

文章编号: 1000-5013(2009)06 0694-04

岩体节理非线性法向循环加载本构模型的改进

俞 缙¹, 林从谋¹, 赵晓豹²

(1. 华侨大学 岩土工程研究所, 福建 泉州 362021;

2. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 假定卸载曲线和重加载曲线在法向的起始刚度由前一次加载曲线和卸载曲线决定, 从而完全确定岩体节理循环加载本构方程. 对模型参数的不同取值, 将已有的不同模型统一起来, 通过卸载曲线渐近线内移的方式来反映滞回特性. 将改进的节理弹性非线性法向变形本构模型拓展到循环加、卸载条件下, 考虑节理面几何特性、充填物特性及岩石类型的复杂性, 在将节理变形的非线性程度量化描述的同时, 修正以往模型对曲线形式做出硬性假定的方式. 新模型的预测结果与试验结果吻合良好, 验证了模型的可行性.

关键词: 岩体节理; 循环加载; 非线性法向变形; 本构模型

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

节理非线性法向变形特性, 与岩石的岩性、风化状态、节理面匹配度、节理面粗糙微粒空间和尺度分布状态, 以及接触状态等多种因素有关^[1], 其变形的非线性程度并非固定不变^[2]. 文[3] 从数学上证明了以往模型都具有半值应力不可调的缺陷, 并提出单调加载情况改进的节理弹性非线性法向变形本构关系. 但对于法向循环加载情况, 无论是加卸载过程还是卸加载过程, 都存在能量耗散, 出现法向残余位移, 应力位移曲线存在滞回圈, 试验曲线也证实了这一特性^[4-9]. 本文借鉴文[10] 的思路, 假定卸载曲线和重加载曲线在法向的起始刚度由前一次加载曲线和卸载曲线决定, 从而完全确定循环加载本构方程, 改进了节理弹性非线性法向变形本构模型.

1 节理法向循环加载本构模型改进

1.1 模型建立

在循环加载过程中, 假定接触法向应力 σ 和法向相对位移 v (区别于单调加载情况的 d_n) 均以压缩为正, 而加、卸载的应力-位移关系, 均符合改进的单调加载弹性非线性法向变形本构关系^[3], 如图 1, 2 所示. 图 1 中, d_n 为节理法向闭合量, $K_{n,i}$ 为节理法向初始切线刚度, d_{max} 为节理法向最大允许闭合量, ξ 为描述节理变形非线性程度的修正系数. 图 2 中, C_1 为首次加载曲线, C_2 为卸载曲线, C_3 为重加载曲线, C_4 为第 2 次卸载曲线, 它们对应的法向起始刚度分别为 $K_{n,1}$, $K_{n,2}$, $K_{n,3}$ 和 $K_{n,4}$, 加载曲线的终点分别为 $A(v_1, \alpha_1)$ 和 $B(v_3, \alpha_3)$. 在法向应力为零时, 卸载曲线的相对位移分别为 $v_{r,2}$ 和 $v_{r,4}$. V_{max} 为法向最大压缩位移, $V_{m,2}$, $V_{m,4}$ 分别为卸载曲线 C_2 , C_4 的渐近线, 曲线非线性程度修正系数分别为 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$.

加载曲线 C_1 各参数如前所述, 其函数关系采用改进的岩体节理弹性非线性法向变形本构关系^[3], 即有

$$v = \left[\xi_1 V_{max} \left\{ \exp \left[\frac{(1 - \xi_1) \sigma}{\xi_1 K_{n,1} V_{max}} \right] - 1 \right\} \right] / \left[\exp \left[\frac{(1 - \xi_1) \sigma}{\xi_1 K_{n,1} V_{max}} \right] - \xi_1 \right], \tag{1}$$

收稿日期: 2008-12-25

通信作者: 俞 缙 (1978), 男, 讲师, 硕士生导师, 现为解放军理工大学工程兵学院(江苏 南京 210007)在站博士后, 主要从事岩土力学及地基处理的研究. E-mail: bugyu0717@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40702046); 福建省自然科学基金资助项目(2006J0445); 建设部科学技术项目计划(06-K1-23); 华侨大学高层次人才科研启动项目(08BS414)

$$\sigma = \frac{\xi_i K_{n,1} V_{\max}}{\xi_i - 1} \cdot \ln \frac{\xi_i V_{\max} - v}{(V_{\max} - v) \xi_i} \quad (2)$$

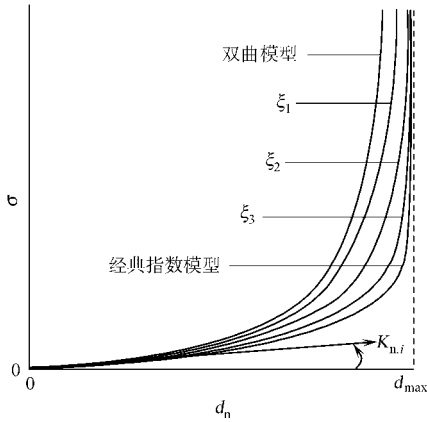


图 1 改进的岩石节理法向变形本构模型示意图

Fig. 1 Schematic figure of improved normal deformation constitutive model of rock fractures

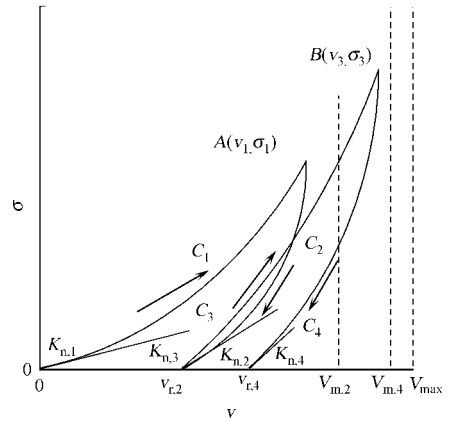


图 2 法向循环加载应力-位移曲线

Fig. 2 Normal stress-displacement curve under normal cyclic loading

此时, 法向刚度表达式为

$$K_n = \frac{\partial \sigma}{\partial v} = \frac{\xi_i K_{n,1} V_m^2}{(V_{\max} - v)(\xi_i V_{\max} - v)} \quad (3)$$

卸载曲线 C_2 经过 A 点, 在法向应力为零时, 曲线在点 $(v_{r,2}, 0)$ 的切线刚度已知, 并且以法向最大闭合量 $V_{m,2}$ 为渐进线. 由于试验资料较少, 暂取 $V_{m,i} = \sqrt{v_{i-1} V_{\max}}$, 可得出卸载曲线 C_2 的数学关系为

$$v = \frac{\xi_i (V_{m,2} - v_{r,2}) \left\{ \exp \left[\frac{(1 - \xi_i) \sigma}{\xi_i K_{n,2} (V_{m,2} - v_{r,2})} \right] - 1 \right\}}{\exp \left[\frac{(1 - \xi_i) \sigma}{\xi_i K_{n,2} (V_{m,2} - v_{r,2})} \right] - \xi_i} + v_{r,2}, \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{\xi_i K_{n,2} (V_{m,2} - v_{r,2})}{\xi_i - 1} \cdot \ln \frac{\xi_i (V_{m,2} - v_{r,2}) - (v - v_{r,2})}{(V_{m,2} - v) \xi_i} \quad (5)$$

重加载曲线 C_3 , 同样经过 A 点, 并且仍以法向最大闭合量 V_{\max} 为渐进线, 有

$$v = \frac{\xi_i (V_{\max} - v_{r,2}) \left\{ \exp \left[\frac{(1 - \xi_i) \sigma}{\xi_i K_{n,3} (V_{\max} - v_{r,2})} \right] - 1 \right\}}{\exp \left[\frac{(1 - \xi_i) \sigma}{\xi_i K_{n,3} (V_{\max} - v_{r,2})} \right] - \xi_i} + v_{r,2}, \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{\xi_i K_{n,3} (V_{\max} - v_{r,2})}{\xi_i - 1} \cdot \ln \frac{\xi_i (V_{\max} - v_{r,2}) - (v - v_{r,2})}{(V_{\max} - v) \xi_i} \quad (7)$$

由式(1)~(7), 可递推得到各次加卸载曲线. 假定各曲线的起始刚度 $K_{n,i}$, 按如下规律取值:

(1) 卸载曲线 C_i 为

$$K_{n,i} = p_1 K_{n,i-1} + (1 - p_1) K_{C_{i-1}}; \quad (8)$$

(2) 加载曲线 C_{i+1} 为

$$K_{n,i+1} = p_2 K_{n,i-1} + (1 - p_2) K_{n,i}. \quad (9)$$

式(9)中, p_1, p_2 为依据法向循环加载试验确定的常数, 取值范围为 $[0, 1]$; $K_{C_{i-1}}$ 为加载曲线 C_{i-1} 的割线刚度. 在缺乏试验资料时, 可取 $p_1 = p_2 = 0.50$, 即对于卸载曲线, 取此前加载曲线初始刚度、割线刚度的平均值; 而对于加载曲线, 取此前加载曲线和卸载初始刚度的平均值.

1.2 模型验证与分析

Jing 等^[5] 假定卸载曲线取与加载曲线相切的线性函数. 在本模型中, 令 $K_{n,2} = K_{n,A}$, 其中, $K_{n,A}$ 为 A 点的加载曲线的切向刚度, 则有

$$\sigma = K_{n,A} (v - v_{r,2}). \quad (10)$$

卸载曲线 C_2 由双曲线退化为直线, 此时不需要参数 p_1 , 可直接由 A 点加载刚度确定线性卸载的刚度. 同时, p_2 取值为 0.75, 忽略卸载-加载过程的滞回圈, 可完全拟合 Jing 等^[5] 提出的模型计算曲线. 所以,

该模型是相当于忽略参数 p_1 , 且 p_2 取 0.75 时的情形. 可以认为, 文[5]的模型是本文模型的退化.

Goodman^[6]的法向循环加载模型认为, 卸载曲线与加载曲线重合. 在本模型中忽略卸载-加载过程的滞回圈, 并假定 $K_{n,2} = K_{n,1}$, 求得 $v_{n,2} = 0$, 在加、卸载曲线重合时, $p_1 = p_2 = 1$. 因此, Goodman 的模型也是本模型的特例.

Boulon 等^[7]采用双曲线模型, 并假定重新加载时, 曲线起始刚度取值为 $K_{n,3} = K_{n,1}$. 假定卸载时, 曲线起始刚度取值近似为 $K_{n,2} = 0.75K_{n,1} + 0.25K_{c,1}$. 因此, 容易求得 $p_1 = 0.75, p_2 = 1$. Souley 等^[8]同样采用双曲线模型, 并假定重新加载时, 曲线起始刚度取值为 $K_{n,3} = 0.5K_{n,1} + 0.5K_{n,2}$; 卸载时, 曲线起始刚度取值为 $K_{n,2} = K_{c,1}$, 则可求得 $p_1 = 0, p_2 = 0.50$. 所以, 文[7-8]的双曲线模型均可由 p_1, p_2 取不同的数值得到.

2 试验数据模拟

Makurat 等^[9]采用 CSFT 试验仪对天然岩石裂隙进行法向试验, 共经历了 3 次法向循环加载, 最大压应力达到 25 MPa. 试验得到的法向应力与接触面相对位移曲线, 如图 3 所示^[10]. 接触面的初始法向刚度 $K_{n,1}$ 为 $7.0 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$, 法向最大压缩量 V_m 为 0.29 mm.

为了进行比较, 采用 Goodman^[6]和 Jing 等^[5]的法向循环加载模型, 以及本文的模型分别对该试验过程进行计算, 结果如图 4 所示. 岩土测试的主要参数: $K_{n,1}$ 为 $7.0 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$, V_m 为 0.29 mm, ε 为 1.18, p_1 为 0.75, p_2 为 0.50.

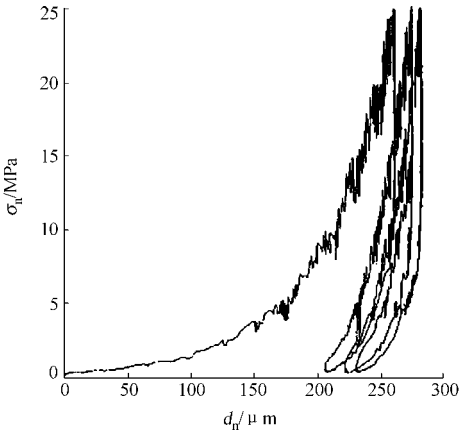


图 3 节理法向循环加载试验曲线

Fig. 3 Test curves of rock fracture under normal cyclic loading

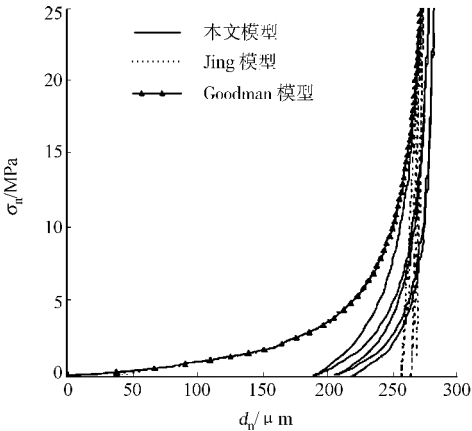


图 4 法向循环加载模型计算结果比较

Fig. 4 Comparison of calculation results by models under normal cyclic loading

从图 4 可知, 在 3 次循环加载过程中, 加载曲线和卸载曲线的起始刚度逐渐增大, 岩体节理表现出硬化的力学特性. 在计算曲线上, 总的法向残余位移随着加卸载循环次数的增加而逐渐增大, 分别为 0.19, 0.22, 0.23 mm. 这与将试验曲线外推至法向应力为零时的数值接近. 法向残余位移的数值介于 Goodman^[6]和 Jing 等^[5]提出的模型之间. 在曲线变化形式和残余位移数值上, 模型计算结果较好地拟合了试验曲线, 且重现了卸载-加载过程的滞回圈.

3 讨论

将考虑非线性程度差异的节理法向变形本构模型拓展到循环加载条件下, 且考虑到岩体节理面的复杂性, 改变对曲线形式采取硬性假定的方式. 引入参数 p_1 和 p_2 , 将卸载和重加载曲线在 σ_n 为零时的起始刚度, 表示为前一次加载和卸载曲线起始刚度的加权平均, 使其具有更广泛的适用性. Jing 等^[5]的线性卸载模型, 以及 Goodman^[6], Boulon 等^[7], Souley 等^[8]等双曲线模型, 均可由参数 p_1 和 p_2 的不同取值得到.

模型中的 5 个参数中, 初始刚度 $K_{n,1}$ 和法向最大压缩位移 V_{max} 、非线性程度修正参数 ξ 均可由岩体节理的单调加载曲线得到; 而参数 p_1, p_2 体现节理法向循环加载曲线的收敛速度和所产生的残余位移

等受力变形特性,可由试件循环加载试验曲线得到.对试验的重现和与其他模型的对比较验证表明,本模型有较好的模拟精度.

参考文献:

- [1] LANARO F. A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(8): 1195-1210.
- [2] MALAM A B, KULATILAKE P H S W. Models for normal fracture deformation under compressive loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(6): 893-901.
- [3] 俞 缙, 赵晓豹, 赵维炳, 等. 改进的岩体节理弹性非线性法向变形本构关系研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1316-1321.
- [4] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock fracture deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 249-268.
- [5] JING L, NORDLUND E, STEPHANSSON O. A 3-D constitutive model for rock joints with anisotropic friction and stress dependency in shear[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, 31(2), 173-178.
- [6] GOODMAN R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[M]. New York: Wiley, 1976: 472-494.
- [7] BOULON M, ARMAND G, HOEIT N, et al. Experimental investigations and modeling of shearing of calcite healed discontinuities of grandiosity under typical stresses[J]. Engineering Geology, 2002, 64: 117-133.
- [8] SOULEY M, HOMAND F, AMADEI B. An extension to the Saeb and Amadei constitutive model for rock joints to include cyclic loading paths[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(2): 101-109.
- [9] MAKURAT A, AHOLA M, KHAIR K, et al. The decovalox test case one[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(5): 399-408.
- [10] 尹显俊, 王光纶. 岩体节理法向循环加载本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1159-1165.

Improvement of Nonlinear Constitutive Model for Rock Fractures under Normal Cyclic Loading

YU Jin¹, LIN Cong-mou¹, ZHAO Xiao-bao²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. College of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: It is supposed that the initial normal stiffness of unloading and reloading curves is calculated from those of the previous loading and unloading curves, and then the cyclic loading constitutive equation for rock fracture is established. With different values of the parameters, this model generalizes the existing different models. By moving inward the asymptote of unloading curves, the characteristic of hysteresis is reflected. Describing the extent of nonlinearity quantitatively, the improved nonlinear elastic constitutive model for normal deformation of rock fractures is extended to cyclic loading process, which changes the way that the assumption is made by the kind of the stress-deformation curves in previous models made. Considering the geometric characters, infill mineralogy of the rock fractures and the rock types, the predication results fitted the test results well in adopting the new model for the predication of others test data, which verifies the feasibility of the new model.

Keywords: rock fractures; cyclic loading; nonlinear normal deformation; constitutive model

(责任编辑: 钱 筠 英文审校: 方德平)