

# 地质材料中的流-固耦合研究

章根德

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

王羽 石占中

(大港油田地质研究院 天津 300280)

**摘要** 阐述地质材料中的流-固耦合问题中的几个重要方面,同时也一般地讨论了流-固耦合的基本方程和边界条件。

**关键词** 流-固耦合, 地质材料

**分类号** O 344 6, TD 313

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2000)增-0856-04

## 1 前言

地质材料(岩土介质)中的流-固耦合问题具有这样的特征:流相与固相部分地或全部地相互重叠相互交叉在一起,难以明显分开。各相的运动状态不能各自单独地决定。用数学物理方程来描绘地质材料中的流固耦合问题,不仅需要描述流固各相的动力平衡方程,还需要描述多相体的总体动力平衡方程,再结合边界条件和初始条件求解方程组才能最终地给出其解答。

流-固耦合研究是20世纪80年代以后,特别是80年代中期后迅速发展起来的一门新兴学科。从美

国机械工程师学会(ASME)出版的权威力学文摘刊物《应用力学评论》(AMR)所收录的有关流-固相互作用的文摘条数的统计曲线来看(图1),从1984年出现了一个跳跃式的上升后,一直呈平均上升的趋势。表明了流-固耦合问题的研究越来越受到人们的重视。流-固耦合问题的研究不仅对力学学科的发展有着深远的意义,而且在与国民经济发展相关的各个工程科学学科分支,都有着极其广泛的应用价值。从环境保护,能源、矿山资源的开采,地下工程建设,水利和水电工程,海洋工程,海岸工程,建筑工程等诸多领域,多普遍地存在着流-固耦合问题。所以,流-固耦合问题的研究在国民经济建设中必将带来极大的效益<sup>[1]</sup>。

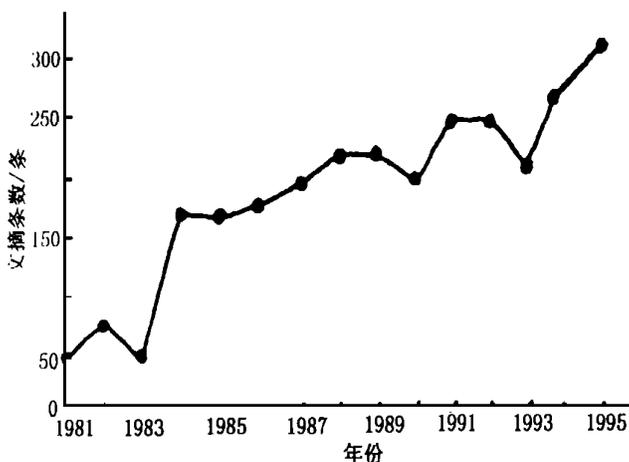


图1 美国ASME力学刊物AMR中有关固-流相互作用文摘条数的统计曲线

Fig. 1 The statistical curve of digest number for fluid-solid interaction in AMR of ASME

## 2 工程领域中流-固耦合问题的阐述

### 2.1 污染物随渗流的迁移

随着工农业生产的发展,环境污染的预测和防治,核废料的贮存等等,使得人们对地下水运动的研究更为重视,更加深入。统计数字表明,在占地球资源75%的水资源中,只有3%是可饮用水,其余全是咸水。而在这少得可怜的淡水中,常年封冰的冰川占90%,只有10%的活水来供养全球的生灵,在这所剩无几的10%活水中,地下水就占了97%。可见研究地下水污染问题具有十分重大的意义。

我国是一个水资源十分缺乏的国家,尤其是西北与华北地区,据报导,华北地区由于地下水的大量

2000年3月20日收到初稿,2000年4月8日收到修改稿。

作者 章根德 简介:男,57岁,1965年毕业于中国科技大学近代力学系,现为研究员,主要从事岩土力学、本构模拟、流固耦合等方面的研究工作。

抽取, 已形成大面积的漏斗形空腔, 有可能导致严重的地质灾害。另一方面, 地下水的污染也很严重, 据遥感照相提供的资料表明, 北京市周围已被五千多个垃圾堆所包围。而全国许多大城市都有着被垃圾堆包围的现象, 污染物对地下水的污染十分严重。

核废料贮存的二个主要问题是贮室热流-固耦合情况下的长期强度与核污染物随地下渗流水扩散问题。核废料污染的严重性举一个例子就可说明。原苏联在北海倾倒入核废料引起海洋动物中一种原来只有几厘米的蜘蛛蟹变成了几十厘米的杀人蟹, 其蟹爪伸展范围可达 3.7m, 在日本海滩和沿海一带, 已有数十名渔民和游泳者葬生于杀人蟹蟹爪之中。可见, 一旦贮存核废料污染了地下水, 将会对人类子孙万代造成多大的危害!

一般说来, 污染物在土壤中的扩散, 可以用对流扩散方程近似地描述。但在岩层中, 污染物的迁移要复杂得多。在多孔的、透水的、通常不固结的蓄水层中, 流动是层流(Darcy流)。在破裂的、固结的岩层, 地下水主要在裂隙中流动, 可能是层流也可能是湍流。而在喀斯特蓄水层, 水流主要通过溶解沟道流动, 速度的大小和方向都不规则, 可能是层流, 湍流和/或是有管流特性的流动。研究污染物随地下水流动的迁移对防治地下水污染, 保护生存环境具有十分重大的意义, 已引起了人们严重关注<sup>[2]</sup>。

## 2.2 石油开采中的流-固耦合问题

油田开采中, 为了提高原油采收率, 往往采用二次采油和三次采油方法, 而注水(或进一步地在水中添加化学溶剂)则是一种应用最为广泛的方法。

水驱油藏在油藏与饱和水的多孔岩石(称为供水层)之间, 有水力连系。供水层可位于整个油藏或局部油藏下方。在供水层中水是被压缩的。一旦由于采油而使油藏压力下降, 水就膨胀, 在油藏/供水层边界处形成天然水驱。供水层内岩石的压缩性同样也供给油藏能量。当供水层十分大, 并且含有充足的能量时, 精心管好流体采出速度可能使整个油藏都被“水驱”的。在有些水驱油藏, 采收率达到原始的石油地质储量(OOIP)的 70% 到 80% 是可能的。

有些水驱油藏与能量有限的供水层连通。如果供水层不能供给足够能量以满足既能达到预定的流体采出速度而又保持住油层压力的话, 那么就可能采用边部注水方案来补充油藏的天然能量。这种称为保持压力的方案就是注水。目前, 高压注水已成为油田增产、稳产的重要措施, 为世界上大多数油田所采用。但注水会引起有效地应力下降, 降低断层的抗剪强度, 导致断层的复活和地层的滑动, 高压水入泥岩层会导致泥岩大量吸水膨胀等等, 这些地质因素的改变会引起油田注采井套管的大量损坏,

带来巨大的经济损失。

油井注水开采时, 引起套管损伤破坏的重要因素有下列几个方面:

(1) 由于注水开发引起岩层回弹、地表上升, 所产生的附加应力场会对油水井套管造成损害。

(2) 注水开采时, 水进入油砂层, 加速了产液流动, 会引起出砂加剧。

(3) 注水开采的一个十分重要问题是水流入膨胀岩层, 引起膨胀岩吸水膨胀而对油水井套管造成巨大的挤压力。

(4) 岩层吸水后, 往往会导致岩层蠕变运动加剧, 加重套损。

这些问题中都存在着流体-岩体-结构物相互耦合作用<sup>[3]</sup>。

## 2.3 海洋工程、海岸工程中的流-固耦合问题

海洋工程、海岸工程中一个人们所关心的问题就是海底的稳定性及对其海工结构物的影响。许多研究都表明, 海洋波浪所引起的海洋中动态压力的分布会导致海底沉积物中应力场和超孔隙压力变化, 会引起海底沉积物的剪切破坏和液化, 最终导致海床的失稳。

一般地说, 这里存在着两种机制: 一种是在初始阶段, 由于土的循环剪切会产生残余孔隙压力, 类似于地震所引起的超孔隙水压增高。另一种是平均有效应力引起瞬态变化, 同时伴随着孔隙压力幅值的衰减和相位的滞后。

物理模拟, 可将地质材料看成多孔介质, 由固体骨架与颗粒之间的空隙组成, 孔隙中部分或全部充满孔隙流体。此时, 整个孔隙介质变形不仅决定于各相变形, 还决定于各相之间的相互耦合作用。当外界扰动作用于部分或完全饱和的地质材料时, 土骨架与孔隙水中的反力也随之增加, 这将引起孔隙水压力的变化并导致孔隙水的流动。孔隙水连续流动, 压力传递到土骨架上, 便会引起土骨架的连续变形, 当孔隙水压力增加得过高时, 往往会导致土骨架的破坏和发生液化现象。地质材料中这种复杂的流-固耦合性极大地增加解题的困难, 但对解决海工结构物动力响应、结构破坏等工程问题具有十分重大的意义, 并具有广泛的应用前景<sup>[4~6]</sup>。

## 2.4 地质材料中热流-固耦合问题

我国是地热资源十分丰富的国家(就北京地区而言, 最近报导地热资源也十分丰富)。地热资源的开发中很重要的问题就是水在岩石裂隙介质中流动进行热能抽取的热力学研究。在研究中首先关心的就是含有液体的地热岩体中大规模的热传导过程。地热岩体可被认为是一个由众多近似相互垂直和相互连通裂隙及相对非渗透性岩块构成的地热区, 水在

其中流动。研究水在不规则裂隙通道中热传导的性状，为地热能抽取的应用奠定了基础。

岩石中热传导基本形式包括热传导和热对流。热对流是热能在岩石裂隙中通过水流来传递的，在地下深层干热的岩石区中，热传导主要的地热传递机制。然而，热能抽取到地面则是通过热从岩石到裂隙中水流的传递而实现的。所以，岩石裂隙中水力-热力特性的研究是提高地热资源开发效益的基础。在地热开采和核废料贮存问题中饱和多孔介质的热流-固耦合的研究中，要采用非线性热水动力学模型来描述岩土介质受热和力学双重作用下的性状，在模型中要同时考虑应力引起的硬化和温度引起的软化和作为多孔介质的岩土材料在此双重作用下性状的变化。

### 2.5 交通、水利、水电等领域中的流-固耦合问题

岩土力学中经典的Lamb问题(1904年)就是求解半无限弹性空间中随时间变化的集中力的动力响应问题。如果介质不是弹性体而换成饱和或部分饱和的多孔地质材料，而荷载是分布载荷，这样就能用来模拟高速公路或铁路路基的动力响应问题。

水电建设中大坝基础设计必须弄清基础岩体的地质构造体系及其渗流特性。此时基础地质材料常视为具有流-固耦合特性的非均质各向异性渗流体。地下隧道、导流洞和地下洞室群，围岩体所赋存的复杂的地质环境-渗流场、温度场、应力场之间的相互影响和耦合作用已不容忽视。特别是寒区的隧道和洞室，冬夏之间的温度场变化较大，存在着不同程度的冰冻灾害，渗流和冻胀对寒区隧道围岩的温度场和应力场的相互影响更为严重。

而半埋式的贮油罐、核电站基础，其稳定性分析中常常要考虑对地震荷载的响应问题。而分析这类饱和或部分饱和的地质材料的动力响应问题时，非线性流-固耦合的特征是非常明显的。

## 3 流-固耦合基本方程及其求解方法

作为一个例子，分析多孔地质材料中动态流-固耦合问题。

流体饱和的多孔介质由土骨架与孔隙流体两部分所组成，孔隙的体积  $V$  等于流体体积  $V_f$ ，孔隙率可由孔隙体积占总体积的百分比来表示，即

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s} \tag{1}$$

式中： $V_s$  为固体体积。

设固体体积的位移分量为  $u_i (i = 1, 2, 3)$ ，则固体骨架的应变可定义为

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \tag{2}$$

设流体相对于土骨架的位移为  $w_i (i = 1, 2, 3)$ ，则每单位土骨架体积内贮存的流体体积的变化为

$$\xi = w_{i,i} \tag{3}$$

根据Biot理论(Biot, 1941, 1956, 1962)，孔隙弹性介质的本构方程可表示为

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} + \alpha M \delta_{ij} (\alpha \epsilon_{kk} \delta_{kl} + \xi) \tag{4}$$

$$\pi = M (\alpha \delta_{ij} \epsilon_{ij} + \xi) \tag{5}$$

式中： $\sigma_{ij}$  是应力张量分量， $\pi$  为孔隙流体压力，而  $C_{ijkl}$  为土骨架的弹性刚度

$$C_{ijkl} = 2\mu \delta_{ik} \delta_{jl} + \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} \tag{6}$$

式中： $\mu$  和  $\lambda$  为土骨架的Lame常数。

在Biot理论中，方程式(4)和(5)中的参量  $\alpha$  与  $M$  分别定义为

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \tag{7}$$

$$\frac{1}{M} = \frac{n}{K_f} + \frac{\alpha - n}{K_s} \tag{8}$$

上两式中： $K$  为土骨架的体变模量， $K_s$  和  $K_f$  分别为土颗粒与流体的体变模量。由于土颗粒的体变模量比土骨架体变模量高很多，所以式(7)中的  $\alpha$  非常接近于 1，而式(8)中的  $M \approx \frac{K_f}{n}$ 。于是式(4)成为

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij} - \pi \delta_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \tag{9}$$

式中： $\sigma_{ij}$  就称为有效应力。式(9)与Terzaghi关于土骨架变形由有效应力所控制的假设是一致的。由于变形包括了不同的两相，所以能导出两个不同的动力平衡方程。

总体平衡方程可表示为

$$\sigma_{ij,j} + (1 - n)\rho_s r_i + n\rho_f r_i + (1 - n)\rho_s \ddot{u}_i - n\rho_f \ddot{U}_i = 0 \tag{10}$$

式中： $r_i$  为每单位质量所受的体积力分量， $\ddot{u}$  为土质点加速度， $\ddot{U}$  为流体加速度。再由Darcy定律  $w_i = k_{ij} h_{,j}$ ，流体的稳态条件  $h_{,j} = \pi_{,i} + \rho_f r_i - \rho_f \ddot{U}_i$ ，最终可以得到表示水土两相介质动力平衡方程：

$$\sigma_{ij,j} + \rho_f r_i - \rho_f \ddot{U}_i - \rho_f w_{i,i} = 0 \tag{11}$$

$$\pi_{,i} + \rho_f r_i - \rho_f \ddot{U}_i + \frac{1}{n} \rho_f w_{i,i} + k_{ij}^{-1} w_{,j} = 0 \tag{12}$$

将式(2~5)代入上两式，可以得到用位移表示的运动方程：

$$[C_{ijkl} u_{k,l} + \alpha M (\alpha u_{k,k} + w_{k,k}) \delta_{ij}],_{,j} + \rho_f r_i = \rho_f \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{w}_{i,i} \tag{13}$$

$$[M (\alpha u_{k,k} + w_{k,k})]_{,j} + \rho_f r_i = \rho_f \ddot{u}_i + \frac{1}{n} \rho_f \ddot{w}_{i,i} + k_{ij}^{-1} w_{,j} \tag{14}$$

相应的边界条件为

在  $S_{1i}$  上

$$u_i(x, t) = \bar{u}_i(x, t) \tag{15}$$

在  $S_{2i}$  上



$$\sigma_i(x, t) = (C_{ijk}u_{k,l} + \alpha\pi\delta_{ij})n_j = \bar{\sigma}_i(x, t) \quad (16)$$

在  $S_3$  上

$$\pi(x, t) = M(\alpha u_{k,k} + w_{k,k}) = \hat{\pi}(x, t) \quad (17)$$

在  $S_4$  上

$$w_i(x, t) = \hat{w}_i(x, t) \quad (18)$$

在  $R$  的边界  $S$  上,  $S_{1i}$  与  $S_{2i}$ ,  $S_3$  与  $S_4$  为互补的子集, 而初始条件为

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= u_0(x) \quad \dot{u}(x, 0) = \dot{u}_0(x) \\ w(x, 0) &= w_0(x) \quad \dot{w}(x, 0) = \dot{w}_0(x) \end{aligned} \quad (19)$$

描述结构物-水土两相体系对地震响应的方程式 (11) 与 (12) 是非常复杂的, 只有极简单的情况下才可得到解析解, 所以通常采用数值方法来求解。两相介质问题的数值解一般都需要在时间与空间领域内分别求解。关于时间积分的迭代常采用 Newmark 方法, 关于空间领域一般采用有限元方法。

根据虚功原理, 这类问题的有限元方程一般都由变分公式求得。对任意的虚位移方程 (11) 和 (12), 在所关心的空间内积分为零。由方程 (11) 可给出

$$\int_V [\sigma_{ij,j} + \rho_i r_i - \rho_i \dot{u}_i - \rho_w \dot{w}_i] \delta u_i dV = 0 \quad (20)$$

式中:  $V$  为所关心的区域,  $\delta u_i$  为虚位移。

同样地, 对方程 (12) 应用虚功原理, 可得

$$\int_V [\pi_i + \rho_i r_i - \rho_i \dot{u}_i - \frac{\rho_f}{n} \dot{w}_i - k_{ij}^{-1} w_j] \delta w_i dV = 0 \quad (21)$$

式中:  $\delta w_i$  为  $w_i$  的虚位移。

根据 Gauss 定律并利用相应的边界条件, 经运算最终可得

$$[M_{uu}] \{\dot{u}\} + [M_{uw}] \{\dot{w}\} + \int_V [B_u]^T \{\delta\} dV = \{f_u\} \quad (22)$$

$$[M_{uw}] \{\dot{u}\} + [M_{ww}] \{\dot{w}\} + [C_{uw}] \{w\} + \int_V [H_w]^T \pi dV = \{f_w\} \quad (23)$$

式中:  $[M_{uu}]$  为固体质量矩阵,  $[M_{ww}]$  为流体质量矩阵,  $[M_{uw}]$  为固体与流体的耦合质量矩阵,  $[C_{uw}]$  为反映流动性质的矩阵,  $[B_u]$  为固体的应变-位移关

系,  $[H_w]$  为流体的流动梯度关系,  $\{u\}$  是固体的节点位移矢量,  $\{w\}$  是流体相对于固体的节点位移,  $\{\sigma\}$  是总应力矢量,  $\pi$  是孔隙水压力,  $\{f_u\}$  与  $\{f_w\}$  分别为作用于固体与流体的荷载。

在地质问题与地下有关的问题中, 大多数都是半空间无限的问题。用有限元法对这一类问题进行分析计算时, 不可能用数目和尺寸均有限的单元模拟这一半空间无限域。为此必须引入人工边界条件来反映未划入网络的土体。对于波动问题在人工边界上必须避免任何向外传播的波的反射。对于单相介质, 基于不同的假说提出了多种人工边界, 如粘性边界, 透射边界, 动力映射无穷元等, 文 [1] 对多种人工边界进行了详述。对于两相饱和多孔介质波动问题的有限元分析中, 论及人工边界问题还不多, 其研究和应用也不够深入。Degrande 等讨论了两相饱和多孔介质波动问题的人工边界问题, 他们采用频率局部吸收边界。对于正入射条件下有较好的吸收能力, 但对斜入射会产生寄生反射。随着对两相饱和多孔介质波动问题研究的不断深入, 其边界问题也必将得到较好的关注和深入的研究。

### 参 考 文 献

- 1 章根德 固体-流体混合物连续介质理论及其在工程上的应用 [J]. 力学进展, 1993, 23(1): 58~ 68
- 2 章根德, 韦昌富, 尚根华等 水蚀性岩层中的渗流和无机物污染物的迁移 [J]. 力学进展, 1996, 26(4): 482~ 492
- 3 Willhite G Paul Water Flooding the Society of Petroleum Engineers[R]. TX 1986
- 4 章根德, 顾小芸 有限厚度砂床对波浪载荷的效应 [J]. 力学学报, 1993, 25(1): 56~ 58
- 5 章根德 饱和砂土对地震的动力响应 [J]. 力学学报, 1994, 26(2): 251~ 256
- 6 Zhang Gende, Ning Shucheng Numerical analysis of the interaction of soil-structure under earthquake loading [J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 10(4): 489~ 497
- 7 Bougacha S Study for fluid-solid interaction in geological media [J]. J. Eng. Mech., ASCE, 1991, 117(8): 1826~ 1850

## STUDY FOR FLUID-SOLID-INTERACTION IN GEOLOGICAL MEDIA

Zhang Gende<sup>1</sup>, Wang Yu<sup>2</sup>, Shi Zhazhong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

(<sup>2</sup> Geological Research Institute of Daqiang Oilfield Group Ltd. Ca., Tianjin 300280 China)

**Abstract** The fluid-solid interaction problems of geological media in some important fields are explained. The basic equation and boundary conditions to describe fluid-solid interaction are also discussed generally.

**Key words** fluid-solid interaction, geological media

