

# コークス破壊現象への剛体ばねモデルを用いた解析の適用

尾形 知輝\*・上岡 健太\*・林崎 秀幸\*・松下 洋介\*<sup>2</sup>・青木 秀之\*<sup>2</sup>  
三浦 隆利\*<sup>2</sup>・福田 耕一\*<sup>3</sup>・松平 寛司\*<sup>4</sup>

Analysis of Fracture Behavior in Metallurgical Coke Using Rigid Bodies-Spring Model

Tomoki OGATA, Kenta UEOKA, Hideyuki HAYASHIZAKI, Yohsuke MATSUSHITA, Hideyuki AOKI,  
Takatoshi MIURA, Koichi FUKUDA and Kanji MATSUDAIRA

**Synopsis :** In this study, fracture behavior of coke is investigated using 4-point bending tests and numerical analyses of Rigid Bodies-Spring Model.

In 4-point bending tests, it is shown that the fracture behavior of coke is brittle fracture. The fracture occurs at the middle of the bottom face of the coke specimen and a crack propagates vertically upwards. Finally, the coke specimen collapses with the powder.

The fracture analyses using RBSM (Rigid Bodies-Spring Model) assuming 4-point bending tests were carried out for two cases in order to investigate the effect of existence of pores on fracture behavior of coke. In case 1, pores are not arranged in the analytical object and the effect of pores is considered by a decrease in the macro material constants. In case 2, the effect of pores is considered by arranging pores in the analytical object. Analytical results of case 2 reproduce the fracture behavior better than those of case 1. In addition, varying the inner structure and input data such as elastic modulus, yield criterion and so on, leads to improve the precision of fracture analyses of coke.

**Key words :** RBSM (Rigid Bodies-Spring Model); fracture; pore; 4-point bending tests; coke.

## 1. 緒言

高炉内におけるコークスの役割の中で最も重要であるのが、炉内の通気・通液性を維持するためのスペーサーとしての機能である。また、製鉄プロセスにおいて高炉の大型化、生産性の向上および燃料比の低下が要望されており、コークスの強度は非常に重要な品質特性となっている。

近年、中国の経済成長に伴い、世界での鉄需要は急激に増加しており、原料となる資源が大量に消費されることで、原燃料の価格高騰および資源の枯渇が大きな問題となっている。これらの問題を解決するためには、埋蔵量が豊富で安価な非微粘結炭を多量に配合しつつ、コークスの強度を保つ技術を確立する必要がある。それにはコークス破壊現象の解明を通じて、コークスの強度を低下させる因子を特定し、高強度コークスとなり得る構造に造りこむことが必要となる。

コークスの破壊に関する既往の研究により、コークス中に存在する欠陥などの微視組織がコークスの破壊に大きく影響を及ぼすことが報告されている<sup>1)</sup>。しかしながら、従来のコークス評価法はドラム試験やタンブラー試験に代表される回転試験が主であり、それらの試験法は経験則に基

づく巨視的な評価であるため、コークス微視組織と破壊現象を関係付けるには不十分である。また、これまで各種材料強度試験がコークスにおいて行われてきたが、破壊現象そのものを捉えるべく検討した研究は僅少である。

近年、数値計算を用いて材料力学に基づいた理論的なコークス強度評価が行われており、コークス微視組織と破壊および強度との関係が明らかにされつつある。これまでのところ、コークスの強度および破壊解析は連続体力学に基づいた解析が主として行われている<sup>2,3)</sup>。一般に、物体の破壊現象は、剥離、すべり、亀裂の発生および進展など様々な破壊因子が存在するため、様々な現象が同時に進行している。特にコークスなどの多孔質複合材料は、物体内部に元々存在していた亀裂や気孔、異種材料間の界面などで発生する応力が干渉し合うため、破壊過程は非常に複雑な様相を示す。そのため、破壊現象を把握するためには、物体内部に存在する微視組織やそれらの構造を考慮することはもとより、発生した亀裂などをも考慮して解析を行うことが必要であり、それには連続体力学を用いた解析ではなく、不連続体の解析に適した手法を導入し、破壊解析を行う必要がある。近年、Kawai<sup>4)</sup>によって開発された剛体ばねモデル (Rigid Bodies-Spring Model, RBSM) を用いてモ

平成 19 年 6 月 11 日受付 平成 19 年 9 月 12 日受理 (Received on June 11, 2007; Accepted on Sep. 12, 2007)

\* 東北大学大学院生 (Graduate Student, Tohoku University, 6-6-07 Aoba Aramaki Aoba-ku Sendai 980-8579)

\* 2 東北大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tohoku University)

\* 3 新日本製鐵 (株) 環境・プロセス研究開発センター (Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Corp.)

\* 4 関西熱化学 (株) 研究開発センター (Research and Development Center, Kansai Coke & Chemicals Corp., Ltd.)

ルタル、コンクリート、多結晶体などを対象とした破壊解析が行われ、複雑な破壊現象を解析により解明しようと、多方面において研究が進められている。

本研究では、実験的アプローチとして均一な曲げモーメント状態により破壊発生状況を観察しやすいと考えられる四点曲げ試験を行い、ハイスピードカメラを用いてコークスの破壊挙動を観察した。さらに、解析的アプローチとしてRBSMをコークスに適用し、破壊現象を再現することを試みた。

## 2. 四点曲げ試験

### 2.1 測定方法および測定試料

Fig. 1に四点曲げ試験の概略図を示す。試験には万能試験機（島津製S-100-C）を用い、初期クロスヘッド速度を約40 μm/secとし、試験片底面の中央部に取り付けたクロスタイプ歪みゲージにより歪みを測定した。また、四点曲げ試験中にハイスピードカメラ（株）朋栄VFC-1000SB）にて破壊現象の観察を行った。降伏応力  $\sigma_f$  は次式により算出した。

$$\sigma_f = \frac{3(L_1 - L_2)}{2bH^2} W_{\max} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $L_1$  および  $L_2$  は支点間および荷重点間の距離、 $b$  および  $H$  は試験片の奥行き幅および高さ、 $W_{\max}$  は最大荷重である。

Table 1に試料の乾留条件を示す。原料炭を乾留して得た塊コークス胴部から長さ60~70 mm、奥行き幅  $b_1$  および高さ  $H$  15~20 mmとなるように炭化室の伝熱方向と試料長さ方向 ( $L_1$  方向) が一致するように試験片を切り出した。さらに、試験片を目視によりそれぞれマクロ亀裂が存在する

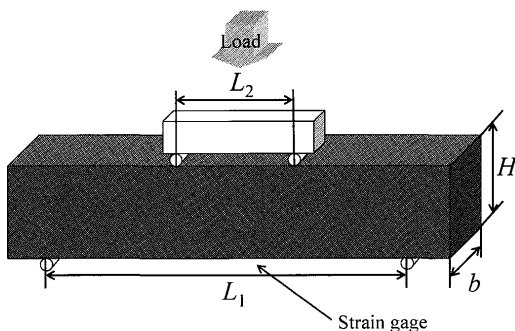


Fig. 1. Schematic diagram of 4-point bending tests.

Table 1. Coking conditions of samples.

Coal	Goonyella, Enshu
Grain size	-3 mm
Moisture	5 wt%
Bulk density of coal charge	0.8 t/m <sup>3</sup>
Coking time	18.5 h

ものとししないものに分別した。

### 2.2 結果および考察

#### 2.2.1 歪み-荷重曲線および降伏応力

Fig. 2に四点曲げ試験で得られたグニエラ炭コークスにおける歪み-荷重曲線の一例を示す。最大荷重に達した後、降伏後においても歪みが増加しているのは、歪みゲージを設置した点で破壊が生じ、歪みゲージが破断したためである。変形初期においては、変位と荷重は直線な関係を示しており、弾性変形領域であることがわかる。さらに荷重を加えていくと、直線関係から逸脱し塑性変形領域へと移行し、その後急激にひずみが増加し、速やかにコークスは破断する。この結果から、コークスは一般的な脆性材料と同様に、降伏直前まで弾性挙動を示し、顕著な塑性変形は示さないことが確認できた。

Table 2に測定した降伏応力およびポアソン比を示す。降伏応力の値は、グニエラ炭コークスおよびエンシュウ炭コークスにおいてマクロ亀裂を含まないものは、それぞれ25回、5回、マクロ亀裂を含むものはそれぞれ10回、1回の測定を行い、平均した値である。ポアソン比の値は、グニエラ炭コークスおよびエンシュウ炭コークスにおいてマクロ亀裂が存在しない試料についてそれぞれ5回、2回の測定を行い、平均した値である。マクロ亀裂を含む試料の降伏応力は、含まない試料の降伏応力と比較して、2/5程度まで低下する結果となった。この結果は、コークスの破壊現象には、マクロ亀裂が非常に大きな影響を及ぼしていることを示唆している。また、ポアソン比の値を比較すると、エンシュウ炭コークスの方がグニエラ炭コークスよりも若干大きい程度で、大きな差異は見られなかった。

#### 2.2.2 破壊現象の観察

Fig. 3にハイスピードカメラを用いて、1秒間当たりの

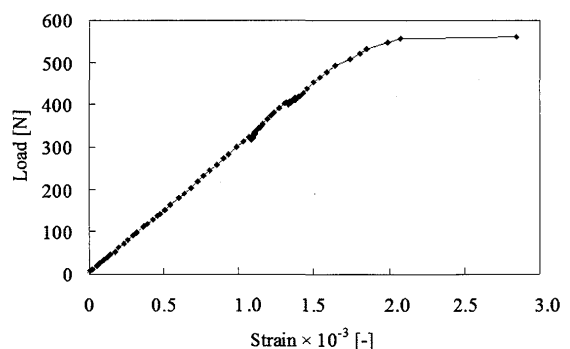


Fig. 2. Strain-load curve of Goonyella coke.

Table 2. Yield stress Poisson's ratio of coke with and without macro crack.

Samples	Yield stress [MPa]	Poisson's ratio [-]
Goonyella coke without macro crack	4.22	0.19
Goonyella coke with macro crack	1.71	-
Enshu coke without macro crack	4.70	0.22
Enshu coke with macro crack	1.52	-

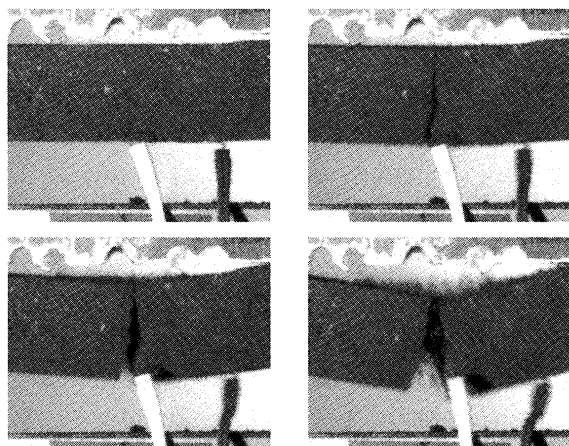


Fig. 3. Images of 4-point bending tests for Goonyella coke by high-speed video camera.

フレーム数を 1000 fps として撮影したグニエラ炭コークスの降伏時の様子の一例を示す。底面の引張応力が最大となる点で破壊が発生し、上面へと進展している様子が確認できた。また、破壊の進展経路は底面から垂直上方へとほぼ直線状であった。特徴的な現象として、破壊と同時に粉が発生していることがわかった。

コークスは内部構造が非常に不均質であるため、局部的に気孔壁が薄い領域が存在すると考えられる。また、コークス内部には大きな気孔が多数存在する上に、3次元的に見れば、そのほとんどが連結しており、変形や歪みに対する抵抗が小さいため、大きな変形や歪みを生じ易く、マクロな破壊の発生に伴い、気孔壁の破壊が生じ、粉が発生したと推察できる。この現象は、高炉内での粉化挙動を考える際にも非常に重要な現象である。

### 3. RBSM を用いたコークス破壊解析

#### 3.1 剛体ばねモデル (Rigid Bodies-Spring Model, RBSM)

本解析では、Kawai<sup>4)</sup>により提案された剛体ばねモデル (Rigid Bodies-Spring Model) を用いた。ここでは簡単に解析手法を説明する。Fig. 4 に RBSM における物体の変形前後の要素位置について示す。RBSM では、要素自体を剛体と仮定し、要素境界上に垂直およびせん断方向の相対変位に抵抗するばねを設け、各々の要素間に蓄えられるエネルギーを評価する。そのため、物体の変形は要素の平行移動と回転にて表現する。ばねモデルに基づく力学において、力  $P$  と変位  $\delta$  の関係は、ばね定数  $k$  を用いて  $P = k \cdot \delta$  と表されるが、RBSM でも同様に、相対変位  $\delta = (\delta_n, \delta_s)$  と、単位面積あたりの表面力  $\sigma = (\sigma_n, \tau_s)$  との間に以下の関係が成立しているものと仮定する。

$$\sigma = \mathbf{D} \cdot \delta \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $\mathbf{D}$  はばね係数行列であり、弾性領域においては次式により表される。

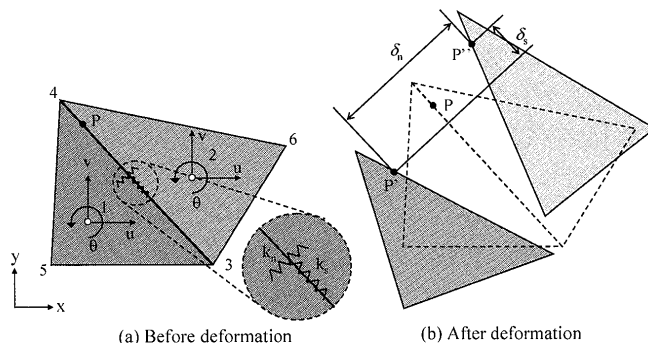


Fig. 4. Element positions before and after deformation.

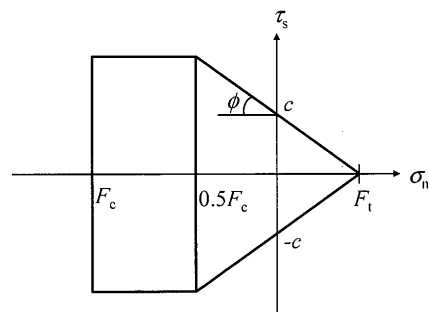


Fig. 5. Mohr-Coulomb criterion.

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $k_n$  および  $k_s$  は要素境界面上における垂直およびせん断方向の相対変位に抵抗するばね定数である。平面応力状態を仮定した場合、ばね定数は弾性係数  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  および重心から要素境界に下ろした垂線の長さの和  $h$  を用いて以下のように表すことができる。

$$k_n = \frac{E}{(1-\nu^2)h} \dots\dots\dots (4)$$

$$k_s = \frac{E}{(1-\nu)h}$$

以上の関係と仮想仕事の原理から、要素内に設定した変位をパラメータとして全体剛性方程式を構築する。

RBSM のような破壊解析の場合、破壊が発生するかを判定する必要がある。Fig. 5 に本解析において破壊規準として用いたモール・クーロンの条件を示す。ここで、図中の  $\sigma_n$  および  $\tau_s$  は要素境界面上における単位面積当たりの垂直およびせん断方向の表面力であり、 $F_t$ 、 $F_c$ 、 $c$  および  $\phi$  はそれぞれ引張強度、圧縮強度、せん断強度および内部摩擦角である。弾性状態から引張方向に応力が働くと、 $F_t$  を超えると引張破壊が発生するとしている。また、圧縮方向に応力が働き、垂直応力が  $0.5F_c$  を超えた時点で圧縮1次降伏、 $F_c$  を超えた時点で圧縮2次降伏するとしている。せん断応力が増加し、モール・クーロンの降伏条件式を満たす時、せん断すべりが発生するとしている。

塑性後は竹内ら<sup>5)</sup>のモデルを参考に、ばね定数行列  $\mathbf{D}$  を低下させることにより剛性の低下を考慮する。塑性後のばね定数行列  $\mathbf{D}^{(p)}$  を次式で表す場合、主な破壊に対する塑性後のばね定数行列に関して示す。

$$\mathbf{D}^{(p)} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ \text{sym.} & d_{22} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

引張破壊が生じた場合の塑性後のばね定数行列を次式に示す。

$$\mathbf{D}^{(p)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.125k_s \end{pmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

垂直方向のばね定数を0とし、せん断方向のばね定数は Yuzugullu と Schnobrich<sup>6)</sup> が示した、初期せん断剛性の12.5%を用いることとする。

圧縮破壊が生じた場合の塑性後のばね定数行列を次式に示す。

$$\mathbf{D}^{(p)} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0.5k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{pmatrix} & (0.5F_c \leq \sigma_n < F_c) \\ \begin{pmatrix} 0.5k_n & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} & (\sigma_n \geq F_c) \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

圧縮破壊としては、破壊の状態により、圧縮1次降伏と圧縮2次降伏に区別する。圧縮1次降伏に達した場合は、垂直方向のばね剛性を1/2に低下させる。圧縮2次降伏に達した場合は、垂直方向のばね剛性を0とする。

せん断破壊が生じた場合、塑性理論に従う流れ則を仮定すると、塑性後のばね定数行列は次式で表される。

$$d_{11} = k_n - \frac{k_n^2 \{ (c - \sigma_n \tan \phi) \tan \phi \}^2}{k_s \tau_s^2 + k_n \{ (c - \sigma_n \tan \phi) \tan \phi \}^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$d_{12} = - \frac{k_n k_s \tau_s \{ (c - \sigma_n \tan \phi) \tan \phi \}}{k_s \tau_s^2 + k_n \{ (c - \sigma_n \tan \phi) \tan \phi \}^2} \dots\dots\dots (9)$$

$$d_2 = k_s - \frac{k_s^2 \tau_s^2}{k_s \tau_s^2 + k_n \{ (c - \sigma_n \tan \phi) \tan \phi \}^2} \dots\dots\dots (10)$$

### 3.2 解析対象および解析条件

四点曲げ試験を仮定した解析を行うにあたって、気孔の存在による剛性の低下が破壊解析に及ぼす影響を検討するため、2つのケースに分けて解析対象を作成した。Fig. 6に解析対象を示す。また、解析において与えた物性をTable 3に示す。

case 1 としては、解析対象内には気孔を配置せず、前節の四点曲げ試験において求めた物性を気孔込みのマクロ物性と仮定し、気孔の存在による剛性および降伏強度の低下の影響を物性のみで考慮したものである。弾性係数は、上岡ら<sup>7)</sup>が均質化法により算出した、気孔を等間隔に配置した場合の気孔率50%における均質化弾性係数の値を参考に10 GPaと仮定した。引張強度は四点曲げ試験の結果を

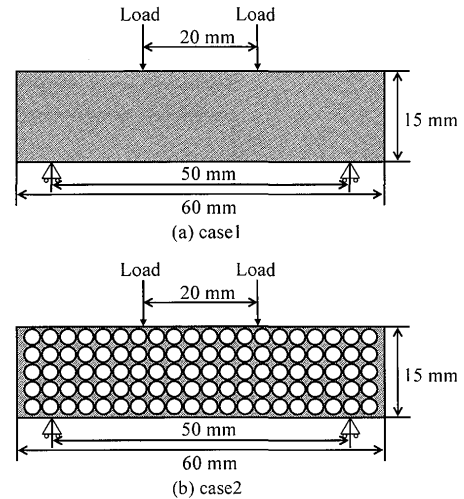


Fig. 6. Schematic diagram of analytical objects in case 1 and case 2.

Table 3. Material constants.<sup>7-11)</sup>

		case1	case2
Elastic modulus	[GPa]	10	27
Poisson's ratio	[-]	0.21	0.21
Tensile strength	[MPa]	5	20
Compressive strength	[MPa]	110	110
Share strength	[MPa]	3.5	14
Internal friction angle	[°]	35	35

参考に5 MPaとし、せん断強度は、引張強度および内部摩擦角から3.5 MPaと仮定した。

case 2 としては、解析領域内に内径約2.8 mmの円形気孔を等間隔に100個配置することで剛性および降伏強度の低下の影響を考慮したものである。この際、気孔率を約50%とした。弾性係数はナノインデンテーション法により測定した、コークス基質の活性成分由来の組織における値<sup>8)</sup>を参考に27 GPaとした。引張り強度を20 MPaと変更し、せん断強度は引張強度および内部摩擦角から14 MPaと仮定した。

両ケースにおいて、ポアソン比<sup>9)</sup>および圧縮強度<sup>10)</sup>は既往の研究結果および四点曲げ試験の測定結果を参考に0.21および110 MPaと仮定した。内部摩擦角はコークスにおいて得られていないためコンクリートのものを参考<sup>11)</sup>に35°と仮定した。

### 3.3 結果および考察

#### 3.3.1 破壊の様子

Fig. 7に解析により得られた四点曲げ試験時の破壊の様子を示す。図中の細線は塑性変形が生じている領域を表し、太線は破壊が生じている領域を表している。図中の数字が大きいほど、積載荷重が大きいことを意味する。Fig. 7(a)に示す case 1 における破壊の様子では、解析対象の底面中央付近から塑性変形が開始し、塑性領域が広がった後、破壊が発生、進展し、最大荷重付近においては支持部および荷重部でも若干の破壊が見られる。また、Fig. 7(b)に示す case 2 の破壊の様子においては、解析対象の楕円領域で示

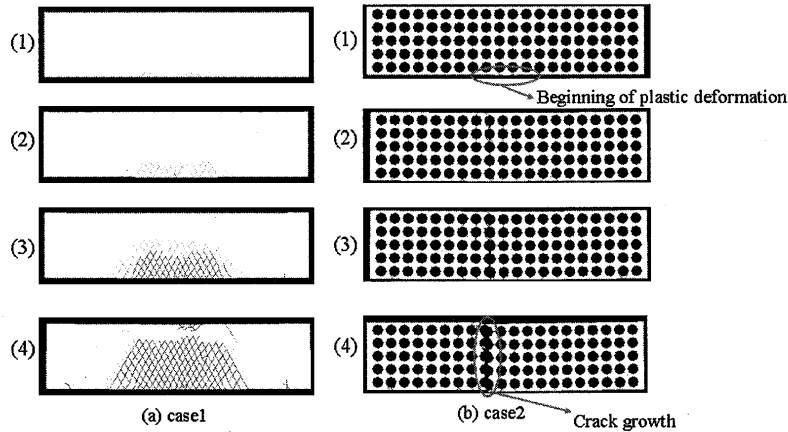


Fig. 7. Fracture appearances in case 1 and case 2.

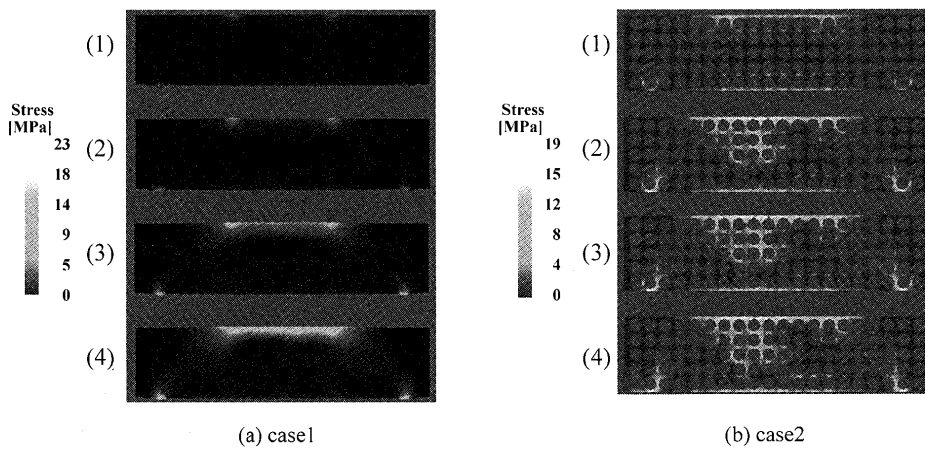


Fig. 8. Stress distributions in case 1 and case 2.

した底面中央付近から塑性変形が開始していることは、case 1の結果と同様である。しかしながら、塑性変形が進行し破壊が発生した後は、case 1で示された破壊が広い領域に進展するのではなく、楕円で示した垂直上方に破壊が進展し破断している。四点曲げ試験の実験結果と比較すると、case 2の場合、すなわち解析対象に気孔を配置した解析の方が、試験片の底面中央部から破壊が発生し、垂直上方に進展することで破断する実験結果を比較的良好に再現できている。

Fig. 8にこれらの結果に対応する応力分布を示す。Fig. 8はFig. 7の破壊状態にそれぞれ対応している。Fig. 8(a)に示すcase 1の応力分布においては、四点曲げの支持部および荷重部付近にて応力が集中していることがわかる。また、Fig. 8(b)に示すcase 2の応力分布においては、試験片の底面中央付近においても、大きな応力が生じていることが確認できるが、最大応力を示す領域は、case 1と同様に、試験片支持部および荷重部であった。これらの結果とFig. 7の破壊の様子から、最大応力を示す領域とは別の領域で塑性変形および破壊が発生していることがわかる。

一般に、緻密な構造体では、圧縮応力に対する強度が高く、破断は引張応力あるいはせん断応力によって生じるこ

とが知られている<sup>12)</sup>。本解析において最大応力を示す領域は、試験片の支持部および荷重部であり、それらの領域は圧縮応力が働く領域であるため破壊が発生しづらく、次に応力値の大きい試験片の底面中央部に生じるせん断または引張応力により破壊が発生したと考えられる。case 2はcase 1よりもコークス基質の弾性係数を2.7倍、引張り・せん断強度を4倍に大きく仮定しているが、破断にいたるまでの荷重の大きさはcase 1に比べて小さく、四点曲げ試験での耐力を良好に見積もっている。これはcase 2では気孔周辺に生じる応力集中を正確に考慮することができ、破断を引き起こす気孔間領域に生じる引張り応力を表現できたためである。測定結果と解析結果の比較から、コークス破壊現象を精度良く表現するには気孔構造を排除したcase 1のような解析対象ではなく、気孔構造を加味したcase 2のような解析対象を設けて解析を行う必要があることが示唆されている。

以上のことから、破壊および強度を検討する際には、曲げ試験などの引張、圧縮、せん断応力が複雑に発生する系においては、応力値のみならず、応力が働く方向とその方向に対する材料物性、強度を考慮することが必要であることが示された。

### 3.3.2 歪み-荷重曲線

Fig. 9に四点曲げ試験における歪み-荷重曲線の解析値とグニエラ炭コークスの実測値の比較を示す。case 1の結果は、塑性変形が開始した後も徐々に荷重は増加しており、脆性破壊の挙動とは異なっている。一方、case 2の結果は、塑性変形が開始すると、速やかに破断まで進行している様子が再現できている。最大荷重を比較してみてもcase 2は実験値と良好に一致しているが、case 1の方は塑性後の挙動が異なるため、過大に見積もっていることが示された。この結果から、コークスのように内部構造が複雑で、破壊挙動と密接に関連している場合は、均質な材料として扱うよりも、内部構造を考慮したメッシュ分割を行う方が実現現象を良好に再現することが示唆された。

次に、Fig. 9における弾性領域を比較すると、歪み-荷重曲線の傾きが大幅に実験結果と異なっていることがわかる。歪み-荷重曲線の傾きに最も影響を及ぼす因子は、解析対象に与える弾性係数であり、適切な弾性係数を与えることにより、解析により実測値を良好に再現することが可能である。単純に弾性係数を小さくすると、物体の剛性が小さくなることになり、降伏荷重は小さくなることが予想

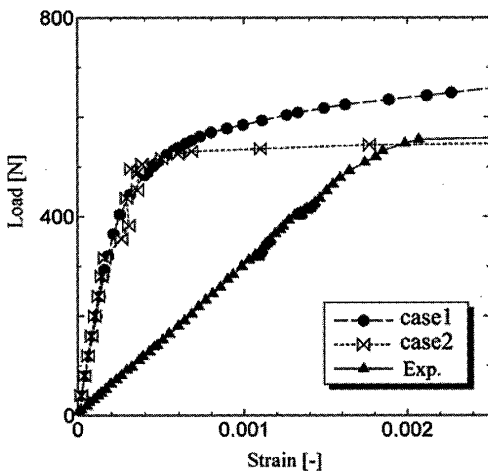


Fig. 9. Comparison of strain-load curve.

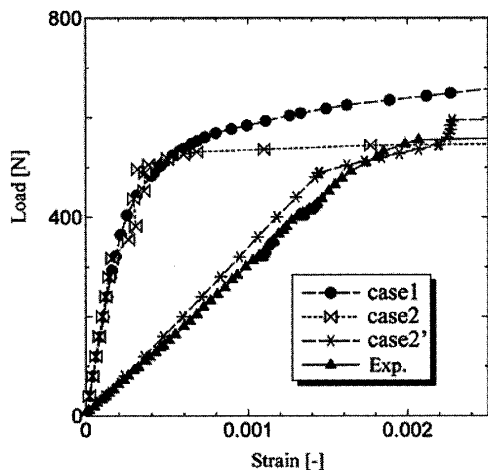


Fig. 10. Comparison of strain-load curve with case 2'.

される。そこで、case 2において弾性係数は0.6倍の値、生じる破壊のうち最も小さい荷重で発生している、せん断破壊に抵抗するせん断強度は1.5倍の値として与え、case 2'として解析を行った。Fig.10にcase 2'とともにFig. 9を再度示す。この図では、破断前の弾性・塑性変形領域の荷重とひずみの関係を精度良く表現することができたが、破断における耐力については良好に推算されておらず、今後は引張り・せん断強度、内部摩擦角といった破壊現象に関わるパラメータの決定が必要である。今後、気孔の形状および配置などのコークス内部構造のモデル化と、それに対応する物性の測定または算出が可能となれば、精度の良い解析が実現でき、破壊現象を詳細に解明することができると考える。

## 4. 結言

コークスの破壊現象を解明するために、四点曲げ試験を行い、破壊現象を観察するとともに、剛体ばねモデル (Rigid Bodies-Spring Model, RBSM)を用いた破壊解析によって破壊現象を再現することを試みた。

四点曲げ試験において、コークスは脆性破壊を示す破壊様式であることを確認した。また、破壊現象として、底面中央付近から破壊が生じ、垂直上方に進展し、破断することを確認した。さらに、破壊と同時に多量の粉が発生することを確認した。

気孔の存在による剛性の低下の影響が破壊解析に及ぼす影響を検討するため、四点曲げ試験を仮定した解析において、解析対象内に気孔を配置せず、物性にて剛性および降伏強度の低下を考慮した場合と気孔を配置することで剛性および降伏強度の低下を考慮した場合の解析を行い、実験結果との比較を行った。気孔を配置することで剛性および降伏強度の低下を考慮した解析の方が、試験片の底面中央部から破壊が発生し、垂直上方に進展することで破断する実験結果を良好に再現できた。また、四点曲げ試験のような応力状態が複雑な系を対象とする場合は、応力値のみならず、応力が働く方向とその方向に対する材料物性、強度を考慮することが必要であることが示された。歪み-荷重曲線に関しては、弾性係数およびせん断強度を変更することにより破断前の弾性・塑性変形領域の荷重とひずみの関係を精度良く表現することができることを示した。

今後、気孔の形状および配置などのコークス内部構造のモデル化と、それに対応する物性の測定、または算出が可能となれば、精度の良い解析が実現でき、破壊現象を詳細に解明することができると考える。

本研究成果は日本鉄鋼協会高強度・高反応性コークス製造技術研究会（主査：三浦孝一京都大学教授）に参画して得られたものである。本研究の遂行にあたり貴重なご意見をいただいた当研究会関係各位に深く感謝いたします。

## 記 号

$b$	: 試験片の奥行き幅 [m]
$c$	: せん断強度 [MPa]
$D$	: ばね定数行列 [MPa·m]
$D^{(p)}$	: 塑性変形後のばね定数行列 [MPa·m]
$d_{11}, d_{12}, d_{22}$	: 塑性変形後のばね定数行列成分 [MPa·m]
$E$	: 弾性係数 [GPa]
$F_c$	: 圧縮強度 [MPa]
$F_t$	: 引張り強度 [MPa]
$H$	: 試験片の高さ [m]
$h$	: 要素重心と要素境界の距離 [m]
$k$	: ばね定数 [MPa·m]
$L_1$	: 試験片の支点間距離 [m]
$L_2$	: 試験片の荷重点間距離 [m]
$\delta$	: 相対変位ベクトル [m]
$\phi$	: 内部摩擦角 [°]
$\nu$	: ポアソン比 [-]
$\sigma_f$	: 降伏応力 [MPa]
$\sigma_n$	: 垂直応力 [MPa]
$\tau_s$	: せん断応力 [MPa]
添え字	
$n$	: 垂直方向
$s$	: せん断方向

## 文 献

- 1) T.Arima: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 274.
- 2) Y.Asakuma, M.Soejima, T.Yamamoto, H.Aoki, T.Miura and S.Itagaki: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 685.
- 3) M.Soejima, Y.Asakuma, T.Mori, T.Yamamoto, H.Aoki, T.Miura, S.Tanioka and S.Itagaki: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 245.
- 4) T.Kawai: *J. Soc. Nav. Archit. Jpn.*, **141** (1977), 187.
- 5) 竹内則雄, 上林厚志, 亀頭宏明, 齊藤成彦, 富田光宏, 樋口晴紀: 鉄筋コンクリートの離散化極限解析法, 丸善株式会社, 東京, (2005).
- 6) O.Yuzugullu and W.C.Schnobrich: *ACI J.*, **7** (1976), 474.
- 7) K.Ueoka, T.Ogata, Y.Morozumi, H.Aoki, T.Miura, K.Uebo and K.Fukuda: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 184.
- 8) T.Ogata, K.Ueoka, Y.Morozumi, H.Aoki, T.Miura, K.Uebo and K.Fukuda: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 171.
- 9) M.Isobe, Y.Suzuki, M.Tachi and H.Kitagawa: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 307.
- 10) M.Sakai, R.Nishimura, M.Nishimura and K.Fukuda: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 164.
- 11) Y.Kosaka, Y.Tanigawa and F.Oota: *Trans. Archit. Inst. Jpn.*, **228** (1975), 1.
- 12) T.Akasawa: *Jpn. Soc. Civ. Eng.*, **29** (1943), 777.