

# 論文 電磁パルス法に基づく PC グラウト充填評価手法の妥当性検証への動磁場解析および衝撃応答解析の適用

角田 蛭<sup>\*1</sup>・内田 慎哉<sup>\*2</sup>・鎌田 敏郎<sup>\*3</sup>・宗像 晃太郎<sup>\*1</sup>

**要旨:** 本研究では、鋼製シース上のコンクリート表面および PC 鋼棒端部にセンサを設置した状態で、コンクリート表面側から非接触でパルス状の電磁力を与えた場合にセンサで受信される弾性波の最大振幅値によりグラウト充填状況の評価する手法の妥当性を検証するために、3次元の動磁場解析および衝撃応答解析を行なった。動磁場解析の結果、電磁力によりコイル直下のシース部分のみが主に振動することがわかった。さらに、シースに生じる電磁力を衝撃応答解析における衝撃荷重として入力することにより、グラウト充填および未充填における弾性波挙動およびグラウト充填評価手法における最大振幅値の有効性を明らかにした。

**キーワード:** グラウト, 非破壊試験, 電磁パルス法, 弾性波, 動磁場解析, 磁気遮蔽, 衝撃応答解析

## 1. はじめに

著者らは、供試体実験により、鋼製シース（以降、シースとする）上のコンクリート表面および PC 鋼棒端部に振動センサを設置した状態で、コンクリート表面側から非接触でパルス状の電磁力を与えた場合にセンサで受信される弾性波に着目し、グラウト充填状況の評価するための方法（以降、電磁パルス法と呼ぶ）についての検討を行ってきた<sup>1)</sup>。その結果、グラウト充填の有無により、弾性波の伝播挙動が顕著に異なることを実験的に把握した。しかも、コンクリート表面および PC 鋼棒端部に貼り付けたセンサで受信した弾性波の最大振幅値に着目することにより、電磁パルス法によりグラウト未充填箇所を検出できる可能性があることを明らかにしている。しかしながら、上記の検討では、供試体での実験結果から、電磁力が作用する磁性体は主にシースであると仮定した上で、これを弾性波の発生源と想定して、最大振幅値によるグラウト充填評価手法を提案したに過ぎない。したがって、弾性波の発生源となる磁性体の条件や受信波の最大振幅値が変化する物理的背景および評価手法の理論については、未解明の部分を残していたのが現状であった。

そこで本研究では、実験結果に基づいて提案した PC グラウト充填評価手法の妥当性を検証するために、3次元動磁場解析および3次元衝撃応答解析を行なった。動磁場解析では、電磁気学理論に基づき磁界の影響を受けてコンクリート内部での弾性波の発生源となり得る磁性体を特定することとした。また、その磁性体における電磁力の大きさおよびその作用範囲の算出も試みた。続いて、磁場解析により求めた電磁力を衝撃応答解析の衝撃荷重として入力することにより、グラウト充填および

未充填における弾性波伝播挙動を、それぞれ波動理論に基づき視覚的に明らかにした。さらに、衝撃応答解析の出力波形から求めた最大振幅値により、実験で仮定した評価手法の妥当性の検証も併せて行なった。なお、本論文では、既往の研究成果と本研究で得られた解析結果の両者を比較する必要があるため、著者らの実験結果<sup>1)</sup>を本論文の2章において一部引用している。

## 2. グラウト充填の有無と最大振幅値の関係<sup>1)</sup>

### 2.1 実験概要

#### (1) 供試体

図-1 に供試体概要を示す。供試体は、縦 2000mm×横 2000mm×奥行 235mm の RC スラブである。コンクリート表面から深さ 100mm の位置に、内径 32mm の鋼製スパイラルシースを設置した。配筋は図に示すとおりである。シースの内部には、呼び径 23mm の PC 鋼棒を挿入し、定着プレートを介してナットにより固定した。ただし、PC 鋼棒には軸力（引張力）は与えていない。グラウト充填の有無による弾性波挙動の違いを把握するため、図-1 に示すように、「グラウト充填」および「グラウト未充填」の2ケースを測定対象とした。なお、グラウト充填ケースは、シース内に鋼棒を挿入した上でグラウトを注入し、これらを型枠に設置、その後コンクリートを打設することにより作製した。コンクリートおよびグラウトの配合を表-1 および表-2 にそれぞれ示す。

#### (2) 電磁パルス法による計測

電磁パルス法の計測状況を写真-1 に示す。励磁コイルは、長さ 200mm×幅 100mm×厚さ 0.25mm のコの字型の電磁鋼板を 230 枚積層（全厚 57.5mm）し、直径 2.0mm のマグネットワイヤを電磁鋼板に 10 回巻き付けたもの

\*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 修士課程（学生会員）

\*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 特任助教（正会員）

\*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授（正会員）

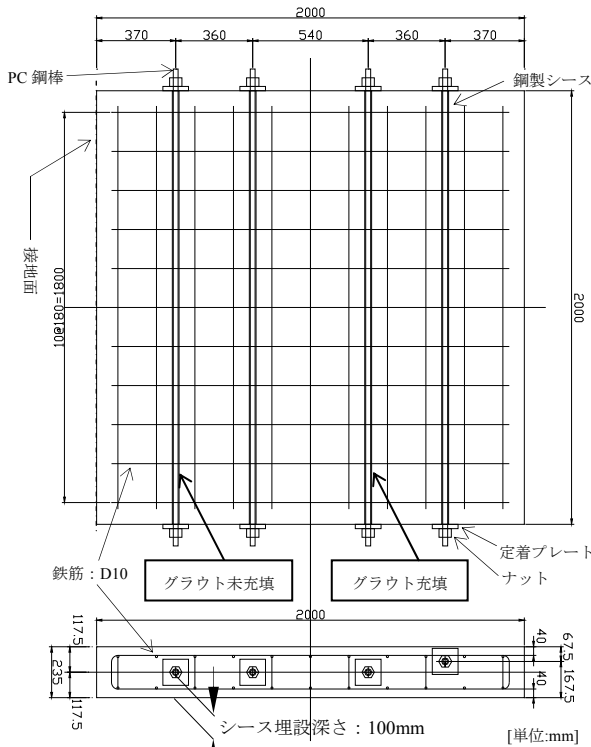


図-1 供試体概要

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	混和剤
49.5	46.7	184	372	791	924	3.72

表-2 グラウト配合

単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
W	C	混和材	混和剤
504	1378	105	13

である(写真-2参照)。定電圧定電流発生装置(100V交流電源)を用いて、印加電圧1000V、パルス幅200 $\mu$ sの電流280mA(実効値)をマグネットワイヤに流し、コイル周辺に瞬間的に磁界を発生させ、コンクリート中の磁性体を振動させた。コイルは、磁界中の磁束線とシースの長手方向とが平行になるように、シース上かつ長手方向中央のコンクリート表面から20mm離れた位置に設置した(写真-1参照)。

コンクリート表面とPC鋼棒の片端部には、弾性波を受信するためのセンサ(60kHz共振型AEセンサ)を貼り付けている。コンクリート表面のセンサ設置位置は、シース長手方向中央のシース埋設位置上、すなわち、コイル直下とした(写真-1参照)。センサで受信された信号は、サンプリング周波数2MHzでデジタル化した後、波形収集装置に電圧の時刻歴応答波形として記録した。

## 2.2 実験結果および考察

図-2に、コンクリート表面に設置したセンサで受信された弾性波の電圧波形の一例を、グラウト充填の有無

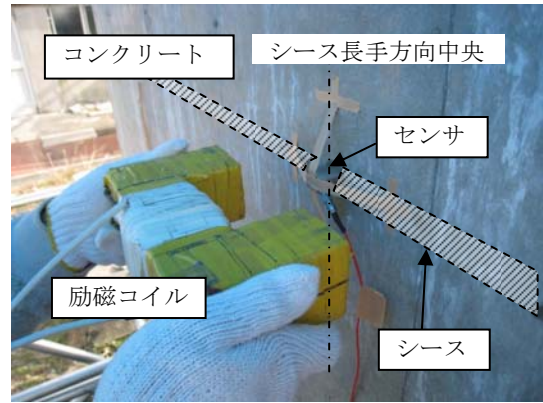


写真-1 電磁パルス法による計測状況

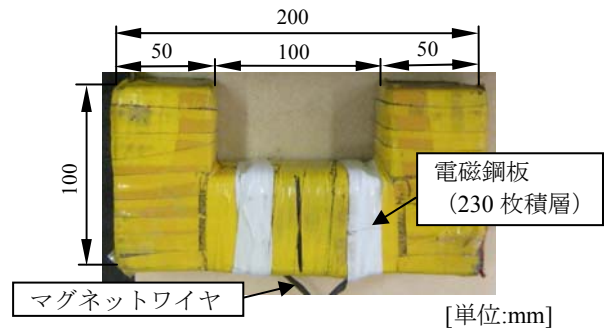


写真-2 励磁コイル概要

ごとに示す。まず、波形の周期に着目すると、グラウトの有無に関わらず、一定の周期で電圧値が変動していることがわかる。しかも、両者の周期はほぼ同じであることも同時に確認できる。続いて、波形の電圧値に着目すると、電圧の最大値(最大振幅値)は、両者で明らかに異なる値となった。なお、本計測では、同一計測点において5回の計測を行い、計測ごとに最大振幅値の測定を行なったが、いずれもほぼ同じ値になった。したがって、計測における最大振幅値のばらつきは小さいと判断し、測定した最大振幅値の代表的なものを示すこととした。

図-3に、コンクリート表面およびPC鋼棒端部に貼り付けたセンサで受信された弾性波の電圧波形の最大振幅値を、グラウト充填の有無ごとにそれぞれ示す。図-3 a)のコンクリート表面計測におけるグラウト未充填の場合の最大振幅値は、充填の場合のそれと比較して約1.6倍大きい。これに対して、図-3 b)に示すPC鋼棒計測におけるグラウト未充填での最大振幅値は、グラウト充填と比較して著しく小さい。最大振幅値が極めて小さくなった理由としては、磁気遮蔽<sup>2)</sup>による影響が考えられる。磁界内に透磁率の高いシースがある場合、シースが磁束線を引き込むことにより、シース内部の磁束線は減少する(図-4参照)。磁束線が減少すると、PC鋼棒へ作用する電磁力も小さくなると考えられる。この電磁力の低下、すなわち鋼棒に対する加振力が小さくなったことにより、鋼棒中を伝播する弾性波のエネルギーが極めて小さくなったと考察できる。

### 2.3 実験結果に基づく評価手法の提案

2.2 の結果を参考にすれば、グラウト充填の有無により、供試体内部の弾性波挙動は以下のとおり異なると推測できる。すなわち、グラウト未充填の場合(図-5 a) 参照)では、励磁コイルにより磁界を瞬間的に発生させると、磁性体であるシースが主に振動する。これに対してシース内部の鋼棒は、シースによる磁気遮蔽により、ほとんど振動しない。したがって、PC 鋼棒端部で受信した波の振幅は小さくなる(図-3 b) 参照)。一方、グラウト充填の場合(図-5 b) 参照)では、シースがグラウトにより拘束されているため、シースの振動は未充填よりも小さくなる。これは、図-3 a) から明らかである。これに対して鋼棒は前述のとおり磁気遮蔽によりほとんど振動しないものの、シースの振動がグラウト、さらには鋼棒へと伝播する。そのため、図-3 b) に示すとおり、充填での振幅は、未充填よりも大きくなると考えられる。

以上のことから、コンクリート表面および鋼棒端部のセンサで受信した弾性波の電圧波形の最大振幅値を測定することにより、グラウト充填状況の評価できる可能性があることがわかった。

### 3. 電磁力が作用する磁性体および電磁力分布に関する動磁場解析による検討

#### 3.1 解析概要

ここでは、電磁力が作用し、コンクリート中での弾性波の主な発生源となり得る磁性体を特定するとともに、その磁性体における電磁力の分布状況について検討するため、3次元有限要素法による動磁場解析を行なった。図-6 に解析モデル(ハーフモデル)の拡大図を示す。電磁鋼板およびマグネットワイヤの外側に磁束が漏れる(漏れ磁束)可能性を考慮し、空気モデル化を行っている<sup>3)</sup>。空気内には、電磁鋼板、マグネットワイヤ、コンクリートおよびシースをそれぞれモデル化している。コンクリートのモデル表面から20mmの位置に励磁コイルを、さらに、100mmの位置(コンクリート内部)にシースを設置した(図-6 参照)。各モデルの材料定数を表-3 に示す。すべてのモデルは6面体要素で分割した。シースは表皮効果の影響を考慮して、厚さ方向に3層に分けて分割した。また、便宜上、コイル下のコンクリートおよびシース部分は細かく分割し(例えば、シース要素一辺の長さ:約0.3mm)、その他の部分はコイルからの距離が離れるほど、要素の大きさが大きくなるように設定した。本解析では、シース表面位置(シースかぶり位置)とシース内部での磁束密度の差から磁力が作用する磁性体(シースあるいは鋼棒)を把握することが目的である。鋼棒の有無による磁界の変化は極めて小さいと考え、シース内部は空気の比透磁率とほぼ同じコンクリー

トでモデル化した。また、電磁鋼板に磁束を生じさせる起磁力<sup>4)</sup>は、次式により算出した。

$$MMF = nI\sqrt{2} \quad (1)$$

ここで、 $MMF$ :起磁力(A)、 $n$ :マグネットワイヤの

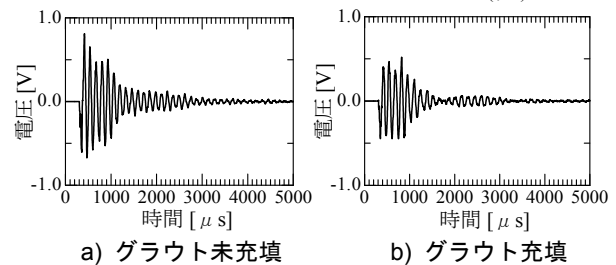


図-2 コンクリート表面における受信波形の一例

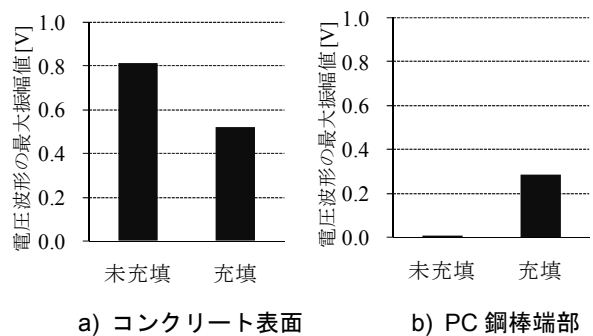


図-3 コンクリート表面およびPC 鋼棒端部における電圧波形の最大振幅値(実験結果)

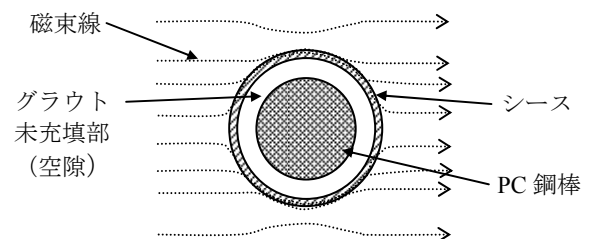


図-4 磁気遮蔽のイメージ(シース断面図)

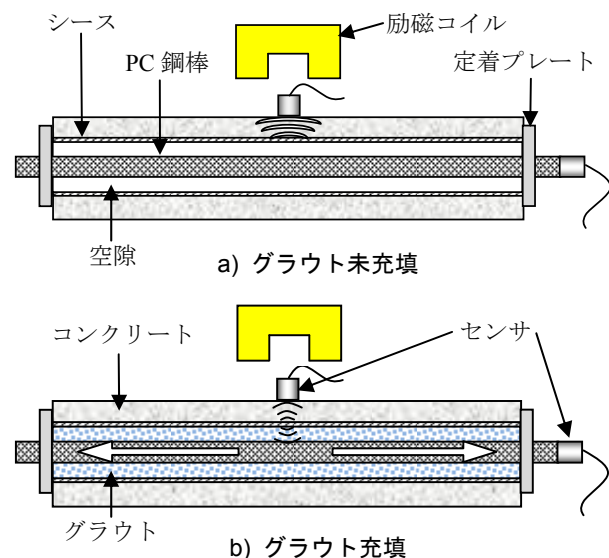


図-5 供試体内部における弾性波伝播挙動のイメージ

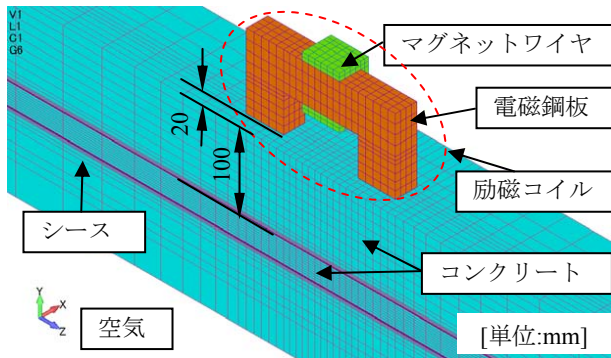


図-6 動磁場解析モデル（励磁コイル周辺拡大図）

表-3 動磁場解析モデルの物性値

構成材料	比透磁率	電気伝導率[S/m]
空気	1.0	0.0
電磁鋼板	$5.0 \times 10^3$	0.0
シース	$5.0 \times 10^3$	$1.0 \times 10^7$
コンクリート	1.0	1.0
マグネットワイヤ	1.0	1.0

表-4 シース表面および内部の磁束密度

出力位置	磁束密度 [T]
シースかぶり位置 (シース表面)	$1.0 \times 10^{-2}$
PC 鋼棒かぶり相当位置 (シース内部)	$9.2 \times 10^{-10}$

巻数,  $I$ : ワイヤに流れる電流の実効値 (A) である。これより, 巻数: 10 巻き, 電流の実効値: 280mA における起磁力は 396mA となる。この起磁力が最大値となるパルス幅 200 $\mu$ s の電流波形により, 磁束を生じさせた。

### 3.2 解析結果および考察

表-4 に, 励磁コイル側のコンクリート表面から 100mm (シースかぶり位置) および 105.5mm (PC 鋼棒のかぶりに相当) における磁束密度をそれぞれ示す。いずれも, 定電圧定電流装置において電流を放電した時刻から 150 $\mu$ s 後の磁束密度である。鋼棒のかぶり位置と想定した位置での磁束密度は, シースかぶり位置でのそれと比較して極めて小さい。シースによる磁気遮蔽により, シース内部の磁束密度が小さくなったと考察できる。したがって, 本研究で使用した励磁コイルおよび定電圧定電流装置では, シース内部には磁界はほとんど生じていないことが確認された。これより, 磁界の影響によりシース部分が主に振動したと考えられる。なお, 供試体内部には鉄筋が存在するものの, 磁束線を貫く表面積がシースと比べて小さいため, 磁界の影響による鉄筋の振動は極めて小さいと考えられる。

続いて, 放電後 150 $\mu$ s の時刻におけるシース全体に作用する磁束密度のコンター図を図-7 に示す。図より,

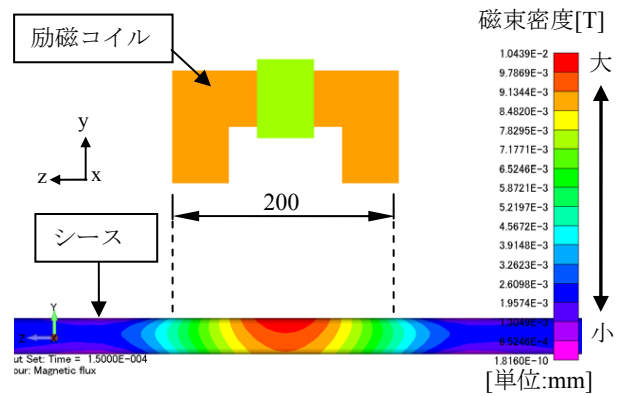


図-7 シースに作用する磁束密度

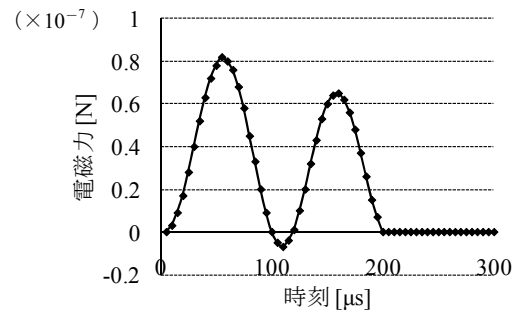


図-8 シース全体が受ける電磁力の時刻歴波形

磁束密度が大きい領域は, コイル直下のシース部分 (長さ約 200mm) であることがわかった。なお, それ以外の時刻においても, 磁束密度が大きくなる主な領域は, コイル直下のシース部分であった。また, 渦電流密度が大きくなる領域もコイル直下のシース部分であった。ここで, 得られた磁束密度および渦電流密度から, シース全体に作用する電磁力の大きさの経時変化を以下の方法により求めた。すなわち, まず, 放電後 5 $\mu$ s の時刻において, シース表面の各節点に作用する磁束密度ベクトルおよび渦電流密度ベクトルをそれぞれ算出した。その後, 各節点において, 磁束密度および渦電流密度ベクトルの外積 (ローレンツ力) を求めた<sup>3)</sup>。さらに, 各節点におけるベクトルの y 方向成分 (シース垂直方向成分, 図-7 参照) を総和し, これを 5 $\mu$ s 後における電磁力とした。この計算を 5 $\mu$ s ごとに 300 $\mu$ s となるまで計算した。得られた電磁力の経時変化を図-8 に示す。図より, 電磁力の時刻歴波形に 2 山のピークが現れている。これは, 各時刻における磁束密度と渦電流密度の位相が異なったためである。この電磁力が, コイル直下のシース部分 (長さ約 200mm) に作用していると仮定して, 次章に示す 3 次元衝撃応答解析を行なうこととした。

## 4. 衝撃応答解析による弾性波伝播挙動の把握およびグラウト充填評価手法の検証

### 4.1 解析概要

ここでは, グラウト充填および未充填の場合における

弾性波挙動およびグラウト充填評価指標としての最大振幅値の有効性について解析的に検討するため、3次元有限要素法による衝撃応答解析を行なった。供試体を模擬した解析モデルを図-9に示す。モデル寸法は、縦235mm×横2000mm×奥行き235mmである。モデル内部には、コンクリート表面から深さ100mmの位置に内径32mmのシースを設け、シース内部には直径23mmのPC鋼棒を設置した。鋼棒は定着プレートにより固定した。本解析では、実験と同様に、「グラウト充填モデル」と「グラウト未充填モデル」の2ケースのモデルを作成した。各構成材料の材料定数を表-5に示す。なお、「グラウト未充填モデル」では、PC鋼棒を除くシース内部空間の要素を空気としてモデル化し、表-5に示す物性値に設定した。

各構成材料の要素は、いずれも8節点ソリッドとした。コンクリートおよびグラウト要素一辺の長さは約4mmであり、PC鋼棒およびシース要素一辺の長さは約1mmとした。モデルの境界条件としては、図-9に示すとおり、モデル下面(x-y平面、z=0mm)における全ての節点のx, y, z方向の変位を固定することとした。さらに、モデル上面(x-y平面、z=235mm)は、供試体での境界条件と一致させるため、節点(媒質)で波が反射しないように無反射条件とした。

本解析における荷重入力位置は、磁場解析による電磁力作用位置を考慮して、コイル直下のシース(200mm)を対象とした。具体的には、コイル設置側シース表面の

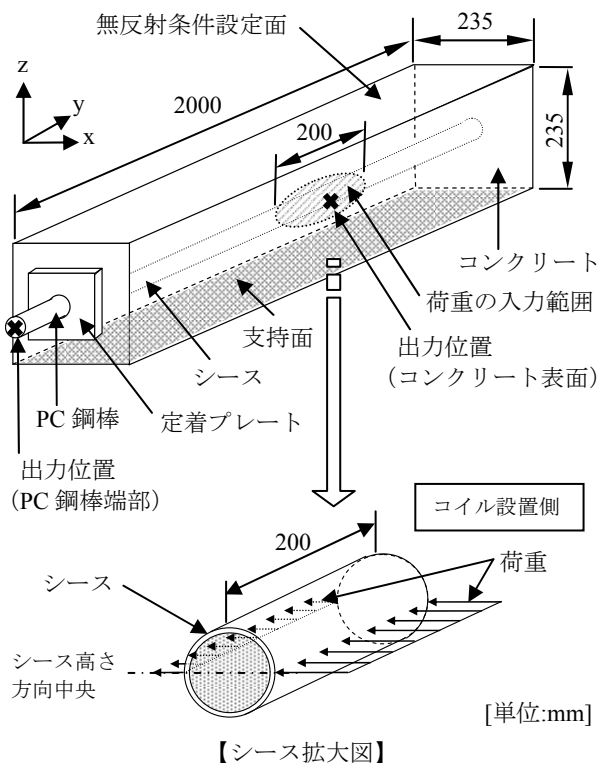


図-9 衝撃応答解析モデル概要

各節点およびその反対側のシース表面の各節点とした(図-9中のシース拡大図参照)。本来は、電磁力ベクトルをx, y, z方向成分に分けた上で、これをシース200mmの全節点において、それぞれの方向ごとに力を作用させるべきである。しかしながら、本研究では、磁場解析と衝撃応答解析で要素数が異なるため、便宜上、図に示す位置に電磁力を作用させることとした。

荷重の入力値には、図-8に示す電磁力の時刻歴波形を用いた。シース表面の対象とした各節点における5 $\mu$ s毎の合力が、図-8に示す時刻歴波形における5 $\mu$ s毎の電磁力と一致するようにした。なお、コイル設置側の合力とその反対面での合力の比は、便宜上、2:1とした。

図-9に弾性波受信位置(出力位置)を示す。供試体実験の場合と同様に、シース長手方向中央かつシース上のコンクリート表面および鋼棒片端部の1節点とした。

#### 4.2 解析結果および考察

グラウト充填および未充填モデルでの波の伝播状況を図-10にそれぞれ示す。図の凡例の大小は加速度の大きさを示している。いずれの図においても、衝撃荷重(電

表-5 衝撃応答解析モデルの物性値

構成材料	縦弾性係数 [GPa]	ポアソン比	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
コンクリート	30	0.24	2.3
グラウト	23	0.20	1.8
シース	200	0.30	7.9
PC鋼棒	200	0.30	7.9
定着プレート	200	0.30	7.9
空気	$1.6 \times 10^{-20}$	$2.0 \times 10^{-20}$	$2.2 \times 10^{-20}$

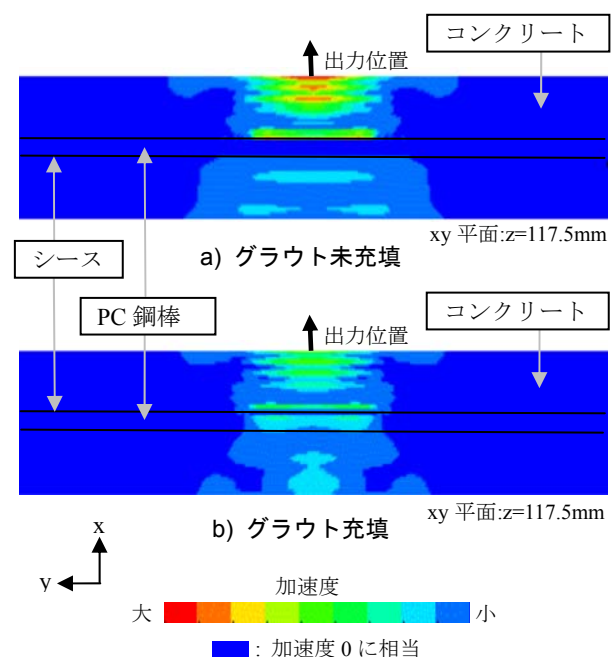


図-10 弾性波の伝播状況

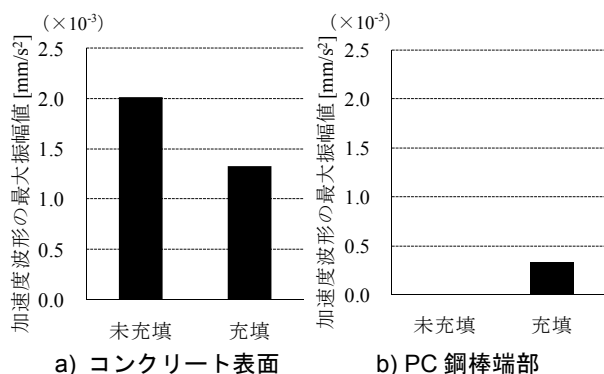


図-11 コンクリート表面および PC 鋼棒端部における加速度波形の最大振幅値（解析結果）

磁力) の入力後 500 $\mu$ s の時点における波の伝播状況を示している。また、図上において波の伝播状況を判読しやすくするため、電磁力の入力位置周辺を拡大して示している。いずれの場合においても、シー스에パルス状の電磁力が与えられると、シースの振動がコンクリートへ伝達され、弾性波がコンクリート中を伝播していることが確認できる。ここで、センサ設置側のコンクリート表面に着目すると、グラウト充填モデルにおける振幅が、未充填モデルと比較して小さい。グラウト充填の場合、シースの振動がグラウトにより拘束され、振幅値が小さくなったと考えられる。これは、実験により測定された図-3 a) に示す最大振幅値の結果とも近い傾向を示している。一方、PC 鋼棒における波の伝播状況に着目すると、グラウト充填モデルでは、シースの振動がグラウトに伝達され、グラウトおよび鋼棒に弾性波が伝播している。これに対して未充填モデルでは、シースの振動を伝達させる媒質であるグラウトが存在しないため、弾性波は鋼棒を伝播しない。これは、実験結果とほぼ同様の傾向を示している。

以上のことから、3次元動磁場解析により求めたシー스에生じる電磁力を、衝撃応答解析における衝撃荷重の入力条件とした結果、グラウト充填および未充填モデル内の弾性波伝播挙動の違いを視覚的に明らかにした。しかもその結果は、実験結果に基づいて仮定した供試体内部での弾性波伝播挙動と近いことが把握できた。そこで、実験において仮定した最大振幅値によるグラウト充填評価手法(2.3 参照)の妥当性を検証するため、グラウト充填および未充填モデルにおけるコンクリート表面および PC 鋼棒端部で出力した加速度波形の最大振幅値を図-11 にそれぞれ示す。コンクリート表面におけるグラウト未充填モデルの最大振幅値は、充填モデルよりも約 1.5 倍大きい(図-11 a) 参照)。これに対して、PC 鋼棒における未充填モデルの最大振幅値は、充填モデルよりも著しく小さい(図-11 b) 参照)。いずれのモ

デルにおいても、実験で得られた最大振幅値の傾向とほぼ一致している。したがって、電磁パルス法による PC グラウト充填評価手法における評価パラメータとしては、コンクリート表面および PC 鋼棒端部で受信した弾性波の最大振幅値に着目することが極めて有効であることが明らかとなった。

## 5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 3次元動磁場解析の結果、電磁力により振動するコンクリート中の磁性体は、主にシースであることが明らかとなった。さらに、本研究の範囲内では、シースが振動する部分は、コイル直下の領域におおよそ限定されることもわかった。
- (2) 磁場解析により計算したシー스에生じる電磁力を 3次元衝撃応答解析における衝撃入力データのとし、コンクリート内部での弾性波の伝播挙動を把握した結果、グラウト未充填の場合ではシースの振動は鋼棒に伝播しないことがわかった。一方、グラウト充填の場合はグラウトによりシースの振動が弾性波として鋼棒に伝播することを視覚的に明らかにした。
- (3) 磁場解析および衝撃応答解析を併用した結果、グラウト未充填および充填の有無を電磁パルス法により評価する場合は、最大振幅値が有効な評価パラメータであることが明らかとなった。

今後は、動磁場解析により算出したシー스에作用する電磁力の大きさおよび作用位置のデータを衝撃応答解析における入力データとして有効に活用する方法について詳細に検討する予定である。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(若手スタートアップ 21860055)の援助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 角田 蛸, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 宗像晃太郎, 稲熊唯史: 弾性波による PC グラウト充填評価手法への電磁パルス法の適用に関する基礎研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 9 巻, pp.39-44, 2009.10
- 2) Jackson, J. D., 西田稔訳: ジャクソン電磁気学(上), 吉岡書店, pp.282-284, 2002
- 3) 大木義路: 電磁気学, オーム社, pp.74-141, 2006
- 4) 二村忠元: 電子・通信・電気工学基礎講座 1 電磁気学, 丸善, pp.128-199, 1972