

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.04.012

压缩荷载条件下大理岩细观损伤动态理论分析

唐胡丹^{1,2}, 朱珍德^{1,2}, 朱明礼^{1,2}

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098 ;

2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 : 基于细观力学与热力学基本理论, 采用均匀化方法, 研究大理岩在单轴压缩条件下的损伤演化规律. 首先, 认为岩石由岩石基质和裂纹组成, 并且岩石基质和裂纹二者符合叠加原理. 其次, 将裂纹分为张开裂纹和闭合裂纹 2 种, 从细观力学角度和热力学角度进行分析, 分析时假设岩石受力初始阶段裂纹主要受张拉力作用, 随着裂纹的闭合, 剪压作用逐渐对岩石的损伤破坏起控制作用. 最后, 根据分析结果建立了描述裂纹损伤演化规律的表达式, 并通过 SEM 细观实验验证了理论分析结果.

关键词 : 细观力学 热力学 均匀化 大理岩 损伤 单轴压缩

中图分类号 : TU452 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1000-1980(2010)04-0418-06

从细观角度来看, 岩石在外荷载作用下的破坏过程包括裂纹的起裂、形成、发展、贯通以及宏观裂纹形成几个过程. 自从 20 世纪 20 年代 Griffith 建立脆性断裂力学理论的基本框架后, 许多学者从理论和实验 2 个方面对断裂问题进行了研究^[1]. 比如 :Huang 等^[2] 通过预制大理岩单轴压缩实验观察了裂纹的扩展过程; Ayatollahi 等^[3] 通过由 PMMA 材料制成的标准 SCM 试样的断裂实验, 对裂纹的起裂角和扩展途径进行了分析. 朱其志等^[4] 进行了大理岩不同加载阶段的损伤分析. 江涛等^[5-6] 对不同岩石材料的损伤进行了实验观察, 并将岩石材料的损伤与渗流相耦合, 对损伤演化与破坏的细观特征和机制进行了一系列研究. 随着科学技术的发展, 研究岩石力学性质的实验方法和技术越来越多, 目前主要的实验方法和技术有模型实验方法、声发射技术、电镜扫描技术和 CT 技术. 肖洪天等^[7] 利用电镜扫描技术观察了裂纹尖端的演化 and 发育过程. 朱珍德等^[8-10] 对岩石的破坏和裂纹扩展机制进行了研究. 周维垣^[11] 利用电镜对黑色大理岩试件进行了扫描, 建立了岩石类脆性材料的细观开裂网络模型. 笔者在以上研究的基础上, 基于细观力学^[12] 与热力学^[13] 基本理论, 利用电镜扫描技术和均匀化方法研究大理岩单轴压缩条件下的损伤^[14] 演化规律.

1 细观损伤理论的基本原理

从细观力学角度选取符合要求的大理岩代表性体积单元 REV (representative element volume)^[12,15], 即

$$d_0 \ll d_1 \ll l \ll L \quad l \ll \lambda$$

式中: d_0 ——特定细观的临界尺寸; d_1 ——非均匀介质的尺寸; l ——代表性体积单元 REV 的尺寸; L ——大理岩结构的宏观特征尺寸; λ ——扰动荷载特征波长.

假设 REV 的边界满足均匀应力边界条件, 边界上受均匀应力 Σ , 边界 $\partial\Omega$ 所受外力为 $T = \Sigma \cdot n$, 内部各点的细观应力张量为 σ , 如图 1 所示.

根据弹性假设, 将含微裂纹的大理岩 REV 受均匀应力的边值问题分解为不含裂纹的岩石基质受均匀外荷载的边值问题 Q_1 和由于微裂纹张开、滑动所产生的附加应力位移场问题 Q_2 (图 2)^[14].

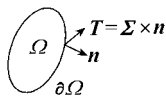


图 1 均匀应力边界条件下的 REV

Fig. 1 REV under uniform stress boundary conditions

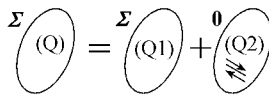


图 2 含裂纹的大理石 REV 分解

Fig. 2 Decomposition of REV of marble with micro cracks

收稿日期: 2009-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(50674040, 50539090) 山东科技大学矿山灾害预防控制教育部重点实验室开放基金(MDPC0605)

作者简介: 唐胡丹(1981—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事岩石力学研究. E-mail: tanghudan@126.com

图2中的应力、应变符合叠加原理,可写成

$$\sigma = \sigma^m + \sigma^d \quad \varepsilon = \varepsilon^m + \varepsilon^d \quad (1)$$

式中: σ^m ——岩石基质内部的应力张量; σ^d ——裂纹演化所产生的附加应力位移场内的应力张量; ε ——代表性体积单元内任意一点的应变张量; ε^m ——岩石基质内部的应变张量; ε^d ——裂纹演化所产生的附加应力位移场内的应变张量。

2 微裂纹分析

假设大理岩代表性体积单元内的所有裂纹均为钱币状,裂纹间的影响忽略不计,取一组法向量为 n 、裂纹半径为 a 、单位体积内裂纹条数为 N 、裂纹密度为 d 且 $d = Na^3$ 的裂纹为研究对象,同时定义 d 为损伤变量。

裂纹面的相对位移 $u(x)$ 包括沿裂纹面的法向位移 $u_n(x)$ 和沿裂纹面的切向位移 $u_t(x)$,即

$$u(x) = u_n(x)n + u_t(x) \quad (2)$$

对于任意一组裂纹,从细观角度定义 β 和 γ 分别为裂纹面的法向和切向位移,且^[9]

$$\beta = N \int_w u_n(x) ds \quad \gamma = N \int_w u_t(x) ds \quad (3)$$

式中: β, γ ——细观裂纹的张开程度和沿裂纹面的滑移程度; w ——所有微裂隙体的集合。

REV内的自由变形余能 W_c 由不考虑裂纹岩石基质的自由变形余能 $\frac{1}{2} \Sigma : S_0 : \Sigma$ 、裂纹法向位移产生的自由

变形余能 $\frac{1}{2} \frac{H_0}{d} \beta^2$ 和裂纹切向滑移产生的自由变形余能 $\frac{1}{2} \frac{H_1}{d} \gamma \cdot \gamma$ 组成,即

$$W_c = \frac{1}{2} \Sigma : S_0 : \Sigma + \frac{1}{2} \frac{H_0}{d} \beta^2 + \frac{1}{2} \frac{H_1}{d} \gamma \cdot \gamma \quad (4)$$

其中

$$H_0 = 3E_0/16(1 - \nu_0^2) \quad H_1 = H_0(1 - \nu_0/2)$$

式中: S_0 ——岩石基质的四阶柔度张量; E_0 ——大理岩的初始弹性模量; ν_0 ——大理岩的初始泊松比。

基于热动力学基本理论,可确定沿裂纹面法向的力 F_β 和沿裂纹切向的力 F_γ ,即

$$F_\beta = - \frac{\partial W}{\partial \beta} = \sigma^d : (n \otimes n) \quad F_\gamma = - \frac{\partial W}{\partial \gamma} = \sigma^d \cdot n \cdot (\delta - n \otimes n) \quad (5)$$

式中 δ 为二阶Kronecker张量.于是可得裂纹张开准则 $F_\beta = 0$

在单轴压缩条件下,裂纹起裂初期以张拉为主,主要受张拉力作用,出现张开裂纹.当裂纹张开时,REV裂纹面上总的细观应力为0,即

$$\sigma_n = \sigma_n^m + \sigma_n^d = \Sigma : (n \otimes n) + \sigma^d : (n \otimes n) = 0 \quad (6)$$

$$\tau = \tau^m + \tau^d = \Sigma \cdot n \cdot (\delta - n \otimes n) + \sigma^d \cdot n \cdot (\delta - n \otimes n) = 0 \quad (7)$$

式中: σ_n, τ ——裂纹面的法向应力和切向应力; σ_n^m, σ_n^d ——岩石基质内部的法向应力和裂纹演化所产生的附加法向应力; τ^m, τ^d ——岩石基质内部的切向应力和裂纹演化所产生的附加切向应力.当含裂纹物体的自由变形余能的释放率大于或等于材料的表面能时,裂纹就会失稳扩张,定义 F_d 为裂纹扩张单位密度时所释放的自由变形余能^[12],可得

$$F_d(\Sigma, d) = - \frac{\partial W_c}{\partial d} = \frac{1}{2} \frac{H_0}{d^2} \beta^2 + \frac{1}{2} \frac{H_1}{d^2} \gamma \cdot \gamma \quad (8)$$

将式(6),(7)代入式(8)可得

$$F_d(\Sigma, d) = - \frac{\partial W_c}{\partial d} = \frac{1}{2H_0} \Sigma : (\Delta \otimes \Delta) : \Sigma + \frac{1}{4H_1} \Sigma : [(\Delta \otimes \delta + \delta \otimes \Delta - 2\Delta \otimes \Delta)] : \Sigma \quad (9)$$

其中

$$\Delta = n \otimes n$$

于是可得裂纹扩张的表达式

$$f(\Sigma, d) = F_d(\Sigma, d) - R(\Sigma, d) \quad (10)$$

其中

$$R = k(1 + \eta d)$$

式中: $R(\Sigma, d)$ ——材料的表面能; k, η ——材料常数.当 $f < 0$ 时,裂纹扩张单位密度时所释放的自由变形余能小于岩石材料的表面能,系统处于稳定状态,裂纹不扩张;当 $f > 0$ 时,裂纹扩张单位密度时所释放的自由变形余能大于岩石材料的表面能,系统不稳定,裂纹扩张.达到平衡状态时,裂纹扩张速率为0,即

$$\dot{f}(\dot{\Sigma}, d) = \frac{\partial f}{\partial \Sigma} : \dot{\Sigma} + \frac{\partial f}{\partial d} \dot{d} = 0 \quad (11)$$

$$\text{又因为 } H_1 = H_0 \left(1 - \frac{\nu_0}{2} \right), \text{ 所以 } S_{\text{hom}} = S_0 + \frac{d}{2H_1} (\Delta \otimes \underline{\underline{\delta}} + \underline{\underline{\delta}} \otimes \Delta - \nu_0 \Delta \otimes \Delta) \quad (12)$$

式中 S_{hom} 为均匀化后的岩石有效四阶柔度张量。

以上公式是假设裂纹在起裂初期以张开裂纹为主的裂纹演化表达式。继续加载, 裂纹有闭合效应, 此时裂纹 2 个面之间有法向力作用, 由于裂纹面为不光滑面, 所以会受到摩擦力的作用。闭合裂纹主要受压剪作用, 脆性岩石的宏观破坏也主要由剪切作用引起。因此, 本文采用 Mohr-Coulomb 准则, 并考虑大理岩损伤演化过程中非弹性应变引起的强化效应。于是, 可将库仑型摩擦准则表示成^[4]

$$f = |\tau| + \eta_c \alpha \sigma_n^d = 0 \quad (13)$$

式中: η_c ——裂纹面的摩擦因数; α ——非弹性引起的强化系数。

由于岩石材料非弹性应变主要由裂纹面的剪切滑移引起^[1], 因此定义 α 为裂纹等效剪切应变的 γ^p 函数, 即 $\gamma^p = \int \sqrt{d\gamma^p \cdot d\gamma^p}$, 其中 γ^p 为裂纹剪切应变。对大多数岩石材料来说,

$$\alpha = \alpha_r - (\alpha_r - \alpha_0) e^{-b_1 \gamma^p} \quad (14)$$

式中: α_0, α_r ——强化函数的初值和渐进值; b_1 ——控制材料强化的参数。将

$$\tau = \tau^m + \tau^d = \Sigma \cdot n \cdot (\delta - n \otimes n) + \sigma^d \cdot n \cdot (\delta - n \otimes n) \quad (15)$$

$$\sigma_n = \sigma_n^m + \sigma_n^d = \Sigma : (n \otimes n) + \sigma^d : (n \otimes n) \quad (16)$$

代入式(13)可得

$$f(\Sigma, \sigma^d) = \Sigma \cdot n \cdot (\delta - n \otimes n) v + \sigma^d \cdot n \cdot (\delta - n \otimes n) v + \eta_c \alpha \Sigma : (n \otimes n) + \eta_c \alpha \sigma^d : (n \otimes n) = 0 \quad (17)$$

式中 v 为单位向量。

当裂纹的相对滑移达到相对稳定状态时, 有

$$\dot{f}(\Sigma, \gamma, \beta) = \frac{\partial f}{\partial \Sigma} \dot{\Sigma} + \frac{\partial f}{\partial \gamma} \dot{\gamma} + \frac{\partial f}{\partial \beta} \dot{\beta} = 0 \quad (18)$$

由式(18)得到 γ 的增量形式

$$\dot{\gamma} = \frac{d}{H_1} \left[(n \otimes v) : \dot{\Sigma} + \eta_c \alpha (n \otimes n) : \dot{\Sigma} - \eta_c \alpha \frac{H_0}{d} \dot{\beta} \right] v \quad (19)$$

当裂纹闭合时, 法向位移 β 由切向位移 γ 产生, 即

$$\dot{\beta} = \chi \dot{\gamma} \cdot v \quad (20)$$

式中 χ 是材料常数。将式(20)代入式(19)可得 REV 内切向位移的进一步简化形式

$$\dot{\gamma} = \frac{d}{H_1 + \eta_c \alpha H_0} \{ [(n \otimes v) + \eta_c \alpha (n \otimes n)] : \dot{\Sigma} \} v \quad (21)$$

以上公式是假设裂纹受压剪力作用的演化公式。由宏观应力增量所产生的裂纹的剪切滑移增量和裂纹的法向位移增量表达式, 可知两位移增长速率相互影响。由于损伤演化过程不可逆, 所以随着荷载的增大, 沿裂纹面的剪切位移和法向位移增大, 使得 RVE 内局部应力增大, 从而引起裂纹系统宏观自由能增大, 从宏观角度加剧了岩石的损伤, 从而加速其宏观破坏。

当裂纹扩张达到相对稳定的状态时, 有

$$\dot{f}(\beta, \gamma, d) = \frac{\partial f}{\partial \beta} \dot{\beta} + \frac{\partial f}{\partial \gamma} \dot{\gamma} + \frac{\partial f}{\partial d} \dot{d} = 0 \quad (22)$$

化简式(22)可求得闭合裂纹在荷载作用下的损伤演化公式, 即

$$\dot{d} = \frac{1}{\frac{H_0}{d^3} \dot{\beta}^2 + \frac{H_1}{d^3} \dot{\gamma} \cdot \dot{\gamma} + k\eta} \left(\frac{H_0}{d^2} \dot{\beta} \dot{\beta} + \frac{H_1}{d^2} \dot{\gamma} \cdot \dot{\gamma} \right) \quad (23)$$

应力与应变的关系为

$$E = E^m + E^d = S_0 : \Sigma + \beta (n \otimes n) + (n \otimes \gamma) \quad (24)$$

式中: E ——岩石宏观应变张量; E^m, E^d ——岩石基质内部的宏观应变张量和裂纹演化所产生的附加宏观应变张量。

由于在分析闭合裂纹时, RVE 内的切向位移和法向位移均以增量形式给出, 所以通过对式 (24) 的求导, 给出应力-应变关系的增量形式, 即

$$\dot{E} = S_0 : \dot{\Sigma} + \chi(\dot{\gamma} \cdot \nu)(n \otimes n) + (n \otimes \dot{\gamma}) \tag{25}$$

将式 (24) 代入式 (25) 可得

$$\begin{aligned} \dot{E} = S : \dot{\Sigma} + \chi \left\{ \frac{d}{H_1 + \eta_c \alpha H_0} [(n \otimes \nu) + \eta_c \alpha (n \otimes n)] : \dot{\Sigma} (n \otimes n) \right\} + \\ \frac{d}{H_1 + \eta_c \alpha H_0} [(n \otimes \nu) + \eta_c \alpha (n \otimes n)] : \dot{\Sigma} (n \otimes \nu) \end{aligned} \tag{26}$$

于是有效弹性张量

$$\begin{aligned} S_{\text{hom}} = S_0 + \chi \frac{d}{H_1 + \eta_c \alpha H_0} [(n \otimes \nu) + \eta_c \alpha (n \otimes n)] (n \otimes n) + \\ \frac{d}{H_1 + \eta_c \alpha H_0} [(n \otimes \nu) + \eta_c \alpha (n \otimes n)] (n \otimes \nu) \end{aligned} \tag{27}$$

3 模型验证和实验分析

所取试样为大理岩, 呈块状、白色、致密的粒状变晶结构, 均匀性好, 但内部仍存在很多微裂纹. 该岩石试件取自四川锦屏二级水电站引水隧洞. 由于该引水隧洞具有洞线长 (约 17 km)、埋深大 (1 500 ~ 2 000 m)、洞径大 (11 m) 等特点, 取该处大理岩进行力学性质研究对引水隧洞的安全和稳定有重要的参考价值. 试件的主要矿物成分为方解石, 有少量镁橄榄石和磁铁矿, 质地较均匀. 按 SL 264—2001《水利水电工程岩石试验规程》制样要求, 制备了 14 个标准试样, 试样尺寸为 50 mm × 100 mm. 14 个试样分为 2 组, 其中 4 个试样做常规单轴压缩实验, 10 个试样做不含预制裂纹的实验. 为了从细观角度研究其损伤演变规律, 并验证本文细观损伤模型的合理性, 进行了大理岩在单轴压缩下的实验验证.

通过实验并参考相关文献得到的该大理岩力学参数为 弹性模量 $E_0 = 42 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu_0 = 0.24$, 裂纹面摩擦因数 $\eta_c = 0.66$, 强化系数渐近值 $\alpha_f = 1.00$, 强化系数初值 $\alpha_0 = 0.30$, 控制大理岩强化速度参数 $b_1 = 300.00$.

图 3 ~ 6 显示了 $\delta = 100 \text{ MPa}$ 时大理岩试样细观实验所得到的裂纹统计分布规律.

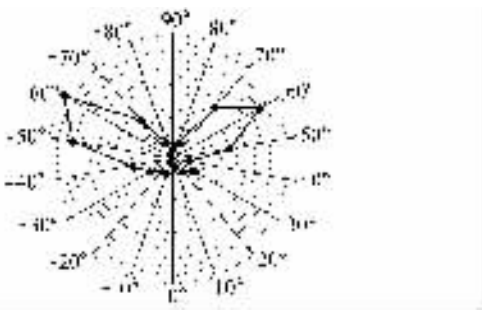


图 3 大理岩单轴压缩下方位角的分布

Fig. 3 Distribution of azimuth angles of marble under uniaxial compression

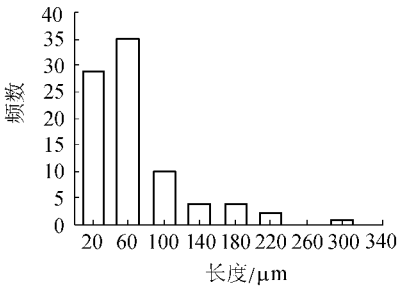


图 4 大理岩单轴压缩下裂纹长度频数统计结果

Fig. 4 Statistical results of crack length-frequency of marble under uniaxial compression

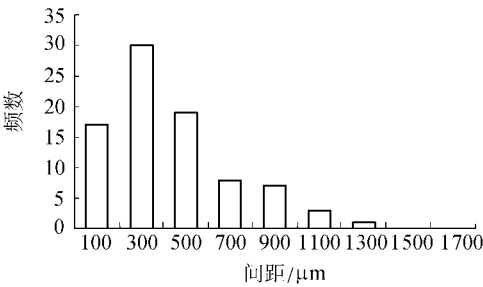


图 5 大理岩单轴压缩下间距频数统计结果

Fig. 5 Statistical results of spacing-frequency of marble under uniaxial compression

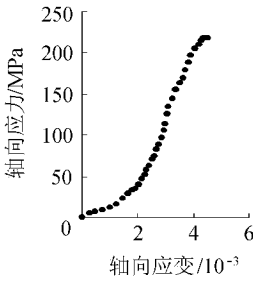


图 6 大理岩单轴压缩实验应力-应变关系曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of marble under uniaxial compression

从上述统计结果和文献[8-10]可知,微裂隙的方位角服从正态分布,相应的分布函数为

$$F(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\theta} e^{-(\theta-\mu)^2/(2\sigma^2)} du \quad (28)$$

采用点估计的方法可算出 μ 和 σ 的无偏估计值,计算公式为

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i = \bar{\theta} \\ \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i^2 - \bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2 \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} \hat{E}(l) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \\ \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [l_i - \hat{E}(l)]^2 \end{cases} \quad (30)$$

将图3和图4的统计数据代入式(28)进行参数估计,可以得到裂纹方位角的相关参数: $\hat{\mu} = 61^\circ$, $\hat{\sigma} = 18.3$ 。由图5和图6的统计数据并参考文献[10]可知,裂纹长度和间距基本服从负指数分布,如式(30)所示。通过对样本长度数据的计算,可得 $\hat{E}(l) = 66.19 \mu\text{m}$, $\hat{\sigma} = 66.19$ 。同理,通过对样本间距数据的计算,可得 $\hat{E}(l) = 183.5 \mu\text{m}$, $\hat{\sigma} = 183.5$ 。

将 $\delta = 100 \text{ MPa}$ 时大理岩试样的细观实验有关数据代入损伤演化方程及有效弹性张量的方程,可得有效弹性模量 $E_1 = 48.9 \text{ GPa}$ 。从常规单轴压缩实验所得到的 $\delta = 80 \text{ MPa}$ 时大理岩试样的有效弹性模量 $E = 51.7 \text{ GPa}$ 可知,实验结果与理论计算结果基本一致。

4 结 语

本文首先基于弹性假设,将含微裂纹的大理岩 REV 受均匀应力的边值问题分解为不含裂纹的岩石基质受均匀外荷载的边值问题和由于微裂纹张开、滑动所产生的附加应力位移场问题,为了使问题易于解决,假设两者符合叠加原理,其次基于断裂力学中的能量原理并定义相关损伤变量,对荷载作用下裂纹的扩张趋势进行了分析和理论推导,最后基于 SEM 细观实验,对大理岩加载条件下的细观结构动态变化全过程进行了分析。分析结果表明,单轴压缩条件下岩石材料的起裂一般由局部拉应力集中引起,但在主裂纹形成过程中存在着压剪和剪切,且压剪和剪切对岩石的破坏起主要作用。

参考文献:

- [1] 赵杰.大理岩细观损伤及断裂过程量化实验研究[D].南京:河海大学,2009.
- [2] HUANG J F, CHEN G L, ZHAO Y H, et al. An experimental study of the strain field development prior to failure of a marble plate under compression[J]. Tectonophysics, 1990, 175(1/2/3): 269-284.
- [3] AYATOLLAHI M R, ALIHA M R M, HASSANI M M. Mixed mode brittle fracture in PMMA-An experimental study using SCB specimens[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 417(1/2): 348-356.
- [4] 朱其志, 胡大伟, 周辉, 等. 基于均匀化理论的岩石细观力学损伤模型及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 266-272. (ZHU Qi-zhi, HU Da-wei, ZHOU Hui, et al. Research on homogenization-based mesomechanical damage model and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 266-272. (in Chinese))
- [5] 江涛. 基于细观力学的脆性岩石损伤-渗流耦合本构模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [6] 褚卫江. 低孔隙度岩石细观本构模型及损伤-渗流耦合研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [7] 肖洪天, 强天驰, 周维垣. 三峡船闸高边坡损伤流变研究及实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497-502. (XIAO Hongtian, QIANG Tian-chi, ZHOU Wei-yuan. Rheologic damage study of three gorges shiplock highslope and analysis on in-situ measured deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497-502. (in Chinese))
- [8] 朱珍德, 邢福东, 刘汉龙, 等. 红砂岩膨胀力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 596-600. (ZHU Zhen-de, XING Fu-dong, LIU Han-long, et al. Testing study on the swelling mechanical behavior of red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 596-600. (in Chinese))
- [9] 朱珍德, 邢福东, 刘汉龙, 等. 南京红山窑第三系红砂岩膨胀变形性质试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1041-1044. (ZHU Zhen-de, XING Fu-dong, LIU Han-long, et al. Experimental research on expansive deformation of tertiary red sandstone in Nanjing[J].

Rock and Soil Mechanics,2004,25(7) :1041-1044. (in Chinese))

[10] 朱珍德,邢福东,张勇,等. 红山窑膨胀红砂岩湿化特性试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(7) :1014-1018. (ZHU Zhen-de,XING Fu-dong,ZHANG Yong,et al. Experimental research on slaking property of swelling red sandstone in Hongshanyao[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(7) :1014-1018. (in Chinese))

[11] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京 中国水利水电出版社,1990.

[12] 张研,张子明. 材料细观力学[M]. 北京 科学出版社,2008 :13-16.

[13] EWALDS H L,WANHIL R J H. 断裂力学[M]. 朱永昌,浦素云,译. 北京 北京航空航天大学出版社,1988 :38-55.

[14] 王山山,万里波. 基于基础激励的结构损伤检测局部损伤因子法[J]. 河海大学学报 :自然科学版,2009,37(4) :405-409. (WANG Shan-shan,WAN Li-bo. Structural damage detection using local damage factor method based on base excitation[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences,2009,37(4) :405-409. (in Chinese))

[15] ZAOUI A Z. Continuum micromechanics :survey[J]. Journal of Engineering Mechanics,2002,128(8) :808-816.

Dynamic theories of meso-damage evolution of marble under uniaxial compression conditions

TANG Hu-dan^{1, 2}, ZHU Zhen-de^{1, 2}, ZHU Ming-li^{1, 2}

- (1. Geotechnical Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Based on the fundamental theories of the micromechanics and the thermodynamics, the damage evolution rules of marble under the uniaxial compression conditions were studied by use of homogeneous methods. Firstly, the marble was regarded as the composition of rock matrixes and cracks, and the two parts conformed to the superposition principle. Secondly, the cracks were divided into the open and close cracks. The relevant analysis was performed from the perspectives of the micromechanics and the thermodynamics under the hypothesis that the cracks were acted by tensile forces at the initial stage and the damage of the marble was gradually dominated by shear compression with the closing of the cracks. Finally, an expression for the damage evolution rules of the marble was established according to the analytic results. The theoretical results were validated by SEM meso-scale experiments.

Key words : micromechanics ; thermodynamics ; homogeneity ; marble ; damage ; uniaxial compression test