

論文 質点系力学モデルの振動挙動に着目した接着系あと施工アンカーの非破壊評価に関する理論的検討

服部 晋一*1・寺澤 広基*2・吉田 風雅*3・鎌田 敏郎*4

要旨：接着系あと施工アンカーボルトの施工不良として、埋込部の充填量不足、埋込長不足を対象に質点系力学モデルを導入し、振動挙動による非破壊評価に関する理論的検討を行った。まず、ボルト固着部の充填量不足、埋込長不足状態を埋込長、付着長の組合せで模擬し、付着長の変化がボルト頭部の振動挙動に及ぼす影響を理論的に評価した。次に、固着部の充填量不足、埋込長不足を識別する評価指標として、波形エネルギーとピーク周波数に着目し、埋込長、付着長との関係を理論的に考察した。その結果、波形エネルギー、ピーク周波数により充填量不足、埋込長不足を評価する手法の妥当性が明らかになった。

キーワード：あと施工アンカー、施工不良、非破壊評価、質点系力学モデル、波形エネルギー

1. はじめに

あと施工アンカーは、付帯設備の設置、既設建造物の補修や補強などに利用され、比較的容易に設置が可能であることから、道路、鉄道などの橋脚や、トンネルなど多くの建造物で使用されている。しかしながら、2012年に発生した笹子トンネル天井板落下事故を契機に、あと施工アンカーの施工不良に対する検査の必要性が改めて認識され、近接目視や打音検査などが規程化されている。このような施工不良を非破壊で評価するため、筆者らはこれまで、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、これにより発生したボルトの振動応答をレーザードップラ振動計や AE センサで計測する電磁パルス法を適用し、ボルト頭部や母材コンクリートに伝播する弾性波の波形エネルギーや周波数応答のピーク周波数から健全性を評価する手法の検討を行ってきた^{1),2)}。しかしながら、施工不良に対応する埋込長や付着長などのパラメータとこれらの評価指標との関係を理論的に考察した事例はなく、いずれも実験的な検討に留まっている。

本論文は、このような状況を背景に、施工不良を物理モデルで模擬し、その振動挙動を理論的に把握することにより、施工不良のパラメータと評価指標との関係を定量的に明らかにすることを目的とした。具体的には、埋設されたあと施工アンカーを質点系力学モデルで模擬し、ボルト固着部の充填量不足、埋込長不足状態を質点、バネ系で近似することにより、これらの特性値の変化がボルト頭部の振動応答に及ぼす影響を理論的に明らかにした。また、これらと波形エネルギーおよびピーク周波数との関係を理論的に考察し、既往の実験により得られた結果と照合することでモデル化の妥当性を評価した。

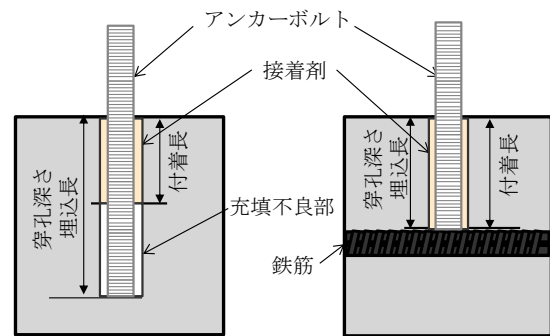
2. あと施工アンカーの力学モデル

2.1 対象とする施工不良

本研究で対象とするボルト固着部の充填量不足、埋込長不足を図-1に示す。

(1) 接着剤の充填量不足

ボルト固着部の充填量不足は、穿孔深さ、およびボルトの埋込長が適正で、接着剤の充填量が不足する場合を対象としている。この際、アンカーボルトの施工は上向き施工を前提に、接着剤が穿孔部の開孔部に充填されているものとした(図-1(a))。一方、接着剤が穿孔部の奥に局在し開孔部が未充填の場合は、目視により施工不良が容易に検出できるため、本研究の対象外とした。



(a) 接着剤の充填量不足 (b) 埋込長不足

図-1 対象とする施工不良

(2) 埋込長不足

埋込長不足は母材のコンクリートにおける配筋や、埋設物の存在により、穿孔深さがボルト径に対応した適切な深さに到達せず、ボルト長が短く施工された場合を対象とした(図-1(b))。この際、接着剤は穿孔部全体に充

*1 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 特任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*3 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 博士前期課程

*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)

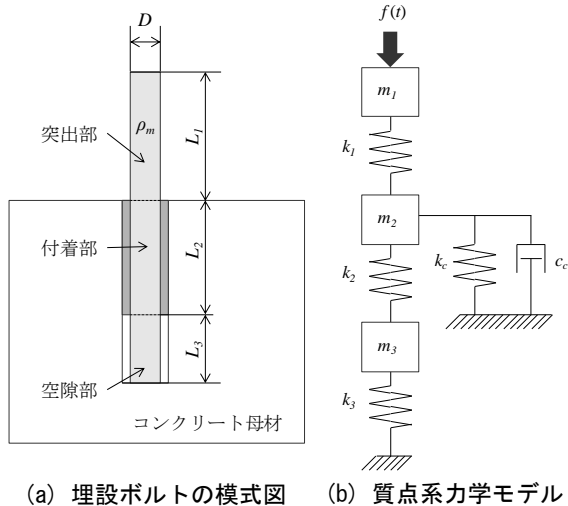


図-2 埋設ボルトのモデル化

埋されているとし、付着長も埋込長に等しいとした。

2.2 質点系力学モデル

以上対象とする施工不良に対して、質点系力学モデルを導入した(図-2)。本モデルは、弾性体を質点がバネにより接続されている要素として近似し、それぞれの要素がさらに相互に接続されているものとして振動方程式を立式する。図-2(a)は埋設ボルトの模式図を示す。図中の表記はそれぞれ突出部、付着部、空隙部の寸法、密度を表している。ここで図-2(a)に示す各部位でそれぞれ質量を1質点に集中させ、各質点は軸方向の振動だけを生じるものとする、図-2(b)に示すモデルになる。図中、付着部におけるボルトとコンクリート母材間の接着剤は、コンクリート母材と同じ特性を有するものとし、コンクリート母材を表すバネ、および減衰係数の抵抗要素で母材に接続されているものとした。

(1) モデル化における特性値の設定

突出部、付着部、空隙部の質量、およびバネ係数を式(1)に示す。バネ係数は、フックの法則より導出した。

$$\begin{aligned} m_i &= \pi \rho_m D^2 L_i / 4 \\ k_i &= \pi E_m D^2 / 4 L_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 m_i :各部位の質量、 ρ_m :ボルト密度、 k_i :各部位のバネ係数、 E_m :ボルトの縦弾性係数、 L_i :各部位のボルト長である($i=1\sim 3$)。また、コンクリート母材のせん断バネ係数、およびコンクリート母材における周方向変形範囲は、土中杭における杭周面摩擦バネに関するRandolphの方法³⁾を適用した。計算式を式(2)、式(3)に示す。

$$k_c = \frac{2\pi \cdot G_c L_c}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} \quad (2)$$

$$r_m = 2.5 L_c (1 - \nu) \quad (3)$$

ここで、 k_c :コンクリート母材のバネ係数、 G_c :コンクリート母材のせん断弾性係数、 r_m :コンクリート母材における周方向変形範囲、 L_c :付着長(L_2)、 r_0 :ボルト半径、 ν :コンクリート母材のポアソン比である。さらに、付着部の減衰係数は、粘性減衰を仮定し、ダッシュポットで表現した。式(4)に計算式を示す。

$$c_c = \frac{2\pi \cdot r L_c G_c}{V_s} \quad (4)$$

ここで、 C_c :付着部の減衰係数、 V_s :コンクリートのせん断波速度である。物性値の設定を表-1に示す。

表-1 物性値の設定

表記	項目	設定値
G_c	コンクリートせん断弾性係数	$1.05 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
E_m	ボルト弾性係数	$3.2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
ρ_m	ボルト密度	7850 kg/m^3
ρ_c	コンクリート密度	2400 kg/m^3
ν_m	ボルトポアソン比	0.25
ν_c	コンクリートポアソン比	0.2
c_c	付着部の減衰係数	15000 Ns/m

(2) 運動方程式

以上で定義した埋設アンカーボルトの力学モデルの運動方程式を式(5)に示す。ボルトの各部位の軸方向の質点位置は x_i ($i=1\sim 3$) で表した。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 (x_1 - x_2) &= f_1 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_c \dot{x}_2 \\ + k_2 (x_2 - x_3) - k_1 (x_1 - x_2) + k_c x_2 &= 0 \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_2 (x_2 - x_3) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 f_1 :ボルト頭部に入力される外力である。質点系力学モデルでは、 m_1 に入力される外力となる。ボルト各部位の減衰係数 c_i ($i=1\sim 3$) は、付着部 c_c と比較し十分小さいと考えられるため、計算上は値を0とした。

(3) 理論解の計算

運動方程式から理論解の導出は、式(5)を状態方程式に変換し、時刻歴応答で解を求めた。使用したアルゴリズムはDormand-Princeによる陽的Runge-Kutta法(4次,5次)を用い、数値解析ソフトウェアMatlabに搭載されているソルバ(ODE45)を適用した。

3. 実験概要

理論値の妥当性を評価するため、施工不良を模擬した試験体において電磁パルス法で実施した既往の実験²⁾の結果と、理論解により得られたデータと比較することとした。表-2に試験体として製作したアンカーの施工条

表-2 試験体の施工条件

No.	アンカー筋	ボルト長 (mm)	突出長 (mm)	穿孔径×埋込長 (mm)	付着長 (mm)	施工不良の種類
1		230	100	φ19×130	130	(標準施工)
2	M16	230	100	φ19×130	60	充填量不足
3	(SNB7)	230	100	φ19×130	40	
4		230	100	φ19×130	20	
5	M16	230	100	φ19×130	130	(標準施工)
6	(SNB7)	180	100	φ19×80	80	埋込長不足
7		150	100	φ19×50	50	

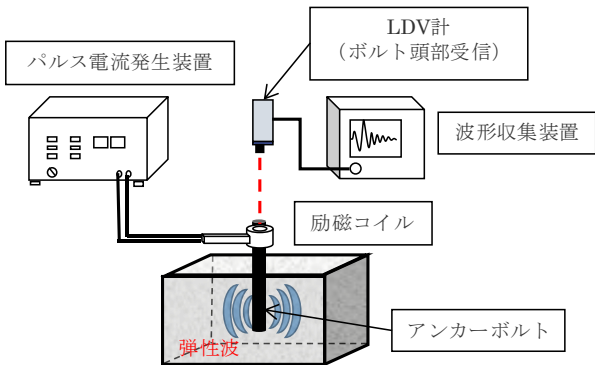


図-3 実験の概要 (電磁パルス法)

件を示す。表中 No.1, および No.5 は標準施工, No.2~4 は, 充填量不足, No.6, No.7 は埋込長不足を模擬した試験体の施工条件を示している。

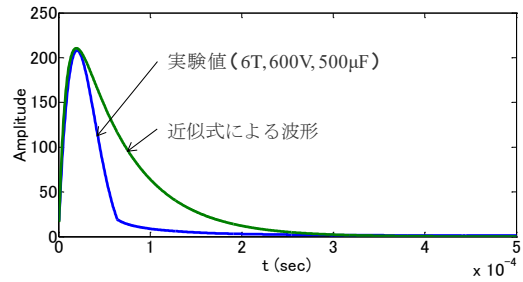
図-3 に電磁パルス法による実験概要を示す。励磁コイルは, 6 ターン, 12 ターンの 2 種類の円筒形状のものを使用している。コイル高さ方向中心部にボルト上端が一致するように励磁コイルを設置し, 瞬間的に電流を流すことにより磁場を発生し, アンカーボルトを振動させた。ボルトの振動は, ボルト頭部に設置したレーザードップラ振動系 (LDV 計) により受信し, データ数 40000 点, サンプル間隔 0.5μs の時刻歴応答波形として波形収集装置に記録した。また, パルス電流発生装置の電圧は 600V, キャパシタは, 500μF の入力条件を使用した。

4. 理論解と実験値の評価結果

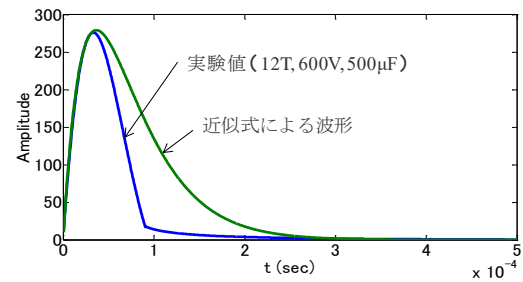
理論計算において, 電磁パルスによる衝撃入力 f_i を模擬するため, パルス電流発生装置の電流波形を基に入力波形を近似した。図-4 に実測された電流波形と, この電流波形を数式にて近似した入力波形の例を示す。また, 近似式を式(6)に示す。

$$f(t) = G \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (6)$$

ここで, T_1, T_2 は, 波形の形状を定義するパラメータであり, 図-4 (a) の例においては, T_1 を 10μs, T_2 を 60μs に設定している。図-4 (b) の例においては, T_1 を 200 μs, T_2 を 40μs に設定している。ボルトに入力される衝撃の特性は, 電流波形の立上り部の影響が大きいと考えら

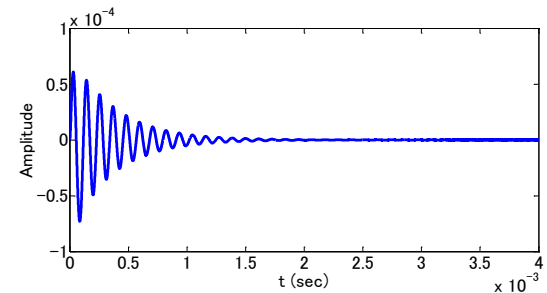


(a) 6T, 600V, 500 μ F

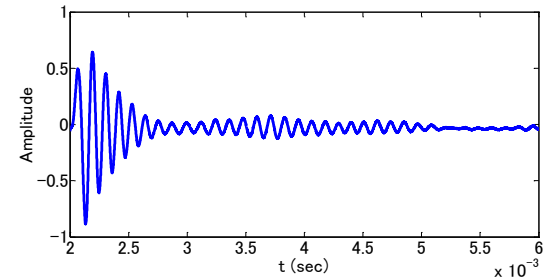


(b) 12T, 600V, 500 μ F

図-4 入力波形の近似



(a) 計算結果



(b) 実測波形

図-5 時刻歴応答の比較

れるため, 図-4 に示すように, 実験値の立上りと近似式の立上りが等しくなるよう定数を設定した。

4.1 時刻歴応答

式(5)の運動方程式より得られた時刻歴応答と実験値の波形比較の一例を図-5 に示す。この事例では, 標準施工 (No.1) の条件でボルト頭部の振動波形を計算した結果 (図-5 (a)) と実測波形 (図-5 (b)) を, 立上り位置を合わせた同一時間幅で示している。図より, 減衰部の応答に差異はあるが, 計算波形と実測波形はほぼ同様な形状を示すことがわかった。

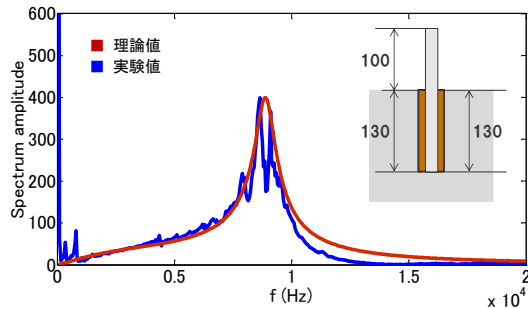


図-6 周波数応答の比較（標準施工，No.1）

4.2 周波数応答

(1) 標準施工

図-6に4.1と同じ標準施工条件（No.1）における計算結果と実測結果の周波数応答の比較を示す。周波数応答は、時刻歴応答で得られた振動波形を高速フーリエ変換した。図中緑線が理論値を示し、青線が実験結果を示している。図より、実験値においては局所的に複数のピークが見られるが、理論値も実験値も約8.9kHzを主たるピークとするほぼ同様なスペクトル分布を示しており、理論値がよい近似となっているがわかる。

(2) 接着剤の充填量不足

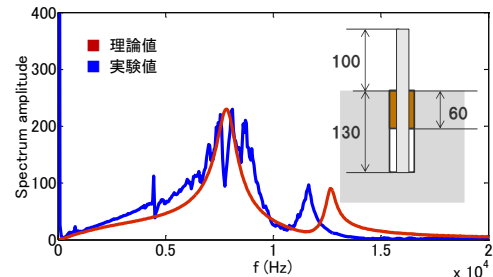
表-2の充填量不足の条件（No.2, 3, 4）において得られた理論値の周波数応答、および実験値の周波数応答を図-7に示す。付着長60mm（図-7(a)）においては、理論値のピーク周波数は7.8kHzになり、標準施工の場合より若干低くなった。また、12.7kHzに第2のピーク周波数が現れた。高周波側のピーク周波数は理論値の方が約1kHz程度大きい結果となったが、理論値の周波数応答は、実験値に対し良い近似となることがわかった。

付着長40mm（図-7(b)）においては、理論値のピーク周波数はさらに7.1kHzに低くなったが、高周波側のピーク周波数（10.8kHz）は両者でほぼ等しくなり、スペクトル振幅値も同様に大きくなった。本ケースにおいても理論値は実験値に対し良い近似となることがわかった。

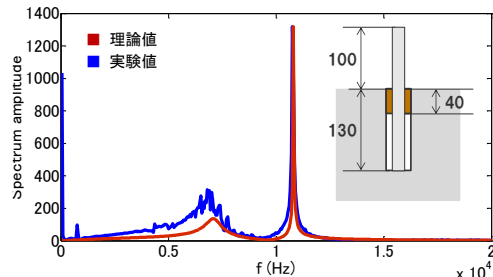
さらに付着長20mm（図-7(c)）においても、理論値の高周波側のピーク周波数は実験値のそれよりさらに低くなったが、周波数応答の傾向は本ケースも実験値に対し良い近似となっていることがわかった。

(3) 埋込長不足

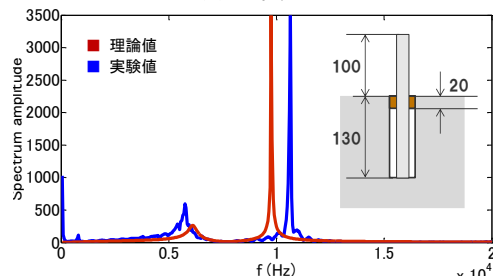
次に、表-2の埋込長不足の条件（No.5, 6, 7）において得られた理論値の周波数応答、および実験値の周波数応答を図-8に示す。本例においては、実験条件に合わせて、 T_1 を200 μ s、 T_2 を40 μ sに設定している。図-8(a)に4.1と同じ標準施工条件における計算結果と実測結果の比較を示す。本例では、No.5の実験時の入力波形の立ち上がりがNo.1の場合より小さいため、図-6の結果と異なった周波数応答が得られている。本例においても、実験



(a) 付着長 60mm (No. 2)



(b) 付着長 40mm (No. 3)



(c) 付着長 20mm (No. 4)

図-7 周波数応答の比較（充填量不良）

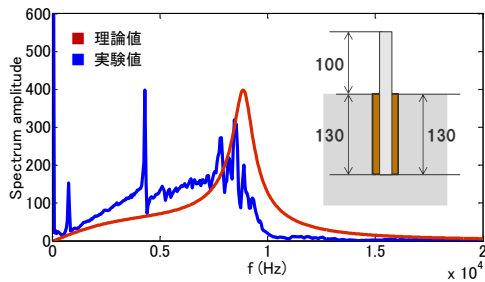
値では局所的に複数のピークが見られるが、理論値では図-6と同じ約8.9kHzにおいて単一のピークが見られることがわかる。また、理論値と実験値のピーク周波数は、理論値のピーク周波数が少し大きい、傾向としてはほぼ等しいことがわかった。

付着長80mm（図-8(b)）においては、理論値のピーク周波数は8.45kHzに若干低くなるが、充填量不良の場合のように第2のピーク周波数は現れなかった。本ケースにおいても理論値の周波数応答は、実験値に対し良い近似となっていることがわかる。

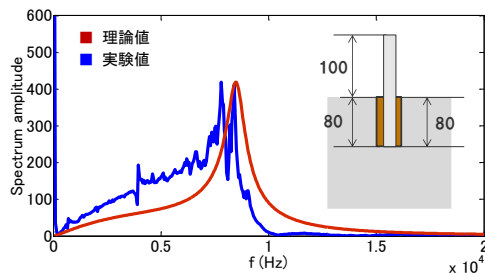
付着長50mm（図-8(c)）においては、理論値のピーク周波数はさらに8.05kHzに低くなるが、実験値のピーク周波数は7.7kHzであり、依然良い近似となっている。

4.3 ボルト振動挙動の理論的考察

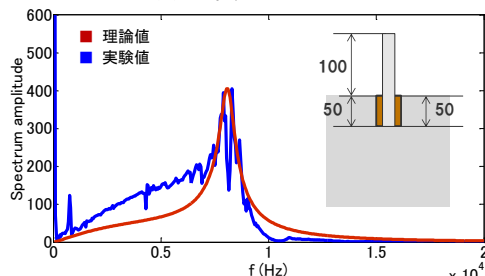
以上4.2より、理論値の周波数応答は実験値の周波数応答の良い近似となることがわかった。これらの結果を、質点系力学モデルの挙動から理論的に考察した。まず充填量不足の場合は、付着部に突出部および空隙部が連結した3次の質点パネ系の構成であり、これらの3つの質量パネ要素が連成振動を起こすことにより発生する現象と理解できる。このため、充填量不足により空隙部が長くなると、突出部と空隙部のパネマス要素が連成し、ピ



(a) 付着長 130mm (標準施工, No. 5)



(b) 付着長 80mm (No. 6)



(c) 付着長 50mm (No. 7)

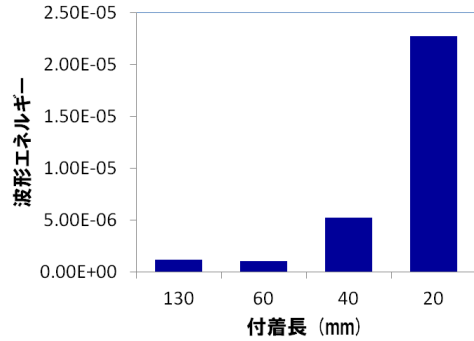
図-8 周波数応答の比較 (埋込長不足)

ーク周波数は2つに分かれるとともに、低周波ヘシフトしたと考えられる。一方、埋込長不足では、付着部に突出部が連結した2次の質点バネ系の構成であり、これらの2つのバネマス要素が連成振動を起こすことにより発生する現象と理解できる。すなわち、埋込長不足により付着部が短くなると、突出部と付着部の質量バネ要素が連成し、ピーク周波数は単一のまま低周波ヘシフトすると考えられる。このように質点系力学モデルで単純な近似を行った結果、周波数応答の傾向が連成振動に起因する現象⁴⁾として理論的に理解できることがわかった。さらに、質点系力学モデルで知られた振動挙動の知見より、ボルト頭部の振動挙動は突出長の影響も受けることが、力学モデルから推察される。今後突出長と付着長を組み合わせ合わせた条件で振動挙動がどのように変化するか、さらに検討する必要があると考えられる。

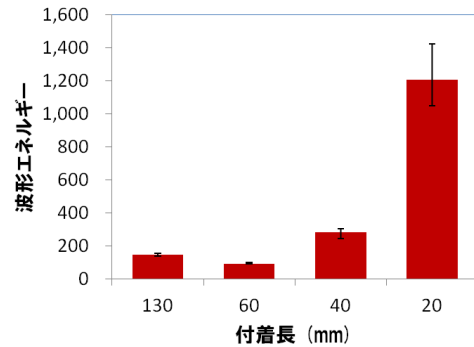
4.4 波形エネルギー

施工不良を評価する評価指標として、波形エネルギーを適用した評価方法について既に報告している^{1),2)}。波形エネルギーは、時刻歴応答波形のサンプリング点における振幅値の2乗和で表され、式(7)により算出される。

$$E = \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (7)$$

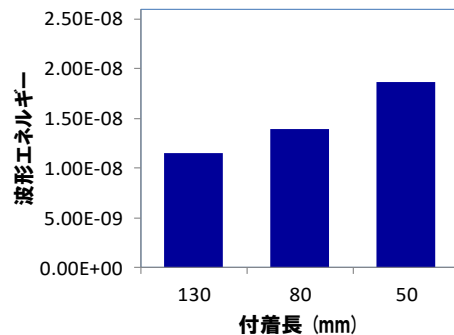


(a) 理論値による波形エネルギー

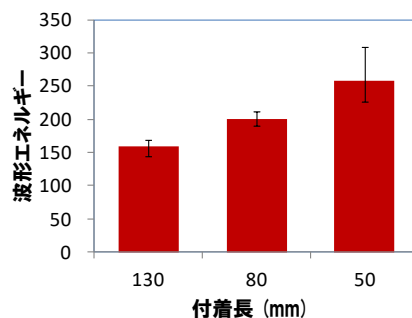


(b) 実験値による波形エネルギー

図-9 波形エネルギーの比較 (充填量不足)



(a) 理論値による波形エネルギー



(b) 実験値による波形エネルギー

図-10 波形エネルギーの比較 (埋込長不足)

ここで、 E : 波形エネルギー、 y_i : 応答波形における各サンプリング点の振幅値、 n : 時刻歴波形におけるサンプリング数 (ここで、 $n=40000: 0\sim 20,000\mu s$) である。本波形エネルギーを用いて、充填量不足、埋込長不足の理論値と実験結果との比較を行った (図-9)。実験において

計測は同一条件で3回行っており、図-9(b)中の棒線は計測値の最大値と最小値の幅を示している。

(1) 接着剤の充填量不足

接着剤の充填量不足の条件で得られた理論値の波形エネルギーを図-9(a)に、実験値の波形エネルギーを図-9(b)に示す。理論値と実験値で入力波形の絶対値が異なるため、それぞれのグラフの波形エネルギーの値は異なるが、いずれのグラフにおいても付着長が短くなると波形エネルギーは増大することがわかった。この傾向は、実験値と理論値で良い一致を示した。これより、埋込長が一定で、付着長が小さくなるような充填量不足が発生すると、波形エネルギーが増大することが理論的に明らかになった。また4.3より、波形エネルギーが著しく大きくなる条件は、突出長が付着不良部の長さ、すなわち埋込長と付着長の差とほぼ等しくなる条件であると考えられることが、理論的に推察された。

(2) 埋込長不足

埋込長不足の条件において得られた理論値の波形エネルギーを図-10(a)、および実験値の波形エネルギーを図-10(b)に示す。波形エネルギーの値は異なるが、いずれのグラフにおいても埋込長が小さくなり、付着長が小さくなると波形エネルギーは増大する。この傾向は、実験値と理論値で良い一致を示した。これより、埋込長が小さくなると波形エネルギーが増大することが、理論的に妥当であることが明らかになった。

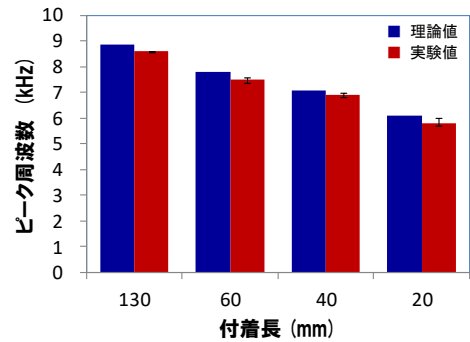
4.5 ピーク周波数

接着剤の充填量不足の条件で得られた理論値および実験値のピーク周波数を図-11(a)に示す。また、埋込長のそれを図-11(b)に示す。ここで実験値のピーク周波数の算出は、最大エントロピー法を適用した。また、スペクトル推定に用いる予測誤差フィルターの次数はAIC(赤池情報量基準)に基づいて決定した。その結果、ピーク周波数と付着長の関係は、実験値と理論値でほぼ等しい傾向が得られることがわかった。これより、充填量不足、埋込長不足が発生すると、ピーク周波数が小さくなることが理論的に明らかになった。

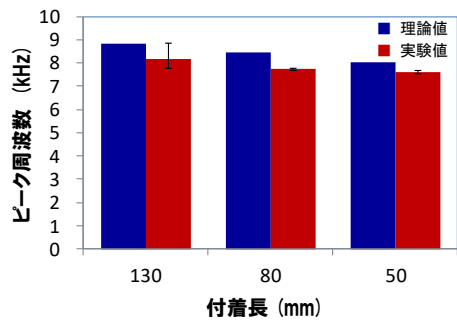
5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 充填量不足、埋設長不足を対象としたあと施工アンカーの振動挙動は、質点系力学モデルにより精度良く近似できることがわかった。
- (2) 質点系力学モデルによる充填量不足、および埋設長不足における波形エネルギー、あるいはピーク周波数と付着長の関係は、実験データとほぼ同様の傾向を示すことを明らかにした。



(a) ピーク周波数の比較 (充填量不足)



(b) ピーク周波数 (埋込長不足)

図-11 ピーク周波数の比較

- (3) 充填量不足、埋設長不足における周波数応答は、ボルト各部位の連成振動の影響が大きいと考えられる。
- (4) 波形エネルギー、ピーク周波数を評価指標とし、充填量不足、埋設長不足を評価する手法の妥当性が明らかになった。

謝辞

本研究は、経済産業省中小企業庁の平成 28 年度戦略的基盤技術高度化支援事業(サポイン事業)助成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) 服部晋一, 鎌田敏郎, 寺澤広基, 山本貴大: 電磁パルス法による接着系アンカーの非破壊評価に関する実験的検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, V-254, 2017.9
- 2) 山本貴大, 鎌田敏郎, 寺澤広基, 服部晋一: 電磁パルス法による接着系あと施工アンカーの施工不良を対象とした非破壊評価手法, 第 17 回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, 第 17 巻, pp.95-100, 2017.10
- 3) 間瀬辰也, 中井正一: 単杭の杭周地盤ばねの評価法に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 680 号, pp.1527-1535, 2012
- 4) 近藤恭平: 工学基礎振動論, 培風館, 2000