

地下空洞における吹付けコンクリートの乾燥収縮解析

Drying shrinkage analysis of shotcrete around underground cavern

松本康寿*・吉田秀典**

Yasuaki MATSUMOTO and Hidenori YOSHIDA

*学生会員 香川大学 大学院工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

**正会員 博士(工学) 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

The cracks on underground cavern are induced by the many factors. Especially, the major factor is the relative humidity and temperature conditions around underground cavern. In this paper, the cracking behavior of shotcrete around underground cavern is simulated by the finite element code with considering the underground cavern environment. First, the drying shrinkage cracking behavior of a concrete is modeled, and the sensitivity of the numerical parameters of the proposed model is examined. Secondly, the experimental drying shrinkage cracking of a shotcrete is reproduced by the proposed model, and the analysis results are compared with the measurement data. Finally, the safety of underground cavern is discussed.

Key Words : *drying shrinkage, crack, shotcrete, underground cavern, finite element analysis*

キーワード：乾燥収縮，ひび割れ，吹付けコンクリート，地下空洞，有限要素解析

1. はじめに

地上に混然と配置された建物，都市施設は都市機能や都市景観の低下要因となりうるため，都市空間を地下も含め立体的に構築することが，世界の多くの都市で実践されている．わが国の都市域でも地下施設が拡充されつつあり，電気，ガス，水道，通信施設等のライフラインの敷設，地下街，地下鉄，地下駐車場などの整備，さらに洪水時の防災施設となる地下調整池の建設等，地下空間が幅広い用途で利用されている¹⁾．

一方，山岳域での地下空間の利用例としては，地下発電所が挙げられる．地中深くに大空洞を掘削し，発電機を設置する地下発電所は，地形が急峻な所，雪崩が多いなど自然条件の厳しい所や，環境の保全が要求される所で用いられ，奥只見発電所や黒部川第4発電所をはじめ，多数の地下発電所が建設された．特に，総電力需要のうちピーク部分を賄う揚水式発電は，夜間の余剰電力で上部貯水池に揚水し，昼間の電力需要のピーク時に発電するため，上部貯水池と下部貯水池の中間地点に大規模な地下発電所が設置される．

これらの発電所の空洞掘削工事は NATM (New Austrian Tunneling Method) により進められた．NATM とは主に山岳部におけるトンネル工法の一つであり，掘削した部分を吹付けコンクリートで素早く固め，岩盤とコンクリートとを固定するためにロックボルトを打ち込み，地山自体の保持力を利用してトンネルを保持する工法である．NATM において，吹付けコンクリートは支保工を構成する重要な部材として機能し，地下発電所においても支保材として吹付けコンクリートが

使用されている．

しかしながら，近年施工された地下発電所の空洞壁面には，現地調査によれば多数のひび割れが発生していると報告されている（非公開資料）．ひび割れの発生要因として，施工時，現場労働者にとって良好な労働環境を維持することを目的とした換気条件により，吹付けコンクリートの湿潤養生が十分ではなかったことが考えられ，換気条件が比較的悪かった従来の発電所ではひび割れの密度が小さい傾向にある．ひび割れの発生は支保としての機能低下に加え，上部からの部材の剥落などの懸念を招く．コンクリート硬化後の長期的なひび割れ挙動は，地下空洞内空の温度・湿度変化による乾燥収縮が主な要因であると考えられる．そこで，地下発電所のような大規模空洞の支保の長期的な安全性を評価するためには，乾燥収縮現象を反映したモデルを構築する必要がある．

空洞支保の安全性を評価するためには，現場労働者にとって良好な労働環境を確保することを目的とした換気条件をふまえた吹付けコンクリートの乾燥収縮ひび割れ挙動を予測する必要がある，相対湿度など，施工環境が吹付けコンクリートに及ぼす影響因子を明らかにする必要がある．

地山応力によりトンネルに生じるひび割れをモデル化し，数値解析により評価したものはある²⁾．しかしながら，地下発電所空洞の吹付けコンクリートに発生したひび割れに関する既往の研究は少なく，特に，乾燥収縮に焦点をあて地下発電所空洞断面の環境状態を考慮に入れることが可能で，かつひび割れ挙動をモデル化し，さらにそれを用いて解析を実施した上で地下

発電所空洞の支保の安全性を評価した研究は筆者らの知る限り未だ行われていない。そこで、本研究では地下発電所空洞の吹付けコンクリートに対し、乾燥収縮挙動、ひび割れ挙動、およびコンクリート中の水分の逸散・移動挙動をモデル化し解析を実施した。それに先だって、提案モデルにおける解析パラメータの感度などについて検討した。最終的に、支保として機能する吹付けコンクリートの乾燥収縮ひび割れ挙動を再現することで、地下空洞支保の安全性を検証した。

2. コンクリート中の水分拡散の定式化

2.1 概要

本研究では、地下空洞の支保として重要な役割を果たす吹付けコンクリートに着目している。吹付けコンクリートの時間依存的挙動としては様々なものがあると思われるが、本研究で対象とされるサイトでは後掲する現場データ（図-5）から判る通り、空洞内の湿度ないしは温度変化に対応したひび割れの開口および閉口挙動が確認されている。一定応力化におけるクリープ現象の範ちゅうでは、こうしたひび割れの開閉挙動を説明するのは難しく、また、時間が相当経過しても確認されていることから自己収縮ということでもないと考えられる。つまり、空洞内の乾湿が繰り返されることでひび割れが発生し、その後に開閉が繰り返されていると考えられる。そこで、自己収縮や地山応力によるクリープについては考慮せず乾燥収縮に焦点をあてモデル化を行った。乾燥収縮挙動のモデル化に当たっては、コンクリート微細孔中の水分の逸散・移動過程を考慮しモデル化を行った。乾燥収縮ひび割れ挙動のモデル化に当たっては、コンクリートは脆性材料であり、また軟化挙動を示すためひずみ軟化モデルを採用し、有限要素解析によりひび割れ挙動の再現を試みた。

2.2 コンクリート中の水分挙動のモデル化

コンクリート中の質量保存則は、気相と液相に対し、次のように表すことができる。

$$\frac{\partial w_V}{\partial t} = -\nabla \mathbf{J}_V + v \quad (1)$$

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -\nabla \mathbf{J}_L - v \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 w_V は単位体積中の水蒸気の質量、 w_L は単位体積中の液状水の質量、 $\mathbf{J}_V$ は水蒸気の質量流速、 $\mathbf{J}_L$ は液状水の質量流速、そして v は相変化速度を表す。

一般に、コンクリートの内部を気体が対流により移動することは考え難く、気体相である水蒸気は、狭い経路において移動の制約を受ける。そこで、水蒸気の移動則は

$$\mathbf{J}_V = -K_V V_G D_{VO} \nabla \rho_V \quad (3)$$

にて表される³⁾。ここで、 K_V は水蒸気の移動に関する係数、 V_G は単位体積中における気相の体積、 D_{VO} は拡散係数、そして、 ρ_V は水蒸気の密度を表す。

細孔組織中において、コンクリートの単位体積中の気相の体積 (V_G) および液状水の体積 (V_L) には、以下のような関係が成り立つ。

$$V_O = V_G + V_L \quad (4)$$

ここで、 V_O は単位体積中の総細孔容積である。

単位体積中の水蒸気の質量 w_V と液状水の質量 w_L はそれぞれ、以下の様な関係を有する。

$$w_V = \rho_V V_G \quad (5)$$

$$w_L = \rho_L V_L \quad (6)$$

気体相は水蒸気と乾燥空気との理想混合気体と仮定すると、水蒸気分圧 P_V と密度には、以下のような関係がある。

$$P_V = \rho_V \frac{RT}{M_W} \quad (7)$$

ここで、 R は気体の状態定数、 T は絶対温度、 M_W は水の分子量を表す。

気相、液相の圧力関係は、Laplace 式より表わされる。

$$P_G - P_L = \frac{2\gamma}{r} \quad (8)$$

ここで、 P_G は気相の圧力、 P_L は液相の圧力、 γ は液状水の表面張力、 r は界面の曲率半径を表す。

水蒸気と液状水の熱力学的平行関係は Kelvin 式により表わされる。

$$\ln \frac{P_V}{P_{V0}} = -\frac{2\gamma M_W}{RT \rho_L} \frac{1}{r} \quad (9)$$

ここで、 P_{V0} は飽和水蒸気圧を表す。

水蒸気と液状水の質量保存則（式 (1) と式 (2)）の和をとり、さらに、単位体積中における水蒸気の質量が液状水のそれと比較して常に微小であり、その変化を無視できるものとする、水分の質量保存則が以下のように導かれる。

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -\nabla (\mathbf{J}_V + \mathbf{J}_L) \quad (10)$$

また、式 (3)～式 (9) より、

$$\mathbf{J}_V = -D_V \nabla w_L \quad (11)$$

が得られる。ここで、 D_V は水蒸気の拡散係数である。下村ら^{3),4)}は、同様の手法にて、液状水の移動則を

$$\mathbf{J}_L = -D_L \nabla w_L \quad (12)$$

と定義している。ここで、 D_L は液状水の拡散係数である。詳しくは文献^{3),4)}を参照されたい。

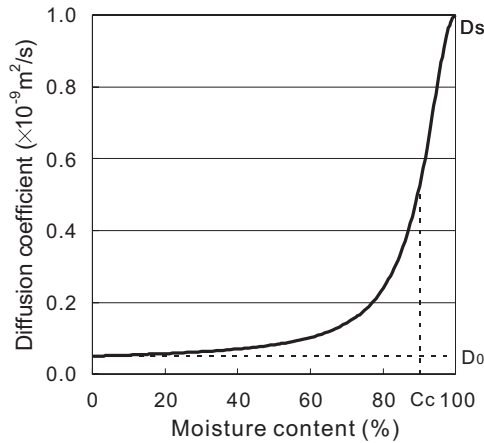


図-1 拡散係数の含水量依存性

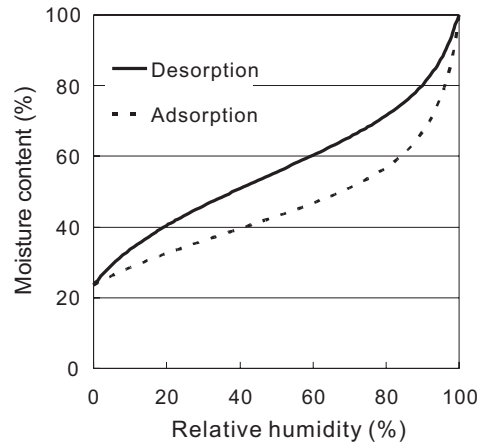


図-2 含水量および湿度の平行関係

式 (11) と式 (12) を式 (10) に代入すると、

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = \nabla(D\nabla w_L) \quad (13)$$

を得る。ここで、 D は水分拡散係数と称され、次式にて定義される。

$$D = D_V + D_L \quad (14)$$

これによって、水分の移動に関する支配方程式である式 (13) を用いることで、水蒸気と液状水を区別することなく、コンクリート中における水分移動の解析が可能となる。なお、本研究では、コンクリート中における水分は等方的に拡散するものと仮定する。

2.3 拡散係数のモデル化

本研究では、コンクリート材料の乾燥収縮を対象としていることから、式 (13) における拡散係数としては、コンクリート中における水分の拡散係数を与える。阪田ら⁵⁾は、Boltzman 変換を応用して、大きさの異なるコンクリート供試体の乾燥試験の結果から、含水率と拡散係数の関係を以下の近似式（図-1 参照）で表している。

$$D(C) = D_0 + \frac{D_S - D_0}{1 + ((100 - C)/(100 - C_c))^n} + \frac{D_S - D_0}{1 + (100/(100 - C_c))^n} \frac{C - 100}{100} \quad (15)$$

ここで、 D_S は飽和状態での拡散係数、 D_0 は絶乾状態での拡散係数、 C は含水率、 C_c は変曲点での含水率、 n は定数である。 n については、コンクリートの場合、0.50 ～ 2.00 の範囲であるとされており、一般に、水セメント比が大きいほど n は小さく、また、若齢期においても n は小さな値をとるという傾向が認められるが、それほど顕著なものではない⁵⁾。図-1 は $n = 2.00$ 、 $D_S = 1.00$ 、 $D_0 = 0.05$ 、 $C_c = 90\%$ とした時の含水率と拡散係数の関係である。阪田らにより実

験的に導出されたこの含水率と拡散係数の関係は、含水率が高い範囲においては拡散係数が急激な勾配を描き、含水率が 70 ～ 80 % 程度以下ではほぼ一定値になる傾向を呈している。この傾向は Bazant ら⁶⁾が提案したモデルとほぼ同じであったものの、実測によって得た意義は大きい。こうした Boltzman 変換を用いて実験的に含水率と拡散係数の関係を導出する研究は、その後秋田ら⁷⁾によっても試みられているが、含水率と拡散係数の関係は、阪田らと同様の結果が得られている。したがって、多くの研究者の検討より、含水率と拡散係数の関係は式 (15) にて表現が可能であることから、本研究でもこの関係式を採用する。しかしながら、この拡散係数の値はコンクリート中の含水率との関係から導出されたものであることから、周囲の環境湿度を境界条件とする解析などでは式 (15) を直接用いることはできず、コンクリート中の含水率と湿度との平衡関係が必要となる。また、含水率と湿度の平衡関係は図-2 に示すように乾燥過程と吸湿過程では異なる経路をたどる。そこで、秋田ら⁷⁾は実験よりこの平衡関係について、乾燥過程に関しては、

$$C = 296/(109 - H) - 447(21 + H) + 0.295H + 42.1 \quad (16)$$

吸湿過程に関しては、

$$C = 359/(107 - H) - 370(32 + H) + 0.189H + 31.7 \quad (17)$$

という近似式で提案している。ここで、 H は相対湿度を表す。式 (15) に式 (16) あるいは式 (17) を代入することで、拡散係数は含水率ではなく湿度に依存することになり、これによって境界条件として湿度を用いることが可能となる。本研究においては簡易のため乾燥過程の式 (16) を採用し、式 (15) に式 (16) を代入した場合を考え解析を実施した（図-3 参照）。

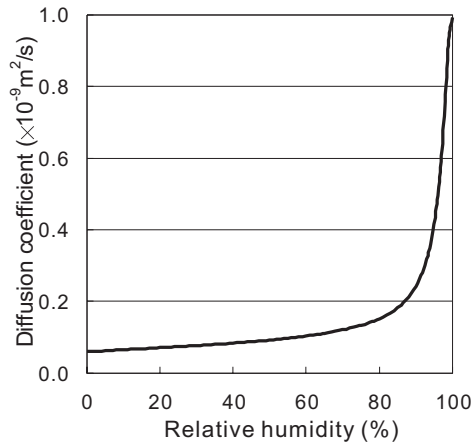


図-3 拡散係数の相対湿度依存性

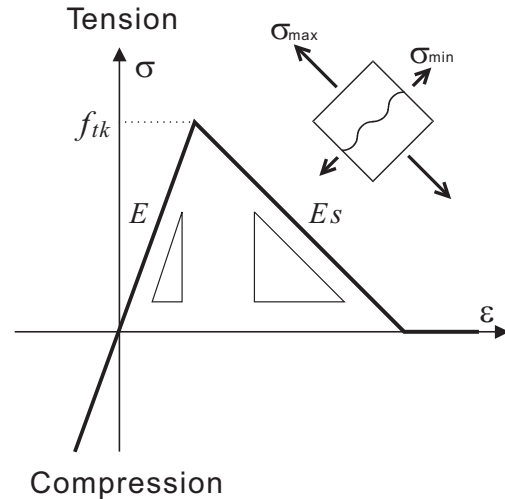


図-4 ひずみ軟化モデル

3. 乾燥収縮ひび割れ挙動の定式化

3.1 乾燥収縮のモデル化

前章にて説明した通り、一般に、硬化コンクリートは、乾燥によってコンクリート中の水分が逸散・移動し、それにもなう水分量の変化により収縮する。このメカニズムとしては、組織内部に存在する水分と組織の固体壁との間における応力のやりとりによって組織が変形するというのが一般的である（毛細管張力説）。しかしながら、コンクリート中の微視的レベルの応力のやりとりは観察／計測が不可能であり、この説も類推の域を出ない。しかも、前述の定式化の過程で明らかのように、コンクリート中の微視的機構に基づく水分移動モデルも、直接には検証不可能な多くの仮定の上に成り立っており、加えて実験より定まるパラメータも多々含んでいる。また、相対湿度 0～100%までの、乾燥収縮とペーストの水の損失の関係は、毛細管張力説のみで説明できるものではない。そのため、研究者によって異なるが、相対湿度 35%, 40%, 50%等を境界として、それ以上では毛細管張力説、それ以下では表面エネルギー説、膨張圧説、あるいはそれらの組み合わせで説明することが多いのが現状である⁸⁾。こうした状況の下で、毛細管張力説に基づいた収縮変形モデルを用いた解析が、必ずしも高精度で現象を再現できるとは限らない。

水分（湿度）の増減によってコンクリートがどれだけ伸縮するかについては、おおよその値は実験的に把握がなされている⁹⁾。

本研究では、多くの仮定や類推を含んだ毛細管張力説は採用せずに、過去の研究事例より、水分増分（相対湿度増分） dH とコンクリートのひずみ増分 ε^h の関係を

$$d\varepsilon^h = \alpha dH \quad (18)$$

と定義する。ここで、 α は材料定数となるが、これは

温度伸縮における線膨張係数と同じような物理的な意味を有する。本研究では、このような収縮は等方的に生じると仮定した。

$$d\varepsilon_{ij}^h = \alpha_{ij} dH \quad (19)$$

$$\alpha_{ij} = \alpha \delta_{ij} \quad (\delta_{ij} \text{ はクロネッカーのデルタ}) \quad (20)$$

と、式 (18) を拡張して用いる。

3.2 ひび割れ挙動のモデル化

乾燥収縮ひび割れ挙動のモデル化に際しては、引張軟化曲線を定義することによりひび割れ発生モデル化を行った。引張側では、コンクリートの弾性係数 (E) を有しながら引張強度 (f_{tk}) まで上昇し、引張強度に達した後は、勾配 (E_s) を有しながら下降することにより、クラックなどの発生にもなうひずみ軟化の挙動を再現できるようモデルを設定している。各要素において最大引張応力を求め、その応力が引張強度に達した場合、最大主応力方向 (σ_{max}) に対して垂直方向にクラックが入るものとしている。この場合、クラックの入った方向に対して直角となる方向にのみ軟化が生じ、他の 2 方向については軟化はさせず、弾性係数を保つものとしている。これにより、クラック発生・進展にもなう材料異方性の表現が可能となる。ひび割れ発生にもなう応力-ひずみ関係の概要を図-4 に示す。

解析では、設定した引張強度（後述しているが、本研究では 2.0MPa）に対して、ひび割れは 10cm 程度の間隔で発生した。文献¹⁰⁾に倣って、応力を開放することでひび割れの開口幅が 0.01cm 程度になると仮定すると、ひび割れによるひずみは 10^{-3} となる。こうしたことに合致するように軟化係数を 2000MPa と設定した。

なお、本研究では乾燥収縮によって発生する応力のレベルで解析を行うことから、圧縮域における構成則は弾性体としている。

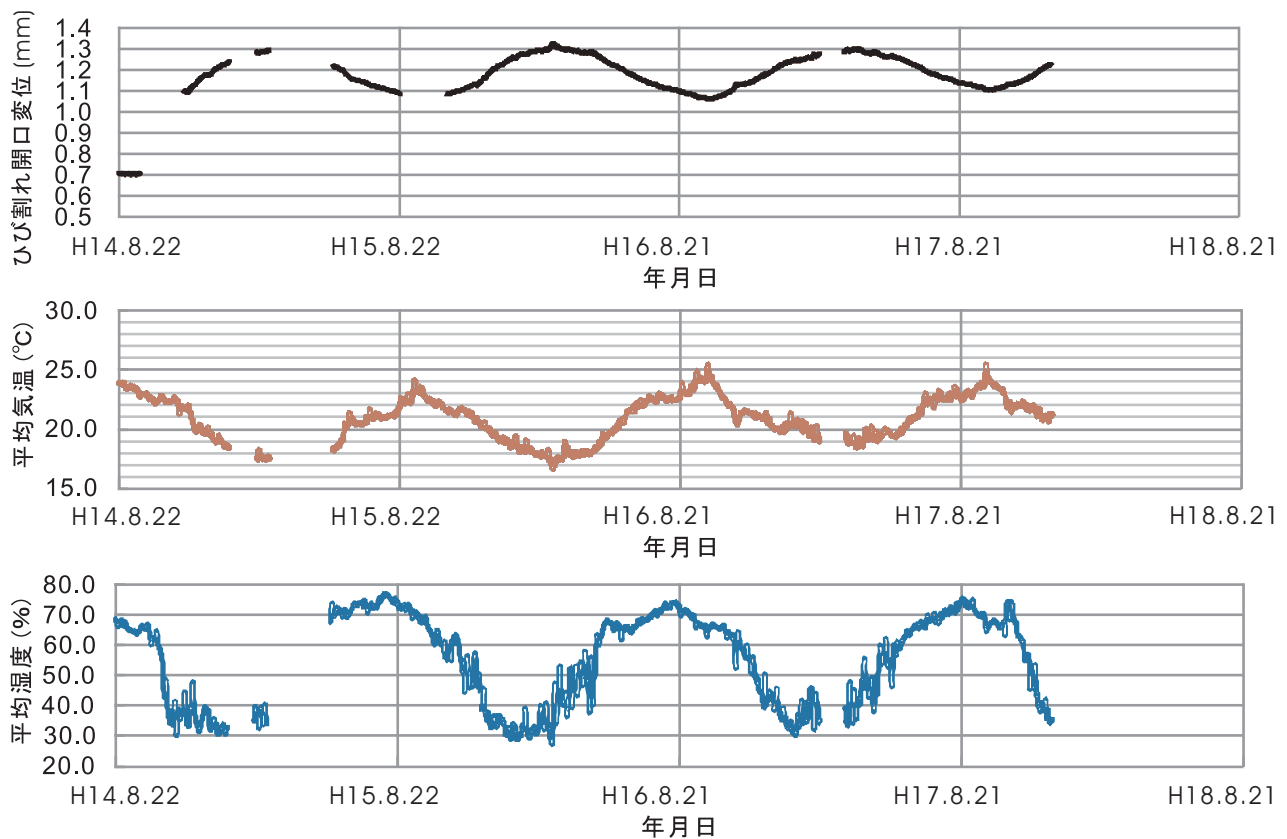


図-5 ひび割れ開口変位および平均気温・湿度分布（現地計測）

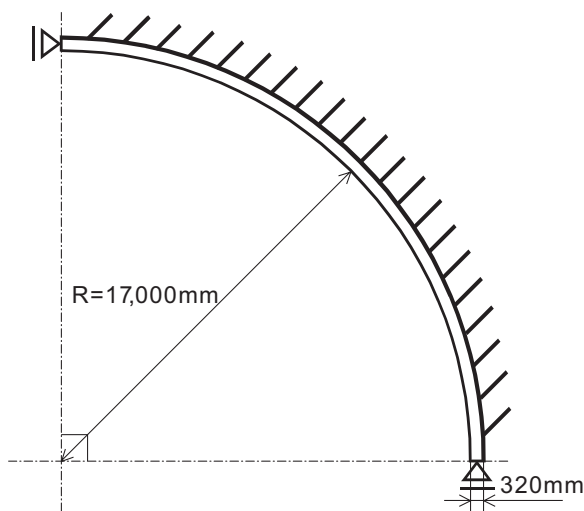


図-6 解析供試体寸法

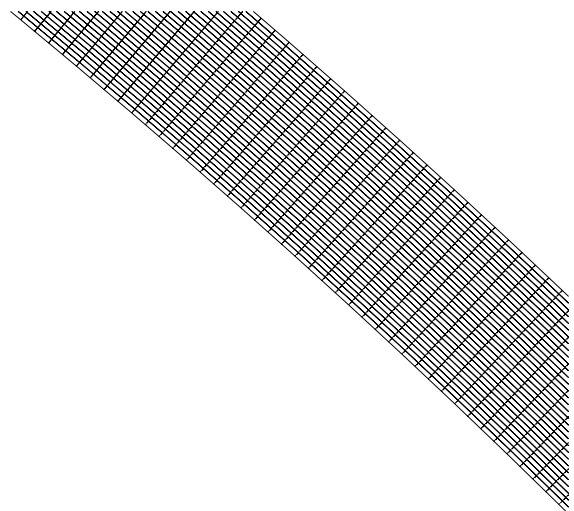


図-7 解析メッシュ（部分）

4. 発電所地下空洞におけるひび割れ進展予測

本研究では、近年施工された地下発電所で実際に得られたクラック変位、温度・湿度変化（図-5 参照）を参考に、提案モデルを用いて当該地下発電所における空

洞壁面のひび割れ進展を再現し、将来にわたる安全性を照査した。解析領域は、地下発電所空洞上半部の半円形断面を基に設定した。解析供試体寸法を図-6に、解析メッシュの一部分を図-7に示す。空洞の全断面を解析するのではなく、材料を等方均質と仮定し、その半分の領域のみを解析対象とした。なお、本解析は2

表-1 感度解析パラメータ

Case	拡散係数 D_s (m ² /s)	材料定数 α (1/%)	引張強度 (MPa)
Case1	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}	2.0
Case2	0.5×10^{-9}	1.0×10^{-5}	2.0
Case3	1.5×10^{-9}	1.0×10^{-5}	2.0
Case4	1.0×10^{-9}	0.5×10^{-5}	2.0
Case5	1.0×10^{-9}	1.5×10^{-5}	2.0
Case6	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}	1.5

次元平面ひずみとし、解析に用いた要素タイプは4節点のソリッド要素で、総節点数は23,793、総要素数は23,040である。

解析供試体の物性については、弾性係数は参考文献¹¹⁾を基に19600MPaと設定した。なお、吹付けコンクリートの材齢28日せん断強度は3.37MPa¹²⁾である。一般的に、コンクリートのせん断強度は圧縮強度の1/6～1/4程度であり、引張強度は圧縮強度の1/13～1/10程度となることが知られている¹³⁾。これより、吹付けコンクリートの引張強度は1.04～2.02MPaの範囲であると推測される。実際の引張強度の値が明らかではないため、ここでは引張強度を2.00MPaと設定した。

解析では、吹付けコンクリートの岩盤に接する面に相当する節点については地山との密着が保たれていると仮定し、 x 、 y 方向を変位固定した。その他の、拘束条件については、図-6に示した通りである。

また、境界条件として外気に接する地下空洞の内空には図-5を基に季節によって変動する実環境と同様の湿度変化を与えた。そして、岩盤側には内空側で夏季において80%の湿度が確認されていることに加え、岩盤側からは水分の供給も多く、かつ季節の変動も少ないものとして相対湿度90%を仮定して与えた。

図-5において、平均気温、平均湿度のそれぞれの変化と開口幅の変動に関連性があることが認められる。しかしながら、それぞれの変化が開口幅の変動にどの程度の影響を及ぼすのかは明らかではない。このことから、本来は解析において、平均気温とひび割れ開口幅の関連性も考慮すべきであるが、本研究で構築した乾燥収縮モデルは、その挙動が相対湿度に起因するという前提の下でモデル化していることから、相対湿度の変動のみに着目して解析を行うこととする。

本論文で用いたモデルの妥当性については、適切なパラメータを与えることによりコンクリート中の水分の逸散・移動挙動および、乾燥収縮挙動についてそれぞれ実験結果を的確に再現できることを参考文献¹⁴⁾において確認している。

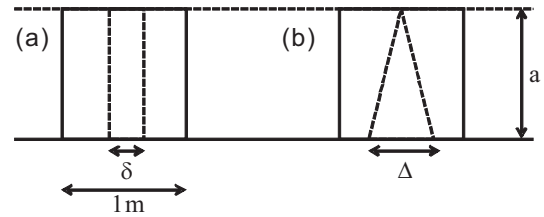


図-8 ひび割れ概要

4.1 感度解析

本モデルにおいては、湿度増分による材料定数 α 、拡散係数 D_s が乾燥収縮、およびひび割れ挙動に影響を与える因子として考えられることから、これら2つのパラメータについて感度解析を行うこととした。感度解析で用いたパラメータを表-1に示す。材料定数 α については、参考文献⁹⁾を参考に $1.0 \times 10^{-5}/\%$ をベースの値とした。この材料定数は単位湿度あたりにコンクリートが収縮膨張する係数であり、湿度1%の変化で、10 μ mの収縮膨張をコンクリートに生じさせるものである。

なお、表-1のCase1を解析ケースのベースとして解析パラメータの値を振り、感度解析を通して解析パラメータが本モデルにおける乾燥収縮、およびひび割れ挙動に及ぼす影響について検討した。また、安全側を考えCase6では引張強度を1.5MPaとしたものを設定した。なお、クラック変位については、解析で得られたひび割れ相当ひずみから、以下の式(21)を用いてひび割れ相当ひずみの平均を算出し、ひび割れ開口幅 $\delta = \bar{\varepsilon} \times 1\text{m}$ として、1m当たりのひび割れ開口幅として計算した。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^m \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}}{2} dx_i \quad (21)$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}$ はひび割れ相当ひずみの平均値、 l は解析対象となる地下発電所空洞壁面の周長、 ε はひび割れ相当ひずみ、 x はひび割れ相当ひずみを得る節点間の長さである。前述の通り、 $\bar{\varepsilon}$ はひび割れ相当ひずみの平均値であり、こうした $\bar{\varepsilon}$ より算出される δ は、模式的には図-8(a)に示すように要素のある方向に一定幅(開口変位 δ)を有しているというイメージになる。一方で、実環境でのひび割れの形状は図-8(b)のような形状をしている。そこで、本解析でのひび割れ開口変位 Δ は図-8(a)と図-8(b)の点線部分の関係を考慮することで、 $\Delta = 2\delta$ となる。なお、図-8の a はひび割れの長さに対応する。このようにして求まる Δ は、あくまでも単位長さ当たりの平均的な開口変位であり必ずしも実測の値と等価なものではない。しかしながら、実測においてはひび割れ間隔の計測が存在しないことから、解析結果と実測値を比較するために便宜的にこの Δ を用いる。

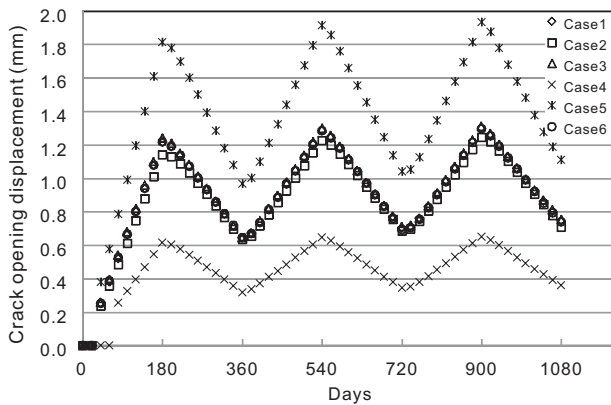


図-9 ひび割れ開口変位

4.2 解析結果

解析によって得た Case1～6 におけるひび割れ開口変位を図-9 に示す。また、図-10～図-15 に Case1～Case3 におけるコンクリート中の相対湿度分布、およびひび割れひずみ分布を示す。相対湿度分布を比較すると図-11 より、Case2 ではコンクリート中の湿度は表面以外全面にわたって高湿度下にあることが分かる。図-12 より Case3 では、コンクリート内部でも乾燥が進んでいることが分かる。これより、本モデルにおいて拡散係数が、コンクリート内部の湿度分布に与える影響については大きいことが確認できた。また、それにとともに図-14 より、Case2 ではひび割れは空洞壁面の表面上にほぼ等間隔にわずかに確認できる程度であるが、図-15 より、Case3 では等間隔に発現したひび割れが顕著に確認できる。また、Case2 と比較し、地下発電所の岩盤方向にひび割れが進展していることが分かる。一方で、図-9 より、拡散係数 D_s はひび割れ開口変位に対し顕著な影響を与えていないことが見て取れる。これは、本論文においてひび割れ開口幅を評価する際に、本来ならば、ひび割れが進展した領域全体を考慮すべきであるが、簡易のため空洞内空側の一層目の節点から得られたひび割れ相当ひずみを用いたためであると考えられる。しかし、ひび割れ開口幅の経時変化に与える影響は少なく、定量的な問題はともかく、時系列的な変化は図-9 と同様の傾向を示すと考えられる。図-16～図-18 に Case4～Case6 のひび割れひずみ分布を示す。これらの相対湿度分布に関しては、図-10 に示した Case1 の結果と同じであるので、そちらを参照されたい。図-9 より、材料定数 α がひび割れ開口変位に与える影響は大きく顕著であることが確認できる。図-16 に示したひび割れの発生状況から Case4 では、わずかながら表面上にほぼ等間隔に分布していることが見て取れる。一方、図-17 に示したひび割れの発生状況から Case5 については、Case4 と比較し顕著なひび割れの進展が確認され、ひび割れの性状をみ

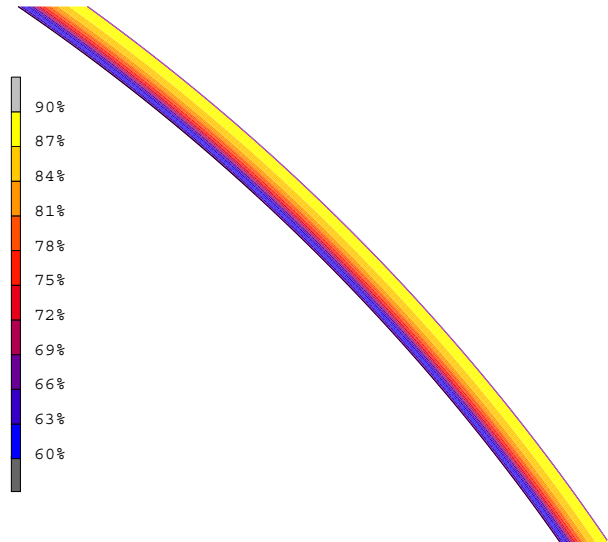


図-10 相対湿度分布 (Case1, 3 年後)

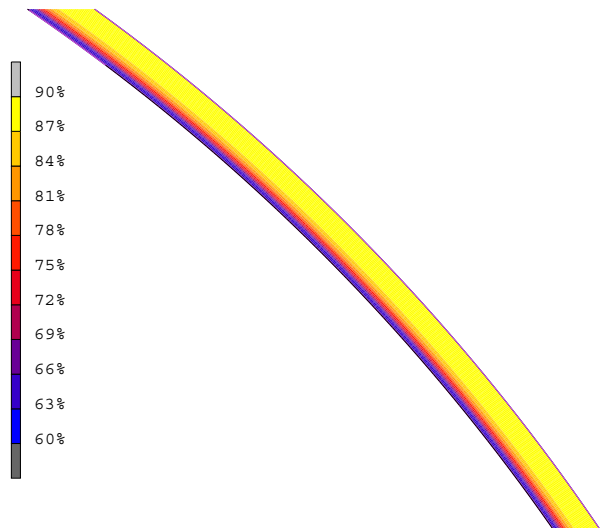


図-11 相対湿度分布 (Case2, 3 年後)

ても、Case4 と比較しひずみが大きく、一部のひび割れにひずみが集中し、変形が局所化していることが伺える。Case1 に対して引張強度を少し低減させた場合、図-9 より、引張強度がひび割れ開口変位に与える影響については、小さいことが考えられる。しかしながら、図-13 (Case1) と図-18 (Case6) を比較すると、Case6 については、ひび割れがやや局所化していることが確認できる。また、ひびわれ性状については、Case1 と比較し、ひび割れの間隔が広がっている。これは、Case1 と比較し引張強度が低いために応力再配分に伴う応力の増加により、ひび割れの局所化が進んだためであると考えられる。

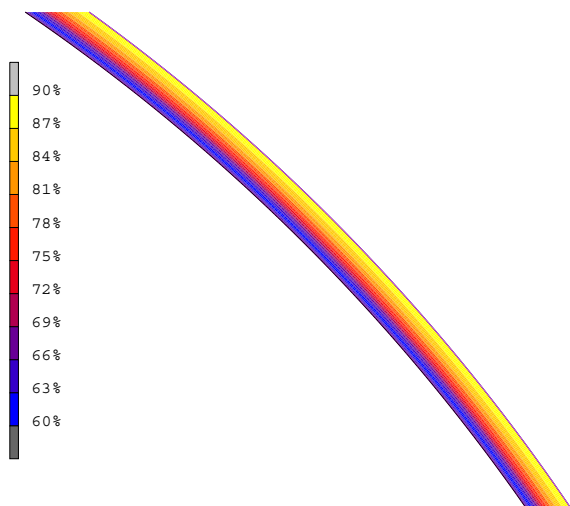


図-12 相対湿度分布 (Case3, 3 年後)

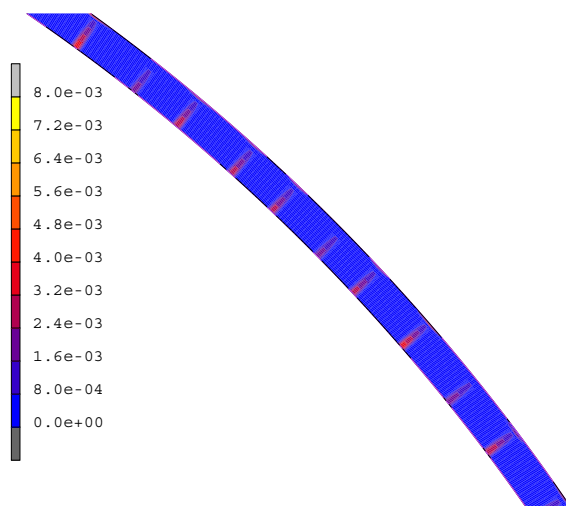


図-15 ひび割れ相当ひずみ (Case3, 3 年後)

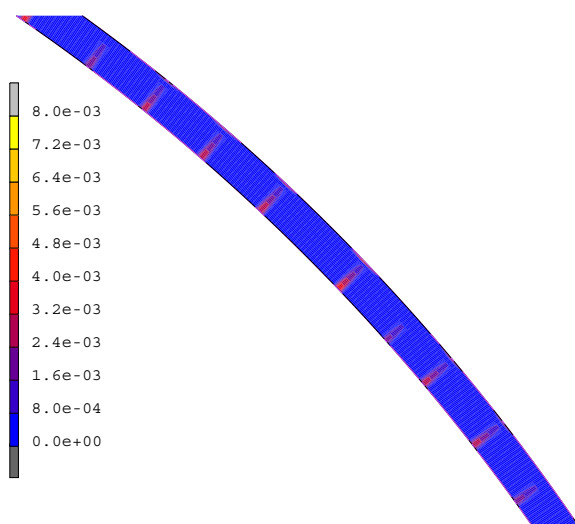


図-13 ひび割れ相当ひずみ (Case1, 3 年後)

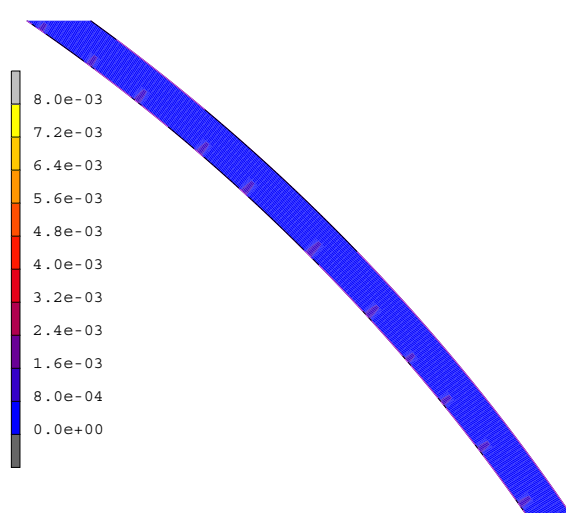


図-16 ひび割れ相当ひずみ (Case4, 3 年後)

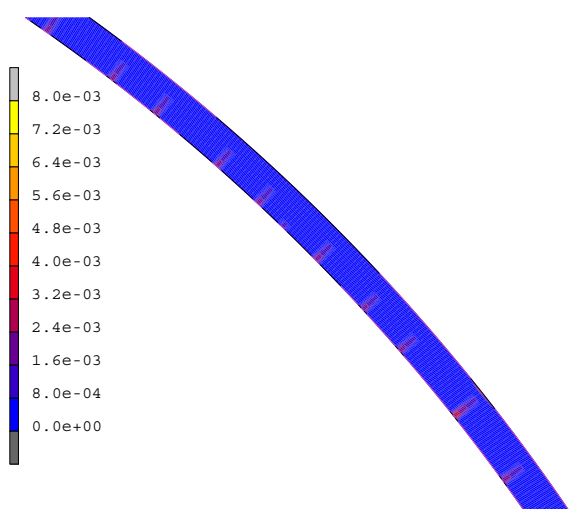


図-14 ひび割れ相当ひずみ (Case2, 3 年後)

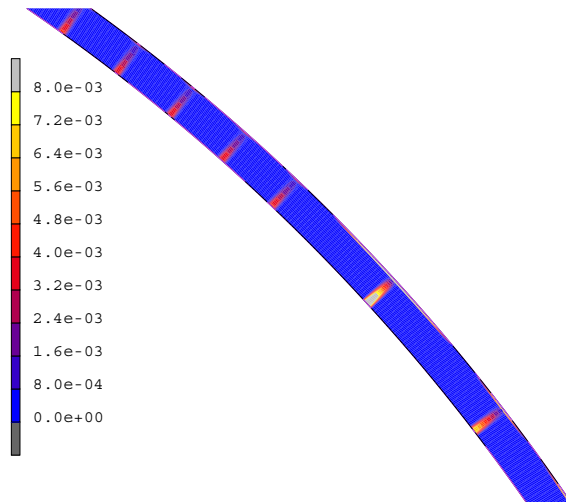


図-17 ひび割れ相当ひずみ (Case5, 3 年後)

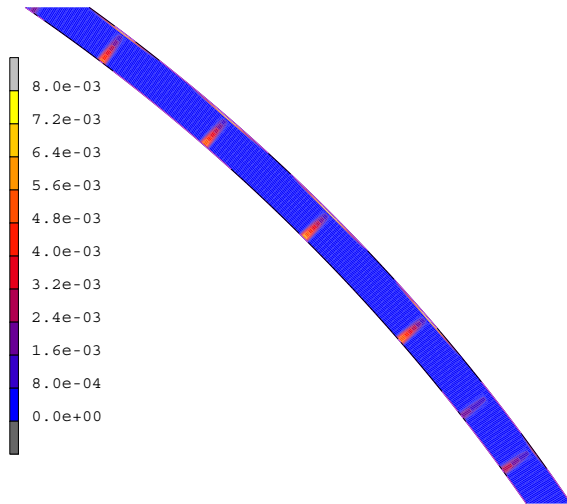


図-18 ひび割れ相当ひずみ (Case6, 3 年後)

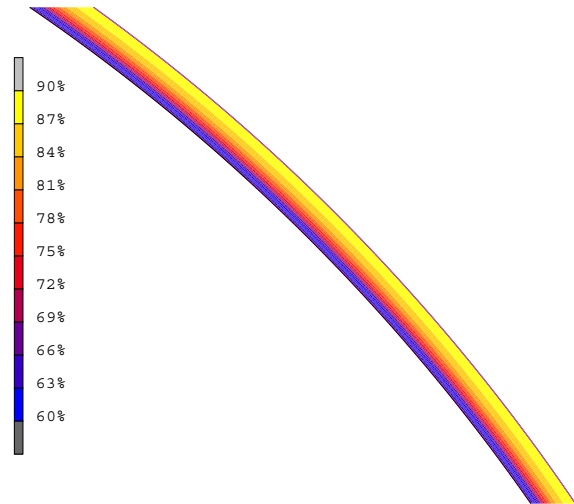


図-20 相対湿度分布 (5 年後)

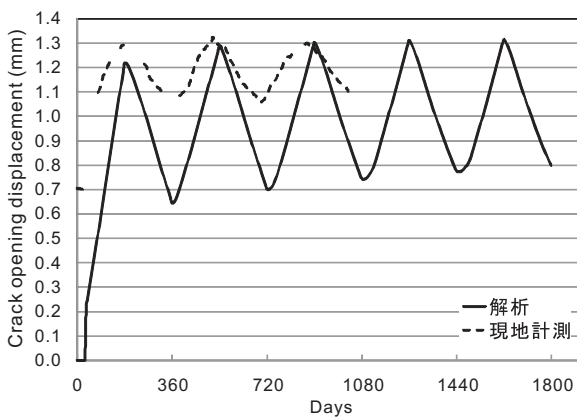


図-19 ひび割れ開口変位 (解析, 現地計測)

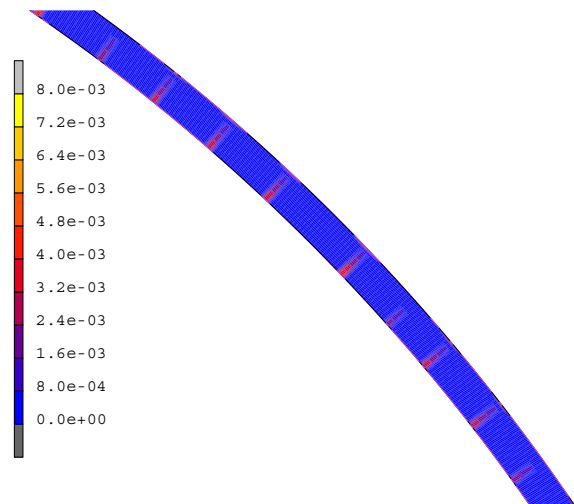


図-21 ひび割れ相当ひずみ (5 年後)

4.3 現場計測との比較

前節における感度解析を参考に実際の地下発電所で計測されたひび割れ進展を最もよく再現できる解析パラメータを同定し、本節では、当該地下発電所でのひび割れ進展の再現、および将来予測を試みる。図-19 に 5 年間のひび割れ進展を再現した解析結果および、現場での計測結果を併記したものを示す。なお、解析にあたっては表-1 中の Case1 のパラメータを用いた。図-19 に示した解析より求まったひび割れ開口変位を、併記した実際の地下発電所空洞で得られたひび割れ開口変位と比較すると、数値解析と現場計測ではクラック変位の変動幅に違いがみられるが、これは吸湿・乾燥過程で同一モデルを用いたために生じたものであると考えられる。また、計測は人間の目視によるものであり、人的な誤差もあることから（特に開口レベルが小さい場合）、解析との比較は必ずしも容易ではないと考えられる。

ひび割れ開口変位は、2 年後をピークにおおよそ収束していることが確認できる。地下発電所空洞においても、ひび割れ開口変位はおおよそ収束している。本モデルにおける 5 年間のひび割れ開口変位をみても 2 年目以降に収束していることが確認されており、これより乾燥収縮ひび割れはこれからも長期的なひび割れ開口変位の観測は必要であるが、今後大きな進展はないものと思われ安全なものと判断できる。参考までに、図-20、図-21 にそれぞれ 5 年後の相対湿度分布および、ひび割れひずみ分布を示す。実際の計測現場において、構造物中の相対湿度分布、ひび割れ深度を把握することは困難だが、本モデルを用いることにより、解析結果から容易に相対湿度分布および、ひび割れ深度をとらえることができる。3 年後と 5 年後、つまり図-10 と図-20、図-13 と図-21 を比較すると、それぞれにおいてほとんど変化が見られず、乾燥現象やひび割れの進展が収束していることがこれからも分かる。

5. まとめ

本研究では、コンクリート中の水分の逸散・移動にともなう乾燥収縮現象をモデル化し、さらにひずみ軟化モデルを組み合わせて乾燥収縮ひび割れ挙動を再現可能な簡易モデルを提案し、地下発電所空洞におけるひび割れ進展解析と現場計測との比較を行い安全性を照査した。

まず、感度解析を通し、材料定数、拡散係数といった影響因子がひび割れ開口変位に与える影響について考察を加えた。その結果、材料定数 α はひび割れ開口変位に大きく関与し、ひび割れ性状にも顕著な影響を与えることが確認できた。

一方、拡散係数については、地下発電所空洞の相対湿度分布、ひび割れ性状に大きく関与しているが、ひび割れ開口変位に対しては顕著な違いが見られなかった。これは、本論文においてひび割れ開口幅を算出する際に地下空洞内空の1層目の節点から得られたひずみを用い、ひび割れ深度について考慮していなかったことが挙げられる。これより、今後の研究においてひび割れ深度を考慮したより適切なひび割れ開口幅の評価手法の構築が今後の課題として明らかとなった。また、安全側を考え引張強度を1.5MPaとして解析を行った。その結果、ひび割れ開口変位に大きな違いは見られなかったが、ひび割れ性状発生頻度に顕著な違いがみられた。

次に、地下発電所空洞で計測された実現象の再現を通し、将来にわたる地下空洞壁面における安全性を照査した。その結果、本解析モデルにおいて適切なパラメータを与えることにより環境変化にともなうひび割れの挙動の再現が可能であり、特に実際の壁面における冬季ひび割れの開口ピーク変位を概ね再現することができた。また、5年後の将来予測を行い安全性の照査を行い安全の確認ができた。なお、本解析モデルは、乾燥収縮、および乾燥収縮挙動に影響を与える因子の

ひとつである温度条件について考慮できていないことから、温度条件の取り込み、モデル化を今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 竹林重夫, 志田亘: 地下空間を拓く—地下空間建設技術—, 山海堂, pp.13-16, 1994.
- 2) 小島芳之, 津野究, 佐野信夫, 伊藤哲男, 馬場弘二, 松岡茂, 川島義和: 三次元効果を考慮したトンネル覆工のひび割れ進展と力学特性, 土木学会論文集F, pp.53-66, 2006.
- 3) 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.35-45, 1995.
- 4) 下村匠, 福留和人, 前川宏一: 微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析, 土木学会論文集, No.514/V-27, pp.41-53, 1995.
- 5) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, No.316, pp.145-152, 1981.
- 6) Bazant, Z. P. and Najjar, L. J.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972.
- 7) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.61-69, 1990.
- 8) コンクリートの実像—その性能と性状—: 戸祭邦之, 理工図書, pp.220-229, 1999.
- 9) 籠橋忍, 伊藤祐樹, 堀部謙, 森本博昭: コンクリートの乾燥収縮ひずみと相対湿度との関係に関する研究, 土木学会中部支部研究発表会公演概要集, pp.523-524, 2002.
- 10) 破壊力学の応用研究委員会報告書: 三橋博三, 日本コンクリート工学協会, 26p, 1993.
- 11) 田坂嘉章, 宇野晴彦, 大森剛志, 工藤奎吾: 節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析手法による地下発電所空洞掘削の解析, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 No.104, pp.575-580, 1998.
- 12) 工藤奎吾, 大規模地下空洞掘削への情報化設計施工技術の適用研究, 神戸大学博士論文, 152p, 1999.
- 13) 土木材料学: 岡田清, 明石外世樹, 小柳治, 国民科学社, pp.276-231, 1998.
- 14) 吉田秀典, 松本康寿: コンクリートの乾燥収縮挙動に関する簡易モデルの提案, 計算数理工学論文集, Vol. 7, No. 2, pp.297-302, 2008.

(2009 年 9 月 24 日 受付)