

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：52601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871030

研究課題名(和文) 応力聴診器及び piezofilm を用いた危険予測のための欠陥・き裂検出技術の基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on Defect/Crack Detection Technology for Hazard Anticipation using Piezoelectric Polymer Film and Strain Checker

研究代表者

志村 穰 (SHIMURA, Jyo)

東京工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：70390424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、応力聴診器及び piezofilm と超高入力インピーダンス接触型表面電位計を用いた欠陥検出の可能性を検討するため、擬似欠陥としての切欠きを有する平滑試験片に一定繰返し荷重を負荷し、切欠き付近のひずみ分布及び電圧分布を測定した。その結果、応力聴診器によるひずみ分布及び piezofilm を用いた電圧分布は、切欠き深さが最大となる位置で最大ひずみ値、最大電圧値を示すとともに、これらの最大値は荷重振幅の増大に対し線形的に変化することがわかった。これらの実験結果より、本研究の提案手法が欠陥検出の可能性を有することが示唆された。特に、応力聴診器を用いた場合はその簡便性、利便性から今後の展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish a defect detecting method by using PVDF film and the strain checker, respectively. In order to verify the possibility of defect detection by both devices, distribution of strain and output voltage on the specimen with a surface notch as an artificial defect subjected to cyclic load were investigated. Output voltages from the PVDF films were measured by an ultra-high impedance surface potential voltmeter. As a result, it was observed that the tendencies of the output voltage distribution and the strain distribution were similar. It was also found that these distribution indicate maximum values at measurement position when notch depth is maximal and these maximum values linearly vary for decrease or increase in load amplitude. Therefore, it was suggested that proposal methods in this study are available for the defect detection. In particular, we expect future development of the case where the strain checker is employed as it is easy to handle.

研究分野：材料力学

キーワード：欠陥・き裂検出 応力聴診器 piezofilm 表面切欠き ひずみ分布 電圧分布 ニューラルネットワーク 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

近年、各種構造物の経年劣化による破損事故等が問題視されており、事故を未然に防ぐ非破壊検査の必要性が益々高まっている。そのため、簡便なひずみ検出システムを構築できれば、破壊事故を予測し、部品交換や補強等の対処が可能になると推察される。それに加え、よりエネルギー消費の少ないひずみ検出システムを実現できれば、環境保全の観点からも社会的貢献に寄与するものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究室では過去に、擬似欠陥を設けた試験片に一定繰り返し荷重を与え、その欠陥付近のひずみ分布を応力聴診器により測定することで欠陥検出の可能性を示唆した。しかしながら、応力聴診器の測定部の大きさや擬似欠陥の寸法に制約があったため、著者らは従来型より小型の応力聴診器を用い、同様の測定をより細かな範囲で行うことを試みた。また以前には、高分子圧電フィルム(PVDF:ポリフッ化ビニリデン、以下、 piezofilm と記す)を用いた電圧分布測定より欠陥検出を検証している。

そこで本研究では、擬似欠陥によるひずみおよび電圧それぞれの分布を応力聴診器ならびに piezofilm による手法で測定した結果を示し、各手法の特性と欠陥検出の可能性について検討することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 応力聴診器

応力聴診器の本体一部はマグネットベースとなっており、その磁力により測定物に固定され、受感部はばねの復元力で測定領域に押し付けられる仕組みとなっている。接着剤が不要となるため、測定領域の表面処理の手間を省略でき、何度でも測定可能である。図 1 に本研究で用いた応力聴診器(東京測器研究所製 FGMH-2A)を、表 1 に主な仕様を示す。受感部のひずみゲージは単軸、ゲージ長は 3mm である。既往研究¹⁾ではゲージ長が 6mm タイプ(FGMH-1B)を使用していたが、本研究ではそれが半減したことで、より細かな領域でのひずみ測定が可能となっている。

(2) piezofilm

本研究では、piezofilm を電圧センサとして用いた。市販の PVDF フィルムは被膜が両面あるいは片面に蒸着された 2 種類がある。加工性に優れており、カッターナイフ等で容易に切り出すことができる。表 2 に piezofilm の機械的特性を、図 2 に電圧センサとして使用した piezofilm の形状および寸法を示す。本実験では両面電極の piezofilm を使用し、両面の電極が通電しないように縁の電極をアセトンで除去している。



図 1 応力聴診器 FGMH-2A の概観

表 1 応力聴診器の主な仕様

型式	FGMH-1B	FGMH-2A
ゲージタイプ	単軸	単軸
ゲージ長 [mm]	6.0	3.0
重量 [g]	63	260

表 2 piezofilm の機械的特性

厚さ [μm]	密度 [10 ³ kg/m ³]	縦弾性係数 [GPa]	引張強さ [MPa]
28	1.78	2.0	140~210

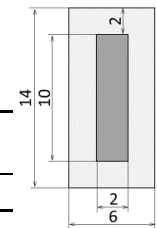


図 2 piezofilm の寸法・形状

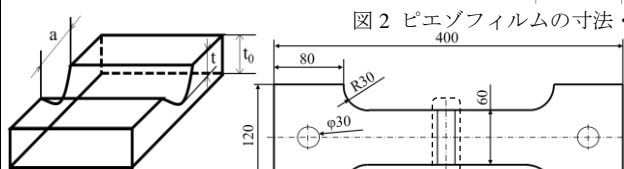


図 3 擬似欠陥(切欠き)の寸法・形状

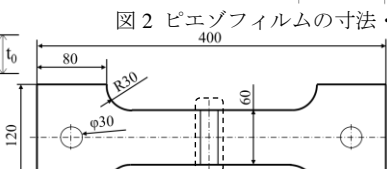


図 4 試験片の寸法・形状

(3) 擬似欠陥のモデル化

構造材料の欠陥として、表面欠陥および内部欠陥が挙げられる。通常、表面欠陥モデルを想定すると三次元形状が一般的であるが、本研究では試験片材料に機械加工により擬似的に表面欠陥を施すため、その加工性を鑑み、まずは図 3 に示す切欠き形状(幅 $a=12.0\text{mm}$ 、深さ $t=2.0\text{mm}$)とした。

(4) 切欠きを有する平滑試験片

厚さ 3.2mm の冷間圧延鋼板(SPCC 材)を図 4 の寸法形状に切り出し、その平行部の中央に図 3 に示す表面切欠きを機械加工により施した。この平滑試験片を用いて次節の各種実験を行った。

(5) ひずみ分布および電圧分布測定実験

平滑試験片に電気油圧サーボ式疲労試験機(容量 100kN)により負荷周波数 5Hz、平均荷重 4kN で固定しつつ荷重振幅 F_n を 3kN まで 0.5kN 刻みで変化させ、一定繰り返し荷重を負荷させた。この際に、図 5 に示すピッチ間隔 $p=2.5\text{mm}$ で切欠きの裏面に応力聴診器を設置し、随時ずらしながらひずみを検出した。平滑試験片に応力聴診器を設置した状態を図 6 に示す。piezofilm は $p=8.0\text{mm}$ の間隔でそれぞれの箇所に貼付した状態で電圧を測定した。併せて参考のため、ひずみゲージによる測定も実施した。その際のピッチ間隔は $p=1.0\text{mm}$ である。ひずみゲージは応力集中測定用の 1 軸 5 素子タイプを用いた。図 7 に示すように、piezofilm の出力電圧は超高入力インピーダンス接触型表面電位計(TREK JAPAN 社製 Model800)により検出した。平滑試験片は各測定法で 3 本ずつ用意し、計 3 回の測定で得られた算術平均値を各測定点での電圧値、ひずみ値としている。

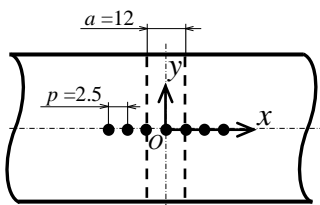


図5 ひずみ測定点

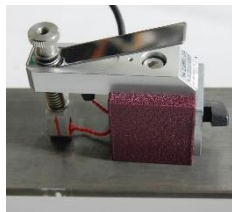


図6 応力聴診器の設置状態

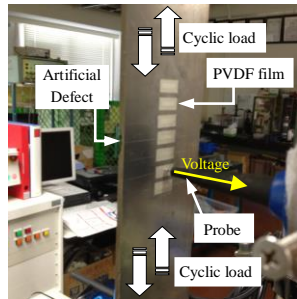
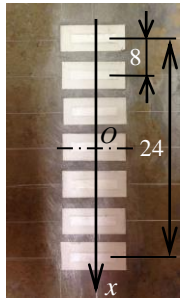


図7 ピエゾフィルムの貼付位置と出力電圧検出方法

4. 研究成果

(1) ひずみゲージによるひずみ分布

図8(a)は幅 $a=12.0\text{mm}$ 、深さ $t=2.0\text{mm}$ の切欠きを有する平滑試験片に振幅荷重を 0.5kN から 3.0kN まで負荷させた時のひずみゲージによるひずみ分布を示す。縦軸は長手方向垂直ひずみ ε [μstrain]、横軸は切欠きに対する位置 x [mm]である。軸方向垂直ひずみ ε_x は切欠き深さが最大の位置 ($x=0$) で最大値となり、ほぼ左右対称な分布となっている。この分布の傾向は荷重振幅が変化しても同様である。

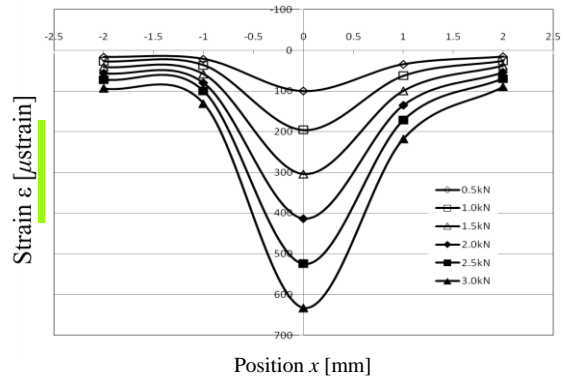
(2) ピエゾフィルムの出力電圧分布

図8(b)は、図8(a)と同様な実験条件におけるピエゾフィルムの出力電圧 V [V]と切欠きに対する位置 x [mm]との関係を示す。切欠き両端最寄りのピエゾフィルム位置 $x=\pm 8\text{mm}$ 付近から出力電圧の上昇が見られ、切欠き深さが最大となる位置 ($x=0$) で最高出力電圧となっている。また、荷重振幅の増加に対する比例的な変化は図8(a)と同様である。

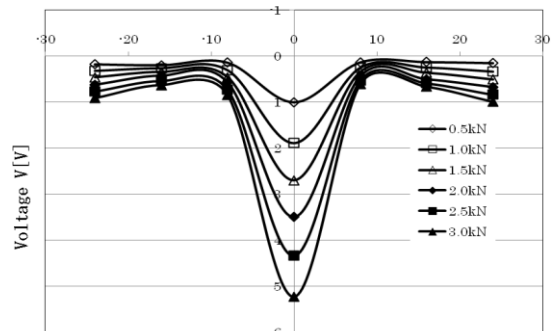
(3) 応力聴診器によるひずみ分布

図8(c)は応力聴診器により測定した長手方向垂直ひずみ ε [μstrain]と切欠きに対する位置 x [mm]との関係を示す。この際の実験条件は上述の図8(a), (b)と同じである。最大切欠き深さの位置 ($x=0$) を境に整然とした左右対称のひずみ分布となることや荷重振幅の増減に対する線形性は図8(a), (b)と類似した結果である。

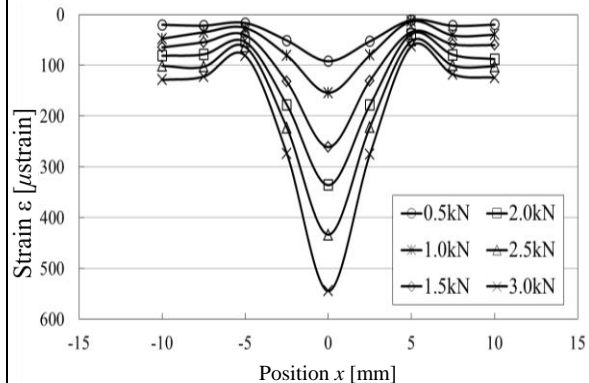
以上より、応力聴診器によるひずみ分布測定およびピエゾフィルムを用いた電圧分布測定より、本研究で初期に設定した擬似欠陥としての切欠き検出の可能性が示唆された。特に、応力聴診器を用いた場合は既往の研究成果に対して、より細かな領域での測定が可能になる点とセンサとしての利便性に優れており、今後の発展性を期待で



(a) ひずみゲージの場合



(b) ピエゾフィルムの場合



(c) 応力聴診器を用いた場合

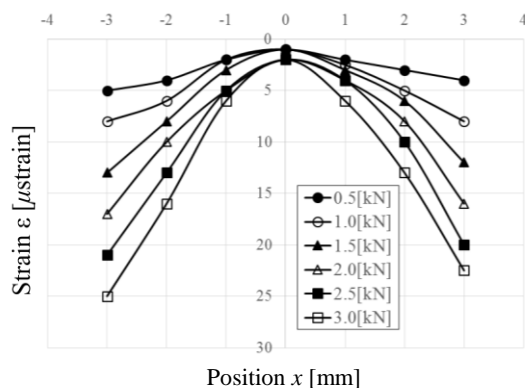
図8 ひずみ分布および電圧分布

きたため、以降は応力聴診器を用いた欠陥検出手法の確立に専心することとした。その実施項目に対する研究結果を以下に記す。

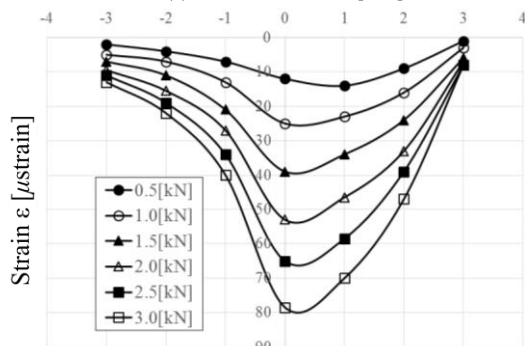
① 切欠き寸法がひずみ分布に及ぼす影響

実験条件は図8の場合と同様とし、試験片厚さおよび切欠き深さを様々に変化させた時のひずみ分布を調査した。一例として試験片厚さを $t_0=6.0\text{mm}$ 、切欠き幅を $a=12.0\text{mm}$ でそれぞれ固定し、切欠き深さを $t=2.0$ および 3.0mm に変化させた場合のひずみ分布を図9に示す。

Fig.9(a)の切欠き深さ $t=2.0\text{mm}$ の場合では切欠き深さが最大となる測定位置 ($x=0$) でひずみ値が最小値を示すが、その最小値は荷重振幅に依らずほぼ同じ値となっている。また、切欠き幅に対応する位置 $x=\pm 1.0\text{mm}$ の範囲を越えるとひずみ変動が顕著になるとともに荷重振幅の増加につれ、ひずみ勾配も増加することがわかる。



(a) 切欠き深さ $t=2.0$ [mm]



(b) 切欠き深さ $t=3.0$ [mm]

図9 切欠きの寸法形状とひずみ分布との関係

図9(b)は切欠き深さ $t=3.0$ mm の際のひずみ分布である。前述の切欠き深さ $t=2.0$ mm の場合とは明らかに様相が異なり、最大切欠き深さの位置($x=0$)で最大ひずみを生じる結果となっている。

全体の傾向として、図9の(a)と(b)とではひずみ分布が上下反転しており、切欠き深さとこの現象との関係を詳細に調査することで切欠き深さの推定の可能性が示唆された。

② 試験片厚さと切欠き深さとの比がひずみ分布に及ぼす影響

図9のひずみ分布の曲率正負変化を踏まえ、試験片厚さと切欠き深さとの比に対するひずみ分布の傾向を調査した。現状の結果としては両者には相関が見出せず、切欠き深さの推定までには至っていない。

③ 応力聴診器とニューラルネットワークを用いた欠陥検出の試み

擬似欠陥として表面切欠きを有する各種試験片の FEM 解析によるひずみ分布を教師データ、応力聴診器を用いて測定したひずみ分布を入力データとしてニューラルネットワークを構築し、未知欠陥の位置、深さおよび幅を検出可能か試みた。

その結果、本手法では欠陥深さおよび幅の寸法が大きくなるとそれらの検出誤差が増加し、欠陥の位置検出誤差は数値的には問題がないが、整合性に難が見られた。欠陥位置および幾何条件のうち、欠陥深さの検出が最も精度が高いことが判明した。

(4) 本研究成果から得られたこと

国内の老朽化した社会インフラの安全性、健全性が不安視されている中、本研究で提案した応力聴診器およびピエゾフィルムを用いた欠陥検出手法は、上記の問題解決に対し少しでも寄与することができるものと考えられる。特に、現場での作業性を考慮した場合、応力聴診器による手法は利便性が高く、その有用性を発揮できると推察される。また、本研究では欠陥検出のみならず欠陥の寸法形状の推定を試行し、その可能性を示唆した。

以上のように応力聴診器を用いた欠陥検出手法には様々な展開が期待されるが、それらを実現するためには、更なる実験結果の蓄積や応力聴診器の小型化等の改良が今後必要になるであろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計8件)

- ① イズル ハディ ロズラン、志村 穰、黒崎 茂、林 丈晴、応力聴診器を用いた欠陥検出技術に関する基礎的検討、日本機械学会関東支部第22期総会・講演会、2016年3月10日、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区)
- ② 新 幸樹、志村 穰、北山光也、黒崎 茂 応力聴診器およびニューラルネットワークを用いた欠陥検出の試み、日本機械学会関東支部第21期総会・講演会、2015年3月21日、横浜国立大学(神奈川県横浜市)
- ③ 高松歩未、志村 穰、黒崎 茂、鈴木拓雄 応力聴診器を用いた欠陥検出に関する基礎的検討、日本機械学会関東支部第21期総会・講演会、2015年3月21日、横浜国立大学(神奈川県横浜市)
- ④ 高松歩未、志村 穰、黒崎 茂、宮川睦巳 応力聴診器およびピエゾフィルムを用いた欠陥検出の試み、日本機械学会・精密工学回共催山梨講演会2014、2014年10月18日、山梨大学工学部(山梨県甲府市)
- ⑤ 高松歩未、志村 穰、黒崎 茂、鈴木拓雄 応力聴診器を用いた欠陥検出の試み、日本機械学会関東支部第20期総会・講演会2014年3月15日、東京農工大学小金井キャンパス(東京都小金井市)
- ⑥ 高松歩未、志村 穰、黒崎 茂、ピエゾフィルムを用いた欠陥検出の試み、日本機械学会・精密工学回共催山梨講演会2013、2013年10月26日、山梨大学工学部(山梨県甲府市)

⑦高松歩未、有田克也、西村大希、黒崎 茂、志村 穰、ピエゾフィルムを用いた欠陥検出に関する研究、日本機械学会関東支部第19期総会・講演会、2013年3月16日、首都大学東京南大沢キャンパス（東京都八王子市）

⑧高松歩未、志村 穰、ピエゾフィルムを用いた欠陥検出に関する研究、第4回大学コンソーシアム八王子学生発表会、2012年12月8日、八王子市学園都市センター（東京都八王子市）

6. 研究組織

(1)研究代表者

志村 穰 (SHIMURA, Jyo)

東京工業高等専門学校・機械工学科・准教授
研究者番号：70390424