

不連続体構造解析手法の開発とコークス炉煉瓦構造への適用

Development of Discontinuous Structure Analysis Methods and Their Applications
to the Brick Structures for the Coke Oven

山村和人* 田尻康之 竹内則雄
Kazuto YAMAMURA Yasuyuki TAJIRI Norio TAKEUCHI

抄 録

コークス炉に代表される煉瓦構造をもつ炉体は、操業に伴って熱的、機械的な負荷を繰り返し受け、多数のブロックの接触集合体であることに起因する目地開き変形、割れの発生と進展、倒壊といった損傷を生じる。これらのメカニズムを解明し、損傷を予測し、煉瓦および煉瓦積み構造の設計最適化を行うために数値解析が大きな役割を果たしている。中でも有限要素法は様々な問題に適用され成果を出しているが、本手法は連続体をベースとしているため多数の接触体の構造解析には不向きであり、これまで不連続体ベースの解析手法の開発を進め実用に供してきた。本論文では、不連続体解析手法を用いた煉瓦構造解析技術への取り組みの概要とコークス炉の様々な問題への適用事例を紹介した。

Abstract

Brick structures which are represented by coking chamber wall of coke oven are subject to repeated thermal and mechanical loads in operation, and consequently many damages due to brick assembly, such as joint opening, crack and their propagation, collapse are caused. Numerical analysis play significant role to elucidate these mechanisms, to predict damages and to realize optimum design of brick and masonry structure. Especially the finite element method is used for various problems and produce practical results, but it is based on continuous body, it is not suited to analyze structure consisting of many blocks, the method based on discontinuous body has been developed. In this paper, outline of analysis technologies for brick structure using discontinuous based method and some applications to coke oven are introduced.

1. 緒 言

高炉、コークス炉、転炉、二次精錬等の高温プロセスには、定形煉瓦や不定形耐火物を用いた多くの炉が使われている。これらは操業に伴って熱的、機械的な負荷を繰り返し受け、様々な劣化や損傷を引き起こす。とりわけコークス炉に代表される煉瓦積み構造をもつ炉は、多数のブロックの接触集合体であることに起因する目地開き変形、割れの発生と進展、倒壊といった現象、即ち初期の変形や割れに始まり、小規模な破壊、最終的には倒壊に至るマルチステージな破壊を生じる。

これらの現象のメカニズムを解明し、損傷を予測し、損傷の回避や炉寿命延長を図るとともに、操業にマッチした機能と長寿命化を実現するための煉瓦構造(材質、形状、目地、ダボ等)および煉瓦積み構造の最適化が求められて

いる。これらに対する数値構造解析の役割は大きく、有限要素法(FEM: Finite Element Method)は大きな武器として利用されている。しかしながら、FEMは連続体をベースとする解析手法であるため多数の接触体の構造解析には不向きであり、これまで不連続体ベースの解析手法の開発を進め、実用に供してきた。一方、操業や設計の現場では破壊後の挙動よりも破壊に至る限界(変形や応力)を掴むことが重要であり、まずは最終強度を予測するため、要素を剛体とする離散化極限解析手法の開発と実用化を進めてきた。その後、操業初期を含む炉壁変形(剛性)や強度の評価の必要性から要素の変形を伴う新しい解析手法の開発を進め現在に至っている。

本論文では、不連続体構造解析手法を用いた煉瓦積み構造の解析への取り組みの概要とコークス炉の様々な問題への適用事例を紹介する。

* プロセス研究所 プロセス研究部 上席主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

2. 不連続構造体の数値解析手法と煉瓦積み構造への適用性

2.1 連続体ベース／有限要素法

現在、数値構造解析手法として最も一般的かつ主要なものではFEMであり、非常に高度な非線形問題を含むあらゆる方面で利用されている。歴史的にFEMは変位法をベースとする変位を未知数とするやり方を中心に発達してきたが、要素と要素の境界面において変位の連続性は保たれているため変形解析の精度は高いものの、境界上の表面力の連続性が保証されておらず、剥離や滑りといった不連続な状態（いわゆる接触問題）を取り扱うことが苦手である。この問題を克服するために歴史的に様々な方法（リンク要素¹⁾やジョイント要素²⁾等）が開発されてきているが、現在においても煉瓦積み構造のような大規模な多体接触の解析は本質的に難しい。

これに対し、目地材のヤング率を煉瓦本体に対して極めて小さく設定したり、目地挙動の非線形性をもたせたりして疑似的に挙動を表現することが従来から行われているが、不自然な引張応力の発生や計算の収束性が悪いといった課題がある。

一方、煉瓦単体や煉瓦数が数個程度の小規模な系の詳細な熱応力解析を行う場合のFEMの利便性は高く、不連続体構造解析手法との使い分けを行っている。

2.2 不連続体ベース／剛体-ばねモデル

緒言で述べた破壊の限界を探る手段として、新日鐵住金(株)はまず離散化極限解析に着目し、川井が開発した剛体-ばねモデル(RBSM: Rigid Body Spring Model)³⁾に着目し、これに熱応力解析機能や煉瓦構造特有の目地モデルを付加した煉瓦構造解析ツール(NS-Brick)を開発した^{4,5)}。

本手法は、“変形や破壊の本質は滑りである”という川井の考えに基づいており、要素を剛体と仮定し、要素間の境界面上に法線方向と接線方向にばねを仮定し、要素間の相対変位から要素間の表面力を計算する。即ち、FEMで扱えなかった表面力を扱うもので、このばねにより要素変形に相当するエネルギーを評価して剛性方程式を解く。

本手法は界面の剥離や滑りの評価により崩壊に至る進行型の破壊も取り扱うことが可能である。この崩壊に至る荷重は上界値を与えるため離散化極限解析ができる。また、本手法は節点を持たないので要素形状は任意に決めることができる。しかしながら、要素が剛体であるため要素内の状態が把握できず、煉瓦構造体の変位や部分的な破壊を含む崩壊に至る途中経過を予測することには限界がある。

RBSMを用いたNS-Brickは少ない自由度で効率的に極限解析ができるため、変位の精度を求めず、煉瓦積み構造体の最終強度を評価することの利便性が高く、次節のHPMが出る前まで実際問題へ多く適用してきた^{6,7)}。

2.3 不連続体ベース／ハイブリッド型ペナルティ法

FEMのような要素内部変形とRBSMのような要素境界面の表面力に相当するものが同時に扱えると微小な変形から崩壊に至るまでが一貫的に計算が可能となる。そこで、要素境界面における変位の連続性を若干緩め、変位の連続性に関する付帯条件をLagrangeの未定乗数によって変分表示に導入することにより同未定乗数が要素境界面上の表面力に等しくなり、また変位場を独立に仮定できる。このハイブリッド型変分モデル^{8,9)}に竹内らは注目し、Lagrangeの未定乗数にばねの考え方を導入し、ばね定数としてペナルティを用いるハイブリッド型ペナルティ法(HPM: Hybrid-type Penalty Method)^{10,11)}を開発した。これに熱応力解析機能¹²⁾や様々な非線形特性に対応可能な目地モデルを強化した新しい煉瓦構造解析ツール(NS-Brick II)を開発した。

本手法は、解析領域を小さな部分領域に分割し、部分領域毎に独立な変位場を仮定して、変位の連続性をペナルティによって近似する。Lagrangeの未定乗数が表面力を意味することから、RBSMと同様な進行型の破壊解析を行うことができる。また、部分領域内の任意点における剛体変位(並行変位と剛体回転)とひずみを用いた線形変位場を各部分領域に適用すれば、HPMの弾性解の精度はFEMにおける定ひずみ要素と同等となり、弾性解の精度を維持しつつ離散化極限解析が行える。

HPMは表面力の連続性と崩壊機構が確保されているため、RBSMと同様に真の解に対して上界値側の崩壊荷重を与えるが、部分領域内での塑性条件を考慮することにより、真の解に対して下界値側の崩壊荷重を求めることが考えられる。即ち、これまで難しかった極限荷重の上下界解のはさみ込みが可能となる¹³⁾。

HPMを用いたNS-Brick IIは煉瓦の変形(剛性)から最終強度まで、広い範囲が一貫的に評価することが可能であり、適用範囲が極めて広く、RBSMに代わる主な手段として実際問題へ適用しつつ現在に至っている^{7,14)}。

2.4 不連続体解析法のその他の手法

不連続体解析手法は大きくは、連続体を前提として解く方法と不連続体を前提として解くものに分けられる。前者の代表がFEMであり、これに接触解析機能を加えて不連続体を取り扱う。後者はさらに現象を静的に取り扱うか、動的に取り扱うかに分かれる。本論文で取り上げているRBSMならびにHPMは静的取り扱いに属する。これに加え、近年、川井による統一エネルギー原理に基づく新しいメッシュフリーな離散化解析手法¹⁵⁾の研究が進んでおり、高精度な接触問題への展開も期待される。

一方、動的取り扱いに属するものとして、要素を剛体と仮定し、この要素をばねとダッシュポットで接続して要素毎に立てた運動方程式を差分法により逐次解くCundallの個別要素法(DEM: Distinct Element Method)¹⁶⁾、ブロック同

士の接触、すべり、衝突や分離を動的に扱う Shi らの不連続体変形法 (DDA: Discrete Deformation Method)¹⁷⁾がある。この手法はブロックの剛体移動、剛体回転に加えてひずみを考慮した定式化がなされており、主に、落石解析や岩盤崩壊等への応用が方向されているが、耐火物構造への応用も自然にできる。同様の手法として DDA のほかにマニフォールド法¹⁸⁾がある。

また、計算機の進歩に伴って、粒子法も目覚ましく発達している。粒子法は連続体を粒子の集合体で記述する方法と、粒子を剛体とし力学的接触を動的に解く方法がある。前者の代表的な例として Lucy らによる SPH (Smoothed Particle Hydro-dynamics)¹⁹⁾、越塚らによる MPS (Moving Particle Semi-implicit)²⁰⁾がある。これらは連続体を移動可能な粒子の集合体とし、重み関数によって平均化 (スムージング)された物理量を逐次計算し、個々の粒子に対して支配方程式を逐次解き、その位置を更新していく。後者の代表例は前出の DEM である。粒子法は流体解析の手法として発達したが、本来の機能から不連続体への応用は比較的容易であり、最近では構造体に用いられるようになって^{21,22)}いる。

さらに、上記で述べた様々な手法を連成した手法も提案され実用に供している。例えば、FEM と DEM の組み合わせ、SPH と DEM の組み合わせなどである。また、FEM の節点を粒子として Lagrange 的に扱いメッシュをかけながら逐次 FEM 計算を行う PFEM (Particle Finite Element Method)²³⁾がある。これら動的解法の煉瓦および煉瓦積み構造解析の適用については今後の課題としたい。

3. 煉瓦積み構造解析手法の定式化

3.1 ハイブリッド型ペナルティ法 (HPM)

3.1.1 ハイブリッド型変分原理

(1) 弾性問題の基礎方程式

図1のような境界 Γ をもつ弾性応力場 Ω を考える。 Ω における基礎方程式は以下のように表わされる。

応力平衡方程式

$$\text{div}\sigma + \mathbf{f} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

応力 - ひずみ関係式

$$\sigma = \mathbf{D} : \varepsilon \quad (2)$$

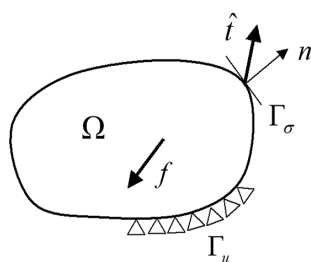


図1 弾性応力場
Elastic stress field

ひずみ - 変位関係式

$$\varepsilon = \nabla^s \mathbf{u} = \frac{1}{2} \{ \nabla \mathbf{u} + {}^t(\nabla \mathbf{u}) \} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u} は Ω における変位場、 ε はひずみ、 σ は応力、 \mathbf{D} は弾性テンソル、 \mathbf{f} は物体力を示す。 Γ_u を変位 $\hat{\mathbf{u}}$ が、 Γ_σ を表面力 $\hat{\mathbf{t}}$ が与えられる境界とすると以下の条件を満足する。

幾何学的境界条件

$$\mathbf{u}|_{\Gamma_u} = \hat{\mathbf{u}} \quad (\text{given}) \quad (4)$$

力学的境界条件

$$\sigma|_{\Gamma_\sigma} \hat{\mathbf{n}} = \hat{\mathbf{t}} \quad (\text{given}) \quad (5)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{t}}$ は表面力であり、 \mathbf{n} は境界上の外向き法線ベクトルとすると、 $\hat{\mathbf{t}} = \mathbf{n}\sigma$ となる。

(2) ハイブリッド型仮想仕事の原理

式(1)に幾何学的境界条件を満たす仮想変位 $\delta \mathbf{u}$ を乗じて領域 Ω について体積積分し、ガウスの発散定理を適用して整理すると次の仮想仕事式が得られる。

$$\int_{\Omega} \sigma : \text{grad} \delta \mathbf{u} dV - \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{u} dV - \int_{\Gamma_\sigma} \hat{\mathbf{t}} \cdot \delta \mathbf{u} dS = 0 \quad (6)$$

今、図2に示すように、領域 Ω は閉境界 $\Gamma^{(e)}$ で囲まれた M 個の部分領域 $\Omega^{(e)}$ に分割構成されているものとする。このとき、式(6)は各部分領域の和として以下のように表すことができる。

$$\sum_{e=1}^M (\int_{\Omega^{(e)}} \sigma : \text{grad} \delta \mathbf{u} dV - \int_{\Omega^{(e)}} \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{u} dV - \int_{\Gamma^{(e)}} \hat{\mathbf{t}} \cdot \delta \mathbf{u} dS) = 0 \quad (7)$$

ここで、隣接する2つの部分領域 $\Omega^{(a)}$ と $\Omega^{(b)}$ の共通の境界 $\Gamma_{\langle ab \rangle}$ における変位を $\hat{\mathbf{u}}^{(a)}$ 、 $\hat{\mathbf{u}}^{(b)}$ とすると、

$$\hat{\mathbf{u}}^{(a)} = \hat{\mathbf{u}}^{(b)} \quad \text{on } \Gamma_{\langle ab \rangle} \quad (8)$$

となり、この付帯条件を Lagrange の未定乗数 λ を用いて、

$$H_{ab} \stackrel{\text{def}}{=} \delta \int_{\Gamma_{\langle ab \rangle}} \lambda (\hat{\mathbf{u}}^{(a)} - \hat{\mathbf{u}}^{(b)}) dS \quad (9)$$

と表し仮想仕事式(7)に導入し、さらに熱応力 σ_T を考慮するとハイブリッド型の仮想仕事式は次のようになる。ただし、隣接する2つの要素境界辺の数を N とする。

$$\sum_{e=1}^M (\int_{\Omega^{(e)}} \sigma : \text{grad} \delta \mathbf{u} dV - \int_{\Omega^{(e)}} \sigma_T : \text{grad} \delta \mathbf{u} dV - \int_{\Omega^{(e)}} \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{u} dV - \int_{\Gamma^{(e)}} \hat{\mathbf{t}} \cdot \delta \mathbf{u} dS) - \sum_{s=1}^N (\delta \int_{\Gamma_{\langle s \rangle}} \lambda \cdot (\hat{\mathbf{u}}^{(a)} - \hat{\mathbf{u}}^{(b)}) dS) = 0 \quad (10)$$

$\hat{\mathbf{t}}^{(a)}$ と $\hat{\mathbf{t}}^{(b)}$ を部分領域 $\Omega^{(a)}$ と $\Omega^{(b)}$ における境界 $\Gamma_{\langle ab \rangle}$ 上の表面力とすると次式となり、Lagrange の未定乗数 λ は $\Gamma_{\langle ab \rangle}$ 上の表面力を意味する⁹⁾。

$$\lambda = \hat{\mathbf{t}}^{(a)} = -\hat{\mathbf{t}}^{(b)} \quad (11)$$

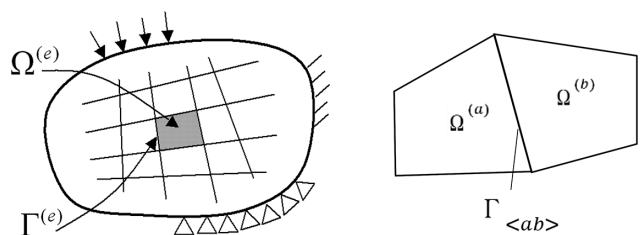


図2 部分領域および共通境界
Partial region and boundary

3.1.2 HPM の離散化方程式

(1) 部分領域毎に独立な変位場

部分領域 (e) 内の変位場 $\mathbf{u}^{(e)}$ をそれぞれの部分領域で独立として以下のように仮定する。

$$\mathbf{u}^{(e)} = \mathbf{N}_d^{(e)} \mathbf{d}^{(e)} + \mathbf{N}_\varepsilon^{(e)} \boldsymbol{\varepsilon}^{(e)} \quad (12)$$

$\mathbf{d}^{(e)}$ は部分領域内の剛体変位と剛体回転を、 $\boldsymbol{\varepsilon}^{(e)}$ は要素内で一定なひずみを、 $\mathbf{N}_d^{(e)}$ 、 $\mathbf{N}_\varepsilon^{(e)}$ は係数行列で座標の関数である。式(12)に示すように変位場は領域内における任意の点の剛体変位、剛体回転、ひずみとその勾配を自由度として表されるため、変位法 FEM と異なり、頂点即ち節点で変位を共有せず形状関数にも支配されない。従って、要素形状は特に限定されず、任意の多角形や多面体、曲面体を部分領域として用いることができる。

(2) Lagrange の未定乗数とペナルティ

式(11)に示すように、境界 $\Gamma_{\langle ab \rangle}$ 上の Lagrange の未定乗数 λ が物理的に表面力を意味することから、 λ を以下のように境界面のばね剛性 (ペナルティ関数) と相対変位で再定義する。

$$\lambda_{\langle ab \rangle} = k \cdot \delta_{\langle ab \rangle} \quad (13)$$

ここで、 $\delta_{\langle ab \rangle}$ は要素境界面 $\Gamma_{\langle ab \rangle}$ 上の相対変位を、 k は表面力と相対変位を関係づける行列を表す。3次元問題の場合、次のように仮定する。

$$\begin{Bmatrix} \lambda_{n\langle ab \rangle} \\ \lambda_{s\langle ab \rangle} \\ \lambda_{t\langle ab \rangle} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_t & 0 \\ 0 & 0 & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_s \\ \delta_t \\ \delta_n \end{Bmatrix} \quad (14)$$

図3に示すように、2次元問題の場合、 $\delta_{n\langle ab \rangle}$ 、 $\delta_{s\langle ab \rangle}$ は要素境界面 $\Gamma_{\langle ab \rangle}$ に対する法線および接線方向の相対変位で、同様に、 $\lambda_{n\langle ab \rangle}$ 、 $\lambda_{s\langle ab \rangle}$ は法線および接線方向に対する Lagrange の未定乗数、即ち表面力である。

式(12)(13)の関係性を式(10)に代入することにより、HPM の離散化方程式が以下のように得られる (途中略)。

$$\begin{aligned} \mathbf{KU} &= \mathbf{P} \\ \mathbf{K} &= \sum_{e=1}^M \mathbf{K}^{(e)} + \sum_{s=1}^N \mathbf{K}_{\langle s \rangle} \\ \mathbf{P} &= \sum_{e=1}^M \mathbf{P}^{(e)} + \sum_{s=1}^N \mathbf{P}_T^{(e)} \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 \mathbf{U} は全体系の変位ベクトル、 $\mathbf{P}^{(e)}$ は荷重項、 $\mathbf{P}_T^{(e)}$ は熱荷重項、 $\mathbf{K}_{\langle s \rangle}$ は付帯条件に関わる係数行列、 $\mathbf{K}^{(e)}$ は要素

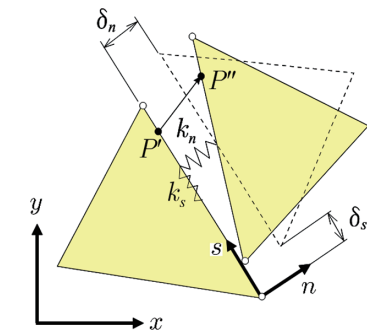


図3 2次元問題の k と $\delta_{\langle ab \rangle}$ の関係
Relation between k and $\delta_{\langle ab \rangle}$

内剛性に関わる項である。HPM の場合、 \mathbf{U} は剛体変位 \mathbf{d} とひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}$ から $\mathbf{U} = [\mathbf{d}, \boldsymbol{\varepsilon}]^T$ のように表されるので、要素面積を $\mathbf{A}^{(e)}$ 、構成行列を $\mathbf{D}^{(e)}$ として以下の関係にある。

$$\mathbf{K}^{(e)} \mathbf{U}^{(e)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}^{(e)} \mathbf{D}^{(e)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}^{(e)} \\ \boldsymbol{\varepsilon}^{(e)} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

式(16)の関係を用いて式(15)の離散化方程式を詳細に表現すると以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{dd} & \mathbf{K}_{d\varepsilon} \\ \mathbf{K}_{\varepsilon d} & \mathbf{K}_{\varepsilon\varepsilon} + \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d} \\ \boldsymbol{\varepsilon} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_d \\ \mathbf{P}_\varepsilon \end{Bmatrix} \quad (17)$$

このように離散化方程式 (17) は、付帯条件によって生じる項と要素剛性によって生じる項から構成されている。

3.2 剛体 - ばねモデル (RBSM) の離散化方程式^{24,27)}

RBSM では式(12)の線形変位場に対して、以下のような剛体変位場を仮定する。

$$\mathbf{u}^{(e)} = \mathbf{N}_d^{(e)} \mathbf{d}^{(e)} \quad (18)$$

この関係を HPM の展開に適用すれば式(17)は以下のようにになる。

$$\mathbf{K}_{dd} \mathbf{d} = \mathbf{P}_d \quad (19)$$

ここで係数行列は次式のとおりである。

$$\mathbf{k}^{\langle ab \rangle} = \int_{\Gamma_{\langle ab \rangle}} \mathbf{N}_d^{(a)} k \mathbf{N}_d^{(b)} d\Gamma \quad (20)$$

HPM において式(20)の k は、式(13)で仮定したペナルティ関数を意味している。一方、RBSM では図4に示すように k をばね定数と考え、以下のように仮定する。

$$\begin{Bmatrix} \lambda_n \\ \lambda_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \end{Bmatrix} \quad (21)$$

このばね定数を用いると式(17)は RBSM の離散化方程式と一致する。

3.3 荷重増分法による HPM の材料非線形解析

材料非線形問題の解析法として rmin 法による荷重増分法がある²⁸⁾。HPM ではこれを応力解放が伴う問題に対して適用できるように拡張し、部分領域内での破壊も容易に考慮可能な非線形解析に適用した²⁹⁾。

破壊基準として、すべり (Mohr-Coulomb の条件、Mises の条件) (除荷)、引張クラック (再接触)、せん断クラック、非線形目地 (後述) に適用している。

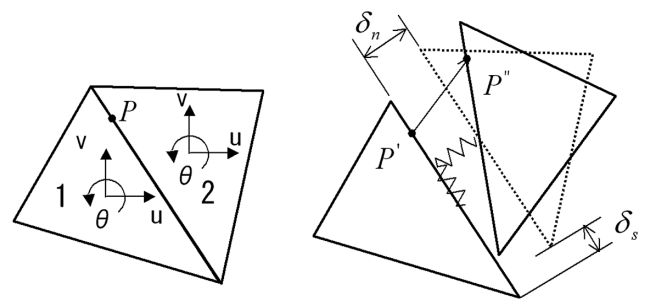
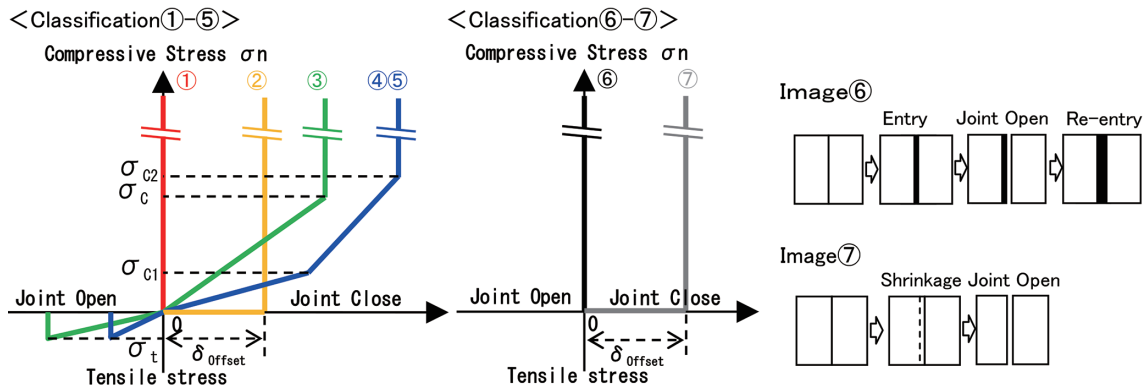


図4 RBSM における剛体 - ばね系
Rigid body and spring system in RBSM

表 1 非線形目地一覧
List of nonlinear joint

Classification	Joint mechanism	Initial thickness	Strength
Simple joint			
① Dry joint	Simple contact	Zero	•TS: zero •CS: ∞
② Initial gap	Thermal expansion allowance	Non zero	•TS: zero •CS: ∞ (after contact)
Joint materials			
③ Unshaped refractories (mortar etc.)	Bonding	Non zero	•TS: non zero •Compressibility
④ Cushion material (blanket etc.)	Thermal expansion allowance	Non zero	•TS: zero •Compressibility
⑤ Another special material (styrofoam etc.)	Dissipation after operation	Non zero	•TS: zero •Compressibility
Changing of joint status after operation			
⑥ Entry of foreign matter into joint (carbon etc.)	Latchet deformation	Zero or non zero	•TS: zero •CS: ∞
⑦ Generation of gap	Shrinkage by drying	Zero Initialized to zero	•TS: zero •CS: ∞ (after contact)



3.4 煉瓦構造解析のための非線形目地の定義

HPM ではばね定数としてペナルティ関数を用いるが、煉瓦構造に特有の様々な目地機能は、このペナルティ関数に定義することで可能となる。現在、HPM に導入している非線形目地を表 1 に示す。

4. コークス炉煉瓦構造への適用

4.1 コークス炉煉瓦構造およびその損傷³⁰⁻³²⁾

国内の多くのコークス炉は稼働年数が 40 年を超え、長期間稼働に伴う炉体の劣化が進行し、生産能力の低下やエネルギー効率の悪化が問題となっている。しかし、コークス炉の改修には工期ならびにコストの問題があり、既設コークス炉の寿命延長や高耐用な炉壁構造へのニーズが強い。

炭化室の煉瓦壁は体積安定性に優れる珪石煉瓦を積み上げて作られており、日々の操業における石炭の装入やコークスの押し出し過程で、繰り返しの熱的かつ機械的な負荷を受け、経年的に損傷が拡大している。

図 5 にコークス炉の模式図と典型的な炉壁の損傷形態を示す。コークス炉炉壁の損傷としては、炭化室窯口近傍煉瓦のスポーリング損傷、経年的な煉瓦摩耗や付着カーボン

の剥離時の煉瓦損傷による減肉、炉長方向に等ピッチで入った縦貫通亀裂の発生、その拡大と壁剛性の低下、開口目地部や亀裂部位へのカーボン侵入による炉体膨張の進行、炉底に近い水平目地付近の角欠け進行、以上の相互作用や悪循環に伴う炉壁耐力の低下、破孔や倒壊の発生が考えられる。

本節では、煉瓦構造タイプの壁剛性と強度への影響、縦貫通亀裂および炉壁破孔の原因解析について紹介する。

4.2 検討対象構造

図 6 に本論文の対象とする煉瓦構造の基本単位構造を示す。(a)をタイプ I、(b)をタイプ II とする。上部ならびに下部の水平方向の煉瓦は炭化室煉瓦（ハンマー煉瓦、ロイファー煉瓦）を、同煉瓦と上下の炭化室煉瓦を繋ぐ煉瓦（ビンダー煉瓦）で囲まれる空間が燃焼室である。実際の炉はこの単位構造が炉長方向（図で左右方向）に約 20 個、垂直方向（図で紙面垂直方向）に数 10 段並んだ構造となっている。

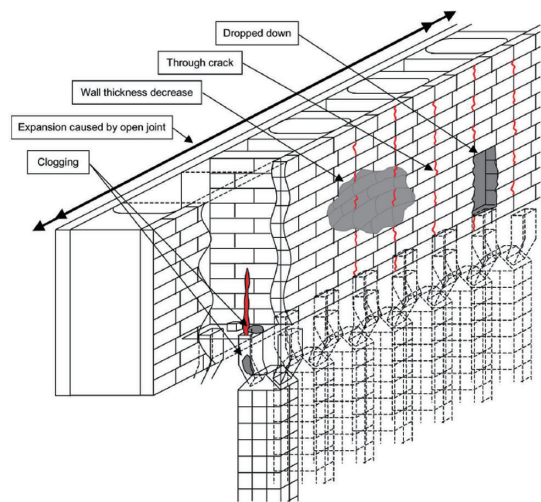
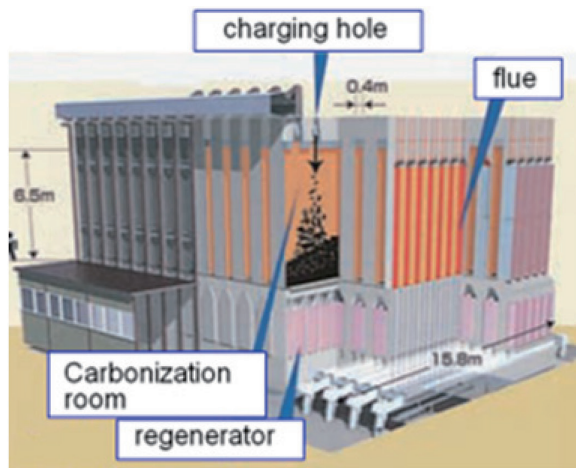


図5 コークス炉の模式図と典型的な炉壁の損傷形態³²⁾
Coke oven and typical damage patterns of chamber wall³²⁾

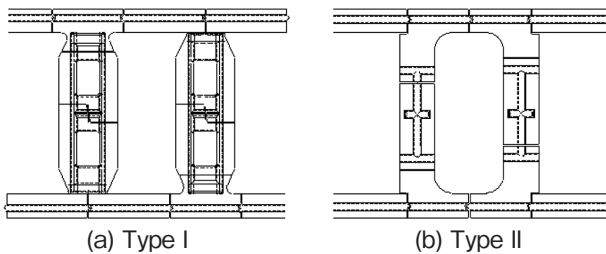


図6 煉瓦構造タイプ
Types of brick structures

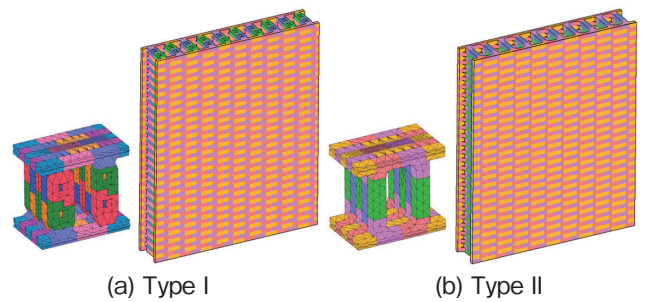


図7 煉瓦構造タイプとモデル
Types of brick structure and models

4.3 コークス炉煉瓦構造タイプの剛性と強度

4.3.1 解析の目的

異なるコークス炉煉瓦構造タイプの基本ブロックおよびその集合体である壁としての剛性と強度を評価し、解析手法の妥当性確認とともに煉瓦積み構造の基本的特性を把握する。本解析では主に機械荷重時の変形、応力状態の変化を見ることとし熱応力は対象としない。

4.3.2 解析対象とモデル

- (1) 解析対象：図6に示す煉瓦構造タイプとする。
- (2) モデル化範囲：基本ブロックは5段×2ピンダの範囲、炉壁は50段×10ピンダの範囲(1/2対称モデル)とし、ダボ部、目地等を考慮する。
- (3) メッシュ：図7に基本ブロックおよび炉壁のモデルを示す。
- (4) 物性値：表2に物性値を示す。
- (5) 伝熱条件：本解析では機械的荷重による挙動を評価することとし、温度分布は考慮しない。
- (6) 荷重条件：図8に示す。基本ブロックには破孔に影響する集中荷重を、炉壁には操業時のコークス乾留圧力を負荷し、炉締力および炉高さ方向には上部からの煉瓦自重を圧力を負荷する。
- (7) 拘束条件：図8に示す。周囲は対称条件とする。

表2 物性値
Material properties

Property	Unit	Brick	Joint
Young's modulus	GPa	12.0	0.03
Poisson's ratio	—	0.25	0.25
Tensile strength	MPa	5.0	0.1
Compressive strength	MPa	50.0	5.0
Shear strength	MPa	10.0	10.0
Internal friction angle	°	65.0	65.0
Thermal conductivity	1/°C	1.0E-5	1.0E-5
Heat transfer coef.	W/mK	0.77	0.77
Specific heat	kcal/kgK	0.17	0.17
Density	kg/mm ³	1.8E-6	1.8E-6

4.3.3 解析手法

- (1) 手法：NS-Brick II (HPM)
- (2) 解析種類：要素内弾性解析
- (3) 要素種類：四面体要素

4.3.4 解析ケース

本解析では表3に示すタイプI、タイプIIの煉瓦構造に対し、基本ブロックおよび炉壁の2構造、図8に示す条件1水準の負荷による解析を実施した。

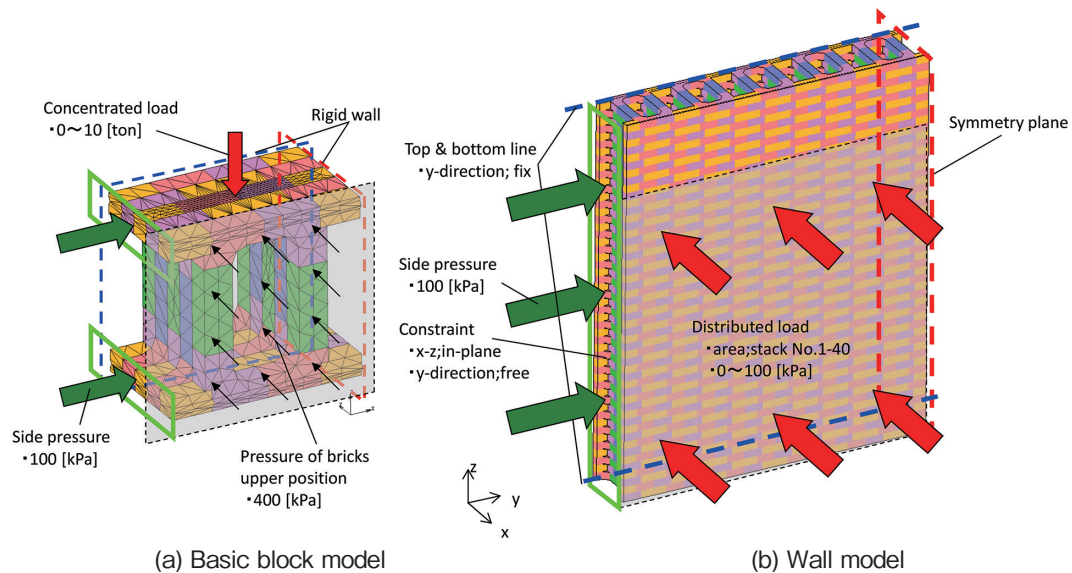


図8 荷重条件, 拘束条件 (タイプIIで説明)
Loading & boundary conditions (Type II)

表3 解析ケース
Analysis cases

Case	Type	Region of modeling
Basic block	Case-S1	Type I 5 layers × 2 bindars
	Case-S2	Type II 5 layers × 2 bindars
Wall	Case-W1	Type I 50 layers × 10 bindars
	Case-W2	Type II 50 layers × 10 bindars

4.3.5 解析結果

(1) 基本ブロックの剛性と強度

図9に最大負荷時の変形図(10倍)を, 図10に荷重点の変位-荷重曲線を示す。本解析結果より次の傾向が得られた。なお, HPM 計算では要素の離脱等数値的な崩壊判定で計算が終了するため, 本論文では初期剛性(主に弾性域)および強度(変位-荷重曲線の変曲点)の評価に限定する。

- ①初期のブロック剛性(=荷重/荷重点変位)はタイプI, タイプIIとほぼ同等である。
- ②変位-荷重曲線の変曲点を強度とすると(図10中○), タイプIIの方がタイプIよりも大きく強度は高い。
- ③タイプIのロイファー部の燃焼室側に曲げ応力に伴う煉瓦に亀裂(図9中○)の発生が見られる。

(2) 炉壁の剛性と強度

図11に最大負荷時の変形図(30倍)を, 図12に荷重点の変位-荷重曲線を示す。本解析結果より次の傾向が得られた。

- ①タイプIでは高さ方向中央(25段)よりやや高い位置(28段~33段付近)で最も大きな目地開きが生じている。
- ②初期の炉壁剛性(=荷重/荷重点変位)はタイプIIの方がタイプIよりも高い。
- ③変位-荷重曲線の変曲点を強度とすると(図12中○)と, タイプIIの方がタイプIよりも大きい。

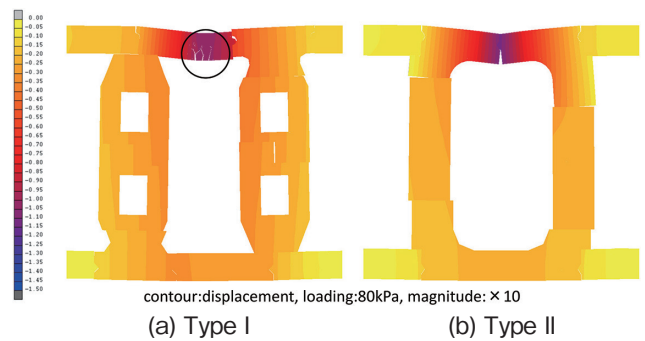


図9 基本ブロックの変形図
Deformation of the basic blocks

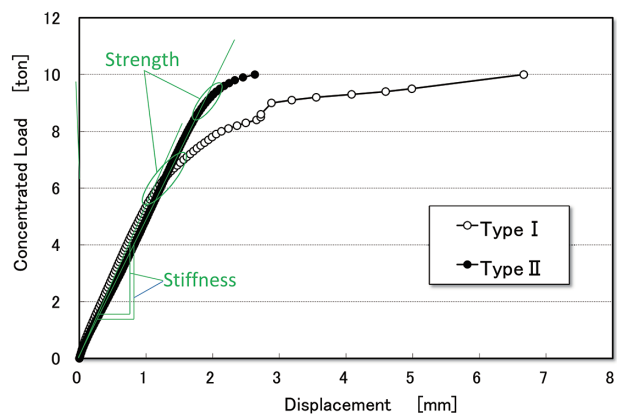


図10 単体ブロックの荷重点の変位-荷重曲線
Strength and stiffness of the wall

4.3.6 単体ブロックのオフライン強度試験との比較

本解析と同等の構造の煉瓦を用いてオフライン破壊試験を行っているが, 計算結果は試験結果よりも20~30%高い数値となっていた。試験では荷重点(油圧ピストン)近傍に応力集中に伴う局所的な変形(食い込み)のためと思われる。そこで, タイプIで局所的な食い込みの影響を除外し, 変位-荷重曲線の合わせ込みを行い, タイプIIを予

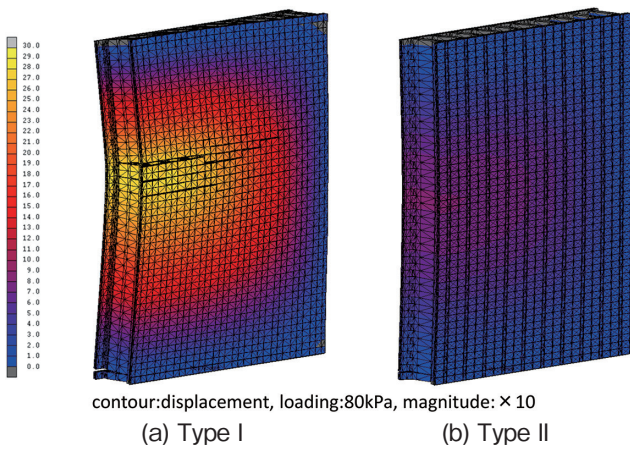


図 11 炉壁の変形図
Deformation of the wall

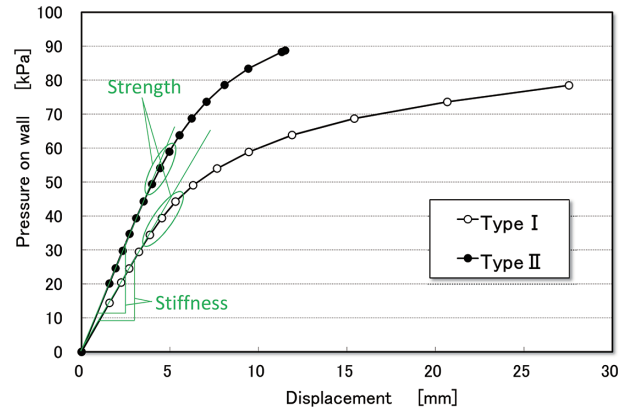


図 12 炉壁の荷重点の変位 - 荷重曲線
Strength and stiffness of the wall

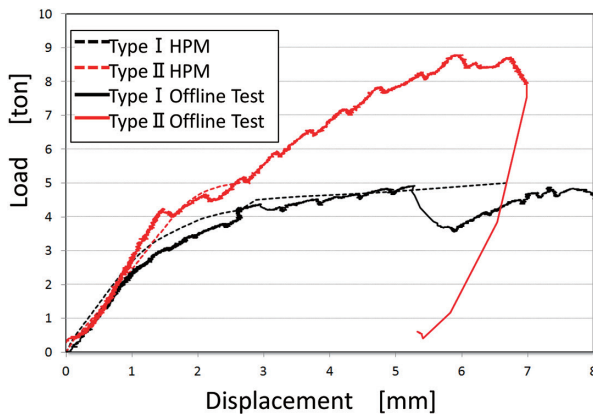
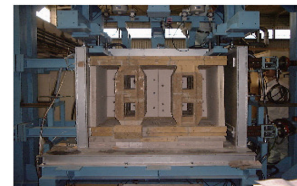


図 13 オフライン試験と HPM 解析の比較
Comparison with offline test and HPM analysis



測したのが図 13 である。これより計算モデルとしては妥当な予測ができていると判断できる。

4.3.7 構造特性とそのメカニズム

(1) 基本ブロック

以上より、本解析の条件では初期のブロック剛性はタイプ I、タイプ II の差はあまり無いが、同強度はタイプ II の方が高い。これはタイプ I のロイファー部の目地が中央に対し偏心しているのに対し、タイプ II はロイファー部中央にあり、集中荷重に伴うハンマー煉瓦根本のモーメント荷重はタイプ I よりも小さいこと、タイプ II は集中荷重が左右に均等に分散される門型構造であり、集中荷重に対する耐力が高いためと思われる。

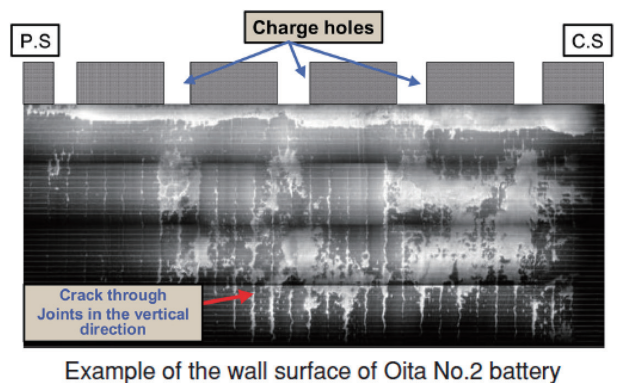
(2) 炉壁

タイプ II の炉壁の初期剛性が高いのは、その単体ブロックの剛性が高く、その集合体である炉壁は同ブロックが千鳥に配置されているためと思われる。

4.4 縦貫通亀裂とその発生メカニズム

4.4.1 損傷状況と推定原因

図 14 にコークス炉炭化室炉壁診断・補修装置で観察し



Example of the wall surface of Oita No.2 battery

図 14 縦貫通亀裂の状況³²⁾
Example of through cracks³²⁾

た大分製鉄所コークス炉での診断画像データを示す³²⁾。炉長方向に等ピッチかつロイファー部の目地と目地で挟まれた煉瓦に亀裂が入っている。写真には載せていないが亀裂は燃焼室まで貫通している。また、全域にほぼ発生していることから熱的影響が考えられる。

4.4.2 解析の目的

異なるコークス炉煉瓦構造タイプが熱応力発生にどのように影響して縦方向貫通亀裂に至るのかを探る。本現象の

本質はRBSMを用いた単体ブロックの解析から判明しており、その結果とともにHPMによる壁全体の解析を紹介する。

4.4.3 解析対象とモデル

- (1) 解析対象：図6に示す煉瓦構造タイプとする。
- (2) モデル化範囲：偶数段・奇数段の2段とする。
- (3) メッシュ：図15に示す簡易モデルとする。
- (4) 物性値：表2に同じとする。
- (5) 伝熱条件：石炭投入による温度降下を非定常計算し、炭化室表面温度が900℃から400℃まで下がった時点の温度分布と仮定する。
- (6) 荷重条件：温度分布は石炭投入直後の値を付与した。また、機械的荷重は図7(a)と同様とした。
- (7) 拘束条件：図7(a)と同様とした。

4.4.4 解析手法

- (1) 手法：NS-Brick (RBSM)
- (2) 解析種類：剛体
- (3) 要素種類：四面体要素

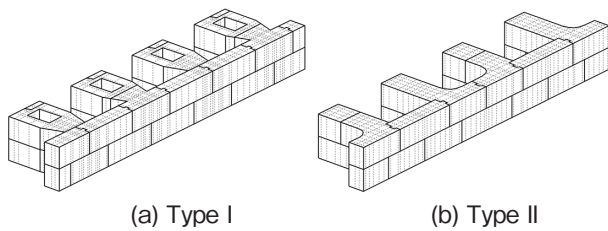
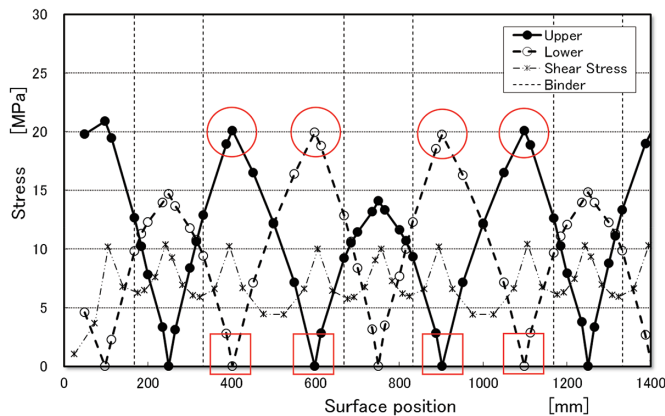
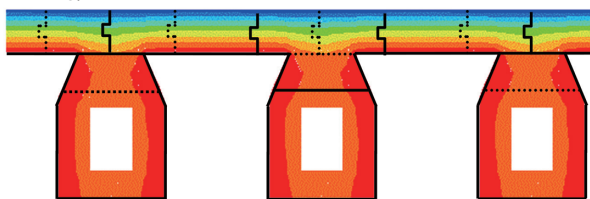


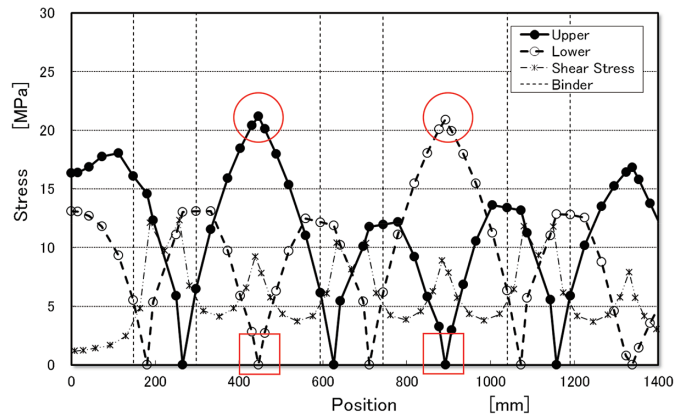
図15 RBSMモデル
RBSM model



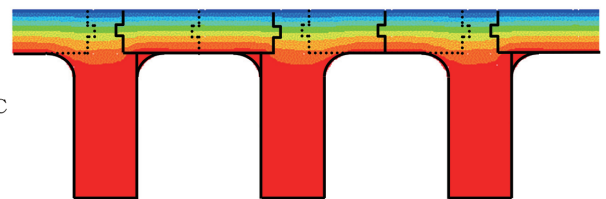
Type I Stress distribution on the surface of chamber wall



(a) Type I



Type II Stress distribution on the surface of chamber wall



(b) Type II

図16 煉瓦ブロックの温度と表面応力分布 (—: 上段, - - -: 下段)
Temperature and stress distribution on bricks (—: upper, - - -: lower)

4.4.5 解析ケース

本解析では表4に示すタイプI、タイプIIの煉瓦構造に対し、1水準の負荷による解析を実施した。

4.4.6 解析結果

図16に煉瓦の温度分布、上段、下段表面の長手方向応力分布、ならびに上下間のせん断応力の分布を示す。これより以下のことがわかる。

- ①ロイファー部に応力分布のピークがあり(図16中○)、同ピーク部は上段あるいは下段の煉瓦の目地部(図16中□)に相当する。
- ②上記ピーク部では、上下間せん断力もピークとなる。

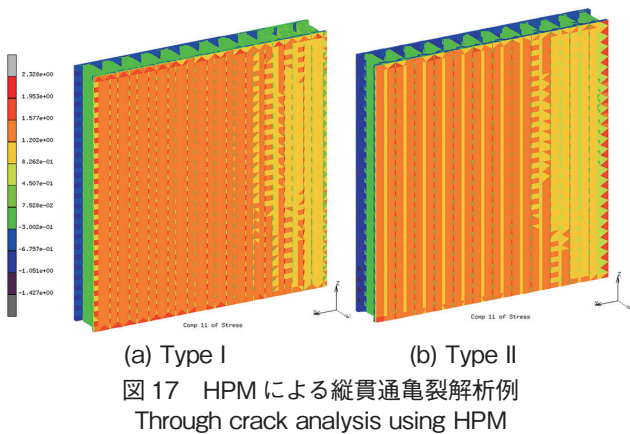
4.4.7 損傷メカニズム

ロイファー部では目地部と目地無し部が上下交互に配置されており、熱収縮・膨張繰り返し時の目地開きがその直上・直下の目地無し部に応力ピークを生じさせ、さらに上下間のせん断応力も重畳されるために亀裂を発生させていると考えられる。一旦入った亀裂は基本的に燃焼室側へ進展し、結果的に炉高方向に貫通進展するものと思われる。

亀裂の数はロイファー部の目地の数に一致するため、タイプIでは2本、タイプIIでは1本入るものと思われる。

表4 解析ケース
Analysis cases

Case	Type	Region of modeling
Case-C1	Type I	2 layers×4 bindars
Case-C2	Type II	2 layers×4 bindars



4.4.8 HPM による炉壁の応力状態

前述結果をベースに HPM により 1/2 炉×全高モデルの解析を実施した。モデルおよび結果を図 17 に示す。ロイファー部煉瓦にタイプ I では 2 本、タイプ II では 1 本の、応力ピーク部と目地が交互に並んだ直線状の高さ方向分布が見られる。

4.5 破孔とそのメカニズム

4.5.1 損傷状況と推定原因

図 18 にコークス炉における典型的な破孔の例を示す。破孔は煉瓦の縦貫通亀裂による剛性の低下やダボ部近傍の亀裂による強度の低下に、コークス押出し時の圧力が集中荷重として作用した時に生じるものと思われる。

4.5.2 解析の目的

コークス炉の縦貫通亀裂や集中荷重による破孔の可能性について評価することを目的とする。なお、本解析では縦貫通亀裂の発生を前提に機械的集中荷重による挙動を捉えることとし、局所的な熱応力の影響は対象としない。

4.5.3 解析対象とモデル

- (1) 解析対象：2 本の亀裂が発生したタイプ I を取り上げる。
- (2) モデル化範囲：58 段×6 ビンダーの範囲 (1/2 対称全体モデル) と 17 段×4 ビンダーの範囲 (部分モデル) を対象とし、ダボ部、目地、初期亀裂等を考慮する。

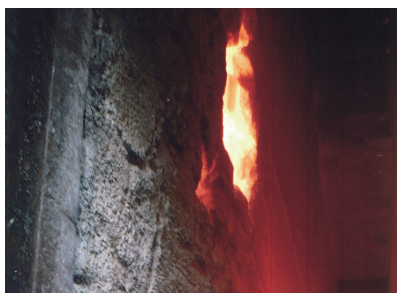


図 18 コークス炉破孔例
Example of through hole on chamber wall

- (3) メッシュ：図 19 に示す。
- (4) 物性値：表 2 に同じとする。
- (5) 伝熱条件：本解析では機械的荷重を評価することとし、温度分布は考慮しない。
- (6) 荷重条件：図 19 に示す。ここでは破孔に影響する機械荷重のみを与える条件とする。
- (7) 拘束条件：図 19 に示す。

4.5.4 解析手法

- (1) 手法：NS-Brick II (HPM)
- (2) 解析種類：要素内弾性解析
- (3) 要素種類：面体要素

4.5.5 解析ケース

本解析ではタイプ I に限定し、中央部への集中荷重にゼロから破壊に至るまでの荷重を加えた解析を紹介する。

4.5.6 解析結果

図 20 に 9t の集中荷重を負荷した時点での変形図および破壊状況を示す。

- ① 荷重点近傍では、ロイファー部の目地部と亀裂部で挟まれた部分の変位が局所的に大きくなっており破孔が発生している (図 20 (c-1))。
- ② 同煉瓦の上部のロイファー部ならびに下段ロイファーの上部ダボ部に亀裂が発生している (図 20 (c-2))。
- ③ 現状下では目地部のダボはかかったままであり、抜けるまでには至っていない。

4.5.7 損傷メカニズム

タイプ I では 2 本、タイプ II では 1 本の縦貫通亀裂が生じるが、タイプ I の場合、ロイファー部の亀裂と目地で囲まれた部分は上下のダボによる拘束のみであり、集中荷重により大きく変形し、上下段のロイファー部の亀裂進展に

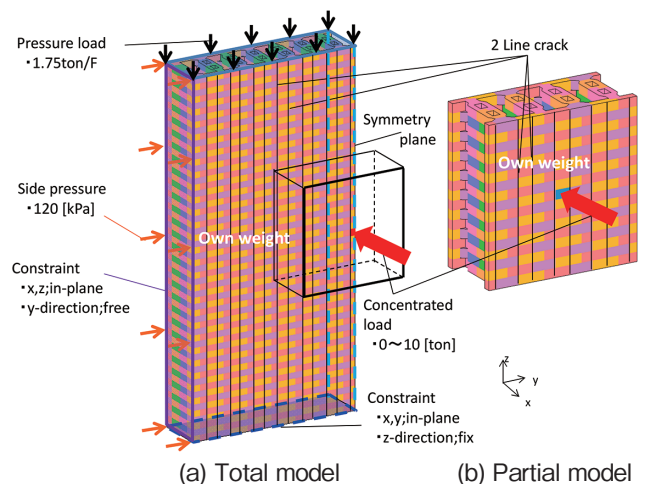


図 19 メッシュおよび荷重条件、拘束条件
Mesh, loading and boundary conditions

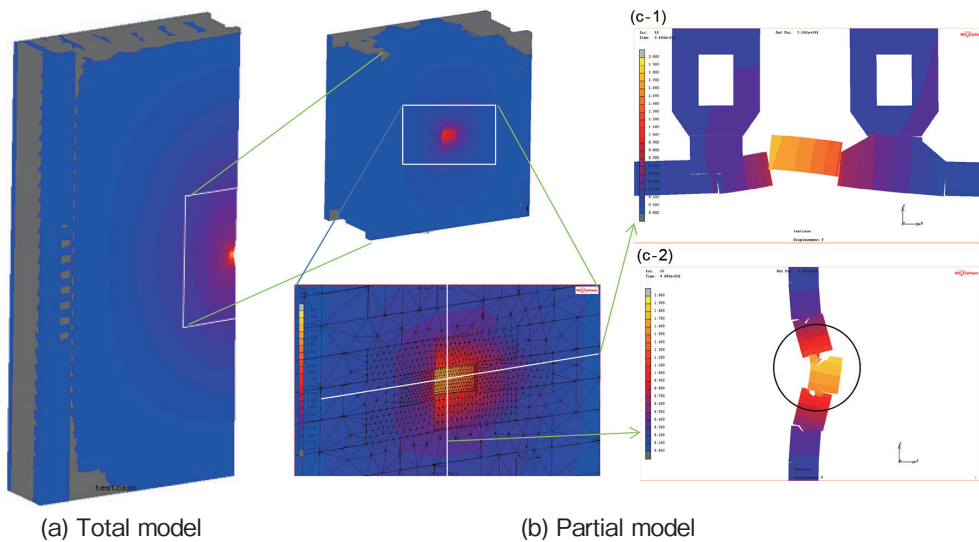


図 20 煉瓦亀裂と破孔の状況 (拡大率 50 倍)
Crack and through hole on chamber wall

伴って破孔に至るものと思われる。

5. 結 言

煉瓦および煉瓦積み構造の操業に伴う損傷予測と最適設計の実現に対して、数値構造解析技術の役割は非常に大きい。本論文では、既存の FEM の不連続体構造解析の限界より、不連続体ベースの解析手法として、まずは要素が剛体である RBSM を用いた極限解析による最終強度予測への、続いて要素の変形も扱える HPM を用いた煉瓦構造の剛性ならびに強度予測への取り組みの流れとその理論的背景を説明した。また、これら手法の実際問題への適用として、コークス炉の煉瓦構造タイプによる基本ブロックならびに炉壁の剛性と強度の特性への、さらには、縦貫通亀裂および破孔を対象としたメカニズムの解明への適用例を紹介した。

現在、HPM を主流としてより複雑な損傷現象やその対策としての最適煉瓦および煉瓦積み構造への適用が広がってきており、成果を上げつつある。残された課題として、圧潰や大変形問題への適用拡大、活用の利便性を上げるためのユーザーインターフェースの開発があり、その具現化に向けさらに発展させていく予定である。

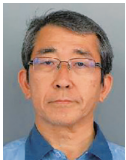
参考文献

- 1) Ngo, D., Scordelis, A.C.: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams. *ACI Journal*. (64-14), 152-163 (1967)
- 2) Goodman, E.R., Taylor, L.R., Brekke, L.T.: A Model for the Mechanics of Jointed Rock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proceeding of the ASCE*, 1968, p. 662-685
- 3) Kawai, T.: New Element Models in Discrete Structural Analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. (141), 187-193 (1977)
- 4) Kikuchi, A., Kawai, T., Suzuki, N.: The Rigid Bodies Spring

Model and Their Applications to Three-dimensional Crack Problems. *Computer & Structures*. 44 (1/2), 469-480 (1992)

- 5) Takihara, T., Uchida, H., Kikuchi, A., Toi, U.: Numerical Simulation of Nonlinear Behaviors of Three-Dimensional Block Structures. *Journal of JSME*. (1), 53-54 (1995)
- 6) 山村和人, 後藤潔, 菊地 麗: 剛体ばねモデルを用いた煉瓦構造の解析. *耐火物*. 56 (9), 435-440 (2004)
- 7) 山村和人: 固体力学分野における CAE の活用～不連続体解析を中心として～. *耐火物*. 62 (9), 471-480 (2010)
- 8) Washizu, K: *Variational Methods in Elasticity and Plasticity*. Pergamon, 1975
- 9) 鷲津久一郎: *弾性学の変分原理概論*. 日本鋼構造協会編, 培風館, 1972
- 10) 竹内則雄, 草深守人, 武田洋, 佐藤一雄, 川井忠彦: ペナルティを用いたハイブリッド型モデルによる離散化極限解析. *土木学会構造工学論文集*. (46A), 261-270 (2000)
- 11) 竹内則雄, 大木裕久, 上林厚志, 草深守人: ハイブリッド型変位モデルにペナルティ法を適応した離散化モデルによる材料非線形解析. *日本計算工学会論文集 (Transactions of JSCES Paper No.20010002)*. 3, 53-62 (2001)
- 12) 矢野一久, 田尻康之, 山村和人, 竹内則雄: HPM による熱伝導及び熱応力解析. *計算工学講演論文集*. 15 (2), 513-516 (2010)
- 13) 大木裕久, 竹内則雄: ハイブリッド型ペナルティ法による上下界解析. *日本計算工学会論文集 (Transactions of JSCES Paper No.20060020)*. 1-10 (2006)
- 14) 山村和人, 松崎真六, 藤健彦, 山田亘, 中川淳一: 鉄鋼業の基盤としての数値科学. *新日鉄技報*. (391), 143-152 (2011)
- 15) Kawai, T.: My Challenge in the Development of a Mixed Variational Method in Solid Mechanics. *Applied Mechanics Reviews, Transaction of the ASME*. (60), 51-64 (2007)
- 16) Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive,

- Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics. 1, Paper No. II-1, 1971, p. 129-136
- 17) Shi, G.H., Goodman, R.E.: Generalization of Two-dimensional Discontinuous Deformation Analysis for Forward Modeling. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 13, 359-380 (1989)
- 18) Shi, G.H.: Manifold Method of Material Analysis. Trans. 9th Army Conf. on Appl. Math. and Comp. Rep. No. 92-1., U.S. Army Res. Office, 1991
- 19) Lucy, L.B.: A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis. The Astronomical Journal. 82 (12), 1013-1024 (1977)
- 20) Koshizuka, S., Oka, Y.: Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. Nucl. Sci. Eng. (123), 421-434 (1996)
- 21) Libersky, L.D., Petschek, A.G., Carney, T.C., Hipp, J.R., Allahdadi, F.A.: High Strain Lagrangian Hydrodynamics—A Three-Dimensional SPH Code for Dynamic Material Response—. J. Comput. Phys. (109), 67-75 (1993)
- 22) Koshizuka, S., Chikazawa, Y., Oka, Y.: Particle Method for Fluid and Solid Dynamics. Computational Fluid and Solid Mechanics. (2), 1269-1271 (2001)
- 23) Onate, E., Idelsohn, S.R., Celigueta, M.A., Rossi, R.: Advances in the Particle Finite Element Method for the Analysis of Fluid-multiphase Interaction and Bed Erosion in Free Surface Flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 197, 1777-1800 (2008)
- 24) 竹内則雄, 田尻康之, 山村和人: 剛体ばねモデルによる要素内応力の評価法について. 法政大学情報メディア教育研究センター研究報告. 22, 7-14 (2009)
- 25) 田尻康之, 山村和人, 竹内則雄: ハイブリッド型仮想仕事の原理を用いたRBSMの要素内応力の評価. 計算工学講演会論文集. 14 (2), 691-694 (2009)
- 26) 田尻康之, 山村和人, 竹内則雄: ハイブリッド型仮想仕事の原理による修正RBSMの開発. 構造工学論文集. 56A, 169-178 (2010)
- 27) 栗田勝, 田尻康之, 山村和人, 竹内則雄: 修正RBSMによる離散化極限解析. 計算工学講演論文集. 15 (2), 501-504 (2010)
- 28) Yamada, Y., Yoshimura, N., Sakurai, T.: Plastic Stress-strain Matrix and Its Application for the Solution of Elastic-plastic Problems by Finite Element Method. Int. J. Mechanical Science. 10, 323-354 (1968)
- 29) 竹内則雄: 地盤力学における離散化極限解析. 培風館, 1991
- 30) 境田道隆, 阿波靖彦, 杉浦雅人, 中嶋淳, 中村功, 笠井清人, 野口敏彦, 塚本義則: コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置の開発. 新日鉄技報. (384), 63-68 (2006)
- 31) 笠井清人, 筒井康志: 最近のコークス炉用耐火物技術について. 新日鉄技報. (388), 54-61 (2008)
- 32) 小林信太郎, 中嶋淳: コークス炉炭化室炉壁補修装置の開発. 新日鉄住金技報. (402), 45-50 (2015)



山村和人 Kazuto YAMAMURA
プロセス研究所 プロセス研究部
上席主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



田尻康之 Yasuyuki TAJIRI
日鉄住金テクノロジー(株)
八幡事業所 TACセンター
主幹 工学博士



竹内則雄 Norio TAKEUCHI
法政大学
デザイン工学部 システムデザイン学科
教授 工学博士