

論文 塩分浸透による鋼材腐食を考慮した RBSM 解析

野城 良祐*1・中村 光*2・SRISOROS WORAPONG*3・田邊 忠顕*4

要旨：本論文では、不連続体力学に基づいた解析手法である剛体 - バネモデルに、物質移動を直接考慮できるトラスモデルを組み合わせ、乾燥収縮と塩分浸透による鋼材腐食を考慮した複合作用下での構造解析手法を提案した。解析は、コンクリート中の相対含水率により塩化物イオンの拡散係数を変化させ、水分移動解析と塩分浸透解析を同時に行い、塩分浸透解析により腐食開始時期を評価した。さらに、鋼材腐食による膨張力のモデル化を行った。そして、開発した解析手法の可能性を検討した。

キーワード：塩分浸透，鋼材腐食，RBSM，トラスモデル，ひび割れ進展，拡散方程式

1. はじめに

近年、社会資本の成熟化、また高度経済成長期に造られた構造物の劣化報告などから、コンクリート構造物の耐久性についての関心が高まっている。コンクリートの耐久性を確保するには、鉄筋の腐食開始時期、鉄筋腐食にともなうひび割れ、剥離の予測が重要である。

従来から塩分浸透解析や、腐食による膨張挙動解析などの個々の研究については多くなされている。しかし、前者はコンクリート中の塩化物イオン濃度の評価に主眼を置いたものであり、構造特性に及ぼす影響を評価することはできない。後者は断面レベルでの解析であり、構造解析としては一般的ではなく、構造物の全体挙動への影響は評価できない。

そこで、本研究では、両者を統合して解析することを目的とし、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を用いた。さらに、塩分浸透に伴う鋼材腐食のモデル化を行った。そして、水分拡散と鋼材腐食に伴うひび割れ進展解析を行い、開発した解析手法の可能性を検討した。

2. 物質移動を考慮した RBSM 解析

2.1 鉄筋コンクリートの構造解析²⁾

(1) 剛体 - バネモデル

本研究では、構造解析手法として、斉藤らによりコンクリート構造物への適用性が確認された、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边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。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、要素の境界边上に垂直バネ (k_n)

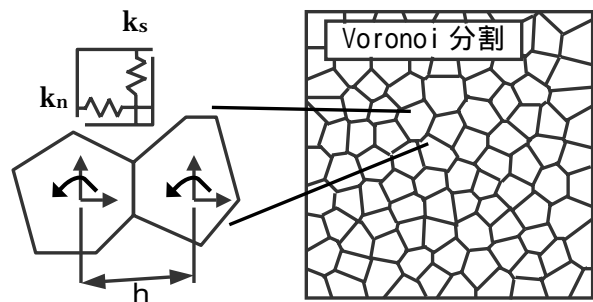


図 - 1 剛体 - バネモデル

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 学生 正会員
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 助教授 工博 正会員
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 学生 工修
 *4 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授 工博 正会員

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。

(2) 鉄筋モデル²⁾

鉄筋のモデルとして梁要素を用いた。

図 - 2 に示すように、梁要素の集合として離散的に扱い、剛体要素にリンク要素を介して、結合させた。鉄筋とコンクリート間の付着すべりは、リンク要素で表現した。

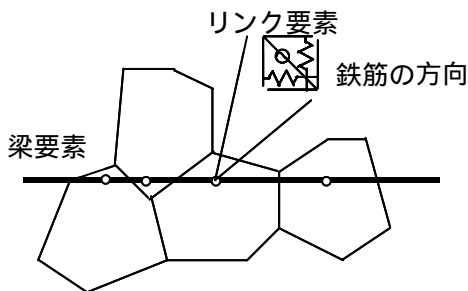


図 - 2 鉄筋モデル

(3) 材料モデル

コンクリートの材料モデルは、垂直バネに圧縮挙動、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、図 - 3 に示すように圧縮領域では二次曲線的に応力が増加し、その後は圧縮終局ひずみまで直線で近似した。引張領域では、引張強度 f_t までは弾性とし、1/4 モデルに従って応力を低減させた。両者とも破壊エネルギーを考慮し、除荷は原点指向型とした。なお、クリ

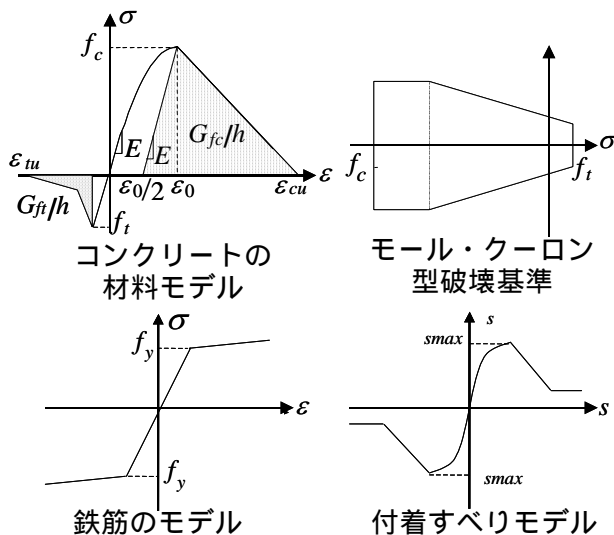


図 - 3 材料モデル

ープについては考慮していない。

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として、図 - 3 に示すようなモール・クーロン型の破壊基準を用いた²⁾。また、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せん断剛性を低下させた。

鉄筋は図 - 3 に示すように、バイリニア型でモデル化した。リンク要素の鉄筋方向バネに対し、鉄筋 - コンクリート間のすべり挙動をモデル化した。

2.2 コンクリート中の物質移動解析

(1) トラスモデル

物質移動解析は、トラスモデルにより行なった。Voronoi 分割を行なった 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 - 4 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。トラスモデルは、一次元の拡散方程式を考えるだけでよく、簡易に物質移動解析を行なうことが可能となる。

(2) ひび割れ間の物質移動¹⁾

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。

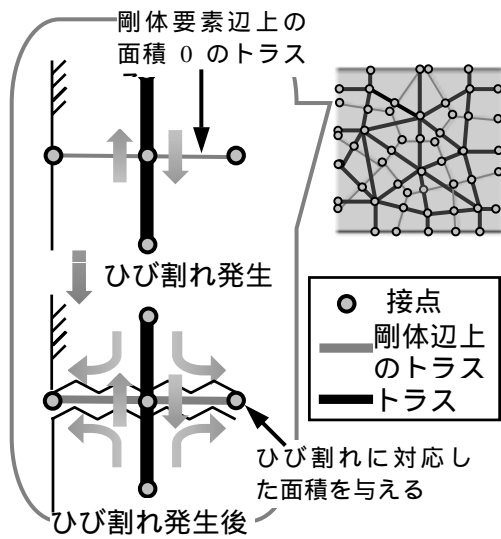


図 - 4 ひび割れ部の処理

これらの影響を考慮するために、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とし、ひび割れ間での物質移動を考慮した。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移動は起こらないと仮定した。ひび割れ発生後は RBSM により得られたひび割れ幅に奥行きを乗じた面積をトラス要素に与えた。また、拡散係数は、コンクリート中とは異なる値を仮定し、直接ひび割れ間での物質移動問題を考慮できるようモデル化した。

(3) 水分移動

コンクリート中の水分移動は拡散則に従うとし、以下の拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial R}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここで、 R ：相対含水率、 t ：時間、 D_w ：水分伝導率である。これを初期条件と境界条件のもとに解いた。

水分拡散問題は、水分伝導率を相対含水率の関数として、非線形解析を行なうことが一般的であるが、 D_w は簡単に相対含水率に拠らず一定と仮定した。

(4) 塩分浸透

コンクリート中の塩分浸透は水分移動と同様に拡散則に従うとし、以下の拡散方程式を用いた。塩化物イオンの拡散係数の含水率依存性³⁾は式(3)により考慮した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D'_{cl} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\frac{D'_{cl}}{D_{cl0}} = 0.0032 \times 10^{0.025\omega} \quad (3)$$

ここで、 C ：可溶性塩化物イオン濃度、 t ：時間、 D'_{cl} ：塩化物イオンの固定化の影響を考慮した拡散係数、 D_{cl0} ：飽水状態における拡散係数、 ω ：相対含水率である。これを初期条件と境界条件のもとに解いた。

2.3 物質移動を考慮した RBSM によるひび割れ進展解析

(1) 水分移動による内部応力の発生

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。

$$\Delta \varepsilon_n = \alpha_{sh} \Delta R \quad (4)$$

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、構造解析を行なった。

(2) 鋼材腐食による内部応力

鉄筋位置での塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} (本研究では $1.2 \times 10^{-6} \text{g/mm}^3$) を超えると、鉄筋の腐食が開始するとし、その後、鉄筋の腐食膨張を考慮した。腐食速度は $3.0 \times 10^{-8} \text{g/mm}^2 \cdot \text{day}$ と一定の値を用いた。

膨張によって生じるコンクリートの強制変位⁴⁾は以下のように与えた。

$$U = \frac{W_r (dV - 1)}{\rho_s} \quad (5)$$

ここで U ：強制変位量、 W_r ：鉄筋の腐食量、 ρ_s ：鉄の密度、 dV ：錆の体積膨張率、である。強制変位 U をポロノイ要素間の長さで割ったものを膨張歪とし、膨張歪から RBSM により外力を求め、鉄筋の法線方向に膨張力として外力を作用させた。

3. 鋼材腐食を考慮した RBSM 解析

3.1 解析概要

図 - 5 に示す鉄筋位置の異なる $200 \times 200 \times 1000 \text{mm}$ の鉄筋コンクリート供試体を用いて、鋼材腐食を考慮した RBSM 解析を行った。

3.2 では A1 供試体のみで、物質移動は行なわず、鉄筋の全要素に一定の腐食速度を与え、腐食に伴うひび割れ進展解析（以下、腐食解析）を行った。3.3 では A1 供試体と A2 供試体を用いて水分移動に伴う乾燥収縮と、塩分浸

透に伴う腐食を複合したひび割れ進展解析（以下、複合解析）を行った。3.4 では 3.3 の複合解析の後に荷重作用を加え、損傷の度合いが供試体に及ぼす影響を調べた。

供試体は、二次元で 1000 要素と 1500 要素に分割してモデル化を行った。解析に使用した材料諸元を表 - 1 に示す。ひび割れ間の水分、塩化物イオンの拡散係数については、解析例を示すために大きめの値を仮定した。また、コンクリート中での塩化物イオンの飽水状態における拡散係数は、鉄筋の腐食開始時期を早めるために、一般的な値の 10 倍の値を仮定した。なお、本研究の目的は、あくまでも、乾燥収縮および鉄筋腐食による複合劣化の評価とその構造特性への影響を評価可能な解析手法を開発することである。したがって、2 章で示した拡散方程式は簡便なものをを用い、解析パラメータの値は、解析手法の可能性を評価できるように設定した。

構造解析の境界条件は、腐食解析、複合解析ともに供試体の左右を水平方向に固定した。拡

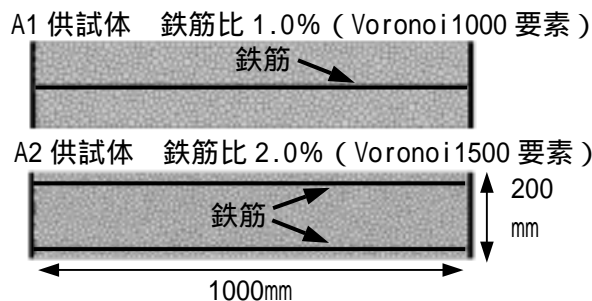


図 - 5 解析モデル

表 - 1 材料諸元

コンクリート	引張強度 f_t (MPa)	2.0
	圧縮強度 f_c (MPa)	30.0
	弾性係数 E (MPa)	2.0×10^4
鉄筋	降伏強度 f_y (MPa)	300.0
	弾性係数 E_s (MPa)	2.0×10^5
水分移動	水分伝導率 D_w (mm ² /day)	10.0
	ひび割れ間の水分伝導率 D_{crw} (mm ² /day)	1.0×10^5
塩分浸透	飽水状態における拡散係数 D_{cl0} (mm ² /day)	8.00
	ひび割れ間の拡散係数 D_{crc} (mm ² /day)	8.0×10^5

散解析の境界条件も、両解析共に供試体上下側面を放出面とした。

解析条件は、腐食解析では塩化物イオンの初期濃度として、鋼材腐食発生限界濃度の $1.2 \times 10^{-6} \text{g/mm}^3$ を与え、1 ステップ目から腐食による膨張圧がかかるようにした。複合解析は初期条件として相対含水率 1.0、塩化物イオン濃度 0.0g/mm^3 を与えた。A1 供試体を用いた解析では、解析期間を 600 日とし、放出面の相対含水率を 200 日までは 0.8 とし、その後 400 日で 0.6 となる様に線形的に減少させた。そして 400 日以降は 0.6 と一定とした。A2 供試体を用いた解析では常に 0.8 と一定にした。塩化物イオンの表面濃度は A1, A2 供試体共に $2.5 \times 10^{-6} \text{g/mm}^3$ と一定にした。

3.2 鋼材腐食によるひび割れ進展解析

図 - 6 に腐食解析での A1 供試体のひび割れ図と応力図を示す。応力は鉄筋法線方向の垂直応力を表し、プラスは圧縮、マイナスは引張である。図は経過時間 360 日、400 日での状態である。図からわかるように、360 日では鉄筋に沿って法線方向の引張応力が作用し、微細なひび割れが鉄筋に沿って各所に発生している。400 日でひび割れが一本につながり、鉄筋を含んだ要素とそうでない要素が完全に剥離している。

3.3 水分、塩分の拡散を考慮したひび割れ進展解析

(1) A1 供試体

図 - 7 に複合解析より得られた、50 日、250

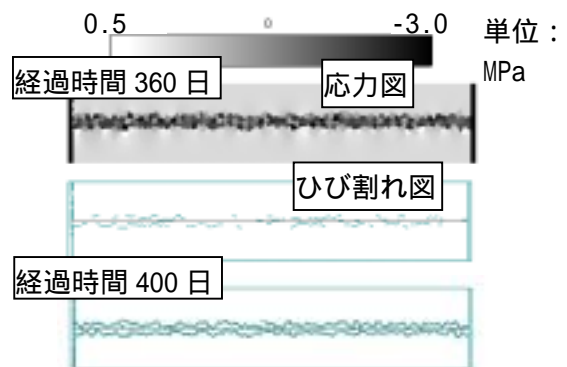


図 - 6 A1 供試体の内部状態

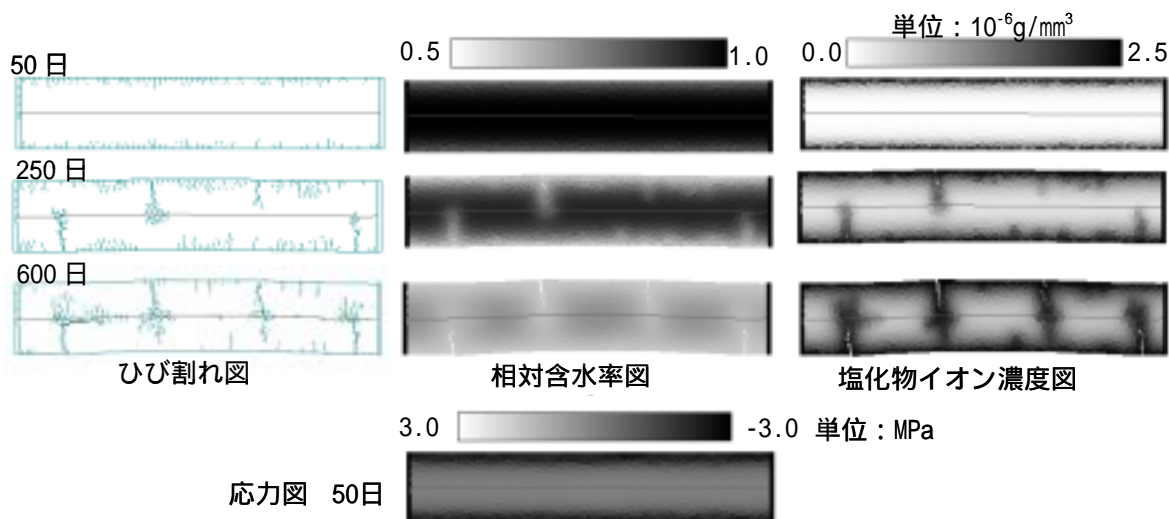


図 - 7 供試体の内部状態

日、600日でのA1供試体の応力図、ひび割れ図、相対含水率図、塩化物イオン濃度図を示す。なお、応力図は鉄筋軸方向の垂直応力であり、50日での状態のみを示す。

50日の応力状態では、供試体側面に一様に引張応力が作用している。これは、50日の相対含水率図から分かるように、内部と外部との相対含水率の差から内部拘束が生じたためである。内部拘束と両端を固定しているために生じた外部拘束の両者の影響により、供試体側面に微細なひび割れが発生した。

250日では、ひび割れ図からわかるように、乾燥収縮がさらに進行して供試体中のひび割れが局所化し、鉄筋付近までひび割れが発生している。このために、ひび割れ間を通しての水分と塩化物イオンの移動が見られる。

600日では、ひび割れ図からわかるように、鉄筋近傍の塩化物イオンが鋼材腐食発生限界濃度を超え、腐食による膨張が始まり、鉄筋に沿ったひび割れが見られる。この鉄筋に沿ったひび割れのため、塩化物イオンも鉄筋に沿って移動していることが分かる。250日と600日の塩化物イオン濃度を比較すると、ひび割れ部を除いては塩化物イオンが浸透していないことが分かる。これは600日での相対含水率図から分かる様に、相対含水率の低下により、塩化物イオ

ンの拡散係数が低下し、塩分浸透のスピードが低下したためである。

(2) A2 供試体

A2 供試体のかぶり厚さを変化させた解析を行い、かぶり剥離が明確になった時点でのひび割れ図を図 - 8 に示す。

かぶりの剥離は、露出面から浸透した塩化物イオン濃度が鉄筋近傍で鋼材腐食発生限界濃度を超え、腐蝕が発生したために生じたものである。かぶり2cmでは262日で、2.5cmでは323日で、3.0cmでは374日で、かぶりの剥離が明確になり、かぶりが厚いほど剥離に時間がかかり、また、剥離面の長さが長くなっていることもわかる。A1 供試体と異なり、かぶり方向の鉄筋の一面のみにひび割れが進展するのは、膨張に抵抗するコンクリートが内部よりも少ないためである。これらの結果は妥当なものと考えられ、提案したモデルが、鉄筋膨張に伴うひび

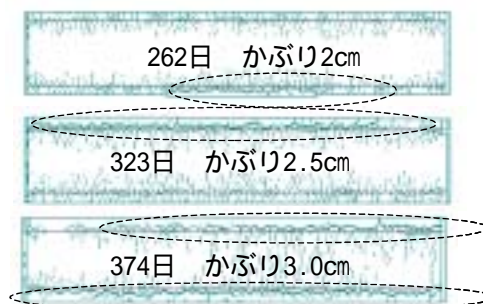


図 - 8 剥離時のひび割れ図

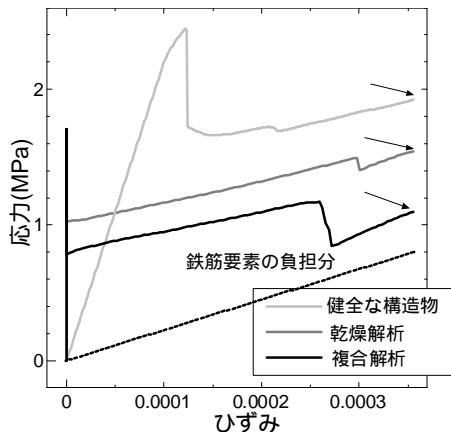


図 - 9 応力ひずみ関係図

割れ進展を妥当に評価していることがわかる。

3.4 荷重作用解析

A1 供試体を用い、健全な状態、乾燥だけさせたもの(乾燥解析)、乾燥と塩分浸透をさせたもの(複合解析)で、600 日間経過した後、一軸引張荷重を作用させた。解析より得られた供試体の応力 - 歪関係を図 - 9 に示す。

図 - 9 において荷重作用前は供試体の全長の変化が 0 にもかわらず、乾燥収縮および複合解析では引張応力が生じている。これは、左右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。また、時間経過途中で鉄筋位置まで達するひび割れが発生し、いったん荷重が低下している。その後に荷重を作用させてもほとんど応力を増加しない挙動を示した後、供試体を貫通するひび割れが生じ応力が低下していった。

図 - 10 にひずみが 0.00035 の時点でのそれぞれの供試体のひび割れ図を示す。図は図 - 9 中の番号に対応している。図から損傷度は複合解析の場合が最も大きくなっていることが分かる。また、貫通ひび割れが発生した箇所も健全

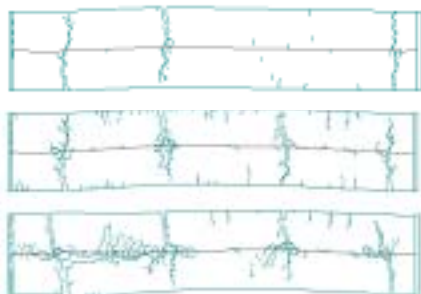


図 - 10 ひび割れ図

な場合と異なっている。

4. まとめ

本研究では、構造解析手法としての RBSM と物質移動解析を統合した著者らが開発した解析手法を、鉄筋腐食と複合劣化を考慮できるように拡張して、ひび割れ進展解析を行った。そして、解析手法の妥当性ならびに適用性の検討を行なった。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 相対含水率に依存した塩化物イオンの拡散係数を用い、水分移動と塩分移動を複合した解析を行なうことが可能になった。
- (2) 鋼材腐食による膨張力のモデル化を行い、腐食膨張によるひび割れ進展解析を可能にした。
- (3) 水分移動と塩分浸透を複合した解析を行った。その結果、本解析で実際の力学的な挙動を再現すると共に、ひび割れ間の物質移動の評価と、損傷を有する構造解析を可能にした。

謝辞：本研究の一部は、平成 15 年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))、課題番号 14205064)により実施したものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 野城良祐ほか：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報告集, Vol.25, No.1, pp.467-472, 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 2 号, pp.71-81, 2001 年 5 月
- 3) 佐伯竜彦ほか：不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.963-968, 1996
- 4) 松尾豊史ほか：鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れ進展解析、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.99-105, 1997