

# 論文 細孔内水分状態と強連成させた準微細ひび割れモデル

米田 大樹<sup>\*1</sup>・石田 哲也<sup>\*2</sup>・前川 宏一<sup>\*3</sup>・Esayas Gebreyouhannes<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、コンクリートの乾燥収縮ひび割れの予測精度向上を目的として、既存のマルチスケール統合解析システムの課題を整理し、細孔内の水分状態を考慮した準微細ひび割れモデルを提案した。収縮駆動力と時間依存構成則に対応するコンクリートの局所的な引張強度について、骨材とセメント硬化体から構成されるコンクリート骨格部の強度と収縮駆動力によるプレストレス効果の和として表現した。また、湿度勾配に伴う応力緩和の影響と、ひび割れ発生に伴う水分流束変化を同時に考慮し、乾燥条件下における部材としての引張強度について解析の精度を確認した。

**キーワード:** 毛細管張力, 引張強度, 微細き裂, マイクロクラック, 乾燥収縮, ひび割れ

## 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮ひび割れは、構造物の耐久性や美観を損なう問題として定量的に予測する試みが数多く行われてきた。乾燥収縮ひび割れに影響を及ぼす収縮やクリープ、強度、弾性係数といった個々の特性や現象についても、材料の微視的機構に関する考察や、メカニズムに立脚したモデルの構築・検証が進められている。乾燥収縮ひび割れの予測に際しては、これらモデルの一部と、無拘束条件下での自由収縮ひずみ、各材齢における強度、弾性係数ならびにクリープ係数など、実験的に計測した材料特性を組み合わせて、構造挙動としての乾燥収縮ひび割れ発生を予測するものが多い<sup>1)</sup>。従って、ある条件下のひび割れ発生が予測可能であっても、任意の条件下に対して適用可能な統一的手法が確立できているとは言い難い。これは、様々な条件下において単独で各現象を説明できる理論が存在せず、複数の理論の組み合わせが必要なことや、それに伴う収縮、クリープ、強度、弾性係数といった個々の影響因子を直接的に計測する難しさ等が原因として考えられる。

一方、様々な条件下におけるコンクリート構造物の複雑な挙動を統一的手法で評価することを目的として、マルチスケール統合解析システム (DuCOM-COM3) の開発が進められている<sup>2)</sup>。本システムは、セメントの水和反応の進展、硬化体の空隙構造形成、内部の水分状態といったコンクリート内部の微視的挙動に関するモデル群を実装した熱力学連成解析システム (DuCOM)<sup>2)</sup>と、鉄筋コンクリート構造の巨視的応答・損傷を追跡可能な非線形動的 RC 構造解析システム (COM3)<sup>3)</sup>を統合したものである。DuCOM-COM3 は、若材齢から超長期に至る時間軸上での挙動を、強度や弾性係数、収縮ひずみとい

った材料特性やパラメータのフィッティングを解析対象ごとに行わなくても、使用材料の種類、コンクリートの配合、養生、環境条件、構造諸元等の基本的情報を与えるのみで実構造物スケールの挙動を良好に表現できることが確認されている。例えば、PC 橋梁のたわみ予測では、時々刻々と変化する場所毎の熱力学的状態諸量に立脚して巨視的構造応答を算定することに成功している<sup>4)</sup>が、本解析では PC 構造物であることから、ひび割れの影響が考慮されていない。一方、収縮とひび割れを同時に考慮した梁部材等の力学的挙動の予測<sup>5)</sup>も行われているが、収縮を入力値としてコンクリート部材としての巨視的な挙動に着目したものであり、若材齢より発生する材料収縮現象と硬化後の巨視的構造応答までを一気通貫で評価するには至っていない。

水分逸散による表面近傍の微細き裂が成長・結合して現れる乾燥収縮ひび割れは、微視的領域から巨視的領域までのひび割れ挙動を連続的に評価しなければならないマルチスケールの課題と考えられる。従って、要素内に複数のひび割れを含む巨視的な応答・破壊挙動をモデル化の出発点とした分散ひび割れモデルを、乾燥収縮ひび割れに対してそのまま適用することは困難と考えられる。

以上の背景より本稿では、空隙構造形成や水分移動等が想定するミクロスケール、乾燥収縮による微細き裂発生から乾燥収縮ひび割れ発生を考慮したメゾスケール、分散ひび割れモデルが対象とするマクロスケールの構造応答までを統一的に評価することを目的として、乾燥条件下における部材としての引張強度に着目して検討を行ったものである。

なお、本稿では、コンクリートとして引張軟化に至らないメゾスケールの微細なひび割れを微細き裂と称する。

\*1 東京大学 工学部社会基盤学科 研究員 (正会員)

\*2 東京大学 工学部社会基盤学科 教授 (正会員)

\*3 東京大学 工学部社会基盤学科 教授 (正会員)

\*4 Addis Ababa University Department of Civil Engineering Assistant Professor

これは、骨材とセメント硬化体間やセメント硬化体内部に生じるような微小領域のひび割れと、分散ひび割れモデルが想定するコンクリートとしてのマクロなひび割れとの物理現象を区別してモデル化するためである。

## 2. マルチスケールモデル

### 2.1 マルチスケール型時間依存構成則

ここでは、本研究の基盤となる DuCOM-COM3 について、収縮やクリープといった時間依存変形を取り扱う体積成分の構成則の概要を述べる。コンクリートは骨材とセメント硬化体で構成される 2 相系材料としてモデル化されており、骨材はそれ自体の収縮を加味した完全弾性体、セメント硬化体は水和の進行とともに仮想水和殻が増加する要素として、次式のようにモデル化している<sup>2)</sup>。

$$\sigma_0 = V_{ag} \sigma_{ag} + V_{cp} \sigma_{cp} \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = V_{ag} \varepsilon_{ag} + V_{cp} \varepsilon_{cp} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{ag}$ 、 $\sigma_{cp}$ ：骨材、セメント硬化体の体積応力、 $\varepsilon_{ag}$ 、 $\varepsilon_{cp}$ ：骨材、セメント硬化体の体積ひずみ、 $V_{ag}$ 、 $V_{cp}$ ：骨材、セメント硬化体の単位体積( $m^3/m^3$ )である。この時、セメント硬化体の体積応力  $\sigma_{cp}$  は、セメント硬化体骨格部の応力と収縮駆動力による応力の和として表される。

$$\sigma_{cp} = \sigma'_{cp} + \sigma_s \quad (3)$$

ここで、 $\sigma'_{cp}$ ：セメント硬化体骨格部に生じる体積応力、 $\sigma_s$ ：収縮駆動力による応力である。したがって、収縮やクリープの影響は、外力と収縮駆動力の区別なく、自動的に連成されることになる。

### 2.2 収縮駆動力

収縮を引き起こす内在駆動力として、セメント硬化体内の 10nm より大きい空隙内部に存在する水分は毛細管張力が、10nm より小さい空隙内水分では分離圧に起因する駆動力が卓越すると仮定されている。そして、収縮駆動力による応力  $\sigma_s$  を毛細管張力と分離圧に起因する駆動力の和として表現している<sup>6)</sup>。

$$\sigma_s = \sigma_{sc} + \sigma_{sd} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{sc}$ ：毛細管張力による収縮駆動力、 $\sigma_{sd}$ ：分離圧に起因する収縮駆動力である。

### 2.3 コンクリートの強度

コンクリートの圧縮強度は、次式で表現されている<sup>7)</sup>。

$$f'_c = \Psi \cdot f'_\infty \left[ 1 - \exp \left\{ -\alpha' \left( k \frac{D_{hyd.out}}{\theta} \right)^\beta \right\} \right] \quad (5)$$

ここで、 $\Psi$ ：強度比、 $f'_\infty$ ：鉱物組成の割合による最終到達強度、 $k$ ：水和生成物分布の偏りを表す係数、 $D_{hyd.out}$ ：初期空隙量と外部水和物量との体積比、 $\theta$ ：粒子間隔を表

す係数、 $\alpha, \beta$ ：定数である。水和の進展によりセメント外部に存在する自由空間が水和物により埋められ、時間の経過と共に増加する圧縮強度が、モデル内で自動的に求められることとなる。構造解析に用いるコンクリートの引張強度は、圧縮強度を用いて次式としている<sup>8)</sup>。

$$f_t = 0.27 f_c^{12/3} \quad (6)$$

ここで、 $f_c$ ：コンクリートの圧縮強度(MPa)である。

## 3. 既存モデルの課題

最初に、コンクリートの表面近傍に発生する微細き裂やひび割れの影響を検討するため、乾燥条件下における一軸引張強度について既存モデルによる解析と上田らによる実験<sup>9)</sup>(断面 100×100mm, 材齢 7 日以降, 温度 20℃, 相対湿度 60% 環境で乾燥開始) の比較を行った。

解析は、図-1 に示すような 100×100×400mm の 1/8 の範囲を 3 次元にてモデル化し、強制変位を軸引張方向に与えて最大荷重を断面積で除したものを引張強度とした。要素寸法は、10×10×10mm の立方体としている。コンクリートの配合と環境条件は、実験と同一の条件を与えた。乾燥開始後、8 日 (1)、10 日 (3)、14 日 (7)、21 日 (14)、35 日 (28)、63 日 (56) の各材齢で実験結果との比較を行った (カッコ内は乾燥材齢)。コンクリートの構成則は、図-2 に示す COM3 に実装される既往のモデル<sup>4)</sup>を基本とし、引張強度に式(6)を設定した。すなわち、巨視的な圧縮-引張強度の関係である式(6)と既往のコンクリートとしての材料構成則が、要素寸法を 10mm としたコンクリートに対してもそのまま適用できると仮定する単純なものを本研究の出発点とした。

図-3 に引張強度を、図-4 に弾性係数の実験結果と解析の比較を示す。既存モデルによる解析の引張強度は、実験に対して半分程度と大幅に小さい結果となっている。また、同様に弾性係数も、実験と比較して過小評価している。図-6 (左) に、一軸引張試験における載荷前のひび割れ発生状況を示す。図中の赤色部分は、乾燥収縮の

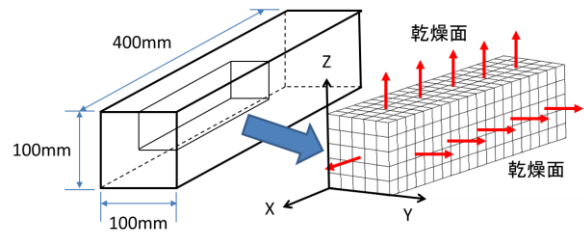


図-1 解析メッシュ

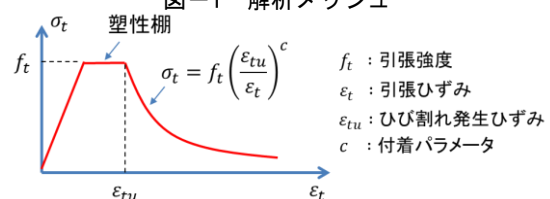


図-2 コンクリートの構成則

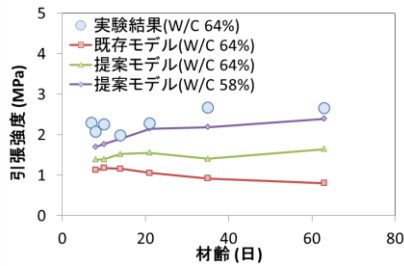


図-3 引張強度の比較

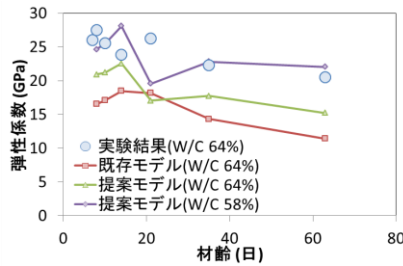


図-4 弾性係数の比較

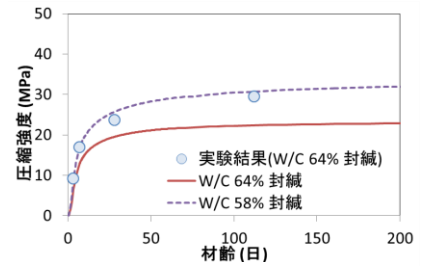


図-5 圧縮強度の比較

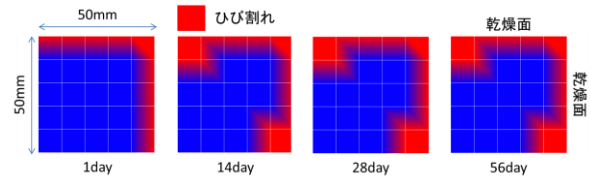
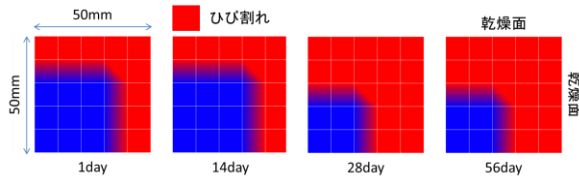


図-6 ひび割れの発生状況 (左: 既存モデル, 右: 提案モデル, ※材齢は乾燥材齢)

影響のみによって軟化開始と判定された要素に相当する。すなわち、分散ひび割れモデルが想定する巨視的なひび割れと比較して非常に小さいもの、コンクリートの構成則上はひび割れ発生と定義されるものである。しかし、実際の現象として、図-6 (左) に示した本解析ほど、コンクリート内部へと軟化領域が進展していくとは考えにくい。図-3 および図-4 で示した引張強度と弾性係数の過小評価も、応力勾配によって発生する表面近傍のひび割れを過大評価したためと考えるのが自然である。図-5 に示す様に、解析の圧縮強度の発現も若干小さいが、これの影響については後で述べる。

#### 4. 細孔内水分状態と強連成した準微細ひび割れモデル

##### 4.1 供試体各位置における局所引張強度

前章で述べた解析と実験の乖離は、コンクリート部材としての巨視的な引張強度を適用したため、乾燥に伴う供試体各位置の局所的な引張強度の変化が考慮されていないことが原因として推測される。式(5)、式(6)に示したように、既存の強度発現モデルは空隙量だけに依存しており、乾燥による不飽和状態の影響が直接的に考慮されていない。過去の研究から、巨視的に測定される引張強度が、乾燥の影響を受けて変化することが知られている<sup>10)</sup>。従って空隙内部の熱力学状態、特にメゾスケールにおける水分状態に応じた局所的な引張強度の関係について考察を深め、モデルへの反映を試みることにした。

地盤工学等の分野では、水と土の2相の混合体を Biot の多孔質弾性論に基づき、混合体の応力  $\sigma_{ij}$  を次式のように表している。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \alpha p \delta_{ij} \quad (7)$$

ここで、 $\sigma'_{ij}$ : 多孔質弾性材料の応力テンソル、 $p$ : 間隙水圧、 $\delta_{ij}$ : クロネッカーのデルタ、 $\alpha$ : Biot-Willis 係数であり、1.0 の定数とした単純化が地盤工学等でしばしば用いられている<sup>11)</sup>。

先にも述べた様に DuCOM-COM3 のコンクリートの応力は、外力と収縮駆動力の区別なく自動的に連成されている。すなわち、コンクリートの収縮や時間依存変形は、骨材、セメント硬化体、硬化体内部の空隙から構成される多孔質体を仮定し、多孔質弾性論<sup>11)</sup>を援用している。そこで、コンクリートの局所引張強度に対しても、骨材とセメント硬化体で構成されるコンクリート骨格部と空隙に作用する収縮駆動力に分割して考える。DuCOM-COM3 のコンクリートの応力は、偏差応力と体積応力の和として次式で表されている。

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \sigma_0 \delta_{ij} \quad (8)$$

ここで、 $S_{ij}$ : 偏差応力テンソル、 $\sigma_0$ : 体積応力、 $\delta_{ij}$ : クロネッカーのデルタである。本解析システムでは骨材の接触は無いものと仮定し、偏差応力は、セメント硬化体だけに依存する<sup>2)</sup>。従ってコンクリートの応力テンソル  $\sigma_{ij}$  の最大主応力を  $\sigma_1$  とし、最大主応力方向における各応力を以下の様に表現する。

$$\sigma_1 = V_{ag} \sigma_{ag} + V_{cp} \sigma_{1\_cp} \quad (9)$$

$$\sigma'_1 = V_{ag} \sigma'_{ag} + V_{cp} \sigma'_{1\_cp} \quad (10)$$

$$\sigma_{1\_cp} = \sigma'_{1\_cp} + \sigma_{ps} \quad (11)$$

$$\sigma'_{1\_max} = \sigma'_1 + (1 - \alpha_1) V_{cp} \sigma_{ps} \quad (12)$$

ここで、 $\sigma'_1$ : コンクリート骨格部の応力、 $\sigma_{1\_cp}$ : セメント硬化体の応力、 $\sigma'_{1\_cp}$ : セメント硬化体骨格部の応力、 $\sigma_{ps}$ : セメント硬化体内の空隙に生じる内圧、 $\sigma'_{1\_max}$ : 内圧の作用で生じるコンクリート骨格部の応力分布による最大応力、 $\alpha_1$ : 応力分布の最大と平均の比率であり 0.0 ~ 1.0 の範囲をとる係数である。

コンクリート骨格部には図-7 の様に空隙に作用する内圧によって応力分布が生じ、最大応力  $\sigma'_{1\_max}$  がコンク

リート骨格部の引張強度  $f_{ske}$  に達した際にコンクリートとしてひび割れが発生すると考えた。

$$\sigma'_{1\_max} = f_{ske} \quad (13)$$

すなわち、式(9)、(10)、(11)は既往の研究を基に最大主応力方向における応力分布の平均応力の関係を再定義したものであり、式(12)はその平均応力と応力分布の最大応力を結びつける関係を表現したもの、式(13)はコンクリートのひび割れ発生基準である。式(12)中の  $\alpha_1$  は、1.0でコンクリート骨格部の最大応力と平均応力が一致し、空隙の内圧によって応力分布が生じないことを意味する。ここで、式(13)となる時、コンクリートの最大主応力方向における平均応力  $\sigma_1$  を  $f_t$  と呼んで式(9)～式(12)を変形すれば、次式の様に表現することができる。

$$f_t = f_{ske} + \alpha_1 V_{cp} \sigma_{ps} \quad (14)$$

上式は、コンクリートとしての最大主応力に対応する引張強度である。換言すれば、コンクリートの局所引張強度は、骨材とセメント硬化体から成るコンクリート骨格部の強度と、収縮駆動力によるコンクリート骨格部へのプレストレス効果の和として説明することができ、係数  $\alpha_1$  は収縮駆動力によるプレストレス効果の有効率と表現することもできる。

湿潤養生の様に収縮駆動力が生じない条件下においては、コンクリート骨格部に生じる平均応力と最大応力は一致する。従って、コンクリート骨格部単体の強度  $f_{ske}$  は、湿潤養生で多くの検証が行われている既往の引張強度と同じと考え、式(6)をそのまま用いることとした。

コンクリート骨格部に応力分布を生じさせる空隙の内圧としては、毛細管張力と分離圧に起因する収縮駆動力の両方をそのまま用いることとした。

$$\sigma_{ps} = \sigma_s = \sigma_{sc} + \sigma_{sd} \quad (15)$$

本来、分離圧に起因する収縮駆動力の影響は、毛細管張力とスケールのオーダーが異なるため、表面エネルギーの増加等によるコンクリート骨格部の強度増加として考慮することが適切と思われるが、本研究では第一次近似として両者を区別せずに扱うこととした。

係数  $\alpha_1$  は、空隙の内圧によって生じるコンクリート骨格部の応力分布を考慮する係数であり、最大応力と平均応力の比率 (0.0～1.0) を表現するものである。空隙率が大きいほど空隙間の距離が小さくなり、応力分布は薄肉の挙動へ近づくと考えられる。一方、コンクリート骨格部のセメント硬化体に生じる微細き裂は、毛細管張力を消失させるように働き、骨材量が減少するほど微細き裂は進展しやすくなると考えられる。従って、空隙率が大きいほど  $\alpha_1$  は大きくなり、骨材量が減少するほど  $\alpha_1$  は

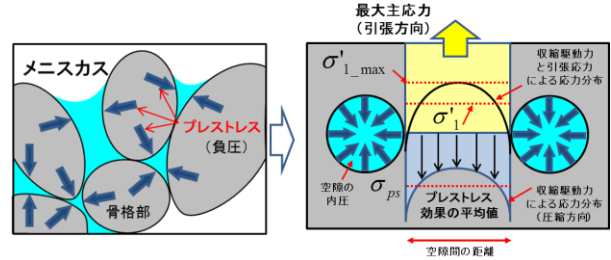


図-7 内圧によるコンクリート骨格部の応力分布

小さくなると推測される。以上より、内圧によって生じるコンクリート骨格部の最大応力と平均応力の関係を結びつける係数を以下の様に表現する。

$$\alpha_1 = 1.5 f(V_{ag}) f(\phi_{cp}) \quad (16)$$

ここで、 $V_{ag}$  : 骨材容積率、 $\phi_{cp}$  : 毛細管空隙率である。式(16)中のそれぞれの関数は、感度解析から簡易に以下の様に定めた。

$$f(V_{ag}) = V_{ag} + 1.0 \quad (17)$$

$$f(\phi_{cp}) = \phi_{cp} \quad (\phi_{cp} \leq 0.10) \quad (18)$$

#### 4.2 湿度勾配に伴う応力緩和

水分逸散・収縮発生に伴う応力勾配によって、表面近傍の計算上の応力が部材としての巨視的な引張強度を超えることがこれまでも指摘されている<sup>12)</sup>。しかし、このような応力勾配による表面近傍の微細き裂と、分散ひび割れモデルが想定する巨視的な構造レベルのひび割れは、性質の異なるものと考えられる。メゾスケールに着目した際の微細き裂発生を、分散ひび割れモデルのマクロなコンクリートとしての軟化開始と同一視することは適切でなく、むしろメゾスケールにおける微細き裂の発生は、マクロなコンクリートとして見た際の応力を低減する方向に働くと考えられる。このような観点から、湿度勾配をパラメータとした微細き裂の発生による応力緩和を考えることとし、空隙内の間隙水圧の関係をを用いて湿度勾配を表現するパラメータを次式の様に表す。

$$\frac{dh}{dX} = h \left( \frac{M}{\rho RT} \right) \frac{dP_l}{dX} \quad (19)$$

ここで、 $h$  : 相対湿度、 $P_l$  : 間隙水圧(Pa)、 $\rho$  : 液状水の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $M$  : 液状水のモル分子量(kg/mol)、 $R$  : 気体定数(J/mol.K)、 $T$  : 絶対温度(K)である。この湿度勾配を表すパラメータの逆数をコンクリートの特性寸法と定義し、次式とする。

$$Q = 0.5 \left( \frac{dh}{dX} \right)^{-1} \quad (20)$$

ここで、 $Q$  : 湿度勾配によるコンクリートの特性寸法であり、50%の相対湿度変化が生じる時に 1.0cm の基準

値となる。封緘養生や十分に乾燥した場合、特性寸法は大きくなり、乾燥初期で表面近傍の湿度勾配が大きい場合の特性寸法は小さくなる。モデル化されている収縮駆動力は、毛細管張力および分離圧といったナノ～マイクロメートルスケールで生じる機構に基づくものである。ここで湿度勾配に起因する急激な応力勾配によって、表面近傍に微細き裂が生じた場合には、ミリメートルあるいはセンチメートルといったコントロールボリュームに対する収縮駆動力が緩和されると考えられる。そこで、特性寸法を考慮した収縮駆動力を式(21)とし、2章にて述べた時間依存変形モデルにおける収縮駆動力を式(22)の様に修正する。

$$\sigma_{s\_n} = \sigma_s \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{Q}{G_{\max}}\right) \right\} \quad (21)$$

$$\sigma_{cp} = \sigma'_{cp} + \sigma_{s\_n} \quad (22)$$

ここで、 $G_{\max}$ ：最大骨材寸法(cm)である。式(21)は、表面近傍の急激な収縮駆動力の増加がマクロな応力へ寄与する影響を、湿度勾配から定まる特性寸法と最大骨材径の比率で表現したものである。これは、セメント硬化体に生じる微細き裂の進展が骨材によって阻害される影響も考慮したためである。例えば、2cmの最大骨材寸法のコンクリートと0.5cmのモルタルの均一性が異なる材料において、特性寸法の影響が異なることを意味している。

#### 4.3 ひび割れからの水分逸散

一般的に、コンクリートにひび割れが生じた場合、水分流束が変化し、水分の逸散が増加する。既存モデルでは、コンクリートの水分流束を次式により表現している。

$$J = -(D_p \nabla P_l + D_T \nabla T) \quad (23)$$

ここで、 $D_p$ ：間隙水圧勾配を駆動力とする水分移動係数、 $D_T$ ：温度勾配を駆動力とする水分移動係数、 $P_l$ ：間隙水圧、 $T$ ：絶対温度、 $\nabla$ ：微分演算子である。

本研究では、コンクリート要素が局所引張強度に達し、有効ひずみが300 $\mu$ を超えた場合、有効ひずみに応じて水分流束を増加させることで、ひび割れ発生による水分逸散の影響を簡易的に表現した。

$$J_i = -B_i \cdot (D_p \nabla P_l + D_T \nabla T) \quad (24)$$

$$B_i = 12 \cdot (\varepsilon_i - 300/10^6) \times 10^3 + 1.0 \quad (25)$$

ここで、 $\varepsilon_i$ ：コンクリートの有効ひずみである。

#### 5. 提案モデルによる検証解析

前章で用いた上田らの一軸引張試験<sup>9)</sup>について、提案モデルによる再解析結果を図-3と図-4に併せて示す。

提案モデルによって、部材としての引張強度の解析値は既存モデルから改善され、乾燥後も増加する傾向が再現されている。また、弾性係数の解析値も実験結果に近い。提案モデルによる断面内のひび割れ状況を図-6(右)に示す。既存モデルによる図-6(左)と比較して、軟化開始と判定された領域が表面近傍に留まっている。これが、部材全体としての引張強度と弾性係数の予測精度向上につながっていると考えられる。すなわち、乾燥に伴う局所的な引張強度の増加と微細き裂発生による応力緩和、ひび割れ発生による表面近傍の軟化と水分逸散量の増加といったそれぞれのプラスとマイナスの影響が複合することによって、部材としてのマクロな引張強度や弾性係数の挙動が表れているのである。提案モデルによる解析結果は、引張強度と弾性係数のどちらも若干実験値より小さい傾向が見られるが、これは式(5)による圧縮強度の解析精度の影響と考えられる。提案モデルのコンクリート骨格部の引張強度は、圧縮強度の精度に依存するため、本ケースでは図-5に示す様に圧縮強度が低めの解析結果となっていることが引張強度と弾性係数を低く算出している原因と考えられる。解析による圧縮強度が実験値と合うように水セメント比を変化させて再解析した結果を図-3と図-4に併せて示す(W/C 58%)。圧縮強度が実験結果に近づくことによって、引張強度と弾性係数も実験結果に近いことがわかる。

次に、水セメント比31, 42, 53%について、水中養生を基本として材齢1, 7, 28日に乾燥を開始した望月らによる実験<sup>13)</sup>と解析の比較を図-8と図-9に示す。提案モデルによる解析結果では、乾燥直後の強度増加が急ではあるものの、全体の傾向として実験を表現できていると考えられる。また、水分逸散量についても実験の傾向を良好に表現できていると考えられる。

これまで、DuCOMを用いたモルタルやコンクリートの供試体の水分逸散量は、様々な条件に対してその精度が検証されてきた<sup>2)</sup>。そこで、表面近傍のひび割れ発生後の水分流束変化の影響を確認するため、既存モデルによる水分逸散量と比較を行った(図-10)。既存モデルによる解析では、ひび割れ発生後も水分流束が変化しないため、高水セメント比の初期材齢に乾燥を開始したケースにおいて若干実験結果よりも小さい傾向を示している。

#### 6. まとめ

本研究では、これまでに積み重ねられた多くの知見を基にし、既往のモデルの課題を抽出すると同時に、乾燥収縮ひび割れの予測精度向上を目的として、局所的な引張強度や収縮駆動力による応力を水分状態と強連成させた準微細ひび割れモデルの提案を行った。

局所的な引張強度の増加と湿度勾配に伴う応力緩和の

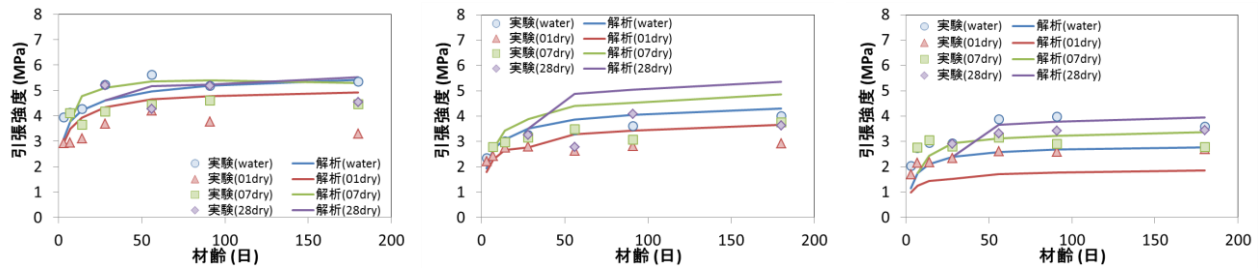


図-8 提案モデルによる引張強度の比較 (左: W/C 31%, 中: W/C 42%, 右: W/C 53%)

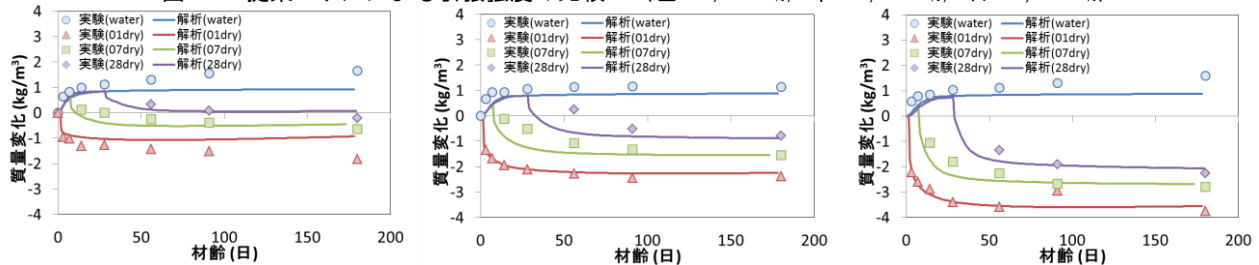


図-9 提案モデルによる水分逸散量の比較 (左: W/C 31%, 中: W/C 42%, 右: W/C 53%)

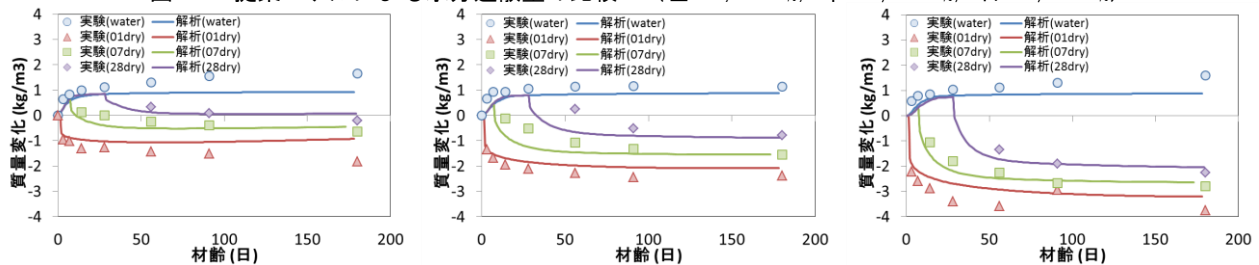


図-10 既存モデルによる水分逸散量の比較 (左: W/C 31%, 中: W/C 42%, 右: W/C 53%)

影響、ひび割れ発生による水分流束の変化を同時に考慮することによって、部材としてのマクロな引張強度を良好に解析で再現できることが確認された。

#### 参考文献

- 1) たとえば, 大野俊夫, 魚本健人: コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.662/V-49, pp.29-44, 2000.11
- 2) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, 2009.
- 3) Maekawa, k., Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 1999.
- 4) Maekawa, K., Chijiwa, N. and Ishida, T.: Long-term de-formational simulation of PC bridges based on the thermo-hygro model of micro-pores in cementitious composites, Cement and Concrete Research., Vol.41/12, pp.1310-1319, 2011.12
- 5) Esayas, G., Maekawa, K. Numerical Simulation on Shear Capacity and Post-Peak Ductility of Reinforced High-Strength Concrete Coupled with Autogenous Shrinkage, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.9, No.1, pp.73-88, 2011.2
- 6) 石田哲也, Yao LUAN: 水和収縮と細孔内水分の形

態に立脚した収縮駆動モデルの再構築, 土木学会論文集, Vol.68, No.4, pp.422-436, 2012.12

- 7) 小田部裕一: 複合水和発熱モデルの一般化と水和組織形成に着目した強度発現モデルの開発, 東京大学学位論文
- 8) 岡村甫: コンクリート構造の限界状態設計法, 共立出版株式会社, 第2版, 1988.2
- 9) 上田賢司, 佐藤嘉昭, 清原千鶴: コンクリートの直接引張強度に及ぼす乾燥の影響に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.828-833, 1997.
- 10) 岡島達雄: コンクリートの強度・ヤング係数と水分の関係, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.20-23, 1994.9
- 11) 徳永朋祥: 準静的多孔質弾性論に基づく地盤・岩盤と間隙水の相互作用と地球科学的意義, 地学雑誌, pp.262-278, 2006.
- 12) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: 含水率分布にもとづいた乾燥収縮応力の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.403-408, 1991.6
- 13) 望月昭宏, 澤本武博, 飛内圭之, 辻正哲, 樋口正典: コンクリートの配合および初期の水中養生期間が強度特性に及ぼす影響, ものつくり大学紀要, 第3号, pp.62-67, 2012.4