

コンクリート構造物の非破壊検査のための  
ガス燃焼を利用した加振装置の開発\*岩本達也<sup>\*1</sup>, 森 和也<sup>\*2</sup>, 鳥越一平<sup>\*3</sup>Development of Excitation Device for Non-Destructive Inspection  
in Concrete Structures Using Gas CombustionTatsuya IWAMOTO<sup>\*4</sup>, Kazuya MORI and Ippei TORIGOE<sup>\*4</sup> Department of Mechanical Engineering, Ariake National College of Technology,  
150 Higashihagio, Ohmuta-shi, Fukuoka, 836-8555 Japan

This paper is concerned with the development of a shock tube suited for nondestructive inspection in concrete structures. The developed shock tube produces shock waves by combustion of propane-air mixture gas in a long cylindrical tube at short intervals. The propane and air mixture are injected into the reaction chamber from the mixing chamber and ignited. A detonation wave goes through the expansion chamber and extends into the atmosphere. The performance of the tube was evaluated by measuring the pressure distribution on a specimen surface and experiments of defect detection for concrete specimens. A triangular wave with a pressure of 4 kPa and a duration of 0.4 ms was obtained at 500 mm distance from the shock tube. In the defect detection, we could detect a defect with a diameter of 200 mm and a depth of 50 mm clearly.

**Key Words:** Nondestructive Inspection, Shock Wave, Combustion, Propane-Air Mixture, Concrete

## 1. 結 言

コンクリート構造物の耐用年数は約 200 年以上と考えられてきたが, 近年, トンネルや高架などのコンクリート片の落下事故が続く, 社会的な関心を集めている<sup>(1)</sup>. 広大な検査領域を持つコンクリート構造物に対しては, 作業効率の優位性のために, 従来から打音検査が利用されてきた. しかしながら, 打音検査は検査作業のすべてが作業者に依存するために, しばしば問題箇所の見落としが生じることがある. そのため打音法にかわる新たな方法が必要とされている.

そこで, 赤外線カメラを利用した赤外線法<sup>(2)</sup>, 超音波の反射を利用した超音波法<sup>(3)</sup>などが開発されてきた. 赤外線法は, 検査効率は良いが, 50mm 以下の比較的浅い欠陥のみ適用可能であり, また, 天候に左右されやすい. 超音波法は, 検査精度は良いが, 検査効率が悪いなどの問題がある.

著者らは, 検査効率と検査精度を兼ね備えた方法として圧縮空気を用いた衝撃波管とレーザードップラ一振動計を用いた非接触非破壊検査法を提案し, 直径

200mm, 深さ 50mm の欠陥の検出に成功した<sup>(4), (5)</sup>. しかし, この加振装置(破膜式)は高圧部と低圧部とを分ける隔膜を破壊することにより圧力波を発生させているために, 隔膜の取替えに時間が掛かり作業効率が低いという問題があった.

本研究では, コンクリート構造物における非破壊検査の自動化を目的として, 連続的かつ自動的に圧力波を発生させるガス燃焼を利用した加振装置(ガス燃焼式)を開発した. また, 検査壁面上の圧力分布と人工欠陥を埋め込んだ試験片の非破壊検査によって装置の性能を評価した.

## 2. 衝撃波を用いた非接触非破壊検査法

図 1 に示すように, 欠陥を有する壁面に衝撃を与えると, 二つの振動パターンを示す. 一つ目は, 図 1

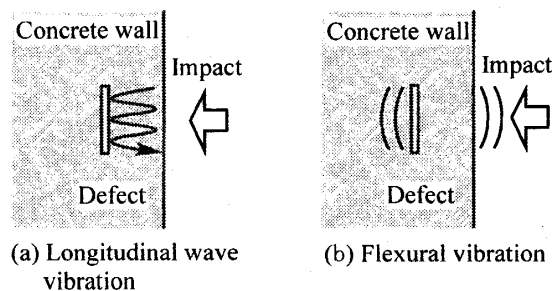


Fig.1 Patterns of vibration of a concrete surface

\* 原稿受付 2005 年 2 月 28 日.

<sup>\*1</sup> 正員, 有明工業高等専門学校機械工学科(☎ 836-8585 大牟田市東萩尾町 150).<sup>\*2</sup> 正員, 熊本大学工学部(☎ 860-8555 熊本市黒髪 2-39-1).<sup>\*3</sup> 熊本大学工学部.

E-mail: tiwamoto@ariake-nct.ac.jp

(a) に示すような縦波振動である。壁面内に欠陥が存在する場合、縦波は欠陥で反射し、その反射波は壁面で再び反射する。これらの反射が繰り返され、壁面は振動する。二つ目の振動パターンは、図 1 (b) に示すような、壁面と欠陥との間の部分が、太鼓のように振動するたわみ振動である。

コンクリート構造物の欠陥の振動においては、たわみ振動の周波数は可聴音領域であり、縦波振動の振動数は超音波領域であるのが一般的である<sup>(6)</sup>。これはコンクリート構造物の欠陥検出の対象となる欠陥寸法が、おおむね 10 cm 以上で、深さが 10 cm 以下であるからである。一方、振幅の大きさは、たわみ振動の場合サブミクロンオーダーで、縦波振動のそれはさらに小さい。

衝撃波を用いた非破壊検査では、たわみ振動を計測対象としている。たわみ振動の振幅は極めて小さいので、はく離している破面が接近している場合でも、たわみ振動は生じる。

図 2 に、衝撃波を用いた非破壊検査の装置を示す。衝撃波管により、圧力波を発生させ欠陥を有する壁面に衝撃を与える。その表面振動をレーザードップラー振動計で計測し、振動の特性によって欠陥の状態を評価するというものである。この方法は、衝撃波を用いることにより、一度に広範囲を加振することが可能である。さらに、レーザードップラー振動計を用いることによって、高精度かつ高効率な欠陥の探査が可能

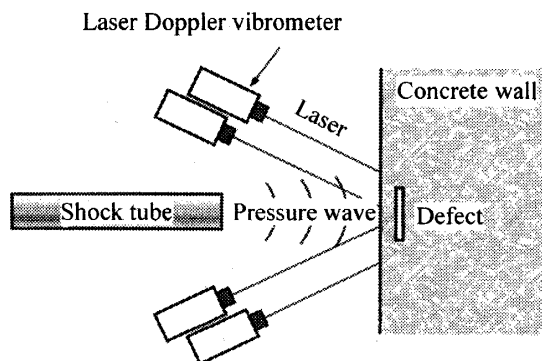


Fig. 2 Non-destructive inspection by using shock wave

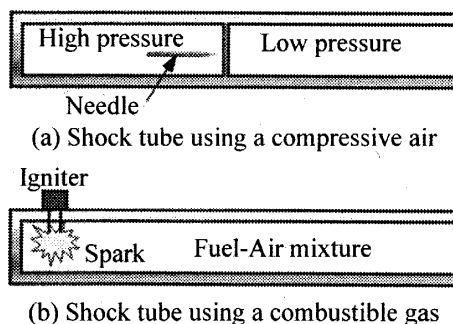


Fig. 3 Mechanisms of producing shock wave

である。レーザードップラー振動計の測定可能な周波数は 100kHz 程度であるため、打音検査では検出できなかった小さな欠陥のたわみ振動（超音波領域）も検出可能である。

森らは加振装置として、図 3 (a) に示すような圧縮空気を用いた破膜式衝撃波管を開発した。この衝撃波管は管内を金属薄膜で高圧部と低圧部とに仕切り、その金属薄膜をニードルで破壊することによって、衝撃波を開放端から空気中に放出する装置である。この装置は薄膜の強度を調整することによって高圧部の圧力を任意設定することが可能であるため、コンクリート壁面を加振させるのに十分な強度の衝撃波を発生させることが出来る。

しかしながら、衝撃波を発生させる度に金属薄膜の交換を必要とするために、作業効率が低く、実際の検査には適用が困難であった。

そこで、本研究では衝撃波を得る方法として、図 3 (b) に示すような可燃性ガスの燃焼反応を利用する方法を開発する。この方法は、薄膜の交換を必要とせず、可燃性ガスを交換するだけで連続的な圧力波の発生が可能である。

### 3. ガス燃焼を用いた加振装置

図 4 にガス燃焼を用いた加振装置（ガス燃焼式）の概略図を示す。加振装置の主要部は、燃料供給部と衝撃波管で構成されており、ガスの充填から点火までの動作は、プログラマブルコントローラによって制御される。

衝撃波管は、厚さ 10mm、内径 30mm のアクリル製のパイプで、燃焼ガスの混合室と反応室に分かれている。混合室と反応室は、厚さ 10mm のアクリル製の円

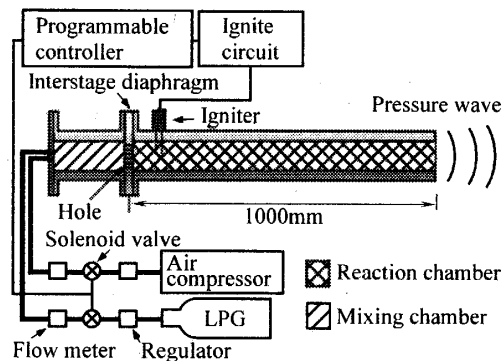


Fig. 4 Schematic diagram of experimental device

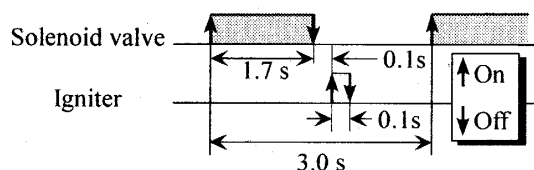


Fig. 5 Time chart on programmable controller for use

板で仕切られており、円盤には直径 1mm の穴が 19 個あけられている。この穴は、混合室から反応室へのガスの移動のためのもので、小径にすることによって火花が混合室内に侵入するのを防いでいる。イグナイターは、二本の鉄心（かんげき 3mm、長さ 15mm）によって構成されている。点火回路によって供給される 10kV 程度の交流電圧（約 48kHz）を印加することによって、安定した火花の発生が可能である。

燃料供給部は、LPG ボンベ、エアーコンプレッサー、レギュレータ、電磁弁、流量計から構成されている。プロパンガスと空気は、それぞれレギュレータによって 0.3MPa に減圧され、それぞれ衝撃波管の混合室に供給される。流量は、流量計に付いているバルブによって、流量比が約 4% になるように調整した。また、プロパンガスと空気の噴射時間は、反応室内に充填するように決定した。

図 5 に、プログラマブルコントローラ上の電磁弁

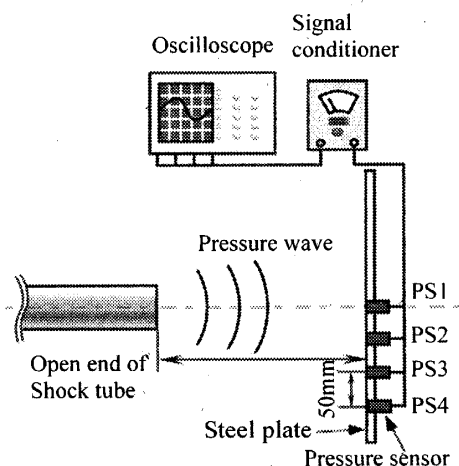


Fig. 6 Schematic diagram of pressure measurement system

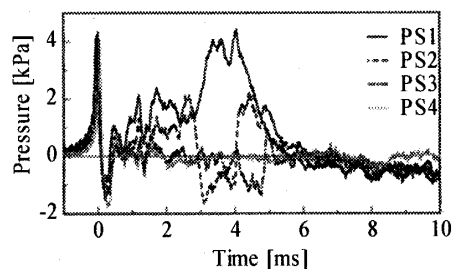


Fig. 7 Pressure variation on wall surface by new device

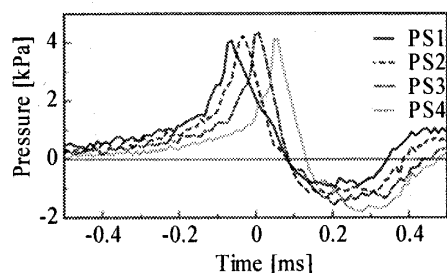


Fig. 8 Enlargement of initial pressure variation at distance

とイグナイターのタイムチャートを示す。プロパンガスと空気は、それぞれ混合室内に噴射され混合された後、反応室へ移動する。反応室内に混合気が充填されると、イグナイターにより点火され、衝撃波を含む圧力波が、開放端より大気中に放出される。なお、今回の設定では、約 3 秒間隔で連続的な衝撃波の発生が可能である。

#### 4. 加振装置の性能評価

開発した加振装置（ガス燃焼式）の加振性能を評価するために、検査壁面上における圧力分布計測、および人工欠陥を埋め込んだコンクリート試験片を用いての欠陥の検出を試みた。

**4.1 圧力測定システム及び実験結果** 図 6 に、圧力計測システムを示す。検査壁面上での圧力分布は衝撃波管の開放端から前方に距離  $L = 500$  mm だけ離れた位置に、圧力センサーを埋め込んだ鉄板を設置して計測を行った。PS1 は衝撃波管の中心軸上に位置する鉄板上の点の圧力で、PS2, PS3, PS4 は、それぞれ中心軸から 50 mm, 100 mm, 150 mm 離れた点における圧力を示している。また、サンプリング速度は 100k/s とした。

図 7 に、圧力計測の結果を示す。0ms 直前の急激な圧力変動が衝撃波による圧力変動である。また、PS1 および PS2 において、衝撃波による圧力上昇の後、再び圧力上昇が確認できる。これは、爆発によって膨張した燃焼ガスによるものである。

図 8 に、衝撃波による圧力変動の拡大図を示す。こ

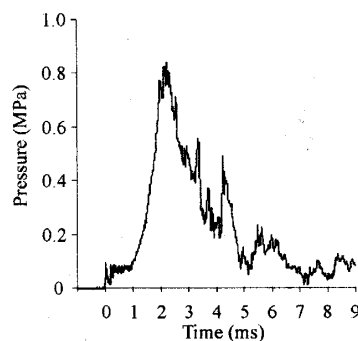


Fig. 9 Pressure on specimen surface by old device

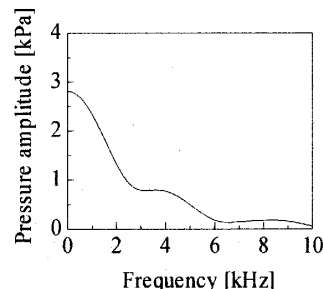


Fig. 10 Amplitude spectrum of pressure due to shock wave

の急激な圧力変動がどの測定箇所においても観測されることから、 $L = 500 \text{ mm}$  の場合、衝撃波による加振が少なくとも半径  $150 \text{ mm}$  の範囲内で有効であることが分かる。また、衝撃波による圧力上昇の形状は三角波で、その大きさは約  $4 \text{ kPa}$ 、間隔は  $0.4 \text{ ms}$  である。

ガス燃焼式との比較のために、一例として図 9 に図 3 (a) に示している破膜式衝撃波管による鉄板上の圧力分布を示す<sup>(5)</sup>。なお、計測条件等は図 7 と同様であり、PSI のみの結果を示す。図 7 と同様に、 $0 \text{ ms}$  直前の衝撃波による圧力変動が確認できる。また、図 7 中の PSI と同様に衝撃波到着後の圧力上昇が確認できる。これは、衝撃波管の高圧室内で圧縮されていた空気が、大気中に放出されたことによる圧力上昇である。

図 7 の PSI と比較すると、衝撃波の圧力の最大値が約 200 倍である。また、衝撃波の圧力に対して、衝撃波到着後の圧力上昇の大きさが、図 7 では、ほぼ同じだったのに対して、図 9 では約 8 倍となっている。また、圧力変動の持続時間も長い。計測に用いるレーザーが、この粗密波である圧力波を通過するためレーザーの速度が変化し計測する振動数が変化する

る<sup>(6)</sup>。このことから、圧力変動がレーザー計測に与える影響はガス燃焼式衝撃波管の方が小さいと言える。また、衝撃波発生時の爆発音も破膜式衝撃波管の方がはるかに大きいため、騒音対策の面からガス燃焼式衝撃波管の方が、実用性が高いと考えられる。

図 10 に、PSI における衝撃波に含まれる周波数成分を示す。含まれる周波数は約  $4 \text{ kHz}$  までであることがわかる。したがって、縦波振動を計測対象とした非破壊検査は困難であり、たわみ振動の固有振動数が  $4 \text{ kHz}$  以下の欠陥が検査対象となる。

**4.2 欠陥検出システム** 図 11 に表面振動計測システムを示す。表面振動計測システムは、レーザードップラー振動計、A/D 変換ボード、コンピュータにより構成されている。圧力波によって加振されたコンクリート壁面の表面振動は、レーザードップラー振動計によって計測され、A/D 変換ボードを介してコンピュータに取り込まれる。サンプリング速度は  $100 \text{ ks/s}$  とした。

図 12 に、コンクリート試験片を示す。試験片は一边が  $500 \text{ mm}$  の立方体で、内部に直径  $200 \text{ mm}$ 、厚さ  $10 \text{ mm}$  の円板状の発泡スチロールを埋め込んでいる。試験片の表面から欠陥まで深さ  $d$  は、それぞれ  $25 \text{ mm}$ 、 $50 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm}$  とした。図 13 は、コンクリート試験片上の計測点を示している。図中の  $r$  は円板の中心軸からの距離であり、 $r = 100 \text{ mm}$  は円板の円周上の点である。

**4.3 実験結果および考察** ハンマーを用いて加振した場合のたわみ振動の固有振動数  $f$  を表 1 に示す。

Table 1 Size of defects and natural frequencies

Diameter $2a [\text{mm}]$	Depth $d [\text{mm}]$	Natural frequency $f_f [\text{Hz}]$
200	25	2696
200	50	3038
200	100	3068

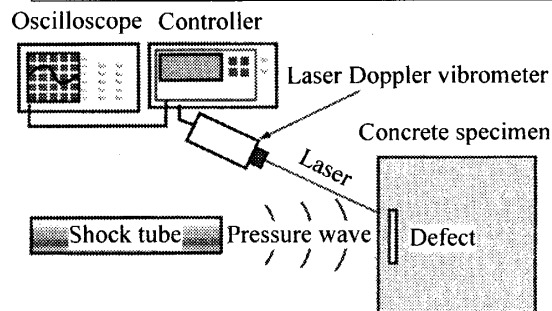


Fig. 11 Schematic diagram of experimental device

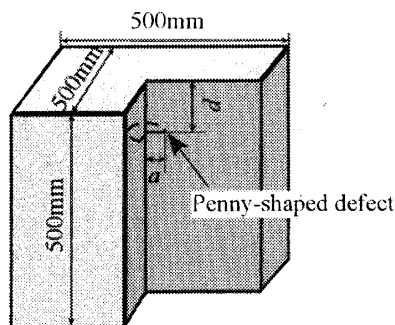


Fig. 12 Concrete specimen

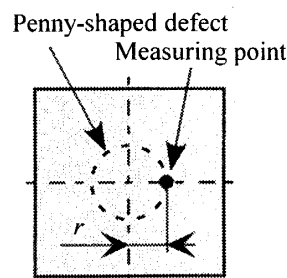


Fig. 13 Measuring point on concrete surface

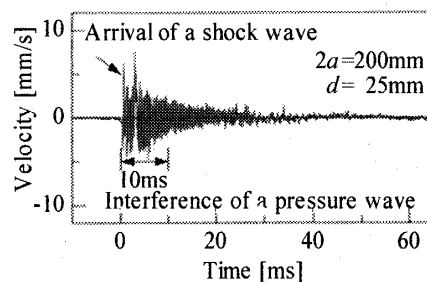


Fig. 14 Vibration of wall surface by pressure wave

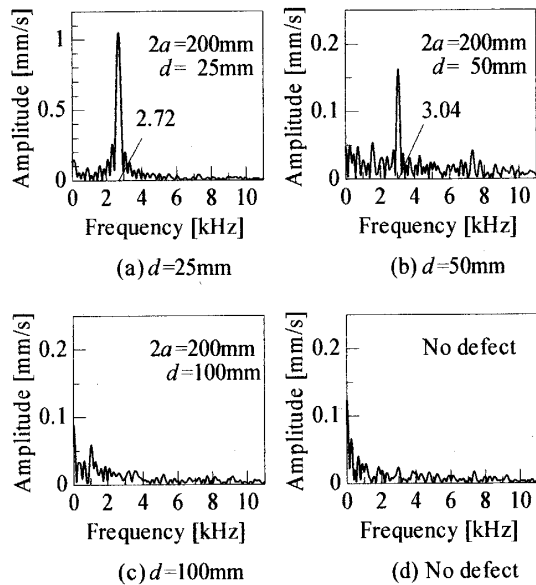


Fig.15 Amplitude spectrum of vibrations for  $d = 25, 50, 100$  mm and no defect at  $r = 0$  mm

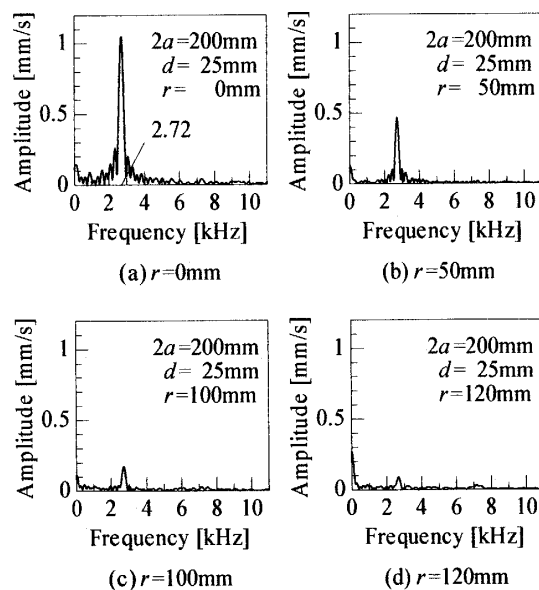


Fig.16 Amplitude spectrum of vibrations for  $d = 25$  mm at  $r = 0, 50, 100, 120$  mm

図 14 に、 $d = 25$  mm におけるレーザードップラー振動計によって計測された  $r = 0$  mm における垂直方向速度を示す。振動の開始から約 10 ms 間ランダムな振動が確認できる。これは、図 7 において観測されたように衝撃波到着後のランダムな圧力変動の影響によるものと考えられる。この圧力波の干渉を防ぐため、表面振動の周波数解析の結果には、振動の開始から約 10 ms 経過した後のデータを用いた。また、約 10 ms 後のデータを用いることにより、たわみ振動の抽出がより確実となる。

図 15 に、異なる欠陥深さに対する、 $r = 0$  mm における垂直方向速度を FFT 解析した振幅スペクトルを示す。 $d = 25$  mm のとき、約 2.72 kHz においてピークを確認できる。また、 $d = 50$  mm のとき、約 3.04 kHz においてピークが確認できる。これらのピークの周波数は、表 1 に示している固有振動数とほぼ一致している。一方、 $d = 100$  mm のときは、明確なピークは確認できない。これは、衝撃波の強度が欠陥上部のコンクリート部分を加振させるのに十分でなかったためと考えられる。なお、欠陥がない場合には明確なピークは確認できない。このことから、 $d = 50$  mm までの欠陥が検出可能である。

図 16 に、 $d = 25$  mm での  $r = 0, 50, 100, 120$  mm における垂直方向速度を FFT 解析した振幅スペクトルを示す。すべての  $r$  において振幅スペクトル、表 1 と一致する周波数においてピークが現れているが、その振幅は欠陥の中心軸上から離れるに従い、小さくなっている。特に、 $r = 120$  mm では、わずかに確認できる程度である。すなわち、欠陥の円周上である  $r = 100$  mm よりも外側ではほとんど振動しないのである。このことから、測定点の間隔を細かくすることによって、多様な形状の欠陥に対する寸法および形状の推定が可能であると考えられる。

**4.4 加振可能範囲拡大の可能性** 今回開発した加振装置の加振可能な範囲は、衝撃波管と壁面までの距離  $L$  を大きくすると、加振可能な範囲は拡大が可能である。その際、衝撃波の衝撃力（圧力波の力積）は、距離の二乗に比例して減衰する。

例えば、距離  $L$  を 2 倍としたとき、加振可能な範囲の半径も 2 倍となるが、衝撃力は約 1/4 倍となる。直径 200 mm、深さ 50 mm の欠陥を対象に考えると、図 15 (b) においてノイズ成分がたわみ振動の振幅の 1/4 倍程度の振幅で含まれている。壁面振動の振幅は衝撃力に比例するので、識別可能な衝撃力を約半分とすると  $L$  は約 1.4 倍まで延長できるため、加振可能な範囲の半径も約 1.4 倍となる。なお、加振可能な範囲は、今回使用したプロパンと空気の混合気体よりも爆発力が大きい気体を用いることによって更なる拡大が可能となる。

## 5. 結 言

プロパンガスと空気の混合気の燃焼を利用した衝撃波管を開発し、圧力波の計測と、欠陥の検出を行った。その結果以下の結論を得た。

- (1) ガス燃焼式衝撃波管を開発したことによって連続的に検査を行うことが可能となった。

- (2) 衝撃波管の開放端から前方に距離  $L = 500$  mm の位置において、振幅 4 kPa、間隔 0.4 ms の三角波状の圧力を得ることができた。
- (3) 衝撃波管と検査壁面の距離を 500 mm とした場合、この衝撃波管を用いると、直径 200mm、深さ 50mm までの円盤状欠陥を検出することが可能であった。
- (4) 表面振動において、欠陥の外側ではほとんど振動していないことから、測定点の密度を上げると欠陥と欠陥でない部分との境目が明らかになり、多様な形状の欠陥に対する寸法および形状の推定が可能であると考えられる。

#### 参考文献

- (1) 小林一輔, コンクリートが危ない, (1999), 1, 岩波新書.
- (2) 柳内 睦人, 魚本 健人, 土木学会論文集, 442-16, (1992), 91-100.
- (3) O. R. Gericke, Journal Acoustic Society America, 35, (1963), 364-368.
- (4) K. Mori, A. Spagnoli, I. Torigoe, I. Murakami, and S. Itoh, Impact Engineering and Application, 2, (2001), 607-612, Elsevier Science Ltd.
- (5) K. Mori, A. Spagnoli, Y. Murakami, G. Kondo, and I. Torigoe, NDT & E, 35, (2002), 399-406, Elsevier Science Ltd.
- (6) 森和也, Spagnoli. A, 近藤悟郎, 村上敬宜, 鳥越一平, 機論, 70-695, A(2004), 986-994