

JAERI-M

8 3 9 2

海洋処分に備えた放射性廃液セメント  
均一固化体の品質検査

—超音波試験法による非破壊検査—

1979年8月

関 晋

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

海洋処分に備えた放射性廃液セメント均一固化体の品質検査  
—超音波試験法による非破壊検査—

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

関 晋

(1979年7月26日受理)

放射性廃液セメント均一固化体の品質検査のため、実規模固化体用超音波伝播速度測定装置を使用して、ドラム缶詰めセメント均一固化体の超音波伝播速度を測定し、同一組成固化体の一軸圧縮強度と対応させた。得られた主な結果は、次のとおりである。

1) ドラム缶詰めセメント均一固化体の超音波伝播速度と同一組成固化体の一軸圧縮強度との間には、直線関係があった。海洋処分用セメント固化体の一軸圧縮強度として必要な $150 \text{ kg/cm}^2$ 以上の値に対応する超音波伝播速度は、 $3200 \text{ m/sec}$ 以上であった。

2) 一軸圧縮強度推定に関して超音波伝播速度法と反発硬度法との比較を行い、両方式を併用することを提案した。

3) ドラム缶詰めセメント固化体内の欠陥についても検討を行い、欠陥の存在とその位置を知ることができた。

Studies on the Inspection of Drum-filled Cement Monolithic  
Solids of Radioactive Liquid Wastes for Sea Dumping (II)

— Nondestructive Ultrasonic Wave Velocity Test —

Susumu SEKI

Division of Environmental Safety Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 26, 1979)

With an ultrasonic wave test apparatus for full-size radioactive waste packages, ultrasonic wave velocities of drum-filled monolithic cement solids were measured and compared against uni-axial compressive strengths of the solids of same composition.

The results are as follows;

- 1) There is a linear relationship between ultrasonic wave velocity and uni-axial compressive strength for the drum-filled solid. Compressive strength  $150 \text{ kg/cm}^2$  or more required of cement solid for sea dumping correspond to ultrasonic wave velocity 3200 m/sec or more.
- 2) Comparison between the ultrasonic test and the rebound hammer test indicates that both the methods should be used for estimation of the uni-axial compressive strength.
- 3) Existence and position of defects in drum-filled cement solids can be detected by the ultrasonic test.

Keywords : Ultrasonic Test, Ultrasonic Wave Velocity, Cement Solid,  
Radioactive Liquid Waste, Drum, Sea Dumping, Uniaxial  
Compressive Strength, Rebound Hammer Test, Radioactive  
Waste Solid.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 超音波試験装置 .....	2
2.1 装置の構成 .....	2
2.2 測定装置の電気系統 .....	3
3. 試験方法 .....	4
3.1 供試体 .....	4
3.2 超音波伝播速度試験 .....	4
4. 測定結果と考察 .....	5
4.1 超音波伝播速度と一軸圧縮強度との対応 .....	5
4.2 欠陥の探査 .....	6
5. まとめ .....	7
文 献 .....	8

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Ultrasonic Test Apparatus .....	2
2.1	Construction of Ultrasonic Test Apparatus .....	2
2.2	Electric Circuit of Digital Type Apparatus for Measuring .....	3
3.	Experimental Method .....	4
3.1	Preparation of Specimen .....	4
3.2	Ultrasonic Test .....	4
4.	Results and Discussion .....	5
4.1	Relationship between Ultrasonic Wave velocity and Uni-axial Compressive Strength .....	5
4.2	Search of Defects .....	6
5.	Conclusions .....	7
	References .....	8

## 1. 緒 言

わが国の原子力発電所では、蒸発缶濃縮廃棄等の低レベル放射性廃棄物はセメントなどで練り混ぜ、200ℓドラム缶内で固化する処理法を一般に採用している。ドラム缶詰めセメント均一固化体は、わが国で近い将来、実施が予定されている試験的海洋処分に用いられる投棄体の主体になるものと思われる<sup>1)</sup>。このドラム缶詰めセメント均一固化体は、海洋処分の実施に際して品質検査を行うことが原子力委員会から提出された「試験的海洋投棄用低レベル放射性廃棄物のセメント固化体に関する暫定指針<sup>1)</sup>」により義務づけられている。暫定指針には、セメント均一固化体の一軸圧縮強度を $150 \text{ kg/cm}^2$ 以上にするのが望ましいという項がある。

一般に、セメント固化体の強度を確認するには破壊試験法によることが多いが、海洋処分を実施しようとしている放射性廃棄物を含んだドラム缶詰めセメント固化体の場合には、その試験体からコアを打ち抜いて破壊試験法を実施するとしても、数が多く、また汚染の拡大および廃棄物の増加など不適条件が加わるので、その実施は容易なことではない。

著者らは、前報<sup>2)</sup>でドラム缶詰めセメント均一固化体のドラム缶をはずした固化体およびドラム缶付きの固化体の反発硬度と同一組成固化体の一軸圧縮強度との間には直線関係があり、実規模セメント均一固化体の品質検査に反発硬度法による非破壊検査が適用できることを報告した。しかし、反発硬度法による反発係数は、試験体の表面硬度に関する値であるため固化体内部の強度については推定にとどまること、ドラム缶外被を介して測定するため直接固化体を測定する場合にくらべ精度の高い値が得にくいことなどの欠点が上げられる。そのため、より一層性能の向上した非破壊検査法の開発が望まれることになる。

セメント固化体の強度は一般に配合の如何に関係なく、水セメント比（水とセメントの重量比）に依存する。すなわち<sup>3)4)</sup>、セメントに対する水の割合が増加すると強度は低下する。これは、コンクリートが締められた後、水和に不必要な水分は蒸発し、空気で満たされた空隙が残される<sup>4)</sup>が、この空隙は強度に寄与しないためである。それ故、空隙の大きさおよび多さを測定することは、セメント固化体の強度を知ることにもなる。以上の理由から著者は、超音波が空気中を伝播しにくいこと<sup>5)</sup>を利用し、ドラム缶詰めセメント固化体の圧縮強度の測定を超音波試験法によりより行うことの可否を検討した。すなわち、超音波はセメント固化体中に大きな空気空隙がある場合、そこでは減衰が大となるために伝播しないし、もしこのような空隙が超音波通路にある場合は、超音波は固化体の最短距離を通過しないことになり、それに要する伝播時間は遅れを生ずることになる。

セメントの強度測定および欠陥の探傷に超音波を用いた例は報告されている<sup>6~13)</sup>。しかし、本報で検討の対象にした固化体は多量の塩類を含む放射性廃液が添加されていること、水セメント比も一般のコンクリートの場合にくらべ小さいことなどから放射性廃液セメント固化体の圧縮強度測定法として超音波が使用できるかどうか検討した。

本研究は、ドラム缶外側からその内容物であるセメント均一固化体の超音波速度を測定する試作装置について述べ、その装置を使用してセメント固化体の一軸圧縮強度の推定を行い、前

報で報告した反発硬度法による値と比較検討する。さらに、固化体内の欠陥の存在ならびにその位置についても検討を行うものである。

## 2. 超音波試験装置

### 2.1 装置の構成

使用した装置の構造を説明するために装置構成図をFig. 1に示す。装置は基本的に5つの部分、すなわち超音波伝播速度測定器(U)、パワーユニット(P)、トランスジューサー(発受振器)(T)、シンクロスコープ(S)およびトランスジューサーの上下移動とドラム缶づめ固化体に振動子をあてがうことを目的とした油圧駆動部(O)から構成されている。装置の概観写真をPhoto. 1に示した。

超音波伝播速度測定器は、英国C.N.S.ELECTRONICS LTD製のものである。ピーク電圧800Vを $\mu\text{sec}$ の間作用させることにより超音波を発生させるようにしてある。セメント固化体を通過する超音波の伝達時間は3桁の数字でデジタル表示されるようになっている。すなわち、 $0.1 \mu\text{sec}$ の単位で $0.1 \sim 9.9 \mu\text{sec}$ および $1 \mu\text{sec}$ の単位で $1 \sim 9.99 \mu\text{sec}$ の時間、測定範囲が切換可能となっている。受信増幅器は、 $20 \text{KHz} \sim 250 \text{KHz}$ の周波数範囲を使用できる。

本装置の電源は、充電式ニッケルカドミウム電池が内蔵されているが、実験室で使用する場合には、本装置に付属しているパワーサプライユニットを連結すれば100V電源も使用可能となる。この場合、本器には12Vの電力を供給する。

トランスジューサーは、ジルコン酸・チタン酸鉛(PZT4)セラミック製のピエゾ・エレクトリックエレメントから成り、ステンレス製のケースに取付けられている。パルス発生器をショック励起させると、トランスジューサーは自己固有の周波数で機械的に振動し、その周波数は全トランスジューサーアセンブリの大きさおよび固さで定められる。ピエゾ・エレクトリックエレメントおよびそのケースの大きさが異れば、異った超音波周波数が得られる。本試験では、 $50 \text{KHz}$ の周波数を有するトランスジューサーを使用した。

測定値は、前述したように伝播時間を超音波伝播速度測定器上にデジタル表示し、同時にシンクロスコープを用いてアナログ的に観測し得るようにしてある。さらに欠陥がある場合、到来波形の異常を観測することによって探査の可能性を期待した。

ドラム缶づめセメント固化体を測定する場合には、ドラム鋼板上から超音波パルスを発射しなければならない。ドラム鋼板とセメント固化体との間には、セメントが固化する段階で乾燥収縮によると思われる間隙が生じる<sup>13)</sup>。その場合、超音波は鋼板上を迂回して伝播し、セメント固化体内部を透過しないことになる。その対策として、本試作装置の特長である油圧駆動により、超音波入出力点すなわちトランスジューサーに荷重を加えて、ドラム鋼板と内容物のセメント固化体の密着をはかった。また、試験体の各箇所超音波速度を測定するため、センサー(トランスジューサー)上下方向の駆動も油圧によった。Fig. 2にそれらの油圧駆動回路



報で報告した反発硬度法による値と比較検討する。さらに、固化体内の欠陥の存在ならびにその位置についても検討を行うものである。

## 2. 超音波試験装置

### 2.1 装置の構成

使用した装置の構造を説明するために装置構成図を Fig. 1 に示す。装置は基本的に5つの部分、すなわち超音波伝播速度測定器(U)、パワーユニット(P)、トランスジューサー(発受振器)(T)、シンクロスコープ(S)およびトランスジューサーの上下移動とドラム缶づめ固化体に振動子をあてがうことを目的とした油圧駆動部(O)から構成されている。装置の概観写真を Photo. 1 に示した。

超音波伝播速度測定器は、英国 C.N.S. ELECTRONICS LTD 製のものである。ピーク電圧 800 V を  $\mu\text{sec}$  の間作用させることにより超音波を発生させるようにしてある。セメント固化体を通過する超音波の伝達時間は3桁の数字でデジタル表示されるようになっている。すなわち、 $0.1 \mu\text{sec}$  の単位で  $0.1 \sim 99 \mu\text{sec}$  および  $1 \mu\text{sec}$  の単位で  $1 \sim 999 \mu\text{sec}$  の時間、測定範囲が切換可能となっている。受信増幅器は、 $20 \text{ KHz} \sim 250 \text{ KHz}$  の周波数範囲を使用できる。

本装置の電源は、充電式ニッケルカドミウム電池が内蔵されているが、実験室で使用する場合には、本装置に付属しているパワーサプライユニットを連結すれば 100 V 電源も使用可能となる。この場合、本器には 12 V の電力を供給する

トランスジューサーは、ジルコン酸・チタン酸鉛 (PZ T4) セラミック製のピエゾ・エレクトリックエレメントから成り、ステンレス製のケースに取付けられている。パルス発生器をショック励起させると、トランスジューサーは自己固有の周波数で機械的に振動し、その周波数は全トランスジューサーアセンブリの大きさおよび固さで定められる。ピエゾ・エレクトリックエレメントおよびそのケースの大きさが異れば、異った超音波周波数が得られる。本試験では、 $50 \text{ KHz}$  の周波数を有するトランスジューサーを使用した。

測定値は、前述したように伝播時間を超音波伝播速度測定器上にデジタル表示し、同時にシンクロスコープを用いてアナログ的に観測し得るようにしてある。さらに欠陥がある場合、到来波形の異常を観測することによって探査の可能性を期待した。

ドラム缶づめセメント固化体を測定する場合には、ドラム鋼板上から超音波パルスを発射しなければならない。ドラム鋼板とセメント固化体との間には、セメントが固化する段階で乾燥収縮によると思われる間隙が生じる<sup>13)</sup>。その場合、超音波は鋼板上を迂回して伝播し、セメント固化体内部を透過しないことになる。その対策として、本試作装置の特長である油圧駆動により、超音波入出力点すなわちトランスジューサーに荷重を加えて、ドラム鋼板と内容物のセメント固化体の密着をはかった。また、試験体の各箇所超音波速度を測定するため、センサー(トランスジューサー)上下方向の駆動も油圧によった。Fig. 2 にそれらの油圧駆動回路

図を示した。

## 2.2 測定装置の電気系統

Fig. 3 に本装置の電気系統図を示す。本系統は便宜上、Pulse recurrence frequency generator (パルス反復周波発生器), Set reference delay (セトリファレンス遅延装置, 0点調整), Receiver Amplifier (受信用増幅器), Timing pulse oscillator, Gate, Decade Units (タイミングパルス振動子, ゲート, ディケード装置) の4つの部分に分けることができる。以下に各部分の詳細を説明する。

パルス反復周波発生器は、パワーユニットと緩和振動子パルス発生器から成る。

発振トランスジューサーの電気容量は、電位差800Vにまで負荷される。この蓄電容量は、そこで毎秒10パルスの反復周波でパルス発生器から引金を引いて放電される。電気容量の放電は、発振器をショック励起させ、固有の周波数で一連の縦振動を発生させるようになっている。

発振器がショック励起されると同時に、パルス発生器から出たパルスは、セトリファレンスコントロールステージを始動させる。このセトリファレンス遅延装置は、ディケードのため「リセット」パルスを発生させ、ゲートコントロールのためには遅延「スタートパルス」を発生させる。

発振用トランスジューサーに適用されるパルスと受振用トランスジューサーからの出力信号の間には、少時間の遅延、つまり、3  $\mu$ secの遅れがある。この遅れは、機械的パルスがトランスジューサーの両表面、連結材およびトランスジューサーの材料を通過する際におこる。この遅れをなくすために、「スタートパルス」が発振器のショック励起後ゲートコントロールに用いられる。

試験体を通して伝播された超音波パルスは、受信側増幅器の中で電気信号に変換される。発信信号は増幅されて、発信信号波長の先行端と一致する急角度上昇「ストップ」パルスの形状となる。

2MHz (または10MHz)・タイミングパルスは、2MHz (または10MHz) の水晶正弦波振動子で発生する。正常波形に変更された後、タイミングパルスがレンジスイッチを経由してゲートの一方の側に使用される。2MHz (または10MHz) パルスは1MHz のタイミングパルスを生ずるため、バイステーブル分配装置に適用される。バイステーブル回路は、ゲートを制御するために使用される。セトリファレンスステージからスタートパルスを受信すると、ゲートを開き、タイミングパルスはそのゲートを通してデケード計算装置に伝わる。ストップパルスが受信増幅器から出て、ゲートコントロールバイステーブルの他の側に使用されるとゲートは閉ざされる。

数字表示管は、スタートパルスがバイステーブル制御ステージとして用いられる直前にリセットパルスが適用されるまで計算を保持する。読取りは、毎秒10回のパルス反復周波割合で行われる。

### 3. 試験方法

#### 3.1 供試体

セメントには、普通ポルトランドセメントおよびC種高炉スラグセメントを用いた。セメントの物理的性質および化学的成分をTable 1 に示す。圧縮強度推定用セメント均一固化体には、前報<sup>2)</sup>の反発硬度法による検査のときに用いた供試体と同じものを用いた。そのため、ここでは製作方法、製作機器および製作条件などについては文献2)にゆずる。ただし、以後の試験結果と対応させるため、供試体の配合および供試体と同一組成固化体の一軸圧縮強度をTable 2 に示す。

Table 2 より試料No.T-23は、固化体内部の欠陥を探查するための供試体である。欠陥としては、セメント固化体にボイド(空隙)が生じていることを想定し、底面から45cmおよび75cmの固化体の中心線上の位置に、直径8cmφの球状発泡スチロール片とウエス(布)でかためたものをそれぞれ設けた。発泡スチロールおよび布片は、モルタル充填の段階で比重が小さいため浮き上がってしまうので、所定距離をとった糸でもってしばりつけ、他端に重しとして約10kgの鉄塊をしばり、その鉄塊を沈めてモルタル内の所定の位置に固定するようにした。Fig. 4 に固化体に設けた欠陥の詳細を示した。

#### 3.2 超音波伝播速度試験

超音波伝播速度測定には、前章で述べた試験装置を使用した。トランスジューサ(受発振子)にはセメント固化体内での減衰を考慮し、50KHzのジルコン酸・チタン酸鉛セラミック(PZT4)であって、直径50mmφ×4.2mmのステンレス製ケースに取付けられているものを用いた。

本試験前にトランスジューサにテストピースを密着させ、基準値(26.3μsec)がデジタル表示されることおよびシンクロスコープにデジタル表示と同等の波形が表われることを確認した。Photo. 2に写真でもってその時の波形を示した。

本試験では、トランスジューサは供試体の直径方向、すなわち、左右対称に配置した。ドラム缶内のセメント固化体圧縮強度推定のための測定は、Fig. 5に示すように、ドラム缶底面から20cm、45cmおよび75cmの高さのところをX-X方向およびその直角のY-Y方向をとり、計6点の超音波伝播時間を測定し、その値を算術平均した。しかし、ドラム缶の腐食部あるいは表面から見えない欠陥部にトランスジューサを当てた場合など、明らかに異常と認められる値が得られることもあるので、このような値は切り捨てた。

伝播速度への換算は次の(1)式によった。

$$S = L / T \quad (1)$$

ここで

S : 超音波伝播速度

T : 超音波伝播時間

L : 両トランスジューサ間の距離, すなわちドラム缶径 (56.7 cm  $\phi$ )

測定に際して, ドラム缶とセメント固化体との間の間隙をなくするため, 油圧により一定の力 (18 kg/cm<sup>2</sup>) でトランスジューサを押さえるようにした。測定値の読取時は, 油圧モータから発生する振動の影響によりデジタル表示が激しくばらつくため, センサー圧着後は油圧モータを停止させた。また, 供試体における測定箇所の上下移動も油圧駆動によった。それらの油圧駆動回路図は Fig. 2 に示してある。さらにトランスジューサが供試体の両側面に一定の力で接するように, ウレタンゴムを介して定着させるようにした。

試料 No. T-23 を使用した欠陥探査のための測定は, 供試体底面から 2.5 cm 毎行い, 欠陥の位置および大きさ等を知ることを試みた。

## 4. 測定結果と考察

### 4.1 超音波伝播速度と一軸圧縮強度との対応

一般にセメント固化体の圧縮強度は, 水・セメント比によって支配される<sup>3)4)</sup>。すなわち, 水セメント比が大きくなれば圧縮強度は低下する。前報<sup>2)</sup>では, 本研究に用いたと同等の放射性廃液セメント固化体において, 水セメント比が増大するにしたがって圧縮強度が低下する傾向にあることを報告した。このことは, 圧縮強度がセメント固化体内に残された空隙率に依存し, 空隙率が高い程圧縮強度が低下するからである<sup>4)</sup>。そのような固化体に超音波をあてた場合, 空隙率が高い程それに伴って固化体を通過する超音波速度も低下することになる。要するに, 水セメント比, すなわち, 圧縮強度とは相関するということは緒言においてすでに述べた。

水セメント比と超音波伝播速度との関係を Fig. 6 に示した。水セメント比が増大するにしたがって, 超音波伝播速度は減少する傾向を示しており, 超音波伝播速度と圧縮強度とが相関することを示唆している。

Fig. 7 に超音波伝播速度と同一組成固化体の圧縮強度との関係を示した。ここで, 最小自乗法によって直線式を算出し, 超音波伝播速度と圧縮強度との関係式を求めると(2)式が得られる。

$$\sigma = 0.48 S - 1380 \quad (2)$$

ここで, S は超音波伝播速度,  $\sigma$  は圧縮強度を表わす。(2)式に対し, 圧縮強度の実測値の標準偏差は, 26.3 kg/cm<sup>2</sup> であり, 超音波伝播速度については 53.5 m/sec であった。この(2)式から前述した圧縮強度 150 kg/cm<sup>2</sup> 以上という値を満足させるには, 固化体の超音波速度は 3200 m/sec 以上, 安全側に見込むと 3300 m/sec 以上あればよいことがわかった。

ここで

S : 超音波伝播速度

T : 超音波伝播時間

L : 両トランスジューサ間の距離, すなわちドラム缶径 (56.7 cm  $\phi$ )

測定に際して, ドラム缶とセメント固化体との間の間隙をなくするため, 油圧により一定の力 (18 kg/cm<sup>2</sup>) でトランスジューサを押さえるようにした。測定値の読取時は, 油圧モータから発生する振動の影響によりデジタル表示が激しくばらつくため, センサー圧着後は油圧モータを停止させた。また, 供試体における測定箇所の上下移動も油圧駆動によった。それらの油圧駆動回路図は Fig. 2 に示してある。さらにトランスジューサが供試体の両側面に一定の力で接するように, ウレタンゴムを介して定着させるようにした。

試料 No. T-23 を使用した欠陥探査のための測定は, 供試体底面から 2.5 cm 毎行い, 欠陥の位置および大きさ等を知ることを試みた。

## 4. 測定結果と考察

### 4.1 超音波伝播速度と一軸圧縮強度との対応

一般にセメント固化体の圧縮強度は, 水・セメント比によって支配される<sup>3)4)</sup>。すなわち, 水セメント比が大きくなれば圧縮強度は低下する。前報<sup>2)</sup>では, 本研究に用いたと同等の放射性廃液セメント固化体において, 水セメント比が増大するにしたがって圧縮強度が低下する傾向にあることを報告した。このことは, 圧縮強度がセメント固化体内に残された空隙率に依存し, 空隙率が高い程圧縮強度が低下するからである<sup>4)</sup>。そのような固化体に超音波をあてた場合, 空隙率が高い程それに伴って固化体を通過する超音波速度も低下することになる。要するに, 水セメント比, すなわち, 圧縮強度とは相関するということは緒言においてすでに述べた。

水セメント比と超音波伝播速度との関係を Fig. 6 に示した。水セメント比が増大するにしたがって, 超音波伝播速度は減少する傾向を示しており, 超音波伝播速度と圧縮強度とが相関することを示唆している。

Fig. 7 に超音波伝播速度と同一組成固化体の圧縮強度との関係を示した。ここで, 最小自乗法によって直線式を算出し, 超音波伝播速度と圧縮強度との関係式を求めると(2)式が得られる。

$$\sigma = 0.48 S - 1380 \quad (2)$$

ここで, S は超音波伝播速度,  $\sigma$  は圧縮強度を表わす。(2)式に対し, 圧縮強度の実測値の標準偏差は, 26.3 kg/cm<sup>2</sup> であり, 超音波伝播速度については 53.5 m/sec であった。この(2)式から前述した圧縮強度 150 kg/cm<sup>2</sup> 以上という値を満足させるには, 固化体の超音波速度は 3200 m/sec 以上, 安全側に見込むと 3300 m/sec 以上あればよいことがわかった。

前報においてドラム缶の上方から打撃した場合の反発硬度と圧縮強度間の直線式は、

$$\sigma' = 12.9 R' - 338 \quad (3)$$

である。このときの圧縮強度の標準偏差は  $24.1 \text{ kg/cm}^2$  であった。本研究における超音波試験法による標準偏差は  $26.3 \text{ kg/cm}^2$  であり、反発硬度法による測定値  $24.1 \text{ kg/cm}^2$  よりわずかに高い値を示している。このことは、超音波が反発硬度に比べて破壊強度との結びつきが良くない結果が得られるという報告<sup>9)</sup>と一致している。これについて原ら<sup>10)</sup>は超音波の測定の場合、水セメント比以外に固化体内部の変化も観測されるためとしている。

なお、セメント固化体は固化の過程で比重の大きい塩類等が沈降するため、供試体底面に近い程超音波伝播速度は高い値を示す結果が得られた。

ドラム缶詰めセメント均一固化体の品質検査に超音波あるいは反発硬度いずれの検査法を用うるにしても、得られる測定値に多少の精度上のばらつきが生じることは避けられない。小阪ら<sup>13)</sup>はその原因の一つは、コンクリート内部にマイクロクラックの発生していない無載荷のコンクリートの非破壊試験値と、無数のマイクロクラックや母材モルタルの圧壊などが内在する、いわば全く別品質のコンクリートの力学特性値とを比較しているところにあるとしている。

以上の知見により、放射性廃液セメント固化体の検査においては、より安全側に見積ることを確実にするために、反発硬度法と超音波試験法の検査法を併用する。そして前述の(2)および(3)式によって  $150 \text{ kg/cm}^2$  以上の一軸圧縮強度を保つ固化体を確認することを提案するものである。

## 4.2 欠陥の探査

Fig. 8 に、試料No.T-23固化体の底面からセメント固化体が充填されている上面まで  $2.5 \text{ cm}$  間隔毎に測定した伝播速度を示した。それによると X-X 方向および Y-Y 方向ともほぼ同様の傾向を示した。測定に際して、トランスジューサーの密着性をはかるため、ドラム缶側面を一周している凸部への押し当ては避けている。Fig. 8 から固化体上面に行くに従って、伝播速度が低下していく傾向にあることがわかる。このことは、セメントモルタルが固化するまでの間に比重が大のものは沈降し、空泡部分が上方に浮上するためと考えられる。また、供試体底面から  $7.5 \text{ cm}$  の位置で伝播速度の著しい増加を示しているのは、ここに重しとして置いた鉄塊があるためである。底面から  $4.5 \text{ cm}$  および  $7.5 \text{ cm}$  のところでは、伝播速度の落ち込みを見せている。これは、これらの位置に設けた発泡スチロール片およびウエスのためである。

(3.1 参照)

これらの欠陥の大きさは、径  $8 \text{ cm}$  の球状のものであるが、この分だけ超音波は遅れて受振されるものと思われる。このようにドラム缶の長手方向については、欠陥の探査は可能であった。しかし、欠陥の大きさおよび種類およびドラム缶の径方向の欠陥などの探査には、実用化上まだ、解決しなければならない問題が数多くある。シンクロスコープに現れる波形からも探査を試みたが、セメント固化体は減衰が甚しいため、微妙な差を読みとるのは不可能であった。今後は、超音波の周波数を  $100 \text{ KHz}$  に上げた試験を行なう予定である。

## 5. ま と め

海洋処分に備えた放射性廃棄物固化体の品質管理の一環として、実規模(200ℓ)のセメント均一固化体用可搬型超音波試験装置を使用して、放射性廃液実規模セメント均一固化体の圧縮強度を推定した。上記固化体の超音波伝播速度と同一組成固化体の一軸圧縮強度との間は直線関係にあり、海洋処分用セメント固化体に必要な一軸圧縮強度 $150\text{ kg/cm}^2$ 以上に対応する超音波伝播速度は、 $3200\text{ m/sec}$ 以上であることを認めた。

超音波試験法と反発硬度法との比較を行い、一軸圧縮強度推定に関しては確実さを得るため両方法を併用することを提案した。

さらにドラム缶詰めセメント固化体内部に存在する欠陥の探査についても検討を行い、欠陥の存在とその位置を知ることができた。しかし、実用化には解決しなければならない問題がいくつか残されている。

おわりに、本研究の遂行にあたり終始便宜を図って下さった環境安全研究部伊藤彰彦主任研究員および低レベル廃棄物処理処分研究室和達嘉樹室長ならびに天野恕環境安全研究部長に感謝するとともに本装置の製作にあたり有益なご意見をいただいた富士物産株式会社山中勘司郎氏ならびに本研究の測定の一部を共同で実施していただいた原研東海研究所保健物理部放射性汚染処理課服部洋司良、森下 悟両氏に厚く謝意を表す。

## 文 献

- 1) 原子力委員会環境・安全専門部会：試験的海洋処分用低レベル放射性廃棄物のセメント固化体に関する暫定指針，（1973）
- 2) 関 晋，伊藤彰彦：放射性廃液セメント均一固化体の品質検査，一反発硬度法による非破壊検査－，非破壊検査27-5（1978），270-274
- 3) 軽量骨材コンクリートハンドブック編集委員会，軽量骨材コンクリートハンドブック，（1966），105-106，〔日刊工業新聞社〕
- 4) W. チェルニン：建設技術者のためのセメント・コンクリート化学，（1975），58-67，〔技報堂〕
- 5) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験法，（1957），42，〔日本セメント技術協会〕
- 6) R.H.Elreery et al.: Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages ; 28-97（1976），181-189〔Magazine of Concrete Research, England〕
- 7) W.N.Reynolds, S.J.Wilkinson: Ultrasonic wave velocities in concrete, AERE-R8973（1977）
- 8) British Standards Institution: Recommendations for Non-destructive methods of test for concrete, BS4408 Part 5,（1974）
- 9) コンクリート品質管理試験に関するシンポジウム発表論文および討議の概要，コンクリートジャーナル，12-9（1974），99-100
- 10) 原 忠勝：超音波によるコンクリートの凝結・硬化に関する実験的考察，セメント技術年報，31，（1974），159-162
- 11) 原 忠勝，大塚孝義：超音波によるコンクリート強度の推定について，セメント技術年報，40，（1975），179-182
- 12) 笠井芳夫：コンクリートの初期圧縮強度の推定方法，日本建築学会論文報告集，141（1967）1-10
- 13) 小阪義夫，谷川恭雄，太田福男：非破壊試験法によるコンクリート品質の推定値の信頼限界，セメント技術年報，105，（1977），400-403
- 14) 関 晋，大内康喜，比佐 勇：海洋処分に備えたセメント均一固化体の高水圧試験，JAERI-M 6364，（1976）



Table 1 Physical property and chemical composition of cement

a) Physical property\*

	Specific gravity	Fineness		Time of setting		Soundness		Strength (kg/cm <sup>2</sup> )					
		Specific surface (cm <sup>2</sup> /g)	<88μ residue (%)	Initial (hr-min)	Final (hr-min)	Soaking test	Boiling test	Bending			Compression		
								3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days
Normal portland cement	3.15	3110	20	2-17	3-20	Good	Good	321	50.1	70.8	126	234	414
Blast furnace slag cement	2.99	3850	1.0	4-32	5-31	Good	Good	228	39.9	62.7	83	176	381

\* According to JIS R 5201

b) Chemical composition (%)

	Loss on ignition	Insoluble residue	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Total
Normal portland cement**	0.7	0.5	21.7	5.3	3.3	64.7	1.3	1.6	99.1
Blast furnace slag cement***	0.9	0.3	28.6	11.9	1.5	49.2	3.8	2.2	99.2

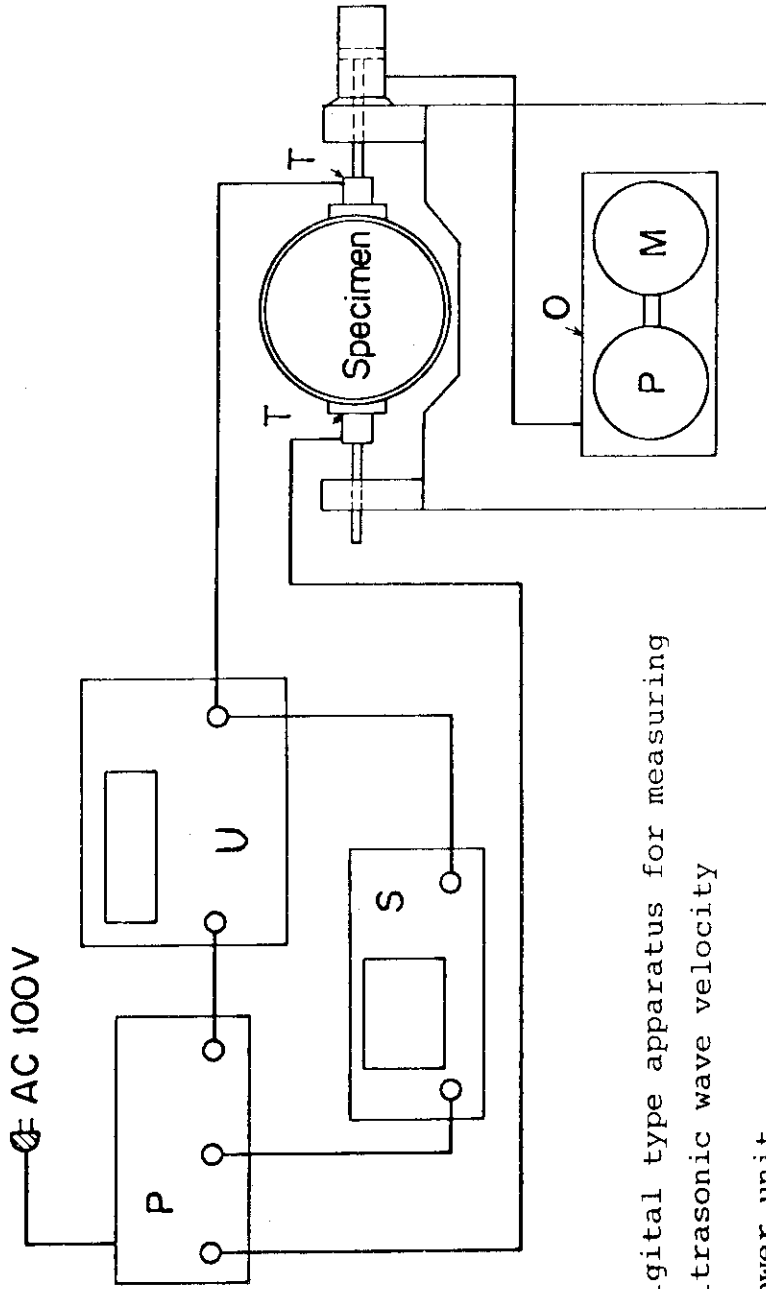
\*\* According to JIS R 5210

\*\*\* According to JIS R 5211

Table 2 Compounding of specimens

Specimen No.	Cement	Simulated liquid waste	Wa/C (%)	W/C (%)	A/A+C (%)	Uni-axial compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )
T- 1	S	20% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	50	33	348
T- 2	S	20% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	42	33	0	454
T- 3	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	42	33	0	530
T- 4	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	53	33	294
T- 5	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	53	22	399
T- 6	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	53	22	398
T- 7	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	53	22	312
T- 8	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	53	22	372
T- 9	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	53	22	377
T-10	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	53	22	325
T-11	S	Water	—	63	22	211
T-12	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	63	53	22	312
T-13	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	74	63	33	266
T-14	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	74	63	33	254
T-15	S	11% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	113	100	45	190
T-16	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	83	70	45	217
T-17	P	11% H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 11% NaOH	84	66	38	129
T-18	P	11% H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 11% NaOH	84	66	38	133
T-19	P	11% H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 7% NaOH	80	66	38	223
T-20	P	11% H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 9% NaOH	75	60	38	200
T-21	P	10% H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 8% NaOH	80	66	38	227
T-22	P	10% H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 8% NaOH	80	66	38	200
T-23	S	15% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	83	72	33	202

S: Blast furnace slag cement, P: Normal Portland cement,  
A: Aggregate, C: Cement, Wa: Simulated waste, W: Water



U : Digital type apparatus for measuring ultrasonic wave velocity

P : Power unit

T : Transducer

S : Synchroscope

O : Oil pressure driving part

Fig. 1 Ultrasonic wave test apparatus for full size waste solid

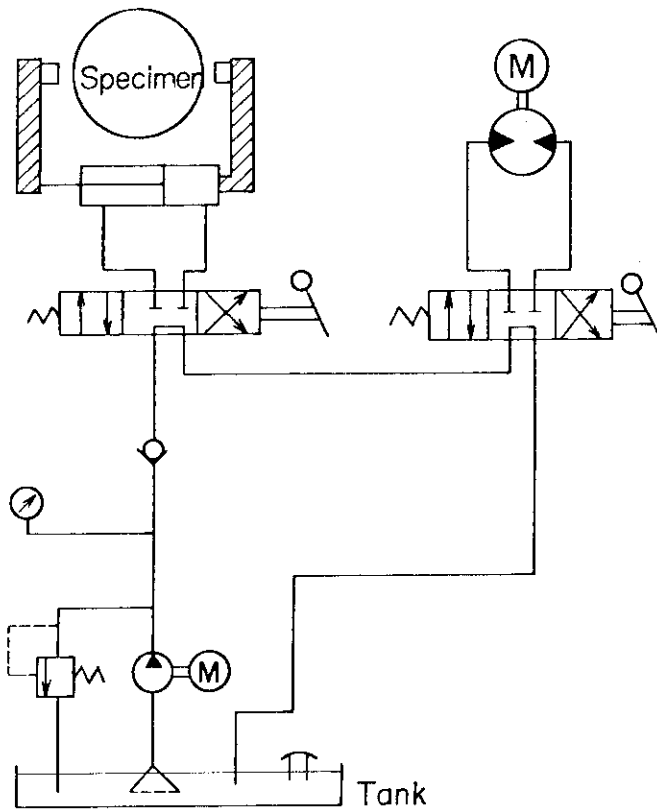


Fig. 2 Oil pressure circuit for driving transducers

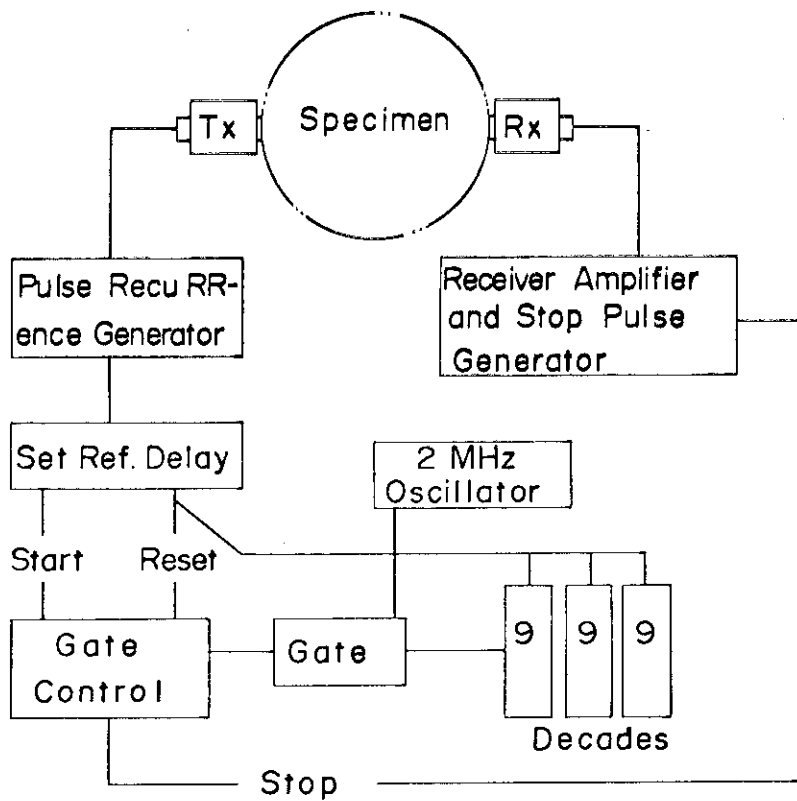


Fig. 3 Electric circuit of digital type apparatus for measuring ultrasonic wave velocity

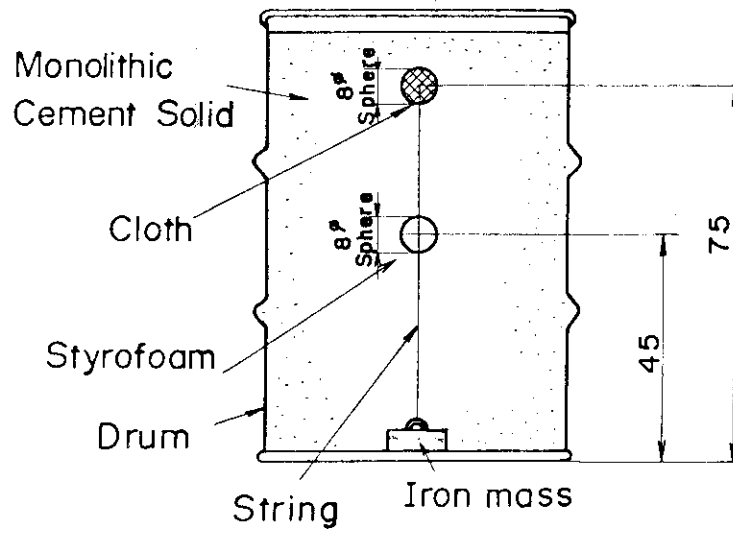


Fig. 4 Cross section of T-23 specimen (Unit:cm)

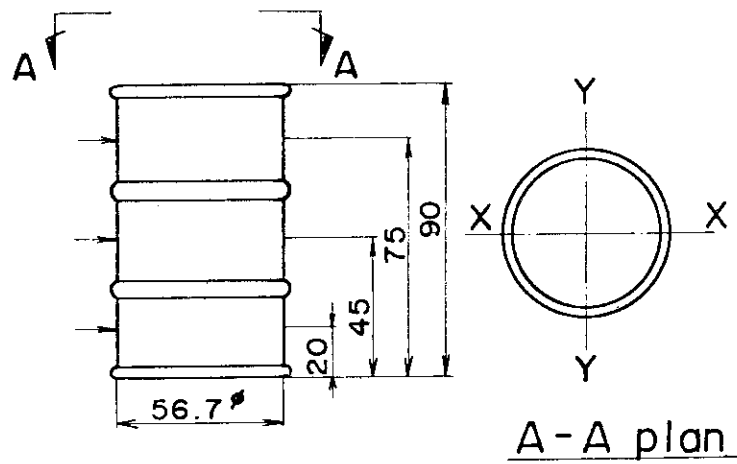


Fig. 5 Position of measurement of the specimen (Unit:cm)

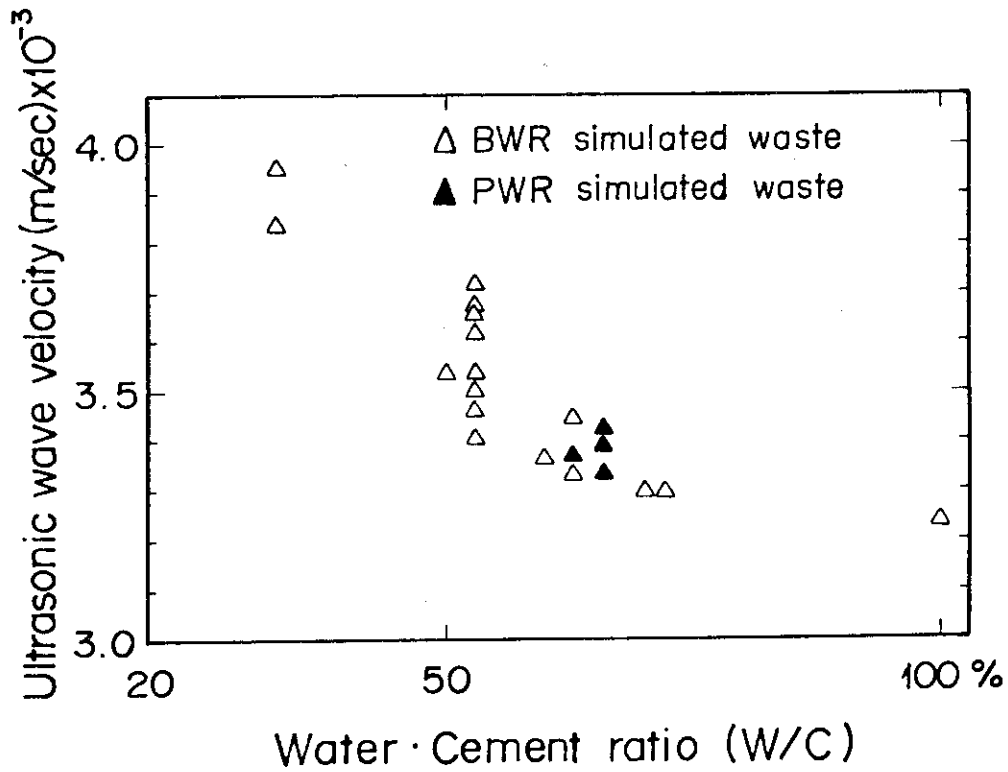


Fig. 6 Relationship between water cement ratio and ultrasonic wave velocity

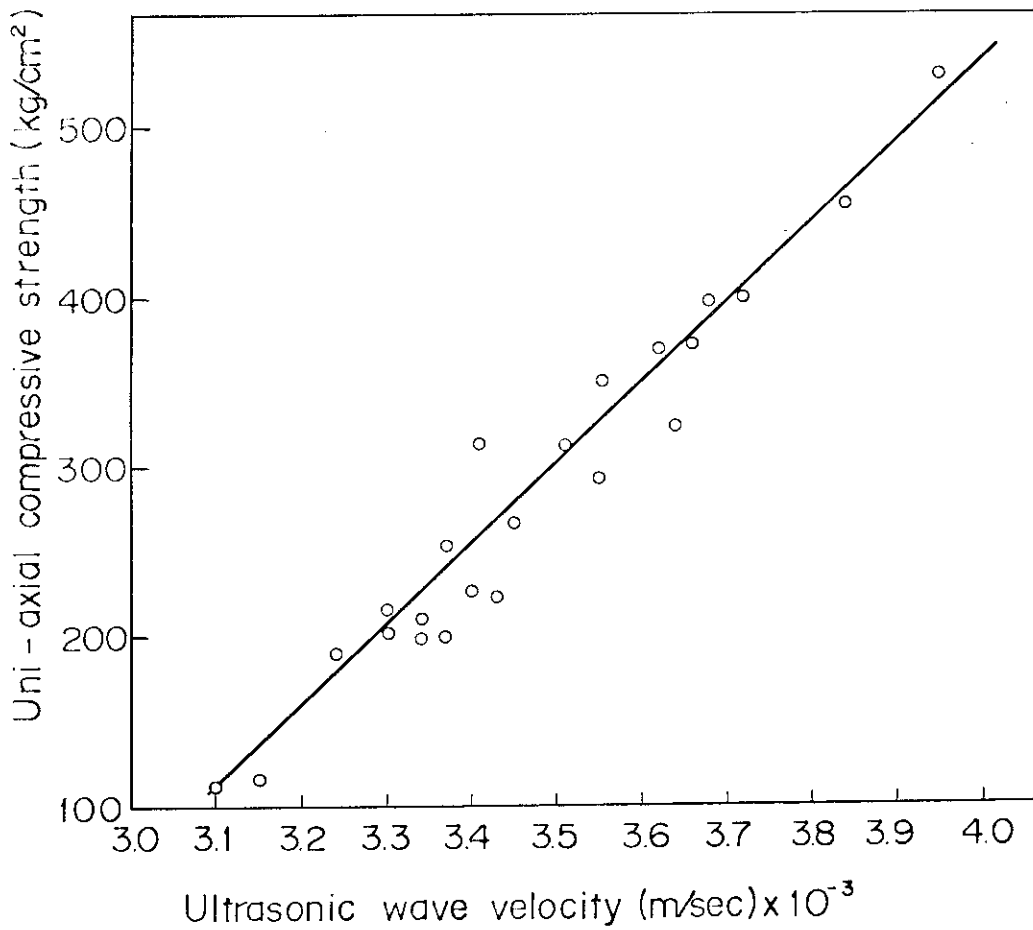


Fig. 7 Relationship between the ultrasonic wave velocity and the uni-axial compressive strength for solids of the same composition

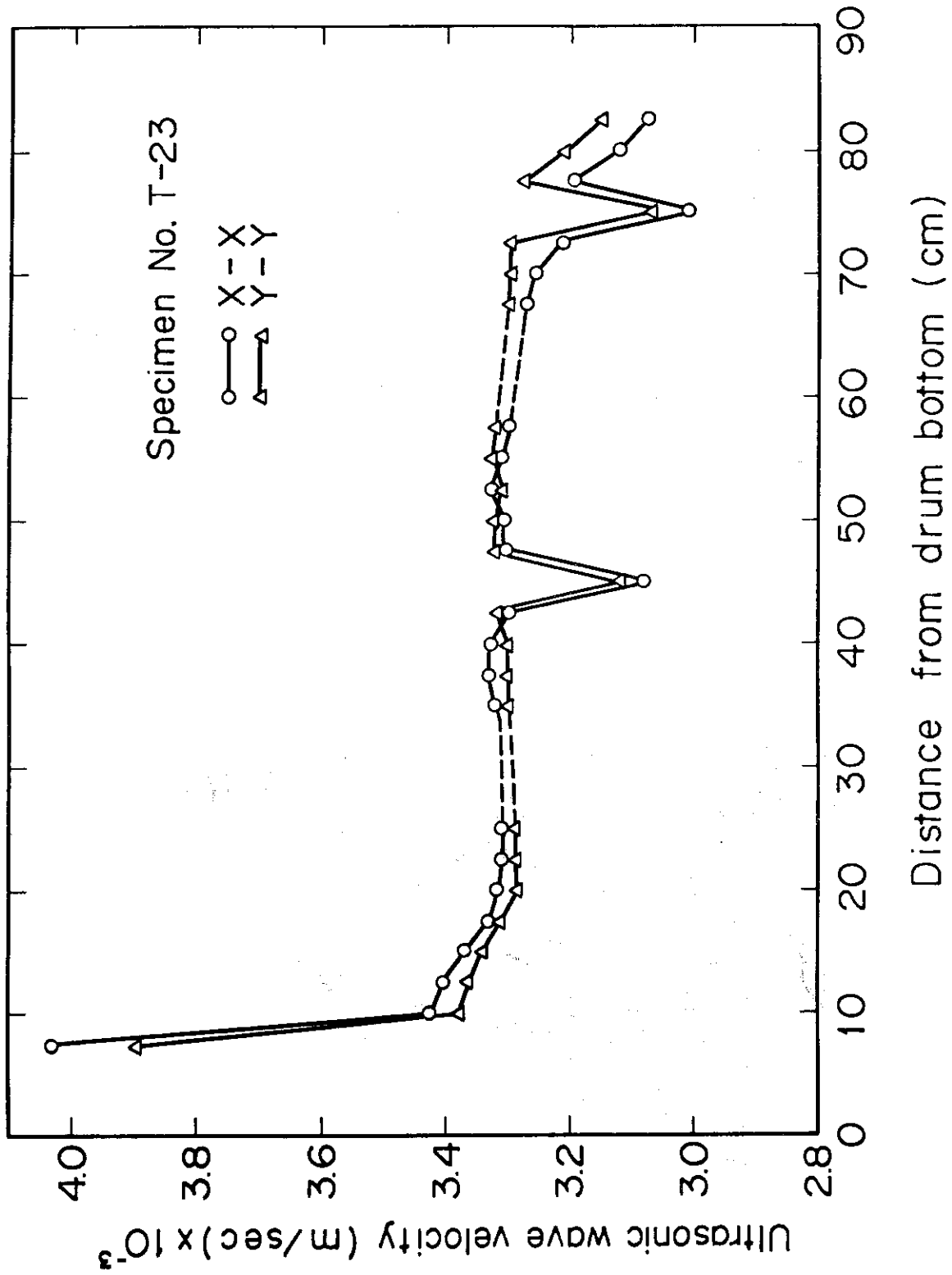


Fig. 8 Variation of the ultrasonic wave velocity (Specimen No. T-23)

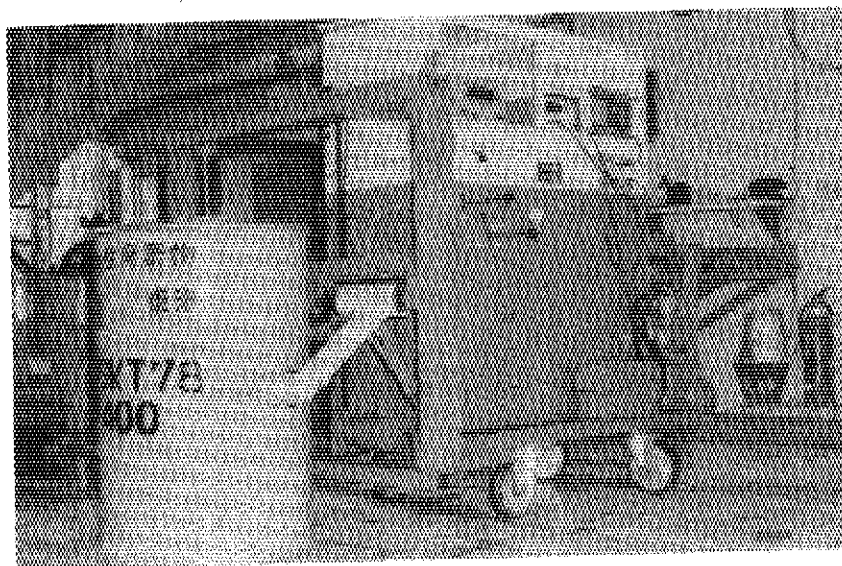


Photo. 1 Ultrasonic wave test apparatus

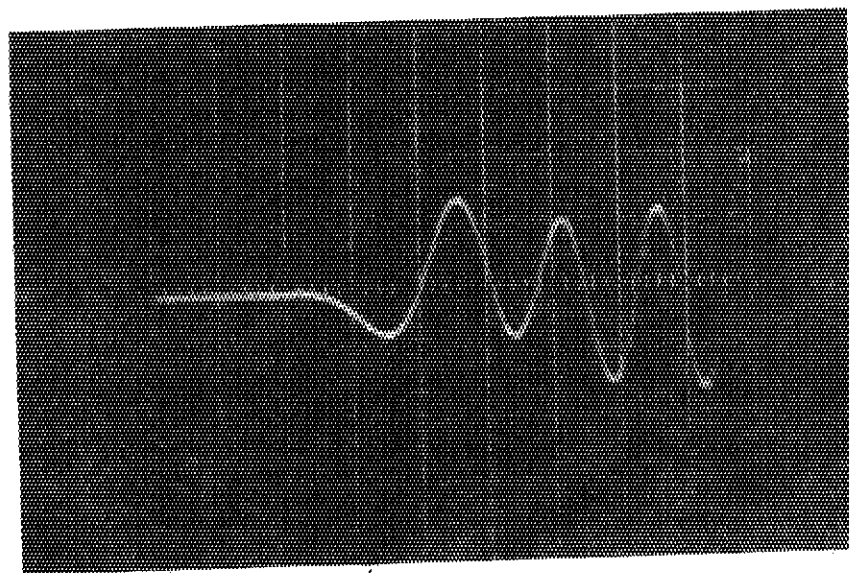


Photo. 2 Wave from of the test-piece