

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⁾。

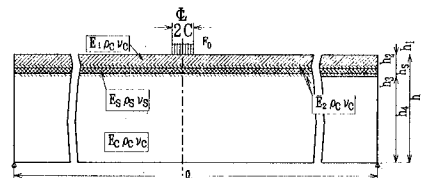
著者らはこれまでに2次元複合長方形ばりの有限帯板要素法によるモデル化で時刻歴応答解析を行い、鉄筋コンクリートの劣化現象と応力波動の伝播特性に関する解析を行った²⁾。本論文では、鉄筋コンクリートの付着力のモデル化を行い、付着力の減少や剥離等による劣化現象が波動伝播に与える影響を検討した。

2. 鉄筋コンクリートばりの付着力のモデル化

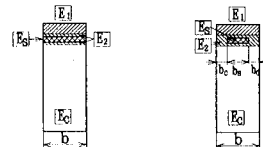
図-1に示すような長方形ばりに対して、面外変形を考慮しない等方性弾性体として高さ h 、幅 b 、長さ l の微小変形を仮定した帯板要素を用いて構造全体に関する運動方程式を求める。ここでは、減衰項（減衰定数）を考慮したモード解析とDuhamel積分によって単位衝撃力に対する変位応答が求められる。FSMによる複合構造のモデル化は図-1に示すように積層状に要素分割して行う。鉄筋コンクリート構造物のようなコンクリート中に鉄筋が埋め込まれた構造物の場合、コンクリートと鉄筋の断面比率により等価な換算弾性係数、換算密度を持つ鉄筋層を仮定してモデル化する。ここでは鉄筋の発錆等による劣化現象の波動伝播特性を検討するために、鉄筋とコンクリート間の付着力を考慮したモデル化の検討を行うことにする。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^* の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 $u_{0,j}$ 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。

$$T^* = k (u_{0,j} - u_{s,i}) \quad (1)$$

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。このようなモデル化を行う場合、鉄筋層によってその上層・下層のコンクリート間の連続性が損なわれる。鉄筋層とコンクリート層の間の付着力による応力波動伝播特性を検討するような場合には、上層と下層のコンクリートの連続性を保つような解析が必要となる。このため図-1(c)の側面図に示すように鉄筋層の横に上層コンクリートと下層コンクリートを連結するコンクリート要素を全体マトリックスに組み入れた。これを改良RC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(b033)、破線は積層モデル(1a33)である。解析したモデルは、鉄筋層の上下の付着力を零とした場合で、積層モデルの鉄筋層は換算弾性係数、換算密度を用いている。また、数値計算に用いた諸元は3.で示す通りである。この図はパルス波が図中右上から入射されてから240 μ s経過



(a)正面図



(b)積層モデル断面 (c)改良RCモデル断面

図-1 積層長方形ばりモデル

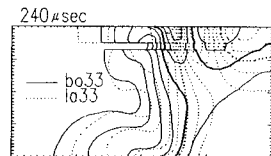


図-2 積層モデルと改良RCモデルの比較

したときのシミュレーション図である。積層モデルは上層の変位が先行して伝播し、下層では逆に伝播は遅れることがわかる。改良RCモデルは上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り、付着力をパラメータとした伝播特性の検討が可能となる。

3. 数値計算

数値計算は、 x 方向81点、 y 方向41点の各点の x 、 y 変位を $30\mu\text{s}$ 時間ステップ毎に求めた。解析結果の表示は、はりの左半分について各点の合成変位を求め、等変位線（ $1\mu\text{m}$ 間隔実線、 $5\mu\text{m}$ 毎に太線）を求めて各時間ステップ毎の変位の伝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。また、各点の変位より要素の応力 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} を求め、各応力について等応力線による比較を行った。ここで数値計算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 $h_s=2\text{cm}$ 、 $h_1=4\text{cm}$ 、 $h_2=1\text{cm}$ 、 $h_3=h_2$ 、 $h_4=32\text{cm}$ 、鉄筋量2%、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⁾。

鉄筋の付着力を考慮するモデルを次の2種類とした。上層と鉄筋の一面付着力 k_1 を考慮したTypeIVと、さらに鉄筋と下層の間の付着力 k_2 を考慮して2面で付着力を考慮したTypeVである。付着バネ要素のバネ定数は $k=200000$ 、 100000 、 10000 、 $0(\text{tf/m})$ の4種類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-3は付着力を考慮しないモデル(bo00)の入射波を図中右上から入射してから時間ステップ $120\mu\text{s}$ 経過した τ_{xy} の等応力線図を示す。図-4はTypeIVの $k_1=0$ のとき(bo30)、図-5はTypeVのモデルで鉄筋層の上下2面で付着力を零とした場合(bo33)である。ここで、図中の破線は負のせん断応力、実線は正のせん断応力を表わし、等応力線間隔は 20tf/m^2 とする。付着力が小さくなると、波動が支点方向に伝播する過程で、鉄筋層内に正負のせん断応力が交互に分布するのが見られる。さらに、両面の付着力が零の場合(bo33)には鉄筋層近くの下層コンクリート部分にも剥離の影響が見られる。

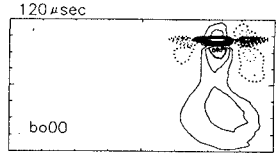


図-3 せん断応力シミュレーション
(付着考慮なし、bo00)

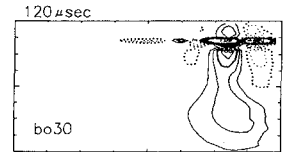


図-4 せん断応力シミュレーション
(TypeIV ($k_1=0$))

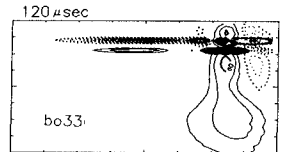


図-5 せん断応力シミュレーション
(TypeV ($k_1=0, k_2=0$))

4. 結論

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用いて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上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を示し、付着を考慮した鉄筋コンクリートの波動伝播特性の解析を行った。
- (2) 付着力が弱くなると鉄筋中を伝播するせん断応力が x 軸方向に早く伝播し、鉄筋層近くの下層コンクリート部分にも付着力低下の影響が見られる。

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.