

電磁パルス法によるアンカーボルト固着部の非破壊評価手法における加振メカニズムに関する一考察

西日本高速道路株式会社	正 会 員	○宮田 弘和	立命館大学	正 会 員	内田 慎哉
大阪大学大学院	正 会 員	鎌田 敏郎	立命館大学大学院	学生会員	木村 貴圭
大阪大学大学院	学生会員	林本 和也	大阪大学大学院	学生会員	劉 軒

1. はじめに

これまでに著者らは、接着系アンカーボルトの固着部の健全度を非破壊で評価するため、孔内の接着剤の充填状況を把握することを目的として電磁パルス法の適用性を検討してきた¹⁾。充填不足を模擬した供試体での測定から、ボルトが加振された際に生じる弾性波をコンクリート表面で受信し、得られた波形を分析することにより、接着剤の充填状況を評価できる可能性があることを明らかにした。しかしながら、ボルト頭部に励磁コイルを配置して瞬間的に磁界を発生させた場合に、ボルトに作用する電磁力分布が不明であり、そのためボルトの加振メカニズムも不明確であった。

そこで本研究では、図-1 に示す既往研究の測定条件¹⁾に基づいて、励磁コイルの空心部をボルト頭部に挿入した状態をモデル化した上で動磁場解析を行い、ボルトに作用する電磁力分布の経時変化を把握することとした。

2. 解析概要

図-2 に解析モデルを示す。直径 16mm、長さ 240mm のアンカーボルト (SS400 材、丸棒) を想定し、円柱形状の対称性から計算を簡単にするため、2次元軸対称の有限要素モデル (8×240mm、要素数 6624) を設定した。また、ボルトの各要素の代表長さを、例えばボルト端部では径方向

に 0.4mm として、表皮効果²⁾の影響を考慮してボルト表層部を厚さ方向に 10 層程度 (1 層あたり約 0.01mm 厚さ) に分割した。一方、ボルト長さ方向にも同様にコイル近傍のボルト表層部は細かく分割し、その他の部分についてはコイルからの距離が離れるほど要素長さが長くなるように設定した。励磁コイル (外径 35mm、内径 31mm) の空心部がボルト端部に挿入された状態を模擬するため、厚さ 4mm、長さ 20mm のコイルの領域を設定した。ボルトとコイルの他は空気の領域とした。励磁コイルへの入力電流は図-3 に示すとおり、電流発生装置 (図-1 参照) から最大値が 3000A となるパルス電流をコイルへ瞬間的に流すことを想定した波形とした。そして、節点力法²⁾に基づく数値解析により各要素の節点に働く電磁力を算出した。

3. 解析結果および考察

図-4 に磁束密度ベクトル図を示す。いずれも励磁コイル近傍を拡大したもので、ボルト上端面から 8mm の範囲を表示している。放電から 50 μ s 後は、磁束密度が大きくなる領域はボルト表層の高々 1mm 厚さ程度に限られることがわかる。また、100 μ s 後までの磁束密度ベクトルの向きは、ボルト側面等の主な部分においては励磁コイルによって印加される磁場の向きと一致している。励磁コイルには常に一定方向 (紙面の奥から手前方向) に電流が入力されるため、

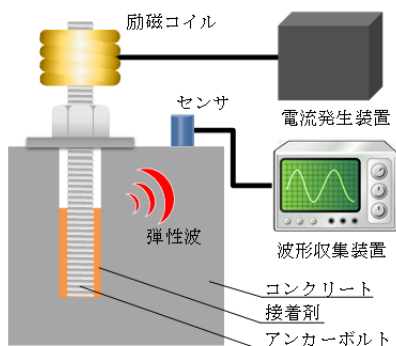


図-1 電磁パルス法の測定条件

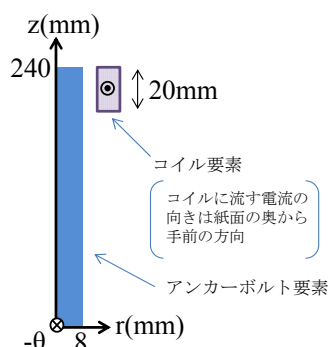


図-2 解析モデル

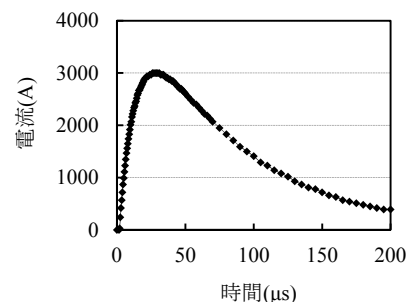


図-3 入力電流波形

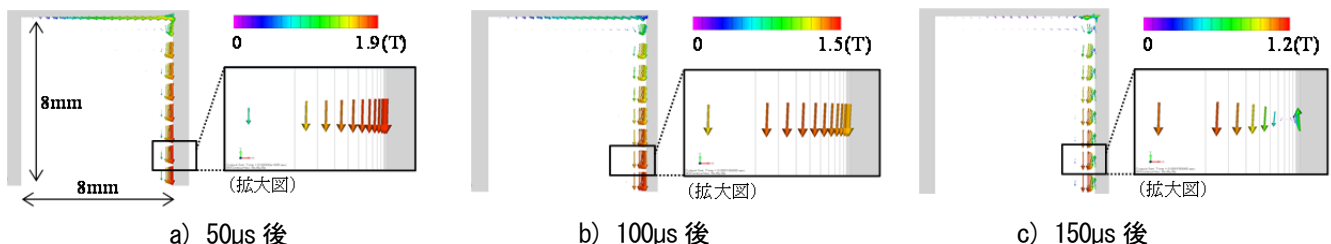


図-4 磁束密度ベクトル (灰色の空気層の内側がボルト断面)

キーワード 非破壊試験, 電磁パルス法, アンカーボルト, 動磁場解析, 渦電流, 電磁誘導

連絡先 〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島 1-6-20 NEXCO 西日本 本社技術本部 技術統括課 TEL 06-6344-4000

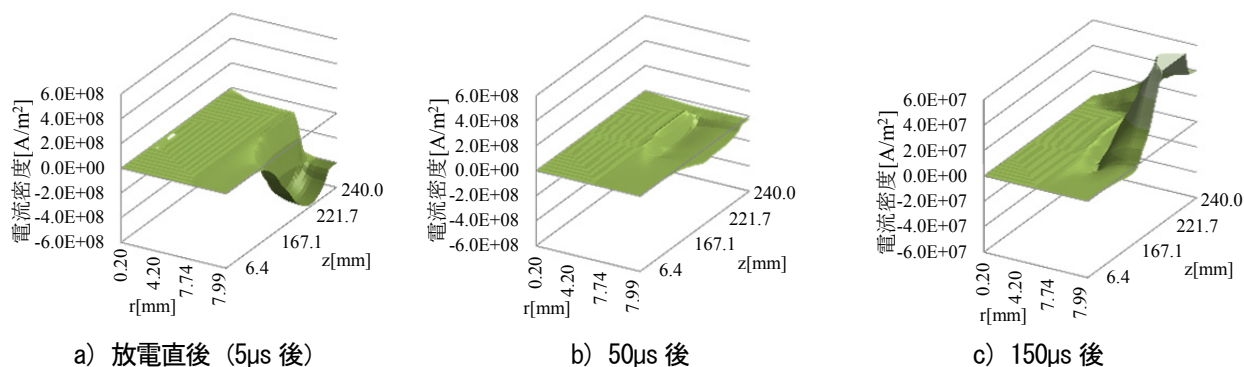


図-5 電流密度分布

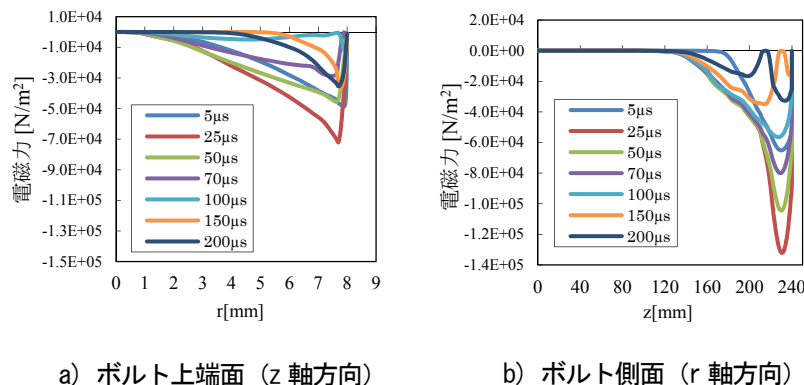


図-6 電磁力分布

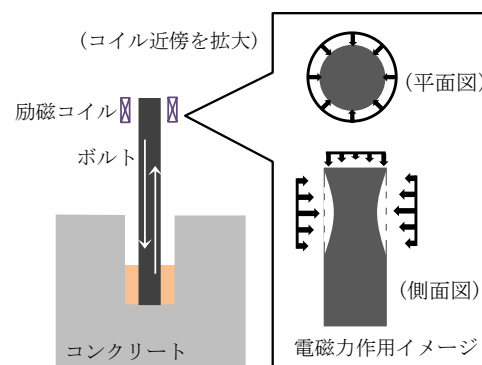


図-7 振動挙動イメージ

ボルト内部も基本的には一定方向（鉛直下方向）の磁束密度ベクトルとなることも整合している。一方で、150 μ s 後にはボルト側面の表層における磁束密度ベクトルの向きが反転することが確認できる。

図-5 に、電流密度分布の例を、放電後の経過時間とともに示す。図の縦軸を電流密度の値とし、コイルに流れる電流の向き（図-2 の紙面に対して奥から手前方向）を正としている。なお、表皮効果によりボルト表面に集中する電流の分布を把握しやすくするため、ボルト上端面側と側面側の2面において表層部の厚さ約1mmの範囲を拡大して表示している。電流密度の絶対値が最も大きくなるのは放電直後で、その極値の発生位置はコイル近傍のボルト側面の表層付近であることがわかる。また、その電流が流れる向きは負（紙面に対して手前から奥の方向）で励磁コイルへの入力電流とは逆向きとなっていることから、これは電磁誘導によってボルトに発生した渦電流であり、主にボルト表層の厚さ1mm程度の範囲を流れていることも同図から確認できる。また、放電直後は負の向きに流れていた渦電流については、25 μ s以降にコイルへの入力電流が次第に減少するため、渦電流が正の方向に流れようとする。この現象は150 μ s後の電流密度分布に現れており、ボルト側面の電流密度が上に凸の形状に変わり渦電流の向きが反転していることがわかる。また、これは前述の磁束密度ベクトルが150 μ s以降にボルト表層で反転することの要因になっていると推測される。

図-6 に、ボルト上端と側面のそれぞれの表面上での電磁力分布の継時変化を示す。なお、この電磁力は各節点で算出した節点力を隣り合う要素間距離で除して平均化した

ものである。ボルト上端面では、ボルト長さ方向には鉛直下向きに電磁力が作用することがわかった。また、ボルト側面上では、ボルト長さ方向にコイル高さの約4倍（約80mm）の区間に電磁力が作用しており、特にコイル近傍でボルト軸方向の力が集中的に作用していることが明らかとなった。つまり、ボルトは円柱形状であるため、断面に絞りが生じるように変形する方向に力が作用することになる。したがって、励磁コイルの空心部をボルト頭部に挿入して磁場を印加する場合には、図-7に示すように、ボルト上端面にはボルト長さ方向に圧縮力が、また、ボルト側面には周方向の圧縮力が作用することによって、ボルトが加振され弾性波が発生するものと考えられる。

4. まとめ

今回適用した動磁場解析で得られた結果によれば、コイル近傍で磁界が急激に変化する際の電磁誘導効果によってボルト表層部に渦電流が生じ、これによりボルト上端面及び側面に電磁力が作用することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 木村貴圭, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎: 電磁パルス法による接着系あと施工アンカー固着部の非破壊評価手法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2116-2121, 2014
- 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, 2006

謝辞

動磁場解析 (EDDY) を実施するにあたり、(株) フォトンの小林篤史氏にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。