

マイクロメカニクスに基づく多孔質脆性材料の
凍結融解作用による劣化のモデルMICROMECHANICAL MODEL OF DETERIORATION OF
POROUS BRITTLE MATERIAL DUE TO FREEZING AND THAWING

堀 宗朗*・森広 英和**・柳沢 栄治***

Muneo HORI, Hidekazu MORIHIRO and Eiji YANAGISAWA

*正会員 Ph.D. 東京大学助教授 工学部 土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

**正会員 工修 NTT データ通信 (〒210 神奈川県川崎市幸区堀川町 66-2)

***正会員 工博 東北大学教授 工学部 土木工学科 (〒980 宮城県仙台市青葉区青葉)

Deterioration under low temperatures has been a major concern for brittle porous materials such as concrete. The mechanism of the deterioration, however, is not fully understood, and needs to be clarified as these materials are being used in severe environments. Based on a commonly accepted hypothesis that the deterioration is caused by the damage of micro-pore structures, this paper constructs the following micromechanical model: the pore structures are modeled as numerous microcracks and the damaging effects are represented by forces that act on microcracks to open them. The degree of the deterioration is analyzed by computing the overall growth and opening of microcracks, and quantified in terms of the residual strain or the loss of effective elasticity. The deterioration process of concrete is simulated under various conditions, and the validity of the model is verified by comparing the computation results with available experimental data. To demonstrate the applicability of the proposed model, this paper conducts the deterioration analysis of a rock cavern which stores very cold substances, which is coupled with the stress and thermal conductivity analysis.

Key Words : deterioration due to freezing and thawing, micromechanics, fracture mechanics, effective property

1. 序論

一般に、コンクリートや岩のような多孔質脆性材料は湿潤状態にある場合に凍結融解の繰り返しを受けると劣化^{1),2),3)}をする。劣化によって非可逆的膨張・強度等の物性低下の他、破壊等に至ることもある。寒冷地方で共用されるコンクリート構造物には凍結融解作用による劣化が発生する可能性があり、AE 剤の開発に見られるような対策が講じられている⁴⁾。近年、コンクリートはより苛酷な低温環境で使用されることが期待されており⁵⁾、低温劣化に対する有効な対処が必要とされている。同様に、岩盤中の地下構造物に LNG 等の極低温物質を貯蔵する計画も検討され^{2),6)}、凍結融解作用を受ける岩盤の挙動や劣化に関する関心も高まっている。低温下・極低温下での劣化を防止し被害を最小とするためには、劣化メカニズムの解明が本質的に重要である。この結果、劣化度の定量的な予測が可能となれば、劣化に体する材料・部材・構造物の長期の安全性を合理的に保障することができる。

多孔質脆性材料の低温劣化は「材料のゆるみ」として理解されている。しかし、微視構造に着目する場合、細孔構造の損傷に起因する¹⁾と考えられており、次のような仮説が広く受けいられている(詳細な文献リス

トについては[3]参照)。

細孔水の凍結による体積膨張(9%)によって細孔に引張応力が発生し、微視的な破壊によって劣化に至る。細孔水は細孔構造内を移動し、劣化作用が促進される。

さまざまな実験^{1),7)}や観察⁸⁾によってこの仮説は検討されており、現象論的に妥当性が支持されている。しかし、仮説自体を理論的に検討することは行われておらず、劣化度の予測を可能とするような劣化解析の手法は確立されていない。これは、劣化過程に影響する要因が多数であるため、現象のモデル化が難しいことが主な原因であると思われる。実際、コンクリートの劣化度は、材料の種類の他に凍結融解の温度範囲・繰り返し・作用応力等に依存して変化することが多数報告されている。

低温劣化による材料・部材・構造物の劣化度を合理的に予測することを念頭に、本研究は多孔質脆性材料の凍結融解作用による劣化過程を細孔構造の損傷という上記の仮説に基づいてモデル化することを試みる。具体的には、複雑な細孔構造と細孔水の作用を単純な微視亀裂群と微視亀裂を開口させる力によって理想化し、低温劣化を材料内の微視亀裂の進展として解析す

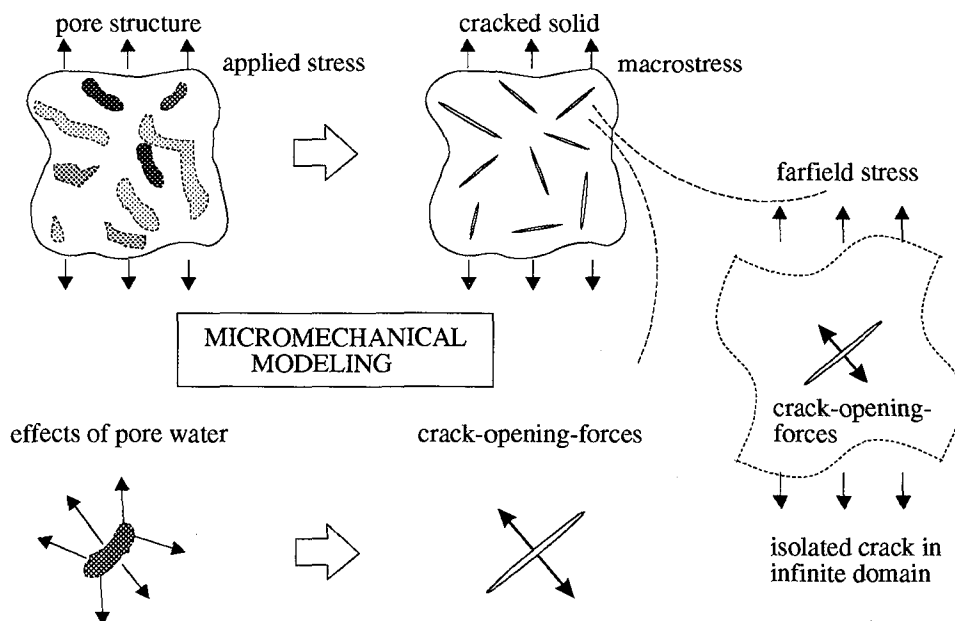


図1：マイクロメカニクスに基づく劣化過程のモデル

ることを目標とする。なお、破壊力学と不均一体理論⁹⁾を適用することで、微視亀裂の進展の度合は解析的に算定され、進展量は実験で測定される劣化指標に対応することができる。構築されたモデルを用いて供試体レベルの劣化過程のシミュレーションを行ったところ、計算結果は種々の実験データ^{1),5),7)}とある程度定量的に一致しモデルの妥当性が支持された。ついで、構造物レベルの劣化をシミュレートするために、岩盤内の地下空洞²⁾の劣化解析を行ったところ、直観的に妥当と思われる計算結果が得られモデルの有効性も示唆された。なお、岩盤内の温度や応力の分布が劣化度に及ぼす影響が加味されているため、構築されたモデルに基づく劣化解析は熱伝導・力学解析と連成するという特徴を持っている。

2. 劣化過程のモデル化

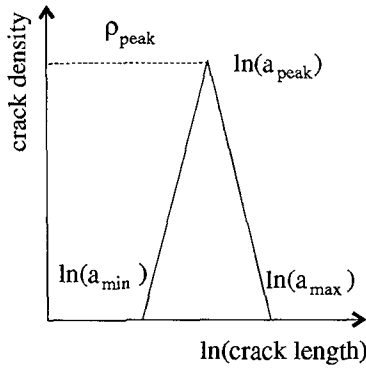
劣化は細孔構造の損傷に起因している^{1),7),8)}ため、亀裂損傷力が作用する微視亀裂群を持つ亀裂損傷体³⁾を多孔質脆性材料の微視構造のモデルとする(図1参照)。微視亀裂が細孔のモデル、亀裂損傷力が細孔内で凍結融解する水分のモデルとなっており、損傷力による微視亀裂の進展が劣化現象に対応する。なお、空隙率・細孔分布・強度等の低温劣化の内的特性は微視亀裂の分布や損傷体の特性として取り込み、温度履歴・湿潤率等の外的要因を適当な亀裂損傷力を選定することで表現する(劣化要因に関しては[4]参照)。また、材料に働く応力は損傷体の平均応力とみなされる。実験で用いられる劣化度の指標は、供試体の残留ひずみや弾性の低下である。マイクロメカニクスに基づく不均

一体の有効物性理論⁹⁾では、亀裂損傷体のひずみや有効弾性は亀裂群の開口や進展によって解析的に与えられるため、このような指標をモデルから算定し実験結果と比較することが可能となる。

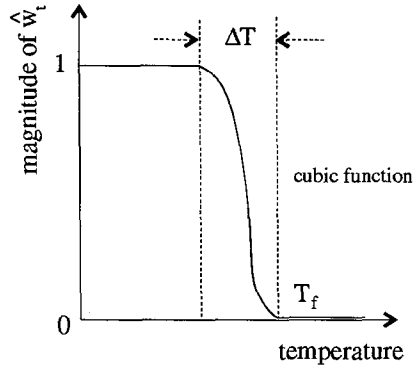
2.1 モデルに設けられた仮定と近似

モデルの構築に際して、材料内の微視亀裂の分布や亀裂損傷力の温度履歴依存性等を設定しなければならない。劣化要因が詳細に設定されると、モデルの解析から得られる劣化の予測も正確になるが、本研究ではモデルの概略の妥当性を検証するために、以下に示す仮定と近似に基づいて比較的簡単に劣化要因を設定することとした。

1. 微視亀裂は凍結融解作用で損傷を被る細孔を代表するため、損傷体内に位置・向きともランダムに分布することを仮定する。亀裂長は細孔径に対応するため、細孔分布特性を簡略化して亀裂長 $2a_0$ の亀裂の密度を図2aに示す $\rho(a_0)$ によって表す。亀裂密度は単位面積毎の亀裂の個数に a_0^2 を掛けたものであり、図2aの3角形分布は $a_{max} \cdot a_{peak} \cdot a_{min} \cdot \rho_{peak}$ の4つのパラメータによって決定される。
2. 細孔が水で飽和した状態を想定し、亀裂長 a の微視亀裂に働く亀裂損傷力を $P = apw$ と仮定する。 p は凍結した細孔水が細孔壁に及ぼす最大の圧力であり、 w は凍結過程の温度依存性を表す重み $w_t(T, h)$ と蓄積された損傷を表す重み $w_d(h)$ の和である。 T と h は温度と温度履歴であり、 h は例えば n サイクルの凍結融解時の亀裂長を a_n とすると $\{a_n\}$ として与えられる。また、 $w_t(h) = \hat{w}_t(T, a)\Pi(1 + \alpha_t(a_m - a_{m-1}))$ と $w_d(h) = \alpha_d(a_n - a_0)$ と仮定す



a) distribution of crack



b) dependence of $\hat{w}_t$ on temperature

図2：近似的に決定された関数 ρ と関数 $\hat{w}_t$

る。ここで、 $\hat{w}_t(T, a)$ は径 a の細孔内での凍結過程を表し（図 2b 参照）、 α_t と α_d は定数である。

3. 細孔の損傷は複雑であるが、簡単のために微視亀裂は折れ曲がらずに真直に進展することを仮定する。また全ての微視亀裂に次の共通の破壊基準を適用する。

$$K_c = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (K_I > 0), \quad (1)$$

ここで、 K_c は母材の破壊靱性であり、 K_I と K_{II} はモード I と II の応力集中係数である。この破壊基準は亀裂先端のひずみエネルギーに関するものであり、 $K_I > 0$ の条件は進展時に亀裂が開くことを意味している。

2.2 定式化

簡単のため、微視亀裂間の相互作用を無視し損傷体の平均応力 $\bar{\sigma}_{ij}$ を遠方応力 σ_{ij}^∞ とみなして、各亀裂の挙動を無限体中の孤立亀裂によって解析する（図 1 参照）。損傷体が等方かつ線形弾性体の場合、長さ $2a$ 方向 θ の微視亀裂の応力集中係数と開口変位は次のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \begin{Bmatrix} P \\ 0 \end{Bmatrix} + \sqrt{\pi a} \begin{Bmatrix} \sigma_{nn}^\infty \\ \sigma_{ns}^\infty \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} [u_n] \\ [u_s] \end{Bmatrix} = \frac{\kappa + 1}{2G} \left\{ \frac{P}{\pi a} \left(a \ln \left| \frac{a}{x} \right| + \sqrt{\pi(a^2 - x^2)} \right) + \sigma_{nn}^\infty \sqrt{\pi(a^2 - x^2)} \right\} \quad (3)$$

ここで、 n と s は亀裂面の直角方向とせん断方向を示し、 G はせん断弾性係数、 κ はポアソン比 ν によって $3 - 4\nu$ として与えられる。

亀裂損傷体の有効弾性は亀裂密度によって計算される⁹⁾。式 (1,2) より初期亀裂長 $2a_0$ 方向 θ の微視亀裂の

長さが $2a(a_0, \theta)$ になった場合、有効ヤング係数は

$$\frac{\bar{E}}{\bar{E}_0} \approx \frac{\int_R \int_0^{2\pi} \rho(a_0) a^2(a_0, \theta) da_0 d\theta}{\int_R \int_0^{2\pi} \rho(a_0) a_0^2 da_0 d\theta}. \quad (4)$$

となる。ここで、 $\bar{E}_0$ は初期ヤング係数であり、 R は a_0 に関する積分領域である。

同様に、微視亀裂の開口から損傷体の亀裂ひずみ ϵ_{ij}^c が計算される。なお亀裂ひずみは細孔構造の損傷に伴う材料の膨張や非可逆ひずみに対応する。亀裂長 $2a$ 方向 θ の微視亀裂の法線ベクトルを n_i 、開口変位を式 (3) の $[u_i]$ とすると、この亀裂の開口の寄与が $\epsilon_{ij}^c(a, \theta) = 1/(\pi a^2) \int_{-a}^a \text{sym}\{[u_i] n_j\} dx$ であるため、亀裂ひずみは次のように与えられる。

$$\bar{\epsilon}_{ij}^c = \frac{1}{2\pi} \int_R \int_0^{2\pi} \rho(a_0) \epsilon_{ij}^c(a, \theta) da_0 d\theta. \quad (5)$$

3. モデルの妥当性の検討

モデルは劣化過程の定性的な仮説に立脚しているが、劣化解析に利用できることを示すために妥当性を定量的に検証する。劣化度の推定の際の最大の問題は、亀裂損傷力 P の設定である。適切な温度や履歴の関数として P を与えることで亀裂群の複雑な進展の状況が算定され、モデルが統一的に現象を再現することが期待される。

3.1 モデル内の定数の決定

提案されたモデルのパラメータの大多数は、実験データ^{1),7)}を用いて決定できる。以下のシミュレーションでは、1) コンクリートの材料特性として $E = 3.3 \times 10^3 [N/m^2] \cdot \nu = 1/6 \cdot K_c = 2.0 \times 10^4 [Pa/\sqrt{m}]$ (線膨張係数 $K = 9.4 \times 10^{-6} [1/^\circ C]$)、2) 細孔構造特性として $a_{min, peak, max} = 10^{-7, -6, -5} [m]$ 、3) 凍結過程特性として $T_f = 273(1/\exp(3.3/(a - 10) - 1) [^\circ C]) \cdot \Delta T = -70 [^\circ C]$ を用いた。

モデルを最終的に構築するには、 $p \cdot \alpha_t \cdot \alpha_d$ の3つ

の定数を決定する必要がある。なお、 p は凍結細孔水が細孔壁に与える圧力であり、 α_t と α_d は損傷の蓄積のパラメータである。本研究では $p = 1.0 \times 10^8 [N/m^2]$ 、 $\alpha_t = 0.02$ 、 $\alpha_d = 0.05$ とした。これは、劣化過程に及ぼす温度履歴の影響が顕著に現れる次の2つの現象¹⁾、1) 凍結融解1サイクル後の劣化度は最低冷却温度と最高加熱温度に依存、2) 凍結融解サイクルの増加に伴い劣化度は徐々に増加、を最も適当に再現することから決定されている。

決定されたパラメータを用いてモデルを解析し、劣化過程のシミュレーションを行った。上記の2つの現象に関して得られたシミュレーションの結果を図3に示す。現象1) に対応して図3aに最低冷却温度と劣化

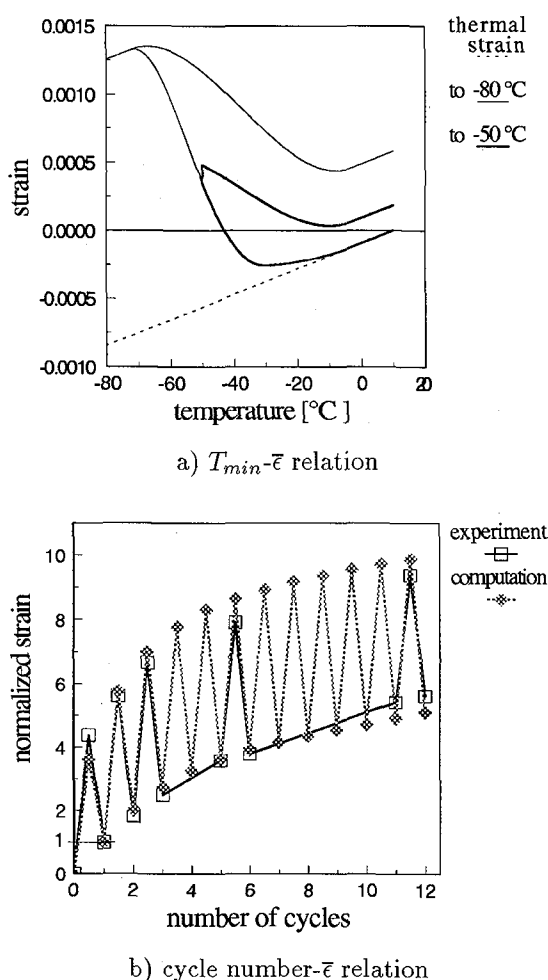


図3：最低冷却温度と凍結融解の繰り返し回数が残留ひずみに及ぼす影響

による膨張の関係を示す。縦軸は-80度まで冷却された時の膨張量が基準となっており、実験データ¹⁾との比較から解析結果が良好に実験データを再現をしていることが示された。さらに、現象2) に対応して図3bに凍結融解の繰り返し回数と各サイクルでの最大ひずみと

残留ひずみの関係を示す。縦軸に1サイクル終了時の残留ひずみを基準として、実験データ⁵⁾をプロットすると良好な一致が得られた。 P の温度履歴依存性は比較的簡単なものが使われているにもかかわらず、この2つの現象が良好に再現されている。したがって、亀裂進展によって劣化現象を表したモデルの妥当性が伺える。

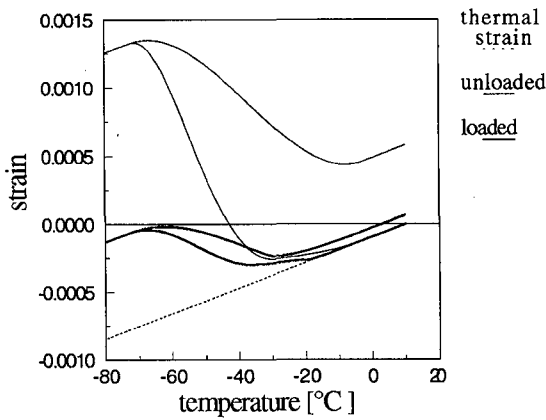
3.2 材料に作用する応力の影響

劣化過程が微視的破壊という力学現象で捉えられているため、同じ材料に同じ凍結融解作用がかかる場合でも材料に働く応力によって劣化の度合いが変化することが予想される。実際、実験観察によってもこの現象は報告されており³⁾、適当な大きさの拘束が与えられる場合には劣化は抑制される傾向にある。上で設定されたパラメータを変えずにこの現象をシミュレートし、モデルの妥当性を検証することを試みる。亀裂損傷体に圧縮応力が作用する場合 (loaded) と作用しない場合 (unloaded) の温度と全ひずみの関係の典型的な例を図4a示す。ここでは、亀裂損傷体に $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{11}$ と $\bar{\sigma}_{22} = \bar{\sigma}_{12} = 0$ の一軸応力が作用する場合が想定されており、損傷体の平均ひずみは、線膨張係数 K によって決定される熱ひずみを $\epsilon_{ij}^t = K \Delta T \delta_{ij}$ として、熱ひずみと亀裂歪の和、 $\bar{\epsilon}_{ij} = \epsilon_{ij}^t + \bar{\epsilon}_{ij}^c$ 、によって計算されている。圧縮応力によって温度-ひずみ関係のヒステリシスが小さくなることが示されているが、この傾向は実験データ³⁾と一致している。

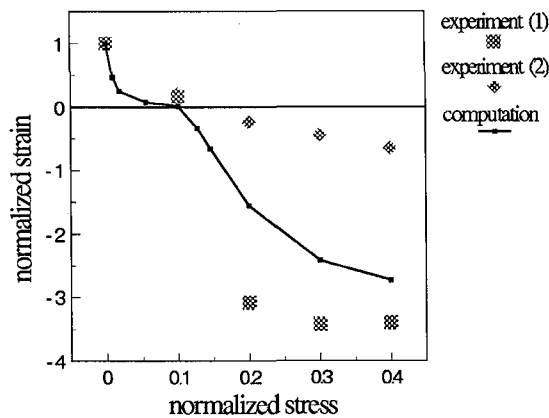
さらに、図4bに作用応力と凍結融解の繰り返し3サイクル目の残留ひずみの関係を示す。横軸の応力を強度によって無次元化し縦軸のひずみは応力が0の場合に発生するひずみを基準とし、対応する実験データ³⁾もプロットした。なお、解析では K_c と亀裂長 a_0 を用いて $K_c/\sqrt{\pi a_0}$ によって応力を無次元化している。図3の場合と比較すると、図4bでの計算結果と実験結果の一致はあまり良好ではないが、応力が比較的小さい範囲では実験データの再現は満足できるものである。したがって、比較的小さい応力が劣化に及ぼす影響はモデルに取り込まれていることが示唆される。

4. 熱伝導・応力・劣化の連成解析

構築された劣化解析を岩盤内の低温物質 (LNG) 貯蔵空洞問題²⁾に適用し凍結に伴う岩の劣化度を推定することで、構築されたモデルの有効性を検討する。解析領域及び境界条件を図5に示す。亀裂損傷体の物性は、岩の材料特性³⁾を用いて設定されているが ($E = 1.0 \times 10^9 [N/m^2]$ 、 $\nu = 0.25$ 、 $K = 9.0 \times 10^{-6} [1/°C]$ 、 $K_c = 5.0 \times 10^4 [Pa/\sqrt{m}]$)、亀裂密度や亀裂損傷力特性に関しては前章で示されたパラメータをそのまま用いた。なお、岩の比重を2・ポアソン比を1/3とし自



a) T - $\bar{\epsilon}$ relation



b) $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}$ relation

図4：材料に作用する応力が劣化に及ぼす影響

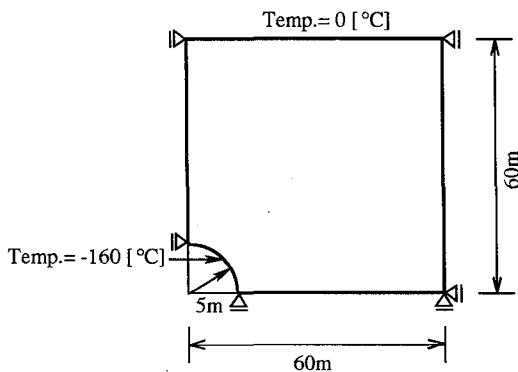


図5：解析領域と境界条件

重による初期地圧を仮定する。

凍結融解作用による劣化は、凍結し移動する細孔水の影響を表す亀裂損傷度が引き起こす微視亀裂の損傷としてモデル化されている。細孔水の挙動は温度に依存し、微視亀裂の破壊は損傷体の平均応力の影響を受けるため、上記の岩盤の劣化解析は熱伝導解析と応力

解析と連成する⁶⁾ことになる。特に、劣化によって弾性の有効弾性が低下するため、応力の再分配が生じ劣化が促進ないし抑制されることが予想される。岩盤を冷却していく際の熱伝導・応力・劣化の連成解析は、次のように増分形式で定式化される。各点ないし小領域に対応して亀裂群 Ω を持つ亀裂損傷体を導入し、ひずみ増分を弾性・温度・亀裂ひずみ増分に分解して考える。

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^t + d\epsilon_{ij}^c. \quad (6)$$

最初に、熱伝導解析から温度増分 dT を決定し温度ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^t = K dT \delta_{ij}$ が求まる。ついで、温度と応力の状態から亀裂群の進展 $d\Omega$ を決定し、亀裂ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^c = d\epsilon_{ij}^c(d\Omega)$ と有効弾性テンソル $\bar{C}_{ijkl} = \bar{C}_{ijkl}(\Omega + d\Omega)$ が決定される。弾性ひずみ増分と応力増分の間に $d\epsilon_{ij}^e = \bar{C}_{ijkl}^{-1} d\sigma_{kl}$ が成立するため、全ひずみ増分と応力増分は次の関係を満たす。

$$d\sigma_{ij} = \bar{C}_{ijkl}(d\epsilon_{kl} - K dT \delta_{kl} - d\epsilon_{kl}^c). \quad (7)$$

地圧 p_j を含む平衡式 $\sigma_{ij,i} + p_j = 0$ の増分形に応力増分 $d\sigma_{ij}$ を代入することで、最終的に増分形式で与えられた応力解析を行うことになる。連成解析は有限要素法を用いた数値計算による。

解析結果の一例として、空洞付近での劣化によって低下したヤング率を図6に示す。空洞の天端部の弾性低下が大きくなっており、劣化がこの部分に集中していることが伺える。天端から割れ目が発生することが予想²⁾されており、天端部に生じる劣化はこの割れ目の進展を促進することを示唆している。また、劣化の

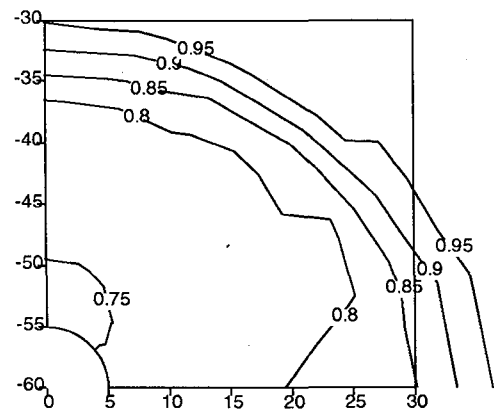
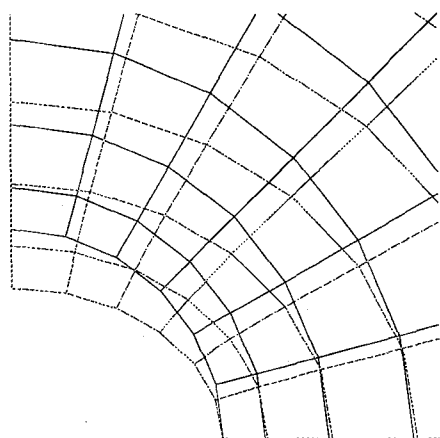
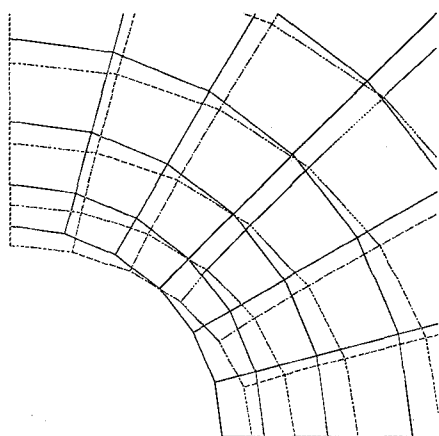


図6：劣化による弾性係数の低下

連成の影響を示すために空洞付近の変形を図7に示す。図7aが劣化を連成しない場合、図7bが連成した場合の空洞周囲の10mの正方形領域であり、実線と破線は変形前後のメッシュを示している。水分の凍結とそれに伴う劣化によって、天端の沈下は低減しているのは側壁が鉛直方向に膨張しているためである。また、側面ののはらみは増大しており、天端の水平方向の伸びも増大しているため、天端の緩みが予測されている。比



a) 劣化を連成しない場合



b) 劣化を連成した場合

図7：岩盤空洞付近の変位場

較すべき現場の測定結果等がないため、図6と図7でしめされた結果の妥当性は検証できない。しかし、空洞付近の岩盤には引張応力が発生する²⁾ため劣化度が大きいことが予想されているが、数値計算の結果もこれを裏付けている。さらに、劣化解析のモデルは単純化されているため解析結果の精度はそれに応じて必ずしも高いものではないが、計算された弾性の低下や劣化によって引き起こされる変形は直観的に妥当と思われる値である。したがって、提案されたモデルを用いた熱伝導・応力・劣化の連成解析から構造物の劣化の傾向を推定することは可能であり、少なくとも定性的な推定に関しては劣化解析が有効であることが示唆される。

参考文献

- 1) Veen, Ir.C.v.d.: Properties of concrete at very low temperatures: A survey of the literature, *Report of Faculty of Civil Engineering, Delft University of*

Technology, 1980.

- 2) Inada, Y., Kitamura, S. and Okada, A.: Stability of underground rock cavern for storage of LNG, *Trans. JSCE*, No. 345, pp. 35-44 (in Japanese), 1986.
- 3) Morihiro, H.: Mechanical study on deterioration of rock and concrete due to freezing and thawing action, *Dissertation of Dept, Civil Eng., Tohoku University* (in Japanese), 1984.
- 4) Hasegawa, S. and Fujiwara, T.: *Frost Damage*, Gi-houdou (in Japanese) 1988.
- 5) Miura, T. and Lee, D.: Strain and deterioration of concrete under low temperatures, *Trans. JSCE*, No. 420, pp. 191-200 (in Japanese), 1990.
- 6) Yamabe, T. and Watanabe, T.: Thermal-stress-permeability-analysis of rock mass considering freezing action, *The 48th National Congress of JSCE*, pp. 1348-1349 (in Japanese), 1993.
- 7) Rostásy, F.S., Weib, R. and Wiedemann, G.: Changes of pore structures of cement mortars due to temperature, *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, pp. 157-164, 1980.
- 8) Monteiro, P.J.M., Bastacky, S.J. and Hayes, T.L.: Low-temperature scanning electron microscope analysis of the portland cement paste early hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, pp. 687-693, 1985.
- 9) Nemat-Nasser, S. and Hori, M.: *Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials*, North-Holland, New York 1993.

(1994年9月14日受付)