

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 01 - 0060 - 06

# 含天然气水合物沉积物损伤统计本构模型

吴二林, 韦昌富, 魏厚振, 颜荣涛

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 水合物含量、有效围压是影响含天然气水合物沉积物力学性质的主要因素, 在忽略其他次要因素(包括水合物种类、试样颗粒大小、试验条件等)的情况下, 水合物含量和有效围压是决定试样弹性模量的两个关键参数。在分析等效弹性模量与水合物含量相互关系的基础上, 考虑有效围压的影响, 建立了弹性模量与有效围压的幂函数关系; 同时采用 Drucker-Prager 破坏准则来表示含天然气水合物沉积物微元强度, 并假设其微元强度服从 Weibull 分布, 从而建立了含天然气水合物沉积物的损伤统计本构模型, 与不同有效围压下的试验结果及已有研究成果相比较, 表明了所建模型能够很好地模拟三轴剪切条件下含水合物沉积物试样的应力-应变关系特性。此研究成果可对含天然气水合物沉积物工程性状的数值模拟提供参考。

**关 键 词:** 含天然气水合物沉积物; 有效围压; Drucker-Prager 破坏准则; 统计损伤理论

**中图分类号:** TU 411

**文献标识码:** A

## A statistical damage constitutive model of hydrate-bearing sediments

WU Er-lin, WEI Chang-fu, WEI Hou-zhen, YAN Rong-tao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Hydrate saturation and effective confining pressure can significantly influence the mechanical behaviour of hydrate-bearing sediments. In the case, that the effects of the hydrate type, grain size, and testing conditions are excluded, these two variables are the critical factors that determine their elastic modulus. Based on the relationship between equivalent elastic modulus and hydrate saturation, a power function is established for the damage variable, which takes into account the influence of effective confining pressure. Drucker-Prager failure criterion is adopted to describe the strength of a micro-element of hydrate-bearing sediments. By assuming that the variation of the micro-element strength follows Weibull's distribution, a statistical damage constitutive model of hydrate-bearing sediments is developed. By comparing the simulated results with the experimental data available in the literature, we show that the proposed model can describe the stress-strain behavior of the hydrate-bearing sediments very well under the triaxial shearing condition. The results can provide reference for numerical simulation of engineering properties of gas hydrate sediments.

**Key words:** hydrate-bearing sediments; effective confining pressure; Drucker-Prager failure criterion; statistical damage theory

## 1 引 言

目前, 对含天然气水合物沉积物力学性质的研究主要集中于三轴剪切试验, 国外较早开展这类试验研究<sup>[1-3]</sup>, 近年来国内也取得不少进展<sup>[4-6]</sup>。随着试验仪器技术的不断发展, 对水合物力学性质的认识也更加深刻, 对含天然气水合物沉积物的本构行为模拟研究也逐渐开展。Sultan 等<sup>[7]</sup>在 Cam-Clay 模型基础上, 将水合物含量作为一个状态变量来模拟含水合物沉积物的骨架结构破坏及软化现象, 由于

其模型考虑的是弹塑性, 模型参数较多, 而且从其模拟结果来看, 只能说明其模型所表达的应力-应变曲线变化趋势是正确的, 与试验曲线还不能很好吻合。Miyazaki 等<sup>[8]</sup>考虑了水合物含量以及有效应力的影响, 基于 Duncan-Chang 模型建立一个线弹性本构关系, 对不同水合物含量和不同有效围压的应力-应变关系、侧向变形、初始切线模量、初始切线泊松比等都有较好的模拟。Rutqvist 等<sup>[9]</sup>基于 Cam-Clay 模型, 考虑水合物含量对沉积物强度和刚度的影响, 模拟海洋水合物藏开采中引起的不可逆

收稿日期: 2011-10-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No. 41102199); 国家自然科学基金重点项目(No. 51239010); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KZCX2-YW-JS108)资助。

第一作者简介: 吴二林, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事天然气水合物开采过程中的有关岩土工程问题的研究工作。E-mail: wuerlin08@163.com

压缩变形问题。Yu 等<sup>[10]</sup>认为，甲烷水合物应力-应变关系可以分为快速结构损伤阶段和完全结构损伤阶段，在 Duncan-Chang 模型中考虑两个不同阶段的初始切线模量和极限偏应力，对不同水合物含量及不同温度下的甲烷水合物应力-应变关系进行较好的模拟。文献[11]从冻土本构模型<sup>[12-14]</sup>的研究思路出发，将沉积物的弹性模量与水合物含量联系起来，假设损伤量服从二参数的 Weibull 分布，同时基于应力-应变曲线在达到峰值时满足的几何条件，来建立含天然气水合物沉积物的本构关系具体表达式。该模型考虑的是某一特定围压下不同水合物含量的应力-应变关系，并且文中采用轴向应变来衡量损伤量。在不同围压的情况下，特别是在稍高的围压下，模型并不能对实际的应力-应变曲线有很好的模拟（见图 1）。曹文贵等<sup>[15]</sup>从岩石微元强度分布的随机性出发，假设微元强度服从 Weibull 分布，用 Drucker-Prager 准则来描述分布参量  $F$ ，推导出岩石损伤演化方程和岩石三维损伤软化统计本构模型，之后考虑了不同的围压、不同破坏准则等情况<sup>[16-19]</sup>，使得模型得到进一步的推广，并且在饱和土、冻土中得到了很好的应用<sup>[20-21]</sup>。

因此，为了克服文献[11]中对于稍高围压模拟效果较差的不足，本文考虑有效围压对弹性模量的影响，同时借助岩石统计损伤<sup>[15-19]</sup>的一些研究成果，考虑含天然气水合物沉积物微元强度服从 Weibull 分布以及 Drucker-Prager 准则，结合连续损伤理论，建立含天然气水合物沉积物损伤统计本构模型，并将模型计算结果与文献[11]方法的结果对比，对所建本构模型进行验证。

## 2 弹性模量

文献[11]已经详细阐述了水合物含量、有效围压这两个因素是影响含天然气水合物沉积物力学性质的主要因素，因此，在忽略其他次要因素（包括水合物种类、试样颗粒大小、试验条件等）的情况下，水合物含量和有效围压是决定试样弹性模量的两个关键参数。文献[11]将含天然气水合物沉积物看作是一种由沉积物颗粒和水合物构成的复合固体骨架、孔隙水、孔隙气体组成的混合物，这种思路和方法能够很好地将水合物含量和沉积物的等效弹性常数（包括等效弹性模量和等效泊松比）联系起来。目前已有的对含天然气水合物沉积物试样进行三轴剪切试验的研究成果表明<sup>[1,3,5]</sup>，随着有效围压的增加，试验抗剪强度及弹性模量都相应增大，因此，必须考虑有效围压对弹性模量的影响。但对于

某一较低有效围压（如 1 MPa）而言，有效围压的影响相对较小，可以忽略，因此文献[11]中仅考虑水合物含量对弹性模量的影响也能对试验曲线达到很好的模拟，但在较高的有效围压下有效围压的影响是不能忽略的。因此，在文献[11]的基础上引入有效围压的影响，同时参考 Miyazaki<sup>[8]</sup>、Janbu<sup>[22]</sup>等认为弹性模量与有效围压之间幂函数的关系，即

$$E' = E \left( \frac{\sigma' + 1}{\sigma_0} \right)^{0.608} \quad (1)$$

式中： $E'$  为沉积物弹性模量； $E$  为沉积物等效弹性模量，与水合物含量有关，其具体计算方法文献[11]中已经做了详细论述，在此不再赘述； $\sigma'$  为有效围压； $\sigma_0$  表示参考值等于 1 MPa，主要起到使等式两边保持量纲一致的作用；指数 0.608 为文献[8]中对水合物砂样弹性模量的试验结果的拟合值。同时，这里忽略有效围压对等效泊松比的影响。

## 3 损伤统计本构模型

### 3.1 基本假设

(1) 孔隙中的水合物分布是均匀的，含天然气水合物沉积物材料在宏观上是各向同性的，在细观上包含材料损伤的基本信息。

(2) 在不考虑损伤的情况下，含天然气水合物沉积物微元服从虎克定律，具有线弹性的性质，产生损伤后，材料具有非线弹性的性质。

(3) 含天然气水合物沉积物微元强度各不相同，服从 Weibull 分布统计规律。

### 3.2 分布变量的建立

由上节假设（3）可知，由于微元强度服从 Weibull 分布统计规律，损伤变量可表示为<sup>[15]</sup>

$$D = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中： $D$  为损伤变量，代表宏观上以破坏微元体数与总微元体数的比值； $F$  为微元强度随机分布的分布变量； $m$ 、 $F_0$  为 Weibull 分布参数，由应力-应变曲线的形态决定。

通常的做法是基于 Drucker-Prager、Mohr-Coulomb 或者 Hoek-Brown 破坏准则，来假设微元强度  $F$  的表达式<sup>[15, 17, 23]</sup>，鉴于 Drucker-Prager 破坏准则参数形式简单、应用广泛等特点，这里采用 Drucker-Prager 破坏准则来确定含天然气水合物沉积物微元强度，具体表达式如下：

$$F = f(\sigma') = \alpha I_1' + \sqrt{J_2'} \quad (3)$$

式中： $\alpha$  为材料参数， $\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}}$ ， $\varphi$  为材料的内摩擦角； $I'_1$  为应力张量的第 1 不变量， $I'_1 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3$ ， $\sigma'_1$ 、 $\sigma'_2$ 、 $\sigma'_3$  均为有效主应力； $J'_2$  为应力偏张量的第 2 不变量， $J'_2 = \left[ (\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2 \right] / 6$ 。

对于含天然气水合物沉积物的三轴试验，有效围压  $\sigma'_2 = \sigma'_3$ ，代入  $I'_1$ 、 $J'_2$  的表达式中，得

$$I'_1 = \sigma'_1 + 2\sigma'_3 \tag{4}$$

$$J'_2 = (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 / 3 \tag{5}$$

由上节假设(2)可知，在不考虑损伤的情况下，材料满足虎克定律，则有

$$\sigma'_1 = E' \varepsilon_1 + 2\nu \sigma'_3 \tag{6}$$

式中： $\varepsilon_1$  为轴向应变； $\nu$  为等效泊松比。

将式(6)分别代入式(4)(5)，得

$$I'_1 = E' \varepsilon_1 + 2(\nu + 1)\sigma'_3 \tag{7}$$

$$\sqrt{J'_2} = [E' \varepsilon_1 + (2\nu - 1)\sigma'_3] / \sqrt{3} \tag{8}$$

将式(7)(8)代入式(3)中，即得到分布变量  $F$ ：

$$F = \left( \alpha E' + \frac{E'}{\sqrt{3}} \right) \varepsilon_1 + \left[ \left( 2\alpha + \frac{2}{\sqrt{3}} \right) \nu + 2\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \right] \sigma'_3 \tag{9}$$

由以上推导可知，基于 Drucker-Prager 破坏准则，用有效应力状态来描述适合含天然气水合物沉积物材料的微元强度分布变量，从而建立了分布变量  $F$  的具体表达式。

### 3.3 三轴试验的损伤统计本构模型

根据 Lemaitre 等效应变假设<sup>[24]</sup>，即应力  $[\sigma']$  作用在受损材料上引起的应变与等效应力  $[\tilde{\sigma}]$  作用在无损伤材料上引起的应变等价：

$$[\varepsilon] = \frac{[\tilde{\sigma}]}{[E]} = \frac{[\sigma']}{[\tilde{E}]} = \frac{[\sigma']}{[E](I - D)} \tag{10}$$

式中： $[E]$  为无损伤材料弹性矩阵； $[\tilde{E}]$  为受损材料弹性矩阵； $[\tilde{\sigma}]$  为等效应力矩阵， $[\sigma']$  为有效应力矩阵； $I$  为单位矩阵。

根据损伤力学理论，用损伤后的等效应力来代替无损伤材料本构关系中的有效应力，即

$$[\sigma'] = [E'](I - D)[\varepsilon] \tag{11}$$

在不考虑损伤的情况下，三轴试验的应力-应变关系可由式(6)所表达，结合式(11)，有

$$\sigma'_1 = E'(1 - D)\varepsilon_1 + 2\nu\sigma'_3 \tag{12}$$

式(12)两边同时减去有效围压  $\sigma'_3$ ，得

$$\Delta\sigma = E'(1 - D)\varepsilon_1 + (2\nu - 1)\sigma'_3 \tag{13}$$

式中： $\Delta\sigma$  为偏应力， $\Delta\sigma = \sigma'_1 - \sigma'_3$ 。

结合式(13)(2)(3)，三轴试验的含天然气水合物沉积物损伤统计本构模型的具体表达式为

$$\Delta\sigma = E' \varepsilon_1 \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] + (2\nu - 1)\sigma'_3 \tag{14}$$

### 3.4 模型参数的确定

式(14)代表了在不同有效围压下，考虑含天然气水合物沉积物微元强度的三轴偏应力与轴向应变的应力-应变关系，其中还包含了 Weibull 分布参数  $m$ 、 $F_0$ ，过去大多采用将本构方程线性化，再根据已知的应力-应变全曲线来拟合得到<sup>[15-17]</sup>，这种方法不能反映模型参数的物理意义，过程复杂，且有时会因峰前出现负损伤及峰后数据点偏少而失效<sup>[25]</sup>，因此，这里采用应力-应变曲线在峰值处满足以下几何条件来确定模型参数<sup>[11-12]</sup>：

(1) 当  $\varepsilon_1 = \varepsilon_f$ ，有

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_f \tag{15}$$

(2) 当  $\varepsilon_1 = \varepsilon_f$ ，有

$$\left. \frac{d\Delta\sigma}{d\varepsilon_1} \right|_{\varepsilon_1 = \varepsilon_f} = 0 \tag{16}$$

式中： $\varepsilon_f$ 、 $\Delta\sigma_f$  分别为峰值应变和峰值偏应力。

对式(14)两边求导可得

$$\frac{d\Delta\sigma}{d\varepsilon_1} = E' \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] \left[ 1 - E' \varepsilon_1 \frac{m F^{m-1}}{F_0^m} \left( \alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \right] \tag{17}$$

由几何条件 可得

$$\frac{m F_f^{m-1}}{F_0^m} = \frac{\sqrt{3}}{E' \varepsilon_f (1 + \sqrt{3} \alpha)} \tag{18}$$

式中： $F_f$  为峰值应变所对应的微元强度的分布变量值。

由几何条件 可得

$$\Delta\sigma_f = E' \varepsilon_f \exp \left[ - \left( \frac{F_f}{F_0} \right)^m \right] + (2\nu - 1)\sigma'_3 \tag{19}$$

式(18)(19)中只含有  $m$ 、 $F_0$  两个未知数，联立求解可得

$$m = \frac{-\sqrt{3}F_f}{E'\varepsilon_f(1+\sqrt{3}\alpha)\ln\left(\frac{\Delta\sigma_f - (2\nu-1)\sigma'_3}{E'\varepsilon_f}\right)} \quad (20)$$

$$F_0 = \left[ \frac{-(F_f)^m}{\ln\left(\frac{\Delta\sigma_f - (2\nu-1)\sigma'_3}{E'\varepsilon_f}\right)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (21)$$

### 4 模型验证及对比分析

为了验证本文损伤统计本构模型的合理性及优越性，引用文献[1]中在不同有效围压下的含水合物砂样的三轴应力-应变关系（具体见文献[1]中图 14），并将结果与文献[11]中所采用方法对文献[1]中图 14 的模拟结果进行对比分析。取砂土的弹性模量为 46.0 MPa，泊松比为 0.2，孔隙率为 36.5%，内摩擦角  $\varphi=30^\circ$ ，水合物含量可近似为 34.3%，有效围压分别为 1.0、2.0、3.0 MPa，含天然气水合物沉积物的等效弹性模量  $E=1\ 179.471$  MPa，等效泊松比  $\nu=0.219$ （具体计算参考文献[11]）。对于文献[1]中图 14 已知的在不同有效围压下的应力-应变曲线，可以根据 3.4 节中所述的方法得到对应的  $m$ 、 $F_0$  值，见表 1。在不同有效围压的情况下，图 1 为文献[11]中模型计算得到的理论曲线与文献[1]试验曲线的对比情况，图 2 为本文模型计算所得理论曲线与文献[1]试验曲线的对比情况。

表 1 不同有效围压下试验曲线的拟合参数  $m$ 、 $F_0$   
Table 1 Fitting parameters  $m$  and  $F_0$  of experimental curves under different effective confining pressures

有效围压 $\sigma'_3$ /MPa	$m$	$F_0$ /MPa
1.0	0.412	6.175
2.0	0.377	7.359
3.0	0.367	8.572

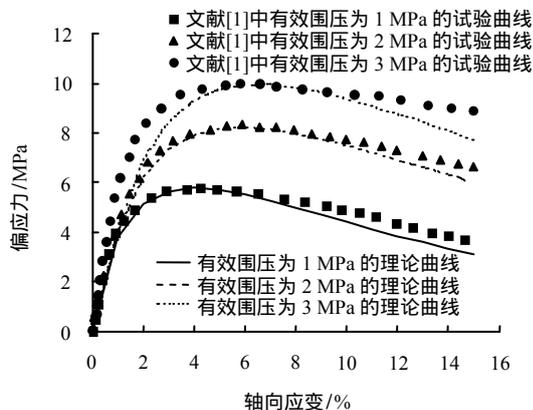


图 1 理论曲线与试验曲线的比较<sup>[1]</sup>  
Fig.1 Comparison of experimental and theoretically curves<sup>[11]</sup>

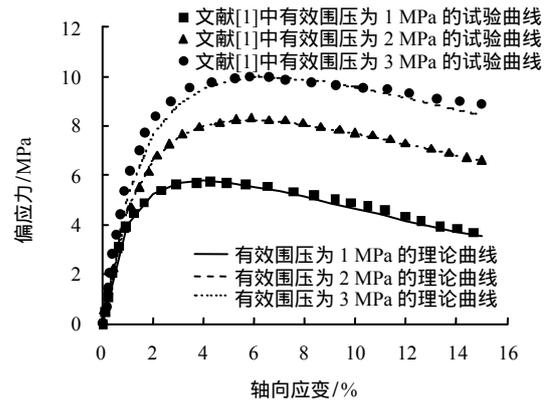


图 2 本文理论曲线与试验曲线的比较  
Fig.2 Comparison of experimental and theoretically curves in this article

从图 1 可以看到，应力-应变曲线在峰值处附近的模型计算与试验结果吻合很好，但对于峰前和峰后的情况都与试验曲线存在一定的差距，首先是因为峰前的应力-应变曲线主要取决于弹性模量的大小，由于文献[11]中并没有考虑有效围压的影响，在不同有效围压下弹性模量的取值都是相同的，因此，模拟的结果中 3 条曲线在峰前的线性阶段几乎没有区别，这样就导致了对于稍高有效围压下理论曲线与实际试验曲线的偏离；其次，在峰后阶段各个有效围压下随着应变的发展逐渐偏离试验曲线，其中的原因就在于文献[11]采用的是轴向应变来度量损伤量，并没有反映复杂应力状态对损伤量的影响，并且压力越高，偏离的幅度越大。

从图 2 中明显可以看到，本文的模拟结果是优于文献[11]的。由于考虑了有效围压对弹性模量的影响，有效围压越高，对应的弹性模量也越大，因此，在初始线性阶段就体现了不同有效围压应力-应变曲线所对应的弹性模量是不同的，特别是在有效围压为 3 MPa 的情况下，所对应的峰前阶段的理论曲线相比图 1 中的要更加接近试验曲线；同时，由于本文考虑了复杂应力状态对损伤量的影响，采用 Drucker-Prager 破坏准则来确定含天然气水合物沉积物微元强度，在峰后阶段，与试验曲线吻合很好，从而使得理论曲线更加接近整个试验曲线，体现了本文模型的合理性。

### 5 结论

考虑有效围压的影响对等效弹性模量进行修正，同时基于统计损伤理论，建立更加合理的含天然气水合物沉积物的非线性损伤本构模型，主要结论如下：

- (1) 建立了弹性模量与有效围压的幂函数关

系,使模型更好地反映了有效围压对峰前应力-应变曲线的影响。

(2) 本文建立的损伤统计本构模型能更好地模拟含天然气水合物沉积物应力-应变曲线的整个过程。

(3) 本模型参数少,且物理意义明确,模拟效果好,便于实际应用。

### 参 考 文 献

- [1] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. The effect of saturation degree of methane hydrate on the shear strength of synthetic methane hydrate sediments[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Gas Hydrates. [S. l.]: [s. n.], 2005: 674 - 680.
- [2] LING YUNWU, JOCELYN L H, GROZIC PENG. Laboratory analysis of carbon dioxide hydrate-bearing sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(4): 547 - 550.
- [3] YUN T S, SANTAMARINA J C, RUPPEL C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2007, 112, B04106.
- [4] 张旭辉, 王淑云, 李清平, 等. 天然气水合物沉积物力学性质的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3069 - 3074.  
ZHANG Xu-hui, WANG Shu-yun, LI Qing-ping, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3069 - 3074.
- [5] 魏厚振, 颜荣涛, 陈盼, 等. 不同水合物含量含二氧化碳水合物砂三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 198 - 203.  
WEI Hou-zhen, YAN Rong-tao, CHEN Pan, et al. Deformation and failure behavior of carbon dioxide hydrate-bearing sands with different hydrate contents under triaxial shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 198 - 203.
- [6] 于锋, 宋永臣, 李洋辉, 等. 含冰甲烷水合物的应力与应变关系[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 687 - 691.  
YU Feng, SONG Yong-chen, LI Yang-hui, et al. A study on stress-strain relations of methane hydrates[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2011, 32(4): 687 - 691.
- [7] SULTAN N, GARZIGLIA S. Geomechanical constitutive modeling of gas-hydrate-bearing sediments[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates. Edinburgh: [s. n.], 2011.
- [8] MIYAZAKI K, AOKI K, TENMA N. A nonlinear elastic constitutive model for artificial methane-hydrate-bearing sediment[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates. Edinburgh: [s. n.], 2011.
- [9] RUTQVIST J, MORIDIS G, KIM J. A numerical study of gas production from collapsing oceanic hydrate-bearing sediments[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates. Edinburgh: [s. n.], 2011.
- [10] YU FENG, SONG YONGCHEN, LIU WEIGUO, et al. Analyses of stress strain behavior and constitutive model of artificial methane hydrate[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2011, 77(2): 183 - 188.
- [11] 吴二林, 魏厚振, 颜荣涛, 等. 考虑损伤的含天然气水合物沉积物本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3045 - 3050.  
WU Er-lin, WEI Hou-zhen, YAN Rong-tao et al. Constitutive model for gas hydrate-bearing sediments considering damage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.1): 3045 - 3050.
- [12] 宁建国, 王慧, 朱志武, 等. 基于细观力学方法的冻土本构模型研究[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(10): 847 - 851.  
NING Jian-guo, WANG Hui, ZHU Zhi-wu, et al. Investigation of the constitutive model of frozen soil based on mesomechanics[J]. **Transactions of Beijing Institute of Technology**, 2005, 25(10): 847 - 851.
- [13] 宁建国, 朱志武. 含损伤的冻土本构模型及耦合问题数值分析[J]. 力学学报, 2007, 39(1): 70 - 76.  
NING Jian-guo, ZHU Zhi-wu. Constitutive model of frozen soil with damage and numerical simulation of the coupled problem[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2007, 39(1): 70 - 76.
- [14] 朱志武, 宁建国, 马巍. 基于损伤的冻土本构模型及水、热、力三场耦合数值模拟研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(6): 758 - 772.
- [15] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 628 - 633.  
CAO Wen-gui, FANG Zu-lie, TANG Xue-jun. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(6): 628 - 633.
- [16] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3226 - 3231.  
CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, LIU Cheng-xue. Study on the model and its modifying method for rock softening

- and damage based on Weibull random distribution[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3226 - 3231.
- [17] 曹文贵, 张升. 基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石损伤统计分析方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 43 - 47.  
CAO Wen-gui, ZHANG Sheng. Study on the statistical analysis of rock damage based on Mohr-Coulomb criterion[J]. **Journal of Hunan University (Natural Science)**, 2005, 32(1): 43 - 47.
- [18] 曹文贵, 张升, 赵明华. 基于新型损伤定义的岩石损伤统计本构模型探讨[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 41 - 46.  
CAO Wen-gui, ZHANG Sheng, ZHAO Ming-hua. Study of statistical damage constitutive model of rock based on new definition of damage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 41 - 46.
- [19] 曹文贵, 莫瑞, 李翔. 基于正态分布的岩石软化损伤统计本构模型及其参数确定方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 671 - 675.  
CAO Wen-gui, MO Rui, LI Xiang. Study on statistical constitutive model and determination of parameters of rock based on normal distribution[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 671 - 675.
- [20] 曹文贵, 张升, 赵明华. 饱和土变形过程模拟的统计损伤方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 13 - 17.  
CAO Wen-gui, ZHANG Sheng, ZHAO Ming-hua. Study of simulation of deformation process of saturated soils by statistical damage theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 13 - 17.
- [21] 李清泽, 赖远明, 徐湘田, 等. 高温冻土三轴强度分布及损伤统计本构模型[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1234 - 1241.  
LI Qing-ze, LAI Yuan-ming, XU Xiang-tian, et al. Triaxial strength distribution of warm frozen soil and its damage statistical constitutive model[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2010, 32(6): 1234 - 1241.
- [22] JANBU N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests[C]// Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wiesbaden: [s. n.], 1963.
- [23] 石崇, 蒋新兴, 朱珍德, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的岩石损伤本构模型研究及参数探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 2647 - 2652.  
SHI Chong, JIANG Xin-xing, ZHU Zhen-de, et al. Study of rock damage constitutive model and discussion of its parameters based on Hoek-Brown criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 2647 - 2652.
- [24] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. **Nuclear Engineering and Design**, 1984, 80(2): 233 - 245.
- [25] 刘成学, 杨林德, 曹文贵. 岩石统计损伤软化本构模型及参数反演[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 453 - 457.  
LIU Cheng-xue, YANG Lin-de, CAO Wen-gui. A statistical damage softening constitutive model for rock and back analysis of its parameters[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(3): 453 - 457.
- [13] ELSHAFFEY AHMED A, HADDARA MAHMOUD R, MARZOUK H. Dynamic response of offshore jacket structures under random loads[J]. **Marine Structures**, 2009, 22(3): 504 - 521.
- [14] 聂庆科, 白冰, 胡建敏, 等. 循环荷载作用下软土的孔压模式和强度特征[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 724 - 729.  
NIE Qing-ke, BAI Bing, HU Min-jian, et al. The pore pressure model and undrained shear strength of soft clay under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.1): 724 - 729.
- [15] 李志刚, 袁志林, 段梦兰, 等. 导管架平台桩-土相互作用试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3833 - 3840.  
LI Zhi-gang, YUAN Zhi-lin, DUAN Meng-lan, et al. Development and application of jacket platform pile-soil interaction test system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3833 - 3840.
- [16] 荣冰, 张嘎, 王富强. 离心场中风力电机桩基复杂加载测试设备的研制[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1596 - 1600.  
RONG Bing, ZHANG Ga, WANG Fu-qiang. Complicated loading device for pile foundation of wind-driven generator in centrifugal field[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 1596 - 1600.

---

### 上接第 59 页