

# 基于两相复合材料的煤矸石混凝土 弹性模量研究

王庆贺<sup>1,2</sup>,李喆<sup>1</sup>,张玉琢<sup>1</sup>,常煜存<sup>2</sup>

(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)

**摘要** 目的 提出一种基于两相复合材料理论的煤矸石混凝土弹性模量预测模型,为煤矸石混凝土弹性模量的计算提供借鉴。**方法** 基于普通混凝土弹性模量预测模型,考虑煤矸石粗骨料取代率的影响,推导得到煤矸石混凝土弹性模量预测模型;采用文献中39组自燃煤矸石和12组原状煤矸石混凝土弹性模量试验数据验证模型的可靠性。**结果** 传统的自燃煤矸石和原状煤矸石混凝土弹性模量预测模型精度还需提高,预测结果与试验结果相差26%~31%;对于基于两相复合材料理论提出的煤矸石混凝土弹性模量预测模型中,BNC模型预测精度最高,对于自燃煤矸石和原状煤矸石混凝土,其预测结果与试验结果比值的均值分别为0.936和1.030,判定系数分别为0.839和0.943。**结论** BNC模型较传统预测方法能更为准确地预测煤矸石混凝土的弹性模量。

**关键词** 煤矸石混凝土;煤矸石粗骨料;弹性模量;预测模型;两相复合材料模型

中图分类号 TU528 文献标志码 A

## Prediction Formula of Elastic Modulus of Coal Gangue Concrete Based on Two-Phase Composite Materials

WANG Qinghe<sup>1,2</sup>, LI Zhe<sup>1</sup>, ZHANG Yuzhuo<sup>1</sup>, CHANG Yicun<sup>2</sup>

(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)

**Abstract:** A prediction model for the elastic modulus of gangue concrete based on the theory of two-phase composite materials is presented, which provides reference for the calculation of the elastic modulus of gangue concrete. Based on the prediction model of elastic modulus of ordinary concrete, the prediction model of elastic modulus of gangue concrete is derived considering the influence of the substitution rate of coarse aggregate. The elastic modulus test data of 39 groups of

收稿日期:2020-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51808351);辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902027);辽宁省博士科研启动项目(2019-BS-193, 2019-BS-197)

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

spontaneous combustion gangue and 12 groups of undamaged gangue concrete were used to verify the reliability of the model. The accuracy of traditional prediction models of elastic modulus of spontaneous combustion gangue and undisturbed gangue concrete needs to be improved. The difference between the prediction results and the test results is 26% and 31% respectively. Among the prediction models for the elastic modulus of coal gangue concrete based on the two-phase composite material theory, the BNC model has the highest prediction accuracy. For spontaneous combustion coal gangue concrete and undamaged coal gangue concrete, the average ratio between the prediction results and the test results is 0.936 and 1.030 respectively, and the determination coefficient is 0.839 and 0.943 respectively. BNC model can predict the elastic modulus of gangue concrete more accurately than traditional forecasting method.

**Key words:** coal gangue aggregate concrete; coarse coal gangue aggregate; elastic modulus; prediction model; two-phase composite material model

煤矸石作为我国排放量最大的工业废弃物<sup>[1]</sup>,长期堆积占用大片土地,且其内部温度升高会发生自燃现象,得到自燃煤矸石<sup>[2]</sup>。合理利用煤矸石不仅可以解决煤矸石处理带来的环境问题,还能产生可观的经济效益。考虑到混凝土中骨料约占体积的60%~70%<sup>[3]</sup>,若将煤矸石破碎、筛选后制成煤矸石骨料替代天然骨料,符合我国可持续发展战略的要求。因此,部分学者对煤矸石作为混凝土骨料的可行性进行了探究,认为煤矸石经合理筛选后可作为混凝土骨料使用<sup>[4]</sup>。

弹性模量是混凝土的重要力学指标之一,显著影响混凝土构件的使用性能。研究学者发现,当采用煤矸石骨料配制混凝土时,由于煤矸石弹性模量低于天然石子,所以煤矸石混凝土弹性模量较普通混凝土低。李少伟等<sup>[5]</sup>通过试验研究了自燃煤矸石粗骨料对混凝土弹性模量的影响,发现当煤矸石粗骨料取代率为100%时,弹性模量降低约33%;周梅等<sup>[6-7]</sup>研究发现,当自燃煤矸石粗骨料取代率为100%时,弹性模量降低19.8%~57.1%;陈彦文等<sup>[8]</sup>通过研究发现,煤矸石掺量的提高对C40等级以上的混凝土弹性模量影响较为明显,原状煤矸石取代率为100%时,混凝土弹性模量最大降低12%。上述研究表明,煤矸石混凝土弹性模量具有一定的差异性,这主要因为煤矸石具有不稳定性,不同地区的煤矸石物化性质差

异明显,且煤矸石自燃后与原状煤矸石力学性能也存在一定的差异<sup>[9-11]</sup>。

目前,煤矸石混凝土的弹性模量计算通常参考轻骨料混凝土结构设计规范,其主要参数为混凝土抗压强度和表观密度。T. C. Hansen等<sup>[12]</sup>学者提出了一种基于两项复合材料(粗骨料和砂浆)的混凝土弹性模量预测模型,国内学者针对该模型也进行了研究,结果表明该模型对于普通混凝土、再生混凝土等均有良好的预测效果<sup>[13]</sup>。因此笔者使用该模型对煤矸石混凝土弹性模量进行预测,通过引入煤矸石骨料取代率,基于两项复合材料理论,推导得到煤矸石混凝土弹性模量预测公式。在此基础上,利用现有试验结果,验证模型的可靠性,通过对比找出精度相对较高的预测模型,为煤矸石混凝土弹性模量的计算提供依据。

## 1 煤矸石混凝土弹性模量试验

笔者选用已有试验结果进行对比分析,研究参数包括混凝土配合比、骨料基本性质和混凝土基本力学性能,试验结果见表1。从表中可以看出,煤矸石混凝土的抗压强度较普通混凝土降低了7.5%~27.6%,弹性模量较普通混凝土降低了11.6%~57.1%。煤矸石混凝土的弹性模量随煤矸石骨料取代率提高而降低,这主要是因为混凝土的弹性模量与骨料的表观密度关系密切<sup>[14-16]</sup>,弹性

模量随骨料表观密度的减小而减小。由于原状煤矸石骨料、自燃煤矸石骨料表观密度均小于天然骨料,故煤矸石混凝土的弹性模量有所降低。

表1 混凝土配合比设计及力学性能

Table 1 Mixture compositions and mechanical properties of concrete

文献	试件编号	体积质量/(kg·m <sup>-3</sup> )						粗骨料			混凝土			
		$\rho$ (水泥)	$\rho$ (粉 煤灰)	$\rho$ (水)	$\rho$ (减 水剂)	$\rho$ (矿粉)	$\rho$ (细 骨料)	$\rho$ (粗 骨料)	表观密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	压碎指 标/%	吸水 率%	$f_{cu}$ / MPa	$E_c$ / GPa	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
	NAC	324	93	215	1.5	46	628	1 025	2 705	4.5	1.35	39.26	28.43	2 332.5
	SAC-25	324	93	215	1.5	46	628	1 010	2 497	25.2	9.80	40.98	24.10	2 317.5
[5]	SAC-50	324	93	215	1.5	46	628	997	2 497	25.2	9.80	39.06	23.01	2 304.5
	SAC-75	324	93	215	1.5	46	628	982	2 497	25.2	9.80	37.79	21.69	2 289.5
	SAC-100	324	93	215	1.5	46	628	970	2 497	25.2	9.80	35.37	19.40	2 277.5
	NAC	324	93	210	1.5	46	628	1 021	2 705	4.5	0.83	50.04	31.40	2 323.5
	RAC-25	328	94	190	8.6	47	626	1 025	2 653	9.9	3.15	46.29	27.75	2 318.6
	RAC-50	328	94	190	8.6	47	626	1 022	2 653	9.9	3.15	39.73	24.00	2 315.6
	RAC-75	328	94	190	8.6	47	626	1 021	2 653	9.9	3.15	39.69	19.73	2 314.6
[6]	RAC-100	328	94	190	8.6	47	626	1 025	2 653	9.9	3.15	39.85	18.40	2 318.6
	SAC-25	324	97	223	1.4	43	632	1 042	2 276	21.2	7.55	40.29	27.50	2 362.4
	SAC-50	324	97	237	1.4	43	632	1 072	2 276	21.2	7.55	38.86	26.92	2 406.4
	SAC-75	324	97	253	1.4	43	632	1 042	2 276	21.2	7.55	36.25	22.87	2 392.4
	SAC-100	324	97	268	1.4	43	632	1 031	2 276	21.2	7.55	36.66	13.46	2 396.4
[7]	NAC	324	93	215	1.5	46	628	1 025	2 705	4.5	1.55	38.71	24.20	2 332.5
	SAC-100	324	93	215	1.5	46	628	970	2 560	25.2	9.80	36.72	19.40	2 277.5
	NAC	253	70	175	11.2	95	753	1 040	2 706	4.6	1.66	43.50	32.55	2 397.2
	SAC-25	334	96	205	10.4	43	632	1 031	2 660	26.2	9.80	42.12	26.56	2 351.4
[14]	SAC-50	334	96	205	10.4	43	632	1 031	2 660	26.2	9.80	37.11	23.46	2 351.4
	SAC-75	334	96	205	10.4	43	632	1 031	2 660	26.2	9.80	34.72	20.64	2 351.4
	SAC-100	334	96	205	10.4	43	632	1 031	2 660	26.2	9.80	31.41	16.73	2 351.4
	NAC	340	60	180	3.4	-	628	1 025	2 705	4.5	1.35	39.2	26.4	2 236.4
	SAC-25	340	60	180	3.4	-	628	1 006	2 497	25.2	9.80	37.5	24.1	2 217.4
[15]	SAC-50	340	60	180	3.4	-	628	984	2 497	25.2	9.80	35.7	22.7	2 195.4
	SAC-75	340	60	180	3.4	-	628	966	2 497	25.2	9.80	32.4	21.3	2 177.4
	SAC-100	340	60	180	3.4	-	628	945	2 497	25.2	9.80	31.6	17.9	2 156.4

注:NAC、RAC和SAC分别代表天然骨料混凝土、原状煤矸石粗骨料混凝土、自燃煤矸石粗骨料混凝土;RAC-25、RAC-50、RAC-75和RCA-100分别为取代率为25%、50%、75%和100%的原状煤矸石粗骨料混凝土,SAC同理; $f_{cu}$ 和 $E_c$ 分别为混凝土立方体抗压强度和弹性模量。

## 2 现有规范预测精度分析

我国《轻骨料混凝土应用技术标准》(JGJ/T 12—2019)中给出了轻骨料混凝土弹性模量计算方法<sup>[17]</sup>(见式(1))。可以看出式(1)是通过混凝土立方体抗压强度与表观密度计算轻骨料混凝土弹性模量。

$$E_c = 2.02\rho \sqrt{f_{cu,k}} \quad (1)$$

式中: $E_c$ 为混凝土弹性模量; $\rho$ 为轻骨料混凝土的表观密度; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值。

笔者利用式(1)计算得到预测值与相应的试验值对比结果见图1,图中 $E_{c,pre}$ 表示预测值, $E_{c,test}$ 表示试验值。从图中可以看出,对于原状煤矸石混凝土,其 $E_{c,pre}/E_{c,test}$ 的均值 $\mu$ 为1.31,变异系数 $COV$ 为0.179,判定系数 $R^2$ 为0.850;对于自燃煤矸石混凝土,其 $E_{c,pre}/E_{c,test}$ 的均值 $\mu$ 为1.26,变异系数 $COV$ 为0.192,判定系数 $R^2$ 为0.535。说明现有规范中计算方法对于原状煤矸石混凝土与自燃煤矸石混凝土的弹性模量的预测精度还需提高,需要进一步优化。

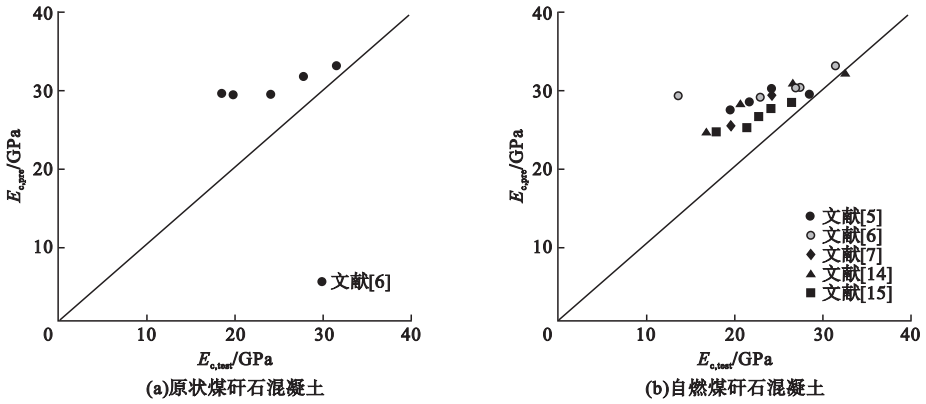


图1 规范预测结果与试验结果对比

Fig. 1 Comparison of calculated results and test results

### 3 基于两相复合材料的煤矸石混凝土弹性模量预测模型

#### 3.1 普通混凝土两相复合材料模型

普通混凝土可认为是由天然粗骨料与砂浆两部分组成,学者将天然骨料混凝土视为两项复合材料,提出了多种普通混凝土弹性模量预测模型<sup>[12]</sup>,见式(2)~式(7)。

Voigt 模型:

$$E_{NAC} = V_{CA} E_{NCA} + E_m (1 - V_{CA}). \quad (2)$$

Reuss 模型:

$$\frac{1}{E_{NAC}} = \frac{V_{CA}}{E_{NCA}} + \frac{1 - V_{CA}}{E_m}. \quad (3)$$

BNC 模型:

$$\frac{E_{NAC}}{E_m} = \left( \frac{E_{NCA}}{E_m} \right)^{V_{CA}}. \quad (4)$$

PCounto 模型:

$$E_{NAC} = E_m \left( 1 + \frac{V_{CA}}{\frac{E_{NAC}}{E_m} - \sqrt{V_{CA}}} \right). \quad (5)$$

Counto 模型:

$$E_{NAC} = E_m \left( 1 + \frac{V_{CA}}{\sqrt{V_{CA}} - V_{CA} + \frac{E_m}{E_{NAC} - E_m}} \right). \quad (6)$$

Hirsch 模型:

$$\frac{E_m}{E_{NAC}} = \frac{0.5}{1 + \left( \frac{E_{NAC}}{E_m} - 1 \right) V_{CA}} +$$

$$0.5 \left( 1 + \left( \frac{E_m}{E_{NAC}} - 1 \right) V_{CA} \right). \quad (7)$$

式中: $E_{NAC}$ 、 $E_{CGAC}$ 、 $E_m$  和  $E_{NCA}$  分别表示普通混凝土、煤矸石混凝土、砂浆和天然粗骨料的弹性模量; $V_{CA}$  为单位体积混凝土中粗骨料的体积分数。

上述公式中,Voigt 模型为并联模型,认为在外荷载作用下,粗骨料与砂浆承受的应变相同,即  $\varepsilon_{NCA} = \varepsilon_m$ ;Reuss 模型为串联模型,认为骨料与砂浆承受相同应力,即  $\sigma_{NCA} = \sigma_m$ ;PCounto 模型、Counto 模型和 Hirsch 模型则结合串联模型与并联模型的特点,且较其他几种模型更加复杂;BNC 模型虽为串并联模型,但可有效预测混凝土早期弹性模量<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 煤矸石混凝土弹性模量预测模型

煤矸石混凝土由煤矸石粗骨料、天然粗骨料与砂浆三部分组成,实际上为多相复合材料,其中粗骨料的弹性模量与煤矸石骨料取代率( $r_{CGA}$ )有关,故在上述预测模型中,需将粗骨料弹性模量( $E_{CA}$ )分为天然粗骨料弹性模量( $E_{NCA}$ )与煤矸石粗骨料弹性模量( $E_{CGA}$ )两部分,见式(8):

$$E_{CA} = r_{CGA} E_{CGA} + (1 - r_{CGA}) E_{NCA}. \quad (8)$$

以 Voigt 模型为例,将式(8)带入天然混凝土预测模型式(2)中,可以得煤矸石混凝土预测公式:

$$E_{CGAC} = V_{CA} [(1 - r_{CGA}) E_{NCA} + r_{CGA} E_{CGA}] +$$

$$E_m V_m. \quad (9)$$

为得出煤矸石混凝土与普通混凝土之间的关系,将式(9)与式(2)相比,得到公式(10):

$$\frac{E_{CGAC}}{E_{NAC}} = 1 - \left[ \frac{E_{NCA}}{E_{NAC}} - \frac{E_{CGA}}{E_{NAC}} \right] r_{CGA} V_{CA}. \quad (10)$$

对于天然粗骨料,可假设天然粗骨料弹性模量为普通混凝土弹性模量的2倍<sup>[18]</sup>;对于煤矸石粗骨料,可认为原状煤矸石粗骨料弹性模量为天然骨料混凝土的1/2,自燃煤矸石粗骨料弹性模量为天然骨料混凝土的1/3<sup>[19]</sup>。将上述假设用于式(10)中可得出式(11),即适用于煤矸石混凝土的Voigt模型。同理可得同样适用于煤矸石混凝土的Reuss模型、BNC模型、Hirsch模型、Counto模型和PCounto模型,见式(11)~式(16)。

Voigt(CGAC)模型:

$$E_{CGAC} = \begin{cases} (1 - r_{RCGA} V_{CA}) E_{NAC}; \\ (1 - \frac{4}{3} r_{SCGA} V_{CA}) E_{NAC}. \end{cases} \quad (11)$$

Reuss(CGAC)模型:

$$E_{CGAC} = \begin{cases} \frac{1}{(1 + 0.5 r_{RCGA} V_{CA})} E_{NAC}; \\ \frac{1}{(1 + r_{SCGA} V_{CA})} E_{NAC}. \end{cases} \quad (12)$$

BNC(CGAC)模型:

$$E_{CGAC} = \begin{cases} \left(1 - \frac{3}{4} r_{RCGA}\right)^{V_{CA}} E_{NAC}; \\ \left(1 - \frac{5}{6} r_{SCGA}\right)^{V_{CA}} E_{NAC}. \end{cases} \quad (13)$$

Hirsch(CGAC)模型:

$$E_{CGAC} = \begin{cases} \left( \frac{1 + \frac{1}{1+7V_{CA}} - \frac{7}{8}V_{CA}}{2 + (7-6r_{RCGA})V_{CA}} + \left( \frac{6r_{RCGA}-7}{8-6r_{RCGA}} \right) V_{CA} \right) E_{NAC}; \\ \left( \frac{1 + \frac{1}{1+7V_{CA}} - \frac{7}{8}V_{CA}}{6 + (21-20r_{SCGA})V_{CA}} + \left( \frac{20r_{SCGA}-21}{24-20r_{SCGA}} \right) V_{CA} \right) E_{NAC}. \end{cases} \quad (14)$$

Counto(CGAC)模型:

$$E_{CGAC} = \begin{cases} \left( \frac{1 + \frac{V_{CA}}{\sqrt{V_{CA}} - V_{CA} + \frac{1}{7-6r_{RCGA}}}}{1 + \frac{V_{CA}}{\sqrt{V_{CA}} - V_{CA} + \frac{1}{7}}} \right) E_{NAC}; \\ \left( \frac{1 + \frac{V_{CA}}{\sqrt{V_{CA}} - V_{CA} + \frac{3}{21-20r_{SCGA}}}}{1 + \frac{V_{CA}}{\sqrt{V_{CA}} - V_{CA} + \frac{1}{7}}} \right) E_{NAC}. \end{cases}$$

(15)

PCounto(CGAC)模型:

$$E_{CGAC} = \begin{cases} \left( \frac{1 + \frac{V_{CA}}{8-6r_{RCGA} - \sqrt{V_{CA}}}}{1 + \frac{V_{CA}}{7-6r_{RCGA}}} \right) E_{NAC}; \\ \left( \frac{1 + \frac{V_{CA}}{24-20r_{SCGA} - \sqrt{V_{CA}}}}{1 + \frac{V_{CA}}{21-20r_{SCGA}}} \right) E_{NAC}. \end{cases}$$

(16)

式中: $E_{RCGA}$ 、 $E_{SCGA}$ 和 $E_{CGAC}$ 分别为原状煤矸石混凝土、自燃煤矸石混凝土和煤矸石混凝土弹性模量; $r_{RCGA}$ 和 $r_{SCGA}$ 分别为原状煤矸石和自燃煤矸石粗骨料取代率。

## 4 煤矸石混凝土弹性模量预测模型预测结果分析

### 4.1 预测结果分析

对各弹性模量预测模型进行分析,预测结果见图2。图中横坐标为煤矸石粗骨料取代率 $r_{CGA}$ ;纵坐标为使用煤矸石粗骨料取代天然骨料对混凝土弹性模量的降低值,用

$(E_{RCGA} - E_{NAC})/E_{NAC}$ 和 $(E_{SCGA} - E_{NAC})/E_{NAC}$ 表示。

由图2可以看出,随着煤矸石骨料取代率、单位体积粗骨料含量的增加,各模型预测出的弹性模量均呈降低趋势,主要原因为煤矸石骨料的力学性能不如天然骨料,单位体积煤矸石骨料的含量越多,混凝土弹性模量降低得越明显。各个模型之间预测结果有明显差异,主要原因为各个模型对煤矸石骨料取代率、单位体积粗骨料含量的敏感程度不同,导致各模型预测结果有所差异。

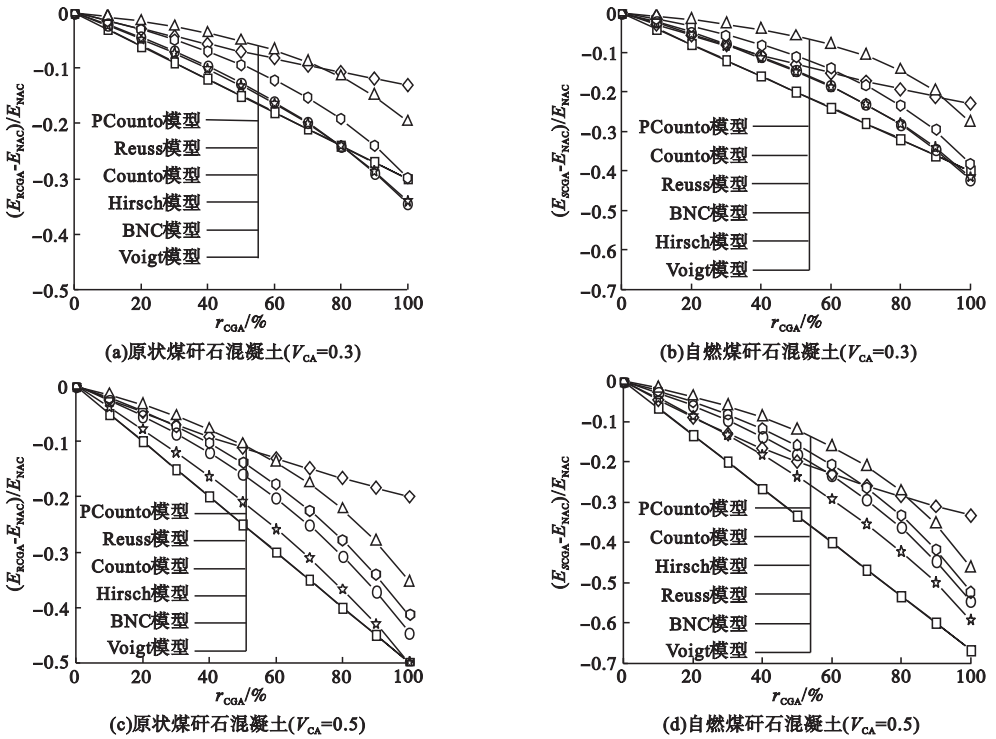


图2 模型预测结果对比

Fig. 2 Comparison of model prediction results

### 4.2 基于试验结果的对比分析

将所提出的各煤矸石混凝土弹性模量预测结果与试验结果进行对比,结果见图3和图4。从图中可以看出,对于原状煤矸石混凝土而言,各模型 $E_{c,pre}/E_{c,test}$ 的均值 $\mu$ 略大于1.0。对于自燃煤矸石混凝土而言,各模型 $E_{c,pre}/E_{c,test}$ 的均值 $\mu$ 为1.0左右。可见各模型的预测结果与试验结果基本吻合,异变

系数与判定系数在可接受范围内。

结合原状煤矸石混凝土与自燃煤矸石混凝土的弹性模量预测情况发现,BNC模型可较为准确地预测煤矸石混凝土弹性模量,对于原状煤矸石混凝土,该模型 $E_{c,pre}/E_{c,test}$ 的均值 $\mu$ 为1.030,判定系数为0.943;对于自燃煤矸石混凝土,该模型 $E_{c,pre}/E_{c,test}$ 的均值 $\mu$ 为0.936,判定系数为0.839。

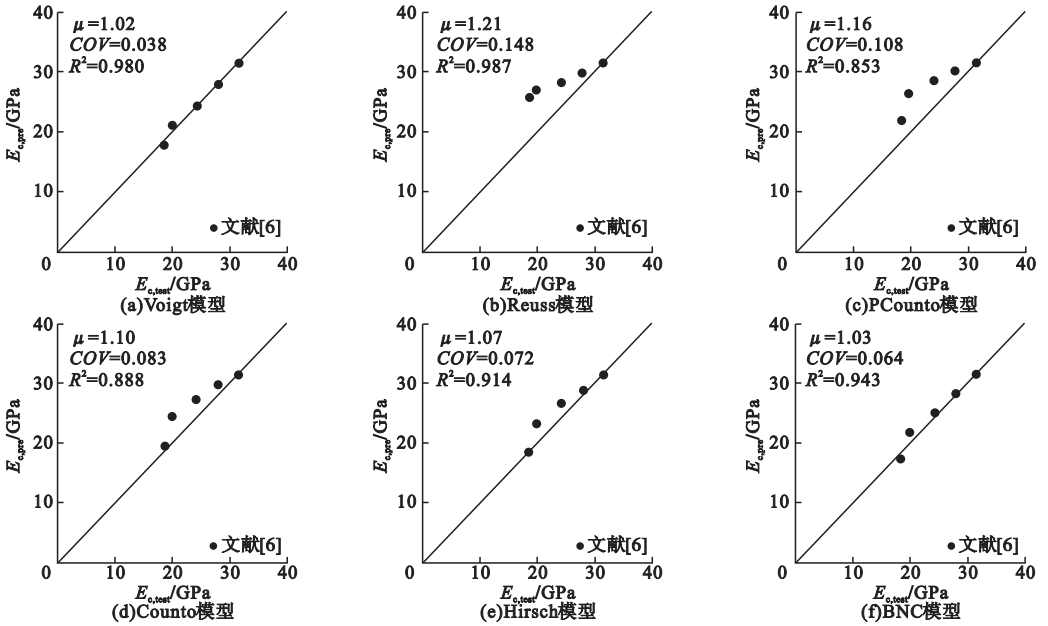


图3 原状煤矸石混凝土弹性模量模型预测结果与试验结果对比

Fig. 3 Comparison of prediction results of elastic modulus model of undisturbed coal gangue concrete

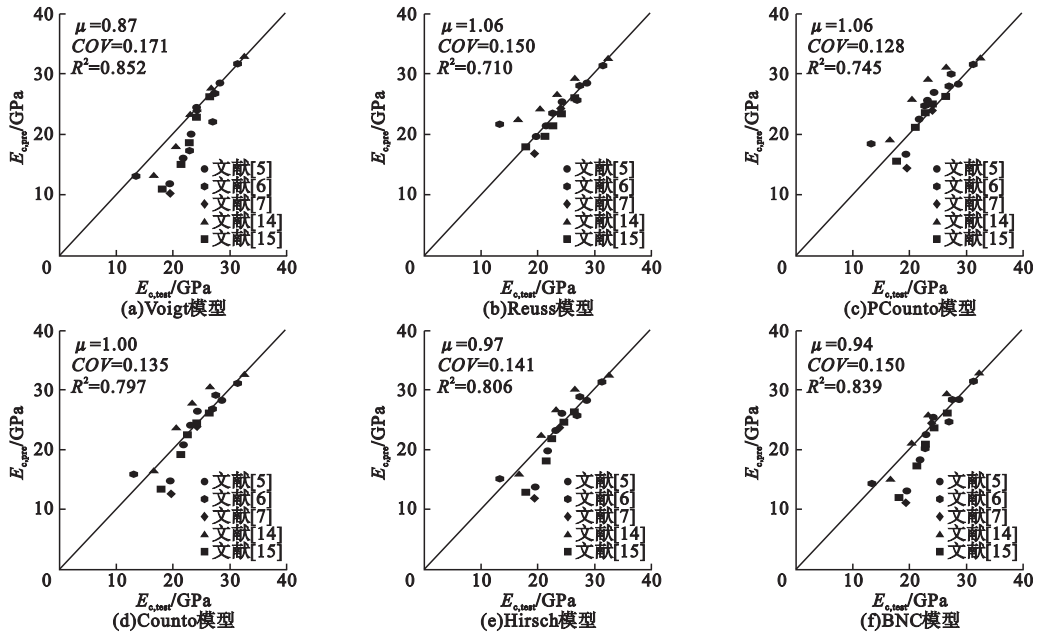


图4 自燃煤矸石混凝土弹性模量模型预测结果与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of prediction and test results of elastic modulus model of coal-fired gangue concrete

### 5 结论

(1) 现有轻骨料混凝土规范通过立方体抗压强度和表观密度预测煤矸石混凝土弹性模量,预测精度不够,需要进一步优化。

(2) 结合普通混凝土弹性模量预测模型,基于两相复合材料理论,提出6种适用于

煤矸石混凝土弹性模量预测模型,各模型对煤矸石骨料取代率、单位体积粗骨料含量的敏感程度不同,导致各模型预测结果有所差异。

(3) 通过将预测结果与试验结果进行对比发现,BNC模型能较为准确地预测煤矸石混凝土的弹性模量。

## 参考文献

- [1] YI C, MA H Q, CHEN H Y, et al. Preparation and characterization of coal gangue geopolymers [J]. *Construction and building materials*, 2018, 187: 318–326.
- [2] WANG S B, LUO K L, WANG X, et al. Estimate of sulfur, arsenic, mercury, fluorine emissions due to spontaneous combustion of coal gangue: An important part of Chinese emission inventories [J]. *Environmental pollution*, 2016, 209: 107–113.
- [3] VREIAN K P, ASHRAF W, CAO Y Z. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production [J]. *Resources, conservation and recycling*, 2018, 133: 30–49.
- [4] 刘辉, 陈菲. 煤矸石用作混凝土骨料的可行性分析 [J]. *陕西煤炭*, 2020, 39(2): 60–63. (LIU Hui, CHEN Fei. Feasibility analysis of coal gangue used as concrete aggregate [J]. *Shaanxi coal*, 2020, 39(2): 60–63.)
- [5] 李少伟, 周梅, 张莉敏. 自燃煤矸石粗骨料特性及其对混凝土性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23: 334–340. (LI Shaowei, ZHOU Mei, ZHANG Limin. Properties of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate and its influence on concrete [J]. *Journal of building material*, 2020, 23: 334–340.)
- [6] ZHOU M, DOU Y W, ZHANG Y Z, 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: 386–395.
- [7] 周梅, 李国栋, 窦艳伟, 等. 自燃煤矸石骨料混凝土单轴受压破坏特征及强度分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(11): 3528–3532. (ZHOU Mei, LI Guodong, DOU Yanwei, et al. Failure characteristics and strength analysis of spontaneous combustion gangue aggregate concrete under uniaxial compression [J]. *Bulletin of the Chinese ceramic society*, 2018, 37(11): 3528–3532.)
- [8] 陈彦文, 牛晚扬, 丁兆阳. 煤矸石混凝土弹性模量的试验研究 [J]. *混凝土*, 2016(4): 20–23. (CHEN Yanwen, NIU Wanyang, DING Zhaoyang. Research on elasticity modulus of gangue concrete [J]. *Concrete*, 2016(4): 20–23.)
- [9] 王爱国, 朱愿愿, 徐海燕, 等. 混凝土用煤矸石骨料的研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(7): 2076–2086. (WANG Aiguo, ZHU Yuanyuan, XU Haiyan, et al. Research progress on coal gangue aggregate for concrete [J]. *Bulletin of the Chinese ceramic society*, 2019, 38(7): 2076–2086.)
- [10] 段晓牧. 煤矸石集料混凝土的微观结构与物理力学性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2014. (DUAN Xiaomu. Study on the micro-structure and physical-mechanical performance of concrete with coal gangue as aggregate [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014.)
- [11] 董作超. 煤矸石集料混凝土的力学性能与抗碳化试验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2016. (DONG Zuochao. Experimental study on mechanical properties and carbonation resistance of coal gangue aggregate concrete [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016.)
- [12] ZHOU F P, LYDON F D, BARR B I G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high-performance concrete [J]. *Cement and concrete research*, 1995, 25(1): 177–186.
- [13] 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): 168–176. (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): 168–176.)
- [14] 李桐昌, 舒静, 张春雨. 钢管煤矸石混凝土压弯构件的有限元分析 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2010, 26(6): 1052–1057. (LI Guochang, SHU Jing, ZHANG Chunyu. Finite element analysis of gangue concrete-filled steel tubular beam-columns [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2010, 26(6): 1052–1057.)
- [15] ZHANG Y, WANG Q H, ZHOU M, et al. Mechanical properties of concrete with coarse spontaneous combustion gangue aggregate (SCGA): experimental investigation and prediction methodology [J]. *Construction and building materials*, 2019, 220: 386–395.
- [16] 刘喜, 史尚冕, 赵天俊, 等. 轻骨料混凝土弹性模量计算模型分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(7): 2192–2196, 2202. (LIU Xi, SHI Shangmian, ZHAO Tianjun, et al. Calculation model for elastic modulus of lightweight aggregate concrete [J]. *Bulletin of the Chinese ceramic society*, 2017, 36(7): 2192–2196, 2202.)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 轻骨料混凝土应用技术规程: JGJ—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for application of lightweight aggregate concrete: JGJ—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.)
- [18] 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.
- [19] WANG Q H, LI Z, ZHANG Y Z, et al. Influence of coarse coal gangue aggregates on elastic modulus and drying shrinkage behaviour of concrete [J]. *Journal of building engineering*, 2020, 32: 1–12. (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)