

为一个锥形螺栓发展动态模型

摘要

为了能够在地下发掘时，确保安全，能够抵御岩爆产生的动态负载这一点是很重要的，例如，使用的支持系统。在本文中，为一个锥形螺栓的动态仿真模型实验研究的基础上提出的。树脂基锥螺栓进行落锤试验。这些实验表明，螺栓有两个能量吸收机制：在树脂和塑料的变形滑动。为了模拟这种行为，提出了两个度的自由度集中质量模型。实验发现，滑动和塑性变形的比例显着变化从一个到另一个测试。为了解释这种变异，提出了两种方法来确定树脂螺栓滑动参数值，而一个充满活力的力量延伸模型被用来模拟塑性变形。以模拟实验数据的比较结果证明，该模型的构成要素是适当的模拟锥形螺栓的动态响应。

如今，地下挖掘深为 5000 米。在这样的水平，可以高度强调岩体造成岩爆的频率和严重性增加。在岩爆的中度至主要的严重性，抛出的岩体可达到速度 3 至 10 米/小号从 10 至 501cJ/mz 的水平相应的能量变化[1]。由于这些现象的动态性，为了正确设计支持系统，知道岩石加固元素的动态行为是很重要的。为了研究该课题，麦吉尔大学的机械和采矿工程部门与 CANMET 采矿和矿物科学实验室（MMSL）在渥太华进行合作。通过这种合作进行工作，到目前为止，已经有三个主要目标：通过 CANMET-MMSL 提供的检测仪器验证，确定测试参数对锥形螺栓的响应和性能的影响，并开发了一个模型来模拟锥形螺栓的动态行为。前两个目标的已经在[2、3]中报道，而这篇文章的重点，是第三个目标，即锥形螺栓的动态行为建模。

在这一为了支持岩石的各元素的文献中，动态模型可分为两大类：集中质量模型和动态变形模型。Thompson 等人。[4]采用集中质量模型来模拟动量转移的原则为基础的动态测试[5]。利用这个原理，锚杆进行测试，同时装载质量下降。当自由落体的元素已达到所需的速度，锚定螺栓迅速停止和装载质量的惯性动态加载测试的强化元素。在他们的模型，装载质量，锚杆安装的其他组件进行离散准时群众串联弹簧和减震器。然而，使用的弹簧和阻尼器连接每个元素可能不是最合适的选择模型，每个互动，特别是通过树脂锚杆春耕。一个集中质量模型也被用来由 Tannant 等。[6]模拟锚杆机械锚固过程中原位测试测量轴向应变响应。动态负荷生产炸药，但其幅度始终低于钢材的屈服极限。

另一方面，动态变形模型是基于理论的应变(或应力)在固体中的波[7,8]Yi和 Kaiser[9,10]上夹紧钢线材，来模拟机械锚杆进行落锤试验。螺栓装弹性或塑性取决于使用的降体重。然而，模型模拟弹性波的传播[11]。模拟应变波的持续时间和幅度，被发现与实验数据吻合良好。

为了研究当地的应变分布沿螺栓，Ansell [12-14]使用播放器等的动量传递原理类似的方法进行动态测试 [5] 然而，使用装载质量更轻，冲击速度更快。来模拟观测到的应变分布，安塞尔使用两种不同的技术应变波理论的基础上：graphodynamical 菲舍尔提出的方法[15-18]和数值的计划，戈东诺夫的方法，在[19]详细说明。由这两种方法得到的结果是令人满意的，但他们依靠一个重要的假设：螺栓被认为是无限长，这意味着没有反映在另一端的应变波。这个假设是塑料波前的时间，需要前往螺栓的长度是相同的顺序为有效由安塞尔执行的测试，因为影响工期。然而，这个假设是不是在任何情况下有效。此外，动态变形模型不允许锚杆在模拟过程中滑动。当试图模拟动态行为的锥形螺栓，螺栓在泥浆中滑动时摩擦消散，因为相当数量的能源，这是一个重要的制约因素[20]。

在本文中，集中质量模型来模拟基于树脂的锥形螺栓的动态行为。这集中质量模型的优势，相比其他的，是它的简单，特别是利用干摩擦，更准确地模拟螺栓滑动树脂。相反，上面介

绍的某些型号，这里提出的制定有效的弹性和塑性变形。

2. 实验

CANMET-MMSL 提供的测试仪器，如图 1 所示。落锤，用于动态加载螺栓，使用未在图 1 中画出的遥控磁铁来被取消和下降。要测试的螺栓放入一个可以很容易地通过一根针连接结构的其余部分的样品管。反复地对每个样品进行实验，但总是从相同的高度，并使用相同的质量。

装备精良的安装在任何时间来衡量有关 **displacemenu** 和力量在影响。**displacemenu**，有导线电位器连接到下拉的重量来衡量其立场和两个数字线的相机，记录四肢螺栓，即锥和板块位移，位移。设置为力量，配备了两个压电负载降体重和传播的力量支撑梁螺栓的力测量细胞。都加载信号被认为是非常相似，所以只能传送到支撑梁力将整个本文所示。有关仪器仪表的更多细节，可以在[2,3,21]中发现。

2.2 螺栓测试

到目前为止，所有的测试了改性锥螺栓(MCB)的尺寸见图 2(a)。筒螺栓在南非最初设计由雅格[22]可以使用水泥浆液。**Ortlepp**[20]表明南非锥螺栓具有优良的能量吸收能力下的动态加载当浆液使用，但它被发现当使用以有效地降低聚酯树脂浆液[23]。因为聚酯树脂经常被使用在加拿大矿山诺兰达些微调技术中心的设计使它更加锥螺栓效率，这种类型的浆液。主要的修改螺钉增加 **resin-mixing** 叶片锥的顶部。名盾牌的尺寸非常相似的孩童的南非锥螺栓。

锥形螺栓的实验中，被灌入钢两个的杜邦 **Falsoc** 聚酯树脂墨盒管。每个墨盒有两个舱室：一个包含聚酯树脂和其他人有催化剂。样品管以及安装过程中的尺寸如图所示。（二）2。在安装过程和样品管的内部直径的推进和旋转速度，获得锥形螺栓制造商（男子酸味矿业公司，萨德伯里，安大略，加拿大）。此外，样品管够厚，在测试过程中，要考虑为刚性。显然，样品管有不同的径向刚度比在原位岩体；然而，这是假设没有重大影响力的动态响应，由于脆性性质的聚酯灌浆螺栓。当螺栓滑动树脂，后者似乎被分解，而不是简单地压缩在径向方向。如图节的样品管。3，说明这个效果。

同样重要的是提锥角有重大影响力的锥形螺栓的表演。锥角的增加将使螺栓，以消耗更多的能量，在树脂滑动时。然而，这也将增加的需要加以克服，以激活滑动螺栓的锚固力。因此，如果锥角过大，螺栓将不能够导致过早失效的肌腱滑动。然而，在这项研究中，锥角将不会被更改；我们只集中于我们的利益，目前在加拿大的矿山使用的螺栓。

2.3 进行测试

大部分落锤试验进行了以下两个测试配置之一：从 1.5 米，从 1.0 米或 1461 公斤 1016 公斤。这两种配置也有类似的冲击能量（14.9514.331cJ），分别和他们的比较突出螺栓响应的落锤冲击速度的影响[2,3]

此外，还有两个样品进行检测，无树脂，以获得当地的应变分布比较结果与安塞尔[13]。在这些测试中，锥形螺栓夹紧，其轴被标记为每 40 毫米，采用雕刻笔。对每个样品进行了两滴后，每一个局部应变测量。第一个样品进行了测试，质量下降了 1.5 米，570 公斤，而第二个样品的质量为 1016 公斤，下跌 0.75 米。

2.4 与其他测试仪器的比较

比较典型的文献报道的各种实验装置使用的测试参数可以揭示洞察力有用的信息类型选择模型模拟测试。表 1 给出了这样一个比较。首先，人们可以看到，典型的撞击速度是 5 至 6 米/秒，而安塞尔使用 10 米/秒。这些值是在良好的协议，在中度至严重岩爆，即 3—10 米/秒[1] 测量速度弹射

然而，使用不同的质量显着表 1 中的设置。此外，人们可以看到，使用更轻的质量测试配置有一个较短的影响持续时间。这可以很容易地了解考虑牛顿第二定律： $FDT = MDV$ ，其

中 F 是影响力， DT 的持续影响，米的质量和 DV 速度在变化的影响。这也是有趣的实验测试影响持续时间较短，（安塞尔彝族和 Kaiser）一直使用模拟动态变形模型。

在一般情况下，如果影响的试验持续时间太短，使塑料波前达到螺栓的另一端，一个动态的模型将被优先考虑到集中质量模型。钢塑模量的 15 兆帕（[14]）和密度 7800 kg/m^3 的考虑，塑料的应变波速度大约是 44 米/秒。因此，一个 2 米的螺栓，将采取 45 毫秒的塑性应变波达到螺栓的另一端。这是一般的标准，45 毫秒的价值，是在良好的协议，表 1 报告的信息。

3.分析结果

3.7 典型结果

落锤试验期间收集到的典型结果如图。 4。加载信号的观测，测试可以分开在三个不同的部分：（1）第一次冲击，这是最重要的一个加载幅度和影响持续，那么（2）有一系列的弹性篮板板螺栓的质量和（3）系统，通过一系列的阻尼振荡达到平衡。寻找图。 4，人们可以看到，只有第一次冲击产生永久位移的螺栓。

圆锥体的位移表示的螺栓滑动树脂板和锥位移之间的差异，而给人的螺栓伸长量。这是两个机制的锥形螺栓消散和吸收冲击能量。这两种机制是目前在每下降，但其比例从另一个测试显着变化。这也是值得注意图。 4，在第一次冲击，是在负荷曲线扭结时发生螺栓开始滑动树脂。当力施加到板，螺栓轴负载转移锥构成锚定螺栓。当这种力量超过了锚固强度，圆锥体开始滑动通过树脂放宽螺栓的紧张和挑起了在测量负载的扭结。

Table 1
Comparison of the testing parameters and models developed for different experimental setups

Setup	Loading option	Mass (kg)	Impact velocity (m/s)	Impact duration (ms)	Model
Ansell [12,13]	Momentum transfer	111 or 219	10 or 12	15	Dynamic deformation
CANMET-MMSL	Drop weight	1016	5.425	50-80	Lumped-mass
Player et al. [5]	Momentum transfer	2040	6.025	140	Lumped-mass
Yi and Kaiser [9,10]	Drop weight	48.494	5.241	25	Dynamic deformation

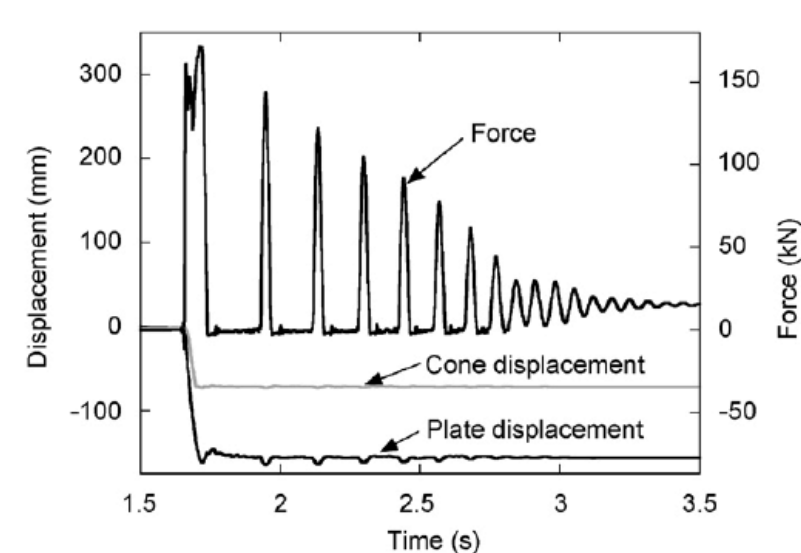


Fig. 4. Typical displacements and force measured during a drop weight test of 1461 kg from 1.5 m.

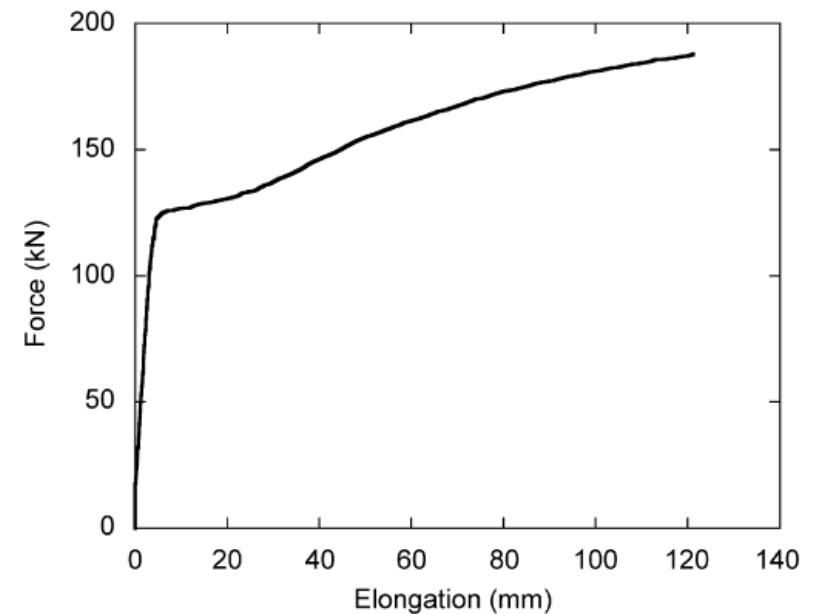


Fig. 5. Force-elongation curve for a pull-out test performed on a cone bolt.

3.2。螺栓的刚度和阻尼

加载信号的第三部分，即一系列阻尼振荡，可以由弹簧和阻尼器并行连接固定基地的大规模模拟。 [24]介绍一种方法来获得实验数据的刚度和阻尼值。

使用这种方法，刚度和阻尼值计算每个测试振荡部分是足够长的时间（约三至五年期间）给一致的结果。符合这个标准和平均刚度和阻尼获得十四测试，分别等于 12.868 千牛顿/毫米和 9.968 千牛 S/M。刚度值被认为是准确和重复的，因为被发现是 1.220 千牛顿/毫米，幅度小于平均标准偏差。另一方面，阻尼值分别为减少重复，标准差等于 2.249 千牛顿/米。这样的变化可以解释群众的倾向锁定在冲击后的导轨。这个问题将在 4.3 节调查后。

3.3 钢变形

在上一节，螺栓弹性刚度，获得实验数据。然而，在测试过程中，螺栓下进入显着的永久

变形，因此，它也是很重要的特点钢塑行为。

3.3.1 准静态属性

可以从制造商和等于 517 兆帕（107 千牛）和 745 兆帕（155 千牛），分别在准静态屈服极限和极限强度钢。为了验证这些值来描述应变硬化行为，拉拔试验，进行了 4 个锥形螺栓。测试螺栓安装在钢样管，遵循同样的程序，用于动态测试（见 2.2 节）。力 - 伸长曲线获得的四个螺栓相似，所以只有一个测试图。5。从这个测试，屈服极限和强度极限为 125 和 185 千牛，分别进行评估，证明制造商的价值是相当保守的。

3.3.2 动态特性

准静态单轴拉伸下的酒吧，应力和应变的状态通常被认为是通过其横截面和长度均匀。然而，在影响的情况下，它可能有本地化的可塑性[13]以及屈服极限的增加，钢的强度极限相比，其准静态值[25]。这些影响都将在下面的调查。

正如在 2.3 节中提到的，两个样品进行了检测，没有树脂，研究当地的应变分布，沿螺栓的长度。结果如图。6 测试与装载质量为 1016 公斤下降到 0.75 中号。配置从 1.5 米（570 公斤）的其他测试了类似的结果，这将不会在这里为简便起见。安塞尔[13]进行类似的试验，但与较轻的重量（111 公斤）和更高的撞击速度（10 米/秒）。他测量了约 25% 的最大局部应变，而其他部分的螺栓都没有紧张。另一方面，在图。6，人们可以看到，所有路段的螺栓变形与局部应变值从大约 1% 至 4% 不等。安塞尔（0-25%）测量相比，这种变化是非常小的。这可以解释的影响持续时间较长的执行相比，安塞尔的 CANMET-MMSL 的测试结果。这使得塑料波前前往螺栓生产应变分布相当均匀的整个长度。这证明，有没有 CANMET-MMSL 的执行测试的本地化可塑性。现在，冲击载荷，即屈服极限和极限强度的增加，第二个作用将在下面的调查。

一个简要钢的动态力学性能[14,26]。此外，Malvar [27] 拟议的经验公式计算动态屈服极限和极限强度钢作为我的应变率的函数;和准静态屈服极限。考虑跌落高度 1.5 小时米，罗湖锚杆自由长度为 2 米，最大应变速率为 2.7 S^{-1} ，其中 v 是影响速度。使用从上面描述的拉拔试验中获得的价值和准静态特性，可以得到一个动态的屈服极限和强度极限，156 和 199 千牛，分别为（上计算的更详细信息，请参阅[3,21]）。

上述计算钢的动态特性也可以得到一定的实验测试。以隔离树脂螺栓滑动钢变形力学主义，只与一个圆锥体的位移小于 1 厘米的测试进行了研究。这些测试的力伸长曲线图绘制。7。一些曲线不从原点开始，这简直是螺栓执行以前滴引起伸长的结果。这些实验结果的基础上，动态模型，提出了 147 kN 和高达 150 毫米和 206 千牛的力伸长率线性增加的应变硬化行为的屈服极限。在屈服极限伸长率被选为给斜率等于平均刚度，发现以前在 3.2 节，即 12.868 千牛/毫米的螺栓。屈服极限和极限强度分析获得良好的协议模型图。7，但为以后的计算与实验值将被分析的首选。

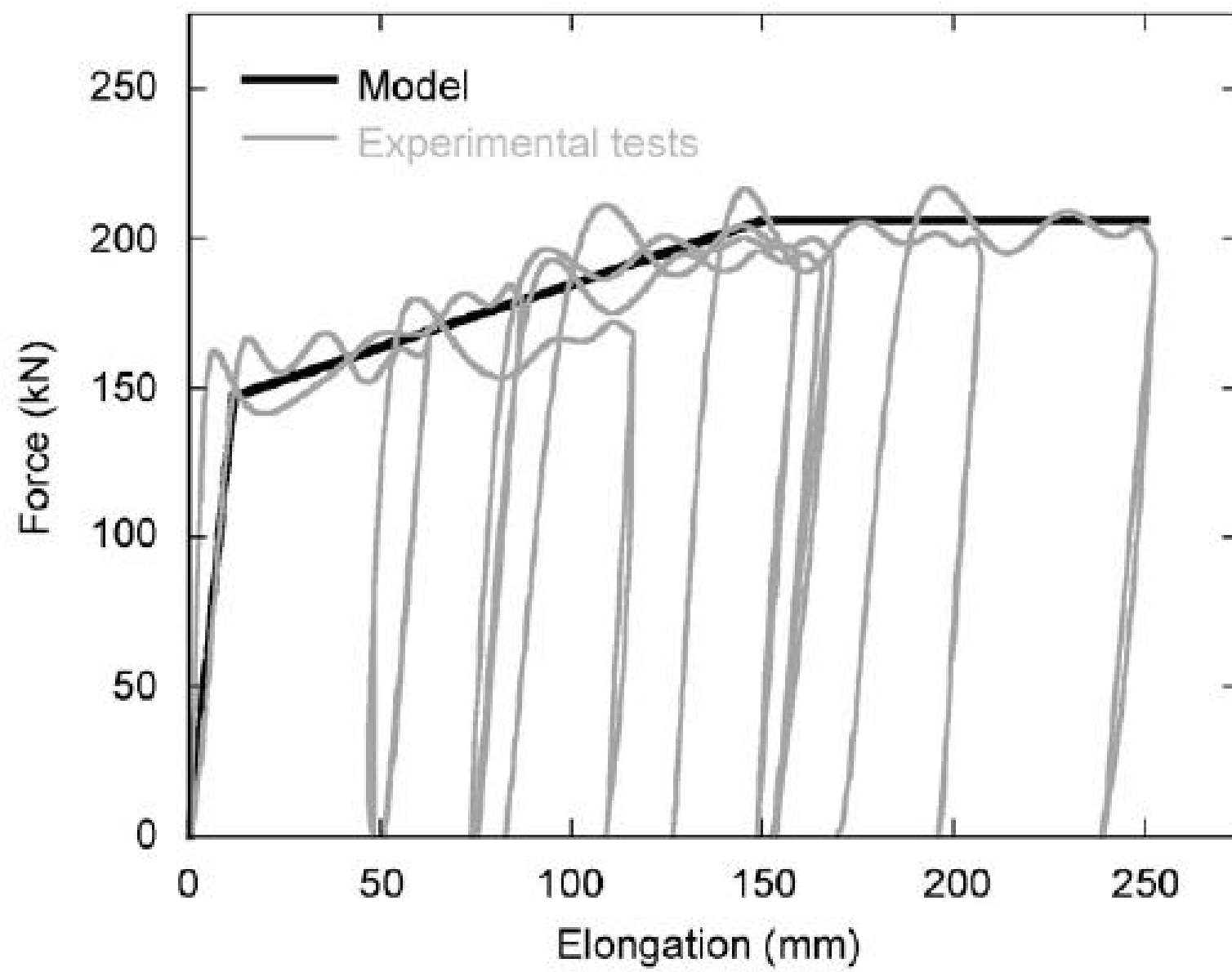


Fig. 7. The cone bolt dynamic force–elongation model based on experimental results.

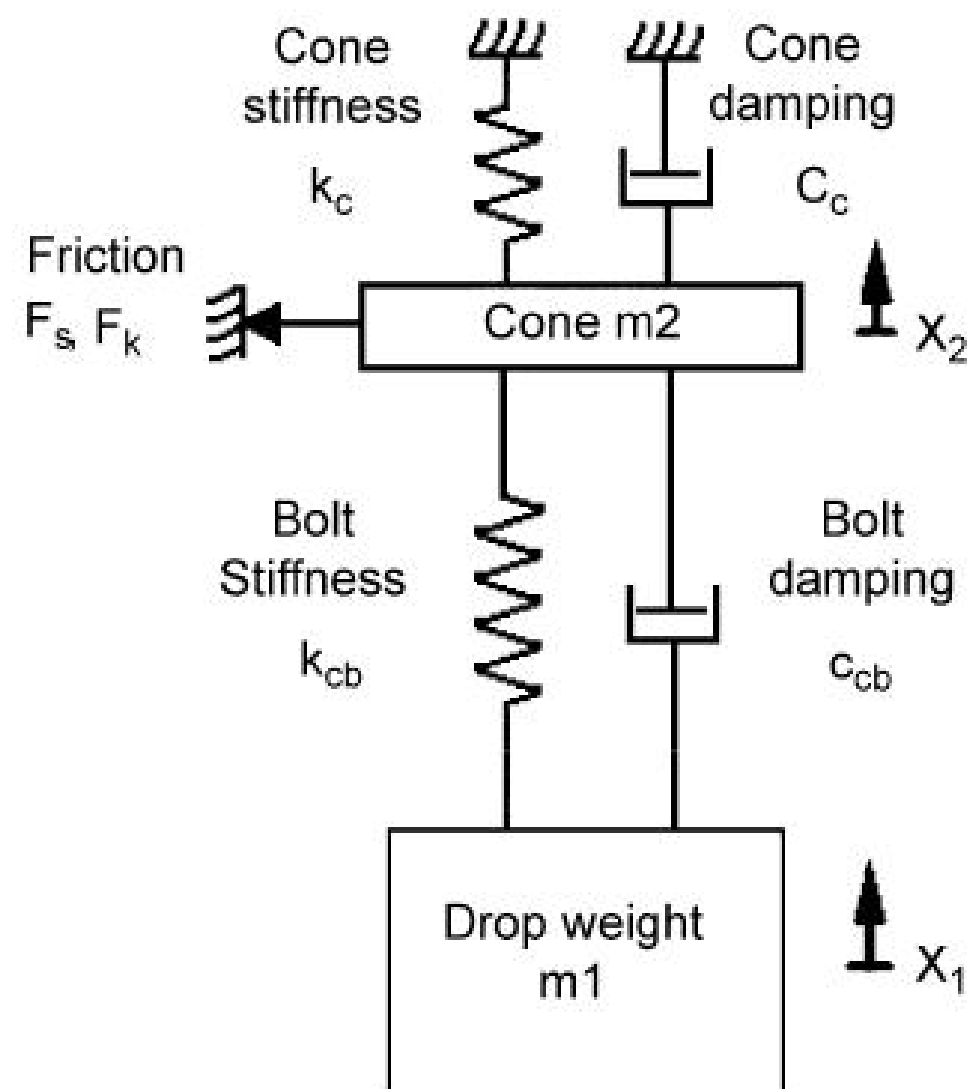


Fig. 8. Schematic representation of the cone bolt model developed.

4. 模拟

4.1,概观

仿真程序开发基础上的集中质量模型，因为沿螺栓的长度，第 3.3.2 节中，发现当地的应变分布是均匀的。锥形螺栓模型有两个学位的自由，为了表示螺栓滑动和断裂伸长率。该模型能够模拟锥板位移和施加的力螺栓为整个持续时间的试验，即第一次冲击，弹性篮板和阻尼振荡。模型的构成要素如图。 8。

代表落锤质量 $M1$ ， $M2$ ，而代表锥形螺栓，并设置了 2 公斤（一半的锥形螺栓的质量）的价值。因此， $M1$ 可在空气中或接触板螺栓。连接到一个固定的基地平方米的元素被称为锥参数和执政树脂螺栓滑动。当应用于螺栓的力量超过静态摩擦凡，螺栓开始下滑，其运动过程中，被认为是动摩擦楼 Z ， $K1$ 的弹簧和阻尼器 $C1$ 。当锥速度降低到零，没有进一步锥运动是可能的。螺栓的刚度 $k\} B$ 是可变的，并获得动力延伸模型图。 7。螺栓阻尼 $C\} B$ 有一个价值 9.968 千牛/米，如发现以前在 3.2 节。

4.2.程序和方程

为了解决模型的运动方程，MATLAB 程序开发。一个总的模拟时间在 3 秒时间步骤 0.1 离散 MS 被认为是足够进行模拟。在每个时间步，落锤，如果是在板与螺栓接触，计划执行四个主要步骤：（1）计算螺栓刚度，（2）它解决了适当的运动方程，（3）计算螺栓力，（4）决定，如果螺栓变形在弹性或塑性范围。

将于下文详述其中的每个步骤，但它首先是要引进某些变量不图。 8。首先，发达的锥形螺栓的内力指定几 O ， T 。指定螺栓的初始伸长，从以前的落锤试验结果，是升， R ，而在模拟过程中发生的塑性伸长表示 $X5$ 。最后，

叶和 $4x$ 是两个变量出现在某些方程，以代表动力延伸模型图。 7。动力延伸模型是三个线段组成，并在模拟过程中，叶和 4 倍，分别位于当前状态的变形段的起源的力量和伸长值。

上面提到的四个步骤是相关的，只有当降体重是在接触板螺栓，并符合以下条件验证： $X1 < X2 - X5$ 。（1）如果不能满足这个条件，群众是在空气中受到恒定的下降幅度加速 $G = 9.81KM/s.z$ 这个运动方程描述这种状态容易得到，而且不会被这里详述。

如果降体重是在与板接触，第一步是评估值的相对螺栓刚度，即， $K\} B$ ，叶和 4 倍。表 2 给出这些参数的值是螺栓伸长和变形的性质（弹性或功能塑料）。

第二步是解决适当的运动方程。两套方程可能视锥滑动或不。如果凡伊斯兰会议组织<凡，螺栓滑动因此， $x2 = X2 = 0$ 和系统退化到一个程度的自由均受

$$m_1\ddot{x}_1 + k_{cb}(x_1 - x_2 - \Delta x) + Y_e + c_{cb}\dot{x}_1 + m_1g = 0.$$

(2)

Table 2
Values of the bolt stiffness parameters

Deformation	$ x_1 - x_2 - dL_{ini} $ (mm)	k_{cb} (kN/mm)	Y_e (N)	Δx (m)
Elastic	—	12.868	0	x_5
Plastic	< 150	0.4248	147,150	0.0114
	≥ 150	0	206,010	0.1500

否则，如果螺栓滑动，该系统由对方程组：

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + k_{cb}(x_1 - x_2 - \Delta x) + Y_e + c_{cb}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + m_1 g &= 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 - k_{cb}(x_1 - x_2 - \Delta x) - Y_e - c_{cb}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ - F_k + k_c x_2 + c_c \dot{x}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

重要的是要提式。(3)，F 的标志，Z 取决于螺栓滑动的方向。在我们的例子中，锥只能负 X2 方向滑动，因此这个词的符号始终是消极的。计算当前时间，使用第四阶 Runge-Kutta 方法[28]一步的位置，速度和加速度的每度自由。

第三步是根据上述计算的当前位置和速度计算凡 O，T。这是很容易做到式。

(4) 叶，K} b 和 4X 值先前已获得：

$$F_{bolt} = Y_e + k_{cb}(x_2 - x_1 - \Delta x) + c_{cb}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1). \quad (4)$$

最后一步是验证钢变形的性质（弹性或塑料）。这些信息将用于在开始下一次的步骤，以评估螺栓刚度。如果是弹性变形 F_{bolt} ，在上一步中计算，价值是大于屈服极限，变量，表示变形的性质改为塑料。另一方面，如果变形已经在塑料范围和 $XZ - X\}$ ， <0 ，改为弹性变形。这种情况下，检测之间的拉伸过渡装卸的。当这种变形的性质的变化检测，螺栓屈服极限的更新以及模拟 X5 在经历了塑料伸长。

4.3. 导轨的校正

如前所述，影响后，当群众的反弹，这可能部分锁定在导轨螺栓采用武力，如果有一定的偏心与落锤质量的中心。这种现象在实验数据中可见。螺栓在系列弹性篮板，只经历弹性变形和行为像一个春天。影响的潜在能量，可以计算出

$$U = \frac{1}{2} k_{cb} \Delta x^2 - mg|x| = \frac{F_{max}^2}{2k_{cb}} - \frac{mgF_{max}}{k_{cb}}, \quad (5)$$

F_{MAX} 是高峰负荷。这种能量，然后应完全转移到动能的质量。两个影响时间 4 吨可以用来评估使用的大规模反弹的动能

$$K = \frac{mg^2 \Delta t^2}{8}. \quad (6)$$

在图中显示的结果。4，影响后评价的动能表示式计算的势能 30-60} (5)。这种差异是太重要了，不容忽视

该模型。因此，在模拟程序中，当大众将离开板螺栓在空中，它的速度将得到纠正。如果模拟进行比较测试，校正因子将获得的实验数据。否则，他们可以指定作为输入的模拟程序。

4.4. 获得锥参数的方法

实验，圆锥体的位移，可以从不到 1 厘米，高达 15 厘米。这种变异被认为是由于螺栓无能混合树脂墨盒在一个可重复的方式，在[29]提到[21]更详细的讨论。研究，目前正在进行调查的原因和可能的解决方案，这种树脂行为的变异。

因此，需要进行调整，根据实验测试所需的模拟锥参数（F5，女，Z，K1 和 C1）理事树脂螺栓滑动，值。在这里，两种方法都提出了根据实验结果找到这些值。

4.4.7. 图解法

使用这种方法，凡，女，Z 和 K 值} 获得所需的测试，以模拟实验的负荷曲线的第一次冲击。c 的值通常设置为 1.0 千牛 S/M，如果有必要的试验和错误后，可以调整每个参数。

静摩擦凡等于顶端负荷曲线的初始峰值。图。4，这大约相当于 161 千牛。然后，动摩擦楼 z 是扭结的负荷曲线图中，大约有 121 千牛当地最低值。4。最后，圆锥体的刚度，可以计算 $KE = (\text{芬德} - FK)$ / 因为，在那里自生自灭是在加载阶段结束时的力量，在第一次冲

击（总是大于或等于为 F_z ）和 ΔL 总锥位移。在图中出现的测试。4, 防范和 ΔL 等于 172 kN 和 72 毫米，分别给予 2.39 千牛顿/毫米锥刚度。

4.4.2 模拟数据库

上述方法进行了详细的图形返回有效锥根据实验负荷曲线的参数。然而，通常是可以减少位移的实验和模拟之间的差异。将在这里介绍的方法，选择锥参数根据实验螺栓滑动和断裂伸长率。

MATLAB 程序开发记录螺栓滑动和断裂伸长率，获得锥参数和不同的初始伸长升值的各种组合的模拟程序，N;表 3 给出了每个变量的测试值范围。

考虑到组合，凡 ΔL 是不适用的，共 31248 模拟已经完成。螺栓滑动和伸长所有这些可能性进行存储的数据在三个测试配置文件：从 1.5 米，1.0 米和 1461 公斤，1461 公斤，1.5 m 的 1016 公斤。因此，以模拟一个特定的测试，初始伸长率，以及实验的螺栓滑动和断裂伸长率有指定的计划，将通过数据库，并选择锥参数的最佳组合，代表给定值。

4.5. 仿真示例

为了证明模型重现准确的锥形螺栓的实验响应能力，进行模拟再现图结果。4。锥值参数获得了使用模拟方法的数据库。图仿真和实验结果进行了比较。9。即使模型需要的实验数据，以获取锥参数比较有见地，以确定如果有足够的模拟模型的构成要素螺栓的动态响应。

正如人们可以看到，模拟的锥位移匹配很好地与实验。另一方面，一个比较模拟的曲线时要小心质量和板相机。在仿真，质量篮板这显然是不可见板摄像机信号的空气。然而，两条曲线交汇在一起，在测试结束。加载信号相比较，可以看出，振幅每个影响的持续时间得到很好的体现，尤其是第一个是最重要的，因为它产生 3.1 节中提到的永久位移的螺栓。

Table 3
Range of values tested for the cone parameters

	ΔL_{ini} (mm)	F_s (kN)	F_k (kN)	c_c (kN s/m)	k_c (kN/mm)
Minimal value	0	120	50	0	0.5
Increment	20	10	10	1.0	0.5
Maximal value	140	200	150	5.0	3.5

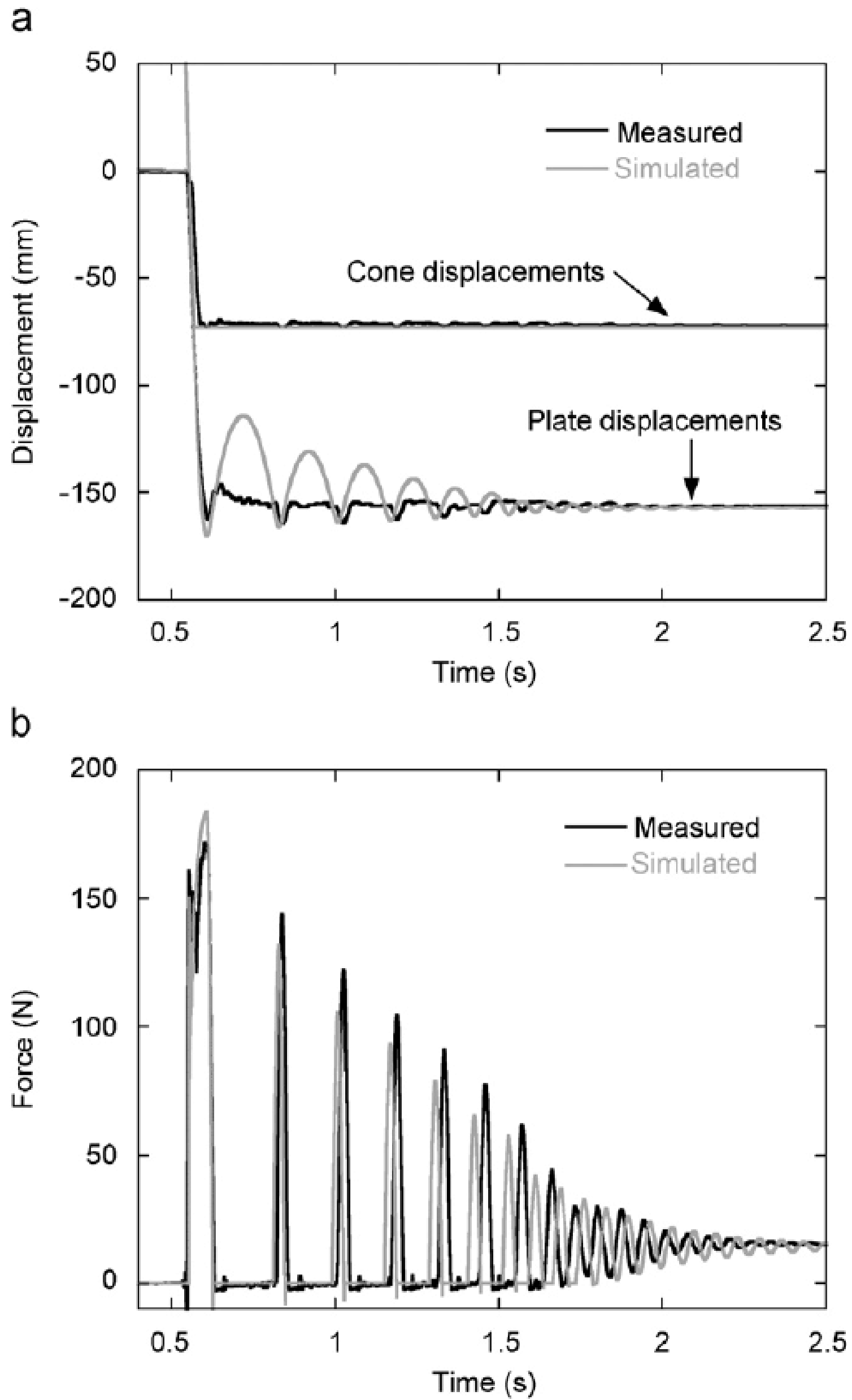


Fig. 9. Comparison between the measured and simulated responses for the test shown in Fig. 4 ($F_s = 150$ kN, $F_k = 80$ kN, $c_c = 0$ and $k_c = 1.0$ kN/mm): (a) displacements and (b) forces.

一个模型，有两个学位的自由和能力模拟锥形螺栓的动态行为，已经研制成功和验证。该模型的某些参数的值已获得进行的实验测试 CANMET-MMSL。例如，螺栓的弹性刚度和阻尼计算已经从一系列的阻尼振荡。还定义了一个动力延伸钢材的弹塑性变形模型实验。另一方面，因为可以显著变化从一个到另一个测试实验锥位移，锥模型的参数需要调整每个模拟。提出了两种方法从实验数据，以获得他们的价值观：第一个使用的装载信号；第二个，螺栓滑动和断裂伸长率。实验测试还表明，沿螺栓的长度，可以考虑当地的应变分布均匀，这解释了为什么一个集中质量模型，而不是一个应变波理论的基础上开发的。最后，比较模拟与实测的反应表明，模型的构成要素是足够的，以模拟动态行为的锥形螺栓。致谢

作者要感谢的自然科学和工程研究理事会，加拿大（NSERC）和喜欢伽ebecoisDE LA RECHERCHE SUR LA 自然和技术（FQRNT）的财政支持。此外，T.安德森，K.法官和 M.普劳夫 CANMET-MMSL 和五 Golder Associates 的 Falmagne 感谢他们的帮助和 advicein 的关于这个项目的。

参考文献

- program,1990-1995: a comprehensive summary of five years of collaborative research on rockbursting in hardrock mines. Sudbury, Canada: CAMIRO Mining Division; 1996.
- [2] St-Pierre L, Hassani F,Ouellet J, Radziszewski PH. An investigation on the dynamic testing, properties and responses of support systems. In: Proceedings of the 11th congress of the international society for rock mechanics Lisbon, 2007. p. 175-8.
- [3] St-Pierre L, Hassani F,Radziszewski PH, Ouellet J, Plouffe M. Testing and analyzing the dynamic response of rock support elements. In: Proceedings of the 4th international symposium on high-performance mine production Aachen, Germany, 2007. p. 353-68.
- [4] Thompson AG, Player JR, Villaescusa E. Simulation and analysis of dynamically loaded reinforcement systems. In: Ground support in mining and underground construction: proceedings of the 5th international symposium on ground support, Perth, Australia, 2004. p. 341-55.
- [5] Player JR, Villaescusa E, Thompson AG. Dynamic testing of rock reinforcement using the momentum transfer concept. In: Ground support in mining and underground construction: proceedings of the 5th international symposium on ground support, Perth, Australia, 2004. p. 327-39.
- [6] Tannant DD, Brummer RI<, Yi X. Rockbolt behaviour under dynamic loading: field tests and modelling. Int J Rock Mech Min Sci 1995;32:537-50.
- [7] I<olsky H. Stress waves in solids. IVew York: Dover; 1963.
- [8] Meyers MA. Dynamic behavior of materials. IVew York: Whey; 1994.
- [9] Yi X, Kaiser PI<. Stresses in dynamically loaded rockbolts with rubber and wood cushions. In: Rock support in mining and underground construction: proceedings of the international symposium on rock support, Sudbury Canada, 1992. p. 683-91.
- [10] Yi X, Kaiser PI<. Impact testing for rockbolt design in rockburst conditions. Int

- J Rock Mech Min Sci 1994;31:671-85.
- [11] Yi X, Kaiser PI<. Elastic stress waves in rockbolts subject to impact loading. Int J Numer Anal Methods Geomech 1994;18:121-31.
- [12] Ansell A. Dynamically loaded rock reinforcement. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1999.
- [13] Ansell A. Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt. Tunnelling Undergr Space Technol 2005;20:291-300.
- [14] Ansell A. Dynamic testing of steel for a new type of energy absorbing rock bolt. J Construct Steel Res 2006;62:501-512.
- [15] Fischer HC. On longitudinal impact i. Appl Sci Res 1959;8:105-39.
- [16] Fischer HC. On longitudinal impact ii. Appl Sci Res 1959;8:278-308.
- [17] Fischer HC. On longitudinal impact iii. Appl Sci Res 1960;9:9-42.
- [18] Fischer HC. On longitudinal impact iv. Appl Sci Res 1960;9:93-138.
- [19] Lin X. Numerical computation of stress waves in solids. Berlin: Akademie Verlag; 1996.
- [20] Ortlepp WD. Grouted rock-studs as rockburst support: a simple design approach and an effective test procedure. J South Afr Inst Min Metall 1994; 94: 2: 47-63.
- [21] St-Pierre L. Development and validation of a dynamic model for a cone bolt anchoring system. M.Eng. thesis, McGill University, Montreal, 2007.
- [22] Jager AJ. Two new support units for the control of rockburst damage. In: Rock support in mining and underground construction: proceedings of the international symposium on rock support, Sudbury, Canada, 1992. p. 621-31.
- [23] Gaudreau D. Performance assessment of tendon support systems submitted to dynamic loading. M.Eng. thesis, Ecole Polytechnique, Montreal, 2004.
- [24] Meriam JL, Kraige LG. Engineering mechanics. IVew York: Wiley; 2001.
- [25] Timoshenko S, Young DH. Elements of strength of materials. IVew York: Van Nostrand; 1962.
- [26] Stronge WI. Impact mechanics. Cambridge: Cambridge University Press; 2000.
- [27] Malvar LJ. Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars. ACI Mater J 1998;95:609-16.
- [28] Hoffman JD. Numerical methods for engineers and scientists. IVew York: McGraw-Hill; 1992.
- [29] Gaudreau D, Aubertin M, Simon R. Performance assessment of tendon support systems submitted to dynamic loading. In: Ground support in mining and underground construction: proceedings of the 5th international symposium on ground support, Perth, Australia, 2004. p. 299-312.

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/965244200121011243>