

滑移元件在不规则滑移隔震结构中的优化布置研究

熊仲明, 王志磊, 王超

(西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要:采用遗传算法对平面布置不规则的多层框架结构进行滑移元件的优化布置研究, 提出一种新型的优化布置方法: 首先采用固定单元分割的方法将布置不规则的建筑平面进行单元划分; 然后采用遗传算法对单个单元进行滑移元件的优化布置, 提出滑移元件在单个单元内的最佳布置方案; 最后综合考虑各方面的影响因素, 提出滑移元件在整个建筑中的最佳布置方案。通过对比研究三种情况下的结构顶层加速度、基底滑移量等参数的影响, 验证了所提出的滑移元件优化布置方法的可行性, 为基础滑移隔震结构推广与应用奠定了基础。

关键词:基础滑移隔震; 滑移元件; 结构优化; 遗传算法; 固定单元分割法

中图分类号: TU 352.12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)03-0317-07

隔震装置作为基础滑移隔震结构中的关键装置, 通常是由滑移支撑元件和限位消能元件两部分组成, 滑移支撑元件一方面要承受上部结构的全部重力荷载, 另一方面必须具有较低的摩擦系数, 以满足在水平力作用下一定滑移量的要求; 而限位消能元件则是用来消耗地震能量并限定滑移隔震结构位移量的。

我国早在 20 世纪 60 年代, 李立^[1]就提出了隔震设想, 并于 20 世纪 70 年代后期和 80 年代初期建成了 4 座以砂砾为隔震层单层房屋和一座 4 层砖混结构楼房。20 世纪 80 年代以来, 冶金部建筑研究总院、西安建筑科技大学和西安城建开发总公司等单位对滑移摩擦隔震体系结构进行了较全面和系统的研究^[2]。近年来先后在全国八个大城市建成了基础滑移隔震房屋。但从目前国内外学者对基础滑移隔震结构进行推广应用情况来看, 隔震装置的造价是决定滑移隔震结构能否推广的一个重要因素, 合理布置滑移元件的位置^[3]对整个建筑物的隔震特性以及隔震建筑造价势必会产生重要的作用。

遗传算法^[4]作为一种基于自然选择和群体遗传机理的算法, 其模拟了自然选择和遗传过程中的繁殖、交叉和突变现象^[5]。它提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架, 不依赖于问题具体的领域, 对问题的种类有很强的鲁棒性, 所以其应用研究比理论研究更加丰富, 应用已经渗透到了许多学科。

遗传算法起源于达尔文的生物进化论和孟德尔的遗传学说, 认为生物进化的动力和机制在于自然选择, 自然选择通过变异, 经过生存斗争来实现进化, 具有适应环境的有利个体, 在生存斗争中有机会生存和繁衍后代, 而适应性较小的个体将被淘汰。这种自然界“物竞天择, 适者生存”的过程带给了科学家无限的遐想。早在 20 世纪 50 年代, 一些生物学家就开始进行计算机模拟。20 世纪 60 年代, Holland 教授开始认识到了生物的自然遗传现象和人工自适应系统行为的相似性, 他认为不仅要研究自适应系统本身, 也要研究与其相关的环境, 所以提出了在研究和设计人工自适应系统时可以借鉴自然遗传的基本原理, 模仿生物遗传的基本方法, 他于 1968 年提出了模式理论。他的学生 Bagley 在其博士论文中首次提出了“遗传算法”一词^[6], 而且他发展了复制、交叉、变异、显性、倒位等遗传算子, 在个体编码上使用双倍体的编码方法。Holland 教授用遗传算法的思想对自然和人工自适应系统进行了研究, 提出了遗传算法的基本定理, 并与 1975 年出版了第一本系统论述遗传算法和人工自适应系统的专著。20 世纪 80 年

收稿日期: 2012-10-12 修改稿日期: 2013-05-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51278395); 陕西省教育厅专项基金(12JK0895); 西安市科技公关课题(GG0451); 江苏省重点结构实验室资助课题(ZD0803)

作者简介: 熊仲明(1966-), 男, 湖北麻城人, 教授, 博导, 主要从事隔震减震控制、共同作用、大跨结构理论及试验研究等。

代, Holland 教授第一个实现了基于遗传算法的机器学习系统, 从此开创了遗传算法的机器学习新概念. 1975 年, De Jong 基于遗传算法的思想在计算机上进行了大量的纯数值函数优化计算的实验, 建立了遗传算法的工作框架, 得到了一些重要而且具有指导意义的结论. 1989 年, David E. Goldberg 系统地总结了遗传算法的主要研究成果, 并全面完整地论述了遗传算法的基本原理及应用^[7]. 近十年来, 遗传算法被广泛应用于各个行业, 涉及的领域包括复杂的非线性最优化问题、复杂的组合优化问题或整数规划问题、飞机外形设计、桁架结构设计等等. 相信随着科技的不断进步, 遗传算法将发挥越来越大的作用.

对此, 本文采用遗传算法来解决滑移元件在平面布置不规则的滑移隔震结构中的优化布置问题, 通过应用 Matlab 遗传算法工具箱^[8]来实现遗传算法, 然后根据实际工程经验以及其它限制条件来最终确定滑移元件的布置位置, 提出了滑移元件在复杂基础滑移隔震结构中的最优布置方案.

1 不规则的滑移隔震结构优化布置

1.1 工程概况

为了研究滑移隔震结构的优化布置, 本文采用某 4 层不规则的钢筋混凝土框架结构, 其层高均为 6 m, 结构平面布置如图 1(a) 所示. 建筑物场地属 II 类场地中的第二组, 抗震设防烈度为 8 度, 场地特征周期为 0.4 s; 结构阻尼比取为 0.05; 构件混凝土强度取为 C30. 梁截面尺寸为 250 mm × 550 mm, 隔震层上部梁截面为 250 mm × 550 mm, 而在最优化布置的隔震结构中, 隔震层上部梁截面为 350 mm × 700 mm, 柱截面尺寸为 500 mm × 500 mm. 构件配筋按 SAP2000 中默认的最小配筋要求配置. 楼板面层荷载 3 kN/m², 梁上线荷载 9 kN/m², 不考虑风荷载作用.

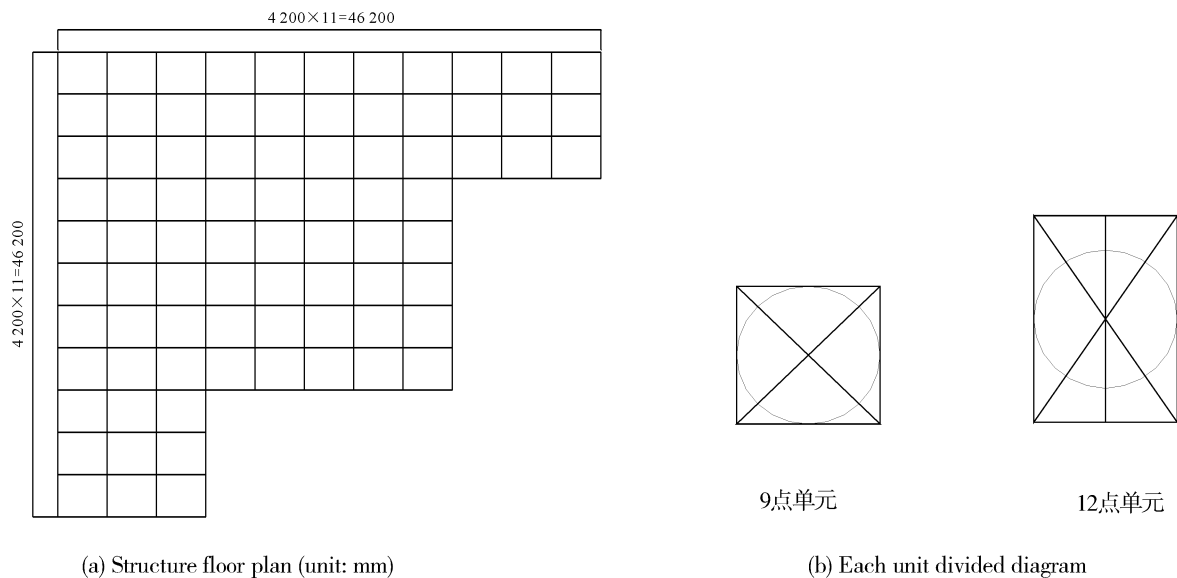


图1 结构平面布置及单元分割图

Fig. 1 The structural layout and the unit-dividing diagram

1.2 滑移隔震结构优化布置准则与方法

本文采用 9 点单元和 12 点单元对整个平面进行单元分割, 然后综合分析, 得到最后的滑移元件布置方案. 所采用的 9 点单元以及 12 点单元进行分割后的示意图如图 1(b) 所示.

1.2.1 采用的优化布置准则

对滑移元件进行优化操作时, 本文采用以下的优化布置准则:

- (1) 尽量减少滑移元件的使用数量, 从而减少整个隔震层的造价.
- (2) 在确定滑移元件数量的前提下, 通过合理布置其位置, 使其尽量发挥最大的耗能作用.
- (3) 隔震层的刚心和上部结构质心的距离尽量最近.

1.2.2 固定单元分割法

为了避免复杂繁琐的编程,同时也为了保证优化后的结构偏于安全,根据优化布置准则,利用遗传算法对滑移元件进行优化布置研究,本文提出一种新的方法结合遗传算法来进行优化,即固定单元分割法。

固定单元分割法有三个操作步骤,分别是选取单元、分割平面和整体分析。其原理是:首先选取一个或数个固定单元,然后利用这些单元将选定的平面进行分割,并进行整体分析。在进行整体分析时需要拟定一些原则对整个布置方案进行完善,最后就可以得到整个结构最优布置方案。经过单元分割后,原本复杂的优化布置问题转换成了简单的单元内优化布置问题,本文采用遗传算法对滑移元件进行固定单元内的优化布置,通过 Matlab 遗传算法工具箱来实现其操作。其优化结果见图2所示。

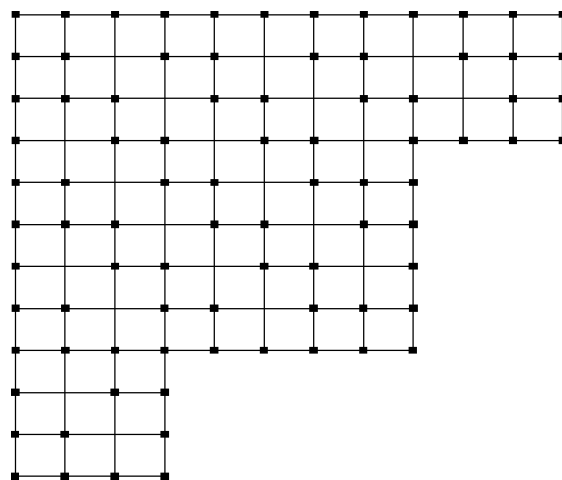


图2 滑移元件的最优布置方案示意图

Fig.2 The optimal scheme diagram of sliding components

2 整体滑移隔震结构有限元分析

2.1 滑移元件的选取和布置

为了验证本文提出的不规则滑移隔震结构布置的正确性,本文选取的隔震滑移支座为 PTFE 支座,限位消能元件选用软钢 U 型带片^[9-13](图3),在进行实际工程布置时滑移缝设置在基础顶部,支座布置在底层框架柱下,限位消能元件分别沿着结构的纵向和横向布置。X 轴方向沿着基础梁下端每边布置 2 个软钢 U 型带片,Y 轴方向沿着基础梁下每边布置 3 个软钢 U 型带片,滑移元件按传统方案布置的滑移隔震结构平面图如图4所示。

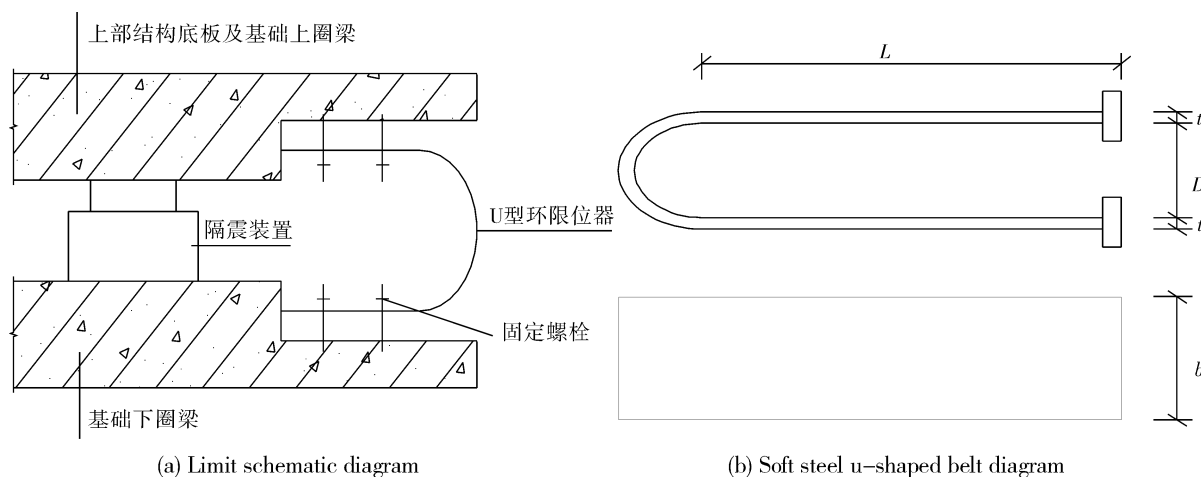


图3 滑移隔震装置示意图

Fig.3 Sliding isolated device diagram

基础滑移隔震结构与普通结构的区别在于上部结构与基础之间设置了滑移层。所以基础滑移隔震结构的重点在于滑移层的模拟,本文选用 SAP2000 中的 Friction Isolator 连接单元来模拟滑移层的滑移支承元件,在框架柱下端竖向布置 Friction Isolator 连接单元。

由于 SAP2000 所提供的摩擦隔震器是一个双轴摩擦摆模型,该模型对两个剪切变形,沿摆滑移面的径向滑移后刚度、在轴向的缝行为和对于 3 个弯矩变形的线性有效刚度具有耦合的摩擦属性。因此本单元在剪切变形上与摩擦塑性耦合,具有沿剪切方向滑移后的滑移后刚度,对于每个剪切变形自由度,

可以独立指定为线性或者非线性行为. 该模型允许在剪力不为零时存在滑移, 当剪力接近屈服值时, 滑移值变的非常大. 对于塑性模型的滞回属性是基于 Wen 和 Park 在 1976 年及 Wen 和 Ang 在 1986 年所提出的滞回行为定义的, 在该单元中, 摩擦力直接和单元的轴压力成比例, 单元不能承受轴拉力, 单元的轴力总是非线性的.

滑移支撑元件的摩擦系数在快、慢两种状态下都设定为同一个值, 通过设定水平刚度来模拟限位耗能元件, 水平刚度设为 3 000 kN/m. 本文所采用的 4 层钢筋混凝土滑移隔震结构分析模型如图 5 所示.

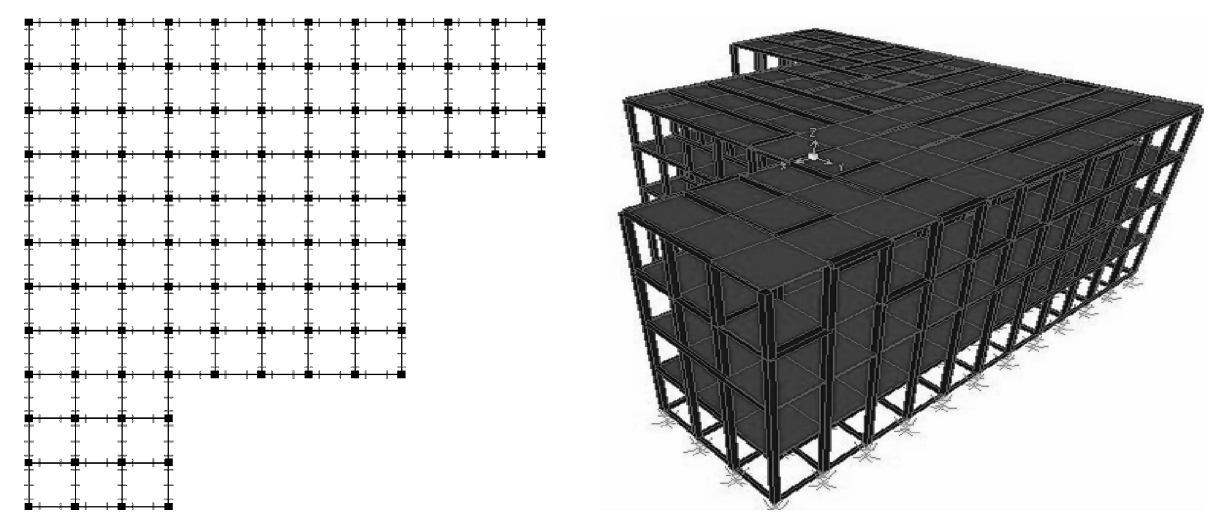


图 4 传统隔震结构平面布置示意图

Fig. 4 The layout diagram of traditional isolated structure

图 5 滑移隔震结构分析模型示意图

Fig. 5 Analytical model diagram of the sliding isolated structure

为了研究复杂结构在滑移隔震结构的优化隔震效果, 本文采用了三种结构体系, 即非隔震结构, 传统的隔震结构(图 4)和本文提出的优化的隔震结构(图 2), 分别进行地震反应分析.

2.2 三种结构的模态分析和主要数据

为了进行三种结构模态分析, 本文分别采用 1940 年 5 月 18 日美国 Imperial Valley 地震所记录的 EL-Centro 波和 1952 年 7 月 21 日美国加利福尼亚克恩县发生的 7.7 级地震所记录的 Taft 波, 所得结果如表 1 所示.

从表 1 中所得模态分析数据可见, 非隔震结构的自振周期最短, 为 1.006 691 s, 而传统隔震结构的自振周期明显延长, 为 1.473 907 s, 比非隔震结构的周期延长了约 46.4%, 对于优化隔震结构的自振周期, 其自振周期比传统隔震结构又有延长, 达到了 1.594 201 s, 比非隔震结构延长了约

表 1 三种结构的自振周期及频率

Tab.1 The vibration period and frequency of three structures						
振型	非隔震结构		传统隔震结构		优化隔震结构	
	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz
1	1.006 691	0.993 35	1.473 907	0.678 47	1.594 201	0.627 27
2	0.997 476	1.002 5	1.465 295	0.682 46	1.586 325	0.630 39
3	0.950 391	1.052 2	1.416 983	0.705 72	1.498 5	0.667 33
4	0.336 238	2.974 1	0.451 959	2.212 6	0.479 814	2.084 1
5	0.326 71	3.060 8	0.448 255	2.230 9	0.475 883	2.101 4
6	0.315 239	3.172 2	0.432 473	2.312 3	0.454 825	2.198 6
7	0.197 342	5.067 3	0.247 663	4.037 7	0.259 156	3.858 7
8	0.195 112	5.125 3	0.245 743	4.069 3	0.257 014	3.890 8
9	0.187 284	5.339 5	0.237 599	4.208 8	0.247 444	4.041 3
10	0.148 697	6.725 1	0.170 009	5.882	0.180 626	5.536 3
11	0.148 059	6.754 1	0.169 465	5.900 9	0.175 901	5.685
12	0.141 337	7.075 3	0.163 609	6.112 1	0.175 237	5.706 5

58.36%. 由此可见非隔震结构的自振周期较短, 与场地的卓越周期相近, 容易引起共振现象的发生, 这是非常不利于抗震的, 而传统隔震结构的自振周期明显延长, 可以有效地避开高频地震, 提高抗震性能, 对于优化后的隔震结构, 其周期进一步延长, 隔震效果较为明显.

3 罕遇地震状况下三种结构的抗震性能分析

运用 SAP2000 有限元分析软件对三种不同的结构进行罕遇地震情况下的抗震性能分析,所采用的地震波分别为 EL-Centro 波和 Taft 波,取规范规定的加速度峰值为 400 cm/s^2 ,得到三种结构在罕遇地震作用下的相应加速度值和位移值,然后对所得数据进行分析比较,对比三种结构的抗震性能。

3.1 三种结构的加速度分析和主要数据

经过 SAP2000 分析后,对所得数据进行分析处理,得到非隔震结构、传统隔震结构和优化隔震结构在 8 度 EL-Centro 波罕遇地震作用下和 8 度 Taft 波罕遇地震情况下的加速度对比,如表 2 和表 3 所示。

从表 2 和表 3 中所得数据可知,非隔震结构的加速度呈上升趋势,而传统隔震结构和优化隔震结构的各层加速度基本呈 K 型分布,符合理论推导的滑移隔震结构加速度分布趋势。在 EL-Centro 波作用下传统隔震结构和非隔震结构的各层加速度相比,传统隔震结构的第一层的加速度有所增加,而其余各层均比非隔震结构的加速度有所减少,其中顶层减幅最大,达到了 59.7%之多;优化隔震结构和非隔震结构的各层加速度相比,其各层的加速度都有所降低,其中顶层加速度的减幅最大,竟然达到了 62.6%。传统

表 2 8 度 EL-Centro 波罕遇地震作用下结构的加速度(单位: m/s^2)

Tab. 2 The structure's acceleration of the 8-degree EL-Centro wave under rare earthquake (unit: m/s^2)						m/s^2
楼层	非隔震结构 a_1	传统隔震结构 a_2	减少/% $(a_1 - a_2)/a_1$	优化隔震结构 a_3	减少/% $(a_1 - a_3)/a_1$	
1	3.726 258	4.034 94	-8.284	3.617 143	2.927	
2	5.788 274	3.655 507	36.846	3.123 81	46.032	
3	7.433 093	4.024 545	45.856	2.712 203	63.512	
4	10.057 89	4.056 652	59.667	3.217 462	68.011	

表 3 8 度 Taft 波罕遇地震作用下结构的加速度(单位: m/s^2)

Tab. 3 The structure's acceleration of the 8-degree Taft wave under rare earthquake (unit: m/s^2)						m/s^2
楼层	非隔震结构 a_1	传统隔震结构 a_2	减少/% $(a_1 - a_2)/a_1$	优化隔震结构 a_3	减少/% $(a_1 - a_3)/a_1$	
1	0.103 096	0.095 308	7.5	0.072 558	29.6	
2	0.105 379	0.088 208	16.2	0.068 017	35.45	
3	0.169 515	0.089 794	47.02	0.071 504	57.8	
4	0.198 252	0.093 877	52.64	0.074 155	62.6	

隔震结构和优化隔震结构都减少了上部结构的各层加速度反应,但通过数据对比分析可知优化隔震结构比传统隔震结构能更大幅度地减少各楼层的加速度反应。

3.2 三种结构的位移分析和主要数据

表 4 8 度 EL-Centro 波罕遇地震作用下结构的位移(单位: mm)

对 SAP2000 分析所得数据进行处理,得到非隔震结构、传统隔震结构和优化隔震结构在 8 度 EL-Centro 波罕遇地震作用下和 8 度 Taft 波罕遇地震情况下的位移对比,如表 4 和表 5 所示。

从表 4 和表 5 所得数据可知,非隔震结构的各层最大位移随着层数的增加呈增长趋势,其层间位移值也比较大,在 EL-Centro 波作用下其层间位移最大值达到了 53.52 mm;而传统隔震结构以及优化隔震结构的各层最大位移比非隔震结

Tab. 4 The structure's displacements of the 8-degree EL-Centro wave under rare earthquake (unit: mm)					/mm
最大结构反应	楼层	非隔震结构	传统隔震结构	优化隔震结构	
楼层最大位移	4	152.353	266.643	274.5	
	3	133.539	261.543	264.04	
	2	98.803	239.689	255.818	
	1	45.286	229.391	255.4	
	滑移层	0	201.433	246.085	
层间位移	4~3	18.814	5.1	10.46	
	3~2	34.735	21.854	8.222	
	2~1	53.518	10.298	0.418	
	1~0	45.286	27.958	9.315	

构有所增大,这主要是因为滑移层发生了位移,并以此来消耗地震能量以达到减震的目的,但是传统隔震结构在 EL-Centro 波作用下其层间位移最大值相比非隔震结构有所减少,最大值为 27.95 mm,比非隔震结构的最大层间位移值减少了约 47.2%,而对于优化隔震结构,在 EL-Centro 波作用下其层间位移最大值相比传统隔震结构又有所减少,最大值为 10.46 mm,比非隔震结构的层间位移最大值减少了

将近 80%。这可能是由于两个隔震结构的滑移层发生了位移,从而减少了地震能量向上部结构的传递,从而其层间位移也逐渐减小。

而传统隔震结构和优化隔震结构相比,优化隔震结构的基底滑移量比传统隔震结构有所增加,在 EL-Centro 波作用下,传统隔震结构和优化隔震结构的基底滑移量值分别为 201.433 mm 和 246.085 mm,增加的幅度约为 22.16%,在滑移量增加的同时,地震能量向上部结构的传递就会减少,从而会减弱上部结构的地震反应,有效地抵抗地震的作用。

表 5 8 度 Taft 波罕遇地震作用下结构的位移(单位:mm)

Tab. 5 The structure's displacements of the 8-degree Taft wave under rare earthquake (unit: mm) /mm

最大结构反应	楼层	非隔震结构	传统隔震结构	优化隔震结构
楼层最大位移	4	4.435	4.161	5.162
	3	3.89	4.068	5.178
	2	2.726	3.721	4.896
	1	1.146	3.595	5.001
	滑移层	0	3.154	4.652
层间位移	4~3	0.545	0.093	-0.016
	3~2	1.164	0.347	0.282
	2~1	1.58	0.126	-0.105
	1~0	1.146	0.441	0.349

4 三种不同结构的基底滑移量与顶层加速度的对比分析

表 6 是两种隔震结构的顶层加速度及基底滑移量的对比。

从表 6 可以看出,虽然滑移元件的使用数量减少,通过进行优化布置后优化隔震结构的顶层加速度反应比传统隔震结构有所降低,降低比例约为 20%;但其基底滑移量有所增加,增加比例约为 20%~30%;表 4 和表 5 分析得优化隔震结构的层间位移最

表 6 隔震结构的地震反应对比

Tab. 6 The isolated structure's comparison of its seismic response

地震波类型	罕遇地震			
	EL-Centro 波		Taft 波	
	传统隔震结构	优化隔震结构	传统隔震结构	优化隔震结构
基底滑移量/mm	201.433	246.085	3.154	4.652
顶层加速度/ $m \cdot s^{-2}$	4.056 652	3.217 462	0.093 877	0.074 155

大值也有所降低,约占比例 50%。分析可知,随着滑移元件数量的减少,结构各层的加速度反应有所降低,而基底滑移量有所增加,而且降低和增加的幅度相差不大。

对滑移元件进行优化布置后的滑移隔震结构,在罕遇作用下与非隔震结构相比,其隔震减震性能明显提高,自振周期明显延长,各层的加速度反应也明显降低;优化隔震结构和传统隔震结构相比,传统布置方案的滑移隔震结构使用的滑移元件数量为 105 个,而优化布置后的滑移隔震结构中滑移元件的使用数量为 69 个,减少了 36 个,滑移元件的使用数量减少了 34.3%,自振周期也有一定程度的延长,约为 8.2%,顶层加速度反应大约降低了 20%,各层的层间位移最大值大约降低 50%。

优化后的滑移隔震结构其基底滑移量和传统隔震结构相比有一定程度的增加,约占比例为 20%~30%,基底滑移量的增加可能使隔震结构的设计以及施工变得更为复杂,虽然目前隔震建筑物水平间距的设置比较保守,滑移量的增大幅度还不会影响到建筑物的安全,但如何更好的控制滑移量的增加这一问题有待于基础滑移隔震结构的进一步深入研究。

5 结 论

综合以上对非隔震结构、传统隔震结构以及优化隔震结构的模态分析,滑移隔震结构优化模型在罕遇地震作用下的地震反应等分析,本文可得出以下结论:

(1) 计算结果表明:隔震结构的自振周期比非隔震结构有所延长,而优化隔震结构比传统隔震结构的自振周期又有一定程度的延长。非隔震结构的自振周期较短,与场地的卓越周期相近,容易引起共振现象的发生,而传统隔震结构的自振周期明显延长,可以有效地避开高频地震,提高抗震性能,对于优化后的隔震结构,其周期进一步延长,隔震效果进一步加强。

(2) 分析结果表明:非隔震结构的加速度呈上升趋势,而传统隔震结构和优化隔震结构的各层加速

度基本呈 K 型分布,符合理论推导的滑移隔震结构加速度分布趋势. 优化隔震结构比传统隔震结构能更大幅度地减少各楼层的加速度反应. 非隔震结构的各层最大位移随着层数的增加呈增长趋势,其层间位移值也比较大,而传统隔震结构以及优化隔震结构的各层最大位移比非隔震结构有所增大.

(3)对比结果表明:在罕遇作用下,优化布置后的滑移隔震结构其隔震减震性能明显提高,自振周期明显延长,各层的加速度反应也明显降低. 这表明优化后的隔震结构,其地震能量作用在上部结构的比例有所降低,可有效保证上部结构的安全,确保生命财产以及贵重物品的安全.

(4)计算结果表明:固定单元分割法作为一种新的方法,其操作简单、方便、快捷,可将平面布置比较复杂的结构转换为简单的单元,并结合遗传算法以及其它优化方法快速解决平面内的优化布置问题,是一种切实可行、有效的滑移隔震原件优化布置方法.

参考文献 References

- [1] 李立. 建筑物的滑动隔震技术的研究与应用[M]. 北京:地震出版社,1991.
LI Li. Research and application of sliding seismic isolation technology for buildings [M]. Beijing: Earthquake Press, 1991.
- [2] 熊仲明,王清敏,丰定国,等. 基础滑移隔震房屋的计算研究[J]. 土木工程学报,1995,28(5):21-30.
XIONG Zhong-ming, WANG Qing-min, FENG Ding-guo, et al. Study on the calculation of brick masonry structure base isolated with sliding layer [J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(5):21-30.
- [3] 刘夏石. 工程结构优化设计:原理、方法和应用[M]. 北京:科学出版社,1984.
LIU Xia-shi. Engineering structure optimization design: the principle, method and application [M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [4] HOLLAND J H. Outline for a logical theory of adaptive systems [J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1962, 9(3):297-328.
- [5] 梁艳春,吴春国. 群智能优化算法理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
LIANG Yan-chun, WU Chun-guo. Group of intelligent optimization algorithm theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [6] BAGLEY J D. The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms [D]. University of Michigan, 1967.
- [7] GLODBERG David E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning [M]. Addison-Wesley, 1989.
- [8] 雷英杰,张善文. Matlab 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.
LEI Ying-jie, ZHANG Shan-wen. Matlab genetic algorithm toolbox and application [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005.
- [9] 熊仲明,王清敏,丰定国,等. 基础滑移隔震房屋抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构,2000,30(3):11-16.
XIONG Zhong-ming, WANG Qing-min, FENG Ding-guo, et al. Experimental Study on Aseismic Behavior of Building with Vibration Insulating Foundation by Sliding System [J]. Building Structures, 2000, 30 (3): 11-16.
- [10] 王超. 滑移元件在复杂滑移隔震结构中的优化布置研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
WANG Chao. The analysis of optimal sliding component placement of complicated sliding isolated structure [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of arch. & Tech., 2011.
- [11] 熊仲明,俞茂宏,王清敏,等. 基础滑移隔震房屋结构设计与工程应用的理论研究[J]. 振动与冲击,2003,22(3):50-54.
XIONG Zhong-ming, YU Mao-hong, WANG Qing-min, et al. Theoretical study on design and application on sliding base isolation structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22 (3):53-54.
- [12] 熊仲明,霍晓鹏,苏妮娜. 一种新型基础滑移隔震框架结构体系的理论分析与研究[J]. 振动与冲击,2008,27(10):124-129.
XIONG Zhong-ming, HUO Xiao-peng, SU Ni-na. Theoretical analysis of sliding base isolation frame structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27 (10): 124-129.

Theoretical calculation and numerical analysis of girderless slab bridge with energy method

WU Shang-de

(Supervision of a hospital in Gansu Railway Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the classical thin plate bending theory, deflection function of girderless slab bridge under uniform load by energy principle is proposed and derived. It also gives the expression of normal stress of bridge deck. The Excel tables are made basis of these formulas, which is more convenient to process the datas. Using the finite element program ANSYS for modeling of girderless slab bridge, the deflection and stress under dead load and lane load is analyzed. The results show that girderless slab bridge can bear a larger vehicle load. Through the finite element analysis of girderless slab bridge, understanding of the mechanical behavior is acquired. To verify the correctness of these formulas, example of girderless slab bridge is given, using the theoretical formulas derived in this paper analyze the deflection and normal stress of bridge deck, and the results agree well with finite element calculations and the calculation results fit in well. It proves that the method is correct, serving as the reference of the design and engineering application of the kind of structure.

Key words: girderless slab bridge; energy method; force analysis; numerical analysis

Biography: WU Shang-de, Engineer, Lanzhou 730000, P. R. China, Tel: 0086-13893355988, E-mail: wusd666@163.com

(上接第 323 页)

- [13] 姚谦峰, 梅占馨, 吴敏哲. 滑移隔震结构振动分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1999, 31(3): 208-210.
YAO Qian-feng, MEI Zhan-xin, WU Min-zhe. Vibration analysis of structure base isolated by sliding [J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Natural Science Edition, 1999, 31(3): 208-210.

Analysis of optimal sliding component placement of irregular sliding isolated structure

XIONG Zhong-ming, WANG Zhi-lei, WANG Chao

(1. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance of Ministry of Education,
Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: By using the method of genetic algorithm, the research on optimal sliding component placement of an irregular layout multi-frame framework structure is carried out in this essay, and a new method for optimal placement is proposed which contains three steps. First, the fixed unit segmentation method is used to divide the irregular layout of the building into units. Second the method of genetic algorithm is used to form an optimal arrangement of the sliding components and bring forward the optimal placement plan of the sliding components in every unit. Finally, considering all aspects of the influence factors, the best layout plan of the sliding components in the whole building is recommended. By comparing the influence of the top floor's acceleration, basal sliding and some other parameters, the feasibility of the method for the sliding components' arrangement is confirmed, laying a foundation for the promotion and application of the base sliding isolated structure.

Key words: base sliding isolated structure; sliding component; structural optimization; genetic algorithm method; the divided method of fixed unit

Biography: XIONG Zhong-ming, Professor, Ph. D, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-62663671, E-mail: xiong_zhongming@yahoo.com.cn