

論文 軽い衝撃を受けるコンクリート部材の応答に関する解析的研究

加藤宏康*1・檜貝 勇*2・中村 光*3

要旨：著者らは、橋梁RC床版の点検を合理化・省力化するために、そのひび割れ発生状況を定量的且つ容易に評価できる非破壊試験方法の確立を目指した研究を行っている。ここでは、解析的アプローチの基礎段階として、ひび割れの無い健全な床版について、鋼球の落下による衝撃に対する応答を、2次元および3次元FEMによって解析するとともに、実験結果と比較しつつ妥当な解析方法について考察を行った。

キーワード：コンクリート床版、非破壊試験方法、衝撃応答、加速度波形、解析方法

1. はじめに

著者らは、RC床版の点検を合理化・省力化するために、そのひび割れ発生状況を定量的に且つ容易に測定できる非破壊試験方法の確立を目指した研究を行っており、RC床版をモデル化した供試体に鋼球の落下による小さな衝撃力を与える実験により、衝撃に対する応答特性であるRC床版の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ひび割れ発生状態を把握できることを確かめている[1]。また、解析的アプローチとして、衝撃応答を振動問題ととらえ、有限要素法を適用した解析によって再現することも試みている[2]。

本論文は、鋼球の落下による軽い衝撃力を受ける健全なコンクリート部材の衝撃応答を再現することを目的として、2次元弾性体モデル、3次元弾性体モデルを用いた有限要素法による時刻歴応答解析を行い、解析結果と実験結果を比較し、その妥当性について検討した結果を示したものである。また、コンクリート内部における減衰を考慮するために、材料の不均一性を表現するものとして、モルタルと骨材からなる内部不均一モデル、およびクリープなどの研究で用いられている粘弾性体モデルを採用した解析も行った。ただし、粘弾性体モデルについては定性的な解析に留めている。

2. 実験の概要

実験では、健全なコンクリート床版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。なお、鋼球は直径19.0mm、重さ28.2gであり、落下高さは10cmである。

実験に用いた供試体は、全長120cm、幅100cm、高さ10cmで、2辺をスパン長100cmで単純支持し

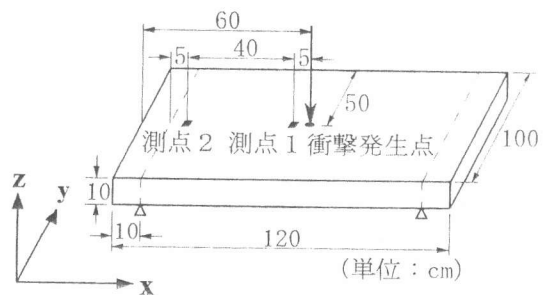


図-1 床版供試体

- *1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)
- *2 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)
- *3 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

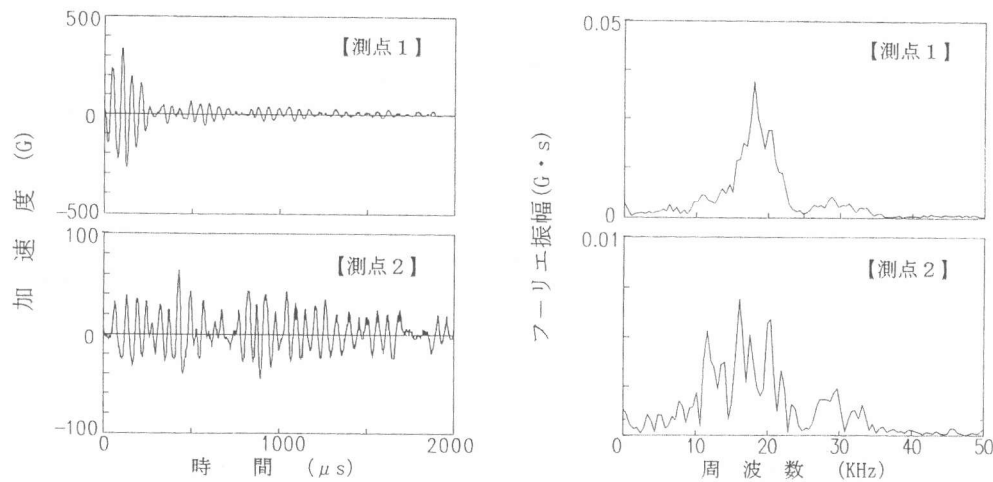


図-2 実験結果 (加速度波形、周波数分布)

た無筋コンクリート床版である。支点には幅2cm、厚さ2cmの硬質ゴムを使用した(図-1)。衝撃発生点は床版中央で、測定点は衝撃点から支持方向に直角に伸ばした直線上に、衝撃点から5cm (測点1)、および支持点から5cmの位置 (測点2) に設けた。また試験時におけるコンクリートの物性は、ヤング係数 $E_c=2.81 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.21$ 、密度 $\rho=2.38 \text{g/cm}^3$ であった。

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を図-2に示す。

3. 解析方法の概要

3.1 有限要素法の概要

解析には有限要素法を用い、2次元弾性体モデルと3次元弾性体モデルの二つを使用した。2次元モデルは四辺形8節点要素とし、剛性マトリックス[K]を平面応力問題として定式化したものを用いた。また3次元モデルは、六面体8節点要素とし剛性マトリックス[K]を3次元応力問題として定式化したものを用いた。質量マトリックス[M]は、2次元モデル、3次元モデルのどちらの場合にも取り扱いの容易な集中質量マトリックスを用いた。また、要素分割については、実験で得られる周波数が2Hz~40KHzであることから、3.2で述べる固有値 $\{\lambda\}$ から得られる固有振動数が40KHz以上になるように分割した。具体的には、図-1に示した座標で x方向を5cm、z方向を2.5cmに分割し、3次元モデルについては y方向を5cmに分割した。

3.2 時刻歴応答解析の方法

時刻歴応答解析には、モーダル解析を用いた。モーダル解析に用いる固有値 $\{\lambda\}$ 、固有ベクトル $\{u\}$ の計算においては、一般的固有値問題 $[K]\{u\}=\{\lambda\}[M]\{u\}$ をコレスキー分解して標準固有値問題として全固有値と全固有ベクトルを求めた。そして求められた固有値、固有ベクトルを用い直接積分法によって特定の外力に対する時刻歴応答を計算した。時間ステップは、 $\Delta t=1 \mu \text{sec}$ である。減衰は一般的な粘性減衰を考慮しており、モーダル減衰定数 ξ には質量比例型 $\xi_i=\alpha/2\omega_i$ と剛性比例型 $\xi_i=\beta\omega_i/2$ の2種類を用いた。ここで、 α 、 β は定数、 ω_i はi次の固有円振動数である。

3.3 衝撃荷重のモデル化

2. で述べたように、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、これをどのようにモデル化するかは検討を要する問題である。また、荷重の接触時間(T_c)についても同様である。本論文では、既往の研究[2]を参考に、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(図-3)、接触時間(T_c)を $50 \mu \text{ sec}$.とした。

3. 4 解析に用いた物性値

解析に用いたコンクリートの物性値は2. の実験で得られたものと同一である。ただし、コンクリート内部がモルタルと骨材の2相からなる内部不均一モデルでの値は、予備実験結果および文献[3]の値を参考にして表-1のように仮定した。

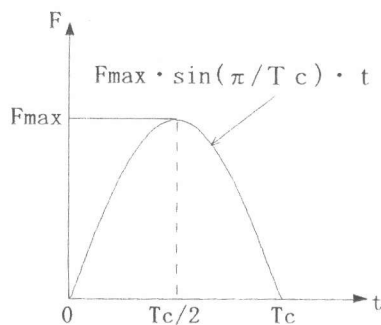


図-3 衝撃荷重モデル

4. 解析結果の検討

4. 1 減衰に関する検討

減衰を無視して計算した加速度波形は、実験から得られた波形とはかなり異なってくるため、質量比例型 $\xi_i = \alpha / 2 \omega_i$ と剛性比例型 $\xi_i = \beta \omega_i / 2$ の2種類の粘性減衰を考慮し、測点1における加速度の最大値と時刻 $2048 \mu \text{ sec}$.における加速度の比を実験値に近づけるように係数 α , β を定めた。一例として3次元モデルによる測点2のフーリエスペクトルを図-4に示す。質量比例型は、 ξ が固有振動数 ω に反比例するので、低次の振動ほど減衰が大きくなり、剛性比例型では ξ は固有振動数 ω に比例するので、高次の振動ほど減衰が大きくなる。図-4をみるとその傾向がよく分かり、特に15KHz以上の周波数分布に大きな違いが表れている。実験結果と比較すると、実験では衝撃点から離れるにつれて周波数範囲が広がる傾向があり、測点2においては15KHz以上の成分も無視できない大きさである(図-2)。このことから考えると、質量比例型減衰のほうが実験値に近い結果を与えるといえる。また、当然ながら加速度波形自体からも同様な特徴がみられた。それで以後の解析には質量比例型減衰を用いることとし、2次元弾性体モデルについては $\alpha = 2200$ 、3次元弾性体モデルについては $\alpha = 2400$ を用いることとした。

表-1 3次元不均一モデルの物性値

	ヤング係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比
モルタル	2.17×10^5	0.17
骨材	6.00×10^5	0.38

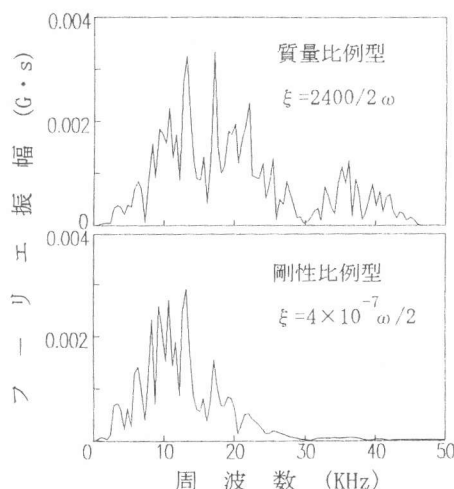


図-4 減衰の与え方による影響

4. 2 2次元弾性体モデルによる検討

コンクリート床版の衝撃応答を、定性的ではあっても簡易に計算することを目的として、まず2次元モデルによる解析を行った。解析結果を図-5に示す。実験と解析から得られた加速度波形を比較してみる。衝撃点に近い測点1において、実験結果の大きな特徴は、 $200 \mu \text{ sec}$. までの間に最大加速度を含む大きな振幅を持つ波が4つあり、これらが一つの大きなピークを形成していることである。またその後も反射等の影響と思われる小さなピークらしきものが幾つかみられることである。それに対し解析結果では、最大加速度を含む大きなピークは、実験結果の倍近い数の波により形成されており、ピークが収束するまでの時間も約 $800 \mu \text{ sec}$. と実験結果の4倍の長さである。またその後続く小さなピークらしきものは認められない。端部に近い測点2についていえば、実験値は $2048 \mu \text{ sec}$. までおよそ40Gの振幅が続いており、時間経過にともなう振幅の減少はさほど大きな

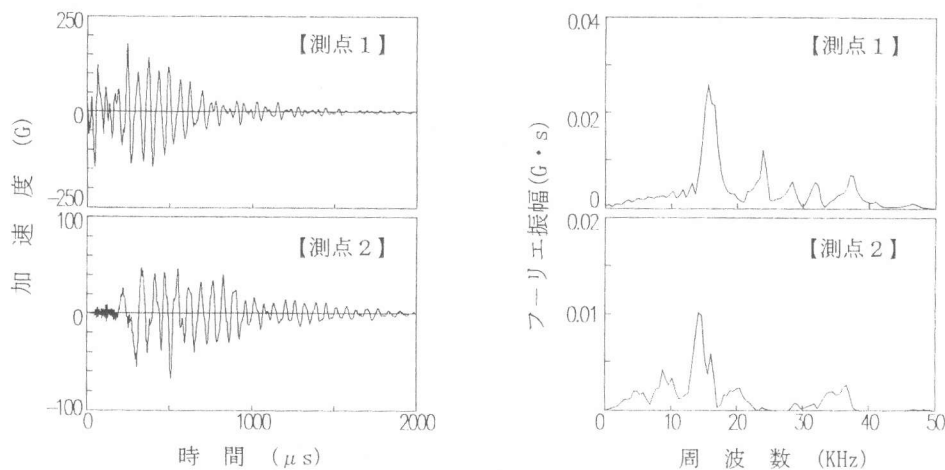


図-5 2次元モデルによる解析結果

い。しかし解析によると、2048 μ sec. に達する頃にはかなり振幅が小さくなっている。次にフーリエスペクトルを比較すると、実験値は、衝撃点近くの測点1では、大きなピークが20KHz付近に一つだけであるが、衝撃点から離れるにつれて周波数分布範囲が広がる傾向があり、測点2においては35KHz辺りまでピークが幾つか認められる。解析値では、衝撃点から離れるにつれて周波数分布範囲が広がるという傾向は認められず、むしろ逆の傾向を示している。これらのことから、2次元弾性体モデルでは、衝撃応答を再現することはかなり困難であると判断した。

4. 3 3次元弾性体モデルによる検討

床版を直接モデル化した3次元弾性体モデルによる解析結果を図-6に示す。まず加速度波形からいえば、最大加速度を含むピークの収束状況が、2次元モデルのような緩やかな収束とは異なり、実験結果により近づいているといえる。また、最大加速度を含むピークの後に続く小さなピークの発生も認められる。次にフーリエスペクトルを比較すると、衝撃点から離れるにつれて周波数分布範囲が広がるという実験結果を2次元解析では再現できなかったのに対し、3次元解析では、測点2において40KHz辺りまでピークが幾つか現れており、実験結果と類似の傾向を示している。このことから、3次元モデルを用いることによって2次元モデルの問題点をある程度解決することができるといえる。しかし、細かく言えば、波形に関しては、最大加速

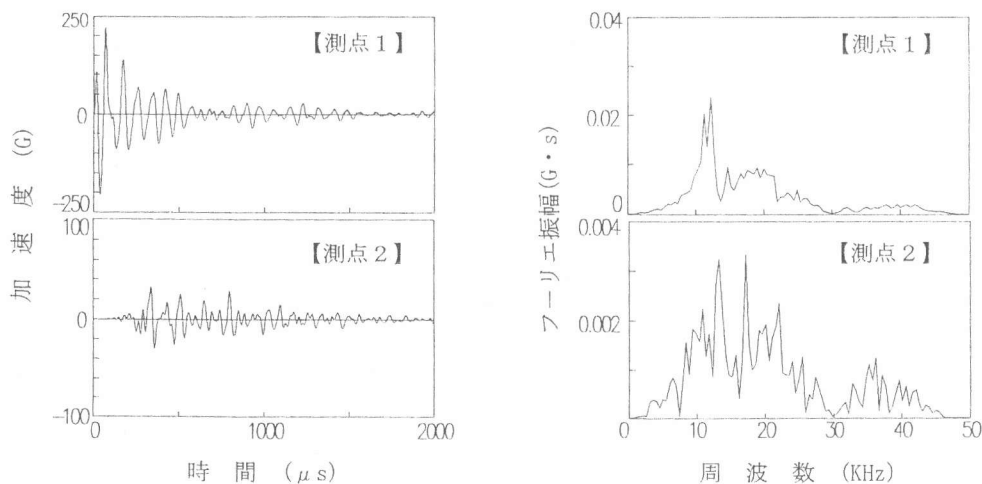


図-6 3次元モデルによる解析結果

度を含むピークの収束が遅く500 μ sec. 近くかかること、フーリエスペクトルにおけるピーク周波数が実験と一致しない、などの問題点も残されている。また、衝撃点からの距離の増加に伴う加速度最大振幅の変化(最大加速度比、図-7参照)を見ると、実験では、25cm付近でいったん加速度比が増加しており解析結果とは傾向が異なっている。このような中間部での応答増加は、板厚方向に伸縮する振動モードに対応するものと思われる。解析においてもそのような固有モードは当然含まれているのであるが、その影響は実験結果ほどには現れていない。これらのことは、有限要素法における要素数、荷重モデル、荷重の接触時間等とも関連するものと考えられ、更なる検討が必要と思われる。また2次元、3次元解析の共通な問題として、衝撃点から遠い測点2において加速度波形が減衰し過ぎになるという問題もある。

5. 内部減衰モデルの検討

5. 1 内部減衰モデルの概要

4.において2次元、3次元解析を行ったがどちらの場合にも減衰のさせ方に問題が生じた。4.で用いた減衰モデルは、変位速度と比例した減衰力が生じる粘性減衰である。しかし実際には、その他にコンクリート内部で減衰が生じているはずであり、その影響がより大きいことも考えられる。よってここでは内部減衰のモデルとして、①コンクリート内部の材料の不均一性が減衰に及ぼす影響を考慮するための内部不均一モデル、および②クリープやフレッシュコンクリートの解析などに用いられている材料内部の歪み速度に比例した減衰力を持つ粘弾性モデル[4]、の2種類を用いて考察を行った。

5. 2 内部不均一モデルによる検討

コンクリートは、巨視的にはモルタルと骨材の2相から成ると考え、材料の物性値を表-1のように与え、モルタル要素と骨材要素を市松模様状に配置した3次元モデルを用いて解析を行った。一例とし測点1での解析結果を図-8に示す。加速度波形をみると、最大加速度を含むピークの後に続く小さなピークの発生が、実験結果よりもさらに明瞭に認められる。フーリエスペクトルをみると通常の弾性体モデルと比べ15~30KHz付近の周波域が減少し、12KHz付近のピークのみが目立つようになった。通常の弾性体モデルとは多少違う結果が得られたが、実験値により近づいたとはいえ、また衝撃点から遠い測点2における加速度波形が減衰し過ぎになるという問題も解決されなかった。

5. 3 粘弾性体モデルによる検討

一般的な粘弾性体モデルは、MaxwellモデルとKelvinモデルを直列につないだもので、Burgersモ

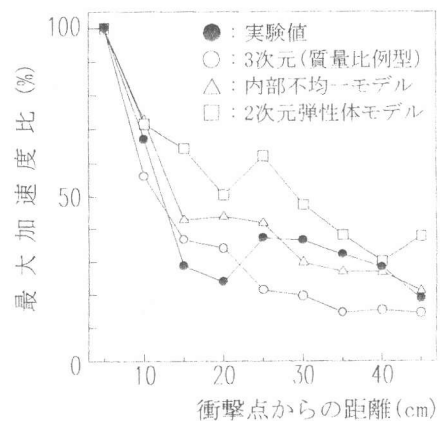


図-7 最大加速度比

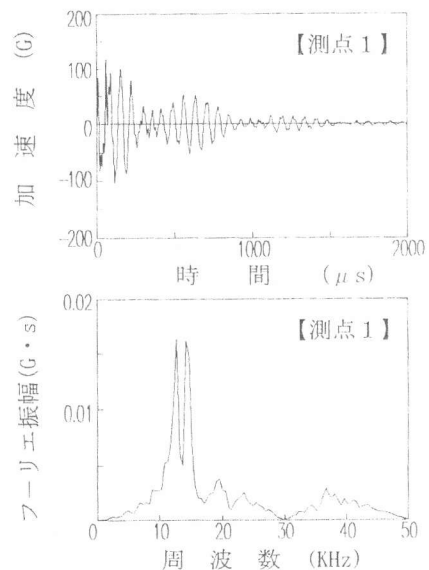


図-8 不均一モデルによる解析結果

デルと呼ばれるものである(図-9)。ここで、 E_m, E_k :モデルに含まれるスプリングのヤング係数、 η_m, η_k :モデルに含まれるダッシュポットの粘性係数、 $\dot{\epsilon}$:要素全体の歪み速度、 $\dot{\epsilon}_m, \dot{\epsilon}_k$:各モデルの歪み速度である。

このモデルの応力-歪み関係を導き、有限要素法に定式化した後、まず軸力を受ける1次元単一要素についてその動的特性の考察を行った。Maxwellモデルのスプリング部分はコンクリートの初期剛性に対応することから、 E_m の値を固定して E_k, η_m, η_k の変化に伴うモデルの動的応答の変化を計算した。その結果、ここで対象とするような衝撃力に対して、Maxwellモデルは質量比例型粘性減衰と、Kelvinモデルは剛性比例型粘性減衰と同一の結果を与えることが分かった。また、Kelvinモデルではスプリング、ダッシュポットの両方とも有効に作用させるような数値の決定はかなり困難であることも分かった。Kelvinモデルの一方の要素のみが有効に作用する場合、BurgersモデルはMaxwellモデルと等価であるから、結局、質量比例型粘性減衰の場合と同じ結果に帰着することになる。さらに粘弾性体モデルを用いた3次元モデルによる解析も一部実施したが、1次元解析と基本的に同様の結果となっており、これまでの検討では粘弾性モデルのメリットは確認できなかった。

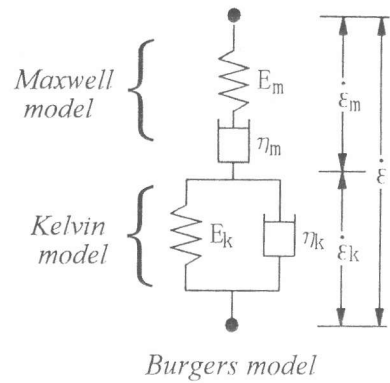


図-9 粘弾性体モデル

6. 結 論

軽い衝撃を受けるコンクリート部材の加速度応答に関し、解析結果を実験結果と比較して検討を行った結果、以下のような結論を得た。

1. 比較的計算時間が短く、簡易な2次元弾性体モデルを用いて有限要素解析を行ったが、実験で得られた加速度波形を再現することは困難であった。一方、3次元弾性体モデルを用いるとより高度なハードウェアと長い計算時間を要するが、実験波形の再現性がかなり向上することが確かめられた。
2. コンクリート内部における減衰を表現し得る方法として、コンクリート材料の不均一性をモデル化した解析および粘弾性体モデルを用いた解析を行ったが、これらのモデルの適用により実験波形の再現性が改善される効果は特に認められなかった。

本研究に対し、文部省科学研究費補助金の交付を受けた。ここに謝意を表します。

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方法に関するシンポジウム論文集，pp. 61～68，JCI，1991. 4
- [2] 白鳥雅也・檜貝勇・岡村雄樹：軽い衝撃荷重を受けるコンクリート部材の応答解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 1，pp. 679～684，1992. 6
- [3] R. E. グッドマン著，大西有三，谷本親伯共訳，「分かりやすい岩盤力学」，鹿島出版会，1984. 11
- [4] 岡本寛昭・遠藤孝夫：持続荷重を受ける極若材令コンクリートの変形予測に関する研究，土木学会論文集，第396号/V-9，pp. 69～77，1988. 8