

文章编号:1007-9629(2023)04-0346-07

煤矸石混凝土抗折强度试验研究

刘瀚卿^{1,2}, 白国良^{1,2,*}, 朱可凡¹, 刘 辉³, 陈 菲⁴

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 陕西陕煤陕北矿业有限公司, 陕西 榆林 719000; 4. 陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要:以榆神矿区煤矸石为粗骨料,通过 288 个棱柱体抗折强度试验,分析了煤矸石含碳量、煤矸石取代率及水灰比对煤矸石混凝土抗折强度的影响.结果表明:当不同矿源煤矸石含碳量由 0.91% 增加至 2.09% 时,煤矸石混凝土抗折强度降低了 21.1%~32.6%;与普通混凝土相比,不同煤矸石取代率下煤矸石混凝土抗折强度降低了 20.5%~47.5%;当水灰比由 0.25 增加至 0.45 时,煤矸石混凝土抗折强度降低了 8.0%~15.3%.综合考虑了煤矸石含碳量和煤矸石取代率的影响,提出了适用于不同矿源煤矸石混凝土抗折强度的预测公式.

关键词:煤矸石混凝土;煤矸石粗骨料;影响因素;抗折强度

中图分类号:TU528.09;TU317.1 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.04.002

Experimental Study on Flexural Strength of Coal Gangue Concrete

LIU Hanqing^{1,2}, BAI Guoliang^{1,2,*}, ZHU Kefan¹, LIU Hui³, CHEN Fei⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance of Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Northern Shaanxi Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China; 4. Shaanxi Coal Group Shenmu Ningtiaota Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: Using coal gangue from Yu-Shen mining area as coarse aggregate, through 288 prisms flexural strength tests, the effects of coal gangue carbon content, coal gangue replacement ratio and water-cement ratio on flexural strength of coal gangue concrete (CGC) were analyzed. The test results show that when the carbon content of coal gangue from different sources increases from 0.91% to 2.09%, the flexural strength of CGC decreases by 21.1%~32.6%. Compared with normal concrete, the flexural strength of CGC is reduced by 20.5%~47.5% under different coal gangue replacement ratios. Compared with CGC with water-cement ratio of 0.25, the flexural strength of CGC with water-cement ratio of 0.45 is reduced by 8.0%~15.3%. Considering the influence of carbon content and replacement ratio of coal gangue, the prediction formula of flexural strength of CGC suitable for different sources is proposed.

Key words: coal gangue concrete; coal gangue coarse aggregate; influencing factor; flexural strength

近年来,随着中国建筑行业的不断发展,天然骨料的 煤矸石作为煤炭开采过程中所排放出的岩石,现有
的大量开采,致使许多地区石材资源已接近枯竭。 存量已超过 50 亿 t^[1]。目前,煤矸石多以露天堆积处理

收稿日期:2022-03-17; 修订日期:2022-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078410);陕西省科技计划成果推广项目(2020CGHJ-017);陕西省教育厅重点实验室项目(20JS071)

第一作者:刘瀚卿(1994—),男,四川江油人,西安建筑科技大学博士生.E-mail: hqliu@xauat.edu.cn

通讯作者:白国良(1955—),男,陕西渭南人,西安建筑科技大学教授,博士生导师,博士.E-mail: guoliangbai@126.com

为主,不仅占用了大量土地^[2],还对矿区周边环境造成了污染^[3].将煤矸石用作粗骨料使用^[4],能有效缓解天然骨料的供需压力.

国内外学者针对煤矸石混凝土的研究,多以其抗压强度为主^[5-8],而抗折强度作为混凝土抗拉强度的代表值之一,不仅是构件抗裂度分析的重要参数^[9],而且是路面混凝土设计的重要参数,但现有研究中针对煤矸石混凝土抗折强度却鲜有报道^[10].由于煤矸石粗骨料材性相对较差,煤矸石混凝土抗折性能与普通混凝土存在一定差异,若依旧基于现有普通混凝土公式来计算煤矸石混凝土抗折强度,将导致结构可靠度降低.

综上所述,本文采用榆神矿区煤矸石为粗骨料,并以煤矸石取代率及水灰比为变量,设计了48组煤矸石混凝土.通过288个煤矸石混凝土棱柱体的抗折强度试验,分析了煤矸石混凝土试件的破坏形态,讨论了不同矿源煤矸石含碳量、煤矸石取代率及水灰比对煤矸石混凝土抗折强度的影响,提出了适用于不同矿源煤矸石混凝土抗折强度的预测公式.

1 试验

1.1 试验材料

试验所用煤矸石(CG)均取自榆神矿区,根据煤矸石矿源不同,将其简称为S矿、Z矿、H矿、N矿及Y矿煤矸石,分别记作S-CG、Z-CG、H-CG、N-CG、Y-CG.实测各矿源煤矸石的基本性能如表1所示.由

表1可见:Z矿、H矿、N矿及Y矿煤矸石的烧失量¹⁾较为接近,在6.40%~10.65%之间,而S矿煤矸石烧失量最高,为23.96%,表明S矿煤矸石热稳定性相对较差;各矿源煤矸石吸水率在5.0%~8.4%之间,较高的吸水率反映出煤矸石中存在着较多开口孔,因此在用作混凝土粗骨料使用时,需对煤矸石进行预湿;各矿源煤矸石含碳量(C)在0.91%~2.09%之间,发热量(CV)在424.31~1 869.34 kJ/kg之间,符合GB 50821—2012《煤炭工业环境保护设计规范》中“一类”煤矸石要求($C < 4\%$, $CV < 2\,090$ kJ/kg),适合用作混凝土粗骨料使用.

采用颚式破碎机将块状S-CG~Y-CG煤矸石进行破碎,然后通过筛分,并按一定比例混合,制备成煤矸石粗骨料,分别记作S-CGCA~Y-CGCA,制备流程如图1所示.

实测煤矸石粗骨料筛分结果如表2所示.由表2可见,各矿源煤矸石粗骨料均满足5.0~31.5 mm连续级配要求.天然粗骨料(NCA)选用与煤矸石粗骨料具有相同颗粒级配的天然碎石.参考GB 14685—2011《建设用卵石、碎石》,分别测试了各矿源煤矸石粗骨料和天然粗骨料的基本性能,结果如表3所示.

由表3可见:与天然粗骨料相比,各矿源煤矸石粗骨堆积密度与表观密度均较小,说明其材质较轻;但压碎指标均满足规范GB 14685—2011中Ⅱ类指标要求(压碎指标不大于20%),表明各矿源煤矸石粗骨料强度较好;各粗骨料针片状颗粒含量在3%~

表1 煤矸石的基本性能
Table 1 Basic properties of coal gangue

CG	Carbon content (by mass)/%	Calorific value/(kJ·kg ⁻¹)	Loss on ignition (by mass)/%	Water absorption ratio (by mass)/%
S-CG	2.09	1 869.34	23.96	8.4
Z-CG	1.31	1 458.99	10.65	5.1
H-CG	1.33	1 557.45	10.49	5.0
N-CG	1.28	664.75	9.76	5.7
Y-CG	0.91	424.31	6.40	5.5

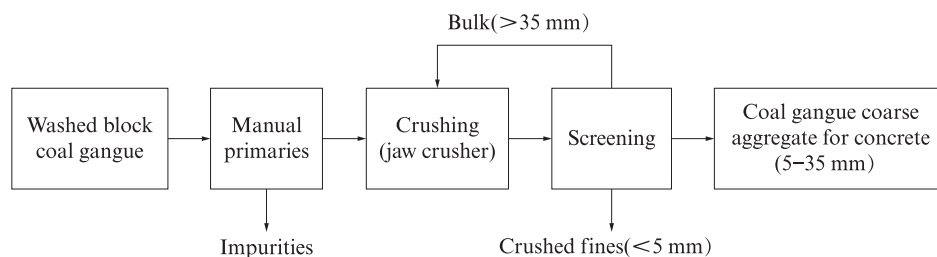


图1 煤矸石粗骨料制备流程图

Fig. 1 Production process of coal gangue coarse aggregate

1) 文中涉及的烧失量、取代率和水灰比等均为质量分数或质量比.

表 2 煤矸石粗骨料累计筛余表
Table 2 Cumulative sieve residue of coal gangue coarse aggregates

Coarse aggregate	Cumulative sieve residue(by mass)/%				
	2. 36 mm	4. 75 mm	9. 50 mm	19. 00 mm	31. 50 mm
S-CGCA	96	95	89	41	2
Z-CGCA	96	94	76	22	0
H-CGCA	97	94	84	42	2
N-CGCA	96	93	83	35	0
Y-CGCA	96	92	80	29	0

表 3 粗骨料的基本性能
Table 3 Basic properties of coarse aggregates

Coarse aggregate	Particle size/ mm	Bulk density/ (kg·m ⁻³)	Apparent density/(kg· m ⁻³)	Crush indicator(by mass)/%	Needle and plate particle content(by mass)/%	Sulfide and sulfate content(by mass)/%	Organic content
S-CGCA	5. 0-31. 5	1 060	2 020	20	4	0. 18	Qualified
N-CGCA	5. 0-31. 5	1 200	2 250	18	3	0. 24	Qualified
Z-CGCA	5. 0-31. 5	1 320	2 390	13	9	0. 32	Qualified
H-CGCA	5. 0-31. 5	1 290	2 450	14	4	0. 19	Qualified
Y-CGCA	5. 0-31. 5	1 360	2 560	12	4	0. 90	Qualified
NCA	5. 0-31. 5	1 490	2 700	10	3		

9% 之间,满足规范Ⅱ类指标要求(针片状颗粒含量不大于 10%),表明通过破碎、筛分所制备的煤矸石粗骨料具有较好粒形;各矿源煤矸石粗骨料中的硫化物与硫酸盐含量在 0.18%~0.90% 之间,满足规范Ⅱ类指标要求(硫化物与硫酸盐含量不大于 1.0%);各矿源煤矸石粗骨料有机物含量均为合格,符合规范要求。

水泥选用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥;细骨料采用天然中砂,实测堆积密度为 1 430 kg/m³,表观密度为 2 780 kg/m³;减水剂采用减水率为 40% 的聚羧酸高效减水剂。

1.2 试件设计

采用 S 矿、H 矿、Z 矿、N 矿及 Y 矿煤矸石粗骨

料制备煤矸石混凝土 S-CGC、H-CGC、Z-CGC、N-CGC、Y-CGC,试验前对各矿源煤矸石粗骨料通过洒水进行预湿处理^[11-12]。每种煤矸石混凝土均以煤矸石取代率($r=40\%,70\%,100\%$)与水灰比($m_w/m_c=0.25,0.35,0.45$)为主要变量,各设计 9 组配合比,共计 45 组。煤矸石混凝土试件统一编号格式为“矿源-水灰比-煤矸石取代率”,如 Y-0.25-70% 表示水灰比为 0.25、Y 矿煤矸石取代率为 70% 的煤矸石混凝土。以 S 矿煤矸石混凝土为例,给出了各组试件的配合比,如表 4 所示。其余矿源煤矸石混凝土的配合比与之相同。此外,还设计了 3 组普通混凝土(NAC)作为对照组,其配合比如表 5 所示。

表 4 S 矿煤矸石混凝土的配合比
Table 4 Mix proportion of S coal gangue concretes

Group	m_w/m_c	$r/\%$	Sand rate(by mass)/%	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				
				Water	Cement	Sand	CGCA	NCA
S-0. 25-100%	0. 25	100	41	160	640	533	767	0
S-0. 35-100%	0. 35	100	41	160	457	608	875	0
S-0. 45-100%	0. 45	100	41	160	356	650	935	0
S-0. 25-70%	0. 25	70	41	160	640	570	574	246
S-0. 35-70%	0. 35	70	41	160	457	645	650	278
S-0. 45-70%	0. 45	70	41	160	356	687	692	296
S-0. 25-40%	0. 25	40	41	160	640	607	349	524
S-0. 35-40%	0. 35	40	41	160	457	682	392	589
S-0. 45-40%	0. 45	40	41	160	356	723	416	625

每组配合比下均制备了6个100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件与15个100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,分别用于测试煤矸石混凝土试件的抗折强度(f_{it})与立方体抗压强度(f_{cu})。试验共计浇筑棱柱体试件288个与立方体试件720个,试验结果见表6,表中数据为有效值的平均。

表5 普通混凝土配合比
Table 5 Mix proportions of normal concretes

Group	m_w/m_c	Sand rate(by mass)/%	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				
			Water	Cement	Sand	CGCA	NCA
NC-0.25	0.25	41	160	640	656	0	944
NC-0.35	0.35	41	160	457	731	0	1 052
NC-0.45	0.45	41	160	356	773	0	1 112

表6 煤矸石混凝土试件的立方体抗压强度与抗折强度
Table 6 Cubic compressive strength and flexural strength of coal gangue concrete specimens

Group	f_{cu} /MPa	f_{it} /MPa	Group	f_{cu} /MPa	f_{it} /MPa	Group	f_{cu} /MPa	f_{it} /MPa
S-0.25-100%	27.3	3.1	S-0.35-100%	23.8	2.7	S-0.45-100%	22.5	2.6
S-0.25-70%	32.3	4.0	S-0.35-70%	30.5	3.4	S-0.45-70%	26.3	3.3
S-0.25-40%	40.7	5.9	S-0.35-40%	35.0	4.1	S-0.45-40%	30.6	3.9
Z-0.25-100%	32.5	4.4	Z-0.35-100%	30.2	3.5	Z-0.45-100%	27.0	3.4
Z-0.25-70%	38.1	4.6	Z-0.35-70%	34.1	4.4	Z-0.45-70%	31.7	4.1
Z-0.25-40%	46.7	5.1	Z-0.35-40%	37.7	5.0	Z-0.45-40%	37.0	4.9
H-0.25-100%	34.4	3.7	H-0.35-100%	29.6	4.1	H-0.45-100%	28.4	3.7
H-0.25-70%	39.2	4.4	H-0.35-70%	34.9	4.0	H-0.45-70%	32.2	3.9
H-0.25-40%	48.9	6.0	H-0.35-40%	39.5	5.9	H-0.45-40%	38.4	5.8
N-0.25-100%	35.6	3.8	N-0.35-100%	29.2	3.8	N-0.45-100%	28.5	3.7
N-0.25-70%	40.1	4.6	N-0.35-70%	31.1	4.2	N-0.45-70%	32.1	4.1
N-0.25-40%	44.2	4.9	N-0.35-40%	43.1	4.8	N-0.45-40%	37.2	4.6
Y-0.25-100%	35.8	4.4	Y-0.35-100%	31.2	4.1	Y-0.45-100%	30.9	3.9
Y-0.25-70%	41.8	4.6	Y-0.35-70%	36.7	5.2	Y-0.45-70%	34.5	5.0
Y-0.25-40%	50.3	6.3	Y-0.35-40%	41.2	5.8	Y-0.45-40%	40.2	5.6
NC-0.25	59.1	7.4	NC-0.35	47.9	6.7	NC-0.45	42.4	6.3

1.3 试验加载

煤矸石混凝土抗折强度试验加载仪器采用DNS 300型电子万能试验机,依据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,加载速率取0.05 MPa/s。

2 结果与分析

2.1 试验现象

加载过程中,煤矸石混凝土试件在达到峰值荷载前无明显变形,而在达到峰值荷载后试件被迅速折成两段,整个破坏过程较为突然,属于脆性破坏。不同矿源的煤矸石混凝土抗折强度试验破坏过程均与普通混凝土相似,典型试件裂缝扩展形态如图2所示。

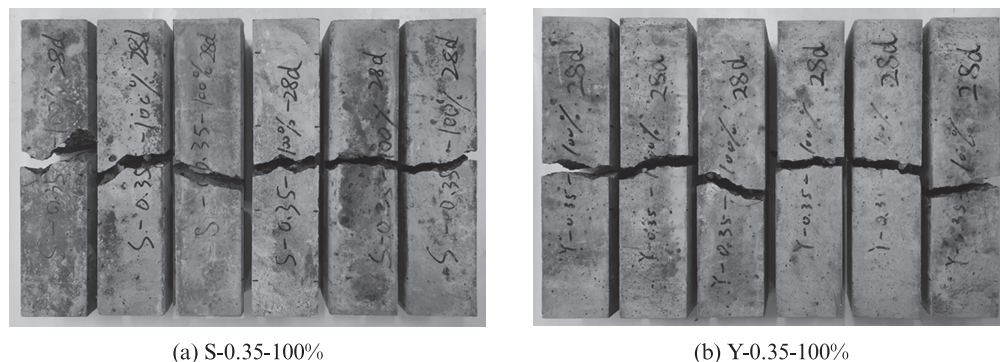
图3为煤矸石混凝土典型试件折断面形态。从图3(a)中可以看到,当煤矸石混凝土试件破坏时,由于

煤矸石粗骨料不能有效地阻止裂缝的扩展,导致裂缝直接穿过煤矸石粗骨料,形成以煤矸石粗骨料破坏为主的形态。分析其原因可能为:(1)与天然粗骨料相比,煤矸石粗骨料强度较低,在块状煤矸石破碎过程中,已在粗骨料内部形成了初始裂纹;(2)煤矸石吸水率较高,反映出粗骨料内部存在着较多孔洞,当煤矸石混凝土受力以后,孔洞处存在应力集中现象,从而导致煤矸石粗骨料破坏。

从图3(b)可以发现,即便是与天然粗骨料压碎指标较为接近的Y矿煤矸石粗骨料,由于其吸水率较高(5.5%),其试件折断面也主要为煤矸石粗骨料破坏,仅局部存在煤矸石粗骨料与水泥砂浆的拉脱界面。可见,煤矸石粗骨料的多孔性是导致煤矸石混凝土以煤矸石粗骨料破坏为主的主要原因。

2.2 抗折强度影响因素

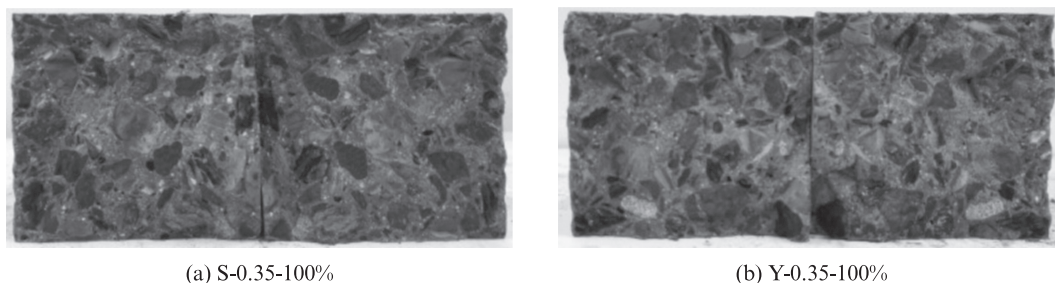
各因素对煤矸石混凝土抗折强度的影响如图4



(a) S-0.35-100%

(b) Y-0.35-100%

图2 典型试件裂缝扩展形态
Fig. 2 Crack propagation pattern of typical specimen



(a) S-0.35-100%

(b) Y-0.35-100%

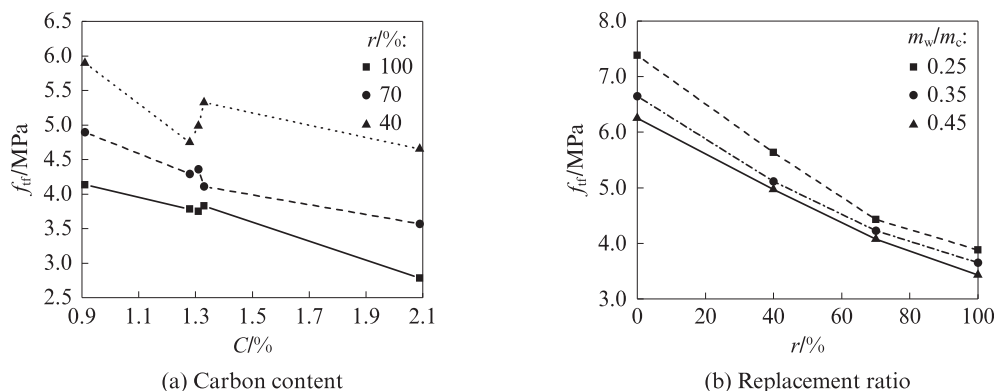
图3 典型试件折断面形态
Fig. 3 Broken section shape of typical specimen

所示.课题组前期研究结果表明,不同矿源煤矸石的含碳量是众多因素中对混凝土强度影响最主要的因素^[13].因此,以各矿源煤矸石含碳量 C 的变化来表示煤矸石矿源差异.

由图4(a)可见,当煤矸石含碳量由0.91%(Y矿)增加至2.09%(S矿)时,在40%、70%及100%取代率下,煤矸石混凝土抗折强度分别降低了21.1%、27.1%及32.6%.显然,由含碳量较高的煤矸石粗骨料所制备的混凝土,其抗折强度也较低,且随着煤矸石取代率的增加,煤矸石含碳量对抗折强度的不利影响更为显著.需要说明的是,由于H矿、Z矿及N矿煤矸石含碳量较为接近,分别为1.33%、1.31%与1.28%,因此含碳量对于这3种煤矸石混凝土抗折强

度的影响较小,在图4(a)中三者抗折强度随含碳量变化存在一定的波动,但并不影响煤矸石混凝土抗折强度随煤矸石含碳量增加而减小的总体趋势.

由图4(b)可见,与普通混凝土相比,煤矸石取代率为40%、70%及100%的煤矸石混凝土,在0.25水灰比下抗折强度分别降低了23.6%、40.0%与47.5%,在0.35水灰比下抗折强度分别降低了23.1%、36.4%与45.1%,在0.45水灰比下抗折强度分别降低了20.5%、34.8%与45.1%.可见,煤矸石混凝土抗折强度随着煤矸石取代率的增加而降低,并且在各水灰比下煤矸石混凝土抗折强度降低率大致相当,表明在不同水灰比下,煤矸石取代率始终是影响煤矸石混凝土抗折强度的主要因素.



(a) Carbon content

(b) Replacement ratio

图4 各因素对煤矸石混凝土抗折强度的影响

Fig. 4 Influence of various factors on flexural strength of coal gangue concretes

从图4(b)还可以看到,当水灰比由0.25增加至0.45时,0%、40%、70%及100%取代率下的煤矸石混凝土抗折强度分别降低了15.3%、11.8%、8.0%及11.6%。可见,水灰比对于煤矸石混凝土抗折强度的影响规律与普通混凝土一致,即随着水灰比的增加,抗折强度不断降低。值得注意的是,虽然水灰比对煤矸石混凝土抗折强度的影响规律与煤矸石含碳量、煤矸石取代率一致,但就影响程度而言,水灰比对于抗折强度的影响较小。结合图3中煤矸石混凝土试件折断面形态可知,煤矸石粗骨料是混凝土中的薄弱部位,因此水灰比对于煤矸石混凝土抗折强度的影响相对较弱。

2.3 抗折强度计算公式

现有关于混凝土抗折强度的计算公式主要是基于混凝土抗压强度计算得到,如欧洲混凝土委员会(CEB)规范《Model code for concrete structures》给出的普通混凝土抗折强度计算公式为:

$$f_{tf} = 0.8 \sqrt{f_{cu}} \quad (1)$$

印度规范 IS 456 《Indian standard code of practice for plain and reinforced concrete (third revision)》中建议 f_{tf} 与 f_{cu} 的换算公式为:

$$f_{tf} = 0.7 \sqrt{f_{cu}} \quad (2)$$

晏亮^[10]基于单一矿源的煤矸石混凝土抗折强度试验研究,建议煤矸石混凝土 f_{tf} 与 f_{cu} 的换算公式为:

$$f_{tf} = 0.68 \sqrt{f_{cu}} \quad (3)$$

通过现有式(1)~(3)计算得到的煤矸石混凝土抗折强度理论值($f_{tf,cal}$)与试验值($f_{tf,test}$)的对比如图5所示。由图5(a)可见,CEB建议公式对于由含碳量较低的煤矸石所制备的混凝土抗折强度预测精度较高,但对于由含碳量较高、材性较差的煤矸石所制备的混凝土(如S-CGC),该公式则会过高地估计其抗折强度,导致结构可靠度降低,可见式(1)不能准确反应出不同矿源煤矸石粗骨料差异对煤矸石混凝土抗折强度的影响。

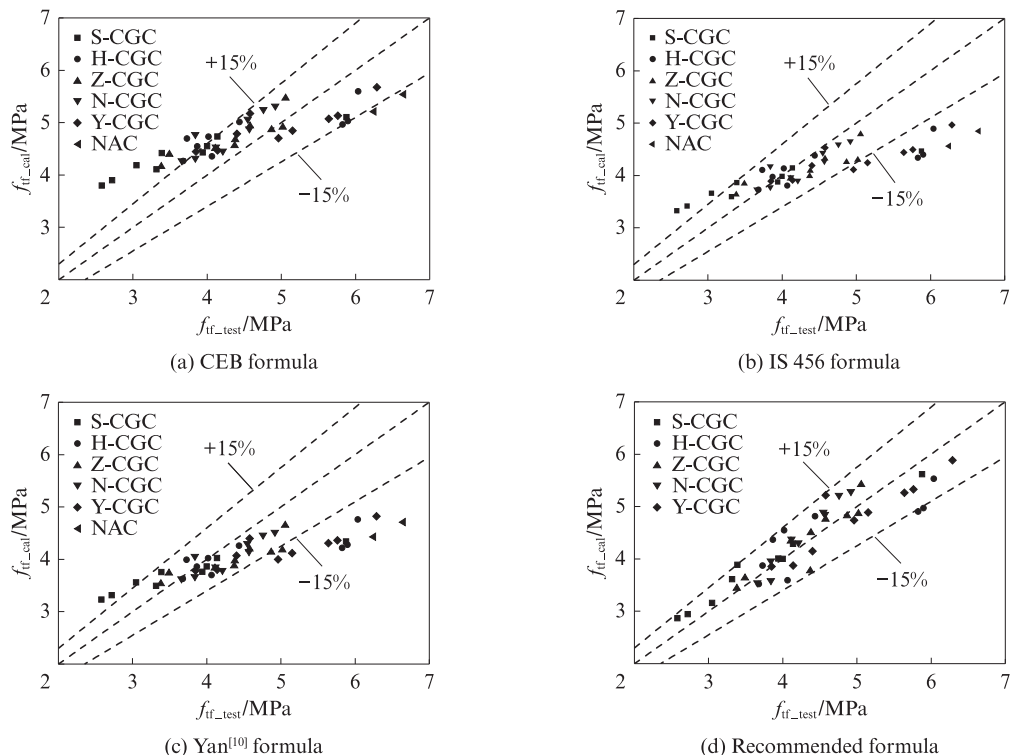


图5 煤矸石混凝土抗折强度理论值与试验值

Fig. 5 Calculated and test values of flexural strength of coal gangue concretes

由图5(b)、(c)可见,IS 456公式与晏亮公式对于煤矸石取代率较高、强度较低的煤矸石混凝土抗折强度的预测精度较高,但对于煤矸石取代率较低、强度较高的煤矸石混凝土抗折强度预测精度较差,表明式(2)、(3)不能准确反映出煤矸石取代率变化对抗折强度的影响。综上所述,现有抗折强度换算公式

仅基于立方体抗压强度计算得到,不能准确反应出不同矿源煤矸石粗骨料差异和煤矸石取代率变化对抗折强度的影响,致使预测结果精度较差。

基于现有计算公式形式($f_{tf} = \alpha \sqrt{f_{cu}}$, α 为系数),并考虑不同矿源煤矸石含碳量 C 与煤矸石取代率 r 的影响,通过回归分析,得到不同矿源煤矸石混凝土

抗折强度的建议公式为:

$$f_{it} = \frac{(-0.56r^2 + 0.53r + 0.8)}{\exp(11.6C)} \sqrt{f_{cu}} \quad (4)$$

通过式(4)计算得到的煤矸石混凝土抗折强度理论值与试验值的对比如图5(d)所示.从图5(d)中可以直观地看到,建议公式对于不同矿源、不同取代率的煤矸石混凝土抗折强度的预测精度均较高,相较于式(1)~(3)而言,具有较好的适用性.并且就计算结果而言,理论值与试验值之比的均值为1.00、变异系数为0.08,说明两者吻合较好.

3 结论

(1)不同矿源的煤矸石粗骨料吸水率(5.0%~8.4%)均显著高于天然粗骨料(0.5%),表明煤矸石粗骨料中存在较多孔洞.当煤矸石混凝土受力后,煤矸石粗骨料内部孔洞处存在应力集中现象,从而直接导致煤矸石混凝土试件折断面上存在大量煤矸石粗骨料破坏.

(2)当不同矿源煤矸石的含碳量由0.91%(Y矿)增加至2.09%(S矿)时,煤矸石混凝土抗折强度降低了21.1%~32.6%.煤矸石含碳量是影响煤矸石混凝土抗折强度的主要因素,且煤矸石取代率越高,煤矸石含碳量对抗折强度的影响越显著.

(3)在不同水灰比下,煤矸石取代率始终是影响煤矸石混凝土抗折强度的主要因素,而随着煤矸石取代率的增加,与普通混凝土相比,煤矸石混凝土抗折强度降低了20.5%~47.5%.

(4)对于以粗骨料破坏为主的煤矸石混凝土而言,相较于煤矸石含碳量与煤矸石取代率,水灰比对于抗折强度的影响较小,当水灰比由0.25增加至0.45时,煤矸石混凝土抗折强度降低了8.0%~15.3%.

(5)基于普通混凝土抗折强度计算公式,并考虑煤矸石含碳量与煤矸石取代率的影响,提出了适用于不同矿源煤矸石混凝土抗折强度的预测公式.

参考文献:

- [1] 白国良,朱超,王建文,等.煤矸石混凝土梁受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(12):49-55.
BAI Guoliang, ZHU Chao, WANG Jianwen, et al. Experimental study on shear behavior of coal gangue concrete beams[J]. Journal of Building Structure, 2020, 41(12): 49-55. (in Chinese)
- [2] WU H, WEN Q B, HU L M, et al. Feasibility study on the application of coal gangue as landfill liner material[J]. Waste Management, 2017, 63: 161-171.
- [3] LI J Y, WANG J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117946.
- [4] GAO S, ZHAO G H, GUO L H, et al. Utilization of coal gangue as coarse aggregates in structural concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121212.
- [5] 张金喜,陈炜林,杨荣俊.煤矸石集料基本性能的试验研究[J].建筑材料学报,2010,13(6):739-743.
ZHANG Jinxi, CHEN Weilin, YANG Rongjun. Experimental study on basic properties of coal gangue aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6): 739-743. (in Chinese)
- [6] ZHANG Y Z, 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, 2020, 255: 119337.
- [7] 易成,马宏强,朱红光,等.煤矸石粗集料混凝土抗碳化性能研究[J].建筑材料学报,2017,20(5):787-793.
YI Cheng, MA Hongqiang, ZHU Hongguang, et al. Investigation on anti-carbonation performance of coal gangue coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(5): 787-793. (in Chinese)
- [8] 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(2):334-340,380.
LI Shaowei, ZHOU Mei, ZHANG Limin. Properties of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate and its influence on concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 334-340, 380. (in Chinese)
- [9] 李孝忠,王庆贺,王玉银,等.再生混凝土抗折强度的影响因素及其计算方法[J].建筑结构学报,2019,40(1):155-164.
LI Xiaozhong, WANG Qinghe, WANG Yuyin, et al. Influence factors and prediction methods for flexural strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Structure, 2019, 40(1): 155-164. (in Chinese)
- [10] 晏亮.煤矸石混凝土及其结构构件性能试验研究[D].天津:天津大学,2012.
YAN Liang. Seismic experimental study of the building block for coal gangue concrete[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [11] 段珍华,江山山,肖建庄,等.再生粗骨料含水状态对混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2021,24(3):545-550.
DUAN Zhenhua, JIANG Shanshan, XIAO Jianzhuang, et al. Effect of moisture condition of recycled coarse aggregate on the properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 545-550. (in Chinese)
- [12] 张高展,王宇譞,葛竞成,等.轻集料对超高性能混凝土工作和力学性能的影响[J].建筑材料学报,2021,24(3):499-507.
ZHANG Gaozhan, WANG Yuxuan, GE Jingcheng, et al. Effect of lightweight aggregate on workability and mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 499-507. (in Chinese)
- [13] 白国良,朱可凡,刘瀚卿,等.混凝土用煤矸石骨料基本理化性能试验研究[C]//第五届全国建筑固废学术交流会议暨第九届全