

論文 電磁パルス法による接着系あと施工アンカーボルト固着部の接着剤の充填状況の評価手法

前川 晴香*1・内田 慎哉*2・鎌田 敏郎*3・宮田 弘和*4

要旨：コンクリート中に埋め込まれた近接する 2 本のアンカーボルトの固着部の健全度を非破壊でそれぞれ評価するため、ボルト頭部に設置した励磁コイルにより動磁場を励起し、生じたボルトの挙動をボルト頭部に設置したレーザードップラ振動計で受信する電磁パルス法を適用し、ボルト周辺の接着剤の充填状況の評価方法に関して検討を行った。その結果、レーザードップラ振動計で受信した波形や周波数スペクトルの特徴から、ボルトが近接し、かつナットでボルトやプレートが締結された状態においても、アンカーボルト固着部における接着剤の充填率の違いを評価できることを明らかにした。

キーワード：アンカーボルト、非破壊試験、電磁パルス法、レーザードップラ振動計、縦波共振周波数

1. はじめに

あと施工アンカーは、標識などの付帯設備を取り付けるため母材コンクリートを削孔し、その孔内にボルトを挿入して固着させるものである。したがって、所要の性能を満足するためには、アンカー本体を構成する部位やアンカー周辺の母材コンクリートはもとより、接着系アンカーでは接着剤の充填状態が良好であることが前提となる。これまでに著者らは、接着剤の充填状態を非破壊で評価するため、ボルト頭部に設置した励磁コイルにより動磁場を励起し、生じたボルトの挙動をボルト頭部に設置したレーザードップラ振動計で受信する「電磁パルス法」を適用し、評価に有効な弾性波特性を把握する試みを行っている¹⁾。その結果、レーザードップラ振動計で受信した弾性波の周波数スペクトルの特徴から、ナットでボルトやプレートが締結された状態においても接着剤の充填率の違いを把握できることが明らかとなった。しかしながら、トンネルの天井板やジェットファンに使用するあと施工アンカーなどでは、プレート 1 枚に対して複数のボルトを使用して対象物を固定している場合が多い。そのため、評価対象であるボルト周辺に、同様のボルトが存在する場合の本手法の適用性については、検討の余地を残していた。

そこで本研究では、コンクリート中に埋め込まれた近接する 2 本の接着系あと施工アンカーをそれぞれ対象として、電磁パルス法によりアンカーボルトを加振し、レーザードップラ振動計によりボルトの振動を受信する測定方法から、各ボルト固着部の接着剤の充填状況の評価方法を検討した。

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、アンカーボルトなどの強磁性体を非接触で振動させる。アンカーボルトの頭部表面にレーザー光をレーザードップラ振動計により照射することで、強磁性体の振動に伴って生じる弾性波を受信し、これを分析することにより、強磁性体周辺の接着剤の充填率を非破壊で評価することができる。

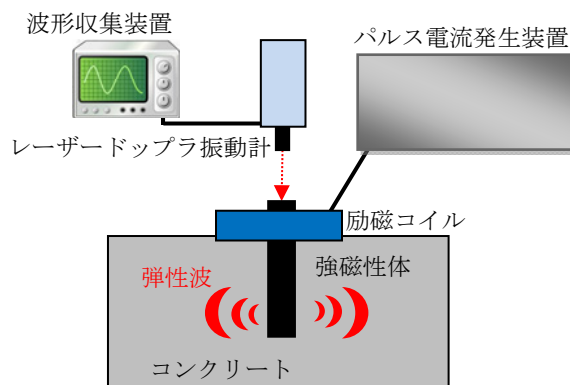


図-1 電磁パルス法の概要

3. 実験概要

3.1 供試体

図-2 に供試体の概要を示す。コンクリート部分の寸法は、縦 1000mm×横 1000mm×厚さ 350mm とした。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、コンクリート部分に直径 24mm、深さ

*1 立命館大学 理工学部環境システム工学科 学生 (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 (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)

*4 西日本高速道路株式会社 本社技術本部技術統括課

130mm の穴を 8 箇所削孔した。続いて、孔内に長さ 240mm のアンカーボルト (M16, SS400 相当材) を 8 本、コンクリート表面から 110mm 突出するようにそれぞれ設置した後、接着剤 (エポキシ樹脂) を流し込むことでボルトを固着させた。本研究では、接着材の充填率として 4 ケース (25, 50, 75, 100%) 設定した。ここでいう充填率とは、接着材の充填率のケースを **図-3** の全高 (削孔深さ) 130mm に対する硬化後の接着剤高さ (**図-3** 中の h) の百分率である。具体的には、例えば充填率が 25% のケースでは、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、**図-2** に示すとおり、充填率ごとにアンカーボルトを 2 本設置した。なお、同一充填率における、2 本のボルトを区別するために、各ボルトの名称を「ボルト A」および「ボルト B」とし、ボルト A の中心位置からボルト B の中心位置までの距離は、いずれの充填率においても 100mm とした (**写真-1** 参照)。コンクリートの設計基準強度は $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 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) は設置していない。また、鋼製プレートとナット 4 個も別途用意し、**写真-1** に示すように

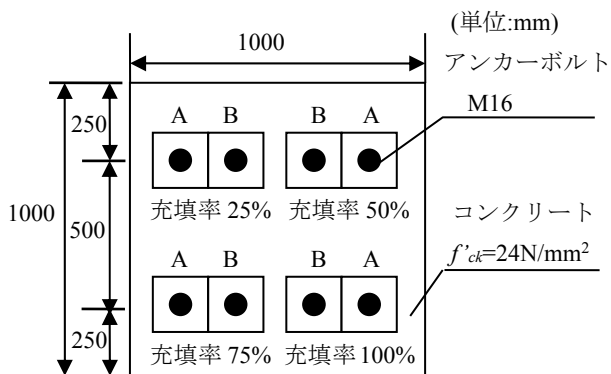


図-2 供試体概要 (平面図)

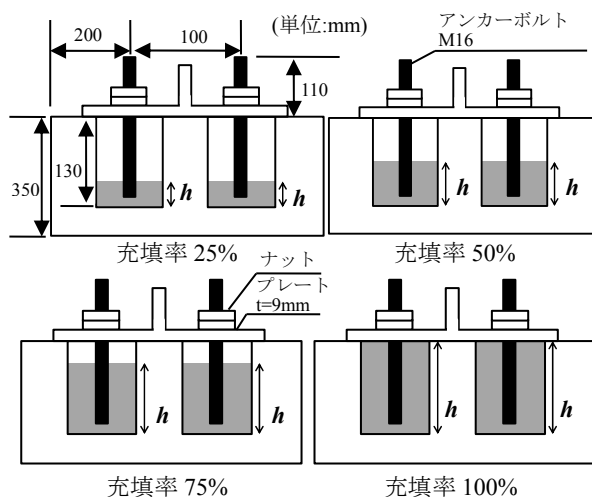


図-3 供試体概要 (側面図) と接着剤の充填パターン

鋼製プレート 1 枚を 2 本のアンカーボルトで固定できるようにした。

3.2 電磁パルス法による計測

図-4 に測定状況を示す。励磁コイルは外径 35mm、内径 24mm、厚さ 11mm (導線部の厚さを含む)、高さ 27mm の円筒形状である。コイル上端とボルト上端が一致するように励磁コイルを設置した。励磁コイルに瞬時的に大電流 (3000A) 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。ボルトの振動に伴って生じた弾性波は、ボルト頭部に設置したレーザードップラ振動計 (以下、LDV 計とする) により受信した。ボルト頭部の表面にレーザーを垂直に照射することで、振動する反射面の速度の垂直成分を測定した。照射面の振動信号は、サンプリング周波数 2MHz で電圧の時刻歴波形として波形収集装置に記録した。なお、LDV 計では、S/N 比が反射光の強さに依存するため、光を入射方向に強く反射させる性質をもつ反射シールを照射面であるボルト頭部表面に貼付けた。記録した波形から、「波形エネルギー」および「周波数スペクトル」をそれぞれ算出した。この指標の具体的な計算方法は 4.1 で説明する。

測定においては、いずれの充填率のケースにおいても、測定回数を 5 回とし、評価指標のばらつきを把握するこ

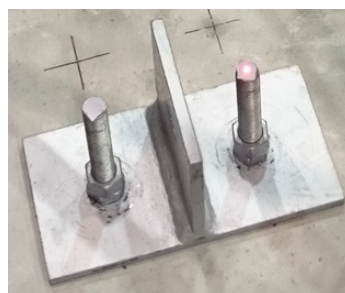


写真-1 鋼製プレートの固定状況

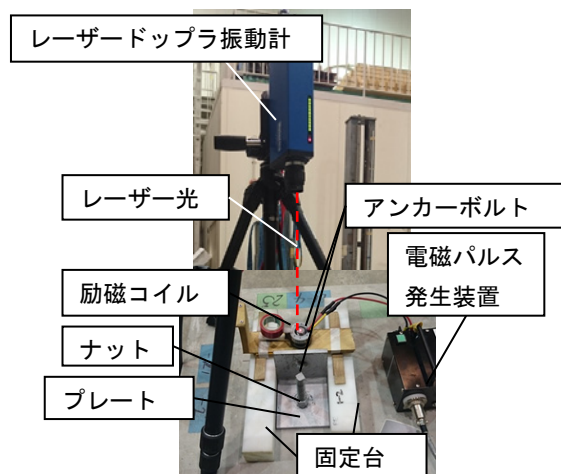


図-4 電磁パルス法による測定状況

ととした。また、いずれの充填率においても、ボルトの基本的な振動特性を把握するためにナットとプレートを設置しない場合と、両者を設置した上でトルクレンチにより 80N・m でボルトを締め付けた場合の 2 ケースを設定した。

4. 実験結果および考察

4.1 ボルトのみの状態で測定した場合

受信波形の一例を図-5 に示す。いずれの場合においても、初動波の振幅は全て正の値を示し、周期的な波が時間の経過とともに減衰していくことが確認できる。実験で使用した LDV 計は、測定対象物が LDV 計に対して近づく方向に速度が増加する場合を正の値としている。したがって、動磁場を発生させた直後においては、充填状況に関わらず、主に磁氣的な力により、ボルトが軸方向 (LDV 計の方向) あるいは軸直角方向のいずれかに変形していると考えられる。

ここで、充填率ごとに受信波形を比較すると、充填率が大きいほど波形の減衰が大きくなる傾向が見られる。接着剤の充填率が大きくなることにより、ボルトの自由長が短く振動の振幅が小さくなり、コンクリートへ伝搬しやすいためと考えられる。ここで、受信波形における振幅の差異を定量的に把握するために、波形エネルギーを算出した。波形エネルギーとは、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。

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

ここに、 E : 波形エネルギー (V^2)、 y_i : サンプリング点における各振幅 (V)、 n : サンプリング数 ($n=20,000 : 0 \sim 10,000\mu\text{sec}$) 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% で算出した値の平均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、充填率が小さくなると波形エネルギーが大きくなる傾向がみられる。しかも、いずれの充填率においても、ボルト A とボルト B での波形エネルギーの値は、概ね同じ値となっている。加えて、各充填率・各ボルトにおける 5 回測定の際のばらつきは極めて小さく、評価指標の再現性は極めて高い。以上のことから、波形エネルギーを相対的に比較すれば、明らかに充填率の小さいアンカーボルトを検出できる可能性があることが明らかとなった。

図-7 に、図-5 に示す受信波形の波頭部を拡大したものを示す。同図には、測定時にモニタリングした入力

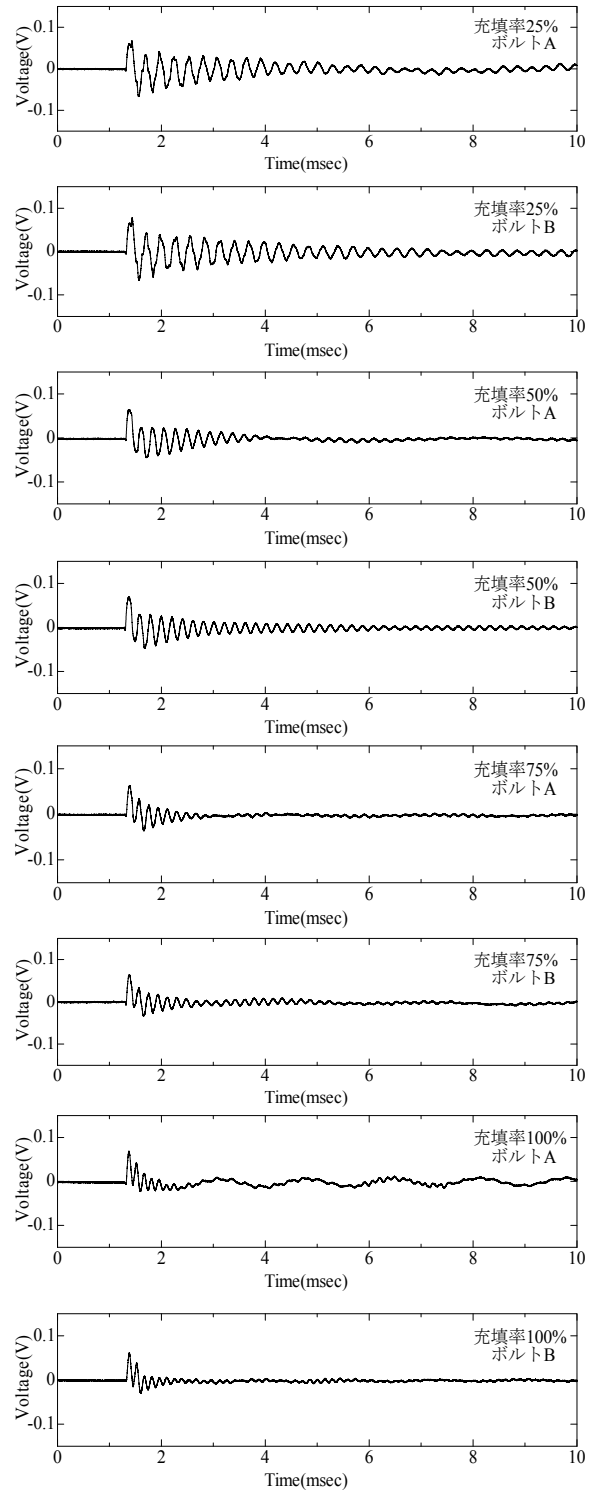


図-5 受信波形の例(ボルト単体)

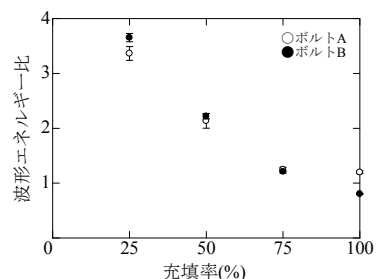


図-6 波形エネルギー比(ボルト単体)

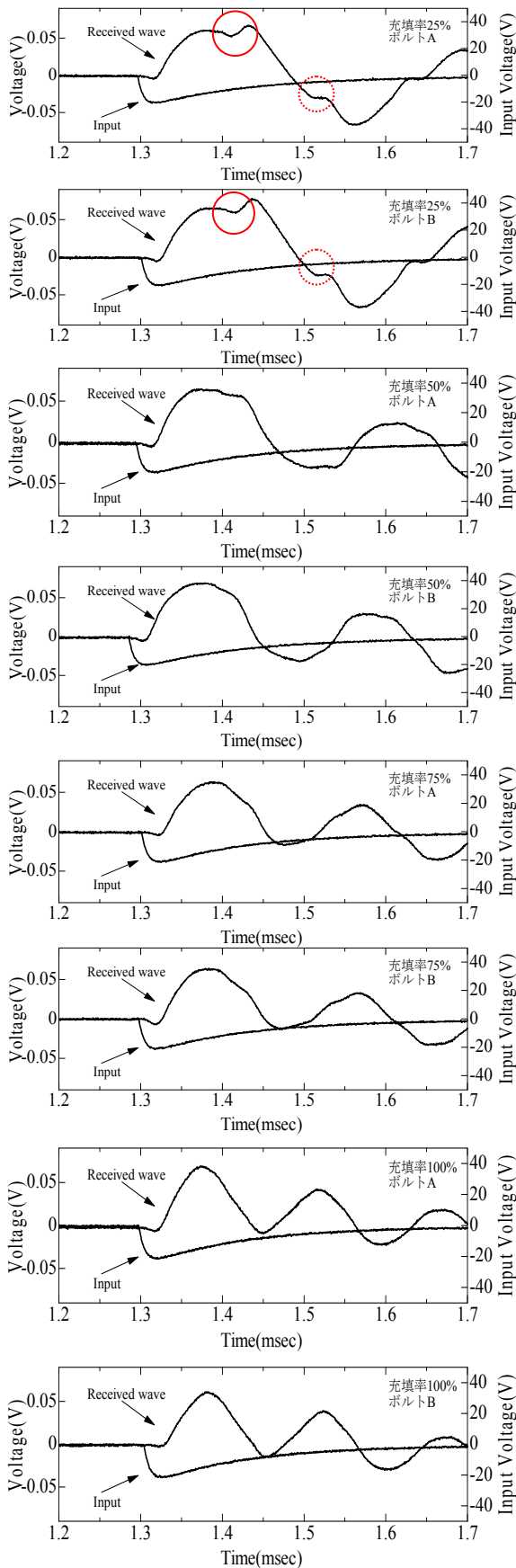


図-7 受信波形(図-5)の波頭部拡大

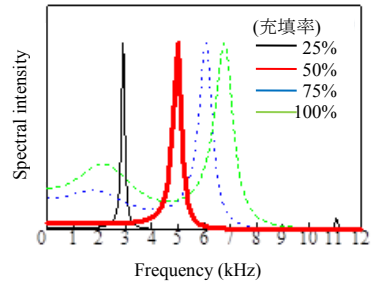
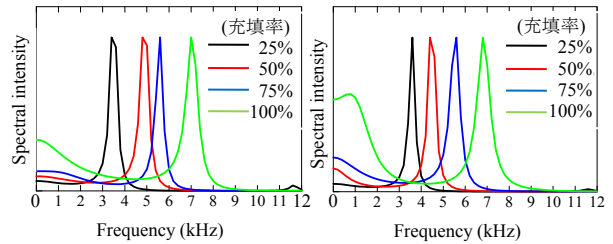


図-8 周波数スペクトル (ボルト単体・1本)¹⁾



(a) A側ボルト (b) B側ボルト

図-9 周波数スペクトル(ボルト単体・2本近接)

電圧波形も併せて示している。入力電圧波形に着目すると、いずれの場合も、動磁場発生時刻(入力電圧波形における電圧振幅の立上り時刻)からおよそ $20\mu\text{sec}$ 後に入力電圧は最大値に達し、その後ピーク値の2割程度に減じるまでの時間は約 $150\mu\text{sec}$ であり、再現性の高い安定した入力が行えていることが確認できる。一方、LDV計で測定した受信波形については、充填状況によって波形形状が若干異なる部分がある。具体的には、図-7に示す。充填率25%のボルトAおよびボルトBの実線および点線丸印部分である。図より、実線丸印の時刻は約 1.4msec であり、その部分に波形の乱れ(ひずみ)が確認できる。同時刻では入力電圧がピーク値の4割程度にまで低下していることを考慮すると、入力による影響(例えば、動磁場)であるとは考えにくい。ボルト頭部で励起された弾性波がボルト底部で反射し、これが頭部に再度伝搬したことによりひずみが生じたものと推察される。動磁場発生時刻からひずみが生じた時刻までの時間が約 $90\mu\text{sec}$ であり、弾性波がアンカーボルト(長さ 240mm)を往復していると仮定したときの速度は約 5333m/s となり、鋼製の棒材を伝搬する縦波の弾性波速度と概ね一致する¹⁾。また、ひずみが初めて出現した時刻から約 $90\mu\text{sec}$ 後にもひずみが生じていることが確認できる(図-7の点線丸印)。したがって、受信波形上においてひずみが生じた充填率の場合は、ボルトを軸方向に往復して伝搬する弾性波を捉えている可能性がある。

ここで、著者らの既往の研究¹⁾を参考にすれば、励磁コイルによりボルト内に入力された弾性波は、接着剤を介して母材コンクリートへ伝搬する。したがって、充填

率が比較的大きい場合は、ボルトを伝搬した弾性波はコンクリートへと伝搬することになる。これに対して、接着剤の充填率が低い場合は、コンクリートへ伝搬する波の成分が少なくなり、逆にボルトのみを伝搬する波の成分が多くなる。そのため、ボルト内の伝搬した波の多重反射により波形にひずみが生じたものと解釈できる。したがって、受信波形におけるひずみの有無から充填率の違いを把握できる可能性がある。

図-8及び図-9に、受信波形の周波数スペクトルを示す。周波数スペクトルの算出方法には、最大エントロピー法を適用した¹⁾。なお、スペクトル推定に用いる予測誤差フィルタの次数 m は AIC (赤池情報量規準) に基づき決定した。また、充填率ごとのピークの出現状況の比較を容易にするため、出力範囲内のスペクトル強度を、最大強度値で除して正規化したものを図示している。図によれば、いずれのボルトにおいても、各充填率において明瞭な単独の鋭いピークが出現している。しかも、充填率が大きくなると、ピークが高周波数側にシフトしている。ここで、アンカーボルトの振動は、接着剤部分を固定端、他方のボルト先端を自由端とした片持ち梁の振動挙動を示すと仮定して、1次振動モードの固有振動数を算出した。計算結果を表-1に示す。表より、測定結果(周波数スペクトル上のピーク位置の周波数の値)と計算値とは概ね一致するものもあるが、多少異なる値を示す場合(特に、充填率100%の場合)もあった。これは、接着剤で固着される場合は接着剤の剛性による影響を受けるため固定端の条件とする計算値とは一致しないことが要因の一つであると推測する。しかしながら、値は多少異なる場合があるものの、充填率が大きくなると(ボルトの自由長が短くなる)、周波数スペクトル上のピークが高周波側にシフトする傾向は、片持ち梁の固有振動と仮定した計算値での傾向と合致している。

ここで、8kHz以上の周波数範囲に着目すると、充填率25%の場合にのみ、いずれのボルトにおいても、11kHz周辺に若干ではあるがピークが出現していることが確認できる。ここで、前述の波の多重反射により出現するピーク周波数(縦波共振周波数)の理論値は以下の式により算出できる。

$$f = \frac{V_p}{2L} \quad (2)$$

ここで、 f : 縦波共振周波数 (Hz)、 L : ボルトの長さ(m)、 V_p : 縦波速度 (m/s) である。

式(2)より、理論値は約 11kHz となり、図-8に示す 11kHz 付近のピークと概ね一致している。したがって、図-7に示す受信波形において出現したひずみはボルト内部を伝搬する波の多重反射であることが明らかとなった。ここで、著者らの既往の研究¹⁾で得られたボルト1

表-1 片持ち梁1次モードの固有振動数

充填率	自由長(mm)	計算値 (kHz)	A側測定値 (kHz)	B側測定値 (kHz)
25%	208	2.7	3.5	3.4
50%	175	3.8	4.4	4.8
75%	143	5.7	5.6	5.6
100%	110	9.6	6.8	7.0

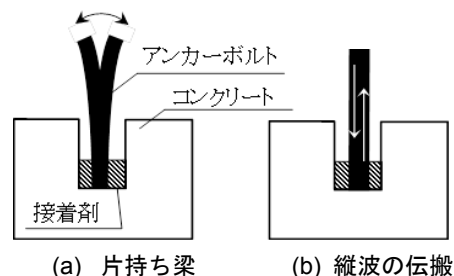


図-10 振動挙動イメージ

本(プレートとナットは取り付けしていない状態)での周波数スペクトル(図-9参照)と図-8との比較より、片持ち梁の1次の固有振動数および縦波共振周波数は概ね同様の傾向を示していることから、本研究で提案する手法は、ボルト2本が近接する場合においても、その影響は少なく、十分に適用できるものと考えられる。

以上より、ナットとプレートを設置せずボルトだけの状態に対して本手法で測定する場合は、図-10に示すような片持ち梁の振動モードに類似した挙動に加えて、ボルト軸方向を伝搬する波の挙動も同時に捉えていることがわかった。したがって、両者の挙動に着目すれば、ボルト周辺における接着剤の充填状況を把握できる可能性がある。

4.2 プレートとナットを設置してボルトを締め付けた状態で測定した場合

ナットをトルクレンチで締め付けた状態での測定から得られた受信波形の例を図-11に示す。アンカーボルトだけの状態で測定した結果(図-5参照)においては、充填率の変化に伴って波形の減衰特性が異なる傾向が見られたが、図-11ではいずれの充填パターンにおいても受信波形は類似の形状を示しており、波形形状を一見するだけでは充填状況を判別することが困難であることがわかる。

図-12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。図より、いずれのボルトにおいても、充填率と波形エネルギーに相関がないことがわかる。したがって、ナットで十分に締結された状態においては、ボルト頭部で得られた波形エネルギーを指標とした場合、充填率の検出感度は鈍いことが明らかとなった。

図-13に周波数スペクトルを示す。プレートとナット

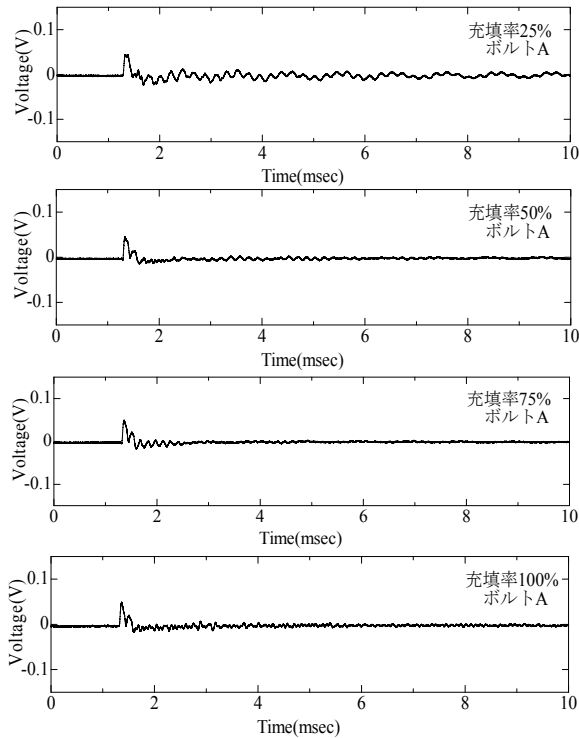


図-11 受信波形の例(トルクあり・ボルトA)

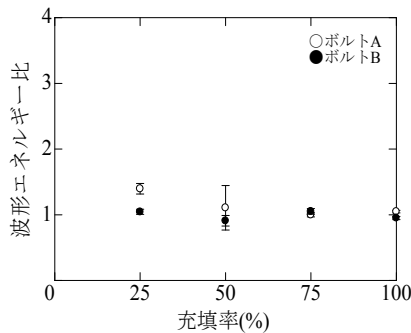


図-12 波形エネルギー比(トルクあり)

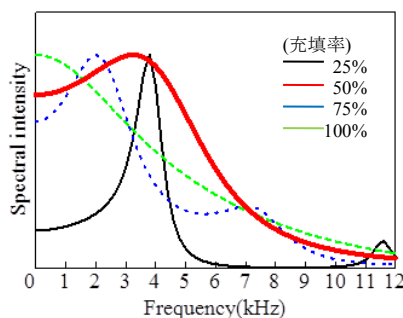


図-13 周波数スペクトル(トルクあり・1本)¹⁾

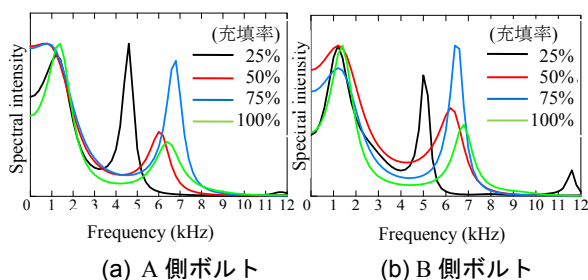


図-14 周波数スペクトル(トルクあり・2本近接)

が無いボルトだけの状態で振動を測定する場合(図-8参照)は、充填率が大きくなると片持ち梁の固有振動数であるピークが高周波数側へとシフトする現象がみられたが、ナットで十分に締結されるとこうした特徴が見られなくなった。しかしながら、いずれのボルトにおいても、12kHz周辺のピークの存在に着目すると、図-8に示す周波数スペクトルと同様に、充填率25%において縦波共振周波数のピークが出現していることがわかる。ここで、著者らの既往の研究¹⁾で得られたボルト1本(プレートとナットは取り付けている)での周波数スペクトルを図-14に示す。図-14と図-13との比較より、いずれの場合においても、充填率25%の場合のみ、ボルトを伝搬する弾性波の多重反射による縦波共振周波数が12kHz付近に出現している。したがって、ボルト2本が近接する場合においても、縦波共振周波数に着目すれば、近接するボルトの影響を受けることなく、本手法により充填率が25%程度以下の低いものを検知できることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) レーザードップラ振動計によりアンカーボルト頭部で受信する方法では、片持ち梁の振動モードに類似した挙動に加えて、ボルト軸方向を伝搬する弾性波の挙動も同時に捉えている事が明らかとなった。
- (2) 受信波形上に出現するひずみや周波数スペクトル上における縦波共振周波数に着目すれば、ボルトが近接し、かつナットでボルトやプレートが締結された状態においても、アンカーボルト固着部の充填率が25%程度以下の低いものを検出できる事がわかった。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究(B)25820194)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

- 1) 劉軒, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和, 木村貴圭: アンカーボルト固着部の健全度の電磁パルス法による非破壊評価手法, 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14巻, pp.87-94, 2014