

# コンパクト断面を有する鋼製橋脚の 地震時低サイクル疲労特性に関する研究

陵城成樹<sup>1</sup>・足立幸郎<sup>2</sup>・猪瀬幸太郎<sup>3</sup>・杉浦邦征<sup>4</sup>・渡邊英一<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株) ニュージェック 技術開発部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

<sup>2</sup>正会員 工修 阪神高速道路公団 工務部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

<sup>3</sup>正会員 工修 石川島播磨重工(株) 技術開発本部 (〒235-8501 横浜市磯子区新中原町 1 番地)

<sup>4</sup>正会員 工博 京都大学大学院 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>5</sup>フェロー 工博,Ph.D 京都大学大学院 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

鋼製橋脚に大地震が作用する場合の保有水平耐力を評価するために、多くの大型供試体による繰り返し水平載荷実験を主体とした検討が行われてきた。これらの中でコンパクト断面を有する供試体において、載荷中に橋脚基部角部に疲労き裂が視認された。この疲労き裂は、その後の載荷サイクルとともに成長し、脆性破壊的な不安定破壊に移行した。このことから、コンパクト断面を有する橋脚の場合、その崩壊は局部座屈よりも、橋脚基部における塑性領域での低サイクル疲労が先行する可能性もある。本研究は、地震時に生じる可能性のある塑性域での低サイクル疲労特性の基礎データ収集を目的に、既存の鋼製橋脚基部を対象とした部分模型による疲労実験を行い、その疲労特性について検討した。

**Key Words :** Steel bridge pier, Low cycle fatigue, Experimental study, Plastic strain

## 1. はじめに

鋼製橋脚に阪神淡路大震災級の大地震が作用した場合の耐震性能を評価するために多くの大型供試体による繰り返し載荷実験が行われてきた。それらによれば、鋼製橋脚の耐震性能を向上させるためには、鋼製橋脚柱部材を構成する補剛板の局部座屈を抑制することが有効であることが明らかになった。補剛板の局部座屈を抑制するためには、板厚を増し、幅厚比を小さくしたコンパクト断面を採用する必要がある。

しかし、コンパクト断面を有する鋼製橋脚の大型供試体実験では、基部ベースプレート角部の引張側フランジに生じる塑性ひずみが累積し、疲労亀裂を生じて脆性的な崩壊となった。このことは、鋼製橋脚の断面構成、および荷重条件によっては、鋼製橋脚の崩壊が局部座屈よりも、低サイクル疲労に支配される可能性があることを示している。

本研究では、この低サイクル疲労が鋼製橋脚の耐震性能に与える影響を明らかにするために、大型供試体実験結果をもとに、既存の鋼製橋脚基部を対象とした部分模型による疲労実験を行い、その疲労特性について検討を行った。

## 2. 大型供試体実験概要<sup>1)</sup>

### (1) 実験供試体

鋼製橋脚の耐震性能を向上させるためには、補剛板パネルの局部座屈が生じにくい断面構成を選

択する必要がある。本実験の目的はフランジ、ウェブおよび縦補剛材の幅厚比パラメータ、ならびに縦補剛材  $\gamma / \gamma^*$  に以下の制限値を設け、この制限値を遵守した供試体 H4 を用いて、繰り返し載荷実験を行い、これらの制限値の妥当性を実験的に明らかにすることを目的とする。

$$\text{幅厚比パラメータ} : R_p \leq 0.4 \quad (2.1)$$

$$\text{縦補剛材の幅厚比パラメータ} : R_1 \leq 0.5 \quad (2.2)$$

$$\text{必要縦補剛材剛比の比} : \gamma / \gamma^* \geq 5.0 \quad (2.3)$$

実験は軸圧縮力 (1285KN) を載荷しながら、変位制御で行った。写真 2-1 は供試体の据え付け状況である。図 2-1 には、供試体 H4 の諸元を示している。

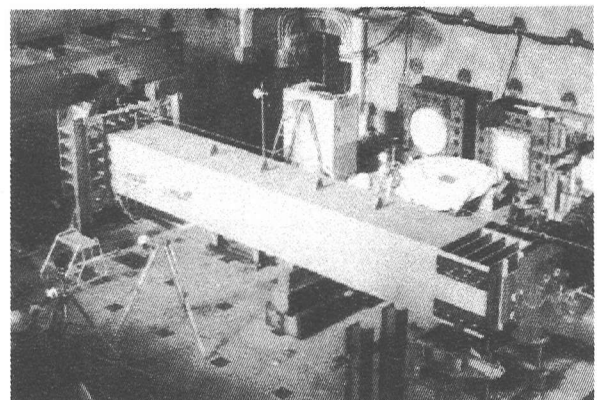


写真 2-1 供試体 H4 据え付け状況

## (2) 実験結果および考察

図 2-2 に供試体 H4 の頂部水平荷重と水平変位との関係を示す。実験は降伏水平荷重  $H_Y=754\text{KN}$  以降も 10 回づつ両振り载荷を行ったが、 $\delta=80\text{mm}$  载荷サイクルの载荷中に基部溶接コーナー部に微小なクラックが確認された。 $\delta=120\text{mm}$  载荷サイクルにウェブとベースプレートとの溶接コーナー部のクラックが進展したため、その後は各载荷サイクルを 1 回とした。

図 2-3 に、各载荷サイクルにおける最大水平荷重と水平変位との関係を示す。図中の破線は、荷重変位曲線の最終経路を示している。供試体 H4 は終局荷重  $H_u$  (1004KN) に達したのに、次の载荷サイクル途中において引張り側フランジに突然、脆性的なクラックが発生して断面が破断して終了した。

荷重変位曲線において  $H_u$  に達するまで载荷回数の影響は見られない。これは重補剛および幅圧比パラメータの制限の効果により圧縮側のフランジパネルの耐荷力が増加したためと考えられる。供試体 H4 は終局時には、圧縮側、引張り側フランジパネル共に塑性化しひずみ硬化領域に入っている。

本実験での载荷方法は降伏点以降の変位振幅 ( $\delta_Y \sim 4\delta_Y$ ) において総载荷回数は 40 回以上である。これは大地震時の鋼製橋脚の動的応答に比べかなり厳しいものと考えられる。

## 3. 低サイクル疲労実験

### (1) 実験供試体および試験方法

大規模地震時における鋼製橋脚基部では低サイクル疲労破壊が発生する可能性が高い。そこでこの破壊現象を再現する実験をおこなった。実験対象は既存の鋼製橋脚基部を対象とした部分模型 (2/3縮尺) である。

大型供試体による载荷実験では、橋脚基部のベースプレートとフランジとの交差部において、塑性領域での繰り返し载荷によって疲労き裂が発生した。そこで図 3-1 に示すように、既存橋脚の構造に着目した疲労実験供試体を製作した。供試体の形状を図 3-2、図 3-3 に示す。これらは鋼製橋脚の、①隅角部 (荷重非伝達型継手 T 1: 3 体)、②貫通型縦補剛材部 (荷重非伝達型継手 T 2: 4 体)、③一般部 (荷重非伝達型継手 T 3: 4 体)、および④非貫通型縦補剛材部 (荷重伝達型継手 T 4: 2 体) を模したものであり、材質は SM490Y である。試験機は 5884KN 疲労試験機を使用し、ひずみの計測には動ひずみ計を使用した。荷重载荷は、完全片振りの荷重制御にて行っている。各供試体にはそれぞれ大きな塑性ひずみ (初期ひずみ  $5 \times 10^3 \mu \sim 100 \times 10^3 \mu$ ) を与え、その後降伏ひずみ程度の繰り返しひずみ (1700  $\mu$  程度) を発生させた。ひずみを発生させる荷重は、それぞれの供試体において実施した単純引張試験にもとづき設定した。

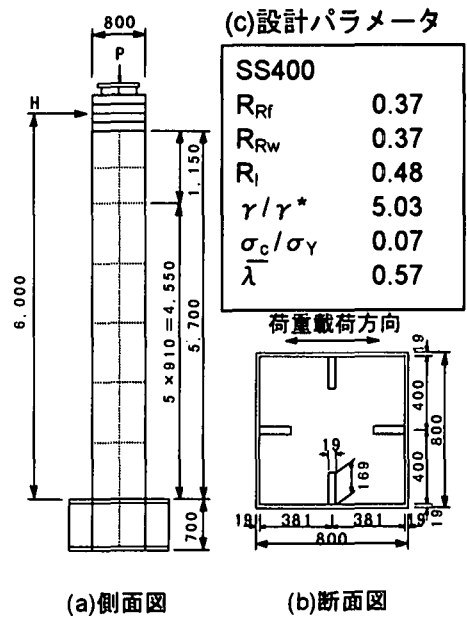


図 2-1 大型供試体 H4 (単位: mm)

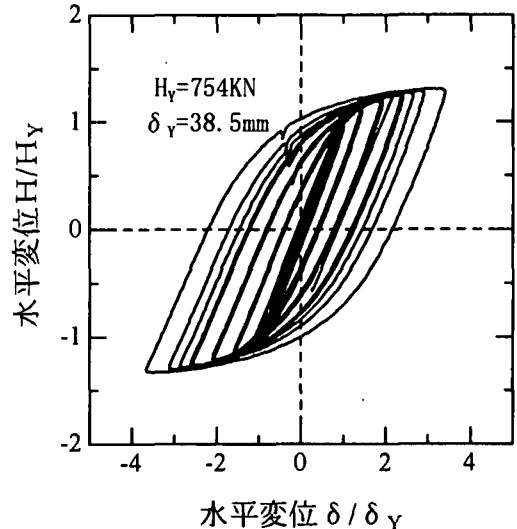


図 2-2 水平荷重を水平変位との関係

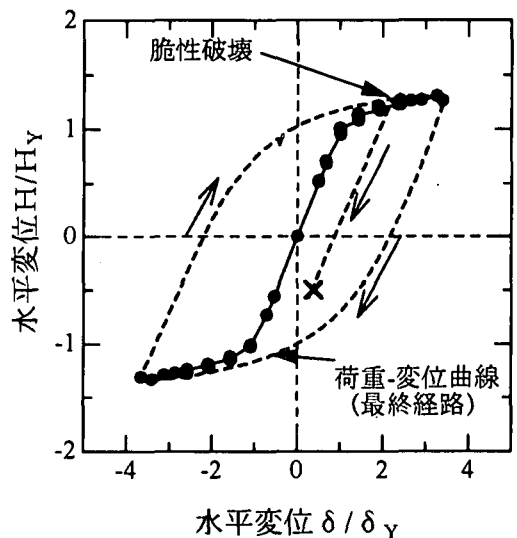


図 2-3 水平荷重と水平変位との関係

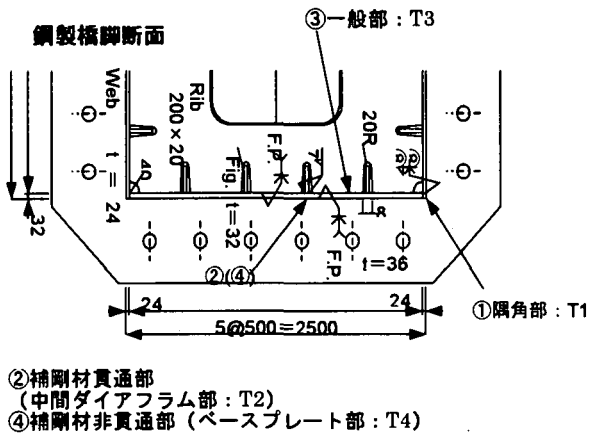


図3-1 着目部位

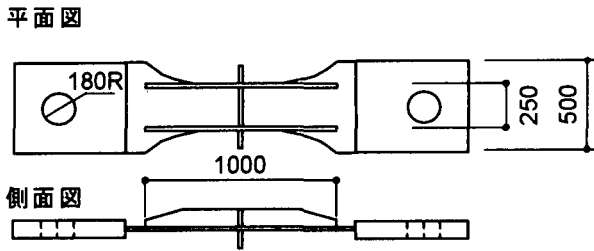


図3-2 供試験体 (T1)

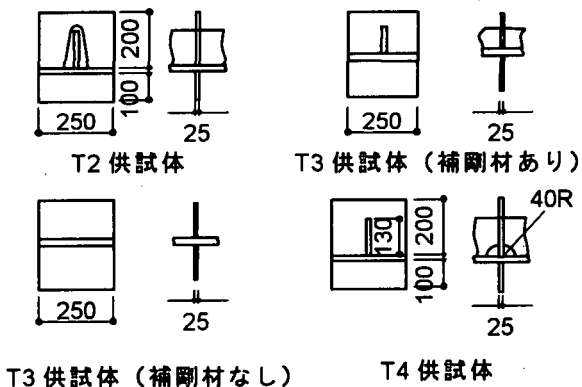
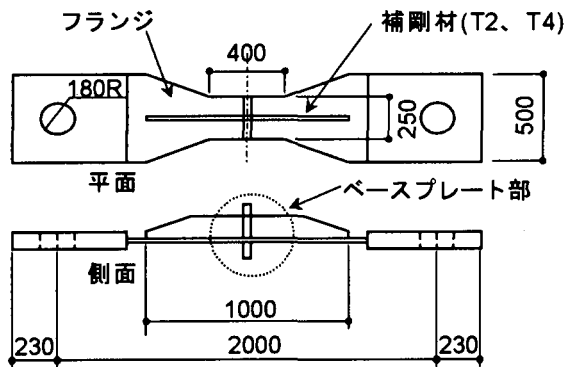


図3-3 供試験体 (T2、T3、T4)

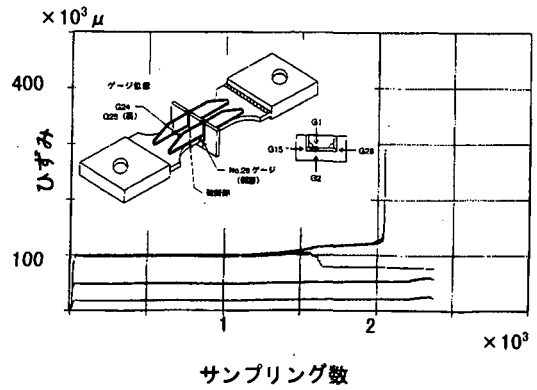


図3-4 供試体 T1 ひずみ履歴

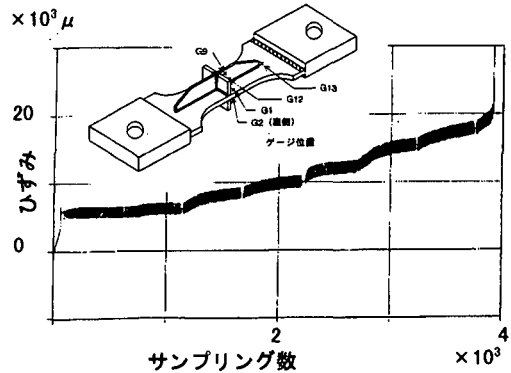


図3-5 供試体 T4 ひずみ履歴

### (1) 試験結果

低サイクル疲労実験の結果として供試体 T1 および供試体 T4 のひずみ履歴を図3-4～図3-5に示す。供試体 T1 では、3体とも初期ひずみ ( $80 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3 \mu$ 程度) 導入時から、コーナ部に微小なき裂が観測された。このき裂は目視ではほとんど確認できず、磁粉探傷にてわずかに観測される程度のものであった。その後、繰返し数の増加に伴い、き裂は進展した。ここでは3体の供試体のうち1体が破断に至っている。

供試体 T2 では、ベースプレートとフランジ溶接部にき裂が認められたが、1,000回の繰返しを行ってもき裂はほとんど進展しなかった。なお、供試体 T2 の初期ひずみは  $20 \times 10^3 \sim 40 \times 10^3 \mu$ 程度であり、微小な断続き裂が初期ひずみ導入時に発生した。

供試体 T3 では、3体が破断に至った。そのなかで補剛材があるタイプの供試体では、荷重の繰返しにより、塑性ひずみが累積され、繰返し数8回で母材破断を生じた。この供試体から補剛材を取り外した供試体では、構造的拘束が低減されたため、破断までの繰返し数が増加した。また破壊性状もフランジ端部の溶接止端部からき裂が進展し不安定破壊に移行するモードに移行した。

供試体 T4 では、他の供試体 T1～T3 と異なり、補剛材とベースプレートの溶接部に疲労き裂が発生し、成長した。これは供試体 T4 が荷重伝達型継手であり、ベースプレートとの溶接部に塑性ひず

みが極端に累積したためと考えられる。この供試体は補剛材の破断による断面欠損のため供試体フランジのひずみは急増し破断に至った。

目視観察によれば、供試体 T1~T4 の破面はき裂成長中の破面は延性破面的であり、その後脆性破面的な不安定破壊へと移行する性状を示していた。これは大型供試体（供試体 H4）において生じた破面も同様であり、塑性域での低サイクル疲労を評価する上で重要な知見であるといえる。

### (3) 低サイクル疲労強度の評価

本実験では前述したとおり、荷重制御にてひずみを供試体に導入した。このため本実験結果と通常行われている塑性ひずみ範囲を一定とした低サイクル疲労実験結果とを直接比較することはできない。そこで低サイクル疲労強度を平均塑性ひずみとその繰り返し数との関係に換算し、比較する手法を適用した。これは塑性域での低サイクル疲労強度を決定する要因は、塑性ひずみの累積であることに着目した評価手法である。図 3-6 にその結果を示す（●印）。また図中には塑性ひずみ範囲一定での低サイクル疲労実験結果<sup>2)</sup>、および大型供試体実験結果（■印）も合わせて示す。本実験結果と低サイクル疲労試験結果（破線）、隅角部を対象とした低サイクル疲労実験の結果（△印）はよく一致する。これは低サイクル疲労強度が供試体の大きさ、形状には依存していないことを示している。

以上のように塑性域での低サイクル疲労強度は作用する塑性ひずみの履歴にて評価できることが確認できた。したがって大規模地震時における鋼製橋脚の低サイクル疲労強度についても平均塑性ひずみによる疲労強度評価曲線によって照査することが可能であると言える。

### (4) 鋼製橋脚における耐震設計上の留意点

大型供試体 H4 では隅角部からき裂が発生した。これは隅角部の構造的拘束効果により隅角部のひずみがフランジ中間部に比べて大きくなり、塑性ひずみが多く累積されたためである。このことは大規模な地震力が作用している鋼製橋脚では低サイクル疲労破壊が発生する可能性が高いことを示している。

特に座屈耐力を改善するため、補剛板の幅厚比を制限したコンパクト断面鋼製橋脚においては橋脚フランジとベースプレートの溶接部に塑性ひずみが累積するため、塑性ひずみの履歴に着目した低サイクル疲労照査の実施が必要であると言える。

## 4. まとめ

実験結果より、明かになったことをまとめると次のようになる。

### (1) 大型供試体実験

①補剛材剛比および幅厚比パラメータの制限に

より、フランジがひずみ硬化領域に達しても局部座屈が発生せず耐震性能が向上した。

②供試体 H4 は、基部コーナー部に生じた微小

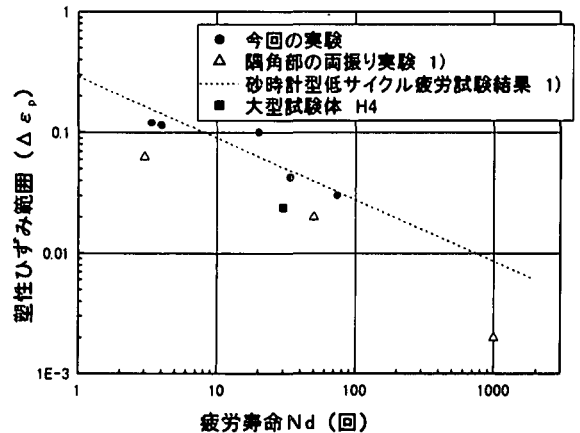


図 3-6 塑性ひずみによる低サイクル疲労強度評価

なクラックが荷重ステップ  $3\delta_y$  のときに進展し、最終的には脆性的な破壊モードとなった。

③局部座屈を抑制するために採用したコンパクト断面を有する鋼製橋脚の場合、繰り返し回数と、応答変位振幅等の地震荷重の特性によっては、低サイクル疲労が先行し、脆性的な破壊性状を示す可能性がある。

④今後、鋼製橋脚の耐震設計に導入される動的応答解析においては、塑性ひずみの累積が予想される部位の低サイクル疲労特性に関する注意が必要である。

⑤今後の課題としては、動的応答解析と実験結果との比較検討、および弾塑性有限変位解析との比較検討等が考えられる。

### (2) 低サイクル疲労実験

①塑性ひずみの累積に着目することで、ひずみ履歴の異なる実験結果の比較が可能である。

②大規模地震が鋼製橋脚に作用した時の塑性ひずみ履歴を算出することで、低サイクル疲労強度を照査することが出来る。

③低サイクル疲労強度は構造的相違（大きさ、形状）には依存しない。

④塑性ひずみが累積する箇所が低サイクル疲労によるき裂の発生点になる。

⑤低サイクル疲労き裂の破面は延性破面的であり、き裂が成長すると脆性破面的な不安定破壊へと移行する。

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：鋼製橋脚の地震時保有水平耐力に関する調査研究業務(その2)概要報告書, pp. 50-54, pp86-104, 1995.
- 2) 坂野昌弘, 三上, 百々良, 加藤：超低サイクル域における鋼製橋脚隅角部の破壊挙動, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要 I -838, 1994