

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202003023

低延性支撑钢框架结构抗倒塌性能简化评估方法*

刘一赫, 董志骞, 李 钢

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为量化不同设计参数条件下低延性中心支撑钢框架结构的抗倒塌能力, 基于增量动力分析方法, 计算了单自由度中心支撑钢框架结构在不同地震强度作用下的反应, 分析了储备承载力、储备刚度、结构周期、强度折减系数等设计参数对低延性结构抗倒塌性能的影响。根据计算结果, 建立了不同参数条件下低延性中心支撑钢框架结构的倒塌富裕度计算公式, 提出了基于该公式的结构抗倒塌性能简化评估方法, 通过算例验证了该方法的适用性与准确性, 为此类结构抗倒塌设计提供参考。

关键词: 中心支撑钢框架结构; 倒塌富裕度; 易损性; 增量动力分析; 简化评估方法

中图分类号: TU391; TU317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0135-07

Simplified Collapse-Prevention Assessment Method for Steel Low-Ductility Concentrically Braced Frames

LIU Yihe, DONG Zhiqian, LI Gang

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to quantify the collapse resistance of the low-ductility concentrically-braced frame (CBF) structure under different design parameters, this paper calculates the structural vulnerability under different earthquake loads based on the incremental dynamic analysis (IDA) method and analyzes the influence of design parameters such as reserve capacity, reserve stiffness, structural period, and response modification factor. According to the calculation results, the fitted formulas of the collapse margin ratio of the low-ductility CBF under different parameters are proposed, and a simplified method for evaluating the collapse-prevention capacity of the CBF structure based on the proposed formula is established. This method can quickly quantify the collapse performance of the low-ductility CBF. The applicability of this method is verified by a numerical example. Results show that the proposed method is accurate and applicable. It can be used for the collapse-prevention capacity evaluation and design of the CBF structure.

Keywords: steel concentrically braced frame; collapse margin ratio; vulnerability; incremental dynamic analysis; simplified assessment method

* 收稿日期:2020-03-13;修回日期:2020-07-05

基金项目:国家自然科学基金(51908105)、辽宁省博士科研启动基金计划项目(2019-BS-052)、辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902043)资助

作者简介:刘一赫(1994—),男,硕士研究生。主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: yihe_liu@qq.com

通讯作者:董志骞(1989—),男,副教授,博士后。主要从事钢结构抗震方面的研究。E-mail: zqdong@dlut.edu.cn

引言

中心支撑钢框架结构 (Concentrically Braced Frame, 简称 CBF) 是由支撑和抗弯框架组成的双重抗侧力体系, 具有优异的初始抗侧刚度。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1]对中心支撑框架结构抗震构造措施有明确规定:“支撑杆件的长细比, 按压杆设计时, 不应大于 $120\sqrt{235/f_{ay}}$, 一、二、三级支撑不得采用拉杆设计, 四级采用压杆设计时, 其长细比不应大于 180。”此外, 也给出了板件的宽厚比限值, 这些构造措施的要求保证了钢框架支撑结构具有足够的延性, 能够防止结构在地震作用下发生脆性破坏。从结构类型方面, 我国规范并没有对中心支撑钢框架结构进行进一步的类别区分, 且规范中关于钢结构构造措施的差异性要求与结构设防烈度没有直接的关系。与我国规范相比, 美国《钢结构抗震设计规范》(AISC 341-10)^[2]中根据结构的强度折减系数 (R) 取值与延性能力将 CBF 结构划分为 3 类: 低延性 CBF ($R=3$)、普通 CBF (Ordinary CBF, 简称 OCBF, $R=3.25$) 和特殊 CBF (Special CBF, 简称 SCBF, $R=6$), 不同类型的 CBF 将采用不同的设计地震作用, 且在构造措施要求方面具有显著差异。目前, 我国钢产量已稳居世界第一, 产能过剩, 而钢结构建筑的比例却显著低于美国、日本等发达国家, 钢结构分类不完善、造价相对较高是影响钢结构发展和广泛应用的重要原因之一。如何根据设防烈度提出合理的钢结构设计方法, 将对我国钢结构的发展具有重要意义。

美国、欧洲规范均允许在中、低抗震设防烈度地区使用低延性钢结构, 此类结构的构件长细比、宽厚比较大, 造价较低, 但同时支撑体系的延性能力较差。国外学者对低延性中心支撑钢框架结构的抗倒塌性能开展了一系列研究: T.A.Nelson 等^[3-4]对 9 层低延性中心支撑钢框架结构开展了数值模拟研究, 发现低延性支撑框架结构在强震作用下出现了显著的残余变形, 存在潜在的倒塌风险; J.T.Callister 等^[5]对低延性中心支撑钢框架结构有限元模型进行了推覆分析, 结果表明在支撑体系失效后, 结

构剩余部分作为储备体系能够有效阻止倒塌; J.Ascsechen 等^[6]研究了低延性中心支撑钢框架结构在临近倒塌时的非线性行为, 结果表明重力框架抗侧力性能对结构抗倒塌性能至关重要; J.Iyama^[7]提出了支撑框架结构的简化单自由度计算模型, 分析了该类结构在支撑失效后的动力特性; G.Li 等^[8]提出了低延性中心支撑钢框架结构的承载力储备系数和刚度储备系数, 分别分析了承载力和刚度对结构延性变形能力的影响, 结果表明经过良好设计的低延性类结构具备可观的抗震性能。由此可见, 对于一些处于我国低烈度地区的结构形式简单的钢结构建筑, 如单层工业厂房等, 若采用低延性钢结构将降低成本, 能够同时满足结构抗倒塌性能和经济性。基于此, 国内学者对于低延性钢结构的抗震性能也开展了一系列研究, 董志骞等^[9-15]采用储备体系设计参数, 考虑我国场地类别和地震分组, 开展了基于延性需求的中心支撑钢框架结构抗倒塌能力参数研究, 基于 IDA (Incremental Dynamic Analysis) 方法定性分析了低延性钢结构的抗倒塌能力, 给出了适用于我国的设计参数与临界设计周期以及多自由度中心支撑框架抗震性能分析方法。然而, 历史上多次地震中存在钢结构民用建筑、单层工业厂房以及钢结构加油站等因为设计不合理发生倒塌破坏而造成巨大的经济损失及人员伤亡的情况^[15-19]。此外, 既有研究中对于中心支撑钢框架结构抗倒塌能力分析, 需通过对结构进行有限元建模并开展非线性时程分析、根据易损性曲线判断结构是否具有足够的抗倒塌性能。这一过程较为繁琐, 缺乏能够量化结构抗倒塌能力的简化评估方法。如何快速评估低延性钢结构的抗倒塌能力, 值得进一步深入研究。

本文选取 44 条远场地震动, 基于 IDA 方法, 计算低延性 CBF 结构的易损性曲线, 进而量化中心支撑框架结构的抗倒塌能力, 并给出简化估算结构倒塌富裕度取值的抗倒塌能力评估方法, 通过低延性单层钢框架支撑厂房算例验证了本文方法的适用性和有效性, 为低延性中心支撑钢框架结构抗倒塌性能评估提供参考。

1 计算模型

低延性中心支撑钢框架结构中,支撑体系提供主要的抗侧能力,是结构的第一道抗震防线,框架体系作为结构的储备体系,是第二道抗震防线。结构的单自由度体系恢复力模型如图1所示,图中横坐标为结构侧向位移 U ,纵坐标为结构承载力 F 。结构在A点发生支撑体系失效,假定低延性支撑体系为节点破坏^[8],整体退出工作,此时结构承载力突然降低,恢复力曲线由A点骤降至B点,并由框架部分继续承担地震作用,在达到C点时框架屈服。根据结构储备体系特点,定义结构的承载力储备系数^[9]为 $\alpha=F_t/F_y$,刚度储备系数为 $\beta=k_t/k$,其中, F_t 、 F_y 分别代表结构支撑体系失效时刻承载力和框架屈服承载力; k_t 、 k 分别代表框架刚度和结构初始刚度。对于典型的低延性中心支撑钢框架体系,结构抗侧刚度主要由支撑提供,框架抗侧刚度不大于支撑的抗侧刚度,即 $\beta \leq 0.5$ 。此外,支撑体系应在框架屈服前发生失效,即 $u_t > u_y$,可推得 $\beta \leq \alpha$ 。储备系数量化了结构储备体系的承载力和刚度,为结构设计与分析提供了有效的归一化参数。

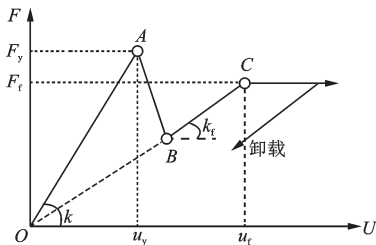


图1 单自由度CBF结构恢复力模型
Fig.1 Restoring force model of SDOF CBF

本文采用延性运动方程^[20]对结构地震反应进行计算分析:

$$\ddot{\mu} + 2\zeta\omega\dot{\mu} + \omega^2\tilde{F} = -\omega^2R\frac{\ddot{u}_g}{S_a} \quad (1)$$

式中, $\mu=u/u_y$,是归一化的结构位移延性; ω 为结构的自振频率; ζ 为阻尼比; $\tilde{F}=F/F_y$,代表归一化的恢复力, F 、 F_y 分别为结构恢复力与屈服承载力; S_a 为谱加速度; R 代表强度折减系数,当 $R=1$ 时,认为体系为弹性体系,当 R 大于1,如 $R=2$ 时,认为体系的

屈服承载力是体系保持弹性时所需最小承载力的一半。从延性运动方程中可以看出,强度折减系数 R 、结构能力储备参数 α 和 β 、结构周期 T 均对CBF结构的延性反应具有影响,本文将主要考虑这4个参数,对结构开展抗倒塌性能分析与评估。本文参数分析的取值范围分别为 $0.1 \leq \alpha \leq 1.5$ 、 $0.1 \leq \beta \leq 0.5$ 、 $1 < R \leq 4$ 、 $0.1 \text{ s} \leq T \leq 3 \text{ s}$,包含了典型低延性CBF结构的参数区间,如 $\alpha > 1.0$ 代表支撑体系较弱、储备体系较强的结构。

2 抗倒塌性能分析

结构抗倒塌性能分析包括定性判断与定量评估两种主要形式。FEMA P695规范^[21]中给出一种采用倒塌富裕度(Collapse Margin Ratio, CMR)对结构抗倒塌性能定量评估的方法,本文采用该方法对结构抗倒塌性能进行分析。结构倒塌富裕度定义为结构50%倒塌概率的地震动强度(S_a)与结构罕遇地震强度条件下的设计谱加速度的比值,其表达式如下:

$$\text{CMR} = \frac{S_{\text{CT}}}{S_{\text{MT}}} \quad (2)$$

式中, $S_{\text{MT}}=\alpha(T) \times g$,地震影响系数 α 与场地特征、结构自振周期相关,参照《建筑抗震设计规范》^[1]中地震影响系数曲线谱取值; S_{CT} 由IDA计算得到。

本文采用FEMA P695中推荐的44条远场地震动分别对每一组设计参数(α 、 β 、 R 、 T)条件下的单自由度低延性中心钢支撑框架结构体系进行IDA计算,并根据分析结果得到倒塌概率为50%的地震谱加速度 S_a (即 S_{CT}),假定其倒塌地震强度的概率分布满足对数正态分布,即可得到结构易损性曲线,如图2(a)所示,其纵坐标为结构的倒塌概率,横坐标为谱加速度 S_a ;对于每一个结构周期均可得到 S_{CT} 谱,如图2(b)所示,图中纵坐标为对易损性曲线插值得到的50%倒塌概率对应的地震强度 S_a ,横坐标为结构周期 T , S_{CT} 谱中每一个点均为对应周期结构的易损性曲线中50%倒塌概率对应的横坐标。进一步通过式(2)求得结构的倒塌富裕度CMR,作为结构抗倒塌能力的量化指标,CMR越大说明抵抗倒塌能力越强。参考FEMA P695规范,考虑CBF结

构地震反应分析的整体不确定性,认为结构不超过10%倒塌概率的安全阈值为 $CMR=2.79^{[21]}$,若 CMR 计算值低于2.79则认为结构不满足抗倒塌性能

的要求。进一步通过 CMR 和规范限值的比较,可以得到满足结构抗倒塌性能的结构适用周期范围,如图2(c)所示。

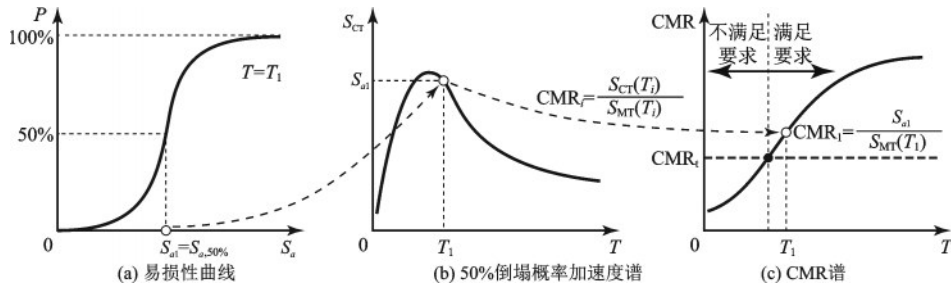


图2 CMR谱计算流程图

Fig.2 Calculation procedures of CMR spectrum

2.1 结构周期、特征周期对结构抗倒塌性能的影响

图3给出了3种不同工况CBF结构在 $\alpha=0.6$ 、 $\beta=0.3$ 参数条件下的 CMR 谱。由图中谱线可以看出, CMR 的值随周期的增大而增大。场地类别改变对于 CMR 的影响结果显著,较低的烈度区(7度0.55s)相比于较高烈度区(8度0.35s、0.55s),随着地震烈度的增大和场地特征周期的变化, CMR 计算公式分母部分 S_{CT} 中地震影响系数显著增大,使得 $CMR_7 > CMR_8$ 。此外,由于场地特征周期的差异,相同烈度下,与硬土地相比,软土地条件下结构的抗倒塌富裕度更高。

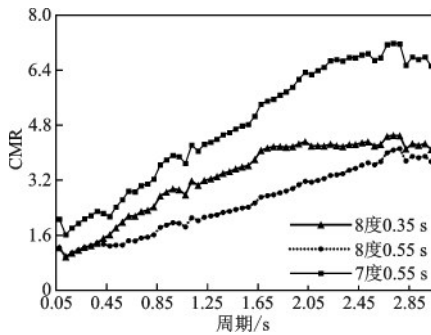


图3 不同场地工况下 CMR 数值对比

Fig.3 Comparison of CMR values under different site conditions

2.2 α 和 β 对结构抗倒塌性能的影响

α 和 β 为分别代表中心支撑钢框架结构的承载力储备系数与刚度储备系数,由式(2)可知,当 R 、 T 不变时, S_{MT} 将不随结构储备参数(α 和 β)的改变而

改变,此时只有 S_{CT} 会产生变化。图4~图6给出了 $\beta=0.2$ 、 $\alpha=0.6$ 、1.0和1.2;以及 $\alpha=0.8$ 、 $\beta=0.2$ 、0.4和0.5时结构的 CMR 谱。随着参数 α 和 β 值的改变, CMR 谱值略有变化,但差异不大。当 α/β 为定值时, CMR 谱线基本重合,可见 α/β 可作为反映结构能力储备对动力反应影响的一个参数。

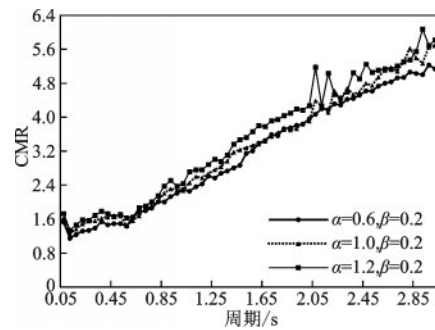


图4 α 变化对 CMR 谱的影响

Fig.4 Change in CMR value and α under the same site condition

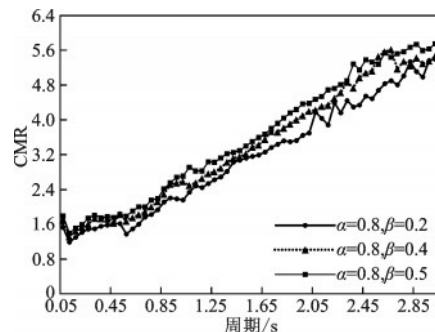


图5 β 变化对 CMR 谱的影响

Fig.5 Change in CMR value and β under the same site condition

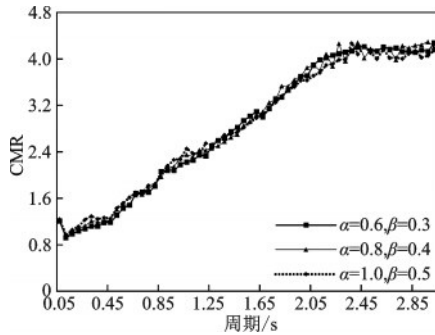


图6 α/β 变化对CMR谱的影响
Fig.6 Influence of α/β changes on the CMR value

2.3 R对结构抗倒塌性能的影响

从R的物理意义可知,R代表结构设计承载力的折减程度,即随着R值增大,弹性承载力折减越大,结构进入非线性的程度越高。图7给出了当 $\alpha=0.6, \beta=0.3, R=2\sim 4$ 时3种工况下结构的CMR谱。数据表明,随着强度折减系数的增大,结构的倒塌富裕度略有降低,但总体上R的变化对CMR谱的影响不大。

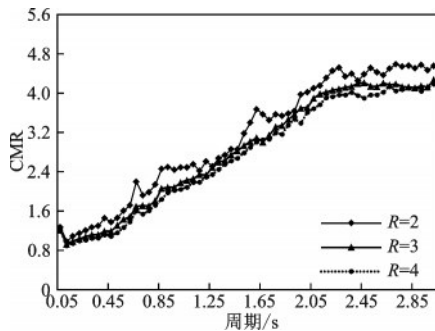


图7 强度折减系数R对CMR谱的影响
Fig.7 Influence of reduction coefficient R on CMR

2.4 简化计算公式

为便于设计应用,基于上述参数分析结果,对CMR谱值进行计算公式拟合。CMR计算式分母部分 S_{MT} 可根据规范查表得到, S_{CT} 的表达式如下:

当 $T < 0.55T_g + 0.2$ 时,

$$S_{CT} = \frac{11 \left(0.04 \frac{\alpha}{\beta} + 0.53 \right) (0.89T + 1.2)}{R + 6} \quad (3)$$

当 $T \geq 0.55T_g + 0.2$ 时,

$$S_{CT} = \frac{12 \left(0.06 \frac{\alpha}{\beta} + 0.7 \right) T}{R + 6(T - 0.15)} \quad (4)$$

将式(3)、式(4)代入式(2),即可求得CMR取

值及CMR谱。

3 简化评估方法

结构抗倒塌性能简化评估方法流程如图8所示,具体包括如下步骤:

(1)结构基本参数确定。根据结构的力学特征,或通过推覆分析,计算结构的储备参数 α (承载力储备系数)和 β (刚度储备系数),并获取结构的自振周期T、强度折减系数R。

(2)代入CMR简化计算公式进行求解,将步骤1中的根据结构特征获取的 α, β, T 和R分别依据周期T的范围条件代入式(3)、(4)中计算CMR分子,分母代入 $S_{MT} = \alpha(T) \times g$ 计算,求解CMR。

(3)将计算出的CMR与限值 CMR_L 进行对比分析,判定结构的抗倒塌性能。对于本文结构取CMR限值为2.79。CMR越大,认为结构的抗倒塌性能越好。

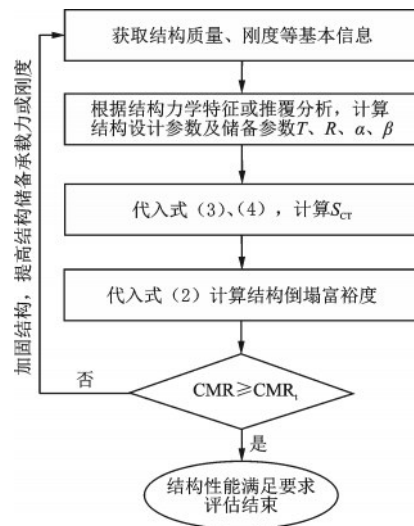


图8 评估流程图
Fig.8 Assessment flow chart

4 算例分析

4.1 算例计算

通过算例对本文方法进行验证,某单层3楹2跨工业厂房,跨度12 m,柱距10 m,总长30 m,厂房内有1台50 t A7级工作制吊车。柱采用单阶柱,吊车肢顶面标高7 m,柱高10 m,上端铰接,下端固接(插入式柱脚),上下柱采用实腹工字形截面,截面形

式采用H型钢500×500×18×25,屋盖肢及吊车肢均为H型钢700×300×12×24,H型钢截面翼缘为火焰切边,支撑正截面支撑采用角钢2L 140×14,长度12.8 m。屋面材料采用双层0.8 mm厚YX114-333-666型彩色压型钢板,中间填100 mm厚普通超细玻璃棉(表观密度20 kg/m³),坡度1/20。钢材采用Q235-B, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ 。建筑结构的安全等级为二级,设计使用年限为50 a。抗震设防烈度7度,设计基本加速度值0.2g, II类场地,设计地震分组为第一组,场地特征周期0.35 s,结构平面、立面及侧立面如图9~11所示。

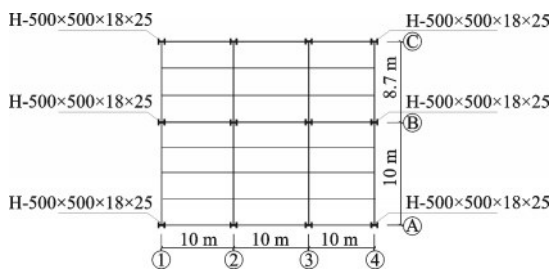


图9 单层工业厂房平面布置

Fig.9 Flat layout of the single-floor industrial plant

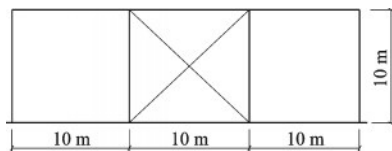


图10 单层工业厂房立面布置

Fig.10 Façade layout of the single-floor industrial plant

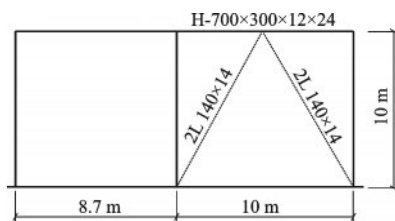


图11 单层工业厂房侧立面布置

Fig.11 Side layout of the single-storey industrial plant

对结构横向进行抗倒塌性能评估,采用简化的单层工业厂房侧立面布置图为基本单元计算,上端铰接。具体流程如下:

(1)获取结构基本参数数据:取强度折减系数 $R=2.86$;结构上下部分为H型钢钢架,惯性矩 $I=154\ 814.6 \text{ cm}^4$,斜支撑为角钢,结构总刚度 $8.043 \times 10^7 \text{ N/m}$,支撑失效后框架刚度为 $1.21 \times 10^7 \text{ N/m}$,

结构总质量为 $m=69\ 736 \text{ kg}$,计算得结构基本周期 $T=0.185 \text{ s}$,承载力储备系数、刚度储备系数分别为 $\alpha=0.736, \beta=0.151$ 。

(2)将所得到的基本参数代入公式中计算,根据规范场地条件可知,罕遇地震条件下该周期的地震影响系数 α 为0.5,即 $S_{MT}=0.5g$;由于 $T=0.185 < 0.35 \times 0.55 + 0.2 = 0.3925$,50%倒塌概率地震动强度代入式(3)计算得 $S_{CT}=1.22g$,由式(2)可得 $CMR=1.22g/0.5g=2.44$ 。

(3)将所计算值与安全阈值 $CMR_t=2.79$ 进行对比,可知计算值2.44小于2.79,即该结构的抗倒塌性能不满足要求,具有较高的倒塌风险,在罕遇地震强度下倒塌概率将高于10%。

4.2 算例验证

采用ABAQUS软件对算例进行地震作用下非线性时程分析计算验证。取中间一榀框架(即图9中的轴线②)进行IDA计算,得到IDA曲线、易损性曲线分别如图12、13所示。可得 $S_{CT}=1.21$,由规范知 $S_{MT}=0.5g$,即 $CMR = 1.21g/0.5g = 2.42 < 2.79$,表明结构不满足抗倒塌需求。采用简化评估方法得到的CMR取值(2.44)与算例结果(2.42)接近,验证了本文方法的有效性。

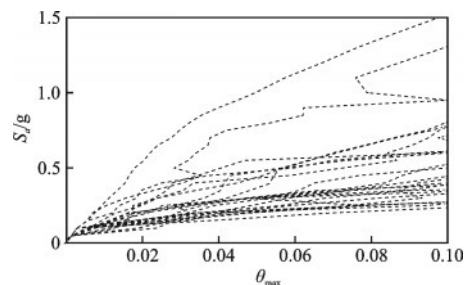


图12 IDA曲线

Fig.12 IDA curves

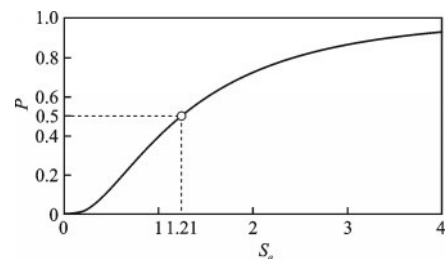


图13 易损性曲线

Fig.13 Vulnerability curve

5 结 论

结合低延性中心支撑框架结构(CBF)的特性,提出了基于IDA的结构抗倒塌性能简化评估方法,分析了中心支撑框架主要抗震设计参数对倒塌富裕度(CMR)的影响,给出了CBF结构在不同设计参数条件下的中值倒塌谱加速度拟合公式及CMR谱简化计算方法,并通过算例对该方法进行了验证,结论如下:

(1)不同参数对低延性钢框架结构抗倒塌性能的影响有所不同:场地条件和结构基本周期对结构的抗倒塌性能具有显著影响,随着周期的增大,结构倒塌富裕度逐渐增大;能力储备系数(α 、 β)对结构抗倒塌性能有一定影响,当 α/β 参数取值相同时对结构的抗倒塌性能影响不大;强度折减系数则对结构的抗倒塌能力影响不大。

(2)提出的低延性中心支撑钢框架结构抗倒塌性能简化评估方法能够快速实现结构抗倒塌性能的量化评估,算例结果表明,该方法具有较好的准确性和适用性。

参考文献:

- [1] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [2] Seismic provisions for structural steel buildings: AISC 341-10 [S]. Chicago: Illinois American Institute of Steel Construction,2010.
- [3] Nelson T A, Gryniuk M C, Hines E M. Comparison of low-ductility moment resisting frames and chevron braced frames under moderate seismic demands [C] // Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, California, USA: [s.n.], 2006.
- [4] Nelson T A. Performance of a 9-story low-ductility moment resisting frame under moderate seismic demands [D]. Medford, MA: Tufts University,2007.
- [5] Callister J T, Pekelnicky R G. Seismic evaluation of an existing low ductility braced frame building in California [C] // Proceedings of the 2011 Structures Congress. Las

Vegas, Nevada: American Society of Civil Engineers, 2011.

- [6] Shen J, Rou W, Akbas B, et al. Near-collapse behavior of steel buildings with non-ductile concentrically braced frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 113: 101-114.
- [7] Iyama J. Estimation of increasing response of steel frame after fracture of structural member under strong earthquake ground motions [C] // 6th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas, STESSA. Philadelphia, Pennsylvania: [s. n.], 2009.
- [8] Li G, Fahnestock L A. Seismic response of single-degree-of-freedom systems representing low-ductility steel concentrically-braced frames with reserve capacity [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139 (2): 199-211.
- [9] 董志骞,李钢,李宏男.基于延性需求的钢框架-中心支撑体系参数研究[J].地震工程与工程振动,2014,34(3):84-94.
- Dong Z Q, Li G, Li H N. Parametric study on steel concentrically braced frames based on seismic ductility demand spectra [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(3): 84-94. (in Chinese)
- [10] 董志骞,李钢,李宏男.多层中心支撑钢框架结构抗震性能简化评估方法[J].建筑结构学报,2018,39(5):1-9.
- Dong Z Q, Li G, Li H N. Simplified evaluation method for seismic performance of multi-layered concentrically-braced-frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 1-9. (in Chinese)
- [11] 董志骞,李钢,刘一赫,等.低延性中心支撑钢框架结构振动台试验 [J].建筑结构学报,2020,41(6):21-29.
- Dong Z Q, Li G, Liu Y H, et al. Shaking table test on low-ductility concentrically braced steel frames [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41 (6): 21-29. (in Chinese)
- [12] 李钢,张天昊,董志骞.长耗能梁-偏心支撑机制对中心支撑钢框架结构抗震性能的影响[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):10-17.

(本文责编:赵霞)

(下转第170页)