

論文

[1105] コンクリートの劣化度評価のための衝撃応答の BEM 解析

金田孝治*1・大津政康*2

1. はじめに

既存コンクリート構造物の多くは、近年の交通量の飛躍的増大、車両の大型化、加えて多年の供用によって様々な損傷を受けている。事実、建設省道路局の道路設計年報により、都道府県道以上の道路にかかる15m以上の道路橋で、架設後50年を供用寿命、30年を補修寿命と考えると西暦2000年には3500橋の架け替えが必要となり、24500橋については何らかの診断・補修が必要となる。このような状況下、コンクリート構造物の安全性確保と有効利用の見地から、これらの構造物の劣化を効果的に評価するための非破壊評価法の開発が急務である。劣化コンクリート部材の判定には、外的な攪乱によって生じる応答の変化を用いる方法が検討されている。これには、衝撃応答を用いる方法があり、本論文では、既に発表されている文献資料[1]と同じモデルを用い、無筋コンクリート部材の劣化度を境界要素法(BEM)を用いた二次元衝撃応答解析により検討し、衝撃試験による橋梁の劣化診断の可能性について基礎的な考察を試みた。

2. 解析モデル

解析に用いた無筋コンクリート部材のBEMモデルを図-1に示す。図では簡略化して示したが、境界メッシュの節点間隔は1cmとした。図中の角点の数字は節点番号を表している。はじめに健全なコンクリートの特性値として、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 $\rho=2.3 \text{ g/cm}^3$ を用いた[1]。

劣化コンクリートの特性値としては、ヤング係数だけを12.5%, 25%, 37.5%, 50%低下させたものを用いた。以下では、健全なモデルをモデル1とし、劣化させたモデルをそれぞれモデル2からモデル5とする。衝撃応答としては、各モデルに対し0kHzから20kHzまで48Hz毎の共振応答解析を実施した。ここで、解析に用いた衝撃荷重のモデルを図-2に示す。これは、重さ28.2gの鋼球を3.2cmの高さから落下させたときの衝撃をモデル化したもの[1]である。解析に用いた接触時間(T_c)は、文献より式(1)を参考にして、 $50 \mu \text{ sec}$ とした。

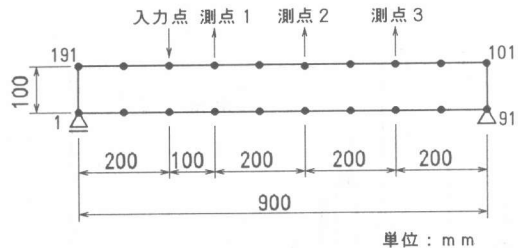


図-1 解析モデル

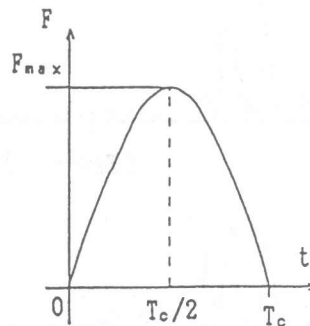


図-2 衝撃荷重モデル

*1 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学教授 工学部土木環境工学科, 工博 (正会員)

$$T_c = 5.97 [\rho_s (\delta p + \delta s)]^{2/5} R / (h)^{0.1} \quad (1)$$

ここに、 $\delta p = (1 - \nu_p^2) / \pi E_p$, $\delta s = (1 - \nu_s^2) / \pi E_s$, h : 落下高さ (m), ν_p : 落下面材質のポアソン比, T_c : 接触時間 (sec), ν_s : 鋼球のポアソン比, ρ_s : 鋼球の密度 (kg/m^3), E_p : 落下面材質の弾性係数 (N/m^2), R : 鋼球の半径 (m), E_s : 鋼球の弾性係数 (N/m^2) である。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 (2) によって求められる [1]。

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

今回の解析での衝撃応答の解析では、図-1 のモデルの応答解析の結果に、図-2 を F F T 解析したスペクトル応答を掛け合わせることになる。この場合には、 $f = 1/2T_c$ より明らかなように、衝撃荷重は 10kHz に大きなピークを有するスペクトルとなる。

3. 解析結果および考察

3.1 実験値との比較

モデル 1 を用いた解析で得られた加速度の応答スペクトルの結果と実験で得られている加速度の応答スペクトル [1] の比較を図-3 に示す。解析結果は、実験結果とよく一致していることが認められる。

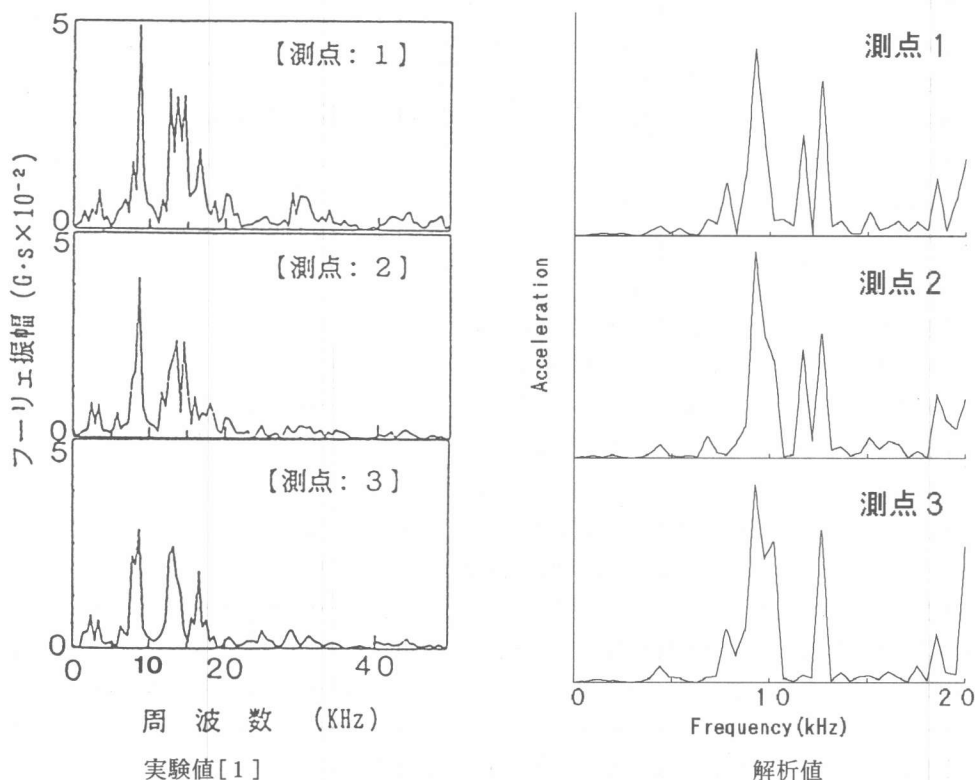


図-3 実験および解析の応答スペクトル

3. 2 劣化度の評価

図-4 および図-5 は、衝撃を考慮しない場合および衝撃を考慮した場合の測点2における振幅の応答スペクトルの変化状況を示している。図-4 中のピーク A~J は、ここで着目したピークである。尚、図-4 では、高周波数域でのピークを明確にするため1500Hz以下の振幅の大きさは実際の1/10の大きさにしてある。また、各ピークの周波数の推移状況を表-1 に示す。表-1 から明らかなように、各ピークの周波数は、劣化が進むにつれてほぼ同じ割合で低下しているこ

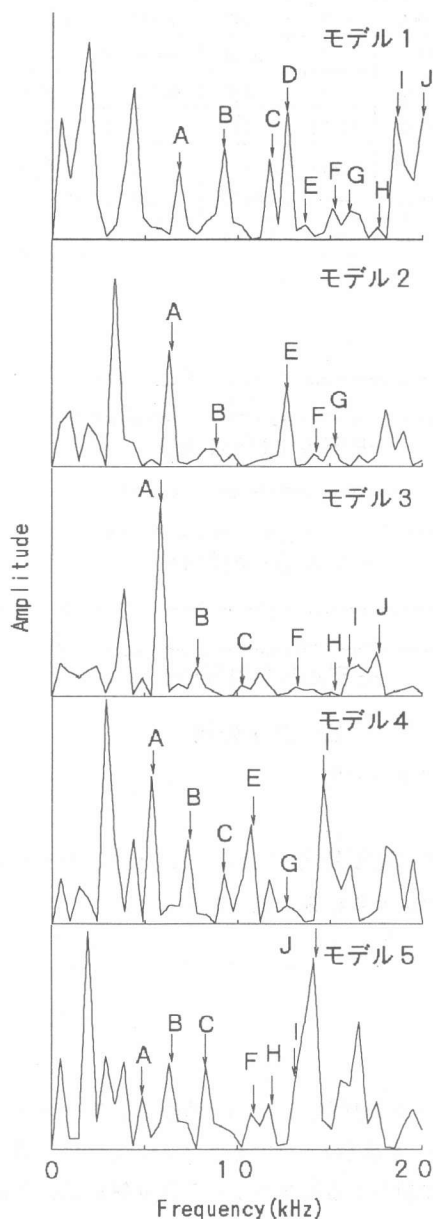


図-4 衝撃を考慮しない場合の劣化に伴う応答スペクトルの変化状況

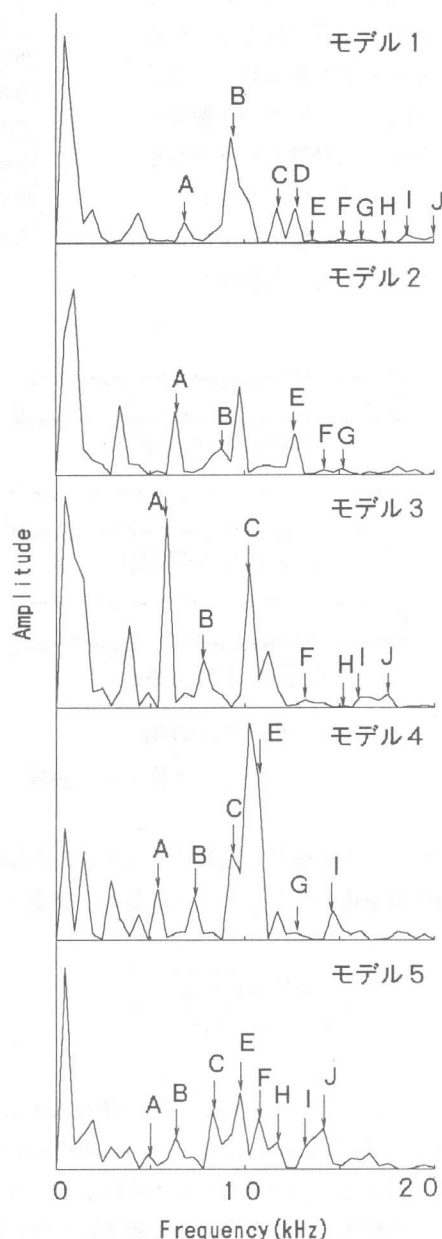


図-5 衝撃を考慮した場合の劣化に伴う応答スペクトルの変化状況

とがわかる。劣化が進むにつれて共振ピークが漸次低周波数へと変化するの図-5を見ても明らかである。ただ、今回想定した衝撃荷重は、10kHz が無限大となるピークを持っており、その影響が大きいので、この図からだけでは変化状況がわかりにくいピークも見られた。さらに、着目したピークの振動モードを確認した結果のいくつかを図-6に示す。同じ共振ピークと考えられる振動モードはよく一致していることがわかる。

表-1 周波数の推移状況の例

モデル名 ピーク名		モデル 1	モデル 2	モデル 3	モデル 4	モデル 5
A	周波数 (Hz)	6832	6344	5856	5368	4880
	周波数比	1.000	0.929	0.857	0.786	0.714
B	周波数 (Hz)	9272	8784	7808	7320	6344
	周波数比	1.000	0.947	0.842	0.789	0.684
C	周波数 (Hz)	11712	—	10248	9272	8296
	周波数比	1.000	—	0.875	0.792	0.708
F	周波数 (Hz)	15128	14152	13176	—	10736
	周波数比	1.000	0.935	0.871	—	0.710
I	周波数 (Hz)	18544	—	16104	14640	13176
	周波数比	1.000	—	0.868	0.789	0.711

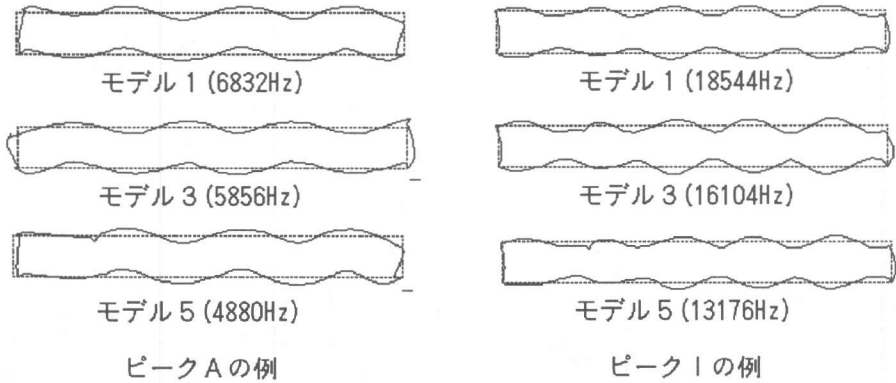


図-6 共振ピークの振動モード例

次に、一次元解析と比較するため、両端単純支持棒の自由振動式 式(3) [2]より、モデル1の特性値を用い、共振モード次数および周波数を求めた。その結果を表-2に示す。

$$f_n = \frac{\pi n^2}{2l^2} \sqrt{\frac{EIg}{A\rho}} \quad (3)$$

ここで、 n : モード次数、 l : 棒の長さ(m)、 E : ヤング係数(N/m²)、 I : 断面二次モーメント(m⁴)、 g : 重力加速度(m/sec²)、 A : 棒の断面積(m²)、 ρ : 密度(kg/m³)である。ここで部材の奥行きは文献により 3cmとした。さらに、表-2の周波数に相当するモデル1の二次元解析結果の振動モード例をいくつか図-7に示す。一次元解析と二次元解析の結果を比較すると、共振モードの次数および周波数は二次、三次の低次モードではよく一致しているが、高次モードになるほど合わない結果となっている。

表-2 一次元解析における共振モード
次数および周波数(モデル1)

次数	周波数(Hz)	次数	周波数(Hz)
1	2 1 6	6	7 7 8 3
2	8 6 5	7	1 0 5 9 4
3	1 9 4 5	8	1 3 8 3 7
4	3 4 5 9	9	1 7 5 1 2
5	5 4 0 5	10	2 1 6 2 0

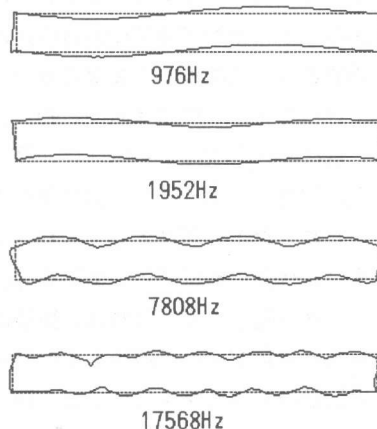


図-7 振動モード例(モデル1)

また、ピークAを対象としたコンクリートの劣化度と周波数の変化を図-8に示す。図-8の縦軸は、モデル1の解析で得られたピークAの周波数を1とした時の各モデルの周波数比を示し、横軸は、モデル1のヤング係数を1とした時の各モデルのヤング係数比を示している。一次元解析の結果は、モデル1のピークAの周波数を初期値として、式(3)を用いて計算した結果である。これによると、コンクリートの劣化度と周波数の変化の関係は、図-8に示すように二次元解析の結果と一次元解析の結果とはよく一致していることが認められる。

3.3 考察

今回、着目したピークは、5kHz以上を対象にしている。これは、低周波数域では、共振ピークの数が多いこと、解析の周波数間隔が488Hzとやや粗いことなどから、低周波数域では共振ピークが重なり易く、ピークの対応がわかりにくいと判断したためである。

また、解析では劣化の割合により共振しなかったピークも見られた。実際にはモデル1で着目した

ピークは、劣化の割合にかかわらず全て存在すると考えられ、今回ピークとして現れなかった共振点は、解析の周波数間隔間に存在すると予測される。このことは、解析の周波数間隔をもっと細かくすることで、各共振ピークの変化の対応が明らかになり解消されると思われる。また、同じピークと考えられる振動モードは、劣化の程度にかかわらず全て一致した結果となった。この結果は、共振ピークの変化の対応を裏付ける重要な根拠となっている。

次に、一次元解析と二次元解析を比較した結果、コンクリートの劣化度と周波数の変化の関係は、図-8に示しているように一次元理論式とよく一致していることが認められた。図-8では

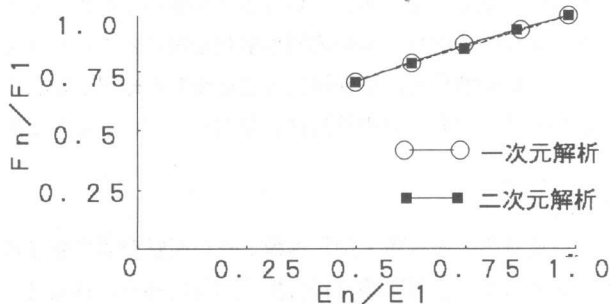


図-8 劣化度と周波数の変化の関係

ピーク A の変化状況しか表していないが、どのピークを対象にしても同じ結果となることは、表-1 から明らかなである。すなわち、劣化による共振ピークの周波数の変化は、式(3)からも明らかなようにヤング係数の平方根比に比例するものと考えられる。一方、共振モードの次数および周波数は、高次モードになるほど一次元理論式とは合わないことが認められた。解析は、二次元で行っており、供試体断面、特に側面による入力波や反射波の反射や重複の影響が考えられるが、低次モードでは、供試体は共振し易く、その振幅の大きさも大きいため、その影響は小さく一次元解析とほぼ一致した結果となり、高次モードになるほど共振しにくく、振幅の大きさも小さいため、その影響は大きくなり一次元解析とは異なってくるものと考えられる。

また、今回の解析では、衝撃を考慮すると、スペクトル図からだけでは変化状況がわかりにくいピークも見られた。これは、衝撃のピークの影響が大きいと考えられるため、実際には、測定周波数域外にピーク周波数をもつ衝撃を用いることにより解消される。例えば、20kHz 外にピーク周波数をもつ衝撃を用いると、図-4 とほぼ同じ結果が得られたと考えられる。しかし、劣化度と周波数の変化の関係が、どの共振ピークも同じ変化を示すことから、劣化度を判定する上で全共振ピークの変化を把握する必要はなく、そんなに大きな問題ではないと考える。

4. 結論

本論文では、衝撃応答によるコンクリート構造物の劣化度判定の理論的根拠を得るため、ヤング係数の異なる無筋コンクリート部材を BEM による二次元衝撃応答解析により検討した結果、以下のような結論が得られた。

1. 解析結果と実験結果はよく一致しており、境界要素法(BEM)は衝撃応答の解析に十分適用できるものと思われる。

2. ヤング係数の低下にともなう共振周波数の変化を確認した結果、図-8 に示されるように一次元理論式とよく一致していることが認められた。この関係を利用することにより、コンクリート部材の劣化度は、衝撃応答の変化を用いることで十分に判定できると思われる。

3. 一次元解析と二次元解析とを比較した結果、部材の劣化度に伴う周波数の変化は一致するが、共振モードおよび周波数は、高次モードになるほど異なることがわかった。

参考文献

- 1) 白鳥雅也・松貝勇・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，第14回コンクリート工学年次論文報告集，pp.679-684，1992.6
- 2) S.Timoshenko(著)・谷下市松・渡辺茂(訳)：工業振動学，東京図書，pp.303-306，1972.6