

杭基礎の ICT 施工 / 計測データに基づく地盤評価

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

*Evaluation of Pile Bearing Layers Based on Measurement Data
from Down-the-Hole Hammer Drilling Machinery*

渡邊 直人 (株式会社ケー・エフ・シー) 阿波 宏司 (アールシーアイ株式会社) 山本 拓治 (先端建設技術センター) 新保 泰輝 (石川工業高等専門学校)

1. はじめに

背景：マイクロパイル工法と DTH 工法

マイクロパイル工法

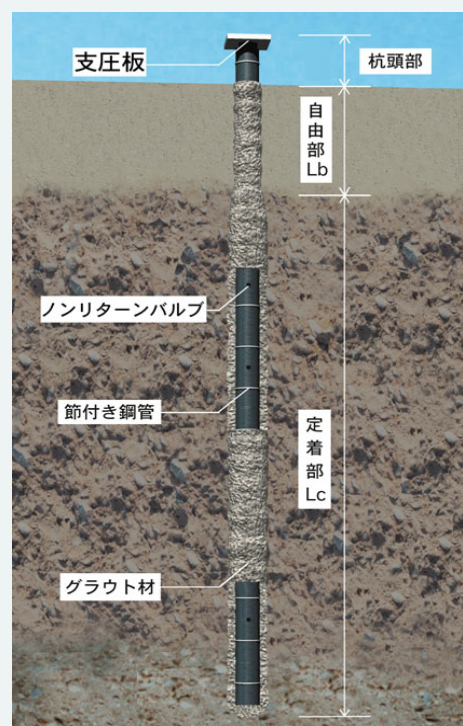
小口径（通常 300mm 以下）の杭を高強度材料と地盤のグラウト固結により一体化する基礎工法。

低振動・低騒音の小型機械施工 — 都市部・狭隘地・近接施工に適合。既存構造物の耐震補強需要の高まりを背景に必要性が増大。

ダウンザホールハンマ（DTH）工法

圧縮空気で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して支持層まで貫入させる工法。

- 硬質地盤・転石層への高い貫入能力
- 打撃と掘削を同時に行い施工効率が良い
- 施工の確実性が高い



STマイクロパイル工法（NIJ研究会）



DTH を適用した杭打設機械

■ 1. はじめに

解決すべき課題と研究の目的

従来手法の課題

支持層到達の評価が、排出土砂の目視確認（調査ボーリング結果との比較）に依存し、客観的な評価が困難。

- 排出土砂は中間層と支持層の混合物となる可能性 → 目視確認に注意を要する
- 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

未到達

設計支持力が得られず
構造物の安定を確保できない

過到達

施工ロスが大きくなり
工程に影響する

本研究の目的

1

礫質地盤での施工結果を報告

掘削体積比エネルギーと N 値の対応を確認する

2

基本周波数推定の理論的背景を整理

振動信号から打撃の基本周波数を推定する手法

3

1 質点系モデルによる参考検討

解析モデルからコンクリートの弾性係数推定を行う

2. システムの概要

開発仕様：無線・クラウド型の地盤探査システム

安全対策

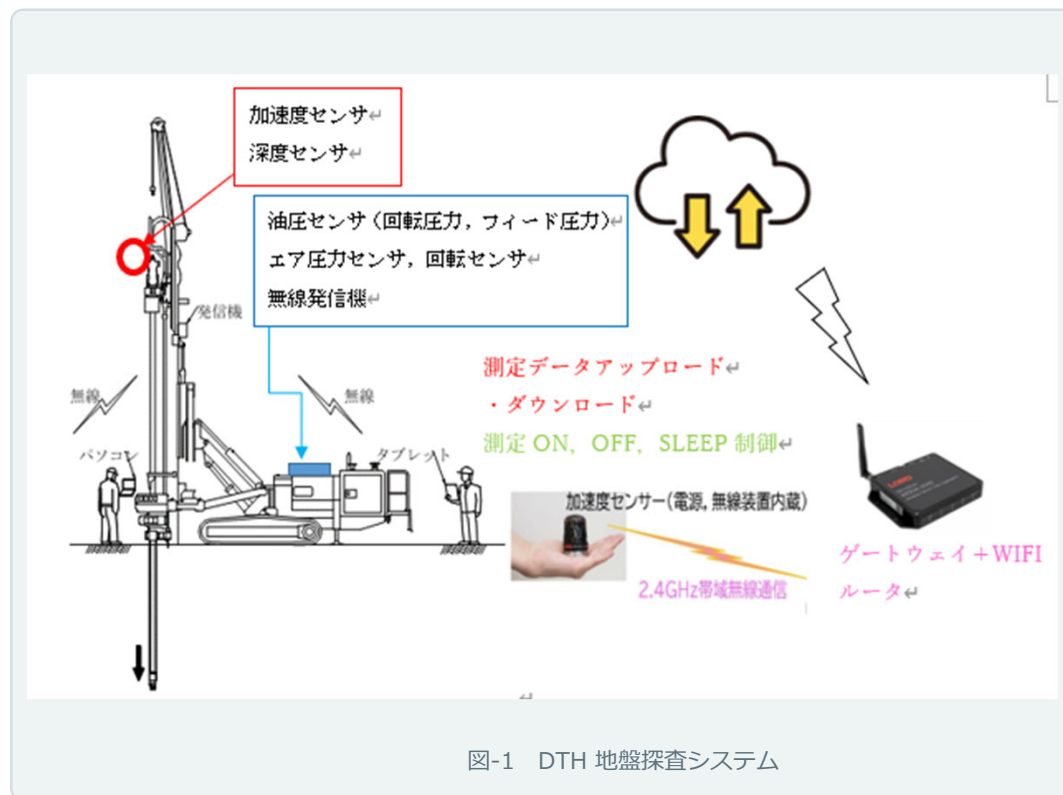
無線環境を主体に構築。実現場での作業を阻害しない。

遠隔運用

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からセンサ制御（ON/OFF・開始・終了）・測定・分析が可能。測定者の現地常駐が不要。

堅牢・汎用

過酷な現場環境や高振動下でも安定的にデータを取得。安価で汎用的なシステム構成。



■ 2. システムの概要

センサの構成と掘削機械への取り付け

掘削機械に装備したセンサ

- 1 エア圧力センサ**
エアコンプレッサーの圧力を測定
- 2 ワイヤエンコーダ (深度センサ)**
掘削速度・掘削深度を測定
- 3 油圧センサ・回転センサ**
回転圧力・フィード圧力・回転数を測定
- 3 成分 小型無線式 加速度センサ**
高振動に強いマグネット式。ガイドセル上部に設置し機械振動を取得

※ 回転による掘削 (回転数・回転圧力・フィード圧力) の評価は本論文では対象外



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

打撃モデル：インパルス列と有限幅パルス列

DTH打撃は周期的に発生する。打撃の「時刻」と1打撃の「波形」を分離してモデル化する。

① インパルス列（時刻のモデル）

$$\Sigma \delta(t - t_k)$$

打撃が「いつ」起こるかを表す近似。打撃周期 T_0 と基本周波数 $f_0 = 1/T_0$ の位置を説明する。

② 有限幅パルス列（実荷重のモデル）

$$f(t) = F_{\max} p(t) * \Sigma \delta(t - t_k)$$

1打撃の波形 $p(t)$ を時刻列に畳み込む。実荷重は瞬間ではなく、ピストン・ビット・地盤の接触で短い時間幅をもつ。

③ 周波数領域での分離

$$F(\omega) = F_{\max} P(\omega) \cdot \Sigma \exp(-i\omega t_k)$$

結論

周波数ピークの位置 → 時刻列 $\Sigma \exp(-i\omega t_k)$ で決まる。
各ピークの振幅比 → パルス形状 $P(\omega)$ で決まる。

■ 3. 打撃振動信号のモデル化

打撃信号のインパルス列モデル

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着目したモデル化

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

T_0 : 平均打撃周期 ε_k : k 回目の打撃時刻の揺らぎ (理想時刻 kT_0 からのずれ)

基本周波数推定における本質

推定に効くのは、個々のパルス波形ではなく「打撃が発生する時刻の列」。

- スペクトルの基本周波数ピーク位置 ← 打撃時刻の間隔で決まる
- パルス波形 → 各ピークの振幅比 (スペクトル包絡) にのみ影響
- 基本周波数 f_0 は打撃回数 (回/秒) に相当する
- 実荷重は $f(t) = F_{max} p(t) * \sum \delta(t - t_k)$ 、観測波形には伝達関数 $H(\omega)$ が掛かるが、周期成分の位置は時刻列に支配される

揺らぎなし $\varepsilon_k = 0$

$$x(t) = (1 / T_0) \sum \exp(j2\pi n f_0 t)$$

周期一定のインパルス列をフーリエ級数展開すると、 $f = n \cdot f_0$ に等間隔の線スペクトルが現れる。

揺らぎあり $\varepsilon_k \neq 0$

打撃時刻の揺らぎはフーリエ変換上で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。

→ 高調波成分が減衰し、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。

3. 打撃振動信号のモデル化

STFT・BPF による基本周波数のリアルタイム推定

STEP 1

加速度センサで取得

打撃振動信号を計測。打撃周波数は施工中に変動する。



STEP 2

STFT で時間-周波数解析

短時間フーリエ変換で時々刻々の周波数変化を捉える。



STEP 3

BPF で帯域外成分を除去

高調波・機械共振・ノイズ・低周波ノイズを除去し、帯域内最大ピークを基本周波数とする。

スライム区間の排除

1秒ごとの矩形窓でスペクトルを求め、各窓でプロミネンス最大の卓越ピークを抽出して頻度分布化（図-4）。例えば、分布は二峰性を示す。→ 数秒間連続して著しく低振幅となる時間帯をスライム介在区間と判定し、谷をしきい値として除外する。

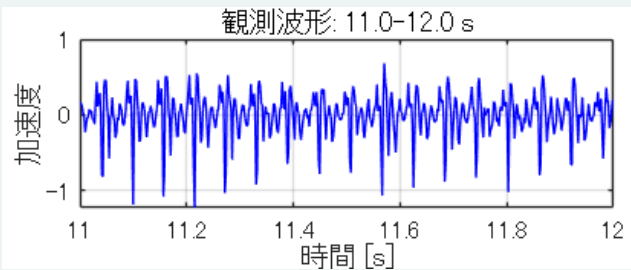


図-3 観測波形例（コンクリート、11.0-12.0 s）

提案手法

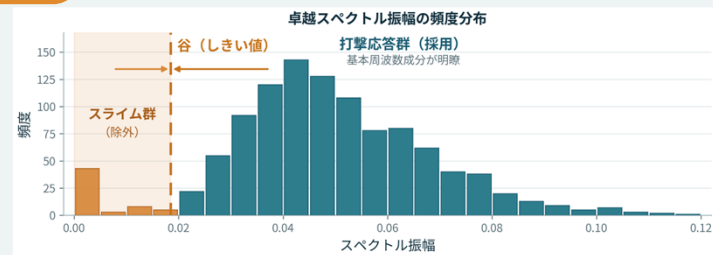


図-4 卓越スペクトル振幅の頻度分布 —— 二峰性の谷で切る

3. 打撃振動信号のモデル化

観測データとスペクトル

図-5 観測波形例

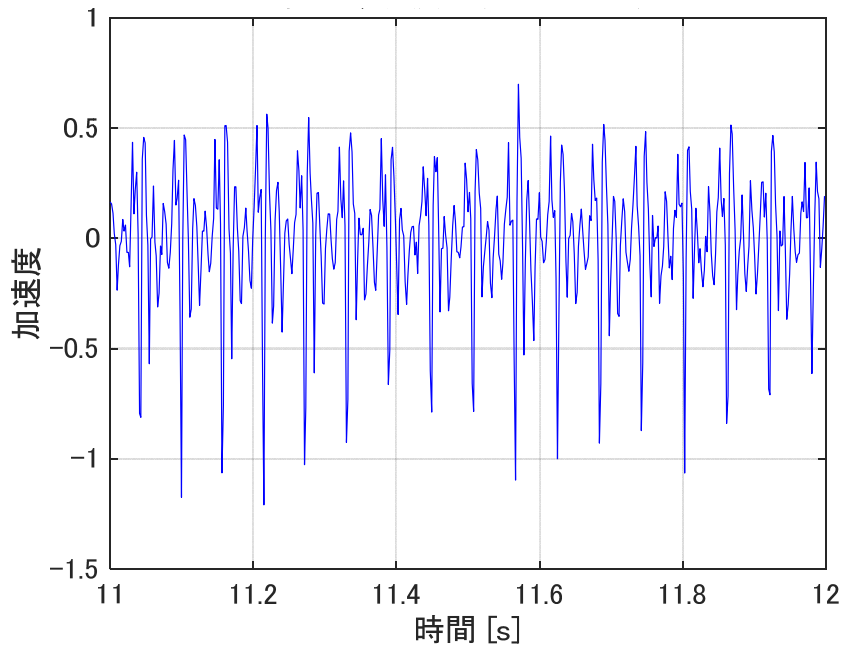
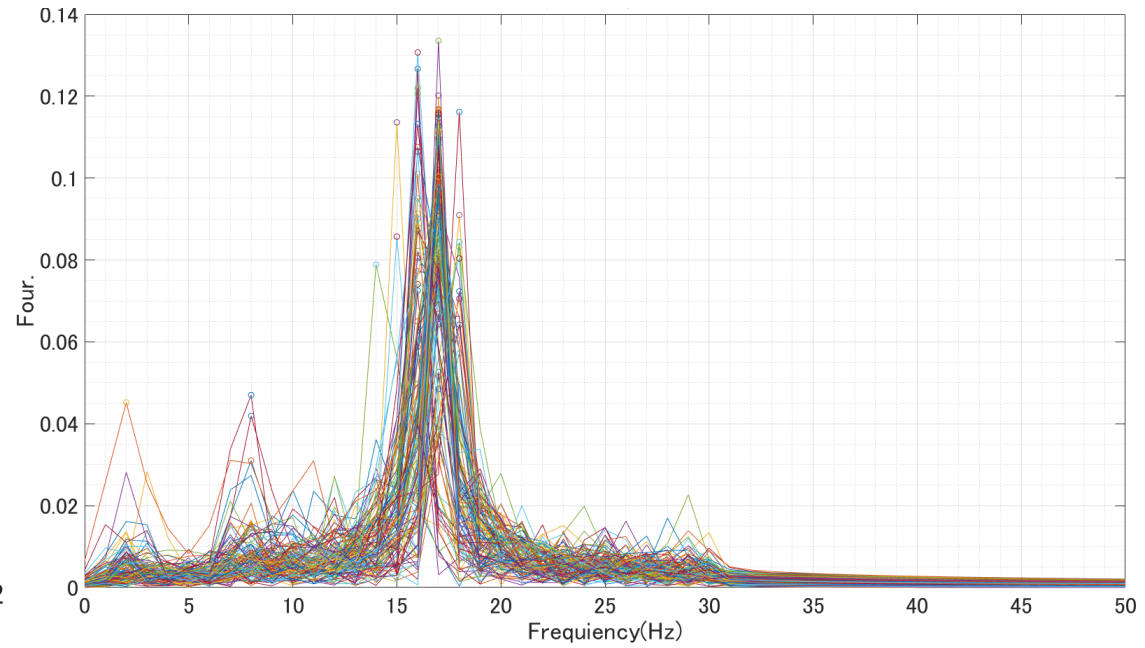


図-6 振幅スペクトル(STFT)



■ 4. 地盤評価の原理

DTH の駆動原理と標準貫入試験（SPT）との対比

DTH の駆動原理 — 空圧駆動による 4 段階の周期的打撃

①

ピストン上部のエア圧力が上昇

②

ピストンが下降しビットと一体化、打撃準備

③

打撃+ビット先端からエアブロー（スライム排除）

④

反力とエア圧でハンマビット・ピストンが上昇

重要な特長

ビットと地盤の距離・ピストン間距離が常に一定 → 地盤条件によらずストロークが一定 → 1 打撃あたりの入力エネルギーが概ね一定

標準貫入試験（SPT）との対比

SPT

63.5kg のハンマを 76cm から自由落下させ、サンプラーを 30cm 貫入させる打撃回数（N 値）で地盤の硬さを評価。

DTH

ストローク一定で 1 打撃エネルギーが概ね一定。単位掘進量あたりに要するエネルギーが N 値と同様の硬さ指標となる。

→ 一定エネルギー打撃に対する掘進抵抗という共通メカニズムで地盤を評価できる



使用機種：Robit Hyper 81

4. 地盤評価の原理



削孔径φ267.4mm

HYPER81製

stroke 102mm

piston weight 43.9kg

φ 149.11mm

bit 81.0kg

Hammer Frequency and Energy Output			
PRESSURE		BLOWS PER MINUTE	ENERGY OUTPUT
(in PSI)	(Mpa)	(BPM)	kw
100	0.689	832	10.71
125	0.861	931	14.97
150	1.034	1019	19.67
175	1.206	1101	24.79
200	1.378	1177	30.29
225	1.55	1249	36.14
250	1.723	1316	42.33
275	1.895	1380	48.83
300	2.067	1442	55.64

供給エア圧	打撃数	エネルギー出力	1打撃エネルギー*
0.689 MPa	832 BPM	10.71 kW	約 770 J
1.034 MPa	1019 BPM	19.67 kW	約 1,160 J
1.206 MPa	1101 BPM	24.79 kW	約 1,350 J
2.067 MPa	1442 BPM	55.64 kW	約 2,320 J

図-7 DTH Robitメーカー資料(Hyper81)

■ 4. 地盤評価の原理

掘削体積比エネルギー S_E

単位体積の地盤を掘削するのに要するエネルギー。SPT の N 値と同様に地盤の硬さの指標となる。

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

S_E 掘削体積比エネルギー (J/cm³)

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)

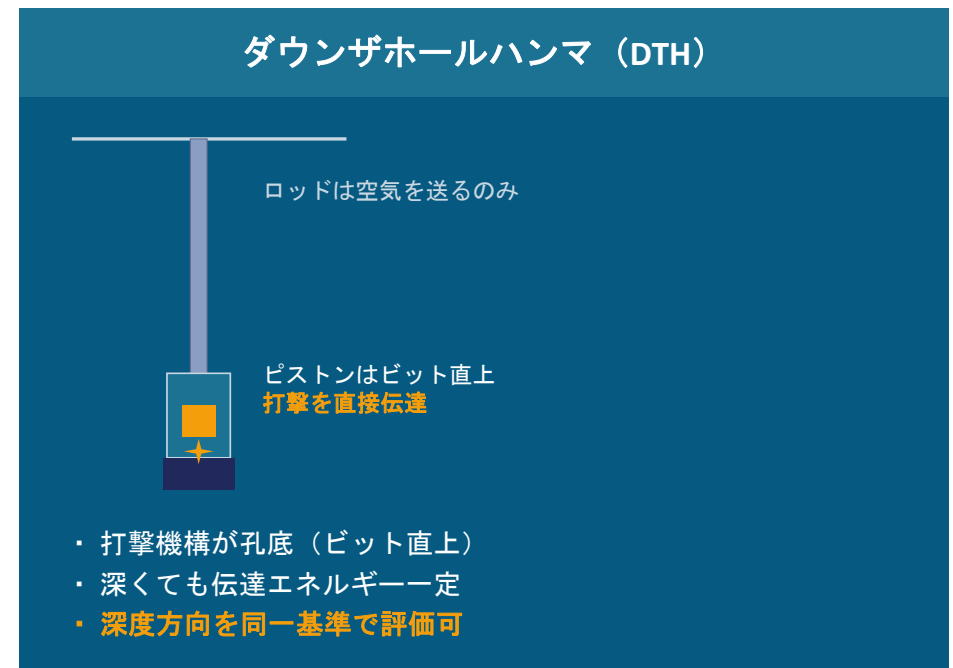
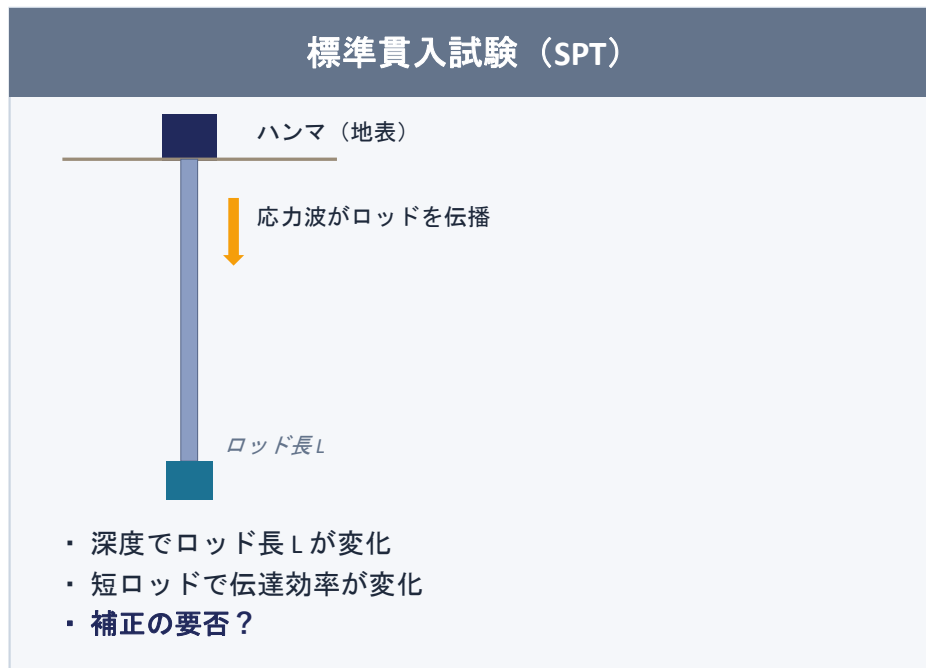
A_H 孔断面積 (cm²)

地盤が硬いほど掘進速度 P_R が低下 → S_E が増大

打撃数 bpm の取得 : メーカー試験値を参考とするが、実施工では、加速度センサの振動信号からインパルス列モデルによりリアルタイムに取得する。

■ 4. 地盤評価の原理

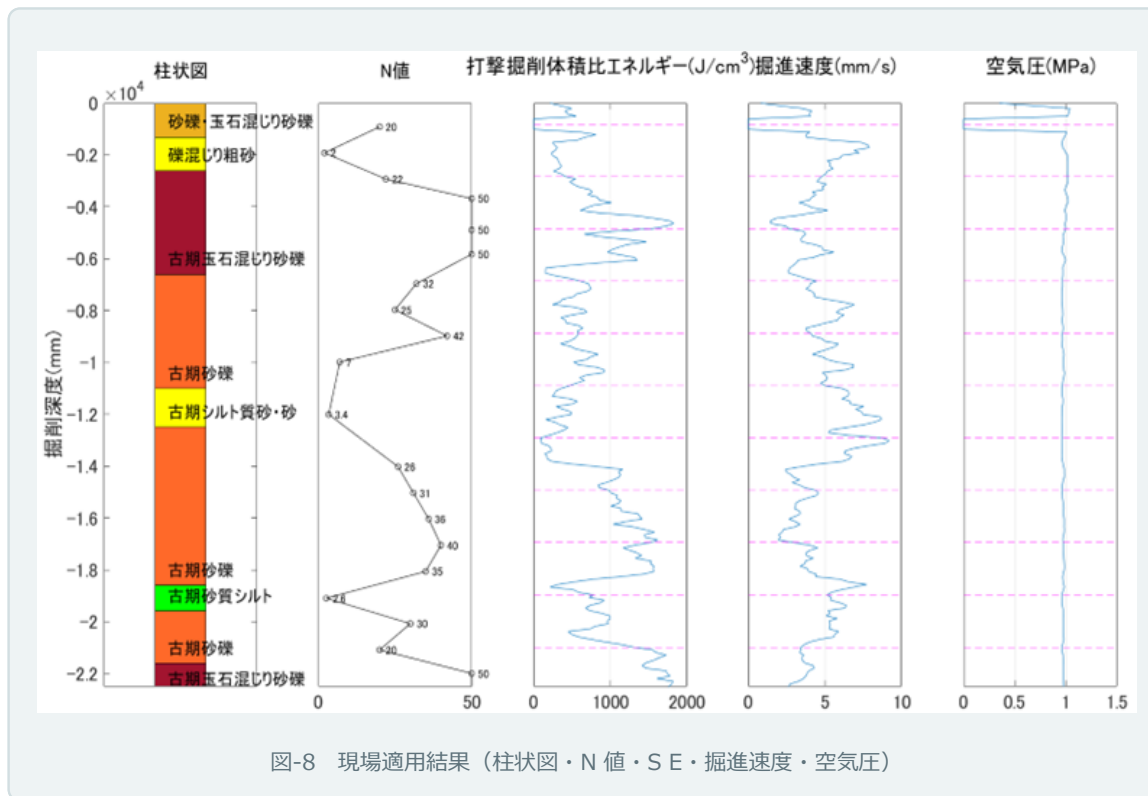
SPTに対する優位性：深度非依存のエネルギー伝達



DTHはハンマがビット直上にあり、原則として深度に依存せず打撃エネルギーを一定に保てる

4. 地盤評価の原理

現場適用結果：N 値と掘削体積比エネルギーの対応



検証方法

事前の調査ボーリング結果と、その近傍での削孔結果を比較。削孔深度ごとに土質柱状・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を取得した。

結果

掘削体積比エネルギーは N 値と非常によく対応し、高い精度でトレースできることを確認。

意義 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実地盤で示すもの。

5.1 質点系解析モデル

周波数特性からの詳細な地盤情報の抽出

位置づけ 掘削体積比エネルギーによる評価に対し、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）を抽出する参考的な試み。

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。

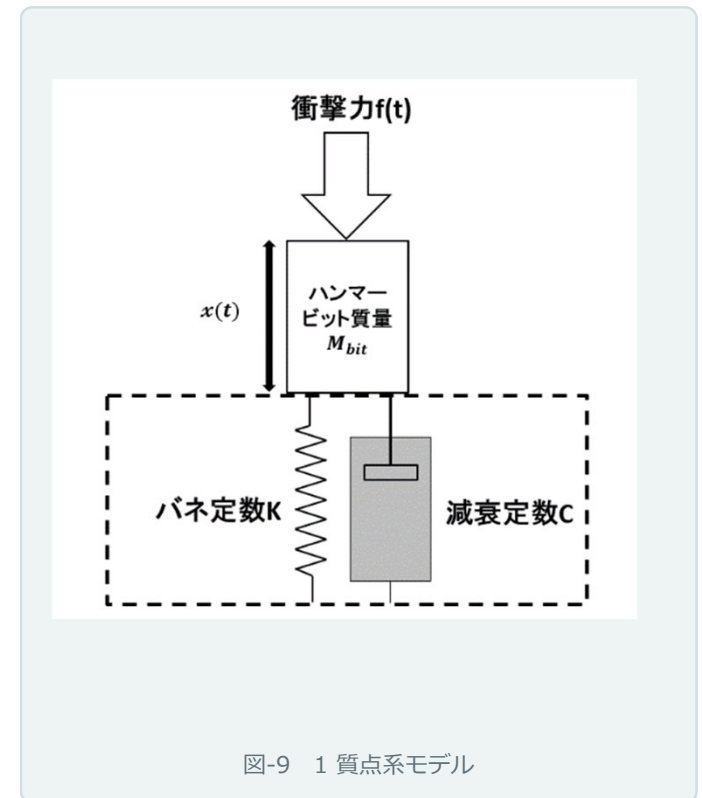
$$M_{bit} \ddot{x} + C \dot{x} + K x = f(t) \quad (4)$$

M_{bit} : ビット質量 K : ばね定数 C : 減衰定数（反発係数 e を用いて設定）

パラメータ同定の手順

- ばね定数 K と反発係数 e を乱数として与え、応答加速度を算出
- 応答加速度と計測波形の一致から $K \cdot e$ を同定
- 荷重係数 F_s は計測波形を再現する荷重の時刻歴から決定

DTH 地盤探査システム



5.1 質点系解析モデル

コンクリートを対象とした弾性係数の推定

検証対象になぜコンクリートか

自然地盤に比べ均質で、弾性係数が圧縮強度から概算でき、エネルギー伝達効率も比較的安定するため、モデルの妥当性検証に適する。

推定弾性係数（移動平均の収束値）

$$\approx 2.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

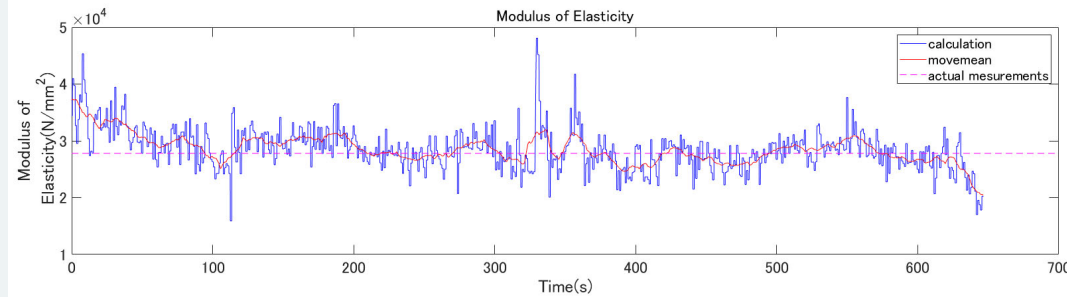


図-10 コンクリートの弾性係数の推定（青：瞬時値、赤：移動平均、破線：実測値）

コンクリートでの整合

移動平均は約 $2.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 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とよく一致。均質・高剛性でエネルギー伝達効率が安定するため。

自然地盤への適用

推定ばね定数は系全体の見かけの剛性。地盤物性の絶対値ではなく、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するのが実用的。

■ 6. おわりに

まとめと今後の展望

1 打撃信号のモデル化

打撃信号をインパルス列としてモデル化。STFT+BPF で基本周波数をリアルタイムに推定。

2 SPT と共通する評価原理

DTH はピストンストロークが一定で 1 打撃エネルギーが概ね一定。掘削体積比エネルギーが現場で N 値と良好に対応することを確認。

3 スライム区間の判別

振幅スペクトルの頻度分布によりスライム介在区間の低振幅データを判別・排除し、現地盤の応答をより明瞭に抽出。

4 1 質点系モデルによる検討

コンクリートの弾性係数推定が実測値と整合。自然地盤では変化パターンから地盤変化を検知する指標として活用可能。

今後の展望

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。