

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

三木 千壽¹・ 休場 裕子²・ 沖中 知雄³

¹ フェロー 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

² 東京工業大学大学院修士課程 (研究当時) (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

³ 正会員 Ph.D. 近畿大学助手 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

阪神淡路大震災において、橋梁部材の大規模変形後に脆性破壊の発生するケースが見られた。そこで本研究では、阪神淡路大震災により被災した橋脚より採取した鋼材の材料試験を行い、材料特性の変化に着目する。これにより地震時に橋脚に導入されたひずみを推定するとともに、このひずみによる鋼材の脆化について検討を加え、地震時の脆性破壊発生メカニズムを明らかにしようと試みる。

Key Words: the great HANSHINAWAJI earthquake, fracture toughness, pre-strain

1. はじめに

阪神・淡路大震災において、座屈や脆性破壊といった不安定破壊現象が多くの構造物において発生した。特に鋼製橋梁における脆性き裂の不安定成長は世界的にも例が無く、その破壊メカニズムの解明が急がれている。これらの脆性破壊のうち、多くの事例では部材の大規模塑性変形後にき裂が発生・進展しており、地震により導入された塑性ひずみにより鋼材が脆化し、脆性破壊を誘発している可能性がある。この検討の為には、局部座屈発生直前にどの程度の塑性ひずみが発生するのかを明らかにする必要がある。

震災下で頻出した図-1のような、鋼製橋脚の不安定破壊については既に多くの実験的、解析的研究が行われている。中村¹⁾は阪神神戸線P-584海側橋脚について動的弾塑性解析を行い、ひずみは座屈部表面で約6%、非座屈部で1%以下としている。これは、中沢ら²⁾によって実測値より計算された座屈部の残留ひずみの最大軸方向ひずみ6.3%、周方向ひずみ0.91%と良い一致を示している。また松尾ら³⁾は同橋脚について、1自由度の簡易モデルと有限要素法を用いた動的弾塑性解析の比較を行い、3%程度のひずみ範囲について簡易モデルで十分な応答計算が可能であるとしている。

これらの解析は、入力地震波形として神戸海洋気象台等により記録された地震波を入力波形として用いている

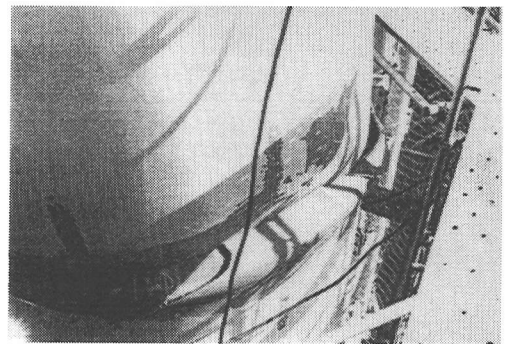
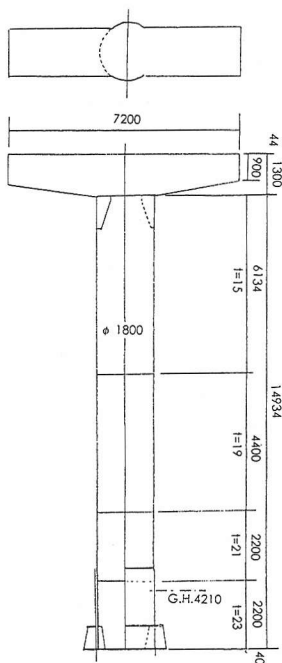


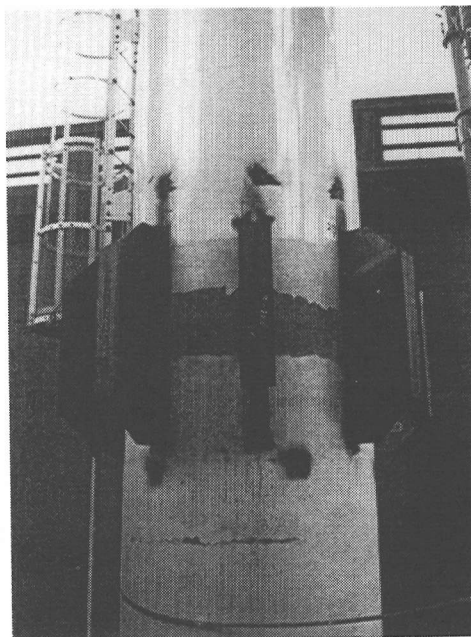
図-1 橋脚の座屈部に発生した脆性き裂
(阪神高速道路神戸線)

が、中村は記録された上下動が解析結果に与える影響は小さいと結論付けている。その一方、地震計に記録されないような高周波の衝撃的上下動の存在した可能性が、松尾らや別府ら⁴⁾により指摘されている。また、伯野⁵⁾は水平方向動により大きな被害が生じたという大方の見解に独自の視点から疑問を呈している。

この一方、橋田ら⁶⁾は震災により歪み履歴を受け脆性破断した建築鋼材について材料試験を行い、材料特性の変化から、歪み履歴を検討している。この結果、破断時



(a) 橋脚概略図



(b) 被災状況

図-2 P-585 橋脚の概要及び被害状況

に建築鉄骨がスケルトン歪みで最大 15% 強の繰り返し予ひずみを受けていると結論付けている。

繰り返し塑性歪みによる、靱性劣化の程度については、中込ら⁷⁾が SM490A 材に対して、N スケルトン最大予ひずみで評価できると述べている。

そこで本研究では、震災により座屈を生じた鋼製橋脚部から採取した鋼材に対して各種の材料試験を行い、その材料特性の変化に着目する。これにより地震時に橋梁橋脚部に作用した地震力の推定を試みるとともに、予ひずみ導入後の脆性破壊発生の可能性について検討を加える。

2. 供試鋼材

(1) 橋脚の概要

今回の震災では、阪神高速道路神戸線 P-580～P-585 のすべての橋脚で局部座屈が発生した。また、このうち 2 つの橋脚では、前出の図-1 のように座屈頂上部に円周方向の脆性き裂が発生した。この区間では上下線の高架は国道 2 号線を挟む形で分離され、J R 和田岬線を跨ぐ為、比較的に長い鋼製円筒橋脚が使用されていた。

供試鋼材は、阪神高速道路公団より土木学会構造工学

委員会震災調査特別小委員会に研究用として提供された、阪神高速道路神戸線 P-585 山側橋脚から採取したものである。この橋脚に使用された鋼材は、主として SM490A 材であったが、この橋脚は 1967 年完成、と施工から年月が経過している上、JIS 規格は A 材の破壊靱性値を要求していない為、当時の鋼材の化学成分、初期破壊靱性値の記録は残っていない。橋脚の概略ならびに被害状況を図-2 に示す。板厚が 21mm から 19mm へと変化した変化部の直上で約 40 cm にわたり凸型半波形の局部座屈（提灯座屈）を生じているが、脆性き裂は発生していない。

(2) 実験の方法

本研究では、まず地震により橋梁部材に導入された予ひずみの大きさと性質を推定する為にビッカース硬さ試験と引張及び圧縮試験を行った。さらに、導入された塑性予ひずみによる鋼材の破壊靱性値の変化を調べため、CTOD 試験及びシャルピー衝撃試験をおこなった。実験に用いた試験片は図-3 に示すように、座屈頂上部、非座屈部および溶接部から採取している。さらに、座屈部及び非座屈部より採取された試験片に、一般に S R 処理と言われる、630℃1 時間の熱処理を加え、予ひずみの低減を試みた。これは、前節で述べたように SM490A 材の製作時における破壊靱性が不明である為、その脆化前の

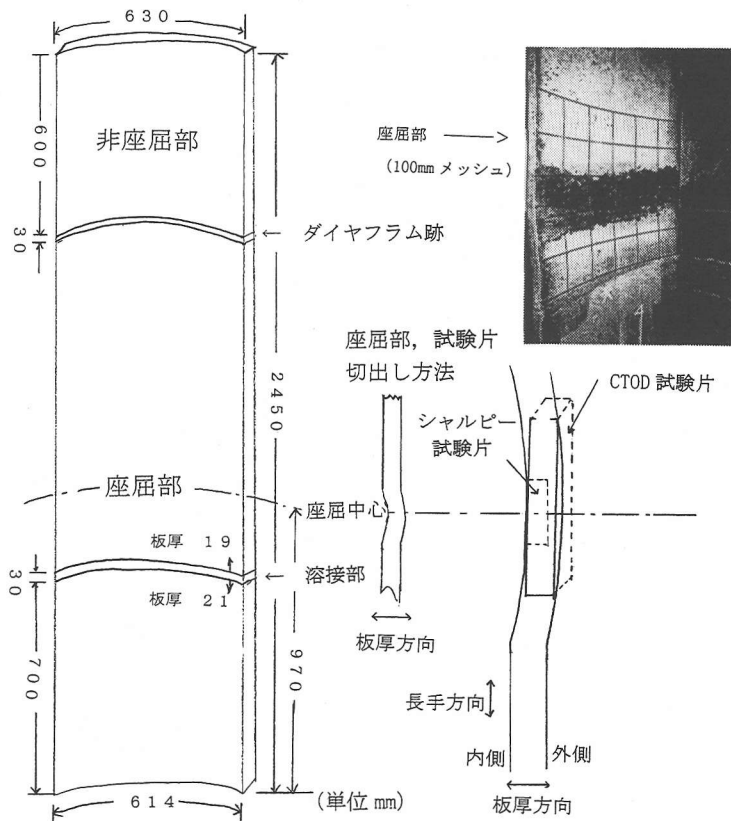


図-3 供試材概要

破壊靱性を推定する目的でおこなったものであり、ここでの熱処理は、加工を受けた材料の機械的性質を加工前のそれに戻すのにもっとも適している条件と言われている^{8), 9)}。

3. 実験結果

(1) ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さ試験の試験結果を実施位置と共に、図-4に示す。図中には後述の熱処理後の結果も合わせて示してある。本研究では、座屈頂上部及び非座屈部について、試験荷重 98 N を用い、CTOD 試験片に対して、橋脚内側より板厚方向に 1 mm 刻みで実施した。座屈頂上部については実施した試験片 10 本のノッチの左右、計

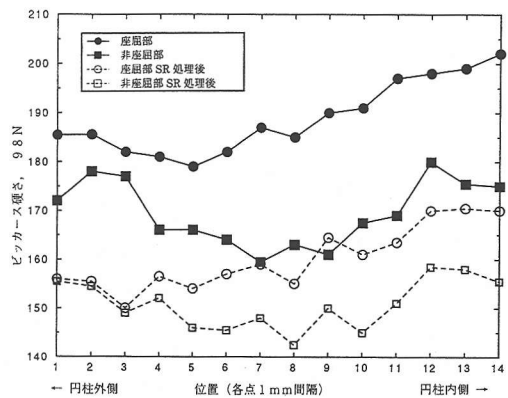


図-4 ビッカース硬さ試験結果

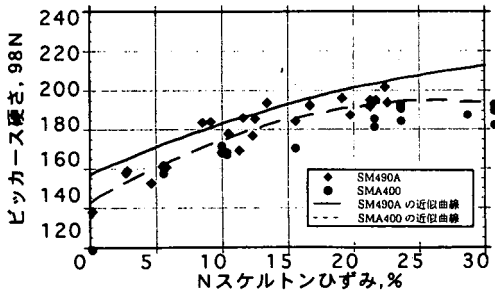


図-5 ビッカース硬さと
Nスケルトンひずみの関係

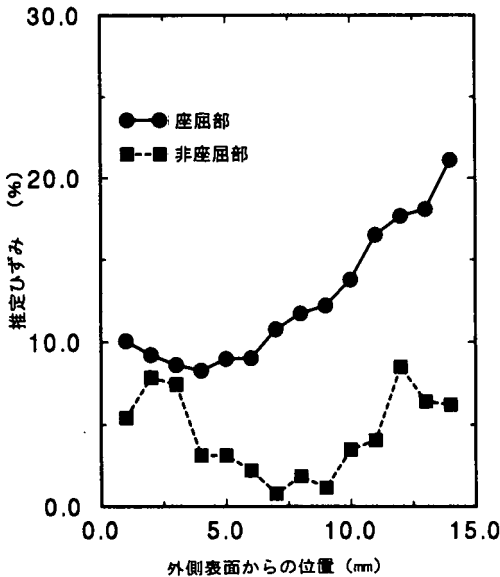


図-6 推定ひずみの板厚方向分布

20ヶ所、非座屈部については1本の左右2ヶ所の試験結果の平均値を示した。SM490A材のビッカース硬さの平均値は通常150～160とされていることから、座屈部・非座屈部ともにかなりの硬化が見られる。

日本溶接協会APD委員会によりSM490A材のビッカース硬さとNスケルトン最大ひずみ（有効ひずみの最大値の絶対値）の関係が実験的に得られた¹⁰⁾。この実験結果とその2次曲線近似を図-5に示す。この近似曲線

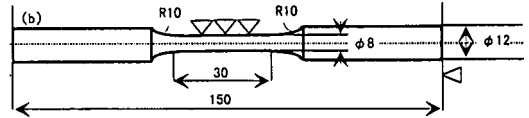


図-7 圧縮及び引張試験片

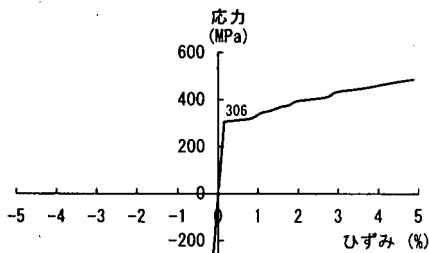
（相関係数0.93）を用いて、橋脚の残留予ひずみの板厚方向の分布を整理した結果が図-6である。座屈部では橋脚内側表面近くで最大値21.1%の残留予ひずみと推定される。板厚方向に平均した値は、12.3%であった。非座屈部では残留予ひずみの分布は板厚中心に対してほぼ対称となっており、内側表面近傍と外側表面近傍の2ヶ所で、最大値8.5%が得られた。非座屈部での板厚方向平均は4.4%であった。この近似曲線ではひずみの繰り返しの影響が評価される為、ある程度の誤差はあると考えられるが、これらの導入塑性ひずみの値は既存の研究で推定されている値の数倍に達する値であり、特に非座屈部においてこのような値が得られたことは特筆に値する。また非座屈部における予ひずみの分布は、板厚方向には大きな分布を持っておらず、この予ひずみは橋脚の軸方向の変形により導入された可能性がある。

前出の図-4中の熱処理後の座屈部及び非座屈部でのビッカース硬さの分布では、熱処理により、硬さは大きく低減されている。特に非座屈部においては、塑性歪み履歴の影響はかなりの程度緩和できたものと考えられる。

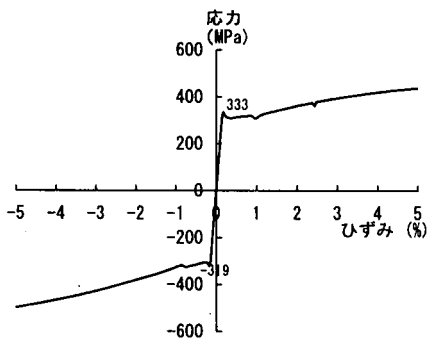
(2) 引張及び圧縮試験

前節で得られた予ひずみを与えられた鋼材の性質を調べる目的で、引張および圧縮の材料試験を実施した。試験には、非座屈部の板厚中央から採取された、図-7に示す形状・寸法を持つ丸棒試験片を用いた。試験により得られた応力-ひずみ関係を図-8に示す。図中には、SR処理後の応力-ひずみ関係も併せて示す。

試験片の引張及び圧縮降伏応力は各々306MPaと326MPaであった。前節のビッカース硬さ試験結果から推定される対象部位の予ひずみの絶対値は約2～3%であり、また降伏棚の存在を考えると、試験部位は地震時に圧縮のひずみを受けたと推定される。ここで、応力-ひずみ関係が引張・圧縮共に降伏点を持つ理由に付いては、



(a) 熱処理前



(b) 熱処理後

図-8 応力-ひずみ曲線

震災後2年を経て、ひずみ時効の影響がある程度進んだものと考えられる。

熱処理により、引張降伏応力は 333MPa と回復したが、圧縮降伏応力は 319MPa とわずかながら低下した。これは、熱処理により残留予ひずみの影響をかなりの程度緩和できたものの、処女材の状態には戻せていないことと関連していると思われる。

(3) シャルピー衝撃試験

被災した橋梁部材のシャルピー衝撃試験結果を図-9に示す。試験片は、座屈頂上部、及び非座屈部より作成し、座屈部 13 本、非座屈部 18 本の試験片について試験を行った。図中の実線及び破線は野方ら¹¹⁾の提案による次式

$$vE(T) = \frac{vE_{shelf}}{\exp\{-a(T - vT_E)\} + 1}$$

を用いて試験結果を整理したものである。 $vE(T)$ は $T^{\circ}\text{C}$ におけるシャルピー吸収エネルギー、 vE_{shelf} は上部棚吸収エネルギー、 a は係数である。遷移温度、 vT_E は座屈部で 32°C 、非座屈部で 12°C が得られた。また、座屈部、非

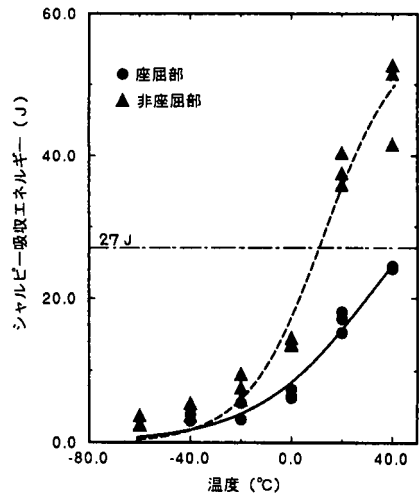


図-9 シャルピー衝撃試験結果

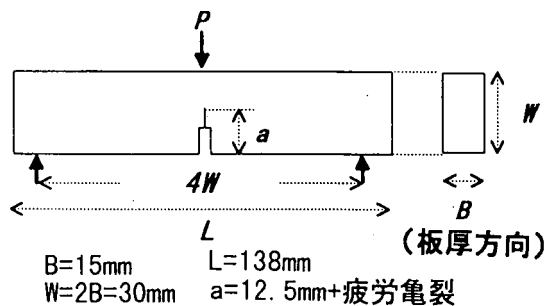


図-10 3点曲げ CTOD 試験片

座屈部共に吸収エネルギーは JIS に B 材の既定値、 0°C で 27Joule、を下回っている。

予ひずみの導入により遷移温度が上昇し、かつ吸収エネルギーの低下することは良く知られているが供試鋼材はシャルピー値を要求されない A 材であり、当初のデータが無い為比較が難しい。しかし、鈴木¹²⁾による SM490B,C,YB 材についてのデータによれば、このなかで JIS 規格値を下回ったものは存在していない。

(4) CTOD 試験結果

被災した橋梁基礎部の座屈頂上部、非座屈部及び溶接部より CTOD 試験片 ($a/W=0.5$) を作成し、3点曲げ試験を実施した。図-10 に試験片の形状・寸法を示す。試験片は各部より 4 本作成し、室温及び 0°C で各 2 本ずつの試験を行っている。

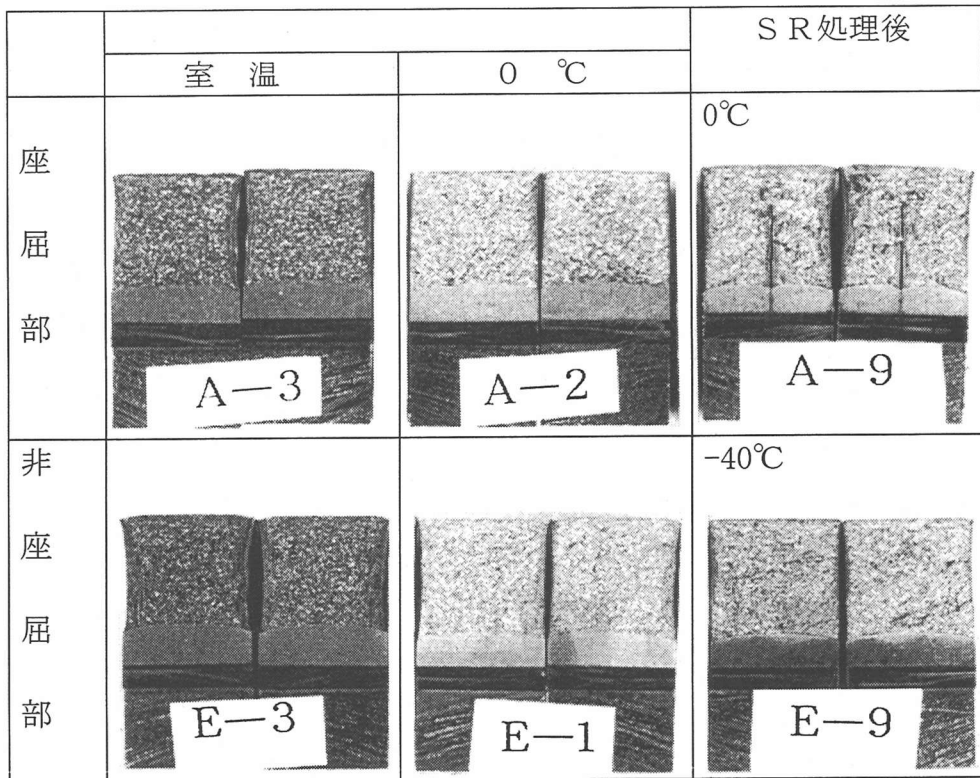


図-12 CTOD 試験片破面写真

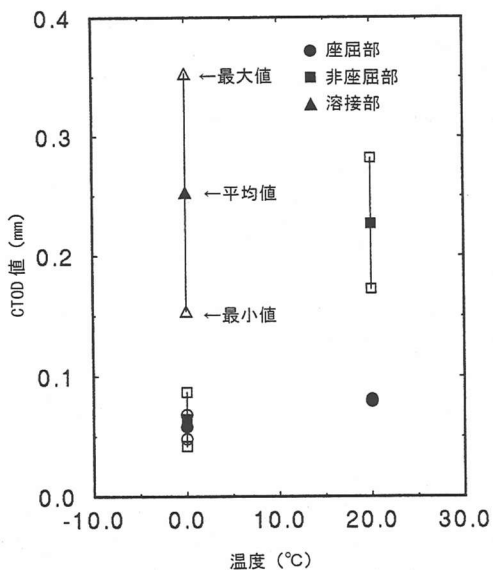


図-11 CTOD 試験結果

CTOD 試験結果を次頁の図-11 に示す。図中には
平均値と最大、最小値を示している。座屈部 CTOD 値は

表-1 SR 処理後の CTOD 試験結果
(単位: mm)

温度	座屈部	非座屈部
0 °C	0. 3 6 ×	×
- 4 0 °C	—	0. 3 4 0. 2 1

室温と 0°C の双方で 0.1mm 以下の低い値を取り、この部
位の鋼材の靱性値が低下していると共に遷移温度が室温
以上に上昇していることが伺える。また非座屈部におい
ても 0°C では座屈部と同程度の値を示しており、遷移温度
は通常の供用温度の範囲まで上昇している。

熱処理により予ひずみを低減した試験体の CTOD 試験
結果、 δ_c を表-1 に示す。表中の×印は、試験体のき裂
開口部での変位が 2mm に達した為、試験を中断したこ
とを示す。また、-40°C での試験は非座屈部について
のみ行っている。この結果から、橋脚に使用された鋼材は
震災前には十分に高い靱性を持っていたと推定される。

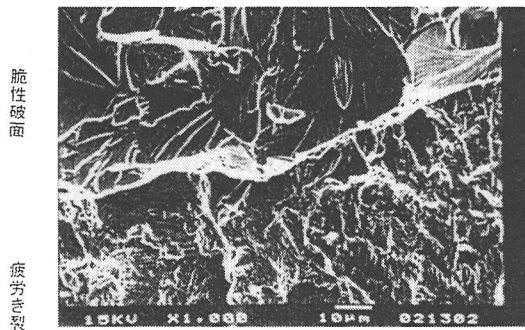


図-13 CTOD 試験破面の SEM 写真

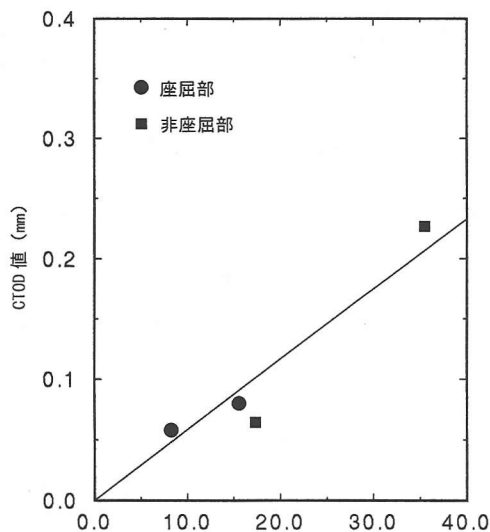


図-14 シャルピー吸収エネルギーと CTOD 値の関係

CTOD 試験片の破面写真を図-12 に示す。座屈部では室温でも脆性破面率がほぼ 100%である。非座屈部においては、室温では脆性破面率は 72%程度であるが、0℃では 84%まで上昇する。

図-13 に示すのは、熱処理前の座屈部の 0℃における破面を、走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した写真である。脆性破面の特徴的な破面である、へき開が見られる。

実験により得られたシャルピー吸収エネルギーと CTOD 値の関係を図-14 に示す。シャルピー吸収エネルギーと限界CTOD 値は近似的に直線関係を持つことが知られているが^{13), 14)}、今実験で得られた両者は温度に

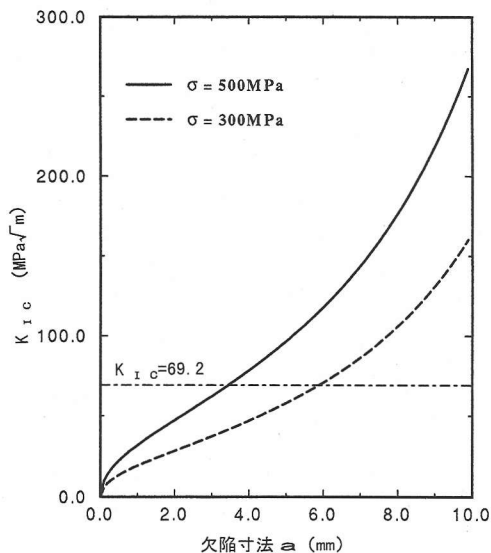


図-15 最大欠陥寸法と K_{IC} の関係

よらず、また座屈部・非座屈部に関わらずこの直線上に乗っており、両者の実験結果は良い一致を示しているといえる。

(5) 脆性破壊発生の可能性

橋脚非座屈部から採取された鋼材の CTOD (δ_c) から Wellman により提案された関係式¹⁵⁾,

$$K_{IC} = \sqrt{1.4E\sigma_{flow}\delta_c}$$

を用いて K_{IC} を推定した。ここで、

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

であり、ヤング係数 E 、降伏応力 σ_y 、引張り強さ σ_u はそれぞれ実験により得られた 206GPa、306MPa、525MPa を用いた。

破壊力学的手法を適用して求めた仮定最大欠陥寸法と K_{IC} の関係を図-15 に示す。ここでは、橋脚を面内に長さ a [mm] のき裂を持ち、橋軸方向に σ [MPa] の一様引張りを受ける帯状片と仮定してモデル化している。実験で得られた非座屈部における CTOD の最小値、 $\delta_c = 0.04\text{mm}$ を上の式に代入することにより得られた応力拡大係数の最小値、 $K_{IC} = 69.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を図中に示す。応力が 300MPa から 500MPa で限界き裂が 3~6mm と小さい値になっており、これは地震時においては十分に脆性き裂が発生し得ることを表している。

以上のことから、地震時に導入された予ひずみが吸収エネルギーの著しい低下と遷移温度の上昇を招き、またこれが阪神高速道路神戸線のピアに生じた脆性破壊の原因であると結論付けて良いと思われる。

4. 結論

本研究では、阪神・淡路大震災により被災した橋脚より採取した鋼材の材料特性の変化から、地震時に橋脚に作用した地震力の推定と地震による鋼材の脆化について検討を加えた。本研究により得られた結論を以下のように要約する。

1. 硬さ及び降伏点の変化から推定される塑性ひずみは、非座屈部で最大 8.5%、板厚方向平均で 4.4%程度であり、座屈部で最大 21.1%、板厚方向平均で 12.3%となり、地震により導入された塑性ひずみは既往の研究で考えられていたものよりはるかに大きい。
2. 降伏点の変化から、ここで導入された塑性ひずみは圧縮ひずみであると考えられる。
3. シャルピー吸収エネルギーは、座屈部・非座屈部から採取された試験片の何れも極めて低く、鋼材 B 種の企画の要求値、0℃で 27Joule を下回る。
4. CTOD 値も極めて低く、座屈部から採取した試験片は、室温 (20℃) でも 0.1mm を下回る。このことは、脆性破壊が容易に発生し得ることを示唆している。

地震により導入された塑性ひずみによる鋼材の脆化は顕著であり、鋼構造物の脆性破壊防止には、今後、材料面からの検討が不可欠であると考えられる。その為、筆者らは、鋼構造物に使用される様々な鋼材が予ひずみにより脆化される程度について実験的に検証中である。

謝辞：本研究は、鋼材倶楽部の大学研究助成：高耐震性性能鋼の開発の一部として、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小委員会”で実施したものである。

鋼材を提供していただいた、阪神高速道路公団に感謝いたします。材料試験にご協力いただいた新日本製鉄鉄鋼研究所はじめ関係各位に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中村秀治：鋼製円筒橋脚の動的弾塑性解析，土木学会論文集，No. 549/I-37，pp. 205-219，1996。
- 2) 中沢正和，有尾一郎，岩熊哲夫：鋼製円筒橋脚に生じた局部座屈変形の数値処理，第 2 回阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 207-212，1997。
- 3) 松尾礼子，依田照彦，石川雅美：簡易非線型動的応答解析による鋼製橋脚の数値シミュレーション，第 2 回阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 235-242，1997。
- 4) 別府万寿博，香月智，石川信隆，宮本二三穂：RC 橋脚の地震時輪切り状ひび割れ発生に関する実験的研究，第 2 回阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 213-218，1997。
- 5) 佐野元彦：帯筋間隔を短くしただけで崩壊を防ぎ得るのか，第 2 回阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 333-338，1997。
- 6) 橋田友幸，藤原正一郎，南二三吉，豊田政男：兵庫県南部地震による被さ鉄骨仕口部の強度・靱性変化特性，片山技法，16，pp. 21-26，1996。
- 7) 中込忠男，山田文富，日高新悟，大林郁良：繰返し塑性ひずみを受ける SM490A 材 鋼溶接接合部の破壊性状と材料劣化に関する実験的研究，鋼構造年次論文報告集第 3 巻，pp. 387-394，1995。
- 8) (社) 日本熱処理技術協会：熱処理ガイドブッカー基礎編 1，大河出版，1983。
- 9) 大和久重雄：熱処理技術マニュアル，日本企画協会，1988。
- 10) 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 III)，1997。
- 11) 野方文男，正木順一：鉄鋼のシャルピー吸収エネルギー遷移曲線の新しい数式表示法と破壊靱性評価，日本材料強度学会誌，17，pp. 1-13，1982。
- 12) 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。
- 13) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会 RTW 委員会：溶接部靱性要求指針に関する研究，1988。
- 14) 森好生，塩崎正孝，三木千寿，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。
- 15) Barsom, J. M. and Rolfe, S. T.: *Fracture & Fatigue Control in Structures* 2nd Edition, Englewood Cliffs, N.J., 1987。

(1997. 6. 10 受付)

A STUDY ON THE MATERIAL OF THE BRITTLE FRACTURED BRIDGE PIER

Chitoshi MIKI, Hiroko KYUBA and Tomoo OKINAKA

During the Great Hanshin-Awaji Earthquake, many steel bridge structures experienced brittle fractures, following the large scale deformation of their members. Hence, in this work, various material tests are performed on specimens which are made out of damaged steel bridge structures. The plastic strain, induced during the earthquake, is estimated through the change in their material properties. And then, the embrittlement of the steel due to the induced plastic strain is discussed, in order to study the mechanism of the occurrence of the brittle fracture during the earthquake.