

明 細 書

発明の名称：

変位の推定装置、座屈応力度の推定装置、変位の推定方法、座屈応力度の推定方法、変位の推定プログラム、及び座屈応力度の推定プログラム

技術分野

[0001] 本発明は、変位の推定装置、座屈応力度の推定装置、変位の推定方法、座屈応力度の推定方法、変位の推定プログラム、及び座屈応力度の推定プログラムに関する。

本願は、2019年6月28日に日本に出願された、特願2019-120970号、特願2019-120971号、特願2019-120972号、特願2019-120980号、特願2019-120981号、特願2019-120982号、及び特願2019-120983号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 従来、梁等の弾性要素における面外変位（第1面外変位）を推定する方法として、（1）式で表されるフーリエ級数を用いるのが一般的である（例えば、非特許文献1参照）。なお、（1）式におけるYの値は、弾性要素のy軸に沿う方向の座標を、この弾性要素のy軸に沿う方向の長さで除して無次元化した値である。

[0003] [数1]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos n\pi Y + b_n \sin n\pi Y) \quad \cdots (1)$$

[0004] フーリエ級数の基底は直交性を有するため、フーリエ級数により多くの曲面を精度よく近似できる。

先行技術文献

非特許文献

[0005] 非特許文献1：Stephen P. Timoshenko and James M. Gere、「Theory of Ela

stic Stability」 Second Edition

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかしながら、フーリエ級数には近似の収れんが遅いという問題がある。例えば建築物の部材や部材を構成する平板状の弾性要素に生じる座屈変形を近似しようとした場合、フーリエ級数の第15項部分和程度、すなわち、(1)式でNを15程度とする必要がある。この場合、近似関数は、未定係数 a_0 以外の三角関数による項を30含む。

このようにフーリエ級数では近似の収れんに多くの項数が必要であるため、フーリエ級数による分析は手計算では行うことができず、計算機を用いた数値計算が必要になる。さらに、従来の変位の推定方法では、推定結果を物理的に理解しやすく定式化できないという技術課題がある。

[0007] 本発明は、このような問題点に鑑みてなされたものであって、フーリエ級数を用いた場合よりも推定に必要な計算を簡単に行うとともに、推定結果を物理的に理解しやすく定式化できる変位の推定装置、座屈応力度の推定装置、変位の推定方法、座屈応力度の推定方法、変位の推定プログラム、及び座屈応力度の推定プログラムを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 上記課題を解決するための手段には、以下の態様が含まれる。

[0009] <1>互いに直交するx軸及びy軸に沿って広がる平板状に形成された弾性要素の端面に外力が作用し、前記弾性要素がその板厚方向であるz軸に沿う方向に座屈するときに、前記z軸に沿う方向に向けた前記弾性要素の第1面外変位 w_w を推定する変位の推定装置であって、前記弾性要素は、前記z軸に沿って見たときに、前記y軸に沿う方向の長さよりも前記x軸に沿う方向の長さが長い矩形状を呈し、前記弾性要素の前記y軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記x軸に沿う線を基準線としたときに、前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に対称になると推定される場合に、前記第1面外変位 w_w を(1)式により推定し、前記第1面外変位 w_w が

前記基準線に対して前記 y 軸に沿う方向に非対称になると推定される場合に、前記第 1 面外変位 w_w を (2) 式により推定する第 1 変位推定部を備え、前記 (1) 式及び前記 (2) 式では、係数 b_n を含む項は前記第 1 面外変位 w_w の成分のうち、前記 y 軸に沿う方向の両端の境界条件が単純支持となる面外変位を表し、係数 a_n を含む項は前記第 1 面外変位 w_w の成分のうち、前記 y 軸に沿う方向の両端の境界条件が固定支持となる面外変位を表す、変位の推定装置。

ただし、(1) 式及び (2) 式中の Y の値は、前記 y 軸の座標を前記弾性要素の前記 y 軸に沿う方向の長さを用いて無次元化した値であり、 N は 2 以上の自然数であり、 a_0 、 a_n 、 b_n は未定係数である。

[0010] [数2]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi Y^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} Y^n \right) \quad \cdots (2)$$

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos 2\pi Y^n + b_n \sin \pi Y^n) \quad \cdots (3)$$

[0011] <2> 前記 N は 2 である <1> に記載の変位の推定装置。

[0012] <3> <1> に記載の変位の推定装置を用いて、前記外力として圧縮力が作用して座屈する H 形鋼の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定装置であって、前記 H 形鋼は、前記弾性要素である、ウェブ板要素と、第 1 フランジ板要素と、第 2 フランジ板要素と、を備え、前記第 1 フランジ板要素及び第 2 フランジ板要素は、前記ウェブ板要素を、前記ウェブ板要素の前記 y 軸である v 軸に沿う方向に挟むように配置され、前記圧縮力は、前記ウェブ板要素の前記 x 軸である u 軸に沿う方向に、前記 H 形鋼の前記端面に作用し、 w 軸を、前記ウェブ板要素の前記 z 軸に沿う方向の軸とし、前記基準線は、前記ウェブ板要素の前記 y 軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記ウェブ板要素の前記 x 軸に沿う線とし、前記 v 軸に沿う方向における前記第 1 フランジ板要素の中心の位置を、前記 v 軸の原点とし、前記第 1 フランジ板要素から前記第 2 フランジ板要素に向かう向きを、前記 v 軸の正の向きとし、前記 v 軸に沿う方向における前記第 1 フランジ板要素の中心と前記第 2 フラン

ジ板要素の中心との距離を、 b_w とし、前記ウェブ板要素の前記 u 軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記 w 軸の正の向き及び前記 w 軸の負の向きに交互に波状に変位する前記ウェブ板要素の前記 u 軸に沿う方向における半波長を a としたときに、前記H形鋼の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記 v 軸に沿う方向に対称になると推定し、前記ウェブ板要素における前記 w 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(4)式により推定し、かつ、前記第1フランジ板要素、前記第2フランジ板要素における前記 v 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(5)式、(6)式によりそれぞれ推定する第2変位推定部と、前記H形鋼の前記座屈応力度を、前記第2面外変位 W_w 、前記第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び(4)式から(6)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、を備える、座屈応力度の推定装置。

ただし、 N は2以上の自然数である。

[0013] [数3]

$$W_w = \sin \frac{\pi u}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (4)$$

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=0} \quad \cdot \cdot (5)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=b_w} \quad \cdot \cdot (6)$$

[0014] <4>前記応力度算出部は、(7)式から(10)式を用いて、(11)式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n 、 b_n 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、<3>に記載の座屈応力度の推定装置。

ただし、 E は前記H形鋼のヤング係数であり、 ν は前記H形鋼のポアソン比であり、 t_w は前記ウェブ板要素の厚さであり、 t_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの厚さであり、 b_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの幅の半分の値である。

[0015]

[数4]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 dv du \quad \cdot \cdot (7) \\
B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (8) \\
C &= \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 dw du \quad \cdot \cdot (9) \\
D &= \frac{b_f^2}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial w} \right)^2 \right] dw du \\
&\quad \cdot \cdot (10) \\
\sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2}{b_w^2} \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2}{b_f^2} \frac{D}{A + C} \quad \cdot \cdot (11)
\end{aligned}$$

[0016] <5><1>に記載の変位の推定装置を用いて、前記x軸に沿う方向に、前記外力として圧縮力が作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定装置であって、前記板要素は、前記弾性要素であり、前記板要素の前記x軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記z軸の正の向き及び前記z軸の負の向きに交互に波状に変位する前記板要素の、前記x軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定部は、前記板要素の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に対称になると推定し、前記z軸に沿う方向に向けた前記板要素の第2面外変位 W_w を(12)式により推定する第2変位推定部と、前記板要素の前記座屈応力度を、(12)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、を備える、

ただし、Nは2以上の自然数であり、 b_w は前記y軸に沿う方向における前記板要素の長さである。

[0017] [数5]

$$W_w = \sin \frac{\pi x}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (12)$$

[0018] <6>前記応力度算出部は、(13)式及び(14)式を用いて、(15)式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n 、 b_n 及び前記半波長aに基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、<5>に記載

の座屈応力度の推定装置。

ただし、 E は前記板要素のヤング係数であり、 ν は前記板要素のポアソン比であり、 t_w は前記板要素の厚さである。

[0019] [数6]

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdots (13) \\
 B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \\
 &\quad \cdots (14) \\
 \sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdots (15)
 \end{aligned}$$

[0020] <7><1>に記載の変位の推定装置を用いて、前記外力として曲げモーメントが作用して座屈するH形鋼の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定装置であって、前記H形鋼は、前記弾性要素である、ウェブ板要素と、第1フランジ板要素と、第2フランジ板要素と、を備え、前記第1フランジ板要素及び第2フランジ板要素は、前記ウェブ板要素を、前記ウェブ板要素の前記y軸であるv軸に沿う方向に挟むように配置され、前記曲げモーメントは、前記ウェブ板要素の前記z軸であるw軸回りに、前記H形鋼の前記端面に作用し、u軸を、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う方向の軸とし、前記基準線は、前記ウェブ板要素の前記y軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う線とし、前記第1フランジ板要素は、前記曲げモーメントにより引張力を受けるとし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心の位置を、前記v軸の原点とし、前記第1フランジ板要素から前記第2フランジ板要素に向かう向きを、前記v軸の正の向きとし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心と前記第2フランジ板要素の中心との距離を、 b_w とし、前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記w軸の正の向き及び前記w軸の負の向きに交互に波状に変位する前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定部は、前記H形鋼の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に非対称になる

と推定し、前記ウェブ板要素における前記 w 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(16)式により推定し、かつ、前記第1フランジ板要素、前記第2フランジ板要素における前記 v 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(17)式、(18)式によりそれぞれ推定する第2変位推定部と、前記H形鋼の前記座屈応力度を、前記第2面外変位 W_w 、前記第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び(16)式から(18)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、を備える、座屈応力度の推定装置。

ただし、 N は2以上の自然数である。

[0021] [数7]

$$W_w = \sin \frac{\pi v}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi v^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi v^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (16)$$

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=0} \quad \cdot \cdot (17)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=b_w} \quad \cdot \cdot (18)$$

[0022] <8>前記応力度算出部は、(19)式から(22)式を用いて、(23)式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n 、 b_n 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める<7>に記載の座屈応力度の推定装置。

ただし、 E は前記H形鋼のヤング係数であり、 ν は前記H形鋼のポアソン比であり、 t_w は前記ウェブ板要素の厚さであり、 t_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの厚さであり、 b_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの幅の半分の値である。

[0023]

[数8]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 dv du \quad \cdot \cdot (19) \\
B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (20) \\
C &= \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+1)} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 dw du \quad \cdot \cdot (21) \\
D &= \frac{b_f^2}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial w} \right)^2 \right] dw du \\
&\quad \cdot \cdot (22) \\
\sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2}{b_w^2} \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2}{b_f^2} \frac{D}{\frac{t_w}{t_f} A + C} \quad \cdot \cdot (23)
\end{aligned}$$

[0024] <9><1>に記載の変位の推定装置を用いて、前記z軸回りに、前記外力として曲げモーメントが作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定装置であって、前記板要素は、前記弾性要素であり、前記板要素の前記x軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記z軸の正の向き及び前記z軸の負の向きに交互に波状に変位する前記板要素の、前記x軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定部は、前記板要素の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に非対称になると推定し、前記z軸に沿う方向に向けた前記板要素の第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(24)式により推定する第2変位推定部と、前記板要素の前記座屈応力度を、(24)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、を備える、座屈応力度の推定装置。

ただし、Nは2以上の自然数であり、 b_w は前記y軸に沿う方向における前記板要素の長さである。

[0025] [数9]

$$W_w = \sin \frac{\pi x}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi y^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi y^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (24)$$

[0026] <10>前記応力度算出部は、(25)式及び(26)式を用いて、(27)式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n ,

b_n 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、＜9＞に記載の座屈応力度の推定装置。

ただし、 E は前記板要素のヤング係数であり、 ν は前記板要素のポアソン比であり、 t_w は前記板要素の厚さである。

[0027] [数10]

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdot \cdot (25) \\
 B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \\
 &\quad \cdot \cdot (26) \\
 \sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (27)
 \end{aligned}$$

[0028] ＜11＞＜1＞に記載の変位の推定装置を用いて、前記外力としてせん断力が作用して座屈するH形鋼の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定装置であって、前記H形鋼は、前記弾性要素である、ウェブ板要素と、第1フランジ板要素と、第2フランジ板要素と、を備え、前記第1フランジ板要素及び第2フランジ板要素は、前記ウェブ板要素を、前記ウェブ板要素の前記 y 軸である v 軸に沿う方向に挟むように配置され、前記せん断力は、前記 v 軸に沿う方向に、前記H形鋼の前記端面に作用し、 u 軸を、前記ウェブ板要素の前記 x 軸に沿う方向の軸とし、 w 軸を、前記ウェブ板要素の前記 z 軸に沿う方向の軸とし、前記基準線は、前記ウェブ板要素の前記 y 軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記ウェブ板要素の前記 x 軸に沿う線とし、前記ウェブ板要素における前記 v 軸に沿う方向の中心の位置を、前記 v 軸の原点とし、前記第1フランジ板要素から前記第2フランジ板要素に向かう向きを、前記 v 軸の正の向きとし、前記 v 軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心と前記第2フランジ板要素の中心との距離を b_w とし、前記ウェブ板要素の前記 u 軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記 w 軸の正の向き及び前記 w 軸の負の向きに交互に波状に変位する前記ウェブ板要素の前記 u 軸に沿う方向における半波長を a としたときに、前記第1変位推定部は、前記H形鋼の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記 v 軸に沿う方向に

対称になると推定し、前記ウェブ板要素における前記 w 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(28)式により推定し、かつ、前記第1フランジ板要素、前記第2フランジ板要素における前記 v 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_{f1} , W_{f2} を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(29)式、(30)式によりそれぞれ推定する第2変位推定部と、前記H形鋼の前記座屈応力度を、前記第2面外変位 W_w 、前記第2面外変位 W_{f1} , W_{f2} 、及び(28)式から(30)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、を備える、座屈応力度の推定装置。

ただし、 N は2以上の自然数であり、 λ は未定係数である。

[0029] [数11]

$$W_w = \sin \frac{\pi}{a} \left(u + \lambda \sin \frac{\pi v}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos n \left(\frac{2v}{b_w} \right) + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (28)$$

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=-\frac{b_w}{2}} \quad \cdot \cdot (29)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=\frac{b_w}{2}} \quad \cdot \cdot (30)$$

[0030] <12>前記応力度算出部は、(31)式から(33)式を用いて、(34)式による前記座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n , b_n , λ 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 τ_{cr} を求める、<11>に記載の座屈応力度の推定装置。

ただし、 E は前記H形鋼のヤング係数であり、 ν は前記H形鋼のポアソン比であり、 t_w は前記ウェブ板要素の厚さであり、 t_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの厚さであり、 b_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの幅の半分の値である。

[0031]

[数12]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial v} \right) dv du \quad \cdot \cdot (31) \\
B &= \frac{b_w^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (32) \\
C_i &= \frac{b_f^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial v^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (33) \\
\tau_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2 t_f \sum_{i=1}^2 C_i}{b_f^2 t_w A} \quad \cdot \cdot (34)
\end{aligned}$$

[0032] <13><1>に記載の変位の推定装置を用いて、前記x軸に沿う方向又は前記y軸に沿う方向に、前記外力としてせん断力が作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定装置であって、前記板要素は、前記弾性要素であり、前記板要素の前記x軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記z軸の正の向き及び前記z軸の負の向きに交互に波状に変位する前記板要素の、前記x軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定部は、前記板要素の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に対称になると推定し、前記z軸に沿う方向に向けた前記板要素の第2面外変位 W_w を(35)式により推定する第2変位推定部と、前記板要素の前記座屈応力度を、(35)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、を備える、座屈応力度の推定装置。

ただし、Nは2以上の自然数であり、 λ は未定係数であり、 b_w は前記y軸に沿う方向における前記板要素の長さである。

[0033] [数13]

$$W_w = \sin \frac{\pi}{a} \left(x + \lambda \sin \frac{\pi y}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (35)$$

[0034] <14>前記応力度算出部は、(36)式及び(37)式を用いて、(38)式による前記座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記未定係数 a_n 、 b_n 、 λ 及び前記半波長aに基づいて、前記座屈応力度 τ_{cr} を求める、<13>に記載の座屈応力度の推定装置。

ただし、 E は前記板要素のヤング係数であり、 ν は前記板要素のポアソン比であり、 t_w は前記板要素の厚さである。

[0035] [数14]

$$A = \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial y} \right) dy dx \quad \cdots (36)$$

$$B = \frac{b_w^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx$$

$$\quad \cdots (37)$$

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdots (38)$$

[0036] <15>前記Nは2である<3>から<14>のいずれか一項に記載の座屈応力度の推定装置。

[0037] <16>互いに直交するx軸及びy軸に沿って広がる平板状に形成された弾性要素の端面に外力が作用し、前記弾性要素がその板厚方向であるz軸に沿う方向に座屈するときに、前記z軸に沿う方向に向けた前記弾性要素の第1面外変位 w_w を推定する変位の推定方法であって、前記弾性要素は、前記z軸に沿って見たときに、前記y軸に沿う方向の長さよりも前記x軸に沿う方向の長さが長い矩形状を呈し、前記弾性要素の前記y軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記x軸に沿う線を基準線としたときに、前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に対称になると推定される場合に、前記第1面外変位 w_w を(41)式により推定し、前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に非対称になると推定される場合に、前記第1面外変位 w_w を(42)式により推定する第1変位推定工程を行い、前記(41)式及び前記(42)式では、係数 b_n を含む項は前記第1面外変位 w_w の成分のうち、前記y軸に沿う方向の両端の境界条件が単純支持となる面外変位を表し、係数 a_n を含む項は前記第1面外変位 w_w の成分のうち、前記y軸に沿う方向の両端の境界条件が固定支持となる面外変位を表す、変位の推定方法。

ただし、(41)式及び(42)式中のYの値は、前記y軸の座標を前記弾性要素の前記y軸に沿う方向の長さを用いて無次元化した値であり、Nは

2以上の自然数であり、 a_0 , a_n , b_n は未定係数である。

[0038] [数15]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi Y^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} Y^n \right) \quad \cdot \cdot (4.1)$$

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos 2\pi Y^n + b_n \sin \pi Y^n \right) \quad \cdot \cdot (4.2)$$

[0039] <17>前記Nは2である<16>に記載の変位の推定方法。

[0040] <18><16>に記載の変位の推定方法を用いて、前記外力として圧縮力が作用して座屈するH形鋼の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定方法であって、

前記H形鋼は、前記弾性要素である、ウェブ板要素と、第1フランジ板要素と、第2フランジ板要素と、を備え、前記第1フランジ板要素及び第2フランジ板要素は、前記ウェブ板要素を、前記ウェブ板要素の前記y軸であるv軸に沿う方向に挟むように配置され、前記圧縮力は、前記ウェブ板要素の前記x軸であるu軸に沿う方向に、前記H形鋼の前記端面に作用し、w軸を、前記ウェブ板要素の前記z軸に沿う方向の軸とし、前記基準線は、前記ウェブ板要素の前記y軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う線とし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心の位置を、前記v軸の原点とし、前記第1フランジ板要素から前記第2フランジ板要素に向かう向きを、前記v軸の正の向きとし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心と前記第2フランジ板要素の中心との距離を、 b_w とし、前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記w軸の正の向き及び前記w軸の負の向きに交互に波状に変位する前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定工程では、前記H形鋼の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記v軸に沿う方向に対称になると推定し、前記ウェブ板要素における前記w軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定工程で推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(4.3)式により推定し、かつ、前記第1フランジ板要素、前記第2フランジ板要素にお

る前記 v 軸に沿う方向に向けた第 2 面外変位 W_{f1} , W_{f2} を、前記第 1 変位推定工程で推定した前記第 1 面外変位 w_w を用いて (44) 式、(45) 式によりそれぞれ推定する第 2 変位推定工程と、前記 H 形鋼の前記座屈応力度を、前記第 2 面外変位 W_w 、前記第 2 面外変位 W_{f1} , W_{f2} 、及び (43) 式から (45) 式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出工程と、を行う、座屈応力度の推定方法。

ただし、 N は 2 以上の自然数である。

[0041] [数16]

$$W_w = \sin \frac{\pi u}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (43)$$

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=0} \quad \cdot \cdot (44)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=b_w} \quad \cdot \cdot (45)$$

[0042] <19>前記応力度算出工程では、(46) 式から (49) 式を用いて、(50) 式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n , b_n 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、<18>に記載の座屈応力度の推定方法。

ただし、 E は前記 H 形鋼のヤング係数であり、 ν は前記 H 形鋼のポアソン比であり、 t_w は前記ウェブ板要素の厚さであり、 t_f は前記第 1 フランジ板要素及び前記第 2 フランジ板要素それぞれの厚さであり、 b_f は前記第 1 フランジ板要素及び前記第 2 フランジ板要素それぞれの幅の半分の値である。

[0043]

[数17]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 dv du \quad \cdot \cdot (46) \\
B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (47) \\
C &= \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 dw du \quad \cdot \cdot (48) \\
D &= \frac{b_f^2}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial w} \right)^2 \right] dw du \\
&\quad \cdot \cdot (49) \\
\sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2}{b_w^2} \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2}{b_f^2} \frac{D}{\frac{t_w}{t_f} A + C} \quad \cdot \cdot (50)
\end{aligned}$$

[0044] <20><16>に記載の変位の推定方法を用いて、前記x軸に沿う方向に、前記外力として圧縮力が作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定方法であって、前記板要素は、前記弾性要素であり、前記板要素の前記x軸に沿う方向の第1端側に向かうに従い、前記z軸の正の向き及び前記z軸の負の向きに交互に波状に変位する前記板要素の、前記x軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定工程では、前記板要素の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に对称になると推定し、前記z軸に沿う方向に向けた前記板要素の第2面外変位 W_w を(51)式により推定する第2変位推定工程と、前記板要素の前記座屈応力度を、(51)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出工程と、を行う、座屈応力度の推定方法。

ただし、Nは2以上の自然数であり、 b_w は前記y軸に沿う方向における前記板要素の長さである。

[0045] [数18]

$$W_w = \sin \frac{\pi x}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (51)$$

[0046] <21>前記応力度算出工程では、(52)式及び(53)式を用いて、(54)式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n 、 b_n 及び前記半波長aに基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、<2

0>に記載の座屈応力度の推定方法。

ただし、Eは前記板要素のヤング係数であり、 ν は前記板要素のポアソン比であり、 t_w は前記板要素の厚さである。

[0047] [数19]

$$A = \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdot \cdot (52)$$

$$B = \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx$$

$$\cdot \cdot (53)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (54)$$

[0048] <22><16>に記載の変位の推定方法を用いて、前記外力として曲げモーメントが作用して座屈するH形鋼の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定方法であって、前記H形鋼は、前記弾性要素である、ウェブ板要素と、第1フランジ板要素と、第2フランジ板要素と、を備え、前記第1フランジ板要素及び第2フランジ板要素は、前記ウェブ板要素を、前記ウェブ板要素の前記y軸であるv軸に沿う方向に挟むように配置され、前記曲げモーメントは、前記ウェブ板要素の前記z軸であるw軸回りに、前記H形鋼の前記端面に作用し、u軸を、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う方向の軸とし、前記基準線は、前記ウェブ板要素の前記y軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う線とし、前記第1フランジ板要素は、前記曲げモーメントにより引張力を受けるとし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心の位置を、前記v軸の原点とし、前記第1フランジ板要素から前記第2フランジ板要素に向かう向きを、前記v軸の正の向きとし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心と前記第2フランジ板要素の中心との距離を、 b_w とし、前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記w軸の正の向き及び前記w軸の負の向きに交互に波状に変位する前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定工程では、前記H形鋼の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記v軸に沿う方向に非対

称になると推定し、前記ウェブ板要素における前記 w 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定工程で推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(55)式により推定し、かつ、前記第1フランジ板要素、前記第2フランジ板要素における前記 v 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を、前記第1変位推定工程で推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(56)式、(57)式によりそれぞれ推定する第2変位推定工程と、前記H形鋼の前記座屈応力度を、前記第2面外変位 W_w 、前記第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び(55)式から(57)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出工程と、を行う、座屈応力度の推定方法。

ただし、 N は2以上の自然数である。

[0049] [数20]

$$W_w = \sin \frac{\pi u}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi v^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi v^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (55)$$

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=0} \quad \cdot \cdot (56)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=b_w} \quad \cdot \cdot (57)$$

[0050] <23>前記応力度算出工程では、(58)式から(61)式を用いて、(62)式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n 、 b_n 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、<22>に記載の座屈応力度の推定方法。

ただし、 E は前記H形鋼のヤング係数であり、 ν は前記H形鋼のポアソン比であり、 t_w は前記ウェブ板要素の厚さであり、 t_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの厚さであり、 b_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの幅の半分の値である。

[0051]

[数21]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 dv du \quad \cdot \cdot (58) \\
B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (59) \\
C &= \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+1)} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 dw du \quad \cdot \cdot (60) \\
D &= \frac{b_f^2}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial w} \right)^2 \right] dw du \\
&\quad \cdot \cdot (61) \\
\sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2}{b_w^2} \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2}{b_f^2} \frac{D}{\frac{t_w}{t_f} A + C} \quad \cdot \cdot (62)
\end{aligned}$$

[0052] <24><16>に記載の変位の推定方法を用いて、前記z軸回りに、前記外力として曲げモーメントが作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定方法であって、前記板要素は、前記弾性要素であり、前記板要素の前記x軸に沿う方向の第1端側に向かうに従い、前記z軸の正の向き及び前記z軸の負の向きに交互に波状に変位する前記板要素の、前記x軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定工程では、前記板要素の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に非対称になると推定し、前記z軸に沿う方向に向けた前記板要素の第2面外変位 W_w を(63)式により推定する第2変位推定工程と、前記板要素の前記座屈応力度を、(63)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出工程と、を行う、座屈応力度の推定方法。

ただし、Nは2以上の自然数であり、 b_w は前記y軸に沿う方向における前記板要素の長さである。

[0053] [数22]

$$W_w = \sin \frac{\pi x}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi y^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi y^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (63)$$

[0054] <25>前記応力度算出工程では、(64)式及び(65)式を用いて、(66)式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n 、 b_n 及び前記半波長aに基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、<2

4 >に記載の座屈応力度の推定方法。

ただし、Eは前記板要素のヤング係数であり、 ν は前記板要素のポアソン比であり、 t_w は前記板要素の厚さである。

[0055] [数23]

$$A = \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdots (64)$$

$$B = \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx$$

$$\cdots (65)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdots (66)$$

[0056] <26><16>に記載の変位の推定方法を用いて、前記外力としてせん断力が作用して座屈するH形鋼の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定方法であって、前記H形鋼は、前記弾性要素である、ウェブ板要素と、第1フランジ板要素と、第2フランジ板要素と、を備え、前記第1フランジ板要素及び第2フランジ板要素は、前記ウェブ板要素を、前記ウェブ板要素の前記y軸であるv軸に沿う方向に挟むように配置され、前記せん断力は、前記v軸に沿う方向に、前記H形鋼の前記端面に作用し、u軸を、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う方向の軸とし、w軸を、前記ウェブ板要素の前記z軸に沿う方向の軸とし、前記基準線は、前記ウェブ板要素の前記y軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う線とし、前記v軸に沿う方向における前記ウェブ板要素の中心の位置を、前記v軸の原点とし、前記第1フランジ板要素から前記第2フランジ板要素に向かう向きを、前記v軸の正の向きとし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心と前記第2フランジ板要素の中心との距離を、 b_w とし、前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記w軸の正の向き及び前記w軸の負の向きに交互に波状に変位する前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定工程では、前記H形鋼の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記v軸に沿う方向に対称になると推定し、前記ウェブ板要素における前記w軸に沿う方

向に向けた第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定工程で推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(67)式により推定し、かつ、前記第1フランジ板要素、前記第2フランジ板要素における前記 v 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を、前記第1変位推定工程で推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(68)式、(69)式によりそれぞれ推定する第2変位推定工程と、前記H形鋼の前記座屈応力度を、前記第2面外変位 W_w 、前記第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び(67)式から(69)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出工程と、を行う、座屈応力度の推定方法。

ただし、 N は2以上の自然数であり、 λ は未定係数である。

[0057] [数24]

$$W_w = \sin \frac{\pi}{a} \left(u + \lambda \sin \frac{\pi v}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (67)$$

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \Big|_{v=-\frac{b_w}{2}} \quad \cdot \cdot (68)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \Big|_{v=\frac{b_w}{2}} \quad \cdot \cdot (69)$$

[0058] <27>前記応力度算出工程では、(70)式から(72)式を用いて、(73)式による前記座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n 、 b_n 、 λ 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 τ_{cr} を求める、<26>に記載の座屈応力度の推定方法。

ただし、 E は前記H形鋼のヤング係数であり、 ν は前記H形鋼のポアソン比であり、 t_w は前記ウェブ板要素の厚さであり、 t_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの厚さであり、 b_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの幅の半分の値である。

[0059]

[数25]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial v} \right) dv du \quad \cdot \cdot (70) \\
B &= \frac{b_w^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (71) \\
C_i &= \frac{b_f^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial v^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (72) \\
\tau_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2 t_f \sum_{i=1}^2 C_i}{b_f^2 t_w A} \quad \cdot \cdot (73)
\end{aligned}$$

[0060] <28><16>に記載の変位の推定方法を用いて、前記x軸に沿う方向又は前記y軸に沿う方向に、前記外力としてせん断力が作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定方法であって、前記板要素は、前記弾性要素であり、前記板要素の板厚方向に延びる軸をz軸とし、前記板要素の前記x軸に沿う方向の第1端側に向かうに従い、前記z軸の正の向き及び前記z軸の負の向きに交互に波状に変位する前記板要素の、前記x軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記第1変位推定工程では、前記板要素の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に对称になると推定し、前記z軸に沿う方向に向けた前記板要素の第2面外変位 W_w を(74)式により推定する第2変位推定工程と、前記板要素の前記座屈応力度を、(74)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出工程と、を行う、座屈応力度の推定方法。

ただし、Nは2以上の自然数であり、 λ は未定係数であり、 b_w は前記y軸に沿う方向における前記板要素の長さである。

[0061] [数26]

$$W_w = \sin \frac{\pi}{a} \left(x + \lambda \sin \frac{\pi y}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos n \left(\frac{2y}{b_w} \right) + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (74)$$

[0062] <29>前記応力度算出工程では、(75)式及び(76)式を用いて、(77)式による前記座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記未定係数 a_n 、 b_n 、 λ 及び前記半波長aに基づいて、前記座屈応力度 τ_{cr} を

求める、＜ 2 8 ＞に記載の座屈応力度の推定方法。

ただし、E は前記板要素のヤング係数であり、 ν は前記板要素のポアソン比であり、 t_w は前記板要素の厚さである。

[0063] [数27]

$$A = \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial y} \right) dy dx \quad \cdot \cdot (75)$$

$$B = \frac{b_w^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx$$

$$\cdot \cdot (76)$$

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (77)$$

[0064] ＜ 3 0 ＞前記 N は 2 である＜ 1 8 ＞から＜ 2 9 ＞のいずれか一項に記載の座屈応力度の推定方法。

[0065] ＜ 3 1 ＞＜ 1 6 ＞又は＜ 1 7 ＞に記載の変位の推定方法を用いて H 形鋼及び板要素の少なくとも一方である板状体を設計する板状体の設計方法。

[0066] ＜ 3 2 ＞互いに直交する x 軸及び y 軸に沿って広がる平板状に形成された弾性要素の端面に外力が作用し、前記弾性要素がその板厚方向である z 軸に沿う方向に座屈するときに、前記 z 軸に沿う方向に向けた前記弾性要素の第 1 面外変位 w_w を推定する推定装置用の変位の推定プログラムであって、前記弾性要素は、前記 z 軸に沿って見たときに、前記 y 軸に沿う方向の長さよりも前記 x 軸に沿う方向の長さが長い矩形状を呈し、前記弾性要素の前記 y 軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記 x 軸に沿う線を基準線としたときに、前記推定装置を、前記第 1 面外変位 w_w が前記基準線に対して前記 y 軸に沿う方向に対称になると推定される場合に、前記第 1 面外変位 w_w を (8 1) 式により推定し、前記第 1 面外変位 w_w が前記基準線に対して前記 y 軸に沿う方向に非対称になると推定される場合に、前記第 1 面外変位 w_w を (8 2) 式により推定する第 1 変位推定部として機能させ、前記 (8 1) 式及び前記 (8 2) 式では、係数 b_n を含む項は前記第 1 面外変位 w_w の成分のうち、前記 y 軸に沿う方向の両端の境界条件が単純支持となる面外変位を表し、係数 a_n を含む項は前記第 1 面外変位 w_w の成分のうち、前記 y 軸に沿う方向の両端の

境界条件が固定支持となる面外変位を表す、変位の推定プログラム。

ただし、(81)式及び(82)式中のYの値は、前記y軸の座標を前記弾性要素の前記y軸に沿う方向の長さを用いて無次元化した値であり、Nは2以上の自然数であり、 a_0 、 a_n 、 b_n は未定係数である。

[0067] [数28]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi Y^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} Y^n \right) \quad \cdot \cdot (81)$$

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos 2\pi Y^n + b_n \sin \pi Y^n) \quad \cdot \cdot (82)$$

[0068] <33>前記Nは2である<32>に記載の変位の推定プログラム。

[0069] <34><32>に記載の変位の推定プログラムを用いて、前記外力として圧縮力が作用して座屈するH形鋼の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定プログラムであって、前記H形鋼は、前記弾性要素である、ウェブ板要素と、第1フランジ板要素と、第2フランジ板要素と、を備え、前記第1フランジ板要素及び第2フランジ板要素は、前記ウェブ板要素を、前記ウェブ板要素の前記y軸であるv軸に沿う方向に挟むように配置され、前記圧縮力は、前記ウェブ板要素の前記x軸であるu軸に沿う方向に、前記H形鋼の前記端面に作用し、w軸を、前記ウェブ板要素の前記z軸に沿う方向の軸とし、前記基準線は、前記ウェブ板要素の前記y軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う線とし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心の位置を、前記v軸の原点とし、前記第1フランジ板要素から前記第2フランジ板要素に向かう向きを、前記v軸の正の向きとし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心と前記第2フランジ板要素の中心との距離を、 b_w とし、前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記w軸の正の向き及び前記w軸の負の向きに交互に波状に変位する前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記変位の推定プログラムにより、前記第1変位推定部を、前記H形鋼の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記v軸に沿う方向に対称になると推定させ、前記推定装置を、前記ウ

ウェブ板要素における前記 w 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(83)式により推定し、かつ、前記第1フランジ板要素、前記第2フランジ板要素における前記 v 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(84)式、(85)式によりそれぞれ推定する第2変位推定部と、前記H形鋼の前記座屈応力度を、前記第2面外変位 W_w 、前記第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び(83)式から(85)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、して機能させる、座屈応力度の推定プログラム。

ただし、 N は2以上の自然数である。

[0070] [数29]

$$W_w = \sin \frac{\pi v}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdots (83)$$

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=0} \quad \cdots (84)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=b_w} \quad \cdots (85)$$

[0071] <35>前記応力度算出部は、(86)式から(89)式を用いて、(90)式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n 、 b_n 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、<34>に記載の座屈応力度の推定プログラム。

ただし、 E は前記H形鋼のヤング係数であり、 ν は前記H形鋼のポアソン比であり、 t_w は前記ウェブ板要素の厚さであり、 t_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの厚さであり、 b_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの幅の半分の値である。

[0072]

[数30]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 dv du \quad \cdot \cdot (86) \\
B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (87) \\
C &= \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 dw du \quad \cdot \cdot (88) \\
D &= \frac{b_f^2}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial w} \right)^2 \right] dw du \\
&\quad \cdot \cdot (89) \\
\sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2}{b_w^2} \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2}{b_f^2} \frac{D}{\frac{t_w}{t_f} A + C} \quad \cdot \cdot (90)
\end{aligned}$$

[0073] <36><32>に記載の変位の推定プログラムを用いて、前記x軸に沿う方向に、前記外力として圧縮力が作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定プログラムであって、前記板要素は、前記弾性要素であり、前記板要素の前記x軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記z軸の正の向き及び前記z軸の負の向きに交互に波状に変位する前記板要素の、前記x軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記変位の推定プログラムにより、前記第1変位推定部を、前記板要素の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に対称になると推定させ、前記推定装置を、前記z軸に沿う方向に向けた前記板要素の第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(91)式により推定する第2変位推定部と、前記板要素の前記座屈応力度を、(91)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、して機能させる、座屈応力度の推定プログラム。

ただし、Nは2以上の自然数であり、 b_w は前記y軸に沿う方向における前記板要素の長さである。

[0074] [数31]

$$W_w = \sin \frac{\pi x}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \right) \right] \quad \cdot \cdot (91)$$

[0075] <37>前記応力度算出部は、(92)式及び(93)式を用いて、(94

) 式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n , b_n 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、＜36＞に記載の座屈応力度の推定プログラム。

ただし、 E は前記板要素のヤング係数であり、 ν は前記板要素のポアソン比であり、 t_w は前記板要素の厚さである。

[0076] [数32]

$$A = \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdot \cdot (92)$$

$$B = \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx$$

$$\quad \cdot \cdot (93)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (94)$$

[0077] ＜38＞＜32＞に記載の変位の推定プログラムを用いて、前記外力として曲げモーメントが作用して座屈するH形鋼の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定プログラムであって、前記H形鋼は、前記弾性要素である、ウェブ板要素と、第1フランジ板要素と、第2フランジ板要素と、を備え、前記第1フランジ板要素及び第2フランジ板要素は、前記ウェブ板要素を、前記ウェブ板要素の前記 y 軸である v 軸に沿う方向に挟むように配置され、前記曲げモーメントは、前記ウェブ板要素の前記 z 軸である w 軸回りに、前記H形鋼の前記端面に作用し、 u 軸を、前記ウェブ板要素の前記 x 軸に沿う方向の軸とし、前記基準線は、前記ウェブ板要素の前記 y 軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記ウェブ板要素の前記 x 軸に沿う線とし、前記第1フランジ板要素は、前記曲げモーメントにより引張力を受けるとし、前記 v 軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心の位置を、前記 v 軸の原点とし、前記第1フランジ板要素から前記第2フランジ板要素に向かう向きを、前記 v 軸の正の向きとし、前記 v 軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心と前記第2フランジ板要素の中心との距離を、 b_w とし、前記ウェブ板要素の前記 u 軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記 w 軸の正の向き及び前記 w 軸の負の向きに交互に波状に変位する前記ウェブ板要素の前

記 u 軸に沿う方向における半波長を a としたときに、前記変位の推定プログラムにより、前記第 1 変位推定部を、前記 H 形鋼の前記第 1 面外変位 w_w が前記基準線に対して前記 v 軸に沿う方向に非対称になると推定させ、前記推定装置を、前記ウェブ板要素における前記 w 軸に沿う方向に向けた第 2 面外変位 W_w を、前記第 1 変位推定部が推定した前記第 1 面外変位 w_w を用いて (95) 式により推定し、かつ、前記第 1 フランジ板要素、前記第 2 フランジ板要素における前記 v 軸に沿う方向に向けた第 2 面外変位 W_{f1} , W_{f2} を、前記第 1 変位推定部が推定した前記第 1 面外変位 w_w を用いて (96) 式、(97) 式によりそれぞれ推定する第 2 変位推定部と、前記 H 形鋼の前記座屈応力度を、前記第 2 面外変位 W_w 、前記第 2 面外変位 W_{f1} , W_{f2} 、及び (95) 式から (97) 式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、して機能させる、座屈応力度の推定プログラム。

ただし、 N は 2 以上の自然数である。

[0078] [数33]

$$W_w = \sin \frac{\pi u}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi v^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi v^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (95)$$

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=0} \quad \cdot \cdot (96)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=b_w} \quad \cdot \cdot (97)$$

[0079] <39>前記応力度算出部は、(98) 式から (101) 式を用いて、(102) 式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n , b_n 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、<38>に記載の座屈応力度の推定プログラム。

ただし、 E は前記 H 形鋼のヤング係数であり、 ν は前記 H 形鋼のポアソン比であり、 t_w は前記ウェブ板要素の厚さであり、 t_f は前記第 1 フランジ板要素及び前記第 2 フランジ板要素それぞれの厚さであり、 b_f は前記第 1 フランジ板要素及び前記第 2 フランジ板要素それぞれの幅の半分の値である。

[0080]

[数34]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 dv du \quad \cdot \cdot (98) \\
B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (99) \\
C &= \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+1)} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 dw du \quad \cdot \cdot (100) \\
D &= \frac{b_f^2}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial w} \right)^2 \right] dw du \\
&\quad \cdot \cdot (101) \\
\sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2}{b_w^2} \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2}{b_f^2} \frac{D}{\frac{t_w}{t_f} A + C} \quad \cdot \cdot (102)
\end{aligned}$$

[0081] <40><32>に記載の変位の推定プログラムを用いて、前記z軸回り、前記外力として曲げモーメントが作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定プログラムであって、前記板要素は、前記弾性要素であり、前記板要素の前記x軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記z軸の正の向き及び前記z軸の負の向きに交互に波状に変位する前記板要素の、前記x軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記変位の推定プログラムにより、前記第1変位推定部を、前記板要素の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に非対称になると推定させ、前記推定装置を、前記z軸に沿う方向に向けた前記板要素の第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(103)式により推定する第2変位推定部と、前記板要素の前記座屈応力度を、(103)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、して機能させる、座屈応力度の推定プログラム。

ただし、Nは2以上の自然数であり、 b_w は前記y軸に沿う方向における前記板要素の長さである。

[0082] [数35]

$$W_w = \sin \frac{\pi x}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi y^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi y^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (103)$$

[0083] <41>前記応力度算出部は、(104)式及び(105)式を用いて、(

106) 式による前記座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n , b_n 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 σ_{cr} を求める、<40>に記載の座屈応力度の推定プログラム。

ただし、 E は前記板要素のヤング係数であり、 ν は前記板要素のポアソン比であり、 t_w は前記板要素の厚さである。

[0084] [数36]

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdot \cdot (104) \\
 B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \\
 &\quad \cdot \cdot (105) \\
 \sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (106)
 \end{aligned}$$

[0085] <42><32>に記載の変位の推定プログラムを用いて、前記外力としてせん断力が作用して座屈するH形鋼の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定プログラムであって、前記H形鋼は、前記弾性要素である、ウェブ板要素と、第1フランジ板要素と、第2フランジ板要素と、を備え、前記第1フランジ板要素及び第2フランジ板要素は、前記ウェブ板要素を、前記ウェブ板要素の前記y軸であるv軸に沿う方向に挟むように配置され、前記せん断力は、前記v軸に沿う方向に、前記H形鋼の前記端面に作用し、u軸を、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う方向の軸とし、w軸を、前記ウェブ板要素の前記z軸に沿う方向の軸とし、前記基準線は、前記ウェブ板要素の前記y軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、前記ウェブ板要素の前記x軸に沿う線とし、前記ウェブ板要素における前記v軸に沿う方向の中心の位置を、前記v軸の原点とし、前記第1フランジ板要素から前記第2フランジ板要素に向かう向きを、前記v軸の正の向きとし、前記v軸に沿う方向における前記第1フランジ板要素の中心と前記第2フランジ板要素の中心との距離を b_w とし、前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記w軸の正の向き及び前記w軸の負の向きに交互に波状に変位する前記ウェブ板要素の前記u軸に沿う方向における半波長を a としたときに、前記変位の

推定プログラムにより、前記第1変位推定部を、前記H形鋼の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記 v 軸に沿う方向に対称になると推定させ、前記推定装置を、前記ウェブ板要素における前記 w 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(107)式により推定し、かつ、前記第1フランジ板要素、前記第2フランジ板要素における前記 v 軸に沿う方向に向けた第2面外変位 W_{f1} , W_{f2} を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(108)式、(109)式によりそれぞれ推定する第2変位推定部と、前記H形鋼の前記座屈応力度を、前記第2面外変位 W_w 、前記第2面外変位 W_{f1} , W_{f2} 、及び(107)式から(109)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、して機能させる、座屈応力度の推定プログラム。

ただし、 N は2以上の自然数である。

[0086] [数37]

$$W_w = \sin \frac{\pi}{a} \left(u + \lambda \sin \frac{\pi v}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdots (107)$$

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \Big|_{v=-\frac{b_w}{2}} \quad \cdots (108)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \Big|_{v=\frac{b_w}{2}} \quad \cdots (109)$$

[0087] <43>前記応力度算出部は、(110)式から(112)式を用いて、(113)式による前記座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記 a_n , b_n , λ 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 τ_{cr} を求める、<42>に記載の座屈応力度の推定プログラム。

ただし、 E は前記H形鋼のヤング係数であり、 ν は前記H形鋼のポアソン比であり、 t_w は前記ウェブ板要素の厚さであり、 t_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの厚さであり、 b_f は前記第1フランジ板要素及び前記第2フランジ板要素それぞれの幅の半分の値である。

[0088]

[数38]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial v} \right) dv du \quad \cdot \cdot (110) \\
B &= \frac{b_w^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (111) \\
C_i &= \frac{b_f^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial v^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (112) \\
\tau_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2 t_f \sum_{i=1}^2 C_i}{b_f^2 t_w A} \quad \cdot \cdot (113)
\end{aligned}$$

[0089] <44><32>に記載の変位の推定プログラムを用いて、前記x軸に沿う方向又は前記y軸に沿う方向に、前記外力としてせん断力が作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定する座屈応力度の推定プログラムであって、前記板要素は、前記弾性要素であり、前記板要素の板厚方向に延びる軸をz軸とし、前記板要素の前記x軸に沿う方向の第1端に向かうに従い、前記z軸の正の向き及び前記z軸の負の向きに交互に波状に変位する前記板要素の、前記x軸に沿う方向における半波長をaとしたときに、前記変位の推定プログラムにより、前記第1変位推定部を、前記板要素の前記第1面外変位 w_w が前記基準線に対して前記y軸に沿う方向に対称になると推定させ、前記推定装置を、前記z軸に沿う方向に向けた前記板要素の第2面外変位 W_w を、前記第1変位推定部が推定した前記第1面外変位 w_w を用いて(114)式により推定する第2変位推定部と、前記板要素の前記座屈応力度を、(114)式を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部と、して機能させる、座屈応力度の推定プログラム。

ただし、Nは2以上の自然数であり、 λ は未定係数であり、 b_w は前記y軸に沿う方向における前記板要素の長さである。

[0090] [数39]

$$W_w = \sin \frac{\pi}{a} \left(x + \lambda \sin \frac{\pi y}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (114)$$

[0091] <45>前記応力度算出部は、(115)式及び(116)式を用いて、(

1 1 7) 式による前記座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である前記未定係数 a_n , b_n , λ 及び前記半波長 a に基づいて、前記座屈応力度 τ_{cr} を求める、＜4 4＞に記載の座屈応力度の推定プログラム。

ただし、 E は前記板要素のヤング係数であり、 ν は前記板要素のポアソン比であり、 t_w は前記板要素の厚さである。

[0092] [数40]

$$A = \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial y} \right) dy dx \quad \cdot \cdot (115)$$

$$B = \frac{b_w^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx$$

$$\quad \cdot \cdot (116)$$

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (117)$$

[0093] ＜4 6＞前記 N は 2 である＜3 4＞から＜4 5＞のいずれか一項に記載の座屈応力度の推定プログラム。

発明の効果

[0094] 本発明の変位の推定装置、座屈応力度の推定装置、変位の推定方法、座屈応力度の推定方法、変位の推定プログラム、及び座屈応力度の推定プログラムによれば、フーリエ級数を用いた場合よりも推定に必要な計算を簡単に行うとともに、推定結果を物理的に理解しやすく定式化することができる。

図面の簡単な説明

[0095] [図1] 本発明の第 1 実施形態の変位の推定装置が適用される H 形鋼を備える建築物の斜視図である。

[図2] 同 H 形鋼に曲げモーメントが作用したときの F E M による解析結果を示す図である。

[図3] 同変位の推定装置の概要を示す図である。

[図4] 同 H 形鋼のウェブが x 軸に沿う方向に十分長い場合に、 y 軸方向に対称となるようにウェブが座屈している状態を模式的に示す斜視図である。

[図5] 図 4 のウェブにおける x 軸に沿う方向の半波長分を拡大した斜視図である。

[図6]ウェブに圧縮力が作用する場合の、 y 軸の座標によるウェブの第1面外変位の推定結果の一例を表す図である。

[図7]ウェブに圧縮力が作用する場合の、 y 軸の座標によるウェブの第1面外変位の推定結果の他の例を表す図である。

[図8] N に対する、(1)式でウェブの第1面外変位を推定したときの標準偏差の比を表す図である。

[図9] N に対する、(1)式でウェブの第1面外変位推定したときの差分の2乗和の比を表す図である。

[図10] y 軸方向に非対称となるように座屈したウェブの斜視図である。

[図11] y 軸方向に非対称となるようにウェブが座屈した場合の、 y 軸の座標によるウェブの面外変位の推定結果の一例を表す図である。

[図12] y 軸方向に非対称となるようにウェブが座屈した場合の、 y 軸の座標によるウェブの第1面外変位の推定結果の他の例を表す図である。

[図13]本発明の第2実施形態の変位の推定装置の概要を示す図である。

[図14]同H形鋼が u 軸に沿う方向に十分長い場合に、圧縮力が作用したH形鋼が座屈している状態を模式的に示す斜視図である。

[図15]同H形鋼の長手方向に直交する断面図である。

[図16]図14のH形鋼における u 軸に沿う方向の半波長分を拡大した斜視図である。

[図17]図16中の切断線A5-A5の断面図である。

[図18]同座屈応力度の推定装置で推定される座屈応力度と、FEMで推定される固有値解析との比較結果を示す図である。

[図19]本発明の第3実施形態の変位の推定装置が対象とするウェブが座屈している状態を模式的に示す斜視図である。

[図20]図19のウェブにおける x 軸に沿う方向の半波長分を拡大した斜視図である。

[図21]ウェブに圧縮力が作用する場合の、 y 軸の座標によるウェブの面外変位の推定結果の一例を表す図である。

[図22]ウェブに圧縮力が作用する場合の、 N に対する座屈係数の変化の一例を表す図である。

[図23]本発明の第4実施形態の変位の推定装置が対象とするH形鋼が座屈している状態を模式的に示す斜視図である。

[図24]図23のH形鋼における u 軸に沿う方向の半波長分を拡大した斜視図である。

[図25]図24中の切断線A9-A9の断面図である。

[図26]同座屈応力度の推定装置で推定される座屈応力度と、FEMで推定される固有値解析との比較結果を示す図である。

[図27]本発明の第5実施形態の変位の推定装置が対象とするウェブが座屈している状態を模式的に示す斜視図である。

[図28]図27のウェブにおける x 軸に沿う方向の半波長分を拡大した斜視図である。

[図29]ウェブに曲げモーメントが作用する場合の、 y 軸の座標によるウェブの面外変位の推定結果の一例を表す図である。

[図30]ウェブに曲げモーメントが作用する場合の、 N に対する座屈係数の変化の一例を表す図である。

[図31]本発明の第6実施形態の変位の推定装置が対象とするH形鋼が座屈している状態を模式的に示す斜視図である。

[図32]同H形鋼の長手方向に直交する断面図である。

[図33]図31のH形鋼における u 軸に沿う方向の半波長分を拡大した斜視図である。

[図34]図33中の切断線A13-A13の断面図である。

[図35]同座屈応力度の推定装置で推定される座屈応力度と、FEMで推定される固有値解析との比較結果を示す図である。

[図36]本発明の第7実施形態の変位の推定装置が対象とするウェブが座屈している状態を模式的に示す斜視図である。

[図37]図36のウェブにおける x 軸に沿う方向の一波長分を拡大した斜視図

である。

[図38]ウェブにせん断力が作用する場合の、 y 軸の座標によるウェブの面外変位の推定結果の一例を表す図である。

[図39]ウェブにせん断力が作用する場合の、 N に対する座屈係数の変化の一例を表す図である。

[図40]板要素が等曲げを受ける場合での、 N に対する座屈係数の変化の一例を表す図である。

[図41]従来の推定方法で推定される座屈応力度と、FEMで推定される固有値解析との比較結果を示す図である。

[図42]同座屈応力度の推定装置で推定される座屈応力度と、FEMで推定される固有値解析との比較結果を示す図である。

発明を実施するための形態

[0096] 〔第1実施形態〕

以下、本発明に係る変位の推定装置の第1実施形態を、図1から図12を参照しながら説明する。

この変位の推定装置（推定装置、以下単に推定装置とも言う）は、例えば図1に示す建築物1に、鉄骨梁として用いられるH形鋼10等の変位を推定するのに用いられる。H形鋼10は、下フランジ（第1フランジ板要素）11と、上フランジ（第2フランジ板要素）12と、下フランジ11及び上フランジ12を互いに連結するウェブ（ウェブ板要素）13と、を備えている。なお、図1では、後述する床スラブ20を二点鎖線で示している。第2実施形態以下では、下フランジ11を第1フランジ板要素11とも言う。上フランジ12を第2フランジ板要素12とも言い、ウェブ13をウェブ板要素13とも言う。

H形鋼10が備える下フランジ11、上フランジ12、及びウェブ13は、それぞれ弾性要素であり、鋼板で形成されている。なお、弾性要素は、材料非線形を考慮しない要素である。

[0097] H形鋼10は、例えば水平面に沿う方向に延びている。下フランジ11は

、平板状に形成され、下フランジ 1 1 の厚さ方向が上下方向に沿うように配置されている。上フランジ 1 2 は、平板状に形成され、下フランジ 1 1 よりも上方に配置されている。上フランジ 1 2 は、上フランジ 1 2 の厚さ方向が上下方向に沿うように配置されている。

ウェブ 1 3 は、ウェブ 1 3 の厚さ方向に見たときに矩形状を呈する平板状に形成されている。ウェブ 1 3 は、ウェブ 1 3 の厚さ方向が水平面に沿うように配置されている。ウェブ 1 3 は、下フランジ 1 1 の下面における幅方向の中心と、上フランジ 1 2 の上面における幅方向の中心とを連結している。

[0098] H 形鋼 1 0 の長手方向の端部は、柱 1 5 等に固定されている。H 形鋼 1 0 は、床スラブ 2 0 を床スラブ 2 0 の下方から支持している。H 形鋼 1 0 の上フランジ 1 2 には、頭付きスタッド等のシャコネクタ 2 1 が設けられている。シャコネクタ 2 1 は、床スラブ 2 0 に埋設されている。

建築物 1 は、床スラブ 2 0 上に図示しない設備を設置する等して用いられる。

[0099] 図 2 に、H 形鋼 1 0 の長手方向の中間部に下向きの外力 F_1 が作用する H 形鋼 1 0 の FEM (Finite Element Method) による解析結果を示す。H 形鋼 1 0 の長手方向の端部は、柱 1 5 に固定されている。下向きに作用する外力 F_1 により、H 形鋼 1 0 に曲げモーメントが作用している。この解析結果では、ウェブ 1 3 における端部に、局部座屈が生じる領域 R_1 がある。

本実施形態の推定装置は、FEM による解析を行うことなく、H 形鋼 1 0 に外力が作用して座屈（局部座屈）したときの H 形鋼 1 0 の第 1 面外変位（面外変位）を推定する。ここで言う第 1 面外変位は、面に直交する方向の変位を意味する。

以下では、説明を簡単にするために、推定装置が第 1 面外変位を推定する対象である弾性要素が、ウェブ 1 3 である場合について説明する。なお、H 形鋼 1 0 においてフランジ 1 1, 1 2 の厚さが無視できる程度に薄い、フランジ 1 1, 1 2 の剛性が無視できる程度に低い等の場合には、H 形鋼 1 0 のウェブ 1 3 の第 1 面外変位がウェブ 1 3 単体の第 1 面外変位に等しくなる。

[0100] 図3に、本実施形態の推定装置50を示す。推定装置50はコンピュータであり、CPU (Central Processing Unit) 51と、主記憶装置55と、補助記憶装置60と、入出力インタフェース (I/O) 65と、記録・再生装置70と、を備えている。CPU 51、主記憶装置55、補助記憶装置60、入出力インタフェース65、及び記録・再生装置70は、バス75により互いに接続されている。

主記憶装置55は、CPU 51のワークエリア等になるRAM (Random Access Memory) 等である。

入出力インタフェース65は、キーボードやマウス等の入力装置66、及び表示装置67に接続される。

記録・再生装置70は、USB (Universal Serial Bus) メモリ等の記録媒体71に対するデータの記録や再生を行う。

[0101] 補助記憶装置60は、各種データやプログラム等が記憶されるハードディスクドライブ装置等である。補助記憶装置60には、前記コンピュータを推定装置50として機能させるための変位の推定プログラム (以下、単に推定プログラムとも言う) 61や、OS (Operating System) プログラム等の各種プログラム等が格納されている。推定プログラム61を含む各種プログラムは、記録・再生装置70を介して記録媒体71から補助記憶装置60に取り込まれる。推定プログラム61等は、記録媒体71に格納される。

なお、これらのプログラムは、CDやDVD等のディスク型の記録媒体や、図示されていない通信装置を介して外部装置から補助記憶装置60に取り込まれてもよい。

[0102] CPU 51は、各種演算処理を実行する。CPU 51は、機能的に、ウェブ13の第1面外変位を推定する第1変位推定部52を備えている。CPU 51の機能構成要素である第1変位推定部52は、補助記憶装置60に格納されている推定プログラム61等をCPU 51が実行することで機能する。推定プログラム61等は、推定装置50用のプログラムである。推定プログラム61は、推定装置50を第1変位推定部52として機能させる。

[0103] 本実施形態の推定装置50の第1変位推定部52では、図4に示すように、ウェブ13の位置座標を、 x 軸、 y 軸、及び z 軸で構成する右手系の直交座標系（以下、 xyz 座標系とも言う）に基づいて認識する。ウェブ13は、互いに直交する x 軸及び y 軸に沿ってそれぞれ広がる（延びる）とする。ウェブ13は、 x 軸及び y 軸のうち、例えば x 軸は水平面に沿って広がるとする。 x 軸は、ウェブ13の材軸方向である。 y 軸は、上下方向に沿って延びるとする。 z 軸は、 x 軸及び y 軸にそれぞれ直交し、ウェブ13の厚さ方向（板厚方向）に沿うとする。 z 軸に沿う方向（以下、 z 軸方向と言う。 x 軸、 y 軸、及び後述する u 軸等についても同様に言う）に見たときに、ウェブ13は、 x 軸に沿う方向に広がる辺、及び y 軸に沿う方向に広がる辺をそれぞれ有する矩形状を呈する。ウェブ13は、 y 軸方向の長さよりも x 軸方向の長さが十分長いとする。

ここで、ウェブ13の x 軸方向の各端に配置され y 軸方向に延びる表面を、以下、 x 軸方向の端面13aと言う。ここで言うウェブ13が、 y 軸方向の長さよりも x 軸方向の長さが十分長いとは、 x 軸方向の端面13aの境界条件が座屈変形に与える影響を無視できる程度の x 軸方向の長さを、ウェブ13が有していることを意味する。

[0104] なお、後述するように、ウェブ13の x 軸方向の端面13aに外力 F_2 が作用してウェブ13が z 軸方向に座屈すると、ウェブ13が、 x 軸方向の第1端（ x 軸方向の端面13aの一方）に向かうに従い、 z 軸の正の向き及び z 軸の負の向きに交互に波状に変位する。これにより、ウェブ13が全体として複数の波長分の波状（以下、 x 軸方向に波状と言う）に変位する。ウェブ13において、 x 軸方向の第2端と第1端との中間部が x 軸の原点である。この中間部から x 軸方向の第1端に向かう向きが、 x 軸の正の向きである。

y 軸の原点は、ウェブ13の下端である。 y 軸の正の向きは、上向き（下フランジ11から上フランジ12に向かう向き）である。

z 軸の原点は、ウェブ13の z 軸方向の中心（厚さ方向の中心）である。

z 軸の正の向きは、x 軸の正の向き及び y 軸の正の向きに対して、右手系の直交座標系を構成する向きである。

[0105] ここで、第 1 実施形態では、ウェブ 13 の y 軸方向の長さ（せい）を、 b_w とする。なお、以下に説明する長さ等の単位には、長さに対しては「m」といった、SI 単位が好ましく用いられる。

推定装置 50 は、例えば、ウェブ 13 に曲げモーメントが作用したときの、x 軸及び y 軸の所定の座標における z 軸に沿う方向に向けたウェブ 13 の第 1 面外変位を推定する。

[0106] 本実施形態の推定装置 50 の第 1 変位推定部 52 では、ウェブ 13 の面外変位を推定する際に、以下の 1 から 6 の仮定を行っている。

1. ウェブ 13 の厚さ（z 軸方向の長さ）は薄く、ウェブ 13 の厚さはウェブ 13 の x 軸方向の長さ及び y 軸方向の長さに比べて短い。
2. ウェブ 13 のたわみ（座屈による面外変位）は小さく、ウェブ 13 の厚さよりも小さい。
3. ウェブ 13 の厚さ方向の中央面は、ウェブ 13 の曲げによって伸縮することなく、中立面を保つ。
4. ウェブ 13 の断面では、曲げに対して平面保持の仮定が成立する。
5. ウェブ 13 の材料は、均質であり、等方性を有する。
6. ウェブ 13 に外力が作用したときの変位は、フックの法則に従う。

[0107] （1. 第 1 面外変位が基準線に対して対称と推定される場合の第 1 面外変位の推定）

図 4 に示すように、ウェブ 13 の x 軸方向の端面 13a に x 軸方向に外力（たとえば圧縮力） F_2 が作用すると、ウェブ 13 が x 軸方向に波状に変位する。外力（たとえば圧縮力） F_2 は、y 軸方向の全長にわたって等しい大きさで作用する外力である。

x 軸方向に波状に変位したウェブ 13 における x 軸方向の第 1 面外変位が $\sin(\pi x/a)$ の式で表されると仮定すると、ウェブ 13 の x 軸方向に波状に変位したウェブ 13 の波長は、 $2a$ になる。

[0108] ウェブ13に外力（たとえば圧縮力） F_2 が作用している場合、従来は（1）式で表されるフーリエ級数を用いてウェブ13の z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w を推定していた。

y 軸の座標が y_0 であるウェブ13の部分の Y の値は、 (y_0/b_w) の値となる。このため、ウェブ13の z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w は、（1）式の Y に (y_0/b_w) の値を代入したときの第1面外変位 w_w の値として得られる。

発明者らは、三角関数を用いつつも、フーリエ級数よりも少ない項数で、ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w を推定できる関数を複数検討した。ここで、ウェブ13の y 軸方向の長さ b_w の中心の位置を通り、 x 軸に沿う線を基準線M1とする。基準線M1は、ウェブ13の z 軸方向の中心を通るとしてもよい。

[0109] その結果、ウェブ13に外力（たとえば圧縮力） F_2 が作用し、ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して y 軸方向に対称になると推定される場合、ウェブ13の y 軸のある座標における第1面外変位 w_w は（121）式により、フーリエ級数よりも少ない項数で推定されることを見出した。ただし、（121）式では、係数 b_n を含む項は第1面外変位 w_w の成分のうち、 y 軸方向の両端の境界条件が単純支持となる面外変位を表す。係数 a_n を含む項は、第1面外変位 w_w の成分のうち、 y 軸に沿う方向の両端の境界条件が固定支持となる面外変位を表す。

[0110] 具体的には、（121）式における係数 b_n を含む項は、「 $b_n \cos(\pi/2) Y^n$ 」である。この項が「第1面外変位 w_w の成分のうち、 y 軸方向の両端の境界条件が単純支持（ピン支持）となる面外変位を表す」とは、この項が、 y 軸方向の両端が自由に回転できる面外変位を表すことを意味する。

一方で、（121）式における係数 a_n を含む項は、「 $a_n \cos \pi Y^n$ 」である。この項が「第1面外変位 w_w の成分のうち、 y 軸に沿う方向の両端の境界条件が固定支持となる面外変位を表す」とは、この項が、 y 軸方向の両端

の回転が拘束されており、回転角が生じない面外変位を表すことを意味する。

[0111] また、(121) 式中の Y の値は、 y 軸の座標をウェブ13の y 軸方向の長さ b_w を用いて無次元化した値である。 N は2以上の自然数であり、 a_0 , a_n , b_n は未定係数(係数)である。

$\cos \pi Y^n$ 及び $\cos(\pi/2) Y^n$ は、基底となる。(121) 式では、第1面外変位 w_w を Y のみの関数として表している。

[0112] [数41]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi Y^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} Y^n \right) \quad \cdots (121)$$

[0113] ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して対称になると推定される場合とは、例えば、ウェブ13の形状、拘束条件が基準線M1に対して対称である場合等である。 z 軸方向に見て、ウェブ13は x 軸方向に沿う辺及び y 軸方向に沿う辺を有する矩形状であるため、基準線M1になり得るのは、ウェブ13の y 軸方向の中心かつ z 軸の原点を通り x 軸方向に沿う線である。

ここで、ウェブ13の y 軸方向の各端に配置され x 軸方向に延びる表面を、 y 軸方向の端面13bと言う。この例では、ウェブ13の y 軸方向の端面13bがそれぞれ固定支持されていて、外力 F_2 が等分布な圧縮力である。従って、ウェブ13の形状、拘束条件、及びウェブ13に作用する外力の全てが、基準線M1に対して y 軸方向に対称になる。このため、ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して y 軸方向に対称になる、と第1変位推定部52が推定(判断)する。そして、第1変位推定部52は、ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w を(121)式により推定する。

なお、基準線M1に対して y 軸方向に対称とは、基準線M1を含み y 軸に直交する基準面に対して、 y 軸方向に対称であることを意味する。

[0114] (121) 式を用いてウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向

けた第1面外変位 w_w を実際に推定するには、以下のような手順で推定することが好ましい。

すなわち、(122)式のように、 Y の値、及びウェブ13の y 軸方向の長さ b_w を用いて表現した値を、 y 軸の座標とする。言い換えれば、(123)式のように、 Y の値は、 y 軸の座標を長さ b_w を用いて無次元化した値(y 軸の座標の2倍を長さ b_w で除した値から1を引いた値)である。

そして、(121)式に(122)式を代入して得られる(124)式により、ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w を推定する。以下では、ウェブ13に圧縮力が作用する場合に、(121)式を(124)式のように変形することを、圧縮時における第1面外変位 w_w 式の修正と言う。

[0115] [数42]

$$y = b_w \cdot \frac{Y+1}{2} \quad \cdots (122)$$

$$Y = \frac{2y}{b_w} - 1 \quad \cdots (123)$$

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n \right) \quad \cdots (124)$$

[0116] なお、前記の推定を推定装置50を操作する操作者が行い、その推定した結果を推定装置50に入力してもよい。

N が2の場合には、(121)式は(125)式のようになり、(124)式は(126)式ようになる。

[0117] [数43]

$$w_w = a_0 + a_1 \cos \pi Y + b_1 \cos \frac{\pi}{2} Y + a_2 \cos \pi Y^2 + b_2 \cos \frac{\pi}{2} Y^2 \quad \cdots (125)$$

$$w_w = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi y}{b_w} + b_1 \sin \frac{\pi y}{b_w} + a_2 \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^2 + b_2 \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^2 \quad \cdots (126)$$

[0118] 図5に示す、ウェブ13の x 軸方向の長さが半波長 a である部分のウェブ13の全領域における第2面外変位(面外変位) W_w について説明する。この第2面外変位 W_w を、 y 軸のある座標における z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w を用いることにより y 軸及び x 軸の関数として表すと、(127)式のようになる。

(127) 式に (124) 式を代入すると、(128) 式が得られる。

[0119] [数44]

$$W_w = \sin \frac{\pi x}{a} \cdot w_w \quad \cdot \cdot (127)$$

$$W_w = \sin \frac{\pi x}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (128)$$

[0120] 図4の第2面外変位 W_w は、図5の第2面外変位 W_w を x 軸方向に繰り返したものである。図4のウェブ13の第2面外変位 W_w を推定することと図5のウェブ13の第2面外変位 W_w を推定することは同義であることから、前記(127)式は図5の第2面外変位 W_w を推定したものである。

例えば、図5のウェブ13に外力 F_2 が作用する前における、ウェブ13において x 軸の座標が x_0 、 y 軸の座標が y_0 の部分(以下、推定対象部分と言う)の z 軸の座標は0である。ウェブ13に外力 F_2 が作用した後において、この推定対象部分における第2面外変位 W_w は、(129)式により推定され、このときの z 軸の座標は、0に(129)式により推定した第2面外変位 W_w を足した値となる。すなわち、外力 F_2 が作用した後では、推定対象部分は、 x 軸の座標が x_0 、 y 軸の座標が y_0 、 z 軸の座標が W_w となる位置に配置されていると推定される。

[0121] [数45]

$$W_w = \sin \frac{\pi x_0}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y_0}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y_0}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (129)$$

[0122] 前記(125)式における未定係数 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 の値は、以下のよう求められる。

ここで、ウェブ13の厚さを t_w 、ウェブ13のポアソン比を ν 、ウェブ13のヤング係数を E 、ウェブ13の板剛性を D_w 、ウェブ13の座屈応力度を σ_{cr} 、座屈によるウェブ13の x 軸方向の変位を δ_w とする。

このとき、板剛性 D_w は(132)式で表され、座屈変形によりウェブ13内で生じる歪エネルギー U 、外力 F_2 により与えられる外力ポテンシャル V は、それぞれ(133)式、(134)式で表される。また、エネルギー法

(energy balance method) における全ポテンシャルエネルギー Π は、前記歪エネルギー U 及び前記外力ポテンシャル V の和である (135) 式によって与えられる。

[0123] [数46]

$$\begin{aligned}
 D_w &= \frac{Et_w}{12(1-\nu^2)} \quad \cdot \cdot (132) \\
 U &= \frac{D_w}{2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \\
 &\quad + \int_0^a \int_0^{b_w} \sigma_{cr} t_w \left[\frac{\delta_w}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 \right] dy dx \quad \cdot \cdot (133) \\
 V &= -\sigma_{cr} b_w t_w \delta_w \quad \cdot \cdot (134) \\
 \Pi &= U + V \quad \cdot \cdot (135)
 \end{aligned}$$

[0124] (135) 式において、全ポテンシャルエネルギー Π を 0 とした式を座屈応力度 σ_{cr} について解く。すると、(138) 式及び (139) 式を用いて、(140) 式のように座屈応力度 σ_{cr} が表される。

ただし、 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 、及び半波長 a は (140) 式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である。

[0125] ここでエネルギー法を用いるのは、ウェブ 13 の第 1 面外変位 w_w に基づいて得られる全ポテンシャルエネルギー Π が 0 となるように、ウェブ 13 の座屈応力度 σ_{cr} が求められるためである。

なお、ウェブ 13 の座屈応力度 σ_{cr} を求める方法は、エネルギー法に限定されない。

[0126] [数47]

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdot \cdot (138) \\
 B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \\
 &\quad \cdot \cdot (139) \\
 \sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (140)
 \end{aligned}$$

[0127] 具体的には、半波長 a を定数として扱う。この状態で、前記全ポテンシャルエネルギー Π を未定係数 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 で偏微分した関数が 0 に等しいことを表す方程式を連立させて、実数である a_1 , a_2 , b_1 , b_2 が求めら

れる。連立方程式の解となる a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の組が複数ある場合には、 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の複数の組のうち、(140) 式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の組に基づいて (a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の組を (140) 式に代入して) 座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱う。前記 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の組が求められた全ポテンシャルエネルギー Π を半波長 a で偏微分した関数が 0 に等しいことを表す方程式から、半波長 a を求める。以上のように求められた前記 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の組及び半波長 a に基づいて求められた座屈応力度 σ_{cr} が、求める座屈応力度 σ_{cr} となる。

連立方程式の解となる未定係数 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の組が 1 つのみの場合には、 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の組が (140) 式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える場合に、 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の組に基づいて座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱い、前述のように座屈応力度 σ_{cr} を求める。

[0128] 求めた前記 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 、及び半波長 a の値から、ウェブ 13 の y 軸方向の第 1 面外変位 w_w を推定した (126) 式及び (127) 式が具体的に求められる。

(126) 式の精度の評価

図 6 及び図 7 に、 y 軸方向に対称となるようにウェブ 13 が座屈すると推定される場合の、 y 軸の座標によるウェブ 13 の第 1 面外変位 w_w の推定結果を表す。この第 1 面外変位 w_w は、図 5 の切断線 A1-A1 の断面における第 1 面外変位である。

図 6 及び図 7 において、横軸はウェブ 13 の長さ b_w に対する y 軸の座標 (Y の値) を表し、縦軸は推定したウェブ 13 の第 1 面外変位 w_w を表す。横軸の 0 はウェブ 13 の下端を表し、横軸の 1 はウェブ 13 の上端を表す。なお、図 6 及び図 7 では、 y 軸の座標の 0 から 1 までを数十の区間に分割して示している。区間の境界の座標は、例えば 0, 0.02, 0.04, ..., 1 等である。

[0129] 図6及び図7において、実線による線L1はFEMによる解析結果を表す。FEMにより推定されたウェブ13の第1面外変位 w_w は、基準線M1（図5参照）に対してy軸方向に対称になる。

図6において、点線による線L2は本実施形態の(126)式を用いて推定した結果を表す。線L2が線L1にほぼ一致しているため、線L2が線L1に重なっている。

図7において、点線による線L3は、Nが1の場合の(1)式によるフーリエ級数を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w を推定した結果を表す。同様に、一点鎖線による線L4、二点鎖線による線L5は、Nが5、15の場合の(1)式によるフーリエ級数を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w を推定した結果を表す。線L5が線L1にほぼ一致しているため、線L5が線L1に重なっている。(1)式によるフーリエ級数を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w を推定した結果は、Nが大きくなるのに従い、FEMにより推定されたウェブ13の第1面外変位 w_w に一致する。

[0130] ここで、y軸の座標が0及び1以外の各区間の境界の座標におけるFEMで推定したウェブ13のy軸方向の第1面外変位 w_w に対する、(126)式(Nが2の場合の(124)式)で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w の比の標準偏差を、第1標準偏差と言う。y軸の座標が0及び1以外の各区間の境界の座標におけるFEMで推定したウェブ13の第1面外変位 w_w に対する、(1)式で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w の比の標準偏差を、第2標準偏差と言う。表1に、第1標準偏差に対する第2標準偏差の比(以下、標準偏差比と言う)を表す。

(1)式において、Nは、1、3、5、7、10、15と変化させた。この標準偏差比が1であると、FEMで推定したウェブ13の第1面外変位 w_w に対する(126)式で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w の比の散らばり具合、及び(1)式で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w の比の散らばり具合が、互いに同等になる。

表1には、後述するy軸方向に非対称となるようにウェブ13が座屈する

場合の結果も併せて載せている。

[0131] [表1]

N	※標準偏差比	
	圧縮力	曲げモーメント
1	107.6	156.8
3	56.0	23.6
5	35.0	15.2
7	24.2	8.0
10	17.7	6.8
15	12.6	5.6

[0132] 図8に、表1をグラフ化したものを示す。図8において、横軸はNを表し、縦軸は標準偏差比を表す。実線による線L8はy軸方向に対称となるようにウェブ13が座屈する場合の結果を表し、点線による線L9はy軸方向に非対称となるようにウェブ13が座屈する場合の結果を表す。

線L8で示すように、Nが大きくなるのに従い標準偏差比は小さくなるが、Nを15にしても標準偏差比は10以上である。

[0133] ここで、y軸の座標が0及び1以外の各区間の境界の座標における(126)式で推定したウェブ13のy軸のある座標におけるz軸方向に向けた第1面外変位 w_w と、FEMで推定したウェブ13の第1面外変位 w_w と、の差分を2乗したものの和を、第1の2乗和と言う。y軸の座標が0及び1以外の各区間の境界の座標における(1)式で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w と、FEMで推定したウェブ13の第1面外変位 w_w と、の差分を2乗したものの和を、第2の2乗和と言う。表2に、第1の2乗和に対する第2の2乗和の比(以下、2乗和比と言う)を表す。

(1)式において、Nは、1, 3, 5, 7, 10, 15と変化させた。この2乗和比が1であると、FEMで推定したウェブ13の第1面外変位 w_w に対する、(126)式で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w の誤差、及び(1)式で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w の誤差が、互いに同等になる。

表2には、後述するy軸方向に非対称となるようにウェブ13が座屈する

場合の結果も併せて載せている。

[0134] [表2]

※2乗和比		
N	圧縮力	曲げモーメント
1	50108	1641.3
3	3552	60.4
5	603	22.7
7	159	15.7
10	55	14.0
15	38	0.4

[0135] 図9に、表2をグラフ化したものを示す。図9において、横軸はNを表し、縦軸は2乗和比を表す。実線による線L10はy軸方向に対称となるようにウェブ13が座屈する場合の結果を表し、点線による線L11はy軸方向に非対称となるようにウェブ13が座屈する場合の結果を表す。

線L10で示すように、Nが大きくなるのに従い2乗和比は小さくなるが、Nを15にしても2乗和比は10以上である。Nを15にしても、(126)式で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w とFEMで推定したウェブ13の第1面外変位 w_w との誤差は、(1)式で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w とFEMで推定したウェブ13の第1面外変位 w_w との誤差よりも小さい。

[0136] (2. 第1面外変位が基準線に対して非対称と推定される場合の第1面外変位の推定)

次に、図10に示すように、ウェブ13のx軸方向の端面13cに外力(たとえば曲げモーメント)F3が作用する場合について説明する。この例では、ウェブ13のy軸方向の端面13bは、x軸方向の全長にわたってそれぞれ固定支持されている。外力(たとえば曲げモーメント)F3は、基準線M1よりも上方でウェブ13を圧縮するように作用する一方で、基準線M1よりも下方でウェブ13を引張るように作用する。このため、y軸のある座標におけるz軸方向に向けた、ウェブ13の第1面外変位 w_w は基準線M1に対してy軸方向に非対称になると推定される。

ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して非対称になると推定される場合とは、例えば、外力によって生じる x 軸方向の垂直応力が基準線M1に対して非対称である場合等である。

[0137] この例についても発明者らは、フーリエ級数よりも少ない項数で、ウェブ13の第1面外変位を推定できる関数を複数検討した。その結果、0以上1以下の座標をとる y 軸に対して、ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w は(143)式により、フーリエ級数よりも少ない項数で推定されることを見出した。 $\cos 2\pi Y^n$ 及び $\sin \pi Y^n$ は、基底となる。(143)式では、第1面外変位 w_w を Y のみの関数として表している。

なお、この場合には、(144)式のように、 Y の値、及びウェブ13の y 軸方向の長さ b_w を用いて表現した値(Y の値と長さ b_w との積)を、 y 軸の座標とする。言い換えれば、(145)式のように、 Y の値は、 y 軸の座標を長さ b_w を用いて(y 軸の座標を長さ b_w で除して)無次元化した値である。

[0138] [数48]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos 2\pi Y^n + b_n \sin \pi Y^n) \quad \cdots (143)$$

$$y = b_w Y \quad \cdots (144)$$

$$Y = \frac{y}{b_w} \quad \cdots (145)$$

[0139] ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w が基準線M1に対して y 軸方向に非対称になる、と第1変位推定部52が推定した場合に、第1変位推定部52は、ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w を(143)式により推定する。 y 軸の座標が y_0 であるウェブ13の部分の z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w は、(143)式の Y に(y_0/b_w)の値を代入したときの第1面外変位 w_w の値として得られる。

(143)式を用いてウェブ13の Y のある値における z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w を実際に推定するには、以下のような手順で推定することが

好ましい。すなわち、(143)式に(122)式を代入して得られる(146)式により、ウェブ13のy軸のある座標におけるz軸方向に向けた第1面外変位 w_w を推定する。

[0140] [数49]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi y^n}{b_w} + b_n \sin \frac{\pi y^n}{b_w} \right) \quad \cdot \cdot (146)$$

[0141] なお、前記の推定を推定装置50を操作する操作者が行い、その推定した結果を推定装置50に入力してもよい。

[0142] ウェブ13のy軸のある座標におけるz軸方向に向けた第1面外変位 w_w の推定に(146)式を適用する際には、(146)式においてNが2であるとした。図10に示すように、ウェブ13のx軸方向の長さが半波長aである部分のウェブ13の全領域における第2面外変位 W_w を、y軸のある座標におけるz軸方向に向けた第1面外変位 w_w を用いることによりy軸及びx軸の関数として表すと、(147)式ようになる。この場合、歪エネルギーUに関して前記(133)式に代えて、(148)式を用い、外力ポテンシャルVに関して前記(134)式に代えて、(149)式を用いる。

[0143] [数50]

$$\begin{aligned} W_w &= \sin \frac{\pi x}{a} \cdot w_w \quad \cdot \cdot (147) \\ U &= \frac{D_w}{2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \\ &\quad + \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \sigma_{cr} t_w \left[\frac{\delta_w}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 \right] dy dx \quad \cdot \cdot (148) \\ V &= - \int_0^{b_w} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \sigma_{cr} b_w t_w \delta_w dy \quad \cdot \cdot (149) \end{aligned}$$

[0144] この場合の座屈応力度 σ_{cr} は、(140)式のように表されるが、定数Aとして(150)式により得られる値を用いる。

[0145] [数51]

$$A = \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdot \cdot (150)$$

[0146] 未定係数 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 、及び半波長aの値は、前述のように、(1

40) 式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数として求められる。これら a_1 , a_2 , b_1 , b_2 、及び半波長 a の値から、ウェブ13の y 軸のある座標における z 軸方向に向けた第1面外変位 w_w を推定した(146)式及び(147)式が具体的に求められる。

(146) 式の精度の評価

図11及び図12に、 y 軸方向に非対称となるようにウェブ13が座屈する場合の、 y 軸の座標によるウェブ13の第1面外変位 w_w の推定結果を表す。この第1面外変位 w_w は、図10の切断線A2-A2の断面における面外変位である。

図11及び図12において、横軸はウェブ13の長さ b_w に対する y 軸の座標を表し、縦軸は推定したウェブ13の第1面外変位 w_w を表す。

図11及び図12において、実線による線L14はFEMによる解析結果を表す。図11において、点線による線L15は本実施形態の(147)式を用いて推定した結果を表す。

[0147] 図12において、点線による線L16は、 N が1の場合の(1)式によるフーリエ級数を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w を推定した結果を表す。同様に、一点鎖線による線L17、二点鎖線による線L18は、 N が5, 15の場合の(1)式によるフーリエ級数を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w を推定した結果を表す。線L18が線L14にほぼ一致しているため、線L18が線L14に重なっている。

(1)式によるフーリエ級数を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w を推定した結果は、 N が大きくなるのに従い、FEMにより推定されたウェブ13の第1面外変位 w_w に一致する。

[0148] 表1に(1)式及び(146)式でウェブ13の第1面外変位 w_w を推定したときのFEMにより推定されたウェブ13の第1面外変位 w_w に対する比の標準偏差比を表し、図8に、表1をグラフ化したものを示す。線L9で示すように、 N が大きくなるのに従い標準偏差比は小さくなるが、 N を15にしても標準偏差比は6程度である。 N が3以上の場合には、 y 軸方向に非対称

となるようにウェブ13が座屈する場合の標準偏差比は、ウェブ13に圧縮力F2が作用する場合の標準偏差比よりも小さい。

[0149] 表2に、(1)式及び(146)式でウェブ13の第1面外変位 w_w を推定したときのFEMにより推定されたウェブ13のy軸のある座標におけるz軸方向に向けた第1面外変位 w_w に対する2乗和比を表す(ただし、(146)式において $N=2$ である。)。図9に、表2をグラフ化したものを示す。線L11で示すように、 N が大きくなるのに従い2乗和比は小さくなり、 N が15のときには2乗和比は1よりも小さくなる。すなわち、(1)式で推定したウェブ13のy軸のある座標におけるz軸方向に向けた第1面外変位 w_w の誤差が(146)式で推定したウェブ13のy軸のある座標におけるz軸方向に向けた第1面外変位 w_w の誤差よりも小さくなる。

なお、FEMにより推定されたウェブ13の第1面外変位 w_w に対して、 N が15のときの(1)式で推定したウェブ13の第1面外変位 w_w の誤差と同等の誤差にするための、(146)式に必要な N は、15よりも小さいことが分かっている。

[0150] 前記ウェブ13単体の第1面外変位 w_w の推定は、フランジ11, 12の厚さが無視できる程度に薄い、フランジ11, 12の剛性が無視できる程度に低い等の場合におけるH形鋼10のウェブ13の第1面外変位 w_w の推定に用いることができる。

なお、本実施形態の変位の推定方法(以下単に推定方法と言う)では、ウェブ13の第1面外変位 w_w を(124)式又は(146)式により推定する第1変位推定工程を行う。(124)式は、第1面外変位 w_w が基準線M1に対してy軸方向に対称と推定される場合に用いられる。(146)式は、第1面外変位 w_w が基準線M1に対してy軸方向に非対称と推定される場合に用いられる。

なお、 y を含む(124)式を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w を推定することと、 Y を含む(11)式を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w を推定することとは、同義である。同様に、 y を含む(146)式を用いてウェブ

ブ13の第1面外変位 w_w を推定することと、Yを含む(143)式を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w を推定することとは、同義である。

[0151] 以上説明したように、本実施形態の推定装置50、推定方法、及び推定プログラム61では、発明者らは、三角関数を用いつつも、フーリエ級数よりも少ない項数で、ウェブ13のy軸のある座標におけるz軸方向に向けた第1面外変位 w_w を推定できる関数を複数検討した。その結果、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して対称な場合には(121)式を用いて、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して非対称な場合には(143)式を用いてウェブ13の第1面外変位 w_w をそれぞれフーリエ級数よりも少ない項数で精度良く推定できることを見出した。

(121)式又は(143)式は、フーリエ級数よりも少ない項数でウェブ13のy軸のある座標におけるz軸方向に向けた第1面外変位 w_w を推定できるため、フーリエ級数を用いた場合よりも推定に必要な計算を簡単に行うことができる。さらに、第1面外変位 w_w を同程度の精度で推定するために必要な項数が、(1)式のフーリエ級数を用いて推定する場合よりも、(121)式又は(143)式を用いて推定する場合の方が少ないため、フーリエ級数を用いた場合よりも推定結果を物理的に理解しやすく定式化することができる。

[0152] また、(121)式又は(143)式においてNは2である。(121)式又は(27)式は半波長aを含まない式であり、(121)式又は(143)式を求めるのに必要な定数が、未定係数 a_1 、 a_2 、 b_1 、及び b_2 の4つ以下である。このため、解の公式が知られている4次以下の方程式を用いて、未定係数 a_1 、 a_2 、 b_1 、及び b_2 の定数を容易に求めることができる。

[0153] なお、本実施形態の推定装置50を用いて、H形鋼10の下フランジ11、上フランジ12、及びウェブ13の第1面外変位 w_w を推定することができる。この場合、フランジ11、12の厚さ(y軸方向の長さ)は、フランジ11、12のx軸方向の長さ及びz軸方向の長さに比べて小さいことが好ましい。

[0154] なお、前記実施形態では、(121)式、(143)式等におけるNは3以上でもよい。

弾性要素であるH形鋼10は鉄鋼で形成されているとしたが、弾性要素を形成する材料は弾性をしていれば鉄鋼に限定されず、木やゴム等でもよい。

[0155] 以下では、本実施形態の推定装置50、推定方法、及び推定プログラム61を用いた、座屈応力度の推定装置50、座屈応力度の推定方法、及び座屈応力度の推定プログラムについての各実施形態を説明する。

[0156] [第2実施形態]

次に、本発明の第2実施形態について図13から図18を参照しながら説明するが、前記実施形態と同一の部位には同一の符号を付してその説明は省略し、異なる点についてのみ説明する。

図13に示す本実施形態の座屈応力度の推定装置（推定装置、以下単に推定装置とも言う）80は、外力として圧縮力が作用して座屈するH形鋼10（図14参照）の座屈応力度を推定するのに用いられる。推定装置80は、第1実施形態の変位の推定装置50を用いてH形鋼10の座屈応力度を推定する。

[0157] 図14に示すように、H形鋼10は、ウェブ板要素13と、第1フランジ板要素11と、第2フランジ板要素12と、を備えている。第1フランジ板要素11、第2フランジ板要素12、及びウェブ板要素13は、それぞれ弾性要素である。図14中には、第1フランジ板要素11に対するxyz座標系 S_{11} 、及びウェブ板要素13に対するxyz座標系 S_{13} を示す。第1フランジ板要素11及び第2フランジ板要素12は、ウェブ板要素13を、ウェブ板要素13のy軸に沿う方向に挟むように配置されている。

本実施形態では、H形鋼10全体が推定対象であり、H形鋼10全体を弾性要素として捉えている。基準線M1は、ウェブ板要素13を基準とした基準線となる。すなわち、基準線M1は、ウェブ板要素13のy軸に沿う方向の長さの中心の位置を通り、ウェブ板要素13のx軸に沿う線となる。

[0158] 図13に、本実施形態の推定装置80を示す。推定装置80は、前記推定

装置50と同様に構成されている。ただし、本実施形態では、補助記憶装置60には、前記コンピュータを推定装置80として機能させるための座屈応力度の推定プログラム（以下、単に推定プログラムと言う）81や、OSプログラム等の各種プログラム等が格納されている。

[0159] また、CPU51は、機能的に、ウェブ板要素13の第2面外変位、及び第1フランジ板要素11、第2フランジ板要素12それぞれの第2面外変位を推定する第2変位推定部82と、H形鋼10の座屈応力度を、ウェブ板要素13の第2面外変位、第1フランジ板要素11、第2フランジ板要素12それぞれの第2面外変位を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部83と、を備えている。CPU51の機能構成要素である第2変位推定部82及び応力度算出部83は、補助記憶装置60に格納されている推定プログラム81等をCPU51が実行することで機能する。第2変位推定部82には、前記第1変位推定部52が含まれている。

推定プログラム81等は、推定装置80用のプログラムである。推定プログラム81は、推定装置80を第2変位推定部82及び応力度算出部83として機能させる。推定プログラム81は、前記推定プログラム61を用いている。

[0160] 本実施形態の推定装置80の第2変位推定部82及び応力度算出部83では、図14に示すように、H形鋼10の位置座標を、 u 軸、 v 軸、及び w 軸で構成する右手系の直交座標系（以下、 uvw 座標系とも言う）に基づいて認識する。これは、後述する第4実施形態及び第6実施形態においても同様である。第6実施形態で v 軸の原点が第2実施形態とは異なること以外、第4実施形態及び第6実施形態の uvw 座標系の規定は、第2実施形態の uvw 座標系の規定と同一である。

なお、図14及び後述する図16では、ウェブ板要素13等の第2面外変位を推定値よりも大きく示している。図14では、H形鋼10が座屈している状態を示している。

v 軸は、ウェブ板要素13の xyz 座標系 S_{13} の y 軸に沿う方向の軸と規

定される。w軸は、ウェブ板要素13のxyz座標系 S_{13} におけるz軸に沿う方向の軸と規定される。u軸は、v軸及びw軸にそれぞれ直交する。u軸は、ウェブ板要素13のxyz座標系 S_{13} におけるx軸に沿う方向の軸と規定される。

ウェブ板要素13の第2面外変位は、ウェブ板要素13のxyz座標系 S_{13} のz軸方向(w軸方向)に向けた変位である。

[0161] 第1フランジ板要素11、第2フランジ板要素12の第2面外変位は、それぞれのxyz座標系のz軸方向(v軸方向)に向けた変位である。

H形鋼10は、u軸方向に十分長いとする。ここで言うH形鋼10がu軸方向に十分長いとは、H形鋼10のu軸方向の各端に配置されv軸方向に延びる表面(以下、u軸方向の端面と言う)10aの境界条件が、座屈変形に与える影響を無視できる程度の長さをH形鋼10が有していることを意味する。

[0162] H形鋼10のu軸方向の端面10aにそれぞれu軸方向に圧縮力F6が作用すると、H形鋼10が座屈する場合がある。なお、圧縮力F6は、H形鋼10のu軸方向の全長さにわたって伝達される。本実施形態では、例えば圧縮力F6は、各端面10aのv軸方向の全長にわたって作用する等分布応力である。

H形鋼10のu軸方向の各端面10aに作用する圧縮力F6は、互い等しい大きさの外力である。

[0163] この場合、ウェブ板要素13のu軸方向の第1端(u軸方向の端面10aの一方)に向かうに従い、ウェブ板要素13がw軸の正の向き及びw軸の負の向きに交互に変位して、ウェブ板要素13が全体としてu軸方向に波状に変位する。ウェブ板要素13に対応して、フランジ板要素11、12も変位する。

u軸に沿って変位したウェブ板要素13の1波長分において、u軸方向の第1端とは反対の第2端をu軸の原点とし、この第2端からu軸方向の第1端に向かう向きをu軸の正の向きとする。

[0164] 図14及び図15に示すように、 v 軸に沿う方向における第1フランジ板要素11の中心の位置を、 v 軸の原点とする。第1フランジ板要素11から第2フランジ板要素12に向かう向きを、 v 軸の正の向きとする。

w 軸の原点を、ウェブ板要素13の w 軸方向の中心（厚さ方向の中心）とする。 w 軸の正の向きを、 u 軸の正の向き及び v 軸の正の向きに対して、右手系の直交座標系を構成する向きとする。

基準線M1は、ウェブ板要素13の v 軸方向の長さの中心の位置を通り、 u 軸に沿う線となる。

[0165] ここで図15に示すように、H形鋼10の長手方向に直交する断面における寸法を規定する。なお、以下に説明する長さ等の単位には、長さに対しては「m」といった、SI単位が好ましく用いられる。

ウェブ板要素13の厚さ（ w 軸方向の長さ）を、 t_w とする。 v 軸方向における第1フランジ板要素11の中心と第2フランジ板要素12の中心との距離を、 b_w とする（H形鋼10を評価の対象とする、第4実施形態及び第6実施形態においても同様である）。

第1フランジ板要素11の幅（ w 軸方向の長さ）及び第2フランジ板要素12の幅は互いに等しく、第1フランジ板要素11及び第2フランジ板要素12それぞれの幅の半分の値を、 b_f とする。なお、第1フランジ板要素11及び第2フランジ板要素12それぞれの幅を、 B_f とする。

第1フランジ板要素11の厚さ及び第2フランジ板要素12の厚さは互いに等しく、第1フランジ板要素11及び第2フランジ板要素12それぞれの厚さを、 t_f とする。

H形鋼10（ウェブ板要素13、第1、2フランジ板要素11、12）のヤング係数を E とし、H形鋼10のポアソン比を ν とする。

[0166] 本実施形態の推定装置80は、H形鋼10に圧縮力 F_6 が作用して座屈したときの、H形鋼10の座屈応力度を推定する。推定装置80の第2変位推定部82及び応力度算出部83では、H形鋼10の座屈応力度を推定する際に、前記1から3の仮定、及び以下の4Aから6Aの仮定を行っている。

4 A. H形鋼 10 の断面では、曲げに対して平面保持の仮定が成立する。

5 A. H形鋼 10 の材料は、均質であり、等方性を有する。

6 A. H形鋼 10 に外力が作用したときの変位は、フックの法則に従う。

[0167] 図 14 に示すように、H形鋼 10 に圧縮力 F_6 が作用すると、H形鋼 10 のウェブ板要素 13 等が u 軸方向に波状に変位する場合がある。 u 軸方向に波状に変位したウェブ板要素 13 における、 v 軸の座標がある値であったとき、 u 軸のある座標における w 軸方向に向けたウェブ板要素 13 の第 2 面外変位が $\sin(\pi u/a)$ の式で表されると仮定する（仮定 1）。このとき、ウェブ板要素 13 の u 軸方向に波状に変位したウェブ板要素 13 の u 軸方向の波長は、 $2a$ になる。ウェブ板要素 13 の u 軸方向の半波長（波長の半分の長さ）は、 a になる。

図 16 は、H形鋼 10 の u 軸方向の長さが半波長 a である部分の H形鋼 10 の全領域における第 2 面外変位 W_w を示す図である。

[0168] 図 17 に、H形鋼 10 に圧縮力 F_6 が作用したときの状態を実線で示す。

図 17 中に点線で示すのは、H形鋼 10 に圧縮力 F_6 が作用していないときの状態である。

[0169] 従来、圧縮力に対する H形鋼の幅厚比区分では、ウェブ（ウェブ板要素）及びフランジ（フランジ板要素）という板要素間の連成座屈を考慮しておらず、単純な支持条件下にある板要素に関して解明された耐力式に基づいて H形鋼の幅厚比区分が構築されている。

しかし、H形鋼の局部座屈ではウェブ及びフランジが相互に作用しあうため、従来の幅厚比区分では H形鋼の座屈応力度（局部座屈応力度）を精度良く推定できない。H形鋼に圧縮力が作用したときの局部座屈の形状は、ウェブ及びフランジともに複雑な周期的挙動を示す。このため、前記（1）式であらわされるフーリエ級数を（159）式のように表現を変えて用いれば H形鋼の板要素であるウェブ等の第 2 面外変位 W_w を推定することができる（例えば、前記非特許文献 1 参照）。

ただし、 b_w は H形鋼の両フランジにおける厚さ方向の中心間の距離である

。

[0170] [数52]

$$W_w = \sin \frac{\pi u}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi v^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi v^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (159)$$

[0171] このように、ウェブ板要素13に圧縮力F6が作用している場合、従来は(159)式で表されるフーリエ級数を用いてウェブ板要素13の面外変位を推定していた。

発明者らは、三角関数を用いつつも、フーリエ級数よりも少ない項数で、u軸の座標がある値であったとき、v軸のある座標におけるw軸方向に向けたウェブ板要素13の第1面外変位 w_w を推定できる関数を複数検討した。なお、第1面外変位 w_w は、v軸の座標の関数であり、u軸の座標の関数ではない(u軸上のある座標における関数である)。

その結果、H形鋼10に圧縮力F6が作用する場合、u軸の座標がある値であったとき、v軸のある座標におけるw軸方向に向けたウェブ板要素13の第1面外変位 w_w は(160)式により、フーリエ級数よりも少ない項数で推定されることを見出した。ただし、Nは2以上の自然数であり、 a_0 、 a_n 、 b_n は未定係数である。

(160)式は、v軸の座標の累乗関数を用いた三角関数による項を含む。 $\cos(\pi(2v/b_w - 1)^n)$ 及び $\cos(\pi/2 \times (2v/b_w - 1)^n)$ は、基底となる。(160)式は、ウェブ板要素13等の板要素の第1面外変位の推定に好ましく用いることができる。

[0172] [数53]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n \right) \quad \cdot \cdot (160)$$

[0173] なお、本実施形態では、後述するようにH形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線M1に対してv軸方向に対称になると推定されるため、第1面外変位 w_w は前記(121)式により推定される。(160)式は、第1実施形態における(124)式と同一である。(121)式が(160)式のように変形

されるのは、第1実施形態における前記圧縮時における第1面外変位 w_w 式の修正、及び y 軸の v 軸への置き換えによる。

[0174] 一方で、 u 軸の座標が任意の値であったとき、 v 軸のある座標における w 軸方向に向けたウェブ板要素13の第2面外変位 W_w は、(161)式により推定される。

(161)式は、前述のように、ウェブ板要素13における、 v 軸の座標がある値であったとき、 u 軸方向の面外変位が $\sin(\pi u/a)$ の式で表される、という前記仮定1に基づく。

なお、図14の第2面外変位 W_w は、図16の第2面外変位 W_w を u 軸方向に繰り返したものである。図14のウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を推定することと図16のウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を推定することは同義であることから、前記(161)式は図16の第2面外変位 W_w を推定したものである。第2面外変位 W_w は、 v 軸の座標及び u 軸の座標それぞれの関数であり、ウェブ板要素13の座屈応力度を推定する際に用いられる。

なお、(161)式に(160)式を代入すると、(162)式が得られる。(162)式において N が2である場合には、(163)式のように変形できる。

[0175] [数54]

$$\begin{aligned} W_w &= \sin \frac{\pi u}{a} \cdot w_w \quad \cdots (161) \\ W_w &= \sin \frac{\pi u}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdots (162) \\ W_w &= \sin \frac{\pi u}{a} \left(a_0 + a_1 \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right) + b_1 \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right) + a_2 \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^2 + b_2 \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right)^2 \right) \\ &\quad \cdots (163) \end{aligned}$$

[0176] また、第1フランジ板要素11の w 軸の所定の座標における第2面外変位 W_{f1} は(164)式により推定され、第2フランジ板要素12の w 軸の所定の座標における第2面外変位 W_{f2} は(165)式により推定される。

(164)式及び(165)式は、 v 軸の座標の累乗関数を用いた三角関数による項を含む。

[0177]

[数55]

$$W_{f1} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=0} \quad \cdot \cdot (164)$$

$$W_{f2} = w \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=b_w} \quad \cdot \cdot (165)$$

[0178] 例えば、図16のH形鋼10に圧縮力F6が作用する前における、ウェブ板要素13においてu軸の座標が u_0 、v軸の座標が v_0 の部分（以下、第1推定対象部分と言う）のw軸の座標は0である。この第1推定対象部分における第2面外変位 W_w は、(162-1)式により推定される。図16のH形鋼10に圧縮力F6が作用した後における第1推定対象部分のw軸の座標は、0に(162-1)式により推定した第2面外変位 W_w を足した値となる。すなわち、圧縮力F6が作用した後では、第1推定対象部分は、u軸の座標が u_0 、v軸の座標が v_0 、w軸の座標が W_w となる位置に配置されていると推定される。

例えば、図16のH形鋼10に圧縮力F6が作用する前における、第2フランジ板要素12においてu軸の座標が u_0 、w軸の座標が w_0 の部分（以下、第2推定対象部分と言う）のv軸の座標は b_w である。この第2推定対象部分における第2面外変位 W_{f2} は、(165-1)式により推定される。図16のH形鋼10に圧縮力F6が作用した後における第2推定対象部分のv軸の座標は、 b_w に(165-1)式により推定した第2面外変位 W_{f2} を足した値となる。すなわち、圧縮力F6が作用した後では、第2推定対象部分は、u軸の座標が u_0 、v軸の座標が $(b_w + W_{f2})$ 、w軸の座標が w_0 となる位置に配置されていると推定される。

[0179] [数56]

$$W_w = \sin \frac{\pi u_0}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v_0}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v_0}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (162-1)$$

$$W_{f2} = w_0 \frac{\partial W_w}{\partial v} \bigg|_{v=b_w, u=u_0, w=w_0} \quad \cdot \cdot (165-1)$$

[0180] 第2変位推定部82に含まれている第1変位推定部52は、H形鋼10に圧縮力F6が作用したときに、H形鋼10（H形鋼10全体）の第1面外変

位 w_w が基準線 M 1 に対して v 軸方向に対称になると推定する。すなわち、推定プログラム 8 1 では、前記変位の推定プログラム 6 1 により、第 1 変位推定部 5 2 を、H 形鋼 1 0 の第 1 面外変位 w_w が基準線 M 1 に対して v 軸方向に対称になると推定させる。この理由は、H 形鋼 1 0 の形状、拘束条件が基準線 M 1 に対して対称であり、H 形鋼 1 0 に作用する圧縮力 F_6 によって生じる u 軸方向の垂直応力が v 軸方向のいずれの断面においても一様であるためである。

第 2 変位推定部 8 2 は、第 1 変位推定部 5 2 が推定したウェブ板要素 1 3 の第 1 面外変位 w_w を用いて、ウェブ板要素 1 3 の第 2 面外変位 W_w を (1 6 2) 式により推定する。第 2 変位推定部 8 2 は、第 1 変位推定部 5 2 が推定した第 1 フランジ板要素 1 1 及び第 2 フランジ板要素 1 2 それぞれの第 1 面外変位 w_w を用いて、第 1 フランジ板要素 1 1 の第 2 面外変位 W_{f1} を (1 6 4) 式により推定し、第 2 フランジ板要素 1 2 の第 2 面外変位 W_{f2} を (1 6 5) 式により推定する。

[0181] ここで、例えば、第 1 変位推定部 5 2 が推定したウェブ板要素 1 3 の第 1 面外変位 w_w を用いて、ウェブ板要素 1 3 の第 2 面外変位 W_w を (1 6 2) 式により推定するとは、以下の意味である。すなわち、H 形鋼 1 0 の第 1 面外変位 w_w が基準線 M 1 に対して対称になることにより、第 1 変位推定部 5 2 が (1 2 1) 式によりウェブ板要素 1 3 の第 1 面外変位 w_w を推定する。ここに、前記圧縮時における第 1 面外変位 w_w 式の修正、及び仮定 1 を適用し、(1 6 2) 式によりウェブ板要素 1 3 の第 2 面外変位 W_w を推定する。

[0182] 例えば、本実施形態において、第 1 変位推定部 5 2 が推定した第 1 フランジ板要素 1 1 の第 1 面外変位 w_w を用いて、第 1 フランジ板要素 1 1 の第 2 面外変位 W_{f1} を (1 6 4) 式により推定するとは、以下の意味である。すなわち、(1 6 2) 式により推定されたウェブ板要素 1 3 の第 2 面外変位 W_w の $v = 0$ における偏微分に、 w 軸の座標を掛けた値を、第 1 フランジ板要素 1 1 の第 2 面外変位 W_{f1} とする。すなわち、本実施形態では、所定の u 軸の値における第 1 フランジ板要素 1 1 は、前記偏微分の値応じて傾いた直線状であ

る。

エネルギー法に基づいて、座屈変形によりウェブ板要素 1 3 内で生じる歪エネルギー U_w は (1 6 7) 式のように表され、第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の歪エネルギー U_f は (1 6 8) 式のように表される。

[0183] [数57]

$$\begin{aligned}
 U_w &= \frac{D_w}{2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
 &\quad + \int_0^a \int_0^{b_w} \sigma_{cr} t_w \left[\frac{\delta_w}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 \right] dv du \quad \cdots (1 6 7) \\
 U_f &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{D_f}{2} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial w} \right)^2 \right] dw du \right. \\
 &\quad \left. + \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \sigma_{cr} t_f \left[\frac{\delta_{fi}}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 \right] dw du \right\} \quad \cdots (1 6 8)
 \end{aligned}$$

[0184] ただし、ウェブ板要素 1 3 の板剛性 D_w は (1 6 9) 式のように表される。

第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の板剛性 D_f は (1 7 0) 式のように表される。H 形鋼 1 0 の座屈応力度を σ_{cr} とする。

関数 δ_w は、座屈が発生した時のウェブ板要素 1 3 の v 軸のある座標における u 軸方向の変位であり、第 2 フランジ板要素 1 2 の中心に生じる u 軸方向変位を δ として (1 7 1) 式のように表される。

[0185] [数58]

$$\begin{aligned}
 D_w &= \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad \cdots (1 6 9) \\
 D_f &= \frac{Et_f^3}{12(1-\nu^2)} \quad \cdots (1 7 0) \\
 \delta_w &= \delta \quad \cdots (1 7 1)
 \end{aligned}$$

[0186] 関数 δ_{f1} , δ_{f2} は、座屈が発生した時の第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の u 軸方向の変位を表現した関数である。関数 δ_{f1} 及び関数 δ_{f2} は、 δ に等しい。

[0187] また、ウェブ板要素 1 3 の外力ポテンシャルエネルギー V_w は (1 7 8) 式のように表され、第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の外力ポテンシャルエネルギー V_f は (1 7 9) 式のように表される。

[0188]

[数59]

$$\begin{aligned} V_w &= -\sigma_{cr} b_w t_w \delta \quad \cdot \cdot (178) \\ V_f &= -2\sigma_{cr} b_f t_f \delta \quad \cdot \cdot (179) \end{aligned}$$

[0189] H形鋼10の全ポテンシャルエネルギー Π は、ひずみエネルギー及び外力ポテンシャルエネルギーの和として、(180)式のように表される。

[0190] [数60]

$$\Pi = U_w + U_f + V_w + V_f \quad \cdot \cdot (180)$$

[0191] 応力度算出部83は、H形鋼10の座屈応力度 σ_{cr} を、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w 、第1, 2フランジ板要素11, 12の第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び(162)式、(164)式、(165)式を用いてエネルギー法に基づいて求める。すなわち、応力度算出部53は、(181)式から(184)式を用いて、(185)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n 、 b_n 及び半波長 a に基づいて、座屈応力度 σ_{cr} を求める。

[0192] [数61]

$$\begin{aligned} A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 dv du \quad \cdot \cdot (181) \\ B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\ &\quad \cdot \cdot (182) \\ C &= \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 dw du \quad \cdot \cdot (183) \\ D &= \frac{b_f^2}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial w} \right)^2 \right] dw du \\ &\quad \cdot \cdot (184) \\ \sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2}{b_w^2} \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2}{b_f^2} \frac{D}{\frac{t_w}{t_f} A + C} \quad \cdot \cdot (185) \end{aligned}$$

[0193] 具体的には、半波長 a を定数として扱う。この状態で、前記全ポテンシャルエネルギー Π を未定係数 a_n 、 b_n で偏微分した関数が0に等しいことを表す方程式を連立させて、実数である a_n 、 b_n を求める。連立方程式の解となる a_n 、 b_n の組が複数ある場合には、 a_n 、 b_n の複数の組のうち、(185)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える a_n 、 b_n の組に基づいて

(a_n , b_n の組を(185)式に代入して)座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱う。前記 a_n , b_n の組が求められた全ポテンシャルエネルギー Π を半波長 a で偏微分した関数が0に等しいことを表す方程式から、半波長 a を求める。以上のように求められた前記 a_n , b_n の組及び半波長 a に基づいて求められた座屈応力度 σ_{cr} が、求める座屈応力度 σ_{cr} となる。

連立方程式の解となる未定係数 a_n , b_n の組が1つのみの場合には、 a_n , b_n の組が(185)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える場合に、 a_n , b_n の組に基づいて座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱い、前述のように座屈応力度 σ_{cr} を求める。

[0194] ウェブ板要素13の座屈係数 k_w は(188)式、第1, 2フランジ板要素11, 12の座屈係数 k_f は(189)式のようにそれぞれ表される。

[0195] [数62]

$$k_w = \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} \quad \cdots (188)$$

$$k_f = \frac{D}{\frac{t_w}{t_f} A + C} \quad \cdots (189)$$

[0196] なお、本実施形態の座屈応力度の推定方法(以下、単に推定方法とも言う)では、第1実施形態の変位の推定方法を用いて、 u 軸に沿う方向に圧縮力 F_6 が作用して座屈するH形鋼10の座屈応力度 σ_{cr} を推定する。推定方法では、第2変位推定工程と、応力度算出工程と、を行う。

第2変位推定工程では、変位の推定方法の第1変位推定工程が行われる。H形鋼10の形状、拘束条件が基準線M1に対して対称であり、H形鋼10に作用する圧縮力 F_6 によって生じる u 軸方向の垂直応力が v 軸方向のいずれの断面においても一様であるため、第1変位推定工程では、H形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して v 軸方向に対称になると推定される。第2変位推定工程では、第1変位推定工程で推定したウェブ板要素13の第1面外変位 w_w を用いて、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を(162)式により推定する。そして、第1変位推定工程で推定した第1, 2フランジ

板要素 1 1, 1 2 それぞれの第 1 面外変位 w_w を用いて、第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の第 2 面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を (1 6 4) 式、(1 6 5) 式によりそれぞれ推定する。

応力度算出工程では、座屈応力度 σ_{cr} をウェブ板要素 1 3 の第 2 面外変位 W_w 、第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の第 2 面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び (1 6 2) 式、(1 6 4) 式、(1 6 5) 式を用いてエネルギー法に基づいて求める。

[0197] なお、H 形鋼 1 0 に座屈応力度 σ_{cr} が生じるときに H 形鋼 1 0 に作用する圧縮力 F_6 は、梁に関する公知の方程式から求めることができる。H 形鋼 1 0 に作用する圧縮力 F_6 をこの圧縮力 F_6 よりも小さくすることで、H 形鋼 1 0 が座屈するのを抑えることができる。

また、本実施形態の推定装置 8 0、推定方法、及び推定プログラム 8 1 における第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の厚さ t_f 等の寸法の適用範囲は、以下の、適用範囲 1 のようであることが好ましい。

- ・第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の幅厚比 (b_f / t_f) : 2 0 以下
- ・ウェブ板要素 1 3 の幅厚比 (b_w / t_w) : 3 0 0 以下
- ・アスペクト比 (b_w / B_f) : 0. 5 以上 1 0 以下
- ・板厚比 (t_f / t_w) : 0. 5 以上 5. 0 以下

[0198] (座屈応力度の推定精度の評価)

図 1 8 に、本実施形態の推定方法 (推定装置 8 0、推定プログラム 8 1) で推定される座屈応力度と、F E M で推定される座屈応力度と、を比較した結果を示す。 N_y は、H 形鋼 1 0 の降伏軸力を表す。降伏軸力 N_y は、H 形鋼 1 0 の降伏応力 σ_y と、H 形鋼 1 0 の断面積 A との積に等しい。 N_{cr_pre} は、本実施形態の推定方法で推定される H 形鋼 1 0 の弾性座屈耐力を表す。弾性座屈耐力 N_{cr_pre} は、本実施形態の推定方法で推定される H 形鋼 1 0 の座屈応力度 σ_{cr} と、断面積 A との積に等しい。 N_{cr_FEM} は、F E M で推定される H 形鋼 1 0 の弾性座屈耐力を表す。弾性座屈耐力 N_{cr_FEM} は、F E M で推定される H 形鋼 1 0 の座屈応力度 σ_{cr_FEM} と、断面積 A との積に等しい。図

18において、横軸は $\sqrt{(N_y / N_{cr_pre})}$ の値を表し、縦軸は (N_{cr_pre} / N_y) 又は (N_{cr_FEM} / N_y) の値を表す。FEM及び本実施形態の推定方法で、様々な諸元のH形鋼10の座屈応力度等を推定した。

[0199] 図18において、○印はFEMで推定された結果、すなわち縦軸を (N_{cr_FEM} / N_y) の値とした結果を表す。○印の横軸には、FEMで解析したH形鋼10と同一の諸元のH形鋼10を本実施形態の推定方法で推定した $\sqrt{(N_y / M_{cr_pre})}$ の値を用いた。曲線は、本実施形態の推定方法で推定された結果、すなわち縦軸を (N_{cr_pre} / N_y) の値とした結果を表す。

[0200] 降伏軸力 N_y は、FEM及び本実施形態の推定方法によらず、材料強度に応じた一定の値となる。本実施形態の推定方法から得られる弾性座屈耐力 N_{cr_pre} とFEMで推定される座屈応力度 σ_{cr_FEM} を比較することで、本実施形態の推定精度を評価することができる。同一の諸元のH形鋼10に対して、FEMで推定した結果及び本実施形態の推定方法で推定した結果は、図18において横軸の値は互いに同一で、縦軸の値が誤差に応じてずれる。

[0201] 図18から、FEMで推定した弾性座屈耐力 N_{cr_FEM} 、及び本実施形態の推定方法で推定した弾性座屈耐力 N_{cr_pre} は、良く対応している。本実施形態の推定方法から推定される弾性座屈耐力 N_{cr_pre} とFEMによって推定される座屈応力度 σ_{cr_FEM} の間には一定の関係があるため、本実施形態の推定方法により座屈応力度 σ_{cr} を推定しても、実用上十分な精度で座屈応力度 σ_{cr} を推定することができる。

[0202] (159)式のフーリエ級数により圧縮力が作用したH形鋼の座屈応力度等を推定しようとした場合、 N を30以上に設定する必要があり、さらに座屈応力度を陽な解で示すことができない。これに対して本実施形態の推定方法では、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を(162)式、第1, 2フランジ板要素11, 12の第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を(164)式、(165)式とした場合、(185)式のように陽な解で座屈応力度 σ_{cr} を算出することができる。

[0203] 以上説明したように、本実施形態の推定装置80、推定方法、及び推定プ

プログラム 81 によれば、圧縮力 F_6 が作用する H 形鋼 10 に対して、(162) 式によりウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w を推定する。(164) 式に示すように、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w を v で一階偏微分した関数の v 軸の座標に 0 を代入した関数に対応して第 1 フランジ板要素 11 の第 2 面外変位 W_{f1} が定まる。そして、(165) 式に示すように、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w を v で一階偏微分した関数の v 軸の座標に b_w を代入した関数に対応して第 2 フランジ板要素 12 の第 2 面外変位 W_{f2} が定まる。

[0204] ウェブ板要素 13 及び第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 の断面諸量及び材料特性に応じて、ウェブ板要素 13 と第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 との間の相互の影響度が変化し、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w 及び第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 の第 2 面外変位 W_{f1} , W_{f2} が定まる。以上のように、H 形鋼 10 の座屈応力度 σ_{cr} を、第 2 面外変位 W_w 、第 2 面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を用いてエネルギー法に基づいて求めることで、ウェブ板要素 13 と第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 との連成座屈を考慮して座屈応力度 σ_{cr} を推定することができる。

[0205] 三角関数を用いても、フーリエ級数よりも少ない項数で、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w 等を推定でき、第 2 面外変位 W_w 等の推定に必要な計算を簡単に行うことができる。

第 2 面外変位 W_w 等を一定の精度で推定するために必要な項数が、(159) 式のフーリエ級数を用いて推定する場合よりも、(162) 式を用いて推定する場合の方が少ないため、第 2 面外変位 W_w 等の推定結果を物理的に理解しやすく定式化することができる。

[0206] 更に加えて、本実施形態の推定装置 80、推定方法、及び推定プログラム 81 には、以下の 1 から 8 の特徴がある。

1. ウェブ板要素 13 の第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 に対する抵抗要素を考慮することで、第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 に対して推定される座屈応力度が上昇し、安全側に評価していた従来の推定方法よりも精度良

く第1, 2フランジ板要素11, 12の座屈応力度を推定することができる。

2. 第1, 2フランジ板要素11, 12のウェブ板要素13に対する抵抗要素を考慮することで、ウェブ板要素13に対して推定される座屈応力度が上昇し、安全側に評価していた従来の推定方法よりも精度良くウェブ板要素13の座屈応力度を推定することができる。

3. 前記1. 及び2. の局部座屈に対する抵抗要素を考慮することで、単純支持条件の基で導出されたH形鋼10全体の座屈応力度に比較して、推定される座屈応力度が上昇する。

4. H形鋼10の局部座屈の挙動が複雑であるため、これまでH形鋼10の局部座屈応力度の式は導出されていなかった。しかし、累乗関数を用いることで、H形鋼10の局部座屈応力度の式を、項数が比較的少ない簡単な式として導出することができる。

[0207] 5. 累乗関数に基づくH形鋼10の局部座屈応力度の式を用いることで、圧縮力F6を受けるH形鋼10の局部座屈応力度を、数値シミュレーションを用いずに推定することができる。

6. 圧縮力F6を受けるH形鋼10の局部座屈応力度の式と、全塑性状態に対する座屈応力度の比率の関係性から、板要素11, 12, 13間の相互作用を考慮した板厚比区分を設定することができる。

7. 板要素11, 12, 13間の相互作用を考慮した幅厚比区分では、従来の幅厚比区分に比較して、ウェブ板要素13の幅厚比が大きい（ウェブ板要素13の厚さに対してウェブ板要素13の幅が広い）範囲も、耐震部材として扱うことができる可能性がある。

8. 板要素11, 12, 13間の相互作用を考慮した幅厚比区分では、従来の推定方法に比較して、単位長さ当たりH形鋼10の質量（鋼重）が小さい部材に置き換えることが可能となり、より安価な建築物を設計することができる。

[0208] また、(162)式においてNは2である。まず(162)式において、

半波長 a を定数として扱った状態で未定係数 a_1 , a_2 , b_1 , 及び b_2 を求め、次に半波長 a を変数として扱い、(162) 式における半波長 a を求める。(162) 式において未定係数 a_1 等を求める際に、一度に求める未定係数の数が4つ以下である。このため、解の公式が知られている4次以下の方程式を用いて a_1 , a_2 , b_1 , 及び b_2 の未定係数を容易に求めることができる。

また、応力度算出部83は(応力度算出工程では)、(181) 式から(184) 式を用いて、(185) 式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n , b_n に基づいて、座屈応力度 σ_{cr} を求める。従って、第2面外変位 W_w 、第2面外変位 W_{f1} , W_{f2} 、及び(162) 式、(164) 式、(165) 式を用いてエネルギー法に基づいて座屈応力度 σ_{cr} を求める際に、数式を用いて座屈応力度 σ_{cr} を正確に求めることができる。

[0209] なお、例えば、前記実施形態では、(162) 式における N は3以上でもよい。

座屈応力度 σ_{cr} をエネルギー法に基づいて求める際には、(181) 式から(185) 式を用いなくてもよい。

[0210] [第3実施形態]

次に、本発明の第3実施形態について図13、図19から図22を参照しながら説明するが、前記実施形態と同一の部位には同一の符号を付してその説明は省略し、異なる点についてのみ説明する。

本実施形態の座屈応力度の推定装置(推定装置、以下単に推定装置とも言う)は、 x 軸方向に、外力として圧縮力が作用して座屈するウェブ(板要素)13の座屈応力度を推定するのに用いられる。推定装置は、第1実施形態の変位の推定装置50を用いてウェブ13の座屈応力度を推定する。

H形鋼10の下フランジ11及び上フランジ12も、板要素である。板要素は、弾性要素である。弾性要素は、材料非線形を考慮しない要素である。

[0211] 図13に、本実施形態の推定装置90を示す。推定装置90は、前記推定装置50と同様に構成されている。ただし、本実施形態では、補助記憶装置

60には、前記コンピュータを推定装置90として機能させるための座屈応力度の推定プログラム（以下、単に推定プログラムと言う）91や、OSプログラム等の各種プログラム等が格納されている。

[0212] また、CPU51は、機能的に、ウェブ13の第2面外変位を推定する第2変位推定部92と、第2面外変位を生じるウェブ13の座屈応力度を、エネルギー法に基づいて求める応力度算出部93と、を備えている。CPU51の機能構成要素である第2変位推定部92及び応力度算出部93は、補助記憶装置60に格納されている推定プログラム91等をCPU51が実行することで機能する。第2変位推定部92には、前記第1変位推定部52が含まれている。

推定プログラム91等は、推定装置90用のプログラムである。推定プログラム91は、推定装置90を第2変位推定部92及び応力度算出部93として機能させる。推定プログラム91は、前記推定プログラム61を用いている。

[0213] 本実施形態の推定装置90の第2変位推定部92及び応力度算出部93では、図19に示すように、ウェブ13の位置座標を、 x 軸、 y 軸、及び z 軸で構成する右手系の直交座標系に基づいて認識する。なお、図19及び後述する図21では、ウェブ13の第2面外変位を推定値よりも大きく示している。

ウェブ13は、 x 軸方向に十分長いとする。ここで言うウェブ13が x 軸方向に十分長いとは、ウェブ13の x 軸方向の端面13aの境界条件が、座屈変形に与える影響を無視できる程度の長さをウェブ13が有していることを意味する。

ウェブ13の第2面外変位は、ウェブ13の z 軸方向に向けた変位である。

[0214] ウェブ13の x 軸方向の端面13aにそれぞれ x 軸方向に圧縮力 F_8 が作用すると、ウェブ13が座屈（局部座屈）する場合がある。この例では、ウェブ13の各端面に作用する圧縮力 F_8 は、ウェブ13の x 軸方向の端面に

y 軸方向の全長にわたって作用する等分布荷重である。ウェブ 13 の各端面に作用する圧縮力 F_8 の大きさは、互いに等しい。

[0215] この場合、ウェブ 13 の x 軸方向の第 1 端 (x 軸方向の端面 13 a の一方) に向かうに従い、z 軸の正の向き及び z 軸の負の向きに交互に波状に変位して、ウェブ 13 が全体として x 軸方向に波状に変位する場合がある。

x 軸に沿って変位したウェブ 13 の 1 波長分において、x 軸方向の第 1 端とは反対の第 2 端を x 軸の原点とし、この第 2 端から x 軸方向の第 1 端に向かう向きを x 軸の正の向きとする。

y 軸の原点を、ウェブ 13 の y 軸方向の下端 (第 1 端) とする。y 軸の正の向きを、上向き (第 1 端から第 2 端に向かう向き) とする。

z 軸の原点を、ウェブ 13 の z 軸方向の中心 (厚さ方向の中心) とする。z 軸の正の向きを、x 軸の正の向き及び y 軸の正の向きに対して、右手系の直交座標系を構成する向きとする。

[0216] ウェブ 13 の y 軸方向の長さ (せい) を b_w とし (ウェブ 13 を評価の対象とする、第 5 実施形態及び第 7 実施形態においても同様である。)、ウェブ 13 の厚さ (z 軸方向の長さ) を t_w とする。ウェブ 13 のヤング係数を E とし、ウェブ 13 のポアソン比を ν とする。

推定装置 90 は、フランジ 11, 12 が連結されていないウェブ 13 に圧縮力 F_8 が作用して座屈したときの、ウェブ 13 の座屈応力度を推定する。なお、推定装置 90 は、H 形鋼 10 において、フランジ 11, 12 の厚さが無視できる程度に薄い、フランジ 11, 12 の剛性が無視できる程度に低い等の場合に、H 形鋼 10 の座屈応力度をウェブ 13 の座屈応力度として推定してもよい。

[0217] 本実施形態の推定装置 90 の第 2 変位推定部 92 及び応力度算出部 93 では、ウェブ 13 の座屈応力度を推定する際に、前記 1 から 6 の仮定を行っている。

[0218] 図 19 に示すように、ウェブ 13 に圧縮力 F_8 が作用すると、ウェブ 13 が x 軸方向に波状に変位する場合がある。x 軸方向に波状に変位したウェブ

13におけるx軸方向の面外変位が $\sin(\pi x/a)$ の式で表されると仮定すると、x軸方向に波状に変位したウェブ13のx軸方向の波長は、 $2a$ になる。x軸方向の半波長（波長の半分の長さ）は、 a になる。

図20は、ウェブ13のx軸方向の中央部におけるx軸方向の長さが半波長 a である部分の面外変位を示す図である。

[0219] ウェブ13に圧縮力F8が作用している場合、従来は(159)式で表されるフーリエ級数を用いてx軸上のある座標かつy軸上のある座標におけるz軸方向に向けたウェブ13の第1面外変位 w_w を推定していた。

発明者らは、三角関数を用いつつも、フーリエ級数よりも少ない項数で、x軸上のある座標かつy軸上のある座標におけるz軸方向に向けたウェブ13の第1面外変位 w_w を推定できる関数を複数検討した。なお、第1面外変位 w_w は、y軸の座標の関数であり、x軸の座標の関数ではない（x軸上のある座標における関数である）。

その結果、ウェブ13に圧縮力F8が作用する場合、x軸上のある座標かつy軸上のある座標におけるz軸方向に向けたウェブ13の第1面外変位 w_w は(196)式により、フーリエ級数よりも少ない項数で推定されることを見出した。ただし、 N は2以上の自然数であり、 a_0 、 a_n 、 b_n は未定係数である。

(196)式は、y軸の座標の累乗関数を用いた三角関数による項を含む。 $\cos(\pi(2y/b_w - 1)^n)$ 及び $\cos(\pi/2 \times (2y/b_w - 1)^n)$ は、基底となる。(196)式は、ウェブ13等の板要素の面外変形の推定に好ましく用いることができる。

[0220] [数63]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n \right) \quad \cdots (196)$$

[0221] 一方で、x軸上の任意の座標かつy軸上のある座標におけるz軸方向に向けたウェブ13の第2面外変位 W_w は、(198)式により推定される。(198)式は、前述のように、ウェブ13におけるx軸上のある座標における

z 軸方向に向けた面外変位が $\sin(\pi x/a)$ の式で表される、という仮定に基づく。第2面外変位 W_w は、y 軸の座標及び x 軸の座標それぞれの関数であり、ウェブ13の座屈応力度を推定する際に用いられる。なお、図19の第2面外変位 W_w は、図20の第2面外変位 W_w を x 軸方向に繰り返したものである。図19のウェブ13の座屈応力度を推定することと図20のウェブ13の座屈応力度を推定することは同義であることから、前記(198)式は図20の第2面外変位 W_w を推定したものである。

なお、(198)式に(196)式を代入すると、(199)式が得られる。(199)式においてNが2である場合には、(200)式のように変形できる。

[0222] [数64]

$$\begin{aligned}
 W_w &= \sin \frac{\pi x}{a} \cdot w_w \quad \cdots (198) \\
 W_w &= \sin \frac{\pi x}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdots (199) \\
 W_w &= \sin \frac{\pi x}{a} \left(a_0 + a_1 \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) + b_1 \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) + a_2 \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^2 + b_2 \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right)^2 \right) \\
 &\quad \cdots (200)
 \end{aligned}$$

[0223] 例えば、図20のウェブ13に圧縮力F8が作用する前における、ウェブ13においてx軸の座標が x_0 、y軸の座標が y_0 の部分（以下、推定対象部分と言う）のz軸の座標は0である。ウェブ13に圧縮力F8が作用した後において、この推定対象部分における第2面外変位 W_w は、(199-1)式により推定され、このときのz軸の座標は、0に(199-1)式により推定した第2面外変位 W_w を足した値となる。すなわち、圧縮力F8が作用した後では、推定対象部分は、x軸の座標が x_0 、y軸の座標が y_0 、z軸の座標が W_w となる位置に配置されていると推定される。

[0224] [数65]

$$W_w = \sin \frac{\pi x_0}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y_0}{b_w} - 1 \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y_0}{b_w} - 1 \right)^n \right) \right] \quad \cdots (199-1)$$

[0225] 第2変位推定部92に含まれている第1変位推定部52は、ウェブ13に圧縮力F8が作用したときに、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線M1に

対して y 軸方向に対称になると推定する。すなわち、推定プログラム 9 1 では、前記変位の推定プログラム 6 1 により、第 1 変位推定部 5 2 を、ウェブ 1 3 の第 1 面外変位 w_w が基準線 M 1 に対して y 軸方向に対称になると推定させる。この理由は、ウェブ 1 3 の形状、拘束条件が基準線 M 1 に対して対称であり、ウェブ 1 3 に作用する圧縮力 F 8 によって生じる x 軸方向の垂直応力が y 軸方向のいずれの断面においても一様であるためである。

第 2 変位推定部 9 2 は、第 1 変位推定部 5 2 が推定した第 1 面外変位 w_w を用いて、ウェブ 1 3 の第 2 面外変位 W_w を (199) 式により推定する。

ここで、第 1 変位推定部 5 2 が推定した第 1 面外変位 w_w を用いて、ウェブ 1 3 の第 2 面外変位 W_w を (199) 式により推定するとは、以下の意味である。すなわち、第 1 変位推定部 5 2 が、(121) 式により第 1 面外変位 w_w を推定する。第 2 変位推定部 9 2 は、この第 1 面外変位 w_w に対して前記理由 1 及び仮定 1 を適用した (199) 式により第 2 面外変位 W_w を推定する。

[0226] ウェブ 1 3 は、x 軸の座標が 0 以上 a 以下という閉区間に配置され、y 軸の座標が 0 以上 b_w 以下という閉区間に配置されている。このとき、座屈変形によりウェブ 1 3 内で生じる歪エネルギー U は (201) 式で表され、圧縮力 F 8 により与えられる外力ポテンシャル V は (202) 式で表される。

全ポテンシャルエネルギー Π は、歪エネルギー U と外力ポテンシャル V との和として、(203) 式で表される。

[0227] [数66]

$$U = \frac{D_w}{2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx$$

$$+ \int_0^a \int_0^{b_w} \sigma_w t_w \left[\frac{\delta_w}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 \right] dy dx \quad \cdot \cdot (201)$$

$$V = -\sigma_w b_w t_w \delta_w \quad \cdot \cdot (202)$$

$$\Pi = U + V \quad \cdot \cdot (203)$$

[0228] ここで、 D_w はウェブ 1 3 の板剛性であり、(205) 式で表される。 σ_w は圧縮力 F 8 が作用するウェブ 1 3 の応力関数であり、(206) 式で表される。ただし、 σ_{cr} はウェブ 1 3 の座屈応力度であり、圧縮を正とする。関数 δ_w は、座屈が発生した時のウェブ 1 3 の x 軸方向の変形を表現した関数で

あり、(207)式で表される。ただし、 δ はウェブ13のx軸方向の変位である。

例えば、 $(\partial^2 W_w / \partial x^2)$ は W_w をxにより二階偏微分した関数を意味し、 $(\partial^2 W_w / (\partial x \partial y))$ は W_w をx, yによりそれぞれ一階偏微分した関数を意味する。

[0229] [数67]

$$\begin{aligned} D_w &= \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad \cdot \cdot (205) \\ \sigma_w &= \sigma_{cr} \quad \cdot \cdot (206) \\ \delta_w &= \delta \quad \cdot \cdot (207) \end{aligned}$$

[0230] 応力度算出部93は、ウェブ13の座屈応力度 σ_{cr} を、(199)式を用いてエネルギー法に基づいて求める。応力度算出部93は、ウェブ13の座屈応力度 σ_{cr} を、(210)式及び(211)式を用いて、(212)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n , b_n 及び半波長 a に基づいて、座屈応力度 σ_{cr} を求める。

ただし、座屈係数 k は、(213)式により求められる。

[0231] [数68]

$$\begin{aligned} A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdot \cdot (210) \\ B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \\ &\quad \cdot \cdot (211) \\ \sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (212) \\ k &= \frac{B}{A} \quad \cdot \cdot (213) \end{aligned}$$

[0232] 具体的には、半波長 a を定数として扱う。この状態で、前記全ポテンシャルエネルギー Π を未定係数 a_n , b_n で偏微分した関数が0に等しいことを表す方程式を連立させて、実数である a_n , b_n を求める。連立方程式の解となる a_n , b_n の組が複数ある場合には、 a_n , b_n の複数の組のうち、(212)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える a_n , b_n の組に基づいて(a_n , b_n の組を(212)式に代入して)座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱う。前記 a_n , b_n の組が求められた全ポテンシャル

ルエネルギー Π を半波長 a で偏微分した関数が0に等しいことを表す方程式から、半波長 a を求める。以上のように求められた前記 a_n 、 b_n の組及び半波長 a に基づいて求められた座屈応力度 σ_{cr} が、求める座屈応力度 σ_{cr} となる。

連立方程式の解となる未定係数 a_n 、 b_n の組が1つのみの場合には、 a_n 、 b_n の組が(212)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える場合に、 a_n 、 b_n の組に基づいて座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱い、前述のように座屈応力度 σ_{cr} を求める。

[0233] なお、本実施形態の座屈応力度の推定方法（以下、単に推定方法とも言う）では、第1実施形態の変位の推定方法を用いて、 x 軸に沿う方向に圧縮力 F_8 が作用して座屈するウェブ13の座屈応力度 σ_{cr} を推定する。推定方法では、ウェブ13の第2面外変位 W_w を(199)式により推定する第2変位推定工程と、ウェブ13の座屈応力度 σ_{cr} を、エネルギー法に基づいて求める応力度算出工程と、を行う。

第2変位推定工程では、変位の推定方法の第1変位推定工程が行われる。ウェブ13の形状、拘束条件、及びウェブ13に作用する圧縮力 F_8 全てが基準線 M_1 に対して対称であるため、第1変位推定工程では、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線 M_1 に対して y 軸方向に対称になると推定される。第2変位推定工程では、ウェブ13の第2面外変位 W_w を(199)により推定する。

応力度算出工程では、ウェブ13の座屈応力度 σ_{cr} を、(199)式を用いてエネルギー法に基づいて求める。

[0234] ウェブ13に座屈応力度 σ_{cr} が生じるときにウェブ13に作用する圧縮力 F_8 は、板要素に関する公知の方程式から求めることができる。ウェブ13に作用する圧縮力 F_8 をこの圧縮力 F_8 よりも小さくすることで、ウェブ13が座屈するのを抑えることができる。

[0235] (面外変位及び座屈応力度の推定精度の評価)
(面外変位による比較)

図 2 1 に、ウェブ 1 3 に圧縮力 F_8 が作用する場合の、 y 軸の座標によるウェブ 1 3 の第 2 面外変位 W_w の推定結果を表す。ウェブ 1 3 の y 軸方向の端面 1 3 b は、固定支持（回転不能に支持、剛接合）されているとした。この第 2 面外変位 W_w は、図 2 0 の切断線 A 7 - A 7 の断面における面外変位である。

図 2 1 において、横軸はウェブ 1 3 の長さ b_w に対する y 軸の座標を表し、縦軸は推定したウェブ 1 3 の第 2 面外変位 W_w を表す。横軸の 0 はウェブ 1 3 の下端を表し、横軸の 1 はウェブ 1 3 の上端を表す。縦軸において、第 2 面外変位 W_w の値は、第 2 面外変位 W_w の最大値により無次元化している。

[0236] 図 2 1 において、実線による線 L 2 1 は F E M による解析結果を表す。点線による線 L 2 2 は本実施形態の (1 9 9) 式を用いて推定した結果（ただし N は 2）を表し、一点鎖線による線 L 2 3 は (1 5 9) 式を用いて推定した結果（ただし N は 1 5）を表す。線 L 2 2 及び線 L 2 3 が線 L 2 1 にほぼ一致しているため、線 L 2 2 及び線 L 2 3 が線 L 2 1 に重なっている。

F E M による解析結果を、(1 5 9) 式のフーリエ級数で N が 1 5 の場合と同程度の精度で近似するのに必要な、本実施形態の (1 9 9) 式における N は、2 であることが分かった。

[0237] （座屈応力度による比較）

ウェブ 1 3 の座屈応力度 σ_{cr} を、(1 5 9) 式、本実施形態の (1 9 9) 式で求め、座屈係数で比較した結果を、表 3 及び図 2 2 に示す。

[0238]

[表3]

	N	ウェブのy軸方向の端面 の支持方法	
		単純支持	固定支持
実施形態 :(199)式	2	4.000	6.975
フーリエ級数 :(159)式	4	8.410	30.451
	5	6.250	20.806
	7	4.530	12.488
	9	4.045	9.205
	11	4.000	7.754
	13	4.000	7.154
	15	4.000	7.012
	20	4.000	7.011
	25	4.000	7.010

[0239] 本実施形態の(199)式を用いた場合には、Nを2にした。一方、比較例である(159)式のフーリエ級数を用いた場合には、Nを4, 5, 7, …, 25と変化させた。

表3において、ウェブ13のy軸方向の端面13bが単純支持の場合の座屈係数は、第2面外変位 W_w 及び座屈応力度 σ_{cr} の推定精度が高くなるのに従い、4.0に収束する(図22中の線L26参照)。ウェブ13のy軸方向の端面13bが固定支持の場合の座屈係数は、第2面外変位 W_w 及び座屈応力度 σ_{cr} の推定精度が高くなるのに従い、6.98に収束する(図22中の線L27参照)。

[0240] 図22において、横軸はNを表し、縦軸は座屈係数kを表す。白抜きの丸印は、本実施形態の(199)式を用いた単純支持の場合の推定結果を表す。黒塗り丸印は、(159)式のフーリエ級数を用いた単純支持の場合の推定結果を表す。白抜きの四角印は、本実施形態の(199)式を用いた固定支持の場合の推定結果を表す。黒塗り四角印は、(159)式のフーリエ級数を用いた固定支持の場合の推定結果を表す。

本実施形態の(199)式を用いて座屈係数kを評価した場合の精度は、単純支持及び固定支持のいずれにおいても、(159)式のフーリエ級数で

Nが15の場合の精度と同程度であることが分かった。

[0241] 以上説明したように、本実施形態の推定装置90、推定方法、及び推定プログラム91によれば、発明者らは、三角関数を用いつつも、(159)式のフーリエ級数よりも少ない項数で、圧縮力F8が作用するウェブ13の面外変位を推定できる関数を複数検討した。その結果、(199)式を用いてウェブ13の第2面外変位 W_w をフーリエ級数よりも少ない項数で推定できることを見出した。

(199)式は、(159)式のフーリエ級数よりも少ない項数でウェブ13の第2面外変位 W_w を推定できるため、フーリエ級数を用いた場合よりも推定に必要な計算を簡単に行うことができる。さらに、第2面外変位 W_w を一定の精度で推定するために必要な項数が、(159)式のフーリエ級数を用いて推定する場合よりも、(199)式を用いて推定する場合の方が少ないため、フーリエ級数を用いた場合よりも推定結果を物理的に理解しやすく定式化することができる。

[0242] (199)式を用いることで、ウェブ13の第2面外変位 W_w を素早く近似することができる。すなわち、面内曲げを受ける建築物の部材や部材を構成する板要素が局部座屈を生じるときの座屈波形を素早く近似することができる。

[0243] また、Nは2である。まず(199)式において、半波長aを定数として扱った状態で未定係数 a_1 、 a_2 、 b_1 、及び b_2 を求め、次に半波長aを変数として扱い、(199)式における半波長aを求める。(199)式において未定係数 a_1 等を求める際に、一度に求める未定係数の数が4つ以下である。このため、解の公式が知られている4次以下の方程式を用いて未定係数 a_1 、 a_2 、 b_1 、及び b_2 等を容易に求めることができる。

また、応力度算出部93は(応力度算出工程では)、(210)式及び(211)式を用いて、(212)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n 、 b_n 及び半波長aに基づいて、座屈応力度 σ_{cr} を求める。エネルギー法に基づいて座屈応力度 σ_{cr} を求める際に、(210)式が

ら（２１２）式の数式を用いて座屈応力度 σ_{cr} を正確に求めることができる。

[0244] なお、前記実施形態では、（１９９）式における N は３以上でもよい。

座屈応力度 σ_{cr} をエネルギー法に基づいて求める際には、（２１０）式から（２１２）式を用いなくてもよい。

前記実施形態では、推定装置９０が板要素であるウェブ１３の座屈応力度を推定するとしたが、板要素はウェブ１３に限定されず、下フランジ１１や上フランジ１２等でもよい。

[0245] 〔第４実施形態〕

次に、本発明の第４実施形態について図１３、図２３から図２６を参照しながら説明するが、前記実施形態と同一の部位には同一の符号を付してその説明は省略し、異なる点についてのみ説明する。

図１３に示す本実施形態の座屈応力度の推定装置（推定装置、以下単に推定装置とも言う）１００は、外力として曲げモーメントが作用して座屈するＨ形鋼１０（図２３参照）の座屈応力度を推定するのに用いられる。推定装置１００は、第１実施形態の変位の推定装置５０を用いてＨ形鋼１０の座屈応力度を推定する。

本実施形態では、図２３に示すＨ形鋼１０全体が推定対象である。基準線 $M1$ は、ウェブ板要素１３を基準とした基準線となる。すなわち、基準線 $M1$ は、ウェブ板要素１３の y 軸方向の長さの中心の位置を通り、ウェブ板要素１３の x 軸に沿う線となる。言い換えれば、基準線 $M1$ は、ウェブ板要素１３の v 軸方向の長さの中心の位置を通り、 u 軸に沿う線となる。

[0246] 図１３に、本実施形態の推定装置１００を示す。推定装置１００は、前記推定装置８０と同様に構成されている。ただし、本実施形態では、補助記憶装置６０には、前記コンピュータを推定装置１００として機能させるための座屈応力度の推定プログラム（以下、単に推定プログラムと言う）１０１や、ＯＳプログラム等の各種プログラム等が格納されている。

[0247] また、ＣＰＵ５１は、機能的に、ウェブ板要素１３の第２面外変位、及び

第1フランジ板要素11、第2フランジ板要素12それぞれの第2面外変位を推定する第2変位推定部102と、H形鋼10の座屈応力度を、ウェブ板要素13の第2面外変位、第1フランジ板要素11、第2フランジ板要素12それぞれの第2面外変位を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部103と、を備えている。CPU51の機能構成要素である第2変位推定部102及び応力度算出部103は、補助記憶装置60に格納されている推定プログラム101等をCPU51が実行することで機能する。第2変位推定部102には、前記第1変位推定部52が含まれている。

推定プログラム101等は、推定装置100用のプログラムである。推定プログラム101は、推定装置100を第2変位推定部102及び応力度算出部103として機能させる。推定プログラム101は、前記推定プログラム61を用いている。

[0248] 本実施形態の推定装置100の第2変位推定部102及び応力度算出部103では、図23に示すように、H形鋼10の位置座標をuvw座標系に基づいて認識する。なお、図23及び後述する図25では、ウェブ板要素13等の第2面外変位を推定値よりも大きく示している。図23では、H形鋼10が座屈している状態を示している。

[0249] H形鋼10のu軸方向の端面10aにそれぞれw軸回りの曲げモーメントF11が作用すると、H形鋼10が座屈する場合がある。なお、曲げモーメントF11は、H形鋼10のu軸方向の全長さにわたって伝達される。伝達された曲げモーメントF11は、H形鋼10の中立軸を通りw軸に平行な軸線（以下、曲げモーメントF11の回転軸と言う）回りに作用する。

H形鋼10のu軸方向の各端面10aに作用する曲げモーメントF11は、互い等しい大きさの外力である。この例では、第1フランジ板要素11が曲げモーメントF11により引張力を受け、第2フランジ板要素12が曲げモーメントF11により圧縮力を受け、H形鋼10が下方に向かって凸となって曲がるように、H形鋼10に曲げモーメントF11が作用している。

[0250] この場合、ウェブ板要素13のu軸方向の第1端（u軸方向の端面10a

の一方)に向かうに従い、ウェブ板要素13が w 軸の正の向き及び w 軸の負の向きに交互に変位して、ウェブ板要素13が全体として u 軸方向に波状に変位する。ウェブ板要素13に対応して、圧縮力を受ける第2フランジ板要素12が波状に変位するが、引張力を受ける第1フランジ板要素11はほとんど変位しない。

u 軸に沿って変位したウェブ板要素13の1波長分において、 u 軸方向の第1端とは反対の第2端を u 軸の原点とし、この第2端から u 軸方向の第1端に向かう向きを u 軸の正の向きとする。

[0251] 本実施形態の推定装置100は、H形鋼10に曲げモーメント F_{11} が作用して座屈したときの、H形鋼10の座屈応力度を推定する。推定装置50の第2変位推定部102及び応力度算出部103では、H形鋼10の座屈応力度を推定する際に、前記1から3の仮定、及び4Aから6Aの仮定を行っている。

[0252] 図23に示すように、H形鋼10に曲げモーメント F_{11} が作用すると、H形鋼10のウェブ板要素13等が u 軸方向に波状に変位する場合がある。このときに、第2実施形態と同一の仮定1を行う。

図24は、H形鋼10の u 軸方向の長さが半波長 a である部分のH形鋼10の全領域における第2面外変位 W_w を示す図である。

[0253] 図25に、H形鋼10に曲げモーメント F_{11} が作用したときの状態を実線で示す。図25中に点線で示すのは、H形鋼10に曲げモーメント F_{11} が作用していないときの状態である。

[0254] ウェブ板要素13に曲げモーメント F_{11} が作用している場合、従来は(159)式で表されるフーリエ級数を用いてウェブ板要素13の面外変位を推定していた。

発明者らは、三角関数を用いつつも、フーリエ級数よりも少ない項数で、 u 軸の座標がある値であったとき、 v 軸のある座標における w 軸方向に向けたウェブ板要素13の第1面外変位 w_w を推定できる関数を複数検討した。

その結果、H形鋼10に曲げモーメント F_{11} が作用する場合、 u 軸の座

標がある値であったとき、 v 軸のある座標における w 軸方向に向けたウェブ板要素13の第1面外変位 w_w は(220)式により、フーリエ級数よりも少ない項数で推定されることを見出した。ただし、 N は2以上の自然数であり、 a_0 、 a_n 、 b_n は未定係数である。

(220)式は、 v 軸の座標の累乗関数を用いた三角関数による項を含む。 $\cos(2\pi v^n/b_w^n)$ 及び $\sin(\pi v^n/b_w^n)$ は、基底となる。(220)式は、ウェブ板要素13等の板要素の第1面外変位の推定に好ましく用いることができる。

[0255] [数69]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi v^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi v^n}{b_w^n} \right) \quad \cdots (220)$$

[0256] なお、本実施形態では、後述するようにH形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して v 軸方向に非対称になると推定されるため、第1面外変位 w_w は前記(143)式により推定される。(143)式から本実施形態の(220)式は、以下のようにして導かれている。

すなわち、(144)式のように、 Y の値、及びウェブ13の y 軸方向の長さ b_w を用いて表現した値を、 y 軸の座標とする。言い換えれば、(145)式のように、 Y の値は、 y 軸の座標を長さ b_w を用いて無次元化した値(y 軸の座標を長さ b_w で除した値)である。

そして、(143)式に(145)式を代入して得られる(146)式、さらに(146)式の y 軸を v 軸に置き換えた(220)式により、ウェブ13の v 軸のある座標における w 軸方向に向けた第1面外変位 w_w を推定する。

[0257] 一方で、 u 軸の座標が任意の値であったとき、 v 軸のある座標における w 軸方向に向けたウェブ板要素13の第2面外変位 W_w は、(221)式により推定される。

(221)式は、前記仮定1に基づく。

なお、(221)式に(220)式を代入すると、(222)式が得られ

る。(2 2 2) 式において N が 2 である場合には、(2 2 3) 式のように変形できる。

[0258] [数70]

$$\begin{aligned} W_w &= \sin \frac{\pi u}{a} \cdot w_w \quad \cdot \cdot (2 2 1) \\ W_w &= \sin \frac{\pi u}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi v^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi v^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (2 2 2) \\ W_w &= \sin \frac{\pi u}{a} \left(a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi v}{b_w} + b_1 \sin \frac{\pi v}{b_w} + a_2 \cos \frac{2\pi v^2}{b_w^2} + b_2 \sin \frac{\pi v^2}{b_w^2} \right) \quad \cdot \cdot (2 2 3) \end{aligned}$$

[0259] また、第 1 フランジ板要素 1 1 の w 軸の所定の座標における第 2 面外変位 W_{f1} は (2 2 4) 式により推定され、第 2 フランジ板要素 1 2 の w 軸の所定の座標における第 2 面外変位 W_{f2} は (2 2 5) 式により推定される。

(2 2 4) 式及び (2 2 5) 式は、 v 軸の座標の累乗関数を用いた三角関数による項を含む。

[0260] [数71]

$$\begin{aligned} W_{f1} &= w \frac{\partial W_w}{\partial v} \Big|_{v=0} \quad \cdot \cdot (2 2 4) \\ W_{f2} &= w \frac{\partial W_w}{\partial v} \Big|_{v=b_w} \quad \cdot \cdot (2 2 5) \end{aligned}$$

[0261] 例えば、図 2 4 の H 形鋼 1 0 に曲げモーメント F_{11} が作用する前における、ウェブ板要素 1 3 において u 軸の座標が u_0 、 v 軸の座標が v_0 の部分（以下、第 1 推定対象部分と言う）の w 軸の座標は 0 である。この第 1 推定対象部分における第 2 面外変位 W_w は、(2 2 2-1) 式により推定される。図 2 4 の H 形鋼 1 0 に曲げモーメント F_{11} が作用した後における第 1 推定対象部分の w 軸の座標は、0 に (2 2 2-1) 式により推定した第 2 面外変位 W_w を足した値となる。すなわち、曲げモーメント F_{11} が作用した後では、第 1 推定対象部分は、 u 軸の座標が u_0 、 v 軸の座標が v_0 、 w 軸の座標が W_w となる位置に配置されていると推定される。

例えば、図 2 4 の H 形鋼 1 0 に曲げモーメント F_{11} が作用する前における、第 2 フランジ板要素 1 2 において u 軸の座標が u_0 、 w 軸の座標が w_0 の部分（以下、第 2 推定対象部分と言う）の v 軸の座標は b_w である。この第 2

推定対象部分における第2面外変位 W_{f2} は、(225-1)式により推定される。図24のH形鋼10に曲げモーメント F_{11} が作用した後における第2推定対象部分の v 軸の座標は、 b_w に(225-1)式により推定した第2面外変位 W_{f2} を足した値となる。すなわち、曲げモーメント F_{11} が作用した後では、第2推定対象部分は、 u 軸の座標が u_0 、 v 軸の座標が $(b_w + W_{f2})$ 、 w 軸の座標が w_0 となる位置に配置されていると推定される。

[0262] [数72]

$$W_w = \sin \frac{\pi u_0}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi v_0^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi v_0^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (222-1)$$

$$W_{f2} = w_0 \frac{\partial W_w}{\partial v} \Big|_{v=b_w, u=u_0, w=w_0} \quad \cdot \cdot (225-1)$$

[0263] 第2変位推定部102に含まれている第1変位推定部52は、H形鋼10に曲げモーメント F_{11} が作用したときに、H形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して v 軸方向に非対称になると推定する。すなわち、推定プログラム101では、前記変位の推定プログラム61により、第1変位推定部52を、H形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して v 軸方向に非対称になると推定させる。この理由は、H形鋼10に作用する曲げモーメント F_{11} によって生じる u 軸方向の垂直応力が基準線M1に対して非対称であるためである。

第2変位推定部102は、第1変位推定部52が推定したウェブ板要素13の第1面外変位 w_w を用いて、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を(222)式により推定する。第2変位推定部102は、第1変位推定部52が推定した第1フランジ板要素11及び第2フランジ板要素12それぞれの第1面外変位 w_w を用いて、第1フランジ板要素11の第2面外変位 W_{f1} を(224)式により推定し、第2フランジ板要素12の第2面外変位 W_{f2} を(225)式により推定する。

ここで、エネルギー法に基づいて、座屈変形によりウェブ板要素13内で生じる歪エネルギー U_w は(227)式のように表され、第1、2フランジ板要素11、12の歪エネルギー U_f は(228)式のように表される。

[0264] [数73]

$$\begin{aligned}
 U_w &= \frac{D_w}{2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
 &\quad + \int_0^a \int_0^{b_w} \sigma_w t_w \left[\frac{\delta_w}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 \right] dv du \quad \cdot \cdot (227) \\
 U_f &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{D_f}{2} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dw du \right. \\
 &\quad \left. + \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \sigma_{fi} t_f \left[\frac{\delta_{fi}}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 \right] dw du \right\} \quad \cdot \cdot (228)
 \end{aligned}$$

[0265] ただし、ウェブ板要素13の板剛性 D_w は(229)式のように表される。

第1, 2フランジ板要素11, 12の板剛性 D_f は(230)式のように表される。曲げモーメント F_{11} が作用するウェブ板要素13の応力関数 σ_w は、H形鋼10の座屈応力度を σ_{cr} として(231)式のように表される。ただし、応力関数 σ_w は圧縮を正とする。

関数 δ_w は、座屈が発生した時のウェブ板要素13の v 軸のある座標における u 軸方向の変位であり、第2フランジ板要素12の中心に生じる u 軸方向変位を δ として(232)式のように表される。

[0266] [数74]

$$\begin{aligned}
 D_w &= \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad \cdot \cdot (229) \\
 D_f &= \frac{Et_f^3}{12(1-\nu^2)} \quad \cdot \cdot (230) \\
 \sigma_w &= \sigma_{cr} \left(\frac{2\nu}{b_w} - 1 \right) \quad \cdot \cdot (231) \\
 \delta_w &= \delta \left(\frac{2\nu}{b_w} - 1 \right) \quad \cdot \cdot (232)
 \end{aligned}$$

[0267] 応力関数 σ_{f1} , σ_{f2} は、曲げモーメント F_{11} が作用する第1, 2フランジ板要素11, 12それぞれの応力関数である。応力関数 σ_{f1} は $-\sigma_{cr}$ に等しく、応力関数 σ_{f2} は σ_{cr} に等しい。ただし、応力関数 σ_{f1} , σ_{f2} は圧縮を正とする。

関数 δ_{f1} , δ_{f2} は、座屈が発生した時の第1, 2フランジ板要素11, 12の u 軸方向の変位を表現した関数である。関数 δ_{f1} は $-\delta$ に等しく、関数 δ_{f2} は δ に等しい。

[0268] また、ウェブ板要素13の外力ポテンシャルエネルギー V_w は(238)式

のように表され、第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の外力ポテンシャルエネルギー V_f は (2 3 9) 式のように表される。

[0269] [数75]

$$V_w = - \int_0^{b_w} \sigma_w t_w \delta_w dv \quad \cdot \cdot (2 3 8)$$

$$V_f = - \sum_{i=1}^2 \int_{-b_f}^{b_f} \sigma_{fi} t_f \delta_{fi} dw \quad \cdot \cdot (2 3 9)$$

[0270] H 形鋼 1 0 の全ポテンシャルエネルギー Π は、ひずみエネルギー及び外力ポテンシャルエネルギーの和として、(2 4 0) 式のように表される。

[0271] [数76]

$$\Pi = U_w + U_f + V_w + V_f \quad \cdot \cdot (2 4 0)$$

[0272] 応力度算出部 1 0 3 は、H 形鋼 1 0 の座屈応力度 σ_{cr} を、ウェブ板要素 1 3 の第 2 面外変位 W_w 、第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 の第 2 面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び (2 2 2) 式、(2 2 4) 式、(2 2 5) 式を用いてエネルギー法に基づいて求める。すなわち、応力度算出部 1 0 3 は、(2 4 1) 式から (2 4 4) 式を用いて、(2 4 5) 式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n 、 b_n 及び半波長 a に基づいて、座屈応力度 σ_{cr} を求める。

[0273] [数77]

$$A = \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2v}{b_w} - 1 \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right)^2 dv du \quad \cdot \cdot (2 4 1)$$

$$B = \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du$$

$$\quad \cdot \cdot (2 4 2)$$

$$C = \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+1)} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left(\frac{\partial W_{fi}}{\partial u} \right)^2 dw du \quad \cdot \cdot (2 4 3)$$

$$D = \frac{b_f^2}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial w} \right)^2 \right] dw du$$

$$\quad \cdot \cdot (2 4 4)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-v^2)} \frac{t_w^2}{b_w^2} \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} + \frac{\pi^2 E}{12(1-v^2)} \frac{t_f^2}{b_f^2} \frac{D}{A + C} \quad \cdot \cdot (2 4 5)$$

[0274] 具体的には、半波長 a を定数として扱う。この状態で、前記全ポテンシャル

ルエネルギー Π を未定係数 a_n , b_n で偏微分した関数が0に等しいことを表す方程式を連立させて、実数である a_n , b_n を求める。連立方程式の解となる a_n , b_n の組が複数ある場合には、 a_n , b_n の複数の組のうち、(245)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える a_n , b_n の組に基づいて(a_n , b_n の組を(245)式に代入して)座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱う。前記 a_n , b_n の組が求められた全ポテンシャルエネルギー Π を半波長 a で偏微分した関数が0に等しいことを表す方程式から、半波長 a を求める。以上のように求められた前記 a_n , b_n の組及び半波長 a に基づいて求められた座屈応力度 σ_{cr} が、求める座屈応力度 σ_{cr} となる。

連立方程式の解となる未定係数 a_n , b_n の組が1つのみの場合には、 a_n , b_n の組が(245)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える場合に、 a_n , b_n の組に基づいて座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱い、前述のように座屈応力度 σ_{cr} を求める。

[0275] ウェブ板要素13の座屈係数 k_w は(248)式、第1, 2フランジ板要素11, 12の座屈係数 k_f は(249)式のようにそれぞれ表される。

[0276] [数78]

$$k_w = \frac{B}{A + \frac{t_f}{t_w} C} \quad \cdots (248)$$

$$k_f = \frac{D}{\frac{t_w}{t_f} A + C} \quad \cdots (249)$$

[0277] なお、本実施形態の座屈応力度の推定方法(以下、単に推定方法とも言う)では、第1実施形態の変位の推定方法を用いて、 w 軸回りに曲げモーメント F_{11} が作用して座屈するH形鋼10の座屈応力度 σ_{cr} を推定する。推定方法では、第2変位推定工程と、応力度算出工程と、を行う。

第2変位推定工程では、変位の推定方法の第1変位推定工程が行われる。H形鋼10に作用する曲げモーメント F_{11} が基準線 M_1 に対して非対称であるため、第1変位推定工程では、H形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線 M_1 に対して v 軸方向に非対称になると推定される。第2変位推定工程では、

第1変位推定工程で推定したウェブ板要素13の第1面外変位 w_w を用いて、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を(222)式により推定する。そして、第1変位推定工程で推定した第1, 2フランジ板要素11, 12の第1面外変位 w_w を用いて、第1, 2フランジ板要素11, 12の第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を(224)式、(225)式によりそれぞれ推定する。

応力度算出工程では、座屈応力度 σ_{cr} をウェブ板要素13の第2面外変位 W_w 、第1, 2フランジ板要素11, 12の第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び(222)式、(224)式、(225)式を用いてエネルギー法に基づいて求める。

[0278] なお、H形鋼10に座屈応力度 σ_{cr} が生じるときにH形鋼10に作用する曲げモーメント F_{11} は、梁に関する公知の方程式から求めることができる。H形鋼10に作用する曲げモーメント F_{11} をこの曲げモーメント F_{11} よりも小さくすることで、H形鋼10が座屈するのを抑えることができる。

また、本実施形態の推定装置100、推定方法、及び推定プログラム101における第1, 2フランジ板要素11, 12の厚さ t_f 等の寸法の適用範囲は、前記適用範囲1のようであることが好ましい。

[0279] (座屈応力度の推定精度の評価)

図26に、本実施形態の推定方法(推定装置100、推定プログラム101)で推定される座屈応力度と、FEMで推定される座屈応力度と、を比較した結果を示す。 M_p は、H形鋼10の全塑性モーメント(H形鋼10が完全に塑性化したときの曲げモーメント)を表す。 M_{cr_pre} は、本実施形態の推定方法で推定されるH形鋼10の座屈時の曲げモーメントを表す。 M_{cr_FEM} は、FEMで推定されるH形鋼10の座屈時の曲げモーメントを表す。図26において、横軸は $\sqrt{(M_p/M_{cr_pre})}$ の値を表し、縦軸は (M_{cr_pre}/M_p) 又は (M_{cr_FEM}/M_p) の値を表す。FEM及び本実施形態の推定方法で、様々な諸元のH形鋼10の座屈応力度等を推定した。

[0280] 図26において、○印はFEMで推定された結果、すなわち縦軸を (M_{cr_FEM}/M_p) の値とした結果を表す。○印の横軸には、FEMで解析したH形

鋼 10 と同一の諸元の H 形鋼 10 を本実施形態の推定方法で推定した $\sqrt{M_p / M_{cr_pre}}$ の値を用いた。曲線は、本実施形態の推定方法で推定された結果、すなわち縦軸を (M_{cr_pre} / M_p) の値とした結果を表す。

[0281] なお、座屈応力度 σ_{cr} に、H 形鋼 10 の断面係数 Z を掛けると、座屈時の曲げモーメント M_{cr} になる。

全塑性モーメント M_p は、FEM 及び本実施形態の推定方法によらず、材料強度に応じた一定の値となる。本実施形態の推定方法から得られる座屈時の曲げモーメント M_{cr_pre} と FEM で推定される座屈応力度を比較することで、本実施形態の推定精度を評価することができる。同一の諸元の H 形鋼 10 に対して、FEM で推定した結果及び本実施形態の推定方法で推定した結果は、図 26 において横軸の値は互いに同一で、縦軸の値が誤差に応じてずれる。

[0282] 図 26 から、FEM で推定した座屈時の曲げモーメント M_{cr_FEM} 、及び本実施形態の推定方法で推定した座屈時の曲げモーメント M_{cr_pre} は、良く対応している。本実施形態の推定方法から推定される座屈時の曲げモーメント M_{cr_pre} と FEM によって推定される座屈応力度との間には一定の関係があるため、本実施形態の推定方法により座屈応力度 σ_{cr} を推定しても、実用上十分な精度で座屈応力度 σ_{cr} を推定することができる。

[0283] (159) 式のフーリエ級数により曲げモーメントが作用した H 形鋼の座屈応力度等を推定しようとした場合、 N を 30 以上に設定する必要があり、さらに座屈応力度を陽な解で示すことができない。これに対して本実施形態の推定方法では、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w を (222) 式、第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 の第 2 面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を (225) 式、(225) 式とした場合、(245) 式のように陽な解で座屈応力度 σ_{cr} を算出することができる。

[0284] 以上説明したように、本実施形態の推定装置 100、推定方法、及び推定プログラム 101 によれば、曲げモーメント $F11$ が作用する H 形鋼 10 に対して、(222) 式によりウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w を推定する

。(224)式に示すように、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を v で一階偏微分した関数の v 軸の座標に0を代入した関数に対応して第1フランジ板要素11の第2面外変位 W_{f1} が定まる。そして、(225)式に示すように、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を v で一階偏微分した関数の v 軸の座標に b_w を代入した関数に対応して第2フランジ板要素12の第2面外変位 W_{f2} が定まる。

[0285] ウェブ板要素13及び第1, 2フランジ板要素11, 12の断面諸量及び材料特性に応じて、ウェブ板要素13と第1, 2フランジ板要素11, 12との間の相互の影響度が変化し、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w 及び第1, 2フランジ板要素11, 12の第2面外変位 W_{f1} , W_{f2} が定まる。以上のように、H形鋼10の座屈応力度 σ_{cr} を、第2面外変位 W_w 、第2面外変位 W_{f1} , W_{f2} を用いてエネルギー法に基づいて求めることで、ウェブ板要素13と第1, 2フランジ板要素11, 12との連成座屈を考慮して座屈応力度 σ_{cr} を推定することができる。

[0286] 三角関数を用いても、フーリエ級数よりも少ない項数で、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w 等を推定でき、第2面外変位 W_w 等の推定に必要な計算を簡単に行うことができる。

第2面外変位 W_w 等を一定の精度で推定するために必要な項数が、(159)式のフーリエ級数を用いて推定する場合よりも、(222)式を用いて推定する場合の方が少ないため、第2面外変位 W_w 等の推定結果を物理的に理解しやすく定式化することができる。

[0287] 更に加えて、本実施形態の推定装置100、推定方法、及び推定プログラム101には、前記1から4, 7, 8の特徴、及び以下の5A, 6Aの特徴がある。

5A. 累乗関数に基づくH形鋼10の局部座屈応力度の式を用いることで、 w 軸回りに曲げモーメント $F11$ を受けるH形鋼10の局部座屈応力度を、数値シミュレーションを用いずに推定することができる。

6A. 曲げモーメント $F11$ を受けるH形鋼10の局部座屈応力度の式と、

全塑性状態に対する座屈応力度の比率の関係性から、板要素 1 1, 1 2, 1 3 間の相互作用を考慮した板厚比区分を設定することができる。

[0288] また、(2 2 2) 式において N は 2 である。まず (2 2 2) 式において、半波長 a を定数として扱った状態で未定係数 a_1 , a_2 , b_1 , 及び b_2 を求め、次に半波長 a を変数として扱い、(2 2 2) 式における半波長 a を求める。(2 2 2) 式において未定係数 a_1 等を求める際に、一度に求める未定係数の数が 4 つ以下である。このため、解の公式が知られている 4 次以下の方程式を用いて a_1 , a_2 , b_1 , 及び b_2 の未定係数を容易に求めることができる。

また、応力度算出部 1 0 3 は (応力度算出工程では)、(2 4 1) 式から (2 4 4) 式を用いて、(2 4 5) 式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n , b_n に基づいて、座屈応力度 σ_{cr} を求める。従って、第 2 面外変位 W_w 、第 2 面外変位 W_{f1} , W_{f2} 、及び (2 2 2) 式、(2 2 4) 式、(2 2 5) 式を用いてエネルギー法に基づいて座屈応力度 σ_{cr} を求める際に、数式を用いて座屈応力度 σ_{cr} を正確に求めることができる。

[0289] なお、例えば、前記実施形態では、(2 2 2) 式における N は 3 以上でもよい。

座屈応力度 σ_{cr} をエネルギー法に基づいて求める際には、(2 4 1) 式から (2 4 5) 式を用いなくてもよい。

[0290] [第 5 実施形態]

次に、本発明の第 5 実施形態について図 1 3、図 2 7 から図 3 0 を参照しながら説明するが、前記実施形態と同一の部位には同一の符号を付してその説明は省略し、異なる点についてのみ説明する。

本実施形態の座屈応力度の推定装置 (推定装置、以下単に推定装置とも言う) は、 z 軸回りに、外力として曲げモーメントが作用して座屈するウェブ (板要素) 1 3 の座屈応力度を推定するのに用いられる。推定装置は、第 1 実施形態の変位の推定装置 5 0 を用いてウェブ 1 3 の座屈応力度を推定する。

[0291] 図13に、本実施形態の推定装置110を示す。推定装置110は、前記推定装置50と同様に構成されている。ただし、本実施形態では、補助記憶装置60には、前記コンピュータを推定装置110として機能させるための座屈応力度の推定プログラム（以下、単に推定プログラムと言う）111や、OSプログラム等の各種プログラム等が格納されている。

[0292] また、CPU51は、機能的に、ウェブ13の第2面外変位を推定する第2変位推定部112と、第2面外変位を生じるウェブ13の座屈応力度を、エネルギー法に基づいて求める応力度算出部113と、を備えている。CPU51の機能構成要素である第2変位推定部112及び応力度算出部113は、補助記憶装置60に格納されている推定プログラム111等をCPU51が実行することで機能する。第2変位推定部112には、前記第1変位推定部52が含まれている。

推定プログラム111等は、推定装置110用のプログラムである。推定プログラム111は、推定装置110を第2変位推定部112及び応力度算出部113として機能させる。推定プログラム111は、前記推定プログラム61を用いている。

[0293] 本実施形態の推定装置110の第2変位推定部112及び応力度算出部113では、図27に示すように、ウェブ13の位置座標を、 x 軸、 y 軸、及び z 軸で構成する右手系の直交座標系に基づいて認識する。なお、図27及び後述する図29では、ウェブ13の面外変位を推定値よりも大きく示している。

ウェブ13は、 x 軸方向に十分長いとする。

[0294] ウェブ13の x 軸方向の端面13aにそれぞれ z 軸回りの曲げモーメント F_{13} が作用すると、ウェブ13が座屈（局部座屈）する場合がある。なお、曲げモーメント F_{13} は、ウェブ13の x 軸方向の全長さにわたって伝達される。伝達された曲げモーメント F_{13} は、ウェブ13の中立軸を通り z 軸に平行な軸線（以下、曲げモーメント F_{13} の回転軸と言う）回りに作用する。なお、中立軸は、曲げモーメント F_{13} によりウェブ13に作用する

引張力と圧縮力とが釣り合うウェブ13のy軸方向の位置に生じる。

ウェブ13のx軸方向の各端面13aに作用する曲げモーメントF13は、互い等しい大きさの外力である。この例では、ウェブ13の下端に引張応力がウェブ13の上端に圧縮応力が作用して、ウェブ13が下方に向かって凸となって曲がるようにウェブ13に曲げモーメントF13が作用している。

[0295] この場合、ウェブ13のx軸方向の第1端に向かうに従い、z軸の正の向き及びz軸の負の向きに交互に波状に変位して、ウェブ13が全体としてx軸方向に波状に変位する場合がある。

推定装置110は、フランジ11, 12が連結されていないウェブ13に曲げモーメントF13が作用して座屈したときの、ウェブ13の座屈応力度を推定する。なお、推定装置110は、H形鋼10において、フランジ11, 12の厚さが無視できる程度に薄い、フランジ11, 12の剛性が無視できる程度に低い等の場合に、H形鋼10の座屈応力度をウェブ13の座屈応力度として推定してもよい。

[0296] 本実施形態の推定装置110の第2変位推定部112及び応力度算出部113では、ウェブ13の座屈応力度を推定する際に、前記1から6の仮定を行っている。

[0297] 図27に示すように、ウェブ13に曲げモーメントF13が作用すると、ウェブ13がx軸方向に波状に変位する場合がある。x軸方向に波状に変位したウェブ13におけるx軸方向の面外変位が $\sin(\pi x/a)$ の式で表されると仮定すると、x軸方向に波状に変位したウェブ13のx軸方向の波長は、 $2a$ になる。x軸方向の半波長は、 a になる。

図28は、ウェブ13のx軸方向の中央部におけるx軸方向の長さが半波長 a である部分の面外変位を示す図である。

[0298] ウェブ13に曲げモーメントF13が作用している場合、従来は(159)式で表されるフーリエ級数を用いてx軸上のある座標かつy軸上のある座標におけるz軸方向に向けたウェブ13の第1面外変位 w_w を推定していた。

発明者らは、三角関数を用いつつも、フーリエ級数よりも少ない項数で、 x 軸上のある座標かつ y 軸上のある座標における z 軸方向に向けたウェブ 13 の第 1 面外変位 w_w を推定できる関数を複数検討した。

その結果、ウェブ 13 に曲げモーメント F_{13} が作用する場合、 x 軸上のある座標かつ y 軸上のある座標における z 軸方向に向けたウェブ 13 の第 1 面外変位 w_w は (256) 式により、フーリエ級数よりも少ない項数で推定されることを見出した。ただし、 N は 2 以上の自然数であり、 a_0 、 a_n 、 b_n は未定係数である。

(256) 式は、 y 軸の座標の累乗関数を用いた三角関数による項を含む。 $\cos(2\pi y^n / b_w^n)$ 及び $\sin(\pi y^n / b_w^n)$ は、基底となる。(256) 式は、ウェブ 13 等の板要素の面外変形の推定に好ましく用いることができる。

[0299] [数79]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi y^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi y^n}{b_w^n} \right) \quad \cdot \cdot (256)$$

[0300] 一方で、 x 軸上の任意の座標かつ y 軸上のある座標における z 軸方向に向けたウェブ 13 の第 2 面外変位 W_w は、(258) 式により推定される。(258) 式は、前述のように、ウェブ 13 における x 軸上のある座標における z 軸方向に向けた面外変位が $\sin(\pi x / a)$ の式で表される、という仮定に基づく。第 2 面外変位 W_w は、 y 軸の座標及び x 軸の座標それぞれの関数であり、ウェブ 13 の座屈応力度を推定する際に用いられる。

なお、(258) 式に (256) 式を代入すると、(259) 式が得られる。(259) 式において N が 2 である場合には、(260) 式のように変形できる。

[0301] [数80]

$$\begin{aligned} W_w &= \sin \frac{\pi x}{a} \cdot w_w \quad \cdot \cdot (258) \\ W_w &= \sin \frac{\pi x}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi y^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi y^n}{b_w^n} \right) \right] \quad \cdot \cdot (259) \\ W_w &= \sin \frac{\pi x}{a} \left(a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi y}{b_w} + b_1 \sin \frac{\pi y}{b_w} + a_2 \cos \frac{2\pi y^2}{b_w^2} + b_2 \sin \frac{\pi y^2}{b_w^2} \right) \quad \cdot \cdot (260) \end{aligned}$$

[0302] 例えば、図28のウェブ13に曲げモーメントF13が作用する前における、ウェブ13においてx軸の座標が x_0 、y軸の座標が y_0 の部分（以下、推定対象部分と言う）のz軸の座標は0である。ウェブ13に曲げモーメントF13が作用した後において、この推定対象部分における第2面外変位 W_w は、(259-1)式により推定され、このときのz軸の座標は、0に(259-1)式により推定した第2面外変位 W_w を足した値となる。すなわち、曲げモーメントF13が作用した後では、推定対象部分は、x軸の座標が x_0 、y軸の座標が y_0 、z軸の座標が W_w となる位置に配置されていると推定される。

[0303] [数81]

$$W_w = \sin \frac{\pi x_0}{a} \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi y_0^n}{b_w^n} + b_n \sin \frac{\pi y_0^n}{b_w^n} \right) \right] \cdot \cdot (259-1)$$

[0304] 第2変位推定部112に含まれている第1変位推定部52は、ウェブ13に曲げモーメントF13が作用したときに、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線M1に対してy軸方向に非対称になると推定する。すなわち、推定プログラム111では、前記変位の推定プログラム61により、第1変位推定部52を、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線M1に対してy軸方向に非対称になると推定させる。この理由は、ウェブ13に作用する曲げモーメントF13によって生じるx軸方向の垂直応力が基準線M1に対して非対称であるためである。

第2変位推定部112は、第1変位推定部52が推定した第1面外変位 w_w を用いて、ウェブ13の第2面外変位 W_w を(259)式により推定する。

[0305] ウェブ13は、x軸の座標が0以上a以下という閉区間に配置され、y軸の座標が0以上 b_w 以下という閉区間に配置されている。このとき、座屈変形によりウェブ13内で生じる歪エネルギーUは(261)式で表され、曲げモーメントF13により与えられる外力ポテンシャルVは(262)式で表される。

全ポテンシャルエネルギーΠは、歪エネルギーUと外力ポテンシャルVと

の和として、(263)式で表される。

[0306] [数82]

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{D_w}{2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \\
 &\quad + \int_0^a \int_0^{b_w} \sigma_w t_w \left[\frac{\delta_w}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 \right] dy dx \quad \cdots (261) \\
 V &= - \int_0^{b_w} \sigma_w t_w \delta_w dy \quad \cdots (262) \\
 \Pi &= U + V \quad \cdots (263)
 \end{aligned}$$

[0307] ここで、 D_w はウェブ13の板剛性であり、(265)式で表される。 σ_w は曲げモーメント F_{13} が作用するウェブ13の応力関数であり、(266)式で表される。ただし、 σ_{cr} はウェブ13の座屈応力度であり、圧縮を正とする。関数 δ_w は、座屈が発生した時のウェブ13のx軸方向の変形を表現した関数であり、(267)式で表される。ただし、 δ はウェブ13のx軸方向の第2端上のy軸方向の第2端(上端)におけるx軸方向の変位である。

[0308] [数83]

$$\begin{aligned}
 D_w &= \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad \cdots (265) \\
 \sigma_w &= \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \sigma_{cr} \quad \cdots (266) \\
 \delta_w &= \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \delta \quad \cdots (267)
 \end{aligned}$$

[0309] 応力度算出部113は、ウェブ13の座屈応力度 σ_{cr} を、(259)式を用いてエネルギー法に基づいて求める。応力度算出部113は、ウェブ13の座屈応力度 σ_{cr} を、(270)式及び(271)式を用いて、(272)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n 、 b_n 及び半波長 a に基づいて、座屈応力度 σ_{cr} を求める。

ただし、座屈係数 k は、(273)式により求められる。

[0310]

[数84]

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^a \int_0^{b_w} \left(\frac{2y}{b_w} - 1 \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad \cdot \cdot (270) \\
 B &= \frac{b_w^2}{\pi^2} \int_0^a \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx \\
 &\quad \cdot \cdot (271) \\
 \sigma_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (272) \\
 k &= \frac{B}{A} \quad \cdot \cdot (273)
 \end{aligned}$$

[0311] 具体的には、半波長 a を定数として扱う。この状態で、前記全ポテンシャルエネルギー Π を未定係数 a_n 、 b_n で偏微分した関数が 0 に等しいことを表す方程式を連立させて、実数である a_n 、 b_n を求める。連立方程式の解となる a_n 、 b_n の組が複数ある場合には、 a_n 、 b_n の複数の組のうち、(272) 式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える a_n 、 b_n の組に基づいて (a_n 、 b_n の組を (272) 式に代入して) 座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱う。前記 a_n 、 b_n の組が求められた全ポテンシャルエネルギー Π を半波長 a で偏微分した関数が 0 に等しいことを表す方程式から、半波長 a を求める。以上のように求められた前記 a_n 、 b_n の組及び半波長 a に基づいて求められた座屈応力度 σ_{cr} が、求める座屈応力度 σ_{cr} となる。

連立方程式の解となる未定係数 a_n 、 b_n の組が 1 つのみの場合には、 a_n 、 b_n の組が (272) 式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える場合に、 a_n 、 b_n の組に基づいて座屈応力度 σ_{cr} を求める。次に、半波長 a を変数として扱い、前述のように座屈応力度 σ_{cr} を求める。

[0312] なお、本実施形態の座屈応力度の推定方法（以下、単に推定方法とも言う）では、第 1 実施形態の変位の推定方法を用いて、 z 軸回りに曲げモーメント F_{13} が作用して座屈するウェブ 13 の座屈応力度 σ_{cr} を推定する。推定方法では、ウェブ 13 の第 2 面外変位 W_w を (259) 式により推定する第 2 変位推定工程と、ウェブ 13 の座屈応力度 σ_{cr} を、エネルギー法に基づいて求める応力度算出工程と、を行う。

第 2 変位推定工程では、変位の推定方法の第 1 変位推定工程が行われる。

ウェブ13に作用する曲げモーメント F_{13} が基準線 M_1 に対して非対称であるため、第1変位推定工程では、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線 M_1 に対して y 軸方向に非対称になると推定される。第2変位推定工程では、ウェブ13の第2面外変位 W_w を(259)により推定する。

応力度算出工程では、ウェブ13の座屈応力度 σ_{cr} を、(259)式を用いてエネルギー法に基づいて求める。

- [0313] ウェブ13に座屈応力度 σ_{cr} が生じるときにウェブ13に作用する曲げモーメント F_{13} は、板要素に関する公知の方程式から求めることができる。ウェブ13に作用する曲げモーメント F_{13} をこの曲げモーメント F_{13} よりも小さくすることで、ウェブ13が座屈するのを抑えることができる。

- [0314] (面外変位及び座屈応力度の推定精度の評価)

(面外変位による比較)

図29に、ウェブ13に曲げモーメント F_{13} が作用する場合の、 y 軸の座標によるウェブ13の第2面外変位 W_w の推定結果を表す。ウェブ13の y 軸方向の端面13bは、固定支持されているとした。この第2面外変位 W_w は、図28の切断線A11-A11の断面における面外変位である。

図29において、横軸はウェブ13の長さ b_w に対する y 軸の座標を表し、縦軸は推定したウェブ13の第2面外変位 W_w を表す。横軸の0はウェブ13の下端を表し、横軸の1はウェブ13の上端を表す。縦軸において、第2面外変位 W_w の値は、第2面外変位 W_w の最大値により無次元化している。

- [0315] 図29において、実線による線L31はFEMによる解析結果を表す。点線による線L32は本実施形態の(259)式を用いて推定した結果(ただし N は2)を表し、一点鎖線による線L33は(159)式を用いて推定した結果(ただし N は15)を表す。線L32及び線L33が線L31にほぼ一致しているため、線L32及び線L33が線L31に重なっている。

FEMによる解析結果を、(159)式のフーリエ級数で N が15の場合と同程度の精度で近似するのに必要な、本実施形態の(259)式における N は、2であることが分かった。

[0316] (座屈応力度による比較)

ウェブ13の座屈応力度 σ_{cr} を、(159)式、本実施形態の(259)式で求め、座屈係数で比較した結果を、表4及び図30に示す。

[0317] [表4]

	N	ウェブのy軸方向の端面 の支持方法	
		単純支持	固定支持
実施形態 :(259)式	2	24.0	40.3
フーリエ級数 :(159)式	4	89.9	272.1
	5	58.3	182.6
	7	37.3	104.3
	9	29.2	72.3
	11	25.7	56.6
	13	24.2	48.3
	15	23.9	43.6
	20	23.9	39.7
	25	23.9	39.7

[0318] 本実施形態の(259)式を用いた場合には、Nを2にした。一方、比較例である(159)式のフーリエ級数を用いた場合には、Nを4, 5, 7, ..., 25と変化させた。

表4において、ウェブ13のy軸方向の端面13bが単純支持の場合の座屈係数は、第2面外変位 W_w 及び座屈応力度 σ_{cr} の推定精度が高くなるのに従い、23.88に収束する(図30中の線L36参照)。ウェブ13のy軸方向の端面13bが固定支持の場合の座屈係数は、面外変位 W_w 及び座屈応力度 σ_{cr} の推定精度が高くなるのに従い、39.6に収束する(図30中の線L37参照)。

[0319] 図30において、横軸はNを表し、縦軸は座屈係数kを表す。白抜きの丸印は、本実施形態の(259)式を用いた単純支持の場合の推定結果を表す。黒塗り丸印は、(159)式のフーリエ級数を用いた単純支持の場合の推定結果を表す。白抜きの四角印は、本実施形態の(259)式を用いた固定支持の場合の推定結果を表す。黒塗り四角印は、(159)式のフーリエ級

数を用いた固定支持の場合の推定結果を表す。

本実施形態の(259)式を用いて座屈係数 k を評価した場合の精度は、単純支持及び固定支持のいずれにおいても、(159)式のフーリエ級数で N が25の場合の精度と同程度であることが分かった。

[0320] 以上説明したように、本実施形態の推定装置110、推定方法、及び推定プログラム111によれば、発明者らは、三角関数を用いつつも、(159)式のフーリエ級数よりも少ない項数で、曲げモーメント F_{13} が作用するウェブ13の面外変位を推定できる関数を複数検討した。その結果、(259)式を用いてウェブ13の第2面外変位 W_w をフーリエ級数よりも少ない項数で推定できることを見出した。

(259)式は、(159)式のフーリエ級数よりも少ない項数でウェブ13の第2面外変位 W_w を推定できるため、フーリエ級数を用いた場合よりも推定に必要な計算を簡単に行うことができる。さらに、第2面外変位 W_w を一定の精度で推定するために必要な項数が、(159)式のフーリエ級数を用いて推定する場合よりも、(259)式を用いて推定する場合の方が少ないため、フーリエ級数を用いた場合よりも推定結果を物理的に理解しやすく定式化することができる。

[0321] (259)式を用いることで、ウェブ13の第2面外変位 W_w を素早く近似することができる。すなわち、面内曲げを受ける建築物の部材や部材を構成する板要素が局部座屈を生じるときの座屈波形を素早く近似することができる。

[0322] また、 N は2である。まず(259)式において、半波長 a を定数として扱った状態で未定係数 a_1 、 a_2 、 b_1 、及び b_2 を求め、次に半波長 a を変数として扱い、(259)式における半波長 a を求める。(259)式において未定係数 a_1 等を求める際に、一度に求める未定係数の数が4つ以下である。このため、解の公式が知られている4次以下の方程式を用いて未定係数 a_1 、 a_2 、 b_1 、及び b_2 等を容易に求めることができる。

また、応力度算出部113は(応力度算出工程では)、(270)式及び

(271)式を用いて、(272)式による座屈応力度 σ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n 、 b_n 及び半波長 a に基づいて、座屈応力度 σ_{cr} を求める。エネルギー法に基づいて座屈応力度 σ_{cr} を求める際に、(270)式から(272)式の数式を用いて座屈応力度 σ_{cr} を正確に求めることができる。

[0323] なお、前記実施形態では、(259)式における N は3以上でもよい。

座屈応力度 σ_{cr} をエネルギー法に基づいて求める際には、(270)式から(272)式を用いなくてもよい。

前記実施形態では、推定装置110が板要素であるウェブ13の座屈応力度を推定するとしたが、板要素はウェブ13に限定されず、下フランジ11や上フランジ12等でもよい。

[0324] [第6実施形態]

次に、本発明の第6実施形態について図13、図31から図35を参照しながら説明するが、前記実施形態と同一の部位には同一の符号を付してその説明は省略し、異なる点についてのみ説明する。

図13に示す本実施形態の座屈応力度の推定装置（推定装置、以下単に推定装置とも言う）120は、外力としてせん断力が作用して座屈するH形鋼10（図31参照）の座屈応力度を推定するのに用いられる。推定装置120は、第1実施形態の変位の推定装置50を用いてH形鋼10の座屈応力度を推定する。

本実施形態では、図31に示すH形鋼10全体が推定対象である。基準線M1は、ウェブ板要素13を基準とした基準線となる。すなわち、基準線M1は、ウェブ板要素13の y 軸方向の長さの中心の位置を通り、ウェブ板要素13の x 軸に沿う線となる。言い換えれば、基準線M1は、ウェブ板要素13の v 軸方向の長さの中心の位置を通り、 u 軸に沿う線となる。

[0325] 図13に、本実施形態の推定装置120を示す。推定装置120は、前記推定装置80と同様に構成されている。ただし、本実施形態では、補助記憶装置60には、前記コンピュータを推定装置120として機能させるための

座屈応力度の推定プログラム（以下、単に推定プログラムと言う）１２１や、ＯＳプログラム等の各種プログラム等が格納されている。

- [0326] また、ＣＰＵ５１は、機能的に、ウェブ板要素１３の第２面外変位、及び第１フランジ板要素１１、第２フランジ板要素１２それぞれの第２面外変位を推定する第２変位推定部１２２と、Ｈ形鋼１０の座屈応力度を、ウェブ板要素１３の第２面外変位、第１フランジ板要素１１、第２フランジ板要素１２それぞれの第２面外変位を用いてエネルギー法に基づいて求める応力度算出部１２３と、を備えている。ＣＰＵ５１の機能構成要素である第２変位推定部１２２及び応力度算出部１２３は、補助記憶装置６０に格納されている推定プログラム１２１等をＣＰＵ５１が実行することで機能する。第２変位推定部１２２には、前記第１変位推定部５２が含まれている。

推定プログラム１２１等は、推定装置１２０用のプログラムである。推定プログラム１２１は、推定装置１２０を第２変位推定部１２２及び応力度算出部１２３として機能させる。推定プログラム１２１は、前記推定プログラム６１を用いている。

- [0327] 本実施形態の推定装置１２０の第２変位推定部１２２及び応力度算出部１２３では、図３１に示すように、Ｈ形鋼１０の位置座標を uvw 座標系に基づいて認識する。なお、図３１及び後述する図３３では、ウェブ板要素１３等の面外変位を推定値よりも大きく示している。図３１では、Ｈ形鋼１０が座屈している状態を示している。

- [0328] Ｈ形鋼１０の u 軸方向の端面１０ a にそれぞれ v 軸方向にせん断力 $F16$ が作用すると、Ｈ形鋼１０が座屈する場合がある。なお、せん断力 $F16$ は、Ｈ形鋼１０の u 軸方向の全長さにわたって伝達される。

Ｈ形鋼１０の u 軸方向の各端面１０ a に作用するせん断力 $F16$ は、互い等しい大きさの、向きが反対となる外力である。例えば、 u 軸方向の負の向き側の端面１０ a に v 軸方向の正の向きのせん断力 $F16$ が作用し、 u 軸方向の正の向き側の端面１０ a に v 軸方向の負の向きのせん断力 $F16$ が作用する。なお、 u 軸方向の負の向き側の端面１０ a に v 軸方向の負の向きのせ

せん断力 F_{16} が作用し、 u 軸方向の正の向き側の端面 $10a$ に v 軸方向の正の向きのせん断力 F_{16} が作用してもよい。

[0329] この場合、ウェブ板要素 13 の u 軸方向の第 1 端（ u 軸方向の端面 $10a$ の一方）に向かうに従い、ウェブ板要素 13 が w 軸の正の向き及び w 軸の負の向きに交互に変位して、ウェブ板要素 13 が全体として u 軸方向に波状に変位する。ウェブ板要素 13 に対応して、第 1 フランジ板要素 11 及び第 2 フランジ板要素 12 が波状に変位する。

u 軸に沿って変位したウェブ板要素 13 の 1 波長分において、 u 軸方向の第 1 端とは反対の第 2 端を u 軸の原点とし、この第 2 端から u 軸方向の第 1 端に向かう向きを u 軸の正の向きとする。

[0330] 図 31 及び図 32 に示すように、ウェブ板要素 13 における v 軸方向の中心の位置を、 v 軸の原点とする。第 1 フランジ板要素 11 から第 2 フランジ板要素 12 に向かう向きを、 v 軸の正の向きとする。

z 軸の原点を、ウェブ板要素 13 の w 軸方向の中心（厚さ方向の中心）とする。 w 軸の正の向きを、 u 軸の正の向き及び v 軸の正の向きに対して、右手系の直交座標系を構成する向きとする。

[0331] 本実施形態の推定装置 120 は、 H 形鋼 10 にせん断力 F_{16} が作用して座屈したときの、 H 形鋼 10 の座屈応力度を推定する。推定装置 120 の第 2 変位推定部 122 及び応力度算出部 123 では、 H 形鋼 10 の座屈応力度を推定する際に、前記 1 から 3 の仮定、及び $4A$ から $6A$ の仮定を行っている。

[0332] 図 31 に示すように、 H 形鋼 10 にせん断力 F_{16} が作用すると、 H 形鋼 10 のウェブ板要素 13 等が u 軸方向に波状に変位する場合がある。 u 軸方向に波状に変位したウェブ板要素 13 における、 v 軸の座標がある値であったとき、 u 軸のある座標における w 軸方向に向けたウェブ板要素 13 の第 2 面外変位が $\sin(\pi(u + \lambda \sin(\pi v / b_w)) / a)$ の式で表されると仮定する（仮定 2 ）。このとき、ウェブ板要素 13 の u 軸方向に波状に変位したウェブ板要素 13 の u 軸方向の波長は、 $2a$ になる。ウェブ板要素 1

3のu軸方向の半波長（波長の半分の長さ）は、aになる。

図33は、H形鋼10のu軸方向の長さが半波長aである部分のH形鋼10の全領域における第2面外変位 w_w を示す図である。

[0333] 図34に、H形鋼10にせん断力F16が作用したときの状態を実線で示す。図34中に点線で示すのは、H形鋼10にせん断力F16が作用していないときの状態である。

[0334] ウェブ板要素13にせん断力F16が作用している場合、従来は(159)式で表されるフーリエ級数を用いてウェブ板要素13の面外変位を推定していた。

発明者らは、三角関数を用いつつも、フーリエ級数よりも少ない項数で、u軸の座標がある値であったとき、v軸のある座標におけるw軸方向に向けたウェブ板要素13の面外変位（第1面外変位） w_w を推定できる関数を複数検討した。

その結果、H形鋼10にせん断力F16が作用する場合、u軸の座標がある値であったとき、v軸のある座標におけるw軸方向に向けたウェブ板要素13の第1面外変位 w_w は(280)式により、フーリエ級数よりも少ない項数で推定されることを見出した。ただし、Nは2以上の自然数であり、 a_0 、 a_n 、 b_n は未定係数である。

(280)式は、v軸の座標の累乗関数を用いた三角関数による項を含む。 $\cos \pi (2v/b_w)^n$ 及び $\cos (\pi/2) (2v/b_w)^n$ は、基底となる。(280)式は、ウェブ板要素13等の板要素の面外変位の推定に好ましく用いることができる。

[0335] [数85]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} \right)^n \right) \quad \cdots (280)$$

[0336] なお、本実施形態では、後述するようにH形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線M1に対してv軸方向に対称になると推定されるため、第1面外変位 w_w は前記(121)式により推定される。(121)式から本実施形態の(2

80) 式は、以下のようにして導かれている。

すなわち、(122-2) 式のように、Y の値、及びウェブ13のy軸方向の長さ b_w を用いて表現した値を、y軸の座標とする。言い換えれば、(123-2) 式のように、Y の値は、y軸の座標を長さ b_w を用いて無次元化した値 (y軸の座標の2倍を長さ b_w で除した値) である。

そして、前記(121) 式に(122-2) 式を代入して得られる(124-2) 式、さらに(124-2) 式のy軸をv軸に置き換えた(280) 式により、ウェブ13のv軸のある座標におけるw軸方向に向けた第1面外変位 w_w を推定する。

[0337] [数86]

$$\begin{aligned} y &= b_w \cdot \frac{Y}{2} \quad \cdots (122-2) \\ Y &= \frac{2y}{b_w} \quad \cdots (123-2) \\ w_w &= a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n \right) \quad \cdots (124-2) \end{aligned}$$

[0338] 一方で、u軸の座標が任意の値であったとき、v軸のある座標におけるw軸方向に向けたウェブ板要素13の第2面外変位 W_w は、(281) 式により推定される。

(281) 式は、前記仮定2に基づく。ただし、(281) 式における未定係数 λ は、v軸方向の位相のずれを表す実数である。

なお、(281) 式に(280) 式を代入すると、(282) 式が得られる。(282) 式においてNが2である場合には、(283) 式のように変形できる。

[0339] [数87]

$$\begin{aligned} W_w &= \sin \frac{\pi}{a} \left(u + \lambda \sin \frac{\pi v}{b_w} \right) \cdot w_w \quad \cdots (281) \\ W_w &= \sin \frac{\pi}{a} \left(u + \lambda \sin \frac{\pi v}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdots (282) \\ W_w &= \sin \frac{\pi}{a} \left(u + \lambda \sin \frac{\pi v}{b_w} \right) \left(a_0 + a_1 \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} \right) + b_1 \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} \right) + a_2 \cos \pi \left(\frac{2v}{b_w} \right)^2 + b_2 \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v}{b_w} \right)^2 \right) \\ &\quad \cdots (283) \end{aligned}$$

[0340] また、第1フランジ板要素11のw軸の所定の座標における第2面外変位

W_{f1} は(284)式により推定され、第2フランジ板要素12のw軸の所定の座標における第2面外変位 W_{f2} は(285)式により推定される。

(284)式及び(285)式は、v軸の座標の累乗関数を用いた三角関数による項を含む。

[0341] [数88]

$$\begin{aligned} W_{f1} &= w \frac{\partial W_w}{\partial v} \Big|_{v=-\frac{b_w}{2}} \cdots (284) \\ W_{f2} &= w \frac{\partial W_w}{\partial v} \Big|_{v=\frac{b_w}{2}} \cdots (285) \end{aligned}$$

[0342] 例えば、図33のH形鋼10にせん断力F16が作用する前における、ウェブ板要素13においてu軸の座標が u_0 、v軸の座標が v_0 の部分（以下、第1推定対象部分と言う）のw軸の座標は0である。この第1推定対象部分における第2面外変位 W_w は、(282-1)式により推定される。図33のH形鋼10にせん断力F16が作用した後における第1推定対象部分のw軸の座標は、0に(282-1)式により推定した第2面外変位 W_w を足した値となる。すなわち、せん断力F16が作用した後では、第1推定対象部分は、u軸の座標が u_0 、v軸の座標が v_0 、w軸の座標が W_w となる位置に配置されていると推定される。

例えば、図33のH形鋼10にせん断力F16が作用する前における、第2フランジ板要素12においてu軸の座標が u_0 、w軸の座標が w_0 の部分（以下、第2推定対象部分と言う）のv軸の座標は $b_w/2$ である。この第2推定対象部分における第2面外変位 W_{f2} は、(285-1)式により推定される。図33のH形鋼10にせん断力F16が作用した後における第2推定対象部分のv軸の座標は、 $b_w/2$ に(285-1)式により推定した第2面外変位 W_{f2} を足した値となる。すなわち、せん断力F16が作用した後では、第2推定対象部分は、u軸の座標が u_0 、v軸の座標が $(b_w/2 + W_{f2})$ 、w軸の座標が w_0 となる位置に配置されていると推定される。

[0343]

[数89]

$$W_w = \sin \frac{\pi}{a} \left(u_0 + \lambda \sin \frac{\pi v_0}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2v_0}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2v_0}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (282-1)$$

$$W_{f2} = w_0 \frac{\partial W_w}{\partial y} \Big|_{v=\frac{b_w}{2}, u=u_0, w=w_0} \quad \cdot \cdot (285-1)$$

[0344] 第2変位推定部122に含まれている第1変位推定部52は、H形鋼10にせん断力F16が作用したときに、H形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して v 軸方向に対称になると推定する。すなわち、推定プログラム121では、前記変位の推定プログラム61により、第1変位推定部52を、H形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線M1に対して v 軸方向に対称になると推定させる。この理由は、H形鋼10の形状、拘束条件が基準線M1に対して対称であり、H形鋼10に作用するせん断力F16が u 軸方向におけるいずれの v 軸方向断面においても一様であるためである。

第2変位推定部122は、第1変位推定部52が推定したウェブ板要素13の第1面外変位 w_w を用いて、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を(282)式により推定する。第2変位推定部122は、第1変位推定部52が推定した第1フランジ板要素11及び第2フランジ板要素12それぞれの第1面外変位 w_w を用いて、第1フランジ板要素11の第2面外変位 W_{f1} を(284)式により推定し、第2フランジ板要素12の第2面外変位 W_{f2} を(285)式により推定する。

ここで、エネルギー法に基づいて、座屈変形によりウェブ板要素13内で生じる歪エネルギー U_w は(287)式のように表され、第1、2フランジ板要素11、12の歪エネルギー U_f は(288)式のように表される。

[0345] [数90]

$$U_w = \frac{D_w}{2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du$$

$$+ \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \tau_{cr} t_w \left[\frac{\delta_w}{b_w} - \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial v} \right) \right] dv du \quad \cdot \cdot (287)$$

$$U_f = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{D_f}{2} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial w^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dw du \right\}$$

$$\cdot \cdot (288)$$

[0346] ただし、ウェブ板要素 13 の板剛性 D_w は (289) 式のように表される。

第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 の板剛性 D_f は (290) 式のように表される。H 形鋼 10 の座屈応力度を、 τ_{cr} とする。

関数 δ_w は、座屈が発生した時のウェブ板要素 13 の u 軸方向の変形を表現した関数であり、第 2 フランジ板要素 12 の中心に対する第 1 フランジ板要素 11 の中心に生じる u 軸方向変位を δ として (291) 式のように表される。

[0347] [数91]

$$\begin{aligned} D_w &= \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad \cdot \cdot (289) \\ D_f &= \frac{Et_f^3}{12(1-\nu^2)} \quad \cdot \cdot (290) \\ \delta_w &= \delta \quad \cdot \cdot (291) \end{aligned}$$

[0348] また、ウェブ板要素 13 の外力ポテンシャルエネルギー V_w は (298) 式のように表され、第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 の外力ポテンシャルエネルギー V_f は (299) 式のように表される。

[0349] [数92]

$$\begin{aligned} V_w &= -\tau_{cr} a t_w \delta_w \quad \cdot \cdot (298) \\ V_f &= 0 \quad \cdot \cdot (299) \end{aligned}$$

[0350] H 形鋼 10 の全ポテンシャルエネルギー Π は、ひずみエネルギー及び外力ポテンシャルエネルギーの和として、(300) 式のように表される。

[0351] [数93]

$$\Pi = U_w + U_f + V_w + V_f \quad \cdot \cdot (300)$$

[0352] 応力度算出部 123 は、H 形鋼 10 の座屈応力度 τ_{cr} を、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w 、第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 の第 2 面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び (282) 式、(284) 式、(285) 式を用いてエネルギー法に基づいて求める。すなわち、応力度算出部 123 は、(301) 式から (303) 式を用いて、(304) 式による座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n 、 b_n 、 λ 及び半波長 a に基づいて、座屈応力度 τ_{cr} を求める。

[0353] [数94]

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left(\frac{\partial W_w}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial v} \right) dv du \quad \cdot \cdot (301) \\
B &= \frac{b_w^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (302) \\
C_i &= \frac{b_f^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-b_f}^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial v^2} \right)^2 + 2v \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial v^2} \right) + 2(1-v) \left(\frac{\partial^2 W_{fi}}{\partial u \partial v} \right)^2 \right] dv du \\
&\quad \cdot \cdot (303) \\
\tau_{cr} &= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} + \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2 t_f \sum_{i=1}^2 C_i}{b_f^2 t_w A} \quad \cdot \cdot (304)
\end{aligned}$$

[0354] 具体的には、半波長 a 及び未定係数 λ を定数として扱う。この状態で、前記全ポテンシャルエネルギー Π を未定係数 a_n , b_n で偏微分した関数が 0 に等しいことを表す方程式を連立させて、実数である a_n , b_n を求める。連立方程式の解となる a_n , b_n の組が複数ある場合には、 a_n , b_n の複数の組のうち、(304) 式による座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える a_n , b_n の組に基づいて (a_n , b_n の組を (304) 式に代入して) 座屈応力度 τ_{cr} を求める。次に、半波長 a 及び未定係数 λ を変数として扱う。前記 a_n , b_n の組が求められた全ポテンシャルエネルギー Π を半波長 a 、未定係数 λ で偏微分した関数が 0 に等しいことを表す方程式から、半波長 a 及び未定係数 λ を求める。以上のように求められた前記 a_n , b_n の組及び半波長 a 及び未定係数 λ に基づいて求められた座屈応力度 τ_{cr} が、求める座屈応力度 τ_{cr} となる。

連立方程式の解となる未定係数 a_n , b_n の組が 1 つのみの場合には、 a_n , b_n の組が (304) 式による座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える場合に、 a_n , b_n の組に基づいて座屈応力度 τ_{cr} を求める。次に、半波長 a 及び未定係数 λ を変数として扱い、前述のように座屈応力度 τ_{cr} を求める。

[0355] ウェブ板要素 13 の座屈係数 k_w は (308) 式、第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 の座屈係数 k_f は (309) 式のようにそれぞれ表される。

[0356]

[数95]

$$k_w = \frac{B}{A} \quad \cdot \cdot (308)$$

$$k_f = \frac{t_f \sum_{i=1}^2 C_i}{t_w A} \quad \cdot \cdot (309)$$

[0357] なお、本実施形態の座屈応力度の推定方法（以下、単に推定方法とも言う）では、第1実施形態の変位の推定方法を用いて、せん断力F 16が作用して座屈するH形鋼10の座屈応力度 τ_{cr} を推定する。推定方法では、第2変位推定工程と、応力度算出工程と、を行う。

第2変位推定工程では、変位の推定方法の第1変位推定工程が行われる。H形鋼10の形状、拘束条件、及びH形鋼10に作用する圧縮力F 6の全てが基準線M 1に対して対称であるため、第1変位推定工程では、H形鋼10の第1面外変位 w_w が基準線M 1に対して v 軸方向に対称になると推定される。第2変位推定工程では、第1変位推定工程で推定したウェブ板要素13の第1面外変位 w_w を用いて、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w を（282）式により推定する。そして、第1変位推定工程で推定した第1, 2フランジ板要素11, 12の第1面外変位 w_w を用いて、第1, 2フランジ板要素11, 12の第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を（284）式、（285）式によりそれぞれ推定する。

応力度算出工程では、座屈応力度 τ_{cr} をウェブ板要素13の第2面外変位 W_w 、第1, 2フランジ板要素11, 12の第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び（282）式、（284）式、（285）式を用いてエネルギー法に基づいて求める。

[0358] なお、H形鋼10に座屈応力度 τ_{cr} が生じるときにH形鋼10に作用するせん断力F 16は、梁に関する公知の方程式から求めることができる。H形鋼10に作用するせん断力F 16をこのせん断力F 16よりも小さくすることで、H形鋼10が座屈するのを抑えることができる。

また、本実施形態の推定装置120、推定方法、及び推定プログラム121における第1, 2フランジ板要素11, 12の厚さ t_f 等の寸法の適用範囲

は、前記適用範囲 1 のようであることが好ましい。

[0359] (座屈応力度の推定精度の評価)

図 3 5 に、本実施形態の推定方法 (推定装置 5 0、推定プログラム 6 1) で推定される座屈応力度と、F E M で推定される座屈応力度と、を比較した結果を示す。 Q_y は、ウェブ板要素 1 3 の降伏せん断力を表す。降伏せん断力 Q_y は、ウェブ板要素 1 3 の降伏応力度と、ウェブ板要素 1 3 の断面積 A_w と、の積に等しい。

Q_{cr_pre} は、本実施形態の推定方法で推定されるウェブ板要素 1 3 のせん断座屈耐力を表す。せん断座屈耐力 Q_{cr_pre} は、座屈発生時のウェブ板要素 1 3 の座屈応力度と、ウェブ板要素 1 3 の断面積 A_w と、の積に等しい。第 1, 2 フランジ板要素 1 1, 1 2 はせん断力 F_{16} に対する抗力に寄与しないと仮定しているため、ウェブ板要素 1 3 の座屈応力度は H 形鋼 1 0 の座屈応力度 τ_{cr} に等しくなる。

[0360] Q_{cr_FEM} は、F E M で推定されるウェブ板要素 1 3 のせん断座屈耐力を表す。せん断座屈耐力 Q_{cr_FEM} は、F E M で推定される座屈発生時のウェブ板要素 1 3 の座屈応力度と、ウェブ板要素 1 3 の断面積 A_w と、の積に等しい。図 3 5 において、横軸は $\sqrt{(Q_y / Q_{cr_pre})}$ の値を表し、縦軸は (Q_{cr_pre} / Q_y) 又は (Q_{cr_FEM} / Q_y) の値を表す。F E M 及び本実施形態の推定方法で、様々な諸元の H 形鋼 1 0 の座屈応力度等を推定した。

図 3 5 において、○印は F E M で推定された結果、すなわち縦軸を (Q_{cr_FEM} / Q_y) の値とした結果を表す。○印の横軸には、F E M で解析した H 形鋼 1 0 と同一の諸元の H 形鋼 1 0 を本実施形態の推定方法で推定した $\sqrt{(Q_y / Q_{cr_pre})}$ の値を用いた。曲線は、本実施形態の推定方法で推定された結果、すなわち縦軸を (Q_{cr_pre} / Q_y) の値とした結果を表す。

[0361] 降伏せん断力 Q_y は、F E M 及び本実施形態の推定方法によらず、材料強度に応じた一定の値となる。本実施形態の推定方法から得られる座屈時のせん断座屈耐力 Q_{cr_pre} と F E M で推定される座屈応力度を比較することで、本実施形態の推定精度を評価することができる。同一の諸元の H 形鋼 1 0 に対

して、F E Mで推定した結果及び本実施形態の推定方法で推定した結果は、
図 3 5 において横軸の値は互いに同一で、縦軸の値が誤差に応じてずれる。

[0362] 図 3 5 から、F E Mで推定した座屈時のせん断座屈耐力 Q_{cr_FEM} 、及び本
実施形態の推定方法で推定した座屈時のせん断座屈耐力 Q_{cr_pre} は、良く対
応している。本実施形態の推定方法から推定される座屈時のせん断座屈耐力
 Q_{cr_pre} と F E Mによって推定される座屈応力度との間には一定の関係があ
るため、本実施形態の推定方法により座屈応力度 τ_{cr} を推定しても、実用上
十分な精度で座屈応力度 τ_{cr} を推定することができる。

[0363] (159) 式のフーリエ級数によりせん断力が作用した H 形鋼の座屈応力
度等を推定しようとした場合、N を 30 以上に設定する必要があり、さらに
座屈応力度を陽な解で示すことができない。これに対して本実施形態の推定
方法では、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w を (282) 式、第 1, 2 フ
ランジ板要素 11, 12 の第 2 面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} を (284) 式、(28
5) 式とした場合、(304) 式のように陽な解で座屈応力度 τ_{cr} を算出す
ることができる。

[0364] 以上説明したように、本実施形態の推定装置 120、推定方法、及び推定
プログラム 121 によれば、せん断力 F_{16} が作用する H 形鋼 10 に対して
、(282) 式によりウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w を推定する。(2
84) 式に示すように、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w を v で一階偏微
分した関数の v 軸の座標に $-b_w/2$ を代入した関数に対応して第 1 フランジ
板要素 11 の第 2 面外変位 W_{f1} が定まる。そして、(285) 式に示すよう
に、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w を y で一階偏微分した関数の y 軸の
座標に $b_w/2$ を代入した関数に対応して第 2 フランジ板要素 12 の第 2 面外
変位 W_{f2} が定まる。

[0365] ウェブ板要素 13 及び第 1, 2 フランジ板要素 11, 12 の断面諸量及び
材料特性に応じて、ウェブ板要素 13 と第 1, 2 フランジ板要素 11, 12
との間の相互の影響度が変化し、ウェブ板要素 13 の第 2 面外変位 W_w 及び第
1, 2 フランジ板要素 11, 12 の第 2 面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} が定まる。以上

のように、H形鋼10の座屈応力度 τ_{cr} を、第2面外変位 W_w 、第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及びエネルギー法に基づいて求めることで、ウェブ板要素13と第1, 2フランジ板要素11, 12との連成座屈を考慮して座屈応力度 τ_{cr} を推定することができる。

[0366] 三角関数を用いても、フーリエ級数よりも少ない項数で、ウェブ板要素13の第2面外変位 W_w 等を推定でき、第2面外変位 W_w 等の推定に必要な計算を簡単に行うことができる。

第2面外変位 W_w 等を一定の精度で推定するために必要な項数が、(159)式のフーリエ級数を用いて推定する場合よりも、(282)式を用いて推定する場合の方が少ないため、第2面外変位 W_w 等の推定結果を物理的に理解しやすく定式化することができる。

[0367] 更に加えて、本実施形態の推定装置120、推定方法、及び推定プログラム121には、前記1から4、7、8の特徴、及び以下の5B、6Bの特徴がある。

5B. 累乗関数に基づくH形鋼10の局部座屈応力度の式を用いることで、せん断力F16を受けるH形鋼10の局部座屈応力度を、数値シミュレーションを用いずに推定することができる。

6B. せん断力F16を受けるH形鋼10の局部座屈応力度の式と、全塑性状態に対する座屈応力度の比率の関係性から、板要素11, 12, 13間の相互作用を考慮した板厚比区分を設定することができる。

[0368] また、(282)式においてNは2である。まず(282)式において、半波長a及び未定係数 λ を定数として扱った状態で未定係数 a_1 , a_2 , b_1 , 及び b_2 を求め、次に半波長a及び未定係数 λ を変数として扱い、(282)式における半波長a及び未定係数 λ を求める。(282)式において未定係数 a_1 等を求める際に、一度に求める未定係数の数が4つ以下である。このため、解の公式が知られている4次以下の方程式を用いて a_1 , a_2 , b_1 , 及び b_2 の未定係数を容易に求めることができる。

また、応力度算出部53は(応力度算出工程では)、(301)式から(

303)式を用いて、(304)式による座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n 、 b_n 、 λ 及び半波長 a に基づいて、座屈応力度 τ_{cr} を求める。従って、第2面外変位 W_w 、第2面外変位 W_{f1} 、 W_{f2} 、及び(282)式、(284)式、(285)式を用いてエネルギー法に基づいて座屈応力度 τ_{cr} を求める際に、数式を用いて座屈応力度 τ_{cr} を正確に求めることができる。

[0369] なお、例えば、前記実施形態では、(282)式における N は3以上でもよい。

座屈応力度 τ_{cr} をエネルギー法に基づいて求める際には、(301)式から(304)式を用いなくてもよい。

[0370] [第7実施形態]

次に、本発明の第7実施形態について図13、図36から図39を参照しながら説明するが、前記実施形態と同一の部位には同一の符号を付してその説明は省略し、異なる点についてのみ説明する。

本実施形態の座屈応力度の推定装置（推定装置、以下単に推定装置とも言う）は、外力としてせん断力が作用して座屈するウェブ（板要素）13の座屈応力度を推定するのに用いられる。推定装置は、第1実施形態の変位の推定装置50を用いてウェブ13の座屈応力度を推定する。

[0371] 図13に、本実施形態の推定装置130を示す。推定装置130は、前記推定装置50と同様に構成されている。ただし、本実施形態では、補助記憶装置60には、前記コンピュータを推定装置130として機能させるための座屈応力度の推定プログラム（以下、単に推定プログラムと言う）131や、OSプログラム等の各種プログラム等が格納されている。

[0372] また、CPU51は、機能的に、ウェブ13の第2面外変位を推定する第2変位推定部132と、第2面外変位を生じるウェブ13の座屈応力度を、エネルギー法に基づいて求める応力度算出部133と、を備えている。CPU51の機能構成要素である第2変位推定部132及び応力度算出部133は、補助記憶装置60に格納されている推定プログラム131等をCPU51

1 が実行することで機能する。第2変位推定部132には、前記第1変位推定部52が含まれている。

推定プログラム131等は、推定装置130用のプログラムである。推定プログラム131は、推定装置130を第2変位推定部132及び応力度算出部133として機能させる。推定プログラム131は、前記推定プログラム61を用いている。

[0373] 本実施形態の推定装置50の第2変位推定部132及び応力度算出部133では、図36に示すように、ウェブ13の位置座標を、 x 軸、 y 軸、及び z 軸で構成する右手系の直交座標系に基づいて認識する。なお、図36及び後述する図37では、ウェブ13の面外変位を推定値よりも大きく示している。

ウェブ13は、 x 軸方向に十分長いとする。

[0374] ウェブ13の x 軸方向の端面13aにそれぞれ y 軸方向のせん断力 $F18$ が外力として作用すると、ウェブ13が座屈（局部座屈）する場合がある。なお、せん断力 $F18$ は、ウェブ13の x 軸方向の全長さにわたって伝達される。

ウェブ13の x 軸方向の各端面13aに作用するせん断力 $F18$ は、互い等しい大きさの外力である。

[0375] この場合、ウェブ13の x 軸方向の第1端に向かうに従い、 z 軸の正の向き及び z 軸の負の向きに交互に波状に変位して、ウェブ13が全体として x 軸方向に波状に変位する場合がある。

y 軸の原点を、ウェブ13の y 軸方向の中心とする。 y 軸の正の向きを、上向きとする。

[0376] この例では、 x 軸の座標が小さい方の x 軸方向の端面13aに y 軸の正の向きにせん断力 $F18$ が作用し、 x 軸の座標が大きい方の x 軸方向の端面13aに y 軸の負の向きにせん断力 $F18$ が作用している。

x 軸方向の各端面13aに作用する外力であるせん断力 $F18$ に釣り合うように、ウェブ13の y 軸方向の各端面13bには、内力としてせん断力 F

19が生じる。

[0377] 推定装置130は、フランジ11, 12が連結されていないウェブ13にせん断力F18が作用して座屈したときの、ウェブ13の座屈応力度を推定する。なお、推定装置130は、H形鋼10において、フランジ11, 12の厚さが無視できる程度に薄い、フランジ11, 12の剛性が無視できる程度に低い等の場合に、H形鋼10の座屈応力度をウェブ13の座屈応力度として推定してもよい。

[0378] 本実施形態の推定装置130の第2変位推定部132及び応力度算出部133では、ウェブ13の座屈応力度を推定する際に、前記1から6の仮定を行っている。

[0379] 図36に示すように、ウェブ13にせん断力F18が作用すると、ウェブ13がx軸方向に波状に変位する場合がある。x軸方向に波状に変位したウェブ13における、y軸上のある座標かつx軸の上のある座標におけるz軸方向に向けた面外変位が $\sin(\pi(x + \lambda \sin(\pi y / b_w)) / a)$ の式で表されると仮定すると、x軸方向に波状に変位したウェブ13のx軸方向の波長は、 $2a$ になる。x軸方向の半波長は、 a になる。

図37は、ウェブ13のx軸方向の中央部におけるx軸方向の長さが波長 $2a$ である部分の面外変位を示す図である。

[0380] ウェブ13にせん断力F18が作用している場合、従来は(159)式で表されるフーリエ級数を用いてx軸上のある座標かつy軸上のある座標におけるz軸方向に向けたウェブ13の第1面外変位 w_w を推定していた。

発明者らは、三角関数を用いつつも、フーリエ級数よりも少ない項数で、x軸上のある座標かつy軸上のある座標におけるz軸方向に向けたウェブ13の第1面外変位 w_w を推定できる関数を複数検討した。

その結果、ウェブ13にせん断力F18が作用する場合、x軸上のある座標かつy軸上のある座標におけるz軸方向に向けたウェブ13の第1面外変位 w_w は(316)式により、フーリエ級数よりも少ない項数で推定されることを見出した。ただし、 N は2以上の自然数であり、 a_0 , a_n , b_n は未定係

数である。

(316) 式は、y 軸の座標の累乗関数を用いた三角関数による項を含む。 $\cos \pi (2y/b_w)^n$ 及び $\cos (\pi/2) (2y/b_w)^n$ は、基底となる。(316) 式は、ウェブ13等の板要素の面外変形の推定に好ましく用いることができる。

[0381] [数96]

$$w_w = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n \right) \quad \cdot \cdot (316)$$

[0382] 一方で、x 軸上の任意の座標かつ y 軸上のある座標における z 軸方向に向けたウェブ13の第2面外変位 W_w は、(318) 式により推定される。(318) 式は、前述のように、ウェブ13における x 軸上のある座標における z 軸方向に向けた面外変位が $\sin (\pi (x + \lambda \sin (\pi y/b_w)) / a)$ の式で表される、という仮定に基づく。ただし、(318) 式における未定係数 λ は、y 軸方向の位相のずれを表す実数である。

なお、(318) 式に (316) 式を代入すると、(319) 式が得られる。(319) 式において N が 2 である場合には、(320) 式のように変形できる。

[0383] [数97]

$$\begin{aligned} W_w &= \sin \frac{\pi}{a} \left(x + \lambda \sin \frac{\pi y}{b_w} \right) \cdot w_w \quad \cdot \cdot (318) \\ W_w &= \sin \frac{\pi}{a} \left(x + \lambda \sin \frac{\pi y}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdot \cdot (319) \\ W_w &= \sin \frac{\pi}{a} \left(x + \lambda \sin \frac{\pi y}{b_w} \right) \left(a_0 + a_1 \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} \right) + b_1 \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} \right) + a_2 \cos \pi \left(\frac{2y}{b_w} \right)^2 + b_2 \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y}{b_w} \right)^2 \right) \\ &\quad \cdot \cdot (320) \end{aligned}$$

[0384] 例えば、図37のウェブ13にせん断力 F18 が作用する前における、ウェブ13において x 軸の座標が x_0 、y 軸の座標が y_0 の部分（以下、推定対象部分と言う）の z 軸の座標は 0 である。ウェブ13にせん断力 F18 が作用した後において、この推定対象部分における第2面外変位 W_w は、(319-1) 式により推定され、このときの z 軸の座標は、0 に (319-1) 式

により推定した第2面外変位 W_w を足した値となる。すなわち、せん断力 F_{18} が作用した後では、推定対象部分は、 x 軸の座標が x_0 、 y 軸の座標が y_0 、 z 軸の座標が W_w となる位置に配置されていると推定される。

[0385] [数98]

$$W_w = \sin \frac{\pi}{a} \left(x_0 + \lambda \sin \frac{\pi y_0}{b_w} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \pi \left(\frac{2y_0}{b_w} \right)^n + b_n \cos \frac{\pi}{2} \left(\frac{2y_0}{b_w} \right)^n \right) \right] \quad \cdots (319)$$

[0386] 第2変位推定部132に含まれている第1変位推定部52は、ウェブ13にせん断力 F_{18} が作用したときに、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線 $M1$ に対して y 軸方向に対称になると推定する。すなわち、推定プログラム91では、前記変位の推定プログラム61により、第1変位推定部52を、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線 $M1$ に対して y 軸方向に対称になると推定させる。この理由は、ウェブ13の形状、拘束条件が基準線 $M1$ に対して対称であり、ウェブ13に作用するせん断力 F_{18} が x 軸方向におけるいずれの y 軸方向断面においても同様であるためである。

第2変位推定部132は、第1変位推定部52が推定した第1面外変位 w_w を用いて、ウェブ13の第2面外変位 W_w を(319)式により推定する。

[0387] ウェブ13は、 x 軸の座標が0以上 a 以下という閉区間に配置され、 y 軸の座標が $-(b_w/2)$ 以上 $(b_w/2)$ 以下という閉区間に配置されている。このとき、座屈変形によりウェブ13内で生じる歪エネルギー U は(321)式で表され、せん断力 F_{18} により与えられる外力ポテンシャル V は(322)式で表される。

全ポテンシャルエネルギー Π は、歪エネルギー U と外力ポテンシャル V との和として、(323)式で表される。

[0388] [数99]

$$U = \frac{D_w}{2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy$$

$$+ \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \tau_{cr} t_w \left[\frac{\delta_w}{a} - \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial y} \right) \right] dx dy \quad \cdots (321)$$

$$V = -\tau_{cr} b_w t_w \delta_w \quad \cdots (322)$$

$$\Pi = U + V \quad \cdots (323)$$

[0389] ここで、 D_w はウェブ13の板剛性であり、(325)式で表される。 τ_{cr} はウェブ13の座屈応力度である。関数 δ_w は、座屈が発生した時のウェブ13のx軸方向の変形を表現した関数であり、(326)式で表される。ただし、 δ はウェブ13のx軸方向の第2端上のy軸方向の第2端(上端)におけるy軸方向の変位である。

[0390] [数100]

$$D_w = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad \cdot \cdot (325)$$

$$\delta_w = \delta \quad \cdot \cdot (326)$$

[0391] 応力度算出部133は、ウェブ13の座屈応力度 τ_{cr} を、(319)式を用いてエネルギー法に基づいて求める。応力度算出部133は、ウェブ13の座屈応力度 τ_{cr} を、(330)式及び(331)式を用いて、(332)式による座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n 、 b_n 、 λ 及び半波長 a に基づいて、座屈応力度 τ_{cr} を求める。

ただし、座屈係数 k は、(333)式により求められる。

[0392] [数101]

$$A = \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left(\frac{\partial W_w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial W_w}{\partial y} \right) dy dx \quad \cdot \cdot (330)$$

$$B = \frac{b_w^2}{2\pi^2} \int_0^a \int_{-\frac{b_w}{2}}^{\frac{b_w}{2}} \left[\left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W_w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx$$

$$\quad \cdot \cdot (331)$$

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2 B}{b_w^2 A} \quad \cdot \cdot (332)$$

$$k = \frac{B}{A} \quad \cdot \cdot (333)$$

[0393] 具体的には、半波長 a 及び未定係数 λ を定数として扱う。この状態で、前記全ポテンシャルエネルギー Π を未定係数 a_n 、 b_n で偏微分した関数が0に等しいことを表す方程式を連立させて、実数である a_n 、 b_n を求める。連立方程式の解となる a_n 、 b_n の組が複数ある場合には、 a_n 、 b_n の複数の組のうち、(332)式による座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える a_n 、 b_n の組に基づいて(a_n 、 b_n の組を(332)式に代入して)座屈応力度 τ_{cr} を求める。次に、半波長 a 及び未定係数 λ を変数として扱う。前記 a_n 、 b_n

の組が求められた全ポテンシャルエネルギー Π を半波長 a 、未定係数 λ で偏微分した関数が0に等しいことを表す方程式から、半波長 a 及び未定係数 λ を求める。以上のように求められた前記 a_n 、 b_n の組及び半波長 a 及び定数 λ に基づいて求められた座屈応力度 τ_{cr} が、求める座屈応力度 τ_{cr} となる。

連立方程式の解となる未定係数 a_n 、 b_n の組が1つのみの場合には、 a_n 、 b_n の組が(332)式による座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える場合に、 a_n 、 b_n の組に基づいて座屈応力度 τ_{cr} を求める。次に、半波長 a 及び未定係数 λ を変数として扱い、前述のように座屈応力度 τ_{cr} を求める。

[0394] なお、本実施形態の座屈応力度の推定方法（以下、単に推定方法とも言う）では、第1実施形態の変位の推定方法を用いて、せん断力 F_{18} が作用して座屈するウェブ13の座屈応力度 τ_{cr} を推定する。推定方法では、ウェブ13の第2面外変位 W_w を(319)式により推定する第2変位推定工程と、ウェブ13の座屈応力度 τ_{cr} を、エネルギー法に基づいて求める応力度算出工程と、を行う。

第2変位推定工程では、変位の推定方法の第1変位推定工程が行われる。ウェブ13の形状、拘束条件、及びウェブ13に作用するせん断力 F_{18} 全てが基準線 M_1 に対して対称であるため、第1変位推定工程では、ウェブ13の第1面外変位 w_w が基準線 M_1 に対して y 軸方向に対称になると推定される。第2変位推定工程では、ウェブ13の第2面外変位 W_w を(319)により推定する。

応力度算出工程では、ウェブ13の座屈応力度 τ_{cr} を、(319)式を用いてエネルギー法に基づいて求める。

[0395] ウェブ13に座屈応力度 τ_{cr} が生じるときにウェブ13に作用するせん断力 F_{18} は、板要素に関する公知の方程式から求めることができる。ウェブ13に作用するせん断力 F_{18} をこのせん断力 F_{18} よりも小さくすることで、ウェブ13が座屈するのを抑えることができる。

[0396] (面外変位及び座屈応力度の推定精度の評価)
(面外変位による比較)

図38に、ウェブ13にせん断力F18が作用する場合の、y軸の座標によるウェブ13の第2面外変位 W_w の推定結果を表す。ウェブ13のy軸方向の端面13bは、固定支持されているとした。この第2面外変位 W_w は、図37の切断線A15-A15の断面における面外変位である。

図38において、横軸はウェブ13の長さ b_w の半分の値($b_w/2$)に対するy軸の座標を表し、縦軸は推定したウェブ13の第2面外変位 W_w を表す。横軸の-1はウェブ13の下端を表し、横軸の1はウェブ13の上端を表す。縦軸において、第2面外変位 W_w の値は、図37の範囲における第2面外変位 W_w の最大値により無次元化している。すなわち、図37において、切断線A15-A15の以外の断面において、切断線A15-A15の断面における第2面外変位 W_w の2倍程度変位している部分がある。このため、切断線A15-A15の断面における無次元化した第2面外変位 W_w が、-0.5~0.5程度の値になる。

[0397] 図38において、実線による線L41はFEMによる解析結果を表す。点線による線L42は本実施形態の(319)式を用いて推定した結果(ただしNは2)を表し、一点鎖線による線L43は(159)式を用いて推定した結果(ただしNは25)を表す。線L42及び線L43が線L41にほぼ一致しているため、線L42及び線L43が線L41に重なっている。

FEMによる解析結果を、(159)式のフーリエ級数でNが25の場合と同程度の精度で近似するのに必要な、本実施形態の(319)式におけるNは、2であることが分かった。

[0398] (座屈応力度による比較)

ウェブ13の座屈応力度 τ_{cr} を、(159)式、本実施形態の(319)式で求め、座屈係数で比較した結果を、表5及び図39に示す。

[0399]

[表5]

	N	ウェブのy軸方向の端面 の支持方法	
		単純支持	固定支持
実施形態 :(319)式	2	5.37	9.05
フーリエ級数 :(159)式	4	9.62	21.24
	5	7.65	16.59
	7	5.97	12.10
	9	5.46	10.18
	11	5.59	9.33
	13	5.39	9.06
	15	5.39	9.04
	20	5.39	9.03
	25	5.39	9.03

[0400] 本実施形態の(319)式を用いた場合には、Nを2にした。一方、比較例である(159)式のフーリエ級数を用いた場合には、Nを4, 5, 7, ..., 25と変化させた。

表5において、ウェブ13のy軸方向の端面13bが単純支持の場合の座屈係数は、第2面外変位 W_w 及び座屈応力度 τ_{cr} の推定精度が高くなるのに従い、5.34に収束する(図39中の線L46参照)。ウェブ13のy軸方向の端面13bが固定支持の場合の座屈係数は、面外変位 W_w 及び座屈応力度 τ_{cr} の推定精度が高くなるのに従い、8.98に収束する(図39中の線L12参照)。

[0401] 図39において、横軸はNを表し、縦軸は座屈係数kを表す。白抜きの丸印は、本実施形態の(319)式を用いた単純支持の場合の推定結果を表す。黒塗り丸印は、(159)式のフーリエ級数を用いた単純支持の場合の推定結果を表す。白抜きの四角印は、本実施形態の(319)式を用いた固定支持の場合の推定結果を表す。黒塗り四角印は、(159)式のフーリエ級数を用いた固定支持の場合の推定結果を表す。

本実施形態の(319)式を用いて座屈係数kを評価した場合の精度は、単純支持及び固定支持のいずれにおいても、(159)式のフーリエ級数で

Nが25の場合の精度と同程度であることが分かった。

[0402] 以上説明したように、本実施形態の推定装置50、推定方法、及び推定プログラム131によれば、発明者らは、三角関数を用いつつも、(159)式のフーリエ級数よりも少ない項数で、せん断力F18が作用するウェブ13の面外変位を推定できる関数を複数検討した。その結果、(319)式を用いてウェブ13の第2面外変位 W_w をフーリエ級数よりも少ない項数で推定できることを見出した。

(319)式は、(159)式のフーリエ級数よりも少ない項数でウェブ13の第2面外変位 W_w を推定できるため、フーリエ級数を用いた場合よりも推定に必要な計算を簡単に行うことができる。さらに、第2面外変位 W_w を一定の精度で推定するために必要な項数が、(159)式のフーリエ級数を用いて推定する場合よりも、(319)式を用いて推定する場合の方が少ないため、フーリエ級数を用いた場合よりも推定結果を物理的に理解しやすく定式化することができる。

[0403] (319)式を用いることで、ウェブ13の第2面外変位 W_w を素早く近似することができる。すなわち、面内曲げを受ける建築物の部材や部材を構成する板要素が局部座屈を生じるときの座屈波形を素早く近似することができる。

[0404] また、Nは2である。まず(319)式において、半波長 a 及び未定係数 λ を定数として扱った状態で未定係数 a_1 、 a_2 、 b_1 、及び b_2 を求め、次に半波長 a 及び未定係数 λ を変数として扱い、(319)式における半波長 a 及び未定係数 λ を求める。(319)式において未定係数 a_1 等を求める際に、一度に求める未定係数の数が4つ以下である。このため、解の公式が知られている4次以下の方程式を用いて未定係数 a_1 、 a_2 、 b_1 、及び b_2 等を容易に求めることができる。

また、応力度算出部133は(応力度算出工程では)、(330)式及び(331)式を用いて、(332)式による座屈応力度 τ_{cr} に最小の正の値を与える実数である a_n 、 b_n 、 λ 及び半波長 a に基づいて、座屈応力度 τ_{cr}

を求める。エネルギー法に基づいて座屈応力度 τ_{cr} を求める際に、(330) 式から (332) 式の数式を用いて座屈応力度 τ_{cr} を正確に求めることができる。

[0405] なお、前記実施形態では、ウェブ13のy軸方向の各端面13bに外力であるせん断力が、x軸方向に作用してもよい。y軸方向の各端面13bに作用するせん断力に釣り合うように、ウェブ13のx軸方向の各端面13aには、内力としてせん断力が生じる。そして、前記(321)式の右辺第2項括弧内 δ_w/a を δ_w/b_w と読み替え、(322)式の右辺の b_w を a と読み替えることで適用される。この場合、 δ はウェブ13のx軸方向の第2端上のy軸方向の第2端(上端)におけるx軸方向の変位である。

[0406] (319)式におけるNは3以上でもよい。

座屈応力度 τ_{cr} をエネルギー法に基づいて求める際には、(330)式から(332)式を用いなくてもよい。

前記実施形態では、推定装置130が板要素であるウェブ13の座屈応力度を推定するとしたが、板要素はウェブ13に限定されず、下フランジ11や上フランジ12等でもよい。

[0407] なお、本実施形態の板状体の設計方法は、第2実施形態から第7実施形態の変位の推定方法を用いてH形鋼10及びウェブ(板要素)13の少なくとも一方である板状体を設計する板状体の設計方法である。なお、板要素は、下フランジ11や上フランジ12でもよい。

[0408] 以上、本発明の第1実施形態及び第7実施形態について図面を参照して詳述したが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲の構成の変更、組み合わせ、削除等も含まれる。さらに、各実施形態で示した構成のそれぞれを適宜組み合わせる利用できることは、言うまでもない。

[0409] (座屈応力度の推定精度の評価)

(1. 板要素が等曲げを受ける場合)

例えば、板要素に曲げモーメントが作用する場合の、本実施形態の推定装

置による座屈応力度の推定精度の評価をした結果について説明する。

精度の比較対象として、「鋼構造座屈設計指針」（日本建築学会編、以下、文献 1 と言う）を用いた。文献 1 には、曲げモーメントが作用して座屈する板要素の座屈係数 k が示されている。

このときの板要素の諸元及び境界条件は、以下のようである。板要素の両端は、単純支持又は固定支持されている。板要素の両端に大きさが互いに等しい曲げモーメントが作用することで、板要素に作用する曲げモーメントが釣り合う状態（等曲げ）である。

なお、座屈応力度 σ_c と座屈係数 k との間には、（336）式の関係がある。

[0410] [数102]

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \quad \cdots (336)$$

[0411] 文献 1 には、板要素の両端が単純支持の場合、座屈係数 k は 23.9 になると記載されている。一方で、板要素の両端が固定支持の場合、座屈係数 k は 39.6 になると記載されている。この結果を、表 6 に示すとともに、図 40 中に線 L51，L52 として示す。

[0412] [表6]

	N	ウェブのy軸方向の端面の支持方法	
		単純支持	固定支持
実施形態	1	24.01	40.27
フーリエ級数 :(195)式	4	82.92	272.14
	5	58.35	182.62
	7	37.35	104.27
	9	29.24	72.29
	11	25.70	56.65
	13	24.23	48.27
	15	23.88	43.64
	20	23.88	39.75
	25	23.88	39.66
鋼構造座屈設計指針		23.9	39.6

[0413] 図 40 において、横軸は前記 N を表し、縦軸は座屈係数 k を表す。実線に

よる線L 5 1は、文献1において単純支持の場合を表す。点線による線L 5 2は、文献1において固定支持の場合を表す。

[0414] 一方で、第5実施形態の座屈応力度の、曲げモーメントが作用して座屈する板要素の座屈応力度を推定した。ただし、板要素のアスペクト比は、10とした。すなわち、板要素のy軸方向の長さに対する、板要素のx軸方向の長さの比が、10である。

単純支持の場合には、(159)式のフーリエ級数では、 $N = 15$ 項の部分で解が収束している。一方で、第5実施形態の推定方法では、1項部分で、ほぼ同精度の解析解が得られている。

また、固定の場合には、(159)式のフーリエ級数では、 $N = 25$ 項の部分で解が収束している。一方で、第5実施形態の推定方法では、1項部分で、ほぼ同精度の解析解が得られている。

すなわち、(159)式のフーリエ級数では、収束計算に多くの時間が必要である。一方で、第5実施形態の推定方法では、収束計算を用いない計算(手計算)で、解析解が即座に算出可能であることが分かった。

[0415] (2. H形鋼が等曲げを受ける場合)

様々な仕様のH形鋼に対して、FEMによる座屈固有値解析、及び本実施形態の推定方法を行った。H形鋼の諸元及び境界条件は、以下のようである。

- ・ H形鋼の梁せいが400mm～1000mmの約600シリーズが対象
- ・ H形鋼の両端は、単純支持

図41は、従来の推定方法による結果を表す。図41における横軸、縦軸は、図26と同様である。

図42は、本実施形態の推定方法による結果を表す。図42における横軸、縦軸は、図26と同様である。

図41における線L 5 6、及び図41における線L 5 7は、各推定方法により引かれた線である。○印は、FEMによる座屈固有値解析結果を表す。

[0416] 図41に示す従来の推定方法は、FEMによる座屈固有値解析結果に対し

て大きくばらついていることが分かった。これに対して、図4 2に示す本実施形態の推定方法では、本推定方法による線L 5 7上に、F E Mによる座屈固有値解析結果のプロットが配置されている。このため、本実施形態の推定方法は、従来の推定方法に比べて、精度が格段に向上していることが分かった。

なお、F E Mにより求めた座屈応力度に対する、各推定方法により求めた座屈応力度の比を、試算した。従来の推定方法では、この比の平均が1. 2 0 7であり、標準偏差が0. 3 1 2であった。一方で、本実施形態の推定方法では、この比の平均が0. 9 9 2であり、標準偏差が0. 0 0 7であった。

産業上の利用可能性

[0417] 本発明によれば、フーリエ級数を用いた場合よりも推定に必要な計算を簡単に行うとともに、推定結果を物理的に理解しやすく定式化できる変位の推定装置、座屈応力度の推定装置、変位の推定方法、座屈応力度の推定方法、変位の推定プログラム、及び座屈応力度の推定プログラムを提供できる。よって、産業上の利用可能性は大である。

符号の説明

[0418] 1 0 H形鋼
1 1 下フランジ（弾性要素、第1フランジ板要素）
1 2 上フランジ（弾性要素、第2フランジ板要素）
1 3 ウェブ（弾性要素、ウェブ板要素）
1 3 a, 1 3 c 端面
5 0 推定装置（座屈応力度の推定装置）
5 2 第1変位推定部
5 3, 8 3 応力度算出部
6 1 推定プログラム（座屈応力度の推定プログラム）
8 0, 9 0, 1 0 0, 1 1 0, 1 2 0, 1 3 0 推定装置（座屈応力度の推定装置）

8 1, 9 1, 1 0 1, 1 1 1, 1 2 1, 1 3 1 推定プログラム（座屈応
力度の推定プログラム）

8 2, 9 2, 1 0 2, 1 1 2, 1 2 2, 1 3 2 第2変位推定部

F 6, F 8 圧縮力

F 1 1, F 1 3 曲げモーメント

F 1 6, F 1 8 せん断力

M 1 基準線