

論文 高温加熱環境下でのコンクリートの内部損傷および爆裂現象の評価 手法の開発

吉田 敬司*1・中村 光*2・国枝 稔*3・小澤 満津雄*4

要旨: ひび割れなどの不連続挙動を扱うのに適している剛体バネモデルと、物質移動を簡易に表現可能なトラスネットワークモデルを統合したモデルを用い、高温加熱環境下での熱応力や蒸気圧の影響を総合的に評価可能な手法を開発した。その結果、開発した手法はコンクリートの高温加熱時の内部損傷のみならず、爆裂主現象までを評価可能な解析手法となり得ることが示された。また、開発した手法により、温度応力ならびに蒸気圧の影響を検討し、蒸気圧が支配的な場合は、蒸気圧が引張強度を超えることで爆裂に至る現象が生じることを示した。

キーワード: RBSM, トラスネットワークモデル, 爆裂, ひび割れ, 熱伝導, 熱応力, 蒸気圧

1. はじめに

コンクリート構造物は、高温加熱環境に曝されると、かぶり部のコンクリートが爆裂し、断面欠損や鉄筋露出により急激な耐力低下を生じる場合がある。特に大規模なトンネル火災が発生すると、構造体の損傷や変形が著しく、復旧工事費用の他、長期間の通行止めによる経済的損出が大きな問題となる。また、近年では、シールドトンネルの建設コストを削減するために、構造体である一次覆工の耐火被覆の役目も果たす二次覆工を省略する事例が増加してきており、構造物本体の火災による影響を懸念した検討も行われている¹⁾。

一般的に、火災時のコンクリートの影響については、有限要素法 (FEM) による線形解析プログラムを用いた熱応力解析によって評価²⁾されている。しかしながら、火災時の内部損傷および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と考えられる。

本研究では、ひび割れなどの不連続挙動を扱うのに適している剛体バネモデル (以下、RBSM) と、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、蒸気圧の物質移動が表現可能なトラスネットワークモデルを統合したモデルを用い、コンクリートの爆裂現象に至るまでの総合評価に加え、構造解析手法として動的変形解析を行うことにより、爆裂後の変形挙動までも評価可能な手法の開発を試みた。

2. 解析手法

2.1 3次元-剛体バネモデル (3D-RBSM)

本研究では、ボロノイ分割³⁾を用いたランダムな要素形状を有する3次元RBSMによりコンクリートをモデル化した。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-1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を配置する (垂直バネが1個、せん断バネが2個)⁴⁾。本モデルでは、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、回転バネを導入することなく、回転バネの非線形性に相当する挙動を簡便に評価できる。

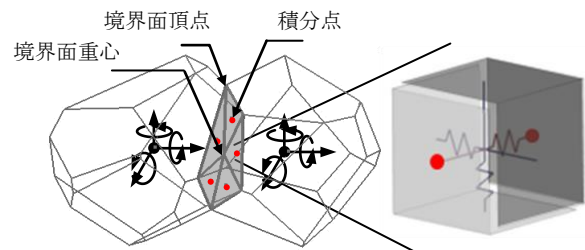


図-1 剛体要素の自由度と要素境界面上の積分点

2.2 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⁵⁾を用い

*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 岐阜大学	工学部社会基盤工学科助教	博士 (工) (正会員)

た。すなわち、図-2に示すように各ボロノイ母点間を結ぶ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一次元の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。高温時には、熱、蒸気圧、水分の移動を考慮する必要があるが、それらには互いに相関性があるため、水分移動は直接的には評価せず物質移動により得られた温度分布および蒸気圧分布を用い、そのステップにおける相対湿度を求めることで水分移動は間接的に評価している。なお、トラス要素はボロノイ要素境界面の面積に対応した断面積を持つものとする。熱伝導解析および蒸気圧移動解析についての詳細は、既往の研究⁹⁾を参照されたい。

また、ひび割れが生じた後は、ひび割れ部にもトラス(境界面トラス)を配置し、コンクリート中とは別途、ひび割れ部での蒸気圧移動を考慮可能にしている。

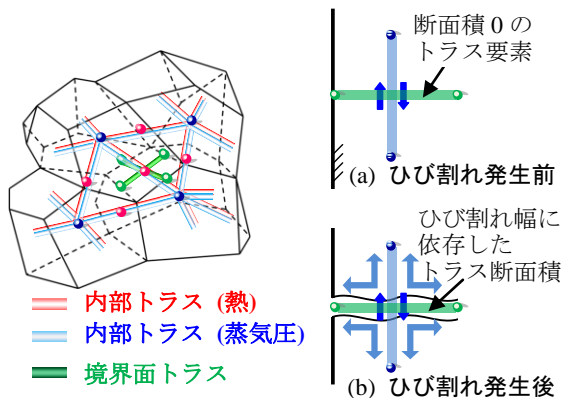


図-2 トラスネットワークモデル

2.3 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)に示す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、引張破壊エネルギー G_{ft} (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⁷⁾。せん断バネについては、モール・クーロン型の破壊基準⁸⁾を用いて、降伏後は関連流れ則に従い、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

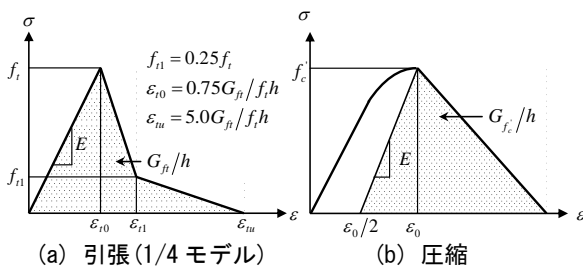


図-3 垂直バネの挙動

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。また、ひび割れ開口に伴うせん断伝達特性の劣化を表現するために、ひび割れ幅に対してせん断剛性を低減させた。なお、解析では、加熱によるコンクリートの力学性状の変化は考慮していない。

3. 解析フロー

図-4に開発した手法の解析フロー図を示す。中島ら⁹⁾の研究では、構造解析手法としてRBSMを用い、熱応力解析までを評価している。本研究では、さらに、加熱時にコンクリート内部で発生する蒸気圧を初期応力として考慮し、熱膨張および蒸気圧の複合問題として解くとともに、RBSMを動的なモデルに拡張して爆裂現象を直接的に再現することに特徴がある。

解析ではトラスネットワークモデルを用い、一次元の拡散方程式を解くことにより温度および蒸気圧分布の算定がまず、行われる。熱伝導解析では、温度依存性のパラメータ⁹⁾として考慮された比熱、熱伝導率を用いて熱伝導方程式を解くことにより温度分布が算定される。得られた温度分布を用いて、飽和蒸気圧を求め、蒸気圧移動解析を行う。蒸気圧移動解析では、算出した飽和蒸気圧および前ステップの相対湿度の値を用い、蒸気圧の

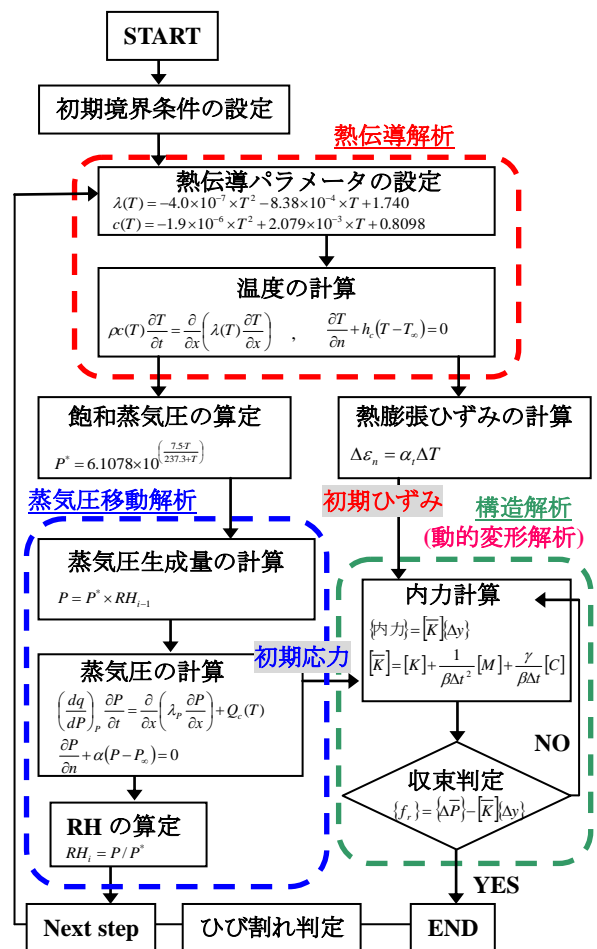


図-4 解析フロー図

生成量を算定した後、湿気移動方程式を解くことで蒸気圧分布を算定する。得られた蒸気圧を用いて、相対湿度を算定し、次ステップの解析で用いる。前ステップにおける構造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。

次に、構造解析では、熱伝導解析により得られた温度分布を用いて算出した熱膨張ひずみ、および、蒸気圧移動解析により得られた蒸気圧を考慮した複合問題として RBSM により内力計算を行う。熱膨張ひずみは、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して算定され、RBSM における垂直バネの初期ひずみとして与えられる。蒸気圧は、蒸気圧移動解析により得られた蒸気圧分布を用い、RBSM における初期応力として与えられる。本研究では爆裂後のコンクリートの変形挙動までも再現することを目的としているため、運動方程式により構造解析手法を構築した。その際、動的応答に対する数値積分法として Newmark β 法 ($\beta=0.25$) を用い、陰的に解を求めた。動的解析手法では、剛性マトリックスが負勾配になった場合、時間刻みを小さくすることで有効剛性マトリックスを正勾配にすることができるため、高温加熱環境下で急激に増加する蒸気圧などの外力が作用しても安定した解析を行うことができる。なお、本解析では減衰項は非考慮とした。内力を計算した後、収束判定を行い、条件を満たさない場合は、繰り返し計算を行い、条件を満たす場合は次のステップへ進む。

ここで、図-4 中の ρ はコンクリートの密度(kg/m^3)、 $c(T)$ は比熱($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$)、 T は温度($^{\circ}\text{C}$)、 t は時間(s)、 $\lambda(T)$ は熱伝導率($\text{W/m}\cdot\text{K}$)、 h_c は熱伝達係数($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)、 n は加熱面の法線ベクトル、 T_{∞} は周囲温度($^{\circ}\text{C}$)、 $(dq/dp)_p$ は湿気容量($\text{g/m}^3\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}$)、 λ_p は透湿率($\text{g/m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}$)、 P は圧力(mmHg)、 P_{∞} は周囲の圧力(mmHg)、 α は蒸発率($\text{g/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}$)、 $Q_v(T)$ は内部蒸気圧生成(mmHg)、 P^* は飽和蒸気圧(mmHg)、 RH は相対湿度、 $\Delta\epsilon_n$ は熱膨張ひずみ増分、 α_t は熱膨張係数($1/^{\circ}\text{C}$)、 ΔT は温度変化量($^{\circ}\text{C}$)、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックス、 $\{\Delta y\}$ は変位増分量、 $[\bar{K}]$ は有効剛性マトリックス、 $\{\Delta P\}$ は有効外力増分量、 $\{f_r\}$ は不平衡力を表す。

4. 実験概要および解析モデル

解析は、北村ら¹⁰⁾により行われたコンクリートスラブの耐火実験を対象とした。実験は $400\times 150\times 400(\text{mm})$ の試験体を、炉内の昇温速度 $33(^{\circ}\text{C}/\text{分})$ で加熱したものである。表-1 にコンクリートの材料特性、図-5 に実験概要図を示す。なお、実験では図-5 に示す測定点(加熱面から $10,50,100(\text{mm})$ の位置)で温度が測定されており、爆

裂は、加熱開始から 28 分後に発生したと報告されている。

解析は、図-6 に示すように供試体境界と対流境界の対称性を考慮して、実験供試体の 1/4 モデル ($200\times 150\times 200(\text{mm})$)とした。解析モデルは、加熱面付近の平均要素寸法が深さ方向に $2.0(\text{mm})$ 、幅、奥行き方向に $3.0(\text{mm})$ とし、加熱面から離れるに従って最大要素寸法が $40(\text{mm})$ となるような要素寸法勾配を考慮したボロノイ要素によって分割を行った。境界条件は、4 点単純支持を仮定し、対称境界面では図-7 のように対称性を考慮した境界条件を設定した。なお、解析は図-6 に示すように、実験供試体における加熱面を上向きとして行った。

表-1 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	熱膨張係数 ($1/^{\circ}\text{C}$)
41.9	2.77	30.1	1.00×10^{-5}

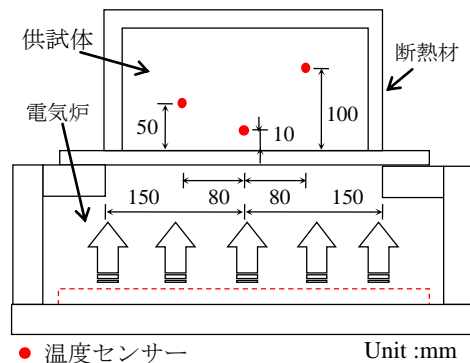


図-5 実験概要図

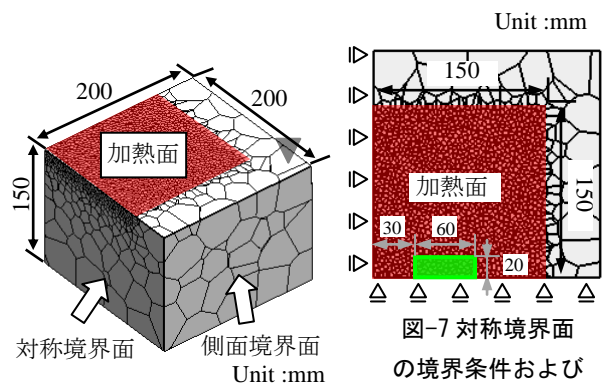


図-6 解析モデル

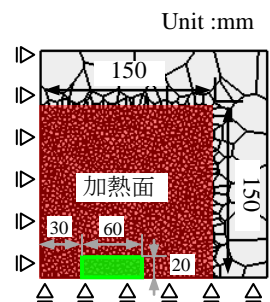


図-7 対称境界面の境界条件およびプロット領域

5. 解析結果

本研究では、前述の実験を対象とした解析(以下、複合解析)に加え、作用する外力を熱応力のみとした解析(以下、熱応力解析)、および、作用する外力を蒸気圧のみとした解析(以下、蒸気圧解析)を行った。各々の解析条件および爆裂発生時間を表-2 に示す。

表-2 解析条件および爆裂発生時間

解析種類/解析条件	複合解析	蒸気圧解析	熱応力解析
トラス	温度	○	○
	蒸気圧	○	○
	ひび割れ間	○	○
RBSM	熱膨張ひずみ	○	○
	蒸気圧応力	○	○
爆裂発生時間(分)	26.8	28.1	無

5.1 複合解析結果

表-3 に解析に用いた熱伝達係数、表-4 に蒸気圧移動解析に用いたパラメータ、図-8 に複合解析および実験で得られた温度履歴を示す。ここで、潜熱や輻射熱の影響をモデル化しないかわりに熱伝達係数は、実験の温度履歴を精度よく評価できるように温度依存型として、逆解析により設定した。なお、どの解析ケースにおいても表-3、表-4 に示したパラメータを用いて解析を行った。図-8 より、用いたパラメータにより温度履歴を精度よく表現できている。また、解析での爆裂発生時間は、加熱開始から 26.8 分後であり、実験における爆裂発生時間と近い結果であった。図-9 に、爆裂直前(26.8 分後)の温度、蒸気圧、相対湿度分布と爆裂後の爆裂深さの関係を示す。なお、各値は、図-7 に示す網掛けした領域(以下、プロット領域)の値を示している。爆裂直前において、温度はコンクリート表面位置(深さ 0(mm))を最大値として、概ね線形的に分布する。相対湿度は、表面付近では水分が蒸発することにより、蒸気が外部へと逸脱するため、深さ 2(mm)以下領域までは低い値で分布している。蒸気圧の値は温度と相対湿度の両者の影響を受け、最大値は加熱と共に内部へと移動し、爆裂直前では深さ約 1~2(mm)の位置が最大値となっている。爆裂深さは約 2(mm)であり、蒸気圧が最大となる位置に対応していた。

図-10 に対称境界面のひび割れ図を示す。なお、ひび割れ図中の青色は垂直バネの応力が引張強度に達した面、赤色は応力が引張強度の 1/4 まで低下した面を表している。図-10 より、ひび割れは加熱開始から 15 分後に発生し、その後加熱と共に内部および表面付近でもひび割れ本数が増加する。また、ひび割れ方向は、供試体内部では鉛直方向に、表面付近では水平方向が卓越しており、位置によりひび割れ方向に相違がみられる。内部に発生する鉛直方向のひび割れは、温度勾配による内部拘束により発生したものと考えられる。一方、表面部で発生するひび割れの原因としては、蒸気圧によるひび割れと内部拘束により圧縮応力下で生じるひび割れの両者が考えられる。個々の要因によるひび割れの発生については、次節以降で検討することとする。なお、表面部で発生している有効圧縮ひずみは、爆裂直前であっても 1700 μ 程度であり、今回の解析条件内では、コンクリートの圧縮強度には到達していなかった。ここで、有効ひ

ずみとは、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ひずみである。図-11 に爆裂後の変形図を示す。図-11 に示したように、爆裂は対称境界面で発生し、その後、加熱面一体に爆裂領域が広がった。また、図-11 より本解析手法は動的解析を行うことで、爆裂後の変形挙動も再現できることが分かる。図-12 にはプロット領域上の蒸気圧履歴を示したが、蒸気圧は 15 分後以降急激に増加していき、26 分後に表面から 1(mm)の位置で引張強度を超えた。図-9 および図-12 より、コンクリートの爆裂現象は、内部の蒸気圧が増加し、引張強度を超えた範囲で発生しており、今回の解析条件内では、表面付近に分布する蒸気圧の影響が支配的となり爆裂に至ったことが推測できる。

表-3 熱伝達係数

表面温度(°C)	0~50	50~100	100~150	150~200
熱伝達係数(W/m ² K)	7.0	14.0	21.0	22.4

表-4 蒸気圧移動解析のパラメータ

	コンクリート	ひび割れ間
透湿率(g/m ² ・h・mmHg)	0.0019	0.0019×10 ⁵
湿気容量(g/m ³ ・mmHg)	2500	2500
蒸発率(g/m ² ・h・mmHg)	5	5×10 ⁵

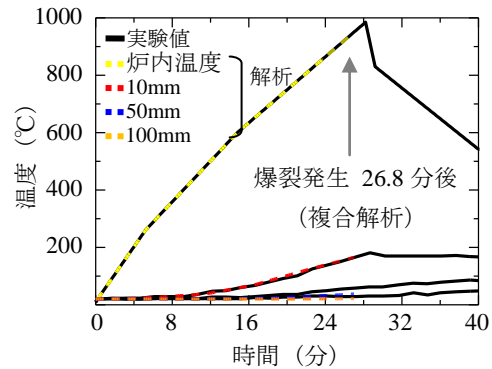


図-8 温度履歴

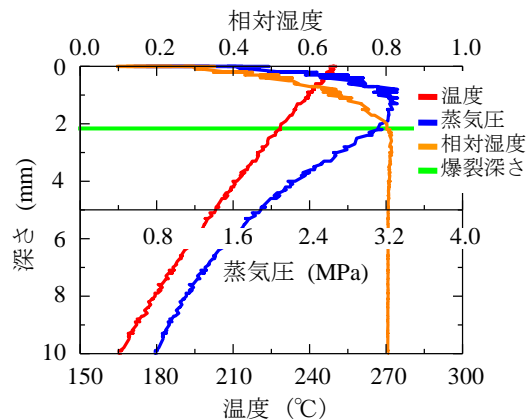


図-9 爆裂直前(26.8 分後)のプロット領域(図-7)の温度、蒸気圧、相対湿度と爆裂深さの関係

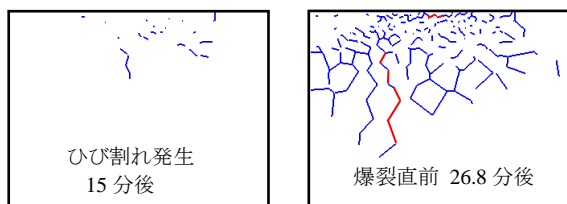


図-10 対称境界面のひび割れ図（複合解析）

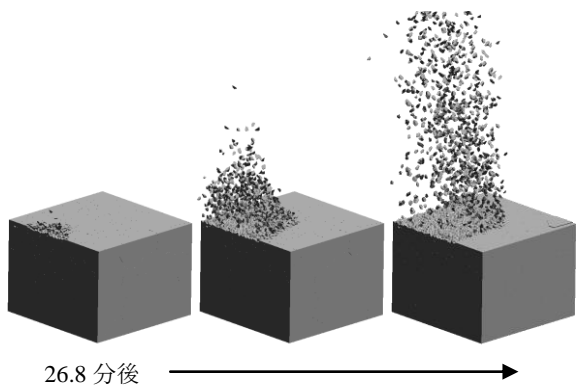


図-11 爆裂後の変形図（複合解析）

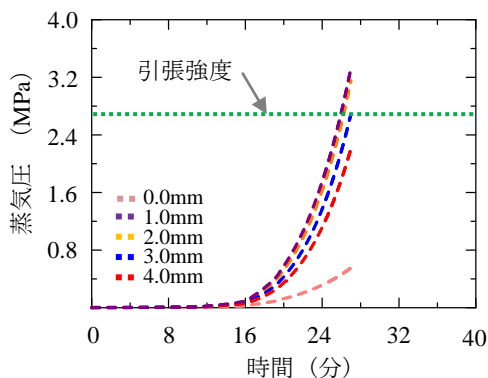


図-12 プロット領域(図-7)上の蒸気圧履歴

5.2 蒸気圧解析結果

蒸気圧のみを外力として作用させた蒸気圧解析より得られた対称境界面のひび割れ図を図-13に示す。また、図-14にプロット領域の蒸気圧分布の履歴を示す。図-13に示したように、蒸気圧解析では内部のひび割れが確認されたのは26.2分後であり、ひび割れは、表面部で水平方向に発生している。また、図-14に示したように、加熱開始から26分後に、深さ約1(mm)位置で蒸気圧の値が引張強度に到達している。ひび割れ発生時間が直後の26.2分後であることから、ひび割れ発生に対して、蒸気圧が密接に関係していることが示されている。さらに、爆裂直前には、表面部のみに水平方向のひび割れが多数発生していることから、コンクリート内部に発生する高温蒸気が表面部を押し上げる現象が生じていることが理解できる。

図-14の蒸気圧解析における蒸気圧分布の推移において、その分布は複合解析の爆裂直前時間である26分後

まで両者の分布に差異は確認されなかった。しかし、複合解析では、加熱開始から26.8分後に蒸気圧の最大値が約3.2MPaで爆裂が発生したのに対し、蒸気圧解析では、28.1分後に蒸気圧の最大値が約4.2MPaで爆裂が発生しており、時間で約1分、蒸気圧の最大値で約1(MPa)の差が確認された。これは蒸気圧解析においては、熱応力による損傷を考慮していないため、爆裂発生には複合解析よりもさらに高い蒸気圧が内部で作用することを必要としたと考えられ、熱応力による損傷も爆裂挙動に影響を与えることが推測される。なお、今回の蒸気圧は、相対湿度と温度の関数で与えられ、ひび割れ部での体積増加の影響は考慮していないことを付記する。

図-15に爆裂後の変形図を示す。図-15より、蒸気圧解析では炉内温度が最大となる28分後を超えた直後に爆裂が発生し、蒸気圧のみで爆裂することが解析的に示された。また、爆裂深さは複合解析と同様に2(mm)であり、両者の爆裂性状にほとんど差異はなかった。

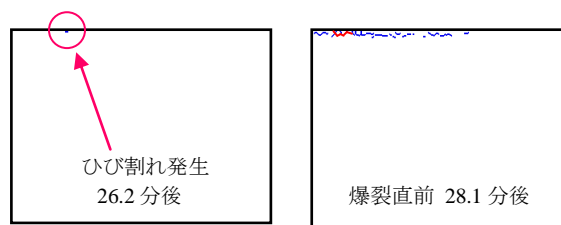


図-13 対称境界面のひび割れ図（蒸気圧解析）

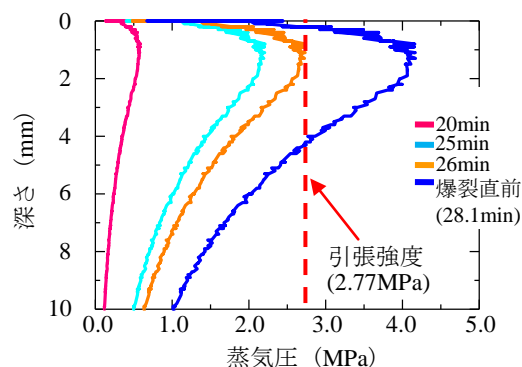


図-14 プロット領域(図-7)の蒸気圧分布の履歴

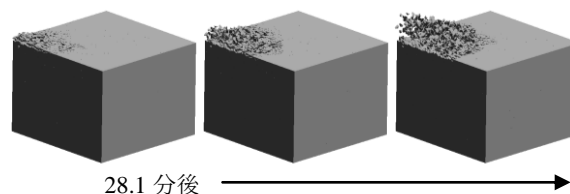


図-15 爆裂後の変形図（蒸気圧解析）

5.3 熱応力解析結果

熱応力のみを外力として作用させた熱応力解析より得られた対称境界面のひび割れ図を図-16に示す。供試体内部のひび割れ性状は、複合解析により得られた結果

(図-10)と同様であった。複合解析で爆裂直前である26.8分後のひび割れ図(図-10)とは、表面部のひび割れに相違がみられる。熱応力により表面部にも水平方向のひび割れが発生するが、複合解析では、より多くの表面部のひび割れが発生しており、図-13に示したように蒸気圧が作用することで、表面でのひび割れ進展をより促進させることが分かる。複合解析が、蒸気圧により早期に爆裂が発生したことは、熱応力が表面部のコンクリートを損傷させ、爆裂現象を引き起こし易くしたと想定される。また、図-16より、内部のひび割れは加熱開始から15分後に発生し、その後加熱と共に内部および表面付近でもひび割れ本数が増加した。

炉内温度がピークとなる28分後であってもコンクリート表面部に作用する有効圧縮ひずみは、複合解析と同様に 1700μ 程度であった。したがって、今回の解析条件下では、熱応力説のような表面圧縮力による爆裂現象は発生せず、熱応力による爆裂の可能性までの検討までには至らなかった。また、図-17には熱応力解析により得られた変形図を示したが、加熱と共に加熱面から熱膨張し、曲げ変形していることが分かる。

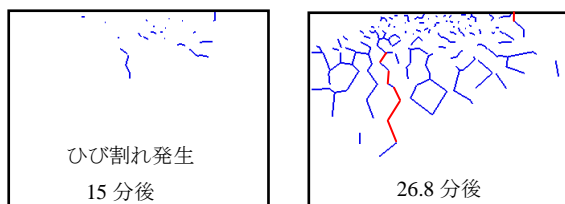


図-16 対称境界面のひび割れ図(熱応力解析)

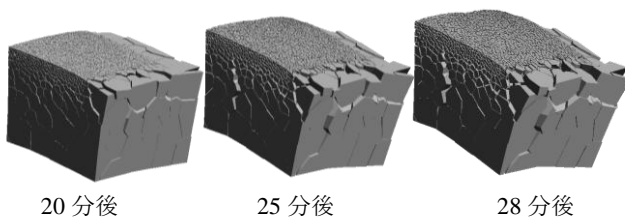


図-17 変形図 変形倍率200倍(熱応力解析)

6. 結論

本研究では、熱伝導解析、蒸気圧移動解析、さらには、熱応力と蒸気圧応力を考慮可能な動的変形解析を統合した解析手法を開発した。さらに、開発した手法を用い、コンクリート内部の損傷および爆裂現象の解析的評価を行った。蒸気圧解析では、蒸気圧のみで爆裂する可能性を示し、今回の解析条件においては、爆裂現象の主たる要因であることを示した。複合解析では、既往の実験との比較により、高温加熱時の熱および蒸気圧の影響だ

けでなく爆裂後の変形性状を具体的に再現でき、本解析手法がコンクリートの爆裂メカニズム解明に有効な評価手法であることを示した。また、爆裂現象には熱応力が表面付近のコンクリートを損傷させ、爆裂を引き起こし易くしている一要因となる場合があることを示した。

参考文献

- 1) 田嶋仁志, 岸田政彦, 神田亨, 森田武: 火災高温時におけるシールドトンネル RC 覆工断面の変形挙動解析, 土木学会論文集, Vol. 62, No.3, pp. 606-618, 2006.9
- 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) 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
- 4) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3次元剛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
- 5) Nakamura, H. and Worapong, S. and Yashiro, R. and Kunieda, M.: 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.
- 6) 中島浩亮, 中村光, 国枝稔, 山本佳士: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.937-942. 2009.6.
- 7) 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: pp.471-487, 2001.
- 8) Saito, S. and Hikosaka, H.: Numerical analysis of reinforced concrete structures using spring network model, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Japan Society of Civil Engineers, No.627 V-44, pp. 289-303, 1999.
- 9) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物に火災安全性研究委員会報告書, pp.95-96, 2002.6
- 10) 北村ら: コンクリートの耐火性に関する研究, <http://www.cive.gifu-u.ac.jp/lab/st1/works/2004/a1033101014mk.pdf>