

## 論文 共振周波数測定によるコンクリート 2 次製品の非破壊試験

伊東 良浩\*1・平 初雄\*2・歌川 紀之\*3

**要旨:**本研究は、コンクリート 2 次製品の品質管理を非破壊試験により行う方法について述べるものである。本研究では、事前解析および共振振動測定実験によりコンクリート 2 次製品の見かけの動弾性係数を算定する。見かけの動弾性係数はコンクリートの品質や内部の欠陥を反映しており、これを用いて 2 次製品に異常がないか、コンクリート品質にばらつきがないかを比較的簡単に判定することが可能である。ここでは具体例を用いてその手順を示し、目的とする見かけの動弾性係数を得るための打撃位置、測定位置、供試体支持位置の決定方法が適当であることを確認した。

**キーワード:**コンクリート 2 次製品, 共振周波数, 動弾性係数, 自由振動, 固有値解析

## 1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理に関わる技術の必要性が高まり、新設および既設構造物の調査法、劣化診断法、補修補強工法等に関する研究開発が多く実施されるようになってきている。このような状況下で、新設構造物を構築する部材であるコンクリート 2 次製品の品質も構造物の耐久性に大きく影響するものと考えられる。

現状の 2 次製品の品質管理は、主に外観観察と抜き取りによる強度試験等が実施されているが、この品質管理レベルを向上させることは、構造物の維持管理上重要な役割を果たすと思われる。加えて 2 次製品製造価格の内外格差から、今後 2 次製品の製作を海外に依存する比率が高まるとすれば、これら輸入製品の品質を検査する必要も高まるものと思われる。

このような考えに基づいて、本研究では 2 次製品の品質を比較的簡便に検査する方法について検討を実施したので、これについて述べる。

## 2. 品質評価パラメータ

コンクリート 2 次製品の品質評価を行う際の特徴として、同一形状のものを多数扱うといっ

た点が考えられる。このような場合の品質検査方法の代表的なものは抜き取り検査であるが、抜き取りによる破壊試験を実施した場合は一般に高いコストがかかり、かつ、不良品を見逃す可能性も考えられる。一方、もし何らかの簡便な方法による全数検査を実施することができれば、実工事における不良品の使用率を低下させることができ、構造物の耐久性向上に寄与できるものと考えられる。

本研究では、コンクリート 2 次製品（以後、ここでは部材と呼ぶ）の品質評価パラメータとして動弾性係数を考え、共振周波数測定によってこれを得ることを考えた。部材の動弾性係数は、部材を構成するコンクリートや補強材の動弾性係数および密度、内部のひび割れや空隙などの状況により均質ではないと考えられる。しかし、部材に共振振動が生じる場合は、これらの不均質要因を平均化したものとして共振が生じているので、測定された共振周波数から部材の動弾性係数を逆算すれば、部材を均質材料とした場合の動弾性係数が得られる。ここではこれを見かけの動弾性係数と呼び、これにより部材の品質評価を行うことを考える。

\*1 千葉工業大学工学部土木工学科 博士(工学)(正会員)

\*2 新日本製鉄株式会社技術開発本部主任研究員

\*3 佐藤工業株式会社中央技術研究所主任研究員 博士(工学)

ここで、部材の形状が直方体などの単純な形状のものであれば、JIS A 1127 等に示される弾性波の理論によって動弾性係数算定式、支持条件が明示されており、簡単に欠陥の可能性のあるものを検出できる。

一例として、図-1 に示すような、欠陥を模擬した切欠きを有する 10cm×10cm×40cm の無筋コンクリート試験体での測定例を示す。試験体は同一配合で作成し、この共振周波数を JIS A 1127 にしたがって測定し、動弾性係数  $E_d$ 、動せん断弾性係数  $G_d$ 、動ポアソン比  $\nu_d$  を算定した。その結果を表-1 に示す。欠陥を有する試験体においては、縦波、たわみ、ねじりのすべての 1 次共振周波数が低下し、これらから算定される各試験体の見かけの動弾性係数は、欠陥のない健全な試験体と比較して大きく低下していることがわかる。

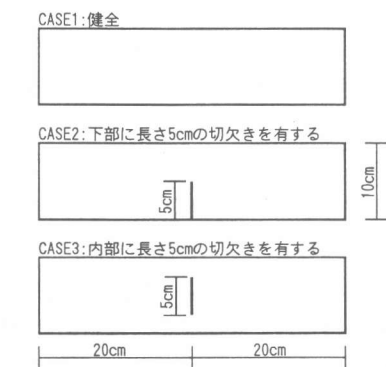


図-1 内部に欠陥を有する試験体

表-1 欠陥を有する試験体の動的物性算定値

CASE	$E_d$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_d$ kN/mm <sup>2</sup>	$\nu_d$
1	39.3	29.6	0.26
2	25.5	12.4	0.25
3	30.7	14.4	0.07

(動弾性係数に関しては縦波共振の結果を用いた。)

本例でも明らかなように、形状や配筋が同一であれば、内部欠陥を有するコンクリート 2 次製品を、見かけの動弾性係数を算定することに

より評価することが可能であると考えられた。

### 3. 形状の複雑な部材の動弾性係数算定方法

前述のように形状が単純な場合は動弾性係数の算定は容易であるが、形状が複雑になると、①共振周波数と動弾性係数の関係を理論式で表すのが困難になる、②共振モードの種類が多くなりどのような共振が生じているかわかりにくい、③適切な支持条件が不明確になるなどのために、動弾性係数を算定するのが困難になる。

そこで本研究では、3 次元自由振動固有値解析を実施することにより、特定の周波数を対象として、動弾性係数および測定時の支持条件、打撃位置、振動測定位置を定める方法を考える。動ポアソン比を一定と仮定すると、弾性波伝播速度  $V$  と動弾性係数  $E_d$  は、式(1)で関係付けることができる。また、通常の共振振動では、弾性波速度  $V$  と共振周波数  $f$  の関係は式(2)に示すように比例関係にあると考えられる。弾性波の挙動は弾性範囲内であり、自由振動解析における特定の共振周波数算定結果と実測の密度および共振周波数が明らかとなれば、形状が解析と同一の部材の見かけの動弾性係数は式(1),(2)から得られる式(3)で算定が可能である。

$$E_d = \rho V^2 \quad (1)$$

$$V = c \cdot f \quad (2)$$

$$E_{de} = E_{dc} \cdot (\rho_e f_e^2) / (\rho_c f_c^2) \quad (3)$$

ここで、

$E_{de}$ : 試験体の見かけの動弾性係数

$E_{dc}$ : 計算に用いた動弾性係数

$\rho_c$ : 計算に用いた密度

$\rho_e$ : 実測で得られた密度

$f_c$ : 計算によって求められた共振周波数

$f_e$ : 実測で得られた共振周波数

$c$ : 形状に関係する定数

この流れを示したものが図-2である。

なお、ここで動ポアソン比を一定としたのは、コンクリート系材料における動弾性係数のばらつきが、解析および実験に及ぼす影響が小さいと判断したためである。

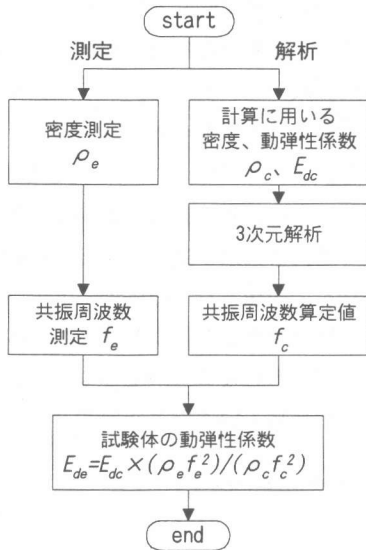


図-2 動弾性係数算定のフロー

#### 4. アルミモデルによる解析および要素実験

前述の動弾性係数算定法の妥当性および支持条件の検討のために、物性値の既知なアルミニウムを使用して3次元自由振動固有値解析および要素実験を実施した。

##### 4.1 3次元自由振動固有値解析

解析は既存の3次元解析コードであるNASTRANを使用して実施した。解析モデルは、図-3に示すような形状の幅が約20cm、長さ50cm、高さ11cmのものである。これは、溶鋳炉取鍋用耐火ブロックを想定したもので、実寸の1/4の寸法で解析および実験を実施する。解析に用いたアルミニウムの物性値は表-2に示すとおりである。

解析の結果、得られた固有周波数のうち1次モードおよび2次モードを図-4に示す。得られた固有周波数は1次モードが長手方向にねじれを生じるようなもので、その値は2472Hzで

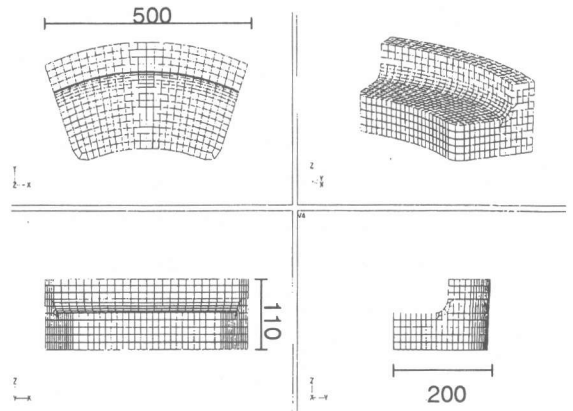


図-3 解析モデル(要素数:2414、節点数:3176)

表-2 アルミニウムの材料物性値

密度	2.69g/cm <sup>3</sup>
動弾性係数	70.3kN/mm <sup>2</sup>
動ポアソン比	0.345

(理科年表による)

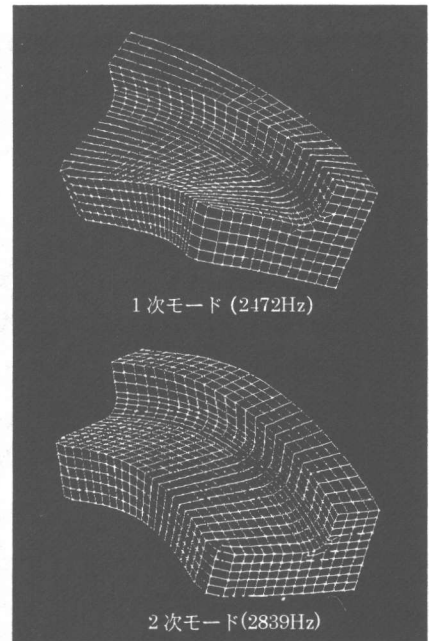


図-4 1次および2次の振動モード

あり、2次モードが長手方向にたわみを生じるようなモードでその値が2839Hzであった。1

次固有周波数に対する 2 次固有周波数の比は 1.15 とかなり近い値であった。

#### 4.2 共振周波数の測定

解析で得られた固有振動数を持つような共振を適切な支持条件下で測定することを目標として、アルミ試験体で振動測定を実施した。測定には圧電型振動子を用い、打撃はφ10mmの鋼球の落下によった。測定はチャージアンプを介してFFTアナライザにより実施した。

ここで、支持条件、打撃位置、振動測定位置は次のような考えに基づいて選択するとした。

- ① 1 次および 2 次モードの振動が鉛直方向に卓越するものであるため、打撃は鉛直方向振動が大きな腹の位置とする。
- ② 同様に振動子の設置位置も鉛直方向振動の腹の位置とする。ただし、振動モードを確認するために、複数位置で測定し、位相を比較する。

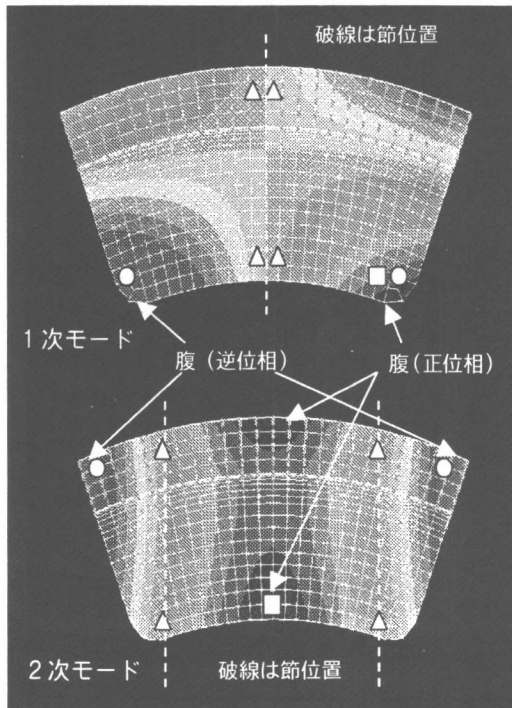


図-5 各モードの鉛直方向振動成分を考慮した支点位置(Δ)、打撃位置(□)、測定位置(○)

- ③ 試験体の自由振動を妨げないように解析から鉛直方向振動の節となっていると判断される位置をゴムで点支持する。

以上の考えに基づいて決定した支点位置、打撃位置、振動測定位置を図-5に示す。

上記の条件で振動測定を実施した結果、得られた振動の周波数スペクトルを図-6に、卓越周波数と解析結果との比較を表-3に示す。これら図表より、アルミニウムのような均質な試験体においては支点位置、打撃位置、振動測定位置を適切に選択すれば、試験体の自由振動を妨げることなく、予想される振動モードの周波数成分のみを検出できることがわかった。さらに、両者の値は10%程度の差異しかないが、両者が明確に区別されていることがわかる。

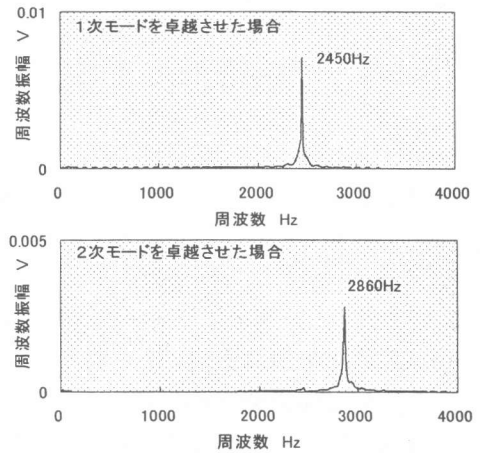


図-6 周波数スペクトル測定結果

表-3 解析結果と実験結果の比較  
(アルミニウム試験体)

次数	解析結果 Hz	実験結果 Hz	解/実
1次	2472	2450	1.009
2次	2839	2860	0.993

なお、このとき2つの振動子により同時に測定した波形のリサージュを描くと、図-7のよ

うになり、その傾斜の方向から1次モードにおける測定では逆位相、2次モードでは同位相であることが明らかであり、解析で予想された結果と一致している。これからも得られた共振振動が解析で得られたものと同一であることがわかる。

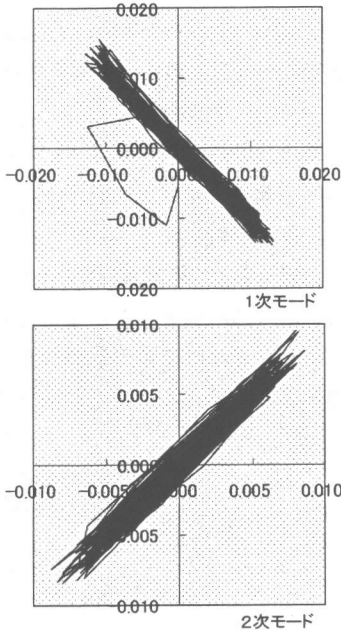


図-7 2つの振動子によるリサージュ

## 5. 実大試験体による評価法の確認

### 5.1 確認方法

アルミニウム試験体での結果を踏まえて、不均質性の高い材料でも同様の結果が得られるかを確認するために、コンクリートを用いて実物大試験体を製作し、実験と解析の比較を行った。

実大試験体作成に用いたコンクリートの配合を表-4に示す。また、管理供試体より求めた強度試験結果およびJIS A 1127に示される方法により求められた動的物性値を表-5に示す。

以上で得られたコンクリートの物性値を用いて、アルミニウム試験体で実施したのと同様の3次元自由振動固有値解析を実施した。解析モデルおよび試験体の形状はアルミモデルと同様であるが、各寸法が4倍の相似形となっている。

表-4 コンクリート配合

粗骨材 最大寸 法 mm	空気 量 %	W/C %	s/a %	単位量 kg/m <sup>3</sup>			
				W	C	S	G
20	3.0	53.5	45.2	173	323	793	984

表-5 コンクリート試験結果  
および解析に用いた入力値

密度	g/cm <sup>3</sup>	<u>2.30</u>
圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>	36.8
動弾性係数(*1)	kN/mm <sup>2</sup>	<u>29.1</u>
動弾性係数(*2)	kN/mm <sup>2</sup>	29.0
動せん断弾性係数	kN/mm <sup>2</sup>	11.6
動ポアソン比		<u>0.25</u>

下線で示す値を解析に用いた。

\*1は縦波共振より、\*2はたわみ共振より算定

振動測定もアルミニウム試験体と同様の方法で実施し、実験結果と解析結果を比較した。

### 5.2 確認結果

実験によって得られた周波数スペクトルを図-8に示す。図によれば、1次モード(445Hz)、2次モード(500Hz)とも明確に卓越した共振周波数成分が観察されているが、アルミニウム試験体と比較して、抽出したい周波数以外の周波数成分も観察される。

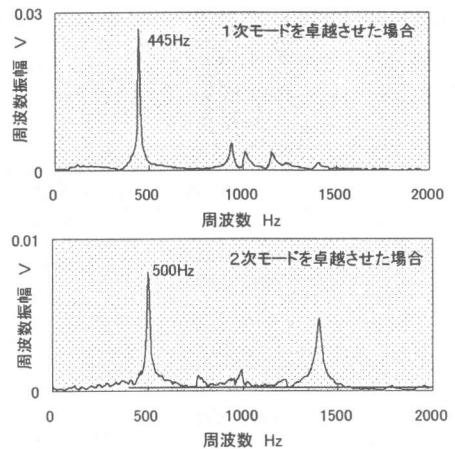


図-8 周波数スペクトル測定結果

測定結果と解析結果の比較を表-6に示す。表より、共振周波数に関してはアルミニウム試験体と同様に、ほぼ解析と実験との誤差は1%程度で、ほぼ同一の値が得られた。以上のことから、粗骨材により不均質性の高いコンクリートにおいてもアルミニウム試験体と同様の測定が可能であることがわかった。

表-6 解析結果と実験結果の比較  
(コンクリート)

次数	解析結果 Hz	実験結果 Hz	解/実
1次	441	445	1.009
2次	493	500	1.014

## 6. 実ブロックへの適用

実耐火ブロックの使用材料は表-7に示すとおりで、アルミナを主体とした成分からなる。高温に晒されるためにブロック中の水分を極力低下させる必要があり、製造は以下のような手順で実施される。ここでは、再度解析を実施せず、コンクリート試験体での解析結果を利用して、耐火ブロックの動弾性係数の算定を試みた。ブロックは5体製作し、高温養生完了後に共振周波数測定を実施し、その動弾性係数算定値のばらつきを比較した。

- ①混合 (添加水分量:4.8%)
- ②混練 (2軸モルタルミキサー×5min)
- ③型枠へ材料投入、振動締め固め (4G×3min)
- ④室温養生 (室温×48hr 以上)
- ⑤高温脱水養生 (350°C×10hr)

表-7 耐火ブロックの使用材料

材 料	仕 様	配合比率	
マトリクス	アルミナ	$Al_2O_3$	0.85
	アルミナ スピネル	$MgO \cdot Al_2O_3$	0.11
	アルミナ セメント	$Al_2O_3$ (70%), $CaO$ (>20%)	0.04
骨 材 (Alumina)	.10-20mm 純度 99%以上	0.30	
メタル ファイバー	SUS430 $l=25mm$	0.02	

本部材の密度はブロックの質量測定から  $\rho=3.25 g/cm^3$  と測定されたので、これとコンクリートでの解析で用いた  $\rho_c=2.30 g/cm^3$ ,  $E_{dc}=29.1kN/mm^2$  と  $f_c=500Hz$  (ここでは2次モード) を使用して、式(3)に代入することにより、実ブロックの動弾性係数を算定した。

その結果を示したものが表-8である。これによれば、各ブロックの動弾性係数は112~144kN/mm<sup>2</sup>の範囲にあり、変動係数は10%とばらつきのあることが確認された。一方、管理供試体で求めた動弾性係数は150kN/mm<sup>2</sup>であり、算定結果の最大値と4%程度の誤差でほぼ一致した。以上の結果から、形状が同一のものであれば、求める動弾性係数にかなりの変化があっても、固有値解析を一度するだけで、あとは算定式により見かけの動弾性係数を共振周波数から得ることができることがわかった。

表-8 推定された実ブロックの動弾性係数

ブロック NO.	共振周 波数 (Hz)	推定動弾性係 数 $E_{dc}$ (kN/mm <sup>2</sup> )
1	936	142(0.95)
2	942	144(0.96)
3	892	129(0.86)
4	832	112(0.75)
5	923	138(0.92)
平均	905	133(0.89)
標準偏差	45	12.9
変動係数%	5%	10%

## 7. まとめ

本研究によれば、理論式の適用できない形状であっても、3次元自由振動解析を実施し、振動モードを考慮して支持条件、打撃位置、測定位置を選択すれば、所要の共振振動を生じさせ、動弾性係数を算定することにより2次製品の品質評価が可能であることがわかった。なお現在、この実ブロックを使用して、実使用環境における損傷程度の調査を実施中である。