

岩体等效变形参数研究

唐辉明¹, 张宜虎², 孙云志³

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 水利部长江科学院, 湖北武汉 430010

3. 水利部长江水利委员会设计院, 湖北武汉 430010

摘要: 岩体变形参数的确定对岩体稳定性模拟至关重要。提出了确定规则裂隙和不规则裂隙岩体等效变形参数的一种模型, 探讨了岩体等效变形参数的规律。通过对不考虑渗流—应力耦合时岩体等效变形性能的研究, 可以发现岩体的等效变形参数不仅与各组结构面的几何形态、结构面变形参数、岩块变形参数等有关, 而且与不同组系结构面间的交切形态有关。岩体的 REV_s 具备以下几点规律: 首先 REV_s 具有多尺度效应和不确定性。其次, REV_s 与结构面各几何形态要素之间有如下关系: 平均迹长越大, 平均间距越小, 方向角的方差越大, 结构面分布越凌乱, REV_s 的取值越小。 REV_s 与岩块、结构面变形参数之间有如下关系: 结构面变形参数与岩块变形参数的差异程度对 REV_s 的取值没有明显影响, 但是不同组系结构面或是同一组中的各条结构面, 其变形参数差异越小, REV_s 的取值将越小。

关键词: 等效变形参数; 岩体; 规则裂隙; 不规则裂隙。

中图分类号: TV45

文章编号: 1000-2383(2007)03-0389-08

收稿日期: 2007-03-19

A Study of Equivalent Deformability Parameters in Rock Masses

TANG Hui-ming¹, ZHANG Yi-hu², SUN Yun-zhi³

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Scientific Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China

3. Institute of Survey and Design, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China

Abstract It is very important to determine deformability parameters in the simulation of stability of rock masses. A model to determine equivalent deformability parameters through regular and irregular fractures in rock mass is put forward in the paper. The research of deformability property of rock mass without consideration of the coupling behavior indicates that the equivalent deformability parameters are not only related to the length, orientation and deformability property of discontinuities but also related to the connection of each group of discontinuities. It is found that the REV_s of rock masses is of several important properties. Firstly, REV_s has multi-scale effect and uncertainty properties. Secondly, REV_s alter with the change of the geometrical properties of the network: REV_s is smaller in the case of longer length, higher density and more disorder of orientation. The diversity between the deformability parameters of rock blocks and discontinuity has no effect on the value of REV_s , while, if the deformability parameters of different groups of discontinuities become more consistent, the value of REV_s is smaller.

Key words: equivalent deformability parameters; rock mass; regular fracture; irregular fracture.

岩体变形参数的确定对岩体稳定性模拟至关重要, 它是国内外岩石力学界研究的前沿课题。在国外, Barton *et al.* (1974)、Goodman (1981)、Bieniaw-

ski (1978)、Hoek and Brown (1980) 和 Kawamoto *et al.* (1988) 等学者在大量试验、统计与反分析的基础上对工程岩体分类与参数估算进行了各有侧重的研

究.在国内,孙均和冯紫良(1993)、于青春等(1995)、周创兵和於三大(1999)、陈波等(2001)、胡云进等(2001)、张有天(2003)和黄润秋等(2004)对岩体变形模量从不同的角度做过系统的研究.

确定岩体变形参数最常用的是等效连续介质法.等效连续介质法将岩体近似看作连续介质,通过等效处理获取岩体的宏观变形参数,它从本质上来说是一种近似处理的方法.

岩体等效连续介质法可以助于岩体结构面网络模拟加以实现.较实用的三维网络模型有 2 种:一种是 Long JCS 在假定岩体中裂隙发育呈圆盘状的基础上提出的圆盘裂隙网络模型;另一种是 Der-showitz WS 的多边形裂隙网络模型.陈剑平等(1995)、周火明等(2001)和贾洪彪等(2002)已编制了不同版本的岩体结构的三维网络模拟程序.目前,平面网络模拟技术已得到较广泛的应用,三维网络模拟成果则相对较少,精度不高.

本文运用岩体等效连续介质方法,从岩体结构面网络模拟为基础,提出了确定规则裂隙和不规则裂隙岩体等效变形参数的一种模型,探讨岩体等效变形参数的规律.

1 规则裂隙岩体的等效变形参数

基于离散介质数值分析方法可以确定岩体等效变形参数,并可得出岩体等效变形参数的一般规律.

1.1 岩体模型

图 1 为沿 z 方向厚度为 1 的规则岩体,内含两组正交裂隙,其中一组与 x 轴垂直,相邻裂隙面垂直向间距为 dx ,裂隙面法向刚度为 K_{nx} ,剪切刚度为

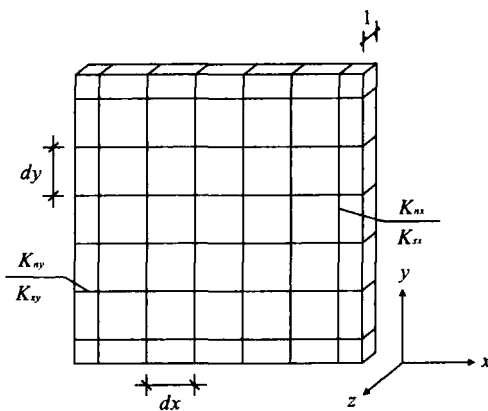


图 1 单位厚度的规则裂隙岩体

Fig. 1 Rock mass with regular fracture in unit thickness

K_{sx} ;另外一组与 y 轴垂直,裂隙间距为 dy ,裂隙面法向刚度为 K_{ny} ,剪切刚度为 K_{sy} ;岩块为各向同性连续介质,其弹性模量为 E ,泊松比为 ν .

假设所分析的问题为 xy 平面内的平面应变问题,并且假定 dx, dy 相对于所研究的岩体尺寸而言足够小.

1.2 等效柔度矩阵的解析解

根据朱伯芳(2000)、Min and Jing(2003)等人的研究,以上裂隙岩体的线弹性本构关系可以表述为:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z(0) \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} + \frac{1}{K_{nx}dx} & \frac{\nu}{E} & \frac{\nu}{E} & 0 \\ \frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} + \frac{1}{K_{ny}dy} & \frac{\nu}{E} & 0 \\ \frac{\nu}{E} & \frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} + \frac{1}{K_{sx}dx} + \frac{1}{K_{sy}dy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

上式中, σ_{ij} 表示连续介质内某点的应力状态,为二阶张量; ϵ_{ij} 表示应变状态,为二阶张量.由于所分析的问题为平面应变问题, $\epsilon_z = 0$;依据这一关系,由式(1)可以求解出用 σ_x, σ_y 表示的 σ_z :

$$\sigma_z = \nu\sigma_x + \nu\sigma_y. \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),消除与 z 有关的项,同时将 γ_{xy} 替换成 $2\epsilon_{xy}$,可得:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1}{K_{nx}dy} & \frac{-\nu-v^2}{E} & 0 \\ \frac{-\nu-v^2}{E} & \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1}{K_{ny}dy} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} + \frac{1}{2K_{sx}dx} + \frac{1}{2K_{sy}dy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

所以对于图 1 所示的含两组正交裂隙规则岩体的平面应变问题,其在原始坐标系下的柔度矩阵 $[S]$ 可以表示为:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1}{K_{nx}dx} & \frac{-\nu-\nu^2}{E} & 0 \\ \frac{-\nu-\nu^2}{E} & \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1}{K_{ny}dy} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} + \frac{1}{2K_{sx}dx} + \frac{1}{2K_{sy}dy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)即可求解此平面裂隙岩体在任何旋转坐标系下的柔度矩阵[S']:

$$[S] = [A]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1}{K_{nx}dx} & \frac{-\nu-\nu^2}{E} & 0 \\ \frac{-\nu-\nu^2}{E} & \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1}{K_{ny}dy} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} + \frac{1}{2K_{sx}dx} + \frac{1}{2K_{sy}dy} \end{bmatrix} [A]^{-1} \quad (5)$$

1.3 等效变形参数的确定

图 2 为旋转坐标系 $x'oy'$ 中的规则裂隙岩体, 沿方向取单位厚度, 假设为平面应变问题, 采用各向异性连续介质理论, 该岩体在旋转坐标系 $x'y'$ 中的本构关系可以表示如下:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{x'} \\ \epsilon_{y'} \\ \epsilon_z(0) \\ \epsilon_{x'y'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{x'y'}}{E_{y'}} & -\frac{\nu_{z'x'}}{E_{z'}} & \frac{\eta_{k'x'y'}}{G_{x'y'}} \\ -\frac{\nu_{x'y'}}{E_{x'}} & \frac{1}{E_{y'}} & -\frac{\nu_{z'y'}}{E_{z'}} & \frac{\eta_{l'y'x'}}{G_{x'y'}} \\ -\frac{\nu_{z'x'}}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{z'y'}}{E_{y'}} & \frac{1}{E_{z'}} & \frac{\eta_{l'x'z'}}{G_{x'y'}} \\ \frac{\eta_{k'v'x'}}{2E_{x'}} & \frac{\eta_{k'v'y'}}{2E_{y'}} & \frac{\eta_{l'v'z'}}{2E_{z'}} & \frac{1}{2G_{x'y'}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \sigma_z \\ \tau_{x'y'} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

上式中, $\eta_{k',yz}, \eta_{k',xz}, \eta_{k',xy}, \eta_{l',yz}, \eta_{l',xz}, \eta_{l',xy}, \eta_{k',yz}, \eta_{k',xz}, \eta_{k',xy}, \eta_{l',yz}, \eta_{l',xz}, \eta_{l',xy}$ 为第一类影响系数, $\eta_{i,jk}$ 表示 jk 平面内的剪切应力所导致的 i 方向的拉伸变形; $\eta_{l',xz}, \eta_{l',zx}, \eta_{l',xy}, \eta_{l',yx}$

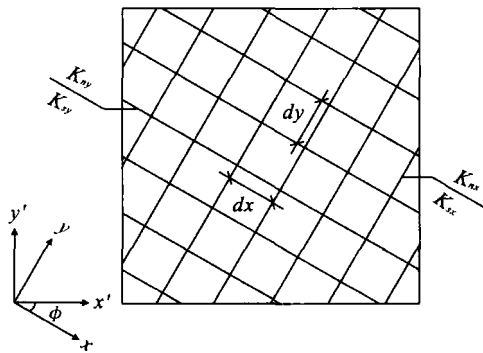


图 2 旋转坐标系中的规则裂隙岩体

Fig. 2 Rock mass with regular fracture in rotating coordinate system

$\eta_{l',yz}, \eta_{l',xz}, \eta_{l',xy}, \eta_{l',yz}, \eta_{l',xz}, \eta_{l',xy}$ 为第二类影响系数, $\eta_{i,jk}$ 表示 k 方向的轴向应力所导致的 ij 平面内的剪切变形。

由于所有结构面均与 $x'y'$ 平面垂直, 所以式(6)中的 $E_{z'}$ 直接等于岩块的弹性模量 E , 而 $\nu_{z'x'}$ 、 $\nu_{z'y'}$ 则等于岩块的泊松比 ν ; 另外, 因为不存在沿 z 方向的轴向变形 ($\epsilon_z = 0$), 所以 $\eta_{k'y',z'} = 0$. 因此, 式(6)右侧系数矩阵中的第三列可以完全确定, 由于对称性, 第三行中的所有项也可以相应确定. 然后再由 $\epsilon_z = 0$, 可以求解出由 $\sigma_{x'}$ 、 $\sigma_{y'}$ 、 $\tau_{x'y'}$ 表示的 σ_z 的表达式. 进而可以将式(6)转换成如下的形式:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{x'} \\ \epsilon_{y'} \\ \epsilon_{x'y'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{x'}} - \frac{\nu^2}{E} & -\frac{\nu_{x'y'}}{E_{y'}} - \frac{\nu^2}{E} & \frac{\eta_{l'x'y'}}{G_{x'y'}} \\ -\frac{\nu_{x'y'}}{E_{x'}} - \frac{\nu^2}{E} & \frac{1}{E_{y'}} - \frac{\nu^2}{E} & \frac{\eta_{l'y'x'}}{G_{x'y'}} \\ \frac{\eta_{k'v'x'}}{2E_{x'}} & \frac{\eta_{k'v'y'}}{2E_{y'}} & \frac{1}{2G_{x'y'}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{x'y'} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

将式(7)右侧系数矩阵中的各项与式(5)所示柔度矩阵中的各项逐项对比, 便可完全确定旋转坐标系 $x'y'$ 中裂隙岩体的所有等效力学参数。

1.4 等效变形参数随方位的变化关系

下面给图 1 和图 2 中的岩体赋一组参数, 研究坐标系旋转角度发生变化时, 岩体各项等效变形参数的变化规律. 岩块参数: 弹性模量 $E = 50$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.25$; 与 x 轴垂直的裂隙面参数: 法向刚度 $K_{nx} = 50$ GPa/m, 剪切刚度 $K_{sx} = 50$ GPa/m, 相邻裂隙面垂向间距 $dx = 0.5$ m; 与 y 轴垂直的裂隙面参数: 法向刚度 $K_{ny} = 25$ GPa/m, 剪切刚度 $K_{sy} = 25$ GPa/m, 相邻裂隙面垂向间距 $dy = 0.5$ m.

表 1 为旋转坐标系相对原始坐标系旋转角度 ϕ 分别取 $0^\circ, 30^\circ, \dots, 360^\circ$ 等 12 个不同值时, 与旋转坐标系一致方向上的等效变形参数的计算结果。

依据表 1 计算结果, 可以在极坐标系中绘制各项等效力学参数随旋转角 ϕ 变化的拟合关系曲线(图 3)。

2 不规则裂隙岩体等效变形参数的确定

对于不规则裂隙岩体, 难以确定其等效柔度矩阵的解析解; 此时, 可借助数值分析方法确定其等效变形参数。

表 1 不同方向上等效变形参数计算结果

Table 1 Computed results of equivalent deformability parameters in different directions

$\phi(^{\circ})$	$E_{x'}(\text{GPa})$	$E_{y'}(\text{GPa})$	$G_{x'y'}(\text{GPa})$	$\nu_{x'y'}$	$\nu_{y'x'}$	$\eta_{x'y',x'}$	$\eta_{x'y',y'}$	$\eta_{x'x',y'}$	$\eta_{y'y',x'y'}$
0	16.67	10.00	5.88	0.08	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
30	14.29	11.11	5.88	0.07	0.06	0.25	0.19	0.10	0.10
60	11.11	14.29	5.88	0.06	0.07	0.19	0.25	0.10	0.10
90	10.00	16.67	5.88	0.05	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
120	11.11	14.29	5.88	0.06	0.07	-0.19	-0.25	-0.10	-0.10
150	14.29	11.11	5.88	0.07	0.06	-0.25	-0.19	-0.10	-0.10
180	16.67	10.00	5.88	0.08	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
210	14.29	11.11	5.88	0.07	0.06	0.25	0.19	0.10	0.10
240	11.11	14.29	5.88	0.06	0.07	0.19	0.25	0.10	0.10
270	10.00	16.67	5.88	0.05	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
300	11.11	14.29	5.88	0.06	0.07	-0.19	-0.25	-0.10	-0.10
330	14.29	11.11	5.88	0.07	0.06	-0.25	-0.19	-0.10	-0.10

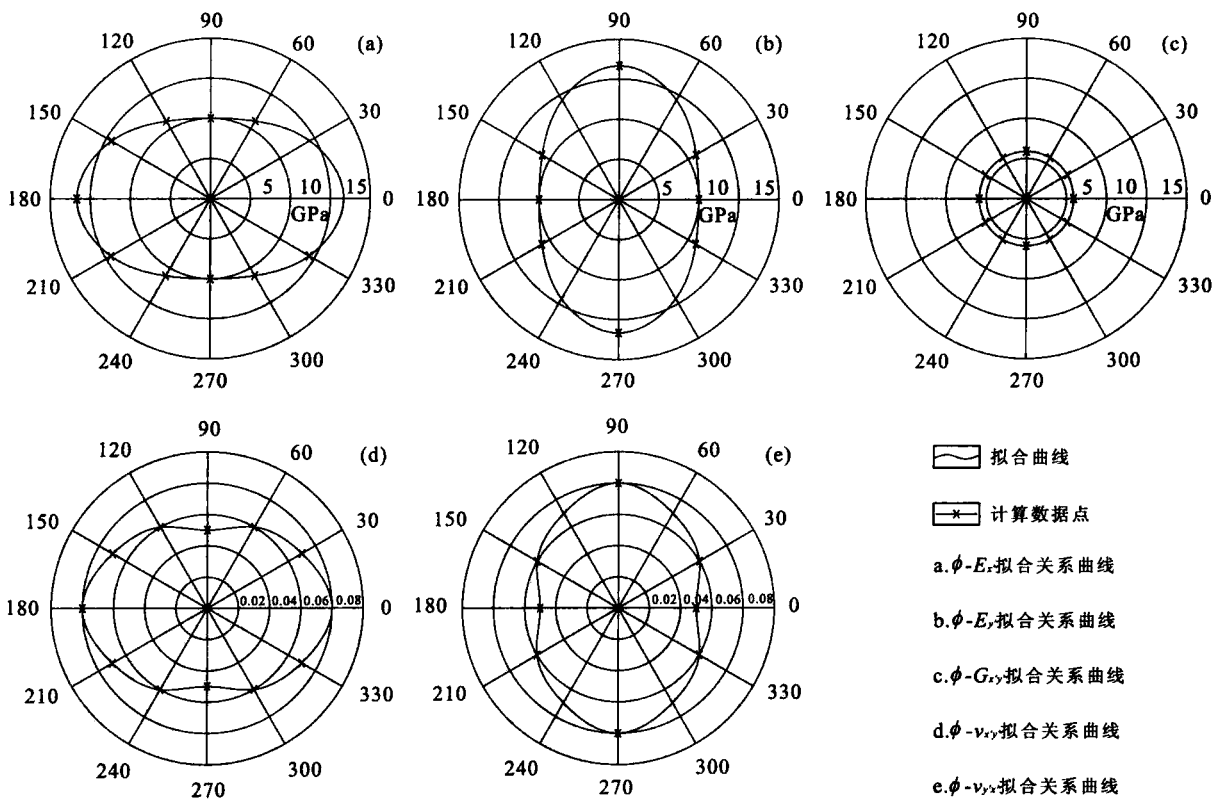


图 3 岩体等效变形参数随旋转角 ϕ 变化关系曲线

Fig. 3 Relation curve between equivalent deformability parameter and rotation angle ϕ

2.1 由数值分析结果反演岩体等效变形参数

以图 4 中 ABCD 所圈闭范围内的岩体为例, 如果岩体能够视为等效连续介质, 则对于平面应变问题, 在坐标系 xoy 内, 其本构关系可写为:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} - \frac{\nu^2}{E} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} - \frac{\nu^2}{E} & \frac{\eta_{x,xy}}{G_{xy}} \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} - \frac{\nu^2}{E} & \frac{1}{E_y} - \frac{\nu^2}{E} & \frac{\eta_{y,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\eta_{xy,x}}{2E_x} & \frac{\eta_{xy,y}}{2E_y} & \frac{1}{2G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

上式中, E 为岩块的弹性模量, ν 为岩块的泊松比; 其他符号意义同前。

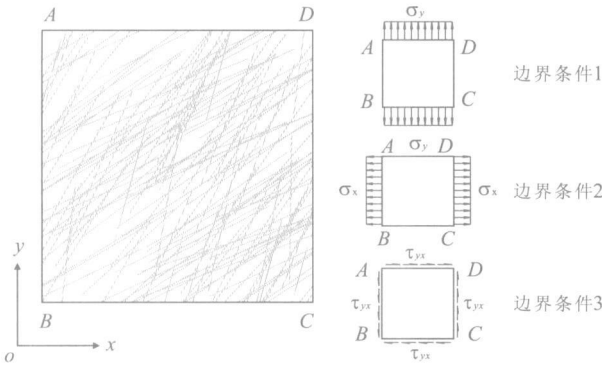


图4 等效变形参数求解图示

Fig. 4 Solving diagram of equivalent deformability parameter

给岩体施加图4右侧的边界条件1, 则岩体在 xoy 坐标系内的等效应力状态分量可以表述为:

$$\{\sigma_{(1)}\} = \{0 \quad \sigma_y \quad 0\}^T \quad (9)$$

采用有限元数值方法模拟岩体在给定边界荷载下的变形, 并基于变形结果计算岩体的等效应变状态分量 $\{\epsilon_{x(1)} \quad \epsilon_{y(1)} \quad \epsilon_{xy(1)}\}$. 然后将这一对等效应力、应变状态分量代入式(8), 可得如下方程组:

$$\begin{cases} \epsilon_{x(1)} = \left[-\frac{\nu_{yx}}{E_y} - \frac{\nu^2}{E} \right] \sigma_y & (a) \\ \epsilon_{y(1)} = \left[\frac{1}{E_y} - \frac{\nu^2}{E} \right] \sigma_y & (b) \\ \epsilon_{x(1)} = \frac{\eta_{xy \cdot y}}{2E_y} \sigma_y & (c) \end{cases} \quad (10)$$

假定已知岩块参数 E, ν , 则依据方程组(10)中的(b)式即可求解 y 方向的等效弹性模量 E_y , 然后

表2 确定12个不同方向上等效柔度矩阵时所需要建立的分析模型和荷载条件

Table 2 Analysis models and loading conditions needed for equivalent flexibility matrix in twelve directions

		局部坐标系 $x'oy'$ 相对整体坐标系 xoy 旋转角度 ϕ —— 分析模型		
		$\phi=0$	$\phi=30$	$\phi=60$
均布荷载作用方向——边界条件	x' 轴方向	 $U_{AB(1-1)}V_{AB(1-1)} \quad U_{CD(1-1)}V_{CD(1-1)}$ $U_{BC(1-1)}V_{BC(1-1)} \quad U_{AD(1-1)}V_{AD(1-1)}$	 $U_{AB(1-2)}V_{AB(1-2)} \quad U_{CD(1-2)}V_{CD(1-2)}$ $U_{BC(1-2)}V_{BC(1-2)} \quad U_{AD(1-2)}V_{AD(1-2)}$	 $U_{AB(1-3)}V_{AB(1-3)} \quad U_{CD(1-3)}V_{CD(1-3)}$ $U_{BC(1-3)}V_{BC(1-3)} \quad U_{AD(1-3)}V_{AD(1-3)}$
	y' 轴方向	 $U_{AB(2-1)}V_{AB(2-1)} \quad U_{CD(2-1)}V_{CD(2-1)}$ $U_{BC(2-1)}V_{BC(2-1)} \quad U_{AD(2-1)}V_{AD(2-1)}$	 $U_{AB(2-2)}V_{AB(2-2)} \quad U_{CD(2-2)}V_{CD(2-2)}$ $U_{BC(2-2)}V_{BC(2-2)} \quad U_{AD(2-2)}V_{AD(2-2)}$	 $U_{AB(2-3)}V_{AB(2-3)} \quad U_{CD(2-3)}V_{CD(2-3)}$ $U_{BC(2-3)}V_{BC(2-3)} \quad U_{AD(2-3)}V_{AD(2-3)}$
	剪切荷载	 $U_{AB(3-1)}V_{AB(3-1)} \quad U_{CD(3-1)}V_{CD(3-1)}$ $U_{BC(3-1)}V_{BC(3-1)} \quad U_{AD(3-1)}V_{AD(3-1)}$	 $U_{AB(3-2)}V_{AB(3-2)} \quad U_{CD(3-2)}V_{CD(3-2)}$ $U_{BC(3-2)}V_{BC(3-2)} \quad U_{AD(3-2)}V_{AD(3-2)}$	 $U_{AB(3-3)}V_{AB(3-3)} \quad U_{CD(3-3)}V_{CD(3-3)}$ $U_{BC(3-3)}V_{BC(3-3)} \quad U_{AD(3-3)}V_{AD(3-3)}$

由(a)、(c)式可分别求得 ν_{yx} 和 $\eta_{xy, y}$. 同样, 由边界条件 2 所对应的等效力、应变状态分量可求解 E_x 、 ν_{xy} 和 $\eta_{xy, x}$, 由边界条件 3 所对应的等效力、应变状态分量可求解 G_{xy} 、 $\eta_{x, xy}$ 和 $\eta_{y, xy}$. 至此, 式(8)中所有的岩体等效变形参数均已求出.

2.2 不规则裂隙岩体 REV_s 的确定

REV_s 是指岩体的等效变形参数同时满足类张量特性和类常量特性的最小尺寸. 只要 REV_s 存在, 而且 REV_s 相对所要分析岩体的尺寸而言足够小, 就可以采用等效连续介质理论来分析该岩体的变形特征.

REV_s 范围内的岩体, 其等效变形参数必须同时满足类张量特性和类常量特性. 所以, 针对一具体的岩体, 要确定其 REV_s , 首先必须从中截取不同大小的分析模型, 对比研究等效变形参数随分析域尺寸的变化, 以校验类常量特性. 另外, 还要对比研究不同方向上的等效柔度矩阵是否满足相应的坐标转换关系, 以校验类张量特性.

要获取岩体在不同方向上的等效柔度矩阵, 可以充分利用模型的对称性, 使计算工作量降到最低. 如要获取 12 个不同方向上的等效柔度矩阵, 只用在 3 个不同方向上选取计算模型, 然后再给每个计算模型分别施加 3 种线性不相关的荷载边界条件, 即总共只需要进行 9 次计算, 就可以完全确定 12 个不同方向上的等效柔度矩阵.

表 2 中列出了相关的计算模型和荷载条件. 表中的三行表示 3 种不同的荷载边界条件.

3 算例

3.1 分析模型

某岩体尺寸为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$, 内含三组结构面, 各组结构面几何形态参数及力学参数如表 3. 岩块弹性模量为 50 GPa , 泊松比为 0.25 .

3.2 类常量特性的校验

首先围绕岩体中心选取 10 个不同尺寸的分析域, 分析域尺寸分别取为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, ..., $10\text{ m} \times 10\text{ m}$. 令分析域的方向与整体坐标系方向一致.

给各个分析域分别施加图 5 所示的 3 种线性不相关的荷载边界条件, 进行变形场模拟, 依据模拟结果可以得到各个模型在 0° 方向上的等效柔度矩阵.

表 4 中列出了各个分析模型所对应的等效柔度矩阵中的主对角元素项. 表中还同时列出了依据主

表 3 结构面几何形态参数及力学参数

Table 3 Geometric shape parameters and mechanical parameters of the structural plane

组号	迹长 (m)	隙宽 (m)	方向角 ($^\circ$)	密度 (条 $\cdot \text{m}^{-2}$)	法向刚度 ($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	剪切刚度 ($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	3	0.000 1	30	1	30	30
2	3	0.000 2	90	1	20	20
3	3	0.000 3	150	1	10	10

表 4 不同尺寸分析域等效模量计算结果对比

Table 4 Comparison of equivalent modulus computed results under different dimension analysis domains

分析域尺寸 (m)	等效柔度矩阵 [S] 中的主对角元素			等效模量 (GPa)		
	S_{11}	S_{22}	S_{33}	E_x	E_y	G_{xy}
1×1	3.72E-10	5.77E-10	4.98E-10	2.68	1.73	1.00
2×2	2.74E-10	4.52E-10	3.44E-10	3.63	2.21	1.45
3×3	2.27E-10	3.68E-10	3.12E-10	4.38	2.71	1.60
4×4	1.92E-10	3.10E-10	2.48E-10	5.18	3.22	2.02
5×5	1.98E-10	2.47E-10	2.23E-10	5.02	4.02	2.24
6×6	1.85E-10	2.24E-10	2.07E-10	5.37	4.44	2.42
7×7	1.75E-10	2.20E-10	2.07E-10	5.67	4.53	2.41
8×8	1.77E-10	2.08E-10	1.95E-10	5.61	4.78	2.57
9×9	1.86E-10	2.13E-10	2.10E-10	5.34	4.66	2.39
10×10	1.75E-10	2.17E-10	1.97E-10	5.66	4.59	2.54

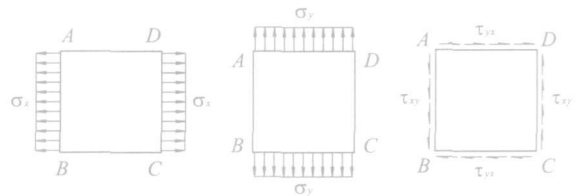


图 5 3 种线性不相关的荷载边界条件

Fig. 5 Three kinds of linear uncorrelated load boundary conditions

对角元素项所计算得到的各分析模型的等效弹性模量和等效剪切模量. 不难看出, 当分析域尺寸取 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 或更大值时, E_x 、 E_y 、 G_{xy} 的计算值都已落入误差允许范围以内, 而且随分析域尺寸的变化不再有明显变化.

3.3 REV_s 及等效变形参数的综合确定

综合以上分析, 可以将岩体的 REV_s 取为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$. 岩体的等效柔度张量可以用 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 分析域所对应的 12 个转换矩阵的平均值表征:

$$[S] = \begin{bmatrix} 2.02E-10 & -1.42E-11 & 3.18E-11 \\ -6.47E-12 & 2.35E-10 & 2.46E-11 \\ 2.91E-11 & 3.00E-11 & 2.27E-10 \end{bmatrix}$$

另外依据以上平均等效柔度矩阵,还可以计算岩体在与整体坐标系一致方向上的等效变形参数。

4 结论

本文提出了确定规则裂隙和不规则裂隙岩体等效变形参数的一种模型,该模型较好地反映了岩体等效变形参数的基本规律。通过该模型并结合岩体结构面网络特点,我们可得如下结论:

(1)岩体等效变形参数具有明显的规律性。一般情况下,岩体的等效弹性模量小于岩块的弹性模量,并小于结构面的变形刚度。

(2) REV_s 与结构面各几何形态要素有关。一般来说,平均迹长越大, REV_s 的取值越小;平均间距越小, REV_s 的取值越小;方向角的方差越大,结构面分布越凌乱, REV_s 的取值越小。总体来说,结构面网络中的交点数目越多,结构面连通性越好, REV_s 的取值越小。

(3)结构面变形参数与岩块变形参数的差异程度对 REV_s 的取值没有明显影响,不会因为结构面变形参数与岩块变形参数差异程度的加大,而导致 REV_s 取值的增加。但是,不同组系结构面,或是同一组中的各条结构面,其变形参数差异越小, REV_s 的取值将越小。

(4) REV_s 具有尺度效应和不确定性。如果考虑的结构面级别不一样, REV_s 将有不同的取值;而且随判别标准的变化, REV_s 的量值也将会发生变化。

References

Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4): 189—236.

Bieniawski, Z. T., 1978. Determining rock mass deformability: Experience from case histories. *Int. J. Rock Mech. Sci.*, 15(5): 237—247.

Chen, B., Li, N., Zhuo, R. H., 2001. FEM analysis on fully coupled the thermo-hydro-mechanic behavior of porous media. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 20(4): 467—472 (in Chinese with English abstract).

Chen, J. P., Xiao, S. F., Wang, Q., 1995. Three-dimensional network numerical simulation technology for random discontinuous interfaces. Northeast Normal University Press, Changchun (in Chinese).

Hoek, E., Brown, T., 1980. Underground excavation in rock. The Institute of Mining and Metallurgy Press, London.

Goodman, R. E., 1981. Methods of geological engineering in discontinuous rock. West Publishing Company, New York.

Hu, Y. J., Qian, R., Su, B. Y., 2001. A numerical simulation method to determine unsaturated hydraulic parameters of fracture. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 23(3): 284—287 (in Chinese with English abstract).

Huang, R. Q., Xu, M., Chen, J. P., et al., 2004. Complicated rock mass structure fine description and its engineering application. Science Press, Beijing (in Chinese).

Jia, H. B., Ma, S. Z., Tang, H. M., et al., 2002. Study on engineering application of 3-D modeling of rock discontinuity network. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(7): 976—979 (in Chinese with English abstract).

Kawamoto, T., Ichikawa, Y., Kyoya, T., 1988. Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock masses and damage mechanics theory. *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 12(1): 1—30.

Min, K. B., Jing, L., 2003. Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40(6): 795—816.

Sun, J., Feng, Z. L., 1993. Several advances of interaction problem in rock mechanics and engineering—Structure and media interaction theory and application. Hehai University Press, Nanjing (in Chinese).

Tang, H. M., Ma, S. Z., Liu, Y. R., 2002. A research on the stability and control measures of Zhaoshuling landslide in the reservoir district of the Three Gorges project. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 621—625 (in Chinese with English abstract).

Yu, Q. C., Chen, D. J., Xue, G. F., 1995. Hydrodynamics of discontinuous fracture network. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(4): 474—478 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. T., 2003. Analysis on several catastrophic failures of hydraulic projects in view of rock hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, (5): 1—10 (in Chinese with English abstract).

Zhou, C. B., Yu, S. D., 1999. Representative elementary vol-

ume REV—A fundamental problem for selecting the mechanical parameters of jointed rockmass. *Journal of Engineering Geology*, 7(4): 332—336 (in Chinese with English abstract).

Zhou, H. M., Sheng, Q., Wu, A. Q., 2001. Size effect analysis on macro-mechanics parameters for the rock masses of the TGP ship lock slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 20(5): 661—664 (in Chinese with English abstract).

Zhu, B. F., 2000. The principle and application of finite element method (Second edition). Water Conservancy and Hydroelectric Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

陈波, 李宁, 褚瑞花, 2001. 多孔介质的变形场、渗流场、温度场耦合有限元分析. *岩石力学与工程学报*, 20(4): 467—472.

陈剑平, 肖树芳, 王清, 1995. 随机不连续面三维网络数值模拟技术. 长春: 东北师范大学出版社.

胡云进, 钱锐, 速宝玉, 2001. 一种确定裂隙非饱和水力参数的数值模拟法. *岩土工程学报*, 23(3): 284—287.

黄润秋, 许模, 陈剑平, 等, 2004. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用. 北京: 科学出版社.

贾洪彪, 马淑芝, 唐辉明, 等, 2002. 岩体结构面网络三维模拟的工程应用研究. *岩石力学与工程学报*, 21(7): 976—979.

孙均, 冯紫良, 1993. 岩石力学与工程中相互作用问题的若干进展——结构与介质相互作用理论及应用. 南京: 河海大学出版社.

唐辉明, 马淑芝, 刘佑荣, 2002. 三峡工程库区赵树岭滑坡稳定性与防治对策研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 621—625.

于青春, 陈德基, 薛果夫, 1995. 岩体非连续裂隙网络水力学特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(4): 474—478.

张有天, 2003. 从岩石水力学观点看几个重大工程事故. *水利学报*, (5): 1—10.

周创兵, 於三大, 1999. 论岩体表征单元体积 REV——岩体力学参数取值的一个基本问题. *工程地质学报*, 7(4): 332—336.

周火明, 盛谦, 邬爱清, 2001. 三峡工程永久船闸边坡岩体宏观力学参数的尺寸效应研究. *岩石力学与工程学报*, 20(5): 661—664.

朱伯芳, 2000. 有限单元法原理与应用(第二版). 北京: 中国水利水电出版社.