

# 摩擦耗能支撑参数优化

徐玉野 王全凤 罗 漪

(华侨大学土木工程系,福建 泉州 362011)

**摘要** 提出摩擦耗能支撑参数优化的一种新数学模型.它的特点是在相同的层间位移角限值下,所求得的结构各层耗能支撑刚度之和最小,从而实现安装较少的耗能装置而能达到相同的抗震要求.文中利用遗传算法求解该优化问题,编制基于遗传算法的摩擦耗能框架结构弹塑性动力优化分析程序 GAOFF.算例表明,该方法有效.

**关键词** 摩擦耗能支撑, 框架结构, 参数优化, 遗传算法

**中图分类号** TU 323.502 TU 311.41

**文献标识码** A

摩擦耗能框架结构设计的关键,在于合理地确定摩擦耗能支撑的布置及其控制参数.大震时,框架主体结构的刚度和阻尼都在变化,摩擦耗能装置的状态在附着和滑移之间交替变化.因此,摩擦耗能框架的设计是一个复杂的非线性问题.摩擦耗能支撑和摩擦耗能器安装的越多,结构在地震作用下的位移反应并不一定会越小.对摩擦耗能支撑参数的优化研究是必要的.

## 1 摩擦耗能框架的影响因素

文[1]分析认为,摩擦耗能框架的两个参数,耗能装置的起滑位移  $u_{dy}$  和支撑刚度  $K_b$ ,对结构耗能减震效果有重要的影响.文[1]基于单自由度分析的基础上,建议这两个参数的最佳取值范围为

$$\left. \begin{aligned} u_{dy}/u_{sy} &= 2/3, & K_b/K_s &= [2, 5], \\ (K_b/K_s)(u_{dy}/u_{sy}) &= [1.25, 1.5]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在式(1)中,  $K_b$  为耗能支撑在水平方向上的刚度,  $u_{dy}$  为摩擦耗能装置的起滑位移,  $K_s$  为设置摩擦耗能器的结构楼层侧向刚度,  $u_{sy}$  为设置摩擦耗能器的结构层间屈服位移.从式(1)可以看出,所给出的取值范围都比较大,且式(1)是在单层的分析基础上总结出来的.对于多层框架这个结论是否合适值得推敲.本文将从整体结构的角度,优化这些参数.

## 2 优化问题的数学模型<sup>[2~4]</sup>

已有的摩擦耗能框架优化数学模型的约束条件基本相同,都是让结构的层间位移角满足给定的层间位移角限值.这些优化模型的差别,主要体现在目标函数上.

### 2.1 已有的几种目标函数

(1) 目标函数取摩擦耗能框架结构非线性时程分析时,所得整个时程的绝对最大层间位移角为

$$\min Z = \max\{|u_i|/h_i\}, \quad (2)$$

在式(2)中,  $|u_i|$  为结构第  $i$  层的层间位移绝对值,  $h_i$  为第  $i$  层的层高. (2) 目标函数取在非线性时程分

**收稿日期** 2003-06-21

**作者简介** 徐玉野(1978-),男,硕士,主要从事防灾工程的研究;现为华南理工大学建筑学院(510640 广东 广州)博士研究生. E-mail: yuyexu@163.net

**基金项目** 福建省建设厅科技基金资助项目(闽建科/2001/44 号)

析中,所得到的绝对最大层间位移角与无量纲的绝对最大楼层加速度值之线性组合.即

$$\min Z = 0.7 \max_i \{ |u_i| / h_i \} + 0.3 \max_i \{ |A_i| / g \}, \quad (3)$$

式中  $|A_i|$  为结构第  $i$  层的绝对加速度的绝对值,  $g$  是重力加速度, 0.7 和 0.3 是权系数. (3) 目标函数取在非线性时程分析中, 所得的绝对最大层间位移角与框架累计滞回耗能之和. 即

$$\min Z = \max_i \{ |u_i| / h_i \} + \int_0^T R_i(u_i, \dot{u}_i) \dot{u}_i dt / R_{i,y} u_{i,y}, \quad (4)$$

式中  $R_{i,y}$ ,  $u_{i,y}$  分别是框架主体结构的层间屈服恢复力和层间屈服位移,  $\int_0^T R_i(u_i, \dot{u}_i) \dot{u}_i dt$  是框架的累计滞回耗能,  $T$  是积分的时间长度. (4) Filiatrault 和 Cherry 的定义. 采用有控结构. 在地震作用下, 时程分析的弹性应变能和最大应变能, 与其相应的无控结构的弹性应变能和最大应变能的比值之和定义. 即

$$\min Z = \frac{1}{2} \left[ \frac{SEA}{SEA_{(0)}} + \frac{U_{\max}}{U_{\max(0)}} \right]. \quad (5)$$

式(5)  $SEA$  和  $U_{\max}$  是在地震作用下, 摩擦耗能框架的主体结构的弹性应变能和最大应变能;  $SEA_{(0)}$  和  $U_{\max(0)}$  是在地震作用下, 相应的无控结构的弹性应变能和最大应变能. (5) 考虑把有控结构的最大层间位移和最大加速度, 以及无控结构的最大层间位移和最大加速度之比的和. 这个性能指标作为优化的目标函数, 即

$$\min Z = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\max_i \{ \ddot{x}_i(t) \}}{\max_i \{ \ddot{x}_{i(0)}(t) \}} + \frac{\max_i \{ \ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t) \}}{\max_i \{ \ddot{x}_{i(0)}(t) + \ddot{x}_g(t) \}} \right\}, \quad (6)$$

式中  $\ddot{x}_i(t)$  和  $\ddot{x}_{i(0)}(t)$  分别为有控结构和无控结构的层间位移,  $[\ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t)]$  和  $[\ddot{x}_{i(0)}(t) + \ddot{x}_g(t)]$  分别为有控结构和无控结构楼层的最大加速度. 已有的优化目标函数直接把有控结构的地震反应, 如各层层间位移角的最大值作为目标函数(极小型); 或者采用有控结构和无控结构的地震反应比值作为目标函数. 摩擦耗能框架结构在地震作用下, 如果安装的耗能装置刚度越大, 一般结构的位移反应就越小. 耗能支撑刚度越大, 需要的造价越高, 特别是用于加固工程之中.

## 2.2 本文提出的目标函数

本文把各层需要安装的摩擦耗能支撑的刚度之和, 作为优化的目标函数. 即

$$\min Z = \sum_{i=1}^n K_{bi}, \quad (7)$$

式中  $K_{bi}$  为各层安装的耗能支撑的刚度,  $n$  为结构的层数. 耗能支撑的刚度越大, 所需要的造价越高. 因此, 这个目标函数, 能很好地考虑到经济因素.

## 2.3 优化问题的约束条件

对于各种目标函数, 优化问题的约束条件相同. 即

$$|u_i| / h_i \leq \theta, \quad (8a)$$

$$K_{bi,l} < K_{bi} < K_{bi,u}, \quad (8b)$$

$$0 \leq u_{dy,i} \leq u_{sy}, \quad (8c)$$

式(8a)是约束条件, 式(8b), (8c)是自变量的取值范围. 其中  $\theta$  为给定的层间位移角限值,  $K_{bi,l}$  为第  $i$  层摩擦耗能支撑刚度的下限,  $K_{bi,u}$  为第  $i$  层摩擦耗能支撑刚度的上限.  $K_{bi,u} = K_s$ , 这里一般取  $\theta = 5$ .

$u_{dy,i,l}$  取为 0,  $u_{dy,i,u}$  取框架主体结构的层间屈服位移, 以便使耗能支撑先行屈服, 达到保护框架主体结构的目的.

## 3 弹塑性动力分析与优化分析

本文采用 VC++ 语言, 编制了摩擦耗能框架结构弹塑性动力分析子程序 IDAFF. 该程序采用层间剪切模型, 其中主体结构的滞回模型为理想弹塑性模型. 假定摩擦型耗能器的力-变形关系为 Coulomb 摩擦型, 耗能支撑始终处于弹性状态. 本文采用 ANSYS 软件, 验证 IDAFF 子程序的正确性, 见算例.

本文在 Kalyanmoy 提供的 NSGA 遗传算法程序包的基础上, 利用 VC++ 6.0 开发工具, 经过适当的改造, 研制出基于遗传算法的摩擦耗能框架结构弹塑性动力优化分析程序 GAOFF. 该程序需要输入结

构的信息,包括层数,以及框架主体结构各层的质量、楼层刚度与屈服位移、允许设置支撑的楼层号、支撑刚度的取值范围、起滑位移的取值范围等.同时,给出遗传算法的相关参数,如群体大小、交叉概率、变异概率、最大进化代数、二进制编码或十进制编码等.程序经过搜索,最终会给出一个满意解.

4 算例

一幢 6 层现浇钢筋混凝土框架结构的轻工业厂房,按 8 度设防,近震Ⅲ类场地.结构各层的重力荷载代表值  $G_1 = 10.360\text{ MN}$ ,  $G_2 = G_3 = G_4 = G_5 = 9.330\text{ MN}$ ,  $G_6 = 6.130\text{ MN}$ .框架主体结构各层的刚度  $k$ 、屈服位移  $u$ 、层高  $h$ ,如表 1 所示.不同层间位移角限值所要求相应的层间位移值,如表 2 所示.

表 1 框架主体结构的主要参数

项 目	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层
$h/\text{m}$	4.0	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
$k/\text{kN}\cdot\text{mm}$	583.970	583.264	583.264	474.254	474.254	454.756
$u/\text{mm}$	14.3	12.2	12.5	10.1	9.1	8.4

表 2 不同层间位移角限值要求对应的层间位移值(mm)

	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{180}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{400}$
第 1 层	80	50	40	20	16	10
第 2~6 层	72	45	36	18	14.4	9

结构未设置消能支撑时,输入峰值为 0.4 g 的 1940 年 El Centro 地震波(南北方向),持时 30 s.取前面 20 s 作时程分析,原地震波时间步长为 0.02 s,对地震波进行线性插值,积分时间步长 0.001 s.结构阻尼采用瑞利阻尼,结构的阻尼比 0.05.采用 ANSYS 软件,每个荷载步时间间隔 0.02 s,时程分析每个荷载步的子步数为 20.结构各层的最大位移( $s$ )、最大层间位移( $u$ )、楼层的加速度( $a$ ),如表 3 所示.建筑抗震设计规范(GB 50011-2001)规定,对于消能减震框架,层间弹塑性位移角限值为  $1/80$ .从表 3 可以看出,在 El Centro 地震波作用下,第 4 层的层间位移角不能满足  $1/50$  层间位移角的要求.因此,拟

表 3 无消能支撑 El Centro 波作用下各层最大反应绝对值

层号	本文结果			ANSYS 结果		
	$s/\text{mm}$	$u/\text{mm}$	$a/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$s/\text{mm}$	$u/\text{mm}$	$a/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
1	37.1	37.1	5.22	37.3	37.3	5.53
2	69.1	48.3	5.46	69.1	48.3	5.51
3	82.8	14.7	5.79	82.9	14.7	5.24
4	149.8	80.6	6.81	149.8	80.5	6.91
5	163.8	20.3	5.22	163.7	20.3	5.82
6	166.1	7.7	6.16	166.0	7.7	6.35

采用摩擦耗能装置进行加固.表 4 给出了各种层间位移角限值在峰值为 0.4 g 的 El Centro 地震波作用下,其耗能支撑的优化结果.遗传算法的参数(本文都取此值),采用十进制编码.其群体规模为 80、交叉概率  $P_c = 0.85$ ,变异概率  $P_m = 0.05$ ,最大进化代数 500,十进制编码的交叉概率分布指数取 20,十进制变量的变异概率指数取 20.假设各层都允许加耗能装置,  $0 < K_{bi} < 5 K_s$ ,  $0 \leq u_{dyi} \leq u_{sy}$ .

从已有的文献可以看出,遗传算法搜索全局最优解的能力很强.但对于本算例,由于摩擦耗能框架的优化变量多,问题本身又是高度非线性问题,因此较难找到最优解.比较在层间位移角限值为  $\frac{1}{50}, \frac{1}{80}, \frac{1}{100}$  的优化结果,可以发现在第 4 层摩擦耗能支撑的优化结果出现了反常.这与结构的概念设计不符合,但其优化结果仍满足约束条件.对于表 4 中层间位移角限值为  $\frac{1}{80}, \frac{1}{100}$  的优化结果出现的刚度突变,结合结构的概念设计,可以认为此时的优化结果是不合理的.这可能是由于时程分析的高度非线性,所引起优化结果是局部最优解等原因造成的.此时,可以采用改变变量范围等进行重新搜索.对于  $\frac{1}{50}, \frac{1}{80}, \frac{1}{100}$  的层间位移角限值,从表 4 可以看出,优化后的耗能支撑刚度都没有超过原结构的刚度.因此,本文建议此

时可以考虑缩小变量范围,利用遗传算法优化程序重新计算. 如果考虑  $0 < k_{bi} < 2k_s, 0 \leq u_{dyi} \leq 0.7u_{sy}$ , 计算结果如表 5 所示. 对于  $\frac{1}{200}, \frac{1}{250}, \frac{1}{400}$  也可以做类似的处理. 表 4, 5 中  $\frac{1}{50}, \frac{1}{80}, \frac{1}{100}$  层间位移角限值下优化的目标函数比较, 如表 6 所示.

表 4 El Centro 波作用下各种层间位移角限值下摩擦耗能支撑的优化结果

$i$	消能支撑参数	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层
$\frac{1}{50}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	0	0	0	55.984	0	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	0	0	0	2.5	0	0
$\frac{1}{80}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	154.299	303.650	197.329	0	41.169	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	3.8	1.7	3.5	0.3	2.0	1.8
$\frac{1}{100}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	544.939	436.958	477.227	0	236.741	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	1.1	1.6	3.1	0	2.4	1.5
$\frac{1}{200}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	1 225.030	1 517.293	198.845	1 204.417	187.800	1
	$u_{dyi}/\text{mm}$	3.1	2.4	9.4	2.3	2.0	2.6
$\frac{1}{250}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	2 054.212	2 022.007	2 402.025	1 144.419	1 565.619	595.548
	$u_{dyi}/\text{mm}$	8.1	7.6	4.5	7.6	3.6	3.3
$\frac{1}{400}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	2 860.949	2 840.677	2 701.047	1 899.461	2 319.150	793.618
	$u_{dyi}/\text{mm}$	11.7	10.9	9.7	9.2	4.5	6.4

表 5 El Centro 波作用且变量范围缩小后各种层间位移角限值摩擦耗能支撑的优化结果

$i$	消能支撑参数	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层
$\frac{1}{50}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	0	0	0	60.589	0	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	0	0	0	2.3	0	0
$\frac{1}{80}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	9.001	181.008	0	192.634	40.832	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	4.3	2.3	0	2.9	1.8	0
$\frac{1}{100}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	295.081	328.344	94.942	190.457	0	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	2.0	4.7	3.5	4.6	0	0

表 6 El Centro 地震波作用下各种变量取值范围的优化目标函数值比较 ( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )

$i$	$0 < k_{bi} < 5K_s, 0 \leq u_{dyi} \leq u_{sy}$	$0 < k_{bi} < 2K_s, 0 \leq u_{dyi} \leq 0.7u_{sy}$
$\frac{1}{50}$	55.984	60.589
$i$	$0 < k_{bi} < 5K_s, 0 \leq u_{dyi} \leq u_{sy}$	$0 < k_{bi} < 2K_s, 0 \leq u_{dyi} \leq 0.7u_{sy}$
$\frac{1}{80}$	696.446	423.476
$i$	$0 < k_{bi} < 5K_s, 0 \leq u_{dyi} \leq u_{sy}$	$0 < k_{bi} < 2K_s, 0 \leq u_{dyi} \leq 0.7u_{sy}$
$\frac{1}{100}$	1 695.864	908.823

从上面的结果可以看出,适当缩小变量范围,对寻优是有利的. 如果只在第 4 层薄弱层处添加耗能装置,在峰值为 0.4 g 的 El Centro 地震波作用下,摩擦耗能框架参数的优化结果如表 7 所示. 从表中可以看出,如果只在薄弱层处设置摩擦耗能支撑,将难以找到满足 8 度大震时层间位移角限值  $1/80$  要求的解. 同时,对此例而言,减少变量的范围(假设最优解仍在变量范围内),不一定就能找到更优的解. 当然,对目标函数而言,求出的优化结果变化不大. 这主要是由于本题的优化变量多,且问题是高度非线性系统所致. 本算例受峰值为 0.40 g 的 1976 年的天津波(东西向)作用,原地震波时间间隔 0.01 s,持时 19.2 s. 对其进行插值,使时间步长为 0.001 s. 结构阻尼比取 0.05. 程序的优化结果,如表 8 所示.

从表 4 和表 8 中可以看出,摩擦耗能框架优化变量在不同地震波作用下其优化结果是不同的. 可能出现一种地震波下的优化结果,在另一种地震波下不能满足层间位移角限值的要求. 因此,如何选用地震波以及在多条地震波下的优化方法求解,是值得进一步研究的问题. 在表 8 中  $\frac{1}{80}$  层间位移角限值下,

遗传算法进化曲线如图 1 所示.

表 7 El Centro 地震波作用下考虑只在薄弱层处设置摩擦耗能支撑的优化结果

$i$	消能支撑参数	$0 < k_{bi} < 5 K_s, 0$	$u_{dyi}$	$u_{sy}$	$0 < k_{bi} < 4 K_s, 0$	$u_{dyi}$	$u_{sy}$	$0 < k_{bi} < 3 K_s, 0$	$u_{dyi}$	$u_{sy}$
$\frac{1}{50}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	8.990			8.990			8.992		
	$u_{dyi}/\text{mm}$	2.1			1.8			2.6		
$\frac{1}{80}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	没有搜索到满足约束条件的解			没有搜索到满足约束条件的解			没有搜索到满足约束条件的解		
	$u_{dyi}/\text{mm}$									

表 8 天津波作用下各种层间位移角限值的摩擦耗能支撑优化结果

$i$	消能支撑参数	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层
$\frac{1}{50}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	409.871	863.420	372.624	237.209	0	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	11.3	3.9	2.5	5.6	0	0
$\frac{1}{80}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	1 304.170	1 506.800	768.345	534.775	198.822	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	7.1	4.6	4.9	6.2	3.7	0
$\frac{1}{100}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	871.611	1 683.947	1 117.521	575.882	416.425	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	12.1	5.1	4.7	7.7	3.5	1.3
$\frac{1}{200}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	1 154.828	1 600.430	1 256.507	848.060	624.134	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	12.4	7.5	6.4	7.8	4.7	0
$\frac{1}{250}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	1 265.075	1 799.658	1 343.196	915.137	683.672	0
	$u_{dyi}/\text{mm}$	12.5	7.5	6.5	8.0	5.0	1.7
$\frac{1}{400}$	$k_{bi}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	2 300 702	1 737 475	1 434 428	1 393 369	1 812 894	254 543
	$u_{dyi}/\text{mm}$	8.0	9.5	8.0	9.2	2.5	3.1

从图 1 中可以看出,在优化的初期,目标函数( $X$ )降低幅度大,当代数( $n$ )为 300 代至 500 之间时,目标函数变化不大.因此,为减少运算量,可以考虑适当减少遗传算法代数.经过本文程序的验证,当摩

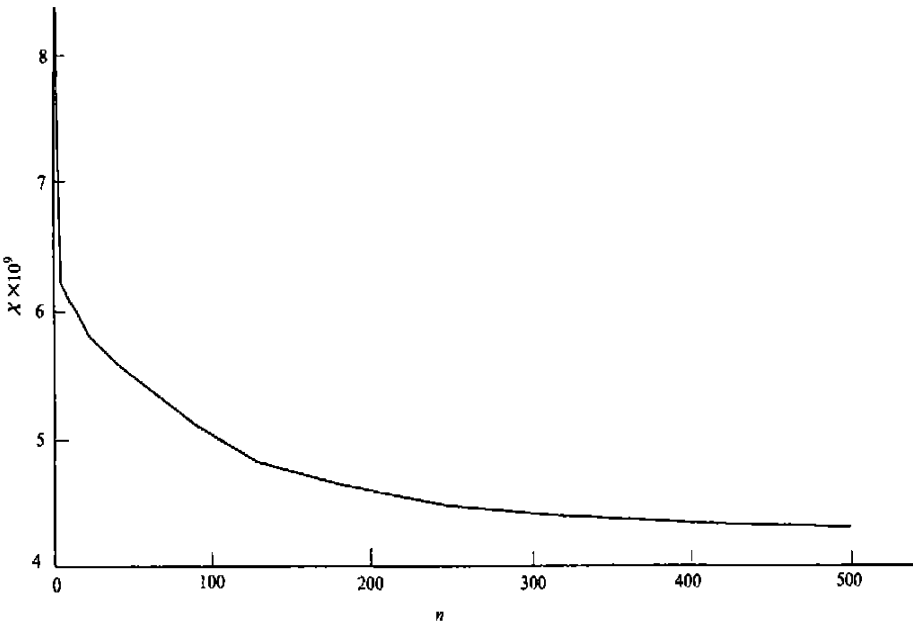


图 1  $\frac{1}{80}$ 层间位移角限值下每一代中最优个体的遗传进化曲线

擦耗能框架支撑参数取表 4 中  $i = \frac{1}{80}$  的优化结果值,在峰值为 0.4 g 的 El Centro 地上述各表格中给出的解都满足约束条件,当用 ANSYS 验证时,也基本上满足约束条件.震波(南北向)作用下结构反应,如表 9 所示.当摩擦耗能框架支撑参数取表 8 中的优化结果值,在峰值为 0.4 g 的天津地震波(东西向)作用下结构反应,如表 10 所示.

表 9  $i = 1/80$  时 El Centro 地震波作用摩擦耗能框架结构的最大反应

层号	本文结果			ANSYS 结果		
	$s/\text{mm}$	$\mu/\text{mm}$	$a/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$s/\text{mm}$	$\mu/\text{mm}$	$a/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
1	37.7	37.7	5.09	37.7	37.7	5.09
2	63.2	36.8	6.41	62.7	36.9	6.37
3	74.8	13.3	5.46	74.3	13.3	5.44
4	110.3	45.0	6.63	110.0	45.7	6.62
5	122.8	18.8	5.39	123.6	18.8	5.37
6	124.9	7.5	5.67	125.7	7.5	5.64

表 10  $i = 1/80$  时天津波作用下摩擦耗能框架结构的最大反应

层号	本文结果			ANSYS 结果		
	$s/\text{mm}$	$\mu/\text{mm}$	$a/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$s/\text{mm}$	$\mu/\text{mm}$	$a/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
1	49.8	49.8	3.31	49.8	49.8	3.30
2	92.1	44.3	4.13	92.1	44.3	4.11
3	133.1	43.9	4.27	133.0	43.8	4.27
4	174.5	43.9	5.35	174.5	44.0	5.33
5	214.0	44.6	4.75	214.1	44.8	4.71
6	218.7	8.72	7.06	218.8	8.70	7.06

5 结束语

本文提出了一种新的摩擦耗能框架结构优化的数学模型,并用遗传算法求解这个优化问题.从优化结果看,优化出来的支撑刚度并不是落在抗震规范的  $K_b/K_s = [2,5]$  这个范围内.因此,对  $K_b/K_s$  的合理取值,有待进一步的研究.虽然遗传算法是目前求解高度非线性优化问题的最优方法之一,但是由于这个优化问题的复杂性,遗传算法能否给出最优解还有待研究.遗传算法的参数选择和变量的取值范围对优化结果是有影响的,不同地震波作用摩擦耗能框架结构的优化结果也是不同的.如何考虑多条地震波作用下优化问题的遗传算法求解,则显得十分必要.

参 考 文 献

1 欧进萍,吴波,龙旭. 结构被动耗能减震效果的参数影响[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(1): 60 ~ 70  
2 冼巧玲,周福霖,成文山. 框架结构消能支撑的减震优化方法[J]. 世界地震工程, 1999, 15(2): 49 ~ 55  
3 冼巧玲,成文山,周福霖. 消能支撑参数优化方法的进一步研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2000, 27(3): 73 ~ 80  
4 吴泽厚,周福霖. 消能减震建筑结构的计算分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(4): 47 ~ 51, 82  
5 徐玉野,王全凤. 面向设计的摩擦耗能框架结构时程分析法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 264 ~ 270

Parameter Optimization with Frictional Energy  
Dissipation as a Brace

Xu Yuye    Wang Quanfeng    Luo Yi

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

**Abstract** For studying the problem of parameter optimization bracing by frictional energy dissipation, a new mathematical model is proposed. The model aims at minimizing the sum of the stiffness of energy dissipative brace at given storey in a frame structure under the limitation of the same relative storey displacement angle. Thus the requirement of seismic resistance can be satisfied with less devices of energy dissipation. In this paper, genetic algorithm is used for solving this problem of optimization; and the computer program based on genetic algorithm is developed for a frame structure of frictional energy dissipation to conduct elastoplastic and dynamic and optimizing analysis. The method is shown by computational examples to be effective.

**Keywords** frictional energy dissipation as a brace, frame structure, parameter optimization, genetic algorithm