

文章编号:1673-2049(2015)02-0091-07

# 罕遇地震作用下框架-核心筒结构弹塑性反应分析

王 朋, 史庆轩, 王 峰, 盛华春

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**采用有限元软件进行单向、双向罕遇地震作用下框架-核心筒结构弹塑性时程分析,通过单向、双向罕遇地震作用下结构响应对比,分析了双向罕遇地震作用对结构顶点位移、层间位移角、楼层相对扭转角及相对加速度的影响;通过改变地震波输入角度,考察了其对结构响应的影响。结果表明:单向、双向罕遇地震作用下的结构层间位移角曲线较为相似,但是双向罕遇地震作用下的结构层间位移角明显较单向作用下的大;地震动特性对楼层扭转角的影响较为显著,一般相对扭转角最大值均出现在结构的顶层;楼层响应相对加速度最大值一般出现在结构底部1/5~3/5结构高度内或结构的顶部;地震波输入角度对结构响应的影响较大。

**关键词:**框架-核心筒结构;双向罕遇地震作用;弹塑性分析;地震波输入角度

**中图分类号:**TU398.2

**文献标志码:**A

## Elasto-plastic Response Analysis of Frame-core Tube Structure Under Severe Earthquake Actions

WANG Peng, SHI Qing-xuan, WANG Feng, SHENG Hua-chun

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the finite element software, elasto-plastic time history analysis of a frame-core tube structure under axial or biaxial severe earthquake actions was carried out. By contrasting, the effects on building top displacement, drift, relative torsion angle of floor and the relative acceleration of structure were analyzed. At the same time, the effect of earthquake input angle on the building was studied. The results indicate that the drift curves of structure under axial or biaxial earthquake actions are similar. However, the drifts of structure under biaxial actions are bigger than those under axial actions. The floor torsion angle is affected significantly by the ground motion characteristics. Furthermore, the peak value of floor torsion angle occurs at the top of the building. The peak value of relative acceleration occurs at the 1/5-3/5 structure height or at the top. The building response is influenced obviously by the earthquake input angle.

**Key words:** frame-core tube structure; biaxial severe earthquake action; elasto-plastic analysis; earthquake input angle

## 0 引言

中国现行规范规定:当结构的质量和刚度分布明显不对称、不均匀时应考虑双向水平地震作用下

的扭转影响;9度抗震设计时的高层建筑应计算竖向地震作用,其他情况一般仅考虑单向地震作用。然而,由于对结构损伤演化和破坏机理缺乏足够的认识<sup>[1-6]</sup>,即使按现行抗震理论设计的高层建筑也在

收稿日期:2014-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51178380,51478382);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20116120110004)

作者简介:王 朋(1987-),男,山东定陶人,工学博士研究生,E-mail:wangpeng870822@163.com。

近年来的地震中发生了倒塌。高层建筑倒塌的原因是多方面的,但是主要原因是抗震设计理论方面不够完善。

杨红等<sup>[7]</sup>认为双向水平地震作用对框架“强柱弱梁”屈服机制的影响未引起重视,导致按现行规范设计的钢筋混凝土框架在四川汶川地震中普遍出现柱铰机制。刘阳冰等<sup>[8]</sup>对钢-混凝土组合框架-RC 核心筒结构进行了弹塑性地震反应分析,验证了分析方法的合理性。叶献国等<sup>[9]</sup>通过三维模拟地震振动台试验,研究了钢筋混凝土结构在地震作用下不同工作阶段的抗震性能和动力性能的改变及破坏机制。杜洪彪等<sup>[10]</sup>研究了双向罕遇地震作用下质量偏心结构各阶段的地震反应,揭示了结构动力特性随裂缝和塑性发展的变化规律。

Oliva 等<sup>[11]</sup>进行了输入斜向地震波的双层单跨钢筋混凝土框架模型振动台试验,结果表明:斜向地震输入使结构承载力降低;结构进入非线性后,由于双轴间弯矩相互耦合的影响,屈服后刚度迅速减小。Singh 等<sup>[12]</sup>对结构进行多维地震动作用下的反应分析,提出设计时要基于不利作用角度的观点。Shakib 等<sup>[13]</sup>对结构进行了双向罕遇地震激励下概率方法基础上的抗震性能评估研究。Faggella 等<sup>[14]</sup>采用纤维梁、柱单元对钢筋混凝土三维空间结构进行三向地震作用下基于概率法的抗震性能评价。Lin 等<sup>[15]</sup>采用三自由度模态分析方法对结构进行双向罕遇地震作用的计算,此法减少了计算强度且具有较高的准确性。

上述学者对结构在双向或多向地震激励作用下的抗震性能进行了一定研究,得出部分成果,但是研究的广度和深度还远远不够。本文以框架-核心筒结构为例,分析双向罕遇地震及地震波输入角度对结构响应的影响,以供建筑设计参考。

1 模型建立

1.1 结构概况

本文结构为某 24 层框架-核心筒混合结构,抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度为 0.20g

( $g$  为重力加速度),二类场地,场地的特征周期为 0.35 s。采用 PKPM 软件进行结构内力计算及配筋,结构平面布置如图 1 所示,其中, $H_1, H_2$  均表示方向。该结构由核心筒内筒和外围框架组成,其中框架为型钢混凝土柱,结构层高均为 3.9 m,剪力墙厚度为 0.3 m,连梁截面尺寸为 0.3 m×0.9 m,纵筋为 HPB400,箍筋为 HPB300,型钢等级为 Q235。荷载取值依据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)<sup>[16]</sup>,楼面恒载取 8 kPa,活载均取 2 kPa。结构共分为 3 个标准层,具体设计参数如表 1 所示。

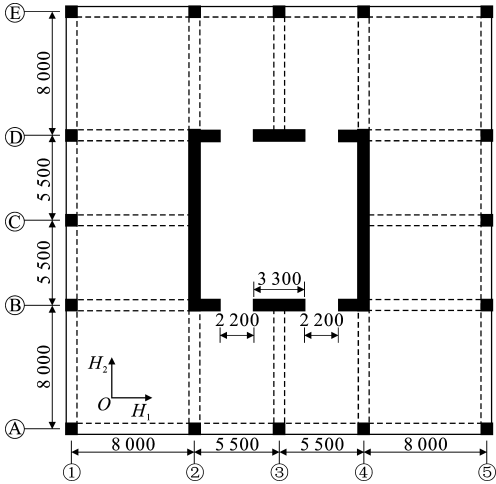


图 1 结构平面布置(单位:mm)

Fig. 1 Layout of Structural Plane (Unit:mm)

1.2 模型实现

1.2.1 材料本构模型

本文采用 Mander 约束混凝土模型<sup>[17]</sup>,其为考虑强度损失的三折线模型,受拉强度、屈服强度、极限强度及相应应变均按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[18]</sup>确定。钢筋及钢材均采用非屈曲双线性理想弹塑性模型,假定拉压对称并考虑钢筋硬化,硬化系数取为 0.01。

1.2.2 框架梁、柱模型

框架梁、柱均采用纤维截面,截面的屈服可直接读取材料的性质。

1.2.3 剪力墙模型

对于剪力墙,除需要考虑弯曲-轴力( $P-M$ )特性

表 1 结构设计参数

Tab. 1 Design Parameters of Structure

楼层	混凝土强度等级	梁尺寸/mm		柱尺寸/mm		角柱型钢尺寸/mm				边柱型钢尺寸/mm			
		宽	高	宽	高	翼缘厚度	腹板厚度	宽	高	翼缘厚度	腹板厚度	宽	高
1~5	C40	300	700	850	850	20	20	350	550	30	30	400	550
6~18	C35	300	700	800	800	20	20	350	550	30	30	350	500
19~24	C30	300	700	750	750	20	20	300	450	30	30	300	450

外,还应考虑其剪切特性,本文通过添加非线性剪切材料来实现,并采用弹性本构来模拟平面外的弯曲、剪切及扭转特性。

1.2.4 连梁及埋设梁模型

当连梁跨高比较大或是柔性连梁时,宜采用一般梁单元,而对于深连梁及刚性连梁宜采用一般墙单元模拟。本文连梁采用一般梁单元模拟,并通过设置埋设梁限制剪力墙节点处平面内转动,埋设梁弯曲线刚度约为连梁的 20 倍,而轴向刚度很小。

1.3 模型验证

1.3.1 模态验证

采用 PKPM 及 Perform-3D 计算出的振型及周期对比如表 2 所示。2 个计算结果的前 3 阶振型一致,依次为  $y$  方向平动、 $x$  方向平动及扭转,且振型周期相差较小,依次为 10.7%,3.9%,7.2%。

表 2 振型及周期对比

Tab. 2 Comparisons of Modes and Periods				
阶次	PKPM 结果		Perform-3D 结果	
	振型	周期/s	振型	周期/s
1	$y$ 方向平动	2.127	$y$ 方向平动	2.355
2	$x$ 方向平动	2.093	$x$ 方向平动	2.176
3	扭转	1.881	扭转	2.017

1.3.2 结构响应验证

以 Taft 波为例,采用 PKPM 和 Perform-3D 进行弹性时程分析,结构响应对比如表 3 所示,由此可知,PKPM 结果与 Perform-3D 结果吻合良好。

表 3 结构响应对比

Tab. 3 Comparison for Structure Response		
结构响应	PKPM 模型	Perform-3D 模型
顶层位移/mm	48.28	55.90
最大层间位移角	1/1 314	1/1 214
基底弯矩/(kN·m)	394 458.8	365 400.0
基底剪力/kN	10 903.5	9 875.8
顶层最大加速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ )	1.202	1.346

综上所述,本文 Perform-3D 所建立模型能够较准确地反映结构动力特性,可用于后续分析研究。

2 单向和双向罕遇地震作用下弹塑性时程分析

对模型结构分别进行单向、双向罕遇地震作用下的弹塑性时程分析,本文地震波选取 Kobe 波、Taft 波及人工波,地震记录持时为 20 s,并将地震动加速度幅值调整至  $400 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2.1 顶层位移

图 2 为 3 组地震波单向、双向罕遇地震作用下

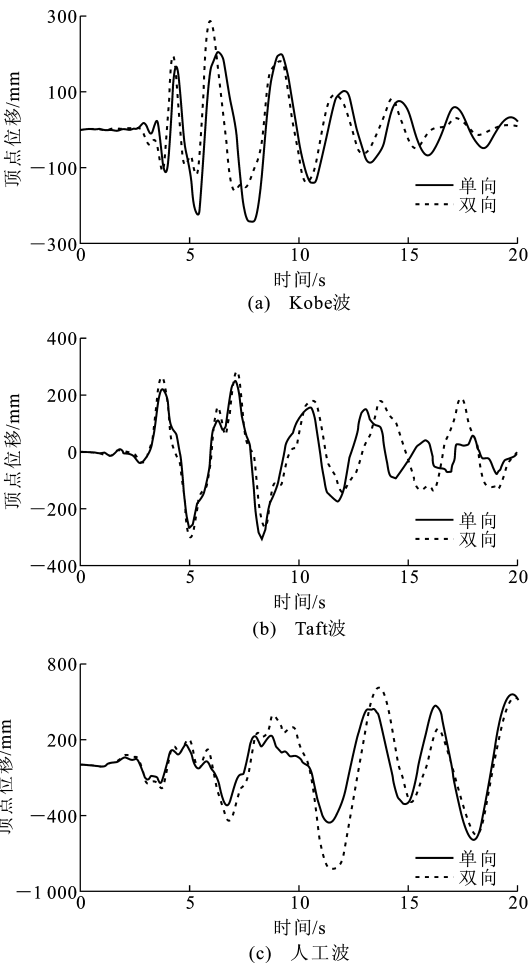


图 2 单向、双向罕遇地震作用下结构顶点位移时程曲线  
Fig. 2 Top Displacement Time History Curves of Structure Under Axial and Biaxial Severe Earthquake Actions

结构顶点的位移时程曲线。由图 2 可知:

(1)对于单向罕遇地震,Taft 波作用下,当时间  $t=8.171 \text{ s}$  时,顶层的位移达到最大值  $335.54 \text{ m}$  ( $H_1$  方向),当  $t=8.284 \text{ s}$  时,顶层的位移达到最大值  $387.4 \text{ mm}$  ( $H_2$  方向);Kobe 波作用下,当  $t=7.65 \text{ s}$  时,顶层的位移达到最大值  $240.87 \text{ mm}$  ( $H_1$  方向),当  $t=7.899 \text{ s}$  时,顶层的位移达到最大值  $243.46 \text{ mm}$  ( $H_2$  方向);人工波作用下,当  $t=17.63 \text{ s}$  时,顶层的位移达到最大值  $555.58 \text{ mm}$  ( $H_1$  方向),当  $t=17.97 \text{ s}$  时,顶层的位移达到最大值  $594.58 \text{ mm}$  ( $H_2$  方向)。

(2)对于双向罕遇地震,以  $H_2$  方向为例,Taft 波作用下,当  $t=5.093 \text{ s}$  时,顶层的位移达到最大值  $379.93 \text{ mm}$ ;Kobe 波作用下,当  $t=5.93 \text{ s}$  时,顶层的位移达到最大值  $289.46 \text{ mm}$ ;人工波作用下,当  $t=11.7 \text{ s}$  时,顶层的位移达到最大值  $830.4 \text{ mm}$ 。

(3)对于双向罕遇地震,在人工波作用下,顶层位移比单向地震时的响应扩大 39.7%,且最大位移

出现时刻提前了;在 Kobe 波作用下,顶层位移比单向地震时响应扩大 18.9%,且出现最大位移时刻也比单向时提前了;在 Taft 波作用下,最大顶点位移略有下降,但是从下述的顶点位移、层间位移角可以看出,双向作用较单向作用时增大较明显,故仅以顶点位移作为衡量标准并不准确。

(4)由于双向耦合作用,即使沿结构 2 个主轴  $H_1, H_2$  输入地震作用, $x, y$  方向的顶点位移均大于单向单独作用时的位移。可见,即使规则对称结构也存在双向耦合作用,应考虑多维地震作用的影响。

## 2.2 层间位移角

图 3 为 3 组地震波作用下结构的层间位移角曲线。为方便表示,记  $H_1$  方向的层间位移角为正值,  $H_2$  方向的层间位移角为负值。由图 3 可以看出:双向罕遇地震作用下的结构层间位移角略大于单向罕遇地震作用下的层间位移角,尤其是在人工波作用下结构  $H_2$  方向的层间位移角,故在进行结构设计时,仅考虑单向罕遇地震作用或未考虑地震波输入角度的影响是偏于不安全的;Kobe 波作用下,双向罕遇地震作用对结构上部层间位移角增大较为明显,而对结构下部层间位移角增大不明显,甚至比单向罕遇地震作用下的还小;结构相同楼层的层间位移角以人工波最大,沿高度方向层间位移角近似为弯剪形变化。

由图 3 还可以看出,虽然输入的 3 条地震波峰值相同,但是结构响应却有明显差别,说明地震频谱特性对结构时程分析有很大影响,故应谨慎、合理地选择地震波。

## 2.3 楼层相对扭转角

由于结构自身的空间性和地面运动的多维性,且地震动的扭转分量对结构的影响很大,扭转会加剧结构的变形而导致失稳或倒塌。为此,应重视在单向、双向罕遇地震作用下结构的扭转反应规律。对结构分别沿  $H_2$  方向单向输入和最不利方向输入地震波,结构每层相对  $H_1$  方向的扭转角如图 4 所示。由图 4 可以看出,不同地震波对结构的影响不同,在 Taft 波和人工波作用下,结构某几层单向作用时的相对扭转角小于双向作用时的相对扭转角,但是总的趋势是双向罕遇地震作用下的相对扭转角较单向作用时的大。在人工波作用下的最大增幅为基底的 73.8%,Taft 波作用下的最大增幅为第 2 层的 59.7%,Kobe 波作用下的最大增幅为顶层的 56.4%,不同地震波作用下相对扭转角的增幅呈现出不规律性,或是底部影响大,或是顶部影响大,但是不同地

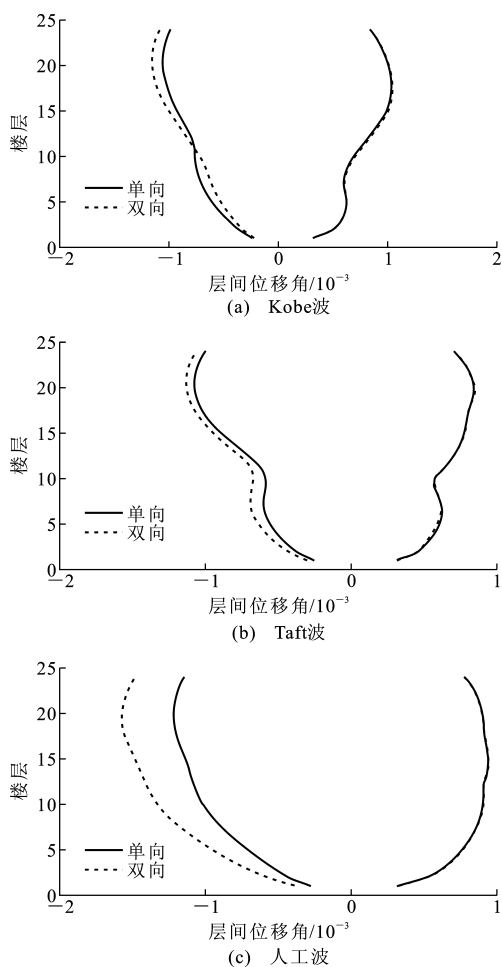


图 3 单向、双向罕遇地震作用下结构层间位移角曲线

Fig. 3 Drift Curves of Structure Under Axial and Biaxial Severe Earthquake Actions

震波作用下均是结构顶层的相对扭转角最大。

## 2.4 相对加速度

结构在双向罕遇地震作用下,楼层相对地面的加速度与输入加速度比如图 5 所示。由图 5 可知:在不同地震波作用下,楼层相对加速度相差较大;楼层响应相对加速度一般出现在结构底部  $1/5 \sim 3/5$  结构高度内或结构顶部,Taft 波作用下比值最大,楼层顶部的加速度与输入加速度的比值为 3.6。

## 3 地震波输入角度对结构响应的影响

实际地震发生时,地震动的方向是随机的,一般不沿结构主轴方向,故需要考虑地震波输入角度对结构抗震性能的影响。本文以地震波输入角度为研究对象,考察地震波输入角度对结构响应的影响。本文最不利地震波输入角度的确定方法为:首先以  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 90^\circ$  地震波输入角度分别进行弹塑性时程分析,找出相应指标的最不利输入角度,然后在

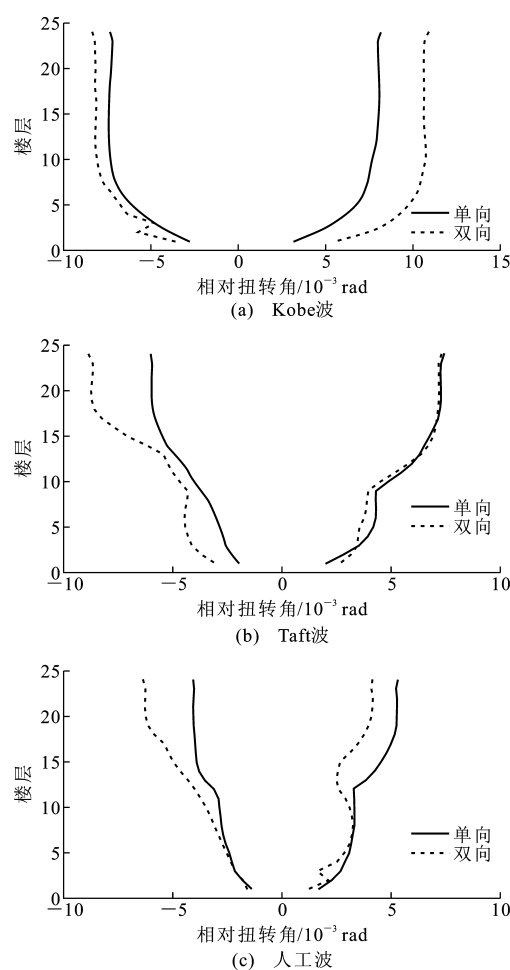


图 4 单向、双向罕遇地震作用下楼层相对扭转角

Fig. 4 Relative Torsion Angles of Floor Under Axial and Biaxial Severe Earthquake Actions

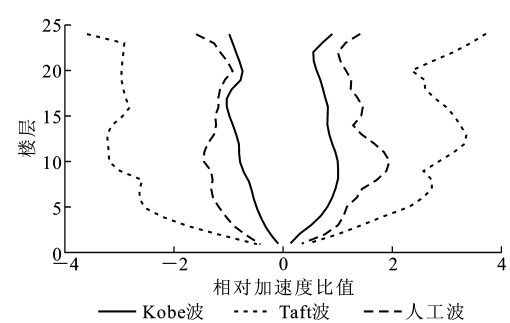


图 5 双向罕遇地震作用下楼层相对地面加速度与输入加速度比

Fig. 5 Ratio of Relative Acceleration and Input Acceleration Under Biaxial Severe Earthquake Actions

该角度上增加或减小  $5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$  分别进行弹塑性时程分析,认为此时相应指标达到最大值时对应的输入角度即为最不利输入角度,然后对最不利输入角度下的时程结果进行分析研究。

### 3.1 顶点位移

图 6 为 3 组地震波输入角度下结构顶点的最大

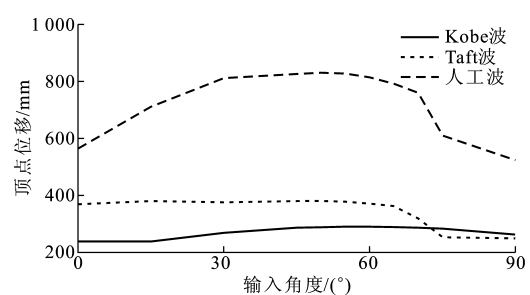


图 6 结构顶点位移随地震波输入角度变化曲线

Fig. 6 Variation Curves of Top Displacements of Structure with Earthquake Input Angles

位移响应。在 Kobe 波作用下,当地震波输入角度小于  $15^{\circ}$  时,输入角度对结构顶点位移响应的影响较小;当输入角度为  $15^{\circ} \sim 60^{\circ}$  时,随地震波输入角度的增大,结构顶点的位移响应迅速增大;当输入角度为  $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$  时,随地震波输入角度的增大,结构顶点的位移响应呈减小的趋势;不同输入角度双向罕遇地震波下,  $H_2$  方向的顶点位移由 237.31 mm 增加到 289.46 mm,增幅为 22%。在 Taft 波作用下,当地震波输入角度小于  $30^{\circ}$  时,输入角度对结构顶点位移响应的影响较小;当输入角度为  $30^{\circ} \sim 75^{\circ}$  时,随地震波输入角度的增大,结构顶点的位移响应迅速减小;当输入角度为  $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$  时,随地震波输入角度的增大,结构顶点的位移响应几乎不变;不同输入角度双向罕遇地震波下,  $H_2$  方向的顶点位移由 248.32 mm 增加到 379.93 mm,增幅为 53%。在人工波作用下,随地震波输入角度的增大,结构顶点位移响应整体呈先增大后减小的趋势;当输入角度小于  $40^{\circ}$  时,结构顶点位移响应随地震波输入角度的增大而增大,但是增大的速率越来越慢;当输入角度大于  $40^{\circ}$  时,结构顶点位移响应随地震波输入角度的增大而减小,且减小速率越来越慢;不同输入角度双向罕遇地震波下,  $H_2$  方向的顶点位移由 523.42 mm 增加到 830.4 mm,增幅为 58.6%。

### 3.2 顶点加速度

结构在不同输入角度、不同地震波的双向水平地震作用下的顶部沿  $y$  方向绝对加速度如图 7 所示。从图 7 可见,不同工况下绝对加速度效应变化较明显,出现最大峰值时所对应的输入角度也不同。Kobe 波作用下的加速度峰值由  $5.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  增加到  $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,增幅为 24.5%,且最不利输入角度为  $0^{\circ}$ ;Taft 波作用下的加速度峰值由  $5.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  增加到  $8.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,增幅为 64.8%,且最不利输入角度为  $45^{\circ}$ ;人工波作用下的加速度峰值由  $4.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  增加到  $9.64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,增幅超过 100%。可

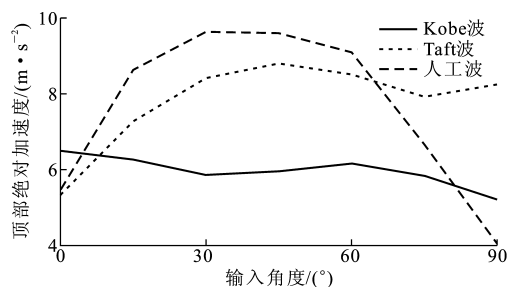


图7 不同输入角度双向罕遇地震作用时结构顶部沿 y 方向绝对加速度

Fig.7 Acceleration in y Direction for Top of Structure with Different Earthquake Input Angles Under Biaxial Severe Earthquake Actions

见,地震波输入角度对结构顶部绝对加速度影响显著。

### 3.3 基底剪力

结构在不同输入角度、不同地震波的双向水平地震作用下的基底剪力如图8所示。从图8可以看出,不同工况下剪力效应变化较明显,出现最大峰值时所对应的输入角度也不同。Kobe波作用下的剪力峰值由22.8 MN增加到33.7 MN,增幅为47.8%,且最不利输入角度为0°;Taft波作用下的剪力峰值由21.8 MN增加到34 MN,增幅为56%,且最不利输入角度为30°;人工波作用下的剪力峰值由22.2 MN增加到34.5 MN,增幅为55.4%,且最不利输入角度为45°。结果表明,地震波输入角度对结构基底剪力的影响非常显著,且不同地震波的结构最不利输入角度不同。

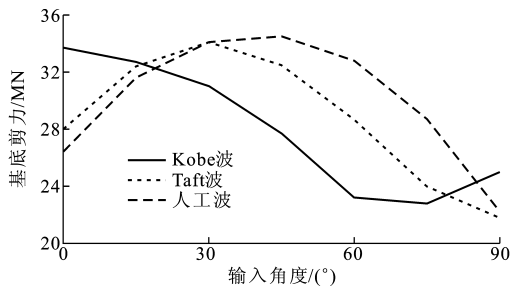


图8 不同输入角度双向罕遇地震作用时沿 y 方向结构基底剪力

Fig.8 Base Shear in y Direction for Structure with Different Earthquake Input Angles Under Biaxial Severe Earthquake Actions

## 4 结语

(1)单向、双向罕遇地震作用下结构的层间位移角曲线较为相似,但是双向罕遇地震作用下的明显较单向作用下的,此外,不同地震动特性下,最大

层间位移角出现的位置有所不同,在 Kobe 波、Taft 波作用下出现在结构中、上部位,相对单向时最大层间位移角出现高度稍有上移,但是在人工波作用下下移。

(2)地震动特性对楼层相对扭转角的影响较为显著,且不同地震波作用下楼层相对扭转角相差较大,或是底部影响大,或是顶部影响大,但是一般相对扭转角最大值均出现在结构的顶层。

(3)不同地震波作用下楼层相对加速度相差较大,楼层响应相对加速度最大值一般出现在结构底部 1/5~3/5 结构高度内或结构的顶部。

(4)地震波输入角度对结构响应的影响较大,且不同地震动特性的地震波输入角度对结构响应的影响程度不同,实际设计中应考虑地震波输入角度对结构响应的影响。

(5)本文在进行结构弹塑性分析时,没有考虑地震动的扭转分量影响,建议今后研究中添加此分量对结构的影响分析。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 江辉,朱晞,倪永军,等.基于多因素分析的桥梁结构地震滞回耗能比值谱研究[J].中国公路学报,2011,24(1):50-58.  
JIANG Hui,ZHU Xi,NI Yong-jun,et al. Research on Seismic Hysteretic Energy Dissipation Ratio Spectra for Bridge Structure Based on Multi-factor Analysis [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1): 50-58.
- [2] 周士金,刘荣桂,蔡东升,等. CFRP 索大跨斜拉桥的非线性地震响应控制分析[J].中国公路学报,2011,24(3):64-71.  
ZHOU Shi-jin,LIU Rong-gui,CAI Dong-sheng,et al. Nonlinear Seismic Response Control Analysis of Long-span Cable-stayed Bridge with CFRP Cables [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3): 64-71.
- [3] 魏标,崔睿博,戴公连,等.橡胶支座对非规则连续梁桥地震反应的影响[J].中国公路学报,2013,26(6):110-117.  
WEI Biao,CUI Rui-bo,DAI Gong-lian,et al. Impact of Laminated Rubber Bearings on Seismic Response of Irregular Continuous Bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 110-117.
- [4] 焦常科,李爱群.非弹性连接对三塔悬索桥地震响应的影响[J].中国公路学报,2013,26(1):98-105.  
JIAO Chang-ke,LI Ai-qun. Influence of Inelastic Con-

- nection on Seismic Response of Triple-tower Suspension Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 98-105.
- [5] 李英民, 谭潜, 汤芸, 等. 砌体结构地震倒塌过程仿真及抗倒塌影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(2): 71-78.
- LI Ying-min, TAN Qian, TANG Yun, et al. Simulation on Collapse Process and Analysis of Anti-collapse Influencing Factors for Masonry Structure Under Earthquake[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(2): 71-78.
- [6] 王社良, 樊禹江, 陈琪, 等. 基于新型摩擦滑移隔振装置的框架模型地震响应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(3): 92-98.
- WANG She-liang, FAN Yu-jiang, CHEN Qi, et al. Earthquake Response of Framework Model Based on a New Type of Frictional Sliding Isolation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(3): 92-98.
- [7] 杨红, 朱振华, 白绍良. 双向地震作用下我国强柱弱梁措施的有效性评估[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 58-64.
- YANG Hong, ZHU Zhen-hua, BAI Shao-liang. An Evaluation of the Effectiveness of the Chinese Strong Column Weak Beam Measure Under Bi-directional Horizontal Seismic Excitations[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 58-64.
- [8] 刘阳冰, 文国治, 刘晶波. 钢-混凝土组合框架-RC核心筒结构弹塑性地震反应分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(2): 51-57.
- LIU Yang-bing, WEN Guo-zhi, LIU Jing-bo. Elastoplastic Seismic Response Analysis for Steel-concrete Composite Frame-RC Core Tube Structures[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(2): 51-57.
- [9] 叶献国, 刘涛, 徐勤, 等. 振动台三维模拟地震试验研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 1998, 21(增1): 1-6.
- YE Xian-guo, LIU Tao, XU Qin, et al. Shaking Table Tridimensional Earthquake Simulation Test[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 1998, 21(S1): 1-6.
- [10] 杜洪彪, 沈聚敏. 空间钢筋混凝土框架结构模型的振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(1): 60-69.
- DU Hong-biao, SHEN Ju-min. Shaking Table Tests of R. C. Space Frames[J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(1): 60-69.
- [11] OLIVA M G, CLOUGH R W. Biaxial Seismic Response of R/C Frames[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(6): 1264-1281.
- [12] SINGH M P, GUAFORO-ASHTIANY M. Structural Response Under Multicomponent Earthquakes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(5): 761-775.
- [13] SHAKIB H, PIRIZADEH M. Probabilistic Seismic Performance Assessment of Setback Buildings Under Bidirectional Excitation[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 140(2): 1-37.
- [14] FAGGELLA M, BARBOSA A, CONTE J P, et al. Seismic Assessment of R/C Building Structure Through Nonlinear Probabilistic Analysis with High-performance Computing[C]//American Institute of Physics. 2008 Seismic Engineering Conference: Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake. College Park: American Institute of Physics, 2008: 930-937.
- [15] LIN J L, TSAI K C. Seismic Analysis of Non Proportionally Damped Two-way Asymmetric Elastic Buildings Under Bi-directional Seismic Ground Motions[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2008, 12(7): 1139-1156.
- [16] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
- GB 50009—2012, Load Code for the Design of Building Structures[S].
- [17] 周文峰, 黄宗明, 白绍良. 约束混凝土几种有代表性应力-应变模型及其比较[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(4): 121-127.
- ZHOU Wen-feng, HUANG Zong-ming, BAI Shao-liang. Introduction and Comparison of Several Representative Confinement Models for Concrete[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(4): 121-127.
- [18] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].