

[3] 初期ひびわれを有するコンクリート部材の超音波フィルター特性

正会員 ○坂 田 康 徳（九州東海大学工学部）

正会員 大 津 政 康（熊本大学工学部）

1. はじめに

コンクリートに関する非破壊検査法として、従来より各種の方法が検討され、かつ、実施されている。中でも超音波法は部材中を伝播する音速を利用した比較的新しい方法として他方面に利用されており、主に、金属加工を中心とする材料科学の分野で、材料中を伝播する超音波の種々の特性を利用した方法が実施検討されている。

筆者等は、以前より、A E 法で用いる装置を主体とする超音波計測システムを用いて、コンクリート部材内部を通過する超音波の周波数領域におけるフィルター特性から、部材内部の諸状況を把握する方法について種々検討してきた。¹⁾ ここでは本方法を、1). 構造物に生じたヒビ割れやその補修の評価に関する現場測定、2). 蒸気養生コンクリート二次製品に生じる微小クラックと耐凍害性に関する凍結融解試験における劣化度評価、3). 疑似クラックや乾燥ヒビ割れを有する供試体のヒビ割れ評価に関する室内実験等に適用し、若干の実験的検討を試みたので報告する。

2. 超音波フィルター特性と計測法

コンクリートのフィルター特性を測定する方法は図-1に示されている。本計測機器は従来の超音波法における装置を用いず、発信部を除けば、全く A E 計測システムと同じであり、必要に応じて A E 計測も可能である。従来の超音波法におけるような装置を用いなかった理由は、基本的には、周波数特性がわかっている装置により、さらに広い周波数領域を対象とした計測を行うためである。

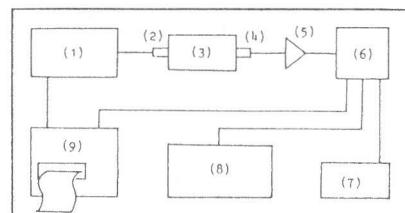
この計測システムを理論的に解説すれば次のようになる。すなわち、波動の伝播する系（これをシステムと呼ぶ）の入力波 $f(t)$ に対するシステム通過後の出力波を $\varphi(t)$ とすれば、図-2に示すように、 $f(t)$ はシステムの変換機能によって $\varphi(t)$ に変えられて取り出される。この変換機能をフィルター特性と呼び、線形システム論に従って時間領域で表せば次のようにになる。

$$\varphi(t) = f(t) * w_{t1}(t) * \Delta(t) * w_{t2}(t) * w_n(t) \quad (1)$$

ただし、*は合成積を表し、また $w_{t1}(t)$ 、 $\Delta(t)$ 、 $w_{t2}(t)$ 、 $w_n(t)$ はそれぞれ発信センサー、供試体、受信センサーおよび増幅器や検波器等のシステム函数を表わす。また $\varphi(t)$ 、 $f(t)$ 、 $w_{t1}(t)$ 、 $\Delta(t)$ 、 $w_{t2}(t)$ 、 $w_n(t)$ をフーリエ変換したものを $G(f)$ 、 $F(f)$ 、 $W_{t1}(f)$ 、 $S(f)$ 、 $W_{t2}(f)$ 、 $W_n(f)$ とすれば、上式の周波数領域での式は

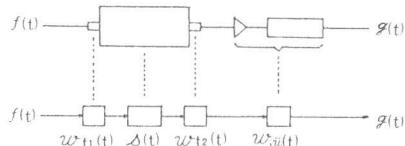
$$G(f) = F(f) * W_{t1}(f) * S(f) * W_{t2}(f) * W_n(f) \quad (2)$$

となる。ここで $S(f)$ は周波数領域でのシステム特性、すなわち、フィルター特性を表わす。



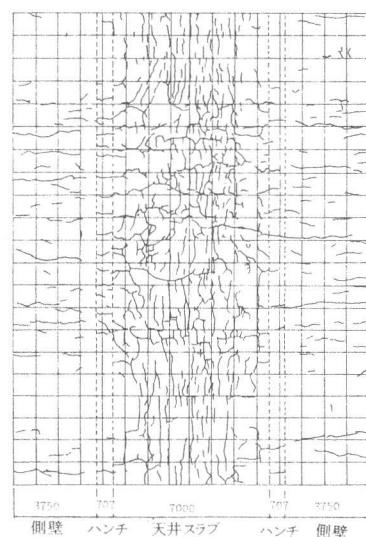
(図-1) 計測システム図

(1)信号発生機 (2)発信センサー (3)供試体
(4)受信センサー (5)プリアンプ (6)デジタルミキシター
(7)デジタルマルチメーター (8)オシロスコープ
(9)ラピコーダー



(図-2) 波動の伝播経路

$f(t)$: 発生信号 $w_{t1}(t)$, $w_{t2}(t)$: ランクルミネーターの伝達函数 $\Delta(t)$: 供試体の伝達函数 $w_n(t)$: 増幅器・検波器等の伝達函数 $\varphi(t)$: 検出波



(図-3) 構造物に生じた補修対象のクラック分布図

本研究はコンクリート部材の諸状況（ヒビ割れ、空げき、異物混入、強度増進、劣化程度等）を直接的に $S(f)$ を通して把握することを目的とするもので、ここでは主にヒビ割れを対象としている。

3. 補修構造物および工場二次製品（U型側溝）の被害の概況

補修が行われた構造物は、昭和46年に建設されたK空港の主要滑走路直下を横断している大型カルバートによる地下道であるが、建設後まもなく、多数のクラックが発生し、構造物としての耐久性が心配され、昭和57年～58年を通じてクラック補修工事が行われた。図-3は補修前に本構造物に発生していた補修対象のクラック分布図の一例であるが、側壁部に比べて天井スラブに多く発生していることが判る。また、ヒビ割れの方向も部分的に異なる傾向が見られる。このヒビ割れ発生の原因については種々考えられるが、本報では特に言及しないものとする。

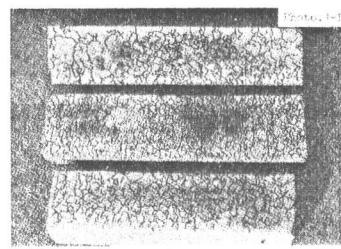
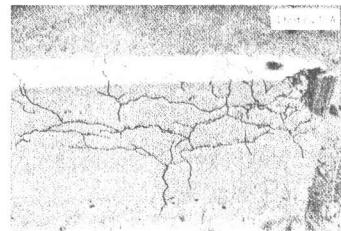
一方、写真1-Aは冬期において比較的寒冷な気候に晒される山間部に布設された農業用排水路としての蒸気養生コンクリート二次製品U型側溝が凍害を受けて発生したと考えられるヒビ割れ分布の状況であり、また、写真1-Bは被害が出たU型側溝の製造工場において、それと同時期に製作されたと考えられる製品より切り出した凍結融解試験用供試体に発生している網状ヘアクラックを肉眼で詳細に拾い出した時のクラック分布状況である。

4. 現場測定および室内実験の概要

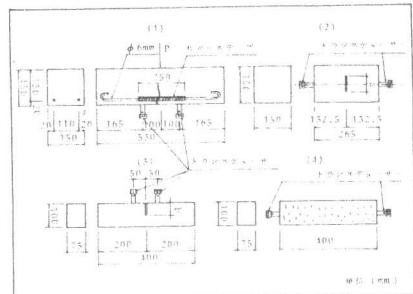
補修構造物の現場測定は壁面上に発生している代表的なクラックに対して図-5に示すように、ワイヤーストレングージ5本を接着し、車両交通振動によるヒビ割れ開閉度を補修工事の前後で動ヒズミ計を用いて測定した。また、本超音波法を用いて補修の施されているヒビ割れ、施されていないヒビ割れ、および、ヒビ割れのない部分についてそれぞれ3～4ヶ所ずつを選定し、発・受信センサー間隔10cm（ヒビ割れがある場合はヒビ割れを中心とする）でフィルター特性を測定した。

U型側溝については同様な被害を受けている数社の製品について、同時期に作られた同種の製品より切り出した供試体（約10×5×40cm）を用いて凍結融解試験を実施した（表-1のシリーズ5）。

また、超音波法によるクラック評価に関する実験として、図-4に示す4種類の簡単な実験を試みた。すなわち、シリーズ1は中央部にビニールテープを巻き付けた直径6mmの普通丸鋼2本を埋め込んだ



（写真1-1）凍害を受けたU型側溝および切り出された凍結融解試験用供試体上のクラック分布状況



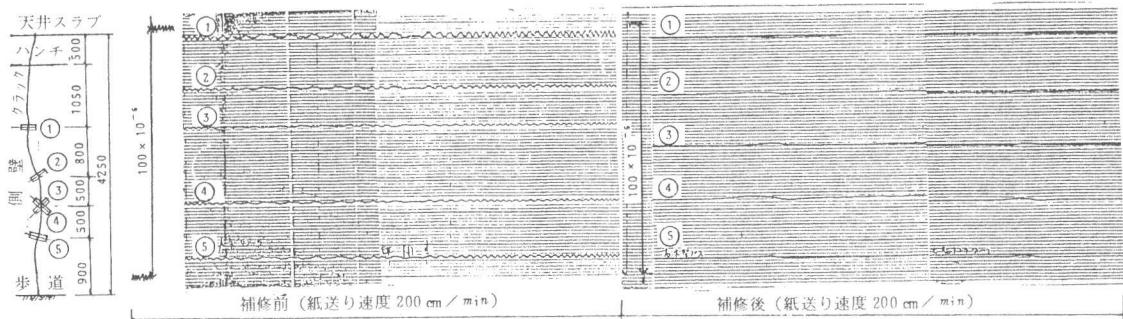
（図-4）供試体寸法および試験方法

（表-1）コンクリートの配合条件および圧縮強度

| Series | ϕ_{max} (mm) | Slump (cm) | W/C (%) | \bar{f}_c (kg/m ³) | σ_c (kg/cm ²) |
|--------|----------------------|---------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 20 | 5 | 50 | 165 | 366 |
| 2 | " | 8 | 50 | 174 | 371 |
| 3 | " | " | 47 | 167 | - |
| 4 | " | " | " | 167 | - |
| 5 | A | " | " | " | *353 |
| | B | " | " | " | *449 |
| | C | " | " | " | *287 |
| | D | " | " | " | - |

注) ϕ_{max} は粗骨材最大寸法、

* 印はコアー強度に基づく換算強度



（図-5）車両交通振動による補修工事前後のクラック開閉度比較

角柱供試体 ($15 \times 15 \times 53\text{cm}$) に曲げヒビ割れを入れる場合のヒビ割れ導入前後およびヒビ割れ補修後のフィルター特性をセンサー間隔 20 cm で測定した。シリーズ 2 は角柱供試体 ($15 \times 15 \times 26.5\text{cm}$) の中央部に幅約 0.1 mm で長さ 3 cm 、 6 cm 、 9 cm の疑似内部クラックを作り、供試体軸線に沿うフィルター特性を測定した。シリーズ 3 および 4 は K 社工場で作られた蒸気養生コンクリート角柱供試体 ($10 \times 7.5 \times 40\text{cm}$) を用いて行ったが、3 は角柱供試体中央部にカッターを用いて幅約 1.2 mm で、深さ b が $0 \sim 7.5\text{ mm}$ まで 2.5 mm 毎に変化する疑似開口クラックを設け、このクラックより両側 5 cm の位置にそれぞれ発・受信センサーを設置してフィルター特性を測定した。シリーズ 4 は乾燥器で供試体を急速乾燥 (約 70°C) させた場合に発生すると予想される網状ヘアクラックの増加に伴うフィルター特性の変化を供試体軸方向にセンサーを設置して調べた。供試体はいずれも 3 本 1 組であり、また、フィルター特性は増幅率を一定とし、周波数領域 $1 \sim 500\text{ kHz}$ 間で適宜測定した。使用した補修用樹脂は補修工事現場で用いられたものと同じエボキシ系樹脂である。また、以上の試験に用いたコンクリートの配合条件および強度は表-1 に示す。

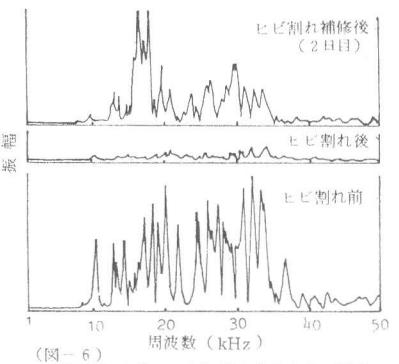
5. 結果および考察

図-5 は K 空港地下道の交通振動によるクラック開閉度を補修工事前後の同一地点で測定し、比較した結果である。同程度の較正値 (100×10^{-6}) に対して、その波形は補修の前後で明らかに差がある事が判る。すなわち、補修前では重交通（大型バス又はトラック等）通過時における波形の変化、ゲージ位置および方向による振幅の差が明確であるのに比べて、補修後ではそれらのものがほとんど区別できない程小さくなっている。これはそのクラックへの樹脂注入による補修効果が現われているものと考えられる。しかし、その程度や耐久性については別に検討されるべきであろう。

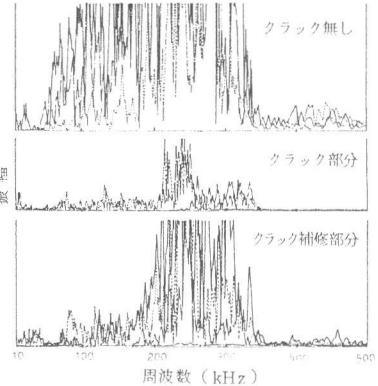
図-6 は実験シリーズ 1 における角柱供試体中央部に曲げヒビ割れを発生させる前後および補修後における周波数領域 $1 \sim 50\text{ kHz}$ 間のフィルター特性の一例を示している。ヒビ割れ発生後は前に比べて波形振幅が著しく小さくなっていることが判る。これはヒビ割れ発生によって超音波エネルギー伝達路が著しく縮小されるか、又は断たれるため鉄筋等を伝わって、ごく少量のエネルギーしか伝えられないためと考えられる。図より樹脂注入後は再び回復していることが判る。

図-7 は K 空港の補修構造物において補修の施されたヒビ割れ、施されていないヒビ割れおよびヒビ割れのない部分について 3 ～ 4 点ずつを選点し、発・受信センサー間隔 10 cm (ヒビ割れのある場合はヒビ割れを中央に両側に各 5 cm の位置) として測定した時の、周波数領域 $10 \sim 500\text{ kHz}$ 間のフィルター特性を示したものである。図-6 と同様に、ヒビ割れの無い部分に比べて有る場合は振幅が著しく小さくなっており、また、補修された部分は振幅が相当回復されていることが判る。

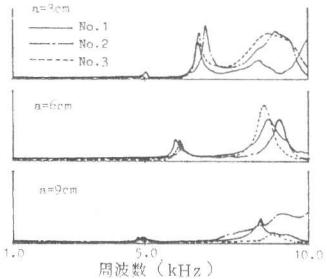
図-8 はシリーズ 2 において得られた角柱供試体の疑似内部クラック長さ a の変化に基づく周波数領域 $1 \sim 10\text{ kHz}$ 間のフィルター特性である。 a が 3 cm



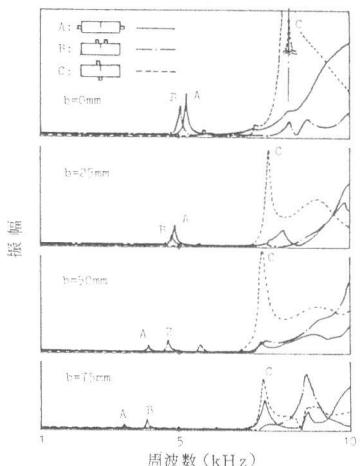
(図-6) 供試体によるヒビ割れ発生前および補修後のフィルター特性 ($1 \sim 50\text{ kHz}$)



(図-7) 補修構造物におけるヒビ割れのある部分、無い部分、補修された部分のフィルター特性 ($10 \sim 500\text{ kHz}$)



(図-8) 疑似内部クラック幅 a の変化に伴うフィルター特性 ($1 \sim 10\text{ kHz}$)



(図-9) 疑似開口クラック深さ b とセンサー位置の相違に伴うフィルター特性 ($1 \sim 10\text{ kHz}$)

から9cmまで3cm毎に変化する間に部材の共振点を示す初期ピーク周波数が次第に小さくなり、また、ピーク振幅も小さくなっていることが判る。これはaの増加に従って超音波伝達経路が次第に長くなるためと考えられる。なお、この初期ピーク周波数 F_1 は縦振動モードでは共振法による一次共振周波数とほとんど一致することが判っている。²⁾

図-9はシリーズ3における疑似開口クラック深さbの変化に基づく周波数領域1~10kHz間のフィルター特性の一例を示している。クラックに対する3種類の発・受信センサー取り付け位置の相違およびbの変化に基づくピーク出現状況の変化が判る。それぞれのセンサー取り付け位置に対して代表的なピーク周波数Fを選んでb=0の時の値 F_0 に対する比 F/F_0 とbとの関係をプロットすると図-10のようになる。これより、bの変化に対して、センサー取り付け位置の相違により、変化の大きいFと小さいFがあることが判る。この場合、部材軸方向にセンサーを配置した時のF(A点)がbの変化に対して最も敏感であることが判る。この共振モードの評価については解析により目下検討中である。

図-11はシリーズ4における角柱供試体をオープン乾燥して行く過程におけるフィルター特性から得られた初期ピーク周波数 F_1 の変化を乾燥前の値 F_{10} との比 F_1/F_{10} と乾燥期間の関係で示したものである。第1日目において、かなり低下しているが、その後の低下率は乾燥期間の増加に対して漸次減小していることが判る。また、図-12はオープン乾燥期間の増加に伴う周波数領域1~100kHz間のフィルター特性を示すもので、これより、乾燥期間が長くなるに従って周波数応答の形態が著しく変ってきていることが判る。すなわち、乾燥前に比べて乾燥後は応答波形が著しく尖り、ピーク間隔も小さく、かつ、周波数領域約35~65kHz附近の本来応答波形振幅の小さい部分において、他と同様の応答を示している。これが乾燥によって供試体に生ずるヘーアクラックの増加に基づいているものとすれば、この現象を定量化することにより網状ヘーアクラックの進展状況を把握できるものと考えられる。

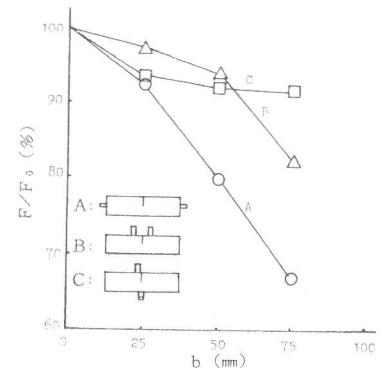
図-13は凍害を受けたと考えられる工場二次製品U型側溝と同時期に作られたものより切り出した供試体を用いて凍結融解試験を行った結果である。この場合の相対動弾性係数(F_{in}/F_{10})²は本法における初期ピーク周波数より求められている。いずれも水セメント比W/C=4.7%であるにもかかわらず、かなり早い劣化度を示している。これは写真-1に示すように、ヘーアクラックの多い事と部材厚さが小さい事も加味して凍害を受け易い状況になっているものと考えられる。

6. 結論

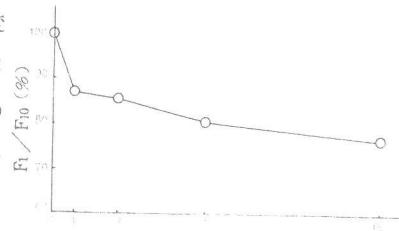
本法を用いて1)、補修の良否をある程度判断できる。2)、部材に生じるクラックの大きさや深さの評価が可能である。3)、前項の評価は縦振動共振モードによる F_1 を利用すると有利である。4)、部材に生じる網状ヘーアクラックの評価も又可能である。5)、凍結融解作用等による劣化度診断が可能である。

参考文献

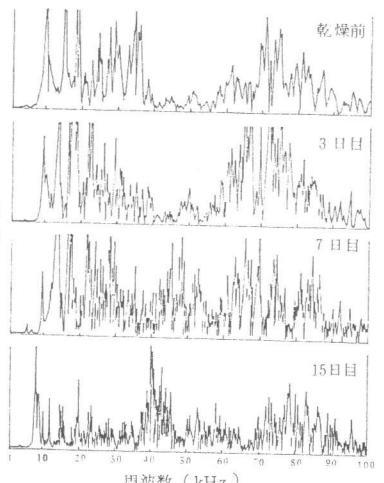
- 1) 坂田、大津「超音波フィルター特性によるコンクリート部材の劣化度判定法に関する研究」熊本大学工学部研究報告 第33巻第3号 S59.2
- 2) 坂田、大津「超音波によるコンクリート構造物の劣化度急速判定に関する基礎研究(第1報)」九州東海大学工学部紀要 第11号 1984



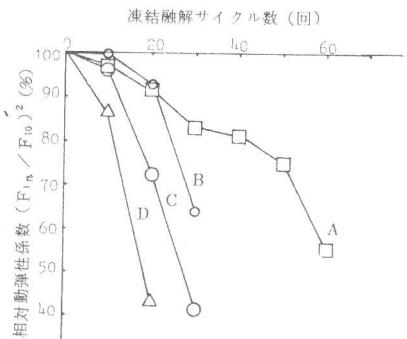
(図-9) 疑似開口クラック深さbの変化およびセンサー位置の相違に伴う F/F_0 の変化



(図-10) オープン乾燥期間と初期ピーク周波数比 F_1/F_{10} の変化



(図-11) オープン乾燥期間に伴うフィルター特性(1~100kHz)



(図-12) U型側溝より切り出した供試体による凍結融解試験結果