

## 衝撃弾性波法によるコンクリート内部空洞の探査

東海大学土木工学科 学生員 鈴木 克利  
 東海大学土木工学科 正会員 極檀 邦夫  
 伊藤建設株式会社 正会員 岩野 聡史

### 1. まえがき

コンクリート構造物の内部空洞を探査する方法の基礎研究について報告する。実際の鉄筋コンクリート構造物では、ジャンカや鉄筋のかぶり厚が剥離した場合に生じる空洞を想定している。

発泡スチロールをかぶり厚さ 5cm, 10cm, 15cm の位置に埋設して疑似空洞とした。鋼球でコンクリート表面を叩き、数 cm 離れた点に加速度計を設置し弾性波を測定した。弾性波は音響境界面で反射を繰り返すので多重反射振動となるが、この周波数解析に最大エントロピー法を採用した。ところが、空洞がない部分は実寸の厚さが測定されるが、空洞部分のかぶり厚さが測定できない。つまり、コンクリートの厚さが数 cm の場合は多重反射振動からかぶり厚さを測定できない。

しかし、超音波法では数 cm のかぶり厚さが測定できることは報告されている。そこで、縦弾性波が光線の屈折と同様に物質の屈折率に従って入射反射すると仮定してスネルの法則を適用し、かぶり厚さを測定したところ良好な結果が得られた。

### 2. 供試体と測定方法

疑似空洞は、立方体のコンクリート (900 × 1800 × 372mm) に長手方向中心線を 4 等分して、発泡スチロール (160 × 160 × 20mm) をかぶり厚さ 50, 100, 150mm で埋設した。測点は、中心線を 5cm 間隔に目盛り 37 点である。表面での弾性波速度は、加速度計 (PCB352C66) を 30cm 間隔で 2 点設置し、弾性波が通過する時間差から測定すると共に、測点ごとにコンクリートを加速度計で挟み、透過法でもおこなった。弾性波は、コンクリート表面を鋼球 16mm で叩き、約 5cm 離れた点に加速度計を手で押しつけて測定した。測定器は、2ch 仕様 (2ch, サンプリングクロック: 1μs、サンプリング数 8,000/ch) を使用した。かぶり厚さ 5cm での反射波は、加速度計を固定し鋼球を 1cm 刻みに変えて測定した。

### 3. 測定結果および解析

周波数解析の結果および全測定点を透過法により測定した弾性波速度の結果を図-1 に示す。

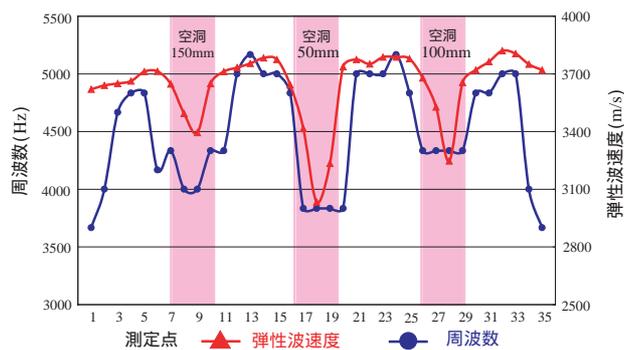


図-1 弾性波速度と周波数分布

周波数は空洞部分に対応して低下し、かぶり厚さ 5cm では 23%、かぶり厚さ 10cm では 14% 低くなった。弾性波速度においても空洞部分に対応して速度が低下し、かぶり厚さ 5cm では 20%、かぶり厚さ 10cm では 15% 低くなった。多重反射振動から厚さを計算する式は  $D = \frac{V_p}{2f}$  であるので、分子分母が同じように減少すると正確な厚さが得られない可能性があると推定される。

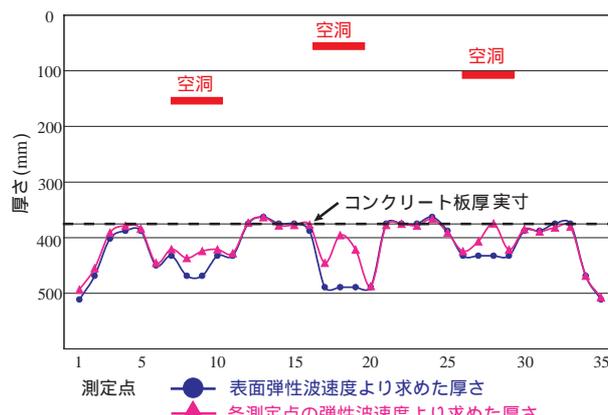


図-2 弾性波速度と周波数分布

図-2 は、表面弾性波速度および透過法によって測定した弾性波速度  $V_p$  と、MEM 解析によって求めた周波数  $f$  から厚さ  $D$  を  $D = V_p / 2f$  より計算して求めた各測定点の厚さを図化したものである。健全部では、コンクリート板厚とほぼ一致しているが、空洞部分では実寸よりも厚い結果になった。

図-3にかぶり厚さ 50mm の速度波形とスペクトログラムを、図-4に空洞のない部分の厚さ 372mm の速度波形とスペクトログラムを示す。

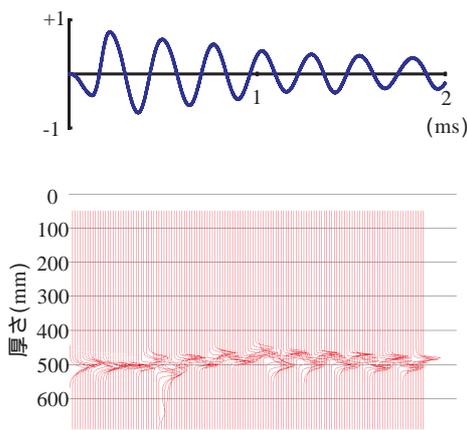


図-3 かぶり厚さ 50mm の速度波形とスペクトログラム

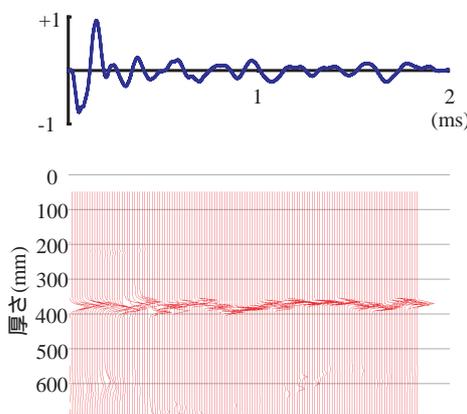


図-4 厚さ 372mm の速度波形とスペクトログラム

健全部の速度波形は打撃直後に急激に減衰して、振幅が 1/100 になる時間は 2.1ms である。打撃によって鋼球がコンクリート表面に接触している時間は 132  $\mu$ s である。また、MEM スペクトログラムからは、372mm 付近にスペクトルがほぼ一直線集中している。それに対し、かぶり厚さ 50mm の空洞部分では健全部に比べ周期が長い。また、速度波形は正弦波に近いきれいな波形となり、減衰は緩やかで振幅が 1/100 になる時間は 5.4ms、鋼球接触時間は 224  $\mu$ s である。スペクトログラムをみると、500mm 付近にスペクトルがうねるように存在する。

これらのことからかぶり厚さ 50mm の空洞部分では薄い板のたわみ振動が発生していることは確かであるが、多重反射の計算式により計算すると空洞のない部分の板厚に比べても厚くなるので、空洞部分のかぶり厚さを求めることができない。

そこで、弾性波が光線の屈折率と同様に物質の屈折率にしたがって入射反射すると仮定しスネルの法則を

適用してみることにした。

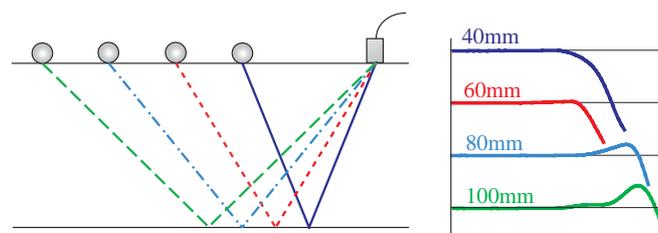


図-5 弾性波の屈折

図-5 の左側に示すように鋼球打撃によって生じた弾性波がコンクリートを伝搬し、空洞部分の底面を境界面として屈折すると仮定した。屈折角  $\theta_R$  は、式(1)で計算されるがコンクリートの屈折率が不明のため、石膏と等しい  $n_2 = 1.52$  と仮定すると  $\theta_R = 41^\circ$  となる。

$$\sin \theta_R = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{空気屈折率}}{\text{コンクリート屈折率}} \quad (1)$$

かぶり厚さ 50mm での反射波の初期部分に注目すると、受信間隔が 80mm より手前では波形は下向きであるが、それ以後は上向きの波形となった。このときの屈折角は  $\tan \theta = \frac{80/2}{50} \Rightarrow \theta = 39^\circ$  であるから  $\theta_R = 41^\circ$  とほぼ一致している。

80mm の半分 40mm と厚さ 50mm が直角に交わる三角形を考えると  $\theta_R = 41^\circ$  と仮定した場合のかぶり厚さの計算値  $d$  は  $d = 40 \tan(90^\circ - 41^\circ) = 46\text{mm}$  となり、実際の厚さ 50mm と近い値を示した。

#### 4. まとめ

発泡スチロールをかぶり厚さ 5cm, 10cm, 15cm の位置に埋設して疑似空洞とみなすコンクリート試験体を製作した。鋼球でコンクリートを叩き、加速度計で弾性波を測定して、最大エントロピ - 法と屈折法により解析した結果、次のことがわかった。

1. 内部空洞の影響により、多重反射の周波数は、かぶり厚さ 5cm では 23% , 10cm では 14% 低下した。また、P 波速度は、かぶり厚さ 5cm では 20% , 10cm では 15% 低下した。

2. P 波速度と多重反射振動から得た周波数を用いて厚さを計算すると、内部空洞の部分では実寸よりも厚い結果になった。すなわち、かぶり厚さが薄い場合は、たわみ振動が発生するので多重反射振動の計算式では正確な厚さは求められない。

3. 弾性波が光線の屈折と同様に物質の屈折率により屈折角が決定すると考えて、つまり、コンクリートと石膏との屈折率は等しいと仮定してスネルの法則を適用すると、かぶり厚さ 50mm に対して計算値は 46mm となった。