

論文 共鳴法における劣化コンクリートの動的弾性係数に関する考察

池田 幸史*¹・鈴木 哲也*²・大津 政康*³

要旨：共鳴法はコンクリートの弾性係数を実験的に算定する非破壊試験法の一つである。JIS 規格で動弾性係数は共鳴法の一次共振周波数から求められている。縦波振動の場合にはポアソン比の影響が無視されており、一次元の近似式となっている。そこで本研究では、劣化コンクリートを用いて、縦波速度に基づくポアソン比を考慮した動弾性係数を求め、静弾性係数との比較を行った。その結果に基づいて、検討手法の有効性を三次元 BEM 解析に基づき得られた周波数スペクトルで確認し、共振周波数に対する供試体の変形モードに関する考察を行った。

キーワード：共鳴法、動弾性係数、三次元 BEM 解析、周波数スペクトル、変形モード

1. はじめに

コンクリートの動弾性係数は振動周期や伝播速度などの波動特性試験から求められる弾性係数で、コンクリートの経時的な材質変化を表す指標とされている。その試験方法と計算式の詳細がコンクリート標準示方書 (JIS A 1127 - 2001)¹⁾ に記載されている。これに従い、本研究では共鳴法における劣化コンクリートの動的弾性係数に関する考察を行った。

共鳴法により一次共振周波数を求め、伝播速度を決定し、示方書に記載されている一次元部材の近似式から、動弾性係数を求めることができる。しかし、これはポアソン比の影響が無視された、近似式に他ならない。この影響により、静弾性係数に比べて 1 割以上大きく評価されることも認められている²⁾。コンクリートは三次元物体であるので、弾性波の縦波速度と動弾性係数との関係式は、ポアソン比を考慮した式でなければならない。また、振動モードの一次元性も確認する必要がある。そこで本研究では、水中凍結融解試験による人工的に劣化させたコンクリート供試体中を伝播する縦波速度を測定

し、ポアソン比を考慮した場合での動弾性係数を求めた。そして一軸圧縮試験より求めた静弾性係数と比較し考察した。また、検討手法の有効性を確認するために、共鳴法と三次元 BEM 解析により得られた周波数スペクトルを比較し、共振周波数に対する供試体の変形モードに関する考察を行った。

2. 動弾性係数 E_d の算出方法

共鳴法を概念的に述べれば、式(1)より波長が導かれる。

$$\lambda = V_1 / f \quad (1)$$

λ : 波長 (m)

V_1 : 伝播速度 (m/s)

f : 一次共振周波数 (Hz)

共振現象は縦波振動、たわみ振動、ねじり振動における振動モードが波長と一致するために生じるので、波長と供試体の振動モードの代表長さ L との対応から伝播速度は決定される。縦方向の振動モードの第一次モードでは、式(2)のようになる。

$$V_1 = 2Lf \quad (2)$$

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科博士前期課程環境土木工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科博士後期課程環境共生科学専攻 修士 (農学) (正会員)

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科共生科学専攻教授 工博 (正会員)

そして、この伝播速度から動弾性係数を決定することができる。コンクリート標準示方書¹⁾に記載されている縦波振動に対する動弾性係数の決定式は、一次元部材の近似式で、

$$V_1 = \sqrt{E_D / \rho} \quad (3)$$

E_D : 動弾性係数 (GPa)

ρ : 供試体の密度 (kg/m^3)

として、ポアソン比は考慮されていない。しかし部材そのものは三次元物体であるので、ポアソン比の影響が無視されている式 (3) は、理論的には近似式に他ならない²⁾。

そこで本研究では、ポアソン比の影響を考慮した三次元弾性体の式(4)を用いることにより、動弾性係数 E_d を推定することにした。

$$V_p = \sqrt{E_d(1-\nu) / \{ \rho(1-2\nu)(1+\nu) \}} \quad (4)$$

E_d : 動弾性係数 (GPa) ν : ポアソン比

V_p : 弾性波波速測定試験による縦波速度 (m/s)

3. 実験概要

3.1 供試体

実験に用いた供試体は、寸法を $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とした無筋角柱供試体を 11 本作製した。損傷程度を変化させるため、9 本の供試体を標準水中養生 28 日後、水中凍結融解試験 (JIS A 1148) を行い、人工的に劣化させた状態で、共鳴法及び弾性波の波速測定試験を実施した。その際、100 サイクル毎に 3 本の供試体を取り出し、半分にカットした供試体 ($100 \times 100 \times 200\text{mm}$) を用いて、一軸圧縮試験を行った。残りの 2 本については、水中養生 28 日後及び水中凍結融解試験 300 サイクル終了後に、劣化させた供試体との比較のため、同様の測定を実施した。

コンクリートの配合と力学的特性をそれぞれ表-1に示す。ここで、圧縮強度及び静弾性係数は径 $100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を同条件で打設し、一軸圧縮試験を各三本ずつ行った平均値である。

3.2 測定方法

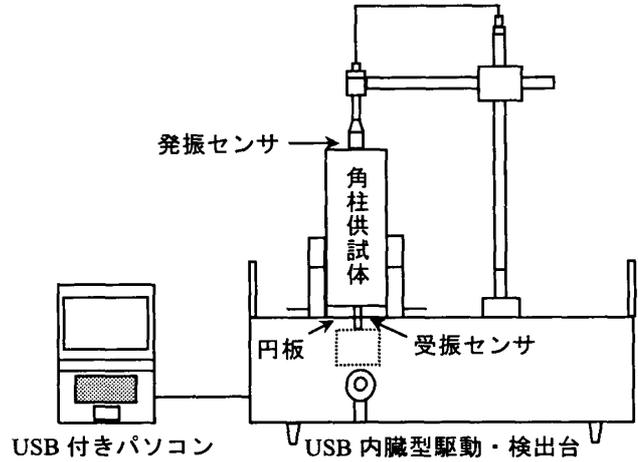


図-1 共鳴法装置の概要

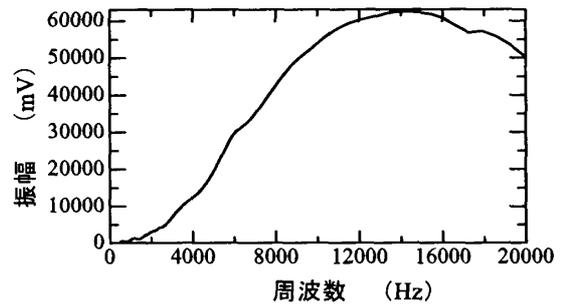


図-2 センサの感度特性

共鳴法の測定は、JIS A 1127 に規定された試験を行うことを目的とし、PC オートスキャン型動ヤング率測定器を用いて、図-1 に示すように縦波振動における周波数スペクトルを測定した。駆動・検出台の上に供試体を置き、発振器より一定電圧の周波数を $500\text{Hz} \sim 20000\text{Hz}$ まで正弦波形のスweepモード信号で発振センサを介して供試体へ入力し、受振センサで検出し、

表-1 コンクリートの配合及び力学的特性

最大粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単体量 (kg/m^3)				AE 剤 (cc)	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)
					W	C	S	G			
20	55	43.1	7.9	6.3	182	331	746	1204	133	36.4	29.4

スペクトル振幅をデジタル出力させることにより共振周波数を求めた。なお、使用したセンサについては、実験前に周波数領域 500Hz～20000Hz 間で、センサの感度特性を測定した。その結果を図-2に示す。センサ特性は、2000Hz～15000Hz まで徐々に応答が大きくなり、高周波領域ほど感度がよいことがわかる。また、周波数スペクトルに特別なピークが見られないことから、実験を行う上で供試体の共振以外のピークは、周波数スペクトル上には現れないことが確認できた。

3.3 弾性波波速測定試験

動弾性係数 E_d を求める際に必要となる弾性波の波速（縦波速度 V_p ）の測定試験を行った。水中凍結融解試験各サイクル終了後に、市販の時間差測定装置で透過法³⁾により測定した。供試体の一端から探触子により発振し、他端で探触子により受振を行った。また、測定位置はランダムに決定し、測定回数は各供試体で10回とし、得られた伝達時間の差の平均値より波速を決定した。

4. 実験結果及び考察

4.1 共鳴法におけるスペクトル応答

水中凍結融解試験の各サイクルにおける周波数スペクトルを図-3に示す。既往の研究結果から、各供試体の卓越周波数は図に示す振幅値が最大となる周波数を共振周波数とした。これは図-2で示したセンサの感度特性を考慮して、周波数 2000Hz～12000Hz の領域における周波数スペクトルについて検討したためでもある。

図-3より水中凍結融解試験 0 サイクルでの共振周波数は、一次共振周波数が 5500Hz、二次共振周波数が 11080Hz に存在することがわかる。これは、他の供試体においても材料特性及び形状が同じ条件であり、完全には一致しないが、ほぼ同様のピークが確認できた。また、スペクトル形状も同様の結果が得られた。

100 サイクル、200 サイクルでは一次共振周波数が 5300Hz に存在し、300 サイクルでは、5110Hz

に存在した。これより、サイクル数の増加に伴って、劣化した供試体の一次共振周波数は低下していくことが確認された。

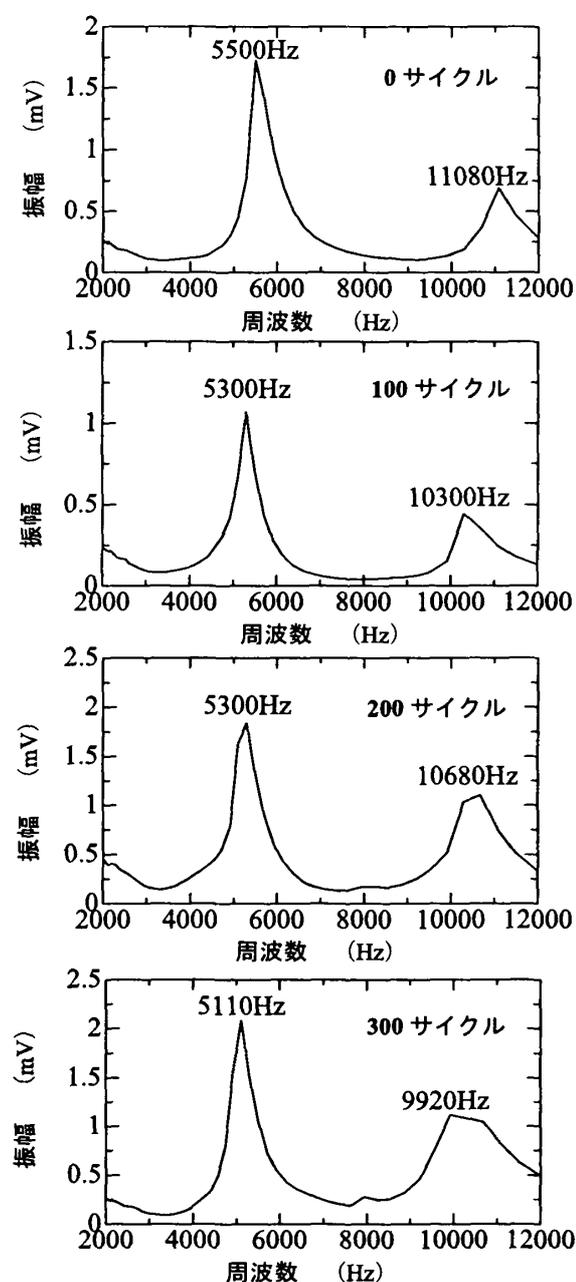


図-3 実験における周波数スペクトル

また、水中凍結融解試験各サイクルでの一次共振周波数を用いて、式(2)より求めた伝播速度 V_1 と弾性波波速測定試験より求めた縦波速度 V_p の比較を、図-4に示す。ここで、 V_1 と V_p は各サイクルにおける平均値である。全体的に V_1 は V_p よりも各サイクルで 800m/s 程度速くなっている。そして、サイクル数の増加に伴って

V_1 と V_p は、共に速度が減少していくことが確認できた。これは、サイクル数の増加に伴って、供試体の劣化が進行し、弾性係数が低下したためだと考えられる。

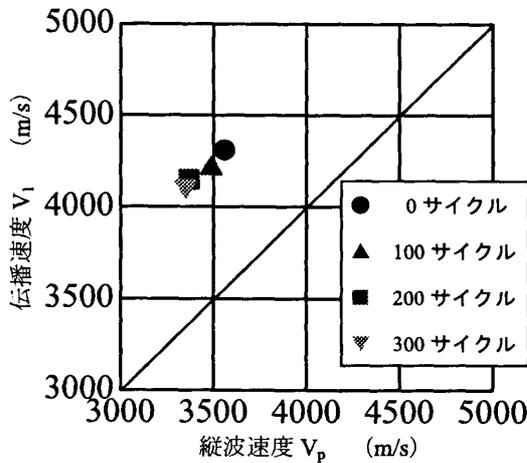


図-4 V_1 と V_p の比較

4.2 解析による周波数スペクトル

そこで、本研究では、実験結果を三次元動的 BEM 解析^{4), 5)}により検討を加えた。

三次元動的 BEM 解析では、任意の周波数 f での定常場の積分方程式を解くことにより、境界上の変位を決定した。要素分割は入出力面を $2.5 \times 2.5\text{cm}$ に区切り、その他の面は $5 \times 5\text{cm}$ の要素に区切り、その中心を節点とした。要素の面積、節点の座標、面の法線方向を決定し、解析のモデルとしている。解析には、水中凍結融解試験各サイクル終了後での密度、ポアソン比、縦波速度 V_p 、及び動弾性係数 E_d を用いた。なお、ポアソン比はコンクリートの標準値である 0.2 とした。解析においては、衝撃の入力を 1N とし、周波数 f を連続的に変化させて、供試体における周波数スペクトルを求めた。また、周波数の入出力点は実験と同じとし、周波数スペクトルを 0~20000Hz まで 78.125Hz の周波数刻みで解析を行った。解析での周波数スペクトルを図-5に示す。

解析と実験の結果を周波数スペクトルの共振周波数の出現状況から比較検討した。水中凍結融解試験 100 サイクル、300 サイクルの共振周波数は、解析及び実験で 5300Hz、5100Hz 付近とな

り、ほぼ一致している。0 サイクル、200 サイクルにおいても、若干の相違はあるものの、ほぼ同一周波数での共振が確認された。

また、実験で得られた一次共振周波数の前後での周波数帯における卓越周波数や高周波数域での共振周波数の相違は、実験と解析で拘束条件の現象が微妙に異なることと、解析モデルの要素分割数が少ないことなどの影響が考えられる。しかし、ピークの発生パターンや発生周波数域の概要を確認する上で、この解析結果は有効であると考えられる。

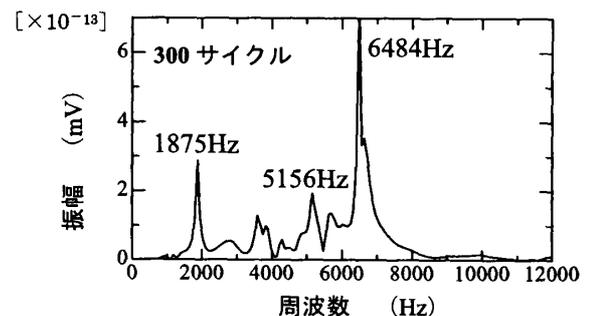
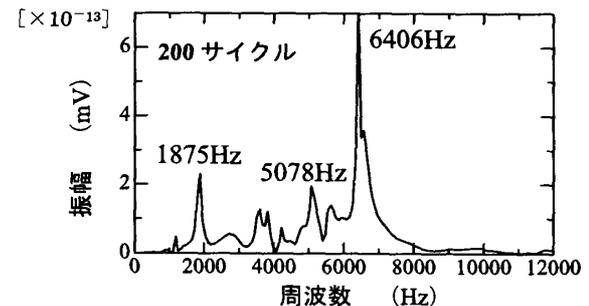
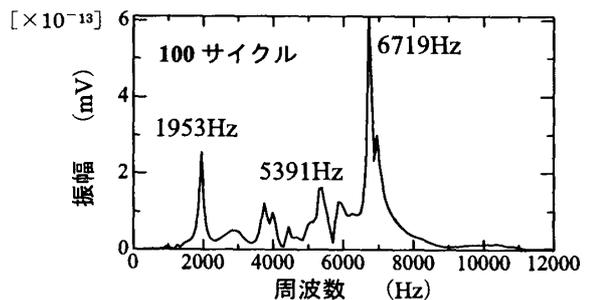
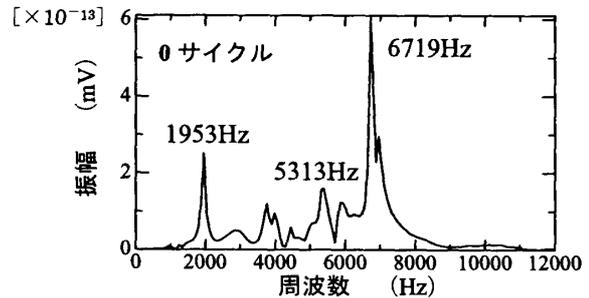


図-5 三次元 BEM 解析における周波数スペクトル

4.3 変形モードに関する考察

図-5に示す三次元 BEM 解析により得られた一次、二次、三次共振周波数に対する各水中凍結融解試験サイクルでの供試体変形モードを図-6に示す。一次ピークの伸縮が大きく見られる一次変形モード、二次ピークの上下振動が見られる二次変形モード、三次ピークでさらに大きな上下振動が見られる三次変形モードの振動が確認できた。ただし、実験結果から求めた振動モードでも、実際には曲げ成分を含んだ振動モードであることが認められる。このことは、式(2)に基づいて速度を評価する問題点を明示している。

4.4 静弾性係数と動弾性係数の比較

水中凍結融解試験各サイクル終了後に、共鳴法で得られた一次共振周波数からの伝播速度 V_l より、式(3)を用いて求めた動弾性係数 E_D と、弾性波波速測定試験で得られた縦波速度 V_p より、式(4)を用いて求めた動弾性係数 E_d の結果を、一軸圧縮試験より求められた静弾性係数(割線弾性係数 E_0 及び初期接線弾性係数 E_1) と比較する。ここで、 E_d を求める際にはポアソン比を 0.2 とした。

各サイクルでの E_0 と E_D の比較を図-7に、 E_1 と E_d の比較を図-8に示す。各サイクルで、 E_D は E_0 より 5 割程度大きくなっている。これは E_D を算出する際にポアソン比を考慮していないことに加え、応力-ひずみ曲線から E_0 を求める際に割線で求めていることが影響しているものと考えられる。このことから、従来法より算出した E_D と E_0 との相違は、コンクリート物性が影響しているのではなく、ポアソン比を考慮しているか否かにより差異が生じたものと考えられる。

これに対して、 E_d と E_1 は 100, 200, 300 サイクルでほぼ一致している。0 サイクルについてはサンプル数が少ないために、一致は十分ではないと考えられる。これにより弾性波動論的にも、物性値としての動弾性係数と静弾性係数は同じであるとされる。また、弾性係数を評価す

る上で、式(4)を用いることが必要である。

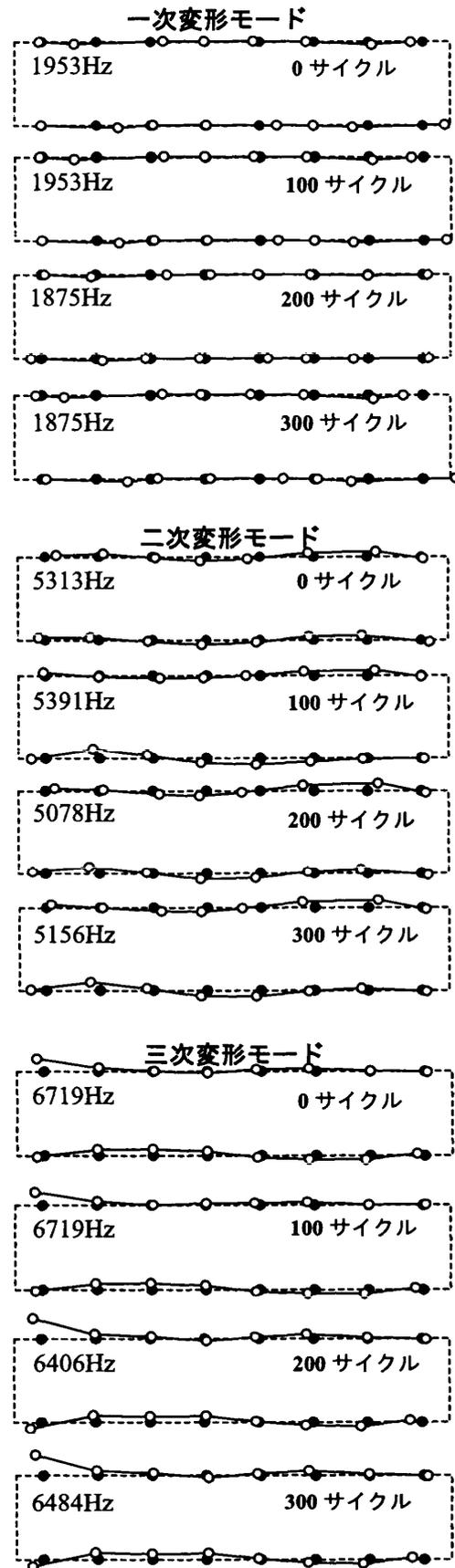
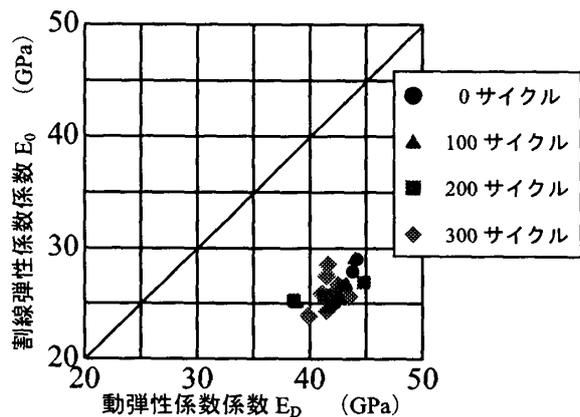
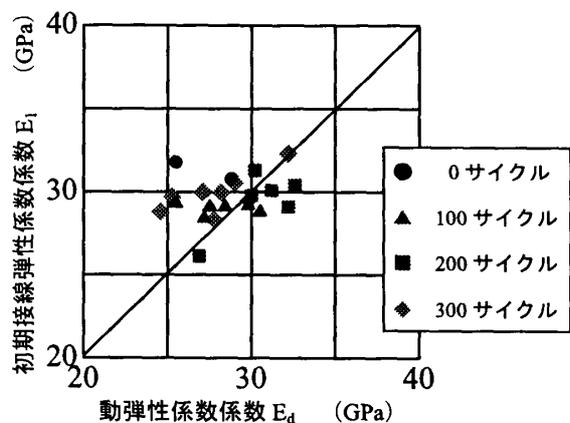


図-6 三次元 BEM 解析による変形モード

図-7 E_0 と E_D の比較図-8 E_1 と E_D の比較

5. 結論

本研究の結果、水中凍結融解試験各サイクルで、三次元 BEM 解析より得られた周波数スペクトルは、共振周波数の発生位置において、共鳴法の結果とほぼ対応することが確認された。また、解析により得られた共振周波数の一次、二次、三次ピークにおいて、一次モードを除けば、曲げ振動モードが含まれることが確認された。

共鳴法により得られた一次共振周波数からの伝播速度 V_1 は、弾性波波速測定試験で得られた縦波速度 V_p に比べて、全体に 800m/s 程度速い波速になり、水中凍結融解試験によるサイクル数の増加に伴って V_1 と V_p は、共に速度が減少していくことが確認された。

水中凍結融解試験各サイクルで、動弾性係数 E_D と静的弾性係数 E_1 が、ほぼ一致したことにより、弾性波動論の物性値としての弾性係数に、

動弾性と静弾性の違いは本来ありえないと考えられる。

以上の結果より、相対動弾性係数を別にすれば共鳴法による動弾性係数の評価には問題があることが考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書「規準編」 pp.307-311, (JIS A 1127-2001)
- 2) 大津政康：コンクリート構造物の診断と非破壊試験 材料, Vol.51, No4, pp.405-411, 2002.4
- 3) 大津政康, 石井勇五郎他：コンクリート構造物の非破壊検査法, 養賢堂, pp.111-141, 1994
- 4) 上杉晋平：弾性定常波問題における境界要素法の適用性に関する研究, 熊本大学 平成2年度 博士論文
- 5) 境界要素法研究会編 「境界要素法の理論と応用」, コロナ社, pp.93-103, 1987