

AEセンサー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

Evaluation of tension of ground anchor by hammering test using AE sensor Vol.2

| | | | |
|------------|-------|-------------------|--------|
| 西日本高速道路(株) | 浜崎 智洋 | Tomohiro HAMASAKI | |
| 原子燃料工業(株) | ○松永 嵩 | Takashi MATSUNAGA | Member |
| 原子燃料工業(株) | 小川 良太 | Ryota OGAWA | Member |
| 原子燃料工業(株) | 磯部 仁博 | Yoshihiro ISOBE | Member |
| (有)マサクリーン | 佐山 政幸 | Masayuki SAYAMA | |
| (有)マサクリーン | 佐山 勝一 | Shoichi SAYAMA | |

Abstract

The purpose of this research is development of tension measurement method using diagnostic technique of hammer sound using acoustic radiation sensor. This report summarizes the method of evaluating the anchor tension based on the natural frequency of the anchor head and the applicability of the method to measured data at the site.

Keywords: ground anchor, nondestructive inspection, tension, acoustic emission sensor

1. はじめに

社会インフラや工場設備等の維持管理において、健全度を調査する手段の一つとして従来から打音点検が行われてきた。打音法は、調査対象をハンマで打撃し、その時の打撃により生じた音とハンマを通した打感との二つから、検査者が異常の有無を判定する手法である。しかしながら、打音法の判定結果は検査者の熟練度に大きく依存しているため、判定結果に対する信頼性が充分とは言えず、調査対象の健全性の定量的な診断を精密に行うことが困難であった。そこで、筆者らは、あと施工アンカーの健全性評価を目的として開発されたAcoustic Emission(以下、「AE」という)センサを用いた客観性・記録性・定量性のある打音診断技術¹⁻²⁾を、土木構造物のグラウンドアンカー(以下、「アンカー」という)の緊張力評価へ適用させることを試みた。

既往の研究により、アンカー頭部の振動特性がアンカー導入された緊張力と相関があることが、実験及びFEM理論から明らかになった³⁻⁵⁾。したがって、本報では、高速道路のり面に施工されたアンカーの頭部振動特性と、そのアンカーに導入された緊張力を比較評価することで、アンカー頭部の振動特性に基づく緊張力評価の現場適用性を検討した。

2. AEセンサを用いた打音診断技術

2.1 測定、評価方法

AEセンサを用いた打音診断技術の振動測定方法は、**図 1**に示すように、アンカーの頭部側面にセンサを押し当て、アンカー頭部側面を打撃する。これにより、信号波形が得られ(**図 2**上図)、この信号波形を高速フーリエ変換(FFT)処理することにより、複数の固有振動ピークを含んだ周波数分布を得る(**図 2**下図)。

既往の研究により、緊張力と曲げ振動の固有振動数に相関があること、さらに、1次モードの固有振動数と比較し、2次モードの固有振動数の方が緊張力に対する感度が高いことが示されたため⁶⁾、本報では、2次モードの曲げ振動の固有振動周波数(以下「2次周波数」という)を緊張力評価指標とした。

ここで、曲げ振動の固有振動数 f は、以下に示す片持ち梁の曲げ振動の理論解から算出した。また、軸力を受ける場合の固有振動数 f' は、式 (2) となる。但し、 λ ; 固有値、 L ; 振動長さ、 E ; 縦弾性係数、 I ; 断面定数、 ρ ; 密度、 A ; 断面積、 T ; 軸力、 P_C : オイラーの限界荷重、 n ; 振動モードである。

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

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

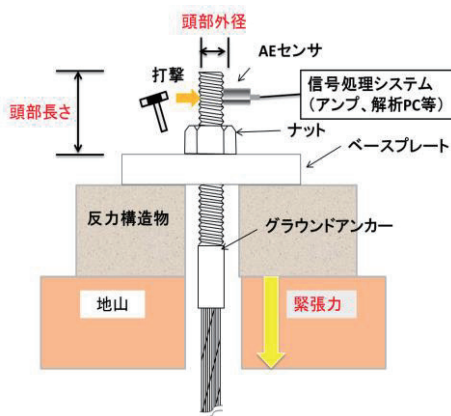


図 1 AEセンサを用いた打音検査の概略図

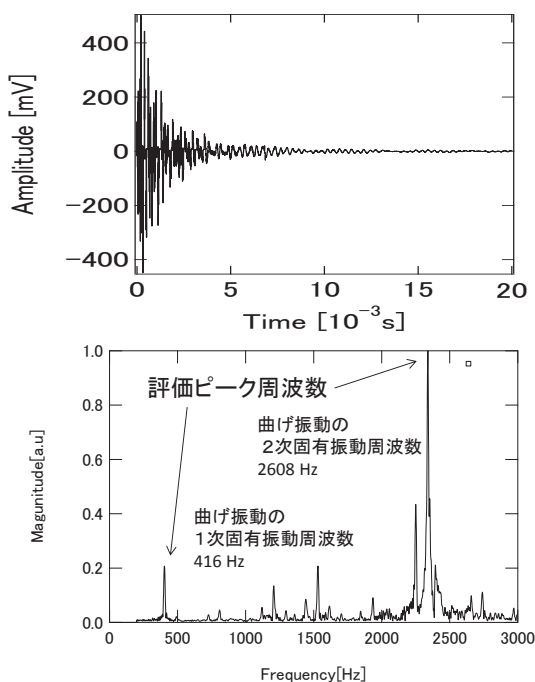


図 2 振動波形と周波数分布

2.2 緊張力評価のアプローチ

緊張力が導入されたアンカー頭部の曲げ振動の固有振

動数は、梁の曲げ振動理論を参考にすると、以下の関係があると推察される。

- ① アンカー頭部の形状と周波数の関係：曲げ振動の固有振動数は、頭部長さの2乗に反比例し、頭部径に比例
- ② 緊張力と周波数の関係：緊張力を受けた周波数と任意の周波数の比（以下「周波数比」という）は、緊張力の平方根に比例

そこで、アンカー頭部の振動特性に基づく緊張力評価のアプローチを2段階に分けて検討した。

i) アンカー頭部の形状と周波数の関係式の導出

緊張力は一定であり、頭部形状（頭部長さ、頭部径）が異なるアンカーの振動測定データに基づき、アンカー頭部の形状と周波数の関係式（式 (3)）を算出する。

本式は、式 (1) を参考に、頭部形状の項を変数として抽出している。また、片持ち梁の理論と現実のアンカーの固定状態は異なることから、切片を加える形でモデル化した。

但し、 L ; 頭部長さ、 D ; 頭部径、 α, β ; 回帰係数である。

$$f_0(L, D) = \alpha \frac{D}{L^2} + \beta \quad (3)$$

ii) 緊張力評価式の導出

式 (3) と緊張力が異なるアンカーの振動測定データに基づき、緊張力評価式（式 (4)）を算出する。

本式は、式 (2) を参考に、周波数比の2乗に比例する形とした。また、片持ち梁の理論と現実のアンカーの固定状態は異なることから、切片を加える形でモデル化した。

但し、 T ; 緊張力、 f' ; 振動測定で得られた曲げ振動の固有振動周波数、 γ, δ ; 回帰係数である。

$$T = \gamma \left(\frac{f'}{f_0(L, D)} \right)^2 + \delta \quad (4)$$

3. 現場測定データに基づく緊張力評価

3.1 現場測定アンカーの諸元

高速道路のり面に施工されたアンカーに対し、AEセンサを用いた打音診断技術を用いて、アンカー頭部の振動を測定した。アンカーの種類は、上部固定形式がナット定着タイプで、緊張材が PC 鋼より線タイプのものを

対象とした。各試験箇所とその諸元を表 1 に示す。緊張材の構成が $1 \times \phi 21.8$ である。なお、新設アンカーについては、頭部の緊張・定着作業が完了した後に打音診断を行った。一方、既設アンカーについては、打音診断後にリフトオフ試験を行い、緊張力を把握した。

表 1 現場調査箇所及びアンカー諸元

| 試験箇所 | 区分 | 試験本数 | 頭部外径 [mm] | 頭部長さ [mm] | 緊張力 [kN] | 許容アンカー力に対する緊張力比 | 許容アンカー力 0.6Tus [kN] |
|------|----|------|-----------|-----------|-------------|-----------------|---------------------|
| 1 | 新設 | 19 | 48 | 119~145 | 244 | 71% | 343.8 |
| 2 | 新設 | 21 | | 161~268 | 319.6~339.6 | 93%~99% | |
| 3 | 既設 | 4 | | 165~173 | 237~273 | 69%~79% | |

3.2 頭部形状と 2 次周波数の関係式の導出

アンカー振動部の形状と周波数の関係式については、頭部長さの異なるデータが多く、また緊張力がほぼ一定の表 1 の試験箇所 2 の現場データを用いた。縦軸に振動測定結果より抽出した 2 次周波数、横軸にアンカー頭部の形状に関するパラメータ (D/L^2) としたグラフを図 3 に示す。

緊張力がほぼ一定の場合、得られた 2 次周波数は D/L^2 と比例関係があり、 $R^2=0.97$ で良い相関がある。

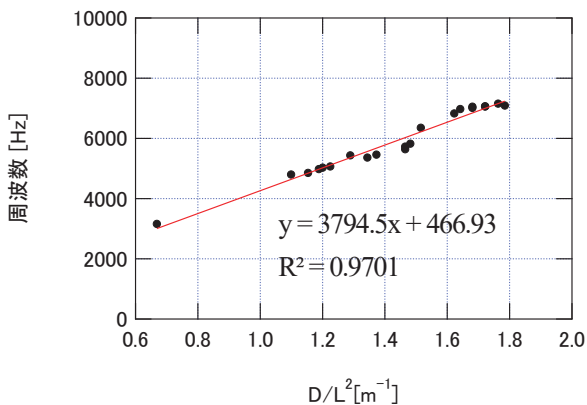


図 3 アンカー頭部の形状と 2 次周波数の関係 (調査箇所 2)
 回帰線 $f_0(L, D)$: 緊張力が 319.6~339.6 kN における任意の頭部長さ、頭部径における基準の周波数

3.3 緊張力評価式の導出と評価誤差

縦軸に振動測定結果より抽出した 2 次周波数、横軸にアンカー頭部の形状に関するパラメータ (D/L^2) としたグラフを図 4 に示す。

調査箇所 2 より低い緊張力である、調査箇所 1 および 3 のアンカーの 2 次周波数は、調査箇所 2 の直線回帰線より概ね低周波側の値となった。これは、既往の室内試

験で得られた、緊張力が増加/低下に伴い、周波数が上昇/低下する傾向と符合する。

次に、緊張力評価式を導出するため、横軸を周波数比の二乗、縦軸を緊張力としたグラフを図 5 に示す。これらのプロットの単回帰線が緊張力評価式となる。この緊張力評価式から算出した推定緊張力と実際の緊張力の対比を図 6 に示す。

推定緊張力の評価精度としては、44 本中 25 本 (57%) のアンカーが許容アンカー力の $\pm 10\%$ (± 34 kN) の範囲で推定可能であり、 $\pm 20\%$ に全アンカーが収まる結果となった。今回の現場データについては、調査箇所によって、アンカーの設置状況 (アンカープレートや受圧版) が異なるため、これらの影響についても今後検証していくことが重要である。

その上で、①基準周波数の決定精度、② 2 次周波数の抽出精度、を改善させるにより、緊張力評価精度を向上させる。①に関しては、頭部長さが異なるアンカーのデータを拡充することで精度を向上することが可能である。また、②に関しては、現在検証進めているが、振動測定方法によって改善可能である見通しを得ている。

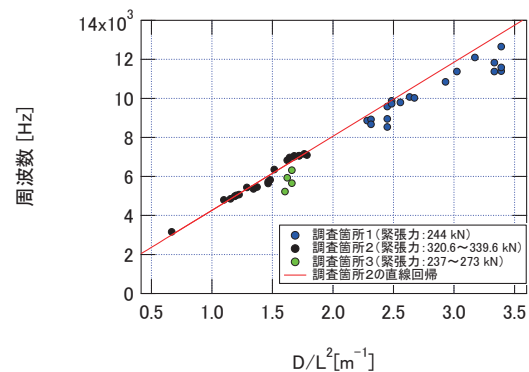


図 4 アンカー頭部の形状と 2 次周波数の関係 (全データ)
 回帰線 $f_0(L, D)$: 緊張力が 319.6~339.6 kN における任意の頭部長さ、頭部径における基準の周波数

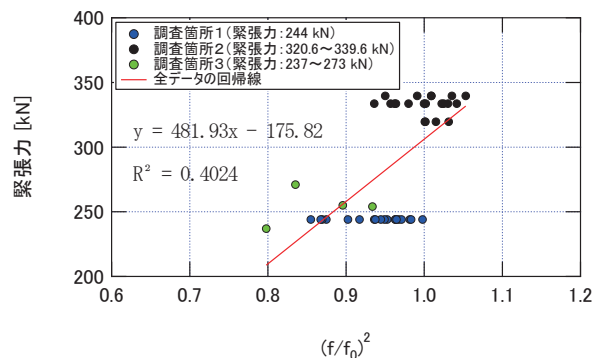


図 5 緊張力と周波数比の関係
 回帰線 : 緊張力評価式

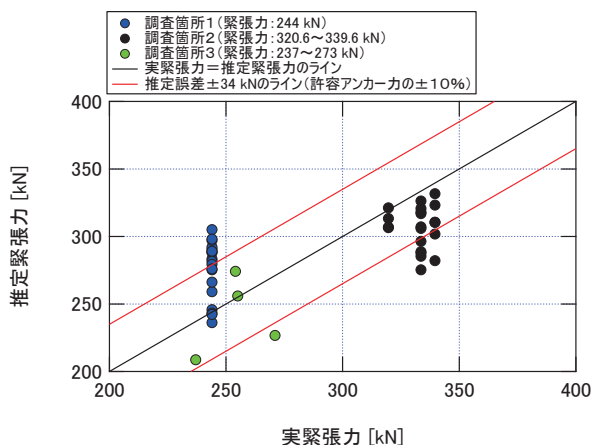


図 6 緊張力評価式による推定緊張力と実緊張力の対比

4. まとめ

本稿では、アンカーの頭部振動特性から緊張力を評価する方法を検討し、その手法を高速道路の法面に施工されたアンカーに適用した結果について取りまとめた。以下、得られた知見をまとめる。

- ・ 緊張力評価のアプローチとして、梁の曲げ振動理論を参考とし、①緊張力一定下におけるアンカー頭部形状と周波数の関係式（基準周波数）を算出し、②実際の測定で得られた周波数と先に導出した基準周波数との比（周波数比）と緊張力との関係式より、アンカーに導入された緊張力を評価する手法を考案した。
- ・ 一定緊張力下のアンカーでは、その頭部外径 D と頭部長さ L を用いた、アンカー頭部の形状に関するパラメータ (D/L^2) と周波数の関係は、理論通り比例関係となり、 $R^2=0.97$ で良い相関があることが分かった。
- ・ アンカー頭部の形状に関するパラメータ (D/L^2) 一定下では、緊張力が増加/低下に伴い、周波数が上昇/低下する結果が得られ、このことは既往の室内試験で得られた知見と符合する。
- ・ 現場で測定したデータおよび緊張力から、緊張力評価式を導出し、同一のデータで評価精度を検証、

推定した結果、44 本中 25 本 (57%) のアンカーが許容アンカー力の $\pm 10\%$ (± 34 kN) の範囲で推定可能であり、 $\pm 20\%$ に全アンカーが収まる結果となった。今回の現場データについては、調査箇所によって、アンカーの設置状況（アンカープレートや受圧版）が異なるため、これらの影響についても今後検証していくことが重要である。

- ・ 今後の展開として、①基準周波数の決定精度、②2次周波数の抽出精度を向上させることにより、緊張力評価精度を向上させる。①に関しては、頭部長さが異なるアンカーのデータを拡充することで精度を向上することが可能である。また、②に関しては、現在検証を進めているが、振動測定方法によって改善可能である見通しを得ている。

参考文献

- [1] 熊谷秀樹ら, “ケミカルアンカの検査技術開発”, 日本保全学会第 13 回学術講演会, pp.267-268.
- [2] 小川良太ら, “AE センサを用いた打音検査システムによるメカニカルアンカ検査技術の開発 2”, 土木学会第 71 回年次学術講演会, pp.1423-1424.
- [3] 松永 嵩ら, “グラウンドアンカーの頭部振動特性による緊張力評価システムの開発 (その 1) - 振動特性評価に関する考察 -”, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1295-1296, 2017
- [4] 浜崎 智洋ら, “グラウンドアンカーの頭部振動特性による緊張力評価システムの開発 (その 2) - 現地計測結果に関する評価・検証 -”, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1297-1298, 2017
- [5] 小川 良太ら, “グラウンドアンカーの頭部振動特性による緊張力評価システムの開発 (その 3) - FEM 解析による検証 -”, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1299-1300, 2017
- [6] 浜崎 智洋ら, “AE センサー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 1”, 保全学会 第 15 回学術講演会, 2017 投稿予定