

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.08.004

自燃煤矸石粗骨料混凝土 Bolomey 公式的修正

周梅, 崔翰博, 赵华民, 李高年, 张倩

(辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为了更好地利用和推广自燃煤矸石骨料混凝土, 研究其配合比设计和温度公式, 以水泥强度等级和自燃煤矸石粗骨料的压碎值为影响因素, 通过试验研究二者与自燃煤矸石粗骨料混凝土强度之间的关系。结果表明, 水泥强度等级和自燃煤矸石压碎值与混凝土强度之间存在良好的线性关系。建立了自燃煤矸石粗骨料混凝土强度的 Bolomey 公式, 并分析了自燃煤矸石粗骨料混凝土 Bolomey 公式中回归系数数值的修正方法。

关键词:道路工程; 自燃煤矸石粗骨料; Bolomey 公式; 水泥强度等级; 压碎指标

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 08-0018-07

Correction of Bolomey Formula for Spontaneous Combustion Gangue Coarse Aggregate Concrete

ZHOU Mei, CUI Han-bo, ZHAO Hua-min, LI Gao-nian, ZHANG Qian

(School of Architecture Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: The mix design and temperature formula of spontaneous combustion gangue aggregate concrete are researched for utilizing and popularizing this kind of concrete preferably. Using the cement strength grade and crushing value of spontaneous combustion gangue coarse aggregate as the influencing factors, the relationship between the two factors and the strength of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete is studied through experiments. The result shows that (1) there is a good linear relationship of concrete strength grade with cement strength grade and crushing value of spontaneous combustion coal gangue. The Bolomey formula for the strength of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete is established, and the revision method to determine regression coefficient and values in the Bolomey formula of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete is also analyzed.

Key words: road engineering; spontaneous combustion gangue coarse aggregate; Bolomey formula; strength grade of cement; crushing index

0 引言

自燃煤矸石粗骨料是将自燃煤矸石经过破碎、分级等一系列加工后, 按一定比例相互配合, 得到的粒径在 40 mm 以下的骨料, 其中粒径在 5 ~ 40 mm 的为自燃煤矸石粗骨料。自燃煤矸石粗骨料全部替代天然粗骨料配制的混凝土称之为自燃煤矸石粗骨

料混凝土^[1-4]。自燃煤矸石粗骨料多微裂纹, 表面粗糙且附着大量的自燃煤矸石粉, 导致其吸水率和压碎值较天然骨料大, 所以若在自燃煤矸石粗骨料混凝土配合比设计时仍沿用传统的 Bolomey 公式, 必然会产生较大的误差。为了更好地利用和推广自燃煤矸石骨料混凝土, 对自燃煤矸石骨料混凝土配合比设计和强度公式的基础研究尤为重要, 但国内外

收稿日期: 2015-02-09

基金项目: 国家自然科学基金委员会与神华集团有限公司联合项目 (U1261122)

作者简介: 周梅 (1964-) 女, 广东潮阳人, 教授级高级工程师. (zhoumei1108@126.com)

这方面的研究报道较少。

鉴于 Bolomey 公式中的回归系数受水泥强度等级和骨料性质影响较大, 且自燃煤矸石骨料的吸水率、压碎值又最能反映其材质特点, 而自燃煤矸石骨料吸水特点对混凝土强度的影响规律笔者团队已经基本明晰^[5], 本文通过大量试验, 试图揭示在考虑自燃煤矸石粗骨料压碎值的条件下, 自燃煤矸石粗骨料混凝土抗压强度与水泥强度等级及胶水比之间的关系, 以便为配制自燃煤矸石粗骨料混凝土提供简便、可行的配合比公式。

1 试验

1.1 原材料

(1) 胶凝材料

水泥: 阜新某品牌 32.5 和 42.5 普通硅酸盐水泥 (P·O), 28 d 实测抗压强度分别为: 53.69 MPa 和 48.47 MPa; 粉煤灰: 阜新发电厂 I 级粉煤灰, 比表面积 844.54 m²/kg, 密度 2.6 g/cm³; 矿渣: 抚顺产 S95 级矿粉, 比表面积 1 135.72 m²/kg。粉煤灰和矿渣的主要化学成分见表 1, 二者的粒度分析结果见图 1。

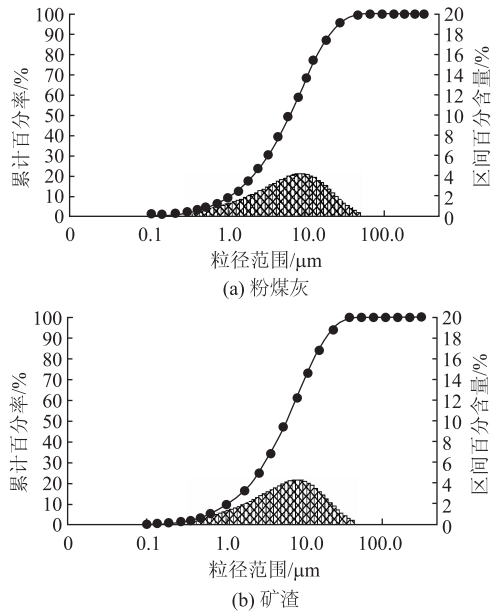


图 1 粉煤灰和矿渣粒度分析结果

Fig. 1 Analysis result of particle sizes of fly ash and slag

(2) 骨料

细骨料: 砂子采用阜新市红帽子天然河沙, 级配良好, $M_x = 2.68$, II 区中砂, 表观密度为 2 580 kg/m², 松堆密度为 1 305 kg/m³, 紧堆密度为 1 430 kg/m³。

表 1 粉煤灰及矿粉的主要化学成分 (单位: %)

Tab. 1 Main chemical composition of slag and fly ash (unit: %)

主要化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
粉煤灰	62.02	11.29	5.19	6.07	1.56	1.04	1.00	1.63	0.13	—
矿粉	35.46	20.33	4.87	20.0	4.52	3.85	—	—	—	—

粗骨料: 阜矿集团所属的 5 个不同矿区的自燃煤矸石, 经由 XPC-100×150 型颚式破碎机破碎、分级组配而得, 详细级配见表 2, 其他主要技术性质见表 3。

表 2 自燃煤矸石粗骨料的颗粒级配

Tab. 2 Particle gradation of spontaneous combustion gangue coarse aggregate

自燃煤矸石骨料品种		公称粒径/mm	各筛孔尺寸（mm） 累计筛余百分率/%					
			2.36	4.75	9.5	16	19	26.5
清河门矿	I	5~20	99.08	98.54	80.38	50.64	2.45	0
高德矿	Ⅱ-1		99.19	94.50	69.25	41.05	17.04	2.37
	Ⅱ-2	5~25	98.55	94.31	77.37	46.95	24.71	3.48
	Ⅱ-3	连续级配	96.58	92.21	70.41	45.47	22.79	2.61
	Ⅱ-4		96.33	94.41	71.95	38.22	17.70	2.22

表 3 自燃煤矸石粗骨料主要技术性质指标

Tab. 3 Main technical properties of spontaneous combustion gangue coarse aggregate

自燃煤矸石骨料品种	表观密度/(kg·m ⁻³)	松堆密度/(kg·m ⁻³)	压碎值/%	吸水率/%	公称粒径/mm
I	2 518	1 121	18.63	8.43	5~20
II-1	2 690	1 298	19.16	8.25	
II-2	2 686	1 240	20.82	8.30	5~26.5
II-3	2 579	1 203	22.93	8.38	
II-4	2 500	1 197	23.96	8.48	

(3) 其他材料

外加剂: 萘系高效减水剂 (含防冻剂), 减水率 18%~20%, 掺量 2.5%~2.8%; 拌和及养护水: 普通自来水。

1.2 试验方案设计

首先按普通混凝土配合比设计方法进行混凝土配合比设计, 但鉴于自燃煤矸石粗骨料吸水率大, 拌和水包括了两部分内容: 一部分是按天然碎石确定的单位用水量, 另一部分是按自燃煤矸石粗骨料吸水率 80% 计算的附加水^[5] (详见笔者的其他研究成果)。

试验研究分两部分: (1) 不考虑自燃煤矸石粗骨料强度的影响, 即选择某一产地的自燃煤矸石,

破碎成粒径为 5 ~ 20 mm 的粗骨料（技术性质见表 3）。利用 32.5 和 42.5 两种普通硅酸盐水泥，配制出强度等级为 C20 ~ C30 的混凝土 16 组（用 I 表示），两种强度等级水泥各成型 8 组试件。通过对上述 16 组试件实测抗压强度的回归分析，建立自燃煤矸石粗骨料混凝土强度与胶水比之间的回归方程。（2）考虑自燃煤矸石粗骨料强度特征影响。引入代表自燃煤矸石粗骨料强度特征参数——压碎值，将不同产地的自燃煤矸石压碎值作为影响因素，即选择 4 种不同产地的自燃煤矸石，每种成型 4 个不同配合比的试件，最后对配制的 16 组强度等级为 C20 ~ C30 混凝土（用 II 表示）试件进行强度回归分析。

混凝土配合比设计要求：（1）坍落度≥160 mm，泵送、机械振捣；（2）强度等级 C20 ~ C30。I、II 组试验的详细配合比见表 4 和表 5。试验过程严格执行《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》（GB/T 50080—2002）^[6]和《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T50081—2002）^[7]，注意自燃煤矸石粗骨料拌和前需要提前 1 h 用附加水润湿^[8]。

2 试验结果及分析

自燃煤矸石粗骨料混凝土稠度和强度试验结果见表 5 ~ 表 6。

表 4 自燃煤矸石粗骨料混凝土（I）试验配合比
Tab. 4 Mix proportion of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete (I)

试验 序号	水泥 强度等级	水胶比	胶水比	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	矿粉/ (kg·m ⁻³)	拌和水/ (kg·m ⁻³)	附加水/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ (kg·m ⁻³)	砂子/ (kg·m ⁻³)	自燃煤矸石/ (kg·m ⁻³)
I-1	32.5	0.50	2.000 0	266.00	76.00	38.00	190.00	61.21	9.50	682.79	1 024.18
I-2		0.49	2.040 8	271.43	77.55	38.78	190.00	60.97	9.69	680.12	1 020.18
I-3		0.48	2.083 3	277.08	79.17	39.58	190.00	60.72	9.90	677.34	1 016.01
I-4		0.47	2.127 7	282.98	80.85	40.43	190.00	60.46	10.11	674.44	1 011.66
I-5		0.36	2.777 8	369.44	105.56	52.78	190.00	56.65	13.19	631.93	947.89
I-6		0.35	2.857 1	380.00	108.57	54.29	190.00	56.18	13.57	626.73	940.10
I-7		0.34	2.941 2	391.18	111.76	55.88	190.00	55.69	13.97	621.24	931.86
I-8		0.33	3.030 3	403.03	115.15	57.58	190.00	55.17	14.39	615.41	923.12
I-9	42.5	0.41	2.439 0	324.39	92.68	46.34	190.00	58.63	11.59	654.08	981.12
I-10		0.40	2.500 0	332.50	95.00	47.50	190.00	58.27	11.88	650.09	975.14
I-11		0.39	2.564 1	341.03	97.44	48.72	190.00	57.90	12.18	645.90	968.85
I-12		0.38	2.631 6	350.00	100.00	50.00	190.00	57.50	12.50	641.49	962.23
I-13		0.37	2.702 7	359.46	102.70	51.35	190.00	57.09	12.84	636.83	955.25
I-14		0.36	2.777 8	369.44	105.56	52.78	190.00	56.65	13.19	631.93	947.89
I-15		0.35	2.857 1	380.00	108.57	54.29	190.00	56.18	13.57	626.73	940.10
I-16		0.34	2.941 2	391.18	111.76	55.88	190.00	55.69	13.97	621.24	931.86

表 5 自燃煤矸石粗骨料混凝土（II）试验配合比及强度试验结果
Tab. 5 Test result of mix proportion and strength of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete (II)

编号	水泥强度 等级	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	矿渣/ (kg·m ⁻³)	拌和水/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ (kg·m ⁻³)	煤矸石/ (kg·m ⁻³)	砂子/ (kg·m ⁻³)	砂率/%	自燃煤矸石骨料品种 28 d 抗压强度/MPa			
II-1	32.5	262.41	74.97	37.49	186.00	9.37	1 032.93	688.62	40	35.13	36.20	21.45	30.73
II-2		365.96	104.56	52.28		13.07	956.56	637.70		34.28	35.97	20.92	29.69
II-3	42.5	319.98	91.42	45.71		11.43	990.47	660.31		33.09	34.15	20.63	29.60
II-4		374.48	106.99	53.50		13.37	950.28	633.52		32.86	33.22	20.83	29.15

注：由于本试验购买的 32.5 水泥实测强度高于 42.5 水泥，导致第 1，2 组强度高于 3，4 组。

表 6 自燃煤矸石粗骨料混凝土 (I) 拌和物工作性及强度试验结果

Tab. 6 Test result of workability and strength of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete (I)

编号	水泥强度等级	水胶比	胶凝比	坍落度/mm	表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/MPa		劈拉强度/MPa		拉压比
						7 d	28 d	7 d	28 d	
1	32.5	0.50	2.00	160	2 180.0	10.04	24.34	1.62	3.03	1/8.03
2		0.49	2.04	168	2 196.7	10.75	25.60	1.75	3.41	1/7.51
3		0.48	2.08	168	2 188.3	10.02	24.21	1.71	3.70	1/6.54
4		0.47	2.13	170	2 200.0	12.65	27.76	2.03	3.74	1/7.42
5		0.36	2.78	208	2 190.0	14.87	33.38	1.95	4.51	1/7.40
6		0.35	2.86	210	2 225.0	19.37	37.53	2.60	5.47	1/6.86
7		0.34	2.94	210	2 216.7	20.53	38.45	2.76	5.31	1/7.24
8		0.33	3.03	200	2 218.3	22.27	39.05	2.93	5.07	1/7.70
9	42.5	0.41	2.44	165	2 205.5	19.15	27.78	3.45	4.08	1/6.81
10		0.40	2.50	130	2 210.0	22.29	27.74	3.35	4.19	1/6.62
11		0.39	2.57	132	2 226.7	23.31	30.36	3.69	4.28	1/7.09
12		0.38	2.63	145	2 222.2	25.46	32.84	3.58	4.63	1/7.09
13		0.37	2.70	235	2 180.0	18.89	31.23	3.05	3.77	1/8.28
14		0.36	2.78	228	2 203.3	18.22	35.12	3.18	4.54	1/7.74
15		0.35	2.86	208	2 201.7	19.78	36.79	3.40	4.45	1/8.27
16		0.34	2.94	220	2 198.3	18.99	37.42	3.29	4.61	1/8.12

注: 9~12 组由于在骨料预湿时未能及时盖上塑料布, 导致水分蒸发, 使得坍落度较其他组小。

2.1 水泥强度等级对自燃煤矸石粗骨料混凝土强度的影响

对表 5~表 6 中的混凝土抗压强度和胶凝比用 Matlab 线性拟合 (最小二乘法原理), 可求出自燃煤矸石粗骨料回归系数 α_a , α_b , 建立回归方程。自燃煤矸石粗骨料混凝土 28 d 抗压强度和胶凝比之间的关系见图 4~图 6。从图中可以清晰看出, 混凝土抗压强度与胶凝比之间成近似线性关系, 其关系可表示为^[9-12]:

$$f_{cu} = \alpha_a f_b \left(\frac{B}{W} - \alpha_b \right), \quad (1)$$

式中, f_{cu} 为自燃煤矸石粗骨料混凝土 28 d 龄期的抗压强度; f_b 为胶凝材料 28 d 抗压强度实测值; B 为 1 m^3 混凝土中胶凝材料用量; W 为 1 m^3 混凝土中的用水量 (不包括附加水); B/W 为混凝土的胶凝比; α_a , α_b 为回归系数。

从图 2~图 5 中发现, 自燃煤矸石粗骨料混凝土的回归系数 α_a 和 α_b 均与水泥的强度等级大小相关, 随着水泥强度等级的增大, 其斜率 α_a 逐渐增大, 截距 α_b 也逐渐增大。考虑了水泥强度等级影响建立的回归方程精度明显高于不考虑水泥强度的影响。研究结果表明: 水泥强度等级高低对自燃煤矸石粗骨料混凝土强度的影响, 可以通过修正 α_a 和 α_b 来实

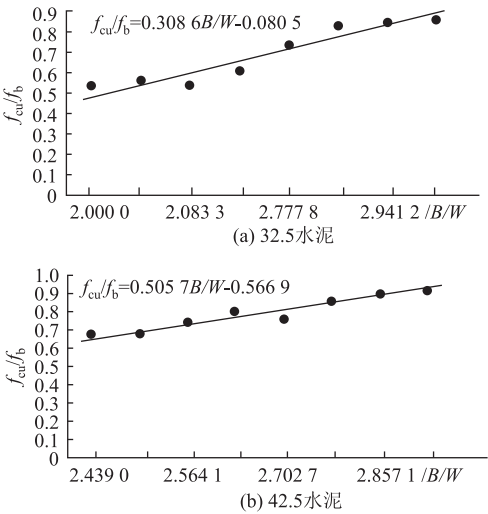


图 2 不同强度等级的自燃煤矸石粗骨料混凝土强度与胶凝比的关系

Fig. 2 Relationships between spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete strength and binder-water ratio for different strength grades

现, 具体执行情况详见表 7。

另外, 自燃煤矸石粗骨料混凝土的拉压比在 1/9~1/6 之间, 明显比普通混凝土 1/20~1/10 大, 这说明利用自燃煤矸石粗骨料配制的混凝土更适用于路面、桥面等工程。

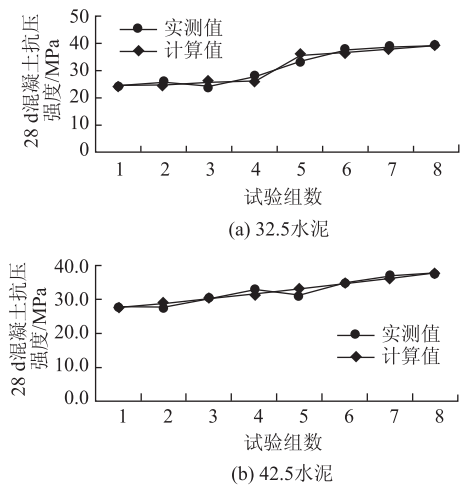


图 3 不同强度等级的自燃煤矸石粗骨料混凝土强度实测值与预测值误差

Fig. 3 Errors between measured and calculated strength values of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete for different strength grades

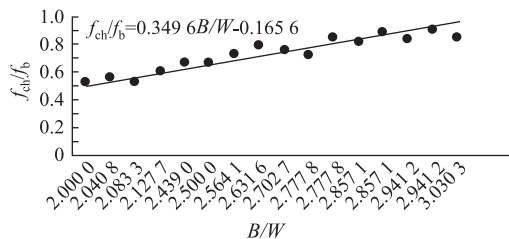


图 4 不考虑水泥强度等级的自燃煤矸石粗骨料混凝土强度与胶水比关系

Fig. 4 Relationships between strength and binder-water ratio of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete without considering cement strength grade

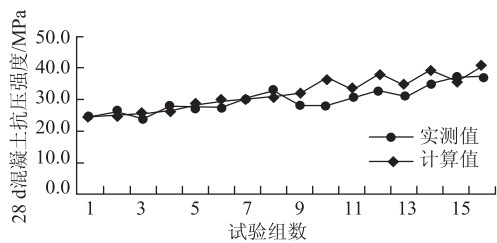


图 5 不考虑水泥强度等级的自燃煤矸石粗骨料混凝土强度实测值与计算值误差

Fig. 5 Error between measured values and calculated strength values of spontaneous combustion gangue coarse aggregate without considering cement strength grade concrete

2.2 自燃煤矸石粗骨料强度的压碎值对混凝土强度的影响

在阜新矿区选择 4 种不同产地的自燃煤矸石，加工成粒径是 5~26.5 mm 的连续级配的粗骨料，主要技术性质见表 3，配制 16 组 C20~C30 混凝土，试验配合比和强度试验结果见表 5。从表 5 中可以看

表 7 水泥强度等级与自燃煤矸石粗骨料混凝土强度之间的回归方程及检验

Tab. 7 Regression equation of cement strength grade and strength of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete and inspection

水泥强度等级	α_a	α_b	R^2	σ^2	回归方程
32.5	0.308 6	0.260 9	0.965 5	0.000 8	$f_{cu} = 0.309f_b$ $(\frac{B}{W} - 0.261)$
42.5	0.505 7	1.121 0	0.930 5	0.000 7	$f_{cu} = 0.506f_b$ $(\frac{B}{W} - 1.121)$
不分水泥品种	0.349 6	0.473 7	0.913 1	0.001 5	$f_{cu} = 0.35f_b$ $(\frac{B}{W} - 0.474)$

出，随着自燃煤矸石粗骨料压碎值的增大，同一水胶比的混凝土 28 d 抗压强度呈减小趋势；随着水胶比的增大，同一压碎值的混凝土 28 d 抗压强度也在不断减小。

采用 2.1 节相同的方法，建立自燃煤矸石粗骨料不同压碎值的混凝土强度回归方程，见表 8，回归系数与自燃煤矸石粗骨料压碎值之间的关系见图 6。

表 8 考虑自燃煤矸石粗骨料压碎值的混凝土强度回归方程及检验

Tab. 8 Regression equation of concrete strength of spontaneous combustion gangue coarse aggregate and inspection

自燃煤矸石 骨料品种	α_a	α_b	R^2	σ^2	回归方程
II-1	0.418 3	0.828 1	0.902 4	0.004 4	$f_{cu} = 0.418 3f_b$ $(\frac{B}{W} - 0.828 1)$
II-2	0.4208	0.874 5	0.907 5	0.004 2	$f_{cu} = 0.420 8f_b$ $(\frac{B}{W} - 0.874 5)$
II-3	0.381 5	0.752 2	0.878 2	0.004 7	$f_{cu} = 0.381 5f_b$ $(\frac{B}{W} - 0.752 2)$
II-4	0.359 4	0.668 9	0.888 9	0.003 8	$f_{cu} = 0.359 4f_b$ $(\frac{B}{W} - 0.668 9)$

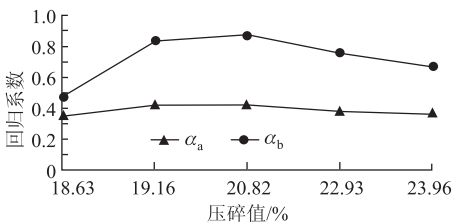


图 6 回归系数与自燃煤矸石压碎值之间的关系

Fig. 6 Relationship between regression coefficient and crushing value of spontaneous combustion gangue

从图 6 中发现, 当自燃煤矸石粗骨料压碎值 > 20% 时, 回归系数 α_a , α_b 与压碎值之间呈现更好的规律性, 二者近似成线性关系, 且 α_a , α_b 都随着自燃煤矸石压碎值的增大而减小。这时, 若设自燃煤矸石粗骨料的压碎值为 y , 可以导出:

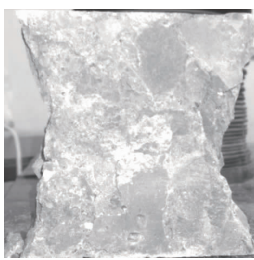
$$\begin{cases} \alpha_a = 0.8476 - 0.0206y, R^2 = 0.9645, \sigma^2 = 0.0001 \\ \alpha_b = 2.2394 - 0.0653y, R^2 = 0.9933, \sigma^2 = 0.0001 \end{cases} \quad (2)$$

由此, 得到自燃煤矸石粗骨料混凝土 28 d 抗压强度与胶水比、粗骨料压碎值 y 之间的回归方程:

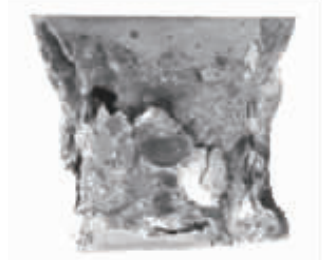
$$f_{cu} = (0.8476 - 0.0206y)f_b \cdot \left[\frac{B}{W} - (2.2394 - 0.0653y) \right] (\text{适宜: } y > 20\%), \quad (3)$$

式中 y 为自燃煤矸石粗骨料的压碎值。

由式 (3) 可知, 随着自燃煤矸石粗骨料压碎值的递增, 回归系数 α_a , α_b 的变化规律相反, 即 α_a 递减, α_b 递增。这说明了随着自燃煤矸石粗骨料压碎值的递增, 自燃煤矸石粗骨料在混凝土强度中所起的作用逐渐递减, 混凝土强度更多地依赖水泥的强度等级和水胶比。图 7 中混凝土的破坏现象也佐证了这一推论。自燃煤矸石压碎值越大, 混凝土破坏时自燃煤矸石被压碎的概率越大, 导致混凝土强度越低。



(a) II-1 组自燃煤矸石粗骨料混凝土



(b) II-4 组自燃煤矸石粗骨料混凝土

图 7 自燃煤矸石粗骨料混凝土受压破坏特征

Fig. 7 Broken characteristics of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete after compression

2.3 回归方程精度分析

为进一步确认上述强度公式的普适性, 笔者将本实验室两批次 25 组自燃煤矸石粗骨料混凝土强度数据代入式 (1) 和式 (3) 进行验算, 计算值与实测值数据的对比结果见表 9。

表 9 自燃煤矸石粗骨料混凝土回归方程精度分析

Tab. 9 Regression equation precision analysis of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete

压碎值/%	水胶比 B/W	实测值/MPa	计算值/MPa		相对误差/%		提高精度
			不考虑压碎值	考虑压碎值	不考虑压碎值	考虑压碎值	
18.2	0.48	31.71	31.04	31.1	2.11	1.92	+0.19
	0.49	28.18	29.67	29.82	5.28	5.82	-0.54
	0.50	32.89	28.35	28.59	13.8	13.7	+0.1
	0.51	27.34	27.09	27.41	0.91	0.26	+0.65
	0.52	26.82	25.87	26.28	3.54	2.03	+1.51
19.16	0.48	33.68	31.04	31.62	7.84	6.12	+1.72
	0.49	30.83	29.67	30.39	3.76	1.43	+2.33
	0.50	29.20	28.35	29.67	2.91	1.61	+1.3
	0.51	28.79	27.09	28.08	5.9	2.47	+3.43
	0.52	27.29	25.87	26.88	5.2	1.5	+3.7
20.82	0.48	31.47	31.04	32.12	0.43	-0.65	-0.22
	0.49	29.55	29.67	30.98	0.12	1.43	-1.31
	0.50	29.77	28.35	29.89	4.77	0.4	+4.37
	0.51	28.53	27.09	28.84	5.05	0.11	+4.94
	0.52	27.16	25.87	27.84	4.75	2.5	+2.25
22.93	0.48	30.04	31.04	32.08	3.33	6.79	-3.46
	0.49	29.96	29.67	31.07	0.97	3.7	-2.73
	0.50	29.25	28.35	30.09	3.08	2.87	+0.21
	0.51	29.98	27.09	29.16	9.88	2.74	+7.14
	0.52	30.54	25.87	28.25	15.29	7.5	+7.79
23.96	0.48	29.99	31.04	31.79	3.5	3.53	-0.03
	0.49	31.27	29.67	30.83	1.6	0.4	+1.2
	0.50	30.2	28.35	29.91	1.85	0.29	+1.56
	0.51	28.72	27.09	29.02	1.63	0.3	+1.33
	0.52	28.18	25.87	28.17	8.19	0.04	+8.15

从表 9 中可以看出, 自燃煤矸石粗骨料混凝土, 若考虑自燃煤矸石粗骨料压碎值的影响, 25 组试件中的 19 组试件相对误差减少, 6 组提高。当自燃煤矸石压碎值 > 20% 时, 15 组试件中的 10 组的预测精度提高, 提高幅度平均为 3.89%, 5 组降低幅度平均为 1.15%; 当自燃煤矸石压碎值 < 20% 时, 10 组试件中的 9 组试件强度预测精度提高, 提高幅度平均为 1.66%。值得注意的是, 即使是压碎值 < 20% 的自燃煤矸石粗骨料混凝土, 利用本文建立的回归方程, 预测精度仍可以提高, 只是提高幅度有限。因此, 本文建立的回归方程普适性较好。对于自燃煤矸石粗骨料混凝土, 建议混凝土 Bolomey 强度公式中引

入代表自燃煤矸石粗骨料强度的特征参数压碎值。

3 结论

(1) 自燃煤矸石粗骨料混凝土与普通混凝土相似,抗压强度与胶水比之间成近似线性关系。自燃煤矸石粗骨料混凝土强度-胶水比符合 Bolomey 公式形式,但回归系数不同;若充分考虑水泥强度等级的影响,回归方程精度更高。

(2) 自燃煤矸石粗骨料混凝土强度和水泥强度等级、胶水比之间也存在较好的线性相关性,但自燃煤矸石粗骨料的压碎值对自燃煤矸石粗骨料混凝土 Bolomey 公式中的回归系数 α_a , α_b 影响较大,可以说自燃煤矸石粗骨料压碎值的大小直接决定了回归系数的取值。

(3) 在普通混凝土强度公式基础上修正的自燃煤矸石粗骨料混凝土 Bolomey 公式,具有良好的普适性,为自燃煤矸石粗骨料混凝土配合比设计提供了较为简便的计算公式。

参考文献:

References:

- [1] 吴秀峰,周梅,崔正龙. 自燃煤矸石粗骨料对混凝土强度影响的试验研究 [J]. 工业建筑, 2009, 39 (3): 81-85.
WU Xiu-feng, ZHOU Mei, CUI Zheng-long. The Experiment Research on Concrete Strength Influence of Self Combustion Coal Gangue Coarse Aggregate [J]. Industrial Construction, 2009, 39 (3): 81-85.
- [2] 周梅,田爽,郭涛,等. 自燃煤矸石配制混凝土的试验研究 [J]. 硅酸盐报, 2011, 30 (5): 1221-1226.
ZHOU Mei, TIAN Shuang, GUO Tao, et al. Experimental Research on the Concrete Using Spontaneous Combustion Gangue as Full Active Material [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30 (5): 1221-1226.
- [3] 周梅,王强,牟爽. 自燃煤矸石砂轻混凝土拌合物工作性研究 [J]. 非金属矿, 2013, 36 (1): 8-11.
ZHOU Mei, WANG Qiang, MU Shuang. The Effects on Workability of Concrete Mixture of Spontaneous Combustion Coal Gangue Coarse Aggregate Characteristics [J]. Non-Metallic Mines, 2013, 36 (1): 8-11.
- [4] 周梅,牟爽,王强. 等强条件下骨料级配对煤矸石骨料混凝土工作性与强度影响 [J]. 硅酸盐通报, 2012, 32 (6): 1529-1534.
ZHOU Mei, MU Shuang, WANG Qiang. Study on the Influence of Aggregate Gradation on Coal Gangue Aggregate Concrete Workability and Harden Strength under Same Compressive Strength [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 32 (6): 1529-1534.
- [5] 浦信超. 粗骨料及掺合料对自燃煤矸石砂轻混凝土性能影响研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
PU Bei-chao. Influence of Coarse Aggregate Pretreatment and Admixture on Spontaneous Combustion Coal Gangue Sand-lightweight Concrete [D]. Fuxin: Liaoning Technical University Library, 2013.
- [6] GB/T 50080—2002, 普通混凝土拌合物性能试验方法标准 [S].
GB/T50080—2002, Standard for Test Method of Mixture Properties on Ordinary Concrete [S].
- [7] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].
GB/T 50081—2002, Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete [S].
- [8] 李化建. 煤矸石的综合利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
LI Hua-jian. Comprehensive Utilization of Gangue [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [9] 周栋梁,周伟玲,林玮. 关于再生混凝土强度计算公式的试验研究 [J]. 混凝土, 2009 (12): 8-10.
ZHOU Dong-liang, ZHOU Wei-ling, LIN Wei. Experimental Study on Formula for Calculating the Strength of Recycled Concrete [J]. Concrete, 2009 (12): 8-10.
- [10] 邓旭华,罗迎社,王智超,等. 再生混凝土强度计算公式中 A、B 值的确定 [J]. 混凝土, 2007 (2): 29-30.
DENG Xu-hua, LUO Ying-she, WANG Zhi-chao, et al. The Confirmation of A、B in the Strength Formula of Regenerated Concrete [J]. Concrete, 2007 (2): 29-30.
- [11] 张永娟,何舜,张雄,等. 再生混凝土 Bolomey 公式的修正 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15 (4): 538-543.
ZHANG Yong-juan, HE Shun, ZHANG Xiong, et al. Modification of the Bolomey Formula in Recycled Aggregate Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15 (4): 538-543.
- [12] 孔德玉. 天然骨料和再生骨料混凝土水灰比统一规定 (I) ~ 粗骨料强度的影响 [J]. 建筑材料学报, 2003, 6 (2): 129-134.
KONG De-yu. Unified Bolomey's Formula of Concrete Made with Natural and Recycled Coarse Aggregate (I): Effect of Strength of Coarse Aggregate [J]. Journal of Building Materials, 2003, 6 (2): 129-134.