

論文 動磁場・弾性波動解析による PC グラウト充填率およびシースかぶりの違いが電磁パルス法で測定される最大振幅値に与える影響

李 興洙^{*1}・内田 慎哉^{*2}・鎌田 敏郎^{*3}

要旨：電磁パルス法は、コンクリート表面にセンサを設置した状態で、シースに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着目し、PC グラウト充填状況の評価のための非破壊評価手法である。本研究では、動磁場および弾性波動解析を併用し、シース直径方向におけるグラウト充填率およびシースかぶりの違いが、電磁パルス法で測定される弾性波の最大振幅値に与える影響について把握することを目的とした。その結果、最大振幅値とグラウト充填率とは概ね相関があることがわかった。また、グラウト充填状況の評価が可能なシースかぶりは 200mm 程度であることも併せて明らかにした。

キーワード：PC グラウト, 非破壊試験, 電磁パルス法, 弾性波, 動磁場解析, 弾性波動解析

1. はじめに

著者らは、供試体実験により、シース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振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¹⁾。その結果、弾性波の最大振幅値に着目すれば、シース全長にわたってグラウトが完全に未充填および完全に充填されている場合に限り、グラウト未充填を検出できることを明らかにしている。さらに著者らは、動磁場および弾性波動解析をそれぞれ用いて、供試体および計測条件をモデル化した上で供試体実験の再現を試み、グラウト充填評価手法における電磁パルス法の有効性を明らかにしている²⁾。しかしながら、上記の検討では、グラウト充填率およびシースかぶりに関する本手法の適用範囲については不明確のままであった。

そこで本研究では、動磁場および弾性波動解析を併用し、シース直径方向におけるグラウト充填率およびシースかぶりの違いが、電磁パルス法で測定される弾性波の最大振幅値に与える影響について把握することを目的とした。

2. 動磁場解析による PC 鋼棒および鋼製シースに作用する電磁力の範囲およびその大きさの把握²⁾

2.1 解析概要

図-1 に解析モデル（ハーフモデル）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）可能性を考慮して、空気のモデル化を行なっている³⁾。図-2 に図-1 における点線部を拡大した図を示

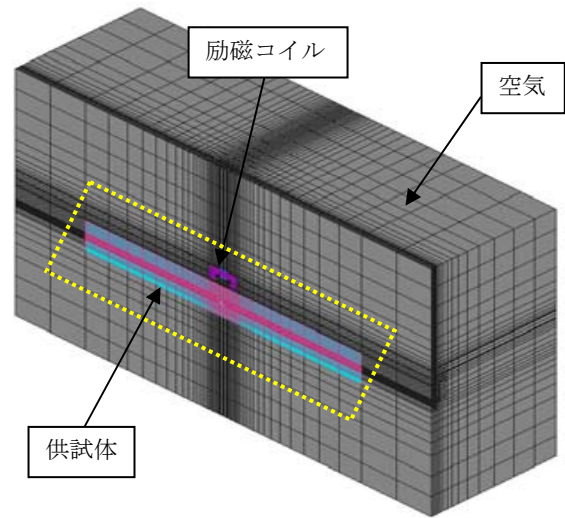


図-1 3次元動磁場解析モデルの概要（メッシュ図）

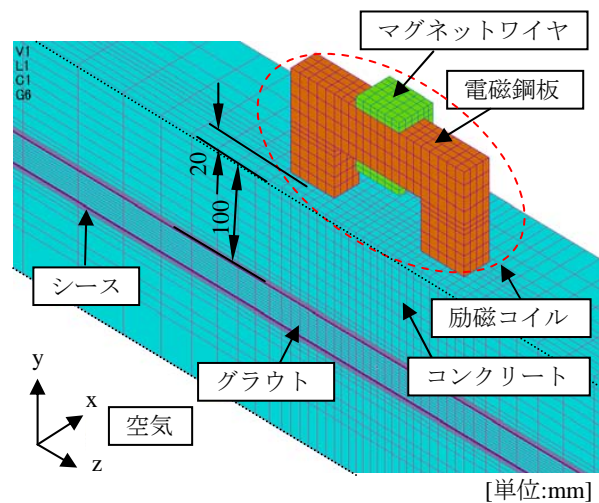


図-2 動磁場解析モデル（励磁コイル周辺拡大図）

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 博士課程（学生会員）

*2 佐賀大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 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）

表-1 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	5.0×10^3	0.0
シース	5.0×10^3	1.0×10^7
コンクリート	1.0	1.0
グラウト	1.0	1.0
マグネットワイヤ	1.0	1.0

す。空気内には、電磁鋼板、マグネットワイヤ、コンクリート、グラウトおよびシースをそれぞれモデル化した。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-1 参照）。各モデルの材料定数を表-1 に示す。なお、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。

電磁鋼板に磁束を生じさせる起磁力⁴⁾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：0.28A における起磁力は 3.96A となる。この起磁力が最大値となるパルス幅 200 μ s の電流波形により磁束を生じさせた。

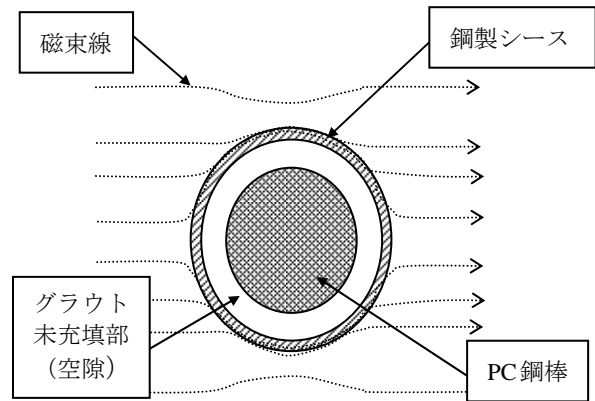
2.2 解析結果および考察

表-2 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 μ s 後の磁束密度である。鋼棒のかぶり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⁴⁾（図-3 参照）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、鉄筋コンクリート部材では、部材内部に鉄筋が配置されているが、磁束線を貫く鉄筋の表面積はシースのそれと比較して小さいため、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 μ s の時刻におけるシース全体に作

表-2 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)	1.0×10^{-2}
PC 鋼棒かぶり相当位置 (シース内部)	9.2×10^{-10}



【シース断面図】

図-3 鋼製シースによる磁気遮蔽効果のイメージ

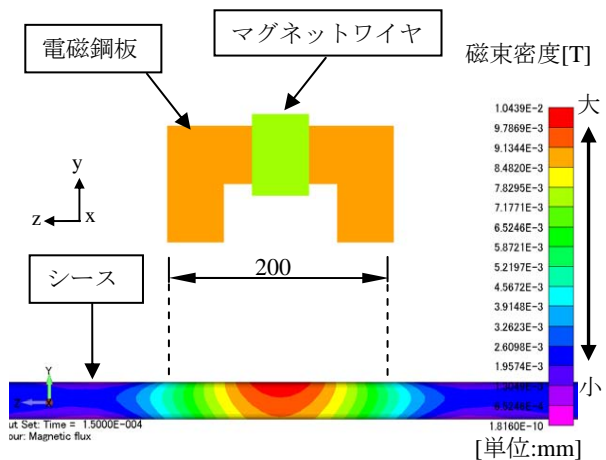


図-4 シースに作用する磁束密度

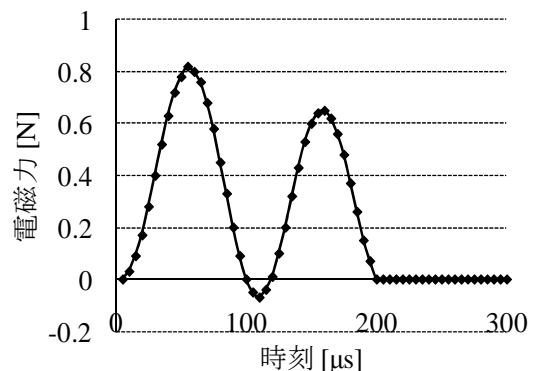


図-5 シース全体が受ける電磁力の時刻歴波形

用する磁束密度のコンター図を図-4に示す。図より、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 μ 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⁵⁾。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-4参照）を総和し、これを5 μ s後における電磁力とした。この計算を5 μ sごとに300 μ sとなるまで計算した。得られた電磁力の経時変化を図-5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、3次元弾性波動解析を行なうこととした。

3. 弾性波動解析によるPCグラウト充填率の違いが最大振幅値に与える影響

3.1 解析概要

解析モデルを図-6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。シース高さ方向におけるグラウト充填率の違いが最大振幅値および周波数特性に与える影響を把握するため、グラウト充填率に5つのバリエーションを設けた。すなわち、「グラウト充填率」を、任意の断面におけるシース内部の全面積（PC鋼棒を含む）に対するグラウト面積の比率として定義（図-7参照）した上で、充填率を0%（グラウト完全未充填）、25%、50%、75%および100%（グラウト完全充填）に設定した。なお、各充填率におけるシース長手方向のグラウト充填状況は、設定したグラウト充填率と同じである。グラウト充填率の全バリエーションを表-3に示す。各モデルの材料定数は表-4に示すとおりである。

各モデルの要素は、いずれも8節点ソリッドとした。コンクリート要素一辺の長さは約10mmに設定した。モデルの境界条件としては、図-6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、節点（媒質）で波が反射しないように無反射条件とした。なお、モデルにおけるPC鋼棒には荷重を与えていない。また、鋼棒と定着プレートの各節点は全て結合した。一方、プレートとコンクリートおよびプレートとシースの節点は結合していない。

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。

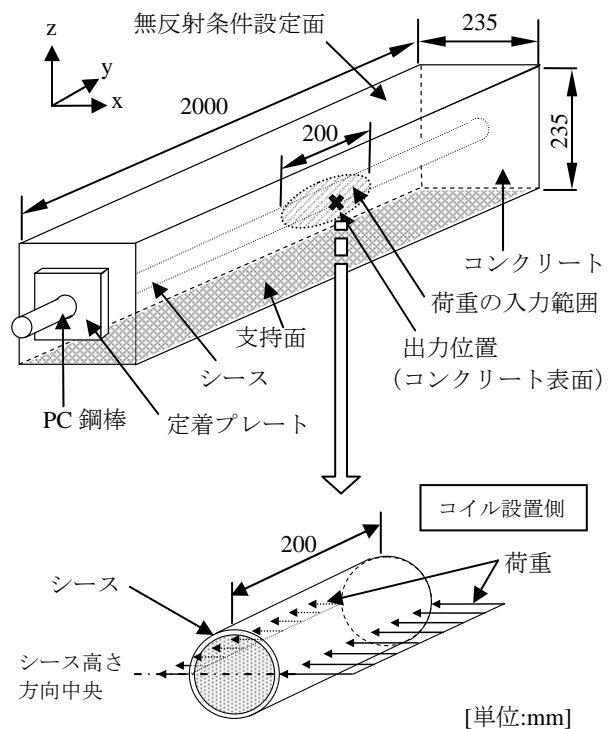


図-6 弾性波動解析モデルの概要

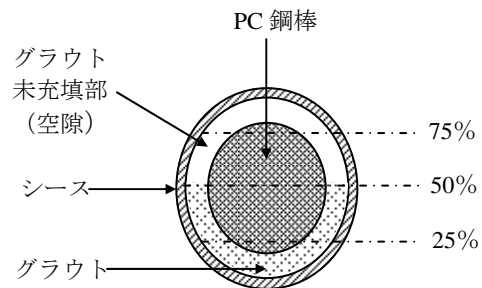


図-7 グラウト充填率（シース断面図）

表-3 シースかぶりの全バリエーション

シースかぶり [mm]	充填率 [%]
100	0, 25, 50, 75, 100
150	0, 100
200	0, 100
250	0, 100

表-4 弾性波動解析モデルの物性値

構成材料	弾性係数 [GPa]	ポアソン比	密度 [g/cm ³]
コンクリート	30	0.20	2.3
グラウト	23	0.20	1.8
シーす	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	1.6×10^{-20}	2.0×10^{-20}	2.2×10^{-20}

具体的には、コイル設置側シーす表面の各節点およびその反対側のシーす表面の各節点とした（図-6 中のシーす拡大図参照）。本来は、電磁力ベクトルを x, y, z 方向成分に分けた上で、これをシーす 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、動磁場解析と弾性波動解析で要素数が異なるため、便宜上、図-6 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-5 に示す電磁力の時刻歴波形を用いた。シーす表面の対象とした各節点における 5 μ s 毎の合力が、図-5 に示す時刻歴波形における 5 μ 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-6 に弾性波受振位置（出力位置）を示す。出力位置は、シーす長手方向中央かつシーす上のコンクリート表面の 1 節点とした。

3.2 解析結果および考察

(1) 受信波形

図-8 に、コンクリート表面の出力点（図-6 参照）において得られた加速度の時刻歴波形を、グラウト充填率ごとに示す。いずれにおいても、概ねほぼ同一周期の波形であることがわかる。

グラウト充填率ごとに比較すると、充填率が大きくなると、波形の振幅値が小さくなることが確認できる。充填率が 0% の場合、グラウトによるシーすの拘束が無いため、シーすは振動しやすい状況にある。これに対してグラウトの充填率が大きくなると、グラウトによる拘束が大きくなり、シーす自体の振動も小さくなる。

シーすかぶり部分のコンクリートの減衰はいずれも同じであるため、上記の影響によりコンクリート表面で出力した波形の振幅に差異が生じたものと考察できる。

(2) 最大振幅値

次に、図-8 に示す受信波形の振幅の最大値（最大振

幅値）とグラウト充填率との関係について整理する。最大振幅値比とグラウト充填率との関係を図-9 に示す。ここでいう最大振幅値比とは、充填率 0% の最大振幅値を 1 として、それに対する各充填率で得られた最大振幅値の比として定義した。図より、充填率が大きくなると、最大振幅値比が小さくなる傾向を示した。この結果は、充填率 0%, 50% および 100% の供試体において行った著者らの実験結果（図-10 参照）¹⁾ と同様の傾向である。ただし、充填率 75% と 100% との最大振幅値は概ね同じ値であった。この原因については、今後、詳細に検討する予定である。

4. 弾性波動解析によるシーすかぶりの違いが最大振幅値に与える影響

4.1 解析概要

シーすかぶりの違いが最大振幅値に与える影響を把

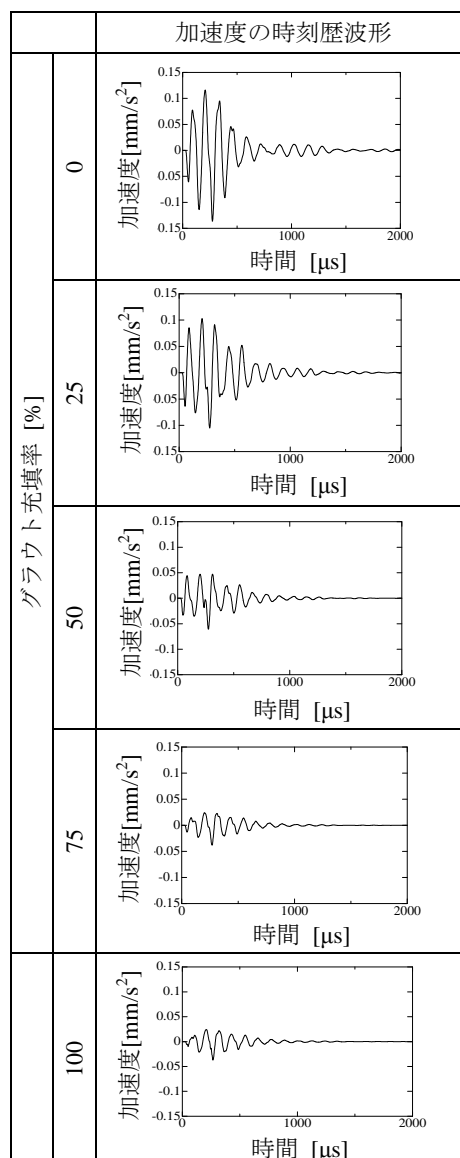


図-8 各グラウト充填率で得られた時刻歴波形

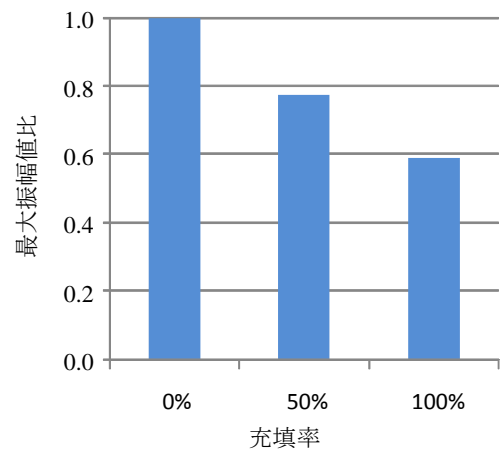
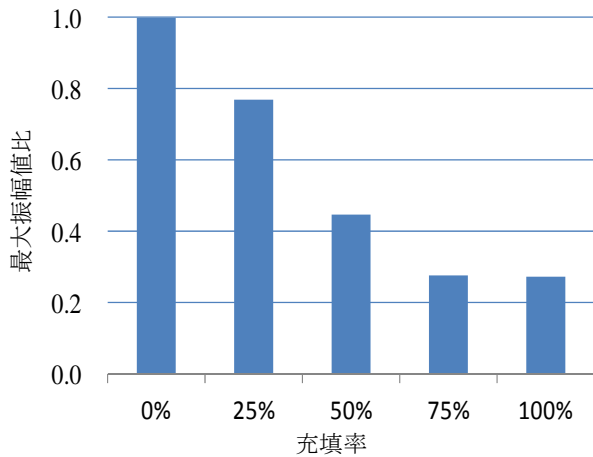


図-9 グラウト充填率と最大振幅値比の関係（解析）

図-10 グラウト充填率と最大振幅値比の関係（実験）

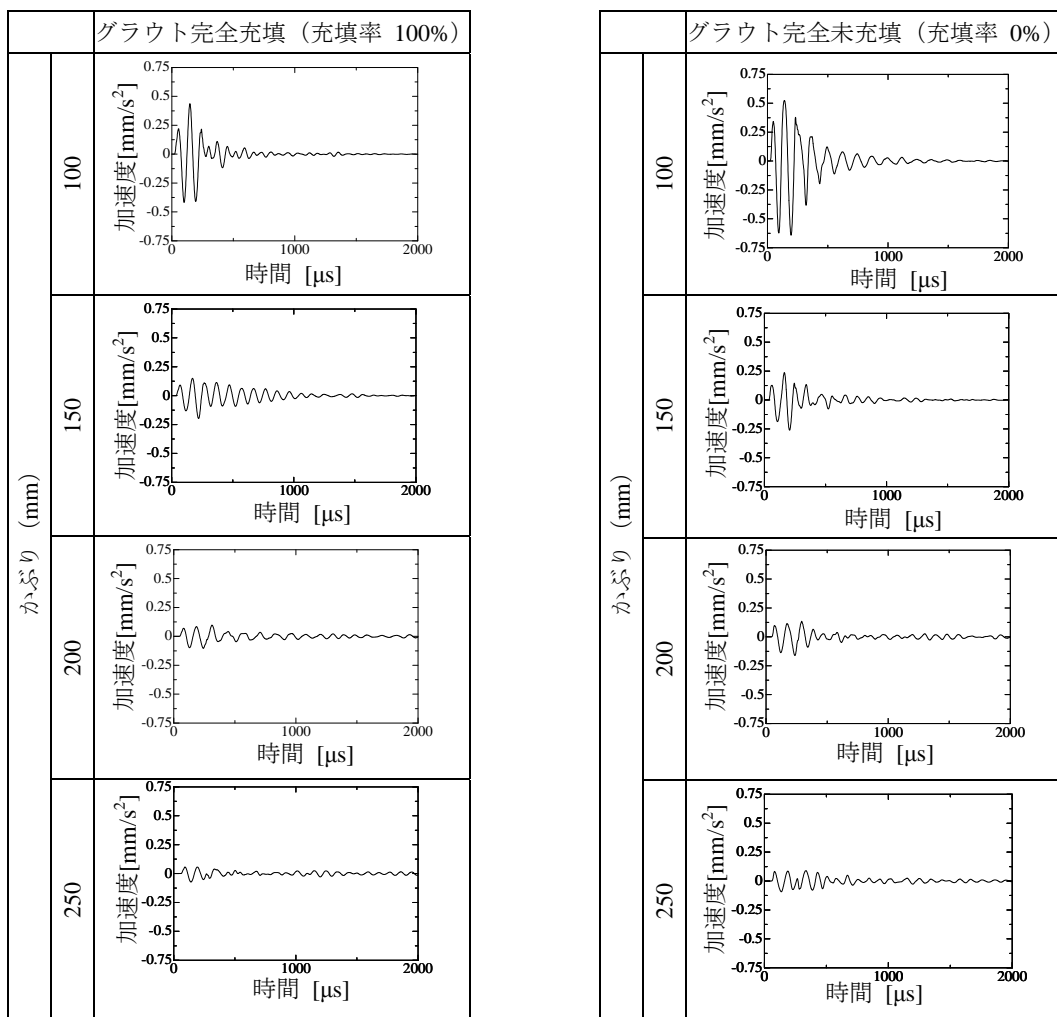


図-11 グラウト充填と未充填場合で得られた加速度の時刻歴波形

握するため、図-6 に示す解析モデルにおいて、シースのかぶりを 150, 200 および 250mm に設定した上で、弾性波動解析を行った。グラウト充填率は、いずれのかぶりについても、0% および 100% とした。グラウト充填率とシースかぶりの全バリエーションを表-3 に示す。各モデルの材料定数は表-4 に示すとおりである。なお

各モデルの寸法および境界条件は 3.1 で示したのと同じである。

シースに与える荷重（電磁力）の大きさやその入力位置は 3.1 と同じであり、詳細は図-5 および図-6 にそれぞれ示している。出力位置も 3.1 と同様である（図-6 参照）。

4.2 解析結果および考察

(1) 受信波形

シースカぶり 100, 150, 200 および 250mm におけるグラウト充填（充填率 100%：グラウト完全充填）と未充填（充填率 0%：グラウト完全未充填）場合で得られた加速度の時刻歴波形を図-11 にそれぞれ示す。図におけるシースカぶり 100mm のグラウト充填および未充填は、図-8 に示すグラウト充填率 100%および0%と同様なものである。かぶりや充填未充填の違いにかかわらず、いずれの場合においても、図-8 と同様に、周期の同じ波であることがわかる。ここで、充填と未充填とを比較すると、かぶりの違いにかかわらず、充填の場合の振幅が未充填の場合のそれよりも小さくなっている。これは、3.2 で考察したとおり、グラウトによるシースの拘束の差によるものである。一方、かぶりに着目すると、かぶりが大きくなるにしたがって、充填や未充填いずれの場合も振幅が小さくなっていくことが確認できる。これは、かぶり部分であるシース表面とコンクリート表面との距離が大きくなったことにより、コンクリート表面へ伝播した波が減衰したためである。

(2) 最大振幅値

図-11 に示す受信波形の最大振幅値とシースカぶりとの関係を図-12 に示す。ただし、図-9 と同様、縦軸は最大振幅値比としている。この図に示す最大振幅値比の定義としては、かぶり 100mm の未充填の最大振幅値を 1 とし、それに対する各ケース（かぶり、充填および未充填）で得られた最大振幅値の比である。グラウト充填と未充填とを比較すると、いずれの場合も未充填の最大振幅値が充填のそれよりも大きくなっている。しかしながら、かぶりが大きくなると、両者の差は小さくなる傾向を示した。特に、かぶり 250mm の場合では、未充填での最大振幅値は充填の場合の約 0.8 倍程度しかないとわかる。したがって、本解析の範囲内では、コンクリート表面で出力した波形の最大振幅値により PC グラウト充填状況を評価する場合は、適用可能なシースカぶりはおよそ 200mm 程度であると考えら

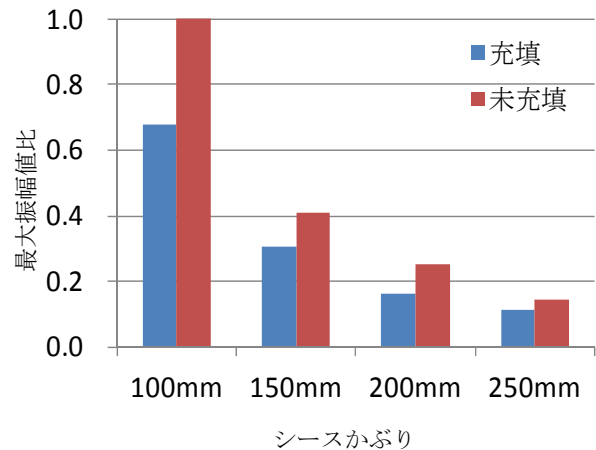


図-12 シースカぶりと最大振幅値比の関係

れる。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 動磁場解析および弾性波動解析を併用した結果、電磁パルス法で得られるコンクリート表面で出力した波形の最大振幅値は、シース内部の PC グラウト充填率と概ね相関があることが明らかとなった。
- (2) 電磁パルス法で得られた最大振幅値に基づき PC グラウト充填状況を評価する場合は、その評価が可能なシースカぶりは 200mm 程度である。

参考文献

- 1) 角田 瑠, 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