

# 論文 コンクリートひび割れ注入材の充填度評価における超音波伝播特性値の活用

山口 佳祐<sup>\*1</sup>・鎌田 敏郎<sup>\*2</sup>・内田 慎哉<sup>\*3</sup>・六郷 恵哲<sup>\*4</sup>

**要旨**：本論文は、超音波伝播特性値を活用して、コンクリートの表層ひび割れにおけるひび割れ注入材の充填度評価を行ったものである。実験では、コンクリート供試体において、表層ひび割れをスリットで模擬し、ひび割れ注入材を注入した。コンクリート供試体において超音波計測を実施し、受振波形を取得後、波形エネルギーを算出した。得られた超音波伝播特性値を活用して、注入材の硬化状況の評価および注入材硬化後における充填度評価を行った。その結果、超音波伝播特性値と、注入材の硬化状態や注入材の充填深さとは良好な相関があり、これらの関係を利用すれば、注入材充填度評価が可能となることが明らかとなった。

**キーワード**：ひび割れ注入，非破壊検査，超音波法，超音波伝播特性値，硬化程度，充填度

## 1. はじめに

コンクリート部材におけるひび割れ補修工法の一つに注入工法がある。この工法では、樹脂系あるいはセメント系の注入材をひび割れ部分に注入し、防水性や、その他の耐久性を向上させることが主な目的である。したがって、これらの性能を向上させるためには、注入工法の実施後、補修箇所に、ある期間振動や衝撃を与えないよう注意しなければならない<sup>1)</sup>。この期間は、注入材の種類によって、硬化時間の目安がおおよそ示されている。しかしながら、注入材の硬化程度は、注入施工時における周辺の環境状態によって大きく変化するため、注入材の硬化程度を適切に判定しなければならない。

注入工法適用後の確認方法として、注入材の充填状況を調べる非破壊検査方法は未だ確立されておらず<sup>1)</sup>、対象部位からコアを採取した上で、目視によって充填深さを確認する等の方法がとられているのが現状である。

このような背景に対して著者らは、貫通したひび割れを模擬したコンクリート供試体を用い

て、ひび割れ注入材の充填度を超音波により評価する手法の基礎研究を行っている<sup>2)</sup>。しかしながら、ひび割れ注入工法が対象とするひび割れは、その多くが表層ひび割れである。注入材未充填の状態では、貫通ひび割れの場合と表層ひび割れの場合とでは、コンクリート中における超音波の伝播状況は、大きく異なることが予想される。そのため、表層ひび割れにおける超音波法の適用性および有効性についても確認する必要があると考えられる。

そこで本研究では、表層ひび割れを対象として、以下に示す2つのケースについての検討を行った。すなわち、まず、表層ひび割れに注入材が充填された状態において超音波計測を実施し、超音波伝播特性値と注入材の硬化程度の関係性を評価した。続いて、注入材硬化後における注入材の充填程度と超音波伝播特性値との関係についても検討を行った。この実験では、供試体において、表層ひび割れ深さにバリエーションを設けるとともに、超音波の発受振に用いるセンサ間隔が、注入材の充填度評価に与える影

\*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

\*3 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 (正会員)

\*4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

表-1 実験ケース

評価の対象	ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ深さ (mm)	注入材の充填度 (%)	センサ間隔：a (mm)
注入材硬化程度	1	100	100	200
注入材充填度	1	50, 100	0, 50, 100	100, 200, 300

表-2 コンクリート配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (kg)
		W	C	S	G	
50	45.6	182	364	829	1012	1.09

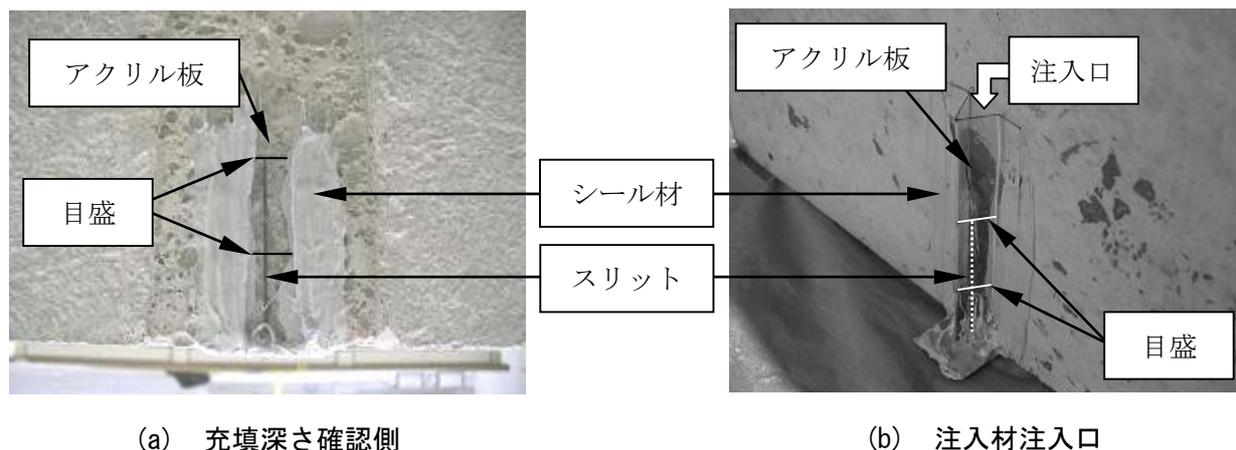


写真-1 注入材充填度確認側および注入材注入口

響についての考察も加えた。

## 2. 実験概要

実験は、表-1 に示すとおり、評価の対象に応じて 2 つのケースについて行った。すなわち、まず注入材の硬化程度を評価するための手法を検討した。続いて、注入材充填度を評価する手法に対して検討を行った。以下に、それぞれの実験概要を示す。

### 2.1 注入材硬化程度の評価

#### (1) 供試体

供試体は、図-1 に示すように、高さ 300×幅 200×長さ 500mm のコンクリート角柱とした。表層ひび割れを模擬するため、長さ方向中央部にスリットを設けた（以降、表層ひび割れ供試体と呼ぶ）。スリット幅は 1mm、深さは 100mm（表-1 参照）である。コンクリートの配合を表-2 に示す。

#### (2) 注入材および注入方法

注入材には、樹脂系注入材としてエポキシ樹脂

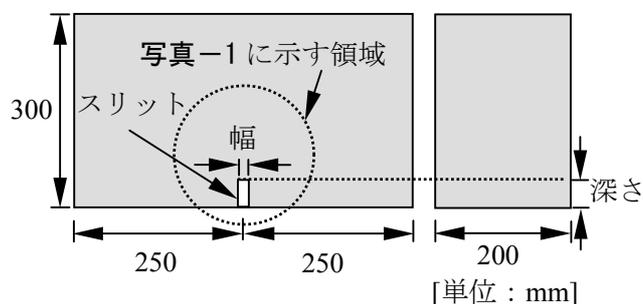
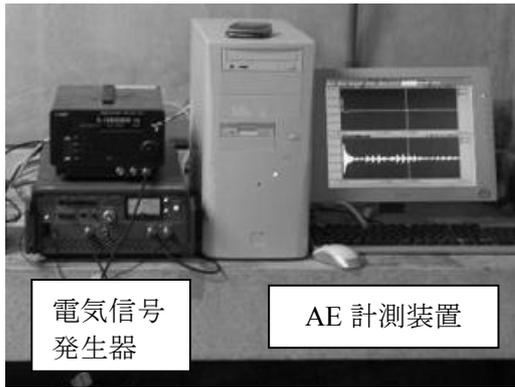
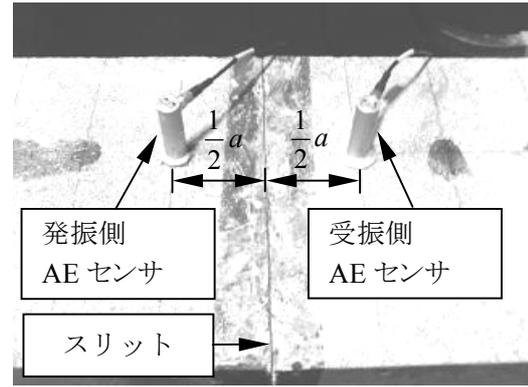


図-1 表層ひび割れ供試体

を使用した。注入材を注入するため、まず、供試体下面のひび割れ部をシール材によりシールした。供試体側面のうち 1 面は、注入材の充填度を確認するためのアクリル板を貼り付けた（写真-1 (a) 参照）。さらに、その反対の側面には、注入材の注入口を設置した（写真-1 (b) 参照）。この注入口から注入材を流し込むことにより、ひび割れに注入材を充填させた。なお、表-1 における注入材の充填度とは、ひび割れ部におけるひび割れ注入材が占める体積の割合として定義した。



(a) 電気信号発生器および AE 計測装置



(b) AE センサ設置状況

写真-2 超音波計測概要

### (3) 超音波計測

超音波計測は、写真-2 (a)に示す電気信号発生器より発生させたパルス波（印加電圧 240V，パルス幅 50nsec）を、写真-2 (b)に示す発振側のセンサから発振し、受振側のセンサで受振することで実施した。発振および受振センサには、0～約 500kHz の間に幅広く応答感度があり、140kHzに共振点を有する AE センサを使用した。AE センサで受振した波形は、プリアンプおよびメインアンプにてそれぞれ 40dB，合計 80dB の増幅をし、サンプリング周波数 2MHz でデジタル化した後、AE 計測装置で記録した。記録された受振波形からは、超音波伝播特性値として波形エネルギーを算出した。なお、本研究で用いた波形エネルギーは、受振波形における振幅値をそれぞれ二乗した後、それらを総和することにより算出した。

センサは、写真-2 (b)に示すように表層ひび割れ供試体においてひび割れからの距離が等しくなるように、供試体の幅方向中央の位置にセンサホルダーを用いて、それぞれ設置した。この実験でのセンサ間隔(表-1および写真-2 (b)における a) は、200mm とした。

実験では、表-1 に示す充填度（100%）になるまでひび割れ部に注入材を注入した後、直ちに超音波計測を行った。計測は 2 分毎に、48 時間経過するまで行った。

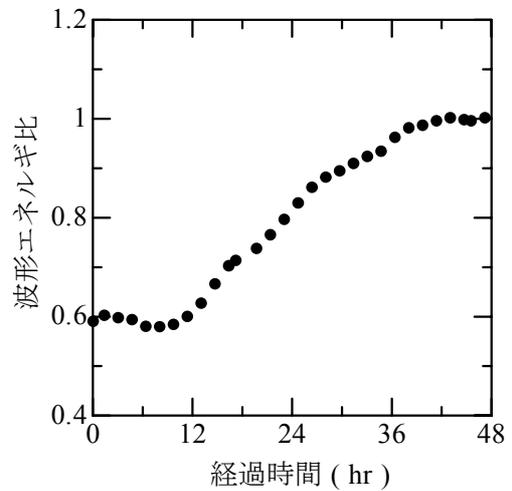


図-2 波形エネルギー比の経時変化

### 2.2 注入材充填度の評価

供試体は、注入材硬化程度の評価と同様に、図-1 に示す表層ひび割れ供試体を用いた。ただし、ここでは、表層ひび割れ深さの違いが注入材の充填度評価に与える影響について検討するため、ひび割れの深さを 50mm および 100mm (表-1 参照) とした。いずれの深さについても、ひび割れ幅は 1mm とした。また、ひび割れのない供試体（以降、健全供試体とする）も作製し、表層ひび割れ供試体との比較を行った。供試体におけるコンクリートの配合は、表-2 に示すとおりである。

注入材および注入方法は、2.1 の(2)と同じである。ただし、注入材の充填度は、表-1 に示すように 3 種類とした。実験では、各充填度ごとに

注入材が硬化したのを確認した上で、2.1の(3)で示した超音波計測(写真-2参照)を実施した。なお、ここでは、AEセンサ間隔の違いが注入材の充填度評価に与える影響についての検討するため、センサ間隔を100, 200および300mmとした。また、いずれの場合も、コンクリート表面にシリコングリスを塗布した後、AEセンサを設置した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 注入材硬化程度の評価

図-2に注入材注入直後からの波形エネルギー比の経時変化を示す。この図に示す波形エネルギー比とは、計測時間内で出現した波形エネルギーの最大値を1として、それに対する任意の経過時間で得られた波形エネルギーとの比率として定義したものである。この図によれば、波形エネルギー比は、経過時間が12時間程度まではほぼ一定であるものの、これ以降から36時間後の間においてほぼ単調に増加していることがわかる。これは、超音波が透過する断面内の媒質、つまりエポキシ樹脂の構造が徐々に変化したためと考えられる。一般的には、エポキシ樹脂の硬化過程は、液相からゲルを経て固相へと変化していく。これにより、樹脂の構造がより密実にも均一になり、接着強さが発現する<sup>3)</sup>。このような樹脂構造の変化により、超音波の透過する断面内における減衰が低減されるとともに、伝播効率も高くなり、波形エネルギー比が増加したと推測できる。なお、エポキシ樹脂の接着強さの発現と波形エネルギー比の関係は、著者らが過去に行った研究結果<sup>2)</sup>からも明らかである。

その後波形エネルギー比は、ほぼ頭打ちしている。これは、エポキシ樹脂の硬化が進行し、樹脂の物理的性質の変化が小さくなったことによるためと考察できる。

以上のことから、本手法で提案する波形エネルギー比は、注入材硬化程度を評価するのに十分な感度を有する指標であることも明らかとなった。これにより、表層ひび割れにおける注入材

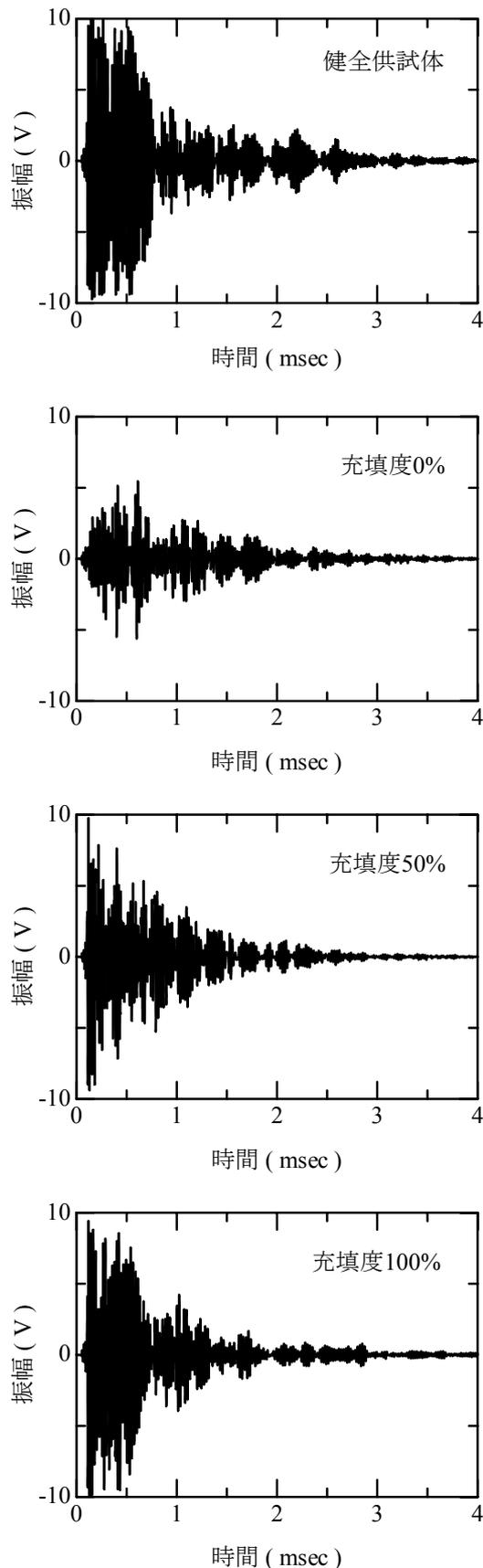


図-3 健全および表層ひび割れ供試体における超音波受振波形

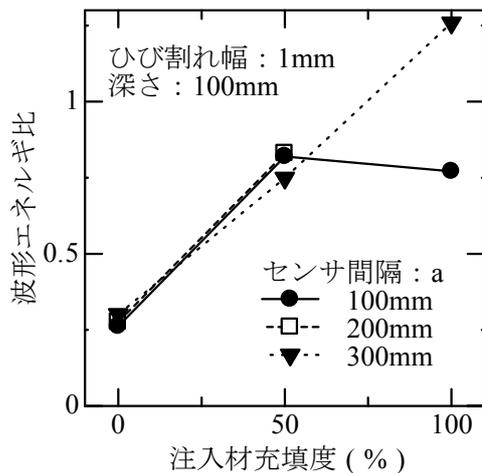


図-4 ひび割れ深さ 100mm における注入材充填度と波形エネルギー比の関係

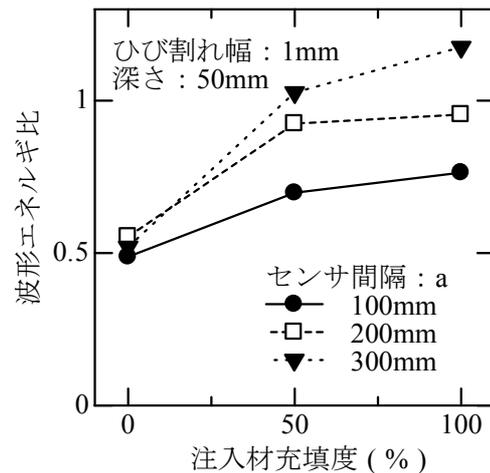


図-5 ひび割れ深さ 50mm における注入材充填度と波形エネルギー比の関係

の硬化程度は、波形エネルギー比の経時変化から評価できる可能性が示された。

### 3.2 注入材充填度の評価

#### (1) 超音波受振波形

図-3 に健全供試体およびひび割れ深さ 100mm の表層ひび割れ供試体でセンサ間隔 300mm とした場合に、得られた受振波形を注入材充填度ごとにそれぞれ示す。この図によれば、ひび割れ注入材の充填度が大きくなるほど、受振波形における振幅が大きくなっていることがわかる。充填度が 0% の場合は、表層ひび割れに注入材が充填されていないため、透過した波の主成分は回折波であると考えられる。そのため、受振波形の形状もその他のものと比較して明らかに異なっている。これに対して、充填度が 50% および 100% では、注入材が充填されることにより、注入材を介して超音波が透過する領域（以下、透過領域）の面積が大きくなることに起因して、波形形状が変化したと考察できる。しかも、充填度 100% の場合は、健全供試体における受振波形の形状に類似していることも明らかとなった。これより、受振波形の振幅や形状特性は、ひび割れ注入材の充填度と密接な関係があることが示された。そこで本研究では、超音波伝播特性を定量化するために前述の波形エネルギー比を活用し、この指標と充填度との関係を調べることにした。なお、図-3 に示すいずれの受振

波形においても、ひび割れ部の透過波以外にも、供試体側面・底面部からの反射波などの成分が含まれている。

#### (2) 波形エネルギー比

図-4 に、ひび割れ幅 1mm、深さ 100mm の供試体において、センサ間隔を変化させた場合の注入材充填度と波形エネルギー比の関係を示す。前述の通り、計測された受振波形には、様々な成分が含まれている。そのため、あくまでも注入材の充填前後での波形の変化に着目し、これによって充填程度を評価するため、波形エネルギー比を活用することとした。なお、本研究にて定義した波形エネルギー比とは、健全供試体で得られた波形エネルギーに対する表層ひび割れ供試体における波形エネルギーである。

これによれば、いずれのセンサ間隔の場合においても、充填度が大きいほど波形エネルギー比が大きくなっていることがわかる。これは、供試体断面内における超音波の透過領域が大きくなったためと考えられる。

また、センサ間隔に着目すると、いずれのセンサ間隔においても、充填度が 50% までは波形エネルギー比の増加傾向は、ほとんど同じである。しかしながら、センサ間隔が 100mm および 200mm の場合は、充填度が 50% から 100% においては、波形エネルギー比の変化がゆるやかである。これに対して、センサ間隔 300mm において

は、充填度の増加に対応した、波形エネルギー比の頭打ち現象は見られない。コンクリート表面から深さ方向へ発振された超音波は、コンクリート内部でほぼ球面状に伝播する<sup>4)</sup>。そのため、超音波の透過領域は、センサ間隔が小さいほど狭い範囲に限定されることになる。したがって、センサ間隔が 100 および 200mm の場合では、充填度 50% および 100% において、注入材を介して超音波が伝播する透過領域に顕著な差が見られなかったため、波形エネルギー比がほとんど変動しなかったものと考察できる。これに対して、センサ間隔が 300mm の場合は、ひび割れ注入材充填部分における超音波透過領域の占める割合は大きくなり、つまり、評価感度を有する領域が拡大され、波形エネルギー比が変化したと考えられる。

図-5 に、ひび割れ幅 1mm、深さ 50mm の供試体においてセンサ間隔を変化させた場合の波形エネルギー比の変化を充填度と併せて示す。

図によれば、いずれのセンサ間隔の場合においても、充填度が大きくなるほど波形エネルギー比が増加しており、ひび割れ深さが 100mm の場合と同様の傾向を示している。

さらに、センサ間隔に着目すると、センサ間隔が 300mm の場合は、ひび割れ深さ 100mm と同様に、その他のセンサ間隔の場合と比較して、充填度が大きくなるに従い波形エネルギー比の増分がより大きくなっていることもわかる。

ひび割れ深さの違いが充填度評価に与える影響を把握するため、センサ間隔 300mm におけるひび割れ深さ 100mm (図-4 参照) と 50mm (図-5 参照) との比較を行った。波形エネルギー比の増分は、深さ 100mm の場合の方がやや大きいものの、いずれの場合も充填度の増加に伴い、波形エネルギー比が大きくなっている。超音波の透過領域におけるひび割れ注入材の占める割合は、ひび割れ深さが 100mm の場合の方が大きい。つまり、注入材を介して超音波が伝播可能となる透過領域が増加したため、充填度の増加に対する波形エネルギー比の増分もより大きくなったも

のと考えられる。

以上のことから、超音波の波形エネルギー比は、本実験の範囲内では、ひび割れ深さによらず、注入材の充填度の評価指標として十分な感度を有していると考えられる。なお、実際の適用では、評価指標としての波形エネルギー比の感度を高めるため、センサ間隔を可能な範囲で大きく設定するのが有効であることが示された。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 注入材の硬化程度は、波形エネルギー比の経時変化により把握できる。
- 2) ひび割れ注入材の充填度評価における受振波波形状および波形エネルギー比は、評価指標として十分な感度を有していると考えられる。
- 3) 表層ひび割れ深さの違いが、充填度評価に与える影響は小さい。
- 4) 本研究の範囲内では、センサ間隔を可能な範囲で大きく設定することにより、注入材の充填度をより評価しやすくなると考えられる。
- 5) 超音波伝播特性値である波形エネルギー比は、表層ひび割れにおける注入材の硬化程度および硬化後における充填度の評価に適用できる可能性が示された。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，pp.85-107，2003
- 2) 山口岳思，鎌田敏郎，寺田孝，六郷恵哲：超音波によるコンクリートひび割れ注入材の確認方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1681-1686，2005
- 3) 日本接着学会：接着ハンドブック，pp.375-395，1996
- 4) 一宮亮一：機械系の音響工学，コロナ社，pp.86-94，1992