

文章编号: 1000-0887(2001) 08_0862_07

锚固岩体参数的等效方法研究^{*}

陈洪凯, 唐红梅, 王蓉, 唐芬, 王凯, 袁建议

(重庆交通学院 岩土工程研究所, 重庆 400074)

(谢和平推荐)

摘要: 利用岩体中结构体与结构面的刚度系数比较严密地推导了裂隙岩体的等效法向及切向刚度系数; 基于岩体小变形、变形可叠加性及强度参数 C 、 φ 不相关性假定, 利用 Coulomb 强度理论推导了裂隙岩体等效连续体的等效强度参数 C 、 φ 值的表达式。其成果在岩体边坡的整体稳定分析方面具有重要的应用价值, 对于推动岩体本构关系的研究具有重要意义。

关键词: 岩体; 锚固; 等效连续体; 刚度系数; 强度参数

中图分类号: TV223.1 **文献标识码:** A

引言

裂隙岩体是边坡及滑坡的主要研究对象, 结构面的走向、倾向、开度、力学特性及连续性等强烈地影响乃至控制着岩体滑坡的稳定性。迄今, 在裂隙岩体断裂及损伤机理等方面取得了较为丰富的研究成果^[1~4]; 在裂隙岩体数值分析方面, 考虑结构面之间的间距和方位的随机性对可靠指标的影响, 采用 Rosenbluth 方法推导出相应的三维随机有限元及可靠度计算公式^[5], 文献[1]则从含断续节理岩体强度的各向异性出发, 运用 Hoek-Brown 准则提出了合理确定断续节理岩体强度系数 m 、 s 的定量分析法。利用计算机模拟实验技术^[6], 为裂隙岩体本构关系的研究开辟了一条新的途径。

把布设锚杆以后的裂隙岩体视为一个性质均一、各向同性或各向异性的综合体的过程称为等效, 此综合体称为等效连续体。具有典型各向异性特征的锚固岩体通过等效以后形成的等效连续体, 可以利用有限元、离散元等数值计算方法进行锚固岩体的变形及稳定性分析。由位移反分析法简化出等效变形系数, 并利用非线性最小二乘法确定等效变形系数的最优估计, 在隧洞等效模型中得到应用^[4]。考虑加锚节理岩体的特点, 文献[5]采用等效抹平的处理方法, 从损伤加筋体的一致理论出发, 推出加锚岩体的本构关系。文献[6]在结合全长型锚杆加固效果评价, 推导出节理岩体本构方程式, 但由于其公式推算复杂, 限制了其工程实用性。有鉴于此, 本文从裂隙岩体最基本的法向、切向刚度系数及强度指标 C 、 φ 出发, 进行锚固岩体的等效连续体研究, 旨在为相关工程的设计提供准确、快速的参数计算方法, 尤其在边坡及地基的大面积锚固时更具实用价值。

* 收稿日期: 1999_09_23; 修订日期: 2001_04_16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59878057); 交通部基金资助项目(95060233)

作者简介: 陈洪凯(1964—), 男, 重庆江津人, 教授, 博士。

1 刚度系数等效过程研究

利用锚杆锚固岩体,尤其是预应力锚杆主要依靠锚杆预应力施加于岩体的反力,通过改善岩体的整体性来体现锚固效果。在进行大面积锚固时,由于锚杆数量大,用耦合分析法就变得繁琐且难于实现,而通过考虑岩石和锚杆共同作用的整体效应,即通过参数等效,从而使计算方法得以大大简化。

1.1 基本假定

- (1) 岩体中结构面有规律地成组分布,且遍及整个岩体;
- (2) 锚杆在各组结构面中是连续的、平行的;
- (3) 锚杆与岩体的变形相容;
- (4) 岩体属于弹性介质。

1.2 一组结构面等效模型

裂隙岩体中有一组结构面,每条结构面的开度、产状等具有统计一致性,结构面之间完整岩层(岩块)的厚度、产状近似一致。建立锚固岩体分析模型如图1。图中: N_g 为锚杆预应力对岩体的反向作用力,模型的高度为 L , h 为岩块厚度, e 为结构面的开度, θ 为锚杆入射倾角。令岩块的法向刚度系数为 K_{rni} 、切向刚度系数为 K_{rti} ,结构面的法向刚度系数为 K_{jni} 、切向刚度系数为 K_{jti} 。则

$$T = N_g \cos \theta, N = N_g \sin \theta, \quad (1)$$

结构面的层数为

$$m = (L - h) / (h + e),$$

岩块的层数为

$$n = m + 1 = (L + e) / (h + e)。$$

根据固体力学基本原理:

法向位移=法向力/法向刚度系数,

切向位移=切向力/切向刚度系数。

(1) 结合图1可得

$$\Delta h = N \left[\sum_{i=1}^m \frac{1}{K_{jni}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{mi}} \right], \quad (2)$$

$$\Delta b = T \left[\sum_{i=1}^m \frac{1}{K_{jti}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{rti}} \right]. \quad (3)$$

再令该模型等效以后的等效法向及切向刚度系数分别为 K_n 和 K_t ,则

$$\Delta h = N / K_n, \Delta b = T / K_t, \quad (4)$$

进而

$$\frac{1}{K_n} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{K_{jni}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{mi}}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{K_t} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{K_{jti}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{rti}}. \quad (6)$$

式(5)、式(6)为等效法向、切向刚度系数与岩层及结构面相应参数的关系式。

1.3 二组结构面等效模型

图2为具有两组结构面的锚固岩体分析模型,模型高度为 L ,其它尺寸如图示。根据变形

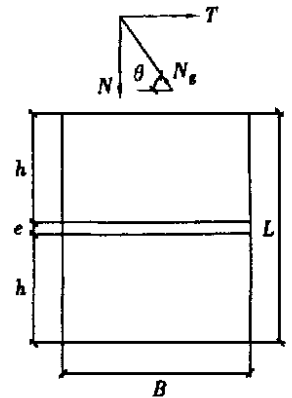


图1 具有一组结构面岩体等效模型

叠加原理, 图 2 中(a) 可视为由(b)、(c) 叠加而成, 图中, h_1 和 h_2 分别为两组岩体结构面之间岩块的厚度, e_1 和 e_2 分别为两组岩体结构面的开度, β_1 和 β_2 分别为两组岩体结构面与水平面的夹角。

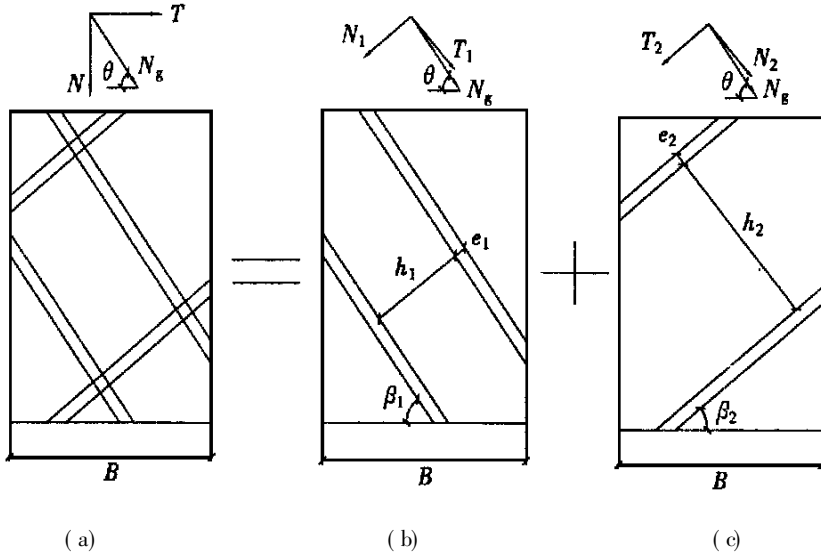


图 2 具有两组结构面岩体等效模型

由图 2(b) 可得

$$T_1 = N_g \cos(\theta - \beta_1), \quad (7)$$

$$N_1 = N_g \sin(\theta - \beta_1); \quad (8)$$

由图 2(c) 可得

$$T_2 = -N_g \cos(\theta + \beta_2), \quad (9)$$

$$N_2 = N_g \sin(\theta + \beta_2). \quad (10)$$

令岩块的法向、切向刚度系数分别为 K_m 、 K_{rt} , 第一组结构面的法向、切向刚度系数分别为 K_{jn1} 、 K_{jt1} , 第二组结构面的法向、切向刚度系数分别为 K_{jn2} 、 K_{jt2} 。则

第一组结构面及岩块的层数分别为

$$m_1 = (L \cos \beta_1 - h_1) / (h_1 + e_1), \quad n_1 = (L \cos \beta_1 + e_1) / (h_1 + e_1).$$

第二组结构面及岩块的层数分别为

$$m_2 = (L \cos \beta_2 - h_2) / (h_2 + e_2), \quad n_2 = (L \cos \beta_2 + e_2) / (h_2 + e_2).$$

对图 2(b) 有

$$\Delta h_1 = m_1 \frac{N_1}{K_{jn1}} + n_1 \frac{N_1}{K_m}, \quad (11)$$

$$\Delta b_1 = m_1 \frac{T_1}{K_{jt1}} + n_1 \frac{T_1}{K_{rt}}; \quad (12)$$

对图 2(c) 有

$$\Delta h_2 = m_2 \frac{N_2}{K_{jn2}} + n_2 \frac{N_2}{K_m}, \quad (13)$$

$$\Delta b_2 = m_2 \frac{T_2}{K_{jt2}} + n_2 \frac{T_2}{K_{rt}}. \quad (14)$$

为便于进行各位移叠加, 创建坐标系统如图 3, 令水平向上与边坡倾向相反为正方向, 垂直向

下为正方向,即 X 轴、 Y 轴。

沿 X 轴

$$\begin{aligned} \Delta b &= \Delta b_1 \cos \beta_1 + \Delta h_2 \sin \beta_2 - \\ &\Delta b_2 \cos \beta_2 - \Delta h_1 \sin \beta_1, \end{aligned} \quad (15)$$

沿 Y 轴

$$\begin{aligned} \Delta h &= \Delta b_1 \sin \beta_1 + \Delta b_2 \sin \beta_2 + \\ &\Delta h_1 \cos \beta_1 + \Delta h_2 \cos \beta_2. \end{aligned} \quad (16)$$

令等效模型的法向、切向刚度系数分别为 K_n 和 K_t , 则

$$N = N_g \sin \theta, \quad (17)$$

$$T = N_g \cos \theta, \quad (18)$$

$$\Delta b = T / K_t, \quad (19)$$

$$\Delta h = N / K_n. \quad (20)$$

综上所述可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_t} &= \frac{L \cos \beta_1 - h_1}{h_1 + e_1} \frac{\cos(\theta - \beta_1) \cos \beta_1}{K_{j1} \cos \theta} + \frac{L \cos \beta_1 + e_1}{h_1 + e_1} \frac{\cos(\theta - \beta_1) \cos \beta_1}{K_n \cos \theta} + \\ &\frac{L \cos \beta_2 - h_2}{h_2 + e_2} \frac{\sin(\theta + \beta_2) \sin \beta_2}{K_{j2} \cos \theta} + \frac{L \cos \beta_2 + e_2}{h_2 + e_2} \frac{\sin(\theta + \beta_2) \sin \beta_2}{K_n \cos \theta} + \\ &\frac{L \cos \beta_2 - h_2}{h_2 + e_2} \frac{\cos(\theta + \beta_2) \cos \beta_2}{K_{j2} \cos \theta} + \frac{L \cos \beta_2 + e_2}{h_2 + e_2} \frac{\cos(\theta + \beta_2) \cos \beta_2}{K_n \cos \theta} - \\ &\frac{L \cos \beta_1 - h_1}{h_1 + e_1} \frac{\sin(\theta - \beta_1) \sin \beta_1}{K_{j1} \cos \theta} - \frac{L \cos \beta_1 + e_1}{h_1 + e_1} \frac{\sin(\theta - \beta_1) \sin \beta_1}{K_n \cos \theta}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_n} &= \frac{L \cos \beta_1 - h_1}{h_1 + e_1} \frac{\cos(\theta - \beta_1) \sin \beta_1}{K_{j1} \sin \theta} + \frac{L \cos \beta_1 + e_1}{h_1 + e_1} \frac{\cos(\theta - \beta_1) \sin \beta_1}{K_n \sin \theta} - \\ &\frac{L \cos \beta_2 - h_2}{h_2 + e_2} \frac{\cos(\theta + \beta_2) \sin \beta_2}{K_{j2} \sin \theta} - \frac{L \cos \beta_2 + e_2}{h_2 + e_2} \frac{\cos(\theta + \beta_2) \sin \beta_2}{K_n \sin \theta} + \\ &\frac{L \cos \beta_1 - h_1}{h_1 + e_1} \frac{\sin(\theta - \beta_1) \cos \beta_1}{K_{j1} \sin \theta} + \frac{L \cos \beta_1 + e_1}{h_1 + e_1} \frac{\sin(\theta - \beta_1) \cos \beta_1}{K_n \sin \theta} + \\ &\frac{L \cos \beta_2 - h_2}{h_2 + e_2} \frac{\sin(\theta + \beta_2) \cos \beta_2}{K_{j2} \sin \theta} + \frac{L \cos \beta_2 + e_2}{h_2 + e_2} \frac{\sin(\theta + \beta_2) \cos \beta_2}{K_n \sin \theta}. \end{aligned} \quad (22)$$

2 锚固岩体等效强度参数 C 、 φ 值的等效过程

2.1 一组结构面等效模型

基本岩体模型如图 1 所示,模型的高度为 L 。令岩块和结构面 1 的强度参数分别为 C' 、 φ' 和 C_1 、 φ_1 。假定岩体及锚固岩体等效连续体的强度参数 C 、 φ 不相关。

根据 Coulomb 强度理论

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi, \quad (23)$$

有

$$\tau_f' = C' + \sigma \tan \varphi', \quad (24)$$

$$\tau_{f1} = C_1 + \sigma \tan \varphi_1, \quad (25)$$

其中

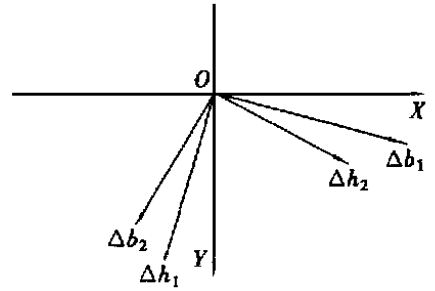


图 3 变形分析坐标系

$$\sigma = N/b = N_g \sin \theta / b \quad (26)$$

假定该岩体物理模型在水平面上有一定的形变, 即模型在等效前后在水平面上受力相等, 令为 F , 则

$$F = \tau_1 b h n_1 + \tau_1 b e m_1 = (C' + \sigma \tan \phi) b h \frac{L+e}{h+e} + (C_1 + \sigma \tan \phi_1) b e \frac{L-h}{h+e} \quad (27)$$

再令岩体的等效强度参数为 C 、 φ , 则

$$F = (C + \sigma \tan \varphi) b L,$$

故有

$$(C + \sigma \tan \varphi) L(h+e) = (C' + \sigma \tan \phi) h(L+e) + (C_1 + \sigma \tan \phi_1) e(L-h) \quad (28)$$

基于强度参数 C 、 φ 不相关的基本假定, 由(28) 分别得

$$C = \frac{C' h L + C' h e + C_1 e L - C_1 e h}{L(h+e)}, \quad (29)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma \tan \varphi \times L(h+e) &= \sigma \tan \phi \times h(L+e) + \sigma \tan \phi_1 \times e(L-h), \\ \tan \varphi &= \frac{\tan \phi \times h L + \tan \phi \times h e + \tan \phi_1 \times e L - \tan \phi_1 \times e h}{L(h+e)}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

式(29)、(30) 即为等效强度参数 C 、 φ 值与岩层及结构面相应参数的关系式。

2.2 二组结构面等效模型

根据图2, 因为模型为小变形, 可以采用变形迭加原理进行分析。

令岩块、第一组、第二组结构面的强度指数分别为 C' 、 ϕ 、 C_1 、 ϕ_1 和 C_2 、 ϕ_2 。图2(b) 内与结构面平行的受剪面积 $b_1 = b / \cos \beta_1$, 图2(c) 内与结构面平行的受剪面积 $b_2 = b / \cos \beta_2$, 又有

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{b_1}, \quad \sigma_2 = \frac{N_2}{b_2}, \quad \tau_1 = \frac{T_1}{b_1}, \quad \tau_2 = \frac{T_2}{b_2}.$$

对岩体

$$\tau = C' + \sigma \tan \phi,$$

对第一组结构面

$$\tau_1 = C_1 + \sigma \tan \phi_1,$$

第二组结构面

$$\tau_2 = C_2 + \sigma \tan \phi_2.$$

图2(b) 中, 沿结构面方向的受力

$$F_1 = \tau_1 b_1 h_1 n_1 + \tau_1 b_1 e_1 m_1 = (C' + \sigma_1 \tan \phi) b_1 h_1 n_1 + (C_1 + \sigma_1 \tan \phi_1) b_1 e_1 m_1; \quad (31)$$

图2(c) 沿结构面方向的受力

$$F_2 = \tau_2 b_2 h_2 n_2 + \tau_2 b_2 e_2 m_2 = (C' + \sigma_2 \tan \phi) b_2 h_2 n_2 + (C_2 + \sigma_2 \tan \phi_2) b_2 e_2 m_2. \quad (32)$$

令岩体等效强度指数为 C 、 φ , 其 Coulomb 强度定律表达式为

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi.$$

根据等效前后水平方向的受力相等, 即 $\sum F_X = 0$ 得

$$(C + \sigma \tan \varphi) b L = F_1 \cos \beta_1 + F_2 \cos \beta_2. \quad (33)$$

把(31)、(32) 代入(33), 基于强度参数 C 、 φ 不相关的假定, 分别可得

$$C = C' h_1 \frac{L \cos \beta_1 + e_1}{L(h_1 + e_1)} + C_1 e_1 \frac{L \cos \beta_1 - h_1}{L(h_1 + e_1)} + C' h_2 \frac{L \cos \beta_2 + e_2}{L(h_2 + e_2)} + C_2 e_2 \frac{L \cos \beta_2 - h_2}{L(h_2 + e_2)}, \quad (34)$$

$$\tan \varphi = \frac{\sin(\theta - \beta_1) \cos \beta_1 h_1 (L \cos \beta_1 + e_1) \tan \varphi_1}{L \sin \theta \times (h_1 + e_1)} + \frac{\sin(\theta - \beta_1) \cos \beta_1 \times e_1 (L \cos \beta_1 - h_1) \tan \varphi_1}{L \sin \theta \times (h_1 + e_1)} + \frac{\sin(\theta + \beta_2) \cos \beta_2 \times h_2 (L \cos \beta_2 + e_2) \tan \varphi_2}{L \sin \theta \times (h_2 + e_2)} + \frac{\sin(\theta + \beta_2) \cos \beta_2 \times e_2 (L \cos \beta_2 - h_2) \tan \varphi_2}{L \sin \theta \times (h_2 + e_2)}. \quad (35)$$

3 结论及讨论

(1) 本文详细地分析了裂隙岩体刚度系数及强度参数的等效过程,得到了裂隙岩体的等效法向、切向刚度系数计算公式;

(2) 得到了基于强度参数 C 、 φ 不相关性假定,按照 Coulomb 强度理论等效的锚固岩体等效强度参数的计算式;目前,在岩土工程学界,关于强度参数 C 、 φ 是否相关的问题仍然处于学术争论过程中,从岩土体微观结构分析,二者具有一定的相关性,但是,从工程角度分析,二者基本处于非相关状态,非相关性的工程意义是重大的,因此本文据此而进行锚固岩体的等效过程研究;

(3) 岩体的根本特点在于典型的各向异性,其成因主要在于岩体中存在岩体结构面。岩体锚固的根本作用在于提高岩体的承载力、降低岩体受荷变形特性及过程,锚固岩体的等效机理主要体现在岩体结构的优化方面,使较差的碎块状或层状岩体结构转变为整体性较好的块体状或整体状岩体结构;

(4) 锚固岩体的等效刚度及强度参数,使利用有限元、边界元、离散元等数值计算方法进行岩体的变形及稳定分析成为可能,计算结果更为客观合理。目前,在进行岩体锚固机理及锚固效果分析中,均主要采用数值计算方法,注重方法本身的研究,而事实上,影响计算成果的岩体力学参数则更为重要,因此,开展参数的研究也是一项有意义的工作;

(5) 本文仅仅对具有一组及二组岩体结构面的岩体等效参数进行了方法研究,而对于具有二组以上的岩体结构面的岩体平面及 3D 状态下的情况目前正处于研究过程中,限于论文篇幅所限,本文方法的应用事例另有专文叙述。值得指出的是,按照本文提出的岩体参数等效方法在边坡及地基的大面积锚固时更具有实际应用价值。而要分析锚杆与围岩的相互作用及研究地下洞室的锚固效果时应该将等效模型与耦合模型共同考虑,在分析边坡的开挖过程时尚应考虑岩体的卸荷效应和锚杆的蠕变效应,尤其在锚杆端部一定范围内应采用耦合模型,其余部分采用等效模型,方能使问题的分析过程更具有客观性,正确描述锚固岩体的强度及变形行为。

[参 考 文 献]

- [1] 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.

- [2] 杨延毅, 王慎跃. 加锚节理岩体的损伤增韧止裂模型研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 9—17.
- [3] 孙建生, 永井哲井. 一个新的节理岩体力学分析模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 193—204.
- [4] 袁绍国, 雷化雨. 节理岩体加载实验的计算机模拟[A]. 见: 第五届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集[C]. 第二卷. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994, 370—373.
- [5] 刘宁, 卓家寿. 节理岩体的三维随机有限元及可靠度计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 297—305.
- [6] 刘保国. 岩体等效变形参数及侧压系数的非线性最小二乘法估计[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 263—268.

Research on Equivalent Processes of Rock Mass Parameters With Anchor Piles

CHEN Hong_kai, TANG Hong_mei, WANG Rong, TANG Fen,
WANG Kai, YUAN Jian_yi

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong
University, Chongqing 400074, P R China)

Abstract: Using normal and shear rigid coefficients of intact rock and fracture plane, rigidly normal, shear equivalent rigid coefficients of fissure rock mass are conducted. On the basis of hypotheses of small displacement of rock mass, principle of superposition, irrelevance of strength parameters C and φ and Coulomb theory, formulas to calculate equivalent strength parameters C and φ of equivalent continuous mass from fissured rock mass with anchor piles are given. The achievement is extremely valuable in integral stability analysis of the rock mass slope and important in promoting the research of the rock mass's constitutive relation.

Key words: rock mass; anchor; equivalent continuous mass; rigid coefficient; strength parameter