

6. ボルト接合部材の疲労損傷モニタリング技術の開発

佐々木哲也\*, 本田 尚\*

6. Development of Fatigue Damage Monitoring Technique for Bolted Joints

by Tetsuya SASAKI\*, Takashi HONDA\*

**Abstract;** To prevent fracture of construction machines such as cranes and concrete boom pump trucks, which are widely used at construction site, is essentially important to assure safety of workers and the neighborhood. Although there are some fracture types, fatigue is a major factor that must be considered to prevent fracture accidents of construction machines. Basically, prevention of fracture due to fatigue used to be attained by employing safe life design or damage tolerance design. In the safe life design, it is set so that the design life may not exceed predicted fatigue life. In the damage tolerance design, nondestructive inspection (NDI) is periodically applied to materials to assure structural integrity during service life. However, these two design concepts are not perfect because predicted fatigue life is inaccurate and all cracks are not always detected by NDI. These fundamental problems of the safe life design and the damage tolerance design are rejected if all fatigue damages which may result in a fatal accident can be monitored at any time using some sort of damage sensors. This idea has being applied to composite materials in which damage sensors can be easily embedded during their fabrication process. In spite of it, quite a few attempts of fatigue damage monitoring have been made for metals, the most widely used materials for any industrial machines and installations, since it is difficult to embed damage sensors in them.

In this study, built-in sensor bolts are used to overcome inherent difficulties of monitoring fatigue damage of is a strain metals. The damage sensor embedded in a bolt is a strain gauge which is not only low cost but also highly sensitive and reliable. Fatigue tests are conducted using two types of specimens; shear type bolted joint specimens and flange type bolted joint specimens, to demonstrate the ability of fatigue damage monitoring with built-in sensor bolts. The shear type bolted joint specimens are used to monitor fatigue damage of base metal. On the other hand, the flange type bolted joint specimens are used to monitor fatigue damage of bolts. Following conclusions are reached from this study:

- (1) Fatigue cracks in body metal of shear type bolted joint specimens can be detected before fracture of a joint using built-in sensor bolts although the change of sensor signal is relatively small.
- (2) Fracture of bolts due to fatigue in the flange type bolted joint specimens can be easily detected using built-in sensor bolts because fracture of one bolt results in the change of axial forces of other unbroken bolts.

**Keywords;** Fatigue, Damage Monitoring, Bolted Joint, Strain Gauge, Damage Tolerance Design, Safe Life Design

---

\* 機械システム安全研究グループ Mechanical and System Safety Research Group

## 1. 緒言

疲労破壊は建設機械においても主要な破壊様式であり、これを防止することは建設現場で働く労働者の安全確保の観点から重要である。従来疲労破壊の防止は、設計寿命を疲労寿命以下にする安全寿命設計か、負荷データと非破壊検査の損傷検出限界値から導き出された適切な保守点検間隔に従って供用中に定期検査を行う損傷許容設計によって行われてきた<sup>1)</sup>。しかし、実際には旋回輪ボルトのように非破壊検査が困難な場所もあるし、非破壊検査における欠陥の見落としの可能性も排除できない<sup>2)</sup>。このため、何らかのセンサーによって構造部材の損傷を常時モニタリングすることによって破壊事故を防止する手法<sup>3)</sup>が考え出され、主として材料の製造過程で材料中にセンサーを埋め込むことが容易な複合材料に対して適用が試みられてきた<sup>4)</sup>。一方、金属材料に対しては材料中へのセンサー埋め込みが困難であるため、材料表面にひずみゲージを貼って疲労損傷をモニタリングする試みが、真壁ら<sup>5)-8)</sup>や著者ら<sup>9)10)</sup>によってなされており、疲労き裂の近傍にひずみゲージを貼ることができれば、疲労損傷のモニタリングが可能であることが示されている。しかし、ひずみゲージを構造部材表面に貼ると、他の物体との接触によってひずみゲージが損傷する恐れがある。また、疲労破壊が予想される箇所を正確に予測することができなければ効果的なモニタリングは期待できない。このため、建設機械等の実構造部材への適用は困難であるのが現状である。

そこで本研究では、構造部材を締結するボルトにひずみゲージを埋め込み、その出力変化によって接合部の母材やボルト自身の疲労損傷をリアルタイム・モニタリングするための基礎技術を開発することを試みる。ひずみゲージをボルト内に埋め込みことにより、他の物体と接触する恐れはなくなるし、ひずみゲージの誤差要因となる湿度の影響も小さくなると考えられる。本研究では、せん断型ボルト継手試験片とフランジ型ボルト継手試験片を用いた疲労試験を行い、前者では継手母材の疲労損傷モニタリング特性を、後者ではボルト自身の疲労損傷モニタリング特性を評価する。

## 2. せん断型ボルト継手の疲労損傷モニタリング

### 2.1 実験方法

Fig.1に本研究で使用したせん断型ボルト継手試験片を示す。この試験片は、母板(6mm厚)を2枚の添接板(3mm厚)で挟んだ2面せん断型継手であり、フ

ァスナには軸力測定用ひずみゲージを内蔵したM8の六角穴付きボルト8本(4列2段)を使用している。

疲労き裂の発生・進展を外部から観察可能な添接板に限定させるために、母板の材料をオーステナイト系ステンレスSUS304、添接板の材料をアルミニウム合金2024-T3とした。2024-T3の機械的性質と化学成分をそれぞれTable 1, Table 2に示す。また、ボルト穴に初期欠陥が存在することによる影響を調べるために、ボルト頭部添接板の荷重端側ボルト穴に切欠きを付与した試験片(切欠き付き試験片)とボルト穴の両側に切欠きを付与しない試験片(切欠きなし試験片)の2種類を疲労試験に供した。

疲労試験は全て応力振幅80MPa、応力比0.1の一定荷重振幅条件下で周波数10Hzの正弦波状繰り返し荷重を負荷して行った。そして、ボルト内のひずみゲージ出力を動ひずみアンプとキーエンス社製データレコーダーNR-2000で計測し、USB(Universal Serial Bus)経由で一定時間ごとにパーソナルコンピュータに保存した。

### 2.2 疲労き裂進展特性

切欠き付き試験片、切欠きなし試験片ともに、荷重

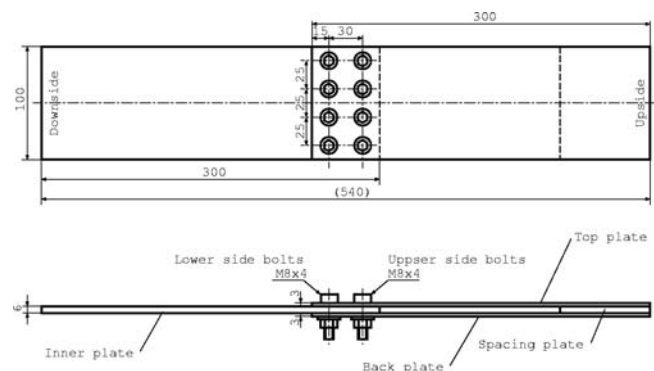


Fig.1 Shear type bolted joint specimen.  
せん断型ボルト継手試験片

Table 1 Mechanical properties of 2024-T3.  
2024-T3の機械的性質

Tensile strength	Yield strength	Elongation
MPa	MPa	%
464	322	20

Table 2 Chemical composition of 2024-T3 (wt. %).  
2024-T3の化学成分(重量%)

Cu	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Ti	Zn	Zr
4.29	1.40	0.49	0.01	0.06	0.18	0.02	0.14	0.01

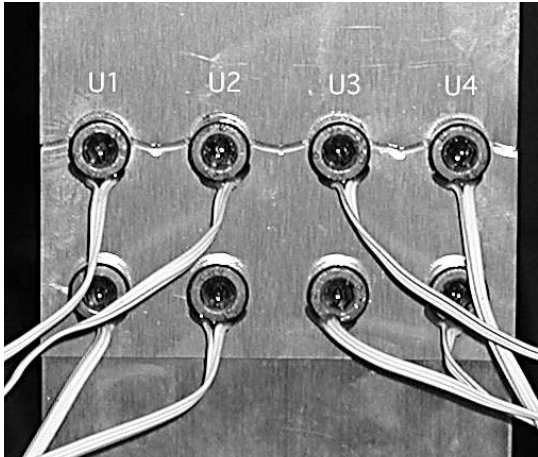


Photo 1 Sample crack growth nature for notched specimens.  
切欠き付き試験片における疲労き裂進展形態の一例

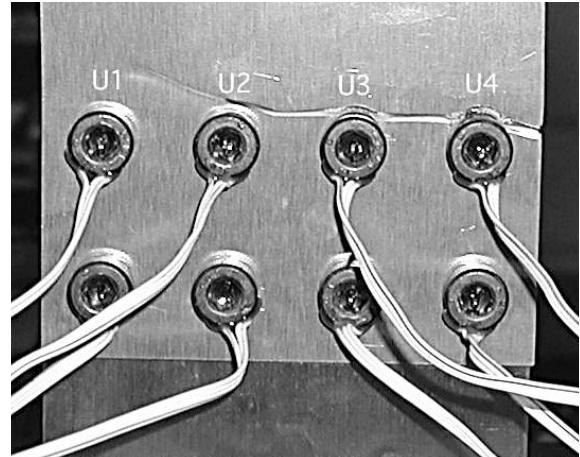


Photo 2 Sample crack growth nature for unnotched specimens.  
切欠きなし試験片における疲労き裂進展形態の一例

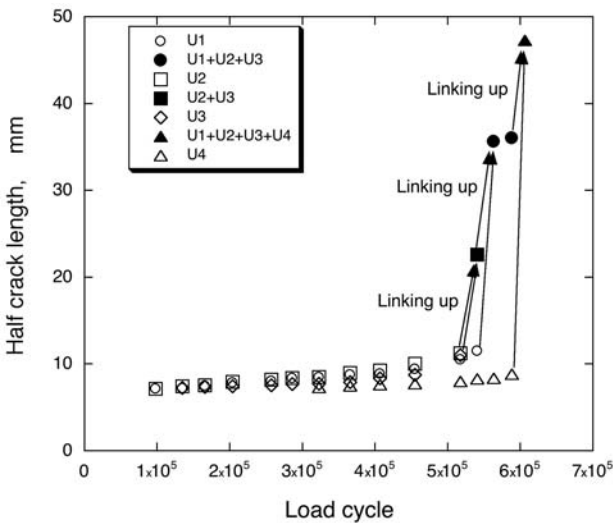


Fig. 2 Sample crack growth curve for notched specimens.  
切欠き付き試験片における疲労き裂進展曲線の一例

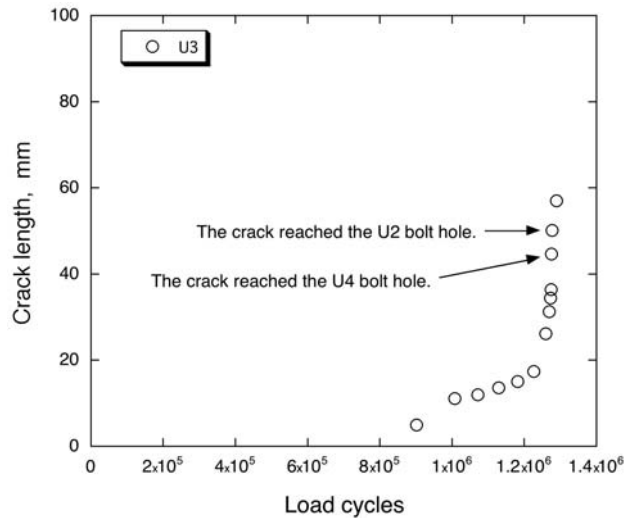


Fig. 3 Sample crack growth curve for unnotched specimens.  
切欠きなし試験片における疲労き裂進展曲線の一例

端側のボルト穴から疲労き裂が発生し、進展したが、き裂の発生場所と進展形態は両者で大きく異なっていた。

Photo 1は切欠き付き試験片における疲労き裂進展形態を示している。切欠き付き試験片の場合は、複数の切り欠き底からほぼ同時に疲労き裂が発生し、隣り合うき裂は合体しながら成長するという、いわゆるマルチサイト損傷状態<sup>11)</sup>となった。そして、疲労寿命は疲労き裂進展寿命に支配された。Fig.2は切欠き付き試験

片における疲労き裂進展曲線の一例である。図中のU1～U4はボルト番号を表している。また、U2+U3はU2とU3のボルト穴から発生したき裂が合体して一つのき裂になったことを表している。切欠き付き試験片では隣り合うボルト穴から発生した疲労き裂が合体しながら成長する様子が見られる。

一方、Photo 2は切欠きなし試験片における疲労き裂進展形態を示している。切欠きなし試験片ではボルト頭部側添接板の荷重端側ボルト穴上部（荷重端側）

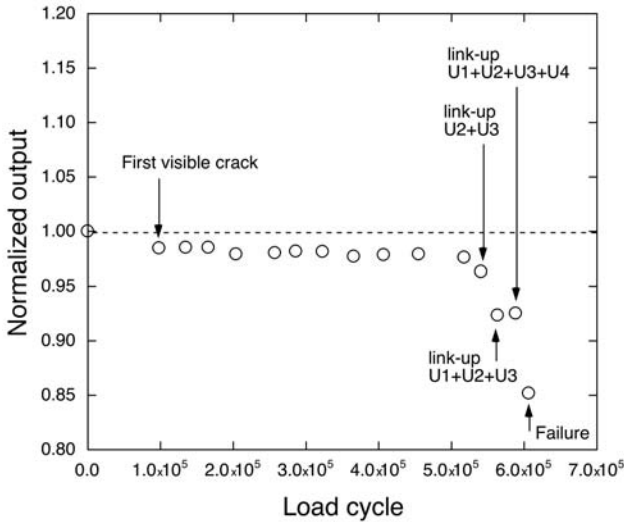


Fig.4 Sample fatigue damage monitoring result for a notched specimen.  
切欠き付き試験片における疲労損傷モニタリング結果の一例

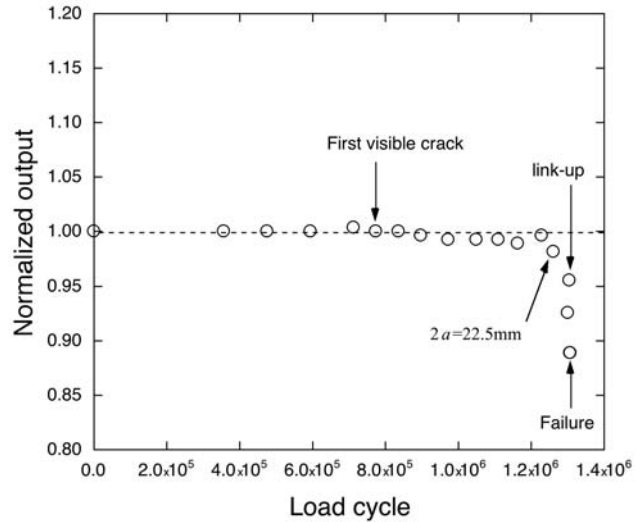


Fig.5 Sample fatigue damage monitoring result for an unnotched specimen.  
切欠きなし試験片における疲労損傷モニタリング結果の一例

のうちの一箇所から疲労き裂が発生し、それが成長して破断に至る場合が多く、き裂の合体も切欠き付き試験片と比べると少なかった。その結果、マルチサイト損傷状態となることは少なかった。また、疲労寿命は疲労き裂発生寿命が支配的であった。Fig.3は切欠きなし試験片における疲労き裂進展曲線の一例である。U3のボルト穴から発生した疲労き裂が卓越して進展し、試験片が破断に至っていることがわかる。

このように、せん断型ボルト継手母材の疲労き裂進展挙動はボルト穴の初期欠陥の有無によって大きな影響を受けることが明らかになったが、詳細については別報<sup>12)</sup>に譲る。

### 2.3 疲労損傷モニタリングの結果

Fig.4はFig.2の切欠きなし試験片における疲労損傷をボルトU2でモニタリングした結果であり、縦軸はボルトU2内のひずみゲージ出力(1荷重サイクルの平均値)を実験開始時の値で基準化したものである。U2ボルト穴に疲労き裂が観察され始めた頃からひずみゲージ出力が減少し始め、き裂が合体すると出力が大きく減少することがわかる。

一方、Fig.5はFig.3の切欠きなし試験片における疲労損傷を同様にボルトU2でモニタリングした結果である。ボルト穴上部に初めて疲労き裂が観察された頃からひずみゲージ出力が減少し始め、両側き裂長さ $2a$ が22.5mmとなる頃から出力の減少が急激になっていることがわかる。

実際のせん断型ボルト接合継手に本手法を適用する場合には、負荷荷重が不規則に変動する上にノイズ等の影響も考慮する必要がある。この場合、き裂が数センチ以下の場合にはひずみゲージ出力の変化が小さいため、精度良く疲労き裂を検出することは困難であると考えられる。しかし、疲労き裂が複数のボルト穴にまたがる程度まで成長するとひずみゲージ出力は大きく変化するため、本研究の手法で常時モニタリングを行うことによって、少なくとも破断直前には疲労き裂を検知できると考えられる。

## 3. フランジ型ボルト継手の疲労損傷モニタリング

### 3.1 実験方法

本研究で使用したフランジ型ボルト継手試験片はFig.6に示すように、2個のフランジを最大8本のM8ボルトで締結できるようにしたものである。このフランジ型ボルト継手試験片を適当な本数の軸力測定用ひずみゲージを内蔵した六角穴付きボルトと通常の六角穴付きボルトで締結し、正弦波状繰り返し荷重による定荷重振幅疲労試験を行った。そして、ボルト内のひずみゲージ出力を共和電業製センサーインターフェースPCD-300Aで計測し、USB経由で一定時間ごとにパーソナルコンピュータに保存した。フランジ型ボルト継手試験片を用いて疲労試験を行っている様子をPhoto 3に示す。

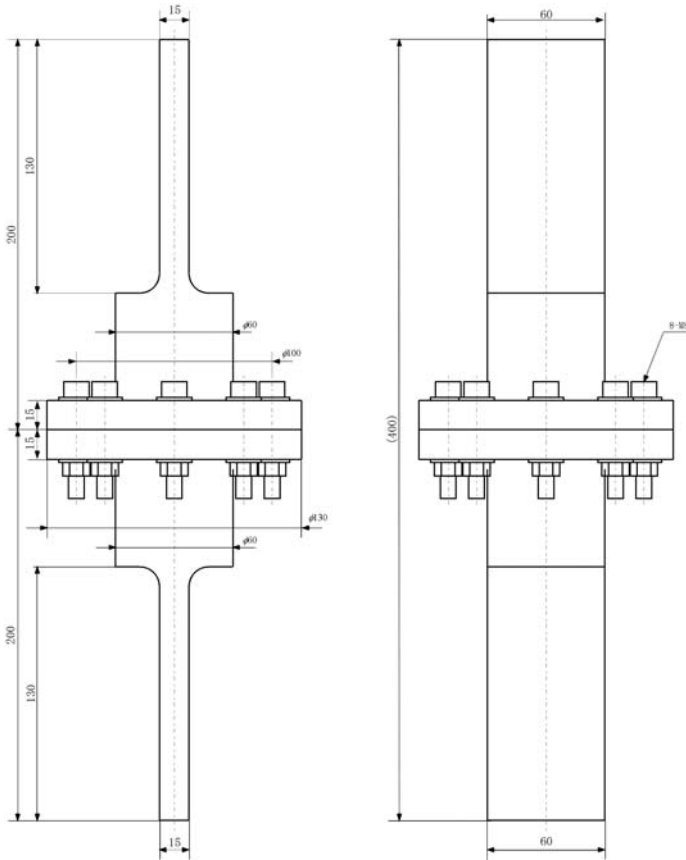


Fig.6 Flange type bolted joint specimen.

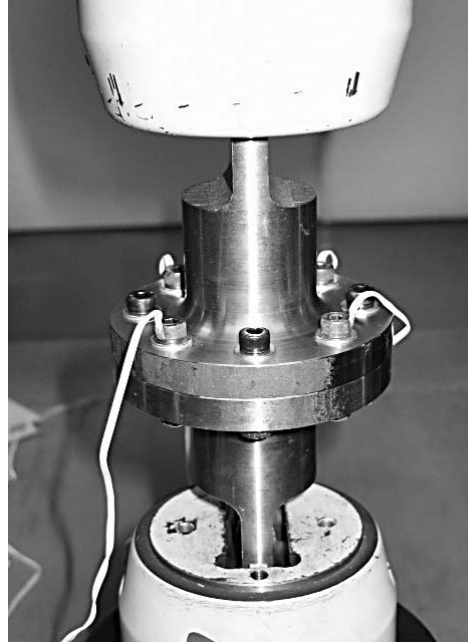


Photo3 Flange type bolted specimen in fatigue testing.  
疲労試験中のフランジ型ボルト接合継手試験片

### 3.2 疲労損傷モニタリングの結果

#### 3.2.1 ボルト2本で締結した場合

まず、ひずみゲージ内蔵ボルト2本で締結したフランジ型継手試験片で疲労試験を行った。この場合のボルト配置はFig.7に示す通りであり、ボルト1本あたり平均で6.37kNの荷重振幅が負荷されるようにした。なお、応力比、荷重周波数はそれぞれ0.1、10Hzである。

Fig.8は疲労損傷モニタリング結果の一例であり、縦軸は各ボルトのひずみゲージ出力(1荷重サイクルの平均値)を実験開始の値で基準化したものである。図中にも示されているように、この場合はボルト1が破断したが、ボルト1、ボルト2ともにひずみゲージ出力は破断までほとんど変化しなかった。これは、ボルトの破断位置が埋め込んだひずみゲージの下部であったことと、ひずみデータの計測間隔が長すぎたことによるものと考えられる。しかし、ボルト1の破断と同時にボルト1のひずみゲージ出力はほぼ0になり、破断しなかったボルト2の出力は2.8倍程度になっている。ボルト1の出力が0になったのは、ボルト1の破断によってボルト1の軸力が0になったためであり、ボルト2の出力が約2.8倍に増加したのは、ボルト1の破断によってボルト2の軸力

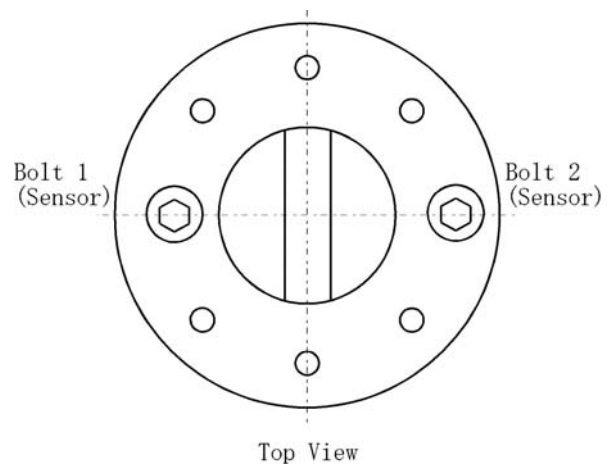


Fig.7 Bolt arrangement for a flange type specimen clamped by two sensor bolts.

センサーボルト2本で締結したフランジ型試験片におけるボルトの配置

が増加したためである。

本実験では破断前のボルトの疲労き裂を外部から観測することはできないため、荷重繰り返し数と疲労き裂の大きさとの関係は明らかではないが、フランジ

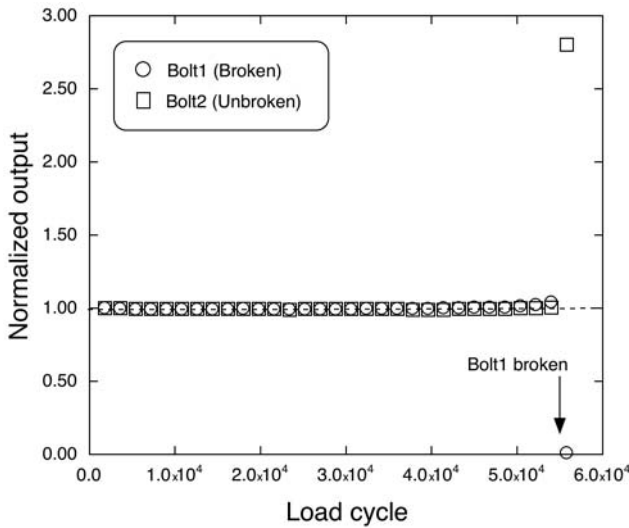


Fig. 8 Sample fatigue damage monitoring result for a flange type specimen clamped by two sensor bolts.  
 センサーボルト2本で締結したフランジ型試験片における疲労損傷モニタリング結果の一例

型ボルト継手でボルトが疲労破壊する場合には、せん断型ボルト継手で母材が疲労破壊する場合と比較して、ひずみゲージ出力が大きく変化するため、疲労破壊の検出は容易であることがわかる。また、ボルトが1本破断すると、他の破断していないボルトの負荷荷重がそれに応じて変化するため、必ずしも全てのボルトにひずみゲージを入れなくてもボルトの疲労破壊を検知できる可能性があることもわかる。

3.2.2 ボルト8本で締結した場合

そこで、次にFig.9に示すように4本のひずみゲージ内蔵ボルトと4本の通常ボルトで締結したフランジ型継手試験片で疲労試験を行った。負荷繰り返し荷重は、ボルト1本あたりの荷重振幅が平均で2.94kNとなるようにした。また、応力比、荷重周波数はそれぞれ0.1、10Hzである。

Fig.10は疲労損傷モニタリング結果の一例であり、先の例と同様に縦軸は各ボルトのひずみゲージ出力(1荷重サイクルの平均値)を実験開始の値で基準化している。この例では、ひずみゲージを内蔵したボルト2、ボルト3の他に2本の通常ボルト(ボルト6、7)が破断したが、ボルト1~4の出力変化から通常ボルトの破断はセンサーボルトよりも先であり、それぞれ $2.5 \times 10^6$ サイクル、 $2.8 \times 10^6$ サイクル頃に発生したことがわかる。次に

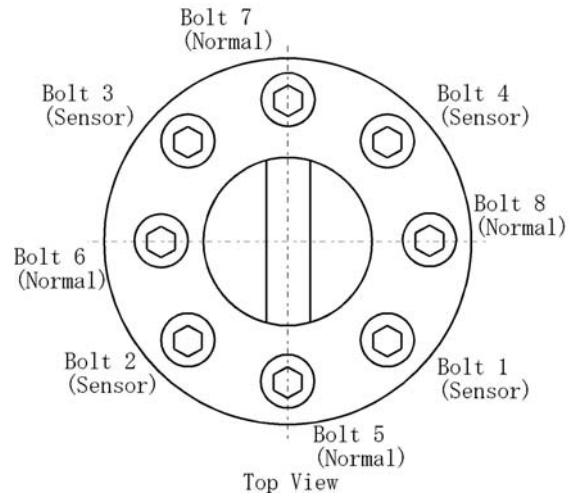


Fig.9 Bolt arrangement for a flange type specimen clamped by four normal bolts and four sensor bolts.  
 通常ボルト4本、センサーボルト4本で締結したフランジ型試験片におけるボルトの配置

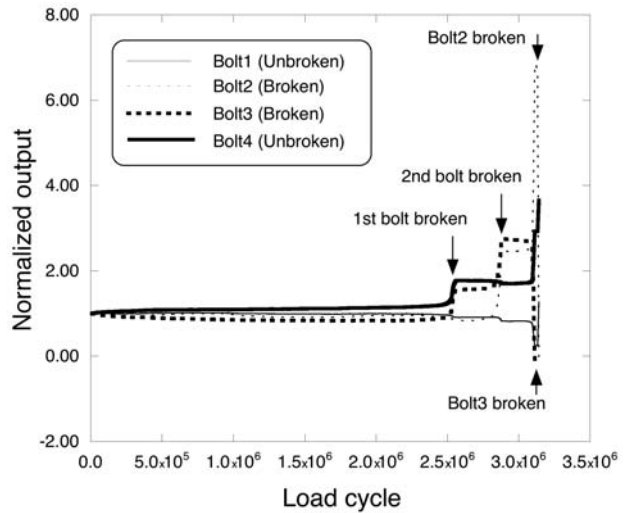


Fig.10 Sample fatigue damage monitoring result for a flange type specimen clamped by four normal bolts and four sensor bolts.  
 通常ボルト4本、センサーボルト4本で締結したフランジ型試験片における疲労損傷モニタリング結果の一例

ボルト3の出力が0になった $3.1 \times 10^6$ サイクル頃にボルト3が破断して、その直後にボルト2が破断したことがわかる。

#### 4. 結 論

構造部材締結用ボルトに埋め込んだひずみゲージによって、締結部の母材やボルト自身の疲労損傷をモニタリングすることを試み、以下の結論を得た。

(1) せん断型ボルト継手の母材に疲労き裂が発生する場合は、ひずみゲージ出力の変化が小さいため数センチ以下のき裂を精度よく検出することは困難である。しかし、き裂が数センチ以上になるとひずみゲージ出力は急激に変化するため、本手法によって破断を回避することは可能であると考えられる。

(2) フランジ型ボルト継手のボルト自身が疲労破壊する場合は、破断によってそのボルトのひずみゲージ出力が0になるため、容易に破断を検出可能である。また、1本のボルトが破断すると他の破断していないボルトの負荷荷重が変化するため、必ずしも全てのボルト内にひずみゲージを内蔵しなくてもボルトの破断を検出可能であり、ボルトの破断によるフランジの分離を回避することは可能であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 例えば、市川昌弘, 構造信頼性工学, pp.97~111, 海文堂 (1988).
- 2) 荒川敬弘, 非破壊試験の欠陥検出能力調査の動き, 溶接学会誌, **55-4**, pp.213~220 (1986).
- 3) 例えば、小林英男, 破壊事故は何故起こるか (2), 高圧ガス, **27-6**, pp.423~431 (1990).
- 4) 例えば、江川幸一, 超先進構造・材料としての知的材料 (1), 機械の研究, **44-7**, pp.793~799 (1992).
- 5) 真壁朝敏, 兼城英夫, き裂開閉口挙動に基づく疲労き裂発生検出法について, 日本機械学会論文集, A編, **56-531**, pp.2223~2228 (1990).
- 6) 真壁朝敏, 糸数真哉, 大場克巳, 兼城英夫, ひずみ情報による非貫通穴材の疲労き裂進展挙動の検知, 日本機械学会論文集, A編, **58-546**, pp.186~191 (1992).
- 7) 真壁朝敏, 西田新一, 兼城英夫, 玉城史郎, ひずみ波形解析による疲労き裂発生検出法, 日本機械学会論文集, A編, **58-551**, pp.1191~1198 (1992).
- 8) Makabe, C., Kaneshiro, H., Itokazu, M. and Ohba, K., An Inspection of Fatigue Crack Extension Based on Strain Information, Engineering Fracture Mechanics, **45-5**, pp.655~662 (1993).
- 9) 佐々木哲也, 酒井信介, ひずみゲージによる疲労き裂モニタリングの基礎研究, 日本機械学会材料と構造物の強度と破壊シンポジウム講演論文集, No.940-34, pp.30 (1994).

10) 佐々木哲也, ひずみゲージを用いた疲労き裂モニタリングの基礎研究, 産業安全研究所研究報告, NIIS-RR-94, pp.21~26 (1995).

11) 例えば, Dawicke, D.S. and Newman, J.C., Jr., Analysis and prediction of multiple-site damage (MSD) fatigue crack growth, NASA-TP-3231, pp. 1~15 (1992).

12) Sasaki, T. and Honda, T., An Experimental Study on Fatigue Crack Growth in Lap Joints with Multiple Fastener Holes, Proceedings of 7th Int. Conference on Damage and Fracture Mechanics, pp.225~234 (2002).

(平成16年8月30日 受理)

