

機関番号：73905

研究種目：基盤研究（C）一般

研究期間：2008～2010

課題番号：20560441

研究課題名（和文）柱の曲げおよびねじり疲労試験機の開発

研究課題名（英文）Development of fatigue testing machine for columns under bending and/or torsion

研究代表者

山田 健太郎（YAMADA KENTARO）

財団法人 名古屋産業科学研究所 上席研究員（名古屋大学 名誉教授）

研究者番号：50109310

研究成果の概要（和文）：偏心おもりを持つモーターを用いて簡易に高速な疲労試験を可能にするために、曲げおよびねじり荷重状態の疲労試験機の開発や、試験方法の検討を行った。この結果、いくつか改良の余地はあるものの、簡便でコストをかけない疲労試験が可能になった。

研究成果の概要（英文）：To enable the high-speed and simple fatigue test by using a motor with misalignment weights, development of fatigue testing machine under bending and/or the torsion conditions as well as fatigue tests were carried out. As a result, by using developed machine, simple and low cost fatigue test can be done even though it needs several improvements.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	2,600	780	3,380
平成21年度	800	240	1,040
平成22年度	300	90	390
総計	3,700	1,110	4,810

研究分野：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：疲労試験機、曲げモーメント、ねじりモーメント

1. 研究開始当初の背景

本研究では、照明柱、標識柱に使われる鋼管の溶接継手を対象とした。照明柱、標識柱などの鋼管構造物は、風や振動によって疲労き裂を生じて倒壊する可能性があり、そのような損傷が発生すると、交通障害や人身災害を引起す。そのような事故を防止するために、

(a) 基本的な疲労強度を求めるための疲労試験

(b) 耐久性を向上させたディテールの検討

(c) 振動や風により発生する応力範囲の計測と耐久性の評価手法の検討

(d) 点検手法の確立

などの研究が行われてきた。

このうち、基本的な疲労強度を求める疲労試

験では、大型の構造物試験機を用いた疲労試験が行われてきた。そのため、疲労設計に必要なS-N線図を求めるのに大変な時間とコストが必要であった。また、構造物によっては、単純な曲げだけでなく、ねじりや曲げねじりが作用する場合もある。これまでの疲労の研究では、既存の試験装置を組み合わせ、ねじりや曲げとねじりの組み合わせの疲労試験が行われてきたが、コストや試験方法が複雑になり、結果的に時間とコストのかかるものであった。

2. 研究の目的

研究では、鋼管の溶接継手の曲げ、純ねじり、および曲げねじりの試験方法の検討、お

よび疲労試験機の開発と製作を行って、また、実際の継手に対して疲労試験を行うことを目的とする。

この研究のベースは、研究代表者が2005年頃から開発してきた板曲げ振動疲労試験機である。この試験機は、偏心おもりをもつ市販のモーターを鋼板試験体の片側に設置し、高速(約20Hz)で回転させることで、板曲げ荷重による疲労試験を可能にしたものである。使用したモーターでは、板幅300~500mm、板厚6~19mm程度の溶接継手試験体を、安価に早く試験できることが分かった。使用するモーターを換えればより大型の疲労試験も可能となる。また、この試験機は、油圧サーボ式の疲労試験機に比べて、使用電力が数百分の1であり、電力使用量からもエコな試験機でもあった。本研究では、板曲げ振動疲労試験機で用いたものと同じ仕様の偏心おもりを持つモーターを使用して、鋼管の溶接継手の曲げ、純ねじり、および曲げねじり疲労試験を行うことができる試験機や試験方法を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、2005年頃から開発してきた板曲げ振動疲労試験機をベースとして、以下に示す载荷状況の疲労試験を行うことができる試験機や試験方法を順次開発する。

(a) 鋼管柱の曲げ疲労試験方法の開発

片持ち支持された鋼管の端部に偏心おもりを持つモーターを設置して曲げ疲労試験をおこなうもの。

(b) 鋼管溶接継手の純ねじり試験機

せん断応力の繰返しによる溶接継手の疲労挙動を観察するために、鋼管溶接継手を対象にした、偏心おもりを持つモーターを用いたねじり疲労試験機を製作した。

(c) 鋼管溶接継手の曲げねじり試験機

曲げとねじりの繰返しを受ける溶接継手の疲労試験を行うための試験装置と試験方法を確立する。

そして、開発した試験機を用いて鋼管の溶接継手の疲労試験が行えることを実証する。

4. 研究成果

(1) 疲労試験機の開発

曲げ応力状態を再現する疲労試験機は、これまでに開発されている板曲げ振動疲労試験機(山田ら, 2007; 佐々木ら, 2007)を、図-1に示すように、鋼管に取り付けられた補助板へ設置し、試験機の振動によって、鋼管の根元部に繰返し曲げ応力が生じる構造とした。

一方、曲げねじり疲労試験機は、図-2に示すように、部材の片側を固定し、自由端側に载荷部材を取り付ける構造とした。载荷部材端部に鉛直方向荷重を与えて偏心载荷することにより、主部材には曲げモーメントおよびねじりモーメントが作用する。これを利用して、鉛直方向荷重を繰返し作用させることにより、試験体に曲げモーメントとねじりモーメント(以下、曲げねじり)を繰返し与えて試験を行うことが可能である。

ねじりモーメントのみを与えて純せん断応力状態を再現する試験機は、図-3に示すように、载荷部材を挟んで両側に2つの支点を設けて鉛直・水平変位を拘束した。ただし、2つの支点間の距離が長くなるほど部材に曲げモーメントが発生するため、支点間距離をできる限り短くして、その発生を最小限に抑える必要がある。これにより、ねじりモーメントのみが作用する状態(以下、純ねじり)を再現することが可能である。曲げねじりおよびねじり疲労試験機にも振動疲労試験機^{1), 2)}を用いることで、高速で簡易に疲労試験が行うことが可能となる。

製作した試験機を図-4に示す。曲げ疲労試験機は、鋼管の頭部に補助板を取り付け、载荷板に振動疲労試験機を設けるだけの単純な構造であるが、純ねじりねじりおよび曲げねじり疲労試験機では、载荷梁や鋼管の固定部が複雑な構造になっている。これらの試験機では、図-5(a)に示す半円形の溝をつけたアルミブロックで鋼管試験体を上下から挟み込み、ボルトによって固定した。ねじりによる試験体の回転を、このブロックと試験体

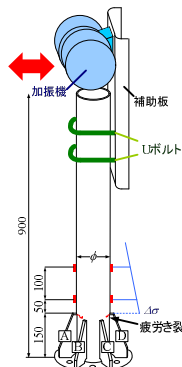


図-1 曲げ疲労試験機

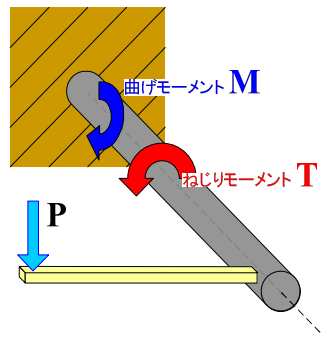


図-2 曲げねじり疲労試験機

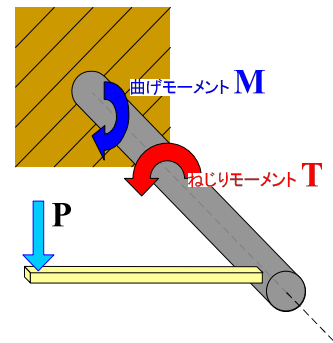
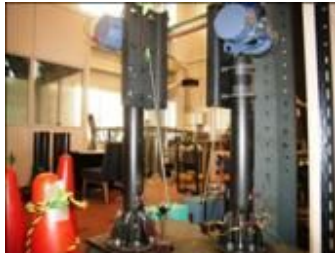


図-3 純ねじり疲労試験機



(a) 曲げ疲労試験機

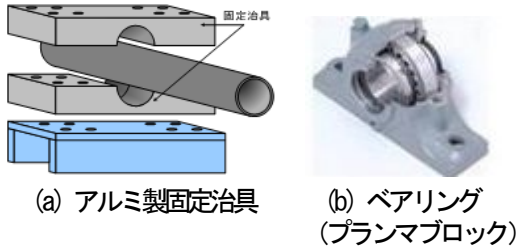


(b) 純ねじり疲労試験機



(c) 曲げねじり疲労試験機

図-4 開発した疲労試験機



(a) アルミ製固定治具

(b) ベアリング
(プランマブロック)

図-5 試験機治具

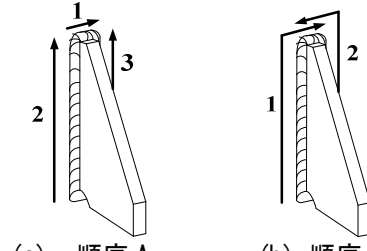
(鋼材)の表面摩擦により拘束するため、ブロックの材料はアルミニウムとした。また、図-4(b), (c)に示すように、I型断面の荷重治具を製作し、荷重治具取り付け用のアルミブロックを介してボルトで締め付けて固定している。純ねじり型に対しては、図-4(b)に示すように、鋼管を試験体部分と荷重部材部分に分けて製作し、両者をボルトにより連結した。さらに荷重治具の前後にベアリング(図-5(c))付きの台座を設置した。ベアリングを用いることにより、回転を拘束することなく鉛直、水平方向変位を拘束することを可能にした。ベアリング付き台座の間の距離は、荷重治具の幅に合わせて、最小となるようにした。

試験機の制御方法は板曲げ振動疲労試験機と同様であり、偏心錘の偏心量、モーターの回転数、荷重部材と加振機の取り付け位置を調節することにより、導入される曲げモーメントおよびねじりモーメントを制御する。ただし、本試験機は荷重制御でも変位制御でもないため、試験体に貼付したひずみゲージによって、発生する応力を制御する必要がある。

(2) 曲げ疲労試験の結果

疲労試験は、図-1に示すように、試験体のリブ側を荷重フレームに高力ボルトで固定して、試験体の自由端側と加振機は補助板を利用しUボルトで固定し、荷重板を介して振動疲労試験機を設置し、鋼管根元部のリブに直応力が繰返し作用するようにした。Uボルトを締める際に鋼管に変形が発生しないよう、鋼管内部に円形木材を挿入した。

今回の試験体の鋼管の厚さと外形は、 $t = 3.2\text{mm}$ に対して $\phi = 101.6\text{mm}$ 、 $t = 3.5$ 、



(a) 順序 A

(b) 順序 B

図-6 溶接順序

4.5mm に対して $\phi = 114.3\text{mm}$ とした。さらに、板厚 12mm の 6 つのテーパ付きリブが、鋼管とベースプレートに対して脚長 6mm ですみ肉溶接されている。疲労試験は一般に溶接したまま(as-welded)の試験体を用いて行われるが、通常設置されている標識柱は垂鉛メッキ加工されている。垂鉛メッキ加工の有無による疲労強度の違いを確認するため、as-welded の試験体(SA シリーズ)と垂鉛メッキ加工を行った試験体(SZA, SZB シリーズ)の 2 種類を用いた。

さらに、溶接順序を変更することにより溶接の簡略化を図った際の疲労強度を検討するため、従来から行われている溶接順序を図-6(a)に示される溶接順序 A(SA, SZA シリーズ)、溶接回数の少ない溶接を図-6(b)に示される溶接順序 B(SZB シリーズ)とした 2 種類で疲労試験を行った。

本研究では、溶接止端から 50, 150mm 離れた位置にひずみゲージを貼り付けて、この 2 点より線形外挿した応力を溶接止端における公称応力と定義した。この試験機は応力制御ではないため、疲労き裂の発生や進展により試験体の剛性が低下することにより試験中も応力範囲が低下していく^{1), 2)}。そのため、次式で与えられる等価応力範囲を用いて整理した。

$$\Delta\sigma_{eq} = \sqrt[3]{\sum \frac{\Delta\sigma_i^3 \times n_i}{N}} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{eq}$ は等価応力範囲[MPa]、 $\Delta\sigma_i$ は i 回目に計測された応力範囲[MPa]、 n_i は $\Delta\sigma_i$ の繰返し数、 N は全繰返し数を示している。

疲労試験で得られた、疲労破面の一例を図-7に示す。この図から、疲労き裂はリブまわ

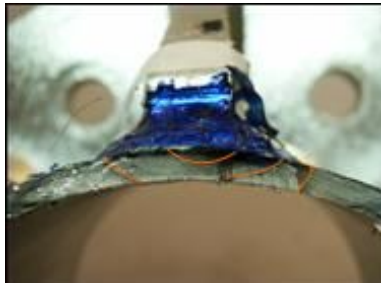


図-7 疲労破面

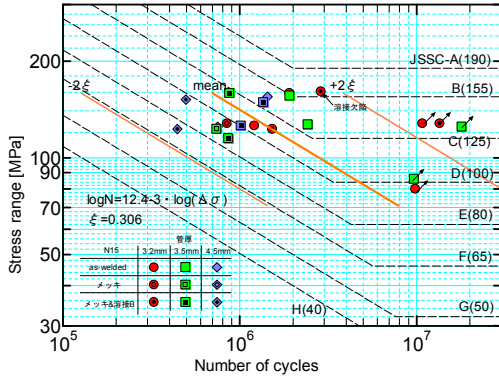


図-8 疲労強度曲線

し溶接部から発生し、鋼管周方向へ進展していくことがわかる。また管厚が小さいため、疲労き裂発生後、疲労き裂が溶接止端から離れる前の早い段階で鋼管を貫通していることがわかる。

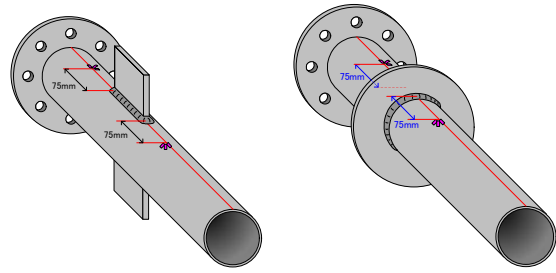
疲労試験より得られた疲労強度を図-8に示す。縦軸は応力範囲、横軸は溶接止端から発生したき裂が止端を離れて15mm進展した際の繰返し数を示し、JSSCの疲労強度等級も合わせて示した。ここで、図中の実線は本試験で得られた疲労強度の平均、および上限値と下限値を示す。

図-8より、疲労強度はJSSCのC～E等級に多く分布しており、下限値はF等級に位置していることがわかった。

(3) 純ねじり疲労試験の結果

純ねじり疲労試験に用いた試験体を図-9に示す。図-9(a)は、直径 $\phi=114.3\text{mm}$ 、管厚 $t=4.5\text{mm}$ の鋼管に、長さ100mm、高さ100mmのガセット2枚を対にしてすみ肉溶接して製作した面外ガセット試験体で、ガセットのまわし溶接止端からき裂を発生させることを目的とした試験体である。図-9(b)は、直径260mm、板厚12mmの鋼板の両側から、直径 $\phi=114.3\text{mm}$ 、管厚 $t=4.5\text{mm}$ の鋼管2本をすみ肉溶接して製作しており、溶接ルートからき裂を発生させることを目的とした試験体である。使用鋼材は、鋼管(電気抵抗溶接鋼管)がSTK400、鋼板がSS400である。すみ肉溶接の脚長は4mmとした。

幾つかの疲労試験で、アルミニウムブロックで固定した位置でフレットング疲労が生じたので、厚さ1mm程度のテフロン板を鋼管に巻いて疲労試験を実施した。PGT-2試



(a) PGT 試験体 (b) PBT 試験体

図-9 純ねじり疲労試験体

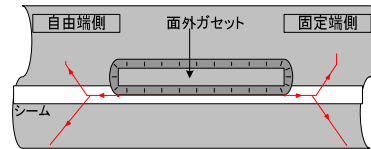


図-10 PGT-2 のき裂進展

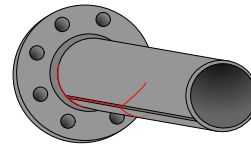


図-11 PGT-3 のき裂進展

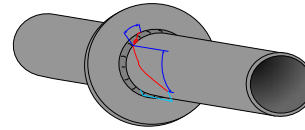
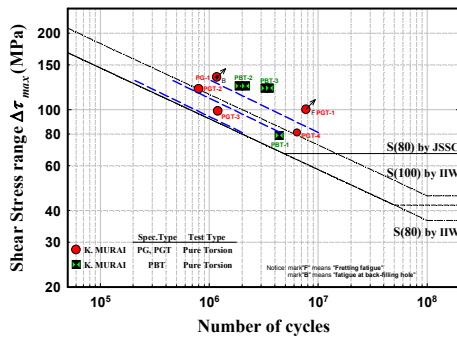


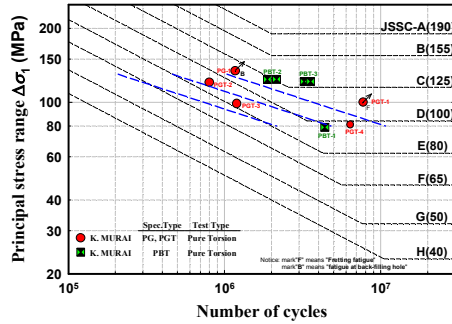
図-12 PBT-3 のき裂進展

験体は、 $\Delta\tau_{max}=120\text{MPa}$ で試験したところ、 $N=80.1$ 万回で面外ガセットのまわし溶接止端より疲労き裂が発生した。き裂は鋼管のシーム部分に沿って鋼管軸方向に進展し、途中でき裂が分岐した後、き裂は角度を持って進展し(図-10)、 $N=81.2$ 万回で試験終了をした。PGT-3試験体では、 $\Delta\tau_{max}=98.8\text{MPa}$ で試験したところ、载荷治具と試験体をボルト接合するために取り付けたフランジ板の溶接部より疲労き裂が発生した。その後シーム沿いに進展し、途中からき裂は分岐して進展した。さらにフランジの溶接止端に沿って進展した疲労き裂も確認された(図-11)。試験は、き裂が大きくなった後、 $N=80.1$ 万回で終了した。PGT-4試験体でも同様に、フランジの溶接部よりき裂が発生し、シーム沿いに進展した。これらのPGT-3, 4試験体においても、面外ガセットの溶接部からの疲労き裂は確認されなかった。

PBT-1試験体は、 $\Delta\tau_{max}=107.1\text{MPa}$ で試験したところ、図-10と同様に、フランジ溶接部からき裂発生し、止端沿いに進展した後、角度を持ちながら鋼管へと進展した。本試験体では、突合せ溶接からのき裂は確認されな



(a) せん断応力に対する S-N 線図



(b) 主応力に対する S-N 線図

図-13 純せん断応力状態の疲労強度

かった。PBT-2 試験体は、 $\Delta\tau_{max} = 124.3\text{MPa}$ で試験したところ、鋼板と鋼管の突合せ溶接部より疲労き裂が発生した。き裂の片側は溶接部を離れて鋼管へ斜めに進展した。もう片側は溶接ビード上を進展した。PBT-3 も同様な疲労き裂の進展であった(図-12)。PBT-2, 3 試験体の結果は、ビードでき裂が確認された段階で整理している。

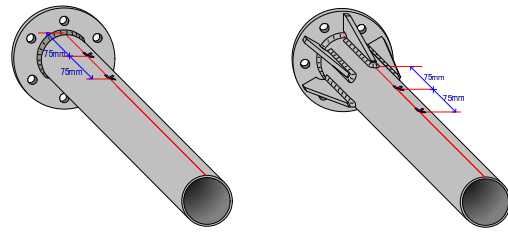
純ねじり疲労試験の結果を図-13 に示す。

図-4.11(a)は、試験結果を最大せん断応力範囲 $\Delta\tau_{max}$ で整理した S-N 線図であり、図中には JSSC と International Institute of Welding(以下、IIW)のせん断応力に対する疲労設計曲線も示してある。図中の矢印は、対象とする疲労き裂が発生しなかった結果を示している。また、印の下の F の記号はフレット疲労が発生したことを、B の記号は、埋め戻し孔から疲労き裂が発生したことを示している。

シームで発生・進展したき裂(PGT-2, 3, 4)とフランジ溶接止端を進展したき裂(PBT-1)に対する試験結果はほぼ同じ位置でばらついており、その下限値は、せん断応力に対する JSSC の疲労強度等級 S(80)とほぼ同じ強度であることが確認される。

図-13(b)は、試験結果を主応力範囲 $\Delta\sigma_1$ で整理した S-N 線図であり、図中には JSSC と IIW の直応力に対する疲労設計曲線も示してあり、その疲労強度等級は、下限値で E(80)である。ルートき裂のビード貫通に対する試験結果は、シーム上のき裂などの試験結果と比べて高い疲労強度を示していた。

(4) 曲げ疲労試験の結果



(a) PBC 試験体 (b) SZA4.5 試験体

図-14 曲げねじり疲労試験体



図-15 曲げねじり疲労試験体

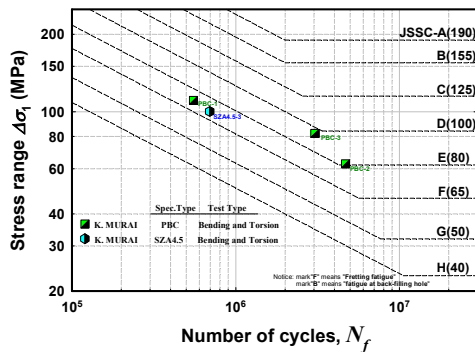


図-16 曲げねじり疲労試験体

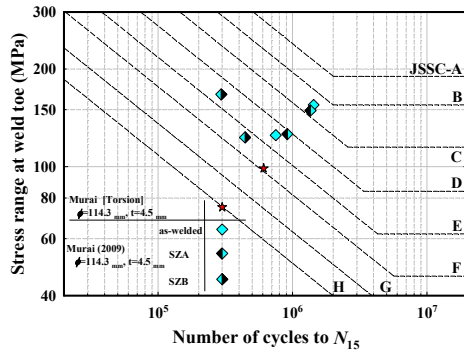
曲げねじり疲労試験に用いた試験体を図-14 に示す。図-14(a)は、直径 260mm、板厚 12mm の鋼板の片側に、直径 $\phi=114.3\text{mm}$ 、管厚 $t=4.5\text{mm}$ の鋼管を突合せすみ肉溶接されており、溶接ルートからき裂を発生させることを目的とした PBC 試験体である。図-14(b)は、直径 $\phi=114.3\text{mm}$ 、管厚 $t=4.5\text{mm}$ の鋼管に、補剛リブ 6 枚をすみ肉溶接して製作した標識柱基部タイプの試験体 SZA4.5 で、まわし溶接止端からき裂を発生させることを目的とした試験体である。曲げねじり試験体の使用鋼材は、鋼管が STK400、鋼板が SS400 である。溶接脚長は 4mm である。

SZA4.5-3 試験体は、直応力 σ に対するせん断応力 τ の比 $\eta=0.74$ 、主応力範囲 $\Delta\sigma_1=103\text{MPa}$ で疲労試験を行った結果、リブのまわし溶接止端よりき裂が発生し、止端に沿って進展した後、母材へ進展した(図-15)。

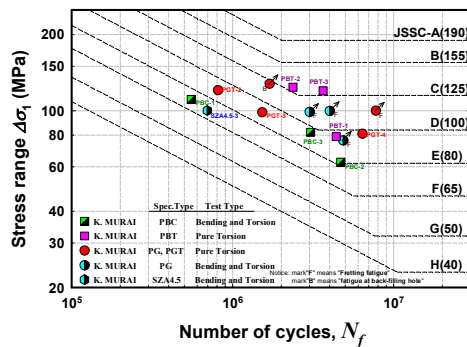
PBC-1 試験体では、 $\eta=0.79$ 、 $\Delta\sigma_1=110\text{MPa}$ で疲労試験を行った結果、鋼管側溶接止端より疲労き裂が発生した(図-16)。その後、鋼管を挟んで 180 度程度回転した位置にもき裂が確認された。両き裂は溶接止端に沿って鋼管周方向に進展した。また、き裂の進展によって鋼管の残りの断面が小さくなり激しい振動と音が発生したため、試験を終了した。PBC-2, 3 試験体では応力範囲を変え、同様な $\eta=0.8\sim 0.9$ 程度で疲労試験を行い、PBC-1 試験体と同様なき裂の発生・進展が確認された。



(a) 曲げねじり疲労試験結果



(b) 曲げねじりと曲げ疲労試験の比較



(c) 曲げねじりと純ねじり疲労試験の比較
図-17 曲げねじり疲労試験結果

曲げねじり疲労試験の結果を図-17(a)に示す。試験結果を溶接止端での主応力範囲 $\Delta\sigma_1$ で整理した S-N 線図であり、JSSC の直応力に対する疲労設計曲線も示している。SZA4.5-3 試験体と PBC 試験体では形状に違いがあるが、直応力 σ_1 に対するせん断応力 τ の比 η が大きくなるほど高い疲労強度を示す結果が得られた。

SZA4.5-3 試験体に対して曲げ疲労試験結果を比較したものを図-17(b)に示している。縦軸は溶接止端での公称応力範囲を示している。曲げ疲労試験結果全体と比較すると、曲げねじり疲労試験の結果は、曲げ疲労試験の結果と比べて 1 等級以上低い疲労強度であった。

SZA4.5-3 試験体に対して純ねじり疲労試験結果と比較したものを図-17(c)に示す。縦軸

は主応力範囲を示している。曲げねじりの試験結果は純ねじりの試験結果よりも、若干低い疲労強度であった。

【参考文献】

- 1) 山田健太郎・小藪江朋堯・小塩達也 (2007)：垂直補剛材と鋼床版デッキプレートすみ肉溶接の曲げ疲労試験，鋼構造論文集，Vol.14，No.55，pp1-8.
- 2) 佐々木裕・小塩達也・山田健太郎・山田聡(2007)：曲げ振動疲労試験機の開発，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.67-68

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 村井啓太，山田健太郎，石川敏之，藤嶋祐太，小塩達也：鋼管のリップ溶接部の疲労強度，鋼構造年次論文報告集，第 17 巻，pp.281-288，2009.

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① 藤嶋祐太，山田健太郎，石川敏之，小塩達也，山田省吾：標識柱リップ溶接止端における疲労強度の検討，平成 20 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，I-3，pp.5-6，2009.
- ② 村井啓太，藤嶋祐太，山田健太郎，石川敏之，小塩達也，山田省吾：板厚が薄い鋼管の補剛リップ溶接部の簡易曲げ疲労試験，土木学会第 64 回年次学術講演会概要集 第 1 部，第 64 巻，I-185，pp.369-370，2009.
- ③ 村井啓太，山田健太郎，石川敏之：ねじり疲労試験機の開発，平成 21 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，I-22，pp.43-44，2010.

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田 健太郎 (YAMADA KENTARO)
財団法人 名古屋産業科学研究所・上席研究員
(前名古屋大学・大学院環境学研究科・教授)
研究者番号：50109310

(2)連携研究者

石川 敏之 (ISHIKAWA TOSHIYUKI)
京都大学・大学院工学研究科・助教
(前名古屋大学・大学院環境学研究科・助教)
研究者番号：00423202
小塩 達也 (OJIO TATSUYA)
名城大学・理工学部環境創造学科・准教授
研究者番号：70303659