

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760339

研究課題名（和文）

コンクリートを充填した鋼構造部材の低サイクル疲労破壊特性の解明

研究課題名（英文）

Investigation on low cycle fatigue behavior of concrete-filled steel members

研究代表者

判治 剛 (HANJI TAKESHI)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80452209

研究成果の概要（和文）：コンクリートを充填した鋼製部材の低サイクル疲労実験を行い、低サイクル疲労破壊メカニズムを解明するとともに、低サイクル疲労破壊を防止するための疲労強度向上法を検討した。三角リブ部を有するコンクリート充填柱では最大耐荷力に到達する前に低サイクル疲労き裂が発生し、それを起点とする脆性破壊が生じる可能性があることを明らかにした。また、低サイクル疲労破壊を防止する手法として止端処理の効果を確認した。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the low cycle fatigue failure mechanism of the concrete-filled steel members and verified the fatigue strength improvement methods. The low cycle fatigue tests revealed that cracks were initiated from the base joints of the specimen in the early stage of loading, meaning that the low cycle fatigue can be a final failure mode of the concrete-filled members. Besides, it was indicated that the weld toe treatment techniques can improve the low cycle fatigue strength of the steel members.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：鋼構造、疲労・破壊、維持管理工学、橋梁工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：低サイクル疲労、コンクリート充填部材、溶接継手、き裂発生、疲労強度向上

## 1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震にて土木鋼構造物は甚大な損傷を受けた。大震災での経験をもとに、それ以降、鋼構造物の耐震性能に対する広範な研究が行われ、2008年には鋼・合成構造標準示方書〔耐震設計編〕が発刊されるに至った。その中の鋼製橋脚の構造細目 6.4.2 には以下のように記されている。

「鋼製橋脚の変形性能を低減させる現象としては、鋼板の局部座屈<sup>(i)</sup>、過度の局部座屈変形による溶接部や鋼板の脆性的破壊に起因する割れ<sup>(ii)</sup>、ひずみ集中部における低サイクル疲労<sup>(iii)</sup>があり、鋼製橋脚の変形性能を向上させるにはこれら(i)-(iii)を抑止すること

が重要である。」

ところが、土木鋼構造物の耐震性能に関する研究のほとんどは(i)の局部座屈を対象としたものであり、(ii)、(iii)の低サイクル疲労による脆性的破壊に関する研究例は数少なく、未だ汎用的な照査法として条文化されるまでには至っていない。

現在、多くの鋼製橋脚にて耐震補強対策が施されているが、局部座屈による破壊を抑止するという観点から、コンクリートを充填して変形性能を向上させる手法がとられることがある。コンクリート充填鋼製橋脚においては、これまで数多くの研究が行われてきており、内部のコンクリートの拘束効果により、

鋼部材に局部座屈が発生してもそれが進展しにくく、耐力の低下が緩やかとなることが示されている。その一方で、基部や局部座屈部周辺においては大きな塑性ひずみが繰り返されることとなり、条件によってはそこの低サイクル疲労き裂が問題となる可能性が指摘されている。しかしながら、低サイクル疲労の側面からコンクリート充填橋脚の耐震性能を検討した例はほとんどない。

## 2. 研究の目的

本研究では、コンクリート充填橋脚の低サイクル疲労特性を把握するとともに、低サイクル疲労破壊を防止するための手法について、以下に示す実験的な検討を行う。

(1) コンクリートを充填した実橋脚を忠実に再現した中型の実部材モデルの繰り返し載荷試験を行い、低サイクル疲労き裂の発生位置、発生寿命および進展挙動を明らかにする。

(2) 鋼素材の低サイクル疲労強度はき裂発生位置のひずみ履歴に支配される。つまり実部材においても、き裂発生点の局部的なひずみを低減できれば、疲労強度が向上すると考えられる。そこで、き裂発生点の一つである溶接部のひずみ集中を低減することによる低サイクル疲労強度向上効果を明らかにする。

(3) 実部材モデルの塑性ひずみ場を測定するための画像計測技術の開発を試みる。き裂発生点の塑性ひずみ履歴をもとに、低サイクル疲労き裂の発生条件を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 試験体の形状および寸法を図-1に示す。供試鋼材はSM400であり、その機械的性質を表-1に示す。試験体基部には三角リブを配置しているが、これは兵庫県南部地震での損傷事例および実橋での適用実績を勘案して採用したものである。コンクリートは試験体を上下反転させて立てた状態で底面の孔から充填した。バイブレータを用いてコンクリートが内部全体に充填されるように注意して行った。コンクリートの載荷試験日における圧縮強度は28MPaであった。

試験状況を図-2に示す。試験体の底部をボルトにより固定し、頂部に水平方向の繰り返し変位および一定の鉛直荷重を与えた。鉛直荷重は水平変位を与える前に載荷し、その大きさは鋼断面のみにおける全断面降伏軸力の10%もしくは20%とした。水平載荷パターンは変位振幅が繰り返し数とともに増加する漸増載荷とした(1 $\delta$ y, 2 $\delta$ y, 3 $\delta$ y ...)。なお、 $\delta$ yは鋼断面のみを考えて算出した降伏変位である。表-2に試験体名と載荷パターンの対応を示す。

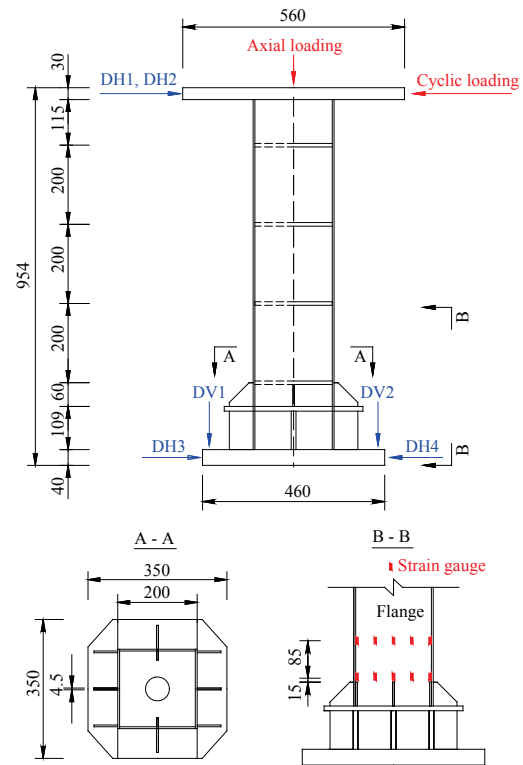


図-1 試験体形状

表-1 鋼材の機械的性質

降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)
351	417	27

表-2 試験条件

名称	コンクリート充填	降伏軸力に対する鉛直荷重の割合
NCFT	なし	20%
CFT1	あり	20%
CFT2	あり	10%

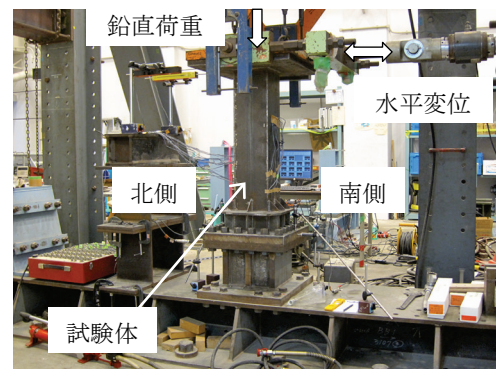


図-2 試験状況

試験中、図-1 に示す位置に設置した変位計 (DHI~4, DV1, 2) の値から頂部の水平変位を算出し、それを制御することによって試験を実施した。磁粉探傷試験によりき裂の発生・進展の様子を観察しながら試験を行い、き裂進展により耐力が大きく低下した時点で載荷を終了した。

(2) 低サイクル疲労強度向上法として溶接部の止端処理に着目し、その適用可能性について検討した。上述と同じような鋼製橋脚を模擬した部材試験体に対して、その基部の溶接止端を滑らかに仕上げたものと溶接したままのものを用意して低サイクル疲労試験を実施した。今回は、局部座屈の影響を無視するために、厚肉断面を有する橋脚とした。試験体のセットアップ状況は(1)と同様である。なお載荷パターンは、漸増載荷に加え、一定振幅載荷 (3δy または 6δy) も実施した。

(3) 局部座屈部のひずみ場を測定するためには3次元的な変形を広範囲にわたって測定できる計測システムが必要である。そこで本研究では、画像計測技術に着目し、それによるひずみ計測システムの構築を試みた。

#### 4. 研究成果

(1) 図-3 に荷重-変位のヒステリシスループとき裂発生・進展状況の関係を示す。試験より得られた成果を以下にまとめる。

- ・コンクリートを充填していない試験体では局部座屈と同時に三角リブ溶接部に低サイクル疲労き裂が生じたが、座屈部の変形が支配的となり、三角リブのき裂はほとんど進展しなかった。最終的には、局部座屈位置の縦方向溶接部にき裂が生じ、急激に耐力が低下して破壊に至った。

- ・コンクリート充填柱での破壊性状は次のとおりである。まず三角リブ止端部に低サイクル疲労き裂が発生し、その後、基部周辺のフランジ面にわずかに局部座屈が生じた。荷重の繰り返しとともに局部座屈部に変形が集中するようになると三角リブ部のき裂進展は遅くなるが、その代わりに局部座屈位置の縦方向溶接部に角割れが発生し、急激に進展して破断した。

- ・コンクリートを充填することにより局部座屈の発生を遅らせ、その進展をおさえることができるが、低サイクル疲労き裂の発生は充填コンクリートの有無にかかわらずほぼ同じであった。つまり、鋼材の低サイクル疲労に関しては内部コンクリートの効果はほとんどない可能性が高い。

- ・低サイクル疲労き裂の発生寿命に対して鉛直荷重の大きさの違いは影響を与えない。つまり、き裂発生寿命に対して平均ひずみはほとんど影響しないといえる。

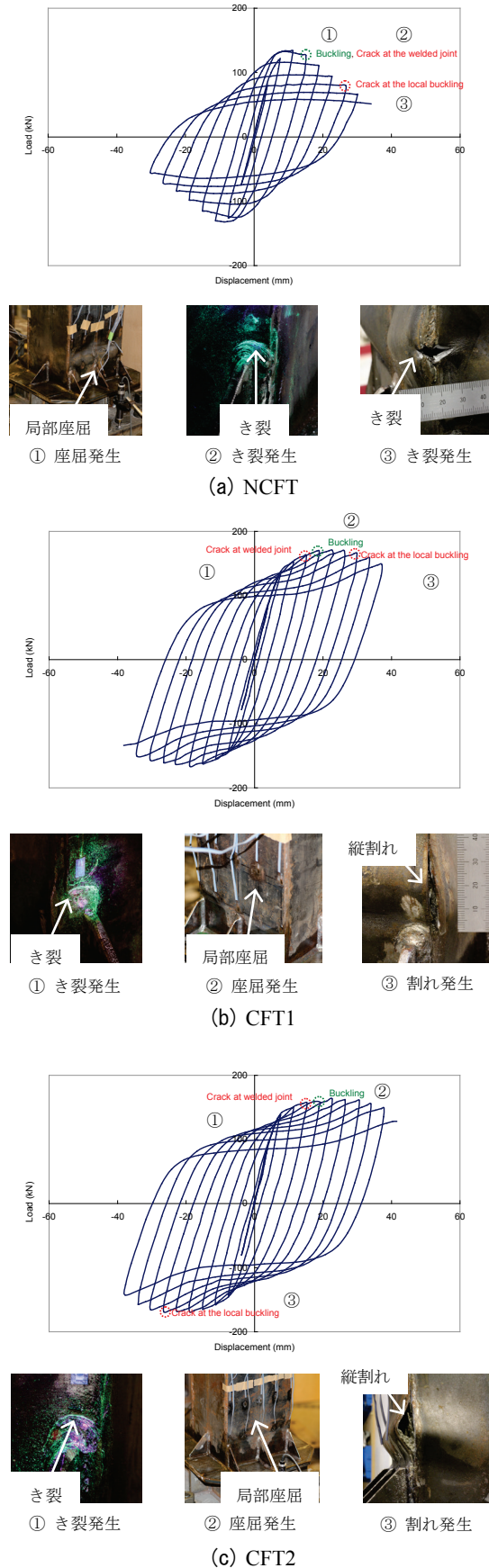


図-3 ヒステリシスループとき裂発生状況

・コンクリート充填柱での三角リブ部のき裂は最大耐力に到達する前に発生した。これは、コンクリート充填柱においては、局部座屈および角割れが生じる前に低サイクル疲労き裂を起点とした脆性破壊が生じる可能性があることを示唆している。

本研究により、三角リブを基部に有するコンクリート充填橋脚の低サイクル疲労破壊メカニズムに関する基礎的かつ貴重な知見を得ることができた。き裂発生位置および破壊性状を把握することができたため、今後はき裂発生点の局部的なひずみと疲労寿命との対応付けを行い、き裂発生条件を明らかにする。

(2) 低サイクル疲労試験結果を図-4に示す。図中には溶接まま試験体の結果も載せている。縦軸は公称ひずみ振幅、横軸は疲労寿命である。公称ひずみ振幅は梁要素を用いた解析によって得られた試験体基部のひずみ振幅である。また本研究では、各角部においてき裂を発見したときの繰り返し数を疲労寿命と定義した。そのときのき裂長は約 2mm 程度である。図より、止端処理試験体の結果は溶接まま試験体より右側に分布しており、疲労寿命の下限値でみると少なくとも 2 倍以上の伸びが確認できる。よって、止端処理を施すことにより、低サイクル疲労強度が向上することが示された。

コンクリート充填により局部座屈に対して補強した橋脚は低サイクル疲労破壊が問題となりうるが、以上より、止端処理を施すことにより、低サイクル疲労の観点からも高い耐久性を有する橋脚が実現可能といえる。

(3) 3次元ひずみ計測システムはステレオグラフィ技術を用いて構築する。ステレオグラフィとは、異なる視点から撮影された複数枚の画像から物体の3次元形状を求めるといったものである。2次元のひずみ場計測システムはすでに構築しており、今後はこれを3次元的に拡張することを試み、試験体のひずみ場とき裂発生の関連付けを行う。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 判治剛, 永松直樹, 館石和雄: 溶接止端処理による鋼製橋脚基部の極低サイクル疲労強度向上法, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第19巻, 2011, 355-360.

[学会発表] (計4件)

- ① J.E. Park, T. Hanji and K. Tateishi: Experimental Study on Low Cycle Fatigue

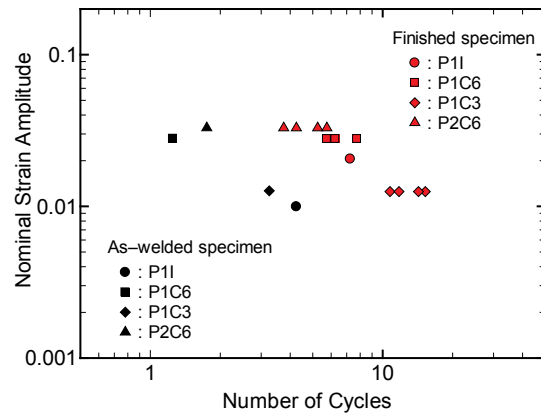


図-4 疲労試験結果

Behavior of Concrete-filled Steel Bridge Piers, The 9th German-Japanese Symposium on Steel, Composite and Concrete Bridges, 2012/9/10, Kyoto University, Japan.

- ② N. Nagamatsu, T. Hanji and K. Tateishi: Improvement in Extremely Low Cycle Fatigue Strength of Steel Bridge Piers by Weld Toe Grinding, The 11th Korea-Japan Joint Symposium on Steel Bridges, 2011/8/25, Jeju National University, Korea.
- ③ 判治剛, 永松直樹, 館石和雄: 溶接止端処理による鋼製橋脚基部の極低サイクル疲労強度向上法, 日本鋼構造協会 鋼構造シンポジウム 2011, 2011/11/17, 東京ファッションタウンビル(東京都).
- ④ 永松直樹, 判治剛, 館石和雄: グラインダー処理による鋼製橋脚基部の極低サイクル疲労強度向上効果, 土木学会平成23年度第66回年次学術講演会, 2011/9/9, 愛媛大学(愛媛県).

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

判治 剛 (HANJI TAKESHI)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 80452209

##### (2) 研究分担者なし

##### (3) 連携研究者なし