

## 論文 衝撃弾性波法による PC 橋梁シース管グラウトの充填度合の測定

極壇 邦夫<sup>\*1</sup>・境 友昭<sup>\*2</sup>

要旨: PC 橋梁は, 普通, PC 鋼材を通したシース管を配置しておいてコンクリート硬化後に鋼材を緊張してプレストレスを与える。その後シース管中にセメントペーストを圧入してコンクリートとの間を間接的に付着させる。セメントペーストが充填されないと, 付着不良によって浸水し鋼材が腐食することがある。X 線あるいはガンマー線を利用して充填状況を検査する方法があるが, 放射線は人体に対する影響や測定時間が長いなどの難点がある。本論文は, 衝撃弾性波法によってシース管グラウトの充填度合を非破壊で診断する方法について, その理論と実橋梁で試験を行った結果について報告する。

キーワード: 衝撃弾性波法, PC 橋梁, 欠陥探査, 縦弾性波, 多重反射

## 1. はじめに

内ケーブル式 PC 橋梁では, 鋼材に緊張力を与えた後, ダクト (シース管) をセメントミルクなどでグラウトする。これは, コンクリートと鋼材を間接的に付着させる目的の他, 浸入水に起因する腐食を防止する目的もある。現在, シース管の充填度合は, 規定量の充填材が注入されたことの確認をもって管理されている。すなわち, 注入量および所定の溢流口からの吐出の確認である。しかし, PC 鋼材とシース管の隙間が狭いことを考えると, 十分な施工管理にも関わらずシース管に空隙が生じる可能性を否定することはできない。

これまで, シース管内のグラウト充填度合の調査法として X 線,  $\gamma$  線などを利用する方法が用いられる場合があったが, 検査に時間がかかること, 透過方式であるため, 放射面と撮像面の確保が必要なことなど, 検査を実施する上での問題もあった。これらのことから, 比較的簡便にシース管の充填度合を検知する技術の開発が期待されており, PC 鋼棒や PC 鋼線に直接弾性波動を入力し, その応答から充填度合を推定する方法<sup>1),2)</sup>, あるいは桁側面に衝撃弾性波を入力しグラウト未充填部を空隙として検知する方法<sup>3),4)</sup>, などが研究されてきた。

本論文では, 衝撃弾性波法によって PC 橋梁桁の側面からシース管内のグラウト充填度合を検知する方法について, その理論および実際の PC 橋梁桁による測定結果について報告する。

## 2. 測定の理論

衝撃弾性波法は, 測定面に打撃によって入力された波動がコンクリート構造物の厚さ方向に多重反射して発生する周波数を検出し, これから構造物の厚さを算出する方法である。多重反射によって特定周波数が発生する現象を音響的には「フラッターエコー」と呼ぶ。いわゆる「鳴竜」現象である。フラッターエコーが人に認識されるためには十分な反射回数と継続時間が必要であると同様に, 信号処理の方法によってフラッターエコーの周波数を特定するためには少なくとも数回の反射回数が要請される。

衝撃弾性波法としては, すでにインパクトエコー (Impact Echo) 法<sup>5)</sup> が開発され, その測定方法は, ASTM<sup>6)</sup> にも規定されている。この意味では, 衝撃弾性波法は, 一般的な測定技術となっているものと言えるであろう。しかしながら, たった 1 回の反射波の到達時間差を元に内部欠陥を検知する超音波法と比較した場合, 衝撃弾性波法は, 波動が構造物内を多重反射することを測定の前提としており, 微小な空隙や測定面と平行でない内部欠陥を検知できるかどうかについては疑問が残

\*1 東海大学助教授 工学部土木工学科 工修 (正会員)

\*2 アブライドリサーチ (株) 代表取締役 工博

されている。本章では、衝撃弾性波法の理論および内部欠陥の検知技術に関し理論的な側面から検討する。

## 2.1 内部欠陥が無い場合

衝撃弾性波法では、図-1に示すように測定面を鋼球などで打撃し、その近傍にセンサーを置いてコンクリート板の振動応答を測定する。打撃に

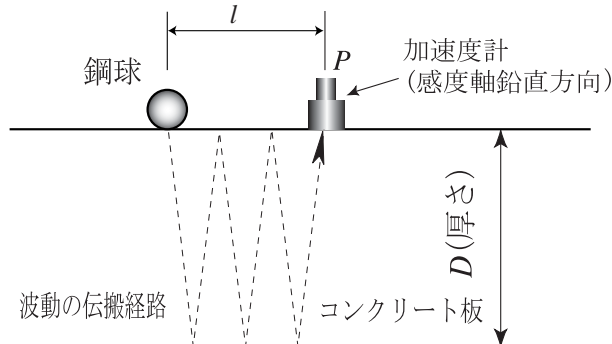


図-1 衝撃弾性波法の測定方法

よって、表面波および縦弾性波、横弾性波が発生する。

表面波は、打撃点から測定点に直接伝搬する。表面波には、レーリー波とラブ波があるが、センサーの感度軸が測定面に対して鉛直であるために、鉛直方向の振動成分を持つレーリー波が検知される。

弾性波には、縦弾性波と横弾性波があるが、打撃点と測定点の間隔が十分に狭く、波動が底面で反射してセンサーに向かう経路では、波動は底面に対してほぼ垂直に入射し、またセンサーに対しても同様に垂直に入射すると考える。このとき、センサーの感度軸は測定表面に対して鉛直であるから、波動の進行方向に対して平行な変位成分を持つ縦弾性波のみが検知され、横弾性波は測定されないことになる。

すなわち、センサーでは、レーリー波と縦弾性波が測定され、それぞれのインパルス応答関数を  $h_R, h_P$  とすると、測定信号  $y(t)$  と入力された打撃力の信号  $x(t)$  の間には、次のコンボリューション積分が成立する。

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t - \tau) \{h_P(\tau) + h_R(\tau)\} d\tau \quad (1)$$

表面波のインパルス応答関数は、

$$\left. \begin{aligned} h_R(t) &= \frac{K_R}{2\pi l} & , & \quad t = \frac{l}{V_R} \\ h_R(t) &= 0 & , & \quad t \neq \frac{l}{V_R} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

として示される。ここで、 $V_R$  は表面波の伝搬速度、 $K_R$  は打撃によって発生した表面波成分のエネルギー比に関する比例係数である。

本論文では、波動の伝搬系の周期性を周波数スペクトルのピーク周波数によって解析することを主眼としており、比例係数  $K_R$  の大きさについては考慮しない。PC 桁を無限平面と仮定すれば、表面波は時刻  $t_R = l/V_R$  に測定点 P に到着するが、測定点を通じた後、再度戻ってくることはない。したがって、時刻  $t_R$  でのみ値を持つが、それ以外の時間では 0 である。

一方、縦弾性波は、弾性体の内部に伝搬し厚さ方向に多重反射する。その伝搬経路長  $L$  は  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) を波動の往復回数として、

$$L(i) = \sqrt{l^2 + (2iD)^2} \quad (3)$$

である。ここで  $L(i)$  は、測定点 P に到達した  $i$  番目の多重反射波の伝搬距離、 $D$  は弾性体の厚さであり、PC 桁の表面および裏面は、波動に対して自由端であるとする。今、 $l \ll D$  とすると、式 (3) は、

$$L(i) = 2iD \quad (4)$$

となる。したがって、弾性波のインパルス応答関数は、

$$\left. \begin{aligned} h_P(t) &= \frac{K_P}{2\pi(2iD)^2} & , & \quad t = \frac{2iD}{V_P} \\ h_P(t) &= 0 & , & \quad t \neq \frac{2iD}{V_P} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となる。ここで、 $V_P$  は、弾性波の伝搬速度である。 $K_P$  は、発生した振動のうち、弾性波成分のパワー比に関する係数であり、周波数スペクトルに現れるピーク周波数には影響を与えない。式 (5) に示されるように、弾性波のインパルス応答は、

$$T = \frac{2D}{V_P} \quad (6)$$

を周期としており、すなわち、フラッターエコー周波数  $f_0$  は、

$$f_0 = \frac{V_P}{2D} \quad (7)$$

である。これから、この周波数  $f_0$  が測定されれば、

$$D = \frac{V_P}{2f_0} \quad (8)$$

として弾性体の厚さが計測される。なお、本論文の周波数分析図では、周波数 ( $f$ ) を式 (8) によってから距離 ( $D$ ) に変換して表記する。

フラッターエコーは、インパルス応答関数の周期性によって生成されるわけであるから、式 (1) を周波数領域に変換し、

$$Y(\omega) = X(\omega) \{H_P(\omega) + H_R(\omega)\} \quad (9)$$

が得られる。ここで、 $\omega, H_P, H_R$  はそれぞれ角周波数、弾性波の周波数応答関数および表面波の周波数応答関数である。表面波のインパルス応答関数には周期性がないから、したがって

$$H_R(\omega) = k_R \quad (10)$$

である。よって、式 (9) は、

$$Y(\omega) = X(\omega)(H_P(\omega) + k_R) \quad (11)$$

となる。スペクトルのピークからフラッターエコー周波数を検出する目的では、式 (11) 右辺 ( ) 内の第 2 項は定数となるので無視することができる。したがって、

$$H_P(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{Y(\omega)X^*(\omega)}{X(\omega)X^*(\omega)} \quad (12)$$

が得られる。 $*$  は、共役複素数を意味し、式 (12) 右辺の分母は、入力のパワースペクトル、分子は、入力と測定波形のクロスパワースペクトルである。

式 (12) によってフラッターエコー周波数を分析するためには、入力信号が測定信号とは別途に測定されなければならない。しかし、図-1 のようにコンクリート構造物の振動応答のみを測定するシステムでは、入力信号の測定ができない。そこで、実際のスペクトル解析では、最大エントロ

ピーによるスペクトル推定法 (MEM) がホワイトノイズで駆動されている系のインパルス応答を与えること<sup>6)</sup> を利用し、測定波形を直接 MEM 解析して周波数応答関数を推定する方法を用いた。

## 2.2 内部に欠陥がある場合

内部空隙には様々な形状、測定点との位置関係が考えられるが、おおよそ表-1 のように分類される。

表-1 空隙の種類と発生振動

空隙の位置	空隙の深さ	
	浅い	深い
測定点直下	曲げ振動	空隙多重反射
測定点隣接	底面多重反射	1 回反射

測定点直下で、空隙の大きさと比較して浅い位置にあって入力の周波数が測定表面と空隙間のフラッターエコー周波数よりも低い場合には、空隙部の曲げ振動が発生し、フラッターエコー周波数よりも低い周波数成分が主体となる。一方、円形空隙が測定点に隣接するものの測定点下でない場合、波動は 1 回だけ空隙に当たって測定面に戻ってくる。しかし、多重反射はしない。この時の 1 回反射は、底面から反射して来た波動についても成立し、したがって底面との多重反射と周期が等しくて位相の異なる波動が重畳する。この結果、測定される波形に歪みが生じ、高調波成分が発生する。

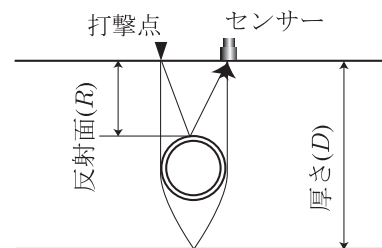


図-2 測定点直下の深い空隙

打撃によって発生した弾性波のエネルギーを  $W$ 、微小空隙の面積を  $A$  とすると、空隙によって

$$W_R = AG_R \frac{W}{2\pi R^2} \quad (13)$$

のエネルギーが反射し、ここが新たな波動の発生源となる。この反射波動が測定面に到達した時の強さは、

$$I_R = AG_R \frac{W}{2\pi R^2} \frac{1}{2\pi R^2} \quad (14)$$

である。ここで  $G_R$  は、空隙での反射波の指向性利得を示す係数である。今、

$$\eta = \frac{AG_R}{2\pi R^2} \quad (15)$$

としてこれを空隙比と定義する。すなわち、空隙によって発生した反射波が測定面に到達する時の強さの比を示すものである。 $i$  回多重反射した場合に測定される強さは、

$$I_{Ri} = \frac{W}{2\pi R^2} \eta^i G_R^i, \quad t = \frac{2iR}{V_P} \quad (16)$$

となり、 $\eta$  の値次第では波動の減衰は大きいものの、周期性を持った信号が得られる。一方、底面との間で多重反射する波動の強さは、

$$I_{Di} = \frac{W(1-\eta)}{2\pi(2iD)^2}, \quad t = \frac{2iD}{V_P} \quad (17)$$

となる。測定点では、これらの波動が重畳されたものとなり、それぞれの周波数およびそれらの周波数の和と差の周波数成分が観測される。また、式にも示されるように空隙のフラッターエコーと厚さのそれでは波動の継続時間が異なる。 $\eta = 0.5$  の場合について、図-3 に示す。この図から、スペ

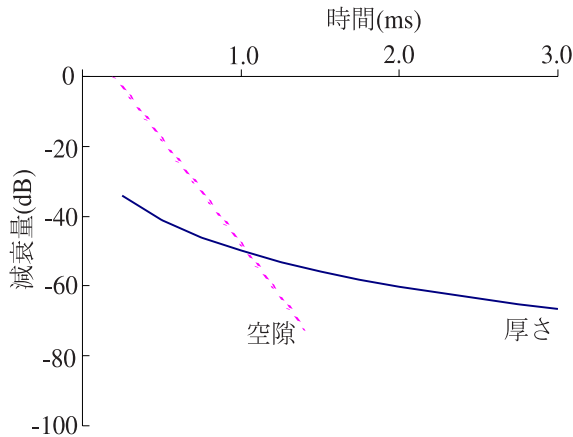


図-3 厚さ，空隙による反射波の継続時間 ( $\eta = 0.5$ )

クトルの時間変化を捉えることによって、空隙の大きさに関する情報を得られることがわかる。すなわち、空隙のスペクトルの継続時間が比較的小さい場合は、空隙が小さいと判断される。また、厚さのスペクトルが観測されないような場合には、空隙での反射が強いこと、すなわち、空隙が大きいと判断される。

## 2.3 数値シミュレーション

先験的にインパルス応答関数および入力波形を与えられれば、応答波形を計算によって求め、そのスペクトルを知ることができる。すなわち、内部に欠陥がある場合の数値計算が可能となる。図-5 は、式 (16) および式 (17) をインパルス応答関数とみなして波形を生成し MEM 解析した結果について示すものである。コンクリート板の厚さは 0.34m、空隙は測定面から 0.2m の深さにあり、コンクリートの弾性波速度は 4,000m/s としている。なお、入力波形は、直径 15mm の鋼球 (質量 14g) で 30N/mm<sup>2</sup> 級のコンクリートを打撃した時の速度波形 (鋼球とコンクリートの接触時間 120 $\mu$ s) である。図-4 にこれを示す。図-5 の横軸は、式 (8)

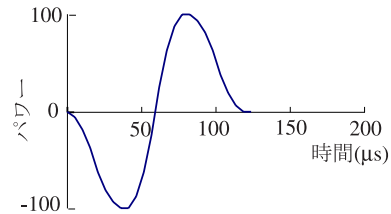


図-4 入力波形

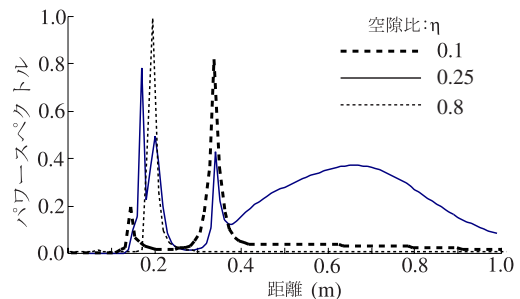


図-5 空隙がある場合 ( $\eta=0.1 \sim 0.8$ )

によって周波数から距離に変換したものである。図-5 に示すように、空隙が小さい場合 ( $\eta = 0.1$ ) には、厚さに相当するスペクトル (0.34m) とその倍音 (0.17m) にのみスペクトルが見られるが、空隙が大きくなると、空隙深さ (0.2m) に相当するスペクトルが卓越する。中間的な領域では、厚さとその倍音および空隙深度のスペクトルが混在することが分かる。この結果から、次のことが考えられる。すなわち、

- (1) 厚さのスペクトルのみが卓越する場合には、空隙はない。

(2) 厚さとその倍音関係にないスペクトルがある場合には、中程度空隙がある。

(3) 厚さと倍音関係にないスペクトルのみが卓越する場合には、大きい空隙がある。

である。

### 3. 実 PC 橋梁での調査

#### 3.1 調査方法

衝撃弾性波法のシース管の充填度合い調査への適用性を検証するために、供用中の実 PC 橋梁桁を対象として試験を行った。測定対象として橋梁は箱桁橋で、桁の側壁の厚さは 0.35m、そのほぼ中央にせん断鋼棒用のシース管(約 45mm)が埋め込まれている。測定は、箱桁の内側から行った。

センサーと打撃点の間隔を 30mm 程度に保ち、50mm ピッチで水平方向に 1.25m 区間測定を行った。

#### 3.2 測定波形と MEM スペクトル

加速度での測定波形を図-6 に示す。なお、P11 は測定点の番号を示し、測定開始の位置から 0.5m の距離である。また、この点の直下にシース管は埋設されていない。波形は、加速度で示しているが、実際に解析する場合には、積分して速度波形としている。図に示されるように、波形からは直ちに PC 桁の厚さなどの情報を知ることは困難である。図-7 は、速度波形に変換した後で、MEM スペクトル解析した結果を示すものである。横

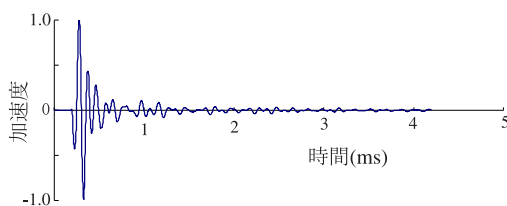


図-6 測定波形例 (P11)

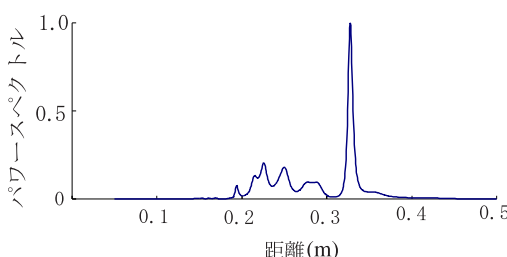


図-7 MEM スペクトル (P11)

軸の距離は、図-5 と同様に周波数を距離に変換したものである。なお、弾性波速度は、4,000m/s としている。図から明らかなように、スペクトルは距離 0.33m に集中し、ほぼ線スペクトルである。0.2 から 0.3m の間に弱いスペクトルが見られるが、特に有意なスペクトルとは考えられない。これから、P11 測定点直下には空隙などはないものと判断される。

一方、図-8 に示すように、測定点 P8 では PC 桁の厚さに相当するスペクトルは観測されず、ほぼ厚さの 1/2 周辺に集中したスペクトルが見られる。

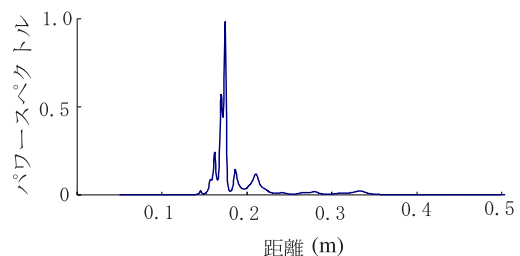


図-8 MEM スペクトル (P8)

#### 3.3 時間窓 MEM スペクトル

P8 でのスペクトルの構造をより正確に把握するために、時間窓 MEM 解析法を導入する。時間窓解析法は、周波数が時間変動するような現象を解析するために、測定波形を時間で区切って切り出し、それぞれをスペクトル分析する方法である。先にも示したように、底面からの反射波と空隙からの反射波とでは減衰速度が異なり、空隙が小さい場合にはその減衰速度が速い。したがって、時間窓 MEM 解析法を適用した場合、空隙での多重反射によるスペクトルの継続時間は空隙の大きさの指標となるものと考えられる。図-9 に P8 と P15 の時間窓 MEM スペクトルを比較して示すが、P8 では測定時間全体に亘って、空隙と推定される部位からのスペクトルが見られるのに対して、P15 では空隙のスペクトルの継続時間が 0.5ms と短い。これから、P8 直下の空隙は P15 と比較して大きいものと考えられる。しかし、いずれの測定点においても、PC 桁の厚さに相当するスペクトルは観測されており、深刻な空隙とは考えられない。

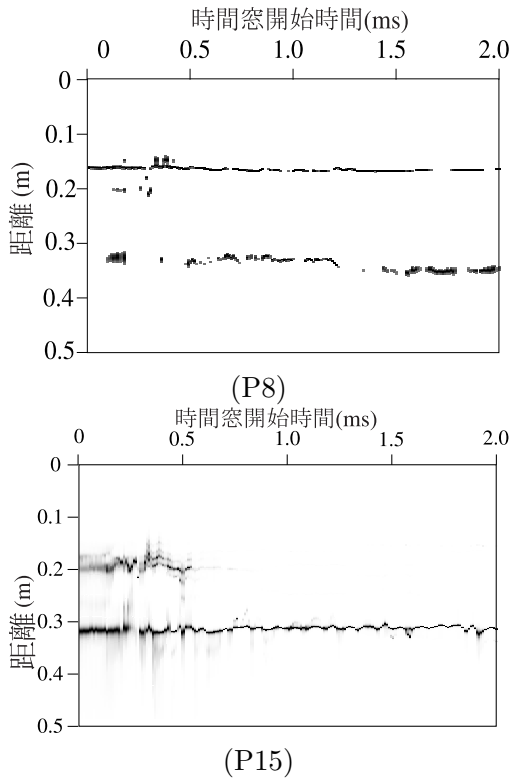


図-9 時間窓 MEM スペクトル

### 3.4 画像による表示

図-10 に測定結果を示す。図は、横軸を水平距離、縦軸をスペクトル (桁の厚さ) としたものである。図から、PC 桁の厚さがほぼ 0.35m であることがわかる。また、PC 桁の厚さが明確に現れていないところがある。0.4m(P8)、0.75(P15)m および 0.9m(P21) 位置である。この直下には、せん断鋼棒用のシース管が通っている。

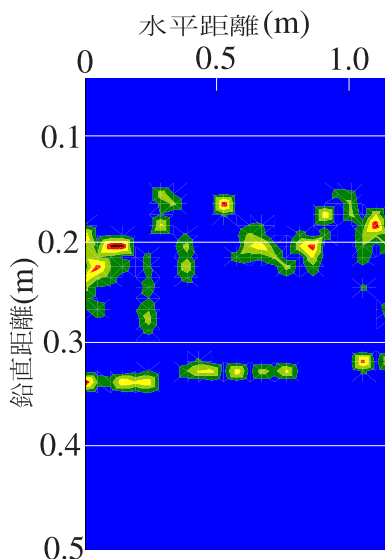


図-10 測定結果の画像表示

## 4. 考察

本論文では、PC 橋梁桁のシース管内のグラウト充填度を衝撃弾性波法で検知する場合について、理論的検討および実橋梁で実施した検知試験の結果を示した。

内部に空隙がある場合の衝撃弾性波法の測定波形およびスペクトルについて、先験的なインパルス応答関数を導入して数値計算する方法を試みた。この結果、計算によるスペクトルと実際に測定したスペクトルには類似性があり、現象解明のための数値計算方法の可能性が示された。しかしながら、空隙の大きさ (空隙の反射面積)、形状 (反射波の指向性係数) と空隙比の関係は、まだ未解明であり、スペクトルの数値計算法の確立に向けて今後の課題である。

スペクトルの解析方法として MEM および時間窓 MEM 解析法を用い、PC 桁の厚さ並びに内部欠陥が検知できることを確認した。また、時間窓 MEM 解析法を用いることによって、内部欠陥の定量化の可能性が示された。

図-10 に示されるように、掃引しながら測定することによって、空隙の位置が視覚的に把握できた。

### 参考文献

- 1) 富田芳男, 岩波光保, 大即信明: 衝撃弾性波を用いた PC フレッシュグラウトの充填性評価に関する研究, 土木学会論文集, No.648, V-47, pp.127-135, 2000.
- 2) 鎌田敏郎, 六郷恵哲, 北園英昭: 実物大 PC 桁のグラウト充填評価への衝撃弾性波法の適用, (社) 日本非破壊検査協会平成 13 年春季大会講演概要集, pp.43-44, 2001
- 3) 極檀邦夫, 岩野聡史, 埴忠夫: 鋼球打撃法によるコンクリート版厚の推定, 第 22 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.620-621, 1995.
- 4) 極檀邦夫, 岩野聡史, 埴忠夫: 打撃法によるコンクリート版厚の推定実験, 第 23 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.656-657, 1996.
- 5) Mary Sansalone and Nicholas J. Carino: Impact Echo Method, *Concrete International*, April, 1988, pp.38-46, 1988.
- 6) ASTM C1383-98a; Standard Test Method for Measuring P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact Echo Method April, 1999.