

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4992084号
(P4992084)

(45) 発行日 平成24年8月8日(2012.8.8)

(24) 登録日 平成24年5月18日(2012.5.18)

(51) Int. Cl.	F 1
GO 1 M 99/00 (2011.01)	GO 1 M 99/00 Z
GO 1 H 17/00 (2006.01)	GO 1 H 17/00 Z

請求項の数 12 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2006-321706 (P2006-321706)	(73) 特許権者	504255685
(22) 出願日	平成18年11月29日(2006.11.29)		国立大学法人京都工芸繊維大学
(65) 公開番号	特開2008-134182 (P2008-134182A)		京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地
(43) 公開日	平成20年6月12日(2008.6.12)	(74) 代理人	100101454
審査請求日	平成21年10月6日(2009.10.6)		弁理士 山田 卓二
		(74) 代理人	100081422
			弁理士 田中 光雄
		(74) 代理人	100098280
			弁理士 石野 正弘
		(74) 代理人	100113170
			弁理士 稲葉 和久
		(72) 発明者	増田 新
			京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地
			国立大学法人京都工芸繊維大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 構造物の損傷の診断システムおよび方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

構造体の監視対象箇所を挟む2点 x_i, x_j に設置した複数の振動応答検出センサおよび位置 x_i, x_j とは異なる参照点 x_k に設置した参照応答検出センサと、

前記振動応答検出センサおよび参照応答検出センサから振動計測データを取得し、入力振動計測データから、固有振動の数 N の振動モードの各々において、 n 次モード ($1 \leq n \leq N$) のモードシェイプから抽出した2点 x_i, x_j の間の注目軸方向の相対変位量である相対モードシェイプ $\Psi_n(x_i, x_j)$ 、参照点 x_k における n 次モードのモードシェイプの参照軸方向成分である参照モードシェイプ $\phi_n^r(x_k)$ および n 次モードの固有振動数 ω_n を求め、下記の式

【数1】

$$d_n(x_i, x_j) = \left\{ \frac{\Psi_n(x_i, x_j)}{\omega_n \phi_n^r(x_k)} \right\}^2$$

で定義される d_n を算出し、下記の式

【数 2】

$$DI(i, j) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{present} - d_n(x_i, x_j)|_{baseline}\}^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{baseline}\}^2}}$$

(ここで添え字presentは現在の d_n の評価値を、添え字baselineは評価の基準となる健全状態における d_n の評価値を表す)で定義される損傷指標DIを評価することを含むデータ処理の少なくとも一部を実行するデータ処理装置と

からなる構造物の損傷の診断システム。

10

【請求項 2】

前記参照点 x_k が位置 x_i, x_j の一方と同じ位置であり、前記複数の振動応答検出センサの1つが前記参照応答検出センサとして兼用されることを特徴とする請求項1に記載された診断システム。

【請求項 3】

前記振動応答検出センサが、角度、角速度または角加速度を検出するセンサであることを特徴とする請求項1または2に記載された診断システム。

【請求項 4】

前記振動応答検出センサが、変位、速度または加速度を検出するセンサであることを特徴とする請求項1または2に記載された診断システム。

20

【請求項 5】

前記参照応答検出センサが、変位、速度または加速度を検出するセンサであることを特徴とする請求項1～4のいずれかに記載された診断システム。

【請求項 6】

前記参照応答検出センサが、角度、角速度、角加速度または歪みを検出するセンサであることを特徴とする請求項1～4のいずれかに記載された診断システム。

【請求項 7】

さらに、複数の監視対象箇所ごとに設けられる前記データ処理装置からデータ処理結果を受け取るホストコンピュータを備えることを特徴とする請求項1～6のいずれかに記載された診断システム。

30

【請求項 8】

前記データ処理装置が、前記データ処理の一部を実行するデータ処理装置であり、前記ホスト装置は前記データ処理装置から受け取ったデータ処理結果を基に、前記データ処理の残りの部分を実行することを特徴とする請求項7に記載された診断システム。

【請求項 9】

前記データ処理装置と前記ホストコンピュータの間でデータが無線で送信されることを特徴とする請求項7または8に記載された診断システム。

【請求項 10】

前記データ処理装置は、2点 x_i, x_j における振動応答データの相対量(差)と参照応答データのクロススペクトルおよびパワースペクトルの比により前記 d_n を求め、前記 d_n の変化を非損傷時の基準ベクトル $d_n(x_i, x_j)|_{baseline}$ からの変動分のノルムで評価することを特徴とする請求項1～9のいずれかに記載された診断システム。

40

【請求項 11】

構造体の監視対象箇所を挟む2点 x_i, x_j に設置した複数の振動応答検出センサおよび位置 x_i, x_j とは異なる参照点 x_k に設置した参照応答検出センサとから振動計測データを取得し、

入力振動計測データから、固有振動の数Nの振動モードの各々において、n次モード(1 ≤ n ≤ N)のモードシェイプから抽出した2点 x_i, x_j の間の注目軸方向の相対変位量である相対モードシェイプ $d_n(x_i, x_j)$ 、参照点 x_k におけるn次モードのモー

50

ドシェイブの参照軸方向成分である参照モードシェイブ $\phi_n^r(x_k)$ および n 次モードの固有振動数 ω_n を求め、

下記の式

【数 3】

$$d_n(x_i, x_j) = \left\{ \frac{\Psi_n(x_i, x_j)}{\omega_n \phi_n^r(x_k)} \right\}^2$$

で定義される d_n を算出し、

下記の式

【数 4】

$$DI(i, j) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{\text{present}} - d_n(x_i, x_j)|_{\text{baseline}}\}^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{\text{baseline}}\}^2}}$$

(ここで添え字 present は現在の d_n の評価値を、添え字 baseline は評価の基準となる健全状態における d_n の評価値を表す) で定義される損傷指標 DI を評価する

構造物の損傷の診断方法。

【請求項 1 2】

前記 d_n を 2 点 x_i, x_j における振動応答データの相対量 (差) と参照応答データのクロススペクトルおよびパワースペクトルの比により求め、

前記 d_n の変化を非損傷時の基準ベクトル $d_n(x_i, x_j)|_{\text{baseline}}$ からの変動分のノルムで評価することを特徴とする請求項 1 1 に記載された診断方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、構造物の健全性を監視し診断する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

構造物の健全性を監視し診断する技術は構造ヘルスマニタリング技術と呼ばれており、近年各分野で重要性が急激に高まっている。特に、耐用年数が近づきつつある社会基盤構造物の劣化による事故リスクや、地震による家屋の倒壊リスクを事前に評価可能な健全性監視システムの開発が急務になっている。損傷は局所的に発生するものであり、しかもできるだけ早期の発見が望ましいため、場所を特定でき、できるだけ小さなレベルの損傷に感度の高い方法が求められる。

【0003】

従来の 1 つの監視方式では、構造物の剛性低下による固有振動数の変化が監視される。固有振動数を評価するには任意の動的物理量を 1 点から数点で計測するだけよく、この方式はきわめてシンプルであるという長所がある。しかし、構造全体の特性が変化するような大きな損傷でないと検出できないというに損傷箇所の特定が難しい。

【0004】

一方、構造物の部材中の亀裂などを個別に発見するための技術として、超音波などを用いる非破壊検査技術がある。定期的なオーバーホール検査など、供用を一時停止しての徹底的な検査が実施できる場合にはきわめて有効であり、航空機やプラントなどの検査に利用されている。しかし、専用の検査機器を必要とするうえに、一度に検査できる範囲が cm オーダーと非常に狭い。構造物の常時監視に用いるためには、これらをきわめて密に常時設置しておく必要があり、コストがかかりすぎて現実的でない。

10

20

30

40

50

【0005】

構造物の健全性を監視する現実的なシステムを構築するためには、損傷感度および空間解像度と計測コストをバランスさせる必要がある。このために、比較的安価なセンサを少数利用して対象構造物のクリティカルな部位（たとえばボルト継手や溶接継手など）ごとに健全性の評価を行う手法が提案されている。たとえば、特許文献1（特開2001-099760号公報）では、圧電インピーダンス法が利用されている。圧電インピーダンス法では、構造物表面に貼付した圧電素子のインピーダンスの変化によって圧電素子近傍の構造特性の変化を検出する。また、特許文献2（特開2000-131197号公報）では、2点に貼付した圧電素子間の伝達アドミッタンスを計測する手法が提案されている。

【0006】

また、圧電インピーダンス法に比べて損傷感度は劣るが少数の振動センサで局所的な損傷を検出可能な手法として、動的応答から構造物のフレキシビリティを算出する手法が提案され、現実的な損傷感度と計測コストを有する損傷評価法として有効性が指摘されている。発明者らはこれまでに、構造物の局所フレキシビリティに基づく損傷検出手法を提案してきた（非特許文献1）。局所フレキシビリティは、構造物上の2点に符号が逆の一对の単位荷重を作用させたときの2点間の相対変形量として定義され、局所化された健全性の指標として有効である。さらに非特許文献2では、はりなどの構造物の曲げ変形に対する局所フレキシビリティが角速度計測によって評価できることに注目し、角速度計測に基づく局所回転フレキシビリティの評価手法を提案している。

【特許文献1】特開2001-099760号公報

【特許文献2】特開2000-131197号公報

【特許文献3】特開11-281311号公報

【特許文献4】特開2000-283800号公報

【非特許文献1】増田新、森田紳也、曾根彰、時間周波数解析によるはり状構造物の損傷モニタリング、第8回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集、pp.641-644、2003

【非特許文献2】A. Masuda, A. Sone and S. Morita, Continuous damage monitoring of civil structures using vibratory gyroscopes, Proceedings of SPIE, Vol. 5391, p. 40-49, 2004

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

上述の圧電インピーダンス法に基づく方法（特許文献1、特許文献2）は、非破壊検査法に匹敵する損傷感度を有するものの、インピーダンス変化の物理的意味が捉えにくい。さらに、高感度の損傷評価を行うにはインピーダンス測定機器の精度が重要であり、また、温度変化などによる圧電素子の特性変化の補償が必要などの問題点がある。

【0008】

発明者らの提案した局所フレキシビリティの評価に基づく方法（非特許文献1、非特許文献2）は、評価指標の物理的意味が明確であり、センサの配置やセンサの種類によって様々な変形様式に対するフレキシビリティを評価できる。しかし計算のためには正規モードの正規化定数が必要であるため、構造物全体のモードシェイプと質量マトリクスを知る必要がある。このため、たとえ構造物の一部分における局所フレキシビリティにのみ興味がある場合であっても、構造物全体の情報が必要である点が実用化に向けての障害であった。

【0009】

なお、本発明の実施形態では角速度計測を用いるが、その観点で先行技術調査をすると、以下の文献が見出された。特許文献3（特開11-281311号公報）では、角速度センサを用いて動歪を測定している。具体的には、2個の角速度センサを、コンクリートの内部に鉄骨が埋め込まれている構造物の表面に、曲げ方向の力を受けるように貼着する。そして、検出された角速度信号の計測値を積分して、2点間の相対角度を算出し、これを曲率の近似値として用いることで、はりの曲げ歪みを得る。本発明の実施形態でも2点

10

20

30

40

50

に配置した角速度センサを用いるが、計測値から2点間の回転変形に関する剛性劣化を近似的に算出する点が異なる。また、特許文献4（特開2000-283800号公報）では、角速度センサを用いて地盤の1点の地学的変位を検出している。この方法では、地中に埋設される筒体内に角速度センサを固定し、各速度センサからの信号より地盤の変位を検出する。ここで、角速度から角度変位を求めるために積分操作を必要としており、センサのドリフトの影響を補正するために別途傾斜計を必要とするなど、複雑なシステムになっている。これに対し、本発明の実施形態は積分操作を必要としないため、角速度センサのドリフトの影響を受けることがなく、構造物上の2点間の回転変形に関する剛性劣化を評価できる。

【0010】

10

本発明の目的は、構造物内部の変位、歪みなどをより容易に監視可能にすることである。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明に係る構造物の損傷の診断システムは、構造物の監視対象箇所を挟む2点 x_i 、 x_j に設置した複数の振動応答検出センサおよび位置 x_i 、 x_j とは異なる参照点 x_k に設置した参照応答検出センサと、データ処理装置とからなる。データ処理装置は、前記振動応答検出センサおよび参照応答検出センサから振動計測データを取得し、入力振動計測データから、固有振動の数 N の振動モードの各々において、 n 次モード（ $1 \leq n \leq N$ ）のモードシェイプから抽出した2点 x_i 、 x_j の間の注目軸方向の相対変位量である相

20

対モードシェイプ $\Psi_n(x_i, x_j)$ 、参照点 x_k における n 次モードのモードシェイプの参照軸方向成分である参照モードシェイプ $\phi_n^r(x_k)$ および n 次モードの固有振動数 ω_n を求め、

下記の式

【数1】

$$d_n(x_i, x_j) = \left\{ \frac{\Psi_n(x_i, x_j)}{\omega_n \phi_n^r(x_k)} \right\}^2$$

30

で定義される d_n を算出し、

下記の式

【数2】

$$DI(i, j) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{\text{present}} - d_n(x_i, x_j)|_{\text{baseline}}\}^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{\text{baseline}}\}^2}}$$

（ここで添え字presentは現在の評価値を、添え字baselineは評価の基準となる健全状態における評価値を表す）で定義される損傷指標DIを評価することを含むデータ処理の少なくとも一部を実行する。

40

【0012】

前記診断システムにおいて、たとえば、前記参照点 x_k が位置 x_i 、 x_j の一方と同じ位置であり、前記複数の振動応答検出センサの1つが前記参照応答検出センサとして兼用される。また、前記診断システムにおいて、たとえば、前記振動応答検出センサは、角度、角速度または角加速度を検出するセンサである。または、前記診断システムにおいて、たとえば、前記振動応答検出センサは、変位、速度または加速度を検出するセンサである。また、前記診断システムにおいて、たとえば、前記参照応答検出センサは、変位、速度または加速度を検出するセンサである。または、前記参照応答検出センサは、角度、角速

50

度、角加速度または歪みを検出するセンサである。

【0013】

前記診断システムは、好ましくは、さらに、複数の監視対象箇所ごとに設けられる前記データ処理装置からデータ処理結果を受け取るホストコンピュータを備える。たとえば、前記データ処理装置が、前記データ処理の一部を実行し、前記ホスト装置は前記データ処理装置から受け取ったデータ処理結果を基に、前記データ処理の残りの部分を実行する。また、好ましくは、前記データ処理装置と前記ホストコンピュータの間で振動計測に関するデータ（前記振動計測データ、データ処理の途中結果またはデータ処理結果）が無線で送信される。

【0014】

前記診断システムにおいて、前記データ処理装置は、たとえば、2点 x_i, x_j における振動応答データの相対量（差）と参照応答データのクロススペクトルおよびパワースペクトルの比により前記 d_n を求め、前記 d_n の変化を非損傷時の基準ベクトル $d_n(x_i, x_j)|_{baseline}$ からの変動分のノルムで評価する。

【0015】

本発明に係る構造物の損傷の診断システムでは、(a) 構造体の監視対象箇所を挟む2点 x_i, x_j に設置した複数の振動応答検出センサおよび位置 x_i, x_j とは異なる参照点 x_k に設置した参照応答検出センサとから振動計測データを入力し、次に、(b) 入力した振動計測データから、固有振動の数 N の振動モードの各々において、 n 次モード（ $1 \leq n \leq N$ ）のモードシェイプから抽出した2点 x_i, x_j の間の注目軸方向の相対変位量である相対モードシェイプ $\Psi_n(x_i, x_j)$ 、参照点 x_k における n 次モードのモードシェイプの参照軸方向成分である参照モードシェイプ $\phi_n^r(x_k)$ および n 次モードの固有振動数 ω_n を求め、(c) 下記の式

【数3】

$$d_n(x_i, x_j) = \left\{ \frac{\Psi_n(x_i, x_j)}{\omega_n \phi_n^r(x_k)} \right\}^2$$

で定義される d_n を算出し、(d) 下記の式

【数4】

$$DI(i, j) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{present} - d_n(x_i, x_j)|_{baseline}\}^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{baseline}\}^2}}$$

（ここで添え字presentは現在の評価値を、添え字baselineは評価の基準となる健全状態における評価値を表す）で定義される損傷指標 DI を評価する。

【0016】

前記診断方法では、好ましくは、前記 d_n を2点 x_i, x_j における振動応答データの相対量（差）と参照応答データのクロススペクトルおよびパワースペクトルの比により求め、前記 d_n の変化を非損傷時の基準ベクトル $d_n(x_i, x_j)|_{baseline}$ からの変動分のノルムで評価する。

【発明の効果】

【0017】

本発明では、振動モードの正規化を行わずに近似的に局所フレキシビリティを評価するので、対象部位の近傍に配置した少数のセンサによって、構造物の局所的なフレキシビリティ（たとえば回転剛性）の劣化を検出できる。興味のある対象部位ごとに独立に計測装置およびデータ処理装置を構成することができるため、構造物の規模やクリティカルな部

10

20

30

40

50

位の個数に合わせて柔軟にシステムを構築できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

以下、添付の図面を参照して発明の実施の形態を説明する。

【0019】

配管や橋梁など細長い形状の構造物や、骨組構造のジョイント部など、主に曲げ荷重に対する強度が問題となる構造部位は多い。このような部位に亀裂やボルト緩みなどの損傷が生じると、損傷箇所における曲げ剛性が低下し、単位荷重に対する変形量すなわちフレキシビリティが増加する。フレキシビリティは剛性行列の逆行列であり構造物の静的な特性であるが、正規モードシェイプと固有振動数を用いて展開表現できるため、動的応答からモード同定を経て求めることが可能である。このためフレキシビリティは大域的構造健全性の監視における健全性の指標としての有効性が指摘されている。

10

【0020】

発明者らはこれまでの研究で、構造物の局所フレキシビリティに基づく損傷検出手法を提案してきた(非特許文献1)。局所フレキシビリティは、構造物上の2点に符号が逆の一对の単位荷重を作用させたときの2点間の相対変形量として定義され局所化された健全性の指標として有効である。非特許文献2では、はりなどの構造物の曲げ変形に対する局所フレキシビリティが角速度計測によって評価できることに注目し、ジャイロセンサの利用を提案した。しかし、この損傷検出手法では、正規モードの正規化定数が必要であった。

【0021】

20

本発明では、局所フレキシビリティ指標LFIを直接評価するのではなく、モードの正規化を行わずに近似的に局所フレキシビリティを評価する実用的な方法を提供する。本発明によれば、対象部位の近傍に配置した少数のセンサによって、構造物の局所的な剛性の劣化を感度よく検出可能な損傷診断システムが提供される。興味のある対象部位ごとに独立に計測装置およびデータ処理装置を構成することができるため、構造物の規模やクリティカルな部位の個数に合わせて柔軟にシステムを構築できる。さらに、データ伝送を無線化することによって、より柔軟な損傷診断システムを提供できる。

【0022】

ここで、局所フレキシビリティの評価について説明する。本発明では、構造物の損傷によって生じる局所的な剛性の低下を、局所フレキシビリティ指標LFIの変化によって評価する。局所フレキシビリティ指標とは、式(1)で表されたものであり、構造物上の注目箇所(たとえば構造上重要なボルト継手、溶接継手など)に特定の様式の局所的変形を生じさせることを意図して負荷された特定の静的荷重パターンに対する変形量として定義される。すなわち、局所フレキシビリティ指標とは、特定の变形様式に対する構造物の局所的な柔らかさを表す量であり、この量の増加は当該箇所における局所的な剛性の低下、すなわち損傷の発生を意味する。

30

【0023】

ここで、特定の静的荷重パターンとは、注目箇所を挟む2点 x_i 、 x_j に印加される一对の静的な単位集中荷重であり、変形量とは、荷重の軸に平行な軸方向で評価した2点間の相対変形量である。単位集中荷重対の与え方を適切に選択することによって、様々な変形様式に対する局所フレキシビリティを評価できる。たとえば、2点間の引張変形に対する局所フレキシビリティを評価するためには、2点を結ぶ線分に平行で互いに向きが逆の単位集中力の対を採用すればよい。同様に、2点間のせん断変形に対する局所フレキシビリティを評価するためには、2点を結ぶ線分に垂直で互いに向きが逆の単位集中力の対を採用すればよい。

40

【0024】

また、荷重としてモーメントを考えることで、2点間の回転変形に関する局所フレキシビリティを評価することもできる。すなわち、2点を結ぶ線分に平行な軸まわりで互いに向きが逆の単位集中モーメントの対を採用することによって2点間のねじり変形に対する局所フレキシビリティを評価でき、2点を結ぶ線分に垂直な軸まわりで互いに向きが逆の

50

単位集中モーメントの対を採用することによって2点間の曲げ変形に対する局所フレキシビリティを評価できる。特に、曲げ変形に関する局所フレキシビリティは、剛結合されたジョイントや梁状または板状構造物の損傷評価を行う際に有益である。

【0025】

上述の局所フレキシビリティ指標LFIは、構造物のモーダルパラメータを用いて次式(1)で定義される(非特許文献1, 2参照)。

【数5】

$$LFI(i, j) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n^2}{\omega_n^2} \{\Psi_n(x_i, y_j)\}^2 \quad (1)$$

10

ここで、Nは固有振動の数であり、固有振動の数Nの振動モードの各々において、 c_n はn次モード(1 ≤ n ≤ N)のモードシェイプを質量正規化するための、すなわちモード質量を1に正規化するための正規化定数であり、 ω_n は固有振動数である。また、 $\Psi_n(x_i, x_j)$ はn次モードのモードシェイプから抽出した2点 x_i, x_j の間の相対変形量であり、ここでは相対モードシェイプと呼んで次式(2)で定義する。

【数6】

$$\Psi_n(x_i, y_j) = \phi_n^d(x_i) - \phi_n^d(x_j) \quad (2)$$

ここで $\phi_n^d(x)$ はn次モードシェイプ $\phi_n(x)$ から抽出した注目する軸方向の変形成分であり、引張変形やせん断変形などの並進変形に関する局所フレキシビリティ指標を評価する場合には、注目する力の方向と平行な軸方向成分をとり、ねじり変形や曲げ変形などの回転変形に関する局所フレキシビリティ指標を評価する場合には、注目するモーメント軸と平行な軸まわりの回転角をとる。

20

【0026】

ここで、局所フレキシビリティ指標LFIを定義している式(1)を次式(3)のように書き換える。

【数7】

$$LFI(i, j) = \sum_{n=1}^N a_n d_n \quad (3)$$

30

ここで、右辺の a_n と d_n はそれぞれ次式(4)で定義される。

【数8】

$$a_n = \{c_n \phi_n^r(x_k)\}^2$$

$$d_n = \left\{ \frac{\Psi_n(x_i, x_j)}{\omega_n \phi_n^r(x_k)} \right\}^2 \quad (4)$$

ここで、 $\phi_n^r(x_k)$ は参照点 x_k におけるモードシェイプの適切な参照軸方向成分であり、ここでは参照モードシェイプと呼ぶ。参照点 x_k は一般には2点 x_i, x_j と異なる第3の点であるが、2点 x_i, x_j のいずれか一方と兼用できる場合もある。

40

【0027】

式(2)の右辺のうち、 d_n は参照モードシェイプで規格化した相対モードシェイプと固有振動数とからなる量であり、点 x_i, x_j における注目軸方向の振動計測データおよび参照点 x_k における参照軸方向の振動計測データから、様々なモード同定の方法を用いて求めることができる。

【0028】

一方、 a_n は参照モードシェイプを質量正規化したものからなる量であり、値を求めるためには正規化定数 c_n を知らなければならない。しかし、 c_n を求めるには、次のいずれかが必要である。

50

- (a) 構造物全体の高精度な数学モデル(有限要素モデルなど)、
- (b) 構造物全体の質量マトリクスおよび構造物全体を十分な空間密度で網羅した動的応答計測、
- (c) 構造物に対するアクティブな加振手段と加振力の計測手段並びに加振点における動的応答計測。

いずれをとるにしても、低コスト、柔軟で使いやすい損傷診断装置の実現を妨げてしまう。

【 0 0 2 9 】

次に、評価方法の簡略化について説明する。式(3)の右辺は、N次元ベクトル空間の二つのベクトル $\{ a_1, \dots, a_N \}$ と $\{ d_1, \dots, d_N \}$ の内積になっている。このうち、 $\{ a_1, \dots, a_N \}$ は各モードの参照モードシェイプを質量正規化したものからなるベクトルであり、正規化定数を含むため上述の通り求めることが難しいが、参照点および参照軸方向を適切に選ぶことにより、局所的な損傷によってほとんど変化しないベクトルと見なすことができる。これに対し、 $\{ d_1, \dots, d_N \}$ は振動計測データからの算出が可能な量(固有振動数および質量正規化されていないモードシェイプ)からなるベクトルであり、また、局所的な損傷によって大きく変化するベクトルである。そこで、式(3)の局所フレキシビリティ指標LFIを直接評価するのではなく、ベクトル $\{ d_1, \dots, d_N \}$ の変化によってLFIの変化を近似的に評価する。ベクトル $\{ d_1, \dots, d_N \}$ の変化を評価するためには、ベクトルから一つまたは複数の特徴量を抽出すればよく、たとえば、ベクトルのノルムによる方法や内積による方法が考えられる。

【 0 0 3 0 】

ここで、モードシェイプを同定するために、点 x_k における加速度応答 $y(x_k, t)$ を参照応答として用いる。一般には、いかなる点のいかなる物理量を参照応答として選んでもよいが、後述の理由で、損傷の影響を受けにくい量を選ぶことが望ましい。場合によっては点 x_i と点 x_j のいずれかにおける角速度応答を参照応答として採用することも可能であり、その場合はセンサ個数を一つ減らすことができる。しかし、後で説明する実験装置では、健全時において点 x_i と点 x_j は水平運動のみを示すためいずれの角速度応答もほぼゼロになってしまう。そのため、別途、水平方向の加速度応答を計測してこれを参照応答としている。なお、以下では点 x_k における加速度応答を参照応答として用いる場合について説明するが、他の物理量を参照応答とする場合についても同様の議論が可能である。

【 0 0 3 1 】

次に、ベクトル $\{ d_1, \dots, d_N \}$ の振動計測データからの算出方法およびベクトル $\{ d_1, \dots, d_N \}$ の変化の評価方法を以下に示す。ここで、
 (1) ベクトル $\{ d_1, \dots, d_N \}$ を振動計測データから算出するための手段として、2点 x_i, x_j における振動応答データの相対量(差)と参照応答データのクロススペクトルおよびパワースペクトルの比による方法を採用し、
 (2) ベクトル $\{ d_1, \dots, d_N \}$ の変化を非損傷時の基準ベクトルからの変動分のノルムで評価する。

【 0 0 3 2 】

モーダルパラメータの同定法としては様々な選択肢があり得るが、ここでは最も簡単な方法、すなわち定常ランダム応答のスペクトルのピーク値を読み取る方法を用いた。この手法では、一カ所の局所フレキシビリティを評価するのに対象部位の近傍に2個ないしは3個のセンサを設置するだけでよく、計測チャンネルは2チャンネルで事足りる。このため興味のある対象部位ごとに独立に計測系および演算系を構成することができるという利点がある。

【 0 0 3 3 】

しかし、固有振動数及びモードシェイプの算出手段およびベクトル変化の評価方法はこれらに限るものではなく、任意のものが適宜選択できる。

【 0 0 3 4 】

局所フレキシビリティ指標についてさらに説明する。n次モード座標系での運動方程式を次のように書く。

【数9】

$$\ddot{\xi}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{\xi}_n(t) + \omega_n^2 \xi_n(t) = f_n(t) \quad (5)$$

ただし $f_n(t)$ はモード外力であり、次式(6)で与えられる

【数10】

$$f_n(t) = c_n^2 \int \phi_n(x) f(x, t) dx \quad (6)$$

10

【0035】

ここで分布外力 f は次式(7)のパワースペクトル $S_f(x, y, \omega)$ を持つ弱定常過程であるとする。

【数11】

$$S_y(x, y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_f(x, y, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (7)$$

$$R_f(x, y, \tau) = E\{f(x, t)f(y, t - \tau)\}$$

【0036】

すると、2点 x_i, x_j の間の相対角速度応答 $z(x_i, x_j, t)$ と参照応答 $y(x_k, t)$ のクロススペクトル S_{xy} は次式(8)のようになる。

20

【数12】

$$S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega) = (-1)^q (i\omega)^{p+q} \iint H(x_i, x_j, x, \omega) G^*(x_k, y, \omega) S_f(x, y, \omega) dx dy \quad (8)$$

ここで、 p は0から2までの整数であり、点 x_i, x_j で変位または角度を計測する場合は $p = 0$ 、速度または角速度を計測する場合は $p = 1$ 、加速度または角加速度を計測する場合は $p = 2$ である。同様に、点 x_k で変位または角度を計測する場合は $q = 0$ 、速度または角速度を計測する場合は $q = 1$ 、加速度または角加速度を計測する場合は $q = 2$ である。右上付きの $*$ は複素共役を表す。ここで、 G および H は、以下のように表される。

【数13】

30

$$G(x_k, x, \omega) = \sum_{n=1}^N c_n^2 \phi_n^r(x_k) \phi_n(x) \Gamma_n(\omega)$$

$$H(x_i, x_j, x, \omega) = \sum_{n=1}^N c_n^2 \Psi_n(x_i, x_j) \phi_n(x) \Gamma_n(\omega) \quad (9)$$

$$\Gamma_n(\omega) = \frac{1}{-\omega^2 + \omega_n^2 + i2\zeta_n \omega_n \omega}$$

同様に、参照加速度応答 $y(x_k, t)$ のパワースペクトル S_y は次式(10)のようになる。

40

【数14】

$$S_y(x_k, \omega) = \omega^{2q} \iint G(x_k, x, \omega) G^*(x_k, y, \omega) S_f(x, y, \omega) dx dy \quad (10)$$

【0037】

いま各モードの固有振動数が互いに離れており、モード減衰比が十分小さいとすると、n次固有振動数 ω_n では、 $n = m$ と $n \neq m$ の場合、それぞれ次式(11)の右辺の上下に示すようになる。

【数 15】

$$\Gamma_m(\omega_n) = \begin{cases} \frac{1}{i2\zeta_n\omega_n^2} \\ \frac{1}{2\zeta_n\omega_n^2}O(\zeta_n) \end{cases} \quad (11)$$

よって、 n 次固有振動数 ω_n では、式 (9) は次式 (12) のようになる。

【数 16】

$$G(x_k, x, \omega_n) = \frac{c_n^2 \phi_n^r(x_k) \phi_n(x)}{i2\zeta_n\omega_n^2} (1 + O(\zeta_n)) \quad (12)$$

$$H(x_i, x_j, x, \omega_n) = \frac{c_n^2 \Psi_n(x_i, x_j) \phi_n(x)}{i2\zeta_n\omega_n^2} (1 + O(\zeta_n))$$

【0038】

これと式 (8)、式 (10) より、次式 (13) および式 (14) を得る

【数 17】

$$\begin{aligned} S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega_n) &= (-i)^q (i\omega_n)^{p+q} \iint \frac{c_n^4 \Psi_n(x_i, x_j) \phi_n^{r*}(x_k) \phi_n(x) \phi_n^*(y)}{4\zeta_n^2 \omega_n^4} S_f(x, y, \omega_n) (1 + O(\zeta_n)) dx dy \quad (13) \\ &= (-1)^q (i\omega_n)^{p+q-4} \frac{c_n^4 \Psi_n(x_i, x_j) \phi_n^{r*}(x_k)}{4\zeta_n^2} (1 + O(\zeta_n)) \iint \phi_n(x) \phi_n^*(y) S_f(x, y, \omega_n) dx dy \end{aligned} \quad 20$$

【数 18】

$$\begin{aligned} S_y(x_k, \omega_n) &= \omega_n^{2q} \iint \frac{c_n^4 |\phi_n(x_k)|^2 \phi_n(x) \phi_n^*(y)}{4\zeta_n^2 \omega_n^4} S_f(x, y, \omega_n) (1 + O(\zeta_n)) dx dy \quad (14) \\ &= \omega_n^{2q-4} \frac{c_n^4 |\phi_n^r(x_k)|^2}{4\zeta_n^2} (1 + O(\zeta_n)) \iint \phi_n(x) \phi_n^*(y) S_f(x, y, \omega_n) dx dy \end{aligned} \quad 30$$

【0039】

式 (13) と式 (14) の比をとると、

【数 19】

$$\frac{S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega_n)}{S_y(x_k, \omega_n)} = (-1)^q i^{p+q} \omega_n^{p-q} \frac{\Psi_n(x_i, x_j)}{\phi_n^r(x_k)} (1 + O(\zeta_n)) \cong (-1)^q i^{p+q} \omega_n^{p-q} \frac{\Psi_n(x_i, x_j)}{\phi_n^r(x_k)} \quad (15)$$

となり、次式 (16) を得る。

【数 20】

$$\left| \frac{S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega_n)}{S_y(x_k, \omega_n)} \right|^2 \cong \omega_n^{2(p-q)} \left\{ \frac{\Psi_n(x_i, x_j)}{\phi_n^r(x_k)} \right\}^2 \quad (16)$$

【0040】

式 (16) と式 (3)、式 (4) より、局所フレキシビリティ指標 LFI の近似評価式 (17) が導出される。

【数 2 1】

$$LFI(i, j) = \sum_{n=1}^N a_n d_n$$

$$d_n(x_i, x_k) \cong \omega_n^{2(-p+q-1)} \left| \frac{S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega_n)}{S_y(x_k, \omega_n)} \right|^2 \quad (17)$$

$$a_n = \{c_n \phi_n^r(x_k)\}^2$$

【0041】

式(17)の右辺はN次元ベクトル空間の二つのベクトル{ a_1, \dots, a_N }と{ d_1, \dots, d_N }の内積になっている。このうちベクトル{ a_1, \dots, a_N }は各モードの参照モードシェイプを質量正規化したものからなり、正規化定数を含むため上述の通り求めることが難しいが、参照点および参照軸方向を適切に選ぶことにより(すなわち、損傷の影響を受けにくい量を参照応答として選ぶことにより)、局所的な損傷によってほとんど変化しないベクトルと見なすことができる。一方、ベクトル{ d_1, \dots, d_N }は、振動計測データからの算出が可能な量(固有振動数および質量正規化されていないモードシェイプ)からなり、局所的な損傷によって大きく変化する。そこでここでは、式(17)の局所フレキシビリティ指標LFIを直接に評価するのではなく、ベクトル{ d_1, \dots, d_N }の変化によってLFIの変化を近似的に評価する。具体的には、ベクトル{ d_1, \dots, d_N }の変化を非損傷時の基準ベクトルからの変動分のノルムで評価する。すなわち、損傷指標DI(i, j)を次式(18)のように定義し、この指標の値の変化によって損傷を検出する。

【数 2 2】

$$DI(i, j) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{present} - d_n(x_i, x_j)|_{baseline}\}^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{baseline}\}^2}} \quad (18)$$

ここで添え字presentは現在の評価値を、添え字baselineは評価の基準となる初期状態(または健全状態)における評価値を表す。

【0042】

次に、局所フレキシビリティ指標LFIの1例として、回転変形に対する局所フレキシビリティ指標LFIについて説明する。(以下の説明は、上述の一般的な説明と重複する箇所についても、繰り返して説明する。)局所フレキシビリティ指標LFIは、構造物上の2点 x_i と x_j に印加された一对の静的な単位集中モーメント荷重に対する変形の相対回転角変位であり、構造物のモーダルパラメータを用いて式(31)で計算される。式(31)は以下のように導出される。

【0043】

n次モード座標系での運動方程式を次のように書く。

【数 2 3】

$$\ddot{\xi}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{\xi}_n(t) + \omega_n^2 \xi_n(t) = f_n(t) \quad (19)$$

ただし $f_n(t)$ はモード外力であり、次式(20)で与えられる

【数 2 4】

$$f_n(t) = c_n^2 \int \phi_n(x) f(x, t) dx \quad (20)$$

【0044】

ここで分布外力 f は次のパワースペクトル $S_f(x, y, \omega)$ を持つ弱定常過程であるとする。

10

20

30

40

50

【数 2 5】

$$S_y(x, y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_f(x, y, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.1)$$

$$R_f(x, y, \tau) = E\{f(x, t)f(y, t - \tau)\}$$

【0045】

角速度センサの設置点を x_i 、 x_j とし、参照加速度センサの接地点を x_k とする。すると、2点 x_i 、 x_j の間の相対角速度応答 $z(x_i, x_j, t)$ と参照応答 $y(x_k, t)$ のクロススペクトル S_{zy} は次式(2.2)のようになる。

【数 2 6】

$$S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega) = -i\omega^3 \iint H(x_i, x_j, x, \omega) G^*(x_k, y, \omega) S_f(x, y, \omega) dx dy \quad (2.2)$$

ここで、右上付きの * は複素共役を表す。また、 G 、 H は以下のとおりである。

【数 2 7】

$$G(x_k, x, \omega) = \sum_{n=1}^N c_n^2 \phi_n^r(x_k) \phi_n(x) \Gamma_n(\omega)$$

$$H(x_i, x_j, x, \omega) = \sum_{n=1}^N c_n^2 \Psi_n(x_i, x_j) \phi_n(x) \Gamma_n(\omega) \quad (2.3)$$

$$\Gamma_n(\omega) = \frac{1}{-\omega^2 + \omega_n^2 + i2\zeta_n \omega_n \omega} \quad 20$$

同様に、参照加速度応答 $S_y(x_k, t)$ のパワースペクトルは次のようになる。

【数 2 8】

$$S_y(x_k, \omega) = \omega^4 \iint G(x_k, x, \omega) G^*(x_k, y, \omega) S_f(x, y, \omega) dx dy \quad (2.4)$$

【0046】

いま各モードの固有振動数が互いに離れており、モード減衰比が十分小さいとすると、 n 次固有振動数 ω_n では、 $n = m$ と $n \neq m$ の場合、式(2.5)の右辺の上下に示すようになる。

【数 2 9】

$$\Gamma_m(\omega_n) = \begin{cases} \frac{1}{i2\zeta_n \omega_n^2} \\ \frac{1}{2\zeta_n \omega_n^2} O(\zeta_n) \end{cases} \quad (2.5)$$

【0047】

よって、 n 次固有振動数 ω_n では、 G 、 H は次式(2.6)になる。

【数 3 0】

$$G(x_k, x, \omega_n) = \frac{c_n^2 \phi_n^r(x_k) \phi_n(x)}{i2\zeta_n \omega_n^2} (1 + O(\zeta_n)) \quad 40$$

$$H(x_i, x_j, x, \omega_n) = \frac{c_n^2 \Psi_n(x_i, x_j) \phi_n(x)}{i2\zeta_n \omega_n^2} (1 + O(\zeta_n)) \quad (2.6)$$

【0048】

これと式(2.2)、式(2.4)より、次式(2.7)および(2.8)を得る。

【数 3 1】

$$\begin{aligned}
& S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega_n) \\
&= -i\omega_n^3 \iint \frac{c_n^4 \Psi_n(x_i, x_j) \phi_n^{r*}(x_k) \phi_n(x) \phi_n^*(y)}{4\zeta_n^2 \omega_n^4} S_f(x, y, \omega_n) (1 + O(\zeta_n)) dx dy \quad (27) \\
&= \frac{-ic_n^4 \Psi_n(x_i, x_j) \phi_n^{r*}(x_k)}{4\zeta_n^2 \omega_n} (1 + O(\zeta_n)) \iint \phi_n(x) \phi_n^*(y) S_f(x, y, \omega_n) dx dy
\end{aligned}$$

【数 3 2】

$$\begin{aligned}
& S_y(x_k, \omega_n) \quad 10 \\
&= \omega_n^4 \iint \frac{c_n^4 |\phi_n(x_k)|^2 \phi_n(x) \phi_n^*(y)}{4\zeta_n^2 \omega_n^4} S_f(x, y, \omega_n) (1 + O(\zeta_n)) dx dy \quad (28) \\
&= \frac{c_n^4 |\phi_n^r(x_k)|^2}{4\zeta_n^2} (1 + O(\zeta_n)) \iint \phi_n(x) \phi_n^*(y) S_f(x, y, \omega_n) dx dy
\end{aligned}$$

【0049】

式(27)と式(28)の比をとると、式(29)

【数 3 3】

$$\frac{S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega_n)}{S_y(x_k, \omega_n)} = \frac{-i\Psi_n(x_i, x_j)}{\omega_n \phi_n^r(x_k)} (1 + O(\zeta_n)) \cong \frac{-i\Psi_n(x_i, x_j)}{\omega_n \phi_n^r(x_k)} \quad (29) \quad 20$$

となり、次式(30)を得る。

【数 3 4】

$$\left| \frac{S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega_n)}{S_y(x_k, \omega_n)} \right|^2 \cong \left\{ \frac{\Psi_n(x_i, x_j)}{\omega_n \phi_n^r(x_k)} \right\}^2 \quad (30)$$

【0050】

式(30)と式(3)、式(4)より、局所フレキシビリティ指標 LFI の近似評価式(31)が導出される。

【数 3 5】

$$\begin{aligned}
& LFI(i, j) = \sum_{n=1}^N a_n d_n \\
& d_n(x_i, x_j) \cong \left| \frac{S_{zy}(x_i, x_j, x_k, \omega_n)}{S_y(x_k, \omega_n)} \right|^2 \quad (31)
\end{aligned}$$

$$a_n = \{c_n \phi_n^r(x_k)\}^2 \quad 40$$

【0051】

上式(31)の右辺はN次元ベクトル空間の二つのベクトル{ a_1, \dots, a_N }と{ d_1, \dots, d_N }の内積になっている。このうちベクトル{ a_1, \dots, a_N }は各モードの参照モードシェイプを質量正規化したものからなり、正規化定数を含むため上述の通り求めることが難しいが、参照点および参照軸方向を適切に選ぶことにより、局所的な損傷によってほとんど変化しないベクトルと見なすことができる。一方、ベクトル{ d_1, \dots, d_N }は振動計測データからの算出が可能な量(固有振動数および質量正規化されていないモードシェイプ)からなり、局所的な損傷によって大きく変化する。そこで、式(31)のLFIを直接評価するのではなく、ベクトル{ d_1, \dots, d_N }の変化によってLFIの変化を近似的に評価する。具体的には、ベクトル{ d_1, \dots, d_N }の変化を非損傷時の基準ベクトルか

らの変動分のノルムで評価する。すなわち、損傷指標DIを次式(32)のように定義し、この指標の値の変化によって損傷を検出する。

【数36】

$$DI(i, j) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{present} - d_n(x_i, x_j)|_{baseline}\}^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \{d_n(x_i, x_j)|_{baseline}\}^2}} \quad (32)$$

ここで添え字presentは現在の評価値を、添え字baselineは評価の基準となる初期状態(または健全状態)における評価値を表す。

【0052】

さらには、上述の損傷指数評価を並進変形に関するフレキシビリティの評価に用いることも可能である。その場合は、センサの計測量として変位、速度、加速度などを選択すればよい。

【0053】

図1に、本発明の1実施形態による損傷診断システムを示す。この診断システムは、監視対象部位(たとえば溶接またはボルトで結合されているジョイント)10を挟んで設置した2個の角速度センサユニット20、これらと有線で接続され監視対象部位の近傍に設置された1個の無線センサノード30および無線アクセスポイント42を持つ1台のホストコンピュータ40からなる。無線センサノード30は、データ処理結果を無線で送信し、無線アクセスポイント42は、無線センサノード30からデータ処理結果を受信する。無線インターフェース38(図2)を用いず有線接続を用いてもよい。また、アクセスポイント42はホストコンピュータ40に直結されている必要はなく、LANなどを介して接続されていてもよい。

【0054】

図2は、この診断システムにおける信号処理系を概念的に示す。角速度センサユニット20に内蔵された角速度センサ(たとえばジャイロセンサ)22は設置点の角速度応答を計測し、その信号は増幅器24により増幅されて無線センサノード20に送られる。また、無線センサノード30に内蔵された加速度センサ32は参照データとして設置点の加速度応答を計測する。無線センサノード30では、これらの応答データはAD変換器34でデジタルデータに変換され、プロセッサ36はこれらのデジタルデータを信号処理して損傷指標DI(式(18))を算出する。プロセッサ36は、通常のコピュータと同様の構成を備え、評価の基準となる健全状態における上述の評価値を記憶していて、図示しない記憶装置に格納されている損傷指標DI算出のための計算処理プログラムにより、入力データを処理して、損傷指標DIを算出する。得られた損傷指標DIは無線インターフェース38を介してホストコンピュータ40に送信され、適切な後処理を経てユーザに提示される。無線インターフェース38は任意のものが利用できる。

【0055】

図3は、無線センサノード30のプロセッサ36で行う信号処理のフローチャートである。健全状態のベクトル $\{d_1, \dots, d_N\}$ は、以下の手順を用いて得られ、評価の基準となる健全状態における評価値として前もって記憶されている。まず、AD変換器34より各センサからの測定データを入力する(S10)。次に、固有振動数およびモードシェイプを求める。このため、相対角速度データと参照加速度データのFFT演算をし、相対角速度データと参照加速度データのクロススペクトルデータおよびパワースペクトルの比を求め、固有振動数とモードシェイプを求める(S12)。そして、固有振動数とモードシェイプを用いてベクトル $\{d_1, \dots, d_N\}$ を計算する(S14)。さらに、ベクトル $\{d_1, \dots, d_N\}$ の変化を非損傷時の基準ベクトルからの変動分のノルムで評価する(S16)。そして、損傷指標DIを求め(S18)、ホストコンピュータ40に送信する(S20)。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 6 】

この実施形態では、剛に結合されたジョイントにおける損傷を検出するために、曲げ変形に関する局所フレキシビリティ指標を評価している。このため、

(1) 相対モードシェイプの取得用に角速度センサを 2 個、参照モードシェイプの取得用に加速度センサを 1 個使用し、

(2) ベクトル $\{ d_1, \dots, d_N \}$ を振動計測データから算出するための手段として、相対角速度データと参照加速度データのクロススペクトルおよびパワースペクトルの比を用いる。

しかし、対象箇所および評価する変形様式、センサ構成（計測量、配置および組み合わせ）、固有振動数及びモードシェイプの算出手段およびベクトル変化の評価方法はこれらに限るものではなく、任意のものが適宜選択できる。

10

【 0 0 5 7 】

たとえば、センサの計測量として角速度ではなく角度や角加速度を利用してもよい。参照データとして加速度ではなく 2 点の角速度データのいずれか一方を用いることが可能な場合もあり、その場合はセンサ総数を 2 個にすることができる。固有振動数及びモードシェイプの算出手段としては、NEXT+ERA法や部分空間法などを用いてもよい。ベクトル変化の評価方法としては、非損傷時のベクトルとの内積を用いてもよいほか、さらに高度なパターン分類手法を用いてもよい。また、これらの信号処理は無線センサノード 30 内で行っているが、信号処理の一部または全てをホストコンピュータ 40 で行ってもよい。

【 0 0 5 8 】

振動応答検出センサ（たとえば角速度センサ 22）および参照応答検出センサ（たとえば加速度センサ 32）からの計測データは、無線センサノード 30 およびホストコンピュータ 40 で処理されるが、図 3 に示したデータ処理手順では、損傷監視場所ごとに設置した無線センサノード 30 内のプロセッサにおいて損傷指標を算出し、その結果すなわち「損傷指標の値」をホストコンピュータ 40 に送信している。ホストコンピュータ 40 は、複数点での損傷指数をまとめて記録し、ユーザに提示する。しかし、無線センサノード 30 およびホストコンピュータ 40 におけるデータ処理については種々の形態が可能である。1 例では、無線センサノード 30 では、計測データ取得までを行い、振動計測データを無線リンクで送信し、ホストコンピュータ 40 において、図 3 と同様なデータ処理手順を実行し損傷指標を評価する。他の例では、無線センサノード 30 では、図 3 のデータ処理手順の一部（たとえば、ベクトル $\{ d_n \}$ の算出まで）を行い、データ処理の途中結果を無線リンクでホストコンピュータ 40 に送信する。ホストコンピュータ 40 では、残りのデータ処理を実行して損傷指標を求める。そして、複数点での損傷指数をまとめて記録し、表示する。

20

30

【 0 0 5 9 】

次に、損傷診断の 1 例について説明する。図 4 に示す 4 層せん断構造物模型を用いて実験を行った。図 4 において左側が立面図であり、右側が第 1 層から第 3 層での上面図である。模型は、直立した 4 枚のアルミ製薄板柱 40（2mm 厚、40mm 幅）に最上層スラブ 42 を固定し、柱に等間隔に固定した支持ブロック 44 上に、第 1 層から第 3 層の中間層スラブ 46a, 46b, 46c の四隅をそれぞれ 4 本の M6 ボルト 48 で皿バネ座金を介して固定したものである。すべてのボルトを十分に締め付けた状態を健全状態と定義する。表 1 に示すように、損傷レベルは 4 つのボルトの緩め角で定義される。ボルトの番号 1 ~ 4 は図 4 中に示されている。中間層スラブの四隅の内の 3 ヲ所について、ボルトを順次緩め（損傷レベル 0 ~ 3）、次に、中間層スラブの四隅の内の残りの 1 ヲ所について、固定ボルト 48 を 10 段階で緩めることで、スラブと柱の締結剛性を変えて損傷状態を作り出した。表 1 に損傷状態の定義を示す。表 1 において、緩め角は、完全締め付け状態からボルトを緩み方向に回した角度である。>180 は、5 回転以上を意味し、完全に緩んだ状態に相当する。

40

【 0 0 6 0 】

表 1 損傷レベルの定義

50

【表 1】

損傷レベル	緩め角			
	ボルト 1	ボルト 2	ボルト 3	ボルト 4
0	0	0	0	0
1	> 1 8 0 0	0	0	0
2	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	0	0
3	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	0
4	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	9 0
5	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	1 8 0
6	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	2 7 0
7	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	3 6 0
8	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	5 4 0
9	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	7 2 0
1 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	9 0 0
1 1	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	1 0 8 0
1 2	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0	> 1 8 0 0

10

【 0 0 6 1 】

実際に相対速度応答を広帯域で計測することは困難であるので、この測定では対象部位の両側の点 x_i と点 x_j に角速度センサの 1 種であるジャイロセンサ（図示しない）を一つずつ設置し、これらで計測した角速度応答の差 $z(x_i, x_j, t)$ から必要なモーダルパラメータを推定する。ジャイロセンサとしては小型で安価な振動ジャイロを使用する。振動ジャイロは上限 50Hz 程度の帯域を持つものが各種入手可能であるが、この測定では Analog Devices Inc. の ADXRS401 を使用した。このセンサの諸元を表 2 に示す。

20

【 0 0 6 2 】

表 2 ジャイロセンサの諸元

【表 2】

範囲	+/- 7.5 deg/s
感度	1.5 mV/deg
帯域幅	20 Hz
分解能	0.2 deg/s
供給電圧	5 V
供給電流	6 mA

30

【 0 0 6 3 】

ジャイロセンサは、スラブ上に 1 個、支持ブロック上に 1 個、それぞれ検出軸が柱の曲げモーメントの作用軸方向と平行になる向きに取り付けた。さらに参照応答計測のための加速度センサ（ADXL311）（図示しない）を 1 個、検出軸がスラブの水平振動方向と平行になるよう取り付けた。

40

【 0 0 6 4 】

構造物模型全体を水平振動台に設置し、定常ピンクノイズでアクチュエータを駆動して加振を行った。各センサでの応答計測値は、サンプリング周波数 500 Hz、データ長 214 個で、各実験条件につき 2 回ずつ収録した。データを 1024 個ずつのセグメントに分割し、それぞれのセグメントにハニング窓をかけたのち、ゼロを付加して長さを 8 倍に伸張したものを高速フーリエ変換した。これらを適切な組み合わせで掛け合わせてから全セグメントについて算術平均をとることによって、必要なパワースペクトルおよびクロスパワースペクトルを計算した。

50

【0065】

次に、実験結果について説明する。第1層から第3層のスラブ44a～44cと支持ブロック42の締結節について、おのおの表1に示した損傷状態を設定して実験を行った。

【0066】

まず、図5a～図5cに、加速度応答のパワースペクトルから読み取った固有振動数の各損傷状態における値を示す。図5a、図5bおよび図5cは、それぞれ、第1層から第3層の中間層スラブ44a、44b、44cでの固有振動数の変化を示す。健全状態（スラブと支持ブロックが4カ所で完全締結されている状態）と最もレベルの大きな損傷状態（スラブと支持ブロックの締結節4カ所のうちの 하나가完全に切れた状態）を比較しても、固有振動数の有意な変化は見られないことがわかる。

10

【0067】

次に、図6a～図6cに、損傷指標を求めた結果を示す。損傷指標を計算する際には、健全時における1回目の試行から得られたベクトル $\{d_1, \dots, d_N\}$ を $\{d_1, \dots, d_N\}_{baseline}$ として採用した。図6a～図6cで損傷レベル0（健全状態）にプロットされている損傷指標の値は、健全時における2回目の試行から得られた $\{d_1, \dots, d_N\}$ を $\{d_1, \dots, d_N\}_{baseline}$ として計算したものである。図6a～図6cより、いずれの層を損傷させた場合も、損傷の進行にしたがって損傷指標が増加していることがわかる。

【0068】

さらに、損傷指標の推移は、(I)健全状態から損傷レベル3まで、(II)損傷レベル4、(III)損傷レベル5以降、の3領域に分かれていることがわかる。(I)の領域での損傷指標の値は健全状態における値と同程度であり、これは、損傷の影響が、損傷指標のばらつきの範囲にとどまっていることを意味している。すなわちこの領域の損傷レベルは検出することができない。損傷レベル3までの範囲ではボルト4が完全締結の状態のまま残っており、締結節の剛性は実質的にほとんど低下していないと考えられることから、この結果は妥当であると考えられる。(II)の領域に入ると損傷指標は急激に増加する。これは残り1本のボルト4が緩み始めるため、締結節の剛性が実質的に、低下し始めるためである。損傷指標の値はボルト4が半回転する間に急激に増大し、半回転以降(領域(III))はほぼ飽和して漸増する傾向が見られる。半回転以降はボルトの締め付け力がほとんど失われていると考えられる。

20

【0069】

今回の実験では、締結ボルトに皿バネ座金を併用するなどある程度の工夫を講じたにもかかわらず、損傷指標の増加が不連続的に急激に進展する結果となったので、損傷の検出限界を詳細に調べることができなかつた。検出限界を調べるためには、実験装置をさらに工夫して損傷状態を連続に制御することが必要であると考えられる。

30

【0070】

以上に説明したように、せん断構造物模型を用いた実験では、スラブと柱の締結剛性の低下を検出することに成功した。この診断では、1カ所の局所フレキシビリティを評価するのに対象部位の近傍に2個ないしは3個のセンサを設置するだけでよく、興味のある対象部位ごとに独立に計測系および演算系を構成することができるという利点がある。このため無線センサネットワーク環境との相性がよく、将来的には無線センサネットワークシステムを利用した分散処理による構造ヘルスマモニタリング手法としての発展が期待できる。

40

【0071】

また、図1に示す例では1箇所の損傷診断を行っているが、複数箇所の診断を行う場合には、図7に示すように、それぞれの箇所に角速度センサユニット及び無線センサノードを配置すればよい。診断のための装置および計算処理が対象部位ごとに互いに独立であるので、監視箇所の追加/削除が容易である。

【0072】

また、上述の損傷診断システムは、高層建築物や社会基盤構造物などの構造ヘルスマモニタリング、個人住宅（木造住宅など）や各種施設の動的精密耐震診断、プラントの各種静

50

止機器などのモニタリング、風力発電タービンブレード、ヘリコプターのロータなどの損傷モニタリング、航空宇宙構造物のヘルスマニタリングなど、さまざまな分野に適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0073】

【図1】 損傷検出システムの図

【図2】 データ処理系を示す図

【図3】 信号処理プログラムのフローチャート

【図4】 4層せん断構造物模型の図

【図5 a】 第1層での損傷レベルに対する固有振動のグラフ

10

【図5 b】 第2層での損傷レベルに対する固有振動のグラフ

【図5 c】 第3層での損傷レベルに対する固有振動のグラフ

【図6 a】 第1層での損傷レベルに対する損傷指標のグラフ

【図6 b】 第2層での損傷レベルに対する損傷指標のグラフ

【図6 c】 第3層での損傷レベルに対する損傷指標のグラフ

【図7】 損傷検出システムの変形例の図

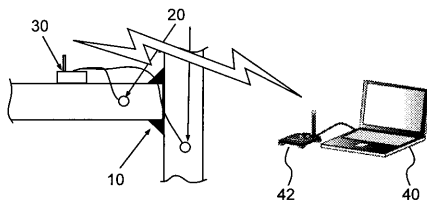
【符号の説明】

【0074】

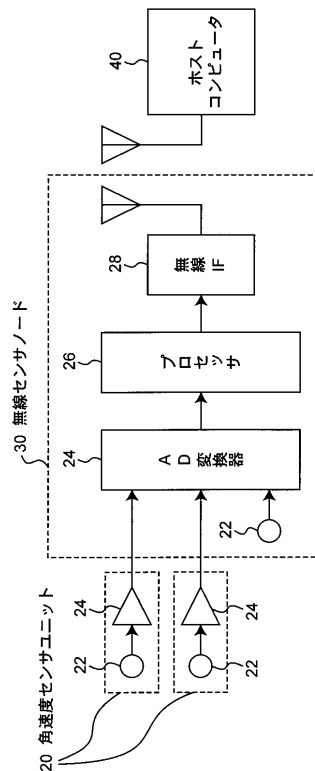
20 角速度センサユニット、 22 角速度センサ、 30 無線センサノード、 32 加速度センサ、 36 プロセッサ、 40 ホストコンピュータ。

20

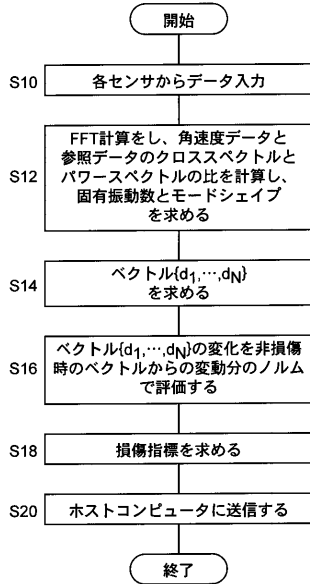
【図1】



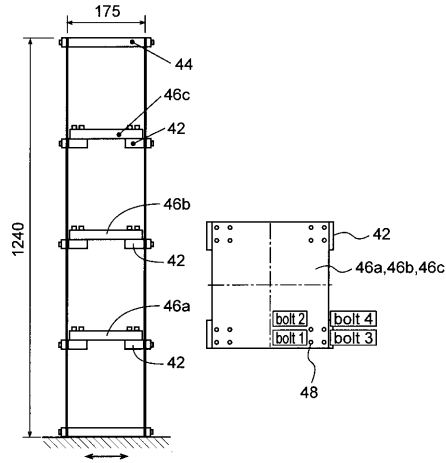
【図2】



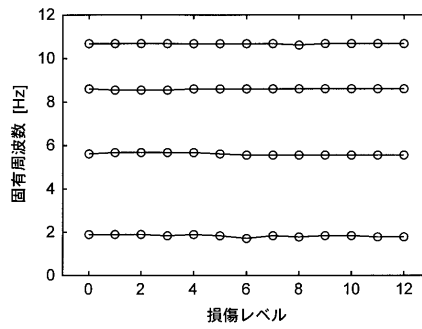
【図3】



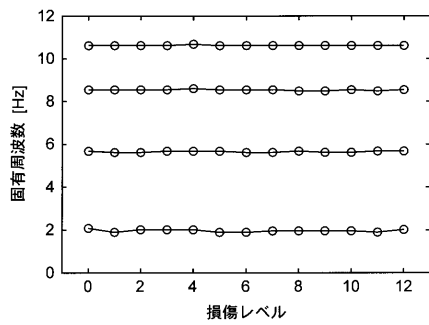
【図4】



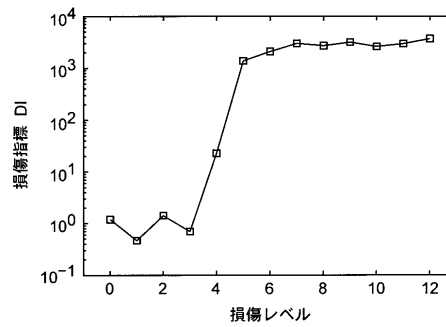
【図5 a】



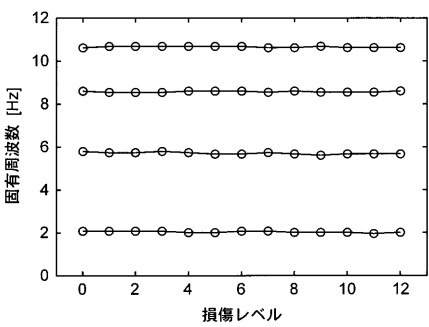
【図5 b】



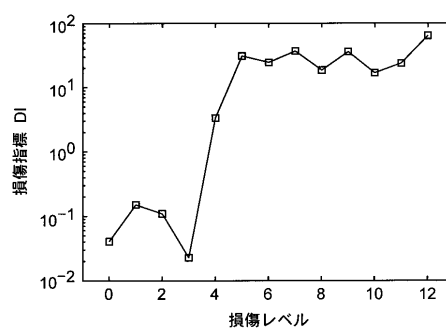
【図6 a】



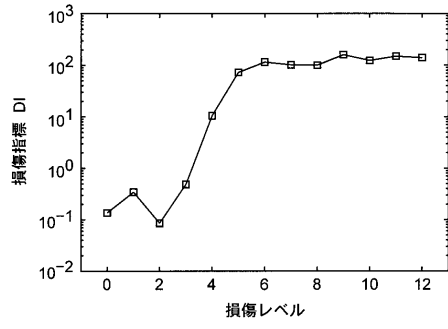
【図5 c】



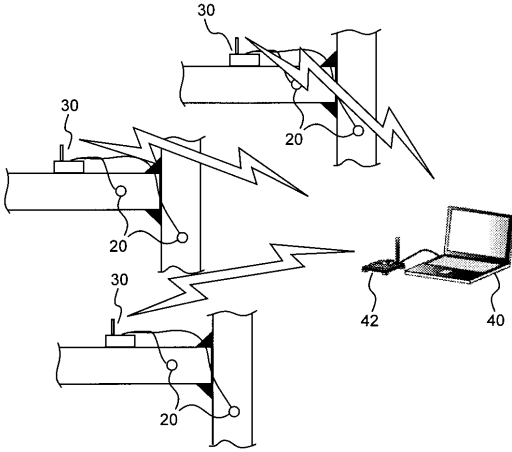
【図6 b】



【図 6c】



【図 7】



フロントページの続き

審査官 福田 裕司

- (56)参考文献 増田新 他, "時間周波数解析によるはり状構造物の損傷モニタリング", No. 03-8 第8回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 社団法人日本機械学会, 2003年10月30日, 641~644頁
- 山下真史 他, "MEMSジャイロセンサによるはり構造物の損傷モニタリング", No. 05-15 第9回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 社団法人 日本機械学会, 2005年 8月23日, 421~424頁
- 中根寿浩 他, "建築構造物の部材レベル損傷同定手法", 日本地震工学会大会 - 2005梗概集, 日本地震工学会, 2005年11月, 402~403頁

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01M 99/00

G01H 17/00

JSTPlus(JDreamII)