論文 PC グラウト充填状況の違いが電磁パルス法で測定される最大振幅値 に与える影響に関する解析的検討

宗像 晃太郎*1·内田 慎哉*2·鎌田 敏郎*3·角田 蛍*1

要旨:電磁パルス法は、コンクリート表面に振動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振される弾性波に着目し、グラウト充填状況を評価するための方法である。本研究で は、有限要素法に基づく動磁場解析および衝撃応答解析をそれぞれ用いることで、シース長手方向におけるグラ ウト未充填区間およびシース高さ方向におけるグラウト充填率の違いが、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、コンクリート表面で出力した波形の最大 振幅値に着目すれば、グラウト未充填区間および充填率の違いをおおむね把握できることが明らかとなった。 キーワード:グラウト、充填率、非破壊試験、電磁パルス法、弾性波、動磁場解析、衝撃応答解析

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 ラウト充填状況を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。しかしながら、グラウトがシース長手方向の一 区間において部分的に未充填のケース、ならびにシース 高さ方向においてグラウトが一部充填されていない箇 所があるケースに対する本手法の適用性については未 検討のままであった。

そこで本研究では、シース長手方向におけるグラウト 未充填区間およびシース高さ方向におけるグラウト充 填率の違いが、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を解析により把握することを目的 とした。

なお、電磁パルスにより生じる鋼製シースの振動特性 を把握するため、有限要素法に基づく3次元動磁場解析 を行った。さらに、磁場解析により得られたシースに作 用する電磁力およびその分布を、3次元衝撃応答解析の 衝撃荷重として入力し、コンクリート内部の弾性波挙動 を再現することを試みた。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、著者らの実験結果の一部¹⁾を本論文の2章に おいて引用した。

シース長手方向におけるグラウト未充填区間の長さ と最大振幅値との関係

2.1 動磁場解析概要

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²⁾。図-2に図-1における点線部を拡大した図を示 す。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



図-1 3次元動磁場解析モデルの概要(メッシュ図)

*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)



[単位: mm]

図-2 動磁場解析モデル(励磁コイル周辺の拡大図)

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
マグネットワイヤ	1.0	1.0

表-1 動磁場解析モデルの物性値

	表2	シー	ス表面おん	よび内部(の磁東密度
--	----	----	-------	-------	-------

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}

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³⁾は、次式により 算出した。

 $MMF = nI\sqrt{2} \tag{1}$

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: 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 200µs の電流波形により磁束を生じさせた。

2.2 動磁場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150µs 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³(図-3



【シース断面図】





図-4 シースに作用する磁束密度

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、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 150µs 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-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 5µs 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⁴⁾。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 5µs 後における電磁力とした。 この計算を 5µs ごとに 300µs 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 次元衝撃応 答解析を行なうこととした。

2.3 衝撃応答解析概要

供試体を模擬した解析モデルを図-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。ここでは、シース長手方向におけるグラウ ト未充填区間の長さとコンクリート表面で受振される 最大振幅値との関係について検討するため、 グラウト未 充填区間の長さが 100mm から 1500mm の間で 8 つのバ リエーションを設けたモデルを作成した。なお、グラウ ト未充填部は、グラウト未充填区間の長手方向中央とシ ース長手方向中央が一致するように設定した(図-7参 照)。また、比較のため、グラウト未充填区間長さが 0mm (グラウト完全充填)および 2000mm (グラウト完全未 充填)のモデルについても併せて検討した。グラウト未 充填区間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 4mm 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、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。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



図-5 シース全体が受ける電磁力の時刻歴波形

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。



【シース拡大図】

図-6 3次元衝撃応答解析モデルの概要



図-7 グラウト未充填区間のイメージ

表-3 検討ケース

-	Ŭ	1711	/ / /
未	充填	区間	[mm]
		0	
		100	
		200	
		300	
		400	
		500	
		800	
		1000	
		1500	
		2000	

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 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-6中のシース拡大図参照)。本来は、電磁カベクト 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-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。シース表面の対象とした各節点における 5μs 毎の合力が、図-5に示す時刻歴波形における 5μs 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。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の1節点とした。

2.4 衝撃応答解析結果および考察

図-8 に、グラウト未充填区間の長さとコンクリート 表面で出力した弾性波の最大振幅値との関係を示す。図 から、グラウト未充填区間が 200mm 以上のときに得ら れた最大振幅値は、全て一致していた(0.0020[mm/s²])。 したがって、グラウト未充填区間が少なくとも 200mm 以上ある場合は、 グラウト完全未充填モデル(未充填区 間 2000mm) で得られる値と一致することが明らかとな った。一方, グラウト完全充填モデル(未充填区間 0mm) で得られた弾性波の最大振幅値(0.0013[mm/s²])は,完 全未充填の場合と比較して小さくなった(約0.65倍)。 ここで,完全未充填(未充填区間 2000mm)および完全 充填モデル(未充填区間0mm)での解析結果と、同条件 で行った供試体での実験結果とを比較すると,最大振幅 値の絶対値そのものは両者で異なるものの、完全未充填 および充填での大小関係はほぼ同様の傾向となった。す なわち、解析と実験とのいずれにおいても、グラウトが 完全に充填されている場合においてコンクリート表面 で得られた弾性波の最大振幅値は、完全未充填の場合の それと比較して小さくなった (図-9参照)。なお、グラ ウト未充填区間 100mm での最大振幅値は, 完全充填モ デル(未充填区間 0mm)よりも大きく,未充填区間 200 から2000mmモデルでの最大振幅値よりも小さい値とな った $(0.0018[\text{mm/s}^2])_{\circ}$

シース断面方向におけるグラウト充填率と最大振幅 値との関係

3.1 衝撃応答解析概要

ここでは、図-6と同様のモデルを使用して、3次元

衝撃応答解析を行った。各モデルの寸法,材料定数およ び境界条件は2.3で示した条件と同じである。シース断

表-4 衝撃応答解析モデルの物性値

構成材料	弾性係数	ポマソント	密度
	[GPa]	ホノノン比	[g/cm ³]
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	1.6×10^{-20}	2.0×10^{-20}	2.2×10^{-20}



加速度波形の最大振幅値 [mm/s²]

図-8 未充填区間の大きさと最大振幅値の関係



図-9 コンクリート表面における受振波の最大振幅値



面方向におけるグラウト充填率の違いが最大振幅値に 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」 をシース内部の全空隙容積に対するグラウト容積の占 める割合として定義(図-10参照)した上で、充填率が 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)とした。なお、シース長手方向に は、グラウトは一様に充填されている。

シースに与える荷重(電磁力)の大きさおよび入力位 置は2.3と同様である。出力位置は、シース長手方向中 央かつシース上のコンクリート表面の1節点とした。

3.2 衝撃応答解析結果および考察

(1) コンクリート表面で出力した弾性波の時刻歴応答 波形

図-11 に、衝撃応答解析により、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 応答波形をグラウト充填率0%,50%および100%の場合 に分けてそれぞれ示す。時刻歴波形における初期の波 (図-11 中の矢印) に着目すると、いずれの充填率の場 合においても、初期の波の振幅が、それ以外の時刻にお ける振幅値よりも大きい値(最大振幅値)を示している ことがわかる。しかも、その最大振幅値は、グラウト充 填率が大きくなると、小さくなる傾向を示している。続 いて、時刻歴波形の時刻:約225 µ s~450 µ s の間の振幅 値(図-11中の点線太枠内)に着目すると、充填率が大 きくなると、振幅が小さくなる傾向を示している。しか も、その減少幅は、最大振幅値の減少幅よりも大きい。 この理由については、現時点では不明であるため、今後 さらに検討を行う予定である。そのため, 3.2(2) におけ る最大振幅値は、図-11 中の矢印で示している初期の波 の振幅値とした。

(2) コンクリート表面で出力した弾性波の最大振幅値 衝撃応答解析により得られたシース断面方向におけ るグラウト充填率とコンクリート表面で出力した弾性 波の最大振幅値の関係を図-12に示す。図から明らかな ように、グラウト充填率が25%の場合は異なるものの、 充填率が大きくなるにしたがって、コンクリート表面で



図-11 各グラウト充填率で得られた加速度の時刻 歴応答波形



-1689-



図=13 クラウト元頃率と取入振幅値の関 (実験結果)

出力した弾性波の最大振幅値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-13参照)と同様の傾向である。なお、解析におけるグラウト充填率が25%の場合に、最大振幅値がその他のものよりも大きくなった理由については不明である。そのため、今後、詳細に検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) シース長手方向の一区間にグラウト未充填区間の長 さが少なくとも100mm存在する場合、コンクリート 表面で出力した波形の最大振幅値は、充填部でのそ れと比較して大きくなることを磁場解析および衝撃 応答解析により明らかにした。
- (2) グラウト未充填区間の長さが励磁コイルの長さである200mmよりも大きくなると、コンクリート表面で出力した波の最大振幅値は、グラウトが長手方向に完全に充填されていない場合の最大振幅値と同じ値となった。
- (3) シース断面内の高さ方向におけるグラウトの充填率が大きくなると、コンクリート表面で出力した波形の最大振幅値は小さくなる傾向を示した。しかしな

がら,充填率が25%の場合についてはこの傾向とは 異なり,充填率が0%のときに得られる最大振幅値よ りも大きい値になった。この原因については,今後 詳細に検討する必要がある。

(4) 上記(1)~(3)の解析結果は、コンクリート表面で得られる弾性波の最大振幅値に着目すれば、シース内の グラウト未充填区間およびグラウト充填率の違いを 把握できる可能性を示唆している。

今後は, PC 鋼棒端部で受信した弾性波の最大振幅値と 充填率の関係について,実験および解析により把握する 予定である。ただし, PC 鋼棒端部での最大振幅値に基づ きグラウト充填評価を行う場合,コイルの設置位置と PC 鋼棒端部との距離により,弾性波の減衰の程度が異なる。 そのため, PC 鋼棒端部で受信した弾性波の最大振幅値を グラウト充填評価にそのまま適用することは困難であ る。したがって,今後は,波の減衰が最大振幅値に与え る影響についての検討を解析により行う必要がある。こ の検討項目を含めて,電磁パルス法によるグラウト充填 評価手法を高度化していく予定である。

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る。

参考文献

- 角田 蛍,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) 大木義路:電磁気学,オーム社, pp.74-141, 2006
- 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
- 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