

振動を用いた電柱基礎の簡便な健全度診断技術の開発

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○生頼 直樹

広島大学大学院工学研究科 正会員 一井 康二

1. はじめに

現在、日本には電力柱のみで 2000 万本以上¹⁾の電柱が存在し、その電柱および電柱地盤の点検は目視によって行われている。しかし目視点検では支持地盤の状態までは把握できず、劣化を見逃してしまう恐れがある。そこで目視に頼らない電柱基礎の点検手法の開発が求められている。さらに対象となる電柱の数が膨大であるため、迅速に点検が実施可能な手法が必要とされている。

本研究では、電柱基礎の状態や電柱の剛性に依存する指標である固有振動数の変化から電柱基礎の健全度診断を簡便に実施する手法および基準を提案する。そのために、まず力学モデルを用いて地盤劣化と固有振動数の関係について検討を行い、地盤劣化に対応する固有振動数の変化が計測機で検出可能なレベルであるかについて検討した。次に、従来の振動計は野外計測には不向きであるため、新たに iPod を振動計測機として用いた簡便な振動計測手法の開発について検討を行った。さらに、実際に電柱において振動計測を実施し、その適用性を確かめた。最後に、実際の計測結果とモデル解析の結果をもとに、健全度診断指標について提案した。

2. 電柱の固有振動数と劣化の関係

計算を行うにあたり、本研究では電柱は地表面より下の部分は無視できると仮定し、地盤に剛結している片持ち梁としてモデル化を行った。そして、電柱が固定されている状態を健全であると考え。しかし降雨や地震動などの影響により、電柱と支持地盤の間に隙間やゆるみが発生することが考えられる。こうした隙間やゆるみが生じた地盤層は水平支持能力を失ったことに等しく、見かけ上根入れ長さが減少したことを意味する。本研究ではこの根入れ損失を劣化であると定義し、固有振動数の変化からこれを検出することを目的とする。図-1 に根入れ損失のイメージを示す。

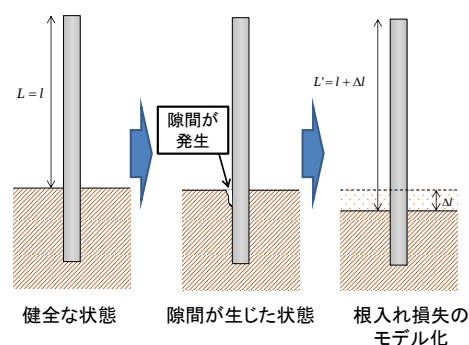


図-1 根入れ損失のイメージ

固有振動数の算出は、連続体の近似的な固有振動数算出法のひとつである Rayleigh-Ritz 法により行った。この手法では振動モード形状を表す変位関数を、求めたい最大振動モードの次数以上設定する必要がある。本研究では 2 次の固有振動数までを計算することを目的に、まず以下の 2 つの多項式を仮定した。

$$\phi_1(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 + C_4x^4 \quad (1)$$

$$\phi_2(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 + C_5x^5 \quad (2)$$

そして、これらに対して片持ち梁の境界条件を適用して、境界条件を満たす係数を求めた。(3)(4)式に本研究で用いた変位関数を示す。

$$\phi_1(x) = 2\left(\frac{x}{L}\right)^2 - \frac{4}{3}\left(\frac{x}{L}\right)^3 + \frac{1}{3}\left(\frac{x}{L}\right)^4 \quad (3)$$

$$\phi_2(x) = 4\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 + \frac{1}{5}\left(\frac{x}{L}\right)^5 \quad (4)$$

固有振動数と根入れ損失 Δl の関係は、柱長 l に加えて自由振動する長さが根入れ損失量 Δl だけ増加するとして計算した。図-2、図-3 に結果を示す。これらの図より、現実的に測定可能な 0.1Hz の固有振動数の変化は 1 次固有振動の場合は 0.3m、2 次固有振動の場合は 0.1m の根入れの変化に対応することがわかった。またこれらの根入れ損失の値は現実的に生じ得ると考えられるレベルである。

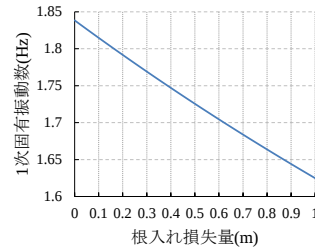


図-2 劣化と
1 次固有振動数の関係

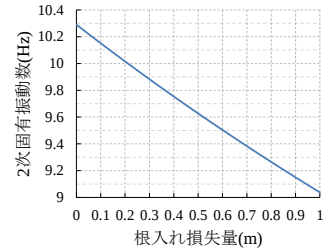


図-3 劣化と
2 次固有振動数の関係

3. 振動計測手法

本研究では、簡便な計測機器として iPod を用いることを検討した。従来の振動計では電源ユニットや A/D コンバーター等の多くの周辺機器を必要とするため煩雑であり、野外計測には不向きである。一方 iPod は内部に小型の加速度計を内蔵しており、内部電源で駆動するため iPod 単体で振動計測を行うことが可能である。したがって簡便に振動を計測できる手法となることが期待できる。ただし、iPod は振動計測を目的として設計されていないため、その振動計測性能に関しては試験によって検証を行う必要がある。

そこで、そこで計測対象振動数となる 1~10Hz の範囲において、iPod が十分な振動計測性能を有しているかを実験によって検討した。実験は次の手順で行った。まず振動数(起振振動数)を任意に設定できる小型振動台を用いて、0.5~10Hz まで 0.5Hz 刻みで振動を iPod およびレーザー変位計で同時に計測する(図-4)。そして計測結果を高速フーリエ変換することによって卓越振動数を求め、比較した。図-5 に結果を示す。図-5 よりそれぞれで得られた振動数はほぼ一致していることがわかる。以上より、iPod は計測対象範囲において高精度に振動数を検出できていることがわかった。

次に、iPod を電柱に設置するための治具について検討を行った。本研究では iPod を工作用粘土に埋め込み、それらをバックルが付属したマジックテープで電柱に固定する方法を考案した。写真-1 に提案した治具による iPod 設置イメージを示す。提案した治具は計測を除く設置・水平調整・撤去の作業は 1 分程度で遂行可能であり、迅速に計測を行うことが出来る。さらに計測される振動数に悪影響が生じないことを実験により確認した。

以上より、iPod が電柱振動計測において十分な性能を有していることが確かめられ、さらにそれを用いて迅速に振動計測を実施可能な手法を確立することができた。

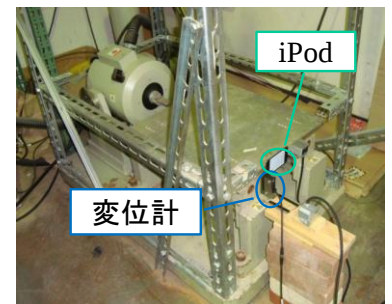


図-4 実験風景

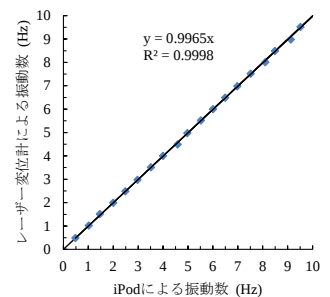


図-5 実験結果

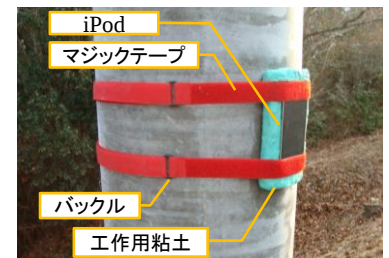


写真-1 iPod 設置用治具

4. 電柱における振動計測結果

ここでは検討を行ってきた計測手法によって電柱の固有振動数が検出できるかを検証するため、実際に電柱の振動計測を実施した結果について述べる。今回計測対象としたのは、広島大学鏡山地区の電柱 8 本であ

る。地上部長さ、電線の数、支線の有無など、条件はそれぞれ異なる。計測はまず iPod を電柱に設置し、その後人力で電柱を打撃し、生じた自由振動をそれぞれの計器で計測するという手順で実施した。また、図-6 のようにレーザー変位計でも比較のために振動を計測した。そして得られた時刻歴波形を高速フーリエ変換し、フーリエスペクトルの卓越振動数を読み取ることで固有振動数を得た。図-7 に計測結果の例を示す。

図-7 において、レーザー変位計では 1.8Hz 付近と 8Hz 付近の 2 つのピークが確認できる。これらは片持ち梁モデルによる固有振動数解析結果から、それぞれ 1 次固有振動数、2 次固有振動数に対応していると考えられる。一方、iPod のデータを見ると、9Hz 付近の一箇所のみピークが確認できる。つまり 2 次固有振動数と考えられる振動数は検出できているが、1 次固有振動数と考えられる振動は検出できていないものと考えられる。これは、変位の振幅がすべての振動数において同程度であったとしても、振動数が小さいほど加速度振動レベルも小さくなるため、1 次固有振動の加速度レベルは検出可能レベルを下回った結果であると考えられる。以上より、本研究で提案した手法により、1 次固有振動数は検出できないが、2 次固有振動数は検出可能であることがわかった。

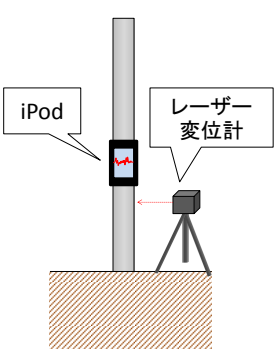


図-6 計器の設置イメージ

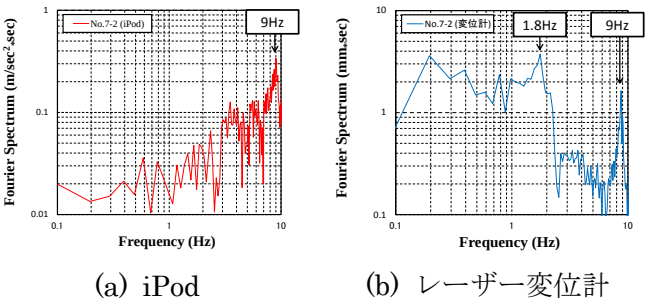


図-7 計測結果の例

5. 計測手法の適用範囲

ここでは、本手法の適用条件を確認するため、設置条件の異なる電柱において振動計測を実施した。そして、電柱を条件に応じて3つのグループに分け、どのグループに属する電柱であれば安定して固有振動数が検出できるかについて検討した。それぞれのグループの設置条件は、グループ A は電線の走向が線対称であり、支線の影響を受けないもの、グループ B は電線が線対称で、支線が設置されているもの、グループ C は電線の走向が非線対称のもの、である。

写真-1 にそれぞれの例を示す。そしてそれぞれのグループ毎にフーリエスペクトルからの固有振動数検出成功率を算出した。検出成功とみなす基準は、①フーリエ振幅の最大値が明瞭なピークを示している、②ピークに相当する値が2つ以上存在しないこと、の2点である。結果を表-1 に示す。

表-1 より、グループ A の成功率が高いことがわかる。これは自由振動の妨げになるものが少なかったため雑振動がほとんど発生せず、低いノイズレベルで電柱の振動を計測できたためであると考えられる。グループ B は標本数が1つしかないため確かなことはいえないが、支線は電柱の振動にあまり影響を与えない可能性があることがわかった。グループ C の検出成功率は他と比較して非常に低い結果となった。これは電柱に電線による拘束が多方向から加わるため、自由振動の振幅レベルが低かったこと、電柱の自由振動以外に電線の振動などの雑振動が混入したことなどが原因であると考えられる。以上の結果から、本研究で提案した計測手法は電線の走向が線対称であり、支線がない電柱に対しては有効であると考えられる。



(a)グループ A (b)グループ B (c)グループ C
写真-1 各グループの電柱の例

表-1 検討結果

グループ名	計測対象数	検出できた数	検出成功率(%)
グループA	4	3	75
グループB	1	1	100
グループC	3	1	33

6. 健全度診断基準の提案

本研究では健全な状態における基準固有振動数 μ に対して健全な範囲を α で与え、点検対象となる電柱において計測された固有振動数 f が(5)式

$$\mu - \alpha < f < \mu + \alpha \quad (5)$$

の範囲に収まった場合を健全と判断する健全度診断基準を提案する。なお、計測する固有振動数 f として、iPod で検出可能な 2 次固有振動数を用いる。

それぞれの指標の値の設定方法について、まず基準固有振動数は、それぞれの電柱が建設された直後に計測によって得ることが望ましい。しかし本研究の期間中に電柱の新設に立ち会うことが出来なかったため、図-6 に設置後 2 年が経過した電柱を対象に、固有振動数を 1 週間に渡って計測し、その平均値を基準固有振動数とした例を示す。

次に、健全度の閾値 α については $\alpha=0.1\text{Hz}$ を提案する。図-6 に実際の計測で得られた固有振動数の変動と、閾値の関係を示す。これは図-3 より、約 10cm の根入れ損失が発生した状況に等しく、異常が生じ始めている状態であると言える。また、計測で得られる固有振動数の変動が正規分布に従うと仮定した場合、今回計測対象とした電柱では、1 週間に渡る固有振動数の変動の標準偏差が 0.033Hz であった。よって、計測した固有振動数が 0.1Hz 以上変化する確率は 0.3%であり、このレベルの変化が生じた場合は何らかの異常を疑うことが合理的であるといえる。

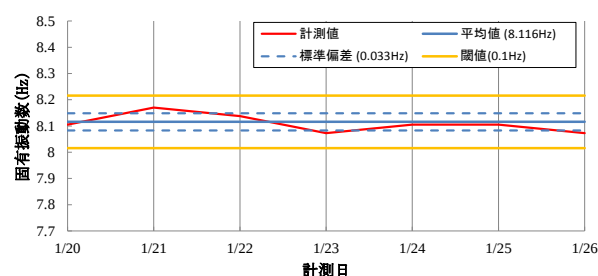


図-6 固有振動数の変動と閾値

7. まとめ

本研究では、iPod を用いた簡便な電柱振動計測手法を提案した。また健全な状態における固有振動数に対して健全な範囲を示す閾値を設定することで、電柱基礎の健全度診断を行う基準を提案した。さらに、本手法は電線の走向が線対称であれば安定して固有振動数を検出することも確認した。また閾値の具体的な値として 0.1Hz を提案した。

今後は、他の電柱においても固有振動数のモニタリングを実施し、健全度の閾値の妥当な値について検討を行う必要がある。また転倒安全率などの実務的な観点からも適切な設定方法について検討を行う必要がある。

謝辞

本研究の電柱のモデル化にあたり、台湾国立中央大学の Huei-Tsyr Chen 教授には貴重な助言を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。また、本研究は平成 22 年度中国電力技術研究財団助成金「常時微動計測による電柱基礎の健全度診断技術の開発」によりました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 電気事業連合会：電気の広場 電力統計情報 <http://www5.fepc.or.jp/tok-bin/kensaku.cgi>