切欠き先端近傍の延性き裂発生における構造用鋼材の破壊条件

建築構造用鋼材	延性き裂	
切欠き	応力三軸度	相当ひずみ

1. はじめに

鋼構造物における溶接欠陥などの応力集中部からの破 壊は延性き裂を起点として脆性破壊に至る.破壊発生の 抑制を目的とし延性破壊の発生・進展を把握する研究^{1,2)} が行われており,鋼材の延性破壊は応力三軸度に対する 限界歪として与えられる³⁾.本研究では,切欠き先端半 径を変えた円周切欠き付き丸棒の引張試験を行い,応力 集中部にける延性破壊発生条件について検討した.また, 脆性破壊に対する破壊限界応力を求めた.

2. 試験概要

2.1 試験片

試験片形状を図1に示す.使用する鋼材はSN490Bとする.使用鋼材の機械的性質と化学成分を表1に示す.切欠きの形状は4種類のタイプである.タイプ1はVノッチ先端半径 0.25mm で、低温で試験を行い脆性破壊のパラメータである破壊限界応力 σ_c を求める⁴⁾.タイプ2~4は延性破壊パラメータを検討するためのもので、既往の研究¹⁾を参考に、表面からのき裂を観察することを想定し切欠き半径を 2.0mm 以下と設定した.タイプ1は7体、タイプ2~4 は各2体実施した.

2.2 載荷方法

載荷は 400kN 油圧式万能材料試験機を用いて実施した. 切欠き付き丸棒試験片は V ノッチは−196℃, R0.5, R1.0, R2.0 については,き裂観察のため常温で行い,マイクロ スコープを用い観察した.切欠き部の最小径と標点距離 27mm の変位をレーザー寸法測定器を使用し連続的に測定 した.応力歪関係を得るためφ6mm の 14A 号試験片の素 材引張試験を常温と低温の2 温度で実施した.

3. 試験結果

3.1 素材・V ノッチ切欠き丸棒

素材試験の結果を図2に真応力真歪関係で示す. 図中丸



A criterion of ductile failure initiation in structural steel

正会員	○見波	進*
同	服部	和徳**
同	宗川	陽祐**

プロットは後に用いる FEM 解析用応力歪曲線である.低温のVノッチ切欠き付き丸棒試験結果を表2に示す.

3.2 R切欠き丸棒(タイプ2~4)

破断性状について、切欠き底に明瞭な延性き裂が発生 し、それが内部に進展して破断に至った.実験から得ら れた真応力-真歪の関係について図 3 に示す.ここで真応 力 *s* と真歪 *e* は次式で定義された切欠き底を通る断面の平 均的な真応力と真歪を表している.

$s = P/(\pi d^2/4)$	••••	•••••	 ••••(1)
$e = 2\ln(d_0/d)$		• • • • • • •	 (2)

ここで, *s*:平均真応力, *e*:平均真歪, *P*:引張荷重,

do:初期直径, d:当該負荷レベルにおける直径

4. 有限要素法解析

4.1 解析概要

試験片形状の対称性を考慮し、1/4 の回転対称モデルとし、切欠き底より標点距離である 13.5mm の範囲とした. 要素分割は切欠き底近傍で1辺の大きさを0.1mmとした. タイプ3(R1.0)について図4に要素分割を例として示す. 載荷条件は変位制御とした.解析に用いる応力-歪関係は 14A号試験片の実験値から多直線に近似した(図2).

4.2 解析結果

図 5 に R0.5, R1.0, R2.0 について実験値の荷重変位関



図 2 素材引張試験結果(真応力真歪関係)

表	1	供調	试材	の材	幾械	的性	b質	と化	;学月	成分	(ミル	シー	F)
소모	_{全国新} Y.P.		Τ.	T.S.		EL.		Y.R.		vEo		Pcm	
判問	川里		N	/mm ²			%			J		×100	
SN4	490B	3'	79	53	33	27 71 188		188	39	23			
С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Sn	I	З
	×100		×1	000	×100				×1000		×1000	×10	000
13	28	133	13	5	19	7	11	3	13	4	8	1	1
	Y.P.	:降伊	、点グ	T.S:	引張	歯さ,	EL.	: 伸び	<				

Y.R.:降伏比, vEo:0℃シャルピー吸収エネルギー Ceq:炭素当量, Pcm:溶接割れ感受性組成

表 2 w 環限界心力 σ_c (低温 V ノッナ丸棒引張試験)									
SN490B	試験片名	V_N-1	V_N-2	V_N-3	V_N-4	V_N-5	V_N-6	V_N-7	平均
test	Pf (kN)	34.0	33.5	28.5	28.4	33.9	33.9	36.3	32.7
FEM	$\sigma_c(N/\text{mm}^2)$	1744	1740	1662	1660	1743	1743	1766	1723
Pf:破断荷重(実験値), oc:破壊限界応力(文献4)に倣いFEMと破断荷重より算出)									

Susumu Minami, Kazunori Hattori, Yosuke Sokawa

係と解析値の荷重変位関係を比較したものとき裂発生点 を示す.実験と解析結果は最大荷重に達するまで,概ね 対応していることが分かる.

4.3 延性き裂発生パラメータ

き裂発生時の応力三軸度と相当歪の分布状況を図 6,7 に示す.

$$\tau = s_h / s_{eq} \qquad (3)$$

ここで, τ: 応力三軸度, s_h: 平均垂直応力(静水圧), s_{ea}: Mises の相当応力, である.

図8に本実験結果と桑村ら¹⁾によって提案された延性き 裂発生条件を示す.

ここで、 *τ_{peak}*: 応力三軸度のピーク値, *e_c*: き裂発生時の 平均真歪, *e_u*: 素材の一様伸び(真歪=15.8%), である.

多少のずれが見られるものの同様の傾向となっている ことが分かる.

本研究では,(4)式と類似の形の次式の指標 D を用い, 延性き裂発生の評価について検討する.

$$D = \sqrt{\frac{e_{eq}}{e_u}} \cdot \tau \qquad (5)$$

ここで、*e_{eq}、*τはFEMの各要素の相当歪と応力三軸度であり、指標*D*がある値に達すると延性き裂が生じると考える.

図9にき裂発生時の指標Dの分布を示す.タイプ2(R0.5) とタイプ 3(R1)は切欠き先端近傍で大きな値となっており, いずれも概ね1に近い値となっているが,比較的切欠き半 径が大きいタイプ4(R2)では値が小さい.

5. まとめ

SN490B 鋼材を対象に切欠き丸棒試験片の破壊試験を実施し, 脆性破壊基準である限界破壊応力 σ c を得, 延性き 裂発生条件について検討した. 延性き裂は断面内に生じ ている応力三軸度と相当歪との相互関係で生じるという ことが確認できた. 指標 D については切欠き半径の小さ い試験片でよい対応が得られた. 今後, 鋼種や切欠き半 径を変えた実験を行う予定である.

【謝辞】実験・解析の実施にあたり当時東京電機大学学生佐藤光志朗君・堀水潤之介君の協力を得た.ここに謝意を表す. 【参考文献】

- (1) 桑村仁,山本恵市:三軸応力状態における構造用鋼材の延性き裂発生条件,日本建築学会構造系論文集,No.477, pp.129-135, 1995.11
- 小野徹郎, 佐藤篤司, 横川貴之, 相川直子:構造用鋼材の延性き裂 発生条件, 日本建築学会構造系論文集, No.565, pp.127-134, 2003.3
- A.C.Mackenzie, J.W.Hancock, D.K.Brown: On the influence of state of stress on ductile failure initiation in high strength steels, Engineering Fracture Mechanics, Vol.9, Issue 1, pp.167-168, 1977
- 4)中込忠男,見波進,白崎博史,新井聡:塑性履歴を受けた鋼材の脆 性破壊におけるローカルクライテリアの適用,日本建築学会構造 系論文集, No.536, pp.151-156, 2000.10



* 東京電機大学 理工学部 教授・博士(工学) ** (一財)ベターリビングつくば建築試験研究センター・博士(工学) Prof., School of Science and Eng., Tokyo Denki Univ., Dr. Eng.
** Tsukuba Building Test Laboratory of Center for Better Living, Dr. Eng.