

# 電磁波レーダのアスファルト表面 遮水壁診断への適用性の検討

伊藤隆彦<sup>1</sup>・菅野克美<sup>2</sup>・後藤英一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 大成ロテック(株)技術研究所部長(〒365 埼玉県鴻巣市大字上谷1456)

<sup>2</sup>正会員 大成ロテック(株)技術研究所課長代理(〒365 埼玉県鴻巣市大字上谷1456)

<sup>3</sup>正会員・フェロー 工博 大成ロテック(株)技術研究所所長(〒365 埼玉県鴻巣市大字上谷1456)

アスファルト表面遮水壁にプリスタリング等が原因で発生する小空洞は、早期に発見して補修する必要がある。一般に行われている電磁波レーダによる空洞探査は高度の熟練を要するが、本研究は高感度レーダを用いて判別に高度の熟練を要することなく小空洞を探査する方法と、これによる探査可能な最小空洞について検討した。測定波形から空洞の生じていない健全箇所の波形を差し引いて空洞の箇所、大きさを特定する方法について検討し、直径5cmで厚さ5mm程度の空洞を判別できることを確認した。また、これを内部亀裂の探査にも応用し、亀裂発生位置が表面から2.5cmであれば、幅1mmの亀裂を探査できることを確認した。

*Key Words : electromagnetic wave, cavity survey, radar, impermeable asphalt layer, cavity, blistering, crack, diagnosis*

## 1. はじめに

アスファルト混合物(以下、アスコンと称す)は、遮水性、たわみ性、耐久性などに優れた材料であることから、ダムや貯水池などの表面遮水壁として利用されている。当該材料による遮水工法は、1930年代よりドイツを中心としたヨーロッパ各地で施工されるようになり<sup>1)・2)</sup>、我国においても1960年代より本格的に採用され、最近では堤高90m級のダムが施工されるようになってきた<sup>3)</sup>。

このため、材料や機械などの新設施工時に関する技術開発は行われてきたが、一方では我が国においても供用後20数年が経過したものもあり、劣化、損傷の事例が散見され始め、保守管理の時期となりつつある。しかし、長期供用後の遮水壁の補修技術に関する研究は少なく、開発研究が必要と考えられる。今後これらの構造物の老朽化が予想されることから、保守管理の合理化、信頼性の向上に資する遮水壁の健全度診断、補修対策などに関する保守管理手法の整備が求められると考えられる。

健全度診断の方法には、遮水壁表面部の劣化・損傷状況を目視などで観察する表面調査と遮水壁内部の状況変化を調査する内的調査がある。遮水壁内部

の状況を調査する方法には、遮水壁から試料を切り取り採取してアスコンの劣化程度を調査、分析する方法と、調査対象物を傷つけたり破壊したりすることなく調査する非破壊検査法がある。当該構造物においては、遮水を目的とした構造物であることから、特に後者による方法が望まれる。

既設のアスファルト表面遮水壁に生じている損傷は、a)亀裂、b)プリスタリング、c)スロープフロー、d)削状痕、摩耗、e)コンクリート構造物などの異種材料との接合部の剥離、f)保護層の劣化、g)老化による表面の荒れ<sup>4)~8)</sup>などがある。表面部に生じた損傷は、その種類、程度、状況などにより適時対応することが可能であるが、内部に生じていて表面部から検知できないものについては、そのまま放置しておけばいずれ表面に異常な現象を表すこととなるので、これらはできるだけ早期に検知し、対応することが肝要である。

これらの損傷のうち、プリスタリング等が原因で生じるアスファルト遮水層内部の空洞やトランジション部の陥没による遮水層下部の空洞などは、早期に発見して補修する必要がある。地下の空洞などを探査する手法の一つとして、電磁波の反射を利用した地中レーダーを用いる方法がある。当該方法は、

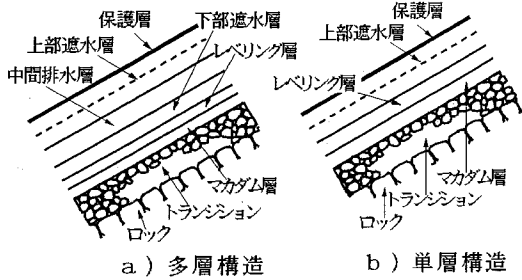


図-1 アスファルト遮水壁の構造

電磁波の反射を表す連続した縞模様の乱れから空洞の位置とその規模を判別するもので、これには高度の熟練を要する。また、ここで調査対象とする損傷部の規模は数cmオーダーの微小な空洞などであり、埋設物などの探査に利用されている従来機器では探査困難である。

本論文は、遮水壁内部に生じている微小な損傷を調査対象として、従来機器の地中レーダーよりも分解能が高く舗装厚の測定などに利用されているレーダーを用い、判別に熟練を要することなく微小な損傷を探査するデータ処理技術などを検討し、当該探査方法によるアスファルト遮水壁の健全度診断への適用性を室内実験により検討した結果について報告する。

## 2. アスファルト表面遮水壁の構造と損傷形態

### (1) 遮水壁の構造

アスファルト遮水壁の構造は、図-1に示すように、a)多層構造とb)単層構造の2種類に大別される。前者は上下の遮水層の間に排水層を設けた構造であり、後者は遮水壁の間に排水層を設けない構造である。多層構造の遮水壁において、遮水壁は最上層から順に①保護層、②上部遮水層、③中間排水層、④下部遮水層、⑤レベリング層、⑥マカダム層より構成されており、マカダム層の下はトランジションである。これら各層は、各々固有の役目を持っている。保護層は、水、太陽光、空気などが直接上部遮水層に接触するのを避けるために設けられ、アスファルトとフィラーなどを混合したアスファルトマッシュなどによる厚さ数mmの層である。上部遮水層は遮水壁の中で最も重要な層で、遮水性と力学的安定性などを具備し、多くの場合、2層以上に分けて施工される。中間排水層は空隙率の大きい混合物が用いられ、上部遮水層を透過してきた水を監査廊に導く役目をもった層である。下部遮水層は堤体内の水が遮水壁に浸入するのを防ぐ役目と排水層に浸入

した水を監査廊に導く役目も有している。レベリング層は不陸整形のための層で、この層より上の層の機械施工を容易にする基盤としての役目も有している。マカダム層は遮水壁とトランジションを接合する役目の層である。アスファルト遮水壁の基盤となるトランジションは、堤体内に浸入した水による遮水壁への背圧を防止する役目と寒冷地においては凍上防止層としての役目も有している。我が国の比較的大型のアスファルト表面遮水壁フィルダムの遮水壁の構造は、ほとんど多層構造が採用されている。

### (2) 既設ダムの供用性

損傷の発生原因は、日射、気温、雪氷などの気象作用や地震、流木など外的要因によるものと、基盤の変形、遮水壁内部の欠陥など内的要因によるものなどが考えられる。以下にこれらの損傷の概要、特徴などを示す。

#### a) 亀裂

亀裂は、地震荷重や湛水、水位変動等による堤体の変形、沈下などの他、温度低下に伴う収縮応力の増大と温度変化による伸縮の繰返し疲労による温度応力などで発生する。これは、表面から発生して深さ方向に成長していく。収縮による亀裂はジョイント部に発生することが多い。亀裂は、遮水を目的とした構造物において、最も不具合な損傷の一つであり、これが生じないように入念な施工を行い対処しているが、上記の原因などでいくつかのダムで発生している。しかし、これより漏水し、監査廊で検知されたとの報告はないことから、亀裂が拡大する前に発見され、修復されているものと考えられる。

#### b) プリスタリング

プリスタリングとは、火傷のあとに皮膚が水膨れを起こし膨れ上がるように、アスファルト遮水層の層下面あるいは層内に閉じ込められた空気や水蒸気が太陽光などの熱により膨張し、上部の遮水層を持ち上げたり、膨れ上がる現象をいう。これは、その発生時期により下記の2種類に分類される。一つは舗設中あるいは舗設直後でまだ舗装体温度が高いうちに、主としてローラの冷却・附着防止用の水が舗装体内に閉じ込められ、舗装体の温度で気化し、舗装を隆起させる。他の一つは舗設完了後、数カ月あるいは数年経過した後に発生するものである。主に問題となるのは後者のものである。また、発生部位により、①保護層のプリスタリング、②2層に舗設された遮水層の上層の1層目と2層目の境界で発生するプリスタリング、③遮水層の1層目の内部で発生するプリスタリングの3種類に分類される。①では直径数cm、膨れ上がりの高さが2～3cm程度が多

い。②は最も多く発生しているもので、上層を2層で舗設するとき、下の層に水分が残されたまま舗設したり、流木などの外力による損傷部あるいはピンホールなどから、上層の1層目と2層目の境界に浸入した水が太陽光で熱せられ、気化・膨張した場合などに発生する。通常、直径は30～50cmで、大きいものは直径1m、高さ10数cmに及ぶこともある。膨らみが激しい場合は、頂部に放射状の亀裂が発生する。③は②と似た現象で、混合物中の水分や外力などによる亀裂から水が浸入した場合などに発生する。また、遮水層に発生したプリスタリングは、そのまま放置しておくとその下方に第2、第3のプリスタリングを誘発する場合がある。したがって、発生の初期に補修が行われれば、それが大きな欠陥につながることはないと考えられる。これは、いくつかのダムで発生しているが、その抜本的な対策法は確立されていない。

#### c) スロープフロー

アスファルト遮水層や保護層アスファルトマチックが、斜面方向に流動する現象をいう。多くは局部的にマチックが軟質であったり、厚さが厚くなり過ぎていることが原因である。遮水壁全層にわたる構造的なスロープフローはほとんどみられない。

#### d) 削状痕、摩耗

アスファルト遮水壁に降雪、氷結した雪氷が滑落した際、あるいは水位変動の繰返しなどで保護層、さらには遮水層が摩耗する。積雪寒冷地にあるダムでは、雪氷の滑落による摩耗や削状痕などの損傷を受けやすい。また、流木によると考えられる削状痕がいくつかのダムで見られる。

#### e) コンクリート構造物との接合部の剥離

コンクリート構造物との接合部が剥離し、漏水した外国での例が報告<sup>9)</sup>されているが、国内のダムのいくつかに堤体の不同沈下などで構造物との接合部が剥離した例があるものの、当該部より漏水したとの報告はみられない。

#### f) 老化による保護層、遮水層表面の荒れ

紫外線劣化によると考えられる保護層表面の荒れが生じ、場合によっては微細な亀甲状の亀裂のようなものが観察される。我が国においては、保護層の部分的劣化により補修した事例が報告<sup>10)、11)</sup>されているが、遮水層表面の劣化による補修の事例は報告されていない。

以上、我が国の既設のアスファルト遮水壁は、建設地点の環境条件などの違いで程度の差はあるものの、種々の損傷を受けており、その多くは遮水壁表面に近い部位に生じている。しかし、厳密な運用管

理が行われており、遮水という目的に対しては、ほぼ満足すべき供用性が得られていると考えられる。

一方、我が国より供用期間の長い表面遮水壁型ダムを多く有するヨーロッパなどでは、ジョイント部の亀裂、プリスタリング、遮水層の劣化などの損傷を修復するために、比較的大規模な補修を行った事例も報告<sup>9)、12)</sup>されており、このような事例は今後増加すると考えられる。このような現状において、今後もより信頼性のある構造物として機能していくためには、これら内的な損傷をできるだけ早期に探査し、対応することが、これら構造物の長期耐久性ならびに信頼性維持に繋がるものと考えられる。このような背景から、以下では、表面観察などで探査できない遮水層内部に生じている発生初期のプリスタリングにより形成された面状の空洞や線状の空間（亀裂）などの損傷を非破壊で検知する技術、手法について検討した。

### 3. 非破壊検査法と遮水壁診断への適用

調査対象物を非破壊で検査する方法には、①放射線透過法、②弾性波法、③浸透探傷法、④電磁誘導試験法、⑤サーモグラフィ法、⑥光による方法、⑦リーク試験法、⑧ひずみ測定試験法、⑨アコースティック試験法（AE法）、⑩電磁波反射法、⑪自然電極電位法、⑫打撃法、⑬超音波法などがある<sup>13)</sup>。これらの内、土木・建築関係の分野では、①、②、④、⑤、⑨、⑩、⑪、⑫および⑬などが利用されている。

#### (1) アスファルト表面遮水壁診断への非破壊検査技術の適用について

既設のアスファルト表面遮水壁に生じている損傷を前節に示したが、これらの内の多くは、表面からの観察でその面積や損傷程度などが確認できる。しかし、プリスタリング、亀裂、施工ジョイントの開き、コンクリート構造物との剥離などの損傷は、表面観察から得られる情報だけでなく、遮水層内部、あるいは厚さ方向の情報がないと正確な診断をすることが困難な場合がある。

ここで調査対象としている厚さは、遮水壁全層を対象としても既設の施工事例から最大でも40cm程度以下であり、遮水壁の最重要部である上部遮水層を対象とすると最大でも15cm程度であり、極めて表面に近い部位が調査対象となる。

アスファルト遮水壁に発生が予想される損傷の状況、測定精度、急斜面で測定条件が厳しいなどを考慮すると、遮水壁の劣化・損傷調査に適用できる非

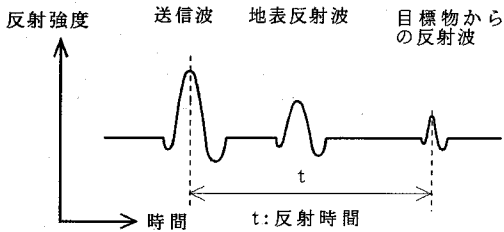


図-2 反射波形

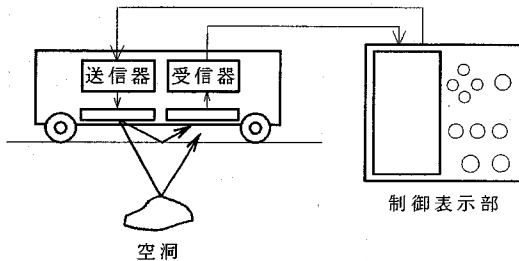


図-3 測定原理

破壊検査技術は、サーモグラフィ法、超音波法および電磁波反射法が考えられる。ただし、これらの技術は完全に完成されたものでなく、適用条件によっては若干検討しなければならない事項も残されている。サーモグラフィ法は損傷の位置を面的に探査する方法としては有効であるが、損傷の厚さや存在位置などの深さ方向の情報を得るには適していない。超音波法においては、温度により変形係数が大きく変化するアスコンを対象とする場合は、測定条件により超音波の透過性が著しく変化し、また、遮水壁表面の凹凸や荒れなどによりデータの再現性が劣るなどの問題も残されている。それぞれの特長を生かして複合した調査法で対応することが有効であると考えられるが、本研究では、電磁波反射法による探査法を試みた。なお、当該法においても従来機器では探査困難な微小空洞などを調査対象としているので、従来機器よりも分解能が高くアスコン厚さ測定などに用いられている高感度レーダを用いて探査する方法で行った。

## (2) 電磁波反射法による測定原理

電磁波反射法は、一般的に地中レーダと呼ばれる装置の送信アンテナから図-2のパルス幅が1ナノ秒(nsec,  $1 \times 10^{-9}$ 秒)前後のパルス状の送信波(一般に、周波数帯域50MHz~1GHz, 送信出力0.2~0.5mW)を地中に向けて放射し、送信波の反射を受信アンテナで受信する方法である。送信波の一部は地表面で反射されるが、残りは地中に入り周囲と電気的特性

表-1 比誘電率の概略値

材料	比誘電率	備考
アスコン	5程度	
セメントコンクリート	8~11	
路盤用砕石	8~9	
関東ローム	20~30	自然含水比
空気	1	
水	81	
金属	$\infty$	

表-2 アスコンの配合 (質量%)

材料	混合物			材質
	密粒度 アスコン	開粒度 アスコン	粗粒度 アスコン	
砕石	20~13 mm	43.0	17.0	硬質砂岩
	13~5 mm	25.0	40.0	
石	5~2.5mm	15.0	16.0	
スクリーニングス	10.0	—	11.0	
粗砂	29.0	9.0	7.0	鬼怒川産
細砂	8.0	—	5.0	霞ヶ浦産
石粉	12.8	2.0	4.0	炭酸カルシウム
添加材	0.2	—	—	植物性繊維
アスファルト	8.5	4.0	5.0	St. As. 60/80

(比誘電率)が異なる物質、例えば空洞、埋設管、地下水などの反射物質の境界面で反射され、再び地表に出て、図-3に示すように地表面近くに置いた受信アンテナに到達する。地中レーダは、比誘電率の異なる境界面で電磁波が反射する原理を利用しており、境界面までの深さdは、比誘電率 $\epsilon_r$ および反射時間tを用いて式(1)<sup>14)</sup>から求めることができる。

舗装を構成する各層、探査対象となる空気・水・金属の比誘電率は表-1に示すとおりである。これらの物質の比誘電率が異なるので、舗装を構成する各層の境界面、舗装体中の空隙・水・金属体で電磁波が反射し、これらを探査することができる。

$$d = \frac{V \times t}{2} = \frac{CO}{2 \times \sqrt{\epsilon_r}} \times t \quad (1)$$

ここで、V : 媒質中の電磁波の伝搬速度  
( $= CO / \sqrt{\epsilon_r}$ , m/s)

CO : 真空中の電磁波の伝搬速度  
( $= 2.997 \times 10^8$  m/s)

t : 反射時間 (s)

## 4. 実験方法

損傷の判別に熟練を必要としない波形処理方法を検討し、さらに当該法により表面に現れた亀裂の深さ探査の可能性、アスコン内部に発生した空洞や亀裂の探査可能な最小寸法を求めめるため、以下の方法で実験を行った。

表-3 地中レーダの仕様例

項 目		①	②	③	④	備考
探査対象		空洞	空洞	鉄筋	アスコン厚さ	
送信パルス幅	nsec	1.6	0.6	0.6	0.6	
送信出力	V p-p	16	10	15	15	
送信周期	$\mu$ sec	20	20	20	20	
測定範囲	nsec	20~200	10~20	6	6	
移動測定間隔	cm	2~10	1.5	0.5	0.5	
移動測定記憶容量	m	30~150	12	5	2.5	
表示		カラー 8色	白黒 16階調	白黒 3階調	白黒 3階調	
探査深さ cm	測定範囲	土 50~200	コンクリート 3~60	コンクリート 0.5~20	アスコン 3~30	材料の比誘電率によって変わる アスコンの場合
	測定可能最小寸法	0.4~4.5	0.4~0.8	0.25	0.13	

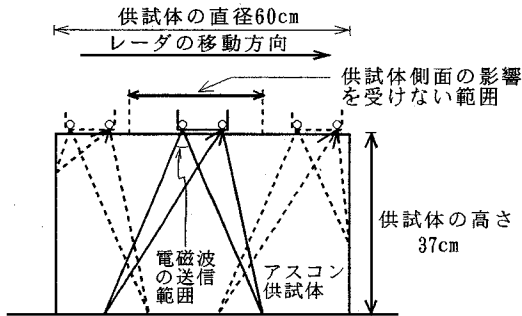


図-4 測定方法

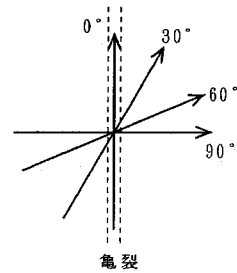


図-5 測定方向

(1) 使用材料

実験には、表-2に示す配合の混合物を用いた。これらの混合物は、著者等が基本的な配合検討に関与した大津岐ダム<sup>15)</sup>、深山ダム<sup>16)</sup>、多々良木ダム<sup>17)</sup>、双葉ダム<sup>18)</sup>、八汐ダム<sup>3)</sup>および既設ダム<sup>19)</sup>、<sup>20)</sup>に採用された遮水壁用の混合物の平均的な配合である。

(2) 実験に用いたレーダ

土木分野で利用されているレーダの探査対象は、地中の空洞や埋設物、コンクリート中の鉄筋、アスコン厚さ<sup>21)</sup>、<sup>22)</sup>などであり、レーダの一般的な仕様例は表-3である。

専用車両に装着して20km/hの速度で移動し、一辺の長さが数10cmの正方形で厚さ10cm程度の空洞を探索するレーダ<sup>23)</sup>、<sup>24)</sup>、<sup>25)</sup>も開発されているが、空洞探索には表-3の①または②のレーダが一般的に使用されている。①のレーダは、一辺の長さが45cmの正方形で厚さ10cm程度の空洞が探索可能<sup>26)</sup>、<sup>27)</sup>、<sup>28)</sup>であるが、探査深さを深くするために大きなアンテナを使用しているため送受信アンテナ間隔が広くなり、表面近くは電磁波の受信可能分布範囲外となる。また、②のレーダは、測定可能最小寸法が4~8mm程度と推定され、遮水壁表面付近に発生が予想される亀裂や小空洞の探索にこれらのレーダを適用するこ

とは不適と考えられた。アスコン厚さを探査対象とする表-3のレーダ④は、電磁波の周波数帯域が400~950MHz、送信平均電力が0.225mWであり、鉄筋を探索する表-3のレーダ③の深さ方向の測定可能最小寸法を小さくした型式である。鉄筋を探索するレーダ③が6nsecの反射時間を160個のデジタル数値に分割するのに対し、6nsecを320個のデジタル数値に分割する。

従って、式(1)より、比誘電率 $\epsilon_r=5$ のアスコンを対象とした深さ方向の測定可能最小寸法は、

$$\begin{aligned} \text{測定可能} &= \frac{2.997 \times 10^{10} \text{ cm/s}}{2 \times \sqrt{5}} \times \frac{6 \times 10^{-9} \text{ s}}{(320-1)} \\ \text{最小寸法} &= 0.126 \text{ cm} \approx 1.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

となる。これより、本研究では亀裂や空洞が小規模な時期に探査を可能とするために、測定可能最小寸法のより小さなアスコンを探査対象とするレーダ④を使用した。

(3) 実験方法

実験に使用したレーダでは電磁波の指向性が広いため、アンテナの真下にある物体以外からの反射波も受信する。従って、図-4に示すように、供試体中心部で測定を行う場合、供試体側面での反射の影響

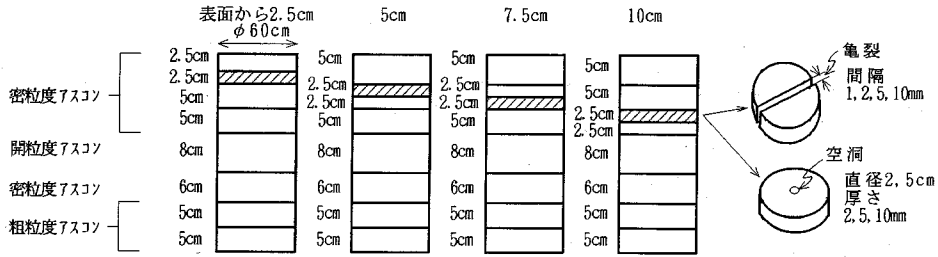


図-6 供試体の積み重ね方法

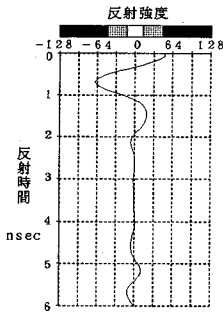


図-7 反射波形例

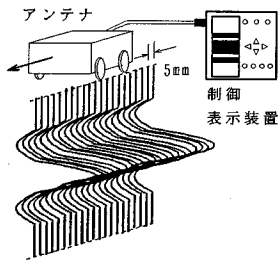


図-8 移動測定

が含まれないように直径60cm、厚さ37cmの円筒状供試体を準備した。厚さ方向の内訳は、八汐ダムの遮水壁構造を模して上面より厚さ5cmの密粒度アスコンを3層、次いで厚さ8cmの開粒度アスコン、厚さ6cmの密粒度アスコン、そして最下部に厚さ4cmの粗粒度アスコンを2層積層している。

a) 表面にある亀裂の深さ探査

亀裂として、最上層の5cmの密粒度アスコン供試体に幅3mmで深さ0.5cm、1.5cm、2.5cm、5cmの溝をカッターで作製した。

測定方向は図-5に示すように亀裂の延長方向に対して90、60、30、0°の角度の4条件とし、測定されたデータはパーソナルコンピュータに取り込んで波形処理を行った。

b) アスコン内部の亀裂または空洞探査

アスコン内部の亀裂または空洞探査用供試体は、図-6の方法で亀裂および空洞箇所とした。すなわ

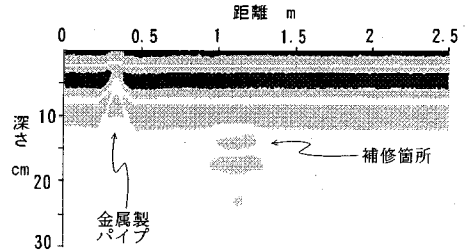


図-9 反射強度分布の例

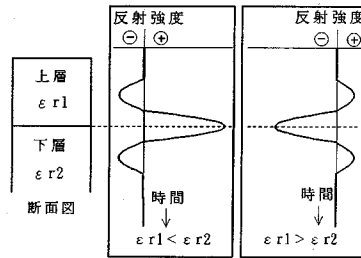


図-10 実験に使用したレーダの反射

ち、亀裂は、直径60cmで厚さ2.5cmの供試体中心を通るようにカッターで切断し、2枚の供試体間隔を亀裂間隔とした。また、空洞は供試体作製時に供試体上面中心に各種寸法のスペーサ（直径2.5cm、厚さ2.5、10mm）を設置して形成し、測定時にはスペーサを取り去った。また、空洞箇所の測定では、空洞が滞水している状況を想定して空洞に水を充填した状態でも測定を行った。

5. 実験結果および考察

(1) 波形処理方法

レーダで測定される反射波形は、図-7の例のように反射時間ごとの反射強度として測定され、図-8に示すように移動しながら連続測定された一定間隔ごとの反射波形<sup>29)</sup>を、図-7の反射強度の区分ごとの色調で図-9の例のように垂直断面の反射強度の分布として表示される。同一区分内の反射強度は連続し

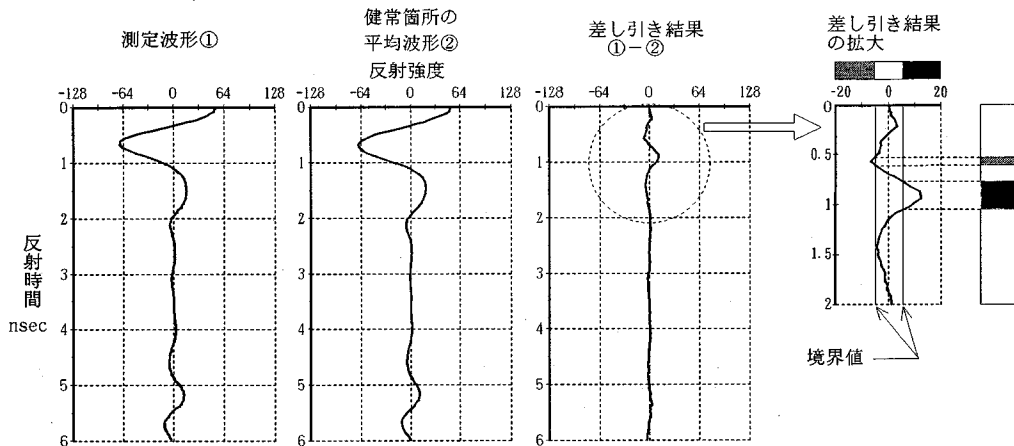


図-11 波形処理方法

た縞模様で表示され、縞模様の区分または種類は装置によって異なる。

図-9は、アスコン層中に表面から10~15cmの深さに直径25mmで長さ3mの金属製パイプ、および周辺アスコンよりも比誘電率が小さい直径50cm程度の補修箇所が存在する場合の測定例である。アスコン層中に金属物質が埋設されていたり、比誘電率が異なる材料が広範囲に存在する場合には、連続した縞模様が乱れたり、局部的に縞模様が積層状に現れ、反射強度分布からアスコン内部の変状を推定することができる。

しかし、小規模な空洞や亀裂が表面近くに存在する場合、遮水壁表面から反射した波形と空洞や亀裂から反射した波形の合成波形が測定され、表面反射波の中に空洞や亀裂からの反射波が埋もれてしまい、識別には高度の熟練を要する。

熟練を必要とせず亀裂や空洞を探索するためには、レーダの連続的な縞模様による表示のみでなく、波形データをコンピュータで処理することにより、亀裂や空洞の特徴的な波形をとらえて表示する方法の検討を行った。

比誘電率の異なる2種類の物質の境界面から反射した反射波の反射強度(受信電圧)Aは、式(2)<sup>30)</sup>で表される反射係数Rを用いて式(3)で表される。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon r1} - \sqrt{\epsilon r2}}{\sqrt{\epsilon r1} + \sqrt{\epsilon r2}} \quad (2)$$

ここで、 $\epsilon r1$ : 上層の比誘電率  
 $\epsilon r2$ : 下層の比誘電率

$$A = G \times R \quad (3)$$

ここで、G: 装置の利得

式(2)から、上下層の比誘電率の大小によって反射係数の正負の符号が変わり、アスコン層内部または下部に空洞が生じた場合( $\epsilon r1 > \epsilon r2$ )と空洞が滞水している場合( $\epsilon r1 < \epsilon r2$ )とでは、反射強度のピーク位置が逆転する。

実験に使用したレーダは表面から6nsecまでの深さの反射波形を表示・記憶し、反射強度(受信電圧)は1ビットの正負の符号と7ビットの数値にデジタル化されるので-128から+128の数値となる。また、反射強度の正負は、式(2)とは逆転する仕様となっている。すなわち、反射強度のピークは、図-10に示すように、アスコン層内部または下部に空洞が生じた場合( $\epsilon r1 > \epsilon r2$ )はマイナス側に、空洞が滞水している場合( $\epsilon r1 < \epsilon r2$ )にはプラス側に生ずる。

亀裂や空洞に達した電磁波は、比誘電率の大きい物質から小さな物質への境界面で反射することとなり、実験に使用したレーダではマイナスのピークをもつ反射波となる。また、滞水箇所では反対にプラス側のピークをもつ反射波となる。亀裂、空洞、滞水が発生した箇所では、それらの発生していない箇所とは異なった波形となり、両者の波形の違いを検出することによって変状箇所を探索することができる。また、亀裂や空洞は比較的表面付近で発生し、舗装表面からの反射波とこれらの反射波が重なることが予想される。したがって、亀裂や空洞が発生していない健全箇所の表面反射波形を含む平均波形を測定・記憶し、測定された表面反射波を含む波形データから健全箇所の波形を差し引き、健全箇所の波形データのバラツキを考慮して設定した境界値を越える部分を正負それぞれの階調で表示することにより、図-11に示すように亀裂、空洞、滞水箇所など

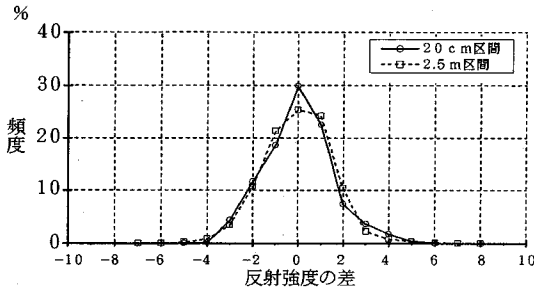


図-12 測定値の変動

の変状箇所を表示することができる。

また、遮水壁での測定を考慮し、表面の荒れによってアンテナと表面との間隔が局部的に変化し、健全箇所を誤って変状箇所として表示してしまうのを避けるために、境界値を越える箇所が深さ方向または延長方向に連続しない箇所は、表示しないこととした。

亀裂、空洞、滞水箇所などを検出するための境界値は、健全箇所での測定結果のバラツキによって求めた。測定結果のバラツキは、装置の特性、アスコンが通常有する電気的特性の差異によって生ずるものであり、空洞や亀裂などの変状の発生していないアスコン層で測定される波形が分布する範囲である。この範囲を越えた波形が得られた箇所では、空洞、亀裂、滞水などの変状が生じている可能性が大きい。

境界値を設定するためには、健全箇所の平均波形を求める必要がある。平均化する健全箇所の距離が長いほどアスコンの均一性が低下し、電気的特性の差異が大きくなると考えられるので、平均波形を求める区間長さが境界値に与える影響を検討した。

図-6に示す舗装構造の長さ数10mのアスコン層において、実験に用いたレーダで数10mの測定を行い、図-9と同様の反射強度分布を記録した。記録された反射強度分布より、図-7の形式で表示される反射波形の均一性を検討した結果、2.5～5m程度の長さで均一性の高い箇所が存在した。

図-6に示す供試体を用いた実験では、図-4に示す供試体側面の影響を受けない長さは20cm程度であった。

したがって、2.5mと20cmを平均波形を求めるための区間長さとした。ここで、2.5m区間は、数10mの測定結果の中から反射波形の均一性が高い区間を選定したものであり、実際の遮水壁を測定する場合の健全箇所の平均波形を求める区間長さを想定したものである。20cm区間は、2.5m区間で特に波形の変動が少ない区間を選定し、今回の実験で使用した供試体を用いた場合の区間長さを想定したものである。

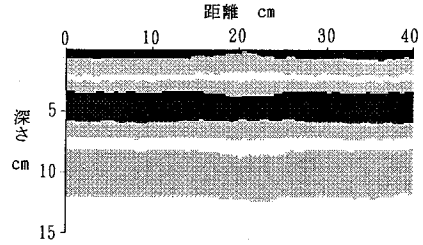


図-13 波形処理前の画像

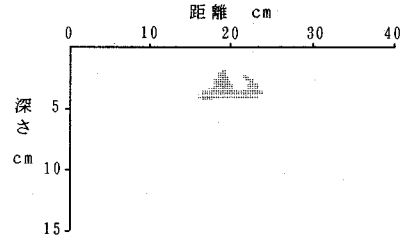


図-14 波形処理後の画像

2.5mと20cmのそれぞれの区間について、5mm間隔のデータを用いて平均値を求めて基準波形とした。5mm間隔のデータから基準波形を差し引き、反射強度の差を求めた結果は、図-12である。

反射強度の差は、測定データから基準波形を差し引いたときの測定結果のバラツキであり、装置の特性およびアスコンの電気的特性の差異が合成されたものであると考えられ、ほぼ均一な区間での反射強度の変動である。したがって、図-12に示される変動の最大値以上および最小値以下を図-11の境界値とすれば、亀裂や空洞発生によって生ずる波形の変化を画像としてとらえることができる。

図-12より、2.5m区間の変動からは $\pm 8$ 、20cm区間の変動からは $\pm 5$ が境界値となり、2.5m区間から求めた境界値が20cm区間から求めた境界値よりも大きくなった。ここで、本実験では、レーダが探査可能な亀裂や空洞の最小寸法を室内実験的にとらえることを目的としていること、供試体寸法が直径60cmと小さいことから、境界値を $\pm 5$ とした。本論文では、マイナス側の境界値以下の領域を灰色、マイナス側の境界値を越えプラス側の境界値未満を白色、プラス側の境界値以上を黒色で表示している。

本実験では、レーダによる移動測定直後に測定データをパーソナルコンピュータに取り込みながら波形処理を行って画像を表示した。画像はマイナス側とプラス側の境界を越える2階調の領域を表示し、亀裂、空洞、滞水が存在する付近に表示された画像を測定結果とした。2.5m区間の測定・処理に要する



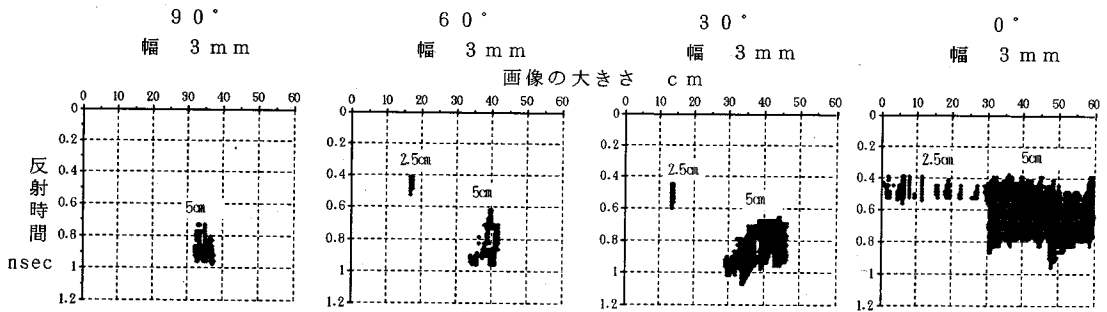


図-15 表面亀裂の画像

時間は、測定が数10秒、データ取り込みおよび画像表示が数分程度であり、ほとんどがデータ取り込みに要する時間である。

表面からの深さが5cmで直径5cm・厚さ10mmの空洞について、レーダで測定された波形処理前の画像を図-13、境界値を±5として波形処理を行いマイナス側の画像のみを表示させた結果を図-14に示す。図-13の画像は、図-9と同様に正負に関わらず反射強度の絶対値で区分されたものであり、いずれの画像も後述する方法で求めた比誘電率を用いて  $\epsilon_r=4.9$  として反射時間を深さに換算している。

波形処理前の画像では、距離20cm付近で縞模様幅が微妙に増減しており、これが空洞による影響であると推定される。一方、波形処理後の画像では、明確に空洞部分を表示することができた。以上の検討より、測定データから健全箇所データを差し引き、健全箇所データが分布する範囲を越える箇所を表示することによって亀裂、空洞、滞水箇所などの変状箇所を探查する波形処理法を開発した。

## (2) 表面の亀裂の深さ

幅3mm、亀裂深さ0.5cm、1.5cm、2.5cm、5cmの各測定方向ごとの画面表示は図-15のとおりである。亀裂の深さが0.5cm、1.5cmではプラスまたはマイナス側いずれの画像もディスプレイには表示されず、2.5cmと5cmではマイナス側よりもプラス側の画像が大きく表示されたので、図-15にはプラス側の画像のみを表示した。測定角度が亀裂に平行になるにしたがって画像は大きくなり、亀裂の直上ではほぼ連続した画像が得られた。実験に用いたレーダでプラス側の反射波が得られたことから、比誘電率が小さい物質（空気）から大きい物質（アスコン）への境界面での反射が卓越していることがわかる。

直径60cmのアスコンの供試体を同寸法の鉄板の上に置き、鉄板の反射時間からアスコンの比誘電率を求めると、厚さ5cm以上の密粒度アスコンの比誘電率

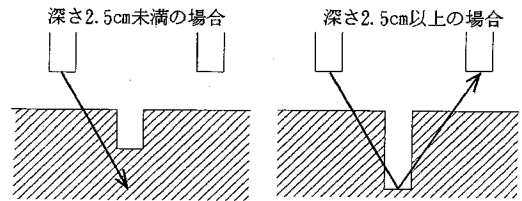


図-16 表面の亀裂の反射

は  $\epsilon_r=4.9$  となった。また、厚さ2.5cmの供試体では、装置の電気的特性の理由から、見掛上の比誘電率は  $\epsilon_r=9.3$  となった。深さ2.5cmを  $\epsilon_r=9.3$  として反射時間を求めると  $t=0.51\text{nsec}$ 、深さ5cmを  $\epsilon_r=4.9$  とすると  $t=0.74\text{nsec}$  となり、ほぼ実際の深さで亀裂底面が表示されることを確認した。以降の画像では、深さ2.5cmの場合は  $\epsilon_r=9.3$ 、深さ5cm以上は  $\epsilon_r=4.9$  として反射時間を深さに換算して表示している。

実際の深さよりも深い領域でも画像が表示されるのは、亀裂から離れた箇所でも反射波を受信して真下にあるものとして表示すること、亀裂箇所でも多重反射した電磁波を検出することが理由として挙げられる。

深さ2.5cm未満では亀裂が検出できない。この理由としては、図-16に示すように表面からの深さが2.5cm未満は検出可能な電磁波の分布角度から外れていることが推定される。

したがって、幅3mm程度の表面の亀裂であれば、亀裂の直上を平行に測定することにより、プラス側の画像の出現の有無によって深さ2.5cmを越えるかどうかの判別ができ、画像が生じた場合には深さを推定できる。また、亀裂を横切る方向で測定を行うことにより、亀裂の有無および深さをチェックできることが確認された。

## (3) アスコン中の亀裂または空洞

表面からの深さが2.5cm、5cm、7.5cm、10cm、亀裂深さが2.5cm、幅が10mm、5mm、2mm、1mmの亀裂の画像は

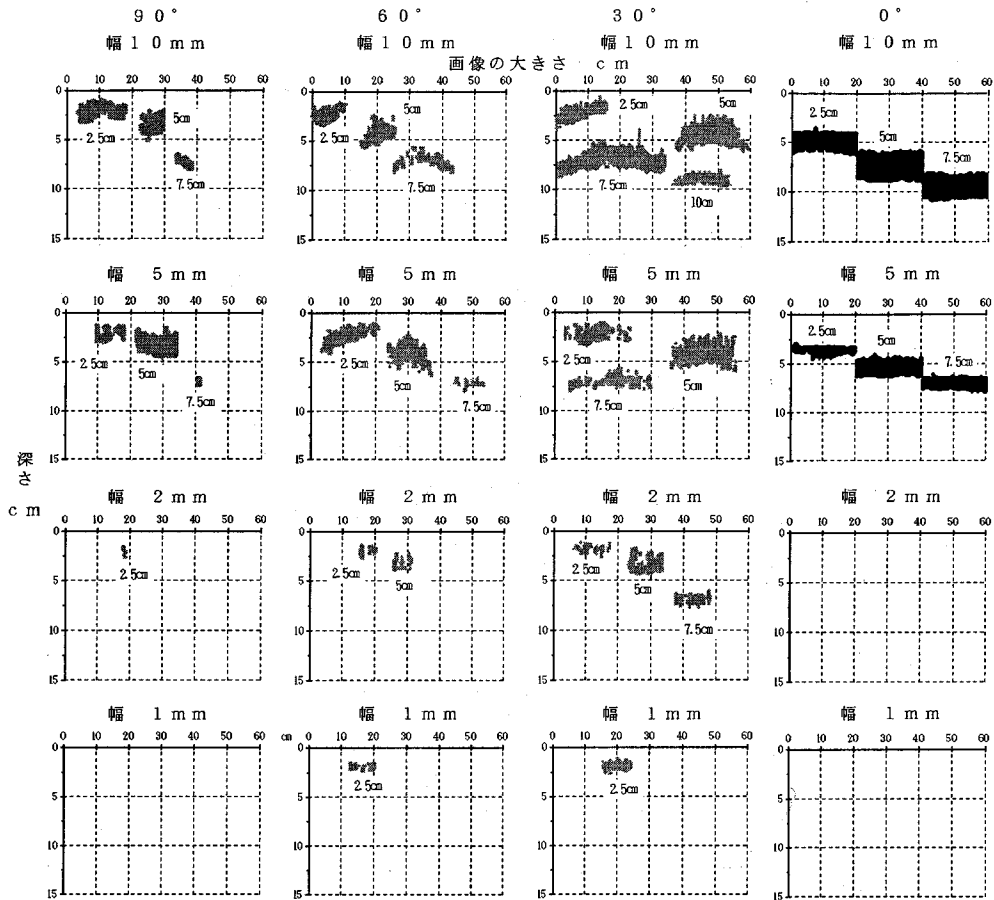


図-17 アスコン中の亀裂画像

図-17のとおりである。測定方向が $0^\circ$ の場合はプラス側で連続した画像となるが、 $0^\circ$ 以外はマイナス側の画像となる。

幅10mmの亀裂は、深さ10cmの $90^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $0^\circ$ 以外は検出可能である。幅5mmの亀裂は、深さ7.5cm以内であればすべて検出可能である。幅2mmの亀裂は、 $0^\circ$ を除く深さ2.5cmで $0^\circ$ および $90^\circ$ を除く深さ5cmで探査可能である。幅1mmの亀裂は深さ2.5cmで $30^\circ$ および $60^\circ$ で測定可能である。

境界面で反射する電磁波の反射強度は、境界面が深いほど弱くなり、また、電磁波の送信範囲中に存在する境界面の面積が狭いほど弱くなる。したがって、測定方向の違いで検出可能範囲が異なるのは、亀裂を横切る角度が $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $0^\circ$ の順番で電磁波の送信範囲中に存在する境界面の面積が狭くなるためと考えられる。

記録される移動測定のデータは5mm間隔ごとの波形であり、電磁波は亀裂に伝搬するまでに分散する。

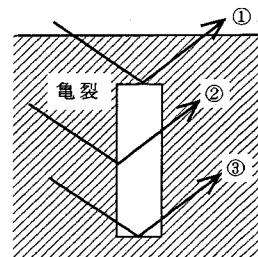


図-18 内部亀裂の反射

5mm間隔ごとに測定される波形は、亀裂のさまざまな箇所からの反射波が合成された波形であり、測定角度の影響を受けるものと推定される。

内部亀裂からの反射波としては、図-18に示す①の亀裂頂部、②の亀裂側面、③の亀裂底面が考えられる。 $0^\circ$ の測定ではほぼ亀裂底面の深さでプラス側の画像が生ずることから、③の亀裂底面での反射波が卓越していると推定される。一方、 $0^\circ$ 以外の測定では、マイナス側の画像が生じ、①の亀裂頂部

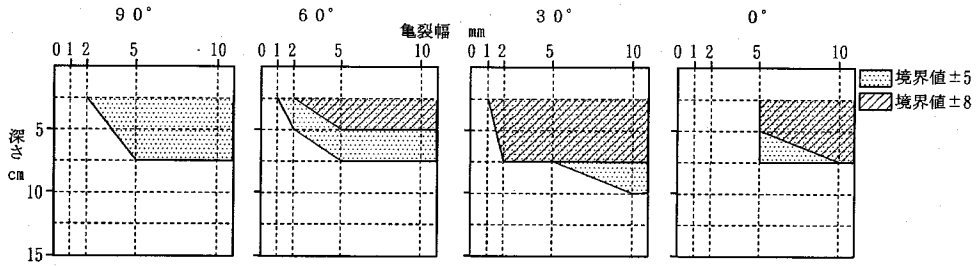


図-19 内部亀裂の探査可能範囲

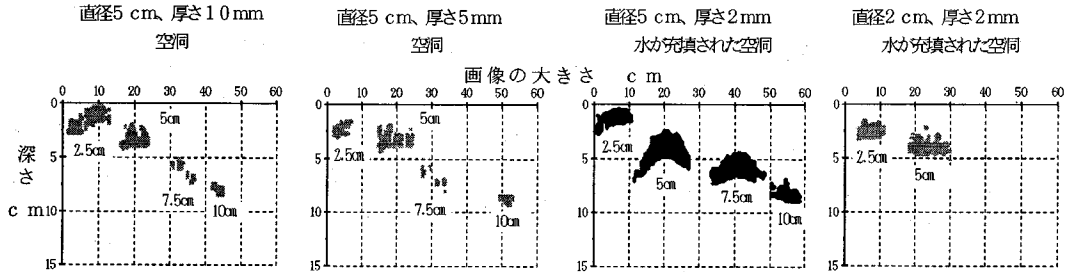


図-20 空洞および滞水箇所 の画像

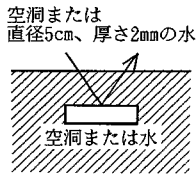


図-21 空洞または滞水箇所の反射

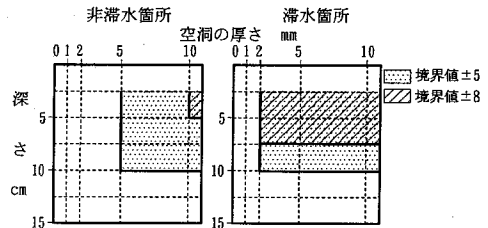


図-22 直径5cmの空洞の探査可能範囲

と②の亀裂側面の反射が合成されているものと考えられるが、特に①の亀裂頂部での反射波が卓越していると推定される。

したがって、なんらかの画像が生じた箇所で測定方向を変えて測定を行うことにより、亀裂と空洞の識別、亀裂の方向および深さを探査することが可能であることが確認された。

境界値の設定が探査可能範囲に与える影響を検討するために、境界値を $\pm 8$ および $\pm 5$ として探査可能範囲を求めた結果を図-19に示す。図-19によれば、境界値を $\pm 5$ から $\pm 8$ まで大きくすることにより、探査可能範囲が狭くなることがわかる。

亀裂に対する測定角度が直角に近づくにしたがって、探査可能な亀裂の深さおよび幅が大きくなり、探査が困難となることが確認された。

深さが2.5cm、5cm、7.5cm、10cmで直径5cmの厚さ10mmと5mmの空洞、厚さが2mmで直径が5cmと2cmの水で充填された空洞の画像を図-20に示す。厚さ5mm以上の空洞は探査可能であったが、厚さ2mmの空洞

は探査できなかった。直径5cmで厚さ2mmの滞水箇所は深さ10cmまで探査可能であったが、直径2cmで厚さ2mmの滞水箇所は5cm以下の深さが探査可能である。

空洞はいずれもマイナス側で、直径5cmで厚さ2mmの滞水箇所はプラス側で画像が生じている。いずれの場合も図-21に示すようにアスコンから空気または水への境界の反射が卓越していると予想される。直径2cmで厚さ2mmの滞水箇所は、マイナス側の画像となり、直径5cmの場合と反転している。送信波は、パルス状の波形とそれに続くその減衰波形で構成される。直径2cmで厚さ2mmの滞水箇所では測定される反射波形がマイナス側の境界となるのは、送信波に含まれる減衰部分の波形が境界面で反射し、本来の反射波と合成されたことも原因の一つであると推察される。

以上より、直径5cmで厚さ5mm程度の空洞であれば、深さ10cm程度までは探査可能である。また、滞水箇

所は、直径5cmで厚さ2mm程度までは探査可能である。

境界値の設定が空洞の探査可能範囲に与える影響は、図-22に示すように ±5では深さ10cmで厚さ5mmまで探査可能であったのに対し、±8では深さ5cmで厚さ10mmの空洞が探査限界である。

## 6. 結論

アスファルト表面遮水壁に生じているブリストリングや亀裂などの損傷の内部情報を得るため、従来機器より高感度なレーダを用いてその適用性について検討した。これらの実験、画像処理法による検討から得られた結果をとりまとめると次のようである。

1) 高度の熟練を要することなく空洞部、亀裂部、滯水箇所を探査できる波形処理技術を開発した。この方法により、従来方法では探査困難な下記に示す範囲の空洞、亀裂、滯水箇所が探査可能となった。

2) 表面に発生した亀裂が幅 3mm程度であれば、亀裂の深さが2.5cmを越えるかどうかの判断ができ、亀裂深さを探査することが可能である。

3) 測定方向を変化させることにより、内部の空洞または亀裂の識別が可能である。

4) 亀裂発生位置が深さ7.5cmまでは、幅2mm程度までの亀裂を、亀裂発生位置が深さ2.5cmでは幅1mmの亀裂を探査することが可能である。

5) 空洞に水分が存在しない場合は、直径 5cm, 厚さ 5mm程度まで探査可能である。また、空洞に水分が存在する場合は、直径5cm, 厚さ2mm程度まで探査でき、滯水、非滯水の識別が可能である。

6) 変状を検出する境界値の設定を大きくすると、探査可能範囲は上記よりも大きな亀裂、空洞となる。

既設ダムの現状から、ブリストリングなどの損傷発生位置の多くは上部遮水層であり、以上の検討より、従来機器では検知困難な小空洞が探査できることが確認された。このことから、ここで開発した方法は、遮水層内部に発生している損傷部が拡大する前の状態で探査でき、アスファルト遮水壁診断の一手法として適用できると考えられる。

ただし、当該方法には、①線状の測定となるので、面的な測定を行うには測定間隔を短くする必要がある。②今回用いた機器の測定可能深度が30cm程度であり、一般的な遮水壁厚さ30数cmより下のトランジション部の陥没など遮水壁下部での損傷は探査困難である、など検討すべき課題も残している。

今後は、例えばサーモグラフィなど他の手法との併用で探査の効率化を図る一方、精度向上、測定範

囲拡大等のため、深さ50cm程度の中深度まで測定のできるレーダでの検討も実施していく予定である。

## 参考文献

- 1) 電力土木技術協会：最新フィルダム工学，山海堂，pp. 161-163，1981年3月。
- 2) Strabag Bau-Ag：Asphalt-Wasserbau-Arbeiten aus den Jahren 1979-1981 Außendichtungen-II Folge Heft 1，pp. 135-161，1989。
- 3) 林七郎：八汐ダムの設計と施工について，ダム日本，No.598，pp. 31-55，日本ダム協会，1994年8月。
- 4) 建設省土木研究所：渡良瀬貯水池流入堤構造設計に関する調査，土木研究所資料，第1882号，1983年3月。
- 5) 菅原照雄：アスファルト混合物のダム遮水壁への利用，ダム技術，Vol. 3-3，pp. 19-27，1985年。
- 6) R. E. Coxon and N. Reilly：Asphaltic Membrane Dams in Kenya，World Dams Today，pp. 325-329，1977。
- 7) G. Innerhofer：Q. 42，R. 46 Asphaltic concrete facing of the Rifa，Partenen and Latschau balancing reservoirs，Commission Internationale des Granda Barrages，Madrid，1973。
- 8) W. F. Van Asbeck：Asphalt facing for the Montgomery dam in the Rocky Mountains，Colorado，Bitumen in hydraulic engineering，Vol. 2，pp. 148-152，1964。
- 9) Manfred Ludewig，Dietrich Kolb and Horst Krinitz：Zustand und Verhalten von Asphaltbetonaußenhautdichtungen an Staudämmen der DDR：Bauplanung-Bautechnik，43. Jg. Heft 5，pp. 217-223，1989. 5。
- 10) 三宅淳一，栗島敏，壁谷紀郎：沼原ダムアスファルト遮水壁表面保護層の経年変化と補修について，大ダム，No. 149，pp. 16-25，1994. 9。
- 11) 武井賢司，加形護：アスファルトフェーシングにおける表面保護層の補修例，アスファルト，Vol. 28，No. 144，1985。
- 12) Wolfgang Haug and Waldemar Reichenbach：Beobachtungen über zeitabhängige Qualitätsveränderungen der Asphaltbetondichtung des Pumpspeicherbeckens Geesthacht und Durchführung der Regenerierungsmaßnahmen，Wasserwirtschaft，77 pp. 401-404，1987. 6。
- 13) 日本非破壊検査協会：非破壊検査便覧，日刊工業新聞，1978年4月。
- 14) 広野進：コンクリートの非破壊検査方法（原理と測定），コンクリート工学，Vol. 27，No. 3，pp. 53-58，日本コンクリート工学協会，1989年3月。
- 15) 渡辺光基：大津岐ダムの設計と施工，フィルダムの施工技術，日本ダム協会，pp. 62-85，1970年4月。
- 16) 谷山重孝，江口文夫，加藤重夫：アスファルト遮水壁の設計と施工，水と土，第16号，pp. 29-80，1974年3月。
- 17) 横田潤，大長昭雄：多々良木ダムの設計と施工，発電水力，No. 125，pp. 53-71，1973年7月。
- 18) 中村孝明，森本浩之，山本義弘，松永和彦，古川啓介：国営かんがい排水事業双葉ダムアスファルトフェーシングの施工，水と土，第39号，pp. 2-14，1979。
- 19) 大原克己，重松和夫，斎藤実：沼原調整池アスファルトフェーシング工事について，アスファルト，Vol. 19，No. 90，pp. 2-9，日本アスファルト協会，

- 1973年4月.
- 20) 赤池義孝, 細井紀光; 大門ダムの特殊遮水膜について, ダム技術, Vol. 5-4, pp. 109-123, ダム技術センター, 1987年10月.
- 21) 菅野克美: 電磁波を利用した舗装体厚さ測定, 道路建設, No. 522, pp. 50-54, 日本道路建設業協会, 1991年7月.
- 22) 大野滋也, 菅野克美: 舗装厚さ計器に関する研究, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp. 10-11, 土木学会, 1994年9月.
- 23) 多田宏行, 富田洋: 道路保全における路面下空洞探査技術, 道路, Vol. 627, pp. 51-54, 日本道路協会, 1993年5月.
- 24) 後藤正洋, 種村一朗: 路面下空洞の探査, 舗装, Vol. 26, No. 11, pp. 28-31, 建設図書, 1991年11月.
- 25) 長健次, 小池賢司: 路面下空洞の探査の現状, 建設の機械化, Vol. 529, pp. 4-7, 日本建設機械化協会, 1994年3月.
- 26) 小林一雄, 内田喜太郎, 金子義明: アスファルト舗装下における空洞の非破壊探査方法に関する調査(その1), 東京都土木研究所年報(平成元年), pp. 47-58, 東京都土木研究所, 1989年9月.
- 27) 小林一雄, 内田喜太郎, 金子義明: アスファルト舗装下における空洞の非破壊探査方法に関する調査(その2), 東京都土木研究所年報(平成2年), pp. 47-54, 東京都土木研究所, 1990年9月.
- 28) 小林一雄, 内田喜太郎: アスファルト舗装下の空洞非破壊探査手法, 東京都土木研究所年報(平成4年), pp. 75-82, 東京都土木研究所, 1992年9月.
- 29) 竹中克己: コンクリートの非破壊検査方法(原理と測定), コンクリート工学, Vol. 27, No. 3, pp. 36-42, 日本コンクリート工学協会, 1989年3月.
- 30) 山下栄吉: 電磁波工学入門, 産業図書, 1980年10月.

(1995. 8. 10受付)

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON APPLICABILITY OF HIGH SENSITIVITY RADAR TO DIAGNOSIS OF IMPERMEABLE ASPHALT LAYER

Takahiko ITO, Katsumi SUGANO and Eiichi GOTO

Cavities inside impermeable asphalt layers produced by blistering and depression of base courses are required to be detected at early stages and remedied. A simple cavity surveying method using a high sensitivity radar and the minimum size of cavities detectable with this radar are examined. Obtained wave forms are processed by computer program for the position and the size deducting those of sound pavement. The minimum detectable size of cavities is found to be 5cm in diameter and 5mm in thickness. This radar system was further applied for inspection of inner cracking of impermeable layer, and detection accuracy of 1mm in width up to 2.5cm in depth from the surface was confirmed.