

論文 曲げひび割れ先端部分の超音波伝播特性に着目したコンクリートのひび割れ評価

若槻 晃右^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・国枝 稔^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: コンクリートのひび割れ深さを超音波により非破壊的に評価する手法として $T_c - T_0$ 法があるが, この手法ではひび割れ面の接触やマイクロクラックの存在など, ひび割れ先端部分の影響により評価精度が低下することが知られている. 本研究では $T_c - T_0$ 法の問題点を踏まえた上で, 新たに AE/UT 法を組み合わせることにより, ひび割れ先端部分の影響も考慮したひび割れ深さ評価について検討を行った. その結果, 受振波の最大振幅値および周波数分布を指標として加えることによって, より適確にコンクリートのひび割れを評価できることが明らかとなった.

キーワード: コンクリート, 非破壊試験, 超音波法, AE/UT 法, 曲げひび割れ深さ

1. はじめに

コンクリートの曲げひび割れ深さ評価への超音波法の適用が検討されており, JIS 化の動き¹⁾もある. 超音波法は, 音響学的に異なる面で反射, あるいは回折する超音波の伝播特性を利用し, コンクリート中のひび割れの位置や発生量を同定することができる手法である²⁾.

コンクリートの曲げひび割れ深さ評価は, ひび割れ先端で回折した超音波の伝播時間を用いる場合が多い³⁾. 先端まで一定の幅をもった人工ひび割れ(スリット)の深さ評価では, ある程度の精度が得られることが明かされている⁴⁾.⁵⁾ しかしながら実際の曲げひび割れでは, 先端部分におけるマイクロクラックの存在や閉塞などを伴っており, 人工ひび割れの場合と異なり深さ評価を難しくしているという指摘もある.

筆者らも, $T_c - T_0$ 法³⁾による曲げひび割れ深さ評価法について研究を行ってきた. その結果, 表面におけるひび割れ開口幅が大きくなるにつれて, 深さの推定値の精度が低くなる場合があることが判明し⁶⁾, これは超音波がマイクロクラックやひび割れ閉塞部を透過するためである

と考察を行っている.

一方, 圧縮载荷により生じるマイクロクラックは, 弾性波の伝播速度にはあまり影響を及ぼさず, 周波数特性を大きく変化させることが明らかにされている⁷⁾. この研究によると, マイクロクラックによる弾性波の散乱が高周波成分の減衰につながり, マイクロクラックを評価することができるとされている.

そこで本研究では, コンクリートの曲げひび割れ深さ評価において, 伝播時間のみにとどまらず, 最大振幅値と周波数分布にも着目した. $T_c - T_0$ 法により伝播時間を計測するとともに, AE/UT 法(本研究では, 超音波を AE センサで受振し, 解析する手法を AE/UT 法とする)⁸⁾により波形の計測を行った. $T_c - T_0$ 法と AE/UT 法を組み合わせた曲げひび割れ深さ評価法について検討した.

2. 実験概要

载荷による曲げひび割れ(以後ひび割れと呼ぶ)の評価を行うために, 幅 100 mm×高さ 200 mm×長さ 800 mm(スパン長 600 mm)のはり供試

*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 工学部土木工学科 工博(正会員)

*3 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工博(正会員)

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

体（はり中央部に深さ 20 mm の切欠きを有する）を作製した。供試体には、ひび割れ進展の制御を容易に行うために、引張側に鉄筋 (2D6) を配置した。骨材寸法がひび割れ発生状況に与える影響を検討するために、骨材最大寸法を 5 mm および 25 mm（以後、それぞれモルタル供試体、コンクリート供試体と呼ぶ）とした。材料の配合は、いずれも W/C = 50% とした。

ひび割れ導入方法は中央 1 点荷重とし、打設面と直角に荷重した。本実験で採用した荷重装置の概要を図-1 に示す。図-1 に示した 4 本の D22 鉄筋（端部は呼び径 16 のねじに加工）に取付けたナットを締めることに

より荷重した。鉄筋に各 2 本取付けたひずみゲージ（検長：10 mm）を用いて、鉄筋ひずみの計測により荷重の制御を行うとともに、切欠き口にクリップゲージ（感度：1/400 mm）を挟んで開口変位（CMOD）を計測した。

超音波探触子および AE センサ取付け位置を図-2 に示す。本実験では CMOD が 0.6 mm になるまで荷重を行い、荷重中における超音波伝播時間および波形を計測した。

伝播時間の計測は超音波計測装置を用いて行い、算定式 ($T_c - T_0$ 法) により幾何学的に曲げひび割れ深さを求めた。これを「超音波法によるひび割れ深さ」とする。

波形の計測については、パルスジェネレータから送信電圧 40V でパルス波を発振し、AE セン

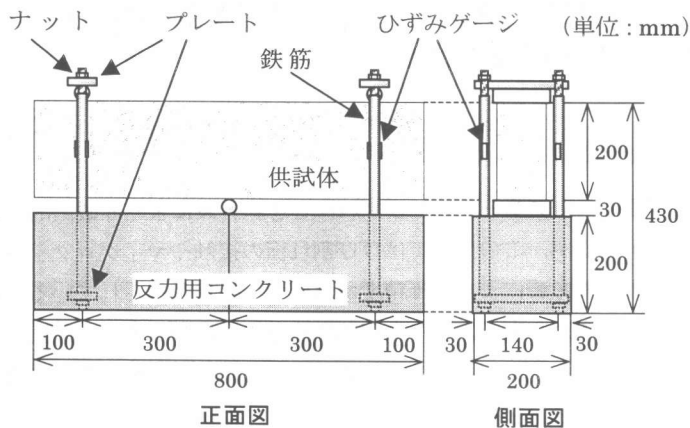


図-1 荷重試験装置

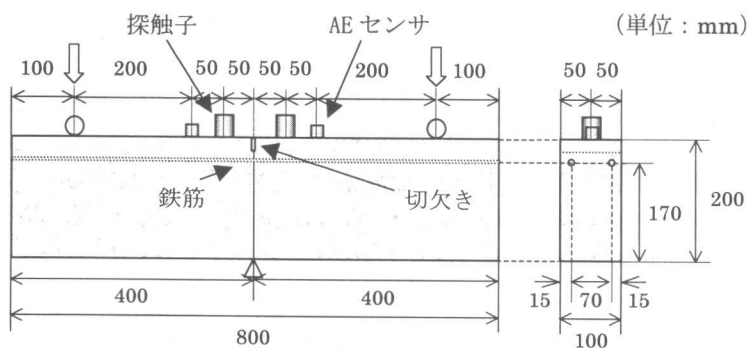


図-2 探触子および AE センサ取付け位置

サ（150kHz 共振型）により検出し、サンプリング周波数 2MHz でデジタル化して AE 計測装置で記録した。発振には 150kHz に共振点をもつ AE センサを用いた。また測定においては、ノイズ除去を目的として 50~500kHz のバンドパスフィルタを用いた。最大振幅値の検出を行うとともに、受振波に高速フーリエ変換 (FFT) を行い、周波数分布を求めた。

3. 結果と考察

3.1 超音波法によるひび割れ深さ

超音波法によるひび割れ深さと CMOD との関係を図-3 に示す。いずれの場合においても、CMOD が小さい段階では、CMOD の増加に伴い超音波法によるひび割れ深さは大きくなった。しか

しながら、CMOD が 0.2 mm 以降では、推定されるひび割れ深さは頭打ちとなった。頭打ちの現象は筆者らの既往の研究⁶⁾においても現れており、本実験でも同様の傾向が見られた。これは、ひとつにはひび割れが進展するに伴い、供試体断面におけるひび割れ深さの部分的なばらつきが大きくなり、伝播時間による評価では、最短経路を透過した超音波の到達時間のみを読み取ることに起因していると考えられる。同時に、ひび割れ先端部分に局所的な接触領域が増加し、この部分を透過している可能性も考えられる。

ひび割れ発生状況を直接的に確認するために、インクを用いてひび割れ断面を染色し、画像解析によりひび割れ深さを求めた。図-4 にその結果を示す。この実験では、図-1 と同じ断面寸法（断面観察を行うために無筋とした）をもつ供試体においてひび割れを導入し、CMOD と超音波伝播時間を測定した。CMOD が 0.05, 0.09, 0.14, 0.20, 0.27 mm となった時点で除荷し、インクをひび割れ面に流し込むことにより染色した。両者の差は CMOD の増加とともに広がっている。これにより超音波法によるひび割れ深さが頭打ちとなる領域でも、ひび割れが進展していることが確認された。

3.2 最大振幅値比

AE/UT 法により得られた波形の例と最大振幅値の定義を図-5 に、最大振幅値と CMOD の関係を図-6 に示す。ここで最大振幅値比とは、载荷を行っていない供試体において計測した最大振幅値に対する、各 CMOD での最大振幅値の比をいう。モルタルおよびコンクリート供試体のいずれの場合においても、CMOD の増加とともに最大振幅値比は減少した。この傾向は超音波の反射波法により得られた山田

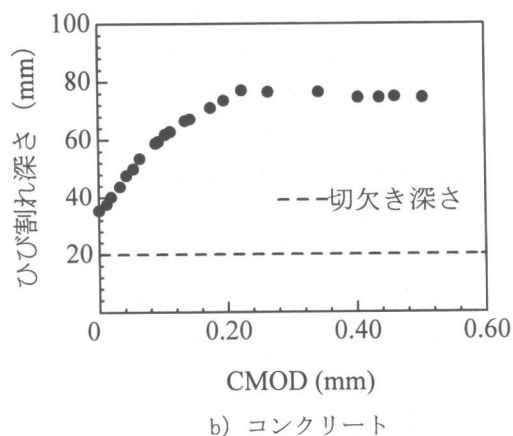
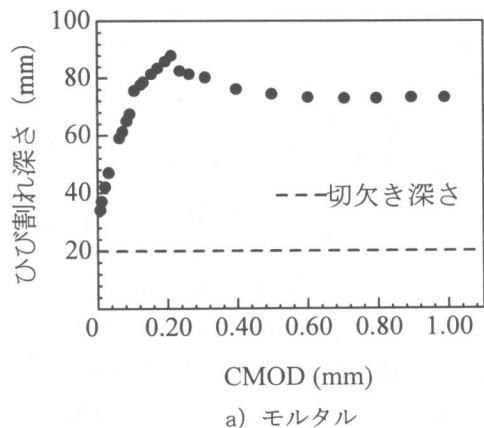


図-3 超音波法によるひび割れ深さと CMOD の関係

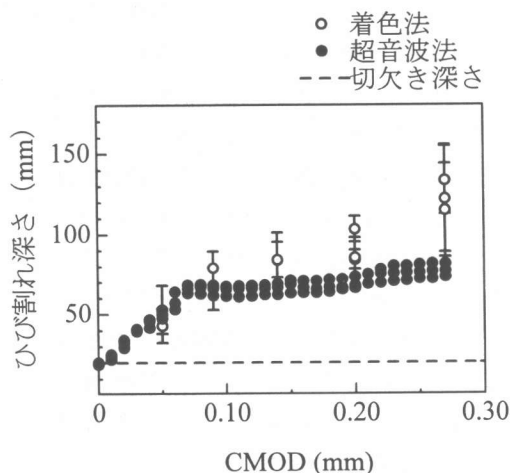


図-4 超音波法と着色法によるひび割れ深さの関係

ら¹⁰⁾の研究結果とも一致しており、ひび割れが進展することにより、供試体断面において透過する波のエネルギーが減少したためと考えられる。

この最大振幅値の減少傾向は、コンクリート供試体よりもモルタル供試体において明確に現れた。これは材料の違いによるひび割れの発生形態に起因すると考えられる。すなわち、モルタルの場合、粗骨材を混入したコンクリートに比べて、骨材のかみ合わせによる拘束力が弱いため、数本のひび割れが絡み合い、1本の束状のひび割れ群となって進展していると考えられる。一方コンクリートでは、粗骨材が架橋効果を發揮してひび割れの伝播に抵抗するため、マイクロクラックの発生領域が広くなり、ひび割れ先端部分では不連続な部分が存在しているためと考えられる。これより、最大振幅値比の減少は、マイクロクラックの存在による影響を受けるが、その程度はむしろひび割れ連続部の大きさの違いによる方が大きいものと推察される。

また、図-3と図-6との比較において、超音波法によるひび割れ深さが頭打ちとなる領域においても、最大振幅値比は減少することが分かった。これは、伝播時間の評価によっては把握することができないマイクロクラックの影響が、最大振幅値において現れることを示している。図-6によれば、いずれの供試体においても、最大振幅値比の減少はCMODの増加とともに緩やかになる傾向を示した。これらより、超音波法によるひび割れ深さが頭打ちとなっている領域においても、最大振幅値比を評価指標として加えることにより、ひび割れ深さの進行程度をより適確に評価できる可能性があることが分かった。

一方、図-6においては、CMODが0.15 mmの前後において、最大振幅値が単調に減少しない傾

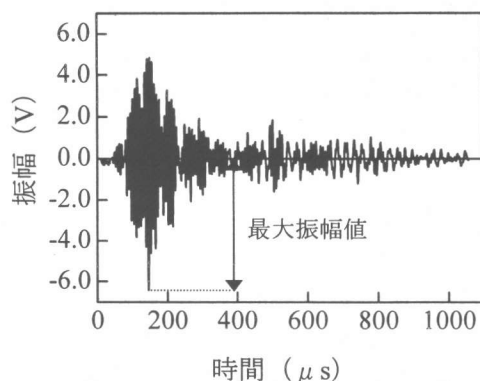
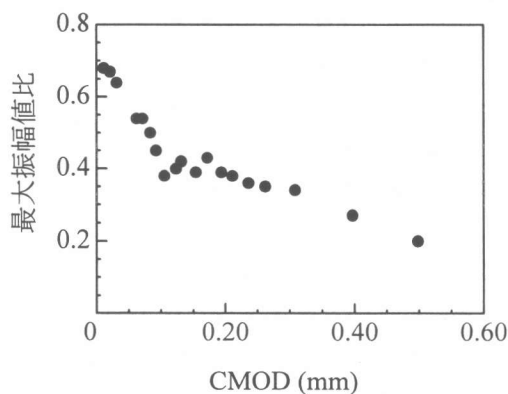
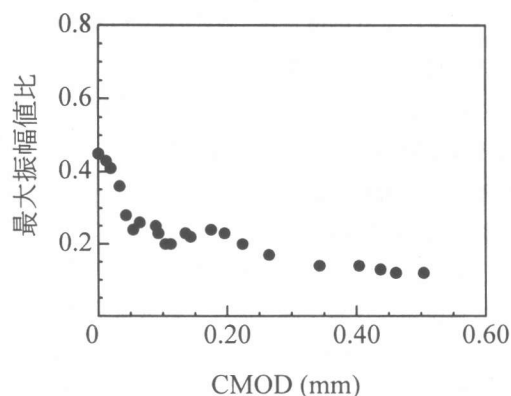


図-5 AE/UT 法による波形と最大振幅値



a) モルタル供試体



b) コンクリート供試体

図-6 最大振幅値比と CMOD の関係

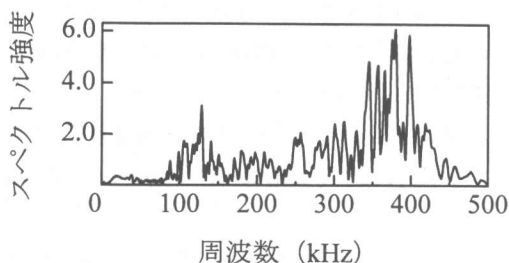
向がみられた。ひび割れ深さが進展するとともに最大振幅値は減少することを考えると、この領域ではひび割れが進展せず停滞している可

性能があるといえる。本研究の範囲内では、CMODの増加が必ずしもひび割れ深さの進展にはつながらない領域が存在するといえる。

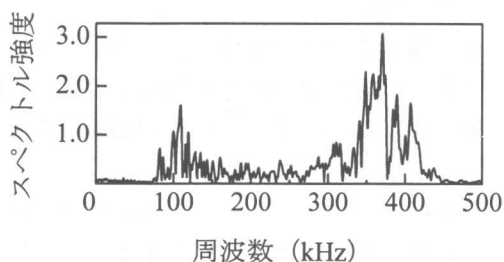
3.3 周波数分布

図-7 および図-8 に、モルタル供試体とコン

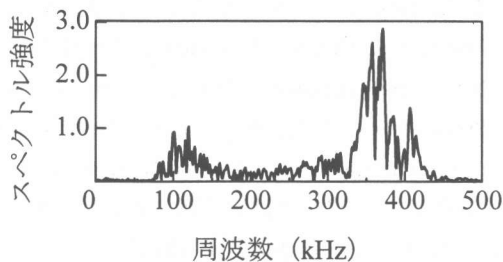
クリート供試体での周波数分布を示す。なお本研究では、同一供試体における周波数分布の比較を行うことが目的であるため、周波数の評価のために特に広帯域の AE センサは用いていない。図-7 のモルタル供試体の場合では、わず



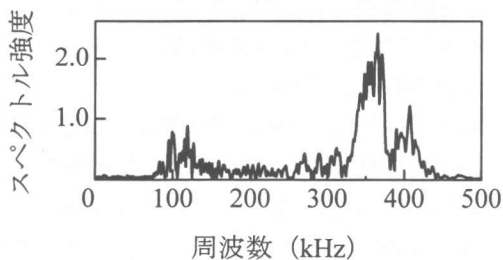
a) 载荷前



b) CMOD : 0.10mm

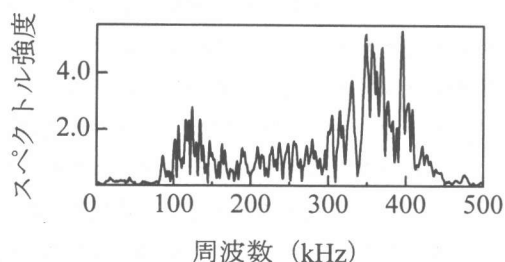


c) CMOD : 0.20mm

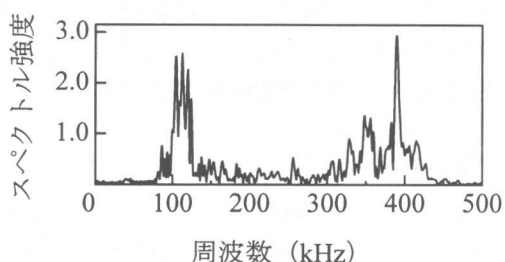


d) CMOD : 0.27mm

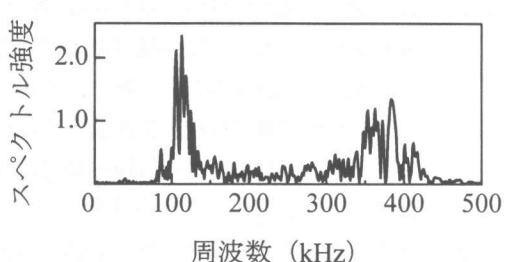
図-7 モルタル供試体の周波数分布



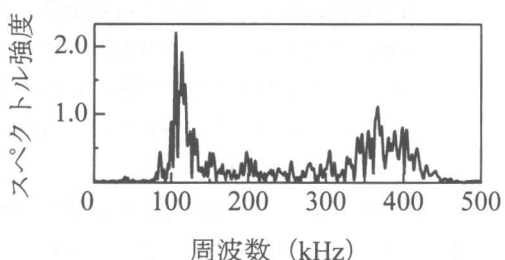
a) 载荷前



b) CMOD : 0.10mm



c) CMOD : 0.20mm



d) CMOD : 0.27mm

図-8 コンクリート供試体の周波数分布

かではあるが高周波成分の減衰がみられた。しかしながら、その傾向はあまり明確ではない。これに対して、図-8 のコンクリート供試体では、CMOD の増加に伴い高周波成分の減衰（低周波成分の卓越）が顕著となり、CMOD が 0.20 mm以降では、載荷前とは全く異なる分布形状を示している。これらより、周波数分布は最大振幅値比とは異なり、むしろマイクロクラックの影響を大きく受けることを示すものと考えられる。コンクリート供試体では、モルタル供試体に比べひび割れ先端部分におけるマイクロクラックが、より広範囲で発生しているため、周波数分布に変化が大きく現れたものと推察される。これより、特にコンクリートの場合では、超音波法によるひび割れ深さが頭打ちとなっている領域においても、周波数成分を指標としてより適確に評価できる可能性が示された。

4. まとめ

曲げひび割れの評価において、 T_c-T_0 法および AE/UT 法により検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) ひび割れの進展に伴い、最大振幅値比が減少するとともに、周波数分布における高周波数成分は減衰した。特に、モルタル供試体の場合には最大振幅値比に、コンクリート供試体の場合には周波数分布において明確な変化が認められた。
- 2) 超音波法によるひび割れ深さが頭打ちとなった領域においても、最大振幅値比あるいは周波数分布の変化を評価指標として加えることにより、ひび割れ先端部分のマイクロクラックやひび割れ接触部分を含めたひび割れ深さ評価を行える可能性があることが明らかとなった。

現時点では、最大振幅値あるいは周波数分布を指標として用いた評価では、深さの程度を定性的に示すにとどまっているが、今後は深さの定量化の手法を検討する必要がある。

謝辞

実験および解析の実施にあたり岐阜大学の内田慎哉君ならびに浅野雅則君にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建材産業協会：鉄筋・鉄骨コンクリートの健全性評価方法の標準化のための調査研究成果報告書，2000
- 2) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究，土木学会論文集，No. 390/V-8，pp. 1-22，1988
- 3) Jones, R. : The Non-Destructive Testing of Concrete, Cambridge University Press, London, p. 42, 1962
- 4) 尼崎省二，明石外世樹：超音波法によるコンクリート部材のひび割れ深さ測定法に関する研究，第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp. 141-144，1981
- 5) 尼崎省二：コンクリートの表面ひび割れ深さの超音波法による測定精度，非破壊検査，Vol. 34，No. 34，pp. 743-749，1985
- 6) Kamada, T., Kunieda, M., Rokugo, K. : Fracture Mechanics Approach to Crack Depth Determined Through Ultrasonic Method, Proceedings of Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000, pp. 375-382, 2000
- 7) 岩波光保ほか：非破壊試験によるコンクリートの材料劣化評価法に関する研究，セメントコンクリート論文集，No. 50，pp. 862-867，1996
- 8) 湯山茂徳：AE 法および AE/UT 法によるコンクリート構造物の健全診断に関する研究，熊本大学学位論文，1999
- 9) 山田和夫ほか：弾性波を利用したひび割れ深さの推定精度に関する実験的研究，第46回セメント技術大会講演集，pp. 340-345，1992
- 10) 大塚浩司，勝部宏明：コンクリートの破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響，土木学会論文集，No. 478/V-21，pp. 109-116，1993