

I-22

アレー計測による長方形ばり中を伝播する応力波動伝播特性の実験的研究

北見工大 正員 三上修一
 北見工大 正員 大島俊之
 榊島田建設 正員 斎藤隆行

1. まえがき

近年構造部材などに発生する局部的損傷をいち早く精度良く発見することは構造部材の適切な維持管理の上で重要な問題となっている。このような構造部材中の欠陥を発見する有力な手段として超音波を用いた評価方法がある。著者らは超音波測定システムを用いた実験によりInclusionを有する長方形板の応力波動特性を明らかにしてきた。^{1), 2), 3), 4)} 本論文では多チャンネルの超音波測定システムを用いて、試験体にセンサーをアレー配置してより多くの情報から構造部材内部の応力波動伝播特性を実験的に明らかにすることを目的とする。ここでは長方形板中にクラックをモデル化しこれによる応力波動の伝播特性を観測波形や周波数解析等から検討したので報告する。

2. 実験装置概要

アレー計測に用いた実験装置は、図1に示すような多チャンネルの超音波測定システムである。このシステムの中心部は4チャンネルのウェーブメモリー(NF社製9620)である。この9620は高速($0.1 \mu s/4CH$ モード)、高分解能(10ビット)、かつ大容量(1Mワード/CH)の波形記憶装置であり高速の過渡現象を記録することが可能である。入射・受信に用いたセンサー(AE-900S-WB(NF社製))は広帯域圧電型のセンサーである。周波数特性は50kHz~1.5MHzで-10dBの応答特性を持っている。プリアンプはAE-912(NF社製)を用い周波数特性50kHz~2MHzの範囲で40dBの利得が得られる。ディスクリミネータは9640(データチェンバー、周波数特性10kHz~2MHz)を用いた。システム全体としてセンサーの周波数特性を考慮した構成になっている。

パルスジェネレーターは、センサーにパルス波を与えて試験体に応力波を入射する。また9620の波形書き込みのタイミングを決めている。

3. 試験体および測定方法

試験体の材質としてアクリル樹脂とモルタルを用いることにした。アクリルは均質な材料であり、長方形ばり中の内部欠陥の影響を解析しやすく応力波動の伝播特性を解析する第一段階とした。また、モルタルは砂、セメント、水等を含み不均質な複合材料であり動的挙動は複雑である。ここでは、図2に示すような長方形

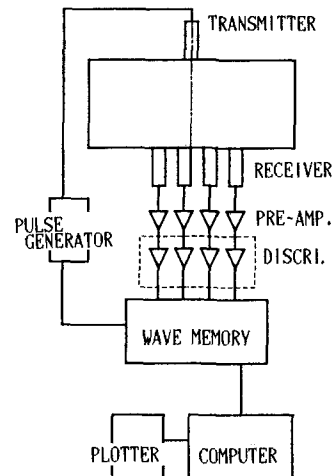


図1 アレー計測による
超音波測定システム

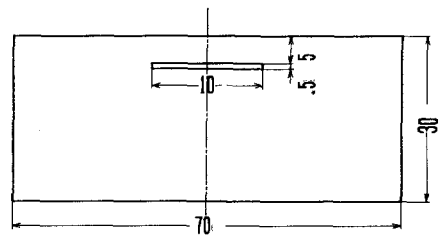


図2 試験体寸法(単位cm)

An Experimental Study of Stress Wave Propagation in Rectangular Beam with Array Sampling
 by Shuichi Mikami, Toshiyuki Oshima and Takayuki Saito

のクラック（高さ5mm、長さ100mm）を内部欠陥として試験体中に作成した。アクリル樹脂試験体は高さ30cm、長さ70cm、厚さ1cmのサイズで、弾性率33000kgf/cm²、ポアソン比0.37、重量密度1.16gf/cm³の材料諸元を持つ。クラックを持たないアクリル試験体を「A00」、クラックを持つ試験体を「A55」と呼ぶことにする。モルタル試験体は高さ30cm、長さ70cm、厚さ3cmのサイズで、普通ポルトランドセメントと標準砂を水セメント比50%で配合した。打設後4週間水中養生してから実験を行った。ここでクラックを持たない試験体を「M00」、クラックを持つ試験体を「M55」と呼ぶことにする。

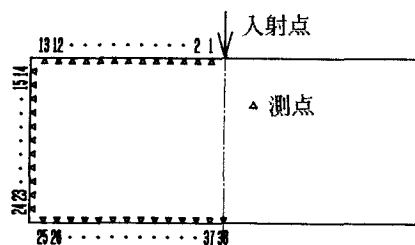


図3 測点配置

測定方法は、試験体を図3に示すように矢印を入射点とし、等間隔（2.5cm）の△印を測点1～38として測定を行った。ここで測点1～13を表面、測点14～24を側面、測点25～38を底面と呼ぶことにする。今回実験に使用した超音波測定システムは4chで測定を行うため測点1～4、測点5～8と4点ごとにセンサーを移動して実験を繰り返した（測点37、38は2点で測定）。センサーの設置に際しては測定条件が同じになるように次の2点に注意した。センサーと試験体の接触面にはグリースを塗って密着度をよくし、センサーを測定面に垂直に設置する。コイルばねでセンサーを押し付けるようにし、ばねの押し込み量を一定にして圧力を調節した。データはサンプリング間隔0.1μs、データ数8kwで測定した。入射センサーには、パルスジェネレーターより継続時間10μs、5Vのパルス波が入射される。これと同時にウェブメモリーのトリガーが働き波形の記録が行われる。ウェブメモリーに記録された波形はコンピュータに転送され解析を行う。

4. 実験結果

(1) アクリル長方形はりの実験結果

a. 観測波形の比較（測点38）

図4はアクリル板試験体A00とA55（クラック有り）の測点38で測定された波形を比較した物である。横軸に経過時間（μs）、縦軸に測定電圧（V）を取っている。破線がA00、実線がA55を示す。この図の実線と破線の比較からクラックの影響として最大振幅が1/5に減衰し、観測された波形の300μsまでにこの影響がみられる。これはクラックにより応力波の伝播経路が長くなったためである。また300μs以後の波形はほとんどクラックの影響がみられないことから、試験体の側面からの反射波が測点38に伝播した波形と考えられる。

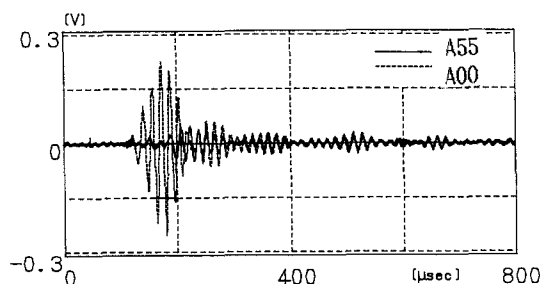


図4 A00とA55の観測波形の比較
（測点38）

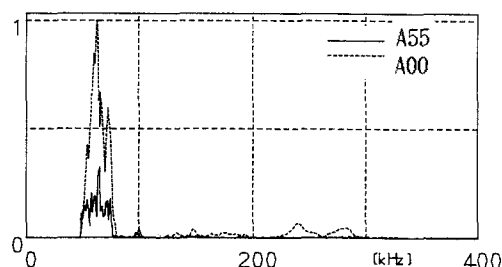


図5 A00とA55のフーリエスペクトルの比較
（測点38）

図5は図4と同様の比較をフーリエスペクトルで比較した場合である。縦軸はA00のフーリエスペクトルの最大値で基準化した。また横軸は周波数（kHz）で表した。測定システムの

周波数特性から50kHz以下の周波数は特に意味を持たないことから表示する際には零とした。実線はA55、破線はA00を示す。ピークを示す周波数は破線が63kHzで実線は65kHzとわずかに大きくなっている。全体的には実線のフーリエスペクトルは半分以下に減少しているが、100kHzのピーク値だけは大きくなっているのが特徴的である。

b. P波初動到達時間による比較

図4の破線(A00)より測点38でのP波初動到達時間は約127 μ sである。これよりP波伝播速度は2.35km/sと計算される。これに対して図4の実線(A55)から測点38におけるP波初動到達時間は約140 μ sである。ここで実線の波形のP波の伝播経路を次のように仮定する。P波は入射点からクラックのエッジ、クラックのエッジから測点38に最短経路で伝播する。この経路の距離は32.6cmとなる。この仮定から計算されるP波伝播速度は2.33km/sとなり先に求めた破線のP波伝播速度と一致する。このことは他の測点14~37でも同様の結果となることからP波は最短の経路を伝播している。

c. 観測波形の最大振幅(尖頭値)による比較

図6はアクリルばりの測点14~38で観測された波形の最大振幅をプロットしたグラフである。図は入射点を原点とした同心円方向に電圧(V)をとり、入射点と測点を放射状にむすぶ線上にその測点の最大振幅をプロットした。実線はA55、破線はA00を表している。この比較では各測点毎に伝播距離が異なるが距離による波形の減衰については考慮していない。しかし伝播距離が長くなっても必ずしも最大振幅が小さくなるわけではない。方向によっては伝播距離が長くなっても最大振幅が大きくなっている。この図の実線と破線の比較からクラックが最大振幅に影響を及ぼす範囲は測点22~38までの広い範囲である。

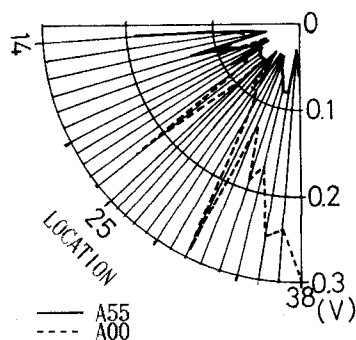


図6 最大振幅の比較

次に入射点と同一面上で観測された波形の最大振幅は入射点に近い測点ほど最大振幅は大きくなる。しかし今回の実験方法で入射点と同一面上に4個のセンサーを配置する場合には入射点側に配置したセンサーによってその後のセンサーの波形に影響を与えて最大振幅を小さくしている。これは入射点と同一面上で観測される波形の最大振幅は表面を伝播する表面波によって決まる為と考えられる。

d. 包絡線による観測波形の比較

図7と図8はそれぞれ試験体A00とA55の測点1~38までの測点で観測された波形の絶対値を各測点毎の最大振幅で基準化して包絡線で結んだ波形を測点38から測点1まで手前から奥行き方向に陰線処理して並べた図である。横軸は経過時間(μ s)である。また奥行き方向には測定面が表面から側面、側面から底面と変わる測点の番号を記した。測定した波形を包絡線表示で比較すると試験体中を伝播する波形を連続して見ることができる。図7はA00の試験体の測定結果を包絡線で表示した図である。測点1から入射点と同一面上を伝播する表面波と考えられる波形が伝播する様子を示す。この波形は測点13を過ぎて試験体側面の測点にも連続してみられる。またP波やS波のピークも連続的に伝播して行く様子を示している。この図を内部欠陥のない均質なアクリルばりの基本の波形と考えることができる。図8にはA55の試験体の測定結果が包絡線で表示されている。この図から測点21~38の包絡線にはクラックによって応力波動の伝播経路が変わったことによる影響が現れている。

e. フーリエスペクトルの比較

図9と図10はそれぞれ試験体A00とA55の測点1~38までの測点で観測された波形のフーリエスペクトルを測点38から測点1まで手前から奥行き方向に陰線処理して並べた図である。縦軸はフーリエスペクトル値をそのまま表示しているが基準値を越えた場合は越えた部分をカットして表示した。横軸は

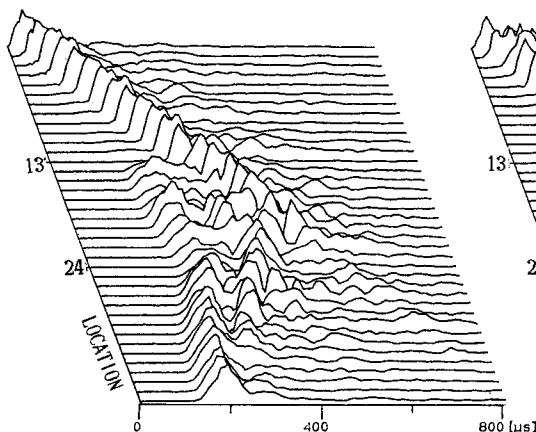


図7 A00の観測波形の包絡線による比較

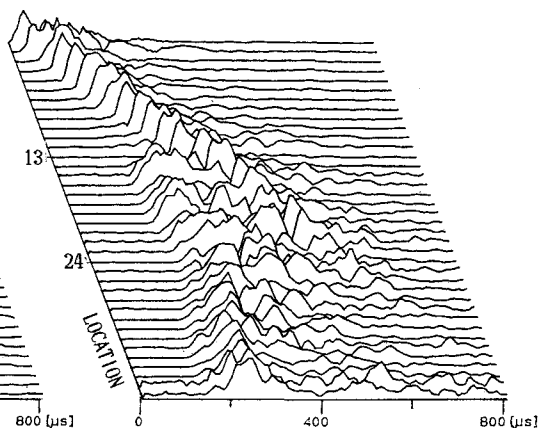


図8 A55の観測波形の包絡線による比較

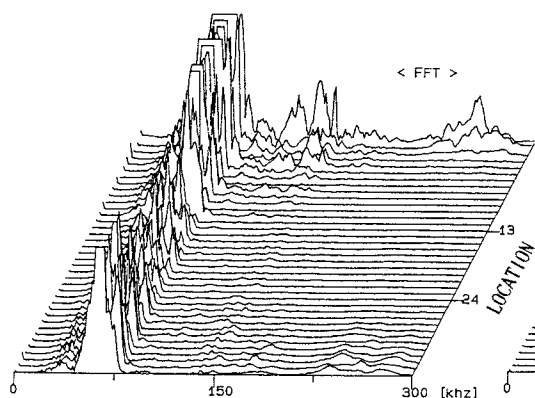


図9 A00のフーリエスペクトルによる比較

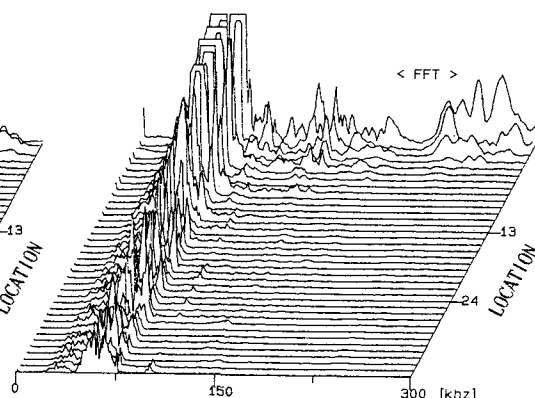


図10 A55のフーリエスペクトルによる比較

周波数 (kHz) で 300 kHz までを表示した。また奥行き方向の軸には測定面が表面から側面、側面から底面と変わる測点の番号を記した。試験体 A55 の内部欠陥によると考えられる特性は、測点 1～5 の 150 kHz 以上の周波数帯のピークが大きいことと a. の図 5 でも述べたように 100 kHz 付近のピークが測点 38 ばかりでなくほとんど全ての測点で見られる。また測点 25～38 までの最大ピーク値が小さいことも特徴である。

(2) モルタル長方形はりの実験結果

モルタル長方形はり M00 と M55 の実験結果の比較からモルタル中に作成したクラック (図 2 参照) による応力波の伝播特性を検討するものである。ここでは、アクリル試験体と対比させながら考察を行う。

図 11 はモルタル試験体 M00 と M55 (クラック有り) の測点 38 で測定された波形を比較した物である。横軸に経過時間 (μs)、縦軸に測定電圧 (V) を取っている。破線が M00、実線が M55 を示す。

実線と破線の比較からクラックの影響として最大振幅が1/4に減衰し、観測された波形の400 μ sまでにこの影響がみられる。モルタルのP波伝播速度は約4.7km/sとアクリルのP波伝播速度に比べて倍近く早くなり、S波も倍以上になる。このため測定された波形はP波、S波、反射波が接近した波形となる。このため各々の波形を区別して応力波動の伝播経路を特定するには数値計算によるシミュレーションを応用する必要がある。

図12は図6と同じくモルタル試験体M00とM55について測点14～38までの測点で測定された波形の最大値を比較した図である。破線はM00、実線はM55を示している。クラックの影響は、測点27～38に大きく現れている。この範囲はアクリル試験体のクラック影響範囲より狭くなっている。

a. 包絡線による比較

図13と図14は図7、図8と同じく包絡線によって試験体M00とM55を表示した図である。図13は測点1から入射点と同一面を伝播する表面波が伝播すると考えられる。この波形の伝播はアクリルの場合よりずっと急な勾配になっている。全体的に包絡線が短い周期で変化するのでアクリルの包絡線のように一定の形状で伝播する様子はとらえにくい。図14の測点25～38の包絡線の形状を図13と比較すると試験体内部のクラックの影響が現れている。

b. フーリエスペクトル

図15と図16は図9、図10と同じくフーリエスペクトルを比較して試験体M00とM55の周波数特性を検討する。試験体M55の内部欠陥によると考えられる特性は、測点14～24（側面）のピーク値が大きい、150kHz付近のピークがほとんど全ての測点でピークとしてみられることである。アクリルの場合と同じく測点25～38までの最大ピーク値が小さいことも特徴である。

5. 結論

本論文では超音波測定システムを用いてセンサーをアレー配置して長方形ばり中を伝播する応力波動の測定を行った。測定された波形は、P波初動到達時間、最大振幅、包絡線、フーリエスペクトル等の解析を行い内部にクラックがある長方形ばりの応力波動伝播特性の検討を行った。結果をまとめると次のようになる。

- 1) クラックの有無による最大振幅の比較からクラックの影響で最大振幅が小さくなる範囲を求めた。今後クラックの大きさや位置を決めるためには、入射点を移動させ入射点ごとの最大振幅の分布を解析する必要がある。また、P波初動到達時間を精度よく測定することによりクラックによって変わるP波の伝播経路を決めることも可能である。
- 2) 観測波形を包絡線表示することで波形の現象単位でとらえることができる。
- 3) フーリエスペクトルの比較からクラックの影響によるスペクトル値の減少する範囲やピーク周波数が数kHz変化することがわかった。

今回実験で使用した測定システムは均質な材料であるアクリル試験体については基本的に大きな問題は

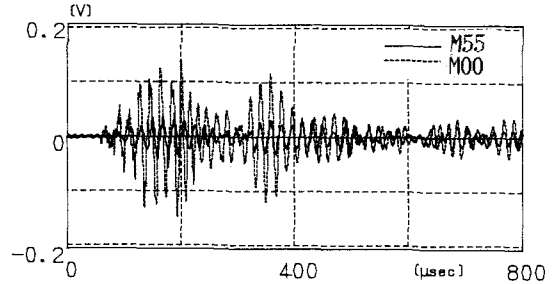


図11 M00とM55の観測波形の比較
(測点38)

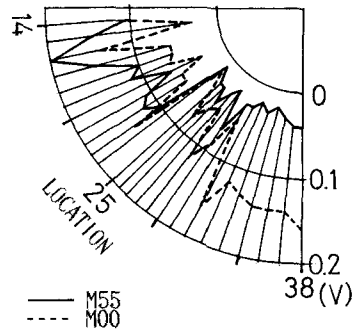


図12 最大振幅の比較

ないと考えられる。しかしモルタル試験体の場合センサー設置位置のモルタル表面の粗度によって測定にばらつきが生じた。今後センサー取り付け部のモルタル表面の仕上げ、センサー配置、入射波の周波数などの検討が必要であると考えられる。

本研究の実施に当り平成元年度・平成2年度文部省科学研究費奨励研究A（研究者三上修一）の補助を受けました。また、本研究の実験及び解析には池田央君（北見工大）の援助がありましたここに深く感謝します。

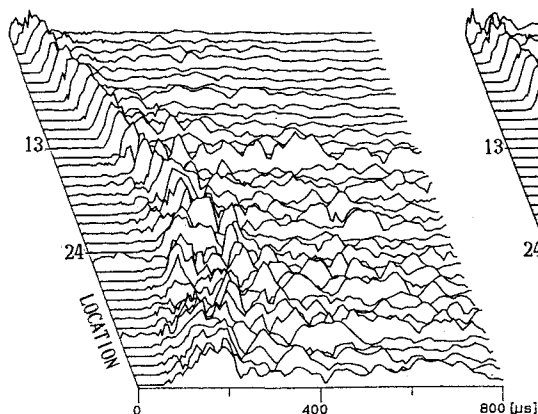


図13 MO0の観測波形の包絡線による比較

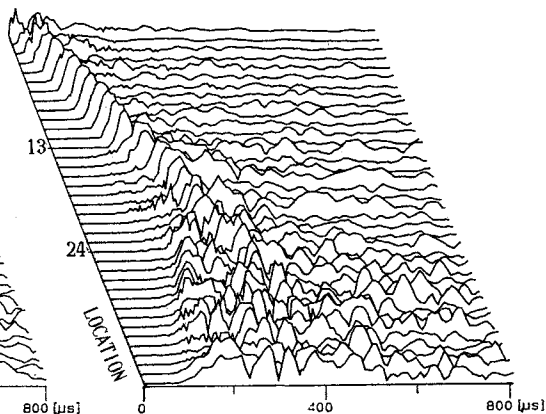


図14 M55の観測波形の包絡線による比較

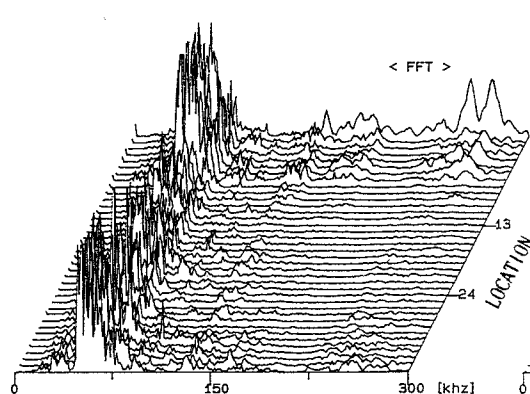


図15 MO0のフーリエスペクトルによる比較

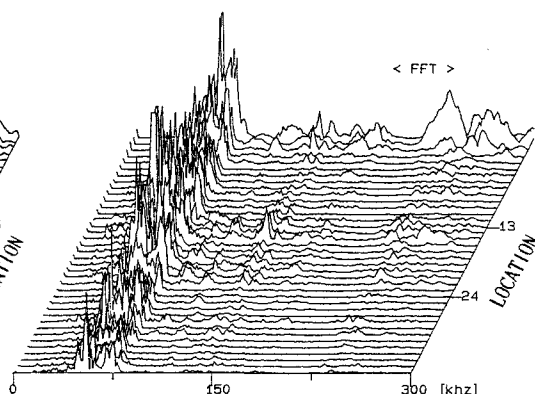


図16 M55のフーリエスペクトルによる比較

参考文献

- 1) 大島、三上、能町、重清：複合材料中の応力波速度と構造物の健全度評価への応用、構造工学論文集、Vol.32A、1986。
- 2) T.Oshima,S.Mikami,S.G.Nomachi,T.Kida:Stress Wave Propagation in a Rectangular Composite Beam,Proc. of Fourth Japan-U.S. Conference on Composite Materials, Washington.D.C.,1988.
- 3) T.Oshima,S.Mikami,S.G.Nomachi:Analysis of Stress Wave Propagation in Composite Rectangular Beam in the Case of Ultrasonic Pulse Method,土木学会論文報告集No.416/1-13、1990.4。
- 4) 三上、大島、能町：複合材料長方形ばりの応力波動解析とその健全度評価への応用、構造工学論文集、Vol.35A、1989。