

初期ひび割れがコンクリート供試体の引張挙動に及ぼす影響評価

名古屋大学大学院 学生会員 ○野城 良祐
 名城大学 正会員 石川 靖晃
 名古屋大学大学院 正会員 中村 光
 名古屋大学大学院 正会員 田辺 忠顕

1. はじめに

初期ひびわれは構造物の耐久性の劣化を引き起こす主要因であるため、初期ひびわれの発生を精度よく予測しひびわれ抑制対策を講じる必要がある。そのためには乾燥、温度などによって生じる初期応力に起因するひび割れ進展と、ひび割れが構造物の耐久性ならびに安全性に及ぼす影響を、解析上より現実的に捉える必要がある。

物質移動に起因する初期応力によるひび割れ進展解析としては、ひび割れ幅や、深さを評価するために、離散ひび割れモデルを用いた有限要素解析が行なわれている。しかし、離散ひび割れモデルは、その特性から多くの解析上の制限を有し、構造解析としては、必ずしも一般的でない。そこで、本研究では、ひび割れを離散的に評価し、ひび割れの発生・進展状況を直接表現できる剛体-バネモデル(以下、RBSM)による構造解析と、一次元のトラス間で物質移動が行なわれると仮定したトラスモデルによる物質移動解析を統合した解析手法¹⁾により、乾燥収縮解析と構造解析を行い、初期ひび割れがコンクリート供試体の引張挙動に及ぼす影響を解析的に検討した。

2. 解析手法

2.1 コンクリート構造物の解析

(1) 剛体バネモデル

本研究では、コンクリートの構造解析手法として、ひび割れ進展等の不連続現象を直接表現できるRBSMを用いた。

RBSMでは、コンクリートのひび割れをバネの破壊によって表現するため、ひび割れは要素境界辺上に沿って発生する。このため、ひび割れの発生・進展がコンクリートの要素分割に大きく依存する。そこで図-1に示すように、計算幾何学の概念であるVoronoi多角形分割により、構造物をランダムな要素に分割し、ひび割れの要素依存性を低減した²⁾。また、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仮定し、要素の境界辺上に垂直バネ(k_n)および、せん断バネ(k_s)を設けた。バネ定数には、コンクリートの弾性係数 E を二要素間の母点間距離 h で除したものを与えた。

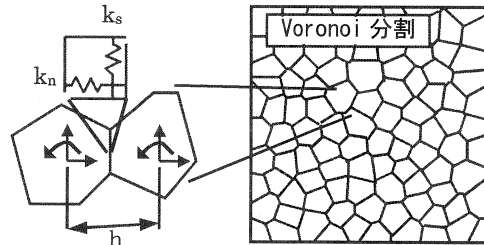


図-1 剛体-バネモデル

(2) コンクリートの材料モデル

コンクリートの材料モデルは、垂直バネに圧縮、引張挙動、せん断バネにせん断すべり挙動をモデル化した。

本研究は、ひび割れ進展を解析対象としたため、圧縮領域では図-2に示すように弾性とした。引張領域では、引張強度 f_t までは弾性とし、その後は引張破壊エネルギー G_f によって軟化勾配を変化させる1/4モデルに従って応力を低減させた。本研究では、引張破壊エネルギー G_f を

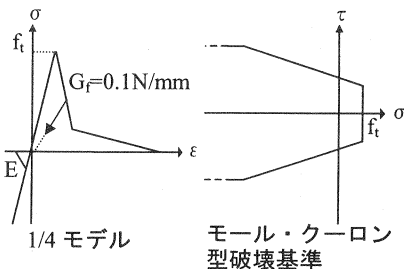


図-2 コンクリートの材料モデル

0.1N/mm と一定の値を用い、除荷は原点指向型とした。

せん断バネについては、コンクリートのせん断伝達機構のモデル化を行った。図-2に示すようなモール・クーロン型の破壊基準を用いて、降伏後は終局せん断ひずみに達するまで降伏曲面上を移動するものとした²⁾。ただし、ひび割れの開口に伴うせん断剛性の低下を表現するために、ひび割れ幅に対して線形的にせん断剛性を低下させた³⁾。

2.2 物質移動モデル

(1) トラスモデル

物質移動解析には、著者らが開発したトラスモデルを用いた¹⁾。Voronoi 分割を行った RBSM 解析では、一次元のバネを Voronoi 多角形上に配置することでマクロの挙動を追っている。これと同様の着想で、図-3に示すように、各 Voronoi の母点を結ぶトラスネットワークを考え、各トラスは、Voronoi 要素の辺長に対応した面積を持つとした。

本研究では物質移動解析として水分の移動による乾燥収縮を対象とし、取り扱う水分拡散の基礎方程式⁴⁾を以下のように与えた。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \nabla(D\nabla R) \quad (1)$$

ここで、R: 相対含水率、t: 時間、D: 水分伝導率である。これを初期条件と以下の境界条件のもとに解けばよい。

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha_m(H_s - H_0) = 0 \quad (2)$$

ここで、n: 乾燥面の法線ベクトル、 α_m : 水分伝達率、 H_s 、 H_0 : 乾燥表面および雰囲気相の相対湿度である。本研究では D は簡単に相対含水率に抛らず一定と仮定し、R と H の関係も R=H とした。

2.3 水分移動を考慮した RBSM によるひび割れ進展解析

(1) 拡散-応力の連成問題

トラスモデルによりコンクリート中の相対含水率の変化を求め、相対含水率と自由乾燥収縮ひずみは線形の関係であると仮定して、自由乾燥収縮ひずみを以下の式より求めた。

$$\Delta \varepsilon_n = \alpha_{sh} \Delta R \quad (1)$$

ここで ε_n : 自由乾燥収縮ひずみ、 α_{sh} : 収縮係数、 ΔR : 相対含水率変化、である。そして、 ε_n を RBSM における垂直バネの初期ひずみとし、RBSM により初期外力を求め、初期応力問題として、構造解析を行った。

(2) ひび割れ間の物質移動

コンクリート中にひび割れが存在すると、外気条件がひび割れ中まで浸入し、ひび割れを通しての物質移動が行なわれる。これらの影響を考慮するために、図-3に示すトラスモデルを図-4に示すように、剛体辺上にもトラス要素を持つモデルに拡張し、ひび割れ間での物質移動を考慮することとした。ここで、剛体辺上のトラス要素は、ひび割れ発生以前は面積を 0 とし、このトラスを通じての物質

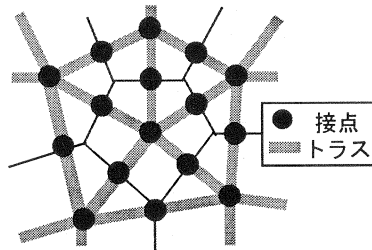
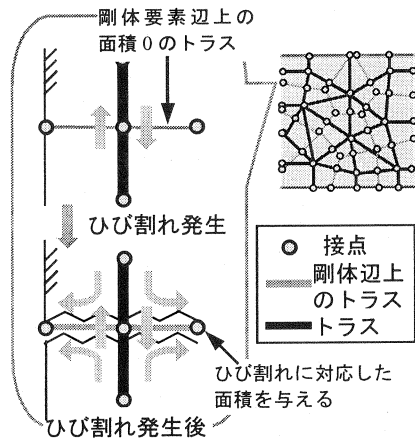


図-3 トラスモデル



移動は起こらないと仮定した。ひび割れ発生後は、ひび割れ幅に対応した面積をトラス要素に与えた。

3. 解析結果

3.1 解析概要

図-5 に示す 100×100×600mm のコンクリートは二次元で 1000 要素に分割してモデル化し、供試体の乾燥収縮解析を行った後、一軸引張解析を行った。

解析に使用した材料諸元を表-1 に示す。構造解析の境界条件として乾燥収縮時は上部と下部を完全に固定し、所定の時間経過後に上部を変位制御にして一軸引張荷重を加えた。拡散解析の境界条件は供試体の側面を湿度条件とした。

供試体の乾燥収縮時に上下端部を固定することにより供試体の収縮が妨げられ引張力が作用する。また、乾燥収縮時に供試体の表面部と内部で相対含水率の差異が生じ、内部拘束が発生し供試体表面部に引張力が作用する。これらの作用により供試体表面から微細なひび割れが生じる。この初期ひび割れが一軸引張解析の結果に及ぼす影響を調べた。

乾燥収縮期間は 0 日、5 日、10 日、20 日、40 日と変化させた。初期条件は相対含水率 1.0 を与え、外気条件は相対湿度を 70% と 80% で常に一定とした 2 種類で解析を行った。

3.2 解析結果

図-6 に相対湿度 70% でそれぞれ異なる期間経過した後、一軸引張荷重を加えた供試体の応力-歪関係を示す。

図-6 において乾燥期間中は供試体の全長の変化が 0 にもかかわらず、引張応力が生じている。これは、上下端部を固定しているため変位は生じないが、収縮に抵抗する力が働くためである。図-6 中の丸印での各乾燥期間の供試体のひび割れ図を図-7 に示す。乾燥収縮の影響により、乾燥期間が長いほど微細な初期ひび割れが多数発生し、供試体の損傷が増加していることがわかる。その後は荷重作用によりひずみが生じ最大応力に達した後、脆性的に応力が低下する。図-6 中の①~③での応力ひび割れ図を図-8 に示す。①以降表面部から内部に卓越したひび割れが進展し、②ではひび割れが二方向から発生し、③ではひび割れが貫通している。

図-6 から乾燥期間が長いほど荷重作用後の応力増加量ならびに弾性係数が低下し、引張強度までに達するひずみ量が少なくなる傾向にあることがわかる。これは、乾燥収縮は供試体の相対含水率と外気の相対湿度が完全に平衡状態になるまで進み、収縮が進む分引張応力が発生し初期ひび割れが多

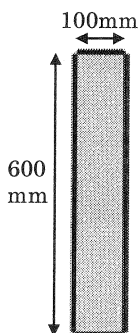
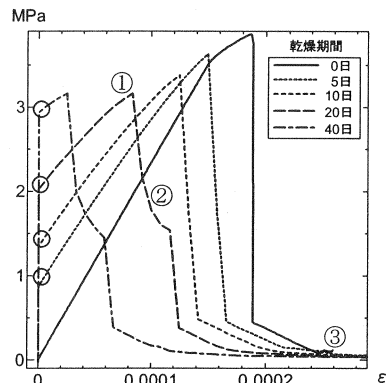


図-5 解析モデル

表-1 材料諸元

引張強度 f_t (MPa)	3.50
弾性係数 E (MPa)	2.38×10^4
水分伝導率 D (cm^2/day)	0.1
水分伝達率 α_m (cm/day)	3.0
収縮係数 α_{sh}	0.001



く発生するためである。

図-9 に相対湿度 70% と 80% の時の乾燥期間が強度低下に及ぼす割合を示す。引張強度低下率は各乾燥期間での荷重作用による応力増加量を乾燥期間 0 日時の応力増加量に対する比で与えている。40 日間乾燥させると相対湿度 80% で約 40%、相対湿度 70% で約 10% 程度まで低下し両者に差が生じた。これは相対湿度が 80% では相対湿度 70% に比べて内部と外部の水分量の差が少なく乾燥収縮の進行が緩やかになるため、初期ひび割れの発生が少なく強度の低下割合もそれに伴い低下するためである。

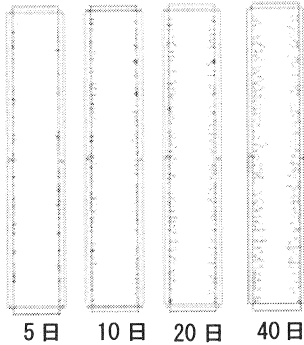


図-7 初期ひび割れ図

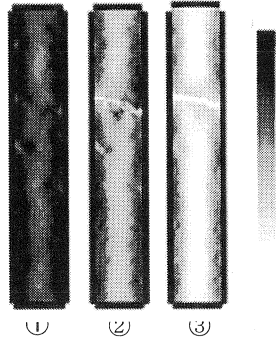


図-8 応力とひび割れ図

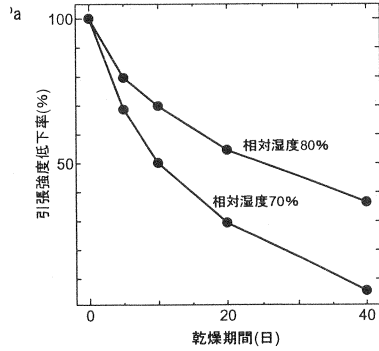


図-9 乾燥期間と強度低下率の関係

5. 結論

以上のことから以下のことが要約される。

1. 離散化解析手法である RBSM と、物質移動を直接考慮できるトラスモデルの両者の利点を組み合わせた解析手法を用いて、初期欠陥を有する構造解析手法の提案を行った。
2. 提案した解析手法では、乾燥収縮による初期ひび割れと、それに伴う一軸引張強度の変化を明らかにできる。
3. 乾燥期間が長いほど、初期ひび割れが多く生じ、荷重作用による引張応力の増加量ならびに、弾性係数が小さくなる。
4. 相対湿度と内部の相対含水率の差が大きいくほど乾燥収縮の進行が早まり、初期ひび割れの発生が多くなる。その結果、引張挙動に及ぼす影響が大きくなる。

参考文献

- 1) 野城良祐, 石川靖晃, 中村光, 田辺忠顕: 物質移動を考慮した RBSM によるひび割れ進展解析手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, 2003
- 2) 斉藤成彦ほか: 剛体-バネモデルを用いた軸方向圧縮力を受ける RC 梁のせん断破壊挙動の数値解析, コンクリート工学論文集, 第 12 巻第二号, pp. 71-81, 2001 年 5 月
- 3) Kouhei, N. et al: Numerical simulation of Fracture Process of Concrete Model By Rigid Body Spring Method, JCI, Vol.24, No.2, pp163-168, 2002
- 4) 秋田宏ほか: モルタルの乾燥・吸湿・給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 年 8 月