梁兴文,史纪从,于婧,等.免拆超高性能混凝土模板钢筋混凝土柱抗震性能研究[J].地震工程学报,2020,42(3):579-588.doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.579

LIANG Xingwen, SHI Jicong, YU Jing, et al. Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns with Permanent Template of Ultra-High-Performance Concrete[J].China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3):579-588.doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.579

免拆超高性能混凝土模板钢筋混凝土 柱抗震性能研究

梁兴文1,史纪从1,于 靖1,李 林2

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055; 2. 陕西建研结构工程股份有限公司,陕西 西安 710082)

摘要:为研究预制超高性能混凝土(UHPC)模板钢筋混凝土(RC)柱的抗震性能,并验证预制 UH-PC模板在往复荷载作用下是否发生剥离,考虑轴压比、剪跨比、箍筋间距和保护层厚度,设计制作6根免拆模板柱(PTC)和1根 RC 对比柱试件,对其进行拟静力试验,研究其破坏形态、滞回性能、变形和耗能能力以及强度和刚度退化规律等。结果表明,与加载方向垂直的预制 UHPC 模板大约在 PTC 试件峰值荷载的 70%时发生剥离,与加载方向平行的预制 UHPC 模板在试件最终破坏时剥离;在剪跨比、轴压比和箍筋数量均分别相同的条件下,由 UHPC 模板加 10 mm 混凝土作为保护层的试件,其抗震性能相对较好,但其承载力和前期刚度略有减小。

关键词:超高性能混凝土;免拆模板柱;剪跨比;滞回性能;抗震性能
中图分类号:TU352
文献标志码:A
文章编号:1000-0844(2020)03-0579-11
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.579

Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns with Permanent Template of Ultra-High-Performance Concrete

LIANG Xingwen¹, SHI Jicong¹, YU Jing¹, LI Lin²

((1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;
2. Shaanxi Jianyan Structural Engineering Co., Ltd., Xi'an 710082, Shaanxi, China)

Abstract: To examine the seismic behavior of reinforced concrete (RC) columns with prefabricated ultra-high-performance concrete (UHPC) permanent templates and check whether the prefabricated permanent templates are stripped from the surface of the specimen under low-cyclic repeated loading. Pseudo-static tests were conducted for the comparative purpose of six permanent template columns (PTC) and one RC column with varying axial load ratio, shear span ratio, stirrup spacing, and concrete cover. The failure pattern, hysteretic characteristics, deformation capacity, energy dissipation capacity, and stiffness degradation of permanent template columns were studied. Test results showed that the permanent templates that were perpendicular to the

收稿日期:2020-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51278402)

第一作者简介:梁兴文(1952-),男,陕西人,教授,博导,从事建筑结构及抗震研究。E-mail:liangxingwen2000@163.com。

direction of loading stripped at about 70% of the peak load; the permanent templates that were stripped at the final destruction of the specimen parallel to the direction of loading. Within the same shear span ratio, axial load ratio, and several stirrups, the seismic behavior of the specimen with the UHPC template and 10 mm concrete as the cover is relatively better than others, but its bearing capacity and prophase stiffness are slightly reduced.

Keywords: ultra-high-performance concrete; permanent template column; shear span ratio; hysteretic performance; seismic performance

0 引言

在现浇混凝土结构工程中,模板工程一般占工 程造价的 20%~30%,占工程用工量的 30%~ 40%,占工期的 50%左右。为此,采用先进的模板 技术,对于提高工程质量,加快施工进度,降低工程 成本和实现文明施工,均具有十分重要的意义。

超高性能混凝土(UHPC)是具有超高强度、高 韧性和高耐久性的混凝土^[1],在自然养护条件下,其 抗压强度可达到 150 MPa。已有研究结果表 明^[2-11]:纤维(钢纤维或复合有机纤维)的掺入使混 凝土具有较高的耗能能力,改善了普通混凝土的脆 性特征;在拉伸和剪切荷载下具有典型的多裂缝开 展和应变一硬化特性;具有控制裂缝宽度的能力,改 善了混凝土结构的抗震性能;加入两种纤维其耗能 能力比只加入一种纤维的耗能能力好。

Milad 等^[12]研究了超高性能纤维增强混凝土柱 的轴压力学性能,结果表明,小间距和良好构造横向 钢筋有助于改善柱的延性;横向钢筋间距和构造对 于柱轴压强度和延性有重要影响。杨医博等[13]通 过对配筋超高性能混凝土免拆模板圆柱、方柱与海 工混凝土圆柱、方柱承载力的对比研究发现,配筋超 高性能混凝土免拆模板短柱开裂荷载和极限荷载均 高于海工混凝土柱;配筋免拆模板圆柱的提高幅度 更大,使用这种整体式模板的试件在破坏时裂缝不 贯穿模板;破坏时钢筋不外露。王均等[14-15]对使用 钢纤维活性粉末混凝土(RPC)免拆柱模混凝土方形 短柱轴压力学性能进行研究,给出了钢纤维 RPC 永 久柱模厚度的理论计算方法及使用免拆柱模方形钢 筋混凝土(RC)短柱轴压承载力计算公式。吴香 国^[16]提出了基于结构耐久性的叠合墩柱设计概念, 将超高性能纤维改性混凝土永久模板拼接成设计的 形状。郝文秀等[17] 对反复荷载作用下 RPC 空心桥 墩的力学性能进行研究,结果表明,配置横向箍筋桥 墩试件的延性和耗能能力得到明显提高,具有良好 的抗震性能。陈旭^[18]对一榀免拆模板 RC 框架在 静力荷载作用下的研究表明,模板对核心混凝土有

一定的紧箍作用;免拆模板与核心混凝土框架柱具 有良好的协同工作特性。李行^[19]对一榀免拆模板 RC框架在拟静力荷载作用下的研究表明,新型框 架具有较好的延性和耗能能力。池寅等^[20]基于有 限元软件 ABAQUS,对混杂纤维混凝土损伤塑性本 构模型的取值方法进行研究,结果表明,采用混凝土 损伤塑性模型可以准确地描述钢-聚丙烯纤维混凝 土的非线性力学行为。

以上研究所使用模板是通过特定模具一次浇筑 成型,这样制作的模板整体性好,然而内模较难拆 除,且以静力试验为主。因此,本文提出用 UHPC 分片预制免拆模板,使用时拼接成需要的截面形状。 为进一步研究 UHPC 模板 RC 柱的抗震性能,并检 验模板在反复荷载下是否剥离,本文考虑轴压比、剪 跨比、箍筋间距及保护层厚度的影响,设计制作了 6 根免拆模板柱(Permanent Template Column,简称 PTC)和一根 RC 对比柱,通过拟静力加载试验,评 估其可行性及抗震性能。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计 6 个 PTC 试件和 1 个 RC 柱对比试件; PTC 试件的编号为 PTC1~PTC6, RC 试件编号为 RC7。试件参数见表 1 所列。试件截面尺寸及配筋 如图 1 所示。柱截面尺寸均为 300 mm×300 mm; 纵向受力钢筋为 8 Φ 16,箍筋直径为 6 mm,纵筋、箍 筋 均 采用 HRB400 级,其力学性能指标见表2。

表1 试件参数表

Table 1 Parameters of specimens											
试件	加载点	剪跨	设计	<i>\$45 \$5</i>	保护层						
编号	高度/mm	比	轴压比	把肌	厚度/mm						
PTC1	900	3	0.15	φ 6@80	10						
PTC2	900	3	0.30	φ 6@80	10						
PTC3	600	2	0.15	φ 6@100	10						
PTC4	600	2	0.30	φ 6@100	10						
PTC5	600	2	0.15	φ 6@100	20						
PTC6	900	3	0.15	φ 6@150	20						
RC7	900	3	0.15	\$ 6@80	20						

表 4

轴向力 0 水平力 300 3\$16 1 1 000(700) $2 \oplus 16$ 3\$16 1-1 400 **\$**6@100 $2\Phi 20$ 2 $2\Phi 16$ $2\Phi 20$ 1 200 2 2-2 图 1 试件尺寸及配筋图



表 2 钢筋的力学性能指标

Table 2	Mechanical	properties d	of reinfo	rcement
I abit 2	wittenamean	properties o	л тенне	n cement

· ·									
钢筋牌号	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa						
HRB400	6	425	609						
HRB400	16	492	665						

PTC 试件制作时,先制作 UHPC 模板(厚度为 10 mm,宽度分为 280 mm 和 300 mm 两种,高度与试 件同高),待模板到达一定强度后用支架固定于钢筋 骨架表面,而后浇筑普通混凝土。

1.2 材料性能

UHPC 是由石英砂、普通硅酸盐水泥、硅灰、聚 丙烯纤维、13 mm 长钢纤维、水和减水剂拌和而成, 纤维体积掺量为 1.5%;聚丙烯纤维基本参数见表 3。普通混凝土设计强度等级为 C40。试件浇筑时, 预留了 100 mm×100 mm×100 mm 的 UHPC 和 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土立方体试 块、100 mm×100 mm×300 mm 的 UHPC 和混凝 土棱柱体试块,以及狗骨形 UHPC 抗拉试件。试块 与试件同条件养护。混凝土和 UHPC 的力学性能 指标见表 4。UHPC 抗拉试验是将预留的狗骨形试 件用夹具固定在试块两端,而后在拉力试验机上进 行试验。5 个 UHPC 试件的受拉应力-应变曲线见 图 2 所示。

1.3 加载及测试方法

拟静力试验加载装置简图如图 3 所示。竖向荷

表 3 聚丙烯纤维性能指标

Table 3 Performance indicators of polypropylene fiber

纤维	长度	直径	抗拉强度	弹性模量	伸长率
名称	$/\mathrm{mm}$	$/\mu{ m m}$	/MPa	/GPa	/ %
PP	12	48	450	5	8

Table 4	Mech	anical pr	operties	of concre	te and U	HPC
材料 类别	f _{cu} ∕MPa	f ₀ ∕MPa	E /GPa	$\epsilon_{\rm cu}$	∫t ∕MPa	ε _t
混凝土	46.5	38.8	33.9	-	-	-
UHPC	76.6	72.9	40	0.0034	4.5	0.01

混凝土和 UHPC 力学性能

注: ε_{cu} 为极限压应变; f_t 为极限抗拉强度; ε_t 为极限拉应变。



图 2 UHPC 受拉应力-应变曲线





载由 500 kN 的竖向油压千斤顶提供,水平反复荷载由 1 000 kN 水平作动器施加。水平荷载采用荷载-位移混合控制方法。试件屈服前,按荷载控制,每级荷载增量为 20 kN,循环 1 次;屈服后采用位移控制,每级位移循环 3 次。

纵向钢筋应变片布置在距柱底 50 mm 处,箍筋 应变片布置在与加载方向平行侧箍筋中间部位,纵 筋、箍筋应变片布置如图 4 所示。柱顶位移计用以 测量加载点水平位移,塑性铰区布置的竖向和交叉 位移计用以测量柱两侧拉压变形及塑性铰区的斜向 变形,梁底位移计用以测量试件滑动,位移计布置图 见图 5。



图4 应变片布置图

Fig.4 Arrangement of strain gauges





2 试验现象分析

2.1 破坏现象及破坏机理分析

在反复水平荷载作用下,各 PTC 试件的破坏特 征基本相似。柱受拉侧模板开裂以前,试件基本处 于弹性状态。随着水平荷载增加,首先在受拉侧柱 底部出现细微水平裂缝,开裂荷载约为 98~141 kN。继续增加水平荷载,受拉侧模板表面出现新的 细小水平裂缝;与加载方向平行的侧面模板也出现 细小水平裂缝。此时,加、卸载曲线基本重合,卸载 时可观测到裂缝闭合现象。

加载至纵筋实测应变达到其屈服应变,各试件的屈服荷载为109~201 kN;剪跨比为3的试件柱顶点屈服侧移角平均值为1/180,剪跨比为2的试件柱顶点屈服侧移角平均值为1/200;UHPC模板未发生剥离破坏。

继续加载,与加载方向垂直的模板发生剥离,剥 离荷载为120~200 kN,其平均值为峰值荷载平均 值的70.74%;此时,剪跨比为2的试件柱顶侧移角 平均值为1/172,剪跨比为3的试件柱顶侧移角平 均值为1/152。

继续施加荷载,与加载方向平行的模板出现细 小斜裂缝,反向加载时,交叉斜裂缝形成;已发生剥 离的模板在往复荷载作用下反复出现张开、闭合现 象。加载至140~260 kN时,荷载-位移曲线出现拐 点,表明试件整体屈服,开始位移控制加载。此时, 剪跨比为2的试件柱顶侧移角平均值为1/95;剪跨 比为3的试件柱顶侧移角平均值为1/94。

当水平位移达到1Δ,时,各 PTC 试件的塑性铰 区内出现新的斜向裂缝或原有裂缝延伸,裂缝宽度 不断加大;试件达到峰值荷载,正向加载时峰值荷载 为165~314 kN,负向加载时峰值荷载为一149~ -301 kN。各试件在达到峰值荷载时的裂缝分布 情况如图6所示。剪跨比为2的试件正、负向柱顶 侧移角平均值分别为1/47、1/52;剪跨比为3的试 件正、负向柱顶侧移角分别为1/56、1/52。

后续位移加载过程中不再出现新裂缝,而是原 裂缝不断扩展延伸。已剥离模板在往复的推、拉作 用下反复张开、闭合。

在1Δ,~3Δ,位移控制加载过程中,各试件第 一批出现的裂缝发展为主裂缝,试件 PTC1、PTC3、 PTC5、PTC6 的模板在大约柱身高度的 1/2 处断 裂。随着位移的继续加大,水平荷载迅速下降,停止 加载。各试件特征点荷载值见表 6 所列。各试件最 终破坏时的裂缝分布情况如图 7 所示。

由上述破坏现象可见:

(1) PTC 试件与 RC 试件相比,前者的柱身裂 缝数量相对较少,后续加载过程中裂缝宽度基本保 持不变,仅是柱底模板裂缝长度扩展。

(2) UHPC 模板与混凝土界面的黏结力约束了 PTC 内部混凝土的脱落。模板内部混凝土开裂后, 由于模板的约束作用及与内部混凝土的黏结作用, 使开裂混凝土块保持在原有位置不变,避免柱在达 到峰值荷载后承载力迅速下降。破坏时,PTC试件



(a) TPC1



(b) TPC2





(d) TPC4



(e) TPC5



(f) TPC6 (g) TPC7 峰值荷载时的试件裂缝分布 图 6 Fig.6 Cracks distribution at peak load



(a) TPC1



(b) TPC2



(c) TPC3



(d) TPC4



(e) TPC5





(g) TPC7

内部开裂混凝土块较小, 而 RC 柱的开裂混凝土块 较大。

(3) 轴压比为 0.3 的试件(PTC2),其斜向裂缝 比较明显;轴压比为 0.15 的试件(PTC1、PTC6),其 斜向裂缝比较少;剪跨比为 2 的试件(PTC3)其斜向 裂缝比较明显。

2.2 滞回曲线和骨架曲线

7个试件柱顶水平荷载-位移滞回曲线如图 8 所示;各试件的骨架曲线对比如图 9 所示。定义试 件表面首次出现明显裂缝的荷载为开裂荷载 P_{cr}, 对应的位移为开裂位移Δ_{cr};屈服荷载 P_v根据试验 中纵向受力钢筋首次达到屈服应变来确定,对应的 位移为屈服位移 Δ_y ;峰值荷载 P_m 为水平荷载最大 值,对应的位移为峰值位移 Δ_m ;极限荷载 P_u 取峰值 荷载的 85%,对应的位移为极限位移 Δ_u ;试件不能 继续承载时的荷载为破坏荷载 P_b ,对应的位移为破 坏位移 Δ_b ;模板剥离时对应的荷载为 P_s 。

从图 8 和图 9 可以看出:

(1)试件屈服之前,各 PTC 试件荷载-位移曲 线基本为直线,滞回曲线基本相似,滞回环面积很 小,耗能较小。超过峰值荷载后,滞回环面积有所增 大,耗能有所增加,而承载力和刚度退化相对较快。



Fig.8 Lateral load-displacement hysteretic curves of specimens





Fig.9 Skeleton curves of the specimens

试件 RC7 的滞回曲线饱满,表明其变形能力较好; 峰值荷载后滞回环面积增加较多,承载力和刚度退 化缓慢。由试件 PTC1 与 RC7 骨架曲线的比较[图 9(a)]可见,后者的变形能力大于前者。这是因为试 件 PTC1 的预制模板剥离后,其截面高度减小,致使 其承载力、刚度降低。

(2)由图 8(a)、(b)和图 9(a)以及图 8(c)、(d) 和图 9(c)这两组试件可知,轴压比为 0.3 的试件 (PTC2、PTC4)滞回曲线相对狭窄,承载力及刚度退 化明显,滞回圈数相对较少,表明其变形能力较差; 轴压比为 0.15 的试件(PTC1、PTC3)滞回曲线相对 饱满,峰值荷载后承载力、刚度退化相对缓慢,承受 反复荷载的次数较多。轴压比从 0.15 增加到 0.3, 试件 PTC2 的正、反向峰值荷载平均值是试件 PTC1 正、反向峰值荷载平均值的 1.2 倍,试件 PTC4 的正、反峰值荷载平均值是试件 PTC3 的 1.1 倍。这 表明轴压比对试件的承载力和变形能力影响较大。

(3) 由图 8(f)、(g)和图 9(b)可知,试件 PTC6、 RC7 的箍筋间距分别为 150 mm 和 80 mm,试件 PTC6 的刚度和强度退化迅速,变形能力较差,且出 现明显的承载力下降。另外,两试件保护层厚度名 义上均为 20 mm,试件 PTC6 的保护层由 10 mm 厚 UHPC 模板和 10 mm 厚混凝土组成,而试件 RC7 保护层为 20 mm 混凝土;UHPC 模板剥离后,试件 PTC6 的截面高度减小,保护层厚度减小;内部 10 mm 厚混凝土保护层开裂后,纵向钢筋与混凝土的 黏结作用进一步减弱,故其滞回性能均不如试件 RC7,刚度和强度退化相对较快。

(4) 由图 8(c)、(e)和 9(c)可知,试件 PTC5 的 保护层厚度大于试件 PTC3 的保护层厚度,前者的 峰值荷载小于后者,而其强度和刚度退化较缓慢,滞 回曲线相对饱满。这表明在剪跨比、轴压比和箍筋 数量均分别相同的条件下,由 UHPC 模板加10 mm 混凝土作为保护层的试件,其抗震性能相对较好。

2.3 耗能性能

耗能性能是构件消耗地震能量的能力,耗能性能越强,构件的抗震性能越好。用能量耗散系数 *E* 来描述试件的耗能性能,*E* 按下式计算^[21]:

$$E = \frac{S_{\text{ABC+CDA}}}{S_{\Delta \text{OBE}+\Delta \text{ODF}}} \tag{1}$$

式中:S_{ABC+CDA}为一次加载与卸载滞回曲线包围的 面积,即为试件一次循环所耗散的能量;S_{AOBE+AODF} 为理想的弹性结构在达到相同位移时吸收的能量, 见图 10。





Fig.10 Calculation of energy dissipation coefficient

各试件屈服荷载点、极限荷载点相应的能量耗 散系数见表 5, 由表 5 可见:

(1) 试件 PTC1 与 RC7 相比,前者屈服点的耗 能系数比后者大17.3%,极限点的耗能系数比后者 小2.7%,总体上前者的耗能能力大于后者。这表 明,采用预制 UHPC 模板,可以提高 RC 柱的耗能 能力。

(2) 试件 PTC5 与 PTC3 相比, 前者屈服点的 耗能系数比后者大 33.3%,极限点的耗能系数比后 者小6.2%,总体上前者的耗能能力大干后者。这表 明在剪跨比、轴压比和箍筋数量均分别相同的条件 下,由预制 UHPC 模板加 10 mm 混凝土作为保护 层的试件,其耗能能力相对较强。

2.4 变形性能

采用位移延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_v 来 g 量 和比较各$ 试件的延性。各个试件特征点的荷载、位移值、剥离 荷载与峰值荷载百分比及位移延性系数如表 6 所列。

表 5 试件能量耗散系数

Table 5	Energy	dissipation	coefficient	of	specimens
---------	--------	-------------	-------------	----	-----------

试件编号	PTC1	PTC2	PTC3	PTC4	PTC5	PTC6	RC7
屈服点 E	0.745	0.680	0.470	0.480	0.640	0.570	0.635
极限点E	1.455	1.695	1.470	1.340	1.380	1.260	1.495

Table 0 - Boad and displacement at characteristic points															
4-1	14	开到	裂点	屈川	报点	峰	值点	极	限点	破	坏点	剥离点	D / D		
试编	14 号	$\Delta_{\rm cr}$	$P_{\rm cr}$ /kN	Δ_y /mm	P _y /kN	$\Delta_{\rm m}$	P _m /kN	$\Delta_{\rm u}$	P_{u} /kN	Δ_b /mm	$P_{\rm b}$ /kN	P _s /kN	$P_{\rm s}/P_{\rm m}$	μ	
PTC1	正向	1.59	100.04	6.16	191.62	14.39	201.61	31.91	171.36	37.61	65.22	-		5.18	
	反向	2.85	99.83	6.46	165.94	29.26	167.96	34.52	142.77	37.23	56.59	119.44	71.11	5.34	
PTC2	正向	1.7	119.36	6.08	234.10	14.04	249.84	21.99	212.37	29.39	88.99	-	-	3.62	
	反向	1.84	100.51	5.40	198.73	13.92	201.48	23.19	171.26	29.64	77.43	180.14	89.41	4.29	
PTC3	正向	0.64	99.12	5.72	239.25	17.00	303.71	17.00	303.71	23.39	58.33	-	-	2.96	
	反向	0.85	100.99	4.72	215.49	15.84	257.45	15.84	257.45	23.36	65.55	179.49	69.72	3.35	
PTC4	正向	0.98	139.11	4.52	252.84	10.30	314.19	14.94	268.76	22.89	129.66	-	-	3.30	
	反向	1.02	139.69	4.48	238.32	8.46	301.47	11.98	254.38	22.32	92.61	198.74	65.92	2.67	
PTC5	正向	2.15	141.13	6.16	224.28	11.01	273.25	16.88	232.26	22.81	79.51	-	-	2.71	
	反向	2.38	140.41	5.19	199.32	10.27	238.15	18.24	201.40	23.44	55.00	-198.23	83.24	3.51	
PTC6	正向	2.92	100.45	5.04	158.99	14.41	165.81	16.67	140.94	22.18	37.44	-	-	3.30	
	反向	3.22	98.72	5.94	141.23	12.9	149.16	18.42	126.79	22.31	42.23	118.29	79.30	3.10	
RC7	正向	2.52	79.97	7.23	161.04	21.33	178.04	37.27	151.33	43.57	80.92	-	-	5.18	
	反向	2.25	79.88	7.49	174.77	13.96	189.59	35.82	161.15	44.46	89.08	-	-	4.78	

试件特征点的荷载、位移值 轰 6

Load and displacement at characteristic point

注:正向加载时模板的剥离情况未能观测到。

由表 6 可见:

(1) 剪跨比为 2 的试件 PTC3 与 PTC5 相比, 后者的保护层厚度是前者的2倍,但两者的位移延 性系数基本相同。表明对于小剪跨比试件,保护层 厚度对其变形性能影响不大。

(2) 剪跨比为 3 的试件 PTC1、PTC2, 轴压比 从 0.15 增加到 0.3, 试件 PTC2 的位移延性系数相

对于试件 PTC1 降低 24.8%。表明随轴压比增大, 试件的位移延性减小。

(3) 由表 6 可见,试件的剥离荷载相差较大,表 明剪跨比、轴压比和箍筋数量对剥离荷载值有一定 影响。试件 PTC5 与 PTC3 相比,剪跨比、轴压比和 箍筋数量均相同,前者的保护层厚度是后者的2倍, 而剥离荷载值两者相差约 20 kN;试件 PTC6 与 PTC1的剪跨比、轴压比分别相同,且前者的箍筋数 量比后者小,保护层厚度比后者大,但其剥离/峰值 荷载值大,表明保护层厚度对剥离荷载值的影响较 大。这是因为保护层厚度为 10 mm 时,柱中纵向受 力钢筋外侧的混凝土厚度相对较薄(等于箍筋直 径),对纵筋及预制模板形成的黏结力相对较弱,故 二者界面容易出现滑移及剥离。

2.5 刚度退化

采用割线刚度 *K*;反映每次循环中刚度的变化,计算公式为^[21]:



式中: K_i 为第i次循环时的割线刚度; $+F_i$ 、 $-F_i$ 为第i次循环时的正、反向最大荷载; $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$ 为第i次循环时正、反向最大荷载对应的位移。

各试件在反复水平荷载作用下刚度随位移的变 化如图 11 所示。从图 11 可以看出:

(1)各试件的刚度退化曲线趋势基本一致。柱顶位移达到 10 mm 之前,试件刚度退化速度较快, 之后刚度退化趋势趋于减缓。



Fig.11 Curves of stiffness degradation

(2) 由图 11(a)可以看出,在不同保护层厚度 时,试件 PTC1 与 RC7 的刚度退化规律基本相同, 加载初期前者的刚度较后者大,但前者的极限位移 小于后者的极限位移。说明 UHPC 模板作为保护 层可提高试件的初始刚度,但减小了试件极限位移。 出现上述现象的原因:试件 PTC1 保护层厚度较小, 截面有效高度较大,故初始刚度较大;加载后期试件 PTC1 的模板剥离,钢筋与混凝土协同工作能力减 弱,故极限位移减小。

(3) 由图 11(b)、(c) 可知,试件 PTC1 与

PTC2,试件 PTC3 与 PTC4,后者的轴压比分别比前者大,刚度分别比前者大,但后者的刚度退化相对较快,位移延性也有一定程度减小。表明在一定范围内,增大试件的轴压比,可提高其刚度,但位移延性降低。

(4) 由图 11(c)可见,剪跨比为 3 的 3 个试件, 其刚度退化规律基本一致,位移延性基本相同;轴压 比较大的试件 PTC4,其前期刚度大于另外两个试 件;保护层厚度较大的试件 PTC5,其前期刚度 最小。

3 结论

通过 6 个 PTC 柱和 1 个 RC 对比柱试件的拟静力试验,研究了各柱试件的破坏形态、荷载一位移滞回曲线、骨架曲线、耗能性能、刚度退化等,得出以下结论:

(1) 与加载方向垂直的预制 UHPC 模板在加载过程中发生剥离,模板剥离荷载平均值占 PTC 试件峰值荷载平均值的 70%;与加载方向平行的预制 UHPC 模板在 PTC 试件最终破坏时发生剥离。因此,免拆 UHPC 模板 RC 柱可应用于非地震区或设防烈度为 6 度的地区。

(2) 在剪跨比、轴压比和箍筋数量均分别相同 的条件下,由 UHPC 模板加 10 mm 混凝土作为保 护层的试件,其抗震性能相对较好,但其承载力和前 期刚度略有减小。综合考虑,建议这种柱的保护层 厚度不宜小于 20 mm。

参考文献(References)

- [1] HENRY G.Russell and Benjamin A.Graybeal. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community[R]. PUBLICATION NO. FHWA -HRT-13-060, JUNE 2013.
- [2] YOO D Y, YOON Y S.Structural Performance of Ultra-highperformance Concrete Beams with Different Steel Fibers[J]. Engineering Structures, 2015, 102, 409-423.
- [3] 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.
- [4] QUDAH S, MAALEJ M. Application of Engineered Cementitious Composites (ECC) in Interior Beam-column Connections for Enhanced Seismic Resistance [J]. Engineering Structures, 2014,69:235-245.
- [5] PARRA-MONTESINOS G J. High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites: an Alternative for Seismic Design of Structures[J].ACI Structural Journal, 2005, 102(5):668-675.
- [6] 徐礼华,邓方茜,徐浩然,等.钢-聚丙烯混杂纤维混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2016,49(1):3-13.
 XU Lihua, DENG Fangqian, XU Haoran, et al. On Seismic Behavior of Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete Columns
 [J].China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 3-13.
- [7] 徐礼华,黄乐,韦翠梅,等.钢-聚丙烯混杂纤维混凝土柱抗震承载力试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(8):95-103.
 XU Lihua, HUANG Le, WEI Cuimei, et al. Experimental Tests of Seismic Bearing Capacity of Steel-polypropylene Hybrid Fi-

ber Reinforced Concrete Columns [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8): 95-103.

- [8] 韦翠梅,徐礼华,黄乐,等.钢-聚丙烯混杂纤维混凝土柱恢复力 模型试验研究[J].土木工程学报,2014,47(增刊2):227-234.
 WEI Cuimei,XU Lihua,HUANG Le,et al.Experimental Study on Restoring Force Models for Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete Columns[J].China Civil Engineering Journal,2014,47(Supp2):227-234.
- [9] HU A X, LIANG X W, YU J, et al. Tensile Characteristics of Ultra-high-performance Concrete[J].Magazine of Concrete Research, 2018, 70(6): 314-324.
- [10] 梁兴文,杨鹏辉,何伟,等.钢筋混凝土框架-纤维增强混凝土 耗能墙结构抗震性能试验研究[J].工程力学,2018,35(1): 209-218.

LIANG Xingwen, YANG Penghui, HE Wei, et al. Experimental Study on Aseismic Behavior of Reinforced Concrete Frame-energy Dissipation Walls Made with High Performance Fiber Reinforced Concrete [J]. Engineering Mechanics, 2018,35(1):209-218.

- [11] 陆婷婷,梁兴文.预期损伤部位采用 FRC 增强梁柱板组合件的力-位移模型[J].工程力学,2018,35(2):133-143.
 LU Tingting,LIANG Xingwen.Force-displacement Mechanical Model of Frc Beam-column-slab Subassemblies[J].Engineering Mechanics,2018,35(2):133-143.
- [12] HOSINIEH M M, AOUDE H, COOK W D, et al. Behavior of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete Columns under Pure Axial Loading[J]. Engineering Structures, 2015, 99,388-401.
- [13] 杨医博,杨凯越,吴志浩,等.配筋超高性能混凝土用作免拆模板对短柱力学性能影响的实验研究[J].材料导报,2017,31
 (23):120-124,137.

YANG Yibo, YANG Kaiyue, WU Zhihao, et al. An Experimental Study on the Influence of Reinforced Ultra-high Performance Concrete Permanent Template to Short Column's Mechanical Property[J].Materials Review.2017.31(23):120-124,137.

[14] 王钧,王志彬,李论.配有钢纤维 R PC 免拆柱模的钢筋混凝土 短柱轴压力学性能[J].建筑科学与工程学报,2016,33(2): 98-106.

> WANG Jun, WANG Zhibin, LI Lun. Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Short Columns with Steel Fiber RPC Column-permanent Template Subjected to Axial Compression [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33 (2):98-106.

[15] 王钧,李论,李行,等.钢纤维 RPC 永久柱模设计方法[J].沈阳 建筑大学学报(自然科学版),2014,30(6):999-1005.
WANG Jun,LI Lun,LI Hang, et al.Research on the Design Method for the Steel Fiber RPC Column-Permanent Template
[J].Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science, 2014,30(6):999-1005. Ground Motions[J].Building Structure, 2016, 46(11): 96-101.

- [19] 叶耀先.工程结构抗震分析的进展[J].建筑结构,1988(5):4-10.
 YE Yaoxian. Progress in Seismic Analysis of Engineering Structures[J].Building Structure,1988(5):4-10.
- [20] 陈厚群.水工建筑物的场址设计反应谱[J].土木建筑与环境 工程,2010,32(增刊2):184-188.

CHEN Houqun. Response spectrum of hydraulic structures site design[J].Journal of Civil Architecural & Environmental Engineering,2010,32(Supp2):184-188.

[21] 江晓涛,袁文扬,楼加丁,等.某水电站大坝强震监测资料分析

研究[J].水电与抽水蓄能,2015(6):28-35.

JIANG Xiaotao, YUAN Wenyang, LOU Jiading, et al. Strong Motion Acceleration Recorded in Hydropower Dam Safety Monitoring Applied Research [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2015(6):28-35.

[22] 刘文清,陈利锋,刘华清,等.大坝强震观测资料分析与探讨 [J].大坝与安全,2009(6):49-52.

LIU Wenqing, CHEN Lifeng, LIU Huaqing, et al. Analysis and Discussion on the Strong Earthquake Observation Data of Dam[J].Dam & Safety,2009(6):49-52.

(上接第 588 页)

(5).60-64.

- [16] 吴香国.基于耐久性的超高性能纤维改性混凝土叠合墩柱设 计概念[J].华北水利水电学院学报,2012,33(6):73-77.
 WU Xiangguo. Design Conception of Ultra-high-performance Fiber Reinforced Concrete Hybrid Pier with Durability Consideration[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012,33(6):73-77.
- [17] 郝文秀,阎贵平,钟铁毅,等.反复荷载作用下活性粉末混凝土 空心桥墩[J].铁道学报,2009,31(5):60-64.
 HAO Wenxiu, YAN Guiping, ZHONG Tieyi, et al. Experimental Study on the Mechanical Behavior of Reactive Powder Concrete Piers with Hollow Cross-sections Subjected to Cyclic Loading[J]. Journal of the China Railway Society, 2009,31
- [18] 陈旭.配有钢纤维 RPC 免拆柱模的 RC 框架静力性能试验研 究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.

CHEN Xu.Static Experimental Study of Reinforced Concrete Frame Structures with Steel Fiber RPC Permanent Pillar[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.

- [19] 李行.配有钢纤维 RPC 免拆柱模的 RC 框架抗震性能试验研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
 LI Xing.Experimental Research on Seismic Behavior of Frame with Undismantled Template of Steel Fiber Reactive Powder Concrete[D].Harbin:Northeast Forestry University,2014.
- [20] 池寅,黄乐,余敏.基于 ABAQUS 的钢-聚丙烯混杂纤维混凝 土损伤塑性本构模型取值方法研究[J].工程力学,2017,34 (12):131-142.

CHI Yin, HUANG Le, YU Min.Calibration Method of Damage Plasticity Model for Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete Based on Abaqus[J].Engineering Mechanics, 2017, 34(12):131-142.

 [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震试验规程:JGJ/ T 101-2015[S].中国建筑工业出版社,2015.
 Ministry of Housing and Urban Rural Development of the China.Specification for Seismic Test of Buildings:JGJ/T 101-2015[S].China Construction Industry Press,2015.