

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03835

研究課題名(和文)粗骨材粒を含む多孔質耐火れんがの構造モデル化と非線形変形挙動解析に関する研究

研究課題名(英文) Study on structural modeling and nonlinear deformation behavior analysis of porous refractory bricks including coarse-grained aggregate

研究代表者

坂井田 喜久 (Sakaida, Yoshihisa)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：10334955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、粗骨材粒を含むマグネシア・スピネル質れんがを用い、曲げ荷重や単軸の圧縮荷重を負荷/除荷してれんがの荷重-ひずみ線図を測定した。実験の結果、この材料の変形挙動は、弾性ヒステリシスを示し、負荷速度や除荷速度に依存しないことがわかった。そこで、本研究では、弾性ヒステリシスを質点の力学を基礎としたばね要素と粘性要素による構造モデル化を試みた。その結果、粗骨材粒を含む多孔質れんがの変形挙動は、ばね要素と構造粘性要素のフォークトモデルで表現できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

焼成炉に用いるマグネシア・スピネル質れんがは、1から5mmの粗骨材粒を中粒と細粒に加えて焼き固めることで収縮率を抑え、脱着し難い耐スポーリング性の高い機能性れんがを提供し、炉の安全を担保してきた。その一方で、粗骨材粒の混合比を増すと健全性が増すとともに、非線形な変形挙動を示すようになるが、なぜ非線形な変形挙動を示すか不明であった。この研究で、れんがの実際の変形特性を定量的に把握し、ばね要素と構造粘性要素のフォークトモデルで特異な変形挙動を表現できることが判明した。今後、れんがの健全性をより向上させ得る“組織構造”の提案につなげることで、科研費で得た知見を社会に還元できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, porous refractory magnesia-spinel bricks including coarse-grained aggregate were used. The load-strain curves during loading and unloading were measured by 4-point bending and uniaxial compressing. The deformation behavior of this material showed an elastic hysteresis. The elastic hysteresis was found to be independent on both loading and unloading speed. The elastic hysteresis was examined by structural modeling using spring and viscous elements based on particle dynamics. It was concluded that the deformation behavior of porous bricks including coarse-grained aggregate could be expressed by the Voigt model with elastic spring and structural viscous elements.

研究分野：材料強度学

キーワード：多孔質耐火れんが 粗骨材粒 弾性ヒステリシス 非線形変形 構造粘性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

セメント焼成炉等に用いる耐火れんがにマグネシア・スピネル質れんががある。このれんがは、マグネシアとスピネルの多結晶体を砕いてふるい分けし、粒径 1~5mm に破碎した粗骨材粒と、それ以下の粒径の中粒と細粒を加えて焼き固めたもので、図 1 のように、粗骨材粒を加えることで収縮率を抑え、脱着し難い耐スポーリング性の高い機能性れんがを提供し、炉の安全を担保している。

一方、粗骨材粒を含むれんがに荷重を加えると、セラミックスのみで構成された材料であるにもかかわらず、線形弾性体に現れる線形域が全くなく、すぐに非線形な変形挙動を示す。すぐに非線形な変形が起こる理由は不明で、力学評価や設計が難しいれんがである。

### 2. 研究の目的

本研究は、供試れんがに荷重を負荷し、荷重に対するひずみ変化から非線形な変形挙動を定量的に把握する。ついで、その変形特性と組織構造の特徴から供試れんがの構造モデルを検討し、非線形な変形挙動を表現可能な力学モデルを構築することが目的である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試験片の作製

供試れんがの荷重 - ひずみ線図を実験的に明らかにするため、曲げ試験片と圧縮試験片を作製した。このとき、粗骨材の平均粒径は 2.6mm であることを考慮し、幅 40mm、厚さ 30mm の断面積を持ち、図 2 (a) に示す長さ 200mm の曲げ試験片と図 2 (b) に示す長さ 100mm の圧縮試験片をそれぞれ切り出した。また、走査型電子顕微鏡下で圧縮試験を行うため、幅 44mm、厚さ 9mm の断面積を持ち、図 2 (c) に示す長さ 21mm の小形圧縮試験片を切り出した。なお、図 (a) の曲げ試験片の上下面と、圧縮試験片の 4 側面の中央長手方向に、ゲージ長 30mm の抵抗線ひずみゲージを貼付け、れんが全体の平均ひずみを計測した。

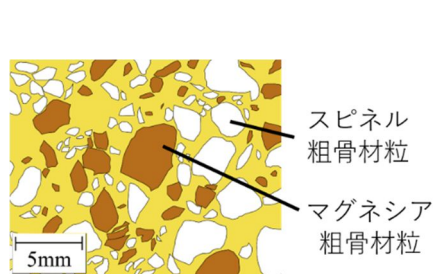


図 1 組織構造

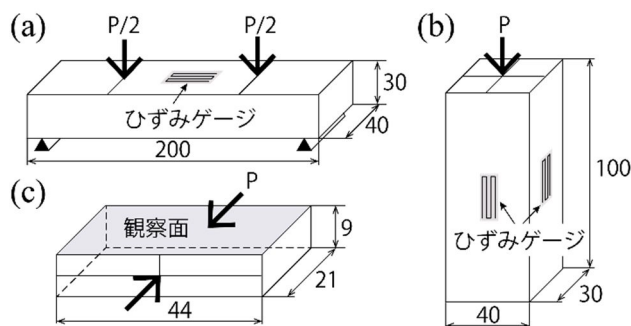


図 2 試験片

#### (2) 弾性特性の把握

供試れんがは、曲げや圧縮荷重を負荷すると、線形域が全くなく、すぐに非線形な変形を起こす。そこで、荷重を負荷する前と再負荷の前に共鳴振動法などの動弾性率測定法により、動ヤング率を測定した。次に、実験で得た荷重 - ひずみ線図から、荷重負荷開始時の初期接線を求め、その傾きから機械的ヤング率を算出した。また、砕く前のマグネシアとスピネルの多結晶から粗骨材粒と同等とみなせる平板試験片を切り出し、縦波振動子と横波振動子を用いて、粗骨材粒の動ヤング率を測定した。

#### (3) 荷重 - ひずみ線図と荷重速度依存性の把握

曲げ試験片に 4 点曲げ荷重を負荷し、れんが全体の曲げによる変形挙動を把握した。ついで、圧縮試験片に一軸荷重を負荷し、れんが全体の圧縮による変形挙動を把握した。また、試験片表面から代表的なマグネシアとスピネルの粗骨材粒を抽出し、粗骨材粒の表面にゲージ長 0.2mm の抵抗線ひずみゲージを貼付け、粗骨材粒の局所ひずみを計測した。

さらに、試験片に負荷 / 除荷する荷重速度を変化させ、荷重 - ひずみ線図が荷重速度に依存するか否か調べた。

#### (4) 構造モデルの提案と運動方程式の定式化

供試れんがの特異な変形挙動を力学的に表現できる構造モデルについて検討し、上記 (3) の実験で得た荷重 - ひずみ線図から、ばね要素と減衰要素の複合モデルの形を提案した。ついで、提案する複合モデルの運動方程式を導き、特異な変形挙動の定式化を試みた。また、荷重に対する減衰係数の変化から、供試れんがの変形挙動の特徴について考察を加えた。

#### (5) 非線形挙動を発生する構造因子の抽出

供試れんがの特異な非線形挙動の主な発生因子は、粗骨材粒の存在にあることは明らかである。そこで、走査型電子顕微鏡下で図2(c)の圧縮試験片に一軸荷重を負荷/除荷し、粗骨材粒とその界面を中心に顕微鏡観察し、構造因子の抽出を試みた。

#### (6) 変形時の粗骨材粒が担う平均応力の測定と妥当性の検証

荷重-ひずみ線図に及ぼす粗骨材粒の影響を明らかにする目的で、圧縮試験片の4側面からマグネシアとスピネルの粗骨材粒をそれぞれ100個任意に抽出し、負荷/除荷時に粗骨材粒が担う平均応力をX線応力測定法により実測する手法を開発した。採用したX線応力測定法は、単一入射したX線のデバイ・シェラー環を計測して応力を測るcos法である。

また、粗骨材粒の応力場を有限要素解析し、れんが全体の変形と骨材粒が担う平均応力の関係について妥当性を検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 供試れんがの弾性特性

共鳴振動法により求めたれんが全体の動ヤング率は38GPaで、荷重-ひずみ線図の原点での初期接線から求めた機械的ヤング率と良く一致した。また、マグネシアとスピネルの多結晶体から切出した平板試験片から超音波パルス法により求めた動ヤング率は、それぞれ275GPa、295GPaであることがわかった。あわせて、多孔質母材の動ヤング率を複合則から導いた結果、24GPaであることがわかった。

#### (2) 供試材の荷重-ひずみ線図と荷重速度依存性の有無

曲げ試験片の荷重-ひずみ線図は、荷重中の増加とともに直ぐに初期接線から逸脱し、上に凸の非線形挙動を示した。また、引張側のひずみが常に圧縮側よりひずむ傾向があること、ある荷重レベルまでは、負荷/除荷を繰り返しても荷重ひずみ関係は可逆的で、弾性ヒステリシスを示すことが明らかとなった。一方、れんが全体のひずみに対するマグネシアとスピネルの両粗骨材粒のひずみの比を測定した結果、負荷の開始時は引張側、圧縮側ともに一定であるが、荷重の増加とともに、引張側では単調減少に対し、圧縮側では単調減少後、ある荷重レベルを超えると一定値に漸近する傾向があり、引張側と圧縮側の非線形挙動に差が生じ、曲げ試験では、荷重が増加すると中立軸がずれていくことが判明した。次に、圧縮試験片の荷重-ひずみ線図を測定した。その結果、れんが全体の荷重-ひずみ線図は、ほぼ曲げと同様の変化を示し、圧縮では曲げで起こる中立軸のずれの影響がないことから、非線形挙動の定式化に適していることがわかった。

次に、圧縮試験片に負荷する最大荷重 $P_{max}$ を3, 4, 5kNの3条件とし、荷重の負荷および除荷時の荷重速度を75, 750, 7500mN/sの3レベルで大きく変化させたときの荷重-ひずみ線図を測定し、荷重-ひずみ線図の荷重速度依存性を調べた。測定結果の一例を図3に示す。その結果、図3の例が示すように、荷重レベルと荷重速度の両方を大きく変化させても、荷重-ひずみ線図は良く重なることがわかった。

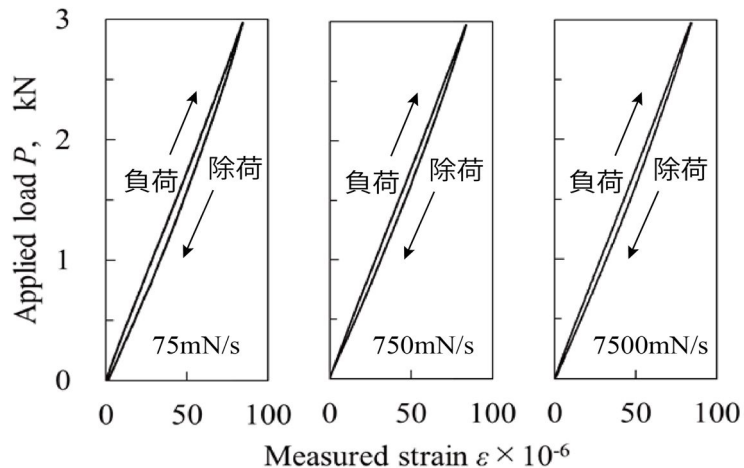


図3 荷重速度依存性

#### (3) 構造モデルの決定と

##### 供試れんがの運動方程式

本研究では、荷重-ひずみ線図に荷重速度依存性がないことから粘性減衰ではなく、構造粘性による粘性要素を採用し、ばね要素と構造粘性要素の直列または並列の複合モデルを検討した。その結果、ばね要素と構造粘性要素が並列のフォークトモデルによる運動方程式が弾性ヒステリシスを表現するのに適していることがわかった。あわせて、れんがに加える最大荷重が増すとれんがの構造が変化して力学モデルに含まれる構造粘性のばね定数 $ik'$ が変化することがわかった。

#### (4) 非線形挙動を発生する構造

電子顕微鏡下で圧縮試験を行い、マグネシアとスピネルの粗骨材粒の同種と異種の界面に存在する潜在空隙に着目し、マクロな荷重に対する変形挙動をその場測定した。その結果、同種と異種の組み合わせに対し、その変形量は負荷時に比べて除荷時が小さく、れんが全体の荷重-ひずみ線図と同様の弾性ヒステリシスを示すことがわかった。また、変形量の絶対値は、異種の方

が明らかに大きいことが判明したが、電子顕微鏡下での定量評価は難しいことがわかった。

#### (5) 粗骨材粒が担う平均応力の変化とその変化の検証

供試れんがは、8MPa 以下の低荷重域の範囲で荷重を負荷すると、一定の割線弾性率を持つ弾性ヒステリシスを示すことがわかった。一方、側面に位置する粗骨材粒の材質は、粒子の色とそのX線回折パターンから容易に判別できる。

本研究では、圧縮試験片の側面から選択した100個の粗骨材粒に対し、cos 法によりX線を照射し、個々の粗骨材粒から得たデバイ・シェラー環を材質毎に積算し、平均応力を算出する手法を開発した。図4は、圧縮試験片の4側面から抽出した合計100個のスピネルの粗骨材粒から計測したデバイ・シェラー環を積算した結果を示す。個々の粗骨材粒から計測したデバイ・シェラー環は、十分な連続環とはいえないが、合計100個の粗骨材粒から計測したデバイ・シェラー環を積算すると、図のように回折に預かる結晶粒が増し、連続環を形成していることが良くわかる。また、このデバイ・シェラー環から作図した  $\varepsilon_{\alpha 1} - \cos\alpha$  線図を図5に示す。図の  $\varepsilon_{\alpha 1} - \cos\alpha$  線図の傾きに応力定数を掛け合わせれば、平均応力が求まるが、本研究で開発した粗骨材粒に特化したX線応力測定法により、スピネルの粗骨材粒が担う平均応力が十分な精度で計測できるようにすることができた。

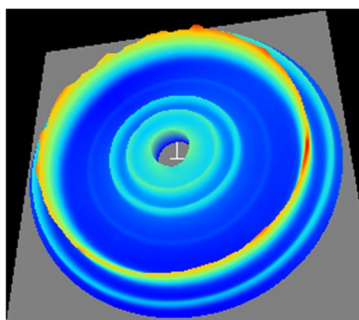


図4 スピネルの粗骨材粒のデバイ・シェラー環

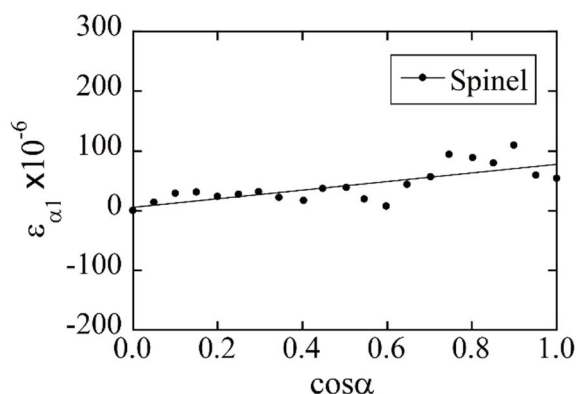


図5 スピネルの粗骨材粒の cos 線図

ついで、開発した手法により、粗骨材粒が負荷時と除荷時に担う平均応力を算出し、れんが全体の变形挙動に対する骨材粒が担うひずみと平均応力について考察を加えた。その結果、供試れんがに含まれるスピネルの粗骨材粒には、初期残留応力として圧縮残留応力が働いていること、れんが全体に圧縮荷重が負荷されると、スピネルの粗骨材粒の平均応力が引張側にシフトすること、さらに、負荷時と除荷時の平均応力に差があることが初めて明らかになった。

そこで、上記(4)で得た知見から、マグネシアとスピネルの異種の粗骨材粒の間に潜在する空隙を持つ2粒子の3次元接触モデルを作成し、有限要素法解析した結果、圧縮荷重下でスピネル骨材粒の空隙周り側面に引張応力が発生し、実験結果が妥当であることを示した。

以上、3年間の研究で、マグネシアとスピネルの粗骨材粒を含む供試れんがに荷重が負荷または除荷されると、主に異種の骨材粒子間に存在する潜在空隙の变形により弾性ヒステリシスが生じ、その挙動は構造粘性で定式化できることを明らかにした。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 柳川諒, 坂井田喜久, 尾関文仁
2. 発表標題 マグネシア・スピネル質れんがの構造モデル化と圧縮変形挙動の解析
3. 学会等名 日本材料学会東海支部第14回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳川諒, 坂井田喜久, 最上壮太郎, 尾関文仁
2. 発表標題 骨材を含む耐火れんがの弾性ヒステリシス挙動における骨材の分担応力測定
3. 学会等名 日本材料学会第54回X線材料強度に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 最上壮太郎, 坂井田喜久, 柳川諒, 尾関文仁
2. 発表標題 耐火れんがの弾性ヒステリシスと骨材応力との関係評価
3. 学会等名 日本材料学会東海支部第15回学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	柳川 諒  (Yanagawa Ryo)	静岡大学・大学院	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	最上 壮太郎  (Mogami Sotaro)	静岡大学・工学部	
研究協力者	尾関 文仁  (Ozeki Humihito)	美濃窯業	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関