

I-31 複合長方形梁の動的応答に関する研究

北見工業大学 正員 三上修一
同 正員 大島俊之
日大生産工学部 正員 能町純雄

1. はじめに

実構造物の老朽度や損傷の程度を判定し、その残存寿命を評価するためには、各構造要素についてひび割れの形状の把握や、材料の劣化の程度などいくつかの因子に対する総合的評価法の確立が必要である。このような中で、材料中に生ずる欠陥を非破壊的に検査する手法の確立は、構造物の適切な維持管理を行う上で重要である。著者らはこれまでに円柱、円板供試体中の材料の劣化やひび割れが応力波速度に及ぼす影響を検討して構造物の健全度評価に応用する研究を行った。本研究では複合長方形梁モデルとして、モルタルとアクリル長方形板の内部Inclusionによる応答特性に関する実験を超音波探傷システムを用いて解析した。また長方形梁をLaplace変換による帯板要素の動的応答解析を行い、実験結果との比較を行った。

2. 実験概要

供試体は図1に示すようなA～Kまでの10種類の供試体を作成した（以後の説明では図中の記号を用いることにする）。A～Gの供試体は、モルタルを母材とした場合の比較である。Aは高さ20cm、長さ70cm、厚さ3cmのモルタルだけの供試体である。B～Gは高さ40cm、長さ70cm、厚さ3cmの寸法である。Bはモルタル中に最大粒径20mmの粗骨材を配合したものである。C、Dはクラックモデルの長さを変えたものである。E～Gは鉄筋（ $\phi 19\text{mm}$ ）を等間隔で配置した供試体である。Eは、かぶり5cmの位置に鉄筋間隔5cmで、2列配置した供試体である。FはEを1列にしたものである。GはFを鉄筋間隔7cmと広げた供試体である。I～Kはアクリル樹脂を母材とした高さ40cm、長さ70cm、厚さ1cmの供試体である。Jは高さ10cmの部分でアクリル板を接着し、供試体の途中に境界面をつくったものである。Kは、角鉄棒（高さ20mm、厚さ30mm）をアクリル板の途中にはさんで接着した供試体である。

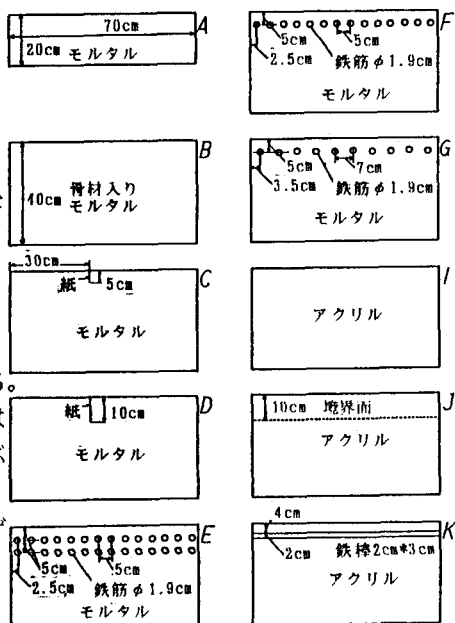


図1 供試体の種類

実験は、図2に示すようなブロックダイアグラムの超音波探傷システムを用いて行った。センサーにはAE-901S(共振周波数140KHz、以後901と呼ぶ)、AE-904S(500KHz、904と呼ぶ)、AE-906S(1500KHz、906と呼ぶ)を用いた。Transmitterは図2の測点Xに固定、Receiverを測点00から16まで移動させてP波到達時間の測定、波形の観測、記録、周波数解析を行った。測点の配置について

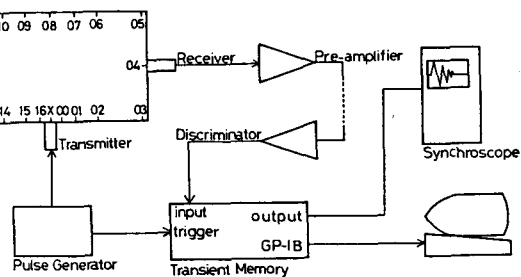


図2 システムダイアグラム

は図2に示すように供試体の長辺および短辺でそれぞれ対象とし、測点00はx点から4.375cm、01は8.75cm、02は17.5cm、03は35cmそれぞれ離れた位置にある。TransmitterとReceiverの選定は周波数特性を考慮して(901,904)、(904,906)、(906,906)の組合せとした。Transmitterには、電圧10V、継続時間10 μ secの方形波を加えて供試体に応力波を入射した。Trangent Memoryのサンプリング間隔は、50ns,100ns,200nsの3種類とし、サンプリング数は4096点である。

3. 実験結果

1) P波到達時間

ここでは、供試体A、C、D、G、Iについて図3に結果をまとめて示している。図3の縦軸は、応力波の伝播速度であり、横軸は各測点番号を示す。伝播速度は応力波の伝播経路が最短となる距離を仮定し、この距離と到達時間から伝播速度を求めた。従って内部のInclusionによる影響を受けると伝播速度は遅くなったり早くなったりすることが考えられる。ここでモルタルの応力波伝播速度は4.3km/sec、アクリルは2.5km/sec程度と考えられる。全体的には、05～11の測点での伝播速度はP波伝播速度に近い値に平均していることがわかる。また発信点側の測点では速度が遅くなる傾向がみられ表面や内部構造の影響が表れているものと考えられる。C、Dの供試体によるクラック長の変化による影響は、クラックが00と01の間にあることから01、02の測点に著しくみられクラック長が長いほど遅くなる傾向がみられる。また、AとIの供試体を比較すると、アクリルの場合測点08を基準としてほぼ対称となつていているが、モルタルの場合は左右のばらつきがみられる。これは、モルタルの不均質性によるものと考えられる。

2) 観測波形の考察

ここでは、アクリル板の波形を測点ごとに解析した場合について考察を行う。図4(a)、(b)、(c)に示したのは(906,906)のセンサーの組合せの時に00(-51.2 μ s),04(51.2 μ s),08(51.2 μ s)の各測点で観測された原波形を縦軸は単位[mV]、横軸は時間で単位[μ s]で表したものである。()内の数字は応力波の到達時間に応じてセットした遅延時間を示しており、図4の横軸を調整した時間である。(a)図は、入射点近傍のため入射波形に最っとも近似している。この波形は01,02,03と測点が遠くなるにしたがって減衰する傾向にある。(c)図は、入射点の対辺である08の測点の波形であるが、00の測点で観測された波形と相似の波形が第1波として観測され、次にその反射波と考えられる波形が第2波として観測されている。この傾向は06～10までの測点で同様である。(b)図は、測点04で観測された波形で、第3波目に最大振幅がみられる。これは、発信点の反対側の面で反射した波形と考えられる。図5は、(901,904)のセンサー

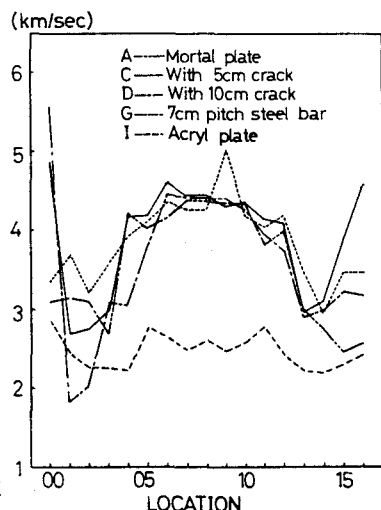
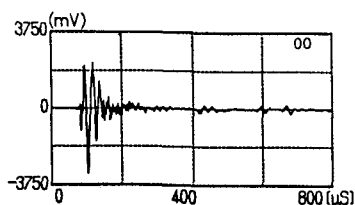
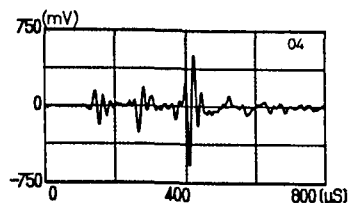


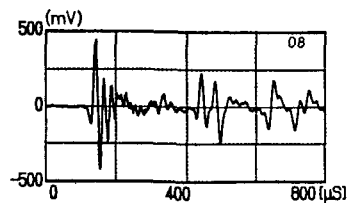
図3 測定位置と
応力波伝播速度の比較



(a) 測点00の波形



(b) 測点04の波形



(c) 測点08の波形

図4 測点による波形の比較

組合せの時に、供試体 I の測点00～03で観測された波形のP波到達時間とS波到達時間を測点毎に並べて比較したものである。この図で、P wave front はP波到達時間の位置を結んだものである。また、S wave front はP波到達時間より計算したS波到達時間の位置を結んだものである。発信点から測点が遠くなる時、P波とS波の到達位置の関係と、波形の伝播によって変化する様子が明らかとなる。

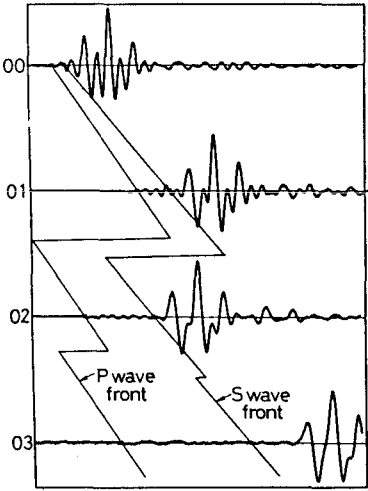


図5 波形伝達過程の比較

3) 周波数解析の比較

図6 (a)、(b) は、アクリル板 I とモルタル板 A の測点00の観測波形の周波数解析結果で(901,904)のセンサーの組合せで測定したものである。図6 (c)、(d) は同じ供試体の同じ測点で(906,906)のセンサーの組合せで測定したものである。縦軸はフーリエスペクトルの最大値で基準化し、横軸は周波数 (kHz) である。一般に受信波のスペクトル解析結果には供試体の特性の他に計測システムのフィルター特性が重なっているので、これらを分離することが必要であるが、そのためには供試体自身の応力波動特性を理論的に把握しておく必要がある。¹⁾

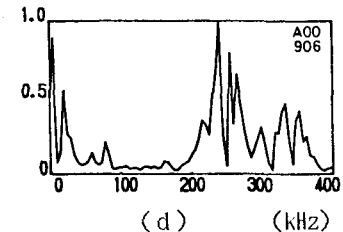
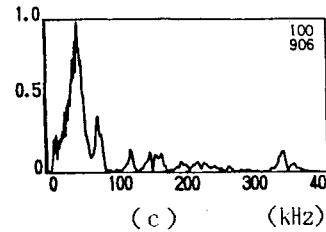
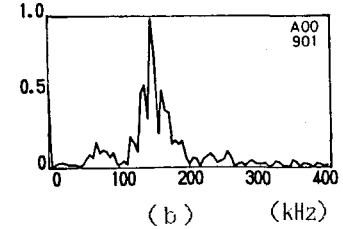
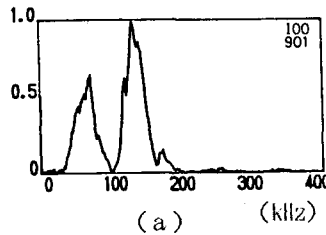


図6 周波数解析

4. 理論解析概要

図7のような帯板要素を考えると、二次元の動的つりあい式に、 x 、 y 両軸方向に有限Fourier変換を行い、時間軸に関してはLaplace変換を行う。 x 、 y 方向変位 U 、 V に関する像関数 $C_m S_n [U]$ 、 $S_m C_n [V]$ は境界物理量による2元連立方程式になる。この連立方程式を $S_n [U]$ 、 $C_n [V]$ について解き y 方向に逆変換し、有限Fourier逆変換公式を用いて閉じた形に整理すると、Laplace像空間での振動方程式が求まるので、繰返し法によりLaplace変換のパラメータに関する固有値を計算する。この固有値に対してHeavisideの展開定理を用いて部分分数に展開し、初期条件を考慮してLaplace逆変換と x 方向にFourier逆変換すると変位 u 、 v の動的応答値がもとまる。この応答値に対してDuhamel積分を施し、入射波の波形の重ね合わせを行うことにより応答変位が求まる。

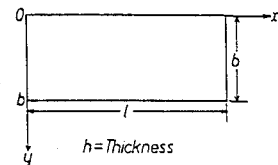


図7 帯板要素

5. 数値解析

数値計算に用いたモデルのデータは $E=21000 \text{ kgf/cm}^2$ ， $\nu=0.17$ ， $l=70 \text{ cm}$ ， $b=20 \text{ cm}$ ， $h=3 \text{ cm}$ ，

密度 $\rho = 2.133 \text{ gf/cm}^3$ とし、モルタルのみの供試体Aの諸元を用いた。また固有値はFourier級数のパラメータ $m=30$ まで、各パラメータごとに20個の固有値を求めて計算を行った。また入射波として(901,904)センサーの組合せで発信点近傍で測定したA供試体の波形を用いる。図8はこの数値計算結果を測点08での波形と比較したもので、実線が実験値、波線が理論値である。50 μsec までの波形について比較した結果、縦波動のみの部分では一致しているが曲げ波動が到達すると位相がずれてくることがわかる。

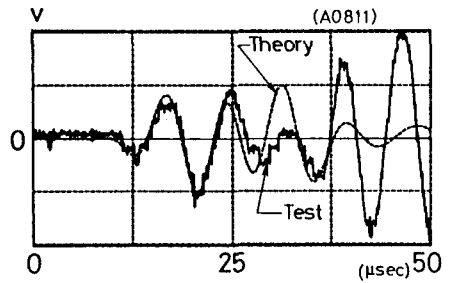


図8 理論値と実験値の比較

6. あとがき

以上の結果によれば、P波到達時間はクラックの深さなどの内部の構造の影響を大きく受ける。また波形解析結果においては、アクリル板による実験より応力波の伝播過程における波形の変形を確認することができた。帯板要素法による理論解析結果と実験結果の比較ではP波の到達初期において両者は一致した。本研究は文部省科学研究費一般研究(C)の補助を受けて行った。また本研究の実験及び解析は渡辺一雄君(北見工大)の卒業研究の一部として行ったものであります。

参考文献

- 1) 坂田、大津：弾性波フィルター特性によるコンクリートのひび割れ評価に関する基礎的研究、コンクリート工学 Vol.24 No7、1986.
- 2) 能町、角田、岸：薄肉H形断面ばりの弾性波の位相速度について、土木学会論文報告集 第244号、1975.
- 3) 大島、三上、重清、能町：複合円盤部材の応力波動解析と内部構造の標定に関する研究、構造工学論文集Vol.34A、1988.