文章编号: 1005－0523(2009)02－0038－04

并联基础隔震体系多目标优化研究

杨柏英[1], 姜余飞[2], 王建华[3]

(1.青岛高园建设咨询管理有限公司,山东 青岛 266061; 2.烟台市清泉建筑建材有限公司,山东 烟台 264003; 3.南京航空航天大学 土木工程系,江苏 南京 210016)

摘要:隔震性能评价是并联基础隔震研究的重要内容,在多目标优化的理论框架下,进行了并联基础隔震体系地震反应优化研究。隔震反应目标包括上部结构最大层间剪力和隔震层最大位移,隔震层决策变量为屈服系数、名义周期和阻尼比。优化的约束条件为上部结构层间剪力不均匀系数在 0.85～1.00之间。针对一特定结构,通过 NSGA-Ⅱ算法分别进行有约束和无约束条件下的多目标优化研究。研究给出了并联基础隔震多目标优化 Pareto最优前沿的一般特征及相关量之间的关系。

关 键 词:并联基础隔震;多目标优化;NSGA-Ⅱ算法

中图分类号: TU352.1 **文献标识码**: A

橡胶垫基础隔震和滑移基础隔震经合理的参数选择和设计,可以收到更好的经济技术效果。已有不少文献对并联隔震体系展开研究[1～6]。然而,目前评价隔震性能一般是针对单一地震反应指标分别进行的,或仅在讨论某指标时定性的兼顾另一指标。本文将在多目标优化的理论框架下,展开并联基础隔震体系地震反应优化研究。

1 并联基础隔震体系的力学模型和地震反应指标

并联隔震体系隔震层以上部分一般为层数不多、刚度较大的结构,在较大地震作用下处于弹性反应状态,可简化为串联多自由度剪切模型。隔震层可简化为如图 1所示的双线性滞回模型,回复刚度为 k_γ,屈服剪力为 ηG,其中 G为隔震层 (含隔震层)以上结构自重, η为隔震层屈服剪力系数。并联隔震结构名义周期 $T_b=2\pi\sqrt{\frac{G}{gk_\gamma}}$变化范围较大,一般大于 2 s[5～7]。对于滑移隔震结构或回复刚度由柔性钢棒提供而无橡胶垫隔震支座参与的并联隔震结构,图 1中隔震层屈服剪力系数 η为滑移支座的摩擦系数 μ。隔震层阻尼系数 ζ取值一般在 0.05～0.25之间[5～7]。

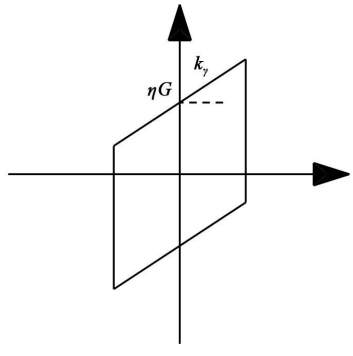


图 1 并联基础隔震体系隔震层滞回模型

上部结构最大层间剪力和隔震层最大位移 d_m是并联基础隔震工程设计最关心的两个反应指标。一般而言,它们是互相矛盾的反应指标。隔震设计应在这两个反应指标间取得平衡。本文最大层间剪力采

收稿日期: 2008－10－10

作者简介:杨柏英 (1965－),男,湖南湘潭人,高级工程师,研究方向为基础隔震。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用最大层间剪力系数 α_f来描述,α_f定义为结构最大层间剪力与结构自重之比。层间剪力不均匀系数 γ,即结构第一层剪力与中间层最大剪力之比,反映了并联隔震与滑移隔震或橡胶垫隔震的类似性,也是一个重要的反应指标。研究表明[8],较大的隔震层回复刚度将增大 γ,明显降低隔震效果;γ过小则对减小隔震层残留位移不利。本文 γ取值 0.85～1.00之间,作为隔震参数优化的约束条件。

2　多目标优化

在实际问题中,多个目标应同时满足以获得问题的最优解。然而,这些优化目标一般都是相互矛盾的,即一个目标的优化会导致另一目标的劣化,不可能同时达到单一目标时的最优值。多目标优化方法便是解决该类问题的常用手段。多目标优化一般定义为

寻求满足 m个不等约束和 p个等式约束的某一决策向量 x^*

$$g_i(x)\geqslant 0 \quad i=1,2,\cdots,m \tag{1}$$

$$h_i(x)\geqslant 0 \quad i=1,2,\cdots,p \tag{2}$$

使得下述多目标向量函数最优

$$F(x)=[f_1(x)\ f_2(x)\cdots f_n(x)]^T$$

多目标向量最优解 x^* (Pareto最优)以最小最优为例定义为

$$x^*\in F;\text{对任一 } x\in F\text{ 且 } i=\{1,2,\cdots,n\}$$

$$\forall\in I,\ f_i(x)=f_i(x^*) \tag{3}$$

或至少存在一个 $\in I$使得

$$f_i(x)>f_i(x^*) \tag{4}$$

其中:F为决策向量的可行域。

上述定义表明,如果不存在一可行向量 x,使得在不导致其它任一向量目标元素提高的前提下,便可减小某一向量目标元素,则 x^*是 Pareto最优解。

3　并联基础隔震体系多目标优化的一般特征

针对某 6层并联基础隔震结构[5],在调幅峰值为 3.1 $m\cdot s^{-2}$,相当于 7度罕遇地震水平 Taft波输入下,以 $x=[\eta\ T_b\ \zeta]^T$为决策向量,以 $F(x)=[d_m\quad \alpha_f]^T$为目标向量,分别考虑在无约束及以约束条件为 $0.85\leqslant\gamma\leqslant 1.0$两种情况下的多目标优化问题。并联基础隔震地震反应仿真在 Matlab的 Simulink仿真工具箱中完成。隔震结构参数如表 1。决策向量选取范围如表 2。

表 1　上部结构参数

结构层	质量 /10^3 kg	刚度 /10^6 N·m^{-1}
6	669.0	650.0
5	669.0	650.0
4	669.0	650.0
3	669.0	650.0
2	669.0	650.0
1	669.0	650.0
隔震层	569.0	

表 2　决策量的取值范围

变量	下限	上限
η	0.01	0.2
T_b /s	1	20
ζ	0.05	0.25

该问题优化采用 NSGA-Ⅱ遗传算法在 Matlab中实现。种群规模为 200,进化 200代结束。图 2为第 0代、无约束和有约束条件下的第 200代进化结果。由图可知,第 0代隔震参数的随机选择导致大量劣解的产生,即非优的隔震设计难以通过增大隔震层位移反应获得理想的减震效果;本文约束条件下多目标优化的最优前沿是无约束条件下的子集,在两者可行域内优化结果是一致的,这也表明该约束条件下能保证多

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

目标优化的全局一致最优，这同时验证了文献[8]的研究成果：随着回复刚度的增加及回复刚度参与系数的增大，结构底部几层层间剪力增加，而其它层层间剪力和结构最大层间剪力基本保持不变，中部以下结构层间剪力分布趋于均匀，继续增加回复刚度，当回复刚度超过一定限值，如大于 1时，同时增加的底层层间剪力将带动上部结构层层间剪力的增加，结构层间剪力分布呈三角形分布，此时结构地震反应类似于抗震体系。可见对并联基础隔震多目标优化问题，层间剪力不均匀系数 γ在 0.85～1.0之间是合适的。图 3为最优前沿中，隔震层最大位移 d_m与决策量 η的关系图。由图可知，当 $\eta<0.03$时，隔震层最大位移反应有较快发展，将隔震层最大位移控制在 50 mm内，则 η必须大于 0.03。图 4为最优前沿中，隔震层最大位移 d_m与决策量 T_b的关系图，最大位移与名义周期基本成线性关系。图 5为最优前沿中，最大剪力系数 α_f与决策量 η的关系图，由图可知，η与 α_f基本成线性关系。图 6为最优前沿中，隔震层最大位移 d_m与决策量 ζ的关系图，考虑到实际工程隔震层等效阻尼比取值在 0.05～0.25之间[7]，而图 6给出的最优阻尼比为 0.18～0.25，因此从多目标优化角度考虑，隔震层阻尼比尽可能取大值为宜。

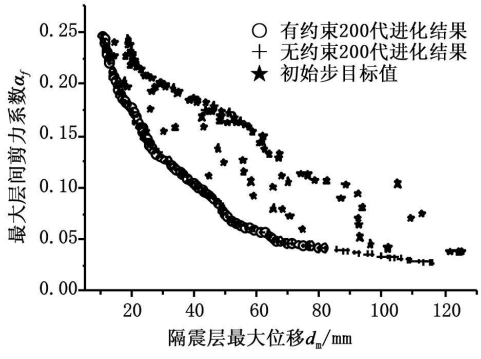


图 2 并联隔震多目标优化 Pareto前沿

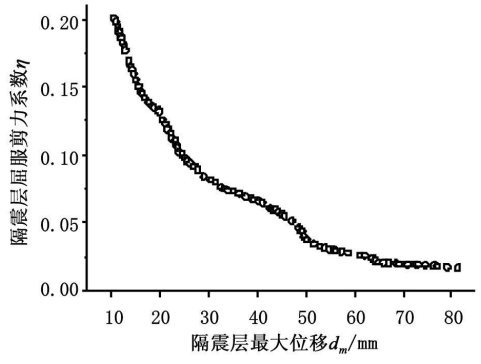


图 3 隔震层最大位移与屈服剪力系数关系图

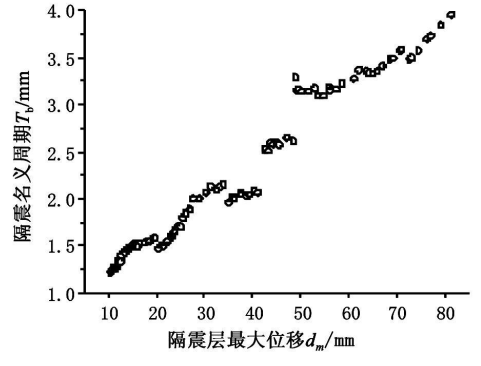


图 4 隔震层最大位移与隔震名义周期关系图

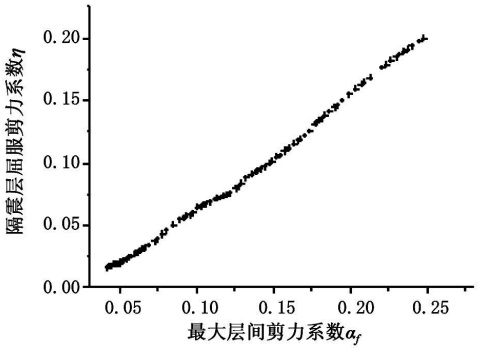


图 5 最大剪力系数与屈服剪力系数关系图

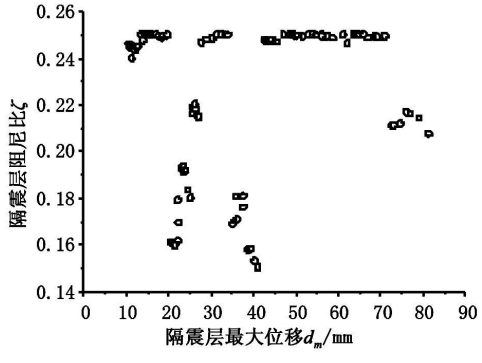


图 6 隔震层最大位移与隔震层阻尼比关系图

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 结论

并联基础隔震结构地震反应指标评价实质是多目标优化问题,本文首先建立隔震结构仿真分析模型,采用 NSGA-Ⅱ算法,对该问题展开研究。研究表明

(1)隔震参数的随机选择将导致大量劣解的产生,即非优的隔震设计难以通过增大隔震层位移反应获得理想的减震效果;

(2)层间剪力不均匀系数 γ在 0.85～1.0之间是合适的,在该约束条件下隔震层位移与减震效果能够获得全局一致最优解;

(3)在最优前沿,隔震目标与隔震参数之间存在简单的对应关系。上部剪力系数和隔震层最大位移两者,与隔震层屈服系数分别成正比与反比关系;多目标最优点一般要求隔震层阻尼比尽量取大值。

参考文献:

[1]周锡元,韩　淼,李大望. 并联和串联基础隔震体系地震反应的某些特征[J]. 工程抗震, 1995, (4): 1－5.

[2] Constantinou M C, Reinhorn A M, Mokha A S. Study of sliding bearing and helical-steel-spring isolation system[J]. J Struct Engrg ASCE, 1991, 117(4): 1 257－1 275.

[3] Mostaghel N, Khodaverdian M. Dynamics of resilient-friction base isolation(R-FBI)[J]. Earthquake Engrg Struct Dyn, 1987, 15(3): 379－390.

[4] Mostaghel N, Khodaverdian M. Seismic response of structures supported on R-FBI systems[J]. Earthquake Engrg Struct Dyn, 1988, 16(6): 839－854.

[5]李爱群. 工程结构减振控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2007. 83－84.

[6]唐家祥, 刘再华. 建筑结构基础隔震[M]. 武昌:华中理工大学出版社, 1992. 152－154.

[7] Skinner R I. 谢礼立译. 工程隔震概论[M]. 北京:地震出版社, 1996. 49.

[8]毛利军,李爱群,艾　军. 基础隔震体系地震反应特征与方案优选[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(4): 504－508.

Multi-objective Optimization of Seismic Responses in R-FBI System

YANG Bai-ying[1], JIANG Yu-fei[2], WANG Jian-hua[3]

(1. Qingdao Gaoyuan Building Advisory Management Co., Ltd., Qingdao 266061, China; 2. Yantai Qingquan Building Material Co., Ltd. Yantai 264003, China; 3. School of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Performance estimation is an important aspect in resilient-friction base isolation research. Multi-objective optimization of seismic responses in R-FBI system is performed in this paper. The seismic responses include the maximum story shear force of structures and the maximum drift of isolation layer. The decision variables are yielding coefficient, nominal cycle and damping coefficient. Constraint in the optimization is that asymmetry coefficient of the story shear in structures lies in 0.85～1.00. Constraint and unconstraint multi-objective optimization for a special R-FBI structure are performed using NSGA-Ⅱ Algorithm. Characteristics of Pareto front of the optimization are given, and relations between seismic responses and isolation layer parameters are analyzed.

Key words: resilient-friction base isolation; multi-objective optimization; NSGA-Ⅱ Algorithm

(责任编辑:刘棉玲)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net