

不連続性岩盤中の空洞周辺の蒸気と水の流動に関する 予備解析

A BASIC ANALYSIS OF THE STEAM-WATER FLOW AROUND THE CAVERN IN THE DISCONTINUOUS ROCK MASS

米山一幸*・熊坂博夫*・八田敏行*

Kazuyuki YONEYAMA, Hiroo KUMASAKA, Toshiyuki HATTA

When the hot water of the high temperature (several hundred degrees C.) is stored in the underground rock cavern, steam-water two-phase flow may occur due to the vaporization of the ground water which exists in the surroundings of the cavern. This two-phase flow actually flows along the fractures in the rock mass. In this study, the steam-water two-phase flow in the fracture system is simulated by the DEM adding two-phase flow function. As a result, it is shown that the steam spread around the cavern rapidly, and its diffusion form is influenced by the direction of fracture system. Furthermore, approximate analysis by the continuous model is studied, and possible approximation method is shown.

Key Words: hot water storage, two phase flow, vapor, DEM

1. はじめに

わが国においては、石油、LPG、圧縮空気および天然ガスなどエネルギーを地下に貯蔵する施設の建設や構想が行われてきている。著者らもこれらの地下施設の技術開発に携わっており、高温、高圧状態の蒸気を利用することを目的とした岩盤内貯蔵施設を対象にして、貯槽周辺岩盤中の地下水と気体（蒸気）の挙動について検討を実施している。蒸気を発電等に用いる場合には 100℃以上の高い温度で貯蔵することが予想され、また、小さな空洞に大量の蒸気を効率良く貯蔵することが望まれることから、高圧下で蒸気を熱水として貯蔵する方法が考えられる。

貯蔵方式（気密方式）としては、圧縮空気や天然ガス貯蔵と同様に、水封方式やライニング方式が考えられるが、中小規模の貯蔵を考えると、地下貯槽までのアクセス距離を短くすることができるライニング方式が有力である。ライニング方式では、貯槽周辺の岩盤の温度は地下水の沸点より高く、大量の蒸気が発生することが考えられ、この蒸気による貯蔵熱の外部への放熱が貯蔵効率を低下させるかどうかの評価や貯槽周辺の環境に及ぼす影響を評価する必要がある。

岩盤内の水・蒸気の挙動は、岩盤中に存在する断層・節理・不連続面などにより影響を受ける。そこで、岩盤中の不連続面を直接モデル化して、蒸気と水の挙動をシュミレーションすることにより、基本的な挙動を把握する。次に、この解析結果を用いて連続体に置換する方法を示し、連続体による解析結果についてまとめる。

* 正会員 清水建設株式会社 技術研究所

2. 不連続性岩盤内の蒸気と水の流動に関する解析

2.1 解析手法の概要

2次元モデルの個別要素法の解析コードである UDEC⁽¹⁾ の不連続面内の浸透流解析に二相流の機能を追加することにより、不連続面と変形を直接考慮した不連続面内を流れる二相流解析を実施した。この解析では、不連続面群が作る1次元の不連続網内を流れる二相流としてモデル化されている。気相と液相のそれぞれの透水係数は、平行平板内の流れとして定式化されている。不連続面によって作られる岩盤ブロック内の流れ（岩質部の流れ）は考慮されていない。また、相対浸透率は解析を簡略化して線形に近い関係で与えられている。毛管圧特性は不連続面の開口量と水の飽和度の関数として与えられている。

ライニング方式の熱水貯蔵では、空洞周辺の地下水圧下における水の沸点よりも熱水貯蔵温度が高いため、貯槽からの放熱により地下水が気化することにより蒸気が発生する。実際の施設では、放熱による熱水貯蔵温度の低下、貯槽近傍の地下水の減少により蒸気の発生量は徐々に低下していくと考えられるが、本検討では貯槽壁面部で一定圧の蒸気が無限に供給されると簡略的にモデル化し、貯槽周辺の蒸気挙動を把握することとした。蒸気の供給圧は、熱水貯蔵温度を約 300℃ と仮定し、この温度での水の蒸気圧より 10MPa と設定した。

2.2 解析条件と解析ケース

対象とする解析モデル、寸法および境界条件を図-1に示す。図に示されるように、解析領域を 40m とし、貯槽を直径 10m の円孔貯槽と設定した。

岩盤内の不連続面の幾何学的な分布特性の影響を把握するために、直交系と斜交系（50°，130°）の2つのモデルを解析対象とした。不連続面の間隔は貯槽の直径より、適度な密度として 0.5m を仮定した。相対浸透率は図-2で示す関係で与えられている。なお、今回の解析では毛管圧を 0 とした。

解析ケースとしては、上記の2つの岩盤の不連続面モデルについて実施した。

2.3 解析結果と考察

直交系と斜交系のそれぞれの解析結果として、間げき水圧分布および地下水の流量と蒸気の分布状況を図-3と図-4に示す。図中の線が太い方が間げき水圧、流量が多いことを示す。また、貯槽周辺の蒸気は流量が示されていない領域（白い部分）となっている。

(1) 圧力分布について

図-3，4は、解析開始後 0.2 秒であり、間げき水圧の圧力伝搬速度が速いことが分かる。また、直交系の岩盤内の間げき水圧は貯槽を中心として同心円状に広がり、圧力分布が等方であることが分かる。一方、

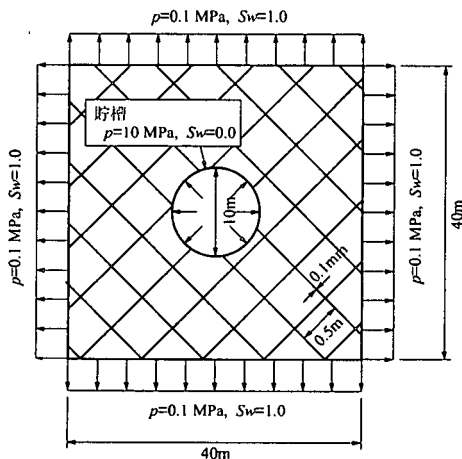


図-1 解析モデルと境界条件（不連続面モデル）

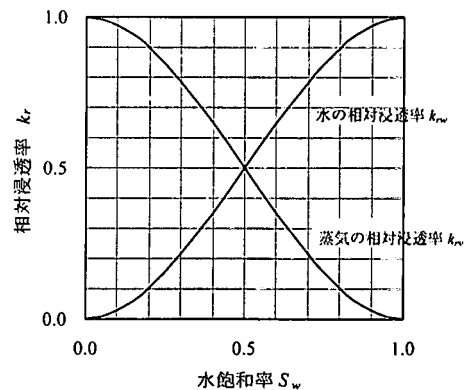
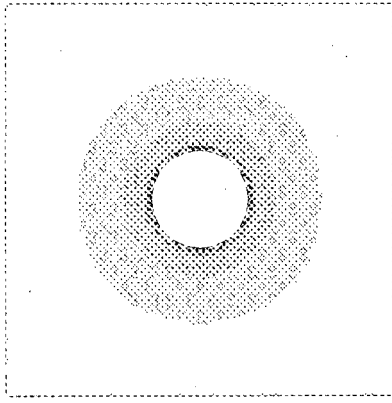
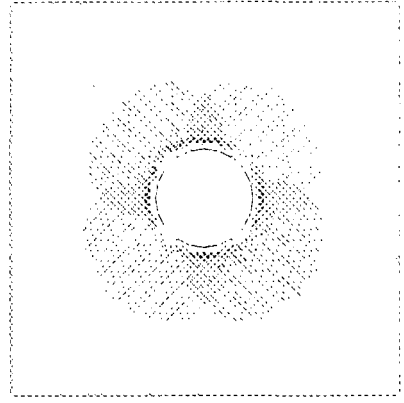


図-2 個別要素法において用いられている相対浸透率の曲線

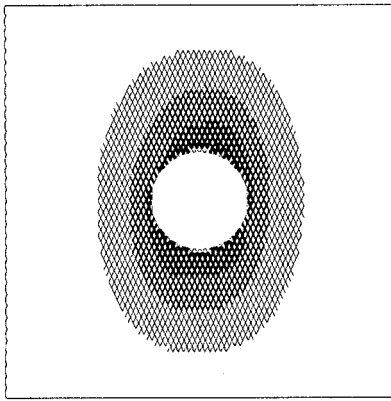


(a)地下水の間げき水圧分布

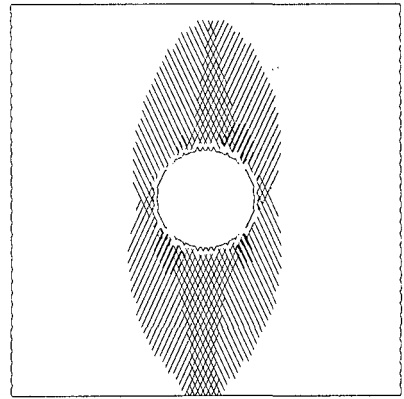


(b)地下水流動と蒸気の分布状況

図-3 直交系の不連続面分布の岩盤における解析結果 (0.24 秒)



(a)地下水の間げき水圧分布



(b)地下水流動と蒸気の分布状況

図-4 斜交系の不連続面分布の岩盤における解析結果 (0.23 秒)

斜交系の岩盤内の間げき水圧は楕円状に広がり、異方的な圧力分布を示すことが分かる。

(2) 地下水流動状況について

直交系の岩盤内の地下水の挙動は、間げき水圧分布が等方的であるため円形状に広がるが、不連続面の幾何学的な分布のため、貯槽中心からの放射方向に近い不連続面内を流動し、それと直交する方向の不連続面内の流れは小さく、選択的に地下水の流動が生じていることが分かる。

斜交系の岩盤内の地下水流動では、間げき水圧が異方的に分布することより流動も異方性を示すが、直交系の岩盤と同じく貯槽からの放射方向に近い不連続面で卓越的な地下水流動があることがわかる。

(3) 蒸気の挙動について

図より、0.2秒で貯槽壁面より約0.5m程度と蒸気は速い速度で貯槽周辺の岩盤に広がっていることがわかる。解析開始直後の貯槽からの蒸気の単位時間当たりの流出量の関係を図-5に示す。解析開始直後に流出量が多く、時間と共に低下して一定となる傾向がみられる。

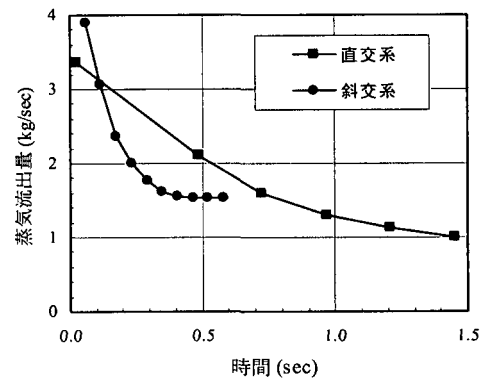


図-5 貯槽からの流出量と時間の関係

3. 連続体モデルによる近似解析方法の検討

前節の結果より、不連続面を直接モデル化した解析により貯槽周囲の蒸気の拡散を解析できることが示された。ただし、これらの解析では計算に非常に長い時間を要し、大きな解析領域を扱うことが難しい。本節では、解析を効率化するために不連続岩盤内の蒸気流動を連続体モデルにより近似的に解析する方法を検討し、この方法による解析結果を前節の結果と比較する。

3.1 連続体によるモデル化方法

解析に用いた不連続面群の連続体への近似方法の概念図を図-6に示す。モデル化においては、単位断面当りの流量を等しくすることを仮定して、不連続面モデルにおける平行平板流の浸透率と等価な浸透率を設定した⁽²⁾。また、間隙率は岩盤中の流体が流動する部分の体積比と考え、不連続面モデルにおける領域内の不連続面部の面積比より連続体の間隙率を設定した。以上より、間隔 a と開口幅 b より、浸透率 k と間げき率 ϕ を次式で与えた。

$$k = \frac{b^3}{12a}, \quad \phi = 1 - \left(1 - \frac{b}{a}\right)^2 \quad \text{---(1)}$$

このモデル化において、不連続面内の流体流速（実流速） v_{real} と連続体モデル内の平均流速（Darcy 流速） v_{darcy} の関係を図-7に示す。各モデルの単位面積当りの流量が等しくなることより、次式が得られる。

$$v_{darcy} = \frac{b}{a} v_{real} = \phi v_{real} \quad \text{---(2)}$$

蒸気と水が明確な境界面を形成して流動するような1次元の流れを仮定した場合、不連続面モデルと連続体モデルそれぞれにおける境界面の移動速度 v_i 、 v_i' は次式で与えられ、各モデルにおける境界面速度は等しくなる。

$$v_i = v_{real} \quad v_i' = \frac{x}{\phi V / A v_{darcy}} = \frac{v_{darcy}}{\phi} = v_{real} = v_i \quad \text{---(3)}$$

以上より、上記で定義した連続体モデルにより、不連続岩盤内の蒸気の拡散速度を近似的に計算できると考えられる。

3.2 解析モデル、解析条件

解析領域の寸法、境界条件、貯槽の形状は前節の不連続面モデルと同一とし、直交系の不連続面分布より(1)式を用いて浸透率と間げき率を設定した。相対浸透率、毛管圧は不連続面モデル解析と同じ相関式を用いた(図-2)。計算には、地下多相流体流動解析コード TOUGH2⁽³⁾に図-2の関係を組み込んで用いた。

3.3 解析結果と考察

図-8に直交系の不連続面モデルの解析結果(図-3)と同時刻における間げき圧分布図、地下水流動状況、および、蒸気飽和率分布図を示す。間げき圧は不連続面モデル解析とほぼ同じような分布となり、蒸気飽和率は不連続面モデルと異なる貯槽を中心とした同心円状の分布になる結果が得られた。蒸気飽和率の分布は、貯槽壁面より約0.2mの位置で飽和率0.2、壁面より約0.5mの位置で飽和率0.1となった。本図や他の

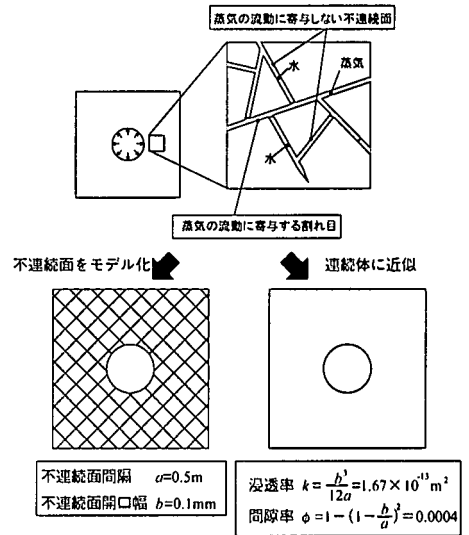


図-6 連続体によるモデル化の概念

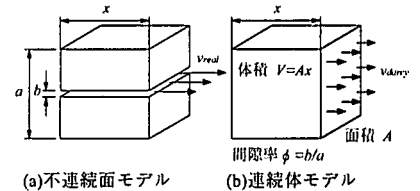


図-7 実流速と Darcy 流速の関係

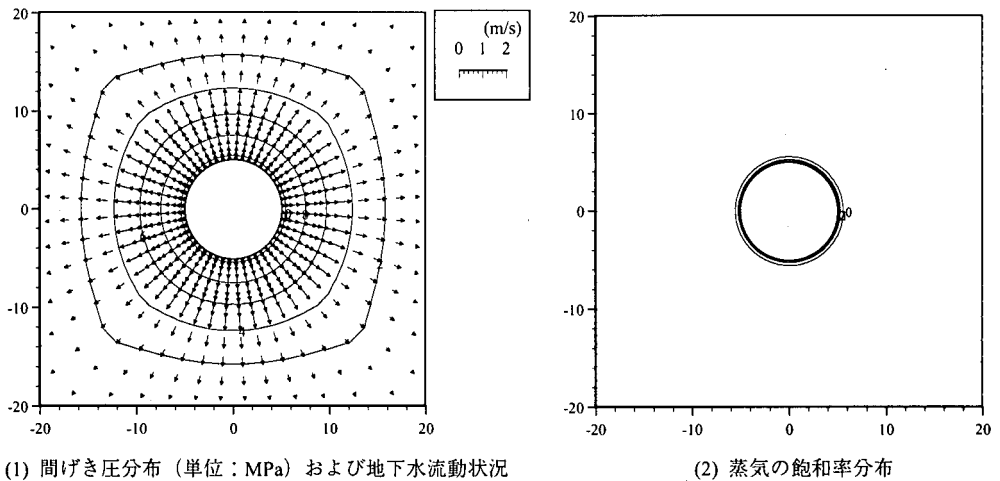


図-8 連続体モデルによる解析結果 (0.24 秒)

時刻における蒸気の分布状況を比較すると、不連続面モデルの方が拡散速度が速い結果が得られており、これは蒸気が不連続面を選択的に流れることに起因すると考えられる。

図-9には各モデルにおける貯槽からの蒸気流出量の時間変化を示す。蒸気流出量は、モデルにより変化の傾向は異なるが、同じ程度の値に収束する傾向が見られる。両モデルの変化傾向の違いは、不連続面モデルにおける割れ目開口幅の変化に起因する可能性が高いと考えられ、今後検討する予定である。

以上より、ここで示した方法により、不連続性岩盤中の二相流の挙動を連続体モデルによって近似的に解析することが可能と考えられる。

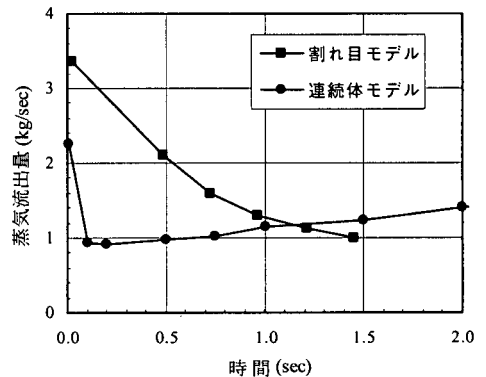


図-9 蒸気流出量の計算結果の比較

4. まとめ

不連続面内を流れる二相流の挙動を個別要素法を用いて解析を実施した。その結果、干渉水圧分布、地下水の流れは不連続面の幾何学的な分布特性に大きな影響を受ける。貯槽の周辺の蒸気の流れは、地下水を押し出すことにより生じることより、地下水の流れに大きな影響を受ける。

また、不連続面を直接考慮する解析では、解析時間が非常に多くなることが分かった。このため、不連続岩盤内の蒸気流動を連続体モデルにより解析する方法を検討し、ほぼ近似的な解析結果が得られることを示した。ただし、蒸気が不連続面を選択的に流れることに起因する拡散速度の違いがあり、その影響を考慮する必要があると考えられる。

なお、本検討では直交系の不連続面モデルの近似を検討したが、斜交系モデルの近似では、割れ目方向による蒸気流動の異方性を連続体モデルにおいてどのように扱うかが課題であり、今後の検討を要する。

(参考文献)

- (1) Itasca Inc. : UDEC ver.3.3 Users Manual, 2000.04.01.
- (2) Witherspoon, P. A., et al. : Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resource Research, Vol.16, No.6, pp.1016-1024, 1980
- (3) Pruess, K. : TOUGH2 - A general-purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow, LBL report No.LBL-29400, 1991