

相似性原理在构造应力场数值模拟中的应用^{*}

苏培东^{1,2} 秦启荣² 黄润秋¹

(1.成都理工大学环境与土木工程学院 2.西南石油学院资源与环境学院)

苏培东等.相似性原理在构造应力场数值模拟中的应用.天然气工业,2005;25(4):57~60

摘要 论述了在构造应力场模拟中相似性原理的重要性,指出地质原形与数值模型在材料、组合形式、边界条件、受力方式和破裂准则等方面必须相似,模拟的结果才具有真实性。并利用相似性原理,对贵州赤水宝元嘉五¹古构造应力场和岩体破坏程度进行了模拟预测。根据模拟结果可知,嘉五¹层岩石最大破坏程度系数达到1.62,一般地区岩体的破坏程度系数在0.85~0.98之间,接近破裂临界值。破坏程度系数最高的分布区带除了断裂带外,还有高木顶、宝元构造的核部,这些地区岩体破坏接近程度系数普遍高于1.42;在上述地区的外围岩体破坏系数也比较高,一般大于1.03,这说明嘉五¹层岩体的破坏程度较高,裂缝比较发育。

关键词 裂缝(岩石) 构造应力 数值模拟 早三叠世 储集层 预测 宝元构造

一、引言

目前,由于致密性油藏勘探开发力度加大,并随着计算机技术的高速发展,构造应力场数值模拟技术得以大力发展,其数值模拟方法主要以有限元数值模拟为主。但数值模拟技术仅是一种方法,它必须和被模拟体的地质原型紧密结合,模拟出来的结果才具有真实性和适用性。

但如何和地质原型紧密结合?这就必须在模拟过程中掌握相似性原理,也就是研究数值模型与地质原形之间互为相似的条件,相似性是数值模拟的基础。

二、相似性原理

1.基本概念

基于相似理论进行的模拟研究是在某些基本定义和定律基础上进行的,基本定义包括相似常数、相似判据和相似关系。

相似常数是地质原型与数值模型间各物理量之间的比例系数,它们是一些常数,例如几何相似常数:

$$G_i = \frac{L_p}{L_m}$$

式中: G_i 为相似常数; L 为几何尺寸;下角 p 表示地

质原型;下角 m 表示数值模型。

该式表示地质原型与数值模型间各部分的几何要素(长度与角度)应成比例,即数值模型应按一定的比例缩小与放大。

相似判据是指地质原型与数值模型间各基本物理量应该满足一定关系,其表达式为:

$$\frac{\rho_p}{\rho_m} = \frac{E_p}{E_m} = \frac{F_p}{F_m} = \frac{c_p}{c_m} = \frac{\phi_p}{\phi_m} = \frac{\mu_p}{\mu_m} \approx 1$$

式中: ρ 为重力; E 为弹性模量; F 为外力; c 为内聚力; ϕ 为内摩擦角; μ 为泊松比。

上式是在考虑重力和构造应力场的线性三维静力学问题时,基本物理量之间的相似判据。该式说明在进行数值模拟时,地质原型与数值模型间应在基本物理量间应该近似相等。

相似关系是指对一特定问题进行模拟研究时,地质原型与数值模型间各物理量与几何量间应满足的关系。

2.相似定律

相似原理的核心内容由三个基本定律组成,即相似第一定律、相似第二定律和相似第三定律。

相似第一定律是指相似现象的各对应物理量之比为一常数,且相似现象可用同一基本方程描述。定律中所指常数即前面的相似常数。例如重力场中线弹性三维静力学问题的基本方程即弹性理论中的

^{*} 本文得到四川省重点学科建设项目(SZD0414)资助。

作者简介: 苏培东,1973年生,博士研究生;现主要从事岩土工程、构造应力场模拟、裂缝预测方面的科研与教学工作。地址:(610500)四川省成都市新都区西南石油学院。电话:(028)81065380。E-mail:spdong@126.com

24 个方程。

相似第二定律是指表示一现象各物理量之间关系的方程式都可以写成相似判据方程式,相似现象具有相同的判据方程式。如在考虑重力场的线弹性三维静力学问题中,通过量纲分析得到原型和模型的相似判据,若二式相等,即

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_p l_p}{F_p} &= \frac{\sigma_m l_m}{F_m} \\ \frac{E_p l_p}{F_p} &= \frac{E_m l_m}{F_m} \\ \frac{\gamma_p l_p}{F_p} &= \frac{\gamma_m l_m}{F_m} \\ \mu &= \mu_m \\ \epsilon_p &= \epsilon_m\end{aligned}$$

那么模型与原型相似。

相似第三定律是指具有相同文字的方程式单值条件相似,并且从单值条件导出的相似判据数值相等,是现象彼此相似的充分必要条件。定理中的所谓单值条件是指满足某一现象个性的那些条件,属于单值条件和因素的有几何性质,对现象有重大影响的物理参数、边界条件、初始状态等。

由此可见,第一定律是数值上的要求,第二定律是物理上的要求,而第三定律则是相似的充分必要条件。考虑到构造应力场数值模拟过程中的复杂性和特殊性,在模拟过程中主要是要求地质原型和数值模型间在几何和主要物理参数上的相似。

三、数值模型与地质原型的相似性

1. 物理力学参数相似

模拟中岩石材料的物理力学参数主要包括弹性模量(E)、刚性模量(G)、泊松比(μ)、内聚力(c)和内摩擦角(ϕ)等,当采用三维数值模拟时,还与岩石的密度(ρ)有关。模型中所加的材料参数必须与地质原型的实际参数一致,只有这样,模拟结果才有真实性。

为准确确定材料的物理力学参数,采取典型岩样进行岩石实验在所难免。材料的物理力学参数必须以岩石实验结果为基础,并利用工程类比法进行调整。同时,材料的物理力学参数的选取还必须结合地质原型的构造特征和构造部位来考虑,即对于同一类岩石,由于其所处区域的构造特征不同,或所处的构造部份不同,其物理力学参数是有区别的。

2. 组合形式相似

在三维数值模拟中,不同岩层之间如何组合是模拟成败的关键。这时就必须考虑岩层数量与厚度

如何按比例缩小,岩层与岩层之间的滑动情况,基底与盖层之间的情况等。

3. 边界条件与受力方式相似

边界条件相似是构造应力场数值模拟中必不可少的重要条件。所以就必须考虑模型在局部或区域上、甚至更大范围内的构造特征。

每一个构造形迹都是岩层受力变形的结果,如何在模拟中准确地把握受力方向、力的大小、力的作用形式、构造力作用的期次和构造力的叠加,这是构造模拟中最为关键的因素。在考虑受力方式相似的同时,必须结合边界条件相似来共同考虑。

边界条件与受力方式相似主要是通过对地质原型的构造解析来完成。通过对地质原型所处的区域地质资料与局部构造分析,解剖出地质原型构造变形的边界条件、主要包括构造作用力的大小、方向、构造形成的时间、不同构造的期次与叠加关系等。然后在数值模拟过程中通过不同的载荷大小、加载方式和加不同的约束条件来实现与地质原型在边界条件与受力方式上的相似。

4. 模拟选用的岩石破裂准则与实际情况相似

岩石破裂准则有许多种,包括现在数值模拟中常用的莫尔—库仑准则。莫尔—库仑准则适用于高围压条件,塑性及脆性材料的剪切破坏,这种破坏方式与大多数构造形成与破坏条件是相似的。但摩尔强度理论的缺点是没有考虑中间应力对岩石强度的影响,而实际上,绝大部分地质原型都处于三向应力状态;同时,摩尔强度理论在张应力区也不适用^[2]。

除莫尔—库仑准则外,还有适用于无围压或低围压及脆性岩石的最大正应变理论;适用于以延性破坏为主的岩石,即适用于塑性变形构造分析的应变能理论和八面体应力理论。此外,还有格里菲斯强度理论与霍克—布朗(Hock—Brown)经验判据等,每一种强度理论都有其适用范围,选取与地质原型岩石破坏一致的岩石破裂准则,这在构造应力场数值模拟与裂缝预测中有着重要意义,但要做到这一点就必须对岩石的物理力学性质、所处的应力环境有着充分的了解^[2~9]。

四、数值模拟计算实例

笔者利用相似性原理,对贵州赤水宝元构造进行二维数值模拟,取得了较好的效果,现以此为例与同行探讨。

1. 模拟区的地质背景及构造成因分析

宝元构造位于赤水地区西南部,根据区域地质

资料和宝元地区构造图分析可知,宝元构造主体为一近南北向的短轴背斜,该构造的西部是以高木顶为主的東西向构造,宝元构造位于该东西向构造的东末倾伏段。由构造解析可知,宝元地区经历了南北向和近东西向两次构造运动作用,但以近东西向构造应力作用为主,形成了近南北向的宝元主构造。在构造形成的期次上,东西向构造的形成时间早于近南北向的构造。此外还有北西和北东等方向的小断裂,但从其方位及组合关系来看,这些小断裂基本上都是上述两组构造的伴生构造,是在形成上述两组大构造的统一应力场作用下而形成的^[6]。

通过构造形迹分析可知,宝元地区是在受到两次不同大小和方向构造应力作用的基础上形成的,由于两次构造应力作用力的大小和方向都有所不同,为了模拟这两期构造应力场,在二维有限元构造应力场的模拟计算中,将该地区的构造应力作用和构造变形的过程分为两步分别进行模拟计算。这两次模拟采取基本相同的地质模型和相同的离散化网格,通过不同的载荷和约束边界来保证与地质原型在边界条件与受力方式上的相似。

2. 数值模型与地质原型的相似性

数值模型与地质原型的相似性主要是通过相似常数 and 相似判据来控制。本次数值模拟的几何相似常数(G)为 100000,而数值模型与地质原型间主要是通过以下三方面的相似性来控制。

(1) 物理力学参数相似

在模拟过程中,我们选取了宝元嘉五¹层有代表性的白云岩进行了岩石力学实验,其实验成果见表 1。

表 1 嘉五¹ 岩石力学试验成果表

| 实验项目 | 试验次数 | | | | | 平均值 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 单轴抗压强度(MPa) | 47.2 | 64.3 | 54.5 | 42.7 | 59.3 | 53.6 |
| 弹性模量(10^4 MPa) | 4.58 | 4.45 | 4.75 | 4.68 | 4.80 | 4.65 |
| 泊松比 | 0.316 | 0.288 | 0.325 | 0.295 | 0.310 | 0.307 |
| 内聚力(MPa) | 4.3 | 5.1 | 4.6 | 3.8 | 4.4 | 4.44 |
| 内摩擦角($^{\circ}$) | 45 | 48 | 38 | 44 | 47 | 44.4 |
| 抗拉强度(MPa) | 6.21 | 6.93 | 6.82 | 6.10 | 5.12 | 6.23 |

模拟过程中,对岩石主要力学参数选取以岩石试验成果为基础,结合工程地质类比法,对岩石的力学参数的相似判据取值约等于 1,即

$$\frac{E_p}{E_m} = \frac{\phi}{\phi_m} = \frac{c_p}{c_m} = \frac{f_p}{f_m} \approx 1$$

同时,对于不同构造部分的岩石,考虑其受构造的影响程度和构造部分来选取力学参数,本次模拟的主要材料力学参数见表 2。

表 2 宝元嘉五¹ 模型主要材料晚期力学参数取值表

| 材料名 | 弹性模量(MPa) | 泊松比 | 残余内聚力(MPa) | 残余内摩擦角($^{\circ}$) |
|--------------|-----------|-------|------------|----------------------|
| 白云岩 | 45000 | 0.260 | 4.0 | 40 |
| 小断裂 | 48000 | 0.235 | 1.4 | 26 |
| 大断裂 | 49000 | 0.230 | 1.2 | 25 |
| 高木顶高点 | 42000 | 0.255 | 1.6 | 25 |
| 高木顶外围 | 43000 | 0.265 | 2.3 | 27 |
| 高木顶最外围 | 43500 | 0.265 | 2.3 | 29 |
| 鞍部高点 | 42500 | 0.270 | 1.6 | 25 |
| 鞍部高点外围 | 43000 | 0.265 | 2.3 | 27 |
| 宝元高点 | 48500 | 0.230 | 2.2 | 27 |
| 宝元高点外围 | 48000 | 0.235 | 2.3 | 28 |
| 宝元-1350 m 以内 | 47500 | 0.240 | 2.6 | 29 |
| 宝元-1350 m 以外 | 47000 | 0.245 | 2.8 | 31 |

(2) 边界条件与受力方式相似

根据宝元地区构造解析可知,宝元地区构造受两期构造作用力影响,所以在模拟过程中,分两期(第 1 期南北向构造力作用阶段;第 2 期近东西向构造力作用阶段)分别给模型施加不同的边界条件——载荷和约束(见彩色图版 10、11)。通过不同的边界条件,来拟合地质原型在实际构造应力场中的变形。模拟过程中的外力相似判据也是约等于 1,即 $F_p / F_m \approx 1$ 。模拟过程中所加外力的大小可通过岩石 Kaiser 效应来检验。通过对古构造应力场的模拟计算,可得到宝元构造嘉五¹ 储层在早、晚两期构造运动中的最大、最小主应力值和剪应力值及其分布特征。

(3) 岩石破裂准则相似

本次预测采用二维有限元数值模型,所以在模拟过程中未考虑中间应力(σ)的影响。宝元嘉五¹ 层岩性为白云岩,属硬质岩,强度较高,同时嘉五¹ 层埋深在 1300~2000 m,埋深大,围压大;而且,宝元构造主要是在挤压力作用下形成,所以本次模拟选用莫尔—库仑准则,这和岩石实际破裂准则相似。

3. 数值模拟结果

根据宝元地区构造应力场的模拟计算结果,利用岩石力学的莫尔—库仑强度准则,计算得到宝元构造嘉五¹ 层岩石破坏程度及其分布特征(见彩色图版 12)。

嘉五¹层岩石最大破坏程度系数达到1.62,一般地区岩体的破坏程度系数在0.85~0.98之间,接近破裂临界值。岩体破坏程度较高(破坏接近程度值大于1)的地区分布较广,主要分布在早期东西构造发育的高木顶构造的东末段;另外在晚期形成的近南北向宝元构造及其附近地区,岩体的破坏程度也比较高。其中破坏程度系数最高的分布区带除了断裂带外,主要集中在高木顶、宝元构造的核部,这些地区岩体破坏接近程度系数普遍高于1.42;在上述地区的外围带岩体破坏系数也比较高,一般大于1.03,说明嘉五¹层岩体的破坏程度较高,裂缝比较发育。

五、结 论

(1)相似性原理在构造应力场数值模拟过程中有着重要意义,它主要是通过相似常数、相似判据、相似关系和相似定律来控制数值模型与地质原形的相似性。

(2)数值模型与地质原型间在物理参数、组合方式、边界条件和受力方式,以及岩石破裂准则等方面必须相似,这样模拟结果才具有真实性。

(3)利用相似原理,对宝元嘉五¹层岩体采用二

维有限元进行数值模拟,计算出了嘉五¹层岩体破坏程度图。

参 考 文 献

- 1 苏培东.贵州赤水地区二、三叠系储层构造解析及裂缝预测研究.西南石油学院硕士论文,2004
- 2 肖树芳等.岩体力学.北京:地质出版社,1987:68~90
- 3 万天丰.古构造应力场.北京:地质出版社,1988:102~138
- 4 安欧.构造应力场.北京:地震出版社,1992:165~525
- 5 陈子光.岩石力学性质与构造应力场.北京:地质出版社,1987:215~403
- 6 滇黔桂石油地质志编写组.中国石油地质志(卷十一滇黔桂油气区).北京:石油工业出版社,1992:218~239
- 7 潘别桐,黄润秋.工程地质数值法.北京:地质出版社,1994:6~52
- 8 疏壮志,秦启荣,苏培东.贵州宝元构造嘉五¹储层裂缝预测.天然气工业,2004;24(3)
- 9 蔡美峰.岩石力学与工程.北京:科学出版社,2002:219~252

(收稿日期 2005-01-24 编辑 韩晓渝)