三维样条小波单元构造及其在地下箱型结构抗爆数值模拟中的应用

孙惠香[1]，许金余[1]，康 婷[1]，齐 勇[2]，刘远飞[1]

（1. 空军工程大学航空航天工程学院，陕西 西安 710038；2. 空军工程大学营房处，陕西 西安 710044 ）

摘要：由于材料的奇异性和加载的快速性，传统有限元在模拟爆炸荷载作用下地下结构动力响应过程中容易出现数值震荡，单元划分较多，计算效率低．小波有限元具有多尺度、多分辨率等特性，可以通过提高尺度函数阶数或小波函数的尺度来提高精度．用区间 B 样条尺度函数作为插值函数，推导了三维小波转换矩阵，构造了三维区间 B 样条小波单元，结合工程实例通过 Matlab 软件编程，对爆炸荷载作用地下箱形结构的动力响应进行了数值模拟，通过与 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序模拟结果进行对比，小波有限元用较少的单元获得了较高的精度，提高了计算效率，避免了数值震荡．

关键词：爆炸荷载；地下箱形结构；动力响应；区间 B 样条小波，单元构造

中图分类号： **文献标志码：**A **文章编号：**1006-7930(2014)06-0816-06

用传统有限元对 6 m 跨地下支护结构进行爆炸荷载作用下的模拟计算时，计算结果出现了数值震荡，如图 1．主要是因为爆炸荷载的加载速度非常快，加载梯度增大，荷载突增．此外，混凝土与岩石的应力应变关系具有奇异性，这些给传统有限元带来了无法解决的问题．

小波有限元是将小波与传统有限元相结合，利用小波函数或尺度函数作为插值函数构造单元，使问题的求解在一个嵌套序列中进行，利用小波多分辨率的特性，在求解变化平缓区域采用较小的分析尺度以提高分析效率．由于小波函数具有多尺度、多分辨率与紧支性等特性，小波有限元是近年来得到迅速发展的一种数值分析方法，可以解决有限元分析中最难以处理的工程奇异性问题[1]，样条函数是 80 年代发展起来的现代函数逼近的一个重要的分支[2-3]，是现代数值计算的重要基础，具有连续性强、待定系数少、高精度和高计算效率等优点，目前为止已经具有完备的计算理论，所以样条小波是将样条函数与小波理论相结合的产物，集样条函数逼近精度、效率高和小波多分辩特性等优点于一体，开辟了数值计算的新领域．由于一个区间 B 样条小波单元能够求出很多个内部和边界节点值，同时，小波单元具有良好的数值逼近性，因此在计算中可以用较少的单元获得较高的精度．

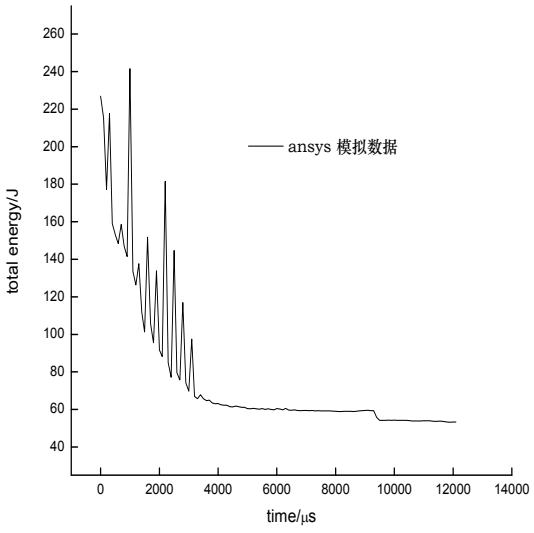

图 1 总的能量曲线
Fig. 1 The total energy curve

国内外学者对样条小波做了大量研究．Chen W H 将小波与有限元相结合，构造了样条小波单元[1]，美国学者 Chui 和 Quak 构造了[0，1]区间上的 B 样条小波，生成了有限区间上的多分辨分析，并给出了快速分解和重构算法．何正嘉、向家伟、陈雪峰等对区间 B 样条小波一维、二维单元的构造进行了详细研究[4-7]．

岩石地下结构地质条件复杂，爆炸荷载作用下地下结构的动力响应，是军事地下工程重要的研究课题，也是一个非常复杂的力学变化过程，其中包含了多重非线性，目前，国内外应用小波有限元进行数值模拟研究的文献很少，本文推导了小波三维转换矩阵，构造了三维实体小波单元，并通过 Matlab 编程将其应用在爆炸荷载作用下的地下箱型结构的动力响应模拟中，很好的解决了数值震荡问题．

收稿日期：2014-06-25 **修改稿日期：**2014-12-04
基金项目：国家自然科学基金项目（51208506，51308540）
作者简介：孙惠香，（1975-），女，副教授．主要从事结构工程和防护工程方面的研究．E-mail：sunhx7504@sina.com

1 三维区间 B 样条小波单元构造

1.1 三维小波转换矩阵推导

三维区间样条六面体单元如图 2 所示，根据文献 1 的求解思路．单元边值问题用 $L(u(x,y,z))=f(x,y,z)\in\Omega$ 表示．对六面体 Ω 求解域进行离散化，将 Ω 求解域映射为 $\Omega_e=\{\xi,\eta,\zeta|\xi,\eta,\zeta\in[0,1]\}$．采用三维张量积区间 B 样条函数尺度函数为插值函数，求解域划分为 $n\times n\times n$ 个网格，节点数为 $(n+1)\times(n+1)\times(n+1)$ 个．则未知场函数 $u(\xi,\eta,\zeta)$ 可以用式（1）表示

$$u(\xi,\eta,\zeta)=\Phi a^e \tag{1}$$

式中，Φ 为小波插值基函数．

$$\Phi=\Phi_1\otimes\Phi_2\otimes\Phi_3 \tag{2}$$

式中：$\Phi_1,\Phi_2,$和Φ_3分别为 m 阶 j 尺度下的一维小波尺度函数．a^e 为待求的小波插值系数列向量．

令 $\xi_i=(i-1)/n$；$\eta_i=(i-1)/n$；$\zeta_i=(i-1)/n$；

$i,j=1,2,\cdots,n+1$为标准求解域中各节点的坐标值，

设物理自由度列向量：$u^e=[u_1^e\cdots u_{i1}^e\cdots u_{n+1}^e]^{\mathrm{T}}$ (3)

可以得到：$$u^e=R^e a^e \tag{4}$$

式中：$$R^e=R_1^e\times R_2^e\times R_3^e \tag{5}$$

其中：
$$\begin{cases} R_1^e=[\Phi_1^{\mathrm{T}}(\xi_1)\Phi_1^{\mathrm{T}}(\xi_2)\cdots\Phi_1^{\mathrm{T}}(\xi_{n+1})]^{\mathrm{T}} \\ R_2^e=[\Phi_2^{\mathrm{T}}(\eta_1)\Phi_2^{\mathrm{T}}(\eta_2)\cdots\Phi_2^{\mathrm{T}}(\eta_{n+1})]^{\mathrm{T}} \\ R_3^e=[\Phi_3^{\mathrm{T}}(\zeta)\Phi_3^{\mathrm{T}}(\zeta_2)\cdots\Phi_3^{\mathrm{T}}(\zeta_{n+1})]^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{6}$$

令 $$u(\xi,\eta,\zeta)=N^e u^e \tag{7}$$

由公式（1）和公式（4），可得到三维C_0型转换矩阵：

$$T^e=(R^e)^{-1} \tag{8}$$

形函数 $$N^e=\Phi T^e \tag{9}$$

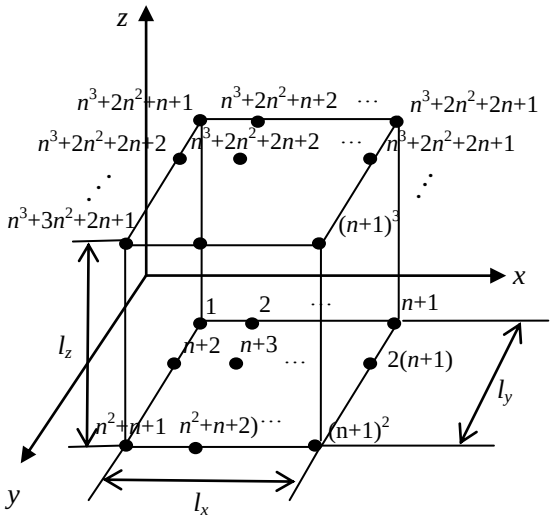

图 2 三维样条单元
Fig.2 Three-way interval B-spline sector wavelet element

1.2 三维区间 B 样条小波单元构造

1.2.1 能量泛函分析

对于爆炸强动荷载作用下的结构分析，必须考虑惯性力的动力效应，设 c 为阻尼粘滞系数，ρ 为拱的密度，三维几何方程为[8]

$$\varepsilon=LV=\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & & & \\ & \frac{\partial}{\partial y} & & \\ & & \frac{\partial}{\partial z} & \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & & \\ & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \\ \frac{\partial}{\partial z} & & \frac{\partial}{\partial x} & \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}=[B][u] \tag{10}$$

应力矩阵为

$$\sigma=[\sigma_x\ \sigma_y\ \sigma_z\ \tau_{xy}\ \tau_{zy}\ \tau_{zx}]=D_\varepsilon \tag{11}$$

其中，三维本构矩阵为

$$[D]=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix}1-\nu & \nu & \text{对称} & & & \\ \nu & 1-\nu & & & & \\ \nu & \nu & 1-\nu & & & \\ & & & \dfrac{1-2\nu}{2} & & \\ 0 & & & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2} & \\ & & & 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2}\end{bmatrix} \tag{12}$$

设求解域上的体分布力为 f，面分布力为 q，集中力为 F_i．则某一瞬时单元的总能量泛函为：

$$\begin{aligned}\Pi_P &= \int_\Omega \frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}\sigma \mathrm{d}\nu + \int_\Omega c\dot{u}\,\mathrm{d}\nu + \int_\Omega \rho\,\ddot{u}\mathrm{d}\nu - \int_\Omega u^{\mathrm{T}} f\mathrm{d}\nu - \int_{s_\Omega} u^{\mathrm{T}} q\mathrm{d}s - \sum F_i u_i \\ &= \frac{1}{2}u^{\mathrm{T}}\int_A^B B^{\mathrm{T}}DBu\mathrm{d}\nu + u^{\mathrm{T}}C\dot{u} + u^{\mathrm{T}}M\ddot{u} - u^{\mathrm{T}}F \\ &= \frac{1}{2}u^{\mathrm{T}}Ku + u^{\mathrm{T}}C\dot{u} + u^{\mathrm{T}}M\ddot{u} - u^{\mathrm{T}}F\end{aligned} \tag{13}$$

1.2.2 运动微分方程和小波单元刚度

对于拱形结构来说，要对 x，y，z 方向位移分别独立插值，分别令

$$\begin{cases}u = N^e u^e = \Phi T^e u^e \\ v = N^e v^e = \Phi T^e v^e \\ w = N^e w^e = \Phi T^e w^e\end{cases} \tag{14}$$

将式 (7)、(9) 代入 (10) 则：

$$B=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{l_{ex}}\dfrac{\partial \Phi}{\partial \xi} & & \\ & \dfrac{1}{l_{ey}}\dfrac{\partial \Phi}{\partial \eta} & \\ & & \dfrac{1}{l_{ez}}\dfrac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \\ \dfrac{1}{l_{ey}}\dfrac{\partial \Phi}{\partial \eta} & \dfrac{1}{l_{ex}}\dfrac{\partial \Phi}{\partial \xi} & \\ & \dfrac{1}{l_{ez}}\dfrac{\partial \Phi}{\partial \zeta} & \dfrac{1}{l_{ey}}\dfrac{\partial \Phi}{\partial \eta} \\ \dfrac{1}{l_{ez}}\dfrac{\partial \Phi}{\partial \zeta} & & \dfrac{1}{l_{ex}}\dfrac{\partial \Phi}{\partial \xi}\end{bmatrix}T^e \tag{15}$$

将单元求解域映射到标准求解域 $\Omega_{(0,1)}$，将 (4)、(10) (12) (15) 代入 (13)，由瞬时变分原理[8] 令 $\delta\Pi_p = 0$ 可以得到：

$$K\delta u + C\delta\dot{u} + M\delta\ddot{u} - F = 0 \tag{16}$$

其中：

$$K^e = l_{ex}l_{ey}l_{ez}\int_{\Omega_{(0,1)}} B^{\mathrm{T}}DB\,\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta \tag{17}$$

$$F^e = l_{ex}l_{ey}l_{ez}\Big(\int_{\Omega_{(0,1)}} N^{e\mathrm{T}} f\,\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta + \int_{s_\Omega} qN^{e\mathrm{T}}\,\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta\Big) + \sum_i N^{e\mathrm{T}}F_i \tag{18}$$

$$M^e = l_{ex}l_{ey}l_{ez}\int_{\Omega_{(0,1)}} \rho N^{e\mathrm{T}}N^e\,\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta \tag{19}$$

$$C^e = l_{ex}l_{ey}l_{ez}\int_{\Omega_{(0,1)}} cN^{e\mathrm{T}}N\,\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta \tag{20}$$

其中：

$$K^e = \begin{bmatrix} K^{e,11} & K^{e,12} & K^{e,13} \\ K^{e,21} & K^{e,22} & K^{e,23} \\ K^{e,31} & K^{e,32} & K^{e,33} \end{bmatrix} \tag{21}$$

经计算可以得到刚度矩阵每一元素的工程显式如下.

$$k^{e,11} = l_{ex}l_{ey}l_{ez}\frac{ET^{e\mathrm{T}}}{(1+\nu)(1-2\nu)}\int_{\Omega_{(0,1)}}\left[\frac{1}{l_{ex}^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\xi^2}(1-\nu)+\frac{1}{l_{ey}^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\eta^2}\frac{1-2\nu}{2}+\frac{1}{l_{ez}^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\zeta^2}\frac{1-2\nu}{2}\right]\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta T^e$$

$$k^{e,12} = \frac{l_{ex}l_{ey}l_{ez}ET^{e\mathrm{T}}}{(1+\nu)(1-2\nu)}\int_{\Omega_{(0,1)}}\left[\frac{1}{l_{ex}}\frac{1}{l_{ey}}\frac{\partial\Phi}{\partial\xi}\frac{\partial\Phi}{\partial\eta}\nu+\frac{1}{l_{ex}}\frac{1}{l_{ey}}\frac{\partial\Phi}{\partial\xi}\frac{\partial\Phi}{\partial\eta}\frac{1-2\nu}{2}\right]\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta T^e$$

$$k^{e,13} = \frac{l_{ey}ET^{e\mathrm{T}}}{(1+\nu)(1-2\nu)}\int_{\Omega_{(0,1)}}\frac{\partial\Phi}{\partial\xi}\frac{\partial\Phi}{\partial\zeta}\frac{1-2\nu}{2}d\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta T^e$$

$$k^{e,21} = \frac{l_{ex}l_{ey}l_{ez}ET^{e\mathrm{T}}}{(1+\nu)(1-2\nu)}\int_{\Omega_{(0,1)}}\left[\frac{1}{l_{ex}}\frac{1}{l_{ey}}\frac{\partial\Phi}{\partial\xi}\frac{\partial\Phi}{\partial\eta}\nu+\frac{1}{l_{ex}}\frac{1}{l_{ey}}\frac{\partial\Phi}{\partial\xi}\frac{\partial\Phi}{\partial\eta}\frac{1-2\nu}{2}\right]\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta T^e$$

$$k^{e,22} = \frac{l_{ex}l_{ey}l_{ez}ET^{e\mathrm{T}}}{(1+\nu)(1-2\nu)}\int_{\Omega_{(0,1)}}\left[\frac{1}{l_{ey}^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\eta^2}(1-\nu)+\frac{1}{l_{ey}^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\xi^2}\frac{1-2\nu}{2}+\frac{1}{l_{ez}^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\zeta^2}\frac{1-2\nu}{2}\right]\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta T^e$$

$$k^{e,23} = \frac{l_{ex}ET^{e\mathrm{T}}}{(1+\nu)(1-2\nu)}\int_{\Omega_{(0,1)}}\frac{\partial\Phi}{\partial\eta}\frac{\partial\Phi}{\partial\zeta}\frac{1-2\nu}{2}\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta T^e$$

$$k^{e,31} = \frac{l_{ey}ET^{e\mathrm{T}}}{(1+\nu)(1-2\nu)}\int_{\Omega_{(0,1)}}\left[\frac{\partial\Phi}{\partial\xi}\frac{\partial\Phi}{\partial\zeta}\frac{3-4\nu}{2}\right)\right]\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta T^e$$

$$k^{e,32} = \frac{l_{ex}ET^{e\mathrm{T}}}{2(1+\nu)(1-2\nu)}\int_{\Omega_{(0,1)}}\frac{\partial\Phi}{\partial\eta}\frac{\partial\Phi}{\partial\zeta}\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta T^e$$

$$k^{e,33} = \frac{l_{ex}l_{ey}l_{ez}ET^{e\mathrm{T}}}{(1+\nu)(1-2\nu)}\int_{\Omega_{(0,1)}}\left[\frac{1}{l_{ez}}\frac{1}{l_{ez}}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\zeta^2}(1-\nu)+\right.$$

$$\left.\frac{1}{l_{ex}}\frac{1}{l_{ex}}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\xi^2}\frac{1-2\nu}{2}+\frac{1}{l_{ey}}\frac{1}{l_{ey}}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\eta^2}\frac{1-2\nu}{2}\right]\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\zeta T^e$$

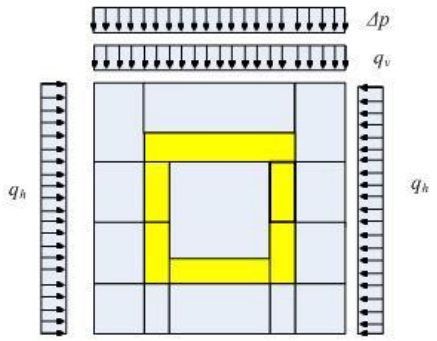

图 3 支护结构和围岩的单元划分

Fig3. The element of supporting structure and adjoining rock

式（21）同样适用于非线性分析，只要将本构矩阵换作非线性本构矩阵即可.

2 爆炸模拟研究

现对埋深为 30 m，跨度为 6 m 的地下箱形硐室进行爆炸荷载作用下小波有限元模拟，直墙高度为 6 m.支护结构为 1 m 的钢筋混凝土结构,混凝土标号为 C 40,钢筋为 HRB 400 级钢筋,围岩类别为白云岩.具体参数见表 1．炸药为 101.875 kgTNT 炸药，密度为 1 630 kg/m^3，爆速为 6 717 m/s，在垂直拱顶 2m 处爆炸（见图 3）.

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameter

Material	ρ/kg·m^{-3}	E/GPa	ν	F_c/MPa	ε_u	F_t/MPa
白云岩	2 400	13.0	0.27	83	0.003	2.45
混凝土	2 400	32.5	0.27	19.1	0.002 2	2.0
钢　筋	7 850	200.0	0.27	360	6.75	360

区间 B 样条函数的表达式为

$$\phi_{m,k}^{l}(\xi)=\begin{cases}\phi_{m,k}^{l}(2^{j-l}\xi), & k=-m+1,\cdots,-1(0\text{边界})\\ \phi_{m,k}^{l}(2^{j-l}\xi), & k=-m+1,\cdots,-1(0\text{边界})\\ \phi_{m,0}^{l}(2^{j-l}\xi-2^{-l}k), & k=0,\cdots,2^{j}-m(\text{内部})\end{cases} \tag{22}$$

取硐室两边各 3 m，硐室顶部 2 m 断面，长度为 3 m 的结构进行三维模拟，用阶数 $m=2$，尺度 $j=3$ 的尺度函数构造单元，由于结构对称，取一半建模，围岩和支护结构分别划分为 7 个和 4 个三维小波单元（长度方向 1 个单元，黄色部分为支护结构）．每个单元的节点数为 9 个节点，节点为等间距排列，阶数 $m=2$，尺度 $j=3$ 的尺度函数有 9 个，边界小波有 2 个，内部尺度函数为 7 个，具体参见文献[1]，节点排列见图 4．

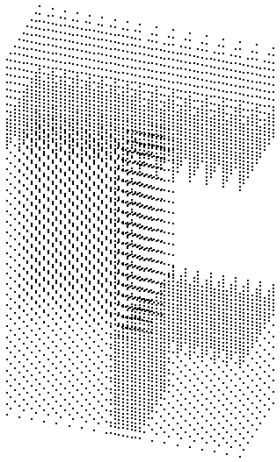

图 4 模拟模型节点排列

Fig4. The nodes arrangement of simulation model

对于阻尼矩阵，采用瑞雷阻尼，岩石中的爆炸荷载取三角形荷载，由于埋深较深，基本为封闭式爆炸，假定硐室 2m 上作用均布荷载，岩石中的爆炸压力采用式（23）计算

$$P=\frac{1}{4}\rho_0 D_v^2 \tag{23}$$

其中: ρ_0 为炸药密度；D_v 为炸药爆速．

此外，硐室结构还承担竖向围岩压力 q_v，水平围岩侧压力 q_h，按照普氏理论

$$q_v=\gamma H_1 \tag{24}$$

其中：γ 为岩石容重；H_1 为围岩压力拱高度，岩石抗压强度为 R_c，围岩稳定性安全系数为 $f_t=R_c/10$，则压力拱高度为

$$H_1=a_1/f_i \tag{25}$$

$$a_1=a+ftg(45^\circ-\frac{\varphi}{2}) \tag{26}$$

式中：a 为毛洞半跨；f 为拱高．由于埋深较大，洞高较小，侧向压力按均布荷载计算

$$q_h=qtg^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2}) \tag{27}$$

混凝土采用整体式模型，钢筋配筋率为 $\rho_x=0.10$，$\rho_y=0.10$，$\rho_z=0.06$，钢筋混凝土本构矩阵为：

$$D=D_c+D_s \tag{28}$$

其中 D_c 为混凝土的本构矩阵，按式（12）计算．D_s 为钢筋的本构矩阵，按式（29）计算．

$$[D_s]=E_s\begin{bmatrix}\rho_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ & \rho_y & 0 & 0 & 0 & 0\\ & & \rho_z & 0 & 0 & 0\\ & & & 0 & 0 & 0\\ & \text{对称} & & 0 & 0 & 0\\ & & & 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{29}$$

运动方程的解法采用增量法[9]，经过 Matlab 编程[10]计算得到的顶板位移和 Y 向应力，与 ANSYS/LS-DINA 模拟[11]得到结果对比如图 5 和表 2 所示．

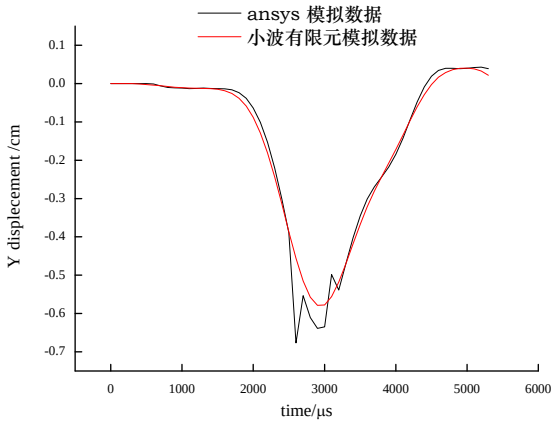

图 5 顶板中部竖向位移

Fig.5 The vertical displacement middle of roof

表 2 支护顶板节点竖向最大应力对比（MPa）
Tab.2 The vertical stress of roof（MPa）

模拟方法	节点号								
	1 支座	2	3	4	5	6	7	8	9 中点
小波模拟	9.3	10.7	12.4	13.5	14.9	15.7	16.6	17.2	17.8
Ansys 模拟	9.2	10.6	12.5	13.5	14.8	15.6	16.5	17.1	17.5

表 2 中数据为板底由支座到中点 9 个节点处竖向最大拉应力．由图 5 和表 2 可见，区间样条小波模拟结果与 7 168 个传统有限元的数值模拟结果基本一致，尤其是顶板中部竖向位移非常接近，并且避免了数值震荡．

3 结论

本文推导了小波单元的三维转换矩阵，构造了三维区间 B 样条小波单元，并用其对爆炸荷载作用地下箱形结构进行数值模拟，通过与 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟结果对比可见：

（1）12 个三维小波单元与 7168 个传统有限元单元的模拟精度相当接近，并且避免了数值震荡．

（2）区间 B 样条小波单元的刚度矩阵是非奇异性矩阵，收敛速度快，计算效率提高 50%以上．

以上研究表明构造的三维 B 区间样条小波单元是正确的，小波有限元可以应用于爆炸等动载作用下结构动力响应的数值模拟．

参考文献　　References

[1] 何正嘉，陈雪峰，李兵，等. 小波有限元理论及其工程应用[M].北京：科学出版社，2006.
HE Zengjia, CHEN Xuefeng, LI Bing, et al. Wavlet element theory and engineering applications [M]. Beijing: Science press, 2006.

[2] 秦荣.计算结构力学[M].北京：科学出版社，2003.
QIN Rong. Computational structure mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[3] MARSDEN J E, SIROVICH L . A practical guide to splines[M]. Bejing:World Book Publishing Company, 2000.

[4] 陈雪峰，向家伟，何正嘉. 区间 B 样条小波薄壳截锥单元构造[J].应用力学学报，2007 (12)：599-603.
CHEN Xeufeng, XIANG Jiawei, HE Zhengjia. Construction of thin truncated conical shell elements by inteval B-spline wavelet [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics. 2007(12):599-603.

[5] 向家伟，陈雪峰，李兵，等. 一维区间 B 样条小波单元的构造研究[J].应用力学学报，2006（6)：222-227.
XIANG Jiawei, CHEN Xuefeng, LI Bing, et al. Construction of one-dimensional elements with B-Spline wavelet [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics. 2006(6):222-227.

[6] GOSWAMI J C, CHAN A K, CHUI C K. On solving first-kindintegral equations using wavelets on a bounded interval [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(6):614-622.

[7] JIANG Z W. Cubic spline wavelet bases of sobolev spaces and multilevel interpolation [J].Applied and Computational Harmonic Analysis，1996(3)：154-163.

[8] 张雄，王天舒.计算动力学[M].北京：清华大学出版社, 2007.
ZHANG Xiong，WANG Tianshu. Computational dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.

[9] 张波，盛和太.ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M].北京：清华大学出版社, 2005.
ZHANG Bo, SHENG Taihe. ANSYS uumerical analysis principle and engineering application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.

[10] 王勖成，邵敏.有限单元法基本原理和数值方法[M].北京：清华大学出版社, 1997.
WANG Maocheng, SHAO Min. The finite element principle and uumerical method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

[11] 孙惠香，许金余，朱国富，等. 爆炸作用下跨度对地下结构破坏形态的影响[J]. 空军工程大学学报，2013, 14(2)：90-94.
SUN Huixiang. XU Jinyu, T ZHU Guofu, et al. The influence of span for deep underground arch structure on failure modes under blast loading [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2013, 14(2): 90-94.

（下转第 832 页）

[8] GB50144-2008 工业厂房可靠性鉴定标准[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.
GB50144-2008 Standard for appraisal of reliability of industrial buildings and structures[S]. Beijing：China Architecture & Building Press, 2010.
[9] GB50205-2001 钢结构工程施工质量验收规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.
GB50205-2001 Code for acceptance of construction quality of steel structures[S]. Beijing：China Architecture & Building Press, 2002.

Numerical analysis of collision between truck and coal transporting trestle

ZHANG Zhentao

(China Northeast Architectural Design & Research Institute Co. LTD, Shenyang 110006, China)

Abstract: In order to improve the capacity of collision of trestle structure, the mechanism of collision between truck and trestle structure was studied. Based on actual accident investigations, a classical collision accident of a coal transporting trestle hit by vehicle was simulated. The failure modes，stress and displacement response of the castellated beam and the bracket were analyzed. Results indicate that under impact load the stress of castellated beam was maximal at the supporting regions and impact site. Bracket has the feature of tension-torsion. The computational results can be used for further studies on the truck- trestle impact problem.

Key words: coal transporting trestle; castellated beam; bracket; collision

(本文编辑 沈波)

（上接第 821 页）

The three-dimension spline wavelet finite element Construction and application on antiknock of underground box structure

SUN Huixiang[1], *XU Jinyu*[1] , *KANG Ting*[1]， *QI Yong*[2]， *LIU Yuanfei*[1]

(1. Aaeronautics and Astronautics Engineering College of Air Force Engineering University , Xi'an 710038, China;
2. The Division of Construction of Air Force Engineering University, Xi'an 710044, China)

Abstract: Because of the characteristics of special material and high-speed loading becomes it easy for numerical oscillation to occur in traditional finite element simulation when the underground structure is subject to blasting load. The division of elements is numerous, and the computation inefficient. The wavelets finite element has the characteristics of many dimensions and many resolutions. And the precision can be improved by increasing yardstick of wavelets functions or measurement functions. The three-dimension transition matrix was derived. The new element of three-dimension interval B-spline was constructed using the measurement functions as interpolation function, which was applied on antiknock of underground box structure under blasting load through programming with Matlab software. The result shows that the computation precision is high with little elements and the computation efficiency is improved comprised with common finite element.

Key words: blast load; underground box structure; dynamic action; interval B-spline wavelet; element construction

(本文编辑 沈波)