円周切欠き試験片の引張破壊現象*

寺沢一雄** 大谷 碧** 吉田俊夫*** 寺井 清***

Fracture of Notched Bar Tension Specimen

by

Kazuo TERAZAWA, Midori OTANI, Toshio YOSHIDA and Kiyoshi TERAJ
(Faculty of Engineering, Osaka University) (Welding Laboratory, Kawasaki Dockyard Co., Ltd.)

In order to investigate the characteristics of fracture stress curve of steel by notched bar tension specimen, we must clarify first the range of notch shapes which would cause an initial crack not at the contour, but at the center of notched section. Authors carried out extensive experiments and obtained some results, which are summarized as follows:

(1) Initiation of center crack of fibrous type could be observed after sectioning longitudinally the specimens which were strained and unloaded just before their fracture by means of very careful and minute adjustment of load, using a rigid and small tension testing machine of screw type (capacity, 5 tons) (cf. Photos. 1~4).

(2) It was proved that "rim effect" could be recognized conspicuously on the flow stress curve of the specimen in which the center crack was initiated. By observing this rim effect, the range of notch shapes that would produce center crack was determined in detail as shown in Fig. 3.

(3) It was also proved that no contour crack was found in the case where center crack would initiate and that this phenomenon might also be observed in the reverse way. Moreover, we observed that contour crack grew slowly in comparatively a long period and was quite stable, and that, on the contrary, center crack was very unstable and accordingly the specimen broke just after its initiation. The fracture mode was shear at the contour in almost all specimens and fibrous at the center.

(4) It was presumed that micro metallurgical defects of steel might influence strongly on the initiation of ductile crack.

(Received May 19, 1961)

鋼のぜい性破壊を応力論的に究明するための方法として、Ludwikが提唱した fracture stress curve (破壊応力曲線) の概念に基づく手段がある¹⁾。この fracture stress curve は破壊現象に関する概念的な特性であって、これを実験的に求めるには多くの困難を伴う。

Fracture stress curve はいわゆる brittle (cleavage) fracture stress curve と ductile (fibrous) fracture stress curve に分けるのがよいと考えられているが²⁾、その形状は間接的に予想されているにすぎない。とくに後者は多くの因子の影響を受けるようで、その特性はほとんど不明のまま残されているといっても過言ではない。しかしぜい性破壊現象を明確にするため

には、破壊発生点におけるこれら応力曲線の挙動を定量的に明らかにすることがぜひ必要であろう。

鋼などの延性材料の室温付近の温度における破壊応力曲線を求めるため Kuntze ははじめて円周切欠き試験片を用いることを提唱し、その後多くの研究者達がこれにならって実験を行なった。かれの方法によれば、試験片の直径 D 、切欠き部最小断面直径 d 、切欠き先端半径 r の各変数を組み合わせ多軸応力状態を design し、これがある実験条件の範囲において切欠き断面の大部分で一定となり、かつ断面の center (design された多軸応力部) で crack (破壊) が発生することを予期して解析する。しかしたとえ多軸状態が一定となる条件においても、もしも crack が center において発生せず、切欠き底部 (contour) において始まっておれば、design した triaxiality は上述の r と d 、とくに r により変わるから、その発生直後から crack 先端局

* 原稿受付 昭和36年5月19日、当協会第10期総会講演会(創立10周年記念)にて講演(昭36.5)

** 大阪大学工学部

*** 川崎重工工業株式会社溶接研究室

部の応力状態はさらに高度の多軸性をおびて変わったものとなり, もしこれを無視して最初に design した多軸応力状態であるとして解析すれば誤った結論を与えるであろう.

切欠き試験片を用いる場合に, center crack の発生条件を明らかにすることが重要なのはこのためである.

Fig. 1 Notched bar tension specimen

Table 1 Steel tested

Steel	Thick. (mm)	Chemical analysis (%)					Mechanical properties (JIS No. 4 specimen)			
		C	Si	Mn	P	S	Y.P. * (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	Elong. (%)	Red. of area (%)
Killed steel	25	0.14	0.20	0.60	0.018	0.024	24.5	44.9	40.0	67.1
Round bar	19 (dia.)	0.14	0.01	0.49	0.017	0.036	27.5	44.0	42.7	65.0

* Y.P. : lower value

Table 2 Results of notched bar tensile test to confirm directly the crack initiation

No.	Item	<div><div><div>r/d</div><div>d/D</div><div>θ</div></div></div>																Total		
		0.013	0.017	0.025	0.031	0.042	0.050	0.063	0.083	0.125			0.166	0.250			0.500	Num- ber	(%)	
		0.8	0.6	0.4	0.8	0.6	0.2	0.4	0.8	0.6	0.2	0.4	0.8	0.6	0.2	0.4	0.2			
		45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	0°,45°	45°	0°,45°	45°	45°	45°	0°,45°	45°			
1	Total number of specimen	6	20	20	7	27	7	17	6	30	10	124	10	10	6	54	6	360	100	—
2	Specimens fractured during test	1	2	6	3	7	4	3	0	7	4	50	6	5	4	20	3	125	35	—
3	Rest : (1)–(2)	5	18	14	4	20	3	14	6	23	6	74	4	5	2	34	3	235	65	100
4	Specimen without crack	0	5	11	0	12	3	14	5	18	6	65	3	4	2	31	3	182	51	78
5	Specimen with contour crack	5	13	3	4	8	0	0	1	5	0	0	1	1	0	0	0	41	11	17
6	Specimen with center crack	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	3	0	12	3	5
7	Mean load (kg)	Maximum	3 112	2 101	1 016	3 167	2 042	265	1 014	3 131	2 057	279	925	3 083	1 939	242	826	191	Summary	
8		When unloaded	2 740	1 810	857	2 660	1 812	240	799	2 542	1 792	225	792	2 360	1 560	178	670	168	(1)	
9		Difference between (8) and (7)	375	200	159	498	211	23	225	573	256	54	133	690	362	78	164	27	Range of crack initiation at notch contour :	
10		When unloaded (including contour crack)	2 740	1 770	776	2 660	1 683	—	—	2 650	1 646	—	—	2 270	1 490	—	—	—	$d/D \geq 0.6$	
11		Difference between (10) and (7)	375	248	260	498	357	—	—	450	413	—	—	830	460	—	—	—	(for any range of r/d)	
12		When unloaded (including center crack)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	713	—	—	—	643	—	(2)	
13		Difference between (12) and (7)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	179	—	—	—	180	—	Range of crack initiation at center :	
14		When fractured	2 400	1 665	822	2 583	1 700	202	803	—	1 853	209	717	2 264	1 496	165	632	133	$d/D \geq 0.4$	
15	Difference between (14) and (7)	700	352	196	596	396	64	182	—	219	70	198	840	460	71	209	56	$r/d \geq 0.125$		
16	Difference between (9), (15)	325 kg	152 kg	37 kg	98 kg	185 kg	41 kg	–43 kg	—	–37 kg	16 kg	65 kg	150 kg	98 kg	–7 kg	43 kg	29 kg	where $D=10$ mm $\theta=0^\circ, 45^\circ$		
Crack condition		Contour crack only, no center crack										Center crack and contour crack								

G. Sachs,³⁾ J.D. Lubahn,⁴⁾ M.L. Fried,⁵⁾ D. Mc-Adam⁶⁾ あるいは小倉信和らの各氏は以上の点を明確にすべく、crack が center で生ずると考えられる試験片を用いて発生直後の center crack を直接に確認して、その発生する条件を求めるためにあらゆる角度

から実験を行なったのであるが、これらはすべて失敗している。著者らはその原因が、(1) 切欠形状の不適合と、(2) 破断直前における試験機の微細な荷重調節の不充分にあると考えた。

実験には Table 1 に示すようなびよう(鋳)材とキルド軟鋼板を用いた。

試験片の D は 10 mm とし、 r , d , θ を Table 2 に示すように広範囲に変化させて、Fig. 1 に示すように

$d=4$ mm, $r=1$ mm, $\theta=0^\circ$, unloaded at 615 kg

$d=4$ mm, $r=1$ mm, $\theta=0^\circ$, unloaded at 640 kg

$d=4$ mm, $r=0.5$ mm, $\theta=0^\circ$, unloaded at 795 kg

$d=4$ mm, $r=1$ mm, $\theta=0^\circ$, unloaded at 555 kg

$d=4$ mm, $r=1$ mm, $\theta=45^\circ$, unloaded at 700 kg

Photo. 1 Examples of center crack

$d=4$ mm, $r=0.5$ mm, $\theta=45^\circ$, unloaded at 735 kg

Photo. 2 Example of center crack just initiated

$d=4$ mm, $r=0.5$ mm, $\theta=0^\circ$, unloaded at 795 kg

Photo. 3 Example of center crack fairly developed

$d=4$ mm, $r=1$ mm, $\theta=0^\circ$, unloaded at 555 kg

Photo. 4 Example of center crack before fracture

$d=4$ mm, $r=0.1$ mm, $\theta=45^\circ$, unloaded at 850 kg

$d=6$ mm, $r=0.5$ mm, $\theta=45^\circ$, unloaded at 1600 kg

Photo. 5 Examples of contour crack

Upper photo.....sharp notch
Lower photo.....shallow notch

試験片を360本作製した。また引張試験機には油圧型のものや電動モーター駆動の大形スクリー型のものを使用を避けて、小形試験片の荷重の微小調節に適した手回し式のスクリー型試験機(容量5t)を用いた。試験片を破断直前まで引張ってから unload して、

試験片中心切断面を研磨して検鏡した。その結果12本の試験片において、切欠部に center crack が見出された。なお破壊はすべて fibrous 型であった。

試験結果を一括して Table 2 にまとめて示す。また、contour crack と center crack の発生範囲は

Fig. 2 Schematic explanation of the shapes of stress-strain curves affected by mode of crack initiation

Table 2 中の summary 欄に記すとおりである. すなわち center crack 発生の有無は, 主として d/D , r/d のいかんにより定められている.

d/D が 0.4 を越えるといかなる r/d に対しても center crack は発生せず. また r/d が 0.083 以下ではいかなる d/D に対しても center crack は発生しない. この結果に基づいて将来行なわれてきた実験を検討すると, kuntze の場合は前者 (d/D) のみを取り上げて論じており, r の影響に関しては触れておらず, また一方 McAdam, Sachs をはじめとする米国の研究者らは後者 (r/d) のみを取り上げて解析を進め, d/D に関しては触れていない不合理のあることがわかる. また θ については小倉氏はあまり影響がないとしているが, 本報告の結果もこれを肯定しているようである. Photo. 1~5 は以上求めた crack の代表的な顕微鏡写真を示す.

なお前述したように小形のスクリー型引張試験機

Method Crack	After sectioning specimen	By rim effect
Center crack	○	△
Contour crack	●	▲

Fig. 3 Summary of test showing the ranges of center and contour crack initiation

により荷重の微小な調節をすることが重要である.

いま center crack の発生した切欠形状 (2 系列, 30 本) の試験片について見ると破壊時の平均荷重は 613 kg であるのに対し, center crack を見出したものにおける unload 時の平均荷重は 611 kg できわめて接近しているにすぎない. したがって, もし荷重の調節が適切に行なわれないと, 切欠き条件は充分でも crack の発生が全然見られなかったり, あるいは試験片は破断してしまうであろう.

なお著者らは center crack の発生範囲をより詳細に求めるため McAdam の提唱する rim effect⁸⁾ による方法 (Fig. 2 参照) を用いて各切欠き形状の試験片の flow curve を測定した. この結果は Fig. 3 に示すように前述の直接証明法の結果と大体一致していた.

なお, 本研究は文部省科学試験研究費補助金の交付を受けて行なわれたものである

また研究の計画と実験に際し, 有益な御助言を賜わった東京大学木原博教授ならびに造船協会電気溶接研究委員会 (第 6 分科) の各位に深く感謝するものである.

末筆ながら運輸技術研究所小倉信和氏は貴重な研究データと調査資料を惜しみなく著者らに教示された.

同氏の御好意がなかったならば, 本研究の実施はさらに著しく困難の度を加えたであろうことをとくに記して, 厚く感謝の意を表する次第である.

参 考 文 献

- 1) P. Ludwik and R. Scheu, Stahl u. Eisen, 43, p. 999 (1923)
- 2) E. Orowan, Reports on Progress in Physics, XII (1949) Physical Society
- 3) G. Sachs, *et al.*, Final Rep. to NACA, on the Tension Properties of Al Alloys in the Presence of Stress Raisers (Part 1) (1947) (*cf.* Ref. (6), p. 103)
- 4) G. Sachs and J. Lubahn, Weld. J., p. 53-s (1946)
- 5) M. Fried and G. Sachs, Special Tech. Publ., 87, ASTM, p. 83 (1948)
- 6) D. McAdam and R. Mebs, Tech. Publ., 1615, AIMME (1943)
- 7) 小倉信和, 日本造船研究協会報告, 9, p. 25 (1955)に関する未発表資料
- 8) J. Lubahn, Fracturing of Metals, ASM, p. 90 (1948)