

爆炸波作用下预应力锚索受力特征研究

张亮亮¹, 夏元友¹, 顾金才²

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 研究爆炸波作用下不同预应力锚索类型的受力特征对提高锚固洞室抗爆性能有着重要的意义。通过模型试验和数值分析, 研究了在集中装药产生的爆炸波作用下两种类型预应力锚索的索端张力变化特征和锚索锚固段轴应变变化波形, 探讨了两种锚索类型的预应力变化特征和规律, 并得出几点有意义的结论。采用显式动力分析程序得出的计算结果与试验数据的吻合性较好, 进一步证实了模型参数和建模的有效性和正确性。

关键词: 爆炸波; 预应力锚索; 受力特征; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1099-06

作者简介: 张亮亮(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程防护方面的研究工作。E-mail: hunter-zhang11@126.com。

Stress characteristics of prestressed anchor cables under explosive waves

ZHANG Liang-liang¹, XIA Yuan-you¹, GU Jin-cai²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Third Research Institute of the Corps of Engineering, General Staff of PLA, Luoyang 471023, China)

Abstract: It is significant to study the stress characteristics of different types of prestressed anchor cables under explosive waves for improving the anti-explosive performance of anchorage chamber. The model tests and numerical simulation are adopted to study the variation of stress characteristics at the end of anchor cables and the axial strain of anchorage segments under explosive waves induced by the centralized charge. The variation laws of two types of anchor cables are introduced, and some valuable conclusions are drawn. The results computed by the explicit dynamic analysis software are similar to the experimental data, and the effectiveness and correctness of parameter selection and model establishment are proved.

Key words: explosive wave; prestressed anchor cable; stress characteristic; model test; numerical simulation

0 引言

当前工程中常用的预应力锚索类型主要有自由式锚索和全长黏式锚索两种。自由式锚索主要是靠锚索垫墩对围岩提供的压力发挥加固作用的; 全黏式锚索主要是靠锚索体沿其轴长对孔壁围岩提供的剪切阻力发挥加固作用的^[1]。对预锚加固技术在静载条件下的加固机理与设计计算方法等问题, 人们已经做了较多的研究, 并取得了丰硕的成果^[2]。但在抗爆条件下对预锚加固洞室的相关问题, 如锚索类型对锚固洞室抗爆性能的影响等还研究得不够充分^[3]。鉴于防护工程中的地下洞室在现代战争中有可能遭受精确制导武器的打击, 应对这些工程部位必须采取合理有效的加固技术措施, 其重要内容之一就是选择抗爆性能较好的锚索类型。

目前, 国内外学者大都采用的野外爆破试验研究洞室群锚下的锚杆加固洞室效应, 尚没有利用室内地质力学模型试验的方法研究^[4]。Tannanta通过现场爆破

试验和数值分析研究了锚杆的动态力学行为, 测量了锚杆的动态应变和岩体表面质点速度^[5]。在构建数值模型方面, 大都利用国际上惯用的计算爆破载荷的经验公式, 来作为施加在模型上的载荷, 未考虑爆炸冲击波连续作用。爆炸冲击波作用下不同部位预应力锚索的受力特征, 以及爆炸过程中预应力锚索与锚固段注浆体、岩体相互作用等一系列问题仍然尚未解决^[6]。

本文采用地质力学模型试验和数值模拟的方法, 在集中装药爆炸应力波作用条件下, 进行自由式锚索与全黏式锚索对比试验, 研究预应力锚索受力特征以及内锚固段的受力特点, 包括锚索轴线上的应变波形特征与锚索张力变化情况以及锚索的破坏形态等, 为提出比较先进合理的提高围岩抗爆炸动载抗力等级的加固方法奠定基础。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50874085)

收稿日期: 2008-04-03

表 1 围岩及模型材料参数
Table 1 Mechanical parameters of rock and model materials

参数	密度 ρ $/(kg \cdot m^{-3})$	抗压强度 R_p/MPa	变形模量 E/MPa	泊松比 ν/MPa	c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
原型材料	2200~2400	0.75~3.0	2000~3000	0.450	15~30	48
要求材料	1650~1800	0.06~0.23	150~225	0.034	1.125~2.25	48
试验材料	1800	0.17	200	0.570	1.8	48
试验方法		劈裂法		电阻片法		双剪法

锚索底部螺母。

1 模型试验

1.1 试验技术

根据爆炸相似率、 π 定理及实验室的设备条件，重力相似比例 $K_g=1.0$ ，则应力相似比例 $K_\sigma=K_\rho K_g K_L=0.075$ 。若洞室围岩按Ⅲ类岩体性质考虑，经过材料试验，选取配比为砂：水泥：水：速凝剂=13：1：1.4：0.0166（质量比）的材料对Ⅲ类围岩进行模拟，力学参数见表 1。

偶合系数比尺 $K_r=2.0$ ，密度相似比例 $K_\rho=0.75$ ，弹性波速相似比例 $K_c=0.365$ ，衰减系数为常数，取为 3，因此比例距离相似系数 $K_R=(K_\sigma/K_r K_\rho K_c)^{(-1/n)}=1.7625$ 。对于装药 500 kg 的炸弹， $(W^{1/3})_m=K_{W^{1/3}}(W^{1/3})_p=0.4502\text{ kg}$ ，则需用药量为 $W=91.2\text{ g}$ ，取为 100 g，为块状的 TNT。

锚索截面一般是按抗拉变形刚度 EA 相似确定即： $(EA)_p/(EA)_m=K_p$ ， $(EA)_p$ 和 $(EA)_m$ 分别表示原型锚索和模拟锚索截面抗拉变形刚度， K_p 为集中力比尺。采用直径 $\phi 3.4\text{ mm}$ 长 20 cm 塑料焊条模拟锚索，长 3 cm 的 M_3 丝扣模拟外锚头，并用交叉压扁锚索尾段模拟枣核状内锚固段，锚索孔直径为 8 mm。全长黏结式锚索是通过二次注浆将全长扎成枣核状杆体与围岩黏结；自由锚索自由段是采用对部分杆体套薄壁塑料管方法来模拟。采用石膏浆注浆，其配比（以重量计）为石膏：水：柠檬酸=1：0.8：0.003。

1.2 试验内容

模型试验在总参工程兵科研三所（洛阳）研制的“岩土工程抗爆结构模型试验装置”完成的。该装置由侧限装置、移动装置组成，同时在迎爆面边界上设置了含孔率达 50% 的木制消波板。围岩模型长×宽×高=1500 mm×1500 mm×2000 mm（含下部消波坑），模型尺寸见图 1。整个围岩模型采用夯实法成型。每部分夯筑完成后，自然养护 3 d 后开挖洞室。用自制风钻的钻头通过立方体限位块和定位孔，在洞壁上钻出达到设计角度和位置的锚索孔。全长黏结式锚索注浆是用医用注射器和薄塑料管完成的；自由式锚索注浆是采用在锚固段与自由段交界处设置一个止浆环和排气管的方法完成的。通过钢环的环向应变来控制施加预应力大小，当预应力达到设计值 200 N 后，旋紧

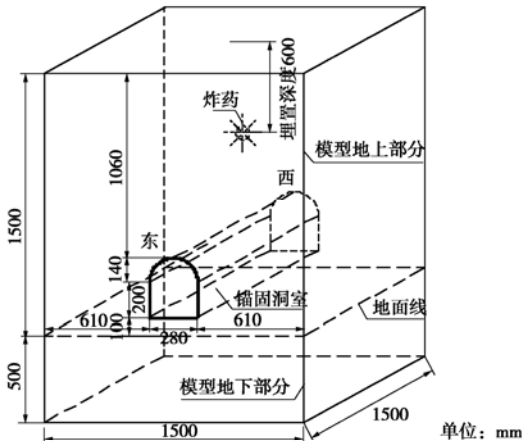


图 1 试验模型示意图

Fig. 1 Test models

测量内容有洞周各测点的应力、洞壁应变、洞室顶底板、两帮加速度、洞室拱顶位移、锚索体轴应变和锚索（外端）张力。测量系统由前置部分的传感器和信号放大器、数据记录器及其控制系统等组成。测量系统方框图如图 2 所示。

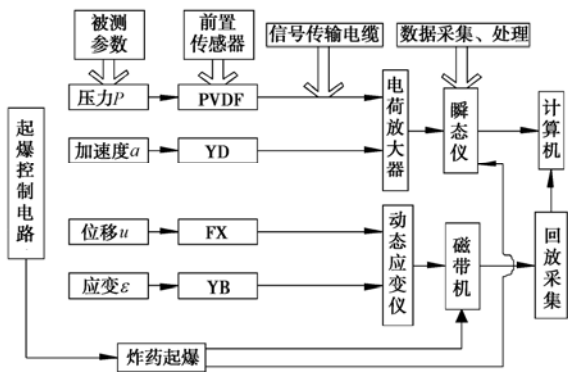


图 2 测量系统方框图

Fig. 2 Block diagram of measurement system

2 数值模型及分析方法

2.1 锚固洞室爆轰计算模型

锚固洞室爆轰模型是三维空间结构，选用三维有限元模型进行计算最为合理，选择计算高度非线性爆炸过程的显式动力分析程序 ANSYS/LS-DYNA^[7]。利用结构的对称性，为了节省计算时间取试验模型 0.3 m

厚的含有炸药剖面体, 并且取中体积的 1/2 进行计算, 即计算区域为 0.75 m×2 m×0.3 m。岩体简化成 8 节点显式结构实体单元, 使用混凝土材料, 并根据试验数据定义体积应变与压力的关系曲线。炸药中心位于自由表面一下 0.6 m 处, 计算中炸药区域尺寸取 10 cm×10 cm×20 cm, 选择炸药区域单元和材料模型, 采用高能炸药状态方程同时设置炸药起爆点。全长黏结式锚索模拟是将锚索结构离散成与应变率相关的塑性梁元后, 通过与混凝土实体单元节点共用方式模拟锚固段, 通过约束锚端接点自由度方式模拟锚索垫墩, 为了防止局部接触力过高带来单元畸变, 预应力施加在垂直于截面的各个梁单元上, 并增加沙漏控制; 自由式锚索内锚固段仍用节点共用方式并施加作用力, 与全长黏结式模拟不同的是在锚索垫墩即索端节点上施加作用压力。为避免边界处波的反射对求解域的影响, 可以对有限域表面施加无反射边界条件来模拟无限大空间, 即在模型的右侧面和地面施加无反射边界条件, 而在左坐标对称面和前后表面施加法向的位移约束条件。有限元计算模型尺寸示意图见图 3。

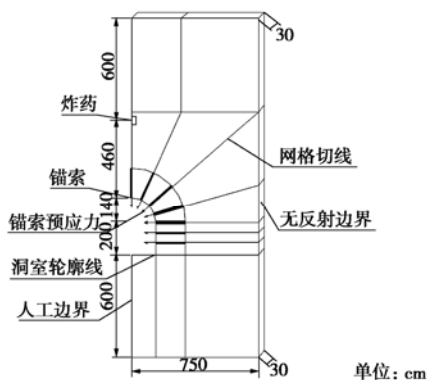


图 3 锚固洞室爆轰作用计算模型

Fig. 3 Model for detonation effect of anchorage chamber

2.2 高能炸药的本构关系^[8]

高能炸药爆轰产物的单元压力 p 由状态方程求得, JWL 状态方程的 $p-v$ 关系为

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{wE}{v} \quad (1)$$

式中 v 为相对体积; E 为初始内能密度; 参数 A , B , R_1 , R_2 , w 为实验确定的常数。对于装药密度为 1.2 g/cm³ 的 TNT 炸药, 各相关参数分别取值 $A=741$ GPa, $B=18$ GPa, $w=0.35$, $R_1=5.56$, $R_2=1.65$, $E=3.6 \times 10^9$ J/m³, 此时, 炸药的爆速 $D=5500$ m/s, 爆压 $P_{CJ}=10 \times 10^{10}$ Pa。

点火增长模型:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right) +$$

$$G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z \quad , \quad (2)$$

式中, λ 为炸药反应度, t 为时间, ρ 为密度, ρ_0 为初始密度, p 为压力, I , G_1 , G_2 , a , b , c , d , y , e , g 和 z 为常数。其中, a 是临界压缩度, 用来限定点火界限, 当压缩度小于 a 时炸药不点火; 大多数情况下, 燃烧项压力指数 $y=1$, 点火和燃烧项的燃烧阶数 $b=c=2/3$, 表示向内的球形颗粒燃烧; 参数 I 和 x 控制了点火热点的数量, 点火项是冲击波强度和压力持续时间的函数; G_1 和 d 控制了点火后热点早期的反应生长, G_2 和 z 确定了高压下的反应速率。

2.3 模拟试验参数选择

围岩模拟是通过混凝土材料试验中体积应变、屈服应力、破坏开始时塑性应变和到达残余强度时塑性应变对压力的 4 个荷载曲线定义模型塑性。为避免 Lagrange 单元网格的形状畸变, 方便建立爆炸模型, 将模型中梁元, 实体单元, 炸药单元划分为 Euler 网格, 采用多物质单元, 即允许一个单元可以包含不同的材料以保证完成物质在空间网格中的交换和输送, 通过流固耦合方式来处理相互作用^[9]。在分析过程中, 不考虑重力影响。整个建模过程采用 cm-g-μs 单位制。模型计算参数见表 2。

表 2 数值模型计算参数

Table 2 Computational parameters of numerical model

项目	密度 (kg·cm ⁻³)	弹性模量 (kN·cm ⁻²)	泊松比	爆炸速度 (m·s ⁻¹)	CJ 压力 (MPa)
围岩	1.70	1.98×10 ⁻²	0.15	—	—
锚索	2.72	0.76	0.34	—	—
炸药	1.63	—	—	0.693	0.27

2.4 锚固洞室爆轰作用的显式动力分析^[10]

对于冲击荷载下动态响应的数值计算, 除了记及材料本构关系的应变率相关性, 还要采用中心差分积分的显式算法计算结构系统各节点在第 n 个时间步结束时刻的加速度向量为

$$a(t_n) = M^{-1} [P(t_n) - F^{int}(t_n)] \quad (3)$$

式中 P 为施加的外力向量, 包括体力经转化的等效节点力; F^{int} 为内力矢量,

$$F^{int} = \int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega + F^{hg} + F^{contact} \quad , \quad (4)$$

其中, $\int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega$ 为当前时刻单元应力场等效节点力, 相当于动力平衡方程的刚度项, 即单元刚度矩阵与单元位移的乘积, F^{hg} 为克服单点高斯积分引起的沙漏问题而引入的黏性阻力, 即沙漏阻力, $F^{contact}$ 为接触力向量。

节点速度和位移矢量通过时间步和时间点表达为

$$v(t_{n+1/2}) = v(t_{n-1/2}) + 0.5a(t_n)(\Delta t_{n-1} + \Delta t_n) \quad (5)$$

1.08 ms 时峰值下降到 273×10^{-6} 。从到达时间 0.12 ms 看, 它早于锚索自由段上的#4 测点应变波到达时间 0.24 ms, 说明它不是由锚索自由段上的拉应变传过来的, 即不是由洞壁的反射拉伸变形引起的, 可能是由爆炸压缩波传到模型表面, 在模型表面产生的反射拉伸波引起的。在 $t=1.08$ ms 之后, 又出现了第二个拉伸应变波, 其峰值为 644×10^{-6} , 峰值所对应的时间是 1.53 ms, 对应锚索自由段上的#4 测点应变波到达时间 0.24 ms, #1 测点的第二个拉伸应变波应是由洞壁产生的反射拉伸波引起的。在 3.4 ms 之后, 应变基本为零, 因为#1 测点是在内锚固段的最外端, 洞壁变形对它的影响应该是较小。数值解对比实测解可以看出, 虽峰值较大, 但两者应力波变化趋势大体一致, 说明数值模拟是基本正确的。

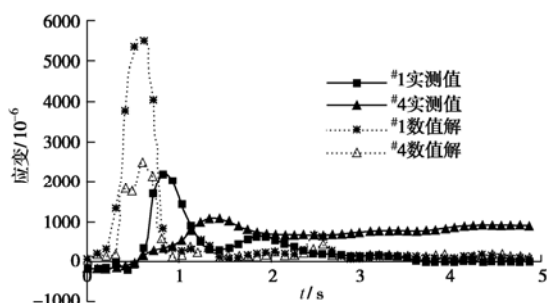


图8 自由式锚索轴应变波形

Fig. 8 Waveform of axial strain of free anchor cables

#4 测点的应变波形, 其变化特征与#1 测点不同: 它只有一个较大的拉应变波形, 并且到达时间较晚, 是在 0.24 ms 时才起跳的, 初始应变为 158×10^{-6} ; 在 1.12 ms 时达到峰值 1045×10^{-6} ; 然后峰值开始缓慢下降, 到 1.96 ms 时, 应变下降到 579×10^{-6} ; 稍后又略有上升, 到 890×10^{-6} 时基本保持该值不再变化。由于该测点是在自由段上, 所以它的受力状态容易判断: 在洞室变形的过程中它应该主要是受拉的, 由此可以判断在整个测试中正应变是代表受拉的。

3.3 全长黏结式锚索锚固段应变 (以拉为正)

全长黏结式锚索轴应变测点布置如图 9, 共有 4 个测点, 自右向左编号为#5~#8。由于试验进程中量测线路损坏, 实际测得的波形只有两条#5 和#6, 如图 10 所示, 其中, 虚线为数值模拟解。

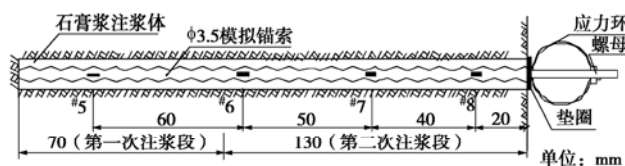


图9 全长黏结式锚索应变测点布置

Fig. 9 Arrangement of strain measuring points of full-length bonding anchor cables

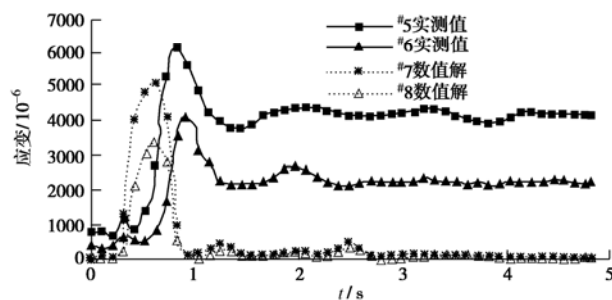


图10 全长黏结式锚索轴应变波形

Fig. 10 Waveform of axial strain of full-length bonding anchor cables

从图 10 中看到, #5 与#6 应变波形的变化特征与 3.2 节介绍的自由式锚索内锚固段上的#1 应变波形的变化特征完全相同, 也是首先产生一个爆炸直接冲击应变波形, 经过一个短暂的稳定阶段, 接着产生一个较大的拉应变波形, 从作用时间上看它也是由模型表面反射拉伸波引起的。在第一个应变波形之后又产生了一个较大的拉应变波形, 也是由洞壁反射拉伸波引起的。在第二个应变波峰之后, 拉应变逐渐降到一个恒值。#5 的直接冲击应变波和模型表面反射拉伸波引起的应变波比#6 的相应应变波发生的时间早, 应变峰值大, 这与#5 比#6 更靠近爆心和模型表面是一致的。由上面的分析得出结论与自由式锚索轴应变分析得出的结论相同。

4 结 论

(1) 自由式锚索的结构特点决定了在锚索长度范围内, 任何部位的岩体变形都会使锚索张力发生变化; 而全长黏结式锚索的结构特点决定了在锚索长度范围内, 任何部位的岩体变形都只能影响其附近部位的锚索轴力发生变化, 一般不会使锚索垫墩下的压力发生显著变化, 因而锚索外端张力也就不会发生显著变化。

(2) 拱顶自由式锚索在爆炸荷载的作用下, 内锚固段部位将受到 3 种力的作用: 爆炸压力的直接冲击作用, 介质表面反射拉伸波的作用, 洞室表面反射拉伸波的作用。锚索自由段一般主要是受洞壁反射拉伸波的作用。锚索内锚固段周围的注浆体对爆炸压力的直接冲击作用, 介质表面反射拉伸波的作用, 洞室表面反射拉伸波的作用等沿锚索的传递都起阻碍和限制作用。

(3) 运用显式动力有限元方法可以求解抗爆洞室预应力锚索轴线上的应变波形特征与锚索外端张力变化波形, 且与实测数据吻合性较好, 说明了模拟得到的爆炸应力波在锚索体中传播过程是可信的, 进一步证实了模型参数和建模的有效性和正确性。可见,

利用地质力学模型试验和数值模拟分析预应力锚索在爆炸波作用下的受力特征, 对开展防护工程围岩加固技术的研究具有重要的实际工程意义。

参考文献:

- [1] 陈安敏, 沈俊, 顾欣. 自由式锚索和全长黏结式锚索加固效果比较模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(15): 2689 - 2696. (CHEN An-min, SHEN Jun, GU Xin. Model experiment study on the different reinforcement effects of un-bonded anchor cable and full-length bonded anchor cable in rock engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(15): 2689 - 2696. (in Chinese))
- [2] 顾金才, 沈俊, 陈安敏. 预应力锚索加固机制与设计计算方法研究报告[R]. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 1998. (GU Jin-cai, SHEN Jun, CHEN An-min. Study on reinforcement mechanism and design method of prestressed anchorage[R]. Luoyang: Third Research Institute of the Corps of Engineering general Staff of PLA, 1998. (in Chinese))
- [3] 杨苏杭, 梁斌, 顾金才, 等. 锚固洞室抗爆模型试验锚索预应力变化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(2): 3749 - 3756. (YANG Su-hang, LIANG Bin, GU Jin-cai, et al. Research on characteristic of prestress change of anchorage cable in anti-explosion model test of anchored cavern[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(2): 3749 - 3756. (in Chinese))
- [4] STJERN Gisle, MYRVANG Arne. The influence of blasting on grouted rock bolts[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, **13**(1): 65 - 70.
- [5] ANNANT D D, BRUMMER R K, YI X. Rock bolt behaviour under dynamic loading field tests and modeling[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1995, **32**(6): 537 - 550.
- [6] 凌贤长, 胡庆立, 欧进萍. 土 - 结构爆炸冲击相互作用模爆试验相似设计方法[J]. 岩土力学, 2004, **25**(8): 1249 - 1253. (LING Xian-chang, HU Qing-li, OU Jin-ping. A scale modeling method of simulation explosion test of soil-structure impactive interaction due to exploding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(8): 1249 - 1253. (in Chinese))
- [7] 陈朗, 龙新平, 冯长根, 等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 121 - 132. (CHEN Lang, LONG Xing-ping, FENG Chang-geng, et al. Aluminized explosives detonation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 121 - 132. (in Chinese))
- [8] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (BAI Jing-zhe. LS-DYNA3D theoretical basis and case study[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [9] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. (SHI Dang-yong, LI Yu-chun, ZHANG Sheng-ming. Explicit dynamic analysis based on ANSYS/LS-DYNA8.1[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))
- [10] ANSYS Inc. ANSYS theory release 9.0[M]. 2006.