

含水合物砂土力学特性及本构模型^{*}

颜荣涛¹ 李扬¹ 杨德欢¹ 韦昌富² 陈学军¹

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 岩土力学与工程国家重点实验室 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 天然气水合物(以下简称水合物)的不当开发可能会带来一系列的地质灾害和环境问题,因此,开展含天然气水合物地层开采过程中的安全稳定性评估显得尤为重要,而建立能有效描述含水合物沉积物的力学行为的本构模型是安全稳定性分析的核心前提。在分析含CO₂水合物砂土的三轴力学特性的基础上,把含水合物沉积物视为水合物和土颗粒骨架组成的复合胶结性材料,参考胶结土体的建模思路,引入附加内变量描述水合物对土体的胶结影响,建立了含水合物砂土的屈服函数和非关联流动法则,建立了含水合物砂土的本构模型。通过模型验证及分析,模型能较好地模拟不同围压下和不同水合物含量下含水合物砂土的应力应变曲线,反映含水合物砂土的力学特性。

关键词: 含天然气水合物砂土; 力学特性; 本构模型

中图分类号: X43

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)04-0923-08

Mechanical Properties and Constitutive Model for Hydrate-bearing Sand

Yan Rongtao¹, Li Yang¹, Yang Dehuan¹, Wei Changfu², Chen Xuejun¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, P.R. China;

2. State Key Laboratory of Aeromechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P.R. China)

Abstract: A series of geological disasters and environmental problems may occur during gas hydrate exploitation. So it is crucial to evaluate the stability of gas hydrate-bearing sediment. In the whole evaluation, developing an effective constitutive model is a key step. Based on the mechanical characteristics of CO₂ hydrate-bearing sand performed by author previously, a constitutive model was developed referring to the approach of developing a constitutive model for cement soils. In the proposed model, hydrate-bearing sediment was considered analogous to the bonding soil consisting of hydrate and soil skeleton. In addition, additional internal variables were employed to describe the bonding properties of hydrate to soil. Finally, the stress-strain relationship curves of CO₂ hydrate-bearing sand were used to verify the proposed constitutive model. It is shown that the proposed model can describe the stress-strain behavior of CO₂ hydrate-bearing sediments primely, which demonstrates the validity and reasonability of this model.

Keywords: gas hydrate-bearing sediment; mechanical characteristic; constitutive model

* 收稿日期: 2016-11-04(修改稿)

作者简介: 颜荣涛(1984-) 男, 湖北仙桃人, 博士, 副教授, 主要从事天然气水合物开采过程中关键岩土工程问题方面的研究工作和土力学教学工作。E-mail: yrt301@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(11562007, 51309055, 51108110)

0 引言

天然气水合物是一种笼形包络物,由水和气体(主要以甲烷气体为主)在高压和低温的条件下形成的似冰状的结晶化合物,广泛赋存于海洋大陆架及永久冻土区。由于其蕴藏有丰富的甲烷气体,被视为一种潜在的替代性能源^[1]。目前天然气水合物的开采主要有加热、降压、注入抑制剂等方法,这些方法主要通过分解水合物后抽取天然气从而达到开采目的^[2]。然而,水合物分解后会弱化土体强度,可能诱发海底滑坡等地质灾害,同时,地质滑坡带来的后继性的水合物分解会释放大量的甲烷气体,带来灾难性的温室效应^[3-5]。因此,为了安全顺利地开采天然气水合物,必须深刻认识含水合物沉积物的力学特性并建立能有效描述含水合物沉积物力学特征的本构模型,以便模拟分析水合物开采方案的可行性并优化开采方案。

经过近十几年的研究,含水合物沉积物的力学特性已被初步揭示^[6-8]。研究表明,水合物于沉积物中形成除了可以提高土体刚度、强度外,还能使土体具有更为明显的应变软化和剪胀效应,这些影响随着水合物含量的增大而越显著。此外,水合物的形成能增大沉积物粘聚力,但对于内摩擦角的影响存在一些争论。Waite 等^[7]认为与沉积物类型有关,如对粗颗粒土,水合物并不会改变内摩擦角,但是对于黏性土,水合物的形成却会减小内摩擦角。然而,针对于黏性土的试验很少,需要进一步的验证。这些力学特性认识对于建立本构模型奠定了一定的基础,但也尚有不足之处。基于此,一些学者考虑到含水合物沉积物固结和变形的率相关特性,建立了含甲烷水合物砂土的柔度力学本构模型,该模型很好地考虑了率相关性和应变软化,但是忽略了体变影响^[9]。另外,一些学者在临界状态理论框架内建立了弹塑性本构模型,此模型能很好地模拟含天然气水合物土体的力学特性,如软化、剪胀等特征,然而预测的应力应变关系曲线并不光滑^[10]。杨期君等^[10]还指出,一些学者为反应化合物的力学影响,在传统的剑桥模型中增加了 2 个硬化参数来描述水合物的胶结效应和剪胀效应,建立含甲烷水合物土的本构模型。相对于上述模型,该模型能描述水合物分解引起的土体变形,但是该模型附加的两个硬化参数难于确定。为此,杨期君等^[10]分别利用修正剑桥模型和弹性损伤模型对土颗粒骨架和水合物的应力-应变关系进行描

述,而后利用体积分数进行组合,从而建立模型。这种处理方式对于水合物含量较少的情况并不适用,因为水合物无法视为连续介质体。此外,Li 等^[11]基于试验结果建立高围压情况下含水合物沉积物的强度准则和应力应变关系模型。通过以上分析可以发现,含水合物沉积物的本构研究还处于起步阶段,距离实际应用还存在一段距离。

根据 Soga 等^[6]和 Waite 等^[7]对含水合物沉积物力学特性的总结和分析,我们发现含水合物沉积物的力学特性类似于胶结土和结构性土^[12-13]。因此,胶结土及结构性土的本构模型的建模思路对含水合物沉积物具有很好的借鉴作用。Gen 等^[14]针对于胶结土和软岩提出了建立本构模型的基本方法。Liu 等^[15]建立了结构性土体在初始压缩过程中结构性的演变规律,提出了描述方程,并建立了结构性土的本构模型^[16]。对于有化学胶结及降解的地质材料,Nova 等^[17]假设了两类内变量,分别受力学加载和化学加载历史的影响,在此基础上推导了本构框架。

由于目前有关于含水合物沉积物的力学特性的试验数据较少,可供于建模的试验数据更是难于获得。在此背景下,本文将重新分析以前针对于含 CO₂水合物砂土的三轴试验数据^[18],在此基础上,借鉴胶结土体的建模思路,引入描述水合物胶结作用的附加内变量,提出了含水合物砂土的屈服函数,并建立考虑水合物胶结影响的非关联流动法则,建立含水合物砂土的本构模型。这里需要指出的是,使用 CO₂水合物代替 CH₄水合物进行研究,主要是 CO₂水合物对于土体的力学影响与 CH₄水合物类似,而 CO₂在水中的溶解饱和度高,形成水合物的条件较为简单,并且于土体中的分布状态更为均匀。

1 试验部分

1.1 试验介绍

本实验采用的实验仪器为改造后的高压土三轴仪,仪器介绍在已经被详细介绍,见参考文献[18]。为了快速较好地获得含水合物沉积物试样,选择二氧化碳气体和砂土作为研究对象。选用砂土相对密度为 2.67,风干含水量为 0.7%,最大孔隙比为 1.0,最小孔隙比为 0.57,试样孔隙比控制为 0.8,砂土颗粒 0.075 mm 占 59.49%,0.005~0.075 mm 范围内,占 39.51%,小于 0.005 mm 占 1%。CO₂气体由武汉翔云气体公司提供,纯度为 99.99%。

试样制备过程按照文献 [18] 阐述的非饱和制样法(US法)进行。水合物饱和度采用水合物形成前后气体损失量来进行计算,气体所处状态可以利用气体状态方程进行计算。再利用以上方法制得不同的饱和度的含水合物沉积物进行三轴排水剪切,剪切速率控制为 0.5%/min。

1.2 试验结果及分析

图 1~3 分别为围压为 1 MPa、2 MPa、3 MPa 情况下不同水合物饱和度对应的应力-应变曲线。从图中可以看出,在围压相同的情况下,刚度、强度随着水合物饱和度的增大而变大。在低围压情况下(如 1 MPa),具有较高的水合物含量的试样 ($S_h > 12.6\%$) 出现了应变软化现象,而具有较低水合物含量的试样 ($S_h = 0\%, 6.3\%$) 主要表现为应变硬化现象。此外,对于围压为 2 MPa 和 3 MPa 的情况,试验的所有试样均显示出应变硬化现象。这充分说明了含水合物砂土的剪切过程中应力-应变曲线的形式与水合物含量以及围压存在重要关系。

图 4 为含水合物砂土的偏应力强度与水合物饱和度之间的关系。强度取值原则为应变软化曲线去峰值作为强度值,硬化曲线取 15% 对应的偏应力作为强度值。从图中可以看出,无论处于哪种围压(1 MPa、2 MPa、3 MPa)下,水合物的形成都可以显著提高土体强度。同时,在水合物含量相同的情况下,围压的提高可以增加土体强度。

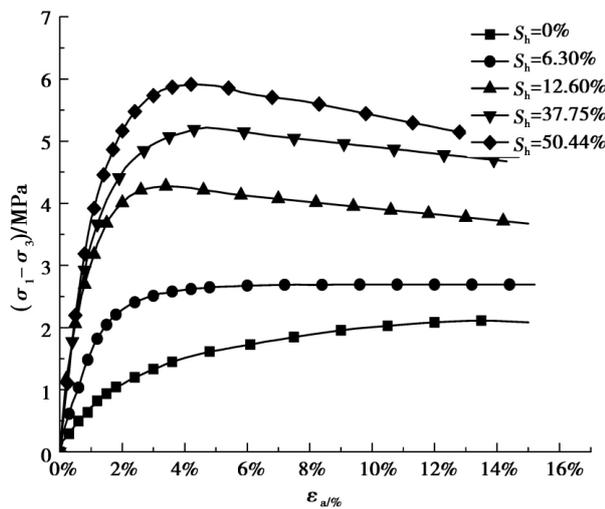


图 1 含水合物砂土的应力应变曲线(围压: 1 MPa)
Fig. 1 Stress-strain relationships of hydrate-bearing sands (confining pressure: 1 MPa)

为了便于本构模型的建立,这里进一步分析水合物对土体的强度影响特性。图 5 给出了不同水合物含量下含水合物砂土的强度线。由图可知,各

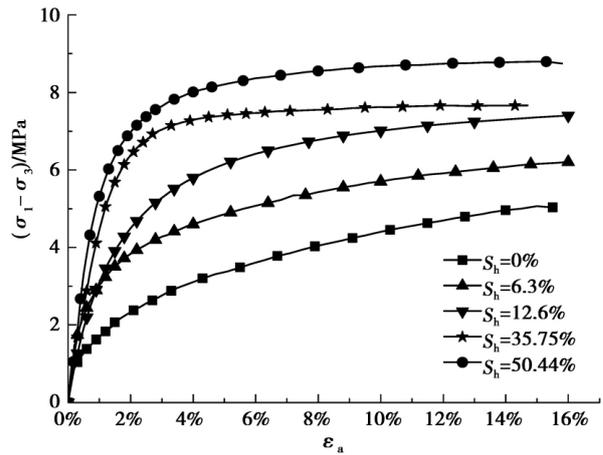


图 2 含水合物砂土的应力应变曲线(围压: 2 MPa)
Fig. 2 Stress-strain relationships of hydrate-bearing sands (confining pressure: 2 MPa)

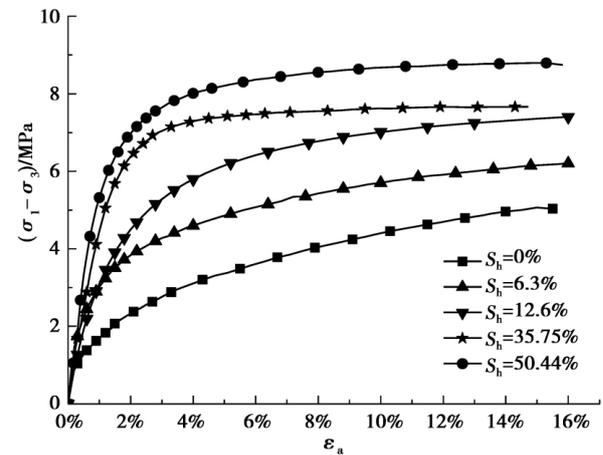


图 3 含水合物砂土的应力应变曲线(围压: 3 MPa)
Fig. 3 Stress-strain relationships of hydrate-bearing sands (confining pressure: 3 MPa)

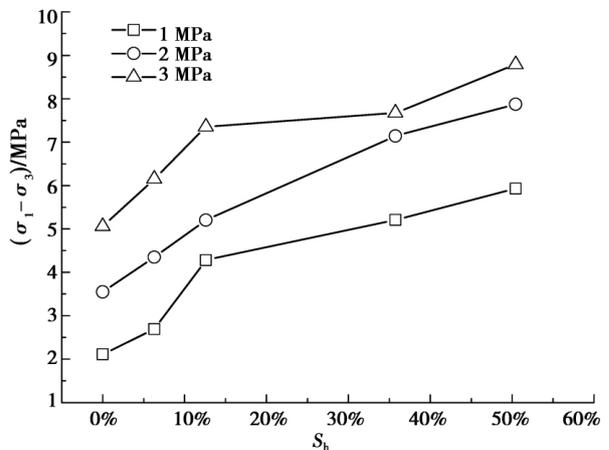


图 4 强度与水合物饱和度的关系
Fig. 4 Relation of strength and hydrate saturation

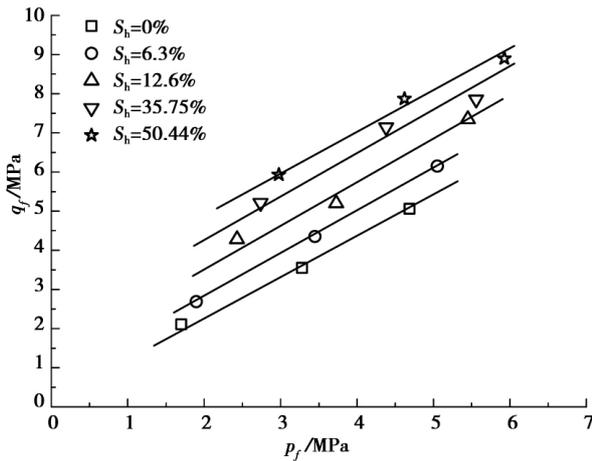


图 5 含水合物砂土的强度线

Fig. 5 Strength lines of hydrate-bearing sand

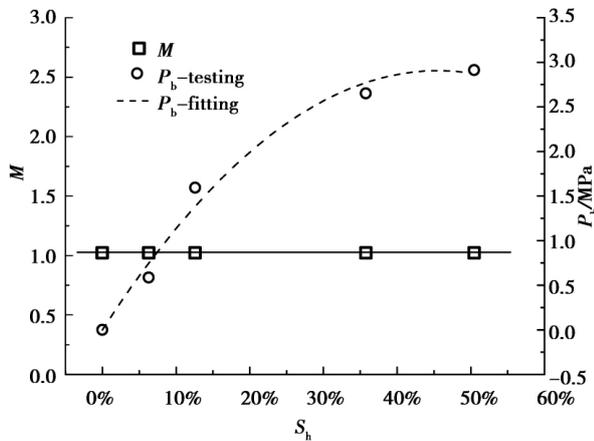


图 6 强度线指标分析

Fig. 6 Analysis of strength line

水合物饱和度对应的强度线处于平行状态,这说明了水合物于砂土中的形成不改变内摩擦角,这一结论与 Masui 等^[19]得出的结论一致;若延长强度线与 q_f 轴相交,各水合物饱和度对应不同的交点,这说明不同水合物饱和度对土体的胶结程度不一。这里,对普通土体的强度线公式进行修正后来分析含水合物土体的强度线,式(1)为修正后的强度线公式:

$$q = M(p + p_i) \tag{1}$$

式中: M 为强度破坏线的斜率; p_i 为强度线延长线与 p_f 轴的交点,表征土体在受到水合物胶结作用后可以承担抗拉的特性。利用式(1)拟合强度线,可以得到不同水合物含量下 M 值和 p_i 值(如图6)。从图中可以看出, M 不随水合物饱和度变化,为 1.023; p_i 随水合物饱和度增到而变大,二者具有很好的二次项关系,相关系数为 0.9867,拟合关系式

为式(2)。

$$p_i = -14(s_h)^2 + 12.76s_h \tag{2}$$

2 模型部分

经过分析含水合物土的力学特性^[6-7],含水合物土的力学特性类似于胶结性土体。因此,把含水合物土体视为一种复合胶结材料,假设水合物和土颗粒具有相同的变形。基于 Nova 等^[17]对于化学胶结土体提出的本构模型的建模结构,本文建立了适用于含水合物砂土的本构模型。本模型遵从小应变假设,因此应变增量可以分解为弹性部分和塑性部分:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \tag{3}$$

2.1 弹性行为

根据弹塑性理论,在屈服面边界内部只发生弹性变形。因此,在当应力状态处于屈服面边界内时,弹性行为可以由下式表示:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa_h}{(1+e)p} dp \tag{4a}$$

$$d\varepsilon_s^e = \frac{dq}{3G} = \frac{2(1+\mu)}{9(1-2\mu)} \frac{\kappa_h}{(1+e)p} dq \tag{4b}$$

式中: e 为孔隙率; m 为泊松比; k_h 为含天然气水合物砂土的回弹模量,由于水合物的加固,含天然气水合物砂土的刚度会提高,这里假设 k_h 为水合物饱和度 S_h 的函数并且给出了相应的表达式:

$$\kappa_h = \kappa_0 \cdot e^{-z \cdot S_h} \tag{5}$$

式中: k_0 为不含天然气水合物砂土(以下称素土)的回弹系数; z 为材料参数,与土体结构类型存在关系; S_h 为水合物饱和度。

2.2 屈服函数

对于含水合物砂土来讲,土骨架屈服应力 p_c 主要与土颗粒的密实程度、颗粒排布有关,反过来也控制了土骨架的变形;此外,水合物于砂土中的形成会对土体产生胶结作用,正如第二部分所分析的,这种作用除了会使砂土的抗压强度得到提高,还会使砂土具备明显的抗拉特性,同时也增大了砂土的屈服应力,扩大屈服面。为了描述这种效应,附加内变量 p_b 、 p_m 将被引入屈服函数用来描述水合物胶结作用在拉、压方向上对屈服应力的影响。虽然附加内变量 p_b 、 p_m 用来描述不同方向上对应的情况,但其都源于水合物的胶结作用。为了简化模型,假设二者存在线性关系。在基础上,本文

提出了含水合物砂土的屈服函数(如式(6)),该屈服函数以传统修正的剑桥模型为基础,参考了 Nova 等^[17]建立化学胶结土的屈服函数的方法,相对于 Nova 等利用的屈服函数形式,该屈服函数形式较为简单,参数较少且易于确定。

$$f = p^* (p^* - p_b - p_c - p_m) + q^2 / M^2 \quad (6)$$

$$p^* = p + p_b \quad (7)$$

$$\eta^* = q / p^* \quad (8)$$

$$p_m = k \cdot p_b \quad (9)$$

式中: p_c 为素土土骨架的屈服应力,在加载之前 p_c 取前期固结压力; p^* 为修正的有效主应力; h^* 为修正后应力比; k 为模型参数,代表水合物胶结作用在压、拉方向上的对屈服应力提高贡献的比值; M 为 p - q 平面上含天然气水合物砂土强度线的斜率,根据以上试验分析及前人试验结论^[6-7],水合物于土体中的形成对于内摩擦角影响不大,即 M 值与水合物饱和度无关,这种处理方式虽然目前存在一些争论,但是对于砂土目前已证实是可行的。图 7 为含天然气水合物砂土的屈服面结构示意图,图中清楚地说明了 p_b 、 p_c 、 p_m 和 M 的物理意义。

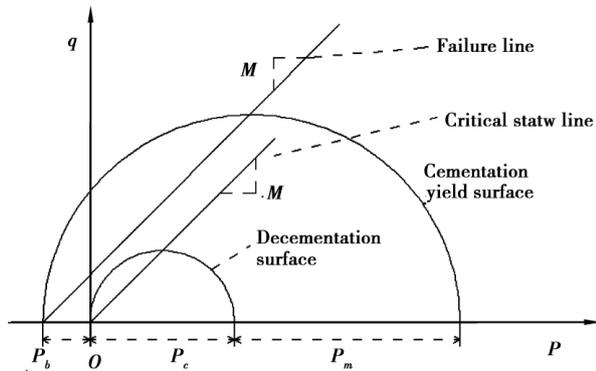


图 7 含天然气水合物砂土的屈服面结构图

Fig. 7 Yield surface of hydrate-bearing sand

从图中可以看出,水合物形成对砂土体的屈服面的形状没有改变,只是扩大了屈服面的大小。在含水合物土加载过程中,应力状态未达到屈服面之前,含水合物砂土发生弹性变形;在应力状态达到屈服面后,含水合物砂土开始发生屈服。在平均主应力 p 的作用下,土颗粒被挤压实,土的屈服应力 p_c 变大;由于剪切的影响,水合物开始发生局部的损伤、土-水合物的胶结相互作用开始发生解胶结作用 p_b 变小,由于是局部效应 p_b 减小值小于 p_c 增长值,因此屈服面在前期整体扩大,发生硬化;在局部损伤解胶结作用达到一定程度后,整体会发生结

构破损垮塌 p_b 急速下降,软化阶段开始,而局部损伤与整体破坏的转化点就对应含水合物土的强度峰值,此时对应的 p_b 值即为强度线公式(1)中用来表征土体在受到水合物胶结作用后可以承担抗拉的特性的 p_t 值。这里必须说明的是,该屈服函数与传统的剑桥模拟具有很好的一致性,当土体中不存在水合物时,屈服面函数(式(6))就转化为修正的剑桥模型屈服面。

2.3 硬化规律

在加载过程中,土颗粒会被挤密和重排,发生硬化;同时一些强度相对较低的水合物颗粒会发生损伤和解胶结作用。为了能描述这些现象,这里给出含水合物砂土体的硬化规律。

$$dp_c = \frac{(1+e)p_c}{\lambda_h - \kappa_h} [d\varepsilon_v^p + M(1 - e^{-\xi \cdot p_b}) d\varepsilon_s^p] \quad (10)$$

相对于传统的剑桥模型中,这里增加了塑形剪切应变对含水合物砂土土骨架屈服应力 p_c 的影响。当然,在水合物含量为零时,式(10)与传统剑桥模型的硬化规律一致。

在式(10)中 λ_h 为含天然气水合物砂土的等向压缩系数。对于给定的土体,其为水合物饱和度 S_h 的函数, Sultan 等^[4]给出了一个经验表达式:

$$\lambda_h = \lambda_0 [1 - (1 - \lambda_1 / \lambda_0) (1 - e^{-\beta \cdot S_h})] \quad (11)$$

式中: λ_h 为无水合物土(素土)的塑性压缩因子; λ_1 为水合物塑性压缩因子,取值为 0.001 47; β 定义了压缩性随水合物饱和度 S_h 的改变速率。

含天然气水合物砂土中的受荷损伤解胶结分为两个阶段,一个阶段是局部损伤;第二阶段整体结构损伤塌陷。第一阶段经常发生在峰值强度之前,一旦峰值强度达到,水合物的整体范围的损伤将开始,当然也就出现了试样强度的大幅度降低,水合物饱和度越高,这种现象就会越显著。对于以上力学特性,本模型采用附加硬化参量 p_b 的硬化法则进行描述。为了简化模型,这里忽略体积塑性应变对附加内变量 p_b 的影响,假设 p_b 只与剪切塑性应变 e_{sp} 存在关系,给出了具体表述形式:

$$dp_b = p_b (-r_b \cdot de_{sp}^p) \quad (12)$$

式中: r_b 是材料模型参数,在峰值强度之前 $r_b = k_1$,在峰值强度之后 $r_b = k_2$ (图 8)。这里没有给出附加内变量 p_m 的硬化规律,原因在于 p_b 、 p_m 具有相应的

线性关系。

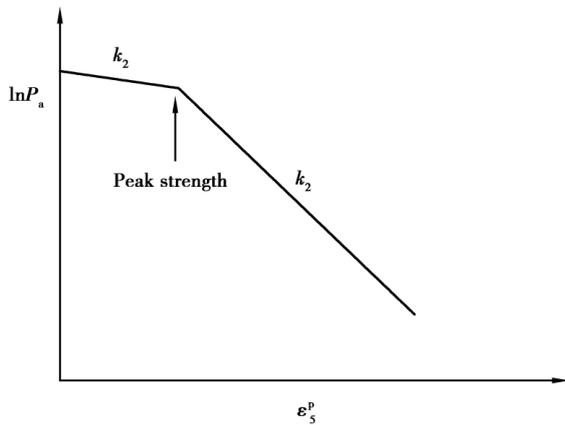


图 8 塑性剪切变形引起附加内变量 p_b 衰减示意图

Fig. 8 Attenuation diagram of additional bonding strength p_b induced by plastic shear strain

从上可知,含水合物砂土在经历塑形剪切应变后,胶结强度会降低。对于未经历过塑形剪切应变的含水合物砂土,其描述胶结效应的附加内变量 p_b 与水合物含量 S_h 存在直接的关系。根据第二部分针对于含 CO_2 水合物砂土的力学特性的分析,这里给出了 p_b 的关系式:

$$p_b = a \cdot (S_h)^2 + b \cdot (S_h) \quad (13)$$

式中: a, b 分别为模型参数,与土体结构类型有关。

2.4 流动法则

流动法则是用来确定塑性应变增量的方向,分为关联流动法则和非关联连流动法则,一般表示为下式:

$$d = d\varepsilon_v^p / d\varepsilon_s^p \quad (14)$$

d 称为剪胀比,表示塑性体积应变增量与塑性剪切应变增量的比值。 d 取决于材料的本身特性和所受的应力状态,也就是说在相同的应力状态的情况下,不同的材料应该展现出不同剪胀比 d 。简单点说,剪胀比函数(或流动法则)应该包括描述材料状态的所有内变量。在本文中,本模型直接把描述胶结作用的附加内变量 p_b 引入剪胀比 d ,采用非相关流动法则来描述含水合物砂土塑形应变增量方向:

$$d = d(\eta^*, M) = Me^{-\xi p_b} - \eta^* \quad (15)$$

式中: x 为模型参数,用来控制水合物胶结参数 p_b 对剪胀比的影响程度。当 p_b 为零时,式(15)退化

成传统修正剑桥的流动法则。

表 1 含 CO_2 水合物砂土的模型参数

Table 1 Model parameters of CO_2 hydrate-bearing sand

模型参数	取值	模型参数	取值
k_0	0.04	x	0.2
l_0	0.05	a	-14.0
b	3.0	b	12.76
z	2.8	k	1.5
M	1.023	r_b	$k_1 = 0.1, k_2 = 3.0$

2.5 模型验证及讨论

为了说明提出模型的有效性,利用第二部分提供的含 CO_2 水合物砂土的应力应变曲线来进行验证。在以上含 CO_2 水合物砂土的三轴试验中,涉及 3 个围压(1 MPa、2 MPa、3 MPa) 下的 5 个水合物饱和度 ($S_h = 0\%, 6.3\%, 12.6\%, 35.75\%, 50.44\%$) 的应力应变曲线。模拟所采用的参数如表 1,参数 M 值通过无水合物砂土在 1 MPa、2 MPa 和 3 MPa 围压下强度值计算而得;其他参数值通过试算 1 MPa 围压下水合物饱和度为 0、6.3% 以及 50.44% 的应力-应变曲线而获得。图 9 展示了不同围压(1 MPa、2 MPa、3 MPa) 和不同水合物饱和度 ($S_h = 0\%, 6.3\%, 12.6\%, 35.75\%, 50.44\%$) 情况下含 CO_2 水合物砂土的应力应变曲线的模型计算理论值与试验测试值的对比情况。通过分析发现,除了水合物饱和度为 35.75% 的情况,其他水合物饱和度对应的应力应变曲线的模型计算值与试验测试值都有很好的一致性。这也说明本模型也很好反映含水合物土体的强度、刚度的增大以及应变软化性。然而,对于水合物饱和度为 35.75% 所对应的应力应变曲线,模型理论计算强度值高于实测值 15% 左右,并且刚度模量理论计算值也高于实测值,这种差距主要是由于式(5)、式(11)和式(13)中的模型参数的取值在满足其他水合物饱和度的精度的情况下,而忽略水合物饱和度为 35.75% 对应的情况。同时,也进一步说了式(5)、式(11)和式(13)给出的关系式需要进一步优化。

由于含 CO_2 水合物砂土并没有提供体积变形的数据,因此本文提出的模型描述体变的能力并没有得到很好的验证。为了说明本模型的体变模拟

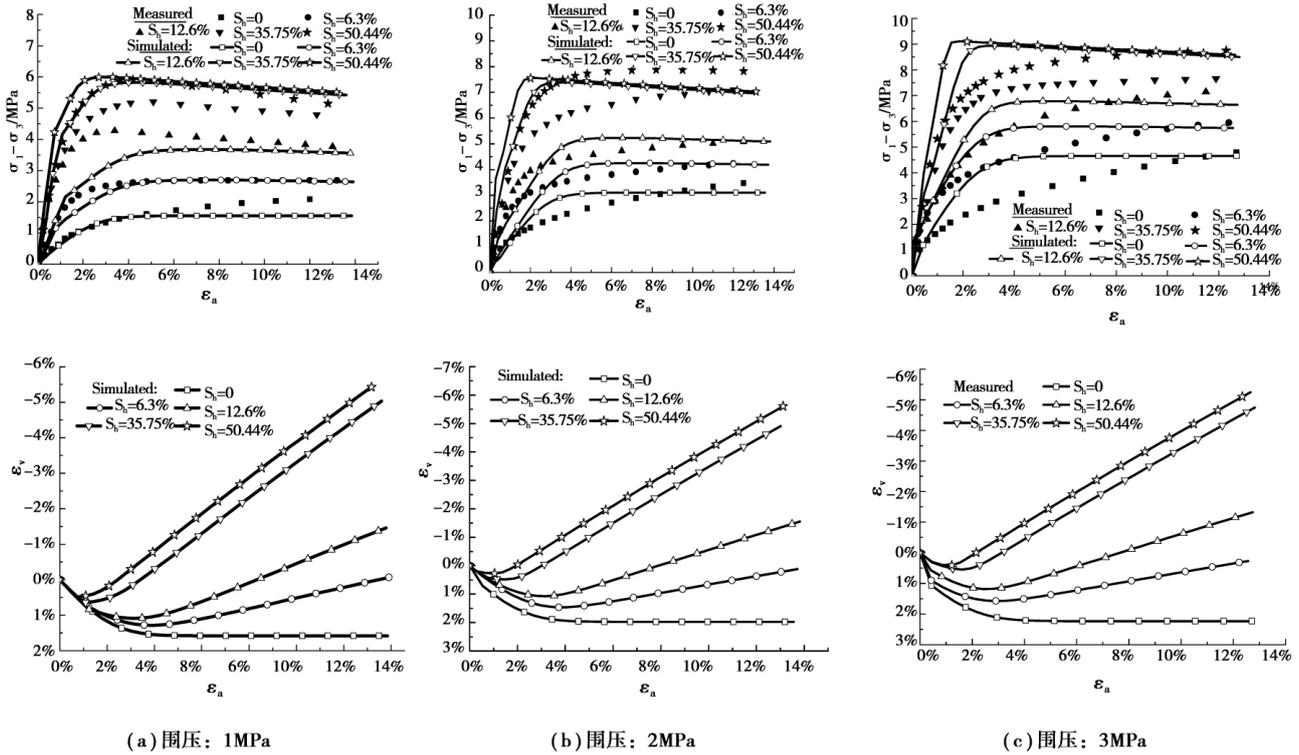


图 9 含二氧化碳水合物砂土的应力应变曲线试验值与理论值对比

Fig. 9 Comparison of simulated curves to measured results for CO₂ hydrate-bearing sands

能力,本文对于控制水合物影响剪胀比函数的参数 ζ 进行了分析(如图 10)。参数 ζ 分析中所采用的参数均取自于表 1,且围压取 1 MPa,水合物饱和度取 6.3% 对应情况。从图中可以发现,随着参数 ζ 的提高,土体强度和刚度并不改变,但剪胀效应趋于显著,说明参数 ζ 能很好地控制含水合物砂土的剪胀比。这也充分说明通过调整参数 ζ ,能很好实现模型对含水合物砂土的剪胀性的模拟。

虽然以上的验证分析结果表明,该模型能很好地反映含水合物砂土的力学特征,但是本模型还是存在一些不足和限制。该模型是在分析沉积物类型为砂土的三轴试验数据的基础上建立的,能否适用于含水合物黏性土需要进一步研究。主要原因在于本模型认为水合物内摩擦角不随水合物而改变,而对于含水合物黏性土的内摩擦角与水合物饱和度的关系目前尚无定论。

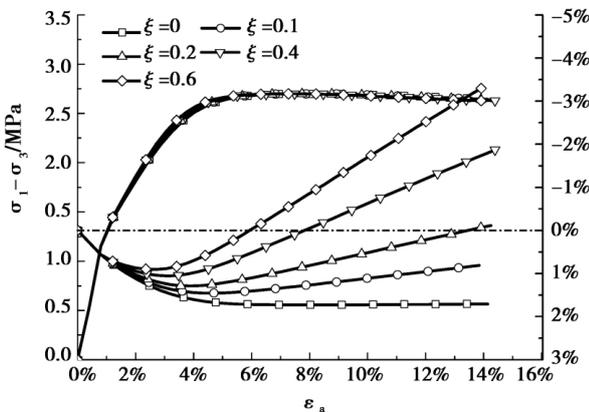


图 10 不同参数 ζ 对应的应力应变曲线

Fig. 10 Stress-strain relationship of stress and strain with different parameter ζ

3 结论及展望

建立有效描述含水合物沉积物行为的本构模型是分析天然气水合物开采活动相关边界值问题的前提。本文在重新分析原有含 CO₂ 水合物砂土的三轴试验的基础上,把含水合物沉积物视为土体骨架和水合物共同组成的复合胶结性材料。基于胶结土的建模思路,引入附加内变量描述水合物对土骨架的胶结影响,建立了含水合物砂土的屈服函数和非关联流动法则,建立含水合物砂土的本构模型。通过模型验证及分析,本文提出的模型能较好地模拟不同围压下和不同水合物含量下含水合物砂土的应力应变曲线,反映含水合物砂土的力学特性。然而,该模型还存在一些不足,如经验关系式

过于简化。此外,该模型基于含水合物砂土的三轴力学特性而建立,加上目前对于含水合物黏性土的力学特性研究较少,该模型是否能适用于含水合物黏性土需要进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Sloan E D , Koh C A. Clathrate hydrates of natural gases (third edition) [M]. CRC Press. Taylor& Francis Group , 2008.
- [2] 郭平,刘士鑫,杜建芬. 天然气水合物气藏开发 [M]. 北京:石油工业出版社,2006.(Guo Ping , Liu Shixin , Du Jianfang. Gas reservoir exploitation for gas hydrate [M]. Beijing: Petroleum Industry Press , 2006. (in Chinese))
- [3] 曾繁彩,蔡秋蓉,陈宏文,等. 天然气水合物的环境效应[J]. 海洋地质, 2003(3) : 1-10. (Zeng Fancai , Cai Qiurong , Chen Hongwen , et al. Environmental effects of natural gas hydrate [J]. Marine Geology , 2003(3) : 1-10.(in Chinese))
- [4] Sultan N , Cochonat P , Foucher J P , et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability [J]. Marine Geology , 2004 , 213(1) : 379-401.
- [5] 颜文涛,陈建文,范德江. 海底滑坡与天然气水合物之间的相互关系[J]. 海洋地质动态, 2006 , 22(12) : 38-40. (Yan Wentao , Chen Jianwen , Fan Dejiang. Relation of marine slide and gas hydrate [J]. Marine Geology Letters , 2006 , 22(12) : 38-40.(in Chinese))
- [6] Soga K , Lee S L , Ng M Y A , et al. Characterisation and engineering properties of methane hydrate soils [J]. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils , 2006 , 40: 2591-2642.
- [7] Waite W F , Santamarina J C , Cortes D D , et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments [J]. Reviews of Geophysics , 2009 , 47(4) : 465-484.
- [8] 刘乐乐,张旭辉,刘昌岭,等. 含水合物沉积物等效弹性模量混合律模型[J]. 地下空间与工程学报, 2015 , 11(S2) : 425-428 , 442.(Liu Lele , Zhang Xuhui , Liu Changling , et al. A Meso-mechanical Mixed-Model for Equivalent Modulus of Elasticity of Hydrate Bearing Sediment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering , 2015 , 11(S2) : 425-428 , 442. (in Chinese))
- [9] Miyazaki K , Aoki K , Tenma N , et al. Application of nonlinear elastic constitutive model to analysis of artificial methane-hydrate-bearing sediment sample [J]. Ninth sope Ocean Mining Symposium , 2011 , 31: 1163-1171.
- [10] 杨期君,赵春风. 含水水合物沉积物弹塑性损伤本构模型探讨 [J]. 岩土力学, 2014 , 35(4) : 991-997. (Yang Qijun , Zhao Chunfeng. A constitutive model coupling elasto - plasticity and damage for methane hydrate-bearing sediments [J]. Rock and Soil Mechanics , 2014 , 35(4) : 991-997. (in Chinese))
- [11] Li Y H , Song Y C , Liu W G , et al. A new strength criterion and constitutive model of gas hydrate-bearing sediments under high confining pressures [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering , 2013 , 109(5) : 45-50.
- [12] Wang Y H , Leung S C. A particulate - scale investigation of cemented sand behavior [J]. Canadian. Geotechnical. Journal , 2008 , 45(1) : 35-43.
- [13] Asghari E , Toll D G , Haeri S M. Triaxial behavior of a cemented gravelly sand [J]. Tehran alluvium , Geotech. Geol , Eng. , 2003 , 21(1) : 1-28.
- [14] Gen A , Nova R. Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks [A]//The 5th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnics of Hard Soil-Soft Rocks [C]. Washington , D. C.: IOS press , 1993: 484-494.
- [15] Liu M D , Carter J P. Modeling the destructuring of soils during virgin compression [J]. Geotechnique , 2000 , 50 (4) : 479-483.
- [16] Liu M D , Carter J P. A structured cam clay model [J]. Candian Geotechnical Journal , 2002 , 39 (6) : 1313-1332.
- [17] Nova R , Castellanza R , Tamagnini C. A constitutive model for bonded geomaterials subject to mechanical and/or chemical degradation [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics , 2003 , 27: 705-732.
- [18] 颜荣涛,韦昌富,魏厚振,等. 水合物形成对含水合物砂土强度影响 [J]. 岩土工程学报, 2012 , 34(7) : 1234-1240. (Yan Rongtao , Wei Changfu , Wei Houzhen , et al. Effect of hydrate formation on mechanical strength of hydrate - bearing sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2012 , 34 (7) : 1234-1240.(in Chinese))
- [19] Masui A , Haneda H , Ogata Y , et al. Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments [A]//Proceedings of the Fifteenth (2005) International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. 2005: 364-369.