

考虑损伤的含天然气水合物沉积物本构模型

吴二林, 魏厚振, 颜荣涛, 韦昌富

(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, 湖北 武汉 430071)

摘要: 对含天然气水合物沉积物施加荷载后, 其内部固体颗粒间将会发生错动、滑移及滚动, 当荷载较小时, 沉积物表现为弹性变形; 随着荷载的增大, 内部将出现塑性流动, 水合物晶体重新定向, 此时沉积物表现为塑性变形; 随着荷载的进一步增大, 最终导致沉积物发生破坏, 这一过程可以看作是沉积物内部损伤产生和逐渐发展的过程。从复合材料的细观力学机制出发研究含水合物沉积物的材料特性, 得到等效弹性常数与水合物含量之间的关系; 同时基于损伤力学理论, 推导出损伤变量的表达式, 建立考虑损伤的含天然气水合物沉积物的本构模型。通过比较不同水合物含量下的计算结果与试验结果, 结果表明, 所建模型能较好地反映含天然气水合物沉积物的应力-应变关系, 验证了模型的可行性。

关键词: 天然气地质学; 含天然气水合物沉积物; 细观力学; 损伤; 本构模型

中图分类号: P 618.13

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)增1 - 3045 - 06

CONSTITUTIVE MODEL FOR GAS HYDRATE-BEARING SEDIMENTS CONSIDERING DAMAGE

WU Erlin, WEI Houzhen, YAN Rongtao, WEI Changfu

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

Abstract: When a gas hydrate-bearing sediment is loaded, inter-particle processes such as dislocating, slipping and rolling will take place. Under small loading condition, the sediment deforms elastically; with the applied load increasing, plastic flow may occur, resulting in re-arrangements of hydrate crystal and the sediment deforms plastically; as the applied load further increasing, failure of the sediment will appear. This process represents the whole process of the damage producing and developing in the sediment. From the mesomechanics mechanism perspective of composite material, the material characteristics of gas hydrate-bearing sediments is investigated; and the relationship between hydrate saturation and equivalent elastic constants is established. Based on the principles of damage mechanics, the expression of damage variable is identified; and then a constitutive model for gas hydrate-bearing sediment considering damage is developed. The calculation results are compared with the experimental data for a gas hydrate-bearing sediment with different hydrate saturations. It is shown that the presented model can describe the stress-strain behavior of gas hydrate-bearing sediments quite well and the reasonability and feasibility of the model are verified.

Key words: geology of natural gas; gas hydrate-bearing sediments; mesomechanics; damage; constitutive model

1 引言

天然气水合物是由天然气和水在一定的温度和

压力条件下, 形成的一种非化学计量的、类似冰状的笼型晶体, 具有能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅、成藏物化条件优越等特点, 是21世纪继常规石油和天然气能源之后最具开发潜力的清洁能源

收稿日期: 2011 - 07 - 08; **修回日期:** 2011 - 09 - 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41102199); 中国科学院“百人计划”择优支持项目; 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2 - YW - JS108)

作者简介: 吴二林(1984 -), 男, 2007年毕业于武汉大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事天然气水合物开采过程中的有关岩土工程问题方面的研究工作。E-mail: wuerlin08@163.com. 通讯作者: 韦昌富(1966 -), 男, 博士, 现任研究员。E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn

源,广泛分布于大陆边缘和永久冻土带^[1]。

天然气水合物的形成和分解主要受温度、压力、气体类型及海水盐度的影响,地质构造作用、海平面升降以及海底工程等因素将导致上述条件发生变化,破坏其相平衡条件,将导致水合物分解,产生大量的游离气,导致孔隙压力的增大,降低沉积物的胶结程度,使沉积层的抗剪强度和承载力降低,从而引起海底滑坡,相应的也会造成钻井平台桩腿的不均匀沉降等地质灾害^[2],因此,针对含天然气水合物沉积物力学性质的研究越来越受到国内外研究者的重视,V. R. Parameswaran 等^[3]对含四氢呋喃水合物的冻砂土在温度 267 K 和应变率 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下进行三轴压缩试验,试验结果表明,峰值应力随着应变率的增大略有升高,峰值应变随着应变率的增大而降低,对于应变率的改变,峰值应变要比峰值应力敏感。A. Masui 等^[4]对在冰、砂混合物和水、砂混合物中形成的不同含量的水合物的砂样进行了三轴压缩试验,发现随着水合物含量的提高,抗剪强度增强、割线弹性模量增大、黏聚力增大,内摩擦角变化不明显而应变软化的趋势却变得更加明显。W. J. Winters 等^[5]对马更歇三角洲钻井原状样和室内渥太华砂的人工合成样进行了声学和三轴强度测试,试验结果表明,相比未含水合物试样,原状样和重塑样的压缩波波速和抗剪强度都有所增大,水合物含量、孔隙内物质组成、颗粒大小、自由气体以及试验条件这些因素将影响它们的增幅。L. Y. Wu 等^[6]对含二氧化碳水合物的砂样进行了三轴试验,发现越高的压力以及越低的温度合成的水合物含量将越高,越高的初始水合物含量将导致越大的有效应力降幅和越低的强度,即使少量水合物分解将使得试样破坏。T. S. Yun 等^[7]在实验室内通过三轴试验测试了砂子、黏土和石英粉 3 种多孔介质在水合物存在条件下的体积弹性模量、压缩模量、杨氏模量、泊松比和剪切强度等各项力学性能指标,试验结果表明,颗粒大小、有效围压、水合物含量将影响含水合物沉积物的应力-应变关系,随着水合物含量的增加,试样呈现屈服软化的特性。K. Miyazaki 等^[8]对人工含水合物试样进行常应变率和加卸载的三轴压缩试验,研究了含水合物试样的变形机制,颗粒间水合物的存在将使试样呈现先收缩再膨胀的特性,同时应变由弹性逐渐发展到塑性。张旭辉等^[9]分别对冰、四氢呋喃、二氧化碳、甲烷 4 种沉积物进行了室内合成和三轴剪切试验,试验结

果表明,4 种沉积物均表现出塑性破坏,围压越大,强度越大,含水合物种类不同会使沉积物强度不同。

通过对以上试验结果的总结,不难发现,沉积物的应力-应变曲线表现为先从弹性到硬化屈服再到软化的 3 个阶段,影响其力学性质的主要因素有:水合物含量、有效围压;次要因素有:水合物种类、颗粒大小、试验条件(包括应变率、加卸载、试验压力、试验温度)、孔隙物质组成等。随着试验仪器的不断发展,对含天然气水合物沉积物力学性质的认识也更加深刻,但是目前在该方面的研究还仅停留在室内试验阶段,还没有建立关于含天然气水合物沉积物方面的本构模型。

含天然气水合物沉积物与冻土相比较,不论是在基本物质组成上还是在形成条件上都与冻土有着明显的区别,但是它们也有相似之处,都涉及到孔隙中的固态物质与骨架的相互作用,应力-应变曲线具有相似的特性。目前损伤理论已经在冻土本构模型研究领域得到了成功的应用^[10-11]。宁建国等^[12]从复合材料的细观力学机制出发研究冻土的材料特性,用混合律方法得到了冻土材料的等效弹性常数,建立了含损伤的冻土单轴本构关系,与试验曲线吻合得很好,但其主要针对冻土的单轴试验,并没有涉及围压的影响。笔者从研究冻土的本构模型中得到启发,尝试将损伤理论应用于含天然气水合物沉积物的本构模型研究中,将沉积物的弹性模量与水合物含量联系起来,针对含天然气水合物沉积物的三轴试验,考虑围压的影响,建立考虑损伤的含天然气水合物沉积物的本构关系,对在不同水合物含量条件下,由 A. Masui 等^[4]试验得到的应力-应变曲线与考虑损伤的含天然气水合物沉积物本构模型得到的应力-应变曲线进行对比分析,显示了该模型的合理性。

2 含天然气水合物沉积物的等效弹性参数

在水合物地球物理学研究中,宋海斌等^[13]将饱和水合物沉积物视为复合骨架,根据 Gassman 方程,得到含水合物沉积物的体积模量和剪切模量,李红星等^[14]将含水合物沉积物作为等效均匀介质,得到等效介质体积模量与剪切模量。本文采用宁建国等^[12]将冻土视为一种复合材料,并用细观力学的混合律理论得到冻土等效弹性常数与其组分相的弹性常数

之间的关系的基本思想，类似地将含天然气水合物沉积物考虑为一种由沉积物骨架、水合物、水、气体组成的复合材料。将整个沉积物中所占比例很大的土颗粒作为骨架，而把水合物作为填充体看待，并假设沉积物骨架颗粒为均匀连续体，骨架颗粒与水合物之间完全黏结，忽略孔隙中液态水和气体的影响，同时忽略孔隙率在变形过程的变化^[15]，由细观力学的混合律理论可以得到含天然气水合物沉积物复合材料的等效体积模量 K 和等效剪切模量 G ：

$$K = n_s K_s + n_h K_h \quad (1)$$

$$G = n_s G_s + n_h G_h \quad (2)$$

式中： n_s ， K_s ， G_s 分别为沉积物骨架的体积分数、体积模量、剪切模量； n_h ， K_h ， G_h 分别为水合物的体积分数、体积模量和剪切模量。

各向同性材料弹性常数之间的关系为

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

将式(3)，(4)分别代入式(1)，(2)中，得

$$\frac{E}{3(1-2\nu)} = \frac{n_s E_s}{3(1-2\nu_s)} + \frac{n_h E_h}{3(1-2\nu_h)} \quad (5)$$

$$\frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{n_s E_s}{2(1+\nu_s)} + \frac{n_h E_h}{2(1+\nu_h)} \quad (6)$$

式中： ν_s ， ν_h 分别为沉积物骨架和水合物的泊松比； E_s ， E_h 分别为沉积物骨架和水合物的弹性模量。

联立求解式(5)和(6)，得到含天然气水合物沉积物复合材料的等效弹性模量 E 和等效泊松比 ν ^[12, 15-16] 分别为

$$E = \frac{[n_s E_s (1-2\nu_h) + n_h E_h (1-2\nu_s)][n_s E_s (1+\nu_h) + n_h E_h (1+\nu_s)]}{n_s E_s (1+\nu_h)(1-2\nu_h) + n_h E_h (1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \quad (7)$$

$$\nu = \frac{n_s E_s \nu_s (1+\nu_h)(1-2\nu_h) + n_h E_h \nu_h (1+\nu_s)(1-2\nu_s)}{n_s E_s (1+\nu_h)(1-2\nu_h) + n_h E_h (1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \quad (8)$$

通过上述推导，建立了在各向同性条件下的等效弹性参数与组成分量的弹性参数及体积分量(含水合物含量)之间的关系。

3 含天然气水合物沉积物的损伤本构关系

鉴于在应力 - 应变关系上含天然气水合物沉积

物与冻土具有相似性，并且温智等^[17-18]的研究中对于冻土本构模型的弹性部分都是假设符合广义虎克定律，在不考虑损伤的情况下，含天然气水合物沉积物符合弹性材料的假设。因此，同样可以假设含天然气水合物沉积物的三轴应力 - 应变关系服从广义虎克定律，即有

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (9)$$

式中： σ_1 为轴向应力； ε_1 为轴向应变； σ_2 ， σ_3 均为围压。

在常规三轴应力状态下，有

$$\sigma_2 = \sigma_3 \quad (10)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma \quad (11)$$

式中： $\Delta\sigma$ 为偏应力。

将式(10)和(11)代入式(9)整理得

$$\Delta\sigma = E\varepsilon_1 - (1-2\nu)\sigma_3 \quad (12)$$

损伤力学理论是以对金属的研究为基础发展起来的，之后又成功地应用于混凝土、岩石力学、冻土等研究中，并提出了不少的损伤本构模型。本文也是将含天然气水合物沉积物作为一种加入损伤的弹性材料来研究，建立考虑损伤的含天然气水合物沉积物的本构模型。

根据 Lemaitre 等效应变假设^[19]，即应力 σ 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：

$$[\varepsilon] = \frac{[\tilde{\sigma}]}{[E]} = \frac{[\sigma]}{[\tilde{E}]} = \frac{[\sigma]}{[E](I-D)} \quad (13)$$

式中： $[E]$ 为无损伤材料弹性矩阵， $[\tilde{E}]$ 为受损伤材料弹性矩阵， $[\tilde{\sigma}]$ 为等效应力矩阵， $[\sigma]$ 为名义应力矩阵， $[I]$ 为单位矩阵， D 为损伤变量。

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名义应力，即可得到考虑损伤的含天然气水合物沉积物的本构关系：

$$\Delta\sigma = E(1-D)\varepsilon_1 - (1-2\nu)\sigma_3 \quad (14)$$

4 损伤演化方程及模型参数的确定

含天然气水合物沉积物材料实际上包含了骨架颗粒、水合物、水以及气体等多种物质，这种复合材料内部孔隙、裂纹等缺陷也是随机分布的，在外荷载作用下，材料微元的破坏是随机的，这里将发

生破坏的微元与微元总体的比例定义为损伤变量，其范围为 0~1。假设材料在加载过程中的损伤是一个连续过程，各微元强度不尽相同，但在概率统计上服从 Weibull^[20]分布统计规律，因而也可以认为材料的损伤量也服从该分布^[21-22]，故有

$$D = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{a} \right)^n \right] \quad (15)$$

式中： a 为尺度参数， n 为形状参数， ε 为应变。从式(15)中可以看到，材料的损伤量是采用应变来度量的，对于本文模拟的含天然气水合物沉积物三轴应力 - 应变关系，这里的应变 ε 就特指轴向应变 ε_1 ，即：轴向应变的发展代表材料的逐渐弱化破坏。

将式(15)代入式(14)得

$$\Delta\sigma = E\varepsilon_1 \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_1}{a} \right)^n \right] - (1 - 2\nu)\sigma_3 \quad (16)$$

在试样达到破坏 ($\varepsilon_1 = \varepsilon_f$) 时，应力 - 应变关系满足以下几何条件^[12, 21, 23]：

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_f \quad (17)$$

$$\frac{d\Delta\sigma}{d\varepsilon_1} = 0 \quad (18)$$

式中： $\Delta\sigma_f$ 为峰值偏应力。

对式(16)两边求导，这里忽略围压的改变所引起的轴向应变，得

$$\frac{d\Delta\sigma}{d\varepsilon_1} = E \left[1 - n \left(\frac{\varepsilon_1}{a} \right)^{n-1} \right] \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_1}{a} \right)^n \right] \quad (19)$$

由式(18)可得

$$E \left[1 - n \left(\frac{\varepsilon_f}{a} \right)^{n-1} \right] \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_f}{a} \right)^n \right] = 0 \quad (20)$$

即

$$E \left[1 - n \left(\frac{\varepsilon_f}{a} \right)^{n-1} \right] = 0 \quad (21)$$

$$a = \varepsilon_f \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (22)$$

式中： ε_f 为峰值应变。

由式(17)可得

$$E\varepsilon_f \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_f}{a} \right)^n \right] - (1 - 2\nu)\sigma_3 = \Delta\sigma_f \quad (23)$$

将式(23)代入式(22)得

$$n = \frac{1}{\ln \left[\frac{E\varepsilon_f}{\Delta\sigma_f + (1 - 2\nu)\sigma_3} \right]} \quad (24)$$

将式(22)代入式(15)有

$$D = 1 - \exp \left[- \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_f} \right)^n \right] \quad (25)$$

最后将式(25)代入式(14)得到含天然气水合物沉积物的损伤本构关系：

$$\Delta\sigma = E\varepsilon_1 \exp \left[- \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_f} \right)^n \right] - (1 - 2\nu)\sigma_3 \quad (26)$$

从以上的推导可以看到，本文通过引入试样破坏全过程中对应的峰值应变 ε_f 和峰值偏应力 $\Delta\sigma_f$ ，结合试验曲线的几何条件以及等效弹性模量和等效泊松比，建立了含天然气水合物沉积物的本构关系的具体表达式。该模型所需参数不仅物理意义明确，而且在常规试验条件下可以获得。

5 模型验证与分析

为验证本文模型的合理性，引用 A. Masui 等^[4]研究中具有代表性的 3 条应力 - 应变试验曲线(对应 3 种不同水合物含量的砂土)与本文模型所得到的理论曲线进行对比分析。取砂土的弹性模量为 46.0 MPa，泊松比为 0.2，孔隙率为 36.5%，A. Masui 等^[4]研究中的水合物体积分数分别为 25.7%，40.7%，55.1%，有效围压为 1.0 MPa，水合物的体积模量和剪切模量^[24]分别取 8 410 和 3 540 MPa，结合式(3)和(4)，可求得水合物的弹性模量和泊松比分别为 9 313.264 MPa 和 0.219，在不同水合物含量下(即式(7)，(8)中每一分量都已知)，由式(7)和(8)计算所得等效弹性模量和等效泊松比见表 1，同时，由式(24)计算所得的形状参数 n 的值见表 1。图 1 为不同水合物体积分数条件下，由式(26)计算得到的理论曲线与 A. Masui 等^[4]研究中试验曲线的对比情况。

表 1 不同水合物含量下的参数值

Table 1 Values of parameters under different hydrate saturations			
$n_h/\%$	E/MPa	ν	n
25.7	891.133	0.219	0.497
40.7	1 394.049	0.219	0.464
55.1	1 876.849	0.218	0.511

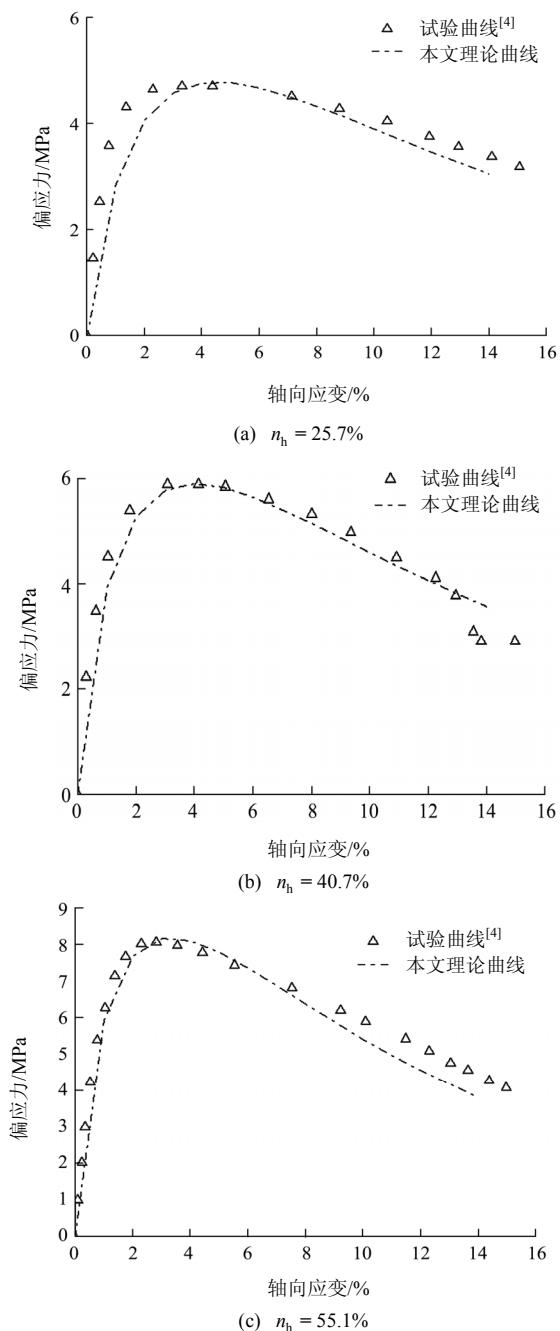


图 1 不同水合物含量下的试验曲线^[4]与本文理论曲线的对比
Fig.1 Comparison of experimental curve^[4] and theoretical curves in this paper under different hydrate saturations

由表 1 可见，随着水合物含量的增加，沉积物等效弹性模量也增加，这符合实际的物理意义，因为孔隙中水合物的存在将会起到胶结的作用，水合物含量越高，相应的等效弹性模量也越大，沉积物强度越大。由于本文所取砂土的泊松比与水合物的泊松比相差不大，故沉积物的泊松比变化也很小。

对沉积物施加荷载后，将导致内部颗粒的错动、滑移及滚动。当荷载较小时，表现为弹性变形；随着荷载的增大，内部将出现塑性流动，水合物晶体

重新定向以及骨架颗粒重新排列，导致颗粒间水合物的黏聚力下降，在沉积物内部就会产生微损伤，随着荷载的进一步增大，沉积物内部损伤程度增加，最终导致沉积物发生破坏，这一过程可以看作是沉积物内部损伤产生和逐渐发展的过程。由图 1 可见，由本文模型计算出的理论曲线能较好地反映含水合物砂土从屈服到软化的整个应力 - 应变过程，变形初期呈现弹性变形；随着应变的增大，呈现硬化屈服，达到应变峰值后变形为软化，且理论曲线与试验曲线吻合较好，显示了本文模型的合理性，具有较高的实用价值。

6 结 论

本文通过在线弹性本构模型的基础上考虑损伤的演化规律，建立了含天然气水合物沉积物的非线性本构模型，主要得出如下结论：

- (1) 基于细观力学的混合律理论建立了等效弹性模量与水合物含量之间的关系，水合物含量越高，相应的等效弹性模量也越大，沉积物强度越大。
- (2) 由本模型计算所得曲线与试验曲线对比，吻合较好，即本模型可以较好地反映含天然气水合物沉积物应力 - 应变曲线的变化过程。
- (3) 本模型只需要获得峰值应力和应变值，不需要获得峰后情况，即可得到应力 - 应变曲线的全过程，且参数少，便于实际应用。
- (4) 目前在含天然气水合物沉积物本构模型方面的研究还很少，本模型为今后进一步的研究提供了新的思路。

参考文献(References):

- [1] KVENVOLDEN K A. Gas hydrate-geological perspective and global change[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(2): 173 - 187.
- [2] 刘 峰, 吴时国, 孙运宝. 南海北部陆坡水合物分解引起海底不稳定的定量分析[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(4): 946 - 953. (LIU Feng, WU Shiguo, SUN Yunbao. A quantitative analysis for submarine slope instability of Northern South China Sea due to gas hydrate dissociation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(4): 946 - 953. (in Chinese))
- [3] PARAMESWARAN V R, PARADIS M, HANDA Y P. Strength of frozen sand containing tetrahydrofuran hydrate[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26(3): 479 - 483.
- [4] 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]// *Proceeding of the 5th International Conference*

- on Gas Hydrate. [S.I.]: [s.n.], 2005: 674 - 680.
- [5] WINTERS W J, WAITE W F, MASON D H, et al. Methane gas hydrate effect on sediments acoustic and strength properties[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56(1/2/3): 127 - 135.
- [6] WU L Y, JOCELYN L H, GROZIC P E. Laboratory analysis of carbon dioxide hydrate-bearing sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(4): 547 - 550.
- [7] 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, doi: 10.1029/2006JB004484.
- [8] MIYAZAKI K, MASUI A, TENMA N, et al. Study on mechanical behavior for methane hydrate sediment based on constant strain rate test and unloading-reloading test under triaxial compression[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2010, 20(1): 61 - 67.
- [9] 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): 3 069 - 3 074.(ZHANG Xuhui, WANG Shuyun, LI Qingping, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3 069 - 3 074.(in Chinese))
- [10] 苗天德, 魏雪霞, 张长庆. 冻土蠕变过程的微结构损伤理论[J]. *中国科学: B辑*, 1995, 25(3): 309 - 317.(MIAO Tiande, WEI Xuexia, ZHANG Changqing. Microstructure damage theory for the creep process of frozen soil[J]. *Science in China: Series B*, 1995, 25(3): 309 - 317.(in Chinese))
- [11] 何平, 程国栋, 朱元林. 冻土黏弹塑损伤耦合本构理论[J]. *中国科学: D辑*, 1999, 29(增1): 34 - 39.(HE Ping, CHENG Guodong, ZHU Yuanlin. Damage and viscoelastic-plastic coupling constitutive theory[J]. *Science in China: Series D*, 1999, 29(Supp.1): 34 - 39.(in Chinese))
- [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 Jianguo, WANG Hui, ZHU Zhiwu, et al. Investigation of the constitutive model of frozen soil based on mesomechanics[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(10): 847 - 851.(in Chinese))
- [13] 宋海斌, 松林修, 吴能友, 等. 海洋天然气水合物的地球物理研究(I): 岩石物性[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(2): 118 - 126.(SONG Haibin, MATSUBAYASHI O, WU Nengyou, et al. Geophysical researches on marine gas hydrate(I): physical properties[J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(2): 118 - 126.(in Chinese))
- [14] 李红星, 陶春辉, 周建平, 等. 非胶结含水合物沉积物修正等效介质速度模型及其地震波场特征研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(11): 8 083 - 8 093.(LI Hongxing, TAO Chunhui, ZHOU Jianping, et al. Modified effective medium modeling and seismic wave field in un-cemented marine sediments with hydrates[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(11): 8 083 - 8 093.(in Chinese))
- [15] 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, 23(1): 70 - 76.(NING Jianguo, ZHU Zhiwu. Constitutive model of frozen soil with damage and numerical simulation of the coupled problem[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 23(1): 70 - 76.(in Chinese))
- [16] 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.(WU Zhiwu, NING Jianguo, MA Wei. Study of constitutive model of frozen soil and hydro-thermo-mechanical coupled numerical simulation[J]. *Scientia Sinica: Physics, Mechanics and Astronautics*, 2010, 40(6): 758 - 772.(in Chinese))
- [17] 温智, 盛煜, 马巍, 等. 多年冻土区铁路保温路基变形特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1 670 - 1 677.(WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Study on deformation characters of railway insulated embankment in permafrost regions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1 670 - 1 677.(in Chinese))
- [18] 霍明, 汪双杰, 章金钊, 等. 含水率和温度对高含冰量冻土力学性质的影响[J]. *水利学报*, 2010, 41(10): 1 165 - 1 172.(HUO Ming, WANG Shuangjie, ZHANG Jinzhao, et al. Experimental study on influences of water content and temperature on mechanical properties of ice-rich frozen soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(10): 1 165 - 1 172.(in Chinese))
- [19] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2): 233 - 245.
- [20] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18: 293 - 297.
- [21] 吴政. 基于损伤的混凝土拉压全过程本构模型研究[J]. *水利水电技术*, 1995, (11): 58 - 63.(WU Zheng. Investigation of concrete tensile and compressive constitutive model based on damage mechanics[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1995, (11): 58 - 63.(in Chinese))
- [22] 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 Wengui, FANG Zulie, TANG Xuejun. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6): 628 - 633.(in Chinese))
- [23] 杨明辉, 赵明华, 曹文贵. 岩石损伤软化统计本构模型参数的确定方法[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 345 - 349.(YANG Minghui, ZHAO Minghua, CAO Wengui. Method for determining the parameters of statistical damage softening constitutive model for rock[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 345 - 349.(in Chinese))
- [24] HUANG J W, BELLEFLEUR G, MILKEREIT B. Seismic modeling of multidimensional heterogeneity scales of Mallik gas hydrate reservoirs[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: B07306, doi: 10.1029/2008JB006172.