

鋼構造物の地震時脆性破壊発生に対する 鋼材特性からの検討

休場 裕子*、三木 千壽**、沖中 知雄***、穴見 健吾****

* 東京工業大学工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

**工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

***Ph.D. 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

****工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

先の阪神大震災において、鋼構造物の脆性破壊が多く見られた。その挙動に関して、様々な解析がなされているが、十分に再現しているとは確言できない。そこで、CTOD 試験、シャルピー衝撃試験を用いて、供試材として得た被災した橋脚の鋼材の脆化を検証した。また、高張力鋼に引張・圧縮の予ひずみを与え、予ひずみが鋼材の脆化に与える影響を検討した。被災した橋脚の鋼材は、座屈部でシャルピー吸収エネルギー約8 Jと極めて低い値となった。予ひずみの影響は、圧縮予ひずみの方が、脆化させる結果となった。ひずみ時効の影響も、圧縮予ひずみ材の方が顕著であった。

Key Words: Fracture toughness, Pre-strain, Strain-aging

1. はじめに

阪神大震災における鋼構造物の脆性的な破壊現象は、土木構造物にとって、これまでに経験したことのないような出来事であった。この度地震時に一瞬にして起こった脆性破壊は、材料固有の破壊靱性特性に加えて、設計値を越えた大きな地震力、構造上の応力集中などが原因と考えられる。しかし、このような現象については、今までほとんど考察されていないといえよう。

すでに、地震時の橋脚の挙動に関しては、多くの研究がなされており、後藤ら⁹⁾は、阪神高速神戸線のP-352、-353橋脚を例にアンカー一部の挙動を考慮した橋脚全体の弾塑性動的応答解析を行い、躯体で、局部座屈発生直前の最大応答ひずみは、いずれも1%未満と推定した。中村¹⁰⁾は、同じく神戸線P-584橋脚を対象に動的弾塑性座屈解析を行い、座屈変形の大きかった山側の内側表面で、同じく座屈発生直前のひずみを-6%程度と推定している。

これらのような解析による結果を踏まえて、本研究では、鋼材特性からの検討を行うことを目的として、脆性破壊に対する抵抗値である破壊靱性値を用いて、鋼材の地震による靱性劣化の程度を検証すると同時に、鋼材に圧縮・引張の予ひずみを与え、予ひずみが靱性値に与える影響を検討した。また、比較的軽微な損傷のため、被災後もそのまま供用されるもの、修復して供用されるものの安全性検討のため、ひずみ時効の影響も併せて検証した。

2. 実験概要

2.1 供試材概要

供試材は阪神大震災で被災した橋脚から採取した鋼材およびSM570Q材である。

被災した橋脚の鋼材は、阪神高速道路公団から土木学会構造工学委員会に提供された、阪神高速3号神戸線P-585山側鋼製円筒橋脚の一部である。

橋脚の概要を図-1に示す。また、試験材の概要を図-2に示す。材質はSM490A材であり、板厚変化部直上で座屈している。試験片は座屈部、健全部(非座屈部)、および溶接部から区別して採取した。

SM570Q材は、かなりの量、土木構造物に使用されており、しかも、破壊靱性値が高いことから、予ひずみの効果を検討する目的で選定した。材料そのものに加えて、圧縮10、15%、引張10、20%の予ひずみを導入している。また、被災後の供用の可能性を想定して、±10%予ひずみ片の一部にひずみ時効を与えた。ひずみ時効は、250℃で1時間加熱することによる、時効促進処理によって再現した。

それぞれの供試材の化学成分を表-1、機械的性質を表-2に示す。表-1における阪神高速丸ピア材は、(財)電力中央研究所による報告、SM570Q材は、ミルシートによる。

表-1 試験材の化学成分

	C	Si	Mn	P	S
丸ピア材	0.15	0.30	1.42	0.015	0.005
SM570Q	0.14	0.23	1.44	0.012	0.005

(重量%)

表-2 試験材の機械的性質

	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
丸ピア材	306	541	28
SM570Q	519	634	29

2.2 実験方法

破壊靱性の検討には、もっとも簡便で多用されている、シャルピー衝撃試験と、破壊力学に基づいたCTOD試験を採用した。図-3に、それぞれの試験片の寸法を示す。

シャルピー衝撃試験は、JIS Z2242に沿って実施した。

CTOD試験は、日本溶接協会規格を参考にし、次式により算出される。

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

ここに δ : CTOD値 (mm)

K : 応力拡大係数 ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)

ν : ポアソン比 (= 0.3)

σ_y : 降伏応力 (MPa)

E : ヤング率 (MPa)

z : ナイフエッジ高さ (mm)

V_p : クリップゲージ変位の塑性成分 (mm)

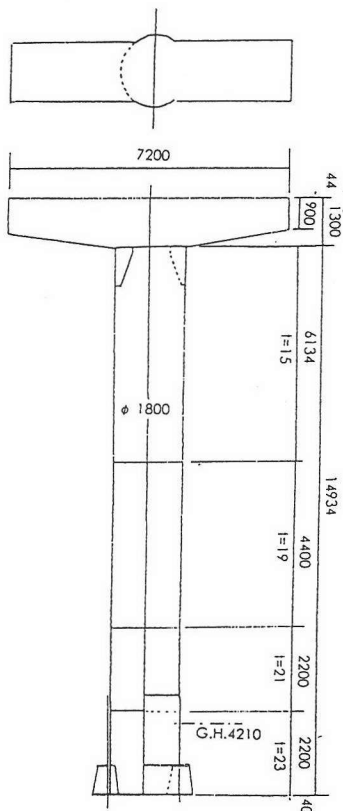
a_0 : 初期き裂長さ (mm)

W : 試験片幅 (mm)

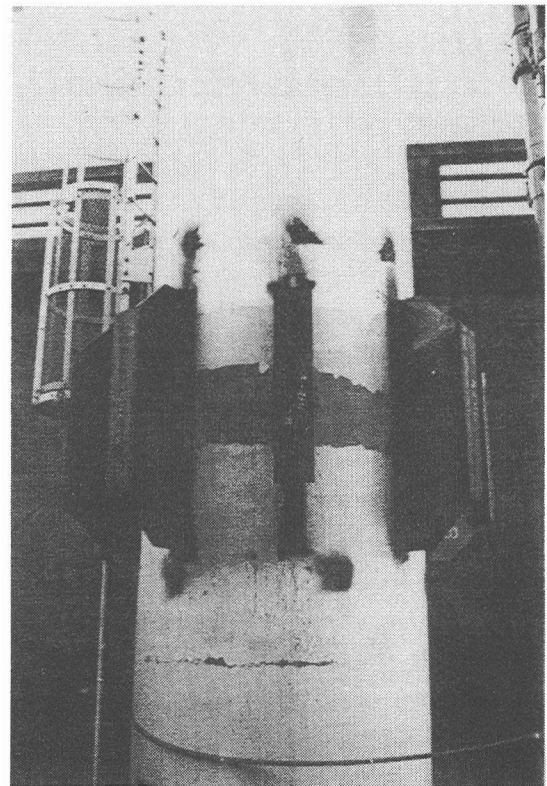
CTOD試験片の板厚は、阪神高速丸ピア材の座屈部から採取できる最大の厚さである15mmに統一した。

また、丸ピア材は非座屈部から、SM570Q材は、0%、±10%予ひずみ片での丸棒による引張試験も行い、その値をCTOD値算出に用いた。

阪神高速丸ピア材に対しては、ビッカース硬さ試験から地震時に鋼材に生じた塑性ひずみを推定した。



(a) 橋脚概略図



(b) 被災状況

図-1 No.585橋脚の概要

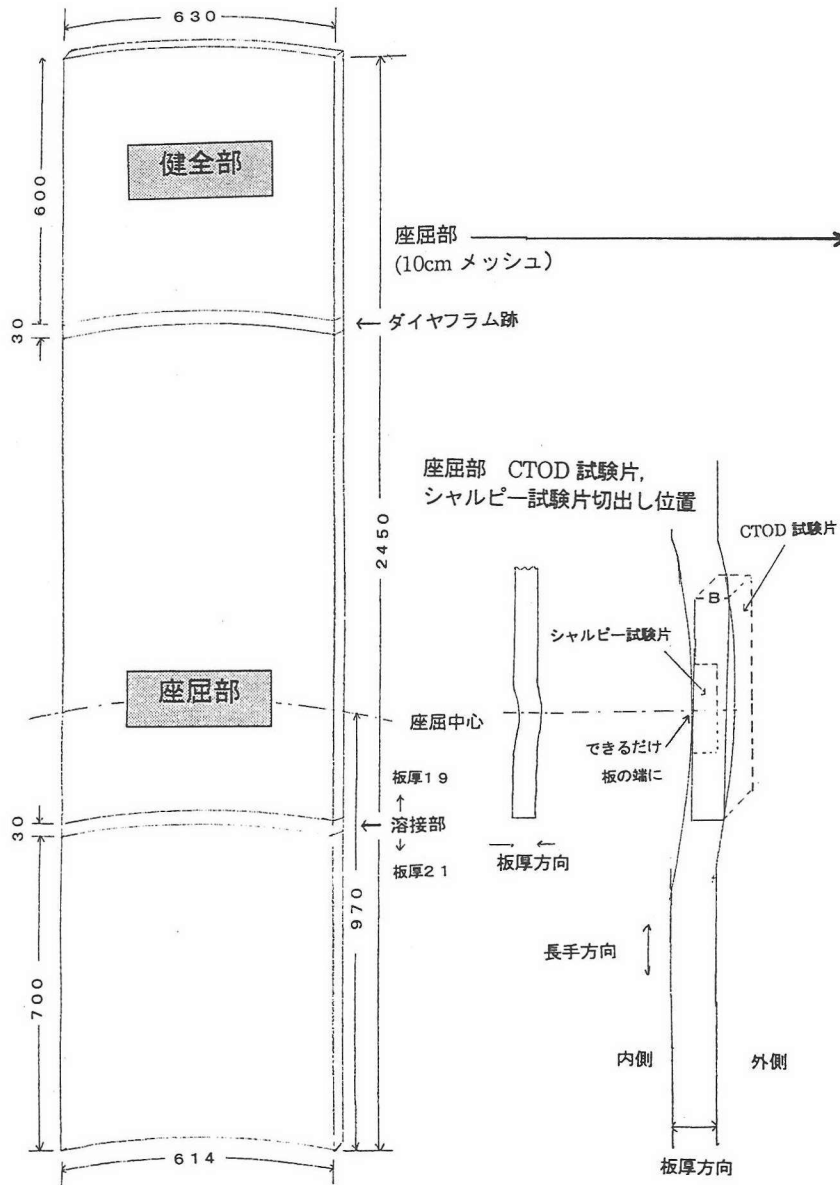
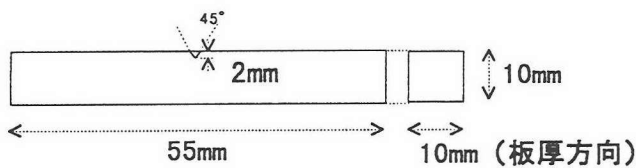
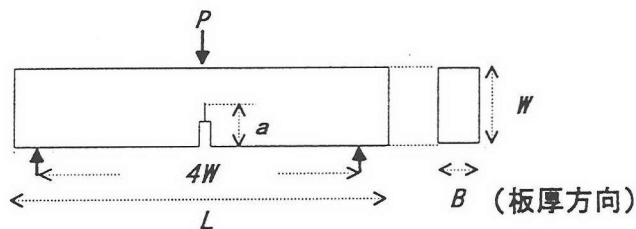


図-2 試験材の概要および試験片採取方法



(a) 2Vシャルピー試験片



$B=15\text{mm}$ $L=138\text{mm}$
 $W=2B=30\text{mm}$ $a=12.5\text{mm}+\text{疲労亀裂}$

(b) CTOD 試験片

図-3 試験片

3. 被災した鋼材の性質

3.1 ビッカース硬さ試験によるひずみ推定

座屈部、非座屈部から採取した鋼材のビッカース硬さ試験を行った。日本溶接協会 APD 委員会の同材料によるビッカース硬さとNスケルトンひずみ（有効ひずみの絶対値和）とのデータ¹⁵⁾を2次曲線に近似（相関係数0.93）した関係を用いて、ひずみを推定した。

図-4に、推定ひずみの板厚方向の分布を示す。ざく座屈部では、最大21.1%、板厚方向平均12.3%、非座屈部で、最大8.5%、同じく平均4.4%と推定できる。ピーク位置のずれは、板厚方向の試験片採取位置の違いによるものである。（図-2参照）

橋脚の製作時の冷間加工によるひずみが、約1%、座屈部の変形量によるひずみは、0.5%前後と推定できる。ただし、両者のひずみの方向は、直交している。ビッカース硬さからの推定ひずみの大きさ、板厚方向の分布いずれも、幾何的条件からは説明できないほど大きい。

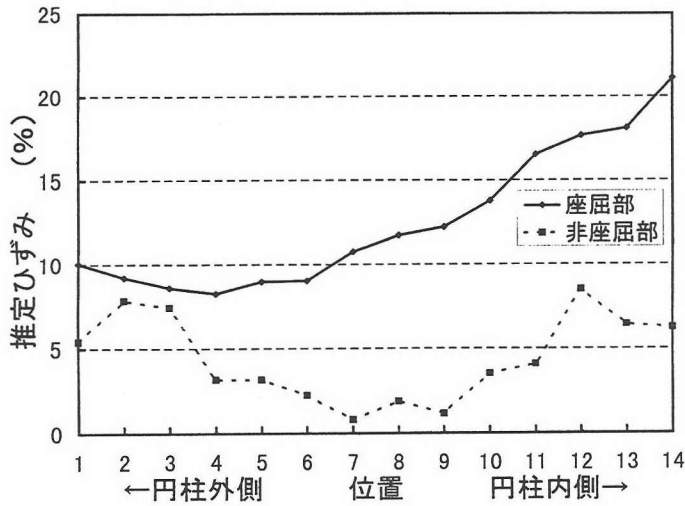


図-4 ビッカース硬さから推定したひずみ

3. 2 引張試験結果

図-5 に非座屈部から採取した丸棒試験片による、引張試験の結果を真応力-真ひずみで示す。降伏点は、306 MPa と、JIS 規格の下限値 315 MPa を下回る値であった。

引張予ひずみの特徴である、明確な降伏点と、圧縮予ひずみの降伏点が低下する特徴の両面を持っており、どちら側のひずみが入っているか、判断しがたい。

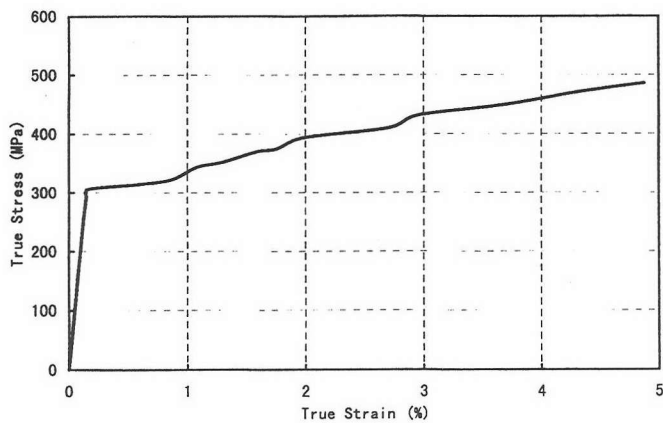


図-5 真応力～真ひずみ曲線

3. 3 シャルピー衝撃試験結果

図-6 にシャルピー衝撃試験の結果を示す。無規格の A 材ではあるが、座屈部にいたっては、40℃でも B 材に対する JIS 規格の 27 J を下回っており、全体的に非常に大きく靱性劣化している。また、遷移温度も明らかに上昇し

ていると言える。

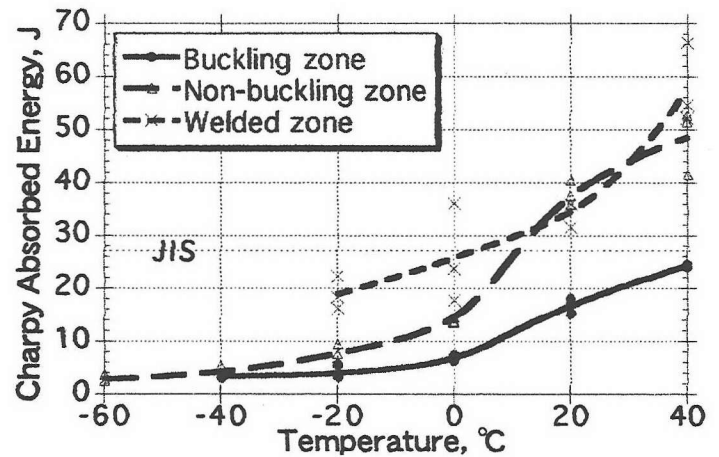


図-6 シャルピー吸収エネルギー

3. 4 CTOD 試験結果

表-3 に CTOD 試験の結果を示す。×印は、クリップゲージ変位が 2 mm に達しても破壊しなかったもので、十分な塑性変形能力があると判断できる。室温での試験においても、脆性的な破断を起こしており、これは通常の鋼材では起こりえないことである。0℃において、非座屈部から採取した鋼材でも極めて低い値であり、全体的に十分に脆性破壊の危険性を持っていたと考えられる。

表-3 丸ピア材 CTOD 試験結果

温度	座屈部		非座屈部		溶接部	
室温	0.081	0.079	0.172	0.282	0.320	×
0℃	0.068	0.048	0.042	0.087	0.353	0.154

(単位: mm)

写真-1 に、電子顕微鏡による、破面写真の一例を示す。これは、0℃で行った座屈部の試験片のもので、明瞭なへき開破面である。

脆性破面

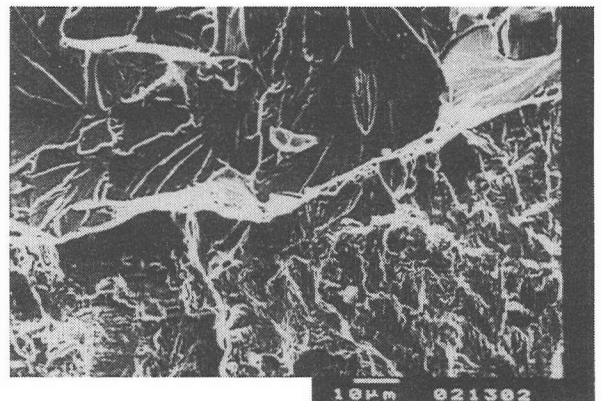


写真-1 SEM による破面観察

3. 5 CTOD 値からの許容欠陥寸法

前節 3. 4 で得た、CTOD 値を有するような鋼材に許容される欠陥寸法を、円筒形橋脚の一部を一樣引張を受ける帯状片に仮定して、応力拡大係数を求めることにより考察する。欠陥は、表面の半円クラックを想定する。

CTOD 値の実験値範囲を参考に、Wellman の提案による次式を用いる。値を表-4 に示す。

$$K = \sqrt{1.4 * E * \sigma_{flow} * \delta_c}$$

ここに、 E : ヤング係数 (MPa)

$$\sigma_{flow} = (\sigma_y + \sigma_u) / 2$$

σ_y : 降伏応力 (MPa) = 306 MPa

σ_u : 引張強さ (MPa) = 525 MPa

δ_c : CTOD 値 (m)

表-4 CTOD 値からのK値の計算

δ_c (mm)	0.04	0.06	0.08	0.10	0.15	0.30
K(MPa \sqrt{m})	69.2	84.8	97.9	109.4	134.0	189.5

図-8 に応力と欠陥寸法の関係をK一定の基に示す。もっとも危険なK値 69.2 程度において、例えば作用応力 500 MPa に対して、3.5 mm 程度と非常に小さい寸法の欠陥が限界となる。

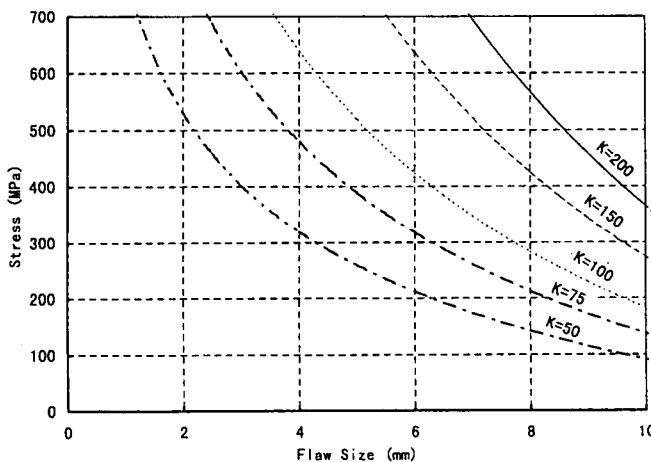


図-7 作用応力と許容欠陥寸法の関係

3. 6 まとめ

阪神高速道路の丸ピアから採取したこの鋼材は、恐ろしいほどに全体的に脆化している。実験で得られた結果をまとめると、次のようになる。

- 1) ビッカース硬さ試験により推定される、導入塑性ひずみの絶対値量は、座屈部で最大 21.1%、非座屈部で最大 8.5% と過大なものであった。
- 2) 座屈部においても、非座屈部においても、ビッカース硬さは、曲げ応力を受けたように、板厚方向に大きく分布した。また、その分布の度合いは、座屈部の方が、多少大きい。
- 3) 鋼材は、座屈部・非座屈部にかかわらず、大きく脆化しており、これは、シャルピー衝撃試験、CTOD 試験、いずれにおいても、明らかに現れている。
- 4) シャルピー衝撃試験から得られた遷移曲線から、遷移温度の大幅な上昇が確認された。

4. 予ひずみが鋼材に与える影響

4. 1 引張試験結果

図-8 に 0%材と ±10% 予ひずみ材の引張試験の結果を示す。また、降伏点 (0.2%耐力) は、表-5 に示す通りである。予ひずみによる影響を強く現れている。

表-4 各予ひずみ材の降伏点

ひずみ量	降伏点 (0.2%耐力) (MPa)
+10%	700
0%	519
-10%	411

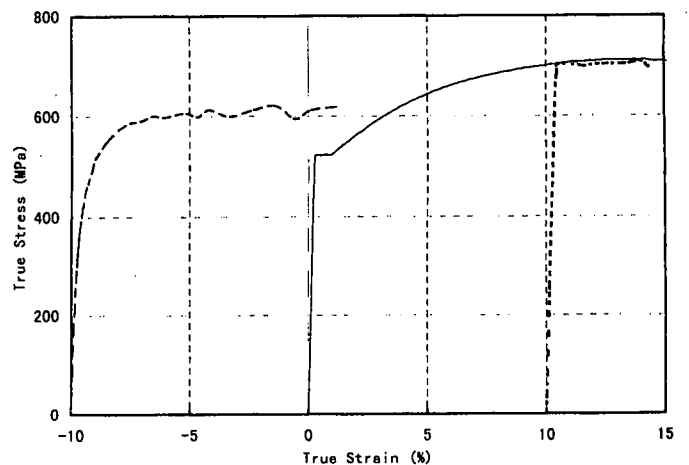


図-8 真応力～真ひずみ曲線

4. 2 シャルピー衝撃試験結果

図-10に各予ひずみ材のシャルピー衝撃試験の結果を示す。圧縮15%予ひずみ材と引張20%予ひずみ材に注目すると、ひずみの絶対値の小さい圧縮15%予ひずみ材の方がはるかに脆化していると判断できる。また、点線と実線で示す、時効処理の有無は、圧縮予ひずみ材の方が、大きく影響を受けると読みとれる。

4. 3 CTOD 試験結果

予ひずみ付与片に対する結果を表-5に、破面写真を図-10に示す。×印は、前章と同様に、クリップゲージ変位が2mmに達しても破断しなかったもので、十分な塑性変形能力があると判断できる。

予ひずみ量の影響は、図-10に示す写真の脆性破面の大きさによく表れている。数値的には判断しづらいが、全体的に、圧縮予ひずみ材の方が脆化していることは明らかである。

また、時効処理の影響が、引張側では-40℃に現れているのに対し、圧縮側では、0℃に現れている。圧縮予ひずみの方が、遷移温度を大きく上昇させるといえる。

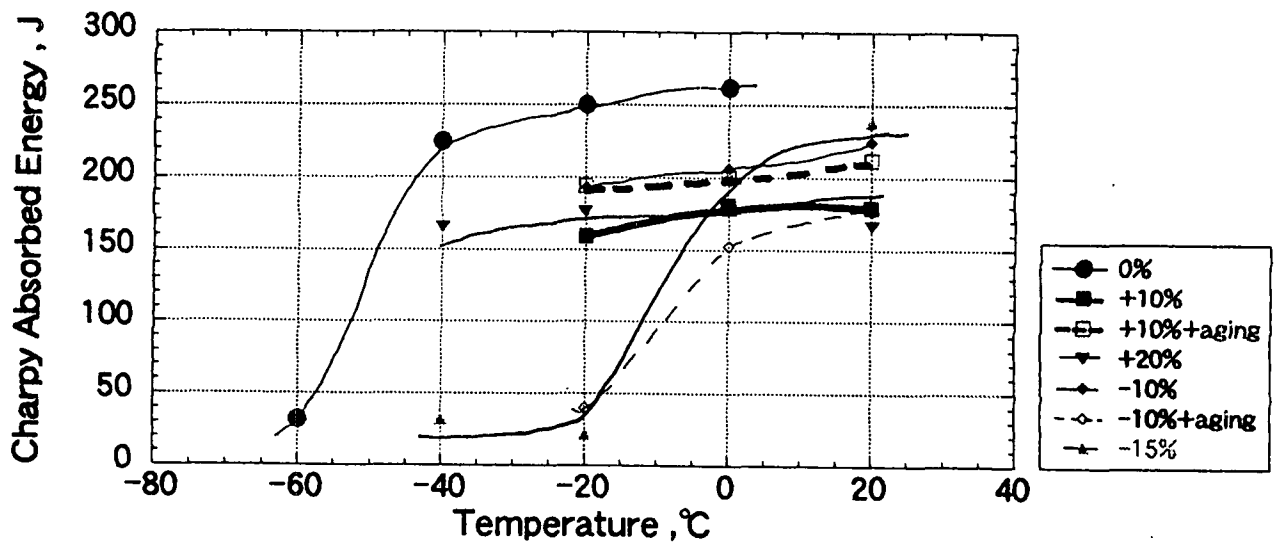


図-9 シャルピー吸収エネルギー

表-5 CTOD 試験結果

温度	ひずみ (％の後の+は時効処理済みを表す)						
	-15%	-10%+	-10%	0%	+10%	+10%+	+20%
0℃	0.279 × 0.335	0.184 0.430	×	×	×	×	×
-40℃	0.187 0.154	0.251 0.265	0.122 0.149	×	×	0.366 0.105 0.146	0.346 ×

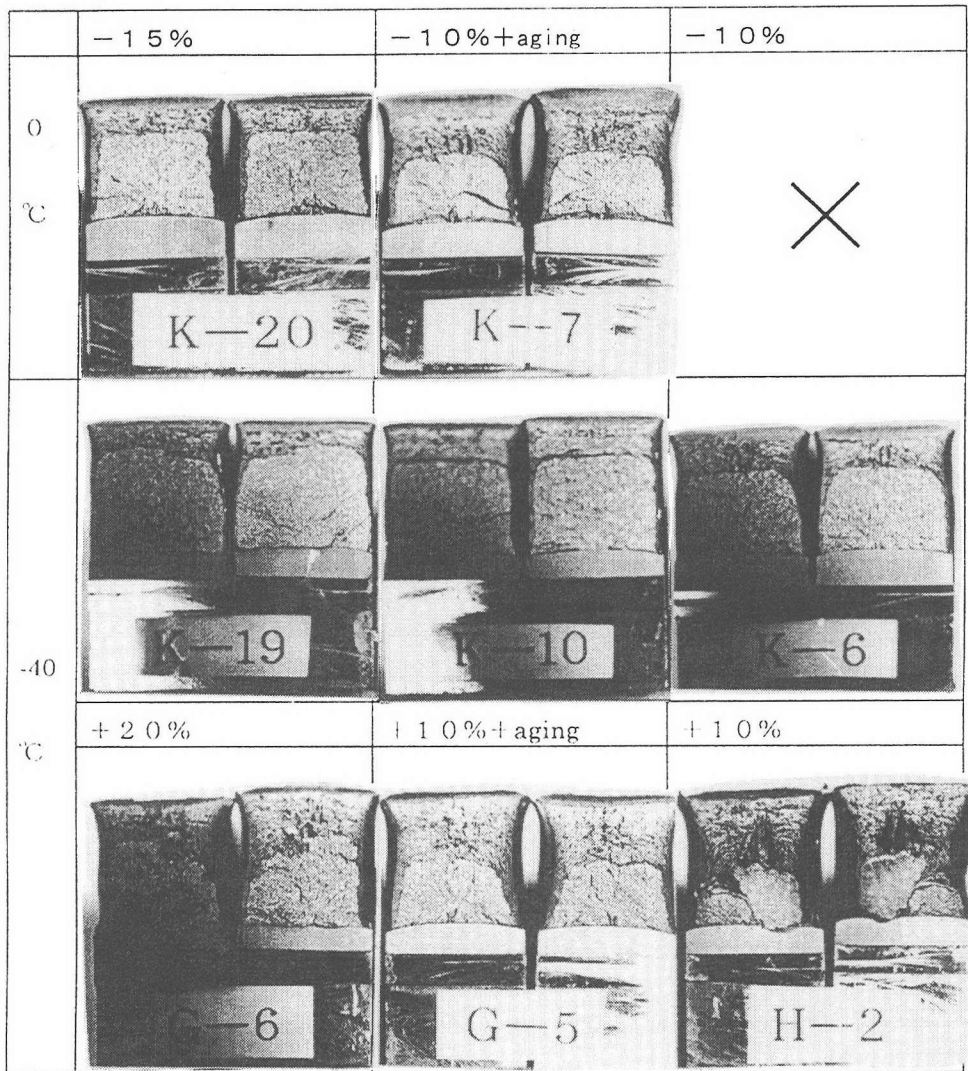


図-10 CTOD 試験破面状況

4. 4まとめ

定量的には評価しにくいですが、塑性ひずみによる脆化傾向が示されている。実験による結果をまとめると以下のようになる。

- 1) シャルピー試験の結果は、圧縮予ひずみの方が、引張予ひずみより鋼材を脆化させる傾向を示している。
- 2) 時効処理の影響は、シャルピー試験の結果から見ると、圧縮予ひずみ材の方が、大きいと言える。
- 3) CTOD 試験の結果、定量的評価は難しいが、圧縮予ひずみ材の方が、明らかに脆化している。
- 4) CTOD 試験片の破面における脆性破面の割合は、ひずみ量と時効処理の影響を、明確に表している。

- (1) 同材は、座屈部、非座屈部ともに、破壊靱性が大幅に低下していた。被災時の気温を踏まえると、橋脚全体の崩壊の危険性が十分にあったと言える。
- (2) 鋼材に塑性ひずみを導入すると、明らかに脆化する。また、その程度は、引張予ひずみより圧縮予ひずみの方が大きくなる。
- (3) 時効処理の影響は、遷移温度を上昇させる。その影響は、圧縮予ひずみ材の方が大きくなる。

5. 結論

- (1) 阪神大震災で被災した橋脚の鋼材には、解析等で再現することが困難なほどの大きな塑性ひずみがあった。その方向は、ビッカース硬さ試験、引張試験では、推定不可能であった。

参考文献

- 1) 大田孝二、深沢誠：鋼構造物の崩壊、破壊、橋梁と基礎、1996年1月
- 2) Richard W. Hertzberg: Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials 4th Edition,

1996

- 3) 宮本博訳: 構造材料の強度と破壊 1 破壊の巨視的様相と微視的様相、培風館
- 4) 町田篤彦、三木千壽ほか: 現代土木材料、オーム社
- 5) 大田孝二、深沢誠: 鋼構造物の破壊、崩壊(その2)、橋梁と基礎、1996年2月
- 6) 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、第300号、1980年8月
- 7) 三木千壽ほか: 冷間加工された鋼材の熱影響部における破壊靱性評価に関する研究、高性能鋼の橋梁への利用に関する研究その1、1995年12月
- 8) 大倉一郎ほか: 繰返し塑性ひずみが鋼材の破壊靱性に与える影響、1996年3月
- 9) アンカー部の挙動を考慮した鋼製橋脚の地震時終局挙動の特性、第2回阪神・神戸大震災に関する学術講演会論文集、pp.393~400、1997年1月
- 10) 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

年10月

- 11) 國尾武ほか: 破壊力学実験法、朝倉書店、1984年
- 12) 中澤一ほか: 金属材料試験マニュアル、日本規格協会、1987年
- 13) 日本溶接協会: き裂開口変位(CTOD)試験方法
- 14) 日本溶接協会 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年7月
- 15) 神戸市港湾局、川崎重工業、三菱重工業: 神戸市港湾P75橋脚調査報告書、1996年3月
- 16) 鈴木博之: 溶接構造用圧延鋼材の機械的性質の実績調査、JSSC No.18、1995
- 17) John M. Barsom, Stanley T. Rolfe: Fracture & Fatigue Control in Structures 2nd Edition, 1987

(1997年3月31日受付)

A STUDY ON MATERIALS OF BRIDGE STRUCTURES : EMBRITTLENESS DUE TO THE GREAT HANSHIN EARTHQUAKE

Hiroko KYUBA, Chitoshi MIKI, Tomoo OKINAKA and Kengo ANAMI

The great HANSHIN earthquake brought steel structures a lot of brittle fracture that we had never experienced. Various analyses have been performed on these phenomena, but it is difficult to express practical activities. By means of fracture mechanics, we consider embrittleness of damaged bridge pier and high tensile strength steel that is added compressive or tensile pre-strain. Fracture toughness of bridge pier is very low. Effect of compressive pre-strain is greater than that of tensile pre-strain..