

定形耐火物の機械的拘束下における耐熱衝撃性評価

Evaluation Method of Thermal Shock Resistance of Refractories under Mechanical Constraint

富田雄也*, 細木亮太**, 神尾英俊***, 後藤 潔****, 森川勝美*****

Yuya TOMITA*, Ryota HOSOGI**, Hidetoshi KAMIO***, Kiyoshi GOTO**** and Katsumi MORIKAWA*****

1 緒言

転炉やRH等で使用される内張り用の定形耐火物は、外周鉄皮等からの機械的拘束を受けた条件で使用されるため、拘束下で耐熱衝撃性を評価することが望ましい。しかし、定形耐火物の耐熱衝撃性は、溶銑浸漬試験や電気炉での加熱・冷却試験等で評価されることが多く¹⁾、これらの多くは非拘束下で実施されており、亀裂の発生時期も正確に把握することができない。

特にRHの下部槽側壁に広く使用されているマグクロレンがは、実機稼働時に稼働面に平行な亀裂(以下、平行亀裂と記述)が発生すると、耐火物の剥離に繋がり、損耗速度が急激に増加する。平行亀裂の原因として、スラグ浸潤の影響、機械的拘束による応力、熱衝撃などが考えられているが不明な部分が多い^{2,3)}。

そこで、本試験では機械的拘束が可能な熱衝撃試験装置と画像解析手法を用いて、マグクロレンがの熱衝撃試験を行い、亀裂の発生、進展の様子を観察し、物性との関係性を評価した。

2 試験方法

2・1 試験装置

熱衝撃試験は既報の装置⁴⁾を使用した。装置の概略図を図1に示す。この装置はサンプルの上下方向に荷重をかけて拘束を加えることができる。サンプルの加熱面方向にはプロパン-酸素ガスバーナーが設置されており、サンプルを急速に片面加熱することができる。この片面加熱されているサンプルの様子を側面から定点カメラで撮影し、得られた写真を画像解析することで熱衝撃試験中の各時間におけるひずみ分布を取得することができる。

1 Introduction

The refractory bricks as typical shaped refractories are usually utilized under constraint condition due to a steel shell for covering and supporting them. It is better to evaluate the thermal shock resistance of refractories under the mechanical constraint. But the thermal shock resistance of shaped refractories is evaluated by the methods of unconstraint condition, such as molten pig iron dipping test and the spalling test by using electric furnaces¹⁾. These methods cannot detect the occurrence of the crack accurately.

Particularly, the occurrence of the parallel crack to the hot surface of magnesia-chrome refractories which are widely used in the side wall of the RH degasser lower vessel leads the separation of the refractories. The separation increases the speed of the wear of the refractories. The causes of the parallel crack are reported that the influence of slag infiltration, stress by the mechanical constraints and thermal shock^{2,3)}. But the mechanism of the causes of the parallel crack are not elucidated sufficiently.

Therefore, we investigated the thermal shock test of the magnesia chromium brick by using a thermal shock test apparatus capable of mechanical constraint, and observed the appearance of crack initiation and progression by using the image analysis method. Then, we investigated the relationship with physical properties and the parallel crack.

2 Materials and experimental procedure

2・1 Apparatus of the test

We investigated the thermal shock resistance by using the test apparatus which was previously reported⁴⁾. The schematic diagram of the device is shown in Fig. 1. The test apparatus can apply constraint by applying a load in the vertical direction of the sample. A propane-oxygen gas burner is installed in the direction of the heated surface of the sample, and the sample can be quickly heated on one side. A strain distribution at each time during the thermal shock test can be obtained by photographing the sample with a fixed point camera from the side and image analysis of the obtained photograph.

* 技術研究所 Technical Research Labs.

** 名古屋支店 Nagoya Branch.

*** 技術研究所 共通基盤研究センター マネージャー Manager, Fundamental Technology Research Center, Technical Research Labs.

**** 技術研究所 副所長 Deputy Senior General Manager, Technical Research Labs.

***** フェロー, 技術研究所 所長 Fellow, Senior General Manager, Technical Research Labs.

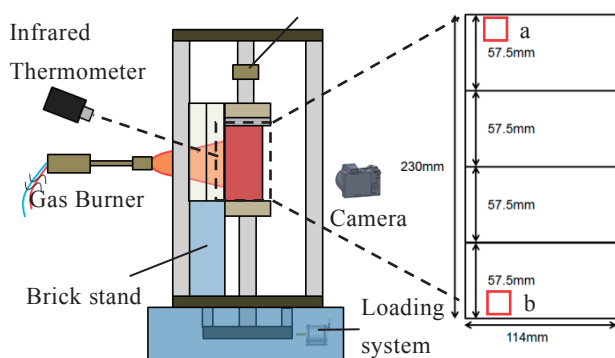


Fig.1 Schematic figure of thermal shock equipment.

2・2 画像解析

初期状態のサンプルの画像を細かな領域に分割し、その領域を変形後の画像の一部領域とパターンマッチング処理を行う。この処理により、分割した領域の変形後の位置を検出できる。この処理を各領域について順次行うことで、各領域の変位量を取得することができる。そして近接する2領域間の変位量と初期長さの比を取ることで各領域間におけるひずみを取得し、ひずみ分布図として表示することができる。サンプルに亀裂が生じた場合、見かけのひずみ量が急激に増加し、連続したひずみが検出されるため、亀裂の発生時期や亀裂の大きさを評価することが可能となっている。

2・3 供試れんが

表1に今回の試験に供した試料の化学成分値および物性値を示す。本実験では、RH下部槽に一般的に使用されているダイレクトボンドのマグクロレンが(符号A)、リボンドのマグクロレンが(符号B)を供試材料とした。供試れんがの試験形状は、57.5 × 65 × 114mmとし、各4個ずつ作製した。

2・4 試験条件

作製したサンプルは、図1に示すように57.5 × 65mmの面を加熱面、57.5 × 114mmの面を観察面として積み重ねた状態で試験装置に配置した。試験中のサンプルの温度変化の一例を図2に示す。昇温速度は200℃/minで1600℃まで昇温し、10分間保持し、10分間冷却の条件とした。試験中は、側面に断熱材を設置した。観察面側の断熱材は、60秒毎に移動させ、デジタルカメラによる撮影が終わったら、移動前

2・2 Image analysis

In the image analysis, the image of the sample in the initial state is divided into small areas, and the area is subjected to pattern matching processing with a partial area of the image after sample deformation. By this processing, the position after deformation of the divided region can be detected. By sequentially performing this process for each region, it is possible to acquire the displacement amount of each region. Then, by taking the ratio between the displacement amount and the initial length between the two adjacent regions, the strain between each region can be acquired and displayed as a strain distribution image. When cracks occur in the sample, the apparent strain amount abruptly increases and continuous strain is detected, so it is possible to evaluate crack initiation time and crack size.

2・3 Test materials

Table 1 shows chemical composition and physical properties of samples subjected to this test. In this experiment, a rebonded magnesia-chrome brick (labeled as A) and a direct-bonded magnesia-chrome brick (labeled as B), generally used in the RH degasser lower vessel, were tested. The test shape of the bricks that was tested was 57.5 x 65 x 114 mm, and four test pieces were prepared.

Table 1 Chemical composition and properties of specimens for the test.

Sample		A	B
Kind of brick		Rebonded	Direct-bonded
Composition /mass%	MgO	63	55
	Cr ₂ O ₃	24	30
	Al ₂ O ₃	4	6
Bulk density/×10 ³ kg・m ⁻³		3.42	3.09
Apparent porosity /%		11.1	16.5
Coefficient of thermal expansion×10 ⁻⁶ /K		8.6	9.8

2・4 Test conditions

The prepared samples were piled up as shown in Fig. 1 and placed in a test apparatus. The surface of 57.5 x 65 mm was the heating surface and the surface of 57.5 x 114 mm was the observing surface. An example of the temperature change of the sample under test is shown in Fig. 2. The temperature rising rate was raised to 1600℃ at 200℃/min, held for 10 minutes, and cooled for 10 minutes. During the test, insulating refractories were installed on the side. The insulating refractory on the observation side was moved every 60 seconds, and when photography by the digital camera was completed, it returned to the position before the movement. The photographing interval by the digital camera of the appearance picture of the sample under test was 67 seconds.

Initial load was set by the lifting mechanism of the

の位置に戻した。試験中のサンプル外観写真のデジタルカメラによる撮影間隔は 67 秒とした。

機械的拘束は、試験装置の昇降機構によって試験開始前に試料にかかる応力が指定の値となるように初期荷重を載荷し、その後、昇降機構を停止させることにより、試料の上下方向の変位を機械的に拘束した。この状態で加熱・冷却の温度変化を与えた。今回の試験では、初期荷重 0.5MPa を負荷して 3 回の加熱・冷却を実施した。

3 試験結果

3・1 リボンドれんがの機械的拘束下における耐熱衝撃性

図 3 にリボンドれんがの試験開始から 67 秒後、335 秒後、1072 秒後、2479 秒後、3149 秒後のひずみ分布図を示す。これらの分布図の出力時期は、図 2 にも示している。335 秒後のひずみ分布図を見ると、一番下のれんがから、加熱面に平行な亀裂が発生していることが分かる。さらに 1072 秒後、2479 秒後、3149 秒後と加熱冷却が進むにつれて、加熱面に平行な亀裂が徐々に進展していることが分かる。

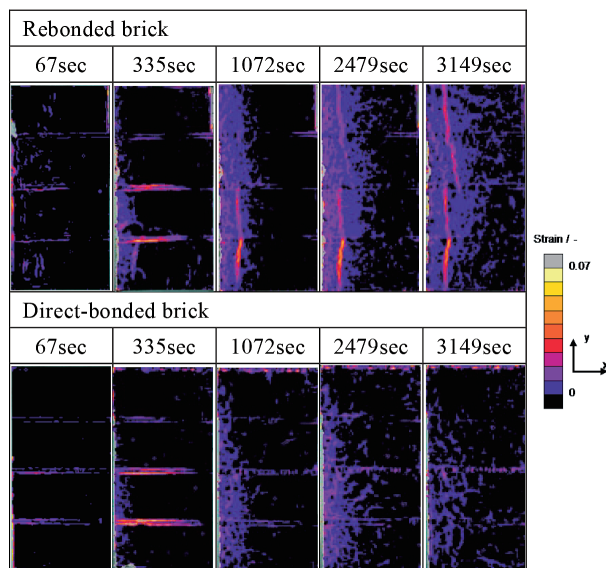


Fig.3 Strain distribution during the test.

3・2 ダイレクトボンドれんがの機械的拘束下における耐熱衝撃性

図 3 にダイレクトボンドれんがのひずみ分布図を示す。これらの分布図の出力時期は、リボンドれんがと

test apparatus so that the stress applied to the specimens before the start of the test was the specified value. Thereafter, the vertical displacement of the sample was mechanically restrained by stopping the elevating mechanism. In this state, temperature change of heating and cooling was given. In this experiment, heating and cooling process was given three times with an initial load of 0.5 MPa.

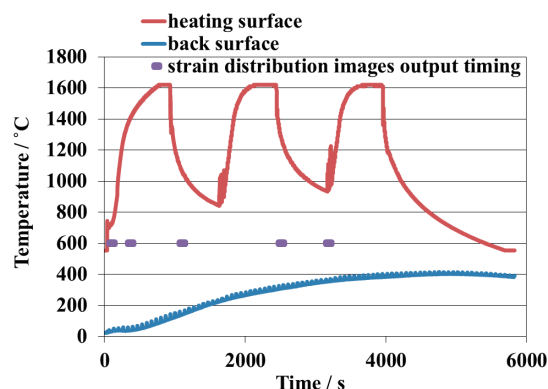


Fig.2 Measurement result example of temperature change.

3 Results

3・1 Thermal shock resistance under mechanical constraint of the rebonded brick

Fig. 3 shows strain distribution images after 67 seconds, 335 seconds, 1072 seconds, 2479 seconds, and 3149 seconds from the start of the test of the rebonded brick. The output timing of these distribution images was also shown in Fig. 2. Looking at the strain distribution image after 335 seconds, it was understood that a crack parallel to the heating surface was generated from the bottom brick. After 1072 seconds, 2479 seconds, and 3149 seconds, it is understood that the crack parallel to the heating surface gradually develops as heating and cooling progresses.

3・2 Thermal shock resistance under mechanical constraint of the direct-bonded brick

Fig. 3 also shows the strain distribution image of the direct bond brick. The output timing of these distribution images was set to the same time as the rebonded brick. No crack parallel to the heating surface was observed at any time.

4 Discussion

4・1 Analysis conditions

In the thermal shock test, parallel crack to the heating surface occurred in the rebonded brick experiment, but parallel crack to the heating surface did not occur in the direct bond brick. In order to investigate the cause of this crack, elastic thermal stress analysis was carried out.

同時期とした。ダイレクトボンドれんがでは、いずれの時期においても、加熱面に平行な亀裂は確認されなかった。

4 考察

4・1 解析条件

熱衝撃試験では、リボンドれんがで加熱面に平行な亀裂が発生したのに対して、ダイレクトボンドれんがでは加熱面に平行な亀裂は発生しなかった。この亀裂の発生した要因を調査するために弾性熱応力解析を行った。熱応力解析には表 1 の物性を使用した。熱膨張係数は JIS R2207-1 に基づき測定した。静弾性率は 3 点曲げ法⁵⁾によって測定した結果を用いた。静弾性率の測定結果を図 4 に示す。静弾性率の測定温度は、200℃、800℃、1400℃とした。その他の物性は、どちらのれんがも同一の値とした。

モデル化範囲は、試料と上下の押え板とした。押え板は剛体として取扱い、接触解析の機能を使用した。さらに、押え板の上下方向変位を固定した。また、本試験では、加熱によってサンプルが熱膨張した場合、れんがを積み上げた時にできた隙間量変化や試験装置のフレームの変形率等によって上下方向の変位が生じる。今回の計算では、この変位量を予めそれぞれのれんが間に隙間を設けて計算を行った。変位量は、図 1 に示す a、b の 2 点間の変位量を測定した。

図 5 にリボンドれんが、ダイレクトボンドれんがの変位量を測定した結果を示す。リボンドれんがは、最大で 1.8mm 程度の変位であったことから、最大の変位量は 1.8mm とした。ダイレクトボンドれんがは、最大で 1.4mm 程度の変位であったことから最大の変位量は 1.4mm とした。この算出した変位量から 5 箇所それぞれのれんが間にリボンドれんがでは 0.36mm、ダイレクトボンドれんがでは 0.28mm の隙間を設けて上下の加圧板を拘束して解析を行った。

熱解析の加熱時の加熱面側の熱荷重は、加熱面側の温度が放射温度計の測定結果と一致するように温度を設定し、熱伝達係数を $1160 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ とした。背面側は温度を 25℃に設定し、熱伝達係数を $11.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ とした。冷却時の熱荷重は、加熱面、背面それぞれ温度を 25℃、熱伝達係数を $11.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ とした。側面は、加熱、冷却いずれにおい

The physical properties of Table 1 were used for thermal stress analysis. The thermal expansion coefficient was measured according to JIS R2207-1. The static modulus of elasticity was measured by 3 point bending method⁵⁾. The measurement result of the static elastic modulus of elasticity is shown in Fig. 4. The measurement temperature of the static modulus of elasticity was 200℃, 800℃ and 1400℃. Other properties were assumed to be the same for both bricks.

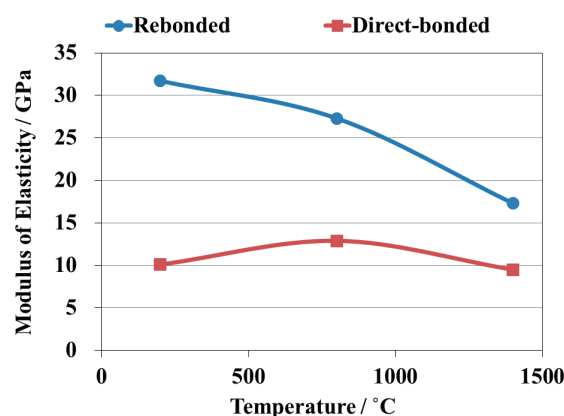


Fig.4 Modulus of elasticity.

The modeling range was a sample, upper and lower holding plates. The holding plate was supposed as a pseudo rigid body, and the function of contact analysis was used. Then, the vertical displacement of the holding plate was fixed. In addition, in this test, when the sample thermally expands by heating, a vertical displacement occurs due to a gap amount change generated when the bricks are stacked and deformation of the frame of the test apparatus. In this calculation, calculation was performed by setting a gap in each brick for this amount of displacement. For the amount of displacement, the amount of displacement between two points a and b shown in Fig. 1 was measured.

Fig. 5 shows the measurement results of the displacement amount of the rebonded brick and the direct-bonded brick. The maximum displacement amount was set to 1.8mm since the rebonded brick was displaced by about 1.8mm at the maximum. The maximum displacement amount was set to 1.4mm since the direct-bonded brick was displaced by about 1.4mm at the maximum. From the calculated amount of displacement, analysis was performed by restraining the upper and lower pressure plates with gaps of 0.36mm for each brick in the rebonded brick test. Likewise, in the test of the direct-bonded bricks, gaps of 0.28mm for each brick were provided.

The heat load on the heating surface during heating by heat transfer analysis was calculated as follows. The temperature was set so that the temperature of the heating

ても断熱した。解析時間は、加熱時間を 900 秒、冷却時間を 600 秒で行い、合計 1500 秒とした。

4・2 熱伝導解析

図 6 の左のグラフにリボンドれんがの放射温度計による加熱面側、背面側の温度の測定結果、右のグラフに熱伝導解析の加熱面側、背面側の温度の結果を示す。同様に、図 7 にダイレクトボンドれんがの放射温度計による加熱面側、背面側の温度の測定結果と、加熱面側、背面側の温度の熱伝導解析の結果を示す。リボンドれんが、ダイレクトボンドれんがそれぞれの加熱時の加熱面側の温度は、実際の測定結果とおおまかに一致する結果が得られていることが分かる。

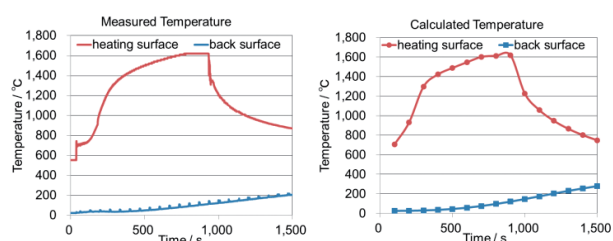


Fig.6 Results of temperature during the test. (Rebonded)

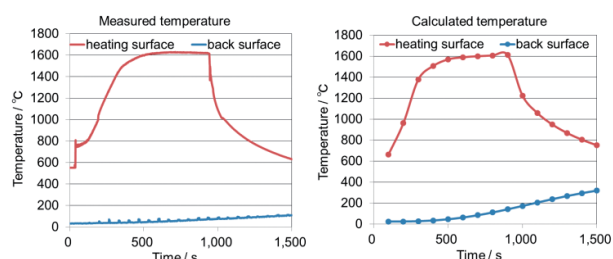


Fig.7 Results of temperature during the test. (Direct-bonded)

4・3 熱応力解析

リボンドれんがの解析結果として、図 8 に加熱開始から 300 秒後の最大主応力の分布図を示す。応力分布図から分かるように、加熱面からわずかに内側の位置に応力が発生していることが分かる。さらに、図 10 に図 8 中に示した点の最大主応力の時間推移を示す。加熱開始から、300 秒で最大の応力が発生しており、300 秒以降は応力が徐々に下がっていることが分かる。

ダイレクトボンドれんがの解析結果として、図 9 に加熱開始から 300 秒後の最大主応力の分布図を示す。

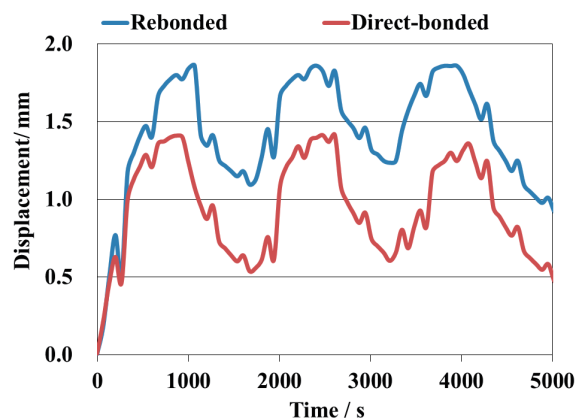


Fig.5 Transition of displacement during the test.

surface matched the measurement result of the radiation thermometer. The heat transfer coefficient was set $1160 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. The heat load during cooling was 25°C for the heating surface and the back surface, and the heat transfer coefficient was set $11.6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. The side was assumed to be insulated both during heating and cooling. The analysis time was 900 s for the heating time and 600 s for the cooling time.

4・2 Thermal analysis

Figure 6 and 7 show measurement results by the radiation thermometer and calculated temperature on the heating and the reverse surfaces. Measurement and calculation agreed well for each sample of rebounded (A) and direct-bonded (b).

4・3 Thermal stress analysis

Figure 8 and 9 show the distribution of the maximum principal stress after 300 s at the start of heating of the rebounded (A) and the direct-bonded (B). It is understood that stress was generated at a position slightly inward from the heating surface.

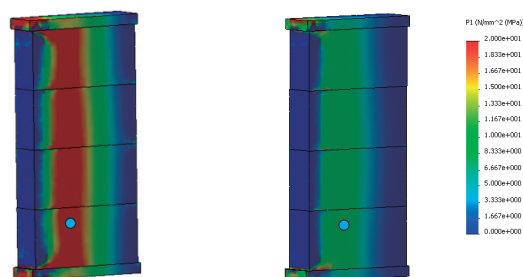


Fig.8 Results of calculated maximum principal stress. (Rebonded)

Fig.9 Results of calculated maximum principal stress. (Direct-bonded)

す。リボンドれんがの応力分布図と同様に、加熱面からわずかに内側の位置に応力が発生していることが分かる。さらに図 10 に図 9 中に示した点の最大主応力の時間推移を示す。加熱開始から、300 秒で最大の応力が発生しており、300 秒以降は応力が徐々に下がっていることが分かる。

リボンドれんがの最大主応力の解析結果とダイレクトボンドれんがの最大主応力の解析結果を比較すると、リボンドれんがで発生する応力は、ダイレクトボンドれんがの応力と比較して 2 倍程度高いことが分かる。このようにリボンドれんがは、ダイレクトボンドれんがと比較して応力が高かったため、加熱面に平行な亀裂が発生したと考えられる。

4・4 感度解析

加熱面に平行な亀裂をもたらす応力を低減させる有効な物性を調査するために、リボンドれんがの解析結果を用いて感度解析を行った。今回の解析では、熱膨張係数と弾性率をそれぞれ 20% 低減させて解析を行った。図 11 に最も応力が高かった加熱開始から 300 秒後の最大主応力の計算結果を示す。どちらの物性を低減させた計算結果も同等の応力となっており、同程度の影響であることが分かる。

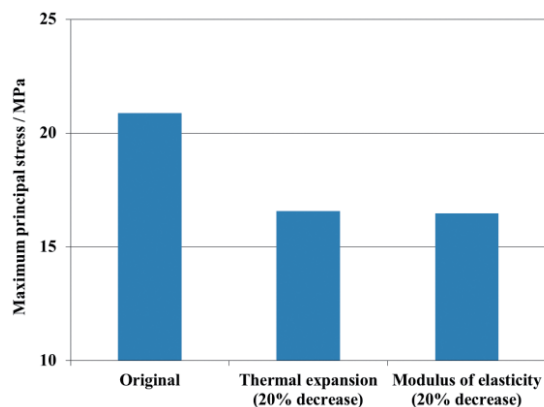


Fig.11 Comparison of the maximum principal stress.

さらに弾性率を低温域(常温～200℃)、中温域(400～800℃)、高温域(1000℃以上)に分けて、それぞれの温度域で 20% 低減させて再度解析を行った。図 12 に加熱開始から 300 秒後の最大主応力の計算

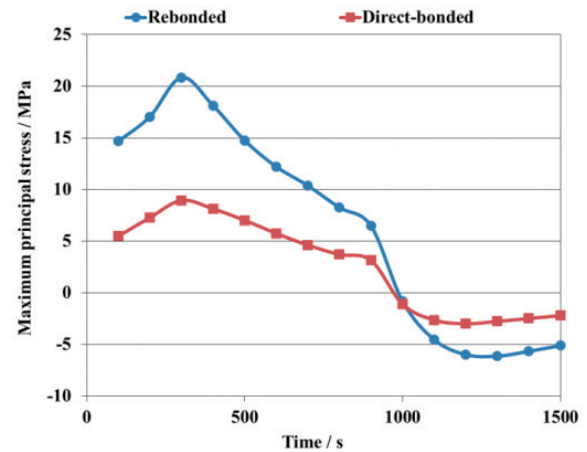


Fig.10 Maximum principal stress obtained by the elastic analysis.

Fig. 10 shows the time course of the maximum principal stress at the position shown in Fig. 8 and 9. From the start of heating, the stress became the maximum at 300 s, then the stress decreased gradually exceeding 300 s.

Comparing the analysis results of the maximum principal stress for the rebonded brick (A) with that of the direct-bonded brick (B), the stress generated in the A was about twice as high as that of the direct-bonded brick (B). The parallel crack to the heating surface occurred in the sample A must be caused by highest stress generated in A.

4・4 Sensitivity Analysis

In order to investigate effective physical properties to reduce the stress that causes the parallel crack to the heating surface, the sensitivity analysis was performed for the rebonded brick.

In this analysis, the thermal expansion coefficient and the modulus of elasticity were reduced by 20%, respectively. Fig. 11 shows the result of the maximum principal stress at 300 s heating at which the stress was the highest. Both results of reducing the coefficient of thermal expansion and the modulus of elasticity were almost equivalent, which meant same degree of influence.

Furthermore, it was investigated that which temperature range of the physical properties were influence on this stress. The analysis was conducted by dividing the modulus of elasticity into three levels of low- (RT - 200℃), intermediate- (400 - 800℃) and high- (1000℃-) temperature regions. It was found that the influence of the modulus of elasticity in the low temperature region was large as shown in Fig.12.

結果を示す。計算結果から、応力を低減させる温度域が、低温域、中温域、高温域の順で応力が低くなっていることが分かる。

図13に応力を評価した点の温度の解析結果を示す。応力が最も高くなる300秒後の温度は300℃程度になっており、応力が発生する位置での温度の弾性率が最も応力低減に影響を与えることが分かる。

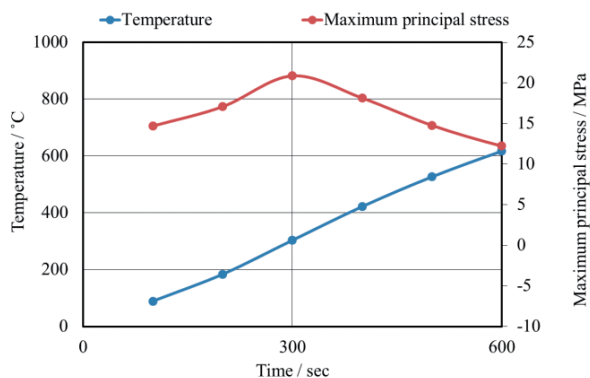


Fig.13 Calculated temperature and maximum principal stress of the evaluated point.

5 結言

リボンドれんがとダイレクトボンドれんがの機械的拘束下での耐熱衝撃性を評価した。

- 1) 試験の結果、リボンドれんがは稼働面に平行な亀裂が確認され、ダイレクトボンドれんがでは亀裂は確認できなかった。
- 2) 応力解析を行ったところ、リボンドれんがはダイレクトボンドれんがと比較して加熱面から少し内側に発生する応力が2倍以上高い結果であった。加熱面に平行な亀裂はこの応力によって発生したと考えられる。
- 3) 加熱面に平行な亀裂をもたらす応力に対して感度解析を実施した結果、熱膨張係数、弾性率は共に同程度の影響を与えることが分かった。さらに、弾性率を低温域、中温域、高温域の3水準の温度域に分けて解析を行ったところ、低温域の影響が最も大きい結果となった。これは、最大応力が発生した時間、場所の温度により説明できる。

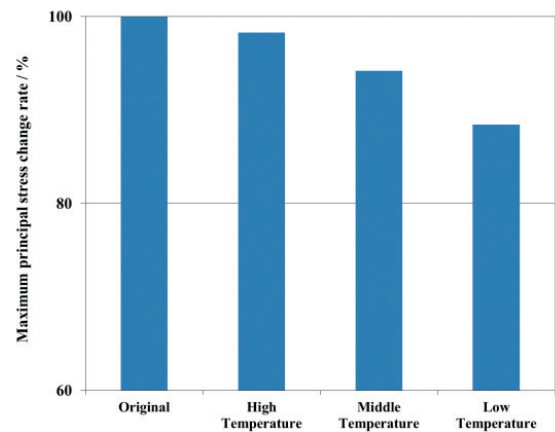


Fig.12 Maximum principal stress change rate.

Fig. 13 shows the analysis results of the temperature at the positions indicated in Fig. 8 and the maximum principal stress. The temperature after 300 s at which the stress became the highest was about 300°C. It is understood that the modulus of elasticity of the temperature at the position where the stress occurs most affects the stress reduction.

5 Summary

The thermal shock resistance under mechanical constraint of the rebonded brick and the direct-bonded brick were evaluated and compared. The results obtained could be summarized as follows.

(1) Cracking occurred parallel direction to the heating surface for the rebonded bricks, but no cracking occurred in the direct-bonded bricks.

(2) According to the thermal stress analysis, the twice higher stress generated in the former bricks.

(3) A sensitivity analysis indicated that, both thermal expansion coefficient and elastic modulus have influenced most on the generation of the stress initiating parallel crack to the heating surface by almost same level. The extended analysis on the elastic modulus clarified that the modulus at low temperature region influenced most on the maximum stress.

References

- 1) TARJ ed. Refractory Handbook, Revised 12th edition pp.103-105 (2015).
- 2) Akio Ishii et al.: Taikabutsu, **44** [4] 245-250 (1992).
- 3) Takashi Kumayasu: Taikabutsu, **66** [9] 449-455 (2014).
- 4) Hidetoshi Kamio et al.: Taikabutsu, **68** [10] 466-476 (2016).
- 5) Arito Mizobe et al.: Japan patent 4895302.

文 献

- 1) 耐火物技術協会編：耐火物手帳 改訂 12 版, pp.103-105 (2015).
- 2) 石井章生他：耐火物, **44** [4] 245-250 (1992).
- 3) 熊安隆：耐火物, **66** [9] 449-455 (2014).
- 4) 神尾英俊他：耐火物 **68** [10] 466-476 (2016).
- 5) 溝部有人他：日本国特許第 4895302 号.

本論文は以下の報文に加筆・再構成して転載したものである。

Yuya Tomita et al.: Proceedings of UNITECR2019 (2019) pp.876-879.

富田他：第 6 回鉄鋼用耐火物専門委員会講演会報告集 (2018) pp.9-18.

This paper is reprinted with some additions and reconstructions to the following papers:

Yuya Tomita et al.: Proceedings of UNITECR2019 (2019) pp.876-879.

Yuya Tomita et al.: Proceedings of the 6th Annual Meeting of Technical Committee on Refractories for Iron and Steel, Technical Association of Refractories, Japan (2018) pp.9-18.