

## 展望・総説・総論

## 球状黒鉛鋳鉄における切欠き強度の新たな評価方法（5）

## —— 切欠き引張強度に及ぼすひずみ速度・温度の影響とその構造部材としての考察 ——

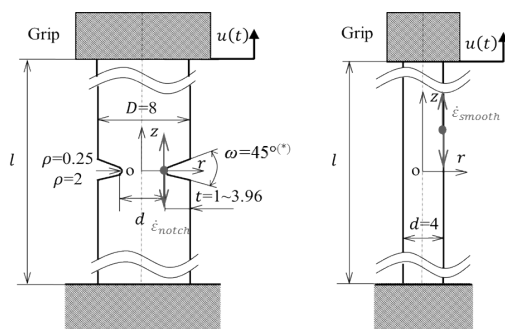
高木 怜\*・野田 尚昭†・佐野 義一‡・池田 朋弘§

## 1. はじめに

構造用材料の強度・じん性はひずみ速度と温度によって変化し、材料固有の特定の条件下で延性破壊から脆性破壊へと遷移する。このため各種構造物の設計においては、構造用材料の安全性を保証するためのひずみ速度と温度の上下限值が必要に応じて指定される<sup>1),2)</sup>。近年では衝撃強度試験などとして、切欠きを有する平板や丸棒の高速引張試験が多く用いられるようになっており<sup>3)~6)</sup>、高速引張試験を用いて材料の機械的性質を知る上でひずみ速度を求めることが必要である。

しかしながら、実験的に切欠き底のひずみ速度を測定することは非常に困難であるため、切欠き試験片のひずみ速度集中係数を解析的に求めることができれば、引張速度から切欠き底のひずみ速度の算出が可能となる。

本稿ではまず、既に高分子材料で使用実績のある平板両側切欠き試験片（図1(a)）を対象に取り上げる。そこでは、ひずみ速度集中係数についての定義を述べるとともに、試験片長さや切欠き深さおよび切欠き半径が及ぼす影響や応力集中との関係について解説する。そして次号においては、第4回の球状黒鉛鋳鉄の評価に用いたような円



(\*)  $\omega$  は第5章で45°以外の大きさについて検討する

図1 試験片形状

筒切欠きを有する丸棒試験片に対するひずみ速度集中係数について解説する。

## 2. ひずみ速度集中係数の定義

はじめにひずみ速度集中係数の定義を紹介する。式(1)に示すように、切欠き材の切欠き底の最大ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{\text{notch}}$  と平滑材のひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{\text{smooth}}$  との比によってひずみ速度集中係数を新たに定義する。

$$K_{t\dot{\epsilon}} = \frac{\dot{\epsilon}_{\text{notch}}}{\dot{\epsilon}_{\text{smooth}}} \quad (1)$$

ここで、平滑材のひずみ速度は引張速度に対して比例的に増加するものとする。このとき、 $u(t)$  を試験片に生じる変位、 $u(t)/t$  を引張速度、 $l$  を試験片長さ、 $t$  を時間とすると、次の関係が成立する。

$$\dot{\epsilon}_{\text{smooth}} = \frac{u(t)/l}{t} \quad (2)$$

\* 九州工業大学 大学院工学府  
(Rei Takaki)

† 九州工業大学 大学院工学研究院  
機械知能工学研究系 教授  
(Nao-Aki Noda)

‡ 九州工業大学 大学院工学研究院  
機械知能工学研究系  
(Yoshikazu Sano)

§ 日之出水道機器株式会社 R&D 総合センター  
(Tomohiro Ikeda)

一方、切欠き底の最大ひずみ速度を FEM 解析で求めた結果から、切欠き底のひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{smooth}$  は引張速度に対して比例的に増加することを明らかにしてきた<sup>7)</sup>。よってひずみ速度は切欠き材、平滑材とも引張速度に対して比例して上昇するため、その比  $K_{t\dot{\epsilon}}$  は引張速度に依存せず常に一定となる。すなわち、ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  を式 (1) のように切欠き材と平滑材の比として定義すると、切欠き底でのひずみ速度は、引張速度とひずみ速度集中係数から求まる (式 (3))。

$$\dot{\epsilon}_{notch} = K_{t\dot{\epsilon}} \cdot \dot{\epsilon}_{smooth} \quad (3)$$

### 3. 試験片長さがひずみ速度集中係数に及ぼす影響


応力集中係数  $K_t$  は  $l/D \geq 1$  ならば試験片長さ  $l$  に依存しないことが知られている。これはサンブナの原理から説明できる<sup>10)</sup>。一方、ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  は相対試験片長さ  $l/D$  に依存するので  $l/D$  の影響を調べる必要がある。

そこで、試験片長さ  $l/D$  を変えてひずみ速度

集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  を計算した。表 1 に、切欠き半径  $2\rho/D = 0.0625$ ,  $2\rho/D = 0.5$  について、試験片長さ  $l/D$  を 1~2560 まで変化させた時のひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  を示す。また、切欠き半径  $2\rho/D = 0.0625$ ,  $0.5$  に対して、切欠き深さを  $2t/D = 0.015625$ ,  $0.0625$ ,  $0.25$ ,  $0.5$  と変化させた。さらに、図 2 に  $2t/D = 0.25$ ,  $0.5$  のときのひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$ 、応力集中係数  $K_t^*$  を示す。表 1 と図 2 より、ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  は、試験片の長さが増加するにつれて増加するが、比較的实际の問題に近い板半幅 4mm の 4 分の 1、すなわち  $2t/D = 0.25$  の場合、 $l/D = 10$  で一定値に収束し  $K_t^*$  と一致する。なお、表 1 中の枠で囲んだ部分は  $K_{t\dot{\epsilon}}$  が一定になる最長長さにおける値との誤差が 1% 以内になる範囲を示している。

表 2 に応力集中係数  $K_t$  と平滑部における引張応力に基づく応力集中係数  $K_t^*$  を示す。応力集中係数  $K_t$  は式 (4) のように定義する。一方、応力集中係数  $K_t^*$  は便宜上、ひずみ速度集中係数と応力集中係数の関係を明らかにすることを目的にこれらの比をとる際、その値を有限にするために用

表 1 ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  と試験片長さの関係 (図 1 (a)参照)

 : 誤差 1% 以内

		$K_{t\dot{\epsilon}}$							
		0.0625 (0.015625)		0.25 (0.0625)		1 (0.25)		2 (0.5)	
$t$ (mm) ( $2t/D$ )	$\rho$ (mm) ( $2\rho/D$ )	0.25 (0.0625)	2 (0.25)	0.25 (0.0625)	2 (0.25)	0.25 (0.0625)	2 (0.25)	0.25 (0.0625)	2 (0.5)
		$l/D$	$l$ (mm)						
1.00	8	1.917	1.151	2.944	1.601	4.595	2.017	5.011	2.039
1.25	10	1.944	1.300	2.985	1.626	4.760	2.101	5.522	2.178
1.5	12	1.964	1.314	3.016	1.644	4.864	2.155	5.658	2.294
1.75	14	1.978	1.324	3.038	1.657	4.936	2.192	5.990	2.390
2	16	1.987	1.330	3.052	1.665	4.989	2.220	6.153	2.469
2.5	20	1.994	1.335	3.064	1.673	5.061	2.258	6.400	2.592
3.5	28	1.994	1.335	3.068	1.676	5.133	2.299	6.627	2.751
5	40	1.992	1.333	3.067	1.676	5.185	2.330	6.832	2.885
10	80	1.991	1.332	3.067	1.677	5.246	2.368	7.231	3.060
40	320	1.989	1.331	3.066	1.677	5.294	2.396	7.506	3.204
80	640	1.988	1.331	3.066	1.677	5.302	2.401	7.554	3.229
160	1280	1.988	1.331	3.066	1.678	5.307	2.403	7.578	3.242
320	2560	1.988	1.331	3.066	1.677	5.308	2.404	7.590	3.249
640	5120	1.988	1.331	3.066	1.677	5.309	2.405	7.597	3.252
1280	10240	1.988	1.331	3.066	1.678	5.309	2.405	7.600	3.253
2560	20480	1.988	1.331	3.066	1.677	5.310	2.406	7.601	3.254

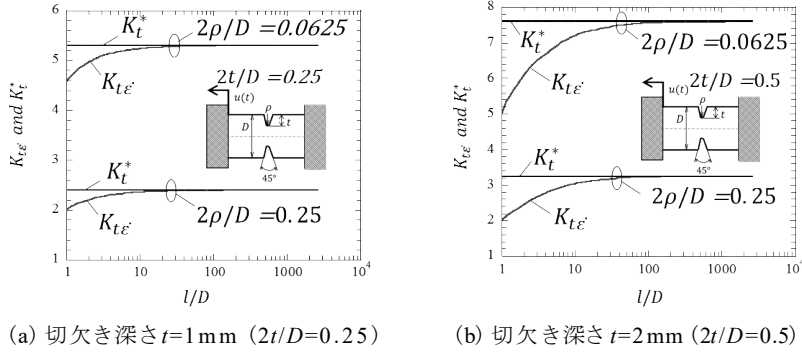


図 2 試験片長さがひずみ速度集中係数  $K_{t\epsilon}$  と応力集中係数  $K_t^*$  に与える影響

表 2 種々の試験片長さにおけるひずみ速度集中係数  $K_{t\epsilon}$  と応力集中係数  $K_t$  の関係

		$t$ (mm)		0.0625		0.25		1		2	
		$(2t/D)$		(0.015625)		(0.0625)		(0.25)		(0.5)	
		$\rho$ (mm)	$l$ (mm)	$l/D$	$l/D$	$l/D$	$l/D$	$l/D$	$l/D$	$l/D$	$l/D$
				0.25	2	0.25	2	0.25	2	0.25	2
				(0.0625)	(0.25)	(0.0625)	(0.25)	(0.0625)	(0.25)	(0.0625)	(0.25)
Strain concentration factor	$K_{t\epsilon}$	5	40	1.992	1.333	3.067	1.676	5.185	2.330	6.832	2.885
Stress concentration factor	$K_t$	1 $\sim$ $\infty$	1 $\sim$ $\infty$	1.963	1.313	2.877	1.574	3.986	1.806	3.805	1.629
	$K_t^* = K_t \cdot (D/d)$	1 $\sim$ $\infty$	8 $\sim$ $\infty$	1.994	1.334	3.069	1.679	5.315	2.408	7.610	3.258
Ratio	$K_{t\epsilon}/K_t$	5	40	1.015	1.015	1.066	1.065	1.301	1.290	1.796	1.771
	$K_{t\epsilon}/K_t^*$	5	40	0.999	0.999	0.999	0.998	0.976	0.968	0.898	0.886

いる。  $K_t^*$  は平滑部における引張応力  $\sigma_{\text{gross}}$  に基づいて式 (5) のように定義する。

$$K_t = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{net}}}, \quad \sigma_{\text{net}} = \frac{P}{d} \quad (4)$$

$$K_t^* = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{gross}}} = K_t \cdot \left(\frac{D}{d}\right), \quad \sigma_{\text{gross}} = \sigma_{\text{net}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right) \quad (5)$$

#### 4. ひずみ速度集中係数と応力集中係数の関係

前章では  $2t/D=0.25$  で  $l/D \geq 10$ ,  $2t/D=0.5$  で  $l/D \geq 40$  で  $K_t^* = K_{t\epsilon}$  となることを示した。すなわち、試験片長さが十分長い場合、応力集中係数からひずみ速度集中係数を求めることができる。しかし、実用的な試験片長さにおいては一致しないため実用的な長さにおけるひずみ速度集中係数と応力集中係数の関係を知る必要がある。本章ではまず応力集中係数について述べ、実用的な長さ

における応力集中係数との関係について解説する。

#### 4.1 任意の切欠き形状寸法に対する応力集中係数

応力集中係数は過去に詳細な研究がなされており、野田・高瀬らは切欠き形状の全範囲に対して応力集中係数を与える計算式を提案している<sup>11)</sup>。両側切欠きを有する平板試験片では式 (6) で与えられる。

$$\frac{K_t}{K_{tN}} = (1.0009 - 0.003561x + 0.001841x^2) + (0.2424 + 0.722x - 0.4555x^2)\lambda + (-1.741 - 1.660x + 1.767x^2)\lambda^2 + (4.113 + 1.121x - 2.943x^2)\lambda^3 + (-4.0762 + 0.0762x + 2.354x^2)\lambda^4 + (1.462 - 0.2603x - 0.7221x^2)\lambda^5 \quad (6)$$

$$\lambda = 2t/D, \quad x = \begin{cases} d/2\rho & (d/2\rho < 1) \\ 2 - d/2\rho & (d/2\rho \geq 1) \end{cases}$$

ここで  $K_{tN}$  は古くから用いられるノイパー三角則<sup>12)</sup>で得られる値で式(7)から得られる。

$$K_{tN} = \frac{(K_{ts} - 1)(K_{td} - 1)}{\{(K_{ts} - 1)^2 + (K_{td} - 1)^2\}^{1/2}} + 1 \quad (7)$$

式(7)で、 $K_{ts}$  は浅い切欠きにおける応力集中係数、 $K_{td}$  は深い切欠きにおける応力集中係数であり、それぞれ式(8)、(9)で表される<sup>9)</sup>。

(半無限板の円弧形状型切欠き)  
 $K_{ts}/K_{tE} = 1.000 - 0.127 \xi$   
 $+ 0.2908 \xi^2 - 0.1420 \xi^3$   
 (半無限板の60°V型切欠き)  
 $K_{ts}/K_{tE} = 1.148 - 0.160 \eta$   
 $- 0.0345 \eta^2 + 0.0693 \eta^3$   
 $\xi = \sqrt{t/\rho}$ ,  $\eta = \sqrt{\rho/t}$ ,  
 $K_{tE} = 1 + 2\sqrt{t/\rho}$  (8)

$$K_{td}/K_{tH} = 1.0015 - 0.054409x + 0.092227x^2$$

$$- 0.071641x^3 + 0.047665x^4$$

$$- 0.012184x^5 \quad (9)$$

$$K_{tH} = \frac{2(d/2\rho + 1)\sqrt{d/2\rho}}{(d/2\rho + 1)\tan^{-1}\sqrt{d/2\rho} + \sqrt{d/2\rho}}$$

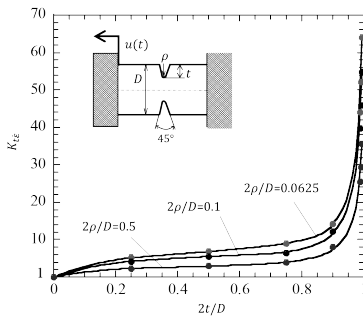
### 4.2 ひずみ速度集中係数と応力集中係数の関係

本節では、試験片長さを JIS 規格  $l/D = 5$  に基づき、板幅  $D = 8 \text{ mm}$  に対して  $l = 40 \text{ mm}$  とした<sup>7),8)</sup>。表3と図3(a)に切欠き半径  $2\rho/D = 0.0625$ ,  $2\rho/D = 0.1$ ,  $2\rho/D = 0.5$  について切欠き深さを変化させてひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  を求めた結果を示す。ここで、 $2\rho/D = 0.0625$  ( $\rho = 0.25 \text{ mm}$ ,  $D = 8 \text{ mm}$ ) はシャルピー衝撃試験における試験片の切欠き半径  $\rho = 0.25 \text{ mm}$  に対応し、 $2\rho/D = 0.5$  ( $\rho = 2 \text{ mm}$ ,  $D = 8 \text{ mm}$ ) は鋳鉄製品における比較的鋭いコーナー部半径に対応させている。図3(a)より、切欠き深さ  $2t/D$  の増加に伴いひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  は増加し、 $2t/D \rightarrow 1$  では  $K_{t\dot{\epsilon}} \rightarrow \infty$  となる。

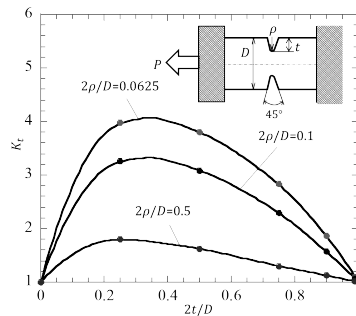
比較のため、応力集中係数  $K_t$  と切欠き深さ  $2t/D$  との関係も表3と図3(b)に示した。 $2t/D \rightarrow 1$  で、応力集中係数  $K_t \rightarrow 1$  となる。一方、 $2t/D = 0$  は平滑材に相当するので、ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}} = 1$ , 応力集中係数  $K_t = 1$  となる。こ

表3 ひずみ速度集中係数と応力集中係数 ( $l = 40 \text{ mm}$ ,  $D = 8 \text{ mm}$ ,  $\omega = 45^\circ$ )

$2\rho/D$	$K_{t\dot{\epsilon}}$			$K_t^*$		
	0.0625	0.1	0.5	0.0625	0.1	0.5
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.25	5.185	4.240	2.330	3.986	3.271	1.806
0.50	6.832	5.498	2.885	3.805	3.089	1.629
0.75	8.879	6.467	3.843	2.830	2.299	1.302
0.90	12.206	10.080	6.342	1.871	1.569	1.124
0.99	44.060	39.792	25.454	1.101	1.065	1.014
$\rightarrow 1.00$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 1.000$	$\rightarrow 1.000$	$\rightarrow 1.000$



(a) ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$



(b) 応力集中係数  $K_t^*$

図3 切欠き深さとひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  および応力集中係数  $K_t^*$  の関係

ここで、ひずみ速度集中係数と応力集中係数の関係を明らかにするために、直接それらの比をとった。そこで、表4と図4にひずみ速度集中係数と応力集中係数の比  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t$  と切欠き深さ  $2t/D$  の関係を示す。  $2t/D \rightarrow 1$  で、ひずみ速度集中係数と応力集中係数  $K_t$  の比  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t \rightarrow \infty$  となる。また、  $2t/D \rightarrow 1$  でひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}} \rightarrow \infty$  であるが、応力集中係数は  $K_t \rightarrow 1$  となる。一方、  $2t/D \rightarrow 1$  で応力集中係数  $K_t^* \rightarrow \infty$  となる。すなわち、  $K_{t\dot{\epsilon}}$  と  $K_t^*$  は  $2t/D \rightarrow 1$  でどちらも無限大となる。これを利用して、ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  と応力集中係数  $K_t^*$  の比をとり、ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  と応力集中係数  $K_t^*$  との関係調べる。

先述の通り、  $2t/D \rightarrow 1$  でひずみ速度集中係数の比  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t$  は無限大に発散する。そこで、その発散をなくすために、応力集中係数  $K_t^*$  を用いて、ひずみ速度集中係数と応力集中係数の比を有限値で求める。表4と図5にこのひずみ速度集中係数と応力集中係数  $K_t^*$  の比  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t^*$  と切欠き深さ  $2t/D$  の関係を示す。  $2t/D \leq 0.5$  の範囲で、  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t^*$  の値は切欠き半径  $2\rho/D = 0.0625$ ,

$2\rho/D = 0.1$ ,  $2\rho/D = 0.5$  において2%以内の誤差で一致していることがわかる。このことから、  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t^*$  の値は  $2t/D \leq 0.5$  の範囲で切欠き半径に依存せず切欠き深さのみに依存するので、  $2t/D \leq 0.5$  の現実的な問題では、ひずみ速度集中係数を求める際に、応力集中係数を求めて  $K_t^*$  を知ることにより、図5よりひずみ速度集中係数を容易に予測することが可能である。

### 5. 開き角がひずみ速度集中係数に与える影響

切欠きの応力集中については、切欠きの鋭さ  $t/\rho$  が大きいほど、開き角の影響を受けやすいことが分かっている。そこで、著者らが先の研究で用いた  $t/\rho$  が極端に大きい  $t/\rho = 25$  の平板試験片において、開き角  $\omega$  が応力集中係数とひずみ速度集中係数に及ぼす影響について調べる。ここでは試験片長さ  $l = 50\text{ mm}$ , 試験片幅  $D = 20\text{ mm}$ , 切欠き深さ  $t = 5\text{ mm}$ , 切欠き半径  $\rho = 0.2\text{ mm}$  としている。

表5に、開き角を  $\omega = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  と変

表4 ひずみ速度集中係数と応力集中係数の比 ( $l = 40\text{ mm}, D = 8\text{ mm}, \omega = 45^\circ$ )

$2t/D$	$K_{t\dot{\epsilon}}/K_t$			$K_{t\dot{\epsilon}}/K_t^*$		
	$0.0625$	$0.1$	$0.5$	$0.0625$	$0.1$	$0.5$
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.25	1.301	1.299	1.290	0.976	0.975	0.968
0.50	1.796	1.780	1.771	0.898	0.890	0.886
0.75	3.137	3.096	2.952	0.784	0.774	0.738
0.90	6.524	6.424	5.642	0.652	0.642	0.564
0.99	40.018	37.363	25.103	0.400	0.374	0.251
$\rightarrow 1.00$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 0.000$	$\rightarrow 0.000$	$\rightarrow 0.000$

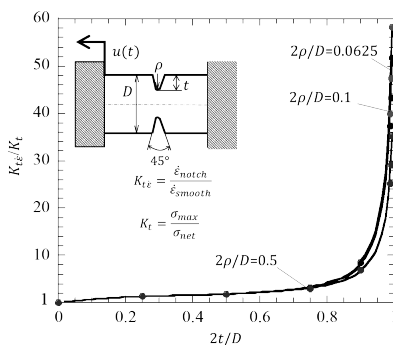


図4  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t$  と相対切欠き深さ  $2t/D$  の関係 ( $l=40\text{ mm}, D=8\text{ mm}$ )

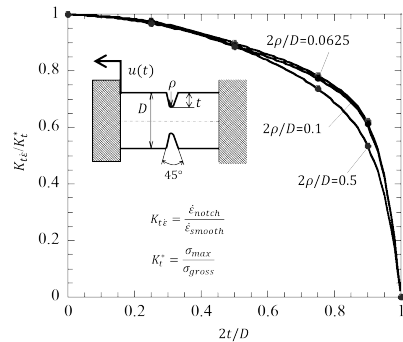


図5  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t^*$  と相対切欠き深さ  $2t/D$  の関係 ( $l=40\text{ mm}, D=8\text{ mm}$ )

表5 開き角の影響 ( $t = 5 \text{ mm}$ ,  $\rho = 0.2 \text{ mm}$ ,  $l = 50 \text{ mm}$ ,  $D = 20 \text{ mm}$ )

	$\rho = 0.2 \text{ mm}$ $t = 5 \text{ mm}$	$\omega = 0^\circ$	$\omega = 45^\circ$	$\omega = 60^\circ$	$\omega = 90^\circ$
Strain concentration factor	$K_{t\dot{\epsilon}}$ ( $K_{t\dot{\epsilon}}/K_{t\dot{\epsilon}} _{\omega=0^\circ}$ )	10.81 (1.000)	10.78 (0.9972)	10.71 (0.9910)	10.20 (0.9440)
Stress concentration factor	$K_t$ ( $K_t/K_t _{\omega=0^\circ}$ )	6.485 (1.000)	6.470 (0.9977)	6.430 (0.9915)	6.145 (0.9476)
	$K_t^*$ ( $K_t^* = K_t * D/d$ ) ( $K_t^*/K_t^* _{\omega=0^\circ}$ )	12.97 (1.000)	12.94 (0.9977)	12.86 (0.9915)	12.29 (0.9476)
Ratio	$K_{t\dot{\epsilon}}/K_t$	1.666	1.668	1.665	1.660
	$K_{t\dot{\epsilon}}/K_t^*$	0.833	0.834	0.833	0.830

化させた時の応力集中係数  $K_t$ ,  $K_t^*$ , ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  を示す. 表5より,  $\omega$  が大きくなると, 上記の3つの値は減少している. また, 表5にそれぞれの値を  $\omega = 0^\circ$  における値で割った値も合わせて示す. これらの値も,  $\omega$  が大きくなると減少していることがわかる.

さらに, 表5にひずみ速度集中係数と応力集中係数の比  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t$ ,  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t^*$  の値を示す. この2つの値は,  $\omega$  が大きくなってもその値はほぼ一定になり, 開き角には依存しないことがわかった. よって, 応力集中係数  $K_t$  が分かれば, 開き角によらずひずみ速度集中係数を求めることが可能である.

## 6. おわりに

高速引張試験で両側切欠き付平板試験片を引張る場合に生じる切欠き底でのひずみ速度集中について考察した. ひずみ速度集中係数と比較的求めやすい応力集中係数の関係を切欠き半径, 切欠き深さおよび開き角を変えて整理し, 図表にまとめた. 本研究より, 以下の結論が得られた.

- (1) ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  は応力集中係数  $K_t$  と同様に, 試験片形状が相似であれば, 同じ値となる.
- (2) ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  は, 試験片長さが増加するにつれて増加する. この点で, 試験片長さに依存しない応力集中係数とは異なる. 比較的实际の問題に近い板半幅  $D/2 = 4 \text{ mm}$  の4分の1, すなわち  $2t/D = 0.25$  の場合,  $l/D = 10$  で一定値に収束する.
- (3) ひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  と応力集中係数  $K_t$ , または  $K_t^*$  の比の値は, 切欠き深さ  $2t/D \leq 0.5$  では, 切欠き相対深さで一義的に

決まる. この関係を用いれば, 応力集中係数  $K_t$ , または  $K_t^*$  よりひずみ速度集中係数  $K_{t\dot{\epsilon}}$  の予測が可能となる. そして  $K_{t\dot{\epsilon}}/K_t^*$  の値は開き角に依存しない.

## 参考文献

- 1) 岡下勝彦・大南亮一・道場康二・山本晃久・富松実・丹治康行・三木千壽:「兵庫県南部地震による神戸港港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討」, 土木学会論文集, 591 (1998) pp.243-261.
- 2) 豊田政男:「材料・溶接施工からみた阪神・淡路大震災における建築鉄骨損傷:被害から何を学ぶか」, まてりあ, 35, 4 (1996) pp.370-379.
- 3) 安藤誠人・野田尚昭・黒島義人・石川康弘・竹田英俊:「ポリジメチルシロキサンを共重合したポリカーボネートの衝撃特性と時間-温度換算則の適用」, 日本機械学会論文集, 80, 814 (2014) DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0149.
- 4) H. Huh, S.B. Kim, J.H. Song and J.H. Lim: "Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body", International Journal of Mechanical Sciences, 50 (2008) pp.918-931.
- 5) N.A. Noda, H. Ohtsuka, H. Zheng, Y. Sano, M. Ando, T. Shinozaki and W. Guan: "Strain rate concentration and dynamic stress concentration for double-edge-notched specimens subjected to high-speed tensile loads", Figure & Fracture of Engineering Materials & Structures, 38, 1 (2015) pp.125-138.
- 6) 竹田英俊:「樹脂材料の高速引張試験法」, マテリアルライフ学会誌, 20, 3 (2008) pp.118-124.
- 7) 野田尚昭・赤木大地・沈雨濃・高木 怜・池田朋弘・佐野義一・高瀬 康:「円周切欠きを有する丸棒試験片におけるひずみ速度集中係数の提案と応力集中係数の関係についての考察」, 日本機械学会論文集, 83, 851 (2017) 17-00034.
- 8) N.A. Noda, Y. Shen, R. Takaki, D. Akagi, T. Ikeda, Y. Sano and Y. Takase: "Relationship between Strain Rate Concentration Factor and Stress Concentration Factor", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 90 (2017) pp.218-227.

- 
- 9) 野田尚昭・高瀬 康・門田圭司：「切欠きを有する丸棒および帯板における応力集中係数の計算式」, 機械の研究, **48**, 7 (1996) pp.757-762.
- 10) 村上敬宜：弾性力学, 養賢堂 (1985).
- 11) 野田尚昭・高瀬 康：設計に活かす切欠き・段付き部の材料強度, 日刊工業新聞社 (2010).
- 12) H. Neuber : Kerbspannungslehre, Springer-Verlog, (1937 (第1版), 1958 (第2版)).
- (次号へつづく)
-