

何利,种迅,沙慧玲,等. 2024. 采用不同连接方式的外挂 UHPC 幕墙钢筋混凝土框架结构抗震性能研究[J]. 地震研究, 47(1): 094 – 104, doi:10. 20015/j. cnki. ISSN1000 – 0666. 2024. 0031.

He L, Chong X, Sha H L, et al. 2024. Study on seismic performance of reinforced concrete frame structure with UHPC cladding panels using different connection systems[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(1): 094 – 104, doi:10. 20015/j. cnki. ISSN1000 – 0666. 2024. 0031.

# 采用不同连接方式的外挂 UHPC 幕墙钢筋混凝土 框架结构抗震性能研究\*

何利<sup>1</sup>, 种迅<sup>2\*</sup>, 沙慧玲<sup>2</sup>, 高俊<sup>2</sup>, 冯晖<sup>1</sup>, 赵鹏<sup>1</sup>, 李志鹏<sup>1</sup>

(1. 合肥工大建设监理有限责任公司, 安徽 合肥 230051; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为研究超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, 简称 UHPC) 幕墙与主体结构间不同连接方式对结构抗震性能的影响, 提出了适用于 UHPC 幕墙的新型柔性连接和耗能连接方式。设计了 4 种单层单跨钢筋混凝土框架结构, 分别为 UHPC 幕墙采用柔性连接、耗能连接和刚性连接方式的框架结构及不含幕墙的纯框架结构。利用有限元软件 ABAQUS 对 4 种结构进行了静力推覆分析和弹塑性时程分析, 对比研究其在水平地震作用下的损伤机制以及动力荷载作用下的抗震性能。结果表明: 4 种模型中主体结构的最终损伤模式一致, 均在梁端和柱脚出现塑性铰; 幕墙与主体结构采用刚性连接时, 连接节点处螺栓发生破坏, 连接附近的墙板及框架梁损伤严重; 采用柔性连接和耗能连接方式时, 连接节点处的墙板和连接螺栓均保持完好。弹塑性时程分析结果表明: 采用耗能连接方式时, 水平地震作用下主体结构的损伤状态较轻, 结构在 3 条地震波作用下的位移响应相比柔性连接模型减小了 24.8%、32.9% 和 36.5%, 减震效果显著。

**关键词:** UHPC 幕墙; 柔性连接; 耗能连接; 刚性连接; 抗震性能

**中图分类号:** TU973+.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)01-0094-11  
doi:10. 20015/j. cnki. ISSN1000 – 0666. 2024. 0031

## 0 引言

随着建筑外装饰技术的不断发展, 建筑结构形式越来越复杂, 建筑设计对建筑幕墙的通透性、美学效果及独特性有了更高的要求。超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, 简称 UHPC) 墙板具有易于造型、外型美观、耐久性好、使用寿命长等优点, 其在建筑幕墙领域的推广应用倍受关注。UHPC 幕墙技术在国外得到较为广泛的应用, 在国内也已在部分工程中得到了应用, 并取得了较好的效果 (陈宝春等, 2019)。

UHPC 幕墙作为一种非结构外围护构件, 其与主体结构之间的连接方式是影响结构安全性的重要因素。目前主体结构和外墙板之间常用的连接方式包括刚性连接、柔性连接和耗能连接。研究表明 (Toniolo, Colombo, 2012; Bournas et al, 2014; Belleri et al, 2015), 墙板与结构间采用刚性连接时, 二者之间无相对变形, 地震作用下将会产生较强的相互作用, 从而导致节点处承受较大的内力。柔性连接方式可以解决这一问题, 通过设置可以产生变形的连接节点, 使得墙板和主体结构在地震作用下可以相互独立变形, 从而避免二者之间的相互作用, 减小对连接节点承载力

\* 收稿日期: 2023 – 06 – 27.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178472); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目 (2023 – YF094)。

第一作者简介: 何利 (1968 –), 教授级高工, 硕士生导师, 博士, 主要从事结构工程、工程监理研究。

E-mail: heli@hfut.edu.cn.

通信作者简介: 种迅 (1978 –), 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事结构工程研究. E-mail: chongxun@hfut.edu.cn.

的需求。柔性连接方式多采用“点连接”形式,墙板和结构之间通常设置4个连接节点。根据墙板的形式和节点连接构造的区别,墙板和主体结构在地震作用下往往会产生滑动或者转动变形 (Del *et al.*, 2019)。近年来,在结构中安装消能减震装置以耗散地震能量已经成为提升现代建筑抗震性能的重要方式。在UHPC幕墙与主体结构间柔性连接节点的基础上采用耗能装置,可以充分利用墙板和主体结构在地震作用下的相对变形,耗散地震能量,减小主体结构的损伤,因此这是一种更为合理的连接方式。而摩擦阻尼器作为消能减震装置的一种,具有构造简单、耗能能力强等优点,具有良好的工程应用前景。

本文首先提出了一种UHPC幕墙与主体结构间的柔性连接方式。这种连接通过在连接角钢上设置可以让螺栓竖向滑动的长螺栓孔,使得UHPC幕墙在地震作用下能够产生与主体结构独立的平面内转动变形。然后在柔性连接的基础上安装摩擦阻尼器,利用墙板和主体结构间的相对转动变形产生摩擦耗能,从而得到了UHPC幕墙与主体结构间的新型耗能连接方式。为了评估所提出的柔性连接方式和耗能连接方式的有效性,采用有限元软件ABAQUS分别建立了4种模型,对4种模型

进行了静力推覆分析和弹塑性时程分析,系统研究了连接节点、墙板以及主体结构在地震作用下的损伤演变机制以及耗能能力。

## 1 新型 UHPC 幕墙连接节点

本文所提出的UHPC幕墙柔性连接方式如图1a所示。墙板下部采用2个承重连接装置(图1e)与下层梁连接,上部采用2个限位连接装置(图1c)与上层梁连接。承重连接装置包括悬臂方钢管和承重连接角钢(图1f),方钢管和连接角钢的水平肢通过螺栓连接。在幕墙下部预埋2个套筒,与连接角钢的竖向肢通过螺栓连接。连接角钢的竖向肢上设有竖向开口长孔,在螺栓垫板与角钢之间设置滑移件,螺栓可在长孔内发生竖向的滑动变形。

由于限位连接装置不承受UHPC幕墙的重力,仅限制幕墙的平面外变形,因此限位连接装置所需的螺栓直径小于承重节点,且角钢上不需设置加劲肋。限位连接角钢(图1d)的竖向肢上也开设竖向长孔,使螺栓可在长孔内发生竖向的滑动变形。采用这种连接方式,主体结构在地震作用下产生水平变形时,UHPC幕墙随之进行平面内的转动变形,幕墙转动变形如图1b所示。

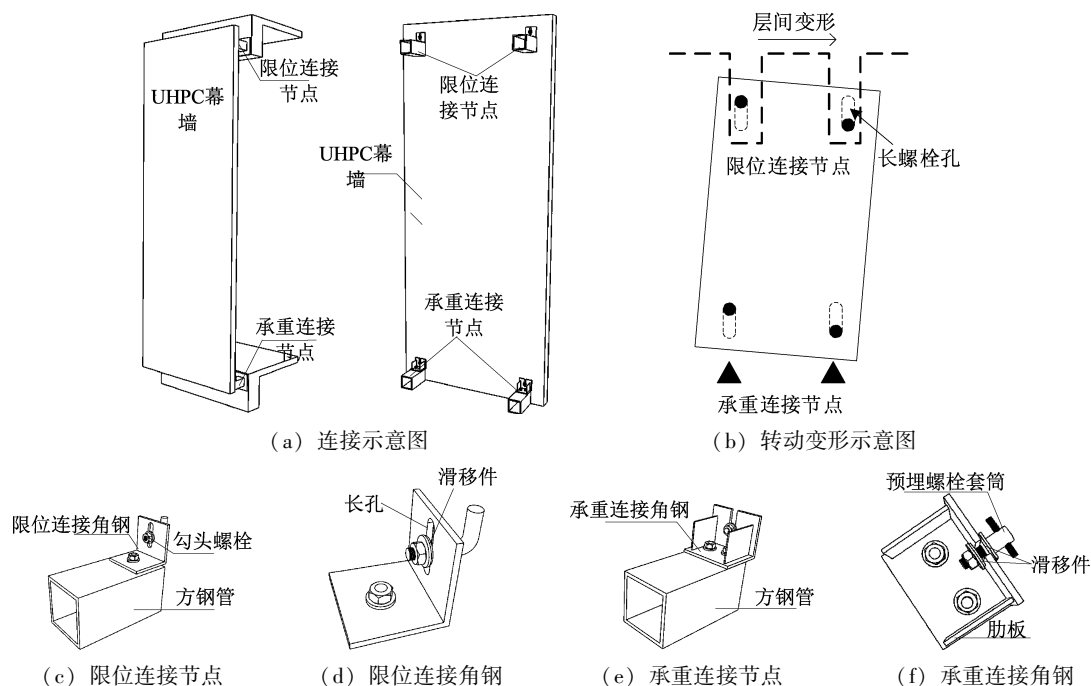


图1 UHPC幕墙与主体结构间连接示意图

Fig. 1 A diagram of the connection between UHPC cladding panel and the main structure

为了有效利用主体结构与 UHPC 幕墙间的相对变形,在上部限位连接节点和下部承重连接节点的连接角钢和螺栓两侧串联摩擦片、钢垫板、螺栓垫片和碟形弹簧组,形成摩擦耗能节点,如图 2 所示。在高强螺栓上施加预紧力后,在水平地震作用下,两块摩擦片只会沿着连接角钢的竖向肢滑动。通过控制高强螺栓的预紧力大小和摩擦片的摩擦系数,可以改变摩擦阻尼器的阻尼力,利用阻尼力消耗地震输入能量,提高结构的抗震性能。

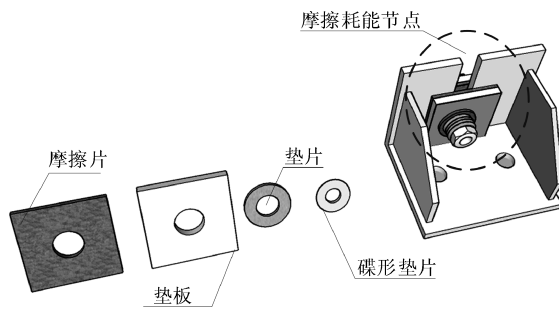


图 2 UHPC 幕墙摩擦耗能节点示意图

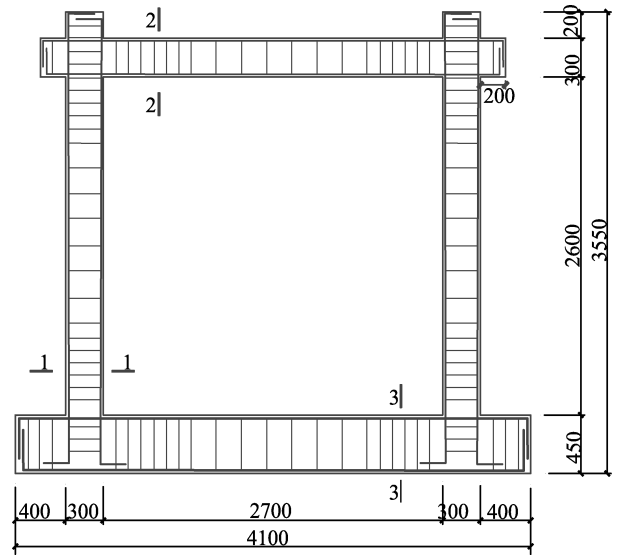
Fig. 2 A diagram of energy-dissipating connection in the UHPC cladding panel

## 2 有限元模型

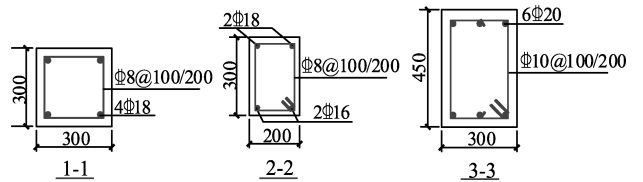
### 2.1 模型设计

为了对比研究采用柔性连接方式、耗能连接方式和传统的刚性连接方式时, UHPC 幕墙对于结构抗震性能的影响,笔者设计了一个单层单跨钢筋混凝土框架 (Reinforced Concrete, 简称 RC) 结构。其中,混凝土强度等级选取 C30,纵筋和箍筋均采用 HRB400 级,连接节点钢材采用 Q355。框架的尺寸和配筋见图 3a、b, UHPC 幕墙板的尺寸和布置见图 3c。

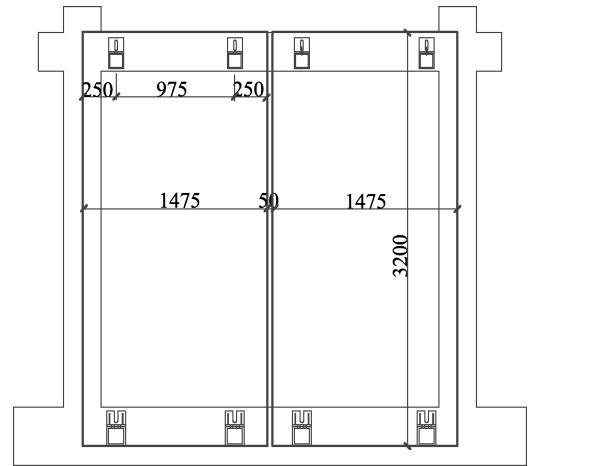
每块 UHPC 墙板通过上部 2 个限位连接节点和下部 2 个承重连接节点与 RC 框架连接,悬臂钢管焊接在梁中的预埋件上。柔性连接节点和连接处的构造见图 4,耗能连接节点构造见图 5。上部限位连接螺栓直径取 18 mm,下部承重连接螺栓直径取 24 mm。根据何利等 (2023) 对转动式柔性连接节点角钢竖向肢开孔长度提出的设计方法,分别取上部限位连接角钢和下部承重连接角钢竖向肢开孔长度为 80 mm 和 90 mm。



(a) RC 框架立面图



(b) 截面尺寸和配筋



(c) UHPC 幕墙布置图 单位: mm

图 3 模型尺寸及配筋

Fig. 3 Details of dimensions and reinforcement of the model

### 2.2 模型建立

利用有限元分析软件 ABAQUS 建立 4 个模型。其中,模型一为不含 UHPC 幕墙的纯框架结构 (图 6a);模型二为采用所提出的柔性连接方式的含 UHPC 幕墙的 RC 框架结构,节点尺寸和连接方式如图 4 和图 6b 所示,建模时预埋在墙板内的螺栓采用绑定方式连接;模型三为采用本文所提出

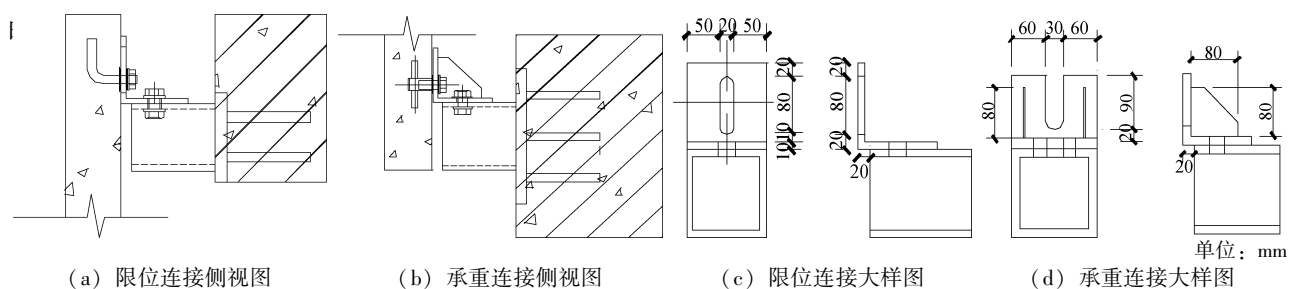


图4 柔性连接节点构造

Fig. 4 Flexible connection

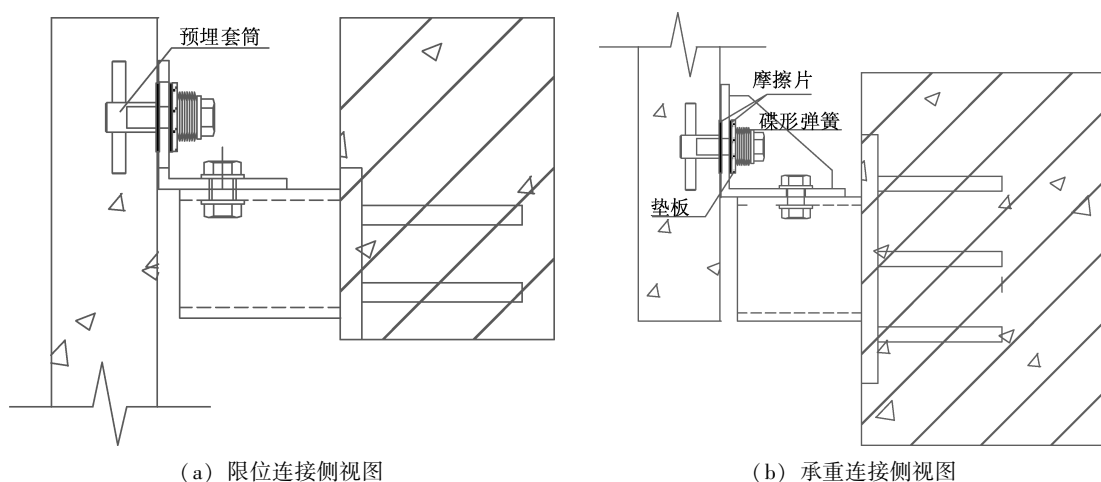


图5 耗能连接节点构造

Fig. 5 Energy-dissipating connection

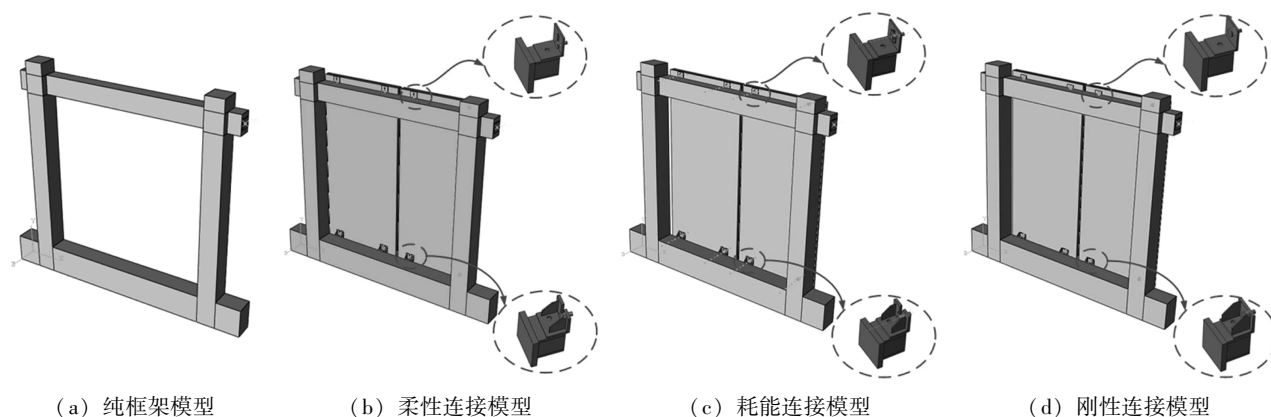


图6 有限元分析模型

Fig. 6 Finite element analysis models

耗能连接方式的含 UHPC 幕墙的 RC 框架结构, 节点尺寸和连接方式如图 5 和图 6c 所示, 建模方式与柔性连接模型类似, 区别在于连接节点处增加了用于耗能的摩擦片; 模型四中将柔性连接改为刚性连接 (图 6d), 即将连接角钢中的长孔改为一般的圆孔, 其余参数均与模型二相同, 此

时 UHPC 墙板和主体结构之间不发生相互变形, 墙板和主体结构间位移耦合。

在 ABAQUS 有限元分析模型中, 钢筋采用 T3D2 桁架单元建模, RC 框架、UHPC 幕墙板和连接节点等均采用 C3D8R 实体单元建模, RC 框架采用 C30 混凝土损伤塑性本构。钢材单轴受拉

和受压应力-应变本构选用理想弹塑性模型。连接节点钢材弹性模量均为 206 GPa, 泊松比均为 0.3。所有模型的钢筋均内置于框架中。高强螺栓采用 Chong 等 (2023) 定义的单轴应力-应变关系, 屈服强度为 570 MPa, 屈服应变为 0.003。UHPC 的受拉和受压本构参考王衍等 (2020)、杨剑和方志 (2008) 定义的模型, UHPC 的抗压和抗拉强度分别为 138 MPa 和 11.7 MPa, UHPC 的峰值应变为 0.003 5, 极限应变为 0.004 5。

在柔性连接、耗能连接和刚性连接模型中, 悬臂钢管与预埋件之间, 以及连接角钢与悬臂钢管之间的焊缝均采用 Tie 连接, 螺栓嵌入 UHPC 墙板内。在柔性连接模型中, 螺栓与连接角钢之间的摩擦系数取 0.15 (杨参天, 李爱群, 2023), 螺栓仅施加一个非常小的预紧力。在耗能连接模型中, 采用黄铜片作为摩擦材料, 建模时不单独建立摩擦片, 将摩擦耗能节点简化为用螺栓相连的两块钢板, 钢板

和角钢竖向肢之间的摩擦系数取 0.15。限位连接节点和承重连接节点的螺栓预紧力均取 100 kN, 由库伦摩擦定律可得, 单个摩擦阻尼器出力为 30 kN。根据等效线性化方法 (潘鹏等, 2014), 此时 RC 框架在多遇地震下的附加阻尼比为 7.3%。

### 2.3 摩擦阻尼器有限元模拟验证

为了验证摩擦阻尼器建模方式的正确性, 需要将其与石文龙等 (2021) 设计的滑动摩擦阻尼器力学性能试验结果进行对比 (图 7)。本文选取了该研究中的第 7 个试验工况作为对比, 试验装置由耳板、上下夹板和开设长孔的滑动板组成, 摩擦材料采用紫铜, 试验加载频率为 0.01 Hz, 加载圈数一圈。按该研究中试验装置的尺寸、材料本构和摩擦系数进行建模, 得到摩擦阻尼器的模拟滞回曲线和本文的试验结果曲线对比 (图 8)。从图 8 可见, 模拟曲线与试验滞回曲线吻合良好, 阻尼器出力稳定, 摩擦阻尼器的建模方式具有合理性。

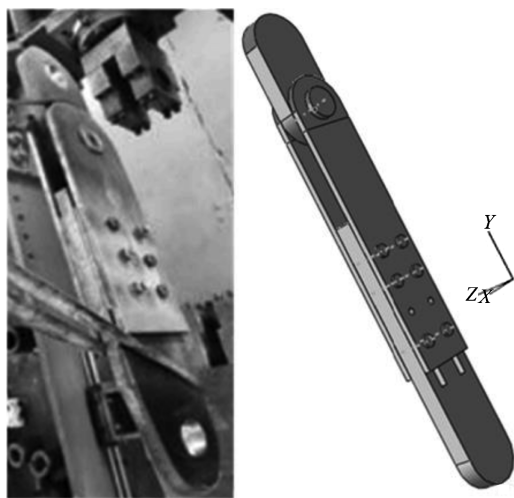


图 7 试验构件及摩擦阻尼器有限元模型

Fig. 7 The test specimen and the finite element model of friction damper

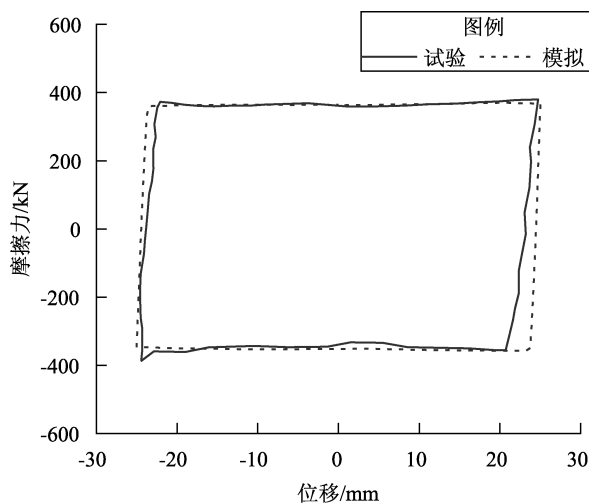


图 8 试验曲线与模拟滞回曲线对比

Fig. 8 Comparison between the test hysteresis curve and the simulated one

## 3 静力推覆分析

在每根柱的顶部施加竖向荷载 321.8 kN (设计轴压比为 0.325)。采用单调位移加载模式, 将结构推覆至《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 规定的罕遇地震下钢筋混凝土框架结构层间位移角限值 1/50, 即顶点位移 58 mm。

### 3.1 RC 框架损伤分析

在加载到 1/50 层间位移角时, 4 种模型框架混凝土等效塑性应变云图和钢筋应力云图如图 9 所示, 通过云图对比分析框架结构的损伤情况。

由图 9a 可见, 模型一的最大等效塑性应变出现在梁端, 为 0.005 53, 模型二、三的最大等效塑性应变出现在同一位置, 分别为 0.006 19 和 0.005 25, 与模型一的差距较小。而模型四

中,在墙板连接节点处出现了明显的应变较大区域,最大等效塑性应变值为0.0117,是另外3个模型中最大等效塑性应变的1.9~2.2倍,且远大于混凝土的极限压应变,表明框架梁混凝土在这一位置地震作用下将产生较明显损坏。

由图9b可见,4个框架纵筋最大应变均出现在梁端和柱底,且纵筋均已达到屈服,表明4

种结构模型的最终损伤模式一致。可见采用4点连接时,无论是采用柔性连接、耗能连接还是刚性连接,UHPC幕墙板对框架的损伤模式没有明显影响。此外,模型四中墙板连接节点附近框架梁内的箍筋应力较大,表明连接节点传递给框架梁的集中力在框架梁内产生了较大的剪力。

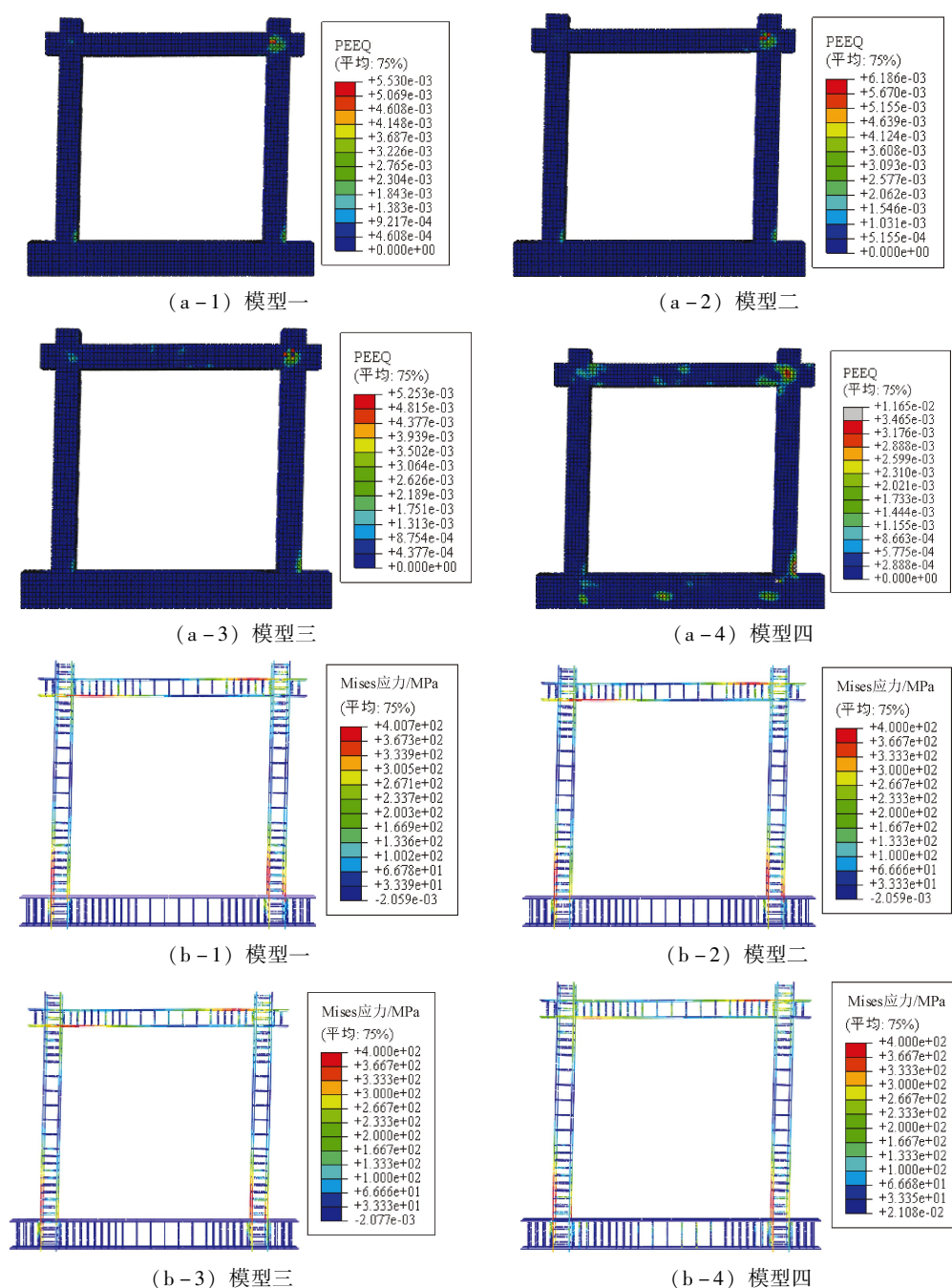


图9 4种模型RC框架等效塑性应变云图(a)及钢筋Mises应力云图(b)

Fig. 9 The distribution of the equivalent plastic strain (a) and the distribution of the Mises stress (b) of the reinforcement in RC frame of four models



### 3.2 UHPC 墙板和连接节点损伤分析

UHPC 墙板造价相比普通预制混凝土墙板较高。因此,减少或者避免 UHPC 墙板在水平地震作用下的损伤,对于降低震后的修复费用有重要意义。

图 10 对比了 3 种模型中 UHPC 墙板的主压应变云图。由图可知, UHPC 幕墙最大压应变发生的部位均在连接节点附近。模型二和模型三中,墙板的最大压应变分别为 0.000 138 5 和 0.002 86,耗能连接节点处由于摩擦阻尼器出力,使得墙板应变较大,但仍小于 UHPC 墙板的峰值应变 (0.003 5)。模型四 (图 10c) 中,当位移加载至 36 mm 时,墙板的最大压应变已经达到了 UHPC 墙板的峰值应变;当位移加载至 43 mm 时,压应变

达到了 UHPC 墙板的极限应变 (0.004 5),说明墙板在连接节点附近出现受压破坏。可见,柔性连接方式可以有效控制 UHPC 墙板在水平地震作用下的损伤。合理设计的耗能连接方式也可以避免墙板损伤,而刚性连接方式会造成墙板在地震作用下有较严重的损坏。

连接节点处的损伤是墙板在地震作用下的安全性的关键,节点破坏可能导致墙板坠落的震害。图 11 分别对比了在 1/50 位移角时采用模型二、模型三和模型四时,在同一位置处承重连接节点高强度螺栓与角钢的 Mises 应力云图。

从图 11a 可见,模型二中,螺栓的最大应力为 87 MPa,远小于屈服强度,表明螺栓未发生破坏。模型三中,由于螺栓预紧力和摩擦阻尼器出力的

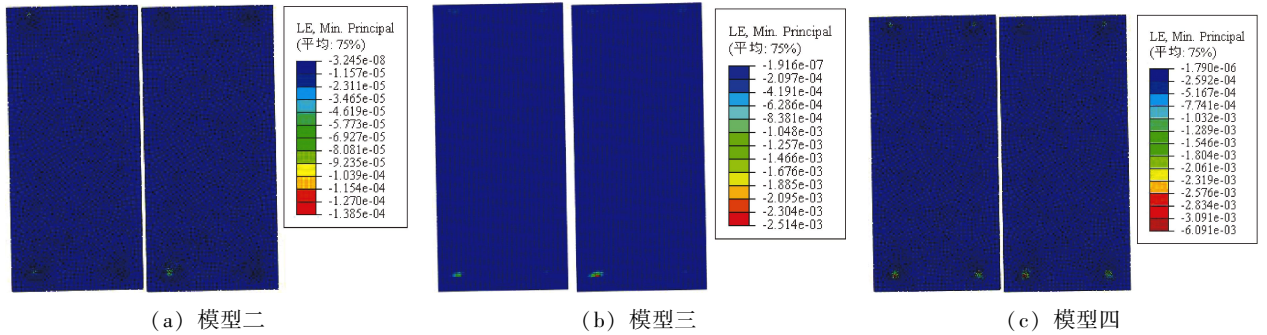


图 10 3 种模型中 UHPC 墙板主压应变云图

Fig. 10 Compressive strain distribution of the UHPC panel of three models

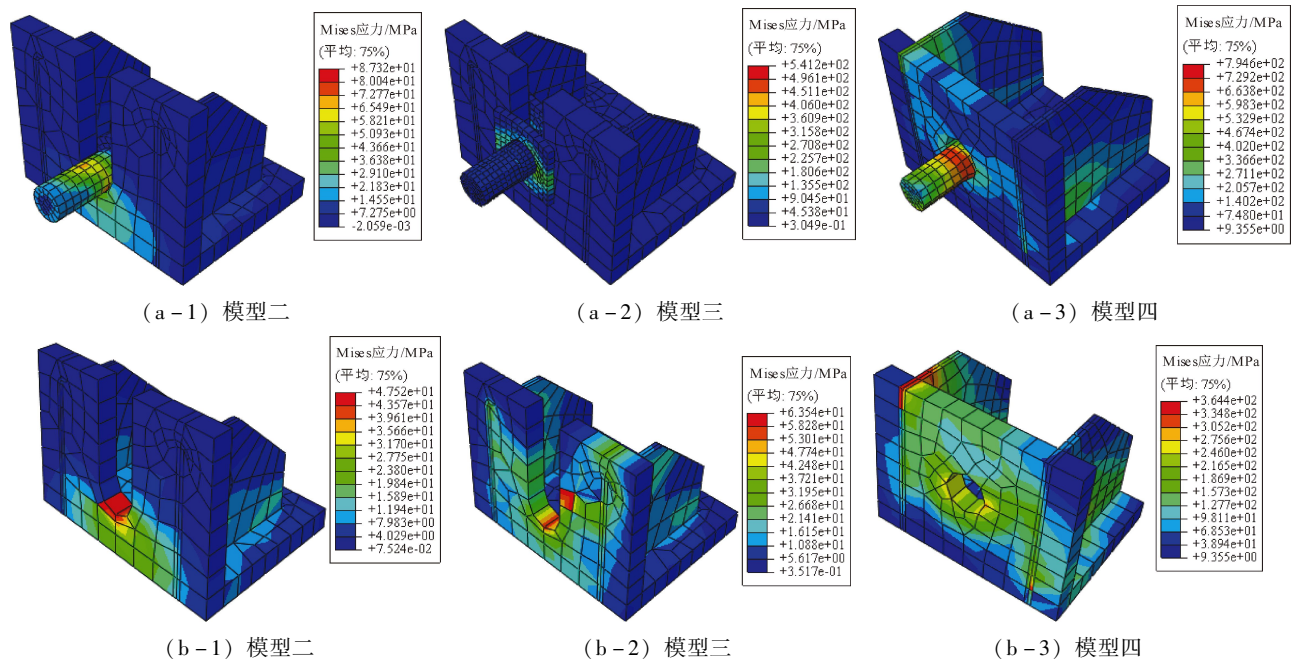


图 11 3 种模型中螺栓 (a) 和角钢 (b) Mises 应力云图

Fig. 11 The mises stress distribution of the high-strength bolt (a) and the joint angle (b) of three models

影响,其最大应力达到了 541 MPa,但仍小于屈服应力。模型四中,螺栓全截面应力均较大,承重连接节点最大应力为 794 MPa,已经达到了屈服应力。此外,分析螺栓应变可知,模型三中,螺栓的最大应变出现在左上角的限位连接节点处,达到 0.002 48,小于屈服应变 (0.003)。模型四中,螺栓的最大应变出现在同一位置,达到 0.0219,是耗能连接螺栓应变和屈服应变的 8.8 倍和 7.3 倍,表明刚性连接节点处螺栓已经破坏,墙板可能有坠落的风险。

从图 11b 可以看出,在模型二和模型三中,承重连接角钢的最大应力分别为 48 和 64 MPa,远小于屈服应力,表明连接角钢未发生破坏。在模型四中,角钢的最大应力为 364 MPa,超过了角钢的屈服应力,但相比螺栓,角钢只有部分位置屈服,说明螺栓是这一连接方式的薄弱部位。

### 3.3 承载力和刚度分析

图 12 对比了 4 种模型结构在单调加载时的水平荷载-顶点位移曲线。模型二中,墙板与主体结构之间独立运动,墙板几乎不参与主体结构受力,因此模型二的水平荷载-顶点位移曲线和刚度与模型一基本一致,承载力比模型一略高。模型三中,由于节点处摩擦阻尼器出力,对结构的刚度和承载力均有一定的提升效果。模型四中,由于墙板和主体结构之间存在强相互作用,结构的刚度和承载能力有明显提升,初始刚度以及 1/50 层间位移角时的承载力约为柔性连接模型的 1.69 和 1.78 倍。可见,刚性连接方式对于主体结构的影响较大。

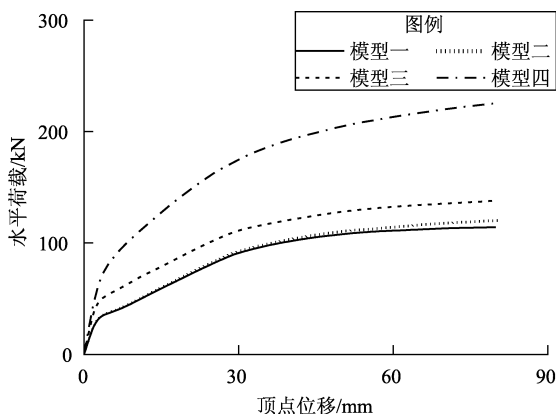


图 12 4 种模型结构水平荷载-顶点位移曲线

Fig. 12 Horizontal load vs top displacement of the four model structures

## 4 弹塑性时程分析

根据前述研究可知, UHPC 幕墙与主体结构间采用刚性连接节点时, 墙板和主体结构间产生了较强的相互作用, 对框架和节点均造成了不利的影响。而对采用柔性和耗能连接方式的 RC 框架进行静力推覆分析时, 主体结构的损伤情况接近, UHPC 幕墙都没有发生破坏。同时, 采用柔性连接方式时, 墙板和主体结构相互变形独立, 墙板对主体结构的刚度和承载力影响可以忽略, 柔性连接模型的抗震性能与纯框架模型基本相同, 因此本节仅选取模型二和模型三, 对其进行 X 方向的弹塑性时程分析, 进一步研究采用柔性和耗能连接方式时 RC 框架的抗震性能。

### 4.1 地震波选取

首先对模型结构进行模态分析, 得到模型二和模型三在 X 方向的周期分别为 0.39 和 0.41 s, 螺栓预紧力对于结构周期的影响较小。

按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 要求, 选取 2 条天然地震波 (EL Centro 波和 Taft 波) 和 1 条人工地震波作为输入地震波。天然地震波从美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 地面运动数据库中选取, 按照Ⅷ度 ( $PGA = 0.2 g$ ) 罕遇地震水准将输入地震波的峰值加速度调整为 0.4 g。天然地震波的加速度时程曲线如图 13a 所示, 为计算方便, 天然地震波有效持续时间仅截取加速度时程曲线的前 20 s, 规范设计谱与天然地震动反应谱对比如图 13b 所示。

### 4.2 RC 框架位移响应

图 14 对比了在 2 条天然地震波和 1 条人工地震波作用下 RC 框架的位移响应。在 EL Centro 波、Taft 波和人工波作用下模型三的最大顶点位移分别为 39.8、34.9 和 20.0 mm, 对应的层间位移角分别为 1/70、1/80 和 1/140。在以上 3 条地震波作用下, 模型二的最大顶点位移分别为 52.9、52.0 和 31.5 mm, 对应的层间位移角分别为 1/53、1/54 和 1/89。可见, 设置摩擦阻尼器后, 相比模型二, 模型三的位移响应分别减小了 24.8%、32.9% 和 36.5%, 模型三的减震效果显著, 说明摩擦耗能连接装置可以有效控制主体结构在地震作用下的位移响应。



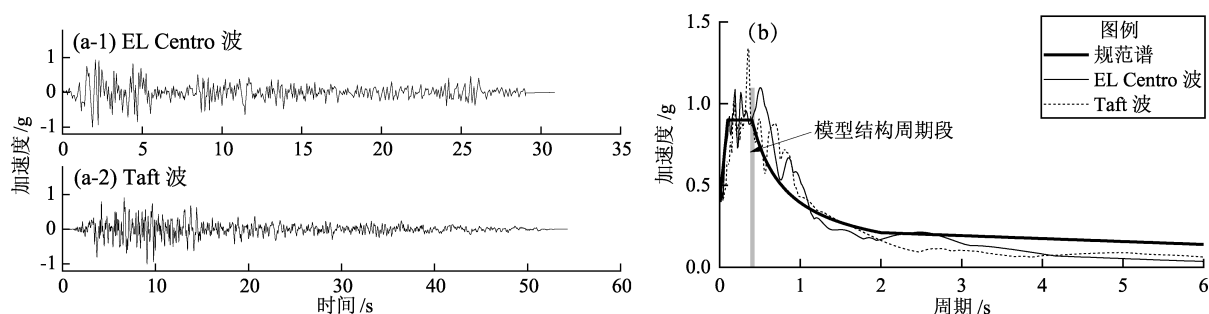


图 13 天然地震波加速度时程 (a) 及规范设计谱与天然地震动反应谱对比 (b)

Fig. 13 Acceleration-time histories of the seismic waves (a) and the comparison between the design spectrum and the earthquake response spectra (b)

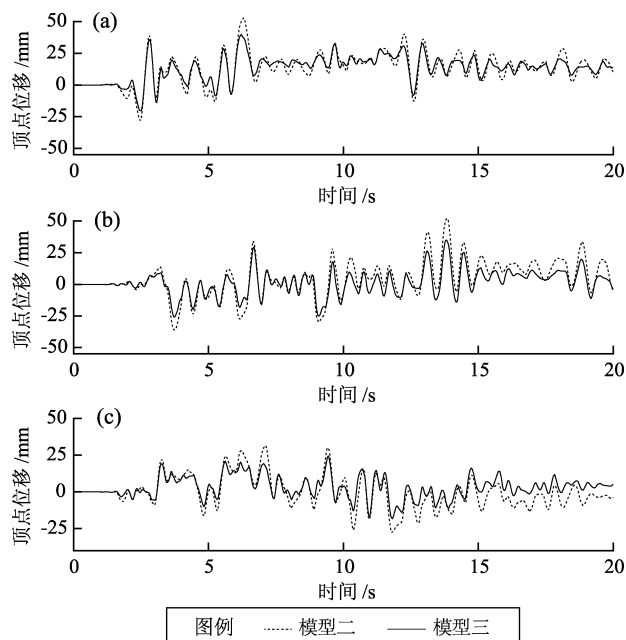


图 14 在 EL Centro 波 (a)、Taft 波 (b) 和人工波 (c) 作用下模型二和模型三顶点位移时程曲线

Fig. 14 Time histories of the top displacement of Model 2 and Model 3 under the action of the EL Centro wave (a), the Taft waves (b) and the artificial wave (c)

#### 4.3 RC 框架损伤分析

图 15 对比了在 2 条天然地震波和 1 条人工地震波作用下 RC 框架的等效塑性应变。在 EL Centro 波、Taft 波和人工波作用下模型三的最大等效塑性应变为 0.014 3、0.021 6 和 0.011 9，而模型二的最大等效塑性应变分别为 0.033 0、0.043 1 和 0.024 5，分别是模型三的 2.3、2.0 和 2.1 倍。可见，在相同地震波作用下，设置耗能连接件可以

有效耗散地震输入能量，从而控制 RC 框架在地震作用下的损伤程度。

## 5 结论

本文提出了一种 UHPC 幕墙板与主体结构间的柔性连接方式和耗能连接方式。利用有限元软件 ABAQUS 对单层单跨含 UHPC 幕墙的钢筋混凝土框架结构进行静力推覆分析和弹塑性时程分析，得到了以下结论：

(1) 纯框架模型一、UHPC 幕墙与 RC 框架间采用柔性连接的模型二、UHPC 幕墙与 RC 框架间采用耗能连接的模型三和采用刚性连接的模型四中，RC 框架的最终损伤模式一致，均为梁端和柱脚出现塑性铰。模型一、模型二和模型三的损伤程度差距较小，而模型四中，RC 框架损伤严重。

(2) 采用柔性连接方式时，UHPC 幕墙和连接节点的应变均处于较低的范围，墙板保持完好。采用耗能连接方式时，UHPC 幕墙和连接节点的应变相比柔性连接较大，但仍处于弹性阶段。采用刚性连接方式时，墙板连接节点附近的应变已经超过 UHPC 的极限应变，螺栓的应变也远超屈服应变，表明螺栓已经破坏。

(3) 由弹塑性时程分析结果可知，相比模型二，在 3 条地震波作用下模型三顶点位移分别减小了 24.8%、32.9% 和 36.5%，减震效果显著。采用耗能装置时，在相同地震波作用下主体结构的损伤程度相比无耗能装置的柔性连接模型大幅降低。在墙板与结构间设置摩擦耗能装置可以有效耗散地震输入能量，控制主体结构的损伤。

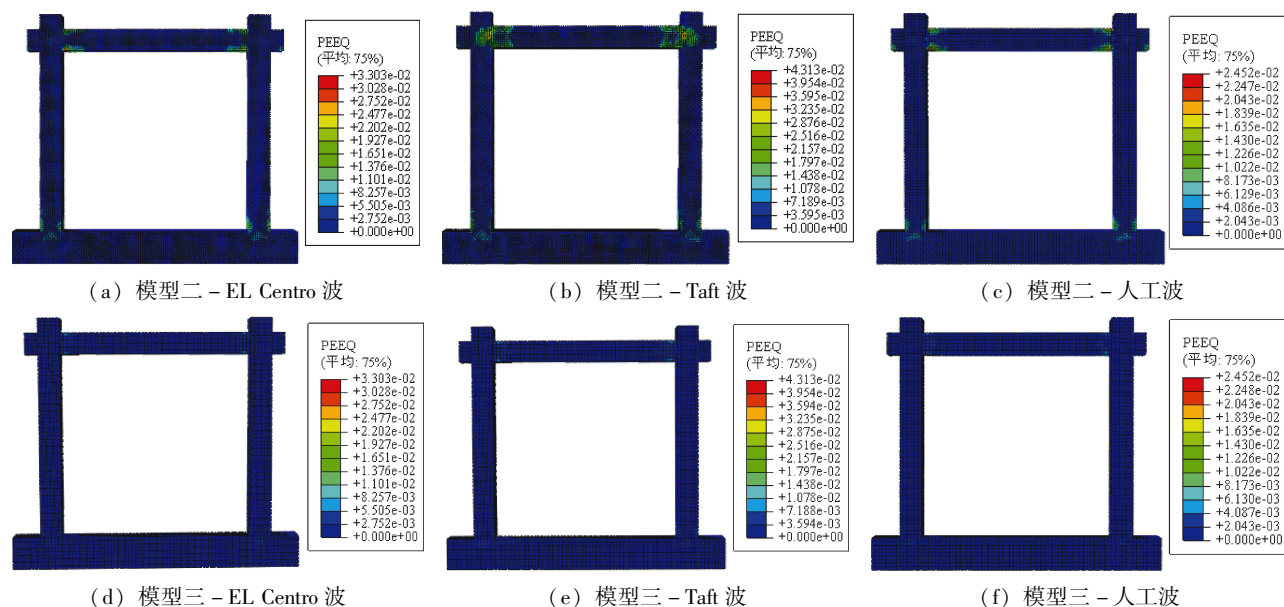


图 15 RC 框架等效塑性应变云图

Fig. 15 Equivalent plastic strain of the RC frame

(4) 相比柔性连接方式,耗能连接方式不仅可以将墙板和节点的损伤控制在较低的范围,还可以增强结构在地震作用下的耗能能力,降低结构在地震作用下的位移响应和损伤程度,因此是一种更为合理的连接方式。

#### 参考文献:

- 陈宝春,韦建刚,苏家战,等. 2019. 超高性能混凝土应用进展[J]. 建筑科学与工程学报,36(2):10-20.
- Chen B C, Wei J G, Su J Z, et al. 2019. State-of-the-art progress on application of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 36(2):10-20. (in Chinese)
- 何利,种迅,沙慧玲,等. 2023. 一种幕墙与主体结构间的柔性连接体系及设计方法;CN202310112059.9[P]. 2023-04-25.
- He L, Chong X, Sha H L, et al. 2023. A flexible connection system and design method between curtain wall and main structure; CN202310112059.9[P]. 2023-04-25. (in Chinese)
- 潘鹏,叶列平,钱稼茹,等. 2014. 建筑结构消能减震设计与案例[M]. 北京:清华大学出版社.
- Pan P, Ye L P, Qian J R, et al. 2014. Seismic design of building structures equipped with energy dissipation devices[M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)
- 石文龙,颜明廷,程荣. 2021. 三种摩擦材料的摩擦阻尼器力学性能研究对比[J]. 结构工程师,37(2):121-128.
- Shi W L, Yan M T, Cheng R. 2021. The mechanical properties comparison of three kinds of friction dampers with different friction materials[J]. Structural Engineers, 37(2):121-128. (in Chinese)
- 王衍,邵旭东,曹君辉,等. 2020. 含小型粗骨料 UHPC 板抗弯性能研究[J]. 土木工程学报,53(3):67-79.

- Wang Y, Shao X D, Cao J H, et al. 2020. Research on flexural performance of UHPC deck panel containing small coarse aggregates[J]. China Civil Engineering Journal, 53(3):67-79. (in Chinese)
- 杨参天,李爱群. 2023. 转动摩擦铰阻尼器力学性能试验研究[J]. 工程力学, 40(7):75-81.
- Yang C T, Li A Q. 2023. Experimental investigation on mechanical performance of rotational friction hinge damper[J]. Engineering Mechanics, 40(7):75-81. (in Chinese)
- 杨剑,方志. 2008. 超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J]. 混凝土, (7):11-15.
- Yang J, Fang Z. 2008. Research on stress-strain relation of ultra-high performance concrete[J]. Concrete, (7):11-15. (in Chinese)
- GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010, Code for seismic design of buildings[S]. (in Chinese)
- Belleri A, Brunesi E, Nascimbene R, et al. 2015. Seismic performance of precast industrial facilities following major earthquakes in the Italian territory[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 29(5):04014135.
- Bournas D, Negro P, Taucer F, et al. 2014. Performance of industrial buildings during the Emilia earthquakes in Northern Italy and recommendations for their strengthening[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 12(5):2383-2404.
- Chong X, Zhao M, Huang J Q, et al. 2023. Experimental investigation and numerical analysis of precast reinforced concrete shear walls with shoe bolt connections[J]. Advances in Structural Engineering, 26(2):329-343.
- Del Monte E, Falsini C, Boschi S, et al. 2019. An innovative cladding panel connection for RC precast buildings[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 17(2):845-865.
- Toniolo G, Colombo A. 2012. Precast concrete structures: The lesson learnt from L'Aquila earthquake[J]. Structural Concrete, 13(2):73-83.

## Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Structure with UHPC Cladding Panels Using Different Connection Systems

HE Li<sup>1</sup>, CHONG Xun<sup>2</sup>, SHA Huiling<sup>2</sup>, GAO Jun<sup>2</sup>, FENG Hui<sup>1</sup>, ZHAO Peng<sup>1</sup>, LI Zhipeng<sup>1</sup>

(1. *Hefei University of Technology Construction Supervision Co., Ltd., Hefei 230051, Anhui, China*)

(2. *College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China*)

### Abstract

To address the impact of different connection systems of the Ultra-High Performance Concrete (UHPC) cladding panels and the main structure on the seismic performance of the overall structure, two novel kinds of flexible and energy-dissipating connections between the UHPC cladding panels and the main structure were proposed in this study. Four single-story, single-span reinforced concrete (RC) frames were designed, including one RC frame with flexibly connected UHPC cladding panels, one RC frame with dissipative connected UHPC cladding panels, one RC frame with rigidly connected UHPC cladding panels, and a counterpart bare frame. Inelastic static analysis and nonlinear time-history analysis of the four structures were conducted using the finite element analysis software ABAQUS, and their mechanical properties and damage modes during earthquakes were compared and investigated. Results from the inelastic static analysis indicated that the ultimate damage modes were consistent for all four structures, and plastic hinges appeared at the ends of the beams and the bottom of the columns. In the rigid connection model, some of the connection bolts were damaged, and severe cracks appeared in the UHPC panels and the frame beam near the connections. In the flexible and energy-dissipating connection models, the connections and UHPC panels remained intact. The results from the nonlinear time-history analysis indicated that the displacement responses of the energy-dissipating connection model under the action of the three ground motions were reduced by 24.8%, 32.9%, and 36.5%, respectively, compared to the flexible connection model, and the damage state of the energy-dissipating connection model hit by the strong earthquake was lighter, indicating a significant damage control effect.

**Keywords:** UHPC cladding panels; flexible connection; energy-dissipating connection; rigid connection; seismic performance