

切り欠きを有する高強度鋼材の延性破壊挙動に関する実験的検討

池田 修斗¹・劉 巖²・葛 漢彬³・康 瀾⁴

¹ 学生会員 名城大学大学院 理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501) E-mail: 213433003@ccmailg.meijo-u.ac.jp

² 正会員 名城大学特任助手 理工学部社会基盤デザイン工学科
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501) E-mail: liuyan@meijo-u.ac.jp

³ フェロー 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)
E-mail: gehanbin@meijo-u.ac.jp

⁴ 中国華南理工大学 (元名城大学 JSPS 外国人特別研究員) (〒510640 中国広州市天河区五山路 381 号)
E-mail: ctkang@scut.edu.cn

近年、様々な優れた特性を持つ鋼材が開発され多くの鋼構造物に適用されている。それらの鋼材の特性を明らかにし、橋梁の性能に適合した鋼材を選定することで、橋梁の性能向上およびライフサイクルコストの低減が可能となる。本研究では、高応力三軸度領域における鋼材の延性き裂の発生・進展を模擬するため、ノッチを有する試験片の単調引張実験を行い、異なるノッチ半径やノッチ角度、鋼種による影響を比較することで、破断に至るまでの力学的特性とき裂の発生・進展を明らかにしようとしている。

Key Words: steels for bridge high performance structure, high stress triaxiality, ductile fracture, experiment

1. 緒言

鋼構造物の破壊性状を検討する際、構造的な不連続部や既存の切り欠きのような欠陥が存在する場合、ひずみが集中する箇所では延性き裂が発生および進展し、応力三軸度が高くなることで脆性的な破壊が生じやすいと考えられている¹⁾⁶⁾。安全性の観点からは延性き裂の発生限界を把握し、その評価手法の構築が重要となる⁹⁾。鋼構造物の延性き裂の発生により引き起こされる脆性的な破壊は、鋼構造の重要な破壊現象の1つであり、溶接鋼構造物の脆性的な破壊を防止するためには、延性き裂の発生とその後の進展のメカニズムの解明は重要である⁵⁾⁸⁾。

これまでに、延性き裂の発生メカニズム等を解明するために、実験的検討に加え、FEM 解析を用いた試みが数多く行われている⁵⁾¹²⁾。この内、著者らは、SM490 材を対象に、母材、熱影響部および境界部に切り欠きを有する溶接継手に対して、3 段階 2 パラメータ延性破壊モデルを適用した数値シミュレーションを行い、延性き裂の発生等に対する評価の精度を検討した⁹⁾。また、応力三軸度の影響を考慮した要素破壊時の塑性変位を適用した延性破壊モデルにより、一連の実験と解析によって要素

破壊時の塑性変位と不均一比（ノッチ先端と試験片の中心における応力三軸度の平均値の比）の関係を解明した。同時に、メッシュ分割による影響を概ね解消するとともに、高応力三軸度下における鋼材の延性破壊挙動を精度良く予測することができた⁷⁾。

一方、近年では、東京ゲートブリッジなどに橋梁用高性能鋼材 SBHS500 材が使用され、高降伏点鋼を利用した構造物も増えている。例えば文献 7)において、橋梁部材が同様な設計条件の時、SBHS500 材は SM570 材と比較して 10%以上の鋼重低減が可能であると示されている。このように高強度鋼材が構造物に利用されているにも関わらず、高強度鋼材の延性破壊に関する研究が十分になされていない。

そのため、本研究では、鋼橋建設の合理化を図るために開発され、強度、靱性等においてより優れた性能を有する橋梁用高性能鋼である SBHS500 材と同程度の降伏応力を有する一般構造用圧延鋼材 SM570 材およびそれらに比べて降伏点強度が低い一般構造用圧延鋼材 SM490 材に対して、文献 7)と同様に、ノッチを有する試験片の単調引張裁荷を行う。これにより、異なるノッチ

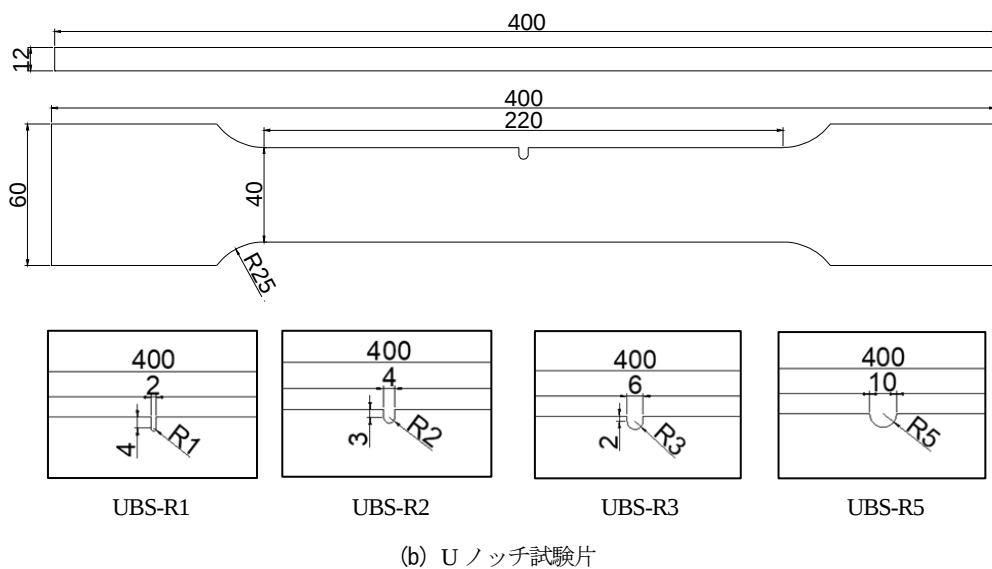
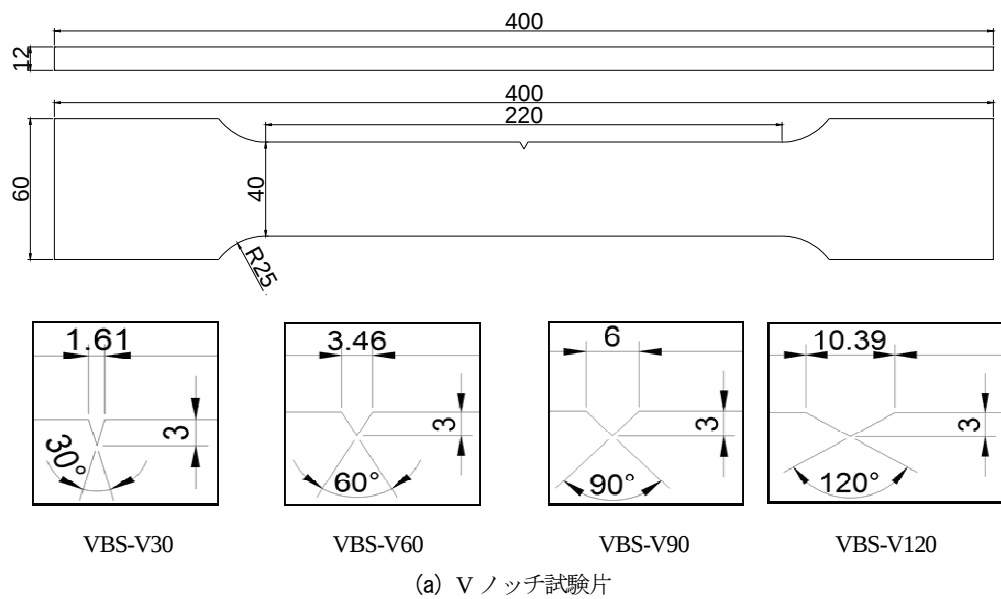
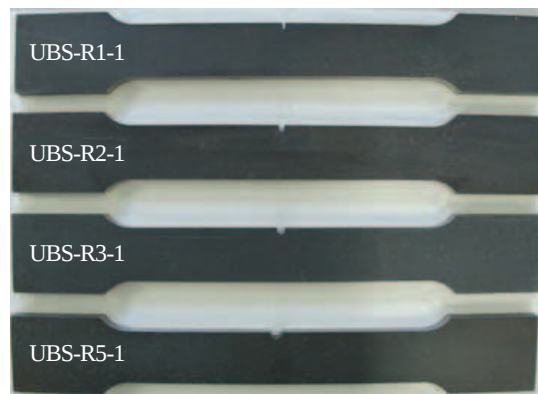


図-1 各試験片の全体と中央拡大部の設計寸法図 (単位: mm)



(a) V ノッチ試験片



(b) U ノッチ試験片

図-2 試験片写真(SBHS500 材)

半径やノッチ角度、鋼種による影響を比較することで、破断に至るまでの力学的特性、き裂の発生・進展を明らかにする。

2. 実験概要

過去の研究⁷⁾で SM490 材を対象とした検討を行った。本研究では、橋梁用高性能鋼材 SBHS500 (以降 SBHS500 材と称する) の延性破壊特性を明らかにすることを主な目的とする。併せて、同程度の降伏応力を有する一般構造用鋼材 SM570 (以降 SM570 材と称する) も検討対象に加えた。なお、比較のため、同じ加工業者による SM490 材の試験片も新たに製作した。延性き裂の発生は多軸応力拘束とひずみ集中が相互に起こることによって発生することが確認されている⁸⁾。そこで試験片内の応力状態を変化させるために、本実験では文献⁷⁾と同様に片側にノッチのある、切欠き半径が 1mm, 2mm, 3mm および

5mm となる U ノッチ試験片 (以降 UBS と称する)、切欠き角度が 30°, 60°, 90° および 120° となる V ノッチ試験片 (以降 VBS と称する) をそれぞれ 2 本ずつ、計 48 本を用意した。図-1 に試験片の設計図を、図-2 に SBHS500 材の写真の一例を示す。実験は、荷重 ± 500 kN、ストローク ± 75 mm まで制御可能な MTS 試験機を用いて変位制御で単調引張载荷を行い、载荷中の荷重と変位をデータロガー(TDS-530)で計測した。変位は標点間距離 200mm のパイ型変位計を用いて測定している。

3. 実験結果と考察

(1) 実験結果

表-1 に各鋼種の材料特性を 3 本の母材試験片の平均値で示す。SBHS500 材には降伏棚が現れなかったため、0.2%の永久ひずみが残る点の応力を降伏応力とした¹⁴⁾。各鋼種の荷重-変位を図-3 に示す。全ての鋼種におい

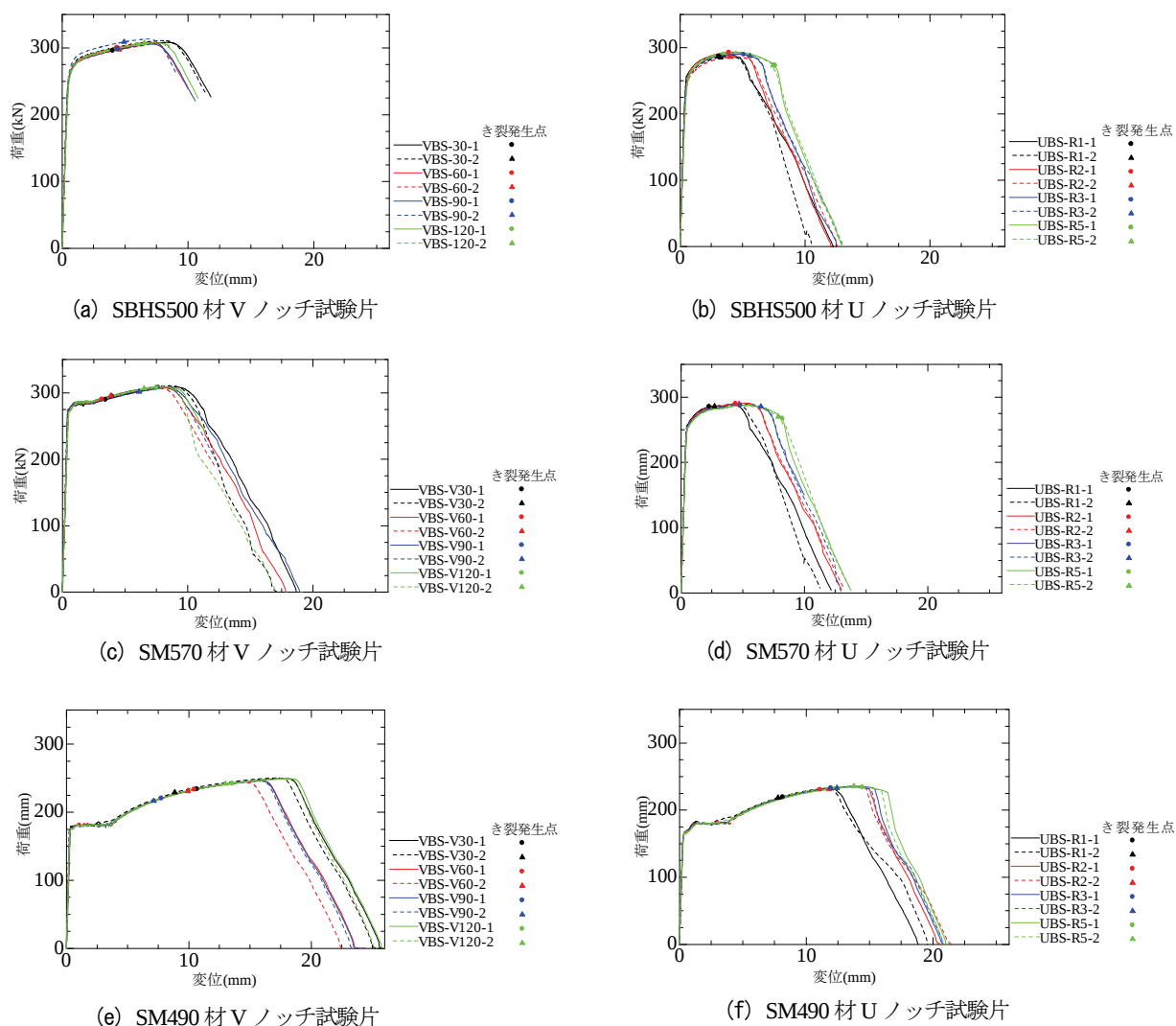


図-3 荷重-変位曲線

表-1 母材試験片の材料特性

	$E(\text{GPa})$	ν	$\sigma_y(\text{MPa})$	ε_y	$\sigma_u(\text{MPa})$	$\delta(\%)$
SBHS500	208	0.270	578	0.0020	675	16.7
SM570	216	0.278	597	0.0028	674	15.5
SM490	213	0.273	388	0.0018	546	26.0

Note : E = ヤング率, ν = ポアソン比, σ_y = 降伏応力, ε_y = 降伏ひずみ, σ_u = 引張応力, δ = 伸び率

表-2 各試験の伸び率

(a) V ノッチ試験片

	SBHS500	SM570	SM490
VBS-V-30	5.8%	9.1%	12.9%
VBS-V-60	6.7%	7.5%	11.7%
VBS-V-90	4.9%	8.1%	12.1%
VBS-V-120	6.9%	7.3%	12.9%

(b) U ノッチ試験片

	SBHS500	SM570	SM490
UBS-R-1	5.9%	6.1%	9.6%
UBS-R-2	6.1%	6.5%	10.5%
UBS-R-3	6.4%	6.1%	10.4%
UBS-R-5	6.6%	6.9%	10.5%

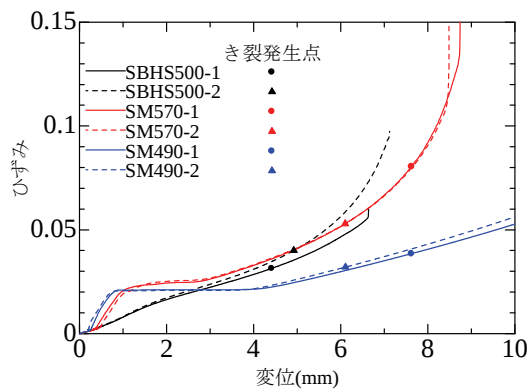
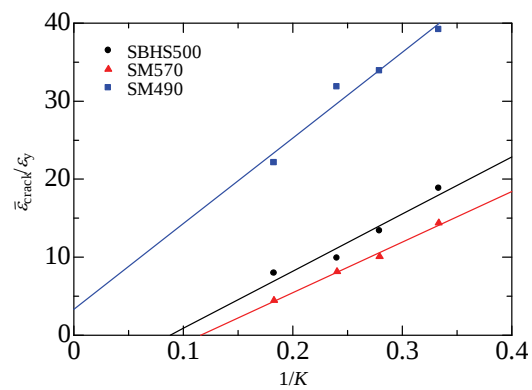


図-4 ひずみ-変位曲線(VBS-90 シリーズ)

図-5 $\bar{\varepsilon}_{\text{crack}}/\varepsilon_y - 1/K$ 関係

て文献 7)と同様にノッチ半径、角度の増加に伴ってき裂の発生が遅くなっていることが分かった。同図に示すように SBHS500 材と比べて、SM570 材および SM490 材は、き裂の発生が遅い。その理由として、ひずみの上昇する速さの違いが挙げられる。各鋼種における VBS-90 試験片を一例としてひずみ-変位曲線を図-4 に示す。ひずみゲージは後出の図-6(a)のようにノッチ先端から 5mm の位置に貼り付けた。変位が約 1mm までの弾性範囲において、SM490 材と SM570 材は同程度のひずみ上昇速度であり、SBHS500 材ではひずみ上昇速度は遅いことが分かった。また、変位 4mm 時の SM490 材のひずみは 2% に対して、SM570 材および SBHS500 材では 3% である。SBHS500 材および SM570 材は塑性変形能力が低く、切り欠きのような欠陥部において過大にひずみが集中する。それとは対照的に、SM490 材は塑性変形能力が高く、標点間距離部分の伸びは大きい。そのため、ノッチ先端のみに着目した時に、ひずみは小さい値を示す。

各試験片の伸び率の平均値を表-2 に示す。ノッチ半径および角度による相関性はみられなかった。しかし、U ノッチ試験片と比べて V ノッチ試験片は伸び率が 2% 程度大きくなった。原因として U ノッチ試験片ではノッチ底部が丸みを帯びているため応力が分散するが、V ノッチ試験片ではノッチ底部が鋭角であり、一点にひずみが集中するためであると考えられる。SM490 材と SM570 材の伸び率がノッチ形状により大きく変化する。また、SBHS500 材は、高応力状態における脆性的な破壊が生じたので、伸び率はノッチ形状による変化が小さいことが分かった。

(2) き裂発生の考察

西谷らは、切り欠きをもつ部材の力学的状態の厳しさを評価する工学的手法として「線形切欠力学」を提案している¹⁵⁾。そして、式(1)で定義される H.Neuber の弾性応力集中係数の近似式を用いることで、鋼材の引張破断

が整理できるとしている¹⁶⁾.

$$K = 1 + 2\sqrt{\frac{d}{R}} \quad (1)$$

ここで、 K =弾性応力集中係数、 d =切り欠き深さ(mm),

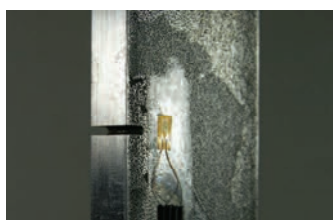
R =切り欠き半径(mm)である.

U ノッチ試験片では、ノッチ半径が 1mm, 2mm の場合においては最大荷重点よりも前にき裂が発生しており、3mm, 5mm においては最大荷重後にき裂が発生する. V

表-3 各試験片のパラメータ

		UBS-R1	UBS-R2	UBS-R3	UBS-R5
	d (mm)	5			
	R (mm)	1	2	3	5
	K	5.472	4.162	3.582	3.000
SBHS500	$\bar{\epsilon}_{\text{crack}}$	0.016	0.020	0.027	0.038
	$\bar{\epsilon}_{\text{crack}}/\epsilon_y$	7.950	9.900	13.400	18.850
SM570	$\bar{\epsilon}_{\text{crack}}$	0.013	0.023	0.028	0.040
	$\bar{\epsilon}_{\text{crack}}/\epsilon_y$	4.471	8.155	10.073	14.395
SM490	$\bar{\epsilon}_{\text{crack}}$	0.040	0.057	0.061	0.071
	$\bar{\epsilon}_{\text{crack}}/\epsilon_y$	22.111	31.833	33.889	39.167

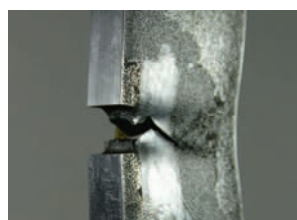
Note : K =弾性応力集中係数, $\bar{\epsilon}_{\text{crack}}$ =2 本試験片延性き裂発生時のひずみの平均値, ϵ_y =母材の降伏ひずみ



(a) き裂発生前



(b) き裂発生



(c) き裂進展



(d) 破断時

図-6 SBHS500 試験片のき裂発生と進展の様子(UBS-R-1)



(a) UBS-R-3-2(SBHS500)



(b) VBS-90-1(SBHS500)



(c) UBS-R5-1(SM570)



(d) VBS-120-1(SM570)



(e) UBS-R2-1(SM490)



(f) VBS-60-1(SM490)

図-7 各種鋼材試験片の破断面の例

ノッチ試験片ではすべてのノッチ角度において、最大荷重到達前にき裂が発生している。

表-3に示すように、全ての鋼材において延性き裂発生時のひずみ ϵ_{crack} は半径 R の減少に伴い小さくなる。また、塑性変形能力に劣る SBHS500 材および SM570 材は、SM490 材と比較して延性き裂発生時のひずみが小さいことが分かる。よって、延性き裂発生は鋼材の塑性変形能力と相関があると分かった。

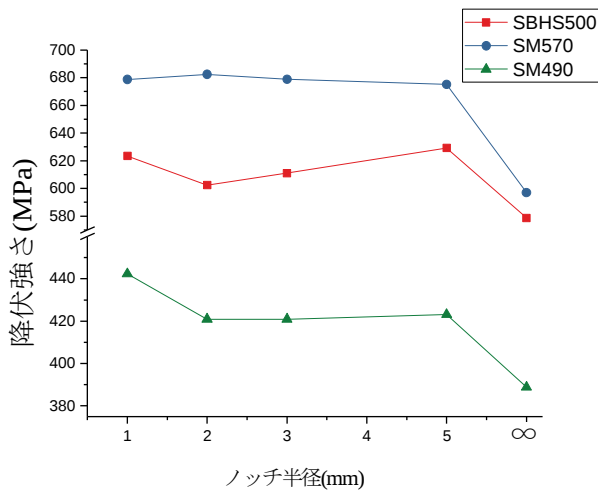
図-5には縦軸に2本の試験片のひずみゲージから延性き裂発生時の平均ひずみを母材の降伏ひずみで無次元化したもの、横軸に弾性応力集中係数の逆数の関係を示す。同図の近似曲線の傾きは、降伏応力が大きい SBHS500 材および SM570 材が最も小さく、SM490 材は傾きが大きい。すなわち、延性き裂発生時のひずみが小さく降伏応力が高いため、大きな塑性変形を伴わずに脆性的な破壊が起こると考えられる。

全ての鋼種の近似曲線において、 $1/K$ の増加に伴い一

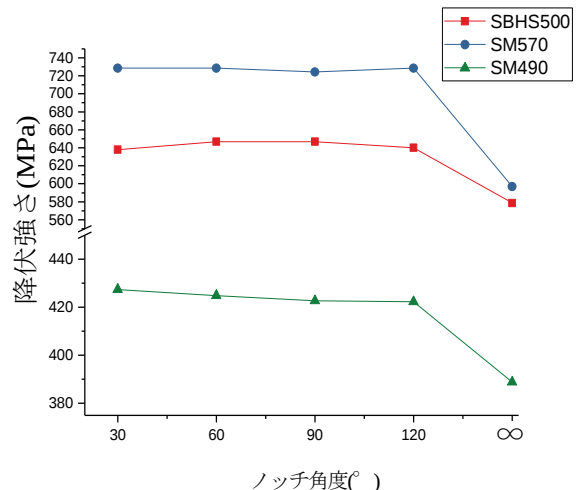
様に増加し、近似曲線の決定係数も 0.9 以上を示しており、強い相関関係があると考えられる。SM490 材と比較して、高降伏点を有する SBHS500 材および SM570 材は延性き裂発生ひずみが小さい。また、切り欠き半径の減少に伴い、延性き裂発生時のひずみは減少し、応力集中係数が上昇する。よって、期待する塑性変形能力を発揮する以前に脆性破壊が起こると考えられる。

(3) ノッチ先端の変形状況と破断面の考察

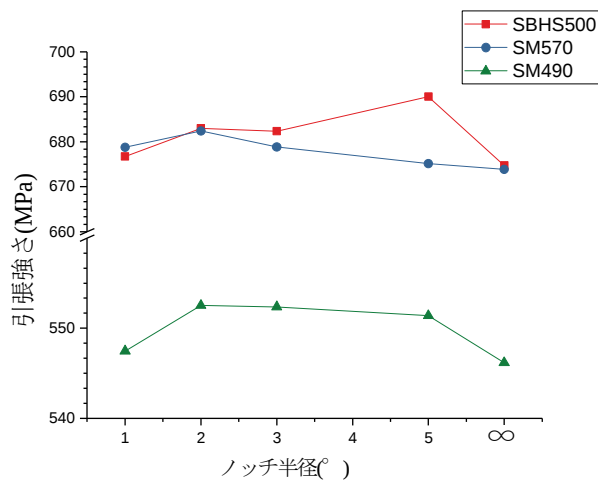
SBHS500 材(UBS-R-1)のノッチ先端の変形状況を図-6に示す。荷重増加に伴ってノッチ先端が徐々に広がっている。き裂の発生は、ノッチ先端が伸びきった後に、中心部より発生している。その後、幅方向へのき裂進展に伴い、延性破壊が生じている。また、破断面を図-7に示すように、全ての鋼種に共通して、ノッチ先端から試験片中心に向かって何層もの山形模様が形成されていることから、ノッチ底部からき裂が発生し、山形の頂点方向



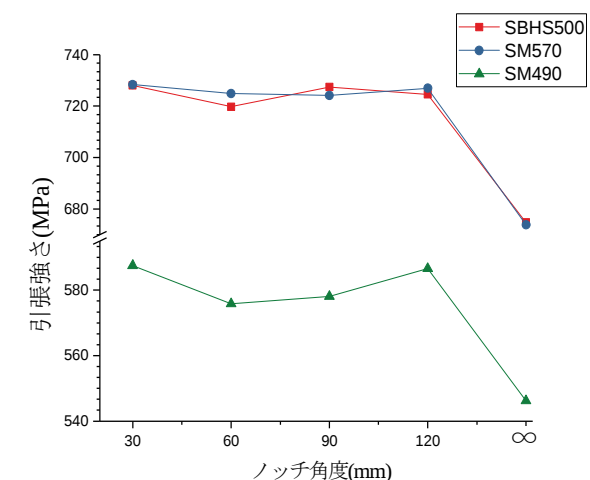
(a) 降伏強さとノッチ半径の関係



(b) 降伏強さとノッチ角度の関係



(c) 引張強さとノッチ半径の関係



(d) 引張強さとノッチ角度の関係

図-8 降伏強さと引張強さに及ぼすノッチ半径および角度の影響

である試験片中心から幅方向へ徐々にき裂が進展していったと考えられる。その後、山形模様が無くなったことから延性破壊の後、脆性的に破壊したと考えられる。ここで、SM490 材において延性破壊が試験片中心まで生じているが、SM570 材および SBHS500 材は脆性破壊が主である。これは、降伏応力が大きい SBHS500 材と SM570 材は、き裂の発生から破断に至るまで、応力がノッチ先端に集中するためであると考えられる。よって、高強度鋼材の構造物に鋭い欠陥が存在する場合、特に注意する必要がある。なお、これらの応力ひずみ状態を数値解析により詳細に検討する必要がある。

(4) 降伏強さと引張強さに及ぼす切り欠き形状の関係

図-8(a)および(b)に降伏強さとノッチの半径および角度の関係を示す。ここで、母材試験から得られる降伏応力 σ_y と引張応力 σ_u と同様に、降伏強さは、各試験片の降伏棚の平均値および 0.2%ひずみ時の応力、引張強さは最大応力と定義する。また、 ∞ は切り欠きの無い試験片である。降伏強さはノッチ半径および角度と関係性は無くほぼ一定であった。V ノッチ試験片では U ノッチ試験片と比較して、降伏強さが 1.1 倍程度大きい値となった。同図の(c)および(d)に引張強さとノッチの半径および角度の関係を示す。降伏強さと同様に、引張強さとノッチの半径および角度の関係性はみられなかった。ノッチ形状による比較では、V ノッチ試験片が U ノッチ試験片に比べて 1.2 倍程度大きい値となった。すなわち、切り欠きが鋭いほど引張強さが大きくなる。

よって、実構造物において V ノッチのような鋭い欠陥が存在する場合、地震などの大きな外力を受けた時に、き裂進展を伴わない想定外な脆性破壊に至りやすいと考えられる。

4. 結言

異なるノッチ半径やノッチ角度、鋼種による影響を比較することで、破断に至るまでの力学的特性とき裂の発生・進展を明らかにした。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 全ての鋼種において、V ノッチ試験片では角度減少に伴いき裂発生が早くなり、U ノッチ試験片では、半径の減少に伴いき裂発生が早くなる。
- (2) SM490 材と SM570 材の伸び率がノッチ形状により大きく変化する。それに対して、SBHS500 材は、ノッチ形状による変化が小さいことが分かった。
- (3) SM490 材と比較すると、SBHS500 材および同程度の降伏応力の SM570 材は降伏応力が大きく塑性変形能力が小さいため、ノッチ先端部に、ひず

みが集中し、き裂の発生が早い。

- (4) 切り欠き半径が小さい場合、応力集中係数が高く、ノッチ先端からき裂が発生する。また、高降伏点を有する SBHS500 材および SM570 材はき裂進展を伴わない脆性破壊に至りやすいことが分かった。

参考文献

- 1) 杉本浩一，高橋泰彦：阪神・淡路大震災で破断した柱梁仕口部近傍の破面の調査－き裂の発生の検証と材質変化の分析－，鋼構造論文集，Vol.3，pp.21-34，1995.
- 2) 渡辺英一，前川義男，杉浦邦征，北根安雄：阪神・淡路大震災特集－第 4 回－公共の被害と耐震性，土木学会誌，Vol.80，No.7，pp.54-62，1995.
- 3) 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，No.591/I-43，pp.243-261，1998.
- 4) 平松秀基，道場康二，豊田政男：応力三軸度が小さい力学状態における構造用材料の延性き裂発生特性，日本造船学会論文集，Vol.192 号，pp.563-571，2002.
- 5) 加藤友哉，康瀾，葛漢彬：溶接継手の破壊メカニズムの解明に関する基礎的研究，土木学会論文集 A1，（構造・地震工学）Vol.71，No.4，pp.634-645，2015.
- 6) 山田剛久，大畑充：延性亀裂発生限界特性に及ぼす材料特性の影響に関する研究，溶接学会論文集，Vol.36，No.4，pp.285-292，2018
- 7) 劉巖，葛漢彬，康瀾：高応力三軸度下における鋼材の延性破壊モデルの予測精度の向上に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.74，No.4，pp. I_546-I_557，2018.
- 8) 葛漢彬，川人麻紀夫，大橋正稔：鋼材の延性き裂発生の限界ひずみに関する基礎的研究，土木学会地震工学論文集，Vol.28，2005.
- 9) Barsoum, I. and Faleskog, J.: Rupture mechanisms in combined tension and shear-Experiments, *Int. J. Solids. Struct.*, Vol.44, No.6, pp.1768-86, 2007.
- 10) Jackiewicz, J.: Use of a modified Gurson model approach for the simulation of ductile fracture by growth and coalescence of microvoids under low, medium and high stress triaxiality loadings, *Eng. Fract. Mech.*, Vol.78, No.3, pp.487-502, 2011.
- 11) Hosokawa, A., Wilkinson, D. S., Kang, J. and Maire, E.: Effect of triaxiality on void growth and coalescence in model materials investigated by X-ray tomography, *Acta. Mater.*, Vol.60, pp.2829-2839, 2012.
- 12) Kiran, R. and Khandelwal, K.: Experimental studies and models for ductile fracture in ASTM A992 steels at high triaxiality, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol.140, No.2, 2014.
- 13) 三木千壽，市川篤司，楠隆，川端文丸：橋梁用高性能鋼材（BHS500，BHS700）の提案，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.1-10，2003.
- 14) 網谷岳夫，森猛，小林裕介：摩擦接合重ね継手のすべり耐力と降伏耐力に関する解析的検討，鋼構造論文集，Vol.24，No.96，pp.45-54，2017.

- 15) 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, No565, pp.127-134, 2003. における応力場の尺度, 日本機械学会論文集, A 編, Vol.49, No.447, pp.1353-1359, 1983.
- 16) 西谷弘信, き裂における応力拡大係数に相当する切欠き

EXPERIMENTAL STUDY ON DUCTILE FRACTURE BEHAVIOR OF HIGH STRENGTH STEELS WITH NOTCHES

Shuto IKEDA, Yan LIU, Hanbin GE and Lan KANG

In this study, in order to simulate the occurrence and growth of ductile cracks in structural steels in the high stress triaxiality region, tensile tests were conducted on test pieces with notches, having different notch radii and notch angles. The test specimens were made of SBHS, a type of steel for high performance structures, as well as two types of conventional structural steels SM570 and SM490. By comparing the effects of different notch radii, notch angles and steel grades, mechanical properties, crack initiation, propagation up to fracture were clarified.