

# 論文 3次元 RBSM を用いたコンクリートの耐火性能評価手法の開発

中島 浩亮<sup>\*1</sup>・中村 光<sup>\*2</sup>・国枝 稔<sup>\*3</sup>・山本 佳士<sup>\*4</sup>

**要旨:** 離散的構造解析手法である3次元 RBSM と、熱伝導と蒸気圧移動を考慮可能な3次元トラスネットワークモデルを統合したモデルを用い、コンクリートの耐火性能評価手法の開発を行なった。開発した手法は、熱伝導、温度応力、蒸気圧のみならず、ひび割れ等の損傷やひび割れ部における物質移動の影響を統合的に評価することが可能である。開発した手法によるシミュレーション結果により、コンクリートの耐火性能評価に有用な解析手法となり得ることが示された。

**キーワード:** RBSM, トラスネットワークモデル, 熱伝導, 熱応力, 蒸気圧, 相対含水率

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐火性能は、材料・構造問題と温度、水分、蒸気圧の物質移動問題によって複合的に評価される。また、耐火性能は火災時にコンクリート構造物表面に生じる爆裂現象とも密接な関係がある。コンクリートの爆裂現象のメカニズムは、詳細には明らかにされていないが、既往の研究では、そのメカニズムとして、熱応力の影響、蒸気圧の影響、および熱応力・蒸気圧の複合作用であることが報告されている<sup>1)</sup>。そのため、コンクリートの耐火性能を評価するために、加熱環境下での、熱水分移動と蒸気圧の発生、さらには、それを原因とする爆裂発生までも考慮可能な手法の開発が望まれる。

一般的に、火災を受けたコンクリートに対する高温加熱の影響は有限要素法 (FEM) による熱応力解析によって評価される場合が多い<sup>2)</sup>。しかしながら、コンクリートの爆裂現象までも適用可能な手法を前提とする場合、連続体力学に基づく FEM は不連続体挙動である爆裂挙動評価には必ずしも適した解析手法ではない。また、FEM では、離散ひび割れモデルを用いない限り、ひび割れと蒸気圧の移動の影響を直接的に考慮することは困難である。

本研究では、火災時におけるコンクリートの挙動を、ひび割れおよび爆裂現象に挙げられる不連続体挙動を扱

うのに適した3次元剛体-バネモデル (3D-RBSM) を用いて評価した。同時に、爆裂挙動を呈するようなコンクリートの耐火性能に大きく影響を及ぼす温度、蒸気圧分布を評価するために、物質移動解析モデルであるトラスネットワークモデルを用いた。この解析手法を用いてコンクリートスラブ耐火実験を対象とした解析を行い、開発した耐火性能評価手法の有用性を検討した。

## 2. 解析手法

### 2.1 3次元剛体-バネモデル (3D-RBSM)

構造解析手法として、3次元 Voronoi 分割<sup>3)</sup> (図-1) を用いたランダムな要素形状を有する 3D-RBSM を用いた。RBSM では、連続体は剛体要素の集合とみなされ、それぞれの要素は剛体要素境界面に配置された長さ 0 のバネによって連結されている。図-2 に示すように、各要素内の任意点 (本研究では要素重心) に 6 自由度の 3次元剛体変位を設定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定する。積分点には、境界面法線方向および接線方向に、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系 (垂直バネが 1 個、せん断バネが 2 個) を配置し、各バネモデルの応答によって要素間の相互作用の評価がなされる。既往の RBSM<sup>4)</sup>ではこの積分点を境界面の重心に設定しているが、本研究では図-2 に示す

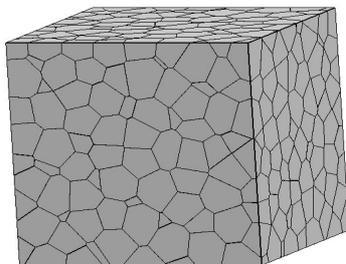


図-1 Voronoi 分割

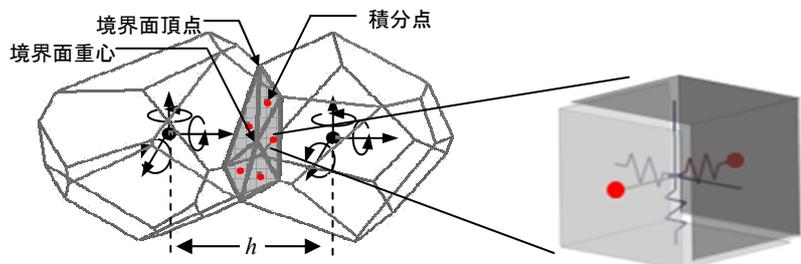


図-2 剛体要素の自由度と要素境界面上の積分点

*1 名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻	(正会員)
*2 名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻教授	博士 (工) (正会員)
*3 名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻准教授	博士 (工) (正会員)
*4 防衛大学校	建設環境工学科	修士 (工) (正会員)

ように、境界面を境界面重心と境界面頂点からなる三角形に分割し、その三角形の重心に積分点を設定した<sup>3)</sup>。一つの境界面に対し複数の垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置することにより、要素間の回転方向相対変位に対する非線形抵抗性を表現できる解析モデルである。

## 2.2 コンクリートの構成モデル

コンクリートの引張挙動は図-3(a)のように垂直応力が引張強度 $f_t$ に達するまでは弾性とし、その後は破壊エネルギー $G_F (=70\text{N/m})$ 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。圧縮挙動に関しては、図-3(b)に示すように、圧縮強度 $f'_c$ までは放物線で上昇し、その後、圧縮破壊エネルギー $G_{fc}$ を考慮した軟化勾配によって応力を低減させるモデルとした<sup>5)</sup>。せん断バネについては、図-4に示す齊藤らのモデル<sup>6)</sup>に基づき、モール・クーロン型の破壊基準を用いて、降伏後は関連流れ則に従い、終局せん断ひずみ0.004に達するまで降伏曲面上を移動するものとして、コンクリートのせん断伝達機構のモデル化を行った。それぞれのパラメータは、粘着力 $c=0.138f'_c$ 、内部摩擦角 $\phi=37^\circ$ と設定した。また、ひび割れ開口に伴うせん断剛性 $G$ の低下を表現するために、ひび割れ幅 $w$ に対してせん断剛性を低減させた。せん断応力 $\tau$ は式(1)によって算定される。

$$\tau = (1 - \lambda)\beta G \gamma \quad (1)$$

ここで、 $\gamma$ はせん断ひずみ、 $\lambda$ は損傷係数、 $\beta$ はせん断剛性低減係数を表す。また、除荷経路は原点指向型の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-2に示すような2要素間の母点間距離 $h$ とした。

高温下におけるコンクリートは材料劣化を生じ、強度

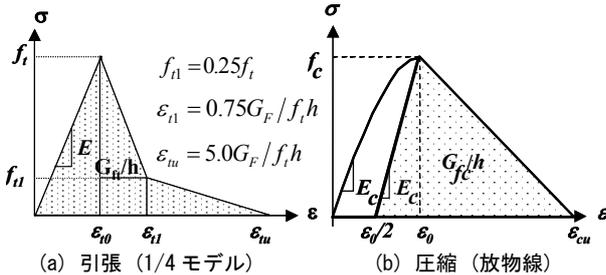
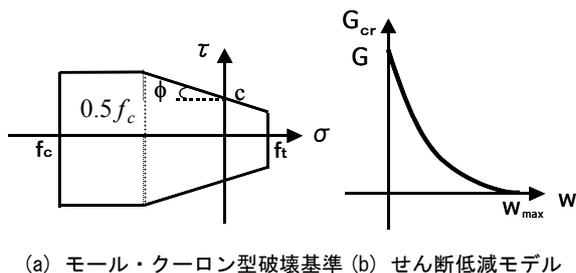


図-3 コンクリートの応力 - ひずみ関係



(a) モール・クーロン型破壊基準 (b) せん断低減モデル

図-4 コンクリートのせん断モデル

や剛性の低下が報告されているが<sup>2)</sup>、簡単のため、本研究では考慮せず、常温時のものとした。

## 2.3 トラスネットワークモデル

物質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<sup>7)</sup>を用いた。すなわち、図-5に示すように各Voronoi母点間を結ぶ3次元トラスネットワークを設定し、物質移動を拡散現象と仮定して拡散方程式を解くことで評価した。本解析では、物質移動として熱と蒸気圧を考慮した。なお、トラス要素はVoronoi要素境界面の面積に対応した断面積を持つものとする。

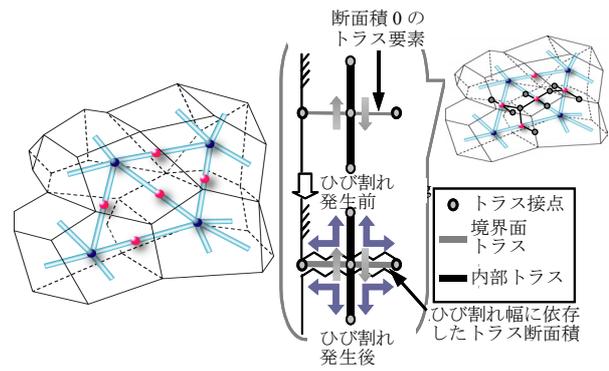
### (1) 熱伝導解析

コンクリート中の熱伝導は式(2)に示す熱伝導方程式を式(3)に示す境界条件式のもとに解くことによって評価した。

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

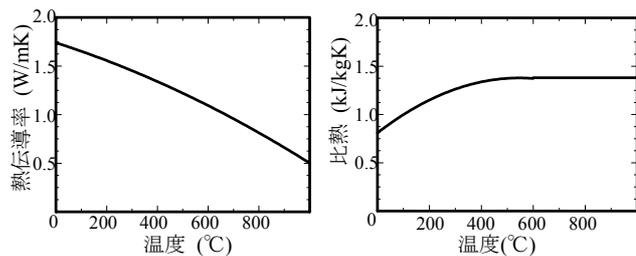
$$\frac{\partial T}{\partial n} + h_c(T - T_\infty) = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ はコンクリートの密度、 $c(T)$ は比熱、 $T$ は温度、 $t$ は時間、 $\lambda(T)$ は熱伝導率、 $h_c$ は熱伝達係数、 $n$ は加熱面の法線ベクトル、 $T_\infty$ は周囲温度を表す。比熱と熱伝導率は図-6および式(4)、(5)に示すように、温度の関数とした<sup>8)</sup>。なお、本解析手法では簡単にするために、潜熱の影響を考慮しないこととした。



(a) ひび割れ発生前 (b) ひび割れ発生後

図-5 トラスネットワークモデル



(a) 熱伝導率

(b) 比熱

図-6 熱伝導パラメータの温度依存性

$$\lambda(T) = -4.0 \times 10^{-7} \times T^2 - 8.38 \times 10^{-4} \times T + 1.740 \quad (4)$$

$$c(T) = -1.9 \times 10^{-6} \times T^2 + 2.079 \times 10^{-3} \times T + 0.8098 \quad (5)$$

## (2) 蒸気圧移動解析

水分移動則から定義された相対含水率によってコンクリート中の水分移動を評価した場合、高温環境下で加熱面近傍が急激に乾燥状態に移行する挙動を再現することが出来ないため、相対含水率は蒸気圧によって評価した<sup>9)</sup>。蒸気圧移動は式(6)の非線形湿気移動方程式によって式(7)の境界条件式のもとで求めた。

$$\left( \frac{dq}{dP} \right)_P \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial P}{\partial x} \right) + Q \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial n} + \alpha(P - P_\infty) = 0 \quad (7)$$

ここで、 $(dq/dP)_P$  は湿気容量、 $\lambda_p$  は透湿率、 $P$  は圧力、 $P_\infty$  は周囲の圧力、 $\alpha$  は蒸発率、 $Q$  は内部蒸気圧生成を表す項である。内部蒸気圧の生成は式(8)のように温度のみによって決定される飽和蒸気圧および、相対含水率による関係式(9)によって考慮した。

$$P^* = 6.1078 \times 10^{\left( \frac{7.5T}{237.3+T} \right)} \quad (8)$$

$$P = RH \times P^* / 100 \quad (9)$$

ここで、 $P^*$  は飽和蒸気圧、 $RH$  は相対含水率 (%) を表す。

コンクリート中にひび割れが発生すると、ひび割れ部における蒸気圧移動は健全なコンクリート中の移動とは異なり、その移動量は増加すると予想される。そこで本研究では、図-5 に示すように Voronoi 要素境界面にトラス節点を配置した拡張トラスネットワークモデルを用いる事によって、ひび割れ部における蒸気圧移動を考慮した。ひび割れ発生前は境界面トラス要素の断面積は 0 であり、蒸気圧移動は行なわれない。ひび割れ発生後、そのひび割れ幅は剛体要素間の相対変位により直接的に計算され、ひび割れ部に存在する境界面トラスの断面積は Voronoi 境界面積とひび割れ幅の積として与えることとした。境界面トラスの透湿率をコンクリート中のトラスより高く設定する事でひび割れ部において増加すると予想される蒸気圧移動の表現を可能とし、また、外気と接する面で発生したひび割れにおいては、蒸発率を高い値に設定する事で蒸気圧がコンクリート外部に逸散する挙

表-1 コンクリートの物性値

圧縮強度(MPa)	41.9
ヤング係数(GPa)	31.0
熱膨張係数(1/K)	$10 \times 10^{-6}$
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2270
熱伝達係数(W/m <sup>2</sup> K)	14

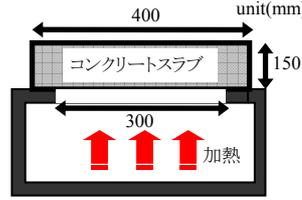


図-7 実験概要図

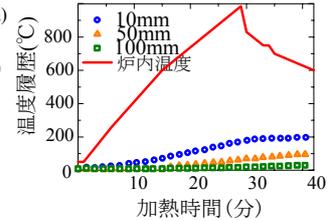


図-8 実験結果

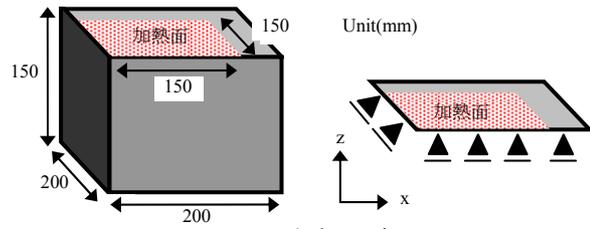


図-9 解析モデル

動を表現できる。

## 3. 解析概要

### 3.1 実験概要

王らによって行われたコンクリートスラブの耐火実験<sup>1)</sup>を対象として解析を行った。実験概要を図-7 に示す。供試体は 400×400×150(mm)のコンクリートスラブで、電気炉を用いて供試体加熱面から加熱が行われた。測定項目はコンクリート内部の温度および蒸気圧であり、それぞれが供試体加熱面から 10mm, 50mm, 100mm の位置で測定された。得られた温度履歴を図-8 に示す。なお、実験では加熱開始後 30 分で深さ 10mm 程度の爆裂現象が発生した事が報告されている。

### 3.2 解析モデルと解析フロー

解析モデルを図-9 に、用いた材料諸元を表-1 に示す。解析は供試体境界と対流境界の対称性を考慮した実験供試体寸法の 1/4 モデルとした (200×200×150 (mm))。解析供試体は平均要素寸法 4mm の Voronoi 要素によって分割を行なった。境界条件に関しては、4 点単純支持を仮定した。

図-10 に本解析のフロー図を示す。解析ではまずトラスネットワークモデルによって熱伝導解析が行われ、温度分布が算定される。ここでは、比熱、熱伝導率を求めめるための変数に前ステップの温度が用いられる。得られた温度分布はその後、温度ひずみとして熱応力解析に、飽和蒸気圧として蒸気圧解析に用いる。

熱応力解析は熱膨張ひずみを考慮した初期ひずみ問題として解かれる。熱伝導解析によって得られた温度勾配と熱膨張ひずみが線形関係にあると仮定する事で、熱膨張ひずみ増分を式(10)のように求めた。

$$\Delta \varepsilon_n = \alpha_t \Delta T \quad (10)$$

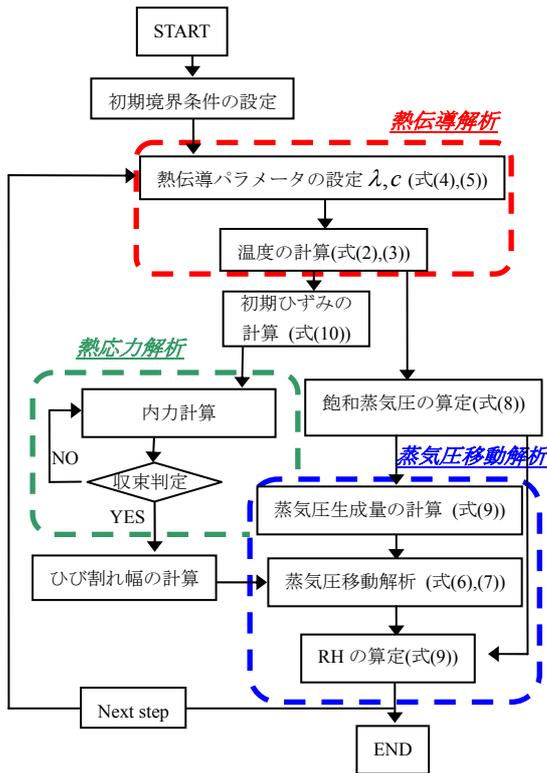


図-10 解析フロー

ここで、 $\Delta\epsilon_n$  は熱膨張ひずみ増分、 $\alpha_t$  は熱膨張係数、 $\Delta T$  は温度変化量を表す。 $\Delta\epsilon_n$  はRBSMにおける垂直パネの初期ひずみとして与えられる。

蒸気圧移動解析は、トラスネットワークモデルによって解かれる。熱伝導解析によって算定された温度から得られた飽和蒸気圧ならびに前ステップの相対含水率を用いて式(9)より内部蒸気圧生成量を算定した後、蒸気圧勾配によって計算された蒸気圧のもと、再度相対含水率を算定し、次ステップに移行するものとする。熱応力解析でコンクリート中にひび割れが発生した場合は、蒸気圧移動パラメータが異なる境界面トラスにより、ひび割れ部の影響が考慮される。表-2に示す蒸気圧移動パラメータは籠橋ら<sup>10)</sup>の用いた値を参考にしており、ひび割れ間のパラメータは $10^5$ 倍という大きな値を仮定した。なお、本解析では、対流境界における相対含水率が0となるように設定した。

熱伝導解析、蒸気圧移動解析ではその計算において前ステップのパラメータを用いているが、これは計算の簡単化のためであり、厳密にはそれぞれの計算での平衡状態を満たすための収斂計算が必要であると考えられる。

## 4. 解析結果

### 4.1 熱伝導解析

熱伝導解析により供試体内部の温度分布が評価される。解析では、実験において測定された炉内温度を対流境界における温度と想定している。解析によって得られた温

表-2 蒸気圧移動解析パラメータ

	コンクリート	ひび割れ間
透湿率(g/m <sup>3</sup> ·h·mmHg)	0.0019	$0.0019 \times 10^5$
湿気容量(g/m <sup>3</sup> ·mmHg)	2500	2500
蒸発率(g/m <sup>3</sup> ·h·mmHg)	0.5	$0.5 \times 10^5$

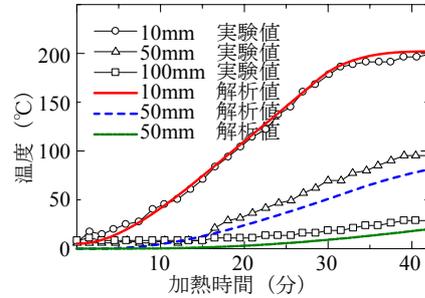


図-11 熱伝導解析結果

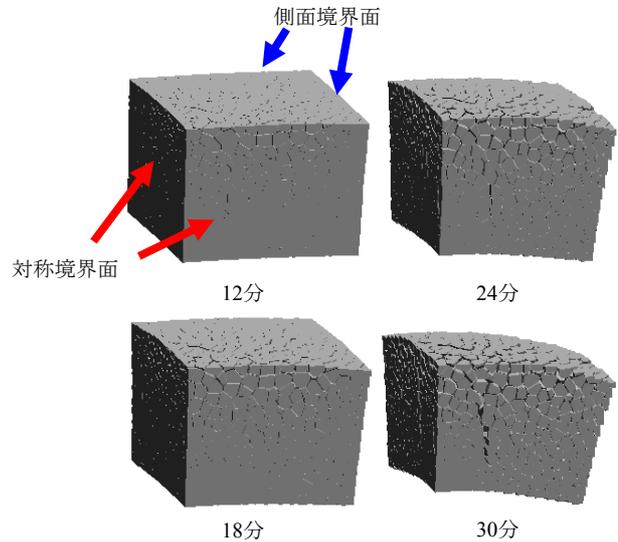
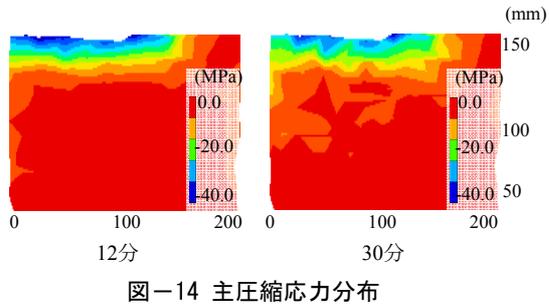
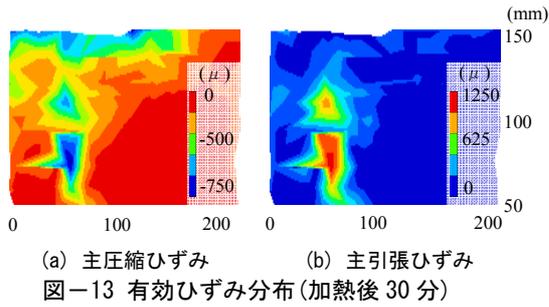


図-12 変形図 (30倍)

度履歴と、実験値の比較を図-11に示す。これらの図から、解析結果はどの測定位置においても良い精度が得られていることが分かる。

### 4.2 熱応力解析

図-12に熱応力解析により得られた解析供試体の変形図の経時変化を示す。解析供試体は加熱面からの熱膨張により曲げ変形が生じている。図-13に加熱開始後30分における対称境界面における有効主圧縮ひずみ、有効主引張ひずみをそれぞれ示す。これらは、変形から求めたひずみから温度ひずみを差し引いた、応力計算のために用いる有効ひずみから求めている。主圧縮ひずみは、加熱面で最大値となるように分布し、主引張ひずみは、内部で大きな値となっており、内部拘束の影響が妥当に再現できている。図-14に加熱後から12分、および30分後の対称境界面における主圧縮応力分布を示す。主圧縮応力は主圧縮ひずみに従い、温度の高い加熱面で最大値を取るように分布し、加熱とともに圧縮応力領域が拡



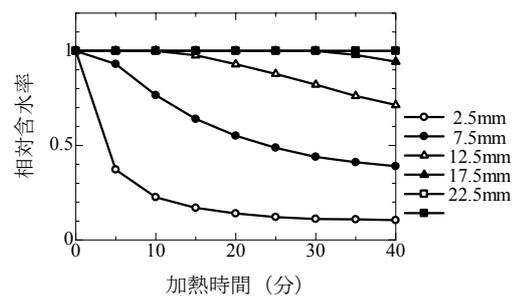
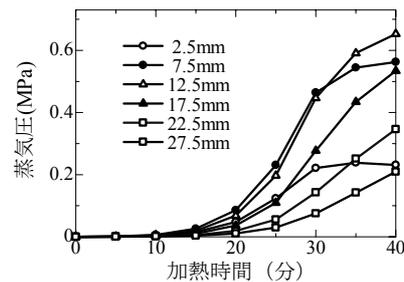
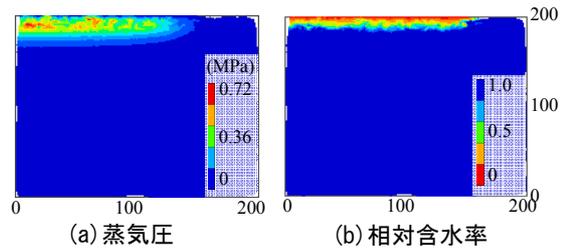
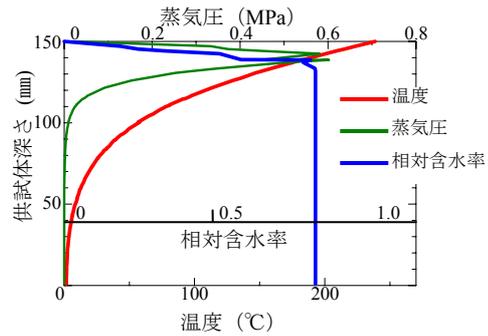
大し、加熱開始 30 分後には圧縮強度まで達している。主圧縮応力が高い値で分布している領域は、加熱面から 10mm 程度の深さであり、これは、実験における爆裂深さと対応しているが、今回の解析では爆裂挙動は見られなかった。このことから、コンクリートの爆裂現象は圧縮応力と密接な関係があるが、圧縮応力のみが発生要因ではない事が予想される。

#### 4.3 蒸気圧移動解析

##### (1) ひび割れの影響を考慮しない解析

図-15 にひび割れの影響を考慮しない解析における、加熱開始 30 分後での温度、相対含水率、蒸気圧の対称境界面における深さ方向の分布を示す。蒸気圧分布は、相対含水率と温度の分布に大きな影響を受け、温度、相対含水率が高い領域では蒸気圧も高い値を示す。対流境界面における相対含水率を 0 と設定しているので、境界付近では温度は高いが、相対含水率は低いため、蒸気圧は境界から離れた位置で最大となるような分布をする結果となった。

図-16 に蒸気圧移動解析によって得られた対称境界面における加熱開始後 30 分での蒸気圧、相対含水率分布を示す。蒸気圧は対流境界面から離れた位置で分布し、その最大値は 0.72MPa となる。蒸気圧については、既往の研究では 3~4MPa との報告がされている<sup>11)</sup>。本論文では簡単なパラメータを用いているため、蒸気圧の定量的な評価には至っていないが、定性的な評価は可能であることが分かる。相対含水率は温度が高い領域で絶乾状態に近い状態となる。また、図-17, 18 に、加熱開始後 30 分での蒸気圧および相対含水率と加熱時間の関係を異なる供試体深さで示す。これによると、蒸気圧は境界から 12.5mm の深さで最大値となる分布を示し、相対含水率については、2.5mm の深さまでは絶乾状態に近い乾燥状



態まで至る。

##### (2) ひび割れの影響を考慮する解析

図-19, 20 にひび割れを考慮した蒸気圧移動解析によって得られた加熱開始 30 分後におけるひび割れ図と蒸気圧分布を示す。図-19 は加熱領域外の側面境界面の断面、図-20 は、対称境界の断面に対するものである。それぞれのひび割れ図は、引張りひずみが図-3 (a) の  $\epsilon_{t1}$  以上

となっている境界を赤色で示している。側面境界面では、外気と接したひび割れが高さ方向に生じ、対称境界面では、内部にひび割れが生じる結果となった。蒸気圧分布に関しては、図-19に示す側面境界面は、外部まで達しているひび割れから、周囲の蒸気圧は解放され、コンクリート内部のひび割れの無い領域より低い値を示す。一方、図-20に示す対称境界面では、ひび割れ付近の透湿率が高い影響で蒸気圧の移動量は多くなり、蒸気圧が局所的に集中する挙動が確認できる。蒸気圧の最大値がひび割れを考慮しない解析における蒸気圧の値と変わらないのは、境界外部に接しているひび割れからの蒸気圧の解放が生じたため、内部蒸気圧も減少したからであると考えられる。

解析では、蒸気圧は境界から10mm程度の位置で局所的に高い値を示した。これは、高圧縮応力領域と同等な領域であり、これらの複合作用によってコンクリートの爆裂現象が生じる可能性が示された。

## 5. 結論

本研究では、温度応力解析、熱伝導解析、蒸気圧移動解析を統合したコンクリートの耐火性能評価手法を開発した。本手法では、構造解析に3D-RBSMが、物質移動解析にはトラスネットワークモデルが用いられる。既往の実験との比較によって、熱伝導解析においては定量的にその有用性が示され、蒸気圧移動解析においては、蒸気圧の分布性状、ひび割れ部における挙動について定性的な評価が可能であることが確認された。また、構造的な損傷領域と内部蒸気圧の分布領域の概ねの一致が確認された。開発した手法は、コンクリートの耐火性能評価に有用な解析手法となり得るとともに、今後、蒸気圧応力を構造問題に統合させることによって、火災時高温加熱を受けるコンクリートの詳細な内部状態の解明の可能性が示された。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究（C））、課題番号：20560432）により行った。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 王若平, 川上寛正, 小澤満津雄, 森本博昭: コンクリートの爆裂現象に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 1703-1708. 2006.6
- 2) コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集, 土木学会, 2004
- 3) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3次元剛

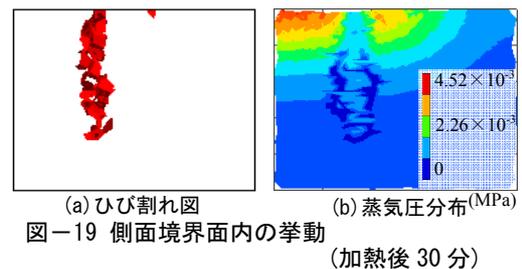


図-19 側面境界面内の挙動  
(加熱後 30分)

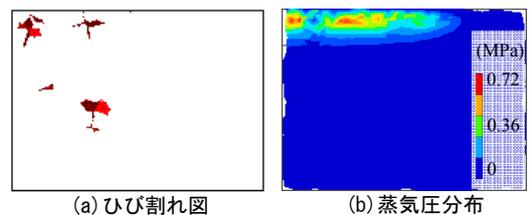


図-20 対称境界面内の挙動  
(加熱後 30分)

体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集, Vol. 64, No.4, pp. 612-630, 2008.11

- 4) Bolander, J. and Saito, S.: Fracture Analysis using Spring Networks with Random Geometry, Engineering Fracture Mechanics, Vol.61, No.5-6, pp.569-591, 1983)
- 5) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete. In: Modeling of inelastic behavior of RC structures under seismic loads. ASCE: 471-487, 2001.
- 6) Saito, S.: Fracture analyses of structural concrete using spring network with random geometry, Doctoral thesis, Kyushu University, 1999.
- 7) 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, Feb.2006.
- 8) Schneider, U. 1983 Thermal property of concrete Gihodo shuppan
- 9) 籠橋忍, 小澤満津雄, 森本博昭: コンクリートの湿気移動解析に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 2, pp. 655-660, 2000.6.
- 10) 籠橋忍, 秦泳, 小澤満津雄, 森本博昭: 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 655-660, 2001.6.
- 11) 小澤満津雄, 王若平, 坂昇, 森本博昭: 高温加熱によるコンクリートの爆裂現象に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 753-758, 2007.6.