

電磁パルス法に基づく PC グラウト充填評価手法における評価指標の有効性の解析的検討

大阪大学大学院 正会員 ○内田 慎哉 正会員 鎌田 敏郎
学生会員 角田 蛍 学生会員 岩崎 俊樹

1. はじめに

著者らは、これまでに PC 部材の横締め部分を模擬した供試体を対象として、鋼製シース直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、グラウト充填状況を評価する方法（以降、電磁パルス法とする）を提案している¹⁾。しかしながら、弾性波の発生源となる磁性体や受信波の最大振幅値が変化する理論的背景については、未解明の部分を残していた。

そこで本研究では、まず、過去に実験で用いた供試体および計測条件を基に設定したモデルにおいて動磁場解析を行い、供試体内部で弾性波の発生源となり得る磁性体を特定し、その磁性体に作用する電磁力分布を算出した。続いて、動磁場解析により得られた電磁力の値を衝撃応答解析における衝撃荷重値として入力することにより、供試体内部での弾性波伝搬挙動を再現し、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検討した。

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

2.1 解析概要

動磁場解析では、漏れ磁束を考慮し、まず、空間のモデル化を行った。この部分の寸法は、縦 1500mm、横 2500mm、高さ 1200mm であり、すべての面に対して固定境界条件を与えた。その中央部には、縦 235mm、横 2000mm、高さ 235mm のコンクリート供試体および励磁コイルをそれぞれモデル化した（図 1 参照）。供試体のモデル内部には内径 32mm、厚さ 1mm、長さ 2000mm の鋼製シース 1 本を、かぶり 100mm となるように設定し、その内部には直径 23mm、長さ 2200mm の PC 鋼棒をモデル化した。供試体両端部は定着プレートを想定した。励磁コイルは、鉄心に導線を巻きつけたものとしてモデル化し、シース直上かつ供試体長手方向中央に設定した。なお、励磁コイルの先端とコンクリート表面との間隔は 20mm とした。

要素は、いずれも 8 節点 6 面体ソリッドである。コンクリート要素 1 辺の長さは約 10mm とした。また、空気層についても同様に、供試体近傍で約 10mm とし、供試体から離れるに従って要素 1 辺の寸法が大きくなるように（最大で 100mm）分割した。一方、PC 鋼棒および鋼製シースの表層部には、表皮効果¹⁾を考慮して表皮層を設けた。表皮層の深度（表皮深さ）は、例えば、磁束密度が鋼棒表面で

の値の $1/e$ （ e ：自然対数の底）となるときの鋼棒表面からの深さのことであり、次式により求めることができる。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (1)$$

ここで、 δ ：表皮深さ(mm)、 f ：周波数(Hz)、 σ ：電気伝導率 $[=1.0 \times 10^7 \text{ S/m}]$ 、 μ ：透磁率 $[=2\pi \times 10^3 \text{ H/m}]$ である。式(1)より、表皮深さは 0.032mm となる。なお、周波数は、供試体での計測時に導線に実際に電流を流した時間：200 μs より 5000Hz とした。解析における表皮層のモデル化では、解析の精度を確保するため、表皮深さ（半径方向）を少なくとも 2 分割する必要がある。そのため、PC 鋼棒および鋼製シースの表皮層の半径方向の要素分割数を 2 つとし、各要素寸法を 0.016mm とした。なお、長手方向は、10mm の長さで均等に分割した。

図 2 に導線に流す電流波形を示す。この図に示す電流の最大値（起磁力）は、次式により算出した。

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

ここで、 MMF ：起磁力 (A)、 n ：導線の巻数 $[=10 \text{ 巻}]$ 、 I ：導線に流れる電流の実効値 $[=0.28 \text{ A}]$ である。式(2)より、起磁力は 3.96A となる。一方、図に示す横軸の時間は、供試体での計測条件と同じく 200 μs とした。図 2 に示す正弦波の電流を導線に入力することにより、コイル周辺に瞬間

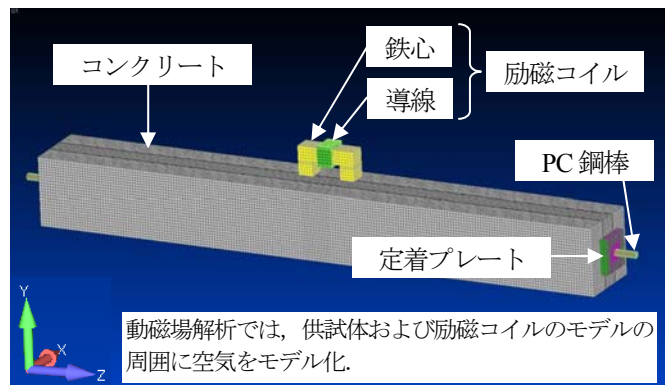


図 1 動磁場解析および衝撃応答解析のモデル概要

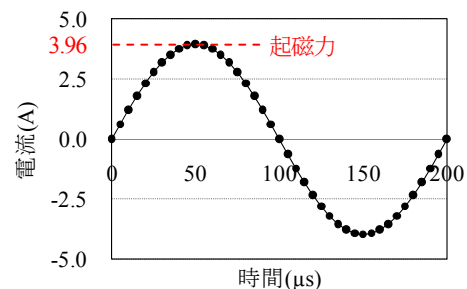


図 2 導線に入力する電流波形

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、衝撃応答解析

連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 TEL 06-6879-7618

的な磁界を発生させた。この磁界により鋼棒表面およびシース表面の各節点に作用する x , y および z 方向それぞれの電磁力を求めた。電磁力の時間変化を把握するため、0 から $200\mu\text{s}$ となるまで $5\mu\text{s}$ ごとに電磁力をそれぞれ求めた。

2.2 解析結果および考察

放電開始時刻から $150\mu\text{s}$ 後におけるシースに作用する電磁力のコンター図を図 3 に示す。図から明かなように、コイル直下のシース部分に集中的に電磁力が作用していることがわかる。励磁コイル側のシース表面における電磁力を求めた結果、 $1.2 \times 10^3 \text{N}$ であった。これに対して、シース内部の鋼棒表面における電磁力は $8.5 \times 10^{-16} \text{N}$ であり、シースのそれと比較して極めて小さい値となった。これは、PC 鋼棒がシースによる磁気遮蔽の影響を受けたためである。このことから、励磁コイルから発生した磁界により鋼製シース部分が主に振動することが明らかとなった。なお、上記の傾向は、磁界が生じている時間内ではほぼ同様であった。

3. 衝撃応答解析による最大振幅値の有効性の検証

3.1 解析概要

衝撃応答解析における供試体モデルは、動磁場解析におけるコンクリート供試体のモデル（図 1 参照）と同じである。なお、ここでは、「グラウト完全充填」と「グラウト未充填」の 2 ケースのモデルを作成した。境界条件は、コンクリート供試体モデルの 1 側面（図 1: y - z 平面, $x = 0\text{mm}$ ）にある全節点の変位を全方向固定した。もう一方の側面（図 1: y - z 平面, $x = 235\text{mm}$ ）は無反射条件とした。動磁場解析により得られたシース表面における各節点の x , y および z 方向に作用する電磁力の経時変化を、衝撃応答解析における衝撃荷重としてそれぞれ入力した。弾性波の出力は、シース長手方向中央かつシース上のコンクリート表面（図 1 におけるコイルの直下）および PC 鋼棒片端部のそれぞれ 1 節点とした。

3.2 解析結果および考察

コンクリート表面および鋼棒端部で出力した変位波形の最大振幅値を図 4 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 2.3 倍大きい。これは、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るためであると考えられる。一方、鋼棒端部におけるグラウト未充填モデルの最大振幅値は、充填モデルよりも著しく小さい。グラウトが存在しないために、シースの振動が鋼棒に伝達されなかったと考えられる。いずれのモデルにおいても、著者らの既往の実験¹⁾で得られた最大振幅値の傾向と概ね一致した（図 5 参照）。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 動磁場解析の結果、コンクリート内部で弾性波の発生源となり得る磁性体は、主に鋼製シースであることが明らかとなった。

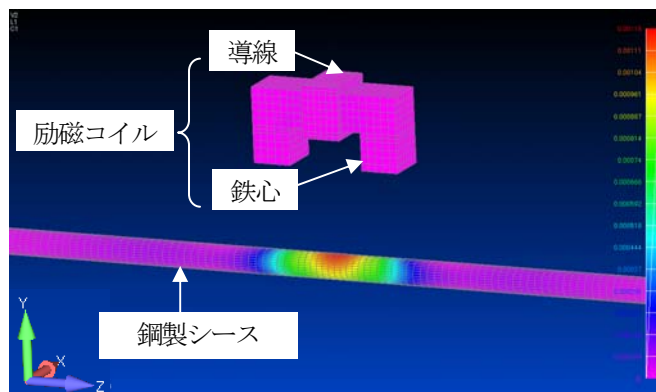


図 3 鋼製シースに作用する電磁力分布

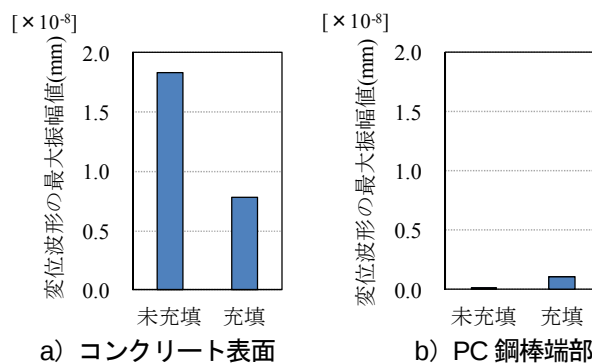


図 4 コンクリート表面および PC 鋼棒端部における変位波形の最大振幅値（解析結果）

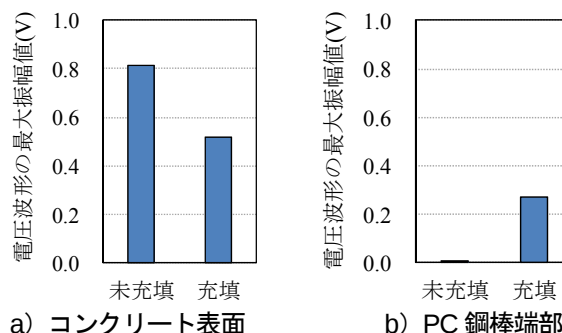


図 5 コンクリート表面および PC 鋼棒端部における電圧波形の最大振幅値（実験結果）

- (2) 動磁場解析で得られた電磁力を衝撃応答解析における衝撃荷重として鋼製シースに与えた結果、電磁パルス法により得られる弾性波の最大振幅値は、PC グラウト充填評価指標として有効であることを把握した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 高橋 則雄: 三次元有限要素法 磁界解析技術の基礎, 電気学会, pp.63-69, 2006

謝辞

本研究は、土木学会吉田研究奨励賞を授与された研究であり、そ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。