

层状岩体结构面特征及其拟合描述模型

朱自强¹, 李海青^{1,2}, 柳群义¹, 何现启¹, 舒谷生¹

(1. 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083; 2. 广东省长大公路工程有限公司, 广州 510620)

摘要: 为了研究层状岩体的压缩破坏特征, 并建立相应的理论描述模型, 利用快速拉格朗日元法对三轴压缩情况下的层状岩体进行数值计算, 分析了层状压缩强度与结构面倾角的关系, 建立了相应的理论模型。利用所建模型, 对参考国外文献中的试验结果进行描述, 并探讨了加载速率和岩体压缩强度的关系。结果表明: 所建拟合模型能够较好描述层状岩体的强度特征, 得到了数值试验和室内试验的验证; 岩体压缩强度随加速速率增大而增大, 二者符合线性关系特征。

关键词: 层状岩体; 压缩实验; 破坏特征; 拟合模型

中图分类号: TU457 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)05-0038-05

Characteristics and Fitting Model of Structure Plane in Layered Rock Mass

ZHU Zi-qiang¹, LI Hai-qing^{1,2}, LIU Qun-yi¹, HE Xian-qi¹, SHU Gu-sheng¹

(1. College of info-Physics Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China; 2. Guangdong Provincial Changda Highway Engineering Co., Ltd, Guangzhou 510620, P. R. China)

Abstract: In order to study the compressive failure characteristics of layered rock mass and build the corresponding theoretical model, the fast lagrangian method was adopted to address numerical simulation of the layered rock mass under tri-axial compression. The relationship between compressive strength and inclination of structure plane was analyzed, and a theoretical model was proposed to describe their relationship. The test data from the foreign references were described by the theoretical model and the relationship between loading velocity and the compressive strength was analyzed. It was shown that, the fitting model can well describe the strength characteristics of stratified rock mass, which was validated by the numerical test and laboratory test. And the compressive strength of rock mass increased linearly with the increase of loading velocity.

Key words: layered rock mass; compression testing; failure characteristic; fitting model

层状岩体在地壳表层分布甚广, 与人类工程活动关系密切, 研究层状岩体力学特性具有理论和实际应用价值^[1-3], 以往主要通过理论方法^[4-7]和室内试验^[8-11]对其进行分析, 如 Tien^[6]和 Duveau^[7]采用复合非线性破坏准则对层状岩体破坏特征进行描述; Tien^[8-9]利用人工制备的层状岩体进行室内试验, 得到了相应的应力应变特征; 冒海军^[10]运用单

弱面理论研究含单组结构面的板岩岩体抗压强度随结构面方位的变化情况, 建立了相应的一维、三维抗压强度的变化规律, 并将该规律运用到南水北调西线的板岩试验结果分析中; 熊诗湖^[11]针对层状岩体进行了原位承压板法变形试验、直剪试验及三轴试验, 对通过不同试验得到的力学参数进行了对比分析。以上理论方法能够反映岩体的一般规律, 但只

收稿日期: 2009-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40804027); 湖南省科技攻关项目(05SK3077)

作者简介: 朱自强(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事应用地球物理的教学与研究, (E-mail) lihaiqingcsu@126.com。

能针对简单几何模型进行分析;试验方法能够较好反映岩石的特性,但由于层状岩体复杂的各向异性特征,无法得到所有研究数据,因此,需寻找一些辅助研究手段,近年来迅速发展的数值计算方法由于能够反应岩土体的应力变形特征^[12-14],以及岩体的破坏机理,在岩土工程界受到广泛应用,不失为一种有效的分析辅助工具,如梁正召^[12]采用基于细观损伤力学基础上开发的 RFPA2D 数值模拟软件,用 2 种不同的岩石材料来组成 7 个不同岩层倾角的横观各向同性的岩石试件,通过单轴加载数值模拟试验,模拟横观各向同性岩石渐进破裂的整个过程;基于以上考虑,该文运用 FLAC3D 对层状岩体的压缩破坏特征进行了数值模拟,并提出相应描述模型,与经典的 Mohr-Coulomb 准则进行对比,为进一步了解层状岩体的各向异性特征提供参考。

1 数值模型与方法

1.1 数值模型

建立数值计算模型,模型为方形层状岩体试样,边长为 4 m;采用软弱结构面模拟夹层,结构面倾角为 β (变化于 $0^\circ \sim 90^\circ$,变化梯度为 10°),结构面厚度为 0.15 m,间距为 0.15 m,具体见图 1。试件加载方式为顶面位移加载,底面约束垂直方向的位移,分别记录加载过程中试件的应力及变形情况。

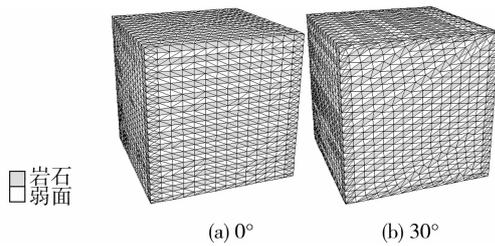


图 1 数值模型

岩土工程分析中选取的数值本构模型十分重要,目前对于岩土体的描述一般采用 Mohr-Coulomb 屈服准则的理想弹塑性模型,但许多研究发现岩土体材料发生塑性流动时,其相应的屈服参数,如粘结力、内摩擦角、剪胀角都发生变化,此时若采用简单的 Mohr-Coulomb 屈服准则的理想弹塑性模型将无法反映岩土体的真实情况,因此该文根据岩体的变形特征^[15-16],采用考虑塑性性状的软化模型分析其破坏特征;当岩样发生塑性变形后,相应的粘结力 c_p ,内摩擦角 φ_p 和膨胀角 ψ_p 与原始粘结力 c_i ,内摩擦角 φ_i 和膨胀角 ψ_i 的关系为: $c_p = \omega_c c_i$; $\varphi_p = \varphi_i - \omega_\varphi$; $\psi_p = \psi_i - \omega_\psi$ 。其中, ω_c , ω_φ 和 ω_ψ 为

粘结力、内摩擦角和膨胀角的变化因子,相应参数见表 1,模型计算参数见表 2。

表 1 $\omega_c, \omega_\varphi, \omega_\psi$ 与塑性应变 ϵ^p 的关系

塑性应变 $\epsilon^p / 10^{-4}$	c 变化因子 ω_c	φ 变化因子 ω_φ	ψ 变化因子 ω_ψ
0	1.0	0.0	0.0
0.05	0.50	3.0	3.0
0.1	0.50	2.0	2.0
1.0	1.00	0.0	0.0

表 2 计算参数

岩层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	泊松比 ν	粘结/ MPa	摩擦角/ $^\circ$	膨胀角/ $^\circ$	抗拉强度/ MPa
岩石	26	1.63	0.21	2.0	41	10	1.41
结构面	21	0.2	0.30	0.1	23	5	0.1

1.2 应变软化特征的数值处理

根据分段线性原则,预先定义软化参数;在塑性应变产生后,部分或所有单元的屈服参数,如粘结力、内摩擦角、剪胀角和拉伸强度都可发生变化。在每一个时间步内,总的塑性剪应变和拉应变都会被增量软化参数校验,然后模型参数会调节到与自定义方程一致。该准则在屈服面上,剪切失效力点的位置由非关联流动准则决定,拉伸失效力点的位置由关联流动准则决定。

对于每个单元都要定义 2 个软化参数 k^s, k^t , 分别作为塑性剪应变和拉应变的增量度量的和。在 FLAC3D 计算的基本四面体单元中,可计算出单元剪切和拉伸软化增量^[15]。对于一个指定的四面体,其剪切软化增量是由塑性剪应变增量张量的第 2 不变量来定义的,即

$$\Delta k^s = \sqrt{[(\Delta \epsilon_1^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2 + (\Delta \epsilon_m^{ps})^2 + (\Delta \epsilon_3^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2]}/2} \quad (1)$$

式中, $\Delta \epsilon_m^{ps}$ 为体塑性剪切应变增量,其值为 $\Delta \epsilon_m^{ps} = (\Delta \epsilon_1^{ps} + \Delta \epsilon_3^{ps})/3$; $\Delta \epsilon_1^{ps}, \Delta \epsilon_3^{ps}$ 为第 1,3 主应力方向的塑性剪切应变增量,其值可由下式得到:

$$\Delta \epsilon_1^{ps} = \lambda^s \quad (2)$$

$$\Delta \epsilon_3^{ps} = -\lambda^s N_\psi \quad (3)$$

式中, $\lambda^s = \frac{f^s(\sigma_1^1, \sigma_3^1)}{(\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi) - (-\alpha_1 N_\psi + \alpha_2) N_\varphi}$;

$N_\psi = (1 + \sin \psi)/(1 - \sin \psi)$; α_1 和 α_2 为由剪切模量和体积模量定义的材料常数, $\alpha_1 = K + 4G/3, \alpha_2 = K - 2G/3$; σ_1^1, σ_3^1 为迭代过程中的试算应力; ψ 为膨胀角。

拉伸硬化增量则由塑性拉伸应变增量 $\Delta \epsilon_3^p$ 表示为:

$$\Delta k^1 = |\Delta \epsilon_3^p| = \left| \frac{\sigma_3^1 - \sigma^1}{\alpha_1} \right| \quad (4)$$

2 计算结果与讨论

2.1 压缩强度与倾角关系模型

图 2 为层状岩体压缩强度 σ_c 与结构面倾角之间的关系,从中可以看出,随着结构面倾角 β 的增大,层状岩体单轴压缩强度呈现先减小后增大的趋势,当 $\beta=50^\circ \sim 60^\circ$ 之间时,岩体的强度最低; $\beta=90^\circ$ 对应的压缩强度 σ_c 最大,其次是 $\beta=0^\circ$ 对应的压缩强度 σ_c ,这是由于这 2 种情况下岩体的破坏主要发生在岩石内部,破坏面通常穿切结构面形成,如图 3;而 $\beta=30^\circ \sim 60^\circ$ 时,岩体的压缩强度迅速减小,此时岩体主要发生沿结构面的滑动破坏,如图 4;因此,采用简单的 Mohr-Coulomb 准则(MC 准则)无法描述层状岩体不同倾角下的强度特征,一些学者采用 2 种破坏准则对层状岩体的强度特征进行描述,如 Tien^[6] 采用 Mohr-Coulomb 准则描述层状岩体沿结构面的滑移破坏, Hoek-Brown 准则描述层状岩体穿切结构面的破坏; Duveau^[7] 采用 Mohr-Coulomb 准则和 Braton 准则描述层状岩体的破坏。

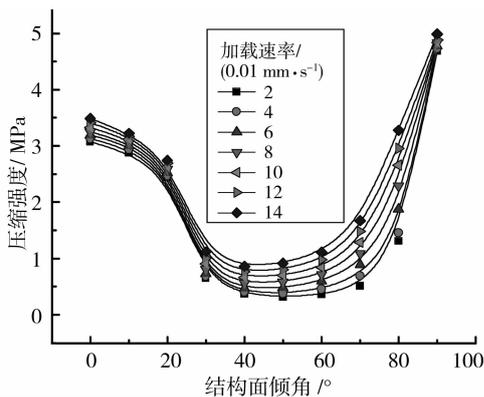


图 2 结构面倾角与压缩强度的关系

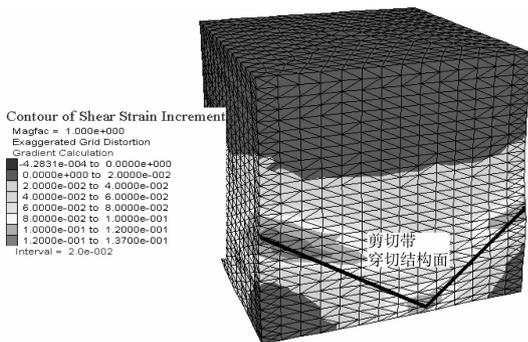


图 3 穿切结构面破坏模式 ($\beta=0^\circ$)

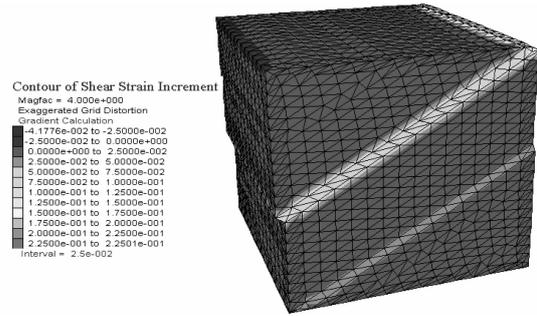


图 4 沿结构面滑动破坏 ($\beta=30^\circ$)

该文通过曲线拟合技术,采用拟合模型描述层状岩体的强度特征,模型图见图 5,其方程为:

$$\sigma_c = A_{\min} + \frac{(A_{\max 1} - A_{\min})}{1 + 10^{[(\beta - \beta_{01}) \times h_1]}} + \frac{(A_{\max 2} - A_{\min})}{1 + 10^{[(\beta_{02} - \beta) \times h_2]}} \quad (5)$$

式中, $A_{\max 1}$ 、 $A_{\max 2}$ 分别岩体在结构面倾角为 0° 和 90° 时对应的压缩强度; A_{\min} 为岩体在结构面倾角为 40° 左右时对应的强度; β_{01} 、 β_{02} 为曲线两边的中位数; h_1 、 h_2 为曲线拟合参数。

在试验过程中,只需得到岩体在结构面倾角为 0° 、 90° 、 40° 时对应的压缩强度,然后,再确定任意 4 个结构面倾角下岩体的强度,即可得到模型的各个参数,从而通过该拟合模型得到各个结构面倾角下,岩体的压缩强度。

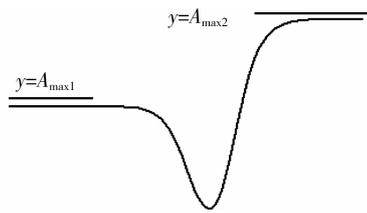


图 5 该文建立的拟合模型

以加载速率 $v=0.06 \text{ mm/s}$ 为例,通过曲线拟合,得到相关系数为 0.999 31,属于高度相关,说明建立的描述模型的正确性,其他参数如图 6 所示;为了与 MC 准则进行对比,对试样采用 MC 准则进行描述,结果见图 6,从中可以看出,当 $\beta=30^\circ \sim 60^\circ$ 时,MC 准则能够较好描述岩体破坏规律,但对于其他结构面倾角,MC 准则与数值试验的结果存在较大差别,这是由于当 φ_i (结构面内摩擦角) $< \beta < 90^\circ$ 时,岩体主要发生沿结构面的滑移破坏,符合理论推导的假设;当 $\beta \leq \varphi_i$ 及 $\beta=90^\circ$ 时,两者差别较大,理论结果明显大于数值计算结果,这是由于理论计算主要考虑材料的剪切破坏,并未考虑拉伸劈裂破坏等复合破坏形式,而数值方法能够再现岩体变形破坏全过程,研究其力学行为。

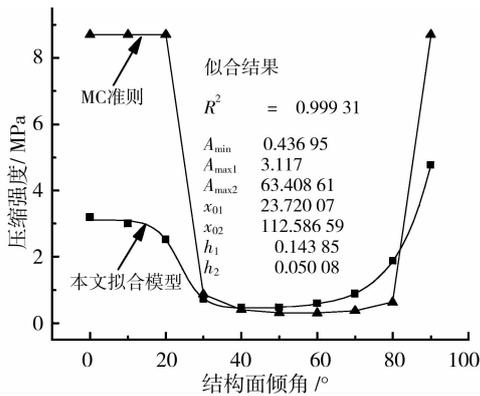


图 6 压缩强度与结构面倾角关系曲线的拟合

2.2 模型的验证

为进一步验证所提出的模型的正确性,引用 McLamore^[17]的试验结果,如图 7,从中可以看出,压缩强度随结构面倾角的变化趋势与该文所进行的数

值计算的结果相同;利用该文提出的模型进行拟合,得到拟合结果,图 7 和表 3。从中可以看出,各个曲线拟合结果的相关系数均接近于 1,属于高度相关,模型的描述效果较好。

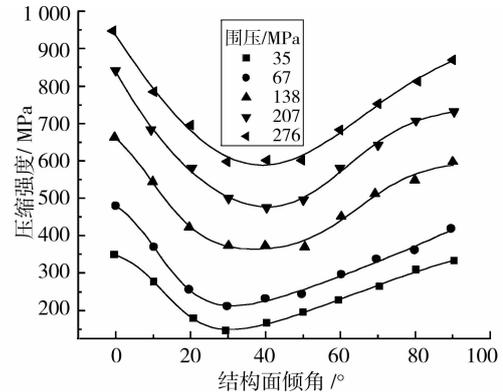


图 7 三轴压缩情况下压缩强度与结构面倾角的关系

表 3 压缩强度和结构面倾角关系的拟合

围压/MPa	拟合参数							
	A_{min}	A_{max1}	A_{max2}	β_{01}	β_{02}	h_1	h_2	R^2
35	149.651 6	347.170 6	438.499 9	13.021 6	62.619 1	0.070 2	0.016 4	0.998 4
67	212.807 8	126.042 4	52 138.523 2	11.095 6	768.967 8	0.063 7	0.002 7	0.994 9
138	363.881 8	736.683 7	601.242 6	9.896 9	64.674 2	0.061 62	0.050 58	0.990 9
207	477.194 5	256 772.946 3	719.402 7	-201.819 8	60.218 9	0.012 9	0.039 4	0.996 5
276	588.657 7	1 865.064 6	936.379 2	0.515 6	56.727 1	0.015 2	0.023 1	0.993 4

2.3 压缩强度与加载速率的关系

随着加载速率的增大,岩体的压缩强度逐渐增大,其关系如图 8 所示,图中显示,不同结构面倾角对应的岩体,其压缩强度与加载速率之间的关系基本符合线性关系,采用线性方程对其进行拟合,得到表 4,从中可以看出, $\beta=30^\circ\sim 80^\circ$,压缩强度与加载速率的关系曲线斜率逐渐增大,并且 $\beta=80^\circ$ 时,斜率达到最大,为 0.173 29,说明此时压缩强度对加载速率的敏感度最高,因此,在试验模拟过程中,须根据实际情况,如结构面的滑移速率,来选择相应模拟试验加载速率。

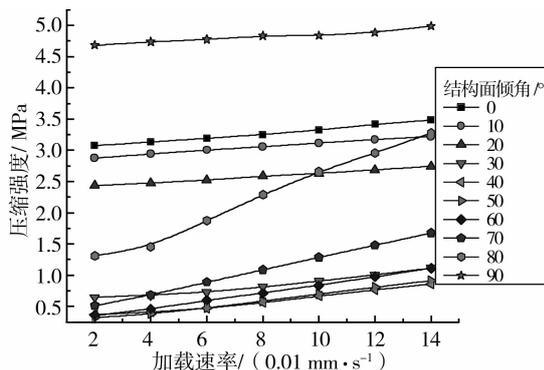


图 8 加载速率 v 和压缩强度的关系

表 4 加载速率和压缩强度关系的拟合

倾角	拟合方程	拟合参数		相关系数
		A	B	
0	$\sigma_c = A + Bv$	2.990 43	0.034 68	0.997 01
10		2.825 71	0.028 77	0.998 84
20		2.375 14	0.026	0.998 98
30		0.524 07	0.039 81	0.985 28
40		0.244 57	0.042 58	0.991 47
50		0.188 79	0.051 1	0.997 23
60		0.216 6	0.063 26	0.999 33
70		0.307 41	0.097 6	0.999 86
80		0.873 57	0.173 29	0.996 13
90		4.635 14	0.022 91	0.977 82

3 结 论

1) 随着结构面倾角 β 的增大, 层状岩体单轴压缩强度呈现先减小后增大的趋势, 不同倾角的结构面导致岩体破坏模式和压缩强度的不同。

2) 通过曲线拟合技术, 建立了层状岩体破坏特征的拟合模型, 该模型能够较好描述层状岩体的强度特征; 将建立的模型应用于数值模拟结果与室内试验结果, 进一步验证了其正确性。

3) 随着加载速率的增大, 岩体的压缩强度逐渐增大, 二者之间的关系基本符合线性关系; 在试验模拟过程中, 须根据实际情况, 来选择相应加载速率。

参考文献:

- [1] 鲜学福. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [2] 卢增木, 陈从新, 左保成, 等. 对影响逆倾层状边坡稳定性因素的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 629-647.
LU ZENG-MU, CHEN CONG-XIN, ZUO BAO-CHENG, et al. Experimentation research on factors influencing stability of anti-dip layered slope[J]. Rock and Soil mechanics, 2006, 27(4): 629-647.
- [3] 黄洪波. 层状岩质边坡的稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [4] LU GUANG-YIN, ZHU ZI-QIANG, LIU QUN-YI et al. Failure mode and strength anisotropic characteristic of stratified rock mass under uniaxial compressive situation[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(4): 663-668.
- [5] WANG C D, LIAO J J. Stress influence charts for transversely isotropic rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(6): 771- 785.
- [6] TIEN Y M, KUO M C. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2001, 38: 399-412.
- [7] DUVEAU G, SHAO JF. A modified single discontinuity theory for the failure of highly stratified rocks [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(6): 807-813.
- [8] TIEN Y M, TSAO PF. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, 37(6): 1001-1012.
- [9] TIEN Y M, KUO M C, JUANG C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2006, 43(8): 1163-1181.
- [10] 冒海军, 杨春和. 结构面对板岩力学特性影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3651-3656.
MAO HAI-JUN, YANG CHUN-HE. Study on effects of discontinuities on mechanical characters of slate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3651-3656.
- [11] 熊诗湖, 邬爱清, 周火明. 层状软岩力学特性现场试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 887-890.
XIONG SHI-HU, WU AI-QING, ZHOU HUO-MING. In-situ test on mechanical characteristic of soft layer rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 887-890.
- [12] 梁正召, 唐春安, 李厚祥, 等. 单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 57-62.
LIANG ZHENG-ZHAO, TANG CHUN-AN, LI HOU-XIANG, et al. A numerical study on failure process of transversely isotropic rock subjected to uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 57-62.
- [13] 林杭, 曹平, 赵延林, 等. 强度折减法在 Hoek-Brown 准则中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1219-1224.
LIN HANG, CAO PING, ZHAO YAN-LIN, et al. The application of strength reduction method in Hoek-Brown criterion [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(6): 1219-1224.
- [14] 郭群. 层状岩石强度特征及其数值实现 [J]. 科技导报, 2008, 26(16): 68-71.
GUO QUN. Strength characteristic of stratified rock and the numerical simulation [J]. Science and Technology Review, 2008, 26(16): 68-71.
- [15] Itasca Consulting Group. Theory and Background [M]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 2002.
- [16] 何忠明, 曹平. 考虑应变软化的地下采场开挖变形稳定性分析 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(4): 641-646.
HE ZHONG-MING, CAO PING. Deformation and stability analysis of underground stope after excavation considering strain softening [J]. J. Cent. South University: Science and Technology, 2008, 39(4): 641-646.
- [17] MCLAMORE R, GRAY KE. The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks[J]. J Eng Ind Trans of the ASME, 1967, 89(2): 62-73.

(编辑 王秀玲)