

GFRP 筋橡胶集料混凝土梁受弯性能

赵秋红^{*1,2}, 刘凯¹, 王菲¹, 李一康¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)



分享本文

摘要: 为提高纤维增强聚合物复合材料 (FRP) 筋混凝土梁抗裂性能, 改善其脆性破坏特征, 将玻璃纤维增强聚合物复合材料 (GFRP) 筋与橡胶集料混凝土共同应用于梁构件中。采用 ABAQUS 对 GFRP 筋橡胶集料混凝土梁的受弯性能进行有限元模拟及参数分析, 探究了橡胶掺量、GFRP 筋配筋率、混凝土强度等级及截面高度对梁受弯性能的影响。结果表明: 增加混凝土中橡胶颗粒的掺量可提高梁的开裂荷载, 当橡胶掺量为 15% 时, 开裂荷载提高了 29%; 增加配筋率可提高梁的开裂荷载和承载力, 当受拉筋直径由 10 mm 增加至 18 mm 时, 橡胶掺量为 10% 的 GFRP 筋橡胶混凝土梁开裂荷载提高了约 15%, 承载力提高了约 85%, 但配筋率增加至一定数值后, 其影响不再明显; 提高橡胶混凝土强度等级, 可提高梁的开裂荷载及承载力, 当橡胶混凝土强度等级由 C25 提高至 C40 时, 开裂荷载提高了约 53.7%, 承载力提高了约 23%; 为更好地满足正常使用极限状态, GFRP 筋橡胶混凝土梁的截面高度宜适当增加。

关键词: FRP 筋混凝土梁; 橡胶混凝土; 非线性有限元分析; 受弯性能; 极限受弯承载力

中图分类号: TU377.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2021)05-1611-12

Analyses on flexural behavior of GFRP-reinforced crumb rubber concrete beams

ZHAO QiuHong^{*1,2}, LIU Kai¹, WANG Fei¹, LI Yikang¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of China Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to improve the crack resistance capacity, and avoid the brittle failure of the fiber-reinforced polymer composite (FRP) reinforced concrete beams, a mixed-use of glass fiber-reinforced polymer composite (GFRP) bars and crumb rubber concrete was adopted in beam components under bending. Finite element analysis software ABAQUS was used to simulate the flexural behavior of GFRP-reinforced crumb rubber concrete beams. Parametric studies were conducted to study the influence of rubber content, reinforcement ratio, concrete strength grade, and cross-section height on the flexural behavior of GFRP-reinforced crumb rubber concrete beams. The results show that the cracking load of beam increases with the increase of rubber content. The cracking load of beam increases by 29% when the rubber content of concrete is 15%. Increasing the reinforcement ratio could improve the cracking load and flexural strength of the beam. The cracking load of the GFRP-reinforced crumb rubber concrete beam with rubber replacement ratio of 10% has a 15% increase and the flexural strength of the beam has 85% increase induced by increasing the diameter of the GFRP bar from 10 mm to 18 mm. However, when the reinforcement ratio reaches a certain value, the influence is no longer obvious. Increasing the crumb rubber concrete strength can improve the cracking load and flexural strength of the beam. Increasing the crumb rubber concrete strength from C25 to C40 results in approximately 53.7% increase in cracking load, and more than 23% increase in flexural strength. The beams with higher section height are more likely to meet the requirements at normal serviceable limit state.

Keywords: FRP-reinforced beams; crumb rubber concrete; nonlinear analysis; flexural behavior; ultimate flexural capacity

收稿日期: 2020-08-08; 录用日期: 2020-10-15; 网络首发时间: 2020-11-09 09:34:41

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201106.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (51378340; 51678406; 51878447)

通信作者: 赵秋红, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为钢结构和组合结构 E-mail: qzhao@tju.edu.cn

引用格式: 赵秋红, 刘凯, 王菲, 等. GFRP 筋橡胶集料混凝土梁受弯性能 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(5): 1611-1622.

ZHAO QiuHong, LIU Kai, WANG Fei, et al. Analyses on flexural behavior of GFRP-reinforced crumb rubber concrete beams[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(5): 1611-1622(in Chinese).

钢筋混凝土结构是土木工程的主要结构形式之一,被广泛应用于建筑、道路桥梁、地铁隧道等多类工程中。对于近海建筑及桥梁结构,钢筋锈蚀问题严重威胁着钢筋混凝土结构的耐久性,在一定程度上制约了钢筋混凝土结构的发展。新型纤维增强聚合物基复合材料筋(FRP)以其轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳等特点获得了工程界长久以来的关注^[1-2],国内外也陆续开展了对FRP筋混凝土梁的研究。Nawy等、Masmoudi等、Theriault等^[3-5]研究指出,FRP筋混凝土梁可以有效解决钢筋混凝土结构由于钢筋腐蚀造成的耐久性问题。根据纤维种类的不同,FRP筋可分为芳纶纤维增强聚合物复合材料筋(AFRP)、玄武岩纤维增强聚合物复合材料筋(BFRP)、碳纤维增强聚合物材料复合筋(CFRP)及玻璃纤维增强聚合物材料复合筋(GFRP)等。其中,GFRP筋由于其制作工艺成熟且成本较低,已在非预应力混凝土结构中得到广泛应用,但由于其弹性模量较低,导致GFRP筋混凝土梁开裂较早,最大裂缝宽度为相应钢筋混凝土梁的3~5倍,且破坏时呈脆性破坏特征。朱虹等、董志强等、徐新生^[6-8]通过GFRP筋混凝土简支梁的单调加载试验发现,截面配筋率相近的情况下,GFRP筋混凝土梁开裂较早,且裂缝疏而宽,裂缝间距大于普通钢筋混凝土梁。此外,由于FRP筋为线弹性材料,基本无耗能能力,因此FRP筋混凝土梁的耗能能力也远低于普通钢筋混凝土梁。

橡胶集料混凝土是一种将废旧轮胎碾磨而成的橡胶颗粒部分代替细骨料掺入传统混凝土制成的新型绿色混凝土材料,与普通混凝土相比,其具有更高的抗裂性能、极限应变及耗能能力^[9-10]。将橡胶集料混凝土与FRP共同应用于梁构件中,有望改善FRP筋混凝土梁的开裂荷载,改善其脆性破坏的特征,并提高结构耗能能力。李悦等和郭红梅等^[11-12]进行了钢筋橡胶集料混凝土梁构件的弯曲试验,发现在混凝土中加入橡胶集料可提高钢筋橡胶集料混凝土梁的开裂弯矩,提高幅度在10%~60%之间。但由于橡胶颗粒的弹性模量较低,若将其直接掺入混凝土,可能导致材料抗压强度有一定程度的下降,当掺量较高时尤为明显^[13-14]。赵秋红等^[15]通过预处理橡胶颗粒及优化配合比设计,配置了与C30普通混凝土基本等强且和易性较好的橡胶集料混凝土,并通过材料试验提出了结构用橡胶集料混凝土的应力-应变全曲

线模型。

本文将FRP筋与橡胶集料混凝土共同应用于梁构件中,利用FRP筋和橡胶集料混凝土良好的抗腐蚀性能,解决近海建筑及桥梁结构中的梁构件腐蚀问题;利用橡胶集料混凝土较高的极限应变,使之与FRP筋能够更为协调地变形,从而提高开裂弯矩,延缓结构破坏;利用橡胶集料混凝土较高的耗能能力,弥补FRP筋耗能能力的不足。虽然目前橡胶混凝土的制作成本略高于普通混凝土,但其应用将为废旧橡胶的回收利用提供一条有效途径,显著降低因废旧橡胶处置不当而造成的环境污染。同时,随着生产技术的提高及工业化生产线的不断完备,橡胶混凝土的生产成本将有望得以逐步降低。

目前,关于FRP筋橡胶集料混凝土构件的相关研究尚未见公开报道。因此,为全面研究FRP筋橡胶集料混凝土梁的受弯性能,本文在FRP筋橡胶集料混凝土梁受弯试验的基础上,利用大型通用软件ABAQUS建立了试件的三维有限元模型,进行了非线性Push-down分析,并研究了橡胶掺量、FRP配筋率、混凝土强度等级和梁截面高度对FRP筋橡胶集料混凝土梁抗弯性能的影响。结合有限元分析及理论计算结果,提出了FRP筋橡胶集料混凝土梁极限承载力的修正公式。

1 试验概况

为研究GFRP筋橡胶集料混凝土梁的抗弯性能,共设计了6根梁试件,长度为2 000 mm,截面尺寸为150 mm×200 mm。B1为普通钢筋混凝土梁对照试件,受拉钢筋直径为16 mm,屈服强度为422 MPa,极限强度为596 MPa,弹性模量为185 GPa。B2~B6为GFRP筋混凝土梁试件,分为两组,其中,1组试件GFRP筋的直径为12 mm,极限强度为747 MPa,弹性模量为49.5 GPa;2组试件GFRP筋的直径为16 mm,极限强度为810 MPa,弹性模量为48.8 GPa。所有试件使用相同的架立筋和箍筋,架立筋直径为12 mm,屈服强度为459 MPa,极限强度为639 MPa,弹性模量为200 GPa;箍筋直径为6 mm,屈服强度为470 MPa,极限抗拉强度为637 MPa,弹性模量为236 GPa。赵秋红等^[15]通过材料试验研究了橡胶掺量分别为0%、5%、10%的橡胶集料混凝土力学性能。研究发现,通过配比优化设计,能够得到强度与普通混凝土相近的橡胶集料混凝土,并给出了相应配比。本试

验采用的橡胶集料混凝土采用文献 [15] 中提出的配比进行配制。试验混凝土的配比及力学性能分别如表 1 及表 2 所示。由表 2 可知，橡胶混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量与普通混凝土相当，基本实现了等强。根据 GB/T 50152—2012^[16]，所有梁均设计为简支梁，净跨为 1.8 m，采用两点加载的形式，跨中 500 mm 为纯弯段。表 3 为试件设计及配筋情况，图 1 和图 2 分别为

试件的尺寸和加载示意图。钢筋混凝土梁为适筋梁，破坏开始于钢筋的屈服。FRP 筋混凝土梁均为超筋梁，B2、B5 和 B6 试件的破坏开始于受压区混凝土压碎，最后 FRP 筋被拉断；而 B3 和 B4 试件表现出少筋破坏的特征，破坏开始于 FRP 筋的拉断，随后受压区混凝土有轻微压碎或梁发生折断。具体试验过程及数据分析见文献 [17]。

表 1 不同橡胶掺量混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of concrete with different rubber contents

Type	Rubber/%	Crumb rubber/kg	Cement/kg	Water/kg	Fine aggregate/kg	Coarse aggregate/kg	Super Plasticizer/%
TC	0	0	300	165	839	1 087	2.40
5% CRC	5	50	400	180	939	768	5.20
10% CRC	10	100	440	162	680	832	4.78

Notes: CRC—Crumb rubber concrete; TC—Traditional concrete.

表 2 不同橡胶掺量混凝土强度及弹性模量

Table 2 Strength and elastic modulus of concrete with different rubber contents

Type	Cubic compressive strength/MPa			Split tensile strength/MPa	Axial compressive strength/MPa	Elastic modulus/GPa
	7 d	28 d	50 d	28 d	50 d	50 d
TC	23.5	29.8	31.0	2.11	25.5	30.8
5% CRC	22.7	29.1	29.9	1.82	24.7	27.9
10% CRC	24.9	32.9	33.2	2.00	25.5	30.6

表 3 玻璃纤维增强聚合物复合材料 (GFRP) 筋橡胶混凝土梁试件主要参数

Table 3 Key parameters of glass fiber-reinforced polymer composite (GFRP)-reinforced crumb rubber concrete beams

Specimen		Span l_0 /mm	Effective height h_0 /mm	Rubber content of concrete/%	Erecting bar ①	Stirrup ②	Longitudinal reinforcement ③	Longitudinal reinforcement ratio/%
Group 1	B1 (Steel/TC)	1 800	161	0	2ΦC12	Φ6@100	2ΦC16	1.665
	B2 (GFRP/TC)	1 800	163	0	2ΦC12	Φ6@100	2-12FRP	0.924
	B3 (GFRP/5% CRC)	1 800	163	5	2ΦC12	Φ6@100	2-12FRP	0.924
	B4 (GFRP/10% CRC)	1 800	163	10	2ΦC12	Φ6@100	2-12FRP	0.924
Group 2	B5 (GFRP/5% CRC)	1 800	161	5	2ΦC12	Φ6@100	2-16FRP	1.665
	B6 (GFRP/10% CRC)	1 800	161	10	2ΦC12	Φ6@100	2-16FRP	1.665

2 试验梁有限元模拟

2.1 模型简述

本文采用有限元分析软件 ABAQUS 建立 GFRP 筋橡胶集料混凝土梁精细有限元模型，并进行非线性 Push-down 分析。采用 C3D8R 实体单元^[18]模拟橡胶集料混凝土，采用 T3D2 桁架单元模拟钢筋和 GFRP 筋，采用 Embedded 命令将钢筋骨架嵌入到混凝土中。经网格密度敏感性分析，并综

合考虑计算精度及效率，网格尺寸为 50 mm。在加载点和支座处设置刚性实体垫块，采用 Tie 约束将支座垫块顶面节点、加载垫块底面节点与对应的梁节点耦合，采用 Coupling 约束将加载垫块顶面节点与加载点耦合。梁端为简支边界条件，梁端支座约束设置在支座垫块底面中线上。Push-down 荷载施加在加载点上，采用位移控制加载。GFRP 筋橡胶混凝土简支梁有限元模型如图 3 所示。

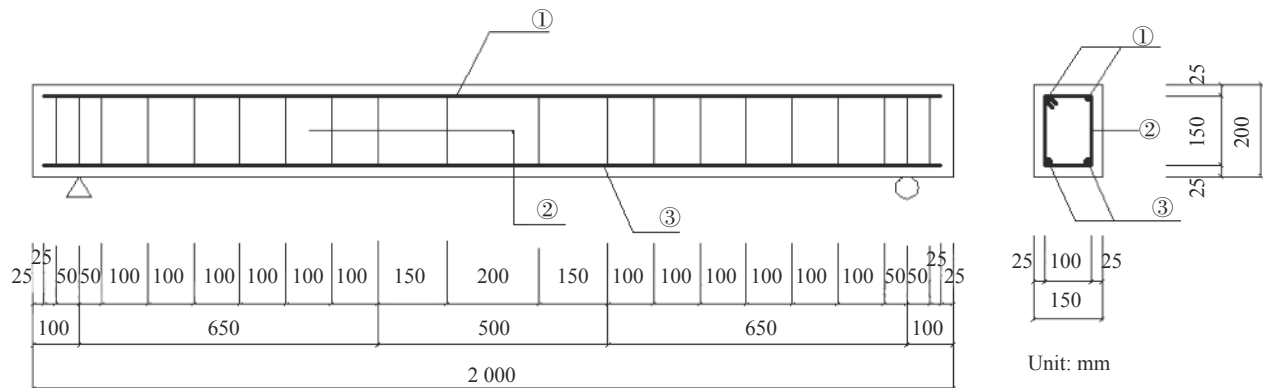


图1 GFRP 筋橡胶混凝土梁试件尺寸
Fig. 1 Specimen of GFRP-reinforced CRC beams size

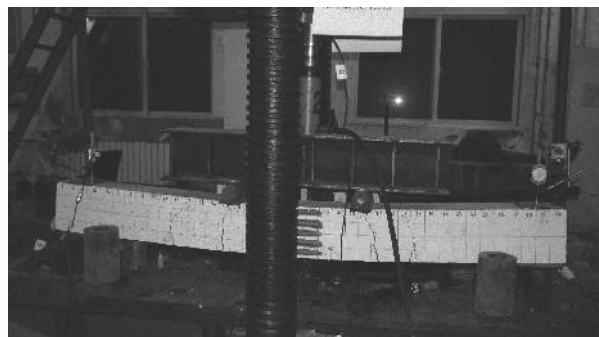


图2 试验加载装置示意图
Fig. 2 Diagram of test setup

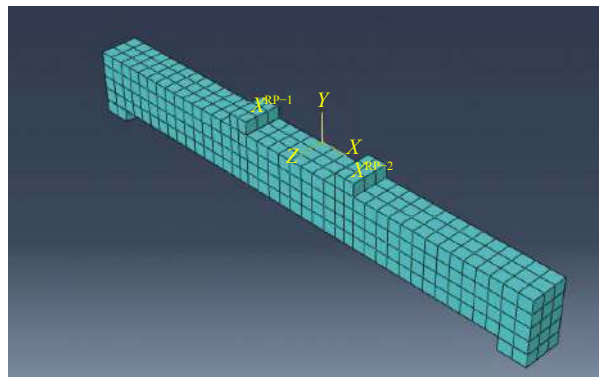


图3 GFRP 筋橡胶混凝土简支梁模型
Fig. 3 Model of simply supported GFRP-reinforced crumb rubber concrete beam

2.2 材料本构选取

2.2.1 混凝土本构模型

本文采用 ABAQUS 软件中提供的混凝土塑性损伤模型模拟橡胶集料混凝土的受力行为。橡胶集料混凝土受压应力-应变关系根据试验确定，试验实测橡胶集料混凝土受压应力-应变关系曲线如图 4 所示。混凝土受拉应力-应变关系根据 GB 50010—2010^[19] 附录 C 的计算公式确定。为便于收

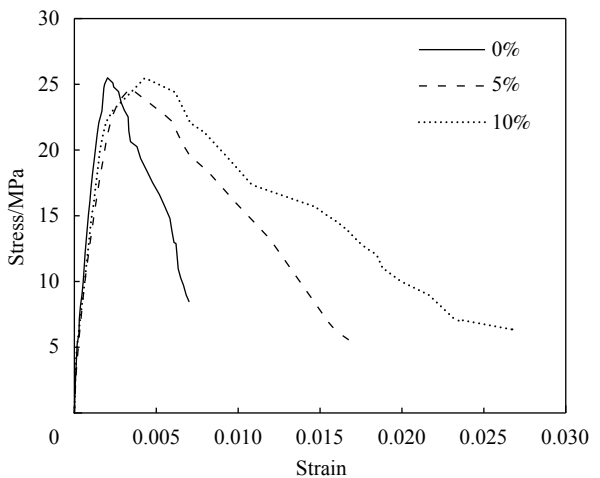


图4 不同橡胶掺量混凝土受压应力-应变试验曲线
Fig. 4 Compressive stress-strain relationship of concrete with different rubber contents from test

敛，将受拉应力-应变曲线的上升段简化为直线^[20]。

材料的损伤状态可采用损伤因子来描述^[21]。本文采用张劲公式法确定损伤因子，如下：

$$d_k = \frac{(1 - \beta)\epsilon^{\text{in}} E_0}{\sigma_k + (1 - \beta)\epsilon^{\text{in}} E_0} \quad (k = t, c) \tag{1}$$

式中：t、c 分别表示拉伸和压缩； β 为塑性应变与非弹性应变的比例系数，受压时取 0.35~0.7，受拉时取 0.5~0.95； ϵ^{in} 为混凝土拉压情况下的塑性应变； σ_k 为混凝土拉压时的强度值。本文中对于受压损伤因子， $\beta=0.7$ ；对于受拉损伤因子， $\beta=0.5$ 。

2.2.2 筋材本构模型

本文采用实测钢筋本构描述钢筋的受力行为，根据实测的钢筋应力-应变关系，输入真实应力和真实应变^[22]。采用双折线本构描述 FRP 筋的受力行为。GFRP 筋为线弹性材料，应力-应变关系曲

线呈线性,在塑性阶段 GFRP 筋的参数设置与弹性阶段相同。钢筋及 GFRP 筋的应力-应变关系如图 5 所示。

2.3 试验梁有限元模拟结果

对钢筋及橡胶集料混凝土梁 B1~B6 试件的模型分别进行非线性 Push-down 分析。有限元模型加载位移目标值与试验一致。图 6 为 B1 和 B5 试件的应力云图。图 7 为 B1、B5、B6 试件的有限元分析和试验结果的荷载-跨中挠度曲线。表 4 为 B1~B6 试件的有限元分析和试验的开裂荷载、极

限荷载。

由表 4 和图 7 可知,大部分有限元分析结果与试验结果相差幅度在 6% 之内,吻合较良好。B6 试件的极限荷载比试验值高了 17%,可能是由于 B6 试件的橡胶集料掺量较高,与 GFRP 筋的黏结稍差,在试验加载后期出现轻微的黏结滑移及承载力下降的情况,而有限元分析则未考虑 GFRP 筋与混凝土的黏结滑移,因此有限元分析的极限荷载值偏大。因此,采用 ABAQUS 软件对试件进行的有限元分析结果与试验结果吻合较好,有限元的建模方法、材料本构模型等是合理的。

3 有限元参数分析

选取 0%~15% (150 kg/m³) 不同橡胶掺量、不同 GFRP 筋直径、不同混凝土强度等级和不同梁截面高度以研究橡胶掺量、配筋率、混凝土等级和梁截面高度对 GFRP 筋橡胶集料混凝土梁受弯性能的影响,参数设计如表 5 所示。GB/T 50152—2012^[16] 规定,当混凝土梁的跨中挠度达到 $l_0/50$ 时,宣告试件破坏。在本文有限元分析中,当梁的跨中挠度达到 50 mm 时,认为模型破坏,达到极限荷载。

3.1 材料本构参数

参数分析采用与模型验证相一致的材料本构模型。混凝土本构参数采用 Carreira-Chu 应力-应

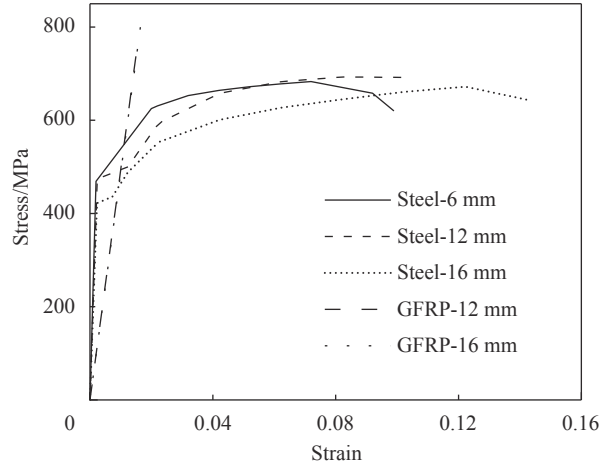


图5 钢筋和 GFRP 筋受拉应力-应变曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of steel and GFRP bars

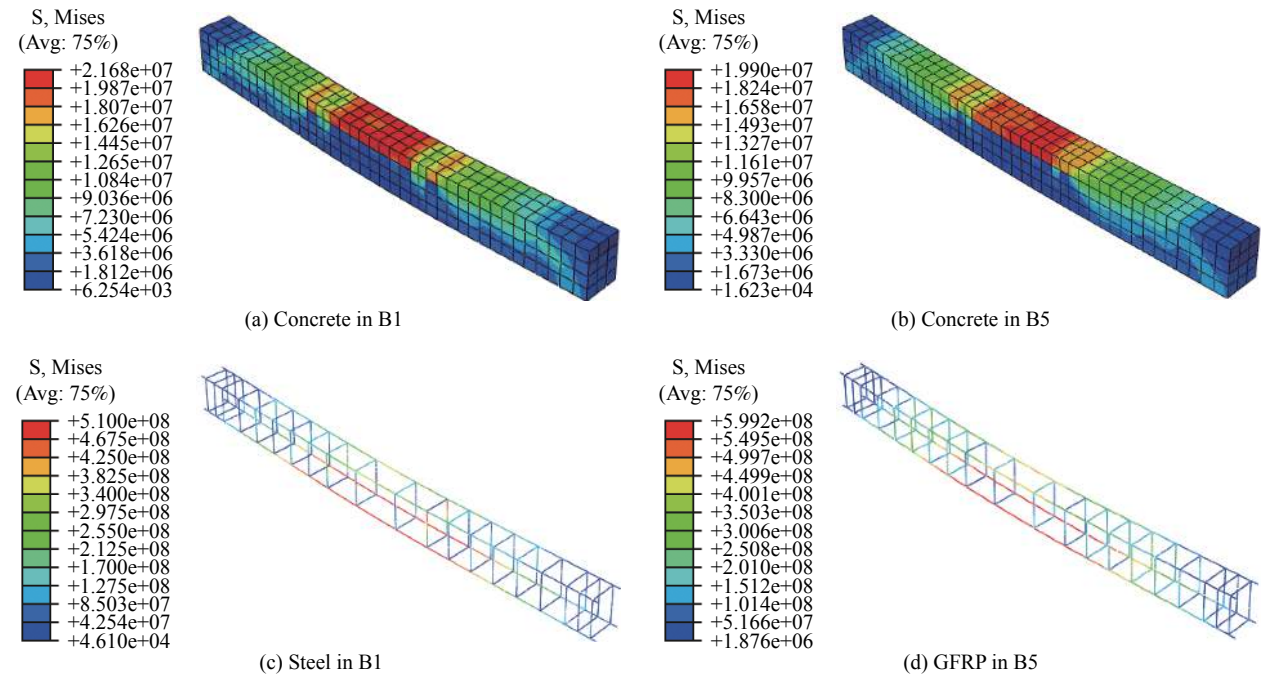


图6 B1 和 B5 试件的应力云图

Fig. 6 Stress distribution of B1 and B5 specimens

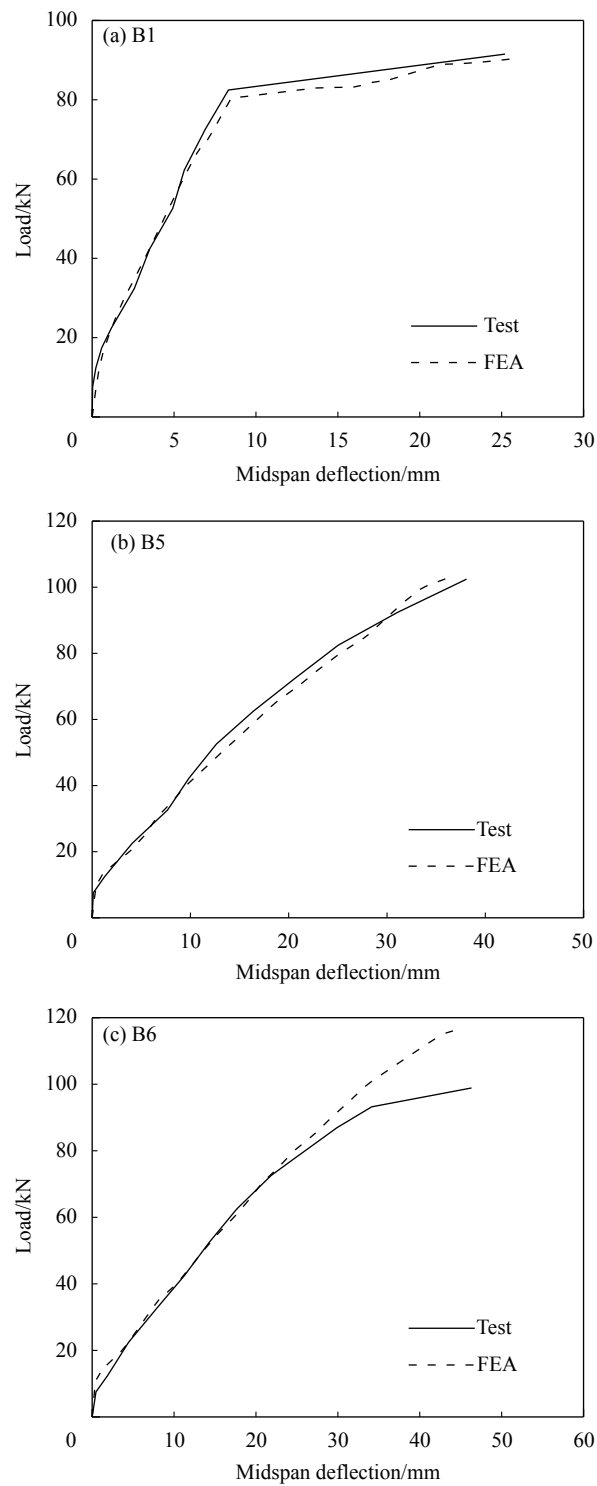


图 7 B1、B5、B6 试件的有限元分析 (FEA) 和试验的荷载-跨中挠度曲线

Fig. 7 Load-midspan deflection curves of B1, B5, B6 specimens by finite element analysis (FEA) and test

变模型^[23]进行计算。Yan 等^[24]曾采用 Carreira-Chu 模型对 Han 等^[25]的钢-橡胶混凝土组合梁的试验进行模拟,发现有限元分析结果与试验结果吻合

度较高。Carreira-Chu 应力-应变模型是基于材料试验结果提出的统一表征混凝土单轴受压应力-应变全曲线上上升段和下降段的有理分式,简称为 C-C 公式,表示如下:

$$\sigma = \frac{f_c \beta (\varepsilon / \varepsilon_c)}{\beta - 1 + (\varepsilon / \varepsilon_c)^\beta}$$
 (2)

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_c}{\varepsilon_c E_{it}}}$$
 (3)

$$\beta = (f_c / 32.4)^3 + 1.55$$
 (4)

式中:σ和ε分别为混凝土的压应力和压应变;f_c和ε_c分别为试验测得的混凝土轴心抗压强度和峰值应变值。β按照式(3)进行计算,其中E_{it}为试验测得的混凝土初始切线模量;当试验只测得混凝土轴心抗压强度f_c时,β按照式(4)进行计算。

图 8 为不同橡胶掺量混凝土试验应力-应变曲线与计算曲线对比。可知,该本构模型可以较好地预测试验中使用的等强橡胶集料混凝土。其中,当橡胶掺量为 15% 时,本构参数参考文献 [25] 取值,不同橡胶掺量下混凝土的本构模型参数取值如表 6 所示。

筋材本构参数取法为:GFRP 筋直径小于 16mm 时,极限强度取 750 MPa;直径大于等于 16 mm 时,极限强度取 810 MPa,弹性模量均取 48 GPa。架立钢筋直径取 12 mm,屈服强度取 474 MPa,极限强度取 693 MPa,弹性模量取 200 GPa。箍筋直径取 6 mm,屈服强度取 469 MPa,极限强度取 493 MPa,弹性模量取 236 GPa。

3.2 参数分析结果

3.2.1 橡胶掺量的影响

图 9 为同橡胶掺量模型的开裂荷载对比。由表 6 和图 9 可知,随橡胶掺量的增加,模型开裂荷载均增加。当受拉筋直径为 10mm 时,S6、S11、S16 模型的开裂荷载分别较 S1 模型提高了 24%、25% 和 29%;当受拉筋直径为 18mm 时,S10、S15、S20 模型的开裂荷载分别较 S5 模型提高了 1%、10% 和 11%。橡胶集料混凝土的抗裂性能优于普通混凝土,且橡胶掺量越大,抗裂性能越优异。当配筋率较低时,橡胶混凝土对梁的开裂荷载改善作用更明显,这是由于低配筋率梁更容易开裂,此时使用抗裂性能更好的橡胶混凝土更能发挥其优点。

图 10 为不同橡胶掺量模型的极限荷载对比。

表 4 B1~B6 试件的有限元分析和试验的开裂荷载和极限荷载

Table 4 Crack load and ultimate load of B1–B6 specimens by FEA and test

Specimen	Load/kN	Test value	FEA value	FEA/Test
B1 (Steel/TC beam)	Crack	18.5	14.9	0.81
	Ultimate	92.0	90.3	0.98
B2 (GFRP/TC beam)	Crack	8.5	8.2	0.96
	Ultimate	77.0	74.2	0.96
B3 (GFRP/5% CRC beam)	Crack	10.0	9.4	0.94
	Ultimate	71.0	74.6	1.05
B4 (GFRP/10% CRC beam)	Crack	10.5	10.2	0.97
	Ultimate	81.0	79.2	0.98
B5 (GFRP/5% CRC beam)	Crack	10.0	9.5	0.95
	Ultimate	102.0	103.0	1.01
B6 (GFRP/10% CRC beam)	Crack	10.5	10.3	0.98
	Ultimate	99.0	116.0	1.17

表 5 有限元模型参数设计

Table 5 Parameter design of finite element models

Model	Rubber content of concrete/%	FRP bar diameter/mm	Strength grade of concrete	Beam section height/mm	Cracking load/kN	Ultimate load/kN
S1	0	10	C30	200	6.3	51.5
S2	0	12	C30	200	7.1	71.9
S3	0	14	C30	200	7.7	90.5
S4	0	16	C30	200	8.1	99.4
S5	0	18	C30	200	8.3	95.7
S6	5	10	C30	200	7.8	55.3
S7	5	12	C30	200	7.9	73.2
S8	5	14	C30	200	8.0	90.9
S9	5	16	C30	200	8.2	97.4
S10	5	18	C30	200	8.4	99.7
S11	10	10	C30	200	7.9	55.5
S12	10	12	C30	200	8.1	73.8
S13	10	14	C30	200	8.3	89.9
S14	10	16	C30	200	8.5	99.5
S15	10	18	C30	200	9.1	101.0
S16	15	10	C30	200	8.1	56.7
S17	15	12	C30	200	8.3	75.1
S18	15	14	C30	200	8.4	91.9
S19	15	16	C30	200	8.6	101.3
S20	15	18	C30	200	9.2	104.8
S21	10	16	C25	200	8.2	98.1
S22	10	16	C35	200	10.2	110.9
S23	10	16	C40	200	12.6	120.7
S24	10	16	C30	250	12.7	170.1
S25	10	16	C30	300	20.5	211.8
S26	10	16	C30	350	26.5	235.6

由表 6 和图 10 可知，相比 GFRP 筋普通混凝土梁，GFRP 筋橡胶混凝土梁的极限承载力总体未下降，在一些情况下还略有增加。这主要是由于该橡胶混凝土为结构用橡胶混凝土，其抗压强度与普通混凝土基本可达等强，而其极限压应变相较于普通混凝土更高，裂缝开展及模型破坏过程缓慢，后期仍可继续承载，更加充分地利用了

GFRP 筋。

3.2.2 配筋率的影响

图 11 为普通混凝土和橡胶掺量为 15% 的橡胶混凝土不同配筋率模型的荷载-跨中挠度曲线。可以看出，GFRP 筋配筋率越大，混凝土梁的抗弯刚度越大，相同荷载下的挠度越小，破坏时的延性越好。

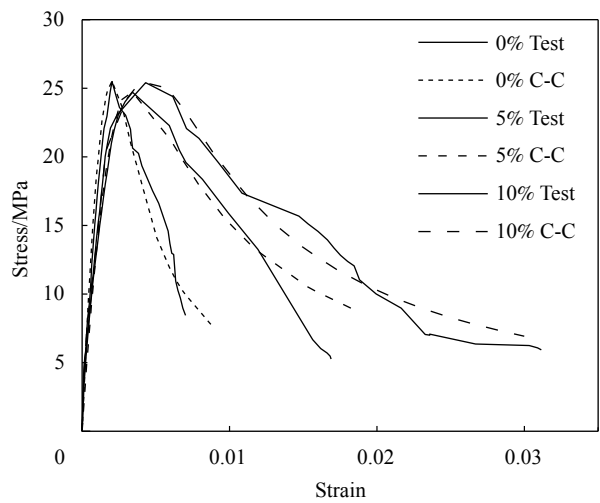


图 8 不同橡胶掺量混凝土试验应力-应变曲线与计算曲线对比
Fig. 8 Comparison of stress-strain curvess of crumb rubber concret with different rubber contents from test and calculation

表 6 不同橡胶掺量混凝土本构参数

Table 6 Constitutive parameters of crumb rubber concret with different rubber contents

Type	Peak strain/ 10 ⁻⁶	Axial compressive strength/MPa	β
TC	2 000	25	2.01
5% CRC	3 400	25	2.01
10% CRC	4 300	25	2.01
15% CRC	4 500	25	2.01

Note: β —Ratio coefficient of plastic strain to inelastic strain.

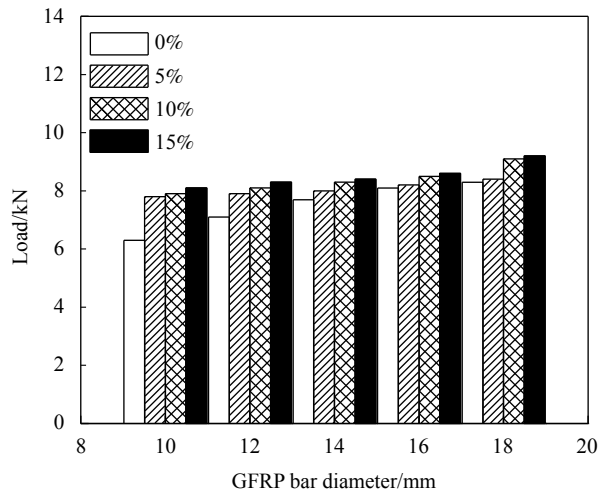


图 9 不同橡胶掺量模型的开裂荷载对比
Fig. 9 Comparison of cracking load of models with different rubber contents

图 12 和图 13 分别为普通混凝土和橡胶掺量为 15% 的橡胶混凝土不同配筋率模型的开裂荷载和极限荷载。由表 6 和图 12 可知，随 GFRP 筋直

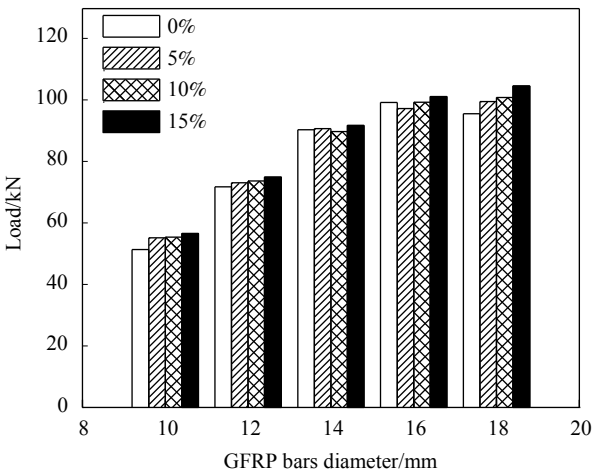


图 10 不同橡胶掺量模型的极限荷载对比
Fig. 10 Comparison of ultimate load of models with different rubber contents

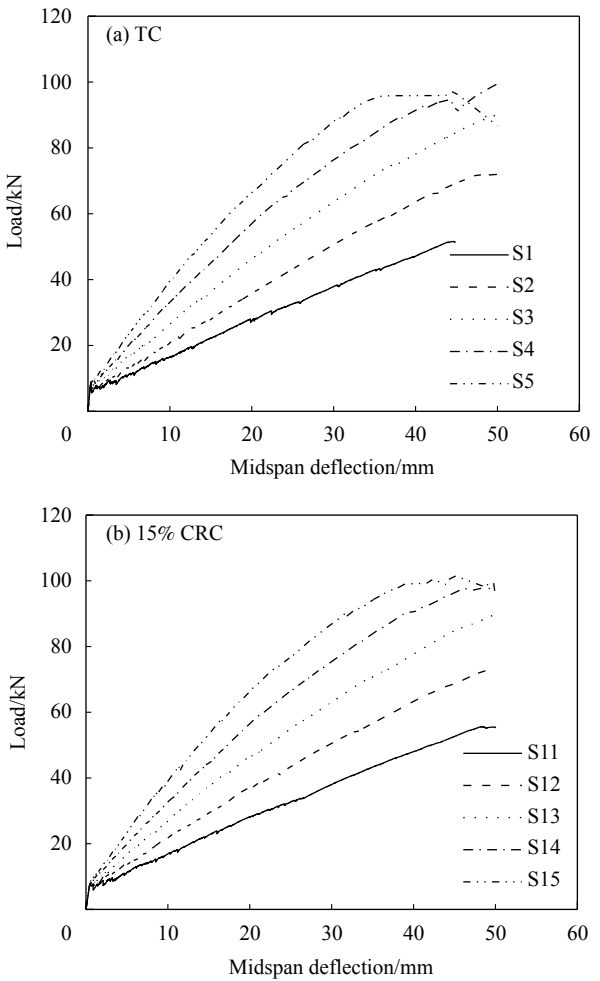


图 11 不同配筋率模型的荷载-跨中挠度曲线
Fig. 11 Load-midspan deflection curves of models with different reinforcement ratios

径的增大，模型的开裂荷载增大，且对普通混凝土梁模型的提高幅度大于橡胶混凝土梁模型。纵

筋直径由 10 mm 增加至 18 mm 时,对于普通混凝土梁模型,开裂荷载提高了 32%;对于橡胶掺量为 10% 的橡胶混凝土梁模型,开裂荷载提高幅度最大为 15%。这是由于相较于普通混凝土,橡胶混凝土本身具有很好的抗裂性,因此配筋率对开裂荷载的影响减弱。

由表 6 和图 13 可知,随 GFRP 筋直径的增大,模型的极限荷载增大。对于橡胶掺量为 10% 的橡胶混凝土梁模型, GFRP 筋直径从 10 mm 增大至 18 mm 时,极限荷载提高了约 85%。但当配筋率增加至一定数值后,其对承载力的影响变得不明显。说明 GFRP 筋橡胶集料混凝土梁的合理超筋数量是有限的。

3.2.3 混凝土强度等级的影响

图 14 为不同强度等级 GFRP 筋橡胶混凝土梁

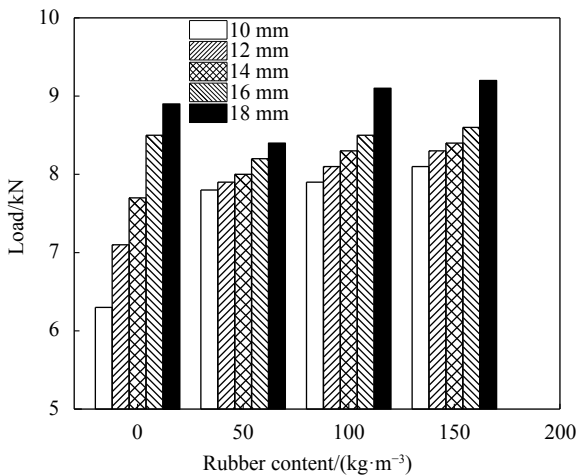


图 12 不同配筋率模型的开裂荷载

Fig. 12 Cracking load of models with different reinforcement ratios

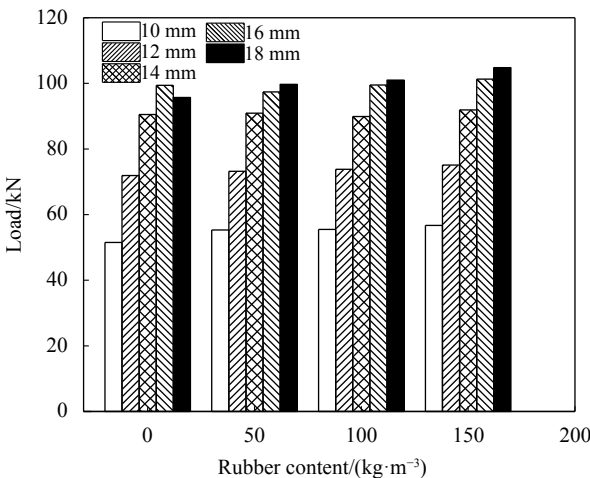


图 13 不同配筋率模型的极限荷载

Fig. 13 Ultimate load of models with different reinforcement ratio

的荷载-跨中挠度曲线。从表 6 和图 14 可以看出,随着橡胶混凝土强度等级的提高, GFRP 筋橡胶混凝土梁的开裂荷载和极限荷载均增大。橡胶混凝土强度等级从 C25 提高至 C40 后,模型开裂荷载提高了 53.7%,极限荷载提高了 23%,强度等级对模型的开裂荷载影响更大。

3.2.4 截面高度的影响

已有研究表明, FRP 筋混凝土梁的跨中挠度较大,应选用较大的截面高度^[8]。对于 GFRP 筋橡胶集料混凝土梁,橡胶集料混凝土的变形能力较大,可能进一步增大梁的跨中挠度,因此可适当增大截面高度。图 15 为不同截面高度的 GFRP 筋橡胶混凝土梁模型的荷载-跨中挠度曲线。

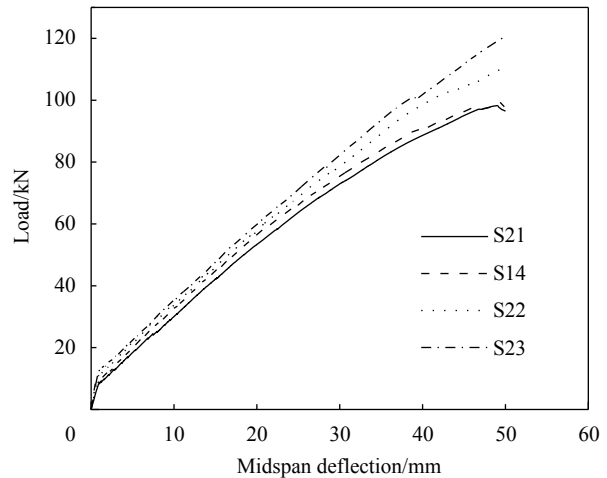


图 14 不同混凝土强度等级的荷载-跨中挠度曲线

Fig. 14 Load-midspan deflection curves of models with different concrete strength grade

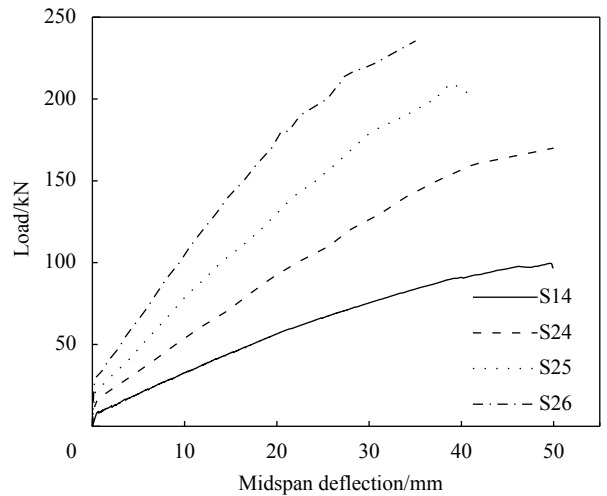


图 15 不同截面高度梁荷载-跨中挠度曲线

Fig. 15 Comparison of load-midspan deflection curves of models with different beam section height

可知，随着截面高度的增大，模型的抗弯刚度增大，有效降低了跨中挠度。文献 [26] 指出，正常使用状态下，GFRP 筋普通混凝土梁的荷载为极限荷载的 30%，而跨中挠度限值为 $l_0/240$ ，即 7.5 mm。上述模型中仅有 S26 模型满足要求，对应跨高比为 5。在建筑结构中，钢筋混凝土梁的跨高比一般为 10~18^[8]。因此，建议通过增大截面高度适当减小 GFRP 筋橡胶混凝土梁的跨高比，以控制梁的跨中挠度。

4 截面极限受弯承载力计算

ACI 440.1R—15^[27] 和 CSA S806—12^[28] 给出 FRP 筋普通混凝土梁极限受弯承载力的计算公式如下：

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{\alpha_1 \beta_1 f_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad (5)$$

$$M = \rho_f f_f \left(1 - \frac{\rho_f f_f}{2 \alpha_1 f_c} \right) b h_{0f}^2 \quad (6)$$

$$\xi_{fb} = \frac{\beta_1 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + f_{fu} / E_f} \quad (7)$$

式中： E_f 为 GFRP 筋的弹性模量； ε_{cu} 为混凝土的峰值压应变； f_{fu} 为 GFRP 筋的极限抗拉强度； f_c 为混凝土的抗压强度值； A_f 为 GFRP 筋横截面面积； f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值； b 为构件截面宽度； h_{of} 为 GFRP 筋合力点距截面顶部纤维的距离； x 为混凝土截面受压区高度； ρ_f 为纵向受力 GFRP 筋的配筋率； f_t 为 GFRP 筋的抗拉强度； ρ_{fb} 为 GFRP 筋混凝土梁的平衡配筋率； α_1 和 β_1 为系数。

将有限元分析得到的极限受弯承载力与按照式 (6) 的计算值进行对比，对比结果如表 7 所示。可知，GFRP 筋橡胶集料混凝土梁的有限元分析结果约为理论计算极限受弯承载力的 1.18 倍，且变异系数较小。因此，可以采用 ACI 440.1R—15^[27] 和 CSA S806—12^[28] 中 FRP 筋普通混凝土梁的极限

表 7 极限受弯承载力 FEA 模拟值与理论值对比
Table 7 Comparison of ultimate flexural capacity from FEA and calculation

Specimen and model	ρ_f/ρ_{fb}	Ultimate flexural capacity from calculation $M_t/(\text{kN}\cdot\text{m})$	Ultimate flexural capacity form FEA $M_n/(\text{kN}\cdot\text{m})$	M_n/M_t
S6	0.86	17.400	17.973	1.03
S7	1.25	21.185	23.790	1.12
S8	1.72	23.298	29.543	1.27
S9	2.58	25.115	31.655	1.26
S10	3.28	26.673	32.403	1.21
S11	0.76	17.394	18.038	1.04
S12	1.11	22.498	23.985	1.07
S13	1.52	24.635	29.218	1.19
S14	2.27	26.448	32.338	1.22
S15	2.89	27.982	32.825	1.17
S16	0.77	17.373	18.428	1.06
S17	1.11	22.399	24.408	1.09
S18	1.52	24.500	29.868	1.22
S19	2.28	26.276	32.923	1.25
S20	2.91	27.773	34.060	1.23
S21	2.84	23.563	31.883	1.35
S22	1.89	28.910	36.043	1.25
S23	1.62	31.046	39.228	1.26
S24	1.74	41.489	55.283	1.33
S25	1.41	59.361	68.835	1.16
S26	1.18	79.535	76.570	0.96
B3	1.92	21.177	23.075	1.09
B4	1.25	22.490	26.325	1.17
B5	1.11	25.115	33.150	1.32
B6	2.58	26.448	32.175	1.22
Average value				1.184
Coefficient of variation				0.083

Notes: ρ_f -Reinforcement ratio of GFRP bars under longitudinal stress; ρ_{fb} -Balance reinforcement ratio of GFRP reinforced concrete beams.

受弯承载力计算公式来计算 GFRP 筋橡胶混凝土梁的极限受弯承载力, 所得结果将偏安全。

5 结论

(1) 随橡胶掺量的增加, 玻璃纤维增强聚合物复合材料 (GFRP) 筋橡胶混凝土梁的开裂荷载增大, 当橡胶掺量为 15% 时, 开裂荷载的增幅可达 29%。

(2) 在采用结构用等强橡胶混凝土材料的基础上, GFRP 筋橡胶混凝土梁的极限承载力较 GFRP 筋普通混凝土梁没有下降, 在一些情况下甚至略有增加。这主要由于橡胶混凝土的极限压应变更高, 裂缝开展及梁的破坏更为缓慢, 更加充分地利用了 GFRP 筋的强度。

(3) 当受拉筋直径增大, 即配筋率提高时, GFRP 筋橡胶混凝土梁的开裂荷载及极限承载力提高。当受拉筋直径由 10 mm 增加至 18 mm 时, 橡胶掺量为 10% 的 GFRP 筋橡胶混凝土梁开裂荷载提高了约 15%, 极限荷载提高了约 85%。但配筋率增加至一定数值后, 其对承载力的影响变得不明显。

(4) 当橡胶混凝土强度等级由 C25 提高至 C40 时, GFRP 筋橡胶混凝土梁的开裂荷载提高了约 53.7%, 极限承载力提高了约 23%。

(5) 结合试验与有限元分析结果, 可以采用 ACI 440.1R—和 CSA S806—12 中 FRP 筋普通混凝土梁的极限受弯承载力计算公式来计算 GFRP 筋橡胶混凝土梁的极限受弯承载力, 所得结果将偏安全。

参考文献:

[1] 吕志涛. 高性能材料FRP应用于结构工程创新[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 2-5.
LV Zhitao. Application of high performance FRP and innovations of structure engineering[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 2-5(in Chinese).

[2] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36(in Chinese).

[3] NAWY E G, NEUWERTH G E, PHILLIPS C J. Behavior of fiber glass reinforced concrete beams[J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(9): 2203-2215.

[4] MASMOUDI R, THERIAULT M, BENMOKRANE B. Flexural behavior of concrete beams reinforced with deformed fiber

reinforced plastic rods[J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(6): 665-676.

[5] THERIAULT M, BENMOKRANE B. Effects of FRP reinforced ration and concrete strength on flexural behavior of concrete beams[J]. Journal of Composites for Construction. February, 1998, 2(1): 7-15.

[6] 朱虹, 吴刚, 吴智深, 等. FRP筋混凝土梁的刚度试验研究和理论计算[J]. 土木工程学报, 2015, 48(11): 44-53.
ZHU Hong, WU Gang, WU Zhishen, et al. Experimental study and theoretical calculation on the flexural stiffness of concrete beams reinforced with FRP bars[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(11): 44-53(in Chinese).

[7] 董志强, 吴刚. 基于试验数据分析的FRP筋混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算方法[J]. 土木工程学报, 2017, 50(10): 1-8.
DONG Zhiqiang, WU Gang. Calculation method for the maximum crack width of FRP bar reinforced concrete flexural member based on experimental data analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10): 1-8 (in Chinese).

[8] 徐新生. FRP筋力学性能及其混凝土梁受弯性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
XU Xinsheng. Research on mechanical property of FRP bars and flexural property of concrete beams with FRP bars[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007(in Chinese).

[9] 屈妍. 橡胶集料混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2012(2): 96-98.
QU Yan. Experimental study on mechanical properties of rubber aggregate concrete[J]. Concrete, 2012(2): 96-98(in Chinese).

[10] 董建伟, 袁琳, 朱涵. 橡胶集料混凝土的试验研究及工程应用[J]. 混凝土, 2006(7): 74-76, 83.
DONG Jianwei, YUAN Lin, ZHU Han. Experiment analysis and application of crumb rubber concrete[J]. Concrete, 2006(7): 74-76, 83(in Chinese).

[11] 李悦, 吴玉生, 杨玉红, 等. 钢筋橡胶集料混凝土结构性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(12): 1280-1285.
LI Yue, WU Yusheng, YANG Yuhong, et, al. Study on the structure properties of steel reinforced crumb rubber concrete[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(12): 1280-1285(in Chinese).

[12] 郭红梅, 朱涵. 钢筋橡胶集料混凝土梁的抗裂性能研究[J]. 混凝土, 2012(12): 11-13.
GUO Hongmei, ZHU Han. Study on cracking resistance of reinforced crumb rubber concrete beam[J]. Concrete, 2012(12): 11-13(in Chinese).

[13] 朱涵, 刘春生, 张永明, 等. 橡胶集料掺量对混凝土压弯性能的影响[J]. 天津大学学报, 2007, 40(7): 761-765.
ZHU Han, LIU Chunsheng, ZHANG Yongming, et, al. Effect of crumb rubber proportion on compressive and fle-

- xural behavior of concrete[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(7): 761-765(in Chinese).
- [14] 刘锋, 潘东平, 李丽娟, 等. 低强橡胶混凝土单轴受压本构关系的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(4): 407-411.
LIU Feng, PAN Dongping, LI Lijuan, et al. Experimental study on constitutive equation of crumb rubber concrete subject to uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(4): 407-411(in Chinese).
- [15] 赵秋红, 王菲, 朱涵. 结构用橡胶集料混凝土受压全曲线试验及其本构模型[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2222-2234.
ZHAO QiuHong, WANG Fei, ZHU Han. Compression test on curves and constitutive model of crumb rubber concrete for structural purposes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2222-2234(in Chinese).
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete structures: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012(in Chinese).
- [17] 王菲. FRP筋橡胶集料混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
WANG Fei. Experimental study on flexural behavior of FRP-reinforced crumb rubber concrete beams[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017(in Chinese).
- [18] XING Y, HAN Q, XU J, et al. Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 123: 79-92.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011(in Chinese).
- [20] 方自虎, 周海俊, 赖少颖, 等. ABAQUS混凝土应力-应变关系选择[J]. 建筑结构, 2013, 43(s2): 559-561.
FANG Zihu, ZHOU Haijun, LAI Shaoying, et al. Choose of ABAQUS concrete stress-strain curve[J]. Building Structure, 2013, 43(s2): 559-561(in Chinese).
- [21] 刘劲松, 刘红军. ABAQUS钢筋混凝土有限元分析[J]. 装备制造技术, 2009(6): 69-70.
LIU Jinsong, LIU Hongjun. Finite element analysis of ABAQUS reinforced concrete[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(6): 69-70(in Chinese).
- [22] 庄茁, 张帆, 岑松, 等. ABAQUS非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHUANG Zhuo, ZHANG Fan, CENG Song, et al. ABAQUS nonlinear finite element analysis and examples[M]. Beijing: Science Press, 2005(in Chinese).
- [23] CARREIRA D J, CHU K H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1985, 82(6): 797-804.
- [24] YAN J B, LI Z X, XIE J. Numerical and parametric studies on steel-elastic concrete composite structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 133: 84-96.
- [25] HAN Q H, WANG Y H, XU J, et al. Static behavior of stud shear connectors in elastic concrete-steel composite beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 113: 115-126.
- [26] EL-NEMR A, AHMED E A, BENMOKRANE B. Flexural behavior and serviceability of normal- and high-strength concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars[J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(6): 1077-1087.
- [27] American Concrete Institute Committee 440. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars: ACI 440.1R—15[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
- [28] Canadian Standard Association. Design and construction of building structures with fiber reinforced polymers: CSA S806—12[S]. Ontario: Canadian Standard Association, 2012.