

論文 超音波によるコンクリートひび割れ注入材の充填確認方法

山口 岳思*¹・鎌田 敏郎*²・寺田 孝*³・六郷 恵哲*⁴

要旨：本研究では、ひび割れ注入材としてエポキシ樹脂を用いた場合について、ひび割れ部を透過した超音波の評価指標から注入材の充填深さを非破壊的に評価する方法について検討した。さらに、充填された注入材の硬化状態を把握する手法についても検討を加えた。その結果、計測により得られた波形エネルギー比は、充填深さと良好な相関関係があることが明らかとなった。また、波形エネルギー比は、注入材の接着強さ試験結果とよい対応を示し、硬化状態の評価にも有効であることがわかった。

キーワード：非破壊検査, 超音波, ひび割れ注入, 充填状態, 硬化状態, 波形エネルギー

1. はじめに

ひび割れ補修工法の一つに注入工法があるが、コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針¹⁾では、「注入材がどこまで注入できたかを調べる非破壊検査方法は未だ確立されていない。」としており、必要がある場合は、現状としては、コアを採取して充填深さを確認する等の方法がとられている。これに対して、横田ら²⁾は、超音波法を適用し、受振波における初動波の位相と振幅に着目することにより、ひび割れ注入深さが推定できるとしている。しかしながら、この文献では、初動波の挙動とひび割れ注入深さとを関連付けた理論的背景について、明確には示されていない。

そこで本研究では、コンクリートのひび割れ部では、注入材が充填された部分のみを超音波が透過する性質を利用して、その伝播特性に着目した非破壊的な充填確認方法について検討した。

さらに上記の指針¹⁾には、「補修工事を実施後、補修箇所にはある期間振動や衝撃を与えないように注意しなければならない。」とも記載し

てある。注入材には、それぞれに硬化時間の目安が示されてはいるものの、実際の硬化の進展状況は周辺環境によって変化する可能性がある。したがって、注入材の硬化程度を判定する手法についても、充填確認方法とあわせて確立することが望ましい。これに関する手法としては、内田ら³⁾がセメント系材料の硬化過程の評価に超音波法を適用した研究成果を報告している。しかしながら、ひび割れに充填された状態での材料の硬化過程を評価する手法に関しては、未だ明らかにされていない。

そこで本研究では、同じく超音波の伝播特性に着目して、ひび割れ部に充填された注入材の硬化程度の評価方法についても検討を加えた。その際、注入材の硬化程度は接着強さ試験によって確認した。

実験では、ひび割れを模擬した供試体を用い、注入材による充填深さと、これに対応した超音波の透過エネルギーとの関係を調べた。試験条件としては、センサ間隔、ひび割れ幅、注入材の材質を変化させ、それぞれが手法に与える影響についても検討した。

*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 工学部土木工学科 (非会員)

*4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

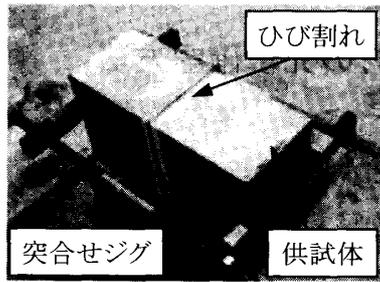
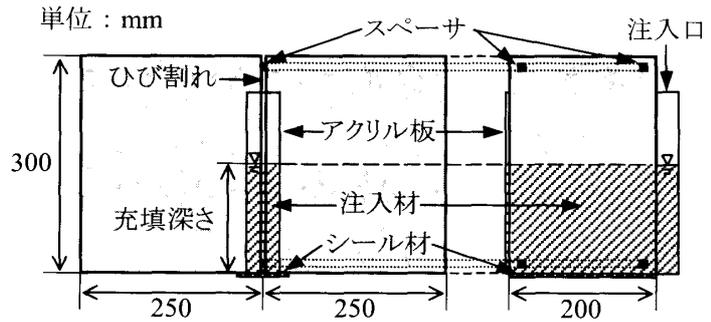
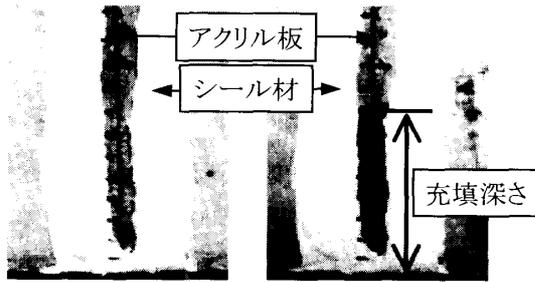


写真-1 ひび割れ供試体



(a) 側面図(充填深さ確認側) (b) 断面図

図-1 ひび割れ供試体および注入方法



(a) 注入前 (b) 注入後

写真-2 充填深さ確認

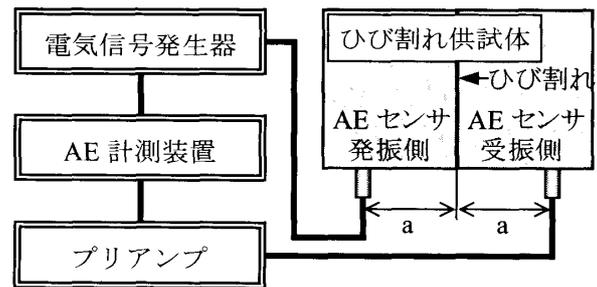


図-2 超音波計測

表-1 実験ケース一覧

実験の種類	供試体数	ひび割れ幅 (mm)	注入材の充填深さ (mm)	センサ間隔 (mm)	注入材	接着強さ試験
A 充填深さ評価実験 (注入材充填直後)	5	0.5, 1.0	30,60,90,120,150, 180,210,240,270,300	100,200,300	エポキシ樹脂A エポキシ樹脂B	なし
B 注入材硬化程度評価実験	1	1.0	300	200	エポキシ樹脂A	あり
C 充填深さ評価実験 (注入材硬化後)	4	1.0	75,150,225,300	100,200,300	エポキシ樹脂A	なし

表-2 コンクリートの配合および物性値

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)
		W	C	S	G	Ad				
35	41.4	146	417	731	1045	2.29	10	3.9	56.3	31.6

表-3 エポキシ樹脂の使用材料および諸試験値

	主剤	硬化剤	可使時間 (min)	接着強さ (N/mm ²)
エポキシ樹脂A	ビスフェノールA型	変性ポリアミドアミン	72.9	8.10
		変性脂肪族ポリアミン		
エポキシ樹脂B	ビスフェノールA型	変性脂肪族ポリアミン	100	6.47

2. 実験概要

実験は、評価の対象に応じて次の3つについて行うこととした。すなわち、A.充填深さ評価実験(注入材充填直後での適用を想定)、B.注入材硬化程度評価実験、C.充填深さ評価実験(注入材硬化後での適用を想定)である。以下に、それぞれの実験の概要を示す。

2.1 供試体

実験A~Cのすべてについて、写真-1、図-1に示すように、縦300×横200×長さ250mmの2個のコンクリート直方体を、スペーサを挟んで突合せジグにて突き合わせ、ひび割れを模擬した供試体(以下、ひび割れ供試体とする。)を作製した。ひび割れ供試体の個数およびひび

割れ幅を表-1に示す。なお、ひび割れ幅は、スペーサの厚さで調整した。コンクリートの配合および物性値を表-2に示す。

02.2 注入材および注入方法

注入材には、表-3に示すような2種類のエポキシ樹脂を使用した。エポキシ樹脂AとBとは可使時間が異なる。可使時間は、JSCE-K541-2000（コンクリート構造物補修用有機系ひび割れ注入材の試験方法）に準拠して硬化発熱温度の急激な立ち上り点の70%の時間である。また、接着強さの試験方法は2.4に後述した。

注入材の注入方法は、ひび割れ供試体下面のひび割れ部をシール材によりシールし、図-1に示すように片側側面に注入口を設置することで、流し込みにより注入した。なお、写真-2に示すように、注入側側面の反対側面のひび割れ部にアクリル板を貼り付けることで目視により充填深さの確認を行った。本研究では、各実験ごとに表-1に示す充填深さにおいて超音波計測を行い、得られる伝播特性との関係について検討した。

2.3 超音波計測

超音波計測は、図-2に示すように電気信号発生器より発生させたパルス波を発振側のAEセンサから供試体中に発振し、受振側のAEセンサで受振することで実施した。AEセンサで受振した波形は、増幅率をプリアンプ40dB、メインアンプ40dB、合計80dBとして、40dBのしきい値を越えたものに対してサンプリング周波数2MHzでデジタル化し、AE計測装置で記録した。また、AEセンサは140kHz共振型センサを用いた。

センサは、図-2に示すようにひび割れ供試体下面においてひび割れからの距離が等しくなるようにして、供試体の幅方向中央の位置にそれぞれ配置した。各実験でのセンサ間隔を表-1に示す。なお、AEセンサはセンサホルダを用いて一定の圧力でコンクリート表面に接触させた。

本研究では、AE計測装置においてデジタル

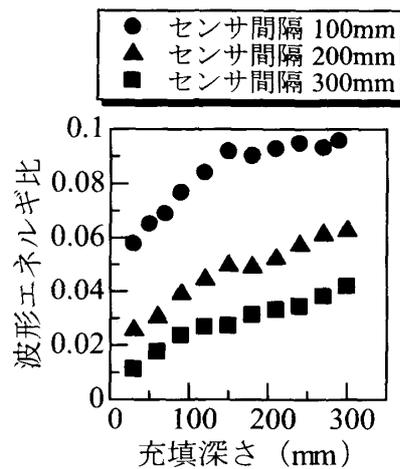


図-3 センサ間隔による波形エネルギー比の違い（実験A）

化されている受振波形から波形エネルギーを算出した。波形エネルギーは、受振波形における各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求めた。また、ひび割れ供試体の健全部で得られる波形エネルギーに対する比として、波形エネルギー比を算出して、本研究での評価指標とした。

2.4 接着強さ試験

実験Bにおいて、注入材の接着強さ試験を実施した。

供試体は、縦40×横40×長さ80mmのモルタルで、2個を突き合わせた長さが160mmとなるものを複数作製した。接着面はサンディングし、接着層の厚さが1mmになるようにスペーサを挟み、注入材が流出しないように粘着テープで三面をシールした。なお、モルタルの配合はひび割れ供試体のモルタル部と同様に水セメント比を35%とした。

注入材を注入後、適当な時間間隔をおきながらJIS A 6024（建築補修用注入エポキシ樹脂）に準拠して載荷試験を実施し、接着強さを求めた。

3. 実験Aの結果および考察

3.1 センサ間隔の違いが評価に与える影響

図-3に注入材をエポキシ樹脂Aとし、ひび割れ幅を1mmとした上でセンサ間隔を変化さ

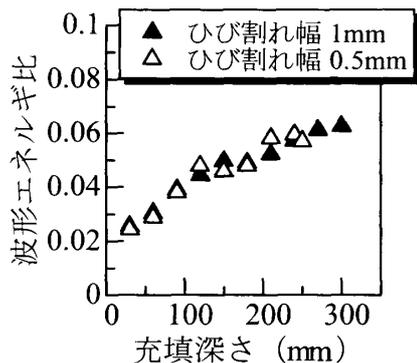


図-4 ひび割れ幅による波形エネルギー比の違い (実験 A)

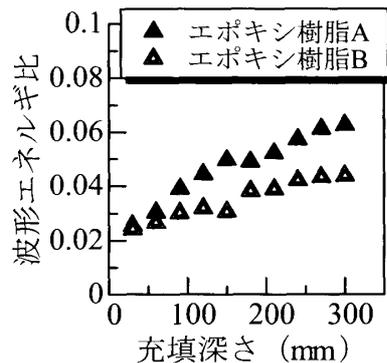


図-5 材質による波形エネルギー比の違い (実験 A)

せた場合の充填深さと波形エネルギー比との関係を示す。

これによれば、いずれのセンサ間隔の場合においても、充填深さが深くなるほど波形エネルギー比が増加することがわかる。これは、充填深さが深くなるにつれて、超音波が注入材を介して透過する領域（以下、透過領域とする。）の面積が大きくなるためと考えられる。

また、センサ間隔に着目すると、センサ間隔 100mm においては、充填深さ 150mm までは波形エネルギー比がほぼ直線的に増加するが、充填深さ 150mm 以深の部分では頭打ちとなっている。一方、センサ間隔 200mm および 300mm においては、センサ間隔 100mm に比べて充填深さが浅い領域での波形エネルギー比の増加率は小さいものの、これらの場合は充填深さが大きくなっても波形エネルギー比の頭打ち現象は見られず漸増する傾向を示した。コンクリート表面から深さ方向への超音波の伝播領域は、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⁴⁾。したがってセンサ間隔 100mm の場合は、充填深さ 150mm 程度以深の部分には、超音波が透過せず、波形エネルギー比には変動がみられなかったと考えられる。これに対して、センサ間隔が大きい場合では、センサ間隔が大きくなるほどひび割れ断面における透過領域の占める割合は小さくなり、波形エネルギー比の感度は鈍るものの、評価可能な領域が大きくなることによって充填深さの広い範囲にわたって波形エネルギー比が変化を生じたものと考えられる。

以上のことから、実際の適用では充填深さは未知であるため、評価可能範囲を広くするためには、本研究の範囲内では、センサ間距離を大きく設定するのが有効であることが明らかとなった。

3.2 ひび割れ幅の違いが評価に与える影響

図-4に、ひび割れ幅が 0.5mm および 1mm のケースについてセンサ間隔を 200mm、注入材をエポキシ樹脂 A とした場合の充填深さと波形エネルギー比との関係をそれぞれ示す。

これによれば、ひび割れ幅の違いによらず、両者の関係はほぼ同様の傾向となっている。つまり、本実験での範囲内においては、ひび割れ幅の違いが波形エネルギー比に与える影響は、問題となる程大きなものではないことがわかった。しかしながら、さらに幅の小さなひび割れに対しては、実験の実施が可能であれば、両者の関係を確認するのが望ましいと考えられる。

3.3 注入材の違いが評価に与える影響

図-5に、センサ間隔を 200mm、ひび割れ幅を 1mm とし注入材の材質を変化させた場合の充填深さと波形エネルギー比との関係を示す。

これによれば、波形エネルギー比は充填深さが小さい場合にはほぼ同様の値を示すが、充填深さが大きくなるにつれて、両者の差が大きくなり、充填深さ 300mm では、エポキシ樹脂 A の値はエポキシ樹脂 B の 1.5 倍程度の値となった。これは、注入材の特性に起因した超音波減衰の違いによってエネルギー損失の程度が異なることによる結果であると考えられる。参考として

表-4 エポキシ樹脂の充填直後および硬化後の超音波伝播特性値

エポキシ樹脂の種類	充填直後		硬化後	
	超音波伝播速度 (m/s)	波形エネルギー (V ²)	超音波伝播速度 (m/s)	波形エネルギー (V ²)
エポキシ樹脂A	1409	0.0183	2458	567.7
エポキシ樹脂B	1256	0.0092	2336	550.1

表-4に、センサ間隔を35mmとして注入材単体に超音波を透過させた場合の波形エネルギーを示す。エポキシ樹脂Bでは、樹脂Aに比べ充填直後の波形エネルギーが小さくなっており、材料の超音波減衰に対する特性が明らかに異なることが示されている。しかしながら、充填深さが小さいケースに両者間の波形エネルギー比の差が小さいのは、透過領域の面積も小さくエネルギー損失自体が小さいことによるものと考えられる。

一方、充填深さが大きくなると、透過領域が大きくなることによって材料の違いによるエネルギー損失の差も大きくなり、このような結果に至ったものと考えられる。

以上のことから、材質の違いは本研究で提案する評価指標に影響を与える因子であり、計測の際には留意するべきであることが明らかとなった。

4. 実験Bの結果および考察

図-6に、実験Bにおいて得られた波形エネルギー比および接着強さの経時変化を示す。なお、図-6には、接着強さが発現し始めた時点以降の時間帯を表示した。

これによれば、接着強さおよび波形エネルギー比は、10時間後から20時間後の間で急激に増加しており、両者はかなり似た増加傾向を示している。これは、硬化反応によりエポキシ樹脂が液相からゲルを経て固相としての挙動に移り、3次元的架橋状態に移行したため、急激に接着強さが増加したことと対応していると考えられる⁵⁾。また、これに伴い、材料の構造がより密にしかも均質なったことで超音波減衰が低減され、結果的に伝播効率が高まり、波形エネルギー比も増加したものと推測される。

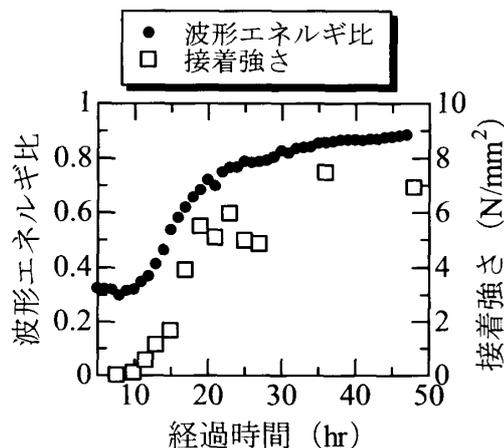


図-6 波形エネルギー比と接着強さの経時変化(実験B)

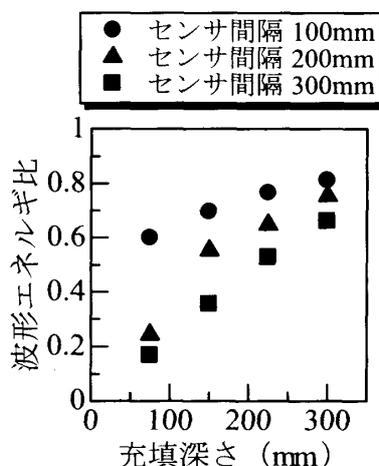


図-7 充填深さと波形エネルギー比の関係(実験C)

その後、波形エネルギー比の増加率はゆるやかとなり、接着強さはほぼ頭打ちとなる傾向を示した。これは、エポキシ樹脂の硬化が進行し、材料の物理的性質の変化が小さくなったことによるものと考えられる。

以上のことから、時間変化に伴う波形エネルギー比および接着強さの挙動は相互に強い相関があることがわかった。これより、波形エネルギー

比は、注入材の硬化状態を評価するのに十分感度の高い評価指標であることが明らかとなった。

5. 実験Cの結果および考察

図-7に、注入材硬化後における充填深さと波形エネルギー比との関係を示す。ここで硬化後とは、注入材注入後、図-6に示すように接着強さ（硬化程度）が十分発現されたと考えられる経過時間が72時間の時点の状態とする。

これによれば、センサ間隔によらず、充填深さが深くなるにつれて、波形エネルギー比が増加しており、この傾向は充填直後の注入材のケース（図-3）とも同じである。しかしながら、充填深さの増加に対する波形エネルギー比の増分は、充填直後の結果（図-3）より明らかに大きくなっていることがわかる。また、本実験の範囲内においては、材料硬化後の場合は、センサ間隔をより大きくした方が、充填深さの変化に対する波形エネルギー比での評価感度が良くなることもわかった。

以上のことから、本研究で提案する手法は、注入材の充填直後でもひび割れ充填深さの程度を十分に評価可能であるが、注入材硬化後においては、充填深さの違いがより明確に把握できるものであることが明らかとなった。また、注入材硬化後では、実験で設定したいずれのセンサ間隔でも充填深さの評価はできるが、センサ間隔を大きく設定することが、評価感度を高めるのに役立つこともわかった。

6. まとめ

本研究では、ひび割れ注入材としてエポキシ樹脂を用い、超音波による非破壊的な充填確認の方法について検討した。

本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 本研究で提案する波形エネルギー比は、注入材の充填直後および硬化後のいずれの条件下においても、充填深さが大きくなるにしたがって増大する傾向を示した。

- (2) 充填深さと波形エネルギー比の関係を用いることによって、注入材の充填程度を把握できる可能性が示された。
- (3) ひび割れ幅が、充填深さと波形エネルギー比の関係に与える影響は小さい。
- (4) 波形エネルギー比から充填深さを評価する際には、材質の影響を考慮する必要がある。
- (5) 本手法により評価できる充填深さの範囲をより大きくするためには、超音波センサの設置間隔は大きくするのがよい。
- (6) 波形エネルギー比は、注入材とモルタル間の接着強さと良い相関があり、注入材の硬化状態の評価に適用可能と考えられる。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（A）16206045）を受けて行ったものである。また、本研究を遂行するにあたり、ショーボンド建設株式会社の江口和雄氏、奥田俊男氏に多大なる協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 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) 横田理 他：直角回折法による補修材のひび割れ注入深さの測定，非破壊検査協会シンポジウム「コンクリート構造物の非破壊検査への期待」論文集，Vol.1，pp.143-148，2003
- 3) 内田慎哉 他：超音波伝播特性に着目した超速硬セメントペーストの凝結・硬化過程の評価手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1631-1636，2003
- 4) 一宮亮一：機械系の音響工学，コロナ社，pp.86-94
- 5) 日本接着学会：接着ハンドブック，pp.375-395，1996