

繰り返し荷重を受けるT型溶接継手の 延性き裂の発生・進展・破断現象の 解明に関する実験的研究

加藤 友哉¹・猪飼 豊樹²・山口 雄涼²・東 良樹²・賈 良玖³・葛 漢彬⁴

¹学生会員 名城大学大学院 理工学研究科建設システム工学専攻

(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501) E-mail: 143437002@ccalumuni.meijo-u.ac.jp

²名城大学 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

³ 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

⁴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.

本論文では、レ形開先溶接を行ったT型継手の三点曲げ繰り返し実験により明らかにされたき裂の発生・進展および破断までの挙動についてまとめたものである。溶接ビードの有無、切り欠きの存在および切り欠きの位置が継手の性能に及ぼす影響を調べている。その結果、溶接ビードを取り除くことでき裂は発生しにくくなり、対して溶接ビードや切り欠きが存在するとひずみ集中部が出来るため、延性き裂の発生から破断までに与える影響が大きいことがわかった。

Key Words : ductile fracture, welded steel joint, cyclic loading, cumulative ductility ratio

1. 序論

1995年の兵庫県南部地震において多くの溶接鋼構造物にて脆性的な破壊が確認された。被害原因の調査より、神戸ハーバーウェイP75橋脚において、隅角部に作用した強大な地震動の繰り返し荷重が起因し、過大な塑性ひずみが生じたことで延性き裂が発生し、き裂発生箇所を起点として脆性的な破壊が生じていたことが明らかとなった¹⁾。延性き裂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一つであり、脆性的な破壊を防止するためには、溶接部の延性き裂発生と進展のメカニズムの解明は重要である。

今日まで延性破壊メカニズムに関する研究は鋼材母材に注目するのが多い^{2,3)}が、溶接部に関する研究はあまり進んでいないのが現状である。

これまで筆者らは切り欠きを有するレ形開先溶接引張試験片を用いた単調引張荷重時における延性き裂発生・進展および破断までの実験的および解析的検討を行ってきた^{4,5)}。これらより溶接ビード止端部や切り欠きのようなひずみ集中が著しくなる箇所の存在が延性き裂発生

の大きな要因となり脆性破壊へと転化していくことを示してきた。

しかしながら、既往の研究では単調荷重時のき裂発生から破断までを重点的に検討してきたものであり、繰り返し荷重時のき裂発生から破断までの検討については十分ではない。

そこで本研究では、繰り返し荷重による延性破壊現象を解明するため、過去に行われた実験的研究を踏まえて、レ形開先溶接T型継手の三点曲げ繰り返し荷重試験を行うことで、溶接後にひずみ集中を緩和するために取り除かれる溶接ビードの有無、人工的に設けた切り欠き形状および切り欠きが存在する位置などの様々な要因が繰り返し曲げを受けた場合のき裂発生・進展・破断までの現象に及ぼす影響について検討する。

2. 実験概要

(1) 実験試験片

試験片はレ形開先T型溶接継手であり、1) 溶接ビー

表-1 試験片一覧

No.	試験片名	ノッチ半径	溶接ビード	ノッチルート	荷重パターン
1	R _{inf} -NWB-I	なし (∞)	なし	なし	図-2(c)
2	R _{inf} -WB-I	なし (∞)	あり	なし	
3	R0.25-NWB-I-Bound	0.25 mm	なし	境界部	
4	R1.0-NWB-I-Bound	1.0 mm	なし	境界部	
5	R1.0-NWB-I-F	1.0 mm	なし	溶接部	
6	R1.0-NWB-I-Base	1.0 mm	なし	母材	
7	R1.0-NWB-I-HAZ	1.0 mm	なし	熱影響部	
8	R4.0-NWB-I-Bound	4.0 mm	なし	境界部	
9	R _{inf} -WB-C1	なし (∞)	あり	なし	図-2(a)
10	R _{inf} -WB-I-C2	なし (∞)	あり	なし	図-2(b)

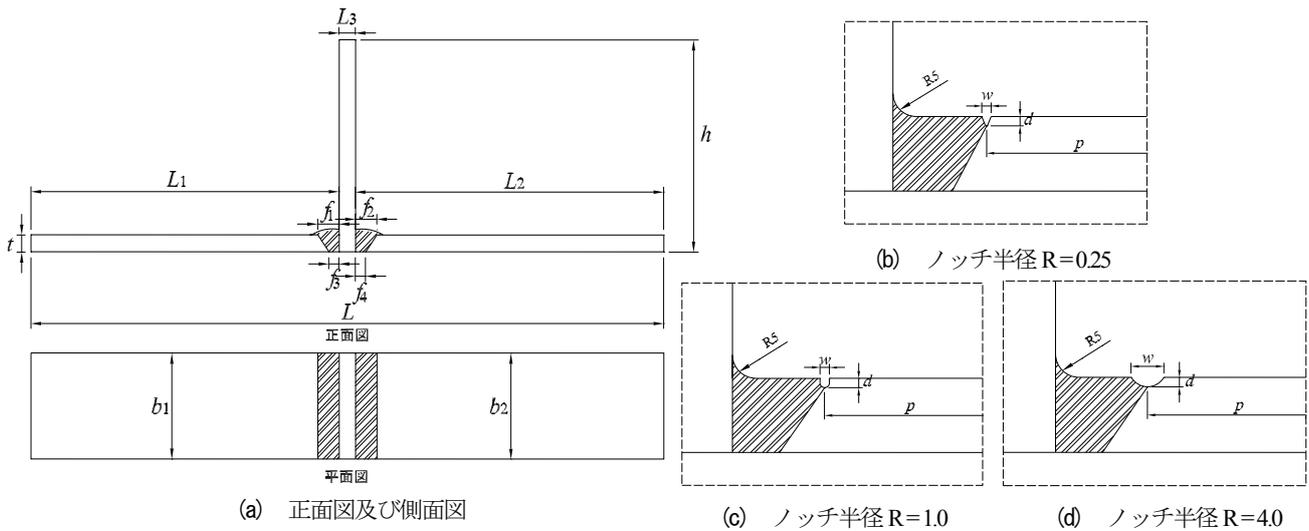


図-1 試験片概要

表-2 試験片パラメーター一覧(単位: mm)

No.	試験片名	試験片寸法														
		L	L ₁	L ₂	L ₃	h	t	b ₁	b ₂	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	w	d	p
1	R _{inf} -NWB-I	650.3	317.2	318.0	15.1	200.3	16.0	98.9	98.6	24.8	24.0	13.0	13.0	/	/	/
2	R _{inf} -WB-I	649.8	316.7	317.1	16.0	200.2	16.0	99.2	99.4	22.7	21.8	12.9	11.7	/	/	/
3	R0.25-NWB-I-Bound	650.2	317.4	317.0	15.8	200.1	15.9	99.2	100.0	21.3	21.9	14.5	12.0	2.5	2.0	297.6
4	R1.0-NWB-I-Bound	650.8	317.5	317.6	15.7	200.1	15.7	99.4	100.5	22.1	22.2	13.4	11.9	2.6	2.0	298.6
5	R1.0-NWB-I-F	650.5	317.5	317.8	15.2	201.0	15.8	99.5	100.5	22.1	23.0	12.8	12.8	2.4	2.1	303.4
6	R1.0-NWB-I-Base	651.3	318.1	317.7	15.5	200.3	15.8	101.9	100.9	22.6	23.1	13.1	12.1	2.6	2.6	290.0
7	R1.0-NWB-I-HAZ	650.6	317.6	317.5	15.5	200.0	15.8	99.6	100.3	21.5	21.4	13.8	12.2	2.5	2.3	296.5
8	R4.0-NWB-I-Bound	651.0	317.8	318.0	15.2	200.1	15.9	99.6	99.0	20.6	20.0	11.5	13.4	5.8	2.0	299.1
9	R _{inf} -WB-C1	651.0	317.8	318.0	15.2	200.2	15.9	101.6	101.0	24.0	23.0	12.0	13.0	/	/	/
10	R _{inf} -WB-I-C2	650.8	317.8	317.3	15.7	199.9	15.9	99.7	99.6	23.0	23.2	13.4	12.0	/	/	/

Note: pは試験片端部からノッチルートまでの長さである。

ドを有するT型試験片, 2) 溶接ビードを有しないT型試験片, 3) 溶接ビードを有さず切り欠きを有するT型試験片の三種類である。試験片一覧を表-1に、試験片概要および試験片パラメーター一覧を図-1および図-2に示す。

試験片は全て板厚16mmのSM490YAの鋼板より切り出して製作した。また、同鋼板より材料試験片も製作して

いる。使用鋼材SM490YAである。鋼材の機械的性質および化学成分を表-3, 表-4に示す。

試験片は溶接部確認のため、全て板厚側面を鏡面研磨仕上げを行い、4%硝酸エタノールを用いてエッチングを行っている。マクロ写真を写真-1に示す。

溶接ビードを有しない試験片はフィレット半径R=5mmとなるように溶接ビードを削除した。

表-3 鋼材の機械的性質

鋼材	ヤング率 E	ポアソン比 ν	降伏応力 σ_y	引張強度 σ_u	硬化ひずみ ϵ_{sh}	伸び率
SM490YA	GPa	-	MPa	MPa	%	%
	201	0.28	368	504	1.64	26.4

表-4 鋼板の化学成分

鋼板	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V
SM490YA	×100			×1000		×100				×1000	
	12	24	129	18	5	-	-	-	-	12	3



写真-1 マクロ写真

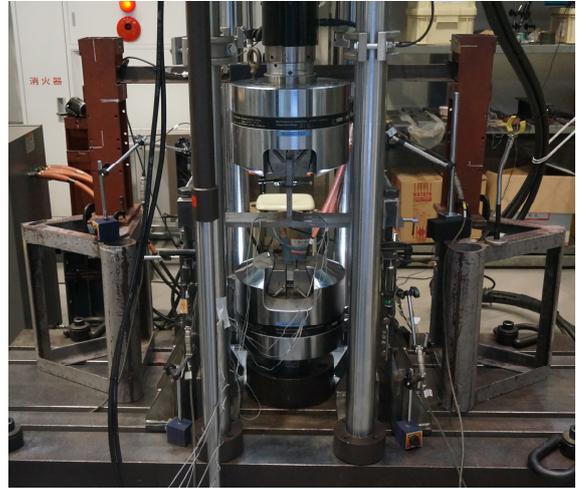
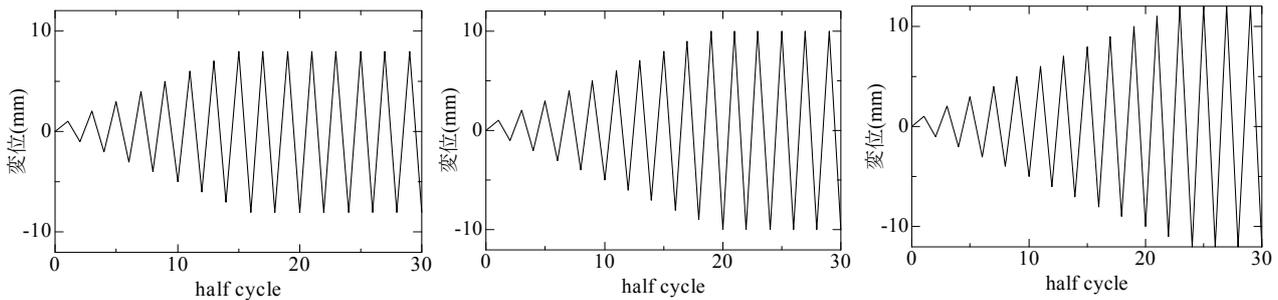


写真-2 試験片設置概要



(a) 漸増変位(0~±8 δ_y)+一定振幅(±8 δ_y) (b) 漸増変位(0~±10 δ_y)+一定振幅(±10 δ_y) (c) 漸増変位(0~±12 δ_y)+一定振幅(±12 δ_y)

図-2 荷重パターン

また、切り欠きを有する試験片については、製作時の切り欠き位置をより精度よく設けるため、母材、溶接部と熱影響部などの位置を確認後に試験片の切り欠きを設けている。

切り欠き形状はV型およびU型ノッチであり、深さは全て2mmとし、ノッチ半径 R_n を0.25, 1.0, 4.0mmと変化させている。また、半径 R_n が1.0mmの試験片については切り欠きの位置が異なることによって及ぼされる影響を検討するために、母材、溶接部、熱影響部および溶接部と熱影響部の境界（以降、境界部）に切り欠きを設けている。

(2) 溶接条件

溶接は溶接姿勢下向きの炭酸ガスシールドアーク半自動溶接、溶接ワイヤは銘柄SM-1S、ワイヤサイズ ϕ 1.2mm、入熱量40KJ/cm、パス間温度は200℃以下、3層3

パスである。

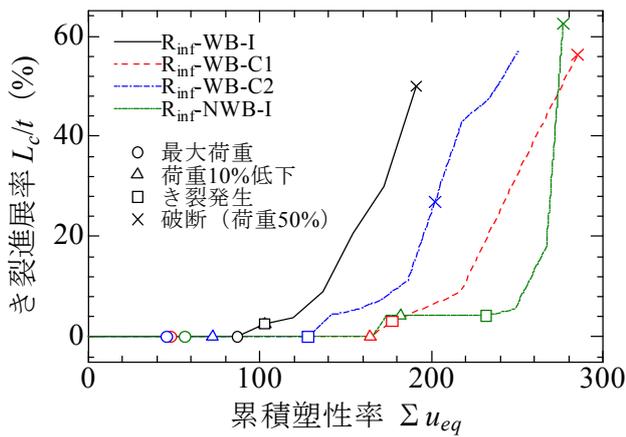
(3) 実験装置概要

実験には荷重±500kN、ストローク±75mmまで制御可能なMTS試験機を用いている。試験装置の左右に治具を設置し、三点曲げ繰り返し載荷試験を行っている。T型試験片の中央から治具の中心間は片側270mmとしている。試験片設置概要を写真-2に示す。

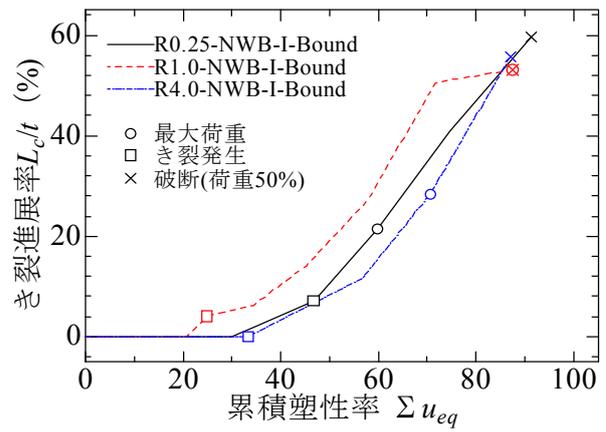
変位計はT型試験片の振幅、治具の上部および下部の変位を測定するように設置している。

(4) 荷重パターン

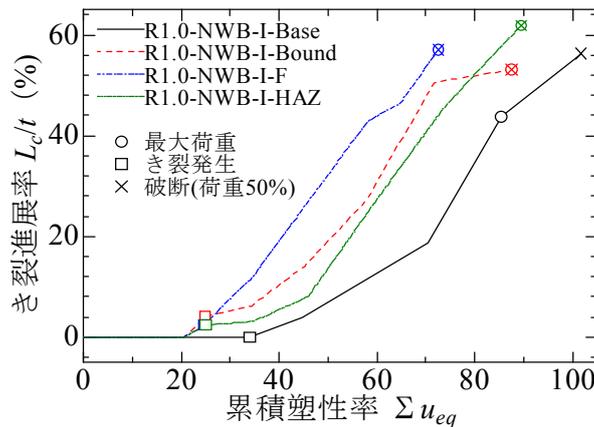
荷重方法については、切り欠きなしのT型試験片を単純梁とした場合より算出した降伏変位 $\delta_y=5.38\text{mm}$ を基準として、荷重パターンは±8 δ_y 、±10 δ_y 、±12 δ_y までの漸増変位振幅繰り返し載荷である。試験機のストローク限界がおおよそ±12 δ_y であるため、漸増変位繰り返し載荷



(a) 溶接ビードの有無および载荷パターンが異なる場合



(b) 切り欠きのサイズが異なる場合



(c) 切り欠きの位置が異なる場合

図-3 き裂進展率 (L_c/t) - 累積塑性率 (u_{eq}) の関係

が設定した上限に達した後は、一定振幅载荷へと変更した。各载荷パターンを図-2に示す。

3. 実験結果

(1) き裂深さ-累積塑性率

繰り返し载荷による塑性変形能力の指標として、累積塑性率を用いた。累積塑性率は以下の式(1)⁶⁾より算出した。

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

ここで、 δ_i : 1 half cycle以降の変位、 P_i : 1 half cycle以降の荷重である。また、 K_e は以下の式(2)を用いた。

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

このとき、 P_y : 降伏荷重、 δ_y : 降伏変位 (5.38mm) である。

各試験片の結果を式(1)に基づいて、溶接ビードの有無、载荷パターンの異なりによる影響、切り欠き形状の

影響、切り欠き位置による影響をそれぞれ整理した。図-3に各試験片の累積塑性率を示す。ただし、切り欠きを有する試験片については $t=14\text{mm}$ として、き裂進展率を算出している。

本研究では、試験片の長さ方向のき裂幅が約1mmに広がったサイクルをき裂発生、き裂の進展に状況については側面観察で行い、最大荷重に対して荷重が50%程度以下となったサイクルを破断(荷重50%になる前に破断した試験片も破断と見なす)と定義した。

溶接ビードの有無および载荷パターンの異なりを比較すると、図-3(a)からわかるように溶接ビードを有する試験片のき裂発生は载荷パターンの異なりに関わらず、最大荷重より荷重が10%程度低下した際にき裂が発生する傾向が見られる。また、累積塑性率がき裂発生後に滑らかな曲線を描いていることからき裂の進展は緩やかであると考えられる。これに対して、溶接ビードを有しない試験片(R_{inf} -NWB-I)は、き裂発生後、急激に上昇していることからき裂の進展は早いことが確認できる。

溶接ビードの有無の比較より、溶接ビードを有すると、溶接ビードを有しない場合の半分程度の累積塑性率で、き裂が発生し、2/3程度の累積塑性率で破断することが



(a) 溶接ビードあり：き裂発生



(b) 溶接部に切り欠き：き裂発生



(c) 溶接ビードあり：き裂進展



(d) 溶接部に切り欠き：き裂進展



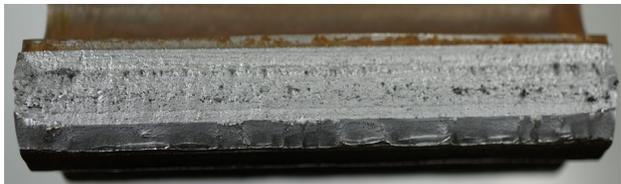
(e) 溶接ビードあり：破断



(f) 溶接部に切り欠き：破断



(g) 溶接ビードあり：破断面



(h) 溶接部に切り欠き：破断面

写真-3 破断状況 (R_{nr} -WB-C2と R1.0-NWB-I-F)

確認できる。

切り欠きを有する場合(図-3(b))、切り欠きを有さない試験片(図-3(a))よりも累積塑性率が3分の1程度で破断へと至っている。また、最大荷重に達するよりも前にき裂が発生していることが確認できる。これより、切り欠きのようなひずみ集中が大きくなる箇所が存在することで少ない累積塑性率であってもき裂の発生が早くなることが確認できる。

切り欠き位置が異なる場合は図-3(c)より、溶接部、境界部、熱影響部のいずれもき裂の発生は概ね同じ累積塑性率である。しかし、破断については溶接部に存在する場合が最も早いことが確認できる。この理由については、後述する破断状況を踏まえて考察する。

(2) 破断状況

き裂発生から破断までの進展の写真を一例として、溶接ビードを有する試験片である R_{nr} -WB-C2と溶接ビードを有さず溶接部に切り欠きを有する試験片R1.0-NWB-I-Fを写真-3に示す。

溶接ビードを有する試験片のき裂の発生は全て写真-3の左側の各写真(即ち、(a)、(c)、(e)、(g))と同様な溶接ビードの止端部からき裂が発生した。ここで止端部にて発生したき裂は境界部に沿うように進展を開始するが、いずれの試験片も約1mm程度まで進展すると境界部から離れ始め、最少断面である板厚鉛直下方向に向かって進展していき破断へと至った。

破断面は大部分が延性的な破面であるが疲労破面も確認出来ることから最終的な破壊は疲労破壊であると考え

られる。

溶接部に切り欠きを有するT型試験片（即ち，(b)，(d)，(f)，(h)）は，ノッチルートにてハの字形にき裂が進展を開始した。その後，境界部に近いき裂が境界部に向かって斜めに進展し，境界部に到達後，最少断面である鉛直下方向に進展していった。このとき，試験片の切り欠き裏側でも境界部に沿って小さな亀裂がいくつも発生していた。そのため，切り欠きのノッチルートからき裂進展していくのと同時に裏側からもき裂が進展していき，お互いが繋がっていくことで境界部に沿って破断へと至った。これらの結果，溶接部に切り欠きを有する試験片R1.0-NWB-I-Fが最も早く破断した要因は境界部で破断したためと考えられる。

4. 結論

本研究では，溶接された鋼材におけるき裂発生・進展および破断の現象について，レ形開先溶接T型試験片の三点曲げ繰返し載荷試験を行うことで検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 溶接ビードを有する場合，溶接ビードを有しない時の半分程度の累積塑性率で，溶接ビード止端部にき裂が発生し，2/3程度の累積塑性率で破断する。この結果から，溶接ビードを取り除くことでき裂の発生リスクを低減することが出来る。
- (2) また，切り欠きを有する場合，切り欠きを有していない時の累積塑性率と比べて10~15%程度でノッチルートにき裂がハの字形に発生し，1/3程度の累積塑性率で破断する。
- (3) 切り欠きが位置が溶接部，境界部および熱影響部と異なっても，き裂の発生にはあまり影響しないが，き裂の進展に大きく影響を及ぼす。

- (4) き裂は組織的に弱い境界部へと進展していく傾向が見られるため，境界部付近に切り欠きが存在することで，脆性的な破壊の危険性が大きくなる。
- (5) 溶接ビードを有する場合，溶接ビード止端部にひずみ集中が起こり，き裂が境界部に沿って発生し，板厚方向の最少断面に進展していき破断へと至る。破断面の大部分は延性破面であるが，最終的な破壊は疲労破面である。

謝辞：本研究は，平成24年度私立大学戦略的基盤研究形成支援事業「21世紀型自然災害のリスク軽減に関するプロジェクト」で名城大学に設置された「自然災害リスク軽減研究センター」の助成を受けて実施されたものである。

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，No.591/I-43，pp.243-261，1998年4月。
- 2) 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，第477号，pp.129-135，1995年11月。
- 3) 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，論文番号No.190，2005年8月。
- 4) 加藤友哉，賈良玖，葛漢彬：溶接ビードの有無による溶接継手の延性破壊への影響に関する実験的研究，土木学会中部支部平成26年度研究発表会，1-8，pp.15-16，2015年3月。
- 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.4，2015年7月(掲載予定)。
- 6) 柴田明憲：最新建築学シリーズ 9 最新耐震構造解析，森北出版，第3版，p.49，2003年5月。

EXPERIMENTAL STUDY ON DUCTILE FRACTURE MECHANISM OF WELDED STEEL T-TYPE JOINTS UNDER CYCLIC LOADING

Tomoya KATO, Toyoki IKAI, Yusuke YAMGUCHI,
Yoshiki HIGASHI, Liang-Jiu JIA and Hanbin GE

This study is aimed to investigate cracking mechanism of welded steel T-type joints. Crack initiation, propagation and rupture of the joints were studied using three-point bending cyclic loading. Effect of post-weld treatment, notch and notch position on cyclic performance of the joints was studied. As a result, post-weld treatment can delay crack initiation and notched joints are apt to crack earlier than those notch-less ones. Notch close to the boundary between the fusion zone and heat affected zone can accelerate the crack propagation.