

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.04.002

UHPC-NC 组合柱抗震性能研究

陈 斌, 罗 宇, 卿 湖

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了提高结构短柱的抗震性能, 提出了超高性能混凝土 (UHPC) - 普通混凝土 (NC) 组合柱的新型结构形式, 并采用 ABAQUS 有限元软件对其进行进行了伪静力试验分析, 研究了 UHPC-NC 组合柱在轴压比为 0.2 时, 低周往复变位移荷载作用下的滞回特性、延性性能、耗能能力、刚度退化等抗震性能, 并与普通混凝土柱的抗震性能进行了比较。研究表明: UHPC-NC 组合柱的延性性能、耗能能力均较普通混凝土柱有较大提升, 其中 UHPC-NC 组合柱 ZH-4 模型的延性系数达 4.0, 相比于普通混凝土柱的延性系数最大值 2.6, 约提高了 54%; 从刚度退化看, 当加载至中后期, UHPC-NC 组合柱较普通混凝土柱的刚度退化速率更慢, 其中 ZH-4 模型的刚度退化性能表现最好。

关键词: 超高性能混凝土; 组合柱; 耗能能力; 刚度退化; 延性

中图分类号: TU756.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)04-0008-08

引文格式: 陈 斌, 罗 宇, 卿 湖. UHPC-NC 组合柱抗震性能研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(4): 8-15.

Study on the Seismic Performance of UHPC-NC Composite Columns

CHEN Bin, LUO Yu, QING Hu

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of an improvement of the seismic performance of structural short columns, a new structural form of ultra-high performance concrete (UHPC) - ordinary concrete (NC) composite columns has thus been proposed, with a pseudo-static test analysis to be carried out by using ABAQUS finite element software, followed by a study on the hysteretic performance, ductility, energy dissipation capacity and stiffness degradation of UHPC-NC composite columns under a low cyclic reciprocating variable displacement load with an axial compression ratio of 0.2, as well as a comparison with that of ordinary concrete columns. The results show that the ductility and energy dissipation performance of UHPC-NC composite columns are greatly improved compared with that of ordinary concrete columns. The ductility coefficient of ZH-4 model of UHPC-NC composite columns reaches 4.0, which is about 54% higher than the maximum ductility coefficient of 2.6 of ordinary concrete columns; in terms of stiffness degradation, UHPC-NC composite columns are characterized with a slower rate of stiffness degradation than ordinary concrete columns when loaded in the middle and late period, with ZH-4 model exhibiting the best performance of stiffness degradation.

Keywords: ultra-high performance concrete; composite column; energy dissipation capacity; stiffness degradation; ductility

收稿日期: 2021-10-27

基金项目: 湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目 (2019JJ60051); 湖南省教育厅科研基金资助项目 (18C0488)

作者简介: 陈 斌 (1982-), 男, 湖南浏阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为新材料及新型结构,

E-mail: abin426@163.com

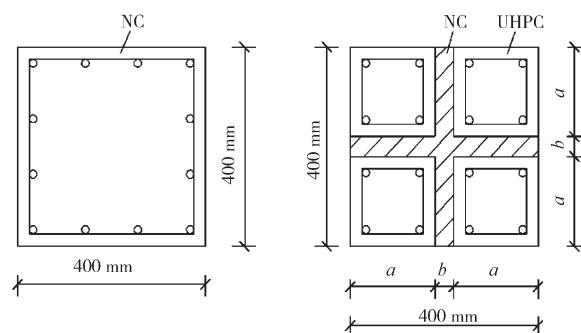
0 引言

在现有高层框架结构柱、桥梁桥墩柱中, 由于轴压比的限制, 底部的柱截面较大, 剪跨比较小, 故底部的框架柱可被视为短柱(简称 RC 短柱), 常规的普通钢筋混凝土短柱水平刚度较大, 变形能力和耗能性能较差^[1], 在地震作用下易出现破损现象。为改善短柱的抗震性能, 国内外很多学者对其进行了研究。如郭子雄等^[2]总结了改善 RC 短柱抗震性能的方法, 主要包括采用箍筋加密或配置“X”筋方式加强的方法, 使用钢管混凝土柱、钢套管、钢板箍约束和横向预应力增强的方法等。贾金青等^[3]研究了 C95~C100 超高强混凝土短柱, 在低周反复荷载作用下构件的抗震性能, 得出以下结论: 其破坏形态为剪切破坏, 脆性越大轴压比越高; 其位移延性越差, 体积配箍率越高, 抗震延性越好。李忠献等^[4-5]对普通钢筋混凝土分体柱进行了相关试验与数值模拟的抗震性能研究, 并得出普通钢筋混凝土分体柱的位移延性性能良好, 分体柱的变形能力较短柱要好的结论。吴诚等^[6]指出, 钢管超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)短柱的破坏形态与方钢管普通混凝土短柱相似, 但是超高性能钢纤维混凝土填充方钢管柱表现出了更好的延性、耗能能力和滞回性能。马福栋等^[7]对梁柱节点核心区采用 UHPC 材料的节点抗震性能进行了研究, 发现当 UHPC 的纤维掺量较大时, 适当配置箍筋对核心区耐损伤能力的提高效果显著, 位移峰值后的承载力退化缓慢, 滞回环饱满, 耗能能力较强。

通过上述关于短柱抗震性能方面的研究可以得知, 由于 RC 短柱的延性较差, 无法保证其抗震性能, 通常采用增大柱截面和配筋、或采用钢管加强、或将普通混凝土(normal concrete, NC)替换为超高高性能混凝土, 以达到“强柱”效果, 提高 RC 短柱的延性, 但是易造成其延性增大的同时刚度也随之增大, 地震作用下不利于发挥其消能减震作用, 从而影响整个结构的抗震性能, 不利于结构抗震。针对上述短柱抗震性能的不足和缺陷, 本文提出了超高性能混凝土(UHPC)-普通混凝土(NC)组合柱的新型结构形式, 并且对 UHPC-NC 组合柱进行了伪静力荷载数值模拟试验, 探究了不同组合截面面积比的普通混凝土与超高性能混凝土组合柱的耗能能力、延性系数、刚度退化等抗震性能, 并且与 RC 短柱的耗能能力进行了比较, 以期得出最佳的 UHPC-NC 组合柱截面面积组合, 同时检验 UHPC-NC 组合柱的抗震性能。

1 UHPC-NC 组合柱结构

由于 UHPC 具有超高强度、高韧性、高耐久性等良好的力学性能^[8-10], 因此, 在普通钢筋混凝土整体柱中将部分普通混凝土替换为配筋 UHPC 柱, 使其形成 UHPC-NC 整体组合柱结构。RC 短柱与 UHPC-NC 组合柱结构示意图见图 1, 其中图 1a 为参考某框架结构工程^[11-12]的普通钢筋混凝土柱, 图 1b 为 UHPC-NC 组合柱结构, 其 4 个角点采用 UHPC 浇筑或预制, UHPC 柱之间采用普通混凝土 NC 填充, 可采用适当的抗剪连接, 使 UHPC 柱与 NC 柱形成整体组合柱。



a) 普通钢筋混凝土柱 b) UHPC-NC 组合柱

图 1 RC 短柱与 UHPC-NC 组合柱结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of RC short columns and UHPC-NC composite columns

UHPC-NC 组合柱在没有发生地震或者地震等级较低的情况下, 整体组合柱中普通混凝土不会发生开裂或者破坏, 从而使整个结构有较大刚度, 整体受力性能较好, 有利于结构抗风; 当地震等级增大到一定等级时, 整体组合柱中普通混凝土达到或者超过其抗拉强度或抗剪强度, 使其发生开裂或破坏, 而此时组合柱中超高性能混凝土因其超高性能并未达到开裂强度, 导致组合柱中超高性能混凝土柱结构形成“分体柱”形式, 其具有良好的延展性能^[5]和耗能能力^[11-12], 大大提高了结构整体的抗震能力, 而且此时整体组合柱转变为柔性柱, 也改善了柱顶附近的主梁及柱身的受力情况。

为了研究 UHPC-NC 组合柱结构的抗震性能, 本文参考某框架结构工程^[13-14], 该组合柱模型的 4 个边角采用 4 根配筋 UHPC 柱, 中间部分采用 C40 素混凝土柱填充。截面尺寸为 400 mm × 400 mm, 柱净高取层高 2.8 m 的一半, 即 $H=1\ 400$ mm。为了研究不同面积比的普通混凝土与超高性能混凝土组合柱的抗震性能, 设计了 UHPC 柱边长尺寸为 140~180 mm 的 5 组 UHPC-NC 组合柱, 并与截面宽度为 400 mm 的普通钢筋混凝土柱进行比较, 如图

1所示。由于UHPC-NC组合柱的特殊布置方式，UHPC-NC组合柱各模型配置16 Φ 16纵筋，箍筋采用 Φ 8@100，普通混凝土柱配置12 Φ 18纵筋，箍筋采用 Φ 10@100；普通混凝土柱纵向配筋率为1.908%，UHPC-NC组合柱纵向配筋率为2.010%，两者纵向配筋率非常接近，相差不到0.12%，影响较小。UHPC-NC组合柱的体积配箍率随着UHPC柱边长尺寸变化而变化。各模型参数信息具体如表1所示。

表1 各模型参数信息表

Table 1 Parameter information table of each model

试件编号	UHPC抗压强度 / MPa	NC抗压强度 / MPa	体积配箍率 / %	纵向配筋率 / %	结点过渡区高度 / mm	UHPC柱尺寸 (a × a) / mm × mm
ZT-1		40	0.897	1.908	0	
ZH-1	139.46	40	1.161	2.010	200	180 × 180
ZH-2	139.46	40	1.071	2.010	200	170 × 170
ZH-3	139.46	40	0.982	2.010	200	160 × 160
ZH-4	139.46	40	0.893	2.010	200	150 × 150
ZH-5	139.46	40	0.804	2.010	200	140 × 140

注：ZT表示RC短柱，ZH表示UHPC-NC组合柱。

2 组合柱计算模型

采用有限元软件ABAQUS，对UHPC-NC组合柱结构和普通钢筋混凝土柱模型进行理论分析与计算，为了模拟实际结构边界条件，在模型底部增加了结点底座，且不考虑组合柱中UHPC与普通混凝土之间的滑移，以及UHPC、普通混凝土与钢筋间的黏结滑移；UHPC-NC组合柱在柱顶考虑了200 mm的UHPC结点过渡区；计算模型的底部采用固结。RC短柱与UHPC-NC组合柱模型如图2所示。

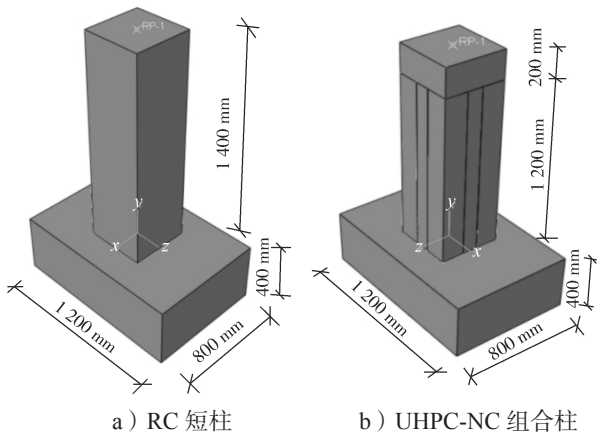


图2 RC短柱与UHPC-NC组合柱模型图

Fig. 2 Schematic diagram of RC short columns and UHPC-NC composite column model

在有限元模型柱顶部施加竖向荷载和水平荷载，设置竖向轴压比为0.2，水平荷载加载制度采用变位

移荷载，每级位移幅值增幅 $\Delta=1$ mm，直至模型破坏为止。具体的水平加载制度如图3所示，模型UHPC采用塑性本构模型，普通混凝土采用混凝土损伤塑性本构模型，并采用C3D8R单元。钢筋采用理想弹塑性本构模型^[15]，并采用Truss单元，各模型的具体配筋形式如图4所示。

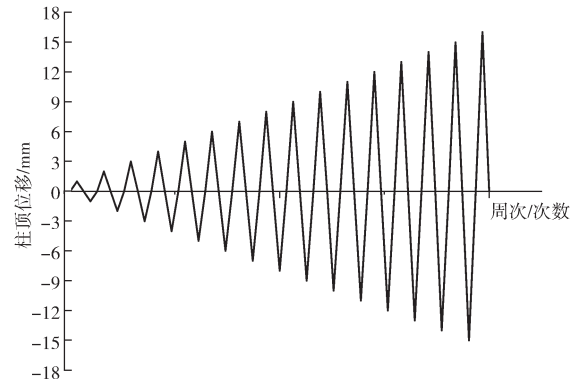


图3 水平加载制度图

Fig. 3 Horizontal loading system diagram

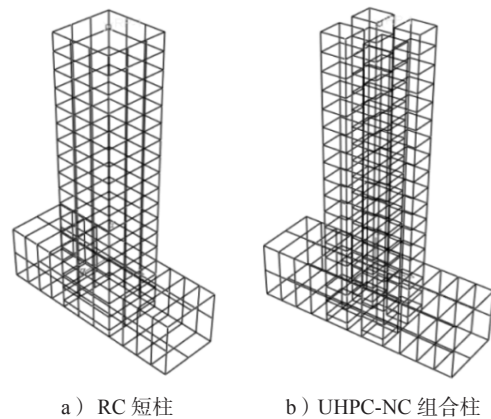


图4 计算模型的配筋形式图

Fig. 4 Reinforcement form diagram of the calculation model

普通混凝土本构关系采用文献[13]所提供的混凝土损伤关系，钢筋的应力-应变关系如图5所示。超高性能混凝土的本构关系^[16-17]如图6所示。

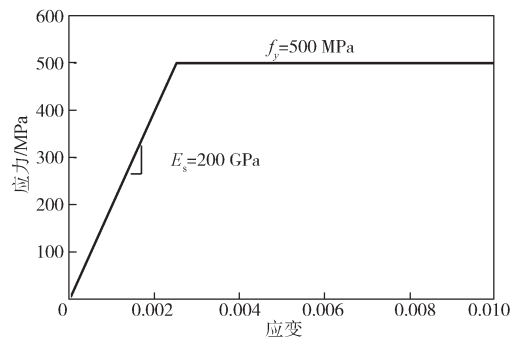


图5 钢筋的应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship of reinforcing bars

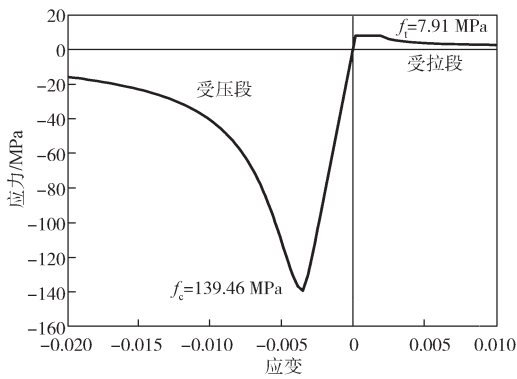


图 6 UHPC 的应力 - 应变关系曲线

Fig. 6 Stress-strain relationship curves of UHPC

3 试验过程与结果分析

3.1 试验过程

伪静力试验采用两个分析步完成, 首先完成竖向加载, 再对模型做水平变位移加载, 加载过程中水平荷载会出现峰值 P_{max} 。加载过程结束后, 当水平荷载降至 $0.85P_{max}$ ^[18] 即停止试验。

随着加载过程的进行, RC 短柱最先在柱底出现塑性受拉损伤, 随着加载增大, 整个柱身出现大范围受拉损伤, 并从柱底蔓延至上部柱身。对于 UHPC-NC 组合柱, 随着加载进行, 首先是普通素混凝土柱损伤明显, 然后是超高性能混凝土组合柱刚度下降, 但由于超高性能混凝土柱的抗拉性能较强, 以及组合柱逐渐转变为分体柱的特点, 使得其承受水平反复荷载的能力逐渐提升。

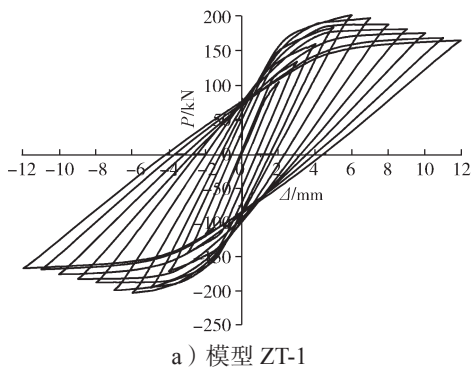
3.2 试验结果与分析

3.2.1 滞回曲线

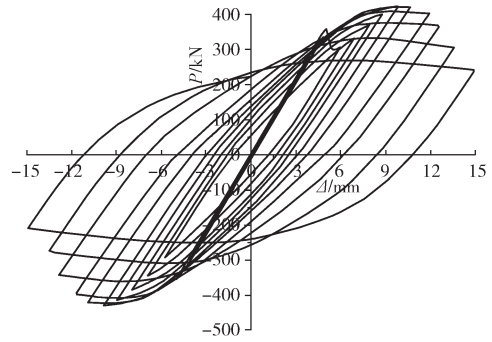
各模型结构的荷载 - 位移滞回曲线如图 7 所示。

由图 7 可知:

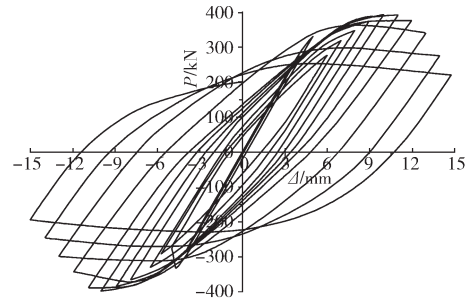
1) 各模型的滞回曲线较为饱满, 形状呈梭形, 具有良好的耗能能力, 且 UHPC-NC 组合柱的变形能力和位移延性较 RC 短柱的更好。可见, UHPC-NC 组合柱结构形式使柱的抗震性能明显改善。



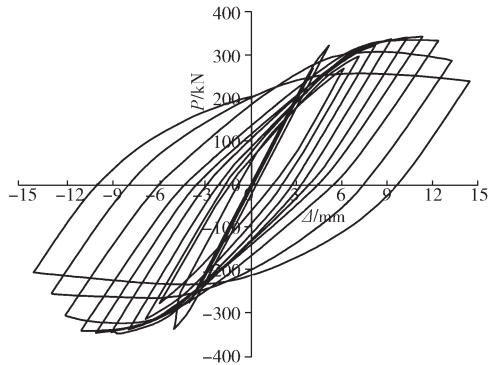
a) 模型 ZT-1



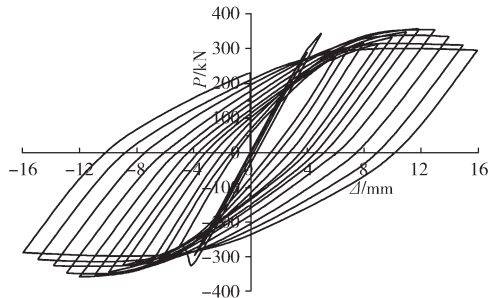
b) 模型 ZH-1



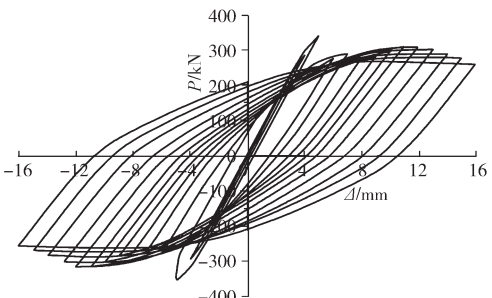
c) 模型 ZH-2



d) 模型 ZH-3



e) 模型 ZH-4



f) 模型 ZH-5

图 7 各组模型的滞回曲线图
Fig. 7 Hysteresis curves of each model

2) 未达到屈服荷载前, UHPC-NC 组合柱各模型的滞回曲线呈线性发展, 形状细长, 滞回曲线的滞回环面积较小, 耗能能力较差。各模型达到屈服荷载之后, 滞回环面积不断增大, 耗能能力增强。

3) UHPC-NC 组合柱在屈服之后出现明显的滞回曲线下降段, 此时, 由于普通混凝土柱被破坏, UHPC-NC 组合柱逐渐转变为 UHPC “分体柱” 受力形式, 柱整体刚度有所下降。在随后的加载过程中, 其荷载值不断增大, 直至达到峰值荷载。各模型达到峰值荷载之后, 随着位移加载进行, 纵筋完全屈服, 各模型承载力迅速下降, 模型被破坏。

4) 比较各模型的滞回曲线卸载段, 可看到 RC 短柱卸载时呈线性滞回, 而 UHPC-NC 组合柱的卸载阶段呈凹形曲线滞回, 图像更饱满。表明 UHPC-NC 组合柱耗能能力更好, 塑性变形能力更强。

3.2.2 骨架曲线与延性系数

通过计算, 得到模型的滞回曲线, 可由滞回曲线确定其骨架曲线, 并进一步计算其屈服位移及屈服荷载值, 根据 R. Park^[19] 方法确定的屈服位移及屈服荷载如图 8 所示。由 D 点先确定峰值荷载 P_{max} , 再在骨架曲线上作 $0.75P_{max}$ 对应的 A 点, 连接 OA, 并作延长线, 与峰值荷载水平线相交于 B 点, 过 B 点向下作垂线, 与骨架曲线相交于 C 点, 即为屈服点, 取屈服点 C 对应的水平位移为 Δ_y , 取水平荷载 $0.85P_{max}$ 所对应的点为破坏点, 则破坏点对应的位移为 Δ_u , 位移延性系数采用 u_d 表示, 按照下式计算:

$$u_d = \Delta_u / \Delta_y$$

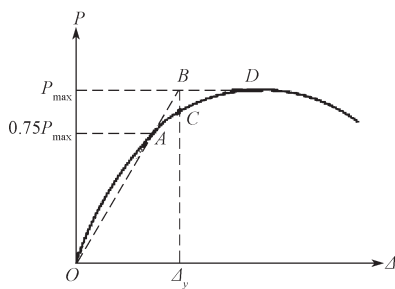


图 8 R. Park 法示意图

Fig. 8 R. Park method

各模型的骨架曲线如图 9 所示。由图 9 可以得知: 各 UHPC-NC 组合柱的骨架曲线均有明显的下降段, 值得注意的是, UHPC-NC 组合柱的骨架曲线中存在两个明显的峰值, 这是因为在普通混凝土柱被破坏后, 柱整体刚度有所下降。随着 UHPC-NC 组合柱逐渐转变为 UHPC “分体柱” 的受力形式, 柱骨架曲线继续上升, 形成第二个峰值; 各组合柱的最大承载力均较 RC 短柱的最大承载力有明显提升, 极限位移明显增大。

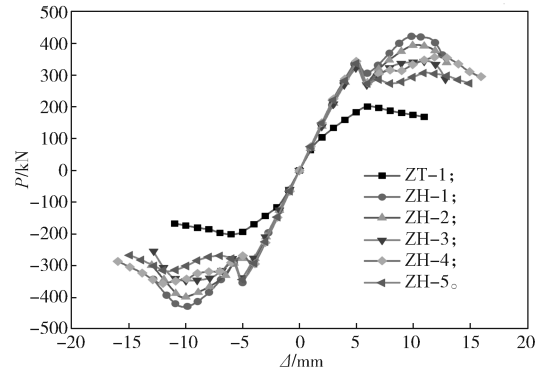


图 9 各模型的骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of each model

根据图 8 和图 9 计算出各模型的位移延性系数, 如表 2 所示。

表 2 各模型的位移延性系数

Table 2 Displacement ductility coefficients of each model

试件编号	Δ_y/mm	Δ_u/mm	u_d
ZT-1	4.2	11.0	2.6
ZH-1	4.4	13.0	3.0
ZH-2	4.2	13.0	3.1
ZH-3	4.1	13.0	3.2
ZH-4	4.0	16.0	4.0
ZH-5	4.0	15.0	3.8

分析表 2 中的数据可知: 1) UHPC-NC 组合柱位移延性系数均比 RC 短柱的高, 其中 ZH-4 模型的位移延性系数最好, 达到 4.0, 较 ZT-1 模型位移延性系数最大值 2.6 提高了约 54%。2) ZH-1、ZH-2、ZH-3、ZH-4 模型的位移延性系数依次增大, 这是由超高性能混凝土柱截面面积依次减少、柱的变形能力增强所致, ZH-5 模型的位移延性系数较 ZH-4 模型的位移延性系数下降, 其原因可能是当超高性能混凝土柱截面过小时, 虽然其变形能力有所增强, 但是其抵抗水平荷载能力下降。

3.2.3 耗能能力

等效黏滞阻尼系数常被作为一个指标来判别结构的耗能能力, 取对应的滞回环作为计算对象, 其计算图见图 10。

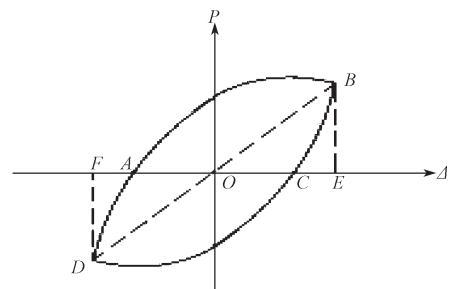


图 10 等效黏滞阻尼系数计算示意图

Fig. 10 Schematic diagram of equivalent viscous damping coefficient calculation

等效阻尼系数 h_e 可以按滞回曲线 $ABCD$ 的面积来计算, 公式如下:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABC} + S_{ACD}}{S_{OBE} + S_{ODF}}$$

一般情况下, h_e 越大, 结构的耗能能力越强。各组模型的峰值荷载、破坏荷载值以及对应点的等效黏滞阻尼系数见表 3。

表 3 各模型的等效黏滞阻尼系数

Table 3 Viscous damping coefficients of each model

模型 编号	峰值荷载点					破坏荷载点				
	P/kN	Δ/mm	滞回面积 / (kN·mm)	h_e	相对变形值(Δ/H)	P/kN	Δ/mm	滞回面积 / (kN·mm)	h_e	相对变形值 (Δ/H)
ZT-1	201.17	5.98	1 192.8	0.158	0.004 3	168.19	10.98	2 263.8	0.195	0.007 8
ZH-1	-428.23	-9.85	3 780.0	0.143	0.007 0	363.89	12.98	7 826.5	0.272	0.009 0
ZH-2	-398.21	-9.99	3 722.8	0.149	0.007 1	339.91	12.95	8 002.0	0.290	0.009 3
ZH-3	-357.25	-9.99	3 576.3	0.164	0.007 1	297.26	12.94	7 161.6	0.309	0.009 2
ZH-4	356.41	11.98	5 325.5	0.200	0.008 5	295.32	15.98	10 139.5	0.342	0.011 4
ZH-5	-323.33	-10.99	3 997.3	0.179	0.007 8	274.15	14.95	8 129.2	0.316	0.010 7

由表 3 可知:

1) 在峰值荷载点处, ZT-1 模型的 h_e 值要略高于 ZH-1、ZH-2 模型的 h_e 值, 说明此时普通混凝土柱 ZT-1 的耗能能力较好。此时所有试件中, 耗能能力最好的是 ZH-4 模型, 其滞回环面积是 RC 短柱的 4.46 倍; ZH-5 模型在峰值荷载点时的耗能能力较好, 其滞回环面积是 RC 短柱的 3.35 倍。

2) 在破坏荷载点处, ZH-4 模型的 h_e 值最大, 说明其耗能能力最好, 其滞回环面积约是 RC 短柱的 4.48 倍; ZH-5 模型在破坏荷载点时的滞回环面积是 RC 短柱模型的 3.64 倍; 此时 UHPC-NC 组合柱模型的耗能能力均明显强于普通混凝土柱的; ZH-5 模型的耗能能力强于 ZH-1、ZH-2、ZH-3 这 3 组模型, 但弱于 ZH-4 模型。

3) 比较各模型的相对变形值, 可知在峰值荷载点、破坏荷载点处 ZH-4 模型的变形值最大, 表明该组模型承受水平往复荷载的变形能力更强, ZH-5 模型的次之。其中, ZH-4 模型在破坏荷载点时的相对变形值是 RC 短柱的 1.46 倍。

3.2.4 刚度退化

从各模型的骨架曲线 (图 9) 可以得知, 各模型的刚度与位移、循环次数等因素有关。在低周反复变位加载情况下, 模型刚度的变化情况较为复杂。在滞回曲线图中, 由原点与加载点的连线可以得到割线的斜率, 可将结构的真实刚度等效为线性等效刚度。为了地震反应分析的需要, 以割线刚度代替切线刚度。刚度退化反映的是结构在低周往复荷载作用下结构性能的退化。刚度退化越慢, 说明结构的抗震性能越强; 反之, 则说明结构的抗震性能越弱。根据文献 [18] 中的抗震试验, 各试件在循环荷载下的平均刚度 K_i 定义如下:

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

式中: P_i 为第 i 次峰值点的荷载值;

Δ_i 为第 i 次峰值点位移值。

各试验组的平均刚度 K_i 计算结果如图 11 所示。

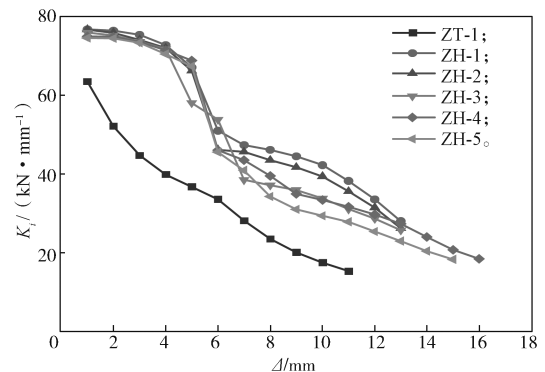


图 11 各模型平均刚度变化趋势图

Fig. 11 Variation trend of average stiffness of each model

由图 11 可知:

1) 加载初期, UHPC-NC 组合柱的刚度退化速率均较为缓慢, 说明此阶段各模型还处于弹性变形阶段, 而 RC 短柱的刚度退化速率较快, 表明 RC 短柱的抗拉能力较差。

2) 当水平位移加载至 4~7 mm 时, UHPC-NC 组合柱的刚度退化速率明显快于 RC 短柱的, 这是由于 UHPC-NC 组合柱中普通混凝土柱被破坏, 仅有 UHPC 柱工作, 整个柱的工作截面迅速减小, 因而 UHPC-NC 组合柱整体刚度快速下降。

3) 当 RC 短柱加载至 7 mm 到破坏时, UHPC-NC 组合柱的刚度退化速率均慢于 RC 短柱的, 这是因为此时组合柱中的 UHPC “分体柱” 发挥作用, 抵抗水平加载, 表明 UHPC-NC 组合柱的刚度退化表现

更好。

4) 当水平位移加载至 11~13 mm 时, ZH-4、ZH-5 模型的刚度退化速率明显慢于其余 3 组 UHPC-NC 组合柱的, 这表明 ZH-4、ZH-5 模型的刚度退化速率较慢。

5) 当水平位移加载至 13~15 mm 时, ZH-5 模型的刚度退化速率要略慢于 ZH-4 模型的, 但是由于 ZH-4 模型的刚度较大, 其在 16 mm 时仍然能工作, 而此时 ZH-5 模型已经被破坏, 表明前面阶段的加载破坏程度对 ZH-4 模型的累积量相对最小, 因而组合柱 ZH-4 模型的刚度退化表现最好。

4 结论

本文提出了 UHPC-NC 组合柱的新型结构形式, 并采用 ABAQUS 有限元软件对其进行了伪静力试验分析, 研究了 UHPC-NC 组合柱在低周往复变位移荷载作用下的抗震性能, 得到了以下结论:

1) UHPC-NC 组合柱的滞回曲线形状呈梭形, 具有良好的耗能能力。在滞回曲线的卸载阶段, UHPC-NC 组合柱的滞回曲线退化呈凹形曲线, 而 RC 短柱的滞回曲线退化呈线性, 并且 UHPC-NC 组合柱的滞回曲线更为饱满, 表明其较 RC 短柱具有更好的耗能能力。

2) UHPC-NC 组合柱具有良好的延性性能, 其中 ZH-4 模型的延性性能最好, 其位移延性系数达 4.0, 较 ZT-1 模型的位移延性系数最大值 2.6, 约增加了 54%, UHPC-NC 组合柱的延性性能相比 RC 短柱有较大提高, 提高幅度为 15%~54%。

3) UHPC-NC 组合柱的抗震能力相较于普通混凝土柱有大幅度提高。其峰值荷载点滞回曲线面积是普通混凝土柱的 3.00~4.46 倍, 破坏荷载点的滞回曲线面积是普通混凝土柱的 3.16~4.48 倍。

4) 从刚度退化变化情况来看, 加载中后期, 由于 UHPC 分体柱作用, UHPC-NC 组合柱的刚度退化速率明显要慢于 RC 短柱的刚度退化速率, 表明 UHPC-NC 组合柱的刚度退化表现更好; 其中, ZH-4 模型的刚度退化表现最好。

参考文献:

[1] MARTIROSSYAN A, XIAO Y. Flexural-Shear Behavior of High-Strength Concrete Short Columns[J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(4): 679-695.
 [2] 郭子雄, 李传林, 黄群贤. 改善 RC 短柱抗震性能的方法评述 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版),

2007, 39(6): 808-813.

GUO Zixiong, LI Chuanlin, HUANG Qunxian. Assessment on the Schemes for Improving the Seismic Behavior of RC Short Columns[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2007, 39(6): 808-813.

[3] 贾金青, 姜睿, 徐世焯, 等. 超高强混凝土短柱抗震性能的试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(6): 120-126.

JIA Jinqing, JIANG Rui, XU Shilang, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Ultra High-Strength Concrete Short Columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(6): 120-126.

[4] 李忠献. 钢筋混凝土分体柱理论与技术 [J]. 工程力学, 2005, 22(增刊 1): 127-141.

LI Zhongxian. Theory and Technology of Split Reinforced Concrete Columns[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(S1): 127-141.

[5] 李忠献, 代崇阳. 钢筋混凝土分体柱的抗震机理 [J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(3): 41-46.

LI Zhongxian, DAI Chongyang. Seismic Mechanism of Reinforced Concrete Split Column[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(3): 41-46.

[6] 吴诚, 徐慎春, 赵秋山, 等. 方钢管超高性能混凝土短柱抗震性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 188-194.

WU Cheng, XU Shenchun, ZHAO Qiushan, et al. Experimental Research on Seismic Behavior of Ultrahigh-Performance Concrete Filled Square Steel Tubular Short Columns[J]. Industrial Construction, 2019, 49(12): 188-194.

[7] 马福栋, 邓明科, 杨勇. 超高性能混凝土装配整体式框架梁柱节点抗震性能研究 [J]. 工程力学, 2021, 38(10): 90-102.

MA Fudong, DENG Mingke, YANG Yong. Seismic Experimental Study on a UHPC Precast Monolithic Concrete Beam-Column Connection[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(10): 90-102.

[8] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of Reactive Powder Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.

[9] GRAYBEAL B A. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete[R]. Mclean: Federal Highway Administration, 2006: 9-14.

[10] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile Behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(2): 172-184.

[11] 李忠献, 郝永昶, 周兵, 等. 钢筋混凝土分体柱框架结构抗震性能的模式试验研究 [J]. 建筑结构学报,

- 2003, 24(6): 1-10.
LI Zhongxian, HAO Yongchang, ZHOU Bing, et al. Model Test Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Split-Column Frame Structure[J]. China Journal of Building Structures, 2003, 24(6): 1-10.
- [12] 郝永昶, 胡庆昌, 徐云扉, 等. 应用分体柱改善短柱(高轴压比)抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(6): 2-11.
HAO Yongchang, HU Qingchang, XU Yunfei, et al. Experimental Study on Improving Seismic Performance of Short Column (High Axial Compression Ratio) with Split Column[J]. China Journal of Building Structures, 1998, 19(6): 2-11.
- [13] 蒋欢军, 王斌, 吕西林. 钢筋混凝土框架结构楼梯震害分析与设计建议[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 22-28.
JIANG Huanjun, WANG Bin, LÜ Xilin. Seismic Damage Analysis and Design Suggestions for Staircases in RC Frame Structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(3): 22-28.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 36-38.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010: 36-38.
- [15] 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: 207-208.
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 and Building Press, 2011: 207-208.
- [16] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J]. 混凝土, 2008(7): 11-15.
YANG Jian, FANG Zhi. Research on Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Concrete[J]. China Journal of Concrete, 2008(7): 11-15.
- [17] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.
ZHANG Zhe, SHAO Xudong, LI Wenguang, et al. Axial Tensile Behavior Test of Ultra High Performance Concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验方法规程: JGT/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 13-16.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for Seismic Test of Buildings: JGT/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015: 13-16.
- [19] PARK R. Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1989, 22(3): 155-166.

(责任编辑: 廖友媛)