

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-194514
(P2016-194514A)

(43) 公開日 平成28年11月17日(2016.11.17)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
GO 1 M 99/00 (2011.01)	GO 1 M 99/00	Z
GO 1 M 7/02 (2006.01)	GO 1 M 7/00	A
		2 GO 2 4

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2016-69596 (P2016-69596)
 (22) 出願日 平成28年3月30日 (2016. 3. 30)
 (31) 優先権主張番号 特願2015-73887 (P2015-73887)
 (32) 優先日 平成27年3月31日 (2015. 3. 31)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 506218664
 公立大学法人名古屋市立大学
 愛知県名古屋市瑞穂区瑞穂町字川澄 1
 (74) 代理人 100095577
 弁理士 小西 富雅
 (74) 代理人 100100424
 弁理士 中村 知公
 (74) 代理人 100188411
 弁理士 阪下 典子
 (72) 発明者 張 景耀
 愛知県名古屋市千種区北千種二丁目 1 番 1
 O 号 公立大学法人名古屋市立大学 大学院芸術工学研究科内

最終頁に続く

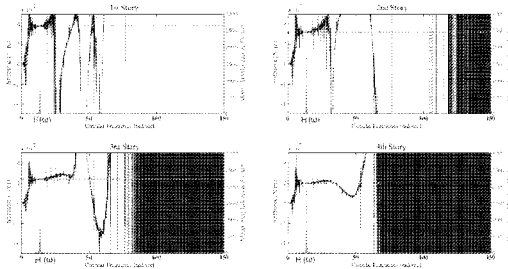
(54) 【発明の名称】 建築物の層剛性を同定する方法及びその装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 建築物の各層の剛性を短時間でかつ高精度に同定できる方法を提供する。

【解決手段】 建築物の各層の質量を質量メモリに保存するステップと、建築物の各層の加速度応答(周波数領域)を加速度応答メモリに保存するステップと、各層の加速度応答及び質量を読み出して、各層の剛性スペクトルを演算する第2の演算ステップとを備える。

【選択図】 図 1 0



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

コンピュータ装置の質量メモリに建築物の各層の質量 m を保存する質量保存ステップと

、
前記コンピュータ装置の加速度応答メモリに前記建築物の各層の加速度応答（周波数領域） $U_{n..}$ を保存する加速度応答保存ステップと、

前記コンピュータ装置の第 1 の演算部が、層 n の前記加速度応答 $U_{n..}$ 及び質量 m_n を読み出して、下記式（1）を演算し、層 n の剛性スペクトル k_n を演算する第 1 の演算ステップと、

【数 1 4】

式（1）

$$k_n = \omega^2 \operatorname{Re} \left(\frac{\sum_{j=n}^N m_j \ddot{U}_j}{\ddot{U}_n - \ddot{U}_{n-1}} \right)$$

ここに、 ω は円振動数、 $\operatorname{Re}(\)$ は（ ）内の実部、 m_j は層 j の質量、 $U_{n..}$ は層 n の加速度応答（周波数領域）である、

を含む、建築物の層剛性を同定する層剛性同定方法。

【請求項 2】

前記コンピュータ装置の第 2 の演算部が前記層 n の伝達関数（周波数領域）の平均値を演算する第 2 の演算ステップと、

前記コンピュータ装置の第 3 の演算部が前記演算された伝達関数（周波数領域）の平均値を重みとして前記剛性スペクトル k_n を重み付け平均する第 3 の演算ステップと、が更に含まれる請求項 1 に記載の層剛性同定方法。

【請求項 3】

前記第 2 の演算ステップは下記式（2）を演算して前記伝達関数（周波数領域）の平均値 $H(\)$ を演算し、

【数 1 5】

式（2）

$$H(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_n(\omega)$$

但し N は最上層、

ここに $H_n(\)$ は下記式（3）であらわされる。

【数 1 6】

式（3）

$$H_n(\omega) = \frac{|\ddot{U}_n(\omega)|^2}{|\ddot{U}_0(\omega)|^2}$$

ここに、 $U_{0..}(\)$ は地上における加速度応答（周波数領域）であり、 $U_{n..}(\)$ は層 n の加速度応答（周波数領域）であり、

10

20

30

40

50

前記第 3 の演算ステップは、前記伝達関数（周波数領域）の平均値 $H(\omega)$ を二乗して $H(\omega)^2 = w_i$ を演算する重み演算ステップと、

演算された前記重み w_i を用いて下記式（4）を実行し、

【数 17】

式（4）

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n^d} w_i x(\omega_i)}{\sum_{i=1}^{n^d} w_i}$$

10

重み付平均値 \bar{x} を得る、請求項 2 に記載の層剛性同定方法。

【請求項 4】

前記層 n の剛性スペクトル k_n を出力する出力ステップが更に備えられる請求項 1 に記載の同定方法。

【請求項 5】

前記剛性スペクトル k_n へ各層の伝達関数（周波数領域）の平均値を重ねて出力する、請求項 4 に記載の同定方法。

【請求項 6】

建築物の全層の質量 m を保存する質量メモリと、

20

前記建築物の各層の加速度応答（周波数領域） U_n を保存する加速度応答メモリと、

層 n の前記加速度応答 U_n 及び質量 m_n を読み出して、下記式（1）を実行し、層 n の剛性スペクトル k_n を演算する第 1 の演算部と、

【数 18】

式（1）

$$k_n = \omega^2 \operatorname{Re} \left(\frac{\sum_{j=n}^N m_j \ddot{U}_j}{\ddot{U}_n - \ddot{U}_{n-1}} \right)$$

30

ここに、 ω は円振動数、 $\operatorname{Re}(\cdot)$ は (\cdot) 内の実部、 m_j は層 j の質量、 U_n は層 n の加速度応答（周波数領域）である、

を備える、建築物の層剛性を同定する層剛性同定装置。

【請求項 7】

前記層 n の伝達関数（周波数領域）の平均値を演算する第 2 の演算部と、

前記演算された伝達関数（周波数領域）の平均値を重みとして前記剛性スペクトル k_n を重み付け平均する第 3 の演算部と、が更に備えられる請求項 6 に記載の層剛性同定装置

40

【請求項 8】

前記第 2 の演算部は下記式（2）を演算して前記伝達関数（周波数領域）の平均値 $H(\omega)$ を演算し、

【数 19】

式 (2)

$$H(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_n(\omega)$$

但し N は最上層、

ここに、 $H_n(\omega)$ は下記式 (3) であらわされる。

10

【数 20】

式 (3)

$$H_n(\omega) = \frac{|\ddot{U}_n(\omega)|^2}{|\ddot{U}_0(\omega)|^2}$$

ここに、 $U_0(\omega)$ は地上における加速度応答 (周波数領域) であり、 $U_n(\omega)$ は層 n の加速度応答 (周波数領域) であり、

20

前記第 3 の演算部、前記伝達関数 (周波数領域) の平均値 $H(\omega)$ を二乗して $H(\omega)^2 = w_i$ を演算する重み演算ステップと、

演算された前記重み w_i を用いて下記式 (4) を実行し、

【数 21】

式 (4)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n^d} w_i x(\omega_i)}{\sum_{i=1}^{n^d} w_i}$$

30

得られた重み付平均値 \bar{x} を得る、請求項 7 に記載の層剛性同定装置。

【請求項 9】

前記層 n の剛性スペクトル k_n を出力する出力装置が更に備えられる請求項 6 に記載の層剛性同定装置。

【請求項 10】

前記剛性スペクトル k_n へ各層の伝達関数 (周波数領域) の平均値を重ねて出力する第 2 の出力装置が更に備えられる、請求項 9 に記載の層剛性特定方法。

【請求項 11】

請求項 1 ~ 5 の何れかに記載の層剛性同定方法をコンピュータ装置に実行させる、該コンピュータ装置が読み込み可能なコンピュータプログラム。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、建築物の層剛性を同定する方法及びその装置の改良に関する。

【背景技術】

【0002】

建築物の剛性低下はその耐震能力の低下に繋がる。多層構造の建築物においては地震の影響が特定の層に集中することがある。そこで、多層建築物における各層の剛性を常にモニタリングしておいて、地震が発生した後も当該モニタリングを実施し、地震発生前後の

50

剛性の変化を把握することが求められている。

各層の剛性を直接特定してその変化を観察することは不可能なため、従来では建築物に加速度センサを設置して、この加速度センサの出力をフーリエ変換して得られた加速度応答スペクトルのピークを観察することによりその剛性の変化を推定していた。ある層の剛性が変化すれば、理論上、加速度応答スペクトルのピークも変化するからである。しかしながら、計測雑音や非構造材の影響により、または解像度の設定具合により、加速度応答スペクトルには複数本のピークが密集的に現れることがある。その場合、建築物の真の固有振動数に最も近いピークの選定が困難なことはもとより、層剛性の変化に伴いその固有振動数も変化するので、時間をおいて観察したときに常に真値に近いピークを選定してその変化を特定することは困難である。更には、ピークの変化のみから剛性の変化の度合いを把握することは難しく、またピークの変化から層の剛性の変化を数値化することには多大な手間がかかる（通常一日程度）。

10

そこで、各層に設置されたセンサの出力を用いてこれをコンピュータ装置で演算処理することにより、各層の剛性をリアルタイムで同定し、その値を表示することが考えられる。

【0003】

例えば、非特許文献1では、最上階から順番に層剛性を同定する方法が開示されている。

また、非特許文献2には近似関数の極限值を利用する方法が開示されている。

20

更には特許文献1～6を参照されたい。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2014-134436号公報

【特許文献2】特開2011-247700号公報

【特許文献3】特開2008-39534号公報

【特許文献4】特開2014-211387号公報

【特許文献5】特開2014-134436号公報

【特許文献6】特開2007-57252号公報

【非特許文献】

30

【0005】

【非特許文献1】Structural Control and Health Monitoring 2013; 20(5), pp. 804-820, Zhang et al.

【非特許文献2】Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2000; 29(8), pp. 1219-1238, Takewaki et al.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

従来提案されている層剛性の同定方法のうち、最上階から順に層剛性を演算していく方法では、演算された層の剛性を利用してその下の層の剛性を演算するため、下の層になればなるほど誤差の累積が生じる。よって、層剛性の同定精度に高い信頼性を得難い。

40

近似関数の極限值を利用する方法においても、近似関数の選定及び範囲の選定時に誤差が含まれるので、同じく同定精度に高い信頼性を得難い。

【課題を解決するための手段】

【0007】

そこでこの発明は、建築物の各層の剛性を高精度に同定できる方法を提供することを目的とする。

上記目的を達成すべく本発明者らは鋭意検討を重ねた結果、以下に規定する本件発明に想到した。即ち、この発明の第1の局面は次のように規定される。

コンピュータ装置の質量メモリに建築物の各層の質量 m を保存する質量保存ステップと

50

前記コンピュータ装置の加速度応答メモリに前記建築物の各層の加速度応答（周波数領域） $U_{n..}$ を保存する加速度応答保存ステップと、

前記コンピュータ装置の第1の演算部が、層nの前記加速度応答 $U_{n..}$ 及び質量 m_n を読み出して、下記式（1）を演算し、層nの剛性スペクトル k_n を得る第1の演算ステップと、

【数1】

式（1）

$$k_n = \omega^2 \operatorname{Re} \left(\frac{\sum_{j=n}^N m_j \ddot{U}_j}{\ddot{U}_n - \ddot{U}_{n-1}} \right)$$

10

ここに、 ω は円振動数、 $\operatorname{Re}()$ は（）内の実部、 m_j は層jの質量、 $U_{n..}$ は層nの加速度応答（周波数領域）である、

を含む、建築物の層剛性を同定する層剛性同定方法。

【0008】

このように規定される第1の局面の層剛性同定方法によれば、層nの剛性スペクトル k_n （周波数領域：この明細書では特に断らない限り、スペクトルは周波数領域のものを指す）が得られる。このスペクトルは、平坦な領域を持つ。この平坦な領域は層nの実の剛性 K_n と略等しくなる。よって、剛性スペクトル k_n を画面やプリンタを用いて視認できるように出力すれば（第4の局面参照）、目視により層nの剛性を同定できる。

20

【0009】

本発明者らは、第1の局面で得られた剛性スペクトル k_n をコンピュータ処理して、いわゆる自動的に、層nの剛性を同定しようと考えた。そのためにコンピュータ装置に入力するパラメータとして各層の伝達関数（周波数領域）に着目した。伝達関数の大きな周波数成分iに対応する剛性 k_{ni} が際立つようにした。そのための手法として重み付け平均を行う。即ち、この発明の第2の局面は次のように規定される。

30

第1の局面で規定される層剛性同定方法において、

前記コンピュータ装置の第2の演算部が前記層nの伝達関数（周波数領域）の平均値を演算する第2の演算ステップと、

前記コンピュータ装置の第3の演算部が前記演算された伝達関数（周波数領域）の平均値を重みとして前記剛性スペクトル k_n を重み付け平均する第3の演算ステップと、が更に含まれる。

【0010】

より具体的には、第3の局面に示す数式を用いた。即ち、この発明の第3の局面は次のように規定される。

前記第2の演算ステップは下記式（2）を演算して前記伝達関数（周波数領域）の平均値 $H()$ を演算し、

40

【数2】

式（2）

$$H(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_n(\omega)$$

但しNは最上層、

50

ここに $H_n(\omega)$ () は下記式 (3) であらわされる。

【数 3】

式 (3)

$$H_n(\omega) = \frac{|\ddot{U}_n(\omega)|^2}{|\ddot{U}_0(\omega)|^2}$$

ここに、 $U_0 \dots$ () は地上における加速度応答 (周波数領域) であり、 $U_n \dots$ () は 10
層 n の加速度応答 (周波数領域) であり、

前記第 3 の演算ステップは、前記伝達関数 (周波数領域) の平均値 H () を二乗して
 H () $^2 = w_i$ を演算する重み演算ステップと、

演算された前記重み w_i を用いて下記式 (4) を実行する。

【数 4】

式 (4)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n^d} w_i x(\omega_i)}{\sum_{i=1}^{n^d} w_i}$$

20

得られた重み付平均値 \bar{x} は層 n の実の層剛性 K_n に極めて近似する。

【0011】

ここにおいて、式 (3) に示す伝達関数 H_n () は地上の加速度応答 (周波数領域)
の二乗と層 n の加速度応答 (周波数領域) の二乗との比であらわされる。加速度応答の複
数乗を用いて伝達関数 H_n () を特定することもできる。伝達関数 H_n () は地上の
加速度応答 (周波数領域) と層 n の加速度応答 (周波数領域) との比で特定することもで
きる。

第 3 の局面では、平均値 H () を二乗してこれを重み w_i としている。同定に要求さ 30
れる層剛性の精度に応じて、この二乗処理を省略したり、また複数乗としたりすること
ができる。

第 3 の局面で規定の層剛性同定方法を用いることにより、各層の剛性を正確に同定でき
る。

【0012】

以上、各層 n の実の層剛性 K_n の値が式 (4) の重み付平均値で近似され、かつその値
は式 (1) で表される剛性スペクトル k_n の平坦部分に大凡一致することを説明してきた
。

本発明者らの観察によれば、伝達関数の平均値 H () の周波数が全ての層においてそ
の剛性スペクトル k_n の平坦部分の周波数に一致する。そこで、各層の伝達関数の平均値 40
 H () を層 n の剛性スペクトル k_n に重ねて表示することが好ましい。

なお、各層の剛性スペクトル k_n へ、各層の加速度応答 $U_n \dots$ のピークその他の周波数
領域で規定されたピークを重ねて表示することも可能である。

【0013】

この発明の第 5 の局面は次のように規定される。即ち、

層 n の剛性スペクトル k_n を出力する第 4 の局面で規定される層剛性同定方法において
、前記剛性スペクトル k_n へ各層の伝達関数 (周波数領域) の平均値を重ねて出力する。

【0014】

この発明は装置としてとらえることもでき、その場合第 6 ~ 第 8 の局面として規定され
る。即ち、第 6 の局面は次のように規定される。

50

建築物の全層の質量 m を保存する質量メモリと、
 前記建築物の各層の加速度応答（周波数領域） $U_{n..}$ を保存する加速度応答メモリと、
 層 n の前記加速度応答 $U_{n..}$ 及び質量 m_n を読み出して、下記式（１）を実行し、層 n
 の剛性スペクトル k_n を演算する第 1 の演算部と、
 【数 5】

式（１）

$$k_n = \omega^2 \operatorname{Re} \left(\frac{\sum_{j=n}^N m_j \ddot{U}_j}{\ddot{U}_n - \ddot{U}_{n-1}} \right) \quad 10$$

ここに、 ω は円振動数、 $\operatorname{Re}(\)$ は（ ）内の実部、 m_j は層 j の質量、 $U_{n..}$ は層 n の
 加速度応答（周波数領域）である、
 を備える、建築物の層剛性を同定する層剛性同定装置。

このように規定される第 6 の局面の層剛性同定装置によれば、第 1 の局面で規定の発明
 と同等の作用効果が得られる。

【0015】

第 7 の局面は次のように規定される。即ち、

第 6 の局面で規定の層剛性同定装置において、前記層 n の伝達関数（周波数領域）の平
 均値を演算する第 3 の演算部と、

前記演算された伝達関数（周波数領域）の平均値を重みとして前記剛性スペクトル k_n
 を重み付け平均して層 n の重み付け平均 x_n を演算する第 4 の演算部と、 x_n が更に備えられ
 る。

このように規定される第 7 の局面の層剛性同定装置によれば、第 2 の局面で規定の発明
 と同等の作用効果が得られる。

【0016】

第 8 の局面は次のように規定される。即ち、

第 7 の局面で規定の層剛性同定装置において、前記第 2 の演算部は下記式（２）を演算
 して前記伝達関数（周波数領域）の平均値 $H(\omega)$ を演算し、

【数 6】

8

式（２）

$$H(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_n(\omega)$$

40

但し N は最上層、

ここに、 $H_n(\omega)$ は下記式（３）であらわされる。

【数 7】

式（３）

$$H_n(\omega) = \frac{|\ddot{U}_n(\omega)|^2}{|\ddot{U}_0(\omega)|^2}$$

50

ここに、 $U_0 \dots ()$ は地上における加速度応答（周波数領域）であり、 $U_n \dots ()$ は層 n の加速度応答（周波数領域）であり、

前記第 3 の演算部は、前記伝達関数（周波数領域）の平均値 $H ()$ を二乗して $H ()^2 = w_i$ を演算し、

演算された前記重み w_i を用いて下記式（4）を実行する。

【数 8】

式（4）

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n^d} w_i x(\omega_i)}{\sum_{i=1}^{n^d} w_i}$$

10

このように規定される第 7 の局面の層剛性同定装置によれば、第 3 の局面で規定の発明と同等の作用効果が得られる。

【0017】

この発明の第 9 の局面は次のように規定される。即ち、

第 6 の局面に規定の層剛性同定装置において、前記層 n の剛性スペクトル k_n を出力する出力装置が更に備えられる。

このように規定される第 9 の局面の層剛性同定装置によれば、第 4 の局面で規定の発明と同等の作用効果が得られる。

20

【0018】

この発明の第 10 の局面は次のように規定される。即ち、

第 9 の局面に規定の層剛性同定装置において、前記剛性スペクトル k_n へ各層の伝達関数（周波数領域）の平均値を重ねて表示する第 2 の出力装置が備えられる。

【0019】

この発明はまた、コンピュータプログラムに関する発明として把握することもできる。即ち、この発明の第 11 の局面は次のように規定される。

第 1 ~ 第 5 の局面の何れかに記載の層剛性同定方法をコンピュータ装置に実行させる、該コンピュータ装置が読み込み可能なコンピュータプログラム。

30

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図 1】図 1 はこの発明の実施例の同定方法を実行する際に利用した建築物のモデルを示す概念図。

【図 2】図 2 はこの発明の実施の形態の層剛性同定装置 1 の構成を示すブロック図である。

【図 3】図 3 は層剛性同定装置 1 により実行される同定方法を説明するためのフローチャートである。

【図 4】図 4 は他の実施の形態の層剛性同定装置 10 の構成を示すブロック図である。

【図 5】図 5 は層剛性同定装置 10 により実行される同定方法を説明するためのフローチャートである。

40

【図 6】図 6 は実施例の層剛性同定装置 30 の構成を示すブロック図である。

【図 7】図 7 は実施例の同定方法を実行する際に利用した地震波（時間領域）を示す。

【図 8】図 8 は図 1 に示す建築物の各層の加速度センサの出力（時間領域）である。

【図 9】図 9 は各層の剛性スペクトルを示す。

【図 10】図 10 は各層の剛性スペクトルへ伝達関数（加速度応答の二乗の比）の平均値 $H ()$ を重畳させた図である。

【図 11】図 11 は伝達関数（加速度応答の比）の平均値 $H ()$ のピークを示す。

【図 12】図 12 は図 9 の各層の剛性スペクトルに図 11 のピークを重ねさせた図である。

50

【図13】図13は各層の減衰定数スペクトルへ伝達関数（加速度応答の二乗の比）の平均値 $H(\quad)$ を重畳させた図である。

【図14】図14は減衰定数を同定するための装置の構成を示すブロック図である。

【図15】図15は実施例の同定方法を実行する際に利用した他の地震波（時間領域）を示す。

【図16】図16はRC造減築例の建築物を示し、(A)は減築前、(B)は減築補強後を示す。

【図17】図17は図16に示した減築建築物の各層の剛性スペクトル k_n を示す。

【図18】図18は伝達関数の平均値 $H(\quad)$ を示し、平均値 $H(\quad)$ を算出するにあたり、Aは加速度応答の比(A)、(B)は加速度応答の二乗の比、(C)は加速度応答の4乗の比である。

【図19】図19は図17の剛性スペクトルへ図18(C)のピークを重畳させたものである。

【図20】図20はRC造灯台に適用する例を示す。

【図21】図21はRC造灯台に関する剛性スペクトルと伝達関数の平均値 $H(\quad)$ をともに表示した図であり、上二段のチャートは第1層及び第2層を示し、下二段のチャートは第3層及び第4層を示す。

【発明を実施するための形態】

【0021】

図1に、建築物のモデルを示す。図1において、0, 1, 2, n, Nは建物の階層を示す。即ち、0はグランドレベルを示し、Nは最上層を示す。 m_n は層nの質量、 u_n は地震による層nの変位を示す。この例では紙面左右方向の変位を表す。勿論、地震により建物は紙面垂直方向及び紙面上下方向への変位も生じるが、ここでは説明の簡素化のため一方向の変位のみを抽出して説明する。

k_n は式(1)から得られる各層の剛性スペクトルである。

c_n は実施例で説明する各層の減衰定数スペクトルである。

各層の床にはu方向の加速度センサ $A_0 \sim N$ が固定されている。グランドに固定される加速度センサ A_0 は地震センサとして使用することもできる。

【0022】

図2にこの発明の層剛性同定装置1のブロック図を示す。

フーリエ変換部2は建築物の各層のフロアに固定された加速度センサ $A_0 \sim N$ の出力をフーリエ変換し、各層の加速度応答として加速度応答メモリ5に保存する。質量メモリ3には各層の質量が保存される。

第1の演算部9は質量メモリ3から層nの質量 m_n を読み出し、加速度応答メモリ5から層nの加速度応答を読み出して、それらを式(1)に代入して各層の剛性スペクトル k_n を演算する。演算された層nの剛性スペクトル k_n を出力装置7から出力する。

【0023】

図3は、図2の層剛性同定装置1の動作を示すフローチャートである。

ステップ1では、建築物が地震にさらされているか否か（即ち、地震状態にあるか否か）を判定し、地震状態にあるときにデータをサンプリングする。地震状態にあるか否かの判定基準は任意に定めることができるが、加速度センサ A_0 の出力が所定値以上のときを地震状態と判定し、加速度センサ A_0 の出力とともに他の加速度センサ $A_1 \sim N$ の出力（加速度応答（時間領域））を保存してデータサンプリングとする。加速度センサ A_0 の出力が所定値を下回ったとき、データのサンプリングを中止し、ステップ5に進む。

なお、地震状態との判定が所定時間以下の場合は、建築物に対する影響が小さいものとみなして、ステップ5へ進まないこともできる。

加速度センサの出力（時間領域）の全て、若しくはそのフーリエ変換後の加速度応答（周波数領域）の全てのデータを一旦保存する。その後、他の地震計等のデータを参照して自動的に、若しくはマニュアルで、保存したデータの中から地震に関係する部分の抽出を行ってもよい。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 4 】

ステップ 5 では、フーリエ変換部 2 が周知の演算ソフトを用いてステップ 3 で取得した加速度応答（時間領域）をフーリエ変換して各層の加速度応答（周波数領域）とし、加速度応答メモリ（第 2 のメモリ）5 へ保存する。

建築物に設置された加速度センサが加速度応答（周波数領域）を出力できるタイプであれば、その出力データを加速度応答メモリ 5 へ直接書き込むこともできる。

【 0 0 2 5 】

ステップ 7 では、下記式（ 1 ）を演算する。

【 数 9 】

式（ 1 ）

$$k_n = \omega^2 \operatorname{Re} \left(\frac{\sum_{j=n}^N m_j \ddot{U}_j}{\ddot{U}_n - \ddot{U}_{n-1}} \right)$$

ここに、 ω は円振動数、 $\operatorname{Re} ()$ は $()$ 内の実部、 m_j は層 j の質量、 $U_{n..}$ は層 n の加速度応答（周波数領域）である。

演算した結果の層 n の剛性スペクトル k_n を出力装置 7 から出力することができる。

層 n の剛性スペクトルにはデータが平坦な部分が存在し、その値が層 n の実の剛性 K_n と略等しい。

【 0 0 2 6 】

図 4 は他の実施形態の層剛性同定装置 10 を示すブロック図であり、図 5 は同フローチャートである。なお、図 4、5 において図 2、3 と同一の要素には同一の符号を付してその説明を省略する。

図 4 に示す第 2 の演算部 11 は各層 n における伝達関数の平均値 $H ()$ を演算する（図 5 のステップ 9）。

伝達関数の平均値 $H ()$ は例えば次のようにして求められる。

【 数 1 0 】

式（ 2 ）

$$H(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_n(\omega)$$

但し N は最上層、

ここに $H_n ()$ は下記式（ 3 ）であらわされる。

【 数 1 1 】

式（ 3 ）

$$H_n(\omega) = \frac{|\ddot{U}_n(\omega)|^2}{|\ddot{U}_0(\omega)|^2}$$

ここに、 $U_{0..} ()$ は地上における加速度応答（周波数領域）であり、 $U_{n..} ()$ は層 n の加速度応答（周波数領域）である。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 7 】

第3の演算部12では、上記で得られた伝達関数の平均値を重みとして剛性スペクトル k_n に対して重み付け平均の演算を行い（図5のステップ11）、得られた重み付け平均値 \bar{x} を層 n の剛性 K_n として出力する（図5のステップ13）。

かかる重み付け平均値 \bar{x} は、例えば次のようにして求められる。

伝達関数（周波数領域）の平均値 $H(\omega)$ を二乗して $H(\omega)^2 = w_i$ を演算し、演算された重み w_i を用いて下記式（4）を実行し、

【数12】

式（4）

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n^d} w_i x(\omega_i)}{\sum_{i=1}^{n^d} w_i}$$

10

得られた重み付平均値 \bar{x} を層 n の層剛性 K_n とする。

【実施例】

【 0 0 2 8 】

以下、この発明の実施例を説明する。

図6は実施例の層剛性同定装置30の構成を示すブロック図である。なお、図4と同一の作用を奏する要素には同一の符号を付してその説明を省略する。

20

この層剛性同定装置30は中央演算装置33に対してバスを介して演算装置40、メモリ装置50、入力部61、出力部63、外部データ入出力インターフェース70がつながれている。

演算装置40は汎用的な演算回路から構成され、主メモリ51に保存されているプログラムにより、フーリエ変換部2、第1～第3の演算部9, 11, 12として機能する。

【 0 0 2 9 】

メモリ装置50は、例えば大容量の読み書き可能なメモリ装置（ハードディスク等）から構成され、その所定の領域がそれぞれ主メモリ51、パラメータメモリ52、質量メモリ3、加速度応答メモリ5、剛性スペクトル k_n メモリ55及びバッファメモリ56に割り付けられる。

30

主メモリ51には層剛性同定装置30自体を制御するためのコントロールプログラム、演算装置40を実行するためのプログラムが保存されている。

パラメータメモリ52には演算装置40が演算を実行する際に要求されるパラメータ（例えば、円振動数）が保存される。

剛性スペクトル k_n メモリ55には、第1の演算部9で演算されたすべての層について層剛性スペクトルが保存される。

バッファメモリ56には伝達関数やその平均値など演算装置40が演算を実行するにあたり一時的に必要とされるデータが保存される。

【 0 0 3 0 】

40

入力部63はキーボード、ポインティングデバイスなど周知の入力装置からなり、層剛性同定装置30を動作させるために必要な指令やパラメータを入力する。

出力部7はディスプレイやプリンタからなり、演算装置40の各種演算結果を出力する。

外部データ入出力インターフェース70は加速度計 $A_0 \dots N$ や地震計80と層剛性同定装置30との間のデータのインターフェースとなる。その他、電話回線やインターネット回線とのインターフェース90も備えられる。

【 0 0 3 1 】

次に、実施例の層剛性同定装置30を使った試験例について説明する。

典型的な地震波として図7に示す $E1 \text{ Centro}$ 地震の南北方向の波形成分（以下、この明細書では同じ方向の波形を解析している）を用いた。建築物のモデルとして図

50

1 に示すものにおいて $N = 4$ を採用した。なお、この建築モデルにおいて各層の質量は $m_1 = m_2 = m_3 = 22.0 \times 10^3 \text{ kg}$ 、 $m_4 = 18.0 \times 10^3 \text{ kg}$ と定義される。この値は質量メモリ3に保存される。

層剛性 K_n は

$$K_1 = 38.0 \times 10^6 \text{ N/m}$$

$$K_2 = 32.0 \times 10^6 \text{ N/m}$$

$$K_3 = 24.0 \times 10^6 \text{ N/m}$$

$$K_4 = 20.0 \times 10^6 \text{ N/m}$$

と定義される。この値が各層における実の剛性である。

【0032】

以上より、固有円振動数 ω_n は次のように計算される。

$$\omega_1 = 13.6689 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_2 = 35.6420 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_3 = 52.9320 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_4 = 67.6712 \text{ rad/sec}$$

また、減衰定数 C_n は次のように定義される。

$$C_1 = 3.0 \times 10^4 \text{ N/m/s}$$

$$C_2 = 3.5 \times 10^4 \text{ N/m/s}$$

$$C_3 = 4.0 \times 10^4 \text{ N/m/s}$$

$$C_4 = 4.5 \times 10^4 \text{ N/m/s}$$

【0033】

上記建築物モデルを用いて、図7の地震波による時刻歴解析（数値シミュレーション）を行う。

そのとき得られた各層の加速度センサ $A_1 \sim A_4$ の出力（加速度応答（時間領域））を図8に示す。

加速度センサ $A_0 \sim A_4$ の出力は一旦バッファメモリ56に保存され、フーリエ変換部2でフーリエ変換されてその結果の加速度応答（周波数領域）は加速度応答メモリ5に保存される。このようにして得られた加速度応答メモリ5の加速度応答の値と、質量メモリ3の質量とが第1の演算部9に読み出され、既述の式（1）を実行すると、図9に示すように各層の剛性スペクトル k_n が得られる。図中の横線が定義された（即ち実の）層剛性 K_n である。図9より、剛性スペクトル k_n の平坦部分が定義された層剛性 K_n とほぼ一致することがわかる。従って、この剛性スペクトル k_n を視認できるように出力すれば、オペレータが目視により各層の層剛性を把握できる。

【0034】

次に、加速度応答メモリ5に保存されている各層の加速度応答の値を用いて第2の演算部11が既述の式（3）を実行し、各層 n の伝達関数 $H_n(\omega)$ を演算し、バッファメモリ56へ一旦保存する。続いて、第2の演算部11は既述の式（2）を実行して伝達関数の平均値 $H(\omega)$ を演算する。

この平均値 $H(\omega)$ を図9の層剛性スペクトル k_n 上に重畳させた結果を図10に示す。図10の結果から、伝達関数の平均値 $H(\omega)$ は周波数依存性があり、平均値 $H(\omega)$ の最大値の周波数は各層 n の剛性スペクトル k_n の平坦部分の周波数と一致していることがわかる。

そこで、この伝達関数の平均値 $H(\omega)$ を重みとして、第3の演算部において式（4）を実行して重み付け平均値 x を演算した。結果を表1に示す。

【表1】

	層1	層2	層3	層4
重み付け平均 x	$37.885 \times 10^6 \text{ N/m}$	$31.918 \times 10^6 \text{ N/m}$	$23.946 \times 10^6 \text{ N/m}$	$19.958 \times 10^6 \text{ N/m}$
実層剛性 K_n	$38.0 \times 10^6 \text{ N/m}$	$32.0 \times 10^6 \text{ N/m}$	$24.0 \times 10^6 \text{ N/m}$	$20.0 \times 10^6 \text{ N/m}$
誤差	0.3025%	0.2559%	0.2251%	0.2081%

10

20

30

40

50

表 1 には、定義された層剛性値 K_n と演算により得られた重み付け平均値との差（同定誤差）も並記した。

表 1 より、重み付け平均値 \bar{x} は殆ど定義された層剛性 K_n と一致することがわかる。

【 0 0 3 5 】

図 1 1 には、伝達関数 $H_n(\omega)$ を $U_{n..}(\omega) / U_{0..}(\omega)$ としたときの、即ち地上の加速度応答（周波数領域）と層 n の加速度応答（周波数領域）の比としたときの、平均値 $H(\omega)$ （式 2）参照）を示す。

図 1 1 と図 9 とを、周波数を一致させて、重ね合わせると図 1 2 となる。

図 1 0 と図 1 2 とも、加速度応答の平均値 $H(\omega)$ のピークの周波数が、剛性スペクトルの平坦部分に重なっており、かつ容易に視認できることがわかる。

10

【 0 0 3 6 】

各層の減衰定数のスペクトル c_n （周波数領域）も上記式（1）と同様にして、下記式（5）より得られる。

【 数 1 3 】

式（5）

$$c_n = \omega \text{Im} \left(\frac{\sum_{j=n}^N m_j \ddot{U}_j}{\ddot{U}_n - \ddot{U}_{n-1}} \right)$$

20

ここに、 ω は円振動数、 $\text{Im}(\cdot)$ は（ \cdot ）内の虚部、 m_j は層 j の質量、 $U_{n..}$ は層 n の加速度応答（周波数領域）である。

【 0 0 3 7 】

実施例の建築物モデルにおいて得られた減衰定数スペクトル c_n を図 1 3 に示す。

層剛性スペクトル k_n と異なり、減衰定数スペクトル c_n には定義された減衰定数に対応する平坦部分が見当たらない。

そこで、層剛性スペクトルと同様に重み付け平均の処理を行った。

図 1 4 は減衰定数同定装置 1 0 0 の構成を示すブロック図である。なお、図 4 と同一の要素には同一の符号を付してその説明を省略する。

30

図 1 4 の減衰定数同定装置 1 0 0 では、上記式（5）を実行する第 4 の演算部 1 0 9 が備えられる。

【 0 0 3 8 】

第 3 の演算部 1 2 の出力、即ち伝達関数の平均値を重みとして、減衰定数スペクトルの重み付け平均をしたときに得られた値を表 2 に示す。

【 表 2 】

	層1	層2	層3	層4
重み付け平均 \bar{x}	$3.2716 \times 10^4 \text{N/m/s}$	$3.6868 \times 10^4 \text{N/m/s}$	$4.1171 \times 10^4 \text{N/m/s}$	$5.0851 \times 10^4 \text{N/m/s}$
実減衰定数 c_n	$3.0 \times 10^4 \text{N/m/s}$	$3.5 \times 10^4 \text{N/m/s}$	$4.0 \times 10^4 \text{N/m/s}$	$4.5 \times 10^4 \text{N/m/s}$
誤差	9.0524%	5.3362%	2.9284%	1.7018%

40

表 1 及び表 2 の結果より、加速度応答（周波数領域）を用いて表現される建築物の各層の特性に対し、各層の伝達関数（周波数領域）の平均値 $H(\omega)$ を重みとして重み付き平均を実施して得られる重み付き平均値は、各層の実の特性に高い精度で対応することがわかる。

なお、建物の損傷同定には剛性の方が減衰定数より重要である。

【 0 0 3 9 】

実施例の加速度応答に $\pm 3\%$ のランダム計測誤差を与え、1 0 0 回繰り返したときの層

50

剛性 (Stiffness) 及び減衰定数 (Damping) の誤差を表 3 に示す。

【表 3】

Story		1	2	3	4
Stiffness	abs. mean (%)	0.6318	0.5343	0.4809	0.4665
	mean (%)	0.6447	0.5297	0.4698	0.4156
	maximum (%)	1.0928	0.9919	0.9033	1.0868
	variation (%)	0.0267	0.0379	0.037	0.0855
Damping	abs. mean (%)	12.7305	10.4432	8.2011	7.8021
	mean (%)	9.4719	3.7881	2.6896	2.1151
	maximum (%)	34.9381	34.0461	24.5378	23.7313
	variation (%)	89.9528	58.4347	32.3337	33.2905

10

また、地震波を図 15 に替えて数値シミュレーションにより得られた加速度応答に $\pm 3\%$ のランダム計測誤差を与え、100 回繰り返したときの層剛性 (Stiffness) 及び減衰定数 (Damping) の誤差を表 4 に示す。

【表 4】

Story		1	2	3	4
Stiffness	abs. mean (%)	0.3525	0.3455	0.336	0.4175
	mean (%)	0.3398	0.2724	0.2251	0.2737
	maximum (%)	0.9474	1.0029	1.0954	1.6212
	variation (%)	0.049	0.0645	0.0449	0.1292
Damping	abs. mean (%)	20.2064	17.9026	12.2506	12.8343
	mean (%)	-9.6016	-7.3956	-1.9892	-0.4691
	maximum (%)	69.0590	62.9654	34.8436	48.4622
	variation (%)	257.7208	212.23	92.9606	74.8339

20

30

表 3 及び表 4 の結果から、この発明の実施例の同定装置を用いれば、各層の特性が正確に同定できることがわかる。

【0040】

この実施例では、周波数領域 (横軸) の周波数として 2048 個を選択した。コンピュータ装置には市販のパソコンを用いた。その結果、全ての層の重み付き平均値を演算するのに要した時間は 1.2 秒であった。

周波数の単位 (ピッチ) を粗くすればより演算速度が向上し、他方その単位を細かくすれば演算精度が向上する。これらトレードオフの関係を調整した結果、周波数の単位 (ピッチ) は 1024 ~ 8192 程度が好ましい。

40

【0041】

次に、RC 造減築建築物に、本発明を適用した例を示す。

図 16 (A) は RC 造建築物の減築前、同 (B) は減築補強後の構造を示す。

減築前後の各層 n の重量は表 5 に示すようであった。

【表 5】

	減築前 A [kN]	減築後 B [kN]	A/B
5F	17727.4	—	—
4F	42535.6	6254.3	14.70%
3F	64625.2	25655	39.70%
2F	87130.9	49626.1	57.00%
1F	110495.9	74253.1	67.20%

10

減築後の建築物の1階については柱脚へ加速度センサを取り付け、2～5階については柱頭あるいは床梁側面へ加速度センサを取り付けた。前の実施例と同様にして得られた剛性スペクトルを図17に示す。なお、この結果は、2014年12月03日23時19分頃愛知県西部を震源とした地震に基づき得られたものである。建築物は名古屋市守山区に存在し、その震度は2であった。

【0042】

図18には、各層の伝達関数の平均値 $H(\quad)$ を示す。同図(A)は地上における加速度応答(周波数領域) $U_{0..}$ と層 n の加速度応答(周波数領域) $U_{n..}$ の比、同(B)は $U_{0..}$ と $U_{n..}$ の二乗の比、同(C)は $U_{0..}$ と $U_{n..}$ の4乗の比を伝達関数としたときを指す(式(2)、(3)参照)。

20

図18より、この例の場合は、加速度応答(周波数領域) $U_{n..}$ のべき数を多くすることにより層の剛性を反映するピークがより鮮明となることがわかる。

図19は、各層の剛性スペクトルを示す図17へ図18の(C)のピークを重ね合わせたものである。

図17では、その5階において剛性スペクトルの平坦部分が特徴たっていないが、このスペクトルを重ね合わせることで、平坦部分を特定できる。このように特定された平坦部分より、5層の剛性が推定できる。

30

【0043】

次に、RC造灯台(茨城県鹿嶋市)に本発明を適用した例を示す。

2015年05月13日06時12分頃宮城県沖で発生したM6.6の地震の観測結果である。なお、灯台における震度は2であった。

図20には、RC造灯台の層 n における加速度応答(時間領域)を示す。

図21には、図20の加速度応答をフーリエ変換し、更に、式(1)を適用して得られた層 n の剛性スペクトル k_n と、そこに重畳された伝達関数の平均値 $H(\quad)$ を示す。なお、各層の質量は灯台の設計図より計算した。また、伝達関数には地上における加速度応答(周波数領域) $U_{0..}$ と層 n の加速度応答(周波数領域) $U_{n..}$ との比の4乗を用いた。

40

【0044】

図21の結果より、灯台のような曲げの影響のある建築物においても、低層階においては本発明が適用できることがわかる。

曲げの影響が大きくなる高層階では、剛性スペクトルに平坦部分がほとんど現れないが、伝達関数の平均値 $H(\quad)$ のピークの周波数に対応する値を剛性と推定することができる。更には、周知の方法(例えば武藤のD値法:武藤清、耐震計算法、丸善)により曲げ剛性をせん断剛性に置換して、見掛けせん断剛性とすることもできる。

【0045】

この発明は、上記発明の実施の形態の説明に何ら限定されるものではない。特許請求の範囲の記載を逸脱せず、当業者が容易に想到できる範囲で種々の変形態様もこの発明に含

50

まれる。

【 0 0 4 6 】

以下、次の事項を開示する。

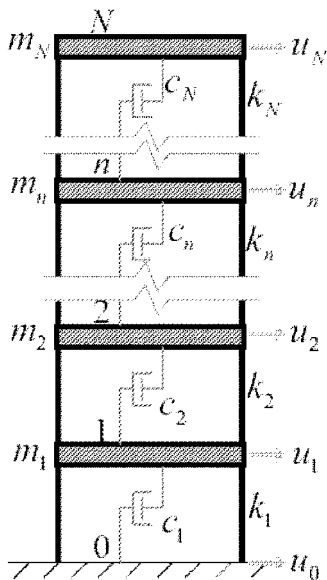
加速度応答（周波数領域）を用いて建築物の各層の特性を規定するステップと、各層の伝達関数（周波数領域）の平均値 H （ ）を重みとして、前記各層の特性を重み付け平均するステップと、を備える、建築物の特性評価方法。

【符号の説明】

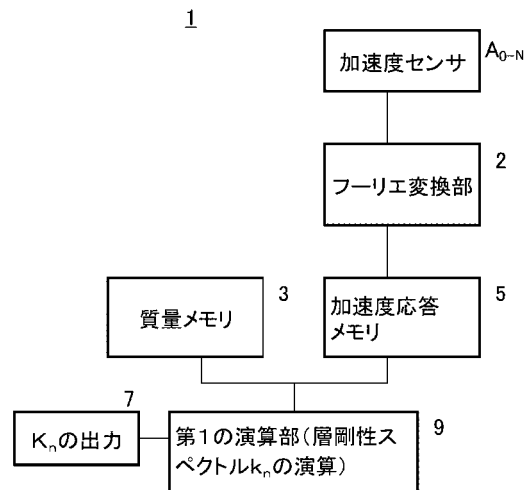
【 0 0 4 7 】

- 1、10、30 層剛性同定装置
- 2 フーリエ変換部
- 5 加速度応答メモリ
- 9 第1の演算部
- 11 第2の演算部
- 12 第3の演算部

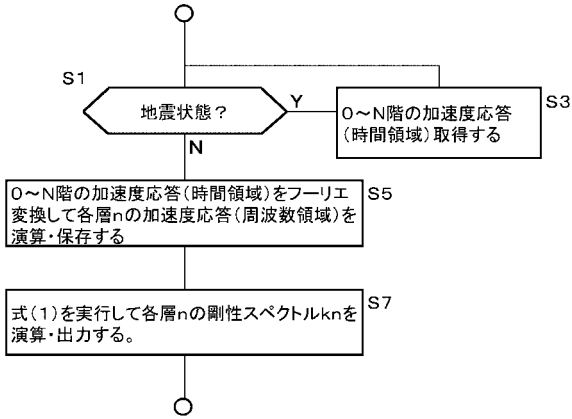
【 図 1 】



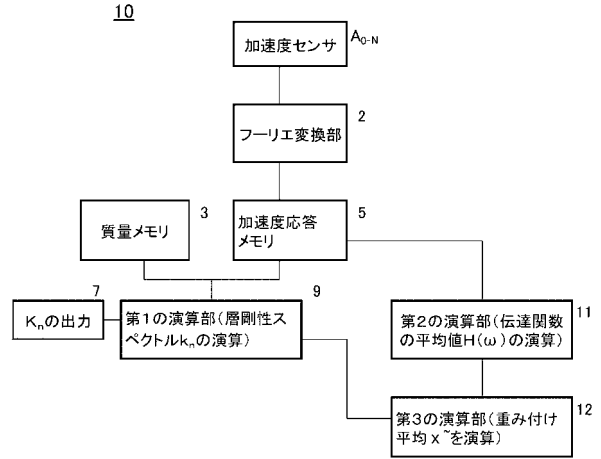
【 図 2 】



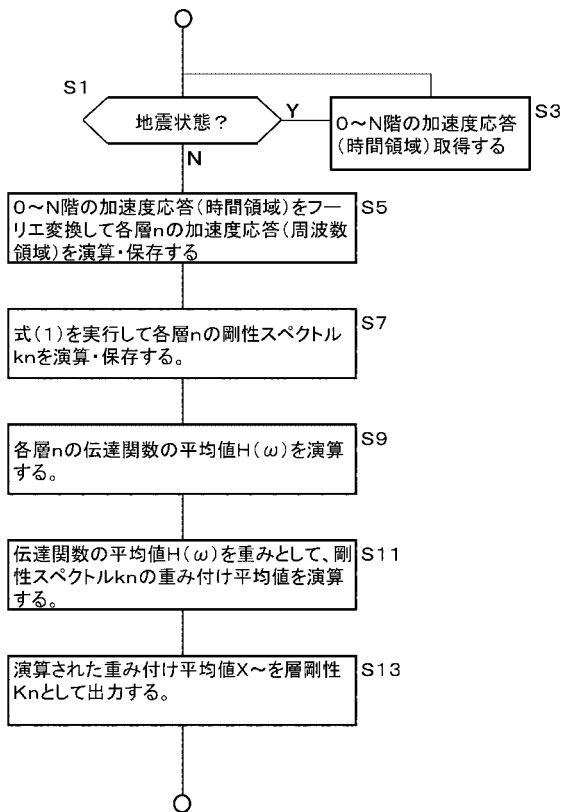
【 図 3 】



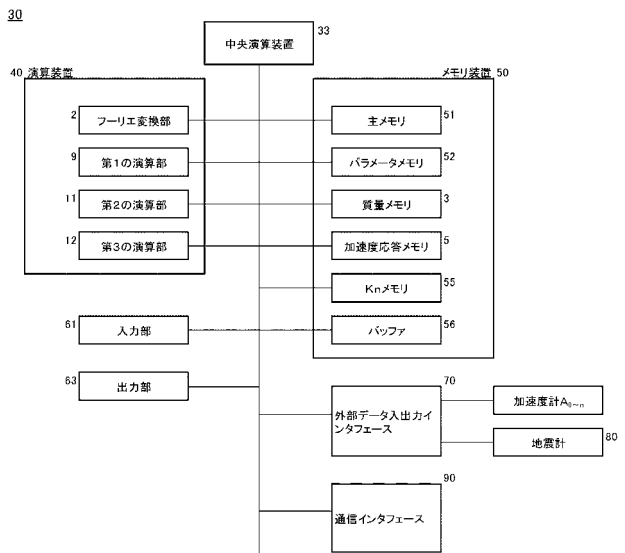
【 図 4 】



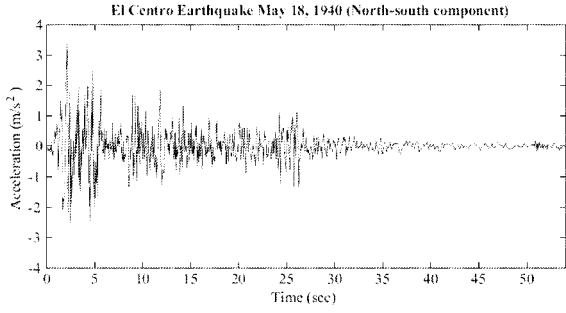
【 図 5 】



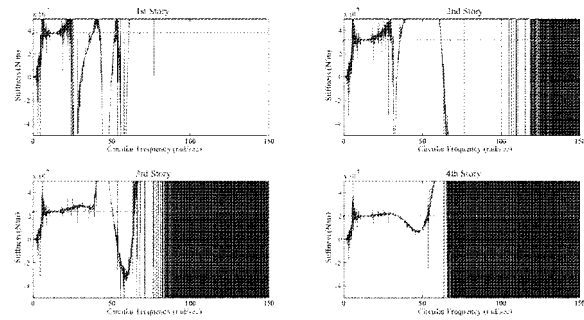
【 図 6 】



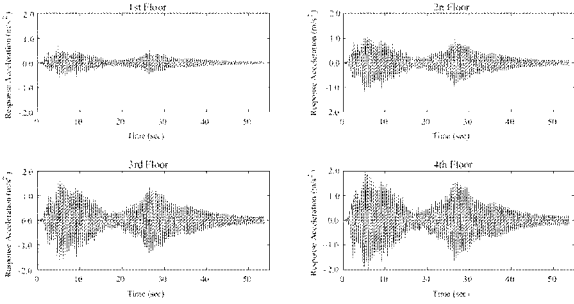
【 図 7 】



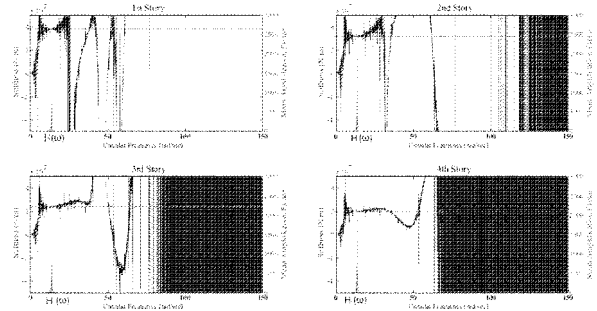
【 図 9 】



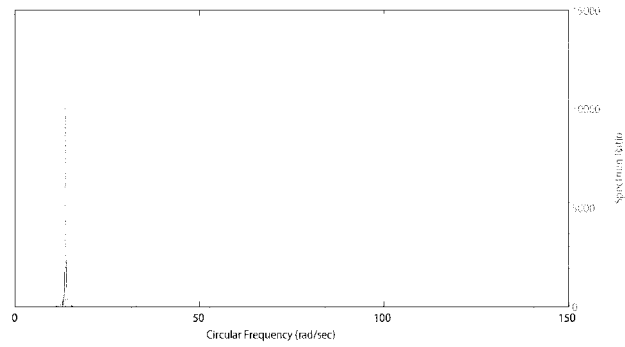
【 図 8 】



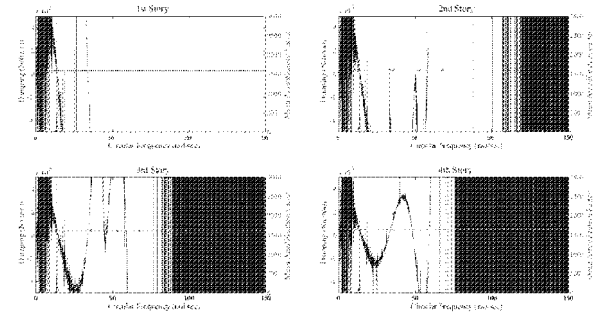
【 図 10 】



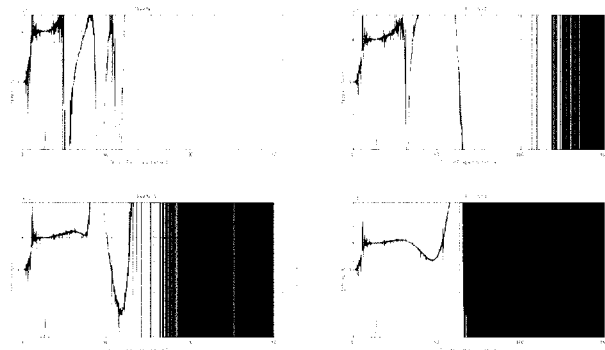
【 図 11 】



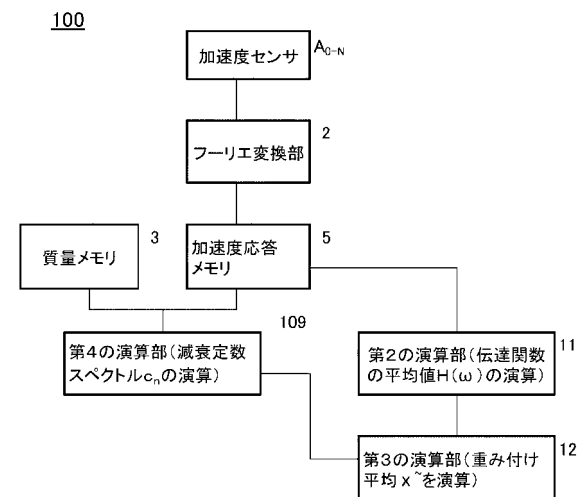
【 図 13 】



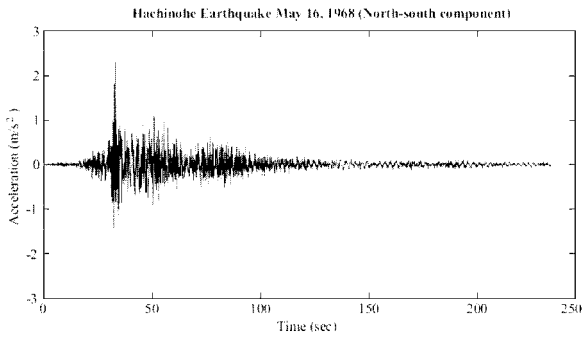
【 図 12 】



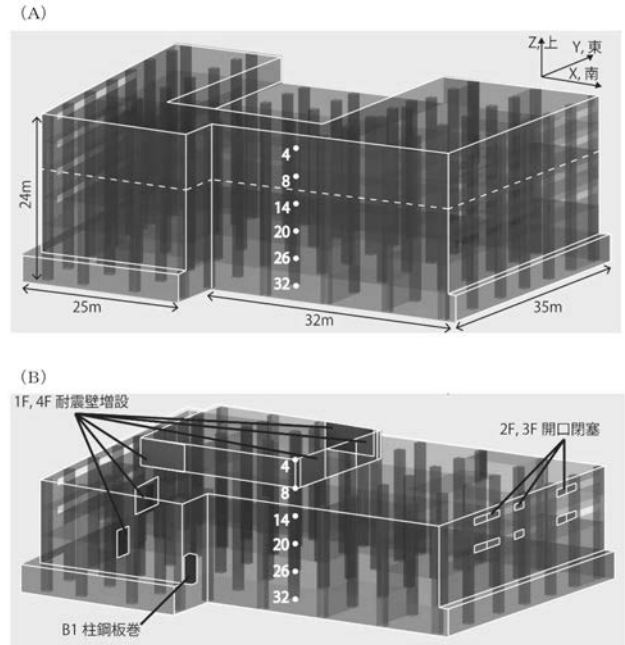
【 図 14 】



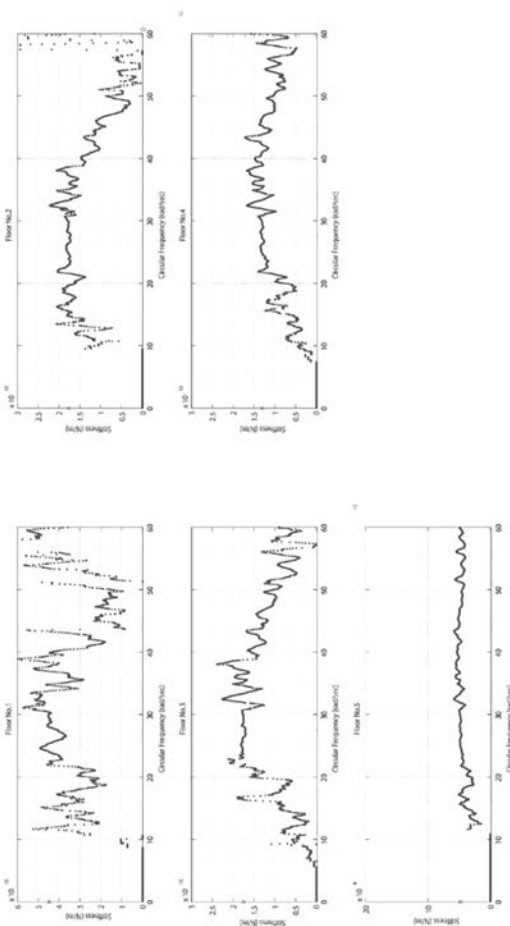
【 図 1 5 】



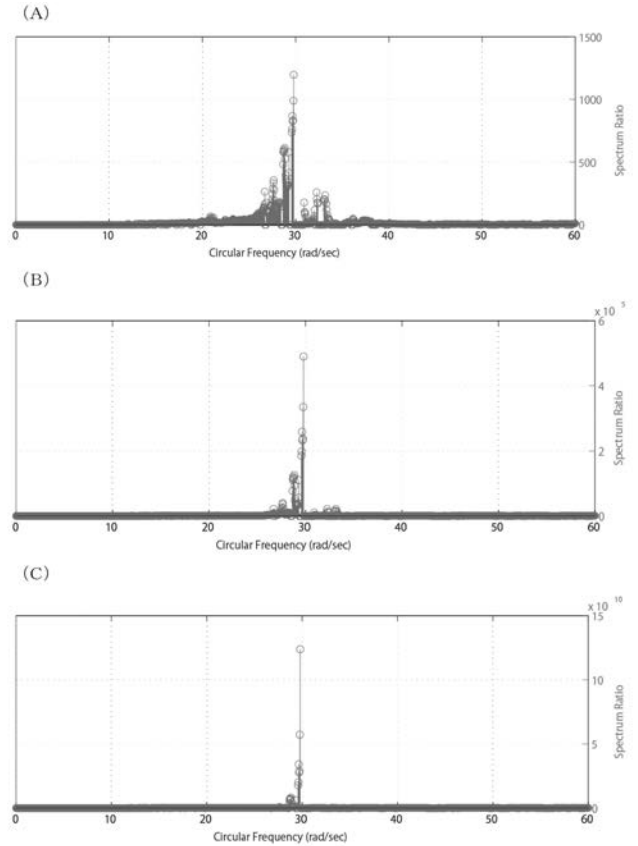
【 図 1 6 】



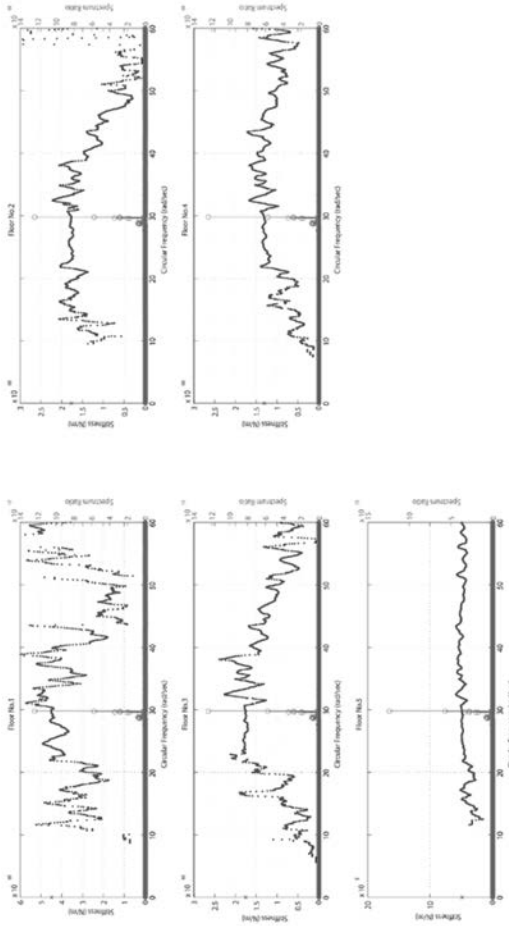
【 図 1 7 】



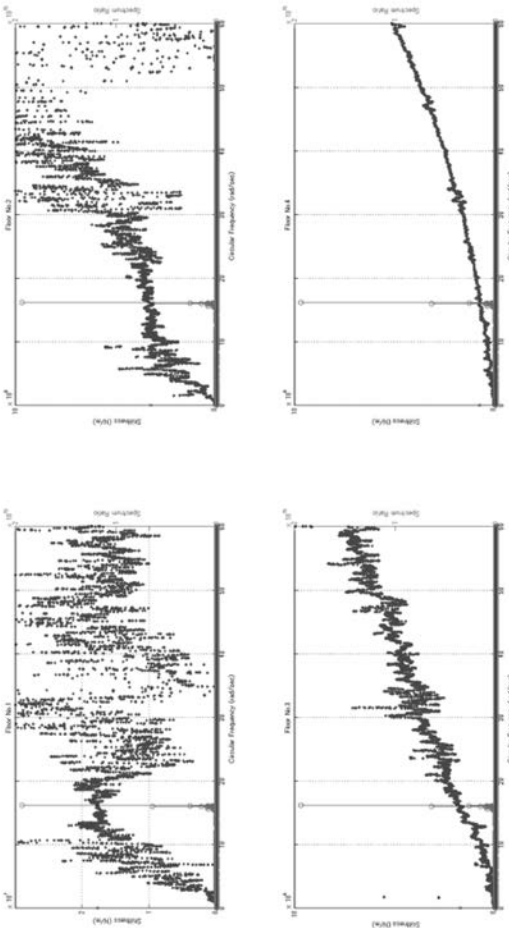
【 図 1 8 】



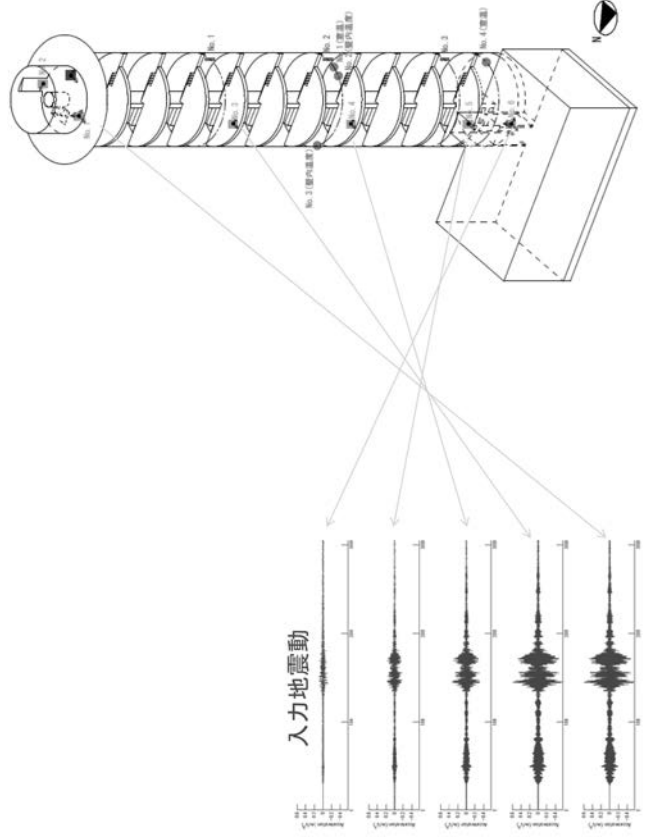
【 図 19 】



【 図 21 】



【 図 20 】



フロントページの続き

(72)発明者 青木 孝義

愛知県名古屋市千種区北千種二丁目1番10号 公立大学法人名古屋市立大学 大学院芸術工学研究科内

Fターム(参考) 2G024 AD34 BA13 BA30 CA13 DA12 FA06