

デコミッショニング技報

Journal of the RANDEC

巻 頭 言：原子力研究・教育の夢と廃止措置

技術報告：超音波（SDS 法）を使った構造物探査とコン
クリート強度推定

研究報告：試験研究炉等廃止措置における除染技術実証
試験

技術概説：原子炉の廃止措置に用いる系統除染及び解体
後の機器除染技術

財団法人 原子力研究バックエンド推進センター

Radioactive Waste Management and Nuclear Facility
Decommissioning Technology Center

超音波(SDS法)を使った構造物探査とコンクリート強度推定

原 徹*

A Structural Analysis and Concrete Strength Presumption using Synthesized Digital Soundwave (SDS Method)

Toru HARA*

原子力施設の廃止措置においては、供用期間中と同様に、建屋・構築物等が有する施設外への放射能の汚染拡大防止機能と放射線遮へい機能を維持管理していくことが重要とされる。また廃止措置の具体的な作業過程における建屋・構築物等の解体撤去では、コンクリート中の埋設管の位置、建屋コンクリートの強度等の事前把握が工事計画の策定に有効となり得る。

コンクリート構造物の内部を探査する手法には幾つかあるが、当社では超音波(SDS法)を使用して、クラック深さの測定、埋設管探査、強度の推定等について成果を上げている。ここでは、上記の各分野におけるSDS法を用いた探査の実例について紹介する。

*SDS: Synthesized Digital Soundwave

In the dismantling process of the nuclear installation, it is important to manage and maintain buildings and structures which prevent the radioactive materials dispersion and keep the sealing capability in the same way as in-service period.

Preliminary information about location of embedded pipes inside concrete structures makes easy decision of operating plan to dismantle the building and structures.

There are various techniques to inquire the inside of concrete structure. Our company successfully uses the Synthesized Digital Soundwave (SDS method) to measure the underground crack depth, tube location and presumption of the strength of concrete structures.

This paper provides an overview of practical examples of the above-mentioned field using our SDS method.

1. SDS探査の概要

1.1 SDS法の原理

(1) 広帯域の周波数分布を持つ超音波を使用

コンクリートに超音波探査を適用する場合、コ

ンクリートの厚さや劣化度によって透過する超音波の周波数が異なり、厚さが増すほど、また劣化が進むほど、コンクリート中を通り抜ける超音波の周波数は低くなる(0.1~0.5MHz)という事実がある。周波数が固定されている通常の超音波探

*: フェニックスエンジニアリング株式会社 (Phoenix engineering Inc.)

査(2~5 MHz)では、発振時点ですでに周波数が高すぎて、ほとんどの入射波が吸収されてしまう。仮に反射波を受信できても微弱であり、受信周波数が0.1~0.5MHzと発信周波数の2~5 MHzより低すぎるために、増幅アンプが対応できず効率よく増幅できない。そのためSDS法(Fig.1が装置の写真である)では0.05~1 MHzという広帯域に周波数分布を持つ超音波を使用し、受信アンプも低域まで十分な増幅度を持たせることで、どのようなコンクリートにも対応している。

原理的には弾性波に近いものであるが、ハンマー等の機械的入力で発生する弾性波が球面波であるのに対して、これは指向性を持った超音波ビームとなるので、反射源を特定することができ、コンクリート構造物での探査が可能になる。

(2) 反射波をデジタル変換して加算

発振する超音波は出力エネルギーが小さいため、100~1,000回程度発振し、デジタル変換した後に加算する事で十分な受信信号出力を得ている。

1.2 探査の項目

- ・版厚(健全コンクリートで最大10m)・クラック深さ(同最大10m)
- ・道路下の構造探査・コンクリート背面空洞、内部不良・埋設管探査(位置、深さ)
- ・内部強度推定(音速からの強度推定が可能)

1.3 音速測定

探査時は、コンクリートによって全て音速が異なるため、対象コンクリートの音速を測定することから始まる。この場合、あらかじめ厚さのわ

かっている部位を発振と受信の探触子で挟み込む2探触子透過法での測定で、最初に受信した波形の到達時間と構造物の厚さから音速を決定する。

2. 各種探査の実施例

2.1 クラック深さ測定

(1) 日本大学工学部旧5号館解体時の実験

解体が決定した日本大学工学部旧5号館が各種の非破壊探査実験に提供され、クラック深さ測定を実施した。Fig.2に示すようにクラックの入った壁面を選定し、超音波で測定した後、測定箇所でのコア抜きを実施し、測定値と実測値を比較した。Fig.3とFig.4に結果の一例を示す。Fig.3では測定波形から貫通であり、コア抜きの結果も貫通である。Fig.4では、測定波形から得られたクラック深さは162mmを示し、コア抜きの目視では約165mmとなっている。コア採取時の振動でクラックが進展することを勘案すると、よい結果であると言える。クラック深さ測定の場合は、対象のクラックを発振と受信の探触子で挟んで測定する。コンクリートに入射した超音波は空気中には伝搬せず、クラック先端部から回折波が帰るため、最初の受信エコーまでの時間からクラック深さを計算する。

(2) ケーソンのクラック測定結果の立体表示

Fig.5はあるケーソンでのクラック測定結果を3D画像で表示したものである。図のクラックは

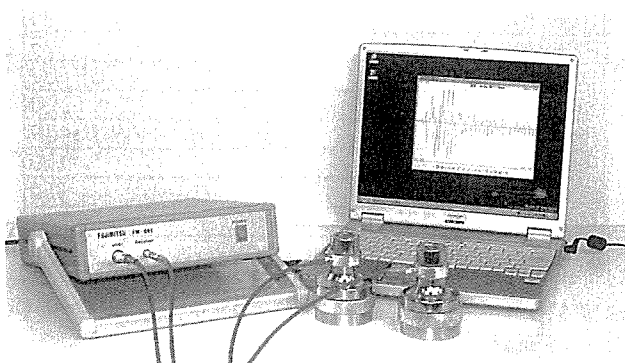


Fig.1 The SDS System

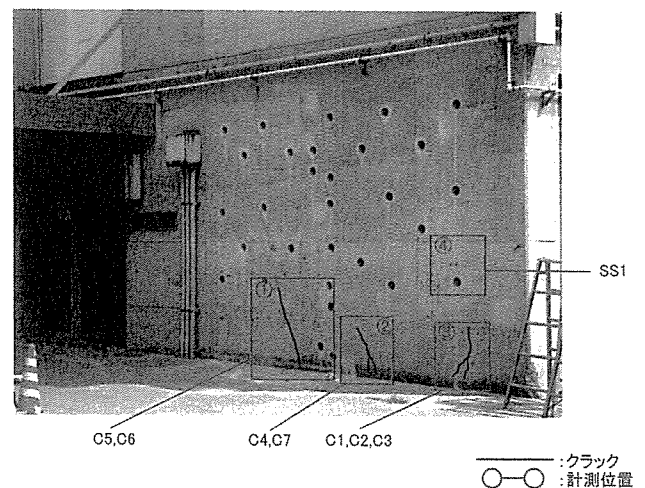
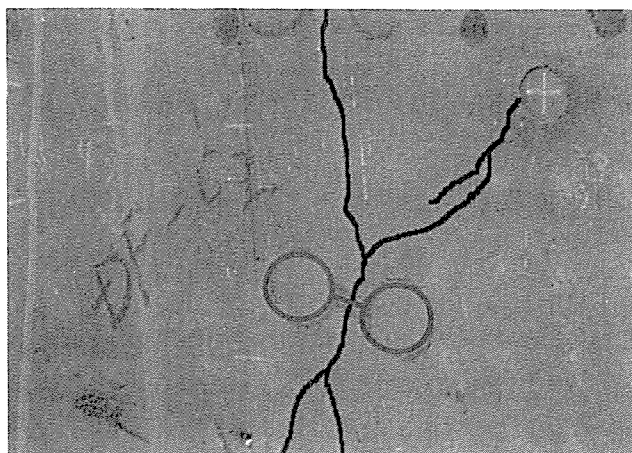


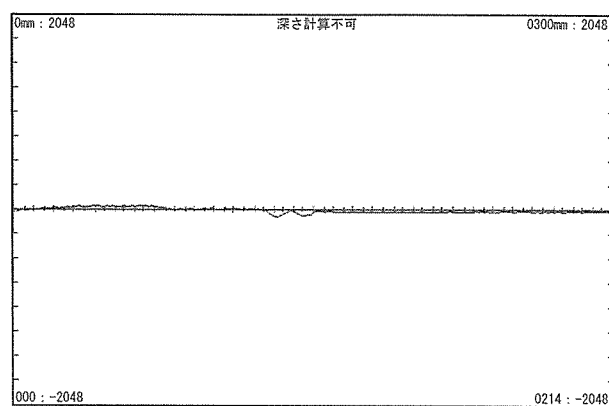
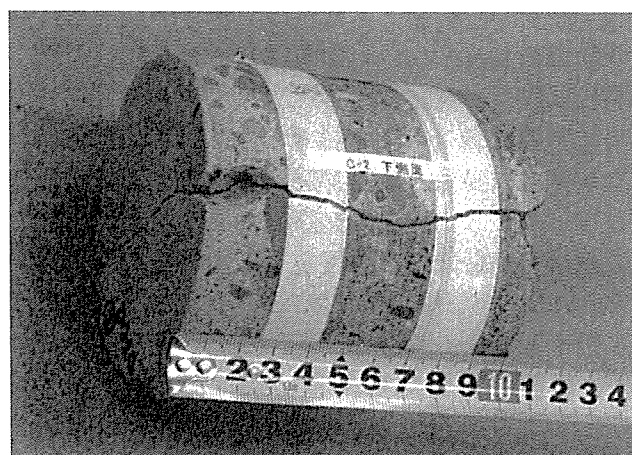
Fig.2 Object Wall



測点名 : DF-C2

<二探反射 (走査 : 固定) 割れ深さ測定>

表示路程300mm 生波形 : —



クラック幅 : 0.4mm

クラック深さ : 貫通

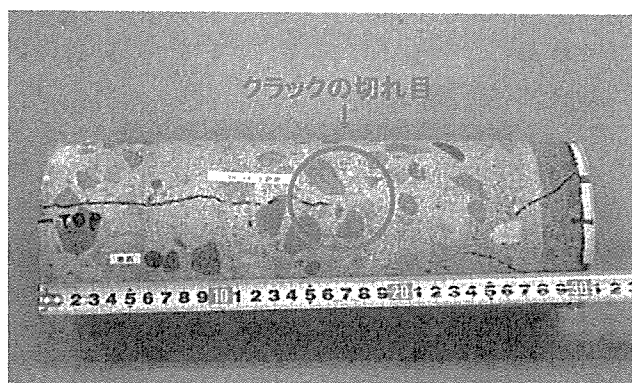
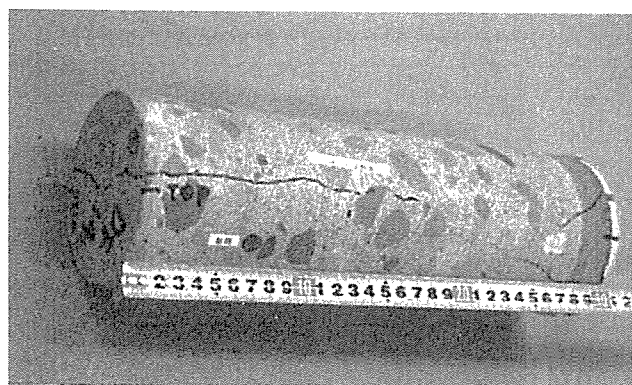
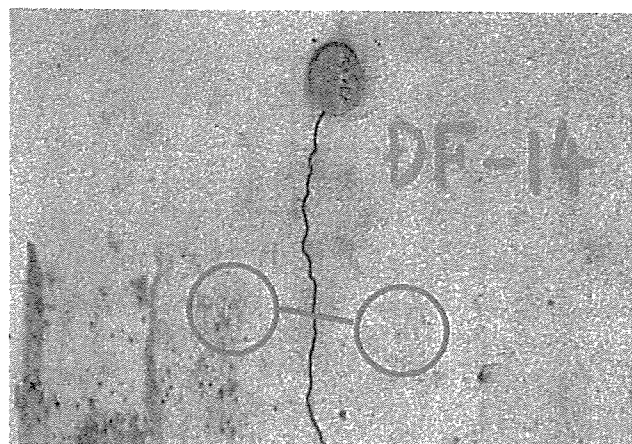
探触子間距離 : 100mm (等距離)

目視 : 貫通



日付:	2004/9/23 16:50
取り込み数:	107
加算数:	200
ADCK(Hz):	1250000
Gain(dB):	30
PRF(Hz)	35
Comment:	DF-C2
SqrGate:	0
Probe Type	FW-0540P->FW-0540R
Probe distance (mm)	100
送信電圧(V):	150
取り込み感度補正:	-6.2dB
音速:	3497m/s

Fig.3 Judged Piercing, Inspected Piercing

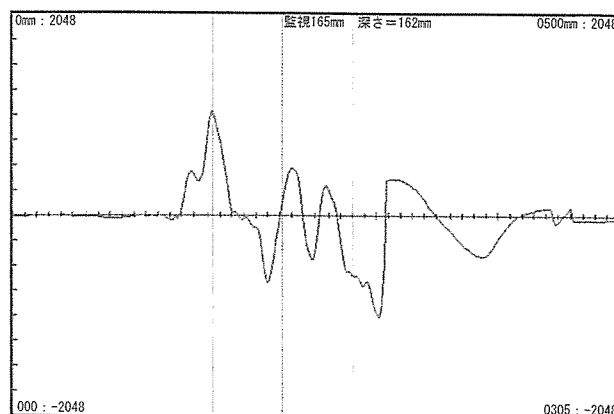


測点名: DF-14

<二探反射 (走査: 固定) 割れ深さ深さ測定>

表示路程400mm

生波形: —



クラック幅: 0.3mm

測定値: 162mm

探触子間距離: 100mm (等距離)

162mm近辺のクラックの切れ目をとらえている。

日付	2004/9/24 12:57
取り込み数	188
加算数	200
ADクロック(Hz)	1250000
感度: Gain(dB)	23
繰返周波数: PRF(Hz)	35
コメント	DF-14
ゲート設定	0
使用探触子	FW-0540P→FW-0540R
探触子間距離 (mm)	80
送信電圧(V)	150
取り込み感度補正	-6.2dB
音速	3995m/s

Fig.4 Judged 162mm Crack, Inspected 165mm Crack

隔壁のひとつのスラブにあったもので、貫通している。クラックは多数あるが、その内の隔壁部分だけを表示している。

2.2 埋設管探索

厚さ1.5mのコンクリート供試体に設置した埋設管 (Fig.6) を探査した実験の結果が Fig.7 である。2 探触子法を使用した。2つの探触子を底辺とし、円形断面の埋設管が頂点となる二等辺三角

形が形成された場合に反射波のピークが最大になることを利用し、埋設管の位置と深さを特定している。この実験で得られた技術を基に、柏崎刈羽原子力発電所では貫通の削孔をするため、鉄筋や埋設管に干渉しない削孔位置を特定する業務を受注している。

2.3 音速(コンクリート)からの強度算出(推定)

ある新設道路トンネルで調査を依頼された。調

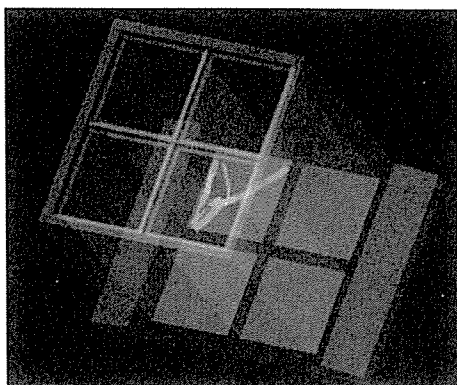


Fig.5 Cracks in 3D Picture

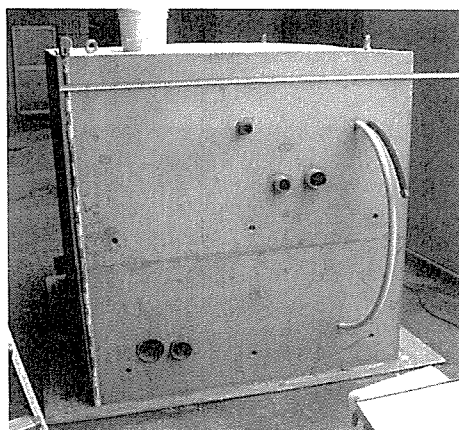


Fig.6 Test Piece

査項目は音速からの強度算出と内部不良の有無である。調査箇所によってコンクリート打設後の日数が異なるため、これまで蓄積したデータから4週強度に換算した。(Table 1) (これまでに供試体で打設直後から4週までの音速を測定したデータに基づいて作成している。)

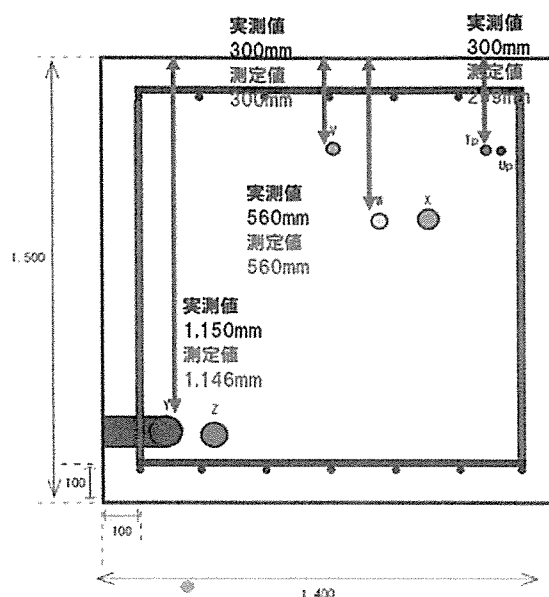
4週強度に換算した音速を基に、音速から強度を推定する式 (Table.2) を作成して使用した。この換算式の係数も、過去の実構造物採取コアによる実測データに基づいている。

上記の計算結果の総括表がTable 3である。

※総括表の単位…版厚①②：mm、到達時間： μ S、音速：m/sec.、強度：N/mm²。

2.4 コンクリート強度の推定

新型転換炉原型炉施設「ふげん」の解体に当たっては、建屋・構築物等のコンクリート強度が重要となるため、SDS法によるコンクリート強度推定技



※埋設管種別

- Tp：照明用電線管（合成樹脂可とう管28φ）
- Up：TV共聴配管（合成樹脂可とう管26φ）
- V：給湯管（給湯用銅管48φ）
- W：給水管（塩ビライニング管60φ）
- X：屋内消火栓用配管（配管用炭素鋼鋼管76φ）
- Y：汚水管（塩ビライニング鋼管115φ）
- Z：排水管（塩ビライニング鋼管90φ）

Fig.7 Result of Measurement

Table 1 Revision Coefficient (1w. to 4w.sound speed)

28日音速/7日音速=4518/4389=1.034
1 週補正：1.034
1.5週補正：1.028
2.1週補正：1.022
2.5週補正：1.017
3.1週補正：1.010
3.4週補正：1.007

Table 2 Conversion Equation (sound speed/strength, concrete)

■推定換算式
$Y = 13,223X - a$
Y = 現場採取テストピース強度28N
X = 現場健全部音速4,110と3,970の平均値
$Y = 28, X = (4110 + 3970) / 2 / 1000 = 4.04$
$a = 24.1$
従って
$Y = 13,223X - 24.1$
Y = 圧縮強度 (N/mm ²)
X = 音速 (km/sec)

Table 3 Result of Measurement

基本音速												
測点名称		版厚①	版厚②	到達時間	音速		打設日	材齡		評価対象音速	評 価	
		424.3		103.3	4107			6.0週		4110		
		424.3		106.9	3969			5.1週		3970		
各測点									測定音速	4週換算音速	4週換算推定強度	
測点名称		版厚①	版厚②	到達時間	音速①	音速②						
		300	345	86.8	3456	3975		6.0週		3980		28.5
		300	370	96.3	3115	3842		2.1週	3927	3930		27.9
		300	370	89.5	3352	4134			4225	4230		31.8
		300	370	114.1	2629	3243			3314	3310		19.7
		305	355	100.3	3041	3539		1.5週	3638	3640		24.0
		305	355	97.4	3131	3645			3747	3750		25.5
		305	355	99.9	3053	3554			3653	3650		24.2

術の適用性を確認するための試験測定を実施した。

(1) 手法と測定結果

2.3の道路トンネルの手法を発展させた手法である。すでに各種の深さ（表層部を除く）でのコア抜きによる強度分布の実測データがあるため、対象壁の表面からの深さ別の強度分布と、その強度を持つコンクリートの厚さを確定し、強度を音速に変換後、表層部以外の超音波透過時間を算出する。全体の透過時間と、表層部以外の透過時間の合計との差が表層部分の透過時間に相当する。表層部の厚みと透過時間から音速を割り出し、音速から強度に変換すれば不明な表層部の強度が推定できる。Fig.8に考え方を示す。

(2) 具体的手法 (Fig.8参照)

①音速測定

対象となる壁面で透過時間Tと全体音速Vを測

定する。測定値は3点の平均とする。

②平均強度算出

すでに壁厚毎に強度が測定されているため、ここから平均強度を算出する。

③音速・強度換算式作成

②の平均強度と測定した音速から、音速と強度の相関式 (Fig.9) を求める。

④断面強度分布

深さ別のコア強度のデータから断面方向の既知の強度分布を作成する。これには内部強度の分布式 (Fig.10) を併用して、コアが採取されていない部分の深さ強度を算出している。

⑤強度別（深さ別）透過時間算出

音速と強度の相関式 (Fig.9) から強度を音速に変換し、深さ別に透過時間を求める。

(Fig.8のs1, s2, s3からv1, v2, v3を求め、さらにt1, t2, t3を求める。)

⑥表層部透過時間算出

壁厚全体の透過時間から④の透過時間合計を減算し表層部分の透過時間を算出する。

⑦表層部音速算出

表層部分の透過時間とその長さ（厚さ）から、表層部の音速が得られる。この場合、透過時間は表層部裏側と表側に相当している。

⑧表層部強度算出

表層部音速を相関式にあてはめ、強度を算出する。

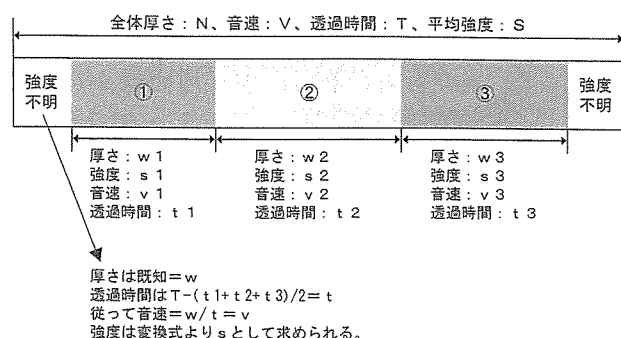


Fig.8 Distribution Map of Penetrating Time (super sonic)

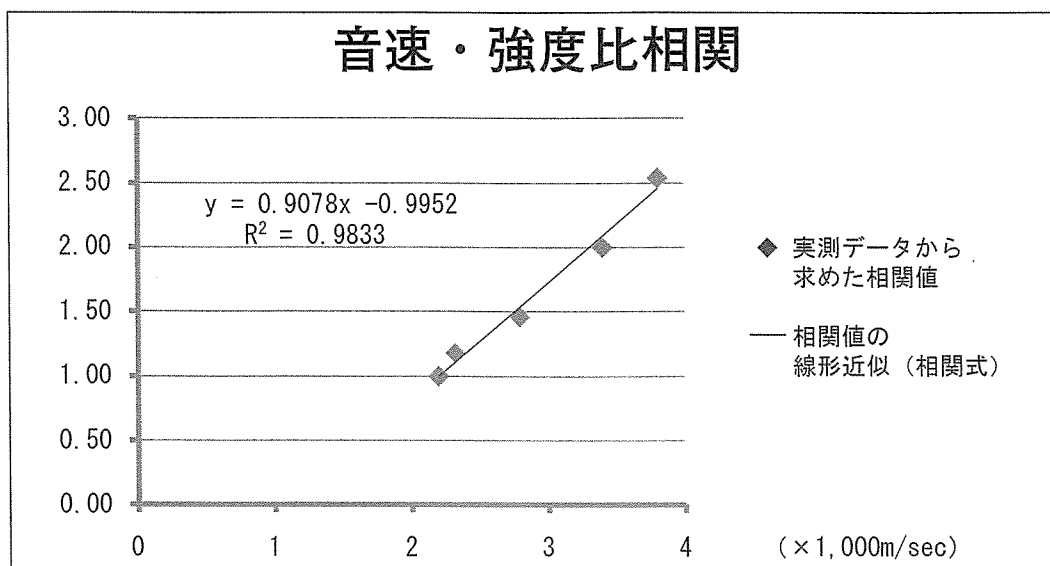


Fig.9 Conversion Equation (sound speed/strength, concrete wall)

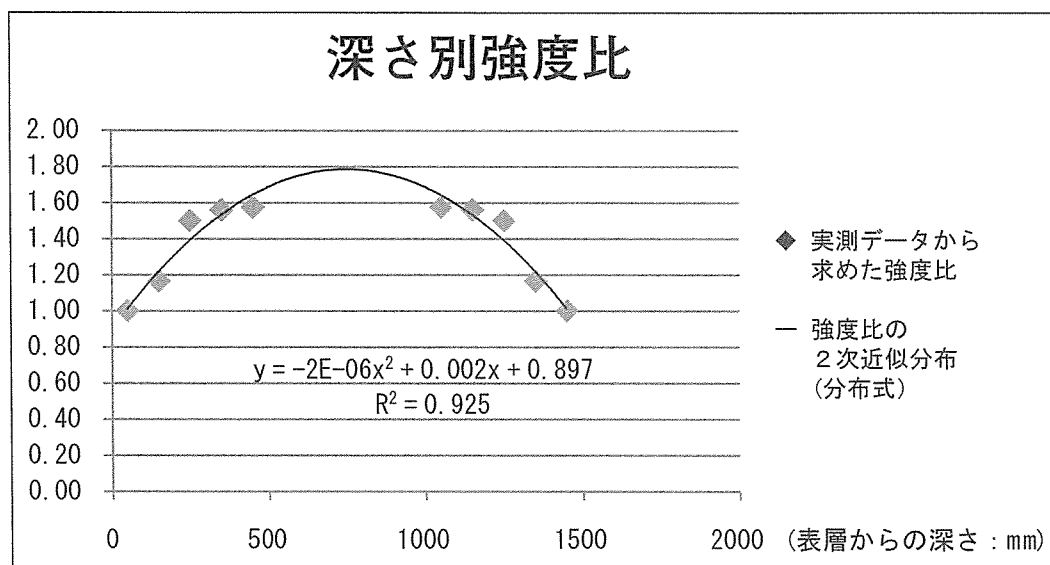


Fig.10 Conversion Equation (sound speed/strength, surface of wall)

⑨壁厚音速と表層部強度関連式作成

上記結果から、壁厚平均音速と表層部強度の相関式 (Fig.11) を求めたものを示す。

この式から得られた表層部強度の数値は、少数ではあるが表層部から採取したコアの強度と近似のものであった。

2.5 コンクリート背面空洞

Fig.12は某発電所導水路トンネル上部覆工厚とその背面状態の立体一括表示画像である。グレー

の表示が背面礫層、赤い線がクラック、トンネル断面と背面礫層の間の透明部が上部コンクリート厚を示す。クラック分布は高解像度画像から、その他はSDS超音波測定で得られたデータである。

2.6 道路下構造調査

ある自治体での道路下の調査結果 (Fig.13) を示す。現場は片側2車線の道路で、私鉄高架をくぐるアンダーパスとなっており、冠水のひどい地点であった。アスファルトとコンクリート合わせ

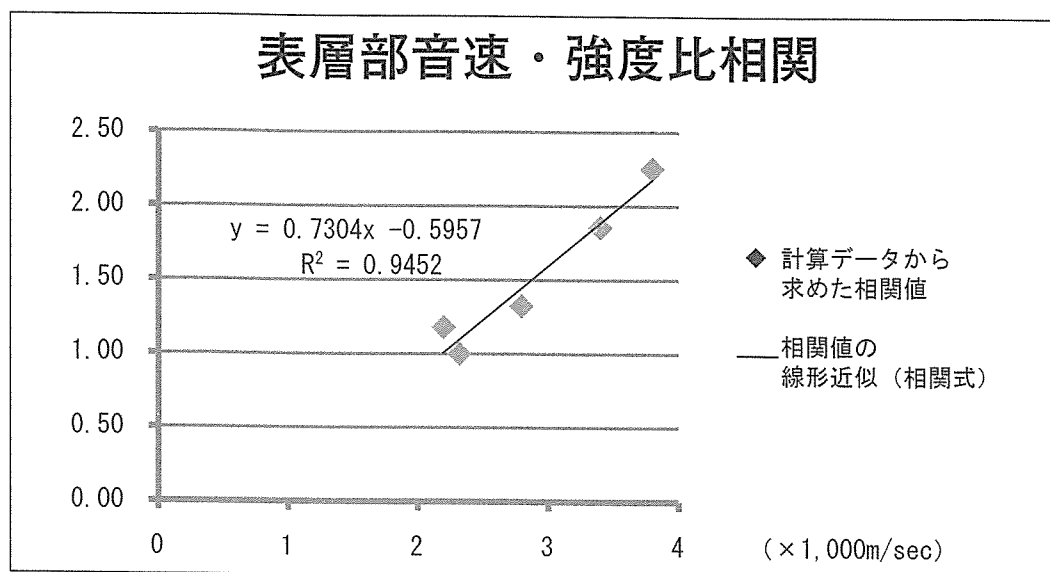


Fig.11 Sound Speed/Strength Conversion Equation (surface of wall)

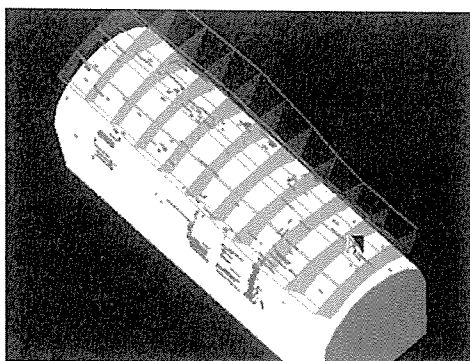


Fig.12 Result of Total Measurement in 3D Pictures

て厚さ1 mの設計であったが、過去の工事でも冠水が止まらなかったため、調査を依頼された。図は調査結果の平面図で、1区画に1点の測定でその区画の結果としている。太い点線で囲まれた区

画が1 m以下の厚さしか認められなかった区画である。この調査結果は試掘や過去の工事写真で正しいことが確認された。この調査結果に基づく工事で湧水は止められた。アスファルト越しに地下を探索した初めての例である。

4. まとめ

超音波によるコンクリートの探索は経験値に大きく左右されるが、クラック深さについては明確な波形が得られるため、問題は少ない。また音速を基準にコンクリートの強度を推定することについては、基準となる強度と音速のデータを整備することで、かなりの正確さを持つことができると考える。埋設管探索は波形の判断が難しいため、

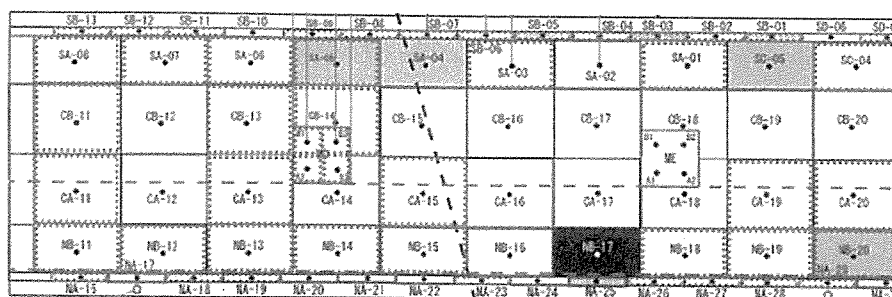


Fig.13 Result of Measurement (under the road)

断面でのデータが1回の探査で得られる装置を考案中である。いずれにしても、超音波でのコンクリート探査には電磁波レーダーやX線にはない利点が数多いため、今後も研究と実績を重ね、より確実な探査方法の確立に努力したい。

5. 謝辞

今回の投稿に当たっては、多くの方のご協力をいただいたが、とりわけ独立行政法人日本原子力研究開発機構 (JAEA) 敦賀本部 原子炉廃止措置研究開発センター (ふげん) にフィールドを提供いただいたことに感謝の意を表する。