

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 竖向及水平地震作用下 PSRC 空腹桁架转换结构 抗震性能分析

陈勇<sup>1</sup>, 简斌<sup>2</sup>, 龚春玉<sup>2</sup>

(1. 东莞市大业施工图审查有限公司, 广东 东莞 523000; 2. 重庆大学 山地城镇建设与  
新技术教育部重点实验室; 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**在“强转换”设计原则的基础上,提出预应力型钢混凝土(简称 PSRC)空腹桁架转换层框架结构多道防线的划分和内力调整的具体方法:空腹桁架下弦梁和转换柱为最后一道防线;其次是转换层桁架中腹杆、上弦梁以及与其相连的上层框架柱;首道防线是转换层其他上抬框架梁柱。采用 OpenSEES 软件建立多榀有限元算例模型,进行水平与竖向地震共同作用下的弹塑性时程分析,研究其抗震性能以及竖向水平分量变化( $V/H=0, 0.65, 1.2$ )产生的影响。研究表明:在罕遇及极罕遇地震水准下( $V/H=0.65$ ),结构可以避免整体和局部破坏,结构形成以上抬框架梁为主的混合耗能机制,总体实现了多道防线设防的设计思想。随着地震动竖向分量的增加,其影响主要表现在桁架下弦挠度显著增加,当竖向地震动较大时,其对上抬构件内力的附加影响应予以考虑。

**关键词:**预应力型钢混凝土;空腹桁架转换层;竖向地震动;抗震性能;时程分析

**中图分类号:** TU378.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2020)03-0064-09

## Seismic performance analysis of frame with PSRC vierendeel truss transfer story under vertical and horizontal ground motion

Chen Yong<sup>1</sup>, Jian Bin<sup>2</sup>, Gong Chunyu<sup>2</sup>

(1. Dongguan Daye Construction Drawings Review Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, P. R. China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education; School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Based on the design principle of “strong transformation”, a multi-lines defense seismic fortification method has been proposed for the frames with prestressed steel reinforced concrete (PSRC) vierendeel truss transfer story. In this method, the transfers columns and lower chord of transfer truss are designed as the last defense line. The second line includes the frame columns joined with transfer story, the upper chord and the middle web members of the transfer truss. Finally, the other columns and beams upon transfer story are the first line. In this study, firstly, the OpenSEES software was used to set up a series

**收稿日期:** 2019-09-27

**基金项目:** 国家自然科学基金(51878100)

**作者简介:** 陈勇(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事混凝土结构和组合结构研究, E-mail: 1169407645@qq.com.

简斌(通信作者), 男, 教授, 博士, E-mail: jianbin0215@163.com.

**Received:** 2019-09-27

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51878100)

**Author brief:** Chen Yong (1980-), senior engineer, main research interests: concrete structures and composite structures, E-mail: 1169407645@qq.com.

Jian Bin (corresponding author), professor, PhD, E-mail: jianbin0215@163.com.

finite element models. Then the elastic-plastic time history analysis was finished under the horizontal and vertical earthquakes to study the basic seismic performance and the influence of the difference vertical motion ( $V/H=0, 0.65, 1.2$ ). Results show that the structure can avoid the overall and partial damage under rare and very rare earthquake level ( $V/H=0.65$ ). And a “beam-column mixed hinge mechanism” can be formed to dissipate energy mainly relying on the beams upon transfer story. The target of multi-lines defense seismic fortification has been realized. On the other hand, with the increase of the vertical component of the ground motion, its influence is focus on the increase of the lower chord deflection.

**Keywords:** prestressed steel reinforced concrete; vierendeel truss transfer story; vertical ground motion; seismic performance; time-history analysis

梁式转换结构形式简单、传力明确,是实际工程应用中最常用的转换结构方案。但随着跨度增大,转换梁截面尺寸也急剧增大,导致建筑空间和使用功能受到极大影响,抗震设计中也将面临“刚度突变”、“强梁弱柱”等突出问题<sup>[1-2]</sup>。预应力型钢混凝土(简称 PSRC)空腹桁架转换层结构,是现代预应力、型钢混凝土组合结构与空腹桁架转换层的优化组合,具有转换跨度大,转换层构件截面尺寸远小于梁式转换的优点,可很好地满足建筑使用功能需求。

空腹桁架转换层结构属于典型的竖向不规则形式,其抗震设计是其结构设计的关键<sup>[3-4]</sup>。傅传国等<sup>[5]</sup>、戴国亮等<sup>[6]</sup>完成了 PSRC 空腹桁架转换结构拟动力地震反应试验研究,结果表明,该类结构更容易实现多道防线设防的抗震设计。张誉等<sup>[7]</sup>完成了梁式和空腹桁架式转换层结构竖向荷载和水平低周反复荷载试验研究,结果表明,后者具有更理想的破坏形态及抗震性能。简斌等<sup>[8]</sup>依据“强化转换层及下层、相对弱化上部结构”的基本原则,完成了一榀 1/4 缩尺 PSRC 空腹桁架转换层结构低周反复荷载试验,实现了预设的延性破坏模式。但该类结构研究目前存在一些不足:试验研究难度大,其子结构模型边界条件、地震作用与实际差异大,实验构件转换层为单跨结构等;大多已有研究未明确说明其试验模型设计的具体原则方法,导致设计依据不明确,对工程设计的指导意义降低;缺少精细化的有限元弹塑性时程分析,且对于大跨度结构,模拟分析未考虑竖向地震作用的影响。

笔者针对 8 度(0.2g)设防地区,在 OpenSEES 软件平台上建立 PSRC 空腹桁架转换层结构精细化有限元模型,考虑竖向及水平地震动共同作用,在罕遇、极罕遇水准下完成弹塑性时程分析,对大震下的破坏模式、抗倒塌性能和竖向地震作用的影响进行研究。

## 1 算例设计

### 1.1 设计基本原则

依据现行相关规范<sup>[2]</sup>和研究成果,确定 PSRC 空腹桁架转换层框架结构设计的基本原则:

1)“强转换”原则。即“对转换层及其下部结构进行强化,而相对弱化转换层上拾框架”。

2)多道防线抗震设防原则。首道防线为转换层上拾框架梁柱(不包括与桁架上弦梁紧邻的上层柱),其次为空腹桁架中腹杆、上弦梁和与其紧邻的上层框架柱,而桁架下弦梁和转换柱则作为最后一道防线。

3)上拾框架部分应满足现行规范有关普通 RC 框架“强柱弱梁”的设计原则。

### 1.2 算例基本信息

以两跨 PSRC 空腹桁架转换层平面框架结构为研究对象,算例基本信息见表 1, KJ1 和 KJ3 为转换跨度不同的基本算例,研究该类结构的基本抗震性能;算例 KJ2、KJ3 及 KJ4 竖向地震作用强度不同,研究竖向地震下的结构反应。

表 1 算例基本信息

Table 1 Information of examples

算例编号	设防烈度	结构高度/m	转换跨度/m	抗震等级	H/V
KJ1	8 度 0.2g	33.6	18	一级	0.65
KJ2	8 度 0.2g	33.6	24	一级	0
KJ3	8 度 0.2g	33.6	24	一级	0.65
KJ4	8 度 0.2g	33.6	24	一级	1.2

注: H/V 为竖向与水平向地震作用加速度峰值比。

除表 1 所列基本信息外,各算例均为 9 层,底层层高 6 m、2 层(转换层)层高 4.5 m、3~9 层层高 3.3 m。上拾框架跨度: KJ1 为 6 m, KJ2~KJ4 为 8 m。板厚:屋面板厚 120 mm,转换桁架上下层楼



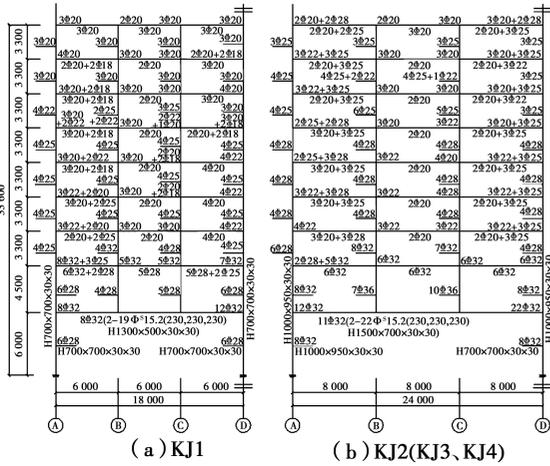


图 2 结构配筋图

Fig. 2 Reinforcement of KJ1 and KJ2(KJ3, KJ4)

因受剪破坏不是研究重点,故当构件截面尺寸满足规范剪压比要求,且在按规范考虑“强剪弱弯”后箍筋配置合理时,即认为满足抗剪要求。

## 2 模型建立及地震波选取

### 2.1 模型建立

基于 OpenSEES 有限元分析平台,对竖向、水平地震共同作用下的平面模型进行弹塑性时程分析。模型建立中,梁、柱采用了纤维杆系模型,考虑楼板翼缘作用和柱脚钢筋粘结滑移。混凝土采用 concrete02 本构模型,滞回关系采用 Berkeley 两折线模型;非预应力钢筋及型钢采用 steel02 本构模型,预应力筋采用 Hysteretic 本构模型;采用 Bond\_SP01 滑移模型考虑柱脚位置处钢筋与混凝土间的粘结滑移<sup>[12-13]</sup>。

在模拟分析中,预应力筋采用“两阶段工作原理”考虑<sup>[14-15]</sup>:第 1 阶段为张拉施工阶段,预应力作用相当于“荷载”,即预应力筋的有效预应力  $\sigma_{pe}$  提供等效荷载;第 2 阶段为张拉灌浆后的使用阶段,预应力筋相当于普通钢筋,只是其抗拉强度设计值取  $f_{py} - \sigma_{pe}$ 。因而,预应力混凝土结构构件就可以视为一个承担外荷载和预应力等效荷载的“普通钢筋混凝土结构构件”,其中,预应力筋材料强度为  $f_{py} - \sigma_{pe}$ 。

### 2.2 地震波选取

弹塑性时程分析地震波选自 PEER 地震波数据库,同时,考虑水平及竖向地震作用,对各算例分别选取 7 对实际地震波记录。

首先,对 PEER 数据库水平分量地震波进行初

筛,然后采用双频段控制选波,双频区段为  $[0.1 s, T_g]$  及  $[T_1 - 0.15 s, T_1 + 0.15 s]$ ,控制其加速度与规范反应谱值的误差不超过 15%。在选取水平分量地震波的同时,取对应的竖向地震波记录。在对竖向地震波进行加速度峰值调幅时,分别取竖向与水平地震加速度峰值比  $V/H = 0, 0.65, 1.2$ ,如表 4 所示。

表 4 选用地震波信息

Table 4 Information of selected seismic waves

编 号				编 号			
KJ1				KJ2~KJ4			
记录名称	震级	V/H	记录名称	震级	V/H	记录名称	震级
1 HWA025E	6.20	0.57	8 CVK090	6.06	0.92		
2 CHY006N	6.20	0.57	9 NIGH11NS	6.63	0.69		
3 Z07360	6.00	0.58	10 MYG010EW	6.90	0.50		
4 AND250	7.00	0.63	11 CACSN	7.00	0.54		
5 3914C145	6.46	0.37	12 AND340	6.93	0.65		
6 NSD090	6.46	0.69	13 3914C145	6.46	0.37		
7 BLD090	6.69	0.38	14 NSD090	6.46	0.69		

## 3 结果分析

### 3.1 破坏准则

#### 3.1.1 整体失效的判定

1)在结构的任何一层中,所有竖向构件上下端均出现塑性铰,即所谓的层侧移机制,且层间位移角大于 2%。

2)任何一层的层间位移角超过 3%。

3.1.2 局部失效的判定 构件塑性铰转动需求大于其转动能力,具体表现为塑性铰截面混凝土最大压应变小于极限压应变。

### 3.2 KJ1 和 KJ3 罕遇地震分析

算例 KJ1、KJ3 为跨度不同的基本算例,  $H/V$  均为 0.65,旨在研究 PSRC 空腹桁架转换层框架结构的基本抗震性能和结构响应特征。对算例 KJ1、KJ3 进行 8 度罕遇地震下的弹塑性时程分析,KJ1 输入地震波 w1~w7、KJ3 输入地震波 w8~w14。

3.2.1 侧向位移 图 3 和图 4 分别列出了算例 KJ1、KJ3 在各自 7 对地震波下层侧向位移的最大值和最大值的平均值(简称平均值,下同)。

由图 3、图 4 可见,算例 KJ1、KJ3 侧向位移曲线整体均未呈现出普通框架的剪切型,而是在转换层处出现明显改变。与剪切型侧移曲线相比,KJ1、KJ3 的转换层及其下部楼层侧向位移明显减小,这

源于设计时对结构转换层及下部楼层的抗侧刚度的加强。

换层及其下部楼层的层间位移角远小于上拾框架各层,且未出现明显的塑性变形,这与层侧向位移的变化是一致的。此外,两算例层间位移角最大值的平均值均出现在第 7 层,这与第 7 层柱截面尺寸减小相关。

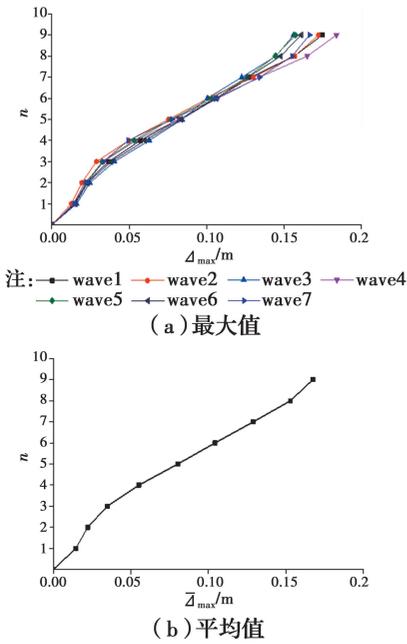


图 3 KJ1 层侧向位移最大值

Fig. 3 Maximum lateral displacement of KJ1

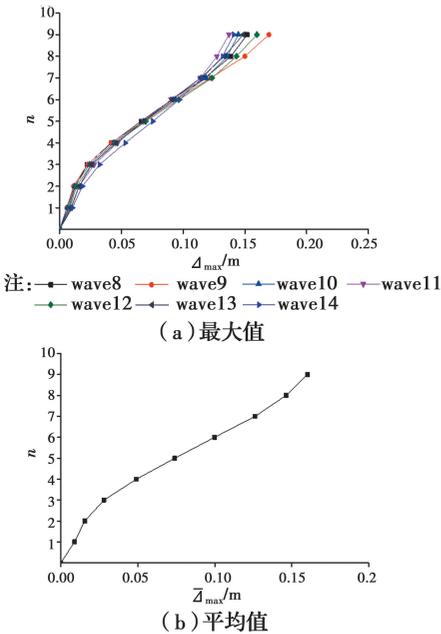


图 4 KJ3 层侧向位移最大值

Fig. 4 Maximum lateral displacement of KJ3

3.2.2 层间位移角 图 5 和图 6 分别列出了算例 KJ1、KJ3 在各自 7 对地震波下层间位移角的最大值和最大值的平均值。

计算结果表明,KJ1 与 KJ3 的层间位移角最大值分别为 1/79 和 1/71,平均值分别为 1/87 和 1/98,未见整体失效,且有较大富余。由图 5、图 6 可见,转

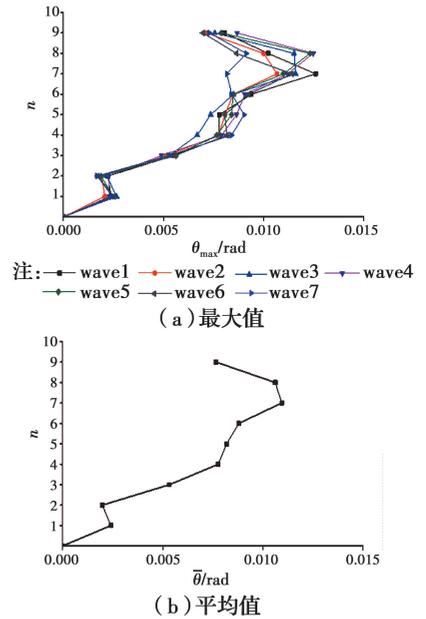


图 5 KJ1 层间位移角最大值

Fig. 5 Maximum story drift of KJ1

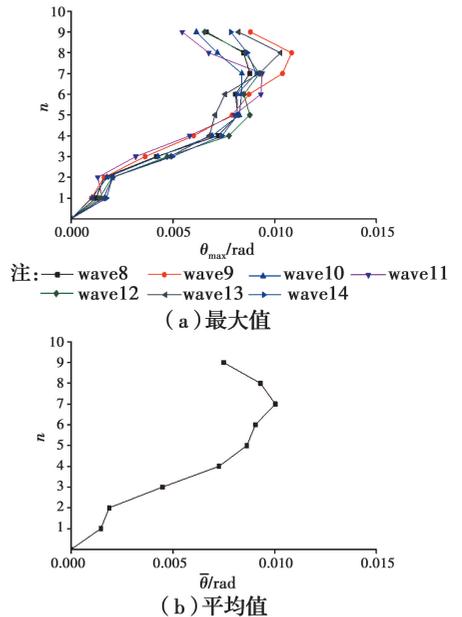


图 6 KJ3 层间位移角最大值

Fig. 6 Maximum story drift of KJ3

3.2.3 转换层竖向位移 PSRC 空腹桁架转换层结构转换跨度大,对竖向地震作用更为敏感。如果桁架转换层出现较大竖向位移,将对转换层及其上部构件受力产生影响。在预应力、竖向荷载以及水

平与竖向地震共同作用下,算例 KJ1、KJ3 转换层下弦梁跨中竖向位移最大值计算结果见表 5。转换层下弦梁如图 7 所示,位移向下为正。

表 5 桁架下弦梁跨中挠度

Table 5 Deflection of the lower chord of transfer truss mm

算例	梁跨中挠度最大值		挠度最大值均值		最大值均值/跨度	
	AD 梁	DG 梁	AD 梁	DG 梁	AD 梁	DG 梁
KJ1	20.88	20.71	18.43	18.11	1/977	1/994
KJ3	36.28	36.49	33.09	33.07	1/725	1/726

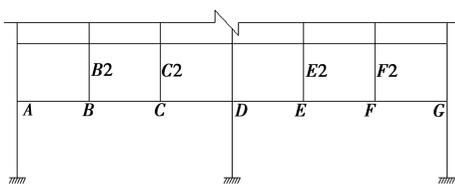


图 7 桁架下弦梁节点号

Fig. 7 Node number of the lower chord of transfer truss

参照《组合结构规范》(JGJ 138—2016)<sup>[16]</sup>,在正常使用极限状态,转换梁下弦挠度与计算跨度之比限值为  $l_0/300$ (KJ1、KJ3 对应为 60、80 mm),且不宜超过  $l_0/400$ (KJ1、KJ3 对应为 45、60 mm)。由表 4 可见,梁跨 AD 与 DG 的数值基本相等,且与规范 JGJ 138—2016 的要求相比有明显富余。

3.2.4 塑性铰分布 考虑算例 KJ3 与 KJ1 计算结果类似,故仅给出算例 KJ1 在 7 对地震波下的塑性铰分布图,见图 8,空心圆代表截面上下部单向出铰,实心圆代表双向出铰。

根据计算分析结果,总结 KJ1 和 KJ3 塑性铰分布特点为:

1) 转换柱。转换层及其下部楼层的转换柱多在转换桁架下弦梁相连的边节点处首先出铰,转换柱虽难以避免出现塑性铰,且少数地震波下出铰数较多,但塑性铰转动需求远小于上抬框架梁。

2) 桁架上、下弦梁和腹杆。下弦梁未见出铰、上弦梁仅个别出铰,中腹杆部分出铰,塑性铰转动需求远小于上抬框架梁。

3) 上抬框架柱。与转换层上弦梁相连的 3 层柱底有部分出铰,塑性铰转动需求远小于上抬框架梁;其他上抬框架柱部分出铰,转动需求明显小于上抬框架梁。

4) 上抬框架梁。上抬框架梁出铰明显最多,且转动需求明显最大。除顶层外其他各层普遍出铰,

4~7 层塑性铰转动需求明显更大。上述特点表明,上抬框架符合“强柱弱梁”设计原则,实现了以梁铰为主的混合出铰耗能机制。

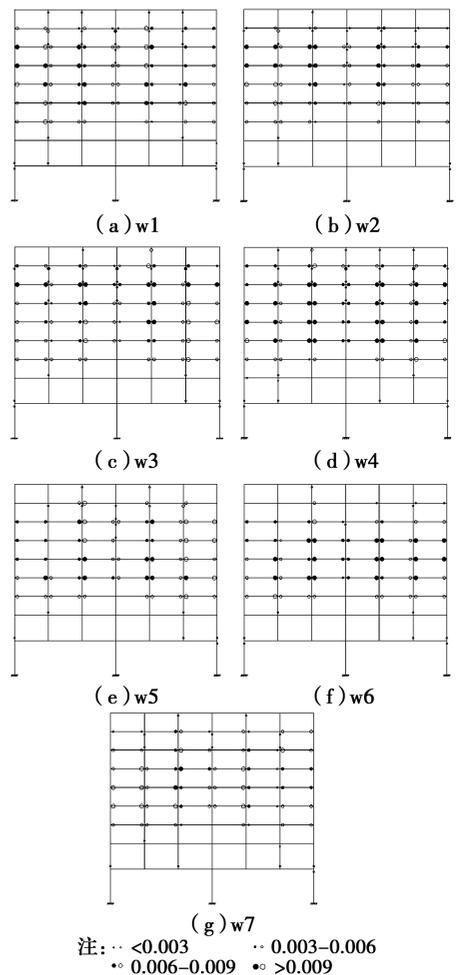


图 8 KJ1 塑性铰分布

Fig. 8 Plastic hinge distribution of KJ1

综上所述,转换柱、空腹桁架下弦梁是作为最后一道防线的关键构件,虽然不能避免转换柱出铰,但塑性铰转动需求小,得到较好地保护;桁架上弦及其相连的上抬框架柱,以及桁架的中腹杆作为中间过渡防线虽有部分出铰,但转动需求小,未见明显损伤;结构塑性铰主要集中在上抬框架梁,并以此耗散地震能量。由此可见,两算例均可以满足“强转换”、“多道防线抗震设防”和上抬框架“强柱弱梁”等设计基本原则,具有较好抗震性能。

3.2.5 关键杆件塑性铰转动需求 表 6 列出了算例 KJ1、KJ3( $H/V=0.65$ ) 各类构件塑性铰的转角延性需求,其延性需求均在合理范围内;同时,计算结果表明罕遇地震下各出铰截面混凝土受压应变均未达到极限压应变值,即不出现局部破坏。

表6 构件最大转角延性需求

Table 6 Maximal rotational ductility requirement of elements

框架编号	位置	最大转角延性需求	最大出铰位置
KJ1	上部框架梁	3.77	5层CD梁
	上部框架柱	1.74	8层F柱
	3层柱底	1.28	3层B柱
	2层转换柱	1.93	2层G柱
	腹杆	1.24	2层B柱
	转换柱	1.24	1层A柱
KJ3	上部框架梁	5.62	5层CD梁
	上部框架柱	1.30	7层D柱
	3层柱底	1.51	3层F柱
	2层转换柱	1.89	2层A柱
	腹杆	1.25	2层F柱
	转换柱	1.37	1层G柱

### 3.3 KJ3 极罕遇地震分析

结构有可能遭遇超越罕遇地震水准的地震作用,在此种情况下,若 PSRC 空腹桁架转换结构在最后一道防线出现破坏,其结果将是灾难性的,危害程度远大于普通框架结构。为确保该类结构在超越罕遇地震水准后的安全储备,以及为进一步研究可能出现的破坏模式,现以算例 KJ3 为对象,进行 8 度极罕遇地震水准下的弹塑性时程分析。

按照《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)的定义,极罕遇地震相应于年超越概率为  $10^{-4}$  的地震动,其 PGA 取基本地震动时的 2.7~3.2 倍。8 度设防基本地震动峰值加速度为  $200 \text{ cm/s}^2$ ,对应的极罕遇地震动水准下则为  $640 \text{ cm/s}^2$ 。故算例 KJ3 在极罕遇地震下的弹塑性时程分析时,需将  $w_8 \sim w_{14}$  地震动水平分量峰值加速度调整到极罕遇地震动水准,竖向分量仍按  $V/H=0.65$  的比例确定。

**3.3.1 层间位移角** 计算结果表明,KJ3 最大层间位移角值在  $1/76 \sim 1/40$  之间,最大层间位移角值平均值为  $1/54$ ,位于上拾框架上部的 6~8 层。其中,在地震波  $w_{11}$  下层间位移角在上拾框架中达到最大值  $1/40$ ,对应的底层和转换层层间位移角分别为  $1/298$  和  $1/333$ ,数值明显较小。

综上所述,在极罕遇地震下,最大层间位移角虽然接近 3% 的限值,但没有形成层侧移破坏机制,未出现整体破坏,且转换层及其下部楼层层间位移角小,得到了较好的保护。

**3.3.2 塑性铰分布** 算例 KJ3 在  $w_{11}$  作用下层间位移角反应最为显著,在图 9 中给出其塑性铰分布,通过与罕遇水准下塑性铰分布图的对比,总结 PSRC 空腹桁架转换层框架结构在极罕遇地震作用下的塑性铰分布的特点。

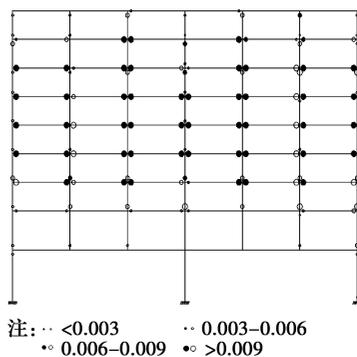
1) 转换柱。边转换柱的底端新增出铰,所有塑性铰转角需求仍较小。

2) 上弦梁、下弦梁和中腹杆。上弦梁端和中腹杆底端出铰更为普遍,但转动需求小;下弦梁不出铰。

3) 上拾框架柱。上拾框架柱塑性铰数量增加,塑性铰转动需求增大趋势也较为明显。其中,转换桁架上弦梁紧邻的 3 层柱下端普遍出铰,且部分塑性铰转动需求相对较大。

4) 上拾框架梁。除顶层外,上拾框架梁端截面几乎全部出铰,且转动需求明显大于其他构件。

综上所述,KJ3 在极罕遇地震作用下临近破坏时,转换层及其下部楼层塑性铰转动仍较小,后续防线得到较好保护。上拾框架混合出铰明显,地震能量的耗散仍主要依靠上拾框架梁进行,多道防线抗震设防的设计思想得以实现。需说明的是,为解决个别地震波下转换柱出铰数略多的问题,必要时可适当提高转换柱的承载能力。

图9 塑性铰分布( $w_{11}$ )Fig. 9 Plastic hinge distribution( $w_{11}$ )

## 4 地震动竖向分量影响分析

### 4.1 侧向位移

算例 KJ2、KJ3 和 KJ4 水平与竖向地震动加速度峰值比  $V/H$  分别为 0、0.65 和 1.2,其在各自 7 对地震波作用下侧向位移最大值的平均值分布如图 10 所示。由图 10 可见,不同  $V/H$  水平下,侧向位移曲线几乎重合,这说明地震动竖向分量的改变几乎未对该类结构的侧向位移产生影响。

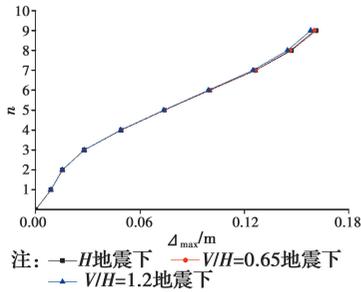


图 10 结构侧向位移曲线

Fig. 10 maximum lateral displacement of KJ2-KJ4

### 4.2 中腹杆下端节点位移

在算例各自 7 对地震波下,空腹桁架下弦各控制点(图 7)竖向位移最大值见表 7。由表 7 可见,随着地震动竖向分量的增加,转换桁架下弦各控制点(B、C、E、F 点)竖向位移最大值也随之增大,其中,靠近边转换柱的 B、F 节点竖向位移增大尤为显著。以 C 节点处竖向位移最大值平均值为例,KJ4 与 KJ3 相比,增大 25.6%;KJ4 与 KJ2 相比,增大 60.4%。KJ4 在个别地震波作用下 C 节点竖向位移已达到 44.9 mm。随着 V/H 的增加,各控制节点的竖向位移不均匀性加大,导致类似支座不均匀沉降效应,这将对上部构件造成相应的影响,如内力重分布更为显著、构件提前开裂等问题,应予以重视。

表 7 转换层下弦梁竖向位移

Table 7 Vertical displacement of the lower chord of transfer truss

框架	节点竖向位移最大值				竖向位移最大值均值			
	B	C	E	F	B	C	E	F
KJ2	25.3	22.0	23.1	26.4	24.0	21.3	21.7	24.5
KJ3	32.8	29.9	29.8	32.6	29.7	27.2	27.0	29.8
KJ4	44.5	40.6	40.6	44.8	37.5	34.2	33.9	37.6

### 4.3 塑性铰分布

算例 KJ2~KJ4 在 w8 地震波下塑性铰分布具有代表性,见图 11。总结塑性铰分布随竖向地震动增大的发展规律如下:

1)转换柱。随着 V/H 数值的增大,转换柱塑性铰数量增多,由边转换柱与空腹桁架下弦梁相交节点处下柱端出铰,逐步向边转换柱与空腹桁架下弦梁相交节点处上下柱端出铰、底层边转换柱下端出铰扩展;同时,塑性铰转动需求呈现增大趋势,但转动需求仍很小。

2)上弦梁、下弦梁及中腹杆。随 V/H 的增大,空腹桁架下弦仍未出铰;上弦梁出铰数量增多,且呈现由梁端向中部发展的趋势,当 V/H=1.2 时,上弦梁出铰数量已较为普遍。

3)上抬框架塑性铰。转换桁架上抬框架梁充分出铰,随着竖向分量占比增加,部分梁塑性铰由单向铰变化为双向铰,且转动需求也有一定增加。而上部框架柱受竖向分量影响相对较小。

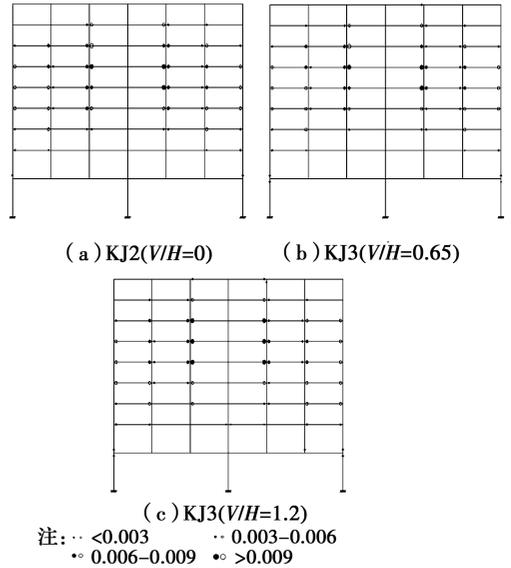


图 11 KJ2~KJ4 塑性铰分布 (w8)

Fig. 11 Plastic hinge distribution of KJ2~KJ4

## 5 结论

1)在“强转换”设计原则基础上,提出了多道防线划分和内力调整的具体方法。多道防线包括:首道防线为转换层上抬框架梁柱(不包括与桁架上弦梁紧邻的上层框架柱);其次为空腹桁架中腹杆、上弦梁和与其紧邻的上层框架柱;桁架下弦梁和转换柱则作为最后一道防线。

2)罕遇地震水准下,考虑竖向与水平地震共同作用,按多道防线设防思想设计的 PSRC 空腹桁架转换层框架结构不出现整体和局部破坏,形成以首道防线上抬框架梁铰为主的混合出铰耗能机制,结构多道防线设防思想总体得以实现。

3)极罕遇地震水准下结构层间位移角明显增大,但不出现整体破坏,仍形成以上抬框架梁铰为主的混合出铰耗能机制,表现出较好的抗震性能。

4)随着竖向地震动的增大,其影响主要表现在桁架下弦挠度显著增加,当竖向地震动较大时,其对上抬构件内力的附加影响应予以考虑。

需要说明的是,底部增设落地剪力墙将明显改善 PSRC 空腹桁架转换框架结构底部的抗侧刚度比和大震下的抗震能力,提高该类结构的可靠性。本文采用平面模型进行抗震性能研究,后续将进一步补充空间模型的研究,包括增设剪力墙的影响。

## 参考文献:

- [1] FINTEL M. Staggered transverse wall-beams for multistory concrete buildings [J]. Journal of American Concrete Institute, Proceedings, 1968, 65 (5): 366-378.
- [2] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 唐兴荣. 高层建筑转换层结构与施工 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
TANG X R. Structure design and construction of high-rise building transfer level [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [4] 傅传国, 娄宇. 预应力型钢混凝土结构试验研究及工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
FU C G, LOU Y. Experimental study and engineering application of prestressed steel concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [5] 傅传国, 蒋永生, 梁书亭. 大跨度叠层空腹桁架整体转换结构模型受力与抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 36-44.  
FU C G, JIANG Y S, LIANG S T. Experimental study on bearing capacity and seismic behavior of large-span two-storied vierendeel truss transfer structure [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 36-44. (in Chinese)
- [6] 戴国亮, 蒋永生, 傅传国, 等. 高层型钢混凝土底部大空间转换层结构性能研究 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 24-32.  
DAI G L, JIANG Y S, FU C G, et al. Experimental study on aseismic behaviors of transfer story with steel reinforced concrete in low stories of large space [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 24-32. (in Chinese)
- [7] 张誉, 赵鸣, 方健, 等. 空腹桁架式结构转换层的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1999, 20(6): 11-17.  
ZHANG Y, ZHAO M, FANG J, et al. Experimental research on transfer story structures of tall building [J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(6): 11-17. (in Chinese)
- [8] 简斌, 钟庆, 甘渊, 等. 预应力混凝土空腹桁架转换结构低周反复荷载试验研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(12): 18-24.  
JIAN B, ZHONG Q, GAN Y, et al. Experimental study of prestressed concrete vierendeel truss transfer structure under low-cycle loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (12): 18-24. (in Chinese)
- [9] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 龚春玉. 竖向与水平地震作用下带 PSRC 空腹桁架转换层框架结构抗震性能分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
GONG C Y. Analysis on seismic performance of frame with PSRC vierendeel truss transfer story under vertical and horizontal ground motion [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [11] 预应力混凝土结构设计规范: JGJ 369—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Code for design of prestressed concrete structure: JGJ 369-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [12] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees users manual [R]. PEER, University of California, Berkeley, 2006.
- [13] 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.  
CHEN X W, LIN Z. Structural nonlinear analysis program OpenSEES theory and tutorial [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [14] 王明. 预应力钢筋两阶段工作原理的试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
WANG M. Experimental study on two-stage-working principle of prestressed reinforcement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [15] 简斌, 汤甜恬, 李东泽. 一级抗震预应力混凝土框架混合出铰机制下柱端弯矩增大系数研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5): 132-140.  
JIAN B, TANG T T, LI D Z. Research on moment magnifying coefficients at column ends of first seismic grade prestressed concrete frame with mixed hinge mechanism [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(5): 132-140. (in Chinese)
- [16] 组合结构设计规范: JGJ 138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Code for design of composite structures: JGJ 138-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)