

DOI: 10.7511/jslx20221228002

基于多水准的高强钢框架-D形偏心支撑结构层剪力分布研究

李慎*, 丁世豪, 李晓蕾, 穆林

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 西安 710048)

摘要: 高强钢框架-D形偏心支撑结构中耗能梁段采用 Q355 钢, 非耗能构件(即框架梁和柱)采用高强度钢材, 形成一种新型结构体系。耗能梁段在结构遭遇罕遇地震时充分发挥塑性变形耗能, 保护高强钢框架处于弹性受力状态, 高强钢框架-D形偏心支撑结构由于在塑性状态下结构刚度发生改变, 其层剪力分布模式不再符合基于强度的设计理论, 因此, 本文研究了高强钢框架-D形偏心支撑结构在多水准地震动状态下的层剪力分布模式。本文设计了四种不同层数(4层, 8层, 12层和 16层)和三种不同耗能梁段长度(900 mm, 1000 mm 和 1100 mm)的高强钢框架-D形偏心支撑结构, 输入 40 条近场脉冲地震和 40 条远场地震记录, 得到结构在多遇地震、设防地震、罕遇地震以及极罕遇地震下的层剪力分布模式, 并对罕遇地震下的层剪力分布模式进行参数标定, 获取塑性状态下结构的弹塑性侧向力分布状态。

关键词: D形偏心支撑; 层剪力分布模式; 近场脉冲地震; 高强钢框架

中图分类号: TU391; O302

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)04-0734-08

1 引言

钢框架结构具有梁柱构件布置灵活的特点, 结构延性和耗能较好, 但是结构刚度较弱, 而中心支撑钢框架在纯抗弯钢框架的基础上, 由支撑提供很大的侧向刚度, 可用于更高的结构高度, 然而支撑作为拉压杆件, 受压变容易发生屈曲, 导致结构延性和耗能较弱^[1,2]。偏心支撑钢框架综合了纯抗弯钢框架和中心支撑钢框架的优点, 依靠耗能梁段剪切变形消散地震能量, 但是梁柱截面尺寸过大限制了工程应用^[3]。高强钢框架-偏心支撑结构体系是指耗能梁段和支撑采用普通钢材(Q355 或 Q235), 利用普通钢材变形能力好的特点, 发挥耗能构件的塑性变形优势, 同时, 框架柱和梁始终保持弹性受力, 采用高强度钢材能够有效减小构件截面, 经济效益显著^[4,5]。常用的偏心支撑结构形式有 K 形、Y 形、V 形和 D 形, 如图 1 所示^[6-7]。

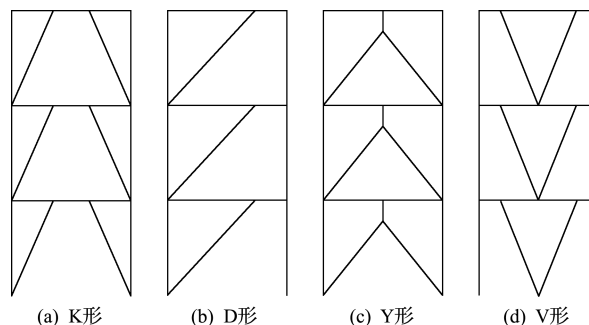


图 1 偏心支撑的结构形式
Fig. 1 Types of EBFs

连鸣等^[8]设计了 4 个不同层数且具有理想整体屈服模式的 Y 形高强钢组合偏心支撑框架, 通过非线性时程分析得到结构在罕遇水准近场、远场地震下层剪力分布并且提出了 Y 形高强钢组合偏心支撑框架结构弹塑性层剪力分布模式。李慎等^[9]设计了具有理想失效模式的 5 层、10 层、15 层和 20 层算例, 通过动力时程分析方法计算在罕遇地震水准下的结构响应, 为高强钢组合 K 形偏

收稿日期: 2022-12-28; 修改稿收到日期: 2023-04-18.

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2021JM330); 中国博士后基金(2019M653878XB); 陕西省教育厅专项(19JK0588)资助.

作者简介: 李慎* (1986-), 男, 博士, 讲师(E-mail: lishen2861@163.com).

引用本文: 李慎, 丁世豪, 李晓蕾, 等. 基于多水准的高强钢框架-D形偏心支撑结构层剪力分布研究[J]. 计算力学学报, 2024, 41(4): 734-741.

LI Shen, DING Shi-hao, LI Xiao-lei, et al. Story shear distribution of high-strength steel frame with D-eccentric brace based on multi-seismic-hazard levels[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(4): 734-741.

支撑能量设计方法和塑性抗震设计理论提供了相应的参考依据。在前期研究的基础上,采用基于性能的抗震设计方法,对4层、8层、12层和16层的不同支撑形式的偏心支撑高强钢框架结构进行了pushover分析和非线性动力分析,研究表明,D形偏心支撑钢框架的刚度和承载力最大^[10]。本文研究对象为高强钢框架-D形偏心支撑结构,该偏心支撑钢框架设计时考虑结构的耗能梁段采用普通钢,保证耗能梁段先于框架梁柱支撑破坏,但抗震设计时需要放大截面内力进行设计,导致框架截面尺寸过大,采用高强钢可以有效降低构件截面尺寸,其余非耗能结构则选用高强度钢,形成高强钢组合偏心支撑钢框架结构。该结构既符合结构抗震耗能需要,又降低结构总体用钢量,经济效益良好。由于框架采用高强钢,结构的刚度与传统偏心支撑发生明显变化,此外,耗能梁段进入塑性后,结构的层刚度与弹性状态迥然而异,因此,研究高强钢框架-D形偏心支撑结构塑性状态下的层剪力分布模式对研究结构的性能化设计方法奠定基础。本文设计了四种不同层数和三种不同耗能梁段的高强钢框架-D形偏心支撑结构,考虑近场脉冲地震和远场地震,分析结构在多遇、设防、罕遇以及极罕遇地震下的层剪力分布模式。本文将24个高强钢框架-D形偏心支撑结构,考虑P-Δ效应进行弹塑性时程分析,获取结构在不同地震水准下的层剪力分布,总结不同层数、不同耗能梁段长度、不同钢材组合以及近场和远场地震波对结构层剪力分布的影响。

2 高强钢组合D型偏心支撑钢框架原型结构设计

高强钢框架-D形偏心支撑的平面布置如图2所示,耗能梁段和支撑采用Q355钢材,其余非耗能构件采用Q460钢材,屈服强度均取名义值,弹性模量取 2.06×10^5 MPa,泊松比取0.3。

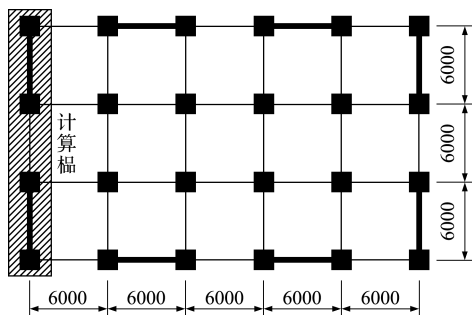


图2 D-8-0.9结构平面布置
Fig. 2 D-8-0.9 structural plan layout

原型结构按照《建筑抗震设计规范》中设计地震分组为第一组II类场地,设计基本地震加速度为0.30g进行设计。结构层高均为3m,柱距均为6m,横向3跨,纵向5跨,平面尺寸18m×30m。框架柱采用方钢管,其他构件采用焊接H型钢,翼缘为焰切边。120mm厚现浇混凝土楼板,C30混凝土。楼面恒载取5kN/m²,活载取2.0kN/m²,屋面恒载取5.5kN/m²,上人屋面活荷载取2.0kN/m²,基本风压0.35kN/m²。计算榀框架结构如图3所示。

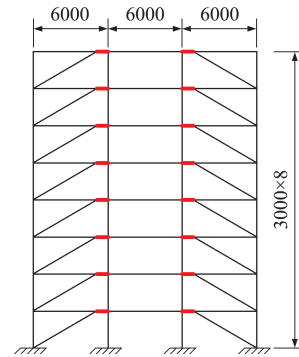


图3 计算榀框架结构
Fig. 3 Computing frame element diagram

高强钢框架-D形偏心支撑的原型结构可按D-层数-耗能梁段长度方式编号,如D-8-0.9,表示Q355与Q460高强钢框架-D形偏心支撑框架层数N为8层,耗能梁长度e为900mm的原型结构。原型结构设计方法采用文献[11]的偏心支撑基于性能的抗震设计方法进行设计。

为了使结构在遭遇大震时能发挥理想的耗能能力,设计中应精确计算耗能梁段在弹塑性状态下的承载力。现行各国规范中水平地震作用的计算都来源于对弹性结构的动力时程分析。这样使得设计中不能较为准确地预估结构在弹塑性状态下的真实性能。

3 弹塑性层剪力分布模式

(1) Lee^[12]通过对抗弯钢框架的非线性时程分析给出了一种新的侧向力分布形式

$$F_i = C_{vi} V \quad (1)$$

$$C_{vi} = (\beta_i - \beta_{i+1}) \left[\frac{W_n h_n}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \right]^{\alpha T - 0.2} \quad (2)$$

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_n} = \left[\frac{\sum_{j=i}^n W_j h_j}{W_n h_n} \right]^{\alpha T - 0.2} \quad (3)$$

式中 β_i 为层剪力分布系数, 当 $i=n, \beta_{n+1}=0$; V 为结构基底剪力, V_i 是第 i 层层剪力, C_{vi} 为楼层水平惯性力分布系数, h_i 为第 i 层计算高度, W_i 为第 i 层重力荷载代表值, T 为结构的基本周期, α 为影响系数, 与结构体系有关, 对抗弯钢框架取 0.5。

(2) Chao 等^[13] 在对 Lee 纯钢框架研究基础上, 对框架支撑体系进行大量的时程分析, 扩大了公式的适用范围。对偏心支撑结构的影响系数 α 取 0.75。

(3) 对于 K 型偏心支撑结构, 潘戈等^[14] 采用相同的分析方法, 在 Lee 与文献^[13] 公式基础上, 提出适用于该结构的层剪力分布公式

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_n} = \left[\lambda \sum_{j=i}^n W_j h_j / (W_n h_n) \right]^b \quad (4)$$

$$V_n = V \left[W_n h_n / \left(\lambda \sum_{j=1}^n W_j h_j \right) \right]^b \quad (5)$$

$$V_i = V \left[\sum_{j=i}^n W_j h_j / \left(\sum_{j=1}^n W_j h_j \right) \right]^b \quad (6)$$

式中 λ 和 b 为与地震影响有关的系数。其余参数同上。

(4) 孙国华等^[15] 以中国规范底部剪力法计算楼层水平地震作用为基础, 给出了钢框架-钢板剪力墙层剪力的简化公式

$$V_i = \sum_{j=i}^n W_j h_j / \left(\sum_{j=1}^n W_j h_j \right) F_{Ek} (1 - \delta_n) + \delta_n F_{Ek} \quad (7)$$

$$V_n = W_n h_n / \left(\sum_{j=1}^n W_j h_j \right) F_{Ek} (1 - \delta_n) + \delta_n F_{Ek} \quad (8)$$

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_n} = \frac{(1 - \delta_n) \sum_{j=i}^n W_j h_j + \delta_n \sum_{j=1}^n W_j h_j}{(1 - \delta_n) W_n h_n + \delta_n \sum_{j=1}^n W_j h_j} \quad (9)$$

$$\delta_n = aT + b \quad (10)$$

式中 F_{EK} 为结构总水平地震作用标准值, δ_n 为顶部附加作用系数。

连鸣等^[16] 对高强钢组合 Y 形偏心支撑钢框架考虑近场地震作用的弹塑性侧向力分布模式进行标定, 采取式(8~10), 近场脉冲地震下 $a=0.018$, $b=0.004$; 王伟等^[17] 对自复位中心支撑钢框架采用弹塑性时程分析方法, 标定了该结构在近场和远场地震激励下的 a 和 b 参数。李慎等^[9] 对高强钢组合 K 形偏心支撑结构在近场脉冲地震和远场地震作用下, 标定了该结构在罕遇地震作用下的弹塑性层剪力分布, 研究表明, 重新标定后的弹塑性层剪力分布模式更加接近时程分析结果。

本文参考式(9,10), 重新标定顶部附加作用系数值, 考虑地震动四水准下结构的层剪力分布模式变化, 考虑结构高度和耗能梁段长度的影响, 给出适用于高强钢组合 D 型偏心支撑结构体系的侧向力分布, 为该结构基于性能的设计方法提供参考。

4 地震波选取与调幅

地震波随机性很强, 不同地震波作用于同一结构时得到的层剪力结果相差明显。为了减小随机性的影响, 取多条地震波分析结果的平均值来评估结构影响更具参考价值。地震波的初选, 既要满足建筑设计的场地条件, 还应满足持续时间、峰值和频谱特性。通过这三要素选择多条合理的地震波记录。

地震波均来自太平洋地震工程研究中心(nga-west2.berkeley.edu), 从 PEER NGA2 数据库中分别选取 40 条近场和远场地震记录对算例进行时程分析。选用的多组时程曲线的平均地震影响系数曲线和振型分解反应谱法采用的地震影响系数曲线在结构各周期点上相差小于 20%。图 4 给出了两组地震波的地震影响系数平均谱与规范地震影响系数谱对比^[18]。结构的层剪力分布模式考虑多遇、设防、罕遇以及极罕遇地震等四个不同水准下的变化, 四水准对应的时程分析最大加速度值列入表 1。

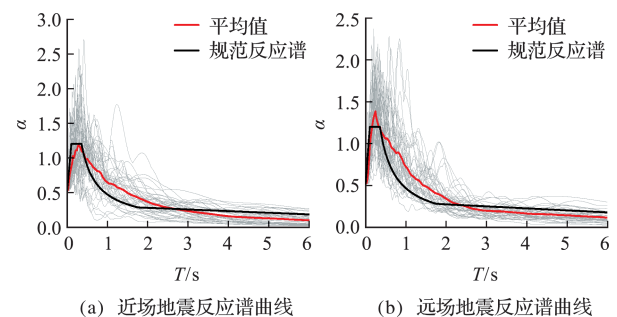


图 4 地震动平均反应谱与规范谱对比

Fig. 4 Mean spectrum is compared with the code spectrum

表 1 地震时程分析最大加速度值(单位: cm/s^2)
Tab. 1 Maximum acceleration value for time history analysis (unit: cm/s^2)

地震水准	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	18	35(55)	70(110)	140
设防地震	49	98(147)	196(294)	392
罕遇地震	125	220(310)	400(510)	620
极罕遇地震	147	294(441)	588(882)	1176

5 结构层剪力分布

5.1 不同地震水准的影响

层剪力分布系数 β_i 是指结构第 i 层的层剪力与结构顶层的层剪力的比值。通过定义这一系数,可以反映出结构在不同设计条件下层剪力分布形式的变化。分析均采用 900 mm 耗能梁段长度的计算模型。不同地震水准下结构层剪力分布如图 5 所示。

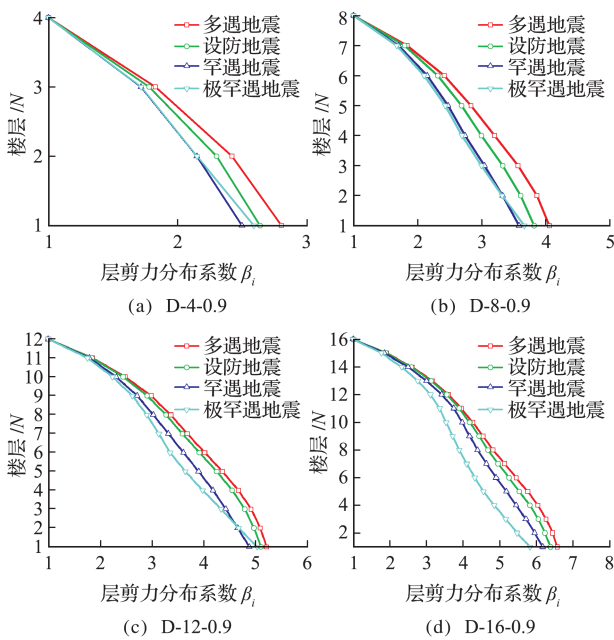


图 5 高强钢框架-D形偏心支撑结构在不同地震水准下的 β_i
Fig. 5 β_i of D-HSS-EBF under different seismic hazard levels

图 5 的各层结构层剪力分布系数 β_i 基本呈相同的规律变化,随着地震波加速度峰值的不断提高, β_i 值逐渐减小。主要原因是各个设计算例在小震下均处于弹性状态,随着峰值加速度的不断提高,结构都不同程度地进入塑性状态,其顶层层剪力 V_n 随着地震加速度幅值逐渐增大,以 V_n 作为分母的 β_i 随之减小。

每条 β_i 曲线值之间的差异大小反映出结构的塑性变化程度,差异越大,塑性变化程度也越大。从图 5(a~c)可以看出,结构在罕遇地震下已充分进入塑性状态,与极罕遇地震作用下的塑性发展程度相似。图 5(d)中,结构进入罕遇地震还有一定的塑性发展能力。

5.2 近场和远场地震的影响

近场地震具有明显的位移和速度脉冲,并且脉冲持时长,峰值较大。结构在近场地震下产生较大

的塑性变形,使得结构的基底剪力、层间位移与顶层位移大于远场地震作用下的记录值,提高了结构位移需求与耗能能力的需求。远场地震没有突出的速度脉冲效应,对结构的塑性变形影响是循环累积的过程。在研究结构弹塑性层剪力分布和抗震设计时,应区别分析近远场地震的作用。

图 6 给出了峰值加速度调幅至罕遇地震水准下,耗能梁段长度为 900 mm 的结构算例,在 40 条近场和远场地震波下的 β_i 平均值对比。可以看出,近场地震波下的 β_i 值大于远场地震波下的 β_i 值,结构底部的差异较上部更加明显。主要由于近场地震的速度脉冲效应加大了结构下部的地震响应。高强钢框架-D形偏心支撑结构设计中,应考虑近场地震波的影响。

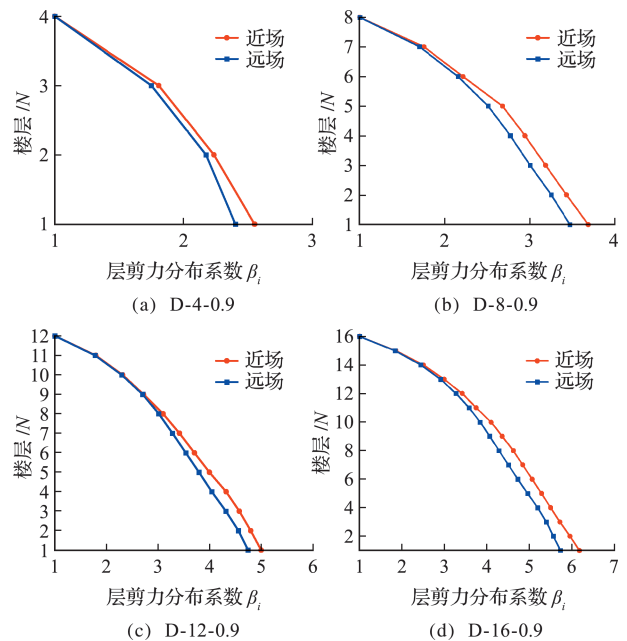


图 6 高强钢框架-D形偏心支撑在近场和远场地震下的 β_i 对比

Fig. 6 Comparison of β_i of D-HSS-EBF under near and far field earthquakes

5.3 耗能梁段长度的影响

三种不同耗能梁段长度(900 mm,1000 mm 和 1100 mm,耗能梁段其长度比 $\rho = e / (M_p / V_p)$ 在 1.3~1.5,为剪切屈服型耗能梁段,具有较好的耗能能力)的算例,其在罕遇地震作用下的 β_i 分布如图 7 所示。

可以看出, β_i 值随耗能梁段长度变化的分布规律并不明显且 β_i 值差异较小。其原因在于,D形偏心支撑结构的抗侧刚度由支撑与柱提供,耗能梁段长度对 D形偏心支撑结构刚度影响较小。在基

于性能的计算模型设计时,不同耗能梁段长度模型的非耗能构件截面尺寸不尽相同,使得层剪力分布系数的变化规律并不明显。

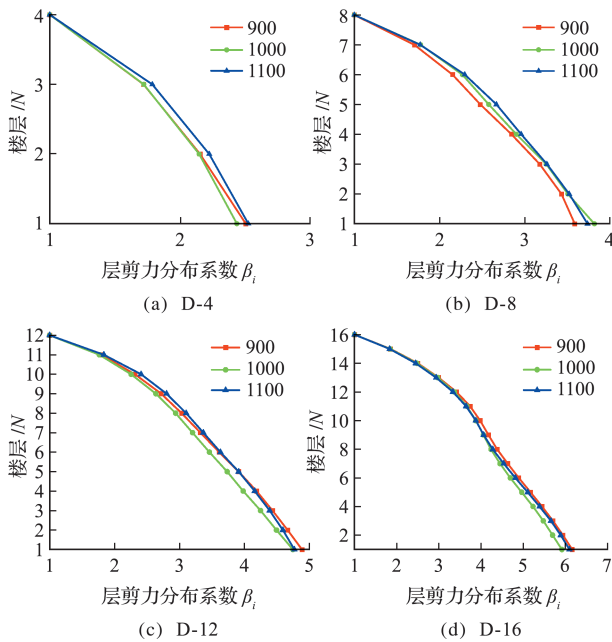


图7 不同耗能梁段长度的高强钢框架-D形偏心支撑层剪力分布对比

Fig. 7 Comparison of β_i of D-HSS-EBF composite with different link lengths

5.4 近场和远场地震下的层剪力分布模式

5.4.1 近场地震作用下的 β_i 分布

通过40条近场地震波对高强钢框架-D形偏心支撑结构模型进行时程分析,图8给出了耗能梁

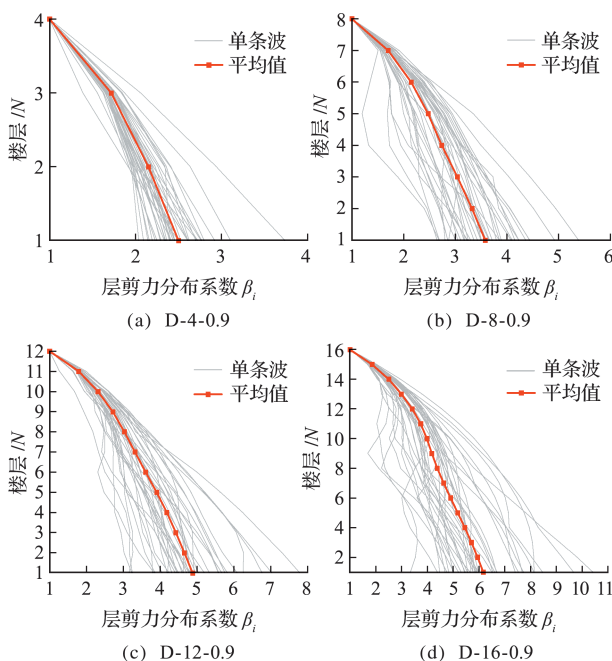


图8 近场地震作用下的高强钢框架-D形偏心支撑的 β_i 值

Fig. 8 β_i of D-HSS-EBF under near-field earthquake

段长度为900 mm的结构在罕遇地震下各条波最大层剪力分布系数 β_i 的包络值与多条波的平均值。

通过时程分析计算结果的统计回归,确定式(10)中顶部附加作用系数 a 和 b 参数的取值。得到近场罕遇地震作用下,高强钢框架-D形偏心支撑结构的顶部附加作用系数为

$$\delta_n = 0.019T + 0.016 \quad (11)$$

图9给出了结构在近场地震作用下,时程分析计算的平均值与中国规范弹性层剪力分布公式和Chao等^[13]提出的层剪力分布公式及本文拟合公式计算值的对比。

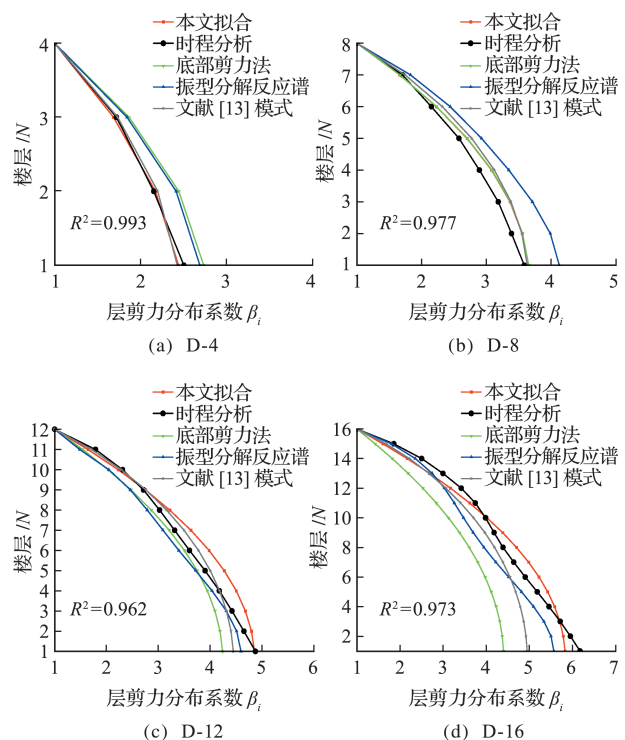


图9 时程分析结构与规范层剪力分布模式对比

Fig. 9 β_i is compared with the existed lateral force distribution

通过对比可以看出,在近场地震波作用下,规范中的层剪力分布系数 β_i 随着结构层数增加与时程分析结果偏差逐渐增大。采用这两种模式设计层数较高的高强钢框架-D形偏心支撑结构,可能导致结构不安全。主要原因是随着层数增加,高阶振型影响逐渐增大。文献[13]模式与结构上部时程分析结果偏差较小,但对于高层结构下部偏差较为明显。原因在于文献[13]时程分析采用地震波均为远场地震波,其拟合公式没有考虑近场地震波速度脉冲效应造成的底部剪力增大。本文拟合公式在近场罕遇地震下,各层结构拟合度 R^2 均大于0.91,更贴近高强钢框架-D形偏心支撑结构在近

场地震下真实的弹塑性层剪力分布模式。

5.4.2 远场地震作用下的 β_i 分布

通过 40 条远场地震波对高强钢框架-D 形偏心支撑结构模型进行时程分析,图 10 分别给出了耗能梁段长度为 900 mm 的不同钢号组合的结构在罕遇地震下各条波最大层剪力包络值与平均值。

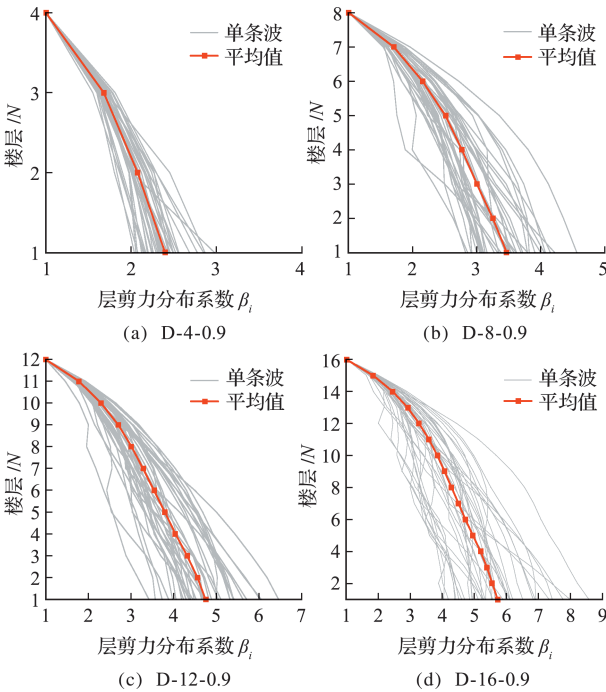


图 10 远场地震作用下的高强钢框架-D 形偏心支撑的 β_i 值
Fig. 10 β_i of D-HSS-EBF under far-field earthquake

通过时程分析计算结果的统计回归,得到远场罕遇地震作用下,高强钢框架-D 形偏心支撑结构的顶部附加作用系数为

$$\delta_n = 0.0135T + 0.07 \quad (12)$$

图 11 给出了结构在远场地震作用下,时程分析结果与中国规范弹性层剪力分布公式、Chao 等^[13]提出的层剪力分布公式及本文拟合公式计算值的对比。

可以看出,在远场地震波作用下,底部剪力法的 β_i 与时程分析平均值误差最大。而振型分解反应谱法的 β_i 对比 4 层和 8 层结构的时程分析结果误差较大,且对 12 层和 16 层结构中上部的层剪力与时程结果对比偏小,不利于安全设计。对 12 层和 16 层结构下部的层剪力,文献[13]模式拟合得到的偏差较大。本文拟合公式在远场罕遇地震下,各层结构拟合度 R^2 均大于 0.94,更接近高强钢框架-D 形偏心支撑结构在远场地震下真实的弹塑性层剪力分布模式。

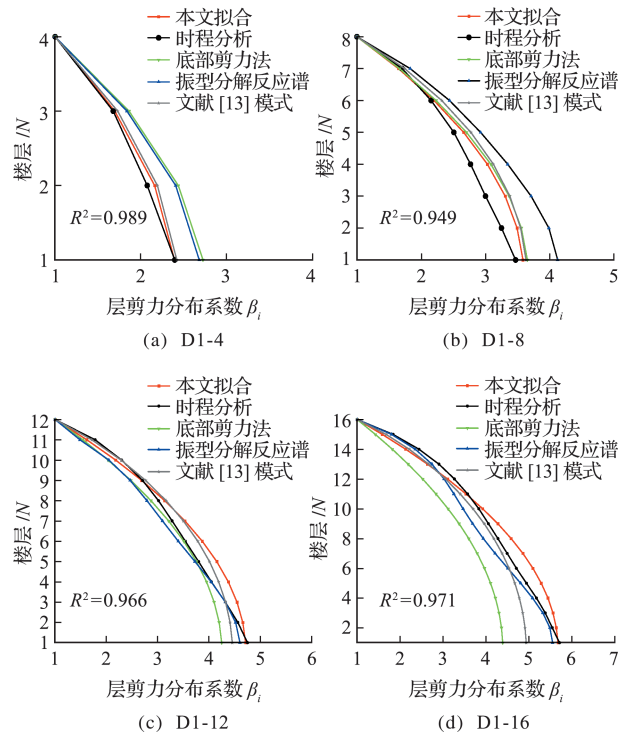


图 11 远场罕遇地震作用下高强钢框架-D 形偏心支撑结构层剪力分布对比

Fig. 11 Comparison of layer shear distribution of D-HSS-EBF under far-field rare earthquake

6 结 论

本文通过基于性能的抗震设计方法,设计了 24 个高强钢框架-D 形偏心支撑算例模型,通过多条地震记录进行时程分析,获取结构在多个地震水准下的层剪力分布。研究结论如下。

(1) 不同地震水准下的层剪力分布系数 β_i 具有一定差异并呈现出规律性变化。结构顶部的层剪力随着地震加速度幅值的逐渐增大而增加,层剪力分布系数 β_i 逐渐减小。

(2) 改变高强钢框架-D 形偏心支撑结构的耗能梁段长度 e , β_i 略有变化,但差异较小。

(3) 近场地震波对高强钢框架-D 形偏心支撑结构层剪力的影响,相对于远场地震波具有明显的差别,对结构层剪力模式的选择应区分两种地震波的影响。

(4) 中国规范中的弹性层剪力分布,与高强钢框架-D 形偏心支撑结构时程分析得到的层剪力结果差异较大,不适用于高层结构;文献[13]模式在 12 层和 16 层结构中,下部弹性时程分析的结果差异较大。

(5) 本文通过拟合顶部附加作用系数,给出高强钢框架-D 形偏心支撑结构在罕遇地震下的层剪

力分布与时程分析结果较为接近,能更加真实反映该结构进入弹塑性时实际的层剪力分布。

参考文献(References):

- [1] 彭观寿,高轩能,陈明华. 支撑布置对钢框架结构抗侧刚度的影响[J]. 工业建筑, 2008, **38**(5): 83-87, 70. (PENG Guan-shou, GAO Xuan-neng, CHEN Ming-hua. Effects of layout of bracing on lateral stiffness of steel frames [J]. *Industrial Construction*, 2008, **38**(5): 83-87, 70. (in Chinese))
- [2] 于海丰,方 斌. 钢框架-中心支撑双重体系抗弯框架设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2013(S2): 117-123. (YU Hai-feng, FANG Bin. Design method of moment frame for the dual system combining moment frame with braced frame [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013(S2): 117-123. (in Chinese))
- [3] 蔡益燕,钱稼茹,郁银泉. 偏心支撑框架设计新进展[J]. 建筑结构, 2011, **41**(4): 7-10. (CAI Yi-yan, QIAN Jia-ru, YU Yin-quan. Advance in eccentrically braced frame design [J]. *Building Structure*, 2011, **41**(4): 7-10. (in Chinese))
- [4] 李 慎,苏明周,连 鸣. 基于性能设计的高强钢组合K形偏心支撑钢框架抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2015, **45**(6): 71-79. (LI Shen, SU Ming-zhou, LIAN Ming. Seismic behavior study of K-typed eccentrically braced steel frames with high strength steel combination based on performance design method [J]. *Building Structure*, 2015, **45**(6): 71-79. (in Chinese))
- [5] 李 慎,田建勃,马 辉,等. 基于性能设计的高强钢组合Y形偏心支撑钢框架抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2018, **48**(3): 140-150. (LI Shen, TIAN Jian-bo, MA Hui, et al. Research on the seismic behavior of Y-type eccentrically braced frames combined with high strength steels based on PBS method [J]. *Industrial Construction*, 2018, **48**(3): 140-150. (in Chinese))
- [6] 潘秀珍,郝际平,高 杰. D型耗能器偏心支撑结构的抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, **29**(3): 146-152. (PAN Xiu-zhen, HAO Ji-ping, GAO Jie. Experimental study on earthquake-resistant behavior of D-type energy dissipating eccentrically braced steel frames [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2009, **29**(3): 146-152. (in Chinese))
- [7] 赵 坤,李腾飞,苏明周,等. 基于OpenSEES的高强钢组合K形偏心支撑框架精细化建模分析[J]. 地震工程与工程振动, 2020, **40**(5): 169-177. (ZHAO Kun, LI Teng-fei, SU Ming-zhou, et al. Accurate modeling of high strength steel composite K-eccentrically braced frames using OpenSEES [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, **40**(5): 169-177. (in Chinese))
- [8] 连 鸣,苏明周,李 慎. Y形高强钢组合偏心支撑框架结构弹塑性层剪力分布研究[J]. 建筑结构学报, 2016, **37**(11): 86-96. (LIAN Ming, SU Ming-zhou, LI Shen. Elasto-plastic story shear distribution of Y-type high strength steel composite eccentrically braced frame [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, **37**(11): 86-96. (in Chinese))
- [9] 李 慎,连 鸣,苏明周. 高强钢组合K形偏心支撑钢框架弹塑性状态的层剪力分布研究[J]. 工程力学, 2016, **33**(12): 167-175, 224. (LI Shen, LIAN Ming, SU Ming-zhou. Seismic shear of K-type eccentrically braced steel frames with high strength steel in elasto-plastic state [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, **33**(12): 167-175, 224. (in Chinese))
- [10] Li S, Wang Z H, Guo H C, et al. Seismic performance of high strength steel frames with variable eccentric braces based on PBS method [J]. *Earthquakes and Structures*, 2020, **18**: 527-542.
- [11] 李 慎,苏明周. 基于性能的偏心支撑钢框架抗震设计方法研究[J]. 工程力学, 2014, **31**(10): 195-204. (LI Shen, SU Ming-zhou. A performance-based seismic design method for eccentrically braced steel frames [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, **31**(10): 195-204. (in Chinese))
- [12] Lee S S. Performance-Based Design of Steel Moment Frames using Target Drift and Yield Mechanism [D]. University of Michigan, 2002.
- [13] Chao S H, Goel S C, Lee S S. A seismic design lateral force distribution based on inelastic state of structures [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, **23**(3): 547-569.
- [14] 潘 戈,顾 强. 强震下K型偏心支撑钢框架的层剪力分布[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2015, **28**(2): 21-25, 30. (PAN Ge, GU Qiang. The story shear distribution in K-braced EBFs under strong ground motions [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology Edition)*, 2015, **28**(2): 21-25, 30. (in Chinese))
- [15] 孙国华,顾 强,何若全,等. 钢框架-钢板剪力墙结构弹塑性状态的层剪力分布研究[J]. 工程力学, 2013, **30**(7): 113-121. (SUN Guo-hua, GU Qiang, HE Ruo-quan, et al. Distribution of horizontal seismic shear based on inelastic state of steel plate shear walls [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, **30**(7): 113-121. (in Chinese))
- [16] 连 鸣,苏明周,郭 艳. Y形高强钢组合偏心支撑框架结构在近场地震下的弹塑性侧向力分布研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, **37**(1): 165-173. (LIAN

Ming, SU Ming-zhou, GUO Yan, Lateral force distribution based on inelastic state of Y-type high strength steel composite eccentrically braced frame during near-fault earthquakes[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2017, **37**(1): 165-173. (in Chinese))

[17] 王 伟,孙国华,刘文渊,等.自复位中心支撑钢框架结构弹塑性状态的层剪力分布研究[J].地震工程与工程振动,2019,**39**(4):148-161.(WANG Wei,SUN

Guo-hua,LIU Wen-yuan et al, Seismic shear distribution of self-centering centrally braced steel frames in elasto-plastic state[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2019, **39**(4): 148-161. (in Chinese))

[18] GB 50011-2013.建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.(GB 50011-2013. Code for Seismic Design of Building [S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2014. (in Chinese))

Story shear distribution of high-strength steel frame with D-eccentric brace based on multi-seismic-hazard levels

LI Shen*, DING Shi-hao, LI Xiao-lei, MU Lin

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A high-strength steel frame with D-eccentric braces (D-HSS-EBF) includes Q355 steel for the energy-dissipating components, while the non-energy dissipating components, such as columns and beams, uses the high strength steel Q460, which is a new seismic resistant structure. The links are found to develop full plastic deformation when the structure suffer rare earthquakes. The story shear distribution is not suitable for the capacity-based design method, because the stiffness of D-HSS-EBF is changed under plastic state. Therefore, this paper presents the elastic-plastic story shear distribution of D-HSS-EBF under various seismic hazard levels. Based on this, the prototype structures of D-HSS-EBF are designed considering different stories (4-, 8-, 12-, and 16-stories) and different link length (900 mm, 1000 mm and 1100 mm), and the story shear distribution modes under various seismic hazard levels are raised under near-fault ground motions and far-fault ground motions. Furthermore, the parameters of the story shear distribution under rare earthquakes are determined by the elastic-plastic lateral force.

Key words: D-eccentric brace; story shear distribution; near-fault ground motions; high-strength steel frame