} / \varepsilon_0 \tag{1}$$

$$=\epsilon_{\rm c}/\sigma$$
 (2)

式中:σ为加载应力(对应表3中的荷载值).

C

由图 5、6 可以看出:对于每组混凝土,其徐变系数和徐变度均随持荷时间的延长而增长,基本随加载龄期的增大而降低;相较 REF,掺加膨胀剂的 3 组



图 5 混凝土徐变系数 Fig. 5 Creep coefficient of concrete



混凝土的徐变系数和徐变度均有不同程度增加.比 较6%C、6%C1.7M1和10%C1.7M1发现,混凝土的 徐变系数和徐变度基本随着膨胀剂总掺量或CaO膨 胀组分掺量的提高而增大.MgO的掺加进一步增加 了混凝土后期徐变的发展,这与文献[6-8]的研究结 果相一致.综合轴心抗压强度、弹性模量及徐变变形 测试结果可知,本试验中膨胀剂的掺加对混凝土力 学性能的影响较小,但对徐变性能的影响较大.因 此,膨胀剂对混凝土徐变的影响并非仅仅由于强度、 弹性模量等力学性能的降低导致.

虽然产生混凝土徐变的机理尚未完全被认知, 但普遍认为,徐变的产生主要与混凝土中水分的迁 移、水泥C-S-H凝胶体的变形及集料的延迟弹性变 形有关.近年来的研究<sup>[9]</sup>也发现,熟料的溶解可以部 分解释混凝土早期测定的高徐变行为.由表2可知, 本试验中,膨胀剂等量取代胶凝材料后,混凝土的浆 骨比保持不变,因此,各组混凝土徐变性能的差异主 要由浆体性能差异导致.Sirtoli等<sup>[3]</sup>研究了硫铝酸盐 水泥基材料的早期基本徐变,发现硫铝酸钙快速水 化且水化产物类似骨料约束着C-S-H的徐变变形, 同时水化需要大量消耗水等原因也导致早期基本徐 变降低.但相较于硫铝酸盐,CaO和MgO水化需水

量小,对混凝土内部水分及湿度影响较小.有研究表 明,适量掺加CaO膨胀剂可以改善混凝土的孔隙结 构,改善骨架组分与水泥浆体的界面,特别是在水化 初期,因为膨胀剂的水化反应更快,水化产物硬度更 大,能够填充和挤实C-S-H体系<sup>[10-11]</sup>,这些影响均会 导致混凝土早期徐变的降低.但如果膨胀剂掺量过 高或不均匀的掺入,膨胀剂将产生过大的局部膨胀, 形成初始损伤(微裂纹),从而导致混凝土徐变增大. 本试验中,膨胀剂的掺加虽对混凝土早期宏观力学 性能影响较小,但显著降低了混凝土的自生体积变 形,甚至在掺量较高的情况下,导致混凝土呈微膨胀 状态,因此,推测膨胀剂的掺加可能增大了基体的孔 隙率,甚至产生微裂纹;在膨胀剂掺量较高的情况 下,Ca(OH)。等膨胀产物也会在骨料-浆体界面过渡 区聚集.这种微结构的变化可能不会显著影响宏观 力学性能,但会对持续加载下的徐变变形产生影响. 此外,本试验混凝土胶凝材料中已有约30%的矿物 掺合料,CaO膨胀剂掺加后,对矿粉和粉煤灰的水化 有促进作用,从而导致C-S-H凝胶体含量增加.同 时,CaO和MgO膨胀剂的掺加也导致额外溶解现象 的发生,这些因素均会导致混凝土徐变增大.

#### 2.3 徐变试验结果与模型计算结果的对比

国内外混凝土结构相关规范中均给出了混凝土 徐 变 的 计 算 模 型,其 中 ACI 209<sup>[12]</sup>、CEB-FIP MC90-99<sup>[13]</sup>和AASHTO LRFD 2007<sup>[14]</sup>等模型整体 描述了徐变规律,但不细分干燥徐变和基本徐变;B3 (B4)<sup>[12]</sup>和 fib 2010模型<sup>[15]</sup>区分了基本徐变和干燥 徐变.

fib 2010给出的基本徐变系数表达式如下:

$$\varphi_{\rm hc}(t,t_0) = \beta_{\rm hc}(f_{\rm cm})\beta_{\rm hc}(t,t_0) \tag{3}$$

式中: $t_0$ 为混凝土加载龄期,d; $f_{cm}$ 为混凝土28d龄期立 方体抗压强度,MPa; $\beta_{bc}(f_{cm})=1.8/((f_{cm})^{0.7});\beta_{bc}(t,t_0)$ 为加载后徐变随时间发展的系数, $\beta_{bc}(t,t_0)=\ln((30/t_{0,adj}+0.035)^2(t-t_0)+1), t_{0,adj}$ 为混凝土加载调整龄期,d,与温度和水泥类型相关,本文取 $t_{0,adj}=t_0$ .

基于 fib 2010 模型的徐变度计算表达式如下:

$$C(t, t_0) = \frac{\varphi_{\rm bc}(t, t_0)}{E_{t_0}}$$
(4)

式中:Et,为混凝土加载时的弹性模量.

根据式(4)得到的4组混凝土徐变度计算结果与 实测结果对比如图7所示.由图7可以看出.fib 2010 模型计算结果与实测结果总体吻合性较好.具体而 言,对于空白混凝土 REF,3d 加载龄期时的计算结 果与实测结果偏差较大,尤其是持荷前5d的实测结 果明显小于计算结果,持荷10d以后两者随时间发 展趋势基本一致;7d加载龄期时,两者差距进一步缩 小;28d加载龄期时,实测结果与计算结果基本吻合. 对于掺加膨胀剂的3组混凝土,其中CaO掺量最低的 6% C1.7M1各龄期徐变发展实测结果与计算结果吻 合性较好;CaO掺量较高的6%C,其徐变发展趋势 高于 fib 2010模型计算结果;CaO 掺量最高且同时掺 加MgO的10% C1.7M1,随着持荷时间的延长,其徐 变发展速率显著高于 fib 2010模型计算结果.如前文 所述,这主要与后期MgO进一步膨胀有关.因此,对 于掺加膨胀剂的混凝土,尤其是在膨胀剂掺量较高 的条件下,有必要在计算模型中进一步考虑膨胀剂 水化膨胀的影响,特别要考虑徐变随时间发展系数 的影响.



图 7 混凝土徐变度 fib 2010模型计算结果与实测结果的对比

Fig. 7 Comparison between calculated value of creep based on fib 2010 model and measured value of concrete

## 3 结论

(1)在基本不影响抗压强度和弹性模量的情况 下,膨胀剂的掺加增大了混凝土的基本徐变变形.混 凝土徐变度和徐变系数基本随着膨胀剂总掺量或 CaO膨胀组分掺量的提高而增大.

(2)未掺膨胀剂的空白混凝土及CaO膨胀剂掺 量较低时,混凝土徐变度实测结果与fib2010模型计 算结果吻合度较好,但在CaO膨胀剂掺量较高的条 件下,混凝土徐变发展趋势明显高于模型计算结果, 进一步掺加MgO后,混凝土后期徐变进一步增加.

(3) 对于 CaO 膨胀剂掺量较高或进一步掺加 MgO 膨胀剂的混凝土,有必要研究膨胀对徐变随时 间发展系数的影响,进而对模型进行修正.

#### 参考文献:

- [1] 赵顺增,游宝坤.补偿收缩混凝土裂渗控制技术及其应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:157-219.
   ZHAO Shunzeng, YOU Baokun. Cracking and seepage controlling technology of shrinkage-compensating concrete and its application [M]. Beijing:China Building Industry Press, 2010: 157-219. (in Chinese)
- [2] 胡曙光,丁庆军.钢管混凝土[M].北京:人民交通出版社,2007: 266-292.

HU Shuguang, DING Qingjun. Steel tube confined concrete [M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 266-292. (in Chinese)

- [3] SIRTOLI D, WYRZYKOWSKI M, RIVA P, et al. Shrinkage and creep of high-performance concrete based on calcium sulfoaluminate cement [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 98:61-73.
- [4] NGUYEN D T, ALIZADEH R, BEAUDOIN J J, et al. Micro indentation creep of secondary hydrated cement phases and C-S-H
   [J]. Materials and Structures, 2013, 46(9):1519-1525.
- [5] CHOI H, CHO B. Calculation of constrained stress in expansive

mortar with a composite creep model [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016:2372835.

- [6] 李承木.外掺MgO混凝土的基本力学与长期耐久性能[J].水 利水电科技进展,2000,20(5):30-35.
  LI Chengmu. Basic mechanics and long-term durability of concrete mixed with MgO [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000, 20(5):30-35. (in Chinese)
- [7] 李方贤,陈友治,龙世宗,等.C50氧化镁微膨胀混凝土的性能 研究[J].建筑材料学报,2009,12(5):599-604.
  LI Fangxian, CHEN Youzhi, LONG Shizong, et al. Research on properties of C50 magnesium oxide micro-expanded concrete
  [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(5):599-604. (in Chinese)
- [8] DU C J. A review of magnesium oxide in concrete [J]. Concrete International, 2005(1):45-50.
- [9] LIX, GRASLEY Z C, GARBOCZI E J, et al. Modeling the apparent and intrinsic viscoelastic relaxation of hydrating cement paste [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 55:322-330.
- [10] SUN W, CHEN H, LUO X, et al. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(4):595-601.
- [11] CORINALDESI V, DONNINI J, NARDINOCCHI A. The influence of calcium oxide addition on properties of fiber reinforced cement-based composites [J]. Journal of Building Engineering, 2015, 4(2):14-20.
- [12] American Concrete Institute. Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete: ACI 209.2R-08 [S].
   Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
- [13] Comité Euro-International du Béton. CEB-FIP model code 1990 design code [S]. London: Thomas Telford Services Ltd., 1993.
- [14] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD bridge design specifications [S].
   Washington, D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [15] International Federation for Structural Concrete (fib). Fib model code for concrete structures 2010[S]. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.