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 Ed の算出方法

共鳴法の概念を理論的に述べれば,式(1)より 波長が導かれる。

$$\lambda = V_1 / f \tag{1}$$

λ:波長(m)

V₁: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。

$$V_1 = 2Lf \tag{2}$$

*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、

$$V_1 = \sqrt{E_D / \rho} \tag{3}$$

E_D:動弾性係数(GPa)

ρ: 供試体の密度 (kg/m³)

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 Ed を推定することにした。

$$V_{p} = \sqrt{E_{d}(1-\nu)/\{\rho(1-2\nu)(1+\nu)\}}$$
(4)

E_d:動弾性係数(GPa) v: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 100×100× 400mm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(100×100× 200mm)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100×200mm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



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 500Hz~20000Hz まで 正弦波形のスウィープ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	W/C	s/a	スランプ	空気量	単位量(kg/m ³)			AE 剤	圧縮強度	静弹性係数	
(mm)	(%)	(%)	(cm)	(%)	W	С	S	G	(cc)	(MPa)	(GPa)
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。



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。



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 ×2.5cm に区切り, その他の面は 5×5cm 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ー **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。



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_1 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 $E_0 \ge E_D$ の比較を**図**-7に, $E_1 \ge E_d$ 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 $E_D \ge E_0$ 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 E₁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 であると考えられる。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-8 E₁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 E₁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)
- 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
- 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