

# 节理岩体的等效连续模型与工程应用\*

朱维申 王平

(中科院武汉岩土力学研究所)

## 提 要

本文将工程范围的规则节理岩体看作是由各向同性的岩石单元与等效各向异性的节理岩石单元构成的统一体,在深入分析节理岩石单元的变形与强度特性的基础上,详细推导了等效变形与等效强度的基本公式,提出了一种等效连续模型。通过非线性有限元数值分析,完成了节理岩体力学特性的模拟。利用前人的物理模型试验验证了该模型的有效性。上述数值模型运用于某一典型的工程节理岩体的强度预测,其结果是令人满意的。

## 一、前 言

节理岩体的力学特性十分复杂,很难定量预测,即使是进行现场大型岩体力学试验,往往也只能获得局部的尺度有限的节理面或岩块的力学参数(一般试验面积都在 $1\text{m}^2$ 以下),更大范围岩体的宏观或平均意义上的特性或参数几乎无法直接实测。用计算机数值模拟来预测节理岩体的力学特性,在加载、变化材料类型、模拟节理分布等方面有诸多方便,其应用前景是十分广阔的。当然,这种数值模拟应至少得到物理模拟实验的一定检验才有其可信性。

对于节理岩体,目前国内外已经发展了名目繁多的数值模拟方法:例如对含少数节理的岩体,有节理单元法<sup>[1]</sup>,也有使用间断概念的<sup>[2]</sup>。密集节理岩体的数值模拟主要有两种途径,一种是连续介质力学途径或称等效途径,比如材料参数等效法、能量等效法<sup>[3]</sup>、变形等效法<sup>[4]</sup>、复合体等效法<sup>[5]</sup>、断裂力学法<sup>[6]</sup>、损伤力学法<sup>[7]</sup>等;另一种途径,就是将岩体的基本单元——岩块当作不连续体的质点,采用不连续介质力学的理论来探讨这些不连续质点集合体的应力、应变和稳定等力学性能,导出块体力学的规律性,如刚性块体法、离散单元法等。尽管如此,这些方法仍有相当局限性,如节理单元与相邻连续单元的相容协调,等效中的尺寸效应,损伤张量定义与损伤演化方程,离散块体中的离散误差等问题尚须进一步研究。本文的目的就在于发展一种新的规则节理岩体的数值模拟方法,为迅速准确地预测节理岩体的力学行为提供一条有效的技术途径。

## 二、节理岩体的等效连续模型

如图1所示,在一个洞室的围岩中宏观上大体均匀分布有两组节理。此时,应该可以找出一种足够大的代表性单元体把两组节理及其交割特征包括进去<sup>[8]</sup>(图2)。当然这个单元体

\*本文的工作得到国家自然科学基金委的资助。

到稿日期:1990-11-28.

的尺度应比工程尺度要足够小才好。对这个含节理的典型单元体进行深入的数值分析, 得出单元体的强度变形特性, 进而将这个特性作为该节理岩体的本构关系, 并用于岩体工程的稳定性分析。

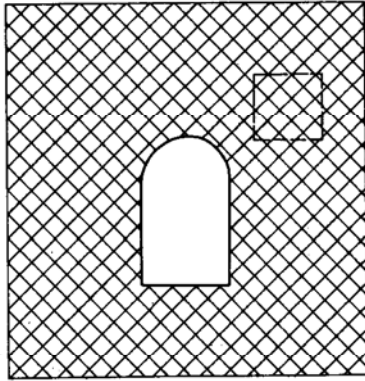


图1 洞周节理岩体

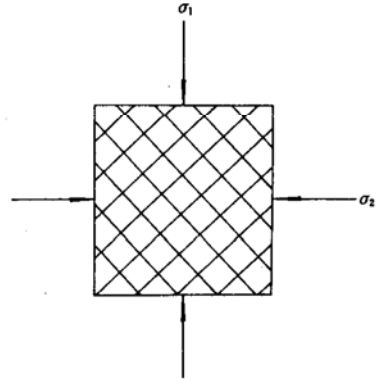


图2 代表性单元

从已有的文献看, 所有“等效”方法的基本思路是在考虑本构模型时, 根据一定的等效原则, 笼统地考虑节理对岩体力学特性的影响, 将整个节理岩体均匀化、连续化, 得出的一套本构关系, 然后再利用数值分析得出整个岩体的力学特性。并且这种等效以弹性模型为多, 有关弹塑性本构关系的讨论尚不多见。本文建议的方法的特点在于: 先对节理岩体的典型单元体按有限元的要求离散, 产生岩石单元和节理岩石单元(指含有节理的岩石单元), 通过详细地研究节理岩石单元的变形强度特性, 建立起该单元的等效本构关系, 进而对典型单元体进行有限元分析, 最后得出该单元体的力学特性。由于这种方法对岩体中节理的处理介于等效法的“笼统”与节理单元法的“精确”之间, 所以具有一定的工程意义。表1给出了节理岩石单元等效连续模型的基本原理。

表1 等效连续模型的基本原理

| 型式   | 原型                                  | 等效连续模型                       |
|------|-------------------------------------|------------------------------|
| 几何形式 | ▣                                   | □                            |
| 模式   | 不连续体                                | 等效连续体                        |
| 变形特性 | 总变形为岩石变形与节理变形之和。                    | 变形等效。即与原生节理岩石单元在同样荷载作用下变形相等。 |
| 强度特性 | 沿节理面破坏时使用节理面控制强度; 沿完整岩石部分破坏时使用岩块强度。 | 强度等效。即保证与被等效的原型同时达到破坏。       |

下面分别从变形和强度两方面建立相应的等效公式。

### (一) 变形等效的基本公式

变形等效的基本原理就是假设等效连续体与节理岩石单元在同样荷载作用下变形相等, 由此推导出等效体与节理岩石单元之间的材料常数关系。这个等效体依据不同情况, 可以假设为各向同性体、正交各向异性体、横观各向同性体或一般的各向异性体。本文将等效体作为一般的各向异性体看待。

假设节理走向与弹性主方向( $z$ 轴)重合, 在平面应力情况下的各向异性材料的应力应变

关系为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

由于  $c_{ij} = c_{ji} (i, j = 1, 2, 3)$ , 其独立的常数为6个。只要能够确定上述6个参数, 则进行有限的弹性计算将无困难。但是要在现场测试这种节理岩体的各向异性的弹性常数很不方便。既然这种节理岩体可以看作是由各向同性的岩石与节理组成, 则可以通过分别测试岩石的弹性常数  $E_r, \mu_r$  和有厚度节理的弹性常数  $E_j, \mu_j$  或节理的刚度系数  $k_n, k_s$  以及节理的几何参数 (间距、贯通率、倾角、宽度等), 然后按照变形等效的方法去推求等效连续体的变形参数。

1. 不考虑节理剪胀效应的变形等效公式

假定岩石是一般各向异性体, 其弹性本构关系可以表示为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^r & S_{12}^r & S_{13}^r \\ S_{21}^r & S_{22}^r & S_{23}^r \\ S_{31}^r & S_{32}^r & S_{33}^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

节理为无厚度且贯穿整个单元。设节理岩石单元受力如图3所示。由平衡方程可得节理面上的应力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \\ \tau &= \sigma_y \sin \alpha \cos \alpha - \sigma_x \sin \alpha \cos \alpha - \tau_{xy} \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由变形叠加原理得

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= S_{11}^r \sigma_x d + S_{12}^r \sigma_y d + S_{13}^r \tau_{xy} d + \frac{\sigma_n}{k_n} \sin \alpha - \frac{\tau}{k_s} \cos \alpha \\ \delta_y &= S_{21}^r \sigma_x l + S_{22}^r \sigma_y l + S_{23}^r \tau_{xy} l + \frac{\sigma_n}{k_n} \cos \alpha + \frac{\tau}{k_s} \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)整理得

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= \left( S_{11}^r d + \frac{1}{k_n} \sin^2 \alpha \sin \alpha + \frac{1}{k_s} \cos^2 \alpha \sin \alpha \right) \sigma_x \\ &+ \left( S_{12}^r d + \frac{1}{k_n} \cos^2 \alpha \sin \alpha - \frac{1}{k_s} \cos^2 \alpha \sin \alpha \right) \sigma_y \\ &+ \left( S_{13}^r d - \frac{1}{k_n} \sin 2\alpha \sin \alpha + \frac{1}{k_s} \cos 2\alpha \cos \alpha \right) \tau_{xy} \\ \delta_y &= \left( S_{21}^r l + \frac{1}{k_n} \sin^2 \alpha \cos \alpha - \frac{1}{k_s} \sin^2 \alpha \cos \alpha \right) \sigma_x \\ &+ \left( S_{22}^r l + \frac{1}{k_n} \cos^2 \alpha \cos \alpha + \frac{1}{k_s} \sin^2 \alpha \cos \alpha \right) \sigma_y \\ &+ \left( S_{23}^r l - \frac{1}{k_n} \sin 2\alpha \cos \alpha - \frac{1}{k_s} \cos 2\alpha \sin \alpha \right) \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将节理岩石单元等效为一般各向异性体, 其弹性本构关系为

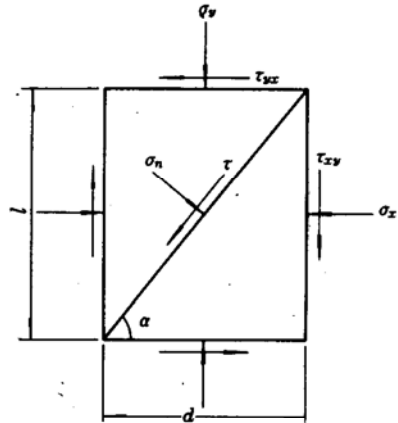


图3 节理岩石单元受力分析

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

在同样荷载作用下, 等效体的变形为

$$\left. \begin{aligned} \delta_x^e &= S_{11}\sigma_x d + S_{12}\sigma_y d + S_{13}\tau_{xy} d \\ \delta_y^e &= S_{21}\sigma_x l + S_{22}\sigma_y l + S_{23}\tau_{xy} l \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

按照前述的变形等效原理, 即  $\delta_x = \delta_x^e$ ,  $\delta_y = \delta_y^e$ , 可得

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= S_{11}^r + \left( \frac{1}{k_n d} \sin^2 \alpha + \frac{1}{k_s d} \cos^2 \alpha \right) \sin \alpha \\ S_{12} &= S_{12}^r + \left( \frac{1}{k_n d} \cos^2 \alpha - \frac{1}{k_s d} \cos^2 \alpha \right) \sin \alpha \\ S_{13} &= S_{13}^r + \left( \frac{1}{k_s d} \cos 2\alpha \cos \alpha - \frac{1}{k_n d} \sin 2\alpha \sin \alpha \right) \\ S_{21} &= S_{21}^r + \left( \frac{1}{k_n l} \sin^2 \alpha - \frac{1}{k_s l} \sin^2 \alpha \right) \cos \alpha \\ S_{22} &= S_{22}^r + \left( \frac{1}{k_n l} \cos^2 \alpha + \frac{1}{k_s l} \sin^2 \alpha \right) \cos \alpha \\ S_{23} &= S_{23}^r - \left( \frac{1}{k_s l} \cos 2\alpha \sin \alpha + \frac{1}{k_n l} \sin 2\alpha \cos \alpha \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由图3有  $l = d \tan \alpha$ , 可以推导出  $S_{12} = S_{21}$ 。从本构关系的对称性出发, 不难得到  $S_{31} = S_{13}$ ,  $S_{32} = S_{23}$ 。由于  $S_{33}$  的推导存在较大困难, 为简化起见, 暂取  $S_{33} = S_{33}^r$ 。至此等效体(一般各向异性体)的本构关系所需6个参数全部求出。

对于含两条节理的节理岩石单元, 根据式(5)计算出含一条节理时的  $S_{ij}$ , 将式(5)中的  $S_{ij}^r$  用  $S_{ij}$  代替, 重复式(5)的计算(此时  $\alpha$  应用第二条节理的倾角), 得出的  $S_{ij}$  即为含两条节理时的等效本构关系。多条节理的情形依此递推。

## 2. 考虑节理剪胀效应的变形等效公式

设节理的剪胀变形(剪切变形引起的法向变形)为  $\delta_w$ , 剪胀角为  $i$ , 则  $\delta_w = \frac{\tau}{k_s} \tan i$ 。考虑剪胀效应之后, 式(2)变为

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= S_{11}^r \sigma_x d + S_{12}^r \sigma_y d + S_{13}^r \tau_{xy} d + \frac{\sigma_n}{k_n} \sin \alpha - \frac{\tau}{k_s} \cos \alpha - \frac{\tau}{k_s} \tan i \sin \alpha \\ \delta_y &= S_{21}^r \sigma_x l + S_{22}^r \sigma_y l + S_{23}^r \tau_{xy} l + \frac{\sigma_n}{k_n} \cos \alpha + \frac{\tau}{k_s} \sin \alpha - \frac{\tau}{k_s} \tan i \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

令式(6)等式右边最后两项分别为

$$\begin{aligned} -\frac{\tau}{k_s} \cos \alpha - \frac{\tau}{k_s} \tan i \sin \alpha &= -\frac{\tau}{k_s'} \cos \alpha \\ \frac{\tau}{k_s} \sin \alpha - \frac{\tau}{k_s} \tan i \cos \alpha &= \frac{\tau}{k_s'} \sin \alpha \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{即 } k_s' &= k_s (1 + \tan i \tan \alpha) \\ k_s'' &= k_s (1 - \tan i \tan \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

用  $k_s'$  代替式(5)前三式中的  $k_s$ , 用  $k_s''$  代替后三式中的  $k_s$ , 即可得到相应的  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  和  $S_{23}$ , 再近似取  $S_{33} = S_{33}^r$ , 则考虑剪胀效应的变形等效公式便得以建立。

## (二) 强度等效的基本公式

假定岩石、节理面、等效连续体的强度都遵循莫尔-库仑准则, 其强度参数分别为 $(c_r, \varphi_r)$ ,  $(c_j, \varphi_j)$ ,  $(c_e, \varphi_e)$ 。节理岩石单元的强度由岩石强度和节理面强度两部分构成。因而节理岩石单元的破坏有两种可能, 一种是岩石部分破坏, 另一种是节理面破坏。

### 1. 含单节理面的强度等效

岩石单元和等效连续体的强度条件分别为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_r = c_r \cos \varphi_r \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_e = c_e \cos \varphi_e \quad (9)$$

显而易见,

$$c_e = c_r, \quad \varphi_e = \varphi_r \quad (10)$$

对于节理岩石单元, 设节理面与最大主应力面的夹角为 $\beta$  (图4), 依据 $\beta$ 的不同, 分两种情况

当 $\beta < \beta_{\min}$ 或 $\beta > \beta_{\max}$ 时, 节理岩石单元的强度受岩石的强度控制, 其等效公式同式(10)。当 $\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}$ 时, 节理岩石单元将沿节理破坏, 其准则为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\beta - \varphi_j) - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_j = c_j \cos \varphi_j \quad (11)$$

设想当 $\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}$ 时, 对节理岩石单元加载便可得出强度包络线, 若将其作为等效体的包络线便可求出等效体的 $c_e, \varphi_e$ 。在数学上只需将式(11)写为下式:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \frac{\sin \varphi_j}{\sin(2\beta - \varphi_j)} = c_j \frac{\cos \varphi_j}{\sin(2\beta - \varphi_j)}$$

再与式(9)比较, 则

$$\left. \begin{aligned} \varphi_e &= \sin^{-1} \frac{\sin \varphi_j}{\sin(2\beta - \varphi_j)} \\ c_e &= c_j \frac{\cos \varphi_j}{\sin(2\beta - \varphi_j)} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_e} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

与岩石材料不同, 当节理面强度为控制强度时, 节理岩石单元的强度不是常数, 而是随节理的方向而改变的。

### 2. 含双节理面的强度等效

对于图5所示的含两组节理的力学模型, 有意义的是滑动开始时沿哪一条节理移动, 它是由岩体内部节理组合的几何形态、应力分布、剪切强度以及各向异性所决定的。当决定了那一条节理的滑动迹线后, 岩体破坏就由该节理继续进行。问题的关键是哪一条节理对强度起控制作用, 其等效强度应该由控制节理的强度制约。

将节理面强度准则写成另一种形式, 即

$$\sigma_1 = \frac{2c_j + 2\text{tg} \varphi_j \sigma_3}{(1 - \text{tg} \varphi_j \text{ctg} \beta) \sin 2\beta} + \sigma_3 \quad (13)$$

假设 $\beta_1, \beta_2$ 均满足 $\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}$

$$\text{令 } A_1 = \frac{1}{(1 - \text{tg} \varphi_j \text{ctg} \beta_1) \sin 2\beta_1}$$

$$A_2 = \frac{1}{(1 - \operatorname{tg} \varphi_j \operatorname{ctg} \beta_j) \sin 2\beta_j}$$

若  $A_1 < A_2$ , 则节理岩石单元强度由第一组节理控制; 若  $A_1 > A_2$ , 则节理岩石单元强度由第二组节理控制。仿照式(12)不难得到相应的等效强度。若一个单元含三条节理, 则可仿照上面的方法建立等效的强度参数。E.Hoek和E.T.Brown<sup>[9]</sup>指出, 当岩体单元含有四组或四组以上的节理时, 根据强度和变形特性, 可将其性态视为各向同性的。

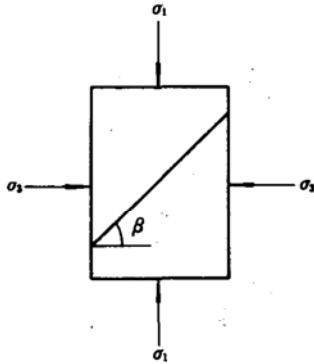


图4 单组节理模型

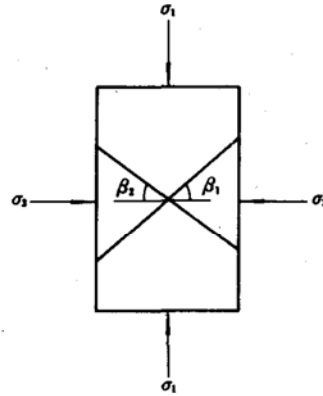


图5 双组节理模型

### 3. 关于节理岩石单元的拉破坏分析

当节理岩石单元受拉时, 其抗拉强度更应由节理面的抗拉强度控制。此时, 采用“无拉应力”分析。拉破坏的本构关系也可按增量塑性理论建立。对于含两组节理的单元, 需根据处于控制地位的节理面而作无拉应力分析。

## 三、等效连续模型的实施、验证与应用

### (一) 含不贯通节理单元的处理

在实际离散的节理岩石单元中, 节理可能是不贯通的, 这就必须对变形等效和强度等效的基本公式做相应修正。为了处理方便, 定义节理在  $x$  和  $y$  方向的投影长度比分别为<sup>[10]</sup>

$$A_x = \frac{L_{jx}}{L_x}, \quad A_y = \frac{L_{jy}}{L_y} \quad (14)$$

式中  $L_{jx}$ ,  $L_{jy}$  分别为节理在  $x$ ,  $y$  方向的投影长度;  $L_x$ ,  $L_y$  为单元的  $x$ ,  $y$  方向尺寸。显然单元的变形与  $A_x$ ,  $A_y$  正相关, 因此应该对变形等效公式(5)进行如下修正: 当  $0 \leq \alpha \leq 45^\circ$ , 对含  $k_n$ ,  $k_s$  的项分别乘以  $A_y$ ,  $A_x$ ; 当  $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ , 对含  $k_n$ ,  $k_s$  的项分别乘以  $A_x$ ,  $A_y$ 。

对于含不贯通节理的单元, 笔者用一条假想的贯通节理来代替不贯通节理, 以此修正强度等效公式。假想节理的  $\tilde{c}_j$ ,  $\tilde{\varphi}_j$  按节理及岩块的  $c$ ,  $\varphi$  加权平均。例如, 若某一节理岩石单元中含一条节理, 节理连通率为  $n\%$ , 则

$$\begin{aligned} \tilde{c}_j &= c_j \cdot n\% + c_r(1 - n\%) \\ \tilde{\varphi}_j &= \varphi_j \cdot n\% + \varphi_r(1 - n\%) \end{aligned}$$

这是单元划分中处理单元特性的一种工作假设。根据加权平均后的  $\tilde{c}_j$ ,  $\tilde{\varphi}_j$ , 再由强度等效公式(12)求得等效体的  $c_{eo}$ ,  $\varphi_{eo}$ 。

为了论证修正的变形等效公式的正确性, 下面分别从节理长度、节理倾角、节理岩石单元的尺寸效应等几个方面进行检验。视用有限元(节理单元为 Goodman 单元)计算出不同情况下沿 $\sigma_1$ 方向的变形 $\delta_1$ (或应变 $\epsilon_1$ )为等效变形, 则此时的弹性常数 $S_{11} = \frac{\epsilon_1}{\sigma_1}$ , 定义 $D_{11} = \frac{S_{11}^r}{S_{11}}$ 。也可以根据节理分布情况, 按照式(5)的修正式求出相应的 $S_{11}$ , 进而得到相应的 $D_{11}$ , 再将二者进行比较。在求相对误差时, 将有限元计算得到的 $D_{11}$ 视为是准确的。

1. 节理的长度变化

设节理岩石单元体在 $xoy$ 平面上为正方形, 几何尺寸为 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ , 节理倾角 $\alpha = 45^\circ$ , 材料参数取 $E_r = 68.0\text{MPa}$ ,  $\mu = 0.25$ ,  $k_n = 75.0\text{MPa/cm}$ ,  $k_s = 5.0\text{MPa/cm}$ , 讨论共分六种情况(图6), 相应的计算结果见表2。

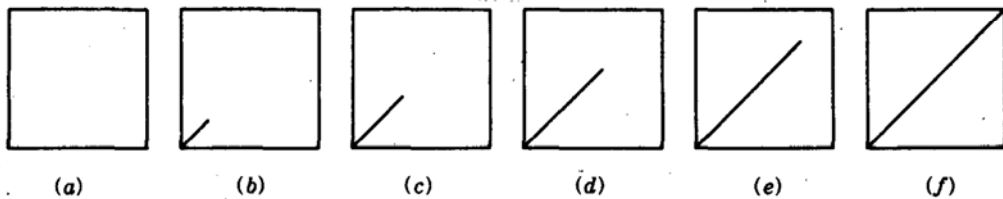


图6 不同的节理长度分布

表2 不同的节理长度分布对等效参数 $D_{11}$ 的影响

| 情况  | 纵向变形( $10^{-3}\text{cm}$ ) | $A_x$ | $A_y$ | $D_{11}$ (解析值) | $D_{11}$ (有限元) | 相对误差(%) |
|-----|----------------------------|-------|-------|----------------|----------------|---------|
| (a) | 735                        | 0.0   | 0.0   | 1.00           | 1.00           | 0       |
| (b) | 786                        | 0.2   | 0.2   | 0.83           | 0.94           | 12      |
| (c) | 883                        | 0.4   | 0.4   | 0.71           | 0.83           | 14      |
| (d) | 1015                       | 0.6   | 0.6   | 0.62           | 0.72           | 14      |
| (e) | 1190                       | 0.8   | 0.8   | 0.55           | 0.62           | 11      |
| (f) | 1490                       | 1.0   | 1.0   | 0.49           | 0.49           | 0       |

2. 节理的角度变化

设单元中心分布一条长为 $1.0\text{cm}$ 的节理, 角度 $\alpha$ 分三种情况: (a)  $\alpha = 0^\circ$ , (b)  $\alpha = 45^\circ$ , (c)  $\alpha = 71.56^\circ$ (图7)。相应的计算结果见表3。

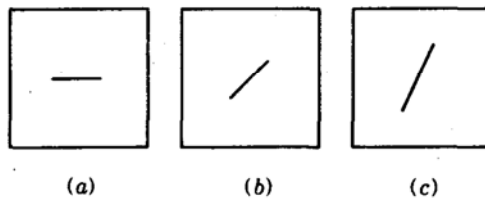


图7 不同的节理角度分布

3. 单元尺寸效应

节理的类型同图6(d),  $\alpha = 45^\circ$ ,  $A_x = A_y = 0.6$ , 节理岩石单元体边长 $l$ 取六种值, 表4是

计算结果。

计算结果表明,当节理岩石单元尺寸大于10cm时,误差将减至5%或更小,而在对工程节理岩体典型单元体进行离散时,有限单元的尺寸一般比10cm大的多。用式(5)及其修正公式处理变形等效是较准确的,在计算机内部实现也十分方便。

表3 不同的节理角度分布对等效参数 $D_{11}$ 的影响

| 情况  | 纵向变形( $10^{-3}$ cm) | $A_x$ | $A_y$ | $D_{11}$ (解析值) | $D_{11}$ (有限元) | 相对误差(%) |
|-----|---------------------|-------|-------|----------------|----------------|---------|
| (a) | 815                 | 0.2   | 0.0   | 0.96           | 0.90           | 7       |
| (b) | 835                 | 0.2   | 0.2   | 0.83           | 0.88           | 6       |
| (c) | 791                 | 0.2   | 0.3   | 0.81           | 0.93           | 13      |

表4 节理岩石单元体的尺寸效应( $\alpha=45^\circ$ ,  $A_x=A_y=0.6$ )

| 单元边长 $l$ (cm)  | 5    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| $D_{11}$ (解析值) | 0.62 | 0.77 | 0.87 | 0.90 | 0.93 | 0.94 |
| $D_{11}$ (有限元) | 0.72 | 0.81 | 0.88 | 0.91 | 0.93 | 0.94 |
| 相对误差(%)        | 14   | 5    | 1    | 1    | 0    | 0    |

## (二)用物理模型验证数值模型

采用本文建议的节理岩石单元的等效连续模型作为有限元法的基本单元之一参与结构的分析,便可反映节理岩体的整体力学特性。为了验证其合理性和可靠性,有必要用前人的物理模型试验<sup>[11]</sup>来进行严格检验。节理模型为 $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 7\text{cm}$ ,有间距和长度均为5cm的两组正交节理。由于物理模型试验的困难,这里只就图8(a)、(b)、(c)所示的三种不同形式的节理岩体在单轴应力状态下的强度和变形特性,以及(a)型节理岩体在双轴应力状态下的强度和变形特性作比较(图9、图10)。图10中, $\epsilon_1^*$ 、 $\epsilon_2^*$ 分别为 $\sigma_1=\sigma_2$ 时在 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 方向上的应变值。

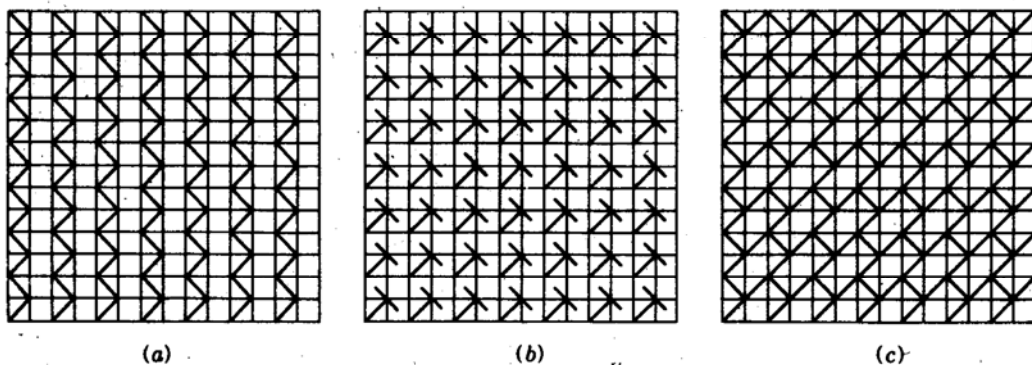


图8 节理分布形式与有限元网格示意图

由图9、图10可以看出,单轴应力状态下的应力应变关系相当吻合,双轴应力状态下的最大主应力-主应变关系、峰值强度与应变的吻合程度较好,但最大主应力-侧向应变关系吻合程度较差,这可能与模型试验中因边界摩擦带来的量测变形偏小有关。



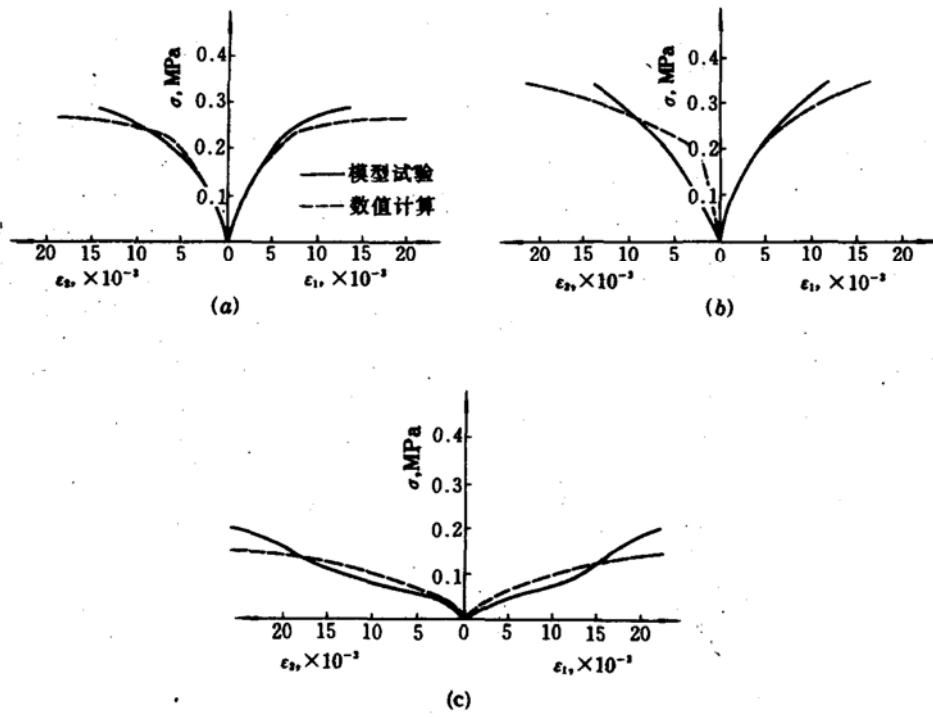


图 9 三种节理岩体的单轴应力-应变关系

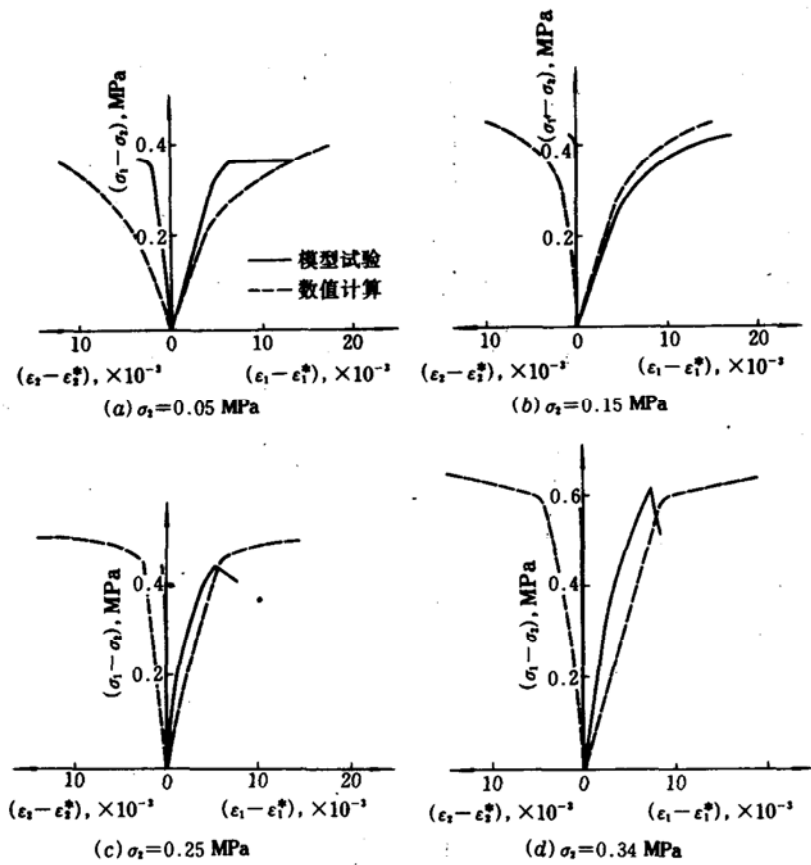


图 10 (a)型节理岩体在双轴荷载下应力-应变关系

### (三) 工程应用

笔者对二滩水电站坝肩节理岩体的强度应用上述数值方法进行预测,其效果是良好的。

根据二滩的工程地质报告,在A—C级岩体中,主要存在“二陡一缓”三组主要节理,计算时取节理连通率分别为50%和30%的1,2两组正交节理(图11)。节理长度在4~7m之间,计算时长度取5m,间距为1m,从地质资料来看,这些是具有代表性的。为了满足节理岩体每边约有10条节理的要求,使之能有较好的力学效应代表性,计算范围取17.8m×17.8m,节理分布及有限元网格见图11,单元数为625个,节点数为676个,其中有242个节理岩石单元。节理分布模式仍取图8的(a)型。岩石的力学参数由A级岩性(正长岩)的室内力学试验结果确定,岩石及节理的力学参数值见表5。

表5 岩石及节理的力学参数

| 材料参数 | $E$ (GPa) | $\mu$ | $c$ (MPa) | $\varphi$ (°) |
|------|-----------|-------|-----------|---------------|
| 完整岩石 | 35        | 0.30  | 14.58     | 65.29         |
| 节理面  | —         | —     | 0.5       | 36.89         |

由于缺乏节理的 $k_n$ ,  $k_s$ , 这里暂只进行强度等效。有限元分析涉及三种单元:一种岩石单元(图11中的4), 两种节理岩石单元(图11中的3, 5)。单元尺寸为71.2cm×71.2cm, 节理岩石单元的强度特性在程序中自动进行等效处理。运用本文的数值模拟方法,对不同的 $\sigma_2$ (侧压)值用计算机模拟加荷的办法求得相应的 $\sigma_1$ 屈服值,再根据 Drucker-Prager 屈服准则反求整个计算范围内的岩体强度参数 $c$ ,  $\varphi$ , 计算结果与优定斜率法和点群中心法相当吻合(图12)。

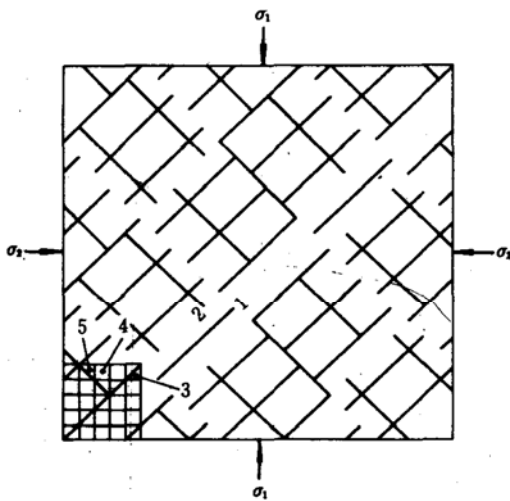


图11 节理分布与节理岩体网格划分

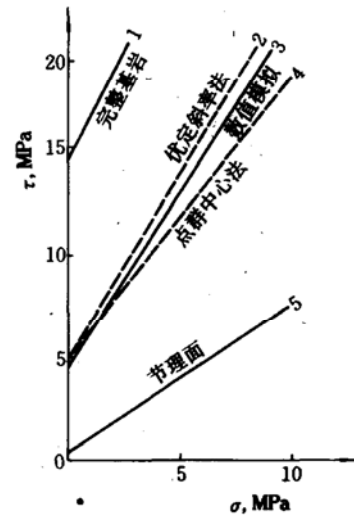


图12 计算结果与建议值比较

## 四、结 论

本文通过建立节理岩石单元的等效连续模型来解决含断续(或连通)规则节理岩体的力学特性的分析方法问题。通过物理模型试验的检验和工程应用,说明该方法是可行的和方便的,可以用于节理有规则分布条件下的大多数情况,特别适于不允许有剧烈变形和明显破坏的水

工建筑物的稳定分析。本文只是从宏观或平均意义上进行等效处理,至于考虑节理相互作用和破坏机制等问题的分析方法尚待今后做更深入的研究。

### 参 考 文 献

- [1] Goodman R E. 不连续岩体中的地质工程方法. 北方交通大学隧道与地质教研室译. 中国铁道出版社, 1980: 188~194.
- [2] 王 仁, 黄克智, 朱兆祥. 塑性力学进展. 中国铁道出版社, 1988: 249~253.
- [3] Gerrard C M. Equivalent Elastic Moduli of a Rock Mass Consisting of Orthorhombic Layers. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1982, 19(1): 9~14.
- [4] 陈胜宏. 节理岩体弹塑性和粘弹性有限元计算. 武汉水利电力学院学报, 1986, (6): 79~86.
- [5] 张 武, 张宪宏. 节理岩体的弹性模型. 岩土工程学报. 1987, 9(4): 33~44.
- [6] 曹 平. 各向异性岩体力学的理论与应用研究[博士学位论文]. 中南工业大学, 1990: 1~10.
- [7] Kawamoto T, et al. Deformation and Fracturing Behaviour of Discontinuous Rock Mass and Damage Mechanics Theory. *Int J for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 1988, 12: 1~29.
- [8] Zhu Weishen, Liang Zhuoyuan, Wang Ping, et al. Research on Strength Behaviour of Jointed Rock Mass by Numerical and Physical Simulation. *Proc of the Intern Conf on Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Vienna, 1990.
- [9] Hoek E, Brown E T. 岩石地下工程, 连志升, 田良灿, 王维德等译. 冶金工业出版社, 1986: 125~133.
- [10] 朱维申, 王 平. 节理岩体特性的数值方法研究. 国家自然科学基金委土与水工建筑物相互作用项目研究成果汇编. 1989: 26~38.
- [11] 梁作元. 某种节理岩体整体力学性质的模型试验研究[硕士学位论文]. 中科院武汉岩土力学研究所, 1988: 31~46.

## An Equivalent Continuum Model for Jointed Rocks and its Engineering Application

*Zhu Wei-shen, Wang Ping*

(Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica)

### Abstract

Jointed rocks with regular joint sets are treated as the unity of isotropic intact rock element and equivalent anisotropic rock element with joints. An equivalent continuum model is proposed and principal formulas of equivalent deformation and equivalent strength are obtained by carefully analyzing the deformation and strength character of rock element with joints. The character of jointed rocks is simulated by non-linear FEM analysis. The effectiveness of above model is verified by physical model tests. The proposed numerical model was used to predict the strength of jointed rocks in a typical engineering project with satisfactory results.