SN プレートの物理的特性と機械的拘束が耐熱衝撃性に及ぼす影響

Influence of the Physical Properties and Mechanical Constraint on the Thermal Shock Resistivity of SN Plate

王丸善太，千々岩駿，赤峰経一郎，神尾英俊，続木哲生
Zenta Ohmaru, Shun Chijiiwa, Keiichiro Akamine, Hidetoshi Kamio and Tetsuo Tsuduki

1. 緒言

取鍋やタンディッシュで溶鋼の流量制御に用いられるスライディングノズル用プレート（以下SNプレート）は,SN摺動装置内部に拘束された状態で使用されることから機械的応力を受け,溶鋼が内孔を通湯することで熱応力が発生し,さらには摺動による摩擦,面圧,コーナー押し付け力等様々な外力を受ける。このような応力や外力によって,エッジ欠けや放射状亀裂等の損耗を生じると考えられている。しかしながら,多くの場合SNプレートの耐スポーリング性等の評価は,無拘束条件下で行われており,実際とは異なる条件で評価されている[1,2,3]。そこで本研究では,実機で使用されているSN摺動装置[4]を使用して試験を行った。

2. 試験方法

2.1. 供試試料

Table1に試験に用いた各SNプレート材質の特性を示す。サンプルA,B,及びDは低温焼成タイプの材質であり,サンプルBは塩基性材質であり,サンプルCとEは高温焼成タイプの材質である。これらの実形状のSNプレートサンプルを作製

1. Introduction

Since sliding nozzle plates for controlling molten steel flow through ladles and tundishes (hereinafter referred to as the SN plate) are used under constrained conditions within the SN sliding mechanism, they are subjected to mechanical stress, thermal stress with molten steel passing through the bore, and various external impacts such as abrasion by sliding, contact pressure and corner pressing force. With such stresses and forces, damages due to edge chipping and radial cracks may occur. However, in most cases, the evaluation of spalling resistance for the SN plates has been carried out under non-constrained conditions[1,2,3], which is different from actual usage. Therefore, in this study, we conducted the test was performed using the SN sliding tester [4] which can be reproduced an actual operation of the sliding mechanism used in the steel works.

2. Test method

2.1. Test sample

Table1 shows the characteristics of the SN plate materials used in the test. Samples A, B and D are materials fired at relatively low temperature (＜1000℃). Sample B is a basic material. Samples C and E are materials fired at relatively high temperature (≧1000℃). We prepared

Table 1 Chemical and physical properties of materials

Material		A	B	C	D	E
Chemical composition / mass%	Al_2O_3	96.0		76.0	96.0	82.5
	MgO	-	95.5	-	-	-
	ZrO_2	-	-	9.0	-	10.0
	SiO_2	-	-	4.5	-	3.0
	F.C.	4.0	4.5	5.5	4.0	4.5
Bulk density / g･cm^{-3}		3.19	3.11	3.28	2.90	3.36
Apparent porosity / %		7.1	5.5	7.3	11.1	5.7
Modulus of rupture / MPa	R.T	45	45	30	30	35
	at 1400℃	50	25	20	35	20
Modulus of elasticity / GPa		80	90	45	80	75
Thermal expansion / %	at 1500℃	1.40	2.10	0.85	1.20	1.05

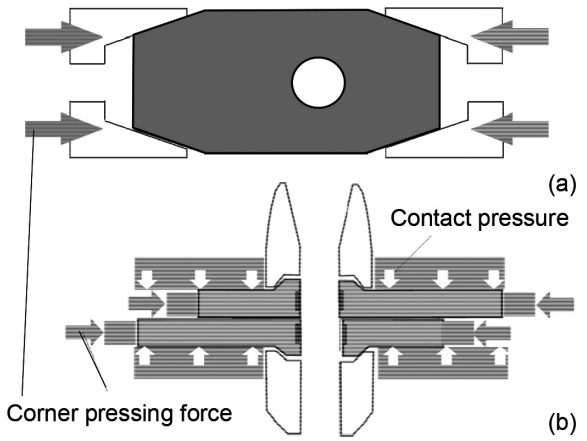

Fig.1 Corner pressing force and contact pressure in the sliding tester.

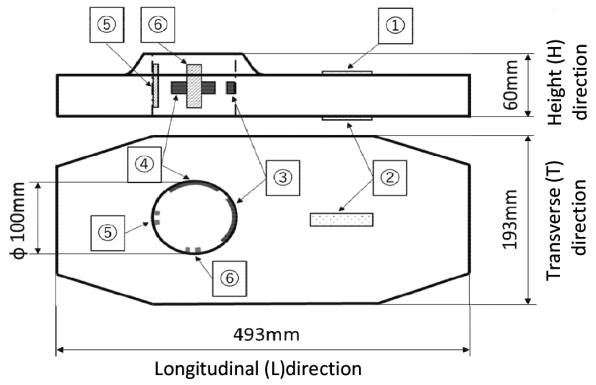

Fig.2 Sticking positions of strain gauge in the test SN plate.

し,SN摺動試験装置[4)]を用いて評価を行った。

2.2. ひずみ測定試験

上記5材質のSNプレートサンプルをSN摺動装置にセットし,コーナー押さえボルト締め付けによる拘束条件下でのSNプレートの変形量,変形状態を測定した。コーナー押さえによる拘束力を**Fig.1**に示す。測定は,各サンプル6箇所にひずみゲージを貼り付け,ボルトの締め付けトルクを20,40,60,80,100N・mの5水準とし,ひずみ量,及びひずみの状態を調査した。ひずみゲージの貼り付け位置とサンプルの評価方向は,**Fig.2**に示しているように長手(L),幅(T),そして,厚さ(H)の各方向とした。

2.3. 摺動力評価

SNプレートサンプルをSN摺動装置にセットし,冷間(室温),及び熱間(～1500℃)での摺動試験を行った。SNプレートサンプルはSN摺動装置の上部,及び下部に同一の材質をセッ

the sample of actual shapes of the SN plate and evaluated using the SN sliding tester[4)].

2.2. Strain measuring test

We set the sample SN plates from the five materials mentioned above on the SN sliding tester, and measured the deformation (amount of strain) and state of the plates under constrained conditions through tightening corner pressing bolts. **Fig.1** shows the constraint forces by corner pressing. Strain gauges were stuck at 6 points on each sample, and detected the amount and state of strain, with 5 levels of bolt tightening torque (20, 40, 60, 80 and 100 N・m). **Fig.2** shows the positions of the strain gauges stuck and the directions of the sample evaluated. Where, the longitudinal (L) and transverse (T) and height (H) directions are shown in the figure.

2.3. Evaluation of sliding force

We then set the sample SN plates on the SN sliding tester, and conducted tests with cold (room temperature) and hot (~1500℃) conditions. The plates of the same material were set on both the upper and lower frames, and the tests were carried out at two levels of the corner tightening torque of 40 and 80N・m. The contact pressure was approximately 78 kN as total, and the sliding between fully closed and fully opened positions was repeated 100 times. For the hot sliding test, the area of the bore of the sample plates was heated with a combustions gases burner for 30 min, and repeated the sliding while maintaining the heated state.

2.4. Evaluation of spalling resistance

The spalling resistance was, also evaluated under constrained conditions of the samples after the hot sliding tests, by grinding their slide surfaces and observing the states of cracks. In particular, the effect of the constrained conditions with corner tightening torque and the material characteristics such as thermal expansion and modulus of elasticity on the cracks has been checked carefully.

3. Results and discussion

3.1. Deformation by mechanical constraint

Fig.3, **4** and **5** show the relationship between the bolt tightening torque and the deformation of the SN plates from the results of the strain measuring tests. ① and ② in the **Fig.3** show the strain on the sliding surface side in the rear side and that on the stroke side, respectively. It was noticed that in the L direction, compressive strains have generated on both the back and the sliding surface side in every materials, except for the sliding surface side of the sample A. ③ and ④ in **Fig.4** show the strain in the T and the L directions of the plate bore, respectively, which indicates that on the bore in the T direction the tensile and in the L direction the compressive deformation occurred, respectively for almost every materials. ⑤ and

トし,コーナー締め付けトルクを40,及び80N・mの2水準で摺動試験を実施した。面圧は全圧で約78kN負荷し,摺動は全閉と全開を100回繰り返した。熱間摺動試験はSNプレートサンプルの内孔部をバーナーで30min加熱した後,加熱を継続した状態で摺動を繰り返した。

2.4. 耐スポーリング性評価

熱間摺動試験を行ったサンプルは,その摺動面を研磨し,亀裂の状態を観察し,拘束条件下での耐スポーリング性を評価した。特に,コーナー締め付けトルクによる拘束条件と熱膨張率や弾性率等の材質特性が亀裂に及ぼす影響について調査した。

3. 実験結果及び考察

3.1. 機械的拘束による変形

ひずみ測定試験結果より得られたボルトの締め付けトルクとSNプレートの変形の関係を**Fig.3**～**5**に示す。**Fig.3**①はL（ストローク）方向背面側,**Fig.3**②は同じく摺動面側のひずみを示している。L方向には,材質Aの背面側のひずみを除いて,どの材質も背面側,摺動面側ともに圧縮方向のひずみを生じていることが判った。**Fig.4**③はノズル内孔T方向,**Fig.4**④はノズル内孔L方向のひずみを示しており,ほぼどの材質も③内孔T方向には引張方向の変形を生じ,内孔L方向には圧縮方向の変形を生じていることが判った。**Fig.5**⑤はノズル内孔幅側のH方向,**Fig.5**⑥はノズル内孔反ストローク側のH方向のひずみを表しており,いずれも内孔H方向には引張方向のひずみを生じていることが判った。どのSNプレートサンプルも,コーナー締め付けトルクが強くなるほどひずみも大きくなる傾向が確認された。また,弾性率が高い材質と比較して低い材質であるサンプルC,及びEの変形が特に大きいことが判った。以上の結果から**Fig.6**に示しているような矢印の方向に変形が生じると判断された。

3.2. 摺動特性

Fig.7（**a**）に冷間摺動試験で摺動時の油圧を測定することによって,算出した摺動力（摩耗力）の100回の平均値を示す。一部の材質を除いて,コーナー締め付けトルクが高いほど摺動力が大きく,締め付けトルクが強いほど摺動力が大きくなる傾向が確認された。**Fig.7**（**b**）の熱間摺動試験は,冷間試験の結果と異なり,締め付けトルクの摺動力への影響を確認することが出来なかった。

冷間摺動試験による摺動力の評価結果は,コーナー締め付けトルクが強い方が,摺動力が大きくなることを示している。

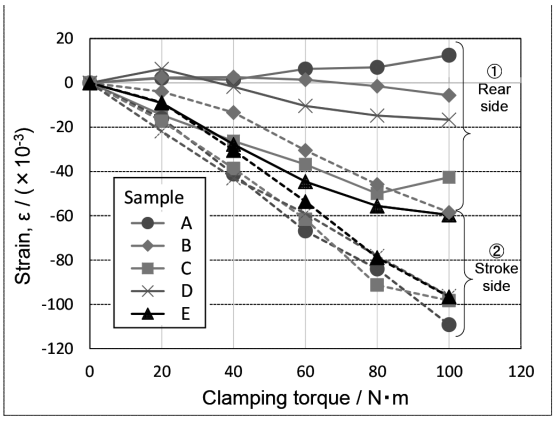

Fig.3 Relationship between strain and clamping torque.

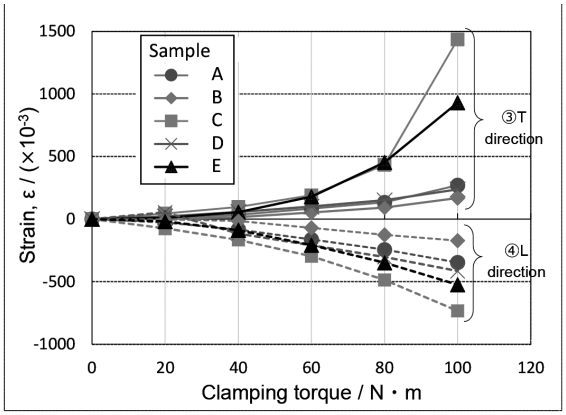

Fig.4 Relationship between strain and clamping torque.

⑥ in the **Fig.5** show the strain in the H direction on the width side of the bore (T) and that on the anti-stroke side of the bore (L), which indicates that on the bore in the height direction tension strain occurred in any case. With all the sample plates, it was confirmed the tendency that the strain got higher when the corner tightening torque is higher. It is also found that the samples C and E with lower modulus of elasticity exhibited particularly large deformation compared to the samples with higher modulus of elasticity.

From these results, it was considered that the directions of the deformation in the SN plate can be schematically as shown in **Fig.6**.

3.2. Sliding properties

Fig.7 (**a**) shows the average sliding forces calculated by measuring the contact pressures during sliding in the cold sliding test. Except for some materials, it was confirmed the tendency that the sliding force with the corner tightening torque of 80N·m was larger than that with the torque of 40N·m and the sliding force became larger with higher tightening torque. **Fig.7** (**b**) shows the average sliding force calculated by measuring the contact pressure during sliding in the hot sliding test. Unlike the

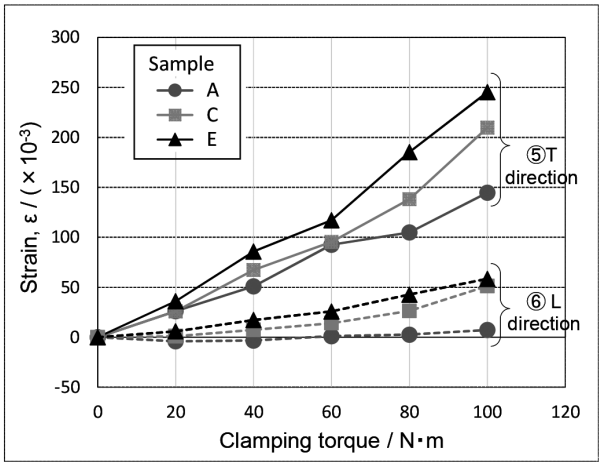

Fig.5 Relationship between strain and clamping torque.

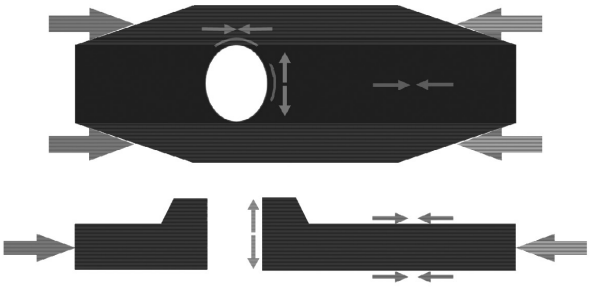

Fig.6 Conceptual image of the manner of deformation occurred in the SN plate.

これは上,下のSNプレートが接する摺動面の内孔付近が,摺動方向と垂直方向であるH(厚み)方向へ変形(厚みの増大)していることから摺動時に変形部が干渉し,摩擦が大きくなることで摺動力が増大するためであると考えられる。これに対して,熱間摺動試験では,コーナー締め付け力が摺動力に及ぼす影響を確認出来なかった。これは,熱間では摺動面に亀裂が発生し拡大する傾向にあり,亀裂の発生によってコーナー方向の拘束力が低下し,H(厚み)方向への変化が小さくなったことが影響していると推測される。一方,締め付けトルクが40N・mの条件では,冷間と熱間の摺動力を比較すると,熱間の摺動力が大きくなる傾向にある。これは加熱によってプレートの摺動面の酸化や熱膨張によるH(厚み)方向の変形により,摺動力が大きくなるためであると考えられる。

3.3. 耐スポーリング性

熱間摺動試験後のA～Eの各サンプルの摺動面を研磨した外観写真を**Fig.8**及び**Fig.9**に,それぞれ締め付けトルクが40,及び80N・mの両条件の場合について示している。各

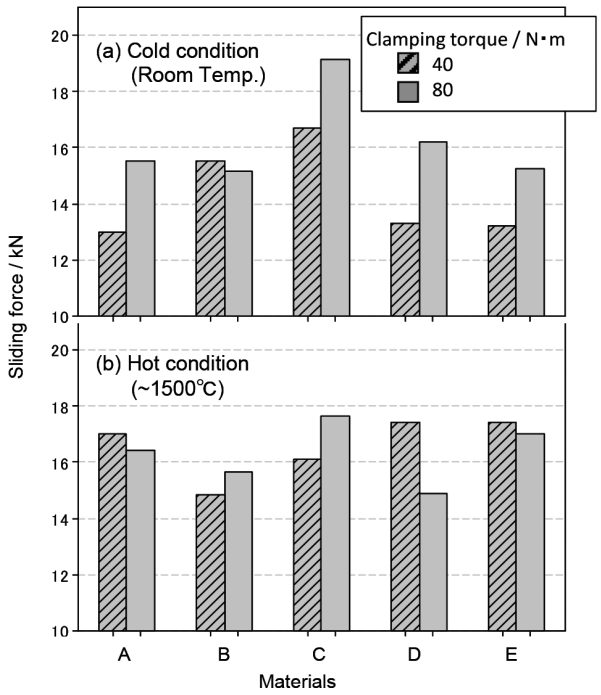

Fig.7 Comparison of sliding force of each material under different clamping torque (a) cold and (b) hot condition.

results of the cold test, it was not able to confirm the effect of the tightening torque on the sliding force.

The evaluation results of the sliding forces in the cold sliding tests indicate that a higher corner tightening torque generates a larger sliding force. It is considered that the sliding force increases by the larger friction in sliding with the deformation of the areas around the bores of the upper and lower SN plates, where they contact each other, in thickness direction perpendicular to the sliding direction. On the other hand, in the hot sliding tests, it was not able to confirm the effect of the corner tightening force on the sliding force. In hot conditions, cracks tend to initiate and propagate on the sliding surface, and it is assumed that there was an effect of these cracks decreasing the constraint force in corner direction and changing the form of the deformation. Meanwhile, under the condition with the tightening torque of 40N・m, the sliding force in hot condition tends to be larger than that in cold condition. We consider that sliding force becomes larger because of the deformation due to oxidation and thermal expansion of plate slide surface during heating.

3.3. Spalling resistance

Fig.8 and **9** show the photographs of the sample plates with ground slide surface after the hot sliding tests. With the tightening torques of both 40 and 80N・m, it was confirmed that the radial cracks were propagating from the bore to the L, T and H directions. Ranking of the

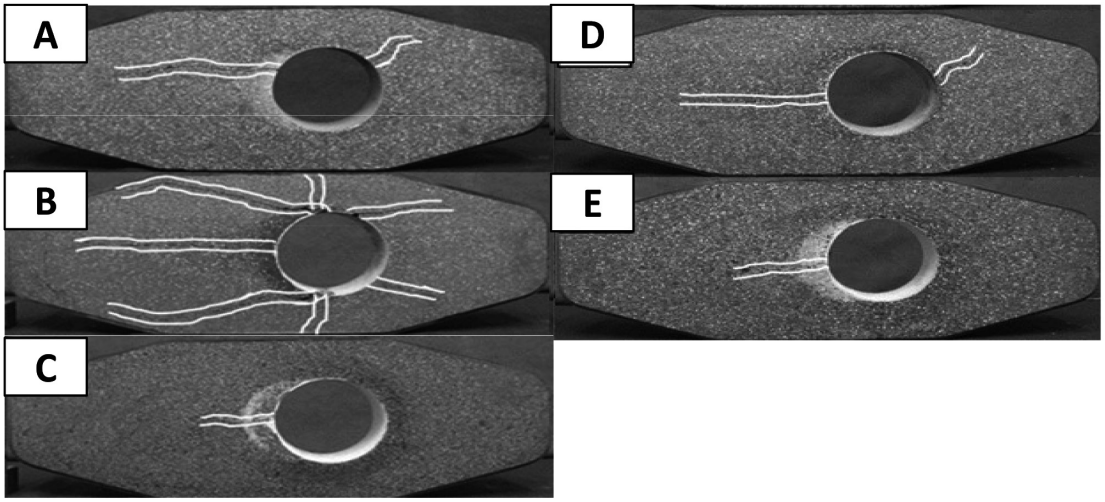

Fig.8 Appearance of upper plate samples after the test (clamping torque : 40N・m), showing cracks initiated from the bore.

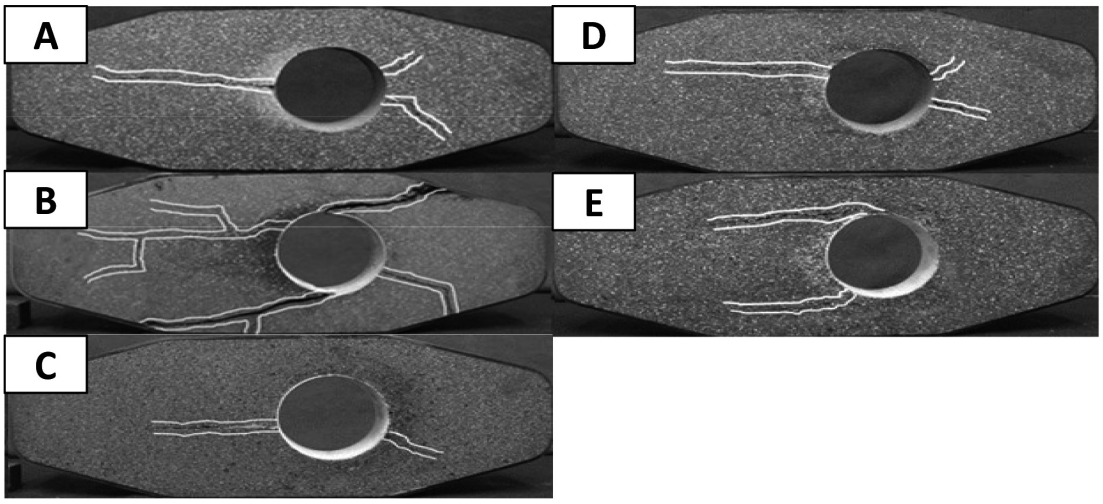

Fig.9 Appearance of upper plate samples after the test (clamping torque : 80N・m), showing cracks initiated from the bore.

サンプルとも,程度の差はあるものの,SNプレート内孔を中心としたストローク方向,反ストローク方向,及び横方向に延びる放射状の亀裂が確認された。この亀裂の本数や長さから亀裂の発生し易さの順位付けを行ったところ,締め付けトルクが40,及び80N・mの両条件ともサンプルB,A,D,E,Cの順であることが判った。また,両締め付けトルク条件のサンプルの亀裂状態を比較すると,ほぼ全てのサンプルでトルクが高い方が,亀裂が大きくなる傾向があることが確認された。

耐スポーリング性の評価結果より,亀裂が最も小さいサンプルCを1,亀裂が最も大きいサンプルBを5として亀裂が大きいほど高い値をつけて指数化し,熱膨張率と亀裂発生のし易さの大きさの相関を**Fig.10**に示す。拘束下での耐スポーリング性は,熱膨張率が低い材質ほど亀裂が小さくなる傾向が

easiness of the cracking was carried out by counting the length and amount of the cracks. As a result, it was found that the cracks got larger in the order of B, A, D, E and C with the tightening torques of both 40 and 80N・m. In almost all the cases, the cracks with the tightening torque of 80N・m tended to be larger than those with the torque of 40N・m.

Fig.10 shows the correlation between thermal expansion and the crack size by indexing the samples based on the evaluation results of spalling test, where the sample with the smallest cracks C was given the first and the one with the largest cracks B was given fifth. We confirmed that as to the spalling resistance under constraint the materials with lower thermal expansion tended to have smaller cracks. The evaluation results for cracks for each material show almost the same tendency as the results with the plates used in actual operation. From these results, we

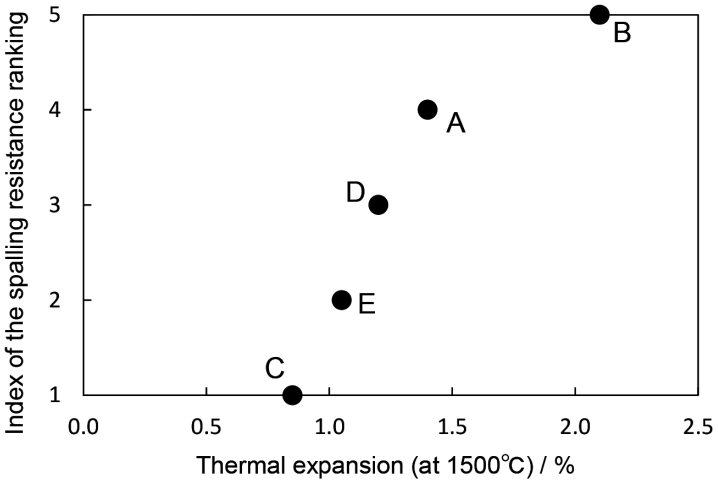

Fig.10 Relationship between index of the spalling resistance and coefficient of thermal expansion.

確認された。各材質の亀裂の評価結果は,実機の使用後の結果とほぼ同じ傾向にある。以上の結果から,この試験方法によって実機を模擬したSNプレートの耐スポーリング性評価が可能であると判断される。

4. まとめ

SN摺動装置を用いて拘束条件下での試験を行った結果,以下の知見が得られた。

1)SNプレートのひずみ測定を行い,コーナー締め付けトルクとSNプレートの変形の関係を調査した結果,a)ストローク(L)方向には圧縮方向,b)内孔部幅(T)方向には引張り方向,c)内孔部ストローク(L)方向には圧縮方向,d)内孔部垂直(T)方向には引張方向の変形が発生し,締め付けトルクが強くなるほど,変形が大きくなることが判明した。

2)摺動試験により摺動力を評価した結果,冷間時は締め付けトルクが強い方が,摺動力が高くなる傾向が確認され,SNプレートの変形が摺動力に影響を及ぼしていることが示唆された。冷間と熱間の摺動力を比較すると,締め付けトルクが40N・mの条件では,熱間の摺動力が冷間よりも大きくなる傾向が認められ,締め付けトルクが80N・mの条件では,冷間と熱間の摺動力に明確な差を確認することは出来なかった。

3)熱間摺動試験による拘束条件下での耐スポーリング性の評価結果は,実機と同じ形態の亀裂を再現することが出来た。また,各材質の亀裂発生のし易さの大きさの順位も実機とほぼ一致した。亀裂は,材質の熱膨張率が高いほど,また,いずれの材質もコーナー締め付けトルクが強い方が,発生し易くなることが判った。

consider that we can evaluate the spalling resistance of the SN plates through simulating actual casting conditions by the present test method.

4. Conclusions

As a result of conducting the tests under constraint condition using SN sliding tester, we have learned the followings.

1) We measured the strain of the SN plates and looked into the relationship between corner tightening torque and the deformation of the SN plates, and found that the deformation in the following direction occurred: a) compression in stroke L (longitudinal) direction, b) tension in T (transverse) direction on the bore, c) compression in stroke L (longitudinal) direction on the bore, and d) tension in thickness direction on the bore, and the deformation became larger when the tightening torque is higher.

2) As a result of evaluating the sliding force, we confirmed the tendency that the sliding force became larger with higher tightening torque in cold condition, which suggested that the deformation of the SN plates affected their sliding force. In comparison between the sliding forces in cold and hot conditions, the sliding force in hot condition tended to be larger than that in cold condition with the tightening torque of 40N·m, but no significant difference was confirmed between the two with the tightening torque of 80N·m.

3) In the evaluation of spalling resistance under constraint condition by hot sliding tests, we managed to reproduce the cracking in the same manner as in the actual operation. The rank of the crack sizes for each material also matched to the one in actual casting mostly. We found that the cracks for the materials with higher thermal expansion were larger and they propagated with higher corner tightening torque for every materials.

以上の結果から,SN摺動装置を用いた拘束条件下での耐スポーリング性試験は,実機を再現する有効な評価方法であると考えられる。また,SNプレートの亀裂を軽減するには,材質の熱膨張率を低減すること,コーナー締め付けトルクを適正化することが,効果的であることが判明した。

From these results, we consider that the spalling resistance test under constraint condition using the SN sliding tester is an effective evaluation method for reproducing actual casting operation. We also found that in order to reduce cracks on the SN plates it is effective to lower the thermal expansion of the plate material and adopt suitable corner tightening torque.

参考文献

1）赤峰経一郎, 佐坂勲穂, 溝部有人, 吉富丈記, 浅野敬輔：耐火物, 55 [7] 312-317（2003）.

2）新谷宏隆, 小口征男, 田中征二郎, 広田哲生, 坂口税幸：耐火物, 44 [10]574-575（1992）.

3）杉野太加夫, 速水邦夫, 山本勝弘, 下田達也：耐火物, 45 [2]60-66（1993）.

4）千々岩駿, 赤峰経一郎, 神尾英俊, 続木哲生, 森川勝美, 平初雄：耐火物, 68 [3]131（2016）.

References

1) Keiichiro Akamine, Isao Sasaka, Arito Mizobe and Jyouki Yoshitomi: Taikabutsu 55 [7] 312-317（2003）.

2) Kouryu Aratani, Yukio Oguchi, Seijiro Tanaka, Tetsuo Hirota and Masayuki Sakaguchi: Taikabutsu 44 [10] 574-575 (1992).

3) Takao Sugino, Kunio Hayamizu, Katsuhiro Yamamoto and Tetsuya Shimoda: Taikabutsu 45 [2] 60-66 (1993).

4) Shun Chijiiwa, Keiichiro Akamine, Hidetoshi Kamio, Tetsuo Tsuduki, Katsumi Morikawa and Hatsuo Taira: Taikabutsu 68 [3] 131 (2016).