工程力学
ENGINEERING MECHANICS
ISSN 1000-4750
CN 11-2595/O3
CODEN GOLIEB
E i 收 录 期 刊

UHPC柱抗震性能及变形量化指标研究

李艳艳 武凯 潘进 武帅鹏

RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE AND DEFORMATION QUANTIFICATION INDEX OF UHPC COLUMNS

LI Yan-yan, WU Kai, PAN Jin, WU Shuai-peng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2024.01.0024

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同性能水平下600 MPa 级高强钢筋混凝土柱位移角限值研究

STUDY ON DRIFT RATIO LIMITS OF 600 MPA GRADE HIGH-STRENGTH STEEL BARS REINFORCED CONCRETE COLUMNS AT DIFFERENT PERFORMANCE LEVELS

工程力学. 2024, 41(3): 50-62 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.04.0323

超高性能混凝土装配整体式框架梁柱节点抗震性能研究

SEISMIC EXPERIMENTAL STUDY ON A UHPC PRECAST MONOLITHIC CONCRETE BEAM-COLUMN CONNECTION

工程力学. 2021, 38(10): 90-102 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.09.0682

部分预制装配型钢混凝土短柱抗震性能试验研究

RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE OF PARTIALLY PRECAST STEEL REINFORCED CONCRETE SHORT COLUMNS

工程力学. 2020, 37(10): 179-191 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.11.0702

WCFT柱-钢梁节点抗震性能试验研究

EXPERIMENTAL RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE OF WCFT COLUMN-STEEL BEAM JOINTS

工程力学. 2020, 37(12): 34-42 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.02.0092

足尺空腔式RC框架柱抗震性能试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF FULL-SCALE REINFORCED CONCRETE FRAME HOLLOW COLUMNS

工程力学. 2019, 36(6): 60-69 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.10.0573

吊顶系统抗震性能研究综述

RESEARCH REVIEW ON SEISMIC PERFORMANCE OF SUSPENDED CEILING SYSTEMS

工程力学. 2021, 38(9): 1-14 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.09.0655

订阅号：面向读者

订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号：1000-4750(2024)00-0001-12

UHPC 柱抗震性能及变形量化指标研究

李艳艳[1,2]，武　凯[1]，潘　进[1]，武帅鹏[1]

(1. 河北工业大学土木与交通学院，天津 300401；2. 河北省土木技术创新中心，天津 300401)

摘　要：对 1 根 HTRB 630 高强钢筋普通混凝土柱和 6 根 HTRB 630 高强钢筋 UHPC 柱开展拟静力试验，研究混凝土类型、钢纤维掺量、纵筋配筋率、箍筋间距和轴压比对抗震性能的影响。试验结果表明：配置高强钢筋的所有试件均发生弯曲延性破坏，与普通混凝土柱相比，UHPC 柱整体性更好，承载能力、变形及耗能能力显著提高；采用 UHPC，在保证抗震性能的前提下，能够降低结构钢筋、混凝土用量，减轻结构自重；对于 UHPC 试件，增加钢纤维掺量、纵筋配筋率及减小箍筋间距均能不同程度提高 UHPC 柱的综合抗震性能，其中增加纵筋配筋率对柱承载力的提高更为明显，减小箍筋间距对柱延性、变形与耗能能力提高更为明显；增加轴压比，试件承载力虽然有所提高，但延性、耗能能力与变形性能却均下降。依据基于性能的抗震设计思想，将 UHPC 柱的抗震性能水准分为正常使用、暂时使用、修复后使用、生命安全和接近倒塌等 5 个等级，并对该文及相关参考文献中共计 52 根 UHPC 墩、柱关键特征点的变形值进行相对频次统计，给出 UHPC 柱在 5 个抗震性能水准下具有 85% 安全保证率的位移角限值，为 UHPC 结构抗震设计提供参考。

关键词：UHPC；抗震性能；拟静力试验；抗震性能水准；位移角限值

中图分类号：TU375　　**文献标志码：**A　　doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2024.01.0024

RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE AND DEFORMATION QUANTIFICATION INDEX OF UHPC COLUMNS

LI Yan-yan[1,2] , WU Kai[1] , PAN Jin[1] , WU Shuai-peng[1]

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. Civil Engineering Technology Innovation Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China)

Abstract: Quasi-static tests were conducted on one ordinary concrete column reinforced with HTRB 630 high-strength rebars and six HTRB 630 UHPC columns reinforced with HTRB 630 high-strength rebars to investigate their seismic performance. The test parameters included the effects of concrete type, of steel fiber content, of longitudinal reinforcement ratio, of stirrup spacing, and of axial compression ratio. The test results indicated that all specimens reinforced with high-strength rebars have bending ductility failure. In comparison to ordinary concrete column, UHPC columns exhibit enhanced integrity. Additionally, the bearing capacity, deformation and energy dissipation capacity of UHPC columns are also increased significantly. Under the premise of ensuring seismic performance, adopting UHPC could lighten the weight of a structure by decreasing the amount of rebars and concrete. For UHPC specimens, the comprehensive seismic performance of UHPC columns could be improved by enhancing the steel fiber content, by reinforcing ratio of longitudinal rebars and, by reducing the stirrup spacing. Specifically, increasing the reinforcing ratio of longitudinal rebars has a better promotion effect on the bearing capacity of columns. Furthermore, decreasing the stirrup spacing could improve the ductility, deformation and, energy dissipation capacity of columns more obviously. The bearing capacity of columns would improve by increasing the axial compression ratio. However, their ductility, deformation and energy dissipation

收稿日期：2024-01-03；修改日期：2024-05-19
基金项目：国家自然科学基金项目(52108132)；河北省自然科学基金项目(E2024202216)；河北省重点研发计划项目(22374501D)
通信作者：李艳艳 (1979—)，女，广西上林人，教授，博士，硕导，主要从事高性能材料工程结构设计理论 (E-mail: nicole_820@163.com).
作者简介：武　凯 (2000—)，男，安徽滁州人，硕士生，主要从事超高性能混凝土柱抗震性能研究 (E-mail: 19955005509@163.com);
潘　进 (1998—)，男，安徽池州人，硕士生，主要从事超高性能混凝土柱抗震性能研究 (E-mail: panjin9518@163.com);
武帅鹏 (1999—)，男，河南安阳人，硕士生，主要从事超高性能混凝土柱抗震性能研究 (E-mail: wsp15690860198@163.com).

capacity descend at the same time. Based on the concept of performance-based seismic design, the performance levels of UHPC columns are classified into five grades: normal operation, temporary operation, repaired operation, life safety and, near collapse. In addition, a statistical analysis on the key characteristic points deformation values of a total of 52 UHPC piers and columns is presented by the grounds of the test results and of those from pertinent references. The objective is to give the angular limit value of the displacement of UHPC columns with 85% safety assurance rate under five seismic performance levels. These findings aim to provide a guidance for the seismic design of UHPC structures.

Key words: UHPC; seismic performance; quasi-static tests; seismic performance level; drift ratio limit

超高性能混凝土 (UHPC) 是一种新型水泥基胶凝复合材料，相较于普通混凝土具有更加优异的力学性能和出色的耐久性能[1－8]，推广应用 UHPC 对于提高建筑结构的抗震性能具有重要意义。柱作为建筑结构中重要的抗震构件，已有部分学者对 UHPC 构件的抗震性能展开了研究。HE、祁婷、方文昌、徐冠普、王德弘等[9－13] 对 UHPC 柱开展拟静力试验，结果表明 UHPC 柱具有良好的变形能力、滞回性能，抗震性能优异。此外，UHPC 柱抗震性能受到多种因素影响，REN 等[14] 研究发现加载角度对于 UHPC 箱型墩的延性影响显著，当加载方向垂直于截面对角线时延性系数最小，变形能力最差。BINDHU 等[15] 研究发现配箍形式对 UHPC 柱抗震性能有影响，其中采用菱形配箍形式抗震性能最优。ZHANG 等[16] 设计制作了 4 根型钢活性粉末混凝土柱，结果表明在配筋率与型钢尺寸相同的条件下，轴压比从 0.1 提高至 0.3，试件峰值荷载提升而延性显著降低。邓宗才等[17] 对分别配置 HRB 400 和 HRB 500 的两种强度等级钢筋的 UHPC 柱进行拟静力试验，试验结果表明提高 UHPC 柱纵筋和箍筋的强度可以进一步增强 UHPC 构件的承载能力和延性。然而，当前学者所研究的 UHPC 柱配置钢筋强度一般为 400 MPa~500 MPa，对于配置 630 MPa 高强钢筋的 UHPC 柱抗震性能相关报道还较少。因此，有必要对 630 MPa 高强钢筋 UHPC 柱进行拟静力试验，研究高强钢筋与 UHPC 间协同作用对柱构件抗震性能的影响。

基于性能的抗震设计思想是当前国际上先进的抗震设计理念[18－19]，采用该设计理念能够以较低的成本达到甚至超过结构既定设计性能目标，并且可以避免传统采用基于承载力、强度等抗震设计方法带来的诸多缺陷[20－23]。目前，部分学者对混凝土柱构件抗震性能量化指标展开研究，孙传智等[24] 对 65 根 600 MPa 级高强钢筋混凝土柱各特征点位移角数据进行相对频率统计分析，给出了 600 MPa 级高强钢筋混凝土柱在三个抗震性能水准下的位移角限值。薛建阳等[25] 对 41 根 SRC 异形柱各特征点位移角数据进行相对频率统计分析，建立了 SRC 异形柱在不同性能水准下的位移角抗震性能量化指标。崔济东等[26] 收集了 469 根钢筋混凝土柱拟静力试验结果并进行统计分析，给出了钢筋混凝土柱在屈服点、承载力退化 20% 点及丧失承载力点三个关键性能点位移角限值统一确定方法。陈金波[27] 统计了 38 根纤维混凝土柱试验数据，在分析后给出了 PVA 纤维混凝土柱在 5 个抗震性能水准下安全保证率超过 85% 的侧向位移角限值。

目前对柱抗震性能量化指标的研究还主要集中在普通混凝土柱上，对 UHPC 柱在不同性能水平下的位移角限值研究尚属空白，亟需开展 UHPC 柱抗震性能的研究，明确 UHPC 柱在不同性能水平下的变形限值，为 UHPC 的推广应用提供必要参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计制作 7 个 1/2 缩尺的钢筋混凝土矩形柱试件，包括 1 根普通混凝土柱 (NC 柱) 以及 6 根超高性能混凝土柱 (UHPC 柱)。其中 1 根 NC 柱与 1 根 UHPC 柱截面尺寸设计为 300 mm×300 mm，为探索构件采用 UHPC 对建材用量的减少，将其余 5 根 UHPC 柱截面尺寸缩减为 250 mm×250 mm，7 根柱高度均为 1200 mm。试件分两批制作，第一批制作 1 根 NC 柱和 1 根 UHPC 柱，研究混凝土种类对柱抗震性能的影响；第二批制作 5 根缩减截面尺寸的 UHPC 柱，设计变量分别为钢纤维掺量、纵筋配筋率、箍筋间距和轴压比。试件具体配置参数如表 1 所示，试件配筋及应变片粘贴情况如图 1 所示。

表 1　试件设计参数

Table 1　Specimen design parameters

批次		I		II				
试件编号		NC1	UC1	UC2	UC3	UC4	UC5	UC6
混凝土		C45	UHPC	UHPC	UHPC	UHPC	UHPC	UHPC
纤维掺量/(%)		0	2	1	2	2	2	2
纵筋	A_s	8E14	8E14	4E18	4E18	4E22	4E18	4E18
	ρ_s/(%)	1.37	1.37	1.62	1.62	2.43	1.62	1.62
箍筋	A_{sv}	E8@100	E8@100	⌀10@100	⌀10@100	⌀10@100	⌀10@60	⌀10@100
n		0.15	0.15	0.15	0.10	0.15	0.15	0.15

注：A_s 与 A_{sv} 分别为纵筋、箍筋配置情况，包括纵筋等级、直径、数量以及箍筋等级、直径、间距；ρ_s 为纵筋配筋率；n 为轴压比 (受实验室加载设备量程的限制，本次试验设计的轴压比相对较小)；⌀与 E 分别为 HRB 400 钢筋和 HTRB 630 高强钢筋。

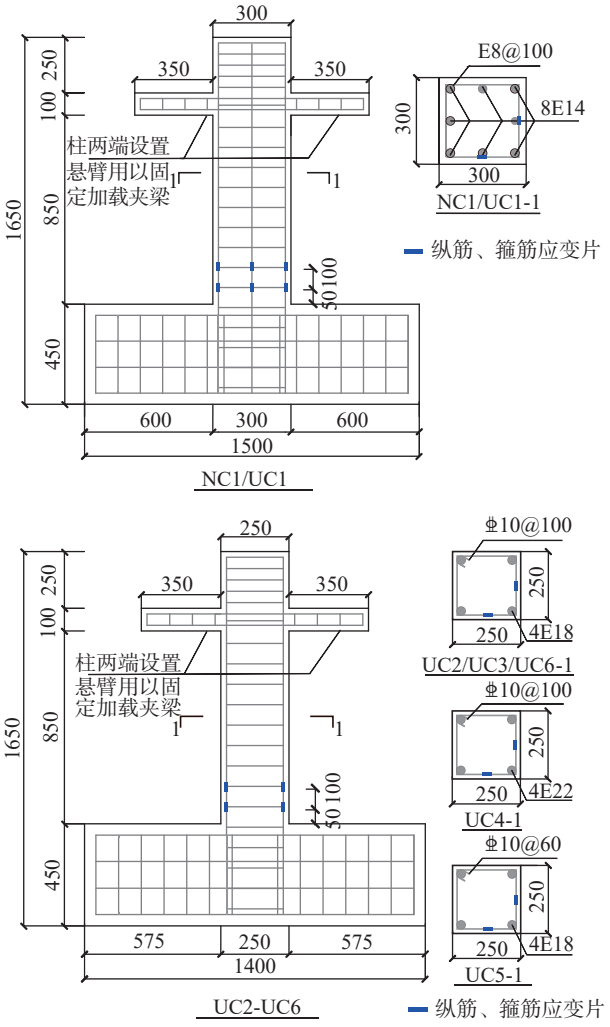
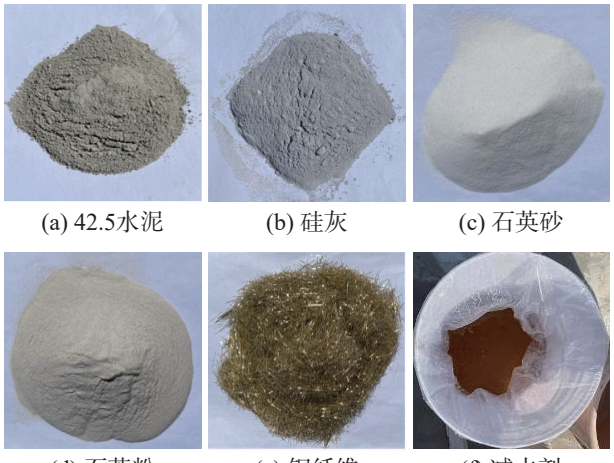


图 1　试件配筋　/mm

Fig. 1　Detail of specimen reinforcement

1.2　材料性能

试验所用的混凝土包括 C45 商品混凝土、钢纤维掺量为 1%、2% 的 UHPC，配置 UHPC 所用相关材料照片如图 2 所示，配比见表 2。浇筑时预留 100 mm×100 mm×100 mm 立方体抗压试块和 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体抗拉试块，试块与试件均在冬季室外现场同期浇筑，采用自然环境下免蒸养的方式进行养护。28 天后，依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[28] 有关试验规定，实测得混凝土立方体抗压强度依次为 47.3 MPa、104.6 MPa、117.3 MPa；抗拉强度依次为 2.5 MPa、6.1 MPa、6.9 MPa。



(a) 42.5水泥　(b) 硅灰　(c) 石英砂

(d) 石英粉　(e) 钢纤维　(f) 减水剂

图 2　UHPC 材料

Fig. 2　UHPC materials

表 2　UHPC 配合比　/(kg·m^{-3})

Table 2　Proportions of materials in UHPC

42.5水泥	硅灰	石英砂	石英粉	减水剂	水	钢纤维
800.5	360.3	480.3	480.3	46.4	232.2	78.5/157

试验采用 HTRB 630 高强钢筋以及 HRB 400 钢筋，依据《金属材料拉伸试验第一部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)[29] 相关试验规定，对钢筋开展力学性能试验，实测参数如表 3 所示。

1.3　加载装置及加载制度

拟静力试验加载前试件通过螺栓、螺帽固定在地面上，加载时由 1000 kN 千斤顶提供竖向恒定轴力，水平荷载由 500 kN 水平作动器提供。加载过程中在柱顶与柱底用位移计测量柱顶横向位移以及试件与滑动支架之间的位移和滑动，在靠

表 3 钢筋力学性能参数

Table 3 Mechanical properties of reinforcement bar

钢筋规格	钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	最大力总延伸率/(%)
HTRB 630	8	650.2	845.3	9.3
HTRB 630	14	684.2	870.0	10.0
HTRB 630	18	660.5	872.5	11.0
HTRB 630	22	667.3	875.9	11.8
HRB 400	10	432.7	590.1	15.3

近柱底部位置纵筋、箍筋表面粘贴应变片测量钢筋应变情况，如图 1 所示，加载装置及测量仪器布置位置如图 3 所示。

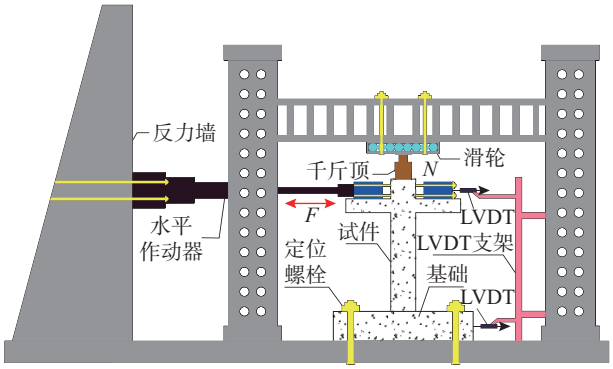


图 3 试验加载装置及监测仪器布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test loading device and monitoring instrument layout

全程采用位移控制加载，分为两个阶段，具体加载模式如图 4 所示。

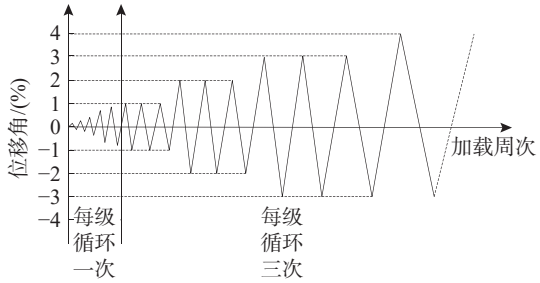


图 4 试验加载模式

Fig. 4 Test load pattern

阶段一，每级施加位移角依次为 0.1%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%，每级各循环一次；阶段二，每级施加位移角依次为 1.0%、2.0%、3.0%、4.0%、…，每级各循环三次。当试件承载力降至峰值荷载的 85% 以下时，视为试件破坏，试验结束。

1.4 量测方案

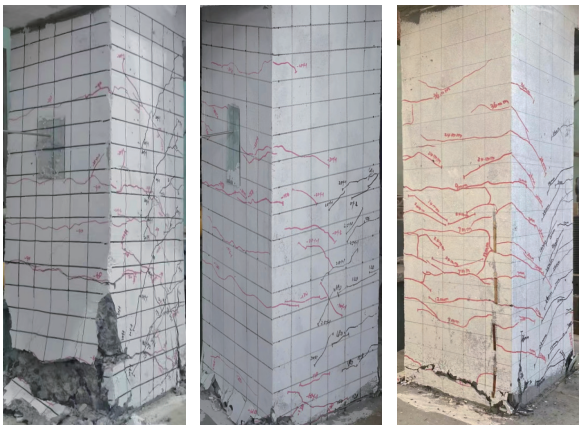
试验过程中主要对试件的水平荷载、柱顶水平位移、钢筋应变及裂缝信息等数据进行量测、记录。

其中：水平荷载、位移由水平伺服作动器内置的荷载-位移传感器采集并实时记录，同时水平位移利用位移计所采集数据进行校核；试验前用白色灰浆均匀涂满柱体表面并画出网格线，加载过程中在每一级加载完成后持荷间隙用马克笔描出裂缝发展并测量出裂缝宽度、长度和间距；钢筋表面应变片用导线与静态应变测试系统相连，试验过程中实时采集、记录钢筋应变。

2 高强钢筋 UHPC 柱抗震性能

2.1 试件破坏形态

代表试件最终破坏形态如图 5 所示，所有试件在达到极限荷载时纵筋应变均超过 HTRB 630 高强钢筋屈服应变 0.003，且受拉屈服要早于受压屈服。而试件箍筋始终未达到屈服应变，其中 UHPC 柱大部分箍筋应变低于 0.0015，远小于 HRB 400 普通钢筋屈服应变 0.002。整体观察可以看出所有试件均发生弯曲延性破坏。



(a) NC1 (b) UC1 (c) UC2

(d) UC3 (e) UC5 (f) UC6

图 5 部分试件破坏模式

Fig. 5 The failure modes of partial specimen

对比试件 NC1 以及 UC1，NC 柱底端有大量混凝土脱落，柱内钢筋外露，而 UHPC 柱仅柱角处有少量混凝土被压碎，破坏现象并不明显，这是由于 UHPC 具有更加优异的力学性能，并且其

中掺入了钢纤维，当试件表面所受拉应力超过其开裂强度出现裂缝时，钢纤维可以在宏观和微观裂缝间继续传递应力，不仅限制了裂缝宽度的发展，而且能使柱体内部应力均匀分布，避免局部发生严重破坏[30]，从而有效改善了试件破坏特征，使柱体变形能力更强，整体性更好。

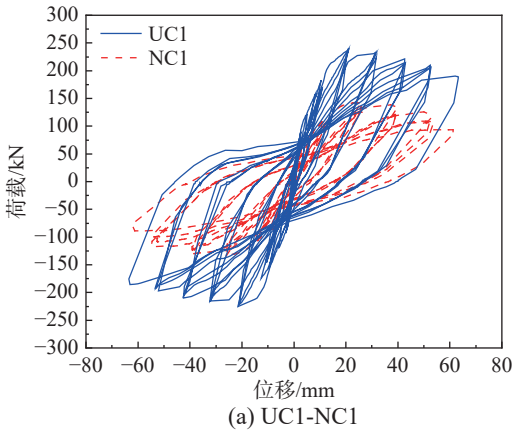
钢纤维掺量为2%的试件UC6与掺量为1%的试件UC2相比，裂缝宽度更细、长度更短、开裂范围更小，可见钢纤维掺量的提高增强了钢纤维在混凝土中的桥联作用，使混凝土间的粘结作用更强，对柱体裂缝的遏制效果更好。轴压比为0.15的试件UC6相较于轴压比为0.1的试件UC3在柱角处竖向裂缝更多，且裂缝明显更宽，说明轴压比的增大会加重试件的损伤。对比箍筋间距为60 mm的试件UC5以及箍筋间距为100 mm的UC6，试件UC6破坏情况显然更为严重，说明加密箍筋间距增强了试件的整体性，从而能够显著改善试件损伤情况，让试件具有更优异的变形能力。

2.2　荷载-位移曲线

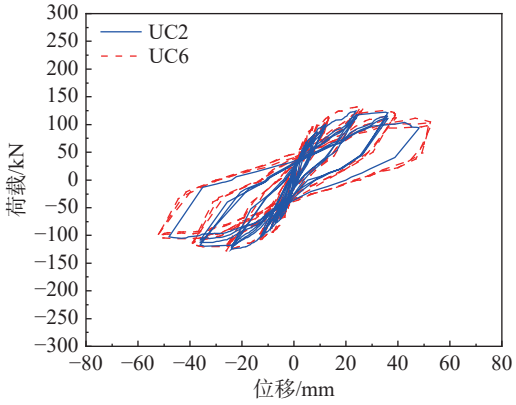
各试件的滞回曲线，如图6所示。

从各个UHPC柱的滞回表现可以看出，加载初期，试件处于弹性阶段，滞回曲线表现出线性特征，试件刚度较大；纵筋屈服后，试件刚度下降滞回曲线变缓但承载力依然有所提高，滞回环饱满但有轻微捏缩现象；荷载达到峰值后，试件刚度进一步退化，承载力开始逐渐下降，滞回曲线整体呈弓形较为饱满。由于UHPC在配料中剔除了粗骨料、优化了细骨料级配并且加入了钢纤维，使得UHPC相较于普通混凝土具有更高的抗压、抗弯强度以及更好的塑性，因此试验中UHPC构件表现出了良好的耗能与变形能力。

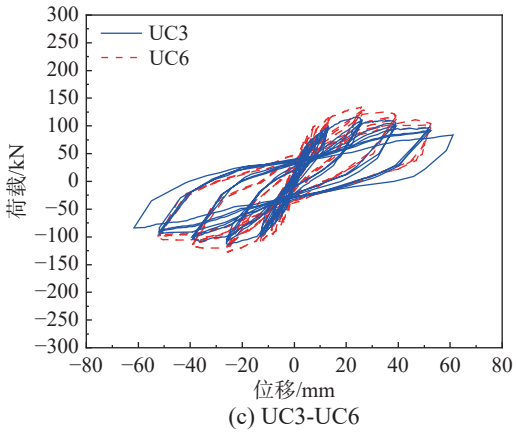
试件UC1滞回曲线较试件NC1更加饱满，可



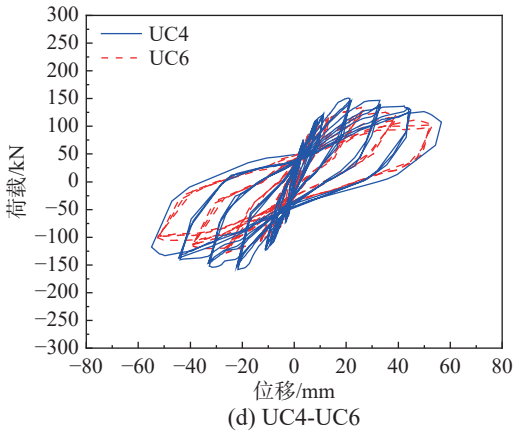
(a) UC1-NC1



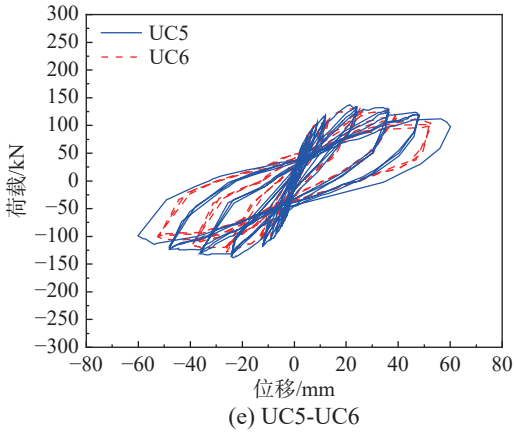
(b) UC2-UC6



(c) UC3-UC6



(d) UC4-UC6



(e) UC5-UC6

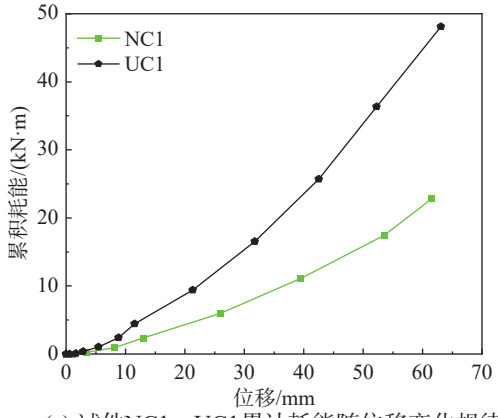
图6　荷载-位移曲线

Fig. 6　Load-displacement curves

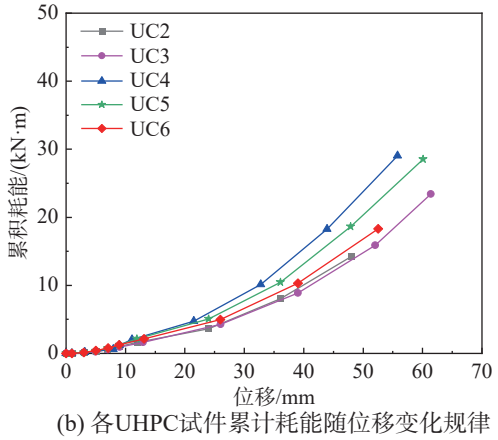
以看出 UHPC 柱变形与耗能能力均明显优于 NC 柱。相比于钢纤维掺量 1% 的试件 UC2，钢纤维掺量为 2% 的试件 UC6 滞回曲线捏缩现象有所改善，这是因为钢纤维掺量的提高对 UHPC 试件内部微裂缝的扩展及表面宏观裂缝的产生抑制效果更强，使试件变形与耗能能力更优异。对比轴压比为 0.15 的试件 UC6 与轴压比为 0.1 的 UC3，发现随着轴压比的增大试件 UC6 滞回曲线捏缩现象更加严重，变形与耗能能力减弱。纵筋配筋率 2.43% 的试件 UC4 与纵筋配筋率 1.62% 的试件 UC6 相比，配筋率更高的试件 UC4 滞回曲线峰值点显著提高，整体滞回性能优于试件 UC6。对比试件 UC6，试件捏缩现象明显改善，这是由于加密箍筋增强了对试件核心区混凝土以及纵筋的约束，提高了试件的侧向刚度，从而使试件变形能力与耗能能力更强。

2.3 耗能能力

试件累计耗能能力是衡量试件抗震能力的重要指标之一，采用式 (1) 计算试件累积滞回耗能，各试件累积滞回耗能与位移的关系见图 7。



(a) 试件NC1、UC1累计耗能随位移变化规律



(b) 各UHPC试件累计耗能随位移变化规律

图 7 累计耗能随位移变化规律

Fig. 7 Accumulated energy dissipation coefficient with displacement

$$E_{\text{sum}} = \sum_{i}^{n} E_i \tag{1}$$

式中：E_{sum}为累计积滞回耗能；i为加载级数；n为总加载级级数；E_i为第i个循环下的耗能，计算值为该滞回环所包络的面积。

由图 7(a)，试件 NC1 累积耗散能量仅为试件 UC1 的 1/2，UC1 相较 NC1 累计耗能提升 110.87%，UHPC 试件耗能能力显然更高。由图 7(b)，试件 UC6 的累积总耗能能力相比于试件 UC2 的累积总耗能提高了约 29%，表明钢纤维的增加能够改善 UHPC 构件的耗能能力。试件 UC6 破坏时的累积总耗能能力相比于试件 UC3 下降 22%，这是由于增大轴压比虽然提高了试件的峰值荷载但加速了试件的破坏，反而降低了试件耗能能力。试件 UC4 与 UC5 累积总耗能能力相比于试件 UC6 分别提高 59%、56%，说明无论是增加纵筋配筋率还是加密箍筋间距，均能显著提高试件耗能能力。

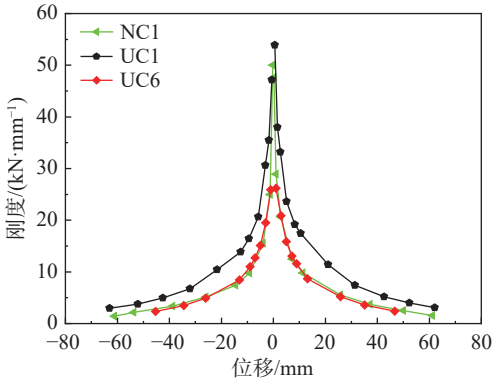
2.4 刚度退化

刚度是反映结构变形与受力大小关系的参数，图 8 为各试件刚度-位移曲线，可以看出在位移控制加载过程中，随着位移幅值的增大，试件刚度逐渐退化。

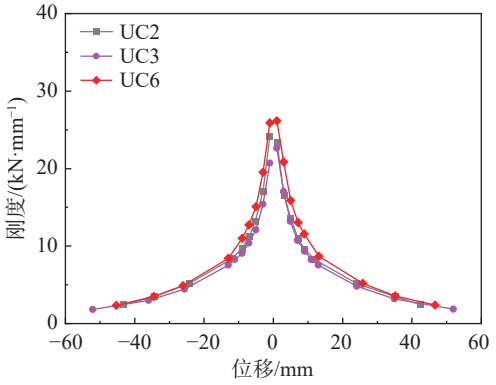
由图 8(a)，对比试件 UC1 与 NC1 刚度退化曲线，由于 UHPC 更密实的物理性质、高抗拉的力学性质以及加入的钢纤维对裂缝的开展有抑制作用，因此试件 UC1 在试验各阶段刚度均明显高于试件 NC1，且试件 UC1 刚度退化曲线斜率更小，刚度退化速率更慢。对比试件 UC6 与试件 NC1，试件 UC6 由于尺寸与配筋有所下降，导致初始刚度远小于试件 NC1，但随着加载的进行，两试件同幅值下刚度大小差距较小，刚度退化趋势高度相似。

由图 8(b)，试件 UC6 初始刚度相比于试件 UC2 有所提高，且刚度随位移增加下降缓慢，说明提高钢纤维掺量能提高试件初始刚度并延缓刚度退化速率。试件 UC6 初始刚度高于试件 UC3，但是由于试件 UC6 轴压比更高，竖向荷载更大，导致同加载位移幅值下混凝土与钢筋的损伤更严重，因此刚度退化速率相比于试件 UC3 更快。由图 8(c)，对比试件 UC4 与 UC6 刚度退化曲线，可以发现随着试件纵筋配筋率的增加，试件的初始刚度将提高且刚度退化速率减缓。对比箍筋间距不同的试件 UC5 与 UC6，在加载初期两试件刚度大小以及退化速率差距较小，但在加载后期箍筋

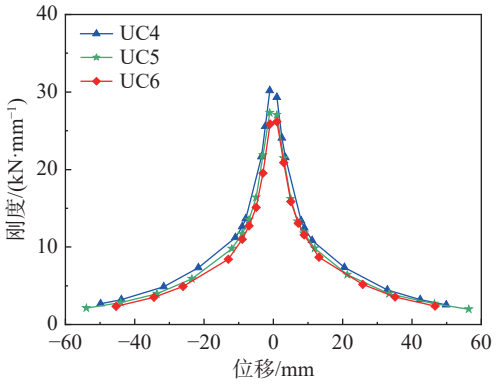
更密集的试件 UC5 刚度退化速率相较于试件 UC6 有所减缓。



(a) 试件NC1、UC1、UC6刚度退化曲线



(b) 试件UC2、UC3、UC6刚度退化曲线



(c) 试件UC4、UC5、UC6刚度退化曲线

图 8　各试件刚度退化曲线

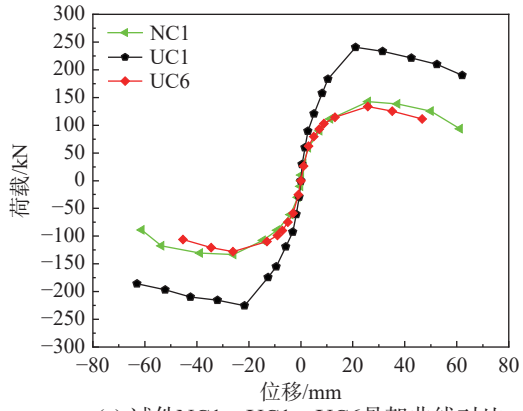
Fig. 8　Stiffness degradation curves of each specimen

2.5　承载力、位移及延性

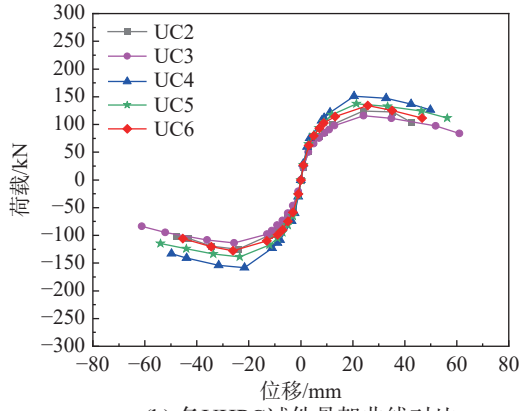
各试件骨架曲线对比如图 9 所示，由骨架曲线得到屈服荷载、峰值荷载、破坏荷载、各特征点对应的位移以及延性系数如表 4 所示，其中试件的延性系数由破坏荷载对应的位移与屈服荷载对应的位移比值得到。

各因素对试件性能具体影响如下：

混凝土类型：1) 试件 UC1 屈服、峰值和破坏荷载比试件 NC1 分别提高了 73.91%、68.98% 和 68.99%，说明采用 UHPC 能够显著提高试件承载力。试件 UC1 骨架曲线上升段斜率较试件 NC1 明显更大，而下降段却更缓，由曲线进一步可以得出试件 UC1 的破坏位移和延性系数上相比于试件 NC1 分别增加了 4% 与 11%，这是由于 UHPC 采用级配良好的细骨料配置并且加入了钢纤维，可以与钢筋产生更好的粘结效果，因此高强钢筋与 UHPC 能更好的协同工作，二者配合使用能显著提高试件的变形与延性性能；



(a) 试件NC1、UC1、UC6骨架曲线对比



(b) 各UHPC试件骨架曲线对比

图 9　骨架曲线对比

Fig. 9　Comparison of skeleton curves

2) 试件 UC6 与试件 NC1 骨架曲线重合度较高，承载能力基本相当，而试件 UC6 的钢筋用量、截面面积同比试件 NC1 却分别减少 17%、31%，可见采用 UHPC 在保证抗震性能的前提下能缩小结构的截面尺寸、减少建材消耗，实现结构的高强度、轻量化。

钢纤维掺量：钢纤维掺量为 2% 的试件 UC6 与掺量为 1% 的试件 UC2 荷载差距较小，但试件 UC6 破坏位移和延性同比分别提高 3.5% 和 13%，结合试件 UC6 骨架曲线下降段更缓的现象，说明钢纤维掺量的增加进一步增强了 UHPC 的韧性[31]，延缓了 UHPC 柱的刚度退化、提高了 UHPC 柱的

表 4 承载力、位移及延性系数

Table 4 Bearing capacity, displacement and ductility coefficient of specimens

试件编号		荷载/kN			位移/mm			延性
		屈服	峰值	破坏	屈服	峰值	破坏	
NC1	正	117.81	142.76	121.34	12.51	25.88	52.43	4.19
	负	−105.91	−133.10	−113.14	−14.15	−25.93	−55.99	3.96
	均值	111.86	137.93	117.24	13.33	25.91	54.21	4.07
UC1	正	203.73	240.56	204.48	12.25	21.10	55.82	4.56
	负	−185.35	−225.61	−191.77	−12.68	−21.59	−56.63	4.47
	均值	194.54	233.08	198.12	12.47	21.35	56.23	4.51
UC2	正	102.12	124.14	105.52	12.54	23.91	42.33	3.38
	负	−102.80	−125.33	−106.53	−12.56	−24.15	−42.68	3.40
	均值	102.46	124.74	106.03	12.55	24.03	42.51	3.39
UC3	正	96.08	116.00	98.60	12.31	24.13	50.66	4.12
	负	−95.98	−113.85	−96.77	−12.28	−25.65	−49.70	4.05
	均值	96.03	114.92	97.68	12.30	24.89	50.18	4.08
UC4	正	130.06	151.03	128.38	12.23	20.53	48.41	3.96
	负	−139.50	−158.49	−134.72	−12.62	−21.62	−48.60	3.85
	均值	134.78	154.76	131.55	12.42	21.08	48.51	3.90
UC5	正	117.96	137.42	116.81	12.09	21.41	52.80	4.37
	负	−118.10	−138.71	−117.90	−12.20	−23.49	−50.56	4.14
	均值	118.03	138.06	117.35	12.15	22.45	51.68	4.26
UC6	正	110.38	133.96	113.87	11.56	25.80	44.57	3.86
	负	−105.79	−127.93	−108.74	−11.44	−26.09	−43.43	3.80
	均值	108.09	130.95	111.30	11.50	25.95	44.00	3.83

变形能力，但这种效果对试件承载力的影响不大。

轴压比：轴压比从 0.1 提升至 0.15，试件 UC6 相比于 UC3 屈服、峰值和破坏荷载分别提高了 12.56%、13.95% 和 13.94%，而破坏位移和延性却分别降低了 12% 和 6%，试件承载力提高是由于轴压比增大使试件内部混凝土更加密实从而增强了柱内纵筋的销栓作用，但在此同时试件的损伤也会加剧导致延性以及变形能力下降[32]。

纵筋配筋率：相比于 UC6，当纵筋配筋率由 1.62% 提升至 2.43%，试件 UC4 各阶段水平荷载均明显提高，且骨架曲线达到峰值点后下降段斜率更小，表明提高试件的纵筋配筋率能够改善试件综合抗震性能尤其是对试件承载力的提高更为显著，这是纵筋配筋率的提高增大了试件侧向刚度导致的。

箍筋间距：箍筋间距为 60 mm 的试件 UC5 与箍筋间距为 100 mm 试件 UC6 相比，试件 UC5 破坏位移与延性分别提高了 17% 和 11%，骨架曲线末端破坏位移更大，这是由于箍筋配筋率的增加增强了纵筋以及核心区混凝土抵抗横向变形的能力从而对试件延性、变形能力有明显的提高。

UHPC 试件延性系数均大于 3.0，高于《建筑抗震设计规范》[33] 相关要求，说明 UHPC 柱配置 630 MPa 高强钢筋能获得良好的延性和变形性能。

3 不同性能水平下的 UHPC 柱变形量化指标

3.1 UHPC 柱性能水平划分

将基于性能的抗震设计思想应用于 UHPC 结构中，需建立抗震性能水平等级及其对应的变形量化指标。结合本文高强钢筋 UHPC 柱拟静力试验结果及工程实际并参考相关文献 [34 − 35]，将 UHPC 柱的抗震性能水准分为正常使用、暂时使用、修复后使用、生命安全和接近倒塌等 5 个等级。

正常使用抗震性能水准，柱体应保持基本完好状态，表面无明显破损，力学性能不受影响，该水准下无需对柱体采取修补措施。对应试验现象为，试件表面无可见裂缝或仅出现少量细微裂缝。

暂时使用抗震性能水准，柱体出现轻度破损，裂缝较多，此时需要对柱体进行一定修补工作。对应试验现象为，试件表面出现较多密集裂缝，随着加载的进行，裂缝持续发展，宽度达到 0.1 mm~

0.5 mm，钢纤维开始发挥桥联作用，进一步的可以观察到有水平裂缝贯通柱底并且有斜裂缝出现。

修复后使用抗震性能水准，柱体发生中等程度的破坏，力学性能受到较大损失，需要对柱进行大量修补工作，经过修复结构依然可以被继续使用。对应试验现象为，钢纤维被拉扯断裂并发出声响，试件表面开始出现竖向裂缝并与斜裂缝交叉，早期出现的裂缝宽度更进一步开展达到 1 mm~2 mm，此时可以看到试件保护层出现鼓包、起皮，但由于钢纤维的拉结并未脱落。

生命安全抗震性能水准，柱体已经发生了严重到无法修复的破坏但并未倒塌，此时其抗震性能已接近极限。对应试验现象为，试件表面裂缝宽度达到 2 mm~3 mm，裂缝与裂缝相互贯通，从裂缝中可以清晰的看到被拔出、拉断的钢纤维，柱脚处保护层混凝土被压碎且有轻微的脱落。

接近倒塌抗震性能水准，柱体发生明显倾斜，随时都将发生倒塌。

3.2　UHPC 柱位移角限值

依据基于性能的抗震设计思想，本文采用试件的侧向位移角作为结构抗震性能水准的量化指标。

限于本文试件数量较少，为扩充统计样本，搜集了文献 [9－14, 17] 中 UHPC 构件位移角试验数据与本文数据共计 52 根试件试验数据进行统计分析，该数据量为 UHPC 柱、墩抗震性能数据，试件配置钢筋型号包含普通钢筋与高强钢筋，具有普遍性。各试件关键特征点侧向位移角见表 5，该值为构件相应特征点柱顶位移与柱高之比。

52 个 UHPC 试件位移角数据统计结果如图 10 所示，可以看出 UHPC 柱在不同性能水准下的位移角均满足正态分布。

孙传智、陆本燕、门进杰等学者[24, 36－37] 对普通混凝土桥墩、框架柱统计时选取安全保证率为 70%~90%。安全保证率越大，各抗震性能水准下侧向位移角限值所取值就越趋于保守，但过高的安全保证率会浪费结构的性能[37]。因此，鉴于 UHPC 构件表现出更为优异的抗震性能，本文将 UHPC 柱位移角限值的安全保证率设定为 85%。

正常使用：由于当前学者对处于正常使用性能水平下试件位移角限值研究较少，考虑到 UHPC 优异的力学性能以及钢纤维的掺入对试件延性、变形能力的增强，即使构件表面存在裂缝其承载能力也基本不受影响，达到建筑“小震不

表 5　试件关键特征点的侧向位移角

Table 5　Drift ratios of of all specimens at each key point

文献	编号	暂时使用 位移角/($\times10^{-3}$)	修复后使用 位移角/($\times10^{-2}$)	接近倒塌 位移角/($\times10^{-2}$)
[本文]	UC1	10.39	1.78	4.69
	UC2	10.46	2.00	3.54
	UC3	10.25	2.07	4.18
	UC4	10.35	1.76	4.04
	UC5	10.12	1.87	4.31
	UC6	9.58	2.16	3.67
[9]	LLC	6.00	0.89	1.95
	FLC	6.69	1.31	2.49
	HLC1	5.68	0.85	2.17
	HLC2	5.20	1.11	2.19
	HLC3	5.91	0.85	1.78
[10]	UHPC-1	11.75	2.38	4.66
	UHPC-2	12.42	2.42	4.21
	UHPC-3	12.42	2.28	3.56
	UHPC-4	4.75	0.81	2.55
	UHPC-5	8.33	1.67	3.22
	UHPC-6	8.42	1.74	3.29
	UHPC-7	9.33	1.58	2.73
	UHPC-8	9.83	1.58	2.54
	UHPC-9	10.67	1.68	2.45
[11]	UC-HS-0.1	4.75	0.71	3.77
	UC-HS-0.3	5.50	0.73	2.50
	UC-HS-0.4	6.54	0.70	2.02
[12]	C-1	14.26	1.83	4.55
	C-2	13.68	1.93	4.64
	C-3	10.59	1.81	2.63
	C-4	11.59	1.87	3.40
[13]	Column-2	7.82	3.31	3.90
	Column-3	8.25	3.26	4.15
	Column-4	7.55	3.64	4.50
	Column-5	8.62	3.73	4.50
	Column-6	8.45	3.84	4.49
	Column-7	9.20	3.87	4.76
	Column-8	8.80	3.97	5.70
	Column-9	8.55	3.57	4.48
	Column-10	8.10	3.71	4.93
	Column-11	7.45	3.79	4.96
	Column-12	7.50	4.12	4.74
	Column-13	7.95	4.18	5.16
	Column-14	7.65	4.33	4.78
	Column-15	9.75	4.19	5.11
	Column-16	8.05	4.25	5.15
	Column-17	7.80	3.63	3.88
	Column-18	8.36	3.43	4.82
[14]	U-BP-0	5.93	1.33	3.05
	U-BP-34	5.40	1.67	2.43
	U-BP-90	8.20	1.89	4.48
[17]	LC-2.0	11.02	2.57	3.48
	LC-2.0F	8.24	1.35	4.40
	HC-1.5	6.76	1.06	2.76
	HC-2.0	12.24	2.07	4.09
	HC-4.0	13.62	2.67	5.20

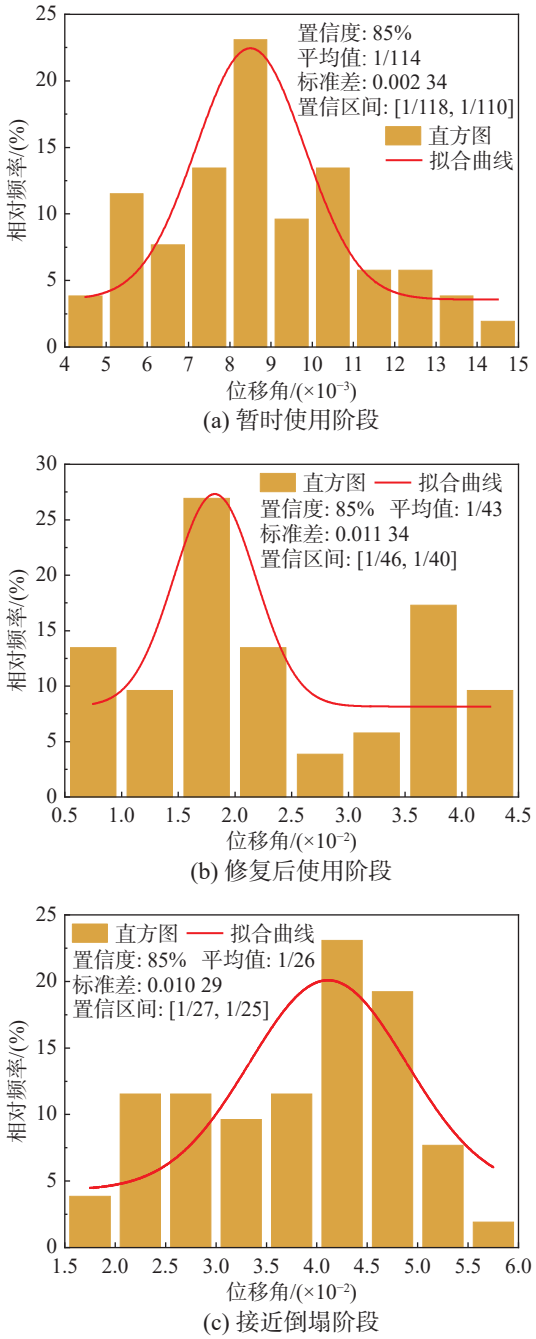


图 10 不同性能水准下位移角统计

Fig. 10 Statistics of drift ratios at different performance levels

坏”的设防目标，结合试验研究结果将 UHPC 柱“正常使用”性能水准下的侧向位移角限值取为 1/300。

暂时使用：UHPC 柱屈服时，其侧向位移角变化区间为 [1/211，1/70]，平均值为 1/114，标准差为 0.00234，在满足 85% 安全保证率下侧向位移角为 1/118。考虑到 UHPC 构件在屈服后屈服强化阶段较长，仍然能够继续传递竖向力，同时参考《建筑抗震设计规范》[33] 中轻微损伤下竖向构件最大层间位移角限值的规定，将“暂时使用”性能水准下的侧向位移角限值取为 1/150。

修复后使用：UHPC 柱承载力达到峰值荷载时，其侧向位移角变化区间为 [1/143，1/23]，平均值为 1/43，标准差为 0.01134，在满足 85% 安全保证率下侧向位移角为 1/46。此时试件变形增大，柱底出现塑性铰，刚度显著减小，处于“中等损伤”状态。参考孙传智等[24]、薛建阳等[25] 分别对于高强钢筋混凝土柱、型钢混凝土异形柱在“中等损伤”状态下所给出的位移角限值 1/80，结合 UHPC 柱良好的变形性能，将“修复后使用”性能水准下的侧向位移角限值取为 1/70。

接近倒塌：UHPC 柱承载力降至峰值荷载 85% 以下时，其侧向位移角变化区间为 [1/56，1/18]，平均值为 1/26，标准差为 0.01029，在满足 85% 安全保证率下侧向位移角为 1/27。此时试件已经明显的倾斜，损伤严重，无法继续稳定传递荷载，随时都将倒塌，为保证构件具备足够安全储备，可以将“接近倒塌”性能水准下的侧向位移角限值取为 1/30。

生命安全：“生命安全”性能水准处于“接近倒塌”和“修复后使用”两个性能水准之间，可简化取值为该两个性能水准所对应位移角限值的平均值，即 UHPC 柱“生命安全”性能水准下的侧向位移角限值取为 1/50。

普通混凝土柱在“正常使用”、“暂时使用”、“修复后使用”、“生命安全”、“接近倒塌”抗震性能水准下侧向位移角限值：1/550、1/250、1/120、1/60、1/50[33]，UHPC 柱在各抗震性能水准下变形指标限值显然更大。结合前文研究结果，这是由于 UHPC 的高抗拉与抗压性能，使 UHPC 构件与传统普通混凝土构件相比，承载力与延性得到明显增强，抗震性能更加优异。

4 结论

对 1 根 HTRB 630 高强钢筋普通混凝土柱和 6 根 HTRB 630 高强钢筋 UHPC 柱进行拟静力试验，分析了混凝土类型、钢纤维掺量、纵筋配筋率、箍筋间距和轴压比对试件抗震性能的影响。基于 52 根 UHPC 墩、柱抗震试验数据的统计分析结果，给出了 UHPC 柱各性能水准下的位移角限值。主要研究结论如下：

(1) UHPC 柱较普通混凝土柱无论在抗弯承载力、变形能力还是耗能能力方面均更加优异，且

破坏现象较轻，综合抗震性能更好。用 UHPC 替换普通混凝土，在满足承载力和变形要求的前提下能够减小试件截面尺寸，降低混凝土、钢筋用量，实现结构的高强及轻量化设计。

(2) 提高 UHPC 柱钢纤维掺量，能有效遏制试件表面裂缝开展，并使试件获得更优异的变形与耗能能力；增加 UHPC 柱纵筋配筋率，试件刚度提高且退化减缓，综合抗震性能提升；减小 UHPC 柱箍筋间距，试件延性增加，变形与耗能能力明显提高；增大轴压比，UHPC 柱峰值承载力提高，但延性更差，变形与耗能能力降低。

(3) 将基于性能的抗震设计理论应用于 UHPC 结构中，结合试验中 UHPC 柱各阶段性能表现，将 UHPC 柱抗震性能水准划分为正常使用、暂时使用、修复后使用、生命安全、接近倒塌 5 个等级并给出柱体在对应抗震水准下损伤情况及试验表现。

(4) 采用侧向位移角为抗震性能量化指标，对本文及多篇文献中共计 52 根 UHPC 墩、柱试验数据进行分析统计，确定了 UHPC 柱在正常使用、暂时使用、修复后使用、生命安全和接近倒塌 5 个抗震性能水准下的侧向位移角限值，分别为 1/300、1/150、1/70、1/50 和 1/30。

参考文献：

[1] 黄祥, 刘天舒, 丁庆军. 超高性能混凝土研究综述[J]. 混凝土, 2019(9): 36 － 38.
HUANG Xiang, LIU Tianshu, DING Qingjun. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. Concrete, 2019(9): 36 － 38. (in Chinese)

[2] ZHANG X H, WU Z M, XIE J, et al. Trends toward lower-carbon ultra-high performance concrete (UHPC)–A review [J]. Construction and Building Materials, 2024, 420: 135602.

[3] DU J, MENG W N, KHAYAT K H, et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC) [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 224: 109220.

[4] 查上, 邓文琴, 刘朵, 等. 波形钢腹板工字钢-UHPC 组合梁抗弯性能试验研究[J/OL]. 工程力学, 1 － 12. https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2023.09.0725, 2024-03-30.
ZHA Shang, DENG Wenqin, LIU Duo, et al. Experimental research on flexural performance of I-Beam-UHPC composite beam with corrugated steel webs [J/OL]. Engineering Mechanics, 1 － 12. https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2023.09.0725, 2024-03-30. (in Chinese)

[5] MA J X, LI G T, DENG X F, et al. Seismic behavior of ultra-high performance concrete columns with GFRP bars under different loading directions [J]. Engineering Structures, 2023, 289: 116334.

[6] 吴方红, 曾彦钦, 徐礼华, 等. 圆形钢管含粗骨料超高性能混凝土中长柱偏压性能试验研究[J]. 工程力学, 2023, 40(增刊 1): 191 － 199, 206.
WU Fanghong, ZENG Yanqin, XU Lihua, et al. Experimental study on eccentric compression performance of circular ultra-high performance concrete with coarse aggregate filled steel tube slender columns [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(Suppl): 191 － 199, 206. (in Chinese)

[7] 周俊, 韦建刚, 杨艳, 等. UHPC 三轴受压力学性能研究[J]. 工程力学, 2023, 40(11): 206 － 217, 226.
ZHOU Jun, WEI Jiangang, YANG Yan, et al. Research on mechanical properties of UHPC under triaxial compression [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(11): 206 － 217, 226. (in Chinese)

[8] WANG R L, MA B, CHEN X. Experimental study on bond performance between UHPC and steel bars [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79: 107861.

[9] HE S F, DENG Z C, YAO J S. Seismic behavior of ultra-high performance concrete long columns reinforced with high-strength steel [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101740.

[10] 祁婷. 超高性能混凝土柱及框架结构抗震性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
QI Ting. Research on seismic performance of ultra-high performance concrete columns and frame structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)

[11] 方文昌. 混合配筋超高性能混凝土矩形截面受压构件抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
FANG Wenchang. Study on seismic behavior of rectangular section compression members of ultra-high performance concrete with mixed reinforcement [D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)

[12] 徐冠普. 型钢活性粉末混凝土柱抗震性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
XU Guanpu. Research on seismic performance of steel reactive powder concrete column [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022. (in Chinese)

[13] 王德弘, 鞠彦忠, 郑文忠. 活性粉末混凝土柱恢复力模型试验研究[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46(9): 3454 － 3460.
WANG Dehong, JU Yanzhong, ZHENG Wenzhong. Experimental study on restoring force model of reinforced reactive powder concrete columns [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(9): 3454 － 3460. (in Chinese)

[14] REN L, FANG Z, ZHONG R, et al. Experimental and numerical investigations of the seismic performance of UHPC box piers [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(2): 597 － 607.

[15] BINDHU K R, ANSARI S, VAISAKH M S. Seismic behaviour of UHPC columns with various tie configurations [J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2021, 22(6): 1097 － 1113.

[16] ZHANG L F, WANG K, ZHANG M, et al. Seismic performance of steel-reinforced reactive powder concrete columns [J]. Structures, 2023, 54: 1788 － 1802.

[17] 邓宗才, 贺少锋, 姚军锁. 配筋 UHPC 柱的抗震性能及影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 51 － 61.
DENG Zongcai, HE Shaofeng, YAO Junsuo. Analysis of

seismic behavior and influencing factors of reinforced UHPC columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(4): 51 − 61. (in Chinese)

[18] 季静, 刘寒, 陈彬彬. 基于试验的型钢混凝土柱抗震性能指标限值研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 1 − 10.
JI Jing, LIU Han, CHEN Binbin. Research on deformation limits of SRC columns based on experimental data [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 1 − 10. (in Chinese)

[19] AMOUSSOU C P D, LEI H G, HALABI Y, et al. Performance-based seismic design methodology for tall buildings with outrigger and ladder systems [J]. Structures, 2021, 34: 2288 − 2307.

[20] DONG G Y, HAJIRASOULIHA I, PILAKOUTAS K, et al. Multi-level performance-based seismic design optimisation of RC frames [J]. Engineering Structures, 2023, 293: 116591.

[21] ZAMEERUDDIN M, SANGLE K K. Review on Recent developments in the performance-based seismic design of reinforced concrete structures [J]. Structures, 2016, 6: 119 − 133.

[22] Federal Emergency Management Agency (FEMA) Next-Generation performance-based seismic design guidelines: Program plan for new and existing buildings [R]. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2006.

[23] ALLAHVIRDIZADEH R, KHANMOHAMMADI M, MAREFAT M S. Probabilistic comparative investigation on introduced performance-based seismic design and assessment criteria [J]. Engineering Structures, 2017, 151: 206 − 220.

[24] 孙传智, 缪长青, 董勃, 等. 不同性能水平下 600 MPa 级高强钢筋混凝土柱位移角限值研究[J]. 工程力学, 2024, 41(3): 50 − 62.
SUN Chuanzhi, MIAO Changqing, DONG Bo, et al. Study on drift ratio limits of 600 MPa grade high-strength steel bars reinforced concrete columns at different performance levels [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(3): 50 − 62. (in Chinese)

[25] 薛建阳, 周超锋, 刘祖强, 等. 型钢混凝土异形柱损伤行为及性能量化指标研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 1 − 11.
XUE Jianyang, ZHOU Chaofeng, LIU Zuqiang, et al. Research on damage behavior and quantitative indexes for steel reinforced concrete column with irregular section [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 1 − 11. (in Chinese)

[26] 崔济东, 韩小雷, 龚涣钧, 等. 钢筋混凝土柱变形性能指标限值及其试验验证[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2018, 46(5): 593 − 603.
CUI Jidong, HAN Xiaolei, GONG Huanjun, et al. Deformation limits of reinforced concrete columns and their experimental verification [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(5): 593 − 603. (in Chinese)

[27] 陈金波. 高强纤维混凝土柱抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
CHEN Jinbo. Research on seismic performance of high strength fiber-reinforced Concrete Columns [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)

[28] GB/T 50081−2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
GB/T 50081−2019, Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)

[29] GB/T 228.1−2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
GB/T 228.1−2021, Metallic materials —Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[30] XU S C, WU C Q, LIU Z X, et al. Experimental investigation of seismic behavior of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete columns [J]. Engineering Structures, 2017, 152: 129 − 148.

[31] 陈宝春, 林毅焌, 杨简, 等. 超高性能纤维增强混凝土中纤维作用综述[J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2020, 48(1): 58 − 68.
CHEN Baochun, LIN Yijun, YANG Jian, et al. Review on fiber function in ultra-high performance fiber reinforced concrete [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 58 − 68. (in Chinese)

[32] 李艳艳, 李泽高, 刘坤, 等. 配置 HRB500 钢筋 T 形截面混凝土柱抗震性能研究[J]. 郑州大学学报 (工学版), 2014, 35(1): 89 − 93.
LI Yanyan, LI Zegao, LIU Kun, et al. Research on seismic behavior of HRB500 reinforced concrete T-shaped section columns [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, 35(1): 89 − 93. (in Chinese)

[33] GB 50011−2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011−2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[34] HOSE Y, SILVA P, SEIBLE F. Development of a performance evaluation database for concrete bridge components and systems under simulated seismic loads [J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(2): 413 − 442.

[35] STONE W C, TAYLOR A W. Seismic performance of circular bridge columns designed in accordance with AASHTO/CALTRANS standards [R]. Gaithersburg: U. S. Dept. of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 1993.

[36] 陆本燕, 刘伯权, 刘鸣, 等. 钢筋混凝土桥墩性能指标量化研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 49 − 57.
LU Benyan, LIU Boquan, LIU Ming, et al. Quantitative research on reinforced concrete performance index of reinforced concrete bridge column [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 49 − 57. (in Chinese)

[37] 门进杰, 史庆轩, 周琦. 框架结构基于性能的抗震设防目标和性能指标的量化[J]. 土木工程学报, 2008, 41(9): 76 − 82.
MEN Jinjie, SHI Qingxuan, ZHOU Qi. Performance-based seismic fortification criterion and quantified performance index for reinforced concrete frame structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(9): 76 − 82. (in Chinese)