文章编号:1674-2974(2024)01-0079-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024008

纤维织物增强高延性混凝土加固RC短柱抗剪性能试验研究

邓明科[1],雷恒[1],张雨顺[2],郭莉英[1],张伟[1†]
(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;
2. 上海建科工程咨询有限公司,上海 200032)

摘 要:为研究纤维织物增强高延性混凝土(TR-HDC)加固钢筋混凝土短柱的抗剪性能,设计了6根钢筋混凝土柱,包括2个对比柱和4个TR-HDC加固柱.通过低周反复荷载试验,对比分析剪跨比、纤维织物层数对试件破坏形态、变形、承载力和耗能能力的影响.结果表明:采用TR-HDC加固钢筋混凝土短柱,可显著提高其抗剪承载力;TR-HDC与原混凝土柱协同工作性能良好,加固后的混凝土柱的变形、承载力和耗能能力明显提高;增加纤维织物的层数对钢筋混凝土短柱的抗剪承载力提高幅度较小,但可大幅增强柱的耗能和变形能力;剪跨比较大时,更有利于发挥TR-HDC加固材料的力学性能.基于桁架-拱模型,提出TR-HDC加固钢筋混凝土短柱的抗剪承载力计算方法,计算结果较准确.

关键词:低周反复荷载;纤维织物增强高延性混凝土;加固;RC短柱;抗剪承载力
中图分类号:TU375.1 **文献标志码**:A

Experimental Study on Shear Performance of RC Short Columns Strengthened by Textile Reinforced High Ductile Concrete

DENG Mingke[1], LEI Heng[1], ZHANG Yushun[2], GUO Liying[1], ZHANG Wei[1†]
(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Shanghai Jianke Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: To study the shear performance of reinforced concrete (RC) short columns strengthened with textile-reinforced high ductile concrete (TR-HDC), six RC columns, including two control columns and four columns strengthened with TR-HDC, were designed. The effects of the shear span-to-effective depth ratio and the layers of textile on the failure mode, deformation, bearing capacity, and energy dissipation capacity of the specimens were compared and analyzed under low cyclic loading tests. The experimental results show that the use of TR-HDC can obviously improve the shear capacity of the RC short columns; TR-HDC works well with the original concrete column, and the deformation, bearing capacity, and energy dissipation capacity of the specimens are significantly improved after strengthening with TR-HDC; increasing the number of layers of textile can slightly increase the shear capacity of the member, but it can greatly enhance the energy dissipation and deformation capacity of the RC short

* **收稿日期**:2022-12-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578445),National Natural Science Foundation of China (51578445);西安市重大科技创新计划项目(20191522415KYPT015JC017),Xi'an Science and Technology Innovation Project(20191522415KYPT015JC017)
作者简介:邓明科(1979—),男,四川南充人,西安建筑科技大学教授,工学博士
† 通信联系人,E-mail: zhangemailing@126.com

column; when the shear span is relatively large, it is more beneficial to exert the mechanical properties of TR-HDC reinforcement materials. Based on the truss-arch model, a calculation method for the shear capacity of the RC short columns strengthened with TR-HDC is proposed. The calculation results are more accurate.

Key words: low cyclic loading; textile reinforced high ductile concrete (TR-HDC); strengthening; RC short column; shear capacity

由于建筑结构的增层改造、使用功能的改变和设计规范的升级,出现大量钢筋混凝土(Reinforced Concrete,RC)柱承载力不足,不能满足现行规范的要求,因此,亟需对这些RC柱进行加固以保证结构安全.

纤维织物增强混凝土(Textile Reinforced Concrete, TRC)由纤维织物和细粒混凝土组成,是具有抗裂性能好和承载力高等优点[1-3]的一种新型水泥基复合材料.近年来,国内外学者将其应用于加固领域,开展了一系列关于加固RC柱的试验研究.肖保辉等[4]研究指出:TRC加固试件的极限荷载随着配网率增加而明显提高,且TRC加固方法可有效改善柱的延性.尹世平等[5]进行了TRC加固RC柱的抗震性能试验,结果表明:TRC能提高RC柱的延性,有效限制斜裂缝开展,延缓试件破坏. Bournas等[6]研究发现:TRC延缓了塑性铰区钢筋的屈服,使RC柱承载力和变形能力得到显著提高. Ortlepp等[7]主要研究RC柱截面形状对TRC加固效果的影响,当柱截面形状从正方形过渡到圆形时,TRC的约束效果增强,有利于提高试件承载力.以上研究表明,采用TRC可有效加固RC柱.然而TRC也存在基体易开裂、纤维织物利用率低和基体开裂后不再传递荷载等方面的不足[8-9].

针对上述问题,不同学者通过改变基体材料来克服传统TRC的缺点,并将其运用于加固RC柱以提高加固效率.朱忠锋等[10]指出:纤维织物和工程水泥基复合材料(Engineered Eementitious Composite, ECC)组成的复合加固层能有效约束核心混凝土;ECC能延缓纤维织物断裂,提高RC柱的刚度和变形能力. Ortlepp[11]用加入短切纤维的TRC加固RC柱,结果表明加固试件承载力明显提高,其破坏时裂缝分布更均匀.侯利军等[12]采用纤维网-超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)加固RC柱,试验表明:纤维网-UHTCC体系与RC柱之间有较好的变形协调能力,能限制柱身裂缝的发展,减缓加载后期试件刚度的退化.然而,现有研究主要集中于加固普通RC柱的抗震和轴压性能方面,对加固不同剪跨比框架RC短柱的抗剪性能研究较少.由于框架短柱延性差、抗剪承载力低,具有明显的脆性破坏特性,破坏后极易造成重大的人员伤亡和严重的经济损失,因此对此类构件进行加固非常必要.

本课题组利用高延性混凝土(High Ductile Concrete,HDC)多裂缝开展和应变硬化的特性[13-14],将纤维织物和高延性混凝土组合制成纤维织物增强高延性混凝土(Textile Reinforced High Ductile Concrete,TR-HDC)[15],提出采用TR-HDC围套加固的方法,提高RC短柱的延性和抗剪承载力.本文通过低周反复荷载试验,研究剪跨比和纤维织物层数对加固试件破坏形态、滞回曲线、承载力及变形能力等的影响,并提出了TR-HDC加固柱抗剪承载力计算公式,为TR-HDC加固RC短柱的设计与工程应用提供参考依据.

1 试验概况

1.1 试件制作及加固方法

试验共设计并制作了6个RC柱试件,为真实地模拟框架柱的受力状态,试件采用工字形,上下两端均为固定端. RC柱截面尺寸为250 mm×250 mm,混凝土保护层厚度为20 mm. 剪跨比λ = 1.5的试件,柱高750 mm;剪跨比λ = 2的试件,柱高1 000 mm,具体试件参数如表1所示. Z-1.5和Z-2为未加固试件,表中试件编号中Z代表柱,第一个数字代表剪跨比,T字母前数字代表加固层中纤维织物层数.纵筋配筋采用6Φ20,箍筋配筋为ϕ6.5@100. 试件的尺寸及具体配筋详图见图1.

为增强试件与加固面层的黏结性,对养护28 d后的加固试件进行表面凿毛处理,清理界面,去掉试件表面碎骨料,同时对方柱四角进行倒圆角处理.加固时,先将试件表面润湿,在加固试件上压抹一层不

表1　试件主要参数

Tab.1　Main parameters of specimens

试件编号	H/mm	剪跨比λ	加固方式	截面尺寸/(mm×mm)
Z-1.5	750	1.5	—	250×250
Z-1.5-2T	750	1.5	2TR-HDC	280×280
Z-1.5-3T	750	1.5	3TR-HDC	280×280
Z-2	1 000	2	—	250×250
Z-2-2T	1 000	2	2TR-HDC	280×280
Z-2-3T	1 000	2	3TR-HDC	280×280

注:加固方式中TR-HDC前数字表示碳纤维织物层数.

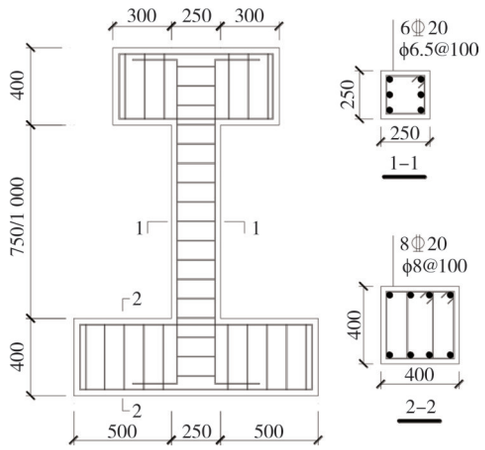


图1　试件尺寸及配筋详图(单位:mm)

Fig.1　Dimensions and reinforcement arrangement of specimens (unit: mm)

小于3 mm厚的HDC,将碳纤维织物铺设在HDC表面,再在碳纤维织物表面涂抹HDC,完成一层加固,重复上述步骤即可完成多层加固.多层加固时,为保证TR-HDC力学性能,纤维织物之间的HDC不应小于2 mm.

1.2　材料力学性能

混凝土设计强度等级为C30,混凝土抗压强度平均值$f_{cu,m}$采用标准试件测得,混凝土轴心抗压强度平均值用公式$f_{c,m}=0.88\alpha_1\alpha_2 f_{cu,m}$[16]换算得到.采用尺寸为350 mm×50 mm×15 mm的试块进行单轴拉伸试验,测得HDC和TR-HDC轴心抗拉强度平均值.按公式$f_{t,m}=0.395f_{cu,m}^{0.55}$[16]计算混凝土轴心抗拉强度.采用边长为100 mm的立方体试块测得HDC抗压强度试验平均值$f_{du,m}$为64.01 MPa,HDC轴心抗压强度按公式$f_{dk,m}=0.88\times0.88\times f_{du,m}$[17]计算.混凝土、HDC和TR-HDC的力学性能见表2.箍筋的屈服强度为345 MPa,钢筋力学性能见表3.

试验用HDC是由一定比例的常用硅酸盐水泥、水、石英砂、粉煤灰、矿物掺和料和体积分数为1.5%的PVA纤维等制备而成[18-19],其基体配合比见表4.

表2　混凝土、HDC和TR-HDC的力学性能

Tab.2　Mechanical properties of concrete, HDC and TR-HDC

材料种类	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	轴心抗拉强度/MPa
混凝土	34.10	22.81	2.21
HDC	64.01	49.57	4.06
2TR-HDC	—	—	8.16
3TR-HDC	—	—	9.55

表3　钢筋力学性能

Tab.3　Mechanical properties of steel bars

钢筋种类	直径d/mm	屈服强度f_y/MPa	极限强度f_u/MPa	伸长率δ/%
HPB300	6.5	345.0	520.0	26.5
HPB300	8	367.5	550.0	27.0
HRB400	20	440.0	627.5	14.8

PVA短纤维力学性能参数见表5.

如图2所示,试验用纤维织物由双向具有相同特性的碳纤维束编织而成,纤维织物间距为20 mm.为提高整体受力性能,网格表面涂有环氧树脂胶,其力学性能参数见表6.

表4　高延性混凝土(HDC)基体配合比

Tab.4　Mixed proportions of HDC　　kg/m^3

$\rho_{水泥}$	$\rho_{硅灰}$	$\rho_{粉煤灰}$	$\rho_{矿粉}$	$\rho_{砂子}$	$\rho_{水}$	$\rho_{减水剂}$
447	59	494	177	424	353	8

表5　PVA短纤维各项性能指标

Tab.5　Performance indicators of short PVA fibers

长度/mm	直径/μm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	密度/(g·cm^{-3})
12	39	1 600	40	7	1.3

表6　碳纤维织物的力学性能指标

Tab.6　Mechanical properties of carbon textile

截面面积/mm^2	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	面密度/(g·m^{-2})
0.877	3322	239	1.39	160

1.3　试验加载与测试

为真实模拟工程实际中框架柱的受力状态,试验采用"建研式"[20]加载方式.水平荷载通过作动器及加载装置作用于柱反弯点处,轴向压力通过油压千斤顶和稳压泵作用于加载横梁进而间接作用于柱顶,试验开始前首先对试件施加572 kN轴向压力,再逐渐施加水平荷载.

试件荷载-位移曲线为直线时,按荷载控制加



图2 碳纤维织物

Fig.2 Carbon textile

载,荷载每级增加20 kN,并循环一次.当荷载-位移曲线出现明显弯曲时改为按位移加载,位移按4 mm的倍数递增,每级循环三次,直到荷载降至峰值荷载的85%以下,试验停止加载.位移计W1用于测量试件整体滑移,位移计W2安装在支架上,用于测量柱顶水平位移,加载装置如图3所示.

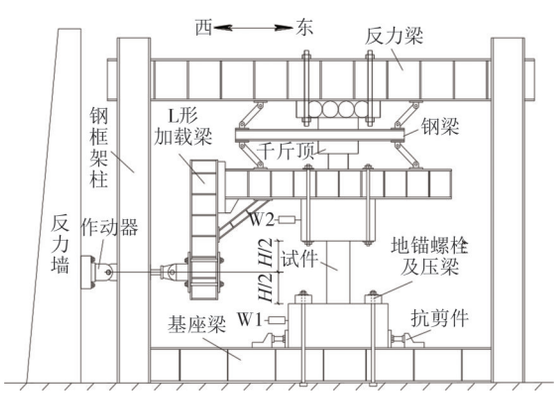


图3 加载装置

Fig.3 Test set-up

2 试验结果及分析

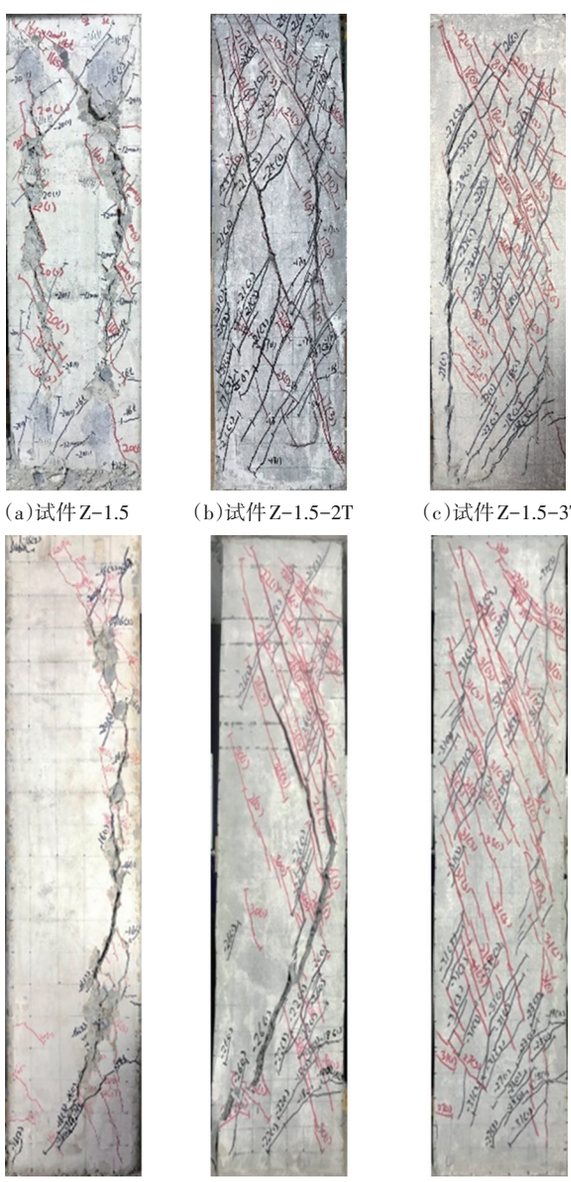
2.1 试验过程及主要结果

为便于描述试验现象,规定加载中推为正,拉为负.各试件破坏形态和裂缝分布见图4.

2.1.1 未加固试件

对于试件Z-1.5,在荷载控制阶段,当加载至-160 kN时,试件东侧出现多条斜裂缝和水平裂缝,最长斜裂缝达到18 cm.在位移控制阶段,加载至16 mm时,原有斜裂缝延伸且加宽至2 mm,柱东侧出现多条贯通的水平裂缝,混凝土表皮开始脱落;加载至-20 mm时,柱西侧出现多条平行裂缝并伴有混凝土脱落,裂缝加宽至4 mm,试件出现两条沿纵筋贯通的黏结主裂缝,荷载下降至峰值荷载的85%,试件发生破坏.

剪跨比较大的试件Z-2裂缝相对较少,破坏程度较轻,柱东侧只出现一条黏结主裂缝.随荷载增大,试件Z-2黏结裂缝开始不断延伸和加宽,混凝土保护层脱落,试件逐渐丧失承载力.



(a)试件Z-1.5 (b)试件Z-1.5-2T (c)试件Z-1.5-3T

(d)试件Z-2 (e)试件Z-2-2T (f)试件Z-2-3T

图4 试件破坏形态

Fig.4 Failure patterns of specimens

2.1.2 2TR-HDC加固试件

对于试件Z-1.5-2T,采用2层碳纤维织物的TR-HDC加固.按荷载控制加载过程中,未出现裂缝.改为按位移加载,加载至13 mm时,试件上部出

现两条斜裂缝,柱东侧底部出现长约5 cm的弯剪斜裂缝;加载至-21 mm时,柱上部出现多条新的斜裂缝,形成斜向主裂缝,主裂缝周围有大量细密裂缝出现;加载至+25 mm时,纤维织物被拉断,发出响声,裂缝不断出现、加宽和延伸,最大主裂缝宽至4.5 mm,试件承载力下降,试验结束.

试件Z-2-2T与Z-1.5-2T破坏过程基本相同.相比于试件Z-1.5和Z-2,试件Z-1.5-2T和Z-2-2T主裂缝形成后,裂缝延伸和发展较缓慢,破坏延迟,加固层未出现剥落.

2.1.3　3TR-HDC加固试件

试件Z-1.5-3T、Z-2-3T均采用3层碳纤维织物的TR-HDC加固.对于试件Z-1.5-3T,按荷载控制加载过程中,试件一直保持弹性.改为按位移加载后,加载至18 mm时,东侧柱顶出现一条斜裂缝,西侧柱顶斜向柱中部出现多条较长的斜裂缝;加载至22 mm时,柱中下部出现大量细密斜裂缝,柱下部黏结裂缝逐渐产生;加载至-30 mm,柱西部黏结裂缝加宽至5 mm,斜裂缝宽至0.5 mm,下部原有斜裂缝不断延伸、扩展,柱西侧下部混凝土表面外鼓,试件逐渐丧失承载力,停止加载.

试件Z-2-3T裂缝发展和分布形态与试件Z-1.5-3T大致相同.与试件Z-1.5-2T和Z-2-2T相比,试件Z-1.5-3T和Z-2-3T斜裂缝数量更多,裂缝更加细密,多裂缝开展现象更明显.

2.2　破坏形态分析

对上述6个试件的试验现象及破坏形态进行分析,得到以下结论.

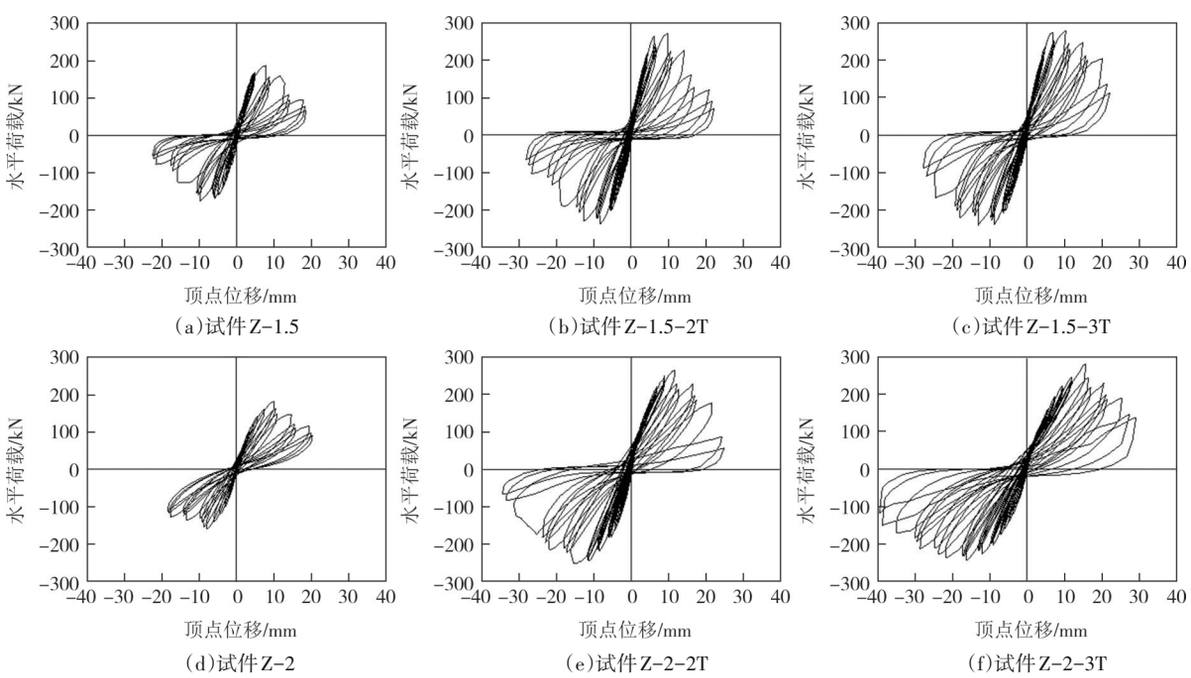
1)试件Z-1.5和Z-2裂缝数量少且长度较短,混凝土剥落严重.由于试件纵向钢筋配筋率较高,混凝土强度低,试件沿纵筋出现大量黏结裂缝,试件最终均发生剪切黏结破坏.

2)试件Z-1.5-2T和Z-2-2T加固层配置两层碳纤维织物,由于PVA纤维的桥接作用加固层未出现剥落.TR-HDC发挥较好的环箍约束作用,有效提高了混凝土与钢筋的协同工作能力,试件未出现黏结裂缝,剪切失效起控制作用.最终,试件均发生剪切破坏.

3)对于试件Z-1.5-3T和Z-2-3T,加固层中的3层碳纤维织物参与抗剪,试件抗剪承载力大幅提高.在达到抗剪承载力之前,内部混凝土开裂,核心区混凝土往外鼓胀,纵筋与混凝土之间的黏结强度首先达到极限,纵筋与混凝土出现黏结滑移,试件均发生剪切黏结破坏.

2.3　滞回性能曲线

图5为各试件荷载-位移滞回曲线.由图5可以得出:



(a)试件Z-1.5　(b)试件Z-1.5-2T　(c)试件Z-1.5-3T

(d)试件Z-2　(e)试件Z-2-2T　(f)试件Z-2-3T

图5　荷载-位移滞回曲线

Fig.5　Load-displacement hysteretic curves of specimens

1) 试件Z-1.5滞回环面积较小,曲线循环次数少,峰值荷载后承载力迅速降低,表现出较差的滞回特性. 与试件Z-1.5相比,试件Z-1.5-2T滞回环更加饱满,加载后期有更大的残余变形,曲线循环次数增多,峰值荷载后强度衰减减慢,加固后试件滞回性能稳定.

2) 与试件Z-2-2T相比,试件Z-2-3T循环次数增多,滞回环面积更大,形状更饱满. 由于纤维织物层数的增加,试件Z-2-3T发生剪切黏结破坏,钢筋与混凝土存在相对滑移且加固层裂缝分布更加细密,使试件的滞回性能进一步提升,更有利于结构抗震.

3) 对比图5(a)和(d)可以看出,试件滞回性能受框架柱剪跨比的影响. 与试件Z-1.5相比,试件Z-2虽然滞回环面积小,表现出较差的滞回性能,但由于Z-2比Z-1.5混凝土剥落较少,峰值荷载后承载力下降更缓慢,残余变形小,滞回曲线循环次数更多.

2.4 骨架曲线

将每个试件荷载-位移滞回曲线中各级加载峰值的点相连,得到每个试件的骨架曲线. 对比图6各试件的骨架曲线可以得出以下结论:

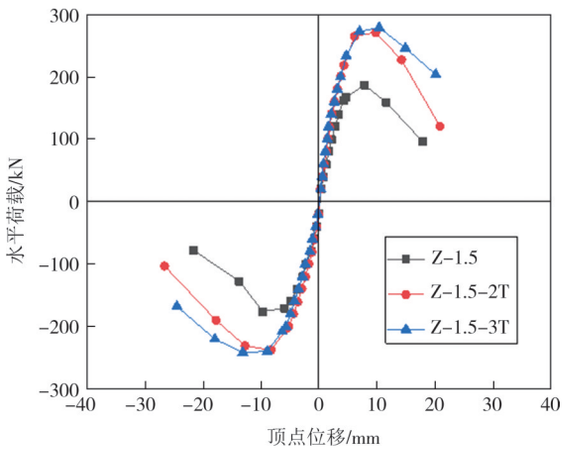
1) 相比于试件Z-1.5,试件Z-1.5-2T骨架曲线峰值荷载之前弹性段更长、斜率更大,峰值荷载和极限位移都明显提高.

2) 由图6(a)可见,试件Z-1.5-2T在峰值荷载后,随着剪切裂缝的产生和延伸,试件累积损伤逐渐增加,发生脆性的剪切破坏,曲线下降相对较快. 试件Z-1.5-3T加固层中3层碳纤维织物能更有效限制剪切裂缝的产生和发展,骨架曲线下降较平缓.

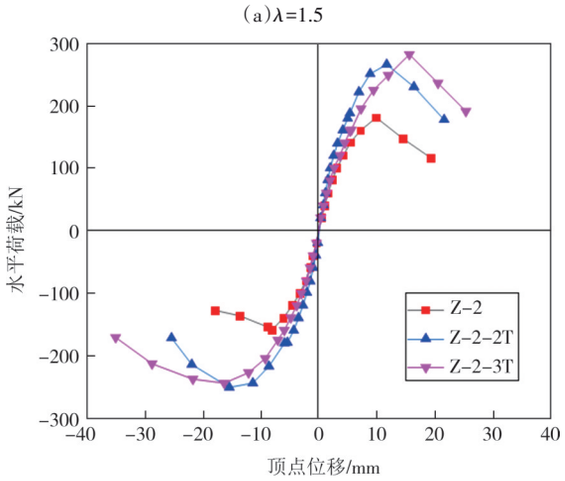
3) 由图6(b)可以看出,试件Z-2-3T比试件Z-2-2T极限位移显著增大,延性更好,承载力退化速率明显减缓. 说明剪跨比为2时,加固层中纤维织物层数的增多,提高了加固层的变形能力和耐损伤能力,更能有效延缓裂缝开展和延伸,使试件承载力下降变缓,表现出较好的后期承载力.

2.5 承载力及变形能力

试件开裂荷载和开裂位移取试件表面出现第一条明显斜裂缝时的荷载和其对应的顶点位移. 运用“能量等值法”确定屈服荷载和屈服位移,试件极限位移为荷载下降至峰值荷载85%时对应的位移. 各



(a)λ=1.5



(b)λ=2

图6 骨架曲线

Fig.6 Skeleton curves

试件特征点的荷载和位移见表7.

由表7可得:

1) 与试件Z-1.5相比,试件Z-1.5-2T承载力提高40.4%,极限位移提高28.5%. 一方面,TR-HDC类似箍筋直接参与抗剪,提高了柱的桁架作用;另一方面,TR-HDC面层对核心混凝土柱起到良好的约束作用,延缓混凝土压拱破坏,从而提高了试件抗剪承载力. 同时TR-HDC限制斜裂缝开展,延缓承载力退化,使混凝土受压区和纵筋变形增大,试件极限位移得到明显提高.

2) 与试件Z-2相比,试件Z-2-2T承载力提高51.8%,极限位移提高40.3%. 与剪跨比为1.5加固试件的承载力和极限位移提高幅度相比,剪跨比为2时提高更明显. 可见,剪跨比较大时,试件所受弯矩作用更大,TR-HDC的高裂缝控制能力和良好的拉伸变形能力可得到更充分利用,加固效率更高.

3) 对比试件Z-1.5-3T与Z-1.5-2T、试件Z-2-3T与Z-2-2T的承载力发现,增加纤维织物层数,试

表7　主要试验结果

Tab.7　Test results of specimens

试件编号	开裂点		屈服点		峰值点		极限点		延性系数
	P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/mm	Δ_u/mm	
Z-1.5	160.52	4.58	166.80	5.14	181.40	8.80	154.19	11.76	2.29
Z-1.5-2T	210.78	4.91	229.04	5.79	254.61	9.00	215.42	15.11	2.61
Z-1.5-3T	221.08	5.48	232.32	6.29	260.49	11.76	217.23	17.14	2.72
Z-2	140.43	5.77	147.00	6.40	170.16	9.01	144.64	13.80	2.16
Z-2-2T	219.52	7.74	223.46	8.04	258.38	13.54	219.62	19.36	2.41
Z-2-3T	226.16	10.75	229.11	10.96	263.07	15.93	223.61	24.64	2.25

注：P为框架柱的水平荷载；Δ为水平荷载所对应的框架柱顶点侧向位移；下标cr、y、m、u分别代表各个试件的开裂状态、屈服状态、峰值状态和极限状态；表中荷载、位移均取试件推、拉两个方向加载的平均值.

件抗剪承载力仅提高2.3%和1.8%. 主要原因是：纤维织物的增加主要对柱的桁架作用起增强效果，而试件Z-1.5-3T和Z-2-3T发生剪切黏结破坏，承载力主要由柱的拱作用控制，因此抗剪承载力提高幅度较小.

4）试件Z-1.5-3T比Z-1.5-2T和试件Z-2-3T比Z-2-2T的极限位移分别提高13.4%和27.3%，提高幅度较大. 增加纤维织物层数，使纤维织物对内部混凝土的侧向约束作用增强，延缓了承载力退化，有利于纵筋的变形发展，使得试件变形能力提高.

2.6　耗能能力

图7为各试件耗能能力的对比曲线，表8为各试件特征点的累积耗能.

1）与试件Z-1.5相比，试件Z-1.5-2T极限点累积耗能提高41.7%. 试件Z-2-2T比试件Z-2极限点累计耗能提高129.2%. 可见，采用TR-HDC加固后试件耗能能力可大幅提升，加固效果明显. 并且剪跨比为2时，受压区混凝土和受拉钢筋变形增加，试件表面产生更多细密裂缝，使试件的耗能能力提升幅度更大.

2）试件Z-1.5-3T相比于Z-1.5-2T，屈服点和峰值点的耗能均未明显提高，但极限点的耗能能力提高13.9%. 这表明，剪跨比为1.5时，纤维织物层数的增加对试件耗能性能的主要影响是极限点耗能能力的提高. 试件Z-1.5-3T发生剪切黏结破坏，钢筋与混凝土之间的相对滑移使试件峰值荷载后变形增大，有利于试件极限点耗能.

3）试件Z-2-3T比Z-2-2T峰值点和极限点耗能分别提高14.6%和10.7%. 剪跨比为2时，随着纤维织物层数的增加，试件表面裂缝增多，承载力退化减缓，故在剪跨比较大时，增加纤维织物层数能有效提升加固试件的耗能能力.

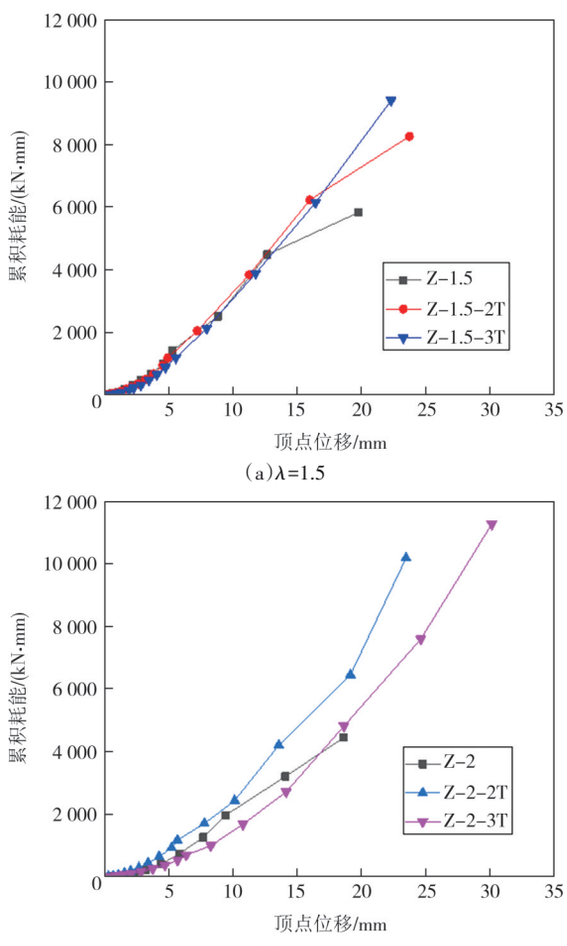


图7　试件累积滞回耗能-位移关系曲线

Fig.7　Cumulative energy dissipation-displacement curves of specimens

2.7　刚度退化

割线刚度K可以表征试件刚度变化，其表达式为：

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \tag{1}$$

式中：K_i为第i级加载下的刚度；$+P_i$和$-P_i$分别为第

表8 试件累积耗能

Tab.8 Cumulated energy dissipation of specimens

试件编号	累积耗能 E/(kN·mm)		
	屈服点	峰值点	极限点
Z-1.5	1 341.10	2 508.72	5 830.45
Z-1.5-2T	1 514.19	3 837.81	8 260.71
Z-1.5-3T	1 480.66	3 884.08	9 408.29
Z-2	1 081.69	1 960.44	4 447.22
Z-2-2T	1 948.64	4 204.13	10 193.40
Z-2-3T	1 755.71	4 819.86	11 281.04

i级加载下正、反方向的峰值荷载值;$+\Delta_i$和$-\Delta_i$分别为第i级加载下正、反向峰值点的位移值.图8给出了各个试件刚度的退化曲线.

1)由图8(a)可见,加固试件Z-1.5-2T、Z-1.5-3T屈服后刚度退化较缓慢,且加固中纤维织物层数的增加对刚度退化速率影响不明显.这说明剪跨比较小时,TR-HDC良好的变形能力得不到有效发挥,加固层的抗剪作用没有被充分利用.

2)由图8(b)可以看出,峰值荷载之前,试件Z-2-2T比Z-2刚度退化更快,峰值荷载之后,试件Z-2-2T刚度退化曲线下降速率小于Z-2.这主要是因为剪跨比较大时,TR-HDC有较高的抗拉强度,在构件受损状态下依旧可以提供较强的横向约束,限制裂缝发展,减缓刚度退化.

3)对比图8(a)和(b)发现,随着加固层中纤维织物层数的增多,加固试件初始刚度降低,峰值荷载之后,刚度退化变慢.

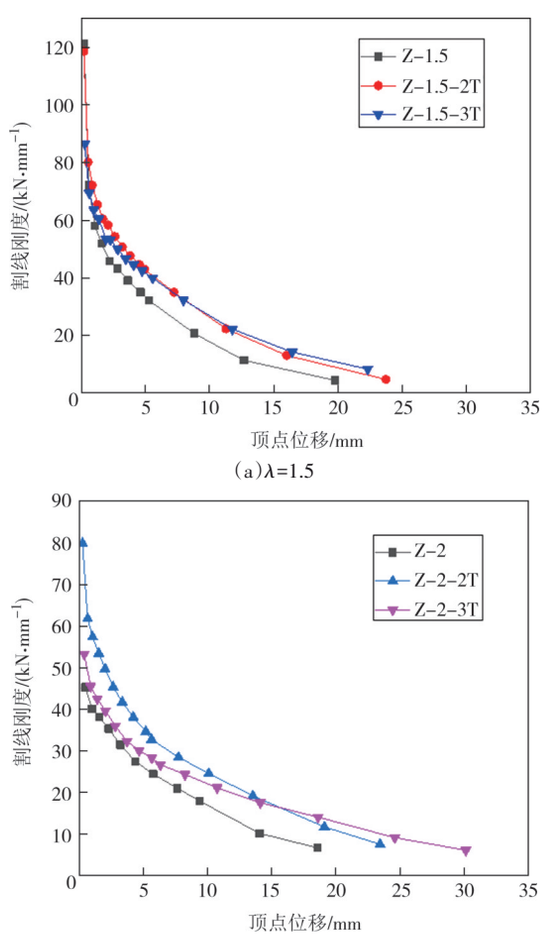


图8 刚度退化曲线

Fig.8 Stiffness degradation curves

3 加固柱抗剪承载力计算

Watson等[21]和Ghee等[22]提出的桁架-拱模型被广泛用于计算RC柱的抗剪承载力,该模型认为桁架机构由裂缝间混凝土、纵筋和箍筋组成,拱机构由混凝土的对角斜向压杆所组成,拱机构不需要箍筋参与,仅由混凝土自身提供.许多学者采用该模型考虑加固材料在桁架机构中的抗剪贡献,计算加固后RC梁[23-24]和柱[25-26]的抗剪承载力.本文根据以上研究,将TR-HDC视为复合材料,考虑其在桁架机构中的抗剪贡献,建立了适用于计算TR-HDC加固RC短柱的抗剪承载力方法.

考虑到对既有结构进行加固存在二次受力和TR-HDC面层相比于箍筋约束作用弱的问题,为简化计算,本文计算过程中忽略TR-HDC面层的受压作用和对原混凝土柱的约束作用.

3.1 桁架机构

图9为TR-HDC加固柱受剪的桁架-拱机构计算简图.图9中取直线AC左侧隔离体如图10所示.

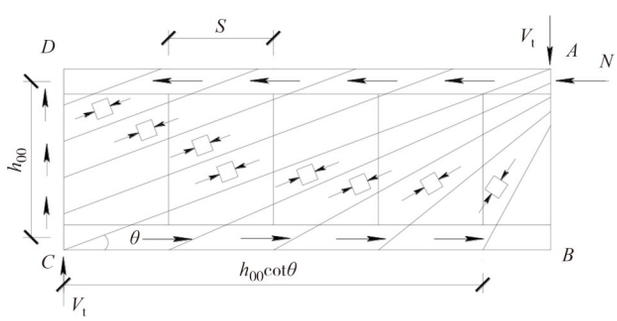


图9 桁架机构计算简图

Fig.9 Calculating diagram for truss mechanism

对于加固柱,TR-HDC面层能抑制斜裂缝开展,可直接参与抗剪,主要在桁架机构中发挥,其抗剪作用可等效为箍筋计入桁架机构,通过平衡可得加固柱桁架机构剪力V_t为:

$$V_t = V_t^{sv} + V_t^{TR-HDC} \tag{2}$$

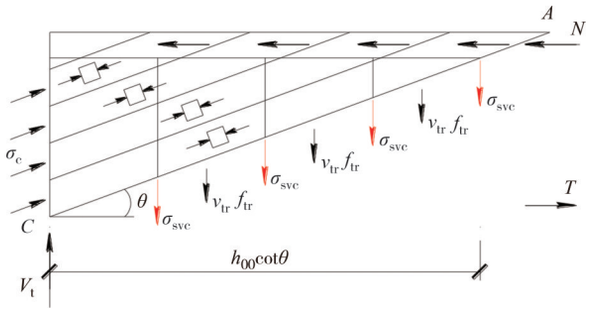


图 10　桁架机构脱离体应力平衡

Fig.10　Equilibrium of stress in truss mechanism

$$V_t^{sv}=\sum A_{sv}\sigma_{sv}=f_{yv}\rho_{sv}bh_{00}\cot\theta \tag{3}$$

$$V_t^{TR-HDC}=2\nu_{tr}f_{tr}\frac{h}{\sin\theta}t\cos\theta \tag{4}$$

式中:θ为桁架机构中斜压杆倾角;V_t^{sv}表示箍筋在桁架机构中的抗剪贡献;V_t^{TR-HDC}表示TR-HDC面层在桁架机构中的抗剪贡献;f_{yv}为箍筋的屈服强度;$h_{00}=0.9h_0$表示受拉纵筋和受压纵筋的间距;$\rho_{sv}=A_{sv}/bs$表示箍筋配箍率,其中A_{sv}为箍筋面积,s为箍筋间距;t表示加固层厚度,取t=15 mm;b为原混凝土柱截面宽度;h为原混凝土柱截面高度.在剪切荷载作用下,由于斜裂缝与纤维织物之间存在倾角,纤维织物的抗拉强度会有所下降[27].因此,引入ν_{tr}考虑TR-HDC抗拉强度的折减.根据文献[27]取ν_{tr}=0.62,f_{tr}表示TR-HDC面层的抗拉强度.

文献[15]提出了PVA短纤维和配网率耦合作用下TR-HDC抗拉强度的计算公式,见式(5).

$$f_{tr}=k^{a+b\nu}\rho f_t \tag{5}$$

式中:k为织物的理论承载力与织物增强试件抗拉承载力的比值,可由未掺加短纤维的织物增强试件得到;ν为HDC中PVA短纤维掺量;ρ为纤维织物配网率,为受力方向上织物的截面面积与TR-HDC截面面积的比值;f_t为纤维织物抗拉强度.当碳纤维织物层数为2层和3层时,ρ为0.7%和1.05%,k取值为0.18和0.14.碳纤维织物常数a和b的取值为1.032和-0.233.根据式(5)可以预测TR-HDC的抗拉强度,便于计算加固柱的抗剪承载力.

柱斜裂缝区有效面积为:

$$A_c=\gamma bh \tag{6}$$

式中:γ为桁架模型斜压杆有效系数,按公式$\gamma=1-0.25b/h$[28]计算.

混凝土斜向受压方向与水平方向的角度θ有一定的范围,取$\cot\theta=2$为其上限.如图11所示,由混凝土柱斜向压应力、箍筋、TR-HDC拉力的内部平衡得:

$$V_t^2\left(1+\cot^2\theta\right)=\left(\gamma\sigma_c bh_{00}\cos\theta\right)^2 \tag{7}$$

式中:σ_c是桁架模型中的混凝土斜压应力.

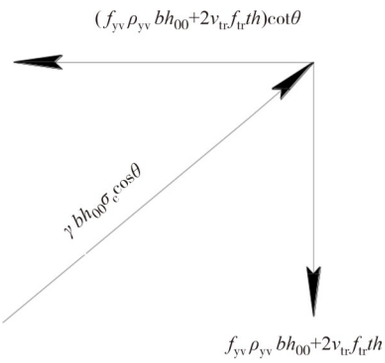


图 11　平衡条件

Fig.11　Balance condition

由于σ_c不应大于混凝土有效抗压强度,即$\sigma_c\leqslant\nu f_c$,可推得:

$$\cot\theta\leqslant\sqrt{\frac{\gamma\nu f_c}{\rho_{sv}f_{yv}+2\nu_{tr}tf_{tr}/b}-1} \tag{8}$$

故可得:

$$\cot\theta=\min\left(\sqrt{\frac{\gamma\nu f_c}{\rho_{sv}f_{yv}+2\nu_{tr}tf_{tr}/b}-1},2\right) \tag{9}$$

式中:ν为混凝土软化系数,按$\nu=0.7-f_c/120$计算[29];f_c为混凝土轴心抗压强度.

3.2　拱机构

由于忽略TR-HDC面层受压作用,拱机构计算与普通RC柱相同.拱机构承担的剪力为:

$$V_a=\frac{bh}{2}\sigma_a\tan\beta \tag{10}$$

式中:σ_a为拱机构中混凝土总压应力.

根据文献[28]得σ_a和$\tan\beta$:

$$\sigma_a=(1.2-0.4\lambda)\nu f_c+2nf_c \tag{11}$$

$$\tan\beta=\frac{1}{3.6\lambda} \tag{12}$$

式中:$n=N/f_cbh$为轴压比;$\lambda=L/2h_0$为RC柱的剪跨比;L为柱高.为简化计算取$h_0=0.9h$.

3.3　计算值与试验值对比

TR-HDC加固柱抗剪承载力为上述桁架机构和拱机构抗剪承载力之和,计算公式为:

$$V=V_t+V_a \tag{13}$$

上述计算中,去掉桁架机构中TR-HDC面层作用即可用于计算未加固RC柱抗剪承载力.

为验证计算模型的准确性,采用本模型对文

献[30]的抗剪承载力进行计算,计算值V_c与试验值V_e比值见表9. 由于剪跨比为1.5试件桁架作用小,而纤维织物抗剪作用主要在桁架机构中发挥,从而碳纤维织物利用率偏低,所以计算结果相对偏差较大. 但总体来说,与试验值相比本文按式(13)计算的抗剪承载力结果较为准确,可为工程设计提供依据.

表9 计算值与试验值的比较

Tab.9 Comparison of theoretical and experimental results

试件编号	V_c/kN	V_e/kN	V_c/V_e
Z-1.5	206.6	181.4	1.14
Z-1.5-2T	282.5	254.6	1.11
Z-1.5-3T	295.4	260.5	1.13
Z-2	164.6	170.2	0.97
Z-2-2T	240.5	258.4	0.93
Z-2-3T	253.4	263.1	0.96
U-30[30]	411.4	419	0.98
UCT-30[30]	408.5	466	0.88
UGT-30[30]	425.3	461	0.92
U-45[30]	451.9	490	0.92
UCT-45[30]	449.0	538	0.83
UGT-45[30]	465.8	512	0.91

4 结 论

1) 采用TR-HDC加固RC柱,试件的破坏程度减轻,滞回环面积增大,峰值荷载后承载力退化减慢. 加固后,RC柱的抗剪承载力可大幅提高,柱的耗能能力得到明显改善. 加固柱具有更好的抗震和滞回性能.

2) TR-HDC面层对核心混凝土形成约束且与原有混凝土有良好的黏结性能,能有效抑制斜裂缝的发展,推迟主裂缝形成,使斜裂缝更加细密,有效改善构件延性的同时,也改善了构件的抗剪性能.

3) 当加固层中有2层碳纤维织物时,增加纤维织物的层数对构件的抗剪承载力提高幅度较小,但可大幅增强柱的耗能和变形能力.

4) 随着剪跨比的增大,试件的破坏程度减轻,增加纤维织物层数,试件变形能力提升幅度增大,较大的剪跨比更有利于提高加固效率,发挥TR-HDC材料的高抗拉强度和高耐损伤能力.

5) 本文基于桁架-拱模型在桁架模型中考虑TR-HDC面层的抗剪贡献,建立了TR-HDC加固柱抗剪承载力的计算公式.

参考文献

[1] FÜRST R, VLACH T, POKORNÝ M, et al. Study of behavior of textile-reinforced concrete with epoxy resin matrix in fire [J]. Fire Technology, 2022, 58(1): 53-74.

[2] BRÜCKNER A, ORTLEPP R, CURBACH M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear [J]. Materials and Structures, 2006, 39(8): 741-748.

[3] DONNINI J, CORINALDESI V, NANNI A. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 88: 220-228.

[4] 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(增刊2): 238-242.
XIAO B H, ZHI Z D, XUN Y. Study on axial bearing capacity of square concrete columns strengthened with textile reinforced concrete [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(Sup.2): 238-242. (in Chinese)

[5] 尹世平, 李耀, 杨扬, 等. 纤维编织网增强混凝土加固RC柱抗震性能的影响因素[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017(5): 904-913.
YIN S P, LI Y, YANG Y, et al. Influencing factors of seismic performance of RC columns strengthened with textile reinforced concrete [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017(5): 904-913. (in Chinese)

[6] BOURNAS D A, TRIANTAFILLOU T C, ZYGOURIS K, et al. Textile-reinforced mortar versus FRP jacketing in seismic retrofitting of RC columns with continuous or lap-spliced deformed bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(5): 360-371.

[7] ORTLEPP R, LORENZ A, CURBACH M. Column strengthening with TRC: influences of the column geometry onto the confinement effect [J]. Advances Materials Science and Engineering, 2010, 2009: 1-5.

[8] 沈玲华, 王激扬, 徐世烺. 掺入短切纤维的纤维编织网增强混凝土薄板弯曲力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 98-107.
SHEN L H, WANG J Y, XU S L. Experimental study on bending mechanical behavior of textile reinforced concrete thin-plates with short dispersed fibers [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 98-107. (in Chinese)

[9] BARHUM R, MECHTCHERINE V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 92: 56-71.

[10] 朱忠锋, 王文炜. FRP编织网/ECC复合加固钢筋混凝土圆柱力学性能的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 1082-1087.
ZHU Z F, WANG W W. Experimental study on mechanical behaviour of circular reinforced concrete columns strengthened with FRP textile and ECC [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 1082-1087. (in Chinese)

[11] ORTLEPP R. Increased efficiency of column strengthening with TRC by addition of short fibers in the fine-grained concrete matrix

[C]//Conference: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2015: 29-36.

[12] 侯利军, 徐冉, 张秀芳, 等. 纤维网-超高韧性水泥基复合材料加固钢筋混凝土柱抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(12): 59-69.
HOU L J, XU R, ZHANG X F, et al. Seismic behavior of reinforced concrete columns strengthened by textile-UHTCC[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(12): 59-69. (in Chinese)

[13] 邓明科, 张伟, 李宁. 高延性混凝土加固砌块砌体墙抗震性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(9): 85-93.
DENG M K, ZHANG W, LI N. Study on seismic behavior of concrete block masonry walls strengthened with high ductile concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(9): 85-93. (in Chinese)

[14] 邓明科, 张阳玺, 熊鑫. 剪切-黏结破坏高延性混凝土短柱拟静力试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 33-40.
DENG M K, ZHANG Y X, XIONG X. Pseudo static tests of high ductile concrete short columns failed in shear-bond[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(3): 33-40. (in Chinese)

[15] 董志芳, 邓明科, 张聪. 纤维织物增强高延性混凝土单轴拉伸性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(10): 13-25.
DONG Z F, DENG M K, ZHANG C. Experimental investigation on uniaxial tension behavior of textile-reinforced highly ductile concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10): 13-25. (in Chinese)

[16] 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 Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)

[17] 高延性混凝土应用技术规程: DBJ 61/T 112—2016 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2016.
Technical specification for application of high ductile concrete: DBJ 61/T 112—2016 [S]. Beijing: China Building Material Press, 2016. (in Chinese)

[18] 邓明科, 秦萌, 梁兴文. 高延性纤维混凝土抗压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 120-126.
DENG M K, QIN M, LIANG X W. Experimental study of compressive behavior of engineered cementitious composities[J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 120-126. (in Chinese)

[19] 邓明科, 刘海勃, 秦萌, 等. 高延性纤维混凝土抗压韧性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(5): 660-665.
DENG M K, LIU H B, QIN M, et al. Experimental research on compressive toughness of the high ductile fiber reinforced concrete [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(5): 660-665. (in Chinese)

[20] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101—1996[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Specification of test methods for earthquake resistant building: JGJ 101—1996 [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2015. (in Chinese)

[21] WATSON S, ZAHN F A, PARK R. Confined reinforcement for concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(6): 1798-1824.

[22] GHEE A B, PRIESTLEY M J N, PAULAY T. Seismic shear strength of circular reinforced concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(1): 45-59.

[23] 荀勇, 尹红宇, 肖保辉. 织物增强混凝土加固RC梁的斜截面抗剪承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 58-64.
XUN Y, YIN H Y, XIAO B H. Experimental study on shear capacity of RC beams strengthened with textile reinforced concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 58-64. (in Chinese)

[24] 邓明科, 宋诗飞, 张敏, 等. 高延性混凝土加固钢筋混凝土梁受剪性能试验研究及承载力计算[J]. 工程力学, 2021, 38(9): 36-44.
DENG M K, SONG S F, ZHANG M, et al. Experimental study on shear behavior and capacity prediction of RC beams strengthened with high ductile concrete[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9): 36-44. (in Chinese)

[25] 郭莉英, 邓明科, 马钰人, 等. 纤维网格高延性混凝土加固RC柱抗剪性能试验研究[J]. 工程力学, 2022, 39(6): 43-54.
GUO L Y, DENG M K, MA Y R, et al. Experimental investigation on the shear behavior of RC columns strengthened with CFRP grid reinforced high ductile concrete [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(6): 43-54. (in Chinese)

[26] 邓明科, 张阳玺, 胡红波. 高延性混凝土加固钢筋混凝土柱抗剪承载力计算[J]. 工程力学, 2018, 35(3): 159-166.
DENG M K, ZHANG Y X, HU H B. Experimental study and calculation of the shear capacity of RC columns strengthened with high ductile concrete[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 159-166. (in Chinese)

[27] HEGGER J, VOSS S. Textile reinforced concrete under biaxial loading [C]//6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes. RILEM Publications SARL, 2004: 1463-1472.

[28] 赵树红, 叶列平. 基于桁架-拱模型理论对碳纤维布加固混凝土柱受剪承载力的分析[J]. 工程力学, 2001, 18(6): 134-140.
ZHAO S H, YE L P. Shear strength analysis of concrete column retrofitted with CFRP sheet based on strut-arch model [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(6): 134-140. (in Chinese)

[29] 史庆轩, 王朋, 王秋维. 桁架-拱模型用于钢筋混凝土梁的受剪承载力计算分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(4): 7-12.
SHI Q X, WANG P, WANG Q W. Shear capacity calculation analysis of reinforced concrete beams based on truss-arch model [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(4): 7-12. (in Chinese)

[30] HONG S G, LEE J H, CHOI Y, et al. Seismic strengthening of concrete columns by ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete jacketing[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(10): 04021157.