

Secondary Development of Generalized M—C Strength Criterion in FLAC^{3D}

Wufeng Huang¹ Hua Liu²

1. The Fourth Engineering Company Of China Railway Seventh Group Co.,Ltd., Wuhan, Hubei, 430074, China
2. Central and Southern China Municipal Design & Research Institute Co.,Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

The generalized M—C strength criterion is proposed based on the first law of thermodynamics in consideration of the influence of the intermediate principal stress. In order to verify the feasibility of the strength criterion, FLAC^{3D} is used as the simulation software and visual studio 2010 is used as the compiler to customize the generalized M—C strength criterion of the constitutive model. In FLAC^{3D}, a simple simulated triaxial test was used to compare and analyze the calculation results of the generalized M—C strength criterion and the M—C strength criterion. The calculation results of the generalized M—C strength criterion in FLAC^{3D} simulation are slightly larger than the calculation results of the M—C strength criterion, which is consistent with the calculation results of the M—C strength and the generalized M—C strength theory formula. The generalized M—C strength criterion is successfully embedded in FLAC^{3D}, and the generalized M—C strength criterion can be applied to related research and calculation of geotechnical engineering.

Keyword

M—C strength criterion; generalized M—C strength criterion; triaxial test

广义 M—C 强度准则在 FLAC^{3D} 中的二次开发

黄武峰¹ 刘华²

1. 中铁七局第四工程有限公司, 中国·湖北 武汉 430074
2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 中国·湖北 武汉 430023

摘要

广义M—C强度准则在考虑到中间主应力的影响, 基于热力学第一定律被提出。为验证该强度准则可行性, 以FLAC^{3D}为模拟软件, visual studio 2010作为编译器, 自定义本构模型广义M—C强度准则。在FLAC^{3D}中以一个简单模拟三轴试验对比分析广义M—C强度准则和M—C强度准则计算结果。FLAC^{3D}模拟中广义M—C强度准则计算结果略大于M—C强度准则计算结果, 符合M—C强度和广义M—C强度理论公式计算结果。广义M—C强度准则成功嵌入FLAC^{3D}中, 且广义M—C强度准则可应用于岩土工程相关研究和计算。

关键词

强度准则; M—C强度准则; 三轴试验

1 引言

随着地下空间的应用和发展越来越多, 岩土工程领域的基建科研水平也随之提高。岩土工程材料的力学性能一直是研究热门话题, 也是影响地下空间发展的阻碍之一。现有的强度准则虽百花齐放, 却也存在着各种问题, 强度理论的不断提出, 却都难有一种强度准则适用于各种复杂的应力状态。

热力学第一定律经过多位物理学家验证, 于 19 世纪中期被正式确立为科学定律。M—C 强度准则被提出后, 大量学者对该准则进行了研究、补充和修正, 也取得了一些成果。

高红等^[1]研究了 M—C 强度准则和三剪能量准则的对比, M—C 强度准则计算的误差更大, 基于能量守恒原理对强度准则进行研究是可行的。

基于热力学第一定律对强度准则进行研究, 也受到了广泛的关注。基于能量原理, 增加了对中间主应力的影响, 对 M—C 强度准则进行修正, 并提出了广义 M—C 强度准则^[2-4]。

2 广义 M—C 强度准则

1773 年, 有关于岩土材料强度的准则被 Coulomb 提出, 该强度理论对材料的极限抗剪强度表示为

$$\tau^0 = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中 σ 为剪切面上的正应力 (压为正, 拉为负), c 为材料的粘聚力, φ 为材料的内摩擦角, τ^0 为材料极限抗

【作者简介】黄武峰 (1995-), 男, 中国湖北武汉人, 硕士, 助理工程师, 从事岩土工程研究。

剪强度，图1表示 $\sigma-\tau$ 平面上关系。

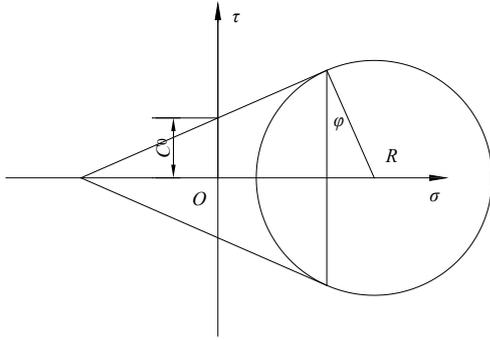


图1 M—C 强度准则

1882年，Mohr提出莫尔强度准则，其准则认为材料内的某个点的破坏受最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 影响，而中间主应力 σ_2 无影响。Mohr以新的理论解释了Coulomb提出的式(1)。式(1)也被称为M—C准则或方程。

两组不同的材料参数以及他们之间的关系见图2。C、 ϕ 和压缩强度极限 σ_c 、单轴拉伸极限 σ_t 、单轴的关系为：

$$\begin{aligned} \sin\phi &= \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \\ C &= \frac{(1 + \sin\phi)\sigma_t}{2\cos\phi} \end{aligned} \quad (2)$$

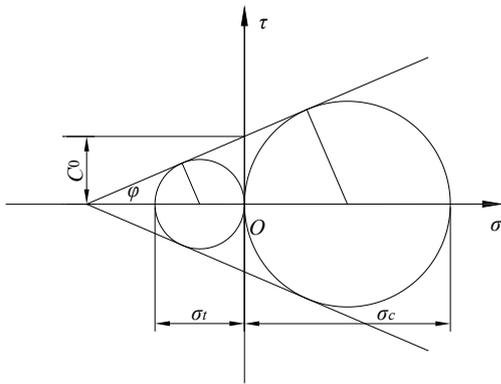


图2 $\sigma-\tau$ 极限线

式(3)为材料强度的统一表达式。

$$\sqrt{J_2} = f(I_1, J_3, K_1, K_2, K_3, \dots) \quad (3)$$

I_1 、 J_3 分别为应力张量第一不变量和应力偏量第三不变量， K_1 、 K_2 、 K_3 为材料参数。

M—C强度准则的表达式为：

$$\sqrt{J_2} = \frac{(I_1 \sin\phi + c \cos\phi)}{\cos\theta_\sigma + \frac{\sin\theta_\sigma \sin\phi}{\sqrt{3}}} \quad (4)$$

其中， θ_σ 为罗德角。

广义M—C强度准则用式(5)表示。试验数据拟合可得 ν ， ν 为拟合泊松比，与材料泊松比 μ 不同^[5-7]。

$$\sqrt{J_{2g}} = \sqrt{J_2 - \frac{1-2\nu}{3} I_2} = \frac{(I_1 \sin\phi + c \cos\phi)}{\cos\theta_\sigma + \frac{\sin\theta_\sigma \sin\phi}{\sqrt{3}}} \quad (5)$$

为使 U_c 、 U_{e2} 及 U_{e2} 正负号表达的物理意义相同。负表示弹性应变能，正表示可释放弹性应变能。由式(3)-(5)可得：① $\nu < (1+k_2^2+k_3^2)/2(k_2+k_3+k_3)$ ， U_c 恒 >0 ；②与 J_2 相关的弹性应变能 U_{e2} 恒 ≥ 0 ；③与 I_2 相关的弹性应变能 U_{e2} 可 >0 ， <0 或 $=0$ 。

J_2 为应力偏量第二不变量， I_2 为应力张量第二不变量。根据能量的耗散与释放原理，定义 J_{2g} 为广义应力偏量第二不变量， J_{2g} 可反映出岩石在某种应力条件下储存的弹性应变能。 J_{2g} 相较于 J_2 对岩石特性的描述更合适。

3 FLAC^{3D} 二次开发

在FLAC^{3D}中头文件Modelgmohr.h的M—C模型模板定义的参数有摩擦角、剪切模、体积模量、粘聚力等。二次开发广义M—C强度准则需将拟合泊松比 ν 这个新的变量加入M—C模型中，fpoisson表示拟合泊松比见图3。杨氏模量E、体积模量K、剪切模量G见式(6)、(7)，拟合泊松比 ν 是新定义的参数与G、K计算无关，需单独定义。

以模型名称命名新的自定义本构模型，用gmohr表示自定义的广义M—C本构模型。在visual studio 2010中，选择FLAC3D500 Constitutive Model，将gmohr填入modelname。visual studio 2010中找到源文件Modelgmohr.cpp和头文件Modelgmohr.h，该头文件和源文件为默认M—C强度准则文件，模板文件中可直接修改。二次开发自定义本构模型的主文件是源文件Modelgmohr.cpp和头文件Modelgmohr.h。

```

32 private:
33     Double bulk_shear_cohesion_friction_dilation_tension_fpoisson;
34     Double e1_e2_g2_nph_csn_scl_sc2_sc3_bisc_e21_rmps;
35 };
36 // namespace models
37
38 // EOF
39

```

图3 Modelgmohr.h中定义变量

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (6)$$

$$K = \frac{E}{3-6\mu} \quad (7)$$

在visual studio 2010中将FLAC^{3D}源文件Modelgmohr.cpp和头文件Modelgmohr.h编辑完成后。再将解决方案调到x64和Release，并重新生成解决方案^[8,9]。

4 FLAC^{3D} 中广义M—C强度准则验证

在FLAC^{3D}中对广义M—C强度准则自定义本构模型二次开发后，以一个简单模拟三轴试验验证二次开发的广义M—C强度准则，并和M—C强度准则进行对比。模拟计算前先加载自定义本构模型并加载dll文件。

模拟三轴试验中，式样为圆柱体，直径为高的1/2，定义Y方向（平面方向）动力加速度为10m/s²。

定义材料参数：粘聚力、摩擦角、材料密度，剪切模量、体积模量等。用位移控制轴压 σ_2 ，围压 $\sigma_2=\sigma_3=10\text{MPa}$ ，屈服应力在运行计算20000步后达到。图4为M—C强度准则模拟计算得三轴试验Y方向的应力云图，其最大应力 $\sigma_1=149.7\text{MPa}$ 。图5为三轴试验Y方向应力云图，计算结果由广义M—C强度准则模拟计算，其最大应力 $\sigma_1=153.86\text{MPa}$ 。对比两次模拟计算结果，广义M—C强度准则计算结果略大于M—C强度准则计算结果，这和式(4)、式(5)计算结果相符合，充分说明广义M—C强度准则在FLAC^{3D}中二次开发本构模型成功并计算。FLAC^{3D}三轴试验模拟证明

广义M—C强度准则可用于岩土工程相关研究及计算。

5 结论

在FLAC^{3D}中嵌入二次开发的广义M—C强度准则，visual studio 2010为编译工具对FLAC^{3D}中M—C强度准则进行修改，Modelgmohr.h头文件中定义参数，Modelgmohr.cpp源文件中定义基类函数，对自定义本构模型进行注册并加载运行。

在FLAC^{3D}以一个简单的模拟三轴试验对比验证广义M—C准则和M—C准则。模拟计算结果表明，基于热力学原理提出的广义M—C强度准则在考虑到了中间主应力的影响，其计算结果应更接近实际值，广义M—C强度准则可以应用于岩土工程相关研究及计算。

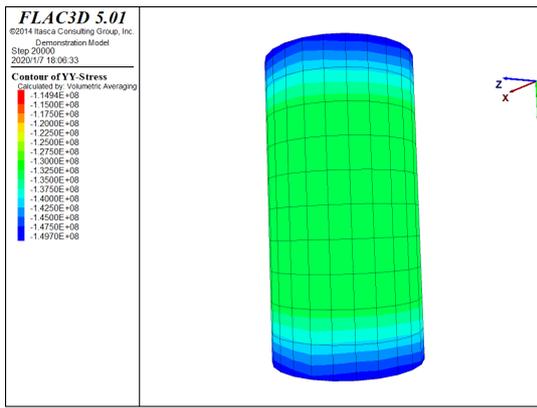


图4 M—C模拟三轴压缩试验Y方向应力云图

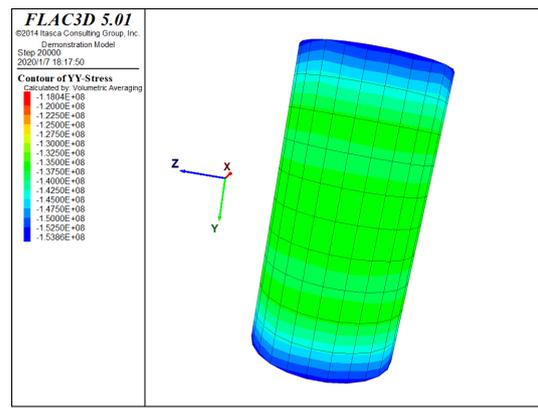


图5 GM—C模拟三轴压缩试验Y方向应力云图

参考文献

- [1] 高红,郑颖人,冯夏庭.岩土材料能量屈服准则研究[J].岩石力学与工程学报,2007(12):2437-2443.
- [2] 谢和平,鞠杨,黎立云.基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J].岩石力学与工程学报,2005(17):3003-3010.
- [3] 谢和平,鞠杨,黎立云,等.岩体变形破坏过程的能量机制[J].岩石力学与工程学报,2008(9):1729-1740.
- [4] 黄武峰.基于弹性应变能M—C强度准则的修正及工程应用研究[D].贵阳:贵州大学,2020.
- [5] 郭建强,刘新荣,王军保,等.基于弹性应变能的岩石强度准则[J].岩土力学,2016(S2):129-136.
- [6] 郭建强,刘新荣,黄武峰,等.基于弹性应变能的Mohr-Coulomb强度准则讨论[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(9):1168-1174.
- [7] 郭建强,黄武峰,刘新荣,等.基于可释放应变能的岩石扩容准则[J].煤炭学报,2019,44(7):2094-2102.
- [8] 王涛,韩焯,赵先宇,等.FLAC3D数值模拟方法及工程应用——深入剖析FLAC3D5.0[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [9] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC3D基础与工程实例(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,2013.