

鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止に必要な鋼材の破壊靱性レベル

佐々木 栄一¹・荒川 泰二²・三木 千壽³・市川 篤司³

¹正会員 博 (工) 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)

²正会員 工修 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (同上)

³フェロー会員 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 (同上)

兵庫県南部地震では、幾つかの鋼製橋脚に脆性き裂が発生した。その後の調査から、脆性き裂発生 of 支配的な要因は、地震時の塑性ひずみ履歴による鋼材の脆化と考えられる。そのため、鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止のためには、塑性ひずみ履歴を受けた後も十分な破壊靱性を有する鋼材を使用する必要がある。本研究では、脆性破壊のシナリオを想定することにより、考慮すべきひずみ履歴パターンを示した上で、試験体へのひずみ導入方法の開発により、折返しのパターンを含めた様々な塑性ひずみ履歴による鋼材の破壊靱性劣化の程度を明らかにした。さらに、その結果とこれまでの研究成果をもとに、鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止のために鋼材に必要とされる破壊靱性について検討した。

Key Words : steel bridge piers, earthquakes, brittle fracture, plastic strain, fracture toughness

1. はじめに

兵庫県南部地震では、幾つかの鋼製橋脚に脆性き裂が発生した¹⁾。このような地震時脆性破壊は、それまで鋼製橋脚では経験のない損傷形式であったことから、主に材料特性の観点から、その発生要因について検討がなされてきた²⁾⁹⁾。その結果、脆性破壊発生 of 支配的な要因は、地震時に鋼材が大きな塑性ひずみ履歴を受けて脆化したことであることが示されている。従って、鋼製橋脚における地震時脆性破壊を防止するためには、地震時に塑性ひずみ履歴を受けた後も十分な破壊靱性を有する鋼材を適用することが必要であると考えられる。

一方、鋼製橋脚における脆性破壊の起点としては、き裂に関する既往の研究および兵庫県南部地震における被害調査結果¹⁾から、地震時に受ける塑性ひずみ履歴により発生する疲労き裂 (タイプ1のき裂と呼ぶ。)¹⁰⁾¹⁴⁾、地震以前に交通荷重等の活荷重により発生していた疲労き裂 (タイプ2)¹⁵⁾、および、地震時に圧縮塑性ひずみを受けて発生する微小なき裂 (タイプ3)¹⁶⁾²⁰⁾の3つのタイプが考えられるが、これらのうち、タイプ1のき裂は他の2つのタイプのき裂とは異なり、き裂の発生・進展の過程で繰返し大きな塑性ひずみを伴うことから、先端が鈍い状態となっている可能性がある。このようなき裂先端の鈍さは、脆性破壊の

発生に支配的な影響を及ぼす可能性があることから、鋼材の破壊靱性の評価においてもその影響を考慮する必要があると考えられる。そのため、筆者ら¹⁴⁾は、CTOD試験による検討から、タイプ1のき裂を起点とする脆性破壊について、その発生規準として限界CTOD値を用いた場合、同じ試験温度で同じ形状および寸法を有するタイプ2のき裂 (通常CTOD試験で導入するき裂) を起点とした場合の限界CTOD値と同等以上の値を示すことを示している。これらは、金沢ら²¹⁾によっても確認されている。これらのことから、脆性破壊防止を目的とした鋼材の必要靱性値を考える上で、タイプ1のき裂を起点とした脆性破壊発生を限界CTOD値により評価する場合、タイプ2およびタイプ3のような比較的鋭いき裂を起点とした場合の限界CTOD値を用いることにより、安全側に評価することが可能と考える。

本研究では、鋼製橋脚における地震時脆性破壊を防止するために必要な鋼材の破壊靱性について、タイプ2とタイプ3を起点として考え、地震時に作用する塑性ひずみ履歴によってどの程度の鋼材の靱性劣化を想定すべきかという観点から検討した。本研究では、脆性破壊発生 of シナリオを想定することにより、考慮すべきひずみ履歴パターンを示した上で、それらによる鋼材の破壊靱性への影響を明らかにするために、鋼材へのひずみ履歴導入後、CTOD試験を実施した。その際、本研究で

考慮したひずみ履歴パターンには、これまで鋼材への導入が困難であったパターンが含まれたことから、ひずみ導入法を新たに開発した。最後に、本研究の成果およびこれまでの筆者らの研究成果を総括して、鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止に必要な鋼材の破壊靱性の提案を行う。

2. 脆性破壊発生シナリオ

ここでは、起点となるき裂と塑性ひずみ履歴に着目し、鋼製橋脚における脆性破壊発生シナリオを想定することにより、考慮すべきひずみ履歴パターンを考える。鋼製橋脚における地震時のひずみ履歴の特徴としては、既往の実験^{22)~24)}および解析^{25)~28)}の結果から、引張あるいは圧縮の一方へ偏り、その一方の領域で変動する、いわゆる、片振りのひずみ履歴となる傾向があると考えられる。この点を踏まえ、本研究では、鋼製橋脚における脆性破壊の発生シナリオを以下のように設定する。図-1は、以下のシナリオを説明するために、鋼製ラーメン橋脚隅角部を例に取り模式的に表したものである。

a) タイプ2のき裂を起点とする場合

以下のような、2つのシナリオが考えられる。

1つは、図-1(a)に示すように、最初の引張ひずみで脆性破壊が発生する場合(シナリオI)であり、この場合は、塑性ひずみ履歴による破壊靱性劣化ではなく、鋼素材そのものの破壊靱性が問題となる(ひずみパターン1と呼ぶ)。もう1つは、図-1(b)に示すように、最初に圧縮ひずみを受けて、その後の引張ひずみにより脆性破壊が発生する場合(シナリオII)である。この場合には、最初の圧縮ひずみを鋼材の受ける塑性ひずみ履歴として考える(ひずみパターン2と呼ぶ)。

b) タイプ3のき裂を起点とする場合

タイプ3のき裂を起点とする場合についても、2つのシナリオを考える。1つは、図-1(c)に示すように、最初に圧縮塑性ひずみを受け、き裂が発生し、その後の引張ひずみにより脆性破壊が発生する場合(シナリオIII)であり、この場合は、最初の圧縮ひずみを、鋼材が受けた塑性ひずみ履歴と考える(ひずみパターン2)。もう1つは、図-1(d)に示すように、最初に引張塑性ひずみを受け、その後の圧縮塑性ひずみを受けた際に、き裂が生じ、その後の引張ひずみで脆性破壊が発生する場合(シナリオIV)である。この場合には、引張から圧縮という折返しパターンの塑性ひずみ履歴を受けることになる(ひずみパターン3)。

以上に示した塑性ひずみ履歴を、鋼製橋脚における地震時脆性破壊の発生において考慮すべき履歴パターンとして考えることとする。また、対象とする塑性ひずみレベルとしては、材料特性の変化から、兵庫県南部地震で被災した橋脚には、10%以上の塑性ひずみが導入されたと考えられること^{2),4)}、さらに、筆者ら²⁴⁾による新設構造物の鋼

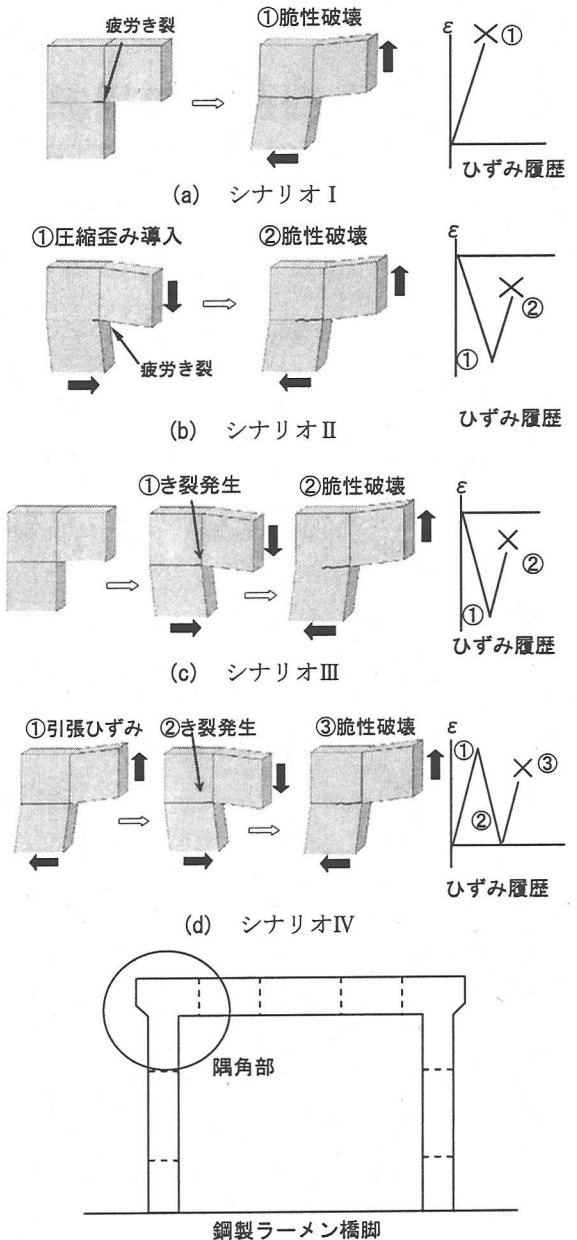


図-1 脆性破壊のシナリオとひずみ履歴

製ラーメン橋脚隅角部を対象とした実験的検討から、その最大耐力時に、5%以下程度、最大耐力を超えその95%に低下した時点で、10%以下程度に達する可能性があることが明らかになっていることから、10%を基本とし、ひずみレベル低減の効果を比較検討するため、5%の場合を含めて考えることとする。

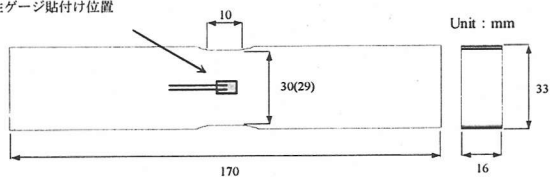
なお、実験の対象としては、上記の考慮すべきひずみ履歴のほか、比較のために、その逆の履歴のものを含めて、表-1に示す様々なパターンのひずみ履歴を考慮する。

表-1 対象とする塑性ひずみ履歴パターン

パターン呼称	ひずみ履歴	備考
AP0, BP0	0%	予ひずみなし (ひずみパターン1)
AP1, BP1	+10%	単調引張予ひずみ (10%)
AP2, BP2	-10%	単調圧縮予ひずみ (10%) (ひずみパターン2)
AP3, BP3	+10%	引張ひずみ域での折返しひずみ (10%) (ひずみパターン3)
AP4, BP4	-10%	圧縮ひずみ域での折返しひずみ (10%)
AP5, BP5	-5%	単調圧縮予ひずみ (5%) (ひずみパターン2)
AP6, BP6	+5%	引張域ひずみでの折返しひずみ (5%) (ひずみパターン3)

*呼称の頭文字は、鋼種を表す。(A: SM490YB, B: SM570Q)

塑性ゲージ貼付け位置



※括弧内の数値はSM570Q材

図-2 塑性ひずみ導入用試験片

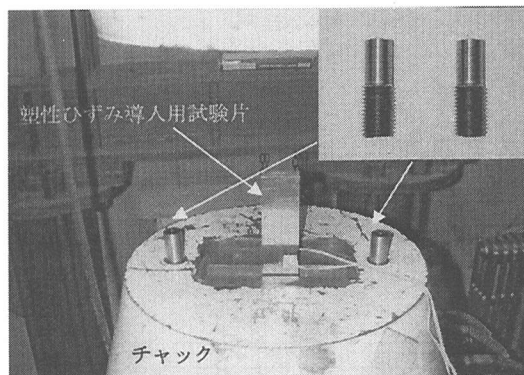


図-3 チャックずれ防止用具

表-2 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-3 機械的性質

鋼材	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (Joule)
SM490YB	407	547	26	154 (0°C)
SM570Q	560	651	39	299(-5°C)

3. 対象鋼材

本研究では、対象鋼材として、鋼製橋脚に一般的に使用される溶接構造用鋼SM490YB材およびSM570Q材の2種類を選定した。その化学成分および機械的性質のミルシート値をそれぞれ表-2、表-3に示す。

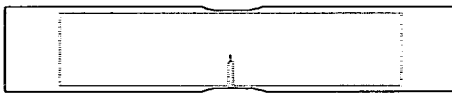
4. 実験方法

(1) 塑性ひずみ導入実験

試験片への塑性ひずみ導入実験では、圧縮方向へのひずみ導入時の座屈防止が最大の課題であった。これまで、単調圧縮ひずみの導入については、筆者らも文献3)で試みているが、本研究で対象とするような、引張ひずみを受けた後の圧縮方向へ

といった折返しの大ひずみの導入は極めて困難であった。

そこで、本研究では、以下のような幾つかの工夫を施した新たなひずみ導入方法を創出し、試験片へのひずみ導入を実施した。まず、出来る限り小さいチャック変位でひずみが導入できるように、CTOD試験片が1体採取できる最小限の大きさで、中央部にひずみが集中して発生するような、図-2に示す形状寸法を有する塑性ひずみ履歴導入用試験片を用意した。また、チャック間の軸直角方向へのずれが座屈の発生の一つの要因であったことから、そのずれを抑えるための図-3に示すような自作の治具を取付けた。これは、チャック双方の同じ位置に存在する、チャック同士の心を合わせるためのボルト穴に突き刺す形で設置することに



(a) CTOD 試験片



(b) 丸棒試験片

図-4 試験片採取位置

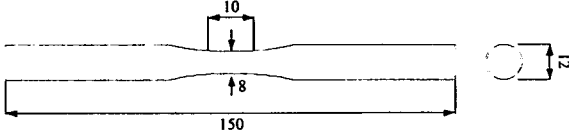


図-5 丸棒試験片の形状および寸法

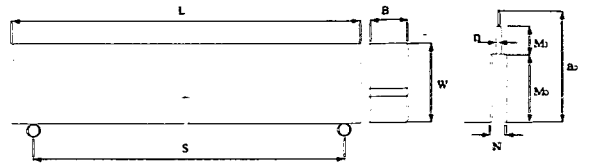
表-4 試験結果

呼称	引張試験			CTOD試験
	降伏点 (0.2% 耐力) (MPa)	引張強度 (MPa)	破断延性 (%)	限界CTOD値 0.1mmでの限界 CTOD曲線の温度 シフト分 $\Delta T_{0.1}(^{\circ}\text{C})$
AP0	421	572	121	-
AP1	616	632	104	25
AP2	360	609	114	51
AP3	334	604	118	28
AP4	672	692	106	74
AP5	297	582	115	32
AP6	339	594	123	22
BP0	535	630	148	-
BP1	702	723	131	8
BP2	418	646	146	31
BP3	720	728	129	10
BP4	678	685	138	6
BP5	389	609	144	13
BP6	367	608	149	2

より、高い精度でチャック間の相対ずれを防止できる治具である。さらに、両方のつかみ部の距離が長いと座屈が発生しやすくなるため、その距離を極小小さくするように配慮した。本研究では、このような工夫により座屈防止を実現した。

実験は、図-2に示すように試験片中央の表裏に貼り付けた単軸塑性ひずみゲージ（ゲージ長2mm）の値を見ながら、両面のひずみが目標の大きさになった時点を終了とした。なお、その際、折返しひずみのパターン（AP3, AP4, AP6, BP3, BP4, BP6）については、最初の一方向へのひずみ導入後、ひずみゲージを張り替えた上で計測を継続し、0%までひずみを戻した。

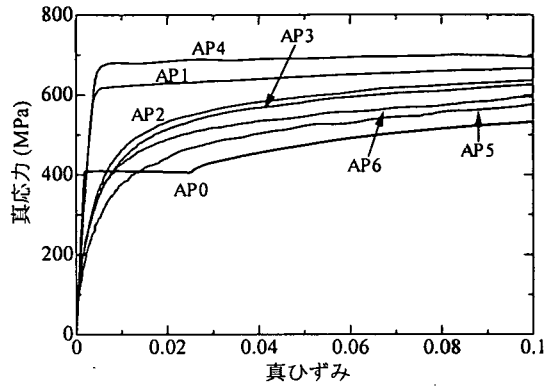
ひずみ導入後、試験片からCTOD試験片および引張試験用丸棒試験片を図-4のような位置から採取した。



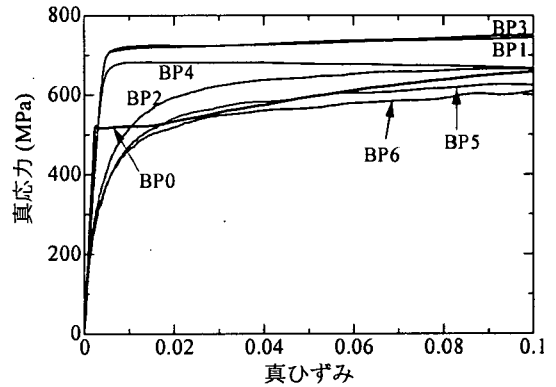
Unit: mm

B	W	S	L	a_0	n	N	M_1	M_0
14.0	28.0	112.0	126.0	0.5W	0.15	1.8	9.0	3.0

図-6 CTOD 試験片の形状および寸法



(a) SM490YB 材



(b) SM570Q 材

図-7 引張試験より得た応力-ひずみ関係

(2) 引張試験

塑性ひずみ履歴を受けた鋼材の強度特性の変化を調べるために、ひずみ導入試験片から採取した丸棒試験片を用いて引張試験を行った。丸棒試験片の形状および寸法を図-5に示す。

(3) CTOD試験

CTOD(Crack Tip Opening Displacement)試験は、日本溶接協会規格、き裂開口変位 (CTOD) 試験²⁹⁾に従い3点曲げ試験により実施した。CTOD試験片の形状および寸法を図-6に示す。

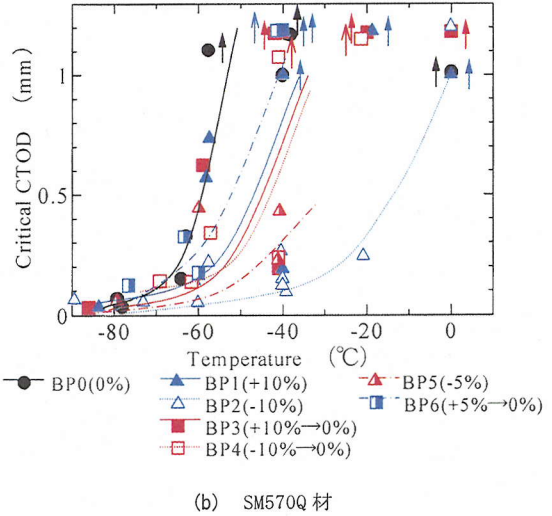
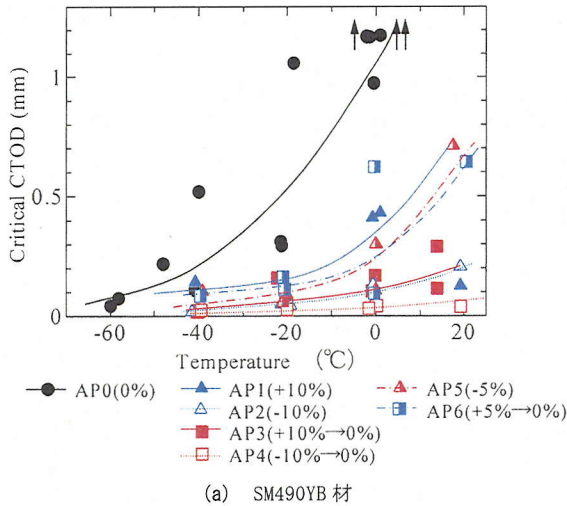


図-8 限界 CTOD 曲線

5. 実験結果

(1) 引張試験結果

図-7に引張試験の結果得られた応力-ひずみ関係を示す。図からわかるように、両鋼種とも塑性ひずみ履歴を受けることにより、応力-ひずみ関係、降伏応力および引張強度が変化している。表-4に、引張試験の結果をまとめる。表からわかるように、塑性ひずみ履歴を受けて、降伏強度および引張強度のほか、破断延性も変化しており、素材に比べ低下している。

なお、本研究では、後述の限界CTOD値の算出の際に、このような塑性ひずみ履歴による降伏応力の変化を考慮することとした。

(2) CTOD試験結果

a) 限界 CTOD 曲線

実験の結果得られた限界 CTOD 曲線を図-8 に示す。試験結果の横につけた矢印は、クリップゲージで測定したき裂開口変位が 4mm を超えても、脆性破壊が発生しなかったことを表す。また、表-4 には、鋼材の破壊靱性劣化の程度を定量的に表現する 1 つの指標として、限界 CTOD 曲線の高温側へのシフト量を考え、文献 9) 同様に、限界 CTOD 値 0.1mm での温度シフト $\Delta T_{0.1}$ を示した。図-9 には、横軸に鋼材へ導入したひずみレベル、縦軸に $\Delta T_{0.1}$ を取り、その関係を表した。なお、図-9 では、10% および 5% レベルで折返し履歴を受けた場合、それぞれ 10% および 5% の位置にプロットしている。以下、これらに基づいて各影響因子について比較検討を行う。

① 鋼素材の破壊靱性

素材 (AP0, BP0) の限界 CTOD 値を両鋼材で比較した場合、脆性-延性遷移温度が SM490YB 材では、

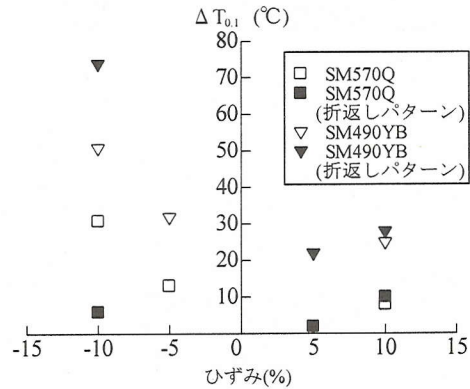


図-9 ひずみレベルと限界 CTOD 曲線の温度シフト量との関係

-40°C程度であり、SM570 材の方が-80°C程度と低く、素材としての破壊靱性は優れている。

② ひずみ方向の影響

図-8 および図-9 で、SM490YB 材について、ひずみパターン AP1 と AP2 を比較すると、圧縮ひずみを受けた AP2 の場合、引張ひずみを受けた AP1 の場合に比べ CTOD 曲線がより高温側に移行しており、鋼材がより脆化する傾向にある。この傾向については、筆者らが既に文献 3) で指摘している通りである。また折返しひずみ履歴を受けた場合、ひずみ履歴が圧縮から始まったパターン (AP4) の方が、引張ひずみを先に受けたパターン (AP3) の場合より脆化している。一方、SM570Q 材の場合にも、SM490YB 材と同様な傾向が見られるが、圧縮単調ひずみ (BP2) の場合にのみ著しく脆化しており、その他のパターンによる脆化の程度は小さい。

③ 折返し履歴の影響

図-8 および図-9 からわかるように、SM490YB 材

温度	AP0	AP1	AP2	AP3	AP4
-20℃					
-40℃					
温度	BP0	BP1	BP2	BP3	BP4
-60℃					
-80℃					

図-10 破面状況

では、引張ひずみ後圧縮ひずみを受けた場合 (AP3)、圧縮ひずみ後引張ひずみを受けた場合 (AP4) のいずれも、それぞれ単調な引張ひずみ (AP1)、単調な圧縮ひずみ (AP2) を受けた場合よりも鋼材がさらに脆化しており、折返しひずみ履歴の影響は、より鋼材の破壊靱性を劣化させる傾向として顕われている。しかしながら、表-4 に示す $\Delta T_{0.1}$ の値に着目し、単調引張ひずみを受けた場合 (AP1) の遷移温度のシフト量と、引張ひずみ後圧縮ひずみを受けた場合 (AP3) のシフト量とを比較すると、折返しによるシフト量よりも最初の単調ひずみによるシフト量が大きく、最初の単調ひずみが鋼材の破壊靱性へ与える影響が大きいと言える。これは、圧縮側のひずみの場合 (AP2 と AP4 の比較) も同様である。

一方、SM570Q 材では、図-8 および図-9 に示されるように、引張ひずみを受けた後、さらに圧縮予ひずみを受けた場合 (BP3) も、圧縮ひずみを受けた後に引張予ひずみを受けた場合 (BP4) も、素材 (BP0) に比べて、限界 CTOD 曲線のシフトが小さく、殆ど脆化が生じていない。すなわち、SM570Q 材では、折返しひずみによる鋼材靱性への影響が明確に顕われておらず、単調ひずみによる靱性劣化のみが際立つ結果となっている。

このように、折返しひずみの鋼材靱性への影響は、鋼種により大きく異なる。

④ ひずみレベルの影響

図-8 でひずみレベルによる影響の違いを比較すると、両鋼種とも、導入されるひずみ量が大きくなると、鋼材がより脆化する傾向が見られる。し

かし、表-4 および図-9 からわかるように、その際、SM490YB 材では、5%のひずみレベルでも $\Delta T_{0.1}$ が 30℃程度と鋼材の脆化が顕著に見られるが、SM570Q 材では 5%のひずみレベルで $\Delta T_{0.1}$ が 10℃程度以下と、10%のひずみレベルの場合と比べ著しく脆化の程度が小さい。SM570Q 材が示すような特性は、鋼材が受けるひずみのレベルを低下させることにより、破壊靱性劣化を著しく抑制することができる可能性を示しており、鋼製橋脚における脆性破壊防止の観点からは重要な特性である。

このように、鋼材靱性に対する塑性ひずみ履歴のひずみレベルの影響は、より大きいひずみレベルの方がより鋼材を脆化させるが、その脆化の程度は鋼種により異なっている。

以上のように、本研究では、様々な塑性ひずみ履歴パターンでの鋼材靱性への影響を明らかにし、それがひずみパターンやひずみレベル、鋼種によって影響の程度が異なることを示した。なお、図-8 および図-9 からわかるように、2. で示した地震時に鋼製橋脚において想定するひずみ履歴パターン (AP2, BP2, AP3, BP3) の中では、単調圧縮塑性ひずみ履歴パターン (AP2, BP2) が最も鋼材を脆化させるひずみパターンである。

b) 破面観察

限界 CTOD 曲線に関する検討で認められた事実を検証するため破面観察を行った。両鋼材の破面状況の代表的なものを図-10 に示す。図-10 からわかるように、両鋼種とも試験温度が低いほど、より破面が平坦となり、断面の絞りの程度が小さくなり、より脆性的な破壊を呈したことが確認できる。

以下に、それぞれの鋼材における破面の特徴を述べる。

図-10 で、SM490YB 材の破面をひずみ履歴パターンごとに比較すると、他と比べ破面が平坦で典型的な脆性破面となっていることから、AP2, AP4 において著しく脆化していることが明確であり、限界 CTOD 値に関する検討で示したように、圧縮ひずみを受けた鋼材の方が引張ひずみを受けた鋼材に比べ脆化している様子が見られる。一方、SM570Q 材においても、単調ひずみでは、圧縮ひずみの方が脆性破面が顕著に見られ、単調引張ひずみ (BP1) と比べ明らかに脆化している。また、BP2 と BP4 の破面を比較すると、圧縮ひずみを受けた後に引張ひずみを受けた場合 (BP4) の方が破断面の紋りが大きくまた破面の凹凸が大きいことから、延性的な破壊が起こっていると考えられ、折返しひずみの影響が小さいことを確認できる。

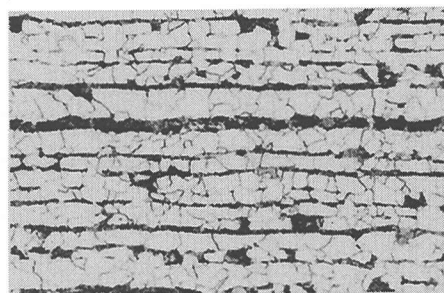
このように、破面観察からも限界 CTOD 曲線に関する検討で示したのと同様な傾向が確認された。

(3) 鋼種およびひずみ履歴による差違の要因

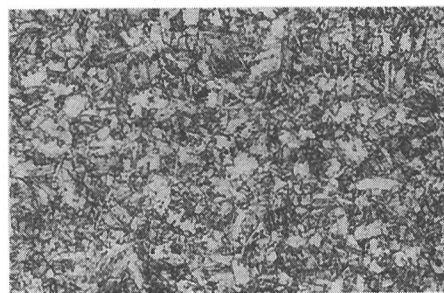
以上述べたような、鋼種および塑性ひずみ履歴パターンによる差違の要因に関して、ミクロ的な構造変化から検討するため、両鋼材に各塑性ひずみ履歴を導入した後、研磨・エッチングにより鏡面処理し、金属顕微鏡を用いて観察した。写真-1 にその際撮影した予ひずみなし (AP0, BP0) の場合の写真を示す。写真から、SM490YB材では、明らかなフェライト結晶を見ることができ、SM570Q材ではフェライト結晶が明瞭に見られない組織となっており (混粒)、明らかに異なる組織となっている。このことが鋼種による差違の一因になっていると考えられる。さらに、明瞭なフェライト結晶が観察されたSM490YB材について、写真-1のような組織写真から幾つかの領域を選定し、その内部にあるフェライト結晶数を求め、領域面積と結晶数から、平均的なフェライト結晶粒径を求めた。測定結果を図-11に示す。図から、より鋼材を脆化させていた圧縮ひずみ材 (AP2) および圧縮ひずみを先に受けた折返し予ひずみ材 (AP4) の方が、引張ひずみ材 (AP1) もしくは引張ひずみを先に受けた鋼材 (AP4) と比べ、フェライト粒径がより大きく変化していることがわかる。文献³⁾でも示されているが、このように、フェライト結晶の大きさの変化がひずみ履歴パターンによる鋼材脆性への影響の差違の一因になっていると考えられる。

6. 鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止に必要な鋼材の破壊靱性レベル

ここでは、本研究の実験結果および筆者らがこれまでに行ってきた各種鋼材に対する塑性ひずみ履歴の破壊靱性への影響に関する研究成果³⁾を総括して、鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止に必



(a) SM490YB 材



(b) SM570Q 材

写真-1 金属顕微鏡で観察したミクロ組織

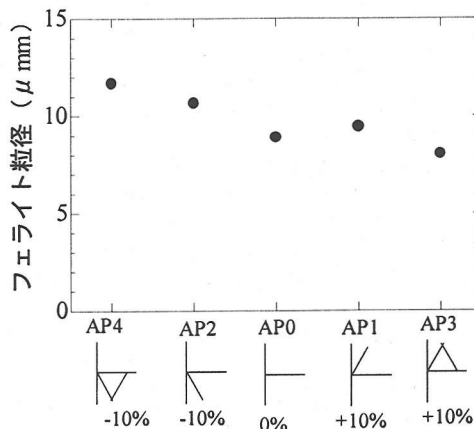


図-11 測定したフェライト粒径

要な鋼材の破壊靱性レベルについて考察する。5.でも示したように、各種鋼材に対する塑性ひずみ履歴の破壊靱性への影響は、鋼種やひずみ履歴パターンによって変化する。そのため、本研究では、地震時に鋼材へ導入されると予想される塑性ひずみ履歴によって、様々な鋼材において、最大どの程度の鋼材の靱性劣化が想定されるのかという観点から検討する。

図-12は、全ての対象鋼材について、図-9と同様、横軸に鋼材へ導入したひずみレベル、縦軸に導入した塑性ひずみ履歴による鋼材の靱性劣化の程度を表すものとして $\Delta T_{0.2}$ を用いて、その関係を表したものである。この図からわかるように、同じひずみレベルと比較すると、引張ひずみによるシフ

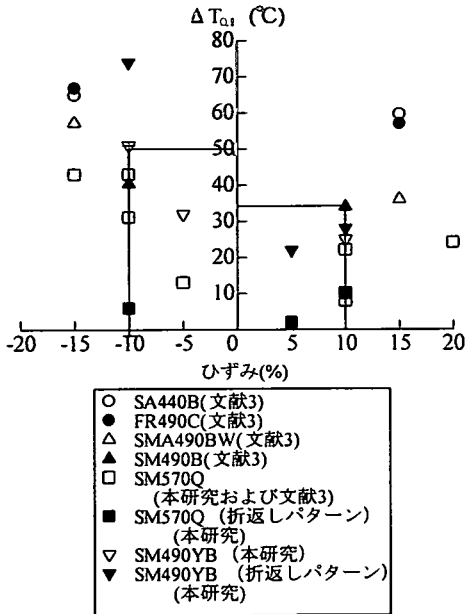


図-12 ひずみレベルと限界 CTOD 曲線の温度シフト量との関係 (全対象鋼材)

ト分よりも圧縮ひずみによるシフトの方が大きく、より鋼材を脆化させる傾向がある。

本研究では、地震時脆性破壊防止を考慮すべき最大の変形レベルとして、才塚・宇佐美³⁰⁾が限界状態として提案する δ_{95} (最大耐力を過ぎその95%に耐力が低下した時点での変形量) を考え、その際の最大塑性ひずみレベルとしては、前述のように、2. で示した地震時に想定するひずみ履歴パターンの中では、単調圧縮ひずみを受けた時の温度シフトが最大であり、約50°Cである。本研究では、地震時の脆性破壊防止の観点から、鋼材の破壊靱性に対する要求として、この温度シフト50°Cを考慮することを考え、以下のように、鋼材の要求靱性レベルを提案する。

$$\begin{aligned} & (\text{限界CTOD値が} 0.1\text{mmと} \text{なる温度} T_{0.1}) \text{ [}^\circ\text{C]} \\ & \leq (\text{対象構造物の最低使用温度} T - 50) \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

我が国における構造物最低使用温度³¹⁾ T は、本州を含む平均的な地域で、-10°C、北海道で-40°C程度であることから、 $T_{0.1}$ に対する要求レベルとしてはそれぞれ-60°C以下、-90°C以下となる。

なお、本研究では、基準となる限界CTOD値として0.1mmを用いた。これは、JIS規格³²⁾で溶接構造用圧延鋼材に対して定められている要求シャルピー吸収エネルギー値27Jおよび47Jは、例えば、降伏点400MPa程度で、それぞれ0.0980mmおよび0.117mm程度に相当する³³⁾こと、貝原ら³⁴⁾が低温溶接継手に関する検討において限界CTOD値0.1mmを要求靱性値として取上げていることを踏まえ、脆性的な破

壊を防止するためには限界CTOD値は少なくとも0.1mm以上必要であると考慮設定したものである。これまでも、防止すべき極めて脆性的な破壊は、限界CTOD値が0.1mmを下回る範囲で起こると指摘されている^{2), 33)}ため、限界CTOD値0.1mmは脆性破壊を防止するには十分な靱性レベルであると考えられる。なお、ひずみ速度(動的効果)の影響については、筆者らの研究⁴⁾から、本研究で対象とするような大きなひずみのレベルでは、動的効果よりも大きなひずみを受けたこと自体による靱性の劣化の影響が大きいことが確認されていることから、本研究では考慮していない。

7. 結論

本研究では、鋼製橋脚における地震時脆性破壊を防止するために必要な鋼材の破壊靱性について、地震時に作用する塑性ひずみ履歴によってどの程度の鋼材の靱性劣化を想定すべきかという観点から検討した。そのために、本研究では、脆性破壊の発生シナリオを考え、考慮すべきひずみ履歴パターンを示した上で、新たに開発したひずみ履歴導入法を開発し、これらを含む様々なひずみ履歴による鋼材の破壊靱性劣化をCTOD試験により明らかにした。以下に、本研究の結論をまとめる。

- 文献 3) 同様、引張ひずみよりも圧縮ひずみの方が鋼材をより脆化させる傾向があることを確認した。
- 折返しパターンのひずみ履歴およびひずみレベルによる鋼材の靱性への影響は鋼種によって異なる可能性がある。本研究で用いた鋼材では、SM490YB材は、折返しひずみにより、単調ひずみの場合に比べてさらに靱性劣化が進行した。また、5%レベルのひずみ履歴によっても明らかな靱性劣化が見られたが、10%レベルのひずみ履歴による劣化の方がより顕著であった。一方、SM570Q材では10%レベルでの単調圧縮ひずみによってのみ著しく靱性が劣化し、折返しひずみおよび5%レベルのひずみによる靱性劣化は殆ど見られなかった。
- 鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止に必要な鋼材の破壊靱性レベルを考える上で、塑性ひずみ履歴による鋼材の限界CTOD曲線の温度シフトとして50°Cを考慮すべきことを示し、それに基づいて脆性破壊防止に必要な破壊靱性レベルの提案を行った。

謝辞：本研究は、東京工業大学鋼橋設計工学講座(新日本製鐵・川崎製鉄・NKK・住友金属工業・神戸製鋼 5社寄附講座)の研究の一環として行った。また、東京工業大学創造プロジェクト研究体SIG1(高性能鋼材の橋梁への適用に関する研究会)に関連した研究でもあり、各委員の方には、数々の貴重なご意見を頂いた。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) 三木千壽，休場裕子，沖中知雄：阪神大震災により円形断面鋼製橋脚に生じた脆性破壊の材料特性からの検討，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.45-53，1999.1.
- 3) 三木千壽，佐々木栄一，休場裕子，竹之井勇：引張および圧縮の塑性ひずみ履歴による鋼材の破壊靱性劣化，土木学会論文集，No.640/I-50，pp.165-175，2000.1.
- 4) 岡下勝彦，大南亮一，道場康二，山本見久，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-40，pp.243-261，1998.4.
- 5) 大倉一郎，田原潤，安田修，広野正彦：阪神・淡路大震災で被災した鋼製円柱橋脚の破壊靱性，鋼構造論文集，第5巻，第19号，pp.17-26，1997.12.
- 6) 大倉一郎，田原潤，西岡敬治，安田修：繰返し予ひずみが鋼材の破壊靱性に与える影響，鋼構造論文集，第3巻，第11号，pp.1-11，1996.9.
- 7) 大倉一郎，田原潤，安田修，広野正彦：繰返し塑性ひずみによる鋼材の破壊靱性低下を評価するためのモデル，構造工学論文集，Vol.45A，pp.347-356，1999.
- 8) 日本溶接協会鉄鋼部会APD委員会：繰返し大変形を受ける建築鉄骨溶接接合部の強度と破壊靱性（中間報告書III），1996.7.
- 9) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会：建築鉄骨での脆性破壊と鋼材破壊靱性セミナーテキスト，1999.
- 10) 三木千壽，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.
- 11) 坂野昌弘，岸上信彦，小野剛史，三上市蔵：鋼製ラーメン橋脚柱梁接合部の超低サイクル疲労破壊挙動，鋼構造論文集，第4巻，第16号，pp.17-26，1997.12.
- 12) 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疲労破壊挙動，鋼構造論文集，第2巻，第8号，pp.73-82，1995.12.
- 13) 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.
- 14) 佐々木栄一，荒川泰二，三木千壽，市川篤司：リブ溶接止端部に発生する低サイクル疲労き裂の先端形状とそれを起点とした脆性破壊の発生挙動，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1107-1112，2002.3.
- 15) 森河久，下里哲弘，三木千壽，市川篤司：箱断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.177-184，2002.4.
- 16) 阪野賢治：圧縮予荷重により発生する亀裂を用いた破壊靱性評価法に関する研究，日本造船学会論文集，第141号，pp.282-289，1977.5.
- 17) 井上肇，前中浩，佐久間正明：圧縮予ひずみが破壊靱性に及ぼす影響，日本造船学会論文集，第160号，pp.450-460，1986.11.
- 18) 山本元道，東田幸四郎，藤久保昌彦，矢尾哲也，矢島浩：座屈により大きな圧縮歪を受けた鋼構造部材の亀裂強度に関する研究（その1），日本造船学会論文集，第178号，pp.565-573，1995.11.
- 19) 山本元道，矢島浩，栗原正好，守田聡：座屈により大きな圧縮歪を受けた鋼構造部材の亀裂強度に関する研究（その2），日本造船学会論文集，第182号，pp.659-665，1997.11.
- 20) 吉成仁志，榎並啓太郎，今井拓水，小関正，島貴広志，井上健裕，粟飯原周二：圧縮予ひずみを受けた鋼材からの延性き裂発生挙動，日本造船学会論文集，第188号，pp.691-705，2000.11.
- 21) 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.
- 22) 建設省土木研究所：鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験，土木研究所資料，第3583号，1999.3.
- 23) 三木千壽，Jorge Muller，佐々木哲也：断面変化部を有する円形断面鋼製橋脚の耐震性能の検討，土木学会論文集，No.605/I-45，pp.117-127，1998.10.
- 24) 佐々木栄一，高橋和也，市川篤司，三木千壽，名取暢：鋼製ラーメン橋脚隅角部の補剛構造がその弾塑性挙動に与える影響，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.201-214，2001.10.
- 25) 石澤俊希，井浦雅司：円形鋼製橋脚の最高荷重および劣化特性に関する研究，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.115-120，1998.11.
- 26) 葛漢彬，高聖彬，宇佐美勉，松村寿男：鋼製パイプ断面橋脚の繰返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究，土木学会論文集，No.577/I-41，pp.181-190，1997.10.
- 27) Shengbin GAO, Tsutomu USAMI, Hanbin Ge: Numerical Study on Seismic Performance Evaluation of Steel Structures, Nagoya University Report, No.9801, 1998.
- 28) 中村秀治：鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析，土木学会論文集，No.549/I-37，pp.205-219，1996.10.
- 29) 日本溶接協会：き裂開口変位（CTOD）試験（WES1108-1995），1995.
- 30) 才塚邦宏，宇佐美勉：コンクリート部分充填鋼製橋脚の終局耐震設計法と耐震実験による検証，土木学会論文集，No.570/I-40，pp.287-296，1997.7.
- 31) 久保雅邦，石田良三，北沢正彦，川北司郎：気温と構造物温度の実態調査による温度荷重の検討，土木学会第41回年次学術講演会講概集，pp.339-340，1986.
- 32) 日本規格協会：溶接構造用圧延鋼材，JIS-G3106-1992，1992.
- 33) 小田勇：シャルピ吸収エネルギーと限界CODの関係，溶接学会論文集，第4巻，第2号，pp.453-458，1986.
- 34) 貝原正一郎，村山武弘，河野武亮，南二三吉，豊田政男，佐藤邦彦：低温用鋼溶接継手の破壊強度評価への曲げ限界COD値の意義について，溶接学会論文集，第4巻，第1号，pp.176-181，1986.

(2002. 1. 28 受付)

REQUIRED FRACTURE TOUGHNESS OF STEEL TO PREVENT BRITTLE FRACTURE DURING EARTHQUAKES IN STEEL BRIDGE PIERS

Eiichi SASAKI, Taiji ARAKAWA, Chitoshi MIKI and Atsushi ICHIKAWA

In this study, the investigations were conducted on the required fracture toughness of steels to prevent brittle fracture during earthquakes in steel bridge piers. By considering the scenarios of the occurrence of brittle fracture, the patterns of prestrain that should be considered were shown, and then the effects of various patterns of prestrain on fracture toughness of steels made to be clear by the development of the method to introduce prestrain into specimens. Finally, by arranging all the results of this study and our previous study on the effects of plastic prestrain, the level of the required fracture toughness was suggested. To prevent brittle fracture during earthquakes, the temperature shift of 50 degrees of Celsius of the critical CTOD curves by plastic prestrain should be considered.