

引用本文:黄海林,高亚强,徐勇逵,等.耐碱玻纤网格与聚丙烯混凝土复合加固方柱的轴压试验研究及承载力计算[J].建筑科学与工程学报,2023,40(3):70-82.

HUANG Hailin,GAO Yaqiang,XU Yongkui,et al. Axial compression test and bearing capacity calculation of square columns composite strengthened with alkali-resistant fiberglass grid and polypropylene concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2023,40(3): 70-82.

DOI:10.19815/j.jace.2021.10025

耐碱玻纤网格与聚丙烯混凝土复合加固方柱的 轴压试验研究及承载力计算

黄海林^{1,2},高亚强¹,徐勇逵¹,陈思程¹,庄达炜³

(1. 湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心,湖南 湘潭 411201; 3. 湖南湘广泰实业集团有限公司,湖南 长沙 410000)

摘要:通过 16 个基于耐碱玻纤网格与聚丙烯混凝土复合加固方柱的轴压性能试验,得到了各试件的极限承载力与破坏形态,测得了各试件混凝土中部纵向压应力-应变曲线、试件压应力-耐碱玻纤网格中部应变曲线,分析了加固层混凝土中聚丙烯纤维含量、耐碱玻纤网格包裹方式等参数对试件轴压性能及破坏机理的影响。通过引入合理的基本假定和强度模型,提出了耐碱玻纤网格与聚丙烯混凝土复合加固方柱的轴压承载力计算方法,并将所提计算方法及相关文献计算方法得到的理论计算值与试验结果进行了比较。结果表明:试件主要破坏形态为纵向压劈破坏,裂缝最先出现在试件角部区域并向两端发展,部分试件出现加固层剥离现象;相较于耐碱玻纤网格间隔包裹试件,全包试件表现出更好的抗压性能及延性;随着加固层混凝土中聚丙烯纤维含量的增加,试件极限承载力呈先提高后降低的趋势;采用所提计算方法得到的理论计算值与试验结果吻合较好,且理论计算值均小于试验值,说明所提公式具有一定安全储备,可供工程设计参考使用。

关键词:耐碱玻纤网格;聚丙烯混凝土;方柱;轴压试验;破坏机理;承载力计算

中图分类号:TU746.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)03-0070-13

Axial compression test and bearing capacity calculation of square columns composite strengthened with alkali-resistant fiberglass grid and polypropylene concrete

HUANG Hailin^{1,2}, GAO Yaqiang¹, XU Yongkui¹, CHEN Sicheng¹, ZHUANG Dawei³

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2. Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricated Passive House, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. Hunan Xiangguangtai Industrial

Group Co., Ltd, Changsha 410000, Hunan, China)

Abstract: Through 16 square columns composite strengthened with alkali-resistant fiberglass grid and polypropylene concrete axial compression tests, the ultimate bearing capacity and failure

收稿日期:2021-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51308207);湖南省教育厅优秀青年项目(19B188);湖南建工集团基础科研项目(JGJTK-2018003)

作者简介:黄海林(1984-),男,工学博士,副教授,E-mail:hhlvsgeenius@163.com.

通信作者:高亚强(1996-),男,工学硕士研究生,E-mail:327548357@qq.com.

modes of each specimen were obtained. The longitudinal compressive stress-strain curve in the middle of the concrete and the compressive stress-strain curve in the middle of the alkali-resistant fiberglass grid were measured. The influences of polypropylene fiber content in the reinforced layer concrete, alkali-resistant fiberglass grid wrapping mode and other parameters on the axial compression performance and failure mechanism of the specimen were analyzed. By introducing reasonable basic assumptions and strength models, the calculation method of axial compression bearing capacity of square columns strengthened with alkali-resistant fiberglass grid and polypropylene concrete was proposed. The theoretical calculation value obtained by the proposed calculation method and the calculation method in relevant literature was compared with the test results. The results show that the main failure mode of the specimen is longitudinal compression fracture. The cracks first appear in the corner area of the specimen and develop towards both ends. Some specimens have peeling phenomenon of the reinforcement layer. Compared with the alkali-resistant fiberglass grid interval wrapped test specimen, the fully wrapped test specimen shows better compression performance and ductility. With the increase of the content of polypropylene fiber in the reinforced concrete, the ultimate bearing capacity of the specimen first increases and then decreases. The theoretical calculation value obtained by the proposed calculation method is in good agreement with the test result, and the theoretical calculation value is less than the test value, indicating that the proposed formula has a certain safety reserve and can be used for reference in engineering design.

Key words: alkali-resistant fiberglass grid; polypropylene concrete; square column; axial compression test; failure mechanism; bearing capacity calculation

0 引言

由于使用功能改变、结构损伤老化、地质灾害等影响,需要修复与加固的结构逐渐增多,各种加固方法相继出现。由于纤维增强复合材料(FRP)具有耐久、强度高、质量轻等优点,在工程结构加固当中的应用越来越广泛^[1]。围绕 FRP 加固混凝土柱的轴压性能,国内外学者进行了大量研究,江佳斐等^[2]以新型聚乙烯型超高韧性水泥基材料(ECC)为基材,研究了 FRP 网格/ECC 加固混凝土柱的加固机制;刘磊等^[3-5]研究了碳纤维增强复合材料(CFRP)约束高强混凝土构件的轴压性能及其受力特点;高鹏等^[6-8]研究了不同类型 FRP 布对加固混凝土柱轴压性能的影响;王磊等^[9-11]通过拉拔试验研究了 FRP 筋与珊瑚混凝土的界面黏结性能。

纤维增强复合材料网格不仅具备传统片材(模、板等)耐腐蚀、强度高和质量轻等优点,而且能够与混凝土通过机械咬合的锚固作用形成良好的界面结合效果,避免传统片材加固混凝土构件面临的界面滑移和剥离问题。混凝土容易开裂,为此可以通过掺入短纤维的方法来改善混凝土易开裂的缺点。因此,可以将纤维增强复合材料网格与纤维混凝土结

合用于工程结构的加固^[12-13]。张倚天等^[14-15]对不同材料约束的钢管混凝土方柱进行了轴压试验,结果表明,碳纤维约束试件强度和延性提高最为明显,FRP 材料约束强度越大,约束钢管混凝土的轴向承载力越高且延性越好。潘毅等^[16]搭建了长期荷载作用下 FRP 约束混凝土变形的仿真模型。任宏伟等^[17]研究了 FRP 包裹层数对高强混凝土柱的影响,结果表明,在一定范围内高强混凝土柱极限抗压强度随着 FRP 约束层数的增加而增加。马高等^[18]研究了预损伤对玄武岩增强复合材料(BFRP)约束钢筋混凝土圆柱轴压性能的影响,结果表明,BFRP 布可有效改善损伤混凝土柱的极限强度和极限应变,但无法恢复混凝土柱因损伤而降低的初始刚度。

耐碱玻璃纤维具有很好的耐磨性能和耐腐蚀性能,聚丙烯纤维混凝土拥有较强的抗裂性能、抗渗性能以及抗磨性能,采用耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土复合加固水下结构,可很好地解决水下加固层混凝土易开裂、受流水冲刷磨损以及腐蚀的问题^[19]。张广泰等^[20]对不同聚丙烯纤维掺量的聚丙烯-钢纤维/混凝土试块进行了立方体抗压试验、轴心抗压试验和劈裂抗拉试验,结果表明,聚丙烯纤维可提高混凝土试块劈裂抗拉强度,但不能提高其抗

压强度,且聚丙烯-钢混杂纤维加入混凝土柱可有效提高其极限承载力。言兴^[21]进行了耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土复合加固短圆柱的试验研究,结果表明,采用复合加固的方法能最大程度提高混凝土柱的承载力以及延性。本文通过耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土复合加固方柱的轴压试验,得到了各试件的极限承载力与破坏形态,通过分析其破坏机理并引入合理的基本假定和强度模型,提出了耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土复合加固混凝土方柱的轴压承载力计算方法,以供工程设计参考使用。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

共设计制作了 8 组试件,试件组号分别为 Z1~Z8,每组包括 2 个参数相同的试件,共 16 个试件。试验参数包括耐碱玻纤网格包裹方式和加固层聚丙烯纤维含量,试件参数如表 1 所示,试件构造见图 1。核心方柱均不掺加聚丙烯纤维,为普通 C30 素混凝土,横截面为边长 100 mm 方形截面,高度为 350 mm。核心方柱成型以后在四周均匀浇筑厚度为 25 mm 的 C40 加固层混凝土,其中加固层聚丙烯纤维含量各为 0.6、1.2、1.8 kg·m⁻³,混凝土配合

比、物理力学性能分别见表 2、3。为了防止核心柱在加固层混凝土振捣时产生偏移,设计了方形箍环安置于核心柱上下各 50 mm 处,限制了振捣时外围模具与核心柱之间的偏移,保证了加固层混凝土厚度的均匀。为增强耐碱玻纤网格的约束作用,减轻方柱轴压试验时角部的应力集中现象,对试件进行圆角化打磨处理,试件倒角设计及现场打磨成型示意如图 2 所示。因为耐碱玻纤网格弹性模量较低,为了减轻耐碱玻纤网格与被包裹试件刚度不匹配导致玻纤网格不能对被包裹试件提供有效约束的问题,在试件周围包裹 2 层网眼尺寸为 4 mm×4 mm 的耐碱玻纤网格,并涂抹纤维浸渍胶,包裹方式分为全包、间隔 40 mm 包裹和间隔 70 mm 包裹,耐碱玻纤网格材性参数见表 4。为避免试件加载过程中端部先出现破坏,在试件上下两端包裹 2 层宽度为 70 mm 的碳纤维布进行端部加固。

1.2 试验装置及测点布置

按照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)进行加载设计。加载分为预加载与正式加载。预加载时,加载至极限荷载计算值的 10% 后,检查试验仪器是否正常,并通过观察两边位移计读数对试件进行物理对中,将所测对中相对误差控制在 10% 以内。正式加载采用分级加载和位移加

表 1 试件参数
Table 1 Parameters of specimens

试件组号	试件尺寸	核心柱混凝土 强度等级	加固层混凝土 强度等级	网格包裹方式	加固层聚丙烯纤维含量/ (kg·m ⁻³)
Z1	150 mm×150 mm×350 mm	C30	C40	全包	0.6
Z2	150 mm×150 mm×350 mm	C30	C40	全包	1.2
Z3	150 mm×150 mm×350 mm	C30	C40	全包	1.8
Z4	150 mm×150 mm×350 mm	C30	C40	间隔 40 mm 包裹	1.2
Z5	150 mm×150 mm×350 mm	C30	C40	间隔 70 mm 包裹	1.2
Z6	150 mm×150 mm×350 mm	C30	C40	全包	
Z7	150 mm×150 mm×350 mm	C30	C40		1.2
Z8	100 mm×100 mm×350 mm	C30			

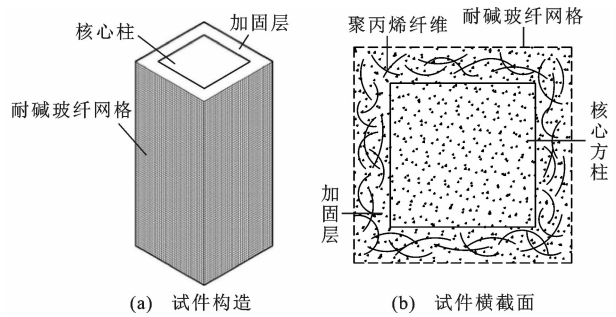


图 1 试件构造
Fig. 1 Structure of specimens

载。试件开裂前采用分级加载,每级荷载为 30 kN,通过观察压力传感器读数来控制加载速率,加载速度控制在 200 N·s⁻¹,同时保持加载速度均匀,达到相应荷载级数后持荷约 1 min,稳定后读取并记录数据;试件开裂后采用位移加载,速率控制为 0.04 mm·min⁻¹,由试验仪器连续采集记录数据。当加载过程中出现以下现象时,认为试件破坏,停止试验:①试件破碎、压溃以后;②荷载达到最大值自动减退。试验装置如图 3 所示。

试验主要量测数据有极限承载力、跨中相对位

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of concrete

构件	混凝土强度等级	各材料用量/(kg·m ⁻³)				水胶比	砂率
		水	水泥	中砂	砾石		
核心柱	C30	200	425	50	1 245	0.47	0.30
加固层	C40	180	480	580	1 210	0.38	0.32

表 3 混凝土物理力学性能

Table 3 Physical and mechanical properties of concrete

混凝土类型		设计强度等级	实测强度/MPa
普通混凝土	核心柱	C30	28.5
	加固层	C40	35.8
不同掺量(kg·m ⁻³) 聚丙烯纤维混凝土	0.6	C40	36.6
	1.2	C40	37.8
	1.8	C40	35.0

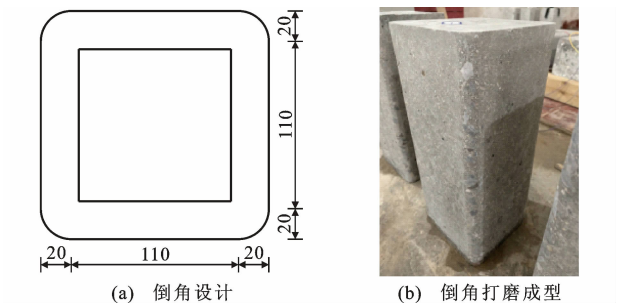


图 2 试件倒角设计及现场打磨成型示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of chamfer design and on-site grinding and forming of specimen (unit:mm)

表 4 耐碱玻纤网格材性参数

Table 4 Material property parameters of alkali-resistant fiberglass grid

参数	极限拉伸力/kN	极限拉伸应力/MPa	极限延伸率/%	弹性模量/GPa
纬向	1.471	700.48	10.48	46.70
经向	0.811	506.86	9.60	35.77

注:纬向为网格环向纤维束;经向为网格竖向纤维束。

移、混凝土与耐碱玻纤网格应变等。通过在混凝土柱高度方向的中部位置布置位移计来测量试件的相对变形变化规律,所采用的测量标距长度为 30 mm。在试件高度方向的中部混凝土与耐碱玻纤网格表面对称布置应变片来测量混凝土与耐碱玻纤网格的应力-应变变化规律。各测点对称布置在混凝土柱和耐碱玻纤网格表面的中部位置,其中经向和纬向分别布置 2 个,以测量压应变和拉应变,测点布置如图 4 所示。

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

主要试验结果见表 5。试件破坏形态主要为纵

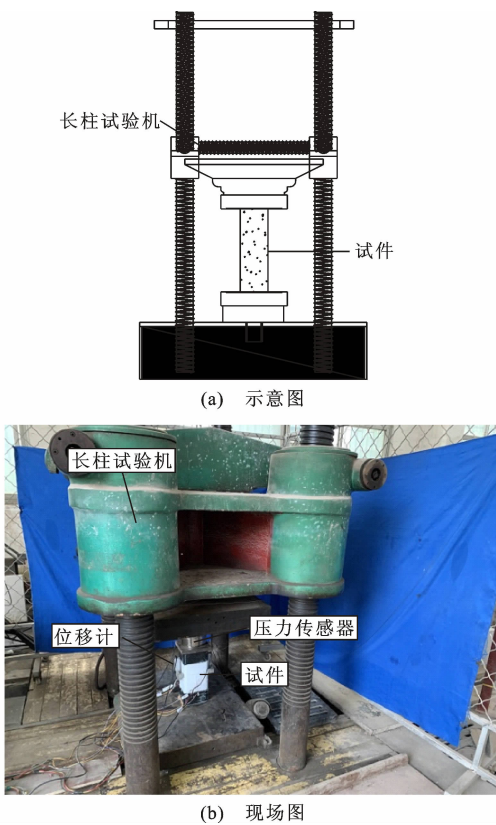


图 3 试验装置

Fig. 3 Test setup

向压劈破坏,其中耐碱玻纤网格均被横向拉断。试验过程中,发现裂缝均在试件角部首先产生,说明倒角只能降低而不能消除应力集中带来的负面影响;包裹耐碱玻纤网格的试件破坏前有声音预兆,角部网格开裂后仍能维持一定荷载,破坏具有一定的可预测性。未进行耐碱玻纤网格加固的试件破坏较为突然,脆性破坏特征明显。

试件典型破坏形态见图 5。通过观察破坏后的试件发现,包裹了耐碱玻纤网格的试件内部混凝土均被压碎,以全包试件最为明显,而未包裹耐碱玻纤网格的试件破坏后混凝土碎块较大,这说明在试件轴心受压过程中,耐碱玻纤网格对被包裹柱提供了强大的侧向约束力,使混凝土充分发挥了其竖向抗压作用,在网格达到极限约束力之后试件才会发生破坏,因此包裹耐碱玻纤网格试件的内部混凝土破碎程度更为明显。同时还发现加固层混凝土与核心

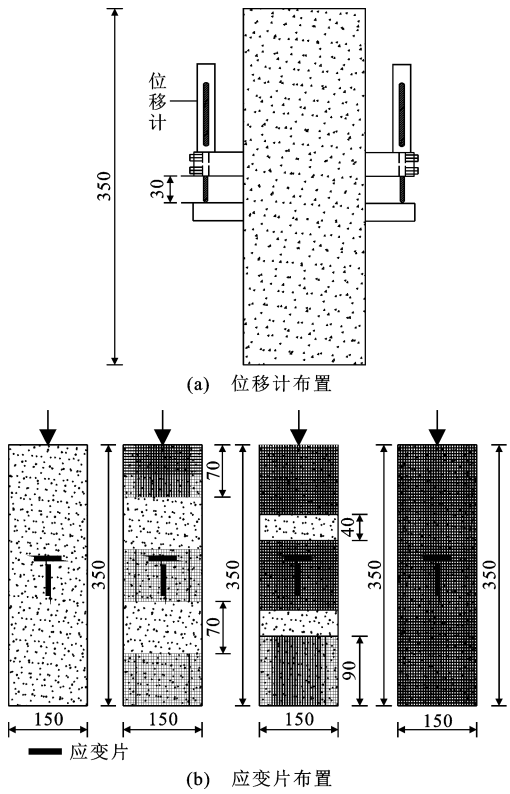


图 4 测点布置(单位:mm)

Fig. 4 Arrangement of measuring points (unit:mm)

柱有部分剥离现象,说明新老混凝土之间还存在一定界面黏结问题,如果采用增大截面法对试件进行



图 5 试件典型破坏形态

Fig. 5 Typical failure modes of specimens

表 5 主要试验结果

Table 5 Main experimental results

试件组号	极限承载力平均值/kN	破坏形态
Z1	806.5	纵向压劈破坏,网格拉断
Z2	811.6	纵向压劈破坏,网格拉断
Z3	791.4	纵向压劈破坏,网格拉断
Z4	748.4	纵向压劈破坏,网格拉断
Z5	712.0	纵向压劈破坏,网格拉断
Z6	751.7	纵向压劈破坏,网格拉断
Z7	585.5	纵向压劈破坏,加固层部分剥离
Z8	337.4	纵向压劈破坏

加固时有必要对新老混凝土界面进行处理。从试验结果可以看出,破坏后的耐碱玻纤网格上粘满了混凝土,表明纤维浸渍胶的黏结性能较好,破坏前能保证网格与混凝土协同工作;同时搭接区网格并未发生脱落,说明搭接长度满足要求。

2.2 应力-应变关系曲线

2.2.1 混凝土中部应力-应变曲线

各组试件混凝土中部纵向压应力-应变($\sigma\epsilon$)曲线如图 6 所示。试验初期,混凝土处于弹性阶段,混凝土中部纵向压应力-竖向应变曲线大致呈线性增长;混凝土中部产生的横向变形随荷载的增加变化较小,混凝土中部纵向压应力-横向应变曲线大致呈

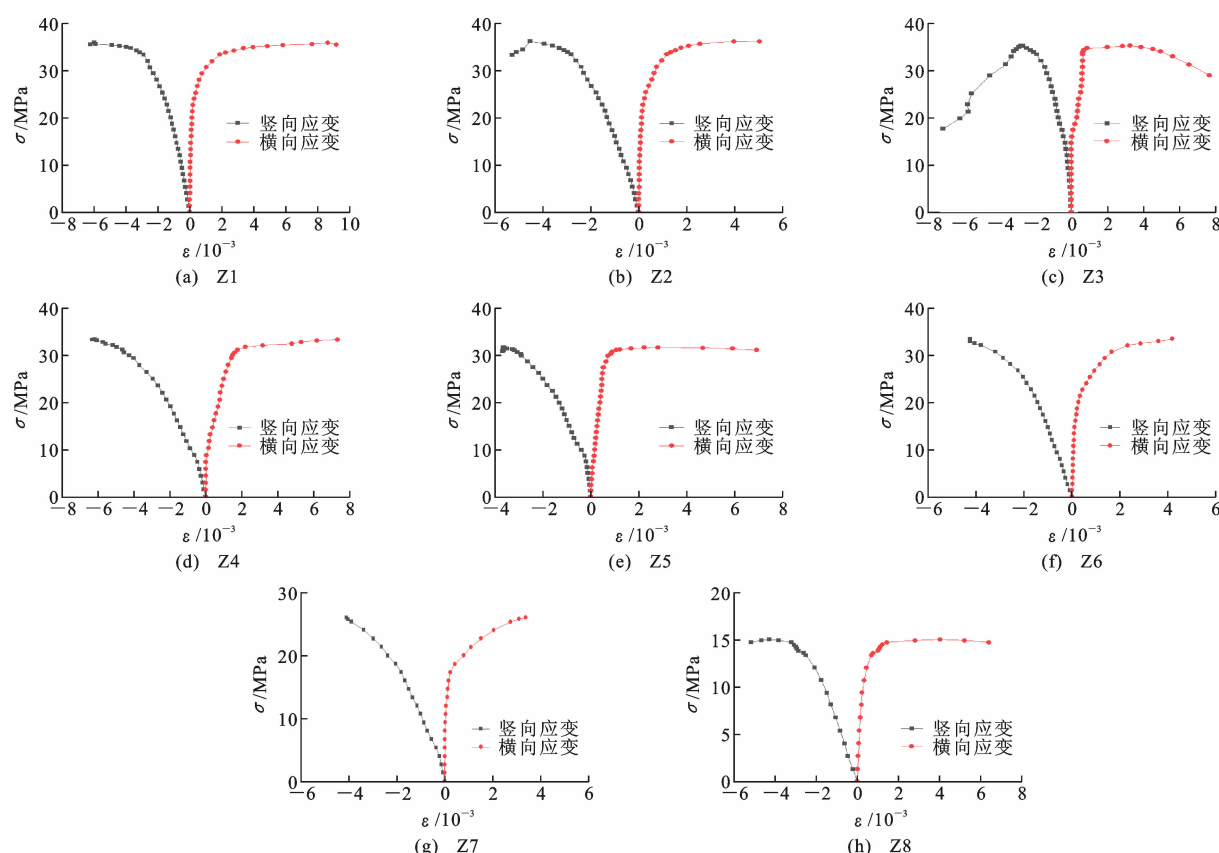


图 6 混凝土中部纵向压应力-应变曲线

Fig. 6 Compressive stress-strain curve in middle of concrete

一条竖直线增长。由于方形截面柱存在有效约束区与非有效约束区,随着荷载提高,混凝土有效约束区面积不断减少,非有效约束区面积不断扩大,而试件承载能力的提升是依托于有效约束区发挥作用,因此试验后期混凝土中部纵向压应力-应变曲线趋于平缓。大部分试件在混凝土中部竖向应变达到 $2\,000 \times 10^{-6}$ 后变形加快,而后混凝土中部纵向压应力-竖向应变曲线和混凝土中部纵向压应力-横向应变曲线出现拐点,此时试件已接近达到极限承载力。

图 6(a)~(c)、(f) 给出了耐碱玻纤网格包裹方式相同、加固层混凝土中聚丙烯纤维含量不同试件的应力-应变曲线。经比较可知,试件极限承载力和极限应变随着加固层混凝土中聚丙烯纤维含量的增加均有不同程度的提高,说明聚丙烯纤维混凝土不仅能够通过其环向约束作用提高试件的承载能力,还能通过发挥其抗拉、变形性能在一定程度上提高试件的极限应变,从而提高试件的变形能力。

图 6(b)、(d)、(e) 给出了耐碱玻纤网格包裹方式不同、加固层混凝土中聚丙烯纤维含量相同试件的应力-应变曲线。经比较可以看出,耐碱玻纤网格全包试件较间隔 40 mm 包裹、间隔 70 mm 包裹试

件表现出更高承载能力的同时,还展现出了更为明显的屈服阶段,说明试件延性的提升与耐碱玻纤网格包裹方式有很大关系。网格包裹面积决定了其约束面积,更大的约束面积所能提供的约束力也越强,从而进一步提高混凝土柱强度,延缓试件的破坏。

图 6(f)、(g) 给出了耐碱玻纤网格全包与不包、加固层混凝土为普通混凝土试件的应力-应变曲线。结合应力-应变曲线及试验破坏现象可以看出,包裹了耐碱玻纤网格的试件开裂荷载要明显高于未包裹试件,且在同一应变条件下,前者荷载值也要高于后者荷载值,说明耐碱玻纤网格能够通过承受拉力发挥其环向约束作用,有效约束混凝土柱的横向变形,提高了混凝土柱的承载力,从而延缓试件开裂。同时观察到包裹耐碱玻纤网格的试件后期应力-应变曲线相较于未包裹试件更为平缓,说明耐碱玻纤网格还能一定程度上提高试件维持高负载的能力,对试件延性的提升产生有利影响。

2.2.2 试件压应力-耐碱玻纤网格中部应变曲线

各组试件压应力-耐碱玻纤网格中部应变曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,无论是哪种参数的试件,其试件压应力-网格中部竖向应变曲线与其混

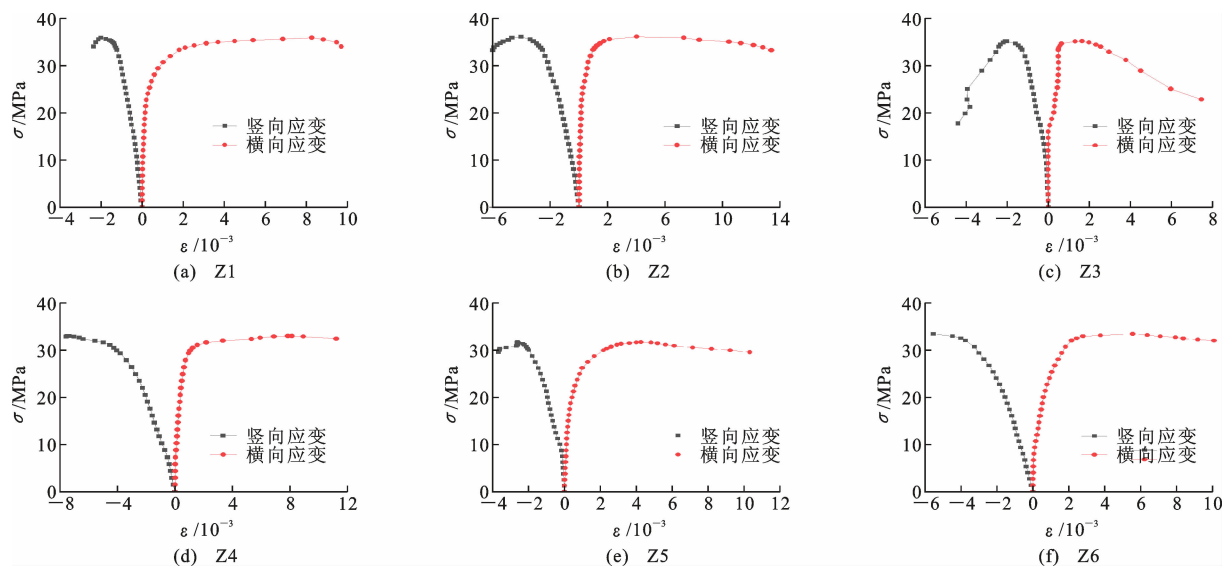


图 7 试件压应力-耐碱玻纤网格中部应变曲线

Fig. 7 Specimen compressive stress-strain curve in middle of alkali-resistant fiberglass grid

混凝土中部纵向压应力-竖向应变曲线变化趋势基本一致,试验过程中没有出现明显的滑移现象,说明采用增加包裹层数并涂刷纤维浸渍胶的方法可有效减轻两者之间因刚度不匹配而导致玻纤网格不能对被包裹试件提供有效约束的问题。耐碱玻纤网格提供的约束力主要是通过其横向纤维束提供的拉力形成,而竖向纤维束在整个受压过程中对试件抗压性能的提升并不明显,因此本文着重研究耐碱玻纤网格横向纤维束对试件抗压性能的影响。

由各组试件压应力-网格中部横向应变曲线可以看出,耐碱玻纤网格环向约束混凝土柱变形大致分为 3 个阶段。第一阶段,试验初期耐碱玻纤网格横向应变随荷载的增加变化并不明显,始终保持缓慢增长。此时混凝土尚处于弹性变形阶段,结构内部的整体性未受破坏,试件产生的变形较小,耐碱玻纤网格还未发挥其约束作用。第二阶段,在逐渐接近试件极限承载力这个过程中,耐碱玻纤网格横向应变增长速率开始加快。此时混凝土内部裂缝开始稳定展开,试件中部变形进一步增加,耐碱玻纤网格横向纤维束开始通过承受混凝土挤压而产生的拉应力发挥其环向约束作用。第三阶段,当达到试件极限承载力后,耐碱玻纤网格横向应变急剧增大。此时试件内部混凝土已经开裂变形,整体刚度不断下降,但由于耐碱玻纤网格的环向约束作用,试件还具备一定承载能力,当荷载值下降到某一程度时,网格被拉断,试件最终完全破坏,失去承载意义。

值得注意的是,在试件逐渐接近极限承载力的过程中,试件中部混凝土开裂膨胀,在耐碱玻纤网格

约束下处于三向应力状态,横向变形受到限制。在三向应力情况下,随着轴向压应力的增大,侧压应力也增大,试件达到极限承载力后,耐碱玻纤网格受拉,横向应变急剧增大,最终被拉断。各组试件耐碱玻纤网格破坏时均接近或超过其极限拉应变 $10\,000\times10^{-6}$,说明试验过程中耐碱玻纤网格的抗拉性能得到了充分发挥,最大程度上提高了试件的抗压强度。

2.3 承载力分析

表 5 给出了各组试件轴心受压下极限承载力平均值和破坏形态的具体试验结果,为了更清晰地观察不同参数影响下极限承载力的变化,图 8 给出了聚丙烯纤维含量 ρ 、耐碱玻纤网格包裹方式以及有无耐碱玻纤网格对试件极限承载力 P_u 的影响柱状图。由图 8(a)可知,随着加固层中聚丙烯纤维含量的增加,试件极限承载力提高幅度呈先增加后减少的趋势,在纤维含量为 $1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时承载能力最强(提升约 8%)。由图 8(b)可知,耐碱玻纤网格全包裹试件极限承载力依次高于间隔 40 mm 包裹和间隔 70 mm 包裹试件,说明耐碱玻纤网格对试件承载能力的提高与其对试件的包裹面积有关,约束面积越大,所提供的环向约束作用也就越强,在全包裹状态下能获得最强的约束力,进而最大程度提高混凝土柱的极限承载力。由图 8(c)可知,采用外包耐碱玻纤网格的加固方法对试件承载能力的提高十分明显(提升约 28%),原因在于试件在轴心受压过程中,被包裹柱的横向变形受到外围耐碱玻纤网格的约束,外围耐碱玻纤网格提供了较大的环向约束力,使

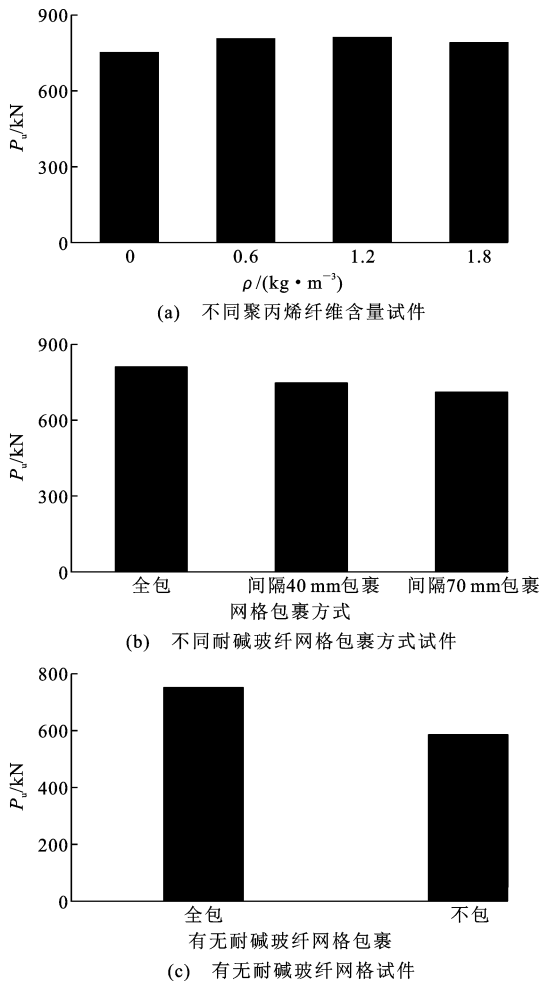


图 8 各参数对试件承载力影响对比

Fig. 8 Comparison of influence of parameters on bearing capacity of specimens

被包裹柱处于三向受压状态,从而大幅度提高了试件的抗压性能。

3 承载力计算

3.1 基本假定

对于耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土复合加固方柱的承载力计算,引入如下假定:

(1)实际工程中,由于混凝土结构内部的不均匀性与施工误差在所难免,所以理想的轴心受压构件很难存在。对于某些混凝土受压短柱,其截面上的弯矩很小,主要承受轴向压力,因此耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土加固方柱承载力近似按照轴心受压构件计算^[21]。

(2)耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土加固方柱在轴心受压时,网格主要通过其纬向纤维束对被包裹柱形成环向约束,从而提高试件极限承载力,而经向纤维束不承担轴向压力。

(3)耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土加固方柱所受轴力由有效约束区混凝土承担,忽略非有效约束区的侧向压应力作用,可简化设计计算,并使结果偏于安全。

(4)耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土加固方柱破坏时,纤维网格均拉断破坏,即耐碱玻纤网格达到其极限拉应变,充分发挥其抗拉性能。

3.2 聚丙烯纤维混凝土增大截面加固方柱的轴心受压承载力

根据以上假定,参考本文试验数据及相关文献[22],引入与聚丙烯纤维掺量相关的混凝土轴压强度提高系数 α ,对于采用聚丙烯纤维混凝土增大截面加固混凝土方柱的轴心受压承载力 N ,建议按式(1)计算。

$$N \leq 0.9\varphi(f_{c1}A_{c1} + \alpha_{cs}\alpha f_{c2}A_{c2}) \quad (1)$$

式中: φ 为稳定系数; f_{c2} 、 f_{c1} 分别为新、旧混凝土轴心抗压强度设计值; A_{c2} 、 A_{c1} 分别为新、旧混凝土柱截面面积; α_{cs} 为综合考虑新增混凝土利用程度的修正系数,结合本文试验取 α_{cs} 值为 0.8;当加固层中聚丙烯纤维含量为 0.6、1.2、1.8 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, α 分别取 1.05、1.08、1.05。

3.3 环向粘贴耐碱玻纤网格加固方柱的轴心受压承载力

耐碱玻纤网格对混凝土方柱的套箍约束存在有效约束区和非有效约束区,如图 9 所示,其中 b 为方柱截面边长, r 为倒角半径。由于耐碱玻纤网格没有抗弯刚度而且受方形截面形状的影响,耐碱玻纤网格可以形成对核心混凝土沿对角线方向的有效约束,但对沿方柱两对边方向的横向约束很弱,致使各边耐碱玻纤网格因核心混凝土的横向膨胀而产生弯曲,因此可以认为核心混凝土中有效约束区处于三向受压应力状态,非有效约束区处于双向受压应力状态^[23]。

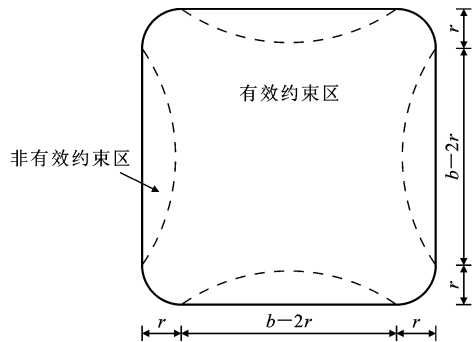


图 9 核心混凝土受约束状态

Fig. 9 Restrained state of core concrete

众多学者围绕 FRP 布约束混凝土进行研究并建立了混凝土强度模型^[21,24-25],其中以 Richart 模型应用范围最广,本文借鉴 Richart 模型首先建立网格约束的混凝土强度模型,即

$$\frac{f}{f_{c0}} = 1 + k \frac{\sigma}{f_{c0}} \quad (2)$$

式中: f 为被约束混凝土轴心抗压强度; f_{c0} 为无约束混凝土轴心抗压强度设计值; k 为受约束后应力提高系数。

为了简化模型,本文根据参考文献及试验数据对式(2)进行修改,取 k 为 2.0,则式(2)可修改为

$$f = f_{c0} + 2\sigma \quad (3)$$

由于方柱截面存在非有效约束区,故引入截面影响系数(截面折减系数) β ,设 $\bar{\sigma}$ 为网格平均约束应力,则

$$\sigma = \beta \bar{\sigma} \quad (4)$$

$$\beta = 1 - \frac{2(b-2r)^2}{3A_{cor}} \quad (5)$$

式中: A_{cor} 为带倒角的方柱截面面积, $A_{cor} = b^2 - (4 - \pi)r^2$ 。

图 10 为耐碱玻纤网格约束截面受力计算简图,其中 A_t 为纬向纤维截面面积。当耐碱玻纤网格沿试件长度方向全部横向粘贴时,对方形截面柱提供的约束应力在竖直方向上的合力为

$$2n_t f_t t_f w_f = \bar{\sigma} s_t b \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{2n_t f_t t_f w_f}{b s_t} \quad (7)$$

$$f_t = E_t \epsilon_{te} \quad (8)$$

式中: n_t 为网格层数,本文 $n_t = 2$; t_f 为网格每层厚度,本文 $t_f = 0.3 \text{ mm}$; w_f 为纬向纤维束宽度; f_t 为纬向纤维束有效拉应力; s_t 为纬向纤维束间距; E_t 为网格弹性模量; ϵ_{te} 为网格有效拉应变设计值。

考虑可靠度的调整系数 0.9 后,网格约束方柱的轴心受压承载力计算公式为

$$N \leq 0.9[f_{c0} + 2\beta \bar{\sigma}]A_{cor} \quad (9)$$

当网格不是连续粘贴时,可按网格的含量作等效连续化处理,式(9)应改为

$$N \leq 0.9(f_{c0}A_{cor} + 2\beta \bar{\sigma}A_{cor} \frac{w}{s}) \quad (10)$$

式中: w 为网格的宽度; s 为相邻网格的中间距。

3.4 耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土复合加固方柱的轴心受压承载力

结合聚丙烯纤维混凝土增大截面加固计算方法和环向粘贴耐碱玻纤网格加固计算方法,通过考虑加固层混凝土中聚丙烯纤维含量和耐碱玻纤网格包

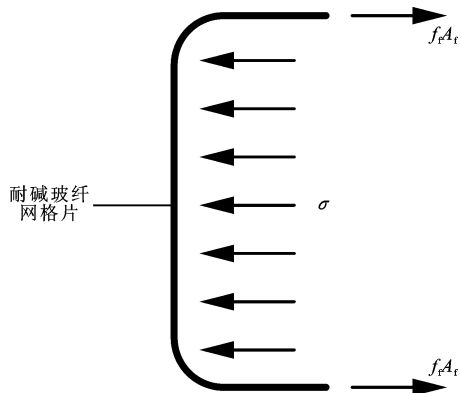


图 10 耐碱玻纤网格约束截面受力计算简图

Fig. 10 Calculation diagram of alkali-resistant fiberglass grid constrained section

裹方式,推导了耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土复合加固方柱的轴心受压承载力计算方法。

(1)核心混凝土方柱的轴心受压承载力计算方法

核心柱的轴向承载能力直接由混凝土承担,其轴心受压承载力计算公式为

$$N \leq 0.9\varphi f_{c0} A_{c0} \quad (11)$$

式中: A_{c0} 为既有混凝土截面面积。

(2)无耐碱玻纤网格包裹,加固层为普通混凝土的方柱轴心受压承载力计算方法

当没有采用耐碱玻纤网格加固,且加固层为普通混凝土时,其轴向压力由核心混凝土柱和加固层普通混凝土共同承担,其轴心受压承载力计算公式为

$$N \leq 0.9\varphi(f_{c1}A_{c1} + \alpha_{cs}f_{c2}A_{c2}) \quad (12)$$

(3)耐碱玻纤网格全包,加固层为普通混凝土的方柱轴心受压承载力计算方法

当采用耐碱玻纤网格全包加固,且加固层为普通混凝土时,其前期主要轴向压力由核心混凝土柱和加固层普通混凝土共同承担,待混凝土柱破坏程度越来越严重,内部变形逐渐增大时,耐碱玻纤网格开始发挥其环向约束作用,限制混凝土的横向变形,从而提高结构的极限承载力,其轴心受压承载力计算公式为

$$N \leq 0.9[f_{c1}A_{c1} + \alpha_{cs}f_{c2}A_{c2} + 2\beta \bar{\sigma}(A_{c1} + A_{c2})] \quad (13)$$

该公式仅适用于截面高宽比 $h/b \leq 1.5$ 、长细比 $l/d \leq 14$ 、截面高度 $h \leq 600 \text{ mm}$,且截面棱角经过圆化打磨的正方形或矩形截面柱,如不满足要求,应按式(12)计算。

(4)耐碱玻纤网格全包,加固层为聚丙烯纤维混凝土的方柱轴压承载力计算方法

当采用耐碱玻纤网格全包加固,且加固层为聚丙烯纤维混凝土时,其受力机理与约束混凝土类似,但由于聚丙烯纤维对混凝土柱承载能力有一定提升,因此还应加入聚丙烯纤维混凝土轴心抗压强度提高系数 α 对式(13)进行修正,其轴心受压承载力计算公式为

$$N\leqslant 0.9[f_{c1}A_{c1}+\alpha_{cs}\alpha f_{c2}A_{c2}+2\beta\sigma(A_{c1}+A_{c2})] \quad (14)$$

该公式适用条件与式(13)相同,如不满足要求,应按式(1)计算。

(5)耐碱玻纤网格间隔包裹,加固层为聚丙烯纤维混凝土的方柱轴压承载力计算方法

耐碱玻纤网格提供的约束效力与其约束面积有关,间隔包裹不如全包效果理想,因此当耐碱玻纤网格间隔包裹时,应按耐碱玻纤网格的含量作等效连续化处理,参照式(10)、(14),其轴心受压承载力计算公式为

$$N\leqslant 0.9[f_{c1}A_{c1}+\alpha_{cs}\alpha f_{c2}A_{c2}+2\beta\sigma(A_{c1}+A_{c2})\frac{w}{s}] \quad (15)$$

该式适用条件与式(13)相同,如不满足要求,应按式(1)计算。当采用全包加固时 $w=s$,此时式(15)与式(14)在形式上一致。

3.5 理论计算值与试验值比较

根据上文所提的轴心受压承载力计算方法,得出了耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土复合加固方柱的承载力计算值 P_u ,并与本文试验值 P_t 进行了比较,结果见表 6。可以看出,理论计算值均小于试验值,说明所提公式具有一定安全储备,可供工程设

表 6 计算结果与试验结果比较

Table 6 Comparison between calculation results and test results

试件组号	P_u/kN	P_t/kN	P_u/P_t
Z1	655.29	806.5	0.81
Z2	664.96	811.6	0.82
Z3	655.29	791.4	0.83
Z4	651.14	748.4	0.87
Z5	640.76	712.0	0.90
Z6	440.83	751.7	0.77
Z7	578.70	585.5	0.99
Z8	256.50	337.4	0.76

计参考使用。

目前,加固柱轴压承载力计算方法较多,《混凝土结构加固设计规范》建议公式与各专家学者建议的计算公式形式差异比较大,本文对部分国内外专家学者所提出的加固柱轴压承载力计算方法进行了收集整理,并与本文 Z1 组试件试验值进行了比较,结果见表 7。由表 7 可知,各计算方法所采用的强度模型不同,约束效应系数会有比较大的差距,相比之下,基于《混凝土结构加固设计规范》建议公式的计算结果有一定的安全储备,相对比较合理。其他几种短柱轴压承载力计算方法与试验结果吻合不理想,且计算值均大于试验值,没有安全储备,主要原因可能为:①强度模型中的参数差异比较大;②没有考虑新旧混凝土之间界面性能的削减作用,且采用的材料都各不相同,造成计算结果与本文试验结果吻合不够理想。

表 7 文献计算值与本文试验值比较

Table 7 Comparison between calculated value in literature and test value in this paper

数据来源	加固方式	承载力计算方法	承载力计算值与试验值之比
《混凝土结构加固设计规范》	增大截面法	$N\leqslant 0.9\varphi(f_{c0}A_{c0}+\alpha_{cs}f_{c0}A_c)$	0.63
文献[26]	碳纤维编织网与短切纤维精细混凝土复合加固	$N\leqslant f_{cc}A+f_y'A'_s$ $f_{cc}=f_{c0}+4.39f_1$	1.70
文献[24]	无碱玻纤网与普通混凝土复合加固	$N\leqslant f_{cc}A+f_y'A'_s$ $f_{cc}=f_{c0}+4\beta\sigma_1$	1.62
文献[27]	玄武岩纤维编织网与聚乙烯醇纤维混凝土复合加固	$N\leqslant f_{cc}A+f_y'A'_s$ $\frac{f_{cc}}{f_{c0}}=1+4.088\beta\frac{f_1}{f_{c0}}$	1.69
		$N\leqslant f_{cc}A+f_y'A'_s$ $\frac{f_{cc}}{f_{c0}}=1+2.761\beta(\frac{f_1}{f_{c0}})^{0.85}$	1.72
文献[28]	碳纤维布和玻璃纤维混凝土复合加固	$N\leqslant f_{cc}A+f_y'A'_s$ $\frac{f_{cc}}{f_{c0}}=1+3.5(\frac{f_1}{f_{c0}})^{0.85}$	1.75

注: f_c 为新增部分混凝土轴心抗压强度; A_c 为新增部分混凝土截面面积; f_{cc} 为被约束混凝土轴心抗压强度; f_y' 为纵筋屈服强度; A 为新旧混凝土截面面积之和; A'_s 为纵筋受压面积; f_1 为网格等效约束应力。

4 结 语

(1)耐碱玻纤网格能够大幅度提高试件极限承载力,对试件延性的提升也发挥了积极作用;全包试件的极限承载力依次高于间隔 40 mm 包裹和间隔 70 mm 包裹试件,说明耐碱玻纤网格提供的约束力与其约束面积有关,包裹面积越大加固效果越好。

(2)采用增加网格包裹层数并涂刷纤维浸渍胶的方法可有效减轻耐碱玻纤网格与被包裹试件之间因刚度不匹配导致玻纤网格不能对被包裹试件提供有效约束的问题。

(3)聚丙烯纤维能够提高混凝土柱的极限承载力,通过发挥其抗拉、变形性能在一定程度上提高试件的极限应变,从而提高试件的变形能力,延缓裂缝的发展。

(4)不对新旧混凝土界面进行处理会出现界面黏结问题导致加固层剥离,因此采用增大截面法加固试件有必要对界面进行人工凿毛、涂刷结构界面胶等工作,以保证新旧混凝土协同工作。

(5)基于试验结果,引入基本假定,采用叠加方法,提出了耐碱玻纤网格与聚丙烯纤维混凝土复合加固方柱的轴压承载力计算公式,所提公式能综合考虑既有核心素混凝土柱、聚丙烯纤维混凝土加固层、耐碱玻纤网格包裹方式、聚丙烯纤维含量等参数的影响。将计算值与试验值进行了对比,结果表明所提计算公式具有一定的安全储备,可为工程加固设计提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 吴 刚,吴智深,蒋剑彪,等.网格状 FRP 加固混凝土结构新技术及应用[J].施工技术,2007,36(12):98-99,102.
WU Gang, WU Zhishen, JIANG Jianbiao, et al. A new technology of strengthening concrete structures with FRP grids and its application[J]. Construction Technology, 2007, 36(12): 98-99, 102.
- [2] 江佳斐,隋 凯.纤维网格增强超高韧性水泥复合材料加固混凝土圆柱受压性能试验[J].复合材料学报,2019,36(8):1957-1967.
JIANG Jiafei, SUI Kai. Experimental study of compression performance of concrete cylinder strengthened by textile reinforced engineering cement composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1957-1967.
- [3] 刘 磊.碳纤维布约束高强混凝土柱轴压性能计算研

究[D].大连:大连理工大学,2006.

LIU Lei. Test study and calculation on high-strength concrete columns confined by CFRP under uniaxial loading[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

- [4] 韩克双.碳纤维布加固高强混凝土柱的受力性能试验研究[D].大连:大连理工大学,2005.

HAN Keshuang. Testing study on the behavior of high-strength concrete column confined by carbon fiber sheet[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.

- [5] 马岩峰.碳纤维约束高强混凝土轴心抗压性能试验研究[D].唐山:河北联合大学,2014.

MA Yanfeng. Experimental study on high-strength concrete restrained by CFRP sheet under axial loading [D]. Tangshan: Hebei United University, 2014.

- [6] 高 鹏,黄镜淳,周 安,等.玄武岩纤维布和碳纤维布加固高强混凝土柱轴压性能试验研究[J].工业建筑,2019,49(9):139-144,160.

GAO Peng, HUANG Jingting, ZHOU An, et al. Experimental research on axial compression of high-strength concrete column strengthened with BFRP and CFRP[J]. Industrial Construction, 2019, 49(9): 139-144, 160.

- [7] 杨 霞,杨文伟,李顺涛.采用CFRP增强的GFRP管混凝土短柱轴压性能试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(4):124-132.

YANG Xia, YANG Wenwei, LI Shuntao. Experimental study on axial compression behavior of concrete-filled GFRP tube short columns strengthened with CFRP[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(4): 124-132.

- [8] DI LUDOVICO M, PROTA A, MANFREDI G. Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(5): 541-552.

- [9] 王 磊,毛亚东,陈 爽,等.GFRP筋与珊瑚混凝土黏结性能的试验研究[J].建筑材料学报,2018,21(2):286-292.

WANG Lei, MAO Yadong, CHEN Shuang, et al. Experimental research on bond performance between GFRP bars and the coral concrete [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 286-292.

- [10] 王 磊,吴 翔,曾 榕,等.CFRP筋与珊瑚混凝土的黏结性能试验研究[J].中国农村水利水电,2016(7):127-131.

WANG Lei, WU Xiang, ZENG Rong, et al. The experimental research on bond performance between

- CFRP bars and the coral concrete[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(7):127-131.
- [11] 胡长顺. 全珊瑚骨料海水混凝土与 FRP 筋粘结性能试验研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
- HU Changshun. Experimental study on the bonding performance of full coral aggregate seawater concrete with FRP bars[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [12] 寇佳亮, 席方勇, 赵坤龙. 卤水-干湿循环侵蚀下高延性混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(8):98-102.
- KOU Jialiang, XI Fangyong, ZHAO Kunlong. Experimental study on mechanical properties of high ductile concrete under bittern-wetting-drying cycles [J]. Building Structure, 2019, 49(8):98-102.
- [13] 王海良, 郭海洋, 杨新磊, 等. 玄武岩纤维防水混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(增1):1467-1470.
- WANG Hailiang, GUO Haiyang, YANG Xinlei, et al. Experimental research on mechanical properties of basalt fiber waterproof concrete[J]. Building Structure, 2013, 43(S1):1467-1470.
- [14] 张倚天, 肖岩. FRP 约束方钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11):50-56.
- ZHANG Yitian, XIAO Yan. Study on behaviors of FRP confined stub concrete filled square steel tubes under axial load [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11):50-56.
- [15] 安凯旋, 王旭月, 刘中宪, 等. 纤维布约束超高性能混凝土短柱轴压性能[J]. 建筑结构, 2021, 51(11):129-135.
- AN Kaixuan, WANG Xuyue, LIU Zhongxian, et al. Study on axial compression performance research on UHPC short columns confined by fiber reinforced polymer[J]. Building Structure, 2021, 51(11):129-135.
- [16] 潘毅, 吴晓飞, 郭瑞, 等. 长期荷载作用下 FRP 约束混凝土应力-应变关系分析模型[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(10):139-148.
- PAN Yi, WU Xiaofei, GUO Rui, et al. Analysis-oriented stress-strain model of FRP-confined concrete under long-term sustained load[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(10):139-148.
- [17] 任宏伟, 严珊. CFRP 约束高强混凝土圆柱抗压力学性能研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(6):157-162.
- REN Hongwei, YAN Shan. Study on the compressive mechanical properties of high strength concrete cylinder confined by CFRP[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2021, 40(6):157-162.
- [18] 马高, 邹雅峰, 何庆锋, 等. BFRP 约束损伤钢筋混凝土圆柱轴压力学性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(2):119-124, 118.
- MA Gao, ZOU Yafeng, HE Qingfeng, et al. Study on axial compressive mechanical behavior of damaged reinforced concrete cylinder columns confined with BFRP[J]. Building Structure, 2021, 51(2):119-124, 118.
- [19] BENZAID R, CHIKH N, MESBAH H. Study of the compressive behavior of short concrete columns confined by fiber reinforced composite[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2009, 34:15-26.
- [20] 张广泰, 曹银龙, 李瑞祥, 等. 聚丙烯-钢纤维/混凝土柱大偏心受压承载力计算[J]. 复合材料学报, 2020, 37(9):2336-2347.
- ZHANG Guangtai, CAO Yinlong, LI Ruixiang, et al. Calculation of bearing capacity of polypropylene-steel fiber reinforced concrete column under large eccentric loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(9):2336-2347.
- [21] 言兴. GRC 网格布与聚丙烯砼复合加固短圆柱试验研究及理论分析[D]. 湘潭:湖南科技大学, 2018.
- YAN Xing. Experimental study and theoretical analysis of short cylinder reinforced with GRC mesh and polypropylene concrete[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2018.
- [22] 张延年, 董浩, 刘晓阳, 等. 聚丙烯纤维增强混凝土拉压比试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(1):104-108.
- ZHANG Yannian, DONG Hao, LIU Xiaoyang, et al. Experiment on tension-compression ratio of polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(1):104-108.
- [23] 肖保辉, 支正东, 荀勇. 织物增强混凝土加固钢筋混凝土方形短柱轴压承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增2):238-242, 297.
- XIAO Baohui, ZHI Zhengdong, XUN Yong. Study on axial bearing capacity of square concrete columns strengthened with textile reinforced concrete [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S2):238-242, 297.
- [24] 李玉鹏. 碳纤维布约束混凝土柱受压性能试验研究及理论分析[D]. 上海:同济大学, 2006.
- LI Yupeng. Experimental investigation and theoretical

analysis for performance of concrete columns confined with carbon fiber composite sheets [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.

[25] 刘栋梁. FRP 加固混凝土柱承载力分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.

LIU Dongliang. The carrying capacity analysis of FRP strengthened reinforce concrete column [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.

[26] 尹世平, 彭 驰, 艾珊霞. 纤维编织网增强混凝土加固混凝土柱轴压性能的研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2016, 48(4): 85-92.

YIN Shiping, PENG Chi, AI Shanxia. Research on the axial compression properties of concrete columns strengthened with textile reinforced concrete [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(4): 85-92.

[27] AL-GEMEEL A N, YAN Z G. Using textile reinforced engineered cementitious composite for concrete columns confinement [J]. Composite Structures, 2019, 210: 695-706.

[28] TOUTANJI H. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(3): 397-404.