## 岩土体的本构模型在 Marc 中的实施

### 苏静波<sup>1</sup> 尹建兵<sup>2</sup> 董兴平<sup>1</sup>

(1.河海大学土木工程学院,江苏南京 210098 2.中港三航局南京分公司,江苏南京 210011)

摘 要:在地下工程的数值模拟过程中,合理地模拟岩土体的本构关系是非常重要的。对大型有限元计算分析软件 Mare 进行了二次开发,介绍了如何在 Mare 中施加土体的 Duncan – Chang 非线性弹性模型和岩体的 Drucker – Prager 弹塑性模型。并通过工程实例表明文中所述方法是合理可行的。

关键词 :本构模型; Duncan – Chang 模型; Drucker – Prager 模型; MARC 有限元软件 中图分类号: TU311.41 文献标识码: A 文章编号:1671 – 5322(2005)01 – 0006 – 03

地下工程施工动态仿真数值模拟包括两大部 分<sup>[1]</sup>(1)确定合适的岩土介质本构模型及其物理 力学性态参数(2)准确模拟整个施工动态响应过 程。由于岩土介质的复杂性,对本构模型的仿真 显得更为重要。本文对地下工程施工动态模拟过 程中常用的两类岩土体本构模型<sup>23</sup>(Duncan – Chang 非线性弹性模型和岩体的 Drucker – Prager 弹塑性模型)的基本理论及其在大型有限元计算 软件 MARC 中的实施分别进行了阐述;并针对具 体工程实例进行了计算分析。

1 土体的 Duncan – Chang 非线性弹性模型

1.1 Duncan - Chang 非线性弹性模型基本理论

常规三轴试验中,在不变条件下施加,并测出 轴向应变和体积应变,点绘曲线,如图1所示。康



纳等人发现,可以用双曲线拟合这些曲线。对于 某一,关系可表示成,式中, a 和 b 为试验常数。 上式可写为。以为纵坐标,为横坐标,则双曲线可 转换成直线,见图 2,其斜率为 b,截距为 a。



邓肯和张利用上述关系推导出了切线弹性模量 *E*, 和泊松比μ, 的计算公式:

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{\left(1 - \sin\phi \right) \left(\sigma_1 - \sigma_3\right)}{2c\cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi} \right] kPd(\sigma_3 Pa)^n (1)$$

$$\mu_{t} = \frac{G - Flg(\frac{\sigma_{3}}{Pa})}{(1 - A)^{2}}$$
(2)

式中 C,  $\phi$ ,  $R_f$ , k, n, G, F, D 分别为 Duncan – Chang 模型 的试验参数。

由式(2)算得的  $\mu_t$  有时可能大于 0.5,在试验中测得 的  $\mu$  值也确有可能超过 0.5,这是由于土体存在剪胀性引

作者简介 ·苏静波 1979 - ) ,男 ,河南邓州人 ,河海大学土木工程学院博士研究生 ,研究方向 :数值计算新方法、结构静动态分析及稳定性等方面的研究。

<sup>\*</sup> 收稿日期 2005-01-20

起的。但在有限元计算中, $\mu$ 若大于或等于 0.5,劲度矩 阵就可能出现异常。因此,实际计算中,当 $\mu$ 大于 0.49, 取 $\mu$ 等于 0.49。

1.2 Duncan - Chang 非线性弹性模型在 Marc 中的实施

在 Mare 中,可使用一个名为 HYPELA 的子程 序来定义 Duncan – Chang 非线性弹性模型。此子 程序是通过材料特性里的 HYPOELASTIC 里的子 程序接口" USER SUB. HYPELA "来调用的。通过 子程序的实施, Mare 可自动计算出土体的切线弹 性模量和切线泊松比,并且施加给单元。

编制的子程序具体实施步骤为:

(1)通过 MARC 公用块调出单元在整体坐标 方向的应力,求解出主应力分量  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ;

(2) 输入每层土的 Duncan – Chang 模型的 8 个 参数;

(3) 根据公式(1)和(2) 计算出单元的弹性模 量和泊松比;

(4)计算出单元劲度矩阵,最后返回 MARC 计 算主程序;

(5) 旅次对每个单元进行循环,直到所有单元 都计算完毕;

其中,数据的传递是通过公用块实现的;头文件及各符号含义见 Marc 帮助文件 D 卷中;所用到的公用块为'/common/space'、'/common/matdat'、'/common/maters '等,具体参考 D 卷中介绍。

2 岩体的 Drucker – Prager 弹塑模型

2.1 Drucker - Prager 弹塑模型基本理论

Drucker – Prager 弹塑性模型是较早提出的且 适用于岩体材料的弹塑性本构模型。目前,理想 塑性屈服准则常用的有十多种,但在岩土工程中 应用较广泛的有 Morh – Coulomb 准则和 Drucker – Prager 准则。鉴于 Morh – Coulomb 准则在计算上 存在的困难,弹塑性有限元程序中大都采用 Drucker – Prager 准则。它的最大优点在于采用简 单的方法考虑静水压力对屈服强度的影响,模型 参数少,计算简单。同时该模型考虑了岩体材料 的剪胀性与扩容性。

Drucker - Prager 准则的屈服函数表示为:

 $F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0$  (3) 式中  $I_1, J_2$  分别为应力状态第一不变量和偏应 力张量第二不变量。其值为:

$$I_{L} = \sigma_{x} + \sigma_{y} + \sigma_{z}$$
(4)

α、K 为应力不变量的函数。其值为:

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3+\sin^2\varphi}} \tag{6}$$

$$K = \frac{\sqrt{3}C\cos\varphi}{\sqrt{3 + \sin^2\varphi}} \tag{7}$$

式中  $C, \varphi$  分别为岩体材料的粘聚力和内摩擦角。

2.2 Drucker – Prager 弹塑模型在 MARC 中的实施

MARC 中线性 Morh – Coulomb 准则的屈服函数为:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \frac{\sigma}{\sqrt{3}} = 0 \qquad (8)$$

由式(8)和式(3)类比可得, Marc 中线性 Morh - Coulomb 准则的屈服函数与 Drucker - Prager 准 则的屈服函数是雷同的,不同的仅仅是系数的取 值而已。经过与式(6)和式(7)的换算可得, Marc 中 Drucker - Prager 准则是通过下面两个公式(9) 和式(10)计算出和,然后施加为弹塑性模型的线 性 Morh - Coulomb 准则的相关参数来实现的。

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3+\sin^2\varphi}} \tag{9}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3C\cos\varphi}}{\sqrt{3+\sin^2\varphi}} \tag{10}$$

式中 C 为内聚力 , $\varphi$  为内摩擦角。

3 工程实例

某大跨悬索大桥,其锚碇采用的是 69 m×50 m 的矩形基础,基坑开挖深度约 48 m,地下连续 墙围护,采用逆筑法施工,满载时大缆拉力为 6.8 万 t。该锚碇基础覆盖层厚度约 48 m,自上而下 为亚粘土、淤泥质亚粘土、淤泥质亚粘土与粉砂互 层、中细砂~中粗砂,基岩为花岗岩。表 1 为土层 物理力学性质指标。计算中土体材料采用本文所 述 Duncan – Chang 非线性弹性模型,岩体材料采 用本文所述 Drucker – Prager 弹塑性模型。整体计 算模型经离散后,单元总数为 47 940,结点总数为 48 670。图 3 为三维整体计算网格图,图 4 为锚碇 体在大缆拉力作用下的增量位移。

					•							
	畄	榵		天然容重 ( kN/m <sup>3</sup> )	Duncan – Chang 参数							
材料	7∓ ∕k	1 <b>≠</b> Pa	泊松比		C ⁄kPa	¢( <sup>0</sup> )	$R_{f}$	k	n	G	F	D
亚粘土夹粉砂				18.9	8.5	33.0	0.75	117.5	0.57	0.20	0.10	3.87
淤泥质亚粘土				18.1	35.0	29.0	0.85	60.0	0.58	0.13	0.09	4.98
淤泥质亚粘土 与粉砂土层				18.2	18.0	33.0	0.70	92.6	0.62	0.16	0.12	5.75
粉细砂				18.1	1.0	36.0	0.54	165.5	0.79	0.22	0.08	6.50
亚粘土				19.1	25.0	31.0	0.74	87.4	0.67	0.18	0.09	4.04
上部粉细砂 下部砾砂				18.2	7.0	39.0	0.87	195.7	0.73	0.20	0.08	5.86
含砾中砂 ~ 砾砂	•			18.0	2.5	41.0	0.86	233.3	0.70	0.23	0.09	3.97
强风化岩	3.051	E + 06	0.241	23.6	3 400	42.8						
弱风化岩	1.64I	E + 07	0.236	25.0	7 200	48.9						
微风化岩	5.861	E + 07	0.192	26.4	11 000	53.5						

表1 土层物理力学性质指标

Table1 Physical index of soil



图 3 三维整体计算网格图 Fig.3 Three – dimensional gridding map

对于如此巨大的网格模型,每个增量步的计算时 间大约为20min,可见Mare对于非线性有限元的 计算效率是非常高的。由图4可以看出,计算所 得结果比较符合实际变形规律,大小也是比较合 理的。由此可见,文中方法对于大型结构的非线 性有限元计算是合理、有效的。

4 结论

总的来说,要合理地模拟岩土体真实的本构

#### 参考文献:

万方数据

- [1] 朱合华,丁文其.地下结构施工过程的动态仿真模拟分析[J].岩石力学与工程学报,1999,18(5):497~502.
- [2] 钱家欢 殷宗泽.土工原理与计算 M].北京 水利出版社,1980.
- [3]朱百里,沈珠江.计算土力学[M].上海:上海科学技术出版社,1990.
- [4] 陈火红. Mare 有限元实例分析教程 M]. 北京 机械出版社 2002.



图 4 锚碇体垂向(z 方向)增量位移图(单位 m) Fig.4 Vertical direction(z direction) increment displacement of anchor - solid

关系是非常复杂的和困难的。本文采用来模拟岩 土体材料的 Duncan – Chang 非线性弹性模型和 Drucker – Prager 弹塑模型,并结合大型有限元计 算分析软件 Mare 的二次开发来模拟地下工程施 工中岩土体的工作性态及变形和应力的分布规 律。经过工程实例的分析验证,本文方法对该工 程是切实可行的,且为其它类似工程提供了一定 的借鉴方法。

### 参考文献:

- [1] Dufresns F, Gerber H U. Risk theory for the compound Poisson process that is perturbed by diffusior[J]. mathematics and Econom ics, 1991 (10):51 – 59.
- [2] Furrer H J, Schmidli H. Exponential inequalities for ruin probabilities of risk process perturbed by diffusior[J]. mathematics and Economics, 1994 (15) 23 – 36.
- [3] 孙立娟,顾岚.保险公司赔付破产的随机模拟与分析[J].数理统计与管理,1999,18(4)25-30.
- [4] Wang G, Wu R. Some Distributions for Classical Risk Process that is Perturbed by Diffusior[J]. mathematics and Economics, 2000 (26):15 – 24.
- [5] Si Jiandong, Wangzhenyu, Wangguojing. Ruin Problem For a Class of risk Process Perturbed by Diffusion [J] Applied Mathemat ics. 2002, 17(4) 435 – 441.
- [6] Grandell. J. Aspects of Risk Theory [M]. Spring verlag, New york, 1991 & -20.
- [7] Arfwedson G. Research in collective risk theory.[M]AktuarTidsr Skand. 1955.
- [8] Cramer H , Collective risk theory [M]. AktuarTidsr : Stockholm. 1955.
- [9] Egerdahl C O. When doesruin occur in the collective theory of risk [M]. AktuarTidskr Skand. 1955.
- [10] Gerber, H. U.数学风险论导引[M].成世学,严颖译.北京.世界图书出版公司,1997.

# Finite Time Ruin Probability for a Class of Risk Processes Perturbed by Diffusion

SI Jian – dong<sup>1</sup> Wang Cheng – gang<sup>2</sup>

(1. Department of Foundamental Sciences Teaching Xancheng institue of technology Jiangsu Yancheng 224003 China)

2. Yancheng Middle School , Jiangsu Yangcheng 224001 ,China

Abstract In this paper, the author addresses a class of risk processes perturbed by diffusion and ortains the "time – dependent" Lundberg inequality, the "time – dependent" Lundberg exponent for the finite time ruin probability and its relation with the probability of ruin within infinite time. He compares the size of the Lundberg exponents, critical value for different kinds of risk model and also analyzes the numerical illustration for the impact of the parameters on the ruin probability.

Keywords finite time ruin probability; risk processes; time – dependent Lundberg inequality; time – dependent Lundberg exponent; Poisson processes, Brownian motion.

(上接第8页)

## Implement of Constitutive Models of Rock - Soil Mass in Marc

SU Jing –  $bo^1$ , YIN Jian –  $bing^2$ , DONG Xing –  $ping^1$ 

(1. College of Civil Engineering ,Hohai University ,Jiangsu Nanjing 210098 ,China)

2. China Harbor Engineering Company ,Jiangsu Nanjing 210011 ,China

Abstract The reasonable constitutive relations of rock – soil mass is very important in the process of numerical simulation of underground engineering. The large software of Marc about finite element is secondly developed. The realization methods about Duncan – Chang non-linear elastic model and Drucker – Prager elasto – plastic model are described. The engineering example shows that the methods are right and reasonable.

Keywords :constitutive model; Duncan – Chang model; Drucker – Prager model; Marc software 万方数据