

# ダウンザホールハンマ掘削機械の計測データに基づく杭支持層評価

株式会社ケー・エフ・シー 国際会員 ○渡邊 直人  
アールシーアイ株式会社 阿波 宏司  
一般財団法人 先端建設技術センター 山本 拓治  
石川工業高等専門学校 国際会員 新保 泰輝

## 1. はじめに

筆者らはマイクロパイル工法を開発し多くの施工実績を有している。マイクロパイル工法は、小口径(通常300mm以下)の杭を高強度材料と地盤のグラウト固結により一体化させる基礎工法であり、近年その必要性が高まっている。既存構造物の近接施工や狭隘な場所での施工において、小型機械による低振動・低騒音での施工が可能であり、都市部での工事や既存建物の耐震補強に適している。また、転石層などの複雑な地盤条件下でも施工可能であり、斜杭としての施工により水平抵抗力を効果的に確保できるため、耐震性能の向上に貢献する。さらに、老朽化した既存構造物の基礎補強の需要が増加しており、社会インフラの長寿命化や防災・減災対策の観点からも重要な技術となっている。

このマイクロパイル工法には、ダウンザホールハンマ工法(以下、DTH)を適用している。本工法は、圧縮空気により駆動するハンマを鋼管杭先端に装着し、杭先端から直接打撃することで支持層まで貫入させる工法である。本工法は、硬質地盤や転石層への貫入能力に優れ、施工の確実性が高く、さらに打撃と掘削を同時に行うため施工効率が良いという利点を有している。しかし、これまでの支持層到達評価は、排出土砂の性状確認など、調査ボーリング結果との比較に依存し、客観的に評価することに課題があった。排出土砂は、幾分かは中間層と支持層の混合物となる可能性があり目視確認に際しては注意を要する。

また、排出土砂採取間隔によっては、支持層境界部の深度判定が粗くなる場合もある。

杭先端が支持層に未到達の場合、設計支持力が得られず構造物の安定が確保できない。逆に、支持層に過到達の場合、施工ロスが大きくなり工程に影響する。このため、筆者らはダウンザホールハンマを用いた空気圧駆動の打撃系掘削装置に関して、鋼管杭を地盤に設置するための支持杭の支持層管理(打止め管理)を行うことができる技術を開発している。

DTHは標準貫入試験(SPT)と同様に一定エネルギーの打撃を繰り返す装置であり、打撃に対する掘進抵抗から地盤の硬さを評価できる。本報告では、礫質地盤での施工結果を報告し、掘削体積比エネルギーとN値の対応を確認するとともに、振動信号から打撃の基本周波数を推定する手法の理論的背景を整理する。また、参考的な検討として1質点系の解析モデルを設定し、コンクリートの施工試験における弾性係数の推定結果を報告する。

## 2. システムの概要

### 2.1 開発仕様

安全対策上、実現場での作業を阻害することがないように、無線環境のシステムを主体に構築している。

また、測定コスト削減のため測定者が現地にいる必要が無いように、インターネット、クラウドを活用し、現場事務所や管理会社にて遠隔での各種センサ制御(ON, OFF, 開始, 終了等)、また実際の測定、分析ができるようにしている。また、ハンマ打撃のみならずビット回転による掘削に対応できるように、回転数、回転圧力、フィード圧力を測定できるセンサを装備しているが、その評価は本論文では言及しない。

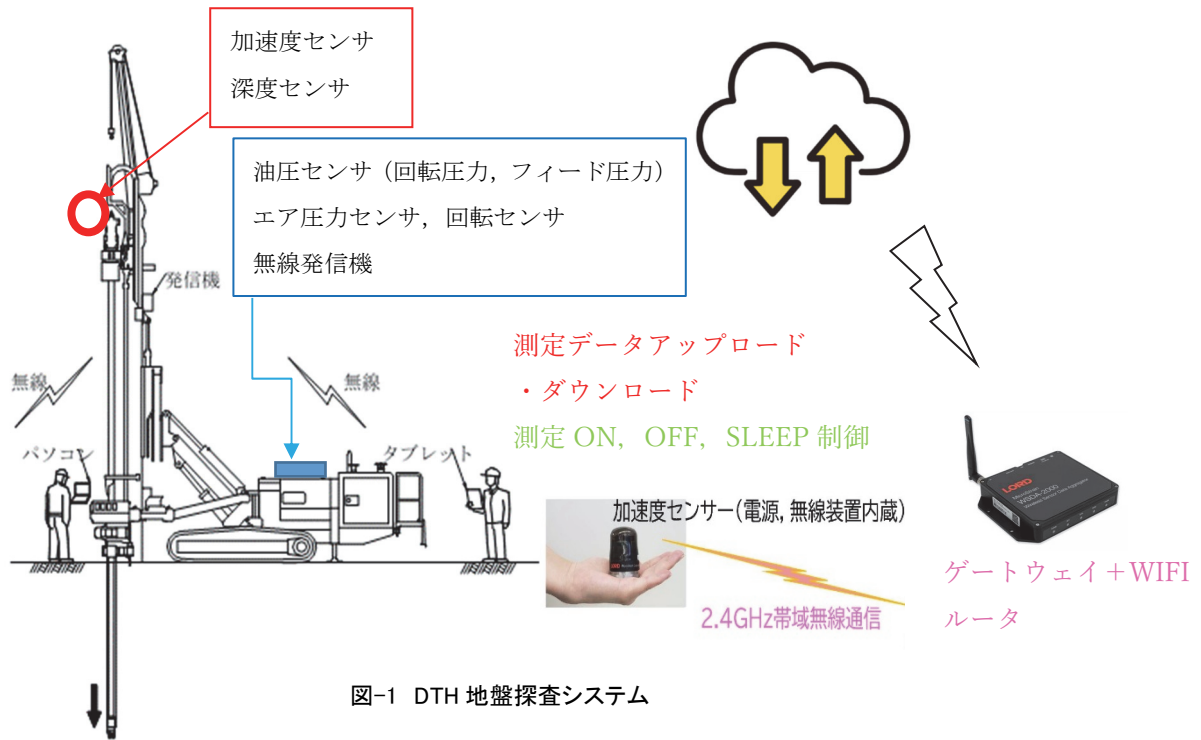


図-1 DTH 地盤探査システム

杭基礎の ICT 施工においては、過酷な現場環境下や高振動の機械でも安定的にデータを取得でき、かつ安価で汎用的なシステムを構築する必要がある。図-2 に掘削機械とセンサの取り付け状況を示す。掘削機のエアコンプレッサの圧力を測定するセンサ、掘削速度や掘削深度を測定するワイヤエンコーダ(深度センサ)、掘削機の回転圧力・フィード圧力を測定する油圧センサ、回転数を測定するセンサ、および機械振動を取得するための加速度センサを取り付けた。加速度センサは、高振動にも強い 3 成分の小型無線式加速度センサ(マグネット式)であり、ガイドセル上部に設置した。

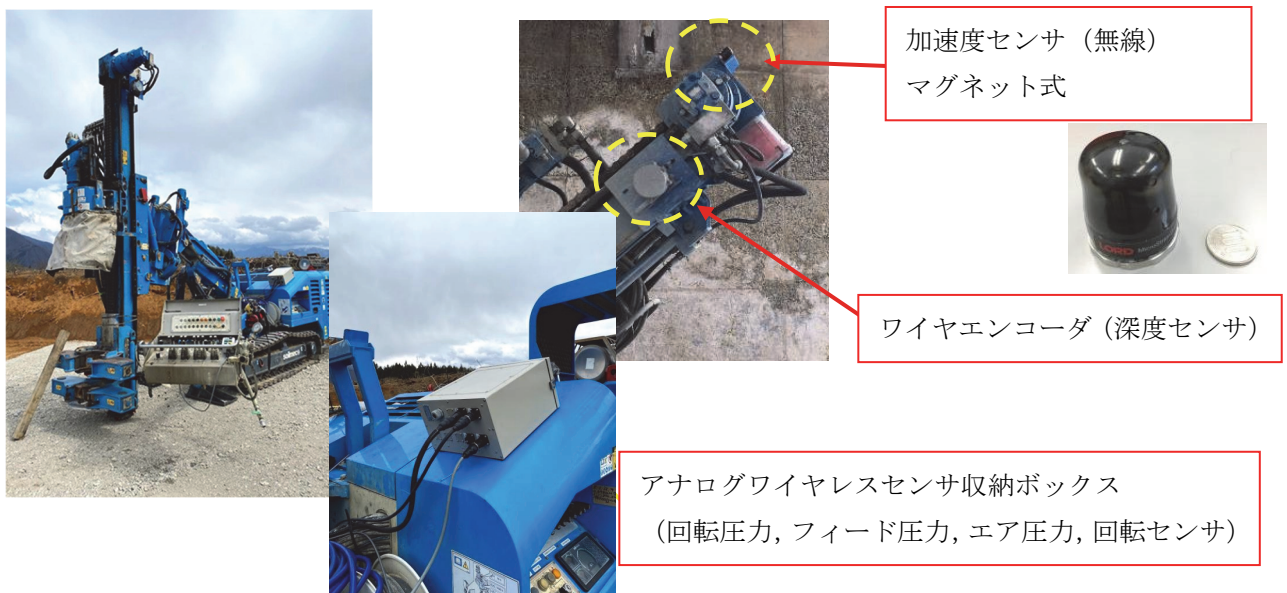


図-2 掘削機械とセンサの取り付け状況

### 3. 打撃振動信号のモデル化

DTH の打撃信号をインパルス列としてモデル化する。実際の打撃荷重は有限の接触時間を持つパルス波形であるが、基本周波数の推定においては、個々のパルス波形ではなく打撃が発生する時刻の列が本質的な情報である。パワースペクトル上の基本周波数ピークの位置は打撃時刻の間隔によって決まり、パルス波形はスペクトル包絡(各ピークの振幅比)にのみ影響する。

DTHの打撃信号を、各打撃時刻にデルタ関数が立つインパルス列として以下のようにモデル化する。

$$x(t) = \sum_k \delta(t - t_k), \quad t_k = kT_0 + \varepsilon_k \quad \dots\dots(1)$$

ここで  $T_0$  は平均打撃周期、 $\varepsilon_k$  は  $k$  回目の打撃に対する打撃時刻の揺らぎ（理想時刻  $kT_0$  からのずれ）である。

「打撃時刻の揺らぎ」とは、各打撃の発生時刻が理想的な等間隔時刻からずれる現象であり、地盤条件・送気圧・回転等の影響により生じる。 $\varepsilon_k > 0$  なら打撃が遅れ、 $\varepsilon_k < 0$  なら早まることを意味する。

打撃時刻の揺らぎがない場合（ $\varepsilon_k = 0$ ）を示す。周期一定のインパルス列のフーリエ級数展開は

$$x(t) = \frac{1}{T_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i2\pi n f_0 t}, \quad f_0 = \frac{1}{T_0} \quad \dots\dots(2)$$

となり、スペクトルは  $f = n f_0$  に等間隔の線スペクトルを持つ。基本周波数  $f_0$  は打撃回数（回/秒）に相当する。

打撃時刻に揺らぎがある場合、フーリエ変換において  $e^{-i\omega \varepsilon_k}$  がランダム位相として作用し、各インパルスのコヒーレントな加算を崩す。

実際の観測信号(図-3)では、打撃時刻揺らぎによる減衰に加え、打撃波形のスペクトル包絡および振動伝播経路の伝達関数の効果が重畳するため、基本周波数ピークがスペクトル中で最も顕著なピークとなる。

打撃信号は加速度センサによって取得する。打撃周波数が施工中に変動するため、短時間フーリエ変換（STFT）により時間-周波数解析を行い、帯域通過フィルタ（BPF）を適用して帯域外成分（高調波、機械共振、ノイズ）および低周波ノイズ（DC オフセット、センサドリフト等）を除去した上で、各時間フレームにおける帯域内最大ピークを基本周波数の推定値とする。

硬い地盤では打撃時の反力が明瞭で基本周波数成分が現れやすいのに対し、スライム（掘削孔底に滞留する泥水や切削くず）では変形・減衰の影響でその成分が小さくなりやすい。このため、本研究では振幅スペクトルの頻度分布を用いて低振幅群を判別し、支持層評価に不適なデータとして排除した（図-4）。これにより、現地盤の応答特性をより明瞭に抽出できる。

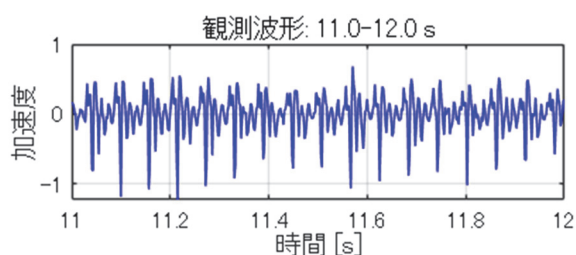


図-3 観測波形例(コンクリート)

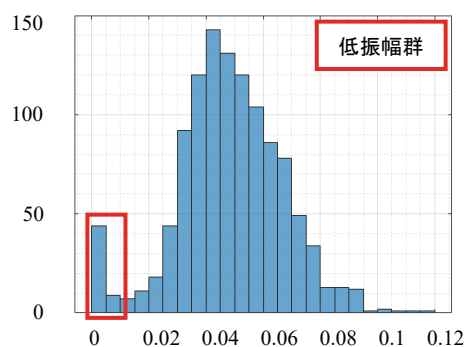


図-4 振幅スペクトル頻度分布例

#### 4. 地盤評価の原理

##### 4.1 ダウンザホールハンマの駆動原理と標準貫入試験(SPT)との対比

DTHは空圧駆動のハンマであり、以下の4段階で周期的に打撃を行う。(1) ピストン上部のエア圧力が上昇、(2) ピストンが下降しハンマビットと一体となり打撃準備状態、(3) 打撃とビット先端からのエアブロー（スライム排除）、(4) 打撃反力とエア圧によりハンマビットとピストンが上昇。

この駆動機構の重要な特長は、ビットと掘削対象地盤との距離およびピストン間距離が常に一定であることである。すなわち、地盤条件によらずピストンのストローク（落下距離）が一定であるため、1打撃あた

りの入力エネルギーは概ね一定となる。

図-5 に本研究で使用した DTH (Robit 社 Hyper81) のメーカー仕様を示す。ピストン重量は 43.9 kg, ストロークは 102 mm である。エア圧力と打撃数・エネルギー出力の関係が表として与えられており, コンプレッサーのエア圧力によって打撃数が変化する。

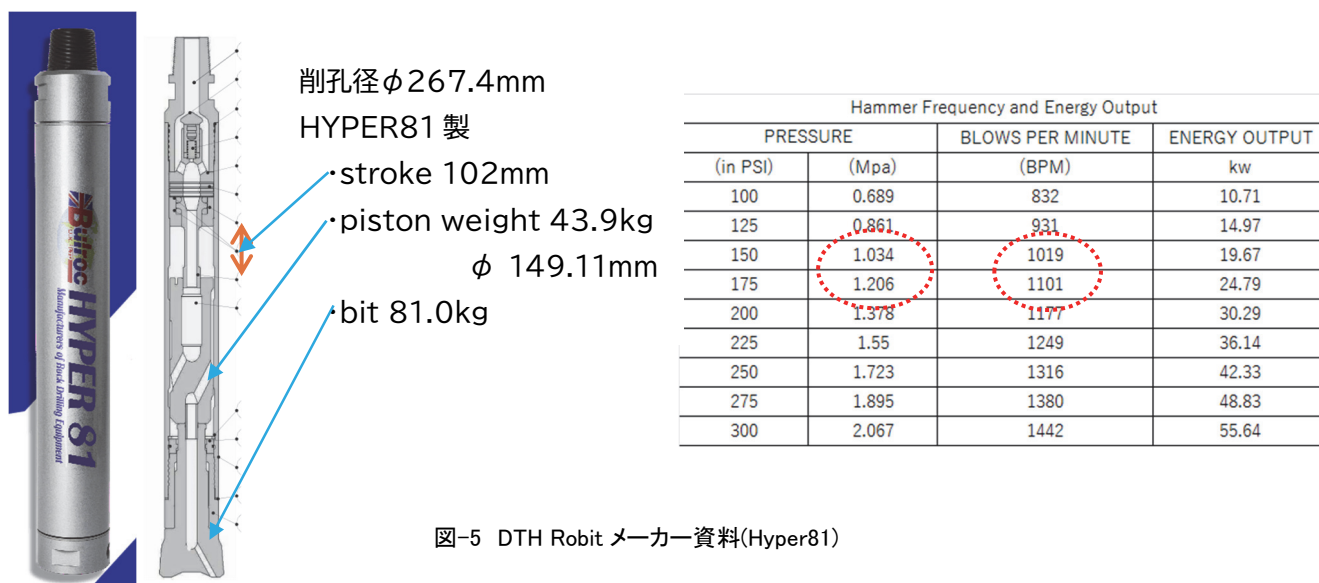


図-5 DTH Robit メーカー資料(Hyper81)

本施工で使用したエア圧 1.0–1.2 MPa の条件では, 打撃数は 1019–1101 BPM (16.9–18.4 回/秒)。この打撃周波数は, 本論文の信号解析で想定した 10–20 Hz の帯域設定と整合している。

DTH による地盤評価の原理は, 標準貫入試験 (SPT) と本質的に共通している。SPT は 63.5 kg のハンマを 76 cm の高さから自由落下させ, サンプラーを 30 cm 貫入させるのに必要な打撃回数 (N 値) を求める試験である。すなわち, 一定エネルギーの打撃に対する地盤の抵抗 (貫入に要する打撃回数) で地盤の硬さを評価する。

DTH においても, 4.1 節で示した通りピストンのストロークが一定であるため, 1 打撃あたりの入力エネルギーは概ね一定である。したがって, 単位掘進量あたりに要するエネルギー (掘削体積比エネルギー) は SPT の N 値と同様に地盤の硬さの指標となる。

#### 4.2 掘削体積比エネルギー

掘削体積比エネルギーは以下の式で評価される。<sup>1)</sup>

$$S_E = \frac{E_i \times \text{bpm}}{A_H \times P_R} \quad \dots\dots(3)$$

ここで,  $S_E$ : 掘削体積比エネルギー (J/cm<sup>3</sup>),  $E_i$ : 1 打撃あたりのエネルギー (J), bpm: 打撃数 (blow/min),  $P_R$ : 掘進速度 (cm/min),  $A_H$ : 孔断面積 (cm<sup>2</sup>) である。 $S_E$  は単位体積の地盤を掘削するのに要するエネルギーを意味する。地盤が硬いほど掘進速度  $P_R$  が低下し,  $S_E$  は増大する。

なお, 打撃数 bpm は空気圧力と打撃数のメーカー試験値, およびハイスピードカメラによる直接測定で確認している。実施工では, 3 節の打撃振動信号のモデル化により, 加速度センサによる振動信号からリアルタイムに打撃数を取得している。

### 4.3 現場適用結果

本手法の妥当性を示すために、事前に実施された調査ボーリング結果とその近傍での削孔結果を比較した。図-6は、削孔深度ごとの土質柱状、N値、掘削体積比エネルギー、掘進速度、エアコンプレッサー圧力のデータである。掘削体積比エネルギーのN値との対応は非常に良く、高い精度でトレースできていることが確認された。

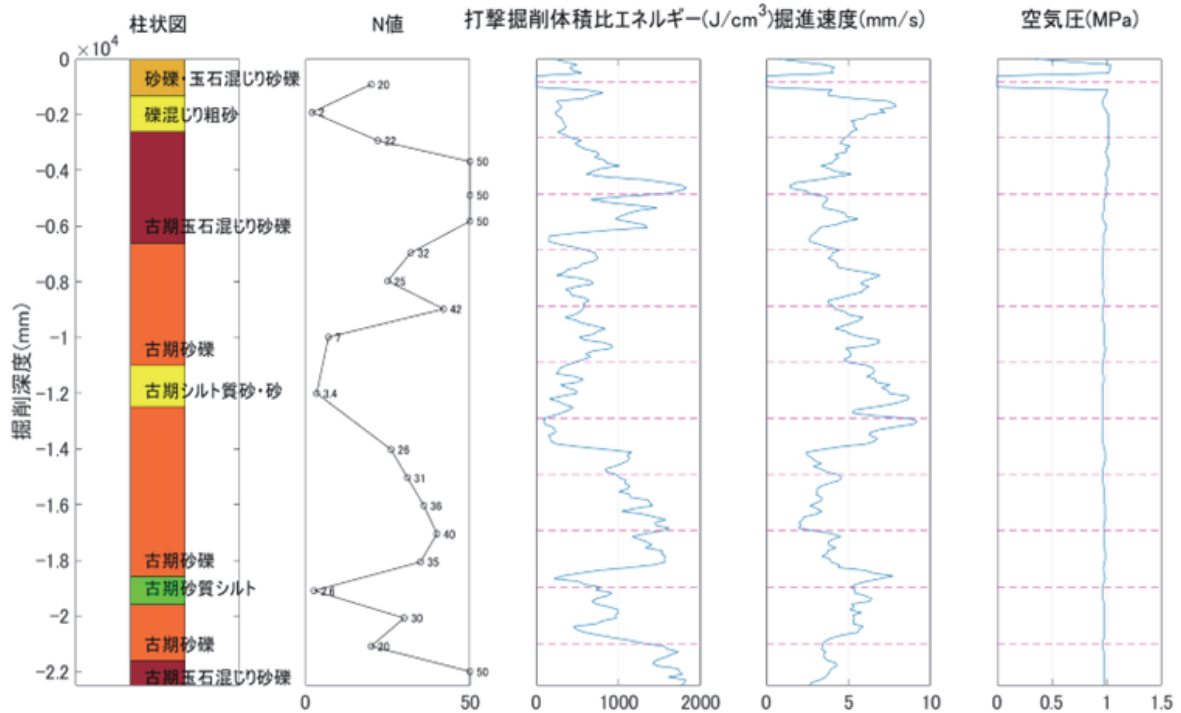


図-6 現場適用結果

この結果は、DTHがSPTと同様のメカニズム（一定エネルギー打撃に対する掘進抵抗）で地盤を評価できることを示すものである。

### 5. 1質点系解析モデルによる検討

4節で示した掘削体積比エネルギーによる地盤評価は、SPTと同様にエネルギー収支に基づく実用的な手法である。これに対し、本節では打撃振動の周波数特性からより詳細な地盤情報（弾性係数等）を抽出する試みとして、1質点系解析モデルによる検討を示す。

図-7に示すように、DTHのビット-地盤系を1質点系（質量-ばね-ダッシュポット系）としてモデル化する。

運動方程式は以下で与えられる。

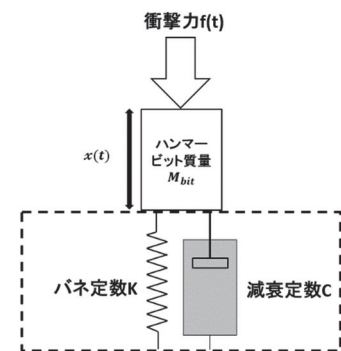


図-7 一質点系モデル

$$M_{bit}\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad \dots\dots(4)$$

ここで  $M_{bit}$  : ビット質量,  $K$  : ばね定数,  $C$  : 減衰定数である。

減衰定数  $C$  は反発係数  $e$  を用いて  $C = 2\sqrt{M_{bit}K/(1 + (\pi/\ln e)^2)}$  で設定する。質量で除して固有角振動数  $\omega^2 = K/M_{bit}$ , 減衰定数  $\gamma = C/(2M_{bit})$  とすると応答加速度はフーリエ変換を用いて、

$$\ddot{x}(t) = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} \frac{-\omega_s^2 F_s}{(\omega^2 - \omega_s^2 + 2i\gamma\omega_s)} e^{i\omega_s t} \quad \dots\dots(5)$$

上式に対し、バネ定数  $K$  と反発係数  $e$  を乱数として与えて求まる応答加速度と計測波形の一致を試みる。これにより、バネ定数  $K$  と反発係数  $e$  が求まる。また、 $F_s$  は荷重に関する係数であり、計測波形を利用して、これを再現可能な荷重の時刻歴波形を求めることで得られる。

モデルの妥当性を検証するため、掘削対象が比較的均質なコンクリートである施工条件に適用した。コンクリートは自然地盤と比較して均質であり、弾性係数が圧縮強度から概算可能で、エネルギーの伝達効率も比較的安定している。

図-8 に結果を示す。推定したばね定数を弾性係数に換算した結果、瞬時値（青線）にはばらつきがあるものの、移動平均（赤線）は約  $2.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  に収束し、一軸圧縮強度  $q_u=46.1 \text{ N/mm}^2$  から換算される弾性係数の実測値<sup>3)</sup>とよく一致した。

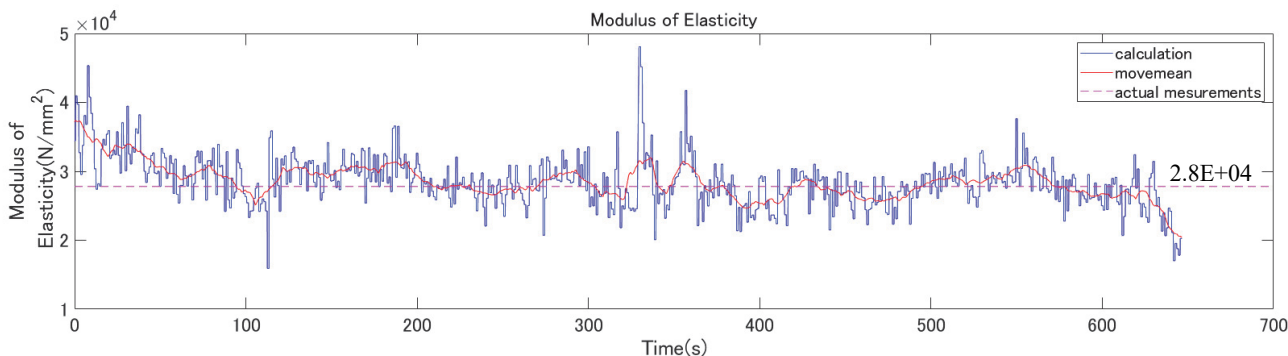


図-8 コンクリートの弾性係数の推定

コンクリートのような均質・高剛性の材料ではエネルギー伝達効率が安定するため、見かけの剛性と実際の弾性係数の間に良好な対応が得られたと考えられる。

自然地盤への適用では、推定されるバネ定数が系全体の見かけの剛性と考えられるため、地盤物性の絶対値としてではなく値の変化パターンから地盤変化を検知する指標として利用することが実用的と考えられる。

## 6. おわりに

支持層到達確認の客観性が求められる中、筆者らは計測データに基づく客観的評価への転換を図るべく、DTH 杭掘削機械による地盤評価システムを開発した。

DTH の打撃信号をインパルス列としてモデル化し、打撃時刻の揺らぎによる高調波減衰の効果から、STFT と BPF により基本周波数をリアルタイムに推定できることを示した。DTH はピストンストロークが一定で 1 打撃あたりのエネルギーが概ね一定であり、SPT と本質的に共通する。この原理に基づく掘削体積比エネルギーが、現場適用において N 値と良好に対応することを確認した。また、振幅スペクトルの頻度分布を用いてスライム介在区間の低振幅データを判別・排除する手法を示した。さらに、1 質点系モデルによりコンクリートの弾性係数推定が実測値と整合することを確認した。自然地盤では絶対値推定に限界があるが、同一施工条件下での変化パターンから地盤変化を検知する指標として利用可能である。今後は、データの集積と掘削体積比エネルギーの定量的評価を進め、AI を活用した支持層判定の高度化を図る。

## 参考文献

- 1) 松井 保・災害科学研究所トンネル調査研究会(2017): トンネル技術者のための地盤調査と地山評価, 鹿島出版会.
- 2) 和田浩二・千葉博紀・松井孝典(2004): “DEM による粉体衝突シミュレーション,” 日本惑星科学会誌, Vol.13, No.4.
- 3) 日本建築学会(2010): 鉄筋コンクリート構造規準・同解説,2010 改定.