

I-40

劣化した鉄筋コンクリートばりを伝播する応力波動のシミュレーション解析

北見工大 正員 三上 修一

北見工大 正員 大島 俊之

北大工学部 正員 角田典史雄

1. はじめに

構造物の健全度診断における内部欠陥評価の精度向上の要請から非破壊検査法の一つとして超音波パルスエコー法を用いた検査法が挙げられる。構造部材中の劣化状態を精度良く特定するためには構造部材中を伝播・散乱する応力波動の特性を明らかにする必要がある¹⁾。

著者らはこれまでに2次元複合長方形ばりの有限帯板要素法によるモデル化で時刻歴応答解析を行い、鉄筋コンクリートの劣化現象と応力波動の伝播特性に関する解析を行った²⁾。本論文では、鉄筋コンクリートのモデル化に際して、これまでの解析では考慮されていなかった鉄筋層によって上下に分けられていたコンクリート層を連結するような帯板要素を導入することによって、より現実的なモデル化を行なった。本論文では、鉄筋コンクリートの劣化現象や付着剥離等をモデル化して数値計算を行い、波動伝播に与える影響を検討した。鉄筋コンクリート中に発生する劣化現象には、中性化による強度低下、塩害や中性化現象の進展に伴う発錆等による鉄筋との付着力減少等が考えられる。鉄筋とコンクリートの間に一様に付着力の減少がある場合には、一方向に有限Fourier変換をほどこす有限帯板要素法(FSM:Finite Strip Method)による解析が有効である。このモデル化によってコンクリート中に埋め込まれている鉄筋の動的影響を検討することができ、また鉄筋コンクリートの劣化に伴う腐食や付着剥離による波動特性の影響を検討することができる。

2. 解析理論

図-1に示すような長方形ばりに対して、面外変形を考慮しない等方性弾性体として高さ h 、幅 b 、長さ l の微小変形を仮定した帯板要素を用いてモデル化する。鉛直方向に直線変化する形状関数を仮定し、長軸方向には連続関数を仮定する。このような帯板要素の微小要素について動的釣り合い

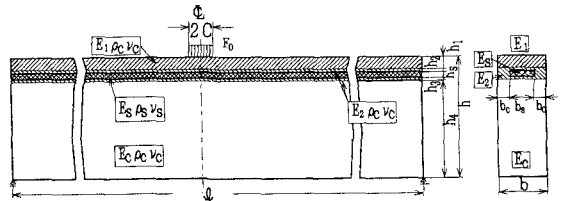


図-1 長方形ばりモデル

式を考え形状関数を重み関数としたガラーキン法を用いて部分積分を行い、境界条件を考慮して整理すると2階線形連立偏微分方程式となる。さらに x 軸方向にFourier変換をほどこし、単純支持の境界条件を考慮して整理すると、各変位成分に対すマトリックス表示が得られる。このマトリックスを全ての要素について剛性と質量の影響を重ね合わせると、次のような構造全体に対する運動方程式となる。

$$[K] \{Sm[\delta]\} + [M] \{Sm[\delta'']\} = \{Sm[F]\} \quad (1)$$

$\{Sm[\delta]\}$ は変位の像関数ベクトル、 $\{Sm[F]\}$ は外力の像関数ベクトルを表し、 δ'' は時間の2階微分を表す。 $[K]$ 、 $[M]$ はそれぞれ剛性マトリックス、質量マトリックスを表す。

次に自由振動問題として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。さらにこれ

Simulation Analysis of Stress Wave Propagation in Damaged RC Beam.

by Shuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA and Yoshio KAKUTA

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。

3. 数値計算モデル

(1) 積層モデルと改良鉄筋コンクリートモデルの比較

すでに述べたようにFSMによる複合構造のモデル化は積層状に要素分割して行う。鉄筋コンクリート構造物のようなコンクリート中に鉄筋が埋め込まれた構造物の場合、鉄筋層によって表層と下層のコンクリート間の連続性が損なわれる。特に、本解析では鉄筋層とコンクリート層の付着力をモデル化しており、表層と下層がコンクリートとしての連続性を保つような解析が必要となる。このため図-1の側面図に示すように鉄筋層の横にコンクリート要素を全体マトリックスに組み入れを行い表層と下層のコンクリートを直接つなぐようにした。これを改良鉄筋コンクリートモデルと呼び、従来のモデルを積層モデルと呼ぶことにする。両モデルの解析結果を合成変位を用いた等変位線で比較したのが図-2である。実線が改良RCモデル、破線は積層モデルである。解析したモデルは、両モデルとも付着力を零とした場合で、数値計算の詳細は第4章の通りである。この図はパルス波が入射されてから240μs経過したときのシミュレーション図である。これによると、積層モデルは表層の変位が下層に比べ先行して伝播し、下層では逆に伝播は遅れることがわかる。改良RCモデルは表層と下層のコンクリートの変位の連続性が保たれることがわかる。

(2) 劣化した鉄筋コンクリートのモデル化

コンクリート構造物は自然環境下で中性化、凍害、塩害等様々な劣化作用を受ける。これら構造物が受ける劣化現象をマクロ的に評価する方法の一つとして弾性係数の変化ととらえることができる。また、中性化が進行したコンクリート構造物の強度は30%~75%程度の強度低下が報告されている^{3),4)}。また、これらの劣化が進展するとかぶり不足やひび割れによる塩分浸透などによって鉄筋の発錆をまねく。この発錆はコンクリートとの境界で膨張し、一時的には鉄筋との付着増加につながる。しかしこの膨張は鉄筋周囲のコンクリートに引っ張り力を作用させて微細なひび割れを発生させる原因となり、しいては付着力の低下をもたらすことになる⁵⁾。ここではコンクリート構造物の表層劣化を弾性定数の低下としてモデル化し数値計算を行う。表層弾性係数を劣化の程度により3段階に分けて表-1に示すようにモデル化した。

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長軸方向付着力 T^* をバネ要素でモデル化して評価する。かぶり部分のコンクリート層の水平変位成分を $u_{c,j}$ と鉄筋層の水平変位成分を $u_{s,i}$ として次の関係を仮定する。

$$T^* = k(u_{c,j} - u_{s,i}) \tag{2}$$

ここで k はバネ定数(tf/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。付着力を考慮するモデルを次の2種類とした。表層側の一面付着力 k_1 を考慮したTypeIV、さらに下層の付着力 k_2 を考慮して二面付着力としたTypeVである。付着バネ要素のバネ定数は $k = 200000, 100000, 10000, 0$ (tf/m)の4種類について解析を行った。

4. 数値計算結果

数値計算結果は、変位と速度を求めた。変位と速度の応答は600μsまでの経過時間に対して解析を行い、比較検討を行った。また、これとは別にx方向81節点、y方向41節点の各合成変位を求め、はりの左半分

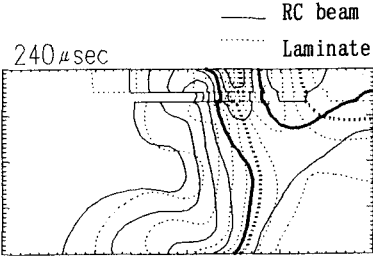


図-2 積層モデルと改良RCモデルの比較

表-1 表層劣化モデル

	劣化状態	表層弾性係数
I	劣化	$E_1=2E_c/3, E_2=E_1$
II	腐食 1	$E_1=2E_c/3, E_2=E_c/3$
III	腐食 2	$E_1=E_c/3, E_2=E_1$

ついて $30\mu\text{s}$ 毎に $1\mu\text{m}$ 間隔($5\mu\text{m}$ 毎に太線)の等変位線を求めて各時間ステップ毎の変位の傳播状況の比較検討を行った。ただし、鉄筋層とコンクリート層が重なる部分は鉄筋層の変位を用いて合成変位を計算した。この図(図6参照)は、応力波が入射されると長方形の枠の右上部より下方へさらに左下の支点方向へと変位が傳播する様子を表す。ここで数値解析に用いた定数を次に示す。支間長 $l=1.6\text{m}$ 、高さ $h=0.4\text{m}$ 、幅 $b=3\text{cm}$ 、荷重幅 $2c=6\text{cm}$ 、 y 方向分割数 $N=40$ 、Fourier級数の項数 $M=80$ 、各部の高さは $h_a=2\text{cm}$ 、 $h_1=4\text{cm}$ 、 $h_2=1\text{cm}$ 、 $h_3=h_2$ 、 $h_4=32\text{cm}$ 、材料定数は $E_c=30\text{GPa}$ 、 $\nu_c=0.17$ 、 $\rho_c=2.3\text{g/cm}^3$ 、 $E_s=210\text{GPa}$ 、 $\nu_s=0.3$ 、 $\rho_s=7.85\text{g/cm}^3$ 、入射継続時間 $T_p=50\mu\text{s}$ 、解析時間間隔 $\Delta t=2\mu\text{s}$ 、最大解析時間 $T=600\mu\text{s}$ 、減衰定数 $h_r=b\omega_r/(a+\omega_r^2)$ 、ここで E は弾性係数、 ν はポアソン比、 ρ は質量密度を表し、添字 c はコンクリート、 s は鉄筋を表す。 a 、 b は実験より求められる定数、 ω_r は固有円振動数(KHz)である²⁾。

(1) 鉄筋量による応答の比較

コンクリートに対する鉄筋量の比率を1%($bc=12.1\text{mm}$, $bs=5.9\text{mm}$)から5%($bc=0.7\text{mm}$, $bs=28.6\text{mm}$)へ変化させた時の応答の比較を行う。数値計算は表-1のType IIのモデルについて解析を行った。図-3は鉄筋比1%、5%の場合の下辺 $l/4$ 点での速度応答を表す。実線が1%($rs1$)の場合、破線は5%($rs5$)の場合である。鉄筋量の増加に伴い、 $50\mu\text{s}$ 以降の応答が小さくなり、高周波成分が増える傾向にある。また全体として位相の遅れが見られる。以下の劣化現象の検討は鉄筋量2%($bc=6.1\text{mm}$, $bs=11.8\text{mm}$)の場合について計算を行っている。

(2) 表層劣化の影響

鉄筋コンクリートばかりが健全な状態を表層コンクリートの弾性係数が全て E_c としたとき、表-1のType I ~ IIIの表層の劣化が進展した状態と比較して波動傳播特性の検討を行う。図-4は入射点での変位 v の応答波形をType III(実線: $ca2$)と健全な鉄筋コンクリート(破線: $ca0$)を比較した図である。図-5は下辺 $1/4$ 点での変位 v を図-4と同様の比較を行った図である。劣化が進展すると変位応答の最大値が大きくなり、弾性係数が $1/3$ になると、 y 方向変位で2.6倍となる。これは表面層の弾性係数が小さくなると入射点近傍に変形が集中するためである。また、表層では x 方向の波動傳播に遅れが見られる。また、下面の応答も劣化の進展に伴い大きくなるが、表面で見られるほど大きな差とはならず、位相の遅れも小さい。また、等変位線によるシミュレーション図から劣化の進展に伴い変位傳播が遅れていることがわかる。しかし、はり下層部分での遅れは、変位が支点に到達する $240\mu\text{s}$ 頃にはあまり差が見られなくなる。図-6に

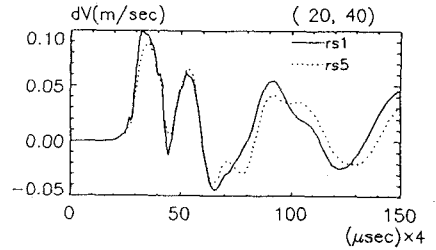


図-3 鉄筋量による速度応答の比較
(下辺、 $l/4$ 点)

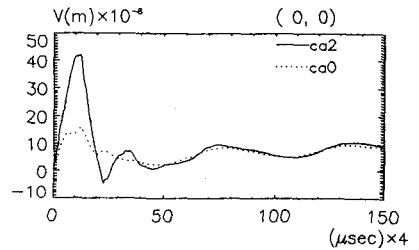


図-4 表層劣化による変位応答の比較
(上辺、支間中央)

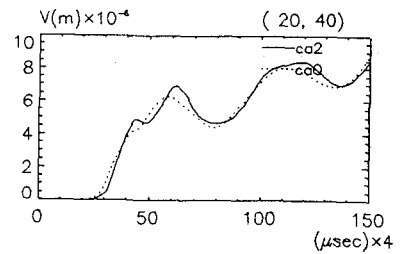


図-5 表層劣化による変位応答の比較
(下辺、支間中央)

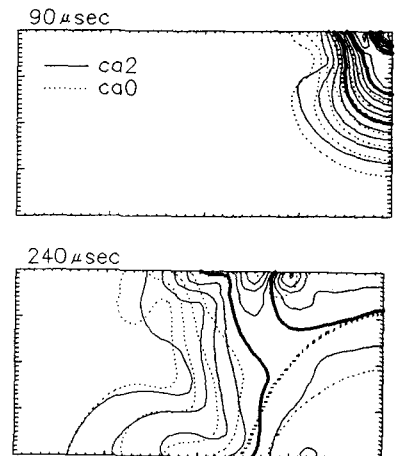


図-6 表層劣化による変位シミュレーション

示すシミュレーション図は図-4と同様の比較を時間ステップ90 μs と240 μs の等変位線図で行った。

(3) 付着剥離の影響

ここではType IV、Vの付着面を考慮したモデルについてその付着力をパラメータとして数値計算を行いその特性について検討を行う。図-7は $k_1=0$ 、 $k_2=10000$ のとき(bo32)と付着力を考慮しないType II(rs2)の時間ステップ180 μs 、270 μs の等変位線図を示す。鉄筋層の上下2面で付着力が弱くなるType Vのモデルでは鉄筋層とコンクリート層のつながりが弱くなると、波動が支点方向に伝播する過程で鉄筋層との付着力低下の影響が見られるが、波動が支点に到達する240 μs 以降ではその影響は少なくなる。しかし、両面の付着力が零の場合(bo33)には図-8に示すように時間ステップ270 μs での鉄筋層とコンクリート層の剥離部分の影響が大きい。このほかの結果から全体として付着力が弱くなると表層でのx軸方向変位の伝播が遅くなる傾向が強くなる。しかし、下層への鉛直方向の変位伝播は付着力の変化にほとんど影響を受けないことがわかる。

5. 結 論

劣化した鉄筋コンクリートの波動伝播特性をシミュレーション解析を行った結果次のようなことが得られた。

- (1) 改良RCモデルは積層モデルと比較して表層と下層のコンクリートの変位の連続性が保たれる。
- (2) 鉄筋量の増加に伴い速度応答は、高周波成分が増え、位相の遅れが大きくなる。
- (3) 表面層の弾性係数が小さくなると入射点近傍に変形が集中するため、表層ではx方向の波動伝播が遅れが見られる。また、下面の応答も劣化の進展に伴い大きくなるが、表面で見られるほど大きな差とはならず、位相の遅れも小さい。
- (4) 付着力が弱くなると表層でのx軸方向変位の伝播が遅くなる。下層への鉛直方向の変位伝播は付着力の変化にほとんど影響を受けない。

なお本研究は平成5年度文部省科学研究費一般研究C(代表者・大島俊之)の補助を受けました。

参考文献

- 1) 構造工学委員会非破壊評価小委員会：土木構造・材料の定量的非破壊評価へのアプローチ、土木学会論文集、第428/I-15、pp9-26、1991.4.
- 2) 大島、三上、小笠原、本間：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、土木学会北海道支部論文報告集、第46号、pp.61-66、1989.2.
- 3) 今井、中沢、枝元、赤木：既存鉄筋コンクリート橋の劣化・損傷について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp915-920、1992.
- 4) 丸山弘、小野島守：コンクリート橋梁の劣化診断技術に関する調査、コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp65-70、1993.4.
- 5) 米田直也、丸山久一、清水、柳：鉄筋の発錆による付着劣化機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、1992.

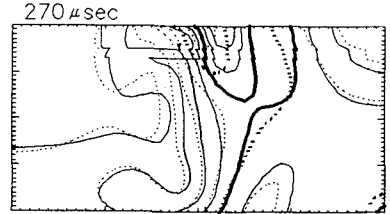
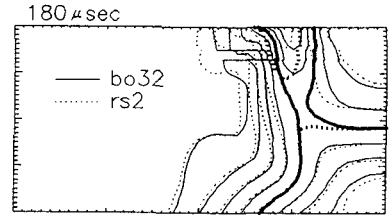


図-7 付着力による変位シミュレーション (Type V ($k_1=0$ 、 $k_2=10000$)、rs2)

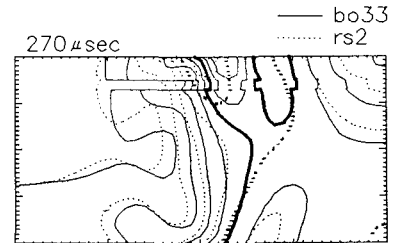


図-8 付着力による変位シミュレーション (Type V ($k_1=0$ 、 $k_2=0$)、rs2)