

高圧ガス貯蔵岩盤空洞の気密性評価のための応力浸透流連成解析手法の入力パラメータの検討

青木 謙治^{1*}・水戸 義忠¹・張 傳聖¹・磯井 健太郎¹・田坂 嘉章²・前島 俊雄³

¹京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²東電設計株式会社 技術開発本部 (〒110-0015東京都台東区東上野3-3-3)

³ (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番)

* E-mail:aoki@kumst.kyoto-u.ac.jp

高圧ガス貯蔵岩盤タンクの建設にあたっては、力学的安定性を確保すると共にタンクの気密性を確保する為の設計を行うことが非常に重要となるが、このためにはタンクの気密性を厳密に評価しなければならない。従来の気密性能評価法は、空洞の力学的安定解析と、地下水浸透流解析とを別に行う手法がとられている。しかしながら、このような手法では、岩盤の亀裂の力学的挙動とそれに伴う間隙水圧・間隙ガス圧変化との関係を十分に考慮できないものと考えられる。そこで著者らは、これまでに岩盤、地下水および貯蔵ガスの相互影響を考慮した連成解析手法を構築してきたが、本研究ではこの解析手法を現場に適用する上で必要となる、入力パラメータの決定方法を構築した。

Key Words : *coupled hydromechanical modelling, distinct element method, channel-domain network model, gas storage cavern, input parameters*

1. はじめに

高圧ガス貯蔵岩盤タンクの建設にあたっては、力学的安定性を確保すると共にタンクの気密性を確保する為の設計を行うことが非常に重要となる。設計にあたっては、安全性はもちろんのこと経済性を考慮に入れることも重要であり、このためにはタンクの気密性を厳密に評価しなければならない。

ここで、従来の気密性能評価法は、空洞の力学的安定解析と、地下水浸透流解析とを別に行う手法がとられている。しかしながら、このような手法では、岩盤の亀裂の力学的挙動とそれに伴う間隙水圧・間隙ガス圧変化との関係を十分に考慮できないものと考えられる。

そこで著者らは、岩盤、地下水および貯蔵ガスの相互影響を考慮した連成解析手法(粒状体DEM-CDN解析)を構築した¹⁾。この新しい解析手法を実際の現場に適用するにあたっては、現場で観測された巨視的な岩盤挙動を高精度に再現することができる微視的パラメータの値を合理的に決定する必要がある。またこの際には、各微視的パラメータの変動が解析結果に及ぼす影響の度合(感度)を明確にした上で、その適用において十分な精度を有するデータを得ることが必要となる。本研究においては、このような入力パラメータについて、詳しく検

討を行うことで、現場におけるパラメータの決定方法を構築する。

2. 粒状体DEM-CDN解析手法

気密試験を含め、貯蔵空洞の気密性を評価するにあたっては、貯蔵ガス圧による岩盤の変形と地下水・貯蔵ガスの浸透による3次元の応力-浸透流連成挙動を考慮する必要がある。特に、間隙水圧の伝播に伴う選択的な透水経路の発生や進展の現象を適正に評価することが重要である。

そこで、著者らは、岩盤の力学的挙動については、3次元の粒状体個別要素法(DEM)²⁾を適用し、貯蔵ガス・地下水の浸透流のモデル化に際しては、粒状体個別要素法との連成を目的として考案されている3次元のChannel-DomainによるNetwork解析手法³⁾を適用する粒状体DEM-CDN解析手法を構築してきた⁴⁾⁵⁾。

粒状体個別要素法は、岩盤を粒子の集合体でモデル化し、岩盤の巨視的な挙動を粒子の挙動によって表す方法である。隣接した粒子間の弾性変位が線形ばね理論に、亀裂発生・岩盤破壊が粒子結合の引張・せん断強度に、破壊後挙動が粒子間の摩擦力に従うことにより亀裂の発

生・進展と岩盤の変形を取り扱う。一方、Network解析は、流量を計算するChannelと圧力を計算するDomainによって亀裂内を流れる地下水・貯蔵ガスの流れを表す方法である。

ここで、DomainとChannelは次の仮定条件のもと幾何学的に変化するものとする。

- ①粒子や接点応力の変化によってChannel幅とそれに伴うChannelの水理学的性質が変化する。
- ②Domainの幾何学的体積変化により、Domainの圧力が変化する。
- ③Domainの圧力変化によりDomainを囲む粒子は移動し、新たなChannel-Domain構造を構築する。

3. 微視的パラメータ

粒状体DEM-CDN解析手法においては、岩盤の巨視的挙動を直接的に規定する岩盤の物性値を用いずに、岩盤の巨視的挙動と同様な挙動を示す粒状体の粒子挙動・粒子間挙動を規定する微視的パラメータを決定する。

具体的なパラメータは、幾何学的パラメータ、力学的パラメータ、水理学的パラメータ、力学—水理学連成パラメータ、気液二相流パラメータに区分される。

- ①幾何学的パラメータ
 - 粒子半径
 - 有効間隙率
- ②力学的パラメータ
 - 粒子間バネ定数
 - 粒子間バネ定数比
 - 粒子間引張強度
- ③水理学的パラメータ
 - 基底開口幅
- ④力学—水理学連成パラメータ
 - 亀裂拡大係数
 - 亀裂縮小係数
- ⑤気液二相流パラメータ
 - 不飽和固有透気/透水係数
 - 毛管抵抗圧

4. 微視的パラメータの決定方法

微視的パラメータの決定にあたっては、図-1に示すようなフローに従うものとする。以下、それぞれのパラメータについて具体的な決定方法を述べる。

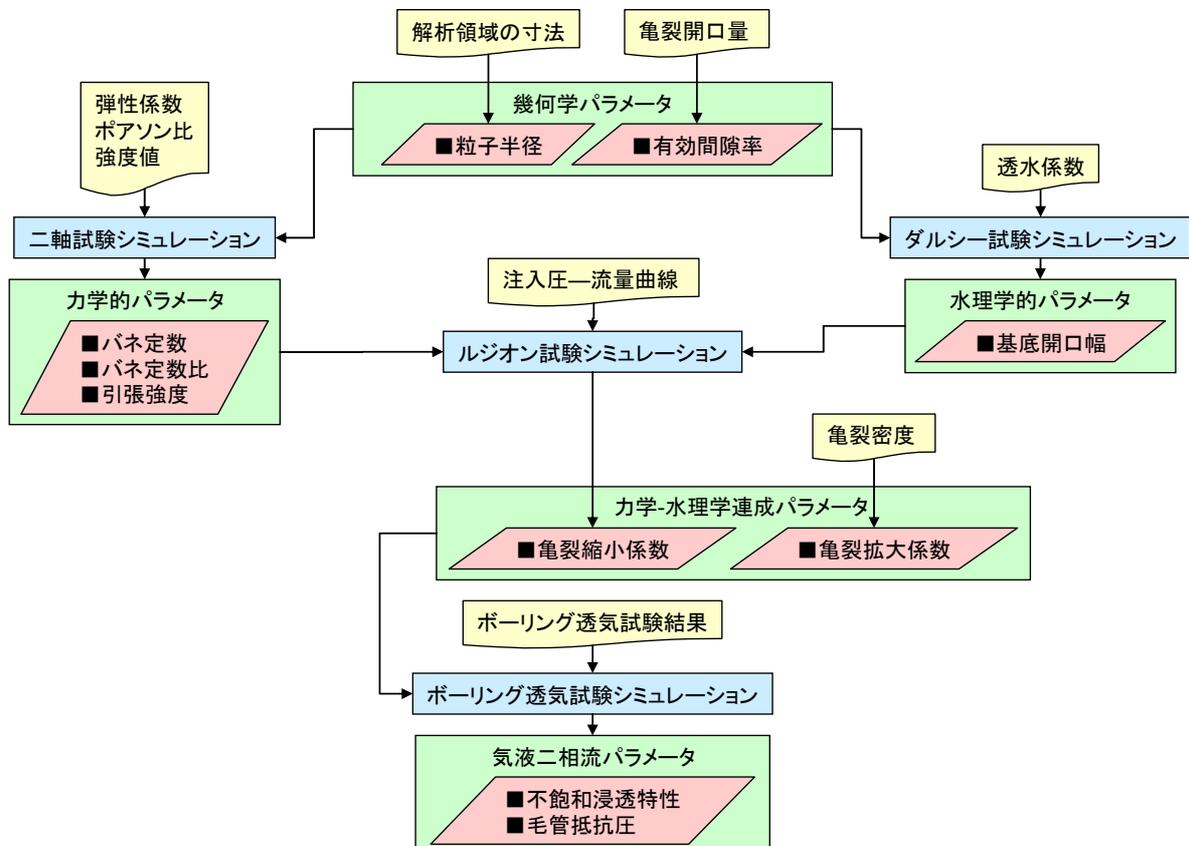


図-1 微視的パラメータの決定フロー

(1) 幾何学的パラメータ

幾何学的パラメータは、粒状体モデルを作成する上で最初に決定する必要があるパラメータである。粒子半径については、粒子半径が解析領域に対して十分に小さいとき、粒子寸法の差異が解析結果に与える影響は小さいことが知られている。解析を行う問題に対してパラメータスタディーを行い、決定すべきである。

また、有効間隙率については、単位長さあたりに分布する亀裂の開口量の合計値から決定する。

(2) 力学的パラメータ

幾何学的パラメータを決定した後に、二軸圧縮試験の粒状体DEMシミュレーションを行い、現場で観測された巨視的挙動（岩盤試験結果における応力一ひずみ関係）を再現する3つの微視的パラメータの値をパラメータスタディーにより決定する。

(3) 水理学的パラメータ

Channel Domain Network (CDN)解析は、複数の不連続面が内在する岩盤の透水性を、円形粒子間に存在する等価な透水性をもつチャンネルによってモデル化する解析手法である。すなわち、ハーゲン=ポワズイユ流れが生じるような平行平板状チャンネルの概念上の開口幅によって、結合粒状体モデル内における粒子間の部分に相当する岩盤の透水係数を表現するものである。チャンネルの概念上の開口幅 a は、円形粒子間に力が作用していない場合には一定値 a_0 を呈する。この値を基底開口幅と呼ぶ。幾何学的パラメータを決定した後に、ダルシー流試験の粒状体 CDN シミュレーションを行い、現場で観測された透水係数を再現する基底開口幅をパラメータスタディーにより決定する。

(4) 力学—水理学連成パラメータ

粒子間に引張力あるいは圧縮力が生じて岩盤に変形が生じる場合、開口幅 a の値が変化して岩盤の透水性に変化が生じる。この引張/圧縮時に透水性の変化を規定する量をそれぞれ亀裂拡大係数 m / 亀裂縮小係数 F_0 と呼ぶ。

中心点間の距離が l の円形粒子間に引張り力が作用して粒子表面間の鉛直距離が d となる時、チャンネルの開口幅 a は、基底開口幅 a_0 と亀裂拡大係数 m を用いて次式のように規定される。

$$a = a_0 + md \quad (1)$$

但し、亀裂拡大係数は1以下の正の無次元量である。

いま、一定の開口幅 b_0 をもつ不連続面が平均間隔 s_f で分布する岩盤について考える。

まず、変形が生じる前の岩盤の透水係数 k_0 は、チャンネルの基底開口幅 a_0 と岩盤の間隙率 n_0 を用いて次式

で与えられる。

$$k_0 = \frac{ga_0^2}{12\nu} n_0 \quad (2)$$

ここに、 g は重力加速度、 ν は水の動粘性係数である。また、岩盤の透水係数 k_0 は、不連続面の開口幅 b_0 と岩盤の間隙率 n_0 を用いて次式によって示すこともできる。

$$k_0 = n_f \frac{gb_0^2}{12\nu} n_0 \quad (3)$$

ここに、 n_f は粒子中心間を結ぶ線分上に交差する不連続面の個数であり、粒子中心間の距離を l とすると、次式で与えられる。

$$n_f = \frac{l}{s_f} \quad (4)$$

この式(2)(3)を連立させると次式が得られる。

$$a_0 = \sqrt{n_f} b_0 \quad (5)$$

次に、中心点間の距離が l の円形粒子間に引張力が作用して粒子表面間の鉛直距離が d となった場合の岩盤の透水係数 k は、引張力作用時におけるチャンネルの開口幅 a と岩盤の間隙率 n を用いて次式で与えられる。

$$k = \frac{ga^2}{12\nu} n \quad (6)$$

式(6)に式(1)を代入すると、岩盤の透水係数 k は次式のようになる。

$$k = \frac{g(a_0 + md)^2}{12\nu} n \quad (7)$$

また、岩盤の透水係数 k は、引張力作用時における不連続面の開口幅 b と岩盤の間隙率 n 、および粒子中心間を結ぶ線分上に交差する不連続面の個数 n_f を用いて次式によって示すこともできる。

$$k = n_f \frac{gb^2}{12\nu} n \quad (8)$$

ここで、引張力作用時における不連続面の開口幅 b が次式を満たすとす。

$$b = b_0 + \frac{d}{n_f} \quad (9)$$

式(8)に式(9)を代入すると、岩盤の透水係数 k は次式のようになる。

$$k = n_f \frac{g \left(b_0 + \frac{d}{n_f} \right)^2}{12\nu} n \quad (10)$$

式(5)(7)(10)を連立させると最終的に次式が得られる。

$$m = \frac{1}{\sqrt{n_f}} \quad (11)$$

亀裂縮小係数 F_0 は、基底開口幅 a_0 のチャンネルに圧縮力 F が作用する時、チャンネルの見かけ開口幅 a を次式によって規定する量であり、力の次元をもつ。

$$a = \frac{a_0 F_0}{F + F_0} \quad (12)$$

ここに、圧縮を正とする。この式は経験より求められたものであり、多くの室内実験ケースで適用性が確認されている。

このような力学—水理学的連成パラメータのうち、亀裂拡大係数については、式(11)によって決定する。一方、亀裂縮小係数の決定に際しては、幾何学的パラメータ、力学的パラメータ、水理学的パラメータが決定された後に、圧力レベルを変化させた注気試験の粒状体DEM-CDN解析を行い、現場で観測された注気試験結果を再現する値をパラメータスタディーにより決定する。

(5) 気液二相流パラメータ

上記パラメータがすべて決定された後に、注気試験の粒状体DEM-CDN解析を行い、現場で観測された注気試験結果を再現する値をパラメータスタディーにより決定する。

5. パラメータの感度分析

微視的パラメータの値を系統的に変化させて、ボーリング孔からの注気試験の2次元シミュレーションを行うことにより、パラメータの感度(sensitivity)を分析した。

モデルは一辺26mの水平な正方領域とし、この中心から空気を注入して、周辺岩盤における間隙水圧の応答を計測した。

初期地圧の鉛直応力及び側圧はそれぞれ5.5MPa、6.1MPaと設定した。水理学的境界条件としては、モデルの周辺に1.05MPaの固定水頭を与えた。この条件の下、圧力1.2MPaおよび2.0MPaで注気した後、注気を停止し、5m離れた点で間隙水圧の応答を計測した。

なお、解析で用いた微視的パラメータの値は、表-1に示すとおりである。実際の岩盤で実施された試験結果を基に同定した微視的パラメータの値を標準値とし、現実

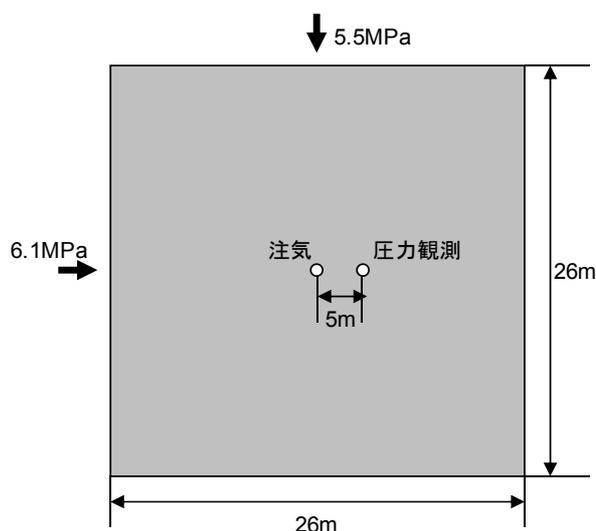


図-2 解析モデル

表-1 感度分析におけるパラメータの値

種別	単位	標準値	感度テストの設定値
粒子半径	M	0.1	0.05(0.5倍), 0.2(2倍)
有効間隙率		0.10%	0.05%(0.5倍), 0.2%(2倍), 0.4%(4倍), 1%(10倍)
粒子間バネ定数	GPa	51	25.5GPa(0.5倍), 102GPa(2倍)
粒子間バネ定数比		3.95	1.98(0.5倍), 7.9(2倍)
粒子間引張強度	MPa	32	16MPa(0.5倍), 64MPa(2倍)
基底開口幅	M	2.6×10^{-5}	1.3×10^{-5} (0.5倍), 5.2×10^{-5} (2倍)
亀裂縮小係数	N	1.0×10^{12}	1.0×10^7 (0.00001倍), 1.0×10^9 (000.1倍), 1.0×10^{11} (0.1倍)
亀裂拡大係数		1	0.1(0.1倍), 0.25(0.25倍), 0.5(0.5倍)

に想定される値の範囲内でこの値を系統的に変化させることによって、水圧応答量の最大値を計測し、パラメータの感度の評価を行った。なお、気液二相流パラメータについては、基本的にはすべてのパラメータが決定された後に同定される値であるため、今回の検討からは除外した。以下に感度分析結果を示す。

(1) 幾何学パラメータ

■ 粒子半径

粒子半径が解析領域に対して大きい（解析領域の寸法の1%程度）とき、粒子半径が大きいほど、周辺岩盤の圧力応答が低い。一方、十分に小さい（解析領域の寸法の0.5%未満）とき、粒子寸法の差異が解析結果に与える影響は小さい。したがって、解析領域の寸法の0.5%未満となるように設定すべきである。

■ 有効間隙率

有効間隙率の値が大きいほど周辺岩盤の圧力応答が小さく、有効間隙率の差異が解析結果に与える影響はやや大きい。また、高压の注入圧力条件下ではこの傾向がさらに顕著である。

(2) 力学的パラメータ

■粒子間バネ定数

バネ定数が大きいほど周辺岩盤の圧力応答が大きい、注入圧力の大きさに関わらずバネ定数の差異が解析結果に与える影響は非常に小さい。

■粒子間バネ定数比

通常の注入圧力条件下 (<2MPa 程度) では、バネ定数比の差異が解析結果に与える影響は極めて小さい。高压の注入圧力条件下でバネ定数比が小さい (<2) とき、周辺岩盤の圧力応答がやや大きくなる。

■粒子間引張強度

通常の注入圧力条件下 (<2MPa 程度) では、引張強度の差異が解析結果に与える影響は極めて小さい。一方、岩盤内に引張亀裂が生じるような高压の注入圧力条件下では、卓越した透水経路が形成されるため、周辺岩盤の圧力応答が極めて小さくなる。粒子間引張強度が極めて低い値をとる場合には、より高精度に値を決定することが必要となる。

(3) 水理学的パラメータ

■基底開口幅

基底開口幅の値が大きいほど周辺岩盤の圧力応答が大きく、基底開口幅の差異が解析結果に与える影響は大きい。また、高压の注入圧力条件下ではこの傾向がさらに顕著である。このように解析結果に対する感度が非常に高いパラメータであるため、より高精度に値を決定することが必要である。

(4) 力学—水理学連成パラメータ

■亀裂拡大係数

通常の注入圧力条件下 (<2MPa 程度) では、亀裂拡大係数の差異が解析結果に与える影響は極めて小さい。一方、岩盤内に引張亀裂が生じるような高压の注入圧力条件下では、亀裂拡大係数の値が小さいほど周辺岩盤の圧力応答がやや小さくなる。

■亀裂縮小係数

亀裂縮小係数の値が、現場の初期応力の力換算値よりも低い 10^6N ~ 10^7N の値をとるとき、亀裂縮小係数の値が小さいほど周辺岩盤の圧力応答が小さく、亀裂縮小係数の差異が解析結果に与える影響はやや大きい。また、注入圧力が高いほどこの傾向が顕著である。

6. おわりに

本研究では、著者らが構築した粒状体DEM-CDN解析を現場に適用する上での入力パラメータ (微視的パラメータ) の決定方法を構築するとともに、パラメータ・スタディーによりパラメータの感度を明らかにした。これらの検討により、現場のデータから合理的に入力パラメータを決定することが可能となり、そのパラメータを測定する際に必要となる精度に関する知見を得た。

参考文献

- 1) Aoki, K., Mito, Y., Chang, C. S., Tasaka, Y. and Maejima T. (2007) "Hydromechanical coupled discrete modelling for the assessment of airtightness of unlined large rock cavern" 11th International Congress on Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, 2007
- 2) Cundall P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, in Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Vol.1, Paper No. II-8, 1971
- 3) Potyondy D.O. and P.A. Cundall: Modeling of Notch Formation in the URL Mine-By Tunnel: Phase IV - Enhancements to the PFC Model of Rock, Itasca Consulting Group, Inc., Report to Atomic Energy of Canada Limited, Ontario Hydro Nuclear Waste Management Division Report No. 06819-REP-01200-10002-R00, 1999
- 4) Aoki, K., Mito, Y., Matsuoka, T., Kondoh D. (2004) "Design of gas storage rock cavern by the hydro-mechanical coupled discrete model" Numerical modelling in Micromechanics via Particle Method, pp.289-300, 2004
- 5) 青木謙治, 水戸義忠, 松岡哲也, 近藤大介(2005) 高压ガス貯蔵岩盤タンク設計のための新しい岩盤の変形・浸透流解析手法の提案, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.447-452
- 6) 青木謙治・水戸義忠・田尾拓也・張傳聖・田坂嘉章・前島俊雄(2007) 岩盤タンクの気密性評価における応力-浸透流連成解析手法の適用性, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.35-38

EXAMINATION OF INPUT PARAMETERS IN HYDROMECHANICAL MODELLING FOR THE ASSESSMENT OF AIRTIGHTNESS OF CAVERNS

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Chuan Sheng CHANG, Kentaro ISOI, Yoshiaki
TASAKA and Toshio MAEJIMA

The authors have developed the hydro-mechanical coupled simulation method based on DEM and Channel-Domain network model. In this study, the input parameters for this method is theoretically examined, and the procedure of the determination of the parameters from the actual field data is developed. Furthermore, the parametric study for the sensitivity of the input parameters are carried out.