

## 論文

## [1115] 軽い衝撃荷重を受けるコンクリート部材の応答解析

正会員○白鳥雅也(山梨大学大学院)

正会員 梶 貝 勇(山梨大学土木環境工学科)

正会員 岡村雄樹(山梨大学土木環境工学科)

## 1. まえがき

近年、交通量の飛躍的増大、大型車両の増加などにより、道路橋RC床版のひび割れ、早期劣化、鉄筋の腐食といった損傷問題が社会的に大きな関心を集めている。この様な状況下、維持管理を合理的に行うために必要となるRC床版の損傷メカニズムの解明と損傷評価に関する研究が関係各機関で精力的に実施されてきている。現時点までに得られている研究成果によると、RC床版の損傷のメカニズムは、貫通ひび割れの発生、漏水と遊離石灰の溶出、輪荷重による貫通ひび割れ面のすりみがき作用、ひび割れの拡大の経緯をたどり、最終的には床版のせん断抵抗力の低下を引き起こす、と考えられている。この損傷メカニズムによると、RC床版の損傷は貫通ひび割れの発生状況を詳細に調査すればその程度がわかることになり、現状のRC床版の損傷状態の調査も、床版下面のひび割れを目視観察することによって行っている。しかし、この目視観察による損傷度判定方法は、定量的な把握を欠き個人差を生じやすく判定結果に主観的あいまいさが付随すること、さらに多大な時間と労力がかかることなどの問題を抱えている。筆者らは、この様な事情を考慮して、RC床版のひび割れ発生状況を定量的に且つ容易に測定できることを最優先に考えた非破壊試験方法の確立を目指した研究を行ってきている。その方法は、RC床版に小さな衝撃力を与え、衝撃に対するRC床版の加速度応答を解析することによって、RC床版に発生したひび割れの状態を定量的に調べるものである。これまでに、筆者らが実施したRC床版をモデル化した供試体を用いた試験の結果[1]から、加速度波形の振幅および周波数分布の変化に着目することで、RC床版に生じたひび割れ発生状態を把握できることが確かめられている。しかしながら、衝撃応答特性によるひび割れ評価を実橋RC床版で行うためには、橋の構造形式、床版厚などの相違等が加速度応答に及ぼす影響を明らかにしなければならないが、これらを実験のみによって解決するには限界があり、解析的アプローチが必要となる。

本論文は、軽い衝撃荷重によるRC床版の応答を解析面より検討する第一段階として、ひび割れの無い無筋コンクリートはりの衝撃応答を有限要素法によって解析する上での問題点について実験結果と比較して検討を行った結果を示したものである。

## 2. 解析方法の概要

## 2.1 有限要素

動的な応答解析を行う手法としては、波動方程式を差分法などを用いて解くことも考えられるが境界条件の設定が難しいこと、また境界条件が変化するつど計算プログラムの変更を要することなどの問題がある。それに対し有限要素法解析はプログラムの変更なく各種の問題に適用できる利点があるので、本研究においては、衝撃応答を振動問題としてとらえ、有限要素法を適用して解くこととした。本研究で用いた有限要素は(1)三角形一次要素、(2)四辺形双一次要素、(3)四辺形二次要素の3種類である。(1)は変位を一次式で近似するため、ひずみや応力は要素内で

一定となる。よってひずみの変化が大きい部分では要素を細かく分割するのが望ましいが、ここでは簡単のため等分割での解析を行った。(2)は四辺形要素のうちで最も簡単なもので、形状関数が2次式であるため、要素の境界線上での変位が一次式であらわされる。(3)は四辺形の頂点と4辺の midpoint にそれぞれ節点を設けたもので、要素の境界線上での変位が二次曲線であらわされるため、今回用いた3つの要素の中では最も精度が高いと思われるものである。尚、いずれの場合も剛性マトリックス[K]は2次元の平面応力問題として定式化したものを用いた。

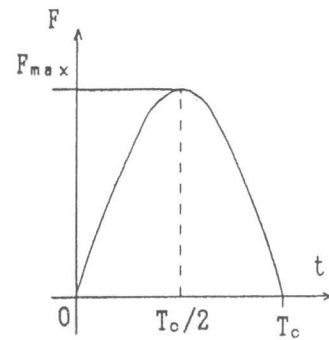


図-1 荷重のモデル

## 2.2 質量マトリックス

質量マトリックス[M]としては、2次元の要素に分布している質量をそのまま表現する分布質量マトリックスを用いる方法と、質量は節点に集中していると近似した集中質量マトリックスを用いる方法がある。本研究ではこのうち取扱いの容易な集中質量マトリックスを用いた。

## 2.3 応答解析の方法

応答解析として、Newmarkのβ法による時刻歴応答解析とモーダル解析を行った。β法については、β=1/4、時間ステップΔt=1μsec.の条件で解析を行った。また、減衰としては粘性減衰のみを考慮し、減衰マトリックス[C]は[M]に比例するものとして、[C]=α[M]、[(α=c/ρ), c:粘性減衰係数、ρ:密度]とした。モーダル解析においては、固有値{λ}、固有ベクトル{u}の計算は、一般化固有値問題[K]{u}={λ}[M]{u}をコレスキー法を用いて標準の固有値問題に変換し、ハウスホルダー法及び陰QL法によって、全固有値と全固有ベクトルを求めることとした。さらに求められた固有値、固有ベクトルを用いて、特定の外力に対する時刻歴応答を計算した。ここでΔt=1μsec.で、減衰としては粘性減衰のみを考慮した。また、モーダル減衰定数ξは全てのモードに対して一定として取り扱った。

ある時刻における、節点iのj次のモードによる応答加速度成分をA(i,j)とすると、全加速度に対するj次モード成分の寄与率は式(1)で表すことができる(ただし、nはモード数)。

$$\text{加速度寄与率} = A(i,j) / \{ A(i,1) + A(i,2) + A(i,3) + \dots + A(i,n) \} \quad \dots \dots \dots (1)$$

各時刻における加速度寄与率を求めることによって、重要な振動モードを把握することが出来る。すなわち、応答計算を2048ステップ行ったなかで、1000ステップ以上の時刻において加速度寄与率が10%を越えたものを重要な振動モードと定義した。

## 2.4 衝撃荷重のモデル化

3.に述べるように、実験においては、コンクリート供試体に鋼球を落下させて衝撃力を与えており、これをどの様にモデル化するかは検討を要する問題である。本解析においては荷重波形として矩形および半波長sin曲線を用いた予備計算の結果も参考にして、第一近似として衝撃力(F)を半波長のsin曲線でモデル化した(図-1参照)。また、解析に用いた荷重の接触時間(T<sub>c</sub>)は、Carinoらの論文[2]に示されている式(2)から求まる値を参考にして、50μsec.とした。

$$T_c = 5.97 [ \rho_s (\delta_p + \delta_s) ]^{2/5} R / (h)^{0.1} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\delta_p = (1 - \nu_p^2) / \pi E_p$ 、 $h =$ 落下高さ(m)、 $\delta_s = (1 - \nu_s^2) / \pi E_s$ 、 $\nu_p =$ 落下面材質のポアソン比、 $T_c =$ 接触時間、 $\nu_s =$ 鋼球のポアソン比、 $\rho_s =$ 鋼球の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $E_p =$ 落下面材質の弾性係数(N/m<sup>2</sup>)、 $R =$ 鋼球の半径(m)、 $E_s =$ 鋼球の弾性係数(N/m<sup>2</sup>)

鋼球の質量、落下高さをそれぞれ $m, h$ とすると荷重の最大値 $F_{max}$ は式(3)によって求められる。

$$F_{max} = m\sqrt{2gh} / (0.637T_c) \quad (g: \text{重力加速度}) \quad \dots \dots \dots (3)$$

### 3. 実験の概要

実験においては、コンクリートはり供試体の上表面に鋼球を落下して衝撃を発生させ、その衝撃に対する鉛直方向の応答加速度を、供試体上表面の測定点において、圧電型加速度センサー(周波数特性2Hz~40kHz)を用いて測定し、加速度波形および周波数特性を調べた。

試験に用いた供試体は、幅3cm高さ10cmの矩形断面を持つ、スパン90cmの無筋コンクリート単純はりで支点は幅10cm厚さ5mmの硬質ゴムで支持した(図-2)。断面の幅を極力小さくしたのは、平面応力状態を仮定した解析との整合を図るためである。衝撃発生点は、供試体端から20cmの点で測定点はそのから10, 30, 50cm離れた点にそれぞれ1, 2, 3点として設けた。用いたコンクリートは水セメント比50%、粗骨材の最大寸法15mmのものである。試験時における物性は、ヤング係数 $E_c = 3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  ポアソン比 $\nu = 0.2$ 、密度 $\rho = 2.3 \text{ g/cm}^3$ であった。

衝撃の発生は、重さ28.2gの鋼球を3.2cmの高さから、コンクリート表面に接着した直径2cm, 厚さ0.6cmの鋼板

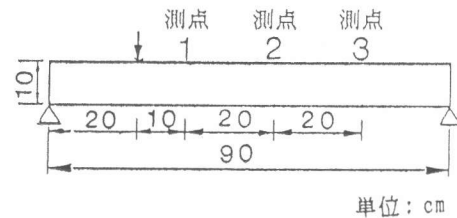


図-2 供試体の概要

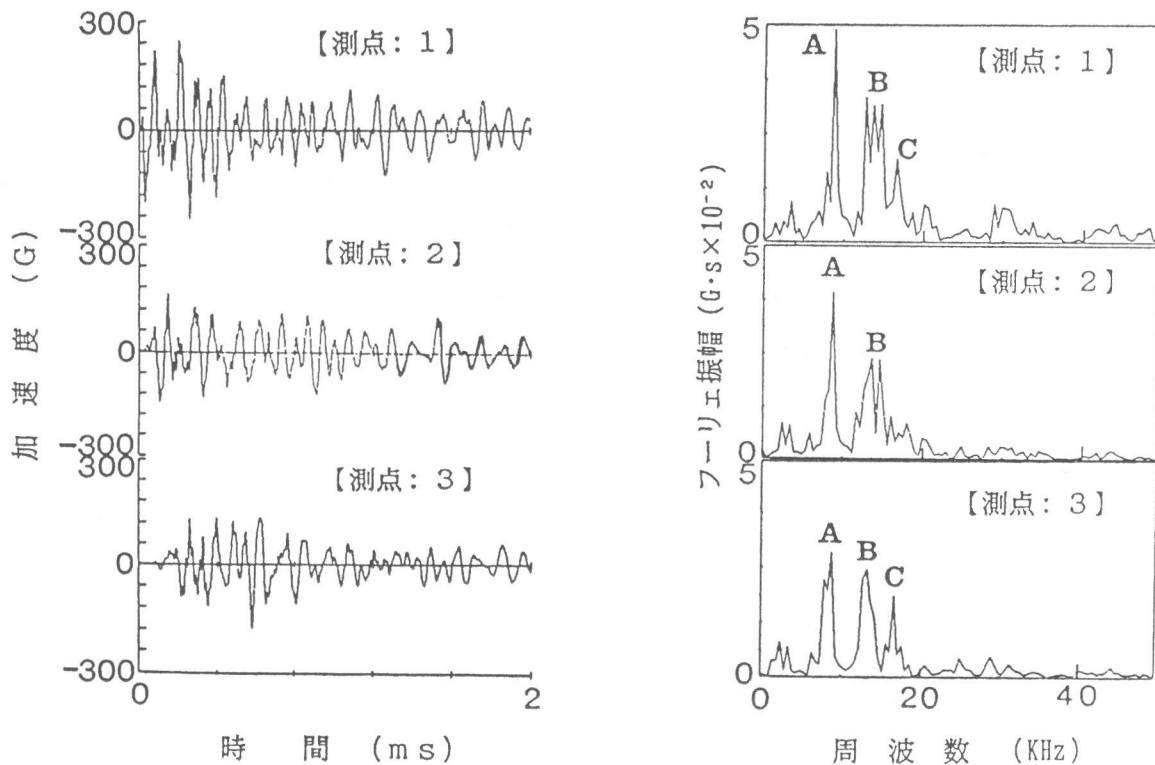


図-3 実験結果(加速度波形、周波数分布)

上に落下させることによった。鋼球の跳ね返りによる再打撃は計測時間(8msec.)を過ぎてから生ずることが確認されている。衝撃発生点に鋼板を用いたのは、鋼球の落下による衝撃荷重でコンクリート表面が性状変化を起こすことを防ぐためである。

各測点で計測した応答加速度波形、およびそのフーリエスペクトルの一例を図-3に示した。衝撃が作用してからある程度時間が経過した後は自由振動に近い加速度波形が現れるが、この領域では加速度の絶対値がかなり小さく計測・解析に困難が生ずるので、応答値の大きな過渡振動領域に着目することとした。

#### 4. 解析結果の検討

##### 4. 1 加速度波形および周波数特性

$\beta$ 法による時刻歴応答の解析に用いたFEMモデルは、図-4に示したとおりである。尚、減衰を無視して計算した加速度波形は、実験で得られた波形とはかなり異ってくるため、ここではとりあえず粘性減衰だけを考慮することとし、測点1での加速度の減衰が大略実験結果と等しくなるような減衰に関する係数( $\alpha=0.005$ 、2.参照)を近似的に用いることとした。

解析で得られた加速度波形 および周波数特性

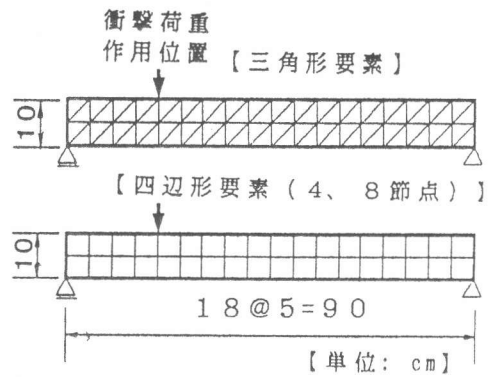


図-4 FEMモデル

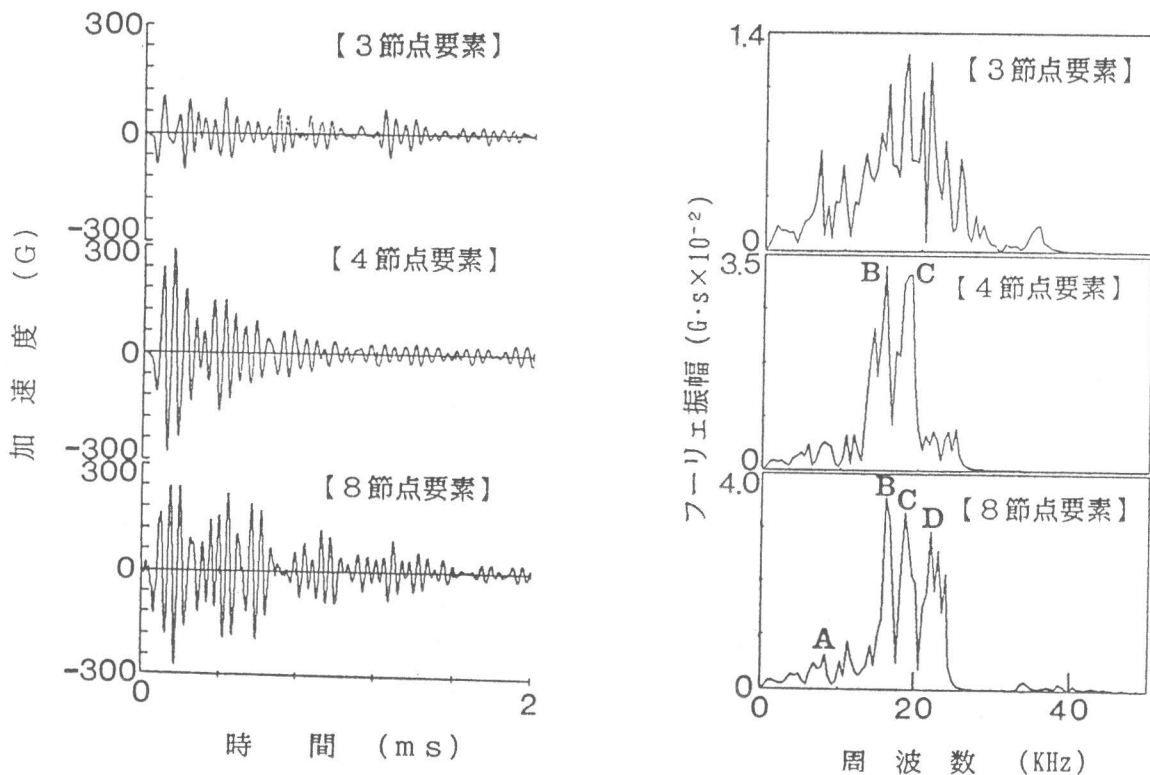


図-5 要素の種類が応答に及ぼす影響

の一例として測点1における結果を図-5に示した。各測点での最大加速度と実験結果とを比較したところ、三角形要素の場合には、いずれの測点においても加速度がかなり小さく、実験結果とはかけ離れているが、4節点および8節点要素の場合には、ともに実験結果と大差ない値となった。また周波数特性に着目すると、三角形要素ではスペクトルが広い周波数範囲に渡って分散しており、実験結果とは異なる傾向であるが、4節点および8節点要素の場合には、実験結果と同様に、スペクトルにいくつかの明瞭なピークが現れている。

次にスペクトルに明瞭なピークが現れている四辺形要素(4節点,8節点)について解析結果と実験結果の周波数特性を比較してみると、実験では8~9KHzにフーリエ振幅が最大のピークがあり、12~14KHzにも大きなピークがある。一方、4節点四辺形要素の場合には、15~16KHz付近に大きなピークがあり、8~9KHzおよび12~14KHzのピークはかなり小さいこと、18KHz付近にも大きなピークが存在することなどの違いが認められる。8節点要素の場合にも、4節点要素とほぼ同様の傾向であるが、さらに22~23 KHz付近にも比較的振幅の大きなピークが現れている。すなわち、解析で求めた加速度波形の周波数特性は、実験結果よりも高い周波数成分が多く現れているのである。

#### 4. 2 振動モードに関する考察

四辺形要素を用いた解析結果のフーリエスペクトルに現れたピークの周波数に対応する振動モードはどのようなものであるのかを確認するために、図-4と同様のモデル(4節点、8節点要素)を用いてモーダル解析を実施し、加速度寄与率の高い重要モードを抽出した。なお、モーダル減衰定数は、 $\beta$ 法による時刻歴応答解析での減衰の効果とほぼ等しいと思われる値として、 $\xi=0.01$ を用いた。図-5中に示したように、 $\beta$ 法で得られたスペクトルには4つの重要なピークがあるが、8~9KHzの小さなピークAは、はりとしての高次の曲げ(または、高次の曲げとせん断の連成)モードであり(以下モードAと呼ぶ)、15~16KHzの最大のピークBは、断面厚さ方向の伸縮モード(低次、以下モードBと呼ぶ)である。18KHz付近の大きなピークは、Bよりも高次の断面厚さ方向の伸縮モード(以下モードCと呼ぶ)であり、22~23KHzのピークは、はりの上下部で位相の異なった、断面厚さ方向の伸縮モード(以下モードDと呼ぶ)であることが判明した。これらの代表的なモードを図-6に示した。図-1の荷重に対する応答としては、低次のモード例えば1次の曲げ振動モードなどの寄与率は微少である。これらの結果から、解析ではBモードやCモードのような断面の厚さ方向の伸縮の影響が卓越していることがわかった。次に、モーダル解析の結果を利用して、実験で得られたスペクトル(図-3)のピークに対応する振動モードを推定すると、8~9 KHzの最大のピークAは、高次の曲げ振動であるモードAであり、次に大きな12~13 KHzのピークは、低次の厚さ方向の伸縮モードであるモードBであると考えられる。以上の結果を総合すると、実験と解析における加速度応答の周波数特性の相違は、解析においては、Aモードの影響が過小となり、CおよびDモードの影響が過大に現れることに起因することが判明した。

#### 4. 3 荷重の接触時間および要素分割の影響の検討

衝撃荷重の接触時間( $T_c$ )は卓越する振動モードに影響を及ぼす要因の一つである。上記の解析

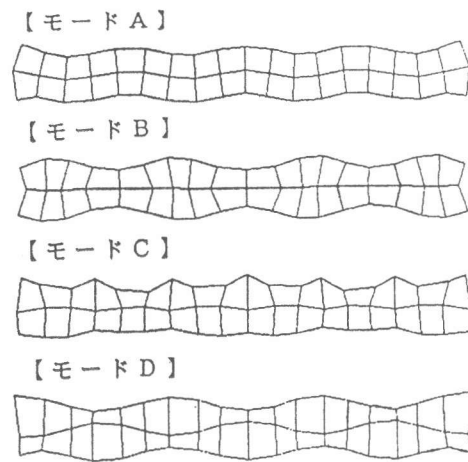


図-6 重要なモードの例

においてはいずれも $T_c=50\mu\text{sec}$ . としたが、これは鋼球が鋼板の上に落下するとして求めた $T_c$ を丸めた値である。しかし、載荷用鋼板は薄いものであり、むしろ荷重は直接コンクリート表面に作用するのに近いとも考えられるので、鋼球がコンクリートに落下するとして求めた $T_c$ を丸めた値である $100\mu\text{sec}$ . を接触時間としてモーダル解析を実施した。この場合もモーダル減衰定数は $\xi=0.01$ である。その結果、接触時間 $T_c$ が長くなると、Aモードの影響が相対的に大きくなるが、Aモードより低次の曲げモードの影響も同時に大きくなってしまふこと、また、C,Dモードの影響は相変わらず大きいままであることがわかった。適切な荷重モデルおよび $T_c$ の値についてはさらに検討を要するが、図-1の荷重モデルでは単に $T_c$ を変化させてもスペクトルが実験結果と一致するとは考えられない。

スペクトルに影響を及ぼすもう一つの要因として要素分割の影響が考えられる。そこで、8節点要素を用い、荒い要素分割を行ったモデル(軸方向9分割、高さ方向1分割:モデル1)および細かい要素分割を行ったモデル(軸方向27分割、高さ方向3分割:モデル2)を用いたモーダル解析を行った。その結果、要素分割を粗くするとフーリエスペクトルは周波数の低い方向に移動し、細かくすると周波数の高い方向に移動するが、加速度応答に大きな影響を及ぼす振動モードは変化しないことが確認された。また、粗い分割のモデル1では最大加速度は大幅に減少するが、細かい分割のモデル2での最大加速度は図-4に示した標準の場合(軸方向18分割、高さ方向2分割)と大差が無いという結果も得られた。

## 5. 結論

衝撃応答特性によるコンクリート構造物の健全度判定法の理論的根拠を得ることを最終目的として、簡単な無筋コンクリートはりの加速度応答を有限要素法によって解析する上での問題点を、実験結果と比較して検討を行った結果、以下のような結論が得られた。

1. 解析に用いる有限要素の種類によって、衝撃荷重に対する加速度応答の解析結果には違いが生ずる。また、本解析に用いたような等分割の三角形一次要素はこの種の解析には適していないようである。
2. 実験から得られた加速度応答の周波数特性と、解析によって求めた周波数特性には一致する部分もあるが、一致しない部分も多い。すなわち、実験においては、高次の曲げモード(A)および低次の厚さ方向伸縮モード(B)の影響が大きい、解析においては、Bモードおよび高次の厚さ方向伸縮モード(C,D)の影響が卓越している。
3. 衝撃荷重の接触時間、要素分割の方法を変化させても、2.に述べた周波数特性の相違を解消することはできなかった。
4. 衝撃荷重に対するコンクリート部材の加速度応答を有限要素法解析によって精度よく算定するためには、今後さらに、適切な有限要素の種類、分布質量マトリックスの適用、適切な減衰の考え方、荷重の適切なモデル化等についての検討が必要であると思われる。

## 参考文献

- 1) 岡村雄樹・檜貝勇: 衝撃応答特性によるRC床版のひび割れ評価方法, コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム論文集, pp.61~68, JCI, 1991.4
- 2) Nicholas J. Carino, Mary Sansal and Nelson N. Hsu: A Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.199~208, 1986