

衝撃弾性波による鋼製防護柵支柱根入れ長測定に関する検討

Experimental examination on the measuring method for embedment length of guardrail post

○ (株)東洋計測リサーチ 山下 健太郎 アプライドリサーチ(株) 境 友昭
Kentaro Yamashita (Toyo survey and research Inc) Tomoaki Sakai (Applied Inc.)
一般社団法人 iTECS 技術協会 極檀 邦夫
Kunio Gokudan (iTECS Association)

衝撃弾性波法を用いた鋼製防護柵支柱の根入れ長測定方法を対象に、波形の読取り位置や、管内土・周面摩擦といった条件が測定結果に及ぼす影響について、実験的な検討を行った。衝撃弾性波法では縦波を計測の対象とするため、土中に埋設された状態、特に管内土が存在する状態では、その高さに応じて見かけの弾性波速度が低下し、測定精度に影響を及ぼすことがわかった。本論では、補正方法などと併せて検討結果を示す。

キーワード：衝撃弾性波、鋼製防護柵、根入れ長測定

1. はじめに

防護柵設置工における出来形管理として、非破壊試験法を用いて支柱の根入れ長さを測定する試みがある¹⁾。非破壊試験法による測定は、従来の抜き取りや、ビデオ撮影による検査方法に比べ、有効な施工管理方法の一つとなることが期待されている。とりわけ衝撃弾性波法は、支柱頂部をハンマ等で打撃して波動を入力し、支柱に押さえつけたセンサで測定するという簡便な測定方法が特徴といえる。

一方で、実現場の測定においては、調査結果が長めに計算される場合が報告²⁾されており、実用においては、波形の理解や必要に応じた補正計算を行うことが要求される。本論では、土中に埋設された状態での波動の減衰や見かけの弾性波速度の低下を考慮し、実供試体を用いて検討した結果を示す。

2. 鋼製防護柵長さの測定

鋼製防護柵長さの測定は、防護柵支柱を1次元弾性体とみなして、支柱先端からの反射波の時間遅れ(波動が1往復する時間)を測定し、弾性波速度を既知としてその長さを計測する技術である。

波動の入力は防護柵頂部(キャップのある場合はキャップの中央)を100g~200g程度の鋼球若しくはハンマによって打撃することを基本としている。センサには加速度計を用い、感度軸と波動の伝播方向が一致するように支柱頂部付近に押さえつけて計測を行う。防護柵支柱長さは、測定された波形(図1右)から波動が1往復する時間差を読み取り、式(1)により求める。

$$L = (t_2 - t_1) / 2 \times V_{steel} + L_0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

V_{steel} : 鋼材の弾性波速度 L_0 : センサ設置位置 L : 支柱長さ

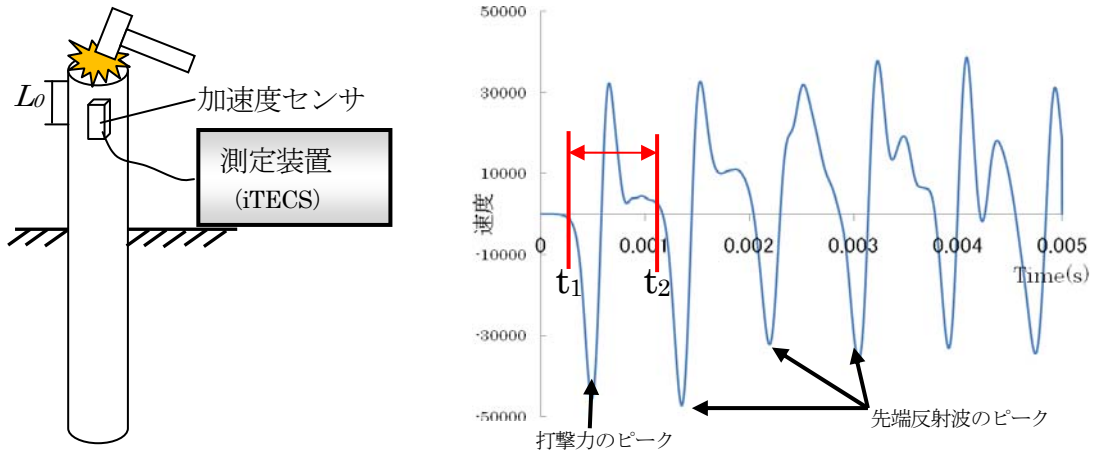


図1 測定方法 (左：測定概念図 右：観測波形)

3. 実験の概要

本研究では、実物の防護柵支柱（材質 STK400，外径 114.3mm×厚さ 4.5mm×長さ 2200mm 重量 27.4kg）を用いて、①周面摩擦が作用している状態、②管内土が詰まっている状態、をそれぞれ模擬して実験を行った。

測定には、iTECS-6（アプライドリサーチ社製）を用いた。センサは加速度計（100mV/G）を用い、支柱上端から 50mm 下に設置した。波動の入力はφ32mm の鋼球を用いて行った。計測条件は、サンプリング速度 2 μs，測定時間 5ms とし、5 回の測定の平均値を測定結果とした。

4. 実験方法

4.1 周面摩擦が及ぼす影響の検証

図 2 に示すような土槽（幅 400mm，長さ 1800mm，深さ 400mm）内に先端を塞いだ防護柵支柱を設置し、山砂を用いて埋め戻した後に、段階的に上載载荷を行いながら計測を行った。

測定は埋め戻し前、山砂投入直後、締固め直後、上載荷重量 330kg から 830kg まで 100kg ずつ 6 段階の载荷直後に行った。

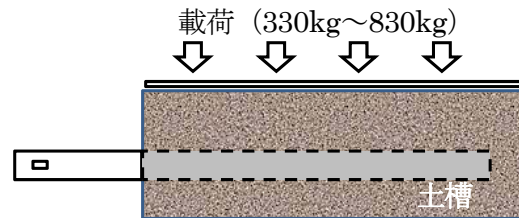


図 2 周面摩擦実験概略

4.2 管内土の高さが及ぼす影響の検証

図 3 に示すように、直立させた支柱の管内に山砂を投入し、密に締固めた後に測定を行った。

測定は管内土高さ 0mm，400mm，800mm，1200mm，1500mm の各段階で行った。また、波動の伝播状況の確認のために、先端から 100mm の位置にもセンサを取り付けて測定した。

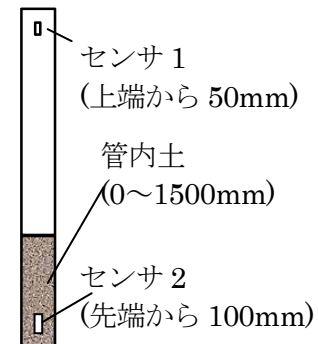


図 3 管内土実験概略

5. 周面摩擦による影響測定結果

5.1 観測波形

図 4 に観測波形を示す，ピークの位置（周期）は同様と見受けられるが，減衰傾向については，土砂投入直後から著しい変化がみられた。

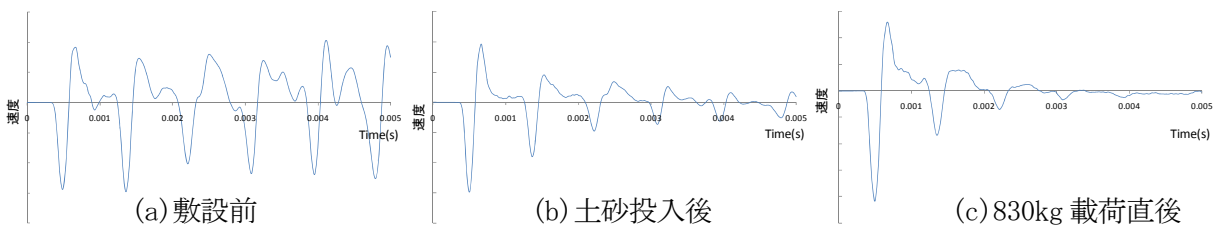


図 4 観測波形

5.2 減衰量の推移

各測定段階における観測波形の打撃力のピーク振幅と反射波の 1 番目のピーク振幅からの減衰量を計算したものを図 5 に示す。土砂投入直後から減衰量が推移し，最大で 9dB 程度減衰量に差がみられた。周面摩擦による影響によって減衰傾向が変化したことがうかがえる。

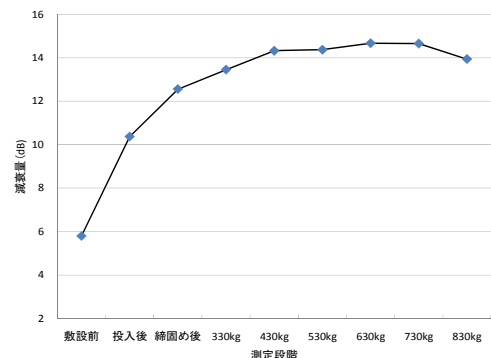


図 5 減衰量の推移

5.3 見かけの弾性波速度の変化

図 6 に見かけの弾性波速度の推移を示す。凡例中の「立上り」は、図 1 における t1~t2 の時間差を読み取り、「Peak-Peak」は打撃力のピークと反射波の 1 番目のピークの時間差から計算したものである。なお、弾性波速度は(2)式によって求めた。

$$V = 2150 \times 2 / T_d \dots \dots \dots (2)$$

T_d : 読み取り時間差 (ms)

図6より、周面摩擦の影響により、最大で約1.4%程度見かけの弾性波速度の低下がみられたが、支柱長さに換算すると31mm程度の差異であり、周面摩擦の影響が見かけの弾性波速度に及ぼす影響は微少であるといえる。

ここで、支柱を1次元の弾性体とみなした場合、弾性波速度 V は(3)式で表され、計算により、鋼材の弾性波速度は大凡5110m/sとなる。「立上り」位置の時間差から算出した速度とほぼ合致する。

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots \dots \dots (3)$$

E : ヤング係数, ρ : 密度 (管内土がある場合は鋼材換算の見かけの密度)

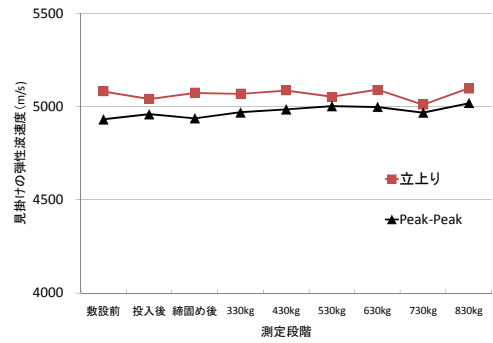


図6 見かけの弾性波速度の推移

6. 管内土の高さによる影響測定結果

6.1 観測波形

図7に観測された波形を示す。実線は上端から50mm、破線は支柱先端から100mmの位置で観測された波形である。図7(a)と(b)の破線の波形から、管内土によって波動が減衰していることがうかがえる。また、センサ1(実線)における観測波の振幅も管内土の高さに応じて減少の傾向にある。

また、図中の丸印部で入力波と逆位相の特異な波形が観測された、これは波動の伝搬経路上に断面積が拡大する境界面が存在することを意味し、管内土からの反射波であると推測される。

なお、図7(b)の③の時間差は0.719msであり、前項の弾性波速度から計算すると1837mmとなり、支柱上端から、管内土の境界までの距離1800mmとほぼ一致する。

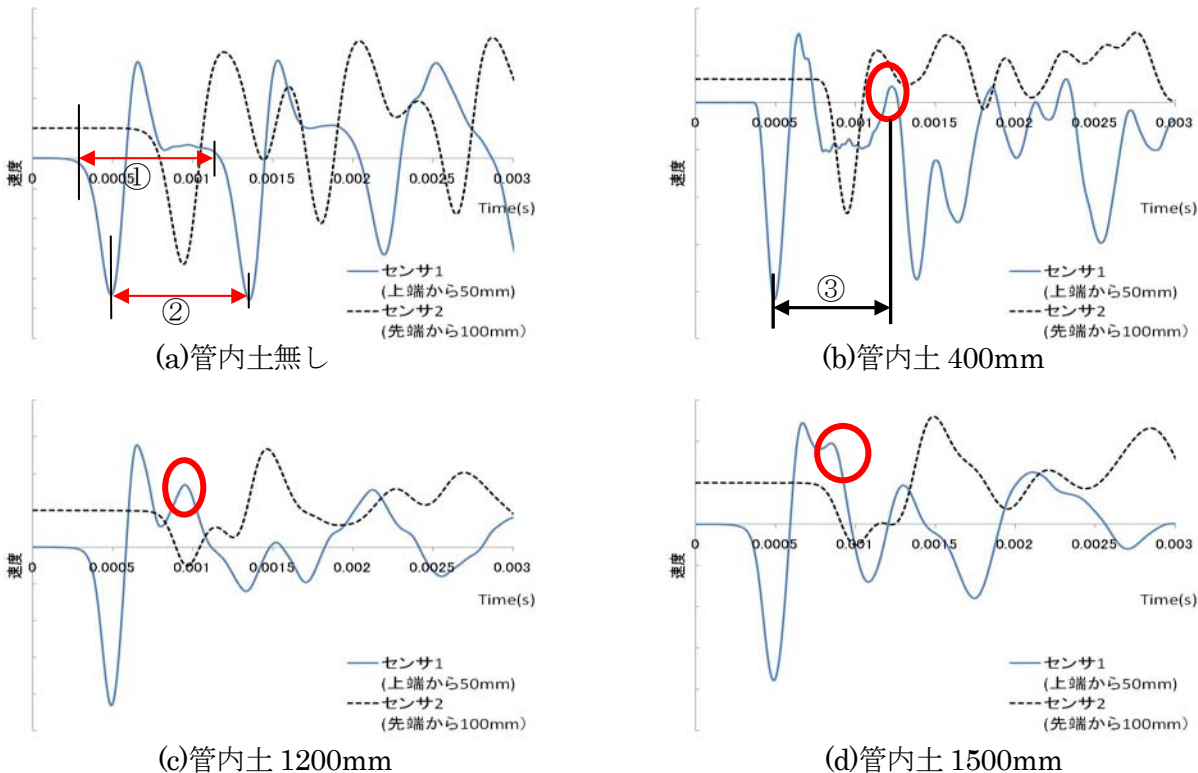


図7 観測波形

6.2 見かけの弾性波速度の低下

図7(a)に示す①, ②における伝搬時間差から弾性波速度を計算した結果と管内土の高さの関係を図8に示す. 管内土の影響により, 見かけの弾性波速度が低下し, 最大で37%の低下が観測された.

管内土の高さ1200mmの測定では, 見かけの弾性波速度が回復したように見られるが, 管内土からの反射波と支柱先端からの反射波が重畳し, 見かけの弾性波速度が大きくなったものと考えられる.

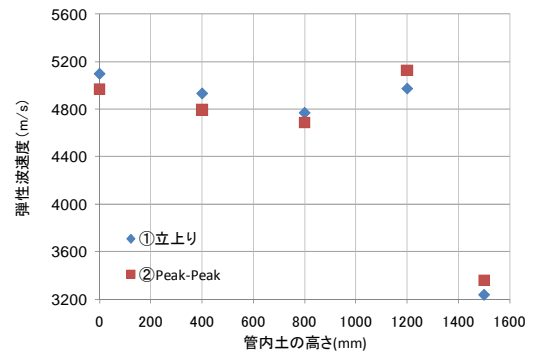


図8 見かけの弾性波速度の推移

7. まとめと考察

7.1 周面摩擦の影響

本実験結果から, 支柱周囲の地盤の周面摩擦が波動の減衰傾向に影響を及ぼすことが分かったが, これに由来する見かけの弾性波速度の低下はわずかであり, 補正の必要はない.

7.2 管内土による見かけの弾性波速度の低下

管内土の存在は観測波形に影響を及ぼし, 管内土の高さに応じて見かけの弾性波速度も低下する傾向が見られた.

ここで, 管内に土砂が詰まると, その分だけ支柱の付加質量が増した状態になると考えられる. 今回の実験では, 管内土の密度は 1.81g/cm^3 であったので, 表1に示すように, 見かけの密度が2.29倍に変化したと仮定される. 式(3)により, この条件では, 34%程度見かけの弾性波速度が低下すると計算され, 6.2の測定結果との整合が得られ, 見かけの弾性波速度の低下には管内土の影響が大きく関わることが分かった.

管内土が存在する状態での見かけの弾性波速度は, $V' = V(1 - \lambda) + V_{Soil}\lambda$ で表される.

(V_{Soil} : 土砂が詰まっている場合の弾性波速度 λ : 管内土高さの比率 V' : 見かけの弾性波速度)

今回の実験結果から, (4)式により補正係数を求めると, 図9のように表わされる, 波形レベルから管内土の有無及び, 大凡の位置が推定できるので補正を行うことが可能である. 本実験では, 管内土が1500mmの場合, 測定長は, 2980mmと計算された, この補正により2287mmとなった.

$$L = \frac{L_M}{\beta}, \quad \beta = \frac{1}{1 - \lambda \left(1 - \sqrt{\frac{1}{\rho'}}\right)} \dots \dots \dots (4)$$

L_M : 測定値 β : 補正係数 ρ' : 見かけの密度

表1 見かけの密度

	断面積 (cm^2)	密度 (g/cm^3)	質量 (g/cm)	見かけの密度
鋼材	15.5	7.85	121.7	
管内土	87.0	1.81	157.5	2.29

(質量は支柱単位長さあたり)

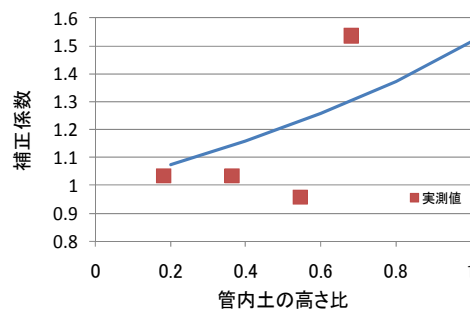


図9 補正係数と実測値

7.3 波形の読み取り位置

波形の読み取り位置は, 打撃力のピークと反射波のピークを選択する方法が容易であるが, 反射波のピーク位置は, 直接到達した反射波と上端部で再度反射した波動が重畳している状態であり, センサの位置に応じた時間遅れを含んでいる. 図6における読み取り位置の違いによる見かけの弾性波速度の差はこの影響によると考えられる. また, 管内土境界からの反射波の影響も見受けられたため, 初動(立上り)を捉えることが望ましいことがわかった.

[参考文献]

- 1) 国土交通省大臣官房技術調査課: 非破壊試験による鋼製防護柵の根入れ長測定要領 (案)
- 2) 井出義彦, 成瀬佳明ら: 土中式防護柵埋込み深さ測定装置の開発, 第62回土木学会年次学術講演会講演概要集 P671~P672