

样本单元法及层状含裂隙岩体力学参数的确定

陈志坚, 卓家寿

(河海大学土木工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 基于大量野外调查和室内研究, 对层状岩体的岩性组合特征, 软弱夹层、裂隙的分布规律以及岩体结构特征进行分析、研究、分区分类并建立相应的样本单元. 提出了用数值分析方法模拟现场大型试验的“样本单元法”, 根据岩块力学参数来获得含裂隙岩体的力学参数.

关键词 层状岩体 岩性组合 软弱夹层 层间裂隙 样本单元 非线性有限元

中图分类号 :TU45 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)01-0014-04

1 层状含裂隙岩体及其力学参数研究现状

大量的工程实践表明, 层状岩体中的工程地质问题极具普遍性和复杂性, 但目前人们还未能对层状岩体进行十分正确的认识和评价. 其研究现状是: 对岩体的组成结构虽然开展了大量的勘察和分析研究工作, 但在定量评价其稳定性时, 却很难对这些成果进行很好的利用. 岩体力学参数对岩体稳定性的计算至关重要, 但目前岩块室内试验多, 而岩体现场大型试验少. 由于大量结构面的存在, 导致了岩块的力学参数与岩体的力学参数相差很大, 且相关性复杂. 显然, 如何根据岩块的力学参数确定含裂隙岩体的力学参数, 是有重要现实意义的.

2 层状岩体的岩性组合特征及其分类

层状岩体大多由软、硬互层状地层组成, 其软岩为粘土岩、片岩等, 硬岩为砂岩、石灰岩等, 它们相间互层, 构成独特的岩性组合特征. 其单层厚度从 1~2 m 到几厘米不等. 层状岩体的工程性质在很大程度上取决于软、硬岩层的组合特征, 其分类依据如下: (a) 岩层单层厚度, 厚、薄层组合关系及变化规律; (b) 岩性特征及软、硬岩组合体的力学行为; (c) 软弱结构面的分布特征. 据此, 一般可将层状岩体分为六类^[1]. A 类: 薄层软、硬岩互层状组合体, 其组成特征如图 1(a) 所示. 岩体中的裂隙多表现为闭合的隐裂隙. B 类: 中厚层、厚层硬岩夹中厚层软岩组合体 (图 1(b)). 一般是几层硬岩夹一层软岩, 软岩层的顶、底面常见泥化现象. 岩体中裂隙的发育受限制于软岩层, 一般硬岩层中裂隙的间距为 0.5~2 倍的单层厚度, 裂隙张开; 软岩层中裂隙间距为几厘米至十几厘米, 但多呈闭合的隐裂隙, 且存在“转层”现象.

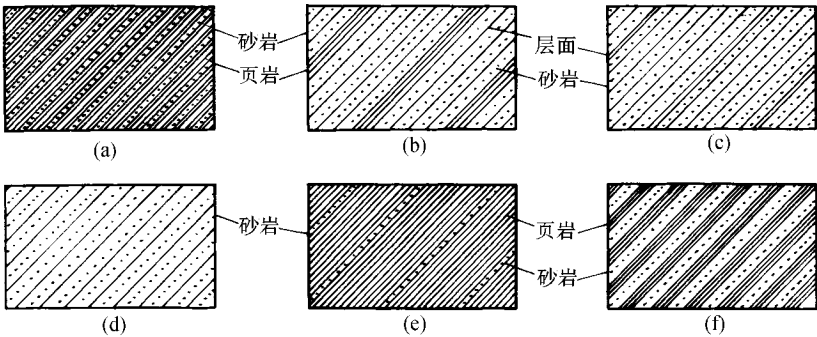


图 1 岩性组合分类示意图

Fig.1 Sketch of classification of lithology combination

C 类:厚层、中厚层硬岩夹薄层、极薄层软岩(图 1(c)).软岩中层间剪切错动和泥化现象较普遍,裂隙的发育也不受软岩限制,间距多大于 50 cm,但切割深度较大,延伸较长. D 类:厚层、巨厚层硬岩(图 1(d)).岩体中层面和裂隙间距都较大.裂隙虽少,却常见切割深度达十几米,延伸几十米的长大裂隙. E 类:厚层、巨厚层软岩夹薄层硬岩组合体(图 1(e)).岩体中软岩的单层厚度大小不一,由于其岩性软弱,层面的优势作用不明显.硬岩层厚度小、层数少,在整个组合体中所占的比例很小.岩体中的裂隙多呈闭合的隐裂隙,其优势作用也不明显. F 类:厚层、中厚层的互层状软、硬岩组合体(图 1(f)).硬岩层中裂隙的间距一般十几至几十厘米,其优势作用明显.软岩层中裂隙多表现为闭合的隐裂隙.但软岩层中往往发育有泥化夹层,从总体上看,裂隙的分布明显受控于软岩的分布.

3 层状岩体中的层间裂隙和切层裂隙

根据对十几个坝址和桥位区 5581 条裂隙的调查,发现它们总体上具有以下特征:不同地点、不同岩层中的发育程度不尽相同,往往是两组较发育,其它则较差.裂隙的延伸长度、切层深度随地、因岩而异.硬岩中的裂隙间距与岩层厚度有关,约为岩层厚度的 0.5 ~ 2 倍.软岩中裂隙的发育程度相对较差,大多表现为密而细小的隐裂隙.所以,层状岩体中的裂隙多表现为不切层的层间裂隙,但有些裂隙的分布和切割深度不受岩性控制,切层贯通性好,延伸长度可达几十米,通常称其为长大裂隙(约占同组裂隙的 5% ~ 10%).每组裂隙或与层面近正交,或与层面平行.同一裂隙切穿软岩时,产状往往变缓.综上所述,层状岩体中的裂隙可归纳为非切层的层间裂隙和切层贯通性好的长大裂隙两大类.其中层间裂隙组数多、数量大,对岩体工程性质的影响表现在:(a)破坏了岩体的完整性,并为岩体卸荷回弹提供了分离面,降低了岩体的变形模量等力学参数;(b)增加了岩体的透水性,加剧了地下水和风化作用对岩体稳定的影响.

4 样本单元分析法及含裂隙层状岩体力学参数的确定

4.1 样本单元分析法

在复杂岩体有限元分析中,通常情况下对计算域内的断层、泥化夹层和切层裂隙都设置专门的单元给予准确模拟.而对于大量存在的层间裂隙、层面以及薄层软岩则很少逐条模拟,所以计算域内的大多数单元仍然是岩体,而不是均质块体.显然,这种单元的力学参数应该采用含裂隙和层面、由几种岩石所组成的结构体的参数,它们可以由大型现场试验获得,但大型现场试验往往为数不多.所以,利用岩块等的室内试验成果来确定含裂隙岩体的力学参数的研究途径就具有广泛的前景.

样本单元分析法的总体思路和步骤如下:(a)岩体结构分区.每一个区的岩体具有相同的边界条件、外荷条件、岩性组合和岩体结构特征.(b)建立每类结构区的样本单元.每个样本单元能够代表各对应结构区的岩性组合特征和岩体结构特征.(c)样本单元计算分析.根据每个区的边界条件和外荷条件对样本单元进行大三轴试验数值模拟,计算分析时全面模拟每一条裂隙、每一个层面,一个单元仅由岩性相同的岩石组成,有关的计算参数和本构关系直接采用室内试验成果.(d)样本单元法成果.每一个样本单元都获得一组 $\sigma \sim \epsilon$ 关系,显然这一关系表征了对应样本单元的本构关系,也可据此求得样本单元的力学参数.(e)样本单元法成果应用.在岩体整体有限元计算分析时,直接引用样本单元分析成果,避免了确定含裂隙岩体力学参数的困难.

4.2 样本单元的形成

样本单元分析法的关键在于样本单元的形成.样本单元应该能够全面、真实地反映其对应岩体的岩性组合和岩体结构特征.本文以江阴大桥南岸山体为例,在大量现场调查的基础上建立了如下四种样本单元:

a. A 类样本单元.属 A 类岩性组合体(图 1(a)),总厚度一般小于 3 m,所以该类样本单元采用两种尺寸: $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$, $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ m}$.岩体中发育两组裂隙且多表现为闭合的隐裂隙,裂隙产状分别为:(a)走向近 SN,倾向 E,倾角 75° .(b)走向近 EW,倾向 S,倾角 65° .裂隙的优势作用不明显;层面间距小,层面产状走向 EW,倾向 N,倾角 25° ,层面的优势作用明显.

b. B 类样本单元.对应 B 类岩性组合体(图 1(b)).采用四种尺寸: $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$, $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ m}$, $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 6\text{ m}$, $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 8\text{ m}$.岩体中发育两组裂隙,产状与 A 类相似.硬岩中裂隙间距 40 ~ 60 cm,裂隙优势作用明显.软岩层中裂隙间距几厘米至十几厘米.

c. C 类样本单元.其组成结构如图 1(c)所示,样本单元的尺寸同 B 类.其岩体结构特征为:裂隙发育不

受软岩控制,间距 50~100 cm,切割深度 4~8 m,层面和裂隙产状与 A 类相似.

d. D 类样本单元. 其组成结构如图 1(d) 所示,主要结构面是层面和裂隙,裂隙的间距可大于几米. 单元尺寸、裂隙和层面产状同 B 类.

4.3 样本单元大三轴试验的有限元模拟计算

试验最大荷载、加荷等级的确定遵循现行规范,垂向压力取(附加应力+自重应力)×1.2 倍,分 10 级加荷,分别为 0.22, 0.44, 0.66, 0.88, 1.10, 1.32, 1.54, 1.76, 1.98, 2.2, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0, 35.0, 40.0 MPa. 试验方法采用压缩类型的加荷方式,即在三向均等的压力下附加轴向压力以增大主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$),而使岩体发生变形破坏.

4.3.1 计算方法与材料参数

数值分析采用三维空间有限元分析,岩块采用空间六面体弹塑性单元,夹层和裂隙采用不抗拉弹塑性单元. 计算中将岩块视为具有应变强化阶段和应变软化阶段的弹塑性材料,并采用四参数准则^[2]作为屈服破坏准则(即 $F(\sigma) = AJ_2 + B\sqrt{J_2} + C\sigma_1 + DI_1 - 1 = 0$),岩块的本构关系为^[3]

$$d\sigma = (D - (1 - \mu)D)d\varepsilon = D_{ep}d\varepsilon \tag{1}$$

$$D_p = D \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T (A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\})^{-1} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T D \tag{2}$$

把 F 和 D 代入式(2)后,即得到各自的 D_p ,硬化效应由参数 A 表示, A 则由岩块的室内单轴试验确定. 软弱夹层和裂隙可能破坏于剪切屈服,也可能被拉裂,其屈服准则为

$$F = 3a\sigma_z + \sqrt{(1 - 12a^2)(\tau_{y'z'}^2 + \tau_{z'x'}^2)} - k \tag{3}$$

而不抗拉准则采用 $F = \sigma_z = 0$,将 F 代入式(2),即得到软弱夹层和裂隙的 D_p . 其本构关系采用式(4).

$$\{d\sigma_z \quad d\tau_{y'z'} \quad d\tau_{z'x'}\} = (D' - (1 - \mu)D_p) \{d\varepsilon_z \quad d\gamma_{x'y'} \quad d\gamma_{z'x'}\} \tag{4}$$

式中 D ——软弱夹层和裂隙的弹性矩阵^[3].

样本单元的材料参数如表 1 所示,软岩层面 $f = 0.5, c = 0.15$ MPa,硬岩层面 $f = 0.7, c = 0.04$ MPa,裂隙面 $f = 0.8, c = 0.2$ MPa.

表 1 岩块力学参数一览表
Table 1 Mechanical parameters of rocks

材料	湿抗压 R_c /MPa	变形模量 E_d /GPa	泊松比 μ	湿重度 γ /(kN·m ⁻³)	摩擦系数 f	凝聚力 c /MPa
硬岩层	55	33.4	0.25	26.6	1.15	2.08
软岩层	10	3.37	0.3	25.9	1.06	0.68

4.3.2 样本单元计算成果分析

B 类样本单元(其它单元略)有限元计算成果如表 2 所示. 表中 ε_i 与 σ_i 对应,为纵向应变. B_1, B_2, B_3 和 B_4 分别代表尺寸为 1 m×1 m×2 m, 2 m×2 m×4 m, 3 m×3 m×6 m 和 4 m×4 m×8 m 的单元. 各类样本单元的应力-应变关系如图 2 所示. 显然,通过改变加载方式,还可以容易地获得岩体的其他力学参数,如 f 和 c 值等.

表 2 样本单元有限元计算成果一览表
Table 2 Computed results with sample FEM

ε_i ($\times 10^{-4}$)	B 类样本单元				ε_i ($\times 10^{-4}$)	B 类样本单元			
	B_1	B_2	B_3	B_4		B_1	B_2	B_3	B_4
ε_1	0.095	0.104	0.103	0.104	ε_9	1.580	1.586	1.589	1.589
ε_2	0.199	0.197	0.195	0.196	ε_{10}	1.726	1.755	1.754	1.754
ε_3	0.299	0.305	0.304	0.304	ε_{11}	3.959	3.964	3.963	3.963
ε_4	0.484	0.493	0.491	0.492	ε_{12}	7.893	7.900	7.900	7.900
ε_5	0.793	0.704	0.703	0.703	ε_{13}	11.54	11.94	11.85	11.88
ε_6	0.905	0.916	0.915	0.915	ε_{14}	16.09	16.19	16.01	16.19
ε_7	1.056	1.101	1.097	1.097	ε_{15}	30.91	31.98	31.70	31.81
ε_8	1.401	1.408	1.401	1.401	ε_{16}	47.14	48.74	48.70	48.70

4.4 含裂隙层状岩体力学参数的确定

根据图 2 可获得各类含裂隙岩体的力学参数如下:

A 类岩体尺寸效应不明显,结构面效应也不明显,由图 2(a)可求得变形模量 $E_0 = 3.0$ GPa. B 类岩体尺寸

效应明显,比较 B_1, B_2, B_3 和 B_4 的计算成果,取 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ m}$ 尺寸的计算成果较合适. 由图 2(b)可见,该类岩体有两个屈服段. 结合岩体结构特征分析,第一个屈服段由裂隙面压缩引起,当应力值较小时,先导致裂隙面和软弱夹层出现“屈服”;当应力继续增大后,裂隙面和软弱夹层出现“强化”,结构面和结构体的共同效应增强,含裂隙岩体出现近似线弹性变形阶段,之后才出现了含裂隙岩体的整体“屈服”. 基于上述分析,可求得该类岩体的变形模量 E_0 为 12.5 GPa . C 类和 D 类岩体的有限元分析成果与 B 类类似,其变形模量可分别取 23.8 GPa 和 34.0 GPa . 显然,还可以根据计算结果获得含裂隙岩体的 c, f 等力学参数.

含裂隙岩体力学参数的确定是复杂而困难的,但却是非常重要的. 样本单元分析法以野外调查和室内试验结果为依据,不失为一条值得深入探索的研究途径. 只要建立的样本单元具有较高的仿真性,采用成熟的非线性有限元分析程序,并严格按照现行试验规程处理边界条件和加载方式,其分析成果的可靠性是容易得到保证的. 本研究成果已得到试验法和类比法的验证,并被江阴大桥和小浪底地下工程实践采用.

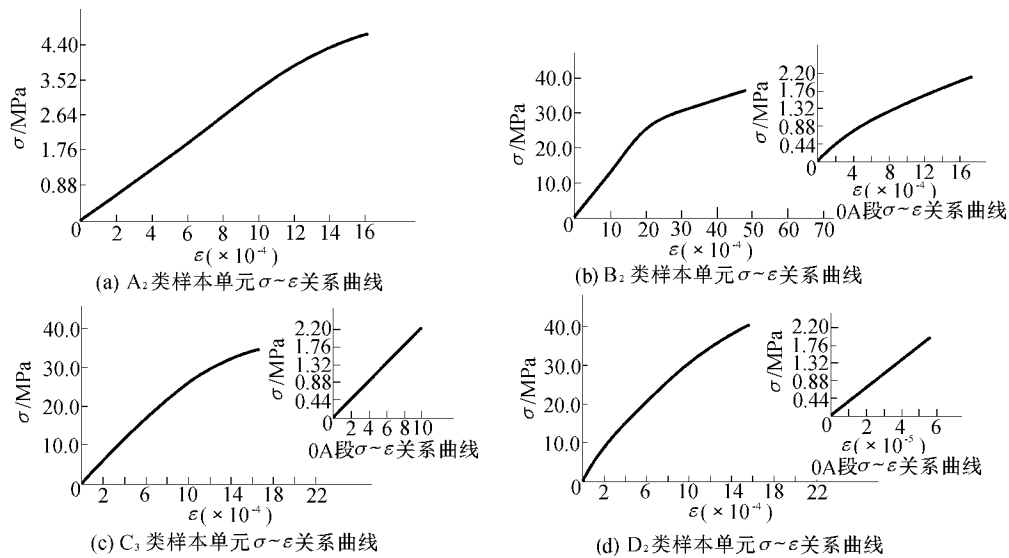


图 2 各样本单元 $\sigma \sim \varepsilon$ 关系曲线
Fig.2 σ vs ε for each sample element

参考文献：

[1] 陈志坚. 样本单元及层状岩质边坡稳定性评价[D]:[学位论文]. 南京:河海大学,1996.
[2] Hsieh S S, Ting E C, Chen W F. A Plastic-fracture model for concrete[J]. Int J Solids Struc, 1982, 18(3):181~197.
[3] 卓家寿,王荫堂. 具有软弱结构面的岩基非线性分析[J]. 岩石力学与工程学报,1983,2(1):49~56.
[4] 黄运飞,冯静. 计算工程地质学[M]. 北京:兵器工业出版社,1992. 42~53.

Application of“ Sample Element Method”to Determination of
Mechanical Parameters of Stratified Crack Rock Mass

CHEN Zhi-jian ZHUO Jia-shou

(College of Civil Engineering ,Hohai Univ. , Nanjing 210098, China)

Abstract Based on field surveys and indoor studies , this paper mainly analyses , studies , zones and classifies the characteristics of rock properties combination of stratified rock mass , the rules of distribution of weak intercalation and crack and the characteristics of rock mass structure. “ The sample element method ” is proposed in which FEM is used to emulate the field large-size trail and to obtain the mechanical parameters and essential structure relation of crack rock mass through rock mechanical parameters and essential structure relation.

Key words stratified rock mass ;rock properties combination ;soft intercalation ;crack-in-layer ;sample element method ; non-linear FEM