

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7489638号
(P7489638)

(45)発行日 令和6年5月24日(2024.5.24)

(24)登録日 令和6年5月16日(2024.5.16)

(51)国際特許分類 F I
G 0 1 N 29/12 (2006.01) G 0 1 N 29/12
G 0 1 N 29/46 (2006.01) G 0 1 N 29/46

請求項の数 8 (全27頁)

(21)出願番号	特願2020-88393(P2020-88393)	(73)特許権者	391021385 株式会社K J T D 東京都港区芝2丁目3番3号
(22)出願日	令和2年5月20日(2020.5.20)	(73)特許権者	501267357 国立研究開発法人建築研究所 茨城県つくば市立原1番地3
(65)公開番号	特開2021-181967(P2021-181967 A)	(74)代理人	110000176 弁理士法人一色国際特許事務所
(43)公開日	令和3年11月25日(2021.11.25)	(72)発明者	田代 秀夫 東京都豊島区東池袋3丁目1番1号 株 式会社K J T D内
審査請求日	令和5年3月14日(2023.3.14)	(72)発明者	奥田 聖哉 東京都豊島区東池袋3丁目1番1号 株 式会社K J T D内
特許法第30条第2項適用	令和1年7月24日~7月 26日に東京ビッグサイト西展示棟1~4ホール、南展 示棟1・2ホール(東京都江東区有明3-11-1)に おいて開催された一般社団法人日本非破壊検査工業会主 催第9回非破壊評価総合展(メンテナンス・レジリエンス T O K Y O 2 0 1 9 内)にて公開	(72)発明者	眞方山 美穂 最終頁に続く
特許法第30条第2項適用	令和1年10月17日に株 式会社タツノ横浜工場(神奈川県横浜市栄区笠間4丁目 1番1号)において開催された神奈川県非破壊試験技術 最終頁に続く		

(54)【発明の名称】 非破壊検査装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

被検体に衝突する衝突物に設けられ、前記被検体と前記衝突物の衝突による打撃力を検出して、それを出力する打撃力センサと、

前記打撃力センサによる出力を所定周期で取得することにより、打撃力の時系列データを取得する第1取得手段と、

前記第1取得手段により取得された前記打撃力の時系列データから最大打撃力を抽出する第1抽出手段と、

前記被検体の表面の対向位置において前記被検体と前記衝突物の衝突による打音の音圧を検出して、それを出力する電気音響変換器と、

前記電気音響変換器による出力を所定周期で取得することにより、音圧の時系列データを取得する第2取得手段と、

前記第2取得手段により取得された前記音圧の時系列データから音圧の絶対値の最大値を最大音圧として抽出する第2抽出手段と、

前記第2取得手段によって取得された前記音圧の時系列データをフーリエ変換することにより、振動数ごとの音圧のスペクトル強度を表した音圧振動数特性を算出するフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段によって算出された前記音圧振動数特性から固有振動数を抽出する固有振動数抽出手段と、

前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力と、前記第2抽出手段によって抽

出された前記最大音圧又はその補正值と、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数とに基づいて、前記被検体の前記表面下の内部欠陥の大きさと前記表面から前記内部欠陥までの深さとのうち少なくとも一方を算出する算出手段と、
を備え、

前記内部欠陥の大きさを a とし、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数を f_n とし、前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力を F_{max} とし、前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧を P_{max} とし、所定の定数を A 又は B とし、前記被検体のヤング率を E とし、前記被検体のポアソン比を ν とし、前記被検体の密度を ρ とした場合、

前記算出手段が次式(1)又は次式(2)を用いて前記内部欠陥の大きさを算出する非破壊検査装置。

10

【数1】

$$a = \sqrt[3]{\frac{A}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}}{F_{max}} \right)}} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad \dots (1)$$

$$a = \sqrt[4]{\frac{B}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}}{F_{max}} \right)}} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad \dots (2)$$

20

【請求項2】

被検体に衝突する衝突物に設けられ、前記被検体と前記衝突物の衝突による打撃力を検出して、それを出力する打撃力センサと、

前記打撃力センサによる出力を所定周期で取得することにより、打撃力の時系列データを取得する第1取得手段と、

前記第1取得手段により取得された前記打撃力の時系列データから最大打撃力を抽出する第1抽出手段と、

前記被検体の表面の対向位置において前記被検体と前記衝突物の衝突による打音の音圧を検出して、それを出力する電気音響変換器と、

30

前記電気音響変換器による出力を所定周期で取得することにより、音圧の時系列データを取得する第2取得手段と、

前記第2取得手段により取得された前記音圧の時系列データから音圧の絶対値の最大値を最大音圧として抽出する第2抽出手段と、

前記第2取得手段によって取得された前記音圧の時系列データをフーリエ変換することにより、振動数ごとの音圧のスペクトル強度を表した音圧振動数特性を算出するフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段によって算出された前記音圧振動数特性から固有振動数を抽出する固有振動数抽出手段と、

40

前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力と、前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧又はその補正值と、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数とに基づいて、前記被検体の前記表面下の内部欠陥の大きさと前記表面から前記内部欠陥までの深さとのうち少なくとも一方を算出する算出手段と、
を備え、

前記被検体の前記表面から前記内部欠陥までの深さを h とし、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数を f_n とし、前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力を F_{max} とし、前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧を P_{max} とし、所定の定数を A とし、所定の定数を C とし、所定の定数を D とし、前記被検体のヤング率を E とし、前記被検体のポアソン比を ν とし、前記被検体の密度を ρ とした場合、

50

前記算出手段が次式(3)又は次式(4)を用いて前記内部欠陥までの深さを算出する非破壊検査装置。

【数2】

$$h = \frac{2\pi f_n a C}{\sqrt{\left(\frac{P_{max}}{F_{max}}\right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \quad \dots (3)$$

$$h = \frac{2\pi n D}{\sqrt{\left(\frac{P_{max}}{F_{max}}\right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \quad \dots (4)$$

10

但し、式(3)中の a は次式(5)の通りである。

$$a = \sqrt[3]{\frac{A}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}}{F_{max}}\right)} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}} \quad \dots (5)$$

20

【請求項3】

被検体に衝突する衝突物に設けられ、前記被検体と前記衝突物の衝突による打撃力を検出して、それを出力する打撃力センサと、

前記打撃力センサによる出力を所定周期で取得することにより、打撃力の時系列データを取得する第1取得手段と、

前記第1取得手段により取得された前記打撃力の時系列データから最大打撃力を抽出する第1抽出手段と、

前記被検体の表面の対向位置において前記被検体と前記衝突物の衝突による打音の音圧を検出して、それを出力する電気音響変換器と、

30

前記電気音響変換器による出力を所定周期で取得することにより、音圧の時系列データを取得する第2取得手段と、

前記第2取得手段により取得された前記音圧の時系列データから音圧の絶対値の最大値を最大音圧として抽出する第2抽出手段と、

前記第2取得手段によって取得された前記音圧の時系列データをフーリエ変換することにより、振動数ごとの音圧のスペクトル強度を表した音圧振動数特性を算出するフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段によって算出された前記音圧振動数特性から固有振動数を抽出する固有振動数抽出手段と、

前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力と、前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧又はその補正值と、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数とに基づいて、前記被検体の前記表面下の内部欠陥の大きさと前記表面から前記内部欠陥までの深さとのうち少なくとも一方を算出する算出手段と、

40

前記第1取得手段によって取得された前記打撃力の時系列データをフーリエ変換することにより、振動数ごとの打撃力のスペクトル強度を表した打撃力振動数特性を算出する第2フーリエ変換手段と、

前記第2フーリエ変換手段により算出された前記打撃力振動数特性から最大スペクトル強度を抽出する第3抽出手段と、

前記第2フーリエ変換手段により算出された前記打撃力振動数特性に、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数を当て嵌めて、その固有振動数に対応するス

50

ペクトル強度を算出するスペクトル強度算出手段と、

前記第3抽出手段によって抽出された前記最大スペクトル強度と、前記スペクトル強度算出手段によって算出されたスペクトル強度とのレベル差を求めるレベル差算出手段と、

前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧に、前記レベル差算出手段によって算出された前記レベル差に応じた倍率を乗ずることによって、前記最大音圧の前記補正値を算出する補正手段と、

を備える非破壊検査装置。

【請求項4】

被検体に衝突する衝突物に設けられ、前記被検体と前記衝突物の衝突による打撃力を検出して、それを出力する打撃力センサと、

前記打撃力センサによる出力を所定周期で取得することにより、打撃力の時系列データを取得する第1取得手段と、

前記第1取得手段により取得された前記打撃力の時系列データから最大打撃力を抽出する第1抽出手段と、

前記被検体の表面の対向位置において前記被検体と前記衝突物の衝突による打音の音圧を検出して、それを出力する電気音響変換器と、

前記電気音響変換器による出力を所定周期で取得することにより、音圧の時系列データを取得する第2取得手段と、

前記第2取得手段により取得された前記音圧の時系列データから音圧の絶対値の最大値を最大音圧として抽出する第2抽出手段と、

前記第2取得手段によって取得された前記音圧の時系列データをフーリエ変換することにより、振動数ごとの音圧のスペクトル強度を表した音圧振動数特性を算出するフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段によって算出された前記音圧振動数特性から固有振動数を抽出する固有振動数抽出手段と、

前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力と、前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧又はその補正値と、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数とに基づいて、前記被検体の前記表面下の内部欠陥の大きさと前記表面から前記内部欠陥までの深さとのうち少なくとも一方を算出する算出手段と、

を備え、

前記内部欠陥の大きさを a とし、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数を f_n とし、前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力を F_{max} とし、前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧の前記補正値を P_{max}' とし、所定の定数を A 又は B とし、前記被検体のヤング率を E とし、前記被検体のポアソン比を ν とし、前記被検体の密度を ρ とした場合、

前記算出手段が次式(6)又は次式(7)を用いて前記内部欠陥の大きさを算出する非破壊検査装置。

【数3】

$$a = \sqrt[3]{\frac{A}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}'}{F_{max}} \right)}} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad \dots (6)$$

$$a = \sqrt[4]{\frac{B}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}'}{F_{max}} \right)}} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad \dots (7)$$

【請求項5】

被検体に衝突する衝突物に設けられ、前記被検体と前記衝突物の衝突による打撃力を検出して、それを出力する打撃力センサと、

前記打撃力センサによる出力を所定周期で取得することにより、打撃力の時系列データを取得する第 1 取得手段と、

前記第 1 取得手段により取得された前記打撃力の時系列データから最大打撃力を抽出する第 1 抽出手段と、

前記被検体の表面の対向位置において前記被検体と前記衝突物の衝突による打音の音圧を検出して、それを出力する電気音響変換器と、

前記電気音響変換器による出力を所定周期で取得することにより、音圧の時系列データを取得する第 2 取得手段と、

前記第 2 取得手段により取得された前記音圧の時系列データから音圧の絶対値の最大値を最大音圧として抽出する第 2 抽出手段と、

前記第 2 取得手段によって取得された前記音圧の時系列データをフーリエ変換することにより、振動数ごとの音圧のスペクトル強度を表した音圧振動数特性を算出するフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段によって算出された前記音圧振動数特性から固有振動数を抽出する固有振動数抽出手段と、

前記第 1 抽出手段によって抽出された前記最大打撃力と、前記第 2 抽出手段によって抽出された前記最大音圧又はその補正值と、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数とに基づいて、前記被検体の前記表面下の内部欠陥の大きさと前記表面から前記内部欠陥までの深さとのうち少なくとも一方を算出する算出手段と、
を備え、

前記被検体の前記表面から前記内部欠陥までの深さを h とし、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数を f_n とし、前記第 1 抽出手段によって抽出された前記最大打撃力を F_{max} とし、前記第 2 抽出手段によって抽出された前記最大音圧の前記補正值を P_{max}' とし、所定の定数を A とし、所定の定数を B とし、所定の定数を C とし、前記被検体のヤング率を E とし、前記被検体のポアソン比を ν とし、前記被検体の密度を ρ とした場合、

前記算出手段が次式 (8) 又は次式 (9) を用いて前記内部欠陥のまでの深さを算出する非破壊検査装置。

【数 4】

$$h = \frac{2\pi f_n a C}{\sqrt{\left(\frac{P_{max}'}{F_{max}}\right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \quad \dots (8)$$

$$h = \frac{2\pi f_n D}{\sqrt{\left(\frac{P_{max}'}{F_{ma}}\right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \quad \dots (9)$$

但し、式 (8) 中の a は次式 (10) の通りである。

$$a = \sqrt[3]{\frac{A}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}'}{F_{max}}\right)} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}} \quad \dots (10)$$

10

20

30

40

50

【請求項 6】

前記被検体の前記表面から前記内部欠陥までの深さを h とし、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数を f_n とし、前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力を F_{max} とし、前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧を P_{max} とし、所定の定数を A とし、所定の定数を C とし、所定の定数を D とし、前記被検体のヤング率を E とし、前記被検体のポアソン比を ν とし、前記被検体の密度を ρ とした場合、

前記算出手段が次式(1.1)又は次式(1.2)を用いて前記内部欠陥までの深さを算出する請求項1に記載の非破壊検査装置。

【数 5】

$$h = \frac{2\pi f_n a C}{\sqrt{\left(\frac{P_{max}}{F_{max}}\right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \quad \dots (11)$$

10

$$h = \frac{2\pi f_n D}{\sqrt{\left(\frac{P_{max}}{F_{max}}\right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \quad \dots (12)$$

但し、式(1.1)中の a は次式(1.3)の通りである。

20

$$a = \sqrt[3]{\frac{A}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}}{F_{max}}\right) \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \quad \dots (13)$$

【請求項 7】

前記内部欠陥の大きさを a とし、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数を f_n とし、前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力を F_{max} とし、前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧の前記補正值を P_{max}' とし、所定の定数を A 又は B とし、前記被検体のヤング率を E とし、前記被検体のポアソン比を ν とし、前記被検体の密度を ρ とした場合、

30

前記算出手段が次式(1.4)又は次式(1.5)を用いて前記内部欠陥の大きさを算出する請求項3に記載の非破壊検査装置。

【数 6】

$$a = \sqrt[3]{\frac{A}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}'}{F_{max}}\right) \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \quad \dots (14)$$

40

$$a = \sqrt[4]{\frac{B}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}'}{F_{max}}\right) \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \quad \dots (15)$$

【請求項 8】

前記被検体の前記表面から前記内部欠陥までの深さを h とし、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数を f_n とし、前記第1抽出手段によって抽出された前

50

記最大打撃力を F_{max} とし、前記第 2 抽出手段によって抽出された前記最大音圧の前記補正值を P_{max}' とし、所定の定数を A とし、所定の定数を B とし、所定の定数を C とし、前記被検体のヤング率を E とし、前記被検体のポアソン比を ν とし、前記被検体の密度を ρ とした場合、

前記算出手段が次式 (16) 又は次式 (17) を用いて前記内部欠陥のまでの深さを算出する

請求項 3、4 又は 7 に記載の非破壊検査装置。

【数 7】

$$h = \frac{2\pi f_n a C}{\sqrt{\left(\frac{P_{max}'}{F_{max}}\right) \rho \sqrt{12\rho(1-\nu^2)}}} \dots (16)$$

10

$$h = \frac{2\pi n D}{\sqrt{\left(\frac{P_{max}'}{F_{max}}\right) \rho \sqrt{12\rho(1-\nu^2)}}} \dots (17)$$

20

但し、式 (16) 中の a は次式 (18) の通りである。

$$a = \sqrt[3]{\frac{A}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}'}{F_{max}}\right) \sqrt{12\rho(1-\nu^2)}}} \dots (18)$$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

30

【0001】

本発明は、被検体の内部欠陥の大きさと、被検体の表面から内部欠陥までの深さのうち少なくとも一方を測定する非破壊検査装置に関する。

【背景技術】

【0002】

病院、学校等の特殊構造物は法令により打音検査等による診断が義務付けられている。また、道路橋やトンネル等のインフラも同じく法令により打音検査等による診断が義務付けられている。打音検査とは、コンクリート構造物等をハンマで叩いた際に発生する音で部材の剥離、浮き等欠陥の有無を診断する技術である。しかしながら、打音検査は検査員の経験に基づくところが大きく、判断基準が定量化されていない。そこで、例えば特許文献 1 には、コンクリート構造物を打撃し、コンクリートの振動加速度を測定することでコンクリートの剥離の有無を判定する方法が開示されている。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特開 2014 - 211333 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、特許文献 1 に記載された方法では、被検体の内部欠陥の有無を判定する

50

ことしかできず、内部欠陥の大きさ及び内部欠陥までの深さを検出することができない。

【0005】

そこで、本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであって被検体の内部欠陥の大きさと、被検体の表面から内部欠陥までの深さのうち少なくとも一方を測定できる非破壊検査装置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】

【0006】

以上の課題を解決するために、被検体に衝突する衝突物に設けられ、前記被検体と前記衝突物の衝突による打撃力を検出して、それを出力する打撃力センサと、前記打撃力センサによる出力を所定周期で取得することにより、打撃力の時系列データを取得する第1取得手段と、前記第1取得手段により取得された前記打撃力の時系列データから最大打撃力を抽出する第1抽出手段と、前記被検体の表面の対向位置において前記被検体と前記衝突部の衝突による打音の音圧を検出して、それを出力する電気音響変換器と、前記電気音響変換器による出力を所定周期で取得することにより、音圧の時系列データを取得する第2取得手段と、前記第2取得手段により取得された前記音圧の時系列データから音圧の絶対値の最大値を最大音圧として抽出する第2抽出手段と、前記第2取得手段によって取得された前記音圧の時系列データをフーリエ変換することにより、振動数ごとの音圧のスペクトル強度を表した音圧振動数特性を算出するフーリエ変換手段と、前記フーリエ変換手段によって算出された前記音圧振動数特性から固有振動数を抽出する固有振動数抽出手段と、前記第1抽出手段によって抽出された前記最大打撃力と、前記第2抽出手段によって抽出された前記最大音圧又はその補正值と、前記固有振動数抽出手段によって抽出された前記固有振動数とに基づいて、前記被検体の前記表面下の内部欠陥の大きさと前記表面から前記内部欠陥までの深さとのうち少なくとも一方を算出する算出手段と、を備える非破壊検査装置が提供される。

【発明の効果】

【0007】

本発明の実施の形態によれば、被検体を破壊することなく、被検体の内部欠陥の大きさと、被検体の表面から内部欠陥までの深さのうち少なくとも一方を測定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図1】第1実施形態の非破壊検査装置のブロック図である。

【図2】打撃力の時系列データの一例を波形によって表したチャートである。

【図3】音圧の時系列データの一例を波形によって表したチャートである。

【図4】振動数ごとの音圧のスペクトル強度を波形によって表したチャートである。

【図5】内部欠陥の大きさの測定値と公称値の比較結果を示したグラフである。

【図6】内部欠陥の大きさの測定値と公称値の比較結果を示したグラフである。

【図7】内部欠陥までの深さの測定値と公称値の比較結果を示したグラフである。

【図8】内部欠陥までの深さの測定値と公称値の比較結果を示したグラフである。

【図9】被検体のモデルの断面図である。

【図10】被検体モデルの平面図である。

【図11】最大音圧と最大加速度の比と、内部欠陥の大きさとの関係を示したグラフである。

【図12】第2実施形態の非破壊検査装置のブロック図である。

【図13】振動数ごとの打撃力のスペクトル強度を波形によって表したチャートである。

【図14】内部欠陥の大きさの測定値と公称値の比較結果を示したグラフである。

【図15】内部欠陥までの深さの測定値と公称値の比較結果を示したグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0009】

以下、図面を参照して、本発明の実施形態について説明する。但し、以下に述べる実施形態には、本発明を実施するために技術的に好ましい種々の限定が付されているところ、

本発明の範囲を以下の実施形態及び図示例に限定するものではない。

【0010】

〔第1の実施の形態〕

<<1. 非破壊検査装置の構成>>

図1は、非破壊検査装置10を示した図面である。

この非破壊検査装置10は、被検体90の内部に存在する内部欠陥93の大きさa[m]と、被検体90の表面91から内部欠陥93までの深さh[m]とを検出する装置である。特に、深さhが100~2500mmである場合のみならず、深さhが100mm以下である場合でも、つまり内部欠陥93が被検体90の表面近傍に存在する場合でも、この非破壊検査装置10では内部欠陥93の大きさa及び内部欠陥93までの深さhを正確に検出することができる。

10

【0011】

被検体90は、例えばコンクリート、セメント、モルタル、石材、金属、セラミック又は樹脂からなる。

内部欠陥93とは、例えば剥離又は内部亀裂のことをいう。

内部欠陥93の大きさaとは、表面91に沿う方向における内部欠陥93の長さのことをいう。内部欠陥93が正方形型の剥離である場合、内部欠陥93の大きさaとはその正方形の辺長をいい、内部欠陥93が円形型の剥離である場合、内部欠陥93の大きさaとはその円形の直径をいい、内部欠陥93が長方形型の剥離である場合、内部欠陥93の大きさaとはその長方形の短辺長又は長辺長をいい、内部欠陥93が長円型の剥離である場合、内部欠陥93の大きさaとは長円の長径又は短径をいう。なお、本明細書において、「長方形」は、正方形を含まない意で用い、「方形」は、正方形及び長方形を含む意で用いる。

20

【0012】

図1に示すように、非破壊検査装置10は、ハンマ21、電気音響変換器22、信号処理回路23、A/Dコンバータ24、打撃力センサ25、信号処理回路26、A/Dコンバータ27、コンピュータ30、ストレージ60、入力デバイス70及び表示デバイス80を備える。

【0013】

入力デバイス70は、押しボタンスイッチ、タッチパネル、ポインティングデバイス若しくはキーボード又はこれらの組み合わせからなる。入力デバイス70は、作業者によって操作されることによって操作内容に応じた信号をコンピュータ30に出力する。入力デバイス70は、設定値の入力に用いられる。

30

【0014】

表示デバイス80はドットマトリクス式表示器又はセグメント表示器である。表示デバイス80は、コンピュータ30から入力した表示信号に応じた表示をする。表示デバイス80は、検出結果、つまり内部欠陥93の大きさa及び内部欠陥93までの深さhの算出結果の表示に用いられる。

【0015】

ハンマ21は、被検体90を叩くために用いられる衝突物である。作業者がハンマ21を被検体90の表面91に衝突させて、打撃力を被検体90に付与する。被検体90に打撃力が付与されると、被検体90の表面91が振動し、その振動による音圧が発生する。

40

【0016】

電気音響変換器22はハンマ21のヘッドの側面に設けられており、ハンマ21が被検体90に衝突することによって被検体90の表面91が振動する時には電気音響変換器22が被検体90の表面91に対向する。電気音響変換器22はマイクロフォンである。つまり、電気音響変換器22は、被検体90の表面91から発生した音圧を電気信号に変換して、音圧を表す電気信号を信号処理回路23に出力する。

【0017】

信号処理回路23は、電気音響変換器22の出力信号を増幅するとともに、その信号を

50

濾波することによってその信号からノイズを除去する。信号処理回路 23 は、増幅及び濾波した信号を A/D コンバータ 24 に出力する。

【0018】

A/D コンバータ 24 は、信号処理回路 23 から入力したアナログ信号を標本化、量子化及び符号化することによって、アナログ信号をデジタル信号に変換する。A/D コンバータ 24 は、音圧を表すデジタル信号をコンピュータ 30 に出力する。

【0019】

打撃力センサ 25 は、ハンマ 21 のヘッドに設けられている。打撃力センサ 25 は、被検体 90 とハンマ 21 の衝突による打撃力を電気信号に変換して、打撃力を表す電気信号を信号処理回路 26 に出力する。打撃力センサ 25 は例えば歪みゲージである。

10

【0020】

信号処理回路 26 は、打撃力センサ 25 の出力信号を増幅するとともに、その信号を濾波することによってその信号からノイズを除去する。信号処理回路 26 は、増幅及び濾波した信号を A/D コンバータ 27 に出力する。

【0021】

A/D コンバータ 27 は、信号処理回路 26 から入力したアナログ信号を標本化、量子化及び符号化することによって、アナログ信号をデジタル信号に変換する。A/D コンバータ 27 は、打撃力を表すデジタル信号をコンピュータ 30 に出力する。

【0022】

コンピュータ 30 は、CPU、RAM、システムバス及び各種インターフェース等を備えた小型コンピュータである。

20

【0023】

ストレージ 60 は、半導体メモリ又はハードディスクドライブ等からなる記憶装置である。

【0024】

上述のような信号処理回路 23、A/D コンバータ 24、信号処理回路 26、A/D コンバータ 27、コンピュータ 30、ストレージ 60、入力デバイス 70 及び表示デバイス 80 が、ハンマ 21 に、特にハンマ 21 の柄部に設けられていてもよい。

【0025】

ストレージ 60 には、コンピュータ 30 にとって読取可能・実行可能なプログラム 61 が格納されている。コンピュータ 30 がプログラム 61 を実行することによって、コンピュータ 30 が第 1 取得部 31、第 1 抽出部 32、第 2 取得部 33、第 2 抽出部 34、高速フーリエ変換部 35、固有振動数抽出部 36 及び算出部 37 として機能する。以下、コンピュータ 30 の機能について詳細に説明する。

30

【0026】

<< 2. コンピュータの機能 >>

(1) 第 1 取得部

第 1 取得部 31 として機能するコンピュータ 30 は、A/D コンバータ 27 の出力デジタル信号（つまり、打撃力センサ 25 によって検出された打撃力）を所定周期で取得することにより、打撃力の時系列データを取得する。打撃力の時系列データとは、打撃力センサ 25 によって検出された打撃力の所定周期おきの値を時系列で配列したデータ列のことをいう。コンピュータ 30 が A/D コンバータ 27 の出力デジタル信号を取得する際のサンプリングレートは、A/D コンバータ 27 のサンプリングレートに等しくても良いし、等しくなくてもよい。

40

【0027】

ここで、作業者がハンマ 21 を被検体 90 に衝突させると、衝突の瞬間に打撃力センサ 25 の出力信号が立ち上がって、その出力信号にトリガが発生する。コンピュータ 30 は、A/D コンバータ 27 の出力デジタル信号を所定の閾値と比較することによって、トリガの有無を判断する。そして、A/D コンバータ 27 の出力デジタル信号が所定の閾値を超えた場合に、コンピュータ 30 がトリガの発生を認識する。そして、コンピュータ 30

50

は、トリガの発生時よりも少し前の時から所定期間の経過後までの間の打撃力の時系列データを一時的にRAM等に記憶する。

【0028】

図2のチャートは、コンピュータ30が取得して一時的に記憶した打撃力の時系列データの一例を波形によって示したものである。図2のチャートにおいて、横軸は時間を表し、縦軸は打撃力を表す。

【0029】

(2) 第1抽出部

第1抽出部32として機能するコンピュータ30は、図2に示すように、第1取得部31が取得して一時的に記憶した打撃力の時系列データから最大打撃力 F_{max} [N]を抽出して、一時的に記憶する。

10

【0030】

(3) 第2取得部

第2取得部33として機能するコンピュータ30は、A/Dコンバータ24の出力デジタル信号(つまり、電気音響変換器22によって検出された音圧)を所定期間で取得することにより、音圧の時系列データを取得する。音圧の時系列データとは、電気音響変換器22によって検出された音圧の所定期間おきの値を時系列で配列したデータ列のことをいう。コンピュータ30がA/Dコンバータ24の出力デジタル信号を取得する際のサンプリングレートは、A/Dコンバータ24のサンプリングレートに等しくても良いし、等しくなくてもよい。

20

【0031】

ここで、前述のように、作業者がハンマ21を被検体90に衝突させることによって、コンピュータ30がトリガの発生を認識したら、そのコンピュータ30は、トリガの発生時よりも少し前の時から所定期間の経過後までの間の音圧の時系列データを一時的にRAM等に記憶する。

【0032】

図3のチャートは、コンピュータ30が取得して一時的に記憶した音圧の時系列データの一例を波形によって示したものである。図3のチャートにおいて、横軸は時間を表し、縦軸は音圧を表す。

【0033】

30

(4) 第2抽出部

第2抽出部34として機能するコンピュータ30は、図3に示すように、第2取得部33が取得して一時的に記憶した音圧の時系列データから音圧の絶対値の最大値 P_{max} [Pa]を抽出して、一時的に記憶する。以下、最大値 P_{max} を最大音圧 P_{max} という。

【0034】

(5) 高速フーリエ変換部

高速フーリエ変換部35として機能するコンピュータ30は、第2取得部33が取得した音圧の時系列データを高速フーリエ変換処理することにより、振動数ごとの音圧のスペクトル強度を表した音圧振動数特性を算出して、一時的に記憶する。

【0035】

40

図4のチャートは、コンピュータ30が算出して一時的に記憶した音圧振動数特性の一例を波形によって示したものである。図4のチャートにおいて、横軸は振動数 [Hz]を表し、縦軸は音圧のスペクトル強度 [dB]を表す。

【0036】

(6) 固有振動数抽出部

固有振動数抽出部36として機能するコンピュータ30は、図4に示すように、高速フーリエ変換部35が算出した音圧振動数特性から極大値を n 次(n は1以上の正数であり、振動モードの次数を表す。)の固有振動数 f_n [Hz]として抽出して、一時的に記憶する。ここで、1次固有振動数 f_1 の抽出が好ましい。

【0037】

50

振動モードの次数 n は、予め決められたものでもよい。或いは、ユーザーが入力デバイス 70 を用いて次数 n の数値を入力することによって、コンピュータ 30 が入力値を取得するとともに、その入力値に応じた固有振動数 f_n を抽出してもよい。

【 0 0 3 8 】

(7) 算出部

算出部 37 として機能するコンピュータ 30 は、第 1 抽出部 32 が抽出した最大打撃力 F_{max} と、第 2 抽出部 34 が抽出した最大音圧 P_{max} と、固有振動数抽出部 36 が抽出した固有振動数 f_n とから次式 (1) 又は次式 (2) により内部欠陥 93 の大きさ a [m] を算出する。更に、コンピュータ 30 は、第 1 抽出部 32 が抽出した最大打撃力 F_{max} と、第 2 抽出部 34 が抽出した最大音圧 P_{max} と、固有振動数抽出部 36 が抽出した固有振動数 f_n とから次式 (3) 又は次式 (4) により内部欠陥 93 までの深さ h [m] を算出する。ここで、式 (3) の右辺に a が存在するところ、式 (1) の右辺が式 (3) の右辺の a に当て嵌められる。また、大きさ a の算出に式 (1) が用いられる場合、深さ h の算出に式 (3) が用いられることが好ましい (但し、式 (4) が用いられてもよい) 。また、大きさ a の算出に式 (2) が用いられる場合、深さ h の算出に式 (4) が用いられることが好ましい (但し、式 (3) が用いられてもよい) 。式 (1) 、式 (2) 、式 (3) 及び式 (4) については、後に詳細に説明する。

10

【 0 0 3 9 】

【 数 1 】

$$a = \sqrt[3]{\frac{A}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}}{F_{max}} \right)} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}} \dots (1)$$

20

$$a = \sqrt[4]{\frac{B}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}}{F_{max}} \right)} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}} \dots (2)$$

30

【 0 0 4 0 】

【 数 2 】

$$h = \sqrt{\frac{2\pi f_n a C}{\left(\frac{P_{max}}{F_{max}} \right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \dots (3)$$

40

$$h = \sqrt{\frac{2\pi f_n D}{\left(\frac{P_{max}}{F_{max}} \right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \dots (4)$$

【 0 0 4 1 】

【 数 3 】

50

ここで、上記式 (1)、(2)、(3) 及び (4) において、

a : 内部欠陥 93 の大きさ [m]

h : 被検体 90 の表面 91 から内部欠陥 93 までの深さ [m]

f_n : n 次固有振動数 [Hz]

P_{max} : 最大音圧 [Pa]

F_{max} : 最大打撃力 [N]

A, B, C, D : 所定の定数

E : 被検体 90 のヤング率 [Pa]

ρ : 被検体 90 の密度 [kg/m^3]

ν : 被検体 90 のポアソン比

10

【0042】

式 (1) ~ (4) 中の A 、 B 、 C 及び D はそれぞれ以下の式 (5) ~ (8) で表すことができる。次式 (5) ~ (8) において、 K_1 は内部欠陥 93 の形状によって決まる定数であり、 P_{ar} は振動モードによって決まる定数である。

【0043】

【数4】

$$A = K_1 \alpha P_{ar}^3 \cdots (5)$$

$$B = K_2 \alpha P_{ar}^3 \cdots (6)$$

$$C = K_1 \alpha P_{ar} \cdots (7)$$

$$D = K_2 \alpha P_{ar} \cdots (8)$$

20

【0044】

内部欠陥 93 が方形状である場合、 K_1 が内部欠陥 93 のアスペクト比によって定まるところ、内部欠陥 93 が正方形であれば、 $K_1 = 0.0056$ である。1 次振動モードの場合、 $P_{ar} = 35.98$ である。 K_1 及び K_2 は予め実験により求めた定数であり一例を挙げると、 $K_1 = 0.16388$ [$\text{Pa}/(\text{m}^2\text{s}^{-2})$] であり、 $K_2 = 0.02438$ [$\text{Pa}/(\text{ms}^{-2})$] である。

30

【0045】

式 (1) ~ (8) における A 、 B 、 C 、 D 、 K_1 、 K_2 、 P_{ar} 、 E 、 ρ 、 ν のうち少なくとも 1 つは、予め決められた数値として、プログラム 61 に組み込まれていてもよい。また、ユーザーが入力デバイス 70 を用いて A 、 B 、 C 、 D 、 K_1 、 K_2 、 P_{ar} 、 E 、 ρ 、 ν のうち少なくとも 1 つの数値を入力することによって、コンピュータ 30 が入力値を取得するとともに、入力値を式 (1) ~ (8) における A 、 B 、 C 、 D 、 K_1 、 K_2 、 P_{ar} 、 E 、 ρ 、 ν のうち少なくとも 1 つに当て嵌めるものとしてもよい。また、ユーザーが入力デバイス 70 を用いて振動モードの次数 n の数値を入力することによって、コンピュータ 30 が入力値を取得するとともに、その入力値に応じた A 、 B 、 C 、 D 、 P_{ar} の値を定めるものとしてもよい。

40

【0046】

なお、コンピュータ 30 が、内部欠陥 93 の大きさ a と内部欠陥 93 までの深さ h の両方を算出するのではなく、内部欠陥 93 の大きさ a と内部欠陥 93 までの深さ h のうちどちらか一方のみを算出するものとしてもよい。

【0047】

(8) 結果の出力

算出部 37 が内部欠陥 93 の大きさ a 及び内部欠陥 93 までの深さ h を算出すると、コンピュータ 30 は表示デバイス 80 に大きさ a 及び深さ h を表示させる。更に、コンピュータ 30 は大きさ a 及び深さ h をストレージ 60 に記録する。

【0048】

50

<< 3 . 有利な効果 >>

以上の非破壊検査装置 10 を用いると、被検体 90 を破壊することなく内部欠陥 93 の大きさ a と、表面 91 から内部欠陥 93 までの深さ h を検出することができる。特に、内部欠陥 93 までの深さ h が 100 mm 以下である場合でも内部欠陥 93 の大きさ a 及び内部欠陥 93 までの深さ h を検出することができる。

【 0 0 4 9 】

ここで、非破壊検査装置 10 を用いて内部欠陥 93 の大きさと内部欠陥 93 までの深さを測定し、大きさの測定値と公称値を比較するとともに、深さの測定値と公称値を比較した。式 (1) による大きさの測定値と公称値の比較結果を図 5 に示すところ、測定値と公称値が近似していることが分かる。式 (2) による大きさの測定値と公称値の比較結果を図 6 に示すところ、測定値と公称値が近似しているものの、式 (2) による測定値は式 (1) による測定値よりも精度が劣ることが分かる。式 (1) を当て嵌めた式 (3) による深さの測定値と公称値の比較結果を図 7 に示すところ、測定値と公称値が近似していることがわかる。式 (4) による深さの測定値と公称値の比較結果を図 8 に示すところ、測定値と公称値が近似しているものの、式 (4) による測定値は式 (3) による測定値よりも精度が劣ることが分かる。

10

【 0 0 5 0 】

<< 4 . 式 (1)、式 (2)、式 (3) 及び式 (4) >>

以下に、上記式 (1)、式 (2)、式 (3) 及び式 (4) について詳細に説明する。

【 0 0 5 1 】

20

(1) 被検体及び内部欠陥モデル

図 9 及び図 10 に示すようなモデルを想定する。図 9 及び図 10 に示すように、被検体 190 の表面 191 に対してほぼ平行な正方形の内部欠陥 193 が被検体 190 の内部に存在すると想定する。内部欠陥 193 の辺長を a とし、被検体 190 の表面 191 から内部欠陥 193 までの深さを h とすると、被検体 190 のうち内部欠陥 193 を覆った領域 194 は、厚さが h であり、幅及び長さが a である正方形平板とみなせ、その正方形平板の 4 辺は固定端とみなせる。以下、この領域 194 を振動板 194 という。

【 0 0 5 2 】

(2) 振動板の変位応答及び加速度応答

振動板 194 に単位インパルスを入力荷重を与えた時、振動板 194 の変位の時間的変化が減衰振動であるところ、振動板 194 の変位応答スペクトルにおける最大スペクトル強度は、入力荷重に等しい静的な垂直単位荷重を振動板 194 に与えた場合の撓みに等しい。振動板 194 の変位応答スペクトルにおける最大振幅は $1/k_1$ となり、振動板 194 の変位応答スペクトルにおける 1 次固有振動数は $f_1 = \omega_1/2\pi$ となる。振動板 194 の加速度の時間的変化も減衰振動であるところ、振動板 194 の加速度応答スペクトルにおける最大スペクトル強度は ω_1^2/k_1 となり、振動板 194 の加速度応答スペクトルにおける 1 次固有周波数は f_1 となる。ここで、 ω_1 は 1 次固有角振動数であり、 k_1 は 1 次固有振動数における振動板 194 のバネ定数である。

30

【 0 0 5 3 】

(3) 振動板の固有振動数

40

振動板 194 の (m, n) 次モードの固有振動数 f_{mn} は、式 (9) で与えられる(参考文献 1)。

【 0 0 5 4 】

【数 5】

50

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{P_{ar}}{a^2} \times \sqrt{\frac{D_{rg}}{\rho h}} \dots (9)$$

$$D_{rg} = \frac{Eh^3}{12\rho(1-\nu^2)} \dots (10)$$

【 0 0 5 5 】

10

【数 6】

ここで、上記式 (9) 及び (10) において、

a : 振動板 194 の大きさ [m]

h : 振動板 194 の厚さ [m]

D_{rg} : 振動板 194 の曲げ剛性

P_{ar} : 振動モードによる定数 (1次振動モードの場合 $P_{ar}=35.98$)

E : 振動板 194 のヤング率 [Pa]

ρ : 振動板 194 の密度 [kg/m³]

ν : 振動板 194 のポアソン比

20

【 0 0 5 6 】

1次振動モードの固有振動数 f_1 は、式 (9) に式 (10) を代入し、式 (11) で与えられる。

【 0 0 5 7 】

【数 7】

$$f_1 = \frac{P_{ar}}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \times \left(\frac{h}{a^2}\right) \dots (11)$$

30

【 0 0 5 8 】

振動板 194 の振動のフーリエ解析により 1次固有振動数 f_1 を求めただけでは、振動板 194 の辺長 a 及び厚さ h を求めることができない。そこで、以下に説明する別の条件が必要となる。

【 0 0 5 9 】

(4) 振動板の振動レベル

振動板 194 が方形板状であるところ、その方形において 2つの対角線が重なる位置に、すなわち方形板の中央に垂直な集中荷重 F_{max} を加えたとき、その中央の最大たわみ δ_{max} は式 (12) で与えられる (参考文献 2)。

40

【 0 0 6 0 】

【数 8】

$$\delta_{max} = \frac{\alpha F_{max} a^2}{D_{rg}} \dots (12)$$

【 0 0 6 1 】

【数 9】

50

ここで、上記式 (12) において、

δ_{max} : 振動板 194 の最大たわみ [m]

F_{max} : 集中荷重 [N]

D_{rg} : 振動板 194 の曲げ剛性

α : 方形のアスペクト比から決まる定数 (アスペクト比が 1 である場合、 $\alpha=0.00560$)

【0062】

式 (12) から、フックの法則より 1 次振動モードのバネ定数 k_1 は、式 (13) で示すことができる。

【0063】

【数10】

$$k_1 = \frac{F_{max}}{\delta_{max}} = \frac{E}{12\alpha(1-\nu^2)} \times \left(\frac{h^3}{a^2}\right) \dots (13)$$

【0064】

ここで、ハンマ等の衝突物が集中荷重 F_{max} [N] の衝突力で振動板 194 に衝突するときを考える。上記 (2) の項で述べた通り、衝突物が振動板 194 に衝突することによって、打撃力 F_{max} [N] が振動板 194 に与えられると、その振動板 194 の変位の時間的な変化が減衰振動であるところ、その変位応答スペクトルにおける最大スペクトル強度は振動板 194 に静荷重 F_{max} [N] を与えた時の静たわみに等しい。このような減衰振動を加速度応答として置き換えると、振動板 194 の振動の加速度の最大値 A_{max} は、式 (14) で与えられる。

【0065】

【数11】

$$\frac{A_{max}}{F_{max}} = \frac{\alpha P_{ar}^2}{\rho} \times \left(\frac{1}{ha^2}\right) \dots (14)$$

【0066】

式 (11) の 1 次固有振動数と、式 (14) の単位打撃力あたりの最大振動加速度とから、振動板 194 の大きさ a 及び厚さ h はそれぞれ次式 (15) 及び (16) により算出することができる。

【0067】

【数12】

$$a = \sqrt[4]{\frac{\alpha P_{ar}^3}{2\pi f_1 \rho \left(A_{max}/F_{max}\right)} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \dots (15)$$

$$h = \sqrt{\frac{2\pi f_1 \alpha P_{ar}}{\left(A_{max}/F_{max}\right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}} \dots (16)$$

10

20

30

40

50

【 0 0 6 8 】

(5) 振動板の振動と検出音圧の関係

振動板 1 9 4 から距離 R [m] だけ離れた位置 1 9 5 における音圧と、振動板 1 9 4 の振動の加速度とは、次式 (1 7) の関係にある。ここで、 $P(s)$ は位置 1 9 5 の音圧のラプラス変換であり、 $G_1(s)$ は振動板 1 9 4 の振動の加速度のラプラス変換であり、 ρ_0 は媒体、つまり空気の密度であり、 r は振動板 1 9 4 が円形板である場合の振動板 1 9 4 の半径であり、 R は振動板 1 9 4 から位置 1 9 5 までの距離である。

【 0 0 6 9 】

【数 1 3】

$$P(s) = \frac{\rho_0 r^2}{2R} G_1(s) \cdots (17)$$

10

【 0 0 7 0 】

式 (1 7) を考慮すると、位置 1 9 5 の音圧と振動板 1 9 4 の加速度の比が振動板 1 9 4 の大きさ a の 2 乗に比例することが想定されるところ、振動モード形状を考慮すると、位置 1 9 5 の音圧と振動板 1 9 4 の加速度の比が振動板 1 9 4 の大きさ a に比例すると考えられる。そこで、実験により位置 1 9 5 の最大音圧 P_{max} と振動板 1 9 4 の最大加速度 A_{max} の比と、振動板 1 9 4 の大きさ a との関係を調べた。その結果を図 1 1 に示す。図 1 1 から明らかなように、最大音圧 P_{max} と最大加速度 A_{max} の比は大きさ a に比例することが分かる。その比例定数を K_1 とすると、最大音圧 P_{max} と最大加速度 A_{max} と大きさ a は次式 (1 8) の関係を満たす。

20

【 0 0 7 1 】

【数 1 4】

$$P_{max} = K_1 a A_{max} \cdots (18)$$

【 0 0 7 2 】

式 (1 8) を式 (1 5) 及び式 (1 6) に当て嵌めると、次式 (1 9) 及び次式 (2 0) のようになる。

30

【 0 0 7 3 】

【数 1 5】

$$a = \sqrt[3]{\frac{K_1 \alpha P_{ar}^3}{2\pi f_1 \rho \left(\frac{P_{max}}{F} \right)}} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \cdots (19)$$

$$h = \sqrt{\frac{2\pi f_1 K_1 \alpha P_{ar}}{\left(\frac{P_{max}}{F} \right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \cdots (20)$$

40

【 0 0 7 4 】

式 (1 9) 及び式 (2 0) を n 次振動モードに一般化したものがそれぞれ式 (1) 及び式 (3) である。

【 0 0 7 5 】

ところで、定数 K_1 を求めるには、内部欠陥の既知の大きさが異なる複数の試験片を準備して、多数回の衝撃試験を行う必要があるため、多大な労力とコストが掛かる。そこで、

50

準備する試験片を少なくするために、内部欠陥の既知の大きさが或る特定値の試験片を準備して、複数回の衝撃試験を行い、最大音圧 P_{max} と最大加速度 A_{max} の比を求めてもよい。こうして求めた比が式 (18) における $K_1 a$ に相当するところ、 $K_1 a = K_2$ とすると、式 (18) は式 (21) のようになる。

【0076】

【数16】

$$P_{max} = K_2 A_{max} \cdots (21)$$

【0077】

式 (21) を式 (15) 及び式 (16) に当て嵌めると、次式 (22) 及び次式 (23) のようになる。

【0078】

【数17】

$$a = \sqrt[4]{\frac{K_2 \alpha P_{ar}^3}{2\pi f_1 \rho \left(\frac{P_{max}}{F} \right)} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \cdots (22)$$

$$h = \sqrt{\frac{2\pi f_1 K_2 \alpha P_{ar}}{\left(\frac{P_{max}}{F} \right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}} \cdots (23)$$

【0079】

式 (22) 及び式 (23) を n 次振動モードに一般化したものがそれぞれ式 (2) 及び式 (4) である。

【0080】

(6) 参考文献

参考文献1；共立出版ホームページ、付録A1自由度系（自由振動）の解放、インターネット<URL：https://www.kyoritsu-pub.co.jp/app/file/goods_contents/46.pdf>

【0081】

参考文献2；堀部・富田・大高、弾性平板の大たわみ問題のFEM解析、茨城県技術センター研究報告、第20号、インターネット<URL：http://www.itic.pref.ibaraki.jp/periodical/research/20/N20P018.pdf>

【0082】

〔第2の実施の形態〕

図12は、第2実施形態における非破壊検査装置10Aのブロック図である。ここで、第2実施形態の非破壊検査装置10Aと第1実施形態の非破壊検査装置10の間で互いに共通する構成要素に同一の符号を付す。以下、第2実施形態の非破壊検査装置10Aについては、第1実施形態の非破壊検査装置10と相違する点を主に説明する。以下に説明する相違点以外については、第2実施形態における非破壊検査装置10Aは第1実施形態における非破壊検査装置10と共通している。

【0083】

第2実施形態のプログラム61Aは第1実施形態のプログラム61と相違する。コンピュータ30がこのプログラム61Aを実行すると、コンピュータ30が第1取得部31、第1抽出部32、第2取得部33、第2抽出部34、高速フーリエ変換部35、固有振動

10

20

30

40

50

数抽出部 3 6、第 2 高速フーリエ変換部 4 1 A、第 3 抽出部 4 2 A、スペクトル強度算出部 4 3 A、レベル差算出部 4 4 A、補正部 4 5 A 及び算出部 3 7 A として機能する。以下、コンピュータ 3 0 の機能について詳細に説明する。

【 0 0 8 4 】

<< 1 . コンピュータの機能 >>

(1) 第 1 取得部 3 1、第 1 抽出部 3 2、第 2 取得部 3 3、第 2 抽出部 3 4、高速フーリエ変換部 3 5 及び固有振動数抽出部 3 6 はそれぞれ第 1 実施形態のそれと同一に機能して、同一の演算を行う。

【 0 0 8 5 】

(2) 第 2 高速フーリエ変換部

第 2 高速フーリエ変換部 4 1 A として機能するコンピュータ 3 0 は、第 1 取得部 3 1 が取得した打撃力の時系列データを高速フーリエ変換処理することにより、振動数ごとの打撃力のスペクトル強度を表した打撃力振動数特性を算出して、一時的に記憶する。

【 0 0 8 6 】

図 1 3 のチャートは、コンピュータ 3 0 が算出して一時的に記憶した打撃力振動数特性の一例を波形によって示したものである。図 1 3 のチャートにおいて、横軸は振動数 [Hz] を表し、縦軸は打撃力のスペクトル強度 [dB] を表す。

【 0 0 8 7 】

(3) 第 3 抽出部

第 3 抽出部 4 2 A として機能するコンピュータ 3 0 は、図 1 3 に示すように、第 2 高速フーリエ変換部 4 1 A が算出した打撃力振動数特性から打撃力の最大スペクトル強度 L_{max} [dB] を抽出する。

【 0 0 8 8 】

(4) スペクトル強度算出部

スペクトル強度算出部 4 3 A として機能するコンピュータ 3 0 は、図 1 3 に示すように、固有振動数抽出部 3 6 が抽出した固有振動数 f_n を、前記第 2 高速フーリエ変換部 4 1 A が算出した打撃力振動数特性に当て嵌めることによって、その固有振動数 f_n に対応するスペクトル強度 L_1 [dB] を算出する。なお、前述のように固有振動数 f_n は 1 次固有振動数 f_1 であることが好ましい。

【 0 0 8 9 】

(5) レベル差算出部

レベル差算出部 4 4 A として機能するコンピュータ 3 0 は、第 3 抽出部 4 2 A が抽出した最大スペクトル強度 L_{max} と、スペクトル強度算出部 4 3 A が算出したスペクトル強度 L_1 とのレベル差 $L_{max} - L_1$ [dB] を算出する。レベル差とは、単位をデシベルとしたレベル表現における最大スペクトル強度 L_{max} のデシベル値とスペクトル強度 L_1 のデシベル値の差をいう。

【 0 0 9 0 】

(6) 補正部

補正部 4 5 A として機能するコンピュータ 3 0 は、第 2 抽出部 3 4 が抽出した最大音圧 P_{max} に、レベル差算出部 4 4 A が算出したレベル差 $L_{max} - L_1$ に応じた倍率 M を乗ずる。このような乗算により得られた積が、最大音圧 P_{max} の補正值 P_{max}' [Pa] である。

【 0 0 9 1 】

【 数 1 8 】

$$P_{max}' = MP_{max}$$

【 0 0 9 2 】

(7) 算出部

算出部 3 7 A として機能するコンピュータ 3 0 は、第 1 抽出部 3 2 が抽出した最大打撃力 F_{max} と、補正部 4 5 A が算出した補正值 P_{max}' と、固有振動数抽出部 3 6 が抽出した

10

20

30

40

50

固有振動数 f_n とから次式 (24) 又は次式 (25) により内部欠陥 93 の大きさ a を算出する。更に、コンピュータ 30 は、第 1 抽出部 32 が抽出した最大打撃力 F_{max} と、補正部 45 A が算出した補正值 P_{max}' と、固有振動数抽出部 36 が抽出した固有振動数 f_n とから次式 (26) 又は次式 (27) により内部欠陥 93 までの深さ h を算出する。ここで、式 (26) の右辺に a が存在するところ、式 (24) の右辺が式 (26) の右辺の a に当て嵌められる。また、大きさ a の算出に式 (24) が用いられる場合、深さ h の算出に式 (26) が用いられることが好ましい (但し、式 (27) が用いられてもよい)。また、大きさ a の算出に式 (25) が用いられる場合、深さ h の算出に式 (27) が用いられることが好ましい (但し、式 (26) が用いられてもよい)。

【0093】

【数19】

$$a = \sqrt[3]{\frac{A}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}'}{F_{max}} \right)} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}} \dots (24)$$

$$a = \sqrt[4]{\frac{B}{2\pi f_n \rho \left(\frac{P_{max}'}{F_{max}} \right)} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}} \dots (25)$$

【0094】

【数20】

$$h = \sqrt{\frac{2\pi f_n a C}{\left(\frac{P_{max}'}{F_{max}} \right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \dots (26)$$

$$h = \sqrt{\frac{2\pi f_n D}{\left(\frac{P_{max}'}{F_{max}} \right) \rho \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}}} \dots (27)$$

【0095】

(8) 結果の出力

算出部 37 A が内部欠陥 93 の大きさ a 及び内部欠陥 93 までの深さ h を算出すると、コンピュータ 30 は表示デバイス 80 に大きさ a 及び深さ h を表示させる。更に、コンピュータ 30 は大きさ a 及び深さ h をストレージ 60 に記録する。

【0096】

<< 2. 補正值の意義 >>

(1) 打撃力と最大加速度の関係

上記式 (1) ~ (4)、(15) 及び (16) を求めるにあたって、振動板 194 に与える入力荷重は理想インパルスを想定している。理想インパルスとは、打撃の瞬間の微小時間 (微小時間とは、限りなく 0 に近いことをいう。) に打撃力が立ち上がり、その微小

10

20

30

40

50

時間の前後では打撃力が0になるような入力荷重をいう。理想インパルスの打撃力の振動数特性は、図13中に二点鎖線で示すように、打撃力のスペクトル強度が振動数に関わらず一定の値をとる。

【0097】

それに対して、ハンマ21によって被検体90を打撃すると、その入力荷重は理想インパルスとはならず、打撃力の時間的変化の波形は図2に示すように正規分布の曲線に近似する。このような打撃力の振動数特性は、図13に示すように、振動数が高くなるほどスペクトル強度が低下する傾向にあることがわかる。上述のように、理想インパルスの打撃力のスペクトル強度が振動数に関わらず一定の値をとることから、上述のように抽出した最大スペクトル強度 L_{max} は理想インパルスの打撃力のスペクトル強度とみなせる。そうすると、1次固有振動数 f_1 におけるスペクトル強度 L_1 が最大スペクトル強度 L_{max} から低下することは、スペクトル強度 L_1 が理想インパルスの打撃力のスペクトル強度から低下していることとみなせる。

10

【0098】

一方、加速度と打撃力は運動方程式から明らかなように比例関係にあることから、測定した加速度のスペクトル強度も理想インパルスの入力荷重における真の加速度のスペクトル強度よりも小さく、測定した最大加速度 A_{max} も理想インパルスの入力荷重における真の最大加速度よりも小さい。また、最大加速度 A_{max} と最大音圧 P_{max} は上記の式(18)又は式(21)の関係にあることから、測定した最大音圧 P_{max} も理想インパルスの入力荷重における真の最大音圧よりも小さい。そこで、最大音圧 P_{max} を理想インパルスの入力荷重における真の最大音圧に補正すべく、最大スペクトル強度 L_{max} と1次固有振動数 f_1 のスペクトル強度 L_1 とのレベル差 $L_{max} - L_1$ に応じた倍率 M を最大音圧 P_{max} に乗じて、補正值 P_{max}' を求める。

20

【0099】

<<3. 有利な効果>>

以上の非破壊検査装置10Aを用いると、深さ h が100mm以下である場合でも、被検体90を破壊することなく内部欠陥93の大きさ a と、表面91から内部欠陥93までの深さ h を正確に検出することができる。

【0100】

ここで、非破壊検査装置10, 10Aを用いて内部欠陥93の大きさを測定し、大きさの測定値と公称値を比較した。その結果を図14に示すところ、横軸は内部欠陥93の大きさの公称値を表し、縦軸は非破壊検査装置10, 10Aによる測定値を表す。図14に示すように、非破壊検査装置10を用いた場合には、最大音圧 P_{max} を補正しないため、測定値と公称値の乖離が大きい。特に、内部欠陥93の大きさが小さいほど、公称値と測定値の乖離が大きい。一方、非破壊検査装置10Aを用いた場合は、最大音圧 P_{ma} を補正したため、測定値は剥離の大きさに関わらず公称値と近似しており、非破壊検査装置10を用いたよりも測定値のばらつきが小さく、測定精度が改善している。

30

【0101】

非破壊検査装置10, 10Aを用いて内部欠陥93までの深さを測定し、深さの測定値と公称値を比較した。その結果を図15に示すところ、横軸は内部欠陥93までの深さの公称値を表し、縦軸は非破壊検査装置10, 10Aによる測定値を表す。非破壊検査装置10を用いた場合、内部欠陥93までの深さが深いほど、公称値と測定値の乖離が大きい。また、内部欠陥93の深さが深いほど、測定値のばらつきも大きい。一方、非破壊検査装置10Aを用いた場合は、測定値は内部欠陥93までの深さに関わらず公称値と近似しており、非破壊検査装置10を用いたよりも測定値のばらつきが小さく、測定精度が改善している。

40

【0102】

上記の非破壊検査装置10, 10Aの何れにおいても、測定項目は音圧と打撃力であり、両者の相違点はプログラム61, 61Aにある。それゆえ、第1実施形態のプログラム61を第2実施形態のプログラム61Aに変更するだけで、内部欠陥93の大きさ a 及び

50

内部欠陥 9 3 までの深さ h の算出精度を大幅に向上させることができる。

【符号の説明】

【 0 1 0 3 】

- 1 0、1 0 A ... 非破壊検査装置
- 2 1 ... ハンマ
- 2 2 ... 電気音響変換器
- 2 5 ... 打撃力センサ
- 3 0 ... コンピュータ
- 3 1 ... 第 1 取得部
- 3 2 ... 第 1 抽出部
- 3 3 ... 第 2 取得部
- 3 4 ... 第 2 抽出部
- 3 5 ... 高速フーリエ変換部
- 3 6 ... 固有振動数抽出部
- 3 7 , 3 7 A ... 算出部
- 4 1 A ... 第 2 高速フーリエ変換部
- 4 2 A ... 第 3 抽出部
- 4 3 A ... スペクトル強度算出部
- 4 4 A ... レベル差算出部
- 4 5 A ... 補正部
- 6 0 ... ストレージ
- 6 1 ... プログラム
- 9 0 ... 被検体

10

20

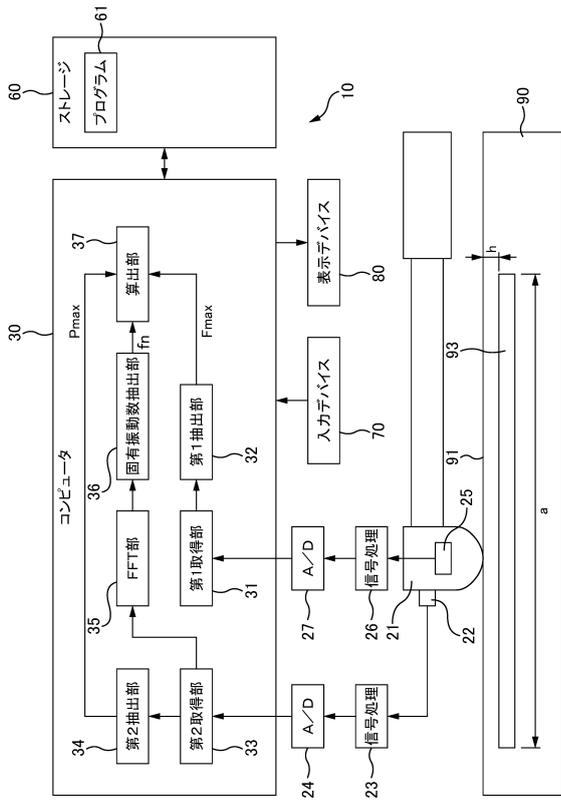
30

40

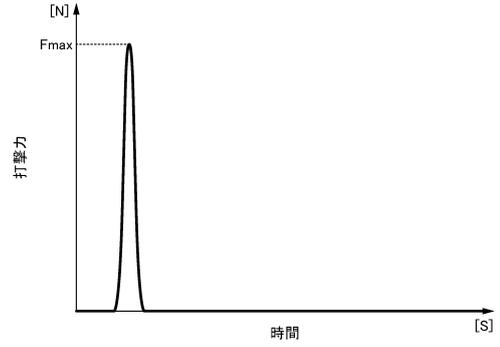
50

【図面】

【図 1】



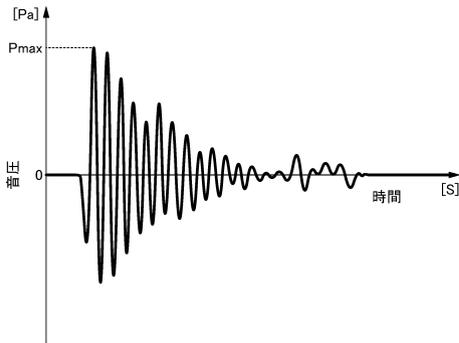
【図 2】



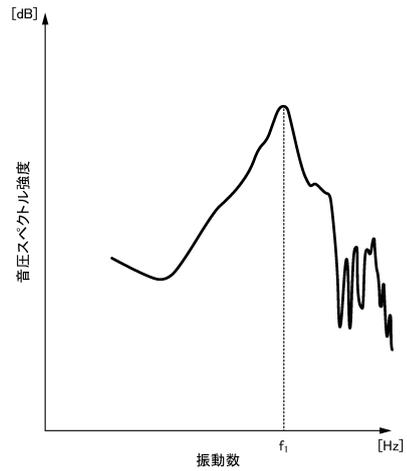
10

20

【図 3】



【図 4】

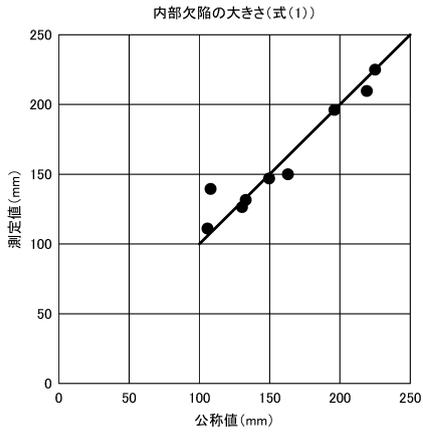


30

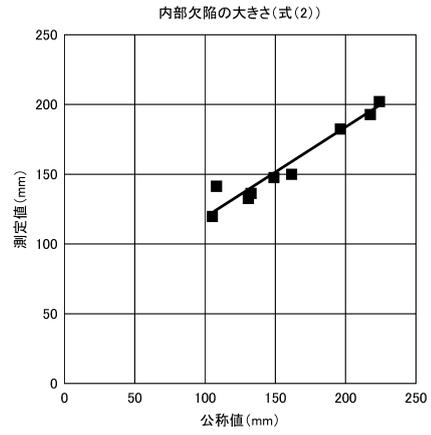
40

50

【図 5】

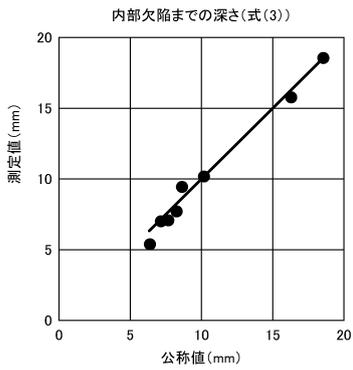


【図 6】

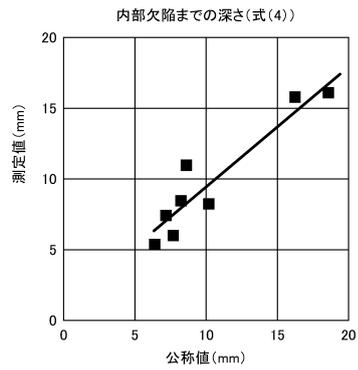


10

【図 7】

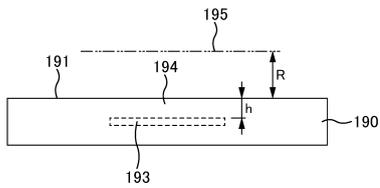


【図 8】

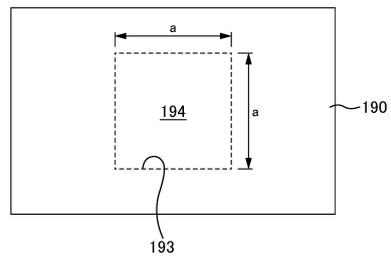


20

【図 9】



【図 10】

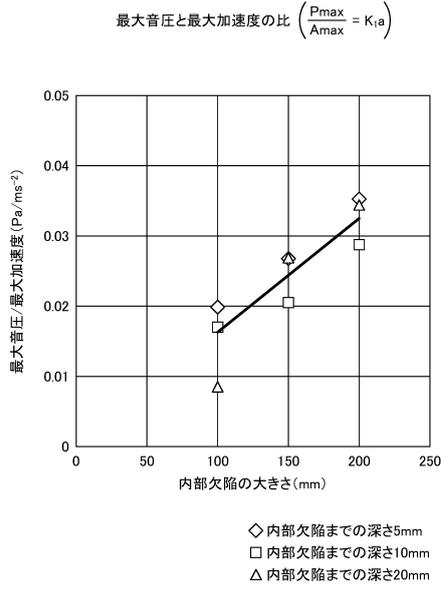


30

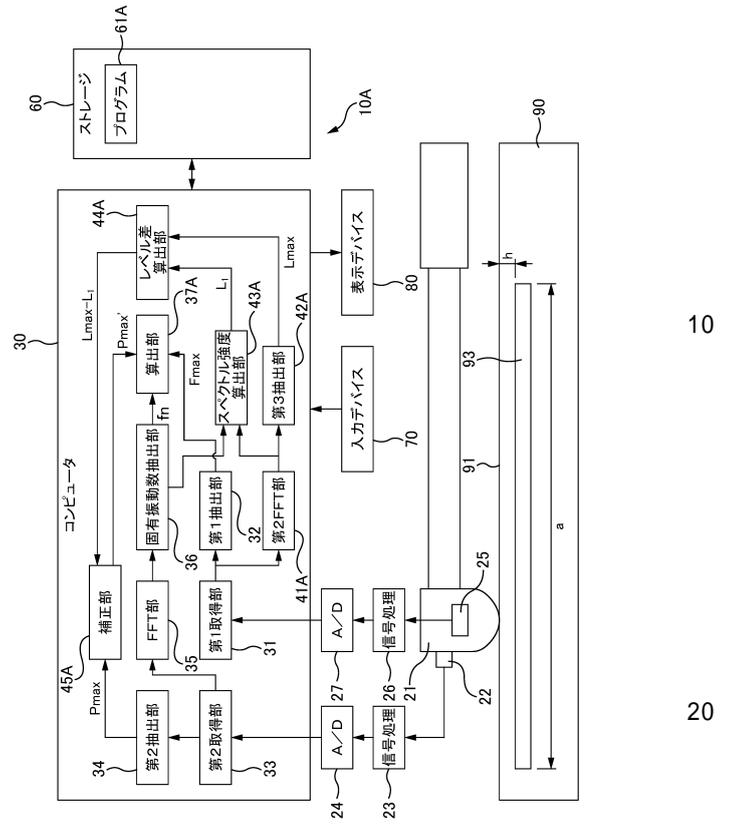
40

50

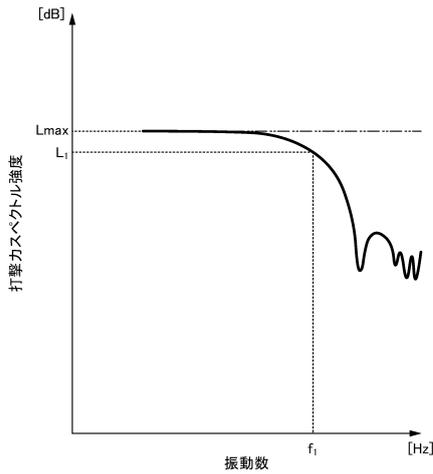
【図 1 1】



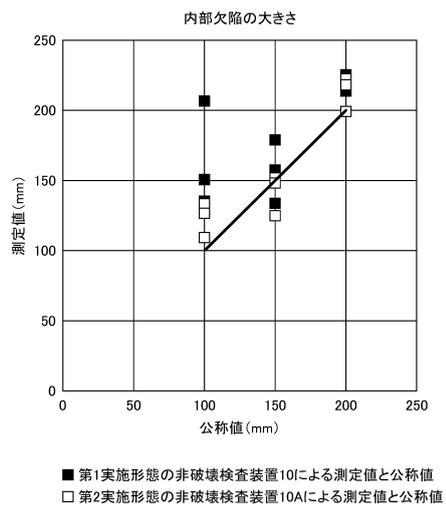
【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】



10

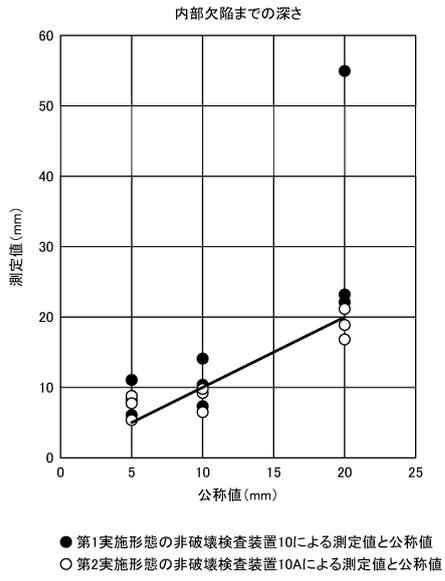
20

30

40

50

【 図 15 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

交流会主催第24回神奈川県非破壊試験技術交流会・技術発表会にて公開

特許法第30条第2項適用 令和2年1月1日に日本工業出版により発行された「検査技術 第25巻 第1号 (通巻279号)」の28ページ~36ページにて公開

茨城県つくば市立原1番地 国立研究開発法人建築研究所内

(72)発明者 棚野 博之

茨城県つくば市立原1番地 国立研究開発法人建築研究所内

(72)発明者 久下 幹雄

茨城県笠間市大田町208番地470号 株式会社クリエイティブスペース内

審査官 村田 顕一郎

(56)参考文献 特公平02-054903(JP, B2)

特開2001-041940(JP, A)

特開2019-168389(JP, A)

特開2001-311724(JP, A)

特開2000-074889(JP, A)

特開2012-168022(JP, A)

特開2017-203711(JP, A)

特開2013-134221(JP, A)

特開2006-047162(JP, A)

特開2002-214209(JP, A)

特開2002-296253(JP, A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G01N 29/00 - 29/52