

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.02.017

石墨尾矿砂混凝土梁抗弯性能试验研究

冯博雅¹, 夏洪春^{1,2}, 朱训国^{1,2}, 刘晓洲³

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 2. 大连大学 复杂结构系统灾害预测与防治重点实验室, 辽宁 大连 116622; 3. 衢州学院 建筑工程学院, 浙江 衢州 324000)

摘要: 通过对5根不同石墨尾矿砂取代率的钢筋混凝土梁进行抗弯试验,探究了不同石墨尾矿砂取代率对钢筋混凝土梁正截面抗弯性能的影响,分析了石墨尾矿砂钢筋混凝土梁的开裂荷载、裂缝发展、抗弯承载力及跨中挠度的变化规律。结果表明:石墨尾矿砂混凝土梁与普通混凝土梁的受弯破坏过程基本一致,仍具有弹性、开裂、屈服和极限四个阶段,裂缝发展过程基本一致;试验梁正截面应变服从平截面假定;石墨尾矿砂混凝土梁和普通混凝土梁的荷载-挠度曲线变化趋势相似,随着石墨尾矿砂取代率的增加,试验梁的极限承载力先增大后降低,其中,石墨尾矿砂取代率为10%、20%、30%时,试验梁的极限承载力均比普通混凝土梁高,取代率为10%~20%的试验梁抗弯性能最优。现行规范中梁的正截面极限承载力和挠度计算公式不适用于石墨尾矿砂混凝土梁。

关键词: 石墨尾矿砂混凝土; 抗弯性能; 极限承载力; 跨中挠度

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)02-0279-08

Experimental study on flexural performance of concrete beams with graphite tailings

FENG Boya¹, XIA Hongchun^{1,2}, ZHU Xunguo^{1,2}, LIU Xiaozhou³

(1. College of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prediction and Control of Complex Structure System, Dalian University, Dalian 116622, China; 3. College of Architectural Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, China)

Abstract: Five reinforced concrete beams with different replacement rates of graphite tailings sand are subjected to bending tests. In order to explore the influence of different graphite tailings replacement rates on the bending performance of reinforced concrete beams, the cracking load, crack development, flexural capacity and mid-span deflection of graphite tailings reinforced concrete beams are analyzed. The results showed that the bending failure process of graphite tailing sand concrete beam and ordinary concrete beam are basically the same; it still has four stages of elasticity, cracking, yielding and limit. The crack development process is basically the same. The strain of the normal section of test beam obeys the assumption of the plane section. The load-deflection curves of graphite tailings concrete beams and ordinary concrete beams are similar. As the replacement rate of graphite tailings increases, the ultimate bearing capacity of the test beam increases first and then decreases. Among them, when the replacement rate of graphite tailings sand is 10%, 20%, or 30%, the ultimate bearing capacity of this test beam is higher than that of ordinary concrete beams. The bending performance of the test beam with the substitution rate of 10%~20% is the best. The formula for calculating the ultimate bearing capacity and deflection of the beam's normal section in the current code is not applicable to the graphite tailings concrete beam.

Key words: graphite tailings sand concrete; flexural performance; ultimate bearing capacity; mid-span deflection

收稿日期: 2021-04-08; **网络出版日期:** 2021-06-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210607.1803.008.html>

基金项目: 辽宁省自然科学基金指导计划项目(2019-ZD-0571); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC 1807219); 大连大学科研创新创业团队(XQN202002); 大连大学科研平台重点项目(202101ZD02)

第一作者: 冯博雅,女,硕士生,研究方向为结构工程。E-mail: 1715373797@qq.com

通信作者: 刘晓洲,男,博士,副教授,研究方向为多材料在复杂环境中的力学问题及耐久性研究。E-mail: 174877444@qq.com

石墨尾矿砂是选矿厂生产石墨后排放的矿业废渣,传统处理方法为露天矿区堆放。根据国土资源部中国矿产资源报告^[1],截至 2019 年,我国石墨生产量达 9 216.5 万 t,较 2018 年增长了 67.7%,而每生产 1t 石墨,就会产生 10t 尾矿。一方面,石墨尾矿长期堆积会对其周边的空气、地表水、地下水等造成严重污染;另一方面,随着我国建筑业的高速发展,对天然砂的需求日益增长,而天然砂作为不可再生资源已濒临枯竭,国家已明令禁止再开采。鉴于此,如果能利用与天然砂物性相似,经浮选后的石墨尾矿砂部分替代天然砂,配制混凝土并应用于工程建设中,不仅符合国家对建材固废再利用的总体规划,而且还能够达到治理环境、节约资源的双重目的。

近年来,刘洪波、李犇^[2-6]等对石墨尾矿水泥基材料及混凝土材料进行了研究,结果表明,与普通混凝土相比,一定掺量的石墨尾矿混凝土其抗压强度、压敏特性及抗渗性能表现更优,且加入石墨尾矿砂有利于提升水泥基材料的力学性能。王亮量等^[7]研究了石墨尾矿混凝土的导电性和力学性能之间的关系,并确立了电阻率和抗压强度间的最优方程。孙小巍等^[8]通过试验方法,研究了高泡沫混凝土的抗压性能,结果表明,掺入适量的石墨尾矿砂可以明显提升其抗压强度。目前,关于混凝土梁的抗弯试验以及极限承载力和挠度计算的相关研究已经取得了丰硕的成果^[9-14],而在不同细骨料砂的替代及其钢筋混凝土梁的力学性能方面也有大量学者进行了研究。李志强等^[15]对沙漠砂混凝土梁进行了抗弯性能研究,结果表明,沙漠砂混凝土梁的破坏形态及破坏机理与普通混凝土梁基本相同,可以应用于工程实际。周梅^[16]、王庆贺^[17]等学者对自然煤矸砂混凝土梁进行了抗弯性能研究,结果表明,单掺 100% 自燃煤矸石细骨料时,开裂弯矩与极限弯矩分别提高 5.44% 和 2.00%。

目前,关于石墨尾矿砂混凝土的研究主要集中在材料性能方面,而针对石墨尾矿砂混凝土梁的抗弯性能试验研究则鲜见报道。因此,本试验利用石墨尾矿砂替代部分天然砂制备混凝土梁,在相同试验条件下,对不同石墨尾矿砂取代率(0、10%、20%、30%、40%)的混凝土梁进行三分点加载试验,通过分析其破坏形态、裂缝发展过程以及试验梁的荷载-挠度规律,探究不同取代率的混凝土梁的极限弯矩,并提出适用于石墨尾矿砂混凝土梁的极限承载力计算公式,以期为石墨尾矿砂混凝土构件应用于工程实际提供参考依据。

1 试验概况

1.1 原材料

1) 水泥:选用大连富民水泥制造公司生产的 P.O42.5 普通硅酸盐水泥。

2) 石子:选用大连瓦房店砂石厂生产的碎石,粒径为 5~20mm,级配良好,表观密度为 2 650 kg/m³。

3) 天然河砂:选用大连瓦房店砂石厂生产的河砂,细度模数为 2.49。

4) 石墨尾矿砂:采用黑龙江省鸡西市石墨尾矿砂库的石墨尾矿砂。天然砂与石墨尾矿砂的物理特征详见表 1。其中 pH 值测定方法为:称 100 g 砂子样品,溶解于 100 mL 纯水中,静置 30 min 后,用滤纸过滤,然后测定溶液的 pH 值。

5) 聚羧酸减水剂:选用大连市铭源科技开发有限公司生产的 MZ-10C 聚羧酸高性能减水剂。由表 1 可知,石墨尾矿砂的吸水率较天然砂高,本试验加入聚羧酸减水剂,用以增加混凝土的和易性。

6) 钢筋:梁构件的受拉纵筋采用直径为 10 mm 的 HRB400 钢筋,对其取样进行材性试验,测得屈服强度为 415 MPa。

表 1 石墨尾矿砂与天然砂的物理性质

Tab. 1 Physical properties of graphite tailings sand and natural sand

物理性质	粒径/mm	表观密度/ (kg · m ⁻³)	堆积密度/ (kg · m ⁻³)	细度模数	吸水率/%	pH 值
天然砂	0.16~5	2 620	1 540	2.49	21.87	8
石墨尾矿砂	0.01~3	2 855	1 630	0.90	30.10	10

1.2 配合比设计

根据配合比,制备了石墨尾矿砂取代率为 0、10%、20%、30%、40% 的石墨尾矿砂混凝土,通过对预留的养护 28 d 的 100 mm×100 mm×100 mm 的

立方体试块进行试验,测量石墨尾矿砂混凝土的立方体抗压强度 f_{cu} ,其配合比和力学性能如表 2 所示。需要说明的是,表中砂率为 30%,与工程中通用的泵送混凝土相比明显偏低,这是因为砂的细度

模数较小时,砂中颗粒多,混凝土的黏聚性较易得到保证,故采用较小的砂率,且本试验为非泵送混凝土,而泵送混凝土的砂率比非泵送混凝土的砂率要

高 2%~5%,故本试验采用的砂率比工程中的泵送混凝土低。

表 2 1 m³ 石墨尾矿砂混凝土配合比及力学性能

Tab. 2 Mix ratio and mechanical properties of 1 m³ graphite tailing sand concrete

试件 编号	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	天然砂/ (kg·m ⁻³)	石子/ (kg·m ⁻³)	石墨尾矿砂/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ (kg·m ⁻³)	水灰 比	砂率/ %	f_{cu} / MPa
SMK-0	180	409	535	1 294	0	15	0.44	30	36.1
SMK-10	180	409	481	1 294	54	15	0.44	30	37.2
SMK-20	180	409	428	1 294	107	15	0.44	30	37.9
SMK-30	180	409	374	1 294	161	15	0.44	30	36.2
SMK-40	180	409	321	1 294	214	15	0.44	30	35.7

注:SMK- n 为试件编号,SMK 表示试验梁, n 表示石墨尾矿砂取代率数值,其中 SMK-0 为普通混凝土对照梁。

1.3 试验梁设计

本试验制作的梁尺寸均为:长度 1 600 mm,截面尺寸 120 mm×180 mm,净跨 1 500 mm。其中一根梁为天然砂混凝土梁(对比梁),其余四根为石墨尾矿砂混凝土梁,取代率分别为 10%、20%、30%、40%,试件制作见图 1。为研究石墨尾矿砂混凝土梁的抗弯性能,所有试验梁均采用相同配筋率,纵向受拉钢筋的配筋率为 1.257%,纵筋保护层厚度为 20 mm,梁的尺寸及配筋详见图 2。



图 1 试件制作过程图

Fig. 1 Production process of the test piece

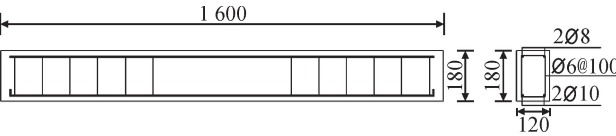


图 2 梁的尺寸及配筋图(单位:mm)

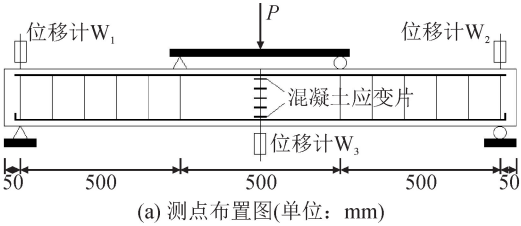
Fig. 2 Beam size and reinforcement diagram(unit: mm)

1.4 试验装置及测量内容

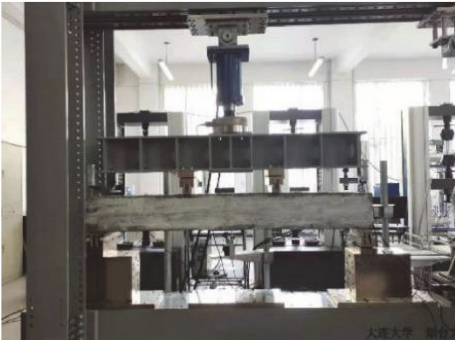
试验采用三分点加载方式,在跨中形成 500mm 纯弯段,加载装置和测点布置见图 3。按照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[18]对混

凝土梁进行抗弯试验,用液压机施加集中荷载,压力传感器置于分配梁跨中以实现两集中力三分点加载方式,试验加载前对试验梁进行预加载,以确保仪器的正常工作以及各点位的接触正常。开始时,加载方式按每级 3kN 加载,每次加载持续 3 min,然后观察梁表面裂缝变化,当试件出现第一条裂缝后,以每级 5kN 为级差加载,随着荷载的逐渐加大,裂缝数量逐渐增多,裂缝不断向上延伸且裂缝宽度增大,用笔标出试验梁出现的裂缝,并记录受力荷载以及裂缝宽度。

试验主要测量内容:①试验梁开裂荷载、极限荷载以及裂缝发展过程,裂缝发展过程用裂缝测宽仪观测;②应变,在梁跨中沿梁高均匀布置 5 个混凝土应变片测量混凝土应变;③荷载-挠度变化。



(a) 测点布置图(单位:mm)



(b) 加载装置图

图 3 测点布置和加载装置图

Fig. 3 Layout of measuring points and loading device diagram

2 试验结果及分析

2.1 试验破坏现象

通过观察试验梁的弯曲加载试验,发现石墨尾矿砂混凝土梁的破坏过程、裂缝发展过程与普通混凝土梁基本一致,试验梁受弯破坏形态如图 4 所示。

在试验加载初期,梁全截面受力,并且应变很小,混凝土和钢筋协调受力,试件近似处于线弹性工作阶段,无肉眼可见的裂缝出现。随着外荷载的不断增大,混凝土出现塑性变形,加载至 12kN 左右,在梁跨中纯弯段出现第一条弯曲裂缝。随着施加荷

载的逐渐增大,在 12kN~40kN,由于受拉区混凝土开裂并退出工作,跨中段弯曲裂缝数量不断增加,并且沿着垂直方向向上延伸,裂缝宽度逐渐增大,同时,在剪弯段也出现数条裂缝。在 40kN~50kN 左右,试验梁受弯段钢筋屈服,试验梁抗弯刚度减小,跨中挠度增长迅速,裂缝沿梁截面高度方向不断向上发展,最终贯通梁全截面,达到试验梁的极限承载力,试验梁破坏。

普通混凝土梁与石墨尾矿砂混凝土梁的开裂荷载(弯矩)、屈服荷载(弯矩)以及极限荷载(弯矩)如表 3 所示。

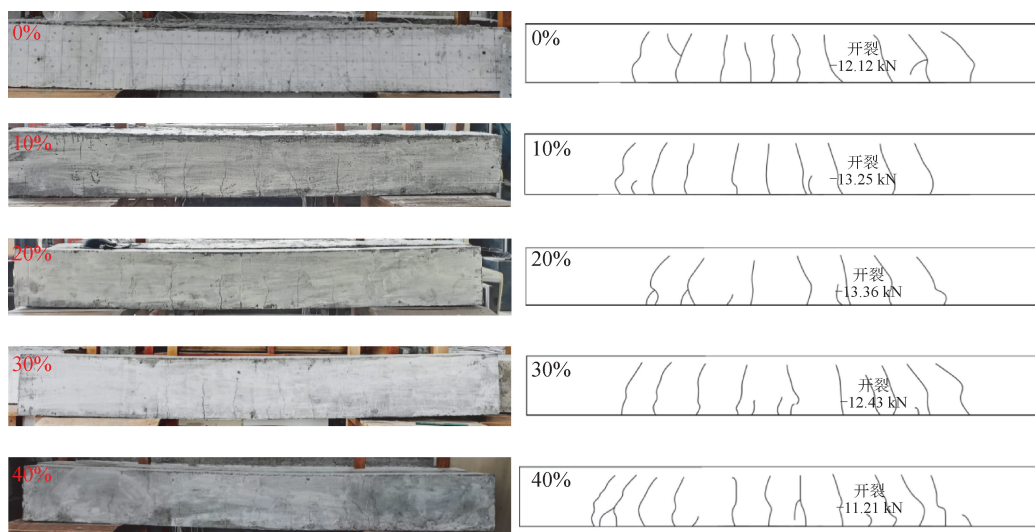


图 4 试验梁破坏形态图

Fig. 4 Diagram of the failure shape of the test beam

表 3 加载试验结果图

Tab. 3 Results of loading test

试件编号	开裂荷载/ kN	开裂弯矩/ (kN · m)	屈服荷载/ kN	屈服弯矩/ (kN · m)	极限荷载/ kN	极限弯矩/ (kN · m)
SMK-0	12.12	3.03	41.37	10.34	49.25	12.31
SMK-10	13.25	3.31	44.58	11.15	52.01	13.00
SMK-20	13.36	3.34	44.92	11.23	53.16	13.29
SMK-30	12.43	3.11	42.35	10.59	50.33	12.58
SMK-40	11.21	2.80	41.98	10.50	47.01	11.75

2.2 平截面假定验证

平截面假定是混凝土结构计算的一个基本依据,对于石墨尾矿砂混凝土,其力学性能较普通混凝土有所不同,为满足石墨尾矿砂混凝土正截面承载力的计算条件,就需要确定石墨尾矿砂混凝土是否符合平截面假定。

图 5 为不同石墨尾矿砂掺量的钢筋混凝土梁在不同荷载作用下,跨中混凝土应变沿梁截面高度的

变化情况,以此来验证石墨尾矿砂混凝土梁对平截面假定的适用性。从图 5 中各试验梁跨中截面不同高度测点的应变可知,不论石墨尾矿砂的掺量是多少,正截面上各测点的应变与该点到中性轴的距离近似成正比,跨中截面上各测点的混凝土应变基本呈线性分布,这一规律说明,石墨尾矿砂混凝土梁基本符合平截面假定,可以作为其正截面受弯承载力计算的理论依据。

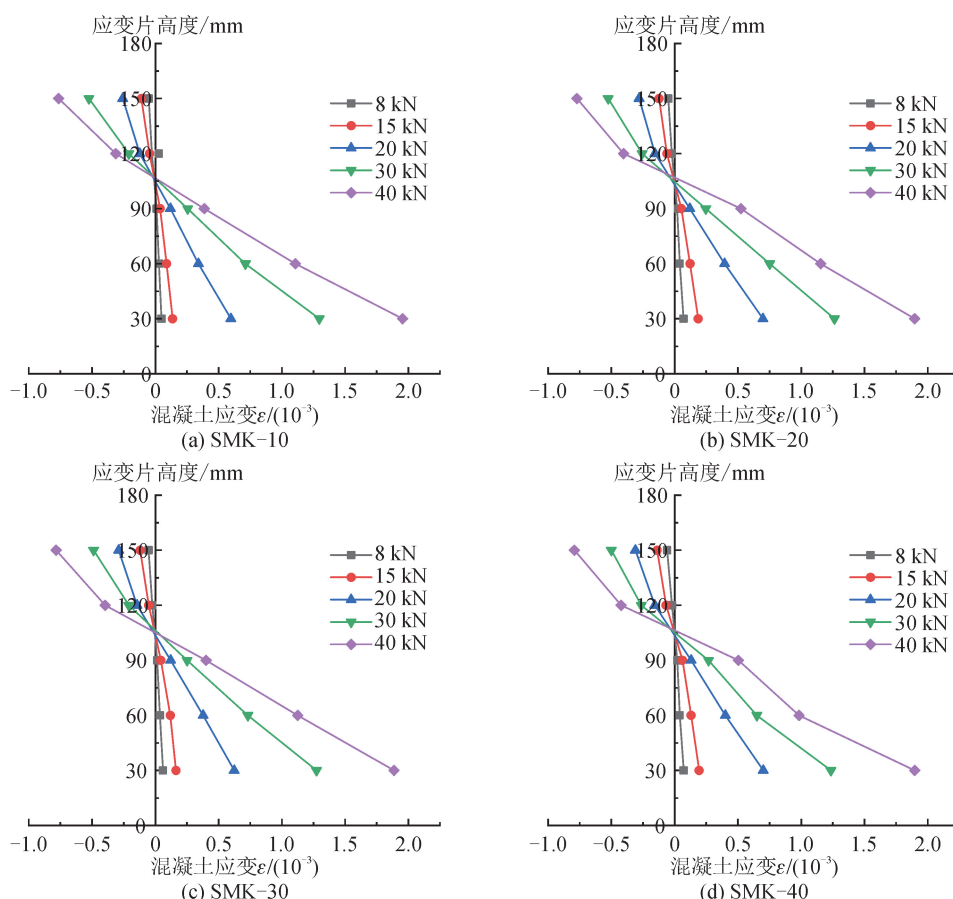


图5 试验梁跨中不同截面高度应变分布

Fig. 5 Strain distribution in the mid-span section of the test beam

2.3 跨中挠度分析

实测各试验梁荷载-挠度曲线如图6所示,试验梁在破坏形态上的差异可以在荷载-挠度曲线中得到直观反映。

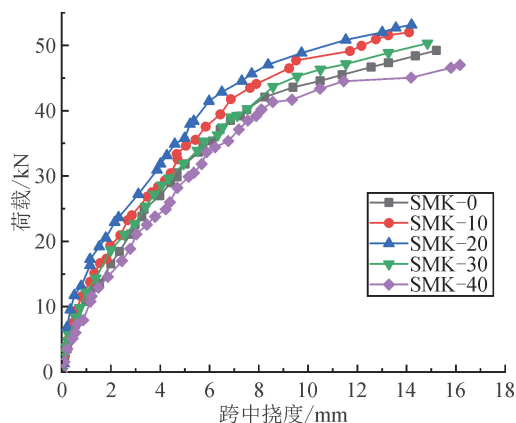


图6 荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curve

从图6中可以看出,石墨尾矿砂混凝土梁的荷载-挠度曲线和普通混凝土梁的趋势基本一致。在试验加载初期,梁处于弹性阶段,曲线近似为直线,随着荷载继续施加,试验梁开始出现裂缝,荷载-挠度曲线出现转折点,挠度增长的速度逐渐加快,且开

裂后荷载-挠度曲线逐渐呈非线性发展,刚度显著降低。荷载逐渐加大至钢筋屈服,荷载-挠度曲线出现第二个转折点,屈服后梁的挠度激增,当荷载增加较少时,挠度增大很多,荷载-挠度曲线也近乎水平直线,最终试验梁破坏。

具体来看,随着石墨尾矿砂取代率的增加,试验梁的极限承载力先升高后降低。石墨尾矿砂取代率为10%、20%和30%时,石墨尾矿砂混凝土梁均比普通混凝土梁的极限承载力大,SMK-10、SMK-20比SMK-0分别增加了5.60%、7.94%,其中,SMK-20增加最多,说明取代率为20%的石墨尾矿砂混凝土梁抗弯性能最好,这可能是由于石墨尾矿砂取代率为10%~20%时,石墨尾矿砂增加了混凝土的致密性,提高了石墨尾矿砂混凝土的强度,当石墨尾矿砂取代率为20%时,混凝土试块的总孔隙率、总孔体积和比表面积全部达到最优,因此混凝土试块的抗压强度达到最优^[2]。取代率为40%时,石墨尾矿砂混凝土梁的极限承载力稍低于普通混凝土梁,SMK-40比SMK-0降低了4.55%。关于极限挠度,当取代率为10%、20%和30%时,石墨尾矿砂混凝土梁均比普通混凝土梁小,SMK-10、SMK-20、SMK-30

比 SMK-0 分别降低了 7.30%、6.64%、2.43%；当取代率为 40% 时，石墨尾矿砂混凝土梁的极限挠度比普通混凝土梁的挠度大，增加了 6.25%。

3 极限弯矩及跨中挠度计算

3.1 极限弯矩试验值及计算值对比分析

根据以上分析，石墨尾矿砂混凝土梁正截面试验满足受弯构件正截面承载力计算的基本假定，但目前并没有石墨尾矿砂混凝土结构的设计规范，因此参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[19]中的承载力计算公式，对石墨尾矿砂混凝土梁极限承载力进行计算，梁正截面承载力为：

$$M_u = \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) \quad (1)$$

$$\alpha_1 f_c x = f_y A_s \quad (2)$$

式中： α_1 为受压区混凝土的简化应力图形系数，取 1.0； f_c 为石墨尾矿砂混凝土轴心抗压强度，取实测值，MPa； b 为梁宽，mm； x 为截面受压区高度，mm； h_0 为截面有效高度，mm； f_y 为纵筋屈服强度，取实测值，MPa； A_s 为受拉纵筋有效截面面积，mm²。

由式(1)和(2)计算各试件抗弯极限承载力 M_u 及试验值 M_c ，如表 4 所示。

表 4 极限承载力计算值与试验值对比

Tab. 4 Comparison of calculated value and test value of ultimate bearing capacity

试件编号	$M_u / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_c / (\text{kN} \cdot \text{m})$	M_c / M_u
SMK-0	9.22	12.31	1.34
SMK-10	9.23	13.00	1.41
SMK-20	9.24	13.29	1.44
SMK-30	9.22	12.58	1.36
SMK-40	9.21	11.75	1.28

由表 4 可知，石墨尾矿砂混凝土梁与普通混凝土梁的试验值均大于计算值，说明按照混凝土规范计算石墨尾矿砂混凝土梁的极限承载力是可行的，但是偏于保守。

然而，现行规范中的计算公式没有考虑石墨尾矿砂取代率的因素，所以不同石墨尾矿砂掺量的混凝土梁的计算值可能会出现误差，因此引入石墨尾矿砂取代率的修正系数。参照李志强等^[15]的方法，对不同石墨尾矿砂取代率的混凝土梁的数据进行数值拟合，拟合曲线如图 7 所示。其中，拟合曲线的决定系数 R^2 为 0.970 2，表明曲线的拟合优度高。

根据拟合曲线，可以提出石墨尾矿砂混凝土梁的正截面极限承载力计算公式：

$$M = y M_u = (B_1 x^2 + B_2 x + C) M_u \quad (3)$$

式中： M 为修正后梁的极限承载力，MPa； y 为修正系数； M_u 为梁的极限承载力理论计算值，MPa； x 为石墨尾矿砂取代率，%； $B_1 = -0.000\ 321\ 4$ ， $B_2 = 0.011\ 16$ ， $C = 1.339\ 7$ 。

利用式(3)计算石墨尾矿砂混凝土梁的极限承载力 M ，并与梁极限承载力试验值 M_c 进行对比，如表 5 所示。同时，利用式(3)，还可预测不同质量取代率的石墨尾矿砂混凝土梁的极限承载力。

由表 5 可知， M_c/M 的平均值为 0.999 2，说明修正后的计算值与试验值吻合较好，表明修正后的极限承载力计算公式适用于石墨尾矿砂混凝土梁的极限承载力计算。

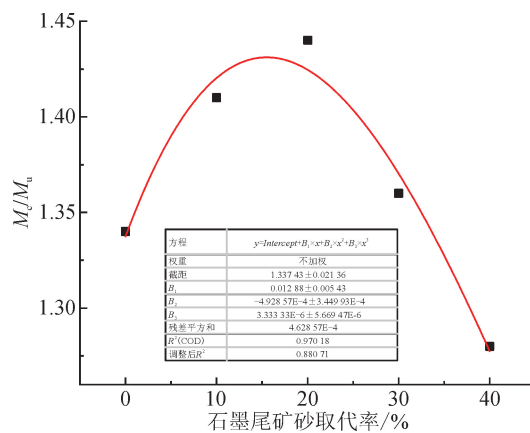


图 7 拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve

表 5 修正后的极限承载力计算值与试验值对比

Tab. 5 Comparison of calculated value and test value of ultimate bearing capacity after revision

试件编号	$M / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_c / (\text{kN} \cdot \text{m})$	M_c / M
SMK-0	12.35	12.31	0.996 8
SMK-10	13.10	13.00	0.992 4
SMK-20	13.25	13.49	1.018 1
SMK-30	12.77	12.58	0.985 1
SMK-40	11.71	11.75	1.003 4

3.2 跨中挠度试验值及计算值对比分析

采用结构力学方法计算试验梁受弯挠度，表达式为：

$$f = \alpha M l_0^2 / B_s \quad (4)$$

式中： α 是与荷载的加载方式、约束条件有关的系数，对于承受三分点加载的简支梁， α 取 0.106 5； l_0 为试验梁净跨长，mm； B_s 为短期刚度值，根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[19]和最小刚度原则，对于矩形截面混凝土梁，有：

混凝土开裂前，混凝土梁类似于弹性材料梁，其

刚度基本是常数:

$$B_s = 0.85 E_c I_0 \tag{5}$$

式中: E_c 是混凝土弹性模量; I_0 为换算截面惯性矩, 矩形截面 $I_0 = ab^3/12$, a 为截面长, b 为截面高。

裂缝出现后, 混凝土梁的短期刚度为:

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + 6 \alpha_E \rho} \tag{6}$$

式中: E_s 是钢筋弹性模量; ψ 为钢筋应变不均匀系数; α_E 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值; ρ 为纵向受拉钢筋配筋率。

按上式计算混凝土开裂前以及开裂后至钢筋屈服前的挠度, 并与不同掺量石墨尾矿砂混凝土梁的实测挠度值进行对比, 如图 8 所示。

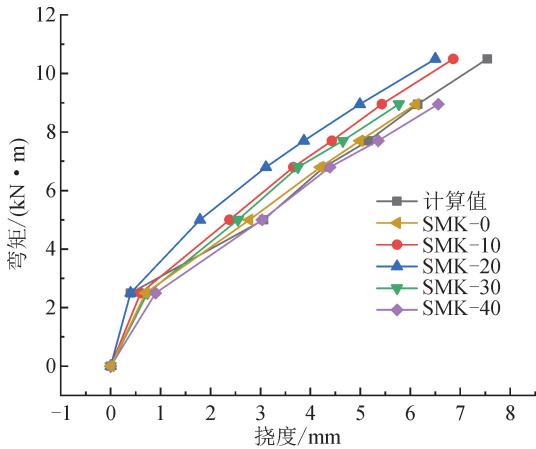


图 8 挠度计算值与实测值对比图
Fig. 8 Comparison of calculated and measured deflection values

从图 8 可以看出, 无论石墨尾矿砂掺量为多少, 在试验梁开裂之前, 挠度的实测值均比计算值稍大; 在试验梁出现裂缝以后, 普通混凝土梁和 SMK-40 梁的挠度实测值与计算值相差不大, 而 SMK-10、SMK-20、SMK-30 梁的挠度实测值均比计算值小, 这说明普通钢筋混凝土梁的挠度计算方法并不适用于石墨尾矿砂混凝土梁的挠度计算, 因此, 引入正常状态下不同质量取代率石墨尾矿梁的跨中挠度修正系数。对弯矩为 5.1 kN·m、6.8 kN·m、7.7 kN·m、8.9 kN·m 的各取代率石墨尾矿砂混凝土梁的实测挠度值与计算值的比值进行拟合, 拟合曲线如图 9 所示。

根据挠度拟合曲线, 可以提出挠度修正系数 η :

$$\eta = y = D_1 x^2 + D_2 x + E \tag{7}$$

式中: x 为石墨尾矿砂取代率, %; y 为修正系数。

不同弯矩作用下, 修正系数的相关系数 D_1 、 D_2 、 E 以及拟合曲线的决定系数 R^2 如表 6 所示。

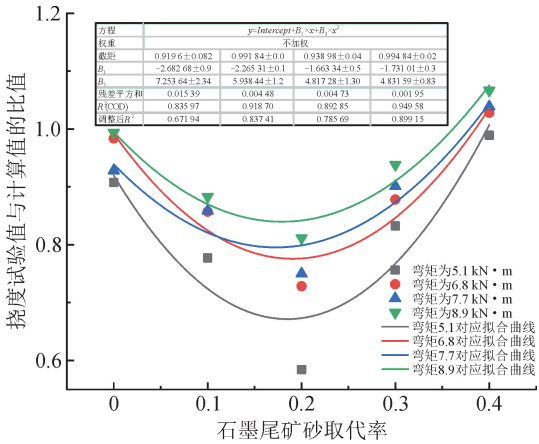


图 9 挠度拟合曲线
Fig. 9 Deflection fitting curve

表 6 修正系数 η 的相关系数

Tab. 6 Correction coefficient η correlation coefficient				
弯矩/ (kN·m)	D_1	D_2	E	R^2
5.1	7.253 6	-2.682 7	0.919 6	0.836 0
6.8	5.938 4	-2.265 3	0.991 8	0.918 7
7.7	4.817 3	-1.663 3	0.939 0	0.892 9
8.9	4.831 6	-1.731 0	0.949 6	0.949 6

4 结 论

通过对不同石墨尾矿砂掺量的钢筋混凝土梁进行抗弯性能试验研究, 得出以下结论。

1) 石墨尾矿砂混凝土梁的破坏形态、裂缝发展均与普通混凝土梁相似, 会经历明显的线弹性阶段、裂缝发展阶段、纵筋屈服阶段以及破坏阶段。同时, 石墨尾矿砂混凝土梁符合平截面假定, 可以作为试验梁极限承载力理论计算的基础。

2) 石墨尾矿砂混凝土梁的荷载-挠度曲线与普通混凝土梁的发展趋势基本一致。随着石墨尾矿砂取代率的增加, 试验梁的极限承载力先增大后降低, 其中, 石墨尾矿砂取代率为 10%、20%、30% 时, 该梁的极限承载力均比普通混凝土梁高, 而当取代率为 10%~20% 时, 试验梁的抗弯性能最优。

3) 现行规范中的混凝土梁极限弯矩计算公式不适用于 10%~40% 取代率的石墨尾矿砂混凝土梁, 本文通过将试验数据与理论计算数据进行拟合, 提出了石墨尾矿砂混凝土梁极限弯矩的修正公式, 并将修正后的数据与试验数据进行对比, 发现吻合较好, 基本可以满足 10%~40% 石墨尾矿砂混凝土梁的极限弯矩的要求; 现行规范中的跨中挠度计算公式也不适用于 10%~40% 石墨尾矿砂混凝土梁, 因此本文引入了挠度修正系数 η 。

参考文献:

- [1] 自然资源部:《中国矿产资源报告(2020)》发布[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(5): 711.
- [2] 刘洪波, 李兴, 佟瑶, 等. 石墨尾矿碳纤维混凝土电阻率与力学参数的相关性研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2020, 11(2): 11-15.
LIU Hongbo, LI Xing, TONG Yao, et al. Study on the relativity between resistivity and mechanical parameters of carbon fiber reinforced concrete with graphite tailings [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2020, 11(2): 11-15.
- [3] LIU Hongbo, LI Ben, XUE Jing, et al. Mechanical and electroconductivity properties of graphite tailings concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020 (1): 113-128.
- [4] WANG Zhongrui, LI Ben, LIU Hongbo, et al. Degradation characteristics of graphite tailings cement mortar subjected to freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117422.
- [5] LIU Hongbo, XUE Jing, LI Ben, et al. Effect of graphite tailings as substitute sand on mechanical properties of concrete[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24: 123-131.
- [6] 刘洪波, 张大双, 刘晓丽, 等. 石墨尾矿混凝土压敏性能研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2015, 6(1): 22-27.
LIU Hongbo, ZHANG Dashuang, LIU Xiaoli, et al. Research on pressure-sensitivity of graphite tailings concrete [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2015, 6(1): 22-27.
- [7] 王亮量, 陈子光, 刘洪波, 等. 石墨尾矿混凝土的力电分析及测强曲线的研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2019, 2(5): 37-41.
WANG Liangliang, CHEN Zigang, LIU Hongbo, et al. Electromechanical analysis of graphite tailings concrete and establishment of strength measuring curve [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2019, 2(5): 37-41.
- [8] 孙小巍, 张雯琪, 王琪, 等. 石墨尾矿泡沫混凝土性能研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(3): 9-13.
SUN Xiaowei, ZHANG Wenqi, WANG Qi, et al. Study on properties of graphite tailings foamed concrete [J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(3): 9-13.
- [9] 陈信展, 韩飞, 孔祥清, 等. BFRP 筋钢纤维部分增强再生混凝土梁抗弯性能研究[J]. 混凝土, 2021(1): 77-81, 86.
CHEN Xinzhan, HAN Fei, KONG Xiangqing, et al. Flexural behaviour of steel fiber partially reinforced recycled aggregate concrete beams reinforced with BFRP rebars [J]. Concrete, 2021(1): 77-81, 86.
- [10] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 混凝土强度对珊瑚混凝土梁抗弯性能的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(2): 450-458.
DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Influence of concrete strength to the flexural behavior of coral aggregate concrete beam[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(2): 450-458.
- [11] 刘云雁, 范颖芳. CFRP 增强损伤预应力混凝土梁抗弯承载力试验研究[J]. 混凝土, 2020(11): 20-25.
LIU Yunyan, FAN Yingfang. Experimental study on flexural behavior of damaged pre-stressed concrete beams reinforced with CFRP[J]. Concrete, 2020(11): 20-25.
- [12] 闫国新, 吴伟, 周宜红. 再生混凝土梁抗弯承载力公式研究[J]. 混凝土, 2019(11): 19-22.
YAN Guoxin, WU Wei, ZHOU Yihong. Fitting of the ultimate flexural formula of recycled concrete beam [J]. Concrete, 2019(11): 19-22.
- [13] 牛荻涛, 陈磊, 刘西光. 硫酸腐蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法[J]. 工业建筑, 2020, 50(12): 50-54, 68.
NIU Ditao, CHEN Lei, LIU Xiguang. A calculation method of flexural capacity of reinforced concrete beams corroded by sulfuric acid[J]. Industrial Construction, 2020, 50(12): 50-54, 68.
- [14] 付强, 马洪伟, 罗丽娜. HRB500 级钢筋 RPC 简支梁挠度计算方法[J]. 铁道建筑, 2016(5): 91-94.
FU Qiang, MA Hongwei, LUO Lina. Calculation method of deflection of RPC(reactive powder concrete) simply supported girder reinforced by HRB 500 rebars [J]. Railway Engineering, 2016(5): 91-94.
- [15] 李志强, 杨森, 王国庆, 等. 沙漠砂混凝土梁抗弯性能研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(4): 931-938.
LI Zhiqiang, YANG Sen, WANG Guoqing, et al. Study on the flexural properties of desert sand concrete beam [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(4): 931-938.
- [16] 周梅, 栾从起, 李高年. 自燃煤矸砂钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(2): 341-346.
ZHOU Mei, LUAN Congqi, LI Gaonian. Flexural behavior on spontaneous combustion gangue sand reinforced concrete beam[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(2): 341-346.
- [17] 王庆贺, 李喆, 周梅, 等. 自燃煤矸石骨料取代率对煤矸石混凝土梁受弯性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 64-74.
WANG Qinghe, LI Zhe, ZHOU Mei, et al. Effects of spontaneous-combustion coal gangue aggregate (SCGA) replacement ratio on flexural behavior of SCGA concrete beams [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12): 64-74.
- [18] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [19] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(责任编辑 周 蓓)