局部振動加振による FRP トラス接合部の損傷検出に関する研究

Investigate on damage detection of Fiber Reinforced Plastic truss by using local vibration excitation

北見工業大学大学院工学研究科	○学生員	追着昂志	(Takashi Oitsuki)
北見工業大学社会環境工学科	正 員	三上修一	(Shuichi Mikami)
北見工業大学社会環境工学科	フェロー	大島俊之	(Toshiyuki Oshima)
北見工業大学社会環境工学科	正 員	宮森保紀	(Yasunori Miyamori)
北見工業大学社会環境工学科	正 員	山崎智之	(Tomoyuki Yamazaki)

1. はじめに

その耐食性、軽量性、比強度の大きさから多方面で使 用されている FRP(Fiber Reinforced Plastic)は、橋梁の主 部材、補強材としても国内外で多くの適用例があるが、 オール FRP 橋梁については、国内において施工事例は ごくわずかである。鋼やコンクリートなどの従来の土木 構造材料とは異なる取り扱いが必要な FRP は、橋梁へ 適用する際の合理的な設計のためのガイドラインの策定 が進められているが、土木構造物用の FRP の利用方法 や設計方法等が検討された歴史が浅く、現在も研究途上 の部分が多いと言える。しかし、腐食しにくいという特 性からメンテナンス費用の削減、また、その軽量性から 下部構造への荷重負担の軽減、架設工事の省力化などが 期待される。FRP 材料は建設工事費を抑える可能性が 十分にあり、今後、歩道橋や点検路、応急橋梁などへの 適用が検討されている¹。

新素材である FRP を構造物として応用する際の力学 特性や破壊メカニズムは十分に解明されておらず、応力 の流れの方向が急激に変化する接合部は、局所的に高い 応力集中が発生し、異方性の大きな FRP 部材を使用す る場合は、こうした応力集中による材料損傷・破壊が公 称の強度よりも低い応力レベルで生ずる可能性があり、 接合部の健全状態を把握することは、FRP を構造部材 として応用する際には極めて重要な課題である。

FRP の破壊過程の複雑さから、安全性と信頼性の確 保のため、光ファイバセンサを用いたヘルスモニタリン グが行われている¹⁾。構造物ヘルスモニタリング技術は 構造材料中に神経やニューロンのようにセンサを埋め込 み、または取り付けることで構造物に生じた応力変化、 材料中に発生した損傷等をリアルタイムで自己検知・診 断する技術であり、橋梁への適用も盛んに行われている。 光ファイバを使用したモニタリングの研究として、山田 ら²⁾³⁾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、さらに光ファイバセンサセン シング結果から FRP 材と鋼材との接着界面の剥離損傷 の予兆する方法について研究している。

また、接合部における損傷の同定及び評価に関する研究として、R.A.Votsis ら⁴⁾は GFRP 接合部の剥離損傷の 評価を実験的検討及び有限要素モデル化を用いて、接合 部における損傷をモデル化し、剥離が構成要素の動的特 性(周波数及びモード形)における差によって検出可能か 評価している。損傷同定法の中で周波数の変化を用いる 手法として、S.Beskhyroan ら⁵は鋼製の橋梁模型に対し て積層圧電アクチュエータと圧電型加速度計を用いて部 材のボルト接合部の損傷位置を特定する研究を行いって いる。さらに、三上ら⁶はこの手法を利用し、橋梁の構 造部材に見立てた FRP 製の I-Beam のボルト接合部の損 傷検出を試みている。

本研究では、FRP部材の接合部の損傷検出法を提案 し、FRP部材で構成されたトラス模型について実験的 に損傷位置を特定するため、積層圧電アクチュエータを 加振源とする局部振動実験を行い、損傷指数(DI)を用い て損傷位置の評価方法を検討する。ここで実験対象模型 としたトラス模型は、国内のFRP橋梁適用事例の1つ であるものつくり大学 FRPトラス橋の主構を参考にし て作製したものである。このトラス橋は接合形式に低コ ストと作業性の良さを持つブラインドリベットを用いた リベット接合を採用している。

2. 局部振動加振実験の概要

2.1 実験装置及び FRP トラス模型

実験装置はアクチュエータ動作部とデータ収録部から 構成され、アクチュエータ動作部はアクチュエータの動 作信号を生成するファンクションジェネレータ、電圧信 号を増幅させるピエゾドライバー及び加振機となる積層 圧電アクチュエータから成る。データ収録部は供試体の 応答加速度を計測する加速度検出器、センサアンプ、 DAQ カード(A/D 変換カード)、ノート型パソコンで構 成されている。

本研究で使用したアクチュエータは樹脂外装型であり、 外形寸法は10×10×20(mm)、動作周波数0~979.8Hz、発 生力3500N、共振周波数69kHzである。また、本実験 で使用するプリアンプ内蔵圧電加速度検出器(NP-3130 小野測器)は、ダイナミックレンジが広く微少加速度か らの測定が可能あり、広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。実験に用いたトラス模 型の写真を図1に示す。トラスの大きさは図2に示すよ うに横×高さ=800×375(mm)である。トラス部材梁には FRP 製角パイプ(□50)を使用し、ガセットプレート (SUS304 製)と、ブラインドリベットにより接合されて



図1 トラス模型



図2 実験1のセンサ配置図



Actuator
Accelerometer

図3 実験2のセンサ配置図





図 5 CH1 の応答波形とパワースペクトル(Area1:D0)

いる。振動実験時の固定条件は、トラスの上下節点4点 をクランプでI桁のフランジの先端と挟むことにより固 定している。

2.2 実験方法

本実験では、供試体の損傷状態として、図2のように リベット接合部の損傷を対象とした実験1と、図3のよ うにトラス部材自体が損傷を有する実験2について、そ れぞれ積層圧電アクチュエータでFRPトラス模型を加 振させ、加速度の測定を行った。アクチュエータ及び加 速度センサの配置を図2、図3に示す。アクチュエータ と加速度計は設置点に接着剤で直接供試体に取り付けた。

アクチュエータによる加振方法として、一定の加振時間内に加振周波数が直線的に変化する SWEEP 加振法を採用し、加振時間 10 秒、加振周波数を 1~700Hz と設定した。また、計測データのサンプリング周波数を7000Hz とした。

実験1では、接合部の損傷評価を行う上で損傷状態を 再現できる損傷モデルとして、リベットの脱落本数を考 える。この方法は、損傷状態が定量的に与えられること、 繰り返し計測に再現性が保てる点から基礎実験として有 効であると考えられる。図2の点線で囲んだ範囲を損傷 導入範囲とし、計8つの損傷範囲においてリベットを取 り外し損傷を導入していく。各損傷範囲を近傍の加速度 計番号と順次対応させ、Area1~Area8と定義する。リ ベットはガセットの端から1本ずつ取り外すこととし、 リベットが全て締結した状態を健全状態D0、リベット の脱落本数に対応して損傷状態D1~D6と定義する。

実験2では図4のように曲げ載荷試験によって損傷したFRP 製角パイプをトラス部材として、図3のように 健全な部材と取り換えて損傷トラス模型を作製した。損 傷部材導入前を健全状態、導入後の状態を損傷状態と定 義する。

実験結果及び考察

図5は実験1、Arealの健全状態におけるCH1で計測 した加速度応答波形とそのパワースペクトルである。加 振開始から3秒過ぎまでの応答波形が、後半の共振によ る振幅の大きさに比べ小さい。これはアクチュエータの 加振力が微小であり、加振時間が加振周波数に対して短 く、低次の周波数の波が形成される前に高次の加振周波 数に移行してしまうなどの理由が考えられる。

この加振時間に対応する 0~200Hz の範囲を後述する 損傷評価解析では解析対象外とする。また、本研究の対 象供試体はスパンの短さから、固有振動数が高次に現れ ることが予想され、実際に図 3 中央に示すように加振周 波数以降の帯域にスペクトルのピークが現れており、よ り損傷による影響を反映しやすいと考えられる高次の 2100Hz までを対象解析範囲とする。損傷検出解析は、 実験1、2 ともに同様の条件で行うこととする。

4. 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番号*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))。

$$D_{i}(f) = \left| log_{10}(G_{i}(f)) - log_{10}(G_{i}^{*}(f)) \right|$$
(1)

 $G_i(f)$ は健全状態、 $G_i^*(f)$ は損傷状態におけるスペクトルの大きさを表す。スペクトルがそれぞれの測定位置 σ_f_i 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。

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

n は測定点の数(チャンネル数)、mはスペクトルの データ数を表わす。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。

$$TC = \left\{ \sum_{f} D_1(f) \sum_{f} D_2(f) \cdots \sum_{f} D_n(f) \right\}$$
(3)

 ∇T

しかし、パワースペクトルの合計だけでは局所的な損 傷を決定することは困難であるため、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。この手順では、 まず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)によう定義する。



次に、各加速度計に現れるパワースペクトルの最大変 化の回数を重みとし、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。

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$
(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} (7)の スカラ積として定義し、これを Damage_Indicator(DI)と する。(式(8))。

$$SM = \left\{ \sum_{f} M_1(f) \sum_{f} M_2(f) \cdots \sum_{f} M_n(f) \right\}^T$$
(6)

$$SC = \left\{ \sum_{f} C_1(f) \sum_{f} C_2(f) \cdots \sum_{f} C_n(f) \right\}$$
(7)

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



図 6 パワースペクトルの変化量(D0-D4:Area1)



図7 Area1、D0-D4 における解析結果

5. 解析結果

図 6 はマトリクス[D]を視覚的に表示したものであり、 この図のスペクトルを各チャンネル方向に積算したもの が、解析の過程で行う健全状態と損傷状態の差をとり積 算する TC となる。図7 は図6のスペクトルを各チャン ネルごとに積算した TC、各周波数の最大変化を選別し て積算した SM、最大変化の総数を表す SC 及び DI を示 しており、統計的意思決定手順を使用することにより、 損傷位置をより明確に決定することができると考えられ る。解析結果の一例として、損傷個所 Areal、7、8 にお



図 8 Damage Indicator (実験 1:D0-D2,実験 2:健全-損傷)



図9 実験2におけるCH4の加速度応答波形



図 10 実験 2 における CH6 の加速度応答波形

いてリベットが2本脱落したD2の状態について、また、 実験2について損傷検出解析を行って得られたDIの結 果を図8に示す。

実験1のDIについては、損傷付近の損傷指数が他の チャンネルに比べ大きな値を示しており、図8に示した 解析 Area についてはリベットが2本脱落した状態にお いて、本研究が提案する実験システムと損傷検出解析手 法を用いることで損傷個所を把握することが可能である と言える。しかし、他の損傷導入範囲では、損傷指数と 損傷近傍のサンセが対応せず、加振点付近の損傷につい ては把握できない結果となった。

実験2においては、損傷部材に取り付けたCH6に比 べ、CH4の損傷指数が2倍以上の値を示している。こ れは部材に損傷が生じることにより部材の減衰が増加し、 図10に示すCH6の加速度応答から分かるように健全時 と比べ部材が振動しなくなる一方、隣接する部材にエネ ルギーが移るため、図9のCH4の応答波形のように損 傷時に振幅の増加が起こっていると考えられる。本評価 手法では、これらエネルギー収支の関係から CH4 を大 きく評価する形となり、今回の実験と解析からは損傷部 材を推定することは出来なかった。また、実験2では、 部材を取り換えるため供試体を固定しているクランプを 外しているため、支持条件が一定でない可能性があり、 実験条件の再現性を確認する必要がある。

6. 結論

本研究は、現存する FRP トラス橋の主構造を参考に して作製したトラス模型について、損傷前後の模型の局 部振動加振実験によって得られた加速度応答に対して損 傷検出解析手法を適用し、その有効性を検証した。本研 究の結果として、

(1)Area1、7、8のような加振点から遠い損傷位置は、リ ベットが2本以上脱落した時点でその損傷個所を推定す ることが可能である。リベットが1本のみ脱落した状態 では、隣接するリベットの接合力の影響があるため、損 傷検出できないと考えられる。

(2)部材自体が損傷を有する場合には、本解析手法では 損傷部材を特定することが出来なかった。損傷による供 試体全体のエネルギー収支を捉えた上で、適切な解析手 法を提案していく必要がある。

実験1では加振源に近い損傷を検出できない結果となったが、実験2と同様に損傷によるエネルギーの再分配の影響を考慮して損傷評価を行うことが課題となる。

今後は応答スペクトルを用いて損傷評価をする上で、 供試体中を伝播する波の周波数成分に対する損傷の影響 を理論的に確認することが必要となることから、数値解 析を通して損傷による振動モードの変化や損傷評価を行 う上で重要なエネルギーの増減や分布状況について検討 を行っていく。

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、2004.
- 2)山田聖志、中澤博之、小宮巌: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モニタリン グ、強化プラスチック、Vol49 No.4 pp.22-28、2003.
- 3)山田聖志、中島慎一、吉田安寿、山田聡、小宮巌: FRP 材と鋼材との接着界面の力学特性とその構造ヘル スモニタリング、第3回 FRP 複合構造・橋梁に関す るシンポジウム論文報告書、pp.121-126、2009.
- 4)Renos A.Votsis, Marios K.Chryssanthopoulos: Assessment of debonding in GFRP joints using damage identification techniques, Construction and Building Materials, Vol.23 No.4 Page.1690-1697,2009.
- 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, Page.55-62, 2006.
- 6)三上修一、追着昂志、大島俊之、宮森保紀、山崎智 之: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、第3回FRP 複合構造・橋梁に関す るシンポジウム論文報告書、pp.127-132、2009.