

FRP 部材ボルト接合部の局部振動加振法による損傷検出法の検討

Investigate on damage detection of bolt joint in Fiber Reinforced Plastic member by using local vibration excitation

三上修一*、追着昂志**、大島俊之*、宮森保紀***、山崎智之****

Shuichi Mikami, Takashi Oitsuki, Toshiyuki Oshima, Yasunori miyamori, Tomoyuki Yamazaki

*北見工業大学教授、社会環境工学科(〒090-8507 北見市公園町 165)

**北見工業大学大学院博士前期課程、土木開発工学専攻(〒090-8507 北見市公園町 165)

***北見工業大学准教授、社会環境工学科(〒090-8507 北見市公園町 165)

****北見工業大学助教授、社会環境工学科(〒090-8507 北見市公園町 165)

In this paper, the damage generated in cases where it carries out bolt joint of the Fiber Reinforced Plastic (FRP) members is modeled, and how to detect damage is examined. In the experiment, the vibrating experiment using the local vibration system which used the multilayer piezoelectric actuator was conducted. The position and frequency of an actuator examined the detection accuracy of damage location. Moreover, the bolt junction part by the finite element method was modeled, and the oscillation characteristic was examined.

Key Words: local vibration system, bolt joint, damage detection

キーワード：局部振動加振システム、ボルト接合、損傷検出

1. はじめに

FRP (Fiber Reinforced Plastic) は耐食性に優れ、軽量でかつ比強度が高いなどの利点を有することから、多方面で適用されている複合材料である。FRP はその特色から土木構造物分野においては維持管理の容易な橋梁を実現できる材料として期待されており、特に橋梁の主部材あるいは補強材として FRP を使用した場合には、従来の橋梁に比べ軽量となることは架設を容易にするだけでなく、地盤が悪条件の場合にも適応できるとともに、地震の多い我が国においては、構造物に対する被害の軽減にも効果的である¹⁾。

FRP 材料が有する塑性領域を持たない複雑な破壊形式から、破壊の予兆を把握することは難しく、軽微な損傷を検出できる損傷検出法の確立が必要とされている。

しかし、現在までに国内で FRP 橋の架設事例は数橋にとどまっているのが現状である。このためにモニタリング技術の開発や FRP 部材のインテリジェント化の研究が行われている¹⁾。山田ら²⁾は、FGB 光ファイバセンサを用いた FRP 部材のモニタリング手法について研究している。また、圧電センサを用いた SMART Layer(Stanford

Multi-Actuator-Receiver Transduction)のような FRP 部材に埋め込み、インテリジェント化する技術も提案されている¹⁾。

FRP 材料の損傷による動的応答の変化、つまり振動特性の変化を把握すると共に、損傷個所の把握を目的とし、本研究では、小型で局部的に加振が可能な積層圧電アクチュエータを用いた局部振動加振システムと周波数解析による損傷検出を提案する。コンクリートや鋼材に比べ FRP は軽量であり、材料を振動させるために大きな加振力を必要としないことから、圧電効果によって生ずる微小変形により加振を行う軽量の積層圧電アクチュエータを用いた局部振動加振は、FRP 材料の損傷検出に対して有効であると考えられる。FRP 部材のボルト接合部をモデル化した供試体に対して積層圧電アクチュエータを用いた局部振動加振システムを用いてボルト接合部の損傷を検出する手法について検討を行った。

2. FRP 供試体

本研究で使用した H 型 GFRP 引抜成形品 (旭硝子マテックス (株) 製) の概要を図-1 に示す。供試体は両端を

4本のボルトでL型の支持板に固定されており、さらに支持板は壁面に4本のボルトで固定されている。供試体の材料特性は表-1の通りである。本研究では、FRPを橋梁の構造部材として使用する際用いられるボルト接合に注目し、損傷状態が定量的に与えられること、繰り返し再現性が保てることを考え、損傷モデルとしてジョイント部のボルトの締め付け具合を取り上げ、ボルト弛緩による疑似的な損傷を扱うこととする。

3. 加振位置の検討

3. 1 実験概要

本研究では、積層圧電アクチュエータを用いた局部振動加振実験により、ボルト弛緩による振動特性の変化から弛緩位置を推定することを目的としている。そこで、加振点の違いによる供試体の振動特性を把握するとともに、ボルト弛緩による振動特性の変化を把握しやすいアクチュエータの設置位置を検討するため、図-1に示す、A、B、Cの位置で加振実験を行った。

実験で使用する積層圧電アクチュエータは、圧電効果縦効果を利用して電気エネルギーを変位や力などの機械的エネルギーに変換するセラミック素子である。本研究で使ったアクチュエータは樹脂外装型であり、外形寸法が $10 \times 10 \times 20(\text{mm})$ 、動作周波数 $0 \sim 979.8\text{Hz}$ 、発生力 3500N 、共振周波数 69kHz である。アクチュエータは、供試体の加振点に直接接着剤で設置を行った。

また本実験では応答加速度を計測する際に、プリアンプ内蔵圧電加速度検出器（NP-3130 小野測器）を使用した。この加速度計はダイナミックレンジが広く微小加速度からの測定が可能で、広帯域の周波数成分を含む波形もひずみなく測定することができる。加速度計は図-1に示すように上フランジに4個、下フランジに4個、計8個設置した。

加振方法については、一定時間内に直線的に周波数が増加するSWEEP加振法を使用し、加振時間 $18(\text{sec})$ 、加振周波数 $1 \sim 700(\text{Hz})$ 、サンプリング周波数 $7000(\text{Hz})$ とした。

3. 2 実験結果

取得した応答波形のパワースペクトル密度（PSD：Power Spectrum Density）を表し、さらに各チャンネル、各加振位置ごとのPSDの最大値で基準化したものである。縦軸は基準化したPSD、横軸は周波数である。横軸は $300 \sim 750(\text{Hz})$ に絞って表示している。これは、その前後には主だった周波数のピークが現れなかったためである。ここでは供試体の形状、センサ配置の対称性からCh1、Ch2、Ch3、Ch4について周波数特性の比較を行う。

図-2(a)、(b)は上フランジが、(c)、(d)は下フランジが揺れることにより発生するピークを表している。図-2(a)、(b)は上フランジの対称な位置関係にあるため、現れる周波数のピークはほぼ同じである。しかし、下フランジの揺れを表す図-2(c)と(d)を比較した場合、 570Hz と 635Hz

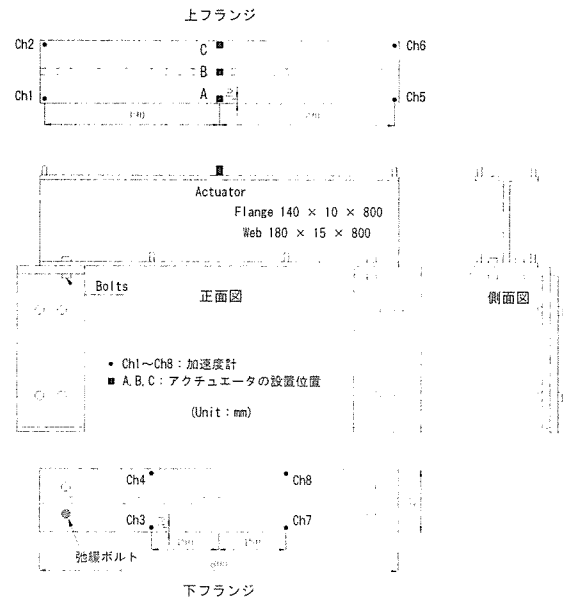


図-1 実験供試体図

表-1 FRP 供試体の材料特性

物性値[単位]	x、y 方向	z 方向
ヤング係数 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	18700	35000*
ポアソン比	0.221	
せん断弾性係数 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	7658**	14333**
密度 $[\text{kg}/\text{mm}^3]$	1.94×10^{-6}	

*参考文献 3) 参照。

**ヤング係数とポアソン比より算出。

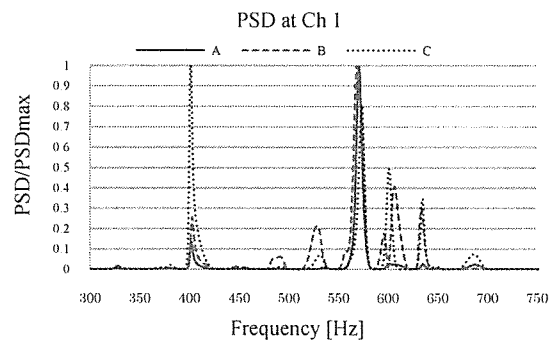


図-2(a)

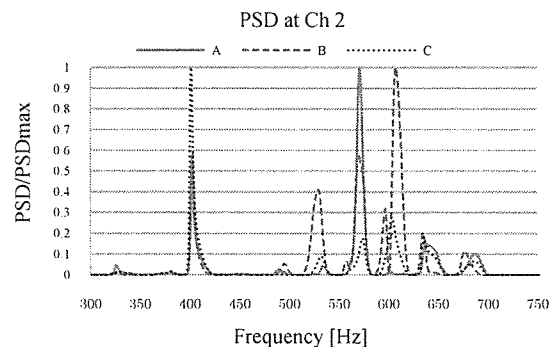


図-2(b)

のピークが現れている。これは、供試体を固定している支持板が L 字型であり、単純な両端固定でないため、Ch3 と Ch4 の周波数に違いが生じたものと考えられる。

図-2(a)～(d)について加振点の位置で比較した場合には、加振位置 A では、(a)～(c)で共通して 570Hz 付近の周波数のピークが確認できた。さらに全体で見た場合には、全ての加振点で Ch1 と Ch3 で 570Hz 付近のピークが集中しており、この周波数は上下のフランジを励振しやすい周波数であると考えられる。加振位置 B では、それぞれのチャンネルで複数の周波数のピークが存在し、A 点のような特徴的な周波数は見られなかった。加振位置 C では、下フランジの Ch3、Ch4 は、他の加振点と同じ位置にピークが現れているが、Ch1 と Ch2 では他の加振点では見られない 400Hz 付近のピークが特徴的である。以上加振位置による比較検討を行ってきた中で、供試体を励振させやすい特徴的な振動数について、次章では数値解析によりそのモードについて検討を行う。次に加振位置によるスペクトルのピーク値を比較する。図-3 は加振位置によるスペクトルの最大値を比較したものであり、縦軸が PSD の最大値、横軸が加速度計番号 (Ch1～Ch8) となっている。この図から加振位置 A が他の加振位置よりも大きな値を示していることが分かる。これは供試体が単純な両端固定ではないため、加振点の位置によりパワースペクトルの最大値に偏りが生じたためと考えられる。本研究では、PSD の最大値が大きくでる加振位置が、よりボルト弛緩による影響を測定する上で有利であると考え、A 点を加振位置として損傷を有する場合の実験を行う。

4. モード解析

4. 1 解析モデル概要

両端を支持板と共にボルトで固定されている図-1 に示す実験供試体を取り扱うものとする。モデルの構築には汎用構造解析プログラム MARC の支援システムである MENTAT を使用した。要素タイプは 8 節点立体要素を使用し、節点数 9663 個、要素数 6136 個となっている。解析に使用した材料定数は表-1 の通りである。境界条件として、両端固定を再現するため、支持板との接触面の x、y、z とそれぞれの回転方向、計 6 方向を完全拘束とした。

固有値解析にはフーボルト法を使用した。解析を行うために使用したモデル図を図-4 に示す。この解析モデルの最低次の固有モードは、I 断面の上フランジが揺れる首振りのモードである。前章で把握した実験供試体を持つ振動に影響がある周波数の中で、ここでは 635Hz 付近のモードを図-5 に示す。図-5(a)は 631Hz、(b)は 635.7Hz、(c)は 635.8Hz のモード図である。

供試体の 635Hz 付近の振動系としては(a)や(c)のように上下のフランジどちらかだけが振動する固有モードと、(b)のように全体が振動する 3 つの固有モードに大別することができる。高次の固有モードには固有値が近接した

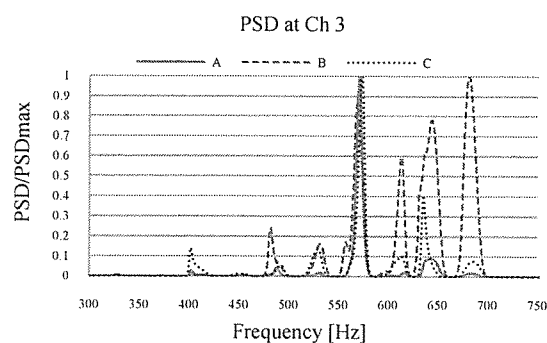


図-2(c)

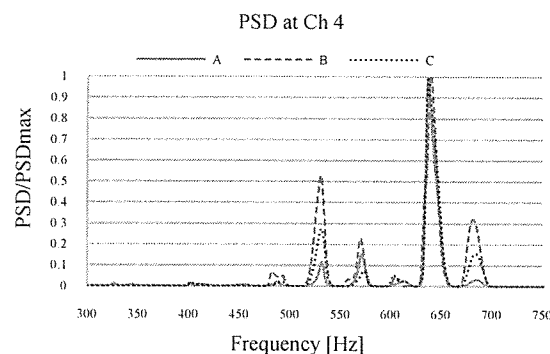


図-2(d)

図-2 加振位置によるスペクトルの比較

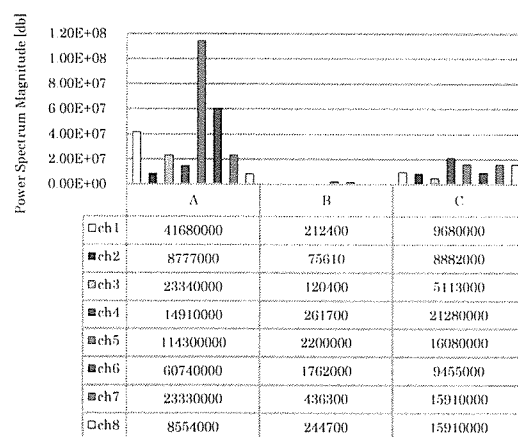


図-3 加振位置によるスペクトルの最大値の比較

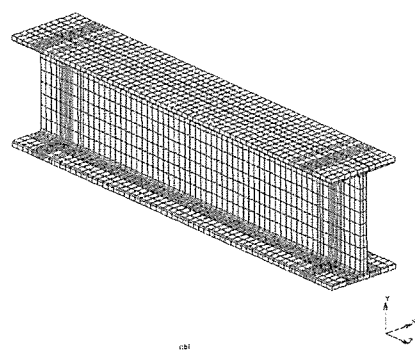
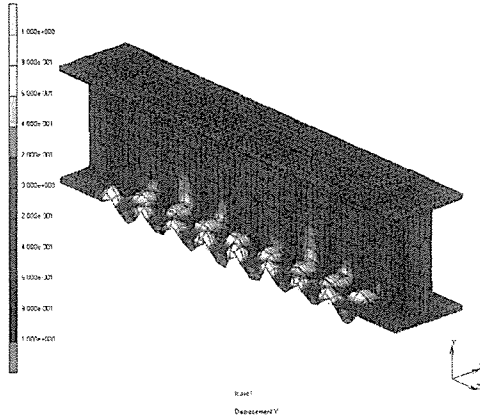
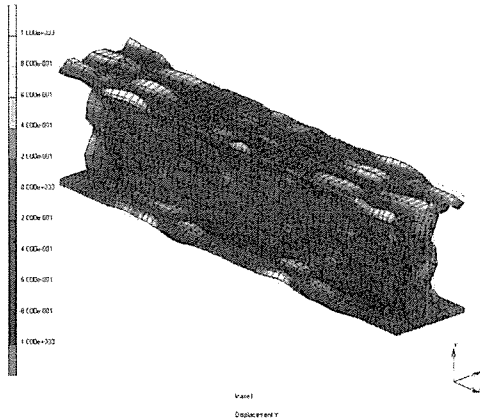


図-4 解析モデル

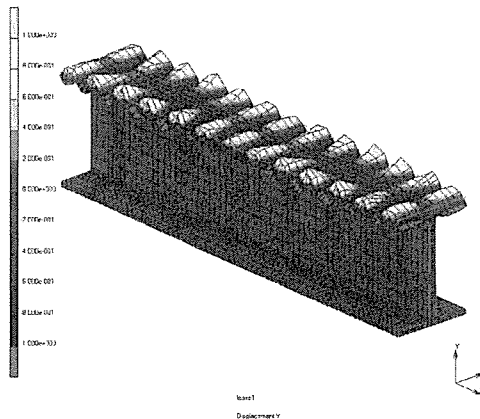
ところにこれらの固有モードが存在しているため、どのモードが実際の振動に最も大きく影響しているかはさらに検討する必要がある。



(a) 631.0Hz



(b) 635.7Hz



(c) 635.8Hz

図-5 モード図

5. ボルト接合部の損傷検出

5. 1 損傷検出解析⁵⁾

関数 $G_i(f)$ は周波数 f におけるチャンネル数 i で測定された加速度応答波形をスペクトル解析した時のパワースペクトルの大きさを示す。そして、健全状態と損傷状態のパワースペクトルの差(絶対値)で損傷による変化の大きさを定義する(式(1))。

$$D_i(f) = |G_i(f) - G_i^*(f)| \quad (1)$$

$G_i(f)$ は健全状態、 $G_i^*(f)$ は損傷状態におけるパワースペクトルの大きさを表す。パワースペクトルがそれぞれの測定位置で f_1 から f_m までの周波数で計算されるとき、損傷による変化を表わすマトリクス $[D]$ は式(2)のように定式化することができる。

$$D = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_1(f_2) & \cdots & D_1(f_m) \\ D_2(f_1) & D_2(f_2) & \cdots & D_2(f_m) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \cdots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

n は測定点の数(チャンネル数)、 m はスペクトル解析における周波数間隔のデータ番号を表わす。マトリクス $[D]$ における列の要素は同じ周波数における異なった測定チャンネルのパワースペクトルを表わす。

マトリクス $[D]$ の合計から計算される

$Total_Change(TC)$ (式(3))は損傷の有無や大きさを表す指標となり、この式から損傷を数値化することができる。

$$Total_Change(TC) = \begin{bmatrix} \sum_f D_1(f) \\ \sum_f D_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f D_n(f) \end{bmatrix} \quad (3)$$

しかし、パワースペクトルの合計は局部的損傷としては小さい値であるため、損傷位置を決定するために統計的意思決定手順を使用した。この手順は、それぞれの周波数で最大のパワースペクトル(マトリクス $[D]$ の各々の列の最大値)を選択して、他のチャンネルのパワースペクトルを全て0とする。例えば、マトリクス $[D]$ では $D_3(f_1)$ が最初の列の最大値であるならば、 $M_3(f_1) = D_3(f_1)$ とし、この列の他の要素は0とする。同様に、マトリクス $[D]$ の他の列に適用し、各々の周波数における最大パワースペクトルを選択してマトリクス $[M]$ を式(4)により定義する。

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_2(f_2) & 0 & \cdots & 0 \\ M_3(f_1) & 0 & 0 & \cdots & M_3(f_m) \\ 0 & 0 & M_4(f_3) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

次に、各加速度計に何度パワースペクトルの最大値があるか検出するためにマトリクス[C]を式(5)のように定義する。マトリクス[C]はマトリクス[M]において最大値がある位置に対応して1の値を置き換えたものである。

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

局部的損傷は、式(6)より計算される各チャンネルの最大変化の合計である{SM}と式(7)より計算されるパワースペクトルの最大変化の総数(マトリクス[C]の行の合計){SC}のスカラ積として定義される(式(8))。

$$SM = \begin{Bmatrix} \sum_f M_1(f) \\ \sum_f M_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f M_n(f) \end{Bmatrix} \quad (6) \quad SC = \begin{Bmatrix} \sum_f C_1(f) \\ \sum_f C_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f C_n(f) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$Damage_Indicator(DI) = \begin{Bmatrix} SM(1) \times SC(1) \\ SM(2) \times SC(2) \\ \vdots \\ SM(n) \times SC(n) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

5. 2 実験概要

加振周波数によって、弛緩ボルト位置をより明確に把握できるものがあるか検討するために、表-2に示す加振方法及び周波数で実験を行った。加振周波数(I)は卓越周波数が存在する周波数帯の振動数、加振周波数(II)は卓越周波数が表れない周波数帯の振動数である。加振時間はSIN波は8秒、SWEEP波は18秒、サンプリング周波数は共に7000Hzとなっている。アクチュエータの設置位置については前節の結果から加振位置Aとし、センサ配置は図-1と同じとした。損傷ケースは、全てのボルトを90(Nm)のトルクで締め付けた状態を健全状態、図-2

表-2 加振方法及び加振周波数

加振方法	加振周波数(I)[Hz]	加振周波数(II)[Hz]
SIN 波	410,574,630	50,100,150,200,250,300,350
SWEEP 波	1~700	

の網掛けで表示されたボルトを0(Nm)のトルクで締め付けた状態を損傷状態と設定する。

5. 3 解析結果

式(3)及び式(8)式から各加振周波数でのTC、DIを算出した。解析結果の一例として、50Hz、630HzのSIN波とSWEEP加振によるTCの結果を図-6に、DIを図-7に示す。図-6の縦軸は健全状態と損傷状態のPSDの差を積算したものであり、横軸は加速度計番号となっている。図-7の縦軸は損傷指数(DI)、横軸は加速度計番号となっている。

TCについては、弛緩ボルト近傍のCh3が全てのケースにおいて一番大きく現われているが、加振周波数(I)と(II)で比較した場合には、(I)の条件では図-6(a)のようにCh3以外で大きく表れるチャンネルは見られないが、(II)の場合には、図-6(b)のようにCh3以外にもある程度の大きさで反応するチャンネルが出てきている。これは卓越周波数が持つ固有モードが影響しているためであると考えられる。SWEEP加振では、加振周波数(I)と(II)の双方の影響が出た結果、弛緩ボルト付近のCh3が一番大きく出る以外にCh7、Ch8が反応したのだと考えられる。

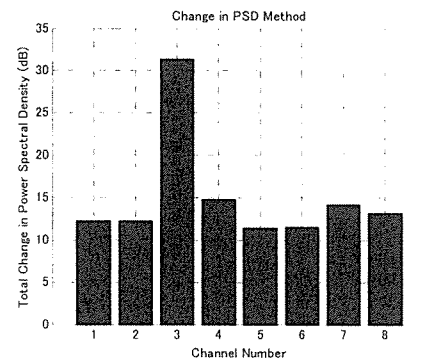


図-6(a) 50HzのSIN波

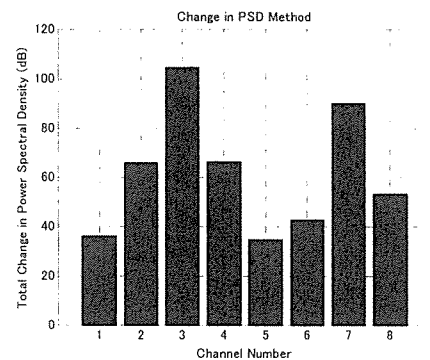


図-6(b) 630HzのSIN波

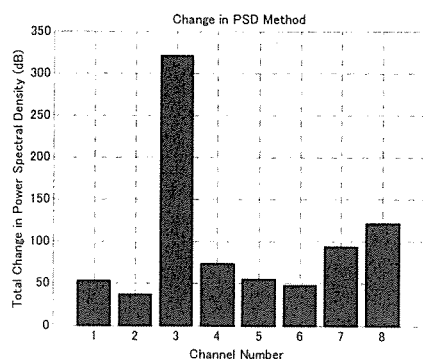


図-6(c) 1~700Hz の SWEEP 波

図-6 TC の比較

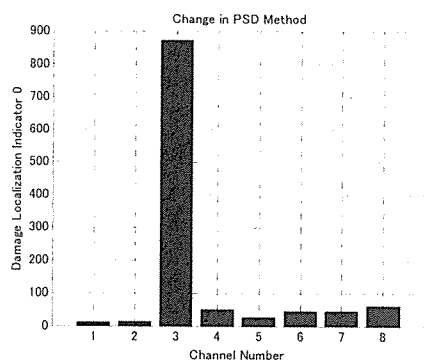


図-7(a) 50Hz の SIN 波

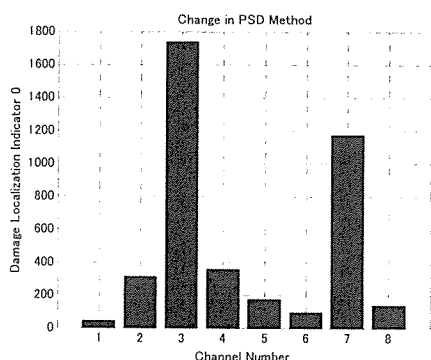


図-7(b) 630Hz の SIN 波

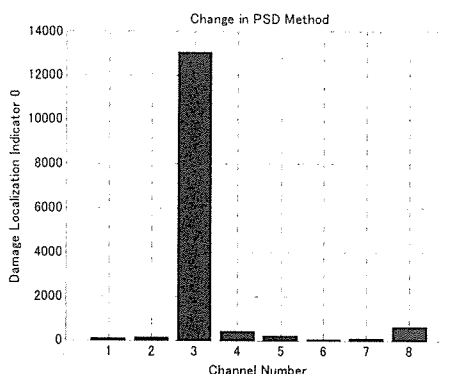


図-7(c) 1~700Hz の SWEEP 波

図-7 DI の比較

DIについては、TCに重みが付加されたことにより、損傷付近のCh3がTCに比べて、より明確に現れるようになっている。しかし、加振周波数(II)で加振した場合には、図-7(b)のようにCh3以外のチャンネルがある程度大きく出る結果となり、これはTCと同じく加振周波数の特定のモードの影響を受けているためであると考えられる。

6. 結論

本研究では、FRP材料の損傷を検出する基礎研究として、本研究が提案する加振システムと周波数解析を用いて、加振位置及び加振周波数の違いによる振動特性の検討、さらに損傷位置の把握を試みた。その結果以下のような結論が得られた。

(1)加振位置の違いによる振動特性を検討した結果、上フランジ、下フランジが振動しやすい特徴的な周波数を確認することができ、加振位置によってその周波数に変化があることが分かった。

(2)TC及びDIによる損傷検出解析から、損傷箇所を把握することができた。しかし、卓越周波数が有する固有モードの影響により、得られる結果が異なることが同時に分かった。

今後は今回の実験で扱ったボルトの緩みという大きな損傷ではなく、損傷が軽微な場合でも本研究が提案する加振システムと周波数解析が適用できるか検討する予定である。

参考文献

- 1)土木学会構造工学委員会 FRP 橋梁研究小委員会,FRP 橋梁—技術とその展望—,土木学会,平成 16 年.
- 2)山田聖志,中澤博之,小宮巖,光ファイバセンサを用いた FRP 骨組膜構造クランプ部のヘルスマニタリング,強化プラスチック,Vol49, No.4, pp.22-28, 2003.
- 3)建設省土木研究所,繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書(Ⅱ),共同研究報告書第 252 号,建設省土木研究所,平成 12 年.
- 4)Lin,M:Development of SMART layer for built-in structural diagnostics, Structural Health Monitoring 2000, Chang, F.K.ed, pp.603-611, 1999.
- 5)S.Beskhyroan, S.Mikami, T.Yamazaki, T.Oshima: Vibration Based Monitoring Technology for FRP Structures, Proc.of The International Colloquium on Application of FRP to Bridges, JSCE, pp.55-62, 2006.