

## 論文 FEM 解析による PC グラウト充填状態の非破壊調査法の検討

松永 嵩\*1・藤吉 宏彰\*2・磯部 仁博\*3・山田 知典\*4

**要旨**：ポストテンション方式の PC 橋の縦締め PC ケーブルに対して、衝撃弾性波法により板厚の縦波共振周波数を評価した場合、PC シース周辺に比べ、PC グラウト未充填部直上の周波数が低下する。この変化量は、橋梁の桁厚、PC シース径、振動評価位置に依存すると想定されるが、これらを網羅的に整備した研究は少ない。そこで、有限要素解析を用いて衝撃弾性波の数値シミュレーションを実施し、板厚、空洞直径、振動評価位置に伴う縦波共振周波数の変化を評価した。その上で、空洞直上と周辺部の縦波共振周波数変化から PC グラウトの充填状態を評価する手法の適用限界および測定条件について取りまとめた。

**キーワード**：PC グラウト、縦締め PC ケーブル、衝撃弾性波法、有限要素解析

## 1. はじめに

## 1.1 ポストテンション方式 PC 橋の現況

ポストテンション方式 PC 橋梁（以下「ポステン橋」という）は 1953 年完成の十郷橋や 1954 年完成の第一大戸川橋りょうの建設以来、約 60 年が経過し、全国において数多く建設されている<sup>1)</sup>。ポステン橋は、コンクリート打設後に PC 鋼材を緊張し、コンクリートに圧縮応力を付与した橋梁であり、内ケーブル工法の場合、緊張付与後は PC 鋼材と構造物との一体化及び PC 鋼材の腐食からの保護を目的としてシース内にグラウト（以降、「PC グラウト」という）を充填している。

しかしながら、シース内に PC グラウトの未充填部が残されている場合には、雨水等の侵入により PC 鋼材の腐食、破断や突出につながる恐れがあり、さらには PC 鋼の耐荷性能の低下だけでなく第三者被害を引き起こす可能性もある。例えば、海外では英国 Bickton Meadows 歩道橋(1967 年)、Ynys-y-gwas 橋 (1985 年)、ベルギーのスヘルデ川に架かる橋 (1992 年) が、国内では新菅橋（長野県木祖村）や島田橋（岐阜県町道）が、PC グラウト充填不足に伴う PC 鋼材の腐食が原因で落橋しており、国内外で PC グラウト充填不足のリスクが顕在化している。

PC グラウト充填不足、PC 鋼材のリスク発生確率は、建設時期との相関があり、「PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル」(PC 建協) (1996 年) の流量計の設置の義務化以前は PC グラウト充填の不確実感是否めないとされており、高度経済成長期に建設された多くのポステン橋で PC グラウト充填不足による PC 鋼材の腐食・破断のリスクを抱えていると言える。このような背景のもと、PC グラウト充填状況や PC 鋼材の腐食破断の調査を実施し、その状況や傾向等について把握することが急務であり、また、予防保全的に維持管理するため

にも早急な調査の実施が望ましいとされている。

## 1.2 PC グラウト充填状態の非破壊検査手法の既往研究

PC グラウトの充填状態を評価する非破壊検査手法は従来から様々な研究が行われている。例えば、X 線透過法は、一方の側から X 線発生装置により X 線を透過させ、その反対側に配置された X 線フィルム等の感光材料で画像化する方法である。撮影された画像は、コンクリート内の鋼材（鉄筋や PC 鋼材）は周囲に比べて白く写り、グラウト未充填部分等の空隙は黒く写ることから、このコントラストの差よりグラウトの充填状況を識別する。一般的に撮影可能なコンクリート部材厚は 500 mm 以下とされており、X 線照射時間は部材厚に応じて大きく異なり、部材厚が 500 mm のものでは 120 分程度必要と言われている<sup>2)</sup>。

広帯域超音波法は、シース直上のコンクリート面に接触媒質を介して探触子を配置する形で実施し、シースからの反射波を受信して、その特性値の差で PC グラウトの充填状況を判定する方法である。近年では、シース反射波に加えて端面反射波の周波数分布を用いて精度を高める検討を行っている<sup>3)</sup>。

より簡便な手法として、振動センサ・変位センサ等を用いてデジタルで振動を取得し、解析することで PC グラウトの充填不足を評価する手法もある<sup>4)</sup>。

例えば、インパクトエコー法では、グラウト未充填箇所をコンクリート中の空隙部分と見なし、表面から空隙までの深さに相当する縦波共振周波数ピークの有無から未充填箇所を判定する。一般的には、空隙が深く、かつ空隙サイズが小さい場合には検出が困難になるが、川嶋らは波形処理方法や周波数分析の手法を検討し、空隙の大きさ/空隙までの深さが 0.25 以下においても検出できる手法を提案している<sup>5)</sup>。

\*1 原子燃料工業（株） エンジニアリングサービス部 修士（正会員）

\*2 原子燃料工業（株） エンジニアリングサービス部 修士（正会員）

\*3 原子燃料工業（株） エンジニアリングサービス部 工学博士

\*4 東京大学 工学系研究科システム創成学専攻 准教授 博士（工学）

筆者らは、グラウト未充填箇所はコンクリートとシースの一体化が図られていないことから、コンクリート内部に弾性係数の低い箇所が存在する状態と同等の振動現象になると考え、表面から空隙までの深さに相当する縦波共振周波数と比べ、ピーク信号強度の高い板厚の縦波共振周波数の変化に着目した評価を行っている。実際に現場橋梁にてグラウト未充填箇所における板厚の縦波共振周波数の低下を確認しており、シース直上とその近傍の縦波共振周波数の差分からグラウト未充填を評価可能であることを示している<sup>6)7)</sup>。

一方、縦波共振周波数の変化で PC グラウトを評価する場合の課題としては、コンクリート板厚とシース径に応じて変化すると想定されるものの、これらの影響を定量的に評価した研究例は少ない。また、シース直上の測定に合わせて、空洞の影響範囲外での測定も必要であることから、空洞が縦波共振周波数に影響を及ぼす範囲を整備することは、測定箇所を選定する上で重要と考えられる。

### 1.3 本研究の目的

本研究では、PC グラウト充填状態の非破壊検査手法のうち、空洞直上と周辺部の縦波共振周波数変化から PC グラウト充填状態を評価する方法の確立を目的として、コンクリート平板の有限要素解析（以降、「FEM 解析」という）で衝撃弾性波の数値シミュレーションを行い、板厚、シース径、振動評価位置における板厚の縦波共振周波数の変化を定量的に評価した。その上で、板厚の縦波共振周波数の変化量と各パラメータの関係性を明らかにし、本手法の適用限界および測定条件について検討した。なお、本研究では、初期検討としてグラウト充填状態は未充填と充填の2段階とし、端部の影響が生じない平面寸法を設定して検討した。

## 2. コンクリート平板における縦波共振周波数

本研究では、縦波共振周波数<sup>8)</sup>に着目した。縦波共振周波数は式(1)で示され、空洞により板厚方向において見掛けの弾性係数が低下する場合、周波数は低下する。また、振動評価位置についても、空洞直上位置では空洞の及ぼす影響が最も大きく得られるが、空洞直上位置から離れるにつれて空洞の及ぼす影響は小さくなる。

$$f = \frac{V}{2D} = \frac{1}{2D} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad (1)$$

$f$ : 周波数 [Hz],  $E$ : 弾性係数 [Pa],  $\rho$ : 密度 [kg/m<sup>3</sup>],  
 $V$ : 伝播速度 [m/s],  $D$ : 厚み [m],  $\nu$ : ポアソン比

## 3. FEM 解析条件の検討

### 3.1 FEM 解析モデル形状

衝撃弾性波の数値シミュレーションについては、汎用

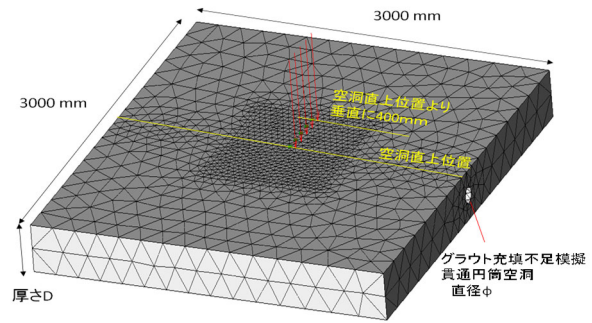


図-1 FEM 解析モデル形状の概要

FEM 解析ソフトである ADVENTURE Cluster を用いた。解析モデル形状については、図-1 に示すように、単純なコンクリートの平板に対して、板厚方向の中心位置に、PC グラウト未充填の模擬として円柱空洞を配置した。板厚及び空洞直径に伴う縦波共振周波数の変化を定量的に評価するため、板厚は 150 mm~600 mm で 4 段階、空洞直径は 20 mm~110 mm の 4 段階を想定し、それぞれの組み合わせで計 16 ケースの形状を作成した。

コンクリート板平面サイズに関しては、インパクトエコー法の米国機械学会規格 C1383 によれば、縦波共振周波数を評価する場合の板厚の平面寸法は板厚の約 6 倍程度とされており、計算コストも考慮して、1 辺 3000 mm とした。

シース及び、骨材に関しては、今回評価対象とする縦波共振のような板厚サイズの全体的な振動モードに対して十分小さく、影響は限定的であると考え、個別にモデル化せずに一様部材としてモデル化した。

### 3.2 解析条件

各種解析条件は表-1 に示す。メッシュサイズに関しては、荷重を付与して振動を評価するコンクリート平板中央部を基本接点間隔 50 mm で、その外周部は 200 mm とし、空洞サイズや板厚に応じて自動調整されている。各解析モデルのメッシュ後の節点数及び要素数を表-2 に示す。

その他、コンクリートの物性値、打撃荷重の設定及び時刻歴応答解析の解析時間条件については、先行研究<sup>9)</sup>にて、打撃部質量が 113 g、打撃面直径が 12 mm の点検ハンマを用いて実施した、無欠陥及び内部空洞のある供試体の実験結果と誤差 1% 程度で再現した条件に基づいて設定した。

なお、時刻歴応答解析は、振動評価位置を空洞直上位置から円柱空洞軸に対して垂直に 400 mm 離れた位置まで、100 mm 間隔で 5 ケース実施した(図-1 の赤矢印)。荷重を付与した位置については、振動評価位置に対して、50 mm 離して付与した。また、コンクリート平板の周囲の境界条件は設定せず、自由端としている。

表-1 解析条件

メッシュ	基本節点間隔	中央部 50 mm 周辺部 200 mm
	要素	4 面体 2 次要素
物性値 (コンクリート)	弾性係数	37 GPa
	密度	2400 kg/m <sup>3</sup>
	ポアソン比	0.2
打撃荷重	荷重	100 N
	波形	三角波
	荷重付与時間	0.1 ms
解析時間条件	解析間隔	4 μs
	解析最大時間	10 ms
	総ステップ数	2500 step

表-2 FEM 解析モデルの形状と節点数・要素数

板厚 D [mm]	空洞直径 φ [mm]	かぶり厚 [mm]	節点数	要素数
150	20	65	82,499	53,192
300	20	140	97,548	64,622
450	20	215	108,613	72,359
600	20	290	116,500	77,523
150	50	50	37,944	21,936
300	50	125	51,382	31,659
450	50	200	59,586	37,049
600	50	275	65,271	40,540
150	80	35	27,276	15,101
300	80	110	37,112	21,760
450	80	185	45,649	27,373
600	80	260	52,294	31,549
150	110	20	24,948	13,800
300	110	95	37,471	22,423
450	110	170	39,744	23,233
600	110	245	47,620	28,341

### 3.3 FEM 解析結果の信号処理

時刻歴応答解析では、解析間隔 4 μs 毎に 10 ms まで、振動評価位置の物理量が得られる。本評価においては、先行研究にて主に速度成分に感度を有する AE センサを用いて試験を行い、FEM 解析条件を設定しており、平面に対して鉛直方向の物理量（速度）を評価対象としている。また、得られる振動波形に対して、縦波共振周波数を抽出するために、高速フーリエ変換を行い、周波数分布を算出した。なお、10 ms の振動波形を高速フーリエ変換した場合、算出される周波数間隔は 100 Hz 刻みとなり、詳細な評価が困難なため、波形長が 1 s となるように両端にゼロを付与するパディング処理を実施し、周波数間隔が 1 Hz となるようにした。この周波数分布より、

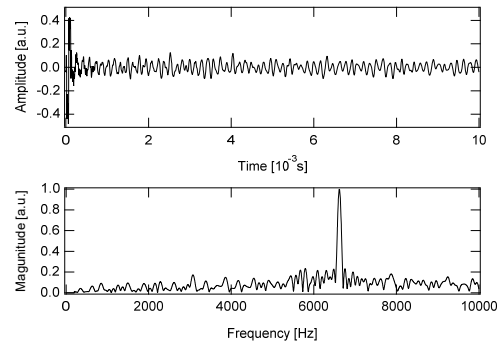


図-2 得られる振動波形と周波数分布の例

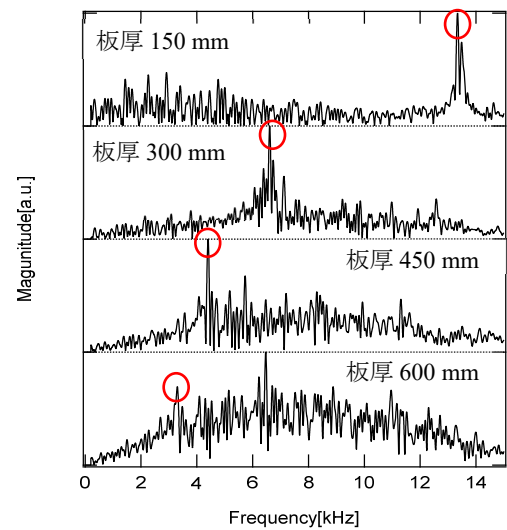


図-3 板厚に伴う縦波共振周波数の変化  
赤丸は一次の縦波共振周波数ピーク

縦波共振周波数ピークを特定し、評価する周波数値をそれぞれ抽出した。図-2 に FEM 解析で得られた振動波形と高速フーリエ変換後の周波数分布の例を示す。

## 4. FEM 解析結果

### 4.1 板厚に伴う周波数分布変化

空洞直径が 20 mm の 4 モデル（板厚 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm）で、空洞の影響がないと想定される空洞直上から 400 mm 離れた位置での周波数分布を図-3 に示す。コンクリート中の弾性波伝播速度は表-1 及び式(1)から 4139 m/s となるため、縦波共振周波数は板厚 150 mm の場合は 13.8 kHz、板厚 300 mm の場合は 6.9 kHz、板厚 450 mm の場合は 4.6 kHz、板厚 600 mm の場合は 3.4 kHz となり、図-3 についても同等の周波数帯で縦波共振周波数ピークが得られていることがわかる。ここで、板厚 600 mm については、卓越周波数が 6.6 kHz 程度で得られるが、これは表-1 に示す打撃荷重条件では、入力される弾性波の周波数が 3.4 kHz よりも高く、1 次モードより高次モードがより励起されたと考えられる。

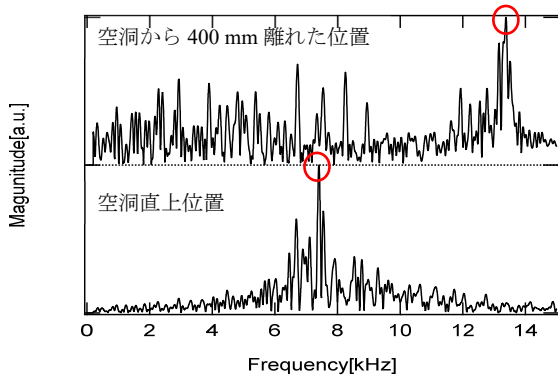


図-4 空洞直上位置及び空洞から 400 mm 離れた位置の周波数分布（板厚：150 mm の場合）  
赤丸は一次の縦波共振周波数ピーク

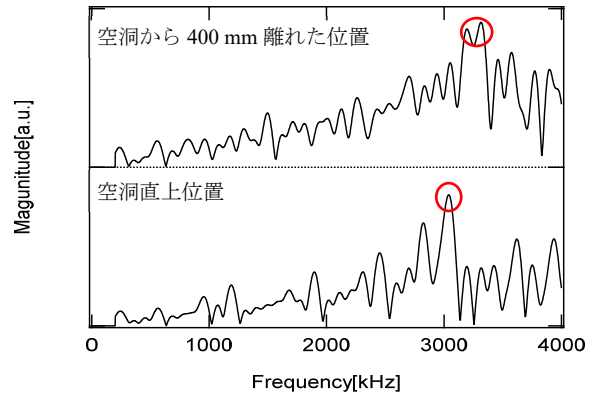


図-5 空洞直上位置及び空洞から 400 mm 離れた位置の周波数分布（板厚：600 mm の場合）  
赤丸は一次の縦波共振周波数ピーク

本研究においては、一次の縦波共振周波数に着目するため、3.3 kHz のピークを抽出している。

#### 4.2 空洞に伴う周波数分布変化

空洞直上位置と空洞から 400 mm 離れた位置での周波数分布について、板厚 150mm で空洞直径 110 mm の場合と板厚 600 mm で空洞直径 110 mm の場合に分けて、それぞれ図-4、図-5 に示す。

板厚 150mm で空洞直径 110 mm の場合では、空洞から 400 mm 離れた位置での縦波共振周波数は 13.4 kHz、空洞直上位置では 7.4 kHz であり、5.9 kHz 程度の周波数低下がみられる。一方で、板厚 600 mm で空洞直径 110 mm の場合では、400 mm 離れた位置での縦波共振周波数は 3.2 kHz、空洞直上位置では 3.0 kHz であり、0.2 kHz 程度の周波数低下となった。

ここで、式(1)より、ポアソン比や密度が一定と仮定すれば、弾性波伝播速度は周波数に比例し、弾性係数は周波数の 2 乗に比例することから、周波数比を式(2)と定義すれば、見掛けの伝播速度、見掛けの弾性係数はそれぞれ式(3)、式(4)のように表せる。

$$r = \frac{f'}{f} \quad (2)$$

$$V' = rV \quad (3)$$

$$E' = r^2 E \quad (4)$$

$f$ : 空洞の影響が小さい位置での周波数 [Hz],

$f'$ : 空洞直上位置での周波数 [Hz],

$r$ : 周波数比,  $V'$ : 見掛けの伝播速度 [m/s],

$E'$ : 見掛けの弾性係数 [Pa]

式(2)～式(4)より、板厚 150mm で空洞直径 110 mm の場合は周波数比が 0.56 であるため、見掛けの伝播速度は周辺部の 0.56 倍、見掛けの弾性係数は周辺部の 0.31 倍になる。同様に、板厚 600 mm で空洞直径 110 mm の場合は周波数比が 0.94 であるため、見掛けの伝播速度は周

辺部の 0.94 倍、見掛けの弾性係数は周辺部の 0.88 倍になり、周波数比を用いることで物性値の見掛け上の変化を定量的に推定可能である。

#### 4.3 空洞に伴う周波数比の変化

空洞に伴う縦波共振周波数の変化範囲を把握するため、空洞直上位置から 400 mm での縦波共振周波数を基準値とした周波数比と振動評価位置の対比を、板厚ごとにそれぞれ図-6～図-9 に示す。

まず、空洞直上位置での周波数比の変化量については、いずれの板厚においても、空洞径の増大に伴い、周波数比はより大きく低下する傾向がある。また、この傾向は板厚が小さいほど顕著であることが分かった。これは、板厚が小さい場合は、板厚に対する空洞の占める割合が増加するため、見掛けの弾性係数が大きく低下したことによると考えられる。

また、空洞が周波数比に与える影響範囲については、空洞板厚 150 mm の場合、空洞直上のみ周波数比が低下する傾向があり、空洞位置から 100 mm 離れた位置では空洞の影響が限定的であることが示された。

一方で、板厚 300 mm 以上の場合については、空洞直上位置に加え、空洞から 100 mm 離れた位置の周波数比も低下する結果となった。模擬した空洞直径は最大 110 mm であり、空洞から 100 mm 離れた位置の直下には空洞は存在しない条件であるが、板厚の増大に伴い振動測定位置直下だけでなく、その周囲の状態も含めた振動特性を評価していると考えられる。

したがって、周波数比を用いて PC グラウト充填評価を行う場合、空洞の影響が小さい振動評価位置は、板厚 150 mm 以下の場合には PC シース直上から 100 mm 以上離れた位置であり、板厚 150 mm を超える場合においては、200 mm 以上離れた位置とすることが望ましいことが分かった。

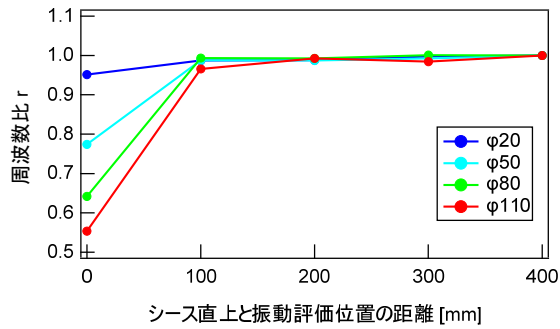


図-6 空洞直径毎の振動評価位置の縦波共振周波数  
板厚 150 mm の場合

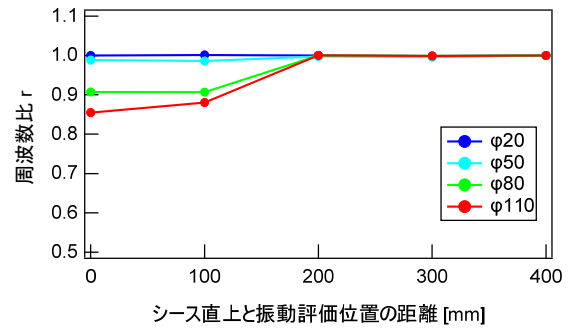


図-8 空洞直径毎の振動評価位置の縦波共振周波数  
板厚 450 mm の場合

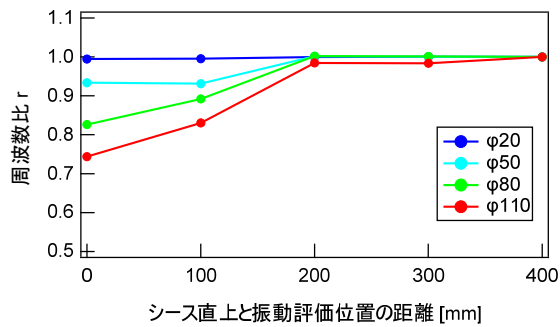


図-7 空洞直径毎の振動評価位置の縦波共振周波数  
板厚 300 mm の場合

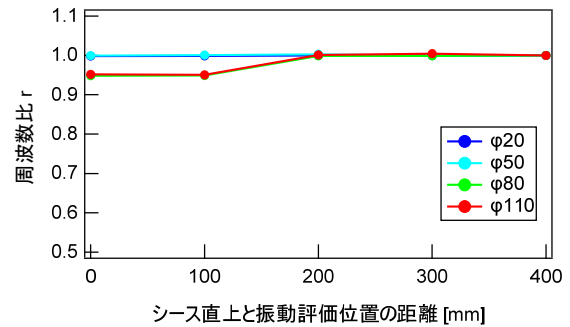


図-9 空洞直径毎の振動評価位置の縦波共振周波数  
板厚 600 mm の場合

#### 4.4 周波数比の変化量と板厚・空洞直径比の関係

板厚に対する空洞の占める割合が周波数比に及ぼす影響を把握するため、板厚に対する空洞の占める割合（以降「 $\phi/D$ 」という）と周波数比の変化量の対比を図-10に示す。

$\phi/D$  が 0.1 以上の場合、 $\phi/D$  の増加に伴い、周波数比の変化量は単調増加を示す傾向がみられた。線形近似を行った結果、決定係数は 0.97 となり、 $\phi/D$  と周波数比の変化量は強い相関があることが示された。

一方で、 $\phi/D$  が 0.1 未満の場合、周波数比の変化量が 1% 未満になることから、見掛けの弾性係数の変化は限定的であることが分かった。

このことから、周波数比を用いて PC グラウト充填評価を行う場合、 $\phi/D$  が 0.1 以上の場合は、 $\phi/D$  の増加するにつれて評価が容易になること、 $\phi/D$  が 0.1 未満の場合は、評価が困難になることが分かった。

#### 5. まとめ

本研究では、PC グラウト充填状態の非破壊検査手法のうち、コンクリート平板の縦波共振周波数の変化から PC グラウト充填状態を評価する方法について、具体的な適用条件や測定方法を明確にすることを目的として、コンクリート平板の FEM 解析で衝撃弾性波の数値シミュレ

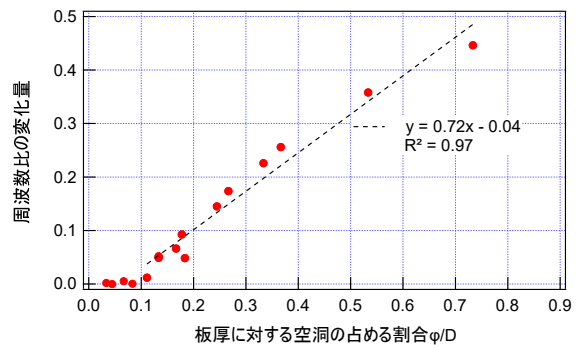


図-10 板厚に対する空洞の占める割合と  
周波数比の変化量の対比

ーションを行い、板厚、シース径毎の縦波共振周波数の変化量を整理した。その上で、本手法の適用限界および測定条件について検討した。本研究で得られた知見を以下に取りまとめる。

- 1) 空洞の影響のない位置での縦波共振周波数に対する空洞直上位置での縦波共振周波数の比（周波数比）を用いることで、見掛けの伝播速度、見掛けの弾性係数の変化を定量的に推定可能であることが示された。
- 2) 空洞直上位置での周波数比は、空洞径の増大に伴い、より大きく低下する傾向がある。また、この

- 傾向は板厚が小さいほど顕著であることが分かった。これは、板厚が小さい場合は、板厚に対する空洞の占める割合が増加するため、見掛けの弾性係数が大きく低下したと考えられる。
- 3) 周波数比を用いた PC グラウト充填評価を行うにあたっての、空洞の影響が小さい振動評価位置は、板厚 150 mm 以下の場合は PC シース直上から 100 mm 以上離れた位置であり、板厚 150 mm を超える場合においては、200 mm 以上離れた位置とすることが望ましいことが分かった。
  - 4) 周波数比を用いた PC グラウト充填評価は、板厚に対する空洞直径の割合を  $\phi/D$  と定義した時、 $\phi/D$  が 0.1 以上の場合は、 $\phi/D$  の増加するにつれて評価が容易になること、 $\phi/D$  が 0.1 未満の場合は、評価が困難になることが分かった。

#### 参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針，プレストレストコンクリート工学会，pp.1-18，2016.9
- 2) 真鍋英規，葛目和宏，鎌田敏郎，木村嘉富：非破壊調査技術を用いた PC グラウト充填率の評価，コンクリート工学，Vol.49，No.6，pp.18-24，2011.6
- 3) 福島邦治，木下尚宜，原幹夫，吉武勇：端面反射波の影響を考慮した広帯域超音波法 (WUT) による PC グラウト充填探査の精度向上，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.76，No.4，pp.283-292，2020.10
- 4) 極檀邦夫，境友昭：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1557-1562，2002.6
- 5) 川嶋雅道，鎌田敏郎，内藤翔太，六郷恵哲：インパクトエコー法により検出可能なコンクリート中の空隙の大きさと深さについて，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1693-1698，2005.6
- 6) 前田良文，松永嵩，小川良太，匂坂充行，藤吉宏彰，磯部仁博：PC グラウト充填率判定システムの開発，土木学会第 72 回年次学術講演会，pp.1833-1834，2017.9
- 7) 戸田一郎，前田良文，俵 司，松永嵩，小川良太，藤吉宏彰，磯部仁博：PC グラウトの非破壊調査技術の開発について その 2 - 現場調査 - ，土木学会第 73 回年次学術講演会，pp.305-306，2018.9
- 8) 日本非破壊検査協会：コンクリートの非破壊検査試験－弾性波法－第 2 部：衝撃弾性波法，日本非破壊検査協会，pp.9-18，2014.9
- 9) 松永嵩，小川良太，匂坂充行，藤吉宏彰，石井元武，磯部仁博，山田知典，吉村忍：機械学習のデジタル打音検査高度化への適用，Transactions of JSCES，P. 20211002，2021.1