

索托结构中接触问题的分析

周志亮 徐国彬 黄国辉

摘要 在索托结构中,索通过滑轮从结构中贯穿过去以承受荷载,而不是固定的结构上。索和滑轮之间相对滑动来传递内力,所以索和滑轮的接触是结构的关键和难点。接触问题属于边界条件非线性,不但具有高度非线性,而且具体计算非常复杂。本文针对接触的几种类型,详细讨论了如何利用 ANSYS 软件处理索托结构的接触问题。

关键词 索托结构 接触 非线性

一 引言

在索托结构中,一些索不是锚固在梁或其它结构上,而是通过滑轮从结构中贯穿过去锚固在另一个塔上。索不是“吊”或“拉”住结构,而是“托”住结构,这样就改变了整个结构的受力。假定索中的拉力为 T ,索和梁之间的角为 α ,那么索的垂直分力为 $T\sin\alpha$,水平分力为 $T\cos\alpha$,索的有效利用率为 $\cot\alpha/2$ 。而在斜拉结构中,索的有效利用率则为 $\tan\alpha$ 。因而,与斜拉结构相比,随着 α 的减小,索托结构中索的有效利用率增高。这样,在斜拉结构中因为 α 要受到限制,塔的高度不能太低,而在索托结构中 α 不受限制,塔的高度就可以比较低。因此,索托结构一般比斜拉结构的抗风稳定性和整体稳定性要强,且能降低造价,在实际工程中值得推广。如何分析和建立索托结构的有限元模型是非常重要的。而其中索不是固定在滑轮上,它们之间通过滑动接触传递内力,索和滑轮之间的接触问题分析复杂,且正确地用有限元来模拟它更是难度大,故接触问题是索托结构中的难点和关键,如何正确分析和模拟接触问题就变得更加重要。本文根据有限元的基本原理,阐述了如何利用 ANSYS 软件中的接触单元来模拟索和滑轮或其它导索槽之间力学模型,并以一索托桥为例,具体介绍了接触问题的处理方法。

二 接触的基本分类

接触问题既不属于几何非线性,也不属于材料非线性问题,而是边界条件非线性问题。在接触过程中,边界条件不是事先给定的,两接触面之间的面积和应力分布随着荷载的变化而变化,而且和目标刚度有关系。所以接触问题具有高度非线性,而且计算非常复杂。

接触问题属于固体力学范畴,一般分为两种类型:刚性—柔性接触;柔性—柔性接触。在刚性—柔性接触中,将一个或多个接触面看成是刚性的(相对它接触的另一变形体的刚度要大)。总的来说,柔软的物体与坚硬物体相接触一般属于刚性—柔性接触,如金属成型等。而柔性—柔性接触中则两种接触体都容易变形(刚度小),如螺栓边缘等。

接触问题属于边界非线性,其具体解法有多种方式,现在已有一些专门的软件来处理接触问题。现以 ANSYS 软件为例,详细说明接触问题的处理。ANSYS 软件支持三种接触模型:点—点接触;点—面接触;面—面接触(图 1)。而且每一接触模型都有不同的一系列接触元以适用于不同的接触类型。

(一) 点—点接触

点—点接触通常指两接触面之间的相对滑动很小的情况,也可用来模拟接触点成直线的面面

周志亮 北京市城市建设设计研究院

徐国彬 黄国辉 北方交通大学土建学院

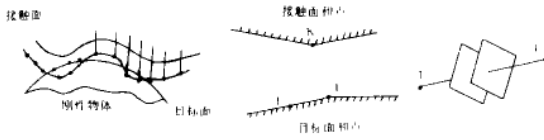


图1 三种接触模型

接触,但是两接触面之间的变形可忽略或偏转很小。点一点接触既可以用来模拟两对立点之间的刚性—柔性,也可以是柔性—柔性接触。ANSYS支持两种接触元 CONTACT12 和 CONTACT52。

(二)点一面接触

点一面接触是工程中发生最多的一种现象,如螺母、螺钉、铆钉和销等扣件,金属形成和旋转操作等现象。可以用来模拟点面之间的刚性—柔性或柔性—柔性接触,而且也可用来代替面之间的接触,只要假定一个接触面为一系列接触点就可以。点一面接触之间一般允许面面之间有比较大的变形,两者之间有相对接触和分离以及库仑摩擦滑动。在 ANSYS 软件中,一般用 CONTACT48 来模拟二维接触,CONTACT49 来模拟三维接触。

(三)面一面接触

面一面接触一般用于锻造和深冲压等目标面是刚性的接触情况,通常用来模拟面面之间的刚性—柔性接触。在 ANSYS 有限元软件中,用 TARGET169 和 CONTACT171 或 CONTACT172 模拟二维接触;TARGET170 和 CONTACT173 或 CONTACT174 模拟三维接触。一般来说,用面面接触模型比用点面接触模型计算要稍微简单一些,因为点面接触模型中单元比较多。

三 基本理论

(一)确定接触类型和接触对

在索托结构中,滑轮或其它导索槽之间固定在梁上,索通过滑轮相对滑动来传递结构内力。索是柔性的物体,滑轮或其它导索槽则是刚性的物体,所以它们之间的接触属于刚性—柔性接触。如果借助 ANSYS 大型有限元通用软件来分析它们之间的内力传递,索和滑轮之间有相对滑动,且可能相对位移比较大,故不能采用点一点接触模型,

而可以采用点一面接触或面一面接触模型。在不同的情况下,采用的模型可能不同,应具体问题具体分析。

接触运动学就是为了清楚明确接触点和接触面之间的接触状态,所以它的首要问题就是要知道二者是处于“断开”(没有接触)还是“闭合”(相互接触)状态。因为在实际的接触分析中,二者之间的接触面积事先是不知道的。所以,确定好接触类型以后,就得确定接触对,定义两接触面之间一个是接触面,哪一个为目标面。在索托结构中,索相对滑轮滑动来传递内力,索是柔性的,故定义成接触面;滑轮则定义成目标面。

(二)接触力

接触力分法向应力 f_n 和两部分,法向应力 f_n 垂直于切向面,切向应力 f_s 则是由于两接触面之间的摩擦而产生的摩擦力。

在 ANSYS 软件中,有补偿法和结合法两种方法来求解法向应力 f_n ,其中结合法是补偿法和拉格朗日乘子相结合的方法。补偿法是通过接触刚度(等补偿参数)来确定接触力;而结合法则通过产生附加接触力(拉格朗日内力)来满足自定义的精度。

补偿法:

$$f_n = \begin{cases} K_n g & g \leq 0 \\ 0 & (g > 0) \end{cases} \quad (3.1)$$

其中: K_n = 接触刚度。

结合法:

$$f_n = \min(0, K_n g + \lambda_{i+1}) \quad (3.2)$$

其中: λ_{i+1} = 第 $i+1$ 步拉格朗日乘子,

$$= \begin{cases} \lambda = a K_n g & |g| \geq \epsilon \\ \lambda & |g| < \epsilon \end{cases} \quad (3.3)$$

ϵ = 自定义的容许误差,

a = 内部计算系数。

切向应力

如果两接触面之间没有摩擦,则

$$f_s = 0 \quad (3.4)$$

对于弹性库仑摩擦,它的变形分为弹性变形(粘接)和滑动变形(无弹性)两部分,如下式所示:

$$u_s = u_s^e + u_s^s \quad (3.5)$$

其中: u_s^e = 弹性切向变形,

u_s^s = 滑动(无弹性)切向变形。

$$f_s = \begin{cases} K_1 u_s' < \widetilde{F} f_s & \text{粘接} \\ \widetilde{f}_s & \text{滑动} \end{cases} \quad (3.6)$$

其中: K_1 = 滑动刚度

\widetilde{f}_s = 库仑摩擦的极限粘接力

F = 静力/动力摩擦系数

极限粘接力:

$$\widetilde{f}_s = -u f_n \quad (3.7)$$

u = 滑动摩擦系数。

四 实例分析

一座公路钢—混凝土组合梁索托桥,如图2所示,中间的三根索穿过梁去托住梁。利用 ANSYS 有限元通用软件进行整体分析时,索和滑轮的接触利用 ANSYS 中的接触单元来模拟有限元模型。具体分析如下:



图2 索托桥的整体分析模型

(一) 确定接触类型和接触对

首先,本桥中索是柔性的,滑轮是刚性的,选用点一面接触单元来模拟。因为是整体分析,故用二维接触单元 CONTACT48 来模拟索和滑轮的相互滑动。

接着,将索中和滑轮接触的一系列点定义成接触点,滑轮定义成目标面。若采用聚氟乙烯板,则摩擦系数非常小,为了简化计算可假设它们之间无摩擦。在建立模型时,将一根整体索离散成几个索单元,尤其是接触的那一部分,多离散成几个单元,如图3所示。

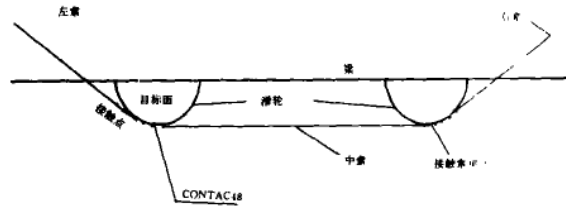


图3 接触模型

(二) 结果分析

如表1所示,我们可以看出,一根整体索离散成一些索单元,它们的应力几乎相等。如第一根索,左边单元和右边单元的内力差为0.4%,边索和中索的内力差为4.5%,而中索和接触索的内力差则仅为1.2%。从这些数据可以知道,此座桥中索和滑轮的接触问题得到了很好的解决。

索的应力(MPa.) 表1

索号	单元号						
	左	右	中	接触单元			
1	2.134	2.142	2.244	2.216	2.216	2.216	2.216
2	2.218	2.134	2.277	2.232	2.232	2.232	2.232
3	2.042	2.047	2.152	2.168	2.168	2.168	2.168

五 结论

ANSYS 大型有限元通用软件中的接触单元不但种类多能适用不同接触类型,而且由实例分析可以看出处理结果理想,故索托结构中的接触问题可用它来圆满解决。

参考文献

- [1]林元培,斜拉桥,北京,人民交通出版社,1994
- [2]王勖成,邵敏,有限单元法基本原理和数值方法,北京,清华大学出版社,1997
- [3]周志亮,一种新型缆索承重桥—索托桥,铁道建筑,2000.(2)
- [4]ANSYS WORKBOOK (Edition 5.4)