

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6531984号  
(P6531984)

(45) 発行日 令和1年6月19日(2019.6.19)

(24) 登録日 令和1年5月31日(2019.5.31)

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

請求項の数 7 (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2015-169420 (P2015-169420)	(73) 特許権者	592254526 学校法人五島育英会 東京都渋谷区道玄坂1丁目10番7号
(22) 出願日	平成27年8月28日(2015.8.28)	(74) 代理人	100097113 弁理士 堀 城之
(65) 公開番号	特開2017-3556 (P2017-3556A)	(74) 代理人	100162363 弁理士 前島 幸彦
(43) 公開日	平成29年1月5日(2017.1.5)	(72) 発明者	関屋 英彦 東京都世田谷区等々力八丁目15番1号 東京都市大学総合研究所内
審査請求日	平成30年6月15日(2018.6.15)	(72) 発明者	三木 千壽 東京都世田谷区玉堤一丁目28番1号 東京都市大学内
(31) 優先権主張番号	特願2015-119617 (P2015-119617)	審査官	本村 真也
(32) 優先日	平成27年6月12日(2015.6.12)		最終頁に続く
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

(54) 【発明の名称】 加速度記録を用いた変位応答算出法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

外力が作用した際の構造物の変位応答を算出する加速度記録を用いた変位応答算出法であって、

前記構造物に設置された中央加速度センサによって測定された加速度記録である原波形に基づいて、前記構造物への外力の作用が始まる時刻である初期時刻および前記構造物への外力の作用が終了する時刻である末期時刻を特定し、前記初期時刻から前記末期時刻までの時間帯を強制振動区間とする第1ステップと、

前記原波形に対してフーリエ変換を行い、周波数領域における加速度波形を算出する第2ステップと、

前記周波数領域における加速度波形について低周波数帯を取り除き、周波数領域における自由振動に対応した加速度波形を算出する第3ステップと、

前記周波数領域における自由振動に対応した加速度波形に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動に対応した加速度波形を算出し、前記時間領域における自由振動に対応した加速度波形について、前記初期時刻よりも前の時刻において加速度が0(ゼロ)になる時刻である積分開始時刻と、前記末期時刻よりも後の時刻において加速度が0(ゼロ)になる時刻である積分終了時刻とを特定する第4ステップと、

前記時間領域における自由振動に対応した加速度波形を、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間として一階数値積分して、時間領域における自由振動に対応した速度波形を算出し、該時間領域の自由振動に対応した速度波形について、前記初期時刻

および前記末期時刻における速度をそれぞれ初期速度および末期速度として特定する第 5 ステップと、

前記時間領域における自由振動に対応した速度波形を、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間として一階数値積分して、時間領域における自由振動に対応した変位波形を算出し、該時間領域の自由振動に対応した変位波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における変位をそれぞれ初期変位および末期変位として特定する第 6 ステップと、

前記原波形を、前記初期時刻から前記末期時刻までを積分区間として一階数値積分して、強制振動区間を含む区間の速度波形を算出する第 7 ステップと、

前記強制振動区間を含む区間の速度波形のうち、強制振動区間の速度波形からドリフト成分を差し引いて、強制振動区間の速度波形の前記初期時刻および前記末期時刻における速度が、それぞれ前記初期速度および前記末期速度になるように補正して、強制振動区間を含む区間の補正速度波形を算出する第 8 ステップと、 10

前記強制振動区間を含む区間の補正速度波形を、前記初期時刻から前記末期時刻までを積分区間として一階数値積分して、強制振動区間を含む区間の変位波形を算出する第 9 ステップと、

前記強制振動区間を含む区間の変位波形のうち、強制振動区間の変位波形からドリフト成分を差し引いて、強制振動区間の変位波形の前記初期時刻および前記末期時刻における変位が、それぞれ前記初期変位および前記末期変位になるように補正して、強制振動区間の補正変位波形を算出する第 10 ステップとを有することを特徴とする加速度記録を用いた変位応答算出法。 20

#### 【請求項 2】

前記第 4 ステップの後に、前記第 5 ステップおよび前記第 6 ステップに代えて、

前記周波数領域における自由振動に対応した加速度波形を、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間として積分して、周波数領域における自由振動に対応した速度波形を算出する第 21 ステップと、

前記周波数領域における自由振動に対応した速度波形を、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間として積分して、周波数領域における自由振動に対応した変位波形を算出する第 22 ステップと、

前記周波数領域における自由振動に対応した速度波形に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動に対応した速度波形を算出し、該時間領域の自由振動に対応した速度波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における速度をそれぞれ初期速度および末期速度として特定する第 23 ステップと、 30

前記周波数領域における自由振動に対応した変位波形に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動に対応した変位波形を算出し、該時間領域の自由振動に対応した変位波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における変位をそれぞれ初期変位および末期変位として特定する第 24 ステップと、を有し、

前記第 24 ステップの後に、前記第 7 ステップから前記第 10 ステップを順次実行することを特徴とする請求項 1 記載の加速度記録を用いた変位応答算出法。

#### 【請求項 3】

前記加速度記録から低周波数帯を除去したものを、前記自由振動における加速度波形にすることを特徴とする請求項 1 記載の加速度記録を用いた変位応答算出法。

#### 【請求項 4】

前記第 1 ステップの後に、前記第 2 ステップから前記第 6 ステップに代えて、

前記原波形を、低周波数帯を除去するフィルタによってフィルタリングして、自由振動に対応した加速度波形を算出する第 31 ステップと、

前記自由振動に対応した加速度波形に対応して一階数値積分して、自由振動に対応した速度波形を算出し、該自由振動に対応した速度波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における速度をそれぞれ初期速度および末期速度として特定する第 32 ステップと

、

前記自由振動に対応した速度波形に対して一階数値積分して、自由振動に対応した変位波形を算出し、該自由振動に対応した変位波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における変位をそれぞれ初期変位および末期変位として特定する第33ステップとを有し、

前記第33ステップの後に、前記第7ステップから前記第10ステップを順次実行することを特徴とする請求項1記載の加速度記録を用いた変位応答算出法。

【請求項5】

前記第31ステップにおいて、前記初期時刻よりも前の時刻において加速度が0（ゼロ）になる時刻である積分開始時刻と、前記末期時刻よりも後の時刻において加速度が0（ゼロ）になる時刻である積分終了時刻とを特定し、

前記第32ステップおよび前記第33ステップにおける一階数値積分は、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間とすることを特徴とする請求項4記載の加速度記録を用いた変位応答算出法。

【請求項6】

前記初期時刻および末期時刻をそれぞれ、前記加速度記録における加速度が変化する時刻にすることを特徴とする請求項1～5の何れか一項に記載の加速度記録を用いた変位応答算出法。

【請求項7】

前記中央加速度センサは、前記変位波形を算出するための加速度記録を測定する中央加速度センサと、前記初期時刻および前記末期時刻を特定するための加速度記録を測定する中央加速度センサとによって構成されることを特徴とする請求項1～5の何れか一項に記載の加速度記録を用いた変位応答算出法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は加速度記録を用いた変位応答算出法、特に外力が作用した際の構造物の変位応答を、中央加速度センサによって得られた加速度記録を用いて算出する「加速度記録を用いた変位応答算出法」に関する。

【背景技術】

【0002】

橋梁等の構造物の保全上、損傷原因となる局所的な応力を引き起こす部材の変位を特定することは重要で、特に、外力によって生じる変位応答が疲労損傷の支配的要因になっていることから、この変位応答を把握することが必要になっている。このとき、レーザー変位計等を用いて変位を直接計測しようとする、設置場所や不動点の確保等の制約があるため、中央加速度センサによって計測された加速度記録（加速度データ）から、外力に対する応答を算出する方法が提案されている。すなわち、加速度記録を二階数値積分することによって、理論的には変位応答が算出されるからである。

しかしながら、中央加速度センサによって計測された加速度記録に含まれる測定誤差が、数値積分結果に大きな影響を与えること、また、測定誤差とは別に、数値積分を行う際の境界条件も、数値積分結果に大きな影響を与えることが明らかになっている。

そこで、数値積分の際の境界条件において、速度の時間平均値が0（ゼロ）になるという仮定を用いて橋梁の変位応答を算出する「初期速度推定法 (Initial velocity estimation method)」が開示されている（例えば、非特許文献1参照）。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献1】Ki Tae Park、外3名、The determination of bridge displacement using measured acceleration、Engineering Structures、Vol.27、pp.371-378、2005年

【発明の概要】

10

20

30

40

50

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0004】

非特許文献1に開示された橋梁における「初期速度推定法」は、初期変位が0（ゼロ）であるという仮定、および車両が橋梁に進入する瞬間や退出する瞬間を検知可能であるという仮定が成り立つ場合に限って、比較的精度の良い変位応答を算出可能である。

しかしながら、供用中の橋梁等の構造物は常に振動しているため、初期変位は必ずしも0にならないことから、数値積分の境界条件が妥当でないという問題があった。

また、構造物に外力が作用する時間帯（以下「強制振動区間」と称す）の開始時刻や終了時刻にそれぞれ相当する、車両が橋梁に進入する瞬間（以下「車両進入時刻」と称す）や退出する瞬間（以下「車両退出時刻」と称す）を検知する方法が開示されていないため、数値積分の積分区間を特定することに問題があった。 10

## 【0005】

本発明は、かかる問題を解消するものであって、中央加速度センサによって計測された加速度記録を用いて、外力が作用した際の構造物の変位応答を精度良く算出可能にする「加速度記録を用いた変位応答算出法」を提供することにある。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0006】

本発明に係る加速度記録を用いた変位応答算出法は、外力が作用した際の構造物の変位応答を算出する加速度記録を用いた変位応答算出法であって、

前記構造物に設置された中央加速度センサによって測定された加速度記録である原波形に基づいて、前記構造物への外力の作用が始まる時刻である初期時刻および前記構造物への外力の作用が終了する時刻である末期時刻を特定し、前記初期時刻から前記末期時刻までの時間帯を強制振動区間とする第1ステップと、 20

前記原波形に対してフーリエ変換を行い、周波数領域における加速度波形を算出する第2ステップと、

前記周波数領域における加速度波形について低周波数帯を取り除き、周波数領域における自由振動に対応した加速度波形を算出する第3ステップと、

前記周波数領域における自由振動に対応した加速度波形に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動に対応した加速度波形を算出し、前記時間領域における自由振動に対応した加速度波形について、前記初期時刻よりも前の時刻において加速度が0（ゼロ）になる時刻である積分開始時刻と、前記末期時刻よりも後の時刻において加速度が0（ゼロ）になる時刻である積分終了時刻とを特定する第4ステップと、 30

前記時間領域における自由振動に対応した加速度波形を、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間として一階数値積分して、時間領域における自由振動に対応した速度波形を算出し、該時間領域の自由振動に対応した速度波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における速度をそれぞれ初期速度および末期速度として特定する第5ステップと、

前記時間領域における自由振動に対応した速度波形を、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間として一階数値積分して、時間領域における自由振動に対応した変位波形を算出し、該時間領域の自由振動に対応した変位波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における変位をそれぞれ初期変位および末期変位として特定する第6ステップと、 40

前記原波形を、前記初期時刻から前記末期時刻までを積分区間として一階数値積分して、強制振動区間を含む区間の速度波形を算出する第7ステップと、

前記強制振動区間を含む区間の速度波形のうち、強制振動区間の速度波形からドリフト成分を差し引いて、強制振動区間の速度波形の前記初期時刻および前記末期時刻における速度が、それぞれ前記初期速度および前記末期速度になるように補正して、強制振動区間を含む区間の補正速度波形を算出する第8ステップと、

前記強制振動区間を含む区間の補正速度波形を、前記初期時刻から前記末期時刻までを積分区間として一階数値積分して、強制振動区間を含む区間の変位波形を算出する第9ス 50

テップと、

前記強制振動区間を含む区間の変位波形のうち、強制振動区間の変位波形からドリフト成分を差し引いて、強制振動区間の変位波形の前記初期時刻および前記末期時刻における変位が、それぞれ前記初期変位および前記末期変位になるように補正して、強制振動区間の補正変位波形を算出する第10ステップとを有することを特徴とする加速度記録を用いた変位応答算出法。

【0007】

また、本発明に係る加速度記録を用いた変位応答算出法は、前記第4ステップの後に、前記第5ステップおよび前記第6ステップに代えて、

前記周波数領域における自由振動に対応した加速度波形を、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間として積分して、周波数領域における自由振動に対応した速度波形を算出する第21ステップと、

前記周波数領域における自由振動に対応した速度波形を、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間として積分して、周波数領域における自由振動に対応した変位波形を算出する第22ステップと、

前記周波数領域における自由振動に対応した速度波形に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動に対応した速度波形を算出し、該時間領域の自由振動に対応した速度波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における速度をそれぞれ初期速度および末期速度として特定する第23ステップと、

前記周波数領域における自由振動に対応した変位波形に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動に対応した変位波形を算出し、該時間領域の自由振動に対応した変位波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における変位をそれぞれ初期変位および末期変位として特定する第24ステップと、を有し、

前記第24ステップの後に、前記第7ステップから前記第10ステップを順次実行することを特徴とする。

【0008】

また、本発明に係る加速度記録を用いた変位応答算出法は、前記加速度記録から低周波数帯を除去したものを、前記自由振動における加速度波形にすることを特徴とする。

【0009】

また、本発明に係る加速度記録を用いた変位応答算出法は、前記第1ステップの後に、前記第2ステップから前記第6ステップに代えて、

前記原波形を、低周波数帯を除去するフィルタによってフィルタリングして、自由振動に対応した加速度波形を算出する第31ステップと、

前記自由振動に対応した加速度波形に対応して一階数値積分して、自由振動に対応した速度波形を算出し、該自由振動に対応した速度波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における速度をそれぞれ初期速度および末期速度として特定する第32ステップと、

前記自由振動に対応した速度波形に対して一階数値積分して、自由振動に対応した変位波形を算出し、該自由振動に対応した変位波形について、前記初期時刻および前記末期時刻における変位をそれぞれ初期変位および末期変位として特定する第33ステップとを有し、

前記第33ステップの後に、前記第7ステップから前記第10ステップを順次実行することを特徴とする。

【0010】

また、本発明に係る加速度記録を用いた変位応答算出法は、前記第31ステップにおいて、前記初期時刻よりも前の時刻において加速度が0(ゼロ)になる時刻である積分開始時刻と、前記末期時刻よりも後の時刻において加速度が0(ゼロ)になる時刻である積分終了時刻とを特定し、

前記第32ステップおよび前記第33ステップにおける一階数値積分は、前記積分開始時刻から前記積分終了時刻までを積分区間とすることを特徴とする。

## 【 0 0 1 1 】

また、本発明に係る加速度記録を用いた変位応答算出法は、前記初期時刻および末期時刻をそれぞれ、前記加速度記録における加速度が変化する時刻にすることを特徴とする。

## 【 0 0 1 2 】

さらに、本発明に係る加速度記録を用いた変位応答算出法は、前記中央加速度センサは、前記変位波形を算出するための加速度記録を測定する中央加速度センサと、前記初期時刻および前記末期時刻を特定するための加速度記録を測定する中央加速度センサとによって構成されることを特徴とする。

## 【 発明の効果 】

## 【 0 0 1 3 】

本発明に係る加速度記録を用いた変位応答算出法は、加速度記録（原波形）に基づいて強制振動区間を特定すると共に、加速度記録（原波形）に基づいて算出された自由振動に対応した加速度に基づいて、速度の境界条件および変位の境界条件を特定し、原波形から算出された強制振動区間を含む区間の速度波形を、前記速度の境界条件を満たす補正速度波形に補正し、さらに、かかる補正速度波形から算出された強制振動区間を含む区間の変位波形を、前記変位の境界条件を満たす補正変位波形に補正するものである。

したがって、測定対象の構造物において、変位応答を知りたい部位に中央加速度センサを設置するだけで、当該部位の変位応答を知ることができる。すなわち、変位センサやひずみゲージの設置を不要にするから、測定が簡素になると共に、測定対象となる構造物の制約が緩和される。

また、加速度波形から速度波形や変位波形を算定する際の積分区間を、それぞれ自由振動に対応した加速度が 0（ゼロ）である積分開始時刻から積分終了時刻までとしているから、積分の精度が高い。

そして、強制振動区間における補正変位波形は、実質的に自由振動における変位波形を含み、実際の状態に近い変位波形になっている。すなわち、外力による変位応答が高精度に把握可能になるから、外力による局所的な応力の推定精度が向上することで、構造物に対する保全情報の精度および構造物に対する信頼性の向上に寄与する。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 1 4 】

【 図 1 】 本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を実施するための変位応答算出装置を説明するブロック図である。

【 図 2 】 本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明するためのものであって、接触式変位計が検知した信号を示す変位記録である。

【 図 3 】 本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明するためのものであって、中央加速度センサが検知した信号（原波形）の高周波成分（25 Hz 以上）を示す加速度記録である。

【 図 4 】 本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明するためのものであって、中央加速度センサが検知した信号を示す加速度記録である。

【 図 5 】 本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明するためのものであって、レーザー変位計が検知した信号を示す変位記録の一例である。

【 図 6 】 本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明するためのものであって、複数の橋梁における変位記録 1 2 秒間を二階微分して得られた加速度スペクトルの一例である。

【 図 7 】 本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明するフローチャートである。

【 図 8 】 図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための測定記録および算出結果の関係を示す相関図である。

【 図 9 】 図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための原波形を示す加速度記録である。

【 図 1 0 】 図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための周波数領域における加速

10

20

30

40

50

度波形である。

【図 1 1】図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための周波数領域における自由振動に対応した加速度波形である。

【図 1 2】図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための時間領域における自由振動に対応した加速度波形である。

【図 1 3】図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための時間領域における自由振動に対応した速度波形である。

【図 1 4】図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための時間領域における自由振動に対応した変位波形である。

【図 1 5】図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための強制振動区間を含む区間の速度波形である。 10

【図 1 6】図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正速度波形である。

【図 1 7】図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための強制振動区間を含む区間の変位波形である。

【図 1 8】図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正変位波形である。

【図 1 9】本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明する実施例であって、中央加速度センサ A による原波形を利用して得られた変位応答算出結果（補正変位波形）である。 20

【図 2 0】本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明する実施例であって、中央加速度センサ B による原波形を利用して得られた変位応答算出結果（補正変位波形）である。

【図 2 1】本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明する実施例であって、中央加速度センサ C による原波形を利用して得られた変位応答算出結果（補正変位波形）である。

【図 2 2】本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明する実施例であって、中央加速度センサ D による原波形を利用して得られた変位応答算出結果（補正変位波形）である。

【図 2 3】本発明の実施の形態 2 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明するフローチャートである。 30

【図 2 4】図 2 3 に示されたフローチャートを補足説明するための測定記録および算出結果の関係を示す関係図である。

【図 2 5】図 2 3 に示されたフローチャートを補足説明するための周波数領域における自由振動に対応した速度波形である。

【図 2 6】図 2 3 に示されたフローチャートを補足説明するための周波数領域における自由振動に対応した変位波形である。

【図 2 7】本発明の実施の形態 3 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法（以下「自由振動仮定法その 3」と称す）を説明するフローチャートである。

【図 2 8】図 2 7 に示されたフローチャートを補足説明するための測定記録および算出結果の関係を示す関係図である。 40

【発明を実施するための形態】

【0015】

[実施の形態 1]

次に、本発明に係る実施の形態 1 を、構造物として橋梁を例にして、図面を参照して具体的に説明する。なお、以下の図面は模式的に描かれたものであり、本発明は描かれた形態に限定されるものではなく、また、フローチャートに示された各ステップを実行する順番は適宜変更可能であり、さらに、橋梁以外の構造物であってもよい。

【0016】

(変位応答算出装置)

図1は、本発明の実施の形態1に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を実施するための変位応答算出装置を説明するブロック図である。

図1において、加速度記録を用いた変位応答算出法（以下「自由振動仮定法その1（Free vibration method 1）」と称す）を実施するための変位応答算出装置100は、橋梁に設置された中央加速度センサ10と、中央加速度センサ10が検知した信号（以下「原波形」と称す）が入力され、原波形を記録するデータレコーダ20と、データレコーダ20に記録された原波形（A/D変換されている）に基づいて所定の演算をする演算部（CPUに同じ）30と、演算部30の演算結果を表示する表示部40とを有している。

#### 【0017】

なお、中央加速度センサ10は、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）中央加速度センサであって、橋軸中央の主桁の下フランジに設置されているが（図示しない）、本発明はMEMSに限定されるものでなく、中央加速度センサであれば何れであってもよく、また、設置場所は外力による変位応答を把握したい位置が適宜選定されるものである。なお、変位応答を把握する目的とは別に、車両検知のための中央加速度センサを、例えば橋端部垂直補剛材に設置してもよい。

また、橋梁は桁橋構造に限定するものではなく、コンクリート構造であってもよい。

さらに、データレコーダ20、演算部（CPU）30および表示部40は、変位応答算出装置100専用の機器である必要はなく、それぞれ汎用性を有するものであって、自由振動仮定法を実施する際に限って変位応答算出装置100を構成するものであってもよい。また、各機器間の信号（情報）の伝達要領は限定されるものではない。

#### 【0018】

##### （車両検知）

国内における道路橋の70%以上は桁橋構造で、支間長さ30m～40mの桁橋が一般的である。かかる一般的な桁橋の橋軸端部の補剛材に中央加速度センサを設置して、加速度記録が得られている。さらに、橋軸中央部の下フランジに接触式変位計を設置して、変位記録が得られている。

図2および図3は、本発明の実施の形態1に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明するためのものであって、図2は一般的な桁橋の橋軸中央部の下フランジに設置された接触式変位計が検知した信号を示す変位記録、図3は一般的な桁橋の橋軸端部の補剛材に設置された中央加速度センサが検知した信号（原波形）の高周波成分（25Hz以上）を示す加速度記録である。

図3より、1013.17[秒]（Taにて示す）において、加速度の変化が初めて生じ、車両の進入が確認される。その後間隔を空けて2回、同様の加速度の変化が測定されている。また、間隔を空けて2回加速度が変化した後、1015.82[秒]（Tbにて示す）における加速度の変化を最後に、加速度の変化が測定されていないことから、車両の退出が確認される。時刻（初期時刻に相当する、以下「車両侵入時刻」と称す）Taおよび時刻（末期時刻に相当する、以下「車両退出時刻Tb」と称す）Tbにおける加速度の変化は、車両のタイヤが橋端部垂直補剛材の直上を通過する時に発生したものであり、図2に示す接触式変位計の検知結果における変位（梁のたわみ）の開始時刻および終了時刻に対応している。

したがって、本発明では、加速度の変化を利用することによって車両検知を実施する（強制振動区間を特定する）。

#### 【0019】

##### （外力による振動数）

図4～図6は本発明の実施の形態1に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を説明するためのものであって、図4は一般的な桁橋の橋軸中央部の下フランジに設置された中央加速度センサが検知した信号（原波形）を示す加速度記録の一例、図5は一般的な桁橋の橋軸中央部の下フランジに設置されたレーザー変位計が検知した信号を示す変位記録の一例、図6は複数の一般的な桁橋の橋軸中央部の下フランジに設置されたレーザー変位計が検知した変位記録12秒間を二階微分して得られた加速度スペクトルの一例である。

図 5 に示す変位記録から車両によるたわみ波形が確認され、かかるたわみ波形は、応答時間が 2.0 秒程度であり、振動数にすると 0.5 Hz 程度である。また、図 6 に示す加速度スペクトルからも、0.4 Hz ~ 0.8 Hz 付近に外力による卓越振動数を確認することができる。

したがって、本発明では、1.0 Hz 以下の「低周波数帯」の振動を外力による応答振動（強制振動）としている。なお、図 6 に示す加速度スペクトルにおいて、2.0 Hz ~ 4.0 Hz 付近にある卓越振動数は、橋梁の固有振動数等である。

なお、低周波数帯を 1.0 Hz 以下としたのは、構造物が橋梁である場合であって、低周波数帯は、構造物毎に相違するものである。

#### 【0020】

（自由振動仮定法その 1）

図 7 ~ 図 19 は本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法（自由振動仮定法その 1）を説明するものであって、図 7 はフローチャート、図 8 は図 7 に示されたフローチャートを補足説明するための測定記録および算出結果の関係を示す関係図、図 9 は原波形を示す加速度記録、図 10 は周波数領域における加速度波形、図 11 は周波数領域における自由振動に対応した加速度波形、図 12 は時間領域における自由振動に対応した加速度波形、図 13 は時間領域における自由振動に対応した速度波形、図 14 は時間領域における自由振動に対応した変位波形、図 15 は強制振動区間を含む区間の速度波形、図 16 は境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正速度波形、図 17 は強制振動区間を含む区間の変位波形、図 18 は境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正変位波形である。

#### 【0021】

図 7 および図 8 において、自由振動仮定法その 1 は、車両進入前および車両退出後においても橋梁が自由振動していることに着目して、車両通行中の橋梁の振動（以下「強制振動区間の振動」に同じ）における変位応答を算出するものである。すなわち、強制振動区間における速度および変位についての初期条件および末期条件（車両の車両進入時刻および車両退出時刻それぞれの速度および変位を、以下、まとめて「境界条件」と称す）を特定する前半ステップと、かかる境界条件を満たすように原波形から補正変位波形を算出する後半ステップとを有している。以下、各ステップ（以下「S」と略記する）について説明する。

#### 【0022】

（S1：強制振動区間の特定）

まず、中央加速度センサ 10 が検知した加速度記録（以下「原波形」と称す）を利用して「車両検知」を実施する（S1、図 3 参照）。すなわち、加速度の変化から車両の車両進入時刻  $T_a$  および車両退出時刻  $T_b$  を特定し、車両進入時刻  $T_a$  から車両退出時刻  $T_b$  までの時間を「強制振動区間」とする。したがって、車両進入時刻  $T_a$  は強制振動区間の開始時刻（初期時刻に相当する）に、車両退出時刻  $T_b$  は強制振動区間の終了時刻（末期時刻に相当する）に同じである。なお、これを除く区間（車両進入時刻  $T_a$  までの時間および車両退出時刻  $T_b$  からの時間）は「自由振動区間」になる。（図 9 参照）。

#### 【0023】

（S2、S3：周波数領域における加速度の算出）

次に、原波形（図 9 参照）に対してフーリエ変換を行い、周波数領域における加速度波形を算出する（S2、図 10 参照）。

そして、外力に対する応答の影響を除去するため、周波数領域における加速度について低周波数帯（1.0 Hz 以下）および直流成分（重力成分）を取り除き、周波数領域における自由振動に対応した加速度波形を算出する（S3、図 11 参照）。

#### 【0024】

（S4：積分開始時刻および積分終了時刻の特定）

次に、周波数領域における自由振動に対応した加速度波形（図 11 参照）に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動に対応した加速度波形を算出する（S5、

10

20

30

40

50

図 1 2 参照)。そこで、車両進入時刻  $T_a$  よりも前の時刻において加速度が 0 (ゼロ) になる時刻 (以下「積分開始時刻」と称す)  $T_0$  を特定する。また、車両退出時刻  $T_b$  よりも後の時刻において加速度が 0 (ゼロ) になる時刻 (以下「積分終了時刻」と称す)  $T_1$  を特定する。

#### 【0025】

(S5、S6：境界条件の特定)

次に、時間領域における自由振動に対応した加速度波形 (図 1 2 参照) を一階数値積分して、時間領域における自由振動に対応した速度波形を算出する (S5、図 1 3 参照)。そこで、速度の境界条件として、算出した自由振動に対応した速度波形における車両進入時刻  $T_a$  の速度および車両退出時刻  $T_b$  の速度を特定し、それぞれ「初期速度  $V_a$ 」および「末期速度  $V_b$ 」とする。 10

さらに、時間領域における自由振動に対応した速度波形を一階数値積分して、時間領域における自由振動に対応した変位波形を算出する (S6、図 1 4 参照)。そこで、変位の境界条件として、算出した変位波形における車両進入時刻  $T_a$  の変位および車両退出時刻  $T_b$  の変位を特定し、それぞれ「初期変位  $U_a$ 」および「末期変位  $U_b$ 」とする。

このとき、前記一階数値積分の区間を、積分開始時刻  $T_0$  から積分終了時刻  $T_1$  までの区間に行っているため、算出精度が高くなっている。すなわち、加速度が 0 (ゼロ) でない時刻によって規定された積分区間で一階数値積分をしてしまうと、誤差を含んだデータを積分することになり、精度が損なわれるからである。

このとき、積分開始時刻  $T_0$  から積分終了時刻  $T_1$  までの 1 つの積分区間に代えて、積分開始時刻  $T_0$  から車両侵入時刻  $T_a$  までの区間と、車両退出時刻  $T_b$  から積分終了時刻  $T_1$  までの区間との 2 つの積分区間にしてもよい。 20

なお、本発明は積分区間を積分開始時刻  $T_0$  から積分終了時刻  $T_1$  までの区間に限定するものではなく、車両侵入時刻  $T_a$  より前の所定の時刻から、車両退出時刻  $T_b$  より後の所定の時刻までであってもよい。

#### 【0026】

(S7、S8：強制振動区間の速度の算出)

次に、原波形 (加速度記録、図 9 参照) に対応して一階数値積分を行って、強制振動区間を含む区間の速度波形を算出する (S7、図 1 5 参照)。このとき、前記一階数値積分の区間を、車両進入時刻  $T_a$  から車両退出時刻  $T_b$  までの区間として、車両進入時刻  $T_a$  における速度を初期速度  $V_a$  として算出するものの、ノイズ等の影響を受けるため車両退出時刻  $T_b$  における速度が末期速度  $V_b$  にならない。すなわち、自由振動区間の速度波形 (図 1 3 参照) に挟まれるように算出した強制振動区間の速度波形を描くと、かかる速度波形は線形成分である「ドリフト成分  $C$ 」を含んでいる (図 1 5 参照)。 30

そこで、算出した速度波形 (図 1 5 参照) からドリフト成分  $C$  を差し引いて、速度の境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正速度波形を算出する (S8、図 1 6 参照)。

#### 【0027】

(S9、S10：強制振動区間の変位の算出)

次に、速度の境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正速度波形 (図 1 6) に対応して一階数値積分を行い、強制振動区間を含む区間の変位波形を算出する (S9、図 1 7 参照)。このとき、前記一階数値積分の区間を、車両進入時刻  $T_a$  から車両退出時刻  $T_b$  までの区間として、車両進入時刻  $T_a$  における変位を初期変位  $U_a$  として算出するものの、ノイズ等の影響を受けるため車両退出時刻  $T_b$  における変位が末期変位  $U_b$  にならない。 40

すなわち、自由振動区間の変位波形 (図 1 4 参照) に挟まれるように算出した強制振動区間の変位波形を描くと、かかる変位波形は線形成分である「ドリフト成分  $D$ 」を含んでいる (図 1 7 参照)。

最後に、算出した変位波形 (図 1 7 参照) からドリフト成分  $D$  を差し引いて、変位の境界条件を満たす強制振動区間の変位波形 (補正変位波形) を算出する (S10、図 1 8 参 50

照)。

【0028】

なお、図13において、強制振動区間(車両進入時刻 $T_a$ から車両退出時刻 $T_b$ まで時間)を点線で描いているのは、強制振動区間における速度の自由振動成分のみを仮想したものであるからである。また、図14において、強制振動区間(車両進入時刻 $T_a$ から車両退出時刻 $T_b$ まで時間)を点線で描いているのは、強制振動区間における変位の自由振動成分のみを仮想したものであるからである。なお、前記数値積分の区間を、積分開始時刻 $T_0$ から車両侵入時刻 $T_a$ までの区間および車両退出時刻 $T_b$ から積分終了時刻 $T_1$ までの区間にした場合には、図13および図14における点線は描かれないことになる。

また、図13、図15および図16における自由振動区間の速度波形は同一であり、図14、図17および図18における自由振動区間の変位波形は同一である。

【0029】

(作用効果)

本発明の自由振動仮定法その1は前記各ステップを有しているから、以下の作用効果を奏する。

(1) 加速度の変化を利用することによって車両検知をするから、外力の作用している強制振動区間(車両進入時刻 $T_a$ から車両退出時刻 $T_b$ までの時間)の把握がより正確になり、境界条件の算出が正確になる。

(2) 原波形をフーリエ変換して算出した周波数領域における加速度波形について、低周波数帯および直流成分を取り除いて「自由振動に対応した加速度」を算出すると共に、かかる自由振動に対応した加速度に対して逆フーリエ変換を行って「時間領域の自由振動に対応した加速度」を算出し、それぞれ加速度が0(ゼロ)である積分開始時刻および積分終了時刻を特定している。そして、特定した積分開始時刻から積分終了時刻までの区間を一階数値積分の区間にしているため、自由振動に対応した速度波形および変位波形を正確に算出することができ、さらに、これらに基づいて速度および変位の境界条件を特定するから、正確な境界条件が得られる。よって、外力の作用している時間(強制振動区間)における変位応答を算出するものでありながら、外力の作用していない自由振動に着目し、しかも、積分誤差をもたらす低周波数帯が取り除かれているから、仮に低周波数帯を含んでいたら生じたであろう積分誤差が排除されている。

(3) 強制振動区間を含む区間における原波形を一階数値積分して得られた速度波形を、前記境界条件を満たすように補正し、さらに、補正された速度波形を一階数値積分して得られた変位波形を、前記境界条件を満たすように補正して、補正後の変位波形を算出するから、高精度の変位波形(補正変位波形)が得られる。

【0030】

(実施例)

次に、一般的な桁橋の橋軸中央部の下フランジにレーザー変位計(Laser displacement meter)および4種類のMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)中央加速度センサA、B、C、D(以下「中央加速度センサA、B、C、D」と称す。表1参照)を設置して、中央加速度センサA、B、C、Dが測定した加速度記録(原波形)を用いて、車両検知(車両通過時間)を得ると共に、本発明の「自由振動仮定法その1」による変位応答を求めた。

すなわち、中央加速度センサA、B、C、DをL字型の鋼製治具に設置し、かかる鋼製治具をG2桁中央部下フランジに固定している。この際、方向によって感度が異なることに注意して、中央加速度センサA、B、C、Dの水平方向が重力方向になるように設置している(図示しない)。

また、比較のため、非特許文献1に開示された「初期速度推定法」による変位応答を求め、さらに、中央加速度センサA、B、C、Dと同じ位置にレーザー変位計ターゲットを設置して、サンプリング頻度500Hzで垂直変位を計測している。

【0031】

(中央加速度センサのノイズレベル)

表 1 は、4 種類の中央加速度センサ A、B、C、D のメーカーによる仕様値である。

また、実際に同一条件下における「静置試験」を行ってノイズレベルを把握している。静置試験は、実橋梁に設置する場合と同様に、床の上に静置された L 字型の鋼製治具に中央加速度センサ A、B、C、D を固定して、100 秒間測定した。このとき、完全に静置された状態では検知されないはずの信号が検知されたことで、静置状態に含まれる外的な要因および A/D 変換性能を含む中央加速度センサシステムとしてのノイズを、各中央加速度センサのノイズレベルと考える。

【0032】

【表 1】

Acceleration Sensor	Acceleration Range [G]	Frequency Bandwidth [Hz]	Sampling Frequency [Hz]	Sensitivity [ $\mu\text{G}$ ]	Noise Density [ $\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]
A	$\pm 5.0$	0.1~330	153.75	$3.8 \times 10^{-3}$	55
B	$\pm 5.0$	0.1~20	100	1.0	0.8
C	$\pm 2.0$	0.1~500	100	60	400
D	$\pm 16.0$	0.1~260	100	488	400

【0033】

そして、静置試験によって得られた加速度データをフーリエ変換して、フーリエ変換結果が周波数分解能に依存しないように、単位周波数幅当たりのパワー値を表すパワースペクトル密度 ( $\mu\text{G}/\text{Hz}$ ) を縦軸に用いている (図示しない)。

このとき、中央加速度センサ A、C、D は、周波数 1.0 Hz におけるパワースペクトル密度の値が表 1 のノイズ密度の値 (仕様値) とほぼ同水準になっていた。

また、5.0 Hz 以下の低周波数帯においては、中央加速度センサ A、B、C、D 毎にノイズレベルは大きく異なり、中央加速度センサ B のノイズレベルは、中央加速度センサ A、C、D に比べ、約 20 分の 1 以下になっていた。

なお、中央加速度センサ B のノイズ密度が表 1 のノイズ密度の値 (仕様値) より大きな値を示したのは、測定を行った場所の常時微動を測定しているためだと考えられる。

【0034】

図 19 ~ 図 22 は、本発明の実施の形態 1 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法 (自由振動仮定法その 1) を説明する実施例であって、図 19 は中央加速度センサ A による原波形を利用して得られた変位応答算出結果 (補正変位波形)、図 20 は中央加速度センサ B による原波形を利用して得られた変位応答算出結果 (補正変位波形)、図 21 は中央加速度センサ C による原波形を利用して得られた変位応答算出結果 (補正変位波形)、図 22 は中央加速度センサ D による原波形を利用して得られた変位応答算出結果 (補正変位波形) である。

なお、図 19 ~ 図 22 には、比較のために、中央加速度センサ A、B、C、D による原波形を利用して得られた車両通過時間 (強制振動区間に同じ) を積分区間とし、非特許文献 1 に開示された「初期速度推定法」によって得られた変位応答算出結果と、レーザー変位計が測定した変位の測定結果とを示す。

【0035】

図 19 において、中央加速度センサ A によって測定された原波形を用いて算出された自由振動仮定法による補正変位波形 (破線にて示す) の方が、初期速度仮定法によって算出された変位応答結果 (点線にて示す) に比べてレーザー変位計の測定結果 (実線にて示す) に近づいている。すなわち、自由振動仮定法を用いことによって、初期速度仮定法を用

いる場合よりも、測定誤差の影響が補正されることが示される（これについては、後記（測定誤差の影響）において検討する）。

【 0 0 3 6 】

図 2 0 において、中央加速度センサ B によって測定された原波形を用いて算出された自由振動仮定法による補正変位波形（破線にて示す）と初期速度仮定法によって算出された変位応答結果（点線にて示す）とに大きな差がなく、何れもレーザー変位計の測定結果（実線にて示す）に略重なっている。

このことは、中央加速度センサ B が静置試験によってノイズレベルが低い（特に、5 . 0 H z 以下の低周波数帯においてノイズレベルが低い）ことが明らかになっていることから、車両進入時刻および車両退出時刻が同じで、測定時の初期変位が 0（ゼロ）に近いことに加え、測定誤差が微小な場合には、それぞれの手法による変位応答結果に大きな差異が生じることなく、正確な値が算出されることを示している。

【 0 0 3 7 】

図 2 1 および図 2 2 において、中央加速度センサ C、D によって測定された原波形を用いて算出された自由振動仮定法による補正変位波形（破線にて示す）と初期速度仮定法によって算出された変位応答結果（点線にて示す）とは何れも、レーザー変位計の測定結果（実線にて示す）から大きく離れている。すなわち、中央加速度センサ C、D は静置試験の結果からもノイズレベルが高いことが明らかになったもので、それぞれの原波形に低周波数帯の成分をより多く含むためである。

このことは、自由振動仮定法を用いた場合でも（当然、初期速度推定法を用いた場合も）、比較的低いノイズレベルの中央加速度センサを用いる必要があることを示唆している。

【 0 0 3 8 】

（測定誤差の影響）

次に、本発明の自由振動仮定法その 1 と非特許文献 1 に開示された初期速度推定法との双方における測定誤差に起因する誤差について検討する。

今、サンプリングレート  $f_s$  [ H z ]（測定間隔  $d_t = 1 / f_s$  [ 秒 ]）で T 秒間の測定を行い、 $n = T \cdot f_s$  の測定点において加速度を測定した時を考える。そうすると、i 番目の測定点で測定された加速度  $a_i$  は、i 番目の測定点での真の加速度  $A_i$  に、i 番目の測定点での加速度の測定誤差  $E_i$  を加えたものである（ $a_i = A_i + E_i$ 、 $i = 1, 2, 3 \dots n$ ）。なお、測定誤差  $E_i$  は標準偏差  $\sigma$  の正規分布に従って発生するランダムノイズであるとする。

そうすると、i 番目の測定点で測定された加速度  $a_i$  に対して、初期速度推定法または自由振動仮定法その 1 によって境界条件（初期条件および末期条件）を満たすように矩形則に従って二階数値積分を行うと、それぞれの手法による変位式が得られる。このとき、計算結果には、加速度に含まれるノイズを源とする誤差、仮定した境界条件に起因する誤差、および数値積分時に発生する積分誤差が含まれるが、数値積分時に発生する積分誤差を検討することがここでの目的では無いため、数値積分誤差は考慮しない。

【 0 0 3 9 】

そして、車両が橋梁に進入してから退出するまでの時間が T 秒間であったとすると、車両が橋梁の中央にいる時（ $T / 2$  秒の時）に変位が最大になるため、この時に測定誤差も最大になると考えられる。

そして、それぞれの手法によって得られた変位式を独立の変数の和に書き改め、誤差の分散を求めると、初期速度推定法における誤差の分散は「 $T^3 / (192 \cdot f_s)$ 」に比例し、自由振動仮定法その 1 における誤差の分散は「 $T^3 / (48 \cdot f_s)$ 」に比例する式が得られる（式の導出過程の記載を省略する）。

すなわち、誤差は、誤差の分散の平方根であるから、初期速度推定法その 1 における誤差は、自由振動仮定法における誤差の  $1 / 2$ （ $= (48 / 192)$ ）になることが明らかになる。

【 0 0 4 0 】

10

20

30

40

50

そうすると、本発明の自由振動仮定法その１は、非特許文献１に開示された初期速度推定法と比較して、前記のように数値積分の積分区間（強制振動区間）や境界条件が、より正確であることに加え、ここで検討したように中央加速度センサの測定誤差の影響を、より受け難い優れた手法であると言える。

#### 【 0 0 4 1 】

##### [ 実施の形態 2 ]

次に、本発明の実施の形態２に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を、構造物として橋梁を例にして、図面を参照して具体的に説明する。

図２３～図２６は本発明の実施の形態２に係る加速度記録を用いた変位応答算出法（以下「自由振動仮定法その２（Free vibration method 2）」と称す）を説明するものであって、図２３はフローチャート、図２４は図２３に示されたフローチャートを補足説明するための測定記録および算出結果の関係を示す関係図、図２５は周波数領域における自由振動に対応した速度波形、図２６は周波数領域における自由振動に対応した変位波形である。

なお、実施の形態１（自由振動仮定法その１）と同じ内容のステップおよび図面には、同じ番号および図番を付し、説明を一部省略する。

#### 【 0 0 4 2 】

##### （ S 1 : 強制振動区間の特定 ）

まず、中央加速度センサ１０が検知した原波形を利用して「車両検知」を実施し、する（ S 1、図３参照）。すなわち、加速度の変化から車両の車両進入時刻  $T_a$  および車両退出時刻  $T_b$  を特定し、強制振動区間と自由振動区間とに分ける（図９参照）。

#### 【 0 0 4 3 】

##### （ S 2、S 3 : 周波数領域における加速度の算出 ）

次に、原波形（図９参照）に対してフーリエ変換を行い、周波数領域における加速度波形を算出する（ S 2、図１０参照）。

そして、低周波数帯（ 1 . 0 H z 以下）および直流成分（重力成分）を取り除き、周波数領域における自由振動に対応した加速度波形を算出する（ S 3、図１１参照）。

#### 【 0 0 4 4 】

##### （ S 4 : 積分開始時刻および積分終了時刻の特定 ）

次に、周波数領域における自由振動に対応した加速度波形（図１１参照）に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動区間の振動である自由振動に対応した加速度波形を算出する（ S 5、図１２参照）。そこで、積分開始時刻  $T_0$  および積分終了時刻  $T_1$  を特定する。

#### 【 0 0 4 5 】

##### （ S 2 1、S 2 2 : 周波数領域における速度および変位の算出 ）

次に、周波数領域における自由振動に対応した加速度波形（図１１参照）を積分して、周波数領域における自由振動に対応した速度波形を算出する（ S 2 1、図２５参照）。

そして、周波数領域における自由振動に対応した速度波形（図１２参照）を積分して、周波数領域における自由振動に対応した変位波形を算出する（ S 2 2、図２６参照）。

このとき、前記積分の区間を、積分開始時刻  $T_0$  から積分終了時刻  $T_1$  までの区間にしているため、算出精度が高くなっている。すなわち、加速度が 0（ゼロ）でない時刻によって規定された積分区間において積分してしまうと、誤差を含んだデータを積分することになり、精度が損なわれるからである。

このとき、積分開始時刻  $T_0$  から積分終了時刻  $T_1$  までの 1 つの区間に代えて、積分開始時刻  $T_0$  から車両侵入時刻  $T_a$  までの区間と、車両退出時刻  $T_b$  から積分終了時刻  $T_1$  までの区間との 2 つの区間にしてもよい。

なお、本発明は積分区間を積分開始時刻  $T_0$  から積分終了時刻  $T_1$  までの区間に限定するものではなく、車両侵入時刻  $T_a$  より前の所定の時刻から、車両退出時刻  $T_b$  より後の所定の時刻までであってもよい。

#### 【 0 0 4 6 】

10

20

30

40

50

( S 2 3、S 2 4 : 境界条件の特定 )

次に、周波数領域における自由振動に対応した速度波形 ( 図 2 5 参照 ) に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動区間の振動である自由振動に対応した速度波形を算出する ( S 2 3、図 1 3 参照 )。そこで、速度の境界条件として、算出した速度波形における進入時刻  $T_a$  の速度および退出時刻  $T_b$  の速度を特定し、それぞれ「初期速度  $V_a$ 」および「末期速度  $V_b$ 」とする。

さらに、周波数領域における自由振動に対応した変位波形 ( 図 2 6 参照 ) に対して逆フーリエ変換を行い、時間領域における自由振動に対応した変位波形を算出する ( S 2 4、図 1 4 参照 )。そこで、変位の境界条件として、算出した変位波形における進入時刻  $T_a$  の変位および退出時刻  $T_b$  の変位を特定し、それぞれ「初期変位  $U_a$ 」および「末期変位  $U_b$ 」とする。 10

【 0 0 4 7 】

( S 7、S 8 : 強制振動区間の速度の算出 )

次に、強制振動区間の原波形 ( 加速度記録、図 9 参照 ) に対応して一階数値積分を行って、強制振動区間を含む区間の速度波形を算出する ( S 7、図 1 5 参照 )。

さらに、算出した速度波形 ( 図 1 5 参照 ) からドリフト成分  $C$  を差し引いて、速度の境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正速度波形を算出する ( S 8、図 1 6 参照 )。

【 0 0 4 8 】

( S 9、S 1 0 : 強制振動区間の変位の算出 )

次に、速度の境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正速度波形 ( 図 1 6 ) に対応して一階数値積分を行い、強制振動区間を含む区間の変位波形を算出する ( S 9、図 1 7 参照 )。 20

最後に、算出した変位波形 ( 図 1 7 参照 ) からドリフト成分  $D$  を差し引いて、変位の境界条件を満たす強制振動区間の変位波形 ( 補正変位波形 ) を算出する ( S 1 0、図 1 8 参照 )。

【 0 0 4 9 】

( 作用効果 )

以上のように自由振動仮定法その 2 は、周波数領域において速度および変位を算出する点 ( S 2 1、S 2 2 ) が、周波数領域において速度および変位を算出しない自由振動仮定法その 1 と相違するものの、これを除く点は自由振動仮定法その 1 に同じである。 30

したがって、自由振動仮定法その 2 によると、自由振動仮定法その 1 の作用効果と同じように、高精度の変位波形 ( 補正変位波形 ) が得られる。

なお、自由振動仮定法その 2 による算定結果は、自由振動仮定法その 1 による算定結果と同じである ( 厳密には相違する場合がある ) ため、自由振動仮定法その 1 による算定結果を示す図 1 2 ~ 図 1 8 を流用している。

【 0 0 5 0 】

[ 実施の形態 3 ]

次に、本発明の実施の形態 3 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法を、構造物として橋梁を例にして、図面を参照して具体的に説明する。 40

図 2 7 および図 2 8 は本発明の実施の形態 3 に係る加速度記録を用いた変位応答算出法 ( 以下「自由振動仮定法その 3 ( Free vibration method 3 ) 」と称す ) を説明するものであって、図 2 7 はフローチャート、図 2 8 は図 2 7 に示されたフローチャートを補足説明するための測定記録および算出結果の関係を示す関係図である。

【 0 0 5 1 】

図 2 7 および図 2 8 において、自由振動仮定法その 3 は以下のステップを有する。なお、自由振動仮定法その 3 は、実施の形態 1 において説明した自由振動仮定法その 1 と同様に、強制振動における速度および変位についての境界条件を特定する前半ステップと、かかる境界条件を満たすように原波形から補正変位波形を算出する後半ステップとを有している。 50

但し、実施の形態 3 における境界条件を特定する前半ステップは、原波形をフィルタリングする点が、フーリエ変換および逆フーリエ変換を用いる実施の形態 1 と相違しているものの、これを除くステップは実施の形態 1 に同じであるから、同じ内容のステップおよび図面には、同じ番号および図番を付し、説明を一部省略する。

【 0 0 5 2 】

( S 1 : 強制振動区間の特定 )

まず、中央加速度センサ 1 0 が検知した原波形を利用して「車両検知」を実施する ( S 2 1 ) と共に、車両進入時刻  $T_a$  および車両退出時刻  $T_b$  を特定し、強制振動区間と自由振動区間とに分ける ( 図 9 参照 ) 。

【 0 0 5 3 】

( S 3 1 : 自由振動の加速度の算出および積分開始時刻および積分終了時刻の特定 )

そして、低周波数帯を除去する ( 1 . 0 H z 超えを通過させる ) フィルタ ( Highpass Filter ) によって原波形 ( 図 9 参照 ) をフィルタリングし、自由振動に対応した加速度波形を算出する ( S 3 1 、 図 1 2 参照 ) 。そこで、車両進入時刻  $T_a$  ( 初期時刻に相当する ) よりも前の時刻において加速度が 0 ( ゼロ ) になる積分開始時刻  $T_0$  と、車両退出時刻  $T_b$  ( 末期時刻に相当する ) よりも後の時刻において加速度が 0 ( ゼロ ) になる積分終了時刻  $T_1$  とを特定する。

【 0 0 5 4 】

( S 3 2 、 S 3 3 : 境界条件の特定 )

次に、自由振動に対応した加速度波形 ( 図 9 参照 ) を一階数値積分して、自由振動に対応した速度波形を算出する ( S 3 2 、 図 1 3 参照 ) 。そこで、速度の境界条件として、車両進入時刻  $T_a$  および車両退出時刻  $T_b$  における速度を、それぞれ初期速度  $V_a$  および末期速度  $V_b$  として特定する。

さらに、自由振動に対応した速度波形を一階数値積分して、自由振動に対応した変位波形を算出する ( S 3 3 、 図 1 4 参照 ) 。そこで、変位の境界条件として、車両進入時刻  $T_a$  および車両退出時刻  $T_b$  における変位を、それぞれ初期変位  $U_a$  および末期変位  $U_b$  として特定する。

このとき、前記一階数値積分の積分区間を、積分開始時刻  $T_0$  から積分終了時刻  $T_1$  までの区間にしているため、算出精度が高くなっている。なお、積分開始時刻  $T_0$  から積分終了時刻  $T_1$  までの 1 つの区間に代えて、積分開始時刻  $T_0$  から車両侵入時刻  $T_a$  までの区間と、車両退出時刻  $T_b$  から積分終了時刻  $T_1$  までの区間との 2 つの区間にしてもよい。

なお、本発明は積分区間を積分開始時刻  $T_0$  から積分終了時刻  $T_1$  までの区間に限定するものではなく、車両侵入時刻  $T_a$  より前の所定の時刻から、車両退出時刻  $T_b$  より後の所定の時刻までであってもよい。

【 0 0 5 5 】

( S 7 、 S 8 : 強制振動区間の速度の算出 )

次に、強制振動区間の原波形 ( 加速度記録、図 9 参照 ) に対応して一階数値積分を行って、強制振動区間を含む区間の速度波形を算出する ( S 7 、 図 1 5 参照 ) 。

さらに、算出した速度波形 ( 図 1 5 参照 ) からドリフト成分 C を差し引いて、速度の境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正速度波形を算出する ( S 8 、 図 1 6 参照 ) 。

【 0 0 5 6 】

( S 9 、 S 1 0 : 強制振動区間の変位の算出 )

次に、速度の境界条件を満たす強制振動区間を含む区間の補正速度波形 ( 図 1 6 参照 ) に対応して一階数値積分を行い、強制振動区間を含む区間の変位波形を算出する ( S 9 、 図 1 7 参照 ) 。

最後に、算出した変位波形 ( 図 1 7 参照 ) からドリフト成分 D を差し引いて、変位の境界条件を満たす強制振動区間の変位波形 ( 補正変位波形 ) を算出する ( S 1 0 、 図 1 8 参照 ) 。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 5 7 】

(作用効果)

以上のように自由振動仮定法その3は、フィルタリングによって自由振動の加速度を算出するステップ(S31)を実行する点が、フーリエ変換およびフーリエ逆変換をよって自由振動の加速度を算出するステップ(S2~S4)を実行する自由振動仮定法その1と相違するものの、これを除くステップは自由振動仮定法その1に同じである。

したがって、自由振動仮定法その3は、フーリエ変換およびフーリエ逆変換を行わないから、算出が簡素で、迅速に変位波形(補正変位波形)を得ることができという作用効果を奏する共に、自由振動仮定法その1と同じ作用効果を奏する。

なお、自由振動仮定法その3による算定結果は、自由振動仮定法その1による算定結果と同じである(厳密には相違する場合がある)ため、自由振動仮定法その1による算定結果を示す図12~図18を流用している。 10

## 【 0 0 5 8 】

以上、本発明を、構造物として橋梁を例にして、実施の形態1~実施の形態3をもとに説明したが、これらは例示であり、構造物の選定や、それらの各構成要素(各ステップ)の組み合わせ等にいろいろな変形例が可能なこと、またそうした変形例も本発明の範囲にあることは当業者に理解されるところである。

【産業上の利用可能性】

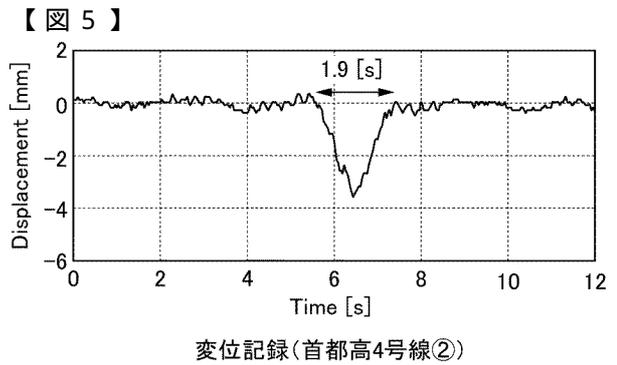
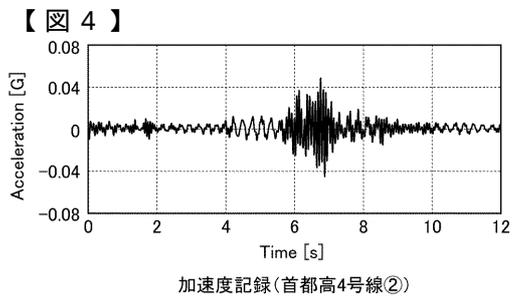
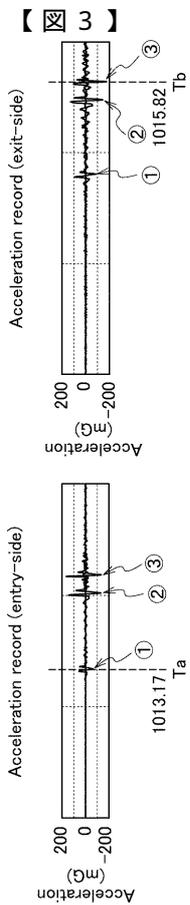
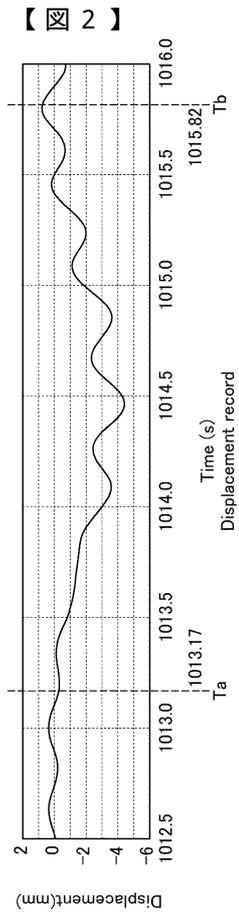
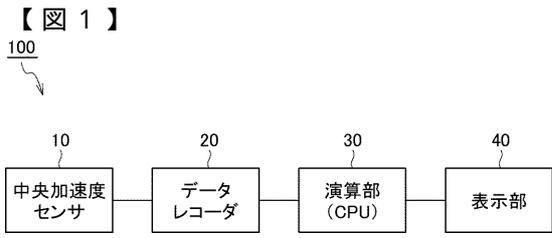
## 【 0 0 5 9 】

本発明に係る加速度記録を用いた変位応答算出法は、構造物に作用する外力による変位応答を高い精度で把握可能であるから、橋梁に限定されることなく、各種構造物の外力による変位応答を算出する手法として広く利用することができる。 20

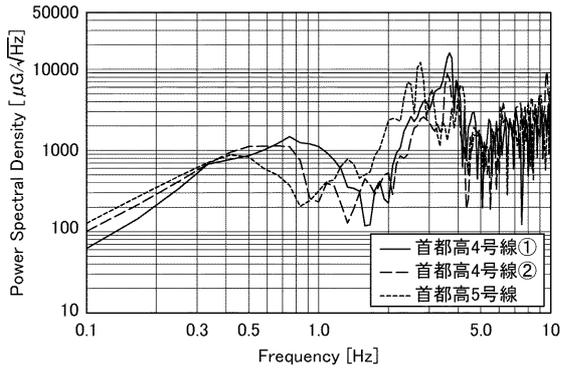
【符号の説明】

## 【 0 0 6 0 】

- 10 中央加速度センサ
- 20 データレコーダ
- 30 演算部(CPU)
- 40 表示部
- 100 変位応答算出装置



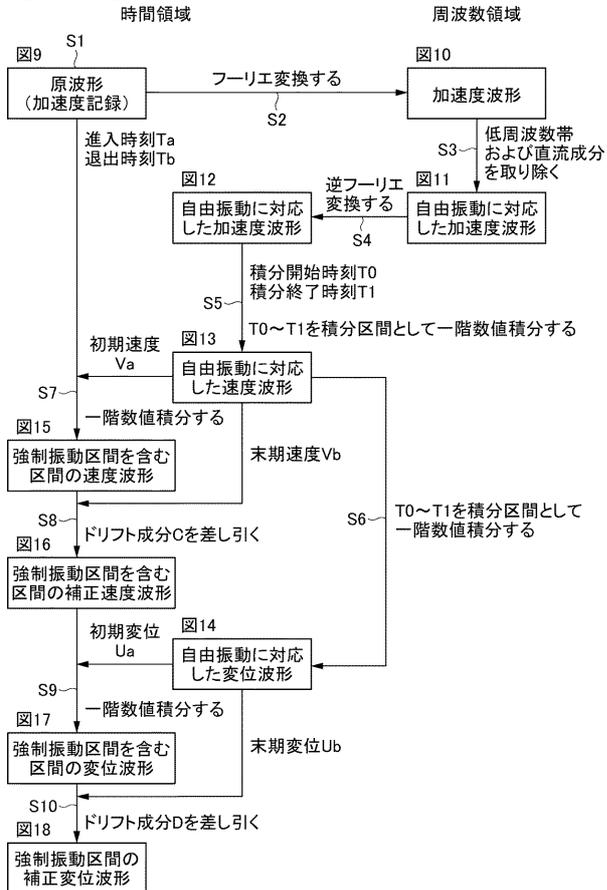
【図6】



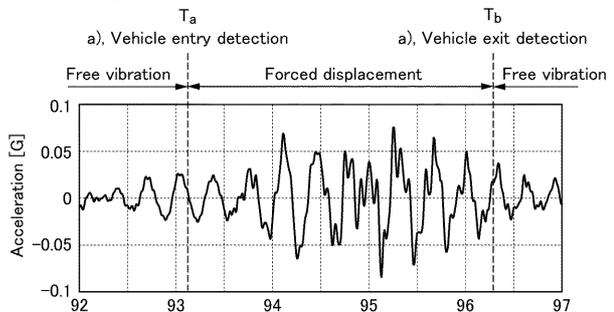
【図7】



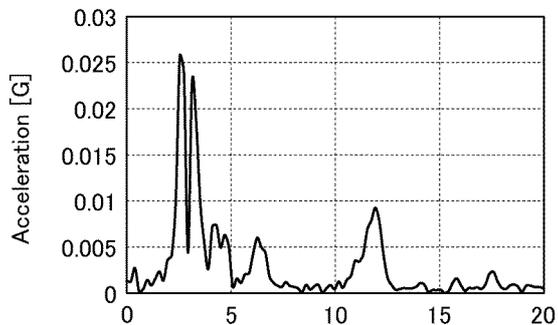
【図8】

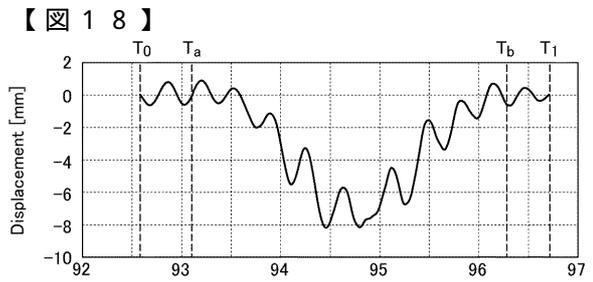
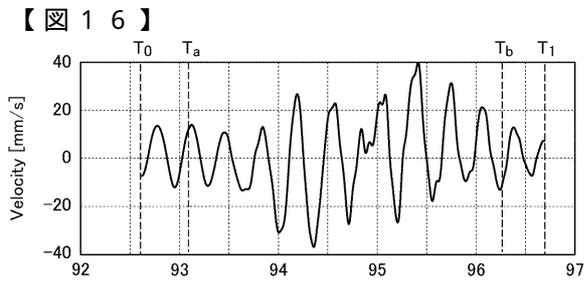
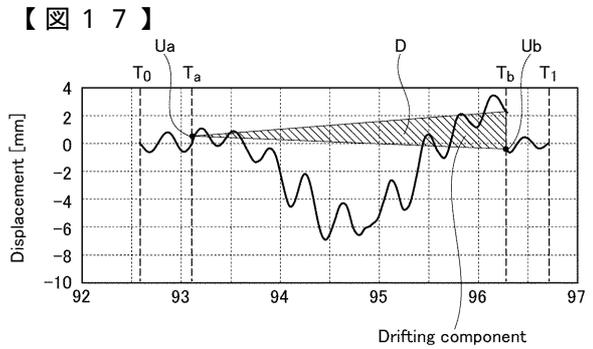
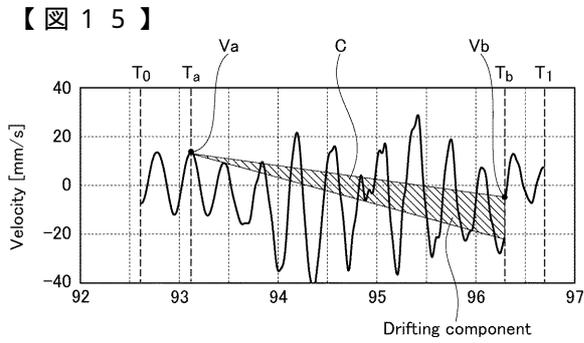
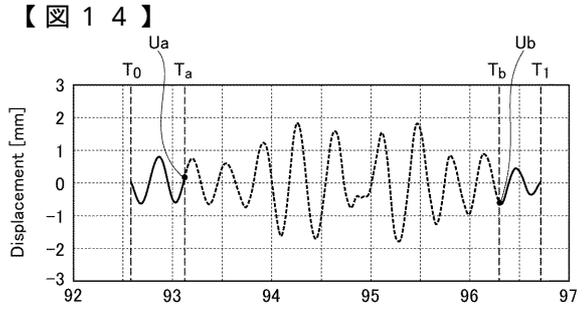
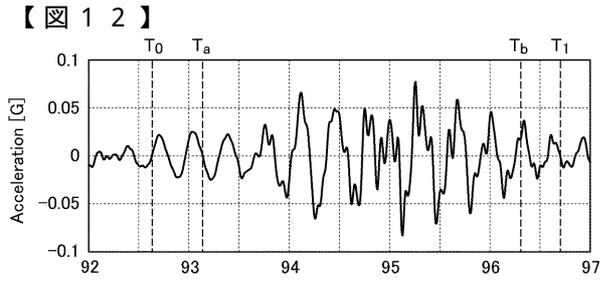
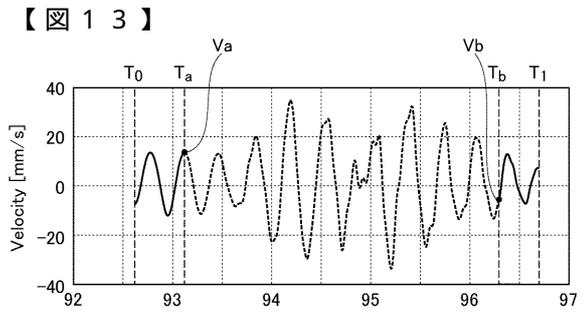
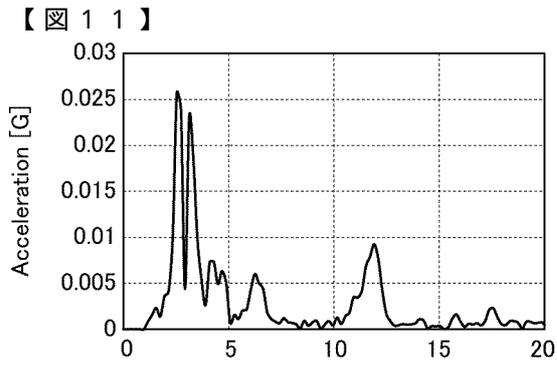


【図9】

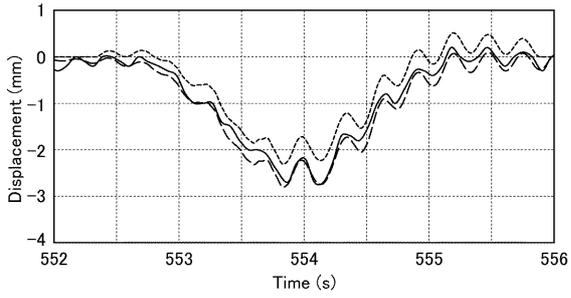


【図10】

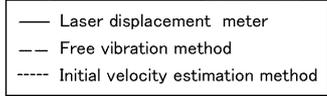




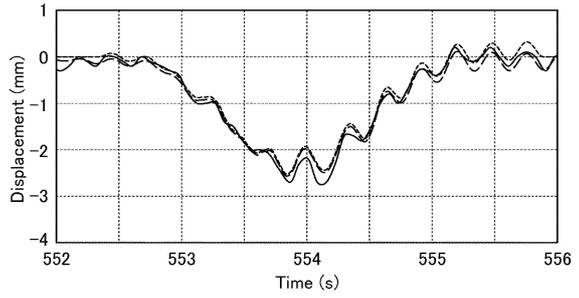
【図 19】



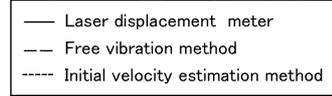
加速度センサA



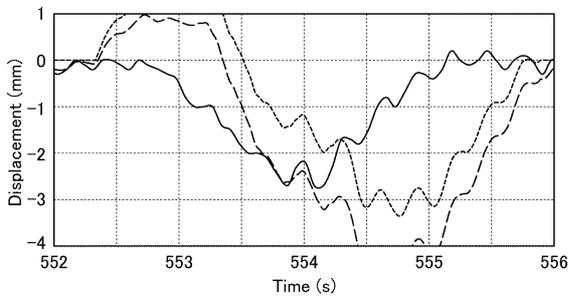
【図 20】



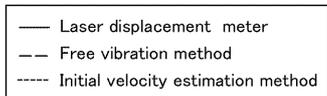
加速度センサB



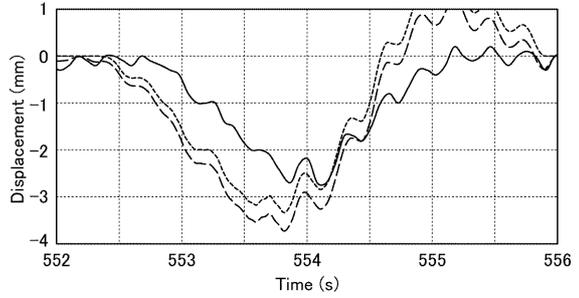
【図 21】



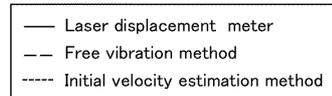
加速度センサC



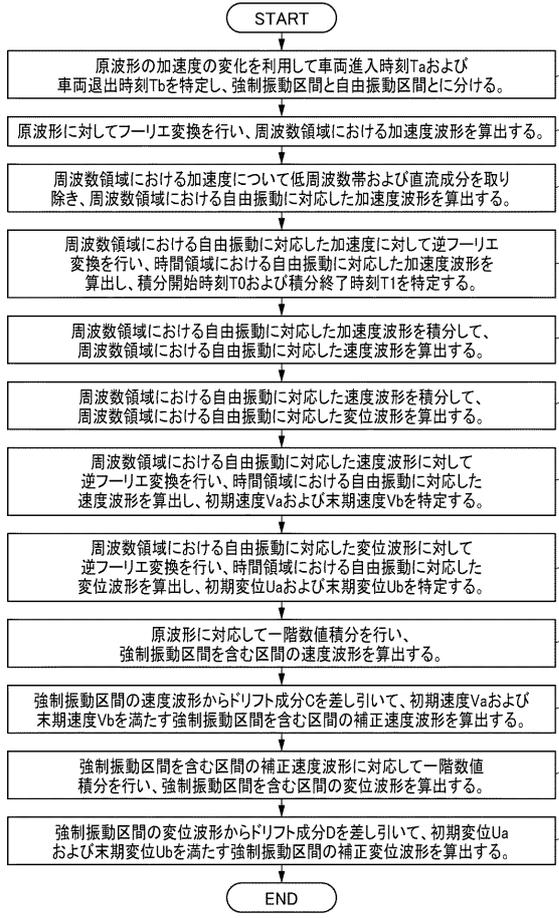
【図 22】



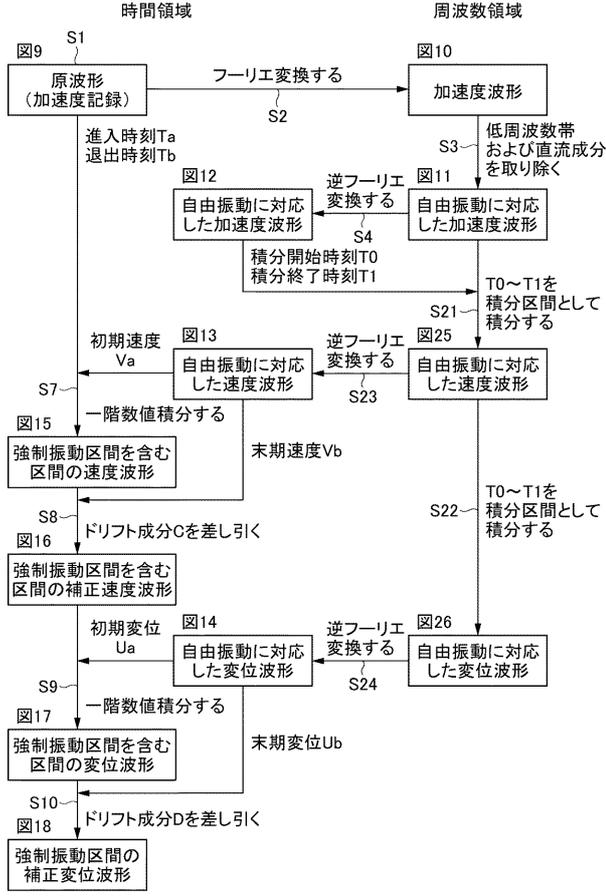
加速度センサD



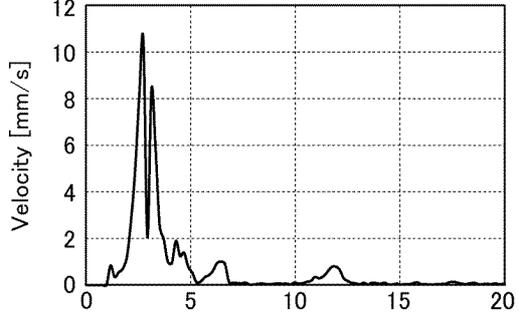
【図 2 3】



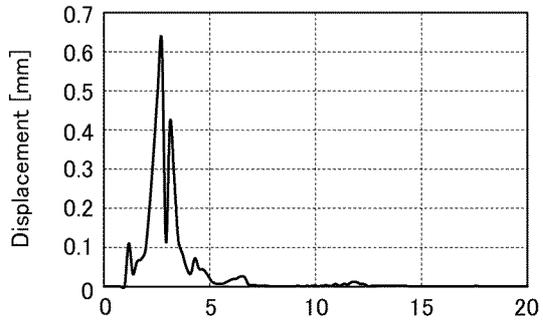
【図 2 4】



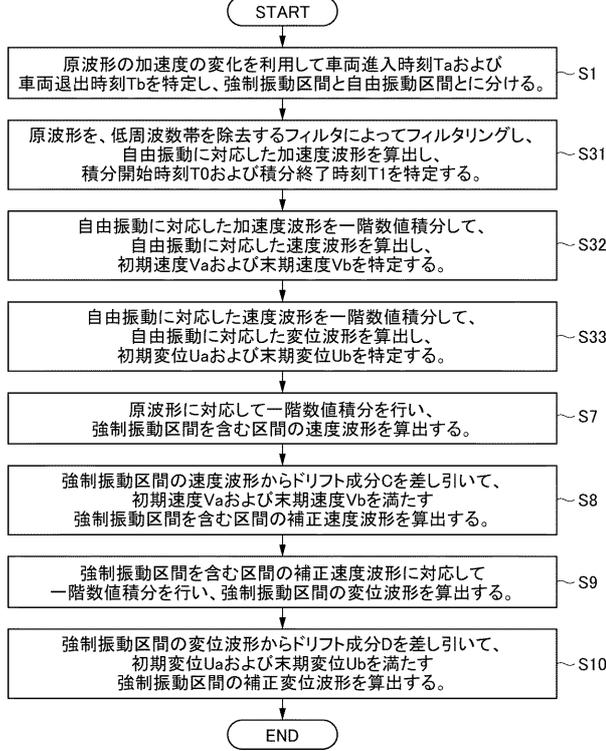
【図 2 5】



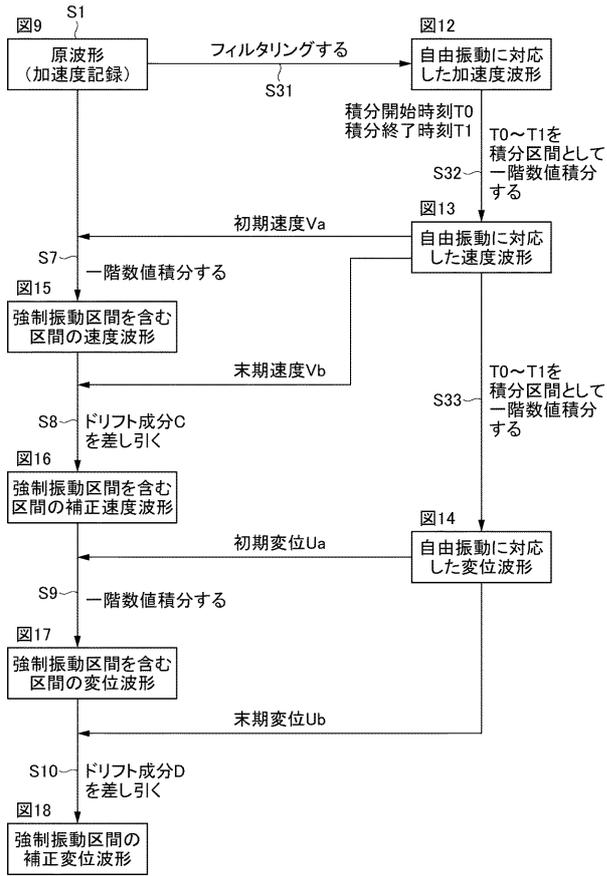
【図 2 6】



【図 2 7】



【図28】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2003-130629(JP,A)  
特開2012-242362(JP,A)  
特開2007-163384(JP,A)  
国際公開第2014/112630(WO,A1)  
米国特許出願公開第2010/0292943(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01H 1/00 - 17/00  
G01M 99/00  
G01B 21/00 - 21/32  
E01D 1/00 - 24/00  
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)