



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402853

引用格式:蒋正波,袁庆盟,李宙兴.水合物沉积物弹塑性本构模型的建立及开发[J].科学技术与工程,2025,25(11):4706-4712.

Jiang Zhengbo, Yuan Qingmeng, Li Zhouxing. Establishment and development of elastic-plastic constitutive model of gas hydrate-bearing sediments[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4706-4712.

# 水合物沉积物弹塑性本构模型的建立及开发

蒋正波<sup>1</sup>, 袁庆盟<sup>2,3\*</sup>, 李宙兴<sup>1</sup>

(1. 深圳清华大学研究院海洋工程技术研发中心, 深圳 518000;

2. 广州海洋地质调查局天然气水合物勘查开发国家工程研究中心, 广州 511458;

3. 青岛理工大学理学院, 青岛 266033)

**摘要** 明晰水合物沉积物(gas hydrate-bearing sediments, GHBS)的应力-应变特征,是实现海域天然气水合物安全开采的重要前提。为定量探究水合物的生成对GHBS力学特性的影响,通过室内试验测试了不同围压和不同水合物饱和度的影响,结果表明,水合物主要增大了GHBS的黏聚强度,而内摩擦角大致不变。为表征GHBS复杂的力学特性,通过前期建立的弹塑性本构模型进行预测,对比发现本构模型具有一定的适用性。在此基础上,基于ABAQUS提供的UMAT用户材料子程序接口,利用FORTRAN语言编写了本构模型的计算机程序,植入ABAQUS中,实现了对本构模型的开发。对GHBS的单个单元和三轴试样进行有限元仿真,结果表明开发的本构模型是有效和稳定的。

**关键词** 天然气水合物沉积物; 黏聚强度; 本构模型; 模型开发; 数值模拟

中图分类号 TU432; 文献标志码 A

## Establishment and Development of Elastic-plastic Constitutive Model of Gas Hydrate-bearing Sediments

JIANG Zheng-bo<sup>1</sup>, YUAN Qing-meng<sup>2,3\*</sup>, LI Zhou-xing<sup>1</sup>

(1. Marine Engineering Technology Research and Development Center Research, Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518000, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, National Engineering Research Center for Gas Hydrate

Exploration and Development, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511458, China;

3. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

**[Abstract]** The stress-strain characteristics of gas hydrate-bearing sediments (GHBS) are essential for achieving safe and secure extraction of marine natural gas hydrate. To quantitatively investigate the influence of hydrate formation on the mechanical properties of GHBS, laboratory tests were conducted under different confining pressures and various hydrate saturations, and it was found that hydrate primarily enhanced the cohesive strength of GHBS, while the internal friction angle remained relatively unchanged. To comprehensively describe the intricate mechanical properties of GHBS, the previously established elastic-plastic constitutive model was employed for predictive purposes. A comparative analysis revealed that the constitutive model exhibited a certain level of applicability. Subsequently, a computer program was developed for the constitutive model by leveraging the UMAT user material subroutine interface provided by ABAQUS. The program was written in FORTRAN language and integrated into ABAQUS, facilitating the implementation of the constitutive model. To validate the effectiveness and stability of the developed model, finite element simulations were conducted on single elements as well as triaxial specimens of GHBS. The results of these simulations confirm the efficacy and reliability of the developed model.

**[Keywords]** gas hydrate-bearing sediments; cementation; constitutive model; model development; numerical simulation

天然气水合物是由天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状的结晶物质,天然气水合物沉积

物(gas hydrate bearing sediments, GHBS)是指含天然气水合物的深海沉积土体<sup>[1]</sup>,全球已探明天然气水

收稿日期: 2024-04-19 修订日期: 2024-07-26

基金项目: 广东省重大人才工程项目(2021ZT09H390); 深圳市高层次人才团队项目(KQTD20200820113011026); 深圳市国际合作研究项目(GJHZ20220913142612023); 南山区高层次创新人才团队支持计划(LHTD2021000X); 广州海洋地质调查局局长基金(2023GMGSJZJJ00002)

第一作者: 蒋正波(1984—),男,汉族,河南焦作人,硕士,工程师。研究方向:海洋岩土工程。E-mail:jiangzb@tsinghua-sz.org。

\*通信作者: 袁庆盟(1988—),男,汉族,山东济宁人,博士。研究方向:海洋岩土力学与工程。E-mail:yqm905@126.com。

合物的碳含量约为现有化石能源碳含量的两倍,是最具潜力和商业开发前景的清洁能源之一<sup>[2]</sup>。加拿大、美国、日本和中国等国家已成功实施了试采<sup>[3-4]</sup>,为产业化发展奠定了坚实的基础。然而,由于水合物的稳定赋存条件极为严苛,温度和压力的变化很容易造成分解,如果快速析出的气体没有得到有效释放,GHBS 的强度将迅速减小、超孔隙压力急剧增大,导致海床土体大范围的下沉、旋转和滑移,甚至引起海底滑坡,严重威胁水合物的安全开采。因此,准确的描述 GHBS 的变形特性,明确其工程力学特性,是水合物安全开采的重要前提。

目前对 GHBS 的测试有原位测试、室内试验这两种类型。原位测试方面,Winters 等<sup>[5-6]</sup>对比了美国阿拉斯加北坡、加拿大麦肯泽三角洲、印度东部近海和安达曼群岛水合物赋存区域 GHBS 的物理特性,试验方法包括红外成像、声波测试、热传导、电阻率测试、剪切强度测试等。日本在 2004 年开展了“日本 Tokai-oki 至 Kumano-nada 计划”<sup>[7]</sup>,钻孔深度距海底 250~400 m,勘探发现了“孔隙填充型水合物”,水合物饱和度最大可达 80%,评估结果为“优质水合物储层”<sup>[8]</sup>。中国地质调查局组织了天然气水合物的调查勘探工作,2007 年首次在南海北部神狐海域获取天然气水合物实物样品<sup>[9]</sup>。由于原位取芯成本过高,同时受制于试验技术的局限,目前对 GHBS 的试验研究实际上以室内试验为主。很多学者做出了卓有成效的工作,如 GHBS 的三轴剪切试验<sup>[10-13]</sup>、一维压缩试验<sup>[14]</sup>、相似材料试验<sup>[15]</sup>等。通过对上述现场原位试验和室内合成试样的试验规律进行分析和总结,可以发现,GHBS 特殊的物理力学特性是水合物饱和度、基质材料类型、水合物赋存模式、温压条件、试样尺寸等因素共同作用的结果。

现场和室内的试验研究成果为深入研究 GHBS 的各项力学性质打下了坚实的基础,本构模型研究也随之开展起来。在经典本构模型框架中引入渐进损伤<sup>[16]</sup>、强度退化<sup>[17]</sup>等参量进行拓展,形成了水合物沉积物的非线性弹性模型<sup>[18]</sup>、临界状态模型<sup>[17]</sup>、损伤统计模型<sup>[19-20]</sup>等系列本构模型。本构模型的

研究为解释和预测 GHBS 力学特性提供了理论依据,但目前的研究对水合物填充效应和胶结效应的描述往往过于简化,模型在参数确定上存在困难,并且计算较为复杂,同时,在大型商业软件中的应用并不多见,导致在解决具体工程问题的应用方面有所不足。

首先进行 GHBS 的室内试验,在试验数据的基础上,验证前期建立的 GHBS 弹塑性本构模型的适用性。然后,基于 ABAQUS 提供的 UMAT 用户材料子程序接口,利用 FORTRAN 语言编写本构模型的计算机程序,植入 ABAQUS 中,实现对本构模型的开发。最后,对 GHBS 的三轴试样进行有限元仿真,验证开发模型的有效性和稳定性。

## 1 GHBS 的试验研究

### 1.1 试验材料和试验方案

2017 年 8 月在南海东北部—吕宋海峡共享航次第三航段中获取到了海底表层土,取样地点为 YD2-04 站位(经度 115°16.407'E,纬度 19°57.056'N),该处水深 1 077 m,土性为软黏土。

中国已开展的 2 轮试采均在南海北部神狐海域,该区域的土性为泥质粉砂。根据该海域水合物分解后沉积物的粒径和矿物成分分析数据结果<sup>[21]</sup>,自行配制泥质粉砂模拟储层土体,进行室内试验研究,级配曲线见图 1,级配指标见表 1。对比可以看到,配制的泥质粉砂与成矿区储层土体的颗粒级配

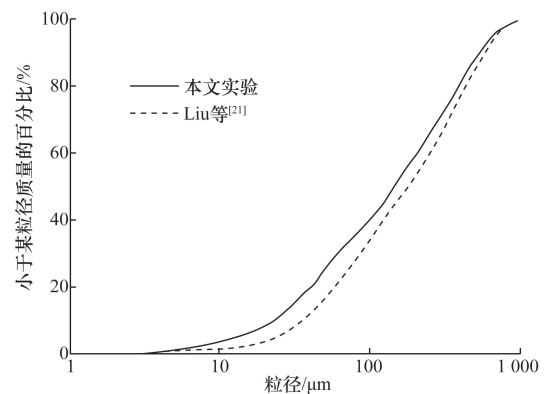


图 1 试验材料级配曲线

Fig. 1 Grading curve of test materials

表 1 级配指标

Table 1 Grade index

试验材料	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{30}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{60}/\mu\text{m}$	$C_u = d_{60}/d_{10}$	$C_c = d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$
Liu 等 <sup>[21]</sup>	0.043 0	0.101 2	0.2147 9	0.293 2	6.819 8	0.812 3
泥质粉砂	0.029 9	0.076 8	0.173 7	0.236 0	7.882 4	0.834 9

注:  $d_{10}$  为小于该粒径的土粒质量占土总质量 10% 时的粒径;  $d_{30}$  为指小于该粒径的土粒质量占土总质量 30% 时的粒径;  $d_{50}$  为小于该粒径的土粒质量占土总质量 50% 时的粒径,也称为中值粒径;  $d_{60}$  为小于该粒径的土粒质量占土总质量 60% 时的粒径,也称为控制粒径或限定粒径;  $C_u$  为不均匀系数;  $C_c$  为曲率系数。

整体较为接近,基本符合南海成矿区储层土体的级配特性。除表 1 中列出指标外,所配制的泥质粉砂比重为 2.659 0,试验制备的初始孔隙比为 1.069 8。

试验设备采用高压低温水合物静三轴测试系统 (environmental triaxial automated system, ETAS), 利用含水率控制水合物的生成含量。取有效围压、水合物饱和度 2 个变量,进行 12 组固结排水试验,见表 2。有效围压  $\sigma'_3$  分别为 1、3、5 MPa,每个有效围压下分别设置 4 个不同水合物饱和度  $S_h$  (0%、20%、30%),如表 2 所示。

表 2 试验方案表  
Table 2 Test plan

编号	水合物饱和度 $S_h$ /%	有效围压 $\sigma'_3$ /MPa
GHBS01	0, 10, 20, 30	1
GHBS03	0, 10, 20, 30	3
GHBS05	0, 10, 20, 30	5

### 1.2 试验结果

图 2(a) 所示的应力-应变曲线表明了 GHBS 样品在不同  $S_h$  水平和  $\sigma'_3$  的力学行为。曲线表明,随着  $S_h$  的增加, GHBS 的强度  $q$  逐渐增加。

此外,应力-应变曲线的形状随  $S_h$  而变化。不含任何水合物的  $S_h = 0$  的样品曲线显示了应变硬化行为;类似地,对于  $S_h = 10\%$ , 曲线表现出应变硬化行为,并显示出双曲线形状,这意味着曲线的斜率在初始加载后逐渐减小,直到达到稳定状态;当  $S_h$  增加到 20% 时,应力-应变曲线在应变  $\varepsilon_a = 8\%$  处达到峰值,但峰值前后强度无明显变化,  $\varepsilon_a > 8\%$  后,样品经历轻微软化,表现出强度的轻微下降;最后,当  $S_h = 30\%$  时,软化现象变得更加明显,曲线呈现出驼峰状。这表明,在较低有效围压下,随着  $S_h$  的增大, GHBS 将出现明显的软化现象。

图 2(b)、图 2(c) 分别为  $\sigma'_3 = 3$  MPa 和  $\sigma'_3 = 5$  MPa 下的应力应变曲线,可以看到,与较低有效围压下的应力应变行为不同,稍高有效围压下, GHBS 全部表现为应变硬化,且强度均随  $S_h$  增大而增大。除此之外,观察发现, GHBS 的初始刚度总体上也表现出随  $S_h$  增大而增大的特性。与图 2(a) 相对比,有效围压的增加会显著影响应力应变曲线的形态,反映出有效围压对强度的贡献。这是因为,水合物分布于 GHBS 土骨架中,既可以填充土颗粒间的孔隙,又起到了胶结土颗粒的作用,即改变了 GHBS 的整体结构特性。在较低围压下,这种结构特征难以保持稳定,由此出现软化现象;而在高围压下,土骨架的整体性增强,体现为应变硬化特性。

以轴向应变  $\varepsilon_a = 15\%$  对应的数值为破坏强度

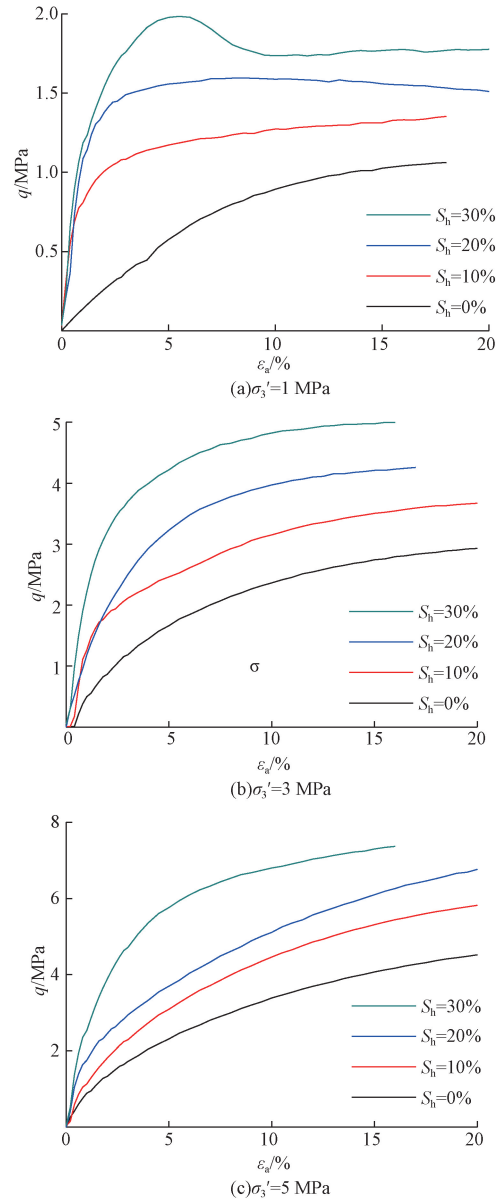


图 2 偏应力-轴向应变曲线  
Fig. 2 Deviatoric stress-strain curve

值,根据图 2 所示的 GHBS 应力应变关系,分别绘制对应的莫尔圆,可得到黏聚强度  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。

绘制  $c$ 、 $\varphi$  与  $S_h$  的关系曲线如图 3 所示,可以看到,  $c$  和  $S_h$  满足较好的指数关系,而  $\varphi$  基本与  $S_h$  无关,表达式为

$$\begin{cases} c = 0.390 3 S_h^{0.333 9} \\ \varphi = 18.30^\circ \end{cases} \quad (1)$$

式(1)为以 M-C (Mohr-Coulomb) 准则描述的 GHBS 破坏准则。可以看出,抗剪强度随着  $S_h$  和  $\sigma'_3$  增大而增大,结合对应力应变曲线的分析可知,其机理是水合物为 GHBS 提供了附加强度,从而提高了黏聚力,但对颗粒之间摩擦特性影响不大,因此内摩擦角基本不变。

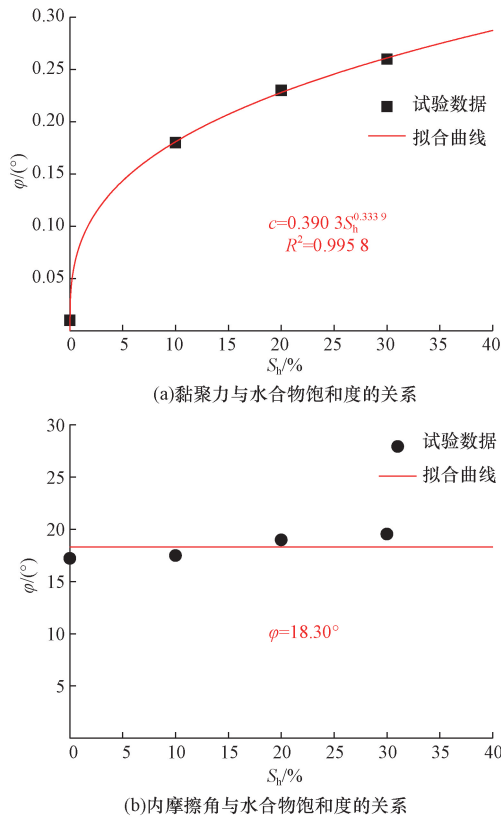


图3 抗剪强度与水合物饱和度的关系曲线

Fig. 3 Curve between shear strength and hydrate saturation

## 2 本构模型的建立和开发

### 2.1 本构模型介绍

文献[22]通过引入压硬性参量描述水合物填充和胶结双重作用对GHBS压硬性的影响,引入黏聚强度修正屈服函数,利用状态参数调整剪胀方程,反映GHBS剪胀、软化等特性对密实度的依赖性,对CSUH模型进行拓展,从而建立能够描述GHBS强度、刚度、剪胀与软化等特性的弹塑性本构模型。

屈服函数表示为

$$f = \ln\left(\frac{p + p_l}{p_0 + p_r}\right) + \ln\left(\frac{p + p_r}{p + p_l} + \frac{\eta^2}{M^2}\right) - \frac{H}{ec_p} = 0 \quad (2)$$

式(2)中: $p$ 为平均主应力; $p_0$ 为 $p$ 的初始平均主应力; $p_l$ 和 $p_r$ 为引入的黏聚强度和压硬性参量; $\eta$ 为应力比 $\eta = q/(p + p_l)$ ; $M$ 为临界状态应力比; $H$ 为统一

硬化参数; $e$ 为当前孔隙比; $c_p = (\lambda - \kappa)/(1 + e)$ , $\lambda$ 和 $\kappa$ 为压缩曲线和回弹曲线的斜率。

统一硬化参数 $H$ 的表达式为

$$H = \int \frac{1}{R(\eta)} d\varepsilon_v^p = \int \frac{M_i^4 - \eta^4}{M^4 - \eta^4} d\varepsilon_v^p \quad (3)$$

$$M_i = M \exp(m\xi) \quad (4)$$

式中: $R(\eta)$ 为比例系数; $\varepsilon_v^p$ 为塑形体积应变; $m$ 为剪胀性参数; $\xi$ 为状态参数,其详细构造过程见文献[22]。

采用关联流动法则,推导得到刚度矩阵,进行程序编制后即可迭代计算获取预测应力应变曲线。

选取有效围压 $\sigma_3' = 3$  MPa时不同 $S_h$ 以及 $S_h = 20\%$ 时不同 $\sigma_3'$ 的GHBS应力应变数据进行对比,模型参数见表3。

图4所示为不同 $S_h$ 的模型预测曲线与本文GHBS试验数据对比图,通过对比可以看到,本文构建的弹塑性本构模型与试验数据有着较好的一致性。在 $S_h$ 较小时,抗剪强度持续增加, $S_h$ 较大时,在 $\varepsilon_a = 15\%$ 时基本保持稳定。模型能够描述GHBS不同 $S_h$ 情况下的硬化特性。

图5所示为相同 $S_h$ 条件下不同 $\sigma_3'$ 时的对比图,对比可知,模型预测能够描述GHBS的强度和刚度随 $\sigma_3'$ 增大而增大的特性。在 $\varepsilon_a$ 较小时,应力应变曲线的斜率较大,强度增幅较快,随着的 $\varepsilon_a$ 增加,强度依然在增大,但增速降低,这是由于GHBS的黏聚强度发生动态变化所引起的。

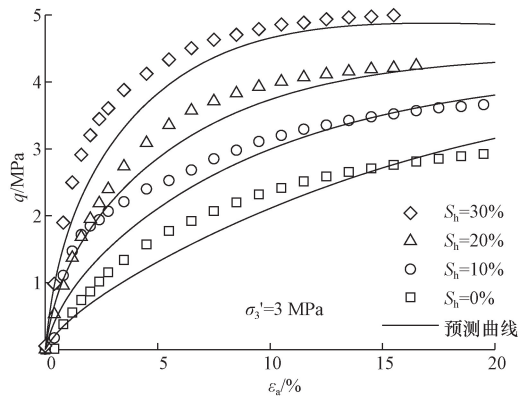


图4 不同 $S_h$ 下预测曲线与试验数据对比图

Fig. 4 Comparison between predicted curves and experimental data under different  $S_h$  values

表3 试验参数表

Table 3 Test parameters

压缩曲线 斜率 $\lambda$	回弹曲线 斜率 $\kappa$	泊松比 $\mu$	临界状态 应力比 $M$	1 kPa 时 孔隙比 $N_0$	孔隙比 比例系数 $k_N$	压硬性 参量参数 $\alpha_1/\text{MPa}$	压硬性 参量系数 $\beta_r$	胶结强 度参数 $\alpha_t/\text{MPa}$	胶结强 度系数 $\beta_t$	胶结强 度衰退 速度 $a$	剪胀性 参数 $m$
0.15	0.04	0.3	0.94	3.0	3.64	5.32	0.02	2.35	0.02	0.002	2.42

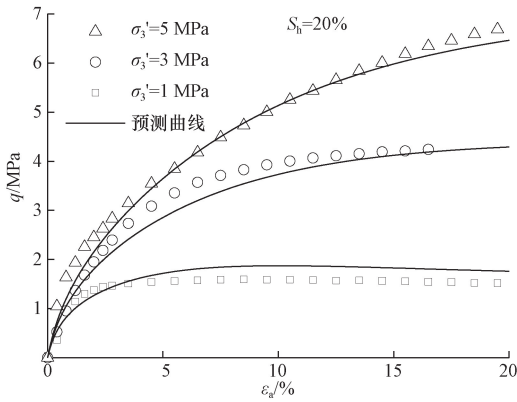


图5 不同  $\sigma_3$  下预测曲线与试验数据对比  
Fig. 5 Different  $\sigma_3$  comparison between the predicted curve and experimental data

### 2.2 模型开发与测试

本构模型数值积分算法主要分为显式积分算法和隐式积分算法<sup>[23]</sup>。显式积分算法相对简单,代码易编写且有较好的稳定性<sup>[24]</sup>。本文中采用显式算法中的向前 Euler 积分算法,在给定了第  $n$  步的一组总应变、塑性应变、等效塑性应变即  $(\varepsilon_n, \varepsilon_n^p, q_n)$ , 以及时间增量  $\Delta t$  内的应变增量  $\Delta \varepsilon = \Delta t \dot{\varepsilon}$ , 得到第  $n+1$  步的  $(\varepsilon_{n+1}, \varepsilon_{n+1}^p, q_{n+1})$ 。向前 Euler 积分算法<sup>[25]</sup>可表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_{n+1} = \varepsilon_n + \Delta \varepsilon \\ \varepsilon_{n+1}^p = \varepsilon_n^p + \Delta \lambda_n r_n \\ q_{n+1} = q_n + \Delta \lambda_n h_n \\ \sigma_{n+1} = D(\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_{n+1}^p) = \sigma_n + D^{ep} \Delta \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:  $\lambda$  为塑性参数;  $r(\sigma, q)$  为塑性流动方向, 一般为  $r(\sigma, q) = \partial g / \partial \sigma$ ;  $q$  为硬化参数;  $g$  为塑性势函数;  $h$  为子步硬化参数增量;  $D$  为四阶弹性刚度矩阵,  $D^{ep}$  为刚度矩阵。

利用 FORTRAN 语言编写本构模型的计算机程序, 以 UMAT 用户材料子程序形式植入 ABAQUS 中。基于表 3 中的参数进行单个单元验证, 得到广义剪应力云图如图 6 所示。解析解和 umat 数值解的对比如图 7 所示。对比可知, 在 20% 应变处, 利用 UMAT 计算得到的  $q$  数值为 4 157, Mises 应力数值为 4 140, 根据本构模型刚度矩阵计算得到的剪应力解析解为 4 281, UMAT 子程序计算精度达到 97%。

### 2.3 模型验证

为进一步验证植入 ABAQUS 中 UMAT 子程序的适用性, 采用三轴剪切试验进行模拟, 与 Hyodo 等<sup>[26]</sup>的试验数据进行对比验证。

建立直径 50 mm、高度 100 mm 的三轴试样有限元计算模型, 网格剖分图见图 8。模型底部约束法向位移, 模型侧面施加围压, 顶面施加 15% 高度的位

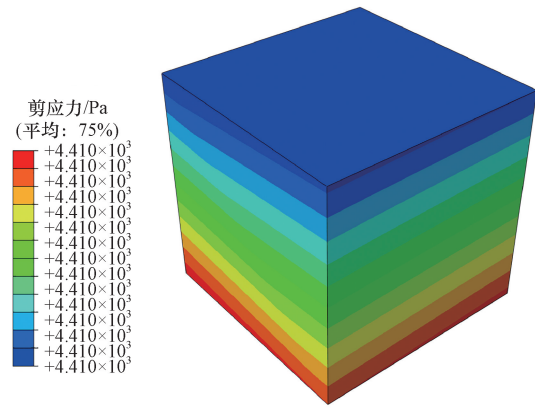


图6 广义剪应力数值解

Fig. 6 Numerical solution of generalized shear stress

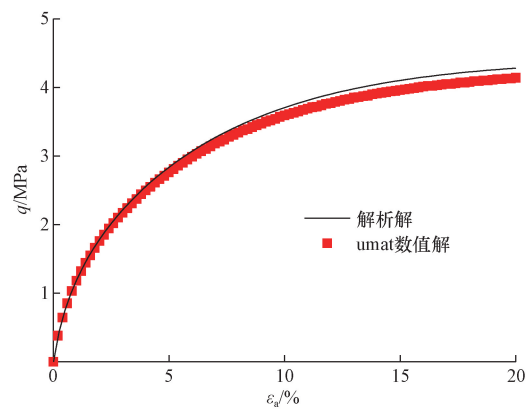


图7 应力-应变数值解与解析解比较

Fig. 7 Comparison between numerical and analytical solutions for stress-strain analysis

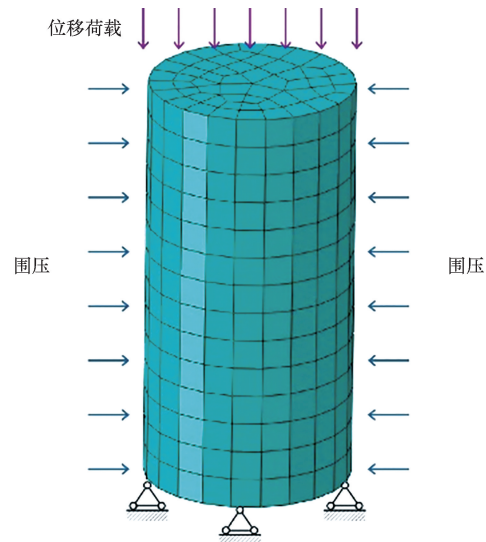


图8 三轴试样有限元计算模型

Fig. 8 Finite element calculation model for triaxial specimens

移(15 mm)作为位移荷载。计算参数如表 4 所示。

选取自上而下第 2 层截面的中心点, 导出计算结果, 图 9 为计算得到的数值解与 Hyodo 等的试验

表4 Hyodo等<sup>[26]</sup>计算模型参数  
Table 4 Hyodo et al<sup>[26]</sup> calculated model parameters

压缩曲线 斜率 $\lambda$	回弹曲线 斜率 $\kappa$	泊松比 $\mu$	临界状态 应力比 $M$	1kPa时 孔隙比 $N_0$	孔隙比 比例系数 $k_N$	压硬性 参量参数 $\alpha_r/\text{MPa}$	压硬性 参量系数 $\beta_r$	胶结强度 参数 $\alpha_1/\text{MPa}$	胶结强度 度系数 $\beta_1$	胶结强度 衰退速度 $a$	剪胀性 参数 $m$
0.135	0.01	0.3	1.25	2.90	1.79	45.38	0.246 6	0.10	0	0.063 7	3.17

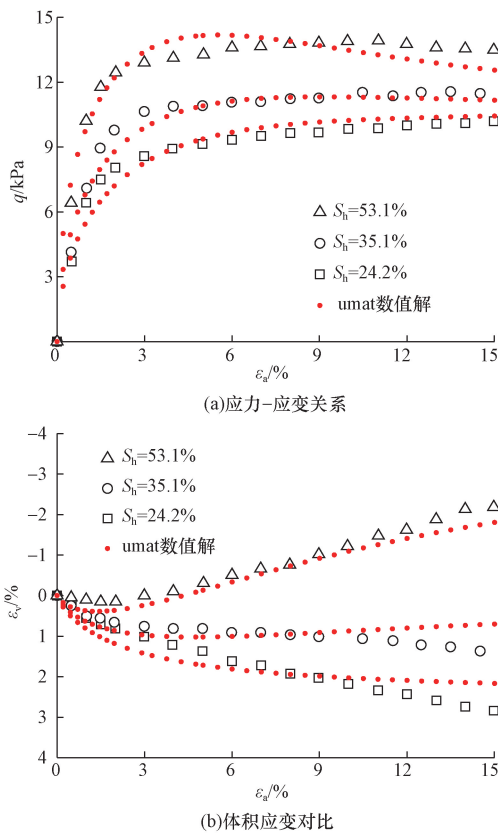


图9 有限元数值解与试验数据对比

Fig. 9 Comparison between finite element numerical solutions and experimental data

数据对比。

对比可知,有限元数值解与试验数据有着较好的对比性,能够合理反映不同  $S_h$  条件下 GHBS 的应力与应变之间的关系,可以描述剪切过程中的体积变化规律。此外,观察曲线形态可知,较大  $S_h$  条件下, GHBS 更容易出现软化和剪胀现象。结合式(1)可知,  $S_h$  越大, GHBS 黏聚强度也越大,即 GHBS 的结构特性越强,当围压相对较小时,更容易出现渐进线结构破坏,从而出现软化现象,伴随着体积的膨胀。

通过数据对比可知,UMAT 计算结果与模型理论解和室内试验数据有着比较好的一致性,说明本文对模型的开发和植入过程是正确的,具有较好的

适用性。计算过程中程序运行稳定,表明所采用和实现的应力更新算法是有效和比较强健的。

### 3 结论

(1)开展了 12 组 GHBS 的室内试验,试验结果表明:随着水合物饱和度的增加, GHBS 的应变软化特性趋于明显;水合物的主要贡献在于增大了黏聚力,但内摩擦角基本不变。

(2)利用前期建立的弹塑性本构模型进行预测和对比,结果表明:本构模型具有一定的适用性,能够描述 GHBS 特殊的力学性质。

(3)采用向前 Euler 积分算法,编写弹塑性本构模型的计算机程序,植入到 ABAQUS 中,单个单元和三轴试样的有限元计算测试表明:建立与开发的弹塑性本构模型编写正确,计算精度较高。

### 参考文献

- [1] Davidson D, Desando M, Gough S, et al. A clathrate hydrate of carbon monoxide[J]. Nature, 1987, 328(6129): 418-419.
- [2] Max M. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments [M]. Hague: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [3] Li J F, Ye J L, Qin X W, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea [J]. China Geology, 2018, 1(1): 5-16.
- [4] 叶建良, 秦绪文, 谢文卫, 等. 中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J]. 中国地质, 2020, 47(3): 557-568. Ye Jianliang, Qin Xuwen, Xie Wenwei, et al. The main progress of the second trial production of natural gas hydrates in the South China Sea[J]. Chinese Geology, 2020, 47(3): 557-568.
- [5] Winters W J, Wilcox-Cline R W, Long P, et al. Comparison of the physical and geotechnical properties of gas-hydrate-bearing sediments from offshore India and other gas-hydrate-reservoir systems [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 139-167.
- [6] Winters W J, Pecher I, Waite W F, et al. Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate[J]. American Mineralogist, 2004, 89(8): 1221-1227.
- [7] Nagakubo S. Pictorial 1: METI exploratory test wells "Tokai-oki to Kumano-nada" conducted in FY2003 [J]. Journal of Geography (Chigaku Zasshi), 2009, 118(5): 19.
- [8] Fujii T, Saeki T, Kobayashi T, et al. Resource assessment of

- methane hydrate in the Eastern Nankai Trough, Japan Tokai-oki Well B Kumano-nada[J]. *Agua Fall Meeting Abstracts*, 2008, 118(5): 814-834.
- [9] Kong L, Zhang Z F, Yuan Q M, et al. Multi-factor sensitivity analysis on the stability of submarine hydrate-bearing slope[J]. *China Geology*, 2018, 1(3): 367-373.
- [10] Miyazaki K, Tenma N, Aoki K, et al. A nonlinear elastic model for triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment samples [J]. *Energies*, 2012, 5(10): 4057-4075.
- [11] Hyodo M, Yoneda J, Yoshimoto N, et al. Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed [J]. *Soils and Foundations*, 2013, 53(2): 299-314.
- [12] 刘莉, 马慧龙, 蒋平, 等. 含水合物细粒土的强度和变形特性[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(22): 9496-9505.
- Liu Li, Ma Huilong, Jiang Ping, et al. Strength and deformation properties of hydrate-bearing fine-grained soil[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(22): 9496-9505.
- [13] Wu P, Li Y H, Liu W G, et al. Cementation failure behavior of consolidated gas hydrate-bearing sand[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2020, 125(1): e2019JB018623.
- [14] Kim H S, Cho G C. Experimental study on the compressibility of gas hydrate-bearing sediments [C]//*Proceedings of the 2014 World Congress on Advances in Civil Environmental and Materials Research*. Busan: Republic of Korea, 2014: 24-28.
- [15] Hyodo M, Li Y, Yoneda J, et al. Effects of dissociation on the shear strength and deformation behavior of methane hydrate-bearing sediments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51: 52-62.
- [16] Zhang N, Wang H, Jiang M. A mesoelastic-plastic damage model for hydrate-bearing sediments with various hydrate-growth patterns [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112919.
- [17] Zhao Y, Kong L, Liu L, et al. Mechanical behaviors of natural gas hydrate-bearing clayey-silty sediments: experiments and constitutive modeling[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 294: 116791.
- [18] Dong L, Li Y, Zhang Y, et al. Deformation characteristics of hydrate-bearing sediments[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2024, 23(1): 149-156.
- [19] Li Y, Liu C, Liu L. Damage statistic constitutive model of hydrate-bearing sediments and the determination method of parameters[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1273.
- [20] Wang F, Wang Z, Zhang D, et al. Statistical damage constitutive model based on self-consistent eshelby method for natural gas hydrate sediments [J]. *Energy Science & Engineering*, 2021, 9(11): 2079-2098.
- [21] ]Liu C, Ye Y, Meng Q, et al. The characteristics of gas hydrates recovered from Shenhu Area in the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2012, 307(15): 22-27.
- [22] 袁庆盟, 孔亮, 赵亚鹏. 考虑水合物填充和胶结效应的深海能源土弹塑性本构模型[J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2304-2312.
- Yuan Qingmeng, Kong Liang, Zhao Yapeng. A deep sea energy soil elastoplastic constitutive model considering hydrate filling and cementation effects[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2020, 41(7): 2304-2312.
- [23] 王兴. 砂土非共轴理论的改进及其本构模型研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- Wang Xing. Research on improvement of non-coaxial theory and constitutive model of sand [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.
- [24] 李舰, 蔡国庆, 尹振宇. 适用于弹黏塑性本构模型的修正切面算法[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(2): 253-259.
- Li Jian, Cai Guoqing, Yin Zhenyu. Modified cutting-plane integration scheme for elasto-viscoplastic models[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(2): 253-259.
- [25] 曹伟. 下加载面修正剑桥模型在 ABAQUS 中的二次开发及应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Cao Wei. Secondary development of subloading yiedd surface modified cam-clay model in ABAQUS and its application [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [26] Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N. Challenge for methane hydrate production by geotechnical engineering [J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016, 2: 62-75.