

リブ溶接止端部に発生する低サイクル疲労き裂と それを起点とする脆性破壊の発生可能性

Low cycle fatigue cracks occurred at weld toe of ribs and possibility of occurrence of brittle fracture from them

佐々木栄一*, 荒川泰二**, 三木千壽***, 市川篤司***
Eiichi SASAKI, Taiji Arakawa, Chitoshi Miki, Atsushi Ichikawa

*工修, 東京工業大学助手, 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

**工修, 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

***工博, 東京工業大学教授, 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

After the Hyogo-ken nanbu earthquake 1995 in Japan, some cracks caused by fatigue in large plastic strain region were observed at the weld toe of ribs in the base joints of some steel bridge piers. Such cracks can have different features from fatigue cracks occurred by usual live loads. In this study, the sharpness of crack tip was focused on as the feature of the cracks, and it was investigated by bending fatigue tests in large plastic strain region on welded joint specimens with ribs and the observation of the crack tips by a microscope. As a result, the tips of low cycle fatigue cracks occurred within 10 cycles were blunted by more than 0.05mm in CTOD. Finally, the brittle fracture behaviors from such blunted cracks were discussed by fracture tests using CTOD specimens, and it was found that the brittle fracture behaviors depend on the types of steels.

Key Words: ribs in base joints of steel bridge piers, low cycle fatigue, shape of crack tip, brittle fracture

キーワード: 鋼製橋脚基部補強リブ, 低サイクル疲労, き裂先端形状, 脆性破壊

1. はじめに

兵庫県南部地震では, 幾つかの鋼製橋脚基部に設置された補強用リブ溶接止端部に, 大塑性ひずみ履歴を受けたことによる疲労き裂 (以下, 低サイクル疲労き裂) が生じたと報告されている^{1,2)}. これらの低サイクル疲労き裂は, 地震時の繰り返し回数 10 回以下の塑性ひずみ履歴により発生したと考えられている. 坂野ら³⁾は, 鋼製橋脚基部を模した試験体に対する低サイクル疲労試験により, き裂の発生挙動, 進展特性, 発生寿命等について検討し, き裂の発生は鋼素材の塑性ひずみ-き裂発生寿命曲線⁴⁾により精度よく評価できると述べ, 繰り返し回数 10 回以下でき裂が発生する際にはき裂発生部で 10%以上のひずみが発生している必要があるとしている. また, 坂野ら⁵⁾は, 補強用リブの設置により橋脚基部のき裂発生寿命はほぼ半減するとも指摘している. このようなき裂損傷は, 脆性破壊の起点となる可能性があり⁶⁾, 鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止の観点からは検討すべき点が多く残されている.

低サイクル疲労き裂を起点とする脆性破壊は, 通常の交通荷重等の活荷重により発生する疲労き裂 (以下, 高サイ

クル疲労き裂) を起点とした脆性破壊とは特徴を異にしていると考えられる. 本研究では, 低サイクル疲労き裂のき裂先端形状に着目して, 低サイクル疲労き裂を起点とする脆性破壊挙動について検討する. すなわち, 地震時に発生する低サイクル疲労き裂は, 高サイクル疲労き裂とは異なり, き裂の発生から進展に到るまで大きな塑性変形を伴っており, き裂先端が鈍くなっていることが予想される. このような先端形状の鈍化は, そのき裂を起点とする脆性破壊の発生に支配的な影響を与える可能性があり, 地震時に発生する低サイクル疲労き裂の先端形状について検討する必要がある. この点については今まで殆ど検討がなされていない. そこで, 本研究では, 地震時に繰り返し回数 10 回以下の塑性ひずみ履歴により発生する低サイクル疲労き裂の先端の鈍さを定量的に把握するとともに, そのような鈍さを有するき裂先端からの脆性破壊の発生可能性について CTOD 試験体を用いた小型破壊試験により検討することとした.

2. 縦リブ溶接継手の曲げ低サイクル疲労試験

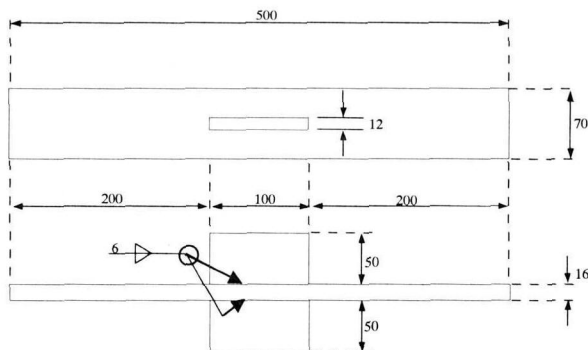


図-1 縦リブ溶接継手試験体
(使用鋼材：SMA490 材，単位 mm)

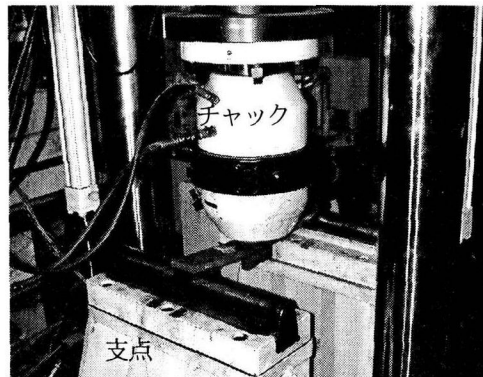


写真-1 試験状況 (支点間隔 400mm)

表-1 試験条件および载荷回数

試験体呼称	目標ひずみ値 (%)	測定した公称ひずみ (%) (最初の载荷時)		载荷点変位 (mm)	最終载荷回数	最終繰返し回数	最初のき裂発見時の繰返し回数
		引張側	圧縮側				
S3	3.00	3.20	-2.78	±17.4	60	29 3/4	3 3/4
S6-1	6.00	6.75	-5.20	±37.0	14	6 3/4	2 3/4
S6-2	6.00	6.12	-2.78	±33.5	20	9 3/4	1 3/4
S9	9.00	9.00	-6.28	±55.4	10	4 3/4	3/4

2.1 実験手法および実験条件

低サイクル疲労き裂の先端形状を定量的に把握するため、図-1 に示すような、鋼製橋脚基部の補強三角リブ溶接止端部をモデル化した縦リブ溶接継手試験体（使用鋼材：SMA490 材）に対し、3点曲げ疲労試験を行った。試験後、リブ溶接止端部に発生したき裂の先端形状を、マイクロスコップを用いて観察し、その開口変位を測定した。低サイクル疲労試験は、写真-1 に示すように、大きな塑性ひずみを導入するため曲げ载荷（支点間隔 400mm）とし、定変位繰返し载荷により変位制御で実施した。この際、繰返しの方法は、坂野らの研究^{3),5)}同様、一方向への曲げが終了した後、試験体を上下逆にひっくり返し、試験を再開する方法とした。また繰返し载荷における変位振幅は、最初の载荷で引張側となる面の 2 つの溶接止端から 10mm の位置にそれぞれ添付した塑性ひずみゲージのひずみ値の平均（以下、公称ひずみと呼ぶ。）が目標ひずみ値に達した際のチャック変位とした。ゲージの位置は、坂野らの研究^{3),5)}を参考に決定した。表-1 に、試験体呼称、载荷条件等の試験条件を示す。対象とするひずみレベルは、10 回以下のき裂発生を想定し、坂野らの研究を参考に、ゲージ位置で最低レベルを 3% として、3%, 6%, 9% の 3 レベルを設定した。6% のひずみレベルについては、载荷回数を変えて 2 体試験を行い、計 4 体の試験体を対象とした。なお、表-1 における载荷回数は 1 方向への曲げ载荷回数であり、ひずみの繰返し数は最初の载荷を 1/4 サイクルとして、その载荷回数から求めたものである。なお、後述のように、最初のき裂は、いずれの試験体においても最初の载荷において圧縮側であったリブ溶接止端部に発生した。このき裂の先端形状を観察できるように、最終的な载荷はこのき裂が発生した側が引張となる状況で行ったため、载荷回数が偶数回となっている。

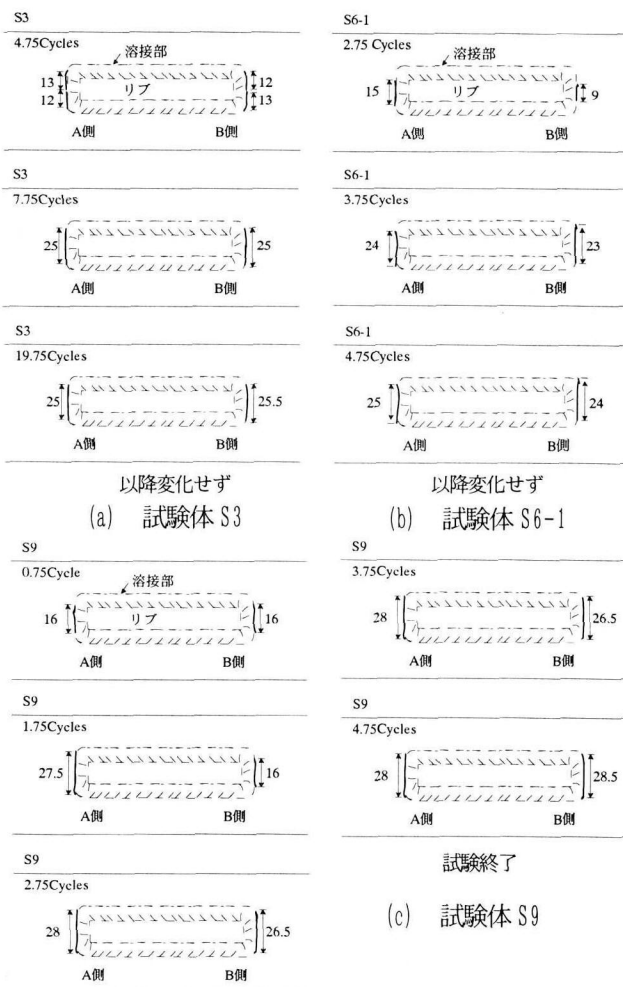


図-2 き裂発生位置および進展状況

2.2 き裂発生状況

表-1 に、最初のき裂発生時の繰返し回数、図-2 にき裂発生位置と進展状況を S3, S6-1, S9 試験体について示

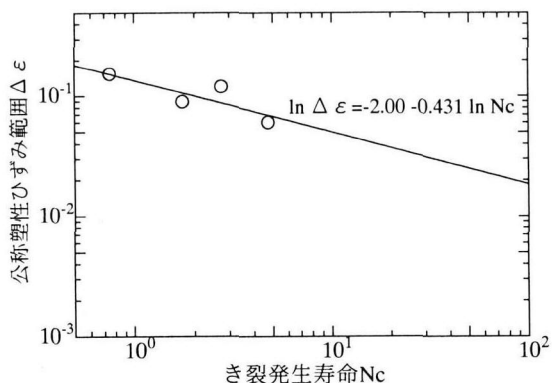


図-3 き裂発生寿命と公称塑性ひずみ範囲の関係

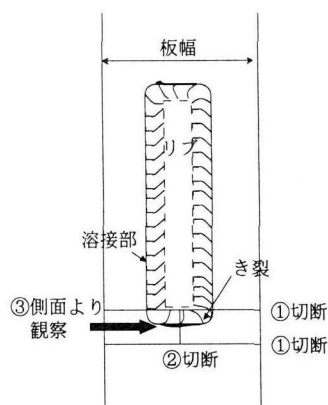
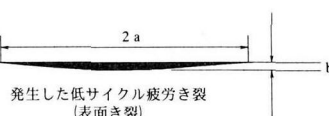


図-4 き裂先端の観察手順

表-2 き裂の寸法および先端開口変位測定結果

試験体呼称	溶接止端部位置	表面長さ 2a (mm)	深さ b (mm)	アスペクト 比 a/b	測定したき裂 先端開口変位 (mm)
S3	A	25.0	0.457	27.4	0.045
	B	25.5	0.486	26.2	0.057
S6-1	A	25.0	0.714	17.5	0.171
	B	24.0	0.857	14.0	0.186
S6-2	A	25.0	0.714	17.5	0.157
	B	26.0	0.839	15.5	0.185
S9	A	28.0	2.035	6.88	0.306
	B	28.5	2.258	6.31	0.726

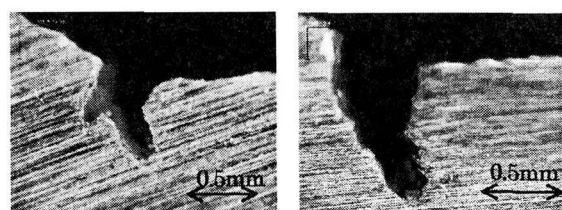


す。なお、図-2は、最初の載荷で圧縮側であった面の状況を示したものである。また図中のA、Bは2つの溶接止端部を区別するために便宜上つけたものであり、後述の表-2にも使用している。

表-1から、最初のき裂はいずれの試験体も5回以下の繰返し数で発生しており、10%以上のひずみが繰返し溶接止端部に導入されていたと考えられる。また、図-2に示すように、いずれの試験体においても、き裂は表面長さ10mm以上の大きさをもって発生し、その後25mm程度まで成長した後、表面上、き裂の進展が止まった状況となった。これは、板厚方向への進展が進行している状態³⁾と考えられる。き裂発生寿命と公称塑性ひずみ範囲との関係を、図-3に示す。ここで、公称塑性ひずみ範囲は、表-1記載の公称ひずみの引張側を最大、圧縮側を最小として求めたひずみ範囲である。図-3より、公称塑性ひずみ範囲とき裂発生寿命は、ほぼ対数線形の関係にある。地震時の鋼製橋脚におけるき裂発生制御の観点からは、き裂発生の評価は、局所ひずみによる評価³⁾と加えて、このような公称ひずみによる評価も設計上重要である。

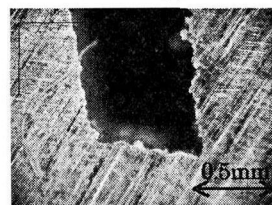
2.3 き裂先端形状の観察および開口変位の測定

疲労試験終了後、試験片を図-4のように板幅中央で切断し、最終載荷で引張側(最初の載荷は圧縮側であった方)の2つの溶接止端部に発生したき裂の先端形状をマイクロスコプを用いて観察し、先端の開口変位を測定した。本研究では、き裂面の延長線には含まれるき裂先端の領域の長さを測定によるき裂先端開口変位と定義する。発生した2つの低サイクル疲労き裂の寸法とき裂先端開口変位を測定した結果を表-2に示す。公称ひずみが3%の場合



(a)試験体 S3 (位置 A)

(b)試験体 S6-1 (位置 A)



(c)試験体 S9 (位置 B)

写真-2 き裂先端形状

には、き裂先端開口変位が0.05mm程度、9%の場合には、0.7mm程度と著しく鈍化した状態となっている。各ひずみレベルにおける代表的なき裂先端形状を写真-2に示す。写真からわかるように、発生ひずみが大きいほどき裂は鈍くなる傾向がある。地震時に橋脚基部に3%以上の公称ひずみが生じた場合、そのリブ溶接止端部から発生する低サイクル疲労き裂のき裂先端開口変位は0.05mm程度以上であると考えられる。

図-5に公称ひずみ ϵ とき裂の形状寸法で無次元化したき裂先端開口変位 δ との関係を示す。ここで、き裂形状寸法は、個々のき裂により変化するため、ここでは、き裂特性寸法 a' を用いて、板厚貫通き裂に置き換えて表現した。図-5に示す関係から、公称ひずみとき裂特性寸法で

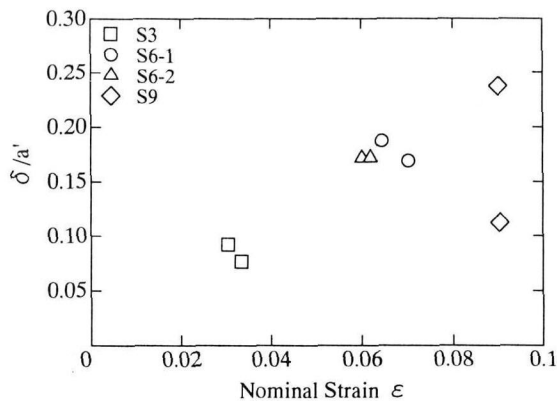


図-5 公称ひずみとき裂寸法で無次元化したき裂先端開口変位との関係

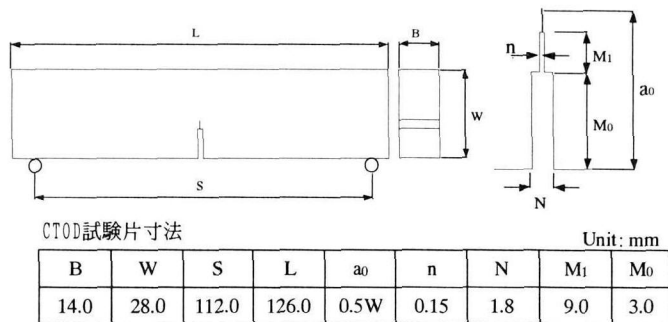


図-6 CTOD 試験片形状

表-3 化学成分

鋼材	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V
SM490YB	0.14	0.46	1.56	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.04
SM570Q	0.14	0.23	0.012	0.005	0.005				

表-4 機械的性質

鋼材	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	降伏比 (%)	伸び (%)	シャルピ吸収 エネルギー (J)
SM490YB	407	547	74	26	154(0°C)
SM570Q	560	651	86	39	299(-5°C)

無次元化したき裂先端開口変位との関係は、本研究の対象範囲である公称ひずみ9%以下の範囲では、ほぼ比例関係にあると言える。

なお、ここでは、SMA490 材を対象としたが、低サイクル疲労特性には材料依存性がないことが知られている⁴⁾ことから、以下に対象とするような SM490YB 材や SM570Q 材のような他の鋼材についても同様の特性があると考えられる。

3. 低サイクル疲労き裂からの脆性破壊の発生可能性

3.1 実験手法

ここでは、上述のように鈍い先端を有する低サイクル疲労き裂からの脆性破壊発生挙動について検討するために実施した、図-6に示すような CTOD 試験片を用いた低温破壊試験について述べる。試験片に使用した鋼材は、SM490YB 材および SM570Q 材の2種類である。表-3および表-4に、対象鋼材の化学成分および機械的性質は示す。

本研究では、挙動比較のため、低サイクル疲労き裂を導入したものに加えて、文献13)に従って、通常の疲労き裂を導入した CTOD 試験も実施した。低サイクル疲労き裂を導入する場合は、初期き裂導入の方法以外は、この通常の CTOD 試験と同様の手順で行った。実験セットアップを写真-3に示す。実験では、荷重とクリップゲージによりき裂開口変位を動的に測定した。

低サイクル疲労き裂を導入する場合、地震時に発生する低サイクル疲労き裂先端を想定して、2.の検討を参考に、先端開口変位 0.1mm 程度の鈍い先端を有するき裂を導入

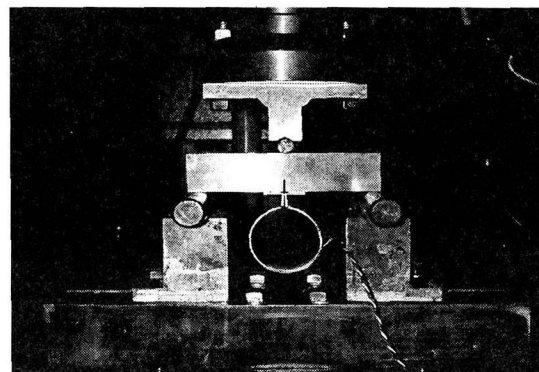


写真-3 実験セットアップ

表-5 導入したき裂先端開口変位

鋼材	き裂長 a (mm)	高サイクル疲労き裂		低サイクル疲労き裂	
		最大荷重 (kN)	き裂先端開口変位 (mm)	最大荷重 (kN)	き裂先端開口変位 (mm)
SM490YB	14	5	0.0069	16	0.0711
SM570Q	14	7	0.0099	22	0.0978

した。初期き裂先端開口変位が 0.1mm を超えない範囲では、CTOD による破壊発生評価は妥当性がある^{8,9)}とされており、予荷重^{10,11)}や繰返し荷重¹²⁾の影響も問題とならないことが指摘されている。初期き裂導入の際適用した荷重は、き裂先端が 0.1mm 程度となるような荷重 P を以下の式¹⁴⁾を用いて算出した。実際には、この荷重は目安とし、どの程度のき裂先端形状になっているかをマイクロ스코ープを用いて 2.3 と同様に測定し確認することとした。

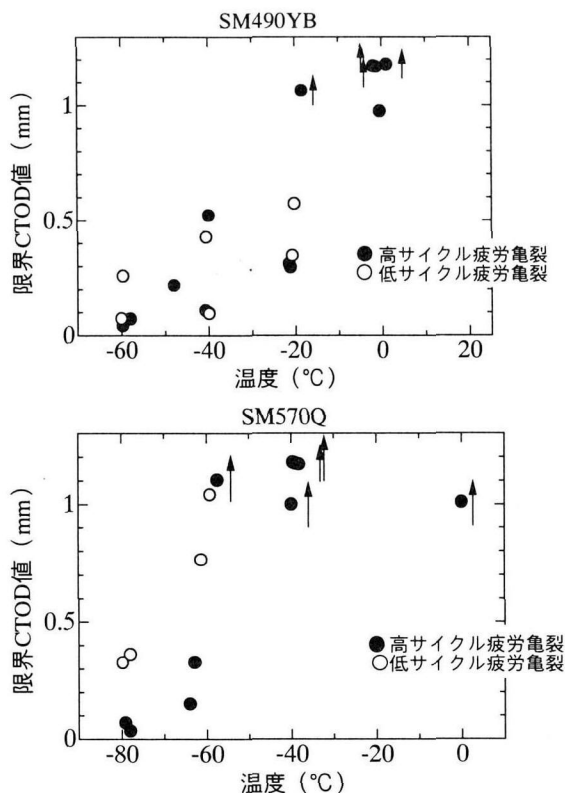


図-7 試験温度-限界CTOD関係

$$\text{き裂先端開口変位 } \phi_{COD} = \frac{4K_I^2}{\pi E' \sigma_{ys}}$$

$$\text{応力拡大係数 } K_I = \frac{Y(a/W)P}{BW^{1/2}}$$

ここで、各記号の定義については文献13)参照。

表-5に、マイクロスコブを用いて測定したき裂導入終了時(き裂長14mm)のき裂先端開口変位を、通常のCTOD試験で導入した初期き裂の開口変位とともに示す。表-5からわかるように、導入した低サイクル疲労き裂の先端開口変位はCTOD試験で導入した初期き裂の開口変位の10倍程度である。

なお、破壊試験での設定温度は、通常の疲労き裂を導入した場合のCTOD試験で各鋼材が脆性破壊した温度とした。

3.2 実験結果および考察

図-7に、それぞれの鋼材について、実験で測定したクリップゲージ値から算出した限界CTOD値¹³⁾と試験温度の関係を示す。この際、図には、通常の高サイクル疲労き裂を導入したCTOD試験結果とともに示す。ここで評価に用いる限界CTOD値は、き裂の初期の鈍さに関わらず破壊までどの程度の靱性を示したかを考えることとし、破壊までに変化したCTOD値として定義した。

図からわかるように、SM490YB材では、低サイクル疲労き裂を導入した場合にも、通常のCTOD試験結果と同程度の限界CTOD値を示し、限界CTOD値には大きな差違は認められない。すなわち、SM490YB材では、比較的

鋼材	SM490YB	SM570Q
試験温度 (°C)	-60	-80
破面		

図-8 低サイクル疲労き裂を導入した試験片の破面状況

鋭い先端を有するき裂でほぼ完全な脆性破壊が生じた温度領域で、10倍程度先端が鈍いき裂からも同様に脆性破壊が生じ得ると考えられる。一方、SM570Q材では全ての温度において、低サイクル疲労き裂の方が高い限界CTOD値を示す傾向が見られた。すなわち、SM570Q材は、比較的鋭い先端を有するき裂で脆性破壊が生じた温度では、き裂先端の鈍い低サイクル疲労き裂からは脆性破壊が発生しないと考えられる。以上のように、低サイクル疲労き裂からの脆性破壊の発生については、通常のCTOD試験で得られた限界CTOD値は、SM490YB材では脆性破壊に到るまでの開口変位の変化量をほぼ同程度に表しており、SM570Q材では、それを過小に評価することになると考えられる。SM570Q材に見られる傾向は、比較的低いひずみレベルにおいて金沢ら¹⁵⁾によっても確認されている。

図-8には、試験片の破面状況の例を示す。図から、SM490YB材では、破面の絞りも殆どなく、平坦な破面であり、明瞭な脆性破面となっていることから、低サイクル疲労き裂を起点として脆性破壊が生じたと判断できる。一方、SM570Q材については、比較的断面の絞りがあり、破面が凹凸に富むことから延性的な破壊であったといえる。

このように、低サイクル疲労き裂からの脆性破壊の発生は、鋼種によって異なる挙動を呈し、鋼種依存の傾向があることが明らかとなった。

4. 結論

本研究では、鋼製橋脚基部の補強リブ溶接部から地震時に発生する低サイクル疲労き裂の先端形状、および、それを起点とする脆性破壊の発生可能性について、橋脚基部の補強リブ溶接部を模した小型縦リブ溶接継手試験体の低サイクル疲労試験と、CTOD試験体を用いた低温破壊試験により検討し、以下のような結論を得た。

- 10%程度以上の繰返し塑性ひずみにより発生する低サイクル疲労き裂先端の鈍さは、き裂先端開口変位で表現して、公称ひずみが3%の場合は、0.05mm、9%の場合は0.7mmと大きく、ひずみレベルにより大きく影響を受ける。
- 低サイクル疲労き裂の先端は、き裂先端開口変位(CTOD)にして、通常の高サイクル疲労き裂の5倍以上と鈍くなっている。
- 鈍い先端を有する低サイクル疲労き裂からの脆性

破壊発生の可能性は、鋼種に依存する。SM490YB材では、通常の高サイクル疲労き裂を初期き裂とした場合脆性破壊が発生した温度で、同様に脆性破壊の発生が確認されたのに対し、SM570Q材では、その温度では脆性破壊の発生が見られなかった。

- (d) 通常のCTOD試験で脆性的な破壊が生じる温度領域では、低サイクル疲労き裂からの脆性破壊に到るまでに変化するき裂先端開口変位は、通常のCTOD試験で得られる限界CTOD値で、SM490YB材では同程度に、SM570Q材では過小に評価される。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(A)(1)課題番号 08305014「橋梁用高性能鋼の開発とその高度利用技術に関する研究」の一環として実施した。また、東京工業大学創造プロジェクト研究体 SIG1「高性能鋼の橋梁への利用技術研究」の活動の一部とともっており、実施にあたっては、委員の方々の貴重な意見と頂いた。

本研究については、鋼材倶楽部からの研究費補助も受けて実施された。

以上、ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会：鋼構造物の安全性の調査報告，1995.7.
- 2) 阪神高速道路管理技術センター，日本鋼構造協会：鋼製橋脚の塑性時の変形性能に関する研究業務報告書，1995.3.
- 3) 坂野昌弘，三上市蔵，村山弘，三住泰久：鋼製橋脚基部の超低サイクル破壊挙動，鋼構造論文集，第2巻，第8号，pp.73-82，1995.12.
- 4) 西村俊夫，三木千寿：構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性，土木学会論文報告集，第279号，pp.29-44，1978.
- 5) 坂野昌弘，岸上信彦，小野剛史，森川友記，三上市蔵：三角リブ付き鋼製橋脚基部の超低サイクル疲労挙動，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1281-1288，1998.3.
- 6) 三木千寿，四十沢利康，穴見健吾：鋼製門型ラーメン橋脚隅角部の地震時脆性破壊，土木学会論文集，No.591，pp.273-281，1998.4.
- 7) 日本溶接協会：溶接継手の脆性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥評価法（WES2805-1997），1997.
- 8) 金沢武，町田進，糸賀興右，土屋秀典：COD仮説による脆性破壊発生の研究，日本造船学会論文集，第131号，pp.345-354，1972.5.
- 9) 金沢武，町田進，萩原行人：工業的試験法としての曲げCTOD試験について，日本造船学会論文集，第132号，pp.361-370，1972.10.
- 10) 金沢武，三村宏，町田進，宮田隆司，萩原行人：脆性破壊発生のクライテリアに関する考察，日本造船学会論文集，第129号，pp.237-246，1971.5.
- 11) 大塚昭夫，宮田隆司，西村誠二，柏木陽一郎，笠井登：切欠部からの破壊発生に関するCOD-クライテリオンとストレッチド・ゾーン，日本造船学会論文集，第136号，pp.249-257，1974.11.
- 12) 大畑充，南二三吉，藤田周亮，橋本昌明，豊田政男：繰返し荷重下における構造用鋼の延性き裂進展特性（第1報），日本造船学会論文集，第188号，pp.679-678，2000.11.
- 13) 日本溶接協会：き裂開口変位（CTOD）試験（WES1108-1995），1995.
- 14) 小林英男：破壊力学，共立出版，1993.
- 15) 金沢武，町田進，矢島浩，青木満，川辺智信：鋼材の脆性破壊発生特性におよぼす疲労の影響（第2報），日本造船学会論文集，第126号，pp.397-410，1969.11.

(2001年9月14日受付)