

弾性波トモグラフィ法によるPC構造物の健全性評価に関する研究

飛島建設(株) 正会員 農修 ○桃木 昌平
京都大学 学博 塩谷 智基
日本大学 工博 小林 義和

Abstract : Poor filling of grout in the sheath in the post-tensioned PC structure is seen as a problem. If left a void by filling failure, by intrusion of rainwater and decrease in density due to aging of concrete, PC steel is broken. In this study, we investigated by numerical simulation analysis the application of seismic tomography method as a non-destructive evaluation technique to understand, such as filling of the sheath and the density of the concrete, the health of the PC structure. In addition the velocity tomography, attenuation tomography that varies with high sensitivity, visualization by the fusion of the two indices, it is possible to efficiently evaluate the health of PC structure has been found.

Key words : PC structure , Non-destructive evaluation technique , Seismic tomography method

1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造物は、コンクリート部材とPC鋼材の一体化を確保し、かつPC鋼材を腐食から保護するために、PC鋼材を通すシース内にグラウトを密実に充填する必要があるが、近年、既設のPC構造物においてグラウトの充填不良が確認されており問題視されている。この充填不良によるシース内の空隙が放置され、コンクリート部材の経年劣化等により外部から雨水等が侵入する事態を招くと、PC鋼材が腐食し、破断や突出による耐荷性能の低下や第三者被害を起こす可能性がある。

コンクリート部材面からのシース内の充填不良の検出方法として、これまでにX線透過法や弾性波法などの研究が行われている。X線透過法は適用可能な部材厚さが限られ、さらには周辺環境への配慮が必須となるが、グラウトの充填部と未充填部を視覚的かつ正確に把握できる¹⁾。弾性波法は主にシースからの反射現象を分析することでシース内の充填状態を推定する²⁾。これらの手法に関する多くの研究により、検査技術は確立されつつある。しかしながら、これらの手法の検査領域が局所的であることは否めず、国内の橋梁約16万橋の半数近く(42.6%)、総延長3,500 kmにもおよぶPC橋³⁾をはじめ、多数のPC構造物への適用は、日々の点検による外観の変化・変状の確認、つまりは目視や打音検査による優先順位付けに頼らざるを得ず、PC構造物に対する合理的な維持管理計画の策定や実施にはなお課題が山積している。

そこで本研究では、充填不良の検出手法の効率的な実施と、外観では確認できない段階での対処に寄与する、PC構造物の広域的な健全性評価が可能な技術の創出を目的とし、コンクリート構造物の広域的な非破壊評価技術として実績のある弾性波トモグラフィ法⁴⁾の適用可否について検討を行った。まず、シース内の充填率を評価するために、一般的な評価指標である伝播速度を用いた速度トモグラフィ法に加え、物性や状態に対し伝播速度より高感度な変化を示す弾性波の減衰特性に着目し、減衰率を評価指標とする減衰トモグラフィ法のアルゴリズムを構築した。次に、両トモグラフィ法による鋼製シース内のグラウト充填率の評価への適用可否を、数値解析によるシミュレーション検証により検討した。また、それぞれのトモグラフィ法で得られた速度および減衰率を同時に表示させる二軸化データ融合を用いた可視化手法による評価についても検討した。

2. 弾性波トモグラフィ法による健全性評価

2.1 速度トモグラフィ法アルゴリズムの概要

弾性波トモグラフィ法は、対象領域を弾性波測定で得られる多数かつ多方向の走査線情報の全てに整合する有限要素モデルで表す手法である。走査線情報に関わるパラメータがモデルの各要素に個々に与えられ、そのパラメータの等高線図で対象領域を表すことで、そのパラメータの不均質性や異常値の分布を確認することができる。つまり、弾性波トモグラフィ法のアルゴリズムとは、弾性波測定結果に整合する各要素のパラメータを求める手順のことである。以下、伝播速度をパラメータとする速度トモグラフィ法のアルゴリズムについて述べる。

弾性波測定における伝播速度は、発信点から受信点までの距離と式(1)で求められる伝播時間 T_{OBS} (以下、観測走時)より求められる。

$$T_{OBS} = t_o - t_s \tag{1}$$

ここに、 t_s : 発信時刻, t_o : 受信時刻である。

一方、速度トモグラフィ法のアルゴリズムでは、図-1に模式図で示すように、各要素に初期パラメータとしてスローネス (s : 速度の逆数) を与える。有限要素モデル上で得られる伝播時間 T_{CAL} (以下、理論走時)は、各要素のスローネスと各要素を横切る走査線長で求められる伝播時間の和集合となり(式(2))、観測走時に対する理論走時の走時残差 ΔT は式(3)より求められる。

$$T_{CAL} = \sum_j s_j l_j \tag{2}$$

$$\Delta T = T_{OBS} - T_{CAL} \tag{3}$$

ここに、 l_j : 要素 j を横切る走査線長である。

各走査線で得られる観測走時に対する理論走時の走時残差を解消するために、各要素のスローネスを補正する。スローネス補正量は、SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) 法により求める。SIRT法は走時残差と各要素を横切る走査線長により、各要素のスローネスの補正量を求める。各要素のスローネス補正量 Δs および補正スローネス s' は式(4)、(5)により求められる。

$$\begin{cases} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \vdots \\ \Delta s_j \end{cases} = \begin{cases} \frac{\sum_i \frac{\Delta T_i l_{i1}}{L_i}}{\sum_i l_{i1}} \\ \frac{\sum_i \frac{\Delta T_i l_{i2}}{L_i}}{\sum_i l_{i2}} \\ \vdots \\ \frac{\sum_i \frac{\Delta T_i l_{ij}}{L_i}}{\sum_i l_{ij}} \end{cases} \tag{4}$$

$$s'_j = s_j + \Delta s_j \tag{5}$$

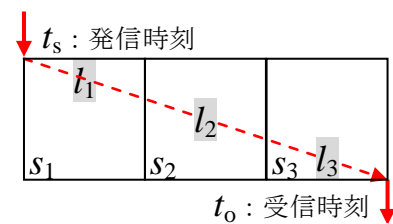


図-1 走時算出模式図

ここに、 L_i : i 番目の走査線の全長である。このアルゴリズムによって、弾性波測定結果である多数かつ多方向の走査線の観測走時に整合する各要素のスローネス、つまりは各要素の速度が求められ、対象領域を速度の等高線図で表すことができる。

2.2 減衰トモグラフィ法アルゴリズムの構築

(1) 弾性波の減衰特性と減衰率の定義

図-2に示すように、コンクリートを伝播する弾性波は、伝播経路上にひび割れや空隙などの異常部が存在すると波動が散乱し、回折経路による伝播時間の遅れとともに振幅またはエネルギーの減衰が生じる。この弾性波の減衰特性を表す減衰率(受信点の振幅/発信点の振幅)は伝播速度よりも異常部を高感度に評価できることが既往の研究⁵⁾により報告されている。この既往の研究では、減衰率を波形の振幅(電圧)から求めているが、弾性波による評価は励起される周波数により異なる⁶⁾ことから、

本研究では、発信点および受信点の波形に対し高速フーリエ変換を行い、発信点の卓越周波数における、受信点と発信点のパワースペクトル密度 (以下、PSD) の比率を減衰率として用いた (図-3)。

(2) 減衰トモグラフィ法アルゴリズムの構築

弾性波測定における減衰率 A_{OBS} (以下、観測減衰率) は式(6)で求められる。

$$A_{OBS} = a_o / a_s \quad (6)$$

ここに、 a_s : 発信点の卓越周波数における発信波形の PSD, a_o : 受信点の卓越周波数における受信波形の PSD である。

速度トモグラフィ法アルゴリズムと同様に、この観測減衰率と有限要素モデルで得られる理論減衰率との残差を解消すべく、モデルを再構成する手順が減衰トモグラフィ法のアルゴリズムである。理論減衰率は、弾性波がある媒質に入力されたとき、その媒質が波動を減衰させる現象として、光の媒質による吸収と類似の現象と見なし、ランベルト・ベールの法則⁷⁾により定式化した。 a_s および a_o の関係は係数 α を用いて式(7)により示される。

$$a_o = a_s e^{-\alpha L} \quad (7)$$

これは、距離 L 進むにつれ $e^{-\alpha L}$ 倍減衰することを意味する。式(7)は係数 β を用いて書き換えられ (式(8)), 理論減衰率 A_{CAL} は式(9)で求められる。

$$a_o = a_s 10^{-\beta L} \quad (8)$$

$$A_{CAL} = a_o / a_s = 10^{-\beta L} \quad (9)$$

ここで、観測減衰率 (式(6)) および理論減衰率 (式(9)) の表現をデシベル [dB] によって改める。

$$A_{OBS} = 10 \log_{10}(a_s / a_o) \quad (10)$$

$$A_{CAL} = \beta L \quad (11)$$

以上の手順により、理論減衰率が単位長さあたりの減衰率 (以下、単位減衰率) β [dB/m] を用いて求められる。したがって、速度トモグラフィ法アルゴリズムと同様に、各要素に初期パラメータとして単位減衰率 β を与え、各要素を横切る走査線長を用いて理論減衰率 (式(11)) および観測減衰率 (式(10)) に対する残差を求め、残差を解消するために SIRT 法により各要素の単位減衰率 β を逐次補正する。この手順により、弾性波測定結果である多数かつ多方向の走査線の観測減衰率に整合する各要素の単位減衰率が求められ、対象領域を減衰率の等高線図で表すことができる。

3. 数値解析によるシミュレーション検証

3.1 解析条件

速度トモグラフィ法および減衰トモグラフィ法による鋼製シース内のグラウト充填率の検査への適用に関する基礎的な検証として、数値解析によるシミュレーションを行った。シミュレーション検証に用いた数値解析ソフトウェア Wave2000 (CyberLogic社製) は、二次元の弾性波動方程式について近似解を計算するもので、有限差分法を基本とし、式(12)で示す弾性波動方程式を用いている。

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left[\mu + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla^2 w + \left[\lambda + \mu + \phi \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta}{3} \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla(\nabla \cdot w) \quad (12)$$

ここに、 ρ : 単位体積重量, λ, μ : ラメ定数, η : せん断粘性係数, ϕ : 体積粘性係数, t : 時間である。また、 w は二次元の列ベクトルで、その構成要素は位置 (x, y) における変位の x 成分と y 成

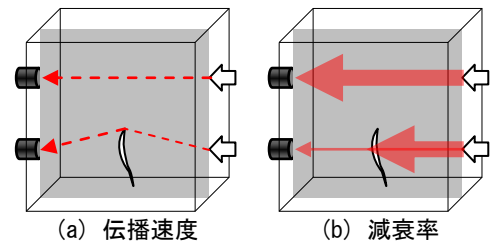


図-2 弾性波法による評価の概念

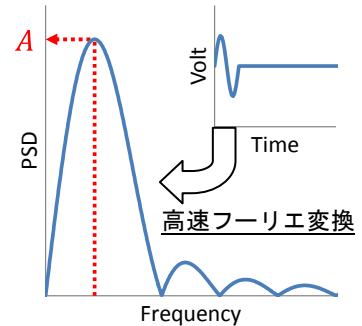


図-3 卓越周波数における PSD

分であり、式(13)で表される。

$$w = [wx(x, y, t) \quad wy(x, y, t)]' \quad (13)$$

本研究では、図-4に示すように鋼製シース内のPC鋼材を保護するグラウトの充填率 (0, 50, 100 %) について、図-5、図-6に示すモデル・センサ配置および走査線によるシミュレーションにより各走査線の観測走時および観測減衰率を求め、図-7に示す有限要素モデルにおいて弾性波トモグラフィ法を行った。このシミュレーションでは、上下端に境界条件を設けず無限延長とし、反射波による影響を考慮しないこととした。各部材は単位体積重量 ρ 、ラメ定数 λ および μ により設定し、ラメ定数は弾性係数とポアソン比から算出した。図-5のモデルに各部材の設定値を(表-1)を入力し解析する。また、減衰率に関わるパラメータとなる各種粘性係数は、本研究では、既往の弾性波測定データをもとに逆解析により同定した値を用いた。入力する弾性波はガウスモノパルス(重心周波数: 1 MHz)を設定した。

3.2 弾性波トモグラフィ法によるグラウトの充填率評価

図-8、図-9および図-10に、それぞれ数値解析による波動伝播イメージ、速度トモグラフィ法および減衰トモグラフィ法によるシミュレーション結果(等高線図)を示す。

鋼製シース内のグラウト充填率が0%である場合(図-8(a))、空隙部において波動が全反射するため、波動は空隙部を回折して伝播するが、回折経路を伝播することによる伝播時間の遅れは計算上でも微小なものであり、シミュレーションでは、鋼製シースに移り伝播する波動により、速度トモグラフィ法による速度の等高線図において鋼製シース付近で速度が速くなる傾向が確認された(図-9(a))。しかし、この速度変化もごくわずかなものであり、速度トモグラフィ法では鋼製シースの位置を検出することも困難であると考えられる。これに対し、減衰トモグラフィ法による減衰率の等高線図では(図-10(a))、回折による距離減衰の増加の影響が反映され、鋼製シースの位置において減衰率が大きく、その差異は速度よりも明瞭であった。

グラウトが充填され伝播経路上の一体性が確保されている場合(図-8(b), (c))は、波動はPC鋼材などに移り、かつ最短である直線経路を伝播することから、速度の等高線図において、充填率が高くなるにつれ鋼製シース付近の速度が速くなる傾向が確認された(図-9(b), (c))。一方、各部材は音響インピーダンスが異なることから、波動は一部が部材界面を移り伝播するとともに、一部は部材界面で反射(散乱)する。減衰の等高線図ではこの波動の散乱減衰の増加の影響が反映されており、鋼製シース付近における減衰率は、充填率0%の場合よりも大きく示された(図-10(c))。また、鋼製シース付近における減衰

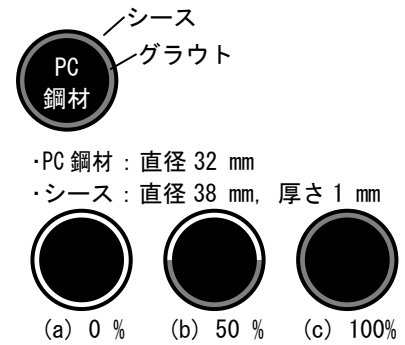


図-4 グラウト充填率

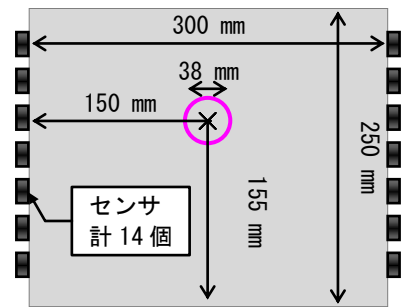


図-5 モデル・センサ配置

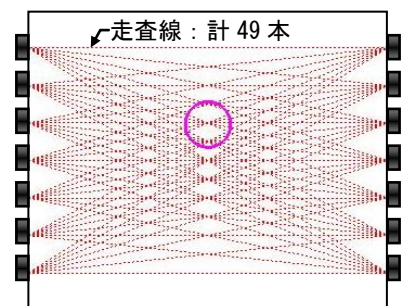


図-6 走査線図

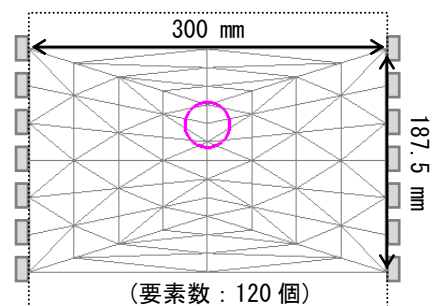


図-7 有限要素モデル

表-1 各部材の設定値

	コンクリート	グラウト	鋼製シース PC鋼材
ρ [kg/m ³]	2,380	2,236	8,030
λ [MPa]	9,875	7,500	100,910
μ [MPa]	13,636	11,250	78,170

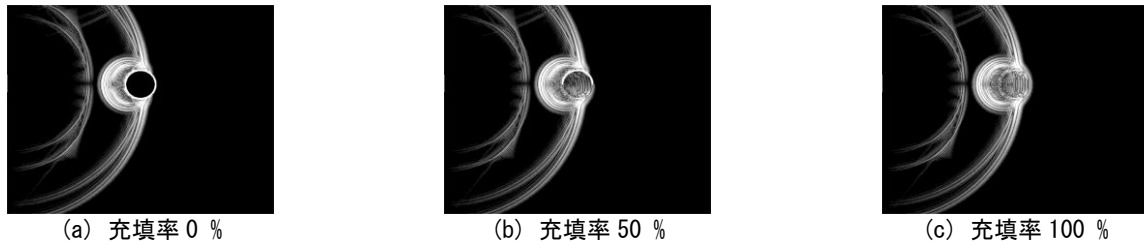


図-8 数値解析による波動伝播イメージ

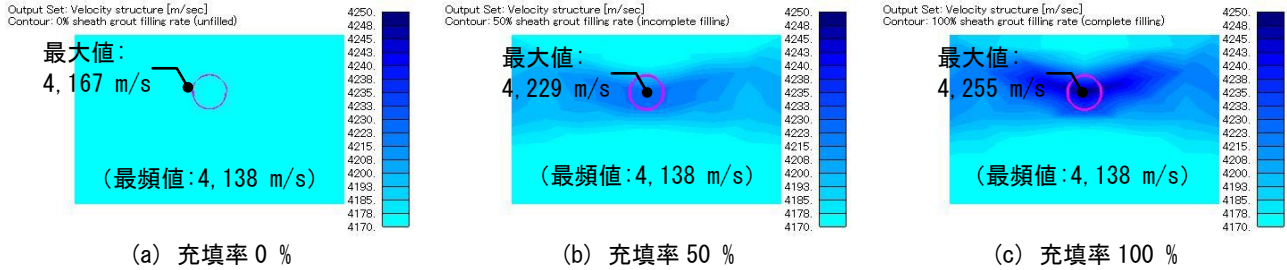


図-9 速度トモグラフィ法によるシミュレーション結果

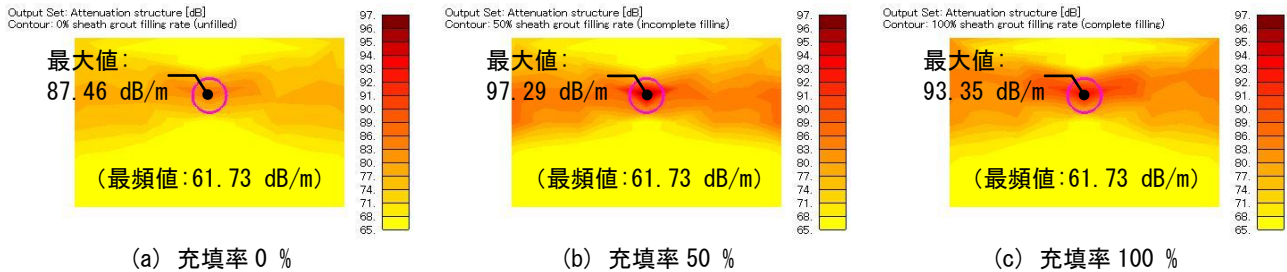


図-10 減衰トモグラフィ法によるシミュレーション結果

率は、充填率100%よりも充填率50%の方が大きく示された(図-10(b))。これは一部に空隙が存在することから、距離減衰と散乱減衰の双方の影響を複合的に反映したためと考えられる。

数値解析によるシミュレーションにより、速度トモグラフィ法および減衰トモグラフィ法の両手法において、鋼製シース内のグラウト充填率に関連する傾向がそれぞれ確認された。また、構築した減衰トモグラフィ法は速度トモグラフィ法よりも高感度に評価できる可能性が確認された。

4. 二軸化によるデータ融合を用いたグラウトの充填率評価

数値解析によるシミュレーションにおいて、速度および減衰率という二つの指標が、それぞれグラウト充填率に関連する傾向を示すことが確認された。

しかし、速度は変化が小さく、また、減衰率は速度よりも感度よく変化するものの、変化の傾向は充填率に対し線形の相関ではない。そこで、異なる傾向を有する二つの指標を同時に表示させる二軸化によるデータ融合を用いた可視化手法⁸⁾についても検討した。図-11に二軸化によるデータ融合の概念を示す。まず、速度・減衰率それぞれの結果(図-11(a), (b))をもとにしきい値を設定する。そして速度と減衰率を軸とした平面上に各要素のデータをプロットし、しきい値を用いてデータを分類す

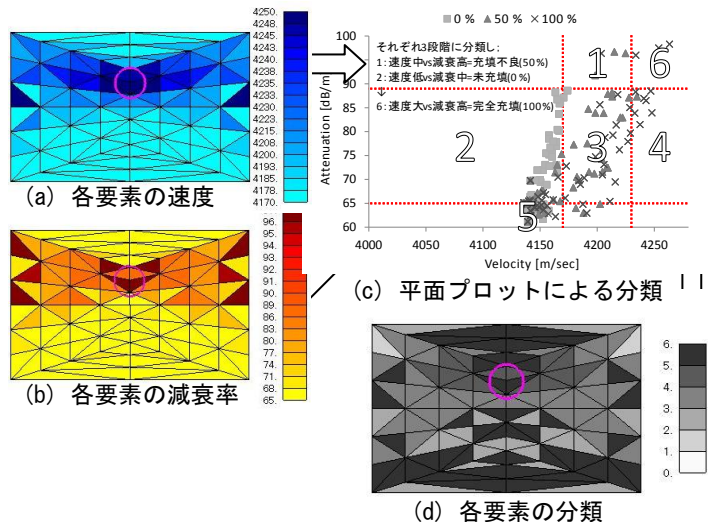


図-11 二軸化によるデータ融合



図-12 二軸化によるデータ融合を用いた等高線図

る(図-11(c))。本研究ではそれぞれの手法で確認されたシース内の傾向をもとに六段階の分類を行い、その分類により要素を改め(図-11(d))新たな等高線図で表した。二軸化によるデータ融合を用いた等高線図を図-12に示す。速度・減衰率データ融合により、鋼製シース内でグラウトの充填率に伴う変化が表されており、二軸化によるデータ融合を用いた可視化手法も有効であることが確認された。

二軸化によるデータ融合を用いた可視化手法は、しきい値を適切に設定すること、二つの指標により表現される状態が何を表すかを想定することが重要となり、実際に評価に用いるためにはより多くのデータの蓄積が必要不可欠となる。しかしながら、速度および減衰率は弾性波測定で同時に得られる指標であり、PC構造に限らずコンクリート部材そのものにおいてもさまざまな状態が想定される実構造物において、効率的に健全性を評価するための判断材料として有効な手法であると考えられる。

5. 結論

本研究ではPC構造物の広域的な健全性評価が可能な技術の創出を目的とし、数値解析シミュレーション検証により弾性波トモグラフィ法の適用可否について検討した。以下に、得られた結論を示す。

- ① 数値解析によるシミュレーション検証により、弾性波トモグラフィ法により鋼製シース内の充填率を評価できる可能性が見出された。
- ② 物性や状態に対し高感度な変化を示す弾性波の減衰特性に着目し構築した減衰トモグラフィ法は、鋼製シースの位置や鋼製シース内の充填率をより明瞭に評価できることが確認された。
- ③ 二軸化によるデータ融合を用いた可視化手法も有効な評価手法であることが確認された。

PC構造物に限らずインフラ構造物の適切な維持管理は喫緊の命題であり、広域的な健全性評価が可能な弾性波トモグラフィ法は、合理的な維持管理に寄与する重要な技術の一つである。弾性波トモグラフィ法を効果的に活用するために、試験体や実構造物での検証も進め、技術を確立する必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、土木研究所橋梁構造研究グループ：PC橋のグラウト充填の確認方法に関する研究，平成21年度土木研究所成果報告書，No. 46，2009。
- 2) 例えば、鎌田敏郎，淺野雅則，川島雅道，内田慎哉，六郷恵哲：弾性波によるPCグラウト充填評価手法の実構造物への適用，土木学会論文集E，Vol. 62，No. 3，pp. 569-586，2006。
- 3) 国土交通省：道路統計年報2013，<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/>，2014。
- 4) 桃木昌平，蔡華堅，塩谷智基，小林義和，宮永孝志：三次元弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価，構造工学論文集，Vol. 57A，pp. 959-966，2011。
- 5) 桃木昌平，塩谷智基，小林義和：「減衰トモグラフィ」で高精度に構造物の健全性を診断，検査技術，Vol. 15，No. 9，pp. 39-43，2010。
- 6) Dimitrios, G. A., Tomoki, S., Shouhei, M.: Frequency Dependency of Elastic Wave in Cement-Based Materials with Artificial Damages, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, V-006, pp. 11-12, 2007.
- 7) IUPAC Gold Book : Beer-Lambert law, <http://goldbook.iupac.org/B00626.html>, 2014.
- 8) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートの非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会(339委員会)(第Ⅱ期)報告書ならびにシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ，No. 100，2012。