

大型探触子超音波探傷法によるコンクリートで覆われた 原子炉格納容器鋼板の腐食測定技術の開発

Development of Ultrasonic Testing Technique with the Large Transducer
to Inspect the Containment Vessel plates
of Nuclear Power Plant Embedded in Concrete

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)* 黒住 保夫 (Yasuo Kurozumi)* 金島 慶在 (Yoshiari Kaneshima)†

要約 加圧水型原子力発電所の原子炉格納容器のコンクリート中に埋設された鋼板は、直接接近して検査を行なうことが不可能なため、今後腐食等の懸念が生じた場合に、その有無や程度を遠隔測定することが可能な技術を開発しておくことが望ましい。

本研究では、原子炉格納容器の接近可能な位置から、広範囲のコンクリート埋設部鋼板を検査することが可能な超音波探傷手法を開発することを目的として、コンクリート埋設部を模擬するために、その外表面をコンクリートで覆った炭素鋼板の上に腐食減肉を模擬した人工のくぼみを設けた試験体に対し、試作した超音波探触子によりそのくぼみを検出する実験を行なった。このために比較的低周波数(0.3, 0.5MHz)の表面SH波を用い、120mm幅の振動子と等価な3個の振動子を連結したこれまでにない大型の振動子を持つ超音波探触子を新たに試作した。

実験の結果、この大型3連振動子を有する表面SH波探触子により、コンクリートで覆われた鋼板試験体表面上で距離1500mm先にある深さ9.5mmおよび19mmの人工くぼみからの反射波を明瞭に検出することができた。このことから、低周波表面SH波を用いた大型探触子によるコンクリート埋設鋼板の腐食減肉等に対する検出の可能性を見出すことができた。

キーワード 超音波探傷, 原子炉格納容器, 炭素鋼, 腐食, 表面波, SH波, コンクリート埋設, 大型振動子

Abstract The containment vessel plates embedded in concrete on Pressurized Water Reactors are inaccessible to inspect directly. Therefore, it is advisable to prepare inspection technology to detect existence and a location of corrosion on the embedded plates indirectly.

In order to establish ultrasonic testing technique to be able to inspect the containment vessel plates embedded in concrete widely at the accessible point, experiments to detect artificial hollows simulating corrosion on a surface of a carbon steel plate mock-up covered with concrete simulating the embedded containment vessel plates were carried out with newly made ultrasonic transducers. We made newly low frequency (0.3MHz and 0.5MHz) surface shear horizontal (SH) wave transducers combined with three large active elements, which were equivalent to a 120mm width element.

As a result of the experiments, the surface SH transducers could detect clearly the echo from the hollows with a depth of 9.5mm and 19mm at a distance of 1500mm from the transducers on the surface of the mock-up covered with concrete. Therefore, we evaluate that it is possible to detect the defects such as corrosion on the plates embedded in concrete with the newly made low frequency surface SH transducers with large elements.

Keywords ultrasonic testing, reactor containment vessel, carbon steel, corrosion, surface waves, shear horizontal waves, embedded in concrete, large active element

1. はじめに

加圧水型原子力発電所 (pressurized water reactor, PWR) の原子炉格納容器 (以下格納容器) は、その内部に原子炉本体、冷却系などを格納し、事故の場合放射

性物質が外部へ放出することを防止する機能を有する重要な設備である。そのため格納容器は、定期検査毎に漏洩率試験によって、耐圧バウンダリとしての機能を確認することになっている。PWRの原子炉

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

† (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 関西電力株式会社 美浜発電所

格納容器鋼板は、現在までのところその機能に影響するような腐食が発生する可能性は、ほとんどないと考えられている⁽¹⁾。しかし、格納容器の下部はコンクリート構造物中に埋設されており、目視のための接近は不可能である。したがって、今後このような部位で腐食、減肉等の懸念が生じた場合にも、的確にその位置および程度を評価できる検査技術を用意しておくことが望ましい。

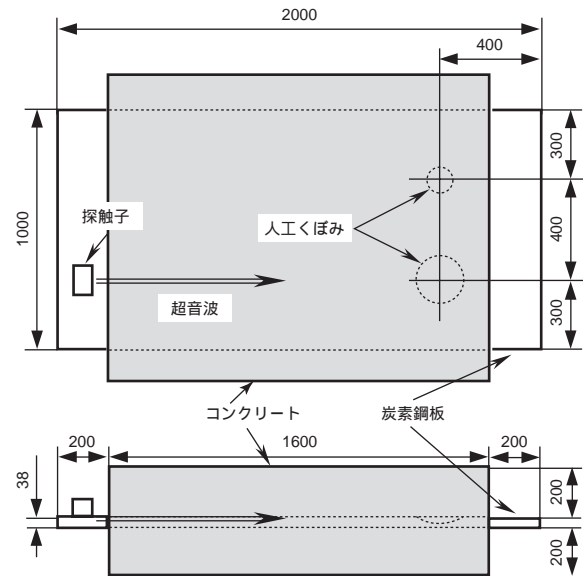
コンクリートに埋設した鋼板部の検査には、接近が可能な位置から約 20m 余りも離れた位置にある部材の検査が可能な技術が求められる。このような遠い距離までの部材の検査技術として、鋼板や鋼管などの平行な面をもつ材料中に伝播させる超音波伝播モードであるガイド波について、電磁超音波 (electromagnetic acoustic transducers (EMAT)) 法⁽²⁾⁽³⁾、磁わい効果を利用する magnetostrictive sensor (MSs) 法⁽⁴⁾⁽⁵⁾、通常の斜角法⁽²⁾などにより、研究開発がされてきている。その超音波の伝播モードは、薄板に適用され材料の厚さ全体を伝播するラム波または材料の表面近傍のみを伝播する share horizontal (SH) 波を利用している。このうち、コンクリートに埋設した鋼板部の検査技術として、実機での適用に至るような、完成されたものは未だ存在しない。

本研究では、構造部材の非破壊検査技術として一般に広く適用されている超音波探傷技術を用いた格納容器鋼板の検査技術の開発を行った。このため、表面の腐食減肉の検知に有効で、かつ鋼板からコンクリートへの超音波の透過が少ないと考えられる表面 SH 波を用い、これを長距離まで伝播させるために、低周波数の大型 (3 連振動子) 探触子を新たに試作した。また、供試体として、腐食等を模擬した人工減肉部 (くぼみ) を有する鋼板試験体を用いて、表面 SH 波による探傷法の適用性を確認するための実験を進めた。

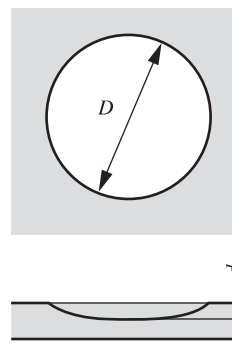
2. 試験体

実験に用いた試験体を図 1 に示す。試験体本体は格納容器鋼板を模擬し、板厚 38mm、長さ 2000mm、幅 1000mm の炭素鋼板である。2 枚の鋼板には、いずれも腐食減肉を模擬した、直径 200mm、最大深さ 19mm (1/2 板厚相当) と直径 100mm、最大深さ 9.5mm (1/4 板厚相当) の凹面状の人工のくぼみを設けた。くぼみの位置は、図 1 に示すように、試験体長手方向の一方の端面からの距離 400mm の片側表

面上である。2 枚の鋼板のうち、1 枚はそのまま用いる裸の試験体とし、もう 1 枚は、コンクリート埋設を模擬するために、その両面をそれぞれ 200mm 厚のコンクリートで覆った試験体とした。人工のくぼみには、実際の腐食減肉の際に生じると考えられるコンクリートとの間隙を与え、またその表面は、平滑でないでこぼことしたものである。



(1) コンクリートに覆われた試験体の構造



	大	小
D	200mm	100mm
d	19mm	9.5mm

(2) 人工くぼみの詳細

図1 人工くぼみのある試験体 (一方は裸で、もう一方はコンクリートで覆った)

コンクリートで覆った試験体では、くぼみから遠い側のコンクリートに覆われていない位置に探触子を設置することにより、超音波を入射させることができる。こうして、約 1900mm 離れた試験体端面からの反射波、および約 1500mm 離れたくぼみからの反射波を捕えることを試みた。

3. 超音波モードの選定と汎用型探触子による実験結果

3.1 超音波モードの選定

埋設鋼板の腐食，減肉などによるくぼみの測定のために，超音波探傷法を適用するためには，超音波探触子として以下のような条件が求められる．

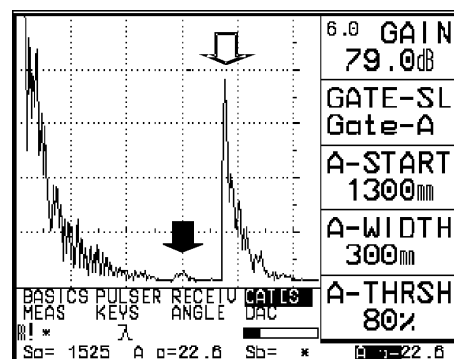
- (1) 腐食，減肉などの表面のくぼみからの反射波の捕捉に適していること，
- (2) 超音波を長距離まで伝播できること，
- (3) 接触するコンクリートへの超音波の透過が少ないこと．

以上の点から，被検体の表面近傍を伝播し，その振動方向が表面に平行な横波である表面SH波を選定した．より強い超音波ビームを発生させるために，できるだけ大きな振動子を用いる必要がある．しかし，SH波を発生させるための振動子の振動方向での製作可能な寸法には制限があった．使用した探触子は，1個の振動子をもち，その振動子寸法は，20mm(D) × 40mm(W)，周波数は0.3，0.5，0.7MHzであった．探傷器には，Krautkramer製USD-15を使用した．

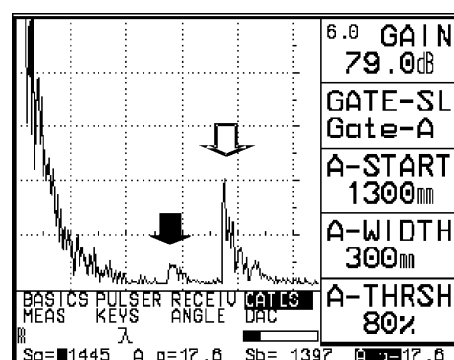
3.2 裸の試験体での試験

まず，裸の試験体を用いて，表面SH波による人工くぼみの検出の可否と試験体端面からの反射波の状況を測定した．0.5MHz探触子での探傷波形を図2に示す．この図は，試験体の人工くぼみから遠い側の端面から120mmの位置に探触子を置き，それぞれ小さいくぼみ，大きいくぼみ，くぼみのない位置での波形を示している．探触子からくぼみまでの距離は約1500mmである．試験体のもう一方の端面からの反射波が大きく現れており，くぼみに相当する位置で，それからと考えられる反射波が識別できる．大きいくぼみの位置では，端面からの反射波の低下が顕著に現れている．

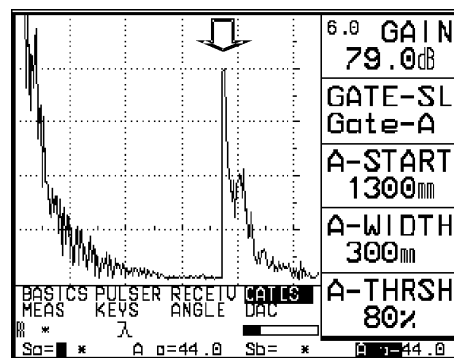
図3には，周波数の異なる探触子による大きいくぼみの位置での探傷波形を比較する．0.7MHzでは，0.5MHzに比べて人工くぼみおよび端面からの反射波は弱く，0.3MHzでは，人工くぼみからの反射波は0.5MHzほど弱くはないが，そのS/N比は低下する．



(1) 小さいくぼみの位置での探傷結果



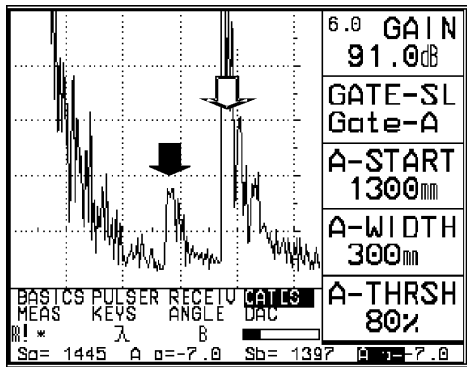
(2) 大きいくぼみの位置での探傷結果



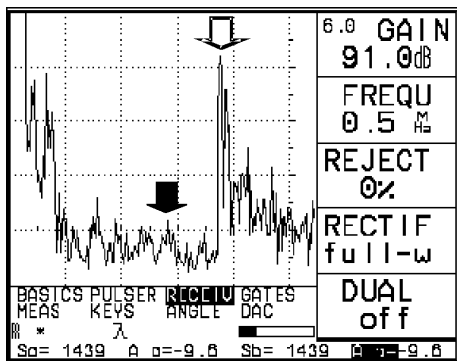
(3) くぼみのない位置での探傷結果

- ▼ くぼみからの反射波
- ◁ 試験体端面からの反射波

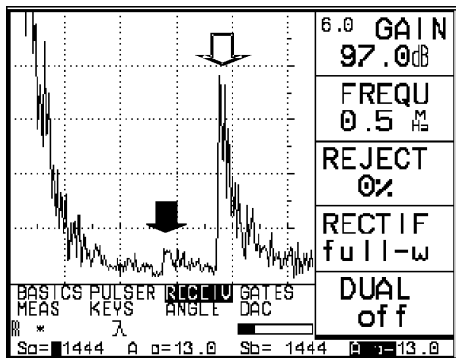
図2 裸の試験体での探傷結果
(1振動子，0.5MHz，表面SH波探触子)



(1) 0.5MHz



(2) 0.3MHz



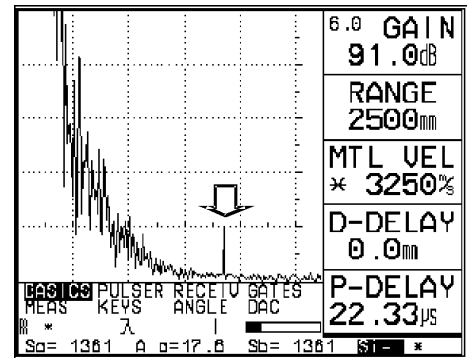
(3) 0.7MHz

- ▾ くぼみからの反射波
- ⇩ 試験体端面からの反射波

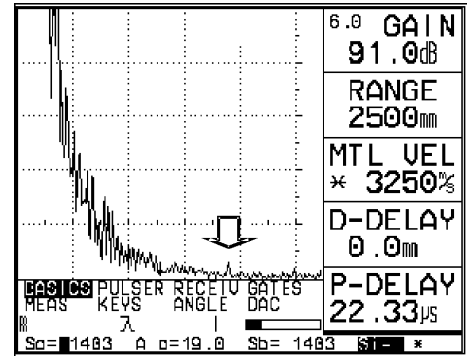
図3 裸の試験体での探触子周波数による探傷結果の違い (1振動子, 表面SH波探触子, 大きいくぼみ)

3.3 コンクリートで覆われた試験体での試験

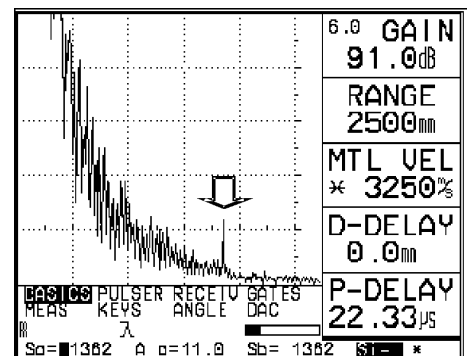
次に, コンクリートで覆われた試験体で, 同様に探傷試験を行なった. 図4に, 0.5MHzの探触子を用いて求めた, それぞれ小さいくぼみ, 大きいくぼみ,



(1) 小さいくぼみの位置での探傷結果



(2) 大きいくぼみの位置での探傷結果



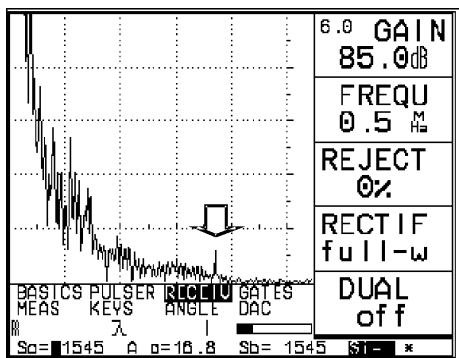
(3) くぼみのない位置での探傷結果

⇩ 試験体端面からの反射波

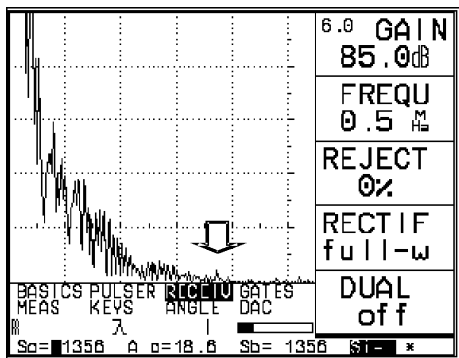
図4 コンクリートに覆われた試験体での探傷結果 (1振動子, 0.5MHz, 表面SH波探触子)

くぼみのない位置での探傷波形を示す. 図2で示したコンクリートのない裸の試験体で識別が可能であったくぼみからの反射波は識別できず, 試験体端面からの反射波も弱くなっている. すなわち, 反射波に対する試験体表面に接触するコンクリートの影響が非常に大きいことがわかる.

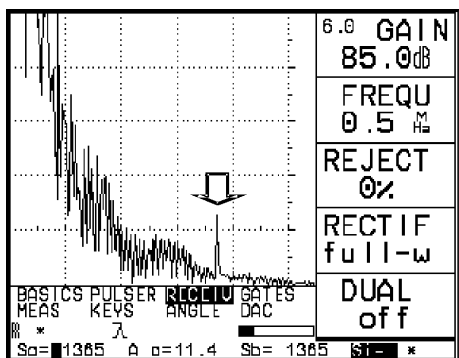
コンクリートによる減衰に対処するため, さらに強い超音波ビームを発生させることを試みた. 振動子寸法 20mm(D) × 40mm(W) の探触子を2個並列させ, 20mm(D) × 80mm(W) 相当の振動子で探傷を行なった. その結果を, 図5に示す. くぼみからの反射波は,



(1) 小さいくぼみの位置での探傷結果



(2) 大きいくぼみの位置での探傷結果



(3) くぼみのない位置での探傷結果

⇩ 試験体端面からの反射波

図5 コンクリートに覆われた試験体での探傷結果
(1振動子, 0.5MHz, 表面SH波探触子, 1振動子探触子を2個並列使用)

同様に識別できないが, 試験体端面からの反射波が強くなるのがわかる。

以上のことから, 探触子の周波数は低く(0.3MHzまたは0.5MHz)することおよび振動子をさらに大きくすることが有効であるといえる。

4. 大型探触子の試作とこれによる実験結果

4.1 大型探触子の試作

振動子を2個並列に励振させることにより, 試験体端面からの反射波の強度が改善されたことから, 次に製作可能な大きさの振動子を3個並列させた探触子を試作した。製作した探触子の仕様を表1に示す。また, この探触子の写真を図6に示す。使用周波数は, 前項を受けて, 0.3MHzと0.5MHzとした。また, 振動子の奥行きは, 最初に使用した探触子の2倍の40mmとした。幅40mmの振動子3個を同時に励振させ, 全体で40mm(D) × 120mm(W)相当の振動子と

表1 3連振動子表面SH波探触子仕様

超音波モード	SH (shear horizontal) 波
周波数	0.3MHz, 0.5MHz
屈折角	90°
振動子	セラミック(ジルコン・チタン酸鉛系磁器)
	40mm×40mm
	3個、並列

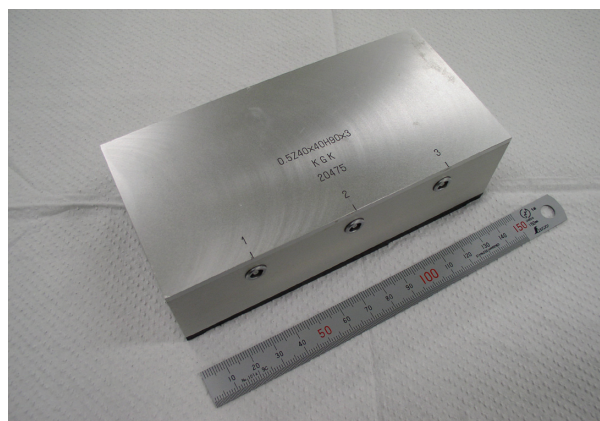


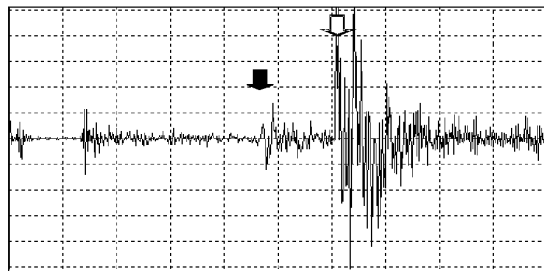
図6 振動子3個を組合せた表面SH波探触子の写真

し、これを1つの筐体に納めた。

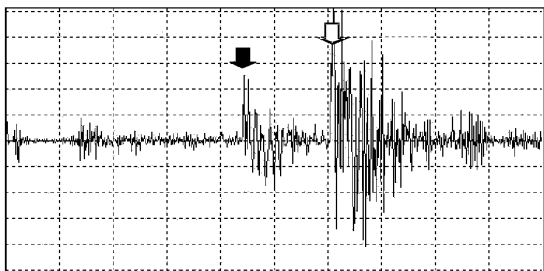
さらに、低い周波数が有効であったことから、0.08 ~ 6 MHz (-3dB) の周波数帯域を有する低周波超音波パルサー/レシーバを使用した。探傷信号はデジタルオシロスコープユニットを経由して、ノートパソコンに取込んだ。これにより周波数帯域フィルタ処理や探傷波形の保存が可能である。

4.2 大型探触子による裸の試験体での試験

周波数 0.5MHz の探触子による、裸の試験体に対する、大きいくぼみ、小さいくぼみの位置での探傷結果を図7に示す。探触子からくぼみまでの距離は、前項での試験と同様に約 1500mm である。図2で前掲した1振動子による結果と比較すると、試験体端面からの反射波に対するくぼみからの反射波の比は大きく、明瞭に識別できることがわかる。小さいくぼみからの反射波も、大きいくぼみからのものより低いですが、明瞭に識別できるものである。



(1) 小さいくぼみの位置での探傷結果



(2) 大きいくぼみの位置での探傷結果

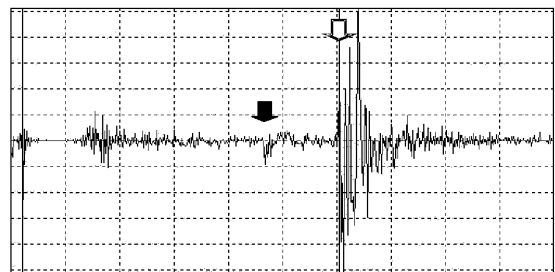
▼ くぼみからの反射波
 ◀ 試験体端面からの反射波

図7 大型振動子によるコンクリートのない裸の試験体での探傷結果 (3連振動子, 0.5MHz, 表面SH波探触子)

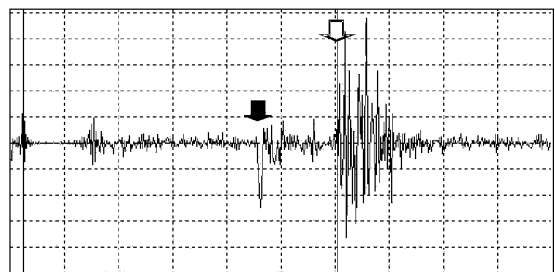
4.3 大型探触子によるコンクリートで覆われた試験体での試験

次に、コンクリートで覆われた試験体に対する、周波数 0.5MHz の探触子による探傷結果を図8に示す。大型の振動子を用いたことにより、この場合でも大小のくぼみからの反射波を捕えることができた。また、コンクリートによる試験体端面からの反射波の減衰は、振動子1個の探触子の場合ほど顕著ではなくなった。

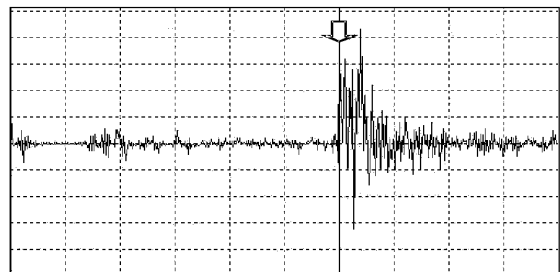
周波数 0.3MHz の探触子での結果を図9に示す。この場合も、くぼみからの反射波は識別が可能であるが、0.5MHz の場合に比べてその信号はより識別しやすくなっている。



(1) 小さいくぼみの位置での探傷結果



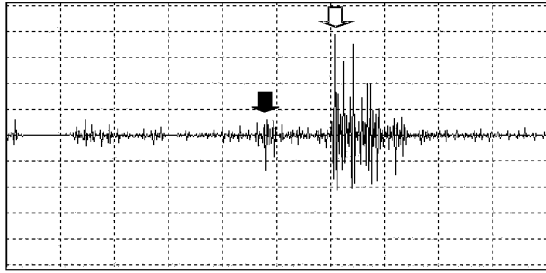
(2) 大きいくぼみの位置での探傷結果



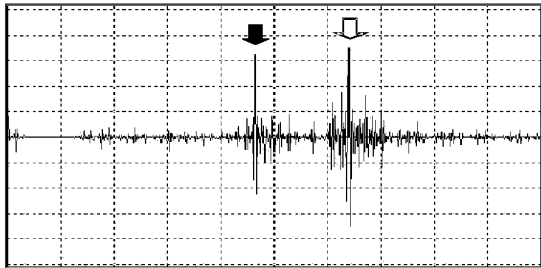
(3) くぼみのない位置での探傷結果

▼ くぼみからの反射波
 ◀ 試験体端面からの反射波

図8 大型振動子によるコンクリートに覆われた試験体での探傷結果 (3連振動子, 0.5MHz, 表面SH波探触子)



(1) 小さいくぼみの位置での探傷結果



(2) 大きいくぼみの位置での探傷結果

- ▼ くぼみからの反射波
- ⬆ 試験体端面からの反射波

図9 大型振動子によるコンクリートに覆われた試験体での探傷結果 (3連振動子, 0.3MHz, 表面SH波探触子)

5. 考察

当初使用した汎用型の1個の振動子を持つ表面SH波探触子(振動子寸法20mm(D)×40mm(W))では、コンクリートで覆われた試験体のくぼみからの反射波を識別することはできなかったが、試作した大型(3連振動子)探触子により、くぼみからの反射波を明瞭に識別することができた。

その原因の1つとして、振動子の大型化が考えられる。そこで、振動子の大きさと反射源の大きさによる反射源からの反射波の大きさについて考察する。

くぼみからの反射波の大きさを、振動子の大きさとくぼみの大きさを用いて、試算した。試算においては、以下の仮定を行なった。

- (1) 超音波は、表面から1波長相当の層を伝播し、高さ1波長の矩形振動子から発生する。
- (2) くぼみは、超音波ビームに垂直な円柱形欠陥とする。
- (3) 試験体端面での反射は、超音波ビームに対して十分に大きい面での反射とする。

試験体の端面からの反射波は、試算の仮定(3)より、直径 D_E の円形振動子から発生した音圧 P_0 の超音波が、距離 x の位置にあり、超音波ビームを完全に反射する

大きい面で全反射し、戻ってきて受信される音圧 P_B として、近似的に次式で表される⁽⁶⁾。

$$P_B = \frac{D_E^2}{8x} P_0 \quad \dots (1)$$

ここで、 λ は超音波の波長を示す。

式(1)において、試算の仮定(1)より、円形振動子の面積は、幅 L_F 、深さ λ の振動子の面積と考え、次に置き換える。

$$\frac{D_E^2}{4} = L_F \quad \dots (2)$$

式(1)、式(2)から、 P_B は次式により求められる。

$$P_B = \frac{L_F}{2x} P_0 \quad \dots (3)$$

くぼみからの反射波については、試算の仮定(2)より、直径 D_E の円形振動子から発生した音圧 P_0 の超音波が、距離 x の位置にある直径 D_F の円柱形欠陥で反射し、戻ってきて受信される音圧 P_F として、近似的に次式で表される⁽⁶⁾。

$$P_F = \frac{D_E^2}{4x} \sqrt{\frac{D_F}{8x}} P_0 \quad \dots (4)$$

同様に式(2)より、式(4)は、次式に置き換えられる。

$$P_F = \frac{L_F}{x} \sqrt{\frac{D_F}{8x}} P_0 \quad \dots (5)$$

式(3)および式(5)から、試験体端面および欠陥からの反射波の大きさ(gain)と、振動子からの距離(distance)、欠陥の寸法(size)との関係を整理したDGS(distance, gain, size)線図として表すことが可能である。周波数0.5MHz、幅120mmおよび幅40mmの振動子を用いた場合の、振動子からの距離に対する、試験体端面からの反射波、大きい円柱欠陥(直径200mm)、小さい円柱欠陥(直径100mm)からの反射波の大きさを、式(3)および式(5)から計算し、これらの関係を表すDGS線図として、図10に示す。図の横軸は振動子からの距離を、縦軸はそれぞれの振動子での発生音圧に対する反射波の比を示す。各曲線は、それぞれの振動子による端面、大きい円柱欠陥、小さい円柱欠陥からの反射波の大きさについて、振動子からの距離による変化を表している。

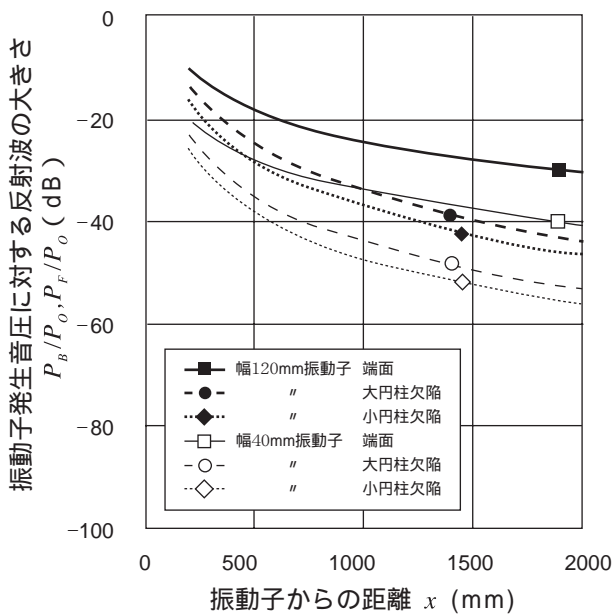


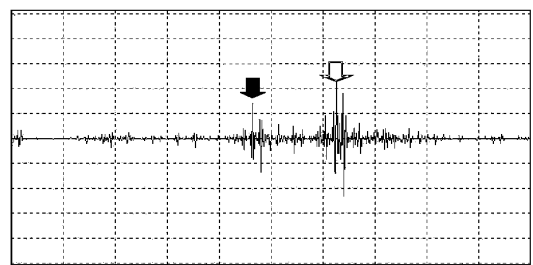
図10 DGS線図 (反射波の大きさと伝播距離の関係)

さらに、図10の図中には、幅120mmおよび40mmの振動子を用いた場合の、実験におけるそれぞれの探触子からの距離に相当する、距離1900mmでの端面()、距離1400mmでの大きい円柱欠陥()、距離1450mmでの小さい円柱欠陥()からの反射波の大きさの、式(3)および式(5)からの計算値を示している。計算した振動子発生音圧に対する反射波の大きさを、表2にまとめて示す。端面、大きい円柱欠陥および小さい円柱欠陥からの反射波の低下量の計算値は、幅120mmの振動子の場合、-30dB、-39dB、-42dB、幅40mmの振動子の場合、-40dB、-48dB、-52dBであり、幅120mmの振動子の方が、約10dB大きな反射波が得られる。このことは、振動子の大型化が、欠陥の検出に対して有効であることを示し、実験における人工くぼみの検出に対する探触子の大型化(3連振動子)の有効性を裏付けるものである。

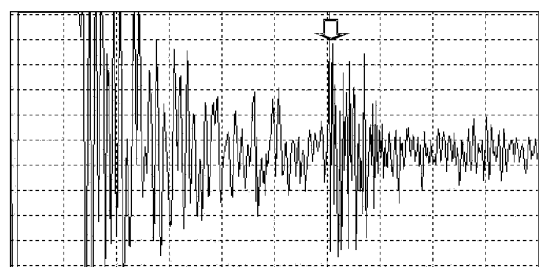
表2 振動子発生音圧に対する反射波の低下量の計算値

振動子の幅	40mm	120mm
端面からの反射波	-40dB	-30dB
大きい円柱欠陥からの反射波	-48dB	-39dB
小さい円柱欠陥からの反射波	-52dB	-42dB

さらに、当初使用した汎用型の1振動子表面SH波探触子を用いたコンクリートに覆われた試験体での実験で、くぼみからの反射波を明瞭に識別できなかった原因として、用いた探傷器の周波数帯域が用いた探触子の周波数に必ずしも適合していなかったことも考えられる。すなわち、探触子の周波数0.3~0.5MHzに対して、用いた探傷器の周波数帯域は0.5~20MHzであった。改良試作した大型(3連振動子)探触子を用いた実験では、0.08~6MHzの周波数帯域を有する低周波超音波パルサー/レシーバを用いた。さらに取り込んだ信号は、ノートパソコンにおいていくつかの周波数帯域フィルタ処理を試行した。図8と図9の結果は、概ね0.07~0.25MHzの範囲での帯域フィルタ処理により得ることができたものである。図11に0.3MHz探触子での、帯域フィルタ処理の有無による結果を比較する。この図から、くぼみの検出には、約0.07~0.25MHzの低周波成分を捉えることが有効であり、用いた探触子と超音波パルサー/レシーバ、周波数帯域処理が適合していたと考えられる。



(1) 周波数帯域フィルタ処理を行なった探傷波形



(2) 周波数帯域フィルタ処理のない探傷波形

▼ くぼみからの反射波
 ▲ 試験体端面からの反射波

図11 周波数帯域フィルタ処理の有無による探傷波形の違い(3連振動子、表面SH波探触子、コンクリートに覆われた試験体の大きいくぼみ)

6. おわりに

コンクリートで覆われた板厚 38mm，長さ 2000mm の炭素鋼板試験体上に設けた腐食減肉を模擬した表面のくぼみの超音波探傷による検出について実験を行なった．得られた結論を以下に示す．

- (1) 大型 (3 連振動子) 探触子 (40mm(D) × 120mm (W) 相当) を持つ低周波数 (0.3, 0.5MHz) 表面 SH 波探触子を開発し，コンクリートで覆われた鋼板表面のくぼみの検出に有効であることを確認した．
- (2) この方法により，コンクリートに覆われた深さ 19mm，9.5mm のくぼみを，距離 1500mm の位置から明瞭に識別することができた．

実際の格納容器埋設部鋼板の全域の探傷を可能にするためには，さらに遠距離までの超音波の伝播が必要であるが，以上の結果から，低周波数の表面 SH 波を用い，複数個の振動子を並列させた大型探触子によるコンクリート埋設鋼板の腐食減肉等に対する検出の可能性を見出すことができた．

文献

- (1) (社)日本電気協会，軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査 電気技術規程 JEAC4205-2000，解説 12(2000)．
- (2) J. Li, J.L. Rose, " Guided Wave Inspection of Containment Structure ", (2000) ．
- (3) J. Li, J.L. Rose, " Guided Wave Testing of Containment Structures ", Materials Evaluation, 59[6], 783-787(2001) ．
- (4) H. Kwun, " Feasibility of Magnetostrictive Sensor Inspection of Containments ", ORNL/SUB/98-SZ272V, 64 (1999) ．
- (5) H. Kwun, S. Y. Kim, " Guided Wave Inspection of Plates Using Magnetostrictive Sensors ", 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, New Orleans, Louisiana USA, May 24-26, (2000) ．
- (6) (社)日本非破壊検査協会，非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験Ⅱ，(2000) ．