

アンカーボルトの腐食量定量評価に関する技術開発

Development of Quantitative Inspection Method of Corrosion on Anchor Bolts Using Ultrasonic Testing

原子燃料工業株式会社	匂坂 充行	Mitsuyuki SAGISAKA	Member
原子燃料工業株式会社	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member
株式会社アトリー	鵜飼 康史	Yasufumi UKAI	
株式会社アトリー	佐久 太郎	Taro SAKU	

Quantitative inspection method of corrosion using ultrasonic testing was developed in order to maintain reliability of anchor bolts. Quantity of corrosion can be measured precisely even if the anchor bolt was installed on concrete base.

In addition to quantity of corrosion, the distance from bolt head and the length of corroded region were estimated by improved method. Mock-up tests were conducted for the purpose of evaluating detection capability of the method.

Keywords: Ultrasonic Testing, Anchor Bolt, Inspection, Quantitative Evaluation, Non Destructive Testing

1. 緒言

国内原子力プラントの高経年化に伴い、プラントにおける構造物の劣化を非破壊で検出できる手法及びその高度化は、プラントの健全性維持に欠かせない重要なテーマとなっている。

プラント構造材を固定するアンカーボルトは、プラント高経年化にあたり健全性を確認すべき部位の一つとして認識されている^{[1][2]}が、万一埋設部に腐食が発生し、ボルト径が減少した場合でも、その減少量を非破壊で定量することは困難であるのが現状である。そこで、腐食による径減少を検出し、精度良く定量できる非破壊的な検査手法の開発が望まれている。

弊社では腐食等により生じる可能性のあるアンカーボルトの径の減少を、超音波により非破壊で定量評価できる手法の開発を進めている。また径減少の定量のみならず、腐食位置、腐食領域の長さの推定を行える評価手法の高度化にも取り組んでいる。

ここではその技術開発について、様々な腐食形態を模擬した試験体に対する評価結果を基に報告する。

2. 評価手法の概要

2.1 腐食量定量方法の概要

開発した腐食量定量手法は、円柱内部に超音波を入射した際に、底面波以降の時間に観察される、いわゆる「遅れエコー」がボルトの径変化に感度を持つことを利用している。その上で、腐食部の位置、長さについて、ある程度の推定を行えるよう、弊社が独自に改良を加えている。

「遅れエコー」の発生に関する模式図を Fig. 1 に示す。超音波探触子から発信された超音波は、ボルト内面で反射しながら Fig. 1 のような経路を通過してボルト底面に達し、その後底面エコーとして受信される (Fig. 1 の①～③)。ボルト内面での反射の際には、一定の条件で縦波から横波へのモード変換が発生し (Fig. 1 の④)、超音波の速度は変化することから、経路の違いによって底面エコーには一定間隔の時間遅れが発生する。この時間遅れを Δt とすれば、以下のような式で書き表される。

$$\Delta t = \frac{d\sqrt{V_L^2 - V_S^2}}{V_L V_S} \quad (1)$$

ここで V_L 、 V_S は、それぞれ鉄鋼中の縦波と横波の速度、 d はボルトの直径である。式(1) から、時間遅れ Δt はボルト径 d に依存することがわかる。

連絡先: 匂坂充行、〒590-0451 大阪府泉南郡熊取町朝代西
1-950、原子燃料工業株式会社、電話: 0724-52-7221、
e-mail: sagisaka@nfi.co.jp

Fig. 2 には、ボルトの腐食前、腐食後について、遅れエコーの違いによる検出の模式図を示した。

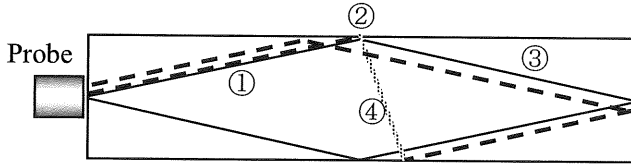


Fig. 1 Schematic of "delayed" echoes

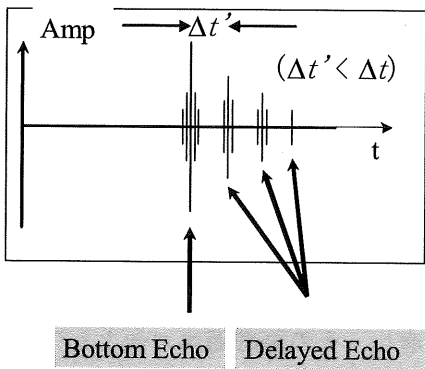
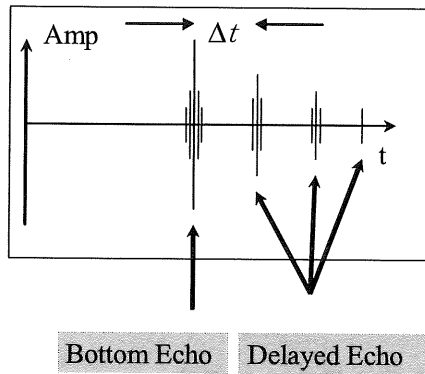


Fig. 2 Delayed echoes obtained from different diameter of anchor bolts.

2.2 試験体

本技術開発における評価例として、直径 60mm、長さ 500mm の炭素鋼丸棒材に機械研削によって模擬腐食を付与した試験体を製作した。試験体の模式図を Fig. 3 に、実際の試験体の外観写真を Fig. 4 に示す。

No.2~3 はボルトの全周ではなく一部分に模擬腐食を付与したもので、No.4~6 は全周にわたり均一に径

減少した模擬腐食が存在する試験体である。以降、No.2~3 の模擬腐食形態を片側腐食と呼び、No.4~6 の模擬腐食形態を周方向腐食試験体と呼ぶ。

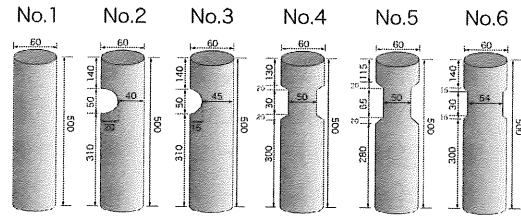


Fig. 3 Geometry of anchor bolt mockups with simulated corrosion

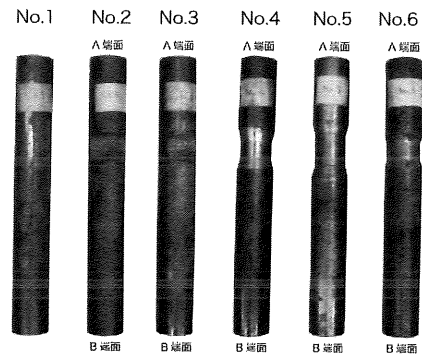


Fig. 4 Appearance of anchor bolt mockups

Table 1 mockups with simulated corrosion (one side)

mockup number	Nominal Diameter (mm)	Simulated Corrosion	
		Depth (mm)	Length (mm)
No.1	60		
No.2	60	20	50
No.3	60	15	50

Table 2 mockups with simulated corrosion (circumferential)

mockups number	Nominal Diameter (mm)	Simulated Corrosion	
		Diameter (mm)	Length (mm)
No.4	60	50	30
No.5	60	50	65
No.6	60	55	30

3. 周方向模擬腐食試験体に対する評価

3.1 腐食部分の径の定量

No.4~6 の試験体に対する腐食量の定量測定では、底面エコー、遅れエコーの測定結果を利用する。測定結果の例を Fig. 5 に示す。得られた測定データを基に、腐食部分の径を定量した結果を Table 3 に示す。この定量結果から、どの試験体に対しても腐食部分の径を定量できていること、定量の誤差は、腐食部分が先端から 280~300(mm)にある場合で最大 4.6%、115~140(mm)にある場合で最大 5.7%であることがわかる。

この結果から、本技術開発における手法により、腐食部分の長さが 30(mm)といった部分的な径減少であっても、腐食部分の径をおおむね正しく定量できることがわかる。

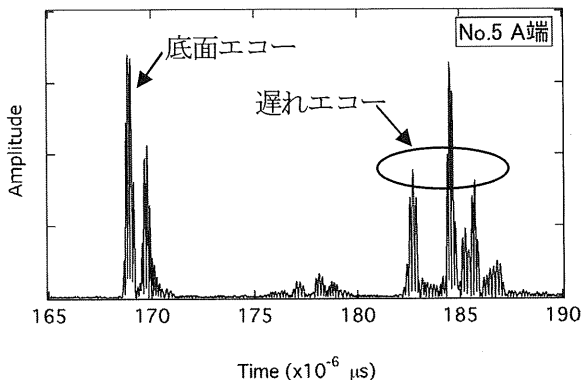


Fig. 5 Experimental example: Bottom and delayed echoes obtained from mockup No.5

Table 3 Evaluated Diameter obtained from mockups No.4, 5 and 6 (circumferential).

No	Corroded region			Evaluated Diameter (mm)	Error (%)
	Distance from top (mm)	Length (mm)	Diameter (mm)		
4	130	30	50	52.7	5.4
	300	30	50	52.3	4.6
5	115	65	50	52.1	4.2
	280	65	50	50.4	0.8
6	140	30	54	56.0	3.7
	300	30	54	55.5	2.8

3.2 腐食部分の位置及び長さの推定

アンカーボルトの健全性を評価するにあたっては、腐食部の径の定量に加えて、その腐食部分の位置、長さの情報が極めて有益な情報となり得る。本技術開発における腐食量評価手法では、取得できる信号データを多角的に活用して、腐食部位の径の定量以上の情報を取得できるよう高度化している。

(1) 腐食部分からのエコー

本技術開発に用いた試験体に対する評価においては、腐食部分から傷エコーと同様のエコーが観測された。観測例を Fig.6 に示す。図の F が傷エコー群であり、傷エコー群の中でも最初に立ち上がっているものを F1 とした。F1 以降に観測されたエコーは、傷エコーにより発生する遅れエコーである。

Table 4 は No.4~6 より計測した腐食部分からのエコーを示している。この表から腐食部分からのエコーはおおよそ減少径部分の位置を示しており、定量の誤差は 115~140(mm)にある場合で最大 62.3mm、280~300(mm)にある場合で最大 21.6mm であった。

腐食部分からのエコーは必ずしもすべての腐食形状において検出できる訳ではないが、腐食部位の位置を把握する上での判断材料の一つとして活用できる情報であるといえる。

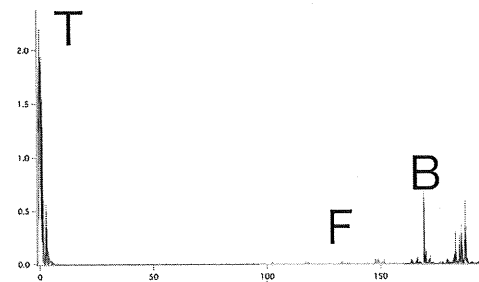


Fig. 6 Flaw echo from corroded region

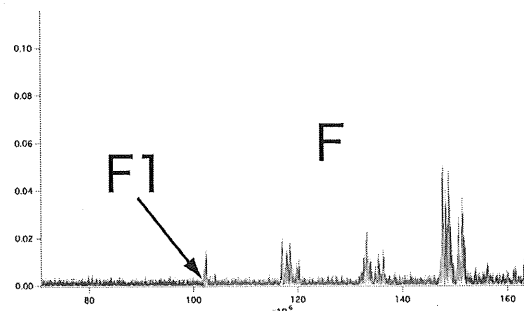


Fig. 7 Flaw echo from corroded region (enlarged)

Table 4 Flaw echo from corroded region

No	Distance from top (mm)	F1 echo (mm)
4	130	192.3
	300	313.3
5	115	136.9
	280	301.6
6	140	194.4
	300	317.2

(2) 位置、長さに関する評価指標

評価手法の高度化を目的として、波形処理により算出される2つの指標(指標A、Bと呼ぶ)を開発し用いた。評価例として、No.4~6に対して指標A、Bを算出したものをそれぞれ Fig.8, 9 に示す。

Fig.8 から、指標 A は腐食位置に感度を有しており、腐食部分が先端から 280~300(mm)にある場合と、115~140(mm)にある場合ではおよそ 10 倍の差を示している。また、指標 B は腐食部位の長さに感度を有していることが読み取れる。

これらの指標は腐食量評価における判断材料の一つとして活用し、腐食量の定量評価結果、腐食部からのエコーなど複数の情報を組み合わせることにより、アンカーボルトの腐食状況が総合的に判断される。

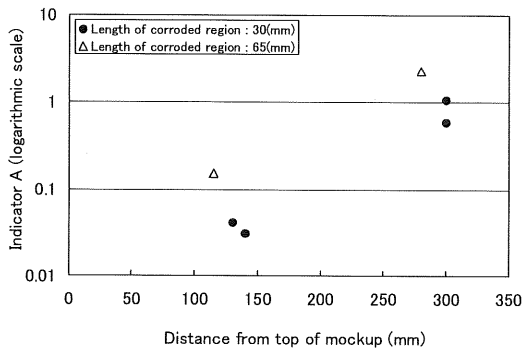


Fig. 8 “Indicator A” calculated based on UT signals from mockups

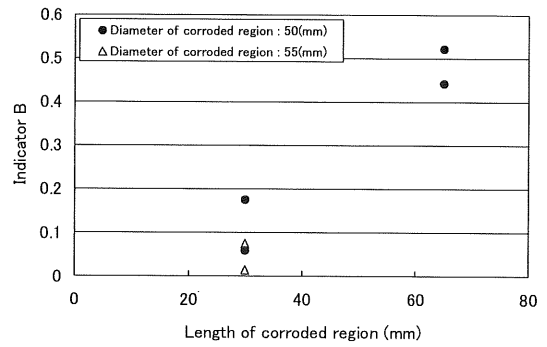


Fig. 9 “Indicator B” calculated based on UT signals from mockups

3.3 片側模擬腐食試験体に対する評価

次に No.2, 3 の片側模擬腐食が存在する試験体の実験結果を示す。片側腐食では 2.1 節に示した手法の適用が困難であるため、以下に示す情報を取得することにより、腐食形態の把握を試みる。

(1) 片側模擬腐食部からのエコー

本技術開発に用いた試験体に対する評価においては、腐食部分から傷エコーと同様のエコーが観測された。評価例として、端面から 140mm の場所に片側腐食が存在する試験体の探傷図を Fig.10 及び 11 に示す。

3.2 節において述べたとおり、腐食部分からのエコーは必ずしもすべての腐食形状において観測できるとは言えないが、腐食部位の位置を把握する上での判断材料の一つとして活用できる情報と言える。

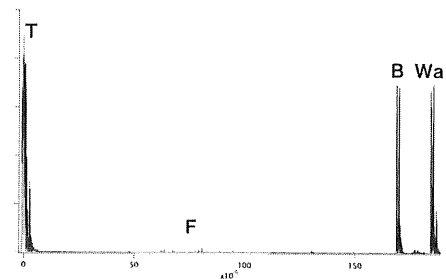


Fig. 10 Flaw echo from corroded region

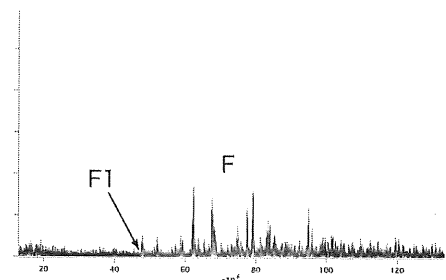


Fig. 11 Flaw echo from corroded region (enlarged)

(2) 片側模擬腐食による底面エコー減衰

片側腐食を検出する方法の一つとして、底面エコーの減衰を利用した結果を示す。Fig.12は腐食部分がある側、Fig.13は腐食部分がない側より得られた波形である。底面エコー (Fig.12, 13中のB)を比較すると、Fig.13の底面エコーの波高がFig.12のものに比べて低くなっていることがわかる。これは、探触子から入射された超音波の一部が腐食部分に当たることにより底面波が減衰するためと考えられる。ここに示した底面の減衰は、(1)と同様に腐食形状、部位の判断材料として活用していく。

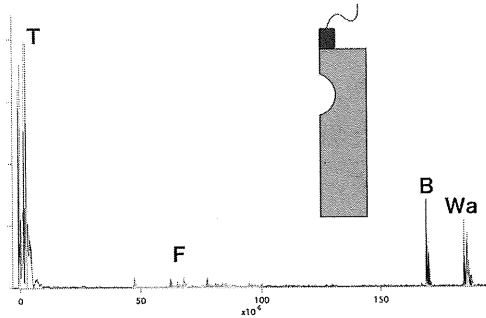


Fig. 12 Attenuation of bottom echo caused by corroded region (left side)

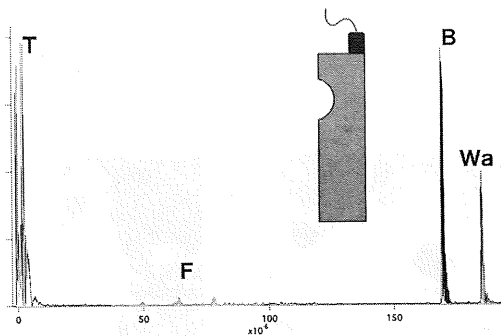


Fig. 13 Attenuation of bottom echo caused by corroded region (right side)

3. 結言

土中、あるいはコンクリートの中に埋設された原子力プラント構造物のアンカーボルトに対して、腐食等による径の減少部の直径を超音波により非破壊で定量評価できる手法を開発した。また、アンカーボルトの健全性評価の高度化として、腐食部位の位置、長さを推定できるよう開発を進めた。

本研究で使用した直径 60(mm)のアンカーボルトにつ

いては、腐食部における径 50(mm)を最大 5.4%の誤差で定量できることを示した。

また腐食部の位置、長さについても評価を試み、本技術開発に用いた試験体においては、傷エコーの検出の他、信号解析によって算出される指標が腐食領域の位置、長さに感度を有することを示した。

本手法は腐食量の定量、傷エコーの検出、波形処理による指標、超音波の減衰といった情報を総合的に活用することによって、アンカーボルトの腐食状況を把握するものであり、今後さらに信号を理論的に解析することを含めたアンカーボルト診断の高度化を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 美浜一号機 高経年化対策に関する報告書、関西電力、1999.
- [2] 玄海一号機 高経年化対策に関する報告書、九州電力、2003.