

## 打音診断技術を活用したグラウンドアンカーのあらたな緊張力計測手法に関する実験的研究

浜崎, 智洋  
西日本高速道路株式会社九州支社

笠間, 清伸  
東京工業大学環境・社会理工学院土木・環境工学系

松永, 嵩  
原子燃料工業株式会社

小川, 良太  
原子燃料工業株式会社

他

<https://hdl.handle.net/2324/7217570>

---

出版情報 : Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering). 75 (1), pp.90-102, 2019. Japan Society of Civil Engineers

バージョン :

権利関係 : © 2019 by Japan Society of Civil Engineers



# 打音診断技術を活用したグラウンドアンカーの あらたな緊張力計測手法に関する実験的研究

浜崎 智洋<sup>1</sup>・笠間 清伸<sup>2</sup>・松永 嵩<sup>3</sup>・小川 良太<sup>4</sup>・磯部 仁博<sup>5</sup>・佐山 政幸<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 西日本高速道路株式会社 九州支社 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東3-13-15)  
E-mail: t.hamasaki.aa@w-nexco.co.jp

<sup>2</sup>正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系  
(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
E-mail: kasama.k.ab@m.titech.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 原子燃料工業株式会社 (〒590-0481 大阪府泉南郡熊取町朝代西一丁目950)  
E-mail: tk-matsunaga@nfi.co.jp

<sup>4</sup>正会員 原子燃料工業株式会社 (〒590-0481 大阪府泉南郡熊取町朝代西一丁目950)  
E-mail: ryo-ogawa@nfi.co.jp

<sup>5</sup>非会員 原子燃料工業株式会社 (〒590-0481 大阪府泉南郡熊取町朝代西一丁目950)  
E-mail: isobe@nfi.co.jp

<sup>6</sup>非会員 有限会社マサクリーン (〒890-0034 鹿児島市田上5丁目33-11-101)  
E-mail: mscrn@solid.ocn.ne.jp

切土のり面などの安定化策として用いられているグラウンドアンカー（以下、「アンカー」という）の点検・管理にあたっては、リフトオフ試験により残存引張り力（以下、「緊張力」という）の計測が実施されているが、その代替となる簡易な緊張力計測手法の開発が必要とされている。本研究では、原子力発電所施設などのアンカーボルトを対象とした非破壊検査で実用化されているAcoustic Emissionセンサを用いた打音診断技術に着目し、それを応用した緊張力計測手法（以下、「本技術」という）の開発に向けた検討を行ってきた。本稿は、ネジ式定着のアンカーに対し緊張力評価への適用を試みるにあたり、室内実験、FEM解析および緊張力の現地計測結果をもとに、本技術における適用性の評価・検証ならびに課題抽出を行ったものである。

**Key Words :** ground anchor, tensioning force, hammering test, acoustic emission sensor

## 1. はじめに

グラウンドアンカー（以下、「アンカー」という）は、アンカー頭部（以下、「頭部」という）、引張り部、アンカー体から構成され、引張り部を介して所定のプレストレスを定着地盤に伝達し、反力構造物と地盤を一体化させて、地盤のすべり滑動力に抵抗する工法である。高速道路においては、切土のり面（以下、「のり面」という）の代表的な安定化策として、約 11.2 万本が施工されてきた（平成 24 年（2012 年）3 月時点）。

高速道路延長の約 40%が供用後 30 年を超過するなかで、防食性能が低い旧タイプアンカー<sup>1)</sup>については、平成 26 年（2014 年）1 月に提言がなされた「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会

報告書<sup>2)</sup>に示されているように、今後大規模な更新を予定している<sup>3)</sup>。

アンカーはその主たる部分が地中に存在するため、劣化や破断などの変状による性能低下を早期に発見・把握することが肝要となる。アンカーの点検・管理では、アンカー頭部や支圧された構造物の劣化状況の把握や周辺地盤の動きの観察とあわせて、長期間経過した状況下での残存引張り力（以下、「緊張力」という）の計測が実施されている。緊張力を計測するためのリフトオフ試験（以下、「リフトオフ」という）は油圧ジャッキを用いて実施され、現地条件によっては起重機や作業用足場などの設備を必要とするなど、労力的、経済的にも多大な負担を要するため、代替となる簡易な緊張力計測手法の開発が必要とされ<sup>4)</sup>、これまでも磁歪法や超音波法用い

た非破壊調査による緊張力計測手法の研究が実施されてきた<sup>5),6)</sup>。

筆者らは、原子力発電所施設などのアンカーボルトを対象とした非破壊検査などで実用化されている Acoustic Emission(以下、「AE」という)センサを用いた打音診断技術<sup>7)</sup>に着目し、それを応用した緊張力計測手法(以下、「本技術」という)の開発に向けた検討を行ってきた。AE センサを用いた打音診断技術の特長は、アンカーボルトの軸力低下に起因する拘束条件の変化に伴う曲げ振動特性の変化を捉え、アンカーボルトの軸力不足を診断することであり、本技術によりアンカーの緊張力評価への適用が期待できる。

アンカーは、背面地盤の状態、受圧板や支圧板(プレート)などを含めた頭部の定着機構、および定着部における引張り力(緊張力)の伝達方式が複雑である。ただし比較的地盤が類似し、定着機構や緊張力伝達方式が同一の条件下においては、緊張力の増減に伴う曲げ振動特性の変化を捉え易いものと推察できる。

したがって本研究は、頭部の定着機構および定着部の緊張力伝達方式が同一条件下で、頭部の曲げ振動特性に最も影響を及ぼすことが想定される緊張力や頭部形状との関係を中心に検討を試みた。

本稿は、頭部の定着機構がナットによるネジ式定着である多重 PC 鋼より線タイプのアンカー<sup>9)</sup>を対象に、室内実験、FEM 解析および緊張力の現地計測結果をもとに、本技術における適用性の評価・検証ならびに課題抽出の結果をとりまとめたものである。

## 2. アンカーのり面の点検・管理

### (1) アンカーのり面の実態

九州・沖縄の高速道路には、図-1 に示すように約 2.8 万本のアンカーが施工されている(平成 24 年(2012 年)4 月時点)。そのうち、旧タイプアンカーは全体の約 67%を占めており、その平均経過年数は 32 年を超えている(平成 29 年(2017 年)4 月時点)。一方、防食性能として二重防食構造を有する新タイプアンカーの平均経過年数は、約 21 年となっている。

アンカーの引張り材に着目すると、図-2(a)に示すように旧タイプアンカーでは、約 1.9 万本のうち多重 PC 鋼より線タイプを含む鋼より線タイプが全体の約 68%を占め、鋼棒タイプは約 32%となっている。また、新タイプアンカーでは、約 0.9 万本のうち多重 PC 鋼より線タイプ

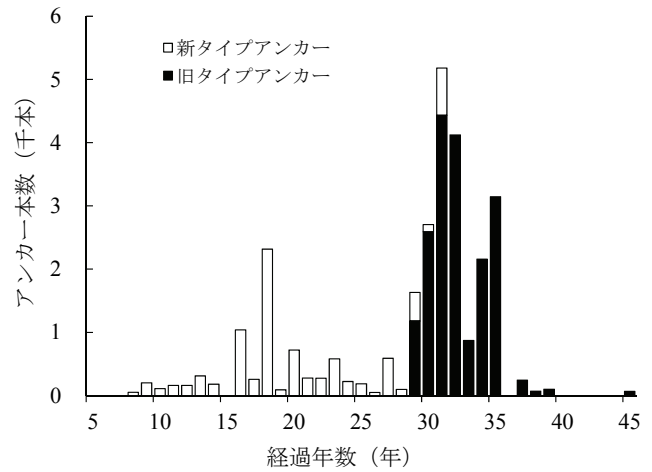


図-1 九州・沖縄の高速道路におけるアンカーの実態

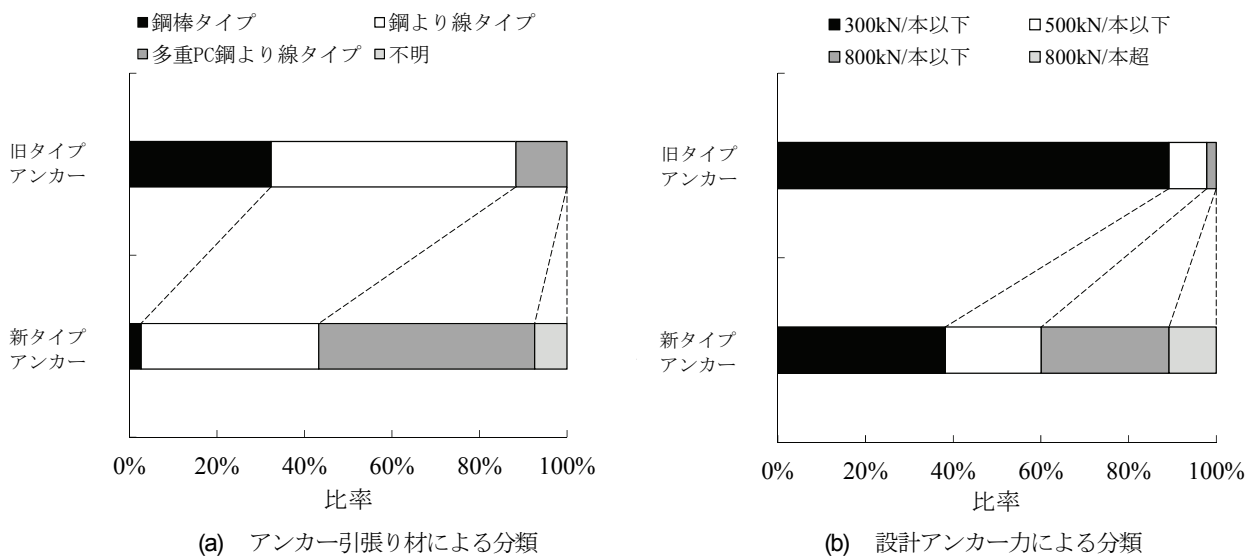


図-2 アンカー引張り材と設計アンカー力による分類

プを含む鋼より線タイプが約90%を占め、鋼棒タイプは3%未満となっている。なお、本稿で検討の対象とした多重PC鋼より線タイプのアンカーは、旧タイプアンカーおよび新タイプアンカー合わせて、全体の約24%となり、同様に定着機構がナットによるネジ式定着である鋼棒タイプへも適用が期待できる。

また、アンカー1本あたりの設計アンカー力<sup>10)</sup>に着目すると、図-2(b)に示すように設計アンカー力が判明しているもののうち、旧タイプアンカーでは500kN/本以下のものが全体の約98%を占めていたのに対し、新タイプアンカーでは500kN/本以下のものは全体の約60%にとどまっている。特に800kN/本以上のものについては、旧タイプアンカーでは確認されなかったのに対し、新タイプアンカーでは約11%に達している。設計アンカー力は、地盤状況やのり面保護工などの採用を含め経済性や施工性を勘案し総合的に決定されているため一概に比較はできないが、対象とする崩壊規模の増大や、反力構造物となる受圧板の耐力向上などに伴い、1本あたりの設計アンカー力が増大してきたものと推察される。

### (2) アンカーの点検・管理

高速道路におけるアンカーの点検・管理にあたっては、車上目視を主体とした日常点検や近接目視・触診を行う定期点検などにより、アンカー頭部の飛び出しや定着具の異常に対する早期発見に努めている。また、各種点検により異常・変状が確認された場合、アンカー頭部の詳細調査やリフトオフによる緊張力の計測を行いアンカーの健全度評価を行っている<sup>11)</sup>。

近接目視・触診ではアンカー頭部の防護コンクリートの浮きや破損、保護キャップの腐食や防錆油の漏れなどの状況を確認するのに対し、詳細調査では防護コンクリートや保護キャップなどのアンカー頭部の保護材を除去し、定着具や鋼材の腐食・破損、クサビやナットの定着状況などについて調査を行う。また、リフトオフによる緊張力の計測の際には、アンカーの荷重-変位特性を把握し、アンカーの経年的な損傷の進行を把握する研究も行われている<sup>12)</sup>。

### (3) アンカーの緊張力

図-3は、全526本(全66箇所へのり面)の旧タイプアンカーを対象としたリフトオフによる緊張力( $P_e$ )の計測結果を、許容緊張力( $T_a$ )に対する荷重レベルの度数分布としてとりまとめたものである。ここで、許容緊張力とはアンカー引張り材の引張荷重と安全率等をもとに算出されるアンカー許容力であり、これをもとに設計アンカー力( $T_d$ )や定着時緊張力( $P_t$ )が設定される<sup>13)</sup>。

緊張力( $P_e$ )の度数分布の中央値は $P_e = 0.4 \cdot T_a \sim 0.5 \cdot T_a$ に位置し、 $P_e < T_a$ となるアンカーが全体の99.0%を占め、

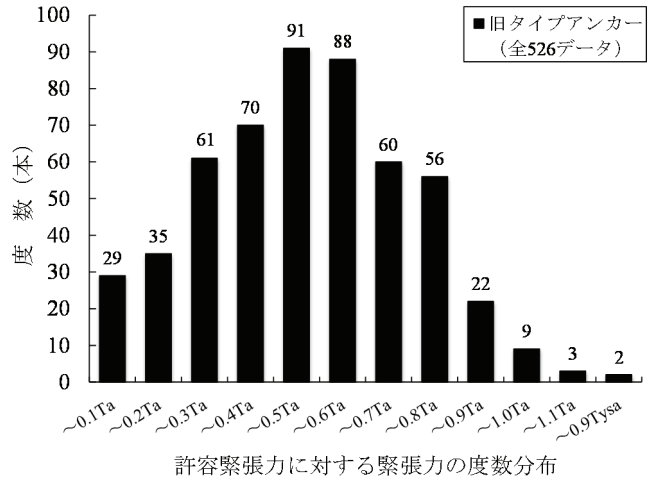


図-3 旧タイプアンカー緊張力の実態

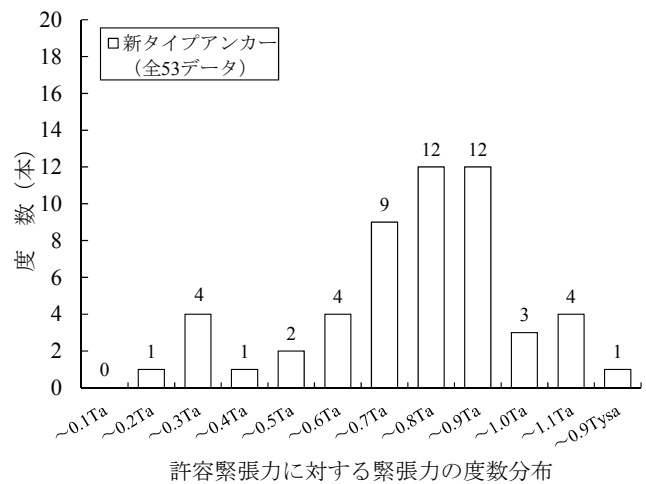


図-4 新タイプアンカー緊張力の実態



写真-1 AEセンサを用いた計測状況

機能を消失している可能性が指摘される  $P_e < 0.1 \cdot P_t$  (ただし、 $P_t = T_a$  と仮定) となるアンカー<sup>14)</sup>は、全体の5.5%となっている。また、 $P_e > T_a$ で過緊張状態のアンカーは、全体の1.0%となっている。

図-4は、全53本(全10箇所へのり面)の新タイプアンカーの緊張力( $P_e$ )の計測結果を、旧タイプアンカー

と同様に、許容緊張力 ( $T_a$ ) に対する荷重レベルの度数分布としてとりまとめたものである。

緊張力の度数分布の中央値は  $P_e=0.7 \cdot T_a \sim 0.8 \cdot T_a$  に位置し、 $P_e < T_a$  となるアンカーが全体の 90.6% を占め、機能を消失している可能性が指摘される  $P_e < 0.1 \cdot P_t$  (ただし、 $P_t = T_a$  と仮定) となるアンカーは、全体の 0.0% となっている。また、 $P_e > T_a$  で過緊張状態のアンカーは、全体の 9.4% となっている。

アンカーの施工にあたっては、旧タイプアンカーが使用されていた年代において、定着時緊張力 ( $P$ ) を崩壊形態などの地盤条件に応じて設計アンカー力 ( $T_d$ ) の 40 ~ 100% 程度に設定してきた。特に引止め効果を期待する場合には、定着時緊張力を設計アンカー力 ( $T_d$ ) の 20 ~ 30% 程度とする場合もあった<sup>15)</sup>。

このように、アンカーはアンカータイプやアンカー構造のみならず設計アンカー力や定着時緊張力の設定などバラツキが大きいことに加え、経年的に緊張力が大きく減少したり増加したりすることが危惧される。したがって、アンカーの健全性や性能低下を発見・把握するためには、緊張力の増減を適切に評価することが肝要となる。

### 3. AE センサを用いた打音診断技術

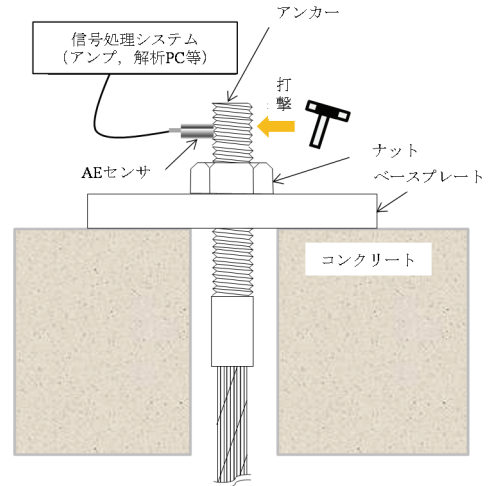
#### (1) AE センサによる振動波形の計測

写真-1 に本技術による計測状況を示し、図-5 に本技術の計測概要を示す。本技術は AE センサ、計測ボックス、タブレット PC などにより構成される。打音診断にあたっては、AE センサを頭部端より 1cm 程度の位置に押し当て、AE センサを押し当てた面の反対側の面からハンマで強制振動を加える。AE センサ表面の圧電素子は、頭部が振動することによる電気信号波形 (振動波形) を計測する (図-6 (a) 参照)。つぎに、図-6 (b) に示すように AE センサにより計測した振動波形を高速フーリエ変換処理し、周波数分布を得る。この周波数分布には、計測対象物の振動特性の情報が含まれており、その振動

特性は頭部の物理的・構造的特性に依存するものと考えられる。

#### (2) 周波数解析による評価ピーク周波数の算出

本稿では、高速フーリエ変換処理により得られた周波数分布のうち曲げ振動の 1 次の固有振動数に着目し、振動特性を評価する指標を評価ピーク周波数と定義する (図-6 (b) 参照)。

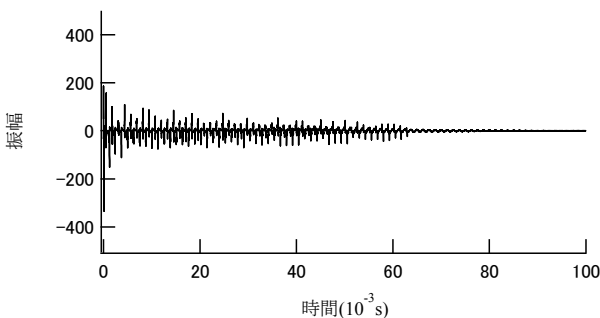


(a) 計測模式図

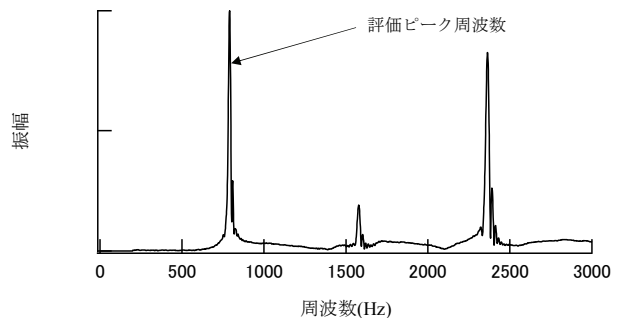


(b) 計測機器

図-5 AE センサを用いた打音診断概要



(a) 振動波形の例



(b) 周波数分布の例

図-6 AE センサにより計測した振動波形と周波数分布の一例

頭部を片持ち梁構造とみなしたときに、片持ち梁の曲げ振動の理論解<sup>16)</sup>は式(1)として算定され、固有振動数はアンカーの物理的・構造的特性に依存することとなる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

ここに、 $f$ : 固有振動数、 $\lambda$ : 1.875、 $L$ : 振動長さ、 $E$ : 縦弾性係数、 $I$ : 断面定数、 $\rho$ : 密度、 $A$ : 断面積である。

また、梁が軸力(引張)を受ける場合、式(2)に示すように固有振動数は軸力がないときの固有振動数より高くなる<sup>17)</sup>ことが推定できる。

$$f' = f \sqrt{1 + \frac{T}{n^2 P_C}} \quad (2)$$

ここに、 $f'$ : 軸力(引張)を受けるときの固有振動数、 $f$ : 軸力を受けないときの固有振動数、 $T$ : 軸力、 $P_C$ : オイラーの限界荷重、 $n$ : 振動モードである。

式(1)と式(2)から示唆されるように、緊張力を導入しナットにより定着された頭部においても、固有振動数(評価ピーク周波数)は頭部の物理的・構造的特性に依存だけでなく、緊張力の導入に伴うナット近傍での引張応力の発生や、ナットやナットを支持するプレートなど頭部を構成する部材間の拘束力の増加に起因して、固有振動数(評価ピーク周波数)は変動するものと考えられる。

したがって本研究にあたっては、緊張力の導入に伴う頭部の曲げ振動特性の変化に着目し、室内実験や現地計測を通じて得られたデータをもとに、評価ピーク周波数の変化から緊張力の状態を評価することを試みた。

なお、頭部の曲げ振動特性に影響を及ぼす因子として、緊張力と頭部形状の他、背面地盤や受圧板などの接触条件(状態)を考慮する必要があるが、本稿においては、特に曲げ振動特性への寄与度が大きいと想定される緊張力と頭部形状に着目することとした。

#### 4. 室内実験による適用性の検討

##### (1) 概要

既往の研究<sup>18)</sup>により、軸力の影響を受けた部材の振動特性は部材の物理的・構造的特性だけでなく、ゆるみや緊張などの拘束条件によって変化することが検討されてきた。本研究では模型実験と実大実験を行い、本技術の緊張力評価への適用性について検討を行った。

まず、アンカーを模擬した寸切りボルトと中空コンクリートブロックを用いた供試体による模型実験を実施した。

模型実験にあたっては、油圧ジャッキにより寸切りボルトに段階的に緊張力を付与し、AE センサにより振動特性を取得した。得られた実験結果をもとに、緊張力および寸切りボルトの長さなどの形状と、評価ピーク周波数との関係性について整理・検討を行った。

つぎに、引張り試験機により所定の緊張力を導入した多重 PC 鋼より線タイプのアンカーを用いた実大実験を実施した。実大実験にあたっては、各緊張力段階で AE センサにより振動特性を取得した。模型実験の結果をもとに、緊張力および頭部形状と評価ピーク周波数との関係性に着目し、本技術の適用性の検討を行った。

##### (2) 模型実験による検討

###### a) 実験条件

模型実験の実験条件を表-1に示す。寸切りボルトの規格は M16 とし、貫通孔を通じてコンクリートブロックの両端をナットで固定した。実験条件 A は、振動長さとなるナット底部から寸切りボルト頭部端までの長さ(以下、「頭部長」という)とナット底部から他方のナット底部までの長さ(以下、「自由長」という)を一定とし、緊張力( $T$ )を変化させたケースである。実験条件 B は、緊張力および自由長( $L_2$ )を一定とし、頭部長( $L_1$ )を変化させたケースであり、実験条件 C は、緊張力( $T$ )および頭部長( $L_1$ )を一定とし、コンクリートブロックの個数を変えて自由長( $L_2$ )を変化させたケースである。なお、模型実験のため自由長( $L_2$ )は 1m 以下を上限としている。

###### b) 緊張力と評価ピーク周波数

図-7に、実験条件Aにおける緊張力と評価ピーク周波数との関係を取りまとめた結果を示す。頭部長および自由長が一定の条件下( $L_1=38\text{mm}$ ,  $L_2=761\text{mm}$ )においては、緊張力の増加に伴い評価ピーク周波数が高周波側にシフトし、単調増加する傾向が認められた。例えば、緊張力  $T=5\text{kN}$  の評価ピーク周波数と緊張力  $T=35\text{kN}$  の評価ピーク周波数の差異は、139Hz(評価ピーク周波数比  $r$ )

表-1 模型実験の条件

実験条件	頭部長 $L_1$ (mm)	自由長 $L_2$ (mm)	緊張力 $T$ (kN)
A	38	761	5-35 (7段階)
B	38/63/88/113	284	19
C	38	284/544/804	19

供試体系

で16%の上昇)であった。数百kNの高緊張力状態のアンカーにおいては、評価ピーク周波数はさらに上昇することが推測される。

なお、評価ピーク周波数比とは、式(2)をもとに模型実験の最小緊張力時における評価ピーク周波数に対し、緊張力の増減に伴う評価ピーク周波数の変化率として、式(3)において算出した。

$$r = \frac{f_T^2}{f_0^2} - 1 \quad (3)$$

ここに、 $r$ ：評価ピーク周波数比、 $f_0$ ：最小緊張力時の評価ピーク周波数 (Hz)、 $f_T$ ：各緊張力時の評価ピーク周波数 (Hz) である。

c) 頭部長・自由長と評価ピーク周波数

図-8 に、実験条件 B における評価ピーク周波数と頭部長との関係、および実験条件 C における評価ピーク周波数と自由長との関係を、あわせてとりまとめた結果を示す。

自由長および緊張力が一定の条件下 ( $L_2 = 284\text{mm}$ ,  $T = 19\text{kN}$ ) においては、頭部長 ( $L_1$ ) の増加に伴い、評価ピーク周波数は低周波側にシフトする傾向が認められた。例えば、頭部長  $L_1 = 38\text{mm}$  の評価ピーク周波数と頭部長  $L_1 = 113\text{mm}$  の評価ピーク周波数の差異は、1,172 Hz (64%の低下) であった。

このことから、固有振動数は式(1)で示したように、振動長さの増大に伴い固有振動数が低下することが確認されるとともに、打音診断で得られる評価ピーク周波数は、頭部長 ( $L_1$ ) に依存する影響が大きいことが示された。

頭部長および緊張力が一定の条件下 ( $L_1 = 38\text{mm}$ ,  $T = 19\text{kN}$ ) においては、自由長 ( $L_2$ ) の増加に伴い、評価ピーク周波数は若干低周波側へシフトする傾向が認められた。例えば、自由長  $L_2 = 284\text{mm}$  の評価ピーク周波数と自由長  $L_2 = 804\text{mm}$  の評価ピーク周波数の差異は、190 Hz (10%の低下) であった。しかし、自由長 ( $L_2$ ) の変化による評価ピーク周波数の変動は、頭部長 ( $L_1$ ) の変化による評価ピーク周波数の変動と比べて極めて小さく、

評価ピーク周波数は自由長 ( $L_2$ ) の変化に依存する程度が小さいことが示された。

(3) 実大実験による検討

a) 試験条件

実大実験の実験条件を表-2 に示す。供試体は、定着機構がナットによるネジ式定着である 2 種類の多重 PC 鋼より線タイプのアンカーを用い、緊張力および頭部長

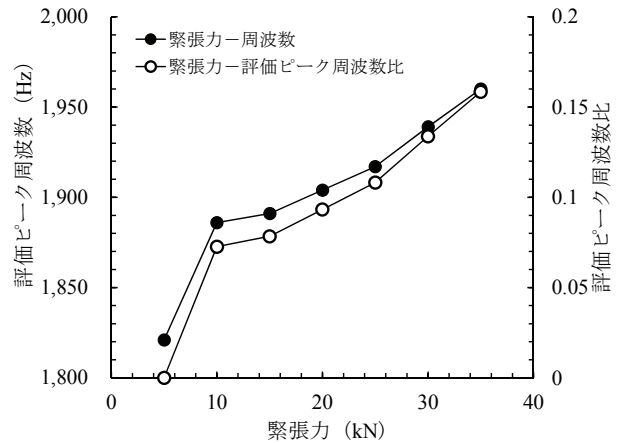


図-7 緊張力と評価ピーク周波数との関係 (1)

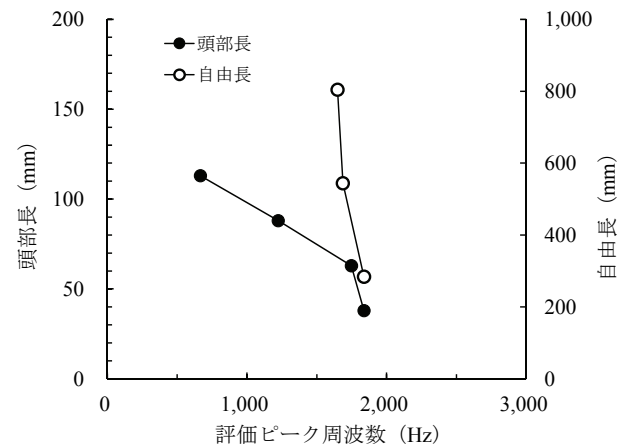


図-8 評価ピーク周波数と頭部長・自由長との関係 (1)

表-2 実大実験の条件

供試体	頭部長 $L_1$ (mm)	頭部径 $D$ (mm)	緊張力 $T$ (kN)	摘要
No. I	100~280	42	0.2 $T_a$ ~ 0.9 $T_{ys}$	$T_{ys}$ : 330kN, $T_{ts}$ : 387kN
No. II	100~300	55.4		$T_{ys}$ : 608kN, $T_{ts}$ : 714kN

$T_a$  : アンカーの許容緊張力 ( $T_a = 0.6 \cdot T_{ts}$ )

$T_{ys}$  : アンカーの降伏点荷重

$T_{ts}$  : アンカーの引張荷重

(ナット底部から頭部端までの長さ)を変化させ、それぞれの条件で頭部の計測を行った。計測はそれぞれ2回測定し、評価ピーク周波数の算定にあたっては平均値を採用した。

緊張力は、各供試体の降伏点荷重 ( $T_{ys}$ ) および引張荷重 ( $T_{ib}$ ) を参考に、アンカーの許容緊張力 ( $T_a = 0.6 \cdot T_{ib}$ ) に相当する荷重を含め6段階で設定し、最大緊張力は  $0.9 \cdot T_{ys}$  とした。また、頭部長については、各供試体で3ケース設定した。

b) 緊張力と評価ピーク周波数

図-9 に、頭部長  $L_1 = 100\text{mm}$  における各供試体の緊張力と評価ピーク周波数との関係をとまとめた結果を示す。No. I 供試体においては、緊張力  $T = 46\text{kN}$  ( $= 0.2 \cdot T_a$ ) の評価ピーク周波数と緊張力  $T = 297\text{kN}$  ( $= 0.9 \cdot T_{ys}$ ) の評価ピーク周波数の差異は、766Hz (評価ピーク周波数比で85%の上昇)であった。また、No. II 供試体においては、緊張力  $T = 85\text{kN}$  ( $= 0.2 \cdot T_a$ ) の評価ピーク周波数と緊張力  $T = 547\text{kN}$  ( $= 0.9 \cdot T_{ys}$ ) の評価ピーク周波数の差異は、1,025Hz (評価ピーク周波数比で123%の上昇)であった。このように、いずれの供試体においても、模型実験と同様、緊張力の増加に伴い評価ピーク周波数が高くなることが確認できた。ただし、いずれの供試体ともに、緊張力が増加するにしたがい評価ピーク周波数の上昇は鈍化する傾向を示し、緊張力が高緊張力領域 ( $T \geq T_a$ ) になると、評価ピーク周波数は収束傾向を示した。

図-10 は、供試体ごとの各緊張力状態における評価ピーク周波数を、頭部長との関係でとりまとめたものである。前述したようにいずれの供試体においても、頭部長が一定の条件下では緊張力の増加に伴い評価ピーク周波数は上昇することが示されているが、さらにいずれの緊張力状態においても、評価ピーク周波数は頭部長が短くなるほど高くなる傾向を示した。この傾向は、模型実験と同様、式(1)に示すように振動数が振動長さ ( $L$ ) の2乗に反比例することを考慮すると、評価ピーク周波数が頭部長 ( $L_1$ ) の減少に対して加速度的に上昇することとも符合する。

5. FEM 解析による評価

(1) 概要

本技術の適用性を解析的に評価するために、FEM 解析を実施した。

解析コードは、ADVENTUREcluster<sup>19), 20)</sup>を用い、緊張力の影響を考慮した時刻歴応答解析を実施した。

ただし、FEM 解析のモデル化にあたっては、本来、背面地盤などの状況やそれらがアンカーに及ぼす影響を考慮したモデルを検討する必要があるが、本稿において

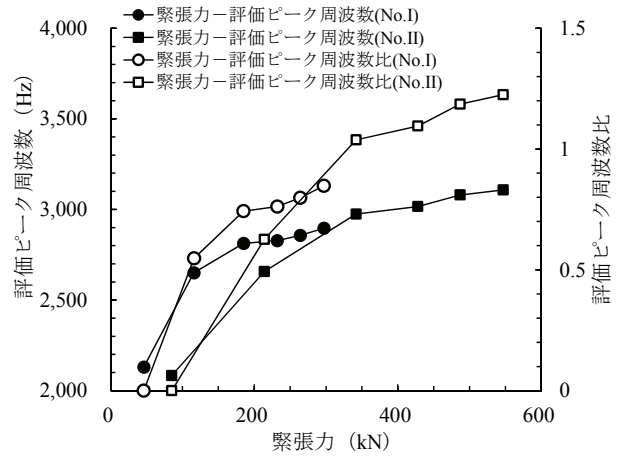
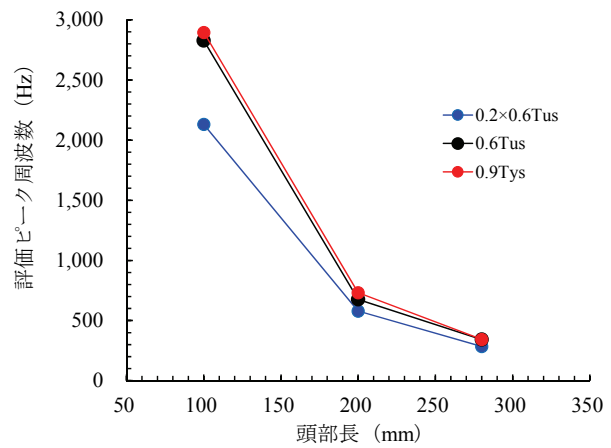
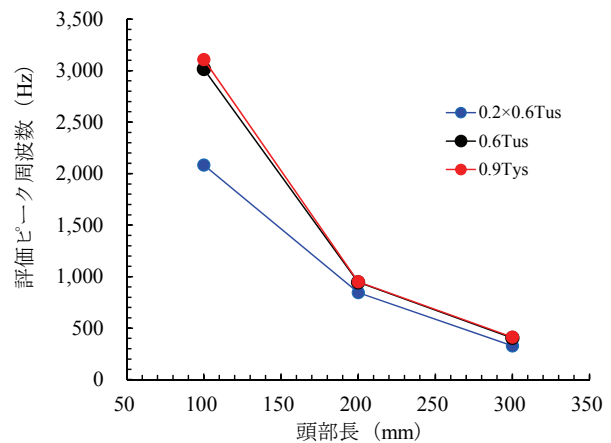


図-9 緊張力と評価ピーク周波数との関係(2)



(a) 供試体 No. I



(b) 供試体 No. II

図-10 各緊張力状態における評価ピーク周波数

は同一条件下の解析を行うことにより、緊張力の増減や頭部形状の相違による振動特性の変化を評価することは可能であると考え、コンクリート受圧板とアンカープレートにより単純化した解析モデルを採用した。

(2) 解析モデルと解析条件

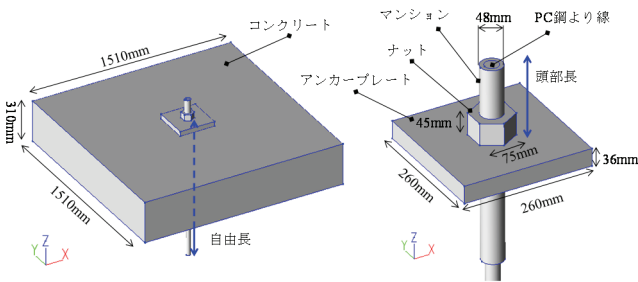
解析モデルの概要を図-11 に示し、解析に用いた物性値、解析条件および解析ケースをそれぞれ表-3、表-4 および表-5 に示す。メッシュ分割については六面体ソリッド 1 次要素とし、PC 鋼より線、マンション、ナット、プレートおよびコンクリートで構成された解析モデルを作成した。それぞれの接触条件は結合接触またはすべり接触（静止摩擦係数および動摩擦係数：0.4）とし、境界条件は完全変位固定とした。また、荷重条件として頭部端から 1cm の位置に打撃時間 75 $\mu$ 秒、打撃力 100N を付与し、打撃力を付与した反対側の面の節点における速度成分 (m/s) で曲げ振動を評価した。

ただし、接触条件や境界条件の設定にあたっては、前述したように背面地盤等の影響、頭部定着機構およびアンカー一体における荷重伝達機構が複雑であるため、今後の検討課題としている。

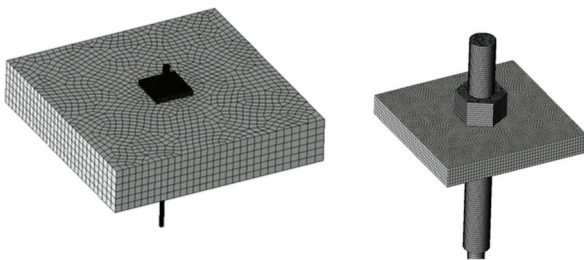
(3) 解析結果

FEM 解析による評価ピーク周波数の算出結果を表-5 に示した。図-12 は、速度成分の時系列データの周波数分布を示したものである。ただし、図-12 の縦軸の表記については、解析ケース毎に周波数が 0~5,000Hz の間で、速度成分 (m/s) の最大振幅で規格化してある（任意単位：au）。

以下に、解析結果に関する考察を述べる。



(a) モデル寸法図



(b) メッシュ分割図

図-11 解析モデルの概要

a) 緊張力の増減に伴う評価ピーク周波数

頭部長  $L_1=145$  mm, 自由長  $L_2=1,055$  mm とした一定条件下（解析ケース I, VII~X）において、緊張力を  $T=50$  kN~ $547$  kN に変化させた周波数分布の解析結果を、緊張力と評価ピーク周波数との関係でとりまとめた図-13 に示す。この結果、模型実験や実大実験と比較してその程度は小さいものの、緊張力の増加に伴い評価ピーク周波数は高周波側にシフトし、単調増加する結果が得られた。例えば、緊張力  $T=50$  kN の評価ピーク周波数と緊張力  $T=547$  kN の評価ピーク周波数の差異は、69Hz（評価ピーク周波数比で 7%の上昇）であった。高緊張力下における頭部拘束状態での接触条件や境界条件の設定等に課題はあるものの、緊張力の増減により評価ピーク周波

表-3 FEM解析に用いた物性値

部 材	ヤング率 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
PC鋼より線	195	0.3	6,070
マンション, ナット	205	0.3	7,840
アンカープレート	206	0.3	7,900
コンクリート	24	0.2	2,400

表-4 FEM解析に用いた解析条件

条 件	部 位	内 容
接触条件	PC鋼より線とマンション	結合接触
	マンションとナット	
	ナットとプレート	
境界条件	プレートとコンクリート	すべり接触 (静止摩擦係数および 動摩擦係数：0.4)
	コンクリート底面	
荷重条件	コンクリート底面	完全変位固定
	PC鋼より線下端	
荷重条件	マンション側面	打撃力：100kN 打撃時間：75 $\mu$ 秒

表-5 FEM解析ケースと結果

解析ケース	頭部長 $L_1$ (mm)	自由長 $L_2$ (mm)	緊張力 $T$ (kN)	評価ピーク周波数 $f$ (Hz)	
解析ケース I	145	1,055	428	2,106	
解析ケース II		5,000		2,107	
解析ケース III		10,000		2,109	
解析ケース IV	95	1,055		4,010	
解析ケース V	195			1,088	
解析ケース VI	245			672	
解析ケース VII	145			50	2,048
解析ケース VIII				100	2,057
解析ケース IX				214	2,077
解析ケース X		547		2,117	

数が変化することが示された。

b) 頭部長の変化に伴う評価ピーク周波数

自由長  $L_2 = 1,055 \text{ mm}$ 、緊張力  $T = 428 \text{ kN}$  とした一定条件下（解析ケース I, IV~VI）において、頭部長を  $L_1 = 95 \text{ mm} \sim 245 \text{ mm}$  に変化させた周波数分布の解析結果を、評価ピーク周波数と頭部長との関係でとりまとめた図-14 に示す。この結果、頭部長 ( $L_1$ ) が増大することに伴い、評価ピーク周波数は低周波数側にシフトする結果が得られた。例えば、頭部長  $L_1 = 95 \text{ mm}$  の評価ピーク周波数と頭部長  $L_1 = 245 \text{ mm}$  の評価ピーク周波数の差異は、 $3,338 \text{ Hz}$  (83%の低下) であった。この結果は、模型実験や実大実験と同様、頭部長が評価ピーク周波数に与える

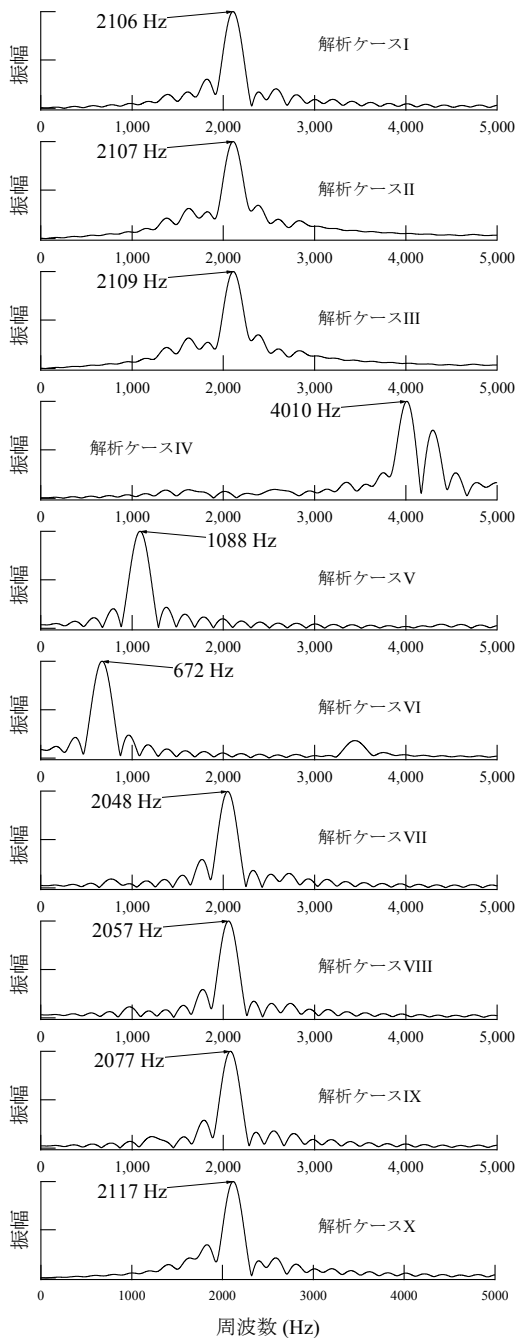


図-12 FEM 解析による周波数分布の算出結果

影響が大きいことを示すものである。

c) 自由長の影響評価

頭部長  $L_1 = 145 \text{ mm}$ 、緊張力  $T = 428 \text{ kN}$  とした一定条件下（解析ケース I~III）において、自由長  $L_2 = 1,055 \text{ mm} \sim 10,000 \text{ mm}$  に変化させた周波数分布の解析結果を、評価ピーク周波数と自由長との関係でとりまとめた図-14 にあわせて示す。この結果、自由長 ( $L_2$ ) が約 10 倍に変化しているのに対し、評価ピーク周波数は  $3 \text{ Hz}$  (0.1%)

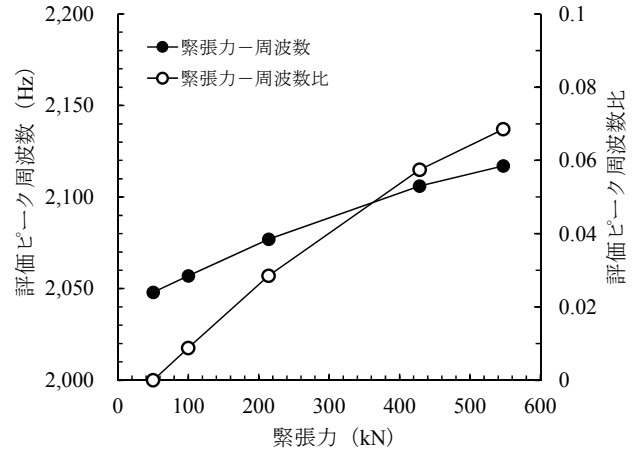


図-13 緊張力と評価ピーク周波数との関係(3)

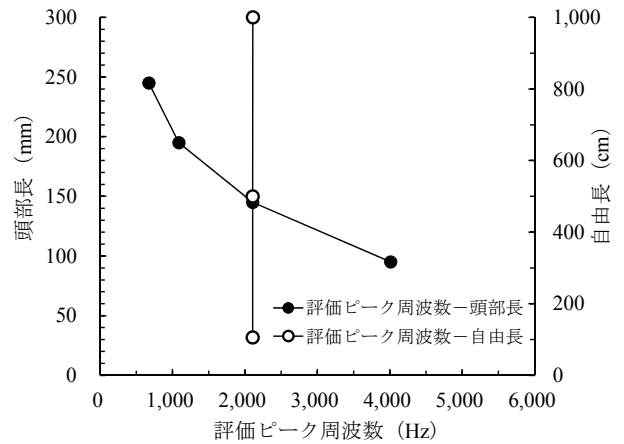


図-14 評価ピーク周波数と頭部長・自由長との関係(2)



写真-2 のり面における現地計測状況例

表-6 現地計測アンカーの諸元

計測箇所	アンカー種類	アンカー区分	計測本数 (本)	頭部径 $D$ (mm)	頭部長 $L_1$ (mm)	緊張力 $T$ (kN)	許容緊張力 $T_a$ (kN)	引張荷重 $T_{is}$ (kN)
A	Type I	新設	16	40	116-145	228	232	387
B	Type II		11	48	169-236	422		
C			52		178-244	411		
D			5		193-212	423		
E	Type I	既設	4	40	123-164	180-207	232	387

の変化にとどまり、図-8 に示したように模型実験で得られた結果と同様、自由長が頭部の振動特性に与える影響は限定的である結果が得られた。

## 6. アンカー緊張力の現地計測

写真-2 に示すように、アンカーを有するのり面において現地計測を行った。以下に、計測条件および計測結果について述べる。

### (1) 計測条件

計測の対象としたアンカーは、定着機構がナットによるネジ式定着である多重より PC 鋼より線タイプで、新設アンカーと既設アンカーにおいて、種々の荷重状態における振動特性について計測を行った。

表-6 に計測を行ったアンカーの緒元を示す。新設アンカーは Type I および Type II の 84 本を対象とし、既設アンカーは Type I の 4 本を対象とした。また、Type I および Type II は、それぞれ表-2 に示す供試体 No. I および供試体 No. II とアンカーのケーブル構成が同一である。

新設アンカーについてはアンカー頭部の緊張・定着作業が完了した後に計測を行い、既設アンカーについては計測後にリフトオフを行い、それぞれ緊張力を把握した。その結果、新設アンカーの緊張力は許容緊張力に対して 96~99%、既設アンカーの緊張力は許容緊張力に対して 78~89%となっている。

また、新設アンカーでは、アンカーの破断などにより頭部の拘束力が著しく低下している状態を模擬し、緊張力が導入されていないケースについてもあわせて計測・評価を行った。

### (2) 計測結果

#### a) 緊張力と周波数分布

図-15 に、計測箇所 D の新設アンカーのうち、緊張力を導入したアンカー（以下、「緊張力有アンカー」という）と、緊張力が導入されていない段階のアンカー（以下、「緊張力無アンカー」という）における周波数分布

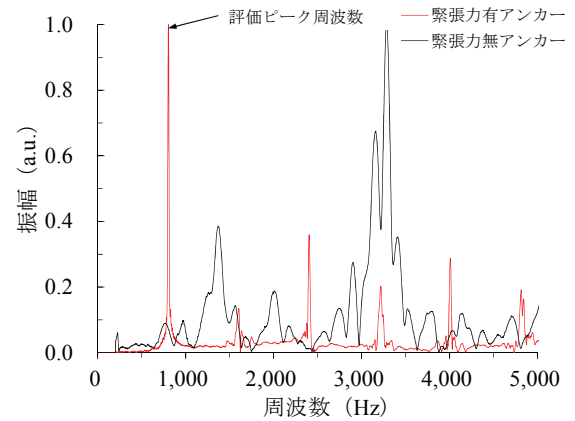


図-15 緊張力の有・無による周波数分布の相違

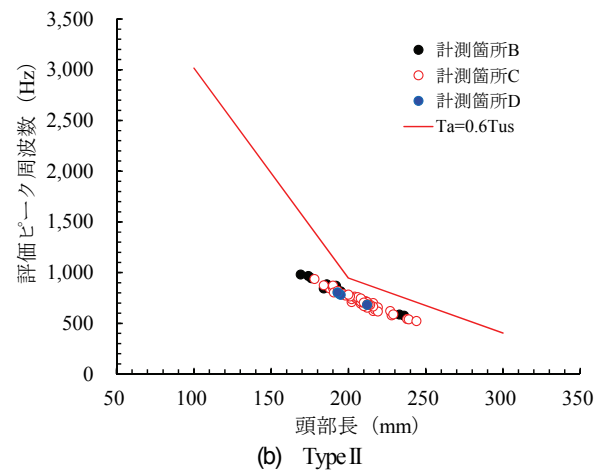
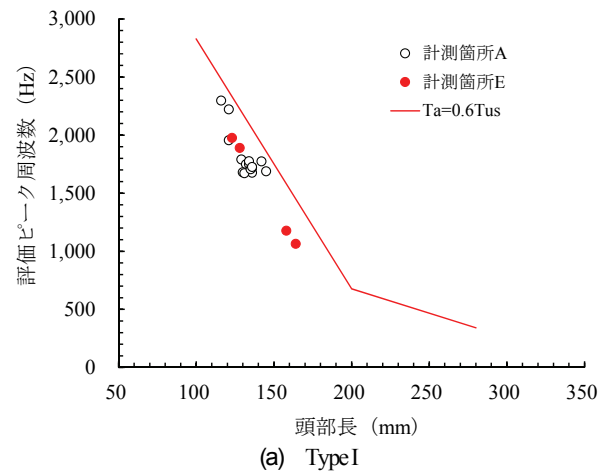


図-16 頭部長と評価ピーク周波数との関係

の一例を示す(縦軸は振幅の最大値で規格化した任意単位である)。緊張力の有・無により周波数分布の形状は大きく異なり、緊張力無アンカーの場合は、評価ピーク周波数の特定が困難な周波数分布の形状となった。このように、緊張力が著しく低下している状態のアンカーを検出可能であることが示された。

またこのことは、緊張力の相違により評価ピーク周波数が変化していることを裏付けるものである。

**b) 頭部長と評価ピーク周波数**

図-16 は、現地計測結果を頭部長と評価ピーク周波数との関係でとりまとめたものである(図中の凡例に示す記号は表-6 の計測箇所に対応する)。また、図中の  $T_a = 0.6T_{ts}$  の実線は、図-10 に示す実大実験で得られた許容緊張力  $T = 0.6T_{ts}$  のときの評価ピーク周波数と頭部長との基準線である。

計測箇所 A~D における新設アンカーの評価ピーク周波数は、緊張力が一定の場合、頭部長が長くなるにしたがい低周波側にシフトする結果が得られた。また、表-6 に示したように緊張力は許容緊張力以下となっているため、図-16 においても許容緊張力以下にプロットされていることが確認できる。

計測箇所 E の既設アンカーについても、同様に緊張力は許容緊張力以下であるため、図-16 においても許容緊張力以下にプロットされていることが確認できる。

このように、アンカー種類ごとに荷重状態に応じた頭部長-評価ピーク周波数の基準線を事前に取得しておくことにより、許容緊張力に対する緊張力状態を把握できることが示唆された。

**(3) 評価ピーク周波数による緊張力の予測検討**

本研究では、緊張力が導入された頭部の振動特性に着目し、その振動特性を評価する指標となる評価ピーク周波数と緊張力との関係について、室内実験およびFEM解析を行い、その有用性について検討を行ってきた。

本稿では、いくつか想定される方法<sup>2)</sup>から、式(4)に示すような現地計測で取得した評価ピーク周波数と実大実験により取得した評価ピーク周波数により構成した回帰分析モデルを用いて緊張力を予測することを試みた。ただし、実大実験と現地計測とでは、アンカー頭部の背面状態に相違があり、それらの条件が与える影響は今後の課題であると考えられる。

$$T = \alpha \cdot (f' / f_{Ta})^2 + \beta \tag{4}$$

ここに、 $T$ : 緊張力 (kN),  $f'$ : 現地計測での評価ピーク周波数 (kHz),  $f_{Ta}$ : 図-16 における  $T_a (= 0.6T_{ts})$  の基準線から得られる評価ピーク周波数 (kHz),  $\alpha, \beta$ : 係

表-7 分散分析と回帰係数

アンカー種類	分散分析				回帰係数	
	F値	P値	F(0.90)	F(0.95)	$\alpha$	$\beta$
Type I	3.952	0.062	3.007	4.414	74.1	168.6
Type II	10.972	0.015	2.783	3.986	-28.4	430.1

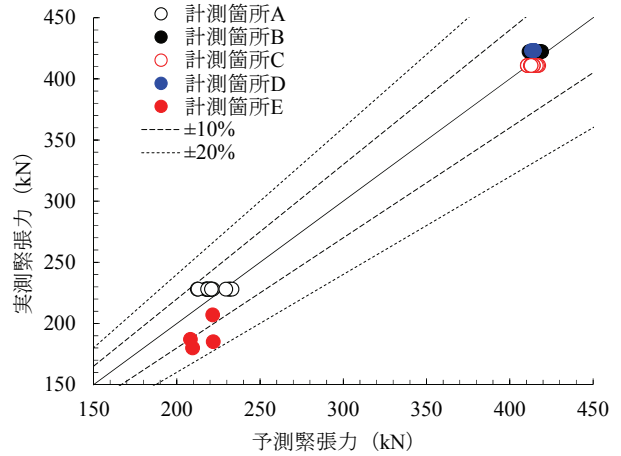


図-17 予測緊張力と実測緊張力との対比

数である。なお、縦弾性係数、密度などの物性値の影響については、係数に包含しているものと考えた。

表-7 は、Type I および Type II における回帰分析の分散分析および回帰係数の算出結果を示したものである。Type I および Type II は、それぞれ危険率 10% および危険率 5% で有意となる結果が得られた。

図-17 は、式(4)および表-7 により得られた回帰係数を用いて算出した予測緊張力を実測の緊張力と対比したものである。Type I は実測緊張力に対して予測緊張力が大きくなっているアンカーもみられるが、全 88 本のアンカーのうち 97% のアンカーについては、±10% の精度で緊張力が予測された。

**7. まとめ**

本稿では、多重 PC 鋼より線タイプのアンカーを対象に、打音診断技術を活用したあらたな緊張力計測手法について、室内実験、FEM 解析および緊張力の現地計測結果を通じて適用性の評価・検証ならびに課題抽出を行い、以下の知見および課題が得られた。

- (1) 模型実験において、緊張力の増加に伴い評価ピーク周波数が高周波側にシフトし、単調増加する傾向が認められた。また、評価ピーク周波数は、頭部長に依存する影響が大きく、自由長に依存する程度が小さいことが示された。
- (2) 実大実験においても、評価ピーク周波数は緊張力の増加に伴い高くなることが確認できた。また、高緊張

領域下において評価ピーク周波数は収束傾向となるものの、低緊張状態では緊張力の増減に伴う評価ピーク周波数の差異が明確になることが確認できた。

- (3) FEM 解析においても、室内実験と同様、緊張力の増減に伴い評価ピーク周波数も変化することが示された。また、評価ピーク周波数は頭部長に依存する影響の程度は大きく、自由長が頭部の振動特性に与える影響は少ないことが示された。
- (4) 緊張力の有・無により周波数分布の形状は大きく異なり、緊張力無アンカーは評価ピーク周波数の特定が困難な周波数分布の形状となるため、緊張力が著しく低下している状態のアンカーを検出可能であることが示された。
- (5) 現地計測で取得した評価ピーク周波数を、実大実験により取得した評価ピーク周波数により補正する回帰分析モデルは、緊張力の予測において一定の精度を得ることを示した。

## 8. おわりに

打音診断技術を活用したアンカーのあらたな緊張力計測手法については、計測の精度や振動特性の評価指標の算出に改善の余地があるものと考えられる。また、現地計測の対象となったアンカーの種類や荷重状態も限定的であるとともに、アンカーの背面地盤や荷重伝達機構におけるアンカーと地盤との相互作用など、検討すべき幾つかの課題がある。

今後も様々な条件のアンカーにおいて計測を行いデータを蓄積するとともに、アンカー周辺の影響を踏まえた検討や高次の固有振動数にも着目した周波数解析を行うなど、本技術の精度向上を行い、アンカーの点検・管理の高度化に向けた一助としたいと考える。

## 参考文献

- 1) 山田浩：グラウンドアンカー工法技術の進歩とその歴史（その2）－耐久性と維持管理－，斜面防災技術，Vol. 35, No. 3, pp. 13-20, 斜面防災対策技術協会，2009.
- 2) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会：報告書，pp. 52-53, p. 66, 2014.
- 3) 西日本高速道路（株）：<http://corp.w-nexco.co.jp/corporate/release/hq/h28/0330c/>，2016.3.
- 4) 殿垣内正人，竹本将，藤原優，野崎晃，矢野法孝：

グラウンドアンカーの維持管理における課題解決に向けた取り組み，基礎工，Vol. 41, No. 10, pp. 57-60, 総合土木研究所，2013.

- 5) 明石達雄，内田純二，小島秀範：M リングを用いたグラウンドアンカー緊張力の長期計測の検証，第 64 回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp. 109-110, 2010.
- 6) 岩本勲哉，塩谷智基，大津宏康，前田良刀，浜崎智洋：グラウンドアンカー緊張力の超音波による非破壊評価に関する研究，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2012 論文集，pp. 7-12, 2012.
- 7) 熊野秀樹，加古晃弘，磯部仁博：ケミカルアンカーの検査技術開発，第 13 回日本保全学会学術講演会要旨集，pp. 267-268, 2016.
- 8) 匂坂充行，松永嵩，小川良太，鶴飼康史，磯部仁博：AE センサを用いたメカニカルアンカーの非破壊検査技術の開発，第 12 回日本保全学会学術講演会要旨集，pp. 365-366, 2015
- 9) 地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説(JGS4101-2012)，pp. 46-47, 2012.
- 10) 日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針（平成 21 年度版），pp. 294, 2009.
- 11) 大窪克己，竹本将：高速道路斜面の維持管理について－特にグラウンドアンカーについて－，地盤と調査，2008 年 1 月号，pp. 13-18, 2008.
- 12) 浜崎智洋，笠間清伸，前田良刀，田口浩史：グラウンドアンカーの劣化度モデルと維持・更新に関する検討，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 71, No. 3, pp. 191-203, 2015.
- 13) 日本アンカー協会：グラウンドアンカー施工のための手引書，pp. 111, 2003.
- 14) 土木研究所，日本アンカー協会：グラウンドアンカー維持管理マニュアル，pp. 74, 2008.
- 15) 地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説（JGS4101-2010），pp. 117-118, 2010.
- 16) 末岡淳男，金光陽一，近藤孝広：機械振動学，pp. 124-125, 朝倉書店，2000.
- 17) 佐藤勇一：振動の捉え方，pp. 176-181, オーム社，2010.
- 18) 村上琢哉，盛川仁：時間一周波数解析を用いたボルトの緩み検出方法に関する一考察，土木学会応用力学論文集，Vol. 9, pp. 1111-1120, 2006.
- 19) ADVENTURECluster: <http://www.alde.co.jp/service/adv/index.html>, 2018.3.
- 20) ADVENTURE プロジェクト：<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>, 2018.3.
- 21) 浜崎智洋，松永嵩，小川良太，磯部仁博，佐山政幸，佐山勝一：AE センサを用いた打音検査によるグラウンドアンカーの緊張力評価 その 2，第 15 回日本保全学会学術講演会要旨集，pp. 131-134, 2018.

(2018. 4. 12 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY FOR ESTIMATING TENSION FORCE OF GROUND ANCHORS BY HAMMERING TECHNOLOGY

Tomohiro HAMASAKI, Kiyonobu KASAMA, Takashi MATSUNAGA,  
Ryota OGAWA, Yoshihiro ISOBE and Masayuki SAYAMA

The ground anchor has been used as one of stabilizing technologies for cut slopes. The measurement of residual tensile force of ground anchor has been conventionally carried out by lift-off testing, however the development of a simple alternative tension measuring method is required in terms of cost and time.

In this study, we have been continuously developing the application of a digital hammering technology using an acoustic emission sensor, which has been practically used as an anchor bolt inspection in nuclear power plants, etc. to the estimation of the tensile force of ground anchors.

This paper shows our approach to evaluate and verify the applicability of the technology and to find out remaining tasks based on laboratory testing, finite element method (FEM) analyses and field inspection results in order to try to estimate the tensile force of ground anchor with the screw type anchorage device.