

钢管煤矸石混凝土的徐变模型 及长期变形计算方法

王庆贺^{1,2}, 张 岩¹, 张玉琢¹, 张信龙², 岳 崇³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100000)

摘 要 为促进煤矸石在混凝土中的应用, 对钢管煤矸石混凝土的徐变性能和长期力学性能进行深入研究。**方法** 基于 Bazant 徐变模型提出考虑煤矸石取代率和粗骨料体积分数综合影响的煤矸石混凝土徐变模型, 进而采用逐步积分法与基于龄期调整的有效模量法研究钢管煤矸石混凝土长期性能。**结果** 50% 取代率的煤矸石混凝土较普通混凝土徐变系数增幅在 10% 以内, 100% 取代率的煤矸石混凝土增幅约为 30%; 相对湿度由 30% 增至 80% 时, 徐变系数降低约 40%; 抗压强度由 30 MPa 增至 60 MPa 时, 徐变系数降低约 40%; 构件厚度达到 500 mm 以后, 对徐变系数影响不显著; 基于龄期调整的有效模量法与逐步积分法预测结果差异在 10% 以内。**结论** 煤矸石混凝土的徐变系数与取代率呈正相关, 与环境相对湿度、抗压强度、砂率、构件尺寸呈负相关, 外部钢管可有效降低煤矸石混凝土的徐变变形; 基于龄期调整的有效模量法能够快速准确地预测钢管煤矸石混凝土柱的长期变形。

关键词 钢管混凝土; 煤矸石混凝土; 徐变; 取代率; 预测方法

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Creep Model and Long-term Deformation Calculation Method of Coal Gangue Aggregate Concrete Filled Steel Tubes (CGACFST)

WANG Qinghe^{1,2}, ZHANG Yan¹, ZHANG Yuzhuo¹, ZHANG Xinlong², YUE Chong³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090; 3. China Construction Second Engineering Bureau Ltd, Beijing China, 100000)

收稿日期: 2022-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808352); 辽宁省应用基础研究计划项目(2022JH2/101300130); 辽宁省教育厅科研项目(Injc202007); 沈阳市中青年科技人才项目(RC200143); 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2019-K-054)

作者简介: 王庆贺(1987—), 男, 教授, 博士, 主要从事钢-混凝土组合结构等方面研究。

Abstract: To promote the application of coal gangue aggregate concrete (CGAC), a research is conducted on the creep properties and long-term deformation calculation method of coal gangue aggregate concrete filled steel tubes (CGACFST). A CGAC creep model considering the combined effects of coal gangue aggregate (CGA) replacement ratio and coarse aggregate volume content was proposed following the Bazant creep model. The long-term performance of CGACFST was predicted by the step-by-step method (SSM) and age-adjusted effective modulus method (AEMM). The results show that Compared with natural concrete, the creep coefficient of CGAC with 50% CGA increased by about 10%; the creep coefficient of CGAC with 100% CGA increased by about 30%. With an increase in relative humidity from 30% to 80%, the creep coefficient decreases by approximately 40%. With an increase in compressive strength from 30 MPa to 60 MPa, the creep coefficient decreases by approximately 40%. The influence on the creep coefficient becomes insignificant after the theoretical thickness reaches 500 mm. The creep coefficient of CGAC increased with the CGA replacement ratio, decreased with relative humidity, compressive strength, sand ratio, theoretical thickness; The creep deformation of CGAC can be effectively reduced due to the outer steel tube. Using the AEMM to predict the long-term deformation of the CGAC-filled steel tube was sufficiently accurate, and the maximum difference between AEMM and SSM of 10%.

Key words: concrete-filled steel tube; coal gangue aggregate concrete; creep; replacement ratio; prediction method

煤矸石作为混凝土骨料以解决固废利用由来已久。研究发现,与普通混凝土相比,煤矸石混凝土力学性能有一定程度的欠缺,且变异性较大,使其在结构工程推广应用中受到了一定的限制^[1-4]。为更好地解决困扰自燃煤矸石应用的难题,在自燃煤矸石混凝土外部增设钢管,制成钢管煤矸石混凝土,充分利用钢管的约束作用改善煤矸石混凝土的力学性能,为煤矸石资源化利用提供了有效途径^[5-8]。徐变引起的结构变形和内力重分布等问题,直接影响到结构的长期使用性能^[9-11]。全取代的煤矸石骨料混凝土的弹性模量降低了30%,使得煤矸石混凝土徐变增长显著^[12]。李永靖^[13]、刘德慧等^[14]通过数据拟合得出考虑煅烧温度、取代率、水灰比的煤矸石混凝土徐变模型,并说明了各因素对煤矸石混凝土徐变的影响程度从大到小依次为煅烧温度、煤矸石取代率、水灰比。Z. P. Bazant^[15]分析了混凝土徐变的影响因素,提出了水泥净浆和骨料体积分数对混凝土徐变系数的影响规律。其他学者通过引入不同影响系数在各自领域对公式进行修正,

证实了公式对于徐变性能预测的可靠性^[16-17]。目前,针对自燃煤矸石混凝土,尚无适用的徐变模型可供参考。此外,钢管煤矸石混凝土中核心混凝土徐变量的增加导致构件长期力学性能发生变化,应当对于钢管煤矸石混凝土的徐变性能进行深入研究。

综上所述,笔者基于 Bazant 徐变模型,考虑煤矸石取代率和骨料体积分数的影响,提出煤矸石混凝土徐变增大系数,并引入普通混凝土徐变模型,得到煤矸石混凝土徐变模型,通过参数分析确定影响煤矸石混凝土徐变性能的关键影响因素;采用基于龄期调整的有效模量法对钢管煤矸石混凝土徐变变形进行预测,并与逐步积分法所得预测结果进行比较,提出钢管煤矸石混凝土柱长期变形的计算方法,提高预测模型的可靠性和安全性,为煤矸石混凝土的工程应用提供更可靠的理论依据。

1 煤矸石混凝土徐变预测模型

1.1 煤矸石混凝土徐变模型

考虑到煤矸石混凝土与普通混凝土差异

在于粗骨料,将骨料体积分数具体到粗骨料体积分数,得到了水泥砂浆徐变系数、粗骨料体积分数对普通混凝土徐变系数影响的关系式,如式(1)~式(2)所示:

$$\frac{\varphi_{\text{NAC}}}{\varphi_{\text{NM}}} = (1 - V_{\text{NCA}}^{\text{NAC}})^{\alpha_{\text{NAC}}}. \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{NAC}} = \frac{3(1 - \mu_{\text{NAC}})}{1 + \mu_{\text{NAC}} + 2(1 - 2\mu_{\text{NAC}})} \frac{E_{\text{NAC}}}{E_{\text{NCA}}}. \quad (2)$$

式中: φ_{NAC} 为普通混凝土徐变系数; φ_{NM} 为水泥砂浆徐变系数; $V_{\text{NCA}}^{\text{NAC}}$ 为普通混凝土中天然粗骨料的体积分数; μ_{NAC} 为普通混凝土的泊松比; E_{NAC} 为普通混凝土的弹性模量; E_{NCA} 为天然粗骨料弹性模量; α_{NAC} 为普通混凝土弹性模量与天然粗骨料弹性模量的关系。

将普通混凝土徐变影响关系类比到煤矸石混凝土,得到了煤矸石混凝土的徐变系数影响关系式,如式(3)~(4)所示:

$$\frac{\varphi_{\text{SCGAC}}}{\varphi_{\text{NM}}} = (1 - V_{\text{CA}}^{\text{SCGAC}})^{\alpha_{\text{SCGAC}}}. \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{SCGAC}} = \frac{3(1 - \mu_{\text{SCGAC}})}{1 + \mu_{\text{SCGAC}} + 2(1 - 2\mu_{\text{SCGAC}})} \frac{E_{\text{SCGAC}}}{E_{\text{SCGA}}}. \quad (4)$$

式中: φ_{SCGAC} 为自燃煤矸石骨料徐变系数; $V_{\text{CA}}^{\text{SCGAC}}$ 为自燃煤矸石混凝土中粗骨料的体积分数; E_{SCGAC} 为煤矸石混凝土弹性模量; E_{SCGA} 为等效自燃煤矸石弹性模量; α_{SCGAC} 为煤矸石混凝土弹性模量与煤矸石混凝土粗骨料弹性模量之间的关系。

联合式(1)~式(4),可以得到煤矸石徐变增大系数 κ :

$$\kappa = \frac{\varphi_{\text{SCGAC}}}{\varphi_{\text{NAC}}} = \frac{(1 - V_{\text{CA}}^{\text{SCGAC}})^{\alpha_{\text{SCGAC}}}}{(1 - V_{\text{NCA}}^{\text{NAC}})^{\alpha_{\text{NAC}}}}. \quad (5)$$

进一步对式(5)进行简化。分析 $V_{\text{CA}}^{\text{SCGAC}}$ 和 $V_{\text{NCA}}^{\text{NAC}}$ 关系,当采用等体积法制作煤矸石混凝土时, $V_{\text{CA}}^{\text{SCGAC}}$ 和 $V_{\text{NCA}}^{\text{NAC}}$ 相等;当采用等质量法制作煤矸石混凝土时,基于相应的质量和表观密度得到的 $V_{\text{CA}}^{\text{SCGAC}}$ 和 $V_{\text{NCA}}^{\text{NAC}}$ 相差约8%。可

以发现采用等质量法与等体积法配置的煤矸石混凝土各成分含量大致相同,可近似认为 $V_{\text{CA}}^{\text{SCGAC}}$ 和 $V_{\text{NCA}}^{\text{NAC}}$ 相等。

通过与普通混凝土弹性模量关系得到煤矸石混凝土弹性模量^[12]:

$$E_{\text{SCGAC}} = (1 - 0.3r)E_{\text{NAC}}. \quad (6)$$

式中: r 为煤矸石粗骨料取代率。

考虑弹性模量与体积的Voigt模型^[18]:

$$E_{\text{NAC}} = V_{\text{CA}}E_{\text{NCA}} + E_{\text{NM}}(1 - V_{\text{CA}}). \quad (7)$$

煤矸石粗骨料弹性模量则需要确定取代率对弹性模量的影响,用式(7)对等效煤矸石粗骨料弹性模量进行预测,并基于测定的骨料弹性模量关系 $E_{\text{SCGA}} = 1/3E_{\text{NCA}}$ ^[12,19],得到等效煤矸石骨料弹性模量:

$$\begin{aligned} E_{\text{SCGA}} &= (1 - r)E_{\text{NCA}} + rE_{\text{SCGA}} = \\ &(1 - \frac{2}{3}r)E_{\text{NCA}}. \end{aligned} \quad (8)$$

式中: r 为煤矸石粗骨料取代率; E_{NM} 为砂浆弹性模量。

根据文献[20]可以得到混凝土弹性模量与混凝土骨料弹性模量关系。

$$E_{\text{NAC}}/E_{\text{NCA}} = 0.5. \quad (9)$$

依据文献[21]的研究成果,煤矸石骨料与普通骨料泊松比相近,即 $\mu_{\text{SCGAC}} = \mu_{\text{NAC}} = 0.2$,由式(2)、式(4)和式(5)可得到煤矸石取代率和粗骨料体积分数综合影响下的徐变增大系数:

$$\kappa = (1 - V_{\text{CA}}^{\text{SCGAC}})^{-\frac{44r}{270 - 147r}}. \quad (10)$$

1.2 各模型预测结果及参数分析

目前国际上常用的徐变模型主要有欧洲规范 EC2、美国规范 ACI 209、GL2000 以及 B3 模型^[22]。将煤矸石混凝土徐变增大系数引入到徐变模型中,得到4种煤矸石混凝土徐变模型。参考文献[13]的配合比对煤矸石混凝土徐变性能进行对比,其中水灰比为0.45,水泥用量350 kg/m³,砂率采用0.35,抗压强度为30 MPa,煤矸石粗骨料取代率分别取0、50%、100%。构件理论厚度为50 mm,首次加载龄期为28 d,相对湿度为60%环境下持续加载50 a,得到徐变预测

结果(见图 1)。可以发现,随着煤矸石骨料取代率增加,各模型预测的徐变系数均呈增加趋势,且增加速率逐渐加快,50% 取代率煤矸石混凝土相比普通混凝土(取代率为 0)徐变系数增幅在 10% 以内;100% 取代率煤矸石混凝土相比普通混凝土徐变系数增幅约为

30%。此外,初期徐变系数增长迅速,之后增长逐渐减缓,以 100% 取代率煤矸石混凝土为例,在 EC 2、ACI 209、GL 2000、B 3 模型预测结果中,持续加载 5a 煤矸石凝土徐变系数约为持续加载 1a 煤矸石凝土徐变系数的 1.26、1.28、1.49、1.82 倍。

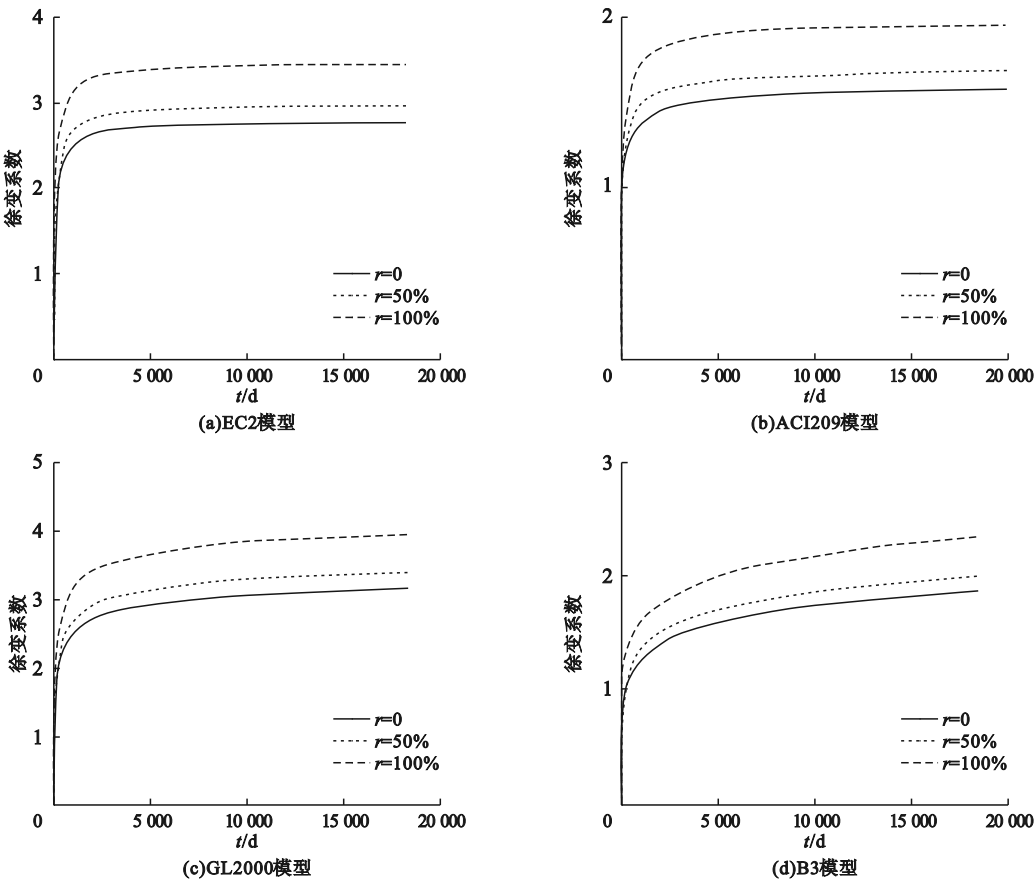


图 1 徐变系数随时间变化规律

Fig. 1 Development laws of creep coefficient with time

为分析混凝土配置中常用参数对煤矸石混凝土徐变性能的影响,选取参数范围如下,砂率为 30% ~ 40%,相对湿度为 30% ~ 80%,抗压强度为 30 ~ 60 MPa,构件厚度为 20 ~ 1 500 mm。图 2 为各参数对煤矸石混凝土徐变系数的影响。可以发现,徐变系数与相对湿度、抗压强度、砂率、构件尺寸呈负相关,其中相对湿度和抗压强度为主要影响因素。以取代率为 100% 煤矸石混凝土为例,砂率由 30% 增至 40% 时,采用 EC 2、ACI 209、GL 2000、B 3 模型预测的徐变系数分别

降低了 7.6%、5.3%、7.6% 和 8.0%。相对湿度由 30% 增至 80% 时,徐变系数分别降低了 43%、31%、38% 和 36%。抗压强度由 30 MPa 增至 60 MPa 时,采用 EC 2、B 3 模型预测的徐变系数分别降低了 46% 和 20%。当构件厚度小于 500 mm 时,徐变系数下降幅度较快;构件厚度为 500 mm 时,采用 EC 2、ACI 209、GL 2000、B 3 模型预测的徐变系数下降幅度可达到大尺寸构件(构件厚度为 1 500 mm)下降幅度的 87%、99%、55% 和 97%;当构件厚度超过 500 mm 以后,构件厚

度对徐变系数影响大幅减少,徐变系数基本保持平稳趋势。

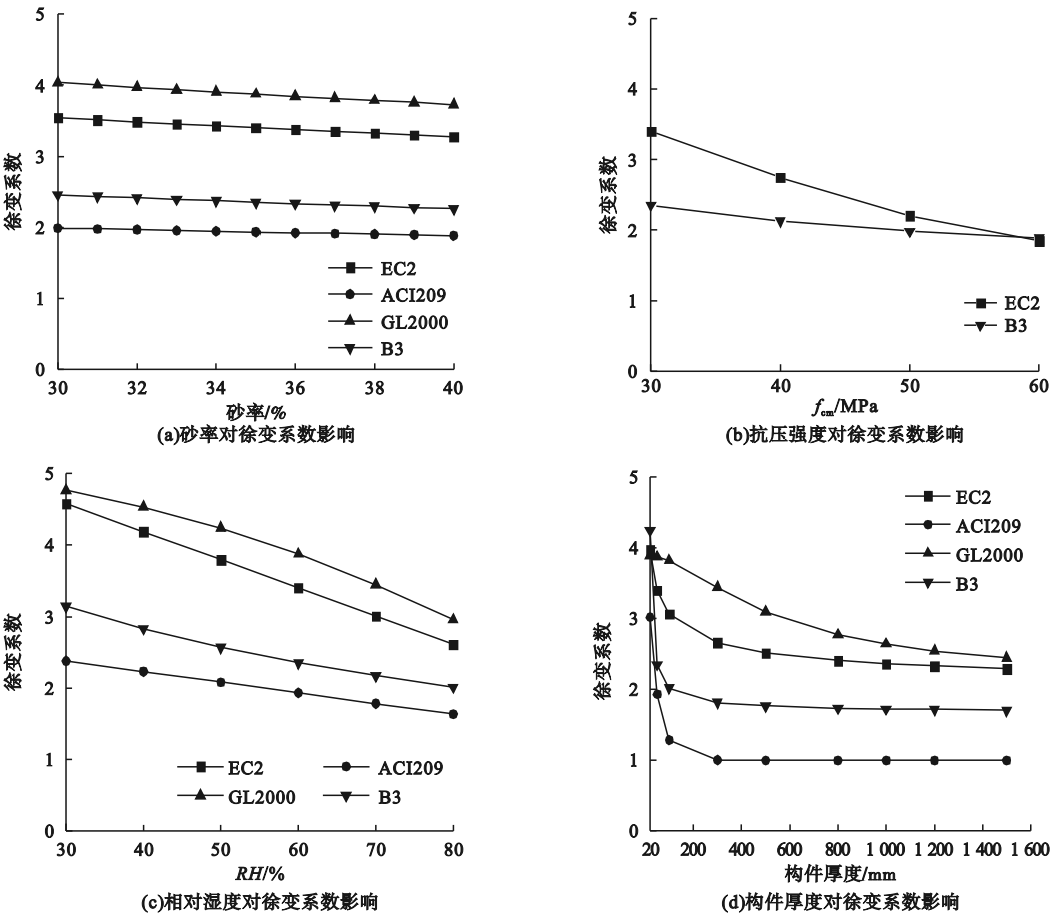


图2 各参数对煤矸石混凝土徐变系数的影响

Fig. 2 Influence of parameters on creep coefficient of CGAC

2 钢管煤矸石混凝土长期变形

2.1 长期性能分析方法

钢管煤矸石混凝土构件在长期荷载作用下,核心混凝土所承担的荷载会随时间增长不断降低,发生应力重分布现象。考虑混凝土时效作用^[23],在变荷载作用下的核心混凝土长期变形可通过下式计算:

$$\varepsilon_c(t_k) - \varepsilon_{sh}(t_k) = \sigma_c(t_0)J(t_k, t_0) + \int_{t_0}^{t_k} J(t, \tau) d\sigma_c(\tau) . \tag{11}$$

式中: $\varepsilon_c(t_k)$ 为 t_k 时刻核心混凝土的总变形量; $\varepsilon_{sh}(t_k)$ 为 t_k 时刻混凝土收缩应变; $\sigma_c(t_0)$ 为 t_0 时刻核心混凝土的应力; $J(t_k, t_0)$ 为从 t_0

开始加载到 t_k 时刻的混凝土徐变函数。
直接计算式(11)中的积分部分比较困难,可采取逐步积分法(SSM)或基于龄期调整的有效模量法(AAEM)进行计算。
2.1.1 逐步积分法

逐步积分法在进行徐变计算时,将时间 t 离散为 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_k$,共 k 个时间段^[24],利用缩短时间间隔的方法来控制误差,因此所得到的计算结果较为精准,得到的徐变计算公式如式(12)~(15)所示:

$$\varepsilon_c(t_k) - \varepsilon_{sh}(t_k) \cong \sigma_c(t_0)J(t_k, t_0) + \sum_{j=1}^k \frac{1}{2} [J(t_k, t_j) + J(t_k, t_{j-1})] [\sigma_c(t_j) - \sigma_c(t_{j-1})] . \tag{12}$$

$$\sigma_c(t_k) = E_{c1k}\varepsilon_c(t_k) + \sum_{j=0}^{k-1} \sigma_c(t_j)E_{c2kj} - E_{c1k}\varepsilon_{sh}(t_k). \tag{13}$$

$$E_{c1k} = \frac{1}{J(t_k, t_k) + J(t_k, t_{k-1})}. \tag{14}$$

$$E_{c2kj} = \begin{cases} \frac{J(t_k, t_1) - J(t_k, t_0)}{J(t_k, t_k) + J(t_k, t_{k-1})}, & j=0; \\ \frac{J(t_k, t_{j+1}) - J(t_k, t_{j-1})}{J(t_k, t_k) + J(t_k, t_{k-1})}, & j=1, \dots, k-1. \end{cases} \tag{15}$$

式中： $\varepsilon_c(t_k)$ 为 t_k 时刻核心混凝土的总变形量； $\varepsilon_{sh}(t_k)$ 为 t_k 时刻混凝土收缩应变； $\sigma_c(t_k)$ 为 t_k 时刻核心混凝土的应力； $J(t_k, t_{k-1})$ 为从 t_{k-1} 开始加载到 t_k 时刻的混凝土徐变函数。

2.1.2 基于龄期调整的有效模量法

发生线性徐变时，混凝土徐变大小取决于应力与弹性模量变化，基于龄期调整的有效模量法^[25-26]考虑了混凝土初始加载应力及持荷过程中的应力变化，并在混凝土弹性模量上增加了老化系数，以考虑混凝土老化对徐变终值的影响，得到的徐变计算公式如式(16)~(17)所示：

$$\varepsilon_c(t_k) - \varepsilon_{sh}(t_k) = \varepsilon_c(t_0) + \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)}\varphi(t_k, t_0) + \frac{\sigma_c(t_k) - \sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)}[1 + \chi(t_k, t_0)\varphi(t_k, t_0)]. \tag{16}$$

$$\chi(t_k, t_0) = [1 - \exp(-(0.09 + 0.686\varphi(t_k, t_0)))]^{-1} - [\varphi(t_k, t_0)]^{-1}. \tag{17}$$

式中： $\varphi(t_k, t_0)$ 为从 t_0 开始加载到 t_k 时刻的混凝土徐变系数； $\chi(t_k, t_0)$ 为从 t_0 开始加载到 t_k 时刻的混凝土老化系数。

采用逐步积分法进行构件长期变形分析时，虽然计算精度较高，但如式(12)所示，计算第 k 步变形时，需调用前 $k-1$ 步核心混凝土应力、应变进行迭代计算，计算相对繁琐，不便在实际工程中使用。与逐步积分法不同，基于龄期调整的有效模量法对迭代计算

进行了代数近似求解，是目前常用的计算钢管混凝土徐变变形的的方法，由于煤矸石混凝土徐变高于普通混凝土，需要对比各徐变模型下基于龄期调整的有效模量法与逐步积分法的差异。

2.2 徐变预测模型对比分析

按照参考文献[13]参数配合比配置钢管煤矸石混凝土，并增加轴压比为 0.4、含钢率为 10% 两个条件。使用逐步积分法和基于龄期调整的有效模量法预测钢管混凝土长期力学性能，得出钢管煤矸石混凝土徐变应变结果(见图 3~图 6)。随着煤矸石骨料取代率增加，各模型预测的钢管混凝土徐变应变均呈增加趋势，且增加速率逐渐加快。EC 2、ACI 209、GL 2000、B 3 模型中 50% 取代率钢管煤矸石混凝土相比钢管普通混凝土(取代率为 0)徐变应变增幅约为 17%；100% 取代率钢管煤矸石混凝土相比普通混凝土徐变应变增幅约为 50%。相对于煤矸石混凝土徐变系数，钢管煤矸石混凝土徐变应变中融入了骨料弹性模量的影响，放大了不同取代率钢管煤矸石混凝土之间徐变应变的差异。

由图 3~图 6 可知，随着时间的增长，基于龄期调整的有效模量法预测精度逐渐提高，但取代率的增加会放大两种方法预测结果的偏差。基于龄期调整的有效模量法在预测钢管煤矸石混凝土徐变应变时与逐步积分法之间的差异均在 10% 以内，相比钢管普通混凝土构件 6% 左右的最大偏差有所增加^[23]。对于持荷 50 a 钢管煤矸石混凝土徐变应变的预测结果，四种模型误差均在 6% 以内，EC2 模型差异最小，约为 1%；ACI209 模型差异最大，为 5.74%。基于龄期调整的有效模量法与逐步积分法预测结果较为吻合，可使用基于龄期调整的有效模量法替代逐步积分法应用于钢管煤矸石混凝土徐变应变计算。

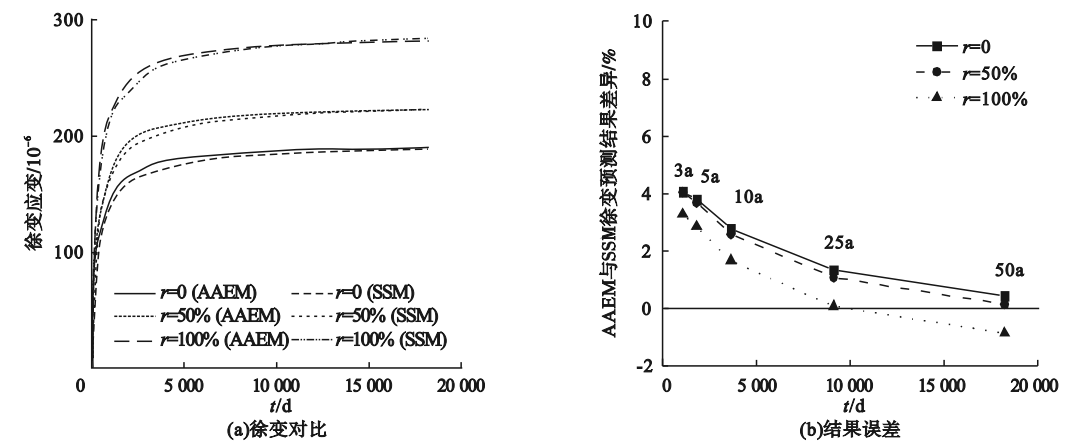


图 3 EC 2 模型的有效模量法与逐步积分法预测结果对比

Fig. 3 Comparison of AAEM and SSM prediction results of EC 2 model

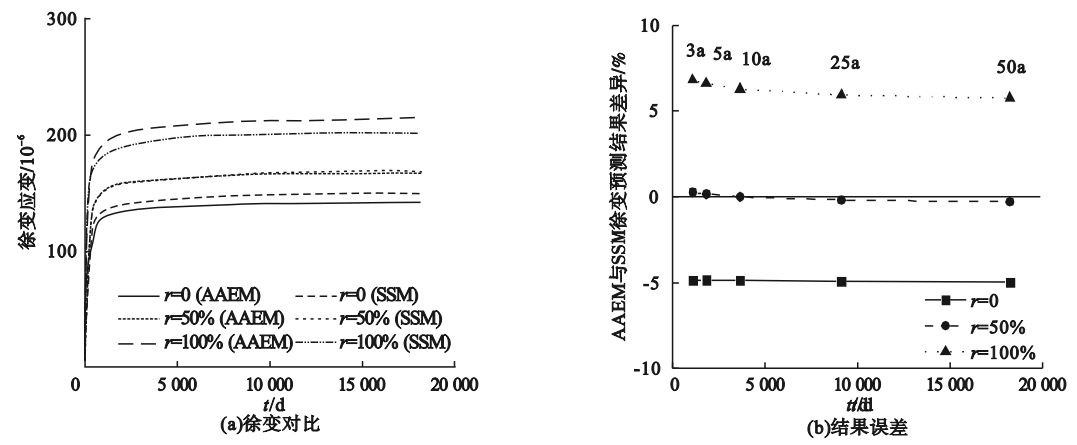


图 4 ACI 209 模型的有效模量法与逐步积分法预测结果对比

Fig. 4 Comparison of AAEM and SSM prediction results of ACI 209 model

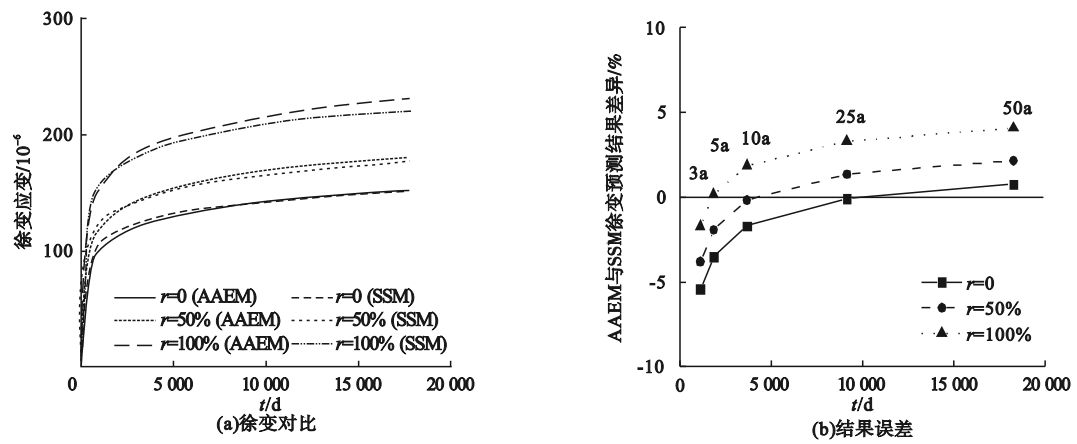


图 5 GL 2000 模型的有效模量法与逐步积分法预测结果对比

Fig. 5 Comparison of AAEM and SSM prediction results of GL 2000 model

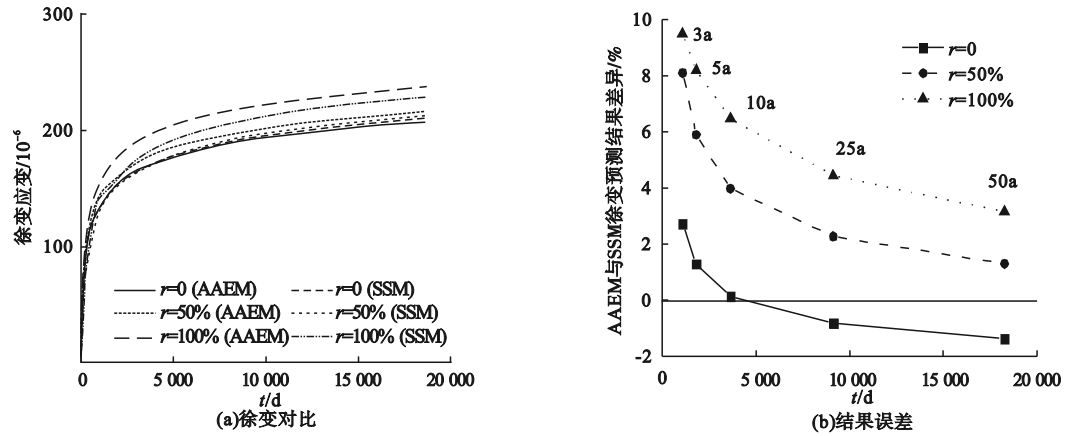


图6 B3模型的有效模量法与逐步积分法预测结果对比

Fig. 6 Comparison of AAEM and SSM prediction results of B3 model

3 结 论

(1)煤矸石混凝土徐变性能与普通混凝土徐变性能的差异可以通过煤矸石取代率和粗骨料体积分数进行计算。

(2)煤矸石混凝土的徐变系数与取代率呈正相关,与相对湿度、抗压强度、砂率、构件尺寸呈负相关。相对湿度和抗压强度为主要影响因素,50%取代率的煤矸石混凝土较普通混凝土徐变系数增幅约为10%,100%取代率的煤矸石混凝土增幅约为30%;相对湿度由30%增至80%时,徐变系数约降低40%;抗压强度由30 MPa增至60 MPa时,徐变系数约降低40%;构件厚度达到500 mm以后,对徐变系数影响不显著;外部钢管可有效降低煤矸石混凝土的徐变变形。

(3)基于龄期调整的有效模量法与逐步积分法预测结果差异在10%以内,由于前者更方便快捷,因此,在工程中可采用基于龄期调整的有效模量法对钢管煤矸石混凝土徐变性能进行预测。

参考文献

[1] 马宏强,易成,朱红光,等. 煤矸石集料混凝土抗压强度及耐久性能[J]. 材料导报,2018,32(14):2390-2395.
(MA Hongqiang, YI Cheng, ZHU Hongguang, et al. Compressive strength and durability of coal gangue aggregate concrete [J]. Materials reports, 2018, 32(14): 2390-2395.)

[2] 周梅,田博宇,王强,等. 自燃煤矸石粗集料对砂轻混凝土性能影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2013,32(11):2231-2237.
(ZHOU Mei, TIAN Boyu, WANG Qiang, et al. Experimental study on the influence of spontaneous combustion gangue coarse aggregate on sand lightweight concrete performance [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2013, 32(11): 2231-2237.)

[3] 王栋民,房奎圳. 煤矸石资源化利用技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,2021.
(WANG Dongmin, FANG Kuizhen. Coal gangue resource utilization technology [M]. Beijing: Chinese Building Materials Industry Publication, 2021.)

[4] 杨彪,姚贤华,何双华,等. 煤矸石粗骨料混凝土力学及耐久性能的研究进展[J]. 工业建筑,2023,53(1):212-222.
(YANG Biao, YAO Xianhua, He Shuanghua, et al. Reviews of research on mechanical properties and durability of coal gangue coarse aggregate concrete [J]. Industrial construction, 2023, 53(1): 212-222.)

[5] SUN J, LU L. Coupled effect of axially distributed load and carbonization on permeability of concrete [J]. Construction and building materials, 2015, 79(3): 9-13.

[6] ZHOU M, DOU Y, ZHANG Y, et al. Effects of the variety and content of coal gangue coarse aggregate on the mechanical properties of concrete [J]. Construction and building materials, 2019, 220(9): 386-395.

[7] 牛晓燕,王海,安明磊,等. 煤矸石粗骨料对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土,2023(1):68-72.
(NIU Xiaoyan, WANG Hai, AN Minglei, et al. Study on physical and chemical properties and mechanical properties of gangue coarse aggregate [J]. Concrete, 2023(1): 68-72.)

[8] 林俊东. BFRP约束煤矸石混凝土徐变及轴压性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.
(LIN Jundong. Research on creep and axial compression performance of BFRP-confined coal gangue concrete [D]. Xuzhou: China University of Geosciences, 2022.)

- [9] ZHANG Y, XU Q, WANG Q H, et al. Axial compressive behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns prepared with spontaneous-combustion coal gangue aggregate [J]. Journal of building engineering, 2022, 48 (5):103987.
- [10] 李幅昌,张海霞,杨志坚. 钢管煤矸石混凝土结构的抗震性能[M]. 北京:科学出版社,2018.
(LI Guochang, ZHANG Haixia, YANG Zhijian. Seismic performance of steel tube coal gangue concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2018.)
- [11] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社,2016.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.)
- [12] 王庆贺,李喆,张玉琢,等. 基于两相复合材料的煤矸石混凝土弹性模量研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(2): 254–261.
(WANG Qinghe, LI Zhe, ZHANG Yuzhuo, et al. Prediction formula of elastic modulus of coal gangue concrete based on two-phase composite materials [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(2):254–261.)
- [13] 李永靖,潘铖,张淑坤,等. 煅烧煤矸石混凝土徐变性能正交试验研究[J]. 非金属矿, 2019, 42(3):40–43.
(LI Yongjing, PAN Yue, ZHANG Shukun, et al. Orthogonal test study on creep performance of calcination coal gangue concrete [J]. Non-metallic mines, 2019 42(3):40–43.)
- [14] 刘德慧,李滢. 煅烧煤矸石再生细骨料混凝土徐变性能[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(9): 2837–2843.
(LIU Dehui, LI Ying. Creep performance of calcined coal gangue recycled fine aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2020, 39(9):2837–2843.)
- [15] BAZANT Z P. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modules method [J]. ACI journal, 1972, 69(4): 212–217.
- [16] BARANIKUMAR A, TORRENCE C E, GRASLEY Z. Thermorheological approach to predict long-term creep of cement mortar from short-term tests [J]. Mechanics of time-dependent materials, 2021(3):1–19.
- [17] 罗素蓉,郑欣,黄海生. 再生粗骨料预处理及再生混凝土徐变试验研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2):242–247.
(LUO Surong, ZHENG Xin, HUAN Haisheng. Experimental study on pretreatment of recycled coarse aggregate and creep behavior of recycled aggregate concrete [J]. Journal of building materials, 2016, 19(2):242–247.)
- [18] VOIGT W. Ueber die beziehung zwischen den beiden elasticitätsconstanten tsconstanten isotroper krper [J]. Wied ann, 1889 (10):573–587.
- [19] 常煜存,耿悦,王玉银,等. 基于两相复合材料的再生混凝土弹性模量预测模型[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12):165–173.
(CHANG Yicun, GENG Yue, WANG Yuyin, et al. Models of elastic modulus for concrete made with recycled coarse aggregate based on two-phase composite material [J]. Journal of building structures, 2020, 41(12):165–173.)
- [20] FATHIFAZL G, RAZAQPUR A G, ISGOR O B, et al. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate [J]. Cement & concrete composites, 2011, 33(10): 1026–1037.
- [21] YANG C C, HUANG R, YEI W, et al. Aggregate effect of elastic moduli of cement-based composite materials [J]. Journal of marine science and technology, 1995, 3(1): 5–10.
- [22] 王永宝,原元,赵成功,等. 混凝土结构徐变模型试验与原型对比关系[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3):465–473.
(WANG Youbao, YUAN Yuan, ZHAO Chenggong, et al. Comparison of relationship between model test and prototype in creep behavior of concrete structures [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3):465–473.)
- [23] Gilbert R I, Ranzi G. Time-dependent behaviour of concrete structures [M]. London: Spon Press, 2011.
- [24] 王玉银,耿悦,张素梅. 钢管混凝土收缩徐变模型及计算方法对比分析[J]. 天津大学学报, 2011, 44(12):1075–1082.
(WANG Yuyin, GENG Yue, ZHANG Sumei. Comparison of concrete models and simplified analysis methods for concrete-filled steel tubular members [J]. Journal of Tianjin university, 2011, 44(12):1075–1082.)
- [25] WANG W N, GONG J X. New relaxation function and age-adjusted effective modulus expressions for creep analysis of concrete structures [J]. Engineering structures, 2019, 188(3):1–10.
- [26] 范峰,王化杰,支旭东,等. 上海环球金融中心施工竖向变形分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(7):118–124.
(FAN Feng, WANG Huajie, ZHI Xudong, et al. Analysis of vertical deformation during construction of the Shanghai world financial center [J]. Journal of building structures, 2010, 31(7):118–124.)
(责任编辑:王国业 英文审校:刘永军)