

# 論文 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

木村 貴圭\*1・内田 慎哉\*2・宮田 弘和\*3・鎌田 敏郎\*4

**概要:** 本研究では、アンカーボルト固着部の健全度を評価するため、アンカーボルトとコンクリート界面における接着剤の充填状況を変化させた供試体を対象として、著者らの既往の解析結果に基づき提案した電磁パルス法による計測を行った。その結果、定着プレート上のナットが緩んだ状態においては、電磁パルス法により得られた波形エネルギーと接着剤の充填率との間に相関があることがわかった。また、磁石を活用して静磁場下において動磁場を与える方法を新たに考案し、ナットで締結された状態においても、波形エネルギーや伝搬時間からアンカーボルト固着部における充填率の違いを的確に評価できることを明らかにした。

**キーワード:** 接着系あと施工アンカー、非破壊評価手法、電磁パルス法、波形エネルギー、伝搬時間

## 1. はじめに

道路構造物などの維持管理において、目視・打音・触診といった人間の感覚だけに頼る方法により点検・調査を行う場合には、得られる結果にばらつきが生じることや、健全度診断に必要となる情報が必ずしも十分に得られない可能性がある。また、得られる情報を定量的に記録することや履歴を管理することが困難であるなどの課題もあることから、点検の信頼性向上及び高度化のためには非破壊評価による点検技術の導入が望まれる。特にトンネルの天井板や大型道路標識などの重量構造物を吊り下げ支持するために用いられる接着系あと施工アンカーを適切に維持管理するための技術開発は急務となっている。

このような背景から、著者らは、電磁パルス法によりアンカーボルト固着部における接着剤の充填状況を非破壊で評価するための計測方法およびその際に着目すべき評価パラメータについて、衝撃応答解析を用いた検討を行っている<sup>1)</sup>。その結果、ボルト突出部に励磁コイルを設置して弾性波を入力し、コンクリート上で出力した波形から波形エネルギーおよび伝搬時間を求め、これらを評価パラメータとして用いることで、接着剤の充填状況を非破壊で評価できる可能性を見出している。

そこで本研究では、解析結果に基づいて提案した上記手法の妥当性を検証するために、アンカーボルト固着部における接着剤の充填状況を変化させた供試体を対象として、電磁パルス法に基づく測定を行った。なお、本論文では、既往の研究結果と本研究で得られた実験結果の両者を比較する必要があるため、著者らの解析結果<sup>1)</sup>を本論文の4章において一部引用している。

## 2. 電磁パルス法の概要

電磁パルス法の概要を図-1に示す。電磁パルス法では、励磁コイル（例えば電磁鋼板（鉄心）にマグネットワイヤを巻きつけたもの）にパルス状の大電流を流すことによりコイル周辺に瞬間的に磁場（動磁場）を発生させ、これにより生じる電磁力により、コンクリート内部に存在する鉄筋やアンカーボルトなどの強磁性体を非接触で振動させる。この方法では、調査対象部材の表面に設置した振動センサにて強磁性体の振動に伴って生じる弾性波を捉え、これを分析することにより、強磁性体界面の状態（欠陥や付着）を非破壊で評価することができる。

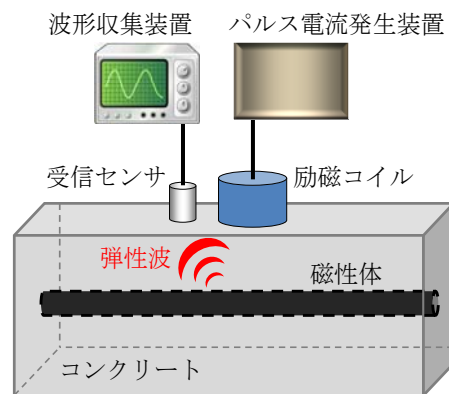


図-1 電磁パルス法の概要

\*1 立命館大学 理工学部環境システム工学科 (学生会員)  
 \*2 立命館大学 理工学部環境システム工学科講師 博士(工学) (正会員)  
 \*3 西日本高速道路株式会社 本社技術本部技術環境部技術統括課主任  
 \*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

### 3. 実験概要

#### 3.1 供試体

図-2 に供試体の概要を示す。供試体のコンクリート部分の寸法は、縦 1000mm×横 1000mm×厚さ 350mm とした。コンクリート部分には、トンネルの天井板を固定する接着系あと施工アンカーを想定して、まず、直径 24mm、深さ 130mm の穴を開けた。続いて、孔内に長さ 240mm のアンカーボルト (M16, SS400 相当材) をコンクリート表面から 110mm 突出するように設置した後、接着剤 (エポキシ樹脂) を流し込むことでボルトを固定した。接着材の充填パターンを図-3 に示す。本研究では、接着材の充填率として 4 水準 (25, 50, 75, 100%) を設けた。ここでいう充填率とは、孔内の全高 (削孔深さ) 130mm に対する硬化後の接着剤高さの百分率である。具体的には、例えば充填率が 25% のパターンでは孔内の底から高さ 32.5mm となるまで接着剤を注入している。以上の方法により、接着剤の充填率が異なるアンカーボルトを供試体 1 体に対して 4 本設置した (図-2 参照)。なお、コンクリートの設計基準強度は  $f_c=24\text{N}/\text{mm}^2$  とし、供試体内部にはアンカーボルト以外の強磁性体 (鉄筋) を設置していない。

いずれのアンカーボルトにおいても 100mm×100mm×厚さ 9mm の鋼製プレートを設置し、ナット 2 個によりプレートを固定できるようにした。

#### 3.2 電磁パルス法による計測の概要

写真-1 に計測概要を示す。励磁コイルは外径 35mm 内径 31mm の円筒形状となっており、コイル中央の空心部にアンカーボルトを貫通させ、コイル上端とボルト上端が一致するように設置した。このリング形状の励磁コイルに瞬間的に大電流を流し、動磁場を発生させることによりアンカーボルトを振動させた。なお、電流は、どの充填パターンにおいても S/N の高い信号をセンサで受信できるように約 3200A とし、計測ごとに電流値をモニタリングした。ボルトの振動に伴って生じた弾性波は、ボルト中心から 100mm 離れたコンクリート表面に貼り付けた振動センサにより受信した (写真-1 参照)。センサで受信した信号は、サンプリング周波数 2MHz でデジタル化した後、波形収集装置で記録した。記録した波形に対して、著者らの既往の解析結果<sup>1)</sup> で有効な評価パラメータとしている「波形エネルギー」および「伝搬時間」をそれぞれ算出した。これら評価パラメータの具体的な計算方法は 4 章で示す。なお、使用した振動センサは、15kHz~100kHz の間に応答感度を有し、特に 25kHz~80kHz の間では感度特性が比較的フラットな AE センサを使用している。

計測においては、いずれの充填率のパターンにおいても、測定回数を 10 回とし、評価パラメータのばらつきを

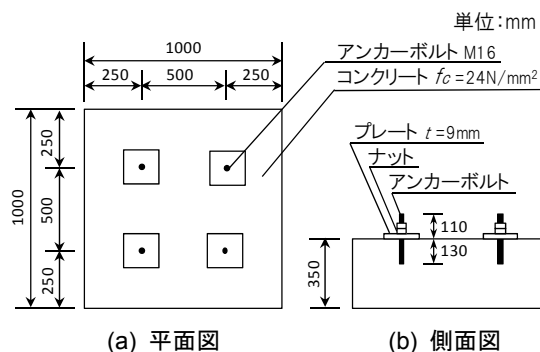


図-2 供試体概要

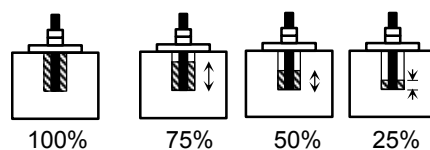


図-3 接着剤充填パターン

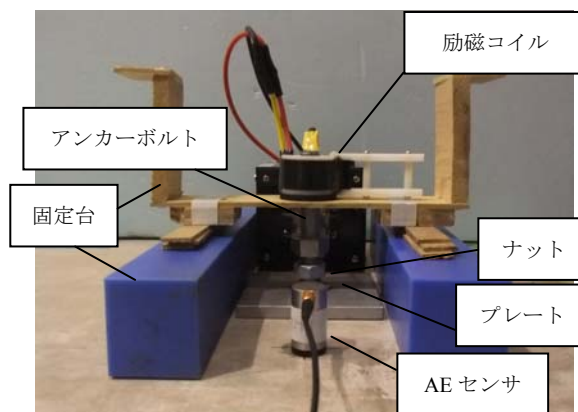


写真-1 電磁パルス法による測定状況

把握することとした。また、ナットの締結状態が評価パラメータに与える影響も把握することとした。具体的には、ナットを手で軽く締め付けた (緩んだ状態) 場合とトルクレンチによりナットを 80N・m で締め付けた場合の 2 ケースを設定した。なお、励磁コイルを設置してから 1 回目の計測を終了するまでの時間は約 3 秒である。

### 4. 実験結果

#### 4.1 受信波形および波形エネルギー

##### (1) ナットが緩んだ状態での測定結果

図-4 に、ナットが緩んだ状態で測定を行った場合における接着剤の各充填率で得られた受信波形の一例をそれぞれ示す。この図より、波形の最大振幅値が接着剤の充填率によって異なることが確認でき、充填率が小さくなるに従って波形の最大振幅値が小さくなる傾向を示した。充填率 100% では、アンカーボルトの振動に伴って生じた弾性波がボルト内部を深さ方向に伝搬し、接着剤

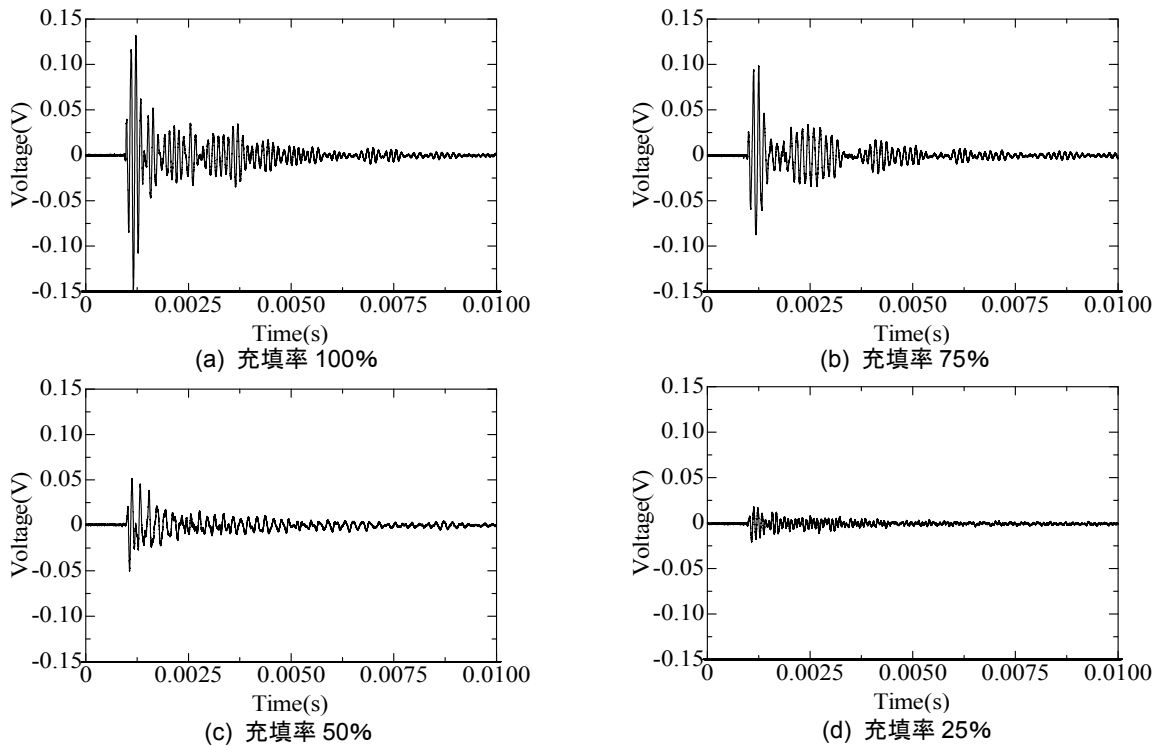


図-4 受信波形の一例（励磁コイルのみ）

を介してコンクリート部分に伝搬することになる（図-5 (a)参照）。一方、充填率 25%では、接着剤よりも空隙（接着剤未充填部分）が占める割合が大きく、弾性波は空隙部分へは透過せず、結果的にコンクリート部に伝搬する波の成分が小さくなる（図-5 (d)参照）。これにより、コンクリート表面で受信した波形の振幅に差異が生じたものと考察できる。

上記の考察を踏まえて、振幅の差異を定量的に把握するために、文献<sup>1)</sup>で定義している波形エネルギーを算出した。ここでいう波形エネルギーは、サンプリングする各点における振幅値の2乗和で表され、次式により算出される値である。

$$E = \sum_{i=0}^n y_i^2 \quad (1)$$

ここで、 $E$ ：波形エネルギー( $V^2$ )、 $y_i$ ：サンプリングする各点における振幅 ( $V$ )、 $n$ ：サンプリング数 ( $n=20,000$ ： $0 \sim 10,000 \mu s$ ) である。

図-6 に、算出した波形エネルギー比と接着剤の充填率との関係を示す。図に示す波形エネルギー比とは、接着剤の充填率 100%で算出した値に対する各充填率での値の比である。また、いずれの充填率においても、測定値の平均、最大・最小の範囲を同図に示している。この図より、充填率が大きくなると波形エネルギーも大きくなる傾向がみられた。前述のとおり、空隙部分の大きさの変化に伴い弾性波がアンカーボルトからコンクリート中へ伝搬する際の減衰に差異が生じたものと考えられる。

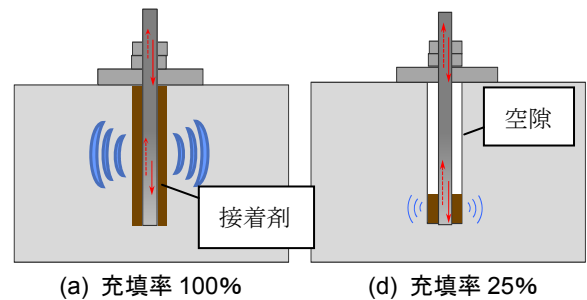


図-5 弾性波伝搬挙動イメージ

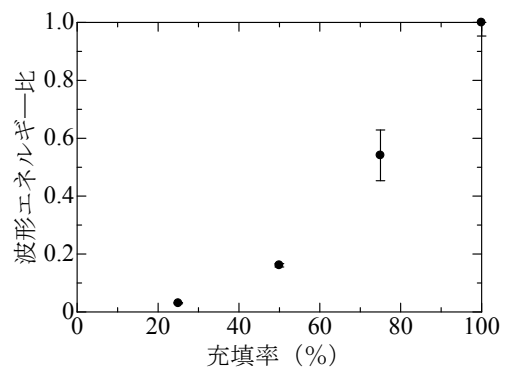


図-6 波形エネルギー比（ナット締結無し）

なお、充填率 75%における測定値のばらつきが大きい理由については現段階では不明であり、今後詳細に検討する必要がある。ただし、本実験で設定した4水準の充填率を把握する上では、判別結果に大きな影響を与えるものではない。

著者らの既往の解析結果を図-7<sup>1)</sup>に示す。図-6および図-7を比較すると、波形エネルギー比は解析値よりも実験値の方が小さい値を示しているものの、充填率に対する波形エネルギー比の変化傾向は同じであることがわかる。

(2) ナットで締結した状態での測定結果

図-8に、式(1)により算出した波形エネルギー比と接着剤の充填率との関係を示す。図中には解析結果を併せて示している。図-8に示す波形エネルギー比は、図-6に示す測定結果と同様に、充填率の増加にともない大きくなることを確認できる。しかもいずれの充填率においても実験値のばらつきは小さく、かつ実験値と解析値との差は、図-6におけるそれよりも小さくなっている。しかしながら、充填率75%と100%の波形エネルギー比は大小が逆転しており、充填率が高い場合には波形エネルギー比から充填率の違いを判別することは困難であることがわかった。これは、ナットで締結することによってプレートとコンクリートが接する面の圧力が大きくなることから、図-9に示すようにボルトを伝搬する弾性波がプレートからコンクリート表層へと伝搬しやすくなることに起因すると考えられる。つまり、ナットが緩んでいる場合にはボルトからアンカーボルト固着部へ伝搬する弾性波の影響をコンクリート表面の受信点で有効に捉えられるが、一方でナットで十分に締結されてプレートが固定される場合はコンクリート表層を伝搬する弾性波による影響が大きくなるため、コンクリート内部の充填率の違いを捉える感度が鈍くなることが推測される。

上記の考察を踏まえ、コンクリートに埋め込まれたアンカーボルト部分に振幅の大きな弾性波を伝搬させることが充填状況の評価のためには重要であると考えられる

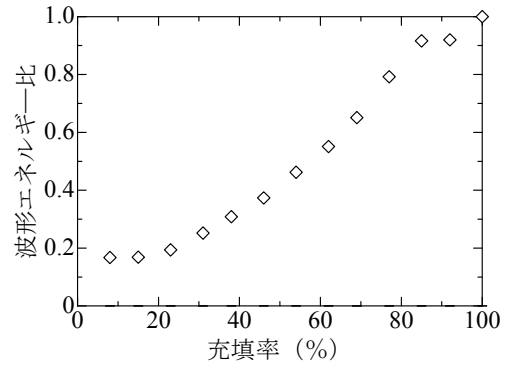


図-7 波形エネルギー比 (解析値)<sup>1)</sup>

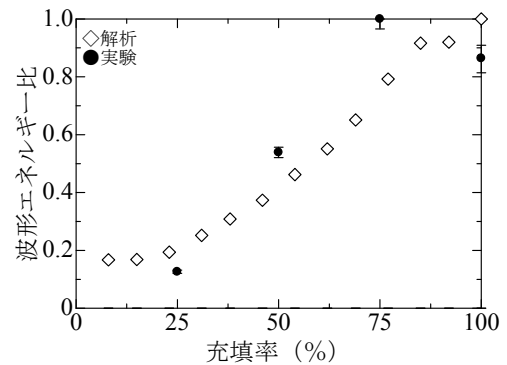


図-8 波形エネルギー比 (ナット締結有り)

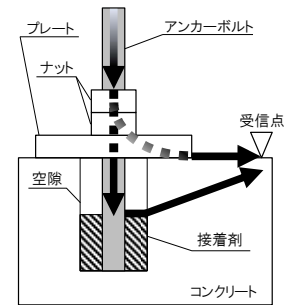
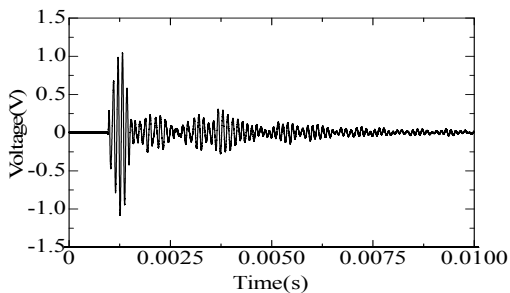
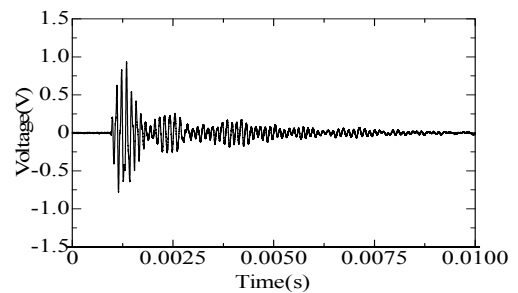


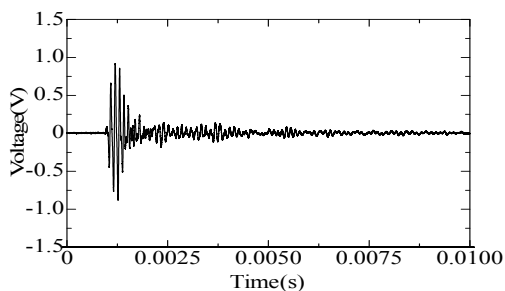
図-9 弾性波の伝搬経路のイメージ



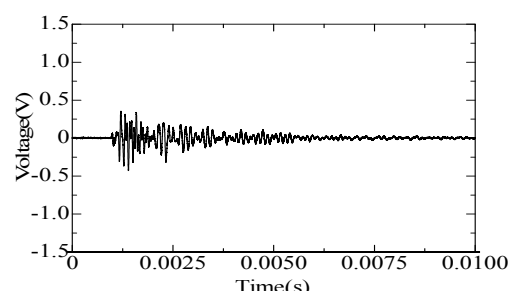
(a) 充填率 100%



(b) 充填率 75%



(c) 充填率 50%



(d) 充填率 25%

図-10 受信波形の一例 (励磁コイルと永久磁石を併用)

ことから、与える磁場の強さをより大きくする工夫をした上で計測を行うこととした。具体的には、アンカーボルト頭部にネオジウム磁石（永久磁石）を設置し静磁場を付与した状態で、リング形状の励磁コイルにより動磁場を発生させて、ボルト内部に弾性波を伝搬させる方法である。測定状況を写真-2に示す。なお、この測定条件については、永久磁石を用いることを除けば3.2と全て同じであり、得られた受信波形の一例を図-10に示す。この図より、いずれの充填率の場合においても図-4に示す波形よりも10倍程度大きな振幅が得られていることがわかる。また、この測定方法により得られた波形エネルギー比を図-11に示す。ナットで締結した場合においても充填状況に応じて波形エネルギー比が一定の割合で大きくなることが確認でき、さらには同一の充填率における10回の測定値のばらつきは4水準の充填率の違いを把握する場合においては影響の無い範囲であることも明らかとなった。

以上のことから、プレートが設置され、さらにナットで締結された状態においても接着剤の充填率が把握可能なことから、永久磁石の併用は現場への適用性の観点からも有意と考えられる。

#### 4.2 伝搬時間

ここでは、初動波がセンサに到達するまでの伝搬時間に着目した。ここでの伝搬時間は、動磁場を発生させた時刻から弾性波がセンサに到達する時刻までの経過時間で表すこととした。このうち前者の動磁場を発生させた時刻は、電磁パルス発生装置で印加する電圧にトリガーを設定することにより自動的に抽出するようにした。一方、後者の弾性波到達時刻は、一般的には手作業あるいはしきい値により決定する 경우가多いが、本研究では文献<sup>2)</sup>を参考にして、波形をノイズ部分と対象物を伝搬した信号部分に分けることができる点を弾性波到達時刻とした。なお、この点は赤池情報量規準 (Akaike Information Criteria, AIC) により決定することができ、任意の点  $i=k$  での  $AIC_k$  は次式によって算出される値である。

$$AIC_k = k \cdot \log\{\text{var}(X[1, k])\} + (N - k) \cdot \log\{\text{var}(X[1, N])\} \quad (2)$$

ここで、 $N$ : 波形のサンプル数、 $X_i$ : 振幅値 ( $i=1, 2, \dots, N$ )、 $\text{var}(X[1, k])$ : 振幅値  $X_1$  から  $X_k$  の分散、 $\text{var}(X[k, N])$ : 振幅値  $X_k$  から振幅値  $X_N$  までの分散である。図-12に受信波形の一例とその波形に対して式(2)を適用して得られたAIC値を示す。図-12(b)は、図-12(a)の弾性波到達時刻部分を拡大したものを示している。この図より、 $AIC_k$  が最小値を示す部分が波形の到達時刻と考えることができ、これを利用することで波頭の読み取りにおける客観性 (再現性) を確保した。なお、到達時刻の読み取りは次式によって行った。

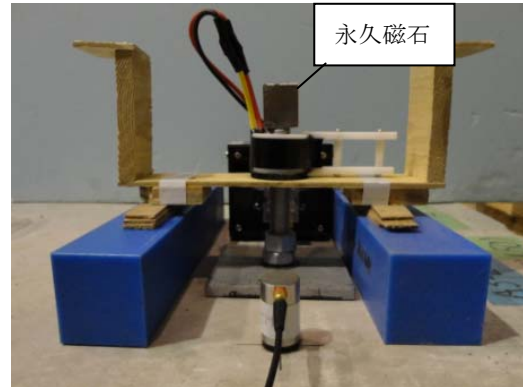


写真-2 永久磁石を併用した電磁パルス発生状況

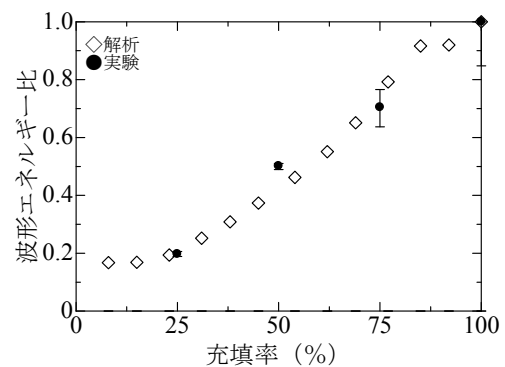
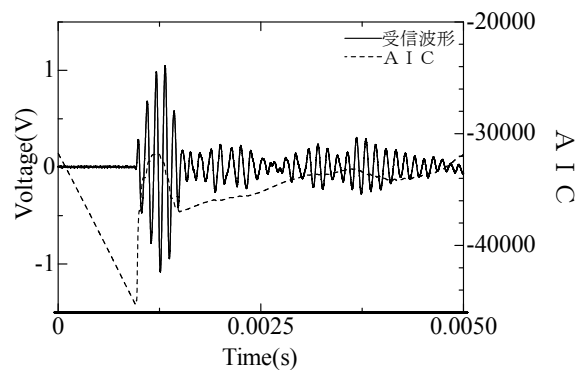
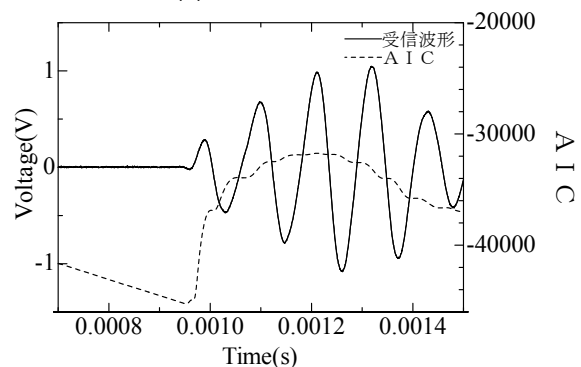


図-11 波形エネルギー比 (ナット締結有り, 永久磁石を併用)



(a) 受信波形全体



(b) 波頭部を拡大

図-12 受信波形とAIC値の例



$$p = T_k \{ \text{Min}(AIC_k) \} - \Delta T \quad (3)$$

ここで、 $T_k \{ \text{Min}(AIC_k) \}$  : AIC が最小値を示す  $i=k$  の時間、 $\Delta T$  : サンプル間隔である。

図-13 に、ナットで締結された状態における接着剤の各充填率で得られた伝搬時間を示す。励磁コイルのみを用いて動磁場を発生させることにより弾性波を入力した場合は、充填率 25%とそれ以外の充填率の判別が可能であるが、充填率 50%以上での伝搬時間の差異は明瞭でない。これに対して永久磁石で静磁場を印加した上で動磁場を発生させる写真-2 に示す方法の場合では、伝搬時間は充填率の増加に伴い徐々に減少する傾向があり、伝搬時間から充填率の違いを把握できる可能性があることが明らかとなった。なお、充填率を評価するための指標の感度としては、伝搬時間よりも波形エネルギーの方が高いと考えられる。

## 5. まとめ

著者らの既往の解析結果に基づいて提案した「電磁パルス法によるアンカーボルト固着部の接着剤の充填評価手法」の妥当性を検証するために、接着剤の充填状況を変化させた供試体を対象として、電磁パルス法に基づく測定を行った。その結果、本研究で明らかとなった結論を以下にそれぞれ示す。

- (1) アンカーボルトにプレートが設置され、ナットが緩んだ状態においては、電磁パルス法に基づく測定により得られた波形エネルギーと接着剤の充填率との間に相関があり、これにより充填程度を評価できることがわかった。
- (2) ボルトがナットで十分に締結された状態においては、既往の解析に基づき提案した手法では、接着剤の充填率が 50%程度以下の場合は充填状況の違いを把握できる可能性があることが示されたが、充填率が 75%程度以上と高い場合では充填状況の違いを明確に把握することが困難であった。
- (3) しかしながら、永久磁石（静磁場）を併用することで磁場の強さを高める方法を用いれば、コンクリート表面で受信される波形エネルギーから本研究で用いた 4 つの充填率（25, 50, 75, 100%）をそれぞれ区別できる可能性があることを明らかにした。

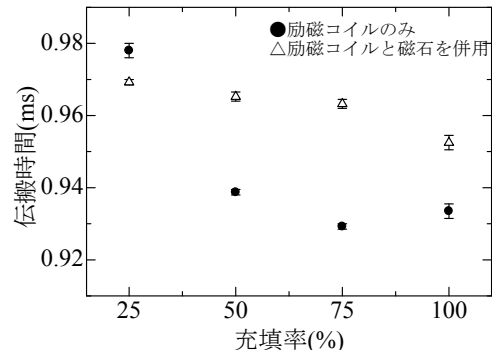


図-13 伝搬時間（ナット締結有り）

今後は、現地での測定を行い、本研究で新たに提案した静磁場と動磁場を併用した新しい電磁パルス法によるアンカーボルト固着部における接着剤充填度の評価手法の実構造物に対する適用可能性を検証する予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（B）25289132）の援助を受けて行なったものである。実験で使用した電磁パルス法の装置は、株式会社アミックの長岡康之氏、三輪秀雄氏、高鍋雅則氏に多大なるご助力を頂いた。また、実験の実施およびデータ整理では、大阪大学大学院の西上康平君、劉軒君にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 西上康平, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和, 劉軒 : 電磁パルス法によるアンカーボルト固着部の健全度評価に関する基礎的検討, 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 13 巻, pp.209-214, 2013
- 2) 大野健太郎, 赤坂康太, 大津政康 : AE 波初動部自動読み取りによるコンクリート材料の曲げ破壊過程の SiGMA 解析, 第 17 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp.53-56, 2009