

締固めたベントナイトのガス移行試験における相似則について

(一財) 電力中央研究所 フェロー会員 田中 幸久

1. はじめに

放射性廃棄物処分施設において放射性核種の移行抑制などの目的で用いられる締固めたベントナイトは緻密であるため透気性が低く、地下深部の還元性環境下における金属腐食等により発生した水素ガスを速やかに排出しないことが予想される。そのため、ガス圧上昇による周辺施設や岩盤への影響を検討する必要がある。そこで、ベントナイトのガス移行特性を調べるためにガス移行試験が行われる。ガス移行試験の結果は、境界条件、初期条件に影響される。ガス移行試験は、通常は小さな寸法の供試体で行われるため、試験結果を規模の大きい実物へ適切に反映させるため、ガス移行試験に関する力学的相似則を考慮した上でガス移行試験を実施する必要がある。そこで本論文では、ガス移行試験の力学的相似則について検討する。

2. 力学連成気液2相流モデルによる説明

図1(a)に示すような実寸法の模型と図1(b)に示す実寸法を1/Nに縮尺した寸法の模型を考える。実寸法の模型と縮尺寸法模型で①材質が等しく、②幾何学的相似点における初期の応力、水圧、ガス圧、飽和度、密度が等しく、境界条件も等しいとする。また、③自重は作用せず、④ベントナイトの応力-ひずみ関係にクリープの影響がなく、⑤材料の粒径の影響もなく、⑥ガス相と水相間のガスの移動もないとする。さらに、図1(a)、図1(b)に示すように模型の一部分にガス圧を加えた場合の挙動は、⑦力学連成気液2相流モデルで表せるとする。

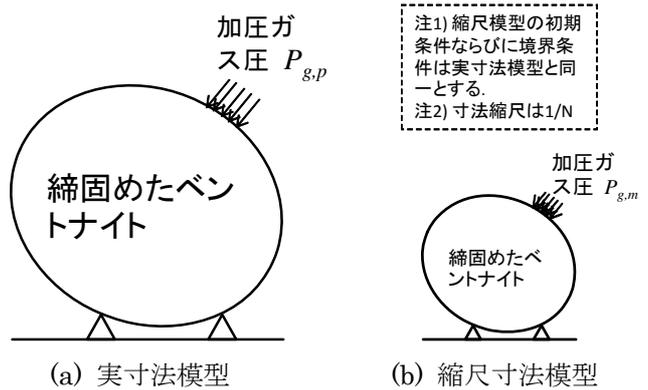


図1 検討対象とした模型

図2は、筆者が示した力学連成気液2相流モデルによる計算の手順¹⁾を簡略化して表したものである。図2中の式(iv-a)、式(iv-b)で示すように⑧液相ならびに気相に対してダルシー則が成立することを仮定している。

縮尺寸法模型における寸法は、実寸法模型の1/Nであるため、縮尺寸法模型における図2中の m_w 、 m_g はいずれも実寸法模型の N^2 倍となるが、縮尺模型における時間の縮尺を $1/N^2$ 倍にすれば、実寸法模型と縮尺模型における m_w 、 m_g はいずれも等しくなる。

図1(a)、図1(b)の境界に加圧されるガス圧 $P_{g,p}$ 、 $P_{g,m}$ は次式で表されるとする。

$$P_{g,p} = c_{p,p} \cdot t_p \tag{1a}$$

$$P_{g,m} = c_{p,m} \cdot t_m \tag{1b}$$

ここで、 $c_{p,p}$ 、 $c_{p,m}$ ：それぞれ実寸法模型、縮尺寸法模型におけるガス加圧速度、 t_p 、 t_m ：それぞれ実寸法模型、縮尺寸法模型におけるガス加圧開始からの経過時間

縮尺寸法模型における時間の縮尺を $1/N^2$ 倍とすれば、 $c_{p,p}$ と $c_{p,m}$ の間には次式が成立しなければならない。

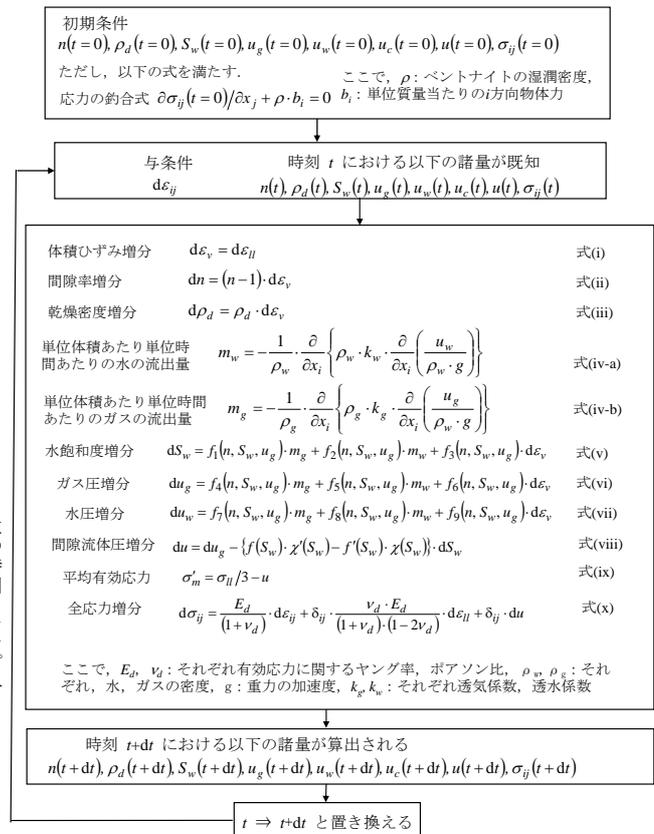


図2 力学連成気液2相流モデルにおける計算フローの例(文献1)より引用・加筆)

キーワード 放射性廃棄物処分、ベントナイト、ガス移行試験、相似則

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 電力中央研究所 TEL 0471-82-1181

$$c_{p,m} = N^2 \cdot c_{p,p} \quad (2)$$

従って、微小な時間 dt_m における縮尺模型における加圧ガス圧の増分 $dP_{g,m}$ は、以下に示すように実物模型における加圧ガス圧の増分 $dP_{g,p}$ に等しくなる。

$$dP_{g,m} = c_{p,m} \cdot dt_m = N^2 \cdot c_{p,p} \cdot dt_m = c_{p,p} \cdot dt_p = dP_{g,p} \quad (3)$$

図 1 (a), 図 1 (b) の幾何学的な相似点における時刻 t_p, t_m における間隙率, 水圧, ガス圧, 水飽和度が等しければ, 変形性(弾性体であれば, ヤング率ならびにポアソン比)も等しくなるので, 境界に同じガス圧増分 $dP_g (=dP_{g,p}=dP_{g,m})$ を作用させた時のひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}$ は等しい。

以上により, 縮尺模型における時間の縮尺を $1/N^2$ 倍と設定することにより, 初期条件, 境界条件が同一である図 1 (a), 図 1 (b) の模型の幾何学的な相似点において生じるひずみ $d\varepsilon_{ij}$ ならびに m_w, m_g は等しくなるため, 図 2 の計算の手順に従えば, 実寸法模型と縮尺模型の幾何学的相似点におけるそれぞれ時刻 t_p, t_m における応力, ひずみ, 水圧, ガス圧, 飽和度, 密度の増分ならびにその積分値はすべて等しくなる。この相似則を一次元圧密における相似則と同様に H^2 則と呼ぶことにする。

3. H^2 則の成立のための①~⑧の条件について

①, ②は, 縮尺寸法模型の試験条件の設定により満足される。③は, 縮尺寸法模型の寸法が小さければ膨潤圧に比べて自重の影響が小さいため満足される。

④としては, ガス加圧速度の違いによる骨格の剛性の変化の影響のほかに長期圧密による膨潤圧または密度の変化の影響が考えられる。いずれも限られた期間内に実施した室内試験結果には影響が表れていないので, 大きな影響要因とはならない可能性がある。

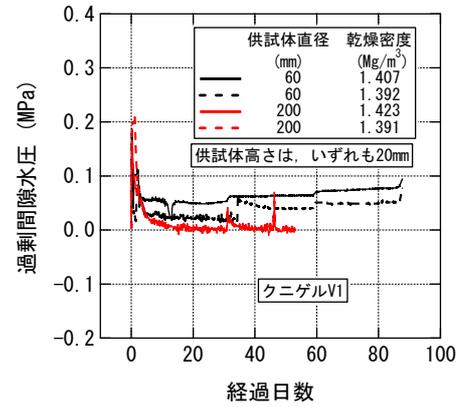
⑥は, ガスが水に溶解するので満足されない。ただし, ガスが水に瞬時に溶解し, 溶存ガスが拡散により移行するとすれば, H^2 則は成立するが, ガスが水に溶解するのに有限な時間を要するため, H^2 則は成立しない。また, 両模型でのガスの種類の違いによる溶解特性の違いも H^2 則の成立を妨げる。予め, GetFlows²⁾ などガスの間隙水への溶解速度を考慮できる解析コードで実物寸法モデルを対象とした解析を行い, 得られたガス圧の経時変化の時間軸を $1/N^2$ 倍して縮尺寸法模型に加えることにより, これらの問題は解決できる。

⑦は, 卓越流路によるガス移行に関しては成立しない。図 3 は, ガス移行試験結果に及ぼす供試体直径の影響を示したものである。直径 200mm の供試体の過剰間隙水圧がガス加圧試験中に 0 となるのは, 間隙水圧が消散するためであり, この挙動は, 力学連成気液 2 相流モデルで表せる (図 3 (a))。一方, 図 3 (a) において, 直径 60mm

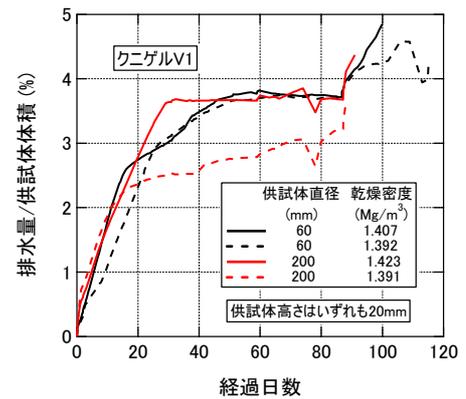
の供試体の過剰間隙水圧が, ガス加圧試験中に 0 とならないのは, 供試体内に卓越流路が形成されるためであると考えられており³⁾, この挙動は厳密には力学連成気液 2 相流モデルで表すことができない。しかし, 図 3 (b), 図 3 (c) に示されるように, こうしたガス移行メカニズムの差が排水量や大破過圧(ガス流出量急増時のガス圧)などガス移行試験結果に及ぼす影響は小さい。従って, 近似的には⑦が満足されると考えて良いと思われる。

ところで, 大破過は, ガス圧によって供試体が損傷することによって発生する。土の破壊時に伴って発生するすべり線や亀裂の幅には粒径が影響することが知られているので, ⑤が満足されるのは厳密には大破過発生直前までである可能性がある。また, 大破過によりガス流速が急増した後にはガス相に関するダルシー則が成立しない可能性があるため, ⑧についても成立するのは, 厳密には大破過発生直前までであると思われる。

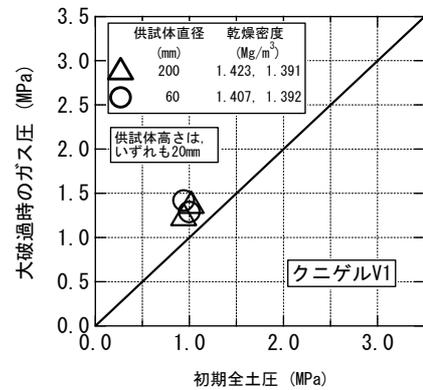
参考文献: 1) 田中幸久(2010): 飽和した高密度ベントナイトの力学連成ガス移行解析手法の開発, 土木学会論文集C, Vol. 66, No. 3, pp. 530-549. 2) 森 康二ほか(2005): 人工バリアシステムの原位置ガス移行挙動試験における2相流モデリングの適用性に関する検討, 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文, pp.41-48. 3) 田中幸久ほか(2009): 飽和した高密度ベントナイトのガス移行メカニズムとそのモデル化, 土木学会論文集C, Vol. 65, No. 1, pp. 303-320.



(a) 過剰間隙水圧



(b) 供試体体積あたりの排水量



(c) 大破過圧

図 3 ガス移行試験結果に及ぼす供試体直径の影響(文献 3)より引用・加筆)