

# 論文 パルス電磁力によるグラウト未充填部検出の有限要素シミュレーション

岩本 達也\*1・森 和也\*2・鳥越 一平\*3

**要旨:** パルス電磁力をPC鋼材に印加した場合に発生する弾性波振動の有限要素シミュレーションを行なった。その結果、グラウトの有無によって生じる、弾性波振動の差異が確認された。さらに、パルス電磁力の大きさと検査表面における振動の大きさとの関係から、振動の検出精度に応じて必要となるパルス電磁力の大きさが求められた。

**キーワード:** 電磁力, 有限要素法, 非破壊検査, 弾性波振動, グラウト

## 1. はじめに

橋桁などには、引張りに対する強度の大きいプレストレストコンクリート(PC)が多く使用されている。PCの工法にはポストテンション方式がある。ポストテンション方式のPC構造物は、グラウトと呼ばれる水とセメントの混合物をPC鋼材の周囲に充填して、PC鋼材の固定ならびに保護を行う。しかしながら、既設のPC構造物には、グラウトが部分的あるいは完全に未充填であるPC鋼材が確認されている。グラウトの未充填はPC鋼材の腐食を促進させ、構造物の安全性を脅かす要因となる。

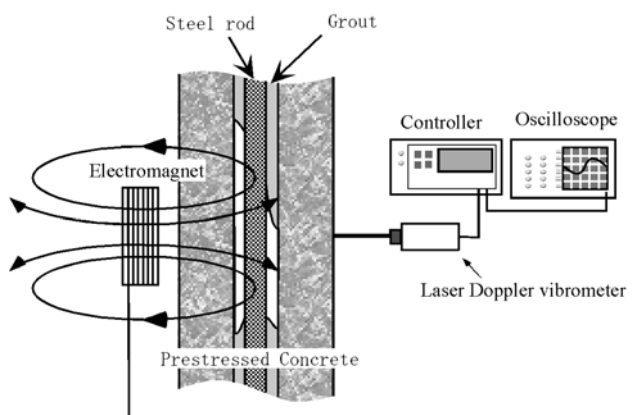
グラウトの未充填を検出する方法には、インパクトエコー法を利用したもの<sup>1)</sup>、PC鋼材の弾性波速度の変化を利用したもの<sup>2)</sup>、透過放射線を利用したものがある。インパクトエコー法を利用したものには、大津ら<sup>1)</sup>によるSIBIE(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on the Impact Echo)がある。この手法は、インパクトによって発生した弾性波の反射波の周波数スペクトルを映像化して、グラウトの有無を判断する方法である。鎌田ら<sup>2)</sup>は、PC鋼材の弾性波速度が、PC鋼材とグラウトの接触状態によって異なることを利用して、

グラウトの有無を判断する方法を提案している。

本研究では、鉄筋の腐食状態やかぶり厚さを測定する方法として提案されたパルス電磁力音響法<sup>1)</sup>を、PC鋼材のグラウト未充填問題に適用した時の有限要素シミュレーションを行い、本法がグラウト未充填部検出に適用可能かを検証した。

## 2. パルス電磁力音響法の原理

パルス電磁力音響法<sup>3)</sup>は、コンクリートのかぶり厚さや鉄筋の腐食を検査するために提案された方法である。著者らはこれまでに、



**Fig.1 Schematic diagram of Pulsed Electro-Magnetic Force Acoustic Method**

\*1 有明工業高等専門学校 機械工学科助手 修(工)(正会員)

\*2 熊本大学 工学部知能生産システム工学科教授 工博(正会員)

\*3 熊本大学 工学部知能生産システム工学科助教授 工博(非会員)

パルス電磁力音響法をグラウト未充填検査に適用することを提案している<sup>4)</sup>。

グラウト未充填検査に用いる原理は以下のとおりである。まず、**Fig.1**のようにコンクリートの外側から電磁石を当てて、その電磁石によってパルス状の磁力を発生させる。コンクリート内の鋼棒はパルス状の磁力を受け、瞬間的にわずかに変形し、その変形に伴いコンクリート中に弾性波が発生する。その弾性波を表面で計測することで、グラウトの状態を評価するものである。

グラウトが未充填である場合、PC鋼材が振動してもその振動はシース管には伝わらず、弾性波が発生して検査表面に達することはない。一方、グラウトがシース管に充填されている場合、PC鋼材のパルス状の変位によって弾性波が発生し、その弾性波はグラウトを通してシース管に伝わり、検査表面に達する。したがって、検査表面における振動を計測することによってグラウトの未充填検査が可能となる。

PCには表面付近に補強のため、鉄筋が配置してあることが一般的である。本法は磁力を用いているため、PC鋼材と同時に鉄筋も振動する。そこで、計測は磁力の影響をほとんど受けない、電磁石と反対側の面から行うものとする。

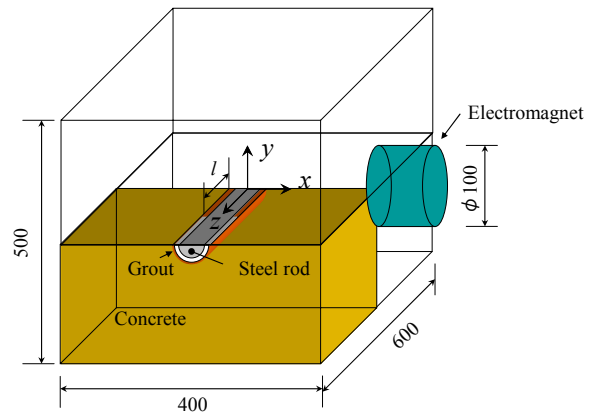
### 3. 解析モデルおよび計算条件

解析対象は、**Fig.2**に示すような、400mm×500mm×600mmのコンクリート試験片であり、内部に直径45mm、厚さ0.5mmのシース管とその中に直径32mmのPC鋼材を含む。グラウト未充填の場合は、PC鋼材の周りに直径45mmの空洞を配し、未充填長さ $l$ は、それぞれ $l = 0\text{mm}$ 、 $75\text{mm}$ 、 $150\text{mm}$ 、 $200\text{mm}$ とした。境界条件は、PC鋼材の端部がある面を固定条件とした。対称性を考慮して、**Fig.2**の1/4モデルで有限要素解析を行った。

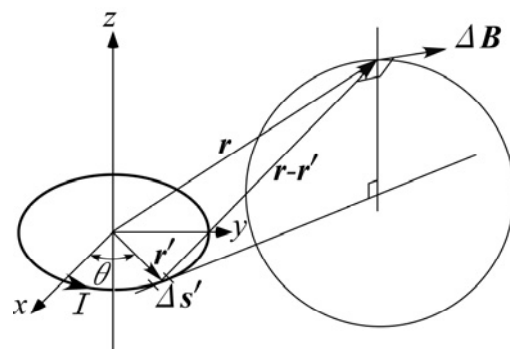
コンクリートの材料定数は、ヤング率 $E =$

**Table 1 Computational condition**

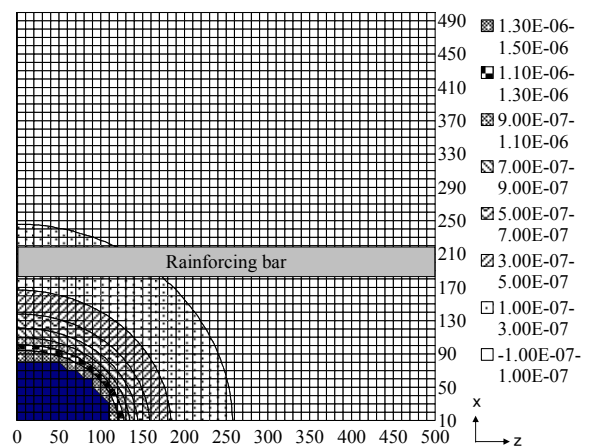
Method	Dynamic Explicit
Time increment $\Delta t$	$0.1 \times 10^{-7}[\text{s}]$
Minimum element size	4mm, Non-uniform
Element type	8-node hex sweep element



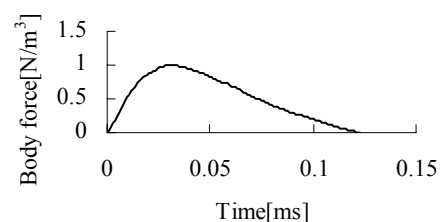
**Fig.2 Analysis model**



**Fig.3 Magnetic field by current element**



**Fig.4 Magnetic field**



**Fig.5 Load amplitude**

26[GPa], ポアソン比  $\nu=0.19$ , 密度  $\rho=2380$  [kg/m<sup>3</sup>]とした。鉄の材料定数は,  $E=209$ [GPa],  $\nu=0.3$ ,  $\rho=7900$ [kg/m<sup>3</sup>]で, 等質および等方性材料とした。接触条件は, 接触接線方向の摩擦はなく, 法線方向は剛接触とし, 接触後の分離は認めていない。Table 1に計算条件を示す。計算は動的陽解法を用い, 最大要素サイズおよび時間増分  $\Delta t$  は式(1),(2)を満足するように決定した。なお, P波速度  $C_p$ <sup>5)</sup> は式(3)より求めた。

$$h_{\max} = 0.33 \frac{C_p}{f_{\max}} \quad (1)$$

$$t_{\max} = 0.9 \frac{h_{\min}}{C_p} \quad (2)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1+2\nu)\rho}} \quad (3)$$

ここで,  $h_{\min}$ ,  $h_{\max}$  は最小要素サイズおよび最大要素サイズ,  $f_{\max}$  は最大周波数,  $t_{\max}$  は最大時間増分である。

荷重分布は, PC 鋼棒およびシース管に印加される磁力の大きさより求めた。Fig.3において, いま導線上の点  $r'$  にある長さ  $\Delta s'$  の電流素片が点  $r$  に作る磁束密度  $\Delta B$  は, 点  $r'$  における電流の向きの単位ベクトルを  $t(r')$  とすると, ビオ・サバルの法則より式(4)のようになる。

$$\Delta B(r') = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{It(r') \times (r-r')}{|r-r'|^3} \Delta s' \quad (4)$$

ここで,  $\mu_0$  は真空の透磁率である。

これを導線に沿って積分することにより, 導線に流れる電流がつくる磁束密度が得られる。

コイルの直径を 100mm, コイルの中心は原点として, z 軸を中心に 1 巻, 電流は 1A とした。計算結果より得られた磁力分布を Fig.4 に示す。図中の PC 鋼材は計算モデルの位置である。磁力は, 原点を中心にほぼ球状に分布しており, 原点からの距離が大きくなるに従い急激に弱まっている。PC 鋼材上の磁力に注目すると, x 軸より約 100mm にわたって, 強度がほぼ変わらないことが確認できる。そ

こで, 荷重条件は, 体積力として PC 鋼材の中央部の長さ 100 mm の部分に加え, 実験で得た Fig.5 のパルス波を印加した。体積力の方向は, Fig.2 中の電磁石が配置してある面に向かって正とし, Fig.5 に示すように振幅の最大値を 1 N/m<sup>3</sup> とした。

また, 磁力を印加したとき, PC 鋼材と同時にシース管も磁力を受ける。そこで, PC 鋼材とシース管が表面振動に与える影響を調べるために, それぞれに体積力を加えた場合の計算を行なった。

## 4. 計算結果および考察

### 4.1 PC 鋼棒を加振したときの表面振動

Fig.6 に, PC 鋼棒を加振したときの計算結果を示す。結果は, 計測点, すなわち電磁石と反対の面における速度で示している。Fig.6(a)は, グラウトがシース管に充填されている場合 ( $l=0$ mm) の表面振動で, Fig.6(b), (c), (d)はグラウトが未充填の場合の表面振動である。それぞれ  $l=75$ mm, 150mm, 200mm である。時刻ゼロはパルス入射時刻である。また Fig.7 に, Fig.6 に示す速度を FFT 解析した振幅スペクトルを示す。

Fig.6(a)において, グラウトが充填されている場合, 電磁力を入射直後に弾性波が表面に達していることがわかる。グラウトが未充填の場合 (Fig.6(b), (c), (d)) は,  $l$  が長くなるに従い, 弾性波が遅れて到着している。また, 振幅の大きさも  $l$  が長くなるに従い, 小さくなっている。これは, PC 鋼材の振動がグラウトと接触している部分を介して表面に達するため, 弾性波の伝播距離が長くなったからである。

波形に注目してみると,  $l$  が長くなるに従い振動の周期は長くなっている。これは, Fig.7 の振幅スペクトルのピーク周波数を見ても同様の結果が示されている。グラウトが充填されている場合の振動は, 主に検査面とシース管, あるいは検査面とその反対の面と

の間で生じる弾性波の多重反射によるものである。一方、グラウトが未充填の場合の振動は、PC 鋼棒の露出している部分が **Fig.8** のような両端固定ばりと同じ状態になっているため、この部分の固有振動数に起因するものと考えられる。このような振動系の固有振動数  $f_n$  は、PC 鋼棒を弦と考えることによって、式 (5)、(6) より簡単に求められる<sup>6)</sup>。

$$f_n = 2.267 \cdot \omega^* / 2\pi \quad (5)$$

$$\omega^* = \frac{\pi^2}{4l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (6)$$

ここで、 $I$  は断面二次モーメント、 $A$  は鋼材の断面積である。**Table 2** に、それぞれの  $l$  における固有振動数を示す。

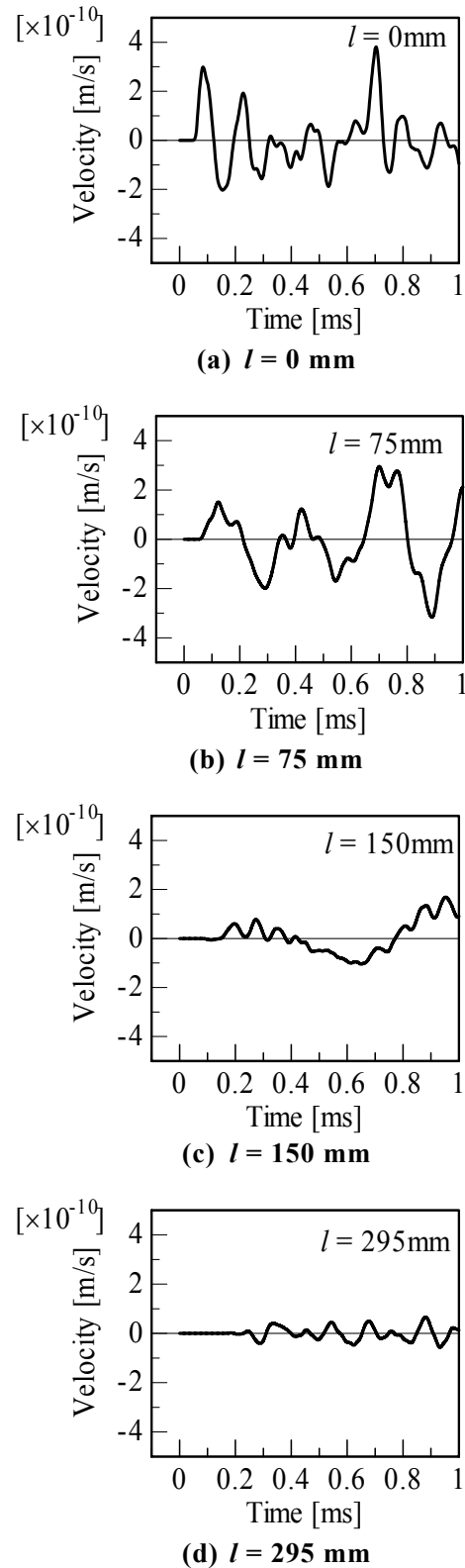
**Fig.7** の振幅スペクトルのピーク周波数と固有振動数を比較すると、 $l=150\text{mm}$  のとき一致している。また、 $l=75\text{mm}$  においては、固有振動数よりも低い周波数でピークが出ているが、これは、加振する範囲が  $l$  よりも大きいためである。 $l=100\text{mm}$  のときの固有振動数は  $3.2\text{kHz}$  となり、 $l=75\text{mm}$  におけるピーク周波数とほぼ一致する。

以上のことから、PC 鋼材を加振した場合、グラウト未充填部分は弾性波の到着時刻、表面振動の振幅、および振幅スペクトルに注目することにより、検出可能である。さらに、弾性波の到着時刻および振幅スペクトルより未充填部分の長さの推定も可能であると考えられる。

#### 4.2 シース管を加振したときの表面振動

**Fig.9** に、シース管を加振した場合の解析結果を、**Fig.6** と同様に検査面における速度で示す。**Fig.9** の各線は、 $l=0\text{mm}$ 、 $75\text{mm}$ 、 $150\text{mm}$ 、 $200\text{mm}$  である。時刻ゼロはパルス入射時刻である。また **Fig.10** に、**Fig.9** に示す速度を FFT 解析した振幅スペクトルを示す。

シース管を加振したときの表面速度は、波形、振幅および弾性波が表面に到達する時刻



**Fig.6** Velocity of inspection point of case of excitation at Reinforcing bar

に関して、すべての  $l$  において同様の結果が得られている。また波形に関しては、PC 鋼棒を加振したときの  $l=0\text{mm}$  における波形とほ

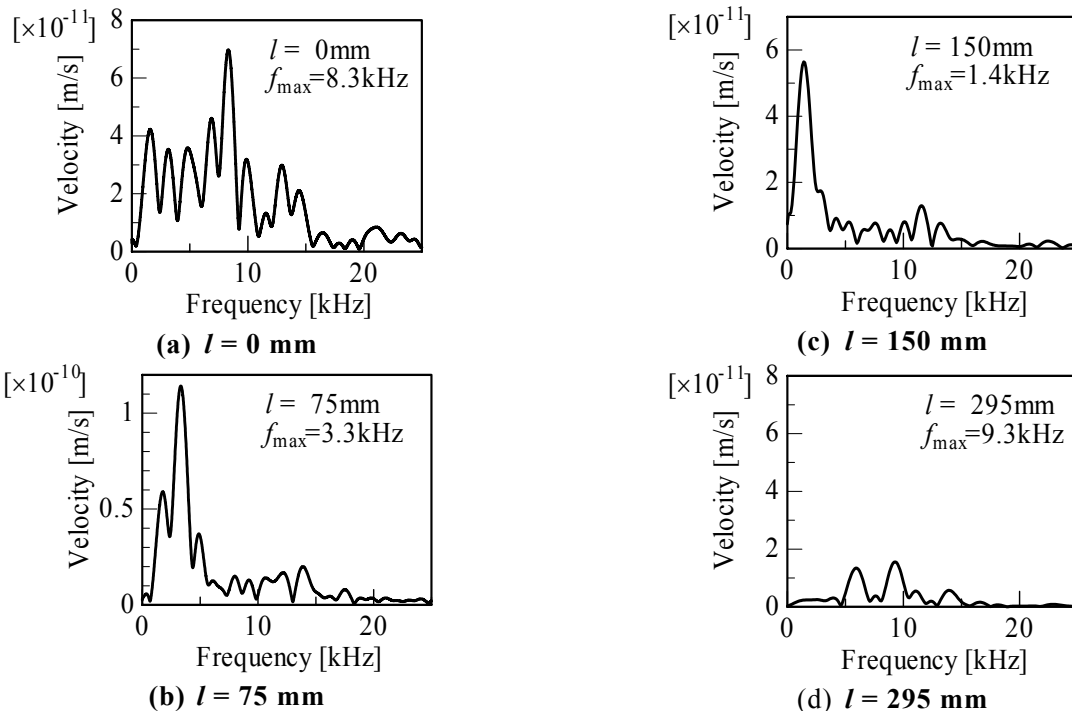


Fig.7 Velocity amplitude of inspection point of case of excitation at Reinforcing bar

ば一致している。これは、シース管とコンクリートがグラウトの充填状況に関わらず、常に接触しているためである。ここで、注目すべきは振幅の大きさである。PC 鋼棒を加振した場合の約 10 分の 1 の大きさである。これは、シース管が PC 鋼棒に比べて薄く、磁力によって荷重が発生する領域が小さいためである。

### 5. グラウトの未充填部検出の可能性

実際の PC に対してこの検査を行なった場合、観測される波形は、Fig.6 と Fig.9 を重ね合わせたものである。したがって、グラウトの充填状況を把握するためには、シース管と PC 鋼棒に印加される磁力の比が重要である。PC 鋼棒はシース管内に納められているため、PC 鋼棒に印加される磁力はシース管に印加される磁力より弱くなることが予想される。

今回の解析結果では充填されている場合、振幅を比較すると PC 鋼材を加振したときのほうが、シース管を加振したときの約 10 倍であった。もし、シース管によって、PC 鋼材に作用する磁力が 10 分の 1 になった場合、全

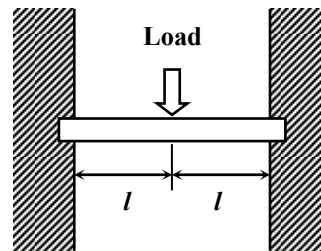


Fig.8 Schematic diagram of beam with both ends built-in

Table 2 Natural frequency  $f_n$  of beam with both ends built-in

$l$ [mm]	75	150	295
$f_n$ [kHz]	5.7	1.4	0.3

ての  $l$  において Fig.6(a) のような波形が観測される。したがって、弾性波の到着時刻によるグラウトの充填状況の評価は困難である。しかし、Fig.6(b), (c), (d) においては、弾性波が遅れて到着するため、最初に観測される波はシース管のみに起因するものであることから、振幅は  $l=0\text{mm}$  のときの約半分の大きさとなる。このことから、未充填部分の検出は可能と考えられる。

また、振幅スペクトルに注目すると、それぞれの  $l$  において、 $l$  の長さに対応した固有

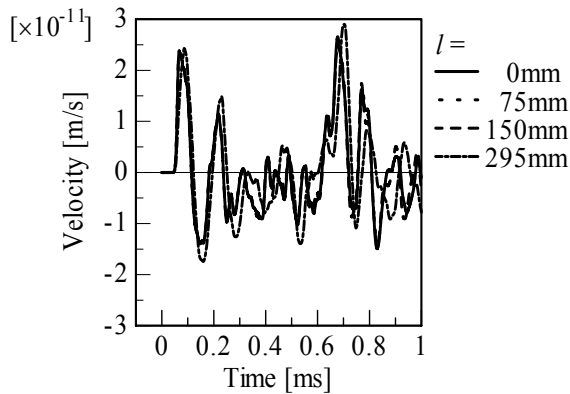


Fig. 9 Velocity of inspection point of case of excitation at duct

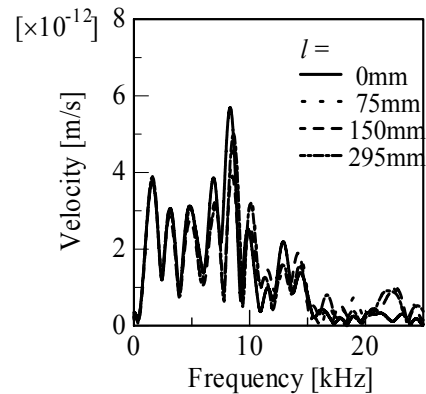


Fig.10 Velocity amplitude of inspection point of case of excitation at duct

振動数が観測されるため、未充填部分の大きさの推定が可能であると考えられる。

次に、Fig.6 に充填されている場合の表面速度より、検出に必要な磁力の大きさの推定を行う。検出には、最初に表面に到達する弾性波が観測できればよいため、第一波の最大速度に注目すると、 $2.5 \times 10^{-10}$  [m/s]である。この結果を元に検出に必要な磁力の大きさの推定を行う。レーザードップラー振動計の検出可能な最小速度は、約  $1 \times 10^{-6}$  [m/s]であるため、速度を波として計測するためには、この約 10 倍の大きさが必要となる。今回の計算では体積力を  $1$  [N/m<sup>3</sup>]と設定したので、必要な体積力は、式(7)のような計算となる。

$$1 \text{ [N/m}^3\text{]} \times \frac{1 \times 10^{-6}}{2.5 \times 10^{-10}} \times 10 \div 4 \times 10^4 \text{ [N/m}^3\text{]} \quad (7)$$

したがって、電磁コイルに必要な磁力は、このような体積力を鋼材に与えられるような大きさとなる。

## 6. 結言

パルス状電磁力を用いたグラウト評価法の有限要素シミュレーションを行い、次のような結果を得た。

- (1) グラウト未充填部分の検出にパルス電磁力音響法が適用可能であることが示された。
- (2) グラウトが完全に充填されている場合と部分的に未充填部が存在する場合に対し

て、パルス電磁力を加えた場合の表面振動の差異が明らかになった。

- (3) レーザードップラー振動計を用いて表面速度を検出する場合に、最低必要となる電磁力の強度を概算した。これは、電磁コイルの設計の基礎データとなるものである。

## 参考文献

- 1) Ohtsu, M. and Watanabe, T.: Stack imaging of spectral amplitude based on impact-echo for flaw detection, NDT & E, Vol. 35, pp.189-196, 2002
- 2) 鎌田敏郎, 浅野正則, 国枝 稔, 六郷恵哲: 弾性波パラメータを用いた PC グラウト充填評価法, 土木学会論文集, Vol. 61, No.746, pp.25-39, 2002
- 3) 森 和也, 鳥越一平, 畑仲俊治: 磁力共鳴法によるグラウト未充填の検出, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 1783-1788, 2005
- 4) 高鍋雅則, 橋本光男: 鉄筋コンクリート診断のためのパルス電磁力音響法の提案, 非破壊検査, Vol.52, No.11, pp. 628-632, 2003
- 5) S. P. Timoshenko, J. N. Goodier: Theory of Elasticity, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, pp. 485-508, 1970
- 6) 中川憲治, 室津義定, 岩壺卓三: 工業振動学, 森北出版, pp.113-114, 1976