

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.08.005

一种基于弹性应变能的裂隙岩体 等效弹性模量评价方法

杨建平¹, 陈卫忠^{1,2}, 杨典森¹, 田洪铭¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2.山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 基于线弹性断裂力学裂隙面张开位移及剪切位移理论公式, 考虑裂隙存在常法向和常切向刚度情况, 研究了含单个裂隙岩体加载过程中由于裂隙存在而附加的弹性应变能。基于应变能等效方法并假设两种裂隙变形模型——非均匀变形模型和均匀变形模型, 研究了二维非贯通裂隙岩体的等效杨氏模量和等效剪切模量解析表达式。研究表明, 对于贯通裂隙规则分布情况, 均匀变形模型得到的解析解与 Amadei 等的结果一致; 对于非贯通裂隙正态分布情况, 考虑裂隙相互作用的非均匀变形模型解明显低估裂隙岩体的等效杨氏模量和等效剪切模量, 而考虑裂隙相互作用的均匀变形模型解与有限元数值解的偏差在 10% 以内。得到的解析表达式在一定条件下可以作为裂隙岩体等效弹性模量评价方法之一。

关 键 词: 裂隙岩体; 等效弹性模量; 解析法; 弹性应变能

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 08-2159-07

A method for estimating equivalent elastic moduli of fractured rock masses based on elastic strain energy

YANG Jian-ping¹, CHEN Wei-zhong^{1,2}, YANG Dian-sen¹, TIAN Hong-ming¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: Based on the formulae of normal displacement and shear displacement of crack faces from linear elastic fracture mechanics, this paper aims to investigate the stored excessive elastic strain energy during the fracturing process of a rock with a single crack by applying external loading. The normal stiffness and shear stiffness of the crack are assumed be constant rather than traction-free. Two deformation models, i.e. the non-uniform deformation mode and the uniform deformation mode, are applied to calculate normal and shear displacements. In addition, based on equivalence of elastic strain energy, the analytical expressions of equivalent Young's modulus and shear modulus of 2D fractured rock mass containing regularly distributed non-persistent cracks are studied. The comparison between the analytical expression and a closed-form solution derived by Amadei and Goodman (1981) shows that the uniform deformation mode provides the same result. The comparison of normally distributed cracks between the analytical expressions and FEM shows that the non-uniform deformation mode considering crack interactions obviously underestimates the elastic moduli, while the uniform deformation mode predicts directional moduli within 10% deviation of FEM results. The obtained analytical expression can be used as one of effective methods to estimate the equivalent elastic modulus of rock mass under specific conditions.

Keywords: fractured rock mass; equivalent elastic moduli; analytical method; elastic strain energy

1 引 言

裂隙岩体的等效弹性模量是进行岩体工程支护设计和围岩稳定性分析的基本参数, 其取值的合

理性直接关系到工程围岩体的稳定性分析结果^[1-2]。当前进行裂隙岩体等效弹性模量的估算方法主要有 4 类: 现场试验法、经验法、数值方法和解析法。解析解由于其形式简洁、清晰、直接等优点而受到

收稿日期: 2014-09-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (No. 2013CB03600) 和国家自然科学基金项目 (No. 51274189)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2013CB03600) and the National Natural Science Foundation of China (51274189).

第一作者简介: 杨建平, 男, 1982 年生, 博士, 副研究员, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: jpyang@whrsm.ac.cn

广泛关注。Amadei 等^[3]、Gerrard^[4]对正交贯通裂隙岩体的弹性模量进行了研究；Fossum^[5]通过平均化方法研究了随机分布贯通裂隙下岩体的弹性模量，所获得的裂隙岩体的弹性模量是各向同性的，不能考虑非贯通裂隙以及裂隙的分布形态的影响；Oda^[6-7]提出的岩体结构张量概念考虑裂隙形态、分布等几何特性，通过结构张量可以描述随机裂隙岩体的弹性，这方面研究内容很丰富，促进了岩体特性的研究^[8]；Huang 等^[9]研究了非正交规则裂隙贯通岩体的等效柔度张量解析解；Li^[10]基于应力分解研究了规则贯通裂隙岩体不同方向等效杨氏模量。目前解析解的研究较多针对贯通裂隙规则分布的情况，对非贯通裂隙，且考虑裂隙刚度的岩体等效弹性参数的研究还不多见。

本文通过应变能等效方法，研究了二维规则非贯通裂隙岩体不同方向等效杨氏模量及等效剪切模量，研究结果与规则裂隙解析解及二维正态分布非贯通裂隙有限元数值解进行了对比，并分析了本文研究结果的适用性。

2 等效弹性模量预测方法

2.1 裂隙岩体弹性应变能

通过应变能等效来研究裂隙岩体的弹性参数是一种有效的方法^[11]。一块弹性模量为 E_0 、尺寸为 $L \times L$ 的均质线弹性板（板厚为 1），在受到单向均匀拉应力 σ 作用下，储存在弹性板中的能量为 $\sigma^2 L^2 / 2E_0$ 。现在假设往平板导入一些随机裂隙，则在应力边界条件不变的条件下，平板的弹性应变能

将增加至 $\sigma^2 L^2 / 2E_0 + \Delta\Sigma$ ，其中应变能增量 $\Delta\Sigma$ 是由于裂隙存在而附加的。根据应变能等价方法，带裂隙弹性板的等效杨氏模量 E 可按式估算：

$$\frac{\sigma^2 L^2}{2E} = \frac{\sigma^2 L^2}{2E_0} + \Delta\Sigma \quad (1)$$

式中： $\Delta\Sigma = \Delta\Sigma_m + \Delta\Sigma_n + \Delta\Sigma_{rs} + \Delta\Sigma_{fs}$ ， $\Delta\Sigma_m$ 、 $\Delta\Sigma_n$ 分别为由于裂隙法向变形引起的储存在岩块、裂隙中的附加弹性应变能； $\Delta\Sigma_{rs}$ 、 $\Delta\Sigma_{fs}$ 分别为由于裂隙切向变形引起的储存在岩块、裂隙中的附加弹性应变能。

同样，带裂隙弹性板的等效剪切模量 G 可以通过下式估算：

$$\frac{\tau^2 L^2}{2G} = \frac{\tau^2 L^2}{2G_0} + \Delta\Sigma \quad (2)$$

式中： τ 为剪切应力； G_0 为不含裂隙弹性板的剪切模量。

2.2 裂隙变形形状

根据断裂力学^[12]，一条长度为 $2a$ 的二维裂隙在远场均匀拉应力 σ 作用下，其应力场可以分解为如图 1 所示的两部分：（1）一块无裂隙的弹性板承受远场均匀拉应力 σ ；（2）带裂隙的弹性板，仅在裂隙面上作用均匀压应力 σ_n （ $=\sigma$ ），其量值与远场应力量值相同。依据线弹性断裂力学，裂隙面上作用均匀压应力 σ 时，上下裂隙面张开位移为（张开位移是裂隙面法向位移的 2 倍）：

$$u = \frac{4\sigma_n}{E} \sqrt{a^2 - r^2} \quad (3)$$

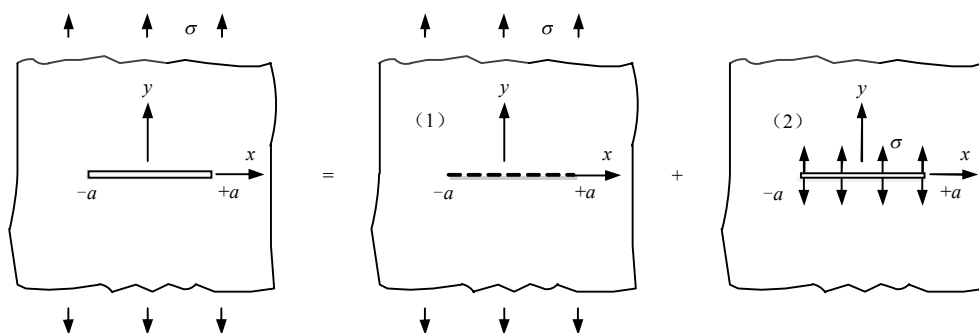


图1 单裂隙在远场应力 σ 作用下的应力场叠加^[12]
Fig.1 Stress field combination of a single crack under far field stress σ ^[12]

同样，对于含二维裂隙弹性板承受远场剪切应力 τ （ $\tau = \tau_s$ ， τ_s 为裂隙面上作用的剪切应力）时，上、下裂隙面相对剪切位移（上、下裂隙面相对剪切位移是裂隙面剪切位移的 2 倍）为 $v = \frac{4\tau_s}{E} \sqrt{a^2 - r^2}$ 。

用断裂力学研究裂隙张开度、应力强度因子等问题时，一般考虑受拉情况，此时式（3）成立；当裂隙上、下表面接触时，裂隙的抗压刚度为无穷大，以保证上、下面物质不互相侵入。而对于岩体中存在的裂隙面，一般情况下存在一定的张开度，在压应力作用下裂隙会发生一定量的闭合，法向应力与

闭合量之间的关系可以通过法向刚度来建立联系^[13]。此外,如果裂隙面之间存在胶结物,则其也存在一定的抗拉刚度,此时上、下表面是不能自由张拉的。同样,岩体裂隙也存在抵抗切向变形的能力,此时,需要通过裂隙切向刚度来描述。这些情况均与断裂力学中的裂隙模型存在差异。因此,在裂隙存在法向刚度的情况下,式(3)中裂隙面上作用的有效法向应力 σ_n 将发生改变,不再等于远场均匀拉应力。对于远场作用剪切应力的情况,剪切面上有效剪切应力 τ_s 也不同于远场均匀剪切应力。

本文假设裂隙具有常法向及常剪切刚度,这种情况下,裂隙上、下面有可能发生互相侵入的现象,因此,本文推导结果适用于裂隙面上应力增量较小的情况,对于应力增量较大的情况只是一种近似。

对于图 1 分解问题(2),裂隙面上作用的压应力为 σ_n ,裂隙上、下面发生张开变形,假设裂隙存在常法向刚度后,裂隙张开将导致裂隙法向弹簧受拉,设拉应力为 σ_k ,则对应于线弹性断裂力学中(见式(3))裂隙面上有效法向应力 σ_p 为(见图 2)

$$\sigma_p = \sigma_n - \sigma_k \quad (4)$$

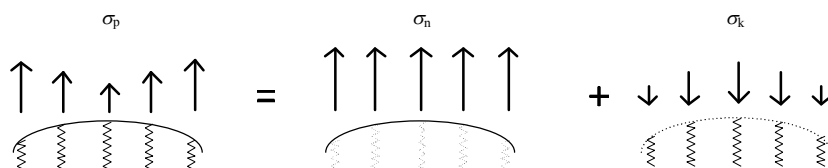


图 2 裂隙常法向刚度时裂隙面上压应力分布示意图

Fig.2 Pressure stress distributions on crack faces of constant normal stiffness cracks

如果从裂隙端部至其中心,裂隙张开度不同,则弹簧拉应力 σ_k 不同,继而裂隙面上有效法向应力 σ_p 也不均匀。此时,沿着裂隙面的法向位移需要迭代求解,较为复杂。为了使计算简化,本文假设两种裂隙张开模型求解裂隙法向位移和剪切位移。

两种裂隙张开模型如下:

(1) 模型 1 (非均匀变形模型): 沿着裂隙长度方向的法向张开位移分布如式(3),公式右边的 σ_n 以平均有效法向应力 $\overline{\sigma_p}$ 代替,

$$\overline{\sigma_p} = \frac{1}{a} \int_0^a \sigma_p dr \quad (5)$$

带入式(3)即为

$$u = \frac{4\overline{\sigma_p}}{E} \sqrt{a^2 - r^2} \quad (6)$$

(2) 模型 2 (均匀变形模型): 沿着裂隙长度方向的法向张开位移均匀分布,其值通过下式得到:

$$\bar{u} = \frac{1}{a} \int_0^a u dr = \frac{\pi a \overline{\sigma_p}}{E} \quad (7)$$

下面在这两种变形模式下,估算裂隙岩体中由于裂隙存在引起的应变能增量。

2.3 裂隙岩体应变能计算

2.3.1 非均匀变形模型:

通过对式(4)沿着裂隙长度方向积分可以得到 $\overline{\sigma_p}$ 、 $\overline{\sigma_k}$ 与 $\overline{\sigma_n}$ ($=\sigma_n$)之间的关系为

$$\begin{aligned} \frac{1}{a} \int_0^a \sigma_p dr &= \frac{1}{a} \int_0^a \sigma_n dr - \frac{1}{a} \int_0^a \frac{4K_n \overline{\sigma_p}}{E} \sqrt{a^2 - r^2} dr = \\ &\sigma_n - \frac{K_n \pi a \overline{\sigma_p}}{E} \end{aligned} \quad (8)$$

将式(5)带入式(8),有

$$\overline{\sigma_p} = \frac{E}{K_n \pi a + E} \sigma_n \quad (9)$$

对式(4)积分有

$$\overline{\sigma_k} = \sigma_n - \overline{\sigma_p} = \frac{K_n \pi a}{K_n \pi a + E} \sigma_n \quad (10)$$

其中: $\overline{\sigma_k} = \frac{1}{a} \int_0^a \sigma_k dr$ 。

在法向应力 σ_{n1} 作用下储存在裂隙中的附加弹性应变能为

$$\begin{aligned} \Delta \Sigma_m &= 2 \int_0^a \int_0^{\sigma_{k1}} u d\sigma_k dr = 2 \int_0^a \int_0^{\sigma_{k1}} \frac{\sigma_k}{K_n} d\sigma_k dr = \\ &\frac{32 K_n a^3}{3 (K_n \pi a + E)^2} \sigma_{n1}^2 = A \sigma_{n1}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

在法向应力 σ_{n1} 作用下(本文积分符号中应力或位移量的下标 1 代表加载结束后的量值,没有下标 1 的量则代表过程量),储存岩块中的附加弹性应变能为

$$\Delta\Sigma_m = 4 \int_0^a \int_0^{\sigma_{p1}} \frac{u}{2} d\sigma_p dr = 2 \int_0^a \int_0^{\sigma_{p1}} \frac{4\bar{\sigma}_p}{E} \sqrt{a^2 - r^2} d\sigma_p dr =$$

$$\frac{\pi a^2}{E} \left(1 - \frac{2K_n \pi a}{K_n \pi a + E} + \frac{32K_n^2 a^2}{3(K_n \pi a + E)^2} \right) \sigma_{n1}^2 = B \sigma_{n1}^2 \quad (12)$$

同样, 在剪切应力 τ_{s1} 作用下, 存储在裂隙和岩块中的附加弹性应变能为

$$\Delta\Sigma_{fs} = \frac{32K_s a^3}{3(K_s \pi a + E)^2} \tau_{s1}^2 = C \tau_{s1}^2 \quad (13)$$

$$\Delta\Sigma_{ts} = \frac{\pi a^2}{E} \left(1 - \frac{2K_s \pi a}{K_s \pi a + E} + \frac{32K_s^2 a^2}{3(K_s \pi a + E)^2} \right) \tau_{s1}^2 =$$

$$D \tau_{s1}^2 \quad (14)$$

2.3.2 均匀变形模型

由式 (7)、(9)、(10), 法向张开位移 $\bar{u}$ 与 $\bar{\sigma}_p$ 、 $\bar{\sigma}_k$ 成线性比例关系, 所以由于裂隙法向变形导致的裂隙、岩块中附加弹性应变能为

$$\Delta\Sigma_{fn} = 2 \int_0^a \int_0^{\sigma_{k1}} \bar{u} d\bar{\sigma}_k dr = \bar{\sigma}_{k1} \bar{u}_1 a \quad (15)$$

$$\Delta\Sigma_m = 2 \int_0^a \int_0^{\sigma_{p1}} \bar{u} d\bar{\sigma}_p dr = \bar{\sigma}_{p1} \bar{u}_1 a \quad (16)$$

将式 (15) 与式 (16) 相加有

$$\Delta\Sigma_{fn} + \Delta\Sigma_m = a \sigma_{n1} \bar{u}_1 = \frac{\pi a^2}{K_n \pi a + E} \sigma_{n1}^2 =$$

$$(\bar{A} + \bar{B}) \sigma_{n1}^2 \quad (17)$$

同样, 由于裂隙剪切变形导致的裂隙、岩块中附加弹性应变能为

$$\Delta\Sigma_{ts} + \Delta\Sigma_{fs} = \frac{\pi a^2}{K_s \pi a + E} \tau_{s1}^2 = (\bar{C} + \bar{D}) \tau_{s1}^2 \quad (18)$$

2.4 远场应力分解

远场正应力分解到裂隙上法向及切向应力分别为

$$\sigma_n = \frac{\sigma}{2} + \frac{\sigma}{2} \cos 2\theta \quad (19)$$

$$\tau_s = \frac{\sigma}{2} \sin 2\theta \quad (20)$$

式中: θ 为裂隙法向与远场应力加载方向的夹角。

根据式 (1)、(19)、(20), 可以计算含有 N 个裂隙组, 其中第 i 个裂隙组裂隙密度为 ρ_i 的裂隙岩体的等效杨氏模量按下式计算:

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \rho_i \left[(1 + \cos 2\theta_i)^2 (A + B) + \sin^2 2\theta_i (C + D) \right] \quad (21)$$

对于非均匀变形模型, A 、 B 、 C 、 D 根据式 (11) ~ (14) 得到。

远场剪切应力分解到裂隙上法向及切向应力分别为

$$\sigma_n = \tau \sin 2\theta \quad (22)$$

$$\tau_s = \tau \cos 2\theta \quad (23)$$

其等效剪切模量可以通过式 (2) 估算, 简化后如下:

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_0} + 2 \sum_{i=1}^N \rho_i \left[\sin^2 2\theta_i (A + B) + \cos^2 2\theta_i (C + D) \right] \quad (24)$$

如果裂隙密度较小, 可以不考虑裂隙之间的相互作用, 这时 A 、 B 、 C 、 D 中的 E 用岩块的弹性模量 E_0 代替。对于裂隙密度较大且裂隙非随机分布的情况, 这种不考虑裂隙间相互作用的方法, 一般会高估岩体的等效弹性模量, 并且这种误差随着裂隙密度的增大而增大。在裂隙密度很大的情况下, Hill^[14]和 Budiansky^[15]所提出的自洽方法 (self-consistent) 是一种间接考虑裂隙相互作用的方法。该方法在计算应变能增量 $\Delta\Sigma$ 时, 假设裂隙是导入弹性模量为 E (即认为裂隙周边介质的弹性模量为裂隙岩体的等效杨氏模量) 的均质弹性体中, 这时 A 、 B 、 C 、 D 中的 E 采用裂隙岩体的等效杨氏模量, 也即式 (21) 左边的 E 。

对于裂隙均匀变形模型, 将式 (21) 和式 (24) 中的 $(A + B)$ 及 $(C + D)$ 替换为式 (17) 和式 (18) 中的 $(\bar{A} + \bar{B})$ 及 $(\bar{C} + \bar{D})$ 。

3 与规则裂隙岩体解析解对比

对于一组间距为 S 的贯通裂隙, 试样尺寸为 $L \times L$, 则裂隙密度为

$$\rho = \frac{L/S}{L^2} = \frac{1}{LS} = \frac{1}{2aS} \quad (25)$$

在远场法向应力 σ_{n1} 作用下 (法向应力垂直于裂隙平面), 对于非均匀变形模型, 式 (21) 简化为式 (26); 对于均匀变形模型, 式 (21) 简化为式 (27)。

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_0} + 2\rho(A+B) = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{S} \left[\frac{32K_n}{3(K_n\pi + E/a)^2} + \frac{\pi a}{E} \left(1 - \frac{2K_n\pi}{K_n\pi + E/a} + \frac{32K_n^2}{3(K_n\pi + E/a)^2} \right) \right] \Bigg|_{a \rightarrow \infty} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{S} \left(\frac{1.08}{K_n} + \frac{0.08\pi a}{E} \Bigg|_{a \rightarrow \infty} \right) \quad (26)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_0} + 2\rho(\bar{A} + \bar{B}) = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{K_n S + E/(\pi a)} \Bigg|_{a \rightarrow \infty} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{K_n S} \quad (27)$$

由式 (26) 所见, 当裂隙长度无穷大时, 岩体有效杨氏模量为 0, 对于存在常法向刚度的裂隙来讲, 这个结论是不合理的。式 (27) 则与 Amadei 等^[1] 的解析解一致。从这种极端情况 (贯通裂隙) 来讲, 对于常法向刚度裂隙, 均匀变形模型更为合理。

4 与非贯通裂隙岩体有限元数值结果对比

文献[16]通过有限元数值方法研究了二维裂隙岩体中存在两组正态分布非贯通裂隙情况时, 裂隙岩体不同方向的杨氏模量及等效柔度矩阵。针对同样的裂隙岩体 (裂隙网络及岩块、裂隙力学参数均相同), 采用本文的方法进行对比研究, 文献[16]中生成的裂隙分布见图 3, 岩块及裂隙力学参数见表 1。

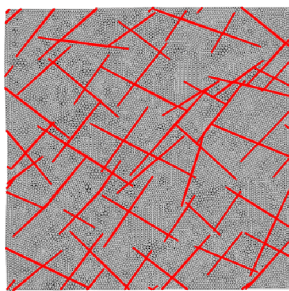


图 3 裂隙网络分布^[16]
Fig.3 Generated FEM mesh and distribution of cracks for FE analysis^[16]

表 1 岩块及裂隙力学参数^[16]

岩块参数		裂隙参数					
E_0 / GPa	ν	组号	倾向 / (°)	平均 迹长 / m	裂隙 密度 / m ²	法向刚度 / (GPa/m)	切向刚度 / (GPa/m)
50	0.25	1	150	4	0.16	50	10
		2	50	3	0.25	50	10

图 4 显示了不同模型预测得到的不同方位等效杨氏模量曲线与 FEM 数值解对比结果。图中的黑点代表 FEM 数值解, 实线为裂隙岩体柔度矩阵结果^[16], 点线及点划线分别对应于不考虑裂隙相互作用及考虑裂隙相互作用时的结果。图 5 为相应的等效剪切模量结果。

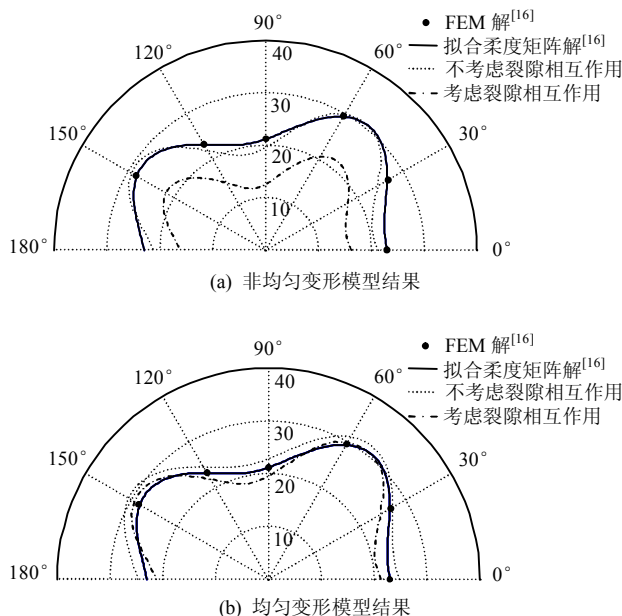


图 4 岩体不同方位等效杨氏模量与 FEM 对比(单位: GPa)
Fig.4 Comparison of predicted Young's modulus with FEM results in various directions (unit: GPa)

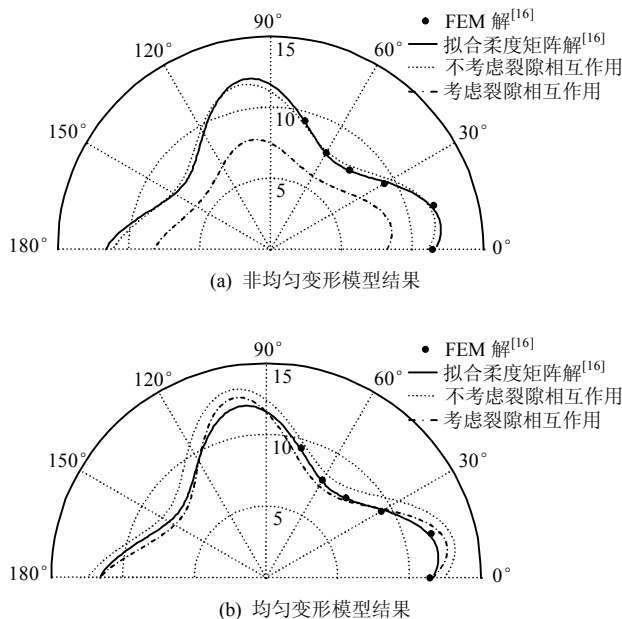


图 5 岩体不同方位等效剪切模量与 FEM 对比(单位: GPa)
Fig.5 Comparison of predicted shear modulus with FEM results in various directions (unit: GPa)

由图 4(a)和图 5(a)所示结果可见, 采用非均匀变形模型时, 不考虑裂隙相互影响的结果与数值解

较为接近,而考虑裂隙相互影响的结果明显低估了岩体的等效弹性模量。对于均匀变形模型,不考虑裂隙相互影响的结果均高估了岩体的等效弹性模量,而考虑裂隙相互影响的结果与数值解的误差在 10% 以内。

对于本文所研究的裂隙模型,裂隙规则分布,相邻裂隙之间的放大效应和屏蔽效应难以消除;且裂隙密度较大(平均裂隙长度大于裂隙间距,见表 1),因此,考虑裂隙相互影响结果应该更加合理^[17]。与非均匀变形模型预测结果相比,均匀变形模型预测结果更为接近数值解,据此认为,均匀变形模型更为合理。实际上,裂隙端部不可能有张开位移,然而对于长度达到 2 m 的常法向刚度裂隙,裂隙端部仅对其附近较小区域的裂隙变形形成约束,在大部分裂隙长度范围内,裂隙张开度变化不大是可以理解的,因此,均匀变形模型有其合理性。

5 结 论

(1) 在假设两种裂隙变形模型——非均匀变形模型和均匀变形模型的基础上,获得了二维非贯通裂隙岩体不同方向等效弹性模量的解析表达式。对于规则贯通裂隙,均匀变形模型解与 Amadei 等^[1]的解析解一致。与二维非贯通裂隙模型有限元数值解对比表明,考虑裂隙相互作用的均匀变形模型预测结果与数值解结果偏差在 10% 以内。本文获得的解析表达式可以作为裂隙岩体等效弹性参数预测手段之一。

(2) 本文结果的局限性在于:获得的解析表达式建立在裂隙常法向及常切向刚度基础之上,实际中裂隙法向刚度随着加载过程中裂隙闭合量增大而快速增大,具有较强的非线性,因此,常法向刚度假设只适用于法向应力增量较小的情况。对于裂隙法向应力增量较大的情况,本文的方法可以作为一种近似。对于裂隙承受拉应力的情况,(由于裂隙一般没有抵抗受拉变形的能力),需要将表达式(11)~(14)、(17)~(18)中的裂隙法向及切向刚度降为 0。对于裂隙卸载情况,卸载过程中裂隙可恢复变形量一般较小,卸载法向刚度不同于加载时的法向刚度,研究裂隙岩体卸载过程中等效弹性模量时,要带入卸载法向刚度值。

参 考 文 献

[1] 冯树荣, 蒋中明, 钟辉亚, 等. 向家坝水电站左岸坝基挤压破碎带变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 539—544.

FENG Shu-rong, JIANG Zhong-ming, ZHONG Hui-ya, et al. Experimental study of deformation characteristics of broken rock mass under dam foundation at left bank of Xiangjiaba hydropower project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.2): 539—544.

[2] 郝杰, 侍克斌, 陈功民, 等. 基于围岩力学参数概率分布模型的变形敏感性灰关联分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 854—860.

HAO Jie, SHI Ke-bin, CHEN Gong-min, et al. Grey relation analysis of deformation sensitivity based on probability distribution models of surrounding rock mechanical parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 854—860.

[3] AMADEI B, GOODMAN R E. A 3D constitutive relation for fractured rock masses[C]//Proceedings of the International Symposium on the Mechanical Behavior of Structure Media. Ottawa: [s. n.], 1981.

[4] GERRARD C M. Elastic models of rock masses having one, two and three sets of joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1982, 19(1): 15—23.

[5] FOSSUM A F. Effective elastic properties for a randomly jointed rock mass[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1985, 22(6): 467—470.

[6] ODA M. Fabric tensor for discontinuous geological materials[J]. **Soils and Foundations**, 1982, 22(4): 96—108.

[7] ODA M. Permeability tensor for discontinuous rock masses[J]. **Geotechnique**, 1985, 35(4): 483—495.

[8] ODA M, SUZUKI K, MAESHIBU T. Elastic compliance for rock-like materials with random cracks[J]. **Soils and Foundations**, 1984, 24(3): 27—40.

[9] HUANG T H, CHANG C S, YANG Z Y. Elastic moduli for fractured rock mass[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1995, 28(3): 135—144.

[10] LI C. A method for graphically presenting the deformation modulus of jointed rock masses[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2001, 34(1): 67—75.

[11] ESHELBY J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems[C]//Proceedings of the Royal Society of London. London: [s. n.], 1957, A241: 376—396.