

节理岩体断裂损伤模型在三峡坝基岩体力学参数模拟和预测中的应用*

赵吉东¹ 尹健民² 周维垣¹ 杨若琼¹

(¹清华大学水利水电工程系 北京 100084) (²水利部长江科学院岩基研究所 武汉 430010)

摘要 基于节理岩体的断裂损伤模型,建立基于等效柔度张量及特定破坏准则等效体力学参数预测的方法,对节理岩体的等效力学参数进行了计算机模拟和预测,并将其应用于三峡工程坝基岩体的等效弹性参数的预测中。通过与节理刚度模型、包体模型进行比较,证明所采用模型在参数预测中较为适用,为三峡工程的坝基岩体稳定分析提供了参考。

关键词 岩体断裂损伤模型,等效力学参数,计算机模拟和预测

分类号 TU 458⁺.4, TP 391.9

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)02-0176-04

1 引言

工程岩体常常被许多节理、裂隙、层理和断层等结构面所切割(以下统称节理),使得岩体的强度和刚度大受影响,岩体的力学性质主要取决于这些节理的性质。因此,估计和模拟节理岩体的力学性质成为岩体力学及工程的关键问题。由于岩体结构复杂多变,代表岩体的特征单元体非常大,一般直接取样测试比较困难,且取样测值与实际岩体存在较大尺寸效应。因此,工程中通常应用经验类比法来估计节理岩体的力学参数。但是,由于不同工程地质岩质条件不同,岩体成因和力学特性也相差甚远,故使用上述方法局限性很大。如果使用节理岩体的概化方法,将节理等结构面对岩体的劣化作用概化为岩体等效强度和刚度参数的折减,则更具合理性。目前有限元方法中普遍使用 Goodman 节理单元模型来进行模拟。其局限性在于仅能够考虑断层类长大结构面,而不能考虑大量的次生节理对岩体强度及变形模量的劣化作用^[1~5]。而这些次级节理的劣化作用有时对宏观性质影响很大,不能忽略。随着工程现场观测设备的发展进步,岩体工程施工或运行中的位移监测资料也逐渐丰富完备,并被用

于反演岩体变形参数,也为数值模拟预测提供了对比验证分析的依据。

本文在岩体节理统计基础上,建立节理岩体损伤模型,使用计算机数值模拟方法,预测节理岩体宏观等效弹性参数,并同节理刚度模型^[6~9]以及包体模型^[10, 11]的计算结果进行了比较。本文模型应用于长江三峡工程坝基岩体的强度参数模拟,可看出,本文节理岩体损伤模型可以很清晰地揭示节理岩体的各向异性特性。岩体的各向异性正是节理分布的各向异性与节理变形本身的各向异性的宏观体现。

2 节理岩体力学参数模拟预测模型

2.1 节理岩体断裂损伤模型

考虑节理岩体,将岩体中的节理等看作岩体介质中的币状微裂纹损伤缺陷,由断裂损伤力学方法,得到的附加应变能为

$$dU_d = \frac{1-\nu_0^2}{E_0} \int_{\Omega} [K_I^2 + K_{II}^2 + K_{III}^2 / (1-\nu_0)] d\Omega \quad (1)$$

式中: K_I, K_{II}, K_{III} 分别为裂纹尖端的 I, II, III 型应力强度因子; E_0, ν_0 分别为材料的弹性模量和泊松比; Ω 为裂纹表面积。对半径为 r 的币状张拉型裂纹,应变能为

2001年5月25日收到初稿,2001年6月6日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(599391390)。

作者 赵吉东 简介:男,26岁,1997年毕业于清华大学水利系水工建筑专业,现为清华大学水利系博士研究生,主要从事岩石力学方面的研究工作。

$$U_d = \frac{8r^3(1-\nu_0^2)}{3E_0} [\sigma^2 + 2(2-\nu_0)\tau^2] \quad (2)$$

式中： σ ， τ 分别为裂纹承受的正应力和剪应力。

对岩体中压剪情况占优的节理，文[8]引入传压系数 C_v 和传剪系数 C_s 作为式(2)中正应力项和剪应力项的修正系数。其取值考虑了节理由于起伏粗糙非完全闭合，且受不同程度风化，使得上下节理之间的相对变形取决于节理变形刚度：

$$C_v = \frac{\pi a}{\pi a + E_0/[k_n(1-\nu_0^2)]} \quad (3)$$

$$C_s = \frac{\pi a}{\pi a + E_0/[k_s(1-\nu_0^2)]} \quad (4)$$

节理岩体等效弹性应变为

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\partial U}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma}(U_0 + U_d) = \tilde{C} : \sigma \quad (5)$$

式中： \tilde{C} 为节理岩体四阶等效柔度张量， U_0 为完整岩石的应变能。考虑自洽理论和即时模量概念^[8, 9]， \tilde{C} 可写为

$$\tilde{C}_{ijkl} = C_{ijkl}^0 + \frac{1}{E_0} e^{Q_{ijkl}-1} \quad (6)$$

$$Q_{ijkl} = \frac{8(1-\nu_0^2)}{3} \sum_{p=1}^q \rho^{(p)} r_{(p)}^3 R_{ijkl}^{(p)} \quad (7)$$

$$R_{ijkl}^{(p)} = 2[1 - C_v^{(p)}] n_i^{(p)} n_j^{(p)} n_k^{(p)} n_l^{(p)} + (2 - \nu_0) [1 - C_s^{(p)}] [\delta_{jk} n_i^{(p)} n_l^{(p)} + \delta_{jl} n_i^{(p)} n_k^{(p)} + \delta_{il} n_j^{(p)} n_k^{(p)} + \delta_{ik} n_j^{(p)} n_l^{(p)} - 4n_i^{(p)} n_j^{(p)} n_k^{(p)} n_l^{(p)}] \quad (8)$$

式中： q 为节理组总数， \mathbf{n} 为各组节理在所选坐标系中的法向矢量。

2.2 节理岩体刚度模型

文[5]和文[7]分别考虑岩体和节理变形，并将总体柔度分解为两部分柔度的贡献，将单一节理的附加位移进行叠加概化，并由此来定义等效应变和等效柔度张量。最后得到如下系数的等效柔度张量：

$$\tilde{C}_{ijkl} = \sum_{p=1}^q \pi \rho^{(p)} r_{(p)}^2 \left\{ \left(\frac{1}{K_n} - \frac{1}{K_s} \right) n_i^{(p)} n_j^{(p)} n_k^{(p)} n_l^{(p)} + \frac{1}{4K_s} [\delta_{jk} n_i^{(p)} n_l^{(p)} + \delta_{jl} n_i^{(p)} n_k^{(p)} + \delta_{il} n_j^{(p)} n_k^{(p)} + \delta_{ik} n_j^{(p)} n_l^{(p)}] \right\} \quad (9)$$

2.3 包体模型

包体模型对于考虑岩体中4或5级次生节理对

岩体力学参数的弱化作用比较适用。假设节理尺寸相对于所考虑的岩体足够小，使之可以看作岩体中的微观缺陷，并假设节理具有一定的面积及厚度，此厚度为包含节理空隙、充填物及风化层的等效厚度。设含有一个夹杂包体的均匀各向同性弹性体，由夹杂产生一小的扰动应变。文[11]引入代表材料相变影响的特征应变作为此扰动，利用 Eshelby 张量将其与体内均匀应变联系起来。并由应变能等价得到如下等效柔度张量：

$$\tilde{C}_{ijkl} = (1 + \varpi \lambda \theta) C_{ijkl}^0 + \varpi \lambda (\theta_n S_{ijab}^n + \theta_t S_{ijab}^t) C_{abkl}^0 \quad (10)$$

式中： $\varpi = \pi r^2 / wh$ 为裂隙相对面积， $\lambda = t_0 / d$ 为相对厚度， $\theta = 1 - E^* / E_0$ 为相对弹性模量， $\theta_n = \theta^2 / (1 - \theta)$ ， $\theta_t = 2\theta^2 / (2 - \theta)$ ， $C_{ijkl}^0 = -\frac{\nu_0}{E_0} \delta_{ij} \delta_{kl} + \frac{1 + \nu_0}{2E_0} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})$ 为初始柔度张量。

3 三峡坝基岩体参数模拟结果比较

三峡工程坝基基岩为微新闪云斜长花岗岩，岩体中节理按优势方向分为5组，一组为缓倾角节理，沿垂直于坝轴线方向倾向下游，另一组为中倾角节理，密度较小，其他3组为陡倾角节理。其中，第1，2，4组节理的平均倾向为116°，与主滑方向NE133.5°平均夹角为18°。

采用本文断裂损伤模型以及刚度模型模拟三峡基岩岩体时，取法向刚度 k_n 为100 MPa/mm，切向刚度 k_s 为0~15 MPa/mm。完整岩石 $E = 60$ GPa，泊松比 $\nu_0 = 0.2$ 。在包体模型模拟过程中，节理平均风化层厚度为2.0 cm，泊松比为2.0，弹模比为0~1。表1为三种模型模拟出各个方向弹性参数、泊松比以及剪切模量的比较(表中切向刚度取 $k_s = 10$ MPa/mm)。图1为断裂损伤模型和刚度模型三个方向柔度张量主值与切向刚度的关系。由于法向刚度对其影响不是很大，此处未给出法向刚度与柔度主值关系。

由表1可见，这三种模型得到的弹性模量、剪切模量以及泊松比均比较接近。其中由断裂损伤模型和节理刚度模型得到的结果更为接近。包体理论由于在建立模型时，引入各向同性位移场，这样就不能充分反映节理本身变形的各向异性特征。因此，在条件相同的情况下，由包体理论得到的弹性模量和剪切模量折减均没有断裂损伤模型和刚体模型那样强烈。

表 1 三种模型模拟出三峡岩基各方向弹性参数、剪切模量及泊松比比较

Table 1 Comparison of parameters of elastic, shear moduli and Poisson's ratios for the three models

模 型		断裂损伤模型	节理刚度模型	包体模型
弹性模量 / GPa	E_1	29	23	36
	E_2	43	38	40
	E_3	30	25	38
剪切模量 / GPa	G_{12}	12	10	15
	G_{23}	14	12	14
	G_{13}	12	9	12
泊松比	ν_{12}	0.13	0.13	0.13
	ν_{13}	0.26	0.23	0.22
	ν_{21}	0.20	0.24	0.17
	ν_{23}	0.21	0.28	0.16
	ν_{31}	0.15	0.16	0.12
	ν_{32}	0.26	0.24	0.13

由图 1 可以看出，断裂损伤模型和节理刚度模型的柔度张量主值的 C_1 方向比较接近，而其余两个方向的差别较大。其原因在于断裂损伤模型不象刚度模型直接反映节理的变形特征，断裂应变能的计算与围岩变形模量有关，这对节理变形实际上起约束作用，所以节理对岩体的劣化作用不像刚度模型那样强烈。

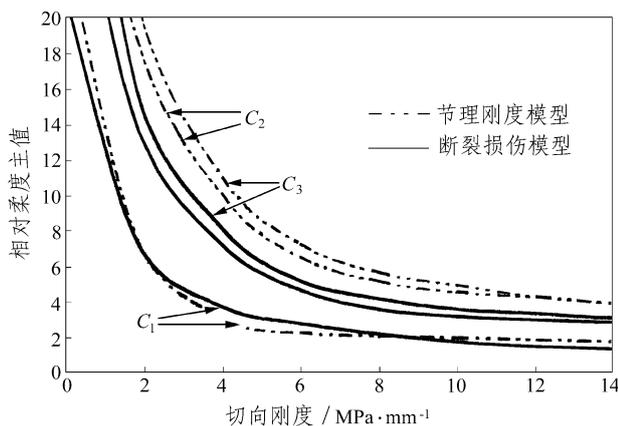


图 1 相对柔度主值与切向刚度关系曲线

Fig.1 Relationship between principal value of relative compliance and tangential stiffness

另外，与三峡工程坝基岩体位移反分析结果比较：本文断裂损伤模型得到平行于缓倾角面的弹性

模量约为 30 GPa，与开挖过程中位移反分析结果得到的微新岩体及弱风化岩体的弹性模量 21 GPa 比较接近，说明本文模型较为合理。

4 结 论

本文使用断裂损伤力学方法，建立预测节理岩体力学参数断裂损伤模型。在对三峡坝基岩体的力学参数的模拟和预测中，通过与节理刚度模型和包体模型的结果进行比较和位移场反分析结果比较，可见本文节理岩体的断裂损伤模型比较合理。结果可应用于坝基岩体的稳定中。

参 考 文 献

- 1 Goodman R E, Taylor R L, Breke T L. Model for the mechanics of jointed rock [J]. J. Soil Mech. Foundation, Div. ASCE, 1968, (94): 637~659
- 2 Zienkiewicz O C, Pande G N. Time-dependent multilaminar model of rock—a numerical study of deformation and failure of rock mass [J]. Int. J. Num. Ana. Meth. in Geomech., 1977, (1): 219~247
- 3 Amadei B, Goodman R E. A 3D constitutive relation for fractured rock masses[A]. In: Proc. Int. Symp. Mech. Behavior of Structured Media[C]. [s. l.]: [s. n.], 1981, 249~268
- 4 Huang T H, Chang C S, Yang Z Y. Elastic moduli for fractured rock mass [J]. Rock Mech. Rock Eng., 1995, 28(3): 135~144
- 5 潘家铮. 夹层地基分析[A]. 见: 潘家铮编. 水工结构分析文集[C]. 北京: 电力工业出版社, 1981, 187~198
- 6 Mura T. Micromechanics of Defects in Solids[M]. Boston: Martinus Nijhoff, 1987
- 7 Oda M T. Crack tensor and its relationship to anisotropy of longitudinal wave velocity in jointed rock masses [J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 1986, 23(1): 35~36
- 8 周维垣, 杨延毅. 节理岩体损伤断裂力学模型应用于坝基稳定分析[J]. 水利学报, 1990, (11): 48~54
- 9 Budiansky B O, Connell R J. Elastic moduli of a cracked solid [J]. Int. J. Solids Struc., 1976, (12): 18~34
- 10 Desroches J, Cornet F. Channeling and stiffness effects on fluid percolation in jointed rocks[A]. In: Baton N ed. Jointed Rock[C]. Rotterdam: A A Balkema, 1990
- 11 Eshelby J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems [J]. Proc. R. Soc. Lond. Ser., 1957, (241): 376~396

FRACTURE-DAMAGE MODEL OF JOINTED ROCKMASS AND ITS APPLICATION TO THE NUMERICAL PARAMETES PREDICTING OF THE DAM-BED-ROCK OF THE THREE GORGES PROJECT

Zhao Jidong¹, Yin Jianmin², Zhou Weiyuan¹, Yang Ruoqiong¹

(¹ Dept. of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

(² Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010 China)

Abstract Based on a fracture-damage model, the equivalent compliance tensor and mechanics parameters for jointed rock mass are numerically predicted, and the dam-bed-rock masses of the Three Gorges Project are analyzed by this model. The comparison of this model with the other two models, joint stiffness model and inclusion model for jointed rock mass, show a good coincidence. The results are also verified by the displacement-back-analysis in the field. The simulated parameters provide a reference for the stability analysis of the Three Gorges Project.

Key words fracture-damage model for jointed rock mass, equivalent mechanics parameters, numerical simulation and prediction

《岩石力学与工程学报》所刊论文 2000 年被引统计表(I)

No	被引论文			引用论文			
	第一作者	刊期	首页码	第一作者	文名	刊名	刊期
1	张有天	1991, 10(2)	103	王恩志	天生桥一级水电站岩体三维渗流初步分析	水力发电学报	2000, (4)
2	蔡美峰	1991, 10(3)	227	蔡美峰	新城金矿地应力场测量及其分布规律研究	有色金属	2000, 52(3)
3	凌建明	1992, 11(4)	373	陈文玲	含非贯通裂隙岩体介质的损伤模型	岩土工程学报	2000, 22(4)
4	于学馥	1994, 13(1)	1	尹光志	岩石细观断裂过程的分叉与混沌特征	重庆大学学报	2000, 23(2)
5	董遵德	1994, 13(2)	149	杜炜平	固液耦合作用下某矿大滑坡机理研究	有色金属矿山部分	2000, (4)
6	董遵德	1994, 13(2)	149	杜炜平	边坡残余构造应力引起的宏观破坏特征及机制	中国有色金属学报	2000, 10(3)
7	郭培军	1994, 13(2)	118	张顶立	夹层对层状岩体稳定性的影响分析	岩石力学与工程学报	2000, 19(2)
8	黄宏伟	1994, 13(3)	219	高 玮	岩土工程非确定性反分析研究动态	地下空间	2000, 20(2)
9	陈 平	1994, 13(4)	299	王 媛	复杂裂隙岩体渗流与应力弹塑性全耦合分析	岩石力学与工程学报	2000, 19(2)
10	陈 平	1994, 13(4)	299	盛金昌	裂隙岩体渗流-弹塑性应力耦合分析	岩石力学与工程学报	2000, 19(3)
11	陈 平	1994, 13(4)	299	柴军瑞	岩体渗流场与应力场耦合分析的多重裂隙网络模型	岩石力学与工程学报	2000, 19(6)
12	陆培炎	1994, 13(4)	375	杨维好	端部嵌固桩的稳定性分析	岩石力学与工程学报	2000, 19(3)
13	乔 兰	1995, 14(1)	25	乔 兰	某地下矿岩层及地表移动规律的有限元模拟研究	金属矿山	2000, (4)
14	冯夏庭	1995, 14(1)	85	胡柳青	边坡稳定性研究及其发展趋势	矿业研究与开发	2000, 20(5)
15	朱焕春	1995, 14(1)	17	唐红梅	重庆库区新构造应力场及其对滑坡宏观活动规律的控制	岩石力学与工程学报	2000, 19(3)
16	席道瑛	1995, 14(1)	49	赵明阶	岩石声学特性研究现状及展望	重庆交通学院学报	2000, 19(2)
17	席道瑛	1995, 14(1)	49	邓 涛	饱水大理岩的波速变化特性研究	岩石力学与工程学报	2000, 19(6)
18	席道瑛	1995, 14(1)	49	席道瑛	饱和多孔岩石弛豫衰减对时间和温度的依赖性	地球物理学报	2000, 43(6)
19	卢应发	1995, 14(1)	59	张顶立	夹层对层状岩体稳定性的影响分析	岩石力学与工程学报	2000, 19(2)
20	章 光	1995, 14(2)	119	徐 军	遗传算法在岩土工程可靠度分析中的应用	岩土工程学报	2000, 22(5)

(待续)