

# 構造材料の損傷評価における非線形超音波の応用

廣瀬壯一<sup>1)</sup>, A. A. Shah<sup>2)</sup>, 酒井綾子<sup>3)</sup>

- 1) 東京工業大学大学院情報理工学研究科 教授, shirose@cv.titech.ac.jp  
 2) 東京工業大学大学院情報理工学研究科 JSPS PD, shah.a.aa@m.titech.ac.jp  
 3) 東京工業大学工学部 学生, sakai.a.aa@m.titech.ac.jp

## 1. はじめに

将来起こりうる地震に対して構造物が十分な耐力を持っているかどうか、あるいは、地震を受けた緊急時に構造物がどの程度損傷を受けているか、などを正確に診断するために、構造材料の簡便な非破壊評価法を開発しておくことが非常に重要である。

非破壊評価法には様々な手法があるが、超音波法は、測定原理や手法が比較的簡便かつ安全で、構造物の内部状態を評価できる数少ない手法の一つである。超音波法では送信探触子に電圧を与えて超音波を発生させ、構造物内の欠陥や損傷で反射したエコーを受信探触子によって受信して構造物内部の状況を把握する。しかし、構造物内部の評価を非破壊で行うことは容易ではない。例えば、構造物内のき裂を検出する場合、開口しているき裂からは明瞭なエコーが反射されるが、き裂が閉じていると超音波はき裂面を透過してしまいエコーは得られない。き裂が存在するにも拘らず健全であるという危険側の判断を下す可能性がある。

最近、閉じたき裂の評価やコンクリート材料の損傷評価、並びに界面の接触状態の評価に超音波の非線形性を用いる研究がいくつか行われている<sup>1)~4)</sup>。欠陥や損傷部に大振幅の超音波を入力して非線形現象を発生させ、それによって反射、散乱した非線形超音波の特性から欠陥及び損傷の評価を行うものである。既往の研究では、通常の線形超音波よりも非線形超音波の方が欠陥や損傷に対して感度が高く有用であるとの報告がなされているが、非線形超音波に関してはその発生メカニズムを含めて未解明の部分が多い。そこで、本研究では、コンクリートの圧

縮破壊と鋼材の疲労き裂の2つの代表的な構造材料の損傷を取り上げ、変動荷重下での非線形超音波を計測し、その特性を考察する。

## 2. コンクリートの圧縮破壊に伴う非線形超音波

### 2.1 実験概要

15cm×15cm×15cm の立方体で、水-セメント比(W/C)が40%, 50%, 60%の3種類のコンクリート試験体をそれぞれ3個作成した。用いたコンクリートの配合は表1の通りである。

実験は、図1は示すように試験機で試験体に圧縮荷重を載荷すると同時に、向かいあう試験体の側面に設置した超音波探触子を用いて超音波の透過実験を行った。送信用と受信用の探触子の直径はそれぞれ70mmと50mmで、中心周波数は100kHzと200kHzである。探触子の接触面にはグリセリンを塗り、常に一定の力で接するようにゴムバンドで固定した。超音波透過実験は各試験体ごとに最大荷重の0, 20,

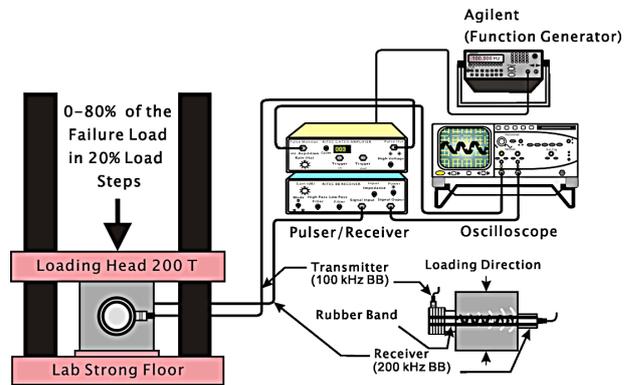


図1 実験装置

表1 コンクリート供試体の配合

W/C (%)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Crushed Stones (kg/m <sup>3</sup> )	Air Entraining Agent (kg/m <sup>3</sup> )	Water Reducing Admixture (kg/m <sup>3</sup> )	Average 28-day Concrete Compressive Strength (MPa) <sup>a</sup>
40	345	138	638	744	1.73	1.04	53.0
50	276	138	696	744	1.38	0.69	41.0
60	230	138	734	744	1.15	0.45	30.0

40, 60, 80%の荷重レベルにおいて送信探触子に対する電圧を変化させて実施した。用いた送信探触子用の入力電圧は、周波数 100kHz の 10 波の正弦波からなるトーンバースト波とし、その peak to peak 電圧はパルサーの最大出力電圧である 1800V の 10, 30, 50, 70, 90%になるように変化させた。

## 2.2 実験結果と考察

図 2 は 0%の荷重レベル、すなわち荷重を載荷する前に行った超音波透過実験によって得られた透過超音波の波形とその周波数スペクトル及び周波数スペクトルを dB 表示した図を上から順に並べたものである。ただし、dB 表示においては 100kHz での振幅を基準として正規化している。また、送信探触子に入力したトーンバースト波の電圧は 1800V の 90%の約 1600V とした。図 3 は図 2 と同様の図であるが、

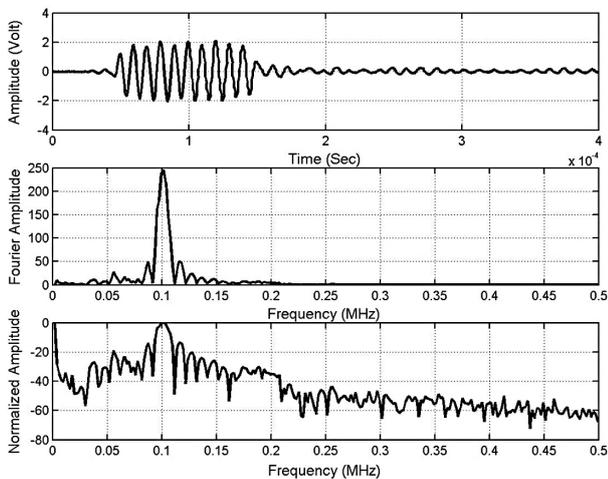


図 2 荷重載荷前に行った超音波透過実験によって得られた透過超音波の波形(上段)とその周波数スペクトル(中段)及び周波数スペクトルの dB 表示(下段)。

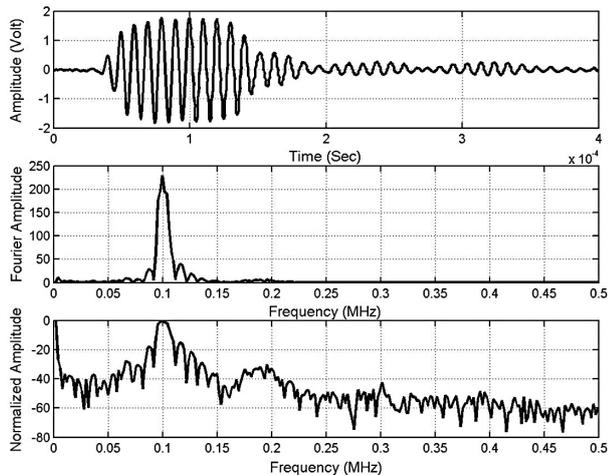


図 3 最大荷重の 40%の荷重レベルにおいて行った超音波透過実験によって得られた透過超音波の波形(上段)とその周波数スペクトル(中段)及び周波数スペクトルの dB 表示(下段)。

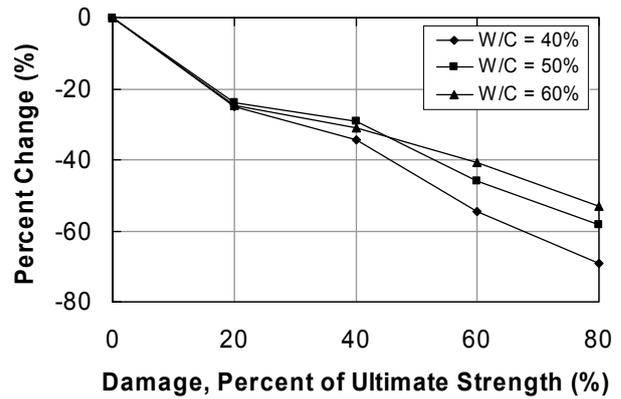


図 4 最大荷重の 20, 40, 60, 80%の荷重レベルにおける周波数 100kHz での振幅の減少割合

荷重レベルが最大荷重の 40%の場合の結果である。

図 2 と図 3 の中段に示した周波数成分より明らかのように、最も強い周波数成分は入力電圧周波数と同じ 100kHz であることがわかる。図 2 と図 3 の 100kHz における振幅を比較すると、40%の荷重レベルである図 3 における振幅の方が図 2 の振幅よりも小さくなっている。これは 40%の荷重によってコンクリート内部に微小なき裂が発生し、それによって透過する超音波が散乱して受信波の基本周波数における振幅が小さくなったものと考えられる。

一方、100kHz 以外の周波数成分はかなり小さいが、図 2 と図 3 における dB 表示した下段の図を比較すると、図 3 には 200kHz なる周波数において明瞭なピークが見られる。これは 40%の荷重によって生じた損傷部を超音波が透過することによって非線形高調波が発生したものと考えられる。

図 4 は水-セメント比 W/C=40%, 50%, 60%のそれぞれの供試体に対して、横軸に最大荷重の 20, 40, 60, 80%の荷重レベルをとり、無荷重状態での周波数 100kHz における振幅を基準(0%)としたときの 100kHz における振幅の減少割合をパーセント表示したものである。各荷重レベルにおいて入力したトーンバースト波の peak to peak 電圧を 1800V の 10, 30, 50, 70, 90%になるように変化させて実験を行い、それらの平均値を求めたものを図 4 に示している。図 4 より、荷重レベルの増加に伴って基本周波数である 100kHz の透過波の振幅の減少割合が大きくなっている。これは図 3 にも見られたように、荷重の増加に伴って発生したコンクリート内部の損傷によって超音波が透過しづらくなり、振幅の減衰が大きくなったためであると考えられる。また、図 4 を見ると、一部例外もあるものの、水-セメント比が大きいほど基本周波数での振幅の減少割合は小さくなっている。これは水-セメント比が大きいコンクリートほど荷重載荷以前の初期状態においてすでに空隙が多く含まれるため、載荷による損傷状態に

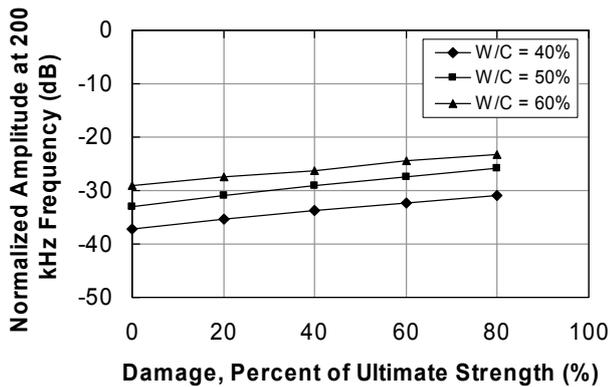


図5 最大荷重の0, 20, 40, 60, 80%の荷重レベルにおける正規化された周波数 200kHz での高調波振幅

おける初期状態からの変化分が小さいためではないかと考えられる。

図5は水-セメント比 W/C=40%, 50%, 60%のそれぞれの供試体に対して、横軸に最大荷重の20, 40, 60, 80%の荷重レベルをとり、100kHzの振幅で正規化された周波数 200kHz での高調波振幅を dB 表示で示したものである。荷重レベル及び水-セメント比が増加するとともに高調波振幅が大きくなっていることがわかる。この傾向はコンクリート中に発生していると考えられる損傷度とよい相関を示しており、高周波振幅からコンクリートの損傷度を推定できる可能性を示唆している。

### 3. 鋼材の疲労き裂によって発生する非線形超音波

ここでは、疲労き裂を有する鋼材試験体を作製し、段階的に荷重をかけることでき裂の接触状態を変化させながら超音波実験を行い、き裂面の接触状態が非線形超音波の発生にどのように関わっているかを検討した。

#### 3.1 実験概要

図6のように中央に疲労き裂を有する鋼製試験体を作製し、図7に示すように、ジャッキを用いた載荷によりき裂の接触状態を変化させながら図8(a)のようにき裂面透過波を測定した。

送信探触子は鋼材中の縦波が入射角 45° で入射するようにポリスチレン製の楔にのせ、受信探触子は入射波が疲労き裂によって遮られるような位置に設置した。なお、き裂の深さ  $d$  は奥行き方向に変化しており、表側が 12mm, 裏側が 4mm である。図8

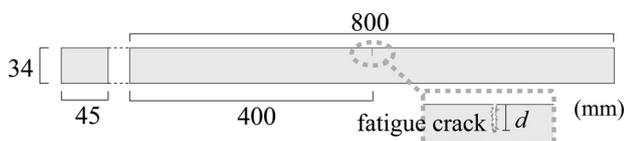


図6 疲労き裂試験体。

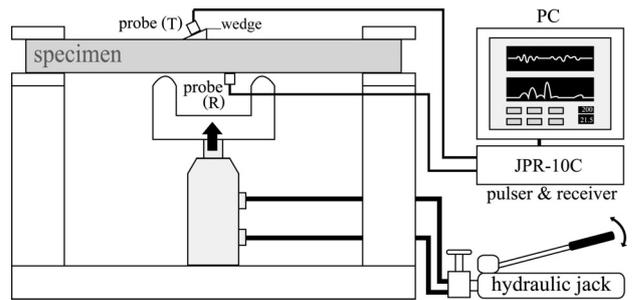


図7 実験装置

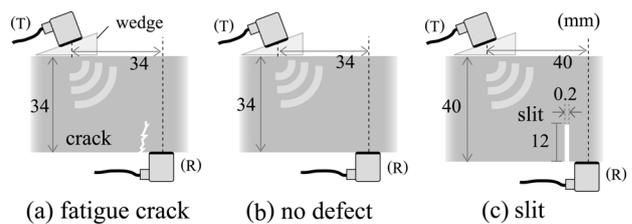


図8 実験の種類

の(b)欠陥のない部分、(c)スリット部の透過波も測定し、(a)き裂面透過波と比較した。なお、実験では周波数 5MHz の矩形バースト波を5波入射した。

#### 3.2 実験結果と考察

図8(a)の疲労き裂に対して荷重を-200~250kgfの範囲で変化させたときの波形、および、(b)、(c)の透過波の波形とそのフーリエ振幅を図9に示す。実験(a)の結果ではき裂を開く方向の荷重をマイナス、閉じる方向の荷重をプラスとして表記している。図10は図9で示したフーリエ振幅を基本波(5MHz)の振幅で正規化し、カラーマップで図示したものである。実験(a)のき裂面透過波には(b)と(c)に比べて基本波よりも低い2.5MHzや3.5MHzの周波数における分調波成分に強い振幅が確認できる。荷重の大きさに応じてそれらの低周波数における成分の大きさは変化しており、特にき裂が開口状態から閉口状態に移りつつある0kgf~150kgfの荷重において強い分調波が見られる。よって、これらの分調波は入射波を受ける疲労き裂が開閉口を伴って振動することによって発生する非線形超音波である可能性が高い。ただし、これらの分調波成分が開口したき裂による線形応答によって発生しているとの疑念もある。そこで、以下においては、き裂面が常に開口している線形き裂モデルを用いた超音波の散乱解析を実施し、そのような解析によって実験で得られた分調波を説明できるか否かを検討する。

#### 3.3 線形き裂モデルによる解析

図11に示すように、線形き裂モデルとしてモデル1~4の4つを考えた。モデル4はき裂が完全に

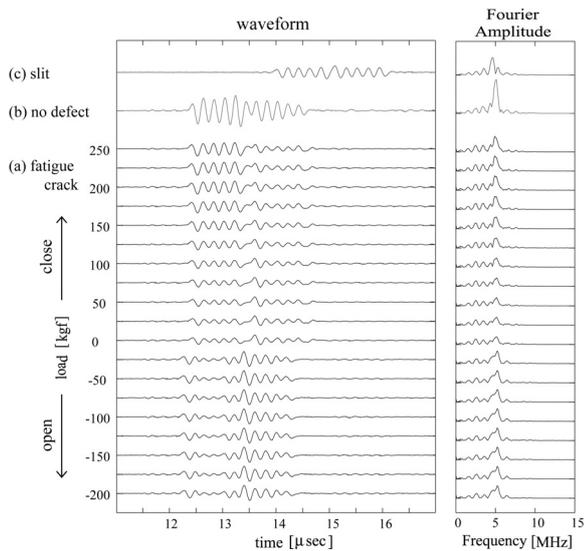


図9 受信波形とフーリエ振幅

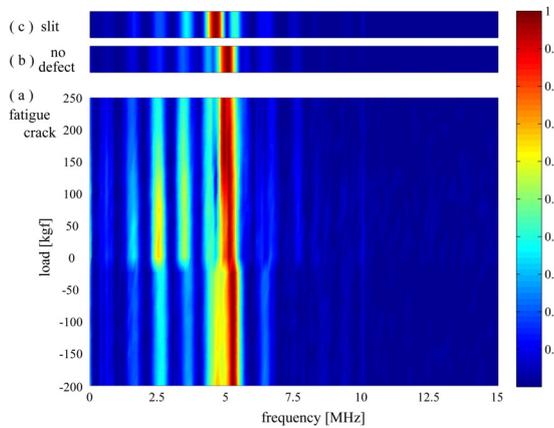


図10 正規化されたフーリエ振幅

開口しているモデルであり、モデル1はき裂が完全に閉じているモデルである。モデル2,3は荷重の載荷に伴ってき裂の接触状態が変化することを模擬したものである。ただし、入射波を受けた場合もき裂は常に開口していると仮定し、き裂面の振動に伴う開閉は生じないものと仮定する。

図11の各モデルの探触子位置における平均変位を周波数ごとに求めた値をカラーマップで表したものが図12である。実験(a)の結果と比較すると、線形き裂モデルの結果には明瞭な分調波の発生は見られない。このことから、分調波はき裂の線形応答ではなく、き裂面の接触による非線形現象によって生じている可能性が大であることがわかった。

#### 4. 結論

本研究では、コンクリートの圧縮破壊と鋼材の疲労き裂の2つの代表的な構造材料の損傷を取り上げ、変動荷重下での非線形超音波を計測した。その結果、コンクリートと鋼材のそれぞれで高調波と分調波からなる非線形超音波が得られ、それらが材料の損傷と密接な関係を有することがわかった。今後

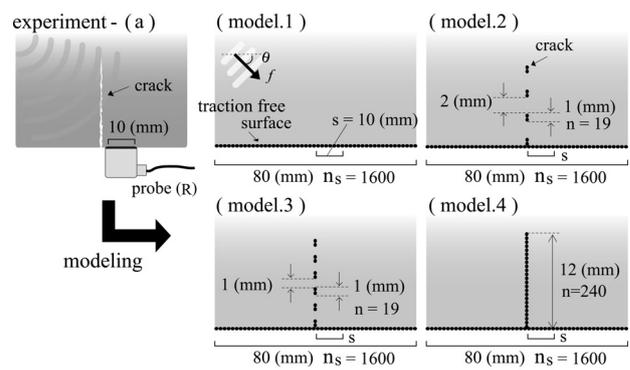


図11 線形き裂モデル

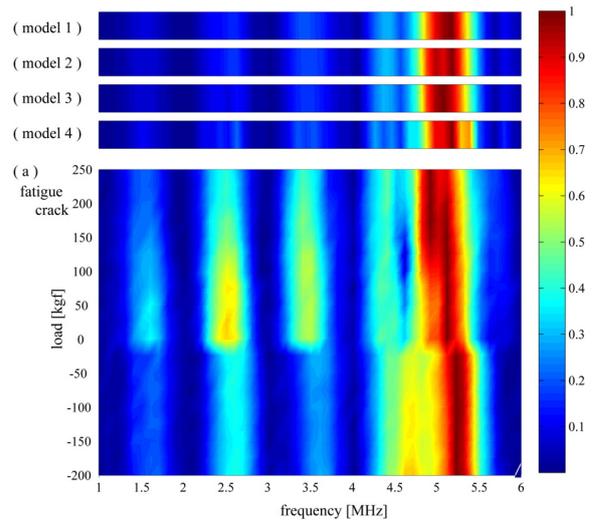


図12 線形モデルによる解析と実験によるフーリエ振幅の比較

さらに解析的な検討をすすめ、非線形超音波の発生メカニズムを解明する予定である。

#### 謝辞

鋼材の疲労き裂に対する超音波計測にご協力頂いたジャパンプローブ(株)に心より感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) C. Payan, V. Garnier, and J. Moysan, P. A. Johnson, Applying nonlinear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete, J. Acoust. Soc. Am. Vol.121, No.4, pp. EL125-EL130,2007.
- 2) Roe, Shannon E.; Woodward, C.; Cramer, M. J.: Nonlinear Ultrasonic Testing on a Laboratory Concrete Bridge Deck, Review of Progress in QNDE, AIP Conference Proceedings, Vol.26B, pp. 1429-1434, 2007.
- 3) 山一司, 小原良和, 山本撰, 三原毅: き裂の非線形超音波映像法, 非破壊検査, Vol. 56, No.6, pp.280-285, 2007.
- 4) S.Biwa, S.Nakajima and N.Ohno: On the Acoustic Nonlinearity of Solid-Solid Contact with Pressure-Dependent Interface Stiffness, Trans. ASME J. Appl. Mech., Vol.71, pp.508-515, 2004.