

引文格式:马馨鑫,孙建恒,张若兰,等.全铁尾矿混凝土梁受弯性能试验研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(3):120-128.

MA Xinxin, SUN Jianheng, ZHANG Ruolan, et al. Experimental study on flexural performance of full iron tailings concrete beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 120-128.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05051

全铁尾矿混凝土梁受弯性能试验研究

马馨鑫^{1,2}, 孙建恒¹, 张若兰¹, 张凤双¹, 袁敬¹, 孟志良¹

(1. 河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071001; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘要:为了充分利用铁尾矿,对铁尾矿混凝土结构的力学性能进行探究,以铁尾矿粉为掺合料,铁尾矿碎石和铁尾矿砂分别作为粗、细骨料,制备成全铁尾矿混凝土(FITC)梁,并与以粉煤灰作掺合料,普通碎石及河砂作粗、细骨料的常规混凝土(CC)梁进行弯曲试验对比。首先,测试铁尾矿的各项参数,验证其作为混凝土原材料的可行性;其次,基于现行规范公式计算梁各阶段的承载力和挠度;最后,将FITC梁和CC梁的实测数值和计算数值对比分析。结果表明:FITC的强度比CC略低,弹性模量显著降低;FITC梁的开裂弯矩和极限弯矩与CC梁相当,梁的抗裂能力与承载力并未因FITC的强度和弹性模量比CC低而明显降低;在裂缝出现之前,FITC梁的混凝土应变与平截面假定基本一致;在荷载作用下,FITC梁受拉区混凝土应变比CC梁的大;FITC梁的延性、裂缝开裂间距均与CC梁接近,FITC梁弯剪区斜裂缝比CC梁更接近梁的顶部;在同等弯矩下,FITC梁的挠度大于CC梁的挠度,FITC梁的受拉纵筋应变也大于CC梁;中国现行设计规范对FITC梁的承载力计算是安全的,但挠度计算公式需要修正。

关键词:全铁尾矿混凝土梁;弯曲试验;特征弯矩;平截面假定;抗弯刚度

中图分类号:TU528.57

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)03-0120-09

Experimental study on flexural performance of full iron tailings concrete beam

MA Xinxin^{1,2}, SUN Jianheng¹, ZHANG Ruolan¹, ZHANG Fengshuang¹,
YUAN Jing¹, MENG Zhiliang¹

(1. College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei, China;

2. China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In order to make full use of iron tailings, and study the mechanical properties of concrete structures with iron tailings, using iron tailing powder as admixture, iron tailing gravel and iron tailing sand as coarse and fine aggregate respectively, the full iron tailings concrete (FITC) beams were prepared. FITC was compared with conventional concrete (CC) beam using fly ash as admixture, common crushed stone and river sand as coarse and fine aggregate in the bending test. First of all, the parameters of iron tailings were tested to verify their feasibility as concrete raw materials. Secondly, the bearing capacity and deflection of each stage of the beam

收稿日期:2023-05-19

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:河北省重点研发计划项目(19211502D);河北省研究生创新资助项目(CXZZBS2018109)

作者简介:马馨鑫(1987-),男,工学博士,E-mail:xxinma@126.com.

通信作者:孙建恒(1962-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:sjh@hebau.edu.cn.

were calculated based on the current code formula. Finally, the measured and calculated values of FITC beams and CC beam were compared and analyzed. The results show that the strength of FITC is slightly lower than that of CC, and the elastic modulus is significantly reduced. The cracking moment and ultimate moment of FITC beam are equivalent to those of CC beam. The crack resistance and bearing capacity of the beam do not significantly decrease due to the lower strength and elastic modulus of FITC compared to CC. The concrete strain of FITC beams is in good agreement with the plane section assumption before cracks appear. Under load, the strain of concrete in the tension area of FITC beams is larger than that of the CC beam. The ductility and crack spacing of FITC beams are close to those of CC beam, and the oblique crack in bending shear zone of FITC beam is closer to the top of beam than that of CC beam. The deflection of FITC beams is larger than that of CC beam under the same bending moment, and the strain of longitudinal reinforcement in FITC beams is also larger than that in CC beam. The current design code of China is appropriate for calculating the bearing capacity of FITC beams, but the deflection calculation formula should be modified.

Key words: full iron tailings concrete beam; bending test; characteristic bending moment; plane section assumption; flexural stiffness

Author resumes: MA Xinxin (1987-), male, PhD, E-mail: xinxinma@yeah.net; SUN Jianheng (1962-), male, PhD, professor, E-mail: sjh@hebau.edu.cn.

0 引言

随着钢铁工业的快速发展,选矿产生的铁尾矿在工业固体废弃物中的比例不断增加^[1]。大量的尾矿都堆积在尾矿库中^[2-3],带来环境污染、资源浪费、大片土地被占用、高昂的维护费用等诸多问题^[4-7]。此外,尾矿库还可能带来山体滑坡等事故隐患^[8-9]。在过去的几年中,随着国家对环境的保护力度不断加大,火力发电厂的排放愈加严苛,导致了粉煤灰供货量减少,市场需求却保持旺盛,价格一路走高。磨细铁尾矿粉具有和粉煤灰相近的活性指数,将铁尾矿粉磨细后当作混凝土掺合料,可以解决粉煤灰供应不足与价格高昂的问题。开山采石及河道采砂不仅会破坏山体及河道的生态环境,还会造成严重的环境污染^[10]。用铁尾矿石、铁尾矿砂分别替代粗、细骨料,可以解决开山采石及河道采砂带来的一系列环境问题,同时可以提高铁尾矿的利用率。

在铁尾矿粉作混凝土掺合料研究方面, Yang等^[11]对铁尾矿粉作为混凝土掺合料的火山灰活性进行了研究,发现铁尾矿粉在比表面积为 $450\sim 550\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 时活性最好,最大掺量不应超过30%。Cheng等^[12]讨论了铁尾矿粉作为混凝土掺合料的混凝土耐久性,结果表明随着铁尾矿粉替代率由10%增加至30%,混凝土抗渗性和抗冻性得到加强,抗碳化性能呈下降趋势,但仍能满足实际工程要求。Mendes Protasio等^[7]观察到铁尾矿粉没有火

山灰活性。在铁尾矿砂作为混凝土细骨料方面, Shettima等^[13]用铁尾矿砂替代混凝土中的河砂,与传统混凝土进行比较,结果表明铁尾矿砂的加入降低了混凝土的和易性,铁尾矿砂混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度等性能均优于传统混凝土。Zhang等^[14]用铁尾矿砂替代机制砂,研究了替代率对超高性能砂浆抗压强度和渗透性的影响,结果表明铁尾矿砂替代率为40%时超高性能砂浆性能最优,替代率为80%时和对照组的抗压强度相差不大,随着铁尾矿砂替代率的增加,超高性能砂浆的抗渗性也得到增强。

部分学者针对铁尾矿砂混凝土受弯构件开展研究。陈秀云等^[15-16]用铁尾矿砂替代部分细骨料,制备成绿色混凝土,对比研究了铁尾矿砂混凝土梁与普通混凝土梁的受弯性能,结果表明两类混凝土梁具有相当的受弯力学性能,其正截面受弯承载力、开裂弯矩及裂缝宽度的计算公式可参照GB 50010—2010,但当铁尾矿砂替代率超过40%时裂缝宽度计算需修正。张龙生^[17]进行了铁尾矿砂混凝土梁和普通混凝土梁的弯曲试验,结果表明铁尾矿砂混凝土梁的刚度比规范计算刚度低了1.1%,最大裂缝宽度比规范计算值小了16%。

上述研究表明,铁尾矿砂混凝土构件的力学性能与普通混凝土构件相近。迄今为止,对全铁尾矿混凝土(FITC)力学性能的研究尚不多见。本研究以铁尾矿粉为掺合料,铁尾矿碎石和铁尾矿砂分别

作为混凝土的粗、细骨料,制备了全铁尾矿混凝土。对全铁尾矿混凝土梁进行了研究分析,并与常规混凝土(CC)梁进行了比较。

1 试验概况

1.1 原材料

本试验选用河北省迁安市铁尾矿,经行星式球磨机研磨,表观密度为 $2\,770\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,比表面积为 $475.0\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 。选用Ⅱ级粉煤灰,表观密度为 $2\,190\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,比表面积为 $418.8\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 。铁尾矿粉和粉煤灰的粒径分布见图1和图2。

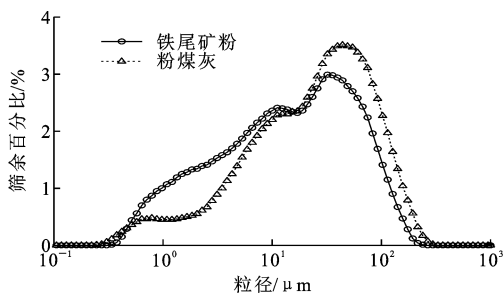


图1 粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution

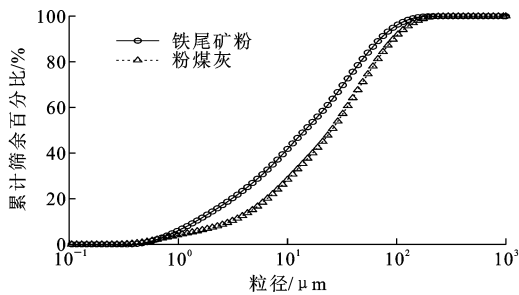


图2 累计粒径分布

Fig. 2 Cumulative particle size distribution

铁尾矿粉和粉煤灰的XRD图谱见图3和图4,

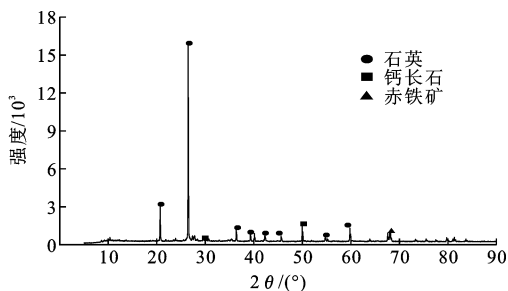


图3 铁尾矿的X射线衍射图谱

Fig. 3 XRD pattern of iron tailings

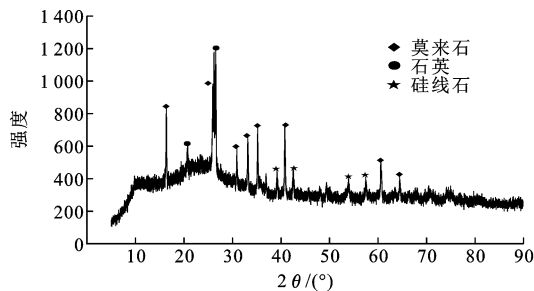


图4 粉煤灰的X射线衍射图谱

Fig. 4 XRD pattern of fly ash

化学成分见表1。从X射线衍射图谱可以看出:铁尾矿主要矿物成分是石英、钙长石和赤铁矿;粉煤灰主要矿物成分是莫来石、石英和硅线石。两种掺合料都是高硅型材料。

细骨料分别采用级配良好铁尾矿砂和河砂,二者均为中砂。粗骨料分别采用5~25 mm连续级配的铁尾矿石和碎石。表2列出了铁尾矿石和碎石的压碎指标、岩石抗压强度、180 d碱骨料反应伸长率。铁尾矿的各项参数均能满足混凝土粗细骨料的要求。

水泥选用P.O 42.5普通硅酸盐水泥。外加剂选用聚羧酸系高效减水剂(PC),固含量为40%,减

表1 铁尾矿粉和粉煤灰的化学成分

Table 1 Chemical compositions of iron tailings power and fly ash

材料	各成分质量分数/%							
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
铁尾矿粉	68.2	12.5	6.8	5.1	4.8	1.2	0.5	0.1
粉煤灰	52.2	5.6	1.3	26.5	4.2	0.9	0.4	1.8

表2 铁尾矿石和碎石的参数对比

Table 2 Parameter comparison of iron tailings and conventional gravel

材料	压碎指标/%	岩石抗压强度/MPa	180 d碱骨料反应伸长率/%
铁尾矿石	6.06	61.69	0.050 9
碎石	6.60	67.06	0.042 3

水率为25%。

1.2 试验设计

按混凝土强度等级为C35计算配合比,由于粉煤灰是中国应用最为广泛的矿物掺合料,所以用同强度等级的粉煤灰混凝土梁作为控制试件。铁尾矿粉和粉煤灰的掺量均为30%。表3为全铁尾矿混凝土和常规混凝土的配合比,从表3可以看出,全铁

表 3 配合比设计
Table 3 Mix proportions design

材料	水胶比	各材料用量/(kg·m ⁻³)									坍落度/ mm	扩展度
		水	水泥	铁尾矿粉	铁尾矿砂	铁尾矿石	粉煤灰	河砂	碎石	PC		
FITC	0.40	170	301	129	791	1 086				2.1	210	460 mm×490 mm
CC	0.40	170	301				129	746	1 031	2.6	225	530 mm×560 mm

尾矿混凝土中铁尾矿的质量高达固体总质量的 87.0%。全铁尾矿混凝土和常规混凝土拌合物具有良好的和易性,坍落度大于 180 mm,满足泵送混凝土的要求。

根据 GB/T 50081—2019,测试两种混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、轴心抗压强度和弹性模量,测试结果见表 4。与同水胶比 CC 对比,全铁尾矿混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 、轴心抗压强度 f_c 、劈裂抗拉强度 f_t 和弹性模量 E_t 分别降低了 5.9%、4.3%、3.1% 和 17.0%,弹性模量的降低与文献 [15]、[18]、[19] 相似。

表 4 混凝土力学性能

Table 4 Mechanical properties of concrete

材料	f_{cu}/MPa	f_c/MPa	f_t/MPa	$E_c/10^4 \text{ MPa}$
FITC	45.9	35.2	3.1	3.18
CC	48.8	36.8	3.2	3.83

采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用直径 8 mm 的钢筋,布置间距为 150 mm。图 5 为 3 种直径钢筋的应力-应变曲线,表 5 为钢筋的力学性能指标。钢筋混凝土梁采用矩形截面,截面尺寸和钢筋布置如图 6 所示。梁的总长度为 3 450 mm,两端支座中的跨度为 3 250 mm。

1.3 试验方法

梁的受拉纵筋应变片设置如图 6 所示;混凝土

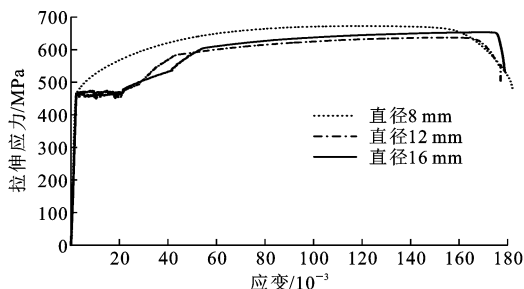


图 5 钢筋的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of steel bars

表 5 钢筋力学性能

Table 5 Mechanical properties of steel bars

钢筋直径/ mm	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 $E_s/10^5 \text{ MPa}$	断后伸长率 $\delta/\%$
8	465	673	2.06	17.9
12	442	604	2.01	17.7
16	466	653	2.04	20.2

应变片分别沿梁高布置在纯弯段和两个弯剪段,应变片设置见图 6。采用两点对称加载进行四点弯曲试验^[20-23]。剪跨长度为 1 080 mm,纯弯区长度为 1 090 mm。图 7 为试验装置,图 8 为试验过程。在梁跨中位置安装可以加载 1 000 kN 的伺服液压加载装置,装置上有荷载传感器。在梁的下方设置 5 个位移计,在梁两端支座上方设置 2 个位移计,检测梁的变形挠度。

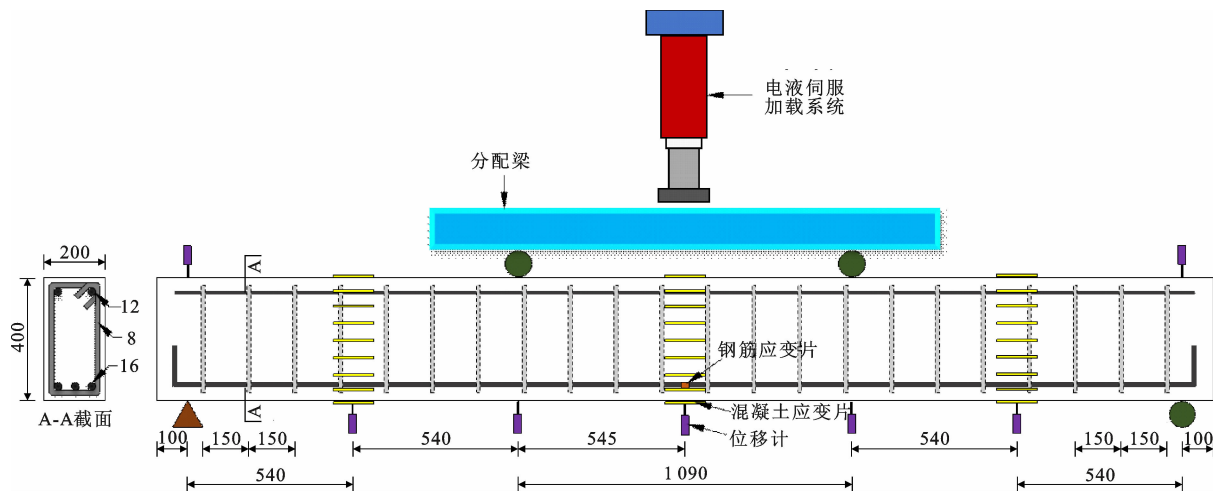


图 6 钢筋和混凝土应变片布置(单位:mm)

Fig. 6 Steel bar and concrete strain gauge layout (unit:mm)

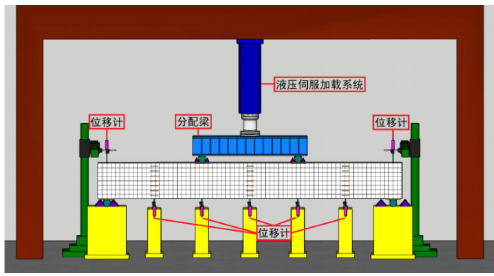


图7 受弯试验装置

Fig. 7 Bending test device

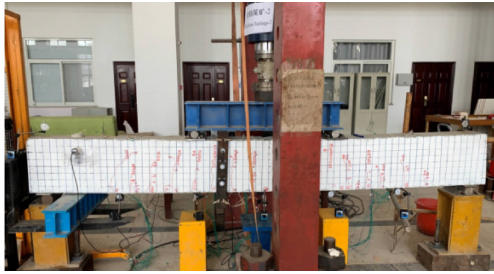


图8 弯曲试验过程

Fig. 8 Bending test process

1.4 加载方式

根据 GB/T 50152—2012, 本文试验采用荷载控制加载。先用小于理论开裂荷载 F_{cr} (对应 GB 50010—2010 中开裂弯矩 M_{cr}) 的 50% 预加载, 检验支架是否稳定, 仪器是否正常工作。加载开始后, 先以理论极限承载力 F_u (对应 GB 50010—2010 中极限承载弯矩 M_u) 的 20% 为增加幅度, 当荷载接近理论开裂荷载 F_{cr} 时, 每级加载增加幅度减小到 F_u 的 5%。当裂缝出现以后, 每级加载增加幅度变为 F_u 的 10%。在最后接近 F_u 时, 加载幅度再减小为 F_u 的 5%, 直到混凝土梁破坏。在试验过程中, 通过裂缝宽度测量仪观察并记录每级荷载的裂缝宽度与裂缝发展情况。

2 试验结果与分析

2.1 弯矩-挠度关系

图 9 为 3 根全铁尾矿混凝土梁 (FITCB-1 ~ FITCB-3) 和 1 根常规混凝土梁 (CCB) 的弯矩-挠度曲线。挠度由布置的位移计测得的位移计算得到, 弯矩值由竖向荷载计算得到。所有梁的曲线从初始受力状态到破坏状态可以分为 3 个阶段。

第一阶段为弹性阶段 (OA 段), 此时无裂缝开展。从图 9 可以看出, 在这一阶段常规混凝土梁与全铁尾矿混凝土梁的弯矩-挠度曲线基本重合。当弯矩增加到开裂弯矩时, 梁的底部出现裂缝, 降低了

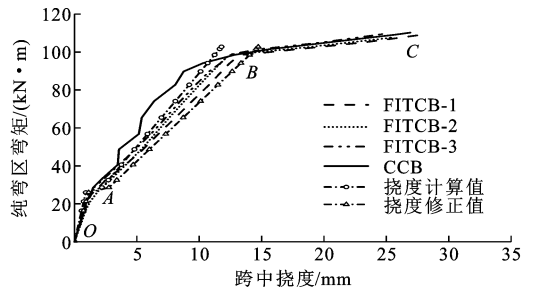


图9 弯矩-跨中挠度关系

Fig. 9 Moment-midspan deflection relationships

梁的抗弯刚度。第二阶段为裂缝开展阶段 (AB 段), 随着弯矩增大, 裂缝宽度逐步增大, 裂缝向上发展。在一定距离处会出现新的裂缝。第三阶段为破坏阶段 (BC 段), 此时受拉钢筋屈服, 弯矩达到屈服弯矩。受拉钢筋屈服后, 钢筋应变显著增大, 裂缝开展和挠度增大, 最后在弯矩增加很小的情况下, 挠度及裂缝宽度迅速增加。最终, 梁构件由于跨中底部垂直裂缝宽度超过 1.5 mm 而失效。

在第一阶段, 全铁尾矿混凝土梁和常规混凝土梁的 4 条曲线发展趋势基本一致。从第二阶段开裂弯矩 A 点以后, 常规混凝土梁的曲线发展趋势明显与全铁尾矿混凝土梁不同。在相同的弯矩下, 常规混凝土梁的跨中挠度更小, 此阶段常规混凝土梁的抗弯刚度要优于全铁尾矿混凝土梁, 在钢筋屈服前, 全铁尾矿混凝土梁比常规混凝土梁的挠度最大相差了 3.05 mm, 这与表 4 中常规混凝土的弹性模量要高于全铁尾矿混凝土这一结果相吻合。破坏阶段 BC 段全铁尾矿混凝土梁与常规混凝土梁也基本吻合。

图 9 所示的挠度计算值为按规范计算的挠度, 其中混凝土及钢筋的参数均按 C35 及 HRB400 级钢筋的规范规定值采用, 结果表明理论挠度大于常规混凝土梁的实测挠度, 但小于全铁尾矿混凝土梁的实测挠度。这意味着现行混凝土规范挠度公式不能保证全铁尾矿混凝土梁在正常使用极限状态下的安全性。在本文试验中, 全铁尾矿混凝土的弹性模量是相同强度等级常规混凝土的 0.83 倍。在此基础上, 建议在梁的挠度计算中, 如果没有试验数据, 应将全铁尾矿混凝土梁开裂后的抗弯刚度 B_s 乘以修正系数 0.8, 以确保梁在正常使用极限状态下的安全性。图 9 显示修正后的理论挠度大于全铁尾矿混凝土梁的实测挠度, 可以确保全铁尾矿混凝土梁在正常使用极限状态下的安全性。

2.2 承载能力

表 6 列出了各阶段梁构件的弯矩理论值和实测

表6 梁构件的承载能力

Table 6 Bearing capacity of beam specimens

试件编号	$M_{cr}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{to-cr}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\frac{M_{cr}}{M_{to-cr}}$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{to-y}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\frac{M_y}{M_{to-y}}$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{to-u}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\frac{M_u}{M_{to-u}}$
FITCB-1	28.84	30.14	0.957	105.03	96.89	1.084	109.08	95.27	1.145
FITCB-2	26.41	30.14	0.876	102.33	95.00	1.077	107.46	95.27	1.128
FITCB-3	26.30	30.14	0.873	104.76	96.81	1.082	109.35	95.27	1.148
CCB	28.57	30.29	0.943	105.46	96.06	1.098	110.16	95.51	1.153

值,理论值通过公式计算获得,并使用表4和表5中混凝土以及钢筋的相应试验强度。在所有梁构件中,开裂弯矩实测值 M_{cr} 为受拉区首次出现裂缝时刻的弯矩;屈服弯矩实测值 M_y 为弯矩-挠度曲线在屈服拐点处的弯矩,结合此时刻前后受拉纵筋应变是否有较大幅度变化,可以推断此时的弯矩是否为屈服弯矩;极限弯矩实测值 M_u 为在跨中最大裂缝宽度超过 1.5 mm 时测得的弯矩; M_{to} 为理论计算弯矩。与常规混凝土梁相比,3根全铁尾矿混凝土梁的极限弯矩分别变化了 -0.98% 、 -2.45% 和 -0.74% ,屈服弯矩分别变化了 -0.41% 、 -2.97% 和 -0.66% ,二者的差异并不显著。同时由表6可以看出,对于全铁尾矿混凝土梁,除了开裂弯矩略低于按实测强度计算的理论值外,屈服弯矩与极限弯矩均高于按实测强度计算的理论值。

为了进一步验证按现行规范计算时全铁尾矿混凝土梁的安全性,按现行规范中的混凝土与钢筋设计值进行开裂弯矩、屈服弯矩及极限弯矩计算。由于全铁尾矿混凝土梁和常规混凝土梁的尺寸、配筋率、混凝土强度等级都完全一致,则二者计算出的开裂弯矩设计值、屈服弯矩设计值、极限弯矩设计值也都一样。经过计算,开裂弯矩 $D_{cr}=15.29 \text{ kN}\cdot\text{m}$,屈服弯矩 $D_y=75.03 \text{ kN}\cdot\text{m}$,极限弯矩 $D_u=70.88 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。3个全铁尾矿混凝土梁实测值的平均值与设计计算值的比值分别为 $M_{cr}/D_{cr}=1.77$ 、 $M_y/D_y=1.39$ 、 $M_u/D_u=1.53$,说明按现行规范设计全铁尾矿混凝土梁具有较好的安全度。

2.3 变形能力

位移延性系数 $\mu=d_u/d_y$ 反映了梁构件的变形能力,其中 d_u 和 d_y 分别为极限弯矩和屈服弯矩对应的跨中挠度。随着延性系数的增加,梁的耗能能力和变形能力都在增加。从表7可以看出,与常规混凝土梁相比,3根全铁尾矿混凝土梁的延性系数变化了 -6.98% 、 $+6.98\%$ 和 -2.33% ,其平均值为 1.28,与常规混凝土梁基本持平。

2.4 受拉纵筋应变

图10为梁构件中受拉纵筋的弯矩-钢筋应变关

表7 梁构件的延性

Table 7 Ductility of beam specimens

试件编号	d_u/mm	d_y/mm	μ
FITCB-1	27.95	23.23	1.20
FITCB-2	25.37	18.44	1.38
FITCB-3	24.65	19.55	1.26
CCB	26.92	20.93	1.29

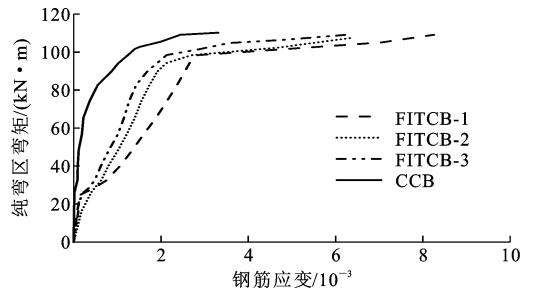


图10 弯矩-钢筋应变关系

Fig. 10 Moment-steel bar strain relationships

系。在钢筋屈服前,3根全铁尾矿混凝土梁的钢筋应变基本相同,并且要远大于常规混凝土梁;在钢筋屈服后,全铁尾矿混凝土梁的钢筋应变更远大于常规混凝土梁的钢筋应变。这是由于全铁尾矿混凝土梁的弹性模量小于常规混凝土梁的弹性模量,在同等弯矩作用下全铁尾矿混凝土梁的跨中挠度较大。

2.5 裂缝分布与宽度

在对梁进行应力状态评价时,裂缝的宽度、分布和间距非常重要。图11~14为试验结束时梁构件的裂缝分布。裂缝在纯弯区开始出现,随着荷载的增加,新的裂缝不断出现,现有的裂缝向上延伸。当荷载达到一定值后,斜裂缝向加载点发展。3个全铁尾矿混凝土梁构件弯曲裂缝间距的平均值为97.3 mm(表8),几乎等于常规混凝土梁构件的裂缝间距。这一结果表明,全铁尾矿混凝土与钢筋的黏结强度可能等于常规混凝土与钢筋的黏结强度。从图11~14可以看出,全铁尾矿混凝土梁的弯剪区斜裂缝比常规混凝土梁的斜裂缝更接近于梁的顶部,说明全铁尾矿混凝土的抗剪强度可能低于常规混凝土。

图15为全铁尾矿混凝土梁和常规混凝土梁的



图 11 FITCB-1 裂缝分布

Fig. 11 Crack distribution of FITCB-1

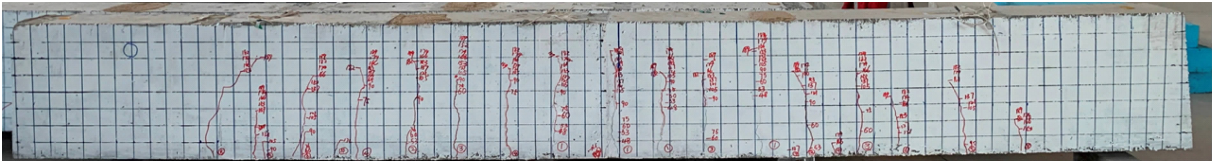


图 12 FITCB-2 裂缝分布

Fig. 12 Crack distribution of FITCB-2

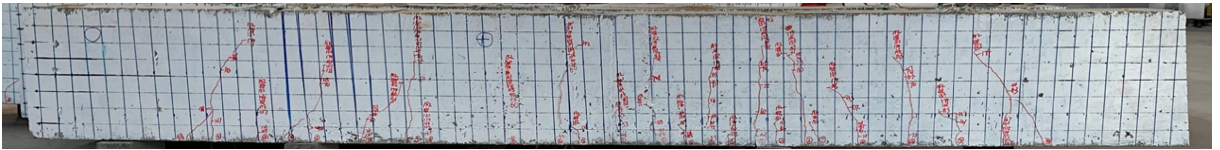


图 13 FITCB-3 裂缝分布

Fig. 13 Crack distribution of FITCB-3

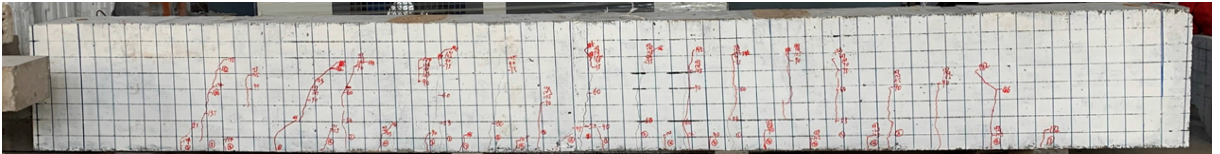


图 14 CCB 裂缝分布

Fig. 14 Crack distribution of CCB

表 8 纯弯区的弯曲裂缝

Table 8 Flexural cracks in pure bending region

试件编号	裂缝数量	裂缝间距/mm	裂缝最大长度/mm
FITCB-1	13	83.8	345
FITCB-2	10	109.0	323
FITCB-3	11	99.1	313
CCB	11	99.1	336

度发展趋势相似,4 根梁构件的 4 条曲线基本重叠在了一起。4 根梁构件最终都以跨中裂缝最大宽度超过 1.50 mm 为极限状态,所有梁构件都没有发生剪切破坏和梁上部受压区混凝土压碎破坏。

2.6 混凝土应变

由于 3 根全铁尾矿混凝土梁跨中及弯剪区混凝土应变随荷载的变化情况较为相似,图 16、17 分别给出了 FITCB-3 及常规混凝土梁跨中混凝土应变,图 18、19 分别给出了 FITCB-3 及常规混凝土梁弯剪区混凝土应变。可以看出:在混凝土开裂前,无论是纯弯区还是弯剪区的混凝土均较好地符合平截面假定;在裂缝出现后,未开裂区域的混凝土也基本符合平截面假定。在跨中截面全铁尾矿混凝土梁较常规混凝土梁混凝土应变更接近平截面假定;同时全铁尾矿混凝土梁受拉区混凝土应变要比常规混凝土梁的大,这是由全铁尾矿混凝土的弹性模量较常规混凝土小造成的。开裂后两种梁的应变变化趋势相似。比较全铁尾矿混凝土梁及常规混凝土梁弯剪区

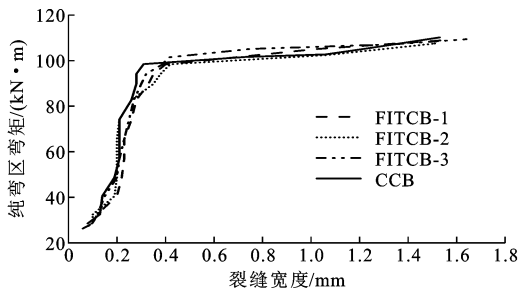


图 15 弯矩-跨中裂缝宽度关系

Fig. 15 Moment-midspan crack width relationships

弯矩-跨中裂缝最大宽度之间的关系。从图 15 可以看出,全铁尾矿混凝土梁和常规混凝土梁的裂缝宽

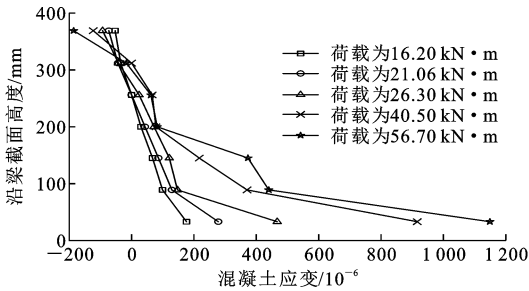


图 16 FITCB-3 跨中截面应变

Fig. 16 Mid-span section strain of FITCB-3

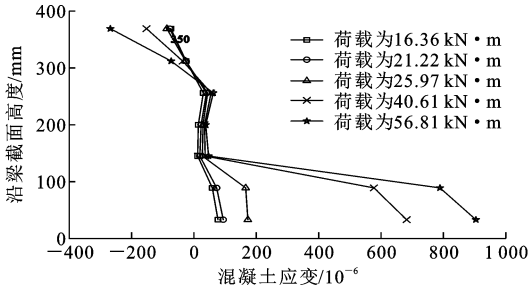


图 17 CCB 跨中截面应变

Fig. 17 Mid-span section strain of CCB

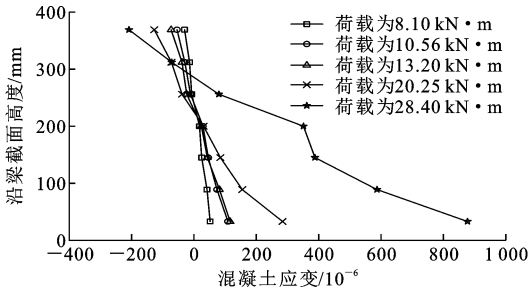


图 18 FITCB-3 弯剪截面应变

Fig. 18 Bending-shear section strain of FITCB-3

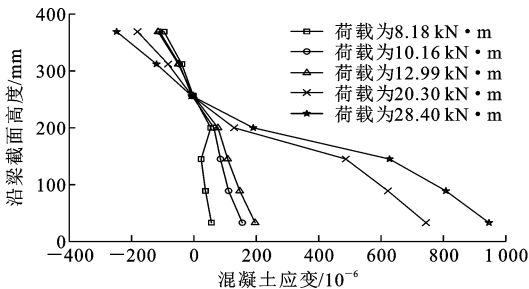


图 19 CCB 弯剪截面应变

Fig. 19 Bending-shear section strain of CCB

混凝土受压区高度及应变随荷载的变化可知,在同等荷载下常规混凝土梁的受压区高度要略大于全铁尾矿混凝土梁,这与图 11~14 中的裂缝分布相吻合。

3 结语

(1)全铁尾矿混凝土的立方体抗压强度、轴心抗

压强度以及劈裂抗拉强度比常规混凝土的相应强度略低。全铁尾矿混凝土的弹性模量比常规混凝土降低比较显著,达到了 17%。

(2)在开裂前,全铁尾矿混凝土梁与平截面假定符合较好。全铁尾矿混凝土梁与常规混凝土梁的开裂弯矩、屈服和极限弯矩差异不显著,现行设计规范适用于全铁尾矿混凝土梁的抗裂及承载能力设计计算。

(3)全铁尾矿混凝土梁的延性与常规混凝土梁接近。由于全铁尾矿混凝土的弹性模量比常规混凝土的小,在梁的正常工作阶段,其挠度要大于常规混凝土梁的挠度。当根据现行设计规范计算全铁尾矿混凝土梁的挠度时,开裂后的抗弯刚度应该乘以修正系数 0.8,以确保梁在正常使用状态下的安全性。

(4)在本文试验中,全铁尾矿混凝土中铁尾矿的利用率达到了固体物料总质量的 87%,全铁尾矿混凝土的广泛应用将使铁尾矿得到有效利用,促进混凝土的绿色可持续发展。

参考文献:

References:

- [1] ZUCCHERATTE A C V, FREIRE C B, LAMEIRAS F S. Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethylthrephthalate [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 859-865.
- [2] BIAN Z F, MIAO X X, LEI S G, et al. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes [J]. Science, 2012, 337(6095): 702-703.
- [3] 全宵, 王社良. 铁尾矿砂再生骨料混凝土力学性能及微观结构分析 [J]. 混凝土, 2021(1): 91-93, 97. TONG Xiao, WANG Sheliang. Mechanical properties and microstructure analysis of recycled aggregate concrete with iron tailings [J]. Concrete, 2021(1): 91-93, 97.
- [4] 冯卡, 王馨语. 硫铁矿尾矿渣改良混凝土力学性质与耐久性 [J]. 矿产综合利用, 2022(3): 6-11, 16. FENG Ka, WANG Xinyu. Research on mechanical properties and durability of concrete improved by pyrite tailings and slag [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(3): 6-11, 16.
- [5] ZHAO J S, NI K, SU Y P, et al. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 286: 122968.
- [6] ZHANG N, TANG B W, LIU X M. Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementi-

- tious materials, bricks and concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 288: 123022.
- [7] MENDES PROTASIO F N, RIBEIRO DE AVILLEZ R, LETICHEVSKY S, et al. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123929.
- [8] LIU R Z, LIU J, ZHANG Z J, et al. Accidental water pollution risk analysis of mine tailings ponds in Guanting reservoir watershed, Zhangjiakou city, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(12): 15269-15284.
- [9] YAO G, WANG Q, SU Y W, et al. Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 145: 106068.
- [10] LV Z Q, JIANG A N, LIANG B. Development of eco-efficiency concrete containing diatomite and iron ore tailings; mechanical properties and strength prediction using deep learning[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327: 126930.
- [11] YANG M J, SUN J H, DUN C Y, et al. Cementitious activity optimization studies of iron tailings powder as a concrete admixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120760.
- [12] CHENG Y H, HUANG F, QI S S, et al. Durability of concrete incorporated with siliceous iron tailings[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242: 118147.
- [13] SHETTIMA A U, HUSSIN M W, AHMAD Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 72-79.
- [14] ZHANG W F, GU X W, QIU J P, et al. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119917.
- [15] 陈秀云. 铁尾矿砂绿色混凝土构件受力性能试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
CHEN Xiuyun. Experimental study on the mechanical properties of the tailing sand green concrete members[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [16] 邝周飞. 掺尾矿砂混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
KUANG Zhoufei. Experimental research on the flexural performance of concrete beams with mine tailings sand[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.
- [17] 张龙生. 铁尾矿砂混凝土筒支梁抗弯刚度和裂缝试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
ZHANG Longsheng. Research on bending stiffness and crack of simply-supported beam of iron tailing concrete[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [18] 冯拴. 大掺量铁尾矿高强混凝土梁受力性能及设计方法研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2017.
FENG Shuan. Mechanical behavior and design method for large capacity iron tailings high-strength concrete beams[D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2017.
- [19] 李壮. 高温后铁尾矿砂混凝土力学性能试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
LI Zhuang. Experimental study on mechanical properties of concrete with iron tailings after high temperature[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [20] 周甲佳, 姚少科, 景川, 等. FRP筋-ECC梁受弯性能[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(6): 46-54.
ZHOU Jiajia, YAO Shaoke, JING Chuan, et al. Flexural behavior of FRP-reinforced ECC beam[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(6): 46-54.
- [21] 章一萍, 李碧雄, 廖桥, 等. 超高强钢筋ECC梁受弯性能试验及承载力分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(6): 38-45.
ZHANG Yiping, LI Bixiong, LIAO Qiao, et al. Flexural behaviors test and capacity analysis of ultra high strength rebar reinforced engineered cementitious composites beams[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(6): 38-45.
- [22] 程东辉, 王楷文, 宋超. 预应力再生混凝土叠合梁受弯性能试验研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2022, 39(2): 52-60.
CHENG Donghui, WANG Kaiwen, SONG Chao. Experimental study on flexural behavior of prestressed recycled concrete composite beams[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2022, 39(2): 52-60.
- [23] 朱琦, 叶力豪, 蔡玮, 等. UHPC-T梁抗弯性能试验研究与理论计算[J]. *建筑科学与工程学报*, 2023, 40(1): 65-74.
ZHU Qi, YE Lihao, CAI Wei, et al. Experimental study and theoretical calculation on flexural performance of UHPC-T beams[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2023, 40(1): 65-74.