

# 引張および圧縮の塑性歪み履歴による 鋼材の破壊靱性劣化

三木 千壽<sup>1</sup>・佐々木 栄一<sup>2</sup>・休場 裕子<sup>3</sup>・竹之井 勇<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>3</sup>学生員 M.S. 東京工業大学博士課程 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>4</sup>学生員 東京工業大学修士課程 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

本研究では、各種鋼材を対象に、地震時に想定される 10%を超える引張あるいは圧縮の塑性歪みを考慮し、CTOD 試験により、塑性歪み導入による破壊靱性の劣化について検討した。その結果、塑性歪みにより全く脆化しない鋼材の存在が確認される一方で、それ以外の全ての種類の鋼材で、歪み時効脆化する以前に、塑性歪みそのものによって著しく脆化することが明らかとなった。その際、塑性歪みによる脆化の程度は、鋼材の種類によって大きく異なった。また、圧縮予歪みの方が引張予歪みよりも鋼材をより脆化させる傾向があることが確認されたことから、その要因について、材料特性面から検討を加えた。

**Key Words :** steel, earthquake, brittle fracture, prestrain, fracture toughness

## 1. 緒言

阪神淡路大震災では、鋼橋等の鋼構造物に甚大なる被害がもたらされた。特に、神戸市ハーバーハイウェイ P75 橋脚や阪神高速道路等の円形断面橋脚など多くの鋼製橋脚で発生した脆性破壊<sup>1)</sup>は、これまで世界でも例がなく、極めて重大な損傷であったと言える。大震災以降、これら脆性破壊の発生メカニズムの究明が進められている<sup>2),3)</sup>が、未だその全容が解明されるには到っていない。

脆性破壊の発生は、応力条件やき裂の形状等の様々な影響を受けるが、最終的には材料の破壊に対する抵抗、すなわち破壊靱性に依存する<sup>4)</sup>。これまで、冷間加工の研究<sup>5)-9)</sup>や造船分野での海難事故後の破壊強度評価に関する研究<sup>10)</sup>から、鋼材の破壊靱性は、塑性歪み履歴を受けた場合、歪み時効により劣化することが知られていた。しかし、阪神淡路大震災で発生した脆性破壊の多くは、部材に大規模な塑性変形が発生した直後にき裂が発生・進展していることから、鋼材は地震力により 1 度あるいは繰返し塑性予歪み履歴を受けた直後、歪み時効の影響が現れる前に脆化していた可能性がある。実際に、筆者らは、阪神淡路大震災で被災した鋼製橋脚から鋼材を採取し、その材料特性の変化を調査することにより、地震力によって座屈部で板厚平均 12.3% (最大 21.1%)にも相当する圧縮塑性歪みが導入されたと推

定し、破壊靱性が著しく低下していたことを示している<sup>11)</sup>。

これまで、地震力による塑性歪みの導入を想定し、歪み時効を考慮せずに、塑性歪みによる鋼材の脆化について検討した研究は殆どなく、大倉ら (対象鋼材: SM400B)<sup>12)</sup>および日本溶接協会 APD 委員会 (同: SM490A)<sup>13)</sup>が、阪神淡路大震災以降に繰返し歪み履歴を含めて検討している程度である。しかし、これらの研究では、前出の調査結果で推定されたような、高い歪み領域の、しかも圧縮の塑性歪みの影響は考慮していない。

また、鋼材は、その種類によって化学成分、製造法、および機械的性質が異なるのが一般的であり、塑性歪みの影響の受け易さも鋼材の種類それぞれの持つ特性であると推測される。特に、近年、各種の性能・機能を有する様々な高性能鋼材<sup>14)-20)</sup>が開発され、実構造物への利用も進められつつある状況にある。しかし、これまでの研究で対象となった鋼材の種類が極めて少なく、より多くの種類の鋼材について、塑性歪み履歴による破壊靱性の劣化の程度を明らかにする必要があると考えられる。このような検討は、塑性歪み履歴による脆化の程度が小さいような鋼材の選定あるいは開発につながり、今後の耐震性に優れた鋼構造物の創造において、極めて重要である。

以上のようなことから、本研究では、各種鋼材を

表-1 化学成分

鋼材	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B
SM490B	0.16	0.33	1.24	0.016	0.003							
SM570Q	0.14	0.23	1.44	0.012	0.005							
SA440B	0.14	0.32	1.39	0.006	0.002	0.25	0.19	0.02	0.01	0.05		0.0001
SMA490BW	0.09	0.38	1.22	0.011	0.002	0.33	0.15	0.51		0.003	0.02	
FR490C	0.11	0.26	1.14	0.008	0.002			0.02	0.52		0.03	
SLA325AN	0.11	0.25	1.49	0.007	0.003	0.18	0.17				0.01	

表-2 機械的性質および製造法

鋼材	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	降伏比 (%)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー(J)	製造法
SM490B	356	518	69	28	299 (-5°C)	通常圧延
SM570Q	560	654	86	39	218 (0°C)	通常圧延後 焼入れ焼戻し処理
SA440B	448	614	73	44	268 (0°C)	TMCP 圧延後 1次・2次焼入れ 焼戻し処理
SMA490BW	421	529	80	24	355 (0°C)	通常圧延
FR490C	383	554	69	23	207 (0°C)	通常圧延
SLA325AN	393	498	79	53	279 (-20°C)	通常圧延後 焼ならし処理

対象に、地震時に想定される10%を超える塑性歪みを考慮し、塑性歪み導入自体による鋼材の破壊靱性劣化について検討することとした。なお、本研究では、引張予歪みに加え、先述のように座屈部に導入され得る圧縮予歪みも考慮することとし、予歪みの方向が鋼材の破壊靱性の変化にもたらす影響についても検討を行った。

## 2. 対象鋼材

本研究では、以下のような6種類の鋼材を検討の対象とした。これらは、強度レベルが500MPaから600MPaで、しかもできるだけ多様な鋼材として選定した。

- ・溶接構造用鋼 SM490B
- ・溶接構造用鋼 SM570Q
- ・建築用低降伏比鋼 SA440B
- ・溶接構造用耐候性鋼 SMA490BW
- ・耐火鋼 FR490C
- ・低温压力容器用炭素鋼 SLA325AN

これらの鋼材のミルシートに記載されている化学成分、機械的性質をそれぞれ表-1、表-2に示す。また、図-1には静的に行った引張試験の結果を、試験に用いた丸棒試験体の形状寸法とともに示す。

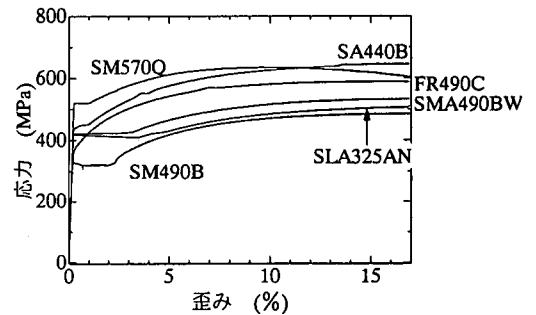
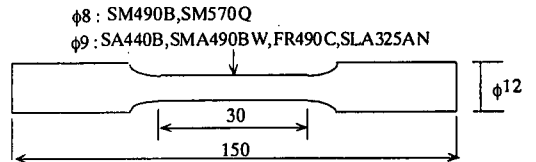


図-1 引張試験結果

## 3. 実験手法

### (1) 予歪み導入試験

引張予歪みは、平行部を有する大型引張試験体に対して引張試験を行うことにより導入し、引張予歪み導入後、平行部中央付近よりCTOD試験体(図-2)を複数体採取した(図-3)。

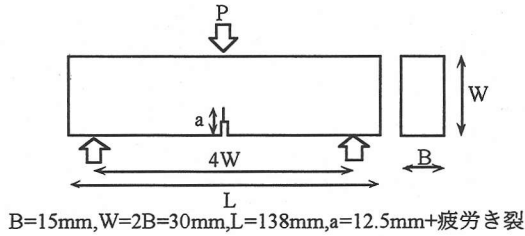


図-2 CTOD 試験体の形状および寸法

圧縮予歪みは、図-4 に示すように、CTOD 試験体が 1 体だけ採取できる最小限度の大きさの圧縮試験体に対して導入することとし、予歪み導入時に座屈が発生しないように配慮した。予歪み導入後、はらみだした部分を切削して、CTOD 試験体を取出した。

導入した予歪み量は表-3 に示す通りである。

## (2) 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<sup>21)</sup>に基づき、3点曲げ試験により行うこととした。

試験温度は、試験体を保温槽内でエタノールに浸し、液体窒素で制御した。保温槽内での試験片設置状況は、図-5 のようである。限界 CTOD 値  $\delta$  はクリップゲージ変位の塑性成分  $V_p$  を用いて、次式により算出される。

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_y E} + \frac{0.4(W-a_0)V_p}{0.4W+0.6a_0+z} \quad (1)$$

ここで、 $K$ : 応力拡大係数 ( $\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ )、 $\nu$ : ポアソン比 ( $=0.3$ )、 $\sigma_y$ : 降伏応力 ( $\text{MPa}$ )、 $E$ : ヤング率 ( $\text{MPa}$ )、 $z$ : ナイフエッジ高さ ( $\text{mm}$ )、 $a_0$ : 初期き裂長さ ( $\text{mm}$ )、 $W$ : 試験体幅 ( $\text{mm}$ ) である。降伏応力は、次式により試験温度  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) によって、予歪み 0% の室温での降伏応力  $\sigma_{y0}$  に補正を加えたものを用いた。

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \exp\left\{\left(481.4 - 66.5 \ln \sigma_{y0}\right) \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{293}\right)\right\} \quad (2)$$

表-3 予歪み量

鋼材	引張予歪み	圧縮予歪み
SM570Q	+10% +20%	-10% -15%
SM490B SA440B SMA490BW FR490C SLA325AN	+15%	-15%

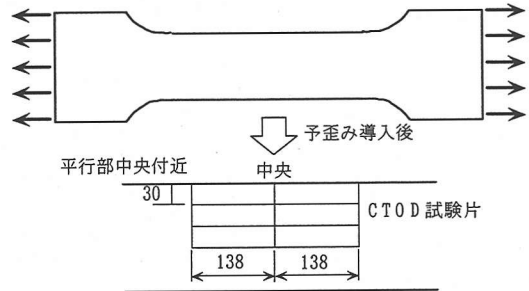


図-3 引張予歪み導入方法

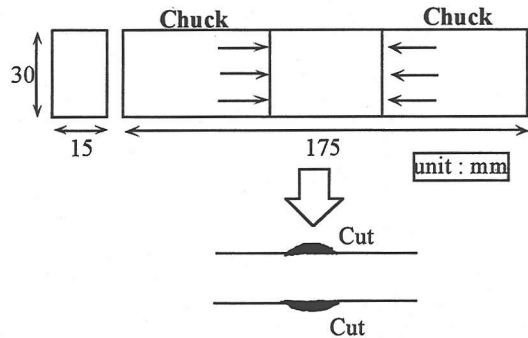


図-4 圧縮予歪み導入方法

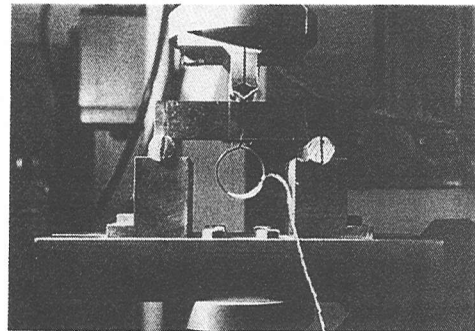


図-5 CTOD 試験状況

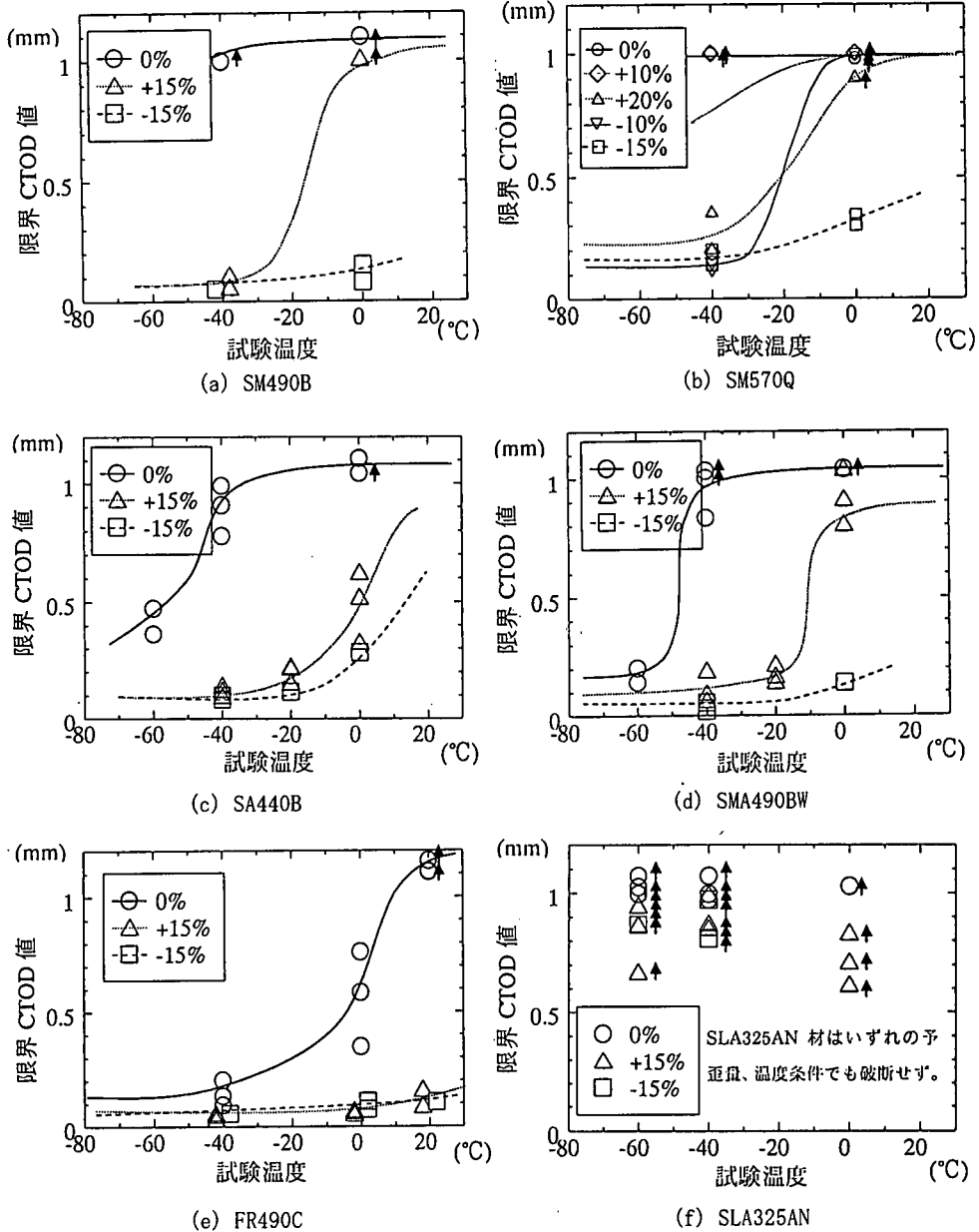


図-6 CTOD 試験結果

#### 4. 実験結果および考察

##### (1) CTOD 特性

図-6 に実験の結果得られた CTOD 曲線を鋼材別に示した。

##### a) 素材(予歪みなし)の CTOD 特性

予歪みなし (0%) の場合には、FR490C 材以外の鋼材では、0°C でその限界 CTOD 値がアッパーシェルフ

領域にあり十分な靱性を有していると言える。しかし、FR490C 材は、0°C で遷移領域にあり他の鋼材よりも明らかに低い靱性を示した。耐火鋼である FR490C 材は、高温域で高い強度・靱性を有しているのが特徴とされているが、土木構造物で予想される温度領域を含む低温域では靱性が著しく低い状態となっている。

-50°C 付近となると、SA440B 材および SMA490BW 材





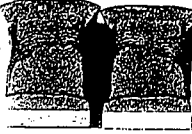
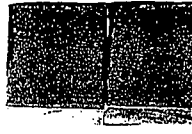

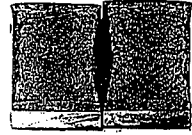
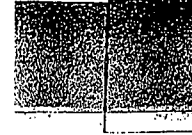
+15%	0%	-15%
		
試験温度 20°C	試験温度 20°C	試験温度 20°C
		
試験温度 0°C	試験温度 0°C	試験温度 0°C
		
試験温度 -40°C	試験温度 -40°C	試験温度 -40°C

図-7 破面状況 (FR490C)

の脆化が見られるようになる。しかし、SM490B 材、SM570Q 材および SLA325AN は、全く脆化することなく依然として優れた靱性を示している。特に、SLA325AN 材は、測定限界としたクリップゲージ変位に到っても破壊せず、低温域で高靱性を有するという特有の性能を十分に発揮している。

#### b) 予歪みによる CTOD 特性の変化

SLA325AN 材以外の鋼材では、予歪みによる明らかな靱性劣化が認められた。特に、FR490C 材は、予歪みの方向に依らず常温での靱性劣化が著しく、予歪み導入後は室温 (20°C) でも脆性的な破壊挙動を示した。このことから、FR490C 材については実構造物への利用にあたって、その素材としての靱性の低さと、予歪みによる激しい脆化を十分に認識しておく必要があると考えられる。

一方、SLA325AN 材は、予歪み導入後も全く靱性を損なうことなく、いずれの設定温度でも破壊せず極めて優れた靱性を示した。従って、SLA325AN 材は、通常使用温度では、予歪みの影響を全く受けず高い靱性を保持できる鋼材であると言える。

SLA325AN 材および FR490C 材以外の鋼材の中では、SM570Q 材が最も予歪みによる脆化の程度が小さく、遷移温度も最も低い。引張予歪み材の遷移温度は、SA440B、SMA490BW、SM490B、SM570Q の順に低くなっている。また SM490B 材および SM570Q 材は、引張予歪みより圧縮予歪みによる靱性劣化の程度の方が著しいという特徴的な性質を示している。この傾向は、SA440B 材および SMA490BW 材にも見られる。特に、SMA490BW 材の圧縮予歪みによる脆化は著しい。既往

の研究<sup>22),23),24)</sup>により、鋼板が大規模座屈した場合、座屈撓みの内側 (圧縮側) から、外側 (引張側) に先行して、容易に亀裂が生じ得ることが明らかとなっていることから、このような予歪みの方向による鋼材の脆化の程度の違いが、各種の鋼材で確認されたことは非常に重要であると言える。

以上のように、CTOD 特性からは、SLA325AN 材が最も優れた破壊靱性を有していること、FR490C 材が通常使用温度レベルで最も破壊靱性が低く予歪みの影響も顕著であること、それ以外の鋼材はこの 2 種類の鋼材の中間的な破壊靱性を有し、予歪みの方向による影響の違いが見られることが明らかとなった。すなわち、鋼材の種類によって、破壊靱性およびその予歪みによる変化の程度に違いがあり、殆どの鋼材で、歪み時効の影響が無くとも、塑性予歪み自体により顕著な脆化が生じることが示された。

#### (2) 破面のマクロ観察

まず、最も脆化の激しかった FR490C 材の破面状況を図-7 に示す。FR490C 材では、CTOD 特性に予歪みの方向による差は認められなかったが、破面状況には明らかな違いが見られる。0°C で破面の状況を比較すると、素材 (予歪みなし) では、延性破面の占める割合が大きく、延性による破断面の絞り (面積の減少)、せん断縁が確認され塑性変形能力があったことがわかるが、圧縮予歪み材 (-15%) では、破面が平らであり、面積の減少、せん断縁も殆ど見られず、完全な脆性破面を呈している。

引張予歪み材 (+15%) では、破面の凹凸および破

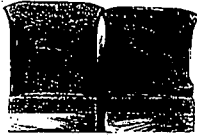
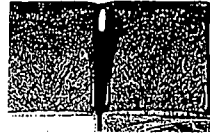





+15%	0%	-15%
		
試験温度 0°C		試験温度 0°C
		
試験温度 -20°C		試験温度 -20°C
		
試験温度 -40°C	試験温度 -40°C	試験温度 -40°C

図-8 破面状況 (SA440B)







+15%	0%	-15%
		
試験温度 -20°C	試験温度 -40°C	試験温度 -20°C
		
試験温度 -40°C	試験温度 -60°C	試験温度 -40°C

図-9 破面状況 (SMA490BW)

断面の絞りの様子から判断して、素材と圧縮予歪み材の中間的な破面となっており、延性と脆性が混在した破壊モードであったことがわかる。すなわち、導入された予歪みの方向によって鋼材の破壊モードに違いが生じることが明らかとなった。限界 CTOD 値では、その値が小さすぎて判然としなかったが、破面状況から判断して、FR490C 材においても圧縮予歪み材の方が、引張予歪み材よりも脆化させる傾向があると言える。-40°Cとなると、引張予歪み材でもほぼ脆性的な破壊となっているが、僅かにせん断縁が伺える点で、完全な脆性破壊モードを呈している圧縮予歪み材の挙動とは異なる。

予歪みの方向による影響の違いが CTOD 特性にも明らかに現れた SM490B 材、SM570Q 材、SA440B 材および SMA490BW 材でも、破面状況に同様な傾向が見られた。SA440B 材および SMA490BW 材について、その破面状況を図-8、図-9 にそれぞれ示しておく。

## 5. 鋼材の種類による破壊靱性の差違の要因に関する考察

### (1) 化学成分

本研究で行った実験で全く予歪みによる脆化が見られなかった SLA325AN 材には、ニッケル(Ni)および銅 (Cu)が特徴的に多く含まれている。しかし、SA440B、SMA490BW にも、これらが多く含まれているが、SLA325AN 材ほどの優れた靱性を示していない。SLA325AN 材では、ニッケル(Ni)および銅 (Cu)以外にはニオブ(Nb)が含まれているだけであり、SA440B 材および SMA490BW 材のように他に多くの合金が含まれない。そのため、SLA325AN 材では低温域における脆化を防止するというニッケル(Ni)の特徴が他の合金に干渉されず十分に発揮される可能性がある。最も脆化が顕著に見られた FR490C 材には、ニッケル(Ni)は全く含まれない。

耐火鋼 FR490C 材では、高温域での転移を生じにくくし降伏点の低下を防ぐ作用を持つモリブデン (Mo) が極めて多く含まれる。しかし、このモリブデン (Mo) の添加により、この鋼材の常温での特性に悪影響を及ぼしている可能性があるかどうかは明らかではない。

化学成分の面では、ニッケル (Ni) の添加の有無と、他の成分との構成が、鋼材の破壊靱性に影響を及ぼしている可能性があるかと推察される。

## (2) 製造過程

SLA325AN 材は、焼ならし処理を施し結晶粒を微細化・均整化することにより、靱性・延性の向上が図られており、その効果が実験結果に十分に現れていると言える。SM570Q 材は、通常圧延後、焼入れ・焼戻し処理により、靱性を調整しながら硬度上昇を図って製造されており、比較的高い破壊靱性を示した。

靱性が比較的低い SM490B 材と、極めて靱性の低い FR490C 材は、通常圧延での製造であり、熱処理は行われていない。

SA440B 材は、TMCP 圧延により製造され、降伏比の低減が計られているが、靱性の面では熱処理の効果は見られない。

## (3) 機械的性質

表-2 で各鋼材の素材での降伏比と伸びを見ると、最も靱性が低かった FR490C 材は、降伏比も伸びも最も低い値を示している。また、図-1 をみると、FR490C 材では降伏棚がない。一方、最も優れた靱性を示した SLA325AN 材は、降伏比も伸びも最も高いレベルにあり、降伏棚も最も長い。このように、鋼材の靱性には、降伏比、伸び、降伏棚の長さ、つまり鋼材の塑性変形性能が関係していると考えられる。

この対照的な 2 種類の鋼材 FR490C 材と SLA325AN 材に、SA440B 材と SMA490BW 材を加えた 4 種類の鋼材で、引張予歪み 15% を導入したものについて、丸棒試験体 (図-1) を用いて引張試験を行った。その結果から、各鋼材の予歪みによる伸びの変化を、表-4 に示す。いずれの鋼材も引張予歪みの導入により、破断伸びが著しく低下している。特に、予歪みの導入により著しく脆化した FR490C 材は、破断伸びが最も小さくなり、一方、予歪み導入後も全く脆化が見られなかった SLA325AN 材は、予歪み導入後の伸びも最も大きい値を示した。引張予歪み材では、鋼材の種類によらず引張降伏強度が著しく上昇し、降伏強度と最大強度が一致しているため、降伏比、降伏棚の長さという指標での比較検討ができない (図-10)。

表-4 予歪み導入による伸び特性の変化

鋼材	予歪みなし (0%)	引張予歪み (+15%)
SA440B	41.2	15.6
SMA490BW	29.3	16.8
FR490C	26.8	14.6
SLA325AN	42.8	19.3

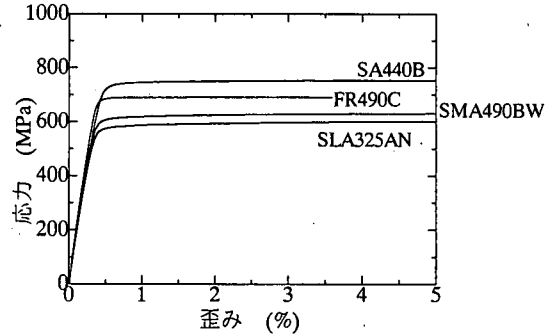


図-10 引張予歪み材の引張試験結果

表-5 各鋼材のフェライト結晶粒度

鋼材	平均的な結晶粒度
SM490B	9.5
SM570Q	混粒のため測定できず
SA440B	混粒のため測定できず
SMA490BW	10.5
FR490C	10.8
SLA325AN	11.3

## (4) 結晶粒径

表-5 に、JIS 規格 G0552<sup>25)</sup> に基づいて測定した、各鋼材 (予歪みなし) の板厚 1/4 の位置での平均的なフェライト結晶粒度を示す。結晶粒度の値が大きいくほど、平均的な結晶粒径が小さくなる。

表-5 から、最も優れた靱性を示した SLA325AN 材は、結晶粒が最も小さくなっていることが分かる。一方で、最も靱性の低かった FR490C 材は、それよりも良好な靱性を示した SM490B 材および SMA490BW 材よりも結晶粒径が小さかった。一般には、結晶粒径が大きく、ミクロ組織が粗くなっている程、鋼材の靱性は低下するとされている。しかし、鋼材の靱性は、これまで述べてきた化学成分や機械的性質等の要因の影響も受けると考えられるため、これらの影響の大きさととの比較の問題となる。SLA325AN 材では、ミクロ組織の小ささが、そのまま優れた破壊靱性に良好な影響を与えていると考えられるが、FR490C 材では、その影響が認められないことから、他の要因の影響が非常に大きいと考えられる。なお、SM570Q

材および SA440B 材は、パーライト等が多量に混在しており（混粒）、フェライト結晶粒度の計測を行えなかった。

ここでは、4 つの視点から鋼材の特徴を比較し、鋼材の破壊靱性に影響を及ぼす要因について検討したが、それらの要因による影響は明らかではなく、今後の課題である。

## 6. 塑性予歪みの方向による鋼材の靱性変化の差違の要因

ここでは、圧縮予歪みの方が引張予歪みよりも鋼材をより劣化させる傾向があることについて、考察を行う。

### (1) 予歪みによる降伏点の変化

SM570Q 材について、素材と予歪み材の機械的特性を比較するために、予歪み材と素材の引張試験結果を図-11 に示す。先にも述べたが、この図からも分かるように、予歪みの導入によって鋼材の降伏強度・伸び特性は変化し、また予歪みの方向によって降伏強度が明らかに異なる。式(1)、式(2)により限界 CTOD 値を算出する際には、素材の降伏強度を用いているため、予歪みの導入による降伏強度の変化を考慮していないこととなり、限界 CTOD 値が正しく評価されていない可能性がある。

そこで、SM570Q 材について、予歪みによる降伏強度の変化を考慮し、限界 CTOD 値を算出し直すことにした。その結果を表-6 に示す。限界 CTOD 値を算出し直した結果、限界 CTOD 値は、引張予歪み材では下降修正され、圧縮予歪み材では上方修正されたため、両者の差違は多少小さくなった。すなわち、素材の引張降伏強度を基に算出した限界 CTOD 値では、圧縮予歪み材と引張予歪み材との差違が過大に評価されていたことになる。しかし、両者には依然として明らかな差違があり、予歪みの方向による破壊靱性値の劣化の差は、降伏点の差に起因するものではないと考えられる。

### (2) ミクロ組織の結晶粒の大きさの変化

CTOD 試験で破断しなかった SLA325AN 材を除く他の 5 種類の鋼材では、予歪みの方向による破壊モードの違いが破面にはっきりと見受けられた。その差違をミクロ的な構造の変化から検証するため、SMA490BW 材を対象に、素材、引張予歪み材、圧縮予歪み材それぞれについて光学顕微鏡で観察した。その結果を、走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した脆

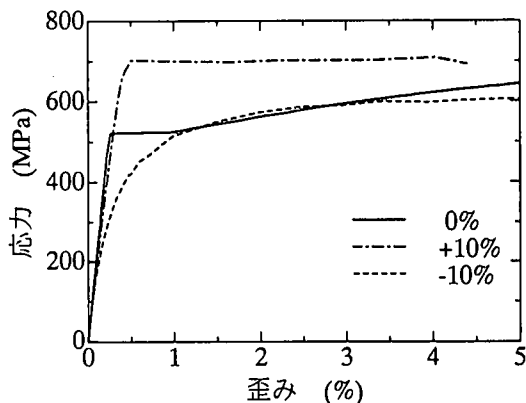


図-11 予歪みによる応力—歪み関係の変化

表-6 修正限界 CTOD 値 (SM570Q, -40°C)

予歪み	引張降伏応力 0.2%耐力 (MPa)	限界 CTOD 値(mm)	
		修正前	修正後
0%	519	× (破断せず)	
+10%	700	0.206	→ 0.192
-10%	411	0.114	→ 0.126
		0.139	→ 0.153

性破面部の様子とともに、図-12 にまとめる。さらに、図-13 には、観察によって得られたフェライト粒径および脆性破面単位長の予歪み量との関係を示す。引張予歪み材では、フェライト粒径および破面単位長ともほぼ素材と変わらないが、圧縮予歪み材では明らかにどちらの量とも素材よりは大きい値を示している。すなわち、圧縮予歪み材では、結晶粒が粗粒化しており、また、脆性破面が粗くなっている。このことから、圧縮予歪み材では、粗粒化により粘りが低下し、脆く破壊靱性が劣化した組織となっていると推察される。これが、圧縮予歪みと、引張予歪みの鋼材に及ぼす影響の差の一因となっている可能性がある。

### (3) ミクロ的な脆性破壊発生メカニズムの差違

FR490C 材を対象に、素材、引張予歪み材、および圧縮予歪み材について、き裂の発生メカニズムを調査するため、光学顕微鏡を用いて観察を行った。その結果、引張予歪み材では、パーライトなどの第二相の一部の硬化相 (マルテンサイト) とフェライトマトリクスの界面が剥離してポイド (空隙) 状となっている状況が観察された (図-14)。このことから、以下のようなことが推察される。



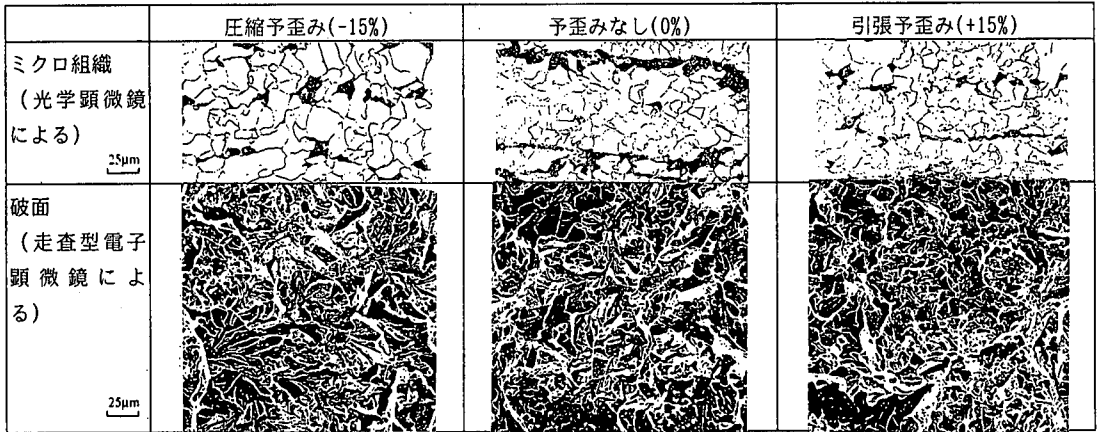


図-12 SMA490BW 材のマイクロ組織および CTOD 破面状況

まず、CTOD 試験の結果が示すように、圧縮予歪み材も引張予歪み材も脆化していることから、主たる構成要素であるフェライトマトリクスが硬化し、靱性が低下しているということが前提として考えられる。しかし、引張予歪み材では、硬化相とフェライトマトリクスの界面が剥離してポイド状となっており、剥離によってできたき裂が鈍化しフェライトマトリクスへ伝搬する脆性き裂の生成能力が低下している。そのため、引張予歪み材では、フェライトマトリクスの脆化を、界面でのき裂生成能力の低下が相殺し、結果的に鋼材全体としての靱性低下が抑えられている。一方、圧縮予歪み材では、第二相とフェライトマトリクス界面がポイド状になっておらず、界面でのき裂生成能力が低下していないため、フェライトマトリクスの脆化が、全体としての靱性の低下に直接結びついている。すなわち、引張予歪み材と圧縮予歪み材の靱性の違いは、第二相とフェライトマトリクスの界面でのき裂の鈍化の有無によるものであると考えられる。

しかし、引張予歪み材で界面におけるき裂が鈍化するメカニズムは未だ不明である。

予歪みの方向による鋼材の破壊靱性への影響の程度の違いは、ここでは明確に解明されていない。以上に述べた要因だけではなく、他にも様々な要因が重なって現出していると考えられ、さらに詳細な検討が必要である。

## 7. 結論

本研究では、各種鋼材に対して、地震時に想定される高レベルの塑性予歪みを導入し、CTOD 試験により鋼材の予歪みによる靱性劣化について検討した。

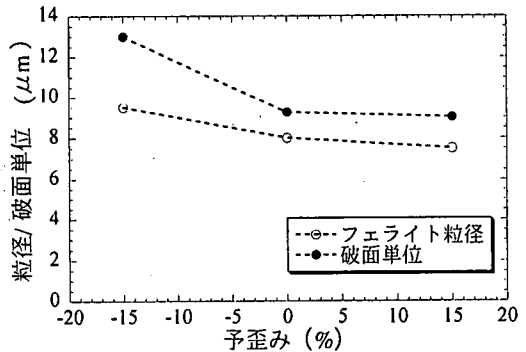


図-13 予歪み量とフェライト粒径および脆性破面単位長の関係



図-14 引張予歪み材のマイクロ組織

以下に、本研究の結論をまとめる。

- (a) いずれの鋼材とも、塑性予歪みにより著しく脆化することが明らかとなった。
- (b) 塑性予歪みによる鋼材の脆化の程度は、鋼材の種類により大きく異なることが示された。本研究で対象とした鋼材の中では、低温圧力容器用炭素鋼 SLA325AN 材が最も優れた靱性を有しており、通常温度レベルでは予歪みによって全く脆化しなかった。逆に、耐火鋼 FR490C 材は、予歪みによる脆化が激しく、予歪み導入により、室温レベルでも脆性的な破壊挙動を示した。
- (c) 多種の鋼材で、圧縮予歪みの方が引張予歪みよりも鋼材をより脆化させる傾向があることが明らかとなった。
- (d) 予歪みの方向による鋼材の破壊靱性への影響の差違は、予歪みの方向によって、鋼材の機械的性質、結晶粒径、結晶間界面での挙動に違いが生じることが要因となっている可能性があることが分かった。

**謝辞：**本研究は、鋼材倶楽部委託の日本鋼構造協会次世代土鋼構造物研究委員会の一環として、東京工業大学創造プロジェクト都市基盤施設研究体「高性能鋼の橋梁への利用研究会」の活動として実施したものであり、貴重な助言を頂きました研究会参加メンバー各位に感謝いたします。金属組織の光学顕微鏡写真等の貴重な資料およびミクロ的な面からの知見を提供して頂きました各位に深謝いたします。

#### 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) 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.591/1-40，pp.243-261，1998.4.
- 3) 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.
- 4) 小林英男：破壊力学，共立出版，1993.
- 5) 堀川浩甫：冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化，土木学会論文報告集，No.300，pp.12-20，1980.
- 6) 森好生，塩崎正孝，三木千壽，栗原正好：歪時効による鋼材の靱性変化の評価，構造工学論文集，Vol.36A，pp.389-397，1990.3.
- 7) 三木千壽，館石和雄，船見純一：冷間加工を受け

- た構造用鋼材の破壊じん性に関する研究，土木学会第 49 回年次学術講演会講概集，pp.586-587，1994.
- 8) 西川和廣，寺田和己，木村貞夫，中西保正，飯田寛之，後藤邦昭：橋梁用鋼材の冷間曲げ加工と要求じん性に関する検討，橋梁と基礎，pp.31-36，1996.11.
- 9) 本間宏二，三木千壽，征矢勇夫，笹尾英弥，奥村健人，原修一：冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究，土木学会論文集，No.570/1-40，pp.153-162，1997.7.
- 10) 井上啓，前中浩，佐久間正明：圧縮予歪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.450-460，1986.12.
- 11) 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.612/1-46，pp.45-53，1999.1.
- 12) 大倉一郎，田原潤，西岡敬治，安田修：繰返し予歪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.
- 13) 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.
- 14) 深沢誠，大田孝二：機能鋼材，橋梁と基礎，pp.39-46，1995.12.
- 15) 大田孝二，深沢誠：これからの鋼材，橋梁と基礎，pp.45-48，1996.9.
- 16) 楠隆：新しい鋼材，橋梁と基礎，pp.117-129，1997.8.
- 17) 高梨晃一，福田俊文，岡田忠義：60 キロ級高性能鋼の利用技術開発，鋼構造論文集，Vol.1，No.1，pp.1-12，1994.3.
- 18) 坂井藤一：土木構造物における高張力鋼利用の現状，鋼構造論文集，Vol.1，No.1，pp.13-24，1994.3.
- 19) 作本好文，千々岩力雄：建築構造用耐火鋼（FR 鋼）の開発と実用化，鋼構造論文集，Vol.1，No.1，pp.25-40，1994.3.
- 20) 上田修三：最近の建築・土木用高機能鋼材，鋼構造論文集，Vol.1，No.1，pp.127-142，1994.3.
- 21) 日本溶接協会：き裂開口変位（CTOD）試験.
- 22) 藤田譲，野本敏治，弓削和徳：圧縮および引張荷重を受ける構造要素の変形挙動一（第一報）繰返し荷重を受ける柱の変形挙動一，日本造船学会論文集，第 156 号，pp.346-354，1984.11.
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) JIS G 0552：鋼のフェライト結晶粒径試験方法（1977）.

（1999.4.13 受付）

## DETERIORATION OF FRACTURE TOUGHNESS OF STEEL BY EFFECT OF TENSILE AND COMPRESSIVE PRESTRAIN

Chitoshi MIKI, Eiichi SASAKI, Hiroko KYUBA and Isamu TAKENOI

In this study, the deterioration of fracture toughness by effect of prestrain of 6 types of steel was investigated by CTOD tests. As a result, it came to be clear that before strain aging effect appears, the fracture toughness of most types of steels can be deteriorated by prestrain itself and that how much fracture toughness is deteriorated is differs from steel to steel. Furthermore, the influence of the direction of prestrain was found on all the types of steel but one, and so the causes of the difference between tensile prestrain and compressive prestrain were also discussed.