

文章编号:1673-2049(2006)04-0028-06

# 交错桁架结构动力特性的简化分析方法

周期石<sup>1</sup>,周绪红<sup>2</sup>,刘永健<sup>3</sup>

(1. 中南大学 土木建筑学院,湖南 长沙 410075; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院,甘肃 兰州 730000;  
3. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**根据交错桁架结构质量和刚度分布比较均匀的特点,构造了一个与其质量和刚度分布相近的假想结构,并给出了假想结构各阶频率和振型的简化计算公式;基于矩阵摄动理论,给出了交错桁架结构和假想结构之间质量、刚度、自振频率和振型之间的关系表达式及其系数的计算公式,采用该理论对交错桁架结构自振频率、振型及地震效应进行了算例分析。结果表明:该方法避免了迭代计算,计算工作量小,且可以计算结构的各阶自振频率和振型;用该方法计算的自振频率及振型与精确解吻合较好;高层交错桁架结构采用底部剪力法和采用振型分解反应谱法计算的结构作用效应相差明显。

**关键词:**交错桁架结构;自振频率;振型;刚度

**中图分类号:**TU973.15 **文献标志码:**A

## Simplified Analysis Methods of Dynamic Characteristic of Staggered Truss Structure

ZHOU Qi-shi<sup>1</sup>, ZHOU Xu-hong<sup>2</sup>, LIU Yong-jian<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;  
2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;  
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** An imaginary structure whose mass and stiffness were close to staggered truss structure's was created according to that staggered truss structure has more uniformly mass and stiffness distribution, and the simplified design formulas to calculate the frequency and vibration mode of hypothetical structure were proposed. Based on the matrix perturbation theory, the formulas about the relationship expression and the coefficient in the expression of the mass, stiffness, natural vibration frequency, vibration mode between the staggered truss structure and the hypothetical structure were proposed. At last, the theory proposed in this paper was applied to analyze the natural vibration frequency, vibration mode, and earthquake effect of examples. The results show that the method in this paper can prevent the interactive calculation and decrease the calculating work load, and the method can also calculate the respective natural vibration frequency and vibration mode of structure, which has a better coincidence with the accurate method, while the disparity between the structural effect applied with the equivalent base shear method of high-rise staggered truss structure and the structural effect applied with the

收稿日期:2006-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50078021);教育部科学技术研究重点项目(99089);

教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(2000053203)

作者简介:周期石(1972-),男,湖南嘉禾人,讲师,工学博士,E-mail:zhouqs\_919@yahoo.com.cn.

vibration mode superposition method was significant.

**Key words:** staggered truss structure; natural vibration frequency; vibration mode; stiffness

## 0 引言

交错桁架结构体系是一种适用于高而窄建筑的多自由度结构体系。在利用振型分解反应谱法求解弹性范围内动力反应的过程中,需要计算结构的多阶自振频率和振型。对于交错桁架结构来说,通过解频率方程得到结构的自振频率和振型过程是非常复杂的。常用的确定结构自振频率的方法有能量法、邓柯莱法、伽辽金法、折算质量法和矩阵迭代法等<sup>[1-2]</sup>,其中瑞雷法、邓柯莱法和折算质量法用于计算结构的基频近似值比较有效,但不适用于计算结构的高阶频率。瑞雷-李兹法和伽辽金法虽然可以计算结构的基频和高频,但最终还是要求解高次的代数方程才能得出结构的自振频率。矩阵迭代法也可以计算出结构的基频和高阶频率,但迭代计算过程较繁琐,因此,笔者根据交错桁架结构刚度和质量分布较为均匀的特点,在矩阵摄动理论的基础上,讨论交错桁架结构自振频率和振型的简化计算方法。

## 1 自振频率和振型近似计算方法

交错桁架结构的刚度和质量分布比较均匀,如果能方便地求出与实际结构刚度和质量分布相近的结构的自振频率和振型,就可以根据矩阵摄动理论求出实际结构的自振频率和振型的近似值<sup>[3-10]</sup>。

图1(a)为简化后的交错桁架结构的串联质点系模型,以下称之为原结构。图1中, $k_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )为原结构第*i*层的剪切刚度, $m_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )为原结构第*i*层的质量。根据图1(a)构造一个与其层数相同的假想结构,以下称之为假想结构,如图1(b)所示。假想结构的

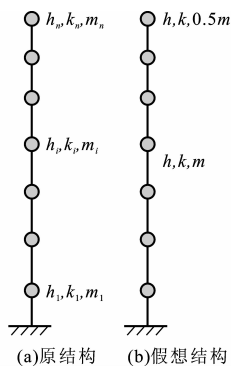


图1 结构计算模型

Fig. 1 Calculation Model of Structure

的剪切刚度 $k = \sum_{i=1}^n k_i / n$ , 质量 $m = \sum_{i=1}^n m_i / (n - 0.5)$ ,

除顶层外,其余各层的质量均为 $m$ 。假想结构的动力方程为

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{u}}_0 + \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{u}}_0 + \mathbf{K}_0 \mathbf{u}_0 = -\mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{A}}_{\dot{g}} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}_0$ 为假想结构的质量矩阵; $\mathbf{K}_0$ 为假想结构的刚度矩阵; $\mathbf{C}_0$ 为假想结构的阻尼矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}_0$ 、 $\dot{\mathbf{u}}_0$ 和 $\mathbf{u}_0$ 分别为假想结构的加速度列向量、速度列向量和位移列向量; $\ddot{\mathbf{u}}_g$ 为地面运动加速度; $\mathbf{A}$ 为各分量均为1的列向量。假想结构的质量矩阵和刚度矩阵分别为

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \\ & & & & 0.5 \end{bmatrix} m \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_0 = \begin{bmatrix} 2 & -1 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -1 & 2 & -1 \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix} k \quad (3)$$

假想结构关于自振频率的方程为

$$(\mathbf{K}_0 - \omega_0^2 \mathbf{M}_0) \Phi_0 = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中: $\omega_0$ 为假想结构的自振频率; $\Phi_0$ 为假想结构的特征向量, $\Phi_0 = (\Phi_0^1, \Phi_0^2, \dots, \Phi_0^n)^T$ 。

令 $1 - \frac{m}{2k} \omega_0^2 = \cos \varphi$ , 式(4)可表示为

$$\begin{bmatrix} 2\cos \varphi & -1 & & & \\ -1 & 2\cos \varphi & -1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -1 & 2\cos \varphi & -1 \\ & & & -1 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_0^1 \\ \Phi_0^2 \\ \vdots \\ \Phi_0^{n-1} \\ \Phi_0^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

若取特征向量的第1个分量 $\Phi_0^1 = \sin \varphi$ , 由式(5)可知假想结构的特征向量的各分量分别为

$$\begin{aligned} \Phi_0^1 &= \sin \varphi, \Phi_0^2 = 2\sin \varphi \cos \varphi = \sin 2\varphi, \\ \Phi_0^3 &= 2\cos \varphi \cdot \Phi_0^2 - \Phi_0^1 = 2\sin 2\varphi \cos \varphi - \sin \varphi = \sin 3\varphi, \dots, \Phi_0^{n-1} = \sin (n-1)\varphi, \Phi_0^n = \sin n\varphi \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可得

$$\cos n\varphi \sin \varphi = 0 \quad (7)$$

由式(7)可知:如果要使特征向量不为 $\mathbf{0}$ ,其必要条件为

$$\cos n\varphi = 0 \quad (8)$$

由式(8)可得

$$\varphi_j = \frac{2j-1}{2n} \pi \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

假想结构的各阶自振频率为

$$\omega_{j0} = 2\sqrt{\frac{k}{m}} \sin \frac{\varphi_j}{2} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

与第  $j$  阶自振频率  $\omega_{j0}$  对应的正交归一特征向量为

$$\Phi_{0j} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{mn}} (\sin \varphi_j, \sin 2\varphi_j, \dots, \sin n\varphi_j)^T \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

原结构关于自振频率的方程可表示为

$$K\Phi = \lambda M\Phi \quad (12)$$

式中:  $K$  为原结构的刚度矩阵;  $M$  为原结构的质量矩阵;  $\lambda$  为原结构的特征值,  $\lambda = \omega^2$ ,  $\omega$  为原结构的自振频率;  $\Phi$  为原结构的振型列向量。

原结构和假想结构的刚度矩阵和质量矩阵之间的关系可表示为

$$M = M_0 + \epsilon M_1 \quad (13)$$

$$K = K_0 + \epsilon K_1 \quad (14)$$

式中:  $\epsilon$  为小参数;  $\epsilon M_1$  和  $\epsilon K_1$  分别为原结构和假想结构的刚度矩阵和质量矩阵的差值。

当  $\epsilon M_1$  和  $\epsilon K_1$  很小时, 原结构的自振频率和振型向量与假想结构自振频率和振型向量相比只有小变化。根据摄动理论, 可将原结构的振型向量和自振频率按小参数  $\epsilon$  展开为幂级数, 即

$$\lambda_j = \lambda_{j0} + \epsilon \lambda_{j1} + \epsilon^2 \lambda_{j2} + \dots + \epsilon^n \lambda_{jn} + \dots \quad (15)$$

$$\Phi_j = \Phi_{0j} + \epsilon \Phi_{1j} + \epsilon^2 \Phi_{2j} + \dots + \epsilon^n \Phi_{nj} + \dots \quad (16)$$

式中:  $\lambda_{j0}$  为假想结构的第  $j$  个特征值,  $\lambda_{j0} = \omega_{j0}^2$ ;  $\lambda_{j1}$  和  $\lambda_{j2}$  分别为特征值的 1 阶摄动值和 2 阶摄动值;  $\Phi_{0j}$  为假想结构的第  $j$  阶振型的振型向量;  $\Phi_{1j}$  和  $\Phi_{2j}$  分别为振型列向量的 1 阶摄动向量和 2 阶摄动向量。

将原结构第  $j$  阶振型向量的 1 阶摄动向量  $\Phi_{1j}$  和 2 阶摄动向量  $\Phi_{2j}$  分别用假想结构的振型  $\Phi_{0s}$  ( $s = 1, 2, \dots, n$ ) 和  $\Phi_{0r}$  ( $r = 1, 2, \dots, n$ ) 表示为

$$\Phi_{1j} = \sum_{s=1}^n C_{1s} \Phi_{0s}, \Phi_{2j} = \sum_{r=1}^n C_{2r} \Phi_{0r} \quad (17)$$

由式(13)~(17), 并根据向量的正交性和归一条件, 可得

$$\lambda_{j1} = \Phi_{0j}^T K_1 \Phi_{0j} - \lambda_{j0} \Phi_{0j}^T M_1 \Phi_{0j} \quad (18)$$

$$\lambda_{j2} = \Phi_{0j}^T K_1 \Phi_{1j} - \lambda_{j1} \Phi_{0j}^T M_0 \Phi_{1j} - \lambda_{j0} \Phi_{0j}^T M_1 \Phi_{1j} - \lambda_{j1} \Phi_{0j}^T M_1 \Phi_{0j} \quad (19)$$

$$\Phi_{1j} = \sum_{s=1, s \neq j}^n \frac{1}{\lambda_{j0} - \lambda_{s0}} (\Phi_{0s}^T K_1 \Phi_{0j} - \lambda_{j0} \Phi_{0s}^T M_1 \Phi_{0j}) \Phi_{0s} - \frac{1}{2} \Phi_{0j}^T M_1 \Phi_{0j} \Phi_{0j} \quad (20)$$

$$\Phi_{2j} = \sum_{r=1, r \neq j}^n \frac{1}{\lambda_{j0} - \lambda_{r0}} (\Phi_{0r}^T K_1 \Phi_{1j} -$$

$$\lambda_{j1} \Phi_{0r}^T M_0 \Phi_{1j} - \lambda_{j0} \Phi_{0r}^T M_1 \Phi_{1j} - \lambda_{j1} \Phi_{0r}^T M_1 \Phi_{0j}) \Phi_{0r} - \frac{1}{2} (\Phi_{1j}^T M_0 \Phi_{1j} + \Phi_{0j}^T M_1 \Phi_{1j} + \Phi_{1j}^T M_1 \Phi_{0j}) \Phi_{0j} \quad (21)$$

综上所述, 摄动法求解结构自振频率和振型的步骤可分为 4 步。

步骤 1: 根据式(10)、(11)分别计算假想结构的各阶自振频率及其振型向量。

步骤 2: 将假想结构与原结构刚度矩阵和质量矩阵之间的关系表示成式(13)、(14)。

步骤 3: 利用式(18)、(19)计算原结构第  $j$  阶振型的自振频率 1 阶和 2 阶摄动向量, 利用式(20)、(21)计算原结构第  $j$  阶振型的振型向量的 1 阶和 2 阶摄动向量。

步骤 4: 根据式(15)计算原结构各阶自振频率及其振型向量。

根据本文方法计算出结构自振频率和振型后, 便可采用中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2001)进行结构抗震作用计算。

## 2 算 例

以文献[11]中的 20 层交错桁架结构为例, 并假定第 1~19 层的重力荷载代表值为 6 kPa, 顶层的重力荷载代表值为 3.5 kPa, 抗震设防烈度为 8 度, 场地类别为 III 类, 地震分组为第 2 组, 研究结构横向振动方向的自振频率、振型向量以及采用底部剪力法和振型分解反应谱法对结构作用效应的影响。计算中未标注单位的物理量均采用国际单位制。

根据文献[11]中结构的楼层侧移刚度, 结构的刚度矩阵可表示为

$$K = \begin{bmatrix} k_1^2 & k_1^1 & & & & \\ k_1^1 & k_2^2 & k_2^1 & & & \\ & k_2^1 & k_3^2 & k_3^1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & k_{18}^1 & k_{19}^2 & k_{19}^1 \\ & & & & k_{19}^1 & k_{20}^2 \end{bmatrix} \times 10^9 \quad (22)$$

式中:  $k_1^1, k_2^1, \dots, k_{19}^1$  分别为 -1.160 082, -1.137 880, -1.143 522, -1.136 898, -1.145 142, -1.130 824, -1.138 808, -1.182 290, -1.141 912, -1.121 770, -1.135 222, -1.110 842, -1.136 410, -1.080 152, -1.097 950, -1.060 818, -1.065 646, -1.057 482, -1.068 878;  $k_1^2, k_2^2, \dots, k_{19}^2, k_{20}^2$  分别为 2.073 264, 2.531 962, 2.515

402,2.514 420,2.516 040,2.509 966,2.503 632,2.555 098,2.558 202,2.497 682,2.490 992,2.480 040,2.481 252,2.450 562,2.412 102,2.392 768,2.360 464,2.357 128,2.360 360,1.198 878。

结构的质量矩阵为

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}m_1&&&&\\&m_2&&&\\&&\ddots&&\\&&&\ddots&\\&&&&m_{20}\end{bmatrix}\times10^5\tag{23}$$

式中: $m_1,m_2,\cdots,m_{19},m_{20}$  分别为 8.026 800,8.026 800, $\cdots$ ,8.026 800,4.682 300。

假想结构每层的刚度取原结构各层刚度的平均值,即为  $1.226\,579\times10^9$ ,则假想结构的刚度矩阵为

$$\boldsymbol{K}_0=\begin{bmatrix}2&-1&&&\\-1&2&-1&&\\&\ddots&\ddots&\ddots&\\&&-1&2&-1\\&&&-1&1\end{bmatrix}\times1.226\,579\times10^9\tag{24}$$

假想结构第 1~19 层的质量取原结构各层的质量之和除以 19.5,即  $\sum_{i=1}^{20}m_i/19.5$ ,顶层的质量取  $\sum_{i=1}^{20}m_i/(19.5\times2)$ ,其质量矩阵为

$$\boldsymbol{M}_0=\begin{bmatrix}1&&&&\\&1&&&\\&&\ddots&&\\&&&1&\\&&&&0.5\end{bmatrix}\times8.061\,100\times10^5\tag{25}$$

根据式(13)、(14),并取  $\epsilon=0.1$ ,原结构和假想结构的质量矩阵和刚度矩阵的关系可表示为

$$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{M}_0+0.1\boldsymbol{M}_1\tag{26}$$

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{K}_0+0.1\boldsymbol{K}_1\tag{27}$$

$$\boldsymbol{M}_1=\begin{bmatrix}\overline{m}_1&&&&\\&\overline{m}_2&&&\\&&\ddots&&\\&&&\ddots&\\&&&&\overline{m}_{20}\end{bmatrix}\times10^5\tag{28}$$

$$\boldsymbol{K}_1=\begin{bmatrix}\overline{k}_1^2&k_1^1&&&\\ \overline{k}_1^1&\overline{k}_2^2&\overline{k}_2^1&&\\ &\overline{k}_2^1&\overline{k}_3^2&\overline{k}_3^1&\\ &&\ddots&\ddots&\ddots\\ &&&\overline{k}_{18}^1&\overline{k}_{19}^2&\overline{k}_{19}^1\\ &&&&\overline{k}_{19}^1&\overline{k}_{20}^2\end{bmatrix}\times10^9\tag{29}$$

式中: $\overline{m}_1,\overline{m}_2,\cdots,\overline{m}_{19},\overline{m}_{20}$  分别为  $-0.343\,00$ ,

$-0.343\,00,\cdots,-0.343\,00,6.517\,5;\overline{k}_1^1,\overline{k}_2^1,\cdots,\overline{k}_{19}^1$  分别为  $-0.635\,03,-0.413\,01,-0.469\,43,-0.403\,19,-0.485\,63,-0.342\,45,-0.422\,29,-0.857\,11,-0.453\,33,-0.251\,91,-0.386\,43,-0.142\,63,-0.398\,31,0.164\,27,-0.013\,71,0.357\,61,0.309\,33,0.390\,97,0.277\,01;\overline{k}_1^2,\overline{k}_2^2,\cdots,\overline{k}_{19}^2,\overline{k}_{20}^2$  分别为  $-3.540\,24,1.048\,04,0.882\,44,0.872\,62,0.888\,82,0.828\,08,0.764\,74,1.279\,40,1.310\,44,0.705\,24,0.637\,64,0.529\,06,0.540\,94,0.234\,04,-0.151\,56,-0.343\,90,-0.666\,94,-0.700\,30,-0.667\,98,-0.277\,01$ 。

根据式(15)、(16)、式(18)~(21)和式(24)~(29)计算出的假想结构和原结构的自振周期见表 1(限于篇幅,只列出 1 阶振型和 2 阶振型),表 1 中的精确解通过求解结构的频率方程获得。从表 1 可以看出:当假想结构的质量和刚度大小及分布与原结构相差不大时,原结构的自振频率与假想结构的自振频率相差较小;在该算例中,通过 1 阶摄动后所求得的自振频率与精确解很接近,2 阶摄动后即可得到与求解频率方程得到的自振频率相同的解。表 2 为假想结构振型计算结果和原结构的振型 1 阶摄动

表 1 假想结构与原结构的自振周期

Tab. 1 Natural Vibration Period of Hypothetical Structure and Original Structure

| 振型阶数 | 假想结构    | 原结构<br>1 阶摄动 | 原结构<br>2 阶摄动 | 精确解     |
|------|---------|--------------|--------------|---------|
| 1    | 2.051 4 | 2.077 8      | 2.077 9      | 2.077 9 |
| 2    | 0.685 2 | 0.698 4      | 0.698 5      | 0.698 5 |
| 3    | 0.412 8 | 0.420 3      | 0.420 5      | 0.420 5 |
| 4    | 0.296 7 | 0.302 0      | 0.302 1      | 0.302 1 |
| 5    | 0.232 7 | 0.235 8      | 0.235 9      | 0.235 9 |
| 6    | 0.192 4 | 0.195 1      | 0.195 0      | 0.195 0 |
| 7    | 0.164 8 | 0.166 3      | 0.166 4      | 0.166 4 |
| 8    | 0.145 0 | 0.145 8      | 0.145 9      | 0.145 9 |
| 9    | 0.130 1 | 0.131 0      | 0.130 9      | 0.130 9 |
| 10   | 0.118 6 | 0.119 1      | 0.119 1      | 0.119 1 |
| 11   | 0.109 7 | 0.109 5      | 0.109 6      | 0.109 6 |
| 12   | 0.102 6 | 0.102 3      | 0.102 5      | 0.102 5 |
| 13   | 0.096 9 | 0.096 6      | 0.096 7      | 0.096 7 |
| 14   | 0.092 3 | 0.092 0      | 0.092 0      | 0.092 0 |
| 15   | 0.088 7 | 0.088 2      | 0.088 2      | 0.088 2 |
| 16   | 0.085 8 | 0.085 5      | 0.085 5      | 0.085 5 |
| 17   | 0.083 7 | 0.083 4      | 0.083 4      | 0.083 4 |
| 18   | 0.082 1 | 0.081 8      | 0.081 8      | 0.081 8 |
| 19   | 0.081 1 | 0.080 6      | 0.080 6      | 0.080 6 |
| 20   | 0.080 6 | 0.079 3      | 0.079 3      | 0.079 3 |

解和精确解,由表 2 可以看出,通过 1 阶摄动后,振型结果与精确解相差较小。

根据本文中计算出的自振周期和振型及中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2001),分别采用底

表 2 假想结构与原结构的振型表征参数

| Tab. 2 Vibration Mode Token Parameters of Hypothetical Structure and Original Structure |         |           |         | 10 <sup>-3</sup> |          |           |          |
|---|---------|-----------|---------|------------------|----------|-----------|----------|
| 振型阶数  | 假想结构    | 原结构 1 阶摄动 | 精确解     | 振型阶数             | 假想结构     | 原结构 1 阶摄动 | 精确解      |
| 1   | 0.027 6 | 0.037 1   | 0.041 3 | 2                | 0.082 2  | 0.108 4   | 0.119 5  |
|   | 0.055 1 | 0.063 1   | 0.066 9 |                  | 0.159 9  | 0.178 9   | 0.187 8  |
|   | 0.082 2 | 0.089 2   | 0.092 6 |                  | 0.228 7  | 0.241 4   | 0.248 0  |
|   | 0.108 8 | 0.114 7   | 0.117 7 |                  | 0.284 9  | 0.291 1   | 0.295 4  |
|   | 0.134 8 | 0.139 7   | 0.142 2 |                  | 0.325 4  | 0.326 0   | 0.327 8  |
|   | 0.159 9 | 0.163 7   | 0.165 8 |                  | 0.347 9  | 0.343 7   | 0.343 4  |
|   | 0.184 0 | 0.186 9   | 0.188 6 |                  | 0.351 1  | 0.343 7   | 0.341 4  |
|   | 0.207 0 | 0.209 0   | 0.210 2 |                  | 0.335 0  | 0.325 8   | 0.321 9  |
|   | 0.228 7 | 0.229 0   | 0.229 9 |                  | 0.300 3  | 0.292 2   | 0.287 2  |
|   | 0.249 1 | 0.248 4   | 0.248 9 |                  | 0.249 1  | 0.242 4   | 0.236 7  |
|   | 0.267 8 | 0.266 6   | 0.266 8 |                  | 0.184 0  | 0.179 0   | 0.173 1  |
|   | 0.284 9 | 0.283 1   | 0.282 9 |                  | 0.108 8  | 0.106 9   | 0.101 3  |
|   | 0.300 3 | 0.298 1   | 0.297 7 |                  | 0.027 6  | 0.026 7   | 0.022 8  |
|   | 0.313 8 | 0.311 1   | 0.310 4 |                  | −0.055 1 | −0.055 2  | −0.055 3 |
|   | 0.325 4 | 0.322 8   | 0.321 9 |                  | −0.134 8 | −0.134 3  | −0.134 1 |
|   | 0.335 0 | 0.332 4   | 0.331 2 |                  | −0.207 0 | −0.203 0  | −0.204 6 |
|   | 0.342 5 | 0.340 1   | 0.338 8 |                  | −0.267 8 | −0.265 7  | −0.266 2 |
|   | 0.347 9 | 0.345 7   | 0.344 3 |                  | −0.313 8 | −0.313 4  | −0.313 0 |
|   | 0.351 1 | 0.349 2   | 0.347 7 |                  | −0.342 5 | −0.342 8  | −0.343 1 |
|   | 0.352 2 | 0.350 5   | 0.349 0 |                  | −0.352 2 | −0.355 5  | −0.354 3 |

部剪力法和振型分解反应谱法计算出的结构层间剪力如图 2 所示,从图 2 中可以看出,采用底部剪力法计算的层间剪力与采用振型分解反应谱法的计算结果相差明显。

构采用底部剪力法和采用振型分解反应谱法计算的结构作用效应相差明显。

参考文献:  
References:

[ 1 ] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,1988.  
HU Yu-xian. Earthquake Engineering [M]. Beijing: Earthquake Press,1998.

[ 2 ] 陈塑寰. 随机参数结构的振动理论[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1992.  
CHEN Su-huan. Vibration Theory of Random Parameter Structure [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press,1992.

[ 3 ] 胡海昌. 多自由度结构的固有振动理论[M]. 北京:科学出版社,1987.  
HU Hai-chang. Natural Vibration Theory of Multiple Degree of Freedom Structure [M]. Beijing: Science Press,1987.

[ 4 ] 廖河山. 框架结构抗震设计的简化分析方法[J]. 世界地震工程,1999,15(3):52-62.  
LIAO He-shan. A Simplified Analytical Method on Seismic Design of Frame Structures[J]. World Infor-

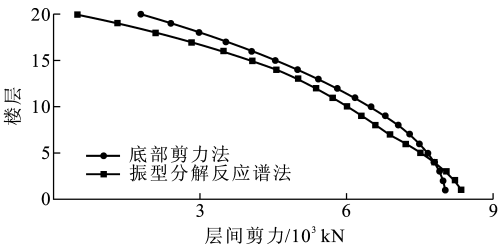


图 2 20 层交错桁架结构层间剪力计算结果  
Fig. 2 Calculation Result of Interlayer Shear of 20-Story Staggered Truss Structure

3 结 语

笔者提出了一种计算交错桁架结构地震作用中计算自振频率和自振周期的简化方法,算例分析表明:本文方法不但能计算各阶自振频率和自振周期,且避免了迭代计算,计算工作量大;本文方法计算自振频率和振型与精确解吻合较好;高层交错桁架结

- mation on Earthquake Engineering, 1999, 15(3): 52-62.
- [5] 刘伯权,潘元. 框架-抗震墙结构抗震墙抗弯刚度的优化研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 55-57.  
LIU Bo-quan, PAN Yuan. Study on Optimum Bending Rigidity of Seismic Wall in Frame-Shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 55-57.
- [6] 沈蒲生,刘杨. 水平地震作用下框支剪力墙结构的变形研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 58-63.  
SHEN Pu-sheng, LIU Yang. Distortion Research of Shear Wall Structure Supported on Frame Under Earthquake Actions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 58-63.
- [7] 张永健,黄平明. 考虑剪力滞效应的简支箱梁自振特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 40-42.  
ZHANG Yong-jian, HUANG Ping-ming. Free Vibration Characteristics of Simply Supported Box Girder with Effect of Shear Lag[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 40-42.
- [8] 沈蒲生,孟焕陵. 框筒结构梁柱截面基于剪力滞最小的合理高度[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 16-19.  
SHEN Pu-sheng, MENG Huan-ling. Reasonable Section Height of Beam and Column Based on the Minimum Shear Lag in Framed Tube Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 16-19.
- [9] 陈政清. 斜拉索风雨振现场观测与振动控制[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 5-10.  
CHEN Zheng-qing. On-Site Observation of Wind-Rain Induced Vibration of Stay Cables and Its Control[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 5-10.
- [10] 郭军庆,王雪韵,雷自学,等. 加芯混凝土框架柱轴压比限值试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 45-49.  
GUO Jun-qing, WANG Xue-yun, LEI Zi-xue, et al. Experimental Research on Limit Value of Axial Compression Ratio for Concrete Frame Columns with Central Reinforcement[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 45-49.
- [11] 周绪红,周期石. 水平荷载作用下交错桁架结构的内力和侧移计算[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 66-71.  
ZHOU Xu-hong, ZHOU Qi-shi. Calculation of Internal Forces and Drift of Staggered Truss Structure Under Lateral Loads[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(4): 66-71.
- (上接第18页)
- [7] 刘伯权,潘元. 框架-抗震墙结构抗震墙抗弯刚度的优化研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 55-57.  
LIU Bo-quan, PAN Yuan. Study on Optimum Bending Rigidity of Seismic Wall in Frame-Shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 55-57.
- [8] 沈蒲生,刘杨. 水平地震作用下框支剪力墙结构的变形研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 58-63.  
SHEN Pu-sheng, LIU Yang. Distortion Research of Shear Wall Structure Supported on Frame Under Earthquake Actions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 58-63.
- [9] 张生录,惠会清. 钢筋混凝土灌注桩试桩静载试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 66-68.  
ZHANG Sheng-lu, HUI Hui-qing. Plate Loading Test of Reinforced Concrete Pile[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 66-68.
- [10] 贺拴海,任伟. 纤维增强塑料加固混凝土结构研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 20-24.  
HE Shuan-hai, REN Wei. Research on Reinforced Concrete Structure with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 20-24.
- [11] 马玉平,马昕,崔建涛. 高强度混凝土试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 67-69.  
MA Yu-ping, MA Xin, CUI Jian-tao. Experimental Research on High-Strength Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 67-69.
- [12] 贺拴海,吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 71-75.  
HE Shuan-hai, LU Ying-zhao. Reliability Research of Existing Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 71-75.