

(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2016-90324
(P2016-90324A)

(43) 公開日 平成28年5月23日(2016.5.23)

(51) Int.Cl. F I テーマコード(参考)
 GO 1 N 19/00 (2006.01) GO 1 N 19/00 Z 2 GO 2 4
 GO 1 M 13/00 (2006.01) GO 1 M 13/00

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2014-222982 (P2014-222982)
 (22) 出願日 平成26年10月31日(2014.10.31)

(71) 出願人 504139662
 国立大学法人名古屋大学
 愛知県名古屋市千種区不老町1番
 (74) 代理人 110000017
 特許業務法人アイテック国際特許事務所
 (72) 発明者 社本 英二
 愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大
 学法人名古屋大学内
 (72) 発明者 橋本 洋平
 愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大
 学法人名古屋大学内
 (72) 発明者 西山 聖久
 愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大
 学法人名古屋大学内

最終頁に続く

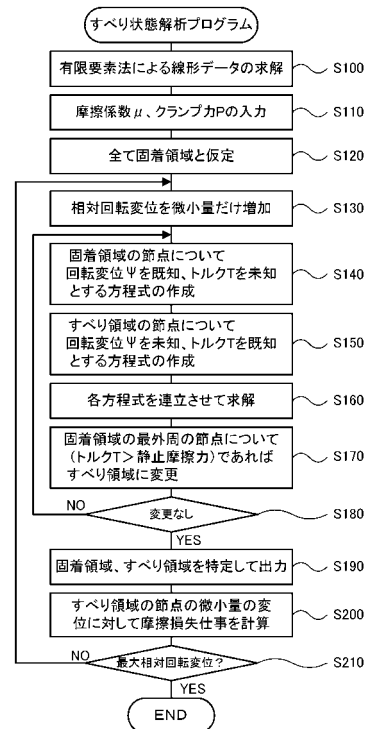
(54) 【発明の名称】 接触状態解析方法および接触状態解析装置並びにプログラム

(57) 【要約】

【課題】すべり状態や接触状態をよりの確に特定すると共に解析処理の短時間化を図る。

【解決手段】ボルト締結された2部材のクランプ力やトルクに対して有限要素法により線形データを求解して記憶しておく(S100)。次に、固着領域に属する節点については回転変位が2部材間に与えられた相対回転変位に等しく既知、トルクTを未知として方程式を作成し(S140)、すべり領域に属する節点については回転変位を未知、トルクTを既知として方程式を作成し(S150)、これらを連立させて求解する(S160)。固着領域に属する節点のうち最外周側の節点のトルクTが摩擦力と回転中心からの距離との積より大きいときにはすべり領域に変更する(S170)。こうした領域の変更が行なわれなくなるまで求解と領域変更とを繰り返して固着領域とすべり領域とを特定する。これにより、領域を的確に特定すると共に解析処理の短時間化を図ることができる。

【選択図】図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第 1 部材と第 2 部材の接触面である前記第 1 部材の第 1 面と前記第 2 部材の第 2 面の各部にすべりが生じているか否かのすべり状態を解析する状態解析方法であって、

前記第 1 部材および前記第 2 部材の各部に作用する力とその変位の間の関係を線形データとして記憶しておき、

前記第 1 部材と前記第 2 部材に対して前記第 1 面と前記第 2 面におけるすべり方向に相対変位または相対力を作用させたときに、

前記線形データを用いて、前記第 1 面と前記第 2 面の対応する各部のうちすべりが生じない固着領域に属すると仮定された各固着部については前記第 1 部材と前記第 2 部材とに生じる変位が各部材の変位の和に等しく既知とすると共にすべり方向のせん断力を未知とする方程式を作成し、前記第 1 面と前記第 2 面の対応する各部のうちすべりが生じるすべり領域に属すると仮定された各すべり部については変位を未知とすると共にすべり方向のせん断力を既知とする方程式を作成し、作成した方程式を連立させて未知とされた前記各固着部のせん断力と前記各すべり部の変位とを求解する求解ステップと、

前記求解ステップにより得られる解において、前記各固着部のうちせん断力が静止摩擦力を超えるという矛盾を有する固着部の少なくとも一部については前記すべり領域に属するものに変更し、前記各すべり部のうち変位がすべり方向のすべり変位とにならないという矛盾を有するすべり部の少なくとも一部については前記固着領域に属するものに変更する変更ステップと、

を前記変更ステップにおいて前記固着部および前記すべり部に矛盾が生じなくなるまで繰り返すことにより、前記各固着部と前記各すべり部とを特定する、

ことを特徴とする接触状態解析方法。

【請求項 2】

請求項 1 記載の接触状態解析方法であって、

前記相対変位または前記相対力を微小量ずつ変化させて各相対変位または各相対力に対する前記各固着部と前記各すべり部とを特定する、

接触状態解析方法。

【請求項 3】

請求項 2 記載の接触状態解析方法であって、

前記相対変位または前記相対力を微小量だけの変化の前後において前記各すべり部におけるすべり変位の変化量とせん断力との積の和を該変化の前後における仕事量として演算する仕事量演算ステップを有する、

接触状態解析方法。

【請求項 4】

請求項 1 ないし 3 のうちのいずれか 1 つの請求項に記載の接触状態解析方法であって、

前記線形データは、有限要素法により解析されたデータである、

接触状態解析方法。

【請求項 5】

請求項 1 ないし 4 のうちのいずれか 1 つの請求項に記載の接触状態解析方法であって、前記各すべり部のすべり方向のせん断力は、摩擦係数と抗力との積により得られる動摩擦力である、

接触状態解析方法。

【請求項 6】

請求項 1 ないし 5 のうちのいずれか 1 つの請求項に記載の接触状態解析方法であって、

前記力をトルク、前記変位を回轉變位、前記相対変位を相対回轉變位、前記相対力を相対トルク、として前記第 1 部材と前記第 2 部材の相対回転運動または相対回転振動における前記各固着部と前記各すべり部とを特定する、

接触状態解析方法。

【請求項 7】

10

20

30

40

50

第1部材と第2部材の接触面である前記第1部材の第1面と前記第2部材の第2面の各部が接触しているか否かの接触状態を解析する接触状態解析方法であって、

前記第1部材および前記第2部材の各部に作用する力とその変位の間の関係を線形データとして記憶しておく、

前記線形データを用いて、前記第1面と前記第2面の対応する各部のうち接触領域に属すると仮定された各接触部については前記第1部材と前記第2部材とに生じる変位が各部材の変位の和に等しく既知とすると共に接触力を未知とする方程式を作成し、前記第1面と前記第2面の対応する各部のうち非接触領域に属すると仮定された各非接触部については変位を未知とすると共に接触力を値0とする方程式を作成し、該作成した方程式を連立させて未知とされた前記各接触部の接触力と前記各非接触部の変位とを求解する求解ステップと、

前記求解ステップにより得られる解において、前記各接触部のうち接触力が負となるという矛盾を有する接触部の少なくとも一部については前記非接触領域に属するものに変更し、前記各非接触部のうち互いに食い込む変位となるという矛盾を有する非接触部の少なくとも一部については前記接触領域に属するものに変更する変更ステップと、

を前記変更ステップにおいて前記接触部および前記非接触部に矛盾が生じなくなるまで繰り返すことにより、前記各接触部と前記各非接触部とを特定する、

ことを特徴とする接触状態解析方法。

【請求項8】

請求項1ないし7のうちのいずれか1つの請求項に記載の接触状態解析方法を用いて接触状態解析を行なう接触状態解析装置。

【請求項9】

コンピュータを請求項8の接触状態解析装置として機能させるプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、接触状態解析方法および接触状態解析装置並びにプログラムに関し、詳しくは、2部材の接触面の各部にすべりが生じているか否かのすべり状態を解析したり2部材の接触面の各部が接触しているか否かの接触状態を解析したりする接触状態解析方法、および、こうした接触状態解析方法を用いて接触状態解析を行なう接触状態解析装置、並びに、コンピュータを接触状態解析装置として機能させるプログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、この種の接触状態解析方法としては、有限要素法を用いてボルト接合を有する平板構造物の減衰特性を解析するものが提案されている（例えば、非特許文献1参照）。この論文では、有限要素法解析を接触状態の解析に用いている。まず、線形振動解析を行ない、振動モード形状を基にモード毎の減衰特性の違いを考察する。そして、振動モード形状を強制変位部分とした静的接触解析を行ない、摩擦による散逸エネルギーを算定することによりモード毎の減衰特性を評価している。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献1】「ボルト接合を有する平板構造物の減衰特性」, 平居嵩朗, 鞍谷文保, 城戸一郎, 日本機械学会[No.12-12] Dynamics and Design Conference 2012 USB論文集[2012,9,18-21,横浜]

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、上述の論文の技術では、線形部分の有限要素法解析が繰り返し処理に組み込まれているため、解析結果を得るためには長時間を要してしまう。有限要素法解析は

10

20

30

40

50

線形部分の解析に有効であるが、計算の規模が大きく処理が多いため、繰り返し処理には不向きである。こうした課題に対して、すべり率を導入し、これを適当に定めることにより、理論値と実験値とを合致させるものも提案されているが、接触面におけるどの部分が固着しており、どの部分がすべっているのかを特定することやすべり量を予測することもできず、本質的な解法と判断することはできない。

【0005】

本発明の接触状態解析方法および接触状態解析装置並びにプログラムは、すべり状態や接触状態をよりの確に特定すると共に解析処理の短時間化を図ることを主目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の接触状態解析方法および接触状態解析装置並びにプログラムは、上述の主目的を達成するために以下の手段を採った。

【0007】

本発明の第1の接触状態解析方法は、

第1部材と第2部材の接触面である前記第1部材の第1面と前記第2部材の第2面の各部にすべりが生じているか否かのすべり状態を解析する状態解析方法であって、

前記第1部材および前記第2部材の各部に作用する力とその変位の間の関係を線形データとして記憶しておく、

前記第1部材と前記第2部材に対して前記第1面と前記第2面におけるすべり方向に相対変位または相対力を作用させたときに、

前記線形データを用いて、前記第1面と前記第2面の対応する各部のうちすべりが生じない固着領域に属すると仮定された各固着部については前記第1部材と前記第2部材とに生じる変位が各部材の変位の和に等しく既知とすると共にすべり方向のせん断力を未知とする方程式を作成すると共に、前記第1面と前記第2面の対応する各部のうちすべりが生じるすべり領域に属すると仮定された各すべり部については変位を未知とすると共にすべり方向のせん断力を既知とする方程式を作成し、作成した方程式を連立させて未知とされた前記各固着部のせん断力と前記各すべり部の変位とを求解する求解ステップと、

前記求解ステップにより得られる解において、前記各固着部のうちせん断力が静止摩擦力を超えるという矛盾を有する固着部の少なくとも一部については前記すべり領域に属するものに変更し、前記各すべり部のうち変位がすべり方向のすべり変位とならないという矛盾を有するすべり部の少なくとも一部については前記固着領域に属するものに変更する変更ステップと、

を前記変更ステップにおいて前記固着部および前記すべり部に矛盾が生じなくなるまで繰り返すことにより、前記各固着部と前記各すべり部とを特定する、

ことを特徴とする。

【0008】

この本発明の接触状態解析方法では、まず、第1部材と第2部材の各部に作用する力とその変位の間の関係を線形データとして記憶しておく。即ち、線形データをデータベース化して記憶しておくのである。次に、第1部材と第2部材に対して第1面と第2面におけるすべり方向に相対変位または相対力を作用させたときに、求解ステップとして、線形データを用いて、第1面と第2面の対応する各部のうちすべりが生じない固着領域に属すると仮定された各固着部については第1部材と第2部材とに生じる変位が各部材の変位の和に等しく既知とすると共にすべり方向のせん断力を未知とする方程式を作成すると共に、第1面と第2面の対応する各部のうちすべりが生じるすべり領域に属すると仮定された各すべり部については変位を未知とすると共にすべり方向のせん断力を既知とする方程式を作成し、作成した方程式を連立させて未知とされた各固着部のせん断力と各すべり部の変位とを求解し、変更ステップとして、求解ステップにより得られる解において、各固着部のうちせん断力が静止摩擦力を超えるという矛盾を有する固着部の少なくとも一部についてはすべり領域に属するものに変更し、各すべり部のうち変位がすべり方向のすべり変位とならないという矛盾を有するすべり部の少なくとも一部については固着領域に属するも

10

20

30

40

50

のに変更する。そして、こうした矛盾が生じなくなるまで、求解ステップによる求解と変更ステップによる領域の変更を繰り返し実行する。こうした繰り返し処理により矛盾が生じなくなったときには、そのときの固着領域に属する各固着部とすべり領域に属する各すべり部とを特定する。線形データについてはデータベース化して記憶しておくから、繰り返し処理中には線形問題の解析（線形データの求解）は行なわない。このため、繰り返し処理中に線形問題の解析が行なわれるものに比して解析時間を短縮することができる。また、第1面と第2面の対応する各部について固着領域に属するかすべり領域に属するかを仮定して解析するから、固着部とすべり部とをよりの確に特定することができる。また、第1面と第2面の対応する各部におけるすべり方向のせん断力や変位の分布、あるいはその履歴や各部材内の各部の変形や応力分布を求めることもできる。ここで、線形データは、実測したものでよいし、有限要素法により解析されたものでよいし、差分法や境界要素法により解析されたものでよい。また、各すべり部のすべり方向のせん断力は、摩擦係数と抗力との積により得られる動摩擦力を用いることができる。

10

20

30

40

50

【0009】

こうした本発明の第1の接触状態解析方法において、前記相対変位または前記相対力を微小量ずつ変化させて各相対変位または各相対力に対する前記各固着部と前記各すべり部とを特定するものとすることもできる。こうすれば、相対変位や相対力が微小量変化する毎に固着部とすべり部とを特定するから、相対変位や相対力の変化の過程で固着部やすべり部がどのように変化するかを特定することができる。この場合、前記相対変位または前記相対力を微小量だけの変化の前後において前記各すべり部におけるすべり変位の変化量とせん断力との積の和を該変化の前後における仕事量として演算する仕事量演算ステップを有する、ものとすることもできる。こうすれば、相対変位や相対力が微小量変化する毎に摩擦損失仕事を演算するから、相対変位や相対力の変化の過程で摩擦損失仕事はどのように変化するかを演算することができる。この結果を用いて等価減衰係数を求めれば、より適正な等価減衰係数を求めることができる。

【0010】

また、本発明の接触状態解析方法において、前記力をトルク、前記変位を回轉變位、前記相対変位を相対回轉變位、前記相対力を相対トルク、として前記第1部材と前記第2部材の相対回轉變位または相対回轉振動における前記各固着部と前記各すべり部とを特定するものとしてもよい。こうすれば、回轉系のすべり状態の解析に用いることができる。

【0011】

本発明の第2の接触状態解析方法は、

第1部材と第2部材の接触面である前記第1部材の第1面と前記第2部材の第2面の各部が接触しているか否かの接触状態を解析する接触状態解析方法であって、

前記第1部材および前記第2部材の各部に作用する力とその変位の間の関係を線形データとして記憶しておく、

前記線形データを用いて、前記第1面と前記第2面の対応する各部のうち接触領域に属すると仮定された各接触部については前記第1部材と前記第2部材とに生じる変位が各部材の変位の和に等しく既知とすると共に接触力を未知とする方程式を作成し、前記第1面と前記第2面の対応する各部のうち非接触領域に属すると仮定された各非接触部については変位を未知とすると共に接触力を値0とする方程式を作成し、該作成した方程式を連立させて未知とされた前記各接触部の接触力と前記各非接触部の変位とを求解する求解ステップと、

前記求解ステップにより得られる解において、前記各接触部のうち接触力が負となるという矛盾を有する接触部の少なくとも一部については前記非接触領域に属するものに変更し、前記各非接触部のうち互いに食い込む変位となるという矛盾を有する非接触部の少なくとも一部については前記接触領域に属するものに変更する変更ステップと、

を前記変更ステップにおいて前記接触部および前記非接触部に矛盾が生じなくなるまで繰り返すことにより、前記各接触部と前記各非接触部とを特定する、

ことを特徴とする。

【 0 0 1 2 】

この本発明の第2の接触状態解析方法では、まず、第1部材の第1面と第2部材の第2面の対応する各部に作用する力とその変位の間の関係を線形データとして記憶しておく。即ち、線形データをデータベース化して記憶しておくのである。次に、求解ステップとして、線形データを用いて、第1面と第2面の対応する各部のうち接触領域に属すると仮定された各接触部については第1部材と第2部材とに生じる変位が各部材の変位の和に等しく既知とすると共に接触力を未知とする方程式を作成し、第1面と第2面の対応する各部のうち非接触領域に属すると仮定された各非接触部については変位を未知とすると共に接触力を値0とする方程式を作成し、作成した方程式を連立させて未知とされた各接触部の接触力と各非接触部の変位とを求解し、変更ステップとして、求解ステップにより得られる解において、各接触部のうち接触力が負となるという矛盾を有する接触部の少なくとも一部については非接触領域に属するものに変更し、各非接触部のうち互いに食い込む変位となるとい矛盾を有する非接触部の少なくとも一部については接触領域に属するものに変更する。そして、こうした矛盾が生じなくなるまで、求解ステップによる求解と領域変更ステップによる領域の変更を繰り返し実行する。そして、矛盾が生じなくなったときに、そのときの接触領域に属する各接触部と非接触領域に属する各非接触部とを特定する。線形データについてはデータベース化して記憶させておくから、繰り返し処理中には線形問題の解析（線形データの求解）は行なわない。このため、繰り返し処理中に線形問題の解析が行なわれるものに比して解析時間を短縮することができる。また、第1面と第2面の対応する各部について接触領域に属するか非接触領域に属するかを仮定して解析するから、接触部と非接触部とをよりの確に特定することができる。また、第1面と第2面の対応する各部における接触力や変位の分布、あるいは各部材内の各部の変形や応力分布を求めることもできる。ここで、線形データは、実測したものでよいし、有限要素法により解析されたものでよいし、差分法や境界要素法により解析されたものでよい。

10

20

【 0 0 1 3 】

本発明の接触状態解析装置は、上述の何れかの態様の本発明の接触状態解析方法、即ち、基本的には、

(1) 第1部材と第2部材の接触面である前記第1部材の第1面と前記第2部材の第2面の各部にすべりが生じているか否かのすべり状態を解析する状態解析方法であって、

前記第1部材および前記第2部材の各部に作用する力とその変位の間の関係を線形データとして記憶しておき、前記第1部材と前記第2部材に対して前記第1面と前記第2面におけるすべり方向に相対変位または相対力を作用させたときに、前記線形データを用いて、前記第1面と前記第2面の対応する各部のうちすべりが生じない固着領域に属すると仮定された各固着部については前記第1部材と前記第2部材とに生じる変位が各部材の変位の和に等しく既知とすると共にすべり方向のせん断力を未知とする方程式を作成し、前記第1面と前記第2面の対応する各部のうちすべりが生じるすべり領域に属すると仮定された各すべり部については変位を未知とすると共にすべり方向のせん断力を既知とする方程式を作成し、作成した方程式を連立させて未知とされた前記各固着部のせん断力と前記各すべり部の変位とを求解する求解ステップと、前記求解ステップにより得られる解において、前記各固着部のうちせん断力が静止摩擦力を超えるという矛盾を有する固着部の少なくとも一部については前記すべり領域に属するものに変更し、前記各すべり部のうち変位がすべり方向のすべり変位とならないという矛盾を有するすべり部の少なくとも一部については前記固着領域に属するものに変更する変更ステップと、を前記変更ステップにおいて前記固着部および前記すべり部に矛盾が生じなくなるまで繰り返すことにより、前記各固着部と前記各すべり部とを特定する、ことを特徴とする本発明の第1の接触状態解析方法や、

30

40

(2) 第1部材と第2部材の接触面である前記第1部材の第1面と前記第2部材の第2面の各部が接触しているか否かの接触状態を解析する接触状態解析方法であって、前記第1部材および前記第2部材の各部に作用する力とその変位の間の関係を線形データとして記憶しておき、前記線形データを用いて、前記第1面と前記第2面の対応する各部のうち接

50

触領域に属すると仮定された各接触部については前記第 1 部材と前記第 2 部材とに生じる変位が各部材の変位の和に等しく既知とすると共に接触力を未知とする方程式を作成し、前記第 1 面と前記第 2 面の対応する各部のうち非接触領域に属すると仮定された各非接触部については変位を未知とすると共に接触力を値 0 とする方程式を作成し、該作成した方程式を連立させて未知とされた前記各接触部の接触力と前記各非接触部の変位とを求解する求解ステップと、前記求解ステップにより得られる解において、前記各接触部のうち接触力が負となるという矛盾を有する接触部の少なくとも一部については前記非接触領域に属するものに変更し、前記各非接触部のうち互いに食い込む変位となるという矛盾を有する非接触部の少なくとも一部については前記接触領域に属するものに変更する変更ステップと、を前記変更ステップにおいて前記接触部および前記非接触部に矛盾が生じなくなるまで繰り返すことにより、前記各接触部と前記各非接触部とを特定する、ことを特徴とする本発明の第 2 の接触状態解析方法、
を用いて接触状態解析を行なう装置である。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 4 】

この本発明の接触状態解析装置では、本発明の第 1 の接触状態解析方法を用いるから、本発明の第 1 の接触状態解析方法が奏する効果、即ち、繰り返し処理中に線形問題の解析が行なわれるものに比して解析時間を短縮することができるという効果や、固着部とすべり部とをよりの確に特定したり、第 1 面と第 2 面の対応する各部におけるすべり方向のせん断力や変位の分布、あるいはその履歴や各部材内の各部の変形や応力分布を求めることもできるという効果を奏することができる。また、本発明の第 2 の接触状態解析方法を用いるから、本発明の第 2 の接触状態解析方法が奏する効果、即ち、繰り返し処理中に線形問題の解析が行なわれるものに比して解析時間を短縮することができるという効果や、接触部と非接触部とをよりの確に特定したり、第 1 面と第 2 面の対応する各部における接触力や変位の分布、あるいは各部材内の各部の変形や応力分布を求めることもできるという効果を奏することができる。

【 0 0 1 5 】

本発明のプログラムは、コンピュータを本発明の接触状態解析装置、即ち、基本的には、本発明の第 1 の接触状態解析方法を用いて接触状態解析を行なう装置や、本発明の第 2 の接触状態解析方法を用いて接触状態解析を行なう装置、として機能させるものである。したがって、本発明のプログラムでは、本発明の第 1 の接触状態解析方法や本発明の第 2 の接触状態解析方法を用いるから、本発明の第 1 の接触状態解析方法が奏する効果や本発明の第 2 接触状態解析方法が奏する効果、即ち、繰り返し処理中に線形問題の解析が行なわれるものに比して解析時間を短縮することができるという効果や、固着部とすべり部とをよりの確に特定したり、接触部と非接触部とをよりの確に特定したりすることができるなどの効果を奏することができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 6 】

【 図 1 】本発明の一実施例としてのすべり状態解析装置 20 の構成の概略を示す構成図である。

【 図 2 】ボルト締結の 2 部材にボルト軸を中心軸して振動する回転相対変位を作用させたときの締結面におけるすべり状態を解析するすべり状態解析プログラムの一例を示すフローチャートである。

【 図 3 】ボルト締結の 2 部材に振動する相対回転変位（トルク）や相対変位（相対力）を作用させた例を示す説明図である。

【 図 4 】ボルト 60 の締結力に対して第 2 部材 50 の第 2 面 52 に生じる応力（接触応力）の分布の一例を示す説明図である。

【 図 5 】ボルト 60 に単位クランプ力を作用させたときのボルト 60 の中心軸からの距離 r_j と応力 σ_j との関係を示す説明図である。

【 図 6 】第 2 部材 50 の第 2 面 52 に単位トルクを作用させたときの第 2 部材 50 の下面 54 を基準としたときの相対変位 δ を模式的に示す説明図である。

【図 7】 相対回転変位を与えたときの回転変位 を固着領域とすべり領域とを用いて模式的に示す説明図である。

【図 8】 相対回転変位を与えたときのトルク T を固着領域とすべり領域とを用いて模式的に示す説明図である。

【図 9】 相対回転変位を与えたときの摩擦損失仕事 W_i を模式的に示す説明図である。

【図 10】 相対回転変位 が振動する場合の摩擦損失仕事 W を模式的に示す説明図である。

【図 11】 相対回転変位 が振動する実験装置の一例を示す構成図である。

【図 12】 実験装置と実施例による解析例の諸元や条件を一覧表示した説明図である。

【図 13】 解析例と実験装置の実験による回転変位 とトルク T との関係の結果を示す説明図である。

10

【図 14】 解析例と実験装置の実験による回転変位 と摩擦損失仕事 W との関係の結果を示す説明図である。

【図 15】 解析例と実験装置の実験による回転変位 と等価減衰係数 D_e との関係の結果を示す説明図である。

【図 16】 一般化したすべり状態解析プログラムの一例を示すフローチャートである。

【図 17】 接触状態解析プログラムの一例を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0017】

次に、本発明を実施するための形態を実施例を用いて説明する。

20

【実施例】

【0018】

図 1 は、本発明の一実施例としてのすべり状態解析装置 20 の構成の概略を示す構成図である。実施例のすべり状態解析装置 20 は、図示するように、一般的な汎用コンピュータ 22 にアプリケーションソフトウェアとしてのすべり状態解析プログラム 30 がインストールされたものとして構成されている。すべり状態解析プログラム 30 は、線形データ求解モジュール 32、求解モジュール 34、領域変更モジュール 36、摩擦損失仕事演算モジュール 38、を含んでいる。

【0019】

線形データ求解モジュール 32 は、ボルトなどにより締結された部材の各部（各節点）に対して線形変形の範囲内の力やトルクと各部に作用する応力や各節点の変位との関係を有限要素法解析や差分法あるいは境界要素法などを用いて求解し、得られた解を線形データとしてデータベース化して記憶するモジュールである。

30

【0020】

求解モジュール 34 は、2 部材に相対変位や相対回転変位あるいは相対力や相対トルク（以下、「相対変位等」と省略する。）を作用したときに、線形データを用いて、すべりが生じない固着領域に属すると仮定した節点については、2 部材に生じる変位が各節点の変位の和に等しく既知とすると共にすべり方向のせん断力（トルク）を未知とする方程式を作成し、すべりが生じるすべり領域に属すると仮定した節点については、2 部材の締結面における対応する節点の変位を未知とすると共にすべり方向のせん断力（トルク）を既知とする方程式を作成し、固着領域の各節点についての方程式とすべり領域の各節点についての方程式とを連立させて解を求めるモジュールである。

40

【0021】

領域変更モジュール 36 は、求解モジュール 34 により得られる解において、固着領域に属する各節点のうちせん断力（トルク）が静止摩擦力を超える節点の少なくとも一部についてはすべり領域に属するものと変更し、すべり領域に属する各節点のうち変位がすべり方向のすべり変位とならない節点の少なくとも一部については固着領域に属するものに変更するモジュールである。例えば、固着領域に属する各節点のうちせん断力（トルク）が静止摩擦力を超える節点のうち最も大きなせん断力（トルク）となる節点をすべり領域に属するものと変更し、すべり領域に属する各節点のうち変位がすべり方向のすべり変位

50

とならない節点のうちすべり方向とは異なるすべり変位が最大のものを固着領域に属するものと変更するものとしてもよい。この変更モジュール36において節点の領域の変更が行なわれなくなるまで領域変更後の各節点に対して求解モジュール34によって求解することと変更モジュール36による領域の変更とを繰り返すことにより、固着領域に属する節点とすべり領域に属する節点を特定することができる。そして、相対変位等を微小量ずつ増加したり或いは減少したりして同様に固着領域に属する節点とすべり領域に属する節点を特定することにより、相対変位等の変化に対して固着領域とすべり領域の変動を特定することができる。

【0022】

摩擦損失仕事演算モジュール38は、すべり領域に属する節点間のすべり変位と動摩擦力との積により節点の摩擦損失仕事を演算すると共にその総和により相対変位等に対する2部材の締結面における摩擦損失仕事を演算するモジュールである。即ち、相対変位等を微小量ずつ増加したり或いは減少したりして同様に相対変位等の各微小量の変位に対する各節点の摩擦損失仕事を求め、その総和により相対変位等を微小量ずつ増加したり或いは減少したりした際の全体の摩擦損失仕事を求め、更にこの全体の摩擦損失仕事を総和することにより相対変位等の全摩擦損失仕事を演算することができる。相対変位等が振動するものである場合、この全摩擦損失仕事は振動の減衰エネルギーとなる。

【0023】

図2は、ボルト締結の2部材にボルト軸を中心軸として振動する回転相対変位(トルク)を作用させたときの締結面におけるすべり状態を解析するすべり状態解析プログラムの一例を示すフローチャートであり、図3は、ボルト締結の2部材に振動する相対回転変位(トルク)や相対変位(相対力)を作用させた例を示す説明図である。図3に示すように、第1部材40は、図中下面の第1面42をベースプレートとしての第2部材50の上面の第2面52に当接するようにしてボルト60により第2部材50に締結されている。締結面としては、第1部材40の第1面42と第2部材50の第2面52とが該当する。図3(a)は、ボルト60により締結された第1部材40と第2部材50にボルト60の軸を中心軸として振動する回転相対変位(トルク)が作用している様子を説明する説明図であり、図3(b)は、第1部材40と第2部材50に対して平行な振動する相対変位(相対力)が作用している様子を説明する説明図であり、図3(c)は、第1部材40と第2部材50に対して垂直な振動する相対力が作用している様子を説明する説明図である。図2のすべり解析プログラムは、図3(a)の回転相対変位(トルク)が作用している場合のすべり状態を解析するプログラムである。以下、図2のすべり状態解析プログラムの処理に沿って図3(a)のすべり状態の解析方法を説明する。

【0024】

図2のすべり状態解析プログラムでは、まず、有限要素法を用いて線形データを求解すると共に線形データをデータベース化して記憶する(ステップS100)。具体的には、ボルト60の締結力(クランプ力)に対して第1部材40の第1面42や第2部材50の第2面52に生じる応力や、ボルト60の軸を中心とするトルクを作用したときの第1部材40の第1面42や第2部材50の第2面52の各部の変位などの線形問題を解析し、解析して得られた結果(線形データ)をデータベース化するのである。図4にボルト60の締結力に対して第2部材50の第2面52に生じる応力(接触応力)の分布の一例を示し、図5にボルト60に単位クランプ力を作用させたときのボルト60の中心軸からの距離 r_j と応力 σ_j との関係を示す。したがって、ボルト60にクランプ力 P を作用させると、線形の範囲内では内周側から j 番目の径位置には $P \times \sigma_j$ の応力が作用することになる。図6に第2部材50の第2面52に単位トルクを作用させたときの第2部材50の下面54を基準としたときの相対変位 θ を模式的に示す。図6では、内周側から k 番目の径位置に単位トルクを作用したときの内周側から j 番目の径位置の変位 $\theta_{j,k}$ を示している。このため、内周側から k 番目の径位置にトルク T を作用させると、線形の範囲内では内周側から j 番目の径位置には $T \times \theta_{j,k}$ の変位が生じる。内周側から j 番目の径位置の回転変位は、最内周側から最外周側までの全ての径位置に作用するトルクによる変位の和とな

10

20

30

40

50

るから、 $(T_i \times r_{j,i})$ によって計算することができる。ステップS100では、図5のボルト60に単位クランプ力を作用させたときのボルト60の中心軸からの距離 r_j の応力 σ_j と、第1部材40の第1面42と第2部材50の第2面52に対して内周側からk番目の径位置に単位トルクを作用したときの内周側からj番目の径位置の変位 $\delta_{j,k}$ 、変位 $\delta_{j,k}$ と、を有限要素法により求めて線形データとしてデータベース化して記憶するのである。

【0025】

次に、第1部材40の第1面42と第2部材50の第2面52との摩擦係数 μ とボルト60のクランプ力Pを入力する(ステップS110)。ここで、摩擦係数 μ は、静止摩擦係数と動摩擦係数の2つを用いてもよく、または摩擦係数が摩擦速度の関数であるとしてもよいが、簡便のために単一のものを用いるものとしてもよい。そして、第1部材40の第1面42のうちステップS100により得られた線形データに基づいて接触応力が値0ではない領域をすべりが生じない固着領域であると仮定する(ステップS120)。第1部材40の上面44にボルト60の軸を中心軸とするトルクを作用させると、第1面42には、すべりを生じることなく第2部材50の第2面52に固着している領域(固着領域)と、第2部材50の第2面52に対してすべりが生じている領域(すべり領域)と、第2部材50の第2面52に対して接触応力が値0の非接触領域とが存在するが、実施例のすべり状態解析プログラムでは、初期値として第1面42のうち非接触領域ではない全ての領域を固着領域であると仮定するのである。なお、仮定であるから、初期値として第1面42の内周側からn番目以内の径位置を固着領域であると仮定すると共に内周側からn+1番目以降の径位置をすべり領域であると仮定するものとしてもよい。

【0026】

こうして領域を仮定すると、第2部材50の下面54に対して第1部材40の上面44に相対的に与える回轉變位としての相対回轉變位 θ_i を微小量 $\Delta\theta$ ずつ増加して(ステップS130)、ステップS140~ステップS210の処理を最大相対回轉變位に至るまで繰り返す。ステップS130を最初に実行するときには、初期値の相対回轉變位 θ_0 は値0であるから、相対回轉變位 θ_i は微小量 $\Delta\theta$ となる。i番目の相対回轉變位 θ_i は微小量 $\Delta\theta$ とiとの積として計算することができる。こうして相対回轉變位 θ_i が与えられると、仮定によって固着領域に属するとされた節点については、第2部材50の下面54に対する第2部材50の第2面52上での回轉變位 $\theta_{2,i}$ と第1部材40の上面44に対する第1部材40の第1面42上での回轉變位 $\theta_{1,i}$ との和として得られる回轉變位 $\theta_{total,i}$ を既知とすると共に、トルクTを未知とする方程式を作成する(ステップS140)。図7は、第2部材50の下面54に対して第1部材40の上面44に相対回轉變位を与えたときの回轉變位 $\theta_{total,i}$ を固着領域とすべり領域とを用いて模式的に示す説明図であり、図8は、第2部材50の下面54に対して第1部材40の上面44に相対回轉變位を与えたときのトルクTを固着領域とすべり領域とを用いて模式的に示す説明図である。図中、横軸 r_x は絶対回轉變位の原点(ゼロ)の第2部材50の下面54を示し、約30度の斜め線 r は第1部材40の上面44の周囲の絶対回轉變位を示している。なお、図8は模式図であるため、図中の斜め線 r の角度は模式的に示したものである。横軸 r_x と斜め線 r との間の分岐する太実線(一部破線)の分岐より左側と分岐から右上部が第1部材40の第1面42の各半径での絶対回轉變位を示し、太実線(一部破線)の分岐より左側と分岐から右下部が第2部材50の第2面52の各半径での絶対回轉變位を示している。太実線(一部破線)の分岐より左側は固着領域であり、分岐より右側がすべり領域と非接触領域である。なお、図中下部には接触応力 σ_k を示した。図7に示すように、内周側からk番目の径位置の回轉變位 θ_k は、第1部材40の第1面42の変位 δ_k と第2部材50の第2面52の変位 δ_k との和として定義した。固着領域では、与えられた相対回轉變位 θ_i が回轉變位 θ_k に等しくなり、既知とすることができる。

【0027】

一方、仮定によってすべり領域に属するとされた節点については、回轉變位 θ_k を未知とすると共にトルクTを既知とする方程式を作成する(ステップS150)。すべり領域では

、内周側から j 番目のトルク T_j は、摩擦力 q_j と回転中心からの距離 r_j との積として計算することができる。ここで摩擦力 q_j は、摩擦係数 μ と接触応力 σ_j と内周側から j 番目の径位置の面積 $2 \cdot r_j \cdot \Delta r$ との積として次式 (1) により表わされるから、既知とすることができる。なお、本プログラムにより最初にステップ S 150 が実行されるときには、ステップ S 120 で第 1 部材 40 の第 1 面 42 のうち非接触領域ではない全ての領域をすべりが生じない固着領域であると仮定されているから、何ら方程式の作成は行なわれない。

【0028】

【数 1】

$$q_j = \mu \cdot \sigma_j \cdot 2\pi r_j \Delta r \quad (1)$$

10

【0029】

こうして固着領域に属する節点についての方程式とすべり領域に属する節点についての方程式を作成すると、作成した方程式を連立させて次式 (2) の連立方程式とし、固着領域の未知のトルク T とすべり領域の未知の回転変位 ψ とを解として求める (ステップ S 160)。式 (2) では、内周側から stk 番目以内が固着領域であり、内周側から stk 番目の次から sld 番目までがすべり領域である。したがって、左辺の回転変位のうち $\psi_1 \sim \psi_{stk}$ までは既知であり、 ψ_{stk} の次から ψ_{sld} までは未知である。また、右辺のトルクのうち $T_1 \sim T_{stk}$ までは未知であり、 T_{stk} の次から T_{sld} までは既知である。このため、未知数と方程式数が同一であるから、連立一次方程式として解を求めることができる。なお、非接触領域に属する節点については、トルク T が値 0 として方程式を作成し、固着領域に属する節点やすべり領域に属する節点についての方程式と共に連立させて連立方程式としてもよい。この場合、非接触領域に属する節点の変位を求めることができる。

20

【0030】

【数 2】

$$\begin{Bmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_{stk} \\ \vdots \\ \psi_{sld} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} + \theta_{1,1} & \cdots & \phi_{1,sld} + \theta_{1,sld} \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_{stk,1} + \theta_{stk,1} & \cdots & \phi_{stk,sld} + \theta_{stk,sld} \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_{sld,1} + \theta_{sld,1} & \cdots & \phi_{sld,sld} + \theta_{sld,sld} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{stk} \\ \vdots \\ T_{sld} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

30

【0031】

こうして連立方程式を解くと、固着領域に属する節点のうち最外周側の節点についてトルク T_{stk} が摩擦力 q_{stk} と回転中心からの距離 r_{stk} との積以下であるか否かを判定し、トルク T_{stk} が摩擦力 q_{stk} と距離 r_{stk} との積より大きいときには、固着領域の最外周側の節点の属する領域を固着領域からすべり領域に変更する (ステップ S 170)。そして、こうした領域の変更なしの判定 (ステップ S 180) に対して否定的判定がなされ、ステップ S 140 に戻り、新たな固着領域とすべり領域との仮定に基づいて式 (2) の連立方程式を作成して解を求め、再び固着領域に属する節点のうち最外周側の節点についてトルク T_{stk} が摩擦力 q_{stk} と距離 r_{stk} との積以下であるか否かを判定するのである。

40

【0032】

ステップ S 180 で固着領域の最外周側の節点に対する領域の変更なしと判定されると、そのときに仮定されている固着領域とすべり領域をその相対回転変位 ψ_i における固着領域とすべり領域として特定する (ステップ S 190)。そして、すべり領域の各節点において相対回転変位 ψ_i に対して摩擦損失仕事 W_i を計算する (ステップ S 200)。摩擦損失仕事 W_i は、次式 (3) により表わされる。式 (3) 中の $u_{i,j}$ は式 (4) により表わ

50

される。この摩擦損失仕事 W_i は、図 9 の最大相対回転変位 θ^{amp} およびこれと反対側の最大相対回転変位 $-\theta^{amp}$ を与えたときの摩擦損失仕事 W_i を模式的に示す説明図に示すように、ハッチングの領域で示されるすべり領域の各節点における接触応力と微小リング要素の面積（内周側から j 番目の径位置の面積 $2 \pi r_j \cdot \Delta r$ ）と摩擦係数とすべり量の積（各節点の摩擦損失仕事）の総和として表わすことができる。

【 0 0 3 3 】

【数 3】

$$W_i = \sum_{j=stk+1}^{sld} w_{i,j} = \sum_{j=stk+1}^{sld} q_{i,j} \cdot u_{i,j} \quad (3)$$

10

$$u_{i,j} = r_j \cdot (\Omega_i - \psi_{i,j}) \quad (4)$$

【 0 0 3 4 】

こうして摩擦損失仕事 W_i を計算すると、相対回転変位 θ が最大相対回転変位 θ^{amp} に至っているか否かを判定し（ステップ S 2 1 0）、相対回転変位 θ が最大相対回転変位 θ^{amp} に至っていないときには、相対回転変位 θ が最大相対回転変位 θ^{amp} に至るまで、ステップ S 1 3 0 に戻って相対回転変位 θ を微小量 $\Delta \theta$ だけ増加するステップ S 1 3 0 ~ ステップ S 2 1 0 の処理を繰り返し実行する。即ち、相対回転変位 θ を微小量 $\Delta \theta$ ずつ増加して各相対回転変位 θ における固着領域とすべり領域とを特定すると共に摩擦損失仕事 W_i を計算するのである。相対回転変位 θ が最大相対回転変位 θ^{amp} に至っているときには、すべり状態の解析が完了したとしてプログラムを終了する。

20

【 0 0 3 5 】

いま、相対回転変位 θ が振動する場合を考える。この場合、摩擦損失仕事は減衰力の原因となるから、等価減衰係数 D_e は次式（5）により与えられる。ここで摩擦損失仕事 W は振動振幅 θ^{amp} の振動 1 周期間に散逸する摩擦損失仕事である。図 10 に相対回転変位 θ が振動する場合の摩擦損失仕事 W を模式的に示す。図示するように、回転変位 θ とトルク T の関係は、まず、ポイント A から回転変位 θ とトルク T とが矢印線に沿ってポイント B に至る。そして、ポイント B から下側の矢印線に沿ってポイント C に至り、ポイント C から上側の矢印線に沿ってポイント B に至るヒステリシスを描くようになる。摩擦損失仕事 W は、このヒステリシスの領域（上側の矢印線と下側の矢印線で囲まれたハッチングされた領域）の面積として表わすことができる。回転変位 θ とトルク T の関係がポイント A からポイント B に至るまでに図 9（a）に示す摩擦損失仕事 W_{A-B} として W_i を散逸する。ポイント C は、ポイント B と対称であるから、図 9（b）に示す状態になっており、それゆえポイント B からポイント C に至るまでに摩擦損失仕事 W_{B-C} として $2 W_i$ を散逸する。同様に、ポイント C からポイント B までにも摩擦損失仕事 W_{C-B} として $2 W_i$ を散逸する。この結果、1 周期では、摩擦損失仕事 W は $4 W_i$ となる。このため、摩擦損失仕事 W は、ポイント A からポイント B に至るまでの摩擦損失仕事 W_{A-B} の 4 倍（ $W = 4 W_{A-B}$ ）として表わすことができる。等価減衰係数 D_e を求めるためには、ポイント A からポイント B に至るまで、即ち、相対回転変位 θ が値 0 から最大相対回転変位 θ^{amp} に至るまでを図 2 に例示したすべり状態解析プログラムにより解析すればよいことになる。なお、これらは摩擦係数が一定とする簡易的な解法で成立するものであり、厳密には摩擦係数が摩擦速度の関数となる場合には成立しない。

30

40

【 0 0 3 6 】

【数 4】

$$D_e = \frac{W}{\pi \omega (\Omega^{amp})^2} \quad (5)$$

【 0 0 3 7 】

50

図 1 1 は、相対回転変位 θ が振動する実験装置の一例を示す構成図である。図 1 1 (a) は実験装置の正面を示し、図 1 1 (b) は実験装置の側面を示す。図 1 2 は、実験装置と実施例による解析例の諸元や条件を一覧表示した説明図である。実験装置では、第 2 部材としては鋳鉄により形成された一辺が 1 3 0 mm の正方形で厚みが 3 0 mm のプレートを用い、第 1 部材としては鋼鉄 (S S 4 0 0) により形成された 8 0 mm × 1 7 5 mm の四角形で厚みが 1 0 mm のプレートを用いた。第 1 部材および第 2 部材には、締結用のボルト孔として中心に 1 0 mm が形成されている。図 1 1 に示すように、第 1 部材には、プレートスプリングによりウエイトが取り付けられており、ウエイトを図 1 1 (a) 中右側に引いた状態でピアノ線を切断し、ウエイトを図 1 1 (a) 中の左右に振動させることにより、相対回転変位 θ を振動させる。この装置ではウエイトの振動周期が 2 5 H z 、角速度 ω が 5 0 [rad/s] となるように調整されている。

10

【 0 0 3 8 】

一方、解析例では、第 2 部材としては弾性率が 1 1 0 G P a でポアソン比が 0 . 3 の材料により形成された直径 1 3 0 mm の円形で厚みが 3 0 mm のプレートを用い、第 1 部材としては弾性率が 2 0 0 G P a でポアソン比が 0 . 3 の材料により形成された直径 8 0 mm の円形で厚みが 1 0 mm のプレートを用いた。第 1 部材および第 2 部材には、締結用のボルト孔として中心に 1 0 mm が形成されている。解析条件としては、振動周期と角速度 ω について実験装置と同一になるように 2 5 H z , 5 0 [rad/s] とし、相対回転変位 θ を増加する微小量 $\Delta \theta$ を 0 . 4 [μ rad] 、径方向の径位置の増加量 Δr を 0 . 5 [mm] 、摩擦係数 μ を 0 . 1 7 とした。

20

【 0 0 3 9 】

解析例による解析結果と実験装置による実験結果を図 1 3 ~ 図 1 5 に示す。図 1 3 に回転変位 θ とトルク T との関係の結果を示し、図 1 4 に回転変位振幅 θ_{max} と摩擦損失仕事 W との関係の結果を示し、図 1 5 は回転変位振幅 θ_{max} と等価減衰係数 D_e との関係の結果を示す。図中、 $P = 1 0$ k N , 2 0 k N , 3 0 k N , 4 0 k N の各曲線は、クランプ力 P が 1 0 k N , 2 0 k N , 3 0 k N , 4 0 k N のときの解析例を示す。図中、丸印、三角印、四角印、菱形印は、クランプ力 P が 1 0 k N , 2 0 k N , 3 0 k N , 4 0 k N のときの実験装置による実験結果を示す。図 1 3 中、「 N o s l i p 」の直線は、全てが固着領域ですべりが無いものとしたときの解析例である。解析例は、実験装置による実験結果に対して比較的良好に一致しているといえる。したがって、実施例のすべり状態解析装置 2 0 による解析結果は、十分に実用的であると言える。

30

【 0 0 4 0 】

以上説明した実施例のすべり状態解析装置 2 0 では、まず、ボルト 6 0 により締結された第 1 部材 4 0 と第 2 部材 5 0 のクランプ力 P やボルト 6 0 の軸周りのトルクに対して 1 回だけ有限要素法により線形データを求解してデータベース化して記憶しておく。求解ステップとして、線形データを利用して、固着領域に属する節点については回転変位 θ を既知とすると共にトルク T を未知として方程式を作成し、すべり領域に属する節点については回転変位 θ を未知とすると共にトルク T を既知として方程式を作成し、作成した方程式を連立させて未知の回転変位 θ と未知のトルク T とを求める。領域変更ステップとして、固着領域に属する節点のうち最外周側の節点についてトルク $T_{s_{tk}}$ が摩擦力 $q_{s_{tk}}$ と回転中心からの距離 $r_{s_{tk}}$ との積より大きいときには固着領域の最外周側の節点の属する領域を固着領域からすべり領域に変更する。こうした領域の変更が行なわれなくなるまで求解ステップと領域変更ステップとを繰り返すことにより、固着領域とすべり領域をその相対回転変位 θ における固着領域とすべり領域として特定することができる。このように繰り返し処理に有限要素法解析が含まれないから、繰り返し処理を迅速に終了することができる。しかも、初期値として、全ての領域を固着領域としたから、固着領域の最外周側の節点についてのみトルク $T_{s_{tk}}$ が摩擦力 $q_{s_{tk}}$ と回転中心からの距離 $r_{s_{tk}}$ との積より大きいかが否かの判定を行えばよいから、計算量を大幅に小さくすることができ、解析時間の短縮化を図ることができる。

40

【 0 0 4 1 】

50

実施例のすべり状態解析装置 20 では、静止摩擦係数と動摩擦係数とを区別せずに摩擦係数 μ を用いたが、静止摩擦係数と動摩擦係数とを区別して用いるものとしてもよく、摩擦係数を摩擦速度の関数として扱ってもよい。また、実施例のすべり状態解析装置 20 では、初期値として第 1 面 4 2 のうち非接触領域ではない全ての領域を固着領域と仮定したが、初期値として非接触領域ではない領域のうち内周側から径方向に 3 / 4 までを固着領域と仮定すると共にそれより外周側をすべり領域と仮定するなど適宜固着領域とすべり領域とを仮定するものとしてもよい。

【0042】

実施例のすべり状態解析装置 20 では、図 3 (a) の回転相対変位 (トルク) が作用している場合のすべり状態を解析するために図 2 のすべり解析プログラムを用いたが、図 3 (b) の第 1 面 4 2 と第 2 面 5 2 に対して平行な振動する相対変位 (相対力) が作用している場合や、図 3 (c) の第 1 面 4 2 と第 2 面 5 2 に対して垂直な振動する相対変位 (相対力) が作用している場合 (ただし、接触領域が変化しない場合) についてのすべり状態を解析するためには、図 1 6 のすべり状態解析プログラムを用いればよい。この図 1 6 のすべり状態解析プログラムは、図 2 のすべり状態解析プログラムを一般化したものであるから、基本的には同様の処理となる。したがって、重複する記載を回避するために、同様の処理についての説明は十分に理解できる程度に省略する。なお、同様の処理であることが容易に理解できるように、図 1 6 のすべり状態解析プログラムのステップ番号には図 2 のすべり状態解析プログラムの各処理と同様の処理に対しては同一のステップ番号に 1000 を加えたものとした。したがって、図 1 6 のすべり状態解析プログラムにおいて、全く新規な処理はステップ S 1 1 7 5 となる。以下に、図 1 6 のすべり状態解析プログラムを用いて図 3 (b) や図 3 (c) の場合のすべり状態の解析について説明する。

【0043】

図 1 6 のすべり状態解析プログラムでは、まず、有限要素法を用いて線形データを求解すると共に結果として得られる線形データをデータベース化して記憶する (ステップ S 1 1 0 0)。線形データとしては、各部材の境界面上にあって、相対変位や相対力、相対回転変位、トルクなどの相対変位等が作用する各節点、および締結面である第 1 部材の第 1 面または第 2 部材の第 2 面の各節点のうち、ある節点のある方向のみに単位変位を与え、他の節点変位をすべて固定したときに各節点、各方向に生じる力などが該当する。続いて、摩擦係数 μ や固定的に作用している作用力 P を入力する (ステップ S 1 1 1 0)。固定的に作用している作用力としては、ボルトのクランプ力に限られず、固定的に作用している全ての力を意味している。そして、第 1 部材の第 1 面と第 2 部材の第 2 面に対して固着領域とすべり領域を仮定する (ステップ S 1 1 2 0)。ここで、固着領域とすべり領域については、如何なる領域を仮定しても構わないが、繰り返し処理を減らして解析時間を短くするために妥当であると考えられる領域を仮定するのが好ましい。

【0044】

続いて、相対変位等を微小量ずつ増加したり或いは減少したりして (ステップ S 1 1 3 0)、ステップ S 1 1 4 0 ~ ステップ S 1 2 1 0 の処理を最大の相対変位等に至るまで繰り返す。繰り返し処理では、まず、仮定によって固着領域に属するとされた節点については、変位 u が 2 部材間に与えられた相対変位に等しく既知とすると共にせん断力 F を未知とする方程式を作成し (ステップ S 1 1 4 0)、仮定によってすべり領域に属するとされた節点については、変位 u を未知とすると共にせん断力 F を既知とする方程式を作成し (ステップ S 1 1 5 0)、これらの方程式を連立させて未知の変位 u とせん断力 F を求める (ステップ S 1 1 6 0)。固着領域の節点について変位 u が既知であることは、2 部材間に与えた相対変位が各部材の相対変位 (各部材の変形量) の和になっているからである。また、すべり領域の節点についてせん断力 F が既知であることは、動摩擦力に基づいて求めることができるからである。

【0045】

こうして連立方程式を解くと、固着領域に属する各節点のうちせん断力が静止摩擦力より大きい節点の少なくとも一部については固着領域からすべり領域に領域変更を行ない (

10

20

30

40

50

ステップS 1 1 7 0)、すべり領域に属する各節点のうち変位 がすべり方向のすべり変位とならない節点の少なくとも一部についてはすべり領域から固着領域に領域変更を行なう(ステップS 1 1 8 0)。固着領域からすべり領域に領域変更については実施例と同様である。すべり領域に属する節点は、すべり方向に変位するから、すべり方向に変位しない節点がすべり領域に属するのは矛盾となる。また、仮定したせん断力の方向(すべりの逆方向)とすべり変位の方向がなす角度が小さい(90度未満)ときには、すべり領域としたことが矛盾となり、なす角が大きい(90度以上であって180度との誤差が十分に小さくないとき)にはすべり方向を修正する必要があるが生じる。こうした矛盾を回避するために、すべり領域に属する各節点のうち変位 がすべり方向のすべり変位とならない節点の一部についてはすべり領域から固着領域に領域変更やすべり方向の修正を行なうのである。固着領域からすべり領域への領域変更やすべり領域から固着領域への領域変更が行なわれなくなるまで、変更された領域に基づいてステップS 1 1 4 0~S 1 1 8 0までの処理を繰り返し、領域とせん断力の方向(すべりの逆方向)の変更が行なわれなくなると、そのときに仮定されている固着領域とすべり領域をその相対変位等における固着領域とすべり領域として特定する(ステップS 1 1 9 0)。そして、すべり領域の各節点における相対変位に対して摩擦損失仕事を計算し(ステップS 1 2 0 0)、相対変位等が最大の相対変位等になるまで、ステップS 1 1 3 0に戻って相対変位等を微小量だけ増加する処理からステップS 1 2 1 0までを繰り返す。

【0046】

以上説明した図16のすべり状態解析プログラムを実行することにより、2部材に対して相対変位や相対回転変位、相対力、トルクが作用したときの当接面における固着領域とすべり領域とを相対変位等を微小量ずつ変動させて特定することができる。しかも、すべり領域による摩擦損失仕事も計算するから、減衰現象を解析することができる。もとより、繰り返し処理中に有限要素法による線形データの求解が含まれないから、繰り返し処理を迅速に終了することができ、すべり状態の解析を短時間に行なうことができる。

【0047】

実施例では、接触面における各節点が固着しているかすべっているかのすべり状態を解析するものとしたが、接触面における各節点が接触しているか接触していないかの接触状態を解析するものとしてもよい。図17は、図1のコンピュータにすべり状態解析プログラムに代えてインストールする接触状態解析プログラムの一例を示すフローチャートである。したがって、図17の接触状態解析プログラムがインストールされたコンピュータは接触状態解析装置として機能する。図17の接触状態解析プログラムは、図16のすべり状態解析プログラムを簡便化すると共に若干の変更を施したものであるため、基本的には同様の処理となる。したがって、重複する記載を回避するために、同様の処理についての説明は十分に理解できる程度に省略する。なお、同様の処理であることが容易に理解できるように、図17の接触状態解析プログラムのステップ番号には図16のすべり状態解析プログラムの各処理と同様の処理に対しては2000番台とした。以下に、図17の接触状態解析プログラムを用いて接触状態の解析について説明する。

【0048】

図17の接触状態解析プログラムでは、まず、有限要素法を用いて線形データを解析すると共に線形データをデータベース化して記憶する(ステップS 2 1 0 0)。線形データとしては、解析対象の各部材の境界面上にあって、相対変位や相対力、相対回転変位、トルクなどの相対変位等が作用する各節点、および接触面である第1部材の第1面または第2部材の第2面の各節点のうち、ある節点のある方向のみに単位変位を与え、他の節点変位をすべて固定したときに各節点、各方向に生じる力などが該当する。続いて、固定的に作用している作用力を入力し(ステップS 2 1 1 0)、第1部材の第1面と第2部材の第2面に対して接触している接触領域と接触していない非接触領域を仮定する(ステップS 2 1 2 0)。ここで、接触領域と非接触領域については、如何なる領域を仮定しても構わないが、繰り返し処理を減らして解析時間を短くするために妥当であると考えられる領域を仮定するのが好ましい。

10

20

30

40

50

【0049】

続いて、仮定によって接触領域に属するとされた節点については、変位 u が2部材間を与えられた相対変位に等しく既知とすると共に接触力 F を未知する方程式を作成し(ステップS2140)、仮定によって非接触領域に属するとされた節点については、変位 u を未知とすると共に接触力 F が値0の既知する方程式を作成し(ステップS2150)、これらの方程式を連立させて未知の変位 u と接触力 F を求める(ステップS2160)。接触領域の節点について変位 u が2部材間を与えられた相対変位に等しいことや非接触領域の節点について接触力 F が値0であることは、接触が非接触かに由来するものである。

【0050】

こうして連立方程式を解くと、接触領域に属する各節点のうち接触力 F の接触面法線方向成分が負の値の節点の少なくとも一部については接触領域から非接触領域に領域変更を行ない(ステップS2170)、非接触領域に属する各節点のうち互いに食い込む変位となる節点の少なくとも一部については非接触領域から接触領域に領域変更を行なう(ステップS2180)。接触領域の節点では、僅かでも正の接触力が生じることから、接触力 F の接触面法線方向成分が負の値となることが矛盾となる。また、非接触領域の節点では、接触していないため、互いの変位 u は食い込むことはないから、互いに食い込む変位となることは矛盾となる。こうした矛盾を回避するために、領域変更を行なうのである。接触領域から非接触領域への領域変更や非接触領域から接触領域への領域変更が行なわれなくなるまで、変更された領域に基づいてステップS2140~S2180までの処理を繰り返し、領域変更が行なわれなくなると、そのときに仮定されている接触領域と非接触領域を接触領域と非接触領域として特定し(ステップS2190)、処理を終了する。なお、変形することで接触面を介して向かい合う節点の位置がずれた場合、または最初からずれている場合には、内挿して相対する位置の変位または力を求めればよい。

【0051】

以上説明した図17の接触状態解析プログラムがインストールされることにより得られる接触状態解析装置では、有限要素法を用いて線形データを求解すると共に結果として得られる線形データをデータベース化して記憶し、作用力が作用した状態で、接触領域に属する節点については変位 u が2部材間を与えられた相対変位に等しく既知とすると共に接触力 F を未知する方程式を作成し、非接触領域に属する節点については変位 u を未知とすると共に接触力 F が値0の既知する方程式を作成し、これらを連立させて解を求める求解ステップと、接触領域に属する各節点のうち接触力 F の接触面法線方向成分が負の値の節点の少なくとも一部については接触領域から非接触領域に変更し、非接触領域に属する各節点のうち互いに食い込む変位 u となる節点の少なくとも一部については非接触領域から接触領域に変更する領域変更ステップとを、領域変更が行なわれなくなるまで繰り返すことにより、2部材の当接面における接触領域と非接触領域とを特定することができる。もとより、繰り返し処理に有限要素法解析が含まれないから、繰り返し処理を迅速に終了することができる。すべり状態の解析を短時間に行なうことができる。

【0052】

以上、本発明を実施するための形態について実施例を用いて説明したが、本発明はこうした実施例に何等限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において、種々なる形態で実施し得ることは勿論である。

【産業上の利用可能性】

【0053】

本発明は、機械製造産業などに利用可能である。

【符号の説明】

【0054】

20 すべり状態解析装置、22 コンピュータ、30 すべり状態解析プログラム、32 線形データ求解モジュール、34 求解モジュール、36 領域変更モジュール、38 摩擦損失仕事演算モジュール、40 第1部材、42 第1面、44 上面、50 第2部材、52 第2面、54 下面、60 ボルト。

10

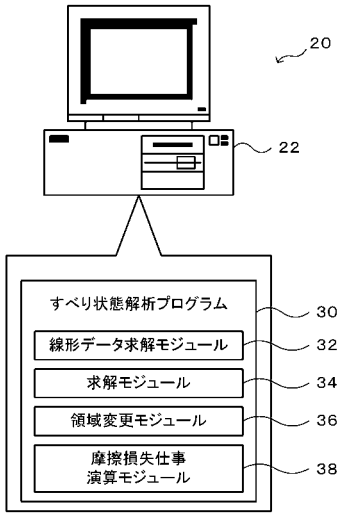
20

30

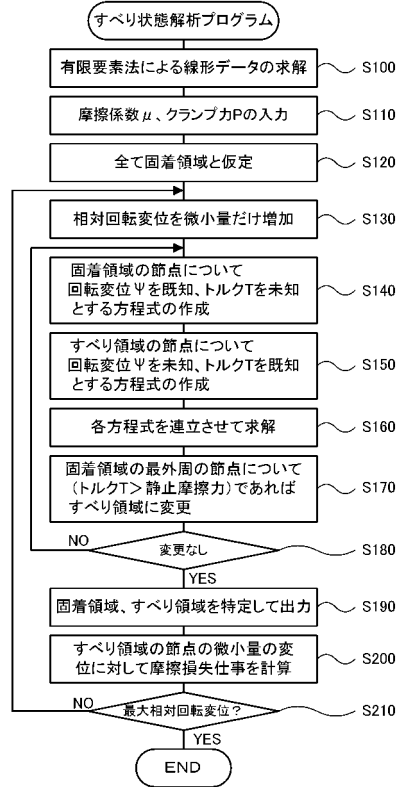
40

50

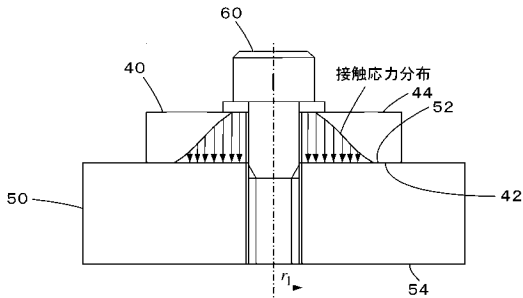
【 図 1 】



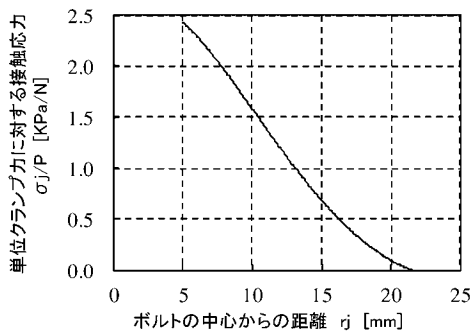
【 図 2 】



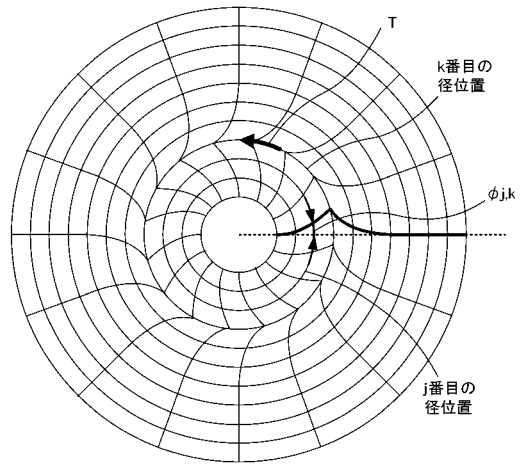
【 図 4 】



【 図 5 】



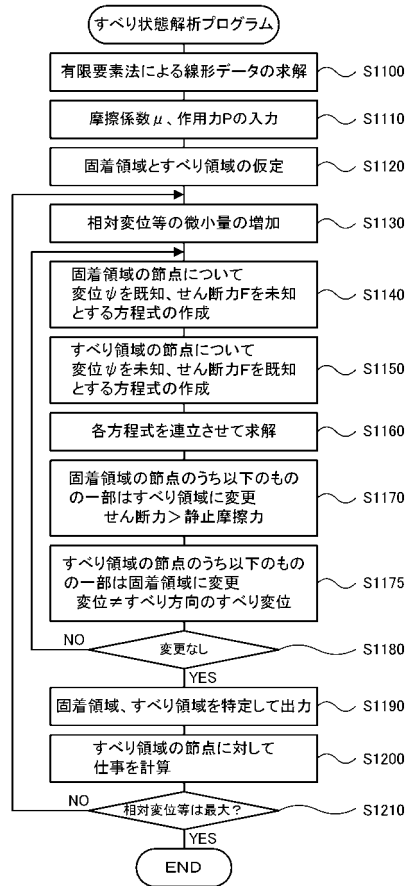
【 図 6 】



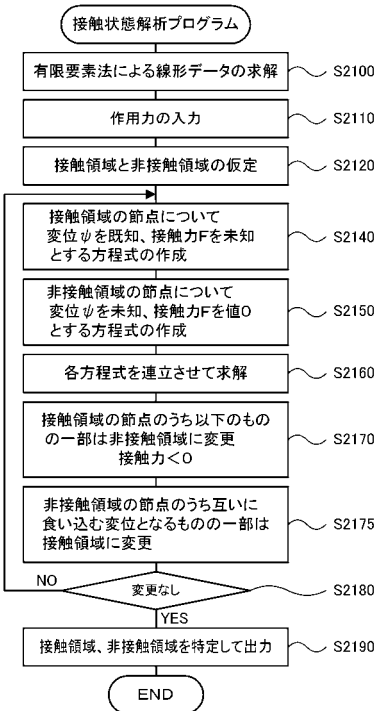
【 図 1 2 】

		実験装置	解析例
ベースプレート (第2部材)	形状	正方形	円形
	サイズ	□130×30mm 中心孔φ10mm	φ130×30mm 中心孔φ10mm
	材料	鑄鉄	弾性率:110Gpa ポアソン比:0.3
第1部材	形状	四角形	円形
	サイズ	80×175×10mm 中心孔φ10mm	φ80×10mm 中心孔φ10mm
	材料	鋼鉄 (SS400)	弾性率:200Gpa ポアソン比:0.3
振動周期 f, ω	25Hz, 50π rad/s		
微小量 $\Delta\Omega$	—	0.4 μ rad	
径方向の増加量 Δr	—	0.5mm	
摩擦係数 μ	—	0.17	

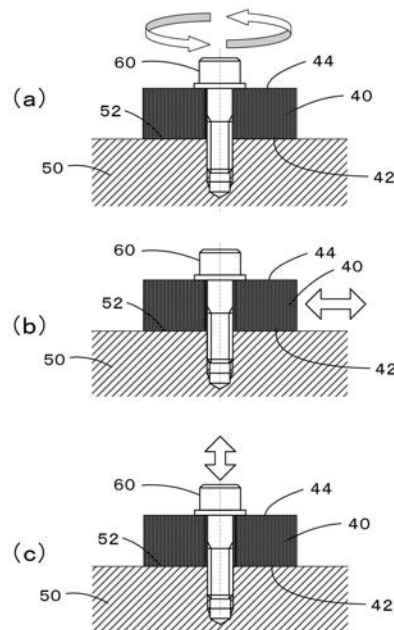
【 図 1 6 】



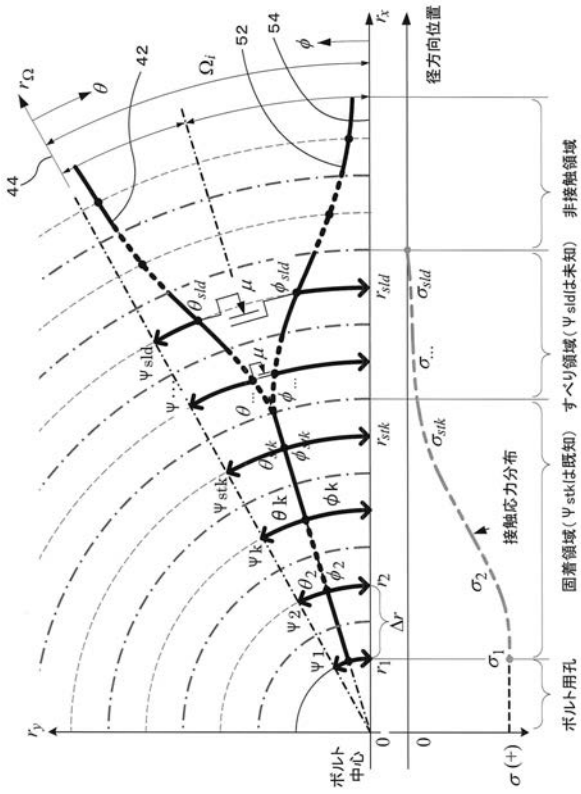
【 図 1 7 】



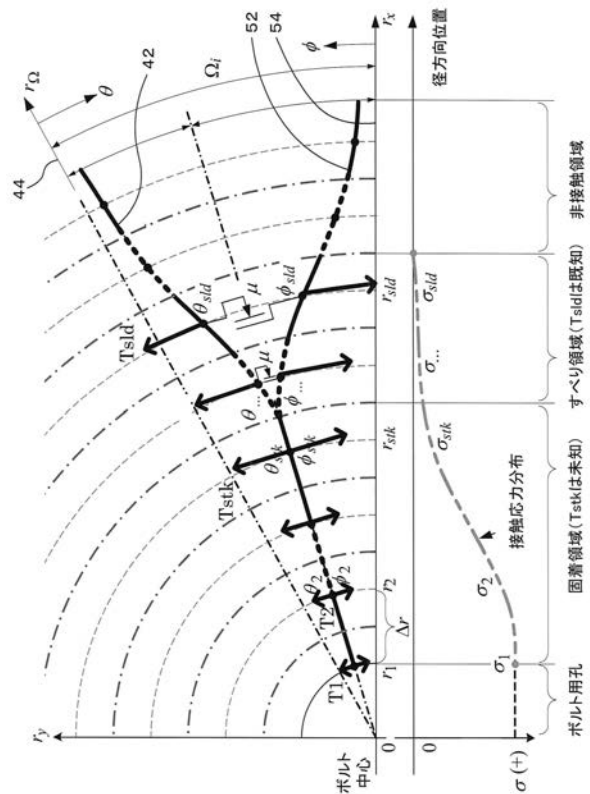
【 図 3 】



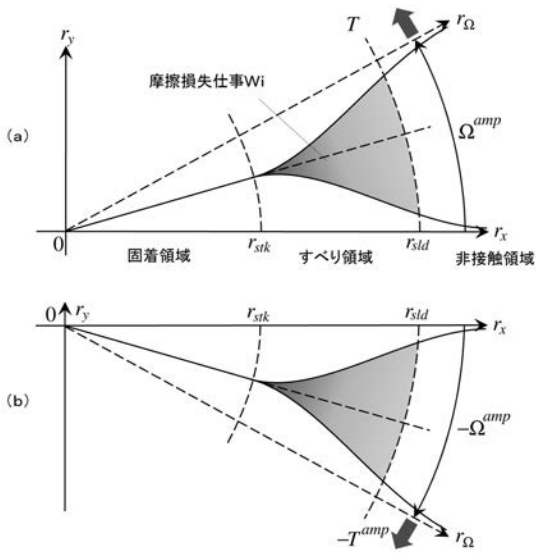
【 図 7 】



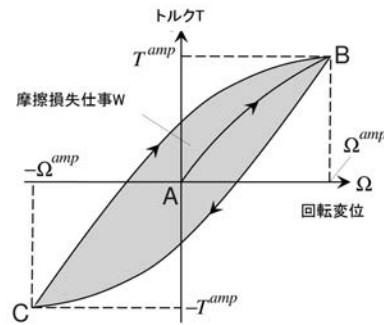
【 図 8 】



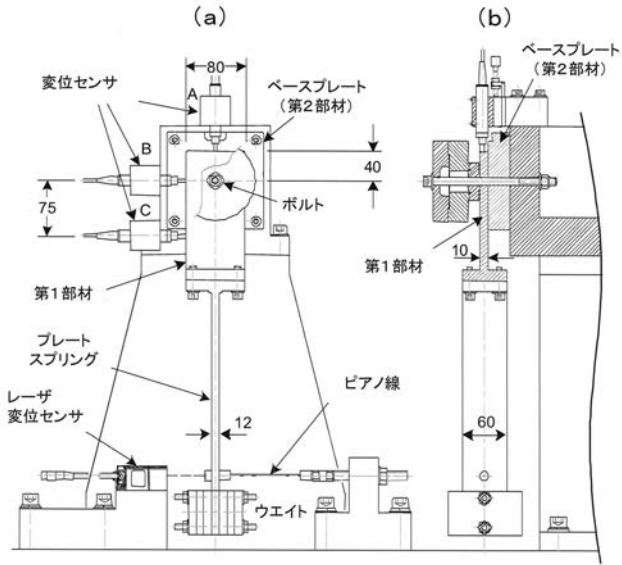
【 図 9 】



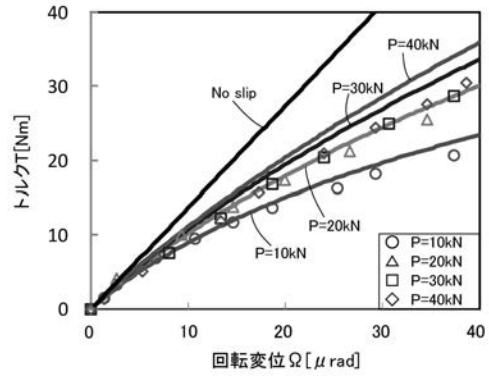
【 図 10 】



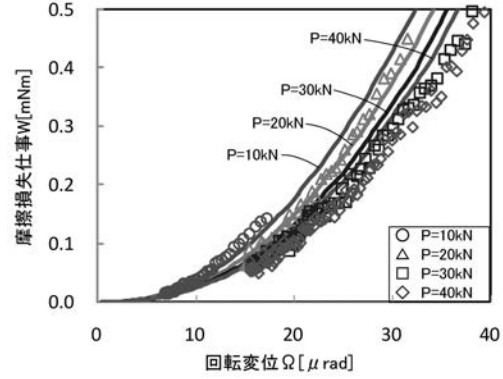
【 図 1 1 】



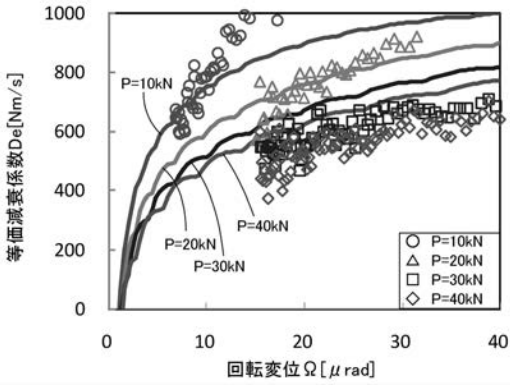
【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



フロントページの続き

特許法第30条第2項適用申請有り (1) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850614001371#> C I R P A n n a l s 2014 - M a n u f a c t u r i n g T e c h n o l o g y , 第63巻, 第353~356頁 掲載年月日 平成26年5月1日 (2) 2014 C I R P G e n e r a l A s s e m b l y 開催年月日 平成26年8月25日 (3) 株式会社デンソー技研センター ハイタレント研修 開催年月日 平成26年9月10日 (4) The 5 t h I n t e r n a t i o n a l C o n f e r e n c e o n A d v a n c e d M a n u f a c t u r i n g 開催年月日 平成26年9月30日 (5) 財団法人金属工業研究開発センター第1回ワークショップミーティング 開催年月日 平成26年10月2日 (6) 日本機械学会 R C 2 6 6 次世代産業を牽引する工作機械に関する研究分科会 第2回研究分科会 開催年月日 平成26年10月10日

Fターム(参考) 2G024 AA03 BA11 BA17 CA08 DA05 FA06