

文章编号: 1000-4750(2016)10-0208-10

高延性混凝土无腹筋梁受剪性能试验研究

邓明科, 代 洁, 梁兴文, 张明玥

(西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

摘 要: 提出采用高延性混凝土改善梁的抗剪性能和变形能力, 设计了8个高延性混凝土梁和3个作为对比试件的混凝土梁, 并通过静力试验研究不同剪跨比和配筋率高延性混凝土无腹筋梁的破坏形态和破坏机理。高延性混凝土无腹筋梁的剪切破坏形态有挤压破坏、剪压破坏、弯剪破坏和剪拉破坏。试验结果表明: 高延性混凝土梁的剪切破坏均表现出一定的延性, 与普通混凝土梁的脆性剪切破坏具有明显不同; 高延性混凝土梁的剪切裂缝开展缓慢, 说明高延性混凝土良好的拉伸应变硬化和多裂缝开展特性能够有效控制剪切裂缝的发展, 防止混凝土压碎剥落, 显著提高梁的抗剪性能和耐损伤能力; 相比普通混凝土无腹筋梁, 高延性混凝土无腹筋梁的受剪承载力和变形能力均有明显提高, 表明采用高延性混凝土可以显著改善无腹筋梁的脆性剪切破坏模式; 剪跨比和纵筋配筋率对高延性混凝土梁的剪切破坏形态和承载力影响较大, 其受剪承载力随剪跨比的增大而降低, 随配筋率的增大而有所提高。

关键词: 高延性混凝土; 无腹筋梁; 抗剪性能; 剪跨比; 纵筋配筋率

中图分类号: TU317 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.03.0209

EXPERIMENTAL STUDY ON THE SHEAR BEHAVIOR OF HIGH DUCTILE FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS WITHOUT STIRRUPS

DENG Ming-ke , DAI Jie , LIANG Xing-wen , ZHANG Ming-yue

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to improve the shear behavior and deformability of the beams without stirrups, 8 high ductile fiber reinforced concrete (HDC) beams were designed, and 3 reinforced concrete (RC) beams were designed for comparison. The failure mechanism and mode of beams on different shear span ratios and longitudinal reinforcement ratios were studied by static loading tests. The shear failure modes of HDC beams without stirrups are extrusion failure, shear-compression failure, bending-shear failure, and shear-tension failure. The research shows that: all of HDC beams have shown ductility to some extent, which were clearly different from the shear failure mode of RC beams without stirrups; the tensile strain hardening and multiple cracking of HDC can effectively control the development of shear cracks of HDC beams during the failure process, prevent from the crushing and spalling of concrete, and significantly improve the shear capacity and damage resistance ability of HDC beams; comparing with RC beams, the shear capacity and deformability of HDC beams has been enhanced notably, which suggests that the brittle shear failure mode of beams without stirrups can be obviously improved; both the shear span ratio and longitudinal reinforcement ratio have great influences on the failure form and bearing capacity of HDC beams without stirrups. And the shear bearing capacity will be reduced when the shear span ratio is increased, and will be increased with the increase of longitudinal reinforcement ratio.

收稿日期: 2015-03-20; 修改日期: 2015-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578445); 西安市科技计划项目(CX13135-3)

通讯作者: 邓明科(1979—), 男, 四川南充人, 教授, 工学博士, 从事高性能土木工程材料与新型结构研究(E-mail: dengmingke@126.com).

作者简介: 代 洁(1988—), 女, 河南洛阳人, 博士生, 从事高性能土木工程材料研究(E-mail: daijie880828@126.com);

梁兴文(1952—), 男, 陕西华县人, 教授, 工学硕士, 从事建筑结构及抗震研究(E-mail: liangxingwen2000@163.com);

张明玥(1989—), 女, 天津人, 硕士生, 从事高性能土木工程材料研究(E-mail: zhangmingyue@163.com).

Key words: high ductile fiber reinforced concrete; beams without stirrups; shear behavior; shear span ratio; longitudinal reinforcement ratio

钢筋混凝土梁的剪切破坏具有明显的脆性,在持续地震作用下常导致结构构件关键部位破坏加重,给结构震后修复带来很大困难。此外,由于梁在结构设计中属于耗能构件,其变形较大且容易开裂,受构件正常使用极限状态控制,高强混凝土在梁式构件中的使用受到较大限制。因此,改善高强混凝土梁的变形能力和脆性剪切破坏模式对提高构件的承载力、延性和控制结构的地震损伤程度具有重要意义。

高延性水泥基复合材料^[1-4](Engineered cementitious composite,简称 ECC)是一种新型的复合建筑材料,具有较强的能量吸收能力和耐损伤能力,能显著改善混凝土材料的韧性及抗裂能力,提高构件的抗剪性能^[5-9]。Ashour 等^[10]和 Vool 等^[11]对钢纤维混凝土无腹筋梁的抗剪性能进行试验研究,表明钢纤维的掺入能够提高梁的刚度和延性。Kanda 等^[12]研究表明循环荷载作用下的 ECC 短梁具有良好的抗剪性能。邓明科等^[13]对塑性铰区采用高延性纤维混凝土剪力墙的抗震性能进行试验研究,结果表明采用高延性纤维混凝土可防止塑性铰区发生剪切破坏,减轻剪力墙的地震损伤程度。梁兴文等^[14]通过对小跨高比纤维增强混凝土(FRC)连梁的抗震性能进行试验研究,表明 FRC 可提高连梁的承载力、延性和耗能能力。以上研究表明,ECC 用于以受剪为主的构件时,可改善其脆性剪切破坏模式,增大其抗剪强度、变形能力和耐损伤性能。

为便于 ECC 在混凝土结构中的应用,本课题组将其称为高延性纤维混凝土(High ductile fiber reinforced concrete,简称 HDC),并对其力学性能进行了系统研究^[15-17]。为了改善钢筋混凝土梁的抗剪性能和变形能力,尤其是高强混凝土梁的剪切脆性破坏模式,本文作者提出采用 HDC 良好的受拉应变硬化特性,改善梁的抗剪性能和耐损伤能力,以减小结构的震后修复费用。本文通过静力试验研究高延性混凝土无腹筋梁的破坏过程及破坏形态,探讨其破坏机理、受剪承载力和变形能力。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共制作了8个HDC梁和3个RC梁作为对比

试件。梁截面尺寸均为120 mm×180 mm,剪跨比 $\lambda=0.75$ 、1.00、1.50、2.00、2.50和3.00,纵筋采用HRB500级钢筋,保护层厚度为20 mm,纵筋配筋率为1.26%、1.71%、2.23%,各试件设计参数见表1。

表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	剪跨比 λ	$b \times h/\text{mm}$	跨度 l/mm	纵筋/mm	配筋率 $\rho(\%)$
E-75	0.75	120×180	450	2 Φ 14	1.71
C-1	1.00	120×180	600	2 Φ 14	1.71
E-1	1.00	120×180	600	2 Φ 14	1.71
E-1c	1.00	120×180	600	2 Φ 12	1.26
E-15	1.50	120×180	900	2 Φ 14	1.71
C-2	2.00	120×180	1200	2 Φ 16	2.23
E-2	2.00	120×180	1200	2 Φ 16	2.23
E-2c	2.00	120×180	1200	2 Φ 12	1.26
E-25	2.50	120×180	1500	2 Φ 16	2.23
C-3	3.00	120×180	1800	2 Φ 16	2.23
E-3	3.00	120×180	1800	2 Φ 16	2.23

1.2 材料力学性能

为满足较高的强度和延性,试验采用的 HDC 由水泥、粉煤灰、砂、矿物掺合料、PVA 纤维和水按一定比例配制而成。其中,砂为天然河砂,水泥为 P.O.42.5R 普通硅酸盐水泥,粉煤灰为 I 级,PVA 纤维的体积掺量为 2%,纤维各项力学性能指标见表 2。试验测得钢筋、混凝土和 HDC 的强度见表 3,表 3 中 f_{cu} 为立方体抗压强度平均值,混凝土抗拉强度按 $f_t = 0.395 f_{cu}^{0.55}$ 计算,HDC 抗拉强度 f_t 由直接拉伸试验测得。

表2 PVA 纤维各项性能指标

Table 2 Performance indicators of PVA

纤维名称	长度/mm	直径/ μm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/ (%)	密度/ (g/cm^3)
PVA	12	39	1600	40	7	1.3

表3 钢筋和试块的测试强度

Table 3 Strength of reinforcement and test cube

钢筋型号	f_y/MPa	f_u/MPa	材料	f_{cu}/MPa	f_t/MPa
Φ 12	523	665	混凝土	75.77	4.27
Φ 14	483	647			
Φ 16	505	658	HDC	70.55	5.83

本试验采用哑铃型试件,通过电液伺服万能试验机按位移控制加载(速率为 0.1 mm/min),测试了 HDC 的单轴拉伸曲线,如图 1 所示。可见,HDC

的极限拉应变可达到 1.0% 左右, 具有明显的应变硬化效应。

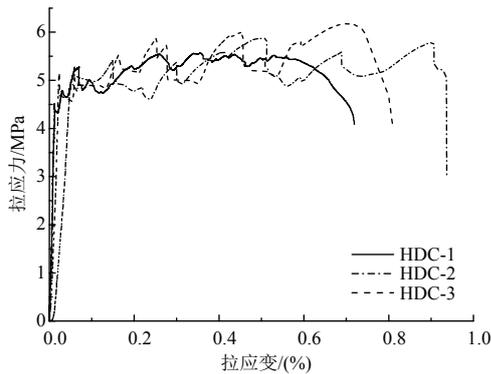


图1 HDC单轴拉伸试验

Fig.1 Stress-strain curves of uniaxial tensile tests

1.3 试验装置及测试内容

本试验采用 1000 kN 万能试验机进行加载^[18], 加载装置如图 2。为避免试件局部压碎, 在加载点及支座处各放置一块钢垫板。在梁跨中底部布置一个位移计, 测量试件的挠度; 在纵筋上贴电阻应变片, 测量纵筋的应变; 并在剪弯区段斜向布置混凝土应变片, 以测量混凝土的应变, 如图 2 所示。试验采用位移控制加载, 加载速率为 0.2 mm/min。

试验过程中主要观测各试件的裂缝开展情况、破坏过程及破坏形态; 记录各无腹筋梁的开裂荷载、屈服荷载和位移、峰值荷载和位移及各无腹筋梁各阶段的混凝土及钢筋应变片数据。

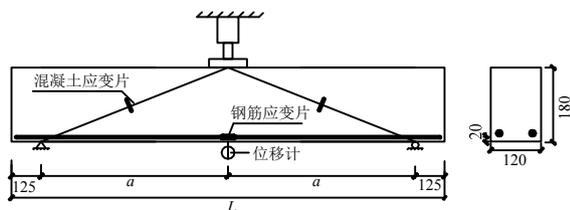


图2 加载与测试装置

Fig.2 Loading and testing apparatus

2 试验结果及分析

2.1 试验过程及破坏形态

2.1.1 RC 试件的试验过程及破坏形态

根据剪跨比不同, 本次试验中 3 个 RC 对比试件的破坏形态分别为斜压破坏、剪压破坏和斜拉破坏。

1) 斜压破坏

试件 C-1 加载至 103 kN 时, 加载点两侧腹部均出现腹剪斜裂缝; 加载至 274 kN 时, 纵筋开始屈服; 加载至 328 kN 时, 梁右侧腹部被多条斜裂

缝分割成若干个斜向受压柱体; 随后斜压柱体被压碎, 斜裂缝之间混凝土剥落, 试件承载力突然降低, 发生带有明显脆性的斜压破坏。

2) 剪压破坏

试件 C-2 加载至 87 kN 时, 梁腹部出现第一条斜裂缝; 加载至 184 kN 时, 纵筋开始屈服; 加载至 202 kN 时, 梁腹部形成主斜裂缝, 最终试件因剪压区混凝土压碎而破坏。

3) 斜拉破坏

试件 C-3 加载至 38 kN 时, 跨中出现两条竖向裂缝; 加载至 73 kN 时, 梁腹部出现一条斜裂缝, 并立即向加载点处延伸形成主斜裂缝, 梁因斜向被拉裂成两部分而突然破坏。

2.1.2 HDC 梁的试验过程及破坏形态

根据剪跨比、纵筋配筋率的不同, HDC 梁的破坏形态有挤压破坏、剪压破坏、弯剪破坏、剪拉破坏和弯曲破坏。

1) 挤压破坏

试件 E-75 和 E-1 均发生挤压破坏。

试件 E-75 加载至 128 kN 时, 梁左侧出现一条腹剪斜裂缝; 加载至 413 kN 时, 梁左侧形成主斜裂缝, 并在附近出现大量细密裂缝, 试件刚度降低; 加载至 466 kN 时, 纵筋开始屈服; 加载至 580 kN 时, 主斜裂缝两侧 HDC 发生明显剪切错动, 试件承载力开始下降。试件破坏过程中, 斜裂缝延伸和发展缓慢, 梁支座和加载点处 HDC 产生了较大的挤压变形, 试件发生具有一定延性的斜向挤压破坏。

试件 E-1 的剪跨比增大, 构件的裂缝出现和分布与试件 E-75 相似, 不再赘述。

2) 剪压破坏

试件 E-2 和 E-25 均发生剪压破坏。

试件 E-2 加载至 95 kN 时, 梁左侧腹部出现第一条斜裂缝; 加载至 198 kN 时, 与斜裂缝相交的纵筋开始屈服, 加载点附近出现多条细密裂缝; 随后试件进入屈服, 荷载增长缓慢, 梁左侧斜裂缝贯通形成主斜裂缝; 继续加载, 主斜裂缝逐渐变宽, 剪压区斜裂缝增多并产生较大的挤压变形, 试件承载力开始下降。试件破坏过程中, 变形不断增大, 主斜裂缝变宽, 但始终具有较高的剩余承载力, 最终发生具有一定延性的剪压破坏。

试件 E-25 的剪跨比增大, 其破坏过程和裂缝分布与试件 E-2 相似, 不再赘述。

3) 弯剪破坏

试件 E-1c 和 E-15 均发生弯剪破坏。

试件 E-1c 加载至 90 kN 时, 梁左侧腹部出现一条斜裂缝; 加载至 101 kN 时, 梁底跨中出现第一条竖向裂缝; 加载至 256 kN 时, 纵筋开始屈服, 跨中竖向裂缝增多并形成主裂缝; 随后试件进入屈服, 梁左侧斜裂缝贯通形成主斜裂缝, 梁底出现多条细密竖向裂缝, 跨中竖向裂缝变宽, 试件承载力开始下降。试件破坏时, 剪压区 HDC 产生较大的挤压变形; 加载点附近斜裂缝逐渐变宽; 最后剪压区 HDC 达到极限压应变, 试件发生弯剪破坏。

试件 E-15 的弯曲主裂缝形成后, 纵筋外侧 HDC 保护层出现纵向劈裂裂缝; 随后剪压区细密斜裂缝增多, 弯曲裂缝斜向发展形成弯剪斜裂缝, 最后试件发生弯剪破坏。

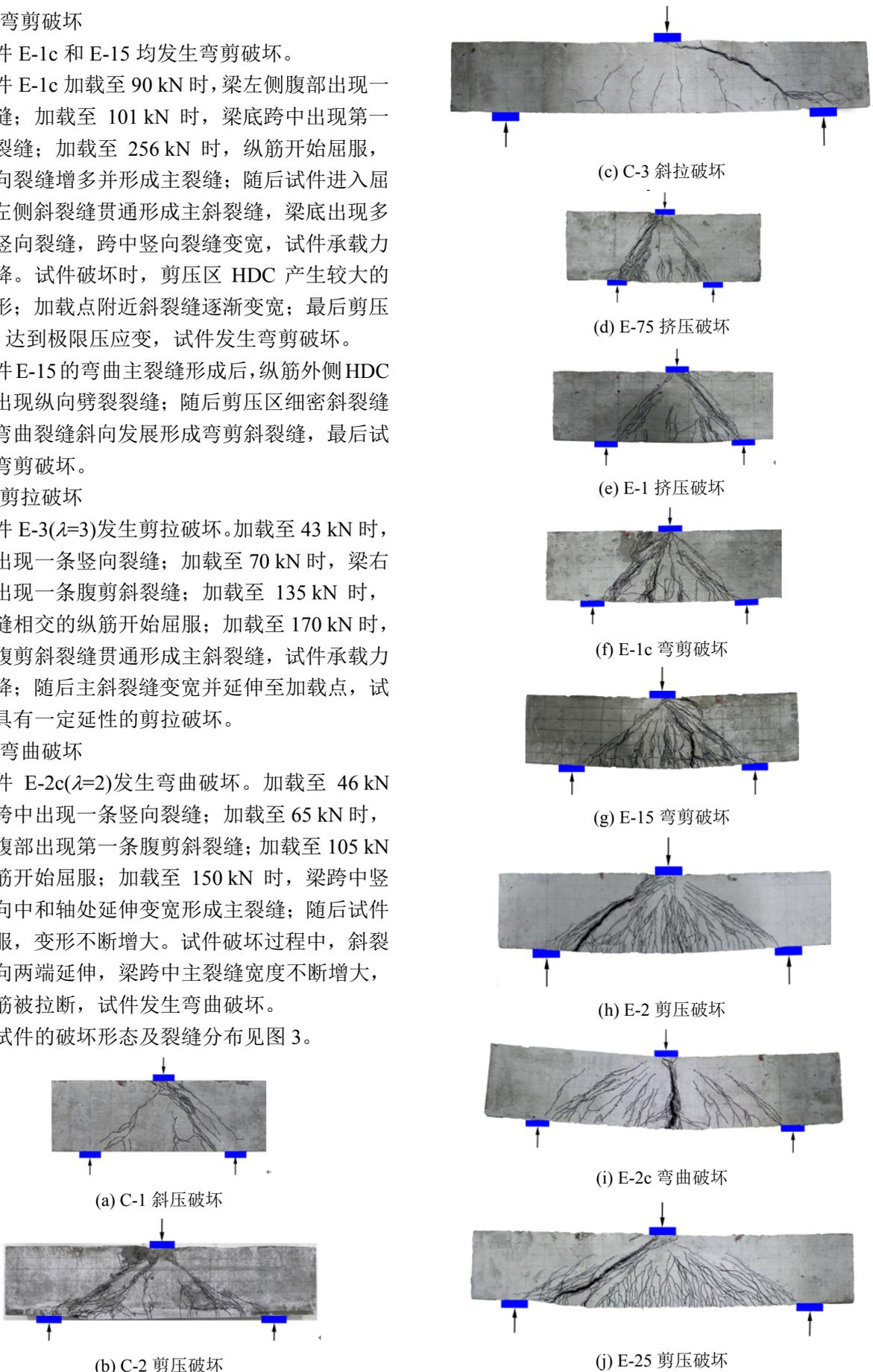
4) 剪拉破坏

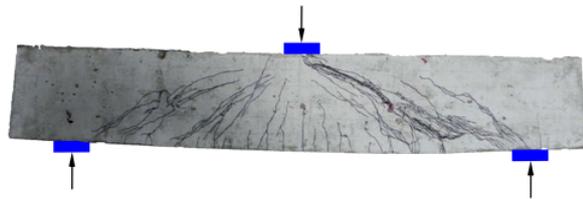
试件 E-3($\lambda=3$)发生剪拉破坏。加载至 43 kN 时, 梁跨中出现一条竖向裂缝; 加载至 70 kN 时, 梁右侧腹部出现一条腹剪斜裂缝; 加载至 135 kN 时, 与斜裂缝相交的纵筋开始屈服; 加载至 170 kN 时, 梁右侧腹剪斜裂缝贯通形成主斜裂缝, 试件承载力开始下降; 随后主斜裂缝变宽并延伸至加载点, 试件发生具有一定延性的剪拉破坏。

5) 弯曲破坏

试件 E-2c($\lambda=2$)发生弯曲破坏。加载至 46 kN 时, 梁跨中出现一条竖向裂缝; 加载至 65 kN 时, 梁左侧腹部出现第一条腹剪斜裂缝; 加载至 105 kN 时, 纵筋开始屈服; 加载至 150 kN 时, 梁跨中竖向裂缝向中和轴处延伸变宽形成主裂缝; 随后试件开始屈服, 变形不断增大。试件破坏过程中, 斜裂缝逐渐向两端延伸, 梁跨中主裂缝宽度不断增大, 最后纵筋被拉断, 试件发生弯曲破坏。

各试件的破坏形态及裂缝分布见图 3。





(k) E-3 剪拉破坏

图3 试件破坏形态

Fig.3 Failure patterns of specimens

2.2 破坏形态分析

根据以上3根RC梁和8根HDC梁的试验结果,对其破坏形态进行比较和分析:

1) RC梁斜压破坏与HDC梁挤压破坏

剪跨比较小时($\lambda=1$),RC梁发生斜压破坏,其受剪承载力主要取决于混凝土斜压柱体的受压承载力,构件承载力较高但变形很小,破坏突然。

剪跨比较小时($\lambda=1$ 和 $\lambda=0.75$),HDC梁发生挤压破坏。与RC梁的斜压破坏相比,具有以下不同之处:

a) 梁腹部斜裂缝出现以后发展缓慢,表现出明显的多裂缝开展现象;当斜压柱体的横向拉伸变形超过HDC的极限拉应变时,梁腹部出现主斜裂缝;但在剪压区HDC达到极限压应变以前,梁始终具有良好的塑性变形能力。

b) HDC良好的拉伸应变硬化效应和纤维桥联作用,使加载点和支座之间的斜向受压柱体始终保持良好的完整性。

c) HDC梁发生挤压破坏时具有较好的延性,主斜裂缝两侧产生较大的剪切错动,剪压区产生较大的挤压流动变形,与RC梁发生斜压脆性破坏具有明显区别。

d) HDC梁发生挤压破坏的受剪承载力主要取决于HDC局部受压和挤压流动破坏的强度,其剪切变形能力主要取决于HDC的极限压应变和极限拉应变。由于HDC局部受压和挤压流动破坏的强度和变形均有较大提高,所以此类梁的受剪承载力很高、变形较大,破坏时斜裂缝宽度较大。

2) RC梁剪压破坏与HDC梁剪压破坏

当剪跨比适当($\lambda=2$),RC梁发生剪压破坏,其受剪承载力主要取决于剪压区混凝土的剪压复合受力强度,构件受剪承载力较低,变形稍大,但破坏具有明显的脆性。

当剪跨比适当($\lambda=2$ 和 $\lambda=2.5$),HDC梁发生延性剪压破坏。与RC梁相比,其破坏形态具有以下不

同之处:

a) 梁剪弯段斜裂缝出现以后发展缓慢,表现出明显的多裂缝开展现象;当剪弯段主拉应变超过HDC的极限拉应变时,梁腹部形成主斜裂缝;此后,试件承载力还能继续增长,具有较好的塑性变形能力。

b) HDC良好的拉伸应变硬化效应,使剪弯段具有良好的变形能力,并沿主拉应力方向形成斜向受拉应力场。

c) HDC梁破坏时,主斜裂缝两侧HDC产生明显剪切错动,剪压区HDC产生较大的挤压变形,最终因剪压区HDC达到极限压应变而导致试件破坏。

d) HDC梁发生剪压破坏的受剪承载力主要取决于剪压区HDC的剪压复合受力强度;其主斜裂缝形成以前的变形能力主要取决于HDC的极限拉应变;剪压破坏时的变形能力主要取决于HDC的极限压应变。

3) RC梁斜拉破坏与HDC梁剪拉破坏

剪跨比较大时($\lambda=3$),RC梁发生斜拉破坏,其受剪承载力主要取决于混凝土的抗拉强度,构件受剪承载力低且变形很小,破坏很突然。

剪跨比较大时($\lambda=3$),HDC梁发生剪拉破坏。与RC梁的斜拉破坏相比,具有以下不同之处:

a) 梁剪弯区出现较多竖向裂缝和斜裂缝,表现出明显的多裂缝开展。直到剪拉区HDC达到极限拉应变时,梁腹部形成临界斜裂缝而发生突然破坏。

b) HDC良好的拉伸应变硬化效应和纤维桥联作用,使剪拉区HDC开裂以后还能继续承担拉应力,且在剪弯段形成斜向受拉应力场,显著提高了构件的承载力和斜裂缝出现后的变形能力。

c) HDC梁发生剪拉破坏的受剪承载力主要取决于HDC的抗拉强度和极限拉应变,其剪切变形能力主要取决于HDC的极限拉应变。

4) HDC梁的弯曲破坏

当纵筋数量较少时,HDC梁发生弯曲破坏。其破坏特征为:

a) 由于HDC良好的拉伸性能和纤维桥联作用,梁受拉区表现出明显的多裂缝开展。当受拉区HDC达到极限拉应变时,梁跨中形成主裂缝。

b) 试件破坏过程中,变形不断增大,主裂缝不断向上延伸,最后受拉纵筋被拉断,表明受压区

HDC 良好的变形能力, 使 HDC 梁发生弯曲破坏时具有更好的延性。

c) HDC 梁发生弯曲破坏的承载力主要取决于纵筋的数量和 HDC 的抗压强度, 其变形能力还与 HDC 的极限压应变有关。

5) HDC 梁的弯剪破坏

由于纵筋数量较少, 本文 2 根剪跨比较小($\lambda=1$ 和 $\lambda=1.5$)的 HDC 梁均发生弯剪破坏。其破坏特征为:

a) 梁的受拉区和剪弯段均呈现出明显的多裂缝开展现象。试验过程中, 纵筋首先屈服, 竖向裂缝逐渐变宽形成弯曲主裂缝; 当剪拉区 HDC 达到极限拉应变时, 梁腹部形成主斜裂缝。

b) 试件破坏时, 变形较大, 剪压区 HDC 产生较大的挤压变形, 最终因剪压区 HDC 达到极限压应变而破坏。

c) HDC 梁发生弯剪破坏时, 试件屈服取决于其抗弯承载力, 出现主斜裂缝取决于 HDC 的极限拉应变, 最终破坏取决于剪压区混凝土的复合受力强度; 其弯曲变形能力主要取决于纵筋配筋率和 HDC 的极限拉应变; 主斜裂缝形成以后, 发生剪压破坏的变形能力取决于剪压区 HDC 的极限压应变。

综上所述, 由于 HDC 的极限拉应变和极限压应变均大于混凝土, HDC 梁发生斜截面破坏时的承载力和变形能力均远高于 RC 梁。此外, 试验中 HDC 的抗压强度略低于混凝土, 但 HDC 试件破坏以前纵筋均达到屈服, 且承载力较 RC 试件有显著提高。试验结果表明, HDC 良好的拉伸变形能力, 不仅能

够有效控制剪切斜裂缝的发展, 防止保护层的压碎剥落, 还可以显著提高试件的受剪承载力和耐损伤能力, 实现延性剪切破坏模式。

2.3 荷载-挠度曲线

各试件特征点以及位移延性系数比较见表 4。根据试验记录的荷载和跨中挠度绘制出 11 根梁的荷载-挠度曲线, 如图 4 所示。以试件表面出现明显裂缝确定其开裂荷载 F_{cr} 及相应的位移 Δ_{cr} ; 以荷载-挠度曲线上最大荷载点对应的荷载和位移确定峰值荷载 F_m 与峰值位移 Δ_m ; 以荷载-挠度曲线上承载力下降到 85%峰值荷载对应的点确定极限位移 Δ_u , 并以极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 之比来确定试件的位移延性系数 μ ; 采用“通用弯矩屈服法”确定屈服位移 Δ_y 。由表 4 和图 4 对比分析可得:

1) 试件 C-1、C-2 和 C-3 分别发生斜压、剪压和斜拉破坏 3 种典型的破坏形态, 其荷载-挠度曲线形状陡峭, 均为脆性破坏, 其中斜拉破坏最为突出, 斜压破坏次之, 剪压破坏稍好。

2) 与 RC 梁相比, 发生剪切破坏的 HDC 梁, 荷载-挠度曲线斜率变化缓慢, 承载力下降缓慢, 呈现出明显的渐变非线性特性, 主要是由于 HDC 良好的受拉应变硬化特性和纤维桥联作用, 使构件出现多条斜裂缝以后还能保持较高的刚度和抗剪承载力。

3) 发生挤压破坏的 HDC 梁, 达到 75%峰值荷载以前, 荷载-挠度曲线近似为直线; 达到峰值荷载以后, 变形增长较快, 但曲线下降缓慢, 表现出一定的延性。

表 4 试验结果

Table 4 Test results

试件 编号	λ	剪切开裂			屈服			临界斜裂缝			峰值			Δ_u/mm	Δ_u/l	μ	破坏模式
		F_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	Δ_{cr}/l	F_y/kN	Δ_y/mm	Δ_y/l	F_k/kN	Δ_k/mm	Δ_k/l	F_m/kN	Δ_m/mm	Δ_m/l				
E-75	0.74	128.65	0.23	1/978	512.46	1.40	1/161	503.24	1.32	1/171	586.30	2.16	1/104	3.60	1/63	2.57	挤压破坏
C-1	0.98	102.95	0.46	1/652	321.73	1.27	1/227	328.62	1.29	1/224	346.35	1.43	1/210	1.51	1/199	1.19	斜压破坏
E-1	0.98	115.32	0.33	1/909	425.76	1.24	1/242	442.41	1.33	1/226	482.65	1.66	1/181	2.50	1/120	2.02	挤压破坏
E-1c	0.97	90.17	0.40	1/750	385.71	1.51	1/199	383.37	4.62	1/65	403.10	1.96	1/153	5.56	1/54	3.68	弯剪破坏
E-15	1.47	103.01	0.97	1/2143	237.80	2.75	1/164	252.45	3.45	1/130	326.55	11.35	1/40	11.53	1/39	4.19	弯剪破坏
C-2	1.97	87.38	1.29	1/465	191.85	4.28	1/140	196.09	3.42	1/176	202.10	3.92	1/153	5.54	1/108	1.29	剪压破坏
E-2	1.97	95.45	1.01	1/594	229.87	2.90	1/207	255.39	5.12	1/117	276.85	8.32	1/72	8.92	1/67	3.08	剪压破坏
E-2c	1.95	65.71	0.97	1/619	148.80	2.41	1/249	—	—	—	192.7	14.51	1/41	18.69	1/32	7.76	弯曲破坏
E-25	2.47	80.05	1.46	1/758	193.75	4.57	1/164	200.53	5.21	1/144	209.85	8.2	1/92	8.58	1/87	1.88	剪压破坏
C-3	2.96	72.95	1.63	1/552	73.11	1.48	1/608	73.37	1.64	1/549	73.37	1.64	1/549	1.70	1/529	1.15	斜拉破坏
E-3	2.96	70.36	1.48	1/608	156.72	5.19	1/173	170.81	5.62	1/160	173.25	6.98	1/129	8.02	1/112	1.55	剪拉破坏

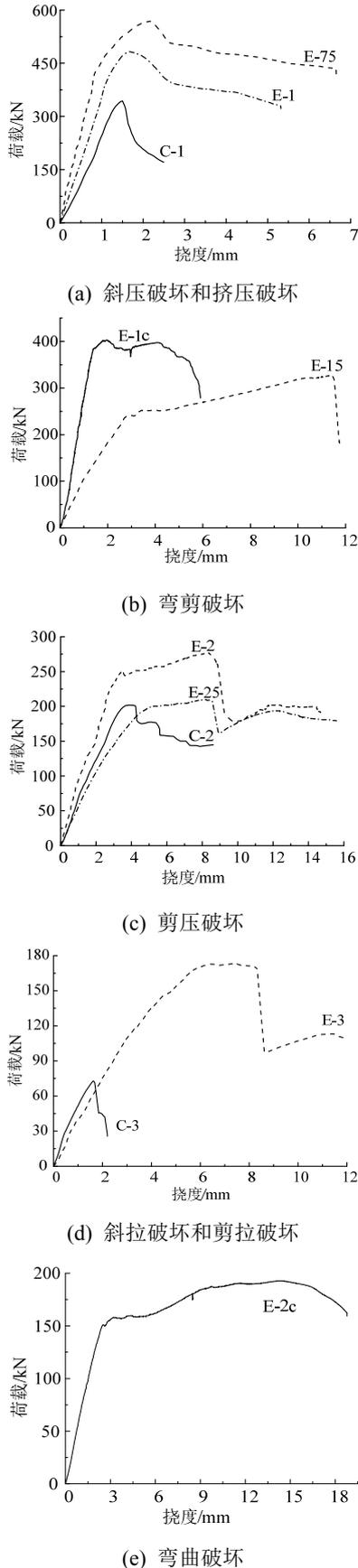


图4 荷载-跨中挠度曲线

Fig.4 Load-deflection curve

4) 发生剪压破坏的 HDC 梁, 与斜裂缝相交的纵筋达到屈服以后, 试件变形不断增大, 荷载-挠度曲线斜率减小, 达到峰值荷载时剪压区 HDC 产生了较大的挤压变形, 表现出较好的延性。

5) 发生剪拉破坏的 HDC 梁, 剪拉区 HDC 开裂以后, 荷载-挠度曲线斜率逐渐减小; 剪拉区 HDC 达到极限拉应变时, 曲线突然下降, 但试件破坏以前具有较大的变形能力。

6) 发生弯剪破坏的 HDC 梁, 纵筋屈服以后产生了较大的弯曲变形, 荷载-挠度曲线出现明显的转折点; 剪压区 HDC 达到极限压应变时, 曲线下降较快。

7) 发生弯曲破坏的 HDC 无腹筋梁, 试件屈服以后挠度增长较快, 直至试件破坏时, 荷载-挠度曲线下降缓慢, 试件变形较大。

2.4 变形能力分析

根据以上试验结果, 对各试件变形能力分析可得:

1) 试件 E-1 与试件 C-1 的剪跨比和配筋率均相同, 试件 E-1 达到峰值荷载和极限位移时的挠跨比分别提高 16% 和 65%, 延性系数提高 70%, 表明采用 HDC 可显著提高小跨高比梁的变形能力。另外, 试件 E-75 达到峰值荷载和极限位移时对应的挠跨比明显高于试件 E-1, 表明随着剪跨比减小, HDC 梁发生挤压破坏时的变形能力有所提高。

2) 试件 E-2 与试件 C-2 的剪跨比和配筋率均相同, 试件 E-2 达到峰值荷载和极限位移时的挠跨比分别为试件 C-2 的 2.13 倍和 2.15 倍, 表明采用 HDC 可显著提高梁发生剪压破坏时的变形能力。

3) 试件 E-3 与试件 C-3 的剪跨比和配筋率均相同, 试件 E-3 达到峰值荷载和极限位移时的挠跨比分别为试件 C-3 的 4.26 倍和 4.72 倍, 表明 HDC 梁发生剪拉破坏时的变形能力明显高于斜拉破坏。

4) 试件 E-1c、E-15 和 E-2c 达到极限位移时的挠跨比分别为 1/54、1/37 和 1/32, 表明 HDC 梁发生弯剪破坏和弯曲破坏时具有良好的变形能力。

5) 由于 HDC 良好的拉伸应变硬化和纤维桥联作用, 使剪拉区 HDC 开裂以后还能继续承担拉力, 有效抑制剪弯区裂缝的发展, 从而提高 HDC 梁出现临界裂缝以前的变形能力。另外, HDC 的极限压应变明显高于混凝土, 发生剪压破坏和弯剪破坏的 HDC 梁出现临界裂缝以后剪压区产生较大挤压变形, 导致其荷载-挠度曲线出现明显的屈服平台, 显

著提高了试件的变形能力。

6) 在剪跨比和配筋率相同的条件下, HDC 梁达到峰值荷载和极限位移时对应的挠跨比明显高于 RC 梁, 表明采用 HDC 能显著提高梁发生剪切破坏时的变形能力, 实现延性剪切破坏模式。

7) 试验结果表明, HDC 梁发生剪切破坏时的变形能力主要取决于其破坏形态, 试件剪跨比和配筋率的变化均可能导致其破坏形态发生改变, 弯剪破坏的变形能力最好, 挤压破坏和剪压破坏次之, 剪拉破坏时稍差。

8) HDC 梁发生弯剪破坏时的变形能力主要取决于纵筋配筋率、HDC 的极限拉应变与极限压应变; 发生挤压破坏和剪压破坏时的变形能力主要取决于 HDC 的极限拉应变与极限压应变; 发生剪拉破坏时的变形能力主要取决于 HDC 的极限拉应变。

2.5 承载力分析

根据3个RC和8个HDC无腹筋梁的试验结果, 由图4和表4对比分析可得:

1) 当剪跨比和配筋率相同时, 试件 E-1 发生挤压破坏时的承载力比试件 C-1 提高了 39%, 试件 E-2 发生剪压破坏时的承载力比试件 C-2 提高了 37%, 试件 E-3 发生剪拉破坏时的承载力为试件 C-3 的 2.36 倍, 表明采用 HDC 能够显著提高梁的抗剪承载力。试件发生剪拉破坏时, 承载力提高最明显。

2) 试验结果表明, HDC 梁的受剪承载力主要取决于其破坏形态。试件发生挤压破坏时承载力最高, 剪压破坏和弯剪破坏次之, 剪拉破坏再次之。

3) 剪跨比和配筋率对 HDC 梁的剪切破坏形态影响较大。当剪跨比较小且配筋率较大时, 容易发生挤压破坏; 当剪跨比较大时, 容易发生剪拉破坏; 当剪跨比和配筋率适当时, 可能发生剪压破坏或弯剪破坏。

4) 与 RC 梁类似, HDC 梁的抗剪承载力随着剪跨比增大而降低; 当剪跨比相同时, 纵筋配筋率增大, HDC 梁的抗剪承载力有所提高。

5) 试验结果表明, HDC 梁发生剪切破坏时, 临界斜裂缝形成以前的承载力和变形能力主要取决于 HDC 的抗拉强度和极限拉应变。

6) 与相同条件下的 RC 梁相比, 由于 HDC 的抗拉强度和极限拉应变均大于混凝土, 从而使发生剪切破坏的 HDC 梁的剪切开裂、屈服、极限荷载均有显著提高, 表明采用 HDC 能够显著提高梁发生剪切破坏的承载能力。

根据我国《混凝土结构设计规范》^[19], 集中荷载作用下无腹筋梁的受剪承载力计算公式为:

$$V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1} \beta_p f_t b h_0 \quad (1)$$

式中: λ 为剪跨比, 取为 a/h_0 , 当 $\lambda < 1.5$ 时取 1.5, 当 $\lambda > 3$ 时取 3; f_t 为混凝土轴心抗拉强度; b 为截面宽度; h_0 为截面有效高度。根据规范条文说明, 当配筋率大于 1.5% 时, 考虑纵向受拉钢筋的配筋率 ρ 对无腹筋梁受剪承载力的影响, 可取 $\beta_p = 0.7 + 20\rho$ 。

根据试验测得的混凝土和 HDC 强度平均值, 梁的受剪承载力试验值 V 和计算值 V_1 见表 5。

表 5 试验值与计算值比较
Table 5 Test and calculated data

试件编号	V/kN	V_1/kN	β_p	V/V_1	破坏形态
E-75	293.15	76.54	1.04	3.83	挤压破坏
C-1	173.18	56.06	1.04	3.09	斜压破坏
E-1	241.33	76.54	1.04	3.15	挤压破坏
E-1c	201.55	73.46	1.00	2.74	弯剪破坏
E-15	163.28	76.54	1.04	2.13	弯剪破坏
C-2	101.05	51.38	1.15	1.97	剪压破坏
E-2	138.43	70.15	1.15	1.97	剪压破坏
E-2c	96.35	61.22	1.00	—	弯曲破坏
E-25	104.93	60.13	1.15	1.74	剪压破坏
C-3	36.48	38.54	1.15	0.95	斜拉破坏
E-3	86.63	52.61	1.15	1.65	剪拉破坏

注: 试件 E-1c、E-15 和 E-2c 分别发生弯剪破坏和弯曲破坏, 其受剪承载力未得到充分发挥。

根据各试件的破坏形态, 由表 5 中受剪承载力计算值与试验值对比分析可得:

1) RC 梁发生斜压破坏时, 其受剪承载力主要取决于混凝土的抗压强度。为避免 RC 梁发生斜压脆性破坏, 我国规范按混凝土抗拉强度计算所得梁的受剪承载力偏于保守。

2) HDC 梁发生挤压破坏时, 其受剪承载力主要取决于 HDC 局部受压和挤压流动破坏的强度。由于挤压破坏时具有较好的延性, 其受剪承载力计算值宜适当提高。由本次试验结果可得, HDC 的抗拉强度约为同等强度普通混凝土的 1.46 倍, 按我国规范计算所得 HDC 梁的受剪承载力均有所提高, 但与试验值相比, 计算结果仍偏于保守。

3) HDC 良好的拉伸应变硬化效应和多裂缝开展性能, 能显著改善 HDC 无腹筋梁的脆性剪切破坏模式。HDC 梁发生剪切破坏时, 其受剪承载力均与 HDC 的极限拉应变和极限压应变密切相关。本

次试验中 HDC 的极限拉应变和极限压应变均远远大于普通混凝土, HDC 梁的受剪承载力试验值明显高于计算值。因此, 计算 HDC 梁的受剪承载力时宜考虑材料延性的影响。

3 结论

通过对 8 个不同剪跨比和配筋率的 HDC 无腹筋梁的试验研究, 并与 RC 梁进行对比分析, 初步得出以下结论:

(1) HDC 无腹筋梁的剪切破坏形态为挤压破坏、剪压破坏、弯剪破坏和剪拉破坏, 其裂缝开展和承载力下降缓慢, 均表现出一定的延性, 与 RC 梁的剪切破坏具有明显不同。部分剪跨比较小的 HDC 无腹筋梁由于抗剪承载力提高而纵筋数量偏少, 分别发生延性较好的弯剪破坏和弯曲破坏。

(2) 集中荷载作用下, RC 梁的斜裂缝两侧混凝土保护层大面积剥落; HDC 梁破坏以前始终保持良好的完整性, 且未出现受压区 HDC 压溃和剥落现象。

(3) 同等条件下, HDC 梁的损伤程度远远小于 RC 梁, 表明 HDC 良好的拉伸应变硬化特性能够有效控制剪切裂缝的发展, 防止斜裂缝两侧的保护层剥落, 提高梁的耐损伤能力, 减小或免去强震后的修复费用。

(4) 与 RC 梁相比, 多数 HDC 梁的荷载-挠度曲线更加平缓且具有明显的屈服平台, 其抗剪承载力和开裂、屈服、极限挠跨比均有明显提高。表明采用 HDC 可显著提高梁的抗剪承载力和发生剪切破坏时的变形能力, 并显著改善梁的脆性剪切破坏模式。

(5) 试验结果表明, 剪跨比和配筋率对 HDC 梁的剪切破坏形态影响较大。HDC 梁的承载力随剪跨比的增大而降低; 当剪跨比相同时, HDC 梁的抗剪承载力随配筋率的增大而有所提高。

(6) 按我国规范计算所得 HDC 梁的受剪承载力与试验值相比偏于保守。由于 HDC 梁的剪切破坏形态和受剪承载力均与 HDC 的极限拉应变和极限压应变密切相关, 考虑材料延性对其受剪承载力的影响还有待进一步研究。

参考文献:

[1] Li V C, Leung C K Y. Steady state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1992, 118(11): 2246—

2264.

- [2] Li V C. ECC-tailored composites through micro-mechanical modeling [C]// Montreal: Canadian Society of Civil Engineering, 1998: 64—97.
- [3] Li V C. On engineered cementitious composite (ECC) a review of the material and its applications [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 215—230.
- [4] Li V C, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6): 483—492.
- [5] Li V C, Mishra D K, Naaman A E, et al. On the shear behavior of engineered cementitious composites [J]. *Advanced Cement Based Materials*, 1993, 1(3): 142—149.
- [6] Kanakubo T, Shimizu K. Evaluation of bending and shear capacities of HPFRCC members toward the structural application [C]. Japan, Sapporo: Proceeding of the Hokkaido University COE Workshop on High Performance Fiber Reinforced Composites for Sustainable Infrastructure System-material Modeling, Structural Design and Application, 2007: 1—10
- [7] Fischer G, Li V C. Influence of matrix ductility on the tension-stiffening behavior of steel reinforced ECC [J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(1): 104—111.
- [8] Fischer G, Li V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions [J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(6): 781—790.
- [9] Shimizu K, Kabele T, Kanda T, et al. Shear behavior of steel reinforced PVA-ECC beams [C]. Vancouver B C & Canada: Proceedings of 13th World conference on Earthquake Engineering, 2004: 704—712.
- [10] Ashour S A, Hasanain G S, Wafa F F. Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 1992, 89(2): 176—184.
- [11] Voo Y L, Poon W K, Foster S J. Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(11): 1393—1400.
- [12] Kanda T, Watanabe S, Li V C. Application of pseudo strain hardening cementitious composites to shear resistance structural elements [C]. Freiburg: Aedificatio Publishers, Proceedings of Fracture Mechanics of Concrete Structures, 1998: 1477—1490.
- [13] 邓明科, 寇佳亮, 梁兴文, 等. 延性纤维混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(7): 170—177.
Deng Mingke, Kou Jialiang, Liang Xingwen, et al. Experimental investigation on seismic behavior of ductile fiber reinforced concrete shear walls [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(7): 170—177. (in Chinese)
- [14] 梁兴文, 车佳玲, 邓明科. 对角斜筋小跨高比纤维增强混凝土连梁抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*,

- 2014, 34(8): 135—141.
- Liang Xingwen, Che Jialing, Deng Mingke. Experimental research on seismic behavior of diagonally reinforced FRC coupling beams with small span-to-depth ratio [J]. Journal of Building Structures, 2014, 34(8): 135—141. (in Chinese)
- [15] 寇佳亮, 邓明科, 梁兴文. 延性纤维增强混凝土单轴拉伸性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(1): 59—64.
- Kou Jialiang, Deng Mingke, Liang Xingwen. Experimental study of uniaxial tensile properties of ductile fiber reinforced concrete [J]. Building Structure, 2013, 43(1): 59—64. (in Chinese)
- [16] 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 Mingke, Qin Meng, Liang Xingwen. Experimental study of compressive behavior of engineered cementitious composites [J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 120—126. (in Chinese)
- [17] 邓明科, 孙宏哲, 梁兴文, 等. 延性纤维混凝土抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 20(5): 85—90.
- Deng Mingke, Sun Hongzhe, Liang Xingwen, et al. Experimental study on flexural behavior of ductile fiber reinforced concrete [J]. Industrial Construction, 2014, 20(5): 85—90. (in Chinese)
- [18] GB/T 50152-2012, 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- GB/T 50152-2012, Standard for test method of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [19] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- GB 50010-2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- (上接第 207 页)
- [22] 廖飞宇, 韩林海. 方形钢管混凝土叠合柱的力学性能研究[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 153—162.
- Liao Feiyu, Han Linhai. Performance of concrete-filled steel tube reinforced concrete columns with square sections [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(4): 153—162. (in Chinese)
- [23] 王文达, 王景玄, 周小燕. 基于纤维模型的钢管混凝土组合框架连续倒塌非线性动力分析[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 142—451.
- Wang Wenda, Wang Jingxuan, Zhou Xiaoyan. Nonlinear dynamic progressive collapse analysis of composite frames with concrete-filled steel tubular columns based on fiber model [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9): 142—451. (in Chinese)
- [24] 于婧, 刘小军, 邓明科. 带施工缝 RC 框架结构抗震性能数值研究[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 190—200.
- Yu Jing, Liu Xiaojun, Deng Mingke. Numerical study of a seismic behavior of RC Frame structure with construction joint [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(8): 190—200. (in Chinese)
- [25] 吴波, 吕文龙, 沈朝勇. 部分柱顶滑移钢筋混凝土框剪结构模型试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 163—170.
- Wu Bo, Lü Wenlong, Shen Chaoyong. Model test of RC frame-shear wall structure with partial columns sliding at upper ends [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 163—170. (in Chinese)
- [26] Park R, Priestley M J N, Gill W D. Ductility of square-confined concrete columns [J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(4): 929—950.
- [27] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1982, 79(1): 13—27.
- [28] Karsan I D, Jirsa J O. Behavior of concrete under compressive loading [J]. Journal of Structural Division, 1969, 95(8): 2543—2563.
- [29] 陈学伟, 林哲. 结构弹塑性分析程序 OpenSEES 原理与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 15—36.
- Chen Xuewei, Lin Zhe. Structural nonlinear analysis program OpenSEES theory and tutorial [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2014: 15—36. (in Chinese)