

論文 乾燥収縮ひび割れの進展挙動解析

長崎 了^{*1}・ 中村 光^{*2}・ 上田 尚史^{*3}・ 国枝 稔^{*4}

要旨:2次元RBSMと水分移動を考慮したトラスネットワークモデルを統合した解析手法に、材齢とひずみ履歴の影響を表現可能な Solidification concept に基づく構成則およびクリープによる変形を導入した手法の開発を行った。開発した手法を用いて、ドッグボーン型一軸拘束供試体を対象とした解析を行い、乾燥収縮によるひび割れ進展挙動に対する、乾燥収縮ひずみ、クリープひずみ、材齢変化の影響を検討するとともに、実験結果との比較から開発した手法の有効性を確認した。

キーワード: 乾燥収縮ひび割れ, RBSM, Solidification concept, クリープ, 水分移動

1. はじめに

コンクリート構造物には、初期材齢から温度変化や湿度変化などによる体積変化に起因した初期応力が発生する。その初期応力を低減させるため、施工・材料の観点から様々な工夫がなされている。それにも関わらず、実環境下におかれた構造物にはしばしば初期応力に起因するひび割れが発生し、耐久性の低下を引き起こす主な原因の一つとして懸念されている。そのため、ひび割れ制御の観点から、初期応力に起因するひび割れ発生の予測および進展挙動の評価が、近年重要な課題となっている。このことから、温度応力や乾燥収縮によるひび割れ発生やひび割れ発生後の時間依存変形挙動を把握する必要がある。

本研究では、ひび割れの進展挙動を明確に表現できる剛体-バネモデル（以下 RBSM）を構造解析手法とし、時間依存性挙動として、水分移動に伴う乾燥による変形、クリープによる変形ならびに材齢に伴う材料特性の変化を考慮できる解析手法の開発を試みた。そして、この手法を用いて乾燥収縮ひび割れの進展挙動解析を行い、ドッグボーン型一軸拘束供試体の変形挙

動の経時変化を評価し、本解析手法の有効性を検討した。

2. 解析手法

2.1 構造解析手法

(1) 剛体-バネモデル

構造解析手法として、離散型の解析手法でありひび割れ進展等の不連続現象を直接表現できる RBSM¹⁾を用いた。RBSMにおいては、ひび割れを要素間のバネの破壊として表現するため、ひび割れは要素境界辺上に沿って発生する。そのため、ひび割れの発生および進展挙動が要素分割に大きく依存するため、Voronoi 多角形分割²⁾によりコンクリートをランダムな要素に分割し、ひび割れ進展の要素依存性を低減した。図-1に示すように Voronoi 分割されたコンクリート要素は3自由度を持つ剛体としてモデル化し、各々の要素間の境界辺上に垂直バネ(k_n)およびせん断バネ(k_s)、回転バネ(k_θ)を配置した。

(2) 水分移動解析手法

水分移動解析手法として、不連続体挙動を表現する RBSM と結合可能なトラスネットワークモデル³⁾を用いた。すなわち、図-2に示すよう

| | | | | |
|-------------|-------------|-----|--------|-------|
| *1 名古屋大学大学院 | 工学研究科社会基盤専攻 | | | (正会員) |
| *2 名古屋大学大学院 | 工学研究科社会基盤専攻 | 教授 | 博士 (工) | (正会員) |
| *3 名古屋大学大学院 | 工学研究科社会基盤専攻 | 助教 | 修士 (工) | (正会員) |
| *4 名古屋大学大学院 | 工学研究科社会基盤専攻 | 准教授 | 博士 (工) | (正会員) |

に各 Voronoi 母点間を結ぶトラスネットワークを設定し、Voronoi 要素境界の辺長に応じた面積を与えた各トラスにおいて、水分移動の基礎方程式を境界条件式のもとに解くことで水分移動を表現した。離散化したトラスの拡散方程式を式(1)に示す。

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{AD}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{A'\alpha_1 L}{6\omega\pi} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{Bmatrix} \\ & + \frac{1}{\omega} \frac{AL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial t} \\ \frac{\partial R_2}{\partial t} \end{Bmatrix} - \frac{A'\alpha_1 L}{2\omega\pi} \begin{Bmatrix} R_s \\ R_s \end{Bmatrix} \\ & + \alpha_2 A \begin{Bmatrix} 0 \\ R_2 - R_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 A はトラス断面積、 L はトラス長さ、 A' はトラス表面積、 t は時間、 D は拡散係数、 ω は容量換算係数³⁾、 R_1 および R_2 は両トラス端面の相対含水率である。また、含水率 R と相対湿度 H の関係は $R=H$ であると仮定し、 R_s は雰囲気相対湿度である。 α_1 はトラス表面からの水分逸散、 α_2 はトラス断面からの水分伝達を表す水分伝達率である。2次元解析を行う本研究では、トラス表面からの水分逸散を考慮することで、3次元的な乾燥条件を簡易的に考えた。ただし、この場合では、部材厚さ方向の含水率勾配はないものと仮定することとなる。また、拡散係数の含水率依存性は既往の文献⁴⁾を参考に式(2)により考慮した。

$$\begin{aligned} \frac{D}{D_1} &= \alpha_0 + \frac{(1-\alpha_0)}{\left\{ 1 + \left(\frac{1-R}{1-R_c} \right)^n \right\}} \\ \alpha_0 &= 0.05 \quad R_c = 0.75 \quad n = 16 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 D_1 は初期拡散係数、 R は相対含水率であり、先述のとおり $R=H$ とした。

乾燥収縮ひずみは、トラスモデルにより求めたコンクリート中の相対含水率の変化量と自由乾燥収縮ひずみは線形関係にあると仮定し、式(3)により求めた。

$$\Delta \varepsilon_{sh} = \alpha_{sh} \Delta R \quad (3)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_{sh}$ は自由乾燥収縮ひずみ、 α_{sh} は収縮係数、 ΔR は相対含水率変化量である。

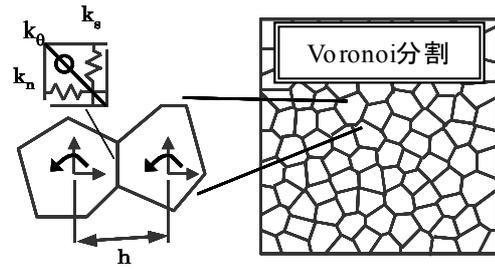


図-1 剛体-バネモデル (RBSM)

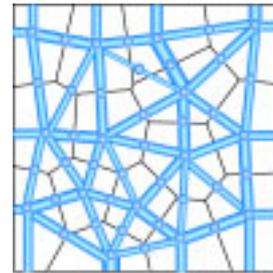


図-2 トラスネットワークモデル

(3) クリープモデル

RBSMにより毎ステップごとの垂直バネおよびせん断バネに作用する応力を求め、逐次クリープひずみを算定した。なお、垂直バネおよびせん断バネのクリープひずみの算定式は式(4)のように記述される一般的な形のものを用いた。

$$\varepsilon_{cr}(t_m) = \sum_{i=1}^{m-1} \phi(t_m, t_i) \Delta \sigma_i \quad (m \geq 2) \quad (4)$$

ここで、 t_i は時間ステップ、 $\varepsilon_{cr}(t_m)$ はある時間ステップにおける全クリープひずみ、 $\phi(t_m, t_i)$ はクリープ関数であり、 t_i に単位応力が作用した場合の経過時間 $(t_m - t_i)$ におけるクリープひずみとして定義される。 $\Delta \sigma_i$ は t_{i-1} から t_i 間での応力増分である。なお、本研究では、圧縮および引張クリープは等しいとした。

(4) Solidification concept に基づく構成則⁵⁾

乾燥のプロセスは、コンクリート打設直後から始まるため、構造物の挙動を評価するにあたり、材齢に伴う材料特性の変化を考慮する必要がある。そこで、本研究では、材齢およびひずみ履歴の影響を考慮可能な Solidification concept に基づく構成則を適用した。

Solidification concept に基づく構成則は、材齢とともに発現する材料特性を、セメントの水和

反応の程度を表す関数である Volume function として表現し、各々の時間ステップでのコンクリートの材料特性の変化は、各時間ステップ間の水和反応の進展を表す Volume function の増分 $dv(t_i)$ により決定する。図-3 に概念図を示す。ひずみ履歴を受けたある時間の応力-ひずみ関係は、図-3 の点線で示したようなひずみ履歴と水和反応の程度に応じて生成された応力-ひずみ関係の和として表される。

(5) コンクリートの材料モデル

硬化後のコンクリートの材料モデルとして、垂直バネに関しては、図-4 に示すように圧縮および引張破壊エネルギーを考慮したモデルを用いた。また、引張領域における除荷経路は初期剛性を持つ線形除荷モデルとした。なお、変位をひずみに変換するための特性長さは、図-1 に示すような2要素間の母点間距離 h とした。

せん断バネについては、斉藤らのモデル⁶⁾に基づきコンクリートのせん断すべり挙動をモデル化した。なお、硬化過程の応力-ひずみ関係は、Volume function に従い応力値を変化させることで与えられる。回転バネについては、斉藤らのモデル⁶⁾に基づき弾性として扱った。

2.2 時間依存挙動を考慮した構造解析

本研究では、時間依存挙動として乾燥およびクリープによる体積変化と、材料特性の変化を考慮している。乾燥およびクリープによる体積変化は、それぞれ式(3)、式(4)より求めたひずみを初期ひずみ問題としてバネに与えることで構造解析と統合される。なお、乾燥収縮ひずみは垂直バネに、クリープひずみは、垂直バネおよびせん断バネに与える。

3. ドッグボーン型一軸拘束供試体を対象としたひび割れ進展挙動評価

3.1 解析概要

(1) 解析モデル

図-5 に示すような、古島ら⁷⁾によって行われたドッグボーン型一軸拘束供試体の乾燥収縮試験を対象として解析を行った。本解析で用いた

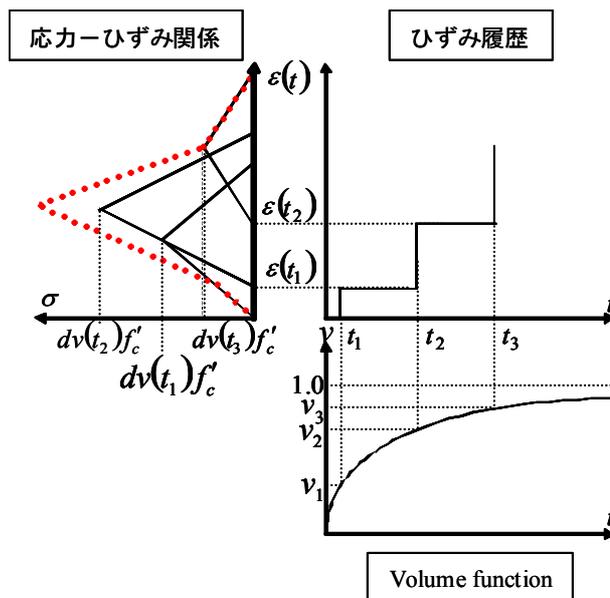


図-3 Solidification concept に基づく構成則

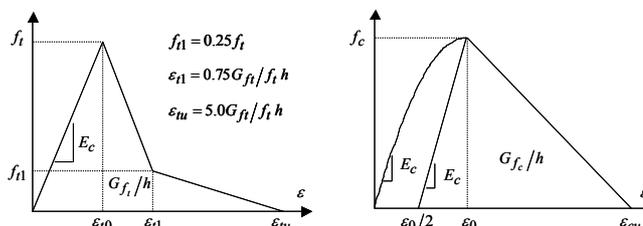


図-4 材料モデル

解析モデルを図-6 に示す。Voronoi 分割を行った要素は、最も断面積が小さい供試体中央のくびれ部で約 10mm の要素寸法である。また、対象とした試験方法は、コンクリート供試体の拘束枠への完全固定を仮定しているため、固定に用いている $\phi 13$ ネジ切棒鋼を図-6 に示すような上下面の拘束板としてモデル化した。また、供試体中央に発生するひび割れの進展挙動を評価するため、接合部および拘束筋に接する固定部のコンクリート要素は弾性体として取り扱った。

構造解析の境界条件は、解析モデルの下部拘束板の垂直および水平方向、および上部拘束板の水平方向変位を固定とした。水分移動解析の境界条件は、図-7 に示すような実際に観測された相対湿度の経時変化を直接入力した。なお、本解析では乾湿の不可逆性については考慮していない。

(2) 材料モデル

解析に用いたコンクリートの材齢 28 日における

る材料定数を表-1に示す。ここで、コンクリートの水和反応の程度を表す Volume function は材齢 90 日で 1.0 となる式(5)とした。Volume function および材齢 90 日の値で正規化した圧縮強度および引張強度の実験値を図-8に示す。なお、ポアソン比は考慮していない。鋼材はヤング係数が 210GPa, 断面積は 353mm²とした。

水分移動解析に用いる解析パラメータは、別途行われた 100×100×500mm の供試体による自由乾燥収縮実験と解析値が一致するように同定した。自由乾燥収縮実験の結果と解析値の比較を図-9に示す。また、同定した水分移動解析パラメータの値を表-2に示す。一方、クリープ関数は、100×100×500mm の供試体に対し圧縮軸応力 6MPa を作用させた実験結果から式(6)のように同定した。 t_i は載荷材齢である。

$$v(t) = \frac{3.224t}{20+t} \quad (5)$$

$$\phi(t, t_i) = \frac{0.39}{E(t_i)} (t - t_i)^{0.35} \quad (6)$$

(3) 解析ケース

解析条件を次の4ケースに関して設定し、各々の変形挙動を比較することで、本解析手法の適用性を検討した。

ケース1は、RBSMにトラスモデルを統合し、水分移動による収縮の影響のみを考慮したケース。ケース2は、ケース1にクリープ変形による影響を考慮したケース。ケース3は、ケース1に Volume function による材料特性の変化の影響を考慮したケース。ケース4は、ケース1に Volume function による材料特性の変化およびク

表-1 コンクリートの材料諸元

| ヤング係数 | 圧縮強度 | 引張強度 |
|----------|-----------|----------|
| 23.4 GPa | 28.20 MPa | 2.82 MPa |

表-2 水分移動解析パラメータ

| | |
|--------------------------|--------|
| 初期拡散係数 $D(mm^2/day)$ | 30.0 |
| 水分伝達率 $\alpha_1(mm/day)$ | 0.1 |
| 水分伝達率 $\alpha_2(mm/day)$ | 1.5 |
| 収縮係数 α_{sh} | 0.0027 |

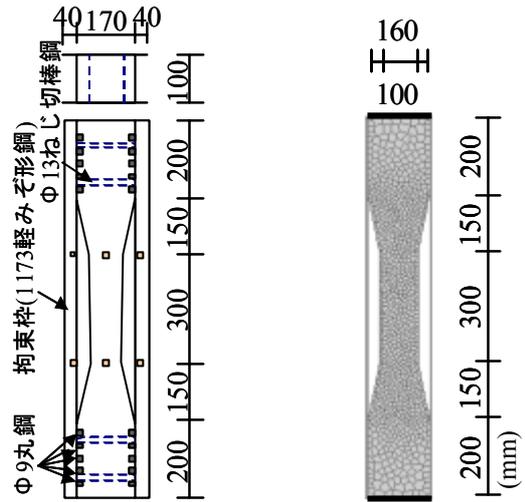


図-5 実験供試体概要 図-6 解析モデル

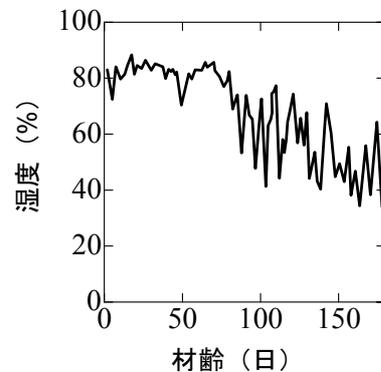


図-7 外気条件

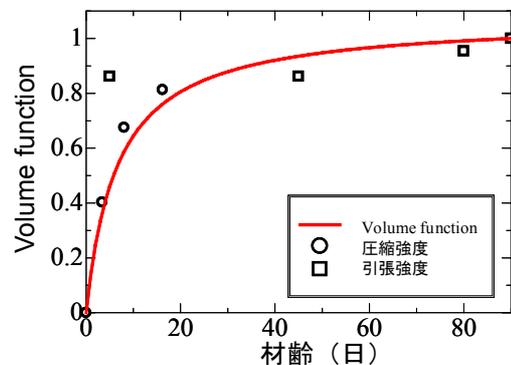


図-8 Volume function および正規化した
圧縮強度・引張強度

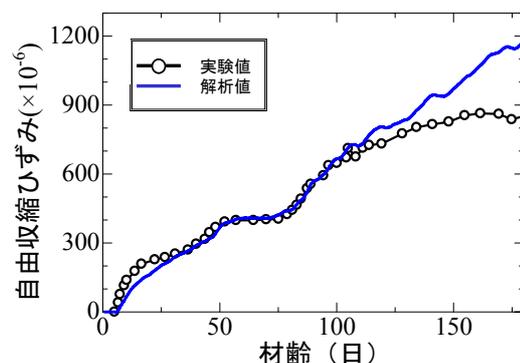


図-9 自由収縮ひずみの経時変化

リープ変形の影響を考慮したケースである。なお、ケース 1 およびケース 2 においては、材料特性の変化を考慮しないため、表 1 に示す材齢 28 日の材料定数を一定値として与えた。なお、検長区間は供試体中央のくびれ部 300mm である。

3.2 解析結果および考察

(1) 拘束収縮ひずみの評価

図-10 にそれぞれのケースの解析によって得られたコンクリートひずみの経時変化を示す。なお、収縮による圧縮ひずみを正の値として示す。いずれのケースも、時間とともに徐々に圧縮ひずみが大きくなり、ある時点において急激に引張ひずみが生じ、その後、引張ひずみが徐々に増加していく傾向を示す。ひずみが急激に変化する時点が貫通ひび割れが生じる時点に対応する。貫通ひび割れ発生時点は乾燥収縮のみを考慮したケース 1 が最も早く、ケース 3、ケース 2、ケース 4 の順で遅くなっている。材料特性の変化の影響を考慮したケース 3 は、Solidification concept では total の応力は増加していても各材齢で生成された応力-ひずみ関係の軟化挙動を考慮するので弾性解析に比べ、total の応力-ひずみ関係の最大応力時のひずみが増加し、みかけの剛性が低下する。そのため、ケース 1 に比べ収縮ひずみが小さくなるとともに、ひび割れ発生時点が遅くなると推測される。クリープ変形を考慮したケース 2 では、引張応力による引張クリープの影響で、ケース 1 に比べ収縮ひずみが小さくなり貫通ひび割れ発生時点が遅くなる。ケース 4 については、材料特性の変化およびクリープ変形の影響がカップリングして、さらに貫通ひび割れの発生が遅くなる。これらの傾向は定性的に本解析が実現象を表していると言える。なお、実験におけるひび割れ発生日は 82 日であり、ケース 4 と概ね一致している。ただし、本解析は 2 次元解析であり、奥行き方向の挙動は実験値と若干異なる点を付記する。

(2) ひび割れの進展挙動の評価

図-11 にケース 4 の解析によって得られた、材齢 52 日、82 日、85 日、105 日、145 日にお

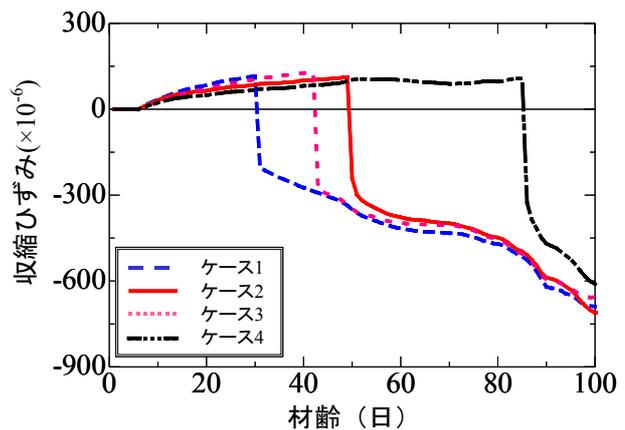


図-10 収縮ひずみの経時変化

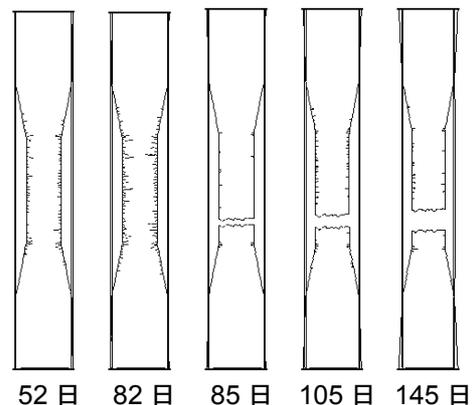


図-11 ひび割れ図の経時変化

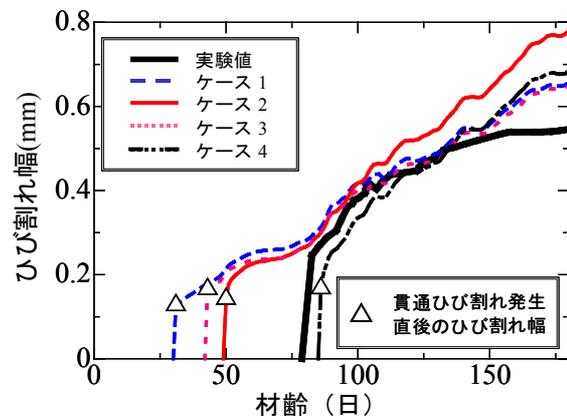


図-12 ひび割れ幅の経時変化

るひび割れ図を示す。材齢 52 日では、水分移動による内部拘束によって、供試体中央のくびれ部に微細ひび割れが多数発生していることが確認される。湿度変化が大きくなる材齢 82 日では、微細ひび割れが増え、供試体くびれ部の断面内中央に微細ひび割れが進展していく。材齢 85 日に貫通ひび割れが発生して、応力が開放され供試体断面の微細ひび割れが消失する。その後は、材齢に伴い、ひび割れ幅が拡大していく挙動を示す。以上のように、本解析手法によりひび割

れの進展，拡大の挙動を明確に再現できることが分かる。

(3) ひび割れ幅の経時変化の評価

図-12 にそれぞれのケースにおける解析によって得られた貫通ひび割れ発生後のひび割れ幅の経時変化を実験値と併せて示す。いずれのケースにおいても，貫通ひび割れ発生直後に急激にひび割れ幅が増加する。ケース 3 およびケース 4 において，貫通ひび割れ発生直後のひび割れ幅がケース 1 およびケース 2 に比べ大きくなっていることが分かる。これは，Solidification concept を考慮することで，材齢に伴う強度増加ならびにひずみ履歴の影響による最大応力時のひずみの増加の影響と考えられる。貫通ひび割れ発生後の供試体は自由乾燥収縮していく挙動を示すと考えられるため，それぞれ材齢約 80 日からのひび割れ幅は実験値に近い挙動を示す。ケース 4 においては，ひび割れ発生直後の急激なひび割れ幅増大およびその後の挙動を概ね実験値と同様に再現できており，乾燥収縮によるひび割れ進展挙動評価に対する本解析手法の適用性ならびに有効性が確認された。

4. 結論

本研究では，RBSM と水分移動を考慮したトラスネットワークを統合した解析手法に，クリープ変形および材料特性の変化の影響を導入することで，時間依存変形を考慮可能な解析手法を開発し，その有効性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) クリープ変形および材齢に伴う材料特性の変化を導入した解析手法を用いて，一軸拘束供試体を対象としたひび割れ進展解析を行った結果，本解析手法を用いることでひび割れ発生およびひび割れ幅拡大の挙動を，妥当に再現できることが示された。
- (2) Solidification concept に基づく構成則を考慮することで，材齢およびひずみ履歴の影響を反映でき，時間依存変形を生じる

乾燥収縮解析の精度向上に寄与するものと考えられる。

謝辞：本研究は，(財)中部電力基礎技術研究所からの研究助成金の援助を得て行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Kawai, T. : New discrete models and their application to seismic response analysis of structure, Nuclear Engineering and design, Vol.48, pp.207-229, 1978
- 2) Bolander, J. and Saito, S.: Fracture Analysis using Spring Networks with Random Geometry, Engineering Fracture Mechanics, Vol.61, No.5-6, pp.569-591, 1998
- 3) Hikaru, N., Worapong, S., Ryosuke, Y., Minoru, K. : Time-Dependent Structural Analysis Considering Mass Transfer to evaluate Deterioration Process of RC Structures. , Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.147-158, February, 2006.
- 4) 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，第 420 号，V-13, pp.61-69, 1990.8
- 5) 国枝稔，Worapong, S., 岸山雄多佳，中村光，石川靖晃：若材齢コンクリートの硬化過程およびひずみ履歴を考慮したひび割れ構成則に関する研究，土木学会論文集，Vol.63, No.1, pp.127-142, 2007
- 6) Saito, S. : Fracture analyses of structural concrete using spring network with random geometry. ,Doctoral thesis, Kyushu University, 1999
- 7) 古島正博，鈴木計夫，大野義照，中川隆夫：高性能 AE 減水剤を用いた早強セメントコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.1, pp.429-434, 1993