

複合材中のはく離欠陥の検出に対する受動型電気ポテンシャルCT法の適用

An Application of the Passive Electric Potential CT Method to Detection of Delamination in Composite Materials

大阪大学工学研究科 中谷 健作 Kensaku NAKATANI
大阪大学工学部 久保 司郎 Shiro KUBO Member
大阪大学工学部 阪上 隆英 Takahide SAKAGAMI

When a piezoelectric film is glued on the surface of a structure member subjected to mechanical load, a distribution of electric potential is induced. In the existence of defects in the member, a characteristic variation of electric potential is observed. Based on this phenomenon, the passive electric potential CT method is developed for detection and identification of defects in a structure. In this study, the applicability of the passive electric potential CT method to the detection and identification of a delamination in a CFRP laminate was investigated. The effect of the delamination on the electric potential distribution are investigated both numerically and experimentally. Identification of delamination by inverse analyses follows. The location and seize of the delamination were estimated accurately. For the estimation of the depth of delamination, the accuracy was deteriorated with increase in the depth.

1. 緒言

CFRP に代表される積層複合材料は、優れた比強度と比弾性等優れた特性を持ち、次世代の構造材料として期待されているが、面外からの衝撃等により、層間のはく離を生じやすいことが知られている。層間のはく離を生じた積層複合材は圧縮強度が著しく低下するため、構造材料としての信頼性を確保するには、層間のはく離の検出・同定技術が不可欠である。さらに、オンラインではく離欠陥のモニタリングが可能になれば、構造材料としての信頼性は飛躍的に向上する。オンラインでの欠陥モニタリングを可能とする手法として、圧電材料[1]を用いた受動型電気ポテンシャルCT法が提案されている[2-5]。受動型電気ポテンシャルCT法は、構造部材に荷重が加わるとき、部材表面に生じるひずみ分布に内部欠陥の影響が反映することを利用した手法である。ひずみに応じて電圧を発生する高分子フィルム(ピエゾフィルム)を部材表面に貼り付け、負荷時に現れるピエゾフィルム表面の電気ポテンシャル分布をもとに逆解析手法を用いて部材中の欠陥の位置、形状および寸法を推定する。本研究では、

複合材料中のはく離欠陥の検出・同定に対して、受動型電気ポテンシャルCT法の適用を試みた。まず、帯状の貫通はく離を有するCFRP積層板に、三点曲げによって負荷を加え、ピエゾフィルム表面に表れる電気ポテンシャル分布を、有限要素法による数値解析および測定実験により調べた。次に、測定された電気ポテンシャル分布に逆問題解析を適用し、はく離の同定を試みた。

2. 電気ポテンシャルの有限要素解析

2.1 解析モデル

CFRP積層板中のはく離欠陥がピエゾフィルム表面の電気ポテンシャル分布に与える影響を、有限要素法による数値解析により調べた。解析モデルは、Fig. 1に示すように、板幅方向に貫通した帯状はく離を有するCFRP積層板の表面にPVDFフィルムを貼り付けたもので、次節で述べる実験における試験片をモデル化したものである。積層板は160 mm、幅60 mm、厚さ0.19 mmの一方向強化単層板を配向角 $[-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ の40層構成で積層した擬似等方性板であり、ピエゾフィルムは厚さ52 μm のPVDFフィ

Table 1 : Material properties of lamina

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}	G_1 (GPa)	G_2 (GPa)	G_3 (GPa)
138	9.1	9.1	0.32	0.32	0.02	4.8	3.4	4.8

Table 2 : Material properties of PVDF

(a) Elastic properties (GPa)								
C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{22}	C_{33}	C_{44}	C_{55}	C_{66}	
3.61	1.61	1.42	3.13	1.60	5.50	0.590	0.690	
(b) Piezoelectric coefficient properties (mC/m ²)								
e_{31}	e_{32}	e_{33}	e_{24}	e_{15}				
41.0	3.19	-16.2	-12.7	-15.9				
(c) dielectric properties (nC/Vm)								
g_{11}	g_{22}	g_{33}						
0.001064	0.1063	0.1063						

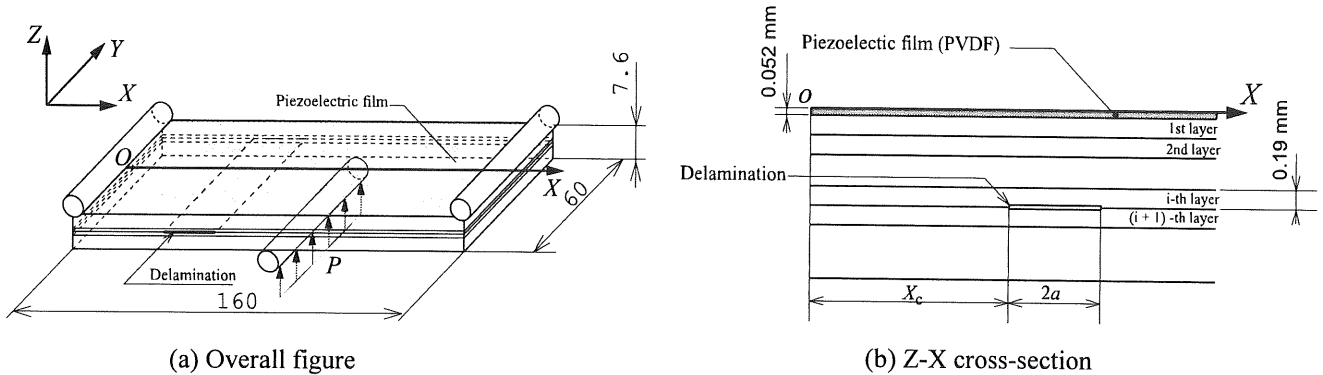


Fig. 1: Composite laminate for numerical analyses.

ルムである。簡単のため、帯状はく離の前縁は直線状で、かつ板長手方向に対して垂直であると仮定する。このような場合、はく離は、はく離の長さ、はく離の長手方向の位置およびはく離の層間深さを定めれば、一意に表される。そこで、はく離を表すはく離パラメータ (a, X_c, d) を Fig. 1(b)に示すように定義する。すなわち、はく離半長を a (mm)、はく離左縁の長手方向の位置を X_c (mm)、はく離の深さを d とする。はく離深さに関しては、ピエゾフィルムを貼付した面から数えて第 i 層と第 $(i+1)$ 層の間にはく離が存在する場合を $d = [i | i+1]$ のように表記するものとする。本研究では、はく離半長 a とはく離の位置 X_c をそれ

ぞれ 10 mm と 45 mm に固定し、はく離深さが $d = [10|11], [20|21]$ および $[30|31]$ の三通りの欠陥材、およびはく離が存在しない健全材について三点曲げ荷重時にピエゾフィルム表面に生じる電気ポテンシャルを計算した。三点曲げの中心支点に加えた荷重は合計 980 N の等分布荷重とし、電氣的境界条件としてピエゾフィルムと積層板との界面の電位を 0 とした。解析に用いた CFRP 単層板および PVDF フィルムの物性値はそれぞれ、Table 1, Table 2 に示す通りであり、次の節で述べる実験における値に準じている。

2.2 ポテンシャル分布の計算結果

数値解析によって得られた X 軸上の電気ポテンシ

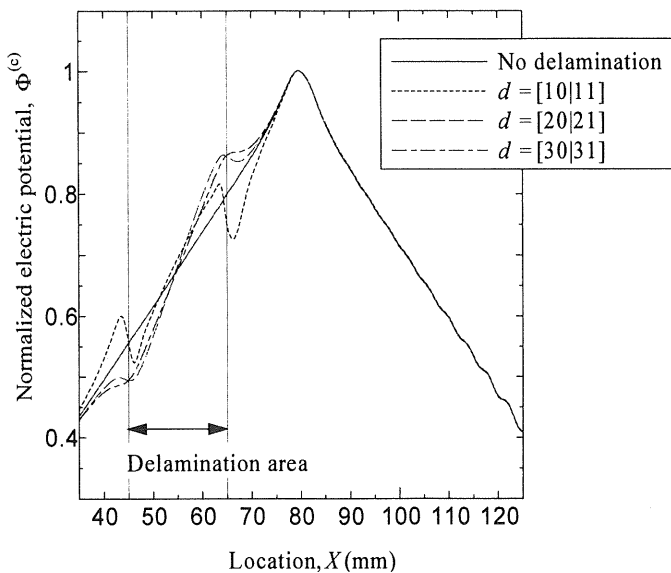


Fig. 2 : Calculated distribution of electric potential, $\Phi^{(c)}$

ナル分布を荷重点直下 ($X = 80 \text{ mm}$) におけるポテンシャル値で除することにより、無次元化したものを、Fig. 2 に示す。無次元化された電気ポテンシャル値を基準化ポテンシャルと呼び、 Φ で表すものとする。また、数値計算による量には上付き添え字(c)をつけて表すものとする。Fig. 2 より、はく離が存在する場合のポテンシャル分布では、健全材におけるポテンシャル分布と比較して、はく離端付近で特徴的な変化が現れており、はく離の影響がポテンシャル分布に現れていることがわかる。

はく離が電気ポテンシャル分布に与える影響を評価する量として、次式で定義される基準化ポテンシャル分布差 $\Delta\Phi(X)$ を導入した。

$$\Delta\Phi(X) = \Phi(X) - \Phi_0(X) \quad (1)$$

ここで、 $\Phi(X)$ ははく離が存在する場合の基準化ポテンシャル分布、 $\Phi_0(X)$ ははく離が存在しない健全材における基準化ポテンシャル分布である。数値解析によって得られた基準化ポテンシャル分布差 $\Delta\Phi(X)$ を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、電気ポテンシャル分布は、はく離の両端付近においてははく離の深さ d に応じた特徴的な変化を示すことがわかる。例えば、 $d = [10 |$

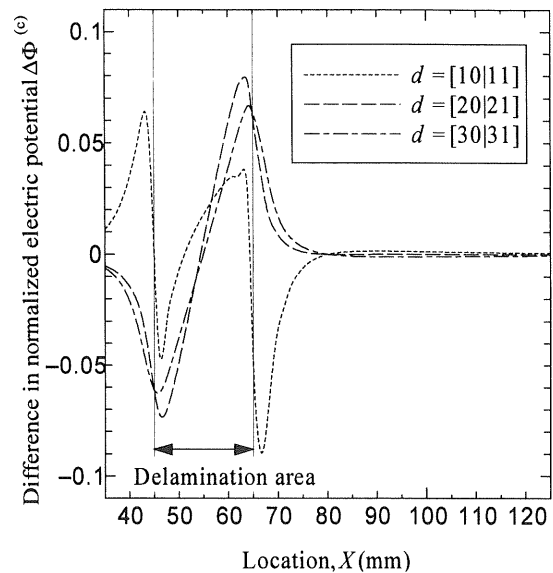


Fig. 3 : Difference in distribution of calculated electric potential, $\Delta\Phi^{(c)}$

11] の場合に得られる $\Delta\Phi$ 分布では、はく離の左縁および右縁付近のいずれにおいても、はく離縁を挟むように極大値と極小値が表れている。一方、 $d = [20 | 21]$ および $[30 | 31]$ の場合に得られる $\Delta\Phi$ 分布は、はく離縁で極大値、右縁に極小値を取り、現れる極値の数は合計二つである。

3. 電気ポテンシャルの測定実験

3.1 実験方法

帯状のはく離を導入した CFRP 試験片の表面に、ピエゾフィルムを貼り付け、三点曲げによって生じるピエゾフィルム表面上の電気ポテンシャル分布を測定した。

使用した CFRP 試験片は、一方向強化プリプレグを $[(-45^\circ / 0^\circ / 45^\circ / 90^\circ)_5]_s$ の 40 層構成で積層した擬似等方性板である。試験片には、層間にフッ素樹脂フィルム (厚さ $50 \mu\text{m}$) を層間に挟み込んで成型することにより、板幅方向に貫通した帯状のはく離を人工的に導入した。試験片の表面には、厚さ $52 \mu\text{m}$ の PVDF フィルムを貼り付けた。PVDF フィルムの試験片に接着する側の面は、同電位に保つために Ni-Cu スパッタリングによって電極加工されている。試験片寸法とピエゾフィルムの貼り付け位置を Fig. 4 に示す。人工はく離

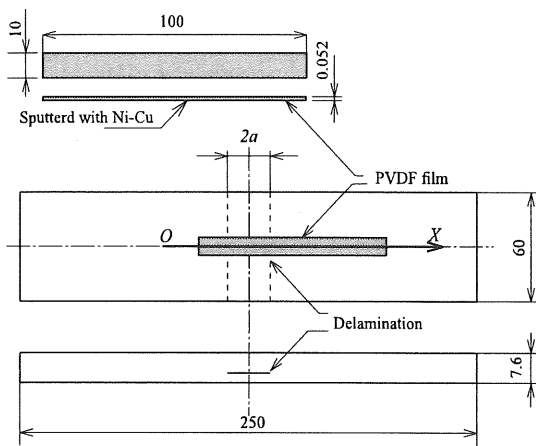


Fig. 4: Configuration of specimen.

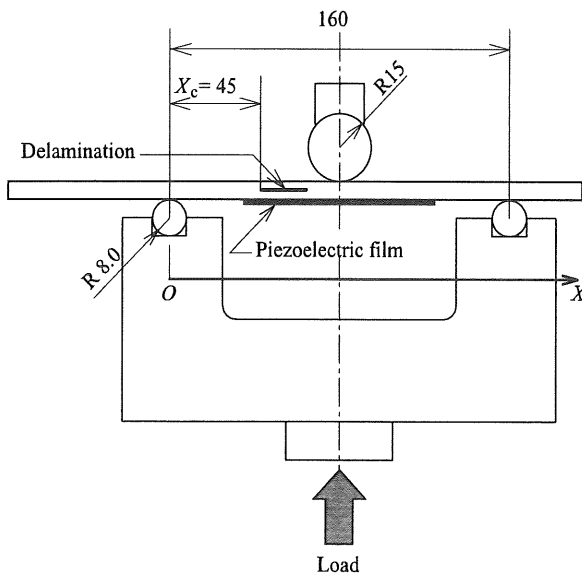


Fig. 5: Experimental set-up

の半長 a は 10 mm とし、はく離深さ d については、 $d = [10|11]$, $[20|21]$ および $[30|31]$ の三通りの欠陥材について測定を行なった。

上記の試験片に三点曲げによって平均荷重 980N、応力振幅 490N、周波数 3Hz の正弦波変動荷重を与え、 piezofilm 表面に生じる電気ポテンシャル分布を、試験片の中心線 X 軸に沿って非接触電位計によって測定した。試験片は、Fig. 5 に示すように、三点曲げジグに対してはく離の左端位置が $X_c = 45$ mm となるように設置してある。

3.2 測定結果

測定されたポテンシャル分布を Fig. 6 に示す。解析

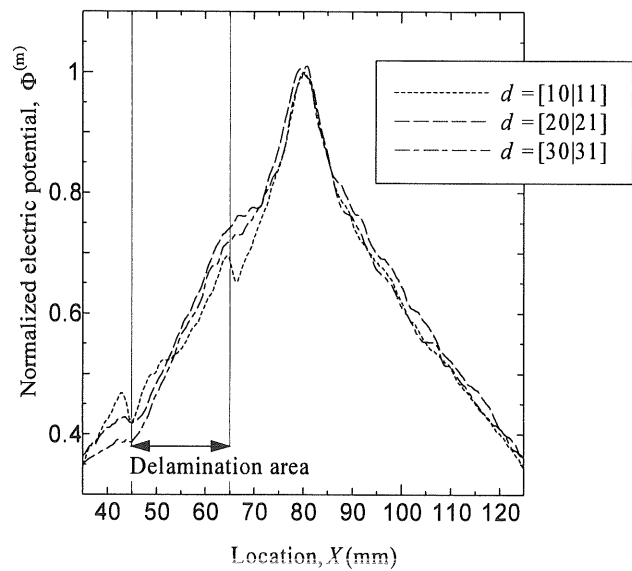


Fig. 6: Measured distribution of electric potential, $\Phi^{(m)}$

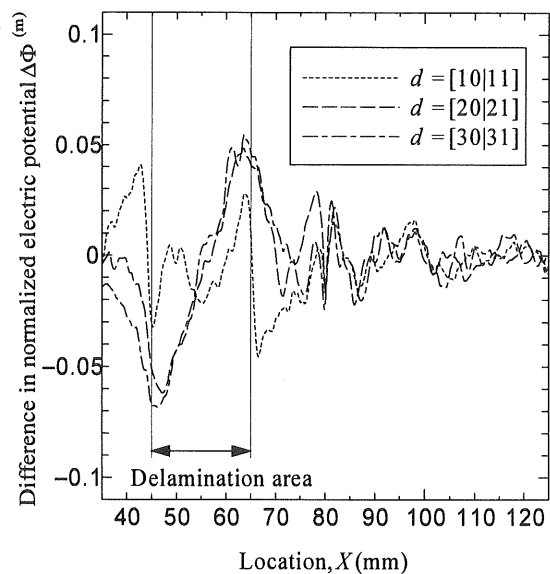


Fig. 7: Difference in distribution of measured electric potential, $\Delta\Phi^{(m)}$

値同様、荷重点直下 ($X = 80$ mm) における値で無次元化した基準化ポテンシャル分布 Φ で示した。また、測定量に関しては、上付き添え字(m)をつけて表すものとする。Fig. 6 より、荷重点に対して左側のはく離が存在する部分と、右側の健全部ではポテンシャル分布に明らかな相違がみられ、はく離の影響がポテンシャルの測定値に現れていることがわかる。ここで、式 (1) で定義された基準化ポテンシャル分布差 $\Delta\Phi(X)$ を

測定値に対しても求め、Fig. 7に示す。ただし、無欠陥材に対する基準化ポテンシャル分布差 $\Delta\Phi_0^{(m)}(X)$ は、負荷の対称性を利用し、はく離の影響を強く受けていないと考えられる中心支点直下より右側のポテンシャル分布に4次関数をフィッティングすることにより求めた。Fig. 7より、測定されたポテンシャル分布においても、解析同様に、はく離の両端付近においてははく離の深さ d に応じた特徴的な変化を示すことがわかる。例えば、 $d=[10|11]$ の場合に得られる $\Delta\Phi$ 分布では、はく離の左縁および右縁付近のいずれにおいても、はく離縁を挟むように極大値と極小値が表れており、解析と同様の傾向を示す。一方、 $d=[20|21]$ および $[30|31]$ の場合に得られる $\Delta\Phi$ 分布においても、はく離縁で極大値、右縁に極小値を取り、解析と同様の傾向を示すことがわかる。

以上のことから、実験および数値解析から得られる基準化ポテンシャル差 $\Delta\Phi$ を比較することにより、はく離パラメータ (a, X_c, d) を推定し、はく離を同定できる可能性が示された。

4. はく離の同定

4.1 はく離の同定手法

基準化ポテンシャル分布 $\Delta\Phi$ に逆問題解析手法として残差最小化法を適用し、はく離の同定を試みた。残差最小化法では、測定で得られたポテンシャル分布とはく離パラメータをある値の組み合わせに仮定したときに数値計算で得られるポテンシャル分布の違いを次式に示す残差平方和 R_s で評価する。

$$R_s = \sum_i \left(\Delta\Phi_i^{(m)} - \Delta\Phi_i^{(e)}(a, X_c, d) \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 i は測定点番号を表し、すべての測定点について和を取ることを示している。測定で得られたポテンシャル分布差 $\Delta\Phi^{(m)}(X)$ に対して、 R_s が最小となるはく離パラメータの組み合わせ (a, X_c, d) を修正パウエル法[6]で探索し、これをはく離パラメータの推定値とした。

4.2 はく離の同定結果

実験で用いた CFRP 中の人工はく離欠陥を上記の手法で同定した結果を示す。試験片における実際のは

Table 3: Estimated parameters of delaminations.

(a) Delamination 1					
Delamination parameters	a (mm)	X_c (mm)	$X_c + a$ (mm)	d	Residual (R_s)
Actual	10.0	45.0	55.0	[10 11]	
Estimated	11.2	43.3	44.5	[8 9]	
Error	+12%	-1.7 mm	+0.5 mm	2/40 layer	2.78×10^{-2}
(b) Delamination 2					
Delamination parameters	a (mm)	X_c (mm)	$X_c + a$ (mm)	d	Residual (R_s)
Actual	10.0	45.0	55.0	[20 21]	
Estimated	8.7	47.3	56.0	[30 31]	
Error	-13%	+2.3 mm	+0.5 mm	10/40 layer	1.47×10^{-2}
(c) Delamination 3					
Delamination parameters	a (mm)	X_c (mm)	$X_c + a$ (mm)	d	Residual (R_s)
Actual	10.0	45.0	55.0	[30 31]	
Estimated	9.1	46.6	55.7	[25 26]	
Error	-9%	+1.6 mm	+0.7 mm	5/40 layer	1.43×10^{-2}

く離パラメータは以下の通りである。

Delamination 1 : $(a, X_c, d) = (10, 45, [10|11])$

Delamination 2 : $(a, X_c, d) = (10, 45, [20|21])$

Delamination 3 : $(a, X_c, d) = (10, 45, [30|31])$

それぞれのはく離について、推定されたはく離パラメータを Table 3 に示す。いずれの場合についても、はく離の大きさ a については、10%前後の誤差で推定されている。また、はく離の位置に関しては、はく離の中心の位置 $(X_c + a)$ を基準に考え、実験の位置合わせ精度等を考えると、実質的な誤差はほとんど無いことがわかる。はく離の深さに関しては、最もはく離が浅い位置にある $d = [10|11]$ の場合において、残差平方和 R_s が最も大きくなっているにもかかわらず、良い精度で推定されていることがわかる。これは、浅い位置にはく離がある場合、はく離深さの推定精度は測定誤差や外乱に鈍感であることを意味する。一方、はく離が中立面にある $d = [20|21]$ である場合と、深い位置にある $d = [30|31]$ である場合においては、推定されたはく離深さと実際のはく離深さが逆転してしまっており、はく離深さの区別ができていない。以上のことから、はく離の寸法や位置に関しては、はく離深さによらず正確な推定が可能である一方で、はく離の深さについては、はく離が深い位置にあるほど推定が困難になることがわかる。

5. 結言

本研究では、 piezofilm を用いた受動型電気ポテンシャル CT 法を積層型複合材料に適用し、はく離欠陥の同定を試み、帯状はく離について寸法と位置がはく離深さによらず推定可能であることを示した。はく離の深さについては、はく離が深い位置にあるほど推定が困難になることがわかった。

参考文献

- [1] IEEE Standard on piezoelectricity, 1987, ANSI/IEEE, Std. 176.
- [2] L. Shanqing, S. Kubo, T. Sakatami and L. Zhengxing, "Theoretical and numerical investigations on crack identification using piezoelectric material-embedded

structures", Materials Science Research International, Vol. 6, 2000, pp.41-48.

- [3] D. Shiozawa, S. Kubo, T. Sakagami and K. Okuno, "An experimental study on applicability of passive electric potential CT method to crack identification.", J. Soc. Material Science Japan, Vol. 8, 2000, pp. 926-931.
- [4] D. Shiozawa, S. Kubo and T. Sakagami, "Passive electric potential CT method using piezoelectric material for crack identification", Inverse Problems in Science and Engineering, Vol. 12, 2004, pp.71-79.
- [5] D. Shiozawa, S. Kubo and T. Sakagami, "An experimental study on applicability of passive electric potential CT method to crack identification", Proc. of ATEM'03, September 2003, paper#OS09W0285.
- [6] W.I. Zangwill, "Minimizing a function without calculating derivations", Computer J., Vol. 7, 1964, pp. 149-154.