

# 强震作用下框架结构的优化设计

刘齐茂<sup>1,2</sup>, 燕柳斌<sup>2</sup>

(1. 广西工学院土木建筑系, 广西柳州 545006; 2. 广西大学土木建筑学院, 广西南宁 530004)

**摘要:**针对第三水准“大震不倒”的抗震设防目标,提出一种在强震作用下框架结构的优化设计方法。依据“用相同的投资获最好的设计”的设计理念,以在强烈地震波的作用下框架结构最大的层间相对位移最小化作为优化目标,建立了同时满足体积约束的优化数学模型。采用动力有限元分析模型和高效的显式动力分析方法进行结构分析,获得最大的层间相对位移;采用改进的复形法求解优化数学模型;在显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 的基础上进行二次开发,实现了一个三维框架结构的抗震优化设计。数值结果表明该设计方法不一定获得抗震结构的最优设计,但能获得一系列抗震性能良好的设计,具有现实的工程意义。

**关键词:** 抗震设计; 结构优化; 动力响应优化; 显式动力分析; 复形法; 空间框架

中图分类号: TU311 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2008)02-0107-06

## An Optimal Design Method for Spacial Frame Structures under Severe Earthquake Loading

LIU Qi-mao<sup>1,2</sup>, YAN Liu-bin<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Guangxi Institute of Technology, Guangxi Liuzhou 545006, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** To aim at the third level seismic fortification target: not collapse in severe earthquake conditions, an optimal design method for spacial frame structures under the severe earthquake loading is performed. According to the design concept: get the best design with the same cost, the optimization mathematics model is established to minimize the maximal relative displacement between neighbor floors in building structure under severe earthquake loading, meanwhile, to satisfy the structural volume constraint. The model is solved with the improved complex method. At last, the 3-D seismic optimal design of a space frame is demonstrated by the second exploitation based on the explicit dynamic analysis soft ANSYS/LS-DYNA. The numerical value result indicates the design method not always achieve the optimum design of the seismic structures, but it can obtain a series of better seismic designs. So the optimal design method can be used in the practical engineering.

**Key words:** Seismic design; Structural optimization; Dynamic response optimization; Explicit dynamic analysis; Complex method; Spatial frame

## 0 引言

人类在长期的工程实践中发展了许多抗震的设计方法,如发展了提高结构和构件抗震强度及变形能力的抗震理论和设计方法<sup>[1]</sup>,基础隔震<sup>[2,3]</sup>、耗能

减震<sup>[4-5]</sup>和振动控制<sup>[6-7]</sup>等抗震设计技术。随着计算机软硬件的飞速发展,利用计算力学和数学规划法对大型复杂的抗震结构进行优化设计已成为可能。对抗震结构进行优化设计的一个主要的目的是

收稿日期:2007-07-25

基金项目:广西自然科学基金资助项目(桂科自 0481007);广西工学院青年科学资金资助项目(500204)

作者简介:刘齐茂(1972-),男,博士研究生,副教授,从事结构优化设计的研究。

通过优化结构的动力特性使结构的地震响应最小。在强烈地震的作用下框架结构的动力响应一般进入弹塑性状态,对结构的响应分析必须采用弹塑性分析方法,可见在强震作用下要对框架结构进行优化设计,计算工作量是非常大的。因此在整个优化设计过程中的每一个环节都要想办法节省计算时间,优化设计才可能取得成功。

在强震作用下框架结构的优化数学模型的目标函数和约束函数一般为设计变量的隐式函数,求解方法一般有数学规划法、准则法和智能优化算法。但大多数的数学规划法都要计算目标函数和约束函数对设计变量的一阶和二阶导数,目前用解析法计算结构塑性响应灵敏度是非常困难的,一般采用差商代替求导<sup>[8]</sup>,但差分法的计算量非常大,而且不够准确。准则法具有物理意义明确,方法简便,结构重分析次数少,收敛速度较快等优点。1968年 Zarghamee 首次提出动力优化设计准则<sup>[9]</sup>:当结构按某一阶固有模态振动时,若所有构件的应变能密度和动能密度之差与其质量密度的比值为一常数,则该结构为在此固有模态下的最小重量设计。后来有许多学者在此基础上通过 Kuhn - Tucker 条件导出很多种动力优化准则法<sup>[10]</sup>,但这些方法是只是适用结构的线弹性范围。智能优化算法是一类随机搜索优化设计方法,主要有遗传算法、模拟退火算法、神经网络优化算法等<sup>[11]</sup>,该类方法避免了计算设计灵敏度这一棘手问题,还可以找到全局最优设计,故受到很多从事结构优化设计研究人员的欢迎。如在抗震设计研究领域, Nikos D. Lagaros 等<sup>[12]</sup>基于欧洲抗震设计规范,用遗传算法求解了满足应力和位移约束的三维框架结构的最轻设计。但该方法仍然存在计算量过大的问题, Nikos D. Lagaros 等在结论中提出在将来的研究中应想办法提高算法的效率如采用并行算法。

根据我国《建筑抗震设计规范》(GB50011 - 2001)的“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准抗震设防目标,本文针对第三水准“大震不倒”的抗震设防目标,提出一种在强震作用下框架结构的优化设计方法。依据“用相同的投资获最好的设计”的设计理念,建立了以强烈地震波的作用下框架结构最大的层间相对位移最小化作为优化目标,同时满足体积约束的优化数学模型,并采用动力有限元分析模型和高效的显式动力分析方法进行结构分析,获得最大的层间相对位移。采用改进的复形法求解优化数学模型,在显式动力分析软件 ANSYS/

LS - DYNA 的基础上进行二次开发,实现一个三维框架结构的抗震优化设计。数值结果表明该设计方法不一定获得抗震结构的最优设计,但能获得一系列抗震性能良好的设计,该抗震优化设计方法具有现实的工程意义。

## 1 强震作用下结构的响应分析

在地震的作用下结构的响应分析方法有静力法、振型分解反应谱法和时程分析法。静力法和反应谱法只能适用于线弹性范围;而时程分析法把地震加速度时程直接输入,对结构进行地震时程响应分析,可以考虑各种因素(如结构进入塑性范围),使结构抗震计算分析结果更符合实际的震害现象。因此本文采用时程分析法。

时程分析法按积分格式可归纳为两类:一类为隐式积分方法,另一类为显式积分方法。隐式方法大部分为无条件稳定,如 Wilson -  $\theta$  法、Newmark 法等,而显式方法为条件稳定。对于大型复杂介质波动问题(如地震动问题)的分析显式方法比隐式方法具有优势,原因是:①隐式方法需要求解联立方程组,而显式方法不需要;②当介质进入非线性(如塑性)状态后,刚度矩阵  $K(t)$  每一步都在改变,显式方法不需要作矩阵的求逆运算,只需要将修改的刚度矩阵  $K(t)$  对节点位移向量的作乘法运算,而隐式方法在每一步都需要作矩阵的求逆运算。中心差分法可以直接以显式的方法应用,但需要作以下假设:质量矩阵  $M$  和阻尼矩阵  $C$  与时间无关,且阻尼矩阵  $C$  只与质量矩阵  $M$  相关并为对角阵。这种阻尼假设对数值的稳定性没有影响<sup>[13]</sup>。故本文采用显式中心差分法求解在强震作用下结构的位移响应,该方法在显式动力分析软件 LS - DYNA 中被采用。

### 1.1 结构的有限元动力计算模型

对于对称结构,框架结构的振动模型一般可简化为层模型、杆系模型和杆系 - 层模型,且为平面体系<sup>[14]</sup>。为了准确地模拟结构在强烈地震动作用下的响应过程,本文采用空间有限元动力计算模型,用 LS - DYNA 软件的显式动力分析三维梁单元 Beam161,将整个框架结构离散。梁单元 Beam161 的节点有 6 个自由度(3 个线位移和 3 个角位移),可定义多种截面形式,而且截面沿单元的长度方向是可以变化的,能准确地模拟实际的工程结构。如图 1 所示的六层空间框架结构,采用 63 个梁单元将结构离散,结构的质量都集中在节点上,形成的质量矩阵为对角矩阵。

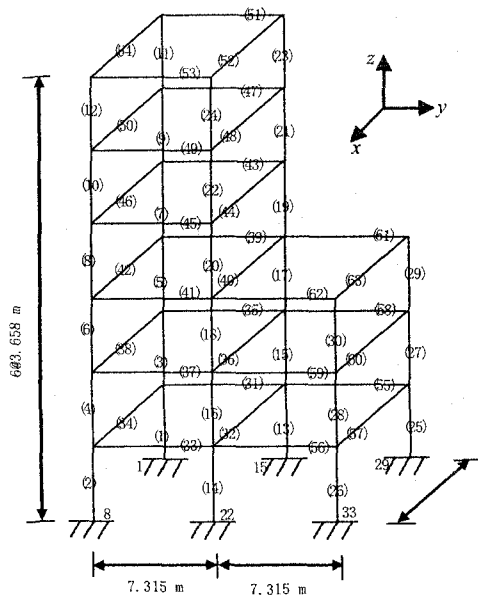


图1 六层空间框架的有限元动力计算模型

Fig.1 Dynamic FEM model of six-story spatial frame.

将与地面连接的节点1、8、15、22、29、33进行耦合,使这些节点之间的距离保持不变,并将它们定义为1个组元,该组元在地面震动过程中任意时刻具有和地面一样的绝对位移、绝对速度和绝对加速度,地震加速度记录可以从任一个或同时在多个方向直接作用在组元上。

1.2 输入地震波的选择

可根据参考文献[15]所提供的选取原则和选取步骤来选用强震记录。一般对框架结构进行显式动力分析可采用的地震波有:(1)拟建场地的实际的强震记录,是最理想的,也是最符合实际情况的;(2)典型的强震记录,国内外用的较多的强震记录是El Centro(1940年,南-北分量)地震记录,Taft(1952年)地震记录,宁河地震天津记录等;(3)人工地震波。本人采用EL Centro波。

1.3 结构的恢复力模型

恢复力模型概括了结构或构件的刚度、强度、延性和吸能能力等力学特性,是结构弹塑性时程分析的重要依据。根据目前的试验研究成果,恢复力模型可总结如下:(1)理想的弹塑性模型,适用于钢结构;(2)考虑硬化的双线性模型,适用于钢结构和近似地用于钢筋混凝土结构;(3)退化双线性模型,适用于钢筋混凝土结构;(4)退化的三线性模型,适用于钢筋混凝土结构。本文采用考虑硬化的双线性模型。

1.4 用中心差分法求解结构的地震动层间相对位移响应及其最大值

质量矩阵  $M$  为常量矩阵,瑞利阻尼矩阵  $C = \alpha M + \beta K(t)$ ,为了应用显式方法,令  $\beta = 0$ ,即  $C$  也为常量矩阵。在线弹性范围刚度矩阵  $K$  与时间无关,进入塑性范围后刚度矩阵  $K(t)$  是变化的,每一步都要重新计算一次刚度矩阵。

时间步长  $\Delta t$  的选择按中心差分法条件稳定的步长限制要求: $\Delta t < \Delta t_{cr} = \frac{T_N}{\pi}$  (其中  $T_N$  为结构系统的最小周期)。LS-DYNA 软件采用显式中心差分法求解振动方程,数值实验表明只要满足步长限制条件,算法是非常稳定的。

通过显式中心差分法求出地震过程中各时刻各节点相对于地面的位移向量  $u_i(t)$  后,将同一楼层上各节点的位移平均获得在地震过程中各个时刻各楼层相对于地面(第一层)的位移  $U_{ij}(t)$ ,进一步即可算出在地震过程中各时刻相邻楼层间的相对位移  $U_{ij}(t)$ :

$$U_{ij}(t) = |U_{ii}(t) - U_{jj}(t)| \quad (j = i + 1, i = 1, 2, \dots, n; t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, m\Delta t) \quad (1)$$

其中  $n$  为楼层总数,  $m\Delta t$  为地震持续的时间。

在地震过程中层间相对位移的最大值  $U_{max}$  为

$$U_{max} = \max\{U_{ij}(t)\} \quad (j = i + 1, i = 1, 2, \dots, n; t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, m\Delta t) \quad (2)$$

2 优化数学模型的建立和求解

2.1 优化数学模型的建立

我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)提出“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准抗震设防目标,针对第三水准“大震不倒”抗震的设防目标和依据“用相同的投资获最好的设计”的设计理念,寻求在强烈地震的作用下,使框架结构在地震作用的过程中最大的层间相对位移最小化,同时满足结构体积(重量)约束的最优设计,用数学表达为

$$\begin{aligned} &\text{find } x \\ &\min U_{max}(x) = \max\{U_{ij}(x, t)\} \\ &\text{s. t. } V(x) \leq [V] \\ &\underline{x} \leq x \leq \bar{x} \end{aligned}$$

$$(j = i + 1, i = 1, 2, \dots, n; t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, m\Delta t) \quad (3)$$

其中  $x$  为设计变量;  $\underline{x}$  为设计变量的下限;  $\bar{x}$  为设计变量的上限;  $V(x)$  为设计  $x$  的体积;  $[V]$  为结构的许可体积,相当于使用材料的上限;  $\max\{U_{ij}(t)\} (j = i + 1, i = 1, 2, \dots, n; t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, m\Delta t)$  为框架结

构在地震作用的过程中最大的层间相对位移。

在优化设计过程中,优化数学模型(3)比以往的求结构最轻设计同时满足位移和应力等约束条件的数学模型<sup>[16-17]</sup>减少了结构重分析的次数,原因是在强震的作用下,由于结构设计敏度计算的困难,通常采用不需要计算设计敏度的优化方法如复形法、进化算法等。该类算法通常通过随机的方法产生新设计,先检验新设计是否满足约束条件,再分析新设计的目标函数是否下降,然后决定是否更新设计的策略。在结构优化设计中结构的体积(重量)是设计变量  $x$  的显式函数,优化数学模型(3)不需要进行结构分析就能获得可行的新的设计,故能减少了结构重分析的次数,提高优化的效率。

2.2 用改进的复形法求解优化数学模型

复形法是求解约束极值问题的直接方法,对于非线性规划问题是一种有效的实用的方法。其算法主要分两步:第一步产生  $k$  个顶点的初始复形;第二

步将  $k$  个顶点的函数值进行比较,通过映射、扩大或收缩等步骤,不断丢掉坏点,代之以映射点,构成新的复形,逐步调至最优。实现求解数学模型(3)的计算流程图如图2,该算法对传统的复形法<sup>[18]</sup>作了一定的改进:①传统的复形法先对映射点  $x_a$  进行结构分析,然后再判断映射点是否可行,即无论映射点是否可行都要进行结构分析。而本文根据所建立的优化数学模型(3)的特点先判断映射点是否可行,如果可行则进行结构分析,如果不可行则不再进行结构分析,重新调整映射系数  $a$  寻找新的映射点,直到映射点可行才进行结构分析;②传统的复形法用映射点  $x_a$  代替最差点  $x_H$  形成新的复形后,再对各顶点  $x_i (i=1, 2, \dots, k)$  及其中心点  $\tilde{x}_s$  进行结构分析获得相应目标函数值  $U_{\max}(x_i)$  及  $U_{\max}(\tilde{x}_s)$ ,而本文只需对中心点  $\tilde{x}_s$  进行结构分析获得相应目标函数值,结构分析由  $k+1$  变为1次。可见改进的复形法

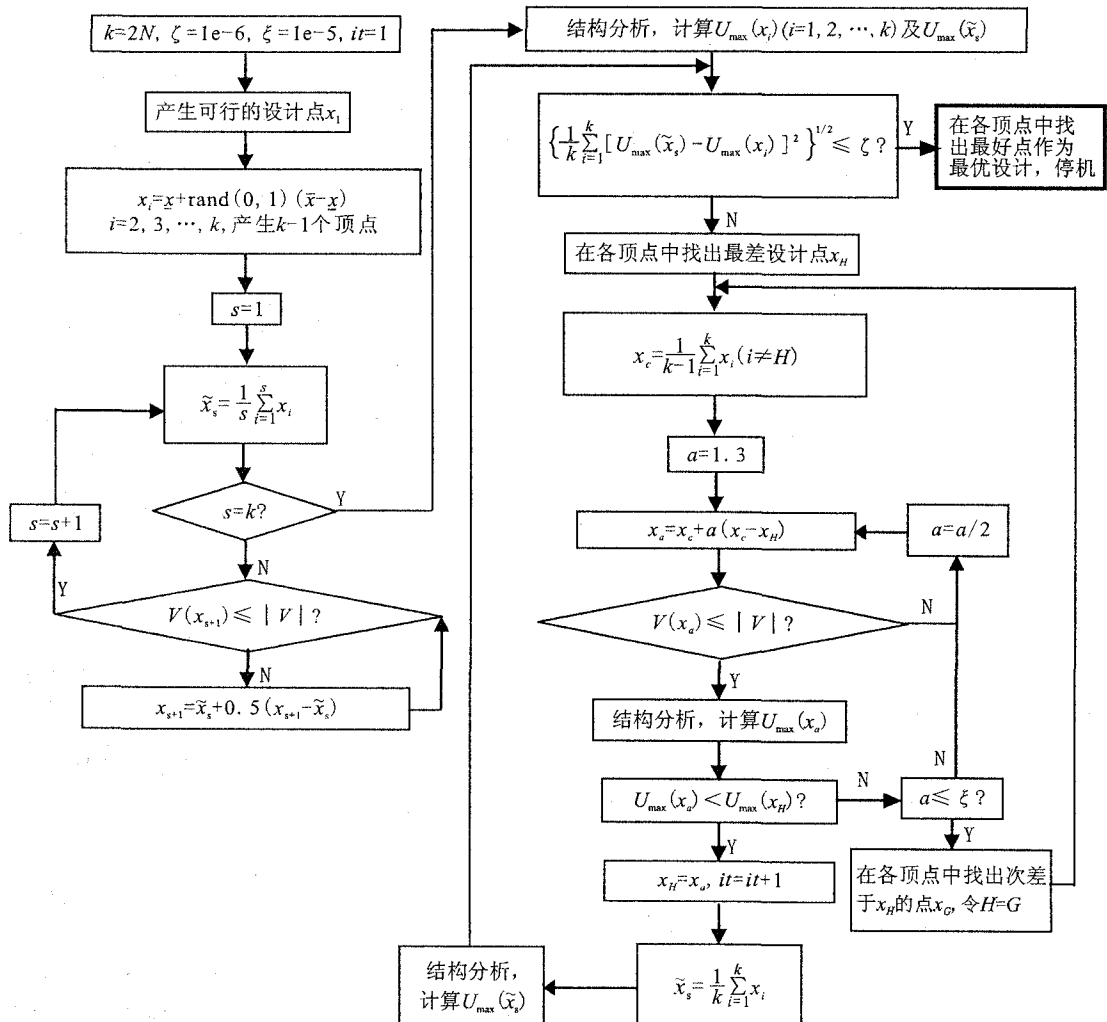


图2 改进的复形法流程图

Fig.2 Flow chart of improved complex method.

减少了结构重分析次数,提高了算法的效率。 $N$  为设计变量  $x$  的维数。

### 3 数值算例

用图 1 所示的 6 层空间混凝土框架,在强震的作用下求该框架的抗震优化设计。

设计变量为梁和柱的横截面尺寸,柱的横截面为正方形,梁的横截面为矩形。单元(1)、(2)边长为  $x_1$ ;单元(3)、(4)边长为  $x_2$ ;单元(5)、(6)边长为  $x_3$ ;……;单元(29)、(30)边长为  $x_{15}$ ;所有的横梁单元的截面宽和高为  $x_{16} \times x_{17}$ 。设计变量  $x$  为

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16} \ x_{17}]^T \quad (4)$$

设计变量取值范围: $x_i \in [0.2, 0.5]$  ( $i = 1, 2, \dots, 17$ );结构的许可体积 $[V] = 70 \text{ m}^3$ 。

地震波从坐标的  $y$  轴方向输入,采用 El Centro 强震记录<sup>[14]</sup>,其地面水平加速度峰值为  $0.349 \text{ g}$ ;记录时长为  $7.98 \text{ s}$ ;步长  $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ,如图 3 所示。

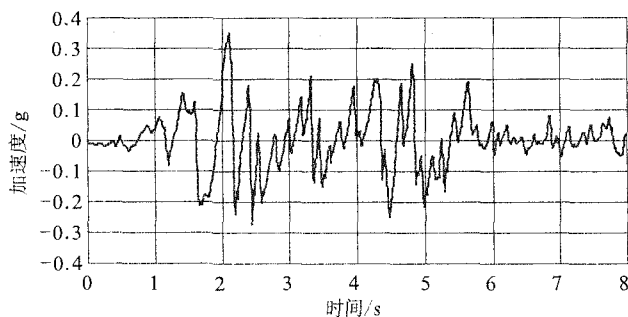


图 3 El Centro 地震波

Fig. 3 El Centro earthquake motion.

材料的密度为  $\rho = 2\ 500 \text{ kg/m}^3$ ;弹性模量为  $E = 30 \text{ GPa}$ ;泊松比  $\nu = 0.2$ ;屈服应力  $\sigma_y = 20 \text{ MPa}$ 。

恢复力模型采用考虑硬化的双线性模型:

$$\begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon, \text{ for } \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma &= E\varepsilon_y + E_{tan}(\varepsilon - \varepsilon_y), \text{ for } \varepsilon > \varepsilon_y \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\varepsilon_y$  为屈服应变; $E_{tan}$  为剪切模量,本文取  $0.2$ ;瑞利阻尼系数  $\alpha = 0.5, \beta = 0$ 。

初始可行设计点  $x_i = 0.2 (i = 1, 2, \dots, 17)$ ,形成的初始复形的最好设计的目标函数值(最大层间相对位移)为  $0.110 \text{ mm}$ ,最差设计的目标函数值为  $0.694 \text{ mm}$ 。对复形的顶点作了 314 次改善后正常收敛,收敛后复形的顶点中最差设计的目标函数为  $0.077 \text{ mm}$ ,最好设计的目标函数为  $0.074 \text{ mm}$ ,可见结构的抗震性能得到了很大的改善。

最好设计  $x_{301} = [470, 475, 363, 408, 255, 217,$

$417, 482, 317, 440, 239, 239, 482, 452, 440, 227, 211]^T (\text{mm})$ ;体积  $V(x_{301}) = 28.13 \text{ m}^3$ 。其三维结构图见图 4。

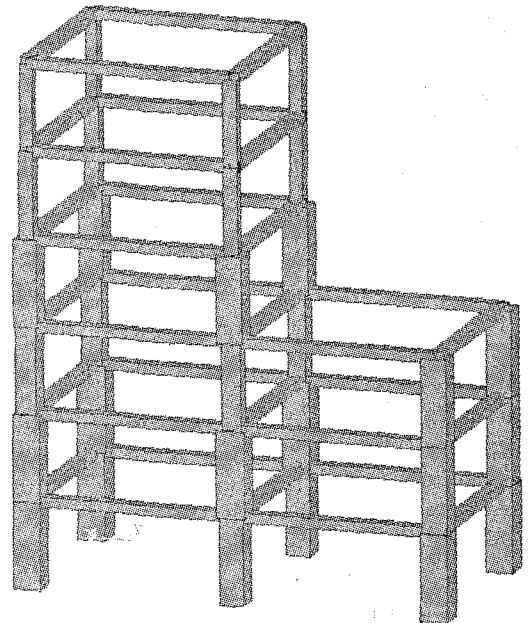


图 4 最好设计  $x_{301}$  三维结构

Fig. 4 3-D structure of the optimum  $x_{301}$ .

如果令  $\zeta = 0$ ,则复形法将永远无法收敛,但可以通过观察  $it$  变量决定是否停机。若经过多次结构分析  $it$  变量仍不增加或长时间  $it$  变量不改变,则输出结果,强行停机。对复形的顶点作了 801 次改善后,复形的顶点已经无法再改善,复形的顶点中最差设计的目标函数为  $0.068\ 3 \text{ mm}$ ,最好设计的目标函数为  $0.068\ 2 \text{ mm}$ ,可见结构的抗震性能得到了进一步的改善。

最好设计  $x_{801} = [494, 464, 426, 356, 259, 207, 478, 480, 341, 410, 226, 204, 491, 494, 442, 228, 217]^T (\text{mm})$ ;体积  $V(x_{801}) = 29.20 \text{ m}^3$ 。其三维结构图见图 5。

假设每个杆件的截面均为  $0.45 \text{ m} \times 0.45 \text{ m}$  的设计,其体积等于  $68 \text{ m}^3$ ,接近许可体积  $[V] = 70 \text{ m}^3$ ,经结构分析后获得其最大层间相对位移为  $0.234 \text{ mm}$ ,而经优化设计后获得的最好设计最大层间相对位移为  $0.068\ 2 \text{ mm}$ ,体积仅为  $29.20 \text{ m}^3$ ,可见通过动力学优化设计获得的最好设计更合理的使用了材料,用较低成本获得较好设计。

收敛或强行停机后,复形的顶点中最差设计与最好设计的目标函数相差是非常小的,可见复形法也许不能获得结构抗震的最优设计,但能获得一系列抗震性能良好的设计,具有很现实的工程意义。

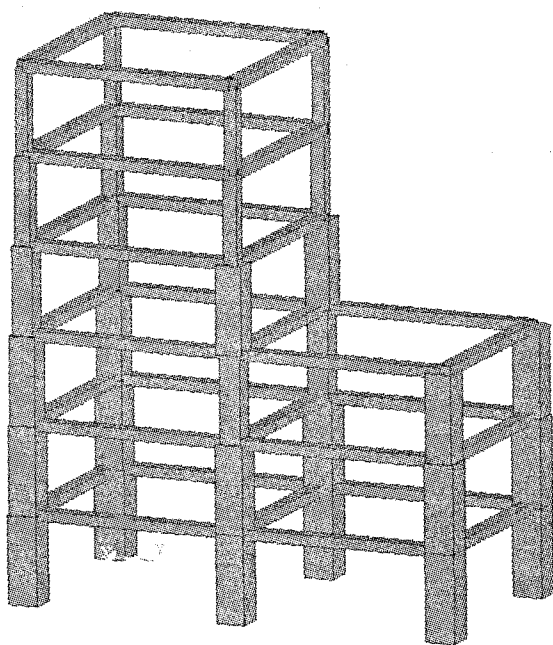


图5 最好设计  $x_{801}$  三维结构

Fig. 5 3-D structure of the optimum  $x_{801}$ .

复形法的计算量也是很大的,如正常收敛的情况,结构重分析的次数至少大于602次(映射点分析1次,中心点分析1次,实际上映射点有可能分析好几次),强行停机情况,结构重分析的次数至少大于1602次,但复形法总是朝更好设计的方向前进,只要  $it$  参数增加,就会获得更好的设计。

#### 4 结论

本文的研究主要针对第三水准“大震不倒”抗震的设防目标,通过对强震作用下框架结构层间相对位移响应的优化,使结构的整体变形最小同时满足体积(重量)的约束,达到在相同成本约束的条件下使结构达到“大震尽可能不倒”的目标。数值算例表明该优化设计方法能获得一系列抗震性能优良的设计,使材料的利用更加合理,用较低成本获得更好的设计。该设计方法可在显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 进行二次开发实现,节省了程序的编写时间,具有现实的工程意义,为结构动力优化设计方法在工程结构抗震设计中的应用开辟了一条途径。结构动力优化设计中结构分析计算量是非常大的,常常让人望而怯步,选用显式中心差分法可明显提高结构分析的效率,降低计算成本,建议选用。复形法虽然是一种较老的(1965年提出)优化设计算法,但当遇到“设计敏感度分析”这一瓶颈时还是一种比较实用、而且是稳定的算法。同时指出,本文的研究只是针对地震作用,在工程的实际应用中还应同

时考虑其他荷载的作用,地震记录最好选用拟建场地的实际的强震记录,并考虑从不同的方向输入地震波。

#### [参考文献]

- [1] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范(GB 50011-2001). 北京:中国工业出版社,2001.
- [2] Yu - Yuan Lin. Statistical study on damping modification factors adopted in Taiwan's seismic isolation design code by using the 21 September 1999 Chi - Chi earthquake, Taiwan [J]. Engineering Structures, 2007, 29: 682-693.
- [3] 杜永峰,李慧,程选生,等. 隔震结构系列研究及在甘肃的工程应用[J]. 西北地震学报, 2005, 27(4): 312-316.
- [4] 李正良,汪之松,李正英,等. 耗能减震结构的复模态矩阵摄动法[J]. 工程力学, 2007, 24(9): 14-18.
- [5] 李兴田,朱东生. 连续梁桥中设置粘弹性阻尼器的减震效果分析[J]. 西北地震学报, 2006, 28(1): 26-30.
- [6] ZHOU Xing-de, CHEN Dao-zheng. Active vibration control of non-linear benchmark buildings [J]. Applied mathematics and Mechanics (English Edition), 2007, 28(4): 487-493.
- [7] 张强,何玉敖. 非线性土木工程振动控制的逆系统方法[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 112-119.
- [8] M Bogomolni, U Kirsch, I Sheinman. Efficient design sensitivities of structure subjected to dynamic loading [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43: 5485-5500.
- [9] Zarghamee M S. Optimum frequency of structures [J]. Journal AIAA, 1968, 6(6): 749-750.
- [10] 陈建军,车建文,崔明涛,等. 结构动力优化设计述评与展望 [J]. 力学进展, 2001, 31(2): 181-192.
- [11] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2001: 17-33.
- [12] Nikos D Lagaros, Michalis Fragiadakis, Manolis Papadrakakis. Structural optimization: A tool for evaluating seismic design procedures [J]. Engineering Structures, 2006, 28: 1623-1633.
- [13] 王进廷,杜修力,张楚汉. 瑞利阻尼介质有限元离散模型动力分析的数值稳定性 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 18-24.
- [14] 包世华. 高层建筑结构计算 [M]. 北京:高等教育出版社, 1991: 179-208.
- [15] 丁彦慧,胡平,张杰. 重大工程抗震设计中实际强震记录的选用研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(5): 103-106 + 67.
- [16] Xiao-Kang Zou, Chun-Man Chan. An optimal resizing technique for seismic drift design of concrete buildings subjected to response spectrum and time history loadings [J]. Computers and Structures, 2005, 83: 1689-1704.
- [17] S Kaliszky, J Lógó. Optimal design of elasto-plastic structures subjected to normal and extreme loads [J]. Computers and Structures, 2006, 84: 1770-1779.
- [18] 朱伯芳,黎展眉,张璧成. 结构优化原理与应用 [M]. 北京:水利电力出版社, 1984: 220-228.