

# 繰り返し曲げを受ける鋼部材の延性き裂発生・進展・破壊現象の解明に関する実験的研究

吉田 聡一郎<sup>1</sup>・葛 漢彬<sup>2</sup>・賈 良玖<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 名城大学 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: 140448101@c alumni.meijo-u.ac.jp

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>名城大学 総合研究所 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail: LJ\_JIA@hotmail.com

本研究では、鋼部材の延性き裂発生・き裂進展および破断までの挙動を解明するために行った繰り返し三点曲げ実験により、切り欠き形状および载荷パターンの異なりが試験体の破壊に及ぼす影響を調べている。その結果、切り欠き半径が大きいものは、き裂が発生しにくい内部にき裂が進展しやすく、破断前の兆候が分かりにくいことや、载荷パターンや切り欠き形状の異なりが、き裂発生や破断までのエネルギー吸収量に影響を与えることが分かった。

**Key Words:** ductile fracture, cyclic loading, U-notch, V-notch, crack propagation rate

## 1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震で、冷間成形鋼管柱と通しダイヤフラムの溶接部が破断するという被害が見られた。そればかりでなく、ラーメン骨組みの梁端部の外部鉄骨柱部材、鉄道高架橋を支持する柱部材にも明瞭な脆性的な破壊が発生したことが分かった。これらは、いずれも熱間圧延又は鑄造の厚肉鋼材であり、溶接部のみならず母材で破断するケースも見られた<sup>1)</sup>。写真-1は神戸高速鉄道の三宮駅付近の高架橋の鑄造製の橋脚における脆性的な破壊の事例である<sup>2)</sup>。すなわち、脆性的な破壊は冷間加工材や溶接部のみではなく、局部座屈が生じにくい厚肉鋼材に潜在する一般的な問題である事が実証された。既往の研究から、この脆性的な破壊は延性き裂を起点としてき裂が進展し、限界まで達すると脆性的な破壊が生じることが分かっている<sup>3)</sup>。そのため、延性き裂発生から脆性的な破壊へと至る破壊メカニズムの解明は重要である<sup>4)</sup>。しかしながら、土木分野の研究は脆性的な破壊に関して多くはない<sup>5)</sup>。

既往の研究<sup>6) 7)</sup>では、鋼製ラーメン橋脚の隅角部等が地震動によって繰り返し曲げを受けた時を想定し、レ型開先溶接されたT型溶接継手に繰り返し三点曲げ

载荷実験を行い、延性き裂の発生・進展および破断までの挙動を調べ、溶接ビード止端部の存在や溶接部等の材料が不連続である(母材部から溶接部に急激な材料変化を有する)箇所にノッチが設けられている場合、延性き裂発生の要因と成り得ることが分かった。

そこで、本研究では過去に行われた実験的研究を踏まえて、繰り返し曲げを受ける鋼部材の延性破壊現象を解明するため、繰り返し三点曲げ载荷実験を行い、初期不整や疲労き裂等の傷を想定した人工的なノッチや、ノッチの先端半径の異なりおよび载荷



写真-1 神戸高速鉄道の三宮駅付近の高架橋 鑄鉄製橋脚の被害様子

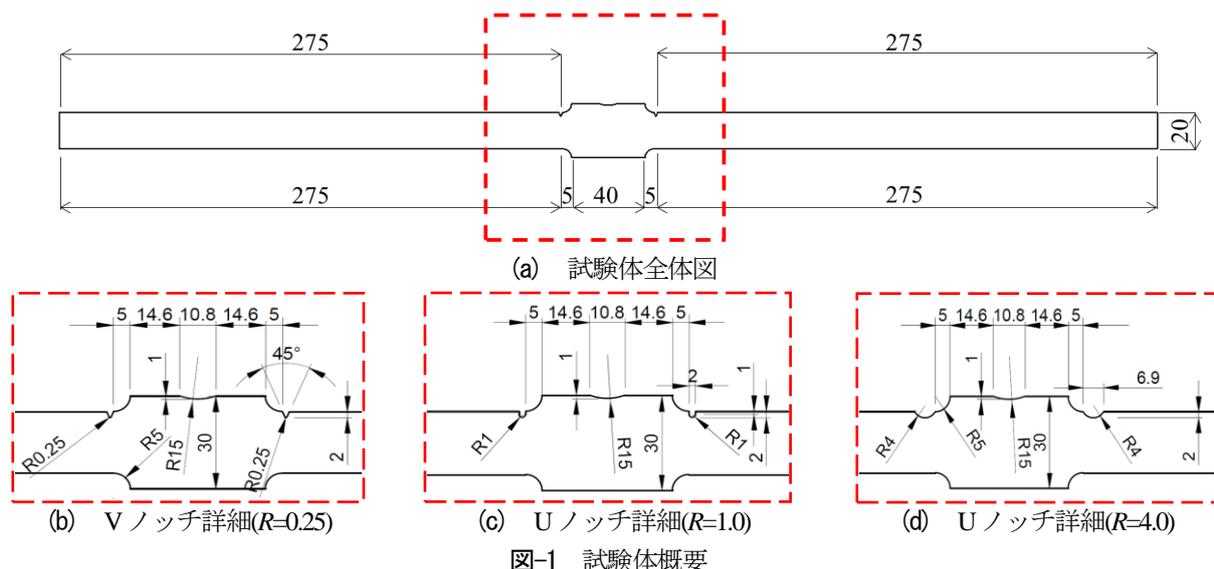


図-1 試験体概要

表-1 試験体概要一覧

No.	試験体名	ノッチ半径(mm)	载荷パターン
1	R0.25-V-I	0.25	2 $\delta_y$ ずつ漸増载荷
2	R1.0-U-I	1.0	
3	R4.0-U-I	4.0	
4	R1.0-U-CL	1.0	一定载荷( $\pm 14\delta_y$ )
5	R1.0-U-CM	1.0	一定载荷( $\pm 10\delta_y$ )
6	R1.0-U-CS	1.0	一定载荷( $\pm 6\delta_y$ )
7	R1.0-U-R	1.0	ランダム载荷

表-2 機械的性質

鋼材	SM490YB
ヤング率 $E$ (GPa)	210
ポアソン比 $\nu$	0.273
降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	363
引張強度 $\sigma_u$ (MPa)	510
硬化ひずみ $\epsilon_w$ (%)	1.59
伸び率(%)	31.1

パターンの異なり等の様々な要因が、繰返し曲げを受けた場合におけるき裂発生・進展・破断までの挙動に及ぼす影響について検討する。

## 2. 実験概要

### (1) 試験体概要

試験体は SM490YB 材を用いた母材で 7 本あり、全てに人工的な切り欠きを設けている。試験体概要を図-1 に、ノッチ形状や実験の载荷パターンを表-1 に示す。また、材料試験片 2 本も同鋼板より作成しており、この鋼板の機械的性質を表-2 に示す。

実験試験体の切り欠き形状は U 形と V 形であり、深さは全て 2mm とし、ノッチ半径  $R$  は V 形の場合 0.25mm, U 形の場合 1.0mm と 4.0mm の 2 種類で計 3 種類である。なお、実験試験体名は例として、R1.0-U-I の場合、R の後の 1.0 がノッチ先端半径、U がノッチ形状、I が载荷パターンを表している。

### (2) 三点曲げ実験方法

実験には荷重 $\pm 500$ kN、ストローク $\pm 75$ mm まで制御

可能な MTS 試験機を用いる。また実験装置の両端と試験体中央にはローラーを用いた治具を設置し、繰返し曲げ载荷実験を行っている。支持条件はピン支持とし、支間長は 540mm となっている。試験装置概要を図-2 に示す。

変位計は実験試験体の中央の変位、治具の上部および下部の変位を測定するように計 7 本設置している。変位計の設置位置を図-3 に示す。载荷パターンについては  $R=1.0$ mm の試験体の解析結果より、1Half cycle の降伏点より算出した降伏変位  $\delta_y=4.5$ mm を基準とした。载荷パターンは図-4 に示しているように漸増载荷、一定载荷、ランダム载荷である。本実験で試験体中央に設置する治具の関係で、試験機のストローク限界が $\pm 70$ mm であるため、図-4(a)に示すように、漸増振幅繰返し载荷は増加量を $\pm 2\delta_y$ とし、設定した上限に達した後は一定振幅载荷へ変更し载荷実験を継続した。図-4(d)に示すように、ランダム载荷は 30Half cycle を 1 周とする Krawinkler らによって提案されたもの<sup>9)</sup>を用いている。ここで、30Half cycle に達して破断に至らなかった場合、2 周目として 1Half cycle から再度、载荷実験を継続した。

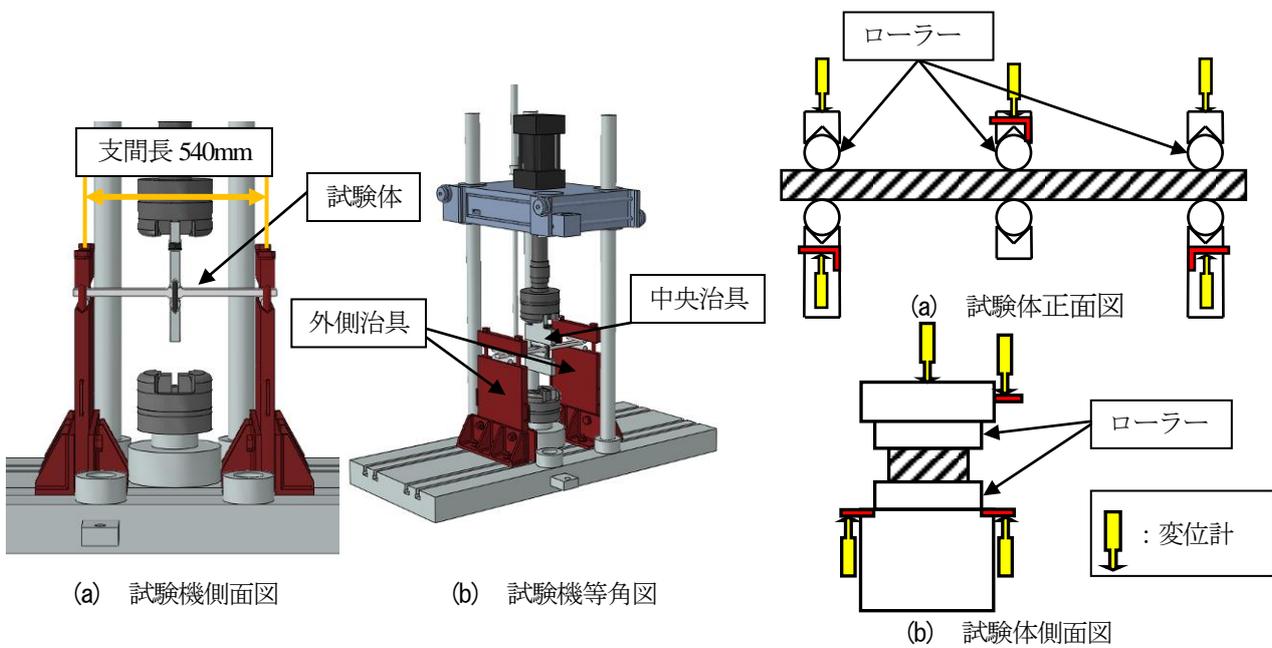


図-2 試験体設置概要

図-3 変位計設置位置

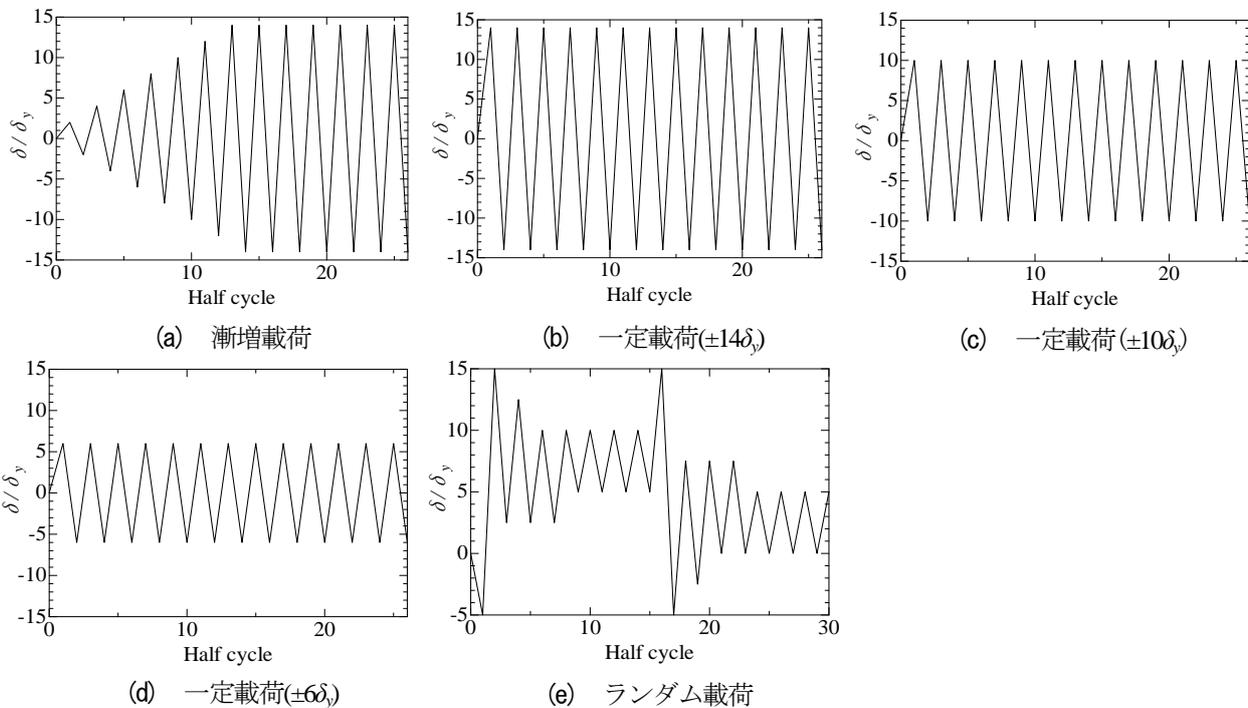
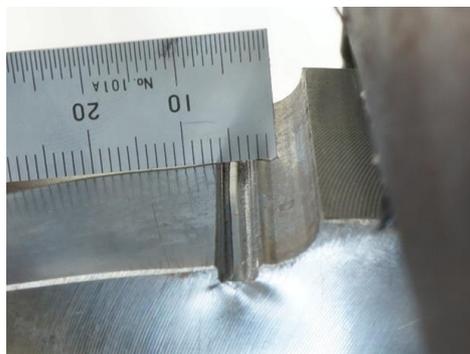
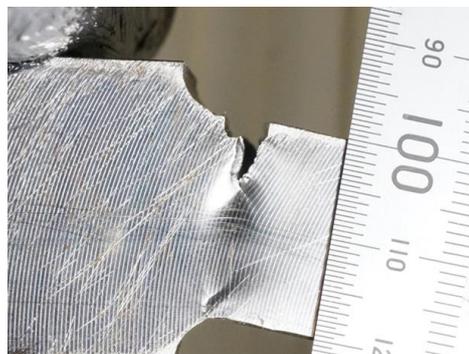


図-4 载荷パターン

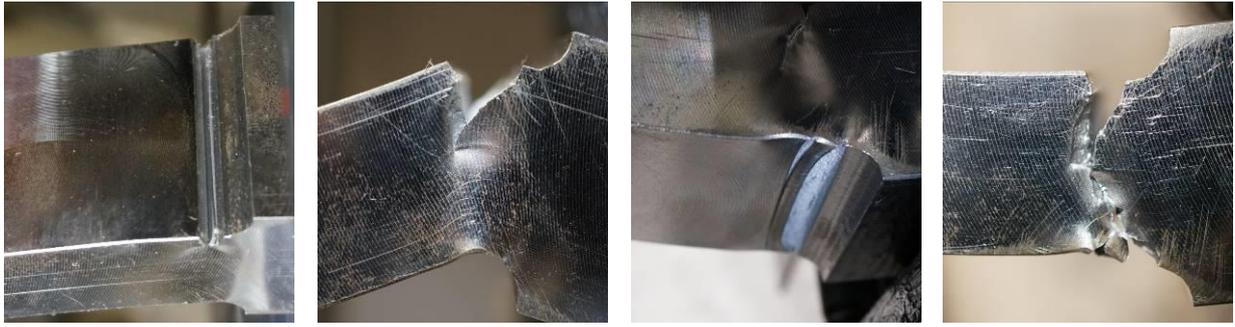


(a) き裂発生測定



(b) き裂深さ測定

写真-2 き裂発生とき裂深さの測定



(a) き裂発生(11Half cycle) (b) き裂進展(15Half cycle) (c) 下き裂(16Half cycle) (d) 破断(18Half cycle)

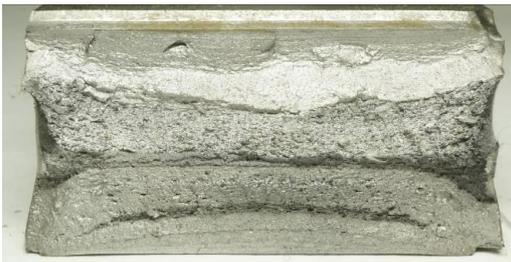
写真-3 R0.25-V-Iの実験状況 (き裂発生, 進展および破断)



(a) R0.25-V-I



(b) R1.0-U-I



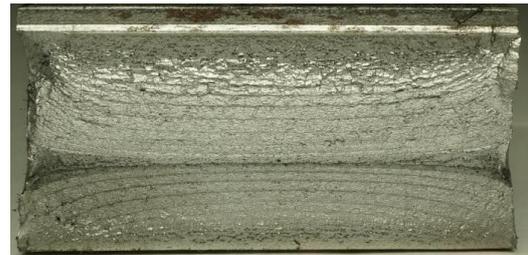
(c) R4.0-U-I



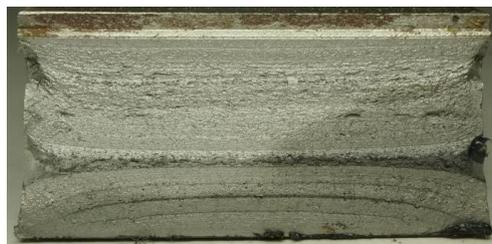
(d) R1.0-U-CL



(e) R1.0-U-CM



(f) R1.0-U-CS



(g) R1.0-U-R

写真-4 各試験体破断面

表-3 最大荷重時・き裂発生時・破断時の Half cycle, 変位および荷重

No.	試験体	最大荷重時			き裂発生時			破断時		
		Half cycle	変位 (mm)	荷重 (kN)	Half cycle	変位 (mm)	荷重 (kN)	Half cycle	変位 (mm)	荷重 (kN)
1	R0.25-V-I	13	63.2	31.3	11	53.9	27.1	18	-47.5	-2.7
2	R1.0-U-I	13	63.2	39.2	11	54.1	33.5	18	-40.1	-2.4
3	R4.0-U-I	13	63.5	33.3	17	63.0	27.5	25	31.0	6.7
4	R1.0-U-CL	1	63.1	39.7	5	63.1	34.3	9	60.5	16.2
5	R1.0-U-CM	3	45.0	25.2	9	45.1	23.2	16	-39.1	-11.9
6	R1.0-U-CS	7	27.1	16.7	27	27.1	15.5	50	-27.2	-2.3
7	R1.0-U-R	2	67.5	39.5	32	67.6	33.9	76	65.4	12.6

### 3. 実験結果

本実験では、Half cycle ごとに荷重を一時中断し、定規をき裂の上から当てて、マクロレンズ付きのカメラにより撮影を行い、き裂の測定を行っている。また既往の研究<sup>9,7)</sup>と同様、き裂幅が試験体長さ方向に測定し、き裂進展状況については側面観察で行っている（き裂発生後、試験体板厚方向にき裂が進展するため）。き裂発生とき裂深さの測定方法を写真-2に示す。また既往の研究<sup>9,7)</sup>では、破断が瞬間的であるため、引張最大荷重に対して荷重が50%低下した時点破断時と定義していたが、今回はその現象がほとんど見られなかったため、破断時は破断した Half cycle 時の急激な荷重低下が確認された点のものとし、その Half cycle と変位および荷重の比較を行った。

#### (1) 破壊状況

例として No.1 R0.25-V-I のき裂発生、進展および破断までの実験状況の写真を写真-3に示し、各試験体の破断面の様子を写真-4に示す。写真-3(a)から分かるように V ノッチ底部がひずみ集中部となり、ノッチ底部からき裂が発生した。その後、き裂は徐々に進展し、15Half cycle 時に写真-3(b)に示す状況である。14Half cycle で下側の R 部でき裂が発生し、写真-3(c)に示すように 16Half cycle で大きくき裂が進展し、そして 18Half cycle で上下のき裂がつながり破断に至った。破断ルートは写真-3(d)より、上側のき裂は鉛直下向きに進展し、下側のき裂は右下から左上方向に進展していることが分かる。最終的に、側面から見ればくの字型になっている。ただし、破断面からのき裂深さは上側のき裂の方が深いことが確認できた。これは上側にはノッチが設けられているため、ひずみが集中したからである。以上の見解は写真-4(a)の破断面からも確認することができる。また上下のき裂が繋がったと見られる部分や、き裂が一気に進

展したと見られる部分には延性破壊により金属の伸びた形跡と、ディンプルのような穴が破断面中央に確認できた。

全試験体に共通して確認できたのは、はじめにき裂が発生するのは必ず試験体上側の切り欠き部からであり、下側き裂はき裂発生後でもしばらく側面にき裂が現れることなく、内部深くにき裂進展していた。また下側き裂の発生箇所は共通して、R 部の始端部であった。

写真-4(a), (b), (c)から漸増荷重における破断面は中央部が延性破壊により金属の伸びた形跡とディンプルのような穴が確認できた。次に、写真-4(d), (e), (f)から一定荷重における破断面は疲労破面の特徴であるビーチマーク（貝殻模様）が確認でき、破断面両端には延性破壊の特徴であるディンプルが確認できた。さらに、写真-4(g)からランダム荷重における破断面は疲労破壊の特徴であるビーチマークが確認できたが、一定荷重の破断面とは異なりビーチマークの間隔が様々であった。

#### (2) Half cycle と荷重および変位

本実験で得られた各試験体の最大荷重時、き裂発生時および破断時の Half cycle, 変位および荷重を表-3に示す。前述したように、破断時の荷重は破断した Half cycle 時の急激な荷重低下が確認された点のものとした。また本実験では、一定荷重およびランダム荷重は荷重-変位履歴曲線では、最大荷重時、き裂発生時また破断時における Half cycle 数の確認が難しいため、各サイクルの最大荷重をつないだ包絡線を用いて各試験体の比較を行う。例として No.2 R1.0-U-I, No.5 R1.0-U-CM および No.7 R1.0-U-R の荷重-変位履歴曲線を図-5に示し、各試験体の引張側と圧縮側の包絡線を図-6に示す。また、図-6においてき裂発生が全て引張側であることから、引張側の最大荷重を示している。

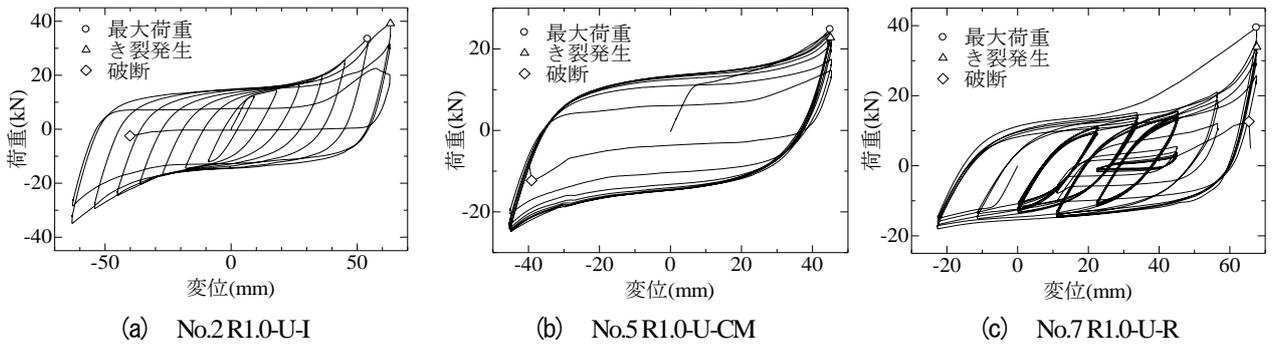


図-5 荷重-変位履歴曲線

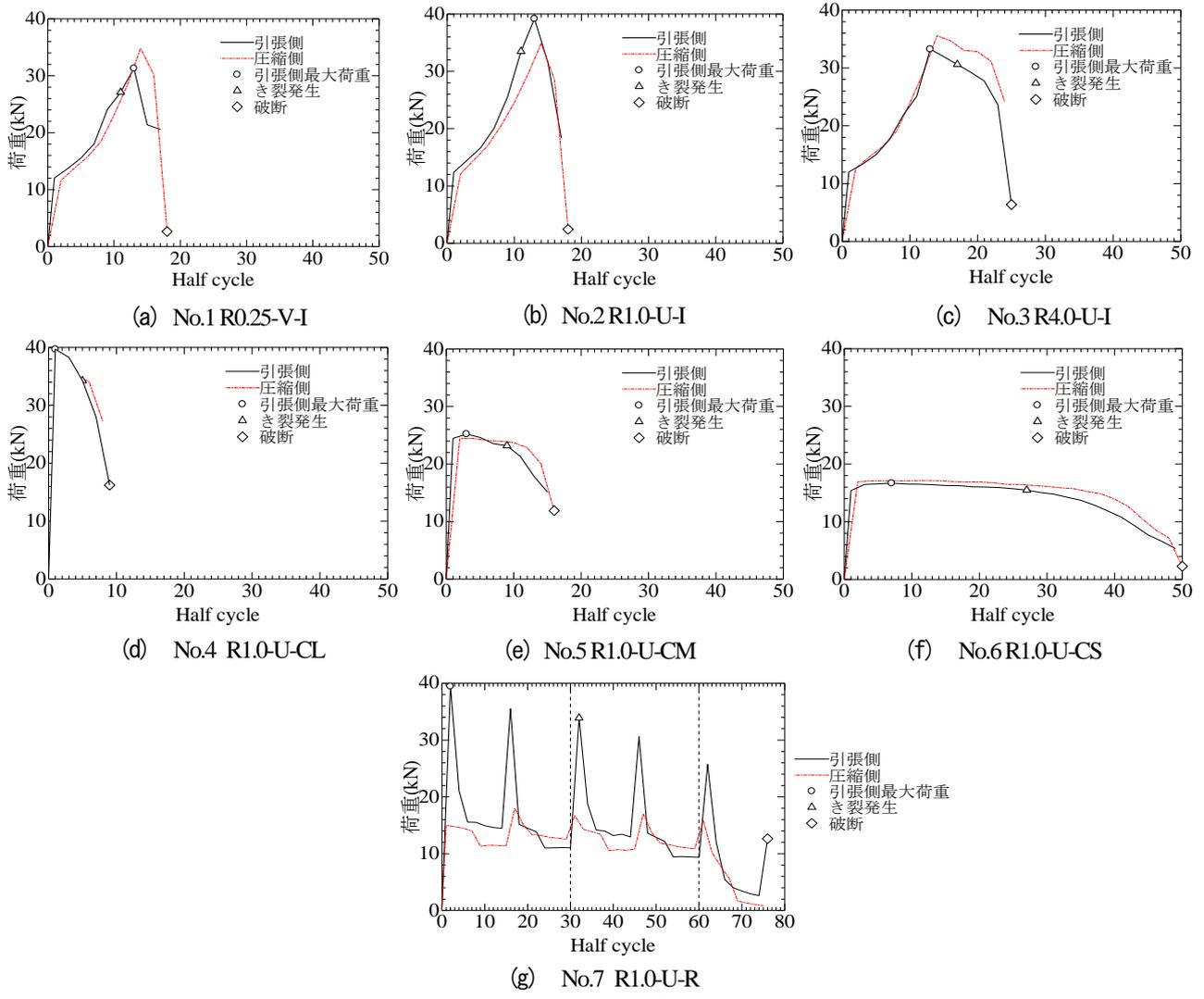


図-6 包絡線

図-6(a), (b)を比較して、VノッチとUノッチでのノッチ形状の異なりによる影響を調べる。No.1 R0.25-V-IとNo.2 R1.0-U-Iにおいて、き裂発生時のHalf cycle数は11Half cycleと同じタイミングであったが、き裂発生時の荷重に着目するとNo.2 R1.0-U-Iの方が6.4kN程度大きい。また最大荷重時においても、Half cycle数は13Half cycleと同じタイミングであったが、最大荷重はNo.2 R1.0-U-Iの方が7.9kN程度大きくなった。最

大荷重後の挙動に着目すると、No.1 R0.25-V-IとNo.2 R1.0-U-I共に最大荷重後の荷重低下が急激である。これはノッチ底部にひずみが過度に集中し、内部へのき裂進展速度が速かったためであると考えられる。

次に、図-6(b), (c)を比較して、漸増載荷におけるノッチ半径の異なりによる影響を調べる。No.2 R1.0-U-Iは最大荷重到達後にき裂が発生しているのに対して、No.3 R4.0-U-Iは最大荷重到達前にき裂が発生して

いる。これは、No.2 R1.0-U-Iはノッチ半径が小さく、ノッチ底部にひずみが集中したことが起因していると考えられる。それに対して、No.3 R4.0-U-Iはノッチ半径が大きく、ノッチ底部にひずみがあまり集中しなかったためであると考えられる。このことは既往の研究<sup>5)</sup>においてもノッチ半径の小さなものはノッチ底部にボイドの成長が見られるが、半径の大きなものは試験体最小断面の内部でボイドの急成長が確認されていることから明らかである。

さらに、図-6(d), (e), (f)のノッチ形状が同一で荷重パターンが一定振幅荷重の試験体と比較を行う。漸増荷重(No.2 R1.0-U-I)の場合と異なり、一定荷重は全ての試験体において、最大荷重後にき裂が発生した。表-3よりNo.4 R1.0-U-CLのみ最大荷重は1Half cycleであったのに対して、他の一定荷重はNo.5 R1.0-U-CMが3Half cycle、No.6 R1.0-U-CSが7Half cycleの時であった。また、振幅が小さくなるにつれ最大荷重からき裂発生、き裂発生から破断までのHalf cycle数が大きくなっている。荷重低下はNo.4 R1.0-U-CLは最大荷重後に急激に低下しているのに対して、No.5 R1.0-U-CMは10Half cycleまでは緩やかに低下しているが、10Half cycle以降は急激に低下している。そして振幅が最も小さいNo.6 R1.0-U-CSは破断時まで緩やかに低下しており、急激な荷重低下が見られない。

最後に、ランダム荷重で行ったNo.7 R1.0-U-Rの最大荷重は荷重パターンの中で最も振幅の大きくなる一周目の2Half cycle(15 $\delta_y$ )の時であった。そしてき裂発生は二周目の32Half cycle(15 $\delta_y$ )であった。一周目の15 $\delta_y$ を見てみると、2Half cycleの荷重が39.1kNで16Half cycleが35.2kN、二周目の32Half cycleでは33.5kNと荷重が低下していた。また、2Half cycleと16Half cycleでは荷重低下が急激であるのに比べ、16Half cycleと32Half cycleでは荷重低下は小さく、ほかの同じ振幅の時を比べても大きな荷重低下は見られなかった。また、小さな振幅では引張と圧縮の両方でほとんど荷重低下が見られないが、破断が近づくにつれ急激に荷重が低下する傾向が見られ、特に64Half cycle(12.5 $\delta_y$ )では明確に現れている。圧縮側に注目してみると一周目の-5 $\delta_y$ は15.4kNであったのに対し17Half cycleでは18.4kN、二周目の31Half cycleでは17.1kNと圧縮側最大荷重は17Half cycleであった。これは圧縮側は切り欠きの様なひずみ集中箇所がないためによるものであり、繰り返し荷重によるひずみ硬化の影響があったと考えられる。以上より、ランダム荷重では、大きな振幅後は急激に荷重が低下するが、小さな振幅では荷重の低下は小さく緩やかである。しかし、破断が近づくにつれ小さな振幅でも急激に荷重が低下し、破断の前兆が現れる。

### (3) き裂進展率と累積塑性率

繰り返し荷重時の塑性変形能力の指標として、累積塑性率を用いた。累積塑性率は式(1)<sup>9)</sup>より算出した。

$$u_{eq} = \frac{\sum_i \left| \delta_i - \frac{P_i}{K_e} \right|}{\delta_y} \quad (1)$$

ここで、 $\delta_i$ は1Half cycle以降の変位、 $P_i$ は1Half cycle以降の荷重である。また、 $K_e$ は式(2)で定義される。

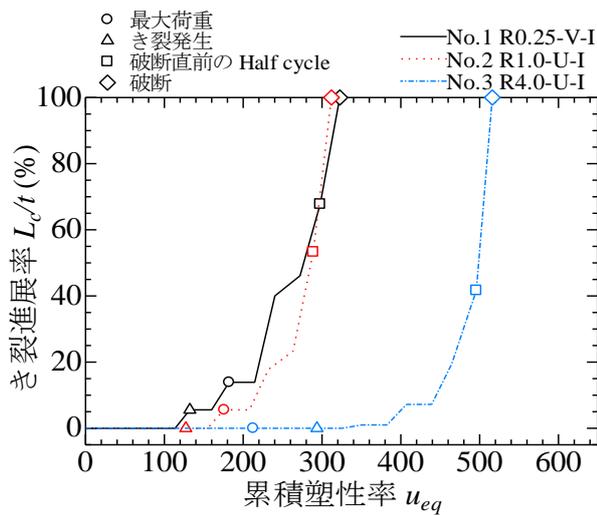
$$K_e = \frac{P_y}{\delta_y} \quad (2)$$

上式中、 $P_y$ は降伏荷重、 $\delta_y$ は降伏変位である。本実験で、累積塑性率を指標として用いているのは、荷重パターンの異なる試験体同士を比較するとき、Half cycle数や変位量による影響で同値な比較が困難であると考えられるためである。各実験試験体の結果を式(1)に基づいて、ノッチ形状の違いと荷重パターンの違いによりまとめたものを図-7に示す。ここで縦軸のき裂進展率は、実験試験体のき裂深さ $L_c$ を最小断面厚であるノッチ部の板厚 $t=18\text{mm}$ で除し百分率で表したものである。

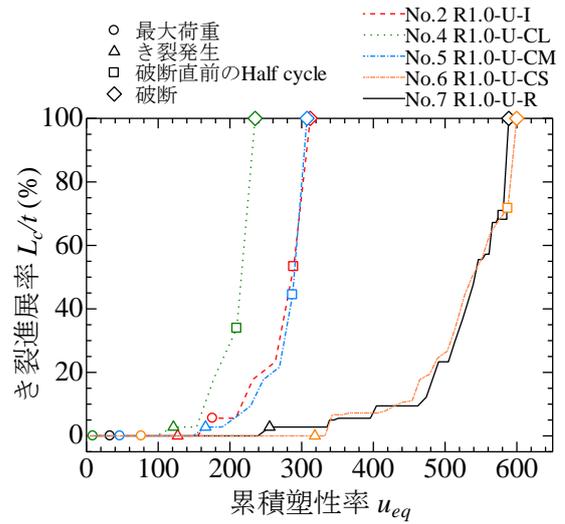
図-7(a)よりNo.1 R0.25-V-IとNo.2 R1.0-U-Iを比較すると、破断直前のHalf cycleのき裂進展率の値に差が出ている。これは本実験がき裂深さを試験体側面で測定しているため、き裂発生後にき裂が側面に現れず内部において進展し、内部のき裂とその後側面に現れたき裂がつながることで一気に破断したものと考えられる。さらにNo.3 R4.0-U-Iはき裂発生後においてしばらくは側面でき裂を観測できず、破断直前のHalf cycleのき裂進展率が40%と小さいことから、漸増荷重はノッチ先端半径が大きい程、最大荷重後にもき裂は発生しづらく耐力が大きいといえる。しかしき裂は側面に現れづらく内部において進展しやすいため、側面観測だけで破断の前兆はわかりにくいと考えられる。

次に、図-7(b)より一定荷重における振幅の違いについて比較する。No.4 R1.0-U-CLは振幅が大きく、き裂が発生したら一気に進展し、破断直前のHalf cycleが40%に満たない値から破断に至った。対して振幅の小さなNo.6 R1.0-U-CSはき裂発生からほぼ一定の間隔でき裂が進展し、破断直前のHalf cycleが73%に達した後破断に至った。以上の結果とNo.5 R1.0-U-CMの結果から、一定荷重において振幅が大きなものほどき裂は一気に進展しやすく、急激な破断に至ることが分かる。

さらに、図-7(b)より荷重パターンの違いについて比較する。No.2 R1.0-U-IとNo.5 R1.0-U-CMが同程度の累積塑性率でき裂が進展しているが、き裂進展率



(a) 漸増载荷時の切り欠き形状とノッチ半径の影響



(b) 载荷パターンの影響 (R=1mm の場合)

図-7 き裂進展率-累積塑性率関係

表-4 最大荷重・き裂発生・破断時のエネルギー吸収量

No.	試験体名	エネルギー吸収量(kJ)		
		最大荷重時	き裂発生時	破断時
1	R0.25-V-I	9.3	6.4	13.2
2	R1.0-U-I	9.7	6.5	15.0
3	R4.0-U-I	9.5	16.4	27.3
4	R1.0-U-CL	1.8	9.0	13.8
5	R1.0-U-CM	3.1	9.3	14.4
6	R1.0-U-CS	3.3	12.7	17.8
7	R1.0-U-R	1.7	10.0	15.3

20%あたりまでに着目してみると、No.2 R1.0-U-I は引張側と考えられる時に急激に上昇するのに対し、No.5 R1.0-U-CM はグラフに段差ができていないことから引張と圧縮の両方で同じように進展していることが分かる。また、No.6 R1.0-U-CS と No.7 R1.0-U-R は、き裂が進展していき破断直前のき裂進展率も同程度の値まで取れている。しかしながら、No.7 R1.0-U-R は No.6 R1.0-U-CS よりき裂発生から破断までの累積塑性率が小さいことが分かる。No.6 R1.0-U-CS は累積塑性率が400程度を超えてから、挙動に段差が生じていないことから、ほぼ一定の間隔で圧縮と引張の両方でき裂が進展していることが考えられる。

#### (4) エネルギー吸収量

エネルギー吸収量については、試験体はその Half cycle に至るまでに要したエネルギーを表し、各载荷ループの荷重-変位関係の塑性変形成分による面積を総和したものと定義している。表-4 に各試験体の最大荷重時・き裂発生時・破断時のエネルギー吸収

量を示す。

表-4 より漸増载荷におけるノッチ形状の違いがエネルギー吸収量に与える影響について考察する。No.1 R0.25-V-I と No.2 R1.0-U-I はき裂発生・破断までの Half cycle 数は同じであったが、エネルギー吸収量は No.1 R0.25-V-I の方が小さかった。また No.2 R1.0-U-I と No.3 R4.0-U-I ではき裂発生時・破断時ともに No.3 R4.0-U-I が大きな値であった。すなわち最大荷重への到達に必要なエネルギーはノッチ半径に影響されないが、ノッチ半径の大きなものほど破断までや、き裂発生から破断までのエネルギー吸収量は大きくなる。

次に一定载荷における振幅の違いがエネルギー吸収量に与える影響について考察する。先述したように、破断までの Half cycle 数は No.6 R1.0-U-CS が最も多いが、き裂発生時・破断時のエネルギー吸収量も一番大きい値となった。No.4 R1.0-U-CL と No.5 R1.0-U-CM のき裂発生時、破断時のエネルギー吸収量を比較すると、き裂発生時が 0.3kJ、破断時が 0.6kJ 程度の違いは生じたが、概ね同等であると言える。これらの

結果を踏まえると、振幅の小さなものは破断するまでにより大きなエネルギー吸収量を要するが、振幅はある程度が大きくなると、破断までに要するエネルギー吸収量が収束していくのではないかと考えられる。

さらに、異なる载荷パターンがエネルギー吸収量に与える影響について考察する。ランダム载荷に比べ、漸増载荷の場合はき裂発生までに要するエネルギーが小さいが、破断までに要するエネルギーはほぼ同程度である。言い換えれば、き裂発生から破断までにはより大きなエネルギーを要する。また、き裂発生から破断までのエネルギーについても比べると、ランダム载荷とすべての一定载荷は同程度のエネルギーで破断に至った。

#### 4. おわりに

##### (1) 結論

本研究では切り欠きを設けた鋼部材におけるき裂の発生・進展および破断までの現象について、切り欠きを設けた試験体の繰り返し三点曲げ载荷試験を行うことで検証した。得られた主な結果を以下に示す。

1. 破断面の多くに疲労破壊と延性破壊の痕跡が確認でき、一部の上側き裂、また全ての下側き裂が内部深く進展していた痕跡も確認できた。
2. 漸増载荷で切り欠き先端半径の異なる場合、切り欠き半径の小さいものは僅かな荷重でき裂が発生し、最大荷重後は著しく荷重が低下し破断までのエネルギー吸収量も小さい。また切り欠き半径の大きいものは多くの繰り返し荷重に耐えられるが、内部でき裂が進展したり耐力低下が起こっているため注意が必要である。
3. 一定载荷は振幅が大きなものほどき裂は一気に進展しやすく急激な破断に至る。また、振幅が小さいものほど破断までに必要なエネルギーが大きくなる。
4. ランダム载荷はき裂進展が振幅の大きな Half cycle を主とし累積塑性率が大きくなるにつれ、小さな振幅でもき裂が進展していくようになる。

##### (2) 今後の課題

漸増载荷において、ノッチ先端半径 0.25mm の V ノッチと 1mm の U ノッチの差が荷重の大小のみで、き裂の発生や破断の Half cycle 数に影響がないという結果になった。しかし、一般的には鋭い切り欠きはひずみ集中が大きいき裂の発生、破断が早いので、振

幅の増加量を変更するなど、より詳細なデータを得ることが望ましいと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 桑村仁, 山本恵市: 応力三軸状態における構造用鋼材の延性き裂の発生条件, 日本建築学会構造系論文集, 第 447 号, pp.129-135, 1995 年.
- 2) 渡邊英一, 前川義男, 杉浦邦征, 北根安雄: 鋼橋の被害と耐震性, 土木学会誌, 阪神・淡路大震災特集—第 4 回—, p.57, 1995 年.
- 3) 岡下勝彦, 大南亮一, 道場康二, 山本晃久, 富松実, 丹治康行, 三木千尋: 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 年.
- 4) 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, 第 565 号, pp.127-134, 2003 年.
- 5) 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研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 論文番号 No.190, 2005 年.
- 6) 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.I\_363-I\_375, 2015 年.
- 7) 加藤友哉, 猪飼豊樹, 山口雄涼, 東良樹, 賈良玖, 葛漢彬: T 型溶接継手の延性き裂発生メカニズムの解明に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.I\_634-I\_645, 2016 年.
- 8) Helmut Krawinkler, Akshay Gupta, Ricardo Medina and Nicolas Luco: Development of Loading Histories for Testing of Steel Beams-to-Column Assemblies, SAC Background Report SAC/BD-00/10, pp.3-5, August, 2000.
- 9) 柴田明憲: 最新耐震構造解析(最新建築学シリーズ 9), 森北出版, 第 3 版, p.49, 2003 年.

(2017.9.1 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON DUCTILE FRACTURE MECHANISM OF STEEL MEMBER UNDER CYCLIC LOADING

Soichiro YOSHIDA, Hanbin GE, Naoto HANYA and Liang-Jiu JIA

This study is aimed to investigate cracking mechanism of steel members. Crack initiation, propagation and rupture of seven specimens under cyclic bending loading were studied. Effects of notch shape and cyclic pattern on failure behavior of the member were discussed. The results show that large radius notch can delay the crack initiation. However the development inside and symptoms before cracking are difficult to be detected. Also, differences in the loading type and notch shape affect the crack initiation and absorption energy.