

### 3.2.8 コンクリートの凍害

#### (1)はじめに

本章では構造物の耐久性能のひとつである凍結融解抵抗の変化を計算できるモデルを対象とし、既往の研究成果の概要を述べる。コンクリートの凍害を引起すメカニズムは複雑で、数多くの研究者により種々検討されてきたが、コンクリート構造物の凍害の程度を計算可能なモデルを提示したものは多くない。その様なモデルは、微細な現象に着目した物理化学モデル、巨視的な統計モデル、微視的なメカニズムと巨視的な損傷劣化現象を結びつける確率モデルに大別される。それぞれ代表的なモデルについてその概要を表1に示す。

#### (2)統計モデル

##### (a)山下らのモデル

山下ら[1][2]は、圧縮強度、気泡間隔係数、全細孔量及び凍結水量を組み合わせて、コンクリートの凍害指標値 を関数表現し、これと凍結融解回数及び相対動弾性係数の関係を実験的に求め、更に統計的に劣化特性曲面を同定した。この曲面から、凍結融解回数と耐凍害指標値の関係を求め、疲労破壊の経験則(マイナー側)を応用して、自然環境下でのコンクリートの凍害寿命予測を可能にした。

圧縮強度( $f_c$ )、気泡間隔係数(L)、全細孔量( $V_0$ )及び凍結水量( $V_f$ )を組み合わせて、コンクリートの耐凍害 指標値 を(1)式のように提案した。

$$\beta = \left(\frac{f_c}{300}\right)^a \cdot \left(\frac{L}{0.5}\right)^b \cdot \left(\frac{V_f}{V_0}\right)^c \quad (1)$$

耐凍害指標値 と相対動弾性係数との関係の一例を図1に示す。また、この結果に基づいて(1)式の係数 a、b、cを同定し、耐凍害指標値と凍結融解回数及び相対動弾性係数の関係を実験的に求め、更にそれを用いて統計的に劣化特性曲面の同定を行い、(2)式を得た。

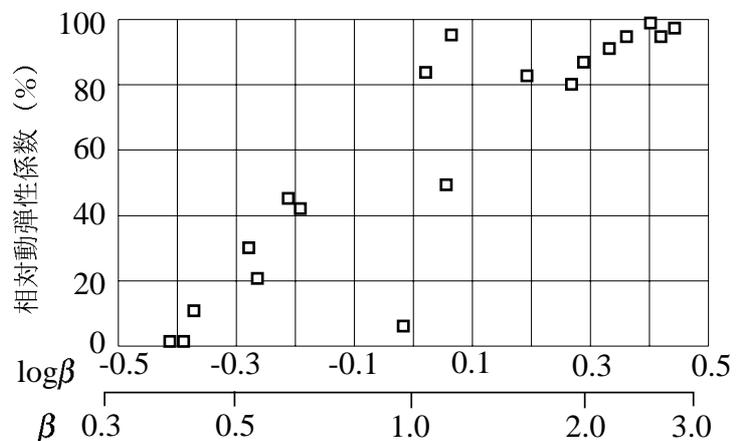


図1 耐凍害指標値 と相対動弾性係数との関係 (150サイクルにおける)

$$z = ax^3 + bx^2y + cxy^2 + dy^3 + ex^2 + fxy + gy^2 + hx + iy + j \quad (2)$$

ここに、 $z = ED'/ED$  : 相対動弾性係数、 $y = N$  : 凍結融解回数、 $x = -\log \beta$  : 耐凍害指標値、a, b, c, ..., j : 定数

$$\frac{\partial z}{\partial y} = 0 : [x \text{ 全域に対して}],$$

(3)

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 0 : [y \text{ 全域に対して}]$$

ここに、係数a~jは、a:135.423、b:0.06、c:0.002、d:0、e:-128.118、f:-0.953、g:0.0002、h:-26.564、i:-0.410、j:109.503である。

この曲面から、凍結融解回数と耐凍害指標値の関係を求め、マイナー則を応用することにより、最低温度別の寿命予測が可能となったと報告している。

#### (b)石井らのモデル

石井ら[3]は最低温度と水セメント比の関数である凍結水量比（全空隙に対する凍結水量の比）と破壊サイクル数（相対動弾性係数が60%となるときのサイクル数）の対数との間に線形関係を見いだした。即ち測定が簡単ではない凍結水量比のかわりに、破壊サイクル数Nを用いることが出来、それは水セメント比をC/W、最低温度を  $\theta$  とすれば次式で表される。

$$\log N = [\alpha \ln(C/W) + \beta]\theta + \gamma \ln(C/W) + \delta \quad (4)$$

ここで  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  は定数である。

次に、自然暴露試験体の相対動弾性係数変化の実測値と、促進試験の結果である破壊サイクル数を相対動弾性係数変化を媒介にして結びつけるため、基準化凍結融解サイクル数の考え方の導入する一方、暴露中の相対動弾性係数に及ぼす強度増加の影響を積算温度を媒介に補正した。これにより、最低温度が不確定の屋外暴露条件下でも最低温度の影響を考慮できることとなり、自然暴露試験と促進試験との対応が可能となった。

#### (c)長谷川のモデル

長谷川[4]は温度要因と湿潤要因の影響を、ある程度定量的に評価できる形に数値化し、凍害危険値としてまとめた。気象データをもとに、凍害融解の繰り返し数(コンクリート表面より1cm部分を基準)を求め、日射による融解も考慮している。これに、凍結温度や湿潤程度の違いを考慮した係数を乗じ、その地域の凍害危険性を評価できるとした。

### (3)物理化学モデル

#### (a)限界飽和度法

コンクリートの耐凍害性を評価するためのRILEM推奨試験法「限界飽和度法」(Degree of Critical Saturation Method)はLund大学のFagerlund[5]によって1977年に提唱された試験方法であるが、凍害のメカニズムに関して、また凍結融解抵抗の経時変化を計算する場合にも重要な理論である。限界飽和度法による評価は、凍結による内部的損傷が初めて検出できる最小の飽和度として定義される限界飽和度（以下RILEMの表記にならぬ $S_{CR}$ と略記する）を実験的に求め、使用中に生じる可能性のある実際の含水量レベル $S_{act}$ との比較によって耐凍結融解抵抗性Fが判定される。すなわち、

$$F = S_{CR} - S_{act} \quad (5)$$

限界飽和度 ( $S_{CR}$ ) はコンクリートの物性値であり、その測定は飽和度 (空隙基準の含水量) を種々変化させた試料を通常一回の凍結条件下におき、この時の長さ変化もしくは動弾性率の変化の測定から求めることとされている。実際の含水量レベル ( $S_{act}$ ) については、試験方法としては実験室で小試験体による一面吸水試験の含水率変化を用いているが、後述するように本来的にはコンクリート構造物の当該部位の含水率変化を地域の気象条件を境界条件とする水分の収支式を解くことによって求めねばならない。

このように、限界飽和度法は評価方法としては長期の凍結融解サイクルを必要としないなどの実用性があり、材料物性としての  $S_{CR}$  と、使用条件としての実際の含水量という2者を明瞭に区別している点でも合理的な試験方法と言うことが出来る。また含水量が大きくなれば凍結融解サイクル数によらずに (只の一度の凍結であっても) 凍害を生じるとして、含水量の重要性を強調し、凍害のメカニズムにも一石を投じている。しかし、凍害に関する限界飽和度の理論はその後あまり進展を見ていない。材料設計の立場から  $S_{CR}$  と細孔構造の関係を論じたTada[6]の研究があるが、 $S_{act}$  を実用的に推定する方法に関しては見あたらない。

### (b) Bazantモデル

Bazantら[7]は1988年にそれまでの定性的な諸理論を数学モデルに統合しようと試みた。まず、凍結融解過程での熱・水分移動を計算するために凍結条件下での吸着等温線が必要になるが、これを常温で測定された吸着等温線から推定した。これにより凍結条件下での含水率とポテンシャルの関係が得られ、熱・水分移動の構成式を計算できる。このとき、連行空気と気泡間距離を考慮して水圧の分布を求めた。熱収支の計算では凍結による凝固熱を考慮して温度分布を求めている。

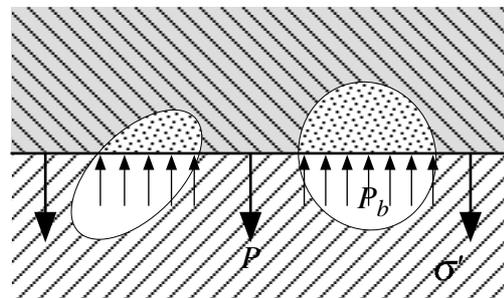


図2 多孔体中の応力の釣り合い[7]

多孔体の密実部分に生ずる公称応力は、土質力学で一般に用いられているTerzaghiの考え方と同様なモデルを導入した。即ち、次式で表わされる。

$$\sigma' = \sigma + np + n_b p_b \quad (6)$$

ここに、 $\sigma'$  は多孔体のある断面に生ずる平均応力、 $n$ と $n_b$ は破断面で圧力 $p$ あるいは $p_b$ が作用している空隙あるいは泡の占める割合を表わしている(図2)。破壊が起るのは、 $\sigma'$ が引張強度 $f_t$ を超えた時であり次式で表わされる。

$$\sigma' \leq f_t \quad (7)$$

ここに、 $f_t$ は一定値ではなく、凍結融解繰返し数と共に低下するものとしている。

以上により、最終的なひび割れの発生の計算が可能となるが、必要とする応力-ひずみ関係のデータが不足しているため具体的な計算には至っていない。また熱・水分移動と応力分布を記述する有限要素解析プログラムも提示されていない。様々な荷重下で冷却速度や試験体の断面積を変えた場合の凍結融解を行い、この時の応力-ひずみ関係を求める必要があるとしている。

Bazantらのモデルは、定説を漏れなく取り込んでいるが、複雑であり、結果に材料の特性が反映

するのは任意に与えられた細孔分布関数と連行気泡量、気泡間距離だけである。また、Bazantらのモデルは、空隙がランダムに並ぶシステムの中のクリティカルな断面を定めることは、確定できない。また、 $f_t$ を繰返し回数関数とする時、空隙やクラックとの相互作用と切り離して考えることは難しく、空隙部分と固体部分を分けて考えるというモデルの基本概念そのものと矛盾することにもなる。

(c)物理化学モデルの要素モデル

・凍結中の水分収支予測モデル

コンクリートの凍害における含水量の影響は極めて大きく、使用中のコンクリート構造体が経年的にどの程度の含水量となるかを予測することは重要である。また凍結・融解を受けているコンクリート中の水分のミクロ的な移動（再配分）も耐凍害性に優れた空隙構造の設計や、試験結果の解釈などにおいて同様に重要であり、Picket[8]やDerjaguin[9]らの研究があるがここでは省略する。

コンクリート構造物の長期の含水量を予測可能なモデルについては多田と渡辺[10]のレビューがある。Matsumoto[11]らは熱水分同時移動モデルに周期変化する境界条件（気象条件）を与えて、実構造物の長期の含水量を予測したが実測値との対応は良好であった[12][13]。Sandberg[14]は同様な境界条件でシミュレーションを行ない、熱収支を省略した計算でも気泡コンクリートスラブについて良好な結果を得ている（図3）。

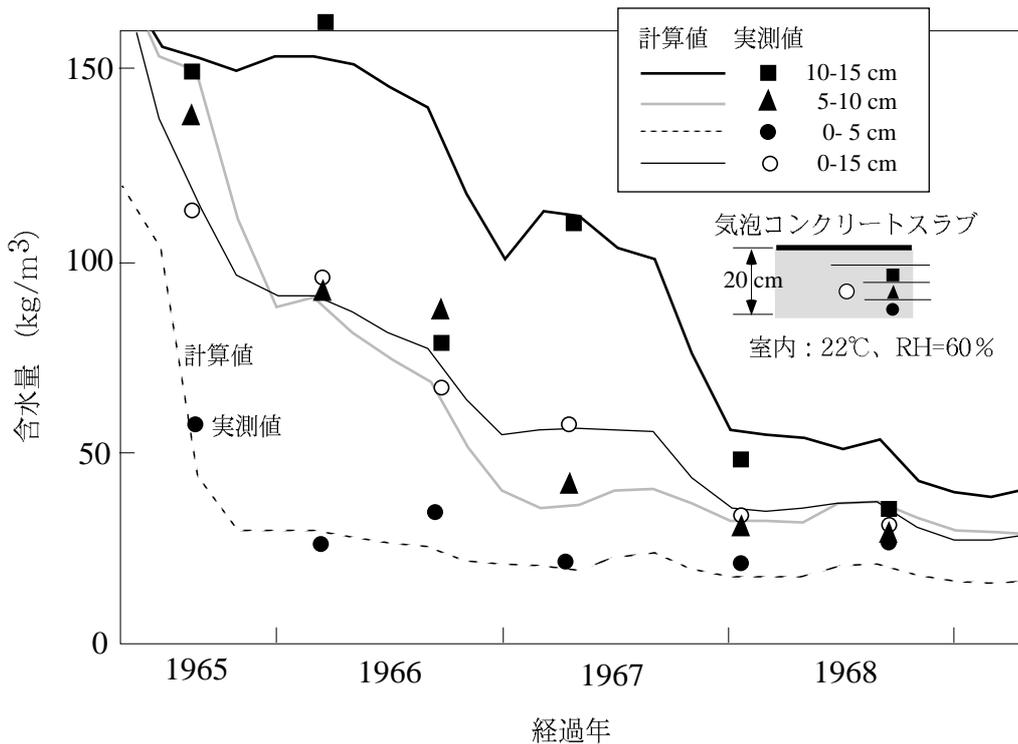


図3 気泡コンクリートスラブの含水量の経年変化 [14]

これらは、構造体が凍結条件下にある場合は除外しているが、Matusmoto[15]は結氷のある場合についても熱・液水・氷の収支式を導いた。

水蒸気移動を無視した水分収支は

$$\rho_l \left( \frac{\partial \phi_l}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \{ \lambda'_{\mu} (\nabla \mu - F_w) \} + \nabla (\nabla \lambda'_T \nabla T) - \frac{\partial \rho_i \phi_g}{\partial t} \quad (8)$$

熱の収支は

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \{ (\lambda + q_{gl} \lambda'_{Tg}) \nabla T \} + \nabla \{ q_{gi} \lambda'_{\mu g} (\nabla \mu - F_w) \} + q_{li} \frac{\partial \rho_i \phi_i}{\partial t}, \quad (9)$$

また、凝固点降下は明らかに

$$\mu(T) = q_{gl} \ln \left( \frac{T}{T_0} \right). \quad (10)$$

ここで、 $\mu$  は水分の化学ポテンシャル、 $F$  は外力、 $\lambda$  は水分量、 $\lambda'$  は熱及び水分伝導率、 $q$  は相変化熱で、サブスクリプト  $g, l, i$  はそれぞれ水分の気相、液相、固相（氷）を示す。

自由水基準の水分の化学ポテンシャルを液水移動のポテンシャルとしており、かつ凝固点降下式では化学ポテンシャルが温度のみの関数となっている。そして含水率と化学ポテンシャルの関係を温度に依存しないものと見なして熱・水分・氷の収支式を計算している。但し解析例は土壤のみであり、コンクリートでの検証は行われていない。

Olsen[16] は地盤凍結の分野で用いられている Taylor-Luthin[17] の熱・水分同時移動モデルをコンクリートに応用し、凍結時の含水量が殆ど飽和の場合について凍結水量を計算した。すなわち、水分の収支は

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} = \nabla (K_s \nabla P) + \nabla D_T \nabla T - \frac{\rho_i}{\rho_l} \frac{\partial \phi_i}{\partial t}, \quad (11)$$

熱の収支は

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \lambda \nabla T + q_{li} \frac{\partial \phi_i}{\partial t}, \quad (12)$$

となる。Olsen のモデルは凍結条件下の構造物の凍結水量とそれに伴う水分の再配分を予測するモデルではあるが、水分移動の項に透水係数  $K_s$  が見られるようにダーシー則をそのまま用いており、殆ど飽和状態の閉じた系を扱っており、コンクリートの凍害に影響を及ぼす系全体の含水量の変化を計算したものではない。

#### ・凝固点降下のモデル

コンクリートなどの高度に分散した系に含まれる水分は、固体表面との相互作用によって熱力学的凝固点降下が生じる。この分散状態を細孔径に翻訳し、細孔径  $r$  と凝固点降下  $\ln(T/T_0)$  の関係を求めるためのモデルが数多く提案されており、Blachere[18] や Fagerlund[19] によるレビューもある。細孔径と細孔容積の関係である細孔径分布が分かれば凍結水量を計算することが出来る。各凝固点降下モデルは氷晶が生成する境界条件がそれぞれ異なっている。以下、 $T$  を絶対温度、 $T_0$

を自由水の凝固点温度、 $r$ を細孔半径、 $\sigma$ を界面張力、 $V$ を水の本体積、 $q$ を相変化熱とし、サブスクリプト $l, i, g, c$ はそれぞれ水、氷、水蒸気、硬化セメントペーストを表すものとする。

Helmuth[20]が用いたVolmer[21]の式は

$$\ln\left(\frac{T}{T_0}\right) = -\frac{2V_i\phi_{li}}{q_{li}\cdot r}, \quad (13)$$

であり、水中に半径 $r_i$ の球形の氷が生成する場合である。

Defay[22]らは水蒸気中にある水滴が冷却され氷晶となる場合について解き、次式を誘導した。

$$\ln\left(\frac{T}{T_0}\right) = -\frac{2}{q_{li}}\left(\frac{V_i\phi_{ig}}{r_i} + \frac{V_l\phi_{lg}}{r_l}\right). \quad (14)$$

Setzer[23]はセメントゲル中に存在する凝縮水が氷晶となる場合について次式を導出した。

$$\ln\left(\frac{T}{T_0}\right) = -\frac{V_i(\phi_{ci} - \phi_{cl})}{q_{li}R_H}. \quad (15)$$

この式では硬化セメントペーストと氷の界面自由エネルギー $\sigma_{ci}$ と硬化セメントペーストと水の界面自由エネルギー $\sigma_{cl}$ が導入されている。より現実的な式となる反面、これらの界面自由エネルギーの値を求めるのが難しく、凝固点降下の計算に至っていない。に細孔半径の代わりに水理半径 $R_H$ を用いているので、氷晶の形状は任意である（細孔の形状が半径 $r$ の円筒形であれば $R_H=r/2$ となる）。

山下、石井らが参照している樋口[24]の式は、

$$\ln\left(\frac{T}{T_0}\right) = -\frac{2V_l\phi_{li}}{q_{li}}\left(\frac{1}{r_{li}} - \frac{1}{r_{lg}}\right), \quad (16)$$

であるが、含水量が飽水状態であれば曲率半径 $r_{lg}$ は無窮大となり(16)式はVolmerの(13)式と一致する。

#### ・微細構造モデル

凍結水量が与えられても、連行空気泡などの圧力緩衝領域を考慮しなければ凍結に伴う内部の静水圧を算定することは出来ない。圧力緩和に有効な限界の気泡間距離 $L$ についてはPowers[25]による式が与えられている。

$$L = \frac{3}{\alpha} \left[ 1.4 \left( \frac{V_p}{A} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (17)$$

ここで、 $A$ は全ての連行気泡の表面積、 $V_p$ はセメントペーストの体積分率、 $A$ は連行気泡の体積分率である。しかしFagerlund[26]はコンクリートの含水率が増加すれば連行気泡にも水分が含まれ

るため、含水状態を考慮して有効な平均気泡間距離を算定することを提案している。

水銀圧入法などで得られた細孔径分布と耐凍害性には密接な関係がある。Maage[27]らは水銀圧入法で測定された空隙量PV(cm<sup>3</sup>/g)と、直径が0.03 μmより大きな空隙のPVに対する比P<sub>0.03</sub>をパラメータとして、コンクリートの耐凍害性Fを

$$F = \frac{6.2}{PV} + 2.1 \cdot P_{0.03} \quad (18)$$

と表し、F>310で耐凍害性に優れ、F<280で耐凍害性に劣ると判定している。

・力学モデル

Nielsen[28]は、図4に示すような空隙システムを提案し、線形破壊力学の考え方に基づいてセメントペーストの凍害抵抗をシミュレートした。空隙を有する多孔材料の強度は(19)式で与えられる。ここにK<sub>c</sub>は限界応力拡大係数即ち破壊靱性である。

$$S = \frac{K_c}{\sqrt{\pi l}} \frac{1}{F} \quad (19)$$

ここに

$$F = \exp \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\mu_0}{\mu} - \frac{\mu}{\mu_0} \right) \right] \quad (19.1)$$

$$\mu_0 < 0.6 \quad (19.2)$$

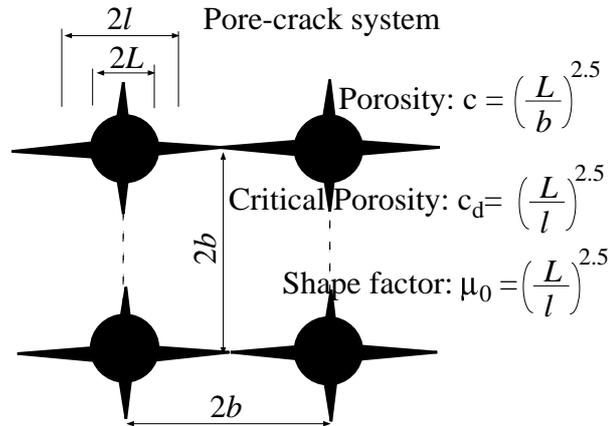


図4 クラック付空隙を含むモデル[28]

同様の考え方に立って、応力拡大緩和係数fを用いて、図5及び図6のようなクラック付空隙まわりの強度は(20)及び(21)式で表わされる。

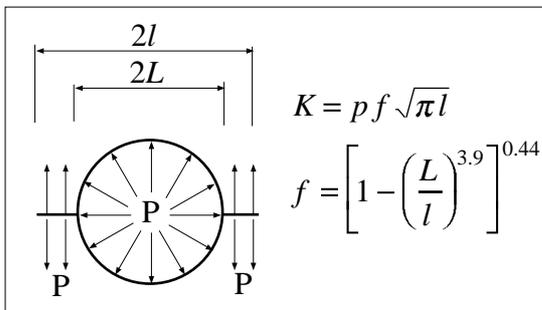


図5 単クラック付空隙まわりの力学条件[28]

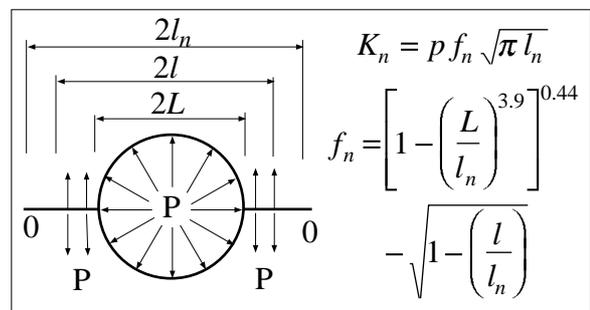


図6 伝播クラック付空隙まわりの力学条件[28]

$$S_{p,\text{single}} = \frac{K_{cr}}{\sqrt{\pi l}} \frac{1}{f} \quad [\text{図5}] \quad (20)$$

$$S_p = \frac{K_{cr}}{\sqrt{\pi l}} \frac{1}{Ff} = \frac{S}{f} \quad [\text{図6}] \quad (21)$$

$$\text{ここに } f = \sqrt{1 - \mu_0^2} \quad (21.1)$$

但し、(21)式は、 $\mu_0 = (L/l)^{2.5}$ を代入して書きかえたものを $f$ として(19)式を直したものである。以上のような基本モデルに基づいて、硬化セメントペーストの凍害過程をシミュレートしている。硬化セメントペーストの材料特性は、水セメント比(W/C)、水饱和度( $g$ )、空隙率( $c$ )、限界空隙率( $c_d$ )、特性累積空隙量( $z_M$ )、剛性( $E_s$ )及び強度( $S$ )である。例として、 $W/C = 0.5$ 、 $g = 0.8$ で完全に水に浸した( $w = 1$ )ものを解析している。結果を図7~9に示す。図7は空隙構造を示し、図8は凍結可能な水分がどれだけの空隙を飽和しているかを温度の関数で表わしたものである。そして、図9は、温度が低下するに従って体積膨張を起し、しかもその膨張率が含有水分の凍結割合に応じて変化する様子をシミュレートした結果である。図10は、空隙飽和率がある限界値  $\beta_{cr}$  を超えると急激に体積膨張が大きくなる様子を表わしている。

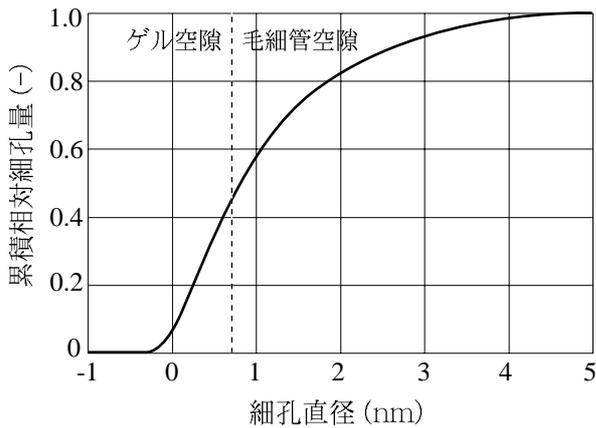


図7 解析対象の空隙構造

(W/C,  $q$ ,  $w$ ) (0.5, 0.8, 1.)[28]

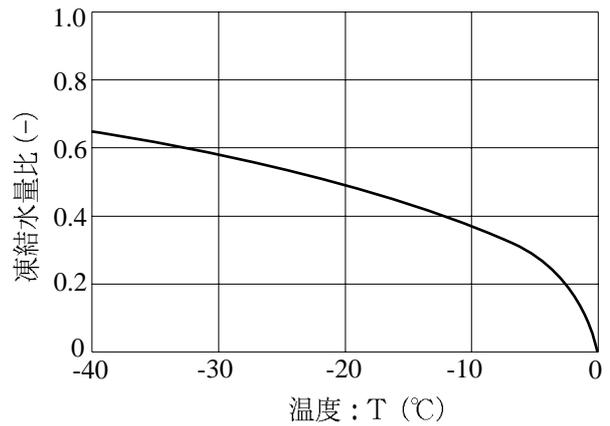


図8 温度と凍結水の関係

(W/C,  $q$ ,  $w$ ) (0.5, 0.8, 1.)[28]

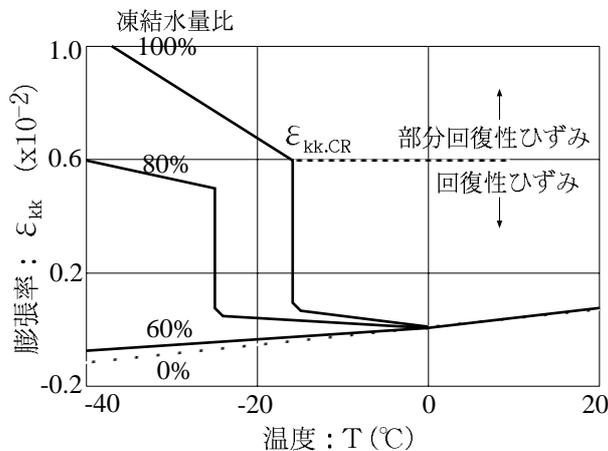


図9 温度と体積膨張の計算結果

(W/C,  $q$ ,  $w$ ) (0.5, 0.8, 1.)[28]

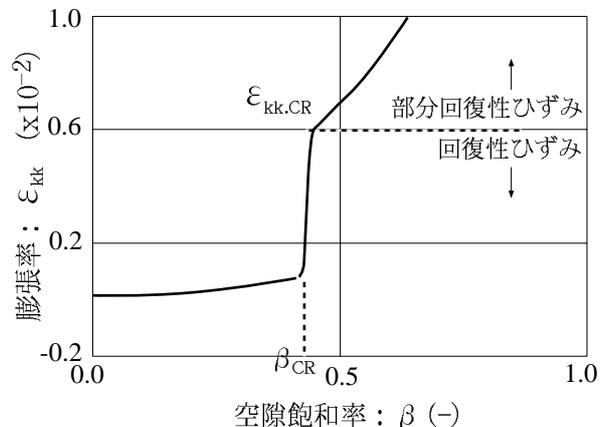


図10 空隙飽和率と体積膨張の計算結果

(W/C,  $q$ ,  $w$ )=(0.5, 0.8, 1.)[28]

Panckenko[29]は、線形破壊力学の考え方をを用いたコンクリートの凍害抵抗性能評価試験法を提案している。即ちコンクリートの限界ひび割れ長さは、(22)式で与えられる。

$$l_{cr} = \frac{K_c}{\pi\sigma^2} \quad (22)$$

損傷パラメータDは(23)式で与えられる。

$$D = \sum_{i=1}^n l_i, \quad \Delta l_i = \frac{(l_0 - l_c)}{l_0} \quad (23)$$

$l_0$ は、凍結融解作用開始前のクラック長さ、 $l_c$ は1サイクル作用後の長さとする。しかし、このクラック長さの変化を直接測定するのは困難なので、次式のように、作用前後の破壊靱性値 $K_c$ 及び $K_{cc}$ を用いて評価する事を提案している。

$$D = f\left(\frac{K_c - K_{cc}}{K_c}\right) \quad (24)$$

凍害抵抗能力がなくなるのは、Dがある限界値を超えた時である。

上述の考え方にに基づき、水分を十分に含んだコンクリート供試体を1度だけ-50℃まで温度低下し、その前後で破壊靱性を測定した。その破壊靱性値の低下  $K_c$  と凍害抵抗性能との関係は下図の式のように得られた(図11)。

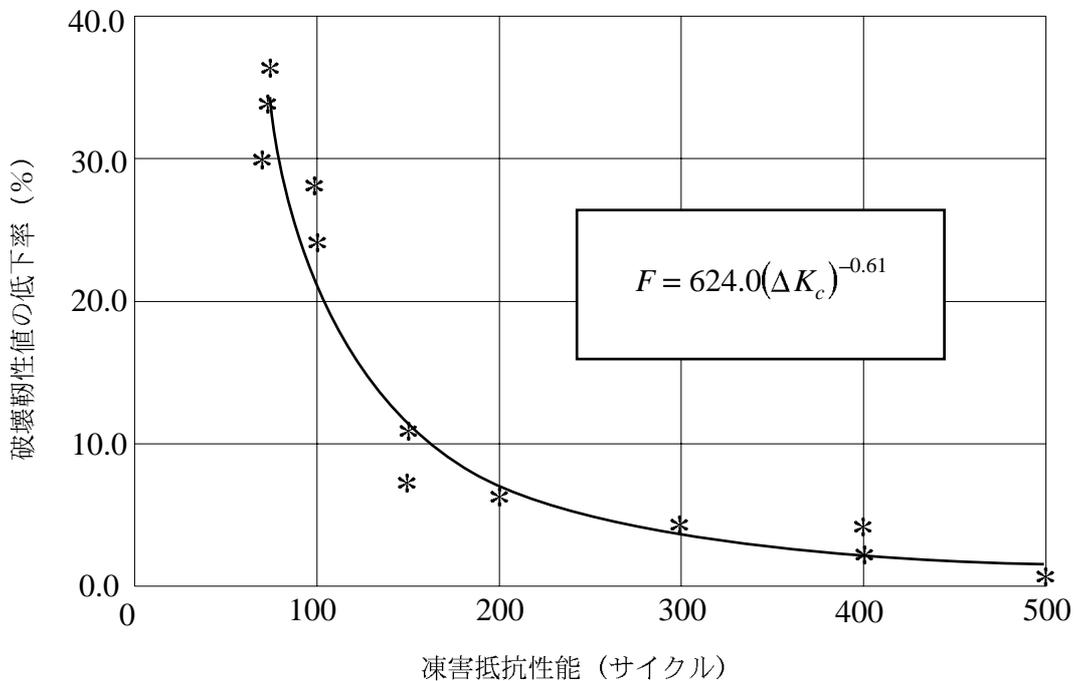


図11 破壊靱性値の温度作用による変化と凍害抵抗性能[29]

線形破壊力学に基づく上記2つのモデルでは、 $K_c$ が材料定数として求められる必要がある。しかしながら、近年の研究によれば破壊プロセスゾーンの介在によって $K_c$ は一義的に決められないことが明らかにされており、何らかの換算係数的なパラメータの導入が必要となる。また、単一クラックの進展はシミュレートできても、それらが複雑に網目状に連結していく段階の取扱いは困難である。

以上のことから、非線形破壊力学と確率論を導入したモデルの構築が必要と考えられる。

#### (4) 確率モデル

三橋ら[30]は、確率過程理論に基づいた凍害損傷モデルを提案した。凍結融解繰返し数 $n$ の時のコンクリートの健全度パラメータ $P_0(n)$ は(25)式で表わされる。

$$P_0(n) = \exp[-p_{01}(n)dn] \quad (25)$$

ここに、状態遷移確率 $p_{01}(n)$ は、最低温度、含有湿度、材料の微細構造及び繰返し数の関数として表わされるものと考えた。損傷度パラメータ $D$ は(26)式で評価される。

$$D(n) = 1 - p_0(n) \quad (26)$$

凍結融解繰返しに伴う健全度の劣化を示す解析例を図12に示す。

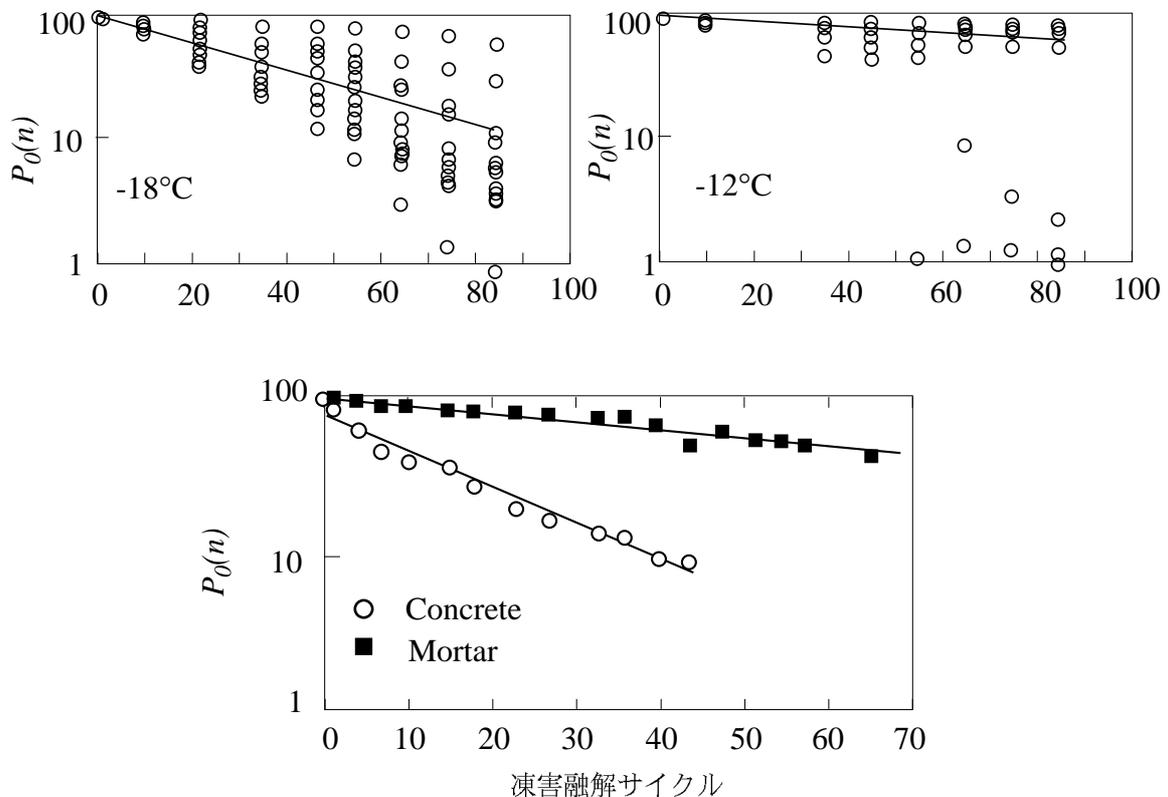


図12 凍結融解繰返し数とコンクリートの健全度の関係[30]

## 参考文献

- [1] 山下英俊, 他: 凍害を受けるコンクリートの凍結水量の算定方法と耐凍害指標値の提案, コンクリート工学年次論文報告集, 13 - 1, pp.729 - 734, 1991.
- [2] 山下英俊, 村上祐治, 鈴木 篤, 吉川弘道: 凍結融解を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 14 (1), 1021-1026, 1992.
- [3] 石井清, 他: 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究, 土木学会論文集, No.564, V - 35, pp.221 - 232, 1997
- [4] 長谷川寿夫, 藤原忠司: 凍害, 技報堂出版, pp.71 - 80, 1988.
- [5] Fagerlund, G. : The Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete. Mater. Constr., 10 : 217-229, 1978.
- [6] Tada, S. : Microstructural Approach to Frost Resistance of Highly Porous Materials, Proc. 7th Int. Conf. Durability Build. Mater. Components, Stockholm, 1996.
- [7] Bazant, Z. P., Chern, J-C., Rosenberg, A. M. and Gaidis, J. M. : Mathematical Model for Freeze-Thaw Durability of Concrete, J. Am. Ceram. Soc., 71(9), 779-783, 1988.
- [8] Pickett, G., Flow of Moisture in Hardened Portland Cement During Freezing, Proc. Highway Research Board, 32, 276-284, 1953.
- [9] Derjaguin, B. V., Churaev, N. V. : Flow of Nonfreezing Water Interlayers and Frost Heaving, Cold Regions Science and Technology, 12, 57-66, 1986
- [10] 多田眞作、渡辺一正、 : 熱・水分同時移動モデルからコンクリートの劣化モデルへ, セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, 65-72, 1996.
- [11] Matsumoto, M. : Simultaneous Heat and Mass Transfer in Porous Walls and Analysis of Internal Condensation, Int. Seminar Heat and Mass Transfer, Dubrovnik, 1, 45-58, 1978.
- [12] Matsumoto, M. : A Periodic Solution of Moisture Condensation and Re-Evaporation Process in the Building Wall, Numerical Methods in Thermal Problems, 1, 819-829, 1985.
- [13] Sakamoto, Y., Watanabe, K. : Verification of the Simultaneous Heat and Moisture Transfer Model Using Full-Scale Test Wall, J. Archit. Plann. Environ. Engng, AIJ, 457, 39-47, 1994.
- [14] Sandberg, P. I. : Byggnadsdelars Fuktbalans i Naturigt Klimat, Lund Institute of Technology, Report 43, 245p, 1973
- [15] Matsumoto, M. : On Prediction of Dynamic Behaviors of Moisture and Temperature in Building and Building Elements, Proc. Int. Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterisation of Transfer Properties, Paris, 166-208, 1995.
- [16] Olsen, M. P. J. : Mathematical Modeling of the Freezing Process of Concrete and Aggregates, Cement and Concrete Research, 14, 113-122, 1984.
- [17] Taylor, G. S. and Luthin, J. N. : A model for Coupled Heat-Mass Flow During Soil Freezing, Canadian Geotechnical Journal, 15, 548-555, 1978.
- [18] Blachere, J. R. : The Freezing of Water in Consolidated Porous Materials, Thesis: Alfred University, 1969.
- [19] Fagerlund, G. : Determination of Pore-Size Distribution from Freezing-Point

Depressions. *Mater. Constr.*, 6 : 215-225, 1973.

[20] Helmuth, R. A. : Capillary Size Restriction on Ice Formation In Hardened Portland Cement Pastes, 4th Int. Symp. Chemistry of Cement, Washington, 1960.

[21] Volmer, M. : Kinetik der Phasenbildung, Theodor Steinkoff Verlag, Dresden and Leipzig, 1939.

[22] Defay, R., Prigogine, I., Bellemans, A., Everett, D. H. : Surface Tension and Adsorption, Wiley, p.54, 1966.

[23] Setzer, M. J. : Basis and Mechanism of Frost-Attack: General Report, Int. Colloquium on Frost-Resistance of Concrete, Vienna, pp. 13-23, 1980.

[24] 盛岡良雄, 小林純一, 樋口泉 : 細孔内毛管凝縮体の相転移に基づく異常熱容量についての理論的考察, 日本化学会誌, 1549-1556, 1972.

[25] Powers, T. C. : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proc. Highway Research Board, 29, 184-211, 1949.

[26] Fagerlund, G. : The Critical Specing Factor, Div. Building Materials, Lund Institute of Technology, Report TVBM-7058, 50p. 1993.

[27] Maage, M., Sliper, J. and Grasdalen, R. : Pore structure and porosity in concrete, characterized by mercury porosimetry and microscopy, correlated to frost resistance, Proc. RILEM/CNR Int. Symp. Principles and applications of Pore Structural Characterization, Milan, Eds. Haynes, J. M. and Rossi-Doria, P., 463-481, 1983

[28] Nielsen, L.F. : Mechanics of Composite Material Subjected to Eigenstress with Special Reference to Frost Resistance of Porous Brittle Material, SBI Bulletin 96, Danish Building Research Institute, 47p, 1993.

[29] Panchenko, A.I. : Frost Failure and Rapid Test Method of Concrete Frost Resistance, in Frost Resistance of Concrete (ed. M.J. Setzer), E & FN Spon, 299-306, 1997.

[30] 三橋博三, 成田 健, 平井和喜 : コンクリートの凍害劣化確率モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 450, 1-6, 1993.

表1 コンクリートの凍害計算モデルの相互関係

