

I-12 長方形ばりを伝播する応力波動の シミュレーション解析

北見工業大学	正員 三上 修一
同上	正員 大島 俊之
榊川田工業	正員 小笠原照夫
榊中神土木設計事務所	正員 本間美樹治

1. まえがき

本研究では超音波パルスエコー法により構造部材中に入射される応力波動を対象として、この応力波動の応答特性を検討する。すなわち構造部材中を伝播する応力波動が内部欠陥やInclusionによって散乱する挙動を解析するためには、健全な状態に対する応力波の応答特性を最初に把握しておくことが必要であり、そののち種々の影響を考慮して検討することになる。

本論文では、二次元積層長方形はり構造を有限帯板要素法を用いてモデル化し、衝撃パルスに対する応答をモード解析とDuhamel積分を応用して解析する手法を用いて、衝撃パルスの入力直後の過渡応答を追跡することを通じて、はり全体の振動モードに遷移していく過程をシミュレーション図形として可視化する。またはり内部に層状の補強材が存在するような構造部材に対して、層状の劣化層が存在する場合やその補強材が母材と剝離する場合のモデルについても計算しそれらの影響についてシミュレーション解析する。

2. 有限帯板法による動的応答解析

図1に示すような支間 l 、桁高 h 、板厚 b 、弾性定数 E 、ポアソン比 ν 、密度 ρ の帯板要素について変位の直線分布を仮定し二次元の動的釣合式にHookの法則による応力と歪の関係を用い、重み関数を考慮したGalerkin法を適用すると、2階線形連立偏微分方程式が得られる。これに、 x 軸方向に有限Fourier変換をほどこし、境界条件を考慮すると次のような運動方程式が得られる。

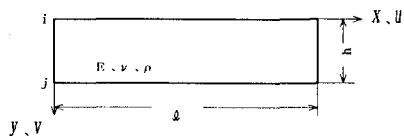


図1 有限帯板要素

$$[K] \{S_m[\delta]\} + [M] \{S_m[\delta'']\} = \{S_m[F]\}$$

ここで $[K]$ は剛性マトリックス、 $[M]$ は質量マトリックス、

$\{S_m[\delta]\}$ は変位の像関数ベクトル、 $\{S_m[F]\}$ は外力の像関数ベクトル、

" は時間の2階微分とする。

この式を各要素に適用して全体系の剛性方程式を作成する。次に外力ベクトルを零として固有値・固有ベクトルをもとめ、固有ベクトルの直交性と減衰項(減衰定数)を考慮すると、各モードにおける2階常微分方程式となる。この微分方程式を単位衝撃力に対する変位の衝撃応答関数を用いてDuhamel積分すると各モードにおける応答が求められる。これを x 軸方向に有限Fourier逆変換を行うと各点における応答が得られる。

Simulation Analysis of Stress Wave Propagation in Rectangular Beam
by Shuichi MIKAMI, Tosiya OSHIMA, Teruo OGASAWARA and Mikiji HONMA

3. 数値計算

以上のような解析理論により図2のようなモデルについて数値計算を行った。またモデルの寸法は支間 $l=160\text{cm}$ 、高さ $h=40\text{cm}$ 、板厚 $t=3\text{cm}$ で図に示す通り4層の複合長方形ばりである。有限帯板要素による動的解析の計算精度についての検討は、文献¹⁾において既に発表している。その結果 y 軸方向分割数20分割以上、Fourier級数の項数は80にとれば充分である。ここでは劣化層をモデル化することを考慮して y 軸方向分割数を40分割、Fourier級数の項数を80項までとした。入射応力波は図2に示すように支間中央上縁に入射幅 6cm 、入射継続時間 $50\mu\text{s}$ のパルス波とした。また、減衰定数 h_r を次のような関数とした²⁾。

$$h_r = \frac{15.5\omega_r}{13935 + \omega_r^2}$$

ここで ω_r は r 次固有円振動数(kHz)である。

表1に示す5つの鉄筋コンクリートモデルについて計算を行った。Type Iは鉄筋コンクリート、残りの4つのモデルは鉄筋コンクリートばりの劣化状態を弾性定数の低下や鉄筋とコンクリートの付着力低下をモデル化したものである。Type IIは鉄筋のかぶり部分(5cm)のコンクリートの弾性定数が劣化により減少したモデルである。Type IIIはType IIの劣化がさらに進み鉄筋層との間に腐食層ができた場合で、鉄筋とかぶり部分(4cm)の間に1cmの弾性定数のさらに減少した層(腐食層と呼ぶ)を設けてモデル化した。次に付着力低下をモデル化する場合、鉄筋とコンクリート層との間の付着力を T^* としたとき、付着力をバネ要素でモデル化する。かぶり部分のコンクリート層の水平変位成分を u_{ci} と鉄筋層の水平変位成分を u_{si} として次の関係を仮定する。

$$T^* = k(u_{ci} - u_{si})$$

ここで k はバネ定数(t/m)、サフィックスの c はコンクリート、 s は鉄筋を示し、 i, j は帯板要素の節点番号を示す。Type IVは $k=100000(\text{t/m})$ 、Type Vは $k=0$ の場合である。

3. 1 変位シミュレーション解析

数値計算は x 軸方向に41点、 y 軸方向に41点、合計1681点の変位(x 方向変位 u 、 y 方向変位 v)計算を各時間ステップ毎に行った。ここで時間ステップとして $30\mu\text{s}$ 、 $90\mu\text{s}$ 、 $150\mu\text{s}$ 、 $240\mu\text{s}$ 、 $300\mu\text{s}$ の5段階の各時間での変位伝播の様子について比較を行う。シミュレーション図(図3～図7)は x 軸方向の構造の対称性を考慮して支間中央より左半分について合成変位 $\delta = \sqrt{u^2 + v^2}$ を各節点の高さと見なしたときの等高線を $1 \times 10^{-6}(\text{m})$ 間隔で表示する。シミュレーション図中の Δ 印は等高線の最大変位を示す位置であり、その数値を各時間ステップの右上に示した。

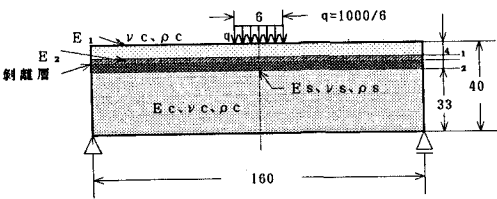


図2 複合長方形板モデル

表1 数値計算モデルの比較

	構造名	材料諸元
Type I	鉄筋コンクリート	$E_s=210\text{GPa}$ 、 $E_1=E_2=E_c$ $\nu_s=0.3$ 、 $\rho_s=7.85\text{g/cm}^3$ $E_c=30\text{GPa}$ $\nu_c=0.17$ 、 $\rho_c=2.3\text{g/cm}^3$
Type II	劣化層を考慮した鉄筋コンクリート	$E_1=2E_c/3=E_2$
Type III	腐食層を考慮した鉄筋コンクリート	$E_1=2E_c/3$ 、 $E_2=E_c/3$
Type IV	付着力を考慮した鉄筋コンクリート	$E_1=2E_c/3=E_2$ $k=100000\text{t/m}$
Type V	剥離層を考慮した鉄筋コンクリート	$E_1=2E_c/3=E_2$ $k=0$

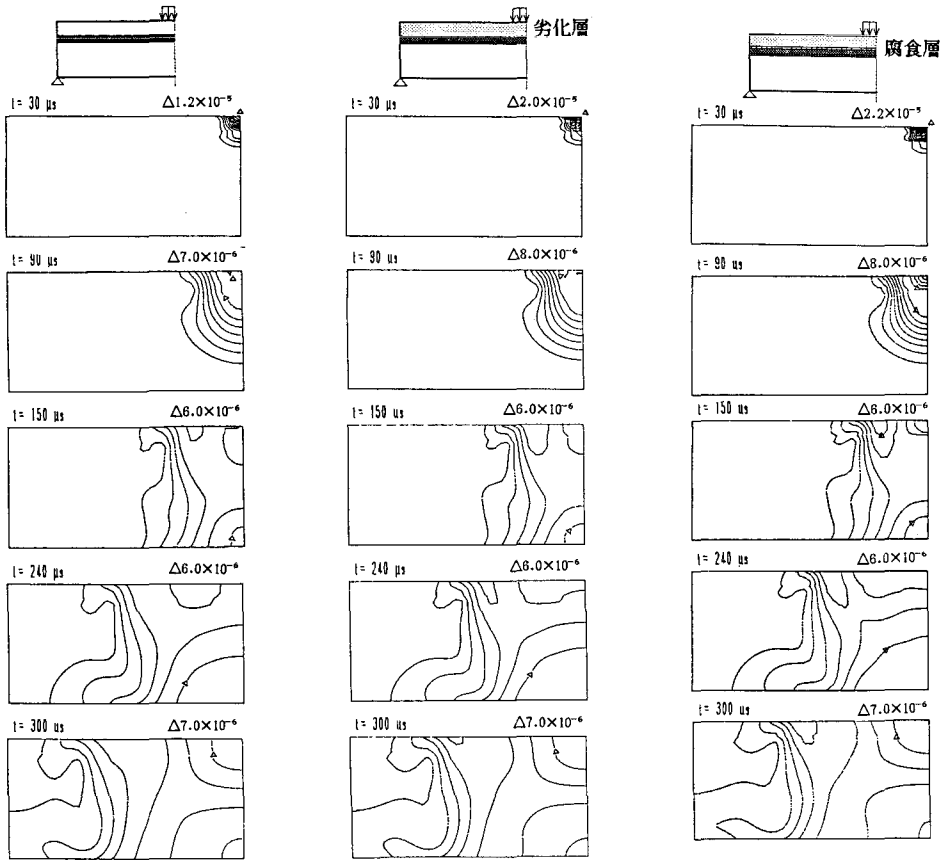


図3 Type Iの変位シミュレーション 図4 Type IIの変位シミュレーション 図5 Type IIIの変位シミュレーション

1) 劣化層の弾性定数による比較 (Type I、II、III)

Type I (図3)、Type II (図4) の比較では、第1時間ステップではType IIの入射点近傍の劣化層に変位分布の集中が顕著にみられ、最大変位で40%程の変位の増加がみられる。そのほかの時間ステップにおいては劣化層部分での変位伝播の遅れる傾向がはっきりとみられるが、はり下部の変位分布はほぼ一致している。Type III (図5) の場合劣化がさらに進み腐食層ができると、第1時間ステップの劣化層への変位集中がさらに顕著になるが、他の時間ステップでは劣化層部分での変位は大きくなるが、Type IIとの等高線分布の傾向にほとんど差がみられない。

2) 鉄筋とコンクリートの付着力による比較 (Type IV、V)

Type IV (図6) の第1時間ステップの最大変位をType II、III (図4、図5) と比較した場合、Type IVの変位が小さく、水平方向に変位分布が大きく現れている。これは、バネ要素によるせん断力の伝達で入射点付近の付着層の変位が水平方向に分散し入射点近傍の変位集中を小さくしたと考えられる。第2、第3時間ステップでは等高線の形状にはほとんど差がみられない。第4ステップ以降は、付着を考慮した劣化層に変位分布が速く伝播している。このことは時間ステップを経てはりの全体振動に移行する前には、バネによる付着力で一体構造として挙動していたはり全体振動に移行するに連れて二層ばりに近い挙動と

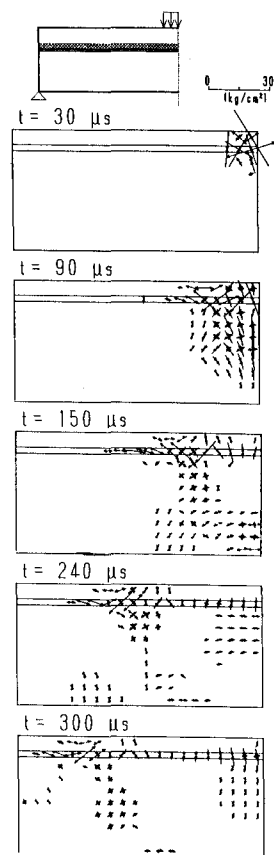
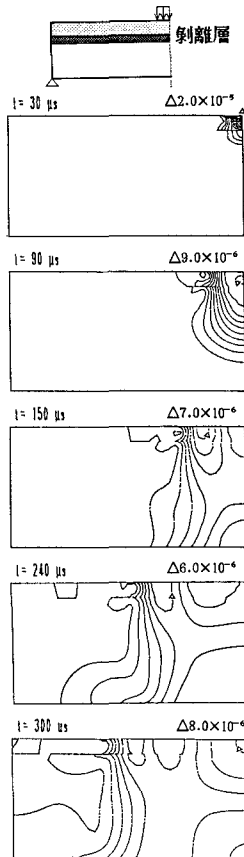
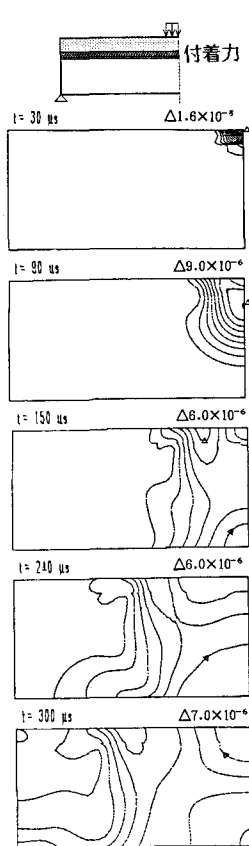


図6 TypeIVの変位シミュレーション 図7 TypeVの変位シミュレーション 図8 TypeIの主応力シミュレーション

なる。

Type V（図7）の第一ステップではType III（図5）の腐食層のあるモデルに近い等高線分布を示し、他のステップでは劣化層の変位分布が速く伝播している。また、はり下部においては逆に変位の伝播は遅くなる傾向がみられる。この場合には、第一ステップでは部分的変形段階であるため劣化層の変形にそのほとんどを依存した変形であるためType II、IIIとほとんど同じであるが、以後の時間ステップでは全体振動モードに移る前に劣化層とはり下部の振動に差があらわれ、全体振動に移行した段階では二層ばりの振動モードとなっている。

3.2 応力シミュレーション解析

ここでは、長方形ばりを応力波動伝播の過渡状態における応力状態の推移を把握することを目的とする。

応力シミュレーション図（図8、図9、図10、図11）は各点の主応力の大きさと方向を矢印の長さや方向であらわしたもので、各図の上部には30kg/cm²のスケールを示した。また、←→は引っ張り応力、→←は圧縮応力を示している。時間ステップは変位シミュレーションと同じ、30μs、90μs、150μs、240μs、300μsの5段階とした。ここでは、鉄筋コンクリートばりType I（図8）と劣化する鉄筋コンクリートばりとして3種類のはりType II（図9）、Type III（図10）、Type V（図11）について検討を行った。

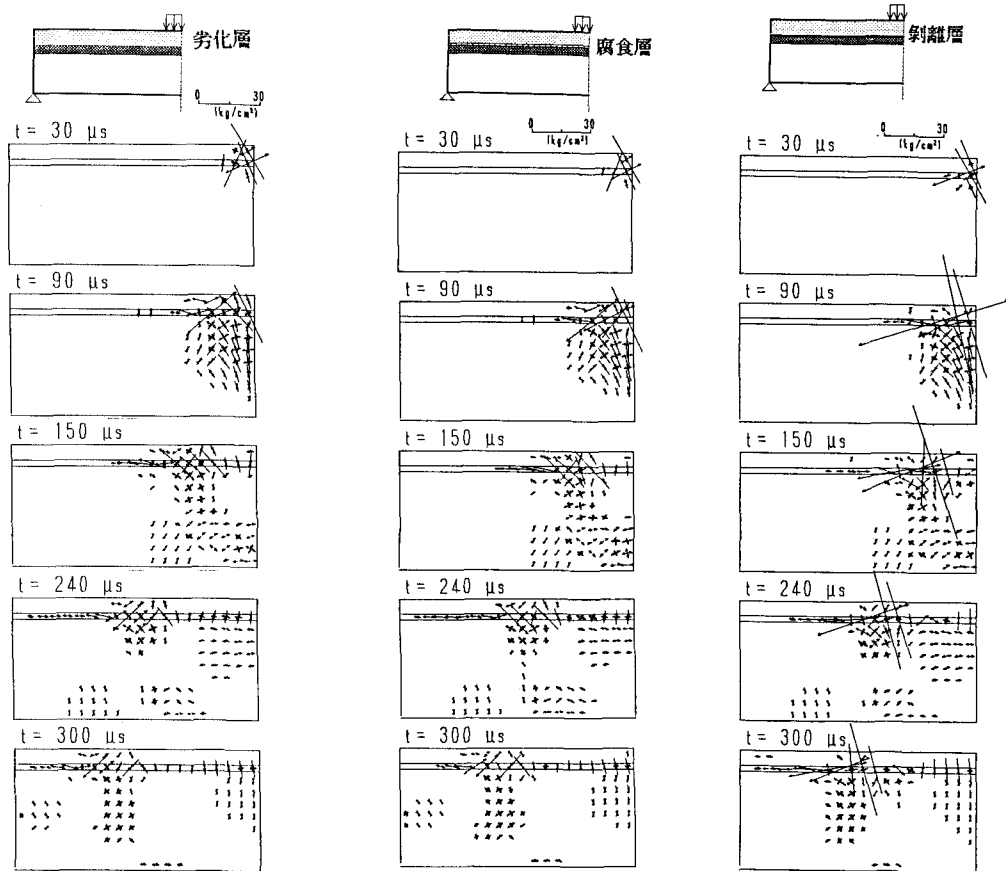


図9 TypeⅡの主応力シミュレーション 図10 TypeⅢの主応力シミュレーション 図11 TypeⅤの主応力シミュレーション

どのほりの場合も $30\mu\text{s}$ 、 $90\mu\text{s}$ の時点では、荷重点近傍に局所変形による主応力の集中が見られ、その後主波動が支点方向へ伝わる様子がわかる。また最大の主応力は鉄筋中を伝播する応力でその伝播する速さはコンクリート中よりもかなり速いことがわかる。また入射点近くの境界とその反対側の境界の間で y 軸方向に反射を繰り返す主応力の様子も確認された。第3時間ステップ以降鉄筋層には x 軸方向に引張り応力が作用し応力波が全体振動に移行する前の段階では固定ばりとしての振動モードであると考えられる。

弾性定数の減少による劣化度のモデル化の影響を比較するとTypeⅠに比べてTypeⅡ、TypeⅢと劣化度が増すにつれて鉄筋中の主応力は伝播速度が速くなる。しかし、劣化層を伝播する主応力は劣化度が増すにつれて伝播速度は遅くなる傾向にある。また、鉄筋層より下のコンクリート層については分布に大きな差がみられなかった。

剝離層を有するモデルTypeⅤはTypeⅡ、TypeⅢに比べて鉄筋との剝離による影響から、鉄筋内にはるかに大きい主応力が作用している。また主応力の伝播は全体的に遅くなっている。

4. おわりに

構造部材としての長方形ばりを用いた、衝撃パルスによる過渡応答問題の追跡を通して、長方形ばり中に劣化層をモデル化した場合の応答特性をシミュレーション解析した結果次のようなことが得られた。

- 1) 部材の劣化を弾性定数の減少や、劣化コンクリート層と鉄筋層の付着力の低下によりモデル化することによる影響を、はり全体の衝撃応答のシミュレーション解析を行うことにより劣化層に変位がどの様に分布しながらはり全体に伝播するかがわかった。
- 2) 主応力のシミュレーション解析を行うことにより、応力の集中する場所や、応力の伝播挙動を把握することができた。

本研究の実施に当り平成元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、北見工業大学開発工学科4年田中義信君の援助がありました。ここに深く感謝します。本研究の数値計算には北見工業大学情報処理センターのACOS910を使用した。

参考文献

- 1) 三上、大島、井上、菅原：長方形ばりを伝播する応力波の波動応答解析、土木学会第44回年次学術講演会 講演概要集、第1部門、1989.10.
- 2) 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.
- 3) 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.