

論文 超音波法によるコンクリート内部空洞の可視化法

村瀬 豊^{*1}・勝木 太^{*2}・魚本 健人^{*3}

要旨：近年建設分野では維持管理の詳細点検手法の定量的評価が求められており，本研究ではひび割れ深さ調査に多用されている超音波法を用いてコンクリートの内部空洞を立体的に可視化することを目的とした。本測定では表面法により超音波伝播速度を求めたのち，内部空洞からの反射波とコンクリート底面からの反射波の振幅値の大小を比較して測定を行った。平面・斜面・円柱・半円柱の空洞をコンクリートないしモルタル内に作製した供試体を測定した結果，内部空洞の可視化が可能であることをわかり，その測定誤差に関しては超音波伝播解析を行うことにより検討した。

キーワード：コンクリート，内部欠陥，非破壊検査，超音波法，超音波伝播解析

1. はじめに

近年，1995年に発生した阪神淡路大震災，1999年以降のコンクリート片の剥落事故，そして塩害やアルカリ骨材反応などによる劣化問題が顕在化してきたことから，構造物の維持管理の重要性が高まっている。しかしコンクリート構造物の日常点検では目視や打音法等による簡易的な手法が点検に用いられており，コンクリート内部に関する情報を定量的に得ることは困難である。またコンクリート表面に発生しているひび割れは通常コンクリート部材に発生しても構造的耐力上問題がない場合が多い。しかし，トンネルの覆工コンクリートの背面空洞やPC構造物のシース管内のグラウト未充填等の内部欠陥は，トンネルのクラウン部の座屈やPC鋼材の腐食等の構造的耐力に問題が生じる可能性があるため，日常点検等で必要と判断された場合に内部欠陥の詳細点検を行うことが必要となってくる。コンクリートの内部情報を得る手法として削孔やコア抜き等の手法があるが，コンクリートを破壊せず調査・診断ができる非破壊検査に注目が集まっている。コ

ンクリート分野での非破壊検査手法では弾性波や電磁波を利用したものがあり，弾性波を用いたものでは超音波法，衝撃弾性波法，アコースティック・エミッション法などがある。そこで本研究では非破壊検査手法の一つである超音波法を用いてコンクリート中に模擬的に作製した内部欠陥を立体的に可視化することを目的とし，超音波伝播解析を行うことで超音波法における測定結果との比較・検証を行うこととする。

2. 実験概要

2.1 超音波測定装置

測定は写真-1に示す発振・受振探触子と超音波測定機とパソコンを組み合わせて行った。探触子の振動子は二オプ酸鉛系の直径40mmで共振周波数100kHzのものを使用した。表-1に本測定で用いた超音波測定機の主要性能を示す。本測定器は骨材からの散乱波を極力除去するために，発振探触子からの複数回発振されたパルス信号を平均化処理し検出対象物からの反射波データを明確に求めることができるという特徴を有し

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科 助教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 教授 工博 (正会員)



写真 - 1 超音波測定装置

表 - 1 超音波測定機の主要性能

パルス電圧(V)	100~500
パルス幅(μsec)	2,5,10,20
パルス波形	マイナス矩形波
増幅率	×125~10000
サンプリング時間(μsec)	0.25,1,2,5,10
サンプリングデータ数	最大2000(500μ~20msec)

ている。

2.2 実験方法

測定は内部空洞を模擬した無筋コンクリートとモルタル供試体を作製し測定を行った。供試体の形状・寸法を図 - 1 に示す。表 - 2 に供試体の配合を示す。模擬した空洞はコンクリート・モルタル打設時に所定位置に発泡スチロールを設置し材齢 7 日の脱型時に発泡スチロールを除去して作製した。今回測定した空洞は測定面に対して平行である平面モデル(No.1)、角度が付いている斜面モデル(No.2)、円柱型の空洞である円柱モデル(No.3)、半円柱型を模擬した半円柱モデル(No.4)である。なお No.1・2 の供試体はコンクリート、No.3・4 の供試体はモルタルで作製している。コンクリート・モルタルの内部空洞を診断する場合コンクリート・モルタルの超音波伝播速度が必要であるが、本研究では同一表面に探触子を設置する表面法により超音波伝播時間を測定し超音波伝播速度を得ることとした。またコンクリート・モルタルの内部欠陥の測定は、供試体表面に XY 座標を定め、探触子間距離を 60mm とし、10mm 間隔で探触子を移動させ測定を行った。なおここでの探触子間距離とは発振・受振探触子の中心間距離のこととする。探触子の操作は供試体表面を紙やすり等で平滑に処理したあと、グリセ

表 - 2 コンクリート・モルタル配合

供試体	W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
No.1,2	55	45	160	291	832	1040

供試体	W/C (%)	S/C (%)	単位容積質量 (kg/m ³)		
			W	C	S
No.3,4	55	55	281	512	1451

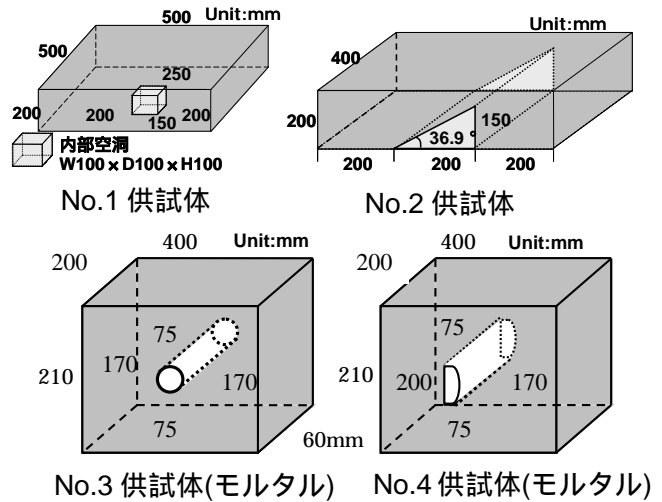


図 - 1 供試体の形状・寸法

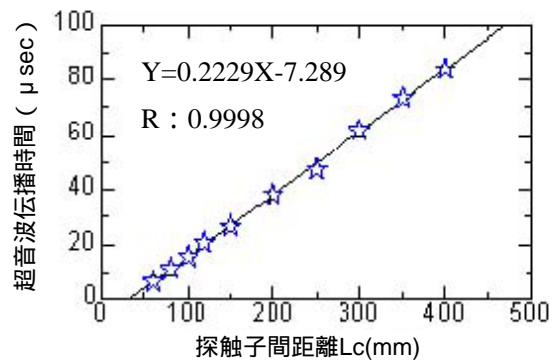


図 - 2 探触子間距離と初動波到達時間

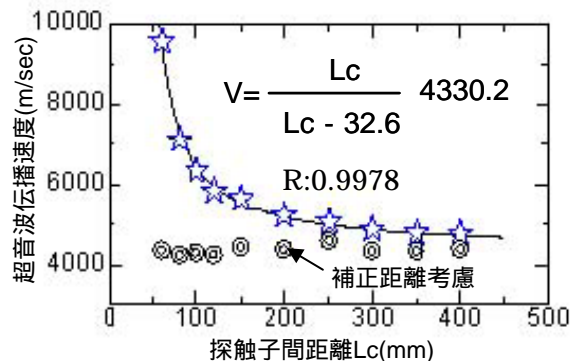


図 - 3 探触子間距離と超音波伝播速度の関係(No.1)

リン系の接触媒質を用いて探触子を供試体表面に密着させ測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 表面法による超音波伝播速度の測定

図 - 2 に No.1 の探触子間距離と初動波到達時間の関係, 図 - 3 に探触子間距離と超音波伝播速度の関係を示す。表面法による超音波伝播速度の測定では, 探触子間距離が 60mm の場合では約 9500m/sec となり, 探触子間距離が 300mm 以上では約 4900m/sec 程度に収束していた。コンクリートはセメントマトリクスと骨材による複合材料ではあるが, 探触子間距離が違うことにより超音波伝播速度が 2 倍程度違うことは理論上あり得ないことになる。これに対して平田ら¹⁾は, 超音波は探触子の中心部が超音波の発振・受振点ではないと指摘しており, 中心探触子間距離よりも若干短い地点に発振・受振点があるとして探触子間距離の補正距離の計算方法を提案している。よって今回の測定では平田らが用いた最小二乗法を用いて補正距離を求める計算手法¹⁾を使用した。その結果を図 - 3 中に示す。探触子間距離を探触子の中心部で計算した場合, 探触子間距離の変化に伴い超音波伝播速度は大きく変化した。最小二乗法を用いた補正距離の算定を行った結果, 超音波伝播速度は探触子間距離が変化してもほぼ 4300m/sec 一定になった。またこの結果は他の供試体での測定でも同様の測定結果になった。このことより表面法で超音波伝播速度を測定する場合, 探触子間距離を変化させ超音波伝播速度を測定し最小二乗法を用いて真の超音波伝播速度を求めれば良いことになる。図 - 4 にコンクリート厚・内部欠陥深さの算定方法²⁾を示す。

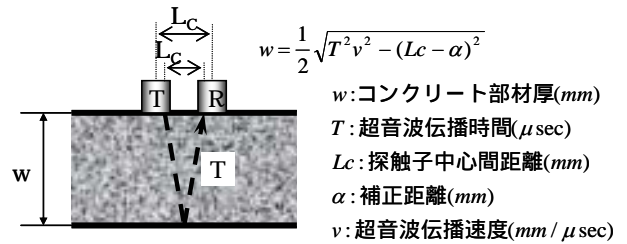


図 - 4 内部欠陥深さの算定方法²⁾

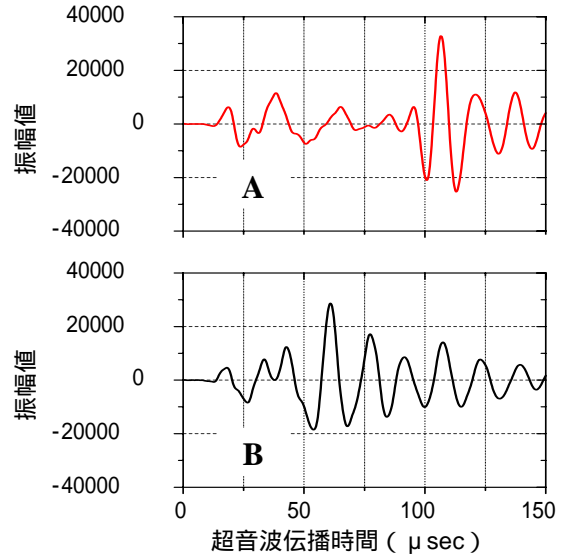


図 - 5 測定位置の違いによる受振波形の違い

(A 図: 200mm B 図: 100mm)

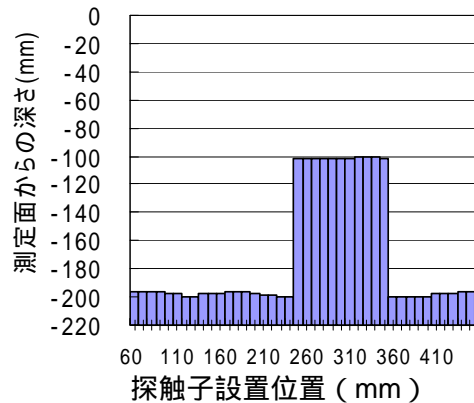


図 - 6 No.1 の測定結果の一例

3.2 コンクリート内部欠陥の可視化

3.2.1 平面モデルの測定

コンクリート厚・内部欠陥深さの測定は, 同一のコンクリート表面に発振・受振探触子を設置し, 底面ないし内部欠陥からの反射波は受振波観察方式で反射時間を測定した。図 - 5 に測定時の受振波形を示す。A 図は厚さ 200mm, B 図は厚さ 100mm の箇所の測定結果であり, 最大振幅波のピーク到達時間でコンクリート版厚と内部欠陥を判別した。

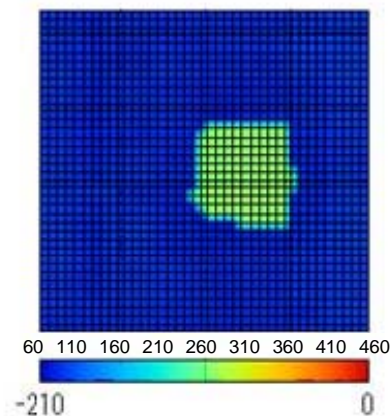


図 - 7 No.1 の平面形状

No.1 の供試体のコンクリート厚は 200mm , 内部欠陥深さは 100mm の供試体であるが , 一測線上での測定では 100mm の箇所と 200mm の箇所では受振波形は大きく異なり , 100mm の箇所を測定した場合は 60 μ sec 付近 , 200mm の箇所では 105 μ sec 付近に最大振幅値のピークが確認できた。図 - 6 に No.1 の一測線上の測定結果を示す。なお図 - 6 の横軸は探触子の設置位置を示している。また 100mm の内部欠陥部を測定したときの測定誤差は約+2mm となり , 200mm のコンクリート底面を測定した場合には約-5mm となった。

図 - 7 に No.1 の測定結果をコンター図で示したものの , 図 - 8 に No.1 の測定結果を三次元表示したものを示す。図 - 7 より実際の空洞形状より若干大きめに測定されており , 平面的測定誤差は外側に約 5mm となった。これは測定面に対してコンクリート底面からの反射パルスより , 内部空洞からの反射パルスが大きいことに起因していると考えられる。図 - 8 の可視化の結果 , 前述した一測線上では 100mm の箇所では約+2mm の測定誤差が約-2 ~ +5mm となり , 200mm の箇所では約-5mm の測定誤差が約-7 ~ +3mm となった。これらの測定誤差は , 測定条件によって変わる可能性はあるが , 実用上問題の無い範囲と考えられる。

3.2.2 斜面モデルの測定

図 - 9 に斜面モデルである No.2 の一測線上の測定結果を示す。前述の No.1 の測定結果と同様に測定面からの 200mm の箇所であるコンクリート底面はほぼ再現していることが分かる。しかし斜面の立ち上がり部付近・斜面部・頂点部から底面への変化部の測定深さは実際の深さと異なる結果となった。斜面の立ち上がり部・斜面部では , 発振探触子から半球状に伝播している超音波が底面より先に斜面部に達し , その地点からの反射波を読み取っているため , 実際の深さより若干浅めに測定したとため考えられる。また平面モデルとは異なり探触子を移動することにより測定結果が異なること , 探触子の移動方向に伴い測定深さが浅くなっていることから , 測定面に対して空

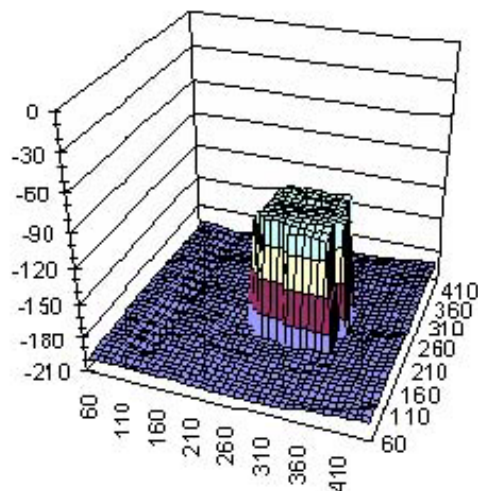


図 - 8 No.1 の可視化(3D)

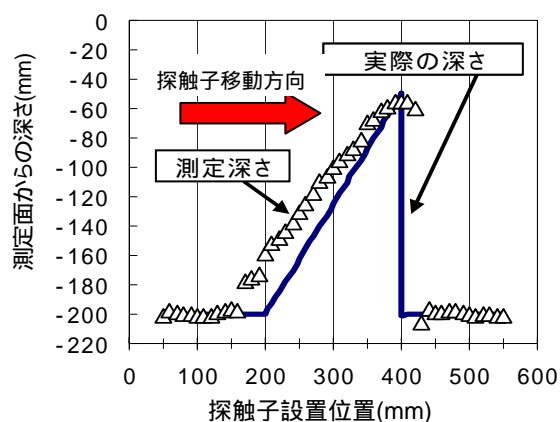


図 - 9 No.2 の測定結果の一例

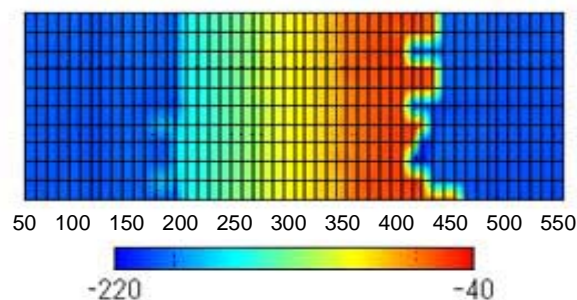


図 - 10 No.2 の平面形状

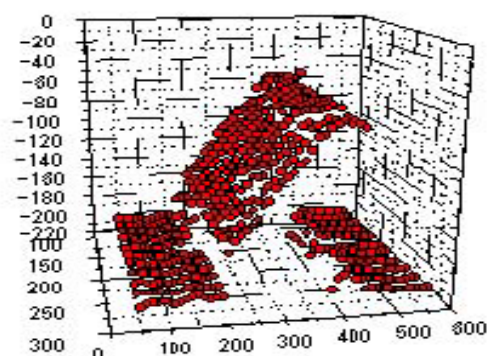


図 - 11 No.2 の可視化(3D)

洞部が傾斜していることが分かる。また測定結果から求まる傾斜角度は実際の傾斜角度より緩やかな測定結果になった。これは前述したように探触子設置地点直下より浅い箇所にある斜面部において超音波が反射することにより、探触子設置地点直下の深さより若干浅めに誤認識したためであると考えられる。

図 - 10 に No.2 の測定結果をコンター図で示したもので、図 - 11 に No.2 の測定結果を可視化したものを示す。図 - 10 よりコンクリート底面部から 200mm の箇所・斜面部に探触子を設置する場合はほぼ同一の結果を示しているが、斜面の立ち上がり部・頂点部から底面への変わり部は場所ごとに測定結果が大きく異なることが分かる。特に頂点部から底面への変わり部では、その平面的測定誤差が大きいことが分かる。これは超音波の測定では探触子設置地点直下の情報ではなく、超音波が反射される地点の深さを測定してしまうためと考えられる。また図 - 11 の測定結果より、コンクリートの内部空洞が測定面に対して傾斜している場合でもほぼ実際の形状を再現していることが分かる。

3.2.3 円柱・半円柱モデルの測定

図 - 12 に円柱モデルである No.3 の一測線上の測定結果、図 - 13 に半円柱モデルである No.4 の一測線上の測定結果を示す。この結果はモルタルではあるが、前述した平面モデル及び斜面モデルと同様に底面の深さは正しく測定できた。円柱の空洞部直上に探触子を設置した場合、すべての測定点において、実際の空洞深さとほぼ同程度の深さとして測定できた。また円柱部からの反射と底面からの反射の最大振幅値がほぼ同程度だったため、同一測定点において二箇所の測定値が得られる結果となった。これはパルスエネルギーがほぼ全反射する平面モデルとは違い円柱型の空洞部に到達したパルスエネルギーは全てが反射せず回折することに起因していると考えられる。図 - 13 の半円柱モデルと図 - 12 の円柱モデルの測定結果を比較すると、円柱モデルでは円柱空洞部の底面の反射より空洞部からの反射パルスエ

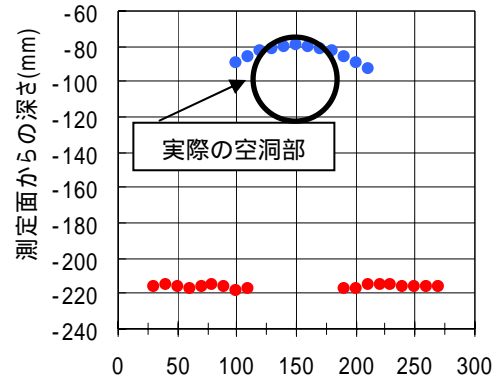


図 - 12 No.3 の測定結果の一例

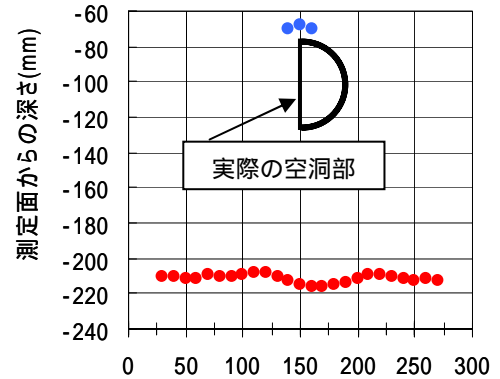


図 - 13 No.4 の測定結果の一例

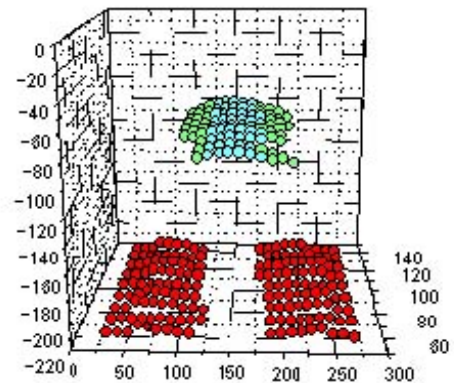


図 - 14 No.3 の可視化(3D)

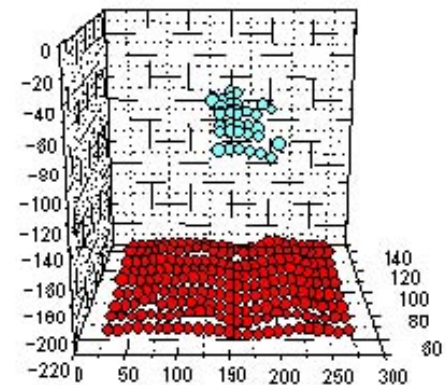


図 - 15 No.4 の可視化(3D)

ネルギーが大きいため空洞部が測定されているが、半円柱モデルでは空洞部の底面も測定され

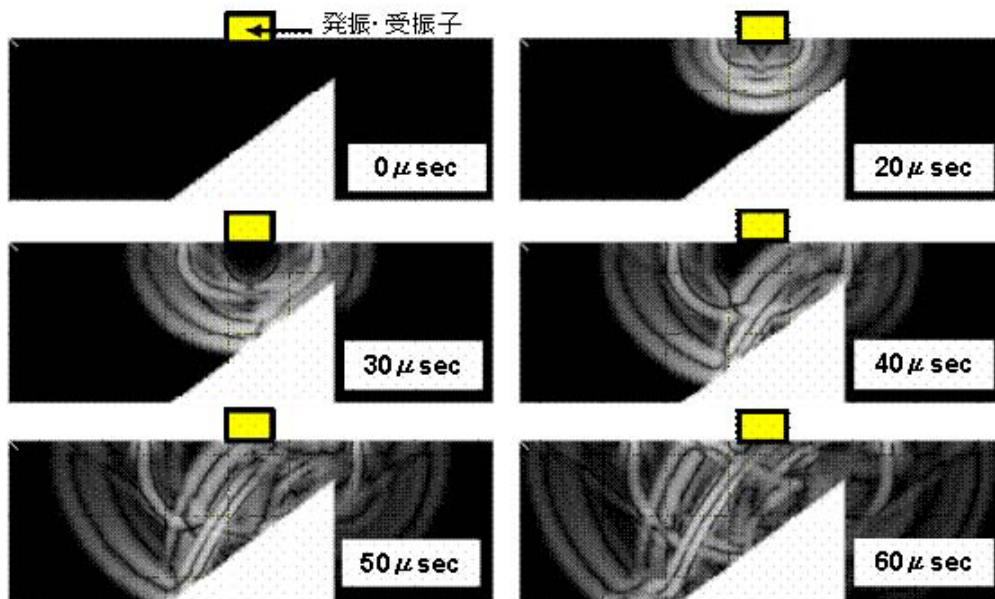


図 - 16 斜面モデルの超音波伝播状況の解析結果(周波数: 100kHz, コンクリート厚 200mm)

ている。これは設置した探触子の寸法より空洞部の寸法が小さいことにより生じたものと考えられる。また半円柱の空洞下の底面の深さが他の底面より深い位置に計測されてしまった結果となった。

図 - 14 に No.3 の円柱モデルを三次元表示したもの、図 - 15 に No.4 の半円柱モデルを三次元表示したものを示す。この結果よりほぼ円柱・半円柱の空洞部を再現していることが分かる、しかし平面モデルや斜面モデルと比較して再現し切れていない箇所が多い理由として、探触子に対して空洞部が小さいことや、空洞部が円柱・半円柱型をしていることにより超音波が全反射せず回折をしたためだと考えられる。

4. 超音波伝播解析

図 - 15 に斜面モデルを模擬した供試体の超音波伝播状況を示す。なおコンクリートの超音波伝播速度は 4592m/sec としており骨材の影響は考慮していない。図 - 15 中の 20 ~ 40 μ sec の図より、探触子直下の位置ではない斜面部で超音波が最初に到達し、その地点を基点として反射されている様子が分かる。またこのような超音波伝播解析を行うことにより複雑な形状の内部空洞に対しても超音波は適用可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究の結果、コンクリートの内部欠陥を超音波超によって第三者にも理解しやすい三次元的に可視化することが可能である。しかし本測定ではコンクリートの版厚が実構造物に比べて薄いことや欠陥の形状によっては反射波の基点位置が異なることを考慮する必要があるため、更なる効率的で定量的な超音波法の測定手法の開発が必要である。

参考文献

- 1) 平田隆祥, 魚本健人: 超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定における探触子の影響 第 54 回セメント技術大会講演要旨, pp.160-161, 2000
- 2) 平田隆祥, 魚本健人: 超音波法によるコンクリート内部の空隙形状の探査精度, 土木学会第 56 回年次学術講演会, V-386, pp.772-773, 2001

謝辞

本研究は東京大学生産技術研究所魚本研究室で行ったものであり、同研究室の皆様にご協力いただいたことに感謝の意を表します。また千葉工業大学卒論生加藤貴春氏には供試体作製から測定までご協力いただいたことに感謝の意を表します。