

文章编号: 1000-7598-(2006)11-1997-04

基于统一强度理论分析不连续面对岩体强度的影响

李杭州¹, 廖红建^{1,2}, 冯夏庭², 冷先伦²

(1. 西安交通大学 土木工程系, 西安 710049; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 基于统一强度理论, 对含有结构面的岩体, 在平面形式下引入材料统一强度参数 c_t , ϕ_t , 推导了含单个节理裂隙岩体材料的统一强度公式, 即考虑中间主应力的岩体破坏强度公式, 并分析了其有效范围。运用硅藻质软岩和石膏的三轴试验结果, 验证了所建立的公式的正确性, 并分析了具有不连续面岩体的强度随中间主剪应力作用系数 b 的变化。结果表明, 岩体强度随 b 值的增大而增大。根据岩土材料统一强度参数的确定方法, 计算并分析了 b 值对强度参数的影响, 从而说明强度参数随着 b 值的变化而变化。

关 键 词: 统一强度理论; 不连续面; 岩体强度

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Analysis of influence of discontinuous plane on strength of rock mass based on unified strength theory

LI Hang-zhou¹, LIAO Hong-jian^{1,2}, FENG Xia-ting², LENG Xian-lun¹

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on unified strength theory, considering condition of plane style of rock mass with discontinuous plane, the unified strength formulation for strength of rock mass with single joint, i.e. failure criterion of rock mass of considering the intermediate principal stress, is derived by introducing unified strength parameters c_t and ϕ_t of material; and the effective range of formulation is analyzed. The proposed formulation is verified by triaxial experiments of diatomaceous soft rock and gypsum; and the change of strength of rock mass with the variation of parameter b of intermediate principal shear stress is analyzed; and the results show that the strength increases with the increasing of parameter b . The parameters c_t and ϕ_t are calculated and analyzed in term of determination method of parameters c_t and ϕ_t of geomaterial; and note that they change with parameter b .

Key words: unified strength theory; discontinuous plane; strength of rock mass

1 引 言

岩体中存在着纵横交错的各类地质结构面, 在力学上则表现为存在着不连续面、弱面或软弱夹层^[1], 这些结构面对岩体力学性质和岩体工程的稳定性起着重要的控制作用。在一定条件下岩体将沿着结构面发生破坏, 采用经典的弹塑性力学已经不能很好地解决问题, 必须从结构面入手。而要研究含有结构面的岩体, 首先要考虑这些不连续面对岩体强度的影响。目前, 国内外对这方面进行了大量的研究, 如采用 Mohr-coulomb 准则分析软弱夹层对岩体强度的影响^[1]。文献[2]运用 Hoek-Brown 强度准则求

得含节理岩体的强度, 文献[3, 4]分别采用不同的方法引用断裂强度因子对节理岩体的强度进行分析, 文献[5]综述了 Patton 剪胀强度准则、Jaeger 负指数剪切强度准则、Barton 经验强度准则等。但是, 在上述的研究中均没有考虑中间主应力的影响, 致使强度发挥偏于安全。

然而, 大量的岩石三轴试验已经证明, 岩石的强度和破坏不仅与最大和最小主应力有关, 而且还与中间主应力密切相关, 即存在着中间主应力效应^[6], 文献[7]对单节理岩体在真三轴状态下的强度特性进行了分析, 认为中间主应力对岩体强度有影响。俞茂宏教授自 1991 年提出了材料的统一强度理论^[8],

收稿日期: 2005-01-24

修改稿收到日期: 2005-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50379043), 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室基金项目 (No. Z110503)。

作者简介: 李杭州, 男, 1977 年生, 博士生, 主要从事岩土材料强度特性方面的研究工作。E-mail: lihangzhou03@tom.com

并在一些领域得到了广泛应用。

本文依据统一强度理论对含有结构面的岩体强度进行分析。基于统一强度理论,引入材料统一强度参数 c_t , φ_t , 推导了含单个裂隙岩体材料的强度公式,即考虑中间主应力岩体的破坏强度,并分析了公式的有效范围。根据岩土 c_t , φ_t 的确定方法,说明其值随 b 值的变化而不同。通过试验验证本文所建立的公式的正确性。

2 平面形式的统一强度

考虑作用于双剪单元上的全部应力分量以及它们对材料破坏的不同影响,可建立一个新的统一强度理论^[8]。其定义为:当作用于双剪单元体上的 2 个较大剪应力及其面上的正应力影响函数到达某一极限值时,材料开始发生破坏。其主应力数学表达式为

$$(1) \text{ 当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi_0 \text{ 时}$$

$$F = \frac{1+b}{2} \sigma_1 - \frac{\sigma_3}{2} - \frac{b}{2} \sigma_2 + \sin \varphi_0 \cdot \left(\frac{1+b}{2} \sigma_1 + \frac{b}{2} \sigma_2 + \frac{\sigma_3}{2} \right) = (1+b) c_0 \cos \varphi_0 \quad (1)$$

$$(2) \text{ 当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi_0 \text{ 时}$$

$$F = \frac{1}{2} \sigma_1 + \frac{b}{2} \sigma_2 - \frac{1+b}{2} \sigma_3 + \sin \varphi_0 \cdot \left(\frac{1}{2} \sigma_1 + \frac{b}{2} \sigma_2 + \frac{1+b}{2} \sigma_3 \right) = (1+b) c_0 \cos \varphi_0 \quad (2)$$

式中 b 为反映中间主剪应力作用的系数; c_0 , φ_0 均为材料的强度参数。令:

$$\sigma_2 = \frac{m}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3)$$

将式 (3) 分别代入式 (1)、式 (2), 并整理得

(1) 当 $m \leq 1$ 时

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi_t + 2c_t \cos \varphi_t \quad (4)$$

(2) 当 $m \geq 1$ 时

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi'_t + 2c'_t \cos \varphi'_t \quad (5)$$

式中 φ_t , c_t , c'_t , φ'_t 均为统一强度参数, 与参数 m , b 有关。

$$\sin \varphi_t = \frac{b(1-m) + (2+b+bm) \sin \varphi_0}{2+b+b \sin \varphi_0} \quad (6)$$

$$c_t = \frac{2(b+1)c_0 \cos \varphi_0}{2+b+b \sin \varphi_0} \frac{1}{\cos \varphi_t} \quad (7)$$

$$\sin \varphi'_t = \frac{b(m-1) + (2+b+bm) \sin \varphi_0}{2+b-b \sin \varphi_0} \quad (8)$$

$$c'_t = \frac{2(b+1)c_0 \cos \varphi_0}{2+b-b \sin \varphi_0} \frac{1}{\cos \varphi'_t} \quad (9)$$

从式 (4)、式 (5) 可以看出, 变化后的统一强度理论在形式上和 Mohr-Coulomb 强度准则一致。

3 单节理岩体的强度分析

3.1 强度公式推导

假设含有单一节理的岩体受力时, 节理与主应力 σ_3 的夹角为 β , 根据力的平衡可以求得节理面上所受的法向力和切向力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \\ \tau &= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

根据式 (4)、式 (5), 节理的破坏条件为

$$\tau = \sigma \tan \varphi_t^j + c_t^j \quad (11)$$

式中 φ_t^j , c_t^j 分别为具有节理的岩体的统一强度参数, 可以根据岩体材料的强度参数 φ_0^j , c_0^j 求得。

本文只进行 $m \leq 1$ 情况下强度公式的推导, 而对于 $m \geq 1$ 情况下的推导过程则完全相同, 只是把 φ_t^j , c_t^j 替换为 $\varphi_t'^j$, $c_t'^j$ 。

把式 (10) 代入式 (11), 整理得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2c_t^j + 2\sigma_3 \tan \varphi_t^j}{\sin 2\beta (1 - \tan \varphi_t^j \tan \beta)} \quad (12)$$

式 (12) 即为含有单个节理岩体的强度破坏准则, 也就是节理岩体的强度公式。

3.2 强度公式的分析

分析式 (12) 可知, 只有在 $\varphi_t^j < \beta < \pi/2$ 时, 式 (12) 才有意义, 此时岩体将沿着节理发生破坏。

将单节理岩体的强度破坏准则式 (12) 求导, 并令其等于 0, 就可求得岩体破坏的最不利位置, 即

$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\varphi_t^j}{2} \quad (13)$$

把式 (13) 代入式 (12) 得岩体破坏时最小强度:

$$\sigma_{\min} = 2(c_t^j + \sigma_3 \tan \varphi_t^j) \tan(45^\circ + \frac{\varphi_t^j}{2}) + \sigma_3 \quad (14)$$

把 φ_t^j , c_t^j 替换为 $\varphi_t'^j$, $c_t'^j$ 可以得到 $m \geq 1$ 时岩体的强度。

4 强度的验证

试验研究结合日本石川县能登半岛端部株洲市区的开发,在第三纪中后期硅藻质泥岩层中采取试样进行试验^[9]。根据试验要求把岩样加工成含不同倾角试样,对其进行完全饱和和三轴试验。根据试验结果可以整理出超固结软岩试样断裂面的有效内摩擦角为 18° ,凝聚力为 0.09 MPa ;正常固结试样断裂面的内摩擦角为 11° ,凝聚力为 0.3 MPa 。围压为 1.0 MPa 时,根据以上数据计算的理论值、试验值绘制于图 1。

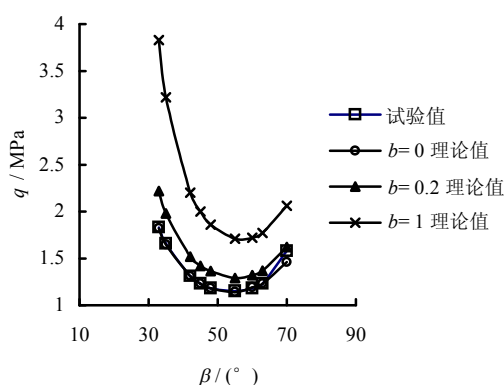


图 1 含单个节理软岩的理论强度值、实验值

Fig.1 Theoretical strength result and experimental result of soft rock with a single joint

从图 1 可以看出,选取不同的 b 值所计算的强度值也不同,且随着 b 值的增大而增大。这是由于在统一强度理论中, b 取不同值时代表不同的强度理论。当 $b=0$ 时,其强度理论即为 Mohr-Coulomb 强度理论,处于强度理论的下限;当 $b=1$ 时,为双剪强度理论,处于强度理论的上限。当 $b=0$ 时,所得的结果最为保守;当 $b=1$ 时,所得的理论值最大。对于硅藻质软岩而言,当 $b=0$ 时,所得的理论值与试验值最为吻合。从图中还可以看出,岩体的强度明显具有方向性,其强度值随着裂隙面与应力 σ_3 方向夹角 β 的改变而改变,且随着 b 值的增大强度的最小值逐渐右移。

为进一步说明不同材料对 b 值的敏感程度,采用文献[10]中的石膏模型进行验证。石膏的物理力学参数为: $E=0.238 \times 10^4 \text{ MPa}$, $\mu=0.2$, 内摩擦角 $\varphi_0=45^\circ$, 内聚力 $c_0=0.38 \text{ MPa}$;节理裂隙参数为: 内聚力 $c'_0=0$, $f=\tan \varphi'_0=0.365$, 围压为 0.2 MPa 。由此计算的理论值、试验值以及文献[10]中的理论值绘制于图 2。从图中可以看出,含节理石膏的强度随节理倾角的变化和硅藻质软岩强度的变化类

似,不同的是石膏体在 $b=1$ 时和试验值较为吻合,且结果明显优于文献[10]的结果。

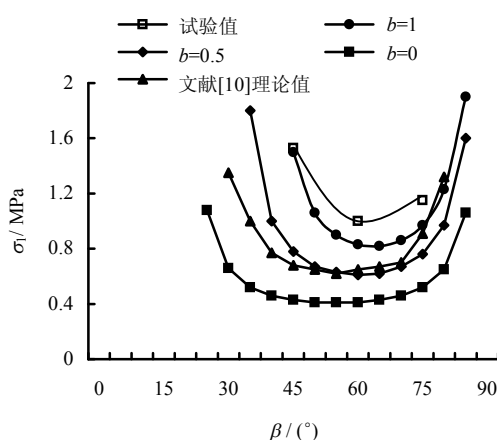


图 2 含单个节理石膏的理论强度值、试验值

Fig.2 Theoretical strength result and experimental result of gypsum with a single joint

对于硅藻质软岩,在节理呈一定倾角的情况下,硅藻质软岩破坏时的强度以及其节理统一强度理论的强度参数随 b 值的变化见图 3、图 4 所示。

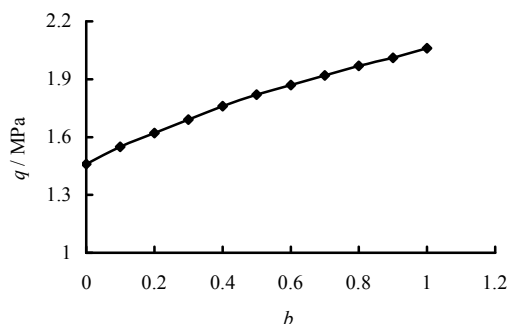


图 3 b 取不同值时软岩体最小值理论强度值的变化

Fig.3 The change of minimum theoretical strength result when b is different

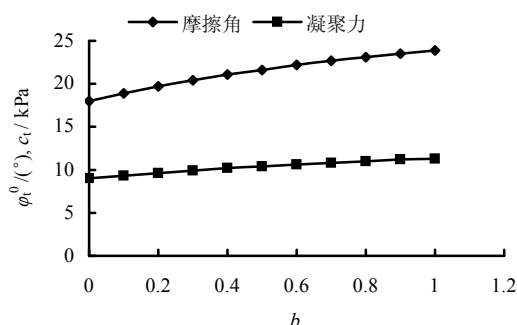


图 4 b 取不同值时节理强度参数的变化

Fig.4 The change of strength parameters of joint when b is different

从图 3 可以看出, 软岩体的强度 q 随 b 值的增大而增大, 这是因为随着 b 值的增大, 其屈服面也是不断增大。因此, 出现强度随 b 值增大的现象。由图 4 也可以看到, 统一强度理论的强度参数 c_t , φ_t 并不像传统的强度参数那样是固定不变的, 而是随 b 值的增大而增大。结合式 (13) 可以进一步说明图 1 以及图 2 中岩体强度曲线随着 b 值的增大而向右移动的现象。

5 结 论

(1) 根据统一强度理论, 引入材料的统一强度参数, 得到含单个节理裂隙岩体的统一强度公式, 即考虑中间主应力效应的强度破坏准则。

(2) 根据统一强度参数 φ_t , c_t 的定义, 分析了随中间主剪应力作用系数 b 值的变化规律。

(3) 通过计算结果与试验结果的对比表明, 当 $b=0$ 时, 其强度理论计算值与含节理的硅藻质软岩试验值吻合; 当 $b=1$ 时, 强度值和含节理裂隙石膏材料的试验值相近。

参 考 文 献

- [1] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 刘东燕, 朱可善. 含断续节理岩体强度的各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 366—371.
LIU Dong-yan, ZHU Ke-shan. A study of strength anisotropy of rock mass containing intermittent joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(4): 366—371.
- [3] 周小平, 王建华, 哈秋龄. 压剪应力作用下断续节理岩体的破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1 437—1440.
ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-hua, HA Qiu-ling. Failure analysis of intermittent jointed rocks under compress-shear stress [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(9): 1 437—1 440.
- [4] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 平面应力条件下闭合断续节理岩体破坏机理及强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 635—640.
BAI Shi-wei, REN Wei-zhong, FENG Ding-xiang, et al. Failure and mechanism and strength properties rock mass containing close intermittent joints under plane stress condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 635—640.
- [5] 夏才初, 孙宗顺. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [6] 许东俊, 耿乃光. 岩石强度随中间主应力的变化规律[J]. 固体力学学报, 1985, 6(1): 72—80.
XU Dong-jun, GENG Nai-guang. The variation law of rock strength with increase of intermediate principal stress [J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 1985, 6(1): 72—80.
- [7] 刘新荣, 姜德义, 鲜学福, 等. 单节理岩体在真三轴压缩状态下强度特性的分析[J]. 力学与实践, 2000, 22(2): 44—46.
LIU Rong, JIANG De-yi, XIAN Xue-fu, et al. Stress analysis of single joint rock under real three-dimension compression[J]. **Act Mechanica Sinica**, 2000, 22(2): 44—46.
- [8] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] 廖红建, 韩波, 高小育, 等. 软岩中断裂面对应力-应变关系影响研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 362—365.
LIAO Hong-jian, HAN Bo, GAO Xiao-yu, et al. The effect of discontinuous plane on stress-strain relationship of soft rocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(3): 362—365.
- [10] 范景伟, 何达江. 含定向闭合节理断续节理岩体的强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(2): 190—199.
FANG Jing-wei, HE Da-jiang. The strength behavior of rockmasses containing oriented and closed intermittent joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1992, 11(2): 190—199.